

广州地磁 Z 分量日变幅的谱特征^{*}

马瑞平 徐寄遥

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用 1972—1993 年广州地磁资料, 分析了 Z 分量日变幅的年平均、年变化和半年变化等低频成分的逐年变化, 以及小于 60 天的短周期变化特征. 同时对 1972—1993 年的 $F_{10.7}$ 日均值进行了谱分析. 结果指出, 广州地磁 Z 分量日变幅的年平均与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的年平均存在良好的线性相关; 具有幅度大约 5 nT 夏季极大的年变化, 与太阳活动没有明显相关, 是一种季节效应; 存在春秋分极大的半年变化, 幅度与太阳活动有关, 高年的幅度明显大于低年; 具有明显的与太阳自转相关的 27 天左右的变化和明显的与行星波有关的接近 16 日、10 日、5 日、2 日等短周期变化. 广州地磁 Z 分量日变幅的这些谱特征, 有助于更深入地了解中低层大气对电离层影响的物理机制.

关键词 地磁变化; 谱特征; 太阳活动

1 引言

电离层 F_2 层受到来自下层大气各种尺度的扰动, 多年来一直受到广泛关注, 特别是发现电离层赤道异常区 F_2 层临界频率经常有 2 日、5 日和 16 日等周期性振荡以后, 对它的特征和形成机制的研究更加活跃^{[1]—[5]}. 目前普遍认为, 低层大气各种时间尺度的波动通过直接向上传播或调制大气潮汐的幅度, 从而影响赤道电急流及相应电场的大小, 进而通过“喷泉效应”形成 F_2 层电子浓度的变化. 基于上述思想, 马瑞平等^{[6],[7]} 分析不同经度扇区电离层站 F_2 层电子浓度的半年变化特征, 提出了形成电离层半年变化的一种新机制, 即大气潮汐 (1, 1) 模和 (1, -2) 模幅度的半年变化造成赤道电急流区电场的半年变化, 通过“喷泉效应”形成 F_2 层电子浓度的半年变化. 为了进一步验证大气影响电离层的理论, 需要检验赤道电急流及其相应的电场是否也存在各种周期的变化现象.

利用火箭直接探测或利用非相干散射雷达探测等离子体的漂移, 可以得到赤道电急流区的电场资料, 但是由于设备少费用大, 至今还没有较长期的连续数据. 然而地磁资料十分丰富, 连续性又好, 因此, 人们多利用地磁资料来研究赤道电急流及相应电场. Chapman 和 Raja Rao^[8] 分析了 1958 年接近赤道电急流区不同经度地磁站宁静日 H 和 Z 分量日变幅, 指出这些地磁日变幅有明显的半年变化和经纬度不对称性. Osborne^[9] 利用地磁 H 分量研究了 Peru 上空赤道电急流的日变化和季节变化. Rastogi^[10] 研究了低纬地磁 H 分量的逐年变化、季节变化、日变化及其与电离层 E 区电子浓度的关系. Parish 等^[11] 分析了位于地磁赤道的 Huancaayo 站 1979 年 H 分量时均值的频谱特征, 指出赤道

^{*} 国家杰出青年基金项目 (40225011) 和国家基础研究专项经费资助项目 (G2000078407) 共同资助
2004-01-06 收到原稿, 2004-03-04 收到修定稿

电急流存在 27 天周期和类似行星波周期的变化. 以上是利用地磁资料研究赤道电急流及相应电场的几个例子, 还有很多类似的研究和有益的结果, 不一一列举. 不过在这些研究中, 大多利用地磁 H 分量, 为了回避地磁扰动期间磁层环电流的影响, 经常分析地磁宁静日的数据, 由于数据的不连续性, 不能有效地分析它们的短周期变化特征. 另外其利用的资料较短, 没有充分研究与太阳活动周期的相关.

由于广州地磁 Z 分量受地磁扰动产生的环电流和极区电流的影响比较小, 而且有连续多年的数据, 有利于进行长、短周期的谱分析. 因此, 我们对广州地磁台连续 22 年 (1972—1993 年) 的 Z 分量日变幅进行了频谱分析, 得到长达 22 年的年均值、年变化的幅度与相位、半年变化的幅度与相位等低频变化, 以及小于 60 天的短周期变化特征. Z 分量日变幅的大小能基本反映中午东向赤道电急流及其相应电场的大小, 所得结果也就基本反映赤道电急流及其相应电场的变化特征. 为了研究地磁变化与太阳活动的关系, 我们同样对 1972—1993 年的 $F_{10.7}$ 日均值进行了频谱分析. 本文的研究结果, 有助于深入了解中低层大气对电离层影响的物理机制.

2 数据和分析方法

本文利用的数据是广州地磁台 (地磁纬度 11.9°N) 1972—1993 共 22 年的 Z 分量日变幅 (用 D_Z 表示). 它的大小能够基本反映中午东向赤道电急流的大小. 按理论, 利用纬度更低的琼中台 (地磁纬度 7.8°N) 数据更好, 但该台可用数据较短, 我们也分析了其中几年的数据, 其结果与广州地磁台数据结果基本一致, 所以本文只讨论对广州数据谱分析的结果.

最常用的时间序列数据频谱分析方法是 Fourier 变换, 对一年的 Z 分量日变幅进行加窗 Fourier 变换, 就可以得到基波 (年周期)、二次谐波 (半年变化) 和其他谐波的功率谱. 但是加窗傅里叶变换的副波瓣漏损, 会造成谱误差, 对低频部分影响最大. 为了提高年变化和半年变化的分析精度, 我们首先对每年的 Z 分量日变幅数据, 按 (1) 式进行多元回归分析, 得到年平均、年周期变化幅度和相位、半年周期变化幅度和相位.

$$\tilde{y}_i = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}i\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{365}i\right) + a_3 \cos\left(\frac{4\pi}{365}i\right) + a_4 \sin\left(\frac{4\pi}{365}i\right). \quad (1)$$

上式中 $\tilde{y}_i$ 为 D_{Zi} 的回归预测值, i 为日序数, a_0 — a_4 为回归系数, $\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ 和 $\arctan(a_2/a_1)$ 分别为年变化的幅度和相位, $\sqrt{a_3^2 + a_4^2}$ 和 $\arctan(a_4/a_3)$ 分别为半年变化的幅度和相位. 从原始数据中减去低频分量 $\tilde{y}_i$, 再对这些残余量进行 Fourier 变换, 数据长度取 364 天, 得到谱密度.

图 1 给出了 1979—1981 年回归分析的结果. 图的上部画出了原始数据及回归分析得到的年变化和半年变化曲线, 图的下部是残余量曲线. 可以看出, 这 3 年都存在明显的春秋分极大的半年变化和夏季极大的年变化.

为了研究与太阳活动的相关, 同样对太阳 $F_{10.7}$ 流量进行了类似的谱分析.

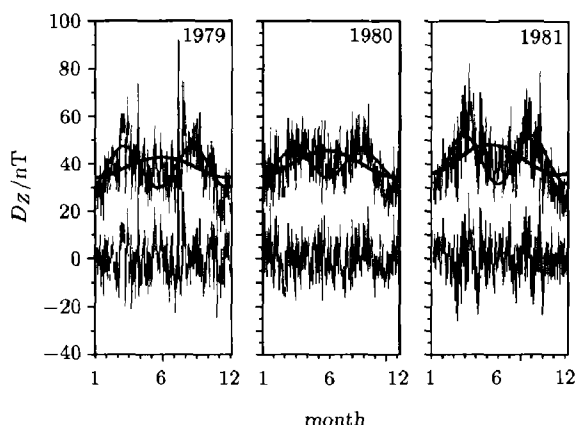


图 1 1979—1981 年广州地磁 Z 分量日变幅与回归分析的年变化、半年变化和残余的高频分量
Fig.1 Daily range of Z at Guangzhou station and its annual variation and semiannual variation calculated by regression analysis and the residual high frequency component from 1979 to 1981

3 结果和讨论

3.1 年均值的逐年变化

对每年的 Z 分量日变幅和 $F_{10.7}$ 的日均值分别进行回归分析, 得到各自的年平均值. 图 2 给出了它们的逐年变化. 从图 2(a) 可以看到, 地磁的年均值与 $F_{10.7}$ 的年均值有非常好的正相关. 图 2(b) 给出了它们的相关性曲线, 图中直线是线性拟合的结果, 可以看出广州地磁 Z 分量日变幅年均值与太阳活动呈良好的线性相关.

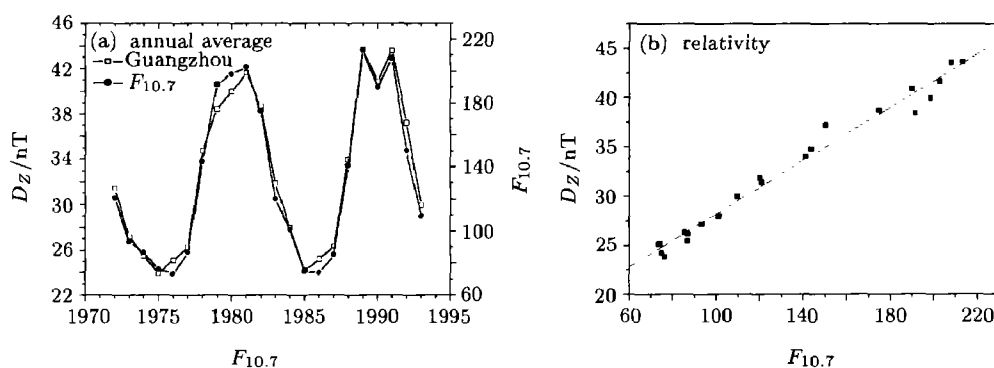


图 2 广州地磁 Z 分量日变幅的年均值和 $F_{10.7}$ 年均值的逐年变化 (a) 和相关性 (b)
Fig.2 Year by year variability of annual average (a) and the relative (b) of geomagnetic daily range of Z at Guangzhou and $F_{10.7}$ respectively

下面讨论这种线性相关的原因.

根据电离层电动力学理论^[12], 赤道电急流可由下式近似计算,

$$J = \left(\sigma_P + \frac{\Sigma_H}{\Sigma_P} \sigma_H \right) E. \quad (2)$$

上式中, J 为赤道电急流, σ_P 为 Pedersen 电导率, σ_H 为 Hall 电导率, Σ_H 和 Σ_P 分别

为发电区垂直积分 Pedersen 电导率和 Hall 电导率, 括号里的部分经常称为 Cowling 电导率, 这些电导率与地磁赤道上空电离层 E 区电子浓度成正比, E 为纬向电场. Rastogi^[10] 分析了赤道电急流区 Kodaikanal 站 1959—1965 年中午平均 f_0E 与太阳黑子数的关系, 显示它们有正相关趋势. 从 E 区电离层形成的理论, E 区电离的能源是太阳紫外辐射, 因此可以推断电子浓度会与太阳活动呈线性相关. 这种推断是否确实, 有待从电离层探测资料证实. 电场 E 是 E 区电离层大气潮汐发电产生的, Rastogi^[10] 的研究显示, 从年平均的意义上它们基本不受太阳活动的影响. 因此赤道电急流 J 将与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 呈线性相关. 广州地磁 Z 分量日变幅主要由赤道电急流和 S_q 电流产生, 其中赤道电急流密度比 S_q 电流密度几乎大一个量级, 因此可以认为地磁低纬的广州站 Z 分量日变幅主要反映赤道电急流的变化, 所以广州地磁 Z 分量日变幅年均值与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的年均值基本上呈线性相关.

3.2 年变化和半年变化

广州地磁 Z 分量日变幅存在明显的年周期和半年周期变化. 图 3 给出了用回归分析得到的年变化和半年变化的幅度与相位, 为了比较, 同时给出了 $F_{10.7}$ 的回归分析结果.

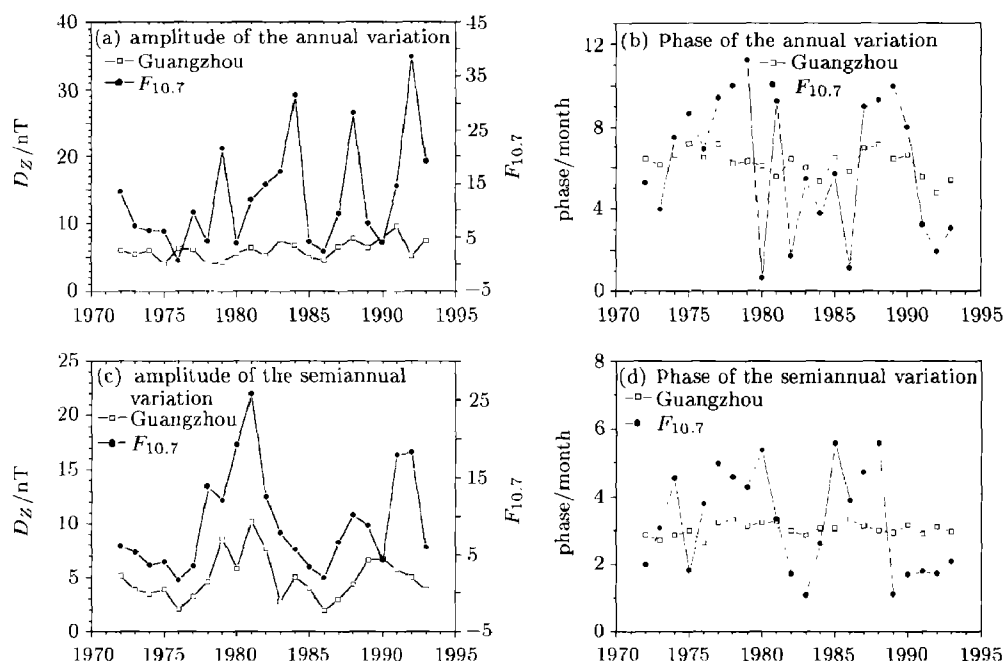


图 3 广州地磁 Z 分量日变幅与 $F_{10.7}$ 的年变化幅度 (a) 和相位 (b) 及半年变化幅度 (c) 和相位 (d)
Fig.3 Annual variation amplitude (a) and phase (b) as well as semiannual variation amplitude (c) and phase (d) of daily range of Z at Guangzhou and $F_{10.7}$ respectively

从图 3(a) 可以看出, 地磁年变化幅度约为 5 nT, 基本不随太阳活动变化, $F_{10.7}$ 的年变化幅度的逐年变化强烈, 最大幅度出现在 1992 年, 接近 40 个 $F_{10.7}$ 单位 ($10^{-22} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$), 1990 年则只有 4 个单位, 幅度的逐年变化与太阳活动周期无关. 从图 3(b) 看到, 地磁年变化的极大值出现在夏季, $F_{10.7}$ 年变化的相位没有什么规律. 作者认为, 广州 Z 分量

日变幅年变化的主要因素是季节效应. 因为广州所在的经度区, 赤道电急流位于地理北半球, 赤道电急流区的电子浓度和相应的电导率夏季大于冬季, 造成赤道电急流的年变化; 另一个因素是 S_q 电流夏季大于冬季, 这两个因素造成 Z 分量日变幅的年变化.

从图 3(c) 可以看出, 地磁半年变化幅度大体上与太阳活动正相关, 例如 1976 年是太阳活动低年, 地磁半年变化的幅度为 2 nT 左右, 而太阳活动高年的 1981 年幅度达到 10 nT. 但是也有例外, 1980 年也是太阳活动高年, 幅度大约是 6 nT, 比前后两年都低, 其原因在下面讨论. $F_{10.7}$ 有时也有明显的半年变化, 一般来说太阳活动高年的半年变化幅度大于太阳活动低年. 从图 3(d) 看出, 地磁半年变化的极大出现在 3 月中下旬, 即春秋分. $F_{10.7}$ 半年变化的相位却没有规律. Z 分量日变幅的半年变化大致反映东向赤道电急流的半年变化, 赤道电急流的驱动力主要是对称日潮 (1, 1) 模和 (1, -2) 模, 它们在白天产生东向电场, 由于太阳入射角变化, 这些对称模在春秋季节会明显大于冬夏季. Burrage 等^[13] 分析高层大气研究卫星 (UARS) 的测风数据, 发现 1991 年 10 月—1995 年 3 月, 95 km 高度上日潮 (1, 1) 模的幅度有非常明显的春秋分极大的半年变化. 这里 (1, 1) 表示潮汐的模式, 第一个数字 1 表示日潮, 第二个数字 1 表示第一重力模. 日潮的半年变化将造成东向电场的半年变化, 根据 (2) 式, 赤道电急流必然出现半年变化. 太阳活动高年赤道电急流区的电导率增大, 它作为一个相乘因子, 如 (2) 式, 使赤道电急流和它产生的地磁 Z 分量的半年变化幅度, 在太阳活动高年显著大于太阳活动低年. 另外, 太阳活动的半年变化也会调制地磁 Z 分量的半年变化幅度, 例如 1980 年 $F_{10.7}$ 的半年变化幅度大约为 20 个单位, 但是半年变化的极大却出现在 5 月末至 6 月初, 与地磁半年变化几乎反相, 通过影响赤道电急流区的电导率, 抵消部分地磁半年变化, 所以 1980 年地磁半年变化幅度减小. 与此相反, 1981 年 $F_{10.7}$ 的半年变化幅度大约为 26 个单位, 相位为 3 月中旬, 与地磁半年变化同相位, 它会增大地磁半年变化幅度, 所以 1981 年地磁半年变化幅度最大.

广州地磁存在明显的半年变化, 为马瑞平等^{[6],[7]} 提出的电离层 F_2 层半年变化形成机制的合理性提供了新的证据.

3.3 短周期变化

对每年从原始数据减去回归分析得到的年均值、年变化和半年变化等低频分量后的残余量, 进行 Fourier 变换, 得到短周期谱. 图 4 给出了 1972—1993 年周期小于 60 天的短周期功率谱密度 (PSD). 从图 4(a) 看到, 每年都有小于 20 天的波谱, 看不出与太阳活动相关, 同时存在 27 天左右的谱, 太阳活动高年更明显. 从图 4(b) 看出, $F_{10.7}$ 的功率谱中, 27 天左右的波动最强, 太阳活动高年显著大于低年, 周期越短谱密度越小. 为了比较, 图 5 给出 22 年的平均谱, 地磁和 $F_{10.7}$ 都有相当强的 27 天左右的谱, 向短周期方向, $F_{10.7}$ 的功率谱很快下降而且没有明显的谱峰, 但在地磁谱中, 存在非常强的 16 日左右的波以及明显的 10 日、5 日和 2 日波等谱峰. $F_{10.7}$ 的 27 天谱是太阳自转的结果, 地磁 27 天左右的谱是太阳辐射造成赤道 E 区电子密度变化, 从而引起电导率变化的结果. 地磁特有的 16 日、10 日、5 日和 2 日等周期的波, 是中低层大气中经常存在共振行星波的结果^[14], 它们调制大气潮汐或直接传播到电离层 E 区, 造成赤道电急流区电场的波动, 从而形成地磁 Z 分量日变幅的振荡. Parish 等^[11] 分析 1979 年地磁赤道地区 Huancayo 站的 H 分量, 也指出存在类似的行星波振荡现象.

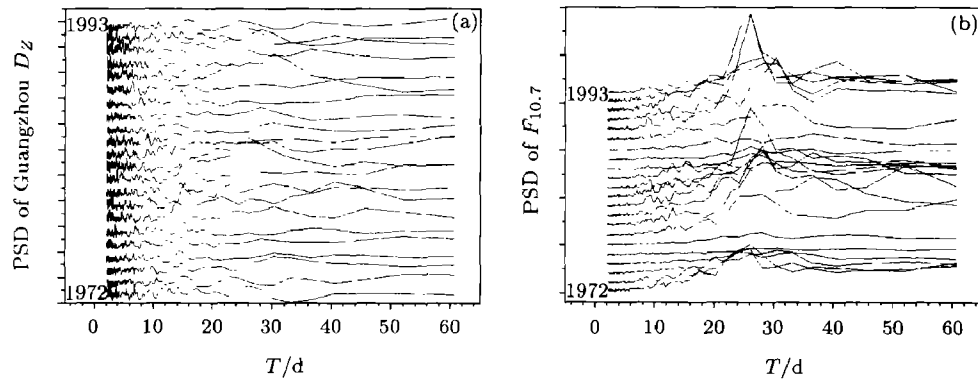


图4 1972—1993年广州地磁 Z 分量日变幅 (a) 和 $F_{10.7}$ (b) 的高频谱

Fig.4 High frequency spectra of daily range of Z at Guangzhou (a) and $F_{10.7}$ (b) from 1972 to 1993

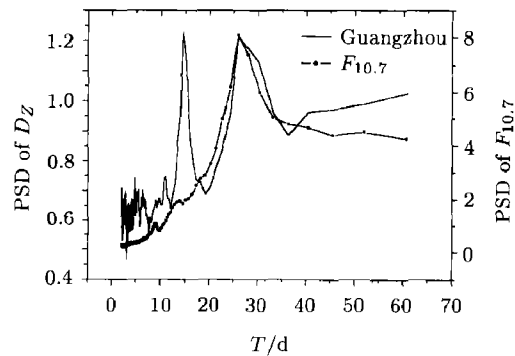


图5 1972—1993年广州地磁 Z 分量日变幅的平均功率谱和 $F_{10.7}$ 的平均功率谱

Fig.5 Average power spectral density of daily range of Z at Guangzhou and the average power spectral density of $F_{10.7}$ from 1972 to 1993

地磁存在行星波振荡, 为解释电离层 F_2 层电子浓度的类行星波振荡, 提供了有力的证据.

4 结语

本文分析了 1972—1993 年广州地磁 Z 分量日变幅的年平均、年变化和半年变化等低频成分的逐年变化, 以及周期小于 60 天的短周期变化特征. 为了研究地磁变化与太阳活动的关系, 同样对 1972—1993 年的 $F_{10.7}$ 日均值进行了频谱分析, 得到以下结果.

- (1) 广州地磁 Z 分量日变幅的年平均与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的年平均存在良好的线性相关, 太阳活动调制赤道电急流区的电子浓度及其相应的电场, 可能是形成线性相关的基本原因.
- (2) 存在夏季极大的年变化, 幅度大约 5 nT, 与太阳活动没有明显相关, 是一种季节效应.

(3) 存在春秋分极大的半年变化, 太阳活动高年的幅度明显大于低年. 大气潮汐在赤道电急流区产生的电场具有春秋分极大的半年变化, 是地磁半年变化的基本原因. 太阳活动影响电急流区的电导率是地磁半年变化幅度随太阳活动变化的因素. 太阳活动有时也有半年变化现象, 它会影响地磁半年变化的幅度, 当太阳活动本身的半年变化与地磁的半年变化同相时, 会增大地磁半年变化的幅度, 相位相反则减小地磁半年变化的幅度.

(4) 地磁存在明显 27 天左右的变化, $F_{10.7}$ 也有这种 27 天变化. 分析认为太阳 27 天自转, 造成电急流区的电导率及其相应电急流的变化, 是地磁 27 天周期变化的原因.

(5) 地磁有明显的大约 16 日、10 日、5 日和 2 日等短周期变化, $F_{10.7}$ 却没有这样的周期变化. 地磁的这些变化主要是大气共振行星波影响的结果.

广州地磁 Z 分量日变幅的这些谱特征, 有助于进一步深入了解中低层大气对电离层影响的物理机制.

参 考 文 献

- [1] Chen Peiren. Planetary-scale oscillation of the equatorial anomaly. *Chin. J. Space Sci.*, 1987, **7**(3):241—246. in Chinese (陈培仁. 赤道异常的行星波振荡. 空间科学学报, 1987, **7**(3):241—246)
- [2] Chen Peiren. Two-day oscillation of the equatorial ionization anomaly. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:6343—6357
- [3] Forbes J M, Leveroni S. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:981—984
- [4] Ito R, Kato S, Tsuda T. Consideration of an ionospheric wind dynamo driven by a planetary wave with a two-day period. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **48**:1—13
- [5] Luo Yi, Chen Peiren. Long period oscillations in the equatorial ionization anomaly correlated with the neutral wind in the mesosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**:1317—1323
- [6] Ma Ruiping, Xu Jiyao, Liao Huaizhe. The features and a possible mechanism of semiannual variation in the peak electron density of the low latitude F_2 layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, **65**:47—57
- [7] Ma Ruiping, Xu Jiyao, Liao Huaizhe. The characteristics and a possible mechanism of semiannual variation of f_0F_2 . *Chin. J. Geophys.* 2002, **45**(6):766—772. in Chinese (马瑞平, 徐寄遥, 廖怀哲. f_0F_2 半年变化的特征和一种可能机制. 地球物理学报, 2002, **45**(6):766—772)
- [8] Chapman S, Raja Rao K S. The H and Z variations along and near the equatorial electrojet in India, Africa and the Pacific. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1965, **27**:559—581
- [9] Osborne D G. Daily and seasonal changes of the equatorial electrojet in Peru. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1964, **26**:1097—1105
- [10] Rastogi R G. Geomagnetic field variations at low latitudes and ionospheric electric fields. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**(10):1375—1381
- [11] Parish H F, Forbes J M, Kamalabadi F. Planetary wave and solar emission signatures in the equatorial electrojet. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A1):355—368
- [12] Richmond A D. Ionospheric electrodynamics. In: Volland H ed. Handbook of atmospheric electrodynamics. Boca Raton: CRC Press, 1995, **2**:249—290
- [13] Burrage M D, Hagan M E, Skinner W R et al. Long-term variability in the solar diurnal tide observed by HRDI and simulated by the GSWM. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(19):2641—2644
- [14] Salby M L. Survey of planetary-scale traveling waves: The state of theory and observations. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1984, **22**:209—236

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF DAILY RANGES OF Z COMPONENT AT GUANGZHOU GEOMAGNETIC STATION

MA Ruiping XU Jiyao

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

Abstract

Using the geomagnetic data of daily variation of Z component observed from 1972 to 1993 at Guangzhou station, the low frequency components that include the annual average, the annual variation and the semiannual variation, and the short period component with periods less than 60-day are analyzed year after year. The daily averages of the $F_{10.7}$ also are analyzed. The daily variations of Z at Guangzhou station can approximately reflect the magnitude of the equatorial electrojet. The results show that, the annual averages of daily variations of Z are favorably linearly correlative with the annual averages of the $F_{10.7}$; the annual variation with the amplitude of about 5 nT and summer maxima is existent in every year, it is not virsuallly correlative with the solar activity and it is a seasonal effect; the semiannual variation with equinoctial maxima is existent, the amplitude of the semiannual variation is obviously greater at solar maximum than at solar minimum, for example, the amplitude of the semiannual variation is about 10 nT at 1981 that is the year of solar activity maximum, but the amplitude is about 2 nT at 1976 that is the year of solar activity minimum; the oscillation with period about 27 day which relate to solar rotation and the oscillations with periods close to 16, 10, 5, 2 d which relate to the planetary wave are obviously existent. The spectral characteristics of the geomagnetic daily ranges of Z at Guangzhou station prompts further investigation into the physical mechanism of that the ionosphere is affected by the middle and lower atmosphere.

Key words Geomagnetic variation, Spectral characteristic, Solar activity