

西太平洋暖池温区中心沉积物磁化率记录的 YD 和 Heinrich 冷事件

汤贤赞 陈 忠 颜 文 陈木宏

(中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放实验室, 广州 510301. E-mail: wyan@scsio.ac.cn)

摘要 通过西太平洋暖池温区中心 WP 92-5 柱样沉积物磁性地层学、磁化率和 $\delta^{18}\text{O}$ 等测试与分析, 获得了布容正极性期内哥德堡、莫诺湖(Mono Lake)和蒙哥(或 Maelifell)3 个短暂的地球磁场漂移, 它们发生的时间约 12.1~11.3, 25.0~24.0 和 31.0~28.0 kaBP; 并从该柱样的磁化率记录中发现 Younger Dryas (YD)和 Heinrich 冷事件沉积层. YD 冷事件出现于 30~22 cm, 年龄约 11.5~10.6 kaBP; Heinrich 层中的 H1, H2 和 H3 冷事件分别出现于 51~39, 108~91 和 140~126 cm, 发生时间约 15.1~13.0, 25.0~22.1 和 30.6~28.2 kaBP, 与大西洋中部 SU90-09 柱样沉积物磁化率所记录的 H1, H2 和 H3 冷事件具有较好的对应关系, 表明磁化率的变化可能是气候频繁颤动特征在大洋沉积中的一个重要标志.

关键词 西太平洋暖池 磁性地层 磁化率 YD 事件 Heinrich 层

以往的磁性地层和环境磁学研究结果^[1~3]表明, 用于磁性地层学和环境磁学研究的样品一般选择中、高纬度地区, 因为样品中磁性矿物的磁矩磁化状态相对稳定, 易获得可期望的磁倾角(I)和磁偏角(D), 可为磁性地层的划分和磁环境信息的提取提供较可靠的分析数据. 而低纬度地区的样品要获得可期望的磁倾角和磁偏角就相对困难些, 尤其处于地球赤道与磁赤道(magnetic equator)附近的样品, 其磁矩磁化状态可能正向磁化, 也可能反向磁化, 因此用于磁性地层研究的不多见.

西太平洋暖池 WP 92-5 柱样很典型, 既位于地球赤道附近偏南, 又位于磁赤道附近偏南, 但未见南半球南极海区沉积物样品的正向磁化为负极性, 反向磁化为正极性的特征^[4], 柱样磁倾角仍具北半球中、高纬度海洋沉积物的正向磁化为正极性、反向磁化为负极性的磁学性质. 它记录的哥德堡、莫诺湖和蒙哥地球磁场漂移, 是对全球陆地、海洋和湖泊沉积物磁性所记录的 3 个短暂的地球磁场漂移^[5~8]存在的又一次佐证. 关于沉积物磁化率的突变是否与气候冷暖变化有关, 随着对这方面研究的不断深入, 近年来在南极^[3]、大西洋中部^[9]、西北太平洋^[10]和中国藏南沉积地区^[11]沉积物的环境磁学及冰期旋回的相关研究中, 磁化率都作为古气候旋回的一个重要的替代性指标, 直接或间接地暗示着它们之间存在一定的相关性, 但目前对其机理还不十分清楚.

WP 92-5 磁化率记录的 YD 和 H1, H2 及 H3 冷事

件, 也是一个典型例子, 它们不但与高、中、低纬度海洋沉积物所发现的 H1, H2 和 H3 冷事件^[12~16]及其柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示的低温段具有较好的对应关系, 而且发生时间也基本一致, 表明西太平洋暖池温区中心发生过 Heinrich 事件, 这对进一步研究和认识南北半球交界处大洋暖池区的地球磁场漂移和气候变化十分重要.

1 样品与测试方法

WP 92-5 柱样沉积物样品是西太平洋科学考察(1992 年)时采自赤道以南的西太平洋暖池区, 地理位置为 155°01.16'E, 2°02.59'S, 水深 2345 m, 柱样长度 165 cm, 去除上下各 2.5 cm 的扰动样品, 实际用于磁性地层研究的样品长度为 160 cm. 沉积物主要是黄褐与黑褐色相间的粉砂质黏土和黏土质粉砂, 并见有呈绿灰色夹黄褐色条带层.

用于磁学研究的样品共 88 个, 其中自上而下连续垂直采样 64 个(通用古地磁标准圆柱体样品), 间隔 2.5 cm. 为了提高测量分辨率, 在垂直采样的层位上段(10~20 cm)、中段(75~85 cm)和下段(145~155 cm)加密并列采样 15 个, 其他层位随机采样 9 个(2 cm × 2 cm × 2 cm). 样品剩余磁化强度、磁偏角和磁倾角测试是在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室 2G-755R 型低温超导磁力仪(美国产)上进行的(因为样品是含水且装在无磁性盒子里密封保存的沉积物, 不宜作热退磁, 所以选择交变退磁). 首

先对所有样品进行天然剩磁测量, 然后进行系列退磁, 系列退磁的交变磁场为 5, 10, 15, 20, …, 80 mT. 从两个不同的天然剩余磁化强度(NRM)样品退磁结果(图 1)看, 随着退磁场递增, 样品的 NRM 逐渐下降, 曲线较光滑, 未有大幅度的跳跃, 表明沉积物中磁性物质较单一, 磁化均匀, 在 35 ~ 40 mT 之间可获得可靠且稳定的磁倾角. 柱样是用重力活塞采集的, 采集时未定向, 磁偏角无实际意义. 样品的体积磁化率是在中国科学院南海海洋研究所古地磁实验室 KLY-1 型磁化率仪(捷克产)上测量的, 仪器测量精度为 2.9×10^{-9} SI. 磁化率样品取样长度、测量个数与所测剩磁的个数相同. 测量方法是: 先测所有样品的各向同性磁化率, 再测各向异性磁化率, 未见 3 个主轴方向(K_{xx} , K_{yy} , K_{zz})的磁化率有明显的差异, 进一步说明柱子样品中的磁化介质是相对均匀的.

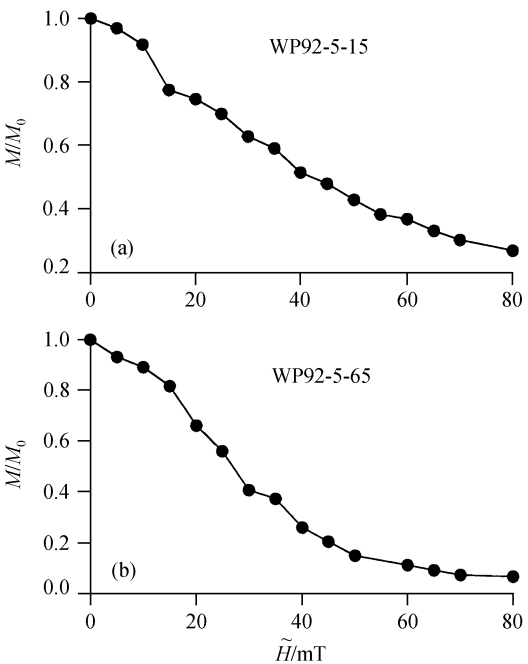


图 1 WP 92-5 柱样沉积物样品的归一化退磁曲线

Fe_2O_3 经 HNO_3 , HF 和 HClO_4 溶解后用原子吸收法测定; FeO 用容量法测定; 氧同位素分析为每 1 cm 取 1 个测试样, 全柱共取 160 个样品. 测试标本选用浮游有孔虫类不具袋状的袋拟抱球虫(*G. sacculifer*) 种壳体, 经常规处理后, 样品送国土资源部青岛海洋地质研究所海洋沉积开放研究实验室用 MAT-251 测试; ^{14}C 测年取全岩样送中国科学院广州地球化学研究所由沈承德完成测试.

2 结果与讨论

2.1 柱样的磁性地层

根据 WP 92-5 柱样沉积物样品的退磁结果, 选择退磁场 35 ~ 40 mT 之间的磁倾角划分磁性地层, 在该退磁场下获得的剩余磁化强度(M_r)约占 NRM 的 40% ~ 50% 左右(图 1). 磁倾角较稳定(图 2(a)), 并结合 ^{14}C 测年, 建立柱样的磁极性柱(图 2(b))如下:

35 ~ 30 cm(柱样深度, 下同)段. 沉积物磁性记录了 3 个负磁倾角(图 2(a)), 分别是 -0.8° , -4.5° 和 -5.6° . 按照古地磁极性年表^[17]确定的事件, 应为哥德堡地球磁场漂移, 年龄约 12.1 ~ 11.3 kaBP. 对于哥德堡地球磁场漂移目前还有争议, 年龄的确定上也有差异, 在中国南海低纬度($7^\circ \sim 5^\circ\text{N}$ 之间)南沙海区 NS89-76 和 NS87-11 柱样沉积物环境磁学研究中, 将这一地球磁场漂移发生的时间定为 12.0 ~ 11.0 kaBP^[5], 黄海 QC1, QC2 和 QC3 钻孔岩芯定为 12.5 ~ 11.0 kaBP^[6], 但比较一致认定的时间是在 13.0 ~ 11.0 kaBP^[17]之间.

95 ~ 85 cm 段. 发现 4 个负磁倾角(图 2(a)), 分别为 -3.02° , -7.97° , -0.11° 和 -0.37° . 认为是莫诺湖地球磁场漂移, 最近的北冰洋沉积物确定的年龄约为 25.3 ~ 24.0 kaBP^[8], 文献[17,18]给出的年龄在 25.0 ~ 24.0 kaBP 之间, 格陵兰海-Ⅱ将其定为 28 ~ 27 kaBP^[7]. 考虑到 WP 92-5 柱样在 112.5 cm 处 ^{14}C 测年为 (24.86 ± 0.98) kaBP, 莫诺湖地球磁场漂移在研究海区发生时间在 25.0 ~ 24.0 kaBP 较合适.

140 ~ 122.5 cm 段. 发现 8 个负磁倾角(图 2(a)), 分别是 -5.16° , -7.51° , -2.42° , -4.45° , -4.73° , -3.51° , -0.23° 和 -1.09° . 按照古地磁极性年表^[17]确定的事件, 应为蒙哥(或 Maelifell)地球磁场漂移, 年龄为 31 ~ 28 kaBP. 根据 WP 92-5 柱样各段的界限年龄和深度(图 2(b)), 求得其平均沉积速率为 5.75 cm/ka, 由此推算 140 ~ 160 cm 段之间的年龄约为 3.48 kaBP, 则柱样底界(160 cm)年龄约 34.48 kaBP. 此外, 柱样 ^{14}C 开孔年龄为 (6.25 ± 0.1) kaBP, 表明重力活塞采样管在取样时将表层悬浮状部分沉积物抽空而流失, 抽空作用对 30 ~ 5 cm 段沉积物产生影响, 是磁倾角偏大(约 $50^\circ \sim 60^\circ$)的主要原因.

2.2 YD 事件与 Heinrich 层的确定

WP 92-5 柱样沉积物的磁化率记录了西太平洋暖池温区中心的 YD 事件和 Heinrich 层, 根据柱样沉积

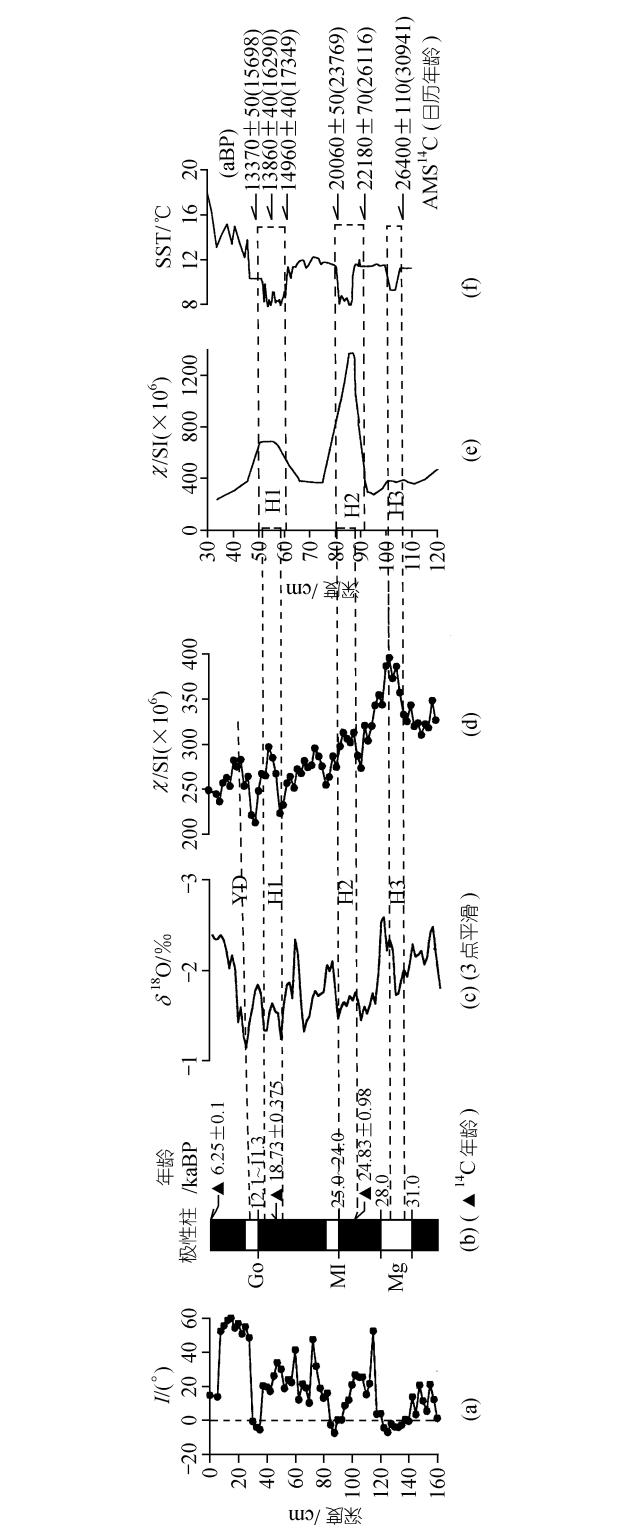


图 2 WP 92-5 柱样沉积物的磁性地层和 Heinrich 事件 (a)~(d) 分别为 WP 92-5 柱样的磁倾角、极性柱(Go: 哥德堡, MI: 莫诺湖, Mg: 蒙哥或 Maelifell 地球磁场漂移)、 $\delta^{18}\text{O}$ 和磁化率曲线; (e) SU90-09 柱样磁化率曲线(Mid-Atlantic, 据文献[9]图 3 整理); (f) SST 曲线(据文献[9]表 1 数据整理, AMS ^{14}C 引自文献[9]图 3)

物磁性地层柱(图 2(a))中的年龄和 ^{14}C 测年推算, YD 事件和 Heinrich 层中的 H1, H2 和 H3 冷事件发生的时间如下:

磁化率记录的下同)YD 冷事件沉积层位于柱样 30 ~ 22 cm 段, 磁化率曲线由低值向高值转变, 呈突峰, 并与柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示的低温期对应(图 2(c)和(d)). 推算该冷事件的年龄约为 11.5 ~ 10.6 kaBP, 与阿拉伯海 TOC111KL^[14], 苏禄海 769 和 768^[12], 北大西洋 VM29-191 和 VM23-81^[19]以及南极柱样沉积物^[3] 分别给出的年龄 12.0 ~ 11.4, 11.7 ~ 10.3 kaBP 相当.

H1 冷事件的沉积层位于柱样 51 ~ 39 cm 段, 沉积厚度 12 cm, 磁化率曲线呈突峰(图 2(d)), 与 SST($^{\circ}\text{C}$) 曲线指示的低温(图 2(f))和大西洋中部 SU90-09 柱样磁化率^[9]指示的 Heinrich 层中的 H1 冷事件对应(图 2(d)和(e)). 推算该冷事件的年龄约为 15.1 ~ 13.0 kaBP, 与大西洋中部 SU90-08 和 SU90-09 柱样确定的时间为 15.23 ~ 13.44 及 $(14.96 \pm 0.06) \sim (13.37 \pm 0.05)$ kaBP^[9]基本吻合.

H2 冷事件的沉积层位于柱样 108 ~ 91 cm 段, 沉积厚度 17 cm, 与 SU90-09^[9]柱样磁化率指示的 H2 冷事件对应, 也与 SST($^{\circ}\text{C}$)曲线和柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示低温段(图 2(c)~(f))对应, 该冷事件的年龄约为 25.0 ~ 22.1 kaBP. ^{14}C 在 112.5 cm 处的测年为 (24.83 ± 0.98) kaBP, 则 H2 冷事件在本研究海区发生的时间是合理的, 与 VM29-191, VM23-81, TOC111KL^[14], 769 和 768^[20] 等柱样沉积物记录的 H2 冷事件的年龄 25.0 ~ 22.1 kaBP 相吻合.

H3 冷事件的沉积层位于柱样 140 ~ 126 cm 段. 沉积厚度 14 cm, 推算其年龄约为 30.6 ~ 28.2 kaBP, 与 SST($^{\circ}\text{C}$)曲线和柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示的低温(图 2(c), (d)和(f))对应. 虽然 SU90-09^[9]柱样磁化率突峰没有 H1 和 H2 那样明显, 但仍呈增大的趋势, 对应 SST($^{\circ}\text{C}$)曲线指示的低温, 是 H3 冷事件的标志. 开始年龄为 (26.4 ± 0.011) kaBP^[9](图 2(f)), 与 WP 92-5 柱样推算的年龄存在一些误差, 而与靠近 SU90-09 柱样位置的 SU90-08 柱样磁化率记录的 H3 冷事件年龄 30.1 ~ 27.48 kaBP^[9]是较吻合的, 并与其他海洋^[12,14,20]发现的 H3 年龄相当.

2.3 讨论

在 $\delta^{18}\text{O}$ 地层学研究中, 往往以 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的峰谷

(负值大)作为判断 YD 和 Heinrich 层中的 H 冷事件的标志^[12,14,16], 而 WP 92-5, SU90-08 和 SU90-09^[9]则以柱样磁化率曲线的突峰(正值大)为标志(图 2(d)和(e)), 虽然峰、谷相反, 但指示的 H 冷事件是相同的.

WP 92-5 柱样的地球化学元素分析结果表明, 沉积物磁性的主要来源是铁氧化物(Fe_2O_3 , 图 3), 其含量多少和面分布密度的疏密程度取决于当时的环境状态, 是决定磁化率和剩磁强度大小的关键. 从 Fe_2O_3 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 的变化曲线可证明: 在发生 YD, H1, H2 和 H3 冷事件的沉积物层中, Fe_2O_3 含量高、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值大, NRM 强度增强, 所呈的突峰相互对应(图 3). 在这些层位中的磁化率也同样增大, 呈突峰, 与柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示的低温期对应(图 2(c)和(d)), 表明低温期层位中的 Fe_2O_3 比其他层位富集. 例如, H1, H2 和 H3 层 Fe_2O_3 分别在 3.3%~3.7%, 2.5%~2.8%和 2.5%~3.0%之间, 比未发生 H 冷事件时的层位高, YD 冷事件层也高于温暖期(0~15 cm). 由此认为导致 H 冷事件层磁化率变大的主要原因是: Fe_2O_3 的富集, 衍生磁性组分 MnFe_2O_4 (地球化学元素分析这些层的 Mn 含量较高)的参杂, 使柱样沉积物中磁性颗粒的面分布密度得到加强, 促使原有的 Fe_2O_3 变形, 在低温下重结晶, 磁化小区域(磁畴)被改变. 因为柱样沉积物不存在磁化率各向异性, 磁化介质比较均匀, 其内部本身磁性矿物的颗粒引起磁化率突变的可能性很小, 所以只有当外部环境状态发生变化时, 磁化率也发生变化.

WP 92-5 和 SU90-09^[9]柱样磁化率变化对比证明, 它们的峰值相互对应, 并与大西洋中部 SST 和柱样本身的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线指示的低温段对应(图 2). 年龄结果也与 SU90-09^[9]柱样 H1, H2 和 H3 发生的时间近似,

即磁化率高值的产生, 是 H 冷事件直接导致的结果, 故可从磁化率的记录中提取冷/暖变换的信息. 当 H 冷事件未发生时, SST($^{\circ}\text{C}$)温度高于发生时约 4°C (图 2(f)), 这时南极密度很大的冷水团经环南极环流向东输送, 再经北大西洋向南流动形成一股强劲的底層水, 并通过印度洋迅速进入太平洋西侧, 使西太平洋形成一股相对北大西洋强度小的底層水; 加剧了暖池区间层水与冷暖水团之间的交换; 交换作用引起的洋流变化, 对原氧化了的表层沉积物重新改造, 在改造过程中磁性矿物被溶解稀释, 颗粒状态发生形变, 使改造后的沉积物中磁性矿物的面分布密度发生了变化; 从而导致 Fe_2O_3 含量降低、磁化率和 NRM 减小(图 2 和 3). 当 YD 和 H 冷事件突发时, 气温下降, 极地冰盖和海冰消融减慢, 进入西太平洋的底層水被削弱, 暖池区间层水和冷暖水团交换作用引起的洋流变化趋缓, 原来埋于底層缺氧环境下被溶解稀释沉淀的部分磁性矿物以孔隙水的方式迁移到沉积物表面, 与新搬运来的沉积物重新凝聚和组合. 组合后沉积物中的磁性颗粒在低温下氧化程度减小, 缓慢的洋流又使其易于富集, 面分布密度得到加强, Fe_2O_3 含量增高(图 2 和 3), 磁化率和 NRM 增大; 造成这一结果的主要因素是温度的频繁变化, 使洋流格局改变, 沉积物被重新改造, 磁性矿物被重新分配. 因此, YD 和 H 冷事件与磁化率突变存在一定的相关性, 时序上趋于一致.

另外, WP 92-5 柱样沉积物的磁性记录结果还表明, 在冰期当发生 H1, H2 和 H3 更寒冷的事件时, 地球磁场极性也发生漂移或将要发生漂移. 例如 H3, H2 的出现正是蒙哥堡和莫诺湖地球磁场漂移之时, H1 的结束之时即是将要发生哥德堡地球磁场漂移的

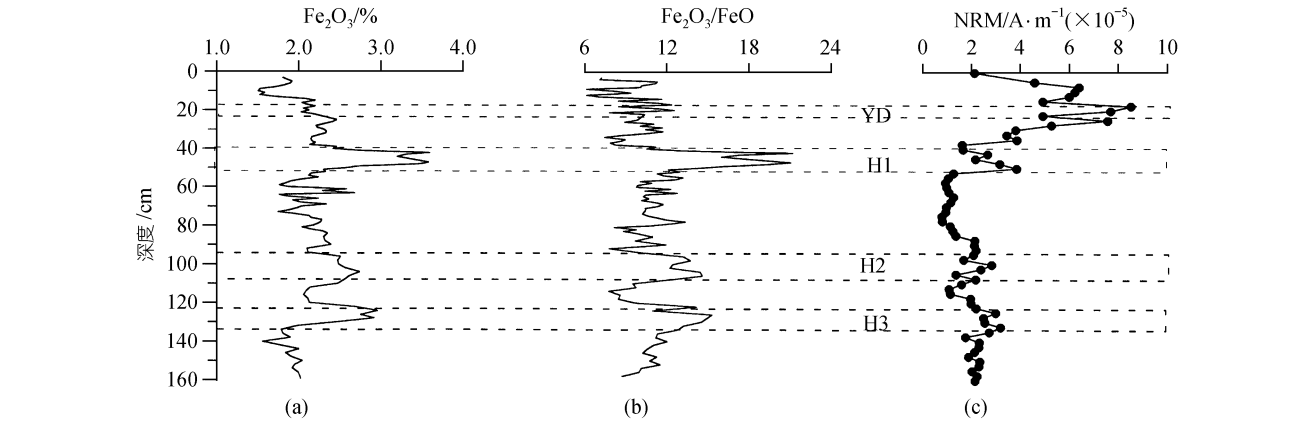


图 3 WP 92-5 柱样沉积物中的 Fe_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和 NRM 变化曲线

开始,而哥德堡地球磁场漂移将要结束之时则出现 YD 事件.气候事件与地球磁场漂移之间是否存在对应关系是一个十分敏感的问题,并引起了广泛关注.但从本柱样和其他柱样^[21]沉积物磁记录的地球磁场长期变化的结果显示它们之间有对应关系的迹象,且在发生的时间上基于一致.虽有冰期的开始与结束能导致地球磁场漂移的相关报道^[22],但尚无定论,仍需要长期的探索与深入研究.

3 结语

WP 92-5 柱样沉积物的磁性地层表明,位于赤道附近(2°02.59'S)南半球西太平洋暖池温区中心沉积物的磁性,与中、高纬度陆地、湖泊和海洋沉积物一样可记录哥德堡、莫诺湖和蒙哥(或 Maelifell)地球磁场漂移,与全球其他地区所确定的这些地球磁场漂移的时间相当,表明近 35 kaBP 以来地球磁场极性曾发生过 3 次短暂的漂移,且具全球性,甚至是同时性.另外柱样虽处南半球,但其磁倾角仍具北半球磁化特征,即负磁倾角为反极性,正磁倾角为正极性,这一磁化特征有待进一步研究给予求证.

WP 92-5 柱样沉积物的磁化率反映西太平洋暖池温区中心存在 Heinrich 层,记录了近 35 kaBP 以来该研究海区曾发生过 YD, H1, H2 和 H3 冷事件,与大西洋中部 SU90-09 柱样沉积物磁化率记录的 H 冷事件有较好的对应关系,时序上基本一致,也与其他大洋沉积物揭示的这些冷事件发生的时间相当.初步认为 YD 和 H 冷事件的发生是导致磁化率突变的主要因素,它们之间存在一定的相关性.因为在这些冷事件沉积层中 Fe₂O₃ 的含量比其他沉积层高,表明低温期磁性矿物易富集,沉积物中的磁性颗粒的密度被加强,原有磁化小区域(磁畴)的结构被改变,所以磁化率突变的特征可用于表征气候的冷/暖变换.

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划(G2000078502)、中国科学院知识创新工程(KZCX3-SW-220)、国家自然科学基金(批准号: 40076018)和中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放实验室基金(BYH02A08)资助.

参 考 文 献

1 Kenneth L V, Andrew P R. Environmental magnetism: Past, present, and future. *J Geophys Res*, 1995, 100(B2): 2175~2192

2 Zhu R X, Coe R S, Zhao X X. Sedimentary record of two geomagnetic excursions within the last 15000 years in Beijing, China. *J Geophys Res*, 1998, 103(B12): 30323~30333

3 侯红明, 罗又郎, 郑洪汉, 等. 南极海洋沉积物中 Heinrich 层的发现及其全球变化意义. *科学通报*, 1998, 43(11): 1206~1209

4 王保贵, 侯红明, 汤贤赞, 等. 东南极普里兹湾 NP93-2 柱样古地磁结果. *南极研究*, 1996, 8(1): 47~52

5 汤贤赞, 颜文, 魏常兴. 南沙群岛及其邻近海区沉积物环境磁学研究. 见: 南海海洋科学集刊, 第 12 集. 北京: 科学出版社, 1997. 25~38

6 周墨清, 葛宗诗. 黄海布容正极性世极性事件的讨论. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(4): 49~56

7 Norbert R N. High-resolution magnetostratigraphy of four sediment cores from the Greenland Sea- II. Rock magnetic and relative palaeointensity data. *Geophys J Int*, 1997, 131: 325~334

8 Norbert R N, Thomas W F, Heidi K, et al. Sedimentation rates in the Makarov Basin, central Arctic Ocean: A paleomagnetic and rock magnetic approach. *Paleoceanography*, 2001, 16(4): 368~389

9 Francis E G, Elsa C, Sylvain H, et al. Zooming on Heinrich layers. *Paleoceanography*, 2001, 16(3): 240~259

10 王慧中, 赵泉鸿, 俞立中, 等. 晚第四纪西北太平洋风尘记录与冰期旋回的比较. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(1): 7~12

11 朱立平, 陈玲, 张平中, 等. 环境磁学反映的藏南沉错地区 1300 年来冷暖变化. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 520~527

12 Braddock K L. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150000 years. *Nature*, 1996, 380: 234~237

13 Peter M, Joseph O, Tom G, et al. Coherent high- and low-latitude climate variability during the holocene warm period. *Science*, 2000, 288: 2198~2202

14 Hartmut S, Ulrich V R, Helmut E. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110000 years. *Nature*, 1998, 393: 54~57

15 陈木宏, 涂霞, 郑范, 等. 南海南部近 20 万年沉积序列与古气候变化关系. *科学通报*, 2000, 45(5): 542~548

16 Mikolajewicz U T, Crowley A S, Voss R. Modelling teleconnections between the North Atlantic and North Pacific during the Younger Dryas. *Nature*, 1997, 387: 384~387

17 Tarling D H. Palaeomagnetism. *British Library Cataloguing in Publication Data*, 1983. 162~215

18 Jacobs J A. Reversals of the Earth's Magnetic Field. 2nd ed. London: Cambridge University Press, 1994. 97~103

19 Gerard B, William S, Maziet C, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257~1265

20 Isabel C, Joan O G, Miquel C, et al. Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography*, 2001, 16(1): 40~52

21 Akira H, Kenneth L V, Franz H, et al. Magnetostratigraphy and relative palaeointensity of late Neogene sediments at ODP Leg 167 Site 1010 off Baja California. *Geophys J Int*, 1999, 139: 829~840

22 Mull R, Morris D. Geomagnetic reversals. *Geotimes*, 1989, 20: 20

(2002-07-16 收稿, 2002-09-27 收修改稿)