

电场对暴时低纬电离层 f_oF_2 变化的影响

孙树计, 陈 春, 丁宗华, 班盼盼, 刘 云, 奚迪龙

(中国电波传播研究所, 山东青岛 266107)

摘要: 电场在低纬电离层的演化过程中扮演着重要角色. 以 2003 年 10~11 月的两次强磁暴事件为例, 分析 105°E 附近由赤道区域扰动电场引起的等离子体输运对低纬指定区域内电离层的影响, 并用电离层模型 SAMI2 进行数值模拟. 研究表明, 电场能引起电离层 f_oF_2 的复杂变化. 在 2003 年 11 月 19~24 日孤立磁暴事件中, 扰动电场在电离层暴初期起主导作用, 向上和向极漂移的等离子体造成赤道异常峰南侧海口站电离层负暴和北侧重庆及兰州站正暴. 在 2003 年 10 月 28 日~11 月 2 日连续磁暴事件中, 电离层暴初期以电场影响为主, 随后电场和中性扰动成分共同作用于电离层, 表现出复杂的暴时变化. 电场扰动能迅速引起电离层的响应, 只是后者能维持较长时间. 上述结果对区域电离层短期预报具有重要意义.

关键词: 扰动电场; 电离层暴; 赤道异常; 模拟

中图分类号: P352.4 文献标识码: A

Effect of electric field on low-latitude storm time ionospheric f_oF_2 variations

SUN Shu-ji, CHEN Chun, DING Zong-hua, BAN Pan-pan, LIU Yun, XI Di-long

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: The electric field plays an important role in low-latitude ionospheric evolutions. Taking two major storms in October–November 2003 for example, the effects of plasma transportation, which is caused by equatorial disturbance electric field, on low-latitude storm time ionospheric variations at given locations were studied near 105°E. The theoretical model of SAMI2 was used to simulate these two events. It is shown that the electric field can cause complicated variations on the ionospheric f_oF_2 . For the isolated storm during 19~24 November, the disturbance field dominated the ionospheric variations during the initial phase. The upward/polarward plasma drift caused a negative storm at Haikou and a positive one at Chongqing and Lanzhou, respectively. The former and the latter two are on either side of the north crest of equatorial ionospheric anomaly. For the seriate storms during 28 October–2 November, the influence of the electric field was major at the beginning, while both the field and the neutral composition act on the ionosphere subsequently, leading to complex disturbances. The disturbance field can cause immediate responses on the ionosphere, though the latter can last longer. The results shown here is of importance to zonal short-time ionospheric predictions.

Key words: disturbance electric field; ionospheric storm; equatorial ionospheric anomaly; simulation

0 引言

对赤道和低纬电离层而言,电磁漂移是影响 F_2 层电子密度分布的重要动力学因素之一. 地磁平静时,在白天东向极化电场和地球磁场的共同作用下,赤道附近的等离子体向上漂移,然后沿磁力线向两极输运,在磁低纬区域形成著名的“赤道异常”双峰. 磁扰期间,伴随太阳风—磁层相互作用的增强和跨极盖电位降的增长,磁层电场能够穿透到赤道电离层,引起增强或减弱的等离子体漂移,进而推动或抑制异常双峰的发展^[1~3];另一方面,高纬增强的粒子沉降引起低热层加热,包括中性风和中性成分变化在内的热层扰动以及扰动发电机电场同样能对赤道异常的形态和动力学过程产生重大影响^[4].

在中纬,电离层暴在夏季主要表现为峰值电子密度 $N_m F_2$ (或者临界频率 $f_o F_2$) 和总电子含量 TEC 的降低,在冬季则大致相反,这可以归因于不同季节暴时热层环流的影响不同^[4]. 在低纬,电场的影响千变万化,它与中性成分的影响交替或同时出现,并在特定条件下相互影响^[5~6],使电离层的暴时变化异常复杂. 2003 年 10~11 月爆发了两次强磁暴事件^[7],其行星际和地磁环境的变化造成电离层和热层的剧烈扰动,引起业内人士的广泛关注^[6,8~14]. 以这两次事件为例,通过分析磁暴期间我国低纬部分区域内电离层的扰动特性,特别是电磁漂移造成电离层的正负相变化,对进一步理解扰动电场在低纬电离层暴中的作用,以及提高区域电离层短期预报精度等方面具有重要意义.

在模拟扰动电场对低纬电离层参数的影响时,采用由美国海军实验室开发的低纬电离层理论模型 SAMI2^[15]. 该模型对 7 种带电离子沿磁力线求解连续性方程、动量方程和能量方程,并考虑了等离子体在电场漂移作用下的垂直和水平运动. 由于模型中只包含平静时刻的经验电场模式,为模拟磁扰期间电场对电离层的影响,需要对模型进行改造,把扰动电场数据作为输入电场的一部分. 由于 105°E 附近没有 $E \times B$ 漂移的观测数据,研究所需的扰动电场数据取自文献^[16]的经验模型. 该模型以前 28 h 的地磁 AE 数据为输入,包括迅速产生的穿透电场和延迟产生的扰动发电机电场两部分.

1 典型磁暴事件中的低纬电离层扰动特性

2003 年 11 月 19~24 日和 10 月 28 日~11 月 2 日的两次强磁暴均是由太阳上产生的快速日冕物质抛射事件及其驱动的行星际激波引起的^[7],对日地空间天气特别是电离层天气造成重大影响. 本文目的是分析两次事件中 105°E 附近扰动电场对低纬海口(记为 HK, 20.0°N, 110.3°E, 磁纬 8.6°N),重庆(CQ, 29.6°N, 106.5°E, 磁纬 18.1°N)以及兰州(LZ, 36.1°N, 103.7°E, 磁纬 24.8°N)站电离层 $f_o F_2$ 变化的影响. 地磁平静时,三站分别位于赤道异常北峰的两侧,如图 1 所示,其中对异常峰的估计采用国际参考电离层^[17]秋季午后的经验值. 电离层的扰动用

$$df = \frac{f_o F_2(o) - f_o F_2(q)}{f_o F_2(q)} \times 100\%$$

表征,其中 $f_o F_2(o)$ 表示观测值, $f_o F_2(q)$ 表示平静时的值,用 27 天滑动中值代替.

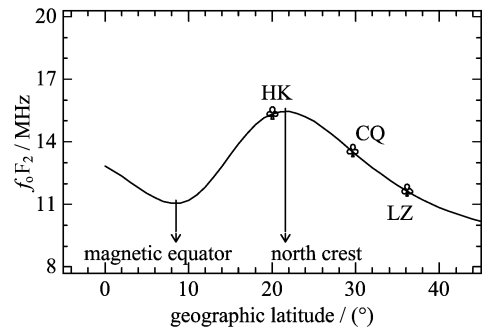


图 1 地磁平静时各台站相对赤道异常北峰的位置

Fig. 1 Locations compared with the north crest of quiet-time equatorial ionospheric anomaly

1.1 2003 年 11 月 19~24 日磁暴期间的低纬电离层扰动

2003 年 11 月 20 日伴随着快速日冕物质抛射穿过地球轨道,ACE 卫星记录到的最强南向磁场达 -45 nT,引起地球磁层的强烈扰动. 本次磁暴从 20 日 6 时(UT,下同)开始,由 Dst 指数表征的磁暴主相是单步发展的,在 20 时达到极小值 -422 nT,随后进入恢复相,如图 2(b)所示. 本次磁暴期间发生一连串亚暴事件,分别对应于 AE 指数的突然增加(图 2(c)),由此引起赤道电场的异常变化. 图 2(d)给出由扰动电场引起赤道电离层 300~400

km 高度等离子体垂直漂移的平均速度 v_d [16], 以向上为正, 其中星号给出由穿透电场引起的漂移速度 v_{pp} , 虚点给出由扰动发电机电场引起的漂移速度 v_{dl} , 二者之和即为 v_d , 用实线表示. 由于 v_d 描述的是相对平静时刻的漂移增量, 与电离层的扰动对应, 因此可用于对后者的分析. 此外, 考虑到电离层 hF 能部分反映磁扰期间低纬的电场和风场信息 [18], 图 2(e) 给出 HK 站电离层 ΔhF 以便与由经验模式给出的电场漂移相互对比和印证. 它定义为电离层 hF 观测值与平静时值之差, 后者同样用观测数据的 27 天滑动中值代替.

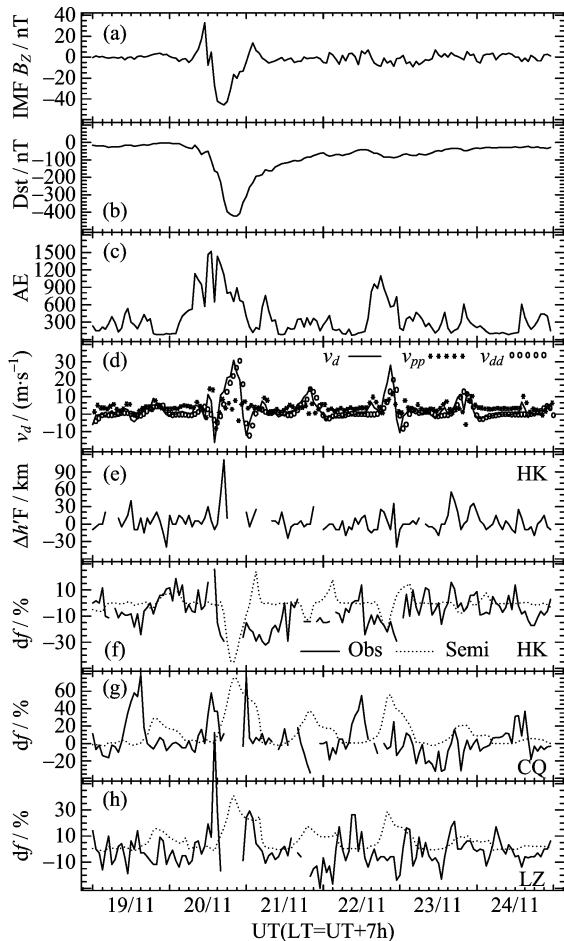


图 2 2003 年 11 月 19~24 日行星际和地磁以及电离层参数的变化

Fig. 2 Variations of interplanetary, geomagnetic and ionospheric parameters during November 19~24, 2003

20 日 8~13 时之间, 赤道附近的等离子体漂移速度 v_d 为正值, 它主要由增强的东向穿透电场以及前次亚暴过程中弱的扰动发电机电场共同产生. 增强的电磁漂移引起等离子体极向输运, 使得日落前

后赤道异常不但得以维持, 而且在纬向上有进一步扩展的趋势, 表现为三站电离层 df 的增加, 如图 2 (f)~(h) 中实线所示. 此时由于赤道翻转电场异常增强 [19], 扰动电场对总电场的贡献较小, 由此导致 SAMI2 的模拟结果 (图 2(f)~(h) 中点线所示) 并未给出相应的正扰动特征. 从 17 时开始, 高纬形成的热层扰动环流逐渐影响到低纬, 扰动发电机电场开始增强. 与此相应, 漂移速度 v_{dl} 迅速增加, 更多的等离子体被输运到较高纬度, 造成 HK 站电离层负暴以及随后 CQ 和 LZ 站正暴, 前者一直持续到 21 日 15 时前后, 后者只是短暂的维持数小时. 在此期间, HK 站电离层 F 层被抬高, 表现为 20 日 17 时前后 hF 的突然增加 (图 2(e)), 与漂移速度 v_d 的变化一致, 这表明经验模型 [16] 给出的电场数据是有效的 [20]. 相比而言, SAMI2 的模拟结果能给出电离层的主要扰动特性和幅度, 只是低估了 HK 站负暴和高估了 CQ 与 LZ 站正暴的持续时间, 特别是在 21 日 3 时前后, SAMI2 给出的扰动趋势与观测结果相反. 这可能是由于模拟过程中只考虑了电场的影响. 此时距磁暴开始超过 15 小时, 中性扰动成分的影响开始波及到低纬地区, 富含分子成分的大气增加了电子复合率, 它与扰动电场共同作用于电离层, 导致期间 HK 站的长时间负暴. 另一种可能是模式 [16] 给出的扰动电场与实际值之间存在一定偏差, 使得对电离层 df 的计算结果偏离真值. 由于文献 [20, 21] 已对该模式在磁暴期间低纬电离层的预报能力进行了详细评估, 本文不再讨论. 此后, 由于电场和中性成分共同或交替作用于电离层, 只考虑电场影响的模拟结果已不能很好地再现观测结果, 由于不是本文关注的重点, 因此不再赘述.

从上述分析中可以看出, 扰动电场能引起赤道异常的变化以及低纬电离层的扰动, 但后者相对其影响因素总能持续更长时间, 这与文献 [6, 22] 的模拟结果一致. 换句话说, 电离层的变化与此前的扰动电场有关, 特别是在磁暴的初相, 电场的作用时间一般低于暴时热层环流携带的中性扰动成分的影响, 后者往往能维持数十 h [23].

1.2 2003 年 10 月 28 日~11 月 2 日磁暴期间的低纬电离层扰动

2003 年 10 月 28~29 日连续发生两次太阳爆发事件, 导致 29~31 日两次超强磁暴 (图 3(b)), 其中前次开始于 29 日 5 时, 主相是两步发展的,

Dst 极小值为 -353 nT, 后次开始于 30 日 16 时, 主相是单步发展的, Dst 极小值为 -383 nT. 在此期间扰动电场出现多次极值, 如图 3(d) 所示, 分别对应于行星际磁场 B_z 以及 Dst 的极小值. 由于行星际和地磁扰动变化频繁, 影响电离层的各因素交替或共同起作用, 导致低纬电离层的扰动异常复杂.

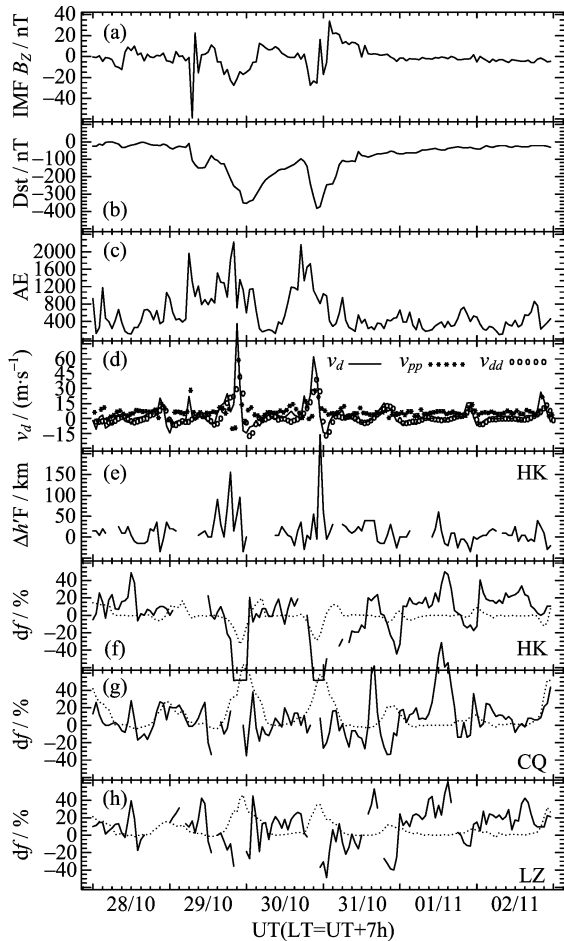


图 3 2003 年 10 月 28 日~11 月 2 日行星际和地磁以及电离层参数的变化

Fig. 3 Variations of interplanetary, geomagnetic and ionospheric parameters during October 28~November 2, 2003

随着行星际扰动影响到地球磁层以及磁暴的开始, 从 29 日 4 时起东向穿透电场开始增强, 此时处于当地正午前, 三站电离层均表现出弱的正扰动, 如图 3(f)~(h) 中实线所示, 这意味着赤道异常峰的纬向扩展. 只是由于扰动电场的值较小, 模拟结果并未捕捉到该现象. 日落后, 伴随前次磁暴主相的发展, 扰动发电机电场和穿透电场均显著增强且为正向, 增强的等离子体运输引起 HK 站电离层强的负暴以及 CQ 和 LZ 站的正暴(负相在前), 后者与纬度相当但提前两个时区的

OKINAWA 站的结果^[10,12]类似, 同时在纬度更高的地区 TEC 表现为负暴^[11]. 模拟结果较好地再现了 HK 站负暴, 只是低估了暴的强度(图 3(f) 点线), 而在 CQ 和 LZ 站, 模拟结果只给出了电离层暴的正相, 这同样是由于模型未考虑中性成分的变化. 此时距第一次磁暴开始已超过 10 h, 在夜间有利条件下热层扰动环流开始影响到低纬, 导致电子复合率的增加. 两种效应不同的影响机制在 CQ 和 LZ 站附近相互作用, 使得该区域内电离层出现复杂扰动^[11].

从 30 日 16 时起, 随着后次磁暴的发展, 扰动电场和相应的等离子体漂移逐渐增强, 导致 HK 站电离层长时间强的负暴, 以及 CQ 和 LZ 站电离层的复杂扰动. 与前次事件类似, SAMI2 只在 HK 站表现得较好, 但并未给出 CQ 和 LZ 站的负暴. 值得注意的是, 伴随着两次磁暴主相的发展以及赤道扰动电场的异常增强, HK 站 hF 均显著增加(图 3(e)), 这同样表明了经验电场模式的有效性. 根据文献^[13]的分析, 由于电场和中性成分两种扰动机制的相互作用, 使得期间电离层赤道异常北峰几乎被破坏, 本文分析给出与之类似的结果. 从 31 日开始进入磁暴的恢复相, 电场扰动逐渐平息, 但三站电离层出现多次强扰动, 特别是在 11 月 1 日, 这种现象是只考虑电场影响的模拟结果无法解释的. 与 f_oF_2 类似, 电离层 TEC 同样出现多次正暴, 文献^[11]把它归因于中性成分的变化.

2 结论和讨论

针对两例典型磁扰事件, 即 2003 年 11 月 19~24 日孤立磁暴和 10 月 28 日~11 月 2 日连续磁暴, 分析 105°E 附近扰动电场引起等离子体漂移对低纬电离层的影响, 并用 SAMI2 的模拟结果进行验证. 研究表明, 扰动电场在电离层暴初期扮演着重要角色. 对 11 月 19~24 日事件, 初始时极向等离子体输运造成 HK 站负暴与 CQ 和 LZ 站正暴, 随后电离层的状态逐渐受中性扰动成分的影响. 对 10 月 28 日~11 月 2 日事件, 初始时以电场影响为主, 随后电场和中性成分共同作用到电离层, 引起复杂扰动, 表现为 HK 站的负暴以及 CQ 和 LZ 站的复杂扰动, 在磁暴的恢复相中中性扰动成分的影响占优. 电场变化能引起电离层的迅速扰动, 且后者的持续时间更长.

低纬电离层暴时的复杂变化受扰动电场、中性

风以及中性成分变化等多种因素的影响,特别是连续磁扰期间,电场对等离子体的输运以及中性成分对电子复合率的影响交替或同时起作用,造成当地电离层增强或减弱的扰动,使得相应的预报难度高于中纬^[24]。本文的分析结果再次印证了电场对低纬电离层变化的重要性,这对研究电场扰动引起的电离层变化规律以及提高区域电离层预报精度等方面具有重要意义。

致谢 本文所用数据分别由世界数据中心 Boulder 中心(WDC-B)和中国电波传播研究所数据中心提供,理论模型 SAMI2 由美国海军实验室提供,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Abdu M A, Sobral J H A, De Paula E R, et al. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): An overview[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1991, 53: 757-771.
- [2] Abdu M A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 1997, 59: 1 505-1 519.
- [3] Fejer B G. Low latitude storm time ionospheric electrodynamics[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2002, 64: 1 401-1 408.
- [4] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F_2 -layer[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 1998, 60: 1 385-1 402.
- [5] Maruyama N, Richmond A D, Fuller-Rowell T J, et al. Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the storm-time equatorial ionosphere[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32; doi:10.1029/2005GL023763.
- [6] Lin C H, Richmond A D, Heelis R A, et al. Theoretical study of the low- and midlatitude ionospheric electron density enhancement during the October 2003 superstorm: Relative importance of the neutral wind and the electric field[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110; doi:10.1029/2005JA011304.
- [7] Alex S, Mukherjee S, Lakhina G S. Geomagnetic signatures during the intense geomagnetic storms of 29 October and 20 November 2003[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2006, 68: 769-780.
- [8] Crowley G, Hackert C L, Meier R R, et al. Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 magnetic storm[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111; doi:10.1029/2005JA011518.
- [9] Yizengaw E, Moldwin M B, Komjathy A, et al. Unusual topside ionospheric density response to the November 2003 superstorm[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111; doi:10.1029/2005JA011433.
- [10] Abdu M A, Maruyama T, Batista I S, et al. Ionospheric responses to the October 2003 superstorm: Longitude/local time effects over equatorial low and middle latitudes[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112; doi:10.1029/2006JA012228.
- [11] Lin C H, Richmond A D, Liu J Y, et al. Large-scale variations of the low-latitude ionosphere during the October-November 2003 superstorm: Observational results[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110; doi:10.1029/2004JA010900.
- [12] Sahai Y, Fagundes P R, Becher-Guedes F, et al. Effects of the major geomagnetic storms of October 2003 on the equatorial and low-latitude F region in two longitudinal sectors[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110; doi:10.1029/2004JA010999.
- [13] Zhao B Q, Wan W X, Liu L B. Responses of equatorial anomaly to the October-November 2003 superstorms[J]. *Ann Geophys*, 2005, 23: 693-706.
- [14] Wang Yu-ming, Shen Cheng-long, Ye Pin-zhong, et al. Comparison of space weather effects of two major coronal mass ejections in late 2003 [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37: 859-867.
- 汪毓明, 申成龙, 叶品中, 等. 2003年10月与11月两次主要日冕物质抛射事件的空间天气效应比较[J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37: 859-867.
- [15] Huba J D, Joyce G, Fedder J A. Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low latitude ionospheric model[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 23 035-23 053.
- [16] Fejer B G, Scherliess L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102: 24 047-24 056.
- [17] Bilitza D. International reference ionosphere 2000[J]. *Radio Sci*, 2001, 36: 261-275.
- [18] Liu Li-bo, Wan Wei-xing, Yuan Hong, et al. Ionospheric heights at Wuhan during the storm of April 2000[J]. *Chin J Space Sci*, 2000, 20: 318-322.
- 刘立波, 万卫星, 袁洪, 等. 2000年4月磁暴期间武汉地区 F 电离层突然抬升现象[J]. *空间科学学报*, 2000, 20: 318-322.
- [19] Scherliess L, Fejer B G. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 6 829-6 842.