

低纬地磁 Z 分量的半年变化^{*}

马瑞平 徐寄遥 纪 巧

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用武汉、广州、泉州和琼中等4个低纬地磁站连续多年的地磁资料,计算了各月5个磁静日 Z 分量日均值与中午 1100—1300 时段平均值之差 (D_z),对每年 12 个 D_z 采用多元回归分析方法,得到各年的半年变化幅度和相位.结果表明:4个站的 D_z 每年都有半年变化现象;半年变化幅度与太阳活动有关,一般来说,太阳活动高年 D_z 半年变化幅度明显大于太阳活动低年;太阳活动本身的半年变化,对 D_z 半年变化幅度有显著的调制作用; D_z 半年变化的相位在 3—4 月(或 9—10 月),即极大值出现在分季;低纬地区地磁 Z 分量存在显著的半年变化,能够反映赤道电急流也有明显的半年变化,这再一次证明,赤道电急流幅度的半年变化,通过“喷泉效应”使得电离层 f_0F_2 产生半年变化,其是产生 f_0F_2 半年变化的一个主要因素.

关键词 地磁变化;半年变化;太阳活动

1 引言

早在 20 世纪 50 年代,就发现电离层 F_2 层的临界频率存在明显的半年变化,即春秋分极大,冬夏至极小^[1]. f_0F_2 半年变化的幅度相当大,从赤道到高纬几乎年年都有,是电离层 F_2 层非常重要的一种现象,因此多年来对这种半年变化的特征和形成机制进行了非常广泛的研究.但是引起 f_0F_2 半年变化的最主要原因是什么,至今还没有取得一致的结论.

马瑞平等^{[2],[3]}利用不同经纬度分布的 33 个电离层台站 1974—1986 年垂直探测数据,分析了 f_0F_2 半年变化的主要特征.提出了产生 f_0F_2 半年变化的一种新的物理机制,即低热层日潮的半年变化引起赤道电急流幅度的半年变化,通过“喷泉效应”使得赤道电离层异常幅度产生半年变化,从而形成 f_0F_2 的半年变化.

很多学者利用地磁台的观测资料研究了赤道电急流与 S_q 电流体系的特征,并且很早就发现赤道电急流与 S_q 电流存在半年变化现象.例如,Chapman 等^[4]分析了 1958 年接近地磁赤道的 11 个地磁观测站国际磁静日 H 和 Z 分量日变幅,发现有春秋分极大的半年变化特征. MacDougall^[5]从美洲地磁资料推算出赤道电急流也有同样的半年变化. Wagner^[6]分析中纬地磁资料指出, S_q 也存在半年变化现象.但是,这些早期的研究,大多利用一年左右的数据,也没有深入研究半年变化的形成机制,更没有充分注意到它对电离层的影响.

^{*} 国家杰出青年基金(40225011)和国家 973 项目(G2000078407)共同资助
2003-08-19 收到原稿, 2004-07-11 收到修定稿

本文的目的是, 利用武汉、泉州、广州、琼中和北京等地磁台连续多年的地磁资料, 分析各站地磁 Z 分量的半年变化特征、形成机制和与太阳活动的关系, 进一步论证作者提出的电离层 f_0F_2 半年变化形成机制的合理性.

2 数据

本文分析的数据来源于地磁观测报告*. 主要使用了低纬地区地磁台的数据, 包括武汉台和广州台 1974—1992 年, 泉州台 1982—1992 年, 琼中台 1982—1991 年的数据, 以及北京台 1974—1992 年的数据. 表 1 给出了各站的地理和地磁经纬度. 为了研究与电离层半年变化的相关, 还分析了 1974—1986 年 Yamagawa 电离层垂直探测数据.

表 1 台站经纬度
Table 1 The longitude and latitude of the stations

台站名称	地理纬度 /°N	地理经度 /°E	地磁纬度 /°N	地磁经度 /°E
琼中 (Qiongzong)	19.0	109.8	7.8	179.4
广州 (Guangzhou)	23.1	113.3	11.9	183.9
泉州 (Quanzhou)	24.9	118.6	13.9	188.7
武汉 (Wuhan)	30.5	114.6	19.4	184.9
北京 (Beijing)	40.0	116.2	28.9	186.1

3 分析方法

为了减小地磁扰动期间极光区电流和磁层环电流的影响, 我们选择了地磁静日的 Z 分量, 因为在地磁低纬地区这些电流对地磁 Z 分量的影响较小, 它的日变化主要是由赤道电急流和 S_q 电流造成的, 在中午达到负极大值. 分析方法是把每月 5 个地磁宁静日的 Z 分量日均值与地方时 1100—1300 时的 3 个时段的平均值之差, 作为该月宁静日地磁 Z 分量的变化幅度, 用 D_z 表示. 这样处理后, D_z 变成正值. D_z 的大小, 反映中午东向赤道电急流与 S_q 电流的强度, 由于在低纬地区赤道电急流与 S_q 电流相位相同, 因此也就基本反映中午东向赤道电急流的强度. 对每年 12 个月的 D_z 数据按下面公式进行多元回归分析, 得到该站该年地磁 D_z 的年平均值、年变化幅度及相位、半年变化幅度及相位.

$$\tilde{y}_i = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{12}i\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{12}i\right) + a_3 \cos\left(\frac{2\pi}{6}i\right) + a_4 \sin\left(\frac{2\pi}{6}i\right). \quad (1)$$

上式中 $\tilde{y}_i$ 为 D_z 的预测值, i 为月序数, a_0 — a_4 为回归系数, $A_1 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ 和 $p_1 = \arctan(a_2/a_1)$ 分别为年变化的幅度和相位, $A_2 = \sqrt{a_3^2 + a_4^2}$ 和 $P_2 = \arctan(a_4/a_3)$ 分别为半年变化的幅度和相位.

* 各地磁台编写, 中国国家地震局地球物理研究所审校, 地震出版社出版

4 结果和讨论

为了直观地看出地磁 Z 分量是否有明显的半年变化, 我们把 5 个台站各月的 D_z 减去其年均值, 用 R_{D_z} 表示并示于图 1 上, 图 1 中纵坐标的一个小格代表 5 nT. 从图 1 可以定性地看出, 除了远离磁赤道的北京站, 其他各站都有半年变化分量, 太阳活动高年半年变化更明显.

对每年的 D_z 数据用 (1) 式进行回归分析, 得到武汉、广州、泉州和琼中各年的半年变化幅度及相位, 分别由图 2(a) 和图 2(b) 给出. 图 2(b) 纵坐标的数字表示该月的月中, 如 3 表示 3 月中, 3.5 表示 3 月底或 4 月初. 从图 2(a) 看到, 每年各站的半年变化幅度基本一致, 太阳活动高年半年变化的幅度显著大于太阳活动低年, 例如太阳活动高年的 1981 年, 广州的半年变化幅度为 7.5 nT, 太阳活动低年的 1975 年大约为 2 nT. 但是, 某些年, 甚至处于太阳活动高年的 1980 和 1990 年, 幅度都有明显的下降. 从图 2(b) 看出, 除了琼中站 1982—1985 年的相位误差比较大以外, 各站半年变化的相位为 3—4 月 (或 9—10 月), 即 D_z 的极大值出现在春秋分.

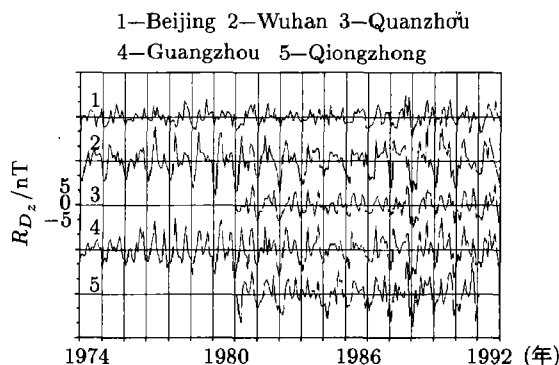


图 1 每月宁静日地磁 Z 分量变化幅度 (D_z) 与它的年平均之差

Fig.1 The difference between the amplitude (D_z) of geomagnetic Z component variation at Quiet-day in every month and its yearly mean

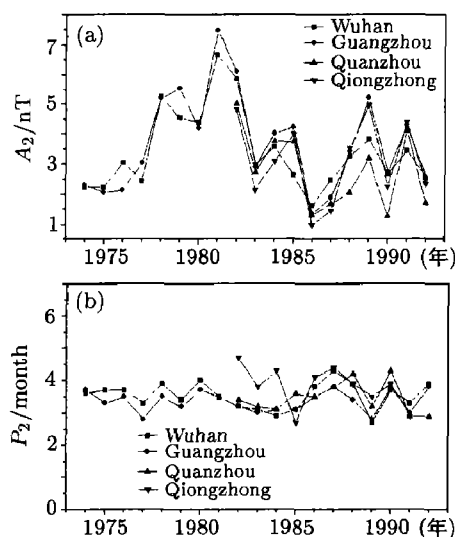


图 2 4 个站地磁 D_z 半年变化的幅度 (a) 和相位 (b)

Fig.2 Amplitude (a) and phase (b) of the semiannual variation of geomagnetic D_z at 4 stations

关于赤道电急流的形成机制, 很多学者作了详细研究. Forbes^[7] 指出, 大气潮汐 (1,1) 模和 (1,-2) 模是形成赤道电急流的主要驱动力, 地磁赤道上空电离层 E 区特殊的磁场位型为形成赤道电急流提供了特别有利的条件. Stening^[8] 讨论了形成赤道电急流的不同观点, 其中, 白天南北半球方向相反的 S_q 电流体系在赤道聚焦形成赤道电急流的机制, 得到广泛认同.

那么, 形成赤道电急流半年变化的原因又是什么呢? 作者认为, 地球公转, 每年太阳直射赤道两次是形成赤道电急流半年变化的基本原因. 当太阳直射赤道时, 太阳对中低层大气的加热相对赤道呈对称状态, 大气潮汐的对称模 $(1, 1)$ 模和 $(1, -2)$ 模的幅度就会增大, 赤道电急流的强度也就相应增大, 因此造成赤道电急流在分季出现极大的半年变化. 卫星探测的结果证实, 低热层大气潮汐 $(1, 1)$ 模的幅度的确有非常明显的半年变化^[9]. 另外, 太阳活动高年, 电离层发电区电导率增大, 而且由于太阳辐射增强, 大气潮汐幅度增大, 这两种因素使得赤道电急流半年变化的幅度增加. 用这种观点可以合理地解释太阳活动高年 D_z 半年变化幅度显著大于太阳活动低年的特征. 那么, 同处太阳活动高年, 为什么 1981 年半年变化幅度很大而 1980 和 1990 年半年变化幅度明显小呢? 为了回答这个问题, 作者分析了 1974—1992 年太阳射电流量 $F_{10.7}$ 的变化情况.

图 3(a) 给出了 31 天滑动平滑后 $F_{10.7}$ 的变化, 图 3(b) 和图 3(c) 分别给出用式 (1) 对各年 $F_{10.7}$ 进行回归分析得到的半年变化幅度和相位. 从图 3(a) 看到, 1981 年 $F_{10.7}$ 有明显的半年变化现象, 图 3(b) 和图 3(c) 也显示, 半年变化幅度确实很大, 达到 25 个 $F_{10.7}$ 单位 ($10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$), 相位在 3 月中下旬, 与分季极大的 D_z 半年变化的相位基本相同. 太阳活动半年变化的极大值出现在春秋分, 会加强 D_z 的半年变化, 因此 1981 年 D_z 的半年变化幅度很大. 相反, 从图 3 看到, 1980 年 $F_{10.7}$ 也有明显的半年变化, 幅度也不小, 大约为 20 个单位, 但是其相位却是 5 月末, 它会抵消一部分 D_z 的半年变化, 造成 D_z 的半年变化幅度小于前后两年. 1983 年 D_z 的半年变化幅度明显减小, 可能有两个因素, 一是太阳活动水平下降, 使得 D_z 半年变化幅度减小, 二是该年太阳活动指数 $F_{10.7}$ 也存在一定幅度的半年变化 (大约 8 个单位), 但是相位却在 1 月中旬, 与 D_z 半年变化的相位几乎相反, 抵消了一部分 D_z 的半年变化.

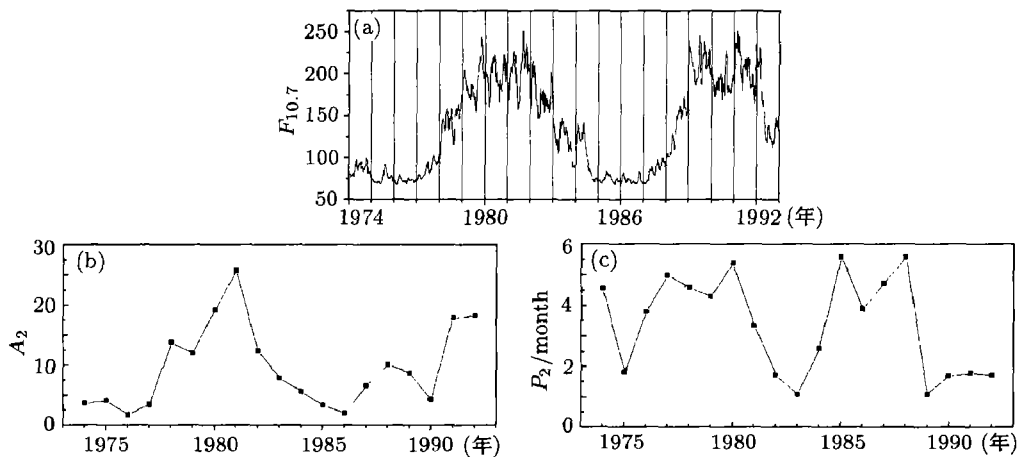


图 3 31 天滑动平均后的 $F_{10.7}$ (a) 及其半年变化的幅度 (b) 和相位 (c)
Fig.3 The 31 day-running average of $F_{10.7}$ (a), amplitude (b) and phase (c)
of the semiannual variation of $F_{10.7}$

4 个低纬台站 D_z 的半年变化幅度相差不大, 是因为在地磁宁静日, Z 分量的变化主要是赤道电急流和 S_q 电流共同造成的, 而且在白天它们的相位相同. 随着纬度增加, 赤道电急流产生的效应减小, 而 S_q 电流的影响增加, 所以 Z 的半年变化幅度相差不大.

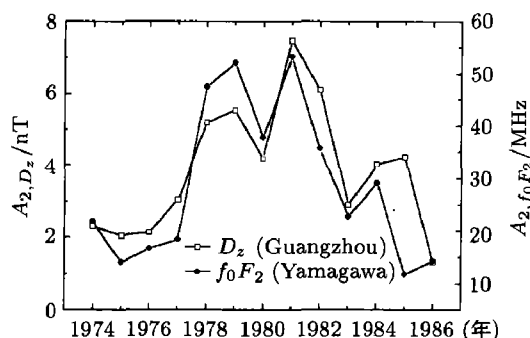


图4 1974—1986年广州地磁 D_z 和 Yamagawa 白天 f_0F_2 的半年变化幅度

Fig.4 Semiannual variation amplitude of Guangzhou geomagnetic D_z and Yamagawa f_0F_2 in daytime from 1974 to 1986

为了与电离层的半年变化进行对比研究, 对位于赤道异常北峰附近的日本 Yamagawa 电离层垂测站 (地磁纬度 20.4°N , 地理经度 130.6°E) 1974—1986 年白天平均 f_0F_2 月中值进行了回归分析, 得到各年的半年变化幅度, 与广州地磁 D_z 的半年变化幅度一起示于图 4. 从图 4 可以看到, 两者变化趋势非常一致. 这再一次证明, “低热层日潮的半年变化, 引起赤道电急流幅度的半年变化, 通过“喷泉效应”使得电离层 f_0F_2 产生半年变化”, 是产生 f_0F_2 半年变化的一个主要因素.

5 结论

利用 4 个低纬地磁站连续十几年的地磁资料, 计算了各月 5 个磁静日日均值与中午 11—13 时段平均值之差, 即宁静日 Z 分量变化幅度 (D_z). 对每年 12 个月的 D_z 采用多元回归分析方法, 得到各年的半年变化幅度和相位. 结论如下.

武汉、广州、泉州和琼中 4 个站, Z 分量每年都有半年变化现象; 半年变化幅度与太阳活动有关, 一般来说, 太阳活动高年 D_z 半年变化幅度明显大于太阳活动低年; 太阳活动本身的半年变化, 对 D_z 半年变化幅度有显著的调制作用, 太阳活动的半年变化幅度越大, 对 D_z 半年变化的调制作用也越大, 若太阳活动半年变化的相位与 D_z 半年变化的相位一致, 会增大 D_z 半年变化的幅度, 相位相反则会削弱 D_z 半年变化的幅度; D_z 半年变化的相位在 3—4 月 (或 9—10 月), 即极大值出现在分季.

低纬地区地磁 Z 分量的半年变化特征, 能够基本反映赤道电急流的半年变化情况, 说明赤道电急流也有明显的半年变化现象.

1974—1986 年广州地磁 Z 分量的半年变化幅度与 Yamagawa 站白天 f_0F_2 的半年变化幅度的逐年变化趋势基本一致, 再一次证明, 赤道电急流幅度的半年变化, 通过“喷泉效应”使得电离层 f_0F_2 产生半年变化, 是产生 f_0F_2 半年变化的一个主要因素.

参 考 文 献

- [1] Yonezawa T, Arima Y. On the seasonal and non-seasonal annual variations and the semi-annual variation in the noon and midnight electron densities of the F_2 layer in middle latitudes. *J. Radio Res. Lab.*, 1959 6(25):293—309
- [2] Ruiping Ma, 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
- [3] Ruiping Ma, 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)

- [4] 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
- [5] MacDougall J W. Equatorial electrojet and S_q current system — Part II. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1979, **31**: 359—372
- [6] Wagner C U. About a “semi-annual” variation of the amplitude of the geomagnetic S_q variations in median latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, **30**:579—589
- [7] Forbes J M. The equatorial electrojet. *Rev. Geophys. Spac. Phys.*, 1981, **19**(3):469—504
- [8] Stening R J. What drives the equatorial electrojet. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(10):1117—1128
- [9] 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

SEMIANNUAL VARIATION OF GEOMAGNETIC Z COMPONENT AT LOW LATITUDE

MA Ruiping XU Jiyao JI Qiao

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

Abstract

Using the data collected in 4 geomagnetic stations located separately at Wuhan, Guangzhou, Quanzhou and Qiongzong in the low latitude, the difference of geomagnetic Z component (D_z) between the diurnal average value and the average value of 1100—1300 LT at 5 quiet-day in every month have calculated. The amplitude and phase of semiannual variation in every year have obtained by analyzing the 12 D_z with multiple regression method. The result shows that D_z of 4 stations all have semiannual variation in every year. The amplitude of semiannual variation is related to the solar activity, and in general, the amplitude of semiannual variation of D_z in solar maximum is obviously greater than that in solar minimum. The semiannual variation of solar activity modulates the amplitude of semiannual variation of D_z obviously. The phase of semiannual variation of D_z is in March- April (or September-October), so the maximum of D_z appears in Equinox. The semiannual variation of geomagnetic Z component at low latitude indicates that the equatorial electrojet have semiannual variation as well. The semiannual variation of the equatorial electrojet causes the f_0F_2 of ionosphere to appear semiannual variation by fountain effect. And this is a reasonable mechanism to produce semiannual variation of f_0F_2 .

Key words Geomagnetic variation, Semiannual variation, Solar activity