

全球电离层对 2000 年 4 月 6—7 日磁暴事件的响应^{*}

张满莲

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

Sandro M. Radicella

(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy)

摘 要 利用分布于全球的电离层台站的测高仪观测数据, 对扰动期间 f_0F_2 值与其宁静期间参考值进行比较, 研究了 2000 年 4 月 6—7 日磁暴期间全球不同区域电离层的响应形态, 并通过对比磁扰期间 N_mF_2 的变化与由 MSISE90 经验模式估算的中性大气浓度比 (n_O/n_{N_2}) 的变化, 探讨了本次事件期间的电离层暴扰动机制. 结果表明, 在磁暴主相和恢复相早期, 出现了全球性的电离层 F_2 层负相暴效应. 最大负相暴效应出现在磁暴恢复相早期, 即电离层暴恢复相开始时间滞后于磁暴恢复相开始时间. 在磁暴恢复相后期, 一些台站出现正相扰动. 研究结果表明, 本次事件期间的电离层暴主要是由磁暴活动而诱发的热层暴环流引起的.

关键词 电离层; 电离层暴; 磁暴效应; 扰动机制

中图法分类号 P 352

Global Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm Event of April 6—7, 2000

ZHANG Manlian

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

Sandro M. Radicella

(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy)

Abstract A great geomagnetic storm occurred during April 6—7, 2000, with the Dst index reaching a minimum value of about -320 nT. Using the ionosonde and digisonde data from about 25 stations distributed globally, the morphology of the ionospheric response to this geomagnetic storm event is studied by comparing the storm-time disturbed value of f_0F_2 with its quiet time reference value. To identify the mechanism responsible for the ionospheric disturbances during this event, a comparison is made between the ratio of disturbed to undisturbed values of N_mF_2 and of the neutral composition concentration ratio (n_O/n_{N_2}). The results of data analysis showed that during the main and early recovery phases of the geomagnetic storm, a negative ionospheric F_2 layer storm occurred globally. The maximum negative deviation of f_0F_2 from its quiet time reference value occurred during the early recovery phase of the geomagnetic storm. During the late recovery phase of the geomagnetic storm, positive ionospheric disturbances occurred in some stations, particularly in those high latitude

^{*} 国家自然科学基金重大项目 (40390150) 和中国科学院创新工程课题共同资助

2004-09-30 收到原稿, 2005-01-20 收到修定稿

stations. It is showed that the main characteristics of the ionospheric disturbances during this geomagnetic storm event are consistent with that expected from the storm effects resulted from storm-induced thermospheric circulation system.

Key words Ionosphere, Ionospheric storm, Storm effect, Disturbance mechanism

1 引言

自从 20 世纪 30 年代^[1]发现了电离层暴(在本文中,“电离层暴”这一术语指的是电离层 F 区暴)以来,电离层暴一直是高空物理学中最重要的研究课题之一。几十年来,尽管人们对这一课题已进行了大量的研究^{[2],[3]},然而,到目前为止,电离层暴的许多特性仍有待进一步深入研究,表明了该现象的极端复杂性。人们基于统计方法^{[4]~[6]},利用多个台站及多个磁暴的数据对电离层的磁暴效应进行统计分析,得到了电离层暴的统计平均形态。在这一统计形态中,电离层暴由三个阶段组成。首先是在磁暴开始后有一个持续几小时的“初相”,这一阶段的 F_2 层临界频率 f_oF_2 相对宁静期间有所增加。接着进入一个较长时间(从几小时到一天左右不等)的“主相”阶段。主相期间 f_oF_2 通常低于宁静期间的正常值(负相暴),但有时也可能比正常值高(正相暴)。主

相结束后,接着而来的是“恢复相”,这时 f_oF_2 将逐渐恢复到其宁静期间的正常值。通常,恢复相将持续几天的时间。然而,这一理想的统计平均形态对于单个的暴并不适用。事实上,单个电离层暴的行为与前述的统计平均形态有很大差异,有些只有正相扰动,另一些则可能只有负相扰动。一般来说,低纬地区以及中纬冬季容易出现正相暴,而高纬地区及中纬夏季容易出现负相暴。可以说,在同一磁暴中,没有两个电离层台站记录到的行为会是一模一样的,而同一台站在两次相似的地磁暴中记录到的电离层响应行为也不一样。统计分析法虽然很有用,但它也会掩盖掉某些可能是极为关键的东西。因此,对单个暴进行较为详尽的研究具有重要的价值。

2000 年 4 月 6—7 日期间发生了一次大磁暴事件。图 1(a) 与 1(b) 显示该事件期间行星际磁场(IMF)及各种地磁指数(Dst , Kp , ap 及 AE)的变化

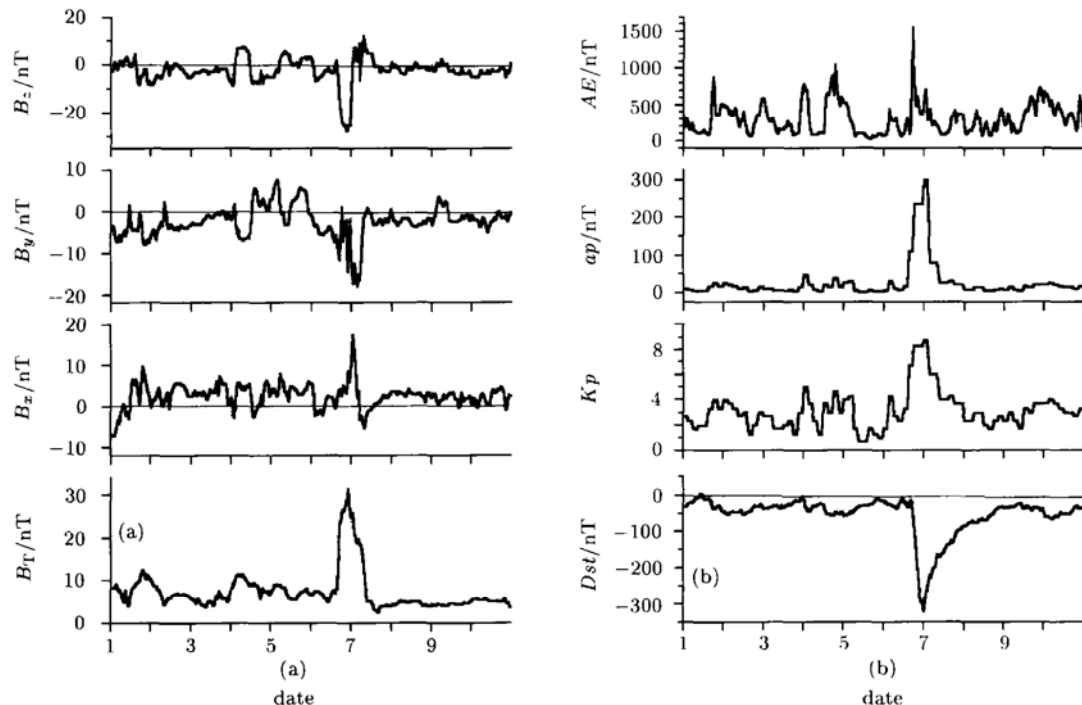


图 1 2000 年 4 月 1—10 日期间 (a) 行星际磁场 (IMF) 及 (b) 地磁指数 (Dst , ap , Kp 及 AE) 的变化情形
Fig.1 Variations of (a) Interplanetary Magnetic Field (IMF) in GSM coordinate system, and (b) the various geomagnetic indices during April 1—10, 2000

化情形. 如图 1 所示, 本次磁暴的主相开始时间为 4 月 6 日 17 UT 左右, 持续时间约为 8 h, Dst 指数在 4 月 7 日 0000—0100 UT 左右达极值 -320 nT, 3 h 时段的 ap 指数也几乎在同一时间达到极大值 300 nT 左右. 恢复相开始时间为 4 月 7 日的 0000—0100 UT 左右, 持续了 2—3 d 的时间. 本文将对这一磁暴事件期间的全球电离层响应形态及扰动机制进行研究.

2 所用数据和分析方法

2.1 所用数据

本研究中所用数据来自全球分布的 25 个电离层台站的 F_2 层临界频率 f_oF_2 的每小时观测值. 全部台站按其经度分布可分为 4 个区域, 各区域所覆

盖的经度范围大致为: 区域 1 (0°E — 30.0°E)、区域 2 (30°E — 90.0°E)、区域 3 (110°E — 150.0°E)、区域 4 (250°E — 310.0°E). 表 1 列出了这些台站的地理和地磁坐标及国际无线电联盟 (URSI) 代码.

2.2 形态分析方法

对所有 25 个台站, 我们将逐个计算电离层 f_oF_2 参数对其宁静期参考值 $f_oF_2^q$ 的偏离量 Δf_oF_2 有

$$\Delta f_oF_2 = f_oF_2 - f_oF_2^q. \quad (1)$$

其中, q 标注宁静期参考值. 本研究中, 我们对宁静期参考值 $f_oF_2^q$ 的取法为, 对一天 24 h 的每个整点时刻, 将 4 月 1—5 日期间在该整点时刻观测值的中值 (median) 作为该小时的宁静期参考值 $f_oF_2^q$.

表 1 数据来源台站的地理与地磁坐标及其 URSI 代码
Table 1 The geographical and geomagnetic coordinates of the stations used and their URSJ code

区域	台站名称	URSI 代码	地理坐标		地磁坐标	
1	Kiruna	KI167	67.8°N	020.4°E	65.1°N	116.4°E
	Uppsala	UP158	59.8°N	017.6°E	58.3°N	106.9°E
	Juliusruh/Rugen	JR055	54.6°N	013.4°E	54.3°N	099.7°E
	Chilton	RL052	51.6°N	358.7°E	54.1°N	083.2°E
	Sofia	SQ143	42.7°N	023.4°E	41.0°N	103.9°E
	Rome	RO041	41.8°N	012.5°E	42.3°N	093.2°E
	Tortosa	EB040	40.4°N	000.3°E	43.6°N	080.9°E
	Grahamstown	GR13L	33.3°S	026.5°E	33.9°S	089.4°E
2	Murmansk	MM168	69.0°N	033.0°E	64.0°N	127.2°E
	Salekhard	SD266	66.5°N	066.5°E	57.4°N	149.7°E
	Podkamennaya	TZ362	61.6°N	090.0°E	50.8°N	165.4°E
	Leningrad	LD160	60.0°N	030.7°E	56.1°N	118.3°E
	Moscow	MO155	55.5°N	037.3°E	50.4°N	123.2°E
	Novosibirsk	NS355	54.6°N	083.2°E	44.2°N	158.9°E
	Rostov	RV149	47.2°N	039.7°E	42.4°N	120.3°E
3	Chung-Li	CL424	24.9°N	121.2°E	13.8°N	190.9°E
	Darwin	DW41K	12.4°S	130.9°E	22.9°S	202.7°E
	Townsville	TV51R	19.3°S	146.7°E	28.5°S	220.4°E
	Learmonth	LM42B	21.9°S	114.0°E	33.0°S	185.3°E
	Camden	CN53L	34.0°S	150.7°E	42.0°S	227.6°E
4	Sondrestrom	SMJ67	67.0°N	310.0°E	77.1°N	035.8°E
	Millstone Hill	MHJ45	42.6°N	288.5°E	53.9°N	358.7°E
	Boulder	BC840	40.0°N	254.7°E	48.9°N	318.7°E
	Eglin Afb	EG931	30.4°N	273.3°E	41.1°N	341.2°E
	Port Stanley	PSJ5J	51.7°S	302.2°E	40.6°S	010.3°E

3 形态分析结果

图 2—5 分别给出表 1 所列区域 1—4 中各台站的 f_0F_2 参数在本次磁暴事件期间相对于宁静期参

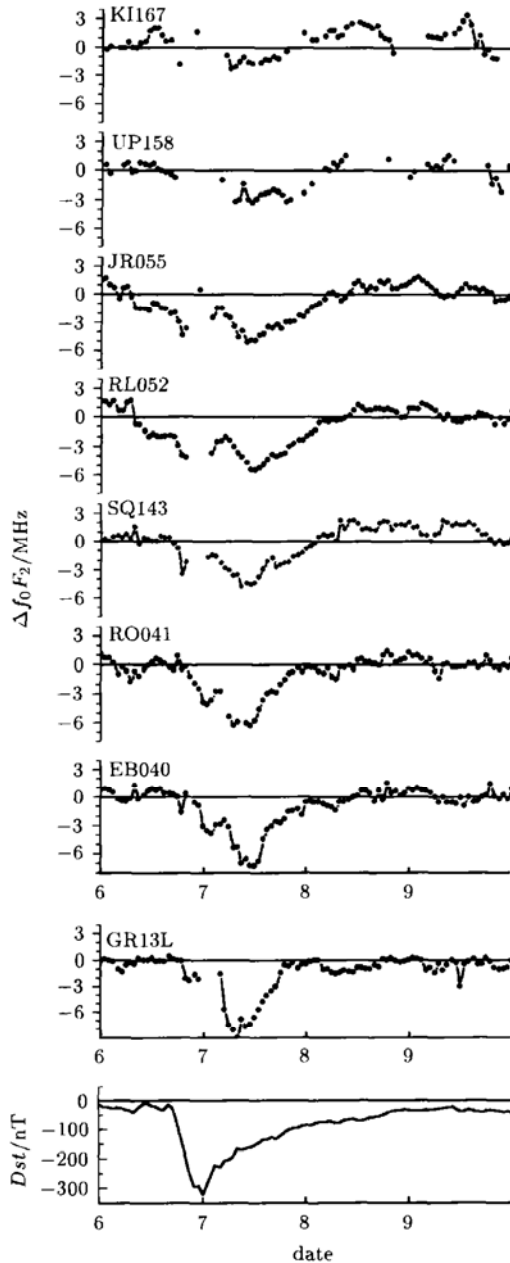


图 2 2000 年 4 月 6—9 日期间区域 1 台站 f_0F_2 参数相对于其宁静期间参考值的偏离量 Δf_0F_2 的变化情形 (最下部给出的是相应期间地磁指数 Dst 的变化情形)

Fig.2 Variation of Δf_0F_2 during April 6—9, 2000 for Region 1 stations (The geomagnetic Dst index is plotted in the bottom panel for reference)

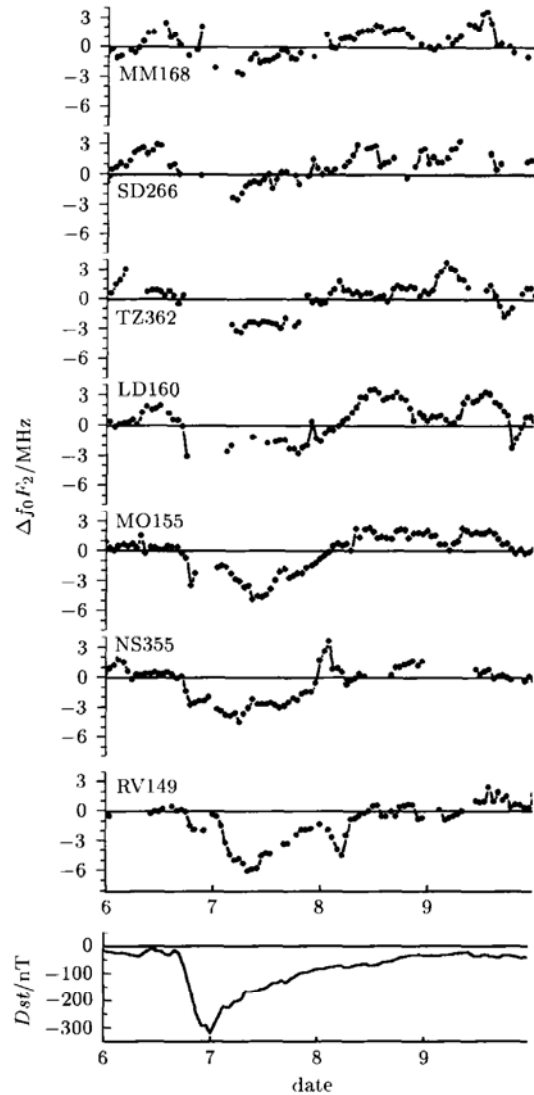


图 3 2000 年 4 月 6—9 日期间区域 2 台站 f_0F_2 参数相对于其宁静期间参考值的偏离量 Δf_0F_2 的变化情形 (最下部给出的是相应期间地磁指数 Dst 的变化情形)

Fig.3 Variation of Δf_0F_2 during April 6—9, 2000 for Region 2 stations (The geomagnetic Dst index is plotted in the bottom panel for reference)

考值 $f_0F_2^q$ 的偏离情形。图中横轴表示时间, 起始时间为 4 月 6 日世界时 0000 UT, 结束时间为 4 月 9 日 2400 UT。横轴上所标数字为以世界时计算的日期。纵轴表示 Δf_0F_2 , 单位为 MHz。图中各台站 (以 URSI 代码标注) 自下而上按地理纬度的分布次序排列。从这些图中可以看出, 本次磁暴事件期间出现了全球性的电离层负相暴扰动, 而处于不同区域的台站其响应情形又有其各自的特点。以下是 4 个不

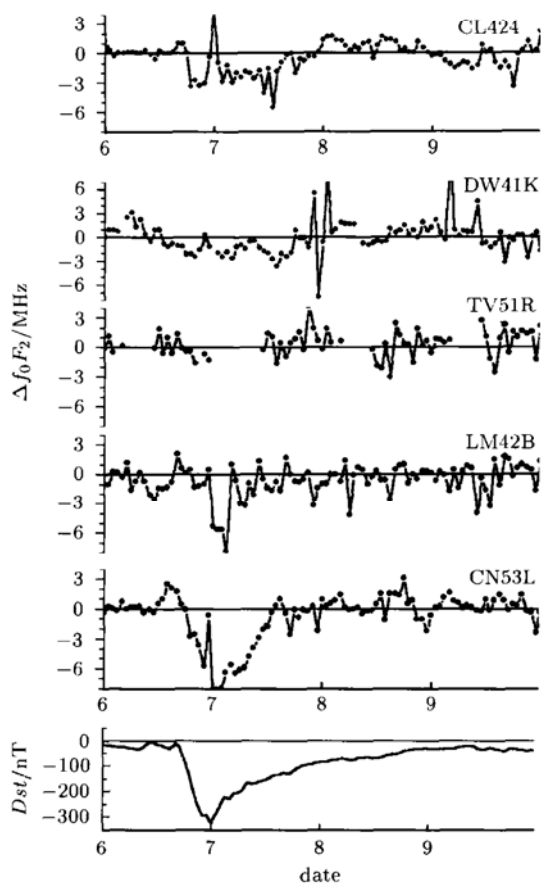


图 4 2000 年 4 月 6—9 日期间区域 3 台站 f_0F_2 参数相对于其宁静期间参考值的偏离量 Δf_0F_2 的变化情形 (最下部给出的是相应期间地磁指数 Dst 的变化情形)

Fig.4 Variation of Δf_0F_2 during April 6—9, 2000 for Region 3 stations (The geomagnetic Dst index is plotted in the bottom panel for reference)

同区域的台站在本次事件中的主要扰动形态特征.

区域 1 该扇区共有 8 个台站, 其中 7 个位于北半球, 1 个位于南半球. 从图 2 中可以看出, 磁暴主相开始后, 该扇区的所有台站, 包括位于南半球的 GR13L (33.3°S, 26.5°E) 台站均记录到持续较长时间的负相扰动. 纬度越高的台站负相扰动的开始时间越早, 而负相扰动的结束时间则越晚. 这些特征与电离层暴的热层暴环流学说所描述的特征相符. 根据该学说, 在地磁暴活动阶段, 由于高纬太阳风能量注入的剧增而产生的热层暴环流将使热层中性大气的组份发生变化, 使 F 区高度上的原子/分子浓度比减少, 从而使 F 区高度上的电离层电离度减小, 产生所谓的电离层负相暴效应. 从图中还可

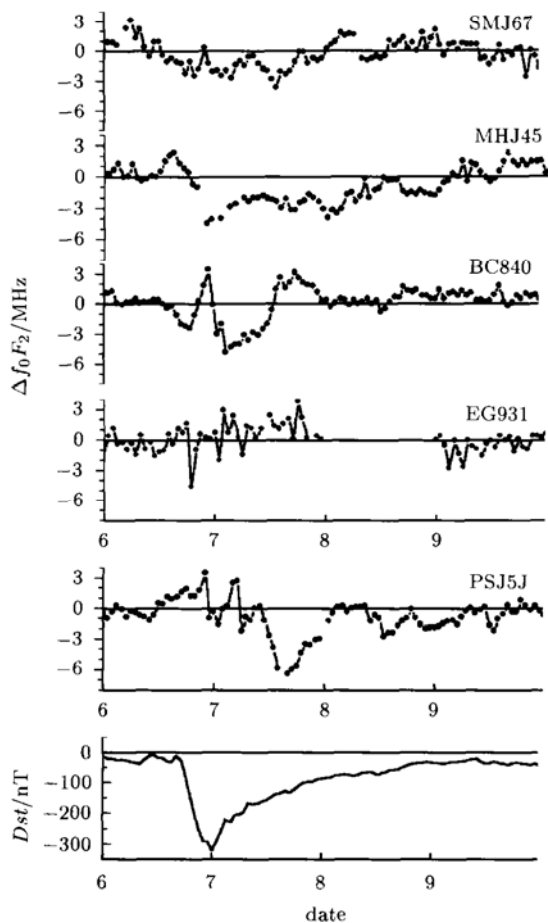


图 5 2000 年 4 月 6—9 日期间区域 4 台站 f_0F_2 参数相对于其宁静期间参考值的偏离量 Δf_0F_2 的变化情形 (最下部给出的是相应期间地磁指数 Dst 的变化情形)

Fig.5 Variation of Δf_0F_2 during April 6—9, 2000 for Region 4 stations (The geomagnetic Dst index is plotted in the bottom panel for reference)

看出, 在磁暴恢复相后期 (4 月 8—9 日) 出现了正相扰动, 尤其是那些高纬台站, 这一现象在 1998 年 5 月 4 日磁暴事件期间的电离层暴中也被观测到 [7].

区域 2 该扇区的经度范围约为 30°E—90.0°E. 除 RV149 台站 (纬度 47.2°N) 外, 该扇区中的其他台站均处于高纬. 从图 3 可看出, 该扇区台站的电离层扰动形态与 1 区台站的非常相似. 在磁暴主相与恢复相前期所有台站均出现较长时间 (大约 1 天左右) 的负相扰动, 在磁暴恢复相后期出现了正相扰动, 这在高纬台站尤为明显. 此外, NS355 (54.6°N, 83.2°E) 台站有一独特现象, 即在世界时 4 月 8 日 0000 UT 左右的时段, f_0F_2 有明显的增大. 这一时

段对应于当地日出时段, 这种 f_0F_2 在日出时段增大的现象在其他天里没有出现, 在本扇区的其他台站也不出现。

由此可见, 在 1、2 扇区, 电离层均出现了持续较长时间的负相暴效应。然而, 从图中可以看出, 负相扰动的发展并非是单调的, 而是多步的发展过程。在大多数情形中, 它由两个阶段组成且在第 2 阶段负相扰动达最大效应。负相扰动达最大效应的时间一般都出现在磁暴恢复相前期。也就是说, 电离层暴恢复相的开始时间滞后于磁暴恢复相的开始时间。

区域 3 该扇区共有 5 个台站, 大部分位于南半球, 只有一个 (CL424) 位于北半球; 且所有台站均处于低纬或赤道地区。从图 4 可以看出, 本次磁暴事件期间, 所有南半球 4 个台站均出现负相扰动, 尤其两个纬度相对较高的台站 (LM42 M, 纬度 21.9°S ; CN53 L, 纬度 34.0°N) 负相扰动效应更为明显。从图中可看出, 这一区域电离层扰动最为突出的特点是不规则振荡, 其振幅在大多数情况下较小。此外, 几乎所有台站都在世界时 4 月 6 日的 2300—2400 UT 左右出现 f_0F_2 的“日出时增大”现象。

区域 4 该扇区共有 5 个台站, 其中 4 个位于北美地区, 一个位于南美地区。对于处在北美的 EG931 (纬度 30.4°N) 台站, 本次磁暴事件期间其上空电离层的响应主要表现为正相扰动, 但幅度较小, 且出现有周期为几小时的波状振荡。对于北美地区的其他 3 个台站, 在磁暴活动相阶段, 其上空电离层的扰动主要表现为负相暴效应。从图中可看出, BC840 台站 (纬度 40.0°N) 负相扰动结束的时间显然比其他两个台站的早得多。此外, 在 BC840 台站观测到了明显的“黄昏效应”, 即傍晚时段的 f_0F_2 突然增大。这一“黄昏效应”现象虽然也在 SMJ67 (纬度 67.0°N) 台站观测到了, 但其强度却弱得多。磁暴恢复相后期, 所有 3 个台站, BC840 (4 月 7 日)、MSJ67 (4 月 8 日) 和 MHJ45 (4 月 9 日) 上电离层均出现了正相扰动, 但在后两个台站上振幅均较小。对于南美地区台站 PSJ5J (51.7°S , 302.2°E), 在持续时间较长的负相暴开始之前出现有正相扰动, 但该台站在本次事件中的主要响应特征是大部份时间均为负相扰动。然而, 在该台站中观测到一个非常奇特的现象, 即在当地时间 4 月 7 日午夜时段左右, f_0F_2 有明显的增大。这在目前来说是很难解释的一种现象, 有待进一步的研究。

4 机制研究与讨论

自从发现电离层地磁暴效应以来的 60 多年, 人们对伴随磁暴发生的电离层暴的扰动机制进行了大量的研究。目前, 人们已普遍地认识到要解释电离层磁暴效应的物理机制, 必须将背景中性大气的效应一起考虑。我们知道, 从高纬注入的太阳风能量的耗损无时不在影响着极区高层大气的结构, 而后者正是决定电离层电离度的重要因素。即使是在磁活动宁静条件下, 高纬地区的能量注入也足以在极区形成一个永久性的“成分扰动带”^[2], 或叫“成分凸团”(composition bulge)。这种成分扰动带或成分凸团的特征使其中的重气体组份增大, 而轻气体组份减少。因而在 F 区高度, 它将是富含分子成分的气团。这种气团在磁宁静条件下将被限于极区。然而, 在磁活动加剧的扰动条件下, 这种富含分子成分的气团不再仅限于极区, 而是会扩展到中纬地区。现在, 人们已普遍地接受了有关 F 区电离层暴的热层暴环流说。这一学说最早是由 Duncan^[8] 提出来的, 后来的人对它加以发展和完善^[2], 而 Fuller-Rowell 等人^{[9],[10]} 又通过数值模型进行详尽的模拟进一步加以证实与充实。根据这一学说, 磁扰期间高纬太阳风能量注入的增加将引发形成一个全球性的热层暴环流体系, 这一暴环流将叠加在静日背景环流上。这些环流中的水平风场是发散的, 从而会诱发垂直的大气运动。垂直的大气运动将导致中性大气组份的改变, 形成在 F 区高度上富含分子成分的所谓的“成分凸团”。这样的气团一旦形成, 就受背景环流与暴环流的共同作用, 向较低的纬度区对流。气团所到之处, 电离层离子电离率将减小而复合率将增加, 从而导致 F 区电离层离子与电子浓度的减少, 产生所谓的电离层负相暴效应。根据 Fuller-Rowell 等人^[10] 的模拟结果, 这种作用机制在午夜及地磁极所在的扇区附近将最为有效。另外, 伴随由高纬能量注入所形成风浪 (wind surge) 的赤道向风场将使离子沿磁力线向上漂移到复合率较小的较高高度上, 导致电离度增大, 产生所谓的正相暴效应。然而, 风场对电离层的这种作用仅在白天有效, 在夜间, 由于缺少电离源, 就观测不到 f_0F_2 (或 N_mF_2) 的增大效应, 而只能观测到电离层高度的抬升。

我们在第 3 部分所得结果与暴环流学说所描述的特征相符。例如, 在磁暴主相开始时 (约为 1700 UT), 区域 1—3 位于傍晚到凌晨的扇区。这些

区域的电离层均出现了强烈的持续时间较长的负相扰动(见图 2—4), 且负相暴效应扩展到了低纬赤道区(如 CL424 台站), 但低纬区负相扰动持续时间显然比高纬的短得多. 美洲扇区(区域 4)在磁暴开始时位于白天, 其电离层负相暴效应只延伸到中纬台站(BC840, 40.0N), 且其负相暴效应的持续时间比纬度较高的台站(MHJ45 和 SMJ67)短得多. 而且, 该区的低纬地区(如 EG931 台站)电离层只出现正相扰动. 另外, 在该区南半球台站 PSJ5J (51.7°S, 302.2°E), 在长时间的负相扰动前出现有正相扰动. 所有这些结果均与热层暴环流所产生的电离层暴效应特征一致. 因此, 我们认为本次磁暴事件期间中高纬地区出现的全球性电离层负相暴是由热层暴环流引起的中性大气组份的改变而引起的. 作为检验, 在图 6(a) 和 6(b) 中分别给出区域 1 与区域 2 台站在本次磁暴事件中 $R_{(N_m F_2)}$ 和 $R_{(n_O/n_{N_2})}$ 的变化对比情形. $R_{(N_m F_2)}$ 和 $R_{(n_O/n_{N_2})}$ 定义为

$$R_{(N_m F_2)} = \frac{N_m F_2}{N_m F_2^q},$$

$$R_{(n_O/n_{N_2})} = \frac{(n_O/n_{N_2})}{(n_O/n_{N_2})^q}. \quad (2)$$

其中, n_O 和 n_{N_2} 分别为 O 和 N_2 的浓度, q 标注非扰动期参考值. 对于一天 24 h 中的每个整点时刻, 我们取其磁活动较宁静期间 4 月 1—5 日的中值作为这一参考值. $N_m F_2$ 是 F_2 层峰值电子浓度, 它与 F_2 层临界频率 $f_0 F_2$ 之间存在平方正比关系: $N_m F_2 \propto (f_0 F_2)^2$. 图中浓度比 (n_O/n_{N_2}) 由中性大气的 MSIS (Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter) 经验模型给出, 这一模型是由 A.E. Hedin 及其合作者基于对大量而广泛观测数据的编汇和分析而建立起来的^{[11],[12]}. 如果 $N_m F_2$ 的改变是由中性大气组份的改变而引起的^[2], 应该有 $R_{(N_m F_2)} \approx R_{(n_O/n_{N_2})}$. 如图 6 所示, 很显然, $R_{(N_m F_2)}$ 的变化情形与 $R_{(n_O/n_{N_2})}$ 的变化情形非常相似, 但并不完全相同——在磁暴恢复相早期 $R_{(n_O/n_{N_2})}$ 比 $R_{(N_m F_2)}$ 偏大. 不过, 根据一些人的研究结果^{[13]—[16]}表明, 在大磁暴期间, 由 MSIS-86 模型给出的浓度比 (n_O/n_{N_2}) 必须除以一个 2—5 倍的因子才足以解释白天所观测到的电子浓度下降量. 由此可见, 本次事件期间 $N_m F_2$ 的负相暴效应基本上可由热层中性大气组份的改变得到解释. 当然, 在磁暴期间, 除中性背景组份要发生变化外, 由于加热效应热层温度将升高, 这将加剧电离层电子浓度负相暴效应. 因为热层大

气温度越高, 电离层离子的复合率将越大.

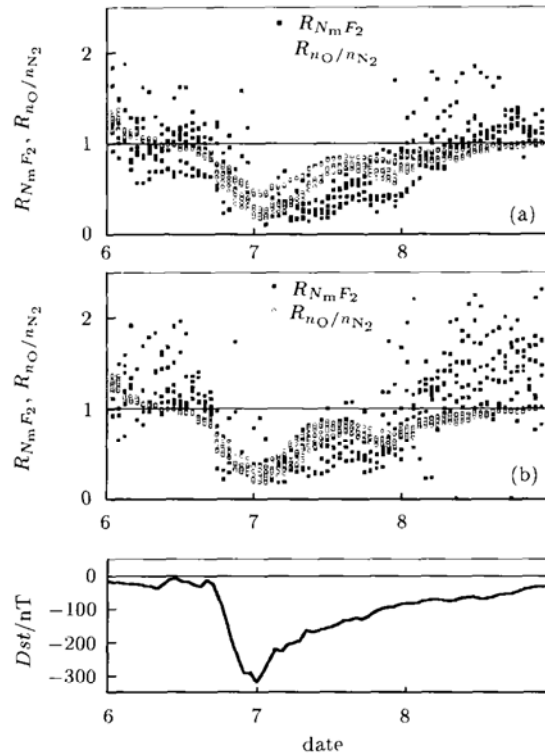


图 6 2000 年 4 月 6—9 日期间 $R_{(N_m F_2)}$ 和 $R_{(n_O/n_{N_2})}$ 的变化情形. (a) 扇区 1 情形, (b) 扇区 2 情形 (最底部图中给出的是相应期间地磁指数 Dst 的变化情形)

Fig.6 Variation of $R_{(N_m F_2)}$ and $R_{(n_O/n_{N_2})}$ during April 6—9, 2000 for (a) Region 1 and (b) Region 2

5 结论

对本次磁暴事件期间电离层响应情形的研究可以得出如下结论.

(1) 在磁暴主相与恢复相初期, 电离层出现了持续时间较长的全球性负相暴扰动. 负相扰动最大效应出现在磁暴恢复相阶段, 或者说, 电离层 F 区暴的恢复相开始时间滞后于磁暴恢复相的开始时间. 负相扰动的发展不是单调下降的, 而是一种多步骤过程. 在大多数情形中, 它由两个阶段组成且在第 2 阶段负相扰动达最大效应. 负相扰动达最大效应的时间一般都出现在磁暴恢复相前期.

(2) 磁暴恢复相后期一些电离层台站出现了正相扰动, 这一现象在区域 1 和区域 2 中的高纬台站表现尤为明显.

(3) 区域 3 中的台站出现了 $f_0 F_2$ 日出时分增大

效应。这些低纬台站其电离层响应最突出的特征是扰动出现无规则振荡。

(4) 几乎与区域 3 中台站 f_0F_2 出现日出时分增大效应的同时, 北美扇区台站 (BC840 和 SMJ67) 出现“黄昏效应”(傍晚时分 f_0F_2 增大), 使得在负相扰动的发展过程中出现了短暂的正相暴效应。

(5) 南美洲台站 PSJ5J 电离层出现“午夜增长”现象, 对该现象的解释有待进一步研究。

(6) 本次磁暴事件期间中高纬出现的持续时间较长的电离层负相暴效应可归因为磁暴活动阶段在高纬能量注入的剧增而引发的热层暴环流。这一暴环流使中性大气组份产生变化, 形成所谓的“成分扰动带”或“成分凸团”, 这种气团在 F 区高度其浓度比 (n_O/n_{N_2}) 减少, 形成富含分子成分的大气。根据电离层的形成理论可以推知, 浓度比 (n_O/n_{N_2}) 的减少将导致电离层离子 (及电子) 浓度的减少, 从而产生所谓的电离层负相暴效应。而且, 磁暴期间由于受到加热, 热层大气的温度增加将导致离子复合率增大, 进一步使电离度减小。

致谢 本文研究所用电离层数据资料由美国 NGDC 数据中心和 World Data Center for Solar-Terrestrial Physics at the Rutherford Appleton Laboratory 提供, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Appleton E V, Ingram L J. Magnetic storms and upper-atmospheric ionization. *Nature*, 1935, **136**:548—549
- [2] Prolss G W. Ionospheric F-region storms. In: Volland H ed. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. Boca Raton: CRC Press, 1995, 195—248
- [3] Buonsanto M J. Ionospheric Storms A Review. *Space Sci. Rev.*, 1999, **88**:563—601
- [4] Appleton E V, Piggot W R. The morphology of storms in the F₂ layer of the ionosphere 1. Storm statistical relationships. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1952, **2**:236—252
- [5] Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.*, 1959, **64**(1):305—321
- [6] Rodger A S, Wrenn G L, Rishbeth H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-region. II. Physical interpretation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**(11/12):851—866
- [7] Zhang Manlian, Shang Sheping, Guo Jianshan, Luo Xigui. The global ionospheric response to the geomagnetic storm event during May 1998. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(2): 137—146. in Chinese (张满莲, 尚社平, 郭兼善, 罗熙贵. 1998 年 5 月磁暴事件期间全球电离层响应形态与机制的研究. *空间科学学报*, 2001, **21**(2):137—146)
- [8] Duncan R A. F-region seasonal and magnetic-storm behaviour. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1969, **31**(1):59—70
- [9] Fuller-Rowell T J, Codrescu M V, Moffett R J *et al.* Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(3):3893—3914
- [10] Fuller-Rowell T J, Codrescu M V, Rishbeth H *et al.* On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:2343—2353
- [11] Hedin A E. MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:4649—4662
- [12] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:1159
- [13] Richards P G, Torr D G, Buonsanto M J, Miller K L. The behavior of the electron density and temperature at millstone hill during the equinox transition study september 1984. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:16 969—16 975
- [14] Buonsanto M J, Salah J E, Miller K L, Oliver W L, Burnside R G, Richards P G. Observations of neutral circulation at mid-latitudes during the equinox transition study. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:16 987—16 997
- [15] Richards P G, Torr D G, Buonsanto M J, Sipler D P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurements. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:23 359—23 365
- [16] Buonsanto M J. Millstone hill incoherent scatter F region observations during the disturbances of June 1991. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:5743—5755