

康国发,白春华,高国明. 地磁场长期变化和日长十年尺度变化的周期特征. 地球物理学报, 2008, 51(2): 369~375

Kang G F, Bai C H, Gao G M. Periodical characteristics of the geomagnetic secular variation and length-of-day variation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 369~375

地磁场长期变化和日长十年尺度变化的周期特征

康国发¹,白春华²,高国明¹

1 云南大学地球物理系,昆明 650091

2 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘 要 根据历史地磁场模型 GUFM1、第 10 代国际参考地磁场(IGRF10)模型和日长资料,采用小波变换方法,分析了地磁场磁矩、能量、西向漂移等参数的长期变化和日长十年尺度变化的周期分量及其时变特征.结果表明,1800~2005 年期间,偶极子磁场长期变化有 82 年和 48 年准周期分量,它们与日长变化的周期没有直接关系.非偶极子磁场参数的长期变化与日长变化有 66 年和 32 年准周期分量,66 年准周期比 32 年准周期强.在 66 年准周期分量,西向漂移比日长变化超前 8.8 年,非偶极子磁场能量比日长变化滞后 15.6 年.日长十年尺度波动和地磁场长期变化的起源不存在因果关系.

关键词 地磁长期变化,日长,小波变换,周期

文章编号 0001-5733(2008)02-0369-07

中图分类号 P318

收稿日期 2007-09-13 2008-01-08 收修定稿

Periodical characteristics of the geomagnetic secular variation and length-of-day variation

KANG Guo-Fa¹, BAI Chun-Hua², GAO Guo-Ming¹

¹ Department of Geophysics, Yunnan University, Kunming 650091, China

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Based on the historical geomagnetic model GUFM1 and the 10th International Geomagnetic Reference Field models(IGRF10) and the length-of-day data series, the secular variation of some parameters, including geomagnetic moment and its energy and westward drift etc, are analyzed with the wavelet transform method, in addition to the periodical components and time-varying characteristics of decadal length-of-day variation. As the results suggest that, during the period of 1800~2005, the 82-year and 48-year quasi-periodic components are available for the secular variation of dipole magnetic field, which are not directly related to the periodicity of the length-of-day variation. And both the 66-year and 32-year quasi-periodic components can be found for the secular variation of non-dipole magnetic field parameters and length-of-day variation, and the 66-year quasi-periodicity is stronger than the 32-year one. As far as the 66-year quasi-periodic component is concerned, the western drift exceeds the length-of-day 8.8 years; and the non-dipole magnetic field energy lags behind the length-of-day 15.6 years. We consider that the causality between the origins of the decadal length-of-day fluctuation and the geomagnetic secular variation can not be found.

Keywords Geomagnetic secular variation, Length-of-day, Wavelet transform, Periodicity

1 引言

由于地球内外多种因素的影响,表征地球自转速率变化的日长(LOD)存在着多种时间尺度的变化,对应着不同的激发源^[1,2]。周期小于两年的日长变化由大气对流引起^[3],十至几十年的波动统称为日长十年尺度变化,普遍认为起源于流体地核和固体地幔的耦合效应^[4,5]。

地球主磁场起源于地球外核的流体运动,长期变化是它的重要特征之一。从地表磁测资料或地磁场球谐模型出发,对主磁场的强度、能量、磁矩和西向漂移等长期变化的研究,发现了多种周期成分,其中包括 11 年和 22 年左右的太阳周期^[6],30 年和 60 年尺度的周期,几百万年到几千万年的地质周期^[7~11]。这些周期变化对人们研究地核和核幔界面附近流体的运动状态提供了重要的信息。

由于地球主磁场和日长十年尺度变化都与地核的动力作用有关,许多学者对它们之间的相关性和核幔电磁耦合机理进行了大量的探索^[12~14]。Le Mouél 等^[15]分析了 1860~1980 年巴黎地区磁偏角变化与日长变化的相关性,得出磁偏角变化比日长变化超前 5~15 年。Greiner-Mai^[16]的研究表明,地磁场长期变化计算的地核旋转相对角速度与日长变化有 60~70 年的共同谱峰。Voorhies^[17]的研究得出球谐系数 g_1^0 和日长变化呈反相关。Yoshida 等^[18]提出地磁场变化中的低阶扇形成分 ($n \leq 4$) 由日长变化引起。这些研究结果肯定了地磁场变化与日长变化存在相关性。但是,各研究者使用的地磁场参数不一致,资料的时间跨度不同,所得结果相差较大。

随着地磁场长期变化和日长十年尺度变化研究的不断深入,结果表明实际的变化情况相当复杂。就地磁场 60 年尺度的周期变化来说,不同学者得出的周期相差较大,分布在 60~82 年之间^[9,10]。而这种周期分量对地磁场起源的发电机过程的研究和下地幔电导率的估计有着非常重要的意义。此外,反映主磁场长期变化的地磁参数很多,不同参数的周期变化及其对应的物理过程不同。例如,对 20 世纪地磁场长期变化的研究表明,地磁场偶极矩快速减小,而非偶极子磁场快速增强^[19]。非偶极子分量的周期变化与核幔边界的耦合过程有关,而偶极子分量的变化对应外核的深部过程^[20],偶极子和非偶极子磁场随时间的变化有很大区别。因此,在研究地磁长期变

化和日长十年尺度变化的关系时,必须充分了解哪些地磁参数与日长变化有关、地磁场和日长变化相近或相同的周期分量及其时变特征。

本文根据 Jackson 等^[21]给出的历史地磁场模型 GUFM1 和第 10 代国际参考地磁场(IGRF10)模型^[22],以及国际地球自转服务(IERS)公布的日长资料,采用小波变换方法,分析地磁场磁矩、能量、西向漂移等参数和日长十年尺度变化的周期分量及其时变特征。

2 资料

本文研究使用的日长资料取自国际地球自转服务机构(IERS)公布的 1623.5~2005 年期间的年均值序列。地磁资料使用两种地磁场模型,一是 Jackson 等给出的地磁场模型 GUFM1,它包括 1590~1990 年期间每隔 2.5 年一个的地磁场球谐模型,截止阶数为 $N = 14$ 。到目前为止,GUFM1 是时间跨度较长、较为完整的历史地磁场模型。在 1832 年高斯(Gauss)提出地磁场绝对强度的测量值方法之前,地磁场观测只有方向测量值(磁偏角和磁倾角),没有绝对强度测量值,GUFM1 模型采用外推的方法得出 1840 年以前的球谐系数,因此,1840 年以前地磁场模型的误差相对较大^[21,23]。二是 IGRF10 模型^[22],它包括 1900~2005 年期间每隔 5 年一个的地磁场球谐模型,其中 1900~1995 年期间的模型截止阶数为 $N = 10$,2000、2005 年的模型截止阶数为 $N = 13$ 。在本文研究中,1990 年以前的地磁资料使用 GUFM1,1990 年以后的地磁资料使用 IGRF10,为了使两种地磁场模型的截止阶数统一,计算中取最大截止阶数为 $N = 10$ 。

表征地磁场长期变化的参数很多,例如磁偶极矩、磁极位置、磁场强度、磁场能量随时间的变化和西向漂移等。而本文的主要目的是研究主磁场长期变化与日长变化对应的周期规律及其时变特征。所选取的参数既要能够反映主磁场的整体变化特征,又要能够反映偶极子和非偶极子部分的变化。因此本文选择西向漂移率、能量和磁偶极矩的变化率三种地磁场参数。因为磁偶极矩是反映偶极子磁场贡献的物理量,西向漂移是地磁场长期变化的重要特征之一,其最显著的部分是非偶极子磁场部分。磁场能量不仅可以反映主磁场的整体变化,而且可以分解为偶极子和非偶极子部分进行计算和分析。

主磁场能量的表达式为^[24]

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

式中 g_n^m 、 h_n^m 是 n 阶 m 次球谐系数. 本文分别计算总能量 $W(n)$ ($n = 1 \sim 10$) 和非偶极子磁场能量 $W_N(n)$ ($n = 2 \sim 10$).

磁偶极矩 M 可由 $n = 1$ 的 3 个高斯系数 (g_1^0 、 g_1^1 和 h_1^1) 计算, 其表达式为

$$M = 4\pi r_0^3 / \mu_0 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}, \quad (2)$$

式中 r_0 是地球平均半径 ($r_0 = 6371.2$ km), μ_0 是真空中磁导率.

地磁场西向漂移率的表达式为^[25]

$$U(n) = \sum_{m=1}^n n(h_n^m \dot{g}_n^m - g_n^m \dot{h}_n^m) / \left\{ \sum_{m=1}^n m^2 [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \right\}, \quad (3)$$

式中 \dot{g}_n^m 、 \dot{h}_n^m 分别是球谐系数 g_n^m 、 h_n^m 的时间变化率. 计算西向漂移率 $U(n)$ 时, 仅取 $n = 2 \sim 10$ 非偶极子部分, 并且用 Richmond 方法^[26] 计算各阶球谐项的权重, 按权重对各阶球谐项的漂移率进行求和. 同时, 我们计算了磁四极子 ($n = 2$) 的西向漂移率 $U(2)$.

计算磁矩、磁场能量和球谐系数的变化率时, 我们采用相邻年代的差值除以年代间隔 (Δt) 来计算变化率, 即计算 $\dot{B} = (B(t + \Delta t) - B(t)) / \Delta t$, 计算中取 $\Delta t = 5$ 年间隔, 2.5 年滑动. 由于 1800 年以前的日长和地磁场模型资料的误差较大, 本文主要分析 1800 ~ 2005 年期间各参数的变化特征. 图 1 给出 LOD、磁矩变化率 \dot{M} 、总能量变化率 $\dot{W}(n)$ 和非偶极子能量变化率 $\dot{W}_N(n)$ 、西向漂移率 $U(n)$ 和 $U(2)$ 随时间的变化.

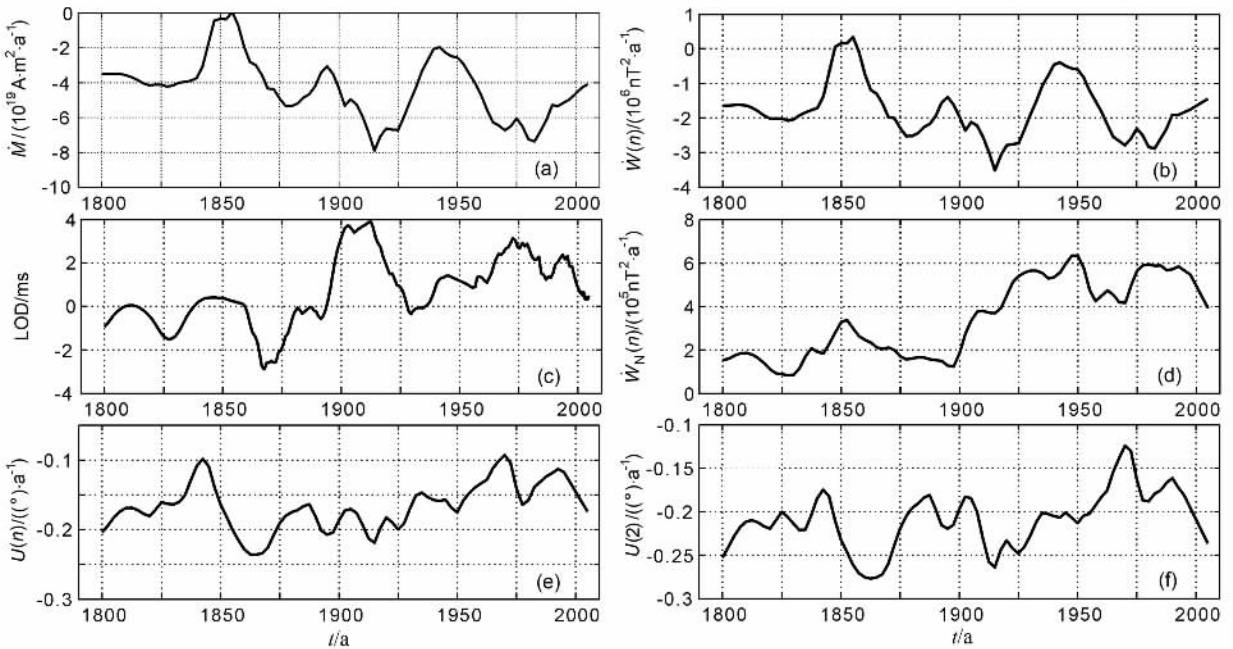


图 1 LOD 和地磁场参数随时间的变化

Fig. 1 The time-varying LOD and geomagnetic field parameters

3 方法与结果分析

3.1 分析方法

为了揭示 LOD 和地磁场长期变化的周期分量及时变特点, 采用小波变换方法, 对 LOD 和地磁场长期变化参数进行分析. 跟传统的 Fourier 变换相比较, 小波分析可以给出信号的局部时频特征, 因而尤其适合于非周期或准周期时变信号过程的检测与分析^[27-29]. 本文使用 Morlet 小波, 其母函数为

$$\Psi(t) = e^{i\alpha} (e^{-t^2/2} - \sqrt{2}e^{-t^2/4}e^{-t^2}). \quad (4)$$

当 $c \geq 5$ 时 (4 式中第二项远远小于第一项, 忽略第二项不会影响分析结果的可靠性, 并且满足 Morlet 小波存在的允许性条件. 时间序列 $f(t)$ 的小波变换可定义为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (5)$$

式中 $\bar{\Psi}$ 为 Ψ 的共轭复数, a 为伸缩因子, b 为平移因子, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数. 利用 (5) 式, 对资料序列进行一维小波变换, 可以得到小波变换系数的实部、幅 (模) 值和相位等信息.

3.2 地磁场长期变化和 LOD 的准周期分量及其时变性

根据(5)式的计算结果,图2给出 LOD 和各个地磁场参数的小波变换实部等值线分布,表示通过小波变换之后信号的强弱.图中横坐标表示时间,纵坐标已换算为周期.红色斑块代表峰值,蓝色斑块代表谷值,等值线的密度表示出它们的小波谱强度,每个斑块焦点的位置同时反映出所示参数的小波谱强

度中心所对应的周期和历元.由于小波变换时,资料序列两端的数据得到的结果存在端部效应的影 响,使相应于该处的结果精度降低.因此,本文作小波变换时,取 1700~2005 年之间的资料进行计算,图 2 中只给出 1800 年以后的部分,这样,其左端不存在端部效应的影 响,但右端仍然存在,它使得计算得到的周期比实际值略小.

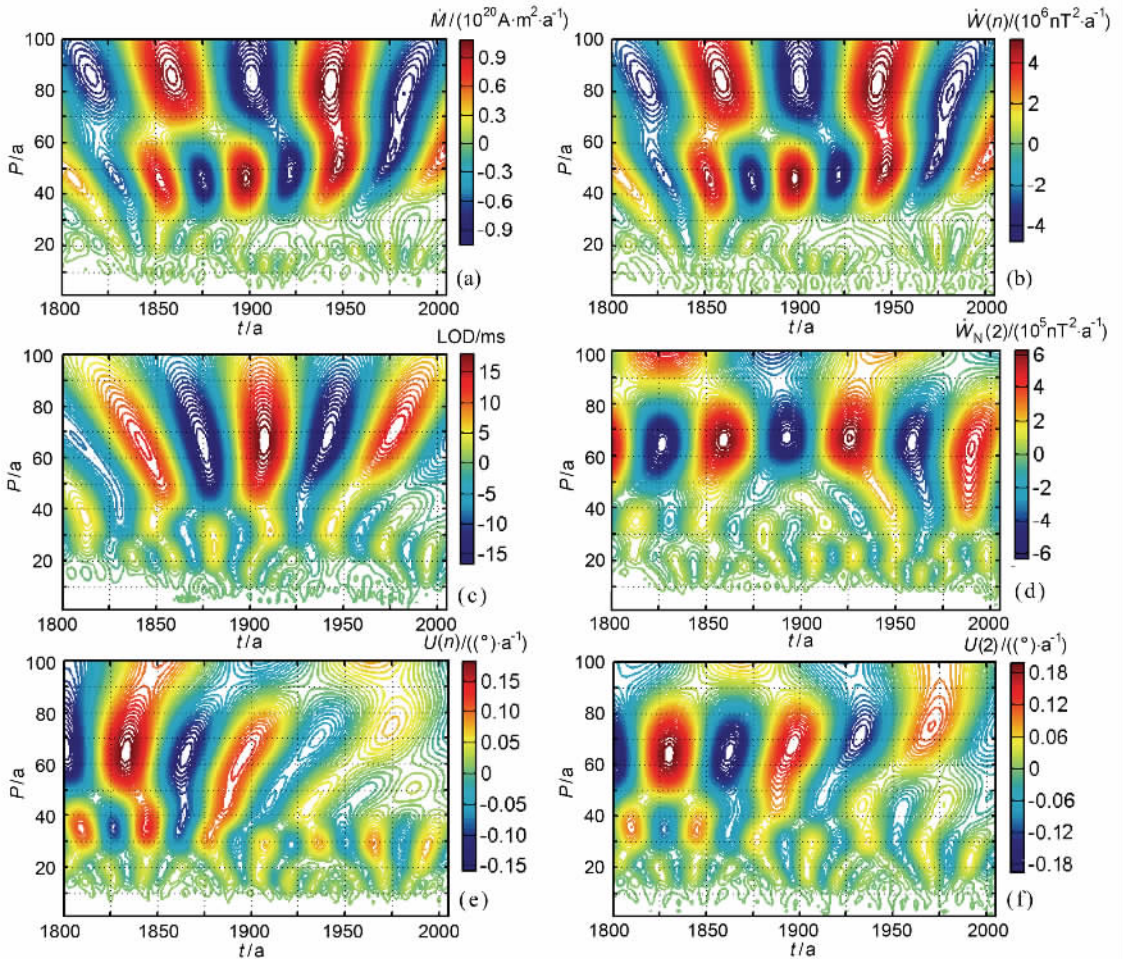


图 2 LOD 和地磁场参数的小波变换图

Fig. 2 The wavelet transformed maps of LOD and geomagnetic field parameters

如图 2 所示,LOD 和各个地磁场参数的小波变换图周期清晰. \dot{M} 和 $\dot{W}(n)$ 的小波变换图变化规律相同(图 2(a,b)) 按正负峰焦点位置对应的周期计算,存在 82 年和 48 年的平均周期. LOD、 $\dot{W}_N(n)$ 、 $U(n)$ 和 $U(2)$ 的小波变换图存在 66 年和 32 年的平均周期(图 2(c~f)). 其中, $U(n)$ 和 $U(2)$ 的小波变换图的变化规律基本一致(图 2(e,f)),表明非偶极子磁场的西向漂移中,磁四极子项的贡献起主要作用.在图 2 中,各个参数的小波谱焦点位置对应的周期值大小和强度都随时间变化,几乎没有一个是

稳定的,即周期成分具有时变性.因此,上述周期更恰当地应该称之为准周期.

在地磁场能量中,偶极子项($n=1$)的能量占绝对优势,能量变化率实际上取决于偶极子磁场的能量变化^[30,31].因此, $\dot{W}(n)$ 存在的 82 年和 48 年准周期分量主要反映偶极子磁场的贡献.比较图 2(a~c) 的小波变换图,可以看出, \dot{M} 和 $\dot{W}(n)$ 与 LOD 的小波谱的分布形态不同,没有相同或相近的周期成分.由此可见,LOD 与偶极子磁场的周期变化没有直接关系.

从图 α (c~f)可以看出, $\dot{W}_N(n)$ 、LOD、 $U(n)$ 和 $U(2)$ 的 66 年准周期分量随时间延续出现一定变化,特别是 20 世纪, $\dot{W}_N(n)$ 的周期值逐渐减小, LOD 和 $U(n)$ 的周期值逐渐增大. 但各个参数的平均周期值非常接近,总的来说,该周期分量的稳定性较好. 它们的主要变化特点是各个参数的正负峰值出现的时间相差较大,存在时间相位延迟. 按照正负峰值出现的时间计算, $U(n)$ 比 LOD 平均超前 8.8 年,而 $\dot{W}_N(n)$ 比 LOD 平均滞后 15.6 年. 图 3 绘出了 66 年准周期小波变换系数的实部随时间的变化,图中清楚地显示出 $\dot{W}_N(n)$ 、LOD 和 $U(n)$ 之间的相位延迟关系.

与 66 年准周期分量相比, 32 年准周期分量的时变性较大. 尤其是 $\dot{W}_N(n)$ 分量, 在 20 世纪后半期变得很弱, 几乎看不到它的存在. LOD 的周期值在 19 和 20 世纪前半期大于 32 年, 后半期变得很弱. 相比较而言, $U(n)$ 的 32 年准周期分量一直比较清晰 (图 2e), 1865 年以前的周期值大于 32 年, 此后一直小于 32 年. 按照正负峰值出现的时间计算, $U(n)$ 比 LOD 平均超前 4.5 年. 其中, 19 世纪平均超前 2.5 年, 20 世纪平均超前 6.5 年, 20 世纪的超前量比 19 世纪的大.

上述分析表明, 各个参数都有两个准周期分量. 每个准周期分量的强度及其时变性可以用其幅值随时间变化的情况来比较. 如图 4 所示. 图 4 不仅可以看出各个准周期分量的强度随时间变化的情况, 而

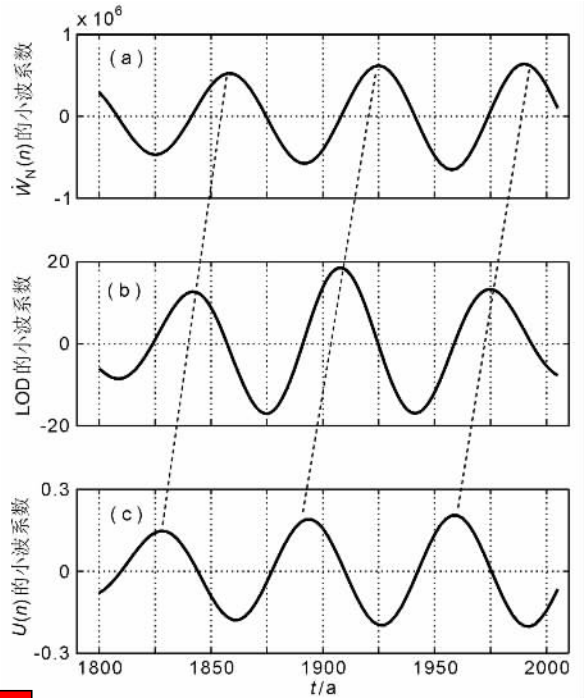


图 3 66 年准周期的小波系数随时间变化比较图

Fig.3 Compare of the time-varying wavelet coefficients of the 66-year quasi-periodicity

且可以比较同一参数的两个准周期分量的强弱. 从图 4 (a, b) 可以看到, 1865 年以前, \dot{M} 和 $\dot{W}(n)$ 在 82 年和 48 年准周期的幅值变化相近, 此后, 82 年准周期的幅值一直大于 48 年准周期, 表明 82 年准周期是强周期. 在图 4 (c~f) 中, 除了 19 世纪初期, $U(n)$ 和 $U(2)$ 在 66 年准周期的幅值小于 32 年准周期外,

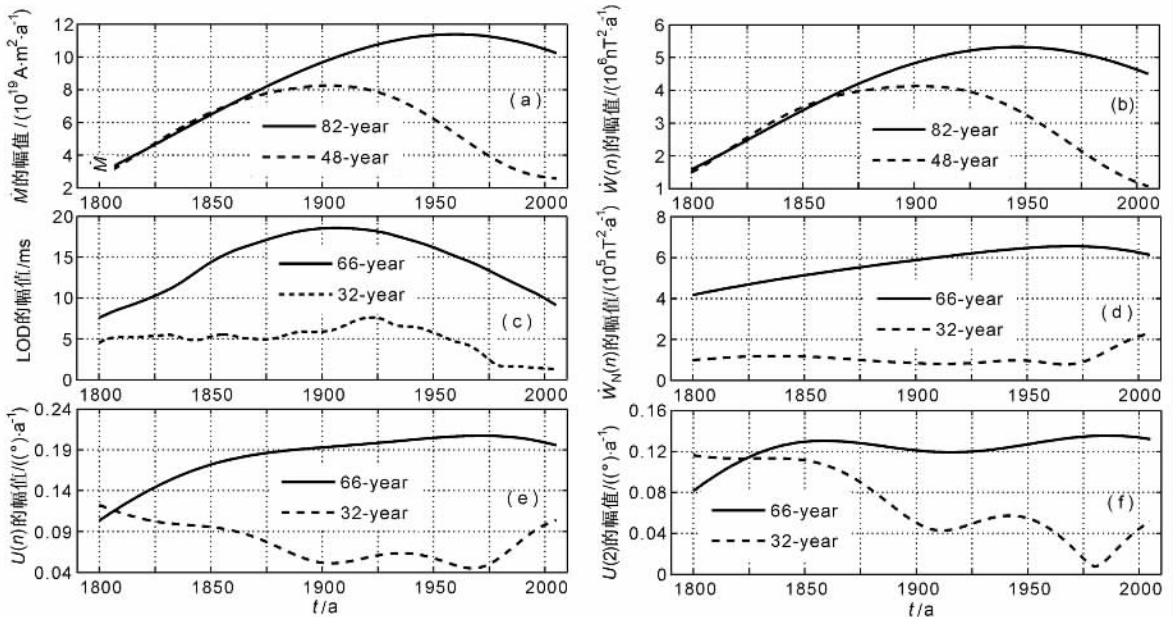


图 4 小波幅值随时间变化的比较

Fig.4 Compare of the time-varying wavelet amplitudes

其余都是 66 年准周期的幅值大,表明 LOD、 $\dot{W}_N(n)$ 、 $U(n)$ 和 $U(2)$ 的 66 年准周期是强周期。

由于 $\dot{W}_N(n)$ 、 $U(n)$ 和 $U(2)$ 主要反映非偶极子磁场的长期变化,它们与 LOD 变化有相同准周期分量,表明地磁场长期变化与 LOD 变化的相互关系中,与 LOD 变化直接相关的是非偶极子磁场,而不是偶极子磁场。非偶极子磁场的长期变化和 LOD 变化的周期分量存在时滞相关规律,反映出 LOD 和非偶极子磁场之间的变化关系非常复杂。 $U(n)$ 的周期超前于 LOD 变化,而 $\dot{W}_N(n)$ 的周期滞后于 LOD 变化,说明日长十年尺度变化并非是地磁场长期变化的原因,反之亦然,即二者的起源不存在因果关系。

地磁场能谱分析得出^[30-32],偶极子和四极子确定的等效场源的深度(距地心)约为 1160 km,位于地球内外核边界附近。而非偶极子磁场的等效场源深度近似为 3300 km,位于核幔界面(CMB)附近。可见,地磁场非偶极子部分与核幔边界的物理过程有关。LOD 与非偶极子磁场长期变化有相同的准周期分量,暗示着它们源于核幔边界附近流体的周期运动过程。

4 结 论

(1) 磁偶极矩和地磁场总能量的长期变化存在 82 年和 48 年的准周期分量,它们主要反映偶极子磁场变化的贡献,与日长变化的周期分量没有直接关系。

(2) 非偶极子磁场的能量和西向漂移的长期变化与日长变化有 66 年和 32 年的相同准周期分量,66 年准周期是强周期。非偶极子磁场与日长变化周期存在时滞相关规律,延时的长短与非偶极子磁场参数及其周期分量有关。在 66 年准周期分量,西向漂移比日长变化超前 8.8 年,非偶极子磁场能量比日长变化滞后 15.6 年。

(3) 日长十年尺度波动和地磁场长期变化的起源不存在因果关系,而与核幔边界磁流体的周期运动过程有关。

参考文献 (References)

- [1] Lambeck K. The Earth's Variable Rotation. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 8
- [2] Wahr J. The Earth's rotation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1988, **16**: 231 ~ 249
- [3] Lambeck K, Cazenave A. Long term variations in the length of day and climate. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1976, **46**: 555 ~ 573
- [4] Hide R, Dickey K O. Earth's variable rotation. *Science*, 1991, **253**: 629 ~ 637
- [5] Pais A, Hulot G. Length of day decade variations, torsional oscillations and inner core superrotation: evidence from recovered core surface zonal flows. *Phys. Earth Planet. Int.*, 2000, **118**: 291 ~ 316
- [6] Yukutake T, Cain J C. Solar cycle variation of the first-degree spherical harmonics components of the geomagnetic field. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1979, **31**: 509 ~ 544
- [7] 徐文耀, Henri-Claud Nataf, 魏自刚等. 地磁长期变化的 30 年周期. *地球物理学报*, 2006, **49**(5): 1329 ~ 1338
Xu W Y, Henri-Claud Nataf, Wei Z G, et al. Thirty-year period in secular rate of the main geomagnetic field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(5): 1329 ~ 1338
- [8] 王宣文. 20 世纪的地磁长期变化场分析. *地球物理学报*, 2004, **47**(3): 423 ~ 427
Wang T W. The analysis of the geomagnetic secular variation in the 20th century. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(3): 423 ~ 427
- [9] 王宣文. 二十世纪的地球偶极子磁场. *地球物理学报*, 2005, **48**(1): 52 ~ 55
Wang T W. The geomagnetic dipole field in the 20th century. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1): 52 ~ 55
- [10] Yokoyama Y, Yukutake T. Sixty year variation in a time series of the geomagnetic Gauss coefficients between 1910 and 1983. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1991, **43**: 563 ~ 548
- [11] Currie R G. Long period magnetic activity - 2 to 100 years. *Astrophys. Space Sci.*, 1976, **39**: 251 ~ 254
- [12] Holme R. Electromagnetic core-mantle coupling - I. Explaining decadal changes in the length of day. *Geophys. J. Int.*, 1998, **132**(1): 167 ~ 180
- [13] Liu Q S, Zhu R X, Pan Y X, et al. Secular variation in geomagnetic field caused by the fluctuation in the fluid flow in the outer-core. *Chinese Sci. Bull.*, 1999, **44**(13): 1214 ~ 1218
- [14] Jin Rong-Shen. Cross correlation of the variation of the geomagnetic dipole moment and the fluctuation of Earth's rotation. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(B12): 17251 ~ 17260
- [15] Le Mouél J L, Maden T R, Ducruix J, et al. Decadal fluctuations in geomagnetic westward drift and Earth rotation. *Nature*, 1981, **290**(30): 763 ~ 765
- [16] Greiner-Mai H. Decade variation of the Earth's rotation and geomagnetic core-mantle coupling. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1993, **45**: 165 ~ 174
- [17] Voorhies C V. Coupling an inviscid core to an electrically insulating mantle. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1991, **43**: 131 ~ 156
- [18] Yoshida S, Hamane Y. Geomagnetic decadal variation caused by length-of-day variation. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1995, **91**: 117 ~ 129
- [19] 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. Dramatic variations in the Earth's main

- magnetic field during the 20th century. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2000, **45** (14):1563 ~ 1566
- [20] 刘青松, 朱日祥, 潘永信等. 地球磁场偶极子和非偶极子分量变化特征及其相关的地球深部过程. *地球物理学报*, 1999, **42** (2):178 ~ 184
- Liu Q S, Zhu R X, Pan Y X, et al. Secular variations in geomagnetic dipole and non-dipole components: constrains on the Earth's interior process. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42** (2):178 ~ 184
- [21] Jackson A, Jonkers R T, Walker M R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, **358**:957 ~ 990
- [22] Maus S, Macmillan S, Chernova T, et al. The 10th generation international geomagnetic reference field. *Phys. Earth Planet. Int.*, 2005, **151**:320 ~ 322
- [23] Gubbins D, Jones A L, Hinlay C C. Fall in Earth's magnetic field is erratic. *Science*, 2006, **312**:900 ~ 902
- [24] Lowes F J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1974, **36**:717 ~ 730
- [25] Hodder B M. Geomagnetic secular variation since 1901. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1981, **65**:763 ~ 766
- [26] Richmond A D. Relation of the westward drift of the geomagnetic field to the rotation of the Earth's core. *J. Geophys. Res.*, 1969, **74**:3013 ~ 3018
- [27] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory-part 1: complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 1982, **47** (2):203 ~ 221
- [28] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory-part 2: sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 1982, **47** (2):222 ~ 236
- [29] Prabhakaran Nayar S R, Radhika V N, Revathy K, et al. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters. *Solar Phys.*, 2001, **208**:359 ~ 373
- [30] Nevanlinna H. Notes on global mean-square values of the geomagnetic field and secular variation. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1987, **39**:165 ~ 174
- [31] 康国发, 白春华, 李伟等. 1690 ~ 2000 年地磁场能量的三维分布及长期变化. *地球物理学进展*, 2007, **22** (1):80 ~ 86
- Kang G F, Bai C H, Li W, et al. Three-dimensional distribution of geomagnetic energy in the Earth's interior and its secular variation for 1690 - 2000a. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22** (1):80 ~ 86
- [32] Meyer J. Secular variation of magnetic mean energy density at the source-layer depth. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1985, **39**:288 ~ 292

(本文编辑 何 燕)