

# 近 300 年来的地磁场总能量在地球内部的分布及长期变化\*

白春华, 康国发, 李 伟

(云南大学 资环学院 地球物理系, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 采用 Bloxham J. & Jackson A. 模型(BJ) 和国际地磁参考场模型(IGRF) 从理论上计算并分析了 1690 年以来地磁场能量在地球内部的分布及长期变化. 结果表明, BJ 模型和 IGRF 模型在相同时段内的总能量变化趋势是基本吻合的. 近 300 a 来, 地核以外和地表以外地磁场总能量变化的总趋势是持续衰减的, 但是地表以外的能量衰减速度比地核以外要快约 2.5 倍. 地磁场总能量随谐波阶数  $n$  的变化关系中, 各年代  $n = 1 \sim 8$  阶的能量变化相对稳定. 磁能密度在地球内部的分布是不均匀的.

**关键词:** 地磁场模型; 地磁场能量; 地球内部; 长期变化

**中图分类号:** P 318.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2005)04-0337-06

研究地球磁场能量在地球内部的分布及其长期变化, 有助于弄清地磁场变化的自身规律, 认识地磁场在地球各圈层耦合以及在整个地球动力学过程中的重要作用. 国内外学者用不同的观测资料和处理方法对这一课题进行了很多研究<sup>[1~6]</sup>. 例如, Lowes 引入了地磁场能量密度谱, 用于分析能谱随谐波阶次  $n$  的变化以及推断地磁场源深度<sup>[3]</sup>; 康国发对此也作了相关研究<sup>[4]</sup> 并且还研究了 1900~2000 年期间地球表面的磁能密度及长期变化以及 1690 年以来的地磁场主要参数的变化<sup>[5,6]</sup>; 徐文耀利用 IGRF 模型分析了 1900~2000 年地磁场能量在地球内部的分布及其长期变化<sup>[1]</sup>. 这些研究使用的资料最长为 100 a, 对全面了解地磁场长期变化规律仍存在局限. 地磁场变化是一个长期的历史过程, 20 世纪的地磁场能量变化特征是否能反映更早历史时期的变化仍需深入地研究.

1992 年, Bloxham and Jackson 根据历史地磁观测资料给出了 1690~1990 年每隔 2.5 a 一个的地磁场球谐模型(以下简称 BJ 模型)<sup>[7]</sup>, 这一模型共分为 2 组, 1690~1840 年的模型称为 UFM2, 1840~1990 年的模型 UFM1, 每一模型的截止阶

数为  $N = 14$ . 第 8 代国际地磁参考场(IGRF) 模型包括了 1900~2000 年每隔 5 a 一个的地磁场球谐模型(截止阶数为  $N = 10$ ) 和 2000~2005 年的长期变化模型(截止阶数为  $N = 8$ )<sup>[8]</sup>. 本文根据这 2 种地磁场模型, 计算并分析 1690~2000 年期间地磁场总能量在地球内部的分布及其长期变化, 讨论地磁场总能量随谐波阶次  $n$  的变化规律. 使我们对 300 a 来主磁场能量变化规律有更清楚的认识.

## 1 磁能公式

地球主磁场标量磁位通常表示成球谐函数的形式

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (a/r)^{n+1} \cdot (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\theta), \quad (1)$$

式中  $r, \theta, \lambda$  分别是地心球坐标系的地心距、余纬和经度,  $a$  为地球半径,  $P_n^m(\theta)$  是 Schmidt 形式的缔和勒让得函数,  $g_n^m, h_n^m$  是由观测资料得到的  $n$  阶  $m$  次球谐系数(又叫高斯系数). 地球主磁场强度等于标量磁位的负梯度, 即  $B = -\nabla V(r, \theta, \lambda)$ .

地心距  $b$  到  $c$  ( $c > b > r_{\text{CMB}}$ , CMB 指核幔界

\* 收稿日期: 2004-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40464001); 云南省教育厅科研基金资助项目(03Y186A); 云南大学科研基金资助项目(2003Z006B).

作者简介: 白春华(1981-), 云南人, 硕士生, 主要从事地磁学方面的研究.

面)的空间范围内地磁场总能量,写成如下积分

$$E(b, c, t) = \frac{1}{2\mu_0} \int_b^c \int_0^{2\pi} \int_0^\pi B^2(r, \theta, \lambda, t) \cdot r^2 \sin\theta d\theta d\lambda dr, \quad (2)$$

结合缔和勒让德函数的正交性,对上式积分得

$$E(b, c, t) = \sum_{n=1}^N M_n = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi a^3}{\mu_0} \frac{n+1}{2n+1} \cdot \left[ \left( \frac{a}{b} \right)^{2n+1} - \left( \frac{a}{c} \right)^{2n+1} \right] \cdot \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2], \quad (3)$$

$M_n$  是  $n$  阶球谐函数对应的能量,当  $c \rightarrow \infty$  时,可得到地心距  $b$  以外整个空间范围地磁场总能量表达式

$$E(b, t) \equiv E(b, \infty, t) = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi a^3}{\mu_0} \frac{n+1}{2n+1} \left( \frac{a}{b} \right)^{2n+1} \cdot \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]. \quad (4)$$

## 2 地磁场总能量及其长期变化

由方程(4)可知,只要根据 BJ 模型 1690 年到 1990 年的高斯系数,就可以得出任意地心距以外空间的地磁场总能量,并与据 IGRF 模型的高斯系数得到的结果对比(图 1). 图 1 给出地表( $b = 6371.2$  km)和核幔边界(CMB)( $b = r_c = 3480$  km)以外地磁场总能量  $E(b, t)$  随时间的变化. 图中实线为 BJ 模型,带三角符号的线为 IGRF 模型.

由图 1 可以看出,地核以外地磁场总能量变化一直在减小,从 1690 年的  $7.306 \times 10^{18}$  J 减小到 2000 年的  $6.609 \times 10^{18}$  J, 310 a 间共减小了 9.5%; 地表以外地磁场总能量变化的总趋势也是急剧减小,从 1690 年的  $1.060 \times 10^{18}$  J 减小到 2000 年的  $8.089 \times 10^{17}$  J, 共减小 23.7%, 地表以外比 CMB

以外的总能量衰减快约 2.5 倍. 1840 年前后存在一个跳变,可能是 BJ 模型在 1840 年前后连续性不完全可靠引起的. 此外, BJ 模型和 IGRF 模型地表以外的能量变化吻合得相当一致(见图 1(a)), 而 CMB 以外总能量(图 1(b))变化并不完全重合,这是由于 BJ 球谐模型的截止阶数高于 IGRF 模型. 由公式(1)可以看出,随着地心距的减小,高阶球谐项的贡献也就显现出来. 图 1(b)中, IGRF 模型在 1945~1950 年的能量变化表现出反常的特点,原因是 IGRF 模型在此阶段高阶球谐系数( $n \geq 8$ )误差大所致<sup>[2]</sup>.

图 2 给出 BJ 模型从 CMB 至地表每间隔 100 km 的能量相对于 1690 年的变化和 IGRF 模型相对于 1900 年的变化. 即对于 BJ 模型,把各层不同年代的能量归一化到 1690 年,计算  $E(r, t)/E(r, 1690)$ . 同理,把 IGRF 模型不同年代各层的能量归一化到 1900 年,计算  $E(r, t)/E(r, 1900)$ . 图中  $R_c$  代表 CMB 界面以外的能量,  $R_e$  代表地表以外空间的能量. 从图 2 中可以看出,2 个模型地磁场总能量变化的总趋势都是持续衰减的. 由 BJ 模型的总能量变化率图还可以看出大约在 1770 年,各层曲线相对变化率近似交于一点,表明 1770 年前后地球主磁场变化存在一个转折期.

## 3 主磁场能量谱随谐波阶数 $n$ 的变化

图 3 给出 1690~1990 年每 100 a 间隔的地磁场在地表和 CMB( $r = 3480$  km)处总能量随谐波阶数  $n$  的变化. 可以看出,各阶谐波的能量在 CMB 处大于地表,  $n = 1$  的偶极子项明显大于其它谐波项. 各年代的能量在  $n \leq 8$  时变化趋势基本一致,主要反映地核磁场.  $n = 9 \sim 14$  阶时相对发散,但各阶能量随时间推移略有增大. 表明 BJ 地磁场模型在  $n$  大于 9 阶时的误差较大.

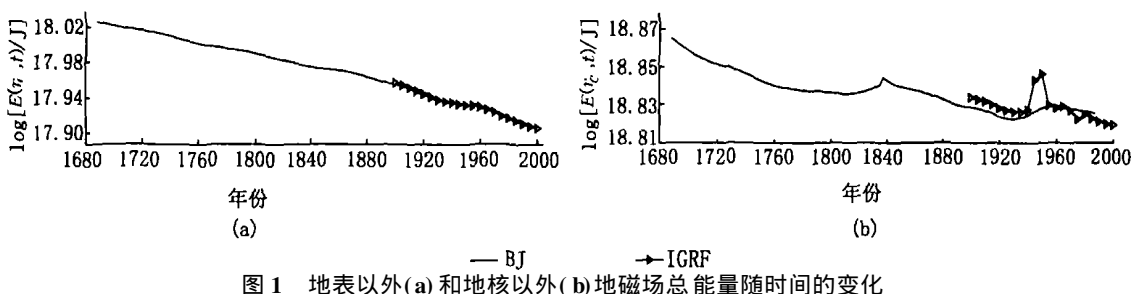


图 1 地表以外(a)和地核以外(b)地磁场总能量随时间的变化

Fig. 1 Time-variation of the total energy of the geomagnetic field beyond the Earth's Surface (a) and beyond CMB (b)

### 4 地球内部各圈层地磁场能量的分布及长期变化

为了区别 CMB 到地表各层地磁场能量变化的差异, 图 4 给出地磁场能量在地下不同深度处各

层的分布, 从 CMB 往上一直到地表, 取各层厚度为 100 km. 实线为 BJ 模型, 带三角形线为 IGRF 模型的能量分布. 结果显示, 除靠近 CMB 的 4 层能量增加, 其余各层能量均在减小, 而且越往地表减小速率越快. 这个结果与 IGRF 模型计算的 20 世纪各年代的变化趋势一致<sup>[1]</sup>.

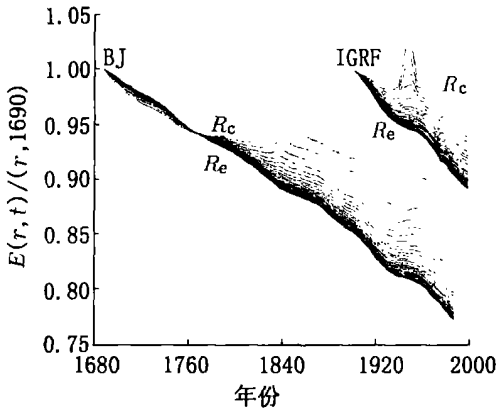


图 2 BJ 模型总能量相对 1690 年的变化和 IGRF 模型总能量相对于 1900 年的变化

Fig. 2 Variations of the geomagnetic total energy normalized to 1690 year for the BJ Model and normalized to 1900 year for the IGRF Model

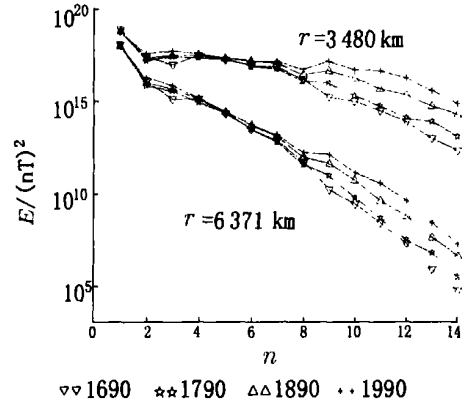
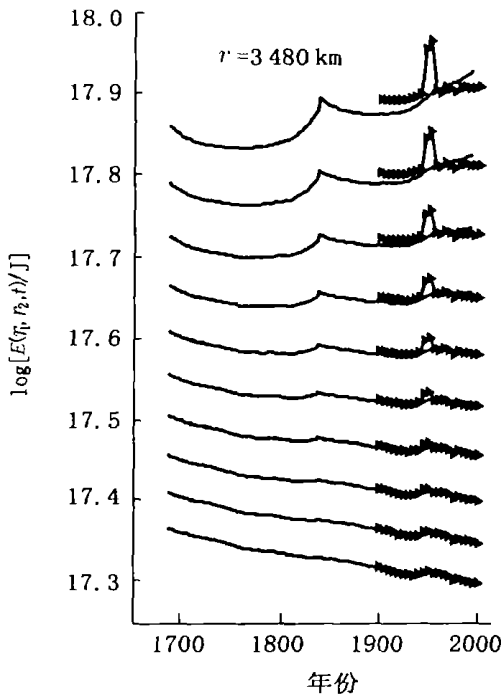
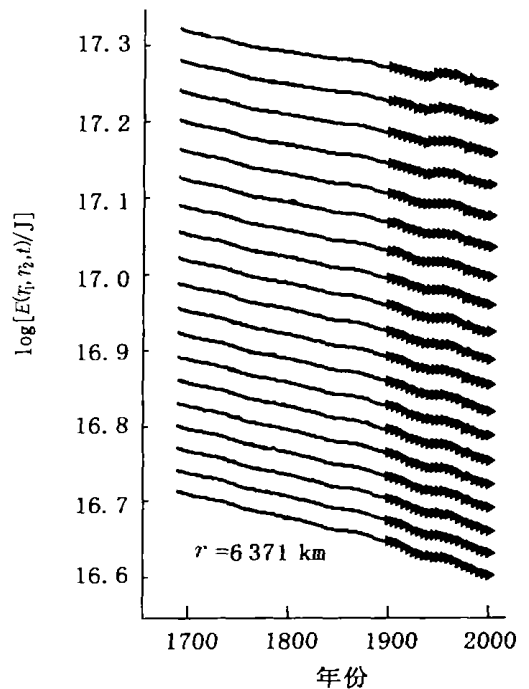


图 3 地表和 CMB 界面处磁场能量随谐波阶数 n 的变化

Fig. 3 The changes with harmonic degree n of the energy at Earth's surface and CMB



(a)



(b)

图 4 从 CMB 到地表各层磁场能量的变化

Fig. 4 Variation of the geomagnetic energy in successive Layers from the CMB to the Earth's surface

为了探讨地磁场能量随深度分布的特点与地球圈层结构的内在联系,分别计算了从 CMB 往上包括下地幔 D''层(地心距  $r = 3480 \sim 3631$  km)和 D'层( $r = 3631 \sim 5671$  km)、过渡层 C 层( $r = 5671 \sim 6021$  km)、上地幔 B 层( $r = 6021 \sim 6321$  km)以及地壳 A 层( $r = 6321 \sim 6371$  km)在内的各圈层的磁能相对于 1690 年的变化(图 5)。如图 5 所显示,除 D''层能量显著增加外,其它各层都减小,其中 D'层在 1950 年左右在经过一个小的增加之后又继续减小。D''层的这种独特变化说明该层是一个特殊的地质层。地震学和矿物物理学研究结果表明,核幔界面是一个热学、力学、化学以及电磁学相互作用很复杂的区域。地核中处于熔融态的铁可能与地幔中的硅酸盐反应,其结果形成物质结构和物理性质都极为复杂的 D''层<sup>[9,10]</sup>。

### 5 地球内部的能量密度的时空变化特征

为便于比较地下各圈层的能量分布,从 CMB 起,将地球分为 10 km 厚的薄层,用各层能量除以各层体积计算出每层的磁能密度  $e(r, t)$ 。图 6(a)表示其磁能密度随地心距的变化,从 1690~1990

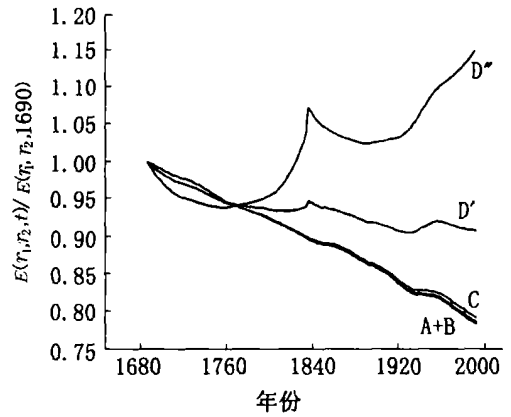


图 5 各圈层能量随时间相对于 1690 年的变化  
Fig. 5 Variations of the geomagnetic energy in different zones

年每隔 50 a 作 1 条磁能密度曲线。各年代的磁能密度变化曲线在 CMB 处稍有不同外,其余地心距的能量密度值几乎重合。各年代磁能密度都随地心距的增大而减小,其中在 D''层区间快速减小。表 1 列出地表和 CMB 的磁能密度值,结果表明磁能密度在 CMB 处远大于地表,例如,1690 年地表的磁能密度是 CMB 处的 1.9%。

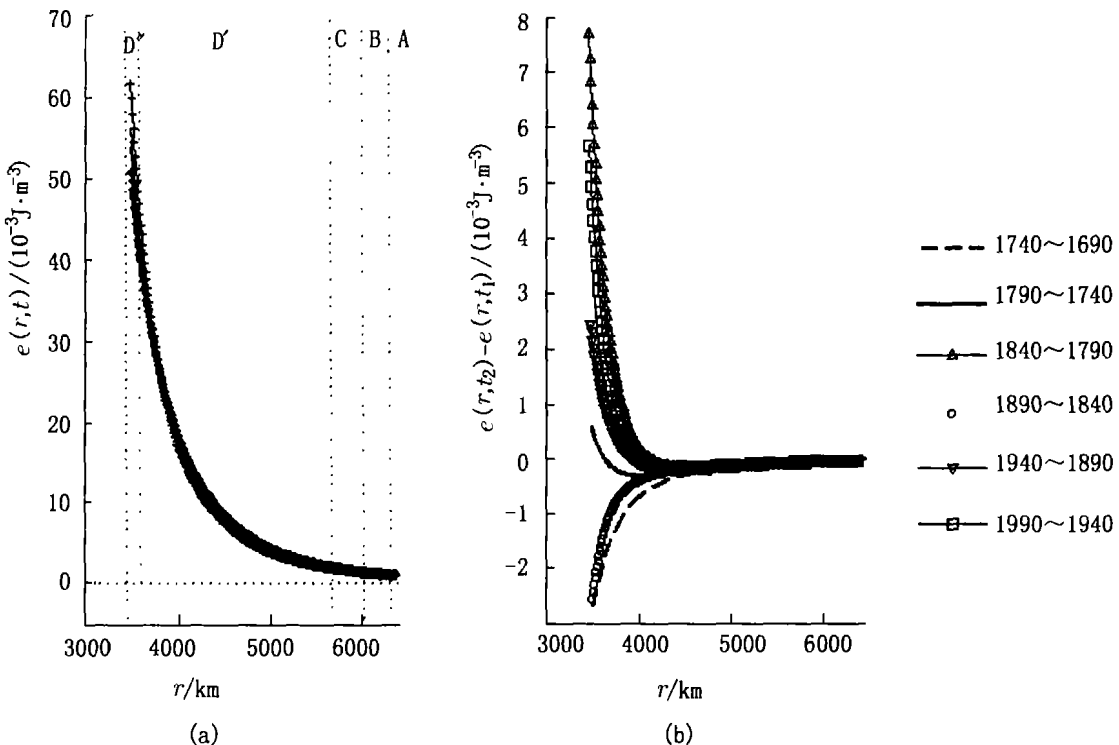


图 6 地球内部磁能密度分布(a)和磁能密度的变化(b)

Fig. 6 Distribution of the geomagnetic energy density in the Earth's interior and time- variations of the energy density

表1 不同时间地表和CMB的磁能密度

Tab. 1 Geomagnetic energy density at the Earth's surface and CMB								( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ )
地心距/km	1690	1740	1790	1840	1890	1940	1990	
3 480	$5.091 \times 10^{-2}$	$4.808 \times 10^{-2}$	$4.868 \times 10^{-2}$	$5.636 \times 10^{-2}$	$5.379 \times 10^{-2}$	$5.623 \times 10^{-2}$	$6.188 \times 10^{-2}$	
6 371	$9.855 \times 10^{-4}$	$9.515 \times 10^{-4}$	$9.179 \times 10^{-4}$	$8.823 \times 10^{-4}$	$8.532 \times 10^{-4}$	$8.108 \times 10^{-4}$	$7.743 \times 10^{-2}$	

图6(b)绘出1690年到1990年每50a间隔的磁能密度差.可以看出,从CMB至地表,不同年代间隔的磁能密度差值有很大区别.其中1740和1690以及1890和1840年的差值在地下深部为负值,磁能密度是减小的.其余年代为正值,磁能密度增加.从地心距约4200km处至地表,各年代的能量密度都接近零值,变化量很小.磁能密度快速变化区域主要在下地幔D''层和D'层下部,其中D''层是主要快速变化区.

## 6 讨论与结论

(1) 本文利用BJ地磁场模型300a的资料和IGRF模型100a的资料,计算了地磁场总能量在地球深部的分布及其长期变化.分析表明,BJ模型和IGRF模型在相同时段内的结果基本一致.

(2) 近300a来,地核以外和地表以外地磁场总能量变化的总趋势是持续衰减的,但是地表以外的能量衰减速度比地核以外要快得多.地磁场总能量随谐波阶数 $n$ 的变化关系中,各年代 $n=1\sim 8$ 阶的能量变化相对稳定,而 $n=9\sim 14$ 阶的能量相对发散,而且CMB处的各阶能量都大于地表处的能量.

(3) 从CMB到地表各圈层的能量分布中,除D''层地磁场能量随时间迅速增加外,D'层、过渡层、上地幔、地壳的总磁能却在减小.各年代的磁能密度在地球内部的分布形式相近.地心距4200km处是磁能密度增大和减小的分界处.D''层和D'层下部磁能密度快速变化,反映出这一区域对地磁场变化的影响起着重要的作用.

(4) CMB磁场的空间分布比地球表面复杂得多,这是因为地磁场的总能量球谐级数表达式中,包含着因子 $(a/r)^{2n+1}$ ,可以看出高阶项随地心距呈指数幂变化.所以,高阶系数的误差对深部磁场位形和磁场能量的计算有不可忽视的影响.BJ模型中CMB以外磁能在1840年处出现一个异常突变,而在较浅部的地壳、上地幔和转换带则看不到异常变化,这是由于地表磁场主要决定于占优势的

低阶分量,而在地下深处和核幔边界,高阶项球谐系数对地磁场能量的分布和变化影响比较大.显然,这种异常的急剧变化并不是真实的长期变化,而是由高阶球谐系数的误差造成的.

(5) BJ模型中,当把各层能量归一化到1690年时,会在1770年左右各条曲线近似交于一点,1770年这个交点究竟有何特殊物理意义还有待下一步的研究.

## 参考文献:

- [1] 徐文耀.地磁场能量在地球内部的分布及其长期变化[J].地球物理学报,2001,44(6):747—753.
- [2] 徐文耀.国际参考地磁场模型中高阶球谐项对地磁场长期变化的影响[J].地球物理学报,2003,46(4):476—482.
- [3] LOWES F J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field and extrapolation to the core[J]. Geophys J R Astron Soc, 1974, 34: 717—730.
- [4] 康国发,吴小平,文丽敏,等.地球主磁场的能量密度谱及其长期变化[J].地球物理学进展,2003,18(1):111—115.
- [5] 康国发.1900~2000年地磁场及长期变化的空间功率谱分析[J].云南大学学报(自然科学版),2001,23(4):262—266.
- [6] 康国发.1600年以来地磁场主要参数的变化特征[J].云南大学学报(自然科学版),2000,22(3):204—208.
- [7] CHRISTOPHER G A, Harrison. An Alternative picture of the geomagnetic field[J]. J Geomag Geoelectr, 1994, 46: 127—142.
- [8] International Association of Geomagnetism and Aeronomy(IAAGA) Division V, Working group 8. International Geomagnetic Reference Field 2000[J]. Geophys J Int, 2000, 141: 259—262.
- [9] 刘青松,朱日祥,潘永信,等.地球外核流体运动与磁场长期变化相互关系的探讨[J].科学通报,1999,44(7):760—764.
- [10] KNITTLE E, JEANLOZ R. Earth's core mantle boundary: results of experiments and temperatures [J]. Science, 1991, 251: 1438—1443.

# Distribution of the total energy of geomagnetic field in the Earth's interior and its secular variation in recent 300 years

BAI Chur hua, KANG Guo-fa, LI Wei

(Department of Geophysics, Institute of Resources and Environment, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** Based on the models of J. Bloxham & A. Jackson(BJ) and the International Geomagnetic Reference Field(IGRF), the distribution of geomagnetic field and its secular variation going back to 1690 year are calculated and analyzed theoretically. The results show that the changing tendencies of the total energy of the two models are basically coincident during the same periods in recent 300 years, the total energy of geomagnetic field is kept decreasing both beyond the Earth's core and the surface, however, the energy decreasing speed beyond the ground is 2.5 times quicker than that beyond the core. The geomagnetic field energy changes with degrees  $n$ , of which the changing relationship shows that the energy changes with degrees  $n = 1 - 8$  every year are relatively stable. The geomagnetic energy density is not well-distributed in the earth's interior.

**Key words:** geomagnetic field models; geomagnetic field energy; Earth's interior; secular variation

\* \* \* \* \*

(上接第 336 页)

### 参考文献:

[ 1 ] 刘屹岷, 吴国雄. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识[ J ]. 气象学报, 2000, 58(4): 500—512.	[ 4 ] 陈宗瑜. 云南气候总论[ M ]. 北京: 气象出版社, 2001.
[ 2 ] 毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷. 季节转换期副热带高压带形态变异及其机制的研究 I : 副热带高压结构的气候学特征[ J ]. 气象学报, 2002, 60(4): 400.	[ 5 ] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[ M ]. 北京: 气象出版社, 2000.
[ 3 ] 汤明敏. 中国夏季风活动与南北半球一些环流系统变化的联系[ A ]. 全国热带夏季风学术会议论文集[ C ]. 1982, 382.	[ 6 ] 王冰, 戴丛蕊, 白林. 热带太平洋和印度洋海温对东南亚降水的影响[ J ]. 云南大学学报(自然科学版), 2003, 25(4): 359—339.

# The relationship between the surface temperature on tropical seas and the western end of the ridge of the subtropical high of Atlantic

WANG Bing, JIAO Ze hong, CHAO Jie

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

**Abstract:** The effect of the SSTA(Sea Surface Temperature Anomaly) of the tropical Pacific, Indian and Atlantic Oceans on the western end of the ridge of the subtropical high of Atlantic is discussed by spectrum analysis, and the optimum time-lags and the key sector of the three oceans corresponding to them are found, which is regarded as the strong signal of west-moving or east-moving of the western end of the ridge. The western end of the ridge of the subtropical high of Atlantic can be regarded as an index of East-Asian monsoons, which have great influence on weather and climate of Yunnan Province in the low latitude plateau.

**Key words:** spectrum analysis; western end of the ridge of the subtropical high of Atlantic; sea temperature; East-Asian monsoon