

F₂ 层对地磁扰动的响应

马瑞平 徐寄遥 吴明亮 纪 巧

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用 37 个电离层垂直探测站 1974—1986 年的数据, 采用 f_0F_2 与地磁 a_p 指数相关分析的方法, 首次得到一个太阳活动周期各年东亚-澳大利亚扇区, 欧洲-非洲扇区和美洲-东太平洋扇区 F_2 层对地磁扰动响应随地磁纬度的分布. 结果指出, 地磁高纬和中纬地区为负响应, 低纬和赤道地区为正响应, 大约在 $\pm 30^\circ$ 附近换向. 最大正响应在磁赤道附近, 最大负响应在地磁纬度 $\pm 50^\circ$ 附近, 最大负响应的幅度大于最大正响应的幅度. 存在明显的经度差别和南北半球不对称性.

关键词 电离层暴; 地磁扰动; F_2 层; 相关分析

1 引言

磁暴造成电离层暴是非常重要的灾害性空间天气事件. 近几十年来对电离层暴的研究取得了显著进展, 得到了电离层暴的基本形态: 磁暴开始以后, 高纬地区的 f_0F_2 一般会有几小时上升, 然后出现持续 2—3 天的下降, 形成所谓负暴现象, 低纬地区经常出现正暴现象, 中纬地区夏季多负暴冬季多正暴. 中纬地区, 形成大尺度电离层暴的机制可以用暴环流理论来解释. 磁暴期间, 大量能量注入极光带低电离层, 加热后的大气上升并向高纬和低纬流动, 引起热层大气经圈环流, 当大气上升, 分子成分与原子成分之比增加, 附和系数增大, 形成电离层负暴现象, 当大气下降, 分子成分与原子成分之比减小, 附和系数减小, 形成正暴现象. 高纬和低纬地区除了暴环流影响外, 还有其他复杂因素^{[1],[2]}.

但是电离层正负暴出现概率随地磁纬度的分布现在还不很清楚. 这是因为电离层扰动是一种非常复杂的现象, 影响它的因素很多, 它还与磁暴发生的季节和地方时有关^[2]. 在以往的研究中, 大多注意分析大磁暴事件对电离层的影响, 很少研究中小磁暴或一般地磁扰动对电离层的影响. 实际上中小磁暴或一般地磁扰动也可能产生较强的电离层扰动. 另外, 不同作者分析正负暴时选取的基准不同, 有的以磁暴发生前 5 天的平均 f_0F_2 为基准^[3], 有的以磁暴发生前一天的 f_0F_2 为基准^[4], 也有的以当月的月中值为基准^{[5],[6]}. 用不同的基准分析磁暴的正负效应将产生明显差别. 因此很难得到电离层正负暴随地磁纬度分布的清晰图像.

为了更清楚地了解 F_2 层对地磁扰动的响应随地磁纬度的分布, 我们不是对电离层暴进行个例分析, 而是把电离层数据和地磁数据作为时间序列, 采用互相关分析的方法进行

* 国家自然科学基金 (49990450) 和国家基础研究项目 (G2000078407) 共同资助

中国科学院空间天气学开放研究实验室

2002-09-26 收到原稿, 2003-01-09 收到修定稿

研究, 利用 1974—1986 年不同地磁经纬度的 37 个电离层站垂直探测的资料, 以月为时间序列长度, 计算 f_0F_2 的相对变化与地磁活动 a_p 指数的极值相关系数, 然后将 12 个月的极值相关系数平均, 作为该站该年的平均相关系数, 从而得到东亚-澳大利亚、欧洲-非洲和美洲-东太平洋等 3 个扇区不同年度 F_2 层对地磁扰动响应的地磁纬度分布特征。

2 数据和分析方法

本文所用电离层数据和地磁扰动资料, 由世界数据中心日本中心 (WDC-C2) 和中国中心 (WDC-D) 提供, 时间是 1974—1986 年, 覆盖了一个太阳活动周期。

为了得到不同地磁纬度 F_2 层对地磁扰动响应的基本特征, 选取东亚-澳大利亚扇区 12 个站, 欧洲-非洲扇区 14 个站和美洲-东太平洋扇区 11 个站的电离层垂直探测数据。台站的地理位置和地磁经纬度列在表 1 上。

研究电离层对磁暴的响应, 最常用的方法是分析磁暴发生前后电离层的变化情况, 但是如何确定暴前或宁静时的参考值仍然是一个需要研究的问题, 不同作者有不同的选取方法, 其结果就会有差别。在以往的研究中大多注意大磁暴和特大磁暴事件对电离层的影响, 忽视大量中小磁暴或者一般地磁扰动的电离层效应, 观测指出小磁暴或地磁扰动也可能产生强烈的电离层扰动, 所以仅分析大磁暴现象是不够的。再加上电离层暴是一种非常复杂的现象, 没有大量的样本, 很难统计出电离层暴效应的纬度分布特征。本文利用大量的数据, 通过计算 F_2 层临界频率 f_0F_2 的相对变化与地磁活动 a_p 指数的互相关系数, 从而统计得到 F_2 层对地磁扰动响应的地磁纬度分布特征。具体方法如下。

利用电离层垂测站的资料, 以月为时间序列长度, 用下式计算 F_2 层临界频率与月中值的相对偏差。

$$\Delta f_0F_2 = (f_0F_2 \text{观测值} - f_0F_2 \text{月中值}) / f_0F_2 \text{月中值}. \quad (1)$$

为了过滤掉重力波和等离子体电动力学漂移造成的小时间尺度扰动, 对 Δf_0F_2 进行 24 h 滑动平均, 然后用下面公式计算它与 a_p 指数的归一化互相关系数。

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{n=1}^{N-\tau} (x_n - \bar{x})(y_{n+\tau} - \bar{y}) / \sqrt{R_x(0)R_y(0)}, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

上式中, R_{xy} 是时间序列 x_n 和 y_n 的归一化互相关系数, N 是样本数, τ 是滞后数, m 是最大滞后数。在本文中 x_n 和 y_n 分别代表 a_p 指数和平滑后的 Δf_0F_2 , 因为 a_p 是 3 h 指数, 所以 Δf_0F_2 也对应 3 h 取 1 个数。

设定 $m = 16$, 相当于最大滞后为两天。从 $R_{xy}(\tau)$ 中选取绝对值最大的数作为当月的极值相关系数, 相关系数的绝对值大小代表该站上空 F_2 层对地磁扰动响应的强弱, 相关系数的正负号表示 F_2 层对地磁扰动是正响应还是负响应, 达到极值的滞后时间就是 F_2 层对地磁扰动响应的滞后时间。

为了保证相关分析的质量, 如果 24 个月中值少于 20 个, 则该月数据视为缺测。如果月中值大于等于 20 个, 则对缺测的月中值进行内插处理。

表 1 使用数据的电离层台站

Table 1 The ionospheric stations whose data have been used

Station Name	Abbreviat ion	Geographic Latitude(°)	Geographic Longitude(°)	Geographic Latitude(°)
Magadan	MG	60.1 N	151.0 E	53.2 N
Wakkanai	WK	45.4 N	141.7 E	35.3 N
Kokubunji	KO	35.7 N	139.5 E	25.5 N
Yamagawa	YG	31.2 N	130.6 E	20.4 N
Chung-Li	CL	25.0 N	121.2 E	13.7 N
Manila	MN	14.7 N	121.1 E	3.4 N
Vanimo	VA	2.7 S	141.3 E	12.5 S
Townsville	TV	19.3 S	146.7 E	28.4 S
brisbane	BR	27.5 S	152.9 E	35.7 S
Canberra	CB	35.3 S	149.0 E	43.9 S
Christchurch	CH	43.6 S	172.8 E	48.0 S
Campbell Is.	CI	52.5 S	169.2 E	57.2 S
Kiruna	KI	67.8 N	20.4 E	65.2 N
Sodankyla	SO	67.4 N	26.6 E	63.7 N
Arkhanglsk	AZ	64.6 N	40.5 E	58.9 N
Leningrad	LD	60.0 N	30.7 E	56.2 N
Moscow	MO	55.5 N	37.3 E	50.8 N
Karaganda	KR	49.8 N	73.1 E	40.3 N
Tbilisi	TB	41.7 N	44.8 E	36.2 N
Ashkhabad	AS	37.9 N	58.3 E	30.4 N
Djibouti	DJ	11.5 N	42.8 E	7.0 N
Johannesburg	JO	26.1 S	28.1 E	27.0 S
Capetown	CT	34.1 S	18.3 E	32.9 S
Kerguelen	KG	49.4 S	70.3 E	58.8 S
Syowa Base	SW	69.0 S	39.6 E	66.5 S
Mawson	MW	67.6 S	62.9 E	73.2 S
Resolute Bay	RB	74.7 N	94.9 W	83.1 N
Churchill	CH	58.7 N	94.2 W	68.7 N
Ottawa	OT	45.4 N	75.9 W	56.8 N
Boulder	BO	40.0 N	105.3 W	48.9 N
Point Arguello	PA	35.6 N	120.6 W	41.2 N
Maui	MA	20.8 N	156.5 W	21.0 N
Huancayo	HU	12.0 S	75.3 W	0.6 S
Rarotonga	RA	21.2 S	159.8 W	20.8 S
Port Stanley	PS	51.7 S	57.8 W	40.4 S
Argentine Is.	AI	65.2 S	64.3 W	53.8 S
Halley Bay	HB	75.5 S	26.7 W	65.8 S

3 结果

作为一个例子, 图 1 给出了 1982 年 3 月东亚-澳大利亚扇区 12 个站滑动平均后的 $\Delta f_0 F_2$ 随时间的变化 (a) 和通过相关分析得到的极值相关系数的纬度分布 (b). 在图 1(a) 的上部画出了 a_p 指数的变化. 从图上可以看到, 3 月初有一个大磁暴, a_p 指数超过 200 nT, 除了磁赤道附近的 Manila 外, 其他站上空的 $f_0 F_2$ 都有明显的下降, 呈现负暴效应. 3 月 10 日和 3 月 23 日有不小的地磁扰动, 但中高纬的 $f_0 F_2$ 都出现明显的下降, 这种小地磁扰动对电离层的影响, 在以往的研究中往往被忽视, 在本文的分析中它们得到合理考虑. 从计算的相关系数曲线知道, 绝对值大于 0.2 的相关系数都在两天以内出现, 这符合 F_2 层对地磁扰动延迟响应的规律. 从图 1(b) 可以看到最大负相关出现在南北 $40^\circ-50^\circ$ 区域, 地磁赤道附近为正相关, 这种纬度分布与从图 1(a) 直观看到的电离层效应是非常一致的. 从图 1(a) 还看到 3 月初的磁暴前电离层已经处在扰动状态, 很难确定合理的参考值, 但是用相关分析方法就不必选取暴前 $f_0 F_2$ 的参考值, 仅用 $f_0 F_2$ 的月中值为基准,

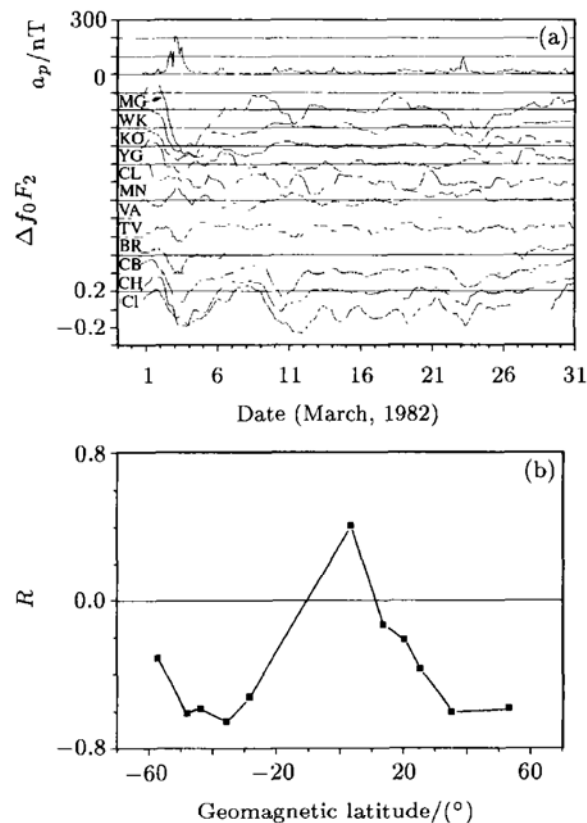


图 1 东亚-澳大利亚扇区 1982 年 3 月 $f_0 F_2$ 偏离月中值的相对变化 (a) 和相关系数的地磁纬度分布 (b)
Fig.1 Relative deviation of $f_0 F_2$ from its monthly median in March, 1982 (a) and the distribution of the correlation coefficient versus geomagnetic latitude (b)

也不必准确确定磁暴的起始时间. 因此本文采用的相关分析方法是研究电离层对地磁扰动大时间尺度响应的一种简便而有效的方法.

用上述方法, 我们计算了各站各月 a_p 指数与平滑后的 $\Delta f_o F_2$ 随时间变化的互相关系数, 然后对 12 个月极值相关系数进行平均, 得到 1973—1986 年 3 个扇区各年相关系数随

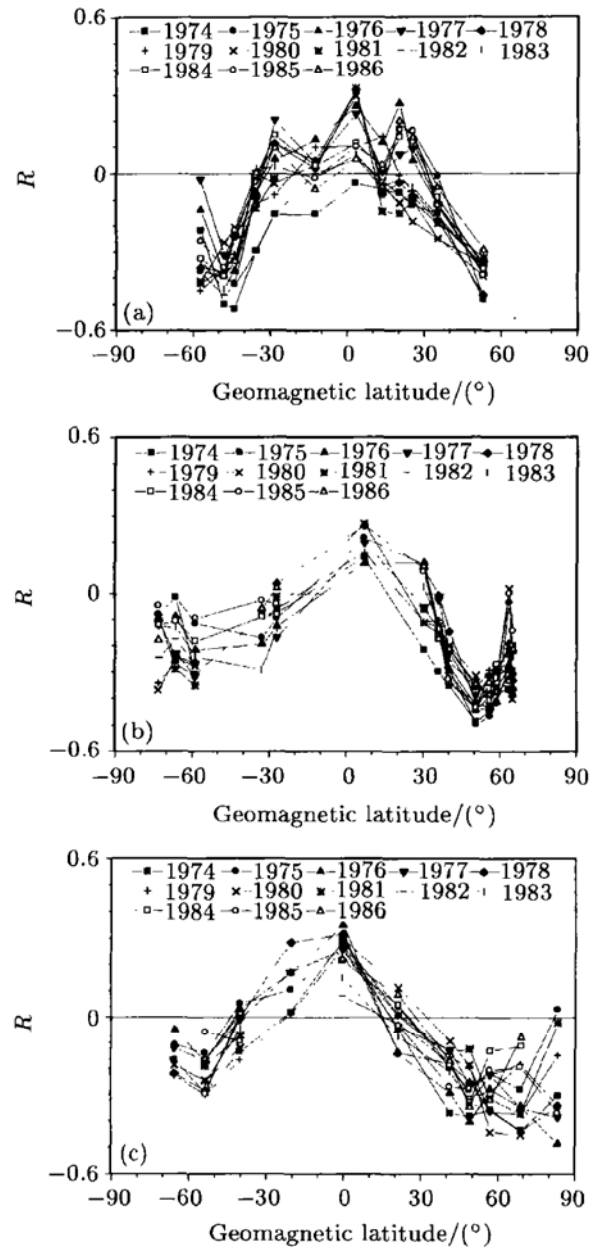


图 2 各年相关系数随地磁纬度的分布

(a) 东亚-澳大利亚扇区, (b) 欧洲-非洲扇区, (c) 美洲-东太平洋扇区

Fig.2 Distribution of the correlation coefficient versus geomagnetic latitude in every year, (a) East Asia-Australia sector, (b) Europe-Africa sector, (c) America-East Pacific Ocean sector

地磁纬度的分布,如图 2(a)—(c) 所示. 从图上可以看到,虽然各年有所差别,但是从总趋势看,高纬和中纬地区为负响应,低纬和磁赤道地区为正响应,大约在 $\pm 30^\circ$ 附近换向. 最大正响应在磁赤道附近,最大负响应不是在极光带而是在地磁纬度 $\pm 50^\circ$ 附近. 最大负响应幅度大于最大正响应幅度. 在东亚-澳大利亚扇区,南北半球的响应幅度基本对称,但是欧洲-非洲扇区和美洲-东太平洋扇区存在明显的南北半球不对称现象,南半球的响应幅度明显比北半球小. 另外,极区响应的离散程度更大一些.

电离层对地磁扰动响应的纬度分布与地磁扰动的大小有很大关系,一般来说,地磁扰动越强,负相关的幅度越大,负相关的区域越向低纬扩展. 为了说明这种情况,我们把每

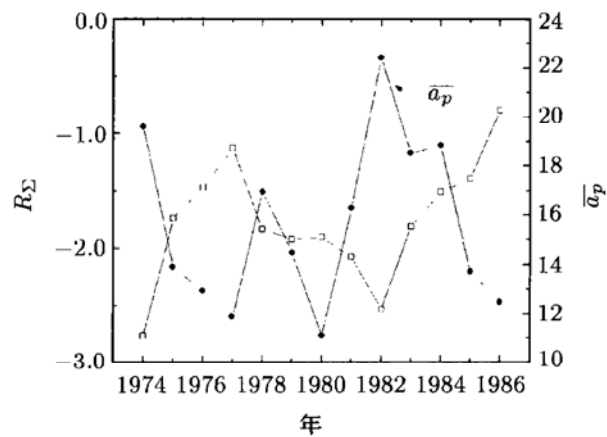


图 3 东亚-澳大利亚扇区各站负相关系数之和 (R_Σ) 与 a_p 指数年平均 ($\overline{a_p}$) 的分布

Fig.3 Distribution of the sum of negative correlation coefficient (R_Σ) in East Asia-Australia Sector stations and yearly average a_p ($\overline{a_p}$)

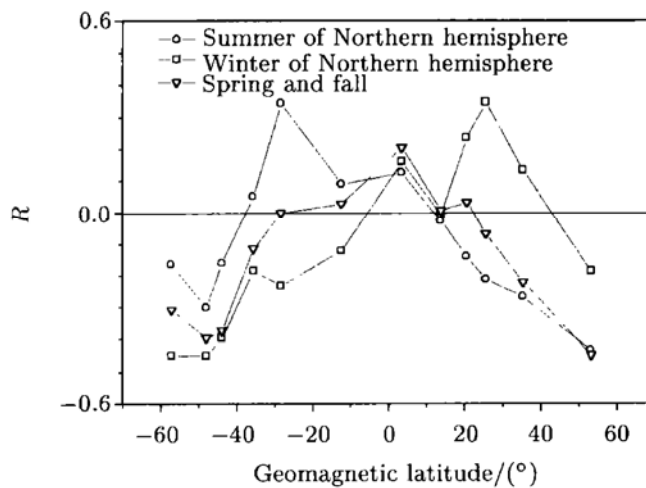


图 4 东亚-澳大利亚扇区不同季节相关系数随地磁纬度的分布

Fig.4 Distribution of the correlation coefficient versus geomagnetic latitude in different seasons in East Asia-Australia sector

年东亚-澳大利亚扇区 12 个站中所有负相关系数相加, 得到 R_{Σ} , 用来估计该年负相关区域的大小, 同时计算了 1974—1986 年 a_p 指数的年平均, 用 $\bar{a}_p$ 表示, 并把它们画在图 3 上. 可以看到, 除了 1980 年外, 各年的 R_{Σ} 与 $\bar{a}_p$ 基本上呈负相关, 表明地磁扰动越强, 负相关的区域越大.

电离层对地磁扰动响应的纬度分布也与季节有显著关系, 同一个磁暴或地磁扰动, 夏季半球多出现负暴效应, 冬季半球则没有明显的负暴或出现正暴现象^[2]. 图 4 给出东亚-澳大利亚扇区 1974—1986 年北半球夏季 (6—8 月)、冬季 (12、1、2 月) 和春秋两季平均相关系数随地磁纬度的分布. 非常明显, 夏季多为负暴效应, 冬季的低纬地区为正暴效应, 只有高纬地区出现负暴效应, 春秋两季两半球基本对称. 从一年各月相关系数的分布, 也能看到上述季节差别, 其图不一一画出. 这与以前的研究结果是一致的.

4 讨论

本文用 37 个电离层垂直探测站 13 年的数据, 首次得到 3 个经度扇区不同年度 F_2 层对地磁扰动响应随地磁纬度的分布特征. 这些统计结果, 有助于深入了解地磁扰动影响电离层的物理机制和提高电离层预报精度.

从 F_2 层对地磁扰动响应的地磁纬度分布规律来看, 暴环流引起的大气成分变化, 是造成 F_2 层扰动的主要原因. 在低纬地区, 除了暴环流引起正效应外, 磁暴对电离层赤道异常的压制也是一个不能忽视的因素. 压制赤道异常的原因有两个, 一个是磁暴主相期间磁层的西向电场, 它穿透到 E 层发电区与产生喷泉效应的东向电场叠加, 从而减弱电离层赤道异常效应^[7], 另一个是扰动引起的向赤道经向风, 它阻碍电子从磁赤道沿磁力线的扩散^[8]. 从图 2(a) 可以看到, 赤道异常峰区 (磁纬 15° 附近) 的正响应幅度下降, 估计就是电离层赤道异常被压制的结果. 另外从计算的最大相关延迟, 发现磁赤道与高纬地区没有太大差别, 如果低纬地区的扰动仅仅是暴环流造成的, 必定比高纬地区有明显的延迟, 说明电离层赤道异常被压制是低纬电离层正效应的重要原因之一. 最大负效应出现在地磁纬度 $\pm 50^\circ$ 附近是一个重要结果, 说明那里的暴环流效应最强烈, 提醒人们加以注意. 极光带及高纬地区情况更复杂, 除了暴环流引起的变化外, 对流电场引起的等离子体漂移, 能量粒子沉降电离等都会对电离层产生或负或正的影响. 所以高纬地区的负暴效应小于 $\pm 50^\circ$ 附近, 而且分布曲线变化较大, 如图 2 所示. F_2 层对地磁扰动响应随地磁纬度分布存在南北半球不对称性, 特别是欧洲-非洲扇区和美洲-东太平洋扇区的南半球负暴效应比较弱, 可能和地理极与地磁极的偏离及地磁场位型有关, 真正原因值得进一步研究.

本文采用的相关分析方法是研究电离层对地磁扰动响应的一种简便而有效的方法, 也是研究独立磁暴效应的好方法, 从分析一些大磁暴事件的结果看, 一般选磁暴前 5 天和磁暴开始后 10 天的数据进行分析, 就能得到合理的结果. 由于电离层存在来自低层的大气行星波等大尺度扰动^{[9],[10]}, 所以地磁扰动越强烈, 相关分析的结果也越准确.

本文的结果仅适用于大于 1 天的大时间尺度响应, 磁暴还产生重力波和等离子体漂移等小时间尺度扰动, 它们的特征有待进一步研究.

5 结论

本文用 37 个电离层垂直探测站 13 年的数据, 通过计算各月 F_2 层临界频率的相对变化 $\Delta f_0 F_2$ 与地磁活动 a_p 指数的相关系数, 首次得到 3 个经度扇区不同年度 F_2 层对地磁扰动大时间尺度响应随地磁纬度分布的统计规律。

结果表明, 高纬和中纬地区为负响应, 低纬和磁赤道地区为正响应, 大约在 $\pm 30^\circ$ 附近换向; 最大正响应在磁赤道附近, 最大负响应不是在极光带而是在地磁纬度 $\pm 50^\circ$ 附近, 最大负响应的幅度大于最大正响应的幅度; 在东亚-澳大利亚扇区, 南北半球的响应幅度基本对称, 但是欧洲-非洲扇区和美洲-东太平洋扇区存在明显的南北半球不对称现象, 极区响应的离散程度更大一些。

结果还说明, 本文所采用的互相关分析方法是研究电离层对地磁扰动响应的一种简便而有效的方法。

致谢 本文所用电离层数据和地磁扰动资料, 由世界数据中心日本中心 (WDC-C2) 和中国心 (WDC-D) 提供, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F_2 -layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, **60**:1 385—1 402
- [2] Prolss G W. Ionospheric F-region storms. In: Volland H ed. Handbook of Atmospheric Electrodynamics (Vol.2), Boca Raton: CRC Press, 1995. 195—248
- [3] Zhang Qiwei, Guo Jianshan, Zhang Gongliang. Morphology analysis of mid and low latitude ionospheric response to geomagnetic storm. *Chin. J. Space Sci.*, 1993, **13**(4):262—270. in Chinese (张奇伟, 郭兼善, 章公亮. 磁暴期间中低纬电离层暴形态和物理机制分析. 空间科学学报, 1993, **13**(4):262—270)
- [4] Ma S Y, Xu L, Yeh K C. A Study of ionospheric electron density deviations during two great storms. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(9):1 037—1 043
- [5] 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):131—140. 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):131—140)
- [6] Danilov A D. F_2 -region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**:441—449
- [7] Abdu M A, Sobral J H A, de Paula E R, Batista I S. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an overview. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1991, **53**:757—771
- [8] Burge J D, Eccles D, King J W, Ruster R. The effects of thermospheric winds on the ionosphere at low and middle latitudes during magnetic disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1973, **35**:617—623
- [9] Forbes J M, Palo S E, Zhang Xiaoli. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:685—693
- [10] Chen Peiren. Planetary-scale oscillation of the equatorial anomaly. *Chin. J. Space Sci.*, 1987, **7**(3):241—246. in Chinese (陈培仁. 赤道异常的行星波震荡. 空间科学学报, 1987, **7**(3):241—246)

F₂-LAYER RESPONSE TO GEOMAGNETIC DISTURBANCES

MA Ruiping XU Jiyao WU Mingliang JI Qiao

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

Abstract

Using the data observed in 37 ionosonde stations during 1974—1986 and adopting the correlation analysis method for the deviation of the daily f_0F_2 value from its monthly median to a_p index, the geomagnetic latitude distribution of the F₂-layer response to geomagnetic disturbance is obtained for the first time in every year of one solar activity cycle in the East Asia-Australia sector, Europe-Africa sector and America-East Pacific Ocean sector. The results showed that the negative response appeared at the high and middle geomagnetic latitude, the positive response appeared at the low latitude and geomagnetic equator, the response sign changes at the geomagnetic latitude of about $\pm 30^\circ$, the maximum positive response appeared at geomagnetic equator and maximum negative response appeared at the geomagnetic latitude of about $\pm 50^\circ$, and the amplitude of maximum negative response is larger than the amplitude of maximum positive response. The responses have obvious longitude dependence and the asymmetry between the Southern hemisphere and the Northern hemisphere. The geomagnetic latitude distribution of the response is symmetrical between the Northern and Southern Hemispheres in the East Asia-Australia sector. But in the Europe-Africa sector and America-East Pacific Ocean sector, the asymmetry between the Northern and Southern Hemispheres is obvious, the amplitude of maximum negative response is larger in the Northern Hemispheres than in the Southern Hemispheres.

Key words Ionospheric storm, Geomagnetic disturbance, F₂-layer, Correlation analysis