10 Altschul S F, Madden T L, Schaffer A, et al. Gappped BLAST and PST-BLAST: a new generation of protein database search programs. Nucleic Acid Res, 1997, 25: 3389~ 3402
11 Thompson J D, HIgins D G, Gibson T J. CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, positions-specific gap penalties and eight matrix choice. Nucleic Acids Res, 1994, 22: 4673~ 4680
12 Kozak M. Recognition of AUG and alternative initiator codons is augmented by G in position + 4 but is not generally affected by the nucleotides in positions + 5 and + 6. The EMBO Journal, 1997, 16: 2482~ 2492
13 Jurata L W, Gill G N. The Functional analysis of the nuclear LIM domain interactor NLI. Molecular and Cell Biology, 1997, 17: 5688~ 5698
14 Bach I, Carriere C, Ostendorff H P, et al. A family of LIM domain-associated cofactors confers transcriptional synergism between LIM and Otx hoeodomain proteins. Genes & Development, 1997, 11: 1370~ 1380
15 Wadman I A, Osada H, Grutz G G, et al. The LIM-only protein Lmo2 is a bridging molecule assembling an erythroid, DNA-binding complex which includes the TAL. 1, E47, GATA-1 and Ldb1/ NLI proteins. The EMBO Journal, 1997: 3145~ 3157
16 Morcillo P, Rosen C, Dorsett D. Genes regulating the remote wing margin enhancer in the *Drosophila* cut locus. Genetics, 1996, 144: 1143~ 1154
17 Agulnick A D, Taira M, Breen J J, et al. Interactions of the LIM-domain-binding factor Ldb1 with LIM homeodomain proteins. Nature, 1996, 384: 270~ 272
18 Visvader J E, Mao X, Fujiwara Y, et al. The LIM-domain binding protein Ldb1 and its partner LMO2 act as negative regulators of erythroid differentiation. Proc Natl Acad Sci USA, 1997, 94: 13707~ 13712

(1998_07_24 收稿, 1998-10-18 收修改稿)

地球外核流体运动与磁场长期变化相互关系的探讨

刘青松 朱日祥 潘永信 郭 斌
(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

摘要 从理论上分析了偶极子场的能谱分布特征, 在高阶项, 它近似为一直线, 斜率与偶极子的深度相关. 地球磁场等效磁源深度(r_0)并非一个常量: 1900~ 1940 年 $r1$ 稳定递减; 1940~ 1950 年 r_0 的阶跃性变化可能与某种扰动相关; 1950~ 1975 年 r_0 呈现递减趋势; 1975~ 1985 年稳定递增; 1985~ 1995 年 r_0 则基本保持不变. 把每一年的能谱归一到相应的等效磁源深度, 发现 1900~ 1960 年偶极子场的能量基本保持不变, 非偶极子场的能量增加, 地球磁场总能量逐年递增. 在此期间地表观测的磁场能量衰减是由等效磁源的深度变化引起. 忽略 1940~ 1950 年的扰动, r_0 的变化在 1975 及 1985 年明显出现拐点. 这一变化规律与地磁阶跃(jerk)及日长变化趋势一致, 但滞后于地磁阶跃 5 a. 初步研究表明, 核、幔耦合引起外核流体运动方式的改变, 不但能够引起地磁阶跃及日长的变化, 而且还能引起 r_0 的长期变化.

关键词 **等效磁源深度 地磁阶跃 日长**

对近一个世纪以来地球磁场的研究表明, 地球磁场 1969 年在世界范围内发生阶跃现象, 其时间尺度仅为年[1]. 如果这一阶跃信号起源于核、幔边界, 那么会为反演下地幔的电导率提供新的约束. 地磁阶跃与核、幔之间电磁耦合及日长变化有关[1]. 基于磁流体冻结近似

(frozen-flux approximation) 及稳定流体假设(steady flow), 可以根据地表观测的地磁场反演外核顶部流体的运动[2~4]. 但是由于上述解所固有的非唯一性, 及在求解过程中稳定流体假设具有的平滑性, 无法模拟地磁阶跃[5]. 地球磁场长期变化与日长变化存在着相关性[6], 地球角动量的改变有可能是地磁阶跃的起因[7], 但是地球角动量的变化趋势与地磁阶跃并不完全一致.

本文将从地球磁场变化本身出发, 寻求地磁阶跃的起因. 借助于高斯系数 g_n^m 和 h_n^m, 地球磁场在地表的能谱可以表示为[8]

$$W(n) = (n+1)\sum_{m=0}^{n}(g_n^{m\,2} + h_n^{m\,2}). \tag{1}$$

在对数坐标下, $W(n)$ 的高阶部分($n=2, \cdots, 11, 12$) 近似为一直线[9~11], 其斜率可以用来确定等效磁源到地心的距离 r_0. 从统计意义上讲, r_0 代表产生地球磁场源的平均深度. Benton 等人[1] 的 r_0 位于核、幔边界之下, 暗示 r_0 变化应起因于外核. 在地表观测的偶极子分量占地球磁场的 85%, 其磁矩在过去 0.1 ka 中降低了近 5%, 然而当把地球磁场在地表的能谱归一到同一等效磁源深度时, 发现地球磁场偶极子的能量衰减, 而非偶极子的能量增加, 总能谱基本保持守恒, 能量从偶极子场向非偶极子场转化[12]. 可见地球磁场在地表及在地球深部的特性是不一样的, r_0 及其变化对于研究地球磁场时空结构具有重要意义. Meyer[12] 把不同年代地球磁场的能谱下延到同一参考面, 没有考虑 r_0 随时间的变化及其对能谱分布的影响. 本文将对这一问题加以探讨, 同时将根据日长变化已有的研究成果, 探讨 r_0 演化的机制, 并寻求 jerk 的形成机制.

1 地球磁场的能谱及等效磁源

假定一个偶极子的位置在 r_0, θ_0 和 φ_0, 磁矩为 M_r. 其磁位可以表达为[13]

$$u_r = a\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left|\frac{a}{r}\right|^{n+1}(g_n^m\cos(m\lambda) + h_n^m\sin(m\lambda))P_n^m(\cos\theta), \tag{2}$$

其中 $g_n^m = \left|\frac{M_r}{a^3}\right|\left|\frac{r_0}{a}\right|^{n-1}nP_n^m(\cos\theta)\cos(m\lambda_0)$, $h_n^m = g_n^m\tan(m\lambda_0)$, 这一模型预测 h_n^m 与 g_n^m 具有相同的变化率. 采用与(1) 式相同的形式, 偶极子的理论能谱密度函数为

$$W(n) = (n+1)n^2\left|\frac{M_r}{a^3}\right|\left|\frac{r_0}{a}\right|^{2[n-1]}\sum_{m=0}^{n}P_n^m(\cos(m\lambda_0)), \tag{3}$$

其中 $\sum_{m=0}^{n}P_n^m(\cos(m\lambda)) = 1$, 因此(3) 式简化为

$$W(n) = (n+1)n^2\left|\frac{r_0}{a}\right|^{2[n-1]}\left|\frac{M_r}{a^3}\right|. \tag{4}$$

由(4) 式可知, $W(n)$ 是 M_r 和 r_0 的函数, $W(n)$ 随 M_r 和 r_0 的减小而减小, 所以在地表观测到的磁场能谱变化包含 M_r 和 r_0 两方面的影响. $W(n)$ 的减小既可以由 M_r 衰减引起, 也可以由偶极子向地心移动引起. 当 $n \geqslant 2$ 时, $W(n)$ 近似为一直线, M_r 只影响这一拟合直线的截距, 而 r_0 则与其斜率相关:

$$K = 2\lg(r_0/a). \tag{5}$$

2 r_0 的长期变化对地球磁场能谱的影响

地球磁场能谱在空间的分布为

$$W_c(n) = \left| \frac{a}{r} \right|^{2n+2} (n+1) \sum_{m=0}^{n} (g_n^{m^2} + h_n^{m^2}), \tag{6}$$

(6) 式中 r 为参考面到地心的距离.

Meyer[11] 把 1965~ 1985 年的地球磁场能谱归一到同一等效磁源, r_0= 3 324 km. 这与 Glatzmaier 等人[13] 估测的地核半径基本一致. 结果表明 $W_c(1)$ 线性递减, 而 $W_c(2)$ 和 $W_c(3)$ 几乎以同一速率递增, 补偿了偶极子场的衰减, 总能量保持守恒. 即 $W_c(1)$ 的能量向 $W_c(2)$ 和 $W_c(3)$ 传递.

事实上, 地球磁场并非真的由放在 r_0 的偶极子场产生, 从物理角度考虑只是一种等效的概念. 在对数坐标下, 地球磁场的能谱在高阶项服从直线分布, 从统计意义上可以得出等效磁源深度 r_0. 由图 1 可知, 地球磁场等效磁源深度 r_0 并非一个常量. 1900~ 1940 年 r_0 稳定递减; 1940~ 1950 年 r_0 阶跃性变化可能与某种扰动相关; 1950~ 1975 年 r_0 呈现递减趋势; 1975~ 1985 年稳定递增; 1985~ 1995 年 r_0 则基本保持不变.

为了分清能谱变化到底是由 , 还是由 M_r 引起. 不同于 Meyer 的处理方法, 本文把不同年份能谱的 $W(1)$ 下延到各自的等效源深度. 结果表明(图 2) , 归一到不同年代相应 r_0 的曲线, 偶极子场的能量 1900~ 1960 年间基本保持不变, 1960~ 1970 年略微上升, 1970 年为转折点, 曲线呈下降趋势. 说明 1900~ 1960 年间偶极子磁矩没有衰减. 非偶极子场能量则逐年增加, 暗示非偶极子的磁矩递增. 地球磁场的总能量递增, 与地表显示的结果正好相反. 1900~ 1960 年间 $W_c(1)$ 基本保持水平, 这表明这一时期在地表 $W(1)$ 的变化是由等效源深度向地心移动引起, 而并非是由偶极子场磁矩衰减引起.

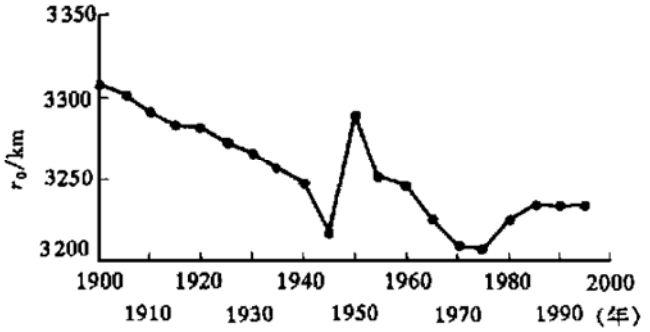

图 1 地球磁场等效磁源深度 r_0 1900 年以来长期变化图

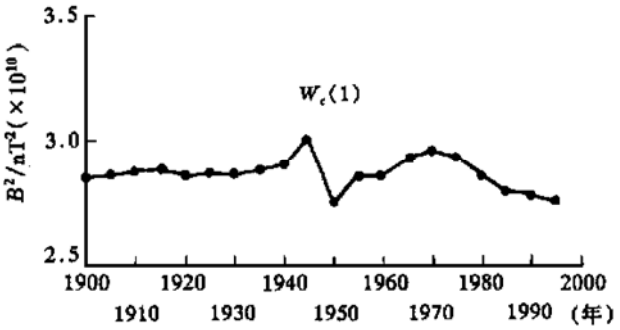

图 2 把每一年的地球磁场能谱归一到相应 r_0 后, $W(1)$ 随时间变化曲线图

除去 1940~ 1950 年的扰动, r_0 的变化明显在 1975 及 1985 年出现拐点. 这一变化规律与 1969 及 1979 年左右发生的地磁地磁阶跃有 5 a 左右的时间差, 这表明 r_0 的长期变化与地磁阶跃密切相关. 而地磁阶跃的形成又与日长变化相联系. 可见 r_0 和地磁阶跃以及日长的变化在成因上相互关联.

3 r_0 和地磁阶跃及日长变化的相互关系

欧洲一些地磁台站的观测资料去除外源场的影响后, 地磁场东向分量对时间的导数呈 V

字形变化[1, 14](图 2),这一变化规律具有全球型特征[15, 16]. V 字形的尖端称为地磁阶跃,代表地磁场长期变化中的加速阶跃. 发生在 1969~ 1970 及 1978 年的地磁阶跃已经被广泛研究[15, 17, 18]. 从地球磁场与外核流体耦合角度分析,地磁场长期变化可由外核顶端流体运动对地球磁场磁力线的扰动引起[19~ 21]. 外核顶端具有一特殊薄层,要维持地球磁场的线性变化,这一薄层的厚度必须大于 75 km[22].

对日长和地球磁场时间尺度为 10 a 的变化研究表明,两者的变化趋势极其相近[23, 24],这表明日长变化和地球磁场变化相关. Yoshida 等人[25]认为地球磁场变化中的扇形成分由日长变化引起. 当地幔的旋转速率变化时,地幔底部会对核幔边界(CMB)产生冲击,引起外核流体的变化. 进而,外核流体的变化与环型磁场耦合产生极型场. 外核流体运动速率与地球磁场的时间导数成正比, 因此,地球磁场 V 型变化可能由 V 型变化的流体与环型磁场耦合引起.

根据 Courtillot[1]的研究结果,可以用核、幔耦合模型来解释日长和地球磁场的长期变化,并且日长的变化滞后于地球磁场变化 10~ 15 a. 另一方面,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化学特征都极为复杂的 D″层[26, 27],它的特点是上界面的起伏很大,且有明显的横向不均匀性. 核、幔物质交换的结果,不但在 CMB 以上形成 D″层,而且还在 CMB 以下外核顶部形成一特殊薄层. 这样,下地幔、外核顶部特殊薄层及剩余的外核流体构成一个 3 层模型. 虽然相比较于地核,地幔的电导率很低,但它仍具有传导性,尤其下地幔. 核、幔间的电磁耦合不能忽略,但是由于对地幔电导率及 D″层的研究还欠深入,这种核、幔电磁耦合还不能用来确定日长的变化. 另一种耦合是形态耦合,由于 CMB 的起伏,流体的环型运动会对地幔产生较大的压力矩,足以引起日长的变化. 径向物质的交换对外核施加了一个力矩,使其减速; CMB 的电磁耦合和形态耦合进而使地幔减速. 地幔旋转速率的改变会反映在日长的变化之中.

以上表明,下地幔底部对 CMB 的影响,使得外核流体运动方式的改变. Jault[22]采用二维双层流体模型探讨磁场与流体耦合的关系. $z = R - r$, z 轴指向地心, R 和 r 分别为地球半径和球心到任一点的半径,特殊薄层厚度为 Δ, $\xi = (R - r)/\Delta = Z/\Delta$ 流体模型为

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{v} &= (\boldsymbol{v}^0(z, x), \boldsymbol{v}^{\Delta}(z, x))e^{-\omega t},\\ v_x^0(z, x) &= v_0\exp[-K(z-\Delta)]\sin Kx,\\ v_r^0(z, x) &= v_0\exp[-K(z-\Delta)]\cos Kx,\\ v_x^{\Delta}(\xi, x) &= -\frac{v_0}{K\Delta}\sin Kx,\\ v_r^{\Delta}(\xi, x) &= v_0\xi\cos Kx. \end{aligned}\right| \qquad (7)$$

磁流体与主磁场耦合产生磁场的振幅表达式为

$$F(t) = BK\gamma\tau B_{\varepsilon}(t/\Theta), \qquad (8)$$

其中 $\varepsilon = 2\pi\Delta/L$, $L = 1.5\times10^6$ m, B 为主磁场的振幅, $\gamma \approx \pi^{-1}\times10^{-12}\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$, $\Theta = (\eta K^2)^{-1}$, $\eta = 2\ \mathrm{m^2\cdot s^{-1}}$.

假设由于下地幔对 CMB 的冲击,使外核流体向地心产生附加运动,则流体的速度((7)式) 向地心平移,其结果使得特殊层的厚度 增大. 由公式(8)可知,特殊薄层厚度 Δ 增大,

$B_\varepsilon(t/\Theta)$的值减小,从而耦合磁场的振幅减小. 从统计意义上讲,r_0代表产生地球磁场源的平均深度. 外核流体运动向地心方向迁移,就相当于r_0向地心迁移,反之亦然. 可见r_0的变化是核幔耦合,使外核流体运动方式发生改变的结果.

对于这样的一种3层模型,地幔、外核顶部及外核其余流体的旋转速率与2个常量有关,其一小于1 a,另一个与核幔之间电导率σ_c/σ_m有关,如果日长滞后于磁场变化10~15 a,则σ_c/σ_m介于500~1000之间,这与目前估测的值一致[1],证实了这种3层模型的合理性.

3 结论

(1) 地球表面观测的磁场的能谱在高阶项,近似为一直线,斜率与偶极子的深度相关;

(2) 地球磁场等效磁源深度(r_0)并非一个常量,它的变化规律与地磁阶越及日长变化趋势一致. 核、幔耦合不仅能够引起地磁阶跃及日长的变化,而且还能引起r_0的长期变化;

(3) 1900年以来,其等效磁源的r_0有向地心靠拢的趋势. 地球磁场偶极子能量的衰减是由r_0的变化引起,其磁矩基本保持不变,而非偶极子场的磁矩逐年递增.

致谢 对Charles Barton博士及徐元芳副研究员提供了1990年以来的地球磁场球谐系数,作者深表感谢. 本工作为国家杰出青年科学基金(批准号:49425405)和中国科学院百人计划项目资助.

参 考 文 献

1 Courtillot V, Le Mouel J L. Geomagnetic secular variation impulses. Nature, 1984, 311: 709~716
2 Gubbins D. Finding core motions from magnetic observations. Phil Trans R Soc Lond Soc, 1982. 73: 247~254
3 Voorihies C V, Backus G. Steady flows at the top of the Earth's core from geomagnetic midels: the steady motions theorem. Geophys Astrophys Fluid Dyn, 1985, 32: 163~173
4 Bloxham J, Jackson A. Time-dependent mapping of the magneic field at the core-mantle boundary. J Geophys Res, 1992, 97: 19537~19563
5 Davis R G, Whaler K A. The 1969 geomagnetic impulse and spirr-up of the Earth's liquid core. Phys Earth Planet Inter, 1997, 103: 181~194
6 Courtillot V, Le Mou•l J L. Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular. Ann rev Earth Planet Sci, 1988, 16: 389~476
7 Backus G E, Le Mouel J L. Application of mantle filter theory to the magnetic jerk of 1969. Geophys J R Astr Soc, 1983, 74: 713~746
8 Lowers F J. Mearr-square values on sphere of spherical harmonic vector fields. J Geophys Res, 1966, 71: 2179
9 Langel R A, Estes R H. A geomagnetic field spectrum. Geophys Res Lett, 1982, 9: 250~253
10 Constable C, Parker R L. Statistical model for geomagnetic secular variation for the past 5 my. J Geophys Res, 1988, 93: 11569~11581
11 Benton E R, Alldredge L R. On the interpretation of the geomagnetic energy spectrum. Phys Earth Palnet Inter, 1987, 48: 265~278
12 Meyer J. Secular variation of magnetic mean energy density at the source-layer depth. Phys Earth Plant Inter, 1985, 39: 288~292
13 Glatamaier G A, Roberts P H. On the sounding of planetary interiors. Phys Earth Planet Inter, 1996, 98: 207~220
14 Gavoret J, Gibert D, Menvielle M, et al. Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field. J Geophys Res, 1986, 91: 4787~4796
15 Mcleod M G. Signals and noise in magnetic observatory annual means: mantle conductivity and Jerks. J Geophys Res, 1992, 97: 17261~17290
16 Stewart D N, Whaler K. Geomagnetic disturbances fields: an analysis of observatory monthly means. Geophys J Int, 1992, 108:

215~ 223
17 Malin S R O, Hodder B M. Was the 1970 geomagnetic jerk of internal or external origin? Nature, 1982, 296: 726~ 728
18 Gubbins D. Geomagnetic field analysis. ㈦. secular variation consistent with a perfectly conducting core. Geophys J R Astron Soc, 1984, 77: 753~ 766
19 Bloxham J, Gubbins D. Thermal core-mantle interaction. Nature, 1987, 325: 511~ 513
20 Kohler M, Stevenson D J, Modeling core fluid motions and drift of magnetic field patterns at the CMB by use of topography obtained by seismic inversion. Geophys Res Lett, 1990, 17: 1473~ 1476
21 Jackson A, Bloxham J, Gubbins D. Time-dependent flow at the core surface and conservation of angular momentum in the coupled core-mantle system. Geophys Monogr Am Geophys Union, 1993, 72(IUGG vol. 1 2): 97~ 107
22 Jault D, Le Mouel J L. Does secular variation involve motions in the deep core?. Physics Earth Plant Int, 1994, 82: 185~ 193
23 Langel R A, Kerridge D J, Barraclough D R, et al. Geomagnetic temporal change: 1903~ 1982, a spline respentation. J Geomagn Geoelectr, 1986, 38: 573~ 597
24 Le Mouel• J L, Courtillot V, Jault D. Changes in Earth rotation rate. Nature, 1992, 355: 26~ 27
25 Yoshida S, Hamano Y. Geomagnetic decadal variations caused by lengtlr-of-day variation. Phys Earth Plan Inter, 1995, 91: 117~ 129
26 Knittle E, Jeanloz R. Earth's core-mantle boundary: results of experiments at high pressures and temperatures, Science, 1991, 251: 1438~ 1443
27 Lay T. Structure of the core_msntle transition zone. Eoc, 1989. 70

(1998-04-08 收稿, 1998-09-20 收修改稿)

≈37 kaBP 大气中宇宙成因同位素含量增加的古里雅冰芯证据

王宁练 姚檀栋 秦大河 L. G. Thompson ④
E. Mosley-Thompson ④ J. Cole-Dai ④
M. E. Davis ④ P. N. Lin ④
(中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 兰州 730000;
④Byrd Polar Research Center, Ohio State University, USA)

摘要 证实了≈37 kaBP 青藏高原古里雅冰芯记录中宇宙成因同位素^{36}Cl 含量峰值的存在, 并认为该峰值是^{36}Cl 在大气中产生速率增加导致的, 而不是净积累速率变化影响的结果. 与其他地区^{10}Be 及^{36}Cl 记录的对比, 指出宇宙成因同位素这一时期的峰值事件具有全球性, 可作为冰芯等沉积物定年的时标. 发现这一峰值事件与气候变冷相伴出现.

关键词 古里雅冰芯 宇宙成因同位素^{36}Cl 全球性事件 气候变化

冰芯不但记录着地球气候环境变化的信息, 而且也记录着宇宙事件信息. 自从南极 Vostok 和 Dome C 两冰芯中发现宇宙成因同位素^{10}Be 浓度(^{10}Be 是宇宙射线与大气中 N 和 O 反应的产物, 常吸附在气溶胶上, 并通过降水或干沉积降落至地表面, 其半衰期为 1.5×10^6a) 在≈35 kaBP 出现峰值[1, 2] 以来, 引起了气候环境研究和天文学研究[3, 4] 的极大兴趣. 南极 Byrd 冰芯和格陵兰 Camp Century 冰芯中^{10}Be 浓度的分析结果, 进一步证实这一时期^{10}Be 浓度峰值的