

郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 地磁场长期变化特征及机理分析. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1649~1657

Guo F X, Zhang Y J, Yan M H. The secular variation characteristics and mechanisms of geomagnetic field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1649~1657

# 地磁场长期变化特征及机理分析

郭凤霞<sup>1</sup>, 张义军<sup>2</sup>, 言穆弘<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

<sup>2</sup> 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘 要** 将地磁场的总变化分为三部分: 偶极场自身变化, 非偶极场自身变化及非偶极场磁斑区通过对核幔边界(CMB)层环电流的调制来影响偶极场的变化. 本文利用国际地磁参考场模型(IGRF)1900~2000 计算分析了地球不同深度地磁场分布及长期变化特征, 且讨论了变化的可能机制. 可以推论, 地磁场西漂和倒转不仅是非偶极场引起, 同时与偶极场有密切关系.

**关键词** 地磁场, 地磁极, 偶极矩, 等效电流, 长期变化

**文章编号** 0001-5733(2007)06-1649-09

**中图分类号** P318

**收稿日期** 2007-01-12, 2007-05-23 收修定稿

## The secular variation characteristics and mechanisms of geomagnetic field

GUO Feng-Xia<sup>1</sup>, ZHANG Yi-Jun<sup>2</sup>, YAN Mu-Hong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

<sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract** The variations of geomagnetic field are divided into three parts, the spontaneous variations of dipole and non-dipole geomagnetic fields, and the dipole geomagnetic field variation resulting from geomagnetic anomaly areas of non-dipole field through modulating the ring current in CMB. The secular variation characteristics and distributions of geomagnetic field at different depths are calculated and analysed in this paper by using the model of International Geomagnetic Reference Field (1900~2000). Possible mechanisms are discussed. It can be concluded that the westward drift and reverse of geomagnetic field are not only resulted from non-dipole field, but also dipole.

**Keywords** Geomagnetic field, Geomagnetic pole, Dipole moment, Equivalent current, Secular variation

## 1 引 言

地磁场变化的频率覆盖范围从秒量级到百万年以上量级. 短期变化通常与外层空间活动(电离层的变化和太阳活动等)有关, 长周期变化一般来自地球内部原因. 研究长周期变化可深入了解地磁场与地球内部物理过程, 尤其是与核幔边界(CMB)流体

动力学之间的相互联系<sup>[1,2]</sup>. 早期研究以磁偶极场为主, 利用古地磁学方法从考古样品、湖海沉积、火山熔岩等介质间接推测地表磁场特征. 此后随着全球地磁场观测网络的建立, 在观测资料基础上, 利用地磁场参考模式可反演地磁场时空分布, 且可伸展到地球内部各个深度, 因此长周期变化研究开始转向非偶极场变化.

很多研究揭示了在 CMB 层南北半球上存在很

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40605002, 40575002)资助.

**作者简介** 郭凤霞, 女, 1977 年生, 博士生, 2000 年毕业于云南大学地球科学系. 主要从事大气电学方面研究工作. E-mail: guofx@lzb.ac.cn

多“磁斑区”，即在磁偶极场背景上，叠加许多尺度较小的非偶极场，有的强度很大，甚至是反极性的，从而形成许多异常磁斑区<sup>[3,4]</sup>。20 世纪 90 年代以来建立了转换场形态学模式，即利用等价地心偶极场磁极位置(虚地磁极 VGP)的分布特征来研究长期变化。这种研究的可靠性目前尚属争论<sup>[5~7]</sup>。古地磁研究给出了地磁偶极场长期变化特点：偶极矩以年速率 0.05% 减小，地磁极沿经圈平均每年西移 0.05°。长此下去，地磁场应有较为规则的极性倒转周期，但事实上，倒转周期很不规则。徐文耀等<sup>[4]</sup>认为地磁极倒转是非偶极场反极性磁斑区发展的结果。本文利用国际地磁参考场模型(IGRF) 1900~2000<sup>[8]</sup>，并引入与偶极场等效的位于 CMB 层的大尺度环形电流模式，研究地表及 CMB 层磁场和电流结构，尤其区分了偶极场和非偶极场自身变化特点，并讨论偶极场变化与地磁极极性倒转的可能物理联系。

## 2 地磁场长期变化特征

### 2.1 计算方案

利用国际地磁参考场模型(IGRF)可以描述地磁场分布及长期变化特征<sup>[8]</sup>。

在球坐标中求解磁位的拉普拉斯方程：

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \left[ g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right] P_n^m(\theta), \quad (1)$$

式中， $r, \theta, \lambda$  是地心球坐标系的地心距、余纬和经度， $a = 6371.2 \text{ km}$ ，是地球半径， $P_n^m(\theta)$  是缩合 Legendre 函数， $g_n^m$  和  $h_n^m$  是由观测资料得到的地磁场球谐系数。垂直方向的地磁场为

$$H_r = -\frac{\partial V}{\partial r}, \quad (2)$$

截断水平取  $N=8$ ，基本上反映了地磁总场的分布和变化特征，精度可以达到  $0.1 \text{ nT/a}$ 。

### 2.2 地磁场全球分布特征

图 1 是利用 1900~2000 年 IGRF 计算的地表(距地心  $6371.2 \text{ km}$ )和核幔边界 CMB(距地心  $3485.2 \text{ km}$ )地磁场垂直分量的全球分布。 $N=1$  为地磁偶极场， $N=8$  还包含了非偶极场。

很多分析表明西漂主要表现在非偶极场部分，很多研究也只计算了非偶极子磁场的漂移，但是在地磁场中，偶极场占了总量的 90%。图 1(a1, b1, c1, d1)是垂直地磁偶极场全球分布，从图可见，CMB 处

值平均比地表约大一个量级，但二者呈现相似规则的波形分布，有很好的南北对称性，且北地磁极偏西于北极。由于磁轴和地理轴不重合，地理赤道不是零垂直地磁场线，沿赤道在西半球有最大垂直磁场，地表为  $1.27 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $69^\circ \text{W}$ , 1900 年)，而在东半球有最小垂直磁场，地表为  $-1.27 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $111^\circ \text{E}$ , 1900 年)，即沿赤道线正负地磁场交替变化且东西波形对称。在 CMB 层有同样结构，分别为  $7.76 \times 10^{-5} \text{ T}$  和  $-7.76 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，这种结构符合地磁偶极场总体分布特点。计算得到 1900~2000 年期间偶极场波形西移，值发生变化。例如在 2000 年，沿赤道线最大和最小垂直磁场值在地表分别为  $1.093 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $72^\circ \text{W}$ )， $-1.093 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $108^\circ \text{E}$ )，在 CMB 层分别为  $6.679 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $72^\circ \text{W}$ )， $-6.679 \times 10^{-5} \text{ T}$  ( $108^\circ \text{E}$ )，平均每年偶极场波形向西移约  $0.03^\circ$ ；百年内两个深度分别减小了 14.17% 和 13.9%，平均每年约减少 0.14%。文献[4]讨论的西漂现象是一种非偶极漂移，不同磁斑区有不同漂移，不具有全球性，完全是一种局地作用，也无周期性。有研究表明，在几百万年内，平均每隔二、三十万年地磁场倒转一次，也有几千年的倒转过程。本文作者认为地磁偶极场长期变化是一种全球性变化机制引起的，最后导致地磁场反转，有相对稳定的反转周期，由于非偶极场的叠加作用，使反转周期发生变化，而后的局地作用很大，所以反转周期变化很不规则。从图 1 可见，非偶极场导致总地磁场波形分布很不规则。在地表，波形发生微弱变形；在 CMB 处，波形发生强烈变化，出现很多正性和负性磁斑区，且在百年内，磁斑区强度和面积变化很大，显然这是非偶极成分的作用，关于其机理有很多讨论<sup>[4]</sup>，主要是 CMB 处局地因素所致，可能是一些中小尺度局地涡旋电流和磁扩散的作用。

### 2.3 地磁极磁场变化特征

表 1 是不同深度地磁极处地磁场垂直分量的年代变化，可见，无论哪个深度， $N=1$  的计算值南北呈很好的对称，且随深度增加值增大，CMB 值比地表约大 6 倍。

1900~2000 百年内，不同深度地磁极处偶极垂直磁场减小比例相同，平均减小了约 6.4%，即  $0.064\%/a$ 。这意味着百年内存在一个较为稳定的全球性机制作用，使其发生相应变化。对于  $N=8$ ，南北失去对称性且变化不规则，这是非偶极场作用。在北地磁极，非偶极部分使总磁场减小，且随深度增加减小越多，地表非偶极场为  $-0.744 \times 10^{-5} \text{ T}$  约减

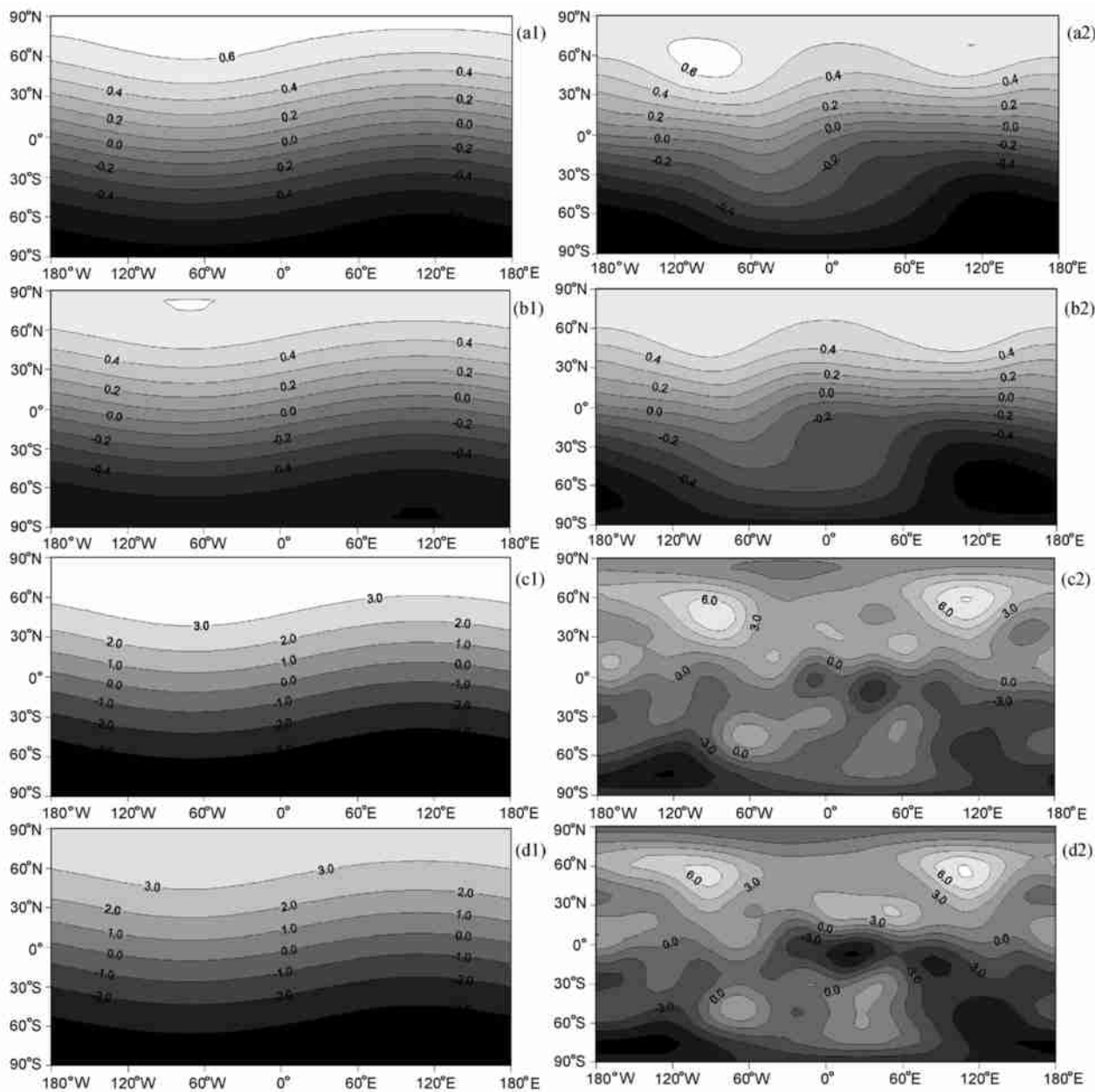


图 1 地磁场垂直分量( $10^{-4}\text{T}$ )分布

(a1,a2)地表 1900 年  $N=1$  和  $N=8$ ; (b1,b2)地表 2000 年  $N=1$  和  $N=8$ ; (c1,c2)CMB 1900 年  $N=1$  和  $N=8$ ; (d1,d2)CMB 2000 年  $N=1$  和  $N=8$ .

Fig.1 The distribution of perpendicular component ( $10^{-4}\text{T}$ ) of geomagnetic field

(a1,a2)  $N=1$  and  $N=8$  in the earth's surface in 1900; (b1,b2)  $N=1$  and  $N=8$  in the earth's surface in 2000; (c1,c2)  $N=1$  and  $N=8$  in the CMB in 1900; (d1,d2)  $N=1$  and  $N=8$  in the CMB in 2000.

少了 11%(1900 年),CMB 为  $-37.4863\times 10^{-5}\text{T}$ ,减少了 95%,也就是说,1900 年地表仍以偶极场为主要成分,而在 CMB 处非偶极场已与偶极场相当,且为反极性. 其作用是减弱北地磁极总地磁场. 结合图 1(c2,d2)可见,在 CMB 层,北极附近有一块反极性磁斑区,地磁北极总场减少是该磁斑区的作用. 从 1900 年到 1940 年,该磁斑区的影响逐年减弱(从

95.4%减小到 89%),此后一直到 2000 年影响不断增强,达到 96.4%. 徐文耀等<sup>[4]</sup>计算了该磁斑区的面积和垂直伸展的变化,在百年内变化较平稳,仅在 1950 年有一个小波动,与本文北地磁极的变化一致,说明 CMB 处北地磁极场主要受该磁斑区控制. 对于地磁南极,非偶极部分使总磁场增加,但增加幅度很低,地表非偶极场为  $-0.0356\times 10^{-5}\text{T}$ ,约增加

表 1 不同深度地磁极处地磁场垂直分量( $10^{-5}\text{T}$ )的年代变化

Table 1 The annual variation of perpendicular component ( $10^{-5}\text{T}$ ) of geomagnetic field in geomagnetic poles at different depths

		地表层 6371.2 km		岩石层底 6291.2 km		软流层底部 5409.2 km		核幔边界(CMB) 3485.2 km	
		N=1	N=8	N=1	N=8	N=1	N=8	N=1	N=8
北 地 磁 极	1900	6.435	5.691	6.684	5.882	10.516	8.507	39.314	1.828
	1910	6.397	5.671	6.645	5.862	10.454	8.496	39.082	2.574
	1920	6.338	5.617	6.583	5.806	10.357	8.430	38.720	3.537
	1930	6.287	5.572	6.530	5.759	10.273	8.373	38.406	4.219
	1940	6.257	5.540	6.500	5.726	10.225	8.314	38.226	3.967
	1950	6.237	5.546	6.478	5.733	10.191	8.324	38.101	3.010
	1960	6.209	5.575	6.449	5.763	10.145	8.390	37.929	4.644
	1970	6.166	5.612	6.404	5.803	10.075	8.462	37.668	2.783
	1980	6.115	5.644	6.351	5.837	9.992	8.543	37.356	2.407
	1990	6.064	5.613	6.298	5.805	9.908	8.485	37.044	1.365
	2000	6.023	5.600	6.256	5.792	9.842	8.472	36.796	1.500
南 地 磁 极	1900	-6.435	-6.471	-6.684	-6.726	-10.516	-10.700	-39.314	-42.711
	1910	-6.397	-6.417	-6.645	-6.670	-10.454	-10.620	-39.082	-42.747
	1920	-6.338	-6.357	-6.583	-6.608	-10.357	-10.540	-38.720	-42.813
	1930	-6.287	-6.307	-6.530	-6.557	-10.273	-10.490	-38.406	-43.360
	1940	-6.257	-6.267	-6.499	-6.517	-10.225	-10.440	-38.226	-43.780
	1950	-6.237	-6.256	-6.478	-6.508	-10.191	-10.520	-38.101	-51.700
	1960	-6.209	-6.173	-6.449	-6.420	-10.145	-10.310	-37.930	-44.460
	1970	-6.166	-6.067	-6.404	-6.307	-10.075	-10.100	-37.668	-41.670
	1980	-6.115	-5.949	-6.351	-6.184	-9.992	-9.880	-37.356	-39.850
	1990	-6.064	-5.858	-6.298	-6.089	-9.908	-9.720	-37.044	-39.400
	2000	-6.023	-5.791	-6.256	-6.020	-9.842	-9.640	-36.796	-42.390

0.55%,CMB 为  $3.3967\times10^{-5}\text{T}$  约增加 8.6%,所以主要还是以偶极场为主. 地磁南极附近主要受变形的偶极场控制,非偶极部分影响还不足以形成正极性磁斑区,而南非附近的反极性磁斑区因离地磁南极较远故影响很小,这说明磁斑区的影响局地性强. 非偶极场的百年变化在不同深度相差很大,CMB 层变化最大(平均 95%),随着向地表伸展而影响减弱,在软流层平均为 19%,岩石层 12%,地表为 11%,对于同一层次,百年内变化有起伏,有增减,变化速率也不同,南北不对称. 这些现象说明,形成偶极场变化的是一种全球性机制,非偶极场变化是局地机制,即局地产生的不同“磁斑区”的作用. 由于磁斑区的长期变化,尤其是通过这些区域的磁通量变化,说明“磁冻结假设”在这些区域已不能成立,即在磁斑区发生磁扩散,这是一种“汇”的解释,即由于磁扩散作用使磁斑区内磁力线逐渐疏散向外扩散,但对整个地球系统而言,总磁场没有发生变化,只是改变了分布. 在北半球正极性垂直磁场背景下,地理北极附近出现一个反极性磁斑区,从磁扩散概念,此负极性磁场是由周围正极性区域扩散而成,或者说是由于该区电导率较低,通过磁扩散把正极性磁

力线扩散出去,这种磁扩散解释有点勉强. 此外,是否还存在一种“源”的作用,即磁斑区内存在一种环形旋转的局地小尺度涡旋电流,产生局地磁场. 近代卫星观测也证实了这些地下涡旋的存在(科学时报新闻报道,2002 年 4 月 17 日). 在南半球负极性垂直磁场背景下出现两块强度较大的正极性磁斑区,一块位于南美洲南部,另一块位于非洲南端到南极洲之间(图 1(d2)),这些反极性磁斑区使偶极场发生变形,可能也是一种“源”的作用,是由局地涡旋产生.

2.4 地磁偶极位置变化特征

图 2 是利用地磁偶极公式( $N=1$ )计算出的地磁北极位置的年代变化. 从古地磁研究,偶极子磁极沿纬圈以平均每年  $0.05^{\circ}$  经度的速率向西移动. 但从图 2 可见,在 1900~1930 年期间地磁北极沿纬圈向东移动,幅度  $0.01\sim0.03(^{\circ})/\text{a}$ ,此后沿纬圈向西移动,从 1930~1950 年移动较小,约  $0.02(^{\circ})/\text{a}$ ,此后移动加快,平均约  $0.06(^{\circ})/\text{a}$ ,且在不同深度计算磁极位置的年代变化都相同. 这种百年内的东西摆动可能是偏心磁矩和地球为椭球体所致. 由于地磁偶极在不同深度的变化相同,故不可能是 CMB 处的局

地因素所致. 除了经度变化外, 磁极还有微弱的纬度变化, 1900~1960 年变化很小, 此后纬度随年代逐渐增加, 从  $0.01(^{\circ})/\text{a}$  (1960~1970) 到  $0.04(^{\circ})/\text{a}$  (1990~2000). 所以偶极场在西漂的同时有向北的微弱漂移, 且在某些年代出现微弱东漂.

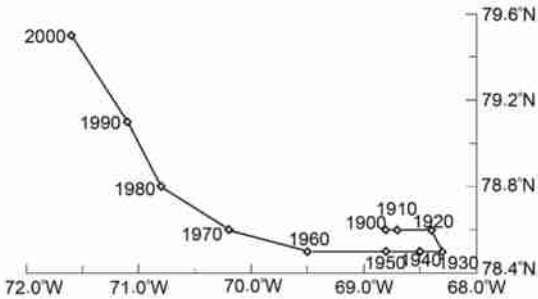


图 2 地磁北极位置年代变化(1900~2000 年)  
Fig.2 The position variation of north geomagnetic pole (1900~2000)

2.5 偶极矩和偶极环形电流变化

从图 1 分析可见,  $N=1$  的垂直地磁场是一种全球性规则变化磁场, 类似于磁偶极子场, 由此可以用一个磁偶极子来等效, 即  $N=1$  的地磁场可以认为是由一个位于地心处的磁矩为  $M$  的磁偶极子产生, 
$$M = a^3 \left[ \left( g_1^0 \right)^2 + \left( g_1^1 \right)^2 + \left( h_1^1 \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$
 及相应磁轴方向: 
$$\text{tg } \lambda = h_1^1 / g_1^0, \quad \text{tg } \theta = \left[ \left( g_1^1 \right)^2 + \left( h_1^1 \right)^2 \right]^{1/2} / g_1^0. \quad (4)$$

地球形成初期, 由于宇宙电磁场作用, 原始地磁场产生, 若无动力维持, 则在时间长河中地磁场会衰减而消失, 而地核内部的铁磁性物质由于其温度已远超过居里温度, 故早已失去铁磁性, 所以地磁场能够维持的主要动力来自地球内部的各种电流系统. Shankland 等<sup>[9]</sup>给出外地核流体电导率为  $3 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 下地幔最大电导率  $3 \sim 10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 二者相差约 5 个量级, 所以 CMB 处会发生大量电荷堆积, 在某种

动力作用下, 电荷发生运动而形成电流. 据电磁学原理, 一个磁矩为  $M$  的偶极子可用一个电流为  $J$  的环形电流来等效, 磁矩位于环形电流圈中心. 离中心距离为  $Z$  的磁轴上的垂直磁场为

$$H_z = \frac{JR^2}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

$R$  为环形电流圈半径. 当  $Z \gg R$  时, 磁矩  $M$  和电流  $J$  有关系:  $M = JS$ ,  $S = \pi R^2$  为环形电流圈面积, 当  $R$  较大时, 上述关系式不成立, 但存在量纲关系, 故引入系数  $A$ , 即  $M = A J \pi R^2$ , 无量纲系数  $A$  是测点距离  $Z$  的函数. 所以, 从偶极场全球波形特征来看, 它可以用位于 CMB 处的全球环形电流来等效, 环形圈半径  $R = 3485.2 \text{ km}$ . 利用磁轴上地磁场垂直分量的计算值可以计算电流  $J$  和系数  $A$ , 对于每个层次的计算假定  $A$  为常数. 以 1900 年为例, 计算得到  $M = 8.3215 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , 从地表磁极处  $H_z$  计算得到  $A = 0.0537$ , 相应  $J = 4.058 \times 10^{10} \text{ A}$ ; 从 CMB 层磁极处  $H_z$  计算得到  $A = 0.0281$ , 相应  $J = 7.75 \times 10^{10} \text{ A}$ . 所以在上述研究距离范围内,  $A$  的变化仅两倍之差, 电流亦然. 在此误差范围之内可取  $A$  的平均值来计算平均电流强度  $J$ . 计算得到地磁偶极矩  $M$  和环形电流  $J$  也存在长期变化.

从图 3 可见, 磁矩从 1900 年的  $8.32 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  到 2000 年的  $7.79 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , 百年内减少了  $0.53 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ , 比例为 6.37%, 年减小率为  $0.0637\%/\text{a}$ , 比古地磁标准的平均值 ( $0.05\%/\text{a}$ ) 略高些, 与徐文耀等<sup>[10]</sup>的计算一致. 相应环形电流强度从  $5.91 \times 10^{10} \text{ A}$  减小到  $5.53 \times 10^{10} \text{ A}$ , 百年内减少了  $0.38 \times 10^{10} \text{ A}$ , 年减小率为  $0.0643\%/\text{a}$ . 二者年减小率差别是由于在计算电流  $J$  时系数  $A$  的变化. 从图 3 还可见, 磁矩和电流的变化在百年内很规则, 基本上以同样变率做线性变化, 仅在 1920~1950 年期间稍有波动, 因此这是一种全球性变化而不是局地性

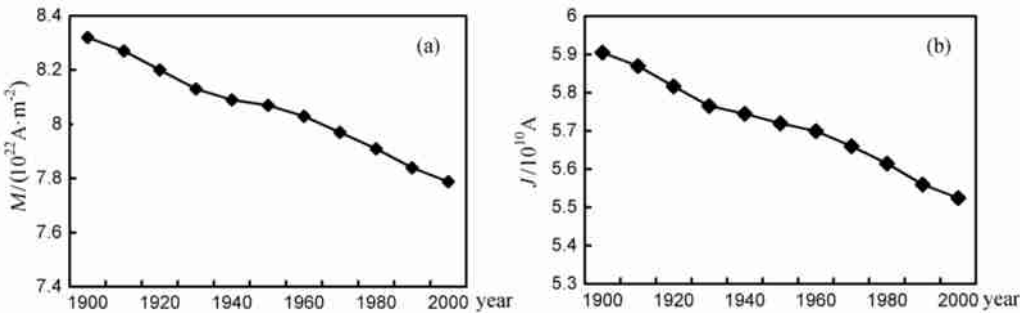


图 3 1900~2000 年间地磁偶极矩(a)和环形电流(b)变化  
Fig.3 The variation of (a) geomagnetic dipole moment and (b) ring current during 1900~2000

作用,且较大可能是来自地球外部原因。

### 3 机制讨论

由于地球内部高温,其已失去永久磁性,但在含有少量铁磁性物质的岩石中,在其形成过程中会获得微弱的永久磁性,即“自然剩磁”。例如火山岩因含有铁磁性物质(如磁铁矿)在其冷却到居里温度以下时,就获得了地球磁场的永久磁性。对于剩磁的古地磁研究,揭示了地球磁场的变化历史。研究指出,地表磁场基本上是一个偶极子,和当今地磁场相同。偶极子指向与地球转动轴指向较一致。在地球历史中,地磁场发生过多次反转,从现在到前 0.72 百万年期间地磁场处在当前方向上,前 0.72 到前 2.5 百万年期间地磁场是反向的,而前 2.5 到前 42 百万年期间地磁场发生过很多次极性反转<sup>[11]</sup>。地磁场的这种变化,说明地球内部存在着一种动力机制,它维持着地球磁场。于是地核发电机概念被提出,由于液态地核的黏滞性很小,在地转流作用下形成环绕地轴旋转的环形液流,因此一种较为简单的对称双圆盘发电机模型被提出<sup>[12]</sup>,它由两个对称的圆盘发电机组成,其中一个发电机产生的电流使另一个磁化。由于地核流的极低黏滞性,其流动无疑是一种湍流,且发电机的动力学性态呈现出一种混沌式性态,其变化相当复杂。考虑到液态外核由铁组成,故在地核条件下它是电导体,地核流形成了环形电流并产生地磁场。我们认为外核流体主要集中在 CMB。在 CMB 上存在着很大电导率梯度<sup>[9,13]</sup>,有大量带电粒子从外核颠倒流向地幔,在 CMB 上堆积电荷,形成一定厚度的带电球壳。在地转力作用下,这些带电粒子环绕地磁轴而旋转形成环形电流,从而维持了地磁场。对地表地磁场做谐波分析,发现其主要分量来自于地层内两个电流圈:一个是软流层和岩石层交界处,另一个是 CMB 处<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 核幔边界(CMB)特性

从上所述,在地转力的作用下,CMB 上形成环绕磁轴旋转的环形电流,从而形成地磁场。此外,带电粒子在地磁场  $\mathbf{B}$  作用下会在南北半球相应两个镜点之间作往返螺旋运动,且同时在某些外力  $\mathbf{F}$  (例如磁场梯度力、离心力)作用下将作纬向运动  $\mathbf{V}_D$ ,也产生环形电流,这里  $\mathbf{V}_D = \mathbf{F} \times \mathbf{B} / (QB^2)$ ,  $Q$  是粒子电荷量。显然,  $\mathbf{F}$  与带电粒子初始动能有关。在知道初始动能情况下可以计算  $\mathbf{V}_D$ ,即环形电流。所以地磁场形成了环形电流,而环形电流又维持了

地磁场,这是一种“自维持”机制。且稳定的环形电流形成的地磁场是偶极场。矿物物理实验<sup>[15]</sup>表明:核幔之间存在着很大的温度梯度和密度梯度,在 CMB 上密度差可达到  $4.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,且分布着厚度约 200 km 的热界线层,此外,由于地核和地幔的自转差异,在 CMB 上有角动量交换等。因此,在 CMB 上,很多物理量有很大的横向不均匀性,不同区域具有不同的动力、电热和化学过程,尤其是球壳上的电荷分布很不均匀。近代卫星观测指出,CMB 上存在着多个电荷聚集区,它是由作涡旋运动的熔融铁流组成,不同旋转方向导致地磁场加强或减弱,是一个磁异常区,故而又称“磁斑区”,CMB 上有很多不同极性的“磁斑区”,它们产生的地磁场是非偶极性,可以影响 CMB 的地磁场,本文的计算已说明了 CMB 场中非偶极部分已占很大比重。根据功率谱分析,由于岩石层和地幔的屏蔽作用,对地表地磁场影响很小,而且其作用主要表现在非偶极场部分,即截断水平约  $N > 15$  之后<sup>[3]</sup>。因此,在 IGRF 计算中取截断水平  $N = 10$  得到的地表地磁场只能反映偶极场,不包含非偶极场部分,故没有屏蔽影响。

地磁场的变化从秒量级到百万年量级,周期小于 5 年的变化一般来自地球外部原因,而长周期变化是由地球内部原因引起。对于短周期的外部原因(太阳活动等)可以导致地表地磁场发生相应变化,例如磁暴、磁异常等,但由于屏蔽作用,对 CMB 地磁场无影响。同样“磁斑区”的短期变化对地表地磁场也无影响。对于地磁场长周期变化(通常在 10 年以上),屏蔽已失去作用。“磁斑区”强度和面积的变化会影响到地表地磁场。在时间长河中,“磁斑区”会向地表方向伸展,从而导致地磁场长期持续变化,甚至使地磁场反转。这是叠加在地磁偶极场上的非偶极部分增大的结果。这是一种比较经典的地磁场长期变化机制。

我们将从另一角度即地磁偶极场的变化来讨论长期变化原因。从前所述,可以确立一种观点,即地磁场是由地球内部尤其是核幔边界上的环形电流产生,其中非偶极部分是“磁斑区”的作用。事实上,地表地磁场有年际变化特征,地磁极位置以平均  $0.05 (^{\circ})/\text{a}$  的速率减小(本文计算  $0.064\%/\text{a}$ ),这是偶极场的自身变化,显然,这种长周期变化不可能来自“磁斑区”(屏蔽作用),也不可能来自外部原因(太阳活动不规则),只可能来自环形电流变化。这也说明了地磁场和环形电流之间的物理联系。环形电流是 CMB 上各类力,例如科氏力、洛伦兹力、气压梯度

力、重力(密度不均匀分布产生的成分重力)以及黏滯力等共同作用产生的流体运动所致,可以利用方程作定量描述. 当流体运动发生变化时,环形电流发生相应变化. 尽管变化原因有多种说法:外核流体相对于地幔有向西运动;磁流体动力波的向西传播;动力过程的本征振荡以及 CMB 上流线重新排列等<sup>[16~19]</sup>,但效果相同. 通过量纲对比,估算 CMB 上环形电流基本参数如下:

(1) CMB 上环形电流系统是一个半径  $r_2 = 15\text{ km}$  的圆柱体环流圈,圆柱体截面积  $s_2 = 7.07 \times 10^8\text{ m}^2$ ,环流圈半径  $R_2 \approx 3485.2\text{ km}$ ,周长  $l_2 = 2.2 \times 10^4\text{ km}$ .

(2) 环流圈电导率  $\lambda_2 \approx 30\text{ }\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,相应电阻率  $\rho_2 = 1/\lambda_2 = 3.3 \times 10^{-2}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ ,总阻抗  $R_2 = 1.02 \times 10^{-3}\text{ }\Omega$ .

(3) 从地表偶极场测量值计算环形电流强度  $J_{20} = 5.3269 \times 10^{10}\text{ A}$ ,电动势  $E_{20} = J_{20} \times R_2 = 5.43 \times 10^7\text{ V}$ ,且一般假定  $E_2 = E_{20}e^{i\omega t}$ .

(4) 环形电流图自感  $L_{22} = 25.32\text{ H}$ .

3.2 高空辐射带特征

众所周知,在地球磁层空间存在着两条辐射带,这是地球外层空间中被地磁场捕获的带电粒子区域,是太阳风、银河宇宙射线与上层稀薄大气相互作用而产生的高能粒子流区. 它们在地磁场作用下,沿磁力线作螺旋式运动,以地球上一个镜点往复运动到另一个镜点,同时沿水平方向漂移,电子向西,质子向东,于是建立了一个纬向环形电流系统,且类似于 3.1 节所述,也有  $V_D$  流存在. 外层空间活动,例如银河旋臂磁场变化,太阳风以及宇宙线暴发都将导致该电流发生变化. 设想此辐射带和 CMB 上环形电流系统类似变压器上的初、次级线圈,地球及其外层空间类似于铁心,二者必定存在着电磁耦合,初级的变化可被耦合到次级. 尽管耦合很弱,但长时间的积累会起作用,且这种耦合可以避免屏蔽作用,这就是“变压器效应”. 一般辐射带有内外两层,以内辐射带作为高空环形电流系统,是由能量在 30 MeV 以上的质子流组成,下边界高度约 600~1000 km,环流中心高度 3000~5000 km,南北横跨约 80 个磁纬度,环形电流由一个环形圆柱体构成,估算得到基本参数如下<sup>[20]</sup>:

(1) 环形圆柱体半径  $r_1 = 4400\text{ km}$ ,截面积  $s_1 = 6.082 \times 10^7\text{ km}^2$ . 环形电流圈半径  $R_1 = 11371\text{ km}$ . 环形电流圈周长  $l_1 = 71448\text{ km}$ .

(2) 环形电流初始值  $J_{10}$ :

假定地表地磁场 1% 来自外源,且集中体现于  $J_{10}$  上,且假定  $J_{10}$  也是绕地磁场旋转,则利用地磁极处垂直地磁场估算  $J_{10} = 1.8 \times 10^{-6}\text{ A}$ .

(3) 环形电流圈总阻抗  $R_1$ :

由于它主要由等离子粒子构成,又可视作矢碰撞,电导率各向异性且主要是平行电导率,而垂直电导率和漂移电导率很小. 但平行电导率无观测数据,近似以磁晴日时内辐射带能量的计算值 ( $1.3 \times 10^{15}\text{ J}$ ) 估算  $R_1 = 400\text{ }\Omega$ .

(4) 初始电动势  $E_{10} = J_{10} \times R_1 = 7.2 \times 10^8\text{ V}$ ,且  $E_1 = E_{10}e^{i\omega t}$ .

(5) 环形电流圈自感  $L_{11} = 18.29\text{ H}$ .

3.3 变压器效应

地磁偶极场(或环形电流)除了有年际变化外,还有长期或超长期变化,我们认为这是“变压器效应”所致. 假定两个电流圈同轴,即都绕地磁轴旋转,在不考虑所谓的砂钢片加强作用时,计算得到两个电流圈之间的互感系数  $L_{12} = 18.32\text{ H}$ . 显然是很弱耦合,若忽略  $L_{11}$ ,  $L_{22}$  和  $L_{12}$  的时间变化,则耦合方程为

$$\begin{cases} J_1 R_1 + L_{11} \frac{\partial J_1}{\partial t} + L_{12} \frac{\partial J_2}{\partial t} \\ = E_1(t) = (E_{10} + \Delta E_1)e^{i\omega t}, \\ J_2 R_2 + L_{22} \frac{\partial J_2}{\partial t} + L_{21} \frac{\partial J_1}{\partial t} \\ = E_2(t) = (E_{20} + \Delta E_2)e^{i\omega t}, \end{cases} \tag{6}$$

这里  $L_{12} = L_{21}$ ,  $J_1 = J_{10} + \Delta J_1$ ,  $J_2 = J_{20} + \Delta J_2$ , 其中  $\Delta J_1$  来自外层空间活动,例如太阳风、银河悬臂磁场等,它的作用体现于  $\Delta E_1$  中,且总是可以展开成  $\sum E_{0i}e^{i\omega t}$  形式. 引起  $\Delta J_2$  原因很多,例如潮汐力、科氏力、电磁耦合力等,本文只讨论电磁耦合力的影响.

太阳活动,例如黑子爆发、耀斑太阳质子爆发通过电磁耦合可以影响  $J_2$ , 尽管其影响强度大,但是短周期性质,一旦太阳活动结束,这种影响就停止,原影响值会随时间衰减,对地磁场长期变化影响很小.

在方程(6)中,  $E_1(t)$  和  $E_2(t)$  是假定圆频率  $\omega$  以  $e$  的指数形式变化. 事实上,它们的变化很不规则,包括各种频率,但总可以展开成许多  $e^{i\omega t}$  变化形式,故假定有合理性. 方程(6)中电阻、电感及初始值  $J_{10}$ 、 $J_{20}$ 、 $E_{10}$ 、 $E_{20}$  均为已知值,所以,当给定  $\Delta E_1$

(或  $\Delta J_1$ ) 及  $\omega$  后, 方程可以求解, 得到 CMB 上电流变化  $\Delta J_2$ . 分别取变化周期  $T\left(\omega=2\pi\frac{1}{T}\right)$  为 10 日、1 年和 10 年, 且假定  $\Delta J_1=0$ , 即认为高空辐射带电流总是不断在变化(即总是有  $\omega$ ), 但强度变化很小, 可以被忽略, 计算得到通过电磁耦合 CMB 上电流变化 ( $\Delta J_2$ ) 分别为:  $2.5\times 10^5$ 、 $6.5\times 10^3$ 、 $6.5\times 10^2$  A, 当然和初值 ( $J_{20}$ ) 相比很小, 且变化周期越长, 耦合值越小, 但是, 只要变化存在且能持续不断, 其耦合值会被不断积累而不间断, 在时间长河中最终会导致  $\Delta J_2$  的很大变化, 从而影响地磁场.

问题是宇宙空间是否存在这种持续不断的长周期变化? 众所周知, 银河中充满了星际氢云, 存在着两个旋臂区域, 在区域内氢云浓度特别高, 形成相对较高的银河旋臂磁场(约  $10^{-12}$  T), 且两个旋臂磁场方向相反. 当日一地系统进入某一旋臂时, 在持续不断变化的旋臂磁场作用下会有响应, 其影响途径有三种: 1. 直接改变进入地球系统的银河宇宙线通量, 从而变化  $J_{10}$ . 2. 通过对太阳风调制, 改变进入地球的太阳风高能粒子流通量, 从而变化  $J_{10}$ . 3. 通过对太阳磁场调制, 改变进入地球空间的银河宇宙线通量, 从而变化  $J_{10}$ . 由于日一地系统不断地进出不同的旋臂,  $J_{10}$  的变化会被不断积累.

此外, 由于引入  $e^{i\omega t}$  因子, 电流和电位已成复数. 计算表明, 对于长周期变化(即  $\omega$  很小),  $\omega$  对虚部的影响很小, 且强度变化(即  $\Delta J_1$ ) 对耦合影响也很小.

通过大量资料分析, 利用本文提出的“变压器效应”, 可以解释地球表层的各种全球变化<sup>[21]</sup>; 可以解释 30 亿年来地球大旋回( $10^8$  年)的原因; 可以解释高原隆升与夷平的原因( $10^7\sim 10^5$  年), 及与其相伴的季风系统演变; 也可以解释  $10^4$  年气候变化的原因.

## 4 结 论

本文利用国际地磁参考场模型(IGRF)计算了 1900~2000 年期间地磁偶极场和非偶极场时空分布, 最高截断水平  $N=8$ , 结果指出, 地球偶极磁场在全球呈现较为规则的波形分布, 从地表一直到核幔边界(CMB)波形分布基本相似. 在百年内(1900~2000 年)波形变化很小, 其绝对值在 CMB 最大, 且变化为全球性, 根据百年统计, 平均年减小率为

0.064%. 用磁矩置于地球中心的磁偶极子和在 CMB 层上相应环形电流来表征偶极场, 计算其值分别为  $8.32\times 10^{22}$  A·m<sup>-2</sup> 和  $5.91\times 10^{10}$  A(1900), 且在百年内也以 0.064%/a 变率线性减小. 除了地磁偶极场变化之外, 非偶极部分变化很强烈, 且很不规则, 首先产生于 CMB 层, 然后逐步向地表伸展. 地磁总场变化应有三部分组成: 偶极场自身变化, 非偶极场变化及非偶极场通过对核幔边界环形电流的调制来影响偶极场.

## 参考文献(References)

- [1] Bloxham J, Jackson A. Fluid flow near the surface of Earth's outer core. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**(1): 97~120
- [2] Kuang W, Bloxham J. An earth-like numerical dynamo model. *Nature*, 1997, **389**: 371~374
- [3] Bloxham J, Gubbins D. The secular variation of Earth's magnetic field. *Nature*, 1985, **317**: 777~781
- [4] 徐文耀, 魏自刚. 核幔边界反极性磁斑区和地磁场倒转. 中国科学(D), 2001, **31**(8): 617~625  
Xu W Y, Wei Z G. Reverse polarity geomagnetic areas and geomagnetic field transitions. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2001, **31**(8): 617~625
- [5] Laj C, Mazaud A, Weeks R, et al. Geomagnetic reversal paths. *Nature*, 1992, **359**: 111~112
- [6] Constable C. Link between geomagnetic reversal paths and secular variation of the field over the past 5 Myr. *Nature*, 1992, **358**: 230~233
- [7] McFadden P L, Barton C E, Merrill R T. Do virtual geomagnetic pole follow preferred paths during geomagnetic reversals? *Nature*, 1993, **361**: 342~344
- [8] IAGA Division 5, Working Group 8. International geomagnetic reference field 2000. *Geophys. J. Int.*, 1996, **141**(1): 259~262
- [9] Shankland T, Peyronneau J, Poirier J P. Electrical conductivity of the lower mantle. *Nature*, 1993, **366**: 453~455
- [10] 徐文耀, 魏自刚, 马石庄. 20 世纪地磁场的剧烈变化. 科学通报, 2000, **45**(14): 1563~1566  
Xu W Y, Wei Z G, Ma S Z. The severe variation of geomagnetic field in 20<sup>th</sup> century. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 2000, **45**(14): 1563~1566
- [11] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 6093~6095
- [12] Rikitake T. Oscillations of a system of disk dynamos. *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, 1958, **54**: 89~105
- [13] McLeod M G. Magnetospheric and ionospheric signals in magnetic observatory monthly means: electrical conductivity of the deep mantle. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(B7): 13 577~13 590
- [14] Gregori G P. Anthropogenic control of the natural long-term climatic variations: proposal for a discussion on greenhouse effect controlled by geothermal heat flow. *In Sindoni and Wong*, 1991, 353~360



[15] 侯渭,谢鸿森. 美国地球深部合作研究计划. 地球科学进展, 1994, **9**(增刊): 42~102  
Hou W, Xie H S. Cooperation study plan in deep earth in American. *Advance in Earth Sciences*(in Chinese), 1994, **9**(Suppl.): 42~102

[16] Bloxham J, Jackson A. simultaneous stochastic inversion for geomagnetic main field and secular variation II: 1820—1980. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**: 15753~15769

[17] Bloxham J, Gubbins D, Jackson A. Geomagnetic secular variation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1989, **329**: 415~502

[18] Jault D, LeMouél J L. Core-mantle boundary shape: constraints inferred from the pressure torque acting between the core and the mantle. *Geophys. J. Int.*, 1990, **101**(1): 233~241 doi:10.1111/j.1365-246X.1990.tb00770.x

[19] LeMouél J L. Outer core geostrophic flow and secular variation of Earth's magnetic field. *Nature*, 1984, **311**: 734~735

[20] 庄洪春等. 宇航空间环流手册. 北京:中国科学技术出版社, 2000. 138~182  
Zhuang H C, et al. Manual of Circulation in Space Navigation (in Chinese). Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2000. 138~182

[21] 汤懋苍,赵红岩,张存杰等. 天气图预测气候变化的原理和方法. 北京:气象出版社, 2007  
Tang M C, Zhao H Y, Zhang C J, et al. Fundamentals and Methods of Forecasting Climatic Change by Earth-Atmosphere Chart (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2007

(本文编辑 何燕)