0254-6124/2011/31(5)-596–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Hu Xiong, Wu Xiaocheng, Xu Qingchen, Ma Guanglin, Tu Cui, Yan Zhaoai, Chen Xuxing, Xiao Cunying, Zhao Mingliang, Gong Jiancun. Observations of the ionosphere effects of the solar eclipse on 22 July 2009. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 596-601

2009 年 7 月 22 日日全食电离层效应观测 *

胡 雄[1] 吴小成[1] 徐轻尘[1] 马广林[1,2] 涂 翠[1,2]
闫召爱[1,2] 陈旭杏[1,2] 肖存英[1] 赵明亮[1] 龚建村[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 首次利用廊坊中频雷达和武汉、嘉兴、廊坊等三站 GPS 对 2009 年 7 月 22 日日全食电离层效应进行了观测. 日食期间, 中频雷达 D 层 78 km 高度上电子密度减小了约 67%, 电子密度为 200 cm^{-3} 的高度上升了近 10 km, GPS/TEC 减小了 1 TECU 左右, 其变化的最大相位与日食最大相位几乎同步; 日食后, 观测到周期为 2 个多小时的电离层扰动现象.

关键词 日食, 电离层效应, 中频雷达, 电子密度, GPS/TEC

中图法分类号 P 353

Observations of the Ionosphere Effects of the Solar Eclipse on 22 July 2009

HU Xiong[1] WU Xiaocheng[1] XU Qingchen[1] MA Guanglin[1,2]
TU Cui[1,2] YAN Zhaoai[1,2] CHEN Xuxing[1,2] XIAO Cunying[1]
ZHAO Mingliang[1] GONG Jiancun[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract For the first time, Langfang Medium-Frequency (MF) radar was used to simultaneously observe the ionospheric effects due to the solar total eclipse on 22 July 2009, with three GPS/TEC receivers operated at Wuhan, Jiaxing and Langfang respectively. Results show that during the solar eclipse, the D layer electron densities at 78 km level observed by the MF radar decreased by 67% and the altitude level of equivalent electron densities of 200 cm^{-3} uprised about 10 km. The ionospheric Total Electron Content (TEC) observed by the GPS/TEC receivers in the above three sites respectively decreased about 1 TECU. Their minimum reductions of the D layer electron densities and TEC are synchronous with the solar eclipse maximum phase. After the solar eclipse, a Traveling Ionospheric Disturbance (TID) was revealed with a period of larger than 2 h in the

* 国家自然科学基金项目 (40774087) 和国家航天领域高技术课题共同资助
2010-04-09 收到原稿, 2011-05-18 收到修定稿
E-mail: xhu@cssar.ac.cn

GPS/TEC data.

Key words Solar eclipse, Ionosphere effect, MF radar, Electron density, GPS/TEC

1 引言

中国曾利用电离层垂测仪 [1−2]、天波雷达 [3]、GPS/TEC[4]、卫星 CT[5]、低频 (LF) 接收机 [6] 等仪器设备开展过日食电离层效应的观测和分析. 日食期间, 由于太阳辐射被月球遮挡, 临近空间 (20~200 km) 大气和电离层的太阳加热及电离源发生变化, 将引起一系列的大气和电离层效应, 如温度降低、风场变化、电子密度降低, 并激发大气和电离层的扰动等 [7]. 这个过程非常复杂, 日食发生在不同地域、不同时间, 可能具有不同的响应特点.

2009 年 7 月 22 日发生的日全食事件在中国的长江流域比较便于观测. 为了解在这次日全食期间电离层的变化特征, 揭示其内在的变化机制, 利用廊坊中频雷达直接观测电离层 D 层电子密度的变化, 并利用在廊坊、武汉和嘉兴等地的电离层 GPS/TEC 监测仪测量电离层电子总含量 (TEC) 的变化. 这是中国首次利用中频雷达观测电离层日食效应, 实验获得了一些新的观测结果.

2 实验情况

利用中国科学院空间科学与应用研究中心廊坊 (39.20°N, 116.66°E) 临近空间环境野外科学综合观测研究站的实验设备 [8−9], 例如中频雷达、电离层 GPS/TEC 监测仪和大气重力波成像仪 [10] 等, 对 2009 年 7 月 22 日的日全食事件进行了观测实验.

根据这次日全食出现在长江流域的地理特征, 在廊坊利用中频雷达观测电离层 D 层电子密度的日偏食效应; 同时在廊坊、武汉和嘉兴三地进行 GPS/TEC 观测, 监测电离层 TEC 的日偏食和日全食带的变化特点.

2.1 中频雷达观测实验

中频雷达主要用于测量 60~100 km (白天)、80~100 km (夜晚) 大气水平风场, 以及测量电离层 D 层 (白天) 和 E 层下部 (夜晚) 电子密度廓线 [11−12]. 廊坊中频雷达于 2009 年 5 月底完成安装和调试, 2009 年 6 月开始常规观测实验. 廊坊中频雷达采用空分天线模式, 天线阵由 4 个子阵组成, 每个子阵为正交的半波偶极子天线, 每个正交偶极子天线架设在 4 根 12 m 高的天线杆上, 垂直向上发射; 4 个子阵的中心分别位于边长约 181 m 的等边三角形顶点和中心. 廊坊中频雷达的基本参数如下.

工作频率: 2 MHz.

峰值功率: 64 kW.

探测高度范围: 60~100 km.

探测参量: 大气水平风场及电子密度.

时间分辨率: 4 min.

高度分辨率: 2 km.

廊坊中频雷达采用微分吸收实验 (DAE) 工作模式, 测量 D 层电子密度廓线. DAE 是通过测量中频雷达回波的 O 波和 E 波在各个高度上的振幅比, 来反演 D 层电子密度, 其是一种比较经济的电离层 D 层探测技术 [11]. 在 2009 年 7 月 22 日前后几天的日食观测实验期间, 在廊坊开展了电子密度观测实验, 获得了连续的电子密度数据.

2.2 三地 GPS/TEC 观测实验

临时在廊坊、武汉和嘉兴三地架设和安装了双频 GPS 观测设备, 用于测量电离层总电子含量的变化. 双频 GPS 接收机通过接收 GPS 双频信号, 利用电离层对电波信号的色散性质, 测量电离层 TEC[13]. GPS 设备型号、地理位置和实验参数列于表 1. 本次

表 1 GPS/TEC 实验配置

Table 1 Configuration of GPS/TEC experiment

地理位置	实验配置		
	接收机	天线	采样率
廊坊 (39.20°N, 116.66°E)	NovAtel DL-V3	GPS702GG	1 Hz
武汉 (30.37°N, 114.34°E)	JAVAD EU80	MarAnt	1 Hz
嘉兴 (30.60°N, 120.74°E)	NovAtel DL-V3	GPS702GG	1 Hz

实验成功获得了 2009 年 7 月 20 至 23 日 4 天的连续数据.

日食初亏、食既、食甚、生光、复圆的时间在嘉兴分别为 00:22:20, 01:35:01, 01:37:59, 01:40:57, 03:00:21 (UTC), 在武汉分别为 00:14:53, 01:23:56, 01:26:39, 01:29:24, 02:46:15 (UTC). 在廊坊, 本次日食为日偏食, 食分约为 0.75, 其初亏、食甚、复圆的时间分别为 00:24:59, 01:32:35, 02:45:25 (UTC). 本文中的时间均为 UTC.

3 电离层效应观测结果

图 1 给出了太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和地磁活动指数 Ap 的变化曲线 ($F_{10.7}$ 和 Ap 指数从美国国家地球物理数据库下载 *), 可以看到, 日食前后几天, $F_{10.7}$ 保持在 70 附近, 太阳活动平静; 在日食将要结束时, 发生了一次较大的地磁暴事件, Ap 指数超过了 60.

由于在日食期间发生了大地磁暴, 所以除日食因素外, 磁层与电离层的相互作用也将导致电离层发生变化. 在分析电离层日食效应时, 需要同时关注磁暴因素.

3.1 中频雷达观测结果与讨论

图 2 给出的是日食期间中频雷达测量得到的 D 层 12 min 滑动平均电子密度变化曲线. 从图 2 可以看出, 80 km 以下电离层的电子密度达到每 cm^3 几十到几百个电子; 随着高度的增加, 电子密度迅速增加, 随时间变化复杂.

对照日食的发生时间发现, 自初亏后, D 层电子密度开始减小; 在食甚时, 电子密度降至最低; 复圆后, 电子密度恢复. 观测显示, 200 cm^{-3} 的电子密度等值线在 01:30 UTC 时位于 71 km 高度附近; 食甚时, 该等值线上升到 80 km 附近; 复圆时, 该等值线下降恢复到 70 km 左右. 食甚时的电子密度在 78 km 高度上从日食前的 300 cm^{-3} 减小到 100 cm^{-3} 以内, 减小了约 67%. 日食后, D 层电子密度出现波动现象.

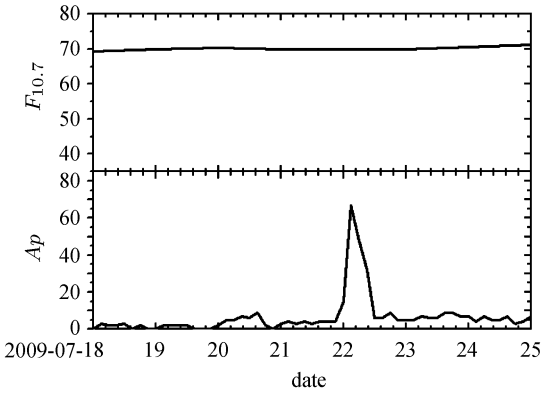

图 1 日食前后 $F_{10.7}$ 指数和 Ap 指数变化

Fig. 1 $F_{10.7}$ and Ap during the solar eclipse

中纬度地区 D 层的电离源主要为 3 种, 即太阳硬 X 射线、Lyman-α 射线、宇宙射线. D 层的绝大部分电离来自 Lyman-α 射线对 NO 分子的电离. 在本次日食期间, 没有发生太阳耀斑现象, 所以不需要考虑太阳硬 X 射线突然扰动过程对 D 层电子密度变化的贡献. D 层电子密度的输送作用可以忽略, 离子的有效复合系数比 E 层大一个量级, 同时与电子温度有关. 一般, 在日落 (出) 时, 太阳辐射突然减小 (增加), 电子密度表现出突然减小 (增大); 夜间 D 层甚至消失. 日食期间, 初亏后, 由于月亮对太阳辐射的遮挡, 太阳辐射的减小量与太阳被遮挡面积大约一致, D 层电子密度将逐渐减小到最小; 食甚后, 月亮对太阳辐射的遮挡逐渐减小, 直到复圆后, 太阳辐射恢复, D 层电子密度逐渐增加到正常水平. 同时, 考虑来自日珥的辐射以及日食阴影区外地球大气的散射, D 层电离源的变化要小于食甚时的最大遮挡比 75%, D 层电子密度的最大变化应该小于 75%. 这些预期结果

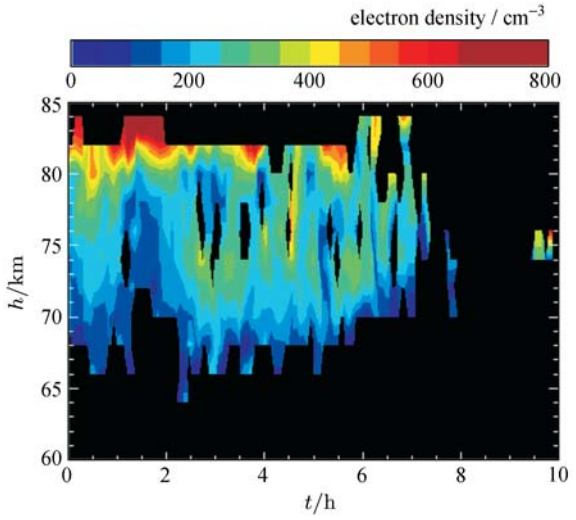

图 2 2009 年 7 月 22 日 00:00 UTC–10:00 UTC 廊坊中频雷达电子密度观测结果

Fig. 2 Electron densities from Langfang MF radar at 00:00 UTC–10:00 UTC on 22 July 2009

* ftp://ftp.ngdc.noaa.gov

与图 1 的观测结果相吻合, 说明 D 层电子密度的变化过程, 主要受到由于初亏后太阳辐射被遮挡减小, 食甚后太阳逐渐复圆而辐射逐渐增加的因素控制.

大磁暴发生后, 磁层高能电子沉降可能是磁层与电离层 D 层相互作用的一种途径, 例如极区粒子沉降事件, 导致 D 层电子密度增加或激发大气重力波. 但是在中纬度地区, 这种大量的粒子沉降现象难以发生, 从图 2 可以看出, 在日食期间没有发现电子密度增强现象.

根据上述分析可以认为, 图 2 所示观测的 D 层电子密度变化完全是由日食引起的.

日本曾报道了 Wakkanai 中频雷达在 1997 年 3 月 9 日日偏食 (79%) 的电子密度变化过程 [14], 观测到电子密度在 80 km 高度减小了 300 cm^{-3}, 变化特征与本文结果大致相符.

3.2　GPS-TEC 观测结果与讨论

图 3 分别给出了廊坊、武汉、嘉兴三地在不同日期的测站天顶 TEC 观测结果.

在图 3(a) 中, 竖直线从左至右依次表示 2009 年 7 月 22 日廊坊日偏食初亏、食甚、复圆的时间; 比较发现, 7 月 22 日食甚前后, TEC 下降不到 1 TECU (TEC 单位, 1 TECU $= 1\times10^{16}\ \mathrm{m}^{-2}$). 这种下降与日偏食发生的时间是对应的, 在其他时间没有这种变化特征. 在图 3(b) 中, 竖直线从左至右依次表示 2009 年 7 月 22 日武汉日全食初亏、食既、食甚、生光、复圆的时间. 比较发现, 7 月 22 日食甚时, TEC 下降约 1 TECU, 下降特征很明显, 与日全食发生的时间对应很好, 在其他日没有这种变化特征. 图 3(c) 为嘉兴的观测结果, 每日 TEC 变化特点与图 3(b) 类似, 7 月 22 日食甚时的 TEC 下降明显. 武汉和嘉兴的 TEC 下降形状比廊坊更陡更深, 武汉下降最低点的相位超前嘉兴, 廊坊似乎居中, 与三地日食食甚时间的相位关系一致.

图 4 所示为 2009 年 7 月 22 日, 武汉、嘉兴、廊坊三地 TEC 的日变化曲线. 图 4 中, 在 01:30 UTC 附近, 三地的 TEC 都有下降, 这对应于食甚的时间, 与图 3 一致. 复圆后, TEC 基本恢复到日常变化. 日食约 2 h 后, 在三地同时观测到开始出现 TID 现象, 振荡周期相同, 约为 180 min, 武汉和嘉兴的相位几乎相同, 廊坊的相位比武汉、嘉兴超前约 16 min.

GPS 观测的电离层垂直 TEC 表示的是自地面到 GPS 卫星高度的电子密度的垂直积分, 包含等离子层、电离层 F_2, F_1, E, D 层电子密度的贡献, 当然 D 层的贡献很小. 日食期间, 由于太阳辐射被月球遮挡, 导致电离层离化作用或电子密度产生率直接减小, F_1, E 和 D 层电子密度将同时减小, 而 F_2 层主要受扩散和输送作用控制, 一般不会产生同步的减小现象 [7].

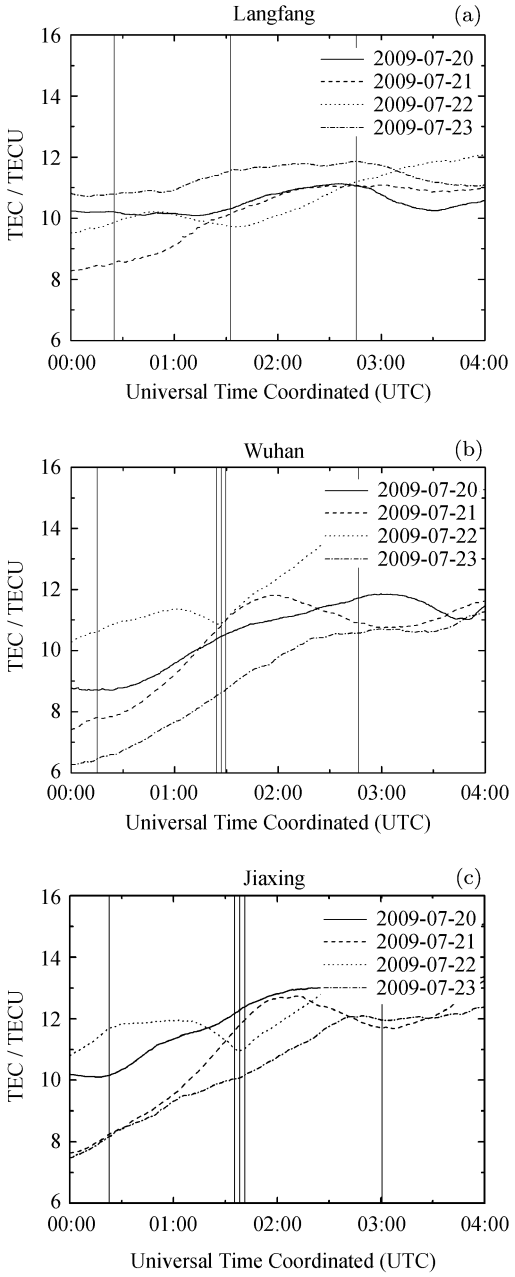

图 3　2009 年 7 月 20 至 23 日电离层 TEC 在 01:00 UTC–04:00 UTC 期间的变化

Fig. 3　TEC variation at 01:00 UTC–04:00 UTC during July 20–23, 2009

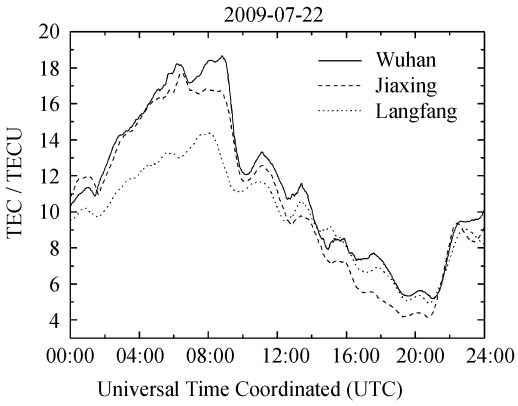

图 4 武汉、廊坊、嘉兴 2009 年 7 月 22 日电离层 TEC 日变化曲线

Fig. 4 Diurnal TEC at Wuhan, Langfang and Jiaxing on 22 July 2009

图 2 的中频雷达观测结果与预期一致, 即 D 层电子密度的减小与日食时间几乎同步. 图 3 和图 4 表明, TEC 在日食发生时也同步减小. 但是, 文献 [15] 报道, 在 2005 年 10 月 3 日的日全食观测中, TEC 减小的最低点的时间比日食最大相位延迟 20~30 min; 文献 [16] 报道, 在 2006 年 3 月 29 日的日食观测中, TEC 减小的最低点的时间比日食最大相位延迟 11 min.

文献 [17] 观测和研究了日食激发的大气重力波现象. 由于月亮的遮挡, 局部大气受到的太阳加热减少, 平流层臭氧层大气温度会降低. 这种局部温度降低和恢复的过程将激发大气重力波扰动, 并向上、向下传播; 向上传播的重力波将引起日食后电离层电子密度或 TEC 的扰动, 即 TID (Traveling Ionosphere Disturbances) 现象. 许多观测表明, 电离层在日食后出现波动现象 [1,3,15]. 但是不同手段观测的结果以及对不同日食的观测结果都不尽相同.

图 4 表明, 日食后在 3 个台站上空都出现了 TID 现象, 这在 2009 年 7 月 20 至 23 日的观测数据中没有出现过. 从图 1 中也可以发现, 在日食即将结束时, 发生了一次大的地磁暴事件. 大的地磁暴事件在高纬度地区可能激发强的粒子沉降事件, 粒子沉降产生焦耳加热, 可能激发大气重力波, 这些大气重力波水平传播到全球, 引起大尺度电离层 TID 现象, 并自高纬度地区向中低纬度地区传播.

观测到的 TID 至少有两个可能的激发源, 具体是由哪一个源激发的还难以确定; 可能需要利用全国乃至全球的 GPS 网格数据进一步分析确认. 如果该 TID 是由于磁暴粒子沉降、焦耳加热引起的, 假设该 TID 水平尺度大于三站间的距离, 则由他们之间的相位延迟 16 min, 可粗略估算, 其水平传播方向为自北向南传播、水平传播速度约 1040 m/s. 这里倾向于认为该 TID 主要与地磁暴有关.

4 结论

首次利用廊坊中频雷达对 2009 年 7 月 22 日日全食期间 D 层的电子密度变化进行了观测, 并在廊坊、武汉、嘉兴三地开展了 GPS 观测, 成功获得了三地的电离层 TEC 数据. 经过分析得到, D 层 78 km 高度上电子密度减小了约 67%, D 层电子密度为 200 cm^{-3} 的高度上升了近 10 km. 在廊坊、武汉、嘉兴都观测到 TEC 减小 1 TECU 左右; 在日食后, 三地上空均出现周期为两个多小时的 TID 现象. 观测到的 D 层电子密度减小到最低值的时刻以及 TEC 减小到最低值的时刻, 与当地日食食甚的时刻基本同步, 这与以前关于 TEC 减小有延迟时间的观测结果不同.

日食期间的 D 层电子密度变化和 TEC 变化主要由于太阳辐射被月亮遮挡引起, 并导致电离层电子密度减小. 日食后的 TID 现象并可能与日食激发大气重力波向上传播到电离层有关, 也可能与同时发生的地磁暴有关. 由于电离层动力学的复杂性, 需要更多的数据进一步分析. 上述新的观测与分析结果, 对于深入研究电离层物理过程具有重要价值.

致谢 武汉大学艾勇教授、张燕革博士等, 中国科学院武汉物理与数学研究所张训械研究员、龚顺生研究员、程学武高工等为本次实验提供了帮助并进行了有益的讨论.

参考文献

[1] Li Libing, Wan Weixing X, Wu Zhenghua, *et al.* Ionospheric disturbances during the annular eclipse of September 23, 1987 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990, **33**(4):384-390. In Chinese (李利斌, 万卫星, 吴振华, 等. 1987 年 9 月 23 日日环食引起的电离层扰动 [J]. 地球物理学报, 1990, **33**(4):384-390)

[2] He Youwen, Long Qili. The ionospheric effects of the solar eclipse [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990, **33**(4):373-383. In Chinese (何友文, 龙其利. 日食电离层效应 [J]. 地球物理学报, 1990, **33**(4):373-383)

[3] Jiao Peinan. The ionospheric undulations during the annular eclipse of September 23, 1987 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990, **33**(4):391-398. In Chinese (焦培南. 1987 年 9 月 23 日日环食的电离层波动现象 [J]. 地球物理学报, 1990, **33**(4):391-398)

[4] Le Huijun, Liu Libo, Yue Xinan, *et al.* Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses [J]. *J. Geophys. Res.*, **114**, A07308, doi:10.1029/2009JA014072, 2009

[5] Wu Xiongbin, Xu Jisheng, Ma Shuying, *et al.* Tomographic study of ionospheric effects associated with a solar eclipse [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2002, **45**(Supp):17-23. In Chinese (吴雄斌, 徐继生, 马淑英, 等. 一次日食电离层效应的 CT 初步研究 [J]. 地球物理学报, 2002, **45**(Supp):17-23)

[6] Huang Zerong, Shen Li, Li Wentao. The study of the effects of the solar eclipse on middle atmosphere [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1990, **5**(1):44-48. In Chinese (黄泽荣, 沈力, 李文涛. 中层大气的日食效应的研究 [J]. 电波科学学报, 1990, **5**(1):44-48)

[7] Gerasopoulos E, Zerefos C S, Tsagouri I, *et al.* The total solar eclipse of March 2006: overview [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, **8**:5205-5220

[8] Gong Jiancun, Hu Xong. The Exploitation and the monitoring and the early warning of the environment of near space [J]. *Tech. Aeros. Aviat.*, 2008(7):1-16. In Chinese (龚建村, 胡雄. 临近空间开发利用与临近空间环境监测预警 [J]. 863 航天航空技术, 2008(7):1-16)

[9] Hu X, Gong J. Introduction to the Re-locatable Atmospheric Observatory in China [R]. PIERS Proceedings, Beijing, 2009. 68-73

[10] Tu Cui, Hu Xong, Yan Zhaoai, *et al.* First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China [J]. *Chin. Sci . Bull.*, 2009, **54**(23):3784-3789. In Chinese (涂翠, 胡雄, 闫召爱, 等. 中国首次中层顶大气重力波成像观测实验 [J]. 科学通报, 2009, **54**(23):3784-3789)

[11] Manson A H, Meek C E. Partial-Reflection D-Region Electron Densities [M]. Handbook for MAP 13, Vincent R A, 1984

[12] Li Fengqin, Hu Xong, Zhang Xunxie, *et al.* Mesospheric MF radar in Wuhan and its preliminary observation results [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):65-71. In Chinese (李凤琴, 胡雄, 张训械, 等. 武汉中层大气中频雷达及其初步探测结果 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(1):65-71)

[13] Zhang Donghe, Cao Chong, Zhen Weiming. The data precession method of TEC observation with GPS receiver [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1995, **10**(3):84-96. In Chinese (张东和, 曹冲, 甄卫民. GPS 接收机测量电离层 TEC 的数据处理方法 [J]. 电波科学学报, 1995, **10**(3):84-96)

[14] Igarashi K, Murayama Y, Hocke K, Yamazaki R, Kunitake M, Nagayama M, Nishimuta I. Coordinated observations of the dynamics and coupling processes of mesosphere and lower thermosphere winds with MF radars at the middle-high latitude [J]. *Earth Planets Space*, 1999, **51**:657-664

[15] Krankowski A, Shagimuratov I I, Barana L W, Yakimova G A. The effect of total solar eclipse of October 3, 2005, on the total electron content over Europe [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**:628-638

[16] Afraimovich E L, Voeykov S V, Perevalova N P, *et al.* Ionospheric effects of the March 29, 2006, Solar Eclipse over Kazakhstan [J]. *Geomag. Aeron.*, 2007, **47**(4):461-469

[17] Fritts D C, Luo Z. Gravity wave forcing in the middle atmosphere due to reduced ozone heating during a solar eclipse [J]. *J. Geophys. Res.*,1993, **98**:3011-3021