

20 世纪地磁场的剧烈变化

徐文耀 魏自刚 马石庄

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101. Email: wyxu@mail.c-geos.ac.cn)

摘要 分析了 1900~2000 年 100 年间地磁场的变化. 结果表明, 100 年来地磁场的偶极矩减小了 6.5%, 而四极子和八极子的强度分别增加了 95% 和 74%, 全球 4 块大尺度地磁异常的强度在 100 年间增加了 21%~56%. 与此同时, 磁心位置向太平洋方向快速移动了 200 km. 这些事实表明, 1900 年以来, 地磁场整体快速减弱, 地磁场的非偶极性和东西半球的不对称性大大加强. 这些变化与地磁场极性倒转发生前的特征相类似.

关键词 地磁场 长期变化 地磁场倒转

地磁场的主要部分 主磁场起源于地球流体外核的发电机过程. 地磁场的空间结构和时间变化既反映了外核导电磁流体的动力学特性, 又反映了核幔耦合和内外核耦合过程, 这些耦合对岩石圈动力学和大地构造运动可能有重大影响^[1,2].

地磁场强度和结构不断发生着缓慢的长期变化^[3]. 在地磁场漫长的演化历史中, 曾经发生过多次极性倒转. 在极性倒转前夕, 磁场强度大为减弱, 地磁场往往失去了偶极子磁场为主的特征, 其非偶极性和不对称性大为增强. 在极性倒转完成后, 地磁场又逐渐恢复原来的偶极子形态, 只是南北极颠倒了过来^[4~7]. 近年来地球发电机理论的数值模拟再现了这些特征^[8~12]. 地磁场倒转常常伴随着气候和近地空间环境的重大突变, 甚至发生过生物大规模灭绝. 虽然它们之间的因果关系还不太清楚, 但这种地质时期的重大突变事件引起了热烈的讨论和极大的关注.

本文以 1900~1995 年国际参考地磁场模型(IGRF)为基本资料^[13], 并由 1995 年长期变化模型将模型序列外推到 2000 年, 然后考察 100 年来地磁场的长期变化特征.

1 地磁场偶极矩的长期变化

主磁场的标量磁位可以用球谐函数表达为^[1,14]

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

式中, r , \mathbf{q} , \mathbf{l} 是地心球坐标系的地心距、余纬和经度, a 是地球半径, $P_n^m(\mathbf{q})$ 是伴随 Legendre 函数, g_n^m, h_n^m 是由观测资料得到的地磁场球谐系数. 除了极性倒转期间外, 偶极子成分($n=1$ 的 3 项)总是占绝对优势, 所以, 在许多场合下, 可以用位于地心的磁偶极子场来近似表示地磁场的强度和分布. 偶极子强度用偶极矩描述为

$$M = \frac{m_0}{4\delta} a^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}. \quad (2)$$

图 1 清楚地显示出 1900~2000 年期间地磁偶极矩持续减小的变化. 偶极矩从 1900 年的 $8.32 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ 减小到 2000 年的 $7.78 \times 10^{22} \text{ Am}^2$, 100 年减小了 6.5%, 目前, 减小的趋势还在继续进行中. 这种减小变化至少可以追溯到公元 1600 年, 从那时起到现在, 400 年来地磁场偶极矩减小了 17%. 结合古地磁资料还可以得到, 1 000 年来, 地磁场偶极矩减小了将近 1/4. 由

此可见,地磁场偶极矩的衰减有越来越快的趋势.这一结果与前人根据不同时期地磁资料得到的估计是基本一致的^[15,16].

2 地磁场非偶极成分快速增长

与偶极矩减小形成鲜明对照的是,地磁场的非偶极部分快速增长.为了描述各阶磁多极子(包括偶极子)的能量大小,通常采用下面的物理量^[1]:

$$R_n = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]. \quad (3)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$, 分别表示偶极子、四极子、八极子等.图2给出四极子、八极子的强度相对于1900年值的变化,作为对比,图中也画出了偶极子相应量的变化.可以看出,在偶极子强度持续减小的同时,100年来,四极子和八极子分别增强了95%和74%,它们的相对变化比偶极子更为剧烈.十六极子以上的更高阶磁多极子大多数也呈增强趋势,但它们在地磁场中所占比例很小,我们暂时不作详细讨论.

这些变化表明,地磁场越来越偏离偶极子位形,它的非偶极子特性变得越来越明显.

3 地磁场磁心的移动

如果同时考虑偶极子和四极子的贡献,即可得到对地磁场更好的近似描述,这就是偏心偶极子模型.在此模型中,磁轴平行于偶极子轴,但磁心偏离地心一段距离^[1].计算表明,1900年磁心离地心330 km,位移方向指向太平洋,1995年磁心的地心距变为527 km,外推到2000年,这一距离将增大到529 km.这就是说,100年当中,磁心向太平洋方向移动了200 km.这种移动的结果使太平洋半球地磁场加强,而使相反半球的地磁场减弱,从而使东西两半球地磁场的差异和不对称性加大.图3是2000年地磁场总强度与1900年总强度的差值等值线图,由图可以清楚地看出,东半球磁场呈现总体增强趋势,最大值超过3 000 nT,

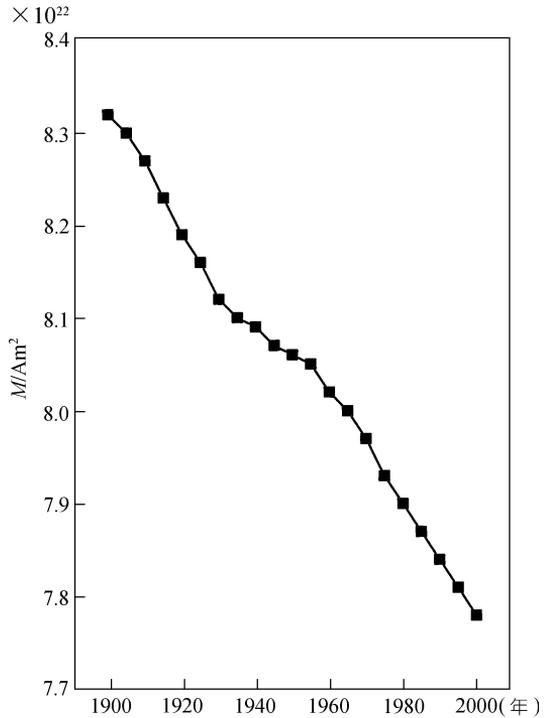


图1 1900~2000年间地磁场偶极矩的变化

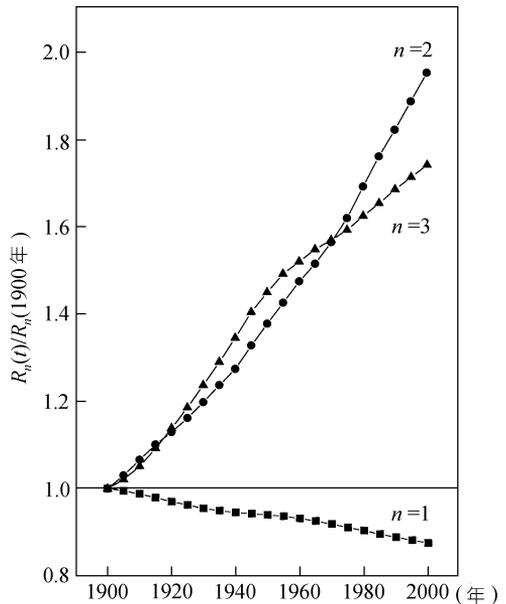


图2 组成地磁场的各阶多极子的长期变化 (1900~2000年)

而西半球减弱的趋势更为明显, 最大值超过-11 000 nT.

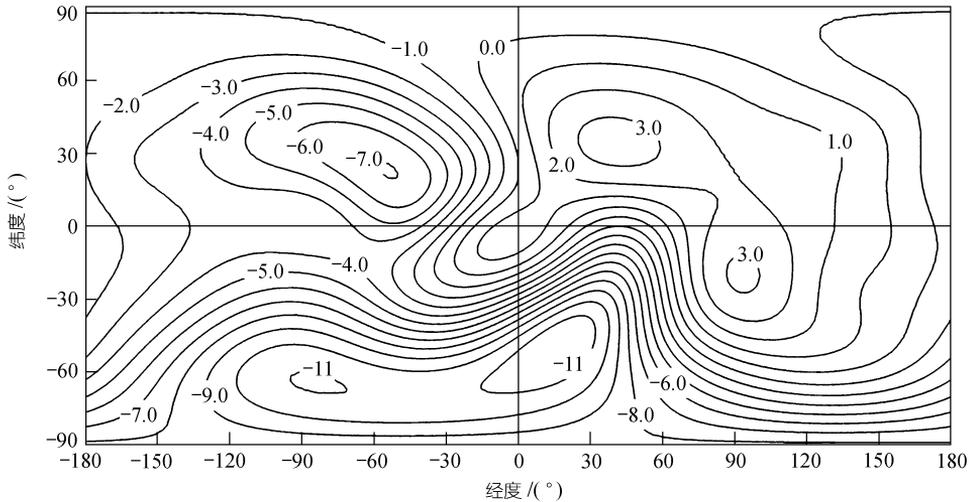


图 3 2000 年地磁场总强度与 1900 年总强度的差值等值线图
等值线间隔为 1 000 nT

4 全球大尺度磁异常强度的变化

从地球总磁场中减去偶极子磁场部分, 可以得到剩余磁场, 其主要特征是几块行星尺度的地磁异常^[17]. 异常中心强度超过 10 000 nT 的磁异常有 4 个, 它们是南大西洋异常(用 SAT 表示)、东亚异常(EA)、非洲异常(AF)和大洋洲异常(AUS). 1900 年以来的 100 年当中, 这 4 个异常的垂直分量强度分别增加了 39%, 21%, 56% 和 55%, 如图 4 所示.

5 讨论和结论

(1) 20 世纪地磁场经历着剧烈变化, 其主要特征是: 地磁场偶极矩持续而快速衰减, 地磁场非偶极子的强度持续而快速增强, 行星尺度磁异常的强度迅速增强, 磁心正在远离地心, 向太平洋方向移动, 使东西两半球磁场的不对称性加强.

(2) 地磁场剧烈变化意味着什么? 本文所述地磁场的变化与地磁场倒转前夕的变化特征非常类似. 因此, 很有可能, 这是一次新的地磁场倒转来临的征兆.

古地磁研究表明, 在地磁极性倒转期间, 偶极场的平均强度减小到正常值的 25% 左右^[6]. 对 800 ka 以来地磁场强度的研究表明, 地磁极性倒转或磁极漂移发生时, 偶极矩强度均小于

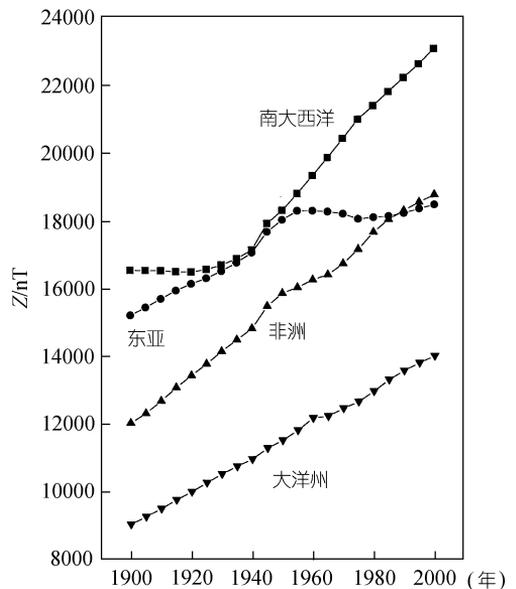


图 4 1900 ~ 2000 年地球大尺度磁异常垂直强度的变化

$4 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ [7], 这可以看作是地磁倒转的阈值. 如果地磁场偶极矩按照当前的趋势和速率减小下去, 则减小到该阈值约需要 700 年左右.

(3) 关于资料分析及其误差问题. 本文计算和分析所依据的基本资料是最新一代国际参考地磁场模型, 它们是用地面和卫星磁测资料, 采用球谐级数拟合得到的地球主磁场的近似描述, 其球谐系数的误差随阶数升高而增大, 本文计算偶极矩和四极子、八极子强度使用的低阶系数误差不超过 5%.

应该指出, 本文只用了近代 100 年的地磁场资料, 对于研究地磁场长期变化和预测未来变化趋势来说, 显然不够长. 地磁场长期变化的时间过程是复杂的, 不会永远按同一速率变化下去, 所以本文的分析及结果只是给出地磁场未来变化的一种可能性. 一次地磁极性倒转过程大约要持续 1 000 ~ 8 000 年, 而两次倒转之间的时间间隔则更要长得多. 与此相比, 近代和现代仪器记录的地磁场历史要短得多. 所以本文指出地磁场极性倒转的可能性还需要用更多的资料来确认.

致谢 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号: 49734140).

参 考 文 献

- 1 Langel R A. The main field. In: Jacobs J A, ed. Geomagnetism, Vol 1. London: Academic Press, 1987. 249 ~ 512
- 2 Bloxham J, Jackson A. Fluid flow near the surface of earth's outer core. Rev Geophys, 1991, 29(1): 97 ~ 120
- 3 Bloxham J, Gubbins D. The secular variation of earth's magnetic field. Nature, 1985, 317: 777 ~ 791
- 4 Zhu R, Ding Z, Wu H, et al. Details of magnetic polarity transition recorded in Chinese loess. J Geomag Geoelectr, 1993, 45(3): 289 ~ 299
- 5 Zhu R, Laj C, Mazaod A. The Matuyama-Brunhes and upper Jaramillo transitions recorded in a loess at Weinan, north-central China. Earth Planet Sci Lett, 1994, 125(1-4): 143 ~ 158
- 6 Merrill R T, McFadden P L. Geomagnetic polarity transitions. Rev Geophys, 1999, 37(2): 201 ~ 226
- 7 Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the earth's magnetic field during the past 800 kyr. Nature, 1999, 399: 249 ~ 252
- 8 Glatzmair G A, Roberts P H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. Phys Earth Planet Inter, 1995, 91(1): 63 ~ 75
- 9 Glatzmair G A, Roberts P H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of geomagnetic field reversal. Nature, 1995, 377: 203 ~ 209
- 10 Glatzmair G A, Roberts P H. Rotation and magnetism of earth's inner core. Science, 1996, 274: 1887 ~ 1891
- 11 Glatzmair G A, Roberts P H. Simulating the geodynamo. Contemporary Phys, 1997, 38(4): 269 ~ 288
- 12 Kuang W, Bloxham J. An earth-like numerical dynamo model. Nature, 1997, 389: 371 ~ 374
- 13 IAGA Division 5, Working Group 8. International geomagnetic reference field, 1995 revision. Geophys J Int, 1996, 125(1): 318 ~ 321
- 14 Chapman S, Bartels J. Geomagnetism. London: Oxford University Press, 1940. 639 ~ 668
- 15 Rikitake T. Electromagnetism and the Earth's Interior. Amsterdam: Elsevier, 1966. 77 ~ 78
- 16 Courillot V, Mouel J L L. Time variations of the earth's magnetic field: From daily to secular. Ann Rev Earth Planet Sci, 1988, 16: 389 ~ 476
- 17 安振昌, 王月华. 1900 ~ 2000 年非偶极子磁场的全球变化. 地球物理学报, 1999, 42(2): 169 ~ 177

(1999-11-09 收稿, 2000-05-12 收修改稿)