

冯健, 邓忠新, 甄卫民, 等. 2004 年 11 月强磁暴期间中国地区电离层 TEC 扰动特性分析[J]. 电波科学学报, 2016, 31(1): 157-165. DOI: 10.13443/j.cjors.2015020501

FENG J, DENG Z X, ZHEN W M, et al. Study of ionospheric TEC disturbances over China during the intense magnetic storm of November, 2004[J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(1): 157-165. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2015020501

2004 年 11 月强磁暴期间中国地区电离层 TEC 扰动特性分析

冯健¹ 邓忠新² 甄卫民² 吴振森¹

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071; 2. 中国电波传播研究所, 青岛 266107)

摘 要 利用 28 个全球定位系统(Global Positioning System, GPS)观测站获取的电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)测量数据, 分析了 2004 年 11 月一次强磁暴期间的中国中低纬地区电离层 TEC 暴扰动特性, 结果表明: 电离层 TEC 以正相暴扰动响应为主, 中纬地区的暴变扰动要强于低纬, 以北纬 35°附近扰动最为强烈; 暴时电离层空间相关性变强, 电离层相关距离由宁静日的约 5 500 km 提升到暴变日的约 8 000 km; 在 8 日的主暴扰动期间, 发现伴有自东北向西南的电离层 TEC 暴扰动传播, 自东向西的经向传播速度约为 120 m/s, 要高于纬向传播。初步探讨表明, 向赤道中性风、日侧东向急剧穿透电场以及喷泉效应等可能是导致此次电离层 TEC 正相暴在北纬 35°附近扰动最为强烈的关键因素, 也进一步揭示了电离层与太阳风、磁层之间以及电离层不同纬度区之间有着复杂的耦合过程。

关键词 电离层; 总电子含量; 电离层暴; 地磁暴

中图分类号 P352

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)01-0157-09

DOI 10.13443/j.cjors.2015020501

Ionospheric TEC disturbances over China during the intense magnetic storm of November, 2004

FENG Jian¹ DENG Zhongxin² ZHEN Weimin² WU Zhensen¹

(1. School of Physics and Optoelectronic engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract Ionospheric total electron content (TEC) disturbance characteristics are obtained during a strong geomagnetic storm in November 2004 based on the TEC data from 28 GPS observation stations in China. It is shown that the responses of the ionospheric TEC are mainly positive phase disturbances with the most intensity in the vicinity of latitude 35°N. It is found that the spatial correlation of TEC becomes stronger on disturbed days than on quiet days, and the correlative distance increases from 5 500 km on November 2nd to 8 000 km on November 8th. During the main phase of the storm on the 8th, an accompanied TEC disturbance spread from northeast to southwest, with a meridian velocity about 120 m/s, much higher than that of the zonal speed. Preliminary study has shown that the neutral wind, the dayside eastward penetrating electric field and the fountain effect may be the key factors to cause this positive disturbance with the most intensity in the vicinity of latitude 35°N. It is also revealed the complex coupling processes

收稿日期: 2015-02-05

资助项目: 国家国际科技合作专项(2011DFA22270)

联系人: 冯健 E-mail: fengjian428@163.com

among the ionosphere, the solar wind and the magnetosphere, and also among the different latitude zones of the ionosphere.

Keywords ionosphere; total electron content(TEC); ionospheric storm; geomagnetic storm

引言

电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)的时空变化对地空无线电通信、卫星导航定位、雷达等无线信息系统电波信号传播有着重要影响^[1-4],特别是对于穿越电离层的电波信号,电离层引起的传播效应直接正比于 TEC 的数值.因此,TEC 是表征电离层电波传播特性的最重要的环境参数之一^[5].

随着无线电卫星信标应用技术发展,特别是全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等的广泛应用,利用相干双频卫星信标信号可以获取星地路径上电离层 TEC 值.相较于电离层测高仪等传统探测技术而言, GPS TEC 测量具有全球覆盖、数据连续、时空分辨率和测量精度高、运行方便等显著优势,使得 TEC 已成为开展电离层及其扰动的特性和预报等电离层天气研究的有力工具^[6-11]. Jakowski 等人提出了基于 TEC 参数发展一种新型电离层活动指数来服务于空间天气系统^[12]. 电离层暴是最重要的空间天气现象之一,它具有剧烈的扰动幅度和较长的持续时间. Michael 曾对 TEC 在电离层暴研究方面的进展和前景进行了综述,建议加强电离层 TEC 暴扰动的形态特性、产生机理及预报方法等研究^[13-14]. 邓忠新等人基于中国地区电离层 TEC 观测数据,分析了电离层 TEC 扰动变化特性,并提出了电离层 TEC 暴事件的判定依据^[15].

太阳爆发所辐射的巨大能量使得地球空间磁场产生剧烈扰动现象(即磁暴),伴随强磁暴的发生,电离层中将出现强烈的暴变事件,因此电离层暴与强磁暴活动有着紧密的相关性. Mangalathayil 等人研究了 2003 年 10 月大磁暴事件期间中低纬电离层的经度响应特性^[16]. 夏淳亮等人基于 GPS 观测数据讨论了大磁暴期间东亚地区中低纬电离层 TEC 的响应特性^[17]. 徐继生等人分析了 2004 年 11 月强磁暴期间武汉地区电离层 TEC 的响应变化^[18]. Balan 等人探讨了中低纬地区电离层正相暴产生的物理机制^[19]. Erickson 等人也曾针对 2004

年 11 月强磁暴事件中北美扇区电离层和热层响应的动力学机制进行了探讨^[20].

本文利用 GPS 观测网获取电离层 TEC 测量数据,分析研究了 2004 年 11 月一次强磁暴期间的中国地区电离层 TEC 暴扰动的变化特征,并初步探讨了其可能的扰动产生机理.

1 数据和分析方法

地面 GPS 双频接收机在每一时间历元能接收到多颗卫星信号,原始观测数据采样时间为 30 s. 为了减少低仰角带来的电离层 TEC 测量误差,本文所用观测数据限定仰角大于 45°. 电离层 TEC 数据获取主要过程如下:首先,采用载波相位方法计算出每一时间历元各星地路径上的电离层斜向 TEC (sTEC);然后,依据电离层薄壳模型,取电离层电子密度质心高度为 400 km,将 sTEC 转换为星下点电离层垂直 TEC (vTEC);最后,将每 15 min 时间间隔内的所有时间历元星下点电离层 vTEC,采用高斯方法拟合出 GPS 观测站上空每 15 min 的电离层 vTEC.

采用电离层 vTEC 的相对变化(dTEC)和绝对变化(Δ TEC)来描述电离层 TEC 扰动特征,其表达式为:

$$\begin{aligned} \text{dTEC}(t) &= \frac{\Delta \text{TEC}(t)}{\text{TEC}_{\text{med}}(t)} \times 100 \\ &= \frac{\text{TEC}_{\text{obs}}(t) - \text{TEC}_{\text{med}}(t)}{\text{TEC}_{\text{med}}(t)} \times 100. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\text{TEC}_{\text{obs}}(t)$ 为 t 时刻的电离层 vTEC 的观测值; $\text{TEC}_{\text{med}}(t)$ 为该月去除磁暴期间观测数据后的对应时刻月中值.

对中国及周边地区 28 个 GPS 观测站的测量数据按上述方法进行处理,获得了各站 15 min 时间间隔的电离层 vTEC、 Δ TEC 和 dTEC 数据.在做区域电离层 TEC 变化分析时,采用 Kriging 插值方法来获取各网格点($1^\circ \times 1^\circ$)的相应电离层 TEC 值^[11, 21-23]. 表 1 给出了各 GPS 观测站的地理位置分布情况.

表 1 中国及周边地区 GPS 观测站位置分布

序号	站名	地理纬度	地理经度	地磁纬度	序号	站名	地理纬度	地理经度	地磁纬度
1	HLAR	49.3°N	119.7°E	39.0°N	15	XIAA	34.2°N	109.0°E	23.8°N
2	URUM	43.8°N	87.6°E	33.9°N	16	JSGY	32.8°N	119.5°E	22.6°N
3	CHUN	43.8°N	125.4°E	33.8°N	17	AHMA	31.7°N	118.5°E	21.4°N
4	SELE	43.2°N	77.0°E	34.1°N	18	SHSS	31.2°N	121.2°E	21.0°N
5	WUSH	41.2°N	79.2°E	31.9°N	19	WHJF	30.5°N	114.5°E	20.1°N
6	DXIN	41.0°N	100.2°E	30.7°N	20	LUZH	28.9°N	105.4°E	18.5°N
7	BJFS	39.6°N	115.9°E	29.2°N	21	XIAG	25.6°N	100.3°E	15.3°N
8	TASH	37.8°N	75.2°E	28.8°N	22	KMIN	25.0°N	102.8°E	14.6°N
9	YANC	37.8°N	107.4°E	27.4°N	23	TWTF	25.0°N	121.2°E	14.9°N
10	DLHA	37.4°N	97.4°E	27.1°N	24	XIAM	24.5°N	118.1°E	14.3°N
11	SUWN	37.3°N	127.1°E	27.4°N	25	GUAN	23.2°N	113.3°E	12.9°N
12	XNIN	36.6°N	101.8°E	26.2°N	26	QION	19.0°N	109.8°E	8.6°N
13	TAIN	36.2°N	117.1°E	25.9°N	27	YONG	16.8°N	112.3°E	6.5°N
14	ZHNZ	34.5°N	113.1°E	24.1°N	28	BAN2	13.0°N	77.5°E	4.1°N

2 分析结果

2.1 暴时电离层 TEC 扰动响应

2004 年 11 月 7—11 日发生了一次双主相强磁暴事件, Dst 指数在 8 日 07:00UT 和 9 日 10:00UT 左右分别达到极小值 -373 nT 和 -289 nT , 见图 1(a). 图 1(b)给出了磁暴期间沿 115°E 经度线上不同纬度电离层 $v\text{TEC}$ 随时间的发展变化. 可以看出, 电离层 $v\text{TEC}$ 仍呈现出周日变化一般特征, 在北京时间午后 ($\text{BJT} = \text{UT} + 8\text{h}$) 为极大, 最大电离层 $v\text{TEC}$ 值达到了 90 TECu ($1\text{ TECu} = 10^{16}\text{ m}^{-2}$). 图 1(c)和(d)分别给出了沿 115°E 经度线上和沿 37°N 纬度线上的电离层 ΔTEC 的发展变化, 总体上表现为正相扰动响应. 8 日电离层 ΔTEC 出现了两个增强峰, 前一个位于 06:00 UT 前, 后一个处于 11:00 UT 前后, 最大增强约为 50 TECu , 且电离层 ΔTEC 增强在中国东部地区持续时间要长于西部地区. 图 1(e)和(f)分别给出了沿 115°E 经度线上和沿 37°N 纬度线上的电离层 $d\text{TEC}$ 的发展变化. 图 1(e)显示出在 8 日 11:00UT 和 10 日 13:00UT 前后分别发生了强电离层 TEC 暴扰动, 前者最大扰动强度达到了 600% , 后者也接近 450% , 两个暴变最强扰动中心位置均出现在北纬 35° 附近. 若以 50% 的相对变化值来考察, 8 日电离层暴变事件的开始时间在低纬度赤道异常区要早于中纬度区, 且在低、中纬过渡区的暴变持续时间超过了 24 h . 图 1(f)可以看出在 8 日东部地区暴变扰动的开始时间要早于

西部, 自东向西有响应时间上的延迟, 且在持续时间上也要长于西部地区.

图 2 给出了四个相近纬度带 ($39.6^\circ\text{N} \sim 43.8^\circ\text{N}$, $36.2^\circ\text{N} \sim 37.3^\circ\text{N}$, $28.9^\circ\text{N} \sim 31.2^\circ\text{N}$ 及 $23.2^\circ\text{N} \sim 25.0^\circ\text{N}$) 上不同经度区 ($121.2^\circ\text{E} \sim 127.1^\circ\text{E}$, $113.3^\circ\text{E} \sim 117.1^\circ\text{E}$ 及 $100.2^\circ\text{E} \sim 105.4^\circ\text{E}$) 3 个站共 12 站的电离层 $d\text{TEC}$ 在 7 日 12:00 UT 至 9 日 12:00 UT 期间变化曲线. 可以看出: 1) 中纬度台站的最大电离层 TEC 暴变扰动强度随经度自东向西有先增强后减弱, 如图 2 中的上两排. 而低纬度台站的最大电离层 TEC 暴变扰动强度随经度自东向西逐渐减弱, 如图 2 中的下两排. 2) 三个相近经度带上不同纬度 4 站的最大电离层 TEC 暴变扰动强度随纬度从北到南均表现出先增强后减弱, 以 $36.2^\circ\text{N} \sim 37.3^\circ\text{N}$ 纬度带内的扰动最强, 且中纬度区扰动强度总体上要高于低纬度区. 3) 低纬度台站在 8 日存在两个明显区隔的电离层 TEC 暴扰动增强峰, 前一个处于 00:00 UT—06:00 UT 间的日侧, 后一个处于 11:00 UT 前后的日落时段, 并随着纬度升高两个暴变扰动逐渐合一. 4) 在中国东北部的 CHUN 站在日落前后却出现两个区隔明显的电离层 TEC 暴扰动响应峰, 且随着经度向西 (如 BJFS 站) 和随纬度向南 (如 SUWN 站) 两个暴变响应峰合二为一. 5) 12 个观测站中以 TAIN 站电离层 TEC 暴变扰动强度为最大, 相对变化达到了 600% , 以 KMIN 站为最小, 但其最大扰动强度值也达到了 100% .

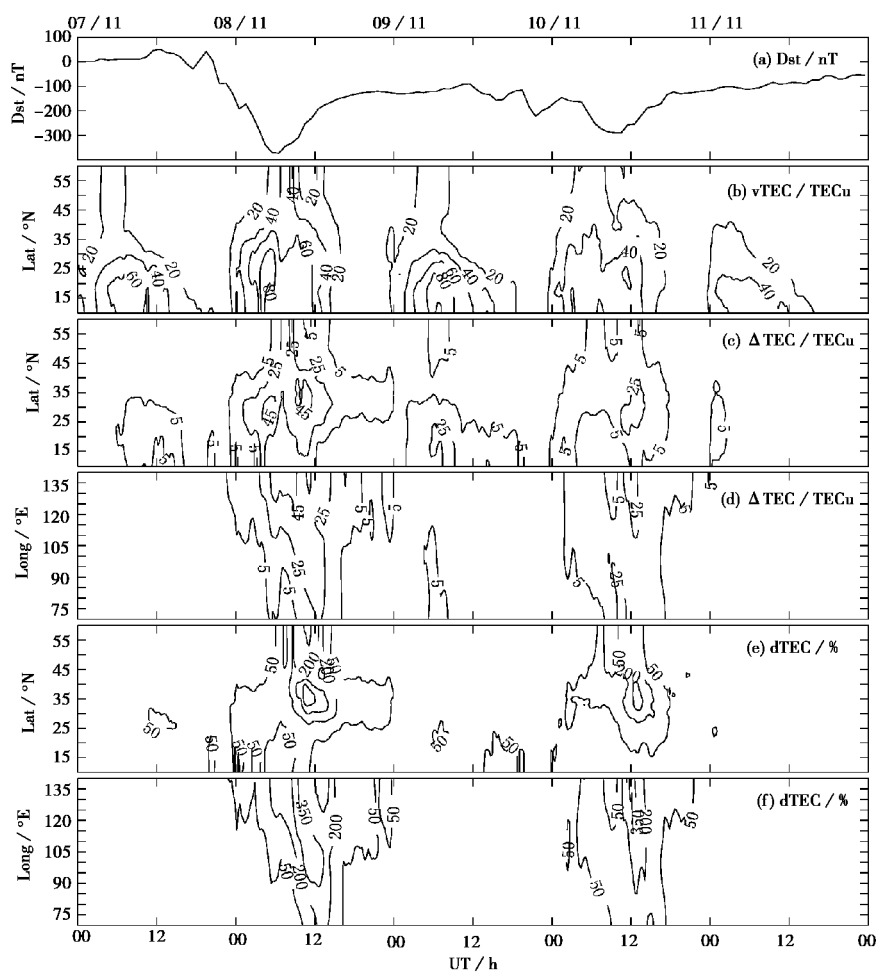


图 1 2004 年 11 月强磁暴期间电离层 TEC 扰动响应

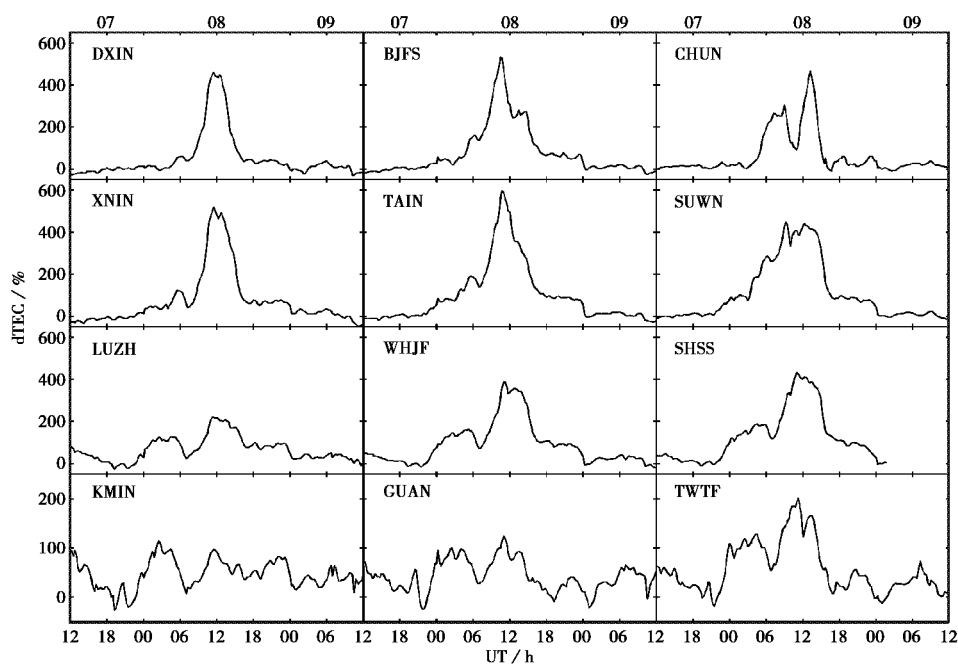


图 2 相近经(纬)度带内不同纬(经)度观测站电离层 dTEC 变化

2.2 暴时电离层 TEC 空间相关性

考虑到电离层参数经、纬向的空间变化差异,引入电离层距离 $d^{[11]}$ 为

$d =$

$$\sqrt{(\text{Lon}(A) - \text{Lon}(B))^2 + (SF \cdot (\text{Lat}(A) - \text{Lat}(B)))^2}. \quad (2)$$

式中:Lon 和 Lat 分别表示观测站 A 和 B 的地理经纬度;SF 为描述纬经向差异的尺度因子,体现了局部区域内电离层参量之间的相关距离. 对电离层 TEC 参数通常取 $SF=5$, 它反映了纬/经度向上的空间距离对电离层 TEC 影响的相关度. 式中电离层距离单位为度,对处于中低纬度的中国地区而言,

$$\text{Cov}(A, B) = E[Z(A)Z(B)] - E[Z(A)]E[Z(B)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(A) - \overline{Z(A)}][Z(B) - \overline{Z(B)}]; \quad (3)$$

$$R(A, B) = \frac{\text{Cov}(A, B)}{\sqrt{D(A)} \cdot \sqrt{D(B)}} = \frac{\text{Cov}(A, B)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(A) - \overline{Z(A)}]^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(B) - \overline{Z(B)}]^2}}. \quad (4)$$

按照上述方法,可以计算出中国地区所有 28 个观测站两两之间的电离层距离和相关系数. 图 3 给出了宁静日(2 日)和暴变日(8 日)的相关系数随电离层距离变化的比较图,图中小圆圈和虚线分别表示宁静日的观测和线性拟合结果,小黑块和实线分别表示暴变日的观测和线性拟合结果. 取相关系数等于 0.8 对应的电离层距离为空间相关距离^[24]. 可以看出:宁静日的空间相关距离约为 5 500 km. 由于电离层 TEC 的纬经向差异尺度因子取值为 5,表示相应于经向的相关距离为 5 500 km,而纬向的相关距离为 1 100 km;但在暴变日的空间相关距离约为 8 000 km,即相应于经向的相关距离为 8 000 km,而纬向的相关距离为 1 600 km. 这不仅表明此

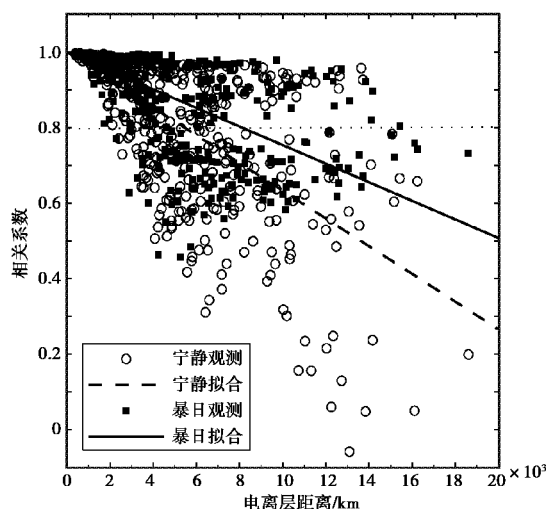


图 3 宁静日和暴变日电离层空间相关距离比较

在电离层质心高度上相隔 1 度的空间距离大约为 100 km,本文采用 100 km 作为电离层距离单位.

采用区域化变量 $Z(x)$ 来描述电离层 $v\text{TEC}$ 的区域空间分布特性,通过下列过程可计算出空间 A 和 B 两站间电离层 $v\text{TEC}$ 的相关系数. 首先,由任意 A、B 两站的电离层 $v\text{TEC}$ 构建出数据对矩阵;然后,通过定义两个随机变量 $Z(A)$ 和 $Z(B)$ 的二阶混和中心矩为 $Z(x)$ 的协方差函数,并计算出其协方差 $\text{Cov}(A, B)$,如式(3);最后,由式(4)计算出两站间的相关系数 $R(A, B)$. 式中 $E(x)$ 为向量 x 的数学期望, $\overline{Z(x)}$ 为向量 x 的算术平均.

次强磁暴期间是一种大尺度的电离层正相暴扰动事件,也预示着期间电离层 TEC 的空间相关性有所增强.

2.3 暴时电离层 TEC 扰动传播

为了考察磁暴期间电离层暴扰动传播特性,图 4 给出了 11 月 8 日电离层 TEC 暴期间 09:00 UT—15:00 UT 时段内每 15 min 的电离层 $d\text{TEC}$ 变化曲线.

图 4(a)为 115°E 经度线上不同纬度电离层 $d\text{TEC}$ 随时间演变,曲线间在垂直轴依次作了等间隔的平移. 可以看出在此期间电离层 TEC 暴变扰动峰呈现出随时间从中纬向低纬区的似波状传播,期间扰动峰由 38°N 到达 32°N 附近,其平均传播速度约为 30 m/s.

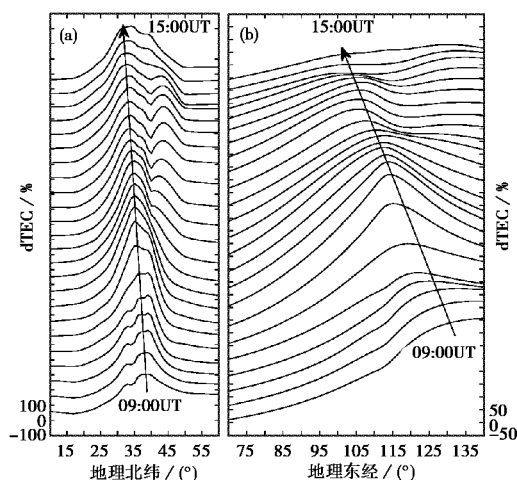


图 4 8 日 09:00 UT—15:00 UT 期间电离层 TEC 暴扰动传播

图4(b)为 37°N 纬度线上不同经度电离层 dTEC 随时间演变,曲线间在垂直轴依次作了等间隔的平移.可以看出在此期间电离层 TEC 暴变扰动也呈现出似波状结构,且其扰动峰随时间自东向西移动,经估算经向平均传播速度约为 120 m/s ,明显要大于纬向传播.

3 讨论

图5分别给出了7日12:00 UT至9日12:00 UT期间的太阳风速度、行星际磁场 B_z 分量、极光电集流 AE 指数以及较高中纬度地区的 CHUN、HLAR 和 URUM 三站电离层 dTEC 的变化曲线.可以看出,在太阳风速度在7日18:00 UT左右有一个急速大幅度提升,由约 450 km/s 剧增到了约 650 km/s ,随后太阳风速度一直处于 550 km/s 以上,并在7日22:00 UT和8日04:00 UT前后各有一次小幅度增强,其峰值速度均超过了 700 km/s ,如图5(a);紧随太阳风速度剧变后,行星际磁场 B_z 分量也发生了剧烈变化,约在7日19:30 UT前后 B_z 南向翻转并持续了约1 h, B_z 分量在22:00 UT前后再次南向翻转,随后南向持续时间长达近12 h,

且在7日22:30 UT后有近6 h时间维持在一 40 nT 上下,如图5(b);极光电集流 AE 指数在8日01:00 UT—12:00 UT期间也出现强烈扰动,在04:00 UT和10:00 UT前后分别超过了 2500 nT ,如图5(c).

在2.1节中,注意到CHUN站($43.8^{\circ}\text{N}, 125.4^{\circ}\text{E}$)电离层 TEC 呈现出两个区隔明显的强扰动峰,分别位于8日的08:00 UT和13:00 UT前后.从图5(d)中看出,处于相近经度带内的更高纬度地区的HLAR站($49.3^{\circ}\text{N}, 119.7^{\circ}\text{E}$)的电离层 dTEC 与CHUN站有着相似的变化趋势,也表现出区隔明显的两个强扰动峰;而处于同纬度有着较大经度差异的西部地区URUM站($43.8^{\circ}\text{N}, 87.6^{\circ}\text{E}$)却只出现了13:00 UT前后的单峰结构.从AE指数变化上能够看出在04:00 UT—10:00 UT之间曾出现了一个由强烈扰动回复到平静趋势的过程,这与CHUN和HLAR两站电离层 dTEC 扰动的双峰结构极为相似,意味着中国东北部较高中纬度地区的电离层 TEC 扰动与极区电离层扰动有着密切联系,也暗示着电离层与太阳风、磁层以及不同纬度区电离层之间有着复杂的耦合过程.

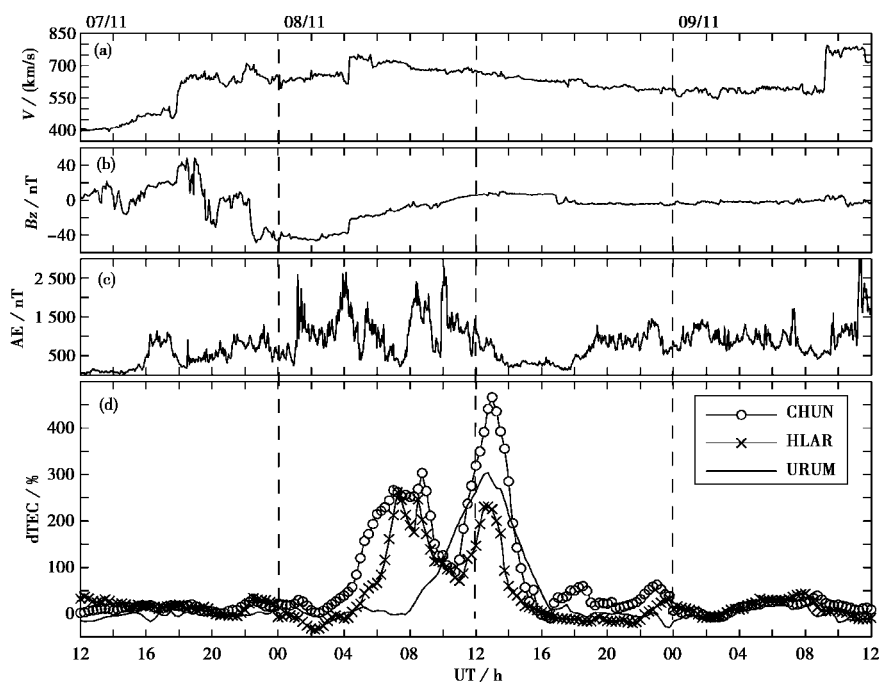


图5 太阳风速度、IMF- B_z 分量、极光 AE 指数及较高中纬台站电离层 dTEC 的变化

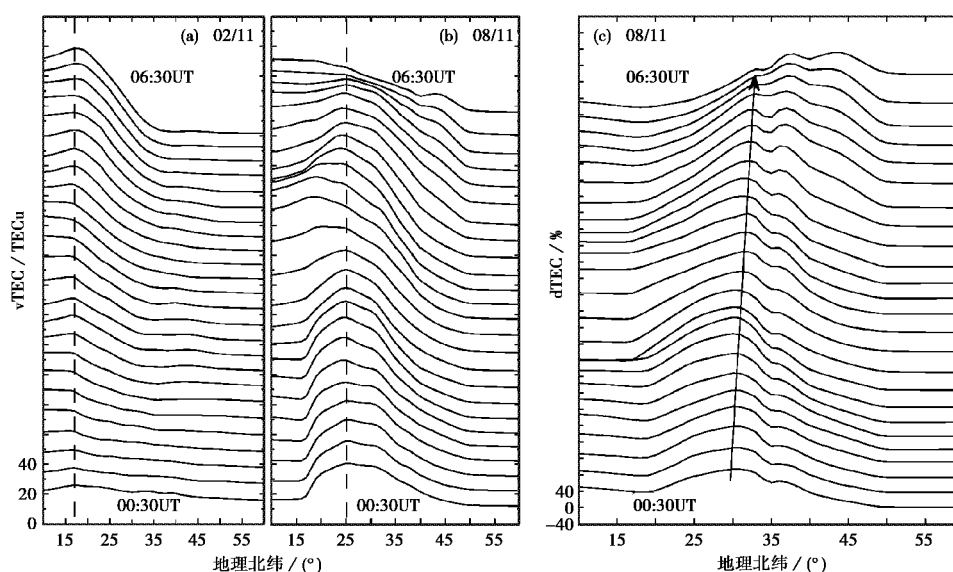


图 6 不同纬度电离层 vTEC 和 dTEC 随时间演变曲线

图 6(a)和(b)分别给出了 11 月 2 日和 8 日 00:30 UT—06:30 UT 期间 115°E 经度线上不同纬度的电离层 vTEC 随时间的变化曲线,曲线间在垂直轴依次作了等间隔的平移.可以看出,在 2 日的电离层宁静条件下,赤道异常北驼峰区大致处于地理北纬 17°附近;而在 8 日的扰动情况下,其驼峰区位置向北侧移动到了北纬 25°附近.图 6(c)给出了 8 日 00:30 UT—06:30 UT 期间 115°E 经度线上不同纬度的电离层 dTEC 随时间演变曲线,曲线间在垂直轴依次作了等间隔的平移.可以看出,期间 dTEC 也呈现出似波状结构,并伴有从较低纬度向中纬度区的较缓慢传播过程.

综合上述分析,太阳活动爆发增强了吹向地球磁层的太阳风粒子的速度和浓度,行星际磁场引起地磁场剧变发生磁暴.伴随地磁暴的大量能量以增强的电场、电流和能量粒子沉降等方式影响到高层大气,从而导致电离层暴扰动事件发生.在此过程中,极区电场穿透到赤道低纬地区,在日侧东向急剧穿透电场(Prompt Penetration Electric Field, PPEF)和向赤道中性风作用下,喷泉效应得到了进一步增强,使得等离子体向更高的纬度区堆积和赤道异常北驼峰向北侧移动,这可能是导致此次电离层 TEC 正相暴在 35°N 附近扰动最为强烈的主要原因.

4 结 论

2004 年 11 月强磁暴期间,中国地区电离层 TEC 暴事件的主要扰动特性总结如下:

1) 总体上以电离层 TEC 正相暴扰动为主,中纬地区的暴变扰动要强于低纬,以北纬 35°附近扰动最为强烈,电离层 TEC 暴扰动的最大绝对偏差超过了 50 TECu,相对偏差达到 600%.

2) 发现此次电离层 TEC 暴是一次大尺度扰动事件,暴时电离层 TEC 空间相关性变强,电离层经向相关距离由约 5 500 km 提升到约 8 000 km,相应的纬向相关距离由 1 100 km 增强到 1 600 km.

3) 期间伴有电离层 TEC 暴扰动传播现象,在北京时的黄昏—子夜时段有自东向西的经向传播和自中纬到低纬的纬向传播,经向扰动传播速度约为 120 m/s,要明显高于纬向传播,且在日侧时段有从低纬向中纬的缓慢扰动传播.

4) 向赤道中性风、日侧东向急剧穿透电场以及喷泉效应等可能是导致在北纬 35°附近扰动最为强烈的关键因素.此次电离层 TEC 正相暴扰动事件也揭示了电离层与太阳风、磁层以及电离层不同纬度区之间有着复杂的耦合过程.

参考文献

- [1] RADICELLA S M, NAVA B, COISSON P. Effects of gradients of the electron density on earth-space communications[J]. Annales geophysicae, 2004, 47: 1227-1246.
- [2] KOMJATHY A, SPARKS L, MANNUCCIA J, et al. The ionospheric impact of the October 2003 storm event on Wide Area Augmentation System [J]. GPS solut, 2005, 9: 41-50.

- [3] 刘钝, 甄卫民. 中国区域电离层特性对卫星导航系统的影响[J]. 电波科学学报, 2012, 27(1): 95-101.
LIU D, ZHEN W M. The effects of China regional ionosphere on satellite augmentation system[J]. Chinese journal of radio science, 2012, 27(1): 95-101. (in Chinese)
- [4] 丁宗华, 陈春. 电离层色散效应对线极化雷达信号的影响分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(1): 30-34.
DING Z H, CHEN C. Preliminary analysis of the ionospheric dispersion effect on linear polarization radar signal[J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(1): 30-34. (in Chinese)
- [5] KERSLEY L, MALAN D, PRYSE S E, et al. Total electron content — a key parameter in propagation: measurement and use in ionospheric imaging [J]. *Annales geophysicae*(Sup), 2004, 47: 1067-1091.
- [6] COSTER A, KOMJATHY A. Space weather and the global positioning system [J]. *Space weather*, 2008, 5(2): 15-19.
- [7] JAKOWSKI N, WILKEN V, SCHLUETER S, et al. Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals [J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial Physics*, 2005, 67(12): 1074-1084.
- [8] ARAUJO-PRADERE E A, FULLER-ROWELL T J, SPENCER P S J. Consistent features of TEC changes during ionospheric storms[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 2006, 68(16): 1834-1842.
- [9] KRANKOWSKI I A, SHAGIMURATOV I I, BARAN L W, et al. The structure of the mid-and high-latitude ionosphere during the November 2004 storm event obtained from GPS observations[J]. *Acta geophysica*, 2007, 55(4): 490-508.
- [10] DENG Z X, LIU R Y, ZHEN W M, et al. Ionospheric TEC disturbances based on GPS observations [C]//9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory. Guangzhou: IEEE, 2010: 395-398.
- [11] 刘瑞源, 王建平, 武业文, 等. 用于中国地区电离层总电子含量短期预报方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(1): 18-23.
LIU R Y, WANG J P, WU Y W, et al. Method for short-term forecasting of ionospheric total electron content in Chinese region[J]. *Chinese journal of science*, 2011, 26(1): 18-23. (in Chinese)
- [12] JAKOWSKI N, STANKOV S M, SCHLUETER S, et al. On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations [J]. *Advance in space research*, 2006, 38: 2596-2600.
- [13] MENDILLO M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content[J]. *Reviews of geophysics*, 2006, 44: 4001.
- [14] MENDILLO M, KLOBUCHAR J A. Total electron content: synthesis of past storm studies and needed future work[J]. *Radio Science*, 2006, 41: RS5S02.
- [15] 邓忠新, 刘瑞源, 甄卫民, 等. 中国地区电离层 TEC 暴扰动研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2177-2184.
DENG Z X, LIU R Y, ZHEN W M, et al. Study on the ionospheric TEC storms over China[J]. *Chinese journal of geophysics*, 2012, 55(7): 2177-2184. (in Chinese)
- [16] 夏淳亮, 万卫星, 袁洪, 等. 2000 年 7 月和 2003 年 10 月大磁暴期间东亚地区中低纬电离层的 GPS TEC 的响应研究[J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 259-266.
XIA C L, WAN W X, YUAN H, et al. Analysis of the intense magnetic storm of July, 2000 and of October, 2003 using the technique for nowcasting of GPS TEC data[J]. *Chinese journal of space science*, 2005, 25(4): 259-266. (in Chinese)
- [17] ABDU M A, TAKASHI M, BATISTA I S, et al. Ionospheric responses to the October 2003 superstorm: longitude/local time effects over equatorial low and middle latitudes [J]. *Journal of geophysical research*, 2007, 112: A10306. doi: 10.1029/2006JA012228
- [18] 徐继生, 朱诒, 程光辉. 2004 年 11 月强磁暴期间武汉电离层 TEC 的响应和振幅闪烁特征的 GPS 观测[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 950-956.
XU J S, ZHU J, CHENG G H. GPS observations of ionospheric effects of the major storm of Nov. 7-10, 2004[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 950-956. (in Chinese)
- [19] BALAN N, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, et al. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes [J]. *Journal of geophysical research*, 2010, 115: A02304. DOI: 10.1029/2009JA014515.
- [20] ERICKSON P J, GONCHARENKO L P, NICOLLS M J, et al. Dynamics of North American sector ionospheric and thermospheric response during the November 2004 superstorm[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial Physics*, 2010, 72(4): 292-301. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.04.001.
- [21] STANISLAWSKA I, JUCHNIKOWSKI G, CAN-

DER L R. Kriging method for instantaneous mapping at low and equatorial latitudes[J]. Advance in space research, 1996, 18(6): 172-176.

- [22] STANISLAWSKA I, JUCHNIKOWSKI G, CANDER L R, et al. The kriging method of TEC instantaneous mapping [J]. Advance in space research, 2002, 29(6): 945-948.

- [23] 毛田, 万卫星, 孙凌峰. 用 Kriging 方法构建中纬度区域电离层 TEC 地图[J]. 空间科学学报, 2007, 27(4): 279-285.

MAO T, WAN W X, SUN L F. Central and northern China TEC map using the Kriging method[J]. Chinese journal of space science, 2007, 27(4): 279-285. (in Chinese)

- [24] CANDER L R. Spatial correlation of f_oF_2 and $vTEC$ under quiet and disturbed ionospheric conditions: a case study[J]. Acta geophysica, 2007, 55(3): 410-423.

作者简介



冯健 (1981—), 男, 山东人, 高级工程师, 西安电子科技大学在读博士研究生, 主要从事电离层物理及电波传播应用方面的研究.



邓忠新 (1971—), 男, 湖南人, 博士, 高级工程师, 主要从事电离层物理及电波传播应用方面的研究.



甄卫民 (1963—), 男, 河北人, 中国电波传播研究所研究员, 博士生导师. 现任中国 GPS 协会理事, 中国空间学会空间物理专业委员会委员, 《全球定位系统》杂志编委等. 主要从事空间环境、电磁环境和卫星导航领域的研究.



吴振森 (1946—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要从事随机介质中电磁(光)波传播和散射、目标激光散射特性研究.