

文章编号 1001-8166(2002)03-0339-05

1600—2000 年地球主磁场的全球变化

康国发 吴小平 胡家富

(云南大学地球科学系,云南 昆明 650091)

摘要:根据汤普森(Thompson)地磁场模型和第8代IGRF模型,计算了1600—2000年期间的偶极子磁场、非偶极子磁场、西向漂移和地磁功率谱等反映主磁场变化的主要参数,分析了各个参数的长期变化特征。主要结果是:400年来地磁场的偶极子磁矩持续减小,1800年以来磁心的位置快速离开地心向太平洋方向移动了291km,西向漂移有大约30年左右的周期;非偶极子磁场异常中,南大西洋正磁异常、非洲负磁异常和大洋洲负磁异常是1600年以来一直存在的3个大型磁异常,东亚正磁异常和北美正磁异常是1700年后逐渐形成的,17世纪北太平洋地区存在强的正磁异常。

关键词:地磁场模型;偶极子和非偶极子磁场;西向漂移;地磁功率谱;全球变化

中图分类号:P318 文献标识码:A

利用球谐分析方法建立的主磁场模型,可以计算和分析地磁场的长期变化。到目前为止,涵盖的时间跨度较长的主磁场模型有2组:国际地磁参考场模型(IGRF),最新的第8代IGRF包括1900—2000年每5年一个磁场模型(球谐级数的截止阶数 $N=10$)和2000—2005年的长期变化预测模型($N=8$)^[1];Thompson and Barraclough(简称Thompson模型)根据历史地面磁测和古地磁数据建立的1600—1950年每50年一个的主磁场模型($N=4$)^[2,3]。本文根据这2组主磁场模型,计算1600—2000年期间偶极子磁场、非偶极子磁场、西向漂移和地磁功率谱等反映主磁场变化的主要参数,分析它们的变化特征,使我们对近400年来的地磁长期变化现象有一个系统的认识。

1 偶极子磁场的长期变化

1.1 地心偶极子的磁矩和地磁北极的位置

在地球主磁场的球谐级数中,与 $n=1$ 的球谐项相应的磁场等效于一个置于地心的偶极子磁场,它约占全部地磁场的80%~85%。偶极子磁场的变化常用偶极子的磁矩 M 、极角 θ_0 和方位角 ϕ_0 来描述,它们可由 $n=1$ 的3个高斯系数(g_1^0 、 g_1^1 和 h_1^1)计算

$$M = \frac{4}{\mu_0} R^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} \quad (1)$$

$$\tan \theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{|g_1^0|} \quad (2)$$

$$\tan \phi_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1} \quad (3)$$

式中 R 为地球的平均半径,计算中取 $R=6371.2$ km。表1列出1600—2000年期间(时间间隔为50a)偶极子磁矩和地磁北极位置的变化。从表1可以看出,1600—2000年期间地球磁矩一直在减小,400年来共减小17%,其中20世纪的100年减小了6.4%,20世纪地球磁矩衰减更快;地磁北极的位置在东西方向的变化主要是向西漂移,1600—2000年共向西漂移 29.7° ,平均 $0.074^\circ/a$,而20世纪共向西移动 2.7° ,平均 $0.027^\circ/a$,20世纪向西漂移的速度明显减慢;地磁北极位置在南北方向的变化缓慢,1600—1950年期间共向南移动了 4.3° ,1950年以后转向北移。

1.2 偏心偶极子位置的长期变化

在地磁场的研究中,除了用地心偶极子模型作

收稿日期 2001-18-03,修回日期 2001-11-05

* 基金项目:云南省教委科研基金项目“地磁长期变化与日长变化和地震时空分布关系的研究”(编号:0012079)资助

作者简介:康国发(1956-),男,云南腾冲人,副教授,主要从事地磁与地震关系方面的研究 E-mail:wmomockb@public.km.yn.cn

一级近似外,还常用偏心偶极子模型对地磁场作更好的近似描述。在此模型中,偏心偶极子的磁轴平行于地心偶极子轴,但磁心偏离地心一段距离。磁心的位置可由地磁场球谐模型中 $n = 1, 2$ 两阶的 8 个高斯系数计算^[4]。表 1 列出 1600 年以来磁心位置的变化。表中 r_0 是磁心离地心的距离, x_0, y_0 和 z_0 表示磁心的直角坐标, λ 和 φ 分别表示磁心位置的经度和纬度。由表 1 可以看出, 1650—1800 年磁心离地心的距离平均以 0.6 km/a 的速度减小,

1800—2000 年平均以 1.45 km/a 的速度增大,其中 20 世纪向外增大速度为 1.99 km/a,向外移动的速度明显加快。磁心的位置变化于 1800 年左右发生转折, 1600—1800 年期间在 $20^{\circ}S \sim 5^{\circ}N, 200^{\circ}E \sim 210^{\circ}E$ 之间波动; 1800—2000 年期间快速向西和向北移动,向西移动的速度为 0.23 °/a,向北移动的速度为 0.14 °/a, 200 年来由西南半球向东北半球的太平洋方向移动了 291 km。

表 1 1600—2000 年地心偶极子和偏心偶极子参数

Table 1 The parameters of dipole and eccentric dipole during 1600—2000

年代	地心偶极子			偏心偶极子					
	$M \times 10^{22} / \text{Am}^2$	$\lambda_0 / (^{\circ}N)$	$\lambda_0 / (^{\circ}E)$	$r_0 / (\text{km})$	$x_0 / (\text{km})$	$y_0 / (\text{km})$	$z_0 / (\text{km})$	$\lambda / (^{\circ}E)$	$\varphi / (^{\circ})$
1600	9.38	82.7	318.2	239.3	-214.2	-105.8	15.0	206.3	3.6(N)
1650	9.17	82.7	319.2	329.0	-280.1	-101.8	-60.2	200.0	11.4(S)
1700	9.00	81.5	312.9	294.9	-256.2	-99.1	-107.3	201.1	21.3(S)
1750	8.84	79.9	307.3	264.7	-236.6	-106.7	-51.7	204.3	11.3(S)
1800	8.65	79.2	302.3	238.6	-222.4	-83.6	-21.7	200.5	5.2(S)
1850	8.50	78.7	296.0	279.3	-279.2	4.8	1.4	179.0	0.3(N)
1900	8.32	78.6	291.2	330.5	-312.7	98.6	41.5	162.5	7.2(N)
1950	8.07	78.4	291.2	418.9	-359.0	190.7	101.3	152.0	14.0(N)
2000	7.79	79.5	288.4	529.3	-395.1	283.6	195.2	144.4	21.9(N)

2 地磁场的西向漂移

早在 1683 年, Halley 就发现了在不同时期的地磁图上等偏角线的漂移,即场的特征量相对固体地球向西漂移^[5]。20 世纪 50 年代以来,随着观测数据的迅速增加,对地磁场西向漂移进行了比较多的研究,提出了多种计算西向漂移的方法^[5,6]。各种方法计算所得的西向漂移速度大致相等,平均在 0.2 °/a 左右^[7],西向漂移主要由非偶极子磁场产生。本文根据 IGRF 模型的高斯系数,用全场速度法计算 1900—2000 年期间每 5 年的地磁场西向漂移。各阶球谐系数的平均漂移速度 $U(n)$ 可表达为^[8,9]。

$$U(n) = \frac{\sum_{m=1}^n m (g_n^m h_n^m - g_n^m h_n^m)}{\sum_{m=1}^n m^2 (g_n^m + h_n^m)} \quad (4)$$

式中 g_n^m, h_n^m 是球谐系数 g_n^m, h_n^m 的时间变化率。用 IGRF 模型计算时, g_n^m, h_n^m 采用相邻年代(时间间隔为 5 a)的平均变化率。1900—2000 年的平均漂移速度为 0.19 °/a^[7]。但是不同时期、不同谐波阶次的漂移速度并非均匀,图 1 绘出各年代的平均漂移

速度 $U(n)$ 和漂移速度最大的 2 阶项 $U(2)$ 的变化,可以看出, $U(n)$ 和 $U(2)$ 的极值所在年份相同,增大和减小的趋势基本一致,说明西向漂移的时间变化规律主要取决于 2 阶球谐项。图 1 还可以清楚的看出,西向漂移的一个明显的特征是有 30 年左右的周期变化。

3 地磁场功率谱的长期变化

主磁场每一阶谐波 n 的功率谱 (spatial power spectrum) $W(n)$ 可以表达为^[10]：

$$W(n) = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (5)$$

在物理上,如果 $W(n)$ 乘以常数因子 $1/2\mu$ (μ 是真空中导磁率) 则具有 J/m^2 的量纲,因此常用 $W(n)$ 描述磁场能量的大小。地磁场北向分量 X 、东向分量 Y 和垂直分量 Z 的功率谱 $Wx(n), Wy(n)$ 和 $Wz(n)$ 可由下列式子计算^[11,12]

$$Wx(n) = \sum_{m=0}^n \left(\frac{n(n+1)}{(2n+1)} - \frac{m}{2} \right) [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (6)$$

$$Wy(n) = \sum_{m=0}^n \left(\frac{m}{2} \right) [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (7)$$

$$Wz(n) = \sum_{m=0}^n \left(\frac{n(n+1)}{2n+1} \right) [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (8)$$

图 2 给出了 1600—2000 年各个分量的功率谱变化(球谐级数的截止阶次 $N=4$),可以看出, $W(n)$ 和 $Wz(n)$ 具有相同的量级,随时间衰减的变化规律完全一致, $Wx(n)$ 也有类似的衰减特征,但小一个数量级。表明地磁场能量的时间变化主要由 Z 和 X 分量决定。东向分量的 $Wy(n)$ 比 $Wz(n)$ 小 2 个数量级,并与 Z 和 X 分量的功率谱有不同的变化特征。

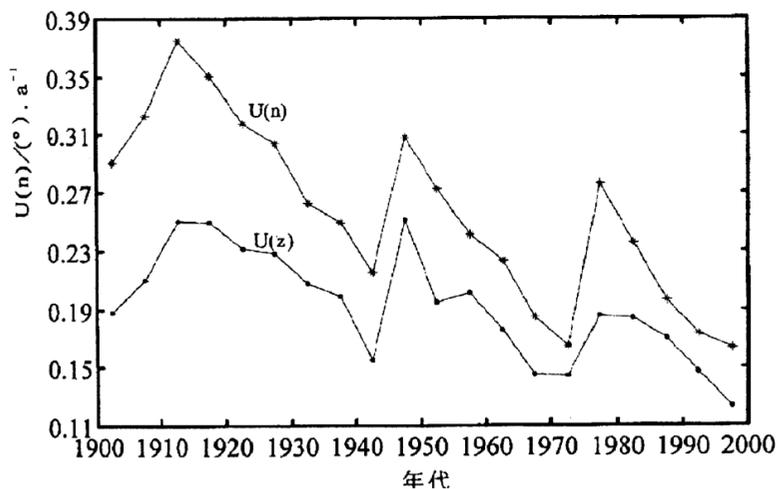


图 1 1900—2000 年地磁场西向漂移速度
Fig.1 Westward drift of geomagnetic field during 1900—2000

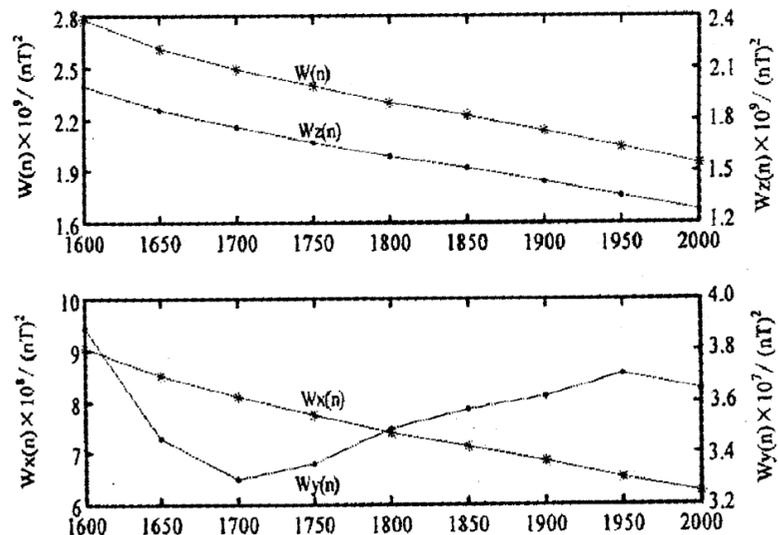


图 2 1600—2000 年地磁场各个分量的能量随时间的变化
Fig.2 The energy of each component of geomagnetic field with time during 1600—2000

4 非偶极子磁场的长期变化

地磁场除去地心偶极子磁场部分后,剩下部分称为非偶极子磁场。对 20 世纪的非偶极子磁场已有较多的研究^[13~15],主要特征是非偶极子场有几个正的和负的异常中心,其中具有行星尺度的大型磁异常有 5 个,它们是南大西洋正磁异常(SAT)、东亚正磁异常(EA)、非洲负磁异常(AF)、大洋洲负磁异常(AUS)和北美正磁异常(NAM)。20 世纪非偶极

子磁场的变化特征是否能够代表更长历史时期的变化,还需要做具体的研究。因此,本文计算并绘制了 1600—2000 年期间每 50 年间隔的非偶极子场,为节省篇幅,本文只给出 1700、1800、1900 和 2000 年非偶极子磁场的垂直强度(Z)的等值线图(图 3)。1900 年以前采用 Thompson 模型($N=4$),1900 年以后采用 IGRF 模型($N=10$)。4 阶球谐模型计算的磁异常在空间分布上与 10 阶球谐模型计算的结果基本一致,已清晰地反映磁异常区。大于 4 阶的高阶球谐项的磁异常所占比例很小,它们对磁异常的强度和异常中心的位置有小量修正。

1600 年以来,具有行星尺度的大型磁异常的变化有 2 个特征:一是 1600 年以来一直存在,并按一定规律变化的大型磁异常。按 2000 年磁异常所在的位置区分,这类异常有南大西洋正磁异常、非洲负磁异常、大洋洲负磁异常;另一特征是在一定时期内出现的大型磁异常。它们是 1600—1700 年期间北太平洋地区存在的正磁异常、1700 年以后逐渐形成的东亚正磁异常和北美正磁异常和 1600—1850 年期间的东南太平洋负磁异常(EPC)。

1600 年以来一直存在的 3 个大型磁异常中,磁异常强度最大的是南大西洋正磁异常,异常中心的强度在 1600—1800 年期间逐渐减小,由 1600 年的 25 406.1 nT 减小为 1800 年的 15 278.1 nT,平均年减小率为 50.6 nT/a,1800—2000 年逐渐增大,2000 年为 23 153.4 nT,平均年增大率为 39.4 nT/a。磁异常位置变化最快的是现在的非洲负磁异常,其中心位置从 1600 年的 112.7 E, 33.4 N 移动到 2000 年的 9.8 W, 1.6 N,平均以 0.3 °/a 的速度向西漂移。大洋洲负磁异常位于大洋洲、印度洋东部和太平洋西南部。磁异常强度的绝对值在 1600—1900 年期间减小,1900 年以后逐年增加。2000 年磁异常中心的位置为 127.1 E, 38.8 S,磁异常中心的位置 1600 年以来平均以 0.1 °/a 的速度向西漂移。从图 3 可以看出,在大洋洲负磁异常东北部的东南太平洋负磁异常(EPC),2000 年异常中心的位置为 240.4 E, 7.9 S,1600 年以来异常强度的绝对值一直在减小,异常中心的强度从 1600 年的 -10 535 nT 减小到 2000 年的 -2 946.8 nT,年平均变化率为 19 nT/a,按这一衰减速率,再过大约 100 年,这一磁异常的闭合中心将消失,成为大洋洲负磁异常的一部分。

从非偶极子场的等值线图可以看出,1600 年,1650 年和 1700 年的磁异常分布相似,与 Yukutake^[16]给出的 1650 年的磁异常分布基本一致。

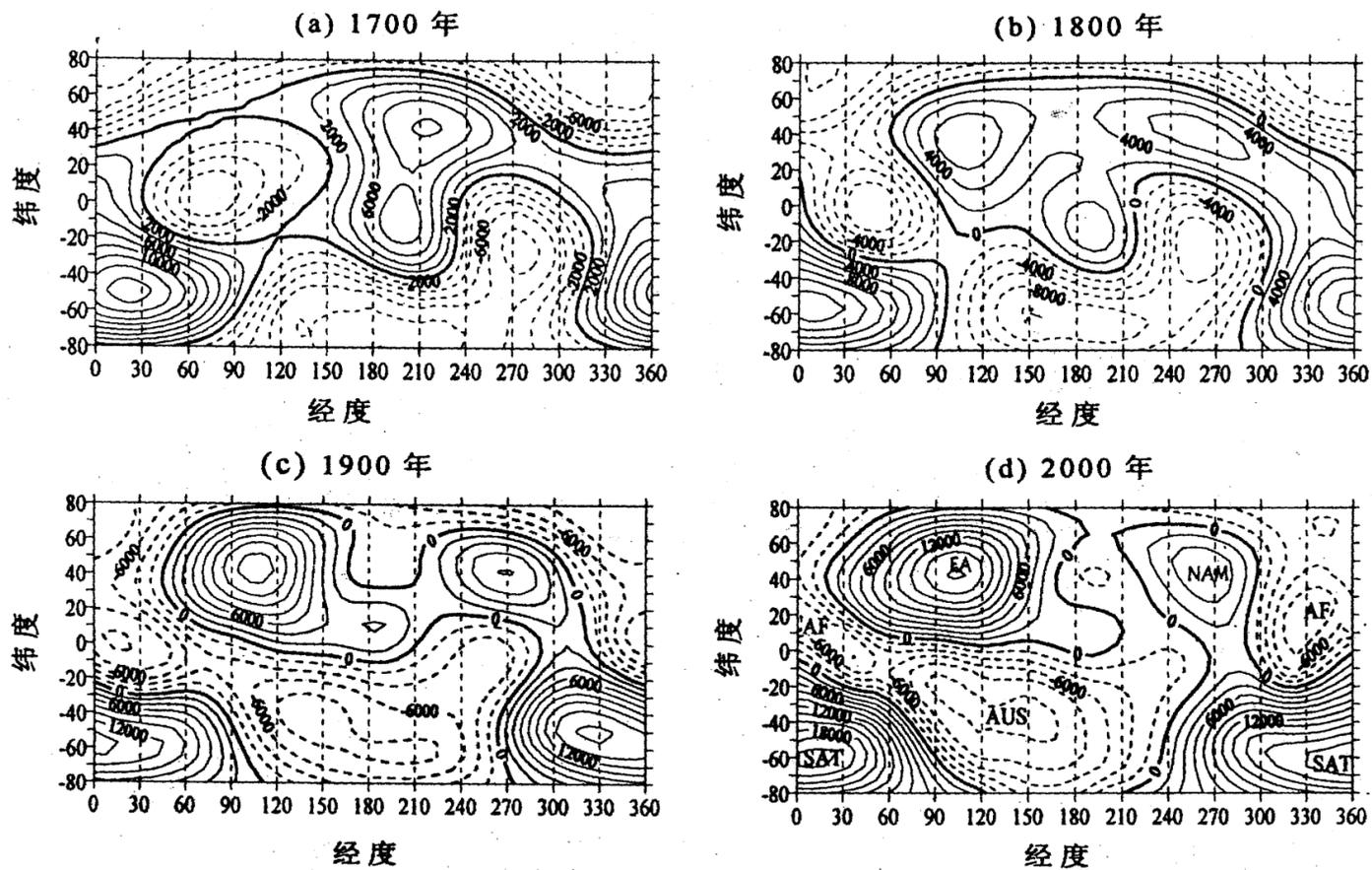


图 3 非偶极子磁场垂直强度分布图

Fig.3 Contour of Z component of non - dipole magnetic field

主要特点是北太平洋地区存在强的正磁异常, 而且有 2 个异常区, 图 3(a) 中位于北部的异常区记为 NPC, 位于南部的异常区记为 MPC。1700 年以后, 北太平洋地区的正磁异常的强度逐渐减弱, 但异常范围向东西两个方向扩大, 向西方向移动的磁异常形成现在的东亚正磁异常, 向东方向移动的磁异常形成现在的北美正磁异常。从各个年代的等值线图的变化看, 这一过程是在 1700—1750 年之间逐渐形成的。位于北部正磁异常(NPC)中心消失, 东亚和北美正磁异常中心的出现, 在 1750 年的等值线分布图就可以清楚地看出来。1750 年以来, 位于南部正磁异常(MPC)一直在减弱, 20 世纪异常强度和范围都较小, 已变为弱磁异常区; 东亚正磁异常的强度一直在增大, 异常中心的强度由 1750 年的 3 632.8 nT 增大到 2000 年的 18 449.8 nT, 年平均增大率为 57.4 nT/a。

5 讨论与结语

(1) 1600 年以来主磁场变化的主要特点是: 磁偶极子的强度持续减小, 400 年间共减小了 17%。磁心的位置 1650—1800 年期间向地心靠近, 1800 年以来快速地离开地心, 并向西向北移动, 200 年来从西南半球向东北半球的太平洋方向移动了 291 km, 地磁场平均以 0.2 %/a 的速度向西漂移, 漂移过程中存在大约 30 年左右的周期变化, 地磁场能量逐年减小, 其中垂直分量的减小起主要作用, 在非偶极

子磁场的变化中, 南大西洋正磁异常、非洲负磁异常和大洋洲负磁异常是 1600 年以来一直存在 3 个大型磁异常; 东亚和北美正磁异常是 1700 年后逐步形成的。

(2) 按磁偶极子磁矩的衰减速度, 大约再过 2000 a, 偶极子磁场将消失, 但从古地磁研究表明, 偶极子磁矩是周期性的增大和减小的^[14]。因此, 400 a 来的磁偶极子的减小应属于地磁场长期变化中的阶段性现象。徐文耀等认为可能是一次新的地磁倒转来临的征兆^[15]。

(3) 计算结果显示, 17 世纪北太平洋区存在强的正磁异常, 此后磁异常逐渐减弱, 20 世纪变为弱异常区, 这一现象属于非偶极子场确实存在的变化特征, 还是由于历史观测资料有限, 导致主磁场模型误差太大产生的? 要对这一问题做出肯定的回答, 可能需要对太平洋地区的多种地球物理资料综合研究才能确定。有的研究者根据 17 世纪航海记录的磁偏角资料和夏威夷熔岩的古地磁测量的分析, 认为 17 世纪北太平洋地区确实存在强正磁异常^[16, 17]。

(4) 主磁场起源于地球外核的流体运动过程, 观测和分析都表明主磁场随时间缓慢变化。对主磁场时空变化规律的研究, 不仅可以搞清地磁场本身的变化特征, 而且是追踪地球内部物质运动的重要线索。本文对反映主磁场变化的主要参数的计算和分析, 对深入研究地磁场起源的发电机理论、外核和

核幔界面的流体运动规律提供了基本参数和信息。

参考文献 (References) :

- [1] International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Division Working group 8. International Geomagnetic Reference Field 2000 [J]. *Geophys J Int* 2000, 141: 259-262.
- [2] Barraclough D R. Spherical harmonic analyses of the geomagnetic field for eight epochs between 1600 and 1910 [J]. *Geophys J R Astron Soc* 1974, 36: 497-513.
- [3] Thompson R, Barraclough D R. Geomagnetic secular variation based on spherical and cross validation analyses of historical and archaeomagnetic data [J]. *J Geomag Geoelectr*, 1982, 34: 245-263.
- [4] Fraser-Smith A C. Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their pole, 1600-1985 [J]. *Reviews of Geophysics*, 1987, 25(1): 1-16.
- [5] Wei Zigang, Xu Wenyao. Westward drift of the geomagnetic anomaly in east Asia [J]. *Chinese J Geophys*, 2000, 43(1): 45-52. [魏自刚, 徐文耀. 东亚大陆磁异常的西向漂移 [J]. *地球物理学报* 2000, 43(1): 45-52.]
- [6] Yukutake T. The westward drift of the magnetic field of the Earth [J]. *Bull Earthquake Res Inst*, 1962, 40: 1-165.
- [7] Kang Guofa, Hu Jiafu, Zhai Yingtian, et al. Global changes of the geomagnetic westward drift since 1900 [J]. *Journal of Yunnan University* 2000, 22(4): 297-301. [康国发, 胡家富, 翟应田, 等. 1900 年以来地磁场西向漂移的全球特征 [J]. *云南大学学报* 2000, 22(4): 297-301.]
- [8] Richmond A D. Relation of the westward drift of the geomagnetic field to the rotation of the Earth's core [J]. *J Geophys Res* 1969, 74: 3013-3018.
- [9] Xu Wenyao, Wei Zigang. On westward drift of the Earth's magnetic field [J]. *Prog Geophys* 1999, 21(4): 45-57. [徐文耀, 魏自刚. 地球磁场的西向漂移 [J]. *地球物理学进展* 1999, 14(2): 44-57.]
- [10] Meyer J. Remark on the secular change in the energy density spectrum of the geomagnetic field [J]. *J Geomag Geoelectr*, 1986, 38: 165-169.
- [11] Nevanlinna H. Notes on global mean-square values of the geomagnetic field and secular variation [J]. *J Geomag Geoelectr*, 1987, 39: 165-174.
- [12] Nevanlinna H. On the drifting parts in the spatial power spectrum of geomagnetic secular variation [J]. *J Geomag Geoelectr*, 1987, 39: 367-376.
- [13] An Zhenchang, Wang Yuehua. Global changes of the non-dipole magnetic fields for 1900-2000 [J]. *Chinese J Geophys*, 1999, 42(2): 169-177. [安振昌, 王月华. 1900-2000 年非偶极子磁场的全球变化 [J]. *地球物理学报* 1999, 42(2): 169-177.]
- [14] Xu Wenyao. Secular variations of the planetary-scale geomagnetic anomalies [J]. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(2): 180-188. [徐文耀. 行星尺度磁异常的长期变化 [J]. *地球物理学报* 2001, 44(2): 180-188.]
- [15] Lin Yunfang, Zeng Xiaopin, Guo Qihua. Analysis of secular variation of non-dipole geomagnetic field in East Asia [J]. *Chinese J Geophys* 1985, 28(5): 482-496. [林云芳, 曾小平, 郭启华. 东亚地区地磁非偶极子场长期变化的分析 [J]. *地球物理学报*, 1985, 28(5): 482-496.]
- [16] Yukutake T. The geomagnetic non-dipole field in the Pacific [J]. *J Geomag Geoelectr*, 1993, 45: 441-453.
- [17] Hodder B M. Geomagnetic secular variation since 1901 [J]. *Geophys J R Astron Soc* 1981, 65: 763-776.
- [18] Xu Wenyao, Wei Zigang, Ma Shizhuang. Dramatic variations in the Earth's main magnetic field during the 20th century [J]. *Chinese Sci Bull* 2000, 45(14): 1563-1566. [徐文耀, 魏自刚, 马石庄. 20 世纪地磁场的剧烈变化 [J]. *科学通报* 2000, 45(14): 1563-1566.]
- [19] Coe R S, Gromm R S, Mankinen A. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific non-dipole low [J]. *J Geophys Res* 1978, 83: 1740-1756.

GLOBAL CHANGES OF THE GEOMAGNETIC FIELD DURING 1600—2000 AD

KANG Guo-fa, WU Xiao-pin, HU Jia-fu

(Department of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Based on Thompson and Barraclough magnetic field models and the eighth generation of International Reference Field (IGRF), the main parameters of main magnetic field for the dipole magnetic field, the non-dipole magnetic field, westward drift and geomagnetic spatial power spectrum were calculated and analyzed. The secular variations of each parameter were analyzed. The magnetic moment of magnetic dipole has been connectively decreasing since 1600. Magnetic center has departed the Earth's center quickly and moved 291 km toward northern Pacific since 1800. There is an approximate 30-years periodicity for westward drift. The distribution range is very large, and the intensities are very strong, and the changes are connective for the following 3 non-dipole magnetic anomaly since 1600: Southern Atlantic positive anomaly, African negative anomaly and Oceania negative anomaly. Eastern Asian positive anomaly and Northern American positive anomaly are non-dipole magnetic anomaly formed gradually after 1700. There is a very strong positive anomaly in the Northern Pacific during the 17th century.

Key words: Geomagnetic reference field models; Dipole and non-dipole magnetic field; Westward drift; Geomagnetic field spatial power spectrum.