科学通报 2008 年 第 53 卷 第 5 期: 577 ~ 582
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示

张玉芬①, 李长安②, 王秋良②, 陈亮①, 马永法②, 康春国②

① 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;
② 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074
E-mail: chanli@cug.edu.cn

2007-09-20 收稿, 2007-12-27 接受
国家自然科学基金(批准号: 90411005, 40472151, 40672206)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2004CB720204)资助项目

摘要 长江三峡何时贯通是研究长江形成的关键问题之一, 也是目前长江研究中争议最大的热点问题之一. 为了解决这一世纪难题, 采取目前国际共识的从源到汇的物质追踪的研究思路和方法, 对采自于江汉平原沉积中心的 2 个钻孔中的沉积物的岩性特征、磁学参数及磁性矿物特征进行了分析研究. 结果显示: 在孔深约 110 m 附近的岩芯中粗颗粒成分和稳定磁性矿物成分的含量均明显增高, 同时沉积物磁化率、饱和等温剩磁、非磁滞剩磁磁化率值也突然增高, 这些均表明在井深 110 m 附近江汉平原水系曾发生过重要调整, 江汉平原的沉积环境和物质成分均发生了重大改变. 该层位可能就是长江三峡贯通的层位, 其贯通时间古地磁测年表明约在 1. 17~1. 12 Ma 之间.

关键词
长江
三峡贯通
江汉平原沉积物
磁学参数特征
磁性矿物特征

长江的形成是流域一些重大科学问题研究的基础, 而三峡的贯通则被认为是研究长江形成的关键之一, 也是目前长江研究中争议最大的热点问题之一. 关于三峡的贯通早在 20 世纪初就引起国内外著名学者Willis[1], Barbour[2], 李四光 [3], 叶良辅和谢家荣 [4], 李春昱 [5]等人的关注. 但以往的研究主要是偏重于地貌学, 区域地质和大地构造演化研究等方法 [6], 很少涉及沉积物的特征, 尤其是沉积物的磁化率特征的研究. 由于地貌成因存在多解性, 区域地质和大地构造影响的复杂性, 以及地质时代的不确定性, 故虽然对长江三峡贯通的研究经历了近一个世纪, 但对贯通的时间仍然存在着不同的看法 [1~3,6~13]. 本文基于江汉平原(盆地)作为长江切开三峡的直接卸载区, 其沉积物必然记录了长江贯通三峡的信息的考虑, 采取目前国际共识的“从源到汇”的物质追踪的研究思路, 选取江汉平原 2 个最具代表性的第四系钻孔岩芯为研究对象, 以沉积物磁化率特征为主要分析手段, 辅以沉积物岩芯、粒度和磁性矿物的特征研究, 通过磁化率变化的物源信息分析, 对长江三峡的贯通进行了探讨.

1 钻孔位置及沉积物岩性特征

江汉平原新沟钻孔位于湖北省监利县新沟镇(图 1), 钻进深度为 400.59 m, 由于采取套管取芯技术, 取芯率达 96%. 江汉平原周老镇钻孔位于湖北省监利县境内周老(咀)镇(图 1), 钻孔全长 300.49 m, 平均取芯率达到 85%以上. 两钻孔均位于江汉盆地的沉积中心, 第四纪厚度大, 沉积较连续, 沉积序列较完整. 且两孔孔位正对长江三峡的出口, 因而是基于江汉平原沉积开展长江三峡贯通的物源示踪研究的理想钻孔.

两钻孔岩芯的岩性具有很好的可对比性. 以新沟孔为例, 该岩芯的岩性特征可明显地分为 5 个岩性段(图 2), 分别构成了细(0~25 m)-粗(25~108 m)-细(108~218 m)-偏粗(218~360 m)-细(360~ 400 m) 2 个半沉积旋回. 自 109 m向上沉积物的粒度明显变粗, 砂砾石层的出现频率增大, 砂砾层中砾石含量增多, 砾石粒径变大, 磨圆度变好 [14]. 其中孔深 109~98.8 m 是全孔粒度最粗, 且砾石层厚度最大的层位. 显示出水动力明显增强的特点.

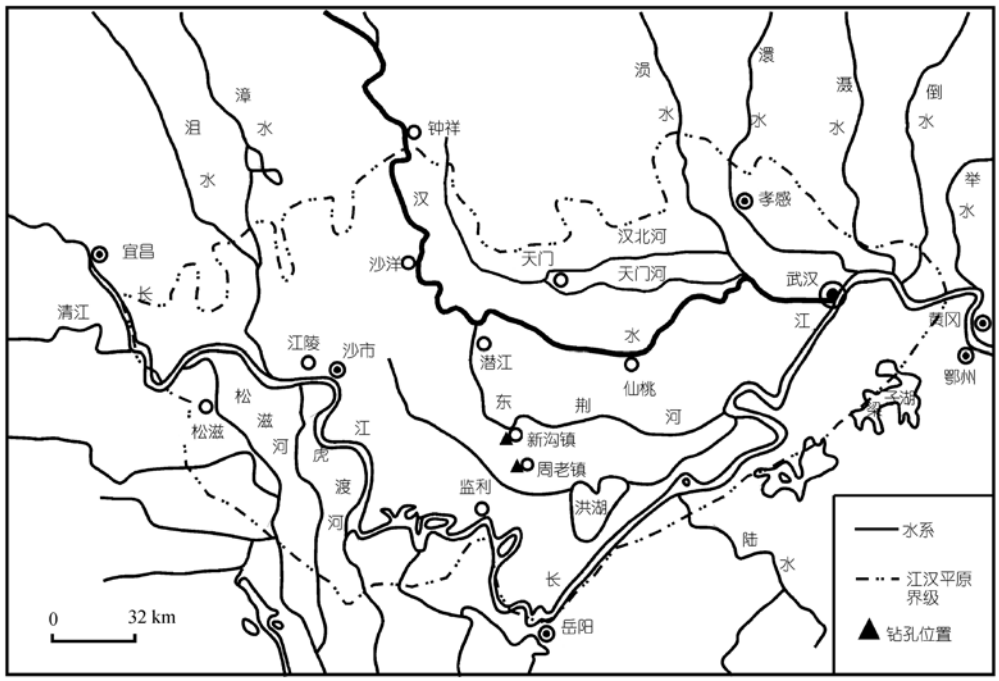

图 1　江汉平原区水系及钻孔位置

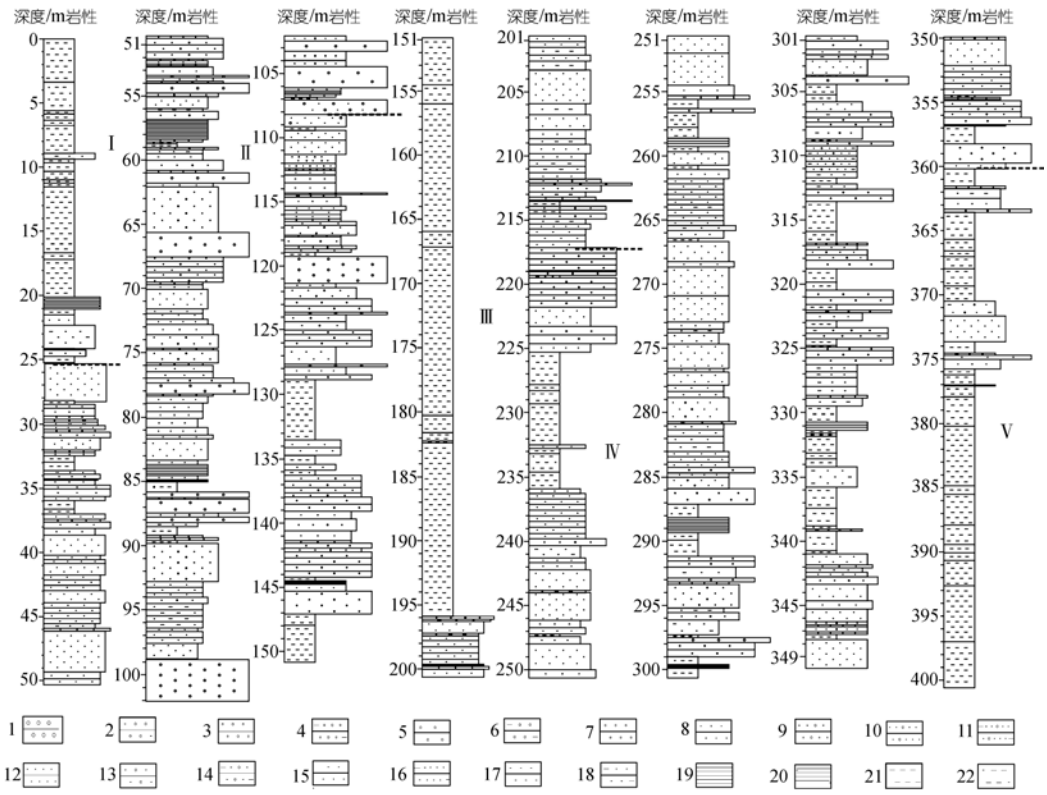

图 2　江汉平原新沟孔岩性柱状图

1. 砾石层; 2. 砂砾层; 3. 含砾粗砂; 4. 含泥砾粗砂; 5. 粗砂; 6. 含泥粗砂; 7. 中砂; 8. 中细砂; 9. 含砾中细砂; 10. 含砾细砂; 11. 含泥砾细砂; 12. 细砂; 13. 含砾粉细砂; 14. 含砾泥质粉细砂; 15. 粉细砂; 16. 泥质粉细砂; 17. 粉砂; 18. 泥质粉砂; 19. 黏土互层; 20. 砂黏土互层; 21. 黏土; 22. 粉砂质黏土

2 样品的采集及测试

分别以 10 cm(新沟孔等间距)和 50~150 cm(周老孔不等间距)对两孔岩芯进行了磁化率样品的采集和测试，新沟孔采集样品 4114 个，周老孔采集样品 335 个. 用直径 2.5 cm，高 2.2 cm 圆柱状无磁性塑料盒进行样品采集，并用胶布密封，以防样品失水. 磁化率样品测量在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院的岩石物性实验室完成，其中新沟孔样品使用仪器为捷克产的 KLY-3S 型卡帕桥，其灵敏度为 2×10^{-8} (SI)，部分样品重复测量误差≤±0.5‰；周老孔样品使用仪器为无定向磁力仪，其灵敏度为 2×10^{-6}(SI)，部分样品重复测量误差≤±2.0‰(文中磁化率为体积磁化率，单位是国际单位制(SI)). 同时对周老孔岩芯中的细粒层以不等间距进行了古地磁年龄样品采集和极性地层研究. 古地磁年龄测试中国地质大学(武汉)古地磁室完成，使用的仪器 Minisep 旋转磁力仪. 此外，我们对周老钻孔岩芯进行了系统的重矿物分析，共采集样品 50 余个，所有样品均在河北省廊坊市地质服务有限公司地质矿产实验室完成. 在磁化率值发生突然变化的附近按不等间距采集了 22 个样品，送华东师范大学河口海岸国家重点实验室进行了有关环境磁学参数的测试.

3 结果分析

沉积物磁化率的大小和特征主要是由沉积物中铁磁性矿物所决定的，也就是说与物源有着密切的关系. 20 世纪 70 年代国外学者就开始了利用磁学特性进行沉积物物源的研究 [15~19]，Thompson等人 [20]在研究北爱尔兰Neagh湖沉积物时，首次提出了湖泊沉积物磁性特征与来源物质组成变化的联系. 近年来，利用磁信息和磁化率特征追踪沉积物的物质来源已在很多国家的沉积环境研究中得到了应用，尤其在流域水系沉积物物源示踪方面已经成为一个重要的方法之一 [18,21~25].

图 3 为新沟孔和周老孔磁化率值随深度变化曲线. 从图 3 可见两岩芯的磁化率值明显地分为两段，周老孔在深度约 100 m 左右，新沟孔在深度约 112 m 附近，钻孔岩芯的磁化率值均突然增大，其平均值由下部的 200 (10^{-6}SI)左右变为上部的 1000(10^{-6}SI)左右(图 3)，相差达 5 倍之多. 这种急剧和如此之大的磁化率值的变化，用气候环境变化是难以解释的，应该与物源的变化有关.

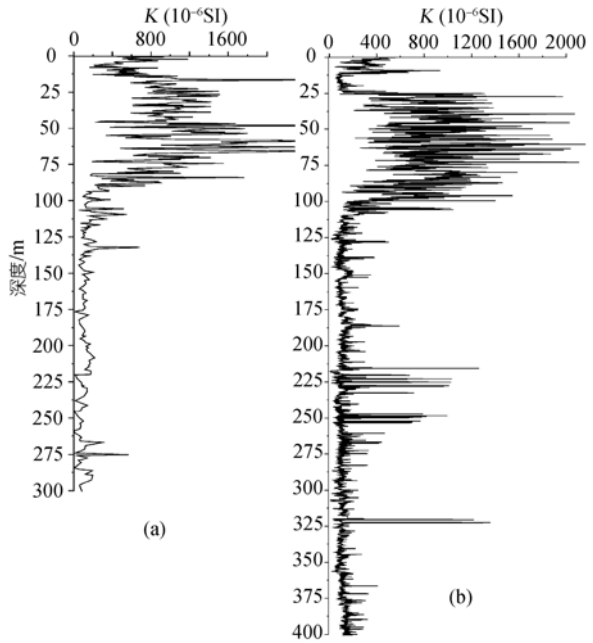

图 3 江汉盆地新沟孔和周老孔岩芯磁化率(体积磁化率)随深度变化曲线

(a) 周老孔; (b) 新沟孔

为了验证上述结果，在磁化率值发生突然变化的附近按不等间距进行了环境磁学参数的采集和测试，结果见图 4，由图可见在孔深 100 m 附近质量磁化率(χ)、饱和等温剩磁(SIRM)、非磁滞剩磁磁化率 X_{ARM} 参数同步发生了增大，而 X_{ARM}/χ和 X_{ARM}/SIRM 值却突然减小，说明在井深 100 m 以后沉积物中磁性矿物含量明显增加，并且沉积物中磁性矿物的颗粒也明显变粗. 这与在 100 m 以上磁化率值增大和粒度的粒径变粗的结果是一致的.

4 讨论与结论

4.1 关于磁化率变化的原因

为了分析磁化率突然增大的原因，我们对周老钻孔岩芯进行了系统的重矿物分析，限于篇幅这里重点讨论与磁化率密切相关的磁性矿物的变化特征，有关江汉平原重矿物组合特征将由另文阐述. 结果表明，样品的磁性矿物含量(在孔深 110 m 左右附近磁性矿物突然增加，其中在孔深 45~100 m 岩芯段沉积物中磁性矿物(主要是磁铁矿)的含量最高(占检测出的重矿物的 8.7%)明显高于下部岩芯段沉积物的磁性矿物的含量(占检测出的重矿物的 1.1%). 这与磁化率变化特征及饱和等温剩磁(SIRM)、非磁滞剩磁磁化率(X_{ARM})变化特征是非常吻合的，说明磁化率的变化

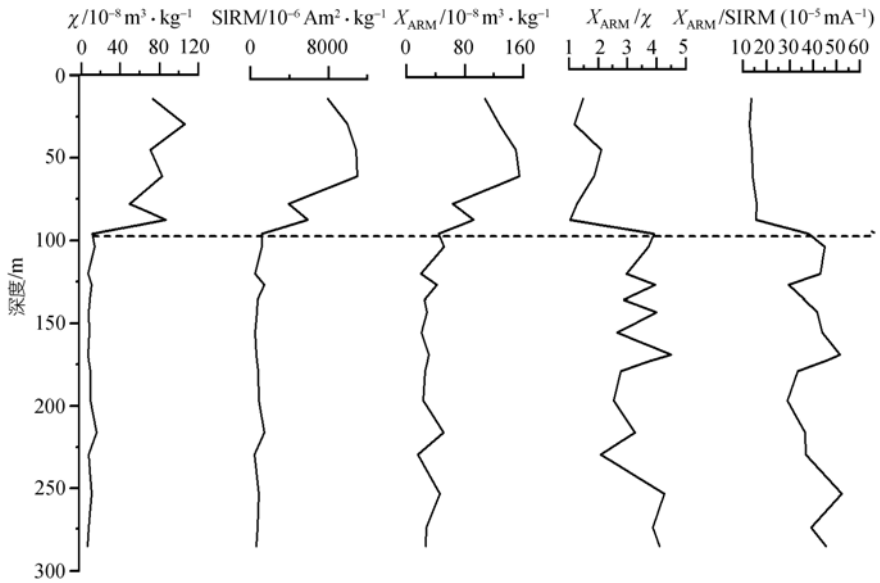

图 4 江汉盆地周老孔岩芯环境磁学参数随深度变化曲线

主要是亚铁磁性矿物的增多引起的.

4.2 磁化率变化对物源变化的指示

磁化率的变化与沉积物中铁磁性矿物含量的变化有关，而铁磁性矿物含量的变化反映出沉积物来源可能发生了变化. 从江汉盆地周缘和长江上游的岩性组成来看 [26]，前者主要为扬子盖层区，以沉积岩发育为主，而长江上游特别是川西和青藏高原地区分布有大量中新生代岩浆岩，有的岩体含有大量的铁磁性矿物(如攀枝花岩体). 长江上游岩石的铁磁矿物的含量远大于江汉盆地周缘的岩石. 据长江水系的重矿物组合研究，三峡以上的重矿物中磁铁矿含量明显大于三峡以下各支流 [27]. 此外，由于磁铁矿为稳定重矿物，其抗风化能力较强，分布较广，一般可在远离母岩区处沉积. 因此，周老孔岩芯在 100 m以上岩芯段沉积物的磁铁矿含量的增高，是由江汉平原接受三峡以上长江上游的远源物质引起的，指示长江三峡已被切开.

4.3 沉积物粒度的变化

在孔深约 100~110 m附近不仅磁化率、饱和等温剩磁、非磁滞剩磁磁化率和磁性矿物发生了突然变化，反映沉积物中亚铁磁性颗粒大小特征的比值参数 X_{ARM}/χ和X_{ARM}/SIRM也发生了突然变化，研究表明 X_{ARM}/χ和X_{ARM}/SIRM比值随着组分中单畴组分比例的增加而增大 [28]，因此X_{ARM}/χ和X_{ARM}/SIRM比值在 100 m以上的减小，反映了 100 m以上沉积物中粗颗粒组分的增加. 另外，沉积物的粒度参数的分析也显示出，在该深度处沉积物的粒径明显变粗，砾石层厚度明显增大，砂砾石层出现的频率也明显加大(图 2)，砾石的磨圆度增加. 砾石统计表明，110 m以下的平均粒径为 16.5~17.5 mm, 110 m以上达到 20.8 mm，磨圆度也从 57%上升到 64%，说明水动力条件在 110 m处明显增强. 上述特征均指示了此时大量上游的来水和沉积物开始注入江汉平原，即长江三峡业已贯通.

4.4 三峡贯通时间的初步探讨

江汉平原的第四系是由粒度相对较粗的河、湖相互层沉积组成，年代地层研究的难度相对较大. 为了尽可能准确地建立磁性地层格架，我们在前人对位于新沟镇的R25 孔研究的基础上 [29]，与湖北地调院合作对周老(咀)镇孔进行了磁性地层研究(详情将有另文讨论). 图 5 是周老(咀)镇孔岩芯的磁性地层研究结果及与R25 孔的对比，其中新沟R25 孔的古地磁结果由中国地质科学院地质力学所完成，周老(咀)镇孔的古地磁在中国地质大学古地磁实验室完成. 尽管结果不甚理想，但这是迄今为止江汉平原最好的磁性地层柱. 从图 5 可以看出，两个孔的极性时和极性亚时大体上是可以对比的. 其中布容(Brunhes)正极性世与松山(Matuyama)反极性世(B/M)界线，新沟镇R25 位于深度 81 m处，周老镇孔位于深度 82 m处. 松山负极性世中的贾拉米洛(Jaramillo)正极性亚世(年龄为 0.99~1.07 Ma)位于新沟R25 孔剖面

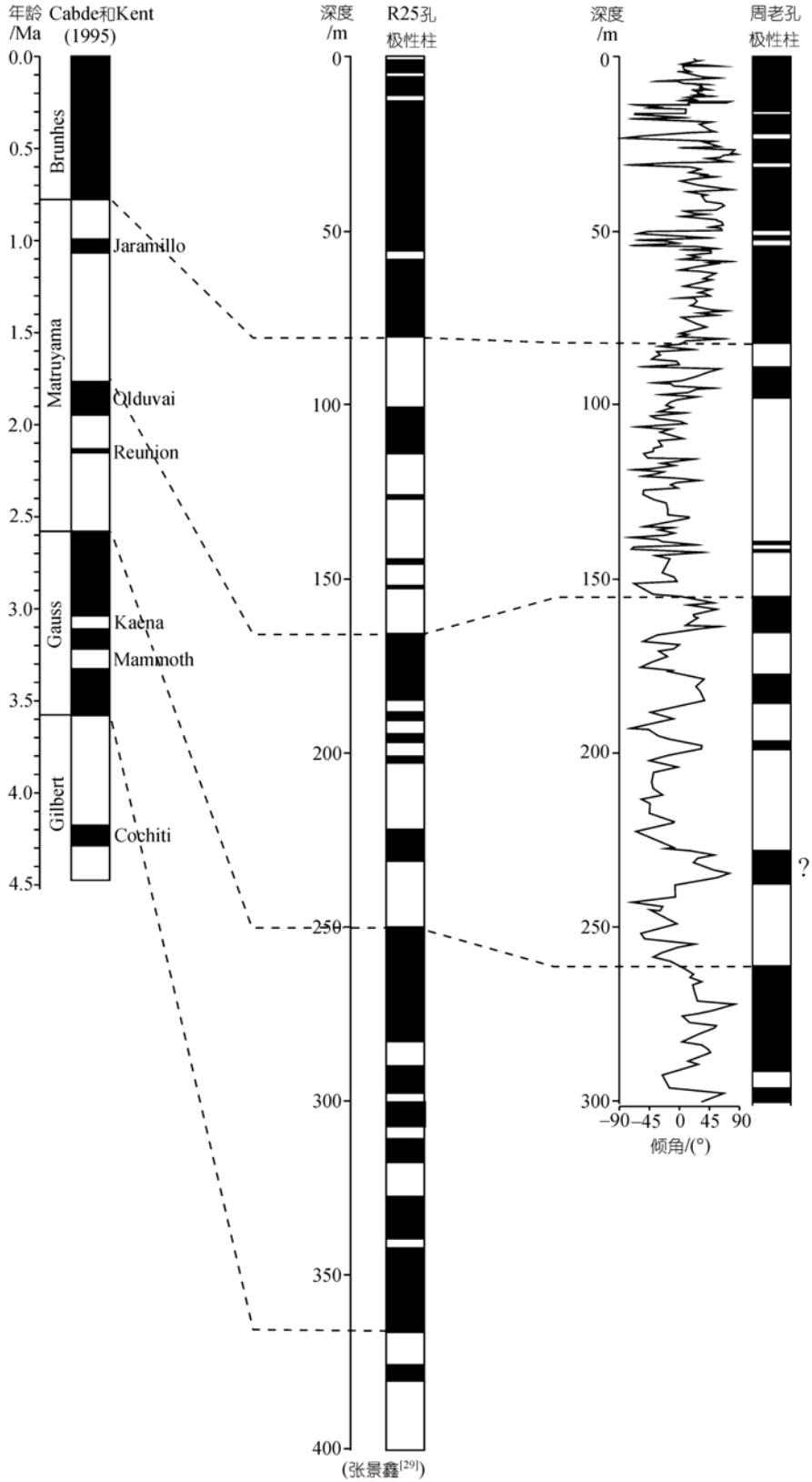

图 5　周老镇钻孔及 R25 钻孔古地磁测量与标准极性柱对比

111.31~125.00 m 深度; 奥杜威(Olduvai)正极性亚世位于 R25 孔剖面 170.08~184.08 m 深度之间; 周老镇孔剖面位于深度 154.99~164.37 m 之间, 其对应的距今年龄为 1.77~1.95 Ma; 留尼汪(Reunion)正极性亚世在新沟 R25 孔 189.76~190.36 m 深度, 周老镇孔剖面位于深度 178.69~185.07 m 之间, 其对应的年代为 2.14~2.15 Ma; 对比于国际标准年表, 松山(Matuyama)负极性世与高斯(Gauss)正极性世(M/G)的界限(年龄为 2.58 Ma), 新沟 R25 孔位于深度 250 m 处, 周老镇孔位于深度 260 m 处. 根据沉积速率推算, 新沟孔整个剖面的底部 400.59 m 深度的磁性年龄为 3.93 Ma, 周老镇孔整个剖面的底部 300.49 m 深度的磁性年龄为 2.77 Ma.

依据 2 个钻孔的古地磁测年资料的沉积速率推算, 孔深约 100~110 m 的地质年龄大致在 1.17~1.12 Ma, 即为长江三峡贯通的时间.

致谢 两位审稿专家对本文提出的修改建议提高了论文质量, 参加野外工作和样品测试的还有徐宏林、袁胜元、胡思辉、李一保、王辉、韩晓飞、周元涛和单波等同志, 在此一并表示感谢.

参考文献

1 Willis B. Research in China (Vol. 1). Washengtom: Washington Press of Gibson Brothers, 1907. 278—339
2 Barbour G B. The physiographic period of the Yangtze valley. Geol Soc China Bull, 1935, 14: 11—15
3 李四光. 陕东地质及长江之历史. 中国地质学会志, 1924, 3-4: 351—391
4 叶良辅, 谢家荣. 扬子江流域巫山以下地质构造及地文史. 地质汇报, 1925, 第 7 号: 69—90
5 李春昱. 长江上游河谷之发展. 中国地质学会志, 1933, 13
6 Jijun L. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. Geomorphology, 2001 ,41: 125—135[doi]
7 任美锷. 长江三峡概况. 地理知识, 1957, 3
8 袁复礼. 长江河流发育史的补充研究. 人民长江, 1957, 2: 1—9
9 吴锡浩. 青藏高原东南部地貌边界与金沙江水系发育. 山地研究, 1989, 7(2): 75—84
10 杨达源. 长江三峡的起源与演化. 南京大学学报(自然科学版), 1988, 24(3): 466—473
11 杨达源, 闾国年. 长江三峡贯通的时代及其地质意义的研究. 见: 刘东生, 安芷生, 主编. 黄土第四纪地质全球变化(第三辑). 北京: 科学出版社, 1992. 140—143
12 张叶春. 长江三峡贯通的时代及意义. 西北师范大学学报, 1995, 31(2): 52—56
13 李长安, 张玉芬. 一次重要的第四纪构造运动及环境效应. 地质科技情报, 1999, 18 (4): 42—46
14 马永法, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原周老镇钻孔砾石统计及其与长江三峡贯通的关系. 地质科技情报, 2007, 26(2): 40—44
15 Thompson R. Environmental applications of magnetic measurements. Science, 1980, 207(4430): 481—486[doi]
16 Oldfield F. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurement: Some preliminary results. Water Resour Res, 1979, 15(2): 211—218
17 Oldfield F, Maher B A, Donoghue J, et al. Particle-size-related mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode River Catchwent, Maryland, USA. J Geol, 1985, 142: 1035－1046
18 Oldfield F. Environmental magnetism——A personal perspective. Quat Sci Re, 1991, 10: 73—85[doi]
19 Walling D F. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. Nature, 1979, 281(13): 110—113[doi]
20 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: Allen & Unwin, 1986. 112—119
21 Yu L, Oldfield F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements. Quat Res, 1989, 32: 168－181[doi]
22 Yu L, Oldfield F. Quantitative sediment source ascription using magnetic measurements in a reservoir catchment system near Nijar, S. E. Spain. Earth Surf Proc Landforms, 1993, 18: 441－454[doi]
23 俞立中. 利用磁信息追踪沉积物物质来源的定量方法. 铁道师院学报(自然科学版), 1992, 19(1): 55—68
24 俞立中, 张卫国. 沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型. 科学通报, 1998, 43(19): 2034－2041
25 王永红, 沈焕庭, 张卫国. 长江与黄河河口沉积物磁性特征对比的初步研究. 沉积学报, 2004, 22(4): 658—663
26 程裕淇, 主编. 中国地质图及说明书 1∶5000000. 北京: 地质出版社, 1990
27 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义. 沉积学报, 2006, 24 (4): 570－578
28 俞立中, 许羽, 张卫国. 湖泊沉积物的矿物磁性测量及其环境应用. 地球物理学进展, 1995, 10(1): 11—22
29 张景鑫. 江汉平原第四纪磁性地层的划分与探讨. 第四纪冰川与第四纪地质论文集. 第八集. 北京: 地质出版社, 1995. 164—174