

2000年4月6—8日磁暴期间电离层 TEC 观测研究^{*}

张东和^{1,2} 肖 佐³ 古士芬¹ 叶宗海¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国电波传播研究所青岛分所)

³(北京大学地球物理系)

摘 要

利用北京、乌鲁木齐、武汉 GPS 观测数据计算的垂直总电子含量,分析了发生于 2000 年 4 月 6—8 日磁暴期间观测区域的电离层状态. 结果表明,在 4 月 7 日北京时间 0200—0700 之间,在中、低纬地区出现了较弱的电离层负相暴,与前一相比,最大 TEC 之差在 -8TECU 左右;在北京时间 0700 之后,在较高纬度地区开始出现强烈的电离层负相暴,并且该负相暴随着时间逐渐增强;但在北京时间 0700—0900 之间,在低纬地区出现了电离层正相暴. 在一定时间内较高纬度地区的负相暴逐渐增强并向南移动而低纬地区的正相暴经历了增强到减弱的过程.

关键词 GPS — TEC — 电离层暴

1 引言

Rishbeth 在 1975 年总结了 F 层暴与热层环流的关系,认为对一些特定电离层暴演化规律的研究有利于对电离层暴本质的了解. 通过对大量个例事件的研究,目前已归纳了电离层暴的时空演化特点,并提出了多种理论对这些特点进行合理解释^{[1]—[3]}.

传统的电离层暴观测研究方法主要基于测高仪临频数据,但该方法也存在着一些不足之处. 例如,当出现大的电离层负相暴时,测高仪可能接收不到 F_2 层的回波,不能提供有效的暴时数据. 另外,临频资料还存在着空间分布稀,时间分辨率低的缺点. 随着信标卫星方法在电离层研究中的应用,总电子含量 (TEC) 成为电离层暴研究中的重要参数之一. 近年来,利用全球范围的 GPS 观测数据获得的 TEC 进行电离层扰动研究日趋活跃. 1996 和 1998 年, Ho 等利用分布在全球范围内的 GPS 观测数据分析了磁活动期间全球电离层 TEC 的变化规律,给出了这期间电离层 TEC 的时空变化过程,取得了一些有价值的观测结果^{[4]—[6]}. 显示了利用 GPS 进行电离层扰动研究的特点和优越性.

2000 年 4 月 6 日世界时 1642(北京时间 (BT)= 世界时 (UT)+8h) 爆发了一次大磁暴. 本文将利用在中国境内的三个 GPS 观测站数据提取的 TEC,结合 TEC 时间变化曲

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (40134020, 49990455)

2001-06-03 收到原稿, 2002-05-08 收到修定稿

线及其星下点的运动轨迹对这次电离层暴的演化过程进行分析, 具体数据处理方法可参考有关文献 [7],[8].

2 事件背景介绍

2000 年 4 月 4 日 1512 UT 在太阳表面爆发了一次 CME 事件, 在 4 月 6 日 1600 UT 左右, ACE 卫星观测到太阳风高速流, 太阳风速度从 380 km/s 上升到了 600 km/s 左右, 随后 ACE 卫星观测到了连续 7 h 左右的行星际南向磁场. 具有行星际南向磁场分量的高速太阳风到达磁层顶表面, 压缩磁层顶, 造成了全球范围内的地磁暴. 在世界时 4 月 7 日零时附近, K_p 指数达到 8, 并持续两个三小时时段. 在磁暴急始以后, Dst 指数快速下降, 在 4 月 7 日北京时间 0800 以后 Dst 达到最小, 为 -318 nT.

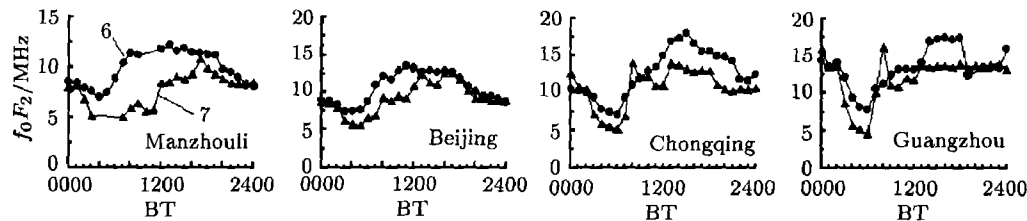


图 1 4 月 6 日和 4 月 7 日在中国境内的 4 个电离层测高仪观测站观测的电离层临频周日变化 (BT 为北京时间)

Fig.1 The diurnal variations of f_oF_2 obtained from 4 ionosonde stations in China from Apr. 6 to Apr. 7, 2000 (Beijing Time)

此次磁暴在中国区域还引起了强烈的电离层暴. 图 1 示出了 4 月 6 日、7 日在中国境内的 4 个电离层观测站的临频周日变化. 从图中可见到, 磁暴期间发生了明显的电离层暴. 其中较高纬度的满洲里站 (49.58°N , 117.45°E) 在 4 月 7 日 0200 BT 以后出现了电离层负相暴, 北京站 (40.00°N , 116.3°E) 在 0300 BT 以后出现了电离层负相暴, 而较低纬度的重庆 (29.63°N , 91.17°E)、广州站 (23.15°N , 113.35°E) 除了出现了电离层负相暴外, 在 4 月 7 日 0800 BT 左右还出现了一段时间的电离层正相暴. 本次电离层暴的持续时间不是很长, 在 4 月 7 日 1700 BT 左右, 电离层暴基本结束.

3 由 GPS 数据得到的 TEC 结果

3.1 从 TEC 时间变化曲线看电离层暴的发展过程

连续几天内同一颗 GPS 卫星的电离层星下点的轨迹变化很小, 可以据此对连续几天的由同一 GPS 卫星数据计算的 TEC 时间变化曲线进行比较, 分析磁暴期间电离层暴的时空变化. 由于在此之前电离层比较平静, 本文将利用磁暴发生当天 (4 月 7 日) 和前一天 (4 月 6 日) 的 TEC 及星下点轨迹, 研究此次电离层暴的时空发展过程.

3.1.1 北京站结果

图2为由北京GPS站(39.996°N, 116.331°E)观测数据计算的4月6日和7日电离层TEC的周日变化图。从图中可见,在4月7日北京时间0700到1400之间发生了明显的电离层暴,其中最大TEC两日变化量接近-30 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$)。与临频的周日变化相比,北京时间0700之前的电离层暴在TEC周日变化图中表现得不是很明显,这或许反映了电离层暴期间电子密度剖面的变化特点。

在分析电离层暴期间TEC随时间的变化过程中,须同时考虑卫星的星下点轨迹。图3为北京观测站观测的由几颗卫星数据计算的TEC和星下点经纬度随时间的变化曲线。从30号星的结果可以看到,卫星的锁定时间在0030BT到0430BT之间。在这期间,星下点从30°N运动到45°N左右,经度的变化范围在5°左右。从该图可见,在0200BT以后TEC开始小于前一天的值,这时的星下点在37.5°N左右,随着时间的增加,DTEC(两日的TEC之差)变小,在0400BT附近DTEC达到了-8 TECU左右,此时的星下点纬度为42.5°N。对于29号星来说,从

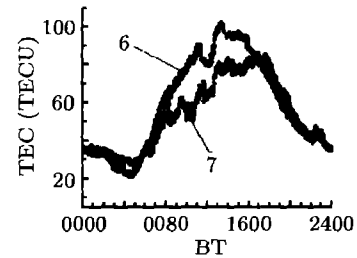


图2 北京地区上空磁暴当天和磁暴前一天的电离层TEC的周日变化

Fig.2 The diurnal change of the TEC derived from Beijing GPS station from Apr. 6 to Apr. 7, 2000

0100BT到0500BT,电离层星下点从40°N, 110°E运动到30°N, 120°E左右。在0000BT到0500BT之间,TEC要比4月6日的小,0300BT左右在40°N附近DTEC达到最小,但在0400BT左右,TEC与4月6日的差别已不大。

从3号星数据得到的TEC随时间的变化可以看到,从0530BT到1130BT左右,星

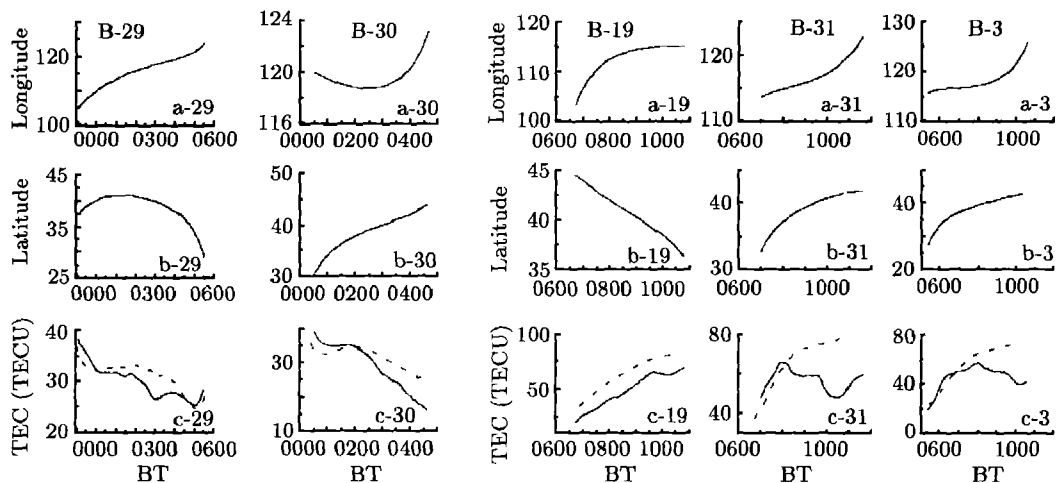


图3 北京观测站观测的不同卫星观测量计算的垂直TEC和星下点随时间的变化曲线

a: 经度-时间; b: 纬度-时间; c: TEC-时间

Fig.3 The temporal TEC variation curves and the corresponding curves of sub-ionospheric point derived from Beijing GPS station.

a is longitude-time; b is latitude-time; c is TEC-time

下点从 (27.5°N, 115°E) 运动到 (42.5°N, 125°E) 左右, 正常情况下的 TEC 应如图中的虚线 (4 月 6 日的 TEC) 随着时间增加, 但在 0630 BT 左右, 4 月 7 日 TEC 增加的速度与前一天相比有所减少, 在 0800 BT 左右甚至开始下降, 这时的星下点经纬度在 39.5°N, 116°E. 在这之后星下点的纬度更高, DTEC 更小. 可以认为星下点进入电离层暴影响区域. 类似的结果也可以从 31 号星得到的 TEC 看到. 在 0700 BT 到 1200 BT 的时间内, 31 号卫星星下点从 32.5°N, 113°E 运动到 43°N, 123°E 左右, 在 0800 BT 之前, TEC 是随时间增加的, 但在 0800 BT 以后, TEC 开始随时间减小, 在 1000 BT 左右 TEC 减至最小, DTEC 将近 -30 TECU, 此时卫星的电离层星下点在 41°N, 117°E 附近.

与 3 号和 31 号星不同, 在 0645 BT 到 1045 BT 的时间内, 19 号星的电离层星下点从 45°N, 105°E 向南运动到 37°N, 115°E 左右. 在这期间内, 4 月 7 日的电离层 TEC 一直比 4 月 6 日的小近 20 TECU 左右, 卫星星下点一直在电离层负相暴影响区域内运动.

3.1.2 乌鲁木齐站观测结果

图 4 示出了由乌鲁木齐 GPS 站 (43.59°N, 87.63°E) 观测数据得到的电离层 TEC 随时间的变化曲线. 对于 15 号星来说, 卫星锁定时间在 4 月 6 日 2300 BT 点到 4 月 7 日 0400 BT 之间, 电离层星下点从 52.5°N, 70°E 向南运动到 32°N, 85°E. 在 4 月 7 日 0200 BT 左右, TEC 开始小于 4 月 6 日的 TEC, 此时星下点的经纬度为 42°N, 84°E, 在这之后, DTEC 越来越大, 在 0350 BT 左右, 星下点运动到 32°N, 81°E 左右, 此时 DTEC 为 -8 TECU 左右.

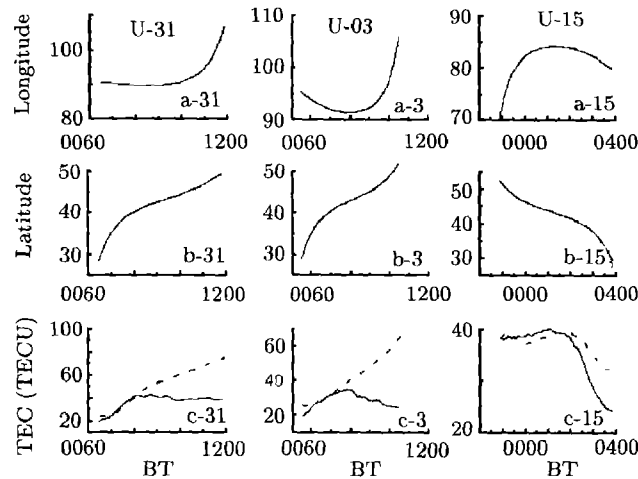


图 4 乌鲁木齐观测站观测的不同卫星观测量计算的 TEC 和星下点随时间的变化曲线

a: 经度-时间; b: 纬度-时间; c: TEC-时间

Fig.4 The temporal TEC variation curves and the corresponding curves of sub-ionospheric point derived from Wulumuqi GPS station

a is longitude-time; b is latitude-time; c is TEC-time

3 号和 31 号星的 TEC 随时间的变化结果与北京站的结果类似, 在 4 月 7 日 0800 BT 左右, 在应该随时间上升的时间内 TEC 出现了下降. 在 0800 BT, 3 号星的电离层星下点为 43°N, 92°E, DTEC 为 -5 TECU; 31 号星的电离层星下点在 40°N, 89°E, DTEC 为 0;

在 1000 BT, 3 号星的电离层星下点在 50°N , 100°E 左右, DTEC 高达 -35TECU ; 31 号星的电离层星下点在 44°N , 91°E , DTEC 为 -20TECU 左右. 从北京和乌鲁木齐的 TEC 结果可以看到, 在 0800 BT 附近, 一个非常明显的电离层负相暴区域从北向南扫过观测区域.

3.1.3 武汉站观测结果

在白天的大部分时间里, 国际 GPS 服务中心 (IGS) 武汉 GPS 观测站 (31.53°N , 114.36°E) 数据质量不好, 本文只能利用两个频率的伪距观测量计算的 TEC 来分析该电离层暴, 这样得到的电离层 TEC 与由载波相位得到的 TEC 相比, 其随机误差要大得多, 但在电离层扰动比较大的情况下, 还是可以从 TEC 曲线中看出扰动变化过程的.

图 5 给出了由卫星数据得到的武汉地区的电离层 TEC 随时间的变化. 对 22 号星来说, 在 0500 BT 之前, 4 月 7 日的 TEC 要比 4 月 6 日的小. 在这以后, 4 月 7 日的 TEC 要大于 4 月 6 日的 TEC, 在 0800 BT 左右 DTEC 达到了 $+20\text{TECU}$ 左右. 可以说在这之后的一段时间内, 该区域的电离层出现了正相暴. 这在由 3 号和 31 号星的 TEC 随时间的变化关系中可以更加明显地看到. 当 TEC 上升一段时间后, 在 0800 BT 以后的一定时间内 TEC 开始随时间下降, 这应该是由较高纬度电离层负相暴区域与低纬电离层正相暴区域共同作用的结果.

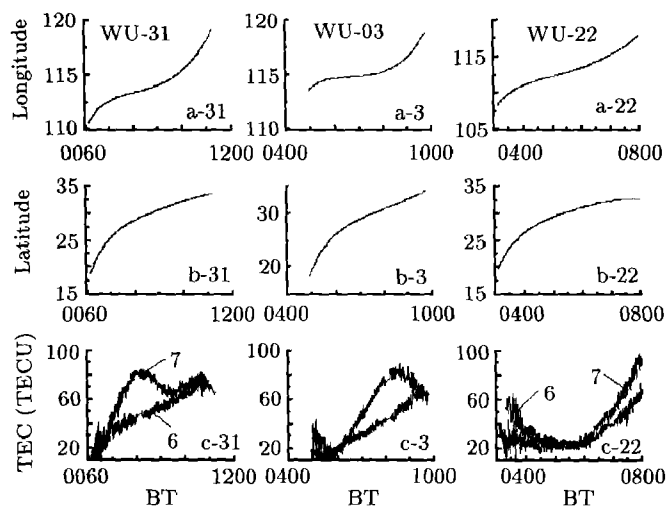


图 5 武汉观测站观测的不同卫星观测量计算的 TEC 和星下点随时间的变化曲线

a: 经度-时间; b: 纬度-时间; c: TEC-时间

Fig.5 The temporal TEC variation curves and the corresponding curves of sub-ionospheric point derived from Wuhan GPS station

a is longitude-time; b is latitude-time; c is TEC-time

由上可见, 与较高纬度的北京、乌鲁木齐不同, 磁暴期间武汉地区附近上空的电离层在 0700 BT—0900 BT 之间出现了电离层正相暴, 这与测高仪的观测结果是一致的. 以往的研究结果表明, 在夏季中纬地区观测到的电离层暴通常为负相暴^{[9],[10]}, 这主要是因为磁暴期间极区高能粒子对极区加热引起的赤道向中性风导致的. 北京和乌鲁木齐的观测

结果符合电离层暴的中纬特性. 而对于低纬地区的电离层暴没有一个明确的统计规律, 普遍认为其暴时行为应与赤道地区的电场引起的垂直漂移有关^[11]. 为了更加直接地显示电离层暴期间在此空间范围内电离层暴的时空演化, 下面将从不同时刻 TEC 的等值线图来看此次电离层暴的时空演化过程.

3.2 电离层暴演化过程

通过对不同 GPS 卫星星下点 TEC 时间变化的分析, 已经对此次电离层暴的发生、发展及空间变化过程有了一个大致的了解. 在 4 月 7 日 0200 BT 以后, 在北京、乌鲁木齐、武汉站出现了电离层负相暴, 但在 0700—0900 BT 之间, 在武汉地区出现了两个小时左右的电离层正相暴. 通过上面的分析, 可以将此次电离层暴发展过程分为明显的两个阶段. 第一个阶段在 4 月 7 日 0200—0700 BT 左右, 第二个阶段大约在 0700—1600 BT 左右. 第一个阶段, 在观测范围内出现了电离层负相暴, 但 TEC 变化幅度比较小; 第二个阶段的初期较高纬度地区的电离层 TEC 变化幅度明显增强, 为电离层负相暴, 但在较低纬度区域却出现了电离层正相暴. 北京地区的负相暴在第一阶段较弱, 由 TEC 几乎看不出电离层暴的存在, 但由临频的周日变化却可看出电离层负相暴, 这是否说明在这一段时间内北京上空的电离层变厚了. 图 6 分别为 4 月 7 日 0730 BT、0830 BT、0930 BT 的 DTEC 的等值线图. 从 0730 BT 的结果可见, 在较高纬度地区开始出现电离层负相暴, 同时在较低纬度地区出现了明显的正相暴. 一个小时以后, 低纬地区的电离层正相暴和较高纬度地区的电离层负相暴加强, 同时还可以看到负相暴是从高纬向低纬方向发展的. 到了 0930 BT, 较高纬度地区的电离层负相暴更加明显, 空间范围加大, 而正相暴的区域减小, 强度也变弱. 由于武汉站的 GPS 观测数据质量不好, 在北京时间中午附近没有观测数据, 不能得到一个完整的电离层暴演化过程.

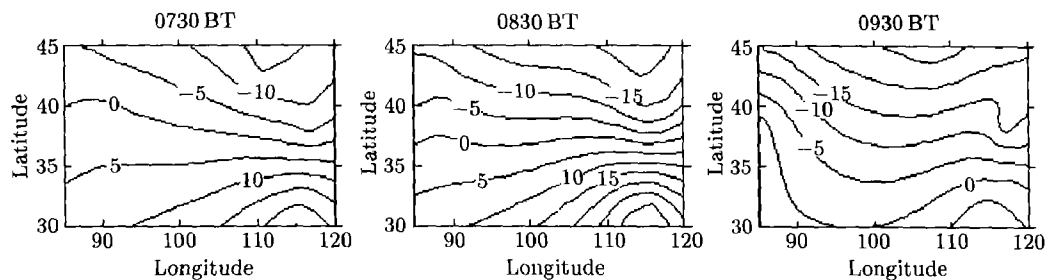


图 6 4 月 7 日电离层 TEC 相对于 4 月 6 日
同一时间的 TEC 变化的等值线图, 单位 TECU

Fig.6 The contour lines of the change of TEC over observing region from Apr. 6—7, 2000 at 0730 BT, 0830 BT and 0930 BT, unit: TECU

4 结论与讨论

利用三个 GPS 台站的观测资料, 对发生于 4 月 6—8 日磁暴期间的电离层暴进行了分析, 给出了此次电离层暴在观测区域的时空演化趋势.

结果表明:从4月7日0200 BT以后,观测地区发生了大面积的电离层负相暴。在0700 BT以后,电离层暴随着时间而增强,具有明显的从高纬向低纬运动的趋势。与前一天相比,最大 TEC 差达到了 -35 TECU,是一次强烈的电离层负相暴。该电离层暴与发生于4月6日1642 UT 的磁暴有直接的关系。

除了电离层负相暴外,较低纬度的武汉地区附近上空,在0700—0900 BT 之间出现了两个小时左右的电离层正相暴。在这一段时间内,该正相暴经历了增强到减弱的过程。按照传统电离层暴理论,磁暴期间赤道向的中性风是造成较高纬度电离层负相暴的原因,而本次低纬地区电离层正相暴的原因是磁暴期间热层中性风的影响还是由于低纬地区电流体系的作用还有必要做进一步的分析。从本次电离层暴的时空演化过程来看,似乎用较高纬度的电离层负相暴南移和低纬区域电离层正相暴北移进行解释要合理一些。

与临频的周日变化不同,4月7日0700 BT 之前的电离层负相暴在北京地区 TEC 周日变化中反映得不明显,这是否反映了电离层暴期间电子密度剖面的变化特点。

致谢 感谢万卫星研究员与作者的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Rishbeth H. F-region storms and thermospheric circulation. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1975, **37**:1055—1064
- [2] Davis K. Studies of ionospheric storms using a simple model. *J. Geophys. Res.*, 1974, **17**:605—613
- [3] Tu Chuanyi, Jia Zhihua. The model of f_0F_2 during ionospheric storm in middle latitude. *Sci. China (A)*, 1982, **25**:1147—1153, in Chinese (涂传诒, 贾志华. 中纬电离层暴 F 层临频变化的模式. 中国科学 (A 辑), 1982, **25**:1147—1153)
- [4] Mannucci A, Wilson J, Yuan B D *et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio. Sci.*, 1998, **33**:565—582
- [5] Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J, Pi X, Tsurutani B. Global ionospheric perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**:3219—3222
- [6] Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J *et al.* Global ionospheric TEC variations during January 10, 1997 storm. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:2589—2592
- [7] Zhang Donghe, Xiao Zuo. A method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances. *Chin. J. Geophys.*, 2000, **41**:451—458, in Chinese (张东和, 萧佐. 利用 GPS 数据计算 TEC 的方法及对电离层扰动现象的 GPS 观测. 地球物理学报, 2000, **41**:451—458)
- [8] Xiao Zuo, Zhang Donghe. An approach to study the day-to-day variations of ionospheric TEC directly by GPS time-delay signals. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**:97—102, in Chinese (萧佐, 张东和. 通过 GPS 测量数据研究电离层电子总含量的逐日变化. 空间科学学报, 2000, **20**:97—102)
- [9] Mendillo M, Klobuchar J A. Ionospheric and geomagnetic behavior at mid-latitudes during the solar events of August 1972. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics Report, UAG-28, part 1—2
- [10] Buonsanto M J. Ionospheric storms-a review. *Space. Sci. Rev.*, 1999, **88**:563—601
- [11] Fejer B G, Scherliess L. Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:851—854

OBSERVATIONAL STUDY OF IONOSPHERIC TEC DURING THE MAGNETIC STORM ON APRIL 6—8, 2000

ZHANG Donghe^{1,2} XIAO Zuo³ GU Shifen¹ YE Zonghai¹

¹(Center for Space and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Qingdao Research Center, Chinese Research Institute of Radio-Wave Propagation)

³(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

One large coronal mass ejection (CME) occurred in the Sun at 1642 UT, Apr. 4, 2000. At about 1600 UT, Apr. 6, the high speed solar wind was detected by ACE satellite, the speed of which increased suddenly from 380 km/s up to 600 km/s. Then a southwards interplanetary magnetic field that lasts for 7 hours was observed. The solar wind push magnetosphere, and a large magnetic storm happened near the earth. At 0000 UT, Apr. 7, 2000, the *Kp* index reaches 8 and lasts for 6 hours. The minimum *Dst* index is -318 nT. During the magnetic storm, an ionospheric storm was also happened over the region of China shown by the observations of the ionosondes. Combining the temporal ionospheric TEC curves and the curves of the corresponding sub-ionospheric point derived from GPS measurements observed at Beijing, Wulumuqi, and Wuhan GPS stations, the morphology of ionospheric TEC over the region of 30°N — 45°N and 85°E — 120°E during the magnetic storm occurred on April 6—8, 2000 is studied. The results showed that, a weak negative storm over this region happened between 0200 BT and 0700 BT on April 7, 2000. Compared with the TEC on April 6, the largest value of TEC change is -8 TECU. After 0800 BT, a strong ionospheric negative storm appeared over higher latitude region and became stronger and stronger with time. Meanwhile, an ionospheric positive storm developed over lower latitude region between 0700 BT and 0900 BT. During this period, the negative storm over higher latitude became gradually stronger, and moved southwards. Nevertheless the positive storm over lower latitude experienced an enhancing and declining process.

Key words GPS, TEC, Ionospheric storm