

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^{*}

夏淳亮¹ 万卫星² 袁 洪³ 赵必强^{2,4} 丁 锋²

¹(中国地质大学地球物理与空间信息学院 武汉 430074)

²(中国科学院地质与地球物理研究所)

³(中国科学院光电研究院)

⁴(中国科学院武汉物理与数学研究所)

摘 要 利用武汉电离层现象台研制的 GPS TEC 的现报方法及现报系统,对东亚地区 GPS 台网的观测数据进行处理分析,特别对 2000 年 7 月 14—18 日和 2003 年 10 月 28 日至 11 月 1 日两次特大磁暴期间的数据进行了对比考察.文中分析了两次磁暴间的电离层响应,得到对应不同磁暴时段电离层 TEC 的不同变化情况,着重揭示了 TEC 赤道异常峰的压缩和移动以及赤道异常随时间的压缩—反弹—恢复的过程,并结合高纬电离层的部分响应机制进行了说明.结果显示,两次磁暴期的电离层响应表现出了各自不同的特点,从而反映出因季节变化引起的高纬电离层暴时能量注入的不同而造成的全球性电离层扰动的不同形态.由此看出,磁暴期间电离层 TEC 的变化直接与太阳扰动发生的时间及其对高纬电离层的耦合有关.若短时期内连续发生多次磁暴,则电离层反应更加复杂,不能简单地当做单一磁暴叠加处理.

关键词 GPS TEC; 电离层暴

中图法分类号 P 352

Analysis of the Intense Magneticstorm of July, 2000 and of October, 2003 Using the Technique for Nowcasting of GPS TEC Data

XIA Chunliang¹ WAN Weixing² YUAN Hong³ ZHAO Biqiang^{2,4} DING Feng²

¹(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

²(*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences*)

³(*Academy of Opto-Electronics, The Chinese Academy of Sciences*)

⁴(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract With a worldwide GPS network, the data of the July 14—18, 2000 geomagnetic storm and the October 28—November 1, 2003 storm is studied and compared using the technique for nowcasting of GPS TEC developed by the ionospheric station of Wuhan ionosphere observatory. In

^{*} 国家自然科学基金项目 (49974039), 国家重点基础研究基金项目 (G2000078407) 和中国地质大学 (武汉) 校自然科学基金 (CUGQNL0539) 共同资助

2004-11-08 收到原稿, 2005-04-10 收到修定稿

this paper, the ionospheric responses and the TEC variation during these two storms are discussed, especially the reducing and moving of the perturbation structure around the geomagnetic equator during storms and the ionospheric responses of high latitude part are analyzed. The results show that the ionospheric responses during these two storms are different and this difference is primarily caused by the seasonal difference of the magnetospheric energy deposition into the polar upper atmosphere. It is shown that the TEC variation is associated with the local time the solar perturbing occurred and the coupling of the ionospheric particles of high latitude with the solar particle. If there are several magnetic storms occurring in series, the ionospheric responses are more complex and disordered than the state that only one storm occur in a few days.

Key words GPS TEC, Ionospheric storms

1 引言

在电离层天气现象中,由磁暴所带来的电离层暴使得电离层各层都发生剧烈的变化,因此往往为人们所关注.磁暴是地磁场强烈扰动的重要地球物理现象,它的能量主要来自于太阳.在太阳耀斑爆发及其他的太阳活动时,从太阳表面喷出的等离子体云通过行星际空间传播到地球磁层顶,太阳风粒子所携带的能量有35%—60%注入到极光带高层大气中,与地球磁场作用引起地磁暴,进而导致全球性电离层的变化,形成电离层暴^{[1],[2]}.

电离层电子浓度总含量(Total Electron Content, TEC),是描述电离层等离子体状态的重要参量,在对磁暴和电离层暴的过程描述和理论研究方面具有十分重要的意义.近年来,随着全球定位系统(GPS)的出现及全球GPS观测台网的建立,大范围、长期的电离层TEC的获取成为可能,基于GPS TEC研究电离层的方法也层出不穷^{[3],[4]}.最近,我们发展了一种以网格插值为主要算法的TEC现报系统^{[5]—[7]},着重于精确、快速地分析局部地区TEC的分布特性,特别是在研究电离层暴等对时空分辨率要求较高的电离层扰动时具有重要意义.本文将采用这一新的分析方法研究大磁暴期间电离层TEC的扰动特性.

本文从GPS TEC数据出发,利用来自我国地壳形变监测网的GPS台站观测数据和IGS网的部分GPS数据,分析了2000年7月14—18日(下文记作磁暴1)和2003年10月28—11月1日(下文记作磁暴2)两次特大磁暴期间电离层的TEC变化,同时结合DMSP卫星数据,考察两次磁暴期间电离层的不同响应情况,最后将分析结果进行讨论.

2 数据资料与背景介绍

2.1 数据资料

所用的地磁指数由世界数据中心WDC-C2提供,主要考察磁暴期间*Dst*, *Kp*和*AE*指数的变化;GPS TEC数据来自于IGS(International GPS Service)所发布的全球GPS台网观测数据与我国地壳形变监测网的GPS台网观测数据,选取纬度30°S—50°N、经度105°E—135°E范围内的观测台站数据,其中涉及到的IGS台站数目约为20个左右,全国地壳形变监测网的台站数目约为12个左右(台站数目和分布视当天观测情况和数据发布情况有少量变化),观测数据的时间分辨率均为0.5 min,所用卫星数据则来自于美国国防气象卫星项目(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP),所涉及的是其中F14卫星的高纬地区卫星轨道面上的离子温度观测值.

以上3种数据资料的时间范围均为2000年7月14—18日(年第196—200天,磁暴1)及2003年10月28日至11月1日(年第301—305天,磁暴2).

2.2 背景介绍

太阳耀斑是太阳活动最剧烈的现象之一,耀斑的爆发往往伴随一系列的高能辐射,形成磁云或高速粒子流,冲击地球磁层,产生突发电离层骚扰、磁暴等现象.本文所分析的两次磁暴均是由X级太阳耀斑事件引起的,并造成了特大电离层暴.本文涉及的两次磁暴的基本情况如下.

磁暴1 2000年7月13日(年第195天)高纬地磁已经处于活动状态,14日(年第196天)在太阳9077活动区爆发了X5级特大耀斑.随后在15—16日(年第197—198天)出现了一次特大地磁暴,此次磁暴的急始出现在15日1500 UT.磁暴

急始出现以后, Dst 指数迅速下降, 在 7 月 15 日 2200 UT Dst 指数达到最小值约为 -300 nT , 磁暴主相持续 6 h, 恢复相持续 2—3 天 [5],[8]. 图 1 给出了 2000 年 7 月 14—18 日 (年第 196—200 天) 期间的相关地磁指数.

磁暴 2 2003 年 10 月 26 日 (年 299 天), 在太阳 484 活动区产生了一个 X1.1 级的太阳耀斑和多个 M 级的太阳耀斑, 地磁受其影响开始活动. 至 10 月 28 日 (年 301 天), 486 活动区出现了 X17.2 级的特大耀斑. 其后 10 月 29 日 (年第 302 天), 这一区域又出现了 X10.0 级的大耀斑, 造成了更为猛

烈的地磁扰动和地磁暴. 此次磁暴的急始出现在 29 日 0600 UT, 磁暴急始出现以后, Dst 指数先是下降到 -200 nT , 随即在 1400 UT 左右出现了一次波动, Dst 指数上升至 -100 nT 后又下降到 -350 nT 左右. 在 30 日 (年第 303 天) 0000 UT Dst 指数开始回升, 于 0700 UT 恢复至 -40 nT , 随后又再次迅速下降, 到当天 2200 UT Dst 指数达到最小值 -400 nT 左右, 随后逐步回升. 图 2 给出了 2003 年 10 月 28 日—11 月 1 日 (年第 301—305 天) 期间的相关地磁指数.

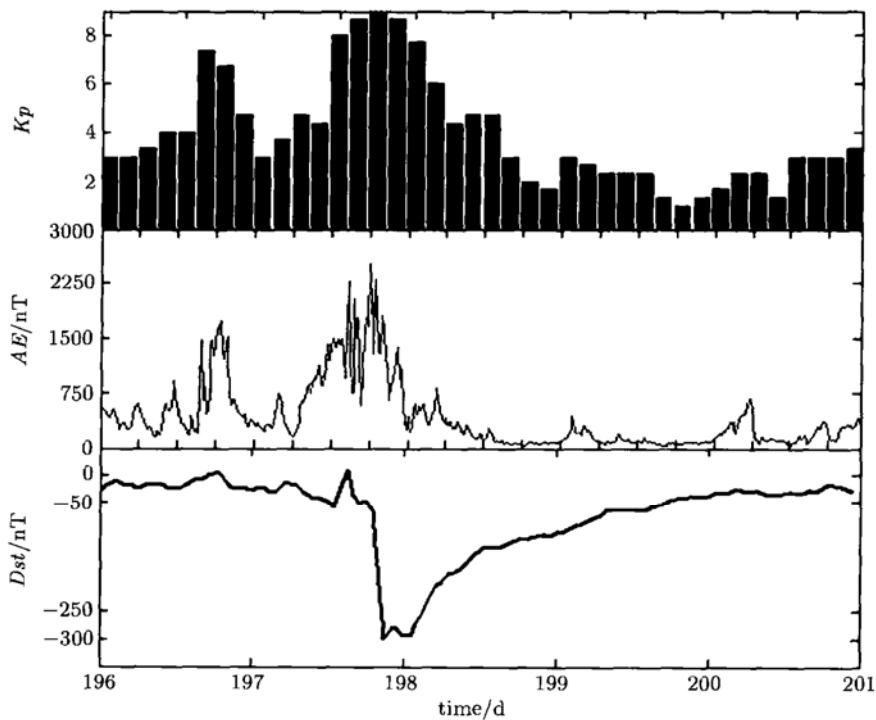


图 1 2000 年 7 月 14—18 日 (年第 196—200 天) 磁暴期间 (磁暴 1) 的地磁指数
Fig.1 The geomagnetic index on July 14—18, 2000 during storm 1

这是两次典型因耀斑激发的磁暴事件, 下面分析比较这两次磁暴期间电离层响应的异同.

3 中低纬电离层响应

3.1 分析方法

为了得到研究范围内满足一定时空分辨率的电离层电子浓度总含量 (TEC) 的值, 我们最近提出了一种以网格插值为主要算法的 TEC 现报系统, 其原理如下.

首先由观测数据得到穿透点处的斜向 TEC 值 $TEC_R^S(t)$, 此即作为计算时的原始观测量, 其中含有硬件延时误差项. 然后将所研究的时空范围划分为规则分布的网格, 计算网格点位置上的等效垂直 TEC, 这样就将研究不规则分布的带有误差的斜向 TEC 观测值简化为研究均匀分布的网格点上的等效垂直 TEC 值.

本方法的观测方程为

$$TEC_R^S(t) \cdot \sin E_R^S(t) = TEC_i + (B_R + B^S) \cdot \sin E_R^S(t). \tag{1}$$

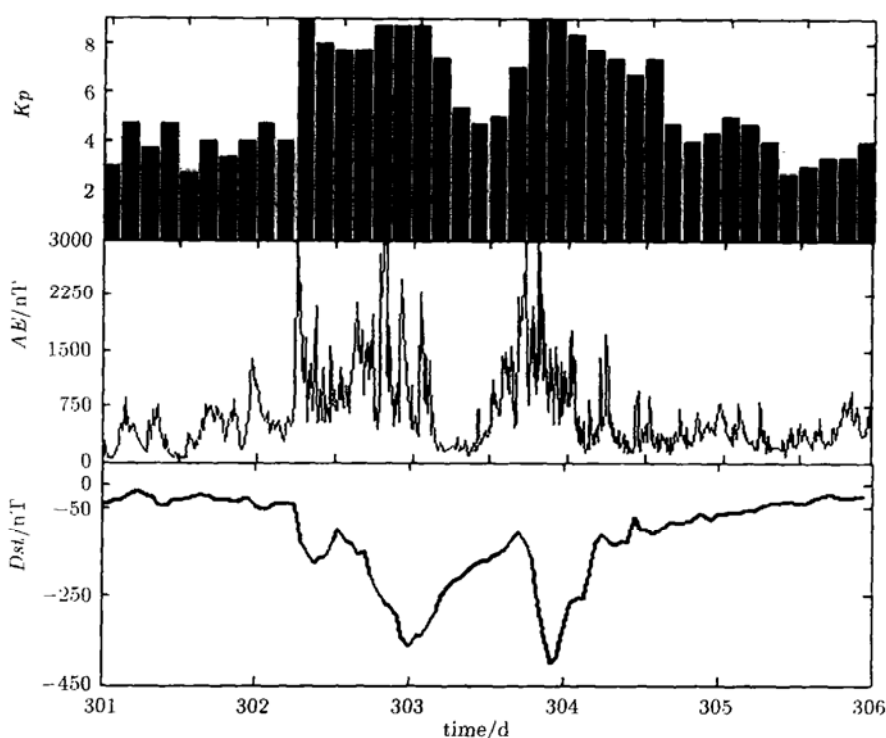


图2 2003年10月28日—11月1日(年第301—305天)磁暴期间(磁暴2)的地磁指数

Fig.2 The geomagnetic index on October 28—November 1, 2003 during storm 2

其中, $TEC_R^S(t)$ 为卫星 S 与接收机 R 之间的连线(即电波射线)与电离层质心高度面的交点(通常称为穿透点)处的斜向观测 TEC 值; $E_R^S(t)$ 为 t 时刻穿透点处的电波射线仰角; TEC_i 为第 i 时空网格点上的等效垂直 TEC 值, 其网格点编号 i 是按照就近原则选取的现报系统时空网格点阵中与对应于卫星 S 和接收机 R 所观测的电离层穿透点最为接近的网格点的编号(在就近原则上, 认为时间就近优先于空间就近); B_R 、 B^S 分别为接收机 R 与卫星 S 的硬件延迟误差, 通常认为在几天的计算范围内同一卫星及同一接收机的硬件误差固定不变. 式(1)给出了 GPS 网站的观测量 $TEC_R^S(t)$ 、 $E_R^S(t)$ 与待求量网格点 TEC_i 、硬件误差值 B_R 、 B^S 之间的关系, 称其为观测方程, 是我们估算网格点 TEC 的出发方程 [6],[7],[9].

基于我们所使用的 GPS 观测台站的分布情况以及中低纬地区暴时 TEC 的分布特点, 以东亚地区上空 (120°E , 30°S — 50°N) 的 TEC 数据作为分析对象, 考察其随时间及纬度的二维变化, 从而得到这两次磁暴期间中低纬电离层的响应情况.

3.2 暴时 TEC 分布与变化

利用上面提到的分析方法, 结合 IGS 和我国地

壳形变监测网的地理坐标在纬度 30°S — 50°N 、经度 105°E — 135°E 范围内的观测台站数据, 得到 2000 年 7 月 14—18 日(年第 196—200 天, 磁暴 1)与 2003 年 10 月 28 日—11 月 1 日(年第 301—305 天, 磁暴 2)期间 120°E 经度线上, 纬度范围为 30°S — 50°N 的电离层 TEC 等值线图(见图 3), 其时空分辨率为纬度 2° , 时间为 0.5 h.

由图 3 可看出, 两次磁暴期间中低纬地区特别是电离层赤道异常结构的 TEC 随时间及纬度的变化情况.

磁暴 1, 在 15 日磁暴急始出现后南北半球的驼峰对称结构被破坏, 16 日赤道异常峰被压缩为单峰并向南半球偏移, 17 日恢复双峰结构, 但强度和范围增大, 且向南北两边扩张, 18 日恢复正常形态, 这与已有的研究结果一致 [5],[6].

磁暴 2, 在 29 日磁暴急始出现后南北半球的驼峰对称结构被破坏, 30 日赤道异常峰被压缩为单峰并向北半球偏移, 31 日保持单峰结构, 且强度和范围增大, 11 月 1 日开始向正常状态恢复, 但仍然受磁暴影响, 赤道异常峰结构不明显.

为了进一步研究这两次特大电离层暴的变化特性, 我们选取相对平静日的电离层 TEC 值作为参考

值(磁暴1以2000年7月14日的数据为参考值,磁暴2以2003年10月28日的数据为参考值),得到这两次磁暴期间TEC的绝对变化值,如图4所示.从此图上可更清楚地看出电离层赤道异常结构特别是恢复相期间单峰压缩和双峰增强的变化过程.暴时电离层赤道异常峰的演变过程可产生极其复杂的电离层正暴和负暴两种情况,下面给出两次磁暴期间的正暴与负暴情况.

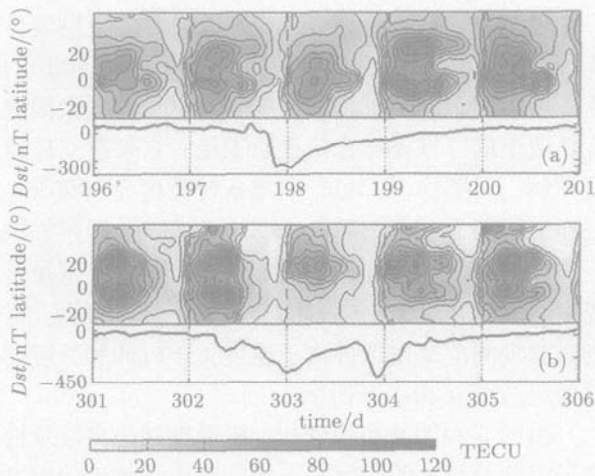


图3 120°E 经度线上的二维 TEC 分布等值线图, (单位为 TECU) (a) 为 2000 年 7 月 14—18 日 (年第 196—200 天) 磁暴期间 TEC(磁暴 1), (b) 为 2003 年 10 月 28 日至 11 月 1 日 (年第 301—305 天) 磁暴期间 TEC(磁暴 2)

Fig.3 The planar TEC contours of the longitude of 120°E, (unit: TECU) the data of part a is from July 14—18, 2000 during storm 1, the data of part b is from October 28 to November 1, 2003 during storm 2

磁暴 1, 负暴主要发生时间是急始后, 即 16 日凌晨, 存在较弱的由中纬向低纬发展的负暴. 正暴主要发生时间是急始发生的那一天, 即 15 日、17 日和 16 日白天时段; 18 日中低纬地区发生了范围较大、向赤道延伸的正暴. 对磁暴 1 的正暴与负暴情况与已有的研究结果一致 [5],[6],[8].

磁暴 2, 负暴主要发生时间是急始后, 即 29 日晚间, 暴由北半球向南延伸, 规模较小; 接后的三日中在靠近赤道的南半球, 也发生了大范围的负暴. 正暴主要发生时间是急始发生后, 即 29 日中午, 在急始后的第二三日北半球也发生了小规模的正暴.

从图 3 和图 4 中可明显看出这两次磁暴的最显著的不同点之一, 即由季节变化和暴发生的地方时不同所引起的电离层 TEC 分布的不同, 主要表现

在两个方面: (1) 从图 3 来看, 磁暴 1 的赤道峰 (特别是压缩单峰) 向南半球偏移, 磁暴 2 的赤道峰 (特别是压缩单峰) 则向北半球偏移; 磁暴 1 的赤道峰 (特别是北半球) 向夜间延伸 (即夜间增强现象), 磁暴 2 则没有这种现象. (2) 从图 4 来看, 磁暴 1 以正暴为主, 影响范围主要由北半球向南半球延伸; 磁暴 2 以负暴为主, 影响范围主要由南半球向北半球延伸; 而磁暴 1 对北半球的 TEC 变化影响更大, 磁暴 2 则对南半球影响更大.

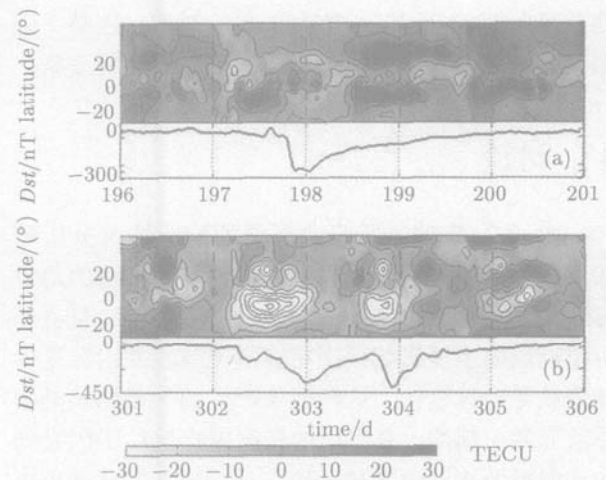


图4 120°E 经度线上的二维 TEC 对比于平静日的绝对等值线图 (单位为 TECU). (a) 为 2000 年 7 月 15—18 日 (年第 197—200 天) 相对于 7 月 14 日的 TEC 数据 (磁暴 1), (b) 为 2003 年 10 月 29 日至 11 月 1 日 (年第 302—305 天) 相对于 10 月 28 日的 TEC 变化数据 (磁暴 2)

Fig.4 The contours of the variations of planar TEC of the longitude of 120°E, (unit: TECU) the data of part a is from July 15—18, 2000 during storm 1, the data of part b is from October 29 to November 1, 2003 during storm 2

同时, 两次磁暴的主要不同点还表现在磁暴 1 呈现出典型的单个孤立磁暴形态, 而磁暴 2 则表现出多重磁暴形态. 这一点反映在两次磁暴的变化趋势上则由图 4 表征出来, 即两次磁暴电离层 TEC 的变化趋势大致相同的部分在前期 (急始发生前后一天), 它们表现出明显不同的部分在磁暴的后期. 对于磁暴 1, 后期的 TEC 变化相对于磁暴前期来说主要是增大的趋势 (特别是在赤道异常峰附近, 这个变化更加明显); 而对于磁暴 2, 后期的 TEC 变化相对于磁暴前期来说主要是减小 (中纬及赤道地区). 结合地磁指数进行分析后我们认为, 这两次磁暴期间

变化趋势相同的原因主要是由于两次磁暴初期的电离层形态与活动十分相似, 两者均由太阳耀斑事件引起, 且发生急始前电离层均已处于活动状态. 后期变化趋势又存在不同的原因是, 对磁暴 2, 在磁暴的第 3 天又发生了一次太阳活动引起的电离层扰动事件, Kp 和 Dst 指数显示出这次事件和前一天磁暴的程度不相上下 (见图 2); 而对于磁暴 1, 从 Kp 和 Dst 指数来看, 太阳与电离层活动均在逐渐恢复平静 (见图 1). 也就是说, 相对于磁暴 1, 赤道异常随磁暴平静—急始—主相—恢复相的发展相应地重复压缩—反弹—恢复的单一过程, 磁暴 2 则因在磁暴的恢复相中叠加了新的磁暴而变得复杂.

4 讨论

由 3.2 节对中低纬电离层的响应情况分析可知, 磁暴期间赤道异常峰有向秋冬半球移动的趋势 (磁暴 2 急始发生后 10 天为该年立冬时间), 且磁暴对电离层的主要影响范围在春夏半球, 并由春夏半球向秋冬半球延伸. 这种现象产生的主要原因是由季节异常引起的, 夏半球的极区电离层粒子因受到阳光照射的影响电离得比较充分, 焦耳加热过程更

为显著, 使得电离层离子更易受到磁暴的影响, 反应更为剧烈^[1]. 再加上各个季节背景风场的不同和各个磁暴发生时间的不同, 引起电离层不同的响应, 最终造成了两次磁暴期间 TEC 分布的相异性.

从上文的分析中得知中低纬电离层对磁暴的响应情况, 特别是季节性电离层响应的不同. 为了更好地分析磁暴的形成机制, 下面将结合高纬电离层在磁暴期间的部分参数变化对其进一步说明.

为了研究高纬电离层形态, 我们利用 DMSP 的 F14 卫星的数据进行分析. 美国国防气象卫星项目 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) 为位于大约距地面 840 km 的倾斜角为 98° 的太阳同步轨道上的三轴姿态稳定极轨卫星, 它采用双星运行体制, 周期约 101 min, 扫描条带宽度为 3000 km, 过赤道时间为 0536 UT 及 1052 UT, 每 6 h 即可提供一次全球可见光和红外云层数据. 根据 F14 卫星所提供的高纬地区卫星轨道面上的离子温度数据, 得到磁暴期间电离层顶部离子温度关于时间和纬度的等值线图如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 可以看出, 磁暴期间电离层顶部离子温度最显著的变化在于极区及中纬附近的温度升高现象.

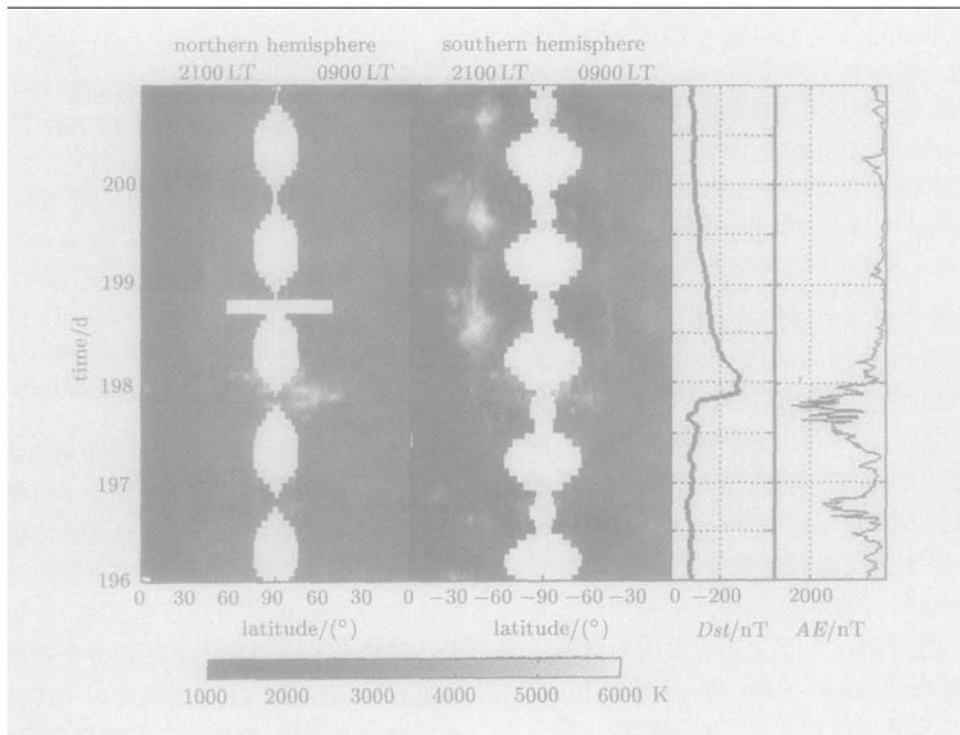


图 5 2000 年 7 月 14—18 日 (年第 196—200 天) 磁暴期间极区电离层顶部离子温度等值线图

Fig.5 The temperature contours of the top ionospheric ions of polar region on July 15—18, 2000 during storm 1

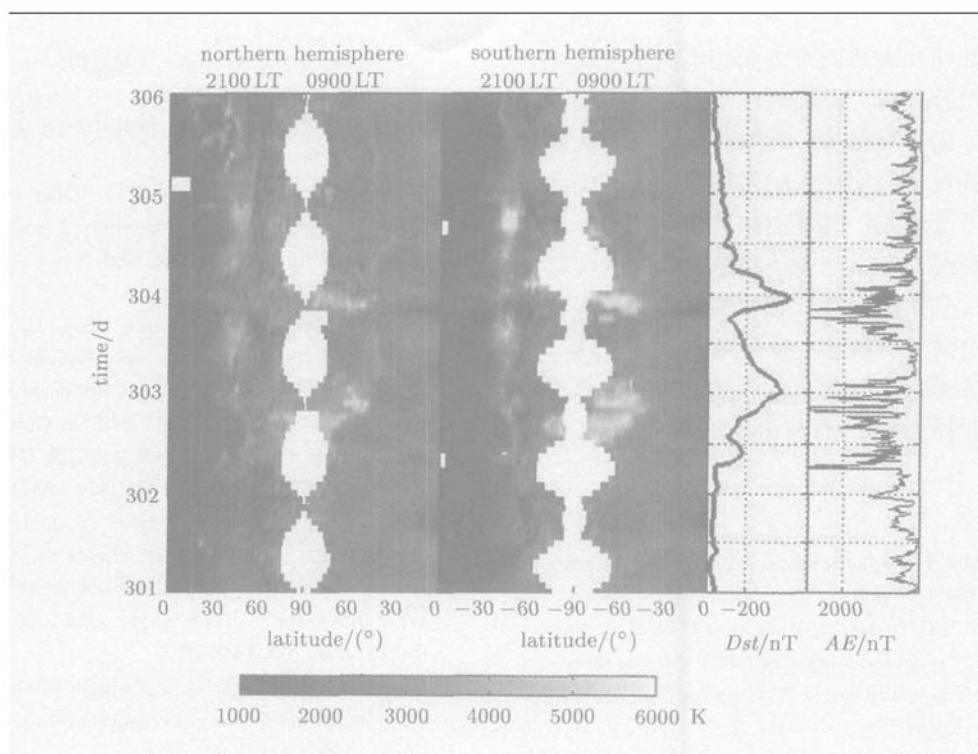


图 6 2003 年 10 月 28 日—11 月 1 日 (年第 301—305 天) 磁暴期间极区电离层顶部离子温度等值线图

Fig.6 The temperature contours of the top ionospheric ions of polar region on October 29—November 1, 2003 during storm 2

磁暴 1, 温度升高的时空范围在急始发生后 16 日凌晨南北极圈附近, 且北极圈附近温度抬升明显强于南极圈; 16 日、17 日、18 日夜间在南半球中纬附近。

磁暴 2, 温度升高的时空范围在急始发生后 30 日凌晨及 31 日凌晨南北极圈附近, 且南极圈附近温度抬升明显强于北极圈; 30 日、31 日夜间南北半球中纬附近, 且南半球温度抬升明显强于北半球。

从分析得知, 在磁暴的急始发生后的 1—2 h 内, 电离层顶部离子温度就有明显的增加。这说明了磁暴期间高纬电离层已经开始产生响应, 一般认为这是由太阳风粒子或磁尾等离子体沉降引起的^[10]。从图 5 和图 6 看出, 这两次磁暴期间的高纬电离层响应的不同在于: 磁暴 1 为北半球比较明显, 且响应时间集中在初相期; 而磁暴 2 则为南半球, 且除初相期的响应外, 在后一日又有高纬电离层活动。高纬电离层的响应活动表明了磁暴 1 的高能粒子注入主要在北半球极区, 磁暴 2 的高能粒子注入主要在南半球极区, 同时对于磁暴 2 的 31 日的粒子注入, 结合 *Dst* 和 *AE* 指数来看, 相应此时的电离层又产生了一次较大的扰动响应。这说明到了磁暴急

始出现后的第 4 天, 磁暴 1 时的太阳活动对电离层的影响逐渐平静, 而磁暴 2 时地球电离层仍然受到太阳活动的影响。

以上对高纬电离层磁暴期间响应结果的分析和我们上文中对磁暴时中低纬电离层响应的分析相吻合, 说明了高纬电离层活动对中低纬电离层活动的影响导致了全球电离层响应的不同。正是由于极区高能粒子注入随季节的变化产生了高纬电离层响应的不同^[11], 这种不同又通过电离层活动和背景风场的作用传递到中低纬。因此我们得出结论, 高能粒子注入的当地时间与半球位置决定了电离层对于磁暴的响应机制^{[8],[12]}。而对于磁暴恢复相期间夜间中纬地区离子温度升高的现象, 现在还没有很好的物理解释。

5 小结

本文通过分析 2000 年 7 月 14—18 日和 2003 年 10 月 28 日至 11 月 1 日的磁暴期间数据, 得到了这两次磁暴期 120°E 经度线上的 TEC 的发展变化情况, 并对两次磁暴的形成机制进行了讨论。

我们从中低纬和高纬两个方面的电离层变化来对这两次磁暴进行分析, 得到对应不同磁暴的不同的电离层响应。由分析得知, 不同的太阳活动造成高纬电离层高能粒子时空注入的不同, 直接影响到高纬电离层离子活动, 进一步影响中低纬电离层, 从而决定全球电离层对磁暴的响应机制。从这两次磁暴来看, 每一次完整的磁暴从起始到恢复相都有着相似性。然而电离层的活动十分复杂, 对于磁暴 2 就不能仅仅看成是数次磁暴 1 的叠加。对于电离层 TEC 在磁暴期间的变化, 有待进一步的研究。

参考文献

- [1] Buonsanto M J. Ionospheric storms-A review. *Space Sci. Rev.*, 1999, **88**:563—600
- [2] Szuszczewicz E P, Lester M, Wilkinson P *et al.* A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:11665—11684
- [3] Mannucci A J, Iijima B, Sparks L *et al.* Assessment of global TEC mapping using a three-dimensional electron density model. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1999, **61**:1227—1236
- [4] Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J *et al.* Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**:3219—3222
- [5] Wan Weixing, Yuan Hong, Liu Libo *et al.* The sudden increase in ionospheric total electron content caused by the very intense solar flare on July 14, 2000. *Sci. China (Series A)*, 2001, **31**(supp.):120—125. in Chinese (万卫星, 袁洪, 刘立波等. 2000 年 7 月 14 日特大耀斑引起的电离层 TEC 突然增强现象. 中国科学 (A 辑), 2001, **31**(增刊):120—125)
- [6] Wan W X, Liu L B, Xia C L, Ding F, Ning B Q. Properties of Equatorial Anomaly Ionosphere Around 120°E Meridian During the High Solar Activity Years. COSPAR, 04-A-01318
- [7] Xia Chunliang, Wan Weixing, Yuan Hong *et al.* An analysis of the ionospheric disturbances during a magnetic storm observed with a GPS network. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(5):326—332. in Chinese (夏淳亮, 万卫星, 袁洪等. 磁暴期间电离层扰动的 GPS 台网观测分析. 空间科学学报, 2004, **24**(5):326—332)
- [8] Kil H, Paxton L J, Pi X Q *et al.* Case study of the 15 July 2000 magnetic storm effects on the ionosphere-driver of the positive ionospheric storm in the winter hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**:1391, doi:10.1029/2002JA009782
- [9] Bánya L. Single station and single satellite method of GPS ionospheric data processing. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, 1997, **32**(3):407—416
- [10] Araki T. A physical model of geomagnetic sudden commencement. *Geophys. Monogr. Ser.*, 1995, **81**:183—200
- [11] Fuller-Rowell T J, McCodrescu M V *et al.* On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:2343—2353
- [12] Lee J J, Min K W, Kim V P *et al.* Large density depletions in the nighttime upper ionosphere during the magnetic storm of July 15, 2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**:10.1029/2001GL013991