

Brunhes 极性期以来地球磁场相对强度变化研究^{*}

杨小强¹, 李华梅², 张澄博¹

(1. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 从沉积物中提取连续、高分辨的地球磁场相对强度记录, 是地磁学研究的热点问题之一。它不仅对探索地球内部动力学过程具有重要意义, 而且也是校正一些宇宙成因核素输入量的参考标准。近几年来, “相对强度地层学”或“相对强度年代学”的概念逐渐兴起, 地球磁场相对强度在全球对比方面的意义日益受到重视, 尤其是对缺乏氧同位素年代学控制的沉积物。在介绍相对强度研究方法的基础上, 主要较系统的回顾了 Brunhes 极性期以来相对强度研究的一些概况。

关键词: 相对磁场强度; 相对强度年代学; 全球对比; Brunhes 极性期

中图分类号: P532 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 03-0078-05

研究古地球磁场强度的变化, 对宇宙成因核素(如¹⁴C、¹⁰Be)的输入量和¹⁴C定年的校正具有重要意义^[1,2]。尤其是地磁场强度的长期变化具有全球可对比性^[3-6], 这有可能为全球变化的研究提供高频的年代控制框架和全球对比的标准之一。而沉积连续、沉积速率较快、相对具有全球覆盖性特点的海洋和湖泊沉积物成为研究相对地磁场强度变化的理想物质。近 20 多年来, Brunhes 极性期以来地球磁场相对强度的研究取得了重要进展^[4-8]。本文试作一较系统的总结。

1 相对磁场强度研究方法的建立

沉积物相对磁场强度研究的困难来源于沉积物获得剩磁的理论基础。Kent 指出在特定的实验室条件下, 沉积物获得的剩磁与外加磁场成线形关系^[9,10]。然而碎屑剩磁强度与沉积物中磁性矿物的类型、浓度、颗粒大小和非磁性矿物的性质相关, 这些因素的作用, 很大程度上改变了沉积物天然剩磁的强度和规律。因此, 利用沉积物进行地磁场相对强度的研究必须正规化, 以补偿非磁场因素对天然剩磁的影响。

1.1 研究相对磁场强度的前提条件

研究相对磁场强度的沉积物必须满足一定的前提条件。Rees 和 Wood 的工作表明^[3], 在沉积过程中, 小颗粒物质受地磁力的影响较大, 而粗颗粒物质则受其它外力的作用较大。在此基础上, King

等^[11]提出用于相对磁场强度研究的前提条件之一是“磁性矿物的颗粒大小一般应在 1~15 μm ”。

如何估计沉积物中磁性矿物的大小, 除常规的筛分、电子或光学显微镜方法外, Banerjee 等^[12]提出利用 ARM 与 χ 的比值来快速估计磁性矿物的相对大小。在他们的工作基础之上, King 等^[11]建立了一个简单的“现象模型”(图 1), 纵坐标 χ_{ARM} 表示在单位偏交场下获得的 ARM (一般是 1 Oe), 横坐标是 χ 。 χ_{ARM}/χ 的大小表示磁性颗粒的相对大小, 与原点的距离表示磁性矿物相对浓度的变化。这种方法快速、简捷, 对大批量样品的测量来说比较理想。

估计沉积物中磁性矿物相对大小的另一方法是利用磁滞回线参数的比值, 即 J_r/J_s 和 H_c/H_c 的比值(J_r 表示饱和剩余磁化强度, J_s 表示饱和磁化强度, H_c 表示剩磁矫顽磁力, H_c 表示矫顽磁力)(图 1)^[11]。与 χ_{ARM}/χ 相比, 磁滞回线参数反映的是矿物的“集中趋势”, 它能够鉴定混合有 MD 和 SD 的双峰矿物, 但测量过程比 χ_{ARM}/χ 耗时、复杂, 一般不应用于大量样品, 而只作为 χ_{ARM}/χ 方法的校正和补充。

研究沉积物相对磁场强度的条件之二是磁性矿物类型应该单一或者类似。这一要求是保证碎屑剩磁获得机制的一致性。检验这一要求的方法是多样的, 既可用实验室条件下的各种磁学参数, 也可用

* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40104002)

作者简介: 杨小强(1972年生), 男, 博士; E-mail: yee93@zsu.edu.cn

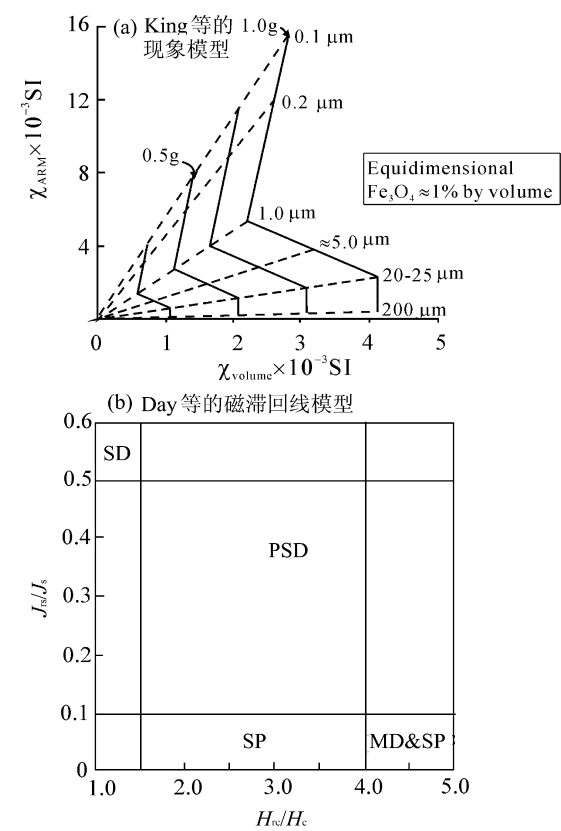


图 1 沉积物中磁性矿物相对粒度大小的估计
Fig 1 Estimation of the magnetic minerals grain size in sediments

X 射线衍射、扫描电镜等其它矿物学手段。

条件之三是在不同沉积层位磁性矿物的浓度差别不能超过 20 ~ 30 倍，这是为了限定由于浓度的变化，磁性矿物相互作用的影响。同样，检验此要求的方法也是多样的。既可根据 χ_{ARM}/χ 与原点的距离来判断^[11]，也可根据代表型样品的 J_s 判断^[11]，还可直接根据 χ 的大小来判断等。

1.2 正规化参数的选取

在上述 3 个条件的基础上，相对强度的研究还必须选择能够补偿由于矿物浓度、颗粒大小等对 NRM 影响的磁性参数来正规化^[3, 13]。一般可选择的磁性参数有 χ 、ARM、IRM 和搅动剩磁 (StRM) 等。文献 [3] 认为用来正规化 NRM 的参数其矫顽磁力谱和 NRM 应该是相似的，环境等因素对正规化参数和 NRM 的作用过程是一致的。他们倾向于用在室温下获得的剩磁参数如粘滞剩磁 (VRM)、等温剩磁 (IRM)、非磁滞剩磁 (ARM) 等作为正规化参数。

Johnson 等^[3] 认为 ARM 对单畴磁性颗粒特别敏感，是比较理想的正规化参数。还有部分学者推测碎屑剩磁 (DRM) 获得过程与热剩磁类似，而 ARM 的获得过程则与热剩磁非常类似，因此 ARM

便成为比较合理的正规化参数^[3]。但实际上 DRM 与热剩磁获得机理的差别是很大的，不能用此理论来解释 ARM 的合理性。Levi 等^[3] 分析 ARM、IRM 和 NRM 的矫顽磁力谱，发现 ARM 与 NRM 是非常相似的，而 IRM 与 NRM 则有较大不同。在不同磁场强度下，NRM/ARM 的比值比较稳定，而 NRM/IRM 则变化较大。矫顽磁力谱的相似性和比值的稳定性，说明 ARM 比较可取。

StRM 是将原沉积物在实验室重新模拟其沉积过程，以获得剩磁^[3]。但是这种沉积类型与磁场并不一定呈线形关系，而且实验室模拟的沉积过程与自然沉积过程有很大差别，在这种情况下获得的剩磁可能不能真实记录相对磁场强度。另外，这种测试方式非常耗时，需要大量样品，而且破坏了沉积物的原有结构，不适合大量样品的测试。

综上所述，大部分学者倾向于用 ARM 作为正规化参数。但当磁性颗粒间的相互作用对 ARM 影响较大时，它并不适合作为正规化参数，这时 IRM 则比较理想。同时，由于 χ 测量的快捷性，在实际应用中也比较广泛。不管用哪个参数来正规化 NRM，它们最终正确的结果都应该是相似的。

1.3 可靠性检验

(1) Pseudo-Thellier 方法 虽然在相对强度研究的过程中，对 NRM 都利用 χ 、ARM 或 IRM 等磁性参数进行了正规化，但是否完全消除了气候等环境因素的影响，仍然值得疑惑。Tauxe 等^[14] 提出了一种新的方法—Pseudo-Thellier 方法，来研究相对磁场强度，这也是对常规方法的检验标准之一。

Pseudo-Thellier 方法的基本思路来源于火山岩中研究绝对磁场强度的 Thellier-Thellier 方法。其实质是直接将含有某一特定矫顽磁力或阻挡温度组分的 NRM 与在相同条件下获得的 ARM 或者热剩磁 (TRM) 做比较。方法有 3 个步骤：①首先测量 NRM，然后用尽可能相近的梯度逐步退磁。退磁过程采用三轴“双重退磁法 (double demagnetization)”。将样品沿 x ， y ， z 3 个垂直方向磁化，测量后再次沿 $-x$ ， $-y$ ， $-z$ 方向磁化重新测量，计算平均值作为此点的剩磁。采用双重退磁的原因是一些沉积物在退磁过程中容易获得假的 ARM，而这一方法可以有效的去除。②将对应的样品放置在与 NRM 退磁相同梯度的磁场下，获得 ARM。③将在相同磁场条件下剩余的 NRM 与获得的 ARM 作图 (Arai plot)，选取能够至少最佳拟合连续 4 个点的直线斜率作为相对强度的估计值 (m_a)，其它可信度达到 90% 以上的斜率值作为 m_a 的上下界。

Pseudo-Thellier 方法提供的相对强度值是相对

可靠的，但是进行连续大量样品的测试，工作量将十分巨大。因此一般作为常规方法的检验，来观察采用 χ 、ARM、IRM 等参数正规化 NRM 后的系统误差和 VRM 对相对强度的贡献。

(2) 相关性检验 Harrison、Somayajulu、Kent 等曾指出，相对强度的估计不应该与反映岩石磁性变化的参数有任何相关性，而且在同一地区在相同的时间尺度下，多个记录应该是相吻合的^[3]。有效的方法是检验在某一频率范围内它们之间是否具有-致性。Tauxe 和 Wu^[3, 13] 系统地阐述了这一方法。他们用“相关函数”来估计随时间序列而变化的两组数据间的相关性（即交叉谱分析）。如果相对强度受岩性的影响，那么它与反映岩性变化的磁性参数在一定频率范围内肯定是有相关性的。他们采用的相关函数如下：

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{|S_{xx}(f)| |S_{yy}(f)|}$$

f 表示某一特定的频率， $S_{xx}(f)$ 、 $S_{yy}(f)$ 、 $S_{xy}(f)$ 分别表示在特定频率下，两个数据系列 x 、 y 的自动谱密度函数和交叉谱密度函数。 γ_{xy}^2 是 x 、 y 的平方相关性。的值在 0 ~ 1 区间，值越大表示相关性越强。上述等式的零相关性检验由下列关系给出：

$$c^2 = 1 - (1 - \alpha)^{2/(\nu - 2)}$$

$\alpha = 0.95$ 是 95 % 的置信度， ν 是等价自由度（这里 $\nu = 24$ ）。如果 γ_{xy}^2 大于 0.24，则两个时间序列在 95 % 的水平与零相关有显著不同。

2 Brunhes 极性期以来的相对磁场强度变化

2.1 相对强度变化及其极性事件

2.1.1 200 ka 以来的强度变化 从深海沉积物中研究 200 ka 以来的相对强度，在 10 年的时间取得了显著的成果^[5, 6, 15, 16]。这些研究都是在满足上述磁性稳定和一致性检验的基础上进行的，结果基本上都可再生。在众多的研究中，Yohan Guyodo 等^[9] 分析叠加全球 18 条记录所得的综合强度曲线（Sint 200），具有标志性意义（图 2）。Sint 200 强度曲线的建立，一方面解释了沉积物是否可以记录可信的地磁场相对强度变化，另一方面说明全球 10 ka 尺度的地磁场相对强度变化具有一致性，可以作为全球对比和定年的工具。

Sint 200 强度曲线的总体特征是呈非对称的“锯齿状”，在 125 ka 以来稳定时间较长，而 140 ~ 200 ka 期间变化较快。在 40、100 ~ 110 和 190 ka 存在 3 处特别显著的低谷，分别对应于 Laschamp、Blake 和 Jamaica 短期极性事件，从 40 ka 以来强度

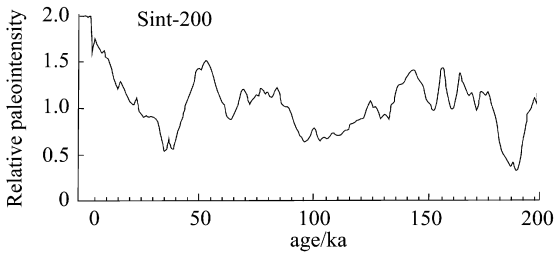


图 2 200 ka 以来的相对磁场强度综合曲线^[9]

Fig. 2 Synthesis curve of relative paleointensity during the past 200 ka

逐渐增加。尽管 Sint 200 没有进行绝对强度的校正，但其结果与 Meynadier 等参照绝对强度校正的地中海—印度洋相对强度曲线非常相似。

Andrew、Channell 等^[6, 7] 在北太平洋、太平洋赤道西侧和南大西洋的工作进一步验证了强度变化的相对全球性^[6, 7]。所有记录共同的特征是在 190、100 ~ 105、60 ~ 70、30 ~ 40 ka 有明显的低谷，从 30 ka 到现在强度逐渐增加。与 Sint 200 相比，Andrew 等的结果在时间控制点和变化幅度上有一定偏差，这是由于氧同位素定年的分辨率和 Sint 200 是各记录的平均值的原因造成的。这不能否定它们之间总体特征的相似性。

2.1.2 Brunhes 极性期以来的相对强度变化 1977 年 Kent 等^[9] 对 Brunhes 极性期以来深海沉积物中的相对强度进行了研究。他们采用能够反映磁性矿物浓度变化的参数来正规化 NRM。在 14.70 m（B/M 界限以来，当时认为是 700 ka）长的强度记录上，发现有 3 种波长的组分：一是约占曲线长度一半的宽阔的基线，另一种是 1 m 长的主波长，最后一种是叠加在 1 m 波长之上的短周期波长。经过能谱分析，认为存在 43 ka 的周期。这一周期恰好与地球轨道的倾斜率参数周期对应。他们进而讨论地球轨道参数对地磁发动机的影响，将地磁场强度变化与气候变化相联系。后来，Jean Pierre 等^[17] 对约 4 Ma 来的相对强度研究显示，磁场强度呈不对称的锯齿状，每次强度的大幅度降低，基本上都伴随着地磁极性的变化。强度在极性稳定时期缓慢降低，在极性变化之后，立即快速恢复。但是他们认为这一规律在 Brunhes 期以来显得相对稍微复杂，相对强度没有显示有规律的变化，也没有观察到非常显著的极性倒转事件。然而从他们的相对强度曲线上，可以看到 Brunhes 期以来的一些极性漂移或短期的极性事件，都对应着强度的低谷。

比较系统的工作同样是 Guyodo 等^[4] 在 1999 年完成（图 3）。他们在 Sint 200 工作的基础上，又新

增加 16 条具全球分布性的大洋钻孔, 其中 10 个包括了约 600~800 ka 以来的记录。综合 33 条钻孔记录的相对强度曲线(800 ka 以来, Sint 800)其主要特征与 Sint 200 和 Jean Pierre 等的工作是相似的, 强度曲线呈不对称锯齿状, 许多强度的低值点与迄今已经发现的一些极性事件的时间是一致的, 如 Laschamp 事件, Blake 事件, Jamaica/Pringle Falls 事件, Calabrian Ridge 2 West Eifel 事件, Big Lost Emperor 事件, Delta 事件等。极性事件或漂移发生时, 强度降到一个临界值 $4 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ 以下, 也就是说小于现在磁场强度的一半。当强度降低到这个程度时, 将会出现非偶极子成分。Toshitsug^[18] 对北太平洋的两个钻孔研究中, 比较显著的强度低值也分别发生在 30~50、100~120、180~200、280~300、380~420、500~550、600 和 660~700 ka, 与前面的结果基本上是一致的。在最近几年众多的强度研究中, 这些低值事件进一步被验证^[19]。所有记录另一个共同的特征是在 Brunhes Matuyama 极性转换之后, 出现相对强度的最高峰, 之后缓慢下降。Brunhes 极性期期间相对强度的平均值不低于现在的强度值。

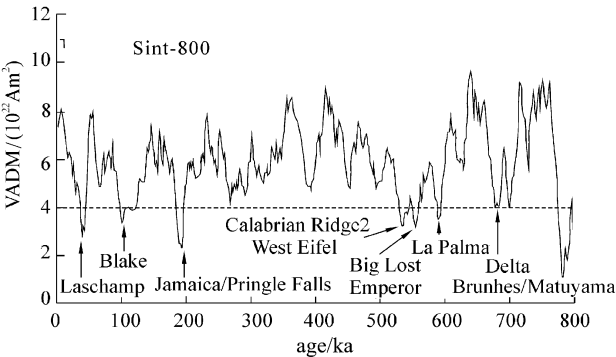


图 3 80 ka 以来的相对磁场强度曲线^[4]
Fig 3 Synthesis record of relative paleointensity over the past 800 ka
(水平虚线表示当磁场强度低于此值时, 可以观察到极性变化^[4])

2.2 相对强度变化与天文周期

地磁场强度的变化是否与天文周期有关, 是长期以来争论的问题之一。在 Kent 等^[9]的研究中发现存在 43 ka 的周期恰好与地球轨道要素的 41 ka 周期临近, 从此以后许多学者认为磁场强度的变化与天文周期息息相关, 进而引伸到磁偶极子活动与天文周期的相关性。最近 Channell 等在北大西洋两个高分辨率的钻孔沉积物中 (ODP Sites 983、984) 也发现了几十万年以来的相对强度记录中存在 41 ka 的周期。分析相对强度与体积磁性参数间的相

关系数, 显示没有任何关联。因此他们推论至少地球轨道的倾斜率周期反映了地磁场的一种性质^[6]。在 Toshitsug Yamazaki 的研究中, 100 ka 的偏心率周期也比较显著, 这一周期在岩性参数上并没有表现出来, 因为钻孔位于远洋环境, 水深大于碳酸岩补偿深度 (CCD)^[18]。从这些资料分析似乎地球磁场强度的变化与地球轨道周期应该有一定的联系。然而在 Jean Pierre、Yohan Guyodo 等^[4,5,17]的工作中磁场强度的变化却没有显示任何主导周期。Yohan Guyodo 等^[20]对 ODP Site 983 孔的相对强度记录进行小波分析, 发现强度记录中地球轨道参数的周期与 IRM、ARM/ κ 等参数具有相关性。这一结果说明在某些钻孔中发现与地球轨道要素相近的周期, 可能是没有过滤掉气候因素对沉积物的影响。

3 应用及其展望

地球磁场强度最初研究的动力来源于对磁场矢量全面认识的需要, 但随着连续的相对强度记录研究的进展, 它在宇宙成因核素如 ¹⁰Be、¹³Cl 输入量的校正, 以及 ¹⁴C 测年的校正等方面的应用逐渐引起人们的注意。Laj 等^[20]就根据 50 ka 以来的地磁场强度变化规律来校正放射性碳同位素的测年数据。Yvo S. Kok 建立 200 ka 以来的 ¹⁰Be 曲线, 将它与 Sint 200 相比较, 发现它们之间有良好的—致性。Frank 等发现在 200 ka 以来, ¹⁰Be 输入量的几个高值, 基本上都可以与相对强度的低值对应^[1]。在全球变化的研究中, 因为磁场强度的长期变化具有全球性, 因而它可以提供全球对比的时间标尺。千年尺度的变化, 可能加入了非偶极子成分, 虽不具有全球性, 但至少具有区域性, 在区域研究中仍具有对比意义^[9]。尤其是由于 CaCO₃ 的缺乏而不能建立有效氧同位素地层的沉积物, 相对强度的对比和提供的时间标尺具有更重要的意义。即使在可以建立氧同位素年代学的沉积物中, 同位素阶段之间的界线有时并不明确。磁场相对强度的研究, 将是十分可靠的辅助对比指标。在最近的文献中, “地球磁场相对强度地层学”或“相对强度年代学”的名词已经出现, 这将是相对磁场强度研究的新领域。

参考文献:

[1] FRANK M, SCHWARZ B, BAUMANN S. A 200kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from ¹⁰Be in globally stacked deep-sea sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 149: 121—129.
[2] BAUMGARTNER S, BEER J, MASARIK J. Geomagnetic

- modulation of the ^{36}Cl flux in GRIP Ice Core, Greenland[J]. Science, 1998, 279: 1330—1332.
- [3] TAUXE L. Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: theory and practice[J]. Review of Geophysics, 1993, 31: 319—354.
- [4] GUYODO Y, VALE J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr[J]. Nature, 1999, 399: 249—252.
- [5] GUYODO Y, VALE J P. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200 000 years [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996, 143: 23—26.
- [6] CHANNELL J E T, STONER J S, HODELL D A, et al. Geomagnetic paleointensity for the last 100 kyr from the sub-antarctic South Atlantic: a tool for inter-hemispheric correlation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 175: 145—160.
- [7] ROBERTS A P, LEHMAN B, WEEKS R J. Relative paleointensity of the geomagnetic field over the last 200, 000 years from ODP Sites 883 and 884, North Pacific Ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 152: 11—23.
- [8] SCHNEIDER D A, MEILLO G A. A high resolution marine sedimentary record of geomagnetic intensity during the Brunhes Chron[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996, 144: 297—314.
- [9] KENT D V, OPDYKE N D. Palaeomagnetic field intensity variation record in a Brunhes epoch deep-sea sediment core [J]. Nature, 1977, 266: 156—159.
- [10] KENT D V. Apparent correlation of palaeomagnetic intensity and climatic records in deep-sea sediments[J]. Nature, 1982, 299: 538—539.
- [11] KING J W, BANERJEE S K, MARVIN J. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59: 404—419.
- [12] BANERJEE S K, KING J, MARVIN J. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies[J]. Geophys Res Lett, 1981, 8: 333—336.
- [13] TAUXE L, WU G. Normalize remanence in sediments of the western equatorial Pacific: relative paleointensity of the geomagnetic field[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 12337—12350.
- [14] TAUXE L, PICK T, KOK Y S. Relative paleointensity in sediments: a pseudo-Thellier approach[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(21): 2885—2888.
- [15] STONER J S, CHANNELL J E T, HILLAIRE-MARCAL C. Geomagnetic paleointensity and environmental record from Labrador Sea core MD95—2024: global marine sediment and ice core chronostratigraphy for the last 110 kyr[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 183: 161—177.
- [16] KRUIVER P P, KOK Y S, DEKKERS, et al. A pseudo-Thellier relative palaeointensity record, and rock magnetic and geochemical parameters in relation to climate during the last 276 kyr in the Azores region[J]. Geophysical Journal International, 1999, 136: 757—770.
- [17] JEAN-PIERRE VATEL, LAURE MEYNADIER. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years[J]. Nature, 1993, 366(18): 234—238.
- [18] TOSHITSUGU YAMAZAKI. Relative paleointensity of the geomagnetic field during Brunhes Chron recorded in North Pacific deep-sea sediment cores: orbital influence? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 169: 23—35.
- [19] BASSINOT F C, et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 126: 156—159.
- [20] YOHAN GUYODO, PHILIPPE GAILLOT, CHANNELL J E T. Wavelet analysis of relative geomagnetic paleointensity at ODP Site 983[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 184: 109—123.

The Progress of Relative Paleointensity of the Geomagnetic Field over the Brunhes Epoch

YANG Xiao qiang¹, LI Hua mei², ZHANG Cheng bo¹

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China)

Abstract: One of the key tasks in geomagnetic field study is to obtain the relative paleointensity records from continuous and well dated sediments. Its meaning is not only on exploring the behavior of the earth's magnetic field in the past and dynamics of the inner earth, but also on calibrating some cosmogenic radionuclide production rate such as ^{10}Be , ^{14}C . In recent years, the concept of "Relative paleointensity chronostratigraphy" is gradually springing up, and the application of relative intensity as a new global correlating tool attracts much attention. The study methods of relative intensity and some progress in this field over the Brunhes epoch were reviewed.

Key words: relative paleointensity; relative paleointensity chronostratigraphy; global correlation; Brunhes epoch