

分类号 _____

密 级 _____

UDC _____

编 号 _____

中国科学院研究生院 博士学位论文

太阳耀斑和日食期间
电离层行为的统计和模拟研究

乐会军

指 导 教 师 刘立波 研究员

中国科学院地质与地球物理研究所

申请学位级别 理学博士 学科专业名称 空间物理学

论文提交日期 2009年5月 论文答辩日期 2009年6月

培 养 单 位 中国科学院地质与地球物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

DISSERTATION SUBMITTED FOR DOCTOR DEGREE IN SCIENCE

**Modeling and Statistic Studies of Ionospheric
Response to Solar Flare and Solar Eclipse**

Huijun Le

Directed by

Prof. Libo Liu

Institute of Geology and Geophysics,

Chinese Academy of Sciences

May, 2009

中国科学院地质与地球物理研究所

研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在刘立波导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院地质与地球物理研究所或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示谢意。

论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

学位论文作者签名：_____ 签字日期：_____ 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解中国科学院地质与地球物理研究所有关知识产权的规定，研究所有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文及论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；中国科学院地质与地球物理研究所可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文（保密的学位论文在解密后适用本授权书）。

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：_____ 年 月 日

签字日期：_____ 年 月

目 录

摘 要.....	1
Abstract.....	3
第一节 绪 论.....	7
§1.1 电离层概论.....	7
§1.2 太阳耀斑电离层效应研究.....	8
§1.3 日食电离层效应研究.....	11
§1.4 本文研究目的及主要内容.....	13
第二节 太阳耀斑和日食.....	15
§2.1 太阳耀斑.....	15
§2.1.1 耀斑期间光谱变化.....	16
§2.1.2 太阳耀斑的分级.....	18
§2.1.3 太阳耀斑主要参数.....	19
§2.1.4 太阳耀斑的观测.....	19
§2.1.5 耀斑随太阳活动的变化.....	20
§2.2 日食.....	22
§2.2.1 日食的形成.....	22
§2.2.2 日食类别.....	24
§2.2.3 日食过程及其参数.....	26
§2.2.4 日食期间太阳辐射变化.....	28
第三节 电离层模式及日食和耀斑期间太阳辐射变化模型.....	30
§3.1 一维中纬电离层模式.....	30
§3.1.1 模式出发方程.....	30
§3.1.2 中性大气参数.....	31
§3.1.3 光电离过程.....	32
§3.1.4 离子化学过程.....	33
§3.1.5 加热率和热传导系数.....	33
§3.1.6 模式求解.....	34
§3.2 中低纬电离层模式TIME-IGGCAS.....	35
§3.2.1 模式坐标选取及网格分布.....	35
§3.2.2 模式出发方程.....	37
§3.2.3 磁通管的垂直漂移.....	38
§3.2.4 模式运行流程.....	40
§3.2.5 模式结果.....	40

§3.3 耀斑期间太阳辐射变化模型.....	44
§3.4 日食期间太阳辐射变化模型.....	46
第四节 中纬电离层对太阳耀斑响应的模拟研究.....	50
§4.1 2003 年 10 月 23 日耀斑期间太阳辐射变化.....	50
§4.2 耀斑模拟.....	51
§4.3 2003 年 10 月 28 日耀斑模拟结果.....	51
§4.4 地方时和季节依赖.....	53
§4.4.1 电子浓度变化.....	53
§4.4.2 TEC变化.....	58
§4.5 小结.....	61
第五节 1999 年日全食电离层响应的观测和模拟.....	63
§5.1 观测数据.....	63
§5.2 日食期间太阳辐射变化.....	65
§5.3 日食模拟.....	66
§5.4 结果和讨论.....	67
§5.4.1 在最大日食程度时的电离层响应.....	67
§5.4.2 电离层响应的时演化.....	72
§5.4.3 共轭半球的电离层扰动.....	74
§5.5 小结.....	75
第六节 中纬F2 层日食响应的统计和模拟研究.....	77
§6.1 引言.....	77
§6.2 观测数据.....	79
§6.3 日食模拟.....	80
§6.4 参量控制实验.....	81
§6.4.1 背景峰高的影响.....	81
§6.4.2 地方时效应.....	82
§6.4.3 太阳活动周效应.....	85
§6.4.4 磁倾角效应.....	88
§6.5 讨论.....	90
§6.6 小结.....	93
第七节 电离层日食响应的纬度依赖.....	94
§7.1 引言.....	94
§7.2 电离层观测.....	96
§7.3 日食响应的纬度变化模拟.....	99

§7.4 模拟结果及分析.....	100
§7.4.1 电子密度.....	100
§7.4.2 电子温度.....	105
§7.5 讨论.....	107
§7.5.1 垂直漂移效应.....	107
§7.5.2 磁倾角效应.....	110
§7.6 小结.....	112
第八节 共轭半球电离层的日食响应.....	114
§8.1 引言.....	114
§8.2 数据选取.....	115
§8.3 共轭电离层日食扰动模拟.....	118
§8.4. 观测与模拟结果.....	120
§8.5. 讨论.....	122
§8.6. 小结.....	124
第九节 工作总结及展望.....	125
§9.1 工作总结.....	125
§9.2 展望.....	129
参考文献.....	131
附录 学术论文完成情况.....	148
致 谢.....	149
CONTENTS.....	151

摘要

电离层是由太阳辐射离化地球上层大气而形成的,因而受到太阳辐射变化的强烈影响。耀斑和日食事件给电离层带来相反的短时太阳辐射变化。耀斑导致电离层受到的太阳辐射突然增强,而日食引起日食区电离层受到的太阳辐射显著减少。耀斑和日食事件不仅直接影响着电离层的光化学过程,还对电离层动力学过程,甚至对作为电离层背景的热层大气都产生非常显著的影响。对耀斑和日食事件电离层效应的观测和模拟研究,可以深化我们对电离层变化的认识和对相关的电离层光化学和动力学过程的理解,评估现有的电离层参数(如损失系数等)的合理性。同时,对耀斑和日食电离层效应的研究是电离层空间天气监测的重要组成部分,可以为空间天气监测与预报提供理论参考。

本博士学位论文选题电离层对太阳耀斑和日食事件的响应。我构建了适用于耀斑和日食事件的太阳辐射时变模型,并参与发展完善了一个二维中低纬电离层模式。利用电离层观测资料和实验室的一维中纬电离层模式和二维中低纬电离层模式,结合相应太阳辐射时变模型,观测分析和模式模拟了电离层对耀斑和日食事件响应的时空演化特征,揭示了太阳活动、太阳天顶角、中性大气密度以及地磁倾角等因素对耀斑和日食期间电离层响应的影响。具体工作和结果如下:

1、利用一维电离层模式模拟了 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级大耀斑期间电离层的响应。模式计算结果在 TEC 变化形态上与观测一致,而在响应幅度有所差别。这表明模式对耀斑的模拟是可靠和有效的。我们进一步对耀斑电离层效应的地方时和季节依赖进行了模拟研究。结果表明太阳天顶角对耀斑电离层效应有重要影响:白天天顶角较小,电子浓度响应主要发生在 300km 以下高度(最大响应出现在约 115km),而在天顶角接近 90 度的日出和日落附近,响应发生在更高的高度;日出时 TEC 增加速度比日落时慢,这是由日出与日落附近天顶角随时间的变化不同导致的,日出时天顶角随时间减小而日落时随时间增大;夏季电子密度增幅最大而冬季最小,这也与天顶角的季节差异有关。模拟结果还显示 TEC 增幅存在关于正午的地方时不对称,这主要与中性大气氧原子密度的不对称有关。

2、利用欧洲测高仪观测资料和电离层理论模式,观测分析和模式模拟了

1999年8月11日日食期间E层和F1层电离层效应。模拟和观测都表明，F1层电子密度下降幅度超过E层下降幅度，分析表明这主要是由于F1层处于原子离子和分子离子过渡区域的缘故。电离层模拟中使用了修正的太阳辐射时变模型，该模型综合考虑了光球面内和光球面外的辐射，这对以前仅考虑光球面内辐射的模型是一个重要修正。未修正模型的模拟结果与观测结果有较大偏差，而修正模型极大地改善了模拟结果，使之与观测结果基本一致。

3、利用电离层模式模拟研究了中纬F2层日食效应随背景峰高、磁倾角、地方时和太阳活动的变化。并利用7次日全食期间测高仪数据对其中的磁倾角和地方时影响作了统计分析。研究表明这些因素对F2层日食效应有显著影响。背景峰高越高foF2的响应越小，因为F区电子浓度响应随高度增加而减少；磁倾角越大的地方foF2响应越小，因为磁倾角越大会导致越大的来自顶部电离层的下行等离子体输运，从而更大程度地弥补F2层等离子体的损失；foF2的响应在正午最大，且随天顶角增大而减小；foF2响应随太阳活动增强而增大。模拟结果表明日食期间foF2响应的地方时和太阳活动差异主要归因于背景中性大气浓度不同而引起的F2层主要离子O⁺损失率的不同。

4、统计和模拟研究了电离层日食响应的纬度依赖。对日食事件电离层的观测分析和模式模拟，揭示出foF2与TEC对日食的响应具有基本相同的纬度依赖特性。低纬地区foF2和TEC的响应比中纬地区的弱；电离层响应在磁纬40度附近最大，然后随纬度增加而减小。模拟结果还显示，低纬300公里以上区域的电子温度下降幅度远小于中纬相同高度。这是由于其共轭低高度的光电产生率降幅较小，由此导致其光电子加热源的损失较小。

5、对2003年10月23日日食期间电离层观测数据的分析，发现在见食区的磁共轭区呈现出了显著的电离层扰动，包括电子温度下降、F2层临界频率和总电子含量上升以及F2层峰高抬升。电离层模式的模拟再现出了这些扰动特征。日食的发生会大幅减少日食区的光电子产生率，从而导致沿磁力线从日食区运动到另一半球的共轭区的高能光电子大幅减少，由此导致该共轭区的光电加热率减少并最终导致该地区的电子温度的下降以及随后的一系列电离层扰动。

关键词：中低纬电离层、电离层理论模式、数值模拟、太阳辐射、耀斑、日食

Abstract

The ionosphere is the ionized component of the Earth's upper atmosphere. Solar EUV radiation is the source of ionospheric ionization. Thus the ionosphere is affected strongly by the variations in solar radiation. Solar flares and solar eclipses can induce remarkable short time changes in solar radiation: the solar radiation would increase suddenly during solar flares and decrease significantly during solar eclipses. Solar flare and eclipse events not only affect directly the photochemical processes, but also affect the dynamic processes, and even affect the neutral atmosphere, which is strongly coupled with the ionosphere. The study on the ionospheric response to solar flares and eclipses can advance our knowledge on the ionosphere and its photochemical and dynamic processes and help us to evaluate the ionospheric parameters (such as ion loss coefficients). In addition, the study on the ionospheric responses to solar flares and eclipses is an important part of the ionospheric space weather, which can provide guides for space weather monitoring.

This thesis devotes to the study on the ionospheric responses to solar flares and solar eclipses. I have developed two models to simulate the variations of solar EUV radiation during solar flares and solar eclipses, and involved in developing a 2D mid- and low-latitude ionospheric model. On the basis of some observed data and the ionospheric model, I study the temporal and spatial variations of the ionosphere during solar flares and eclipses, and investigate the influences of solar activity, solar zenith angle, neutral gas density, and magnetic dip angle on the ionospheric responses to solar flares and solar eclipses. The main points of my works and results are summarized as follows.

1. The ionospheric response to the X17.2 solar flare on October 28, 2003 was modeled via using a one-dimension theoretical ionospheric model. The simulated variation of TEC is in accordance with the observations, though there are some differences in the amplitude of the variation. Then I carried out a series of simulations to explore the local time and seasonal dependences of the ionospheric responses to

solar flares. These calculations show that the ionospheric responses are largely related with the solar zenith angle (SZA). During the daytime (small SZA), most of the increases in electron density occur at altitudes below 300 km with a peak at around 115 km; whereas around sunrise and sunset ($SZA > 90^\circ$), the strongest ionospheric responses occur at much higher altitudes. The TEC increases slower at sunrise than at sunset, which is caused by the difference in the evolution of SZA at sunrise and sunset: SZA decreases with time at sunrise and increase with time at sunset. The ionospheric response is largest in summer and smallest in winter, which is also related to the seasonal difference of SZA.

2. Based on the observations from the ionosondes in Europe and the ionospheric model, I investigated the differences of the ionosphere responses to solar eclipses between the E-layer and F1-layer. Both the observation and simulation show that the decrease in foF1 due to the solar eclipses is larger than that in foE. This effect is due to that the F1 region locates at the transition height between the atomic ion layer and the molecular ion layer. With the revised model of solar radiation during solar flares, our model calculates the radiations from both the inside and outside of photosphere. Large discrepancy can be found between the observations and the calculations with an unrevised model, while the calculations with the revised model consist with the observations.

3. I also explore the effects of the F2-layer height, local time, solar cycle, and magnetic dip angle on the ionospheric responses to solar eclipses via using an ionospheric model and study on the solar zenith angle and the dip dependences by analyzing the data derived from 23 ionosonde stations during seven eclipse events. Both the measured and simulated results show that these factors have significant effect on the ionospheric response. The larger F2-layer height causes the smaller decrease in foF2, which is because that the electron density response decreases with height. The larger dip results in the smaller eclipse effect on the F2 layer, because the larger dip would cause the more diffusion from the top ionosphere which can make up for the plasma loss. The foF2 response is largest at midday and decreases with the increasing SZA. The foF2 response is larger at high solar activity than at low solar

activity. The simulated results show that the local time and solar activity discrepancy of the eclipse effect mainly attribute to the difference of the background neutral gas density.

4. I carried out a statistical study on the latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses and modeled this latitudinal dependence by the ionospheric model. Both the observations and simulations show that the foF2 and TEC responses have the same latitudinal dependence: the eclipse effects on foF2 and TEC are smaller at low latitudes than at middle latitudes; at the middle latitudes ($>40^\circ$), the eclipse effect decreases with increasing latitude. In addition, the simulated results show the change in electron temperature at the heights of above 300 km of low latitudes is much smaller than that at the same heights of middle latitudes. This is due to the smaller decrease in photoelectron production rate at its conjugate low heights.

5. By analyzing the observed data during the October 3, 2005 solar eclipse, I find some significant disturbances in the conjugate region of the eclipse region, including a decrease in T_e , an increase in foF2 and TEC, and an uprising in hmF2. I also simulated the ionosphere behavior during this eclipse using a mid-low latitude ionospheric model. The simulations reproduce the measured ionospheric disturbances mentioned above in the conjugated hemisphere. The simulations show that the great loss of arriving photoelectron heat from the eclipse region is the principal driving source for the disturbances in the conjugate hemisphere.

Keywords: Middle-low ionosphere; Theoretical ionosphere model; Numerical simulation; Solar radiation; Solar flare; Solar eclipse

第一节 绪 论

§1.1 电离层概论

在来自太阳色球层以及日冕层的极紫外线 (EUV)、X 射线等的辐射作用下,地球上层中性大气分子及原子会被部分电离,在地球表面以上约六十公里至一千五百公里左右区域,称之为电离层,在更高的高度区域是磁层。除中性大气以外,电离层中存在大量被太阳辐射离化产生的自由电子和离子,电离层从宏观上是呈现电中性的。电离层中大量的自由电子及离子能显著地影响无线电波传播。地球电离层作为近地大气和外层空间连接的纽带,与中高层大气以及磁层均存在着强烈的耦合,所以电离层是整个日地空间环境中承上启下的重要部分及关键环节。对电离层的研究有助于推动地球科学领域相关的理论和应用问题的认知与解决。另外,电离层是离地球表面最近的太空区域,是与人类空间活动关系最为密切的太空区域,绝大部分的人造卫星以及国际空间站都飞行在此高度,短波通讯也依赖于电离层的电波反射作用。电离层的异常扰动会直接影响卫星的运行环境和卫星通信质量和安全。因此,对电离层的研究对现代无线电技术系统和人类的空间活动有着重要影响。研究电离层有着非常重要的现实意义,通过对电离层的不断了解和监测,空间天气预报在将来必将称为现实,它可以为人类日益频繁的太空活动提供更为安全可靠的信息服务(涂传诒, 1988)。

电离层中的等离子体并不是均匀分布的,而是有着明显的空间分布特征。根据电子密度的高度分布特征,电离层一般可分为 D、E、F 层以及顶部电离层。另外,白天 F 层可能出现两个层,因此可再细分为 F1 和 F2 层。这种结构分布随着位置、季节、地方时和太阳活动性等因素而变化(Davies, 1990)。一般而言, D 层约在 60-90 km 高度,由多原子离子团“簇”组成,而且随太阳天顶角的减少和太阳活动性的增强而增加,其主要离化源为硬 X 射线、宇宙线以及 Lyman- α (1216Å) 射线。E 层所处高度范围大约是 90-140 km,其主要离子成份为 NO^+ 和 O_2^+ ,其主要离化源为波长小于 140 Å 的软 X 射线和波长位于 800-1027Å 的 EUV 辐射,其峰值高度 h_mE 大约在 110-120 km 之间。F 层一般位于 140 km 以上至数千公里,其中 F1 层约在 140-200 km 之间,其主要离子成份为 NO^+ 和

O^+ , 主要离化源为 140—800Å 的 EUV 辐射, 其层峰高度 hmF1 约在 180 km (Yeh and Liu, 1972)。F1 层并不总会出现, 太阳活动周中低年最易出现, 季节上夏季最为明显, 地方时方面正午最为发达, 在夜间则会消失 (张顺荣, 1995)。F2 层一般位于 200 公里以上区域, 主要离子为 O^+ , 其峰值电子浓度 NmF2 在白天可达 $2.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, 夜间亦有 $2.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ (Yeh and Liu, 1972), 其峰值高度 hmF2 一般在 200-400 km 之间。在 F2 层以上属于顶部电离层, 其电子密度随高度增加而逐渐减少。

§1.2 太阳耀斑电离层效应研究

太阳活动有着不同时间尺度的变化, 其中太阳耀斑是一种时间尺度约为十分钟量级的短时变化。耀斑期间产生的 X 射线及极紫外辐射等不同波段辐射会出现不同程度的增强, 因此会对电离层各高度的电子密度造成程度不同的增加, 从而产生各种电离层突然骚扰现象。太阳耀斑的电离层效应研究一直是电离层研究的一个传统热点课题, 在当前空间天气研究中也受到极大关注, 是电离层监测的重要内容之一。

自上世纪 60 年代以来, 人们已经利用各种观测设备, 如法拉第旋转测量 FR (Faraday Rotation), 非相干散射雷达 ISR (Incoherent Scatter Radar), 全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 等, 广泛地研究了太阳耀斑所引起的电离层变化。Davies [1990]总结了太阳耀斑期间向日面电离层发生的突然扰动现象, 包括宇宙噪声吸收 SCNA (Deshpande and Mitra, 1972)、突然频率吸收 SWF (Stonehocker, 1970)、突然相位异常 SPA (Jones, 1971; Ohshio, 1971)、突然天电噪声增强 SEA (Sao et al., 1970)、突然短波频移 SFD (Donnelley, 1967, 1969, 1971)、总电子含量突然增加 SITEC (Mendillo et al., 1974; Davies, 1980) 等。另外, 随着太阳耀斑期间电离层 E 层电导率的增加, Sq 电流系也得到增强, 地面磁场从而出现扰动, 称之为磁钩扰, 也称为地磁太阳耀斑效应 SFE (Ohshio, 1964)。

虽然耀斑期间电离层各高度的电子密度都有所增加, 但引起总电子含量突增的电子密度绝对增加量在电离层 F 区要比其他区域大得多。研究发现, 不同的电离层骚扰现象与耀斑期间特定高度区域的电子密度增加有关, 如宇宙噪声吸收、

突然频率吸收、突然天电噪声增强、突然相位异常与耀斑期间 D 区电子密度的增加有关；突然短波频移、磁钩扰与耀斑期间电离层 E 区电子密度的增加有关。一般认为，耀斑期间 D 区电离层电子密度的变化对电波传播的影响最为强烈。

对于耀斑期间电子浓度变化的高度分布特征，以往的研究（Wagner,1971; Thome and Wagner, 1971; Mitra, 1974; Donnelly, 1976）表明，在耀斑期间电子密度增加最大的区域发生在 D 层，在该层通常会出现一个数量级甚至更大的增加；其次是电离层 E 层，该层通常会出现 50—300 % 的增加；而电离层 F 层的电子密度增幅通常不超过 40%。太阳耀斑期间在电离层不同高度的差异主要是由于耀斑期间硬 X 射线（D 层离化源）会出现最大幅度的增强，增加幅度通常能达到 10^3 量级甚至更高，其次是软 X 射线（E 层离化源），而 EUV 辐射（F 层离化源）的增强幅度最小。总体而言，耀斑期间电离层低高度的响应要远大于电离层高高度；换言之，电离层耀斑响应主要发生在 F 层以下高度区域。但也有一些研究表明，在有些耀斑期间，F 层以上区域也会出现显著的电子密度增加，如 Millstone Hill 非相干散射雷达对 1972 年 8 月 2 日耀斑的观测表明，在该次耀斑期间，40% 的总电子含量增量来自 300 公里以上高度区域电离层电子浓度的增加（Mendillo and Evans,1974）。Leonovich et al.（2002）发现 2000 年 7 月 14 日耀斑期间 TEC 增幅的 25% 的贡献来自 300 公里以上的电离层电子浓度增加。尽管绝大部分的耀斑会导致电子浓度在不同高度出现不同程度的增加，但也有观测和模拟研究显示，在某些耀斑期间，顶部电离层电子浓度会出现不同程度的衰减（Koren'kov and Namgaladze, 1977; Leonovich and Tashchilin 2002），Smithtro et al.（2006）甚至观测到 F2 层临频在 1999 年 6 月 22 日 M1 级耀斑期间出现小幅下降。Leonovich and Tashchilin（2002）和 Smithtro et al.（2006）的模拟结果表明， O^+ 的上行是形成耀斑期间电子浓度负向扰动的主要原因，而此 O^+ 的上行主要是由耀斑期间等离子体热膨胀导致的。

总电子含量突然增加 SITEC 是描述电离层耀斑响应的重要参量。由于观测手段的限制，以往对这一问题的研究大多针对特大型耀斑、局限于少数台站，难以很全面揭示不同高度、不同地区电离层对各类耀斑响应的规律（Thome and Wagner, 1971; Mitra et al., 1974; Mendillo et al., 1974）。如 Mendillo et al.（1974）利用 17 个台站的法拉第偏振仪的电离层总电子含量增量观测资料，首次进行了

耀斑期间全球不同区域的电离层响应的对比研究, 其结果表明低纬的 SITEC 比高纬的大, 但 SITEC 与太阳天顶角没有明显的相关性。如今, 随着 GPS 技术的发展与普及, GPS TEC 数据具有观测精度高、空间覆盖范围大、时间连续性好等优点。将 GPS 数据应用到太阳耀斑爆发等引起的电离层突然骚扰的研究, 可以定量地揭示出与太阳爆发相关的电离层扰动过程, 这对电离层空间天气的监测与研究具有重要意义。

近来, 正是利用 GPS 卫星 TEC 数据的诸多优点, 很多学者进行了耀斑期间 SITEC 变化的全球观测和研究 (Afraimovich, 2000; Leonovich et al., 2002; Liu et al., 2004; Tsurutani et al., 2005; Zhang et al., 2002; Zhang and Xiao, 2003, 2005, 张东和与肖佐, 2000, 2002; 张东和等, 2001, 2004)。Wan et al. (2002, 2005) 根据电离层的 Chapman 电离理论, 分析得出耀斑爆发引起的 TEC 时间变化率与太阳耀斑的有效辐射通量成正比、与依赖太阳天顶角 χ 的 Chapman 函数 $ch(\chi)$ 成反比的结论, 并且得到 2000 年 7 月 14 日耀斑期间来自 GPS 网的 TEC 数据的验证。Zhang and Xiao (2003) 通过对 2001 年 4 月 15 日耀斑期间向日面 53 个 GPS 台站的电离层总电子含量数据的统计分析, 得到相同的结果, 即 SITEC 与太阳天顶角有明显的负相关性。总之, 以往观测显示电离层耀斑响应和太阳天顶角没有关系, 但是最近的研究结果从理论和观测分析两方面都证实电离层耀斑响应与天顶角有密切的关系。在后面章节中, 我们通过模式模拟也验证了这一结论。

电离层耀斑响应与耀斑 X 射线辐射等级密切相关, Zhang et al. (2002) 的结果表明, 总体而言, 耀斑期间 X 射线辐射通量越大, 电离层 SITEC 的增量也越大。研究还表明, 电离层响应与耀斑爆发的日面位置有关 (Zhang et al., 2002; Tsurutani et al., 2005)。Zhang et al. (2002) 的结果表明耀斑日面位置也是影响 TEC 增幅的一个重要因素: 太阳经度角越小 SITEC 将越大。Chen et al. (2005) 统计分析了 1996 到 2003 年期间 X 级大耀斑引起的 SITEC 的变化特征, 其结果表明 TEC 增量与日地距离和耀斑持续时间都存在负相关性。目前为止, 还没有关于耀斑日面位置对电离层耀斑响应影响的非常合理的物理解释。

一般认为中性大气对耀斑导致的太阳辐射短时突然改变不会有明显的响应, 以前热层大气密度的观测也很少, 所以迄今关于耀斑期间热层响应的研究不多。但最近的 Champ 卫星观测结果表明在大耀斑期间热层也出现了显著的改变, 中

性大气密度甚至能增加 40% (Sutton et al., 2006; Liu et al., 2007), 这将进一步对电离层的变化产生重要影响。随着观测数据的增多, 以后可以开展更多热层大气对空间环境突然扰动(如耀斑、磁暴等事件)的响应的相关研究, 以进一步揭示热层大气的变化特征。

以往主要是运用各种观测数据研究耀斑事件的电离层响应, 很少涉及对电离层的耀斑响应的数值模拟。这主要是由于以前缺少太阳全波段辐射谱耀斑期间变化的观测资料。为了克服这个困难, Warren et al. (1998, 2001) 发展了一个描述太阳 EUV 辐射变化的模型。利用 Warren 等人的方法和 2000 年 7 月 14 日耀斑期间的 EUV 和 X-ray 观测结果, Meier et al. (2002) 首先估计了耀斑期间各谱段辐射随时间的变化情况, 然后预测了电离层对此次耀斑的响应情况。利用一个时变 EUV 光谱模式 (Mariska et al., 1989) 和由二维模式 SAMI2 (Huba et al., 2000, 2002, 2003) 发展而来的三维电离层模式 SAMI3 中, Huba et al. (2005) 对 2000 年 7 月 14 日耀斑事件进行了电离层耀斑响应的首次全球模拟。Meier et al. (2002) 和 Huba et al. (2005) 的工作都是针对单个耀斑事件进行模拟。我们知道, 耀斑是一种非常普遍的太阳活动事件, 发生频繁, 尤其是在太阳高年几乎每天都会发生不同程度的耀斑事件。耀斑事件会直接导致地球空间环境的改变, 强耀斑事件甚至会影响到卫星安全以及无线电通讯中断等, 因此进行更全面的耀斑研究就显得非常必要。

§1.3 日食电离层效应研究

日食是一种天象奇观。对电离层而言, 日食可视为一次快速的日落和日出过程。不同于正常日落和日出过程的是, 除了时间演变、空间特征和持续时间的差异外, 日食表现为在日食带地区太阳天顶角变化不大, 主要是太阳辐射通量的快速变化。日食事件为我们研究电离层结构以及电离层中动力学和光化学过程提供了一个良好机会。对电离层日食响应的研究可以让我们有机会评估已有的电离层参数(如损失系数等)的合理性, 促进我们对引起电离层变化的各种物理机制和过程的理解。

自上世纪 30 年代就开始了日食电离层效应的研究, 但主要成果出现在 50 年代以后。早期的电离层主要通过测高仪观测获取数据, 对日食响应研究也局限

于对测高仪观测数据的分析（如 Beynon and Brown, 1956; Ratcliffe, 1956a; Evans, 1965a, 1965b 等）。利用 E 层和 F1 层的观测数据，估计出了电离层离子复合率（Ratcliffe, 1956a; Minnis, 1958; Marriott et al., 1972）。结合其他学者的结果以及对各种观测数据的综合分析和，Rishbeth（1968）阐述了电离层对日食响应的基本理论。随后，陆续有人对日食电离层效应进行了观测和模拟研究（如 Stubbe, 1970; Brace et al., 1972; Horvath and Theon, 1972; Marriott et al., 1972; Berning, 1983; Ridley et al., 1984）。后来出现了非相干散射雷达。借助非相干散射雷达对电离层更全面的观测，很多学者对日食期间电离层电子密度高度剖面以及电子离子温度做了详细的研究（Baron and Hunsucker, 1973; Oliver and Bowhill, 1974; Holt et al., 1984; Roble et al., 1986; Salah et al., 1986）。

随着卫星的发射，各种卫星数据极大丰富了电离层日食响应研究（Cohen et al., 1984; Singh et al., 1989; Cheng et al., 1992; Huang et al., 1999; Tsai and Liu, 1999; McPherson et al., 2000; Afraimovich et al., 1998, 2002; Farges et al., 2001, 2003; Curto et al., 2006; Tomás et al., 2007; Le et al., 2009a）。

各种观测数据表明，电离层日食效应有显著的高度依赖（Stubbe et al., 1970; Ridley et al., 1984; Roble et al., 1986; Boitman et al., 1999）。在日食期间，在低高度如 E 层和 F1 层会出现电子浓度的大幅下降，并且电子浓度的响应与日食食分的变化基本同步。我们知道，低高度（如 E 层和 F1 层）电离层的行为主要受到光化学过程的控制。日食期间太阳辐射的减小会直接导致光电子产生率的减小，这样，在电离层低高度电子浓度下降，其对日食的响应与日食过程基本同步，即在食甚时达到最大（Rishbeth et al., 1968）。尽管如此，E 层和 F1 层的日食响应程度也有差别的，我们的研究表明，F1 层电子浓度下降幅度比 E 层大（Le et al., 2008a）。对于 F2 层及以上区域而言，由于该区域受到等离子体输运过程的影响，在不同日食事件期间，它们的日食响应可能会不尽相同，不同地点不同地方时会出现不同幅度的电子浓度下降，甚至有时会出现电子浓度的小幅增加。Evans（1965b）提出日食期间出现 foF2 上升需要满足两个必要条件：首先，观测点应该位于全食区或光球最大遮挡程度超过 90%；第二，观测点的磁倾角要大（ $I > 60$ 度）。不过，最近的一些模拟研究显示，日食期间 foF2 增加主要与中性大气收缩导致 O/N₂ 的改变有关（Millward et al., 1999; Korenkov et al., 2003b）。总之，F2

层比较复杂的日食响应主要与该层的动力学过程有关,而动力学过程则与背景中性大气、太阳活动和地磁活动水平、经纬度,地方时等密切相关。因而,对 F2 层日食响应的研究可以深化我们对电离层动力学过程的认识,我们也将在这一方面开展工作。

日食期间除了电子密度会受到显著影响外,等离子体温度也会出现显著的下降,尤其是 F2 区电子温度最大可能出现 50% 的下降,这可能起因于光电加热的减少 (Evans, 1965a; Salah et al., 1986; Robel et al., 1986; Boitman et al., 1999; Le et al., 2008a)。温度的变化会引起等离子体扩散速度和方向发生变化,从而进一步影响电子密度的变化。有趣的是,一些观测和模拟表明,日食期间低纬电离层电子温度的变化比较小 (Van Zandt et al. 1960; Tomás et al. 2007; Le et al. 2008b)。利用在 2005 年 4 月 8 日日食期间 CHAMP 卫星对磁赤道附近的观测, Tomás et al. (2007) 报道了在磁赤道上空 370 公里高度没有发现明显的电子温度下降。不过,相对于电子密度等参量而言,由于电子温度的观测更难,数据量有限,日食期间日食发生地刚好有观测的就更少。随着积累的各种卫星数据的日益增多,我们以后可以开展更多日食期间电离层电子温度响应特征的相关研究。

日食期间不仅电离层的电子浓度会出现显著下降,月亮阴影区内整个中性大气层(包括近地面至热层的整个大气层)的温度也会明显下降。同时,月影还在地面以超音速自西向东移动。根据声重力波理论,大气层中的这种温度变化可能成为大气声重力波的激发源。激发的声重力波会导致电离层行扰。自上世纪 70 年代, Chimnaso and Hines (1970) 提出日食时臭氧层在超声运动月影冷却时能激发声重力波理论以来,人们使用各种实验手段企图能检测到日食带外的声重力波 (如 Goodwin and Hobson, 1978; Jones et al., 1982; Li et al., 1988; Singh et al., 1989; Fritts and Luo, 1993; Liu et al., 1998; Altadill et al., 2001; Farges et al., 2003; 焦培南, 1990; 李利斌等, 1990; 熊年禄等, 1990; 何友文和孙宏林, 2001)。

§1.4 本文研究目的及主要内容

如前所述,太阳耀斑和日食期间,电离层各特征参量会出现剧烈的扰动,对此时电离层绕行行为的观测和研究可以促进我们对电离层变化的物理机制的理解。同时,对电离层耀斑和日食响应的研究也可以为日后空间天气预报提供理论

参考和检验。本文选题围绕太阳耀斑和日食事件电离层响应这个主题展开，主要内容如下：

第一节是全文的绪论，首先简单介绍了电离层的形成以及基本形态，然后分别介绍了电离层对耀斑和日食响应研究的历史和现状，最后阐述了本文研究工作的目的和主要内容。

第二节详细介绍了太阳耀斑和日食的基本情况，包括太阳耀斑的形成、太阳耀斑的分类、太阳耀斑光谱变化及其观测，日食的形成以及日食期间太阳辐射变化。

第三节介绍了本实验室的一个中纬电离层模式和一个中低纬电离层模式 TIME-IGGCAS，主要包括模式的基本方程、方程的数值求解、光化学过程处理以及电子离子加热率的计算等内容。另外，分别构建了太阳耀斑和日食期间太阳辐射变化模型，这是耀斑和日食期间电离层模拟工作的前提和基础。

第四节利用第三节介绍的中纬电离层模式首次对电离层耀斑响应的地方时、高度、季节依赖进行了详细的模拟研究。

第五节利用众多测高仪台站对 1999 年 8 月 11 日日全食的观测数据，首次统计比较了 E 层和 F1 层对日食响应的差别，同时介绍利用二维模式 TIME-IGGCAS 模拟了共轭电离层日食响应特征。

第六节利用 16 次日全食期间观测数据并结合电离层模式模拟，对 F2 层日食响应进行了细致和全面的分析，考察了 F2 层日食响应与背景峰高、地方时、太阳活动、地磁倾角以及中性大气密度等因素的关系。

第七节结合观测数据和理论模式，详细的研究了电离层日食响应的纬度依赖，着重于低纬地区的喷泉效应和中高纬地区的磁倾角效应。

第八节利用在日食的共轭区 DMSP 卫星、测高仪以及 GPS 数据的观测数据并结合模式模拟，首次报道了日食期间共轭半球的电离层扰动特征。

最后，在第九节中，我们总结了对本文工作，并对下一步工作的展望。

第二节 太阳耀斑和日食

§2.1 太阳耀斑

太阳耀斑是最激烈的太阳活动现象之一。20 世纪 50 年代以前关于太阳耀斑的定义是指用 H_{α} 单色光看到的太阳色球层谱斑中的突然增亮现象，因此早先也称为色球爆发。后来各种手段的综合观测表明，除了 H_{α} 突然增亮外，包括从波长短于 1\AA 的 γ 射线、X 射线、远紫外辐射 (EUV) 的太阳辐射也会出现不同程度的突然增强，并伴随发射能量从 10^3eV 到 10^{11}eV 的各种粒子流。现在的研究认为耀斑的爆发是太阳大气磁能积累到一定程度后突然释放的过程，其能量积累和释放的过程具有非常复杂的物理机制，至今依然是太阳物理的研究热点。图 2.1 显示了 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑爆发时日面 19.5nm 的极紫外射线的突然增强，数据来自 SOHO/EIT 谱线成像观测。

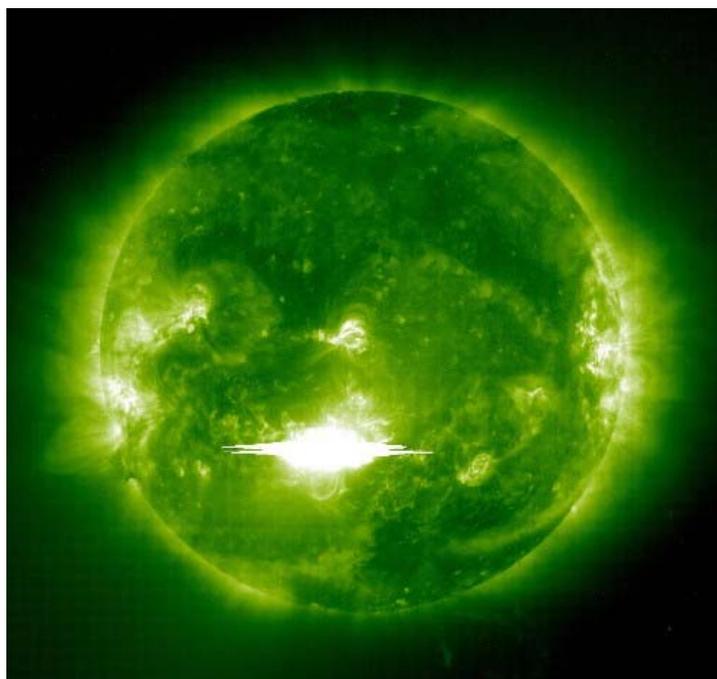


图 2.1 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑爆发时日面 19.5nm 的极紫外射线的成像观测，数据来自 SOHO 卫星的 EIT 图像。

§2.1.1 耀斑期间光谱变化

太阳耀斑期间，从 γ 射线、X 射线到微波射电辐射的全波段电磁辐射都会出现变化。图 2.2 给出了一次大耀斑发生过程中各种电磁辐射和粒子发射随时间的变化。较小的耀斑通常只有可见光、软 X 射线和微波射电辐射增强，而无 γ 射线、硬 X 射线、以及各种射电爆发和可见的粒子流（林元章，2000）。从图 2.2 我们可以看到，耀斑开始时， γ 射线、硬 X 射线、EUV 辐射和射电厘米波段有明显的脉冲式增强，称为脉冲相；而软 X 射线、可见光 (H_{α}) 和分米波射电辐射有持续几分钟的增强持续期，称为闪相；闪相之后的辐射开始缓慢减弱，称为下降相或延续相。大耀斑在脉冲相之间，有时还会出现前兆，表现为耀斑区被迅速加热和相应的辐射略为增强。

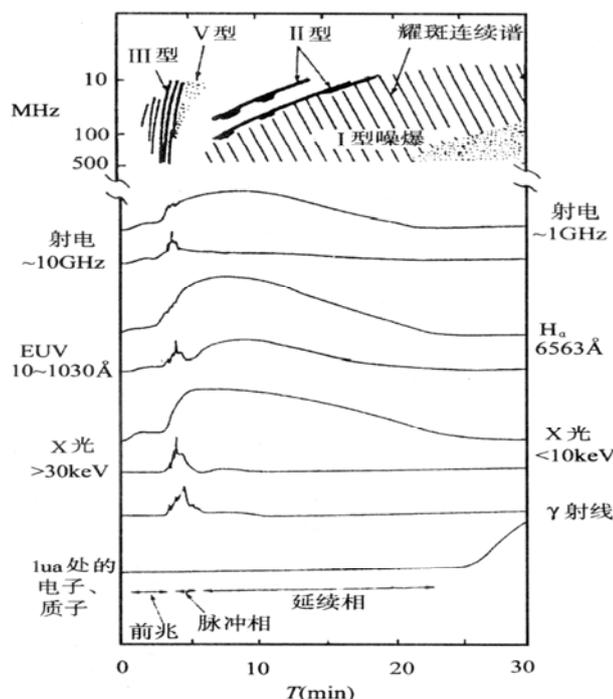


图 2.2 一次大耀斑发生过程中各种电磁辐射和粒子发射随时间的变化。摘自林元章（2000）

太阳耀斑期间，用 H_{α} 单色光监视太阳色球层时可以在活动区附近的谱斑中看到局部小区域的突然增亮，增亮区内原有的谱斑亮度在几分钟内 (10^2 s 量级) 迅速增亮几倍甚至几十倍。然后在几十分钟至 1~2 小时 (10^3 s 量级) 缓慢恢复至原有谱斑亮度，这就是耀斑在 H_{α} 单色光观测中的表现，其亮度变化就是如图 2.2 所示的 H_{α} 曲线。一个活动区发生耀斑时往往有几个亮块。一般亮度增大时亮块面积也在增大，但各亮块到达极大值的时间并不一定一致。

耀斑期间 X 射线辐射的变化与 H_{α} 光辐射变化有所不同。 H_{α} 耀斑光度变化存在持续约几分钟至十多分钟快速上升至极大的闪相，而耀斑的 X 射线、 γ 射线、远紫外辐射 (EUV) 虽然与 H_{α} 耀斑同时开始，但只有持续时间比闪相短得多的脉冲相。因此一般只把闪相和表示 H_{α} 耀斑面积快速增大的爆发相用于 H_{α} 耀斑，但在 X 射线、 γ 射线、远紫外辐射的爆发中不用闪相，而用脉冲相，不过软 X 射线的爆发与 H_{α} 的光度变化有些类似。一般而言，波长越短（能量越高）的辐射持续时间越短，而波长越长（能量越低）的辐射越晚到达其峰值，而且持续时间也越长。图 2.3 画出了太阳耀斑期间短波辐射的各种成份。其中宁静太阳的 X 光辐射主要来自高温日冕的热辐射，其主要功率集中在 $10-1000\text{\AA}$ 区域，活动区出现时， $1-10\text{\AA}$ 的软 X 射线可增强 1-2 个量级，仍为热辐射性质。活动区演化过程中，软 X 光强度也会有缓慢变化，波长越短变化幅度也越大。当耀斑发生时，由热电子韧致产生的 $1-10\text{\AA}$ 的软 X 射线可再增大 1-2 个量级。而能量为 $10-500\text{keV}$ 的非热电子韧致辐射产生的波长小于 1\AA 的硬 X 射线强度可增加 2-3 个量级。

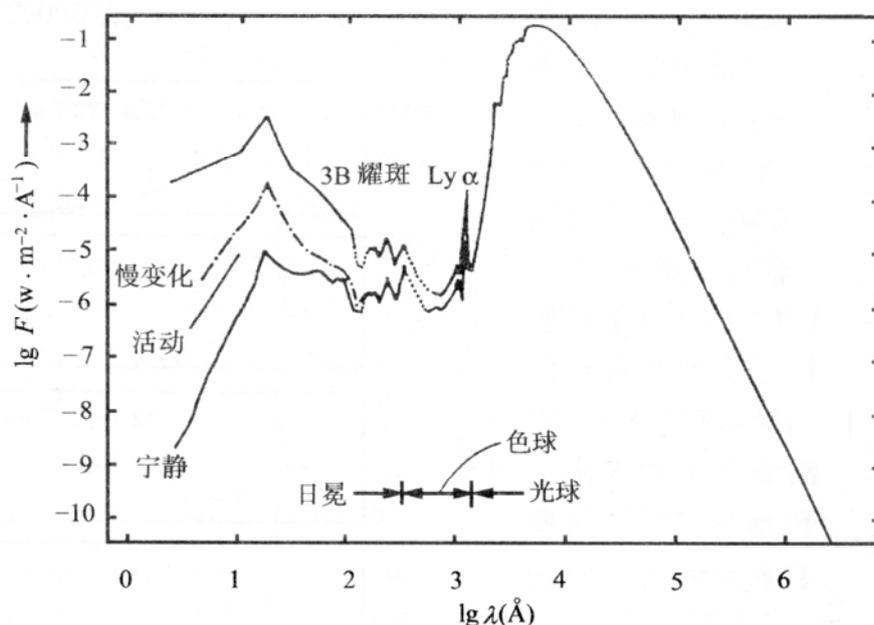


图 2.3 太阳耀斑期间短波辐射的各种成份，摘自林元章（2000）。

耀斑期间，在波长 $100-1500\text{\AA}$ 的远紫外区 (EUV) 也会出现突然增强，即 EUV 爆发。它的强度变化与 H_{α} 和软 X 射线比较相似。耀斑的 EUV 辐射增强包括各种离子产生的谱线以及中性氢和中性氦的 f-b 跃迁产生的连线谱。这些辐射

主要来自色球的光学耀斑区与日冕中高温耀斑区之间的过渡区。因此耀斑 EUV 的观测可以推知耀斑大气中过渡区的情况。

§2.1.2 太阳耀斑的分级

耀斑面积的大小是耀斑辐射规模的重要指数，因此国际上规定用耀斑亮度到达极大时的面积作为耀斑级别的主要依据和评级标准，同时用 B、N、F 三个字母来辅助定性表示耀斑的亮度强弱，B 表示很亮，N 表示中等、F 表示较暗。表 2.1 给出了 1966 年 1 月 1 日以前和以后的国际通用耀斑分级标准。观测到的 $H\alpha$ 耀斑，在照片或 CCD 图像上测出面积 S_d 后，必须先做太阳球面投影改正到相当于耀斑处在日面中心时的面积 S_p ，然后再根据表 2.1 定级。按此标准最小的耀斑为 1F 级，最大的耀斑为 4B 级，如 2003 年 10 月 28 日的耀斑则为 4B 级。

表 2.1 太阳耀斑的光学分级标准（胡文瑞等，1983）

改正至日面中心时的耀斑面积			耀斑亮度	
1966 年 1 月 1 日前的级别	1966 年 1 月 1 日后的级别	10^{-6} 太阳半球面积	$H\alpha$ 特征	意义
S	1 ⁻	<100	F	暗的
1	1	100 – 250	N	正常
2	2	250 – 600	B	亮的
3	3	600 – 1200		
4	3 ⁺	>1200		

表 2.2 太阳耀斑的 X 射线分级标准

级别	1–8Å 峰值通量 $F_x(W/m^2)$
B	$10^{-6} - 10^{-7}$
C	$10^{-5} - 10^{-6}$
M	$10^{-4} - 10^{-5}$
X	$>10^{-4}$

除了根据 $H\alpha$ 单色光面积大小和亮度强弱的分级外，现在通常还会加上太阳耀斑期间 1–8Å 软 X 射线辐射强度的等级。地球电离层对太阳 1–8Å 软 X 射线辐射强度的变化非常敏感，所以，太阳耀斑 X 光级可以大致反应其产生地球物理效应尤其是电离层扰动的能力。根据 GOES 卫星测量的 1–8Å 辐射峰值流量，太阳耀斑的 X 光级别可以分为 A、B、C、M、X 五大级。每一个等级又根据流

量的大小细分为 10 个等级，在这些字母后面加上数字表示，数字越小等级越低。详细分类如表 2.2

§2.1.3 太阳耀斑主要参数

通常，我们会采用参数：耀斑开始时间，耀斑最强时间，耀斑结束时间，耀斑爆发在日面的位置以及耀斑峰值流量和耀斑光学和 X 射线等级来描述一次耀斑的过程。下面分别解释这些参数的定义。

耀斑开始时间：对于 X 射线耀斑，当 GOES 卫星 1–8Å 辐射流量连续四分钟的观测值满足以下三个条件就认为是耀斑开始发生了。首先这四个值都要大于 B1 下线值；其次，这四个值是严格的连续增加；最后，第四个值要比三分钟前的值大 1.4 倍。**耀斑最强时间：**耀斑最强时间的定义很简单，即是 1–8Å 辐射流量值到达其峰值的时刻。**耀斑结束时间：**1–8Å 辐射流量值回落到其“峰值”的一半的时刻。这里需要说明的是，此“峰值”为耀斑最大辐射流量值与耀斑开始时刻流量值的和。除了耀斑发生的时间外，耀斑爆发所在的日面经纬度也是耀斑的重要参数。

§2.1.4 太阳耀斑的观测

太阳耀斑是最重要和常见的太阳爆发事件，通过认知太阳耀斑爆发现象及其物理机制可以帮助人们更深入地研究太阳的相关活动。由于太阳耀斑的爆发会对日地空间环境如地球磁层、电离层以及热层大气有重要影响，引起空间环境的剧烈变化，所以一直以来空间环境对耀斑响应是空间物理学的重要研究课题。因此更好地观测耀斑期间各种辐射以及高能粒子流的变化就显得日益重要。以下一些空间探测器可以为探测耀斑提供了非常有价值的观测。

Yohkoh 卫星（最初也叫 Solar A 卫星）是日本宇航局与美国和英国合作研制的太阳高能物理观测卫星，于 1991 年 8 月 31 日发射。卫星从 1991 年升空一直在轨运行到 2001 年，获得了一个完整太阳活动周的数据。卫星上搭载了两个专为探测耀斑的设备，其中一个为软 X 射线探测望远镜（SXT），它能探测 1keV 的太阳辐射(Tsuneta et al., 1991)；另一个为硬 X 射线探测望远镜（HXT），能探测 15–92keV 的太阳辐射。。SXT 每天可以收集 50 张全日面的软 X 射线成像。

Acton et al. (1999) 的研究工作中详细讨论了如何将成像结果中的总的信号转换成特定谱波段的 X 射线辐射。

GOES 卫星从 1974 年开始计划利用 X 射线探测器 XRS 观测太阳 X 射线辐射。事实上, X 射线辐射数据只能追溯到 1986 年。两个 GOES 飞船运行, 每个飞船上都有一个 XRS 探测器, 能够连续地工作, 时间分辨率为 0.5 s。重叠的波段范围 0.05-0.8 nm, 最初选择这个波段观测是由于这个波段的辐射变化对耀斑最为敏感, 而且能够用来研究电离层 D 层的扰动。鉴于这些目的, 我们仅仅利用软 X 射线 0.1-0.8 nm 波段。第二个通道 0.05-0.4 nm 能够提供日冕等离子体的信息。

RHESSI 卫星是美国 NASA 于 2002 年 2 月 5 日发射的太阳探测卫星, 其主要目标是探测耀斑期间粒子加速和高能粒子流的突然释放过程的基本物理机制。它是专为高能太阳物理研究而发射的, 能对从 3keV 的软 X 射线到 20MeV 的 γ 射线的高能太阳辐射成像, 可提供直到 20MeV 的 γ 射线的高分辨率的光谱分析。

Hinode 卫星是一颗新的太阳探测卫星, 最初也叫 Solar B 卫星。为了更清楚准确地观测耀斑过程, 日本宇航局联合美国、英国以及挪威等国于 2006 年 9 月发射了这颗 Hinode 卫星。此卫星搭载了能探测更强太阳磁场的设备, 因为太阳磁场被认为是太阳耀斑爆发的源。

§2.1.5 耀斑随太阳活动的变化

既然太阳耀斑是太阳能量的突然爆发, 那么太阳活动越强, 太阳耀斑爆发的概率应该也会越大。如 2.1.3 节所述, 按照 0.1—0.8nm 波段 X 射线辐射通量的大小, 太阳耀斑可以分为 X、M、C、B、A 等级别。各级太阳耀斑发生频次随年份的变化画在图 2.4 中。另外, F107 的变化也画在图中。我们是按月统计的, 即统计 1980 到 2007 年总共 336 个月中每个月发生各级耀斑的频次, F107 则取相应月份的月中值。

从图 2.4 中, 我们可以看到 X 级、M 级以及 C 级耀斑都有明显的准 11 年周期变化, 他们与 F107 的变化呈现显著正相关性。比较各级耀斑发生的频次可以发现, C 级耀斑最常发生, B 级耀斑次之, X 耀斑最少。另外, 有意思的是, B 级耀斑的发生频次与其他级别耀斑有显著差别, 它与太阳活动水平呈现负相关, 即 B 级耀斑在太阳活动高年很少发生, 而在太阳活动低年则显著增多。这可能

是由于太阳活动高年小耀斑会直接发育成大耀斑而爆发。为了更直接地看各级耀斑发生与太阳活动水平的关系，我们把这四级耀斑随太阳活动的关系画在图 2.5 中。

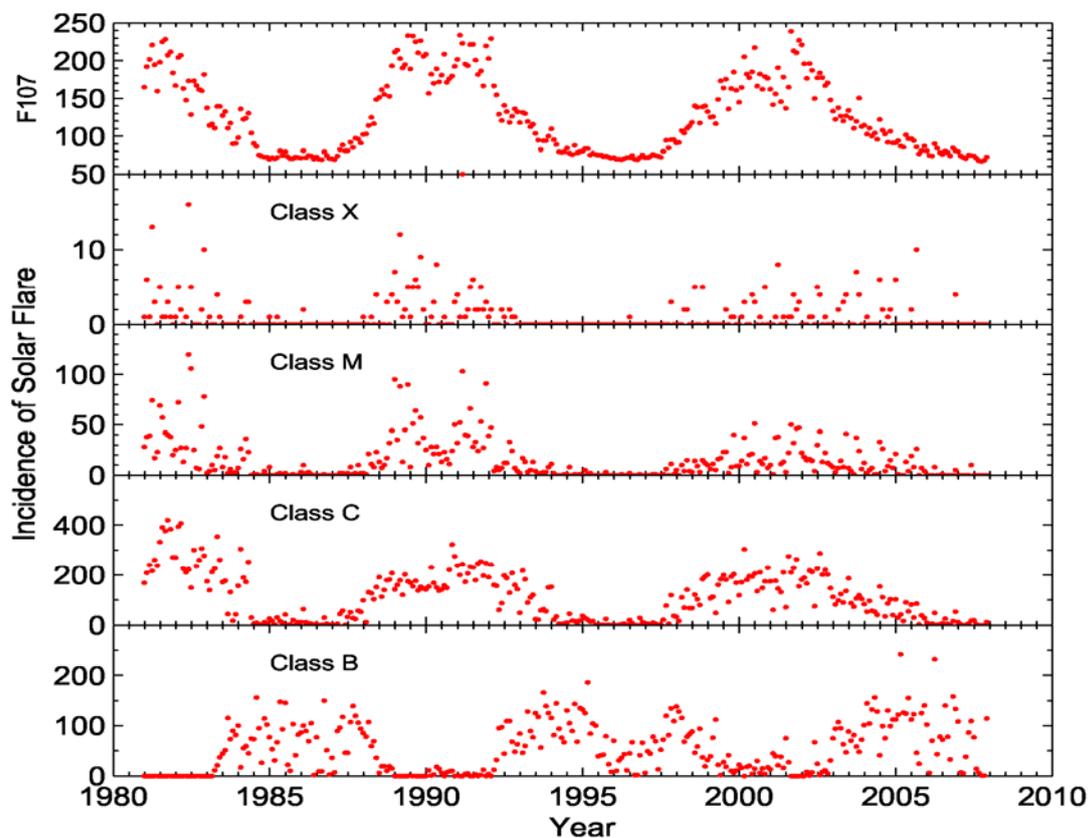


图 2.4 各级耀斑发生频次以及太阳活动 F107 指数随年份的变化

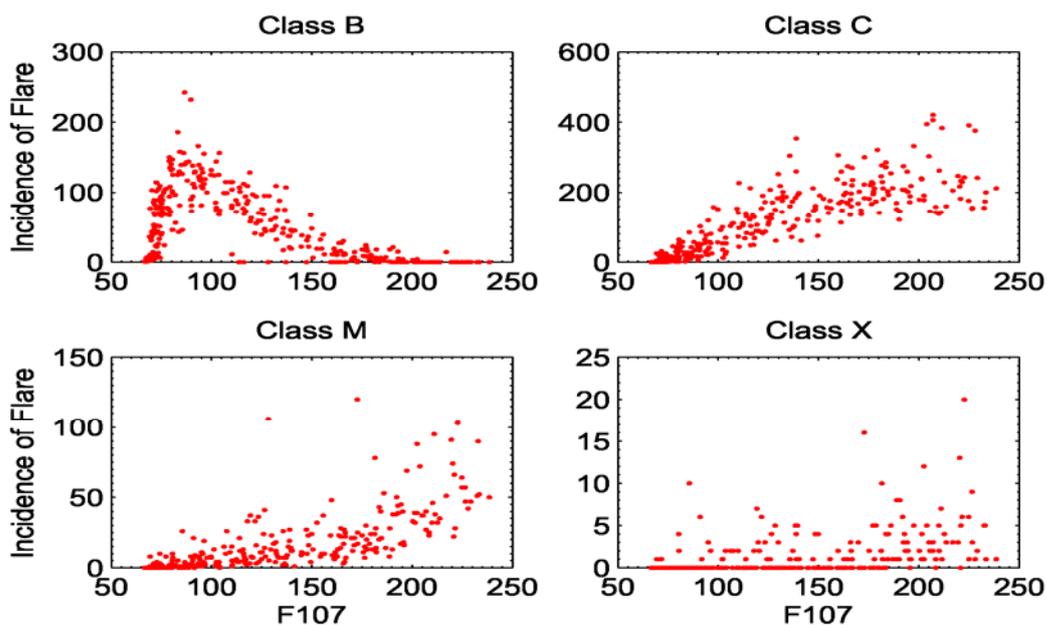


图 2.5 各级耀斑发生频次随太阳活动指数 F107 的变化

从图 2.4 中，我们可以看到 X 级、M 级以及 C 级耀斑都有明显的准 11 年周期变化，他们与 F107 的变化呈现显著正相关性。比较各级耀斑发生的频次可以发现，C 级耀斑最常发生，B 级耀斑次之，X 耀斑最少。另外，有意思的是，B 级耀斑的发生频次与其他级别耀斑有显著差别，它与太阳活动水平呈现负相关，即 B 级耀斑在太阳活动高年很少发生，而在太阳活动低年则显著增多。这可能是由于太阳活动高年小耀斑会直接发育成大耀斑而爆发。为了更直接地看各级耀斑发生与太阳活动水平的关系，我们把这四级耀斑随太阳活动的关系画在图 2.5 中。

从图 2.5 我们可以看到，C 级和 M 级太阳耀斑出现率随太阳活动增强而增高；X 级耀斑也随太阳活动增强逐渐增多，但增加幅度不大。在太阳活动低年也会发生一些 X 级耀斑。B 级耀斑随太阳活动的关系就更复杂了，当 F107 指数小于 85 时，它随太阳活动增强趋于增多，而当 F107 大于 85 时，它又随太阳活动增强而逐渐减少。综上所述，总体而言，随太阳活动水平增加，太阳耀斑出现率增高、强度增强。

§2.2 日食

日食，又作日蚀，是一种天文现象。当月球绕地球公转到太阳和地球中间时，如果太阳、月球、地球三者正好排成或接近一条直线，那么月球就会挡住射到地球上去的太阳光，并在其后的地球表面形成阴影区，这些阴影区就会发生日食现象。在地球上月影里的人们开始看到阳光逐渐减弱，太阳面被圆的黑影遮住，天色转暗，全食食甚时，天空中可以看到最亮的恒星和行星，几分钟后，从月球黑影边缘逐渐露出阳光，开始生光、复圆。由于月球比地球小，只有在月影中的人们才能看到日食。

§2.2.1 日食的形成

日食是光在天体中沿直线传播的典型例证。月亮运行到太阳和地球中间并不是每次都发生日食，发生日食需要满足两个条件。其一，日食总是发生在朔日（农历初一）。也不是所有朔日必定发生日食，因为月球运行的轨道（白道）和太阳运行的轨道（黄道）并不在一个平面上。白道平面和黄道平面有 $5^{\circ} 9'$ 的夹角。

如果在朔日，太阳和月球都移到白道和黄道的交点附近，太阳离交点处有一定的角度（日食限），就能发生日食，这是要满足的第二个条件。

日食的发生必须是新月和满月出现在黄白交点的一定界限之内，这个界限就叫做“食限”。计算表明，对日食而言，如果新月在黄道和白道的交点附近 18 度左右的范围内，就可能发生日食；如果新月在黄道和白道的交点附近 16 度左右的范围内，则一定有日食发生。由于黄道和白道的交点有两个，这两个交点相距 180 度，所以一年之中有两段时间可能发生日食，这两段时间都称为“食季”，它们相距半年。太阳每天在黄道上向东移动约 1 度，由于日食的食限为 18 度左右的范围，太阳从黄道和白道交点以西的 18 度运行到黄道和白道交点以东的 18 度，大约需要 36 天，也就是说日食的每一个食季为 36 天。日食的一个食季是 36 天，这个天数比一个朔望月的平均长度 29.53 还要长。因此在一个日食的食季内必定会发生一次日食，也可能发生两次日食。一年之中有两个日食食季，所以在一年之内至少有两次日食发生，也可能有四次日食发生（如果每个食季中都包含两个朔日的话，如 2000 年发生了四次日偏食）。上面这些情况只是对全地球来说的。至于对地球的某个地点而言，一年内能看到日食的机会就要少得多。平均起来，一个地方要二百年才能看见一次日全食。因此有不少的人一生也没有看到日全食是不足为奇的。

由于月亮的影锥又细又长，所以当它落到地球表面时，所占的面积很小，至多不会超过地球总面积的万分之一，它的直径最大也只有二百六十多千米。当月球绕地球转动时，影锥就在地面上自西向东扫过一段比较长的地带，在月影扫过的地带，就都可以看见日食。所以这条带就叫做“日食带”。带内发生日全食的，就叫全食带；带内发生日环食的，就叫环食带。可以看到偏食的范围很广阔，已经不像一条带子，而是很大的一片地区。

全食带是一条宽度不过二三百千米，长约数千到 10000 千米的狭窄路径（有时全食带的宽度甚至只有几千米），只有在全食带扫过的地区才能看见日全食或日环食的发生。全食带的两旁是较广阔的半影扫过的地区，在这些地区内可见偏食。离全食带愈近的偏食区，所见偏食程度愈大；离带愈远，可见偏食程度愈小；半影区以外的地方是看不见日食的。由于月球是由西向东运行，所以它的影子也是沿同一方向运行，因此各地看到日食的时间是不同的。当地面上的西部地区已

经处在黑影区域内，这一地区的人已经看到日食时，东部地区的人却不能同时看到日食，得在月影向东移来后才能看到日食。所以，西部地区的人总是比东部地区的人先看到日食。

§2.2.2 日食类别

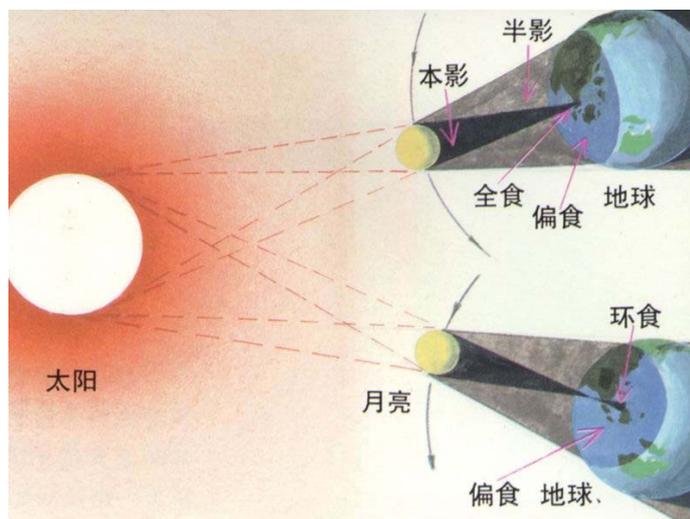


图 2.6 日全食和日环食示意图（来自 intel 网）

日食共有三种，即：日偏食、日环食和日全食。月球遮住太阳的一部分叫日偏食。月球只遮住太阳的中心部分，在太阳周围还露出一圈日面，好象一个光环似的叫日环食。太阳被完全遮住的叫日全食。这三种不同的日食的发生跟太阳、月球和地球三者的相互变化着的位置有关，并且也决定于月球与地球之间的距离变化。

由于月球比太阳小得多，它的直径大约是太阳直径的四分之一，而月球与地球间距离也差不多是太阳与地球间距离的四分之一，所以从地球上看来，月亮与太阳的圆面大小差不多相等，因而能把太阳遮住而发生日食。地球公转和月球公转轨道都是椭圆，不论是太阳与地球间距离，还是月球与地球间距离，并不是固定不变的，而有时比较远，有时又比较近，因此月球本影的长短也不一样，月球本影最长时有 379660 公里，最短时为 367000 公里，而地球与月球之间的距离最近时为 356700 公里，最远时达 406700 公里。

日全食，当月球运动到近地点并与地球和太阳处在同一直线上时，此时月球的本影锥长度较月地之间距离长，本影锥才能扫到地球表面，在月球的本影锥内就会发生日全食，而半影区内就会发生日偏食现象。

表 2.3 将来二十年日全食、环食及全环食的发生情况

年代	日期	日食类别	可见地区	全食时间
2009	1月26日	环食	大西洋, 印度洋, 印度尼西亚	-
	7月22日	全食	太平洋, 印度, 中国	6分38秒
2010	1月15日	环食	印度洋, 缅甸, 非洲, 中国	-
	7月12日	全食	南美洲南部, 太平洋	5分20秒
2012	5月21日	环食	中国, 日本, 太平洋, 美国	-
	11月14日	全食	太平洋, 澳洲	4分2秒
2013	5月10日	环食	澳洲, 伊利亚岛, 太平洋	-
	11月3日	全、环食	大西洋, 非洲	1分39秒
2014	4月29日	环食	南极洲	-
2015	3月20日	全食	大西洋, 北冰洋	2分46秒
2016	3月9日	全食	印度尼西亚, 太平洋	4分9秒
	9月1日	环食	大西洋, 非洲, 印度洋	-
2017	2月26日	环食	太平洋, 南美洲南部, 非洲南部, 大西洋	-
	8月22日	全食	太平洋, 美国, 大西洋	2分40秒
2019	7月3日	全食	太平洋, 南美洲	4分32秒
	12月26日	环食	阿拉伯半岛, 印度, 印度尼西亚, 太平洋	-
2020	6月21日	环食	非洲, 阿拉伯半岛, 巴基斯坦, 中国, 太平洋	-
	12月15日	全食	太平洋, 南美洲南部, 大西洋	2分9秒
2021	6月10日	环食	北美洲东北部, 北冰洋, 俄罗斯	-
	12月4日	全食	大西洋, 南极洲, 太平洋	1分54秒
2023	4月20日	全环食	印度洋, 伊瑞安岛, 太平洋	1分16秒
	10月15日	环食	太平洋, 北美洲南部, 南美洲北部, 大西洋	-
2024	4月9日	全食	太平洋, 北美洲南部, 大西洋	4分28秒
	10月3日	环食	太平洋, 南美洲极南部, 大西洋	-
2026	2月17日	环食	南极洲, 印度洋	-
	8月13日	全食	北冰洋, 格陵兰, 大西洋, 欧洲极西部	2分18秒
2027	2月6日	环食	太平洋, 南美洲极南部, 大西洋	-
	8月2日	全食	大西洋, 非洲极北部, 亚洲极西南部, 印度洋	6分22秒
2028	1月26日	环食	太平洋, 南美洲北部, 大西洋, 欧洲西部	-
	7月22日	全食	印度洋, 澳洲, 太平洋	5分3秒

日环食, 当月球处于远地点并与地球和太阳处在同一直线上时, 此时月球的本影锥长度较月地之间距离短, 月球的本影锥不能到达地球; 到达地球的是由本影锥延长出的伪本影锥。此时月球的视直径略小于太阳。因此, 这时太阳边缘的

光球仍可见，形成一环绕在月球阴影周围的亮环，此即日环食现象。同样，在半影区内会发生日偏食现象。

日偏食，当月球运到地球和太阳之间，但又不完全在同一直线上的时候，月球的本影锥偏离地球表面，此时地球任何地方都不在本影区内，只有少部分地方处在半影区内，所以整个日食事件即为日偏食。

图 2.6 画出了发生日全食和日环食事件的示意图。此外，还有一种比较特别的日食现象，即混合食，也叫全环食。全环食只发生在地球表面与月球本影尖端非常接近，或月球与地球表面的距离和月本影的长度很接近的情形下。由于地球为球体，这样，因为大地是圆的，而本影影锥接触地球时为日全食（常在食带中间），在食带两端由于影锥未能接触地球，致只能有伪本影到达地球之下，所看到的是日环食。所以，当全环食发生时，随着地月之间的相对运动，会首先出现环食，然后出现全食，最后又出现环食。然而也有一些全环食只是在开始阶段出现日环食或在结束阶段出现日全食（如即将发生的 2013 年 11 月 3 日全环食）。全环食发生机率甚少，最近的一次在 2005 年 4 月 8 日。

对于同一个地点连续观测两次日全食或环食的间隔可能会非常长，可能长达百年至几百年。但如果是日偏食的话则不会很久，可能几年之内就能看到两次。对于全球而言，日食事件并不是很罕见的日食现象，如前所述，几乎每年都会有两次日食，有时会有四次日食。20 世纪全球发生日全食、日环食、日偏食以及混合食的次数分别为 71 次、73 次、78 次以及 6 次，总计发生日食 228 次，即平均每年 2.2 次日食。表 2.3 列出了近二十年将要发生的全食、环食以及全环食的信息。

§2.2.3 日食过程及其参数

对于典型的日全食发生过程，根据月球圆面同太阳圆面的位置关系，可分成如下五种食象：

1. 初亏，月球比太阳的视运动走得快，日食时月球追上太阳，月球东边缘刚刚同太阳西边缘相“接触”时叫做初亏，是第一次“外切”，此时即是日食的开始。

2. 食既，初亏后大约一小时，月球的东边缘和太阳的东边缘相“内切”的时刻叫做食既，此时即是日全食的开始，这时月球把整个太阳都遮住了。

3. 食甚，是太阳被食最深的时刻，此时月球中心移到同太阳中心最近的地方。

4. 生光，月球西边缘和太阳西边缘相“内切”的时刻叫生光，此时是日全食的结束，从食既到生光一般只有二三分钟，最长不超过七分半钟。

5. 复圆，生光后大约一小时，月球西边缘和太阳东边缘相“接触”时叫做复圆，从这时起月球完全“脱离”太阳，整个日食过程结束。

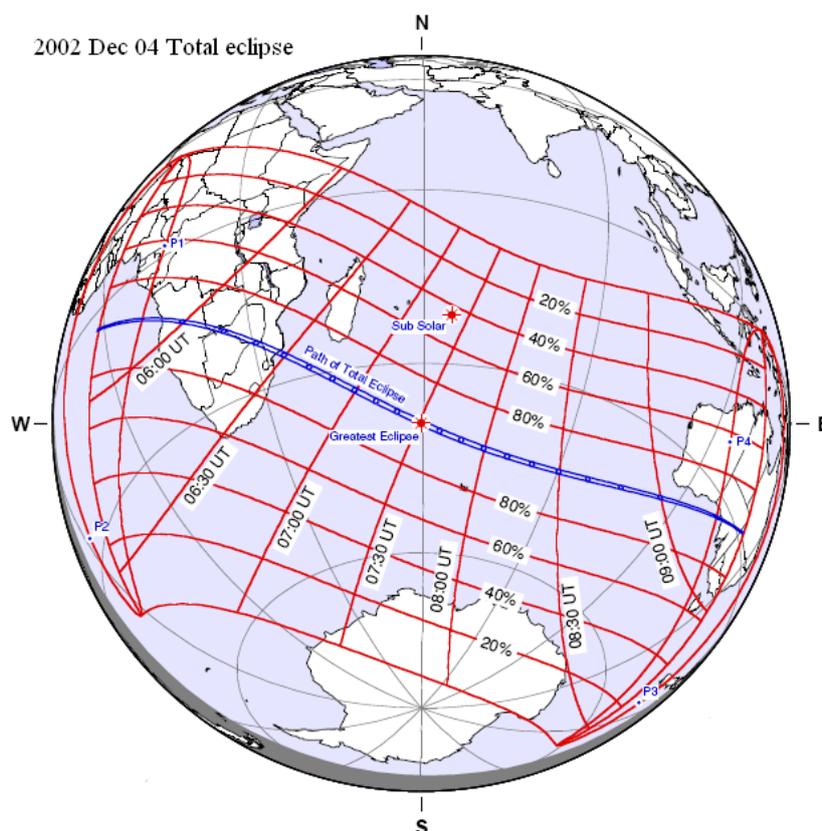


图 2.7 2002 年 12 月 4 日日全食期间全球各地发生日食的时间和空间分布。

摘自 Espenak and Anderson (2001)

为了准确描述一次日食过程，我们需要定义一些相关参数，对于日食发生时间，如上所述，需要记录第一次接触（初亏）时间，第二次接触（食既）时间，最大日食（食甚）时间，第三次接触（生光）时间以及第四次接触（复圆）时间。此外还有全食持续时间，其等于第三次和第二次接触时间之差。如果是偏食的话，就没有第二和第三次接触。对于日食时太阳光被月影遮挡的程度，可以用食分（eclipse magnitude）来记录。食分定义为太阳直径被月影遮挡的比率。对于日

全食，食分一般大于 1.0，而对于偏食和环食其值都小于 1.0。图 2.7 画出了 2002 年 12 月 4 日日全食期间全球各地发生日食的时间和空间分布。图中横线代表各地发生日食的食分等值线，正中间的两条线画出了全食带路径；纵线为各地日食程度最大的时刻线。

§2.2.4 日食期间太阳辐射变化

日食期间太阳辐射会随着月球对太阳遮挡程度的增大，即随食分的增大而逐渐减小，并在食甚（对日全食而言）或食分最大时（对日偏食而言）达到最小值，并在随后月球远离日地连线而逐渐增大并最终恢复到日食前水平。食甚时可见光将会完全被月影遮住，可见光通量基本降为零。但是对于离化地球上层大气的 EUV 辐射和 X 射线而言，情况有所不同。这些高能太阳辐射主要来自太阳日冕和色球，而日冕和色球层在光球层外。日食时月影最多只能遮住光球层，所以即使在食甚时也还有部分太阳 EUV 和 X 射线能到达地球。

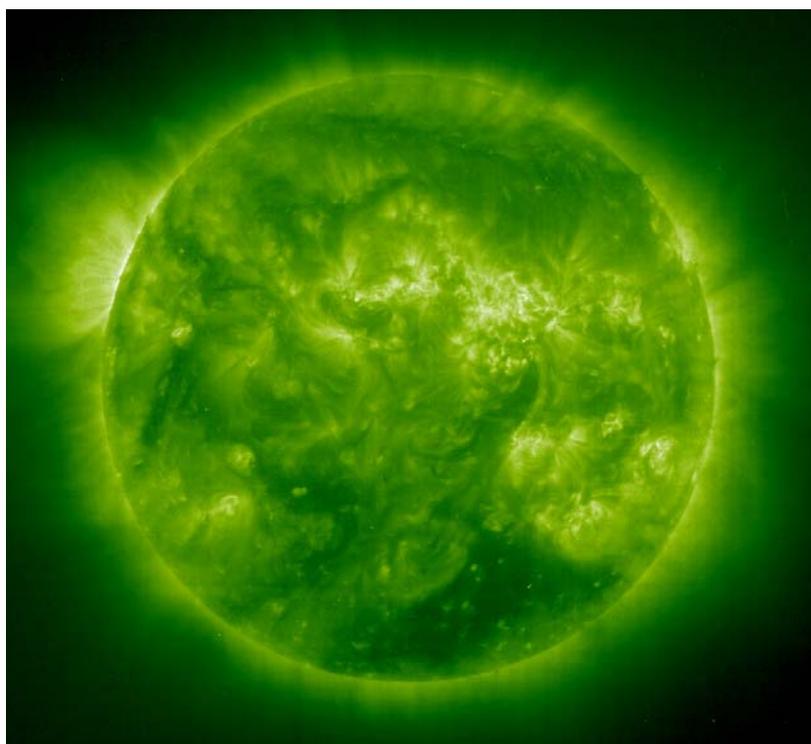


图 2.8 2001 年 6 月 21 日 SOHO 极紫外辐射成像望远镜拍摄的 19.5nm EUV 通量日面分布

一般我们假定日面太阳辐射是均匀的，也即太阳辐射减小量与光球面被遮挡的面积成正比。按此假设，太阳辐射几乎是先线性减少然后又线性增加。但当日面有明显的活动区时，日面的太阳辐射就不是均匀分布的，活动区附近太阳辐射降明显强于其它地区。所以日食时太阳辐射的变化就有所不同，遮住活动区时太阳辐射降下降更多。而且各个波段的辐射也不尽相同。图 2.8 给出了 SOHO 极紫外辐射成像望远镜拍摄的 2001 年 6 月 21 日 28.5nm EUV 通量日面分布。从图中可以看到日面辐射南北半球不均匀，南半球活动区明显多于北半球。图 2.9 给出了 17.1nm、19.5nm、28.4nm 以及 30.4nm EUV 辐射在日食期间随食分的变化，实线和虚线分别表示从北半球开始和从南半球开始的日食。

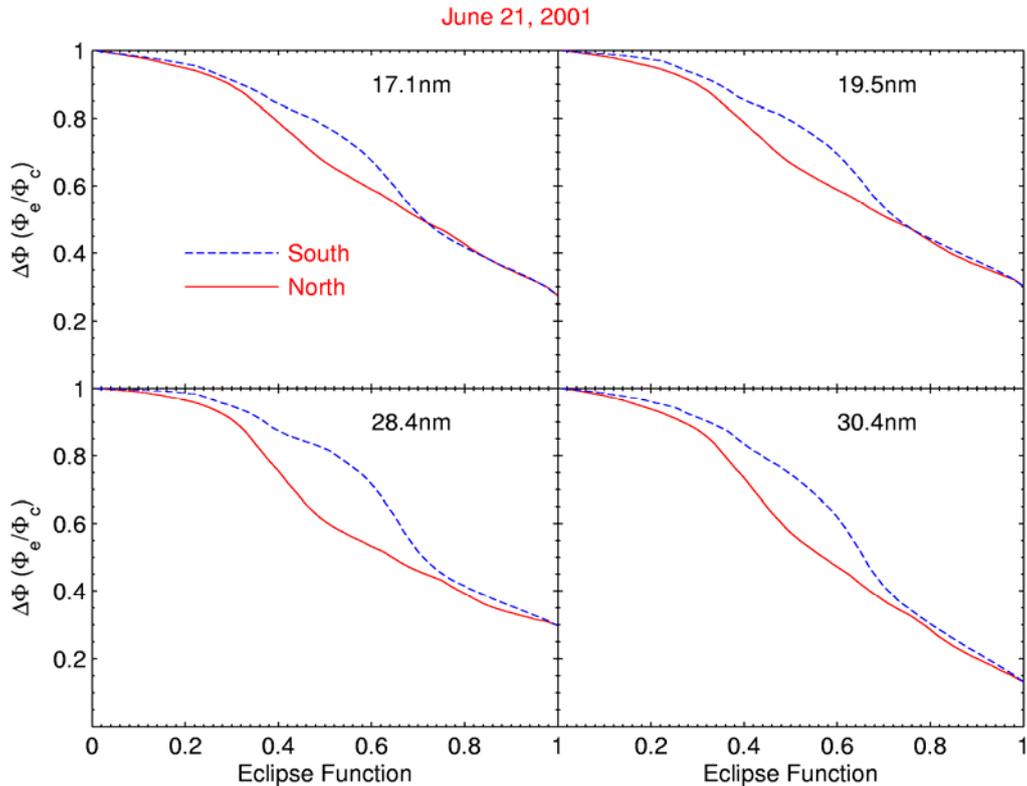


图 2.9 给出了 17.1nm、19.5nm、28.4nm 以及 30.4nm EUV 辐射在日食期间随食分的变化，实线和虚线分别表示从北半球开始和从南半球开始的日食。

如图 2.9 所示，对于相同食分的日食，太阳北半球辐射被遮挡比南半球被遮挡会产生更大的 EUV 辐射通量下降。并且各个波段的辐射变化也有差别，比如在食甚时 19.5nm 的辐射降到日食前的 0.3 倍，而 30.4nm 辐射下降更多只有日食前的 0.18。

第三节 电离层模式及日食和耀斑期间太阳辐射变化模型

本节首先简要介绍本实验室的一维中纬电离层模式 (Lei et al., 2004a, 2004b) 以及二维中低纬电离层理论模式 (Theoretical Ionospheric Model of the Earth in Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy Sciences, 简称为 TIME-IGGCAS)。一维中纬电离层模式在地理经纬度给定的中纬地区沿高度求解电离层出发方程, 给出电离层参数的垂直剖面信息; 二维中低纬电离层理论模式是沿磁力线构建的, 能给出磁子午面内中低纬电离层参数信息。然后介绍如何构建日食和耀斑期间太阳辐射随时间演变的模型, 这是我们进行日食和耀斑电离层响应模拟研究的基础。我们将基于日食和耀斑期间太阳辐射随时间演变的模型, 并运用这两个电离层理论模式, 来模拟不同条件下太阳耀斑和日食事件的电离层演变。

§3.1 一维中纬电离层模式

我们发展的一维中纬电离层模式 (Lei et al., 2004a, 2004b) 是在本实验室以前电离层模式研究基础上发展的 (涂剑南, 1997; 刘立波, 1997; Liu et al., 1999)。对于中纬地区, 电离层可以假定处于水平分层, 我们只考虑电离层沿高度的变化, 忽略水平方向上的变化。该模式采用垂直地面方式构建坐标, 计算范围从 100 公里到 600 公里。模式中网格划分既可采用均匀网格, 也可采用非均匀网格 (网格随高度增加而渐疏)。模式基本方程涉及到连续性方程、动量方程、能量方程以及中性大气运动方程。下面简要介绍这些方程及其求解。

§3.1.1 模式出发方程

离子质量连续性方程、离子动量方程、电子动量方程分别如下:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = q_i - \beta_i N_i - \frac{\partial}{\partial z} (N_i V_{iz}) \quad (3.1)$$

$$0 = -\nabla P_i + N_i m_i g + N_i e (E + V_i \times B) - N_i m_i \sum_n v_{in} (V_i - U) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{0} = -\nabla P_e - N_e e (E + V_e \times B) \quad (3.3)$$

式中 q_i 为离子的产生率, β_i 为离子的复合率, V_{iz} 为离子垂直 z 方向上的输运速度; $P_i = N_i k T_i$ 为离子压强, k 为 Boltzman 常数, T_i 为离子温度; m_i 为 i 种成份离子的质量, e 为基本电荷, E 、 B 分别为电场强度和磁感应强度; ν_{in} 为离子-中性成分间的碰撞频率; g 是重力加速度项; V_i 是离子速度, 而 U 为中性风矢量; $P_e = N_e k T_e$ 为离子的动力学压力, N_e 为电子浓度, T_e 为电子温度, V_e 为电子速度矢量。

离子与电子能量方程如下:

$$\frac{3}{2} Nk \frac{\partial T}{\partial t} = -NkT \nabla \cdot V - \frac{3}{2} NkTV \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \quad (3.4)$$

上式 T 为 T_i 或 T_e 。(3.4)式右边第一项表示绝热膨胀; 第二项为环流项; 第三项代表热传导, λ 为热传导系数; 最后一项表示带电离子或电子的加热率, 它是光电子加热、离子与中性成分以及离子与电子之间的碰撞、摩擦加热等过程的总和。

目前模式考虑了 4 种离子 O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ 。对于 O^+ , 模式通过耦合求解其连续性方程和动量方程可以给出它的浓度及速度在垂直方向的投影(简称垂直速度)。分子离子 (O_2^+ , NO^+ , N_2^+) 主要分布在电离层低高度, 模式忽略了其输运效应, 通过直接计算光化学平衡得到它们的浓度。通过求解离子和电子的能量方程可以得到离子和电子的温度。模式假定分子离子温度与 O^+ 温度相同, 只计算 O^+ 及电子温度。关于此模式的详细描述和方程的具体求解过程, 请参见雷久侯博士论文 (2005)。

§3.1.2 中性大气参数

中性大气浓度和温度由 MSIS 热层大气经验模式给出。MSIS 是根据卫星质谱议、非相干散射雷达等观测数据建立的一个全球中性大气经验模式。到目前为止, MSIS 模式已有多个版本, 本模式采用 MSIS 最新版 NRLMSISE-00 (Picone *et al.*, 2002)。模式能够给出八种中性成分的数密度、中性大气的温度与外热层温度随高度、地理经纬度、时间、太阳活动(用 10.7cm 射电通量 F_{107} 表示)和地磁活动(用 A_p 指数表示)的变化。不过, MSIS 模式不提供 NO 的浓度。早期, Mitra (1968) 提出了利用中性成分 O 和 O_2 的数密度来表示 NO 的简单模式。本文采

用 Titheridge (1997) 构建的 NO 模式, 它是根据大量的观测数据而建立的一个能够比较合理地反映出 NO 密度随地方时、季节、地理位置和太阳活动变化的经验模式。

对于水平风场, 本模式采用 HWM93 (Hedin *et al.*, 1996) 模式。HWM 模式是根据地面雷达和光学观测以及卫星等手段的探测数据建立的一个全球热层风场经验模式。由于观测数据的有限, 水平风场模式在某些地区与实测有较大偏离 (e.g., Titheridge, 1993)。另外, 另外本模式也可采用 Richards (1991) 的方法通过电离层 F2 层峰高数据提取等效风场。其中采用了 Pavlov and Buonsanto (1997) 给出的峰高变化与中性风之间的关系系数。这里需要指出, 此等效风已经同时包含了中性风及电场的作用。

§3.1.3 光电离过程

太阳辐射是产生电离层的源。中性大气 O、O₂ 和 N₂ 等吸收波长短于 1050 Å 的太阳辐射发生电离, 产生自由电子和 O⁺, O₂⁺, N₂⁺ 等初级离子。其中, O⁺ 有 ⁴S、²D、²P、⁴P 和 ²P* 等多种能态。但是, ⁴P 和 ²P* 能态的 O⁺ 很不稳定, ²P* 能态 O⁺ 离子很快以 2.6:1 的比例转换为 ²D 和 ²P 能态 O⁺ 离子, 而 ⁴P 能态直接转换成 ⁴S 能态 O⁺ 离子 (Schlesier and Buonsanto, 1999)。因此, 可直接将 ⁴P 和 ²P* 能态光电离产生率记入到转换后能态 O⁺ 离子光电离产生率中, 最后可以等效光电离只产生 O⁺ (⁴S、²D、²P)、O₂⁺ 和 N₂⁺ 共 5 种初级离子。

在求解离子光电离产生率时, 需要太阳 EUV 辐射通量以及中性大气成分 O、O₂、N₂ 等在这些波段上的吸收截面和离化截面等参数的信息。目前, 高分辨率太阳 EUV 辐射通量没有长期连续的实测数据可供使用, 因此一般用经验模式提供这一参数, 现在常用的有 Richards 等的 EUVAC 经验模式和 Tobiska 等的 SOLAR2000 经验模式。本模式采用 Richards 等的 EUVAC 经验模式。该模式以 F74113 太阳 EUV 辐射通量为参考谱(EUVAC 经验模式修改了 25nm 以下的波段通量), 通过 10.7cm 太阳辐射指数 F107 和它 81 天均值 F107A 的均值 (F107+F107A)/2 作为太阳活动的指数, 给出通用的 37 波段太阳 EUV 辐射通量。中性大气各成分在 37 波段上的吸收截面和离化截面参见雷久侯博士论文 (2005)。

已知 37 波段太阳 EUV 辐射通量、中性大气成分 O、O₂、N₂ 等在 37 波段上的吸收截面和离化截面参数、以及中性大气成分浓度和温度信息后，便能计算出第 j 种初级离子的光电离产生率：

$$Q_j(h, \chi) = \sum_{\lambda} I_{\infty}(\lambda) \sigma_j^i(\lambda) n_j(h) e^{-\tau(\lambda, h, \chi)} \quad (3.5)$$

上式中 h 为高度， χ 为天顶角， $I(\lambda)$ 为第 λ 波段太阳辐射通量， $\sigma_j^i(\lambda)$ 为离化截面， n_j 为中性大气密度， τ 为光学深度。模式中采用 Chapman 函数 $Ch(\chi, h)$ 来计算光学深度：

$$\tau(\lambda, h, \chi) = \sum_j \sigma_j^a(\lambda) n_j(h) H_j(h) Ch(\chi, h) \quad (3.6)$$

上式中 $H_j(h)$ 为 j 种成分在高度 h 处的标高， $\sigma_j^i(\lambda)$ 为吸收截面。

另外，波长较短的太阳辐射（小于 400Å）具有较高的能量，它能离化产生光电子。部分光电子具有足够的能量进一步电离周围的中性成分，从而产生附加的电离效果，此即二次电离或次级电离。Richards and Torr（1988）等提出的一种简单的修正因子来计算二次电离。Titheridge（1996）考虑更为复杂的方法对光电子的次级电离产生率进行修正，本模式采用了 Titheridge 提出的方法计算二次电离。

§3.1.4 离子化学过程

模式中主要考虑了 O⁺、O₂⁺、N₂⁺ 和 NO⁺ 四种离子成分。这些离子成分之间以及与电子之间发生各种化学反应，目前模式中考虑了 21 个化学反应，其中稳态离子的化学反应为 10 个，与亚稳态 O⁺ 相关的反应共 11 个。详细信息参见雷久侯博士论文表 4.1 及 4.2。反应系数依次为 k_1, k_2, \dots, k_{21} 。通过考虑这些化学反应过程及前面介绍的离子光电产生过程，可以计算得到各离子总的产生率（ q_{O^+} ， $q_{O_2^+}$ ， $q_{N_2^+}$ ， q_{NO^+} ）和损失率（ β_{O^+} ， $\beta_{O_2^+}$ ， $\beta_{N_2^+}$ ， β_{NO^+} ）

§3.1.5 加热率和热传导系数

求解电子离子的能量方程可以给出电子离子的温度信息。

在能量方程中，加热率 Q 和热传导系数是两个重要参量。离子的加热率为 $Q_i = Q_{ie} + Q_{in} + F_{in}$ ，其中 Q_{ie} 为离子和电子之间的碰撞加热， Q_{in} 为离子和中性成分

之间的碰撞热交换, F_{in} 为离子与中性成分间的摩擦加热。模式假设各种离子的温度和速度都相同, 离子与离子的碰撞加热可以忽略。模式采用 Millward et al. (1996)的经验公式计算以上三项加热率。

电子加热率为 $Q_e = Q_{phe} + Q_{ei} + Q_{en} + Q_{en}^{rot} + Q_{en}^{vib} + Q_{en}^f + Q_{en}^{1D}$ 。其中 Q_{phe} 为光电子加热率, Q_{ei} 为电子和离子之间的碰撞加热, Q_{en} 为电子和中性大气之间的弹性碰撞加热, Q_{en}^{rot} 和 Q_{en}^{vib} 为中性成分 N_2 、 O_2 的旋转能级的激发及其振动能级的激发加热, Q_{en}^f 和 Q_{en}^{1D} 为原子氧精细结构的激发和低亚稳态的中性氧原子 $O(^1D)$ 的激发加热。光电子加热 Q_{phe} 采用 Richards and Torr (1983) 模式计算得到。

模式中离子热传导系数 λ_i 采用 Bank and Kockarts (1973) 提供的经验方法计算, 电子热传导系数 λ_e 则采用 Schunk and Nagy (1978) 提出的方法计算。

§3.1.6 模式求解

整理连续性方程和能量方程, 可以写成如下形式:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = f_1 + f_2 X_i + f_3 \frac{\partial X_i}{\partial z} + f_4 \frac{\partial^2 X_i}{\partial z^2} \quad (3.7)$$

上式中 X_i 为需要求解的主要参数 (如 O^+ 密度, 电子及离子温度; 即 $X_i = N_{O^+}$, T_e , T_i)。系数 f_k ($k=1,2,3,4$) 是高度、时间及 X_i 的复杂函数。模式在时间上采用后向差分, 空间上采用中心差分格式将上述方程离散化, 可以得到基本方程的差分形式:

$$A_i X_i(k-1, t) + B_i X_i(k, t) + C_i X_i(k+1, t) = D_i \quad (3.8)$$

其中系数 A_i 、 B_i 、 C_i 和 D_i 是时间、中性大气参数、 X_i 等参量的复杂函数。给定初始条件及边界条件, 利用追赶法即可方便地求解 X_i 。

模式的初始条件的取法非常灵活。对于 O^+ 的初始值, 可以由 IRI 等经验模式给出, 也可采用 Chapman 函数形式的浓度剖面。对于 T_e 和 T_i , 可以由 IRI 等经验模式给出, 或直接设定其等于中性温度。初始中性风速由 HWM93 模式计算得到, 或直接设为零。计算表明, 不同的初始条件对最后的模拟的结果几乎没有影响。除了初始条件外, 模式还需要给出计算的下边界、上边界的边界条件。 O^+ 密度在下边界处可以忽略输运作用而采用光化学平衡条件, 其上边界值可以直接由观测值或经验模式给定。对于能量方程, 下边界假定当地加热与冷却率平衡

(即总的加热率为零), 或直接假定等离子体等于中性温度。上边界处, 一般采用观测或经验模式的温度值作为边界条件。

§3.2 中低纬电离层模式 TIME-IGGCAS

二维中低纬电离层模式 TIME-IGGCAS 是一个沿磁力线构建的电离层模式。此模式在中性大气参数的获取、光电离的计算、离子化学、加热率及热传导的计算以及数值求解等方面与前一模式基本相同, 为节省篇幅在此将不再介绍。不同的是, 电子的光电加热率的计算, 采用与 Millward (1993) 相同的方法考虑了来自共轭半球的光电子的加热; 离子化学方面, 较一维电离层模式增加了主要分布在等离子体层的 H^+ 和 He^+ 的计算, 考虑的离子化学反应达到 31 个, 包括亚稳态氧离子反应 11 个 (具体信息参见乐新安博士论文 (2008) 中的表 4.5 和 4.6)。二维中低纬电离层模式与一维电离层模式还有一个重要的差别, 即模式沿磁力线构建的, 计算区域涵盖了低纬电离层, 考虑了 $E \times B$ 等离子体漂移。另外, 模式的坐标选取和网格划分较一维模式复杂得多。下面简要介绍模式及一些计算结果。

§3.2.1 模式坐标选取及网格分布

二维中低纬电离层模式 TIME-IGGCAS 采用 (p, q, Φ) 正交坐标系统 (Huba et al., 2000; Millward et al., 1996; Pavlov, 2003)。这里 Φ 是地磁经度, p 和 q 在地磁极坐标下可以表示为:

$$\begin{aligned} p &= \frac{r_m}{r_0 \sin^2 \theta_m} \\ q &= \frac{r_0^2 \cos \theta_m}{r_m^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

r_m 是该点到地磁中心的距离, r_0 是地球半径, θ_m 是地磁余纬。坐标 q 沿磁力线向北为正, p 垂直磁力线指向地心为正, Φ 为地磁经度, 垂直磁子午面, 向东为正。该坐标系的优点是: 对一根磁力线而言, p 是相等的, 其值等于该磁力线磁赤道上空顶点与地心的距离和地球半径的比值; 对于磁回旋频率远大于碰撞频率的高度, 可以近似认为等离子体垂直于磁力线的运动是等 q 值的。因此该坐标系非常适合我们对动力学效应采取的简化处理。从 (p, q, Φ) 坐标系向地磁极坐标系的转换则要通过数值求解以下的方程来完成:

$$q^2 (r/r_0)^4 + r/(pr_0) = 1 \quad (3.10)$$

考虑到空间等离子体随高度其标高逐渐增大，合理的网格分布应该是低高度密而高高度稀，因此我们采用了一种非均匀网格划分方法（Millward, 1993）。定义一个新的变量 x ：

$$x = \frac{\sinh \gamma q}{\sinh \gamma q_s} \quad (3.11)$$

然后定义每根磁力线上网点分布如下：

$$x_i = x_{i-1} + c, \quad c = \left(1 - \frac{\sinh \gamma q_n}{\sinh \gamma q_s}\right) \left(\frac{1}{N-1}\right) \quad (3.12)$$

式中 γ 是一个调节因子， γ 越大，则较低高度的点越多，我们这里取值为 5； c 是 x 的常数增量； q_n 和 q_s 为磁力线在北半球和南半球端点的 q 值； N 是沿一根磁力线总的网格点数，可以根据研究工作的需要任意给定。图 3.1 给出了在地磁纬度 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内划分 60 根磁力线，每根磁力线上 201 个点的网格划分示意图，这里每根磁力线的端点离地面的高度是 130 km。可以看到这种划分方式保证了在电离层 F 层有较好的覆盖。

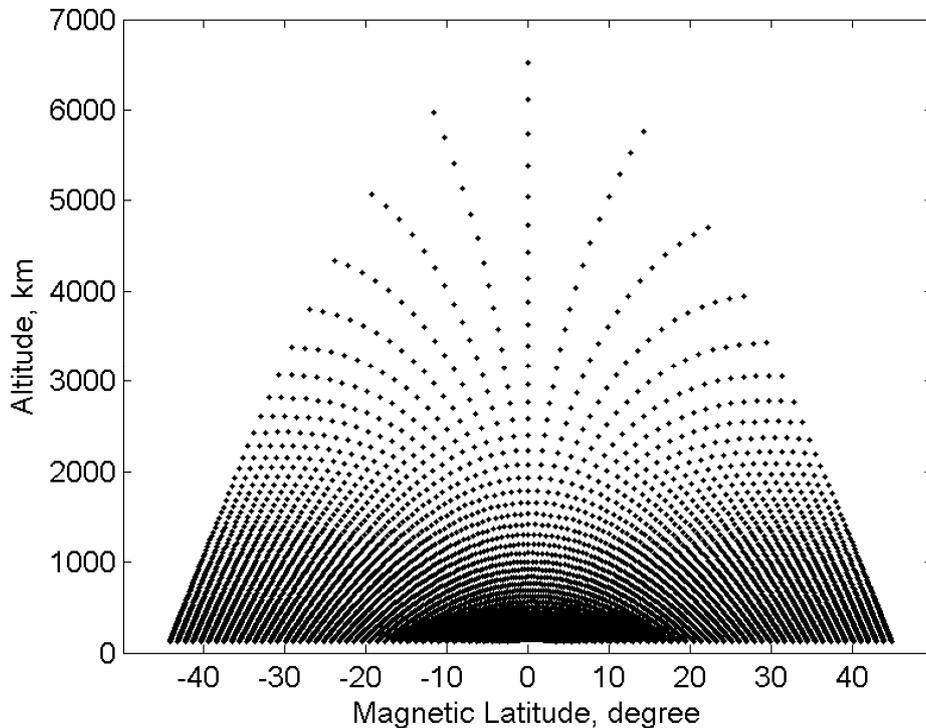


图 3.1 TIME-IGGCAS 在地磁纬度 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内划分 60 根磁力线，每根磁力线上 201 个点的网格示意图。

§3.2.2 模式出发方程

连续性方程如下：

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = p_i - \beta N_i - \nabla \cdot (N_i V_i) \quad (3.13)$$

经过整理及转换到 (p, q) 坐标系下为：

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = P_i - N_i(\beta + \nabla \cdot V_{\perp}) - \eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{N_i V_{\parallel}}{\eta} \right) \quad (3.14)$$

其中， $\eta = -(1 + 3 \cos^2 \theta_m)^{0.5} \cdot \frac{r_0^2}{r^3}$ ，度规系数的推导略。上式中 N_i 是离子浓度， P_i 和 L_i 分别是产生和损失的离子， V_i 是离子运动速度， V_{\perp} 和 V_{\parallel} 分别是离子速度在垂直于磁场和平行于磁场的分量。

动量方程如下：

$$0 = -\nabla p_i + N_i m_i g + N_i e(E + V_i \times B) - N_i m_i \sum v_{in}(V_i - V_n) - N_i m_i \sum v_{ij}(V_i - V_j) \quad (3.15)$$

式中下标 i 代表第 i 种离子， n 代表中性成分，求和是对除 i 离子以外的离子和中性成分进行。上式中右边 5 项分别代表压力梯度力、重力、洛仑兹力、中性成分的拖曳力和离子成分的拖曳力。对电子而言，可以忽略与电子质量有关的小量，有：

$$0 = -\nabla p_e - N_e e(E + V_e \times B) \quad (3.16)$$

现在考虑沿磁力线方向的 i 离子的动量方程，此时洛仑兹力为零，并利用 3.16 式求解出场向电场 E ，带入离子动量方程 3.15，得到：

$$0 = -g \sin I - \frac{k T_i}{m_i N_i} \frac{\eta \partial N_i}{\partial q} - \frac{k T_e}{m_i N_e} \frac{\eta \partial N_e}{\partial q} - \frac{k}{m_i} \frac{\eta \partial (T_e + T_i)}{\partial q} - \sum_j v_{ij}(V_{i\parallel} - V_{j\parallel}) - v_{in}(V_{i\parallel} - V_{n\parallel}) \quad (3.17)$$

能量方程如下：

$$\frac{3}{2} K \left(\frac{D}{Dt} \right) (NT) = -\frac{5}{2} NKT \nabla \cdot V + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \sum Q - \sum L + F_m \quad (3.18)$$

经过一系列分解及转化，离子电子能量方程写为如下形式：

$$\frac{3}{2} KN_i \frac{dT_i}{dt} = -KN_i T_i \left[\eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{V_{\parallel}}{\eta} \right) + \nabla \cdot \bar{V}_{\perp} \right] + \eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(\kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial q} \right) - \frac{3}{2} KN_i V_{\parallel} \eta \frac{\partial T_i}{\partial q} + \sum Q - \sum L + F_m \quad (3.19)$$

式中 K 是玻尔兹曼常数, k 是热传导系数, V 是速度项, Q 是离子或电子的热产生率, L 是热损失率, F_{in} 是摩擦加热。

§3.2.3 磁通管的垂直漂移

在 $E \times B$ 漂移的作用下, 整个通量管会以整体在垂直方向和东西方向运动。在本模式中, 我们重点讨论垂直方向的漂移, 东西方向的漂移处理方法类似。

垂直漂移速度一般是白天向上夜间向下的。白天向上的漂移可以达到几百公里, 而夜间向下的运动可以达到同样量级, 因此白天会造成覆盖 F 层的通量管运动到顶部电离层甚至等离子体层, 而晚上会造成一些通量管运动到很低的高度。如果我们给定模式的输出是这些运动磁力线上的点, 一方面会导致不能在固定网格上给出输出值, 另外不利于研究固定区域的物理问题, 为了解决这个问题, 我们参照 Pavlov (2003) 提出的结合欧拉网格和拉格朗日网格的方法, 即在沿磁力线求解等离子体连续性方程和能量方程后, 考虑等离子体的电场漂移作用导致网格点的位置的变化, 然后利用通量冻结原理得到这些新网格点的对应参数的值, 再插值到原来固定的网格点, 下一时刻又以固定网格点为初值向前运算 (Huba et al. 2000)。

图 3.2 给出的是在 $p = p_1$ 位置的磁力线在向上垂直电场漂移的作用下运动到 $p = p_2$ 处的示意图。图中 r 为磁力线上的点距地心的距离, dl 为沿磁力线的长度, ρ 为磁通管半径。上下两个磁通管元的体积分别为: $dv_1 = \pi\rho_1^2 dl_1$, $dv_2 = \pi\rho_2^2 dl_2$ 。由总的粒子数密度守恒得: $n_1 dv_1 = n_2 dv_2$ 。根据磁通量守恒得: $\rho_1^2 B_1 = \rho_2^2 B_2$ 。联合这两式可以得到如下关系:

$$n_2 = \frac{dl_1}{dl_2} \frac{B_2}{B_1} n_1 \quad (3.20)$$

在沿磁力线的方向上 $dl = dq / \eta$, 同时因为磁力线的运动是等 q 值的, 所以可以得到:

$$n_2 = n_1 \times (\eta_2 / \eta_1)^2 \quad (3.21)$$

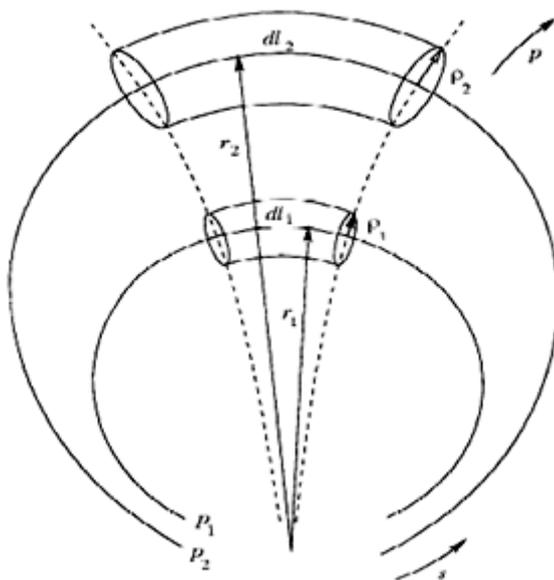


图 3.2 磁力线膨胀示意图（摘自 Huba et al., 2000）。

得到等离子体浓度在漂移后所在位置处的值之后，我们将其插值到固定网格点上。处理分为两种情况：

当漂移速度方向向上时，我们让最下面的一根磁力线不做漂移运动，因为最下面一根磁力线位置较低(赤道高度<math><150\text{ km}</math>)，这个高度及以下基本是光化学平衡，因此这种简化是成立的，这个时候我们就可以内插到原来的固定网格，示意图如图 3.3a。当垂直漂移速度向下时，为了能够内插，我们假定最外面一根磁力线不动，一般最外面一根磁力线已经对应中纬 F 层了，电离层参数受电场的影响很小，因此这种假设也是成立的，这个时候的插值示意图如图 3.3b。

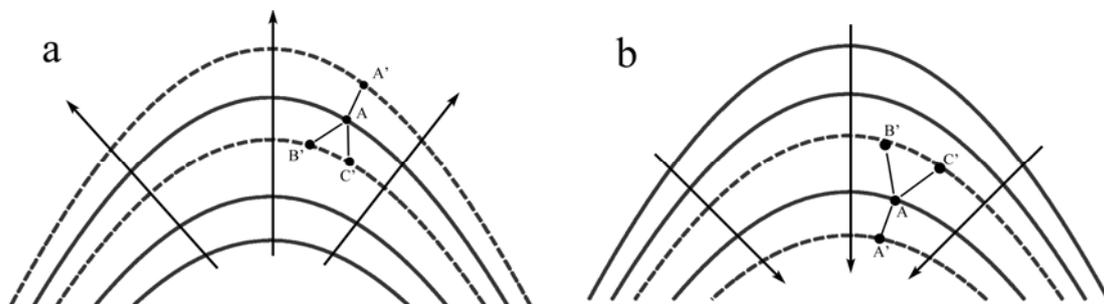


图 3.3 当垂直漂移速度向上 (a) 和向下 (b) 时插值过程示意图。

§3.2.4 模式运行流程

模式运行首先需要给定各种背景地球物理参数，包括太阳活动指数 F107 及其 81 天滑动平均值 F107A，地磁活动指数 A_p ，地磁经度以及最大地磁纬度等。然后，初始化电子和离子的密度、温度。初始化可以采用 IRI 的数据，也可以人为另外给定。借助中性大气经验模式给出背景热层参量，包括中性大气温度、各中性成份数密度、以及水平中性风场。有了这些数据之后，对于 O^+ 、 H^+ 、 He^+ 等三种原子离子，通过耦合求解离子质量连续性方程和离子动量方程，获得这三种离子的密度以及场向速度；对于主要集中在低高度的分子离子 O_2^+ 、 N_2^+ 、 NO^+ ，基于光化学平衡假设，通过计算它们的光化学产生率和损失率，可得到这些离子的密度。计算得到离子密度和场向速度后，基于电离层宏观电中性原则，得到电子密度及场向速度。然后，考虑电场漂移效应，计算磁通管漂移后的位置并把相关参量如等离子体密度插值到原位置。最后再分别求解电子与离子的能量方程，获得电子与离子的温度。至此一个时间步长的计算就完成了。

模式通常需要运行一段时间消除初始条件的影响并给出稳定的输出结果。当然，如果模式的初始条件越偏离实际情况，那么模式需要运行越长的时间来消除初始条件的影响，所以，准确的初始化过程会使计算结果快速地收敛达到稳定。我们首先利用 IRI 初始化模式，让模式运行在不同的太阳活动和季节条件下，把这些稳定后的计算结果作为以后模式在相应条件下的初始条件，这样可以避免每次模拟时浪费太多的计算资源来达到稳定。一般来说模式开始时刻取中午时刻 (12 点) 比较好。

关于模式的边界条件，由于本模式是跨半球沿磁力线模式，所以没有所谓上边界条件，也就无需给定上边界。模式中网格点的南北边界点分别位于南北半球上空 130 公里处，处于电离层 E 层高度，可以认为处于光化学平衡，所以下边界由光化学平衡给出。

§3.2.5 模式结果

我们已经利用该模式开展了一系列电离层数值模拟研究 (Le et al., 2007, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b)。在给定外部输入参量，如模式运行时间 doy (doy 为 1 代表 1 月 1 日，365 代表 12 月 31 日)、太阳活动指数 F107 及其 81 天滑动

平均值 F107A、地磁指数 A_p 等，该模式可以计算出电子离子数密度、电子离子温度以及等离子体场向扩散速度等参量。限于篇幅，下面将仅给出电子数密度的一些典型结果。

首先给出在不同太阳活动水平条件下电子及各原子离子浓度的高度分布。模式运行时间为春分 $doy=81$ ，模拟地点为地磁经度 68 度子午面，太阳活动 F107 指数分别取 80、140、200，分别代表低太阳活动，中等太阳活动以及高太阳活动。地磁指数取 $A_p=5$ ，代表地磁平静。图 3.4 给出了在不同太阳活动条件下北纬 40 度电子及各原子离子密度随高度的变化。

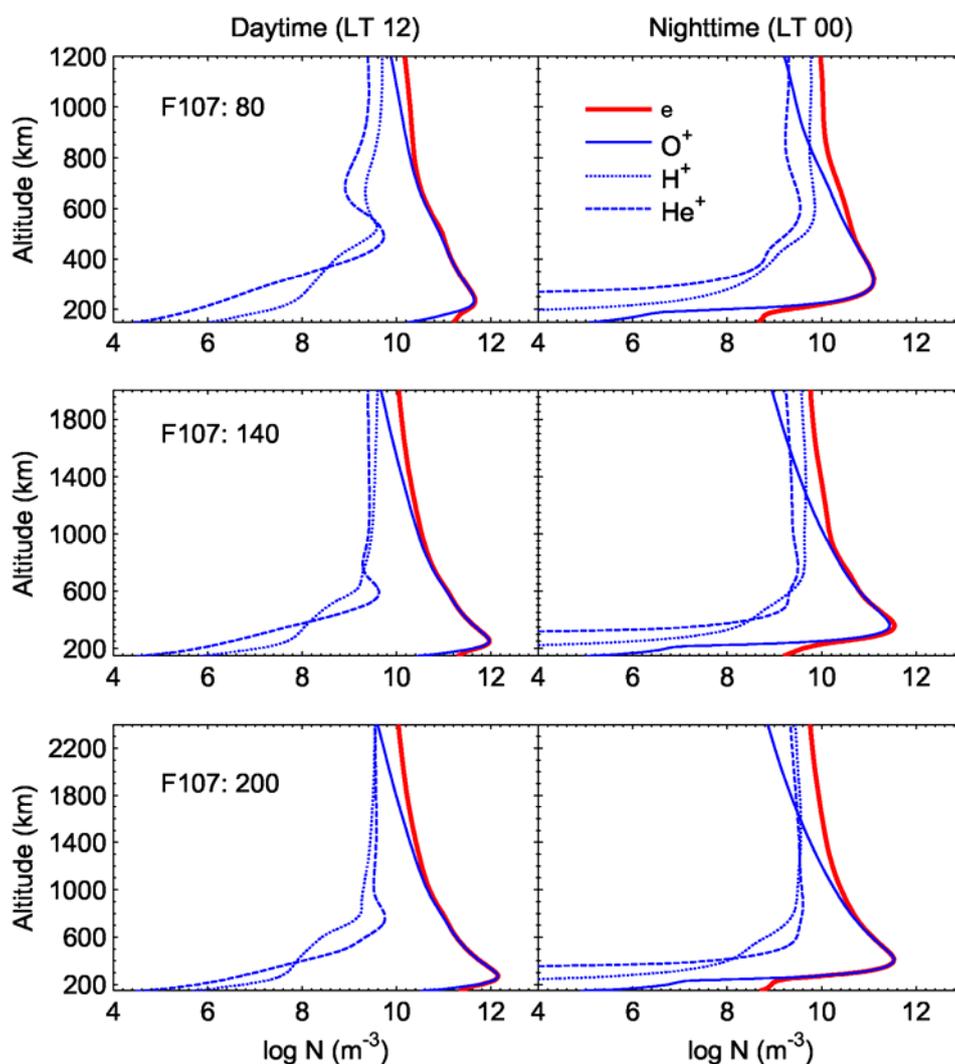


图 3.4 在低太阳活动 (F107=80)，中等太阳活动 (F107=140)，以及高太阳活动 (F107=200) 条件下中纬地区电子及各离子 O^+ ， H^+ ， He^+ 的高度分布。

如图 3.4 所示， O^+ 为 F 层的主要离子，在峰值高度以上其随高度增加而逐渐减少，其所占总等离子体密度的比重也逐渐减少； H^+ 以及 He^+ 在 F 层含量很少，

但由于其标高很大，随着高度的增加，它们的密度变化远小于 O^+ 的变化，这导致其所占总等离子体密度的比重随高度上升而逐渐增加，在某一高度， O^+ 与 H^+ 的密度相等，此即上过渡高度 H_T 。图 3.4 表明，上 H_T 随太阳活动增加而上升，并且夜间的 H_T 要显著低于白天的 H_T ，这些结果与以往的观测结果基本一致 (Titheridge, 1976; Truhlík et al., 1997, 2004)。

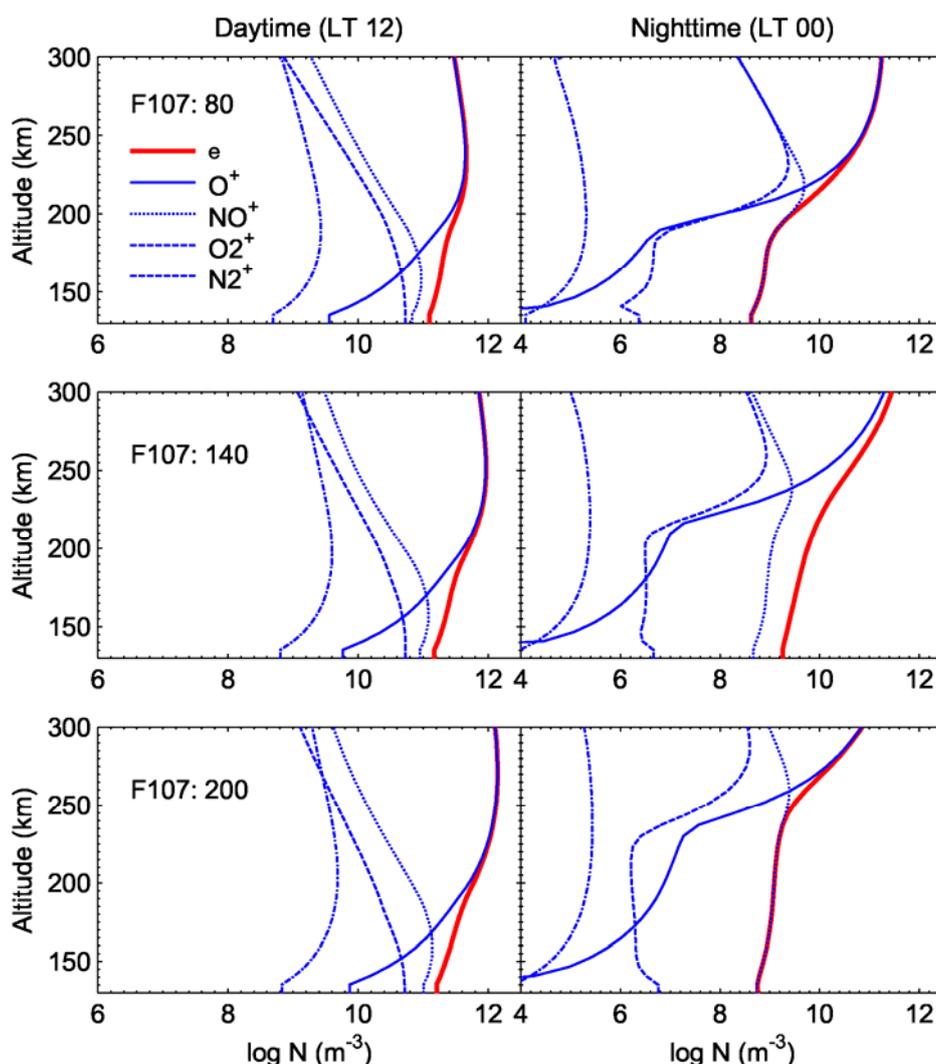


图 3.5 同图 3.4，但为分子离子的结果

图 3.5 给出了在不同太阳活动条件下低高度各分子离子随高度的分布。从图中可以看到，电离层 100-300 km 范围内主要的离子成分是原子离子 O^+ ，分子离子 NO^+ ， O_2^+ 及少量的 N_2^+ 。随着高度的增加，原子离子 O^+ 迅速增加而分子离子含量下降。通常定义原子离子与分子离子各占 50% 的高度处为原子-分子离子的过渡高度，也称为低过渡高度 H_L 。从图 3.5 可以看出，白天的低过渡高度显著低

于夜间值，并且在白天低过渡高度随太阳活动增加小幅下降，而夜间则随高度增加而增加，其增幅明显大于白天。这些结果与以往的结果也基本一致 (Lei et al., 2005a)。

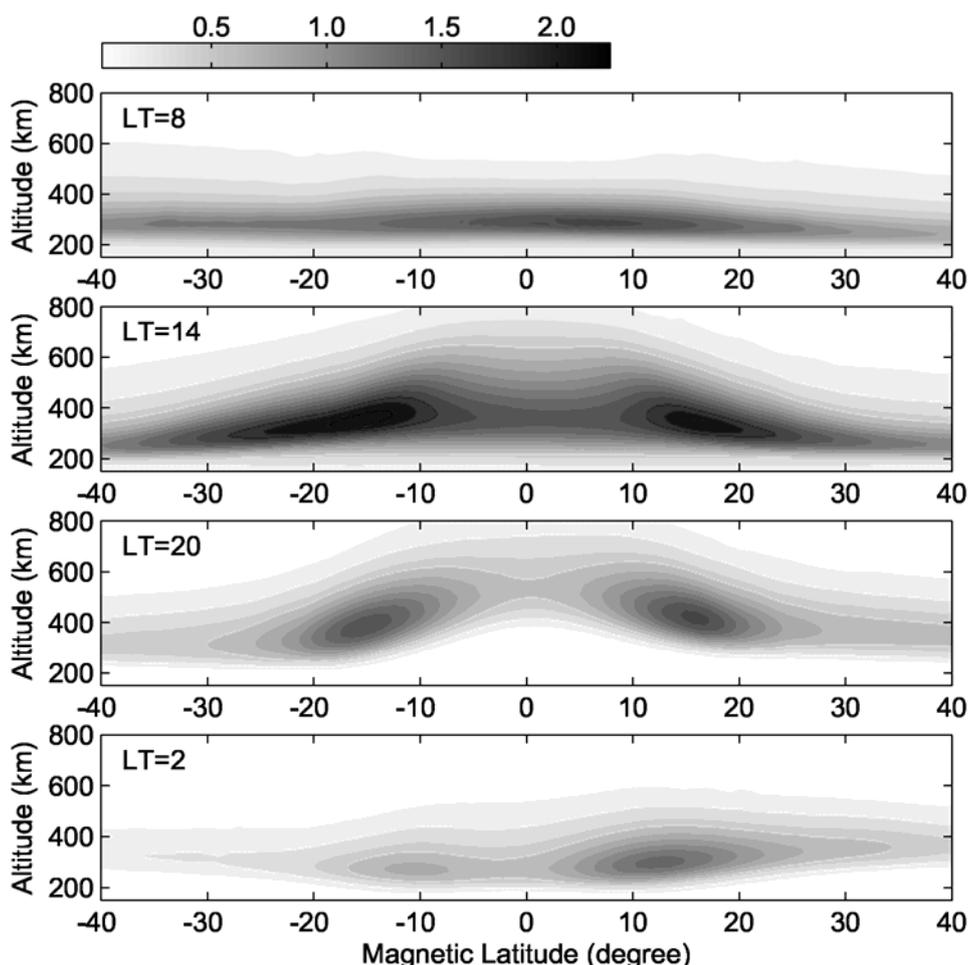


图 3.6 中等太阳活动 ($F_{107} = 140$) 东经 0 度经度链上电子浓度的高度纬度剖面随地方时的变化特征。

图 3.6 演示了赤道异常的发生及其变化。模拟结果表明，地方时上午赤道异常没有发展，而到中午赤道异常已经比较明显，赤道异常现象可以一直持续到子夜时分，但其驼峰位置会逐渐向赤道方向移动，直至汇聚到赤道位置而消失。

从图 3.7 可以看到赤道异常的发展演化，直到 $LT=9$ 赤道异常依然没有发展，到 $LT=11$ 已经基本出现。图中也显示在北半球的中纬会出现显著的冬季异常，即冬季 $NmF2$ 值大于夏季值，但此冬季异常仅发生在正午附近，如图所示，在 11 时开始出现冬季 $NmF2$ 值大于夏季值，而在 15 时已经没有此特征。另外，如

图所示在南半球中纬也有比较弱的冬季异常。图 3.7 还显示了显著的半年变化，即在两分点的 NmF2 大于冬季和夏季，此特征在低纬和赤道区尤为显著。

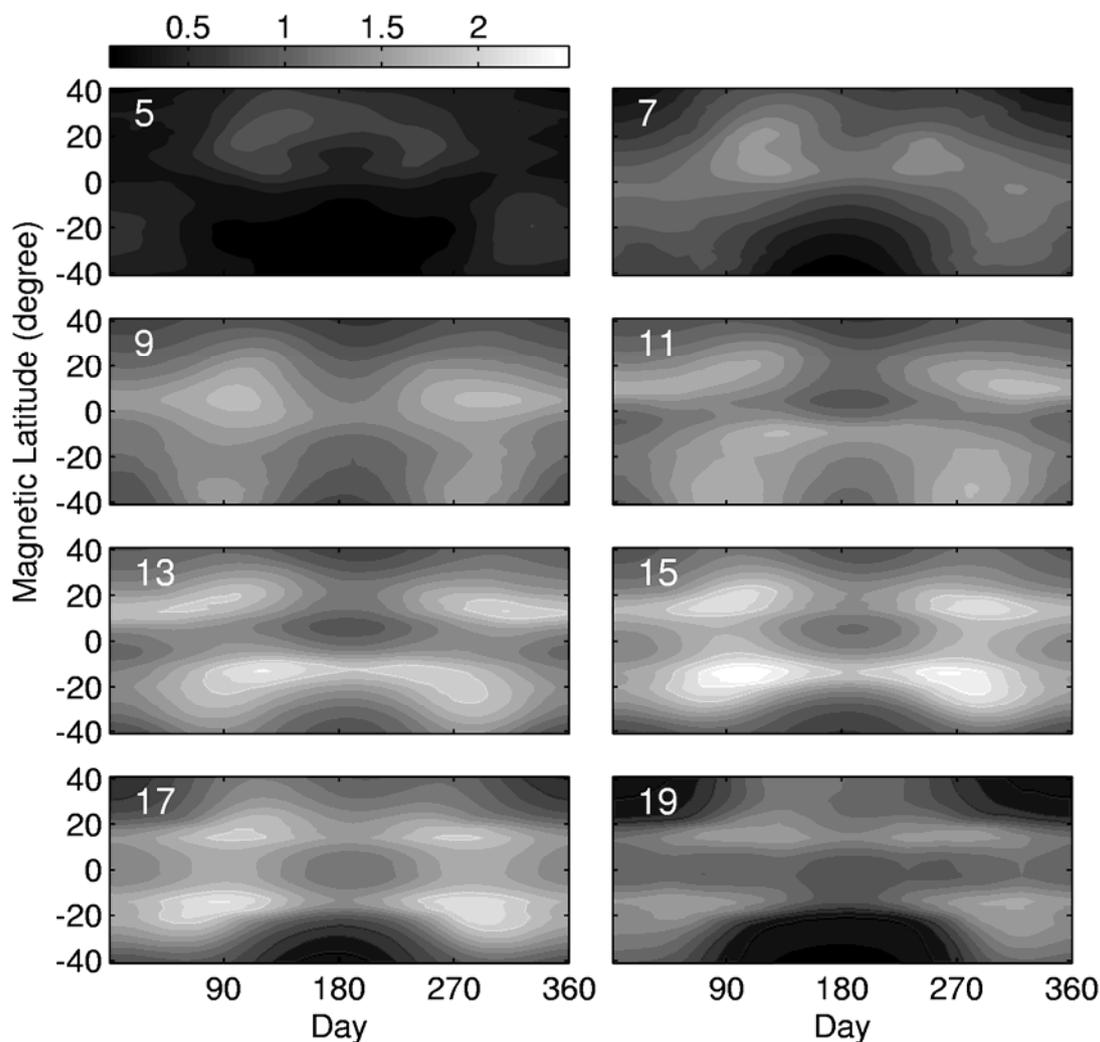


图 3.7 NmF2 在不同地方时随季节和纬度的分布特征，每个子图中的数字表示地方时时间

§3.3 耀斑期间太阳辐射变化模型

太阳耀斑期间太阳辐射会发生剧烈的变化，尤其是短波 X 射线和 EUV 辐射波段会出现一定增加。为了模拟电离层对耀斑的响应，我们需要构建一个耀斑期间太阳辐射变化的模型。

首先，背景太阳辐射（耀斑爆发前的辐射）可以通过 Richards 于 1994 年开发的 EUVAC 模式 (Richards et al., 1994) 计算获得，该模式可以给出 EUV 的 37 个波段和一些特征谱线的辐射通量，波段范围从 50—1050Å 不包括 X-ray 波段。

背景太阳辐射也可采用 Richards et al. (2006) 发展的一个更高分辨率的太阳辐射模式 HEUVAC。此模式覆盖了 0—1050Å 的整个波段，最小分辨率可以达到 1Å。在本次研究中，我们采用了后一模式，并把太阳辐射 0—1050Å 按 5Å 的精度分为 210 个波段。HEUVAC 模式输出的 EUV 辐射运用到我们的电离层理论模式当中去。

在耀斑期间，太阳 X-ray 和 EUV 辐射通量会发生不同程度的变化。为了获得更真实的耀斑光谱变化，我们分别利用 SOHO/SEM 观测的 260—340Å 的 EUV 辐射变化（15 秒分辨率）和 GOES 卫星获得的 1-8Å X-ray 辐射变化（1 分钟分辨率）作为 EUV 波段（50—1050Å）辐射和 X-ray 波段（0—50Å）辐射的参考值。假定 EUV 各波段辐射与 SOHO 卫星观测的 260-340Å 辐射有相同的时间变化曲线，而 X-ray 波段辐射与 GOES 卫星观测的 1—8Å 数据有相同的时间变化曲线，不过各波段变化幅度不同。耀斑前一个小时的辐射值被当作背景值，耀斑期间的太阳辐射通量可以通过在背景辐射值基础上乘以一个时间变化系数 $\alpha_i(t)$ 而获得。 t 是耀斑爆发后的时间， i 指示的是第 i 波段 ($i=1, 2, \dots, 210$)。时变系数 α_{60} （对应 295—300Å）和 α_1 （对应 0—5Å）分别是 260—340Å 和 1—8Å 的观测数据中直接获得的。其他各波段的时变系数可以按以下方法获得：

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} \alpha_1(t) \cdot A_i / A_1, & \text{for } i \leq 10 \\ \alpha_{60}(t) \cdot A_i / A_{60}, & \text{for } i > 10 \end{cases} \quad (3.22)$$

上式中 A_i ($i=1, 2, \dots, 210$) 是耀斑期间各波段太阳辐射较耀斑爆发前的最大增幅，是调节各波段变化幅度的一个控制参数，定义为耀斑最强时太阳辐射通量与背景辐射通量的比值。不同耀斑期间太阳辐射变化幅度不同，一般而言，耀斑级别越高， A 值将越大。各波段 A_i 值可以按照 Woods 和 Eparvier 给出的一个方法计算得出的 (Woods and Eparvier, 2006)。确定各波段 A_i 值后，根据方程 (3.22) 计算出各波段辐射的时变系数 $\alpha_i(t)$ ，这样就构建出了一个时变的耀斑期间太阳光谱模式。图 3.8 给出了 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑期间各波段辐射的最大增幅。

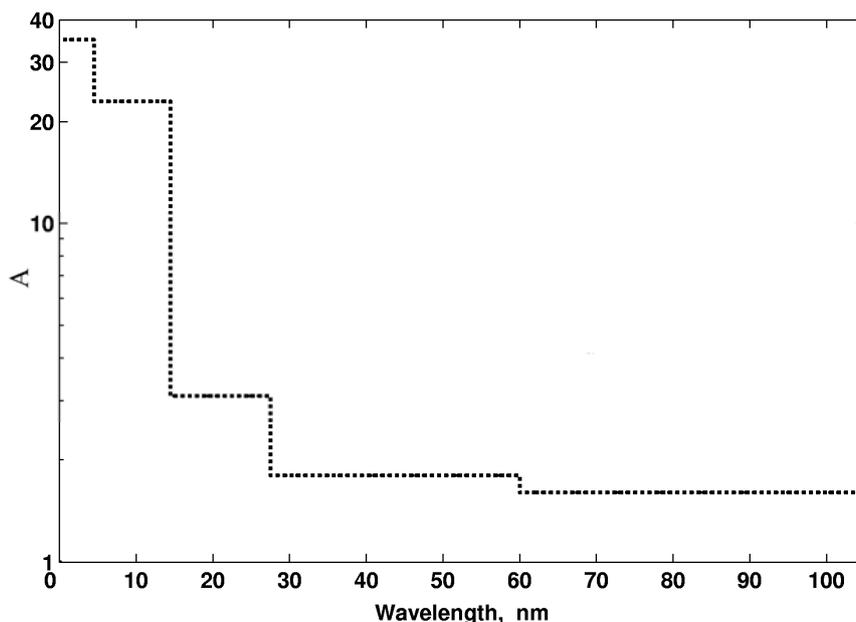


图 3.8 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑期间各波段辐射的最大增幅 A

§3.4 日食期间太阳辐射变化模型

日食期间，由于太阳被月影遮蔽，到达地球高层大气的太阳辐射通量会显著减少。当然日食程度会随时间和地点发生改变。为了模拟电离层对日食的反应，我们需要构建一个日食期间太阳辐射变化模型。

日食期间，太阳 EUV 辐射通量可以通过在背景辐射强度的基础上乘以一个日食因子 $F(UT, h, \Phi, \theta)$ 来获得，这个日食因子 F 是时间（世界时 UT）和地点（高度 h ，纬度 θ ，经度 Φ ）的函数。在过去有很多基于数值模拟的方法对电离层日食响应的研究（比如 Stubbe, 1970; Roble et al., 1986; Müller-Wodarg et al., 1998; Boitman et al., 1999; Liu et al., 1999; Korenkov et al., 2003a, 2003b）。然而，对于日食期间太阳辐射通量的变化，他们做了简化处理，假设太阳 EUV 辐射像可见光一样全部来自在光球层大小的球面中。在他们的模拟中，这个日食因子 F 就简单地等于光球剩余面积的百分比。换言之，按照他们的方法计算，食甚时日食因子 F 将等于零，太阳 EUV 辐射将完全被月球遮挡而不能到达地球大气。但是，众所周知，太阳 EUV 辐射及 X 射线主要来自太阳色球和日冕层，位于光球更外层。当月球遮住光球层的时候，日冕层并不能完全被遮住。观测显示，即使在食甚的时候，一部分太阳 EUV 辐射能到达地球大气（Rishbeth, 1968; Davis et al., 2000, 2001; Curto et al., 2006）。

Davis et al. (2000) 首次给出了一个可以估计日食期间任何时间剩余未被遮挡的太阳辐射的百分比的方法。他们是通过比较日食时 E 层临频 foE 与其控制日的值而获得这一比率的。他们的结果表明，在 1999 年 8 月 11 日日全食期间，太阳辐射在食甚时降到了没发生日食前的 25% 左右。对每次日全食事件而言，由于日地距离和日月距离不同，月球在太阳表面投影的大小不同，即月球相对太阳的大小不同。Davis et al. (2001) 讨论了因月球相对大小的不同而导致食甚时剩余太阳辐射的差异：月球相对尺寸越大，则剩余太阳辐射就越小。对于 1999 年 8 月 11 日日全食而言，月球在太阳上投影的直径与光球直径比率为 1.0277。采用与 Davis et al. (2000) 相类似的方法，Curto et al. (2006) 利用众多测高仪台站的数据，估算了太阳不同区域的辐射对地球电离层的贡献，并且构建了一个天文模式来计算日食期间任何时刻的剩余太阳辐射量。这个天文模式的计算结果表明，对于 1999 年这次日全食，在食甚时依然有 22% 的太阳 EUV 辐射能到达地球大气层，这个结果与 Davis 等人的结果基本一致。

基于以上的分析，为了更准确地获得日食期间太阳辐射的变化，我们应该考虑来自光球面以外的太阳辐射量。我们参照 Curto et al. (2006) 的方法，将太阳辐射分为两部分，一部分来自光球面，一部分来自光球面以外的日冕区域。并假定这两个区域内的辐射是均匀分布的。如图 3.9 是太阳辐射分布区域的示意图。

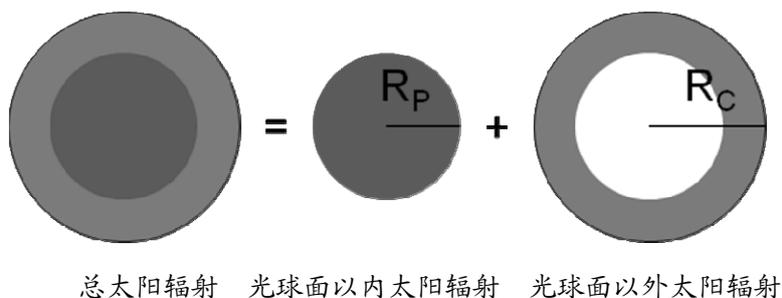


图 3.9 太阳辐射分布区域示意图

图中 R_p 和 R_c 分别是光球面半径和总太阳辐射面半径。它们的比值设为 ΔR 。要获得完整太阳辐射信息还需要知道光球面以内以及光球面外两部分太阳辐射强度 I_p 和 I_c 的比值， ΔI 。由于 E 层主要受光化学平衡控制，通过 foE 的相对变化可以近似获得太阳辐射总量的相对变化。其对应公式如下

$$\Phi_{ei}/\Phi_0 = (foE_{ei}/foE_0)^4 \tag{3.23}$$

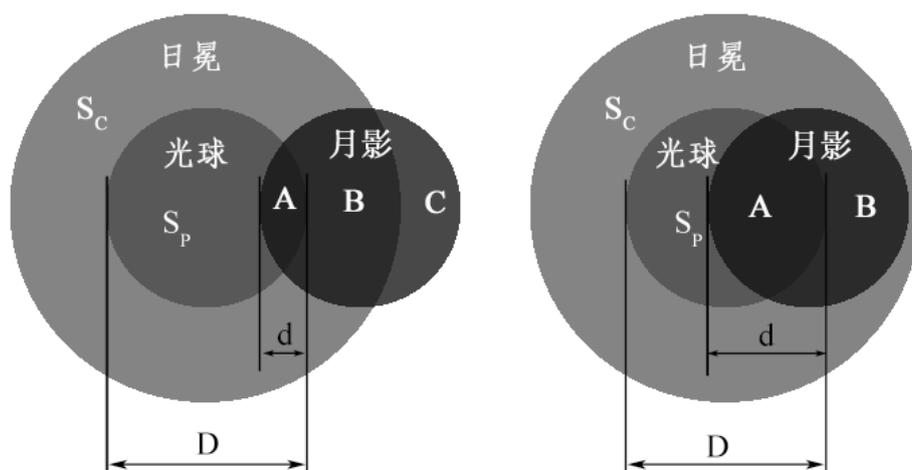


图 3.10 月球在日面投影与光球和日冕的相对位置以及光球和日冕分别被遮挡的面积示意图，分月影部分进入日冕和完全进入日冕两种情况。

上式中左边代表食分为 i 时的太阳辐射相对无日食时的变化。 e 代表日食， 0 代表无日食即背景值， i 指示食分大小。根据不同食分地区 foE 的相对变化 ΔfoE ，可以获得相应的 $\Delta \Phi$ 的变化，并以此建立关于未知数 ΔR 和 ΔI 的方程，通过求解方程组我们可以获得 ΔR 和 ΔI 的值。对于 1999 年 8 月 11 日这次日全食， $\Delta R = 2.09 \pm 0.01$ ， $\Delta I = 12.3 \pm 0.278$ 。

在获得 ΔR 以后，对于任意食分的日食，都可以通过几何计算求出太阳辐射各区域内面积的相对变化情况。图 3.10 给出了月影部分进入日冕和完全进入日冕两种情况下各区域被遮挡示意图。结合 ΔI ，就可以获得相应的太阳辐射通量的相对变化。

如上图所示，月球在日面的投影面积可以分成三部分：1，与光球面的重叠区域 A；2，位于日冕环内的区域 B；3，在日冕外的区域 C。图中， d 为光球被月影遮挡的长度， D 为光球直径长度。那么食分为 $E_m = d/D$ 。光球面积记为 S_P ，日冕环面积记为 S_C 。

我们定义一个修正日食因子 $F_R(UT, h, \Phi, \theta)$ ，它代表未被月影遮蔽的太阳辐射与总的太阳辐射的比值。总的太阳辐射包括来自光球面内和光球外的太阳辐射。为了计算此 $F_R(UT, h, \Phi, \theta)$ 的值，我们首先计算了在给定地点和给定时间的食分大小，可以通过一个 Java 语言的日食计算程序而获得。这是 Chris O'Byrne and Stephen McCann 开发的一个开源代码程序 (<http://www.chris.obyrne.com/>)

Eclipses/calculator.html)。我们将此java程序改编成fortran程序并嵌入到电离层模式中。当已知在任意地点任意时间的食分Em时，根据简单的几何计算可以得出月影三部分的面积，进而计算剩余太阳辐射与总太阳辐射的相对变化FR(UT, h, Φ, θ)。其计算公式如下：

$$F_R = \frac{(S_p - A) \cdot I_p + (S_C - B) \cdot I_C}{S_p \cdot I_p + S_C \cdot I_C} \quad (3.24)$$

第四节 中纬电离层对太阳耀斑响应的模拟研究

本节我们首先对 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级耀斑进行了模拟研究，通过模拟结果与 GPS 观测结果比较来验证此电离层模式和耀斑太阳辐射变化模型对耀斑模拟的可靠性。在此基础上，我们将此耀斑发生时间移植到不同地方时和不同季节，以此来进行电离层耀斑响应的地方时和季节依赖特性研究。模拟研究中用到的一维中纬理论电离层模式和耀斑期间太阳辐射变化模型已经在上一节有详细的介绍和描述。

§4.1 2003 年 10 月 23 日耀斑期间太阳辐射变化

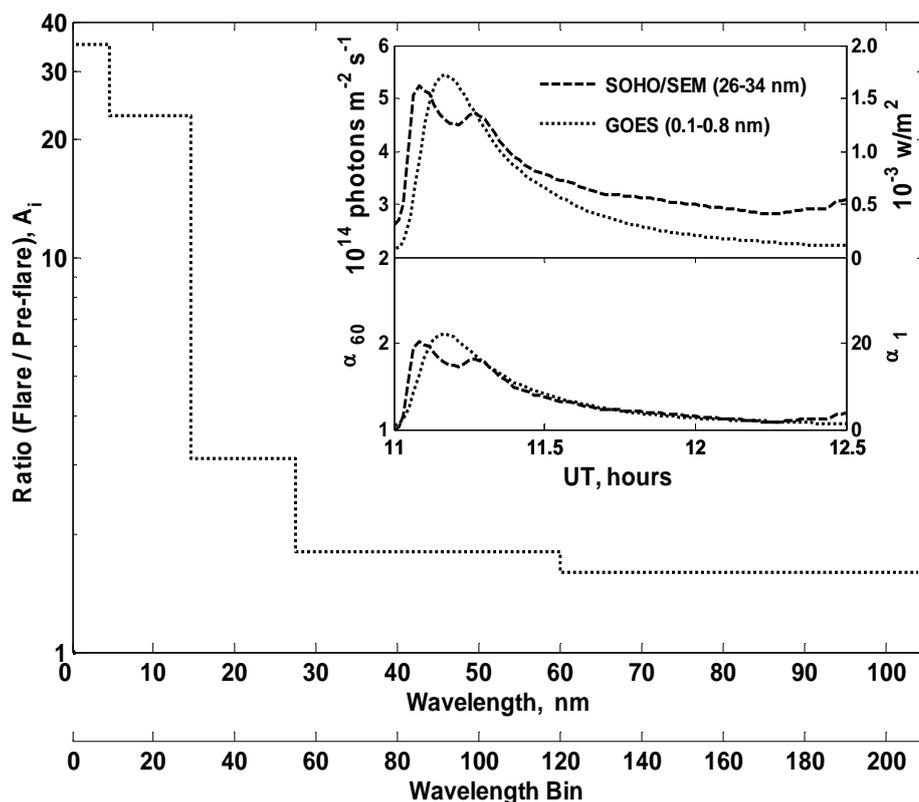


图 4.1 耀斑期间各波段太阳辐射较耀斑爆发前的最大增幅 A_i ($i=1, 2, \dots, 208$), 这个结果是根据 Woods and Eparvier (2006) 的结果得到的。2003 年 10 月 28 日耀斑期间 SOHO/SEM 260–340 Å 的 EUV 辐射数据和 GOES 1–8 Å 的 X 射线数据也画在图中 (内嵌图上图)。时变系数 α_{60} 和 α_1 也画在图中 (内嵌图下图)。

为了模拟电离层对耀斑的响应，我们基于太阳辐射观测数据构建一个耀斑太

阳辐射变化模型。上节中，我们详细介绍了该模型的构建。该模型将耀斑期间太阳辐射变化分成两段来处理：一段为 X-ray 辐射波段（0-50Å）的变化，另一段为 EUV 辐射波段（50-1050Å）的变化。利用 SOHO 卫星观测的 260-340Å 辐射数据以及 GOES 卫星观测的 1-8Å 数据分别作为 EUV 辐射和 X-ray 辐射随时间演化的参考。另外各波段的最大增幅由经验方法给出。

根据此模型并利用 2003 年 10 月 28 日的 SOHO 和 GOES 卫星的观测数据，我们建立了 2003 年 10 月 28 日~1105UT 开始爆发的 X17.2 级耀斑期间各波段太阳辐射模型。这次大耀斑期间各波段最大增幅 A 和以及第 60 和第 1 波段辐射的时变系数 α_{60} 和 α_1 画在图 4.1 中。从图中可以看到 1-8Å 的 X 射线辐射通量在 1110UT 出现一个峰值，而 260-340Å 的 EUV 辐射通量有两个峰值，第一个出现在 1105UT，第二个出现在 1116UT。

§4.2 耀斑模拟

首先我们利用一维电离层理论模式模拟了 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级大耀斑期间电离层的响应。模拟选取经度东经 0 度、北纬 48 度，所用地球物理参数为：DoY (day of year)=301, F10.7=254, F10.7A=138.7, 3 小时地磁指数 AP=[15 39 22 39 12 27 18 27]。为了清楚地展示电离层的耀斑响应，我们给出两种情形下的模拟结果：一个为采用正常光谱模式的结果作为无耀斑时的参考值，另一个为采用时变耀斑光谱模式的计算结果。随后，我们利用已经建立的耀斑辐射变化模型模拟了不同地方时和不同季节的耀斑电离层效应。

模拟时的时间步长在耀斑期间为 60 秒(因为 GOES 卫星的经度即为 1 分钟)，而耀斑不存在时段的时间步长则选取为 300 秒，以节省计算时间。为了对比我们进行无耀斑和有耀斑发生两种情形下的模拟计算。

§4.3 2003 年 10 月 28 日耀斑模拟结果

图 4.2 给出的是模拟结果与三个 GPS 台站的 TEC 观测结果。选取的三个 GPS 台站分别来自澳大利亚的 Innsbruck (HFLK, 47.3°N, 11.4°E)，奥地利的 Bregenz (PFAN, 47.5°N, 9.8°E) 和德国的 Karlsruhe (KARL, 49.0°N, 8.4°E)，它们的地理位置与我们模拟的位置接近。在薄层电离层假设下可以将斜 TEC 转化成垂直

TEC。我们采用 GPS 9 号星的数据，因为它的仰角最大，这样就可以减少斜 TEC 转化垂直 TEC 的误差。TEC 的增强定义为 $\Delta\text{TEC} = \text{TEC}_f - \text{TEC}_0$ 。式中 TEC_f 为 10 月 28 日耀斑当天的 TEC 值，而 TEC_0 为没有耀斑时 TEC 的背景值，通过拟合耀斑前后的结果得到。对于模拟结果， TEC_f 为应用太阳辐射时变模型计算的结果，而 TEC_0 为无太阳辐射变化时计算的结果。如图 4.2b 显示，SOHO/SEM EUV 在耀斑期间有两个峰值，其中第一个也是更大的一个峰值发生在大约 1105 UT，而第二个则发生在 1116 UT。三个台站的 GPS 观测结果基本相同， ΔTEC 从 1100 UT 到 1105 UT 迅速地增加，然后从 1105 UT 到 1118 UT 继续缓慢地增加并且在 1118 UT 达到一个峰值 16 TECU。与观测结果相同，模拟的 ΔTEC 也是从 1100 UT 到 1105 UT 迅速地增加，然后继续缓慢地增加并且在相同的 UT 时间达到一个峰值 12 TECU。除了在增加幅度上有一些差别外，模拟的 TEC 的时间演化与观测结果基本一致，这表明本文使用的一维电离层模式以及太阳辐射变化模型在模拟电离层对耀斑响应方面是有效和可靠的。

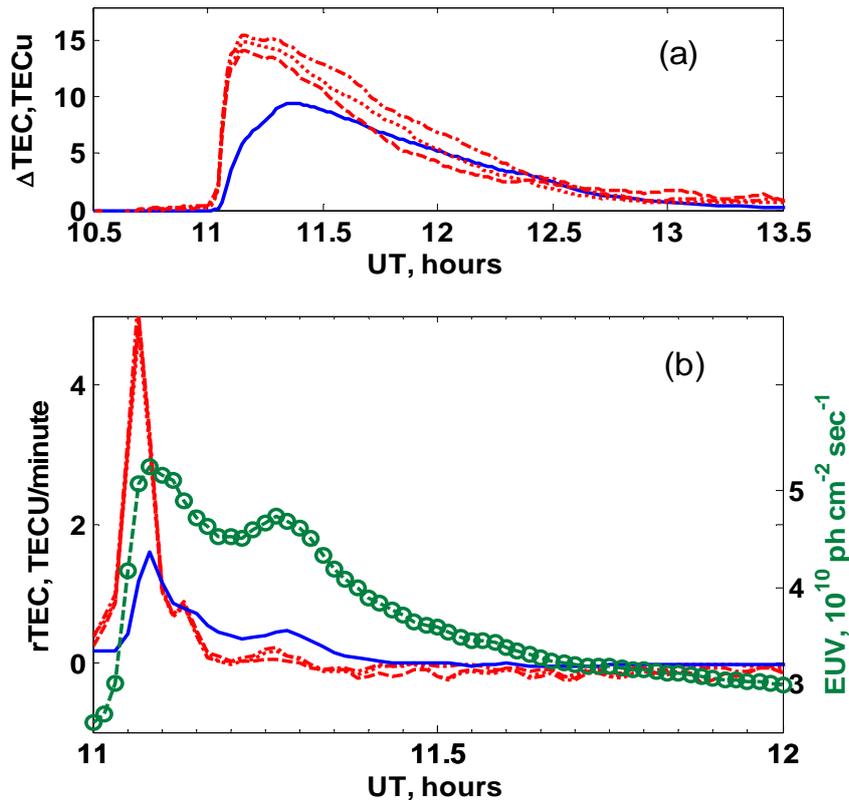


图 4.2 (a) ΔTEC 模拟值与三个 GPS 台站观测值。(b) 同 (a)，但为 $r\text{TEC}$ 的结果。图中蓝实线为模拟值，点线、点虚线以及虚线分别为 HFLK、PFAN、KARL 站的观测值。SOHU/SEM 260-340 Å 的 EUV 变化 (点圈线) 也画在下图中。

对于 TEC 的时间变化率 $r\text{TEC}$ ，观测结果和模拟结果均表明它有两个明显的峰值，而且这两个峰值出现的时间与 EUV 辐射通量两个峰值的发生时间基本一致。这表明 $r\text{TEC}$ 能准确反应 EUV 辐射随时间的变化，并适合于用来监测耀斑期间太阳 EUV 辐射的突然变化，刘正彦等人也得出类似的结论 (Wan et al., 2001; Liu et al., 2004)。

我们的模拟结果与观测结果在变化形态上基本一致，但在变化幅度上存在一定的差别（比如模拟的 TEC 增幅比的观测的小，模拟的 $r\text{TEC}$ 远小于相应的观测值）。这主要是由于耀斑模拟中还存在很多不确定的因素。一方面，背景大气模式不能完全反映中性大气密度的实际情况，根据 Champ 卫星观测，此次耀斑初期中性大气密度增长了大约 20%，在我们的模拟中没有考虑耀斑带来的中性大气变化。另一方面，我们只获得了 260–340 Å EUV 和 1–8 Å X-ray 的观测数据，其他波段只是按照方程 (3.22) 简单地类比得到，而实际情况可能比这要复杂得多。

§4.4 地方时和季节依赖

为了研究电离层耀斑响应的季节变化，我们选择第 81 天，171 天，261 天以及 351 天分别代表春夏秋冬四个季节。另外，为了研究耀斑响应的地方时差异，我们模拟了耀斑发生在不同地方时的电离层响应。在后文中，距耀斑爆发的时间 (time after flare onset) 将被频繁地使用，为书写方便简记为 TAFO。另外，由于第 261 天的模拟结果与第 81 天的模拟结果基本一致，因此我们再把一年分为三个季节并选择第 81 天，第 171 天，以及第 351 天分别代表分季，夏季以及冬季。

§4.4.1 电子浓度变化

N_{ef} 和 N_{e0} 分别代表耀斑期间的电子浓度和无耀斑发生的电子浓度（背景值或参考值）。定义电子浓度的绝对增幅为 $\Delta N_{\text{e}} = N_{\text{ef}} - N_{\text{e0}}$ ，而相对增幅为 $r\Delta N_{\text{e}} = \Delta N_{\text{e}} / N_{\text{e0}}$ 。本文中，我们主要研究电子浓度的相对变化 $r\Delta N_{\text{e}}$ 而不是绝对变化 ΔN_{e} ，因为相对变化更能反应不同区域电离层的响应程度。图 4.3a-c 显示了不同季节不同地方时耀斑引起的 $r\Delta N_{\text{e}}$ 。左边一列是日出附近的结果，中间三列是白天的结果，而右边是日落附近的结果。模拟结果显示，对于白天时段的耀斑，电子浓度增加主要发生在 300 公里以下高度，这一结果与 Thome and Wagner (1971)

的结果一致。最大的电子浓度响应出现在 E 区大约 115 公里处，其 $r\Delta N_e$ 值达到 3。在耀斑期间，X-ray 和短波段 EUV 辐射的增强幅度要远大于长波段，而这些 X-ray 和短波 EUV 辐射主要是离化 E 层中性大气产生正离子和自由电子。正是这些迅速增强的 X-ray 和短 EUV 辐射导致 E 层高度巨大的电子浓度增加。如图 4.3 所示，在白天耀斑期间，最强的 $r\Delta N_e$ 所在高度几乎总是处在 110—120 公里，这一结果在三个季节都是一样的。这是由于低高度电离层主要受光化学过程控制 (Rishbeth and Garriott, 1969)，太阳辐射的迅速增强会使低高度电离层的光电产生率迅速增加。但是在日出和日落附近的模拟结果与白天时段的结果有很大的差别。在白天时段电离层低高度 E 层电子浓度增幅大于高高度 F 层，而在日出和日落附近（比如分季的 05 LT 和 18LT，夏季的 03LT 和 20LT，冬季的 06LT 和 17LT），结果相反，F 层电子浓度增幅比 E 层大。日出和日落附近，天顶角都比较大，这各波段太阳辐射的穿透高度（太阳辐射衰减到 e^{-1} 的高度）较高，从而导致太阳辐射主要在高高度被吸收了，即较少的辐射到达低高度，因此高高度的耀斑响应比低高度强，如图 4.3 所示，最大响应高度在 150—200 公里。

为了更清楚地描述电离层耀斑响应的高度分布特征，我们把三个季节正午的电子浓度增加的高度剖面画在图 4.4 中。最大的 $r\Delta N_e$ 出现在 E 层 110-125 公里高度区，除了这个最大电子浓度增加外，在 180 公里附近还有一个稍小的 $r\Delta N_e$ 的峰值。在耀斑期间，最大的太阳辐射增强出现在波长小于 100 Å 的 X-ray 和短 EUV 辐射，这些波长的穿透高度在 100-120 公里，所以最大的电子浓度响应位于这一高度区域。模拟结果也表明，三个季节有基本相同的高度剖面，但也存在一些差别。如图 4.4 所示，对于 E 层的电子密度响应，夏季最强，而冬季最弱；对于最大电子密度响应所在高度，夏季最低，约为 110km，而冬季最高约为 125km。

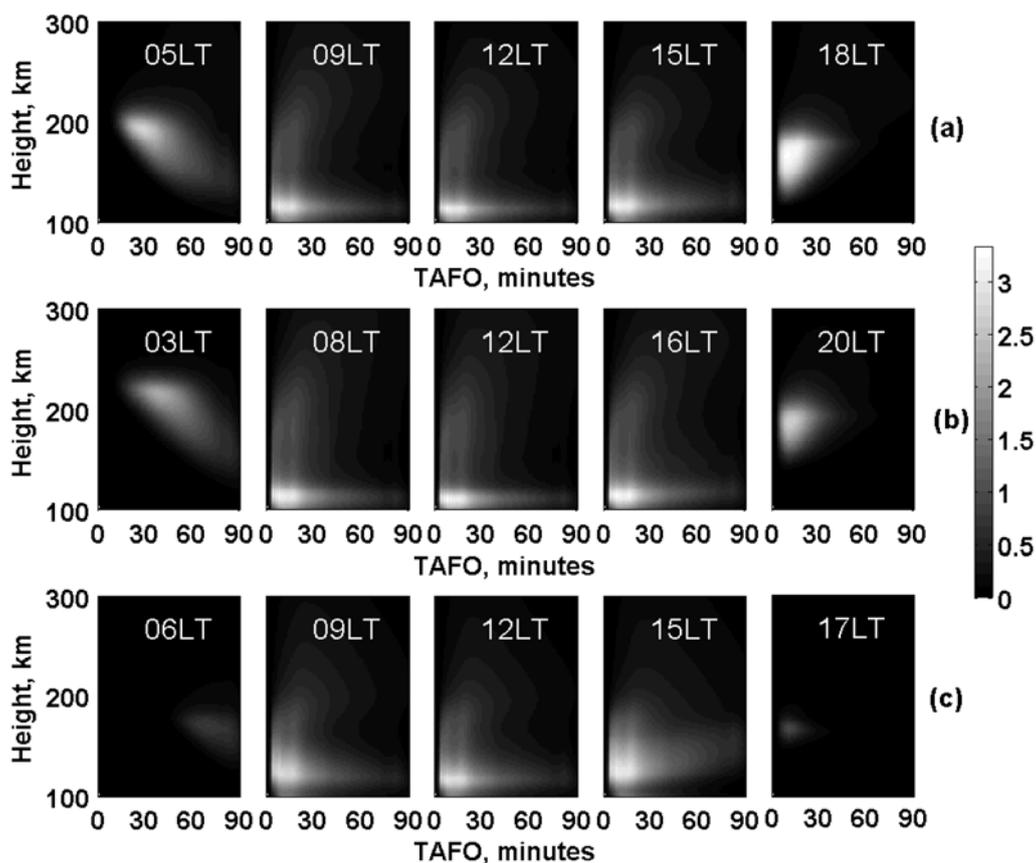


图 4.3 $r\Delta Ne$ 在 (a) 分季 DOY = 81, (b) 夏季 DOY = 171 和 (c) 冬季 DOY = 351 等季节的不同地方时随高度和时间的分布情况。每个子图上的地方时代表耀斑的爆发时间。

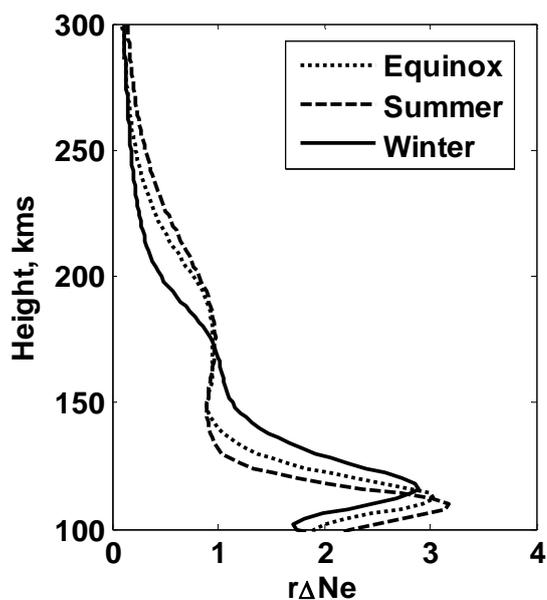


图 4.4 耀斑发生在三个季节正午时的 $r\Delta Ne$ 模拟值随高度的变化。此数据是 12 LT 发生的耀斑在 TAFO = 10 分钟时的结果。

对于每次耀斑模拟结果，我们用整个耀斑期间所有高度上最大的 $r\Delta Ne$ 值来描述该次耀斑引起电离层响应的强度。而最大 $r\Delta Ne$ 值所在高度记为 H_{pr} (height of peak $r\Delta Ne$)。 H_{pr} 的地方时依赖特征画在图 4.5a 中。最大 $r\Delta Ne$ 的地方时变化显示在图 4.5b 中。太阳天顶角 (SZA) 的地方时变化如图 4.5c 所示。

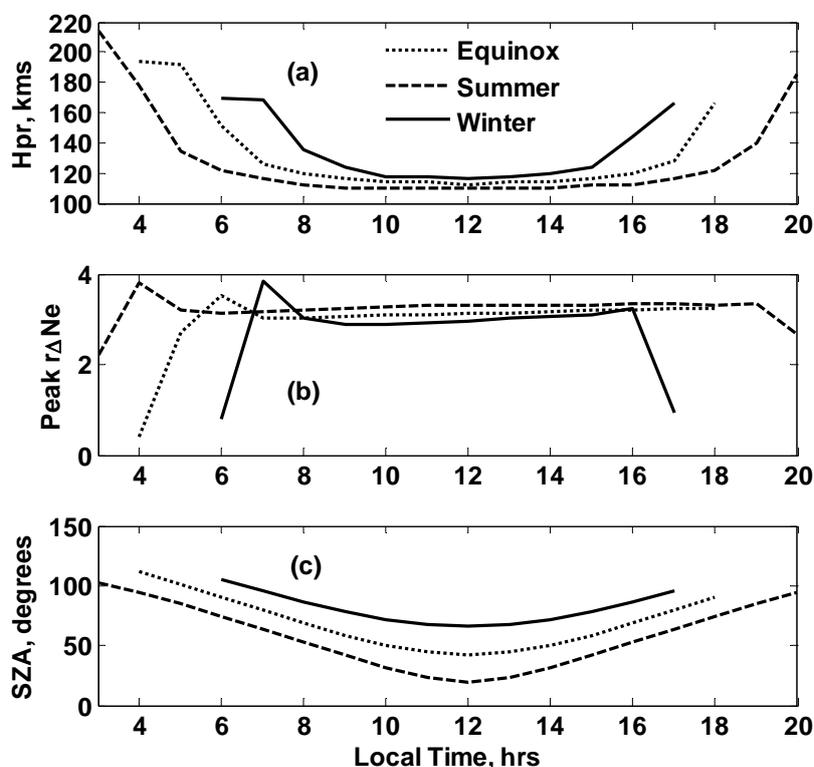


图 4.5 (a)、(b)、(c) 分别为不同季节 H_{pr} 、 $r\Delta Ne$ 的峰值、太阳天顶角随地方时的变化。

从图 4.5a 可以发现最大电子浓度响应高度 H_{pr} 的地方时变化曲线像个”U”字形， H_{pr} 在日出和日落附近远高于白天的值。以分季为例， H_{pr} 从日出 04 LT 的 210 km 逐渐下降到早上 08 LT 的 116 km，然后在白天时段 08—16 LT 保持在 116 km 左右，最后又从下午 16 LT 的 116 km 逐渐上升到日落 18 LT 的 190 km。对于 H_{pr} 的季节差异，白天的模拟结果显示， H_{pr} 在夏季最低 (110km)，而在冬季最高 (120km)。将图 4.5a 与图 4.5c 对比，我们可以发现 SZA 与 H_{pr} 有相似的变化形态，因此我们认为 SZA 的变化很可能是 H_{pr} 季节差异和地方时变化的主要因素。首先，SZA 在夏季最小而冬季最大，这使 H_{pr} 在夏季最低而在冬季最高。而日出日落附近更大的 SZA 也会导致耀斑辐射在更高的高度被吸收，从而导致 H_{pr} 值更高。图 4.5b 显示的是三个季节最大电子浓度增强的地方时变化。从图

4.5b 我们可以看到日出后一两个时段后的耀斑产生的电子浓度响应最大。这可能与此时的背景电子浓度最低有关。模拟结果也表明白天时段的耀斑电离层效应有很小的地方时差异。

下面讨论不同地方时电离层响应的高度变化特征。图 4.6 显示的是分季期间日出时段, 白天时段和日落时段发生耀斑时, 不同高度(包括 120 km, 160 km, 200 km, 240 km 和 280 km) 电子浓度耀斑响应的时演化。模拟结果表明电离层耀斑响应有很强的高度和地方时依赖。白天和日落时段的结果类似, 200 公里以下区域的电子浓度在耀斑爆发后迅速增加并且在耀斑发生后 6—8 分钟达到最大, 然后又迅速地回落, 然而 200 公里以上区域电子浓度开始增加得较慢, 在耀斑发生后 20 分钟才达到最大值, 然后也缓慢地回落。

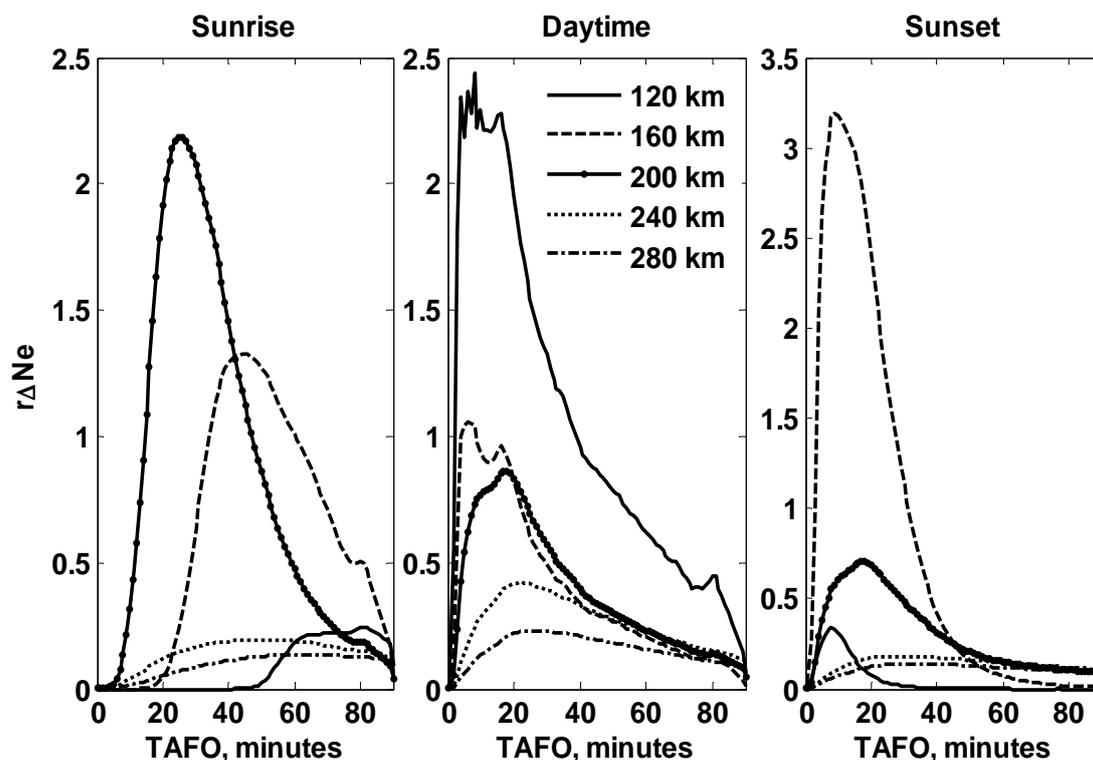


图 4.6 当日食发生在分季的日出附近 (05 LT)、白天 (12 LT) 及日落附近 (18LT) 时, $r\Delta Ne$ 在 120 公里、160 公里、200 公里、240 公里及 280 公里等高度上随时间的变化。

我们知道, 在 200 公里以下的低高度, 电子浓度变化主要受光化学过程控制。低高度有更大中性大气密度, 同时大幅增强的 X-ray 和短 EUV 辐射离化低高度的中性大气, 因此这两个因素共同作用就导致电子浓度大幅地增加。在低高度,

分子离子如 NO^+ 和 O_2^+ 等主要离子有一个非常快的分解复合系数，这就导致了耀斑结束后电子浓度迅速地回落。随高度的增加，输运过程的对电离层的控制作用逐渐超过光化学过程。F 层的离化源为中波段 EUV 辐射，耀斑期间它的增幅远小于 X-ray 辐射，这导致 F 区光电产生率的增幅远小于低高度，因此 F 层电子浓度的增幅远小于低高度。另外，在 200 公里以上的 F 区高度，主要离子 O^+ 的离子损失过程需要通过离子原子交换反应，这一过程反应速率远小于低高度的分解复合过程，这导致了一个更缓慢的电子浓度回落过程。如图 4.6 左列所示，当耀斑发生在日出 05LT 时段附近，高高度的电离层耀斑响应更快更强：120 公里高度电离层在 TAFO ≈ 40 分钟才开始出现明显的耀斑响应，其 $r\Delta\text{Ne}$ 在 TAFO ≈ 70 分钟时达到最大值约 0.25；160 公里高度在 TAFO ≈ 20 分钟时才开始出现明显的耀斑响应，其 $r\Delta\text{Ne}$ 在 TAFO ≈ 45 分钟时达到峰值 1.3，而对于 200 公里高度则在 TAFO ≈ 5 分钟就出现了明显的耀斑响应，其 $r\Delta\text{Ne}$ 在 TAFO ≈ 22 达到一个更大的峰值 2.3。对于日出时段附近发生的耀斑，在耀斑初始阶段，由于天顶角很大，从而使 EUV 和 X-ray 辐射不能穿透到足够低的高度，因此在低高度也就不会出现明显的电子浓度上升。然后，天顶角随着时间逐渐减小，这太阳辐射逐渐能达到更低的高度（比如 120 公里和 160 公里高度分别在 TAFO ≈ 20 和 40 分钟时开始出现耀斑响应）。但在此之后低高度电子浓度依然不会出现迅速的上升，因为天顶角减小的同时耀斑辐射强度从 TAFO ≈ 20 开始也在迅速减小。

§4.4.2 TEC变化

TEC_f 和 TEC_0 分别代表耀斑期间的 TEC 和无耀斑发生的 TEC（背景值或参考值）。定义 TEC 的绝对增幅为 $\Delta\text{TEC} = \text{TEC}_f - \text{TEC}_0$ ，而相对增幅为 $r\Delta\text{TEC} = \Delta\text{TEC} / \text{TEC}_0$ 。分季 05LT、12LT 和 18LT 三个地方时的 $r\Delta\text{TEC}$ 随时间的变化显示在图 4.7 中，这三个地方时的模拟结果分别代表日出附近，白天，和日落附近的耀斑 TEC 响应。

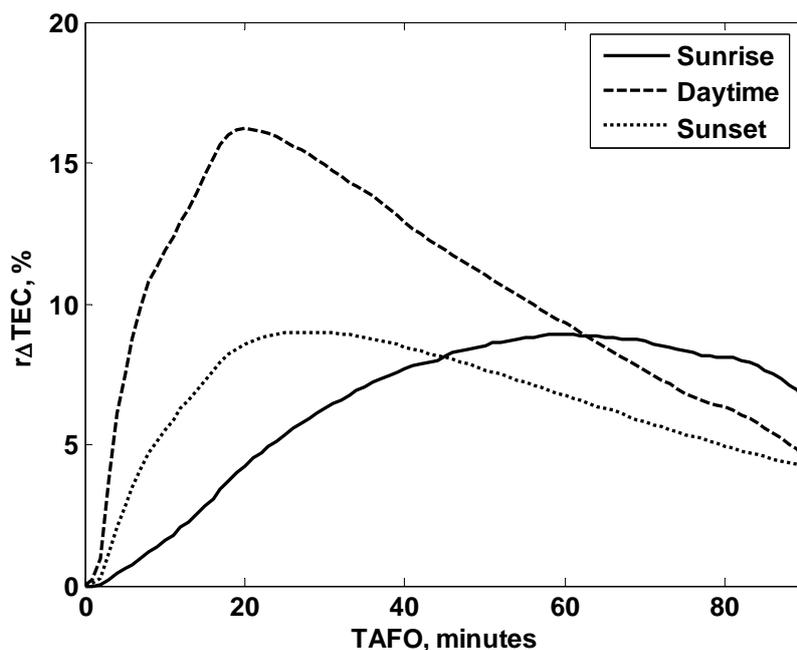


图 4.7 当日食发生在分季的日出附近 (05 LT)、白天 (12 LT) 及日落附近 (18LT) 时, $r\Delta\text{TEC}$ 的模拟值随时间的演化。

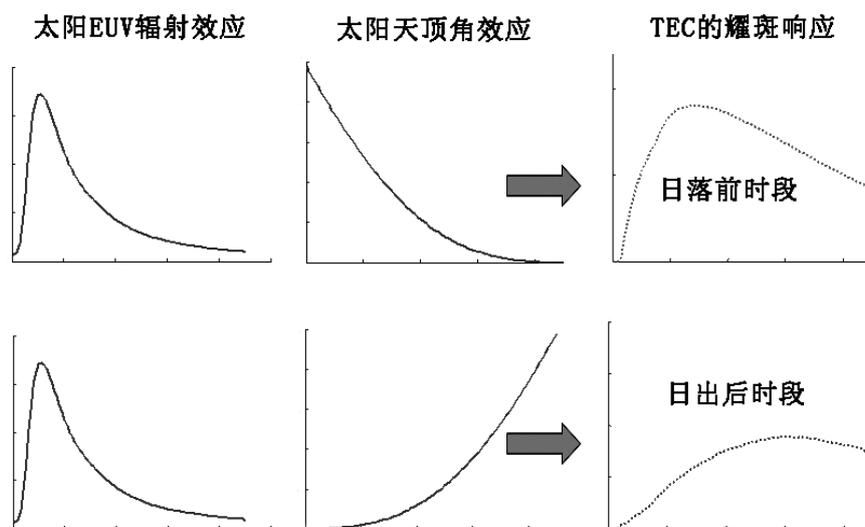


图 4.8 日出后时段与日落前时段发生耀斑时 TEC 响应差异的示意图

如图 4.7 所示, 对于白天和日落附近时发生的耀斑, TEC 在耀斑爆发后迅速地上升并在 $\text{TAFO} \approx 18$ 分钟时到达最大值, 这个时间稍晚于 EUV 辐射的第二个峰值发生的时间 ($\text{TAFO} \approx 16$ 分钟), 然后随时间缓慢回落。模拟结果表明 TEC 上升的速度是下降速度的 3 至 4 倍。然而对于日出附近发生的耀斑, TEC 增加得更慢, 在 $\text{TAFO} \approx 60$ 分钟才达到最大值。在日出附近, 大天顶角使太阳辐射只

能在更长路径的高高度被中性大气吸收，这就导致了 TEC 增幅较小。然后天顶角逐渐变小，这使得太阳辐射能逐渐穿透到更低的高度产生更多的光电离，这就使 TEC 逐渐增加直到太阳辐射回到背景值前的某个时间。在最初的 20 分钟里 200 公里以下没有明显的电子浓度增加，160 公里处 TAFO \approx 20 分钟和 120 公里处 TAFO \approx 50 分钟才出现小幅的增加；对于 120 公里，160 公里和 200 公里电子浓度变化， $r\Delta Ne$ 分别在 TAFO \approx 70 分钟，45 分钟，以及 25 分钟时达到最大。对于耀斑爆发时的天顶角，日出时的值大于日落附近的值，因为日出的 05 LT 在正午的 7 小时前，而日落的 18LT 在正午的 6 小时后。在耀斑爆发初期日出附近更大的天顶角导致了 TEC 增幅更小。另外，日出和日落时的还有个明显的区别：日出时天顶角是逐渐减小的，而日落时则是逐渐增大的。逐渐减小的太阳天顶角就会导致 TEC 逐渐增大并能持续较长时间。这两个因素可能就是日出和日落附近耀斑响应差别的主要原因。图 4.8 给出了日出后与日落前发生耀斑时 TEC 响应差异的示意图。

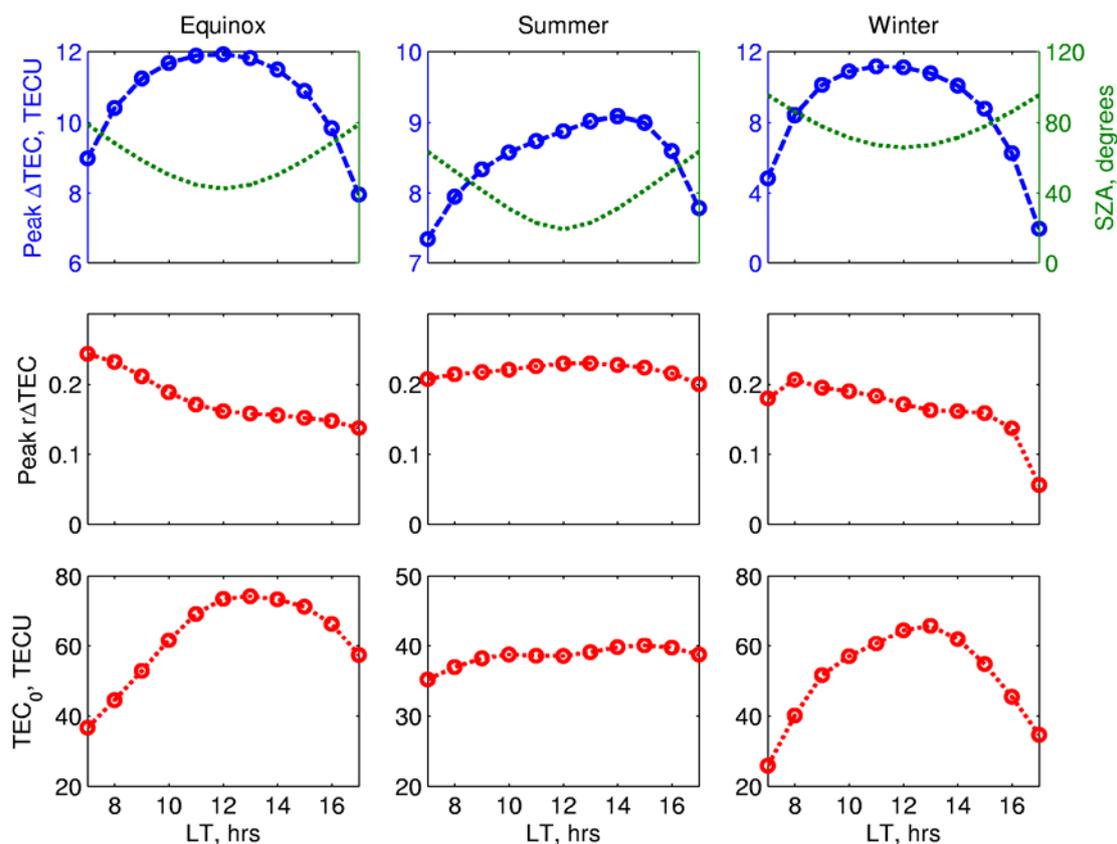


图 4.9 不同季节 TEC_0 、 ΔTEC 峰值和 $r\Delta TEC$ 峰值随地方时的变化（点线为太阳天顶角随地方时的变化）。

为了进一步考察耀斑引起的 TEC 响应的地方时差异，我们把在各地地方时发生的耀斑引起的 ΔTEC 最大值和 $r\Delta\text{TEC}$ 最大值画在图 4.9 中。 TEC_0 的地方时变化也显示在图中。模拟结果表明在所有季节，不管是上午还是下午，TEC 绝对增幅 ΔTEC 都与天顶角密切相关：天顶角越大 TEC 的增幅越小。这个结果与以往的观测结果一致，张东和等（2004）利用 2001 年 4 月 15 日 1336 UT 耀斑爆发期间向日面 GPS 观测数据分析了向日面电离层对这次耀斑的响应特点，结果表明 TEC 增加量与太阳天顶角有关，太阳天顶角越大，TEC 增幅越小。理论分析也表明电离层对耀斑的响应与太阳天顶角有密切关系，Wan et al. (2002, 2005) 根据电离层的 Chapman 电离理论，分析得出耀斑爆发引起的 TEC 时间变化率与依赖太阳天顶角 χ 的 Chapman 函数 $\text{ch}(\chi)$ 成反比，此结论得到 2000 年 7 月 14 日耀斑期间来自 GPS 网的 TEC 数据的验证。

如图 4.9 所示，TEC 绝对增幅呈现关于正午的不对称。在夏季，相同天顶角下午的绝对增幅大于上午，而在冬季和分季，相同天顶角上午的绝对增幅大于下午。张东和与肖佐（2000, 2002）也报道了类似的不对称性。在我们的电离层模式中，中性大气由经验模式 MSIS00 给出。其计算的背景大气氧原子密度为：在夏季，下午的氧原子密度大于上午，而在冬季和分季则为上午的氧原子密度大于下午。因此我们认为可能是中性大气密度的差异导致 TEC 增幅关于正午的不对称。对于 TEC 的相对增加值 $r\Delta\text{TEC}$ ，如图 4.9 所示，它有更显著的上下午不对称性。这主要由背景 TEC 值的差异造成，比如在分季和冬季上午的 $r\Delta\text{TEC}$ 值远大于下午的 $r\Delta\text{TEC}$ 值，这与上午的 TEC_0 较小有关。另外，我们也发现在分季和冬季最大的 TEC 相对增加发生在早上（如分季在 07LT，冬季在 08LT），这主要是由于此时的背景 TEC 值很小。

§4.5 小结

本节利用一个中纬电离层模式和耀斑期间太阳辐射时变模型，对 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级的特大太阳耀斑的电离层响应进行了模拟，模拟结果与观测结果基本一致。模拟结果和观测结果均表明 TEC 的时间变化率可以监测到太阳 EUV 辐射的突然增加。随后我们让此耀斑发生在不同的地方时和不同的季节来考察电离层耀斑响应的地方时和季节变化。模拟结果表明太阳天顶角是影响电离

层耀斑响应的一个重要因素。主要的模拟结果小结如下。

1. 耀斑期间电子浓度增强主要发生在 300 公里以下高度。在白天低高度的电子浓度相对增加值 $r\Delta Ne$ 远大于高高度，最大增加发生在大约 115 公里高度，另外 $r\Delta Ne$ 还有一个次高峰出现在约 180 公里高度处。耀斑期间 X 射线和短波 EUV 辐射的大幅增加是导致低高度电子浓度迅速大幅上升的主要原因。在白天电离层对耀斑响应存在较小的季节差异，且季节差异主要来自天顶角的季节变化。

2. 在接近日出和日落的时段，由于天顶角很大，所以电子浓度对耀斑的响应主要发生在较高的高度，比如在分季、夏季和冬季最大响应高度分别为 190 公里、210 公里及 170 公里。而在白天最大响应高度在夏季最低约为 110 公里，在冬季最高约为 120 公里，这也是由于夏季天顶角最小而冬季天顶角最大造成的。

3. 对于白天和日落附近的电离层耀斑响应，低高度的 $r\Delta Ne$ 比高高度需要更少的时间就能达到其最大值，然而日出附近的电离层耀斑响应的情况则不同，其最快的耀斑响应发生在中等高度。以分季日出附近发生的耀斑模拟结果为例，120 公里、160 公里、200 公里、240 公里及 280 公里高度处的 $r\Delta Ne$ 分别在耀斑爆发后的 70 分钟、45 分钟、25 分钟、50 分钟和 60 分钟达到最大。

4. 当耀斑发生在白天和日落附近时， $r\Delta TEC$ 值迅速增加并在耀斑爆发后约 18 分钟达到其峰值；然而当耀斑发生在日出附近时， $r\Delta TEC$ 值增加得更缓慢并在耀斑爆发后近 60 分钟才达到其最大值。有两个主要的因素导致日出和日落附近耀斑响应出现明显的差异：耀斑爆发时日出附近的天顶角比日落时的大；日出日落天顶角随时间的变化趋势不同，日出后太阳天顶角是逐渐减小的，而日落前太阳天顶角是逐渐变大的。

5. ΔTEC 的地方时变化有明显关于正午的不对称性，这主要与背景中性大气氧原子密度的不对称有关。而 TEC 背景值的上下午差异使得 $r\Delta TEC$ 有更显著的不对称性。

第五节 1999 年日全食电离层响应的观测和模拟

二十世纪末最后一次日全食发生在 1999 年 8 月 11 日, 全食带经过了欧洲中心地区, 纬度范围为北纬 40 度到 50 度。欧洲大范围的测高仪网络监测到了这次日全食对电离层的影响。利用这些测高仪台站的观测数据以及电离层模式模拟, 本节将重点研究电离层低高度如 E 层及 F1 层日食响应特征, 并比较 E 层日食响应与 F1 层日食响应的差别。为了更准确地模拟电离层日食效应, 我们应用了第三节构建的一个修正的日食光谱变化因子 F_R 来描述日食期间地面不同地点接收到的太阳辐射随时间的变化。

§5.1 观测数据

图 5.1 为 1999 年 8 月 11 日日全食各地日食情况分布图。如图 5.1 所示, 1999 年 8 月 11 日的日全食主要发生在欧洲大部分地区, 全食带经过北纬 40 至 50 度欧洲中心地区。这次日食发生在一个地磁活动相对比较平静的时期, 太阳活动在整個日食期间基本没有变化, 所以我们可以认为日食期间电离层剧烈变化主要由太阳辐射大幅减少导致。有很多的测高仪台站对这次日食期间电离层的变化进行了观测。并且这些台站的 E 和 F1 层临界频率数据都比较完整。这给我们给研究中纬电离层 f_oE 和 f_oF1 对太阳 EUV 辐射变化的响应提供了一个很好的机会。

我们用太阳光球面积被月影遮挡的最大比率 d 来描述日食程度, 其值为 0 代表没有日食, 而大于或等于 1 代表日全食。为了研究各地电离层响应随 d 的变化特征, 我们对来自 16 个台站的电离层 E 层和 F1 层的数据进行了统计分析。这些台站的信息按 d 值大小排列在表 5.1 中。如表 5.1 所示, 在这些台站的 200 公里高度处, d 值最大为 95%, 最小为 20%。为方便与模拟结果比较, 首先按照公式 $f_o = 9Nm^{1/2}$ (Rishbeth and Garriot, 1969) 将 E 层和 F1 层临频 f_oE 、 f_oF1 转换成相应的峰值浓度数据 NmE 、 $NmF1$ 。为获得日食期间 NmE 和 $NmF1$ 相对于控制日的变化 ΔNmE 和 $\Delta NmF1$, 我们首先计算这些数据日食前后 30 天平均值, 将其作为控制日的参考值, 记为 NmE_C 和 $NmF1_C$, 而日食期间的值, 记为 NmE_E 和 $NmF1_E$ 。 NmE 和 $NmF1$ 相对变化分别为 $\Delta NmE = NmE_E / NmE_C$, $\Delta NmE =$

$NmF1_E/NmF1_C$ 。同时还计算了日食期间各站上空 200 公里高度处最大日食程度时可见光球面积的相对变化 ΔS_p （未被月影遮挡的面积 SP_E 与日食前面积 SP_C 的比值， SP_E/SP_C ）。Curto 等计算表明，在食甚时（ $SP_E/SP_C=0$ ）剩余 EUV 和 X 射线辐射通量会降至日食前的 22%（Curto et al., 2006）。换言之，即使在食甚时也还有部分太阳辐射不被遮挡而进入地球上层大气。EUV 及 X 射线主要来自光球层以外的色球和日冕层，而食甚时月影只能遮住光球层而不能遮住色球和日面。需要说明的是，并不是每个台站都有 foE 和 foF1 两个数据都有记录。在 16 个台站中，有 12 个台站有 foE 的数据，13 个台站有 foF1 的数据。

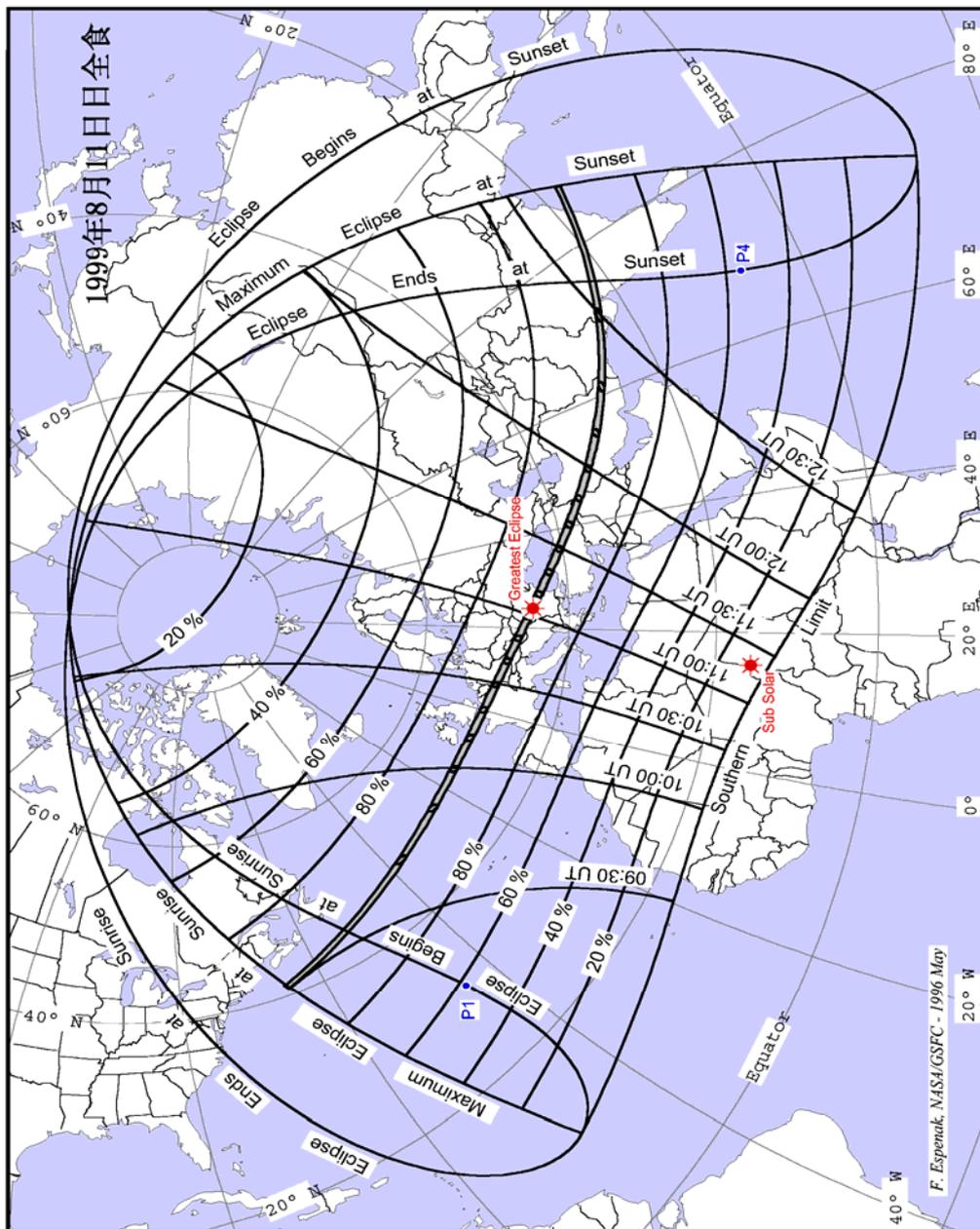


图 5.1 1999 年 8 月 11 日日全食各地日食情况分布图

表 5.1 1999 年 8 月 11 日日全食期间测高仪台站的地理位置以及 200 公里处最大遮挡面积百分比

Station	Geographic Latitude	Geographic Longitude	Maximum obscuration at 200 km height (%)
Salekhard	66.5° N	66.7° E	18.8
Novosibirsk	54.6° N	83.2° E	21.6
Lycksele	64.62° N	18.76° E	45.8
Leningrad	59.95° N	30.7° E	50.5
El Arenosillo	37.1° N	6.7° W	54.1
Moscow	55.5° N	37.3° E	56.4
Uppsala	59.8° N	17.6° E	58.8
Tortosa	40.4° N	0.3° E	68.5
Ashkhabad	37.9° N	58.3° E	74.7
Rostov	47.2° N	39.7° E	75.9
Juliusruh	54.6° N	13.4° E	77.2
Rome	41.8° N	12.52° E	81.1
San Vito	40.7° N	17.9° E	82.2
Fairford	51.7° N	1.8° W	93.6
Chilton	51.6° N	1.3° W	93.6
Sofia	42.7° N	23.4° E	94.9

§5.2 日食期间太阳辐射变化

在日食期间，由于太阳被月影遮蔽，到达地球高层大气的太阳辐射通量会显著减少。为了模拟电离层对日食的反应，首先要知道日食期间太阳 EUV 辐射随时间的变化情况。为此在第三节我们构建了一个修正的日食太阳辐射变化模式，该模式综合考虑了来自光球面以内和光球面以外的太阳辐射的贡献。该模式定义了一个修正日食因子 $F_R(UT, h, \Phi, \theta)$ ，它代表未被月影遮蔽的太阳辐射与总的太阳辐射的比值。 F_R 的详细计算参见第三节。

根据该模型，我们计算了 1999 年 8 月 11 日日全食期间东经 1.67 度子午链内 F_R 随世界时 UT 和地理纬度的变化，其结果如图 5.2 所示。日全食发生在北纬 48.9 度，太阳辐射在食甚时降至日食前的 22%。从北纬 20 度到 48.9 度发生程度不等的日偏食。对于日全食，最大日食程度发生在食甚中间时刻；而对于日偏食，

最大日食程度发生在光球直径被遮挡最多的时刻。从图 5.2 我们可以看到，东经 1.67 度子午链上北纬 20 到 60 度区域几乎在 UT=10.35 (1021 UT) 同时到达最大日食。

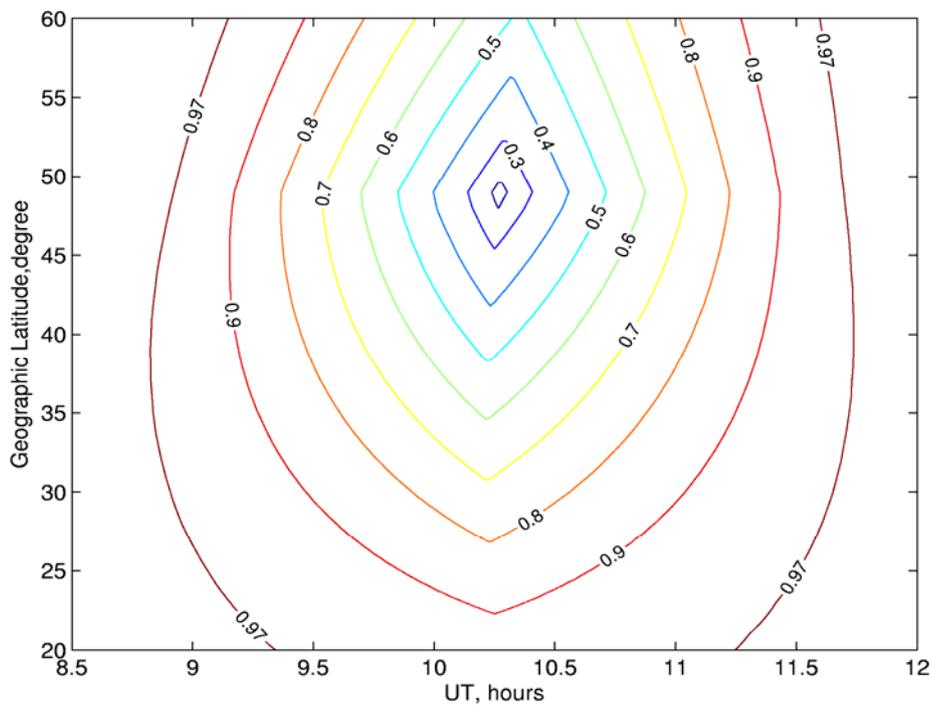


图 5.2 1999 年 8 月 11 日日全食期间，东经 1.67 度子午链上的修正日食因子 $F_R(UT, h, \Phi, \theta)$ 随世界时 UT 和地理纬度的分布。

§5.3 日食模拟

本节利用 TIME-IGGCAS 模式（详细介绍参见第三节）对 1999 年 8 月 11 日日全食期间的电离层对日食响应进行了模拟。模拟地磁经度为东经 70 度，相应的地理经度为东经 1.67 度。地理纬度范围为南纬 55 度至北纬 55 度。1999 年 8 月 11 日各地球物理参数如下： $F_{10.7} = 130.8$ ， $F_{10.7A} = 164.5$ ，3 小时地磁指数为 $AP = (12, 7, 3, 4, 4, 4, 9, 6)$ 。同观测结果一样，用下标“E”指示日食期间的模拟结果。为了确认日食效应，我们进行了另一次不发生日食的模拟，其结果作为无日食的参考值，其值用下标“C”指示。另外，我们还进行了一次用未修正日食因子 F 的模拟，该因子仅考虑了光球面内的太阳辐射，即在食甚时太阳辐射降为零。

§5.4 结果和讨论

§5.4.1 在最大日食程度时的电离层响应

图 5.3 显示了各测高仪台站 E 层和 F1 层峰值浓度的相对改变 ΔNmE 、 $\Delta NmF1$ 随可见光球面积的相对变化 ΔS_p 的关系。图 5.3 中的粗实线是 ΔNmE 数据的线性拟合，虚实线是 $\Delta NmF1$ 数据的线性拟合。这些观测结果显示剩余光球面积越小， NmE 和 $NmF1$ 的相对变化越大。如图所示，统计结果表明对于相同的太阳辐射变化（相同的 ΔS_p 值）， $NmF1$ 的降幅大于 NmE 的降幅，比如在食甚时（ $\Delta S_p=0$ ）， ΔNmE 值降到 0.46，而 $\Delta NmF1$ 值则降到 0.32。从图 5.3 我们也可以发现，对于每一个同时有 foE 和 $foF1$ 数据记录的台站，它的 $\Delta NmF1$ 值总是小于 ΔNmE 的值。总之，观测结果表明日食期间电子浓度相对变化 F1 层比 E 层大。

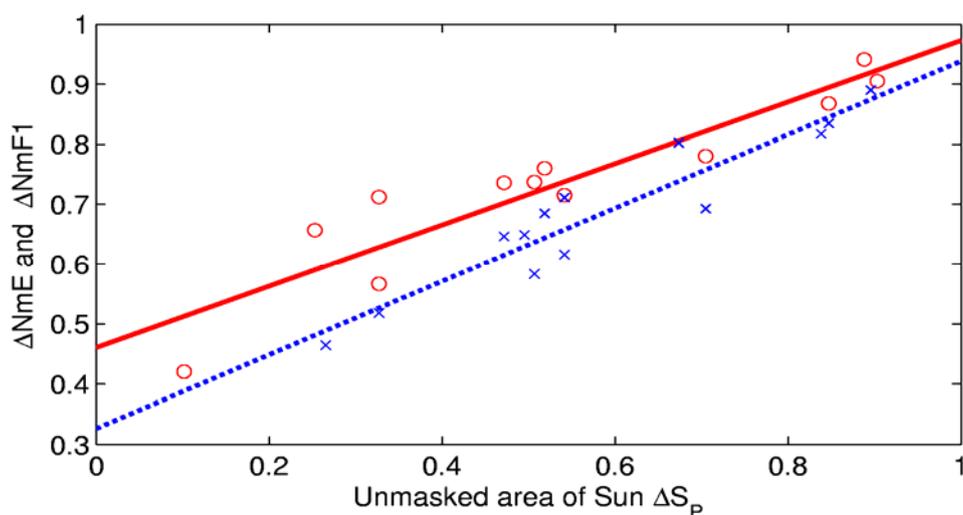


图 5.3 日食期间 ΔNmE （圆圈）和 $\Delta NmF1$ （十字叉）随 ΔS_p 的变化。图中实线为 ΔNmE 数据的线性拟合直线，虚线为 $\Delta NmF1$ 数据的线性拟合直线。

ΔNmE 和 $\Delta NmF1$ 随 ΔS_p 变化的模拟结果显示在图 5.4 中。为方便与观测结果对比，观测数据的拟合曲线也画在图 5.4 中。其中，上图为使用修正日食因子 F_R 的计算结果，下图为使用未修正日食因子 F 的计算结果。图中 7 个模拟结果分别来自 $29.6^\circ N$ ， $32.7^\circ N$ ， $35.8^\circ N$ ， $39.0^\circ N$ ， $42.2^\circ N$ ， $45.5^\circ N$ 和 $48.9^\circ N$ （ N 代表北纬）等七个地点，对应的日食食分别为 0.4，0.5，0.6，0.7，0.8，0.9 和 1.0。从图 5.4 我们可以发现使用未修正日食因子 F 的模拟结果与观测结果有很大

偏差，尤其是在食分大的地方。而修正日食因子 F_R 使模拟结果与观测结果高度一致，这表明修正日食因子 F_R 可以比较准确地计算日食期间太阳辐射变化，同样也表明我们的日食期间太阳辐射变化模型相对于以前的模型有很大的改善。

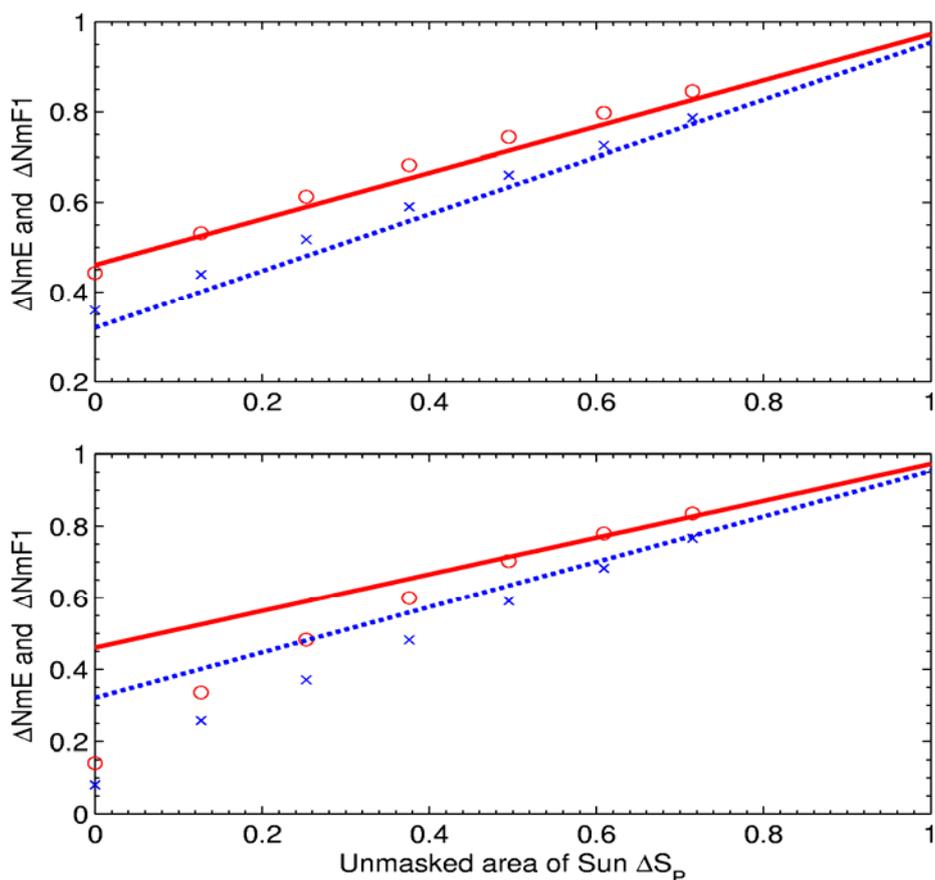


图 5.4 ΔNmE 和 $\Delta NmF1$ 观测数据的线性拟合值与 ΔNmE (圆圈) 和 $\Delta NmF1$ (十字叉) 模拟值的比较。上子图为使用修正日食因子 F_R 的计算结果，下子图为使用修正日食因子 F 的计算结果。

如图 5.4 所示，模拟结果也表明日食期间 $NmF1$ 的下降幅度比 NmE 的下降幅度大。Roble et al. (1986) 报道了相同的结果，但他们报道的是单个事件的观测结果，而我们的是统计结果。总之，观测和模拟结果均表明在日食期间 F1 层的电子浓度响应比 E 层电子浓度响应更大。

众所周知，E 区和 F1 区主要受光化学过程控制，因此 E 层和 F1 层峰值浓度 NmE 、 $NmF1$ 对于太阳辐射变化非常敏感。即使只是一个小的日偏食也会造成 NmE 和 $NmF1$ 的显著下降。如图 5.3 和 5.4 所示，食分为 0.4 的日偏食会导致 NmE 下降约 15%， $NmF1$ 下降约 20%。

假定 E 区的电子浓度按 chapman- α 层分布。日食日和控制日 E 区电子浓度分别满足方程(5.1)和(5.2).

$$\frac{dNe_E}{dt} = F_R \cdot q_0(\chi) - \alpha \cdot Ne_E^2 \quad (5.1)$$

$$\frac{dNe_C}{dt} = q_0(\chi) - \alpha \cdot Ne_C^2 \quad (5.2)$$

上式中 Ne_E 和 Ne_C 分别为日食日和控制日的电子浓度, $q_0(\chi)$ 是控制日电子产生率, χ 是太阳天顶角, F_R 是日食因子, α 是复合系数。通常从日食开始到日食结束要经过 2—4 个小时。比如 1999 年 8 月 11 日东经 1.67 度北纬 49.8 度的日全食时长约 3 个小时。因此我们假定日食为一个准平衡过程, 也即对于方程(5.1)和(5.2), 等式左边为零。在这个准平衡状态条件的假设下, 从方程(5.1)和方程(5.2), 我们可以得到电子浓度相对变化 $\Delta NmE = F_R^{1/2}$ 。当在食甚时, 修正日食因子 F_R 达到一个最小值约为 0.22。那么相应 ΔNmE 的最小值 (对应最大的 NmE 下降) 就约为 0.22 的平方根 0.47。这个分析结果与观测结果的线性拟合值 0.46 和模拟结果 0.446 基本一致。

F1 层处在从平方损失率 αN^2 到线性损失率 βN 的一个过渡区域 (Ratcliffe, 1956b; Rishbeth, 1968)。假定 F1 区完全受线性损失率 βN 控制, 食甚时 $NmF1$ 相对变化 $\Delta NmF1$ 则等于 F_R 值 0.22。而假定 F1 区完全受平方损失率 αN^2 控制, 食甚时 $NmF1$ 相对变化 $\Delta NmF1$ 则等于 $F_R^{1/2}$ 值 0.47。因此在食甚时 $\Delta NmF1$ 值的大小应该介于 0.22 和 0.47 之间。观测和模拟的 $\Delta NmF1$ 值分别为 0.32 和 0.37, 这与上面的分析基本一致。

图 5.5 为 1021 UT 时 (最大日食程度) 电子浓度相对变化 ΔNe 、电子温度相对变化 ΔTe 以及 O^+ 场向漂移速度相对变化 ΔVi 随纬度、高度的分布。其中 ΔNe 定义为 Ne_E/Ne_C , ΔTe 定义为 $Te_E - Te_C$, ΔVi 定义为 $Vi_E - Vi_C$ 。图 5.6 为 $hmF2$ 相对变化 $\Delta hmF2$ 最大值随纬度的变化, 其中 $\Delta hmF2$ 定义为 $hmF2_E - hmF2_C$ 。

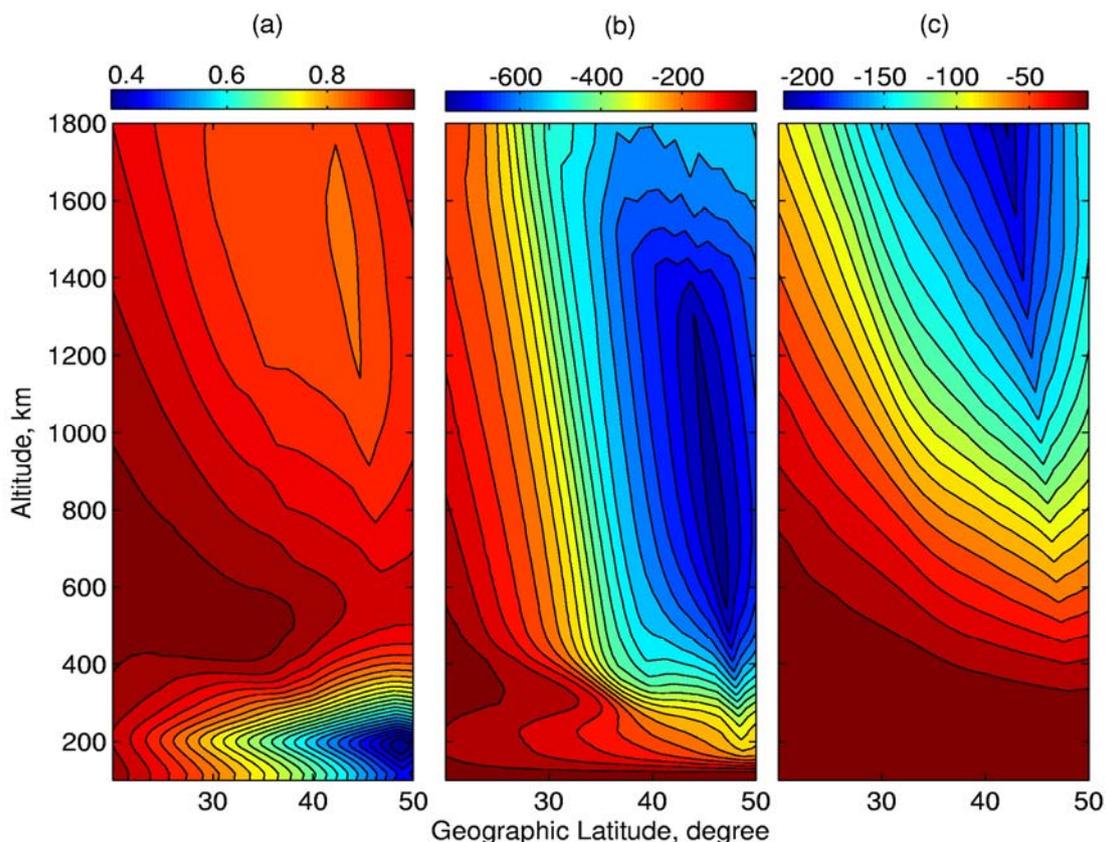


图 5.5 食甚 1021 UT 时电离层响应的高度 - 纬度分布, (a)、(b)、(c) 分别为 ΔN_e 、 ΔT_e 、 ΔV_i 的模拟结果。

如图 5.5a 所示, 电子浓度下降主要发生在 400 公里以下, 其中北纬 48.8 度 185 公里处的 F1 区降幅最大, 其 ΔN_e 值达到 0.343。而 400—800 公里高度区域电子浓度仅有约为 10% 的下降 ($\Delta N_e \approx 0.9$), 在更高的高度 (1200—1800 公里) 电子浓度降幅约为 15%。对于所有日食区 (北纬 20 到 60 度), 最大日食响应高度都位于 180—205 公里区域的 F1 区。最大日食响应高度也有纬度差异, 它随纬度减小而上升, 比如从 50° N 处的 185 公里上升到 25° N 处的 205 公里。如图 5.6 所示, 与控制日相比, F2 层峰值高度 $h_m F_2$ 出现明显的上升, 并且食分越大 $h_m F_2$ 上升幅度越大。例如, 在食分为 0.5 的北纬 33 度偏食区, 峰高 $h_m F_2$ 从 305 公里上升到 315 公里, 升幅为 10 公里, 而在北纬 50 度全食区, 峰高 $h_m F_2$ 从 270 公里上升到 295 公里, 升幅为 25 公里。日食期间 $h_m F_2$ 上升的结果也被其他学者报道 (如 Evans, 1965b; Stubbe, 1970; Salah et al., 1986; and Boitman et al., 1999)。如图 5.5a 所示, 对于 200 公里到 400 公里范围高度区域电离层, 电子浓度降幅随高度增加而减小。因此在峰高以下电子浓度下降幅度比峰高以上下降幅度大,

这会导致电子浓度高度剖面形状发生改变并导致峰值浓度所在高度上移，从而导致 hmF2 上升。

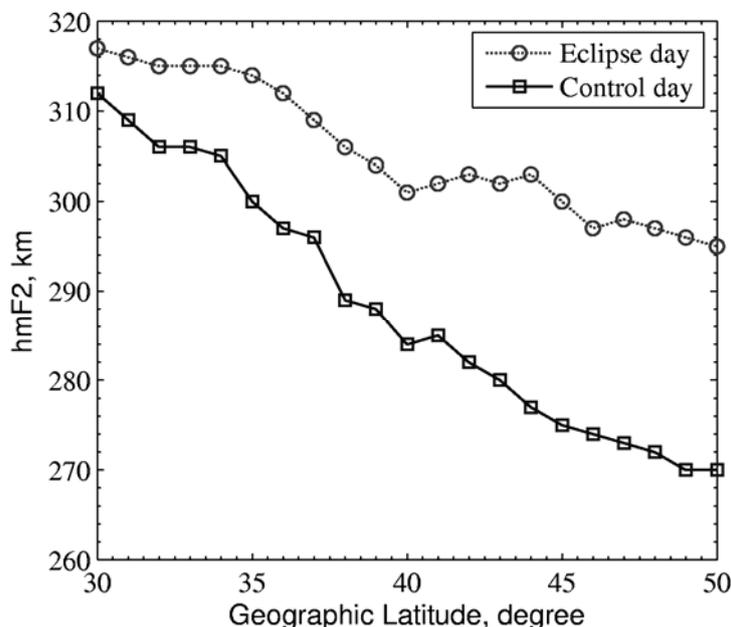


图 5.6 日食期间 $\Delta hmF2$ 最大值随纬度的变化。

图 5.5b 显示，在 E 层以上高度电子温度出现了不同程度的下降。最大的电子温度下降发生在北纬约 46 度上空 600—1000 公里的高度区域内，最大降幅达到 700K。然而在 140 公里的低高度只有很小的下降，其降幅小于 50K。计算结果也表明 600 公里以上离子温度出现小幅下降（100—200K），低高度降幅更小。在以前的日食研究中，也有一些关于大幅电子温度下降和小幅离子温度下降的报道，这些报道既有来自观测的结果也有模拟的结果（如 Evans, 1965a; Stubbe, 1970; Salah et al., 1986; Roble et al., 1986; Boitman et al., 1999）。

离子场向漂移速度的相对变化画在图 5.5c 中。如图所示，在最大日食程度 1021 UT 时，E 层以上所有高度都出现了显著的下行等离子体输运，其中约 1800 公里处下行离子漂移速度最大，其值超过 200m/s。同时，日食食分越小，相应的下行离子速度也越小。需要指出的是，这个下行离子漂移速度是个相对值，定义为 $V_{iE} - V_{iC}$ ，其中 V_{iE} 是日食期间的离子漂移速度，其方向向下，而 V_{iC} 是控制日的离子漂移速度，其方向向上。电子和离子的温度下降会导致扩散平衡标高减小，继而引起等离子体向下扩散。这些下行等离子体扩散会弥补低高度的等离子体损失，从而使该区域的电子浓度下降幅度减小。比如 600 公里附近电子浓度

降幅不超过 8%。而对于高高度而言，等离子体向下输运导致该高度电子浓度小幅下降，如图 5.5a 所示，在 1200—1800 公里高度电子浓度下降约 15%。

§5.4.2 电离层响应的的时间演化

如图 5.2 所示，在 1999 年 8 月 11 日日食期间，东经 1.67 度子午面内最强电离层响应发生在北纬 49 度。图 5.7 给出了这一地点电离层响应随时间的演化。图 5.7a 是电子浓度的相对改变 ΔN_e ，5.7b 是电子温度的相对改变 ΔT_e ，5.7c 是 O^+ 场向漂移速度的相对变化 ΔV_i （向上为正）。

如图 5.7a 所示，在整个日食期间，电子浓度的变化主要集中在 600 公里以下的区域。最大电子浓度响应相对于食甚的延迟时间有明显的高度依赖。200 公里以下高度，这个延迟时间很小，为 1—3 分钟，也即低高度电子浓度变化与太阳辐射变化基本同步。而 200 公里以上高度，这个延迟时间随高度逐渐增加，到 600 公里处最长，然后又随高度逐渐减小。例如，300 公里的时间延迟为 15 分钟，600 公里的时间延迟为 60 分钟，1200 公里的延迟为 30 分钟。这一结果与 Stubbe (1970) 的结果基本一致。电离层这一延迟特性与电离层惰性 (sluggishness) 有关 (Appleton, 1953; Rishbeth, 1968; Rishbeth and Garriott, 1969)。电离层惰性指的是电离层电子浓度的改变理论上应滞后于电子产生率的改变，在低高度 E 层和 F1 层，这个滞后时间约为 $1/2\alpha N$ ，对于更高高度则为 $1/\beta$ 。其中 α 是平方损失系数， β 是线性损失系数。图 5.7a 也表明，最大电子浓度响应（对应最小的 ΔN_e 值）所在高度在食甚前维持在约 200 公里高度，而在食甚后逐渐上升。在日食后期（从食甚到日食结束），低高度电子浓度开始随太阳辐射的恢复而逐渐上升，而高高度则还继续下降，因为如前文所述高高度的响应有一个时间延迟，并且高度越高延迟时间越长。如此电子浓度变化会导致最大电子浓度响应所在高度随时间逐渐上升。计算结果也表明 F2 层峰值高度 $h_m F2$ 也随时间而升高，在食甚后达到最高，然后又逐渐下降回落。模拟结果显示 $h_m F2$ 的最大上升发生在 1024 UT，升幅达到 25 公里左右。

图 5.7b 给出了电子温度响应 ΔT_e 随高度和时间的变化。计算结果表明日食期间整个高度的电子温度均出现下降，且电子温度的变化与太阳辐射变化基本同步，即最大电子温度下降发生在食甚附近时刻。200 公里、400 公里以及 600 公里处电子温度分别下降了 200 K、500 K 和 700 K。在日食后期（从食甚到日食

结束), 电子温度开始逐渐回升, 在日食结束前回升到正常水平。之后, 模拟结果显示电子温度会继续上升并在日食结束时达到其最大值, 最大升幅约为 200K。在此时, 太阳辐射已经完全恢复到日食前的正常水平, 然而电子浓度依然低于控制日水平, 因此就会导致电子温度比控制日还高。这一过程与日出时电子温度的上升过程相类似。

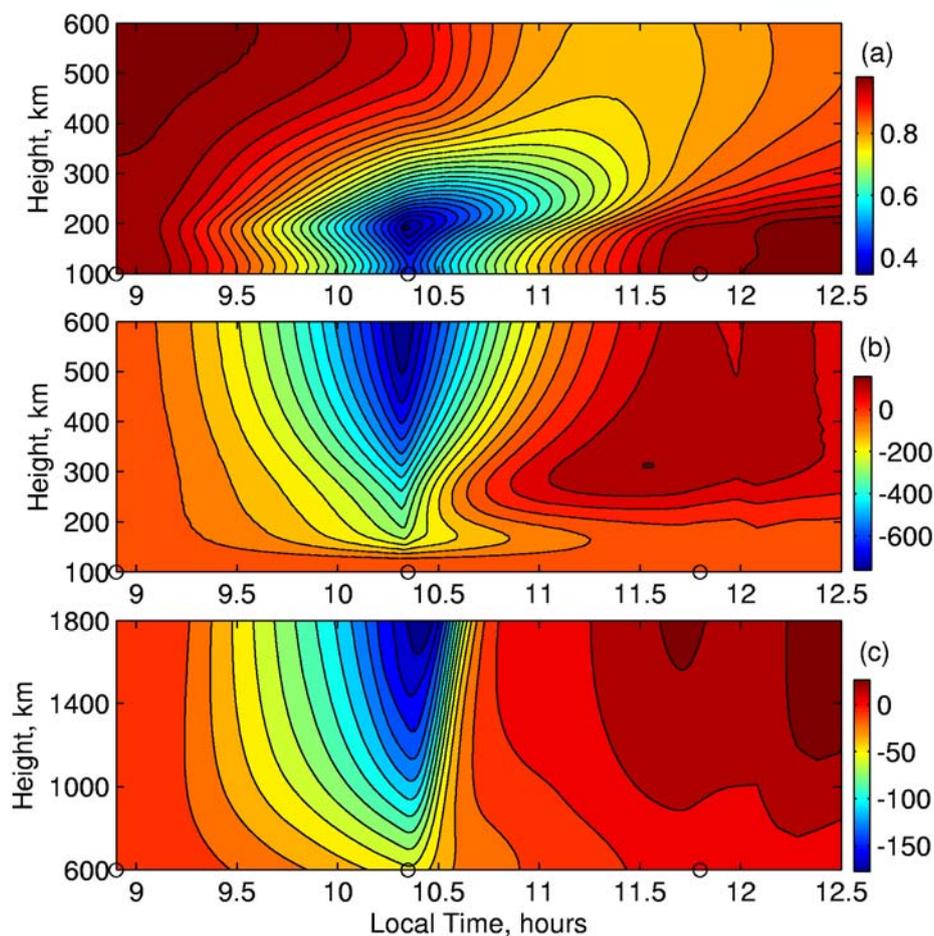


图 5.7 北纬 48.8 度电离层响应的时演化。(a)、(b)、(c) 分别为 ΔN_e 、 ΔT_e 、 ΔV_i 随时间的演化。X 轴上的圆圈分别指示日食开始, 食甚和日食结束。

O^+ 场向漂移速度变化 ΔV_i 随高度和时间的分布画在图 5.7c 中。在日食期间, 由于电子温度的下降, 等离子体的标高也会相应地下降, 那么高高度的等离子体就会沿磁力线向下输运, 从而部分弥补低高度电子浓度的损失。因为电子温度在食甚附近降幅最大, 由此导致最大下行离子通量也发生在食甚附近。随着电子浓度和电子温度的恢复, 下行离子通量会逐渐减小。并且低高度的恢复速度比高高度快, 这导致下行通量逐渐消失。在日食结束时刻附近, 高高度的离子漂移速度甚至改变方向而向上, 因为此时电子浓度还没完全恢复但电子温度已经有一个小

幅的增加（如图 5.7b）。

§5.4.3 共轭半球的电离层扰动

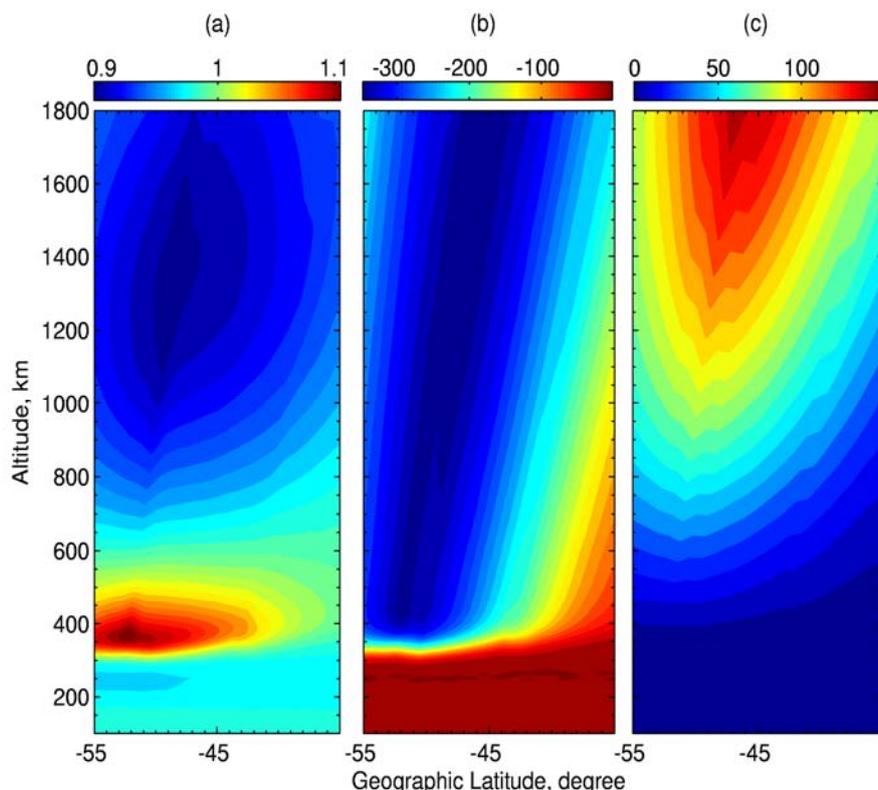


图 5.8 与图 5.5 相同，但为共轭半球的情况（ $35^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$ ）。

模拟结果表明当日食发生在北半球的时候，在其共轭半球即南半球也会出现电离层扰动。图 5.8 为南半球电子浓度相对变化 ΔN_e 、电子温度相对变化 ΔT_e 以及 O^+ 场向漂移速度相对变化 ΔV_i 在 1021 UT 时刻随纬度和高度的分布。图 5.8a 显示在 600 公里以上有小幅的电子浓度下降，其中最大下降约为 10%，位于 1200—1400 公里。同时在 600 公里以下高度有小幅的电子浓度增加，最大增加发生在约 380 公里处，最大升幅约为 10%。

在北半球，日全食发生在北纬 49 度附近，它的磁共轭点位于南纬 53 度，因此南半球最大电离层扰动发生在南纬 53 度附近（如图 5.8 所示）。计算结果表明南半球最大的电子浓度扰动相对于北半球食甚时 1021 UT 约有 12 分钟的延迟。图 5.8b 显示，共轭区 300 公里以上高度区域的电子温度出现全面下降，最大降幅约为 350K。模拟结果还表明，共轭区的电子温度响应相对于北半球日食区的响应有不超过 4 分钟的时间延迟。如图 5.8c 所示，在共轭区 400 公里以上也有

明显的沿磁力线的下行等离子体通量,这应该与电子温度下降导致等离子体标高下降有关。

太阳 EUV 和 X-ray 辐射离化中性大气并产生离子和高能光电子。绝大部分光电子是在在 300 公里以下的低高度区域产生,这些高能光电子首先加热周围的电子。还有部分光电子能运动到更高高度而加热高高度的电子,甚至还有部分高能光电子能沿磁力线运动到共轭半球并加热那里的电子。对于 300 公里以下的高度区域,电子加热主要来自局地的光电子加热。而对于 300 公里以上的高高度区域,电子加热不仅有来自本半球低高度光电子的贡献,还有来自共轭半球光电子的贡献 (Nisbet, 1968; Banks and Nagy, 1970; Nagy and Banks, 1970; Richards and Torr, 1988)。高能光电子从一个有光照的半球沿磁力线运动到共轭半球的现象已经在过去的很多文章中有描述 (如 Evans, 1973; Schunk and Nagy, 1978; Bailey and Sellek, 1990; Chao et al., 2003, Zhang et al., 2004; Lei et al., 2007; Bilitza et al., 2007)。当日食发生在北半球时,由于 EUV 和 X-ray 辐射的大幅减少,北半球的光电子产生率会大幅地下降,这会导致沿磁力线输运到共轭半球南半球的光电子急剧减少,因而该地区的光电加热率会下降,并导致电子温度下降。而南半球低高度的电子温度基本不受影响,因为低高度的光电加热主要来自局地的光电子加热。对于南半球,电子温度的下降会导致等离子体标高减小,从而引起等离子体沿磁力线向下运动,这导致在高高度会有一个小幅的电子浓度下降而在低高度会有一个小幅的电子浓度增加。

§5.5 小结

本文通过欧洲 16 个测高仪台站的 E 层临频和 F1 层临频数据,对 1999 年 8 月 11 日日食引起的电离层响应包括 E 层峰值浓度和 F1 层峰值浓度变化进行了一个统计分析。然后利用本实验室开发的二维中低纬电离层理论模式 TIME-IGGCAS 以及修正的日食期间太阳辐射变化模型 (参见第三节),对 1999 年这次日全食的电离层响应进行了模拟研究。模拟和观测结果均表明,对于中低纬电离层,日食期间电子浓度下降幅度 F1 层比 E 层大。模拟结果还表明,除了 500 公里以下高度有明显的电离层响应外,高高度 (直到 2000 公里高度)的电子浓度也有小幅下降。另外,当日食发生在北半球中纬的时候,模拟结果显示在

它的共轭区域也会出现小幅的电离层扰动。主要的结果小结如下：

1. 对于中低纬电离层，在日食期间 F1 层电子浓度下降幅度比 E 层大。在 1200—1800 高度区域电子浓度也有小幅下降。日食还会引起 200 公里以上电子温度显著下降，其中最大温度下降发生在 600—1000 公里的顶部电离层，降幅达到 700K。离子温度也有小幅的下降。

2. 日食期间，电离层低高度 E 层和 F1 层电子浓度的响应与太阳辐射变化基本同步，然而 F2 层的响应具有明显的时间延迟，其值随高度增加先增加后减少，比如在 300 公里大约为 15 分钟，在 600 公里为 60 分钟，在 1200 公里为 30 分钟。电子温度响应在整个高度范围内都基本与太阳辐射变化同步，并在日食结束时间附近出现最大电子温度上升，升幅约为 200 K。

3. 对于日食共轭区，300—500 公里处的电子浓度出现小幅上升，而在 1200—1600 公里电子浓度出现小幅下降。电子温度在 400 公里高度以上都有显著的下降，最大降幅达到 350 K。

第六节 中纬F2 层日食响应的统计和模拟研究

上一节中我们重点研究了低高度 E 层及 F1 层的日食响应以及它们之间的差别。由于低高度电离层主要受光化学过程控制,因此低高度电离层响应相对简单,基本与日食程度成正比。而 F2 层与电离层低高度不同,其主要受输运过程控制。这导致 F2 层对日食的响应会受到各种因素的影响。本节主要研究背景峰高 $hmF2$ 、地方时、太阳活动以及磁倾角等因素对中纬电离层响应的影响。

§6.1 引言

电离层低高度如 E 层和 F1 层的行为主要受到光化学过程的控制,所以日食期间太阳辐射减小会直接导致光电子产生率减小,并因此引起电子浓度下降,降幅随食分增大而增大 (Klobuchar and Whitney, 1965; Rishbeth, 1968; Hunter et al., 1974; Oliver and Bowhill, 1974; Cohen, 1984; Cheng et al., 1992; Farges et al., 2001)。低高度电子浓度的时间变化与日食过程基本同步。

与低高度不同, F2 层主要受等离子输运过程控制,而影响输运过程的因素很多,因此在不同日食事件期间, F2 层的响应可能会不尽相同。大部分观测结果表明日食期间 $foF2$ 可能会出现不同程度的下降 (如 Datta et al., 1959; Walker et al., 1991; Cheng et al., 1992; Boitman et al., 1999; Huang et al., 1999; Korenkov et al., 2003b; Afraimovich et al., 2002; Baran et al., 2003),但也有一些结果显示有时 $foF2$ 会出现小幅上升 (如 Higgs, 1942; Pierce, 1948; Evans, 1965b; Millward et al., 1999; Korenkov et al., 2003b)。以前许多观测结果表明日食期间 $foF2$ 下降幅度从 0.2MHz 到 1.6MHz 不等,另外 $foF2$ 响应的延迟从 9 分钟到 30 分钟不等。如此大的响应差异可能与背景中性大气差异和日食期间的各地球物理环境不同有关 (比如太阳活动和地磁活动水平,经纬度,地方时等方面)。也可能与各观测数据的时间和空间分辨率不同有关。

以前的日食研究主要是针对不同事件进行事例分析,给出特定的日食事件 F2 层行为的变化特征。与此不同,本文将主要研究各种因素如地方时或天顶角,太阳活动,磁倾角以及背景峰高 $hmF2$ 等对 F2 层响应的影响。首先我们利用 1970

—2005 年 7 次日全食期间 23 个测高仪记录的 foF2 数据统计研究 foF2 响应随地方时和磁倾角的关系。然后我们借助本实验室二维中低纬电离层理论模式 TIME-IGGCAS, 设计四个模拟实验来分别研究 F2 层对日食的响应与地方时 (或天顶角)、太阳活动、磁倾角以及背景峰高等因素的关系。

表 6.1 各测高仪台站地理位置, 在 200 公里高度最大食分时遮挡面积百分数, 以及最大食分发生的地方时。

日食日期	台站名称	纬度	经度	最大日食 发生时间 (地方时)	200 公里高 度太阳被遮 挡百分比
March 7 1970	Wallops Island	37.9	284.5	1338	99
March 7 1970	Ottawa	45.4	284.1	1340	81
April 29 1976	Karaganda	49.8	73.1	1645	62
April 29 1976	Novokazalinsk	45.5	62.0	1558	76
April 29 1976	Alma ata	43.3	76.9	1710	76
April 29 1976	Tbilisi	41.7	44.8	1430	90
April 29 1976	Moscow	55.5	37.3	1341	51
February 26 1979	Ottawa	45.4	284.1	1213	81
February 26 1979	Boulder	40.0	254.7	0921	92
July 31 1981	Magadan	60.0	151.0	1358	74
July 31 1981	Karaganda	49.8	73.1	0720	97
July 31 1981	Novosibirsk	54.6	83.2	0813	98
July 31 1981	Sverdlovsk	56.4	58.6	0627	81
July 31 1981	Irkutsk	52.5	104.0	1001	93
July 31 1981	Tomsk	56.5	84.9	0824	94
May 30 1984	Wallops Island	37.9	284.5	1146	99
August 11 1999	Juliusruh	54.6	13.4	1133	82
August 11 1999	Rostov	47.2	039.7	1357	81
August 11 1999	Sofia	42.7	23.4	1237	96
August 11 1999	Tortosa	40.4	0.3	1018	75
August 11 1999	Rome	41.8	12.5	1132	85
August 11 1999	Chilton	51.6	358.7	1012	95
October 3 2005	San vito	40.7	17.9	1033	67

§6.2 观测数据

为了分析中纬 F2 层对日食的反应，我们选择 1970 年 3 月 7 日、1976 年 4 月 29 日、1979 年 2 月 26 日、1981 年 7 月 31 日、1984 年 5 月 30 日、1999 年 8 月 11 日、以及 2005 年 10 月 3 日七次日全/环食期间磁纬大于 30 度的台站的观测数据。而且，为了确保电子浓度的下降相对于日常电离层的变化足够的大，也即确保电子浓度下降主要由日食效应引起，我们仅使用光球面积相对变化超过 50% 的台站的数据。这些台站的详细信息如经纬度，最大日食时间以及最大日食程度等都列在表 6.1 中。

日食期间 foF2 的相对改变 rfoF2 定义为日食发生时的 foF2 值与参考值的比值。此参考值为日食前后 20 天的平均值。本文中的 rfoF2 值都小于 1，表明临频都下降。按此定义，foF2 降幅越大，rfoF2 值越小。在这七次日全食事件中，所选的 23 个台站都位于偏食区。为了方便地比较，偏食区的 rfoF2_P 值（P 代表偏食）都应该转换成全食区的 rfoF2_T 值（T 代表全食），即把所有位于不同程度日偏食区的临频变化值都归一到日全食区的临频变化值。在相同的地球物理条件下，假设 F2 层临频的变化与太阳辐射的变化成正比，因此，这个转换方程可以写成如下形式：

$$rfoF2_T = 1 - \frac{1 - rfoF2_P}{\Delta S_P} \quad (6.1)$$

上式中 ΔS_P 为光球面最大遮蔽面积百分比，如表 6.1 所示。基于这些转换数据，我们把 $\Delta foF2$ 随地方时和磁倾角的变化分别画在图 6.1a 和 6.1b 中。如图 6.1a 所示，日食期间临频响应有明显的地方时效应：正午时 foF2 的相对变化最大，在上午和下午，foF2 的相对变化都与天顶角的变化成反比，即天顶角越大（接近清晨或黄昏）则 foF2 的变化就越小。图 6.1b 显示 rfoF2 的值随磁倾角增加而增大，也即越大的磁倾角会导致越小的 foF2 下降。

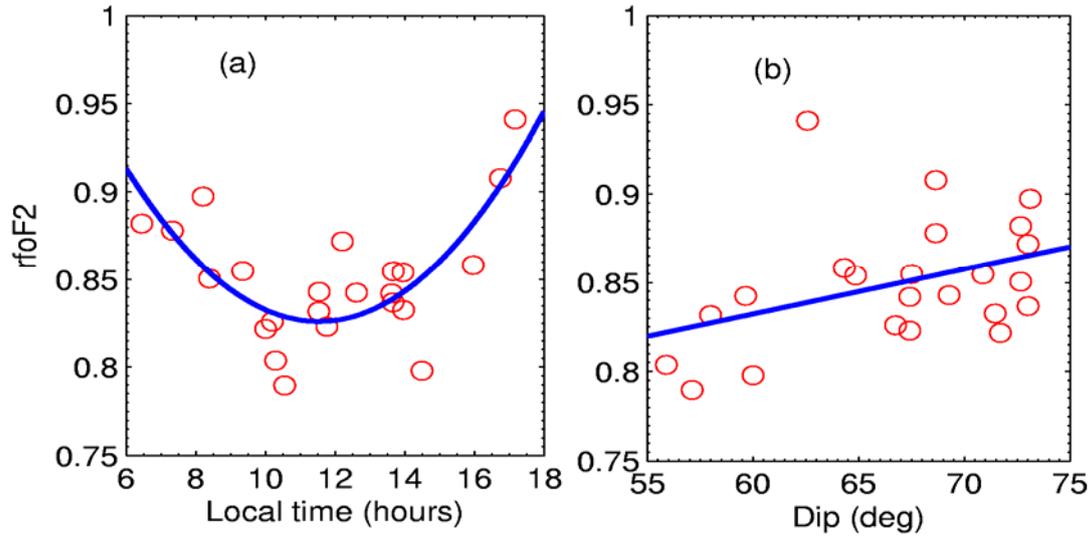


图 6.1 $rfoF2$ 随地方时 (a) 和磁倾角 (b) 的变化。实线代表观测数据的最小二乘拟合结果。这些数据来自 23 个测高仪台站的观测。

§6.3 日食模拟

本节的研究中，我们将使用中低纬电离层理论模式 TIME-IGGCAS 来模拟 F2 层对日食的反应。为了研究不同参量对 F2 层日食反应的影响，我们需要分别设计不同的模拟实验，具体的实验设计将在下一小节给出。同时，为了模拟电离层日食反应，我们需要把日食期间太阳辐射的变化加入到电离层模式中。在第三节中我们构建了一个日食期间太阳辐射变化模式，在本节中我们依然将利用此模式。对于每次模拟，首先我们把修正的日食因子 $F_R(UT, h, \Phi, \theta)$ 运用到电离层模式中计算日食期间电离层的变化，然后再运行一次模式，在这次模拟中保持太阳辐射不变。通过比较这两次模拟结果就可以清楚地描述出电离层对日食的反应状况。Davis et al. (2001) 的研究结果表明 1932—1999 年的七十多年间的日全食事件中，太阳辐射被遮挡的程度有不小的变化。本文的主要目的是通过理论模拟研究各因素对电离层日食反应的影响，因此所有的模拟实验使用相同的太阳辐射变化模型是有必要的。因此本文中采用 1999 年 8 月 11 日这次日全食期间太阳辐射变化模型来代表日食时的太阳辐射通量变化，如上所述，对于这次日全食，食甚时还剩余 22% 的太阳辐射通量。

为方便书写，在本节后面内容中我们使用符号 $rNmF2$ 、 $rhmF2$ 、 rNe 、 rTe 和 rPf 来分别表示日食期间 F2 层峰值浓度 $NmF2$ 、峰高 $hmF2$ 、电子浓度 Ne 以及等离子体扩散通量 Pf 等参量的相对变化。峰值浓度的相对变化 $rNmF2$ 定义为

$NmF2_E/NmF2_C$, 峰高的相对变化 $rhmf2$ 定义为 $hmF2_E - hmF2_C$, 电子浓度的相对变化 rNe 定义为 Ne_E/Ne_C , 等离子扩散通量的相对变化 rPf 定义为 $Pf_E - Pf_C$ 。下标 E 和 C 分别代表日食日和控制日。定义 $rNmF2$ 到达最小值（对应于最大的 $NmF2$ 下降）的时间相对于食甚时的时间延迟为 τ 。

§6.4 参量控制实验

在这一小节, 我们将分别进行四个模拟实验来研究背景峰高、地方时或天顶角、太阳活动以及地磁倾角等因素对电离层响应的影响。背景峰高在此定义为日食开始前的 F2 层峰高值。Le et al. (2008) 研究表明日食期间最大幅度电子密度降低发生在 F1 层大约 200 公里高度处, 并且电子密度下降幅度随高度增加而减小。所以越高的背景峰高会导致 F2 层离最大日食响应高度越远, 从而影响 $NmF2$ 的日食响应。我们知道, 太阳活动水平和太阳天顶角都对电离层光化学过程有重要影响 (Balan et al., 1994; Liu et al., 2003; Liu et al., 2006)。而日食过程是光电产生率发生显著变化的过程, 因此电离层日食响应可能与此两因素有关。Evans (1965b) 把日食期间 F2 层临频 $foF2$ 的上升归因于大磁倾角的作用 (磁倾角大于 60 度)。我们的观测结果也表明 $foF2$ 响应有明显的磁倾角依赖 (图 6.1b)。基于以上的分析, 我们选择了背景峰高、地方时或天顶角、太阳活动水平以及磁倾角这四个参量来进行参数控制研究。

§6.4.1 背景峰高的影响

对于第一个模拟实验, 我们使用 1981 年 7 月 31 日日全食的太阳辐射变化对电离层响应进行了三次模拟, 并通过分析其结果来研究背景峰高的高低对 $NmF2$ 的日食响应的影响。这些模拟运行在东经 127 度子午面上。在这个子午面内, 日全食发生在北纬 54.5 度, 食甚的时间为地方时 12 点。太阳活动指数 F10.7 设为 140。这三次模拟的差别在于中性风的不同。其中一个使用经验模式 HWM93 直接给出的结果 (称为 normal 情况), 另外两个模拟也使用了 HWM93 的结果但分别加了一个 +30m/s 和 -30m/s 的水平中性风 (赤道向为正)。

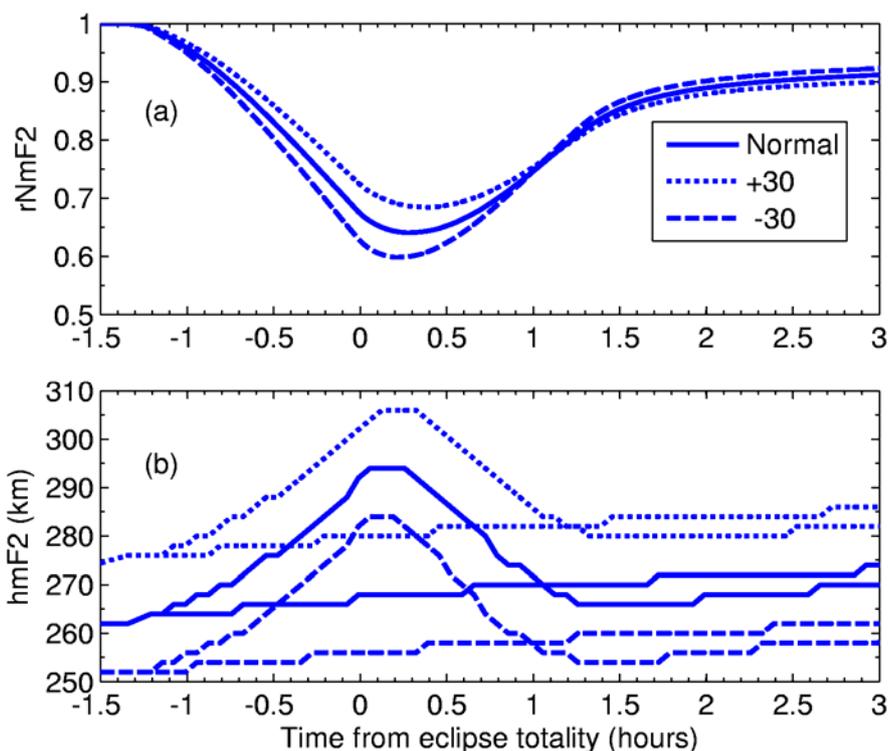


图 6.2 (a)不同风场下 $rNmF2$ 随时间的变化,实线为正常风场,点线为加了+30m/s (赤道向)的风场,虚线为加了-30m/s (极向)的风场。(b)相应 $hmF2$ 随时间的变化,其中有显著抬升的线为日食期间的峰高变化,而没有明显变化的线为控制日的峰高变化。

图 6.2 给出了峰值浓度相对变化 $rNmF2$, 无日食发生以及日食期间的峰高随时间的变化。从图 6.2 可以很清楚地看到加赤道向中性风后 F2 层峰高抬升了大约 12 公里, 而加极向中性风后 F2 层峰高降低了约 12 公里。模拟结果还显示增加一个赤道向风将会导致更大的 $rNmF2$ 值 (对应更小的 $NmF2$ 响应), 其值从正常风场时的 0.64 到加赤道向风后的 0.685; 而增加一个极向风将会导致更小的 $rNmF2$ 值 (对应更大的 $NmF2$ 响应), 其值从正常风场时的 0.64 变到加极向风后的 0.6。这些结果表明背景峰高越高, 那么 $rNmF2$ 的值会越大, 对应越小的 F2 层电子浓度响应。模拟计算结果显示, 对于 200 公里以上高度, rNe 值随高度增加而增加。所以更高的峰值高度将会产生更大的 $rNmF2$ 值。

§6.4.2 地方时效应

在第二个模拟实验中, 我们使用 1981 年 7 月 31 日日全食的太阳辐射变化对电离层日食响应进行了三次模拟, 并通过分析其结果来研究背景峰高的高低对

NmF2 的日食响应的影响。这些模拟运行在东经 127 度子午面上。太阳活动指数 F10.7 为 140, 地磁指数 A_p 为 5。在这个经度链上, 日全食发生在北纬 54.5 度, 食甚的时间为地方时 12 点。为了模拟地方时效应, 我们通过把日食发生时间提前 4 个小时、提前 2 个小时, 以及不做调整来模拟三个不同的地方时发生的日食的电离层响应, 三次模拟的食甚时间分别为 08 LT, 10 LT 以及 12 LT, 对应的太阳天顶角分别为 58 度, 43 度以及 35 度。

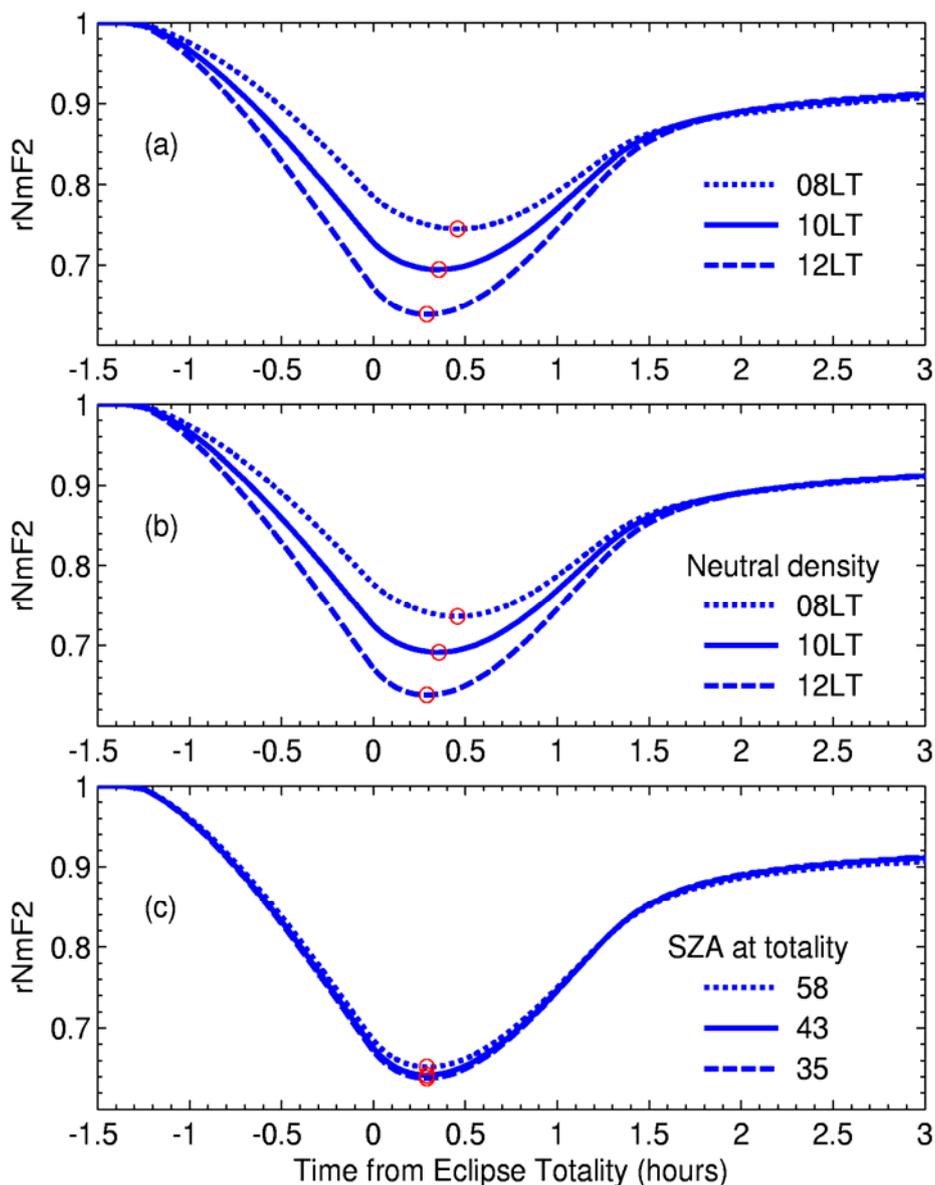


图 6.3 (a) 不同地方时 $rNmF2$ 随时间的演化。(b) 食甚分别发生在 08 LT, 10 LT, 12 LT 时的 $rNmF2$ 值随时间的演化, 但这三个模拟具有相同的太阳天顶角 ($SZA=35$)。 (c) 食甚均发生在 12 LT, 但天顶角分别为 58 度, 43 度和 35 度的 $rNmF2$ 值随时间的演化, 即这三个模拟具有相同的中性大气浓度分布。三个圆圈指示的是最小 $rNmF2$ 的位置。

食甚分别发生在 08 LT, 10 LT, 12 LT 时的 $rNmF2$ 随时间的演化过程显示在图 6.3 中。图 6.4 给出了这些模拟过程中 rNe 的时间和空间分布。如图 6.3a 所示, 食甚发生在 08 LT、10 LT、12 LT 时, $rNmF2$ 的最小值分别为 0.74、0.69、0.64; 最小 $rNmF2$ 发生时间对于食甚的延迟时间分别为 26 分钟, 21 分钟, 17 分钟。这些模拟结果与图 6.1a 所示的观测结果一致: 正午日食引起的 $NmF2$ 下降幅度比上午日食大。从图 6.4 我们也可以发现, 对于 200 公里以下的 E 区和 F1 区, 当日食发生在不同地方时, 这个高度的电子浓度变化几乎完全一样, 即低高度的电子浓度响应没有明显的地方时效应; 然而对于 200 公里至 400 公里的 F2 区, rNe 的值在 08 LT 最大而在 12 LT 最小, 即 F2 层高度的电子浓度响应有明显的地方时依赖。

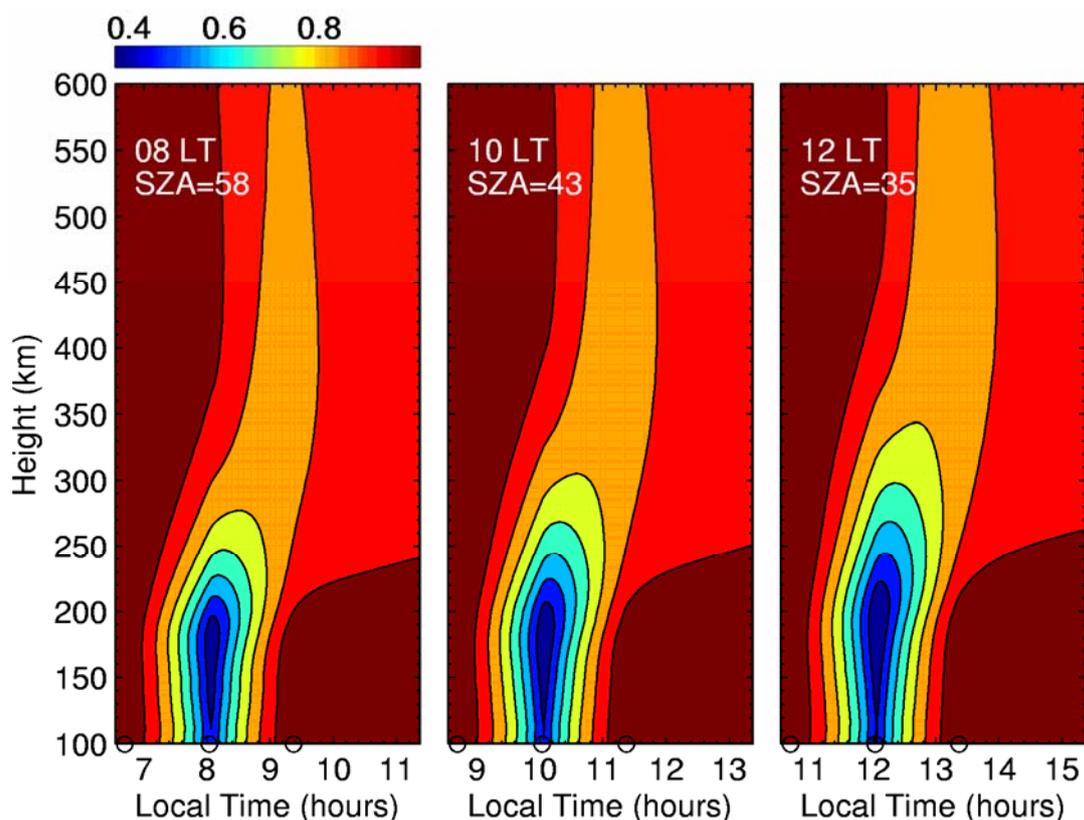


图 6.4 不同地方时 rNe 值随时间和空间的演化, 三个子图分别对应食甚发生在 08 LT, 10 LT, 12 LT 的情况。X 轴上的三个圆圈分别对应日食开始, 食甚以及结束的时间。

我们知道, 中性大气密度和太阳天顶角都会随地方时变化而变化。为了进一步考察哪一个因素对电离层日食响应的地方时效应起主要作用, 或两者贡献相

当，我们又进行了两次模拟实验来分别考察中性大气效应和太阳天顶角效应。当考察中性大气效应的时候，各地方时使用相同的天顶角（都使用 12 LT 时的天顶角），以此来消除天顶角的影响；而当考察太阳天顶角效应的时候，都使用相同的中性大气浓度分布（都使用 12 LT 时的值），以此来消除中性大气的影响。

图 6.3b 和 6.3c 分别给出了中性大气密度效应和太阳天顶角效应的模拟结果。需要提及的是，在这些模拟中，F 区中性密度在正午 12 LT 最大而在上午 08 LT 最小。如图 6.3c 所示，当日食发生在不同的天顶角的时候，NmF2 的变化几乎一样，只有很小的差别（天顶角最小时 rNmF2 也最小）。这表明电离层响应的地方时效应并不非由天顶角差异导致。而从图 6.3b，我们可以看到显著的中性浓度效应：中性大气浓度越大，NmF2 响应越大。这表明电离层日食响应的地方时效应主要来源于不同地方时的中性密度差异。另外，我们也可以看到 NmF2 响应的延迟时间 τ 的地方时差异也主要来自于中性大气密度的地方时差异。对于延迟时间 τ ，我们知道这主要与电离层惰性有关（Appleton, 1953; Rishbeth, 1968; Rishbeth and Garriott, 1969）。这个延迟是指电子浓度的改变总是要滞后于电子产生率的改变一段时间，对于低高度这个时间大约为 $1/2\alpha N_e$ ，对于高高度这个时间大约为 $1/\beta$ ， α 是平方率损失系数而 β 是线性损失系数。所以中午 12 LT 时更大的 N_2 分子浓度就会导致一个更大的 β 值，这也会导致一个更短的延迟时间。除了 NmF2 的日食响应有明显的地方时效应，峰高 hmF2 和电子温度（没有在图中显示）的日食响应也有地方时效应。模拟结果显示 hmF2 最大响应出现在 12 LT 的日食期间，其最高升幅约为 26 公里，最小响应出现在 08 LT 日食期间，其升幅约为 18 公里。电子温度也是在 12 LT 日食期间下降幅度更大而在 08 LT 日食期间下降幅度更小。

§6.4.3 太阳活动周效应

在第三个模拟实验中，我们使用 1981 年 7 月 31 日日全食的太阳辐射变化对电离层日食响应进行了两次模拟，并通过分析其结果来研究 NmF2 日食响应的太阳活动依赖。这两次模拟的太阳活动指数 F10.7 为 100 和 200，分别代表低太阳活动水平和高太阳活动水平。这两次模拟的是东经 127 度子午面的电离层响应。日全食发生在北纬 54.5 度，其食甚时间为 12 LT。

图 6.5a 给出了 $rNmF2$ 在低太阳活动和高太阳活动情况下的时间演化。图 6.5b 给出了两种太阳活动条件下的峰高及相应太阳活动条件下的背景峰高(无日食的情况)。低太阳活动和高太阳活动条件下的电子浓度相对变化 rNe 分别画在图 6.6a 和图 6.6b 中。如如图 6.5a 所示, 峰值浓度相对变化 $rNmF2$ 的最小值在太阳活动 $F107=200$ 和 $F107=100$ 条件下分别为 0.6 和 0.67。这说明太阳活动越高 $NmF2$ 的响应越大。图 6.5a 也显示在这两种条件下的模拟中 $NmF2$ 响应相对与食甚的时间延迟 τ 基本相同。如图 6.5b 所示, 背景峰高在高太阳活动 $F107=200$ 条件下比低太阳活动 $F107=100$ 条件下要高大约 40 公里, 然而在两种条件下的 $hmF2$ 响应基本相同, 在食甚附近都有大约 28 公里的上升。

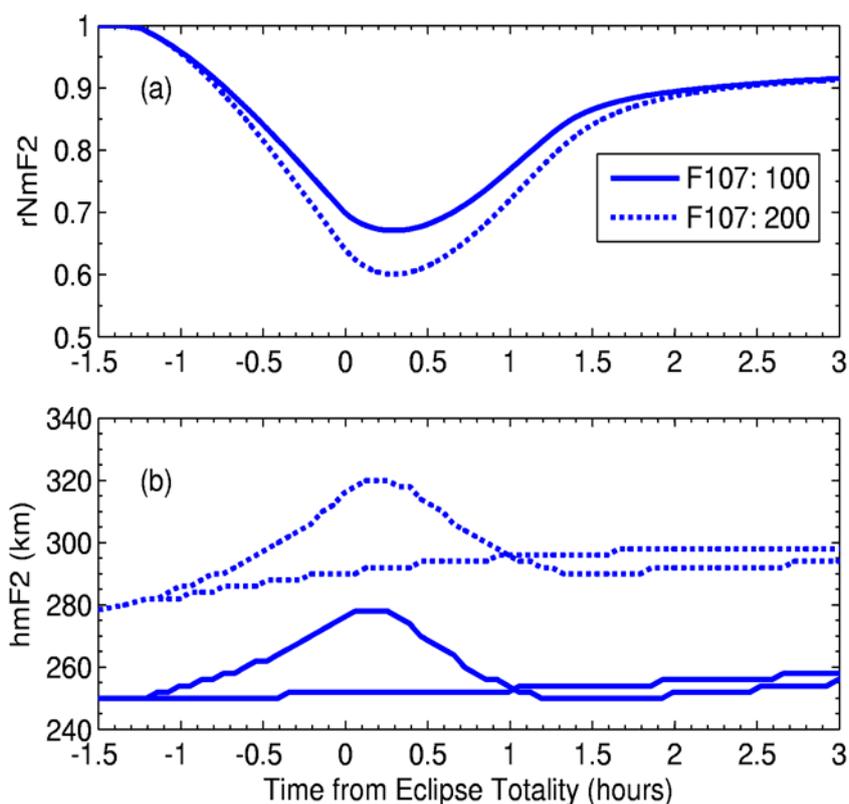


图 6.5. (a) 不同太阳活动条件下 $rNmF2$ 值随时间的演化, 实线和点线分别对应低太阳活动 $F107=100$ 和高太阳活动 $F107=200$ 的结果。(b) 相应的峰高 $hmF2$ 随时间的变化。

模拟结果显示, 相对于低太阳活动时发生的日食, 高太阳活动时发生的日食会使 F2 区高度电子浓度有更大的下降(图 6.6)。而且高太阳活动时大的日食响应也会扩展到更高的 F 区高度。模拟结果显示, 在 $F107=100$ 的低太阳活动期,

最大的电子浓度下降发生在大约 182 公里，其 rNe 值为 0.386；而在 $F107=200$ 的高太阳活动期，最大的电子浓度下降则发生在大约 200 公里，其 rNe 值更小为 0.362。如图 6.5b 所示，高太阳活动的背景峰高比低太阳活动的背景峰高高约 40 公里。根据 6.4.1 节关于背景峰高对 $NmF2$ 日食响应的影响的实验结果，在 $F107=200$ 的太阳高年的高 $hmF2$ 值应该导致更大的 $rNmF2$ 值。然而图 6.5a 给出了相反的结果，这表明高太阳活动时电子浓度下降幅度更大而导致 $NmF2$ 降幅也增大的效应超过了高太阳活动引起 $hmF2$ 抬升而导致 $NmF2$ 降幅减小的效应，从而导致在高太阳活动时的 $NmF2$ 响应比低太阳活动时更大的结果。

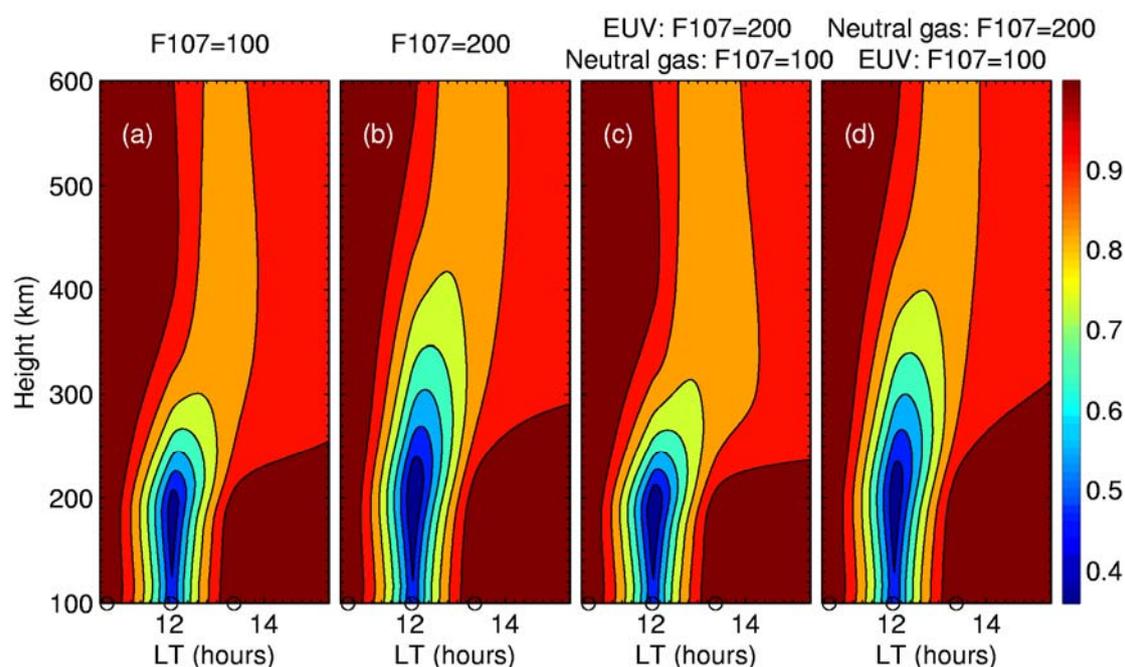


图 6.6 不同太阳辐射和中性大气浓度时 rNe 值随时间和空间的演化，(a) 和 (b) 分别对应低太阳活动 $F107=100$ 和高太阳活动 $F107=200$ 时的结果。右边两个子图与左边两个相似，但是使用不同的 $F107$ 指数来计算太阳 EUV 辐射和中性大气浓度：(c) 太阳辐射用 $F107 = 200$ 来计算而中性成份浓度用 $F107 = 100$ 计算；(d) 太阳辐射用 $F107 = 100$ 来计算而中性成份浓度用 $F107 = 200$ 计算。X 轴上的三个圆圈分别对应日食开始，食甚以及结束的时间。

我们知道，太阳 EUV 辐射通量和中性大气浓度都会随太阳活动水平变化而变化。为了考察哪一个因素对于电离层日食响应的太阳活动依赖起主要的作用，我们通过调整太阳辐射和中性大气密度进行了另外两次模拟：在一次模拟中，用 $F107=200$ 驱动模式 EUVAC (Richards et al., 1994) 计算太阳 EUV 辐射而用

F107=100 驱动模式 NRLMSIS-00 (Picone et al., 2002) 计算中性大气密度; 在另一次模拟中, 用 F107=100 驱动模式 EUVAC 计算太阳 EUV 辐射而用 F107=200 驱动模式 NRLMSIS-00 计算中性大气密度。即在这两个模拟中, 一个使用太阳活动高年的 EUV 辐射和太阳活动低年的中性大气密度, 而另一个刚好相反, 使用太阳活动低年的 EUV 辐射和太阳活动高年的中性大气密度。

图 6.6 给出了四种条件下电子浓度相对变化 rNe 随时间和空间的演化: 第一种, 用 F107=100 计算太阳辐射和中性大气密度, 即模拟太阳活动低年的情况; 第二种, 用 F107=200 计算太阳辐射和中性大气密度, 即模拟太阳活动高年的情况; 第三种, 用 F107=200 计算太阳辐射而用 F107=100 计算中性大气密度; 第四种, 用 F107=100 计算太阳辐射而用 F107=200 计算中性大气密度。如图 6.6 所示, 第一种和第三种情况之间仅有很小的差别; 同样第二种和第四种情况之间也仅有很小的差别。这些结果表明, 由太阳活动引起的太阳辐射通量变化并不是导致太阳活动高低年 F2 区响应差异的主要因素。相反, 图 6.6b 和图 6.6c 之间(或图 6.6a 和图 6.6d 之间) rNe 的巨大差别表明中性大气密度的高低年变化是导致 F2 区日食响应的太阳活动高低年差异的主要因素。总之, 背景大气浓度对于日食期间 F2 层的响应具有重要的影响。

§6.4.4 磁倾角效应

在第四个模拟实验中, 我们分别使用 1976 年 4 月 29 日日全食的太阳辐射变化和 1999 年 8 月 11 日日全食的太阳辐射变化对电离层日食响应进行了两次模拟, 并通过分析其结果来研究 NmF2 日食响应的磁倾角依赖。太阳活动指数 F10.7 设为 180, 地磁指数 A_p 设为 5。这两次模拟分别在东经 15 度和东经 9 度的子午面上进行。对于这两个子午面, 日全食分别发生在北纬 32.3 度(其磁倾角为 46 度)和北纬 49.1 度(其磁倾角为 66 度), 相应的食甚发生时间为 1112 LT 和 1109 LT。这两次模拟的中性大气浓度已经调整到相同水平。所以这两次模拟的主要区别在于地理纬度或地磁倾角的变化。

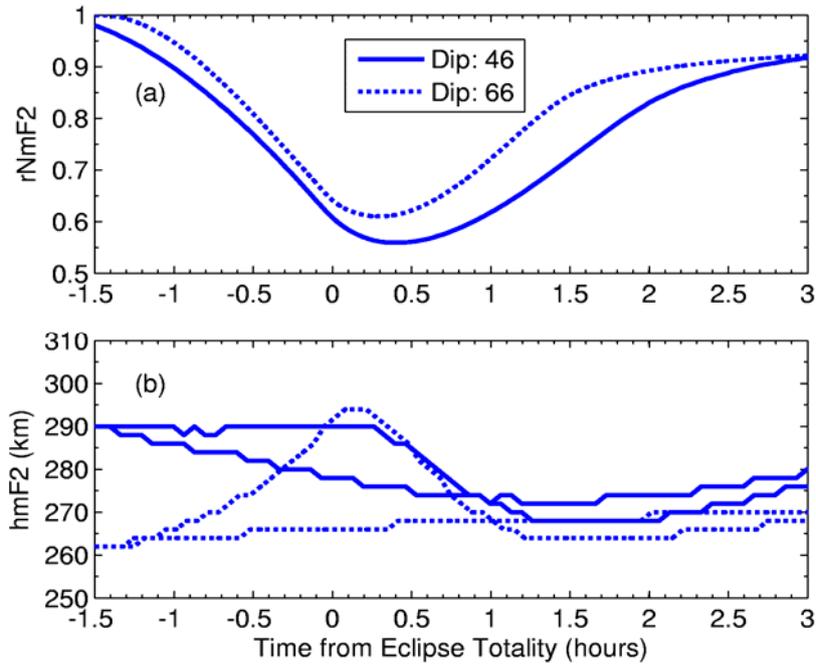


图 6.7 (a) 不同地磁倾角地区 $rNmF2$ 值随时间的演化。(b) 相应的峰高 $hmF2$ 随时间的变化。

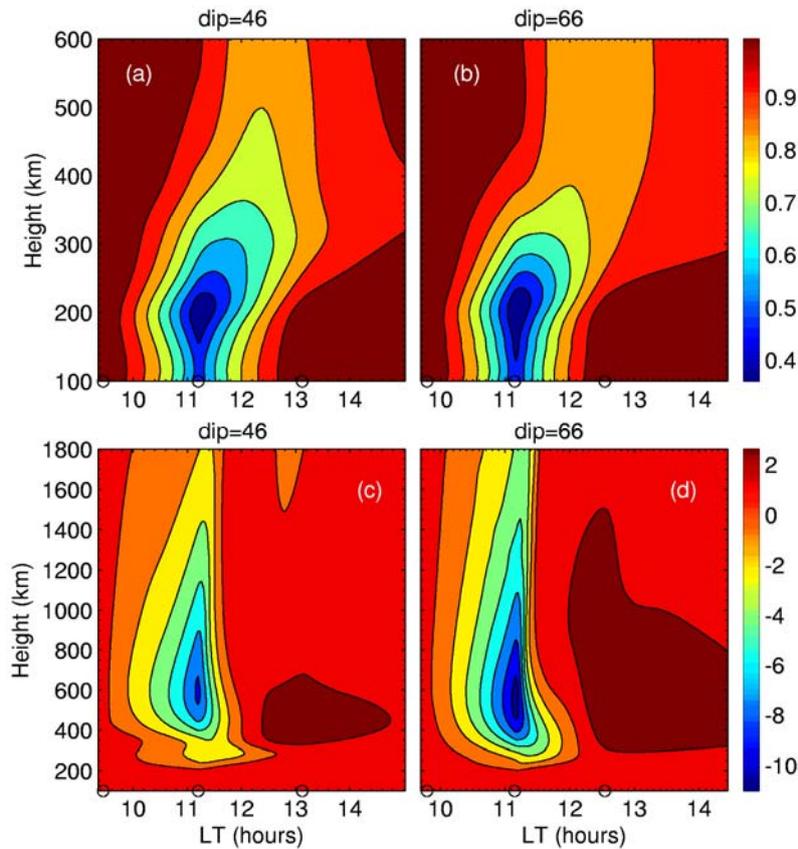


图 6.8 (a) 和 (b) 为不同磁倾角地区 rNe 值随时间和空间的演化。(c) 和 (d) 为相应的等离子体通量变化，单位为 $10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。X 轴上的三个圆圈分别对应日食开始，食甚以及结束的时间。

图 6.7a 给出了 $rNmF2$ 在磁倾角 $dip=46^\circ$ 和 $dip=66^\circ$ 的时间演化特征。图 6.7b 给出了两种磁倾角条件下的峰高变化及相应磁倾角的背景峰高(无日食的情况)。图 6.8a 和 6.8b 为磁倾角 46 度和 66 度的电子浓度相对变化 rNe 的时间和空间分布。如图 6.7a 所示, 磁倾角 66 度处 $NmF2$ 下降幅度比磁倾角 46 度处小。此模拟结果与测高仪的统计结果一致(如图 6.1b 所示): 更大的磁倾角会导致更小的 $NmF2$ 或 $foF2$ 响应。图 6.7b 显示磁倾角 66 度处的背景峰高比磁倾角 46 度处低, 然而日食期间磁倾角 66 度处 $hmF2$ 上升幅度更大。根据 6.1.1 节关于背景峰高对 $NmF2$ 日食响应的影响的实验结果, 更低的背景峰高应该导致更小的 $rNmF2$ 值, 然而图 6.7a 显示的结果表明磁倾角效应超过了背景峰高对日食响应的影响。

图 6.8 显示对于 250 公里以上高度区域的电子浓度响应, 大磁倾角导致电子浓度下降幅度更小(更大的 rNe 值)。我们知道, 等离子体扩散速率受到磁倾角 I 的强烈控制, 控制因子为 $\sin^2 I$, 因此日食期间更大的磁倾角会产生更大下行离子扩散通量。比较图 6.8c 和图 6.8d 的结果, 我们可以发现日食期间在更大磁倾角的地方会出现更大的下行等离子体运输, 这些等离子体可以部分弥补 F2 区等离子体的损失, 从而减小 $NmF2$ 的下降幅度。日食期间由于太阳 EUV 辐射的迅速减少, 光电加热率会大幅下降并引起电子温度大幅下降。电子温度的下降又会使等离子体扩散平衡标高下降, 从而导致等离子体从顶部向下运输。为了考察电子温度变化和磁倾角不同对电离层响应的作用, 我们在磁倾角为 46 度和 66 度的地方又进行了两次模拟, 在这两次模拟中, 保持电子和离子温度与控制日的温度相同, 即电子和离子温度没有受到日食的影响而发生变化。结果显示这两次模拟几乎具有相同的电离层响应。并且由于等离子体温度没有发生改变, 两次模拟都没有出现明显的下行等离子体通量。比较考虑温度改变和不考虑温度改变的模拟结果, 我们发现电子温度的下降确实是导致等离子体向下运动的主要因素。

§6.5 讨论

电离层低高度(E层和F1层)主要受光化学过程控制, 这导致该高度区域的日食响应主要由太阳辐射的变化决定, 因此在最大食分时日食响应达到最大。然而F2层主要受输运过程控制, 因此它的日食效应不仅与当地的太阳辐射变化有关, 而且与当时的空间环境如背景峰高 $hmF2$, 地方时, 太阳活动水平, 磁倾

角等因素有关。对于中纬 F1 层以上高度区域，日食期间电子浓度的相对变化随高度增加而减少。因此更高的背景峰高 $hmF2$ 会导致 F2 层有更小的日食响应。当水平中性风加了一个 30m/s 的极向或赤道向风之后，日食期间电子浓度相对改变 rNe 的时间和空间分布只有非常小的变化。这表明，在固定高度的 rNe 值并不随中性风的改变而产生大的变化。因此中性风影响 F2 层日食响应主要通过抬升或降低 F2 层峰高来实现的。

地方时（或天顶角）是日食期间 F 层响应的重要控制因素之一，观测和模拟结果均表明正午的 $foF2$ 响应最大。

在 F2 层，电子浓度 Ne 的连续性方程可以写为如下形式：

$$\frac{\partial Ne}{\partial t} = q - \beta \cdot Ne - \nabla \cdot (NeV) \quad (6.2)$$

上式中 q 是电子产生率， β 损失系数， V 是电子运动速度（向上为正）。我们通过假设一个日食函数 $q = q_0 \cos(\chi)e^{-at}$ ，并认为通量散度为一个常数来求解方程（6.2），其中 q_0 是太阳天顶角 $\chi=0$ 时的电子产生率， a 是个常数。因此我们可以获得日食期间的电子浓度 Ne_E 如下：

$$Ne_E = \frac{q_0 \cos(\chi)}{\beta - a} (\exp(-at) + k \cdot \exp(-\beta t)) \quad (6.3)$$

上式中 k 是个正的常数。对于控制日的电子浓度 Ne_C ，通过对方程（6.3）取 a 为零时的极限值，得到 Ne_C 为：

$$Ne_C = \frac{q_0 \cos(\chi)}{\beta} (1 + k \cdot \exp(-\beta t)) \quad (6.4)$$

比较方程（6.3）与方程（6.4），我们可以获得电子浓度的相对值 rNe ：

$$rNe = \left(1 + \frac{a}{\beta - a}\right) \cdot \left(\exp(-at) + \frac{(1 - \exp(-at)) \cdot k}{\exp(\beta t) + k}\right) \quad (6.5)$$

按照方程（6.5），我们可以发现天顶角的大小对于电离层响应并没有影响，因为如方程（6.3）和方程（6.4）所示，天顶角对日食日和控制日的电子浓度变化有同等作用，因此对电子浓度的相对变化就没有什么影响。然而，从方程（6.5）我们可发现损失系数 β 对电子浓度的相对变化有重要的影响： β 值越大导致 rNe

值越小，即产生更大的电子浓度下降。如我们所知，损失系数 β 正比于中性大气 N_2 和 O_2 的浓度： $\beta = \gamma_1[N_2] + \gamma_2[O_2]$ ，式中 γ_1 和 γ_2 是化学反应速率。因此中性大气浓度越大则 β 值越大， β 值越大又使 rNe 值越小。

如第三个关于太阳活动效应的模拟实验结果显示，F2 区的响应有明显的太阳活动依赖，在高太阳活动时会有更大的电离层响应。模拟结果表明电离层响应的高低年差异并不是由太阳辐射本身的差异造成的，而是由太阳活动高低年的中性大气密度差异引起的。电子的产生率 q_0 正比于太阳 EUV 辐射通量，如方程 (6.3) 和方程 (6.4) 所示，太阳 EUV 辐射通量对日食期间和控制日的电子浓度变化有同等的作用，这就导致太阳辐射对电离层响应没有明显的影响。相反，如上一节讨论的一样，中性大气浓度对电离层响应有显著的影响。

第四个关于磁倾角效应的模拟实验结果显示，磁倾角对日食期间 F2 层响应有重要影响。更大的磁倾角会导致更大的下行扩散通量，这使 F2 层的电子浓度下降幅度更小。基于几次日食期间对电离层响应的观测，Evans (1965b) 提出日食期间 foF2 的反常增加可能是由于顶部电离层向下的扩散通量的作用。如第一、第二及第三个模拟实验的结果显示，更高的背景峰高，更大的太阳天顶角以及更低的太阳活动都有利于产生更小的电子浓度下降。利用这些条件并在磁倾角为 75 度的地方，我们再次模拟了电离层对日食的响应情况，但是依然不能获得 foF2 上升的模拟结果。需要指出的是，在本次工作中，我们并没有考虑日食可能对中性大气（浓度，温度，以及风场）产生的影响。Müller-Wodarg et al. (1998) 利用耦合热层电离层等离子体层模式 (CTIP) (Millward et al., 1999) 模拟热层和电离层对日食的响应，他们的模拟结果显示，在日食期间和日食结束后都出现了 NmF2 的增强效应。模拟结果表明 NmF2 的增加主要是由于日食期间大气的压缩效应以及日食结束后 O/N₂ 的增加效应。利用全球热层电离层以及质子层自适应模式 (GSM-TIP)，Korenkov et al. (2003b) 调查了日食对上层大气的影响，他们也发现在日食结束后 foF2 会出现增加。他们的结果表明这个 foF2 的增加主要是由分子 N₂ 浓度的减少造成的。上面提及的结果均表明中性大气浓度和温度在日食期间的扰动是 NmF2 出现增加的主要原因，尽管他们的结果并不完全一致。我们的结果也间接地表明只考虑来自顶部电离层的等离子体扩散并不足以引起 NmF2 的上升，而中性大气在日食期间的扰动对于产生 NmF2 上升应该是必须考

虑的。

§6.6 小结

利用 7 次日全食期间的 23 个测高仪台站的观测数据，我们统计分析了 foF2 响应随地方时（或天顶角）以及磁倾角的变化特征。统计结果表明日食期间 foF2 的响应有明显的地方时依赖，正午时 foF2 的下降幅度比上午和下午都大。统计结果还表明 foF2 的日食响应有明显的磁倾角依赖，foF2 的下降幅度随磁倾角的增大而减小。然后为了进一步研究背景峰高、地方时、太阳活动和磁倾角等物理参量对日食期间 F2 层响应的影响，我们设计了四个模拟实验来分别研究这些参量的作用。而且为了分析地方时效应，太阳天顶角和中性大气浓度的影响也分别被研究了。同样，为了分析太阳活动效应，太阳辐射和中性大气浓度的影响也分别被研究了。本文的主要贡献是发现日食期间各观测的 NmF2 响应的差异主要可以归因于背景中性大气浓度不同而引起的 F2 层主要离子 O^+ 损失率的不同，如 F2 层响应的地方时和太阳活动依赖都可以从这个方向来解释。本文主要模拟结果小结如下：

1. 背景峰高越高导致 F2 层峰值浓度下降幅度越小，因为日食期间 F 层电子浓度响应随高度增加而减少。

2. F2 层电子浓度对日食的响应有明显的地方时依赖：F2 层电子浓度响应在正午最大，并随天顶角增大而减小。这个地方时效应主要来源于中性大气浓度的地方时差异，而不是太阳天顶角的地方时差异。

3. F2 层电子浓度对日食的响应有明显的太阳活动依赖：F2 层电子浓度响应随太阳活动增强而增大。这个太阳活动效应并不是由太阳辐射本身的增大而产生的，而是由高太阳活动期间背景中性大气浓度的增强引起的。

4. 磁倾角对中高纬 F2 层日食响应有重要的影响。磁倾角越大会导致越多等离子体向下输运从而部分弥补 F2 区的等离子体损失，进而使该地区的电子浓度下降幅度越小。

第七节 电离层日食响应的纬度依赖

前面几节我们重点研究了电离层不同高度区域的日食响应特征,以及这些响应随背景大气、背景太阳辐射等的变化。电离层有显著的纬度变化,不同纬度区域由不同的动力学过程控制。那么在日食期间,这些动力学过程势必也会影响电离层日食响应,或者日食的发生也会改变某些动力学过程,这些改变又反过来影响电离层日食响应。也就是说不同纬度区域会出现不同的电离层日食响应过程。基于此考虑,本节将重点研究电离层日食响应的纬度依赖特征。在本节中,首先通过统计分析 1973 至 2006 年 15 次日食期间的测高仪观测数据和 1999 年至 2006 年 6 次日食期间的 GPS TEC 观测数据,我们研究了电离层 F2 层临频 foF2 与总电子含量 TEC 对日食响应的纬度依赖特性。然后我们利用理论电离层模式 TIME-IGGCAS 对电离层日食响应的纬度变化进行了模拟研究。为了模拟此纬度依赖,我们让日全食发生地点从北纬 0 度一直移动到北纬 60 度,每次间隔 5 度,因此模式被运行了 13 次。

§7.1 引言

电离层等离子体行为有明显的纬度差异。磁赤道及低纬地区电离层行为主要受到喷泉效应影响。在白天,垂直向上的 $E \times B$ 漂移作用会把磁赤道附近低高度等离子体输运到更高高度,这导致磁赤道的 F2 层峰值高度远高于其它地区。被抬升的等离子体在重力及压力梯度等的作用下沿磁力线扩散到赤道两边区域,在磁纬约 ± 15 度的地方形成两个电子浓度峰值,这就是赤道离化异常 (EIA)。如一些学者所述 (Cheng et al., 1992; Tsai and Liu, 1999; Sridharan et al., 2002; Tomás et al., 2007; Adeniyi et al., 2007), 这些动力学过程也同样对低纬电离层的日食响应有重要的影响。通过分析主要 TEC 所在的位置,其发生时间以及下降幅度, Tsai and Liu (1999) 认为喷泉效应的变化是低纬 TEC 变化的重要控制因素。Sridharan et al. (2002) 对 1999 年 8 月 11 日黄昏附近发生在印度上空的日全食进行研究,观测结果显示日食后 F 层虚高出现巨大的抬升,他们的分析结果表明这个巨大 F 层虚高的抬升来自于日落后更大的垂直漂移,而这个更大垂直漂移则是由于 F

区发电机的负载——E 层电子浓度的迅速减小，从而产生更大的电场及相应的 $E \times B$ 漂移。Tomás et al. (2007) 分析了 2005 年 4 月 8 日日食期间来自欧洲 CHAMP 卫星的电离层和热层观测数据，他们发现日食期间赤道上空的等离子喷泉效应有很大的增强，其结果有点类似日落反转增强的情况。基于对 200 公里以上高度电子浓度及 F2 层临频 foF2 随时间变化的分析，Cheng et al. (1992) 认为赤道异常区 (EIA) 附近 F2 层的日食响应不仅受到当地的太阳辐射变化的影响，也受到磁赤道地区太阳辐射变化的影响，并且喷泉效应在低纬电离层日食响应中发挥了重要的作用。

在中高纬度地区，更大的磁倾角将会导致更大的来自顶部电离层的等离子体扩散，这会影响 F2 层的日食响应过程。Evans (1965b) 发现在 1963 年 7 月 20 日的日全食期间，有三个测高仪台站都观测到 foF2 上升的日食响应特征。他把这个 foF2 上升行为归因于很大的来自顶部电离层的等离子体下行扩散通量，并认为这三个地方的大磁倾角是产生大等离子体扩散的主要因素。Salah et al. (1986) 表明日食期间 400 公里以上的电子浓度增加是由于等离子体的压缩效应导致的，而这个压缩效应是由于电子温度 T_e 的显著下降而产生的。在上一节中，我们利用观测数据和电离层模式模拟分析了日食期间磁倾角对电离层响应的影响。结果表明磁倾角越大会导致越多的等离子体向下输运，这些下行等离子体通量会部分弥补 F 区的等离子体损失，使 F 区电子浓度降幅减小。

在本次研究中，我们利用 1973—2006 年十五次日食事件的测高仪观测数据和 1999—2006 年六次日食事件的 GPS TEC 观测对电离层响应的纬度特征进行统计分析。为了进一步研究日食响应的纬度依赖，我们通过一个理论电离层模式对此进行了模拟实验。模式被运行了十三次，其日全食分别发生在 $0^\circ N$, $5^\circ N$, $10^\circ N$, ..., $60^\circ N$ 等 13 个纬度区域。为了确认 $E \times B$ 垂直漂移对低纬电离层日食响应的影响，我们模拟了不考虑 $E \times B$ 漂移的情况。

表 7.1 15 次日食期间各测高仪台站的位置以及日食食分和发生时间

日期 年/月/日	台站 代码	地理 经度	地理 纬度	地磁 经度	地磁 纬度	食分	地方时
1970/3/7	WP937	284.5	37.9	355.1	48.6	0.99	13.66
1970/3/7	GB926	281.8	26.6	352.3	37.2	0.84	13.17
1973/6/30	DKA14	341.6	14.8	56.1	21.4	0.88	9.33
1973/6/30	OU012	358.4	12.3	71.6	16.2	0.77	11.24

1976/4/29	SV256	58.6	56.4	139.9	48.8	0.50	15.46
1976/4/29	GK156	44.3	56.1	127.9	50.4	0.51	14.21
1976/4/29	MO155	37.3	55.5	121.7	50.9	0.51	13.68
1976/4/29	RV149	39.7	47.2	120.7	42.5	0.73	13.97
1976/4/29	TB142	44.8	41.7	123.7	36.3	0.90	14.49
1976/4/29	EB040	0.3	40.8	81.1	43.3	0.62	10.01
1976/4/29	AS237	58.3	37.9	135.1	30.6	0.96	15.79
1979/2/26	OT945	284.1	45.4	354.3	56.1	0.81	12.22
1979/2/26	BC840	254.7	40.0	319.8	48.6	0.92	9.35
1980/2/16	DH328	77.2	28.6	150.2	18.9	0.64	15.45
1981/7/31	KB548	135.1	48.5	202.2	38.7	0.91	12.86
1981/7/31	MG560	151.0	60.0	212.7	51.5	0.74	14.06
1981/7/31	KR250	73.1	49.8	150.3	40.7	0.97	7.33
1981/7/31	NS355	83.2	54.6	159.5	44.7	0.98	8.25
1981/7/31	SV256	58.6	56.4	139.9	48.8	0.81	6.57
1981/7/31	IR352	104.0	52.5	176.2	41.8	0.93	9.92
1981/7/31	TK356	84.9	56.5	161.2	46.5	0.94	8.41
1983/6/11	VA50L	141.3	-2.7	212.5	-12.3	0.89	15.33
1983/6/11	TV51R	146.7	-19.3	220.4	-28.5	0.73	15.62
1983/12/4	OU012	358.5	12.4	71.6	16.2	0.65	12.31
1984/5/30	WP937	284.5	37.9	355.1	48.6	0.99	11.58
1987/9/23	OK426	127.8	26.3	196.9	15.5	0.98	10.92
1987/9/23	YG431	130.6	31.2	199.1	20.6	0.83	11.05
1987/9/23	TO535	139.5	35.7	206.7	25.7	0.57	11.78
1987/9/23	VA50L	141.3	-2.7	212.5	-12.3	0.74	13.44
1988/3/18	YG431	130.6	31.2	199.1	20.6	0.63	10.71
1988/3/18	WK545	141.7	45.4	207.3	35.5	0.61	12.11
1995/10/24	09429	106.3	29.5	177.0	18.1	0.56	10.89
1995/10/24	CL424	121.2	24.9	190.9	13.8	0.48	12.52
1998/2/26	BJJ32	295.3	32.4	7.7	43.0	0.52	14.29
1999/8/11	LD160	30.7	60.0	118.4	56.2	0.60	13.01
1999/8/11	UP158	17.6	59.8	106.8	58.3	0.67	11.87
1999/8/11	MO155	37.3	55.5	121.7	50.9	0.65	13.64
2005/10/3	FF051	358.2	51.7	83.5	54.2	0.68	8.85
2005/10/3	RL052	358.7	51.6	83.9	54.0	0.68	8.85
2005/10/3	VT139	17.9	40.7	98.4	40.0	0.67	10.52
2006/3/29	VT139	17.9	40.7	98.4	39.9	0.69	11.92
2006/3/29	MO155	37.3	55.5	123.20	50.4	0.64	13.86
2006/3/29	AS00Q	345.6	-7.9	56.2	-2.0	0.86	7.68

§7.2 电离层观测

为了统计分析 F2 层临频 foF2 对日食响应的纬度依赖, 我们选择了 1973 年到 2006 年 15 次日全食期间的测高仪观测数据。表 7.1 列出了这些台站的位置信息及日食相关信息。为了减少非日食效应对数据的干扰, 尽量使用日食效应比较明显的观测数据, 观测点上空 200 公里高度处日食程度超过 50% (即光球面积

在最大食分时被遮盖超过 50%) 的观测数据才被选用。确定日食效应比较普遍或典型的方法是计算日食日 $foF2$ 与参考日的背景值之间的偏差, 记作 $\Delta foF2$ 。同时, 为了更好地比较不同纬度的日食响应情况, 本文计算了 $foF2$ 的百分比变化 ($PfoF2$), $PfoF2$ 等于 $foF2$ 的绝对变化 $\Delta foF2$ 除以相应参考日的 $foF2$ 值。在本文中, 每个台站的月中值被当作参考日的背景值。由于我们考虑的都是常规的日食响应, $foF2$ 在日食时会出现下降, 所以 $PfoF2$ 均为负值。那么 $PfoF2$ 的绝对值 $|PfoF2|$ 的大小就反应了 F2 日食响应的程度的强弱。因此对于每个台站观测, 我们可以用日食期间 $|PfoF2|$ 的最大值来代表本次日食观测的 F2 层日食响应程度。本文所有数据均来自日偏食区的观测, 其日食程度从 51% 到 92% 不等。在相同的地球物理参数条件下, 一个日偏食引起的 $foF2$ 改变幅度可以假定与太阳辐射通量被遮挡的百分比成正比。因此为了比较不同日食程度引起的电离层响应, 在上面的假设条件下, 对每次观测事件, 我们把日偏食引起的 $foF2$ 变化归化为由日全食引起的 $foF2$ 变化。由于地磁纬度对于研究电离层动力学和相应机制更为合理, 本文采用地磁纬度进行电离层日食响应的纬度依赖研究。

为了进一步研究总电子含量 TEC 对日食响应的纬度依赖, 我们收集了 1999 年到 2006 年间 6 次日全食事件起降的 GPS TEC 数据进行统计研究。为了方便比较, 所有的观测数据斜 TEC 都转换成垂直 TEC。为了减少这种转换带来的误差并避免其他未知的干扰, 仅使用仰角大于 40 度的 GPS 接受站的数据。TEC 数据的处理和分析过程与前面描述的 $foF2$ 数据的相同。首先, 计算日食日 TEC 相对参考日背景值的偏离值, 其结果记作 ΔTEC 。然后计算 TEC 的百分比变化, 即为 TEC 的绝对变化 ΔTEC 除以相应参考日的 TEC 值。与 $foF2$ 数据的选择规则一样, 仅使用 200 公里高度处日食程度超过 50% 的观测数据。每次电离层日偏食响应也都被归一到日全食响应, 并且用 $|PTEC|$ 的最大值来代表该次观测的 TEC 响应程度。

基于这些转化和归一后的数据, 我们把 $PfoF2$ 和 $PTEC$ 的纬度依赖特征分别画在图 7.1a 和 7.1b 中。如图 7.1a 所示, $foF2$ 对日食的响应有明显的纬度变化: 最大的 $foF2$ 日食响应出现在中纬 30 度左右, 而最小的 $foF2$ 日食响应则发生在低纬 15 度左右, 即 EIA 所在区域。图 7.1b 也显示 TEC 日食响应有类似的两个特征。另外, 我们发现对于纬度大于 35 度的中纬地区, TEC 的日食响应随纬度

增加而迅速减小。但是 foF2 日食响应并没有如此明显的趋势。

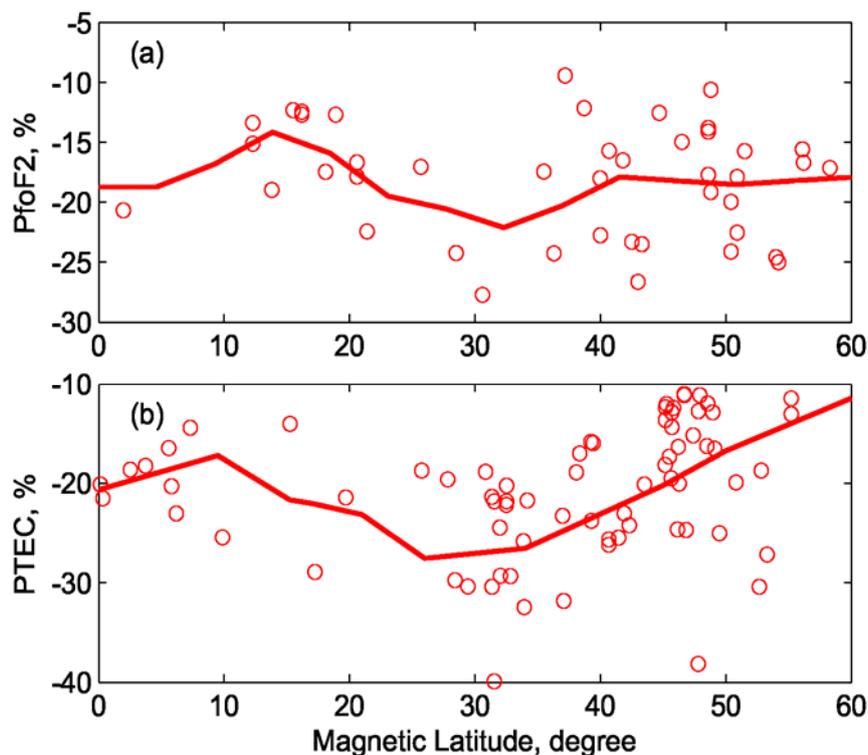


图 7.1 foF2 与 TEC 响应的纬度变化。foF2 数据来自 1973 - 2006 年 15 次日全食期间的众多测高仪观测。TEC 数据来自 1999 - 2006 年 6 次日全食期间的 GPS 观测。两条粗实线是 foF2 和 TEC 数据的曲线拟合结果。

上面的观测结果表明，电子密度的日食响应有显著的纬度依赖。以往的研究表明 F2 层峰高的日食响应也有纬度变化。比如一些观测结果(Cohen et al., 1984; Boitman et al., 1999; MacPherson et al., 2000; Afraimovich et al., 2002; Farges et al., 2003) 显示日食期间中纬地区的 F2 层峰高会出现大约 20 公里的上升，而赤道及低纬地区的峰高会出现更大程度的上升（如 Sridharan et al., 2002; Adeniyi et al., 2007）。图 7.2 给出了四个低纬地区 F2 层虚高在日食期间以及在控制日的变化。从图中可以看出，在最大日食程度发生后不久虚高上升到最大，最大升幅达到 80 km。还有一个显著的特征就是峰高上到最大值后迅速回落并在日食结束后回落到比控制日峰高还低几十公里的高度。

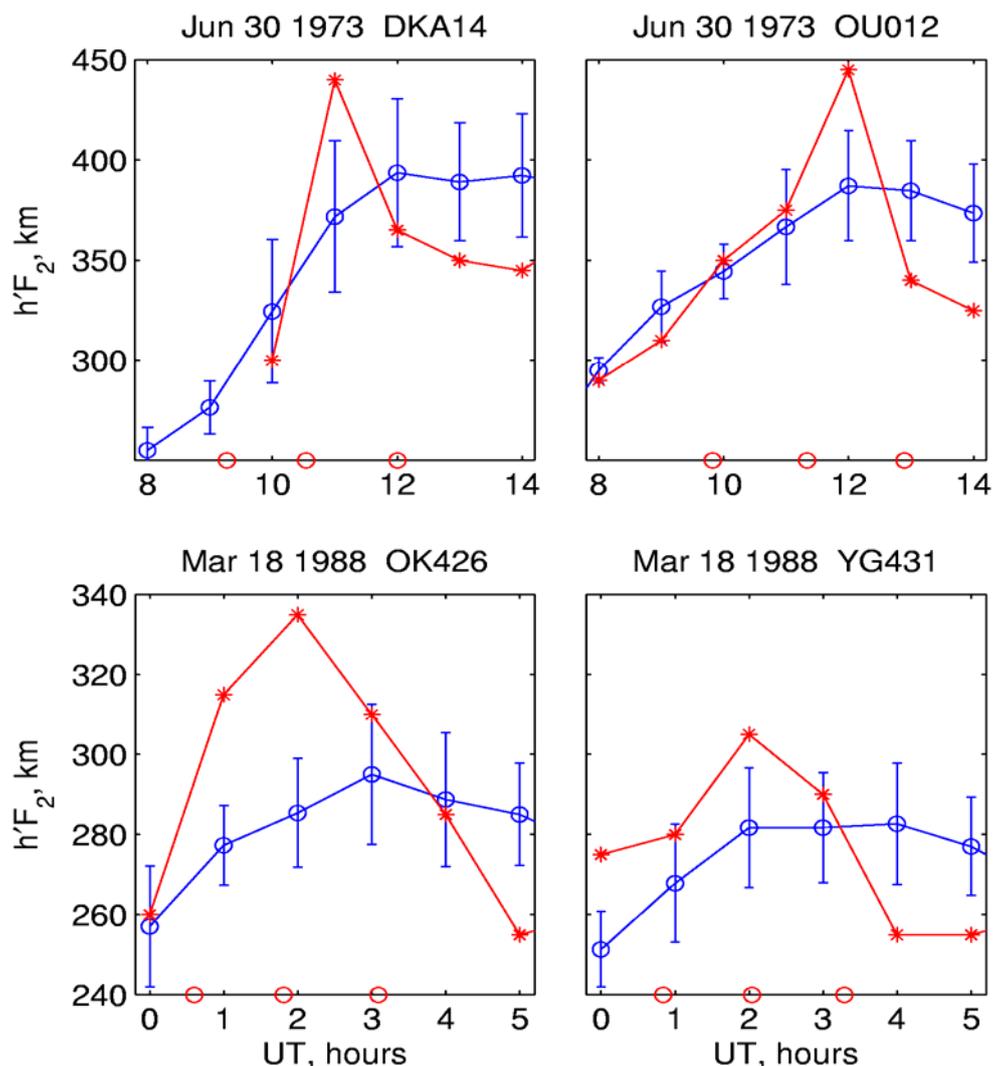


图 7.2 日食期间四个测高仪台站虚高变化 (星号线), 其月中值也画在图中 (实圆线)。X 轴上三个圆圈分别指示日食开始、食分最大、以及日食结束的时间。

§7.3 日食响应的纬度变化模拟

为了模拟研究电离层日食响应的纬度依赖, 我们分别模拟了十三个纬度区 (0°N , 5°N , 10°N , 15°N , \dots , 60°N) 的电离层日食响应。模式中, 太阳活动指数 F107 设为 140, 地磁活动指数设为 $A_p=5$ 。为了更清楚地检验低纬的电动力学过程对日食的影响, 我们让日全食开始于 0900 LT, 在约 1030 LT 达到最大日食, 结束于约 1200 LT, 因为白天的 $E \times B$ 垂直漂移这个期间出现最大值 (Scherliess and Fejer, 1999)。为了获得日食导致的电离层变化, 我们还模式了不发生日食的情况, 得到的结果作为参考日的背景值。

根据模拟得出的结果, 我们计算了日食期间电子浓度 N_e , F2 层峰值浓度

NmF2 及总电子含量 TEC 相对于参考日背景值的百分比变化, 分别记作 PNe , $PNmF2$ 和 $PTEC$, 同时还计算了日食日的 F2 层峰值高度值与参考日的差值, 记作 $\Delta hmF2$ 。除了电子浓度外, 电子温度对日食也有显著的响应, 因为日食会导致光电加热急剧减少 (Evans, 1965a; Salah et al., 1986; Robel et al., 1986; Boitman et al., 1999)。因此本文也计算了日食日的电子温度 Te 值与参考日的差值, 记作 ΔTe 。

§7.4 模拟结果及分析

§7.4.1 电子密度

对于发生在磁纬 $5 \times I - 5$ 度 ($I=1, 2, 3, \dots, 13$) 的电离层日食响应, 我们用日食过程中 $|PNmF2|$ 和 $|PTEC|$ 的最大值 (即 NmF2 和 TEC 的最大百分比下降) 表征在该纬度区域 NmF2 和 TEC 响应的程度, 相应的结果分别画在图 7.3a 和 b 中, 用 $\Delta hmF2$ 的最大值 (即 hmF2 的最大上升值) 表征在纬度区域 hmF2 响应的程度, 其结果画在图 7.3c 中。模拟结果表明, NmF2 和 TEC 响应的纬度变化有 4 个明显的特征: (1), 最大日食响应出现在中纬 40 度; (2), 低纬 ($0^\circ - 25^\circ$) 的日食响应比中纬 ($30^\circ - 50^\circ$) 小; (3), 赤道异常 EIA 地区 ($10^\circ - 20^\circ$) 的响应比磁赤道地区 ($0^\circ - 5^\circ$) 略小; (4), 对于 40 度以上的中高纬地区, 日食随纬度的增加而减小。将模拟结果与观测结果比较, 我们可以发现两者纬度变化趋势基本一致, 但也有些差别, 比如观测数据表明 foF2 和 TEC 的最大响应均发生在大约磁纬 30 度的地方, 而模拟结果显示 NmF2 (对应与观测的 foF2) 和 TEC 最强响应分别出现在磁纬 40 度和 45 度附近。对于峰高 hmF2 的响应, 模拟结果显示: 最大 hmF2 抬升发生在磁赤道附近, 其最大抬升值达到近 100 公里; hmF2 抬升幅度随纬度增加而迅速减小, $\Delta hmF2$ 值从赤道的 100 公里降到中纬的约 20 公里。而且, 模拟结果表明在日食结束后 hmF2 会出现下降, 其降幅随纬度增加而减小, 从赤道的约 50 公里降到中纬的不到 10 公里。这些模拟结果与以前的观测结果基本一致, 以前的一些观测结果显示在日食期间中纬的 F2 层虚高或 F2 层峰值高度会在食甚或最大日食程度后一些时间出现小幅的大约 20 公里的上升, 同时 F2 层临频也会下降到最小值 (e.g., Cohen et al., 1984; Boitman et al., 1999; MacPherson et al., 2000; Afraimovich et al., 2002; Farges et al.,

2003)。一些对日食的模拟结果（如 Stubbe, 1970; Boitman et al., 1999; Le et al., 2008a, 2008b 等）也表明中纬 F2 层峰高在日食期间会出现一个小幅的上升，然而低纬尤其是磁赤道附近 F2 层峰高会出现更大的上升（如 Sridharan et al., 2002; Adeniyi et al., 2007 等）。

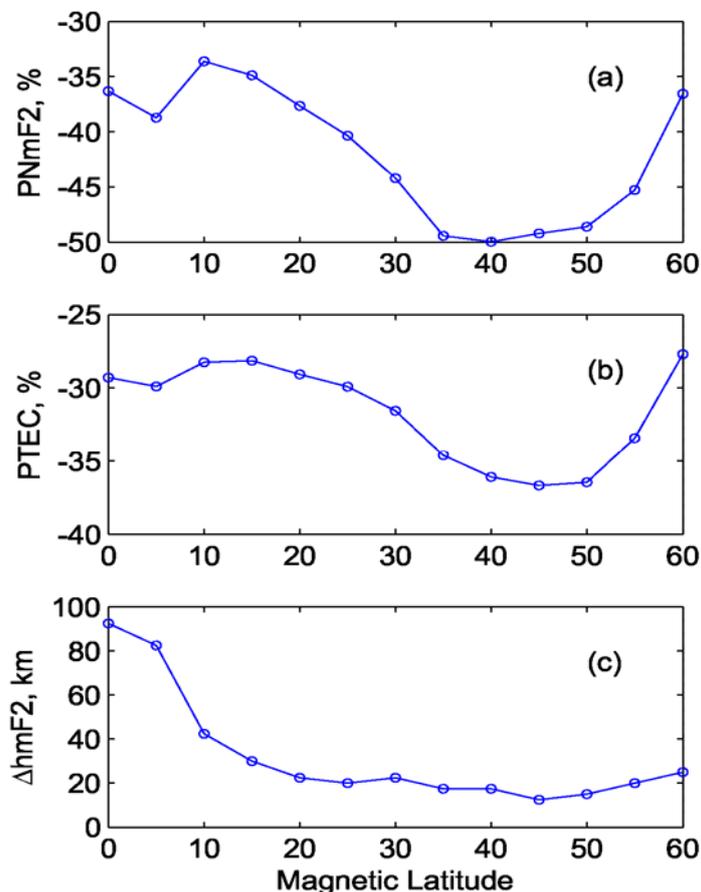


图 7.3 模拟的 NmF2 (a), TEC (b) 以及 hmF2 (c) 对日食响应的纬度依赖。每次模拟中，日全食发生在 $5 \times I - 5$ 的纬度 ($I=1, 2, 3, \dots, 13$)。

以上的分析表明电子密度响应有明显的纬度变化，按上面关于此纬度变化趋势的分析，我们把电离层响应在纬度上分为四个区域，分别为磁赤道区，赤道异常 EIA 区，中纬区和中高纬区。用纬度 0 度，15 度，40 度及 60 度分别代表这四个纬度区。图 7.4a—d 分别给出了日全食分别发生在相应的纬度区域时电子浓度百分比变化 PNe 随时间和高度的演化，

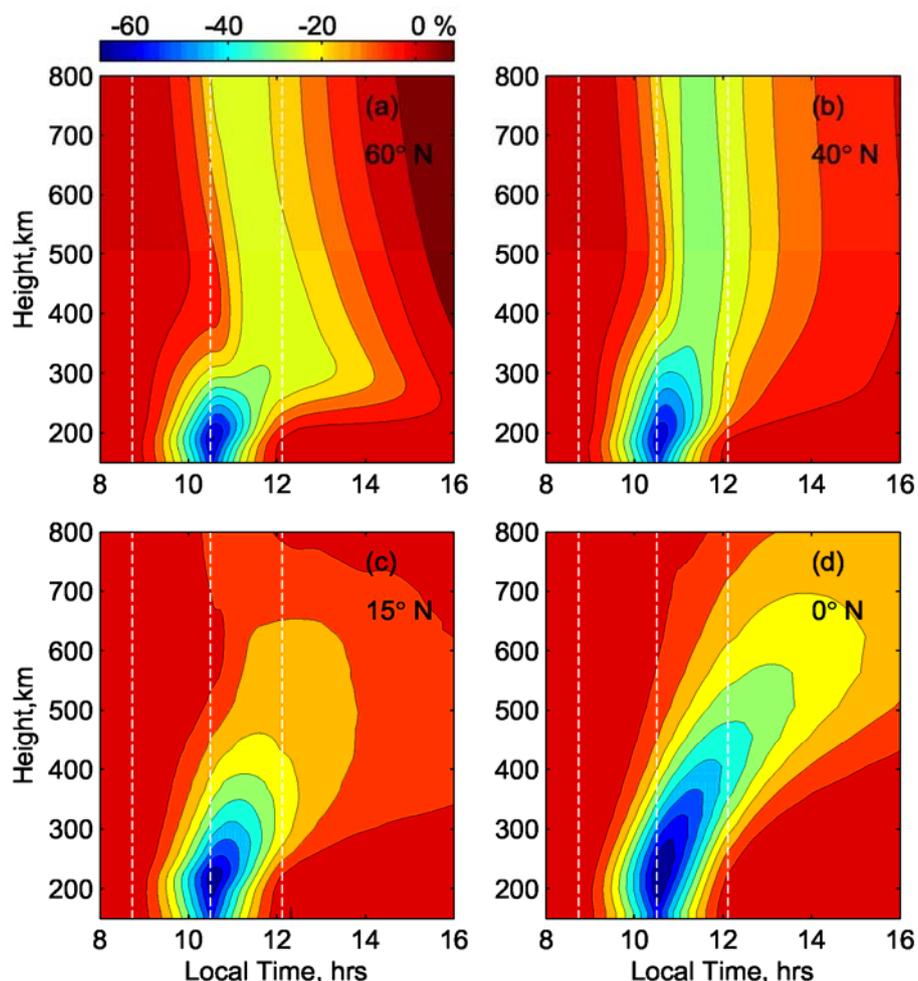


图 7.4 当日全食分别在中高纬 60°N (a)、中纬 40°N (b)、赤道异常区 15°N (c) 以及赤道区 0°N (d) 时, PNe 随高度和时间的演化。三条竖虚线分别指示日食的开始、食甚及日食结束时间。

如图 7.4 所示, 200 公里以下高度区域的电子浓度变化并没有明显的纬度差异。此高度范围的电子浓度的时间演化基本与日食期间太阳辐射变化过程同步。对于所有的纬度区域而言, 最大电子浓度下降均出现在 200 公里附近, 但不同纬度有少许差别, 如在北纬 60 度为 190 公里, 而在赤道则约为 230 公里。因为不管在什么纬度电离层低高度 (E 区和 F1 区) 都主要受光化学过程控制, 所以日食期间太阳辐射的减小会直接降低该区域的光电产生率并因此导致电子浓度下降。由于该区域非常小的时间常数或等离子体寿命, 电子浓度响应的延迟也非常小, 一半不超过 2 分钟。

与低高度日食响应结果不同, 高高度对日食的响应有明显的纬度依赖。从图 7.4 我们可以看到中纬 (包括 40 度和 60 度) 的响应与低纬 (包括 15 度和 0 度)

的响应有非常大的差别。对于中纬地区，300 公里以上高度几乎有一致的电子浓度变化特征，在此高度区域电子浓度下降幅度为 30—35%，最大电子浓度下降出现的时间与食甚的延迟大约为 1 个小时。中纬 F2 层电离层行为主要受等离子扩散过程控制。理论上讲，扩散过程趋向于平衡各不同高度层的等离子体行为，而这个扩散过程的平衡效应会导致日食期间 F2 层顶部高度区域具有相似的电子浓度响应 (Rishbeth, 1968)。模拟结果显示中高纬 60 度与中纬 40 度的电子浓度响应也存在一些差别。对于在 200 公里及以上的所有高度区域，60° N 的电子浓度下降幅度比 40° N 的下降幅度小，然而在 60° N 的 250—400 公里区域电子浓度响应的延迟时间更长，响应的持续时间也 longer。中高纬 60° N 与中纬 40° N 之间的这些差异可能主要与磁倾角大小有关，磁倾角越大会导致日食时出现更大的下行等离子通量，这会部分弥补 F 区的电子浓度损失。也即是说，与中纬 40 度的结果比较，中高纬 60 度的 NmF2 和 TEC 下降幅度更小，这主要归因于由更大磁倾角导致的更大下行等离子通量对 F2 区电子浓度损失的弥补。有关中纬地区磁倾角效应的详细讨论参见下节。

对于低纬的电子浓度响应，从图 7.4c 和 4d 我们可以看到电子浓度响应随高度增加而逐渐减小。由于等离子体主要沿磁力线方向运动，而低纬接近水平的磁力线会导致了接近水平的扩散通量，如此方向的扩散通量并不能像中高纬接近垂直的扩散一样起到平滑各高度的电子浓度日食响应的作用。图 7.4c 和 4d 显示最大电子浓度响应时间相对食甚的延迟时间随高度增加而迅速增加，这就导致最大电子浓度响应所在高度随时间增长而逐渐上移。这些模拟结果表明 F 区的电子浓度日食响应首先从低高度开始，然后逐渐向上传播。这一特征应该与 $E \times B$ 垂直漂移效应有关。比较图 7.4c 与 4d，我们可以发现赤道区和 EIA 区的日食响应存在一些差别。对于 300 公里以上高度区域，EIA 区的电子浓度响应明显比赤道区小。例如，在 1200 LT 时 EIA 区最大电子浓度下降发生在约 360 公里高度，其幅度约为 23.5%，而赤道区最大电子浓度下降发生在约 405 公里高度，其幅度约 39%。关于低纬的这些响应特征将在下节详细讨论。

从图 7.4b 显示的中纬响应结果与图 7.4c 与 4d 显示的低纬响应结果的比较中我们可以看到，对于 400 公里以下高度，低纬电子浓度响应比中纬大。需要注意的是，在参考日的 1030 LT (即日食日的食甚时刻) 40° N, 15° N 及 0° N 的峰值

高度分别为 245 公里, 310 公里及 375 公里。这表明, 由于 $E \times B$ 垂直漂移的作用, 低纬的峰值高度远大于中纬的峰值高度。因此尽管低纬的低高度有更大电子浓度响应, 但由于低纬的峰值高度远高于中纬地区, 而电子浓度响应随高度增加而减小, 因此该区域的 NmF2 响应依然比中纬的 NmF2 响应小。另外, 与中纬相比低纬峰高附近及以上高度区域的电子浓度下降更小, 这会导致该纬度的 TEC 下降幅度更小。

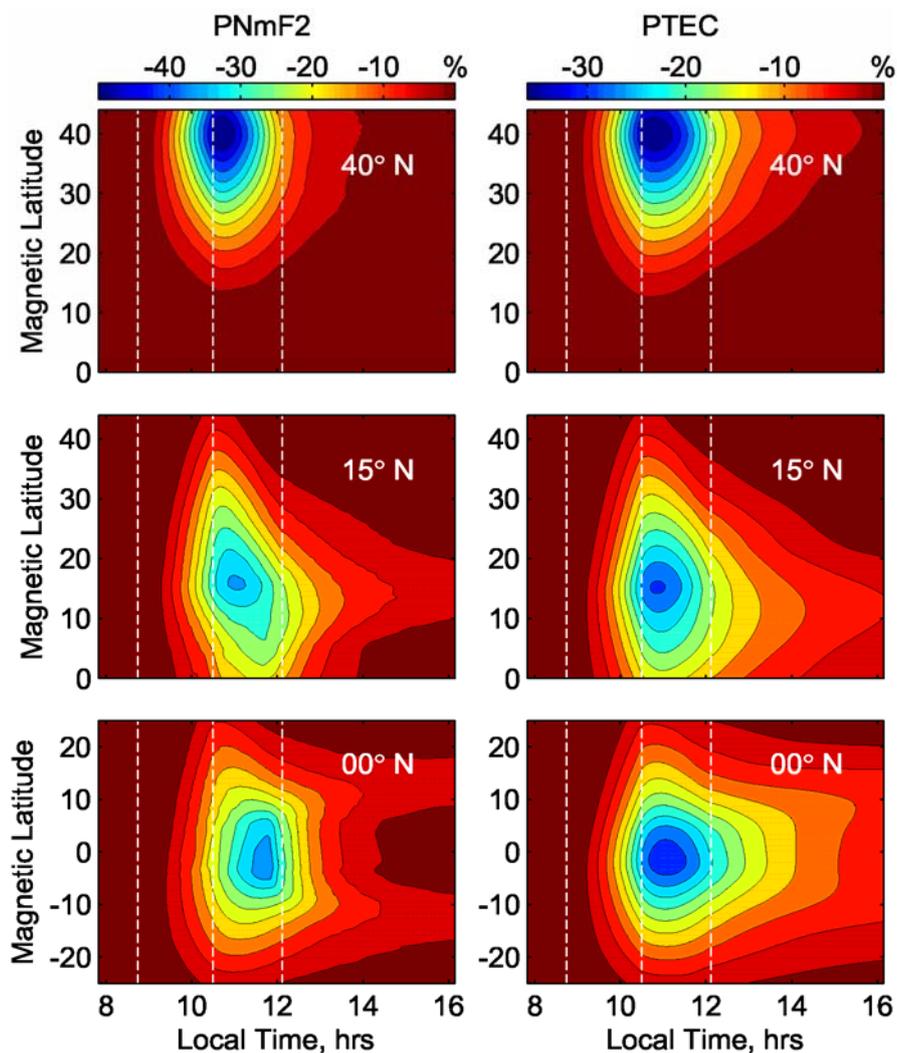


图 7.5 当日全食分别发生在中纬 40°N 、赤道异常区 15°N 以及赤道区 0°N 时, 相应区域的 PNmF2 与 PTEC 随时间的演化。三条竖虚线分别指示日食的开始、食甚及日食结束时间。

图 7.5 给出了当日全食发生在中纬 (40°N)、赤道异常 EIA 区 (15°N) 以及赤道区 (0°N), NmF2 和 TEC 的百分比变化 PNmF2 与 PTEC 随时间的演化。中高纬 (60°N) PNmF2 与 PTEC 随时间的演化结果与中纬基本一致, 所以就没

有画在图 7.5 中。如图所示，中纬的 NmF2 和 TEC 百分比下降比低纬大，但是 NmF2 和 TEC 响应的持续时间在低纬更长一些。而且当日全食发生在赤道区，EIA 区的日食响应的持续时间也还是最长的。模拟结果表明 NmF2 响应的延迟时间在赤道区最长，约为 70 分钟，而在中纬最短，约为 13 分钟。TEC 响应的延迟时间也是在赤道区最长，约为 36 分钟，而在中纬最短，约为 13 分钟。对于同一个日全食事件——2006 年 3 月 29 日日全食，Adeniyi et al. (2007) 给出的观测结果显示在一个低纬地区 foF2 响应的延迟时间约为 40 分钟，Afraimovich et al. (2007) 给出的观测结果显示在一个中纬地区 TEC 响应的延迟时间约为 11 分钟。我们的模拟结果与这些观测结果基本一致，即低纬的电离层响应延迟时间明显比中纬地区长。通过 NmF2 日食响应和 TEC 日食响应的比较，我们发现对于所有纬度地区 TEC 响应的持续时间都比 NmF2 响应更长。我们知道，TEC 是电子浓度的高度积分值。如图 7.4 所示，在食甚前，低高度的电子浓度响应远大于高高度的响应，因此在此期间 TEC 响应主要来源于低高度的电子浓度响应；在食甚发生后，高高度电子浓度响应比低高度的响应大，因此在此期间 TEC 响应主要来源于高高度的电子浓度响应。由于高高度具有更长的等离子体时间常数，所以其日食响应也具有更长的持续时间。因此高高度更长时间的电子浓度响应可以认为是 TEC 响应持续时间更长的主要原因。

§7.4.2 电子温度

日食期间除了电子浓度外，电子温度也会出现比较显著的变化，因为日食期间光电子加热率会急剧减小。图 7.6 给出了当日全食分别发生在中高纬 (60°N)，中纬 (40°N)，赤道异常 EIA 区 (15°N) 及赤道区 (0°N) 时电子温度变化 ΔT_e 随高度和时间的分布特征。如图 7.6 所示，电子温度对日食的响应有明显的纬度依赖。中纬（包括 40°N 和 60°N ）的电子温度响应与低纬的 (15°N 和 0°N) 响应有很大区别。对于中纬地区，日食开始发生后不久，所有高度的电子温度都出现了下降，降幅随高度变化不大，电子温度变化几乎与日食食分同步，即在食甚时出现最大下降。类似的结果已经被一些文章报道过（如 Evans, 1965a; Salah et al., 1986; Robel et al., 1986; Boitman et al., 1999; Le et al., 2008a）。然而，与中纬电子温度响应情况相比，低纬的电子温度下降幅度更小，尤其是 300 公里以上高度区域的响应。而且模拟结果表明在 EIA 区上空 300—450 公里范围和磁赤道上

空 400—600 公里高度区域都只有很小的电子温度响应。利用 CHAMP 卫星在 2005 年 4 月 8 日对磁赤道附近的观测，Tomás et al. (2007) 报道在磁赤道上空 370 公里高度并没有发现明显的电子温度对日食的响应。Van Zandt et al. (1960) 也报道了与此类似的观测结果。

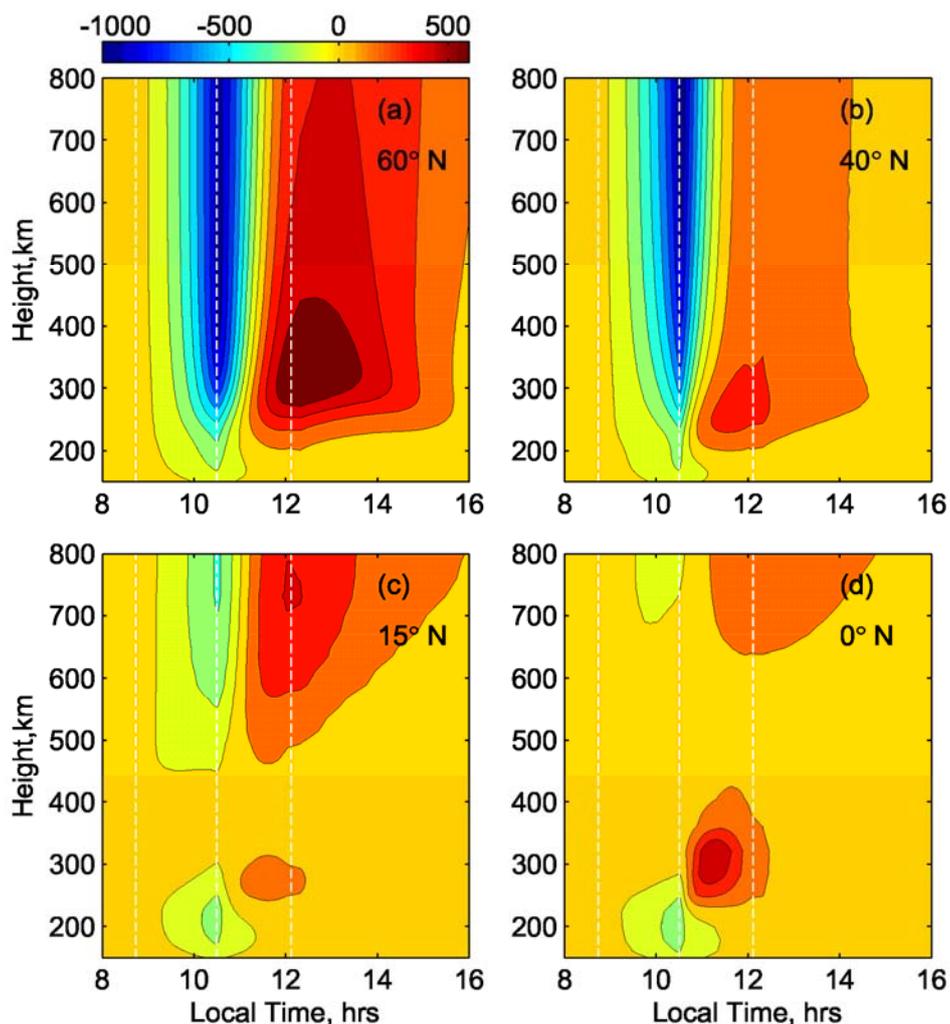


图 7.6 同图 7.4，但为电子温度变化 ΔT_e 的结果。

我们知道，大部分光电子都是在 300 公里以下的高度由太阳辐射离化稠密的中性大气而产生的，其中一部分光电子加热局地电离层电子，一部分光电子沿磁力线向上运动并加热更高高度的电子，甚至还有一部分光电子能够沿磁力线跨过磁赤道而到达共轭半球并加热那里的电子。也就是说，300 公里以上高度的光电加热主要来自其共轭低高度沿磁力线向上输运的光电子的贡献。对于中纬地区，由于有较大的磁倾角，磁力线较为垂直，那么同一根磁力线上的高高度和它的共

轭低高度的纬度值差别很小。因此当一个日全食发生在中纬的时候，高高度会出现显著的电子温度下降，因为它的共轭低高度的光电产生率出现了巨大的减少。而对于低纬地区，由于磁倾角较小，磁力线较为水平，那么同一根磁力线上的高高度和它的共轭低高度的纬度值会有较大的差别。例如，对于磁赤道上空 800 公里高度，它的共轭低高度 300 公里位于纬度 18 度的地方。因此当一个日全食发生在低纬的时候，其高高度的电子温度并不会出现明显的下降，因为它的共轭低高度并不在全食区，而是处于食分较小的偏食区，这就导致低高度的光电加热率降幅并不大，那么向上输运的光电子不会出现显著的下降。

§7.5 讨论

§7.5.1 垂直漂移效应

为了进一步考察喷泉效应对低纬电离层对日食的响应的影响，我们模拟了在不考虑 $E \times B$ 垂直漂移的情况下低纬电离层对日食的响应。图 7.7 给出了当日食发生在磁赤道时 $NmF2$ 、TEC 及 $hmF2$ 的响应随时间的演化。左边一列为普通条件即考虑 $E \times B$ 垂直漂移的模拟结果，而右边为不考虑 $E \times B$ 垂直漂移的模拟结果。从图 7.7 我们可以发现这两种情况下的模拟结果最显著的一个差别是：不考虑 $E \times B$ 垂直漂移时峰高 $hmF2$ 与中纬的响应一样只有很小的上升。这表明日食期间赤道区 $hmF2$ 的巨大上升主要是由 $E \times B$ 垂直漂移驱动的。模拟结果也表明如果不考虑 $E \times B$ 垂直漂移，赤道地区的 $NmF2$ 和 TEC 下降幅度都会明显减小，而 EIA 地区 $NmF2$ 和 TEC 的日食响应持续时间也会明显减少。图 7.8 给出了当日食发生在磁赤道时 EIA 区和磁赤道区不同高度（从 200 公里到 500 公里）的电子浓度响应随时间的变化。细线代表考虑 $E \times B$ 垂直漂移的情况，粗线代表不 $E \times B$ 垂直漂移的情况。如图 7.8 所示，200 公里的电子浓度并不受 $E \times B$ 垂直漂移的影响。然而不考虑 $E \times B$ 垂直漂移的话，更高高度的日食响应则会弱很多。模拟结果表明当 $E \times B$ 垂直漂移被考虑的时候，即使在日食结束后 EIA 区上空 400 公里和 500 公里高度的电子浓度并没有随时间增长而逐渐恢复，而是保持 10% 的下降幅度达数小时。

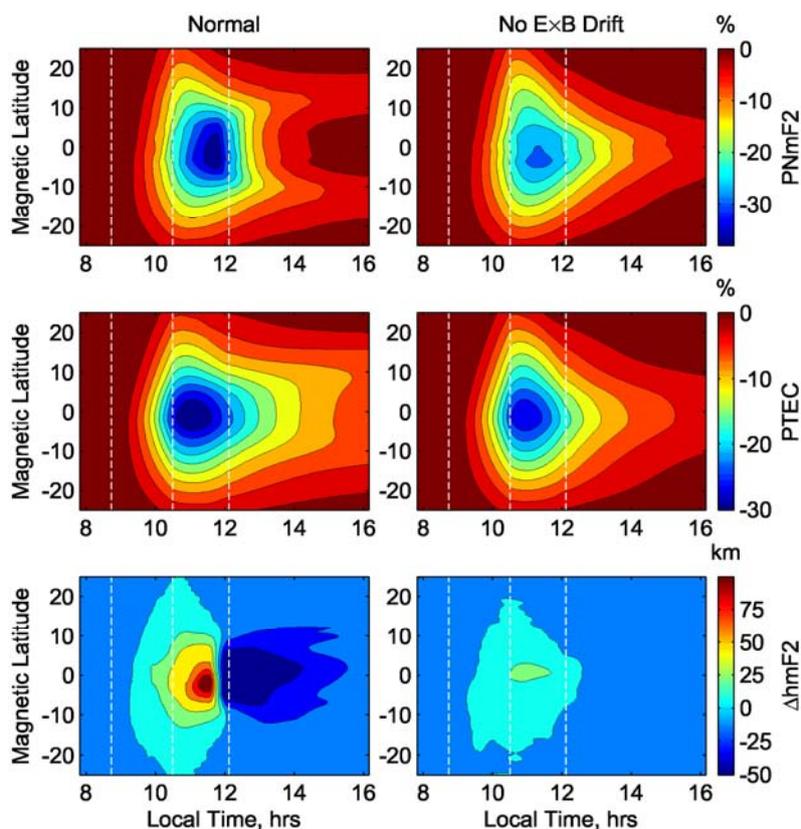


图 7.7 日全食发生在磁赤道时 NmF2、TEC 及 hmF2 的响应。左边为考虑 E×B 的结果，右边为不考虑 E×B 的结果。三条竖线分别指示日食开始、食甚、结束。

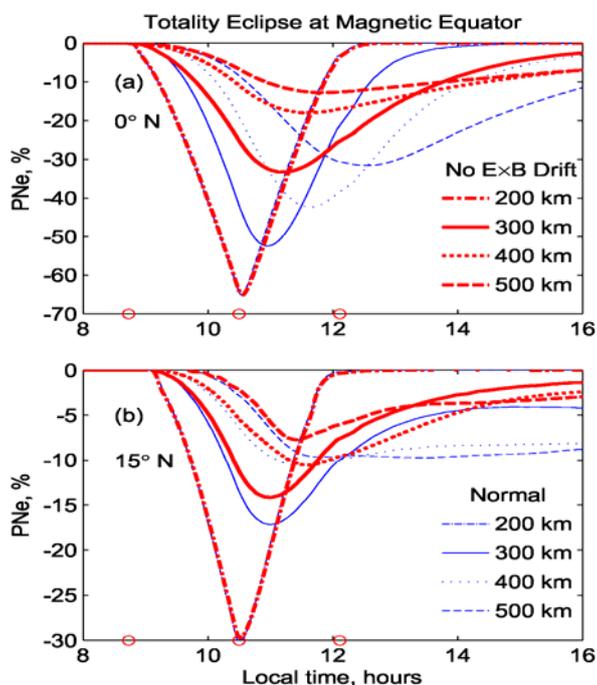


图 7.8 日全食发生在磁赤道时，赤道 0° N (a) 和赤道异常区 15° N (b) 不同高度随时间的变化情况。粗实线为考虑 E×B 的结果，细实线为不考虑 E×B 的结果。X 轴上的三个圈分别指示日食开始、食甚及结束。

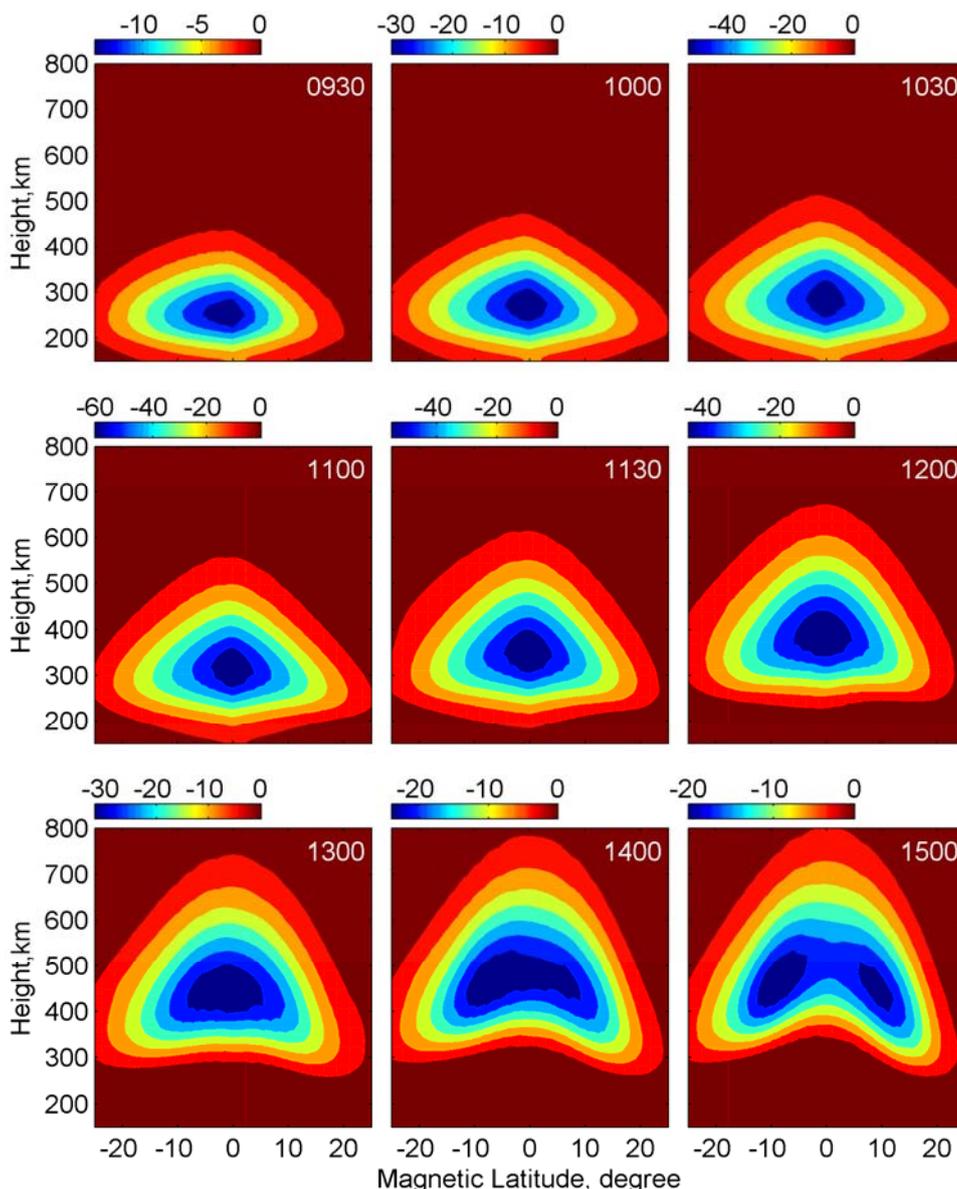


图 7.9 日食发生在磁赤道时，电子浓度绝对变化的高度纬度分布从 0930 LT 到 1500 LT 的演化过程。单位是 10^{10} el/m^3 。每个子图中的文字指示相应的地方时。

图 7.9 给出了当日全食发生在磁赤道时从 0930 LT 到 1500 LT 电子浓度绝对变化的时间演化。日食的开始时间为约 0900 LT，食甚时间为 1030 LT，日食结束时间为 1200 LT。从图 7.9 可以看到从日食初期到日食后几个小时最大电子浓度响应所在的高度随时间的增加而连续地上升，并且食甚后的上升速度比食甚前的上升速度大（如在食甚前此高度从 0930 LT 的约 250 公里上升到 1030 LT 的约 284 公里，而在食甚后此最大电子浓度响应高度从 1030 LT 的 284 公里上升到 1400 LT 的约 474 公里）。在食甚前，此高度的上升主要来自于垂直漂移的作用。但是在食甚后，所有高度的电子产生率随着太阳辐射的逐渐恢复也逐渐增加，并

且低高度电离层电子浓度对电子产生率增加的响应更快, 因为低高度主要受光化学过程控制。在等离子体的向上漂移与电子产生率的恢复的共同作用下, 最大电子浓度下降所在高度会更快地向上移动。F2 层峰值高度以下的电子浓度下降幅度远大于峰值高度以上的降幅, 由此导致电子浓度高度剖面发生很大的改变并导致峰高 h_mF2 的位置出现巨大上升 (如图 7.7 所示, 在 1130 LT 峰高 h_mF2 出现了大约 100 公里的上升)。相反, 如果 F2 层峰值高度以上比峰值高度以下出现更大的电子浓度降幅, 电子浓度的高度剖面同样会发生改变并导致峰高 h_mF2 的位置向下移动 (如图 7.7 所示, 约 1210 LT 峰高 h_mF2 有大约 50 公里的下降)。

从图 7.9 我们也可以清楚地看到低纬赤道区电离层的日食响应能够通过喷泉效应逐渐向也两边 EIA 区传播。这个传播过程在 1400 LT 和 1500 LT 时刻较为明显, 尤其是在 1500 LT, 在 $\pm 10^\circ$ 上空 460 公里高度有两个比较大的电子浓度下降。EIA 区高高度的日食响应能够持续很长时间应该是由赤道区日食引起的电子浓度减少效应通过喷泉效应向 EIA 区传播导致的。由于赤道区本身电子浓度下降, 通过喷泉效应从赤道区向 EIA 区扩散的等离子体通量相对于参考日的背景值出现显著减少。但是当赤道区电子浓度出现减小的时候, 从赤道区到 EIA 区的等离子体扩散通量并不会立刻减少, 因为等离子体从赤道区到 EIA 区的扩散需要数小时。如图 7.8b 所示, 即使在日食完全结束后 EIA 区 400 公里和 500 公里的电子浓度并没有随时间而逐渐恢复, 而是保持了 10% 下降达数小时。

以上的讨论表明赤道电离层对日食的响应会受到 $E \times B$ 垂直漂移的强烈影响, 向上的等离子体垂直漂移会将低高度的巨大电子浓度耗空逐渐向上传播到更高高度, 从而导致高高度也有明显的电子浓度下降。而且, 赤道区电子浓度的减少效应也会通过等离子体喷泉效应传播到赤道异常 EIA 区并影响那里的电子浓度变化。

§7.5.2 磁倾角效应

如图 7.1 和图 7.3 所示, 观测结果和模拟结果均表明对于中高纬地区的日食响应, 纬度越大的地方 $NmF2$ 和 TEC 的衰减程度会更小。图 7.10 给出了当日全食分别发生在 $40^\circ N$, $50^\circ N$ 和 $60^\circ N$ 的纬度区时等离子体通量随高度和时间的变化。在此三个纬度的磁倾角分别为 55 度, 64 度和 72 度。正负等离子体通量分别表示上行和下行通量。如图所示, 三个纬度区域的下行等离子体通量都在食

甚附近达到最强，然后随时间逐渐减小并在日食结束后一段时间发生反向。在中纬，日食会导致电子温度出现明显下降（如图 7.6 所示），而温度的下降会降低等离子扩散平衡标高，由此引起下行的等离子体通量，这些下行等离子体通量会部分弥补低高度的电子浓度损失。在过去已经有很多关于此日食效应的报道（如 Evans, 1965b; Stubble et al., 1970; Salah et al., 1986; Boitman et al., 1999; Le et al., 2008a）。模拟结果表明这三个纬度区的等离子体通量变化也存在一些差别，其中最明显的一个特征就是纬度越高的地方它的下行等离子体通量也越大。我们知道，磁倾角效应是通过 $\sin^2 I$ （ I 为磁倾角）这样一个因子来控制等离子体扩散速率的，因此磁倾角越大会导致下行等离子体通量也越大。而更大的下行通量就会更大程度地缓解 F 区电子浓度下降幅度，由此导致出现更小的电子浓度下降（如图 7.3 所示）。

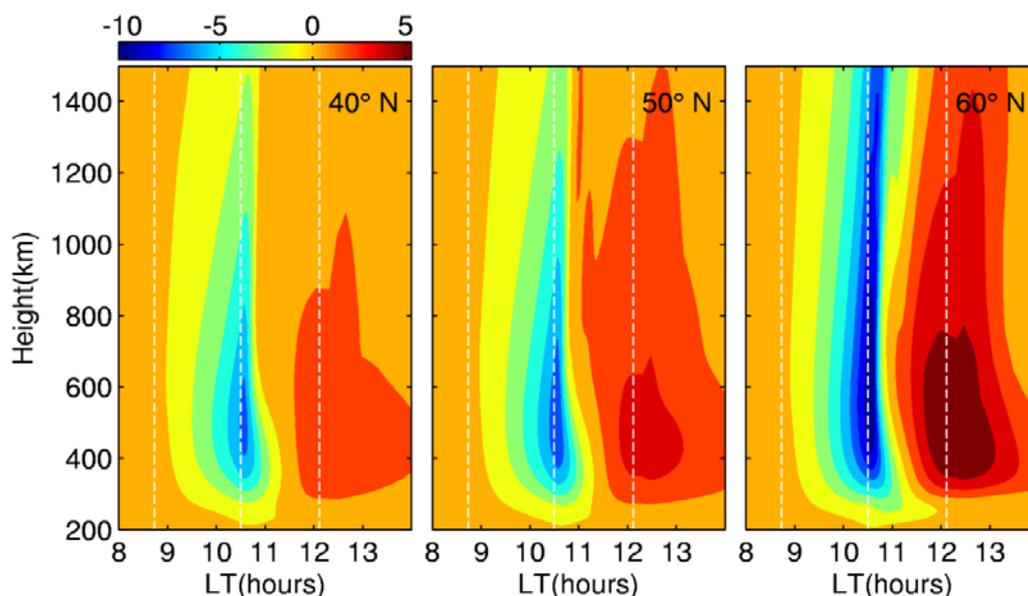


图 7.10 日全食发生在 40°N 、 50°N 和 60°N 时，等离子体通量随时间的变化。单位是 $10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。三条竖虚线分别指示日食开始、食甚及结束。正值和负值分别代表向上和向下的扩散。

为了更好地理解电子温度和磁倾角在中高纬日食响应中的作用，我们又分别在 40°N 、 50°N 和 60°N 这三个纬度区进行了三次模拟实验。在这三次模拟中，我们并没有考虑日食期间等离子体温度的变化，即让电子离子温度保持与参考日的温度一样。结果表明在这三个纬度区域几乎有相同的电离层响应。因为没有考虑温度的变化，这三个模拟的等离子体通量与参考日的值基本一致。早在上世纪

60年代, Evans (1965b) 就提出在 1963 年 7 月 20 日日全食期间三个测高仪台站记录的 foF2 上升现象应该归因于来自顶部电离层等离子通量的贡献, 因为这三个台站的磁倾角都很大, 可能会产生很大的下行等离子通量。另外, 用与此文类似的方法, 我们在另一个工作中 (Le et al., 2008b) 也研究了磁倾角在中高纬日食响应中的控制作用, 结果与此文一样: 更大的磁倾角会导致更大的向下等离子通量, 并因此会部分弥补 F 区电子浓度的减小, 由此导致在该地出现更小的电子浓度下降。

§7.6 小结

在本节中, 我们首先统计分析了 foF2 与 TEC 的日食响应的纬度依赖特征。其中, foF2 数据来自于 1973 年到 2006 年 15 次日全食期间的测高仪观测, 而 TEC 数据来自于 1999 年到 2006 年 6 次日全食期间的 GPS 观测。观测结果表明 foF2 和 TEC 日食响应都有相同的纬度依赖特征: 最大日食响应发生在中纬 40 度左右; 低纬的日食响应小于中纬的日食响应; 对于 40 度以上的中纬地区, 日食响应随纬度增加而减小。

然后通过一个理论电离层模式我们进行了一系列的模拟实验来研究电离层日食响应的纬度变化特征。为了模拟电离层日食响应的纬度依赖, 我们让日食分别发生在从 0 度到 60 度并以 5 度为间隔的 13 个纬度区, 如此进行了 13 次模拟。模拟结果表明 foF2 与 TEC 日食响应有类似的纬度依赖, 并且模拟结果与观测结果基本一致。本文的主要结论如下:

1. 低纬 400 公里以下的电子浓度响应比中纬相同高度区域的电子浓度响应大。但是由于低纬的峰高位置远大于中纬地区且电子浓度响应随高度迅速减小, 低纬的 NmF2 日食响应仍然小于中纬的 NmF2 日食响应。

2. 低纬 300 公里以上区域的电子温度下降幅度远小于中纬相同高度。对于低纬地区, 由于磁倾角较小所以磁力线更为接近水平, 因此同一根磁力线上的高高度和它的共轭低高度之间有不小的纬度差异。当日全食发生在低纬地区, 而低纬高高度的共轭低高度却只发生一个食分较小的日偏食, 因此在此低高度的光电产生率下降幅度较小 (即共轭高高度的光电子加热源的损失较小), 由此共轭高高度的电子温度下降也会较小。

3. 磁赤道电离层对日食的响应会受到 $E \times B$ 垂直漂移的重要影响，因为低高度的巨大电子浓度下降会通过此垂直漂移作用而向上传播到更高的高度。同时，赤道区的电子浓度减小会影响从赤道通过喷泉效应扩散到赤道异常区的等离子体扩散通量，从而影响到赤道异常区的日食响应。

4. 对于中纬电离层，磁倾角越大 $NmF2$ 和 TEC 日食响应会越小。更大的磁倾角会导致更多的下行等离子体通量，从而更多的弥补 F 区的电子浓度损失，并因此出现更小的日食响应。

第八节 共轭半球电离层的日食响应

前面几节重点研究的是发生日食的区域内的电离层的响应特征。电离层行为受到地磁场的强烈控制和影响，而磁力线是南北共轭的，光电子以及等离子体可以沿磁力线跨半球运动。那么日食期间，通过共轭的磁力线，在日食区的共轭点是否也会出现电离层扰动呢？实际上在第五节的研究中，通过电离层日食模拟，我们发现在共轭区也会出现小的电离层扰动。我们这一节将通过一个事件的观测数据对此问题作进一步的研究。基于美国国防气象卫星（DMSP）观测的电子温度 T_e 数据，南非 Grahamstown 测高仪台站的 F2 层临频 f_oF2 和峰高 h_mF2 数据，以及 SUTH GPS 台站的总电子含量 TEC 数据，我们分析了 2005 年 10 月 3 日日全食期间共轭半球电离层的变化。同时为了进一步研究日食区的共轭区的电离层扰动行为，我们利用一个二维中低纬电离层理论模式对这次日食进行了模拟。模拟结果基本再现了与观测结果一致的电离层扰动行为。

§8.1 引言

自上世纪 60 年代以来，电离层对日食的响应特征已经被许多研究者利用各种观测资料和计算机模拟进行了详细的研究（如 Evans, 1965a, 1965b; Klobuchar and Whitney, 1965; Rishbeth, 1968; Stubbe, 1970; Hunter et al., 1974; Oliver and Bowhill, 1974; Cohen, 1984; Salah et al., 1986; Müller-Wodarg et al., 1998; Boitman et al., 1999; Tsai and Liu, 1999; Afraimovich et al., 1998; Davis et al., 2000; Le et al., 2008a, b），并取得了许多成果。但迄今为止，至今依然很少有关于日食区的共轭区的电离层扰动观测以及相应的研究，其主要原因可能有两个，一方面共轭区的电离层扰动幅度不大，而电离层的逐日变化很大，这导致即使有小的电离层扰动也不容易被观测到；另一方面就是缺少相关的联合观测数据。

2005 年 10 月 3 日的日环食发生在欧洲，在该地区日食发生的时间处在上午。基于高频多普勒观测和测高仪观测，Jakowski et al. (2008) 调查了这次日环食期间的电离层响应特征并获得了一些结果，如在电离层 E 层、F1 层以及 F2 层高度都出现了显著的电子浓度减少，以及出现了大气重力波，还有电离层等效厚度的

增加等。与 Jakowski et al. (2008) 的研究不同，我们这次关注的是当日食发生在北半球的时候，在日食的共轭区—南半球的电离层扰动特征。我们使用的观测数据包括 DMSP 卫星的电子温度数据，南非一个测高仪台站的临频和峰高数据，以及临近位置的 GPS TEC 数据。图 8.1 给出了此次日食食分的分布情况以及这三个观测设备的位置信息。而且为了进一步研究共轭区的电离层扰动，我们还对这次日食的电离层响应进行了模拟研究，并将模拟结果与观测结果进行详细的比较。

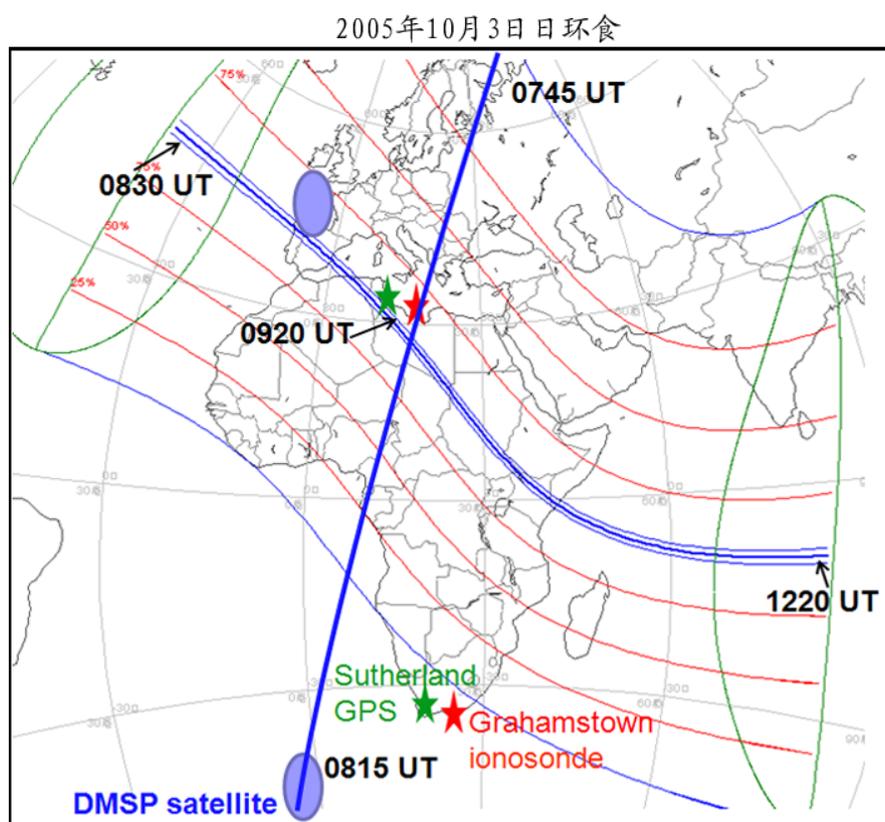


图 8.1 2005 年 10 月 3 日日环食期间全球日食分布图；三种电离层观测仪器及卫星所在位置画在图中；粗线画出了 DMSP F15 卫星在日食期间的飞行轨迹，两个椭圆分别给出了发生日食的区域以及其在南半球的共轭观测位置。下面的绿五角星和红五角星分别指出了 GPS 观测站和测高仪站的位置，上面两个对应的五角星为其在日食区内的共轭点。

§8.2 数据选取

美国国防气象卫星组 DMSP (Defense Meteorological Satellites Program) 是世界上惟一的专用军事气象卫星，隶属于美国国防部，由美国空军空间和导弹系

统中心负责实施。出于军事目的, 60 年代以来, 美国军方发射了一系列以F开头的飞船用来监测地面以及地球的空间环境。现有DMSP 卫星为三轴姿态稳定卫星, 运行在高度约 840 公里的太阳同步轨道, 周期约 101 分钟, 即一天有 14-15 个轨道, 轨道之间相隔 25° , 轨道倾角为 99° 。这些飞船各自所在轨道面的地方时不同主要在 06:00LT-18:00LT (包括F11, F13 卫星) 和 09:00LT-21:00LT (包括F12, F14, F15 卫星) 两条轨道上。DMSP飞船上面搭载各种探测仪器, 其中空间环境探测器组 (SSIES) 是用来探测等离子体的温度, 密度和速度的。我们在这使用的是朗谬尔探针 (LP) 探测的电子温度数据, 这个数据可以在德克萨斯州达拉斯大学网站上下载到, 网址是(<http://cindispace.utdallas.edu/DMSP/>)。

2005 年 10 月 3 日 F15 号卫星在 0815 UT 至 0817 UT 期间从西经 1 度南纬 41 度上空运动到西经 3.6 度南纬 47 度上空。同时一个食分为 0.76 的日偏食正发生在这个区域的共轭地区 (北半球), 其食甚时间为 0845 UT。在日食之前和之后一天, F15 在相同的地方时经过了相近的区域, 其轨道在经度方向上只有 3 度的偏移。因此 10 月 2 日和 10 月 4 日的观测数据可以当作参考日的结果。这为我们研究日食期间日食区的共轭点的电子温度扰动提供了一个好机会。F15 卫星 10 月 2、3 以及 4 日在日食发生时段附近的电子温度 T_e 值画在图 8.2 中。其中上子图给出了卫星飞行位置在北半球的共轭点发生日食的情况, 即卫星位置的共轭点的食分。从图中可以很清楚地看到, 当北半球经历食分过程时, 其共轭点的电子温度出现了明显的下降。F15 号卫星在 10 月 2 日, 3 日以及 4 日的运动轨迹画在了图 8.3 的上子图中。相应的电子温度的信息则画在图 8.3 的下子图中。

根据国际地磁参考场 IGRF95 模式, 南非 Grahamstown ($26.5^\circ \text{ E}, 33.3^\circ \text{ S}$) 测高仪台站的磁共轭点大约位于 $13.3^\circ \text{ E}, 33.5^\circ \text{ N}$ 。这个地点在 10 月 3 日发生了一个食分约为 0.91 的日偏食, 食甚时间为 0918 UT。我们从美国空间物理交互数据中心 (SPIDR) 获得了 Grahamstown 台站的数据, 这些数据经过了人工检查和矫正。我们使用 Grahamstown 台站的数据来研究共轭区电离层参数 foF2 和 hmF2 的变化情况。2005 年 10 月 3 日 Grahamstown 台站 foF2 和 hmF2 随时间的变化分别画在图 8.4a 和 4b 中。他们的月均值和标准偏差也画在图 8.4a 和 4b 中, 这将用来显示日食期间观测数据与控制日结果的偏离与普通电离层逐日变化的差别。

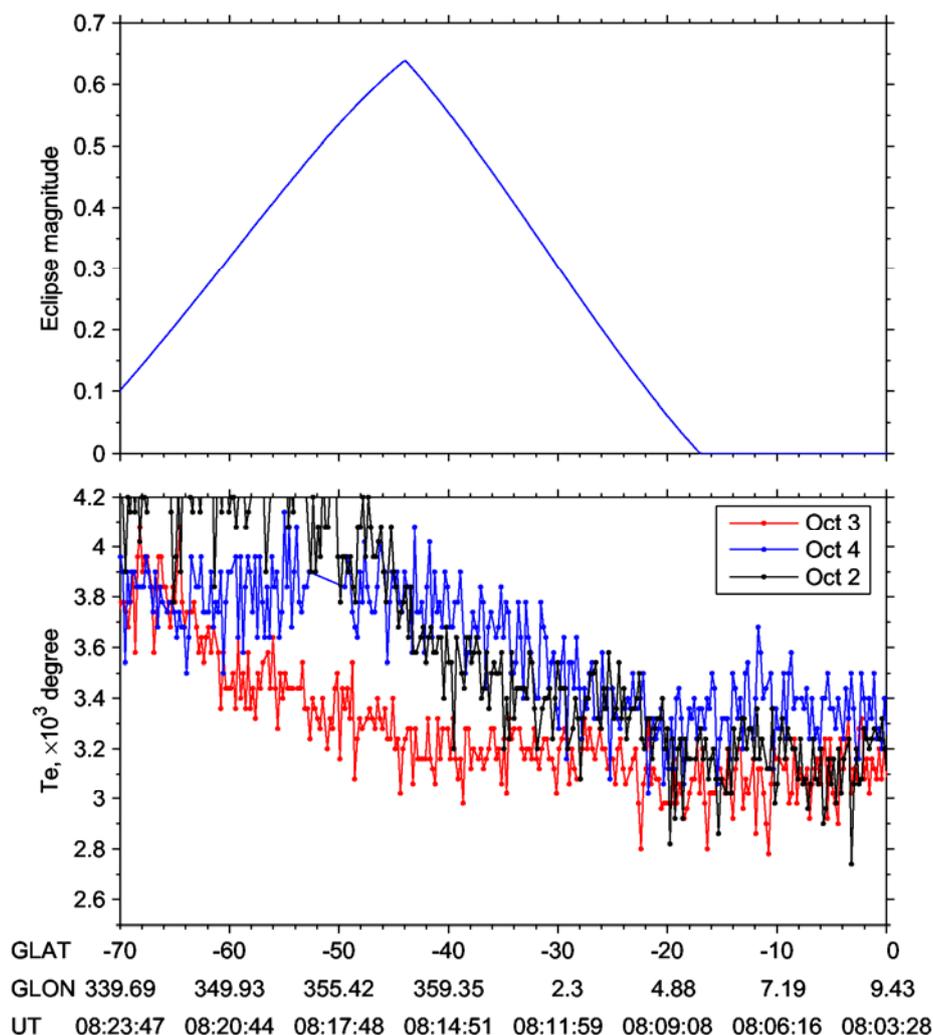


图 8.2 上图是 DMSP 卫星划过位置的共轭点的日食食分变化; 下图是 DMSP F15 卫星电子温度 T_e 的观测数据, 红线代表日食当日的结果, 蓝线和黑线分别表示日食前一天和后天一天的结果。

在 08—12UT 这段时间, GPS PRN 2 号星相对于台站 SUTH (20.8° E , 32.4° S) 的仰角都超过了 50 度, 这使斜 TEC 到垂直 TEC 的转换过程仅存在较小的误差。垂直 TEC 是通过假设电离层是在 350 公里高度的一个薄层而获得的, 在此高度的穿透点位置为 21° E , 33° S 。相应的磁共轭点位置为 9.1° E , 34.2° N , 在这个位置 10 月 3 日发生了一个食分为 0.96 的日偏食, 其食甚时间为 0914 UT。因此我们使用这个站的数据用来研究日食期间日食区的磁共轭区 TEC 的扰动特征。在日食前后各三天的 08—12UT 时间段内, PRN 2 号星的仰角都大于 50 度, 因此我们将这 7 天数据的平均值作为控制日的背景值。10 月 3 日的 TEC 变化, 7 天平均值以及相应的标准偏差都画在图 8.4c 中。

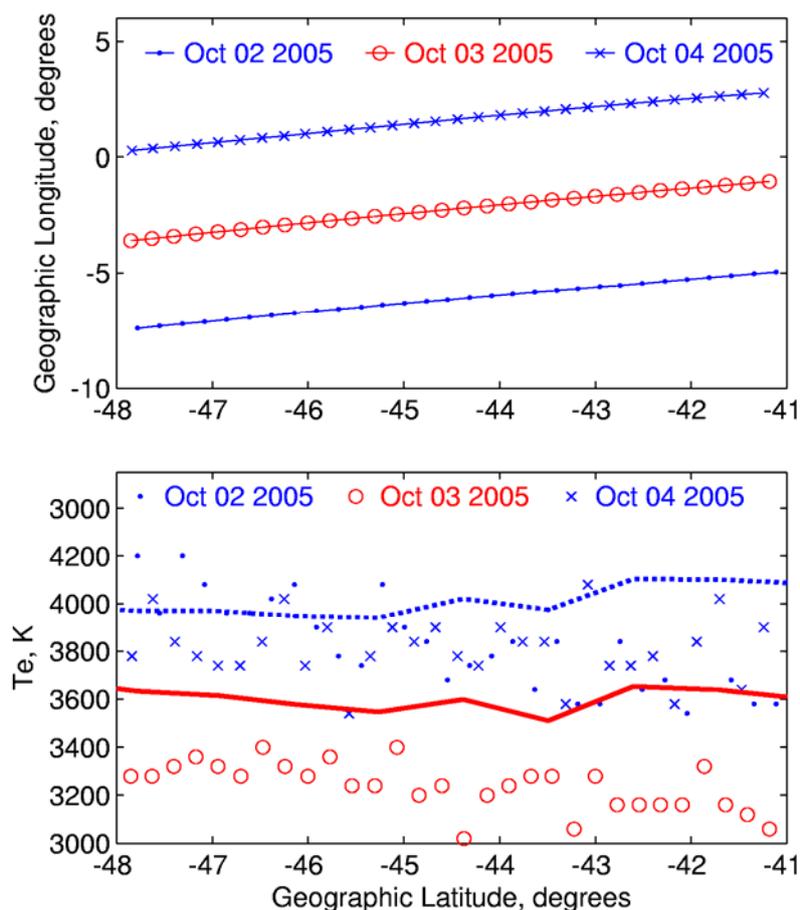


图 8.3 上子图为 F15 卫星在日食前一天 10 月 2 日 0831–0833 UT，日食当天 10 月 3 日 0815–0817 UT，日食后一天 10 月 4 日 0800–0802 UT 的空间位置信息。下子图为在相应位置和相应时间的电子温度观测数据。日食期间的模拟结果和控制日的模拟结果也分别用实线和点线画在下子图中。

§8.3 共轭电离层日食扰动模拟

在电离层模拟中，考虑到三种观测不在同一地点，其中 Grahamstown 测高仪台站和 SUTH GPS 接收站位置相近都位于东经 23 度附近的经度链上，但 DMSP 卫星划过的位置处在另一个经度东经 2.5 度经链上。为了更好地将模拟结果与观测结果对比，我们进行了两次模拟，其中一次为方便与 DMSP 卫星的电子温度数据比较，其磁力线经过 2.5° E , 45° S 的位置，这是 DMSP F15 经过的中间位置；另一次为方便与测高仪的 foF2 和 hmF2 数据以及 GPS 接收站的 TEC 数据比较，其磁力线经过 23° E , 33° S 的位置，这是测高仪台站和 GPS 接收站的中间位置。太阳活动指数 F107 设为 80，地磁活动指数 A_p 设为 5。为了确认电离层的日食响应，还进行了两个不考虑太阳辐射变化即没有日食的模拟，其计算结果作为参

考日的背景值。NmF2, Ne, TEC, hmF2, Te, Φ (场向离子通量) 在日食期间和无日食情况的变化分别被定义为 $rNmF2=NmF2e/NmF2c$, $rNe=Nee/Nec$, $rTEC=TECe/TECc$, $\Delta hmF2=hmF2e-hmF2c$, $\Delta Te=Te_e-Te_c$, $\Delta\Phi=\Phi_e-\Phi_c$ 。其中下标 e 和 c 代表日食日和控制日。

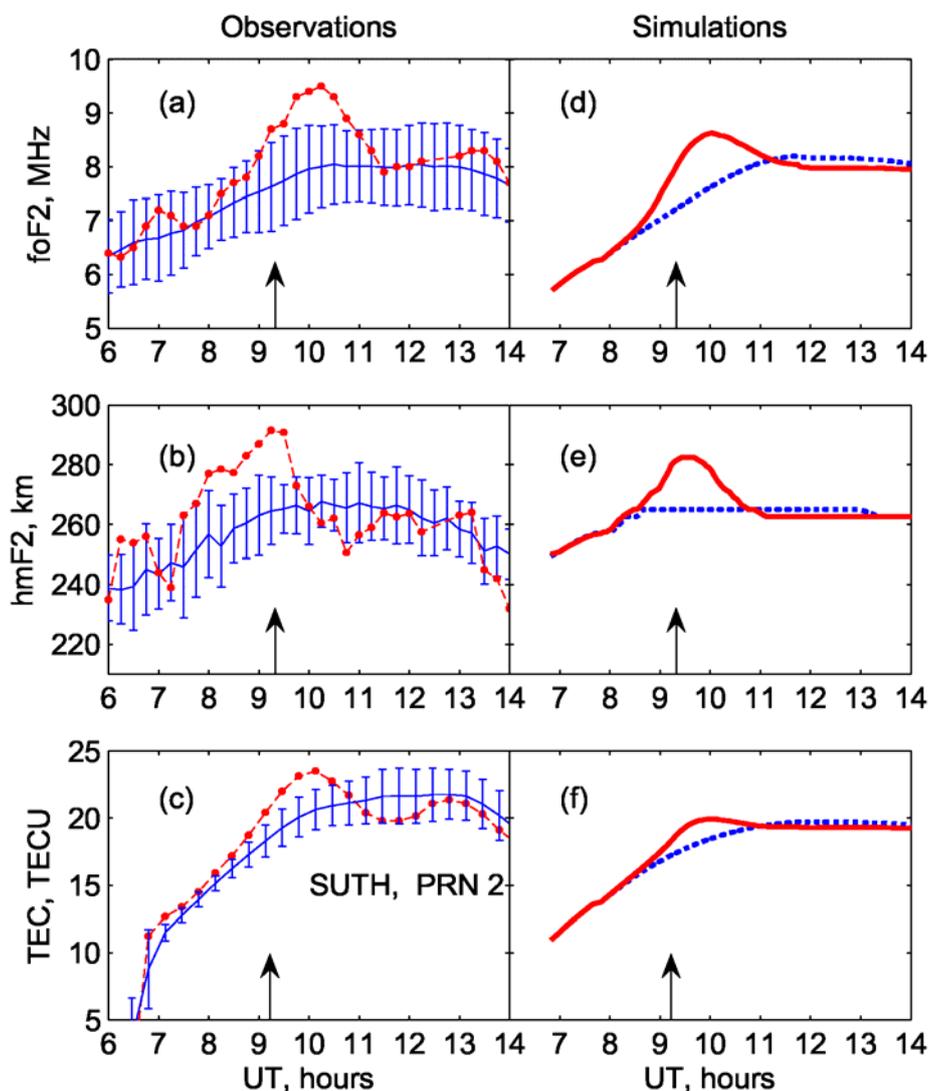


图 8.4 (a) 和 (b) 为 Grahamstown 测高仪台站在 2005 年 10 月 3 日 (实心圆圈线) 记录的 foF2 和 hmF2 随时间的变化, 他们的月均值 (实线) 和标准差也画在相应的图中。(c) 为 GPS 台站 SUTH 在 2005 年 10 月 3 日 (实心圆圈线) 记录的 TEC (c) 随时间的变化, 其前后 7 日的均值 (实线) 和标准差也画在图中。foF2、hmF2 及 TEC 在日食日 (实线) 和控制日 (点线) 的模拟结果被分别画在 (d)、(e) 及 (f) 中。每一个图中, 共轭点的日食最大相的时间用一个向上的箭头标示出。

§8.4. 观测与模拟结果

DMSP F15 卫星在日食日和控制日的电子温度数据画在图 8.3 中。模拟的电子浓度在日食日的变化和控制日的背景值也画在图 8.3 中。如图 8.3 所示, 尽管在控制日模拟值比观测结果大 350K, 观测结果和模拟结果均表明当日食发生在北半球中纬的时候, 在南半球它的共轭区也会出现大的电子温度下降(观测数据最大下降 600K, 模拟结果最大下降 450K)。

Grahamstown 测高仪台站的观测数据 foF2, hmF2 以及它们的月均值和标准偏差画在图 8.4a 和图 4b 中。相应的模拟结果画分别画在图 8.4d 及 4e 中。从图 8.4 中我们可以看到在 06 UT 至 11 UT 期间有两个明显的扰动事件。第一个事件开始于大约 06 UT, 首先峰高 hmF2 出现上升并伴随 F2 层的同步抬升, 随后 foF2 出现了明显的增强效应。第二个事件开始于大约 0715 UT, 出现与第一个事件类似的行为, 首先 hmF2 升高然后 foF2 出现增强, 但是这次事件有更长的持续时间。而且在这次事件中在 0830 UT 时出现了第二次 hmF2 抬升和 foF2 增强的脉冲效应。第一次事件和第二次事件中的第一个脉冲增强效应在时间上相对于日食的缓慢过程来说都太快了, 因此不能被认为是由日食效应引起的。对于第二个脉冲增强效应, 从图 8.4 中我们可以看到, foF2 响应和 hmF2 响应的开始时间几乎一样都在 0830 UT 附近; 峰高 hmF2 在 0930UT 达到最大的上升, 其幅度大约为 15 公里, 临频 foF2 在半个小时以后即大约 10 UT 出现最大增加, 其增幅为 1.3MHz。图 8.4d 和 4e 的模拟结果与观测结果吻合得很好: 模拟的 hmF2 最大上升约为 18 公里, 出现在 0925 UT; 而模拟的 foF2 最大增加约为 0.98MHz, 出现在 10 UT; 另外, hmF2 和 foF2 出现响应的开始时间也都在大约 0830 UT。

图 8.4c 显示的是 GPS 台站 SUTH 的 TEC 观测结果。从图 8.4c, 我们可以看到日食期间观测的 TEC 值明显比控制日的背景值要大, 在大约 10UT 两者出现最大偏差, 日食日 TEC 值比控制日背景值高大约 3TECU ($1\text{TECU} = 10^{16}$ electrons/m²), 对应于大约 15% 的背景值。图 8.4f 给出的是 TEC 的模拟结果。模拟结果与观测结果基本一致, 但是模拟的 TEC 上升幅度更小, 大约为 1.68TECU, 对应于 9.4% 的背景值。

随时间和空间变化的模拟结果画在图 8.5 和图 8.6 中。图 8.5 显示的是峰值浓度变化 rNmF2, 峰高变化 ΔhmF2 , 总电子含量变化 rTEC 等随纬度和时间的分

布情况。从图 8.5 我们可以看到北半球的日食区有明显的电离层日食响应，比如峰值浓度 $NmF2$ 出现一个迅速的下降，其最大降幅出现在 0915UT 降幅大约为 43%；峰高 $hmF2$ 出现明显的上升，其最大升幅为 15 公里，出现在 0920UT 时刻附近；TEC 也出现了大的下降，最大降幅达到 31%，出现在 0925 UT 时刻附近。这些模拟结果与 Jakowski et al. (2008)对这次日食报道的观测结果基本一致。对于共轭半球的电离层扰动，从图 8.5 中可以看到 $NmF2$ 在 0945 UT 达到最大约 29%的增幅，TEC 在 0940 UT 达到最大约 11%的增幅， $hmF2$ 在 0930 UT 达到最大约 22 公里的上升。比较日食区和它的共轭区发生最大电离层响应的时间，我们发现共轭区的电离层响应明显滞后于日食区的响应。

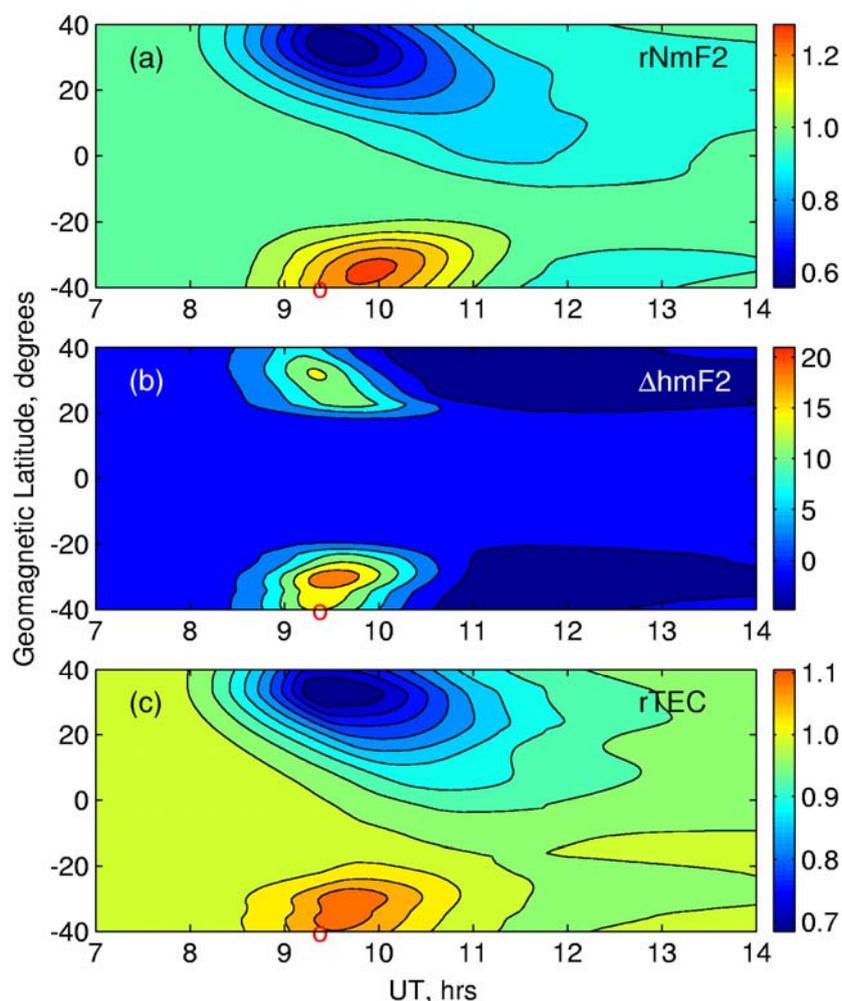


图 8.5 从南纬 40 度到北纬 40 度，在 0700 - 1400UT 期间电离层对日食响应的模拟结果，(a)、(b)、(c) 分别对应 $rNmF2$ 、 $\Delta hmF2$ 、 $rTEC$ 。X 轴上的圆圈指示的是食甚发生的时间。

如图 8.5 所示, 南半球最强电离层扰动位置处在大约南纬 33 的地方。为了更清楚地研究日食区共轭点的电离层变化特征, 我们把该共轭点 (南纬 33 度) 的电子浓度变化, 电子温度变化以及等离子体沿磁力线通量的变化随高度和时间的分布画在图 8.6 中。图 8.6a 显示电子温度在 200 公里以上的整个高度都有明显的下降, 其中最大电子温度下降出现在约 305 公里高度, 降幅约为 1250K, 发生在 0924 UT 时刻。这些电子温度的变化将会改变等离子体的标高, 压缩 F2 区等离子体并促使高高度的等离子体向下扩散而低高度的等离子体向上扩散。图 8.6c 给出了沿场向等离子体通量随高度和时间的分布: 在 300 公里以上出现向下的等离子体通量而在 220—290 公里区域有向上的等离子体通量。这些等离子体扩散会改变等离子体的高度分布。图 8.6b 画出了相应的电子浓度 N_e 变化随高度和时间的分布: 在大约 600 公里以上高度区域出现了很大的电子浓度下降, 最大下降出现在约 1300 公里处, 降幅达到 23%; 而在 250—600 公里高度区域出现了显著的电子浓度增加, 最大增幅出现在 310 公里达到 40%; 在 250 公里以下有一个小幅的电子浓度下降, 最大降幅不超过 10%。这些等离子体的重新分布会使峰高位置上移到更高的高度, 并使 N_mF2 和 TEC 增加。

§8.5. 讨论

我们知道, 在电离层低高度 (300 公里以下) 光电子加热是局部的, 即来自周围中性大气被 EUV 辐射离化产生的高能光电子的碰撞加热; 而在更高的高度, 高能光电子能够沿磁力线而运动到共轭半球并加热那里的电子。也就是说, 在更 300 公里以上的高度区域, 光电加热不仅来自于本半球低高度离化产生并向上输运的光电子, 还有来自共轭半球沿磁力线运动过来的光电子。一些研究已经表明在一些地方日出前的等离子体温度增加主要归功于共轭半球光电子加热的贡献, 因为它的共轭半球已经处在日照下了 (如 Carlson, 1966, 1968; Carlson and weill; 1967; Cole, 1965; Rao and Maier, 1970; Evans, 1973; Peterson et al., 1977; Sheperd et al., 1978; Chao et al., 2003, Zhang et al., 2004)。在一个日食期间, 由于太阳辐射的急剧减少日食区的光电子会大幅减少, 那么在它的共轭区, 那些在日食前还能沿磁力线运动过来的光电子数量就会相应的大幅减少, 这导致该共轭区的光电加热率下降, 继而电子温度的下降。

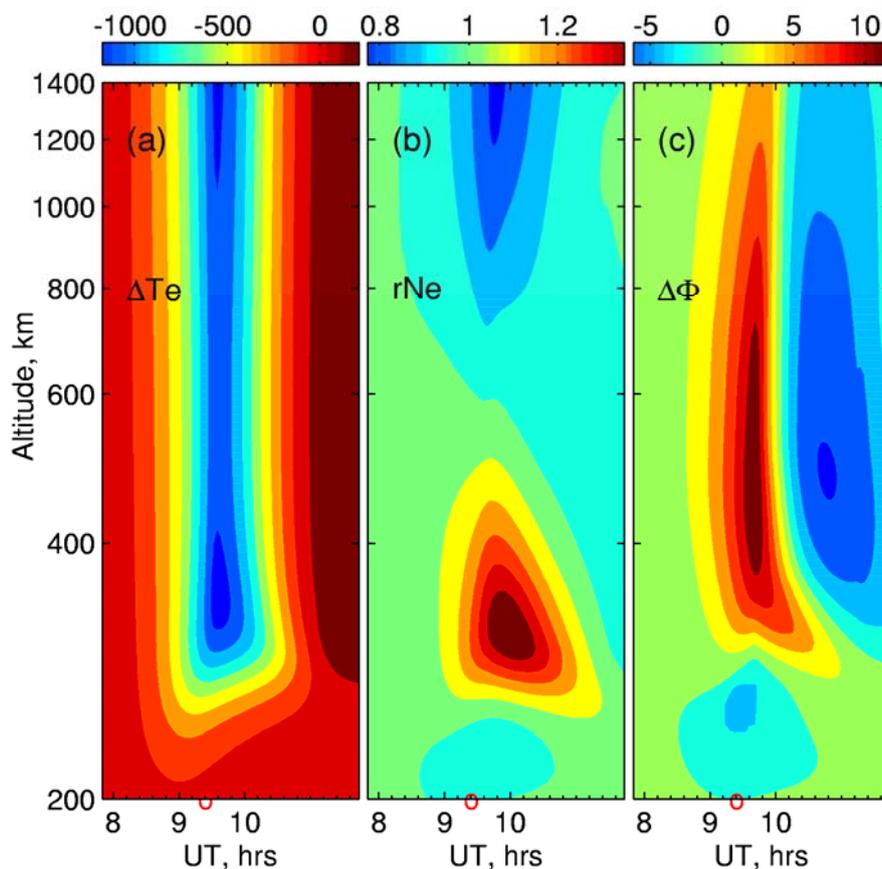


图 8.6 南纬 33 度在 0700 - 1400UT 期间电离层扰动的模拟结果。(a)、(b)、(c) 分别对应 ΔT_e (K)、 rNe 、 $\Delta\Phi$ ($10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。X 轴上的圆圈指示的是共轭点（北纬 33 度）食甚发生的时间。在 (c) 中，正值代表向下的扩散，负值代表向上的扩散。

如上所述，对于日食共轭区 300 公里以上高度区域，其光电子加热 Q 可以分为两部分 Q_l 和 Q_c （即 $Q=Q_l+Q_c$ ），其中 Q_l 为来自本半球（不发生日食的半球）的光电子加热， Q_c 为来自共轭半球（发生日食的半球）的光电子加热。在日食发生前，如果共轭半球的光电子加热 Q_c 比较大（相对于本地光电加热），那么当日食发生时， Q_c 会显著减少，这导致总光电加热率也出现显著减少，继而引发该区域发生显著的电离层扰动。相反，如果共轭半球的光电子加热 Q_c 比较小，那么即使日食的发生会显著减小 Q_c 值，总光电加热率也不会出现明显的减少，这导致该区域不会出现明显的电离层扰动。根据经验光电子通量模式 (Millward et al., 1996)，这两部分光电加热的相对大小主要由本地半球与共轭半球沿磁力线的电子含量的比值 r 决定： r 越大， Q_c 相对 Q_l 越大，这是由于越大的 r 值意味着光电子在共轭半球损失越小，这就使更多的光电子能够从共轭半球

运动到该区域。在我们的模拟中,南纬 33 度与北纬 33 度的 TEC 比值 r 达到 1.75,这意味着 Q_c 相对 Q_l 而言比较大,因此日食导致 Q_c 显著减少的同时也使该地区总光电加热 Q 在整个高度出现显著下降。模拟结果显示从 300 公里到 3000 公里最大下降幅度为 32%—55%。正是这个大的光电加热率的下降导致了电子温度的大幅下降并在随后产生一系列的电离层扰动。我们的模拟结果还表明,如果这个比值小于 1.0,在日食共轭区将会有较小的电离层扰动,比如 NmF2 降幅不超过 15%。

§8.6. 小结

本文给出了 2005 年 10 月 3 日日全食期间日食区的共轭区发生的电离层扰动的初步观测结果。来自 DMSP F15 卫星的观测表明日食发生在北半球的时候在该区域电子温度相对于日食前后两日出现了明显的下降。来自南非 Grahamstown 测高仪台站的数据也表明在日食区的共轭区有显著的 NmF2 增加以及 hmF2 上升。来自 GPS 接收台站 SUTH 的 TEC 数据也表明在该区域 TEC 有明显的增加。然后为了进一步分析共轭区的电离层扰动特征,我们利用本实验室开发的一个沿磁力线的二维电离层理论模式 TIME-IGGCAS 对此次日食的电离层相应进行了模拟(包括日食区和其共轭区)。模拟结果基本再现了所有的观测结果。分析表明在日食期间,等离子体温度的下降改变了等离子体分布的标高继而导致 NmF2 的增强,TEC 的增加,以及 hmF2 的位置上移。而等离子体温度的下降主要是由来自日食区的入流光电子通量的大幅减少而引起的。

第九节 工作总结及展望

太阳 EUV 辐射及 X 射线电离地球高层大气，是电离层的源。太阳辐射在太阳耀斑（太阳 X 射线及 EUV 辐射短时大幅增长）和日食（日食区太阳辐射会大幅减少）期间的变化，无疑会显著地影响地球电离层。我的博士学位论文选题研究太阳耀斑和日食期间的电离层变化，利用各种观测数据并结合电离层模式，重点分析了太阳耀斑和日食两类事件所引起的电离层变化的时空演化特征，并考察主要因素（如太阳活动、太阳天顶角、地磁倾角以及背景中性大气）对电离层响应的控制与影响，得到了一些有意思的结果。

§9.1 工作总结

我的工作由六个部分组成，分别为：

一、参与发展中低纬电离层理论模式

基于实验室以往模式工作基础，借鉴目前国际上比较成熟的方法，参与改建原有中低纬电离层理论模式，将其发展、完善成一个简称为 TIME-IGGCAS（全名为 Theoretical Ionospheric Model of the Earth in Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences）的中低纬电离层理论模式。

TIME-IGGCAS 模式通过耦合求解离子连续性方程、动量方程以及能量方程，给出原子离子 O^+ ， H^+ ， He^+ 的数密度，场向速度以及温度；通过光化学平衡给出分子离子 O_2^+ ， N_2^+ ， NO^+ 的数密度。中性成份和温度参数由 NRLMSISE00 模式提供，水平中性风场由 HWM93 模式提供。初步分析表明，该模式能够再现中低纬电离层大部分气候学变化特征，如冬季异常、半年异常、赤道异常等。TIME-IGGCAS 模式计算快捷、使用灵活，可作为一维中纬模式使用，也可以作为二维中低纬模式使用，还易于拓展为三维。

二、模拟 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级大耀斑电离层响应

利用 SOHO 卫星上太阳辐射监测仪（SEM）的 EUV 辐射变化与 GOES 卫星的 X 射线观测数据，构建了一个耀斑期间太阳辐射变化模型。利用一维电离层

模式模拟了 2003 年 10 月 28 日 X17.2 级大耀斑期间电离层响应，计算结果在变化形态上与观测基本一致，但在响应幅度上有所差别。此次大耀斑期间 EUV 辐射有两个峰值，两者相隔大约 11 分钟。模拟与观测结果均显示出 TEC 的时间变化率 $d\text{TEC}/dt$ 也有相应的两个峰值，表明可以用 TEC 的时间变化率来表征和监测耀斑期间太阳辐射的突然变化。模拟与观测结果在响应幅度上的差异，可能是背景大气模式不能反映中性大气成份与密度的实际情况。根据 Champ 卫星观测，此次耀斑初期中性大气密度增长了大约 20%。在我们的模拟中没有考虑耀斑带来的中性大气变化。

我们进一步模拟了耀斑中纬电离层响应的地方时、季节依赖。结果表明，耀斑电离层响应与太阳天顶角有密切的关系。在白天，耀斑引起的电子浓度增加主要发生在 300km 及以下高度区域。耀斑引起的电子密度相对增加最大值出现在 115 km 附近，在日出和日落附近时段出现在更高的高度（如夏季耀斑最大电子浓度增加发生在 210km）。电离层耀斑响应的这种地方时差异主要依赖耀斑发生时的天顶角。太阳辐射在大天顶角要经过更长的大气层，从而它只能达到更高的高度。结果还表明，日出与日落附近的电离层耀斑响应有明显的区别：耀斑时电离层响应在日出附近比日落慢，TEC 缓慢增加并在耀斑爆发后近一个小时才到达其峰值。这个区别主要来源于这两个时段的太阳天顶角呈现相反的变化：日出时天顶角逐渐变小，有利于 TEC 的持续增加；而日落附近天顶角逐渐变大，抑制了 TEC 的增加，导致 TEC 增加持续时间变短。模拟结果表明耀斑电离层效应还存在季节变化，夏季电子密度增幅最大而冬季最小，这也主要由天顶角的季节差异导致。模拟结果还显示 TEC 绝对增幅的地方时变化有明显关于正午的不对称性，这主要与背景中性大气氧原子密度的不对称有关。而 TEC 背景值的上下午差异使得 TEC 相对增幅有更显著的不对称性。

三、E 层和 F1 层电离层日食响应的观测与模拟分析

利用欧洲测高仪观测资料和电离层理论模式，观测分析和模式模拟了 1999 年 8 月 11 日日食期间 E 层和 F1 层电离层效应。为了更好地模拟日食过程，构建了一个修正的日食期间太阳辐射时变模型。以前的模型仅考虑了光球面以内的太阳辐射的贡献。我们构建的模型综合考虑了来自光球面以内和光球面以外的太阳

辐射的贡献。未修正模型的模拟结果与观测结果有较大偏差，而修正模型极大地改善了模拟结果，使之与观测结果基本一致。E 层和 F1 层虽然都主要由光化学过程控制，它们的日食响应比较简单，即电子密度随食分的增加而减小。但它们也有一些区别，E 层主要是分子离子，而 F 层中分子离子和原子离子成份同等量级。这导致了日食期间这个层的响应不同。模拟结果和观测结果均表明 F1 层电子密度下降幅度大于 E 层下降幅度。而且分析结果正表明这主要是由于 F1 层处于原子离子和分子离子过渡区域的缘故。而原子离子的损失率大于分子离子的损失率，因此 F1 层的离子损失要大于 E 层。

四、中纬 F2 层日食响应的统计和模拟分析

不同于低高度电离层，F2 层不仅受光化学过程的影响，而且受输运过程的控制。影响输运过程的因素非常多，这就导致 F2 层会出现各种时间和空间的变化。利用电离层模式分别模拟研究了背景峰高、地方时、太阳活动以及磁倾角等对日食中纬电离层效应的影响。统计分析了 7 次日全食期间的测高仪资料，考察可能的地方时和磁倾角效应。由于数据有限没有做背景峰高和太阳活动效应的统计分析。观测和模拟结果均表明，foF2 的日食电离层效应有明显的地方时和磁倾角依赖：地方时正午时 foF2 下降幅度最大，并随天顶角增大而减小；倾角越大的地方 foF2 下降幅度越小，这主要是由于越大的磁倾角会导致更多的等离子体从顶部电离层向下输运，从而更大程度地弥补 F2 层等离子体的损失。关于峰高和太阳活动的影响，模拟结果表明峰高越高 foF2 的下降幅度会越小，这与 F 区电子浓度响应随高度增加而减少有关；太阳活动高年 foF2 的响应比太阳活动低年大。通过参量控制的模拟实验我们发现 foF2 响应的地方时和太阳活动差异主要归因于背景中性大气浓度不同而引起的 F2 层主要离子 O⁺损失率的不同。模拟结果还发现尽管更大磁倾角会引发更多等离子体向下输运并弥补 F2 层等离子体的损失，从而使 foF2 降幅减小，但不管磁倾角如何增大，下行等离子体通量都不会多到能使 foF2 不降反升。因此在某些日食期间 foF2 上升的观测结果就不能仅仅用磁倾角很大来解释，日食期间中性大气的变化可能是产生 foF2 上升的另一重要因素，这在几个模拟实验中得到验证。

五、F2 层临界频率 foF2 与总电子含量 TEC 对日食响应的纬度依赖特性

利用 1973 至 2006 年 15 次日食期间的测高仪资料和 1999 年至 2006 年 6 次日食期间的 GPS TEC 数据, 分析了 foF2 与 TEC 对日食响应的纬度依赖特性。观测结果表明, foF2 和 TEC 的日食响应有类似的纬度依赖特性: foF2 日食响应最大出现在中纬 30 度左右, 在低纬 15 度左右的赤道异常区响应最弱; 在 40 度以上的中高纬地区, TEC 的日食响应随纬度增加而迅速减小, 而 foF2 日食响应的趋势相对较弱。为了更清楚地揭示日食响应的纬度依赖, 我们对日食电离层效应进行了模拟研究。模拟结果与观测结果基本一致, foF2 和 TEC 都有明显的纬度依赖: 低纬日食响应小于中纬; 而中高纬的日食响应则随纬度或磁倾角增大而减小, 这即是前面提到的磁倾角效应。尽管低纬低高度 400 公里以下的电子浓度响应比中纬相同高度区域的电子浓度响应要大。但低纬的峰高位置远大于中纬地区且电子浓度响应随高度迅速减小, 这两个因素共同作用导致低纬的 NmF2 变化仍然小于中纬。模拟结果还表明低纬 300 公里以上区域的电子温度下降幅度远小于中纬相同高度的电子温度下降。对于低纬地区, 由于磁倾角较小所以磁力线更为接近水平, 因此同一根磁力线上的高高度和它的共轭低高度之间有不小的纬度差异。当一个日全食发生在低纬, 那么低纬高高度的共轭低高度却只发生一个食分较小的日偏食, 这可能是低纬电子温度下降幅度更小的主要原因。

六、日全食期间共轭半球(南半球) 电离层扰动特征的观测与模拟分析

基于美国国防气象卫星(DMSP)观测的电子温度 T_e 数据, 南非 Grahamstown 测高仪台站的 F2 层临频 foF2 和峰高 hmF2 数据, 以及 SUTH GPS 台站的总电子含量 TEC 数据, 分析了 2005 年 10 月 3 日日全食期间共轭半球(南半球) 的电离层特征。观测显示, 日食期间出现了电子温度下降, F2 层临界频率和总电子含量 TEC 上升, 以及 F2 层峰高抬升。进而利用 TIME-IGGCAS 模式模拟了此次日食电离层响应, 模拟基本再现了上述观测结果。计算结果显示, 日食会减少日食区的光电子产生率, 并使得从日食区沿磁力线运动到达共轭区的高能光电子大幅减少, 导致光电加热率共轭区减少, 出现电子温度下降。在共轭区电子温度的改变会改变等离子体分布, 并引发一系列电离层变化。当然, 这只是一次事件的观测结果, 我们希望找到更多相关观测结果来进一步验证。

§9.2 展望

上面简要回顾了本文的主要工作。在本文工作的基础上,还有许多研究工作有待进一步完善和发展。对以后的工作展望如下:

首先,电离层理论模式 TIME-IGGCAS 需要进一步完善和发展。目前 TIME-IGGCAS 模式中电子温度的计算中一个重要参量——光电子加热率的计算采用的是一个比较简化的经验模式,这给电子温度的计算带来了一些偏差。下一步我们要改进模式通过求解光电子通量方程来自恰求解光电子的运动,从而获得更准确的光电子加热率。还有模式的扩展问题,目前模式虽然能通过计算多个子午面而获得三维电离层信息,但在这个过程中我们并没有考虑等离子体的东西向运动。所以下一步需要把等离子体通量管的东西向运动加到模式中,这样就扩展到真正的三维电离层计算。另一方面,在纬度方向上,目前模式并没有计算高纬和极区电离层行为,以后通过考虑对流电场、焦耳加热以及离子沉降等高纬特有的物理过程而把高纬和极区包括进模式中,最终发展成为全球三维电离层模式,为进一步开展电离层变化特性与机理研究,分析研究电离层各种变化甚至电离层暴等内在的物理机理提供良好的研究平台。

第二,联合利用观测数据和电离层模式的研究方法,数据同化方法已经越来越多地应用到电离层研究中。数据同化方法同时兼顾了观测数据的客观性和电离层模式中物理过程的可调节性。数据同化方法不仅可以帮助对电离层复杂变化的物理过程的理解,还可以进行电离层等离子体行为的预报。这种预报工作已经在大气物理和海洋研究中得到广泛应用,并积累了丰富的经验和成熟的同化算法比如变分法、Kalman 滤波等,电离层数据同化可以借鉴这些经验和方法。基于以上考虑,以后可以利用数据同化方法开展更多相关物理问题的研究,并为建立符合我国实际情况的电离层空间环境预报模式开展工作。

第三,现在的日食电离层效应的研究都假定日面太阳辐射是均匀分布的,而实际上太阳表面的一些活动区导致日面太阳辐射并非均匀分布的,尤其是在太阳活动高年这种不均匀性更明显。由于月影在日面位置的不同,日食期间有些地方太阳活动区被遮住而有些地方没有,这可能会导致电离层响应的差异;如果日食期间日面辐射有显著的南北不对称性,那么在食带南北可能也会出现不同的电离

层响应。因此我们可以开展日面辐射不均匀性对日食期间电离层响应的影响的相关研究。

第四, 进一步开展耀斑和日食对热层影响的观测和模拟研究, 在本文的研究中, 我们重点研究的是电离层等离子体对这些太阳辐射大幅改变而产生的响应。早期的研究认为中性大气对这种太阳辐射的短时突然改变不会有明显的响应, 但最近的 Champ 卫星观测结果表明在大耀斑期间热层也出现了显著的改变, 中性大气密度甚至能增加 40%。热层的改变又会进一步影响电离层的变化。所以下一步我们可以进一步研究热层对耀斑和日食等过程的响应, 这方面的研究也是目前中高层大气研究的热点。

第五, 利用更多观测数据及模式模拟对低纬电动力学过程与太阳辐射变化的关系。本文中我们讨论了低纬电动力学过程对电离层日食以及耀斑响应的影响, 但并没有考虑这些电动力学过程本身也会出现一系列变化, 而且这些变化会进一步对电离层等离子体的变化产生重要影响。

参考文献

- Acton, L. W., D. C. Weston, and M. E. Bruner (1999), Deriving solar X ray irradiance from Yohkoh observations, *J. Geophys. Res.*, 104(A7), 14827-14832.
- Adeniyi, J. O., S. M. Radicella, I. A. Adimula, A. A. Willoughby, O. A. Oladipo, and O. Olawepo (2007), Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station, *J. Geophys. Res.*, 112, A06314, doi:10.1029/2006JA012197.
- Afraimovich, E. L (2000), GPS global detection of the ionospheric response to solar flares, *Radio. Sci.*, 35(6), 1417-1424.
- Afraimovich, E. L., E. A. Kosogorov, and O. S. Lesyuta (2002), Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1933-1941.
- Afraimovich, E. L., K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova, V. V. Chemukhov, A. V. Lukhnev, and V. T. Zalutsky (1998), Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 25(4), 465-468.
- Afraimovich, E. L., S. V. Voeykov, N. P. Perevalova, V. V. Vodyannikov, G. I. Gordienko, Yu. G. Litvinov, and A. F. Yakovets (2007), Ionospheric Effects of the March 29, 2006, Solar Eclipse over Kazakhstan, *Geomagn. Aeron.*, 47(4), 461-469.
- Altadill, D., J. Solé, and E. Apostolov (2001), Vertical structure of a gravity wave like oscillation in the ionosphere generated by the solar eclipse of August 11, 1999, *J. Geophys. Res.*, 106(A10), 21419-21428.
- Anderson, D., et al. (1998), Intercomparison of physical models and observations of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 103(A2), 2179-2192.
- Appleton, E. V. (1953), A note on the "sluggishness" of ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 3, 228-232.
- Bailey, G. J., R. and A. Sellek (1990), Mathematical model of the Earth's plasmasphere and its application in a study of He⁺ at L = 3.0, *Ann. Geophys.*, 8, 171-190.
- Balan, N., and G. J. Bailey (1995), Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer, *J. Geophys. Res.*, 100, 21421-21432.
- Balan, N., G. J. Bailey, B. Jenkins, P. B. Rao, and R. J. Moffett (1994), Variations of ionospheric ionization and related solar fluxes during an intense solar cycle, *J. Geophys. Res.*, 99, 2243-2253.

- Balan, N., G. J. Bailey, M. A. Abdu, K. I. Oyama, P. G. Richards, J. MacDougall, and I. S. Batista (1997), Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer, *J. Geophys. Res.*, 102,2047-2056.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, J. H. A. Sobml, J. MacDougall, and G. J. Bailey (1999), Occurrence of an additional layer in the ionosphere over Fortaleza, *Adv. Space Res.*, 24(11), 1481-1484.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, J. MacDougall, and G. J. Bailey (1998), Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 29169-29181.
- Banks, P. M., and A. F. Nagy (1970), Concerning the Influence of Elastic Scattering Upon Photoelectron Transport and Escape, *J. Geophys. Res.*, 75(10), 1902-1910.
- Banks, P. M., and G. Kockarts (1973), *Aeronomy, Part A*, Academic Press, New York and London.
- Baran, L. W., I. I. Ephishov, I. I. Shagimuratov, V. P. Ivanov, and A. F. Lagovsky (2003), The response of the ionospheric total electron content to the solar eclipse on August 11, 1999, *Adv. Space Res.*, 31(4), 989-994.
- Baron, M. J., and R. D. Hunsucker (1973), Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total solar eclipse of July 10, 1972, *J. Geophys. Res.*, 78, 7451-7460.
- Batista, I. S., M. A. Abdu, J. MacDougall, and J. R. Souza (2002), Long term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza, Brazil, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1409-1412.
- Batista, I. S., N. Balan, M. A. Abdu, J. MacDougall, and P. F. Barbosa Neto (2000), F3 layer observations at low and equatorial latitudes in Brazil, *Geosynth Int*, 39, 57-64.
- Berning, W. W. (1983), The solar eclipse of 26 February 1979 - Introductory comments, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 45, 423-425.
- Beynon, W. J. G. and G. M. Brown (eds.) (1956), *Solar Eclipses and the Ionosphere*, Pergamon Press, London and New York.
- Bilitza, D., V. Truhlik, P. Richards, T. Abe, and L. Triskova (2007), Solar cycle variations of mid-latitude electron density and temperature: Satellite measurements and model calculations, *Adv. Space Res.*, 39, 779-789.
- Boitman, O. N., A. D. Kalikhman, and A. V. Tashchilin (1999), The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997, *J. Geophys. Res.*, 104(A12), 28,197-28,206.
- Brace, L. H., H. G. Mayr, M. W. Pharo III, L. R. Scott, N. W. Spencer, and G. R. Carignan (1972), The electron heating rate and ion chemistry in the

- thermosphere above Wallops Island during the solar eclipse of 7 March 1970, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 673-688.
- Bremer, J. (1998), Trends in the ionospheric E and F region over Europe, *Ann. Geophys.*, 16, 989-996.
- Bremer, J. (2001), Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations, *Adv. Space. Res.*, 28, 997-1006.
- Bremer, J., L. Alfonsi, P. Bencze, J. Lastovicka, A. Mikhailov, and N. Rogers (2004), Long-term trends of the ionosphere and upper atmosphere parameters, *Ann. Geophys.*, 47, 1009-1029, (Suppl. 2/3).
- Carlson, H. C. (1966), Ionospheric heating by magnetic conjugate-point photoelectrons, *J. Geophys. Res.*, 71, 195-199.
- Carlson, H. C. (1968), Most recent studies of low latitude effects due to conjugate location heating, *Radio Sci.*, 3, 668-673.
- Carlson, H. C., and G. M. Weill (1967), Solar cycle variation of conjugate photoelectron flux onset timing deduced from 6300 Å and Te observations, *Ann. Geophys.*, 23, 569-572.
- Chao, C. K., Su, S.-Y., and Yeh, H. C. (2003), Presunrise ion temperature enhancement observed at 600 km low and mid-latitude ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30(4), 1187, doi:10.1029/2002GL016268.
- Chen, B., L. Liu, W. Wan, B. Ning, and F. Ding (2005), A statistical analysis of SITEC caused by intense solar flares during 1996-2003. *Chin. J. Space Sci.*, 25(1), 6-16.
- Cheng, K., Y.-N. Huang, and S.-W. Chen (1992), Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region, *J. Geophys. Res.*, 97(A1), 103-111.
- Chimonas, G., and C. Hines (1970), Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, 75, 875-875.
- Cohen, E. A. (1984), The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations, *Radio Sci.*, 19(3), 769-777.
- Cole, K. D. (1965), The predawn enhancement of 6300 Å airglow, *Ann. Geophys.*, 21, 156-158.
- Curto, J. J., B. Heilig, and M. Pinol (2006), Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999, *J. Geophys. Res.*, 111, A07312, doi:10.1029/2005JA011499.
- Dameris, M., A. Ebel, and H. J. Jakobs (1986), Three-dimensional simulation of quasiperiodic perturbations attributed to solar activity effects in the middle atmosphere. *Ann. Geophys.*, 4, 287-296.
- Danilov, A. D. (2002), The method of determination of the long-term trends in the F2 region independent of geomagnetic activity, *Ann. Geophys.*, 20, 1-11.

- Danilov, A. D. (2003), Long-term trends of foF2 independent of geomagnetic activity, *Ann. Geophys.*, 21, 1167-1176.
- Danilov, A. D., and A. V. Mikhailov (1999), Spatial and seasonal variations of the foF2 long-term trends, *Ann. Geophys.*, 17, 1239-1243.
- Datta, S., P. Bandyopadhyay, and R. N. Datta (1959), Ionospheric observations on the F-region during the solar eclipse of 19 April 1958, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 16, 182-185.
- Davies, K. (1980), Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment, *Space Sci. Rev.*, 25, 357-430.
- Davies, K. (1990), Ionospheric Radio, *Short Run Press Ltd.*, Exeter, England.
- Davis, C. J., E. M. Clarke, R. A. Bamford, M. Lockwood, and S. A. Bell (2001), Long term changes in EUV and X-ray emissions from the solar corona and chromosphere as measured by the response of the Earth's ionosphere during total solar eclipses from 1932 to 1999, *Ann. Geophys.*, 19, 263-273.
- Davis, C. J., M. Lockwood, S. A. Bell, J. A. Smith, and E. M. Clarke (2000), Ionospheric measurements of relative coronal brightness during the total solar eclipses of 11 August, 1999 and 9 July, 1945, *Ann. Geophys.*, 18, 182-190.
- Deshpande, S. D., and A. P. Mitra (1972), Ionospheric effects of solar flares-IV. Electron density profiles deduced from measurements of SCNA's and VLF phase and amplitude, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 255-266.
- Donnelley, R. F. (1971), Extreme ultraviolet flash of solar flare observed via sudden frequency deviation: Experimental results, *Sol. Phys.*, 20, 188-203.
- Donnelly, R. F (1976), Empirical Models of solar flare X ray and EUV emission for use in studying their E and F region effects, *J. Geophys. Res.*, 81(25):4745-4753
- Donnelly, R. F (1967), The solar flare radiations responsible for sudden frequency deviations, *J. Geophys. Res.*, 72, 5247-5256.
- Donnelly, R. F (1969), Contribution of X-ray and EUV bursts of solar flares to sudden frequency deviations, *J. Geophys. Res.*, 74, 1873-1877.
- Eastes, R., S. Bailey, F. Marcos, J. Wise, and T. Woods (2004), The correspondence between thermospheric neutral densities and broadband measurements of the total solar soft X-ray flux, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19804, doi:10.1029/2004GL020801.
- Ebel, A., M. Dameris, H. Hass, A.H. Manson, C. E. Meek, and K. Petzoldt (1986), Vertical change of the response to solar activity oscillations with periods around 13 and 27 days in the middle atmosphere. *Ann. Geophys.*, 4, 271-280.
- Elias, A. G., and N. O. de Adler (2006), Earth magnetic field and geomagnetic activity effects on long-term trends in the F2 layer at mid-high latitudes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 68, 1871-1878.

- England, S. L., S. Maus, T. J. Immel, and S. B. Mende (2006), Longitudinal variation of the E-region electric fields caused by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21105, doi:10.1029/2006GL027465.
- Espenak, F., and J. Anderson (2001), Total Solar Eclipse of 2001 June 21, *NASA RP-1398*, Washington DC.
- Evans, J. V. (1965a), An F Region Eclipse, *J. Geophys. Res.*, 70, 131-142.
- Evans, J. V. (1965b), On the Behavior of foF2 during Solar Eclipses, *J. Geophys. Res.*, 70, 733-738.
- Evans, J. V. (1973), Seasonal and sunspot cycle variation of F region electron temperatures and protonospheric heat flux, *J. Geophys. Res.*, 78, 2344-2349.
- Farges, T., A. Le Pichon, E. Blanc, S. Perez, and B. Alcoverro (2003), Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 717-726.
- Farges, T., J. C. Jodogne, R. Bamford, Y. Le Roux, F. Gauthier, P. M. Vila, D. Altadill, J. G. Sole, and G. Miro (2001), Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, 915-924.
- Fehsenfeld, F. C. (1977), The reaction of O_2^+ with atomic nitrogen and $NO^+ \cdot H_2O$ and NO_2^+ with atomic oxygen, *Planet. Space Sci.*, 25, 195-196.
- Foppiano, A. J., L. Cid, and V. Jara (1999), Ionospheric long-term trends for South American mid-latitudes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 717-723.
- Forbes, J. M., S. Bruinsma, and F. G. Lemoine (2006), Solar rotation effects in the thermospheres of Mars and Earth, *Science*, 312, 1366-1368.
- Fritts, D., and Z. Luo (1993), Gravity Wave Forcing in the Middle Atmosphere Due to Reduced Ozone Heating During a Solar Eclipse, *J. Geophys. Res.*, 98(D2), 3011-3021.
- Fuller-Rowell, T. J., and D. Rees (1980), A three-dimensional time-dependent global model of the thermosphere, *J. Atmos. Sci.*, 37(11), 2545-2567.
- Fuller-Rowell, T. J., G. H. Millward, A. D. Richmond, and M. V. Codrescu (2002), Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1383-1391.
- Garriott, O. K., A. V. da Rosa, L. A. Wagner, and G. D. Thome (1969), Enhancement of ionizing radiation during a solar flare, *Sol. Phys.*, 8, 226-239.
- Garriott, O. K., A. V. da Rosa, M. J. Davis, and D. G. Villard Jr (1967), Solar flare effects in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 72, 6099-6103.
- Goodwin, G. L., and G. J. Hobson (1978), Atmospheric gravity waves generated during a solar eclipse. *Nature*, 275, 109-111.

- Guo J., W. Wan, J. M. Forbes, E. K. Sutton, R. S. Nerem, T. N. Woods, Sean Bruinsma, L. Liu (2007), Effects of solar variability on thermosphere density from CHAMP accelerometer data, *J. Geophys. Res.*, 112, A10308, doi:10.1029/2007JA012409.
- Guo, J., W. Wan, J. M. Forbes, E. Sutton, R. S. Nerem, and S. Bruinsma (2008), Interannual and latitudinal variability of the thermosphere density annual harmonics, *J. Geophys. Res.*, 113, A08301, doi:10.1029/2008JA013056.
- Hanson, W. B., and R. J. Moffett (1966), Ionization transport effects in the equatorial F region, *J. Geophys. Res.*, 71, 5559-5572.
- Hargreaves, J. K (1992), Effects of solar flares, In: Dessler, A. J., Houghton, J. T., Rycroft, M. J. (Eds.), *The Solar–Terrestrial Environment. Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- Hartman, W. A., and R. A. Heelis (2007), Longitudinal variations in the equatorial vertical drift in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 112, A03305, doi:10.1029/2006JA011773.
- Hedin, A. E. (1987), MSIS–86 thermospheric model, *J. Geophys. Res.*, 92, 4649-4662.
- Hedin, A. E., et al. (1996), Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1421-1447.
- Heelis, R. A. (2004), Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 825-838
- Higgs, A. J. (1942), Ionospheric measurements made during the total solar eclipse of 1940, October 1, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 102, 24-34.
- Hocke, K., and K. Schlegel (1996), A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995, *Ann. Geophys.*, 14, 917-940.
- Hoegy, W. R. (1976), New fine structure cooling rate, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 541-544.
- Holt, J. M., R. H. Wand, and J. V. Evans (1984), Millstone Hill measurements on 26 February 1979 during the solar eclipse and formation of a midday F-region trough, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 251-264.
- Horvath, J. J., and J. S. Theon (1972), Response of the neutral particle upper atmosphere to the solar eclipse of 7 March 1970, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34(4), 593-599.
- Huang, C. R., C. H. Liu, K. C. Yeh, K. H. Lin, W. H. Tsai, H. C. Yeh, and J. Y. Liu (1999), A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse, *J. Geophys. Res.*, 104(A1), 79–94.
- Huba, J. D., G. Joyce, and J. A. Fedder (2000), Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low latitude ionospheric model, *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(A10), 23035-23053.

- Huba, J. D., G. Joyce, and J. A. Fedder (2003), Simulation study of midlatitude ionosphere fluctuations observed at Millstone Hill, *Geophys. Res. Lett.*, 30(18), 1943, doi:10.1029/2003GL018018.
- Huba, J. D., H. P. Warren, G. Joyce, X. Pi, B. Iijima, and C. Coker (2005), Global response of the low-latitude to midlatitude ionosphere due to the Bastille Day flare, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15103, doi:10.1029/2005GL023291.
- Huba, J. D., K. F. Dymond, G. Joyce, S. A. Budzien, S. E. Thonnard, J. A. Fedder, and R. P. McCoy (2002), Comparison of O⁺ density from ARGOS LORAAS data analysis and SAMI2 model results, *Geophys. Res. Lett.*, 29(7), 1102, doi:10.1029/2001GL013089.
- Hunter A. N., B. K. Holman, D. G. fieldgate, and R. Kelleher (1974), Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973, *Nature*, 250, 205-206.
- Immel T. J., E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson, and L. J. Paxton (2006), Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15108, doi:10.1029/2006GL026161.
- Ivanov-Kholodny, G. S., and A. V. Mikhailov (1986), The prediction of ionospheric conditions, *Reidel*, Dordrecht.
- Jacchia, L. G. (1964), Influence of solar activity on the earth's upper atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 12, 355-378.
- Jakowski, N., et al. (2008), Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 70, 836-853.
- Jarvis, M. J., B. Jenkins, and G. A. Rogers (1998), Southern hemisphere observations of a long-term decrease in F region altitude and thermospheric wind providing possible evidence for global thermospheric cooling, *J. Geophys. Res.*, 103(A9), 20,775-20,787.
- Jenkins, B., G. J. Bailey, M. Abdu, I. S. Batista, and N. Balan (1997), Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil, *Ann. Geophys.*, 15,753-759.
- Jones, B. W., G. J. Miseldine, and R. J. A. Lambourne (1982), A possible atmospheric pressure wave from the total solar eclipse of 22 July 1990, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 54, 113-115.
- Jones, T. B. (1971), VLF phase anomalies due to a solar X-ray flare, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33, 963-963.
- Kane, R. P. (2003), Fluctuations in the ~27-day sequences in the solar index F10 during solar cycles 22-23, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 1169-1174.

- Kil, H., E. R. Talaat, S.-J. Oh, L. J. Paxton, S. L. England, and S.-J. Su (2008), Wave structures of the plasma density and vertical $E \times B$ drift in low-latitude F region, *J. Geophys. Res.*, 113, A09312, doi:10.1029/2008JA013106.
- Klobuchar, J. A., and H. E. Whitney (1965), Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse, *J. Geophys. Res.*, 70(5), 1254-1257.
- Korenkov, Y. N., V. V. Klimenko, V. Baran, I. I. Shagimuratov, and F. S. Bessarab (2003a), Model calculations of TEC over Europe during 11 August 1999 solar eclipse, *Adv. Space Res.*, 31(4), 983-988.
- Korenkov, Y. N., V. V. Klimenko, F. S. Bessarab, N. S. Nutsvalyan, and I. Stanislawski (2003b), Model/data comparison of the F2-region parameters for the 11 August 1999 solar eclipse, *Adv. Space Res.*, 31(4), 995-1000.
- Laštovička, J., R. A. Akmaev, G. Beig, J. Bremer, and J. T. Emmert (2006a), Global change in the upper atmosphere, *Science*, 314(5803), 1253-1254.
- Laštovička, J., et al. (2006b), Long-term trends in foF2: A comparison of various methods, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 68, 1854-1870.
- Le, H., L. Liu, X. Yue, and W. Wan (2008a), The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: Observations and modeling, *Ann. Geophys.*, 26, 107-116.
- Le, H., L. Liu, X. Yue, and W. Wan (2008b), The mid-latitude F2 layer during solar eclipses: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 113, A08309, doi:10.1029/2007JA013012.
- Le, H., L. Liu, X. Yue, and W. Wan (2009), The ionospheric behavior in conjugate hemispheres during the 3 October 2005 solar eclipse, *Ann. Geophys.*, 27, 179-184.
- Lei, J. (2005), Statistical analysis and modeling investigation of middle latitude ionosphere, Dissertation for the Doctoral Degree., Beijing: Institute of Geology and Geophysics, *Chinese Academy of Sciences*, 1-121.
- Lei, J., L. Liu, W. Wan, and S.-R. Zhang (2004a), Modeling the behavior of ionosphere above Millstone Hill during the September 21st, 1998 storm, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 1093-1102.
- Lei, J., L. Liu, W. Wan, and S.-R. Zhang (2004b), Model results for the ionospheric lower transition height over mid-latitude, *Ann. Geophys.*, 22, 2037-2045.
- Lei, J., R. G. Roble, W. Wang, B. A. Emery, and S.-R. Zhang (2007), Electron temperature climatology at Millstone Hill and Arecibo, *J. Geophys. Res.*, 112, A02302, doi:10.1029/2006JA012041.
- Leonovich, L. A., and A. V. Tashilin (2008), Formation of negative disturbances in the topside ionosphere during solar flares, *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 8, GI1001, doi:10.1029/2006GI000157.

- Leonovich, L. A., E. L. Afraimovich, E. B. Romanova, and A. V. Tashilin (2002), Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network, *Ann. Geophys.*, 20, 1935-1941.
- Li, J., W. Wan, L. Li., and Z. Wu (1988), A network observation of traveling ionospheric disturbances during the annular eclipse of September 23, 1987. *Proceeding of the International Beacon Satellite Symposium*, Beijing, April 18–21, 1988, pp. 166-172.
- Lin C. H., W. Wang, M. E. Hagan, C. C. Hsiao, T. J. Immel, M. L. Hsu, J. Y. Liu, L. J. Paxton, T. W. Fang, and C. H. Liu (2007a), Plausible effect of atmospheric tides on the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC: Three-dimensional electron density structures, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11112, doi:10.1029/2007GL029265.
- Lin, C. H., C. C. Hsiao, J. Y. Liu, and C. H. Liu (2007b), Longitudinal structure of the equatorial ionosphere: Time evolution of the four-peaked EIA structure, *J. Geophys. Res.*, 112, A12305, doi:10.1029/2007JA012455.
- Liu, H., H. Lühr, S. Watanabe, W. Köhler, and C. Manoj (2007), Contrasting behavior of the thermosphere and ionosphere in response to the 28 October 2003 solar flare, *J. Geophys. Res.*, 112, A07305, doi:10.1029/2007JA012313.
- Liu, J. Y., C. H. Lin, H. F. Tsai, and Y. A. Liou (2004), Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers: Theory and observation, *J. Geophys. Res.*, 109, A01307, doi:10.1029/2003JA009931.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, and J. S. Lin (2003), Statistical investigation of the saturation effect in the ionospheric foF2 versus sunspot, solar radio noise, and solar EUV radiation, *J. Geophys. Res.*, 108(A2), 1067, doi:10.1029/2001JA007543.
- Liu, J. Y., C. C. Hsiao, L. C. Tsai, C. H. Liu, F. S. Kuo, H. Y. Lue, and C.M. Huang (1998), Vertical phase and group velocities of internal gravity waves from ionograms during the solar eclipse of 24 October 1995, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 60, 1679-1686.
- Liu, L., W. Wan, and B. Ning (2004), Statistical modeling of ionospheric foF2 over Wuhan, *Radio Sci.*, 39, RS2013, doi:10.1029/2003RS003005.
- Liu, L., W. Wan, B. Ning, O. M. Pirog, and V. I. Kurkin (2006), Solar activity variations of the ionospheric peak electron density, *J. Geophys. Res.*, 111, A08304, doi:10.1029/2006JA011598.
- Liu, L., W. Wan, J. N. Tu, Z. T. Bao, and C. K. Yeh (1999), Modeling study of the ionospheric effects during a total solar eclipse, *Chinese J. Geophys.*, 42(3), 296-302.

- Lühr, H., K. Hausler, and C. Stolle (2007), Longitudinal variation of F region electron density and thermospheric zonal wind caused by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16102, doi:10.1029/2007GL030639.
- Luo, Y., A. H. Manson, C. E. Meek, K. Igarashi, and Ch. Jacobi (2001), Extra long period (20–40 day) oscillations in the mesospheric and lower thermospheric winds: observations in Canada, Europe and Japan, and considerations of possible solar influences, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, 835-852.
- MacPherson, B., S. A. González, M. P. Sulzer, G. J. Bailey, F. Djuth, and P. Rodriguez (2000), Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998, *J. Geophys. Res.*, 105(A10), 23,055-23,067.
- Marin, D., A. V. Mikhailov, B. A. de la Morena, and M. Herraiz (2001), Long-term hmF2 trends in the Eurasian longitudinal sector on the ground-based ionosonde observations, *Ann. Geophys.*, 19, 761-772.
- Mariska, J. T., A. G. Emslie, and P. Li (1989), Numerical simulations of impulsively heated solar flares. *Astrophys. J.*, 341, 1067-1074.
- Marriott, R. T., D. E. S. John, R. M. Thorne, S. V. Venkateswaran, and P. Mahadevan (1972), Ionospheric effects of two recent solar eclipses, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 695-712.
- McPherson, B., S. A. Gonzalez, M. P. Sulzer, G. J. Bailey, F. Djuth, and P. Rodriguez (2000), Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998, *J. Geophys. Res.*, 105, 23055-23067
- Meier, R. R., et al. (2002), Ionospheric and dayglow responses to the radiative phase of the Bastille Day flare, *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1461, doi:10.1029/2001GL013956.
- Mendillo, M., et al. (1974), Behavior of the ionospheric F region during the greatest solar flare of August 7, 1972, *J. Geophys. Res.*, 79, 665-672.
- Mendillo, M., and J. V. Evans (1974), Incoherent scatter observations of the ionospheric response to a large solar flare, *Radio. Sci.*, 9, 197-210.
- Mentzoni, M. H., and R. V. Rao (1963), Rotational excitation of electron relaxation in nitrogen, *Phys. Rev.*, 130, 2312-2316.
- Mikhailov, A. V. (2002), The geomagnetic control concept of the F2-layer parameter long-term trends, *Phys. Chem. Earth.*, 27, 595-606.
- Mikhailov, A. V., D. Marin, T. Yu. Leschinskaya, and M. Herraiz (2002), A revised approach to the foF2 long-term trends analysis, *Ann. Geophys.*, 20, 1663-1675.
- Millward, G. H. (1993), A global model of the earth's thermosphere, ionosphere and plasmasphere: theoretical studies of the response to enhanced high-latitude convection, Dissertation for the Doctoral Degree, UK: University of Sheffield, 1-195.

- Millward, G. H., R. J. Moett, S. Quegan, and T. J. Fuller-Rowell (1996), A Coupled Thermosphere-Ionosphere-Plasmasphere Model (CTIP), *Solar Terrestrial Energy Program (STEP) Handbook*, edited by R. W. Schunk, 239-279.
- Minnis, C.M. (1958), The interpretation of changes in the E and F1 layers during solar eclipses, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 12, 272-282.
- Mitra, A. P. (1968), A review of D-region process in non-polar latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 1065-1114.
- Mitra, A. P. (1974), Ionospheric Effects of Solar Flares, 294 pp., D. Reidel, Norwell, Mass.
- Müller-Wodarg, I. C. F., A. D. Aylward, and M. Lockwood (1998), Effects of a Mid-Latitude Solar Eclipse on the Thermosphere and Ionosphere - A Modelling Study, *Geophys. Res. Lett.*, 25(20), 3787-3790.
- Nagy, A. F., and P. M. Banks (1970), Photoelectron Fluxes in the Ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 75(31), 6260-6270.
- Nisbet, John S. (1968), Photoelectron escape from the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 1257-1278.
- Ohshio, M. (1964), Solar flare effect on geomagnetic variations, *J. Radio Res. Lab. Jpn.*, 11, 377-491.
- Ohshio, M. (1971), Negative sudden phase anomaly, *Nature*, 229, 239-248.
- Sao, K., M. Yamashita, S. Tanahashi, H. Jindoh, and K. Ohta (1970), Sudden enhancements (SEA) and decreases (SDA) of atmospheric, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 32, 1567-1578.
- Oliver, W. L. and S. A. Bowhill (1974), The F1 region during a solar eclipse, *Radio. Sci.*, 9(2), 185-195.
- Pancheva, D., R. Schminder, and J. Lastovicka (1991), 27-day fluctuations in the ionospheric D-region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 1145-1150.
- Pavlov, A. V. (2003), New method in computer simulations of electron and ion densities and temperatures in the plasmasphere and low-latitude ionosphere, *Ann. Geophys.*, 21, 1601-1628.
- Pavlov A. V., and M. J. Buonsanto (1997), Comparison of model electron densities and temperatures with Millstone Hill observations during undisturbed periods and the geomagnetic storms of 16-23 March and 6-12 April 1990, *Ann. Geophys.*, 15, 327-344.
- Peterson, W. K., J. P. Doering, T. A. Potemra, R. W. McEntire, and C. O. Bostrom (1977), Conjugate Photoelectron Fluxes Observed on Atmosphere Explorer C, *Geophys. Res. Lett.*, 4(3), 109-112.

- Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin (2002), NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1468, doi:10.1029/2002JA009430.
- Pierce, J. A. (1948), The ionospheric eclipse of October 1, 1940, *Proc. IRE.*, 36, 137-144.
- Prölss, G. W. (1995), Ionospheric F-region storms, In Handbook of Atmospheric Electrodynamics, Edited by Volland H., *CRC Press*, Chapter 8.
- Rao, B. C., and E. J. R. Maier (1970), Photoelectron flux and photospheric heating during the conjugate point sunrise, *J. Geophys. Res.*, 75, 816-822.
- Ratcliffe, J. A (1956b), The formation of the ionospheric layers F1 and F2, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 8, 260-269.
- Ratcliffe, J.A. (1956a), A survey of solar eclipses and the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 6 special Suppl., 1-13.
- Rhoden, E. A., J. M. Forbes, F. A. Marcos (2000), The influence of geomagnetic and solar variabilities on lower thermosphere density, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 999-1013.
- Rich, F. J., P. J. Sultan, and W. J. Burke (2003), The 27-day variations of plasma densities and temperatures in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1297, doi:10.1029/2002JA009731.
- Richards, P. G. (1991), An Improved Algorithm for Determining Neutral Winds from the Height of the F 2 Peak Electron Density, *J. Geophys. Res.*, 96(A10), 17,839-17,846.
- Richards, P. G. (2004), On the increases in nitric oxide density at midlatitudes during ionospheric storms, *J. Geophys. Res.*, 109, A06304, doi:10.1029/2003JA010110.
- Richards, P. G., and D. G. Torr (1988), Ratios of Photoelectron to EUV Ionization Rates for Aeronomic Studies, *J. Geophys. Res.*, 93(A5), 4060-4066.
- Richards, P. G., J. A. Fennelly, and D. G. Torr (1994), EUVAC: A Solar EUV Flux Model for Aeronomic Calculations, *J. Geophys. Res.*, 99(A5), 8981-8992.
- Richards, P. G., T. N. Woods, and W. K. Peterson (2006), HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model. *Adv. Space. Res.*, 37, 315-322.
- Ridley, E. C., R. E. Dickinson, R. G. Roble, and M. H. Rees (1984), Thermospheric Response to the June 11, 1983, Solar Eclipse, *J. Geophys. Res.*, 89(A9), 7583-7588.
- Rishbeth, H. (1968), Solar eclipses and ionospheric theory, *Space Sci. Rev.*, 8(4), 543-554.
- Rishbeth, H., and O. K. Garriott (1969), Introduction to Ionospheric Physics. *Academic Press*, San Diego, Calif.

- Roble, R. G., B. A. Emery, and E. C. Ridley (1986), Ionospheric and Thermospheric Response Over Millstone Hill to the May 30, 1984, Annular Solar Eclipse, *J. Geophys. Res.*, 91, A2, 1661-1670.
- Roemer, M. (1967), Geomagnetic activity effect and 27-day variation: Response time of the thermosphere and lower exosphere, *Space Res.*, 7, 1091-1099.
- Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende (2005), Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV, *J. Geophys. Res.*, 110, A11302, doi:10.1029/2004JA010848.
- Salah, J. E., W. L. Oliver, J. C. Foster, J. Holt, B. A. Emery, and R. G. Roble (1986), Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill, *J. Geophys. Res.*, 91, 1651-1660.
- Scherliess, L., and B. G. Fejer (1999), Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model, *J. Geophys. Res.*, 104(A4), 6829-6842.
- Scherliess, L., D. C. Thompson, and R. W. Schunk (2008), Longitudinal variability of low-latitude total electron content: Tidal influences, *J. Geophys. Res.*, 113, A01311, doi:10.1029/2007JA012480.
- Schlesier A. C., and M. J. Buonsanto (1999), The Millstone Hill ionospheric model and its application to the May 26-27, 1990, ionospheric storm, *J. Geophys. Res.*, 104, 22,453-22,468.
- Schunk, R. W., and A. F. Nagy (1978), Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16(3), 355-399.
- Sheperd, G. G., J. F. Pieau, T. Ogawa, T. Tohmatsu, K. Oyama, Y. Watanabe (1978), Direct measurement of conjugate photoelectrons and predawn 630 nm airglow, *Planet. Space Sci.*, 26, 211-217.
- Singh, L., et al. (1989), A multi-station satellite radio beacon study of ionospheric variations during total solar eclipses. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 271-278.
- Singh, L., T. R. Tyagi, Y. V. Somayajulu, P. N. Vijayakumar, R. S. Dabas, B. Loganadham, S. Ramakrishna, P. V. S. Rama Rao, A. Dasgupta, G. Navneeth, J. A. Klobuchar, and G. H. Hartmann (1989), A Multi-Station Satellite Radio Beacon Study of Ionospheric Variations During Total Solar Eclipses, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 271-278.
- Singh, L., T.R. Tyagl, Y.V. Somayajulu, P.N. Vijayakumar, R.S. Dabas (1989), Multi-station satellite radio-beacon study of ionospheric variations during total solar eclipses, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 271-278.
- Smithtro, C. G., J. J. Sojka, T. Berkey, D. Thompson, and R. W. Schunk (2006), Anomalous F region response to moderate solar flares, *Radio Sci.*, 41, RS5S03, doi:10.1029/2005RS003350.

- Sridharan, R., C. V. Devasia, N. Jyoti, Diwakar Tiwari, K. S. Viswanathan, and K. S. V. Subbarao (2002), Effects of solar eclipse on the electrodynamical processes of the equatorial ionosphere: a case study during 11 August 1999 dusk time total solar eclipse over India, *Ann. Geophys.*, 20, 1977-1985.
- Stonehocker, G. H. (1970), Advanced telecommunication forecasting technique in AGY, 5th, Ionospheric forecasting, *AGARD Conf. Proc.*, 29, 27-31.
- Stubbe, P. (1970), The F-region during an eclipse – A theoretical study, *J. Geophys. Res.*, 32, 1109-1116.
- Sutton, E. K., J. M. Forbes, R. S. Nerem, and T. N. Woods (2006), Neutral density response to the solar flares of October and November, 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L22101, doi:10.1029/2006GL027737.
- Thome, G. D., L. S. Wagner (1971), Electron density enhancement in the E and F regions of the ionosphere during solar flares, *J. Geophys. Res.*, 76, 6883–6894.
- Titheridge, J. E. (1976), Ion transition heights from topside electron density profiles, *Planet. Space Sci.*, 24, 229-245.
- Titheridge, J. E. (1993), Atmospheric winds calculated from diurnal changes in the mid-latitude ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 55, 1637-1659.
- Titheridge, J. E. (1996), Direct allowance for the effect of photoelectrons in ionospheric modeling, *J. Geophys. Res.*, 101, 357-369.
- Titheridge, J. E. (1997), Model results for the ionospheric E region: solar and seasonal changes, *Ann. Geophys.*, 15, 63-78.
- Titheridge, J. E. (1998), Temperatures in the upper ionosphere and plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 103(A2), 2261-2277.
- Tobiska, W. K. (2000), Status of the SOLAR2000 solar irradiance model, *Phys. Chem. Earth*, 25(5-6), 383-386.
- Tomás, A. T., H. Lühr, M. Förster, S. Rentz, and M. Rother (2007), Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP, *J. Geophys. Res.*, 112, A06303, doi:10.1029/2006JA012168.
- Truhlik, V., J. Smilauer, L. Tiiskovii, Yu. A. Shultchishin and N. F. Smimova (1997), Manifestation of ionospheric storms in the upper transition height, *Adv. Space Res.*, 20(9), 1709-1712.
- Truhlik, V., L. Triskova, and J. Smilauer (2004), New advances in empirical modelling of ion composition in the outer ionosphere, *Adv. Space Res.*, 33, 844-849.
- Tsai, H. F., and J. Y. Liu (1999), Ionospheric total electron content response to solar eclipses, *J. Geophys. Res.*, 104(A6), 12,657-12,668.
- Tsuneta, S., and 12 colleagues (1991), The Soft X-ray Telescope for the SOLAR-A Mission, *Solar Phys.*, 136, 37-67.

- Tsurutani, B. T., et al. (2005), The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03S09, doi:10.1029/2004GL021475
- Tu, J. N., L. Liu, and Z. T. Bao (1997), An low latitude theoretical ionospheric model, *Chinese J. Space Sci* (in Chinese), 17, 212-219.
- Van Zandt, T. E., R. B. Norton, and G. H. Stonehocker (1960), Photochemical rates in the equatorial F2 region from the 1958 eclipse, *J. Geophys. Res.*, 65(7), 2003-2009.
- Walker, G. O., T. Y. Y. Li, Y. W. Wong, T. Kikuchi, and Y. H. Huang (1991), Ionospheric geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 25-37.
- Wan, W., H. Yuan, L. Liu, and B. Ning (2002), The sudden increase in ionospheric total electron content caused by the very intense solar flare on July 14, 2000, *Sci. China Ser. E*, 45(Supp.), 142-147
- Wan, W., L. Liu, H. Yuan, B. Ning, S. Zhang (2005), The GPS measured SITEC caused by the very intense solar flare on July 14, 2000, *Adv. Space. Res.*, 36, 2465-2469.
- Warren, H. P., J. T. Mariska, J. Lean (1998), A new reference spectrum for the EUV irradiance of the quiet Sun 1. Emission measure formulation. *J. Geophys. Res.*, 103(A6), 12, 077-12,090.
- Warren, H. P., J. T. Mariska, J. Lean (2001), A new model of solar EUV irradiance variability: 1. Model formulation, *J. Geophys. Res.*, 106(A8), 15,745-15,758.
- Woods, T. N., F. G. Eparvier (2006), Solar ultraviolet variability during the TIMED mission, *Adv. Space. Res.*, 37(2), 219-224.
- Xu, Z.-W., J. Wu, K. Igarashi, H. Kato, and Z.-S. Wu (2004), Long-term ionospheric trends based on ground-based ionosonde observations at Kokubunji, Japan, *J. Geophys. Res.*, 109, A09307, doi:10.1029/ 2004JA010572.
- Young, E.R., A.F. Nagy, D.G. Torr, P. Richards (1980), A computer simulation of the midlatitude plasmasphere and ionosphere, *Planet. Space Sci.*, 28, 881-893.
- Yue, X., L. Liu, W. Wan, Y. Wei, and Z. Ren (2008c), Modeling the effects of secular variation of geomagnetic field orientation on the ionospheric long term trend over the past century, *J. Geophys. Res.*, 113, A10301, doi:10.1029/2007JA012995.
- Yue, X., W. Wan, L. Liu, and B. Ning (2006a), An empirical model of ionospheric foE over Wuhan, *Earth Planets Space*, 58, 323-330.
- Yue, X., W. Wan, L. Liu, B. Ning, and B. Zhao (2006b), Applying artificial neural network to derive long-term foF2 trends in the Asia/ Pacific sector from

- ionosonde observations, *J. Geophys. Res.*, 111, A10303, doi:10.1029/2005JA011577.
- Yue, X., W. Wan, L. Liu, B. Ning, B. Zhao, and M. Zhang (2008b), TIMEIGGCAS model validation: Comparisons with empirical models and observations, *Sci. China Ser. E-Tec. Sci.*, 51(3), 308-322.
- Yue, X., W. Wan, L. Liu, H. Le, Y. Chen, and T. Yu (2008a), Development of a middle and low latitude theoretical ionospheric model and an observation system data assimilation experiment, *Chinese Sci. Bull.*, 53(1), 94-101.
- Zhang D. H., and Z. Xiao (2003), Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 108(A8),1330-1340.
- Zhang, D. H., and Z. Xiao (2000), Study of the ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on Nov. 6, 1997. *Chinese Science Bulletin* 45, 1749-1752.
- Zhang, D. H., and Z. Xiao (2005), Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data, *J. Geophys. Res.*, 110, A03307, doi:10.1029/2004JA010738.
- Zhang, D. H., Z. Xiao, K. Igarashi, and G. Y. Ma (2002), GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000, *Radio Sci.*, 37(5), 1086, doi:10.1029/2001RS002542.
- Zhang, S. R., X. Y. Huang, Y. Z. Su and S. M. Radicella, (1993), A physical model for one-dimension and time-dependent ionosphere. Part I. Description of the model, *Ann. Geofis.*, 36, 105-110.
- Zhang, S.-R., J. M. Holt, A. M. Zalucha, and C. Amory-Mazaudier (2004), Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987, *J. Geophys. Res.*, 109, A11311, doi:10.1029/2004JA010709.
- Zhang, S.-R., J. M. Holt, T. van Eyken, M. McCready, C. Amory-Mazaudier, S. Fukao, and M. Sulzer (2005), Ionospheric model and climatology from long-term databases of worldwide incoherent scatter radars, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20102, doi:10.1029/2005GL023603.
- 傅竹风, 胡友秋 (1995), 空间等离子体数值模拟, 安徽: 安徽科学技术出版社。
- 何友文, 孙宏林 (2001), 日食声重波效应, 电波科学学报, 16 (1), 93—99。
- 胡文瑞, 林元章, 吴林襄 (1983), 太阳耀斑, 北京: 科学出版社。
- 焦培南 (1990), 1987 年 9 月 23 日环食的电离层波动现象, 地球物理学报, 33 (4), 391—397。

- 雷久侯 (2005), 中纬电离层的统计分析 with 模式化研究, 博士学位论文, 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所。
- 李利斌, 万卫星, 吴振华, 宁百齐, 李钧 (1990), 1987 年 9 月 23 日日环食引起的电离层扰动, 地球物理学报, 33 (4), 384—390。
- 林元章 (2000), 太阳物理导论, 北京: 科学出版社。
- 刘立波 (1997), 中国南方电离层参量形态特征的机制研究, 博士学位论文, 武汉: 武汉大学。
- 涂传诒 (1988), 日地空间物理学, 北京: 科学出版社。
- 涂剑南, 刘立波, 保宗悌 (1997), 一个低纬电离层理论模式, 空间科学学报, 17, 212—219。
- 熊年禄, 龙咸灵, 张训械 (1990), 日食所致大气波动及其对电离层高频多普勒频移的影响, 电波科学学报, 5 (1), 53—60。
- 熊年禄, 唐存琛, 李行健 (1999), 电离层物理概论, 武汉: 武汉大学出版社。
- 徐文耀 (2003), 地磁学, 北京: 地震出版社。
- 乐新安 (2008), 中低纬电离层模式和数据同化研究, 博士学位论文, 北京: 中科院地质与地球物理研究所。
- 张东和, 孙臻, 刘四清 (2004), 大耀斑期间向日面电离层总电子含量的响应各例分析, 空间科学学报, 24 (2), 96—104。
- 张东和, 萧佐 (2000), 1997 年 11 月 6 日大耀斑期间电离层 TEC 的 GPS 观测结果分析, 科学通报, 45 (6), 575—578。
- 张东和, 萧佐 (2002), 太阳耀斑期间向日面电离层相关扰动现象与分析, 科学通报, 47 (2), 96—98
- 张东和, 萧佐, 常青 (2000), 耀斑的日面位置与电离层 SITEC 的关系, 科学通报, 46 (16), 1339—1341。
- 张顺荣 (1995), 中纬电离层结构的时变理论模式及其在电离层形态与机制研究上的运用, 博士学位论文, 武汉: 中科院武汉物理与数学研究所。

附录 学术论文完成情况

1、第一作者 SCI 论文

- [1] **Huijun Le**, Libo Liu, Bin Chen, Jiuhou Lei, Xinan Yue, Weixing Wan (2007), Modeling the responses of the middle latitude ionosphere to solar flares, *J. Atoms. Sol. Terres. Phys.*, 69, 1587-1598.
- [2] **Huijun Le**, Libo Liu, Xinan Yue, and Weixing Wan (2008), The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling, *Ann. Geophys.*, 26, 107-116.
- [3] **Huijun Le**, Libo Liu, Xinan Yue, Weixing Wan (2008), The midlatitude F2 layer during solar eclipses: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 113, A08309, doi:10.1029/2007JA013012.
- [4] **Huijun Le**, Libo Liu, Xinan Yue, and Weixing Wan (2009), The ionospheric behavior in conjugate hemispheres during the 3 October 2005 solar eclipse, *Ann. Geophys.*, 27, 179-184.
- [5] **Huijun Le**, Libo Liu, Xinan Yue, Weixing Wan, Baiqi Ning (2009), The latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses, *J. Geophys. Res.*, in press, doi:10.1029/2009JA014072.

2、合作者论文

- [6] Libo Liu, **Huijun Le**, Weixing Wan, Mike P. Sulzer, Jiuhou Lei, and Man-Lian Zhang (2007), An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, A06307, doi:10.1029/2007JA012250.
- [7] Yiding Chen, Libo Liu, and **Huijun Le** (2008), Solar activity variations of nighttime ionospheric peak electron density, *J. Geophys. Res.*, 113, A11306, doi:10.1029/2008JA013114.
- [8] Xinan Yue, Weixing Wan, Libo Liu, **Huijun Le**, Yiding Chen, and Tao Yu (2008), Development of a middle and low latitude theoretical ionospheric model and an observation system data assimilation experiment, *Chin. Sci. Bull.*, 53(1), 94-101.
- [9] Maosheng He, Weixing Wan, Baiqi Ning, Biqiang Zhao, Xinan Yue, **Huijun Le** (2009), A study of the Weddell Sea Anomaly observed by COSMIC, *J. Geophys. Res.*, under review, 2009JA014175.

致 谢

时间匆匆而过，五年的研究生学习阶段即将结束，本毕业论文也顺利完成并将付梓。在此我衷心地向所有关心、帮助以及支持过我的老师、同学、朋友以及家人表示真诚的感谢。

首先要感谢的是导师刘立波研究员，本论文是在他的精心指导和大力帮助下完成的。从论文的选题、资料的收集、文章的定稿都始终得到刘老师的悉心指导。刘老师对科研事业的执着和热爱，以及对学术问题的敏锐和深刻的洞察力给我留下了深刻的印象，并让我受益匪浅。

感谢万卫星、宁百齐、徐文耀、朱岗昆研究员，熊建刚、丁锋、张满莲、陈耿雄、洪明华、杜爱民副研究员，以及研究室秘书张容燕女士，他们在我平时的工作和学习中给予了很多帮助和支持。另外还要感谢中科院武汉物理与数学研究所教育处的赵江南和斌老师，虽然研究室的搬迁给我们的学习和生活造成了一些不便，但赵江南和刘斌老师不辞辛劳为我们解决了很多问题，同时也感谢中科院地质与地球物理研究所教育处的苏宏、王军枝、铁翠霞以及李铁胜老师在我的学习和生活中给予的关心和帮助，特别是他们为我从武汉物理与数学所到地质与地球物理所的转学事宜提供了很多帮助。

感谢现在美国罗拉多大学工作的雷久侯师兄在我的学习以及论文的写作过程中的指导。感谢即将赴美国工作的乐新安师兄在电离层模式以及数据同化的学习中给予了帮助和指导。另外，还要感谢美国乔治梅森大学的 Phil. G. Richards 和英国卢瑟福·阿普尔顿实验室的 C. J. Davis 教授在论文的写作与评审中给予的建议和指导，这些建议和指导极大地提高了文章的质量。

感谢何茂盛同学帮助校对了全文。同时感谢五年来和我一起生活和学习过的同学们，他们是已经毕业的赵必强、赵光欣、牛晓娟、毛田、柯璇、徐桂荣、李国主、吴迎燕、孙凌峰、朱正平、丁宗华、姜国英、王保民、陈华娇、梅冰、熊波、郭建鹏、王敏、魏勇、左小敏、陈博、刘晓灿、陈晓博、胡连欢、占亮、刘三军、於晓、江葵、芦琳伶、余承莉、高琴、刘春煦、王程功、骆遥，以及还在继续求学以及即将毕业的王源、赵旭东、白春华、罗浩、文坤杰、周旭、洪文佳、

何茂盛、温晋、王秋军、穆文峰、刘晶、余优、陈一定、任志鹏。在这五年的学习和生活中大家相互帮助，相互鼓励。与你们在一起的这段时光将永远留在我的记忆里。

最后更要感谢我的家人。父母都已年逾半百，你们为了支持我的学业默默付出了太多心血和艰辛，儿子由衷地感谢你们默默无悔的付出和始终如一的支持。同时感谢大哥、嫂子对我学业始终如一的大力支持，并为此承担了更多的照顾家庭的责任，让我没有后顾之忧地学习和工作。还要感谢一直支持和鼓励我的爱妻郭婷婷，她给予了我无限的关心和支持，这些是我不断前进的动力和源泉。

本论文得到了国家自然科学基金(批准号：40725014, 40674090, 40636032)和中国科学院知识创新方向性项目(批准号：kzcx3-sw-144)、国家 973 计划(批准号：2006CB806306)的联合资助，在此一并致谢。

乐会军

2009 年 5 月于北京

CONTENTS

Abstract (In Chinese)	1
Abstract (In English)	3
Chapter 1. Introduction	6
§1.1 Morphology of Ionosphere	6
§1.2 Solar flare effects on the ionosphere	7
§1.3 Solar eclipse effects on the Ionosphere	10
§1.4 Aim of This Work and the Outline	12
Chapter 2. Solar Flare and Solar Eclipse	14
§2.1 Solar Flare	14
§2.1.1 Variations in Solar Radiation during Solar Flare	15
§2.1.2 Solar Flare Classification	17
§2.1.3 Main Parameters of Solar Flare	18
§2.1.4 Measurements of Solar Flare	18
§2.1.5 The Dependence of Solar Flare on the Solar Cycle	19
§2.2 Solar Eclipse	21
§2.2.1 Formation of Solar Eclipse	21
§2.2.2 Solar Eclipse Category	23
§2.2.3 Solar Eclipse Process and Main Parameters	25
§2.2.4 Variations in Solar Radiation during a Solar Eclipse	27
Chapter 3. Ionospheric model and solar radiation model for solar flare and eclipse	29
§3.1 One-dimension Middle- latitude Ionospheric Model	29
§3.1.1 Basic Equations of the Model	29
§3.1.2 Neutral Gas Parameters	30
§3.1.3 Photoionization Process	31
§3.1.4 Chemical Reaction Process	32
§3.1.5 Heating Rate and Heating Conduction Coefficient	32

§3.1.6 Solution of Equations.....	33
§3.2 Mid-low latitude Ionospheric model IGGCAS	34
§3.2.1 The Coordinate System and Distribution of Points	34
§3.2.2 Basic Equation of the Model	36
§3.2.3 $E \times B$ Drift.....	37
§3.2.4 Solution Procedure	39
§3.2.6 Model Results.....	39
§3.3 Solar Radiation Model during Solar Flares.....	43
§3.4 Solar Radiation Model during Solar Eclipse.....	45
Chapter 4. Modeling the Responses of the Middle latitude Ionosphere to Solar Flares	49
§4.1 Solar Radiation Variation during the October 23, 2003 Solar Flare	49
§4.2 Modeling Solar Flare Effect	50
§4.3 Observations on October 23, 2003	50
§4.4 Local Time and Seasonal Dependence	52
§4.4.1 Variation in Electron Density	52
§4.4.2 Variation in TEC	57
4.5 Summary	60
Chapter 5. The Ionospheric Responses to the 11 August 1999 Solar Eclipse: Observations and Modeling.....	62
§5.1 Data Source	62
§5.2 Solar Radiation Variation during the August 11, 1999 Solar Eclipse	64
§5.3 Modeling the Solar Eclipse Effect	65
§5.4 Results and Discussions	66
§5.4.1 Ionospheric Response at the Time of Maximum Eclipse	66
§5.4.2 Time-Dependent Response of the Ionosphere to Solar Eclipse.....	71
§5.4.3 Ionospheric Disturbances in the Conjugate Hemisphere.....	73
§5.5 Summary	75
Chapter 6. The Mid-latitude F2 layer during Solar Eclipses: Observations and Modeling.....	76

§6.1 Introduction	76
§6.2 Ionospheric Observations	78
§6.3 The Eclipse Modeling	79
§6.4 Case Control Studies	80
§6.4.1 Effect of background hmF2	81
§6.4.2 Local Time and Solar Zenith Angle Effects	82
§6.4.3 Solar cycle effects	85
§6.4.4 Dip angle effects	88
§6.5 Discussion	90
§6.6 Summary	92
Chapter 7. The Latitudinal Dependence of the Ionospheric Response to Solar Eclipses	94
§7.1 Introduction	94
§7.2 Ionospheric Observations	97
§7.3 Modeling Latitudinal Variations of the Eclipse effect on the ionosphere	99
§7.4 Simulations and Analyses	100
§7.4.1 The Plasma Density	100
§7.4.2 The Plasma Temperature	105
§7.5 Discussion	107
§7.5.1 $E \times B$ effects	107
§7.5.2 Dip angle effects	110
§7.6 Summary	112
Chapter 8. The Ionospheric Behavior in Conjugate Hemispheres	114
§8.1 Introduction	114
§8.2 Data Chosen and Analyses	115
§8.3 Modelling the Disturbances in the Conjugate regions	118
§8.4. Observations and Modeling results	120
§8.5. Discussion	122
§8.6. Summary	124
Chapter 9 Summary and Future Work	125

§9.1 Summary of the Results 125

§9.2 Future Work 129

Reference 131

Appendix: Publications 149

Acknowledgements 150