

江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示

康春国^{1,2}, 李长安^{1*}, 王节涛¹, 邵磊¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 哈尔滨学院, 黑龙江哈尔滨 150086

摘要: 江汉平原是长江穿过三峡区的第一个大型卸载盆地, 其沉积物必然反映长江流经的物源区的物源特征。通过对盆地中心周老孔第四纪岩心的重砂样品中 0.125~0.063 mm 粒级的重矿物含量变化、ATi、GZi、ZTR 指数和重矿物组合分析, 发现从钻孔岩心深度 110 m 开始向上, 水动力条件加强, 沉积速率加快, 重矿物的数量特征发生明显突变, 特征矿物的组合与现代长江相同。表明在周老孔岩心深度 110 m (古地磁年龄 1.1 Ma 左右) 位置处, 长江三峡开始贯通, 江汉平原开始接纳长江带来的三峡上游的物质。

关键词: 江汉平原; 周老孔; 第四纪沉积物; 重矿物特征; 三峡贯通。

中图分类号: P571

文章编号: 1000-2383(2009)03-0419-09

收稿日期: 2008-12-13

Heavy Minerals Characteristics of Sediments in Jiangnan Plain and Its Indication to the Forming of the Three Gorges

KANG Chun-guo^{1,2}, LI Chang-an^{1*}, WANG Jie-tao¹, SHAO Lei¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Harbin University, Harbin 150086, China

Abstract: Quaternary sediments in Jiangnan Plain, the first large-scale offloading basin of the Yangtze River after the forming of Three Gorges, reflect the characteristics of provenance through which the Yangtze River flows. The heavy mineral samples were collected from the sand layer in the drilling core, with the size fraction ranging from 0.125 mm to 0.063 mm. We find that there is an obvious mutation of the combination and quantitative characteristics of heavy minerals at the depth of 110 m, with the paleomagnetic age of 1.1 Ma, through series of analyses including the change of content, index ATi, index GZi and index ZTR. The combination of characteristic heavy minerals from the sediments above the depth of 110 m is in accordance with the modern Yangtze River. So we conclude that the Three Gorges was formed at around 1.1 Ma when the materials from the upper reaches of the Three Gorges has deposited at Jiangnan basin as a result of the transfixion of the Yangtze River.

Key words: Jiangnan Plain; Zhoulaok core; Quaternary sediments; characteristics of heavy minerals; forming of the Three Gorges.

近年来, 大河流域的发育历史和沉积演化越来越引起国际地学界的关注, 对世界主要河流贯通的研究是目前人们对过去全球变化中一些重要科学问题研究的基础。长江三峡的贯通, 在 20 世纪初就引起国内外著名学者的关注, 但对三峡贯通时间的看法却有很大分歧 (李四光, 1924; 叶良辅和谢家荣, 1925; 李春昱, 1933; 李承三, 1956; 任美镔, 1958; 沈玉昌, 1965; 杨达源, 1988; 李长安和张玉芬, 1997; 范代读等, 2004,

2006; 向芳等, 2006; 范代读和李从先, 2007; 王昆山, 2007; 张玉芬等, 2008)。江汉盆地是长江切开三峡后第一个接受沉积的大型卸载盆地, 长江携带的上游的川江物质首先沉积在这里, 是长江流域的一个重要的“沉积汇”, 其连续、巨厚的沉积体很好地记录了三峡贯通前后主要水系变化信息。对盆地环境变迁和长江切开三峡系统的沉积记录, 是三峡贯通最理想的信息载体 (李长安和张玉芬, 1997; 李长安, 2003)。潜江凹

基金项目: 国家重点基础研究 973 发展计划 (No. 2004CB720204); 国家自然科学基金 (No. 40672206)。

作者简介: 康春国 (1968—), 男, 博士研究生, 副教授, 第四纪地质学专业。E-mail: chunguokang@sohu.com.

* 通讯作者: 李长安, E-mail: chanli@cug.edu.cn

陷南缘是江汉盆地的沉积中心,位于该凹陷南缘的周老孔,以其巨大的厚度和连续的沉积成为江汉平原第四纪地质与环境变化研究的一个典型孔. 本文重点对周老孔第四纪沉积物的重矿物特征进行了研究,并通过重矿物组合的变化与物源变化的分析,对长江三峡贯通的发生层位及时代进行了探讨.

1 区域自然地理概况及地质地貌背景

江汉平原位于湖北省中南部,地处长江中游和汉江下游,介于北纬 29°26′~30°23′和东经 111°30′~114°32′之间. 江汉平原与构造上的江汉盆地在地域上大体一致,为长江出三峡后的第一个大型卸载盆地,长江所携带的泥沙大量地沉积在此. 长江从宜昌入境,自西向东(经平原南部)横贯整个江汉平原. 江汉平原受新构造运动影响,由 NNW 和 EW 向相互交切的张性正断层所控制,形成断块式构造格局,从第三纪初期开始,一直处于沉降状态中,进入第四纪以来,仍以沉降为主,受黄陵隆起的影响,沉降中心不断南移,现代沉降中心在枝城—监利一带. 岩相特征以河湖相为主(张德厚, 1994; 杨达源和李徐生, 2000). 江汉平原的周老镇钻孔就位于监利县周老镇(112°59′E, 30°02′N),处于江陵—陈沱口凹陷带(图 1).

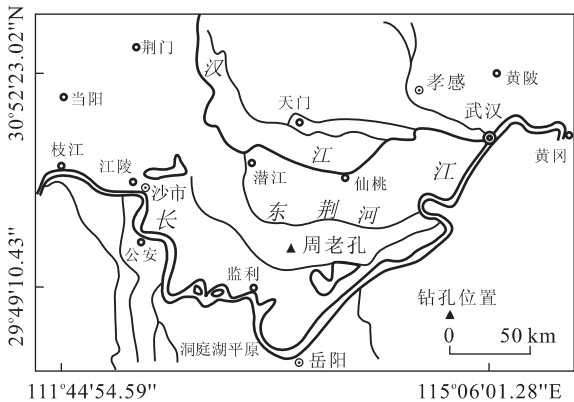


图 1 江汉平原周老孔位置

Fig. 1 Study map and location of Zhou Lao core in the Jianghan plain

2 样品采集和测量

江汉平原周老镇钻孔深度 300 m, 取芯率在 85%以上, 由上而下在其细砂层中取重砂样品 22 个(表 1). 样品的实验流程是: 首先将每个样品烘干后

称取 1 kg, 在清水中浸泡 48 h 后, 经过套筛, 适当加压、水析分离出 0. 125~0. 063 mm 粒级的样品, 烘干后用电子天平称重(精度为 0. 1 mg). 用缩分法取 10 g 样品, 利用三溴甲烷(密度 2. 89 g/cm³)进行轻重矿物分离, 分离出来的样品用酒精反复冲洗后, 60 ℃恒温烘干再称重, 可得重矿物部分的含量. 将分离出来的重矿物部分在实体显微镜下采用条带法随机选取 10 个视域进行矿物鉴定, 并取其平均值来减小分析误差. 个别样品需磨切片在偏光显微镜下确认. 每个重矿物样品鉴定颗粒数均在 600 粒以上, 然后计算出每种重矿物的颗粒百分含量. 因样品是同一粒级的精矿样品, 可以用颗粒百分含量代表体积百分含量. 每种矿物的密度为已知, 于是可算出每种重矿物的重量(中国地质科学院地矿所编著, 1977). 用每种重矿物的重量占同粒级原样总重量的百分数(即为此粒级的品位)的变化来分析问题, 根据动力学原理和沉积分异规律, 具有相同的地质意义. 鉴定及计算结果见表 1.

3 结果分析

3.1 重矿物种类及含量变化

在周老孔岩心样品中检测出的重矿物共有 25 种. 其中, 尖晶石、独居石、碳硅石和重晶石仅在个别样品中偶见, 在此不做分析, 表 1 中仅列出 21 种, 其中磁铁矿、角闪石、辉石、绿帘石、绿泥石、石榴石、钛铁矿、赤褐铁矿以及密度大于 2. 89 的铁染岩屑, 占重矿物部分总量的 83. 54%; 锆石、磷灰石、楣石、白钛石、锐钛矿和黄铁矿占 13. 61%; 其余 11 种重矿物仅占 2. 85%. 图 2 中可以看到重矿物部分及主要矿物的含量随深度的变化, 自下而上从 8 号样品开始, 含量发生了明显的变化, 呈现出显著增加的趋势; 所有样品重矿物部分的百分含量平均为 1. 35%, 最高值出现在 8 号样品, 为 4. 31%. 1~8 号样品的平均值为 2. 11%, 高出平均值 0. 76%; 9~22 号样品的平均值为 0. 91%, 低于平均值 0. 44%. 因此, 可将钻孔岩心从 8 号和 9 号样品中间的砾石层为界, 分为两段, 即 1~8 号样品为上段; 9~22 号样品为下段, 并将所有样品中主要重矿物的平均值作为背景值, 与上段和下段进行对比(图 3).

所有结果显示, 自下而上, 从 8 号样品的深度开始, 江汉平原的沉积环境发生了巨大变化, 有可能是水系发生了重大调整而导致水动力明显加强, 而且

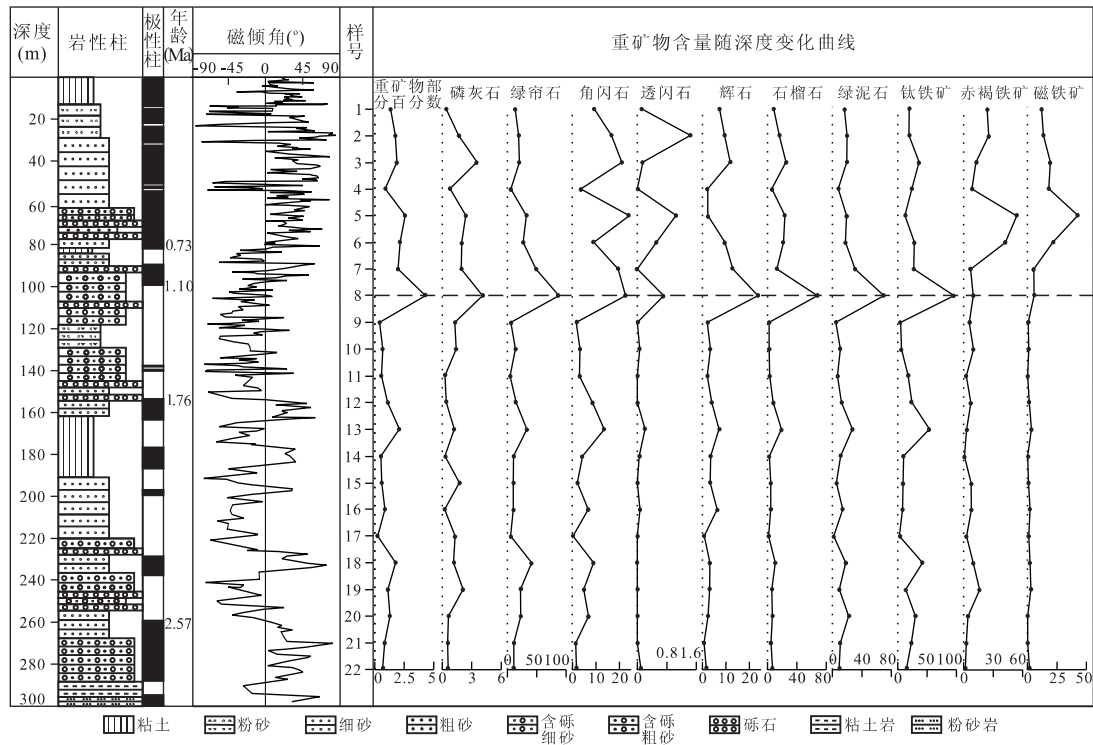


图 2 周老孔岩性柱、古地磁及重矿物含量变化曲线综合

Fig. 2 Lithologic column, paleomagnetism and curves of main heavy minerals content variation of Zhoulao core
图中极性柱引自文献张玉芬等(2008);图中各种重矿物的含量均为 1/万

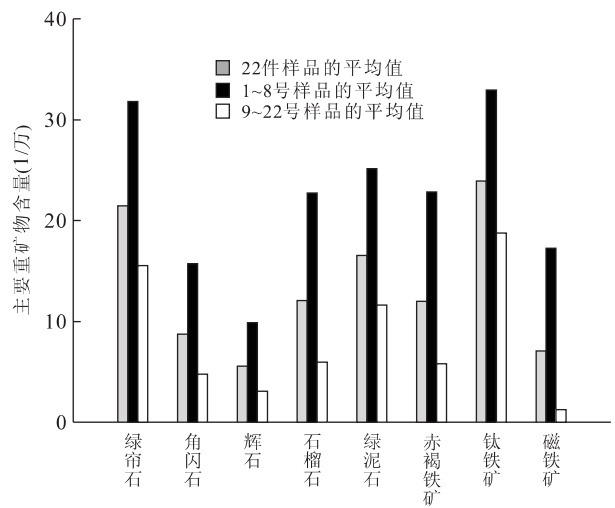


图 3 主要重矿物含量的平均值

Fig. 3 Average content of main heavy minerals

周老孔岩心的磁化率及砾石层统计显示,从 8 号取样点之下的砾石层(深度 110 m)开始,磁化率明显增大(张玉芬等,2008),砾石的砾径明显增大(马永法等,2007)。

3.2 重矿物特征指数分析

Morton and Hallsworth(1999)认为水动力条

件是影响物源的主要因素之一,但在相似的水动力作用下,稳定重矿物的比值能够更好地反映物源特征,这些比值被称作重矿物的特征指数,包括 ATi 指数、GZi 指数和 ZTR 指数等。计算方法: ATi 指数=100×磷灰石%/(磷灰石%+电气石%);GZi 指数=100×石榴子石%/(石榴子石%+锆石%);ZTR 指数=100×(锆石%+电气石%+金红石%)。其中 ATi 指数和 GZi 指数反映出来的信息可以分别揭示出沉积物中磷灰石的风化程度及石榴子石的稳定性。如果风化作用很弱,则 ATi 数值的变化主要反映沉积物物源的变化;GZi 的变化反映含石榴子石的母岩组成,主要是角闪岩和麻粒岩的变化。而 ZTR 指数则代表重矿物的成熟度,ZTR 指数愈大,矿物的成熟度愈高,系统的研究可以指示沉积物的搬运距离和物源方向(Morton *et al.*, 1991; Morton and Hurst, 1995; Morton and Hallsworth, 1999; 赵红格和刘池洋,2003;李双建等,2005;王中波等,2006)。

重矿物 ATi 指数、GZi 指数、ZTR 指数以及主要重矿物含量之和的计算,均采用同粒级样品中重矿物的重量占样品中部分重量的百分含量(表 2)。

表 2 ATi 指数、GZi 指数、ZTR 指数及主要重矿物之和的含量
Table 2 ATi, GZi, ZTR and sum of main heavy minerals content

样品号	ATi 指数	GZi 指数	ZTR 指数	主要重矿物含量之和(%)
1	9	75	5.5	79
2	50	82	5.0	78
3	95	98	0.6	86
4	83	78	2.3	83
5	91	90	1.2	79
6	77	77	3.6	80
7	50	86	2.8	82
8	91	94	1.6	87
9	75	56	6.0	61
10	83	43	5.4	68
11	50	42	8.5	67
12	44	54	9.5	72
13	63	64	4.8	60
14	33	83	3.0	79
15	75	64	5.8	68
16	13	71	4.2	70
17	83	60	5.6	60
18	41	75	4.0	77
19	67	45	7.5	69
20	50	63	4.0	72
21	41	40	11.0	65
22	50	79	5.0	74

图 4 中的 4 条曲线显示,都以 8 号样品为拐点,前后出现显著的变化.图 4(a~c)3 条曲线上段数值明显增大,都集中在 70~100 之间,呈现出一致性;而图 4d 曲线上段的数值却明显减小,与其他 3 条曲线恰好相反.ATi 指数增大的原因有两种可能:一是沉积物源区发生调整,含有磷灰石的母岩增加了;二是沉积环境发生变化,水动力加强,沉积速率加快,导致磷灰石风化程度减弱.GZi 指数增大,反映沉积物源区含石榴石的母岩增多了,也就是源区变质岩

的范围扩大了.图 4c 曲线值增大,并结合图 3,显示出上段中不仅主要重矿物含量之和增大了,而且每一种主要重矿物的含量都增大了,反映沉积环境发生了变化或是水动力加强.ZTR 指数减小,上段从 8 号样品开始皆低于 6%,说明样品中重矿物的成熟度很低,流域风化剥蚀加快,沉积区的沉积速率也加快(李双建等,2005),一些沉积物没有经过显著的动力分选和长期风化磨蚀.表 1 所示最后一项是通过重液分选出来的(密度大于 2.89 g/cm³)、没有完全分化剥离的铁染岩屑的含量,从 8 号样品开始突然增加,也恰好说明了这一点:沉积速度加快、风化不彻底.图 4 中 4 条曲线的相关性表明,从 8 号样品开始的上段,不仅沉积环境发生重大改变,水系也可能发生重大调整,而且沉积物的源区也发生了变化.

3.3 重矿物组合特征

根据重矿物含量的变化情况,把周老孔岩心 22 件重砂样品分上下两段,并将各种重矿物取平均值进行对比分析(图 5).结果显示,上段特征重矿物组合为绿帘石—角闪石—辉石—石榴石—绿泥石—赤褐铁矿—钛铁矿—磁铁矿;下段特征重矿物组合为锆石—绿帘石—角闪石—石榴石—白钛石—绿泥石—赤褐铁矿—钛铁矿.可以看出,两段样品的重矿物组合存在着很大的差异,说明两段样品所代表的沉积物物源区有很大的差别.而且上段的特征重矿物组合与现代长江上游的低矮阶地和现代河漫滩的重砂样品中特征重矿物组合:磁铁矿—普通角闪石—普通辉石—石榴子石—绿帘石—褐铁矿—钛铁矿基本相同(杨达源,1988;吕全荣,1992;王腊春等,1997;向芳等,2006),所不同的是上段中的绿泥石含量较高,这可能是一部分角闪石、辉石和黑云母等铁镁矿物的次生产物.相比之下,下段的特

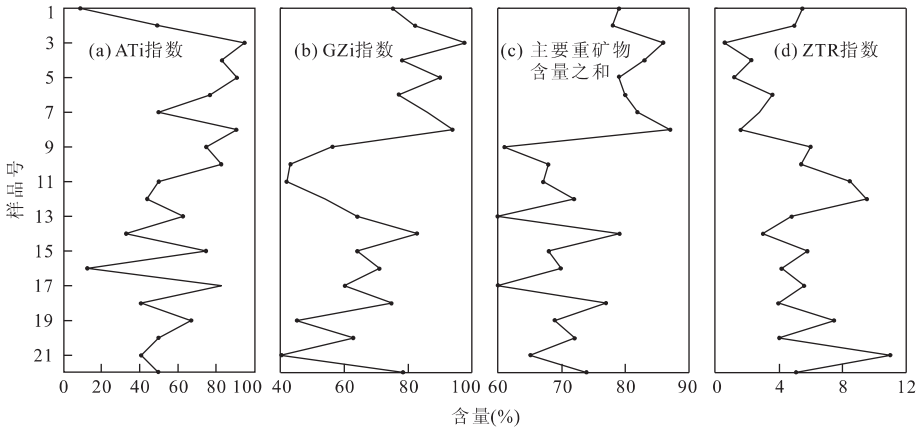


图 4 ATi 指数、GZi 指数、ZTR 指数及主要重矿物之和的含量变化曲线

Fig. 4 Curves of ATi, GZi, ZTR and sum of main heavy minerals content variation

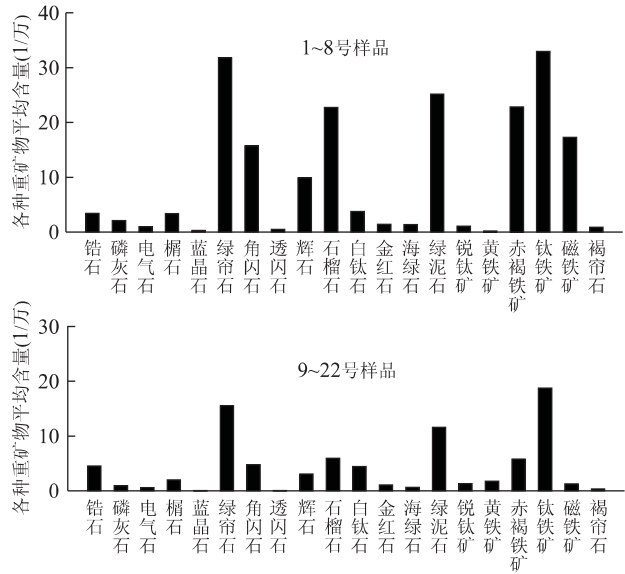


图 5 重矿物重量平均含量变化

Fig. 5 Average weight content variations of heavy minerals

征重矿物组合与现代长江上游的低矮阶地和现代河漫滩的重砂样品中特征重矿物组合明显不同,与长江中、下游和长江口地区沉积物的重矿物组合也明显不同(王中波等,2006;陈静等,2007;窦衍光等,2007;范代读和李从先,2007).

重矿物组合是源区母岩性质的良好反映(沈丽琪,1985;李珍,1998). 因为重矿物一般耐磨蚀、稳定性强,能较多地保留其母岩的特征,所以在物源分析中占有重要地位. 但这种方法对母岩性质具有一定的要求,对火山岩和变质岩作为母岩时,其中的重矿物所经历的搬运、沉积次数较少,受后期的影响小,保留得一般较好,能够很好的反映物源区的性质. 一

般对新生代的沉积物的判断较为准确、可靠,而且沉积物时代越新,准确性越高(中国地质科学院地矿所编著,1977;沈丽琪,1985;赵红格和刘池洋,2003;李双建等,2005;王中波等,2006). 从图 5 中可以看到,上段特征重矿物组合中,绿帘石、石榴石和绿泥石为典型的变质岩矿物,其中一部分绿泥石和绿帘石可以是角闪石、辉石和黑云母等铁镁矿物的次生产物;钛铁矿、磁铁矿、辉石及角闪石主要产生于超基型、基性火山岩中;赤褐铁矿主产于沉积变质岩中. 表明上段源区中变质岩、超基性—基性岩浆岩是其重要的母岩组成类型. 下段的特征重矿物组合中锆石、绿帘石、白钛石和绿泥石明显具有沉积岩特征及次生矿物特性;石榴石、角闪石、赤褐铁矿和钛铁矿为变质岩矿物,这说明下段沉积物的源区可能是以沉积岩为主的母岩区,而且下段重矿物的成熟度较大,可能是重矿物经历了多次的搬运、沉积和改造作用(赵红格和刘池洋,2003;李双建等,2005;王中波等,2006;王世虎等,2007),同时也有一定量的变质岩分布.

从图 6 可以看到,江汉平原主要是松散沉积岩分布区,在长江没有贯通之前,江汉平原的沉积物应主要来源于近源的物质及汉江带来的沉积物,而汉江流域分布的也主要是松散沉积岩及变质岩,这与周老孔岩心下段沉积物重矿物特征所指示的源区一致;在三峡以西的长江上游金沙江流域分布有大量的超基性—基性火山岩及变质岩,金沙江就流经了峨眉玄武岩区和攀枝花钒钛磁铁矿区,并且在嘉陵江流域也分布有大面积的变质岩(武法东等,1996;和钟铨等,2001;马大铨等,2002;向芳等,2006;孙小

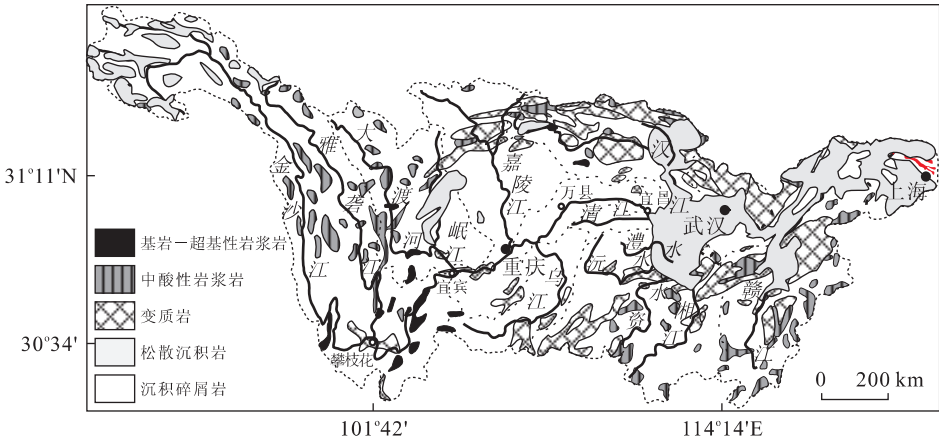


图 6 长江流域岩性分布

Fig. 6 Distributions of lithology in the Yangtze River basin

根据中科院长春地理研究所《长江流域水体环境背景值研究图集》(1998),重新绘制

霞等,2006),这与周老孔岩心上段沉积物重矿物特征所指示的源区一致。

4 结论

(1)重矿物含量变化及 ATi、GZi、ZTR 特征指数从 8 号样品开始发生显著变化,表明从 110 m 附近开始,江汉平原的沉积环境发生了巨大变化,不仅沉积物的物源区发生改变,而且沉积区的沉积速率加快,可能是平原水系发生了重大调整。

(2)上段的特征矿物组合为:绿帘石—角闪石—辉石—石榴石—绿泥石—赤褐铁矿—钛铁矿—磁铁矿,与现代长江上游的低矮阶地和现代河漫滩的重砂样品中特征重矿物组合基本一致;而且这些重矿物所代表的母岩类型主要有超基性—基性、变质岩及沉积岩,与三峡以西的长江上游地区的的岩性分布吻合。而下段的特征矿物为:锆石—绿帘石—角闪石—石榴石—白钛石—绿泥石—赤褐铁矿—钛铁矿,显示出的母岩特征为松散沉积岩和变质岩,这与江汉平原区及其附近的岩性分布相同。

(3)在江汉平原沉积物深度 110 m(古地磁年龄约在 1.1 Ma)开始,长江上游之水来到江汉平原,并将三峡以西的物质带到平原(基于钻孔位置,钻孔岩心物质尚不能排除汉江的干扰),表明长江三峡贯通时间可能就在 1.1 Ma。

References

- Chen, J., Wang, Z., Wang, Z. H., et al., 2007. Heavy mineral distribution and its provenance implication in Late Cenozoic sediments in western and eastern areas of the Changjiang River delta. *Quaternary Sciences*, 27(5): 700—708 (in Chinese with English abstract).
- Chinese Academy of Geological Sciences, 1977. Identification manual of sand mineral. Geological Publishing House, Beijing, 58—63 (in Chinese).
- Dou, Y. G., Wang, K. S., Wang, G. Q., et al., 2007. Research of detrital minerals in the sediment of sub-aqueous Yangtze delta. *Marine Sciences*, 31(4): 22—31 (in Chinese with English abstract).
- Fan, D. D., Li, C. X., 2007. Reviews on researches of timing of the Yangtze draining the Tibetan Plateau to the East China sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 121—131 (in Chinese with English abstract).
- Fan, D. D., Li, C. X., Yokoyama, K., et al., 2004. Monazite age spectra in the Late Cenozoic of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time. *Science in China (Ser. D)*, 34(11): 1015—1022 (in Chinese).
- Fan, D. D., Li, C. X., Yokoyama, K., 2006. Constraints on the Yangtze River running-through time, using Th(U)-Pb dating of monazite. *Marine Geology Letters*, 22(7): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. H., Liu, Z. J., Zhang, F., 2001. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 29—32 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. A., 2003. Possible floodwater utilization of the Yangtze River. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 461—466 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. A., Zhang, Y. F., 1997. Geoscientific factors analysis on the through cutting of main drainages and the formation of flood damage in China. *Exploration of Nature*, 16(1): 61—65 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. S., 1956. History of Yangtze River. *Yangtze River*, (12): 3—6 (in Chinese).
- Li, C. Y., 1933. Development of Upper Yangtze River valley. *Bulletin of the Geological Society of China*, 13: 107—117 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., 1924. West Three Gorges geology and the history of Yangtze River. *Bulletin of the Geological Society of China*, 3(3—4): 351—391 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. J., Wang, Q. C., Li, Z., et al., 2005. Characteristics of mesozoic and Cenozoic heavy minerals from Kuche River section in Kuche depression and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 53—61 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Jiao, Y. Q., Liu, C. H., et al., 1998. Source analysis of heavy minerals in Gaoliu area, Huanghua depression. *Petroleum Exploration and Development*, 25(6): 5—7 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Q. R., 1992. Mineral characteristics of fine grain sediment and its sedimentary differentiation in Changjiang Estuary. *Shanghai Geology*, 43(3): 18—25 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. Q., Du, S. H., Xiao, Z. F., 2002. The origin of Huangling granite batholith. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(6): 151—162 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2007. Statistics of gravels from a bore in Zhoulaotown, Jiangnan plain and its relationship with cut-through of the Yangtze

- Three Gorges, China. *Geological Science and Technology Information*, 26(2): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Morton, A. C., Hallsworth, C. R., 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124(1—4): 3—30.
- Morton, A. C., Hurst, A., 1995. Correlation of sandstones using heavy minerals: An example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea. In: Dunay, R. E., Hailwood, E. A., eds. Non-biostratigraphical methods of dating and correlation. *Geological Society Special Publication*, 89: 3—22.
- Morton, A. C., Todd, S. P., Haughton, D. W., 1991. Developments in sedimentary provenance studies. Oxford University Press, London.
- Ren, M. E., 1958. General situation of the Three Gorges. *Geographical Knowledge*, 3: 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Shen, L. Q., 1985. Several important concepts and its application in heavy mineral study of sedimentary rock. *Science in China (Ser. B)*, 17(1): 70—78 (in Chinese).
- Shen, Y. C., 1965. Valley landform of upper Yangtze River. Science Press, Beijing, 85—144 (in Chinese).
- Sun, X. X., Li, Y., Qiu, D. Z., et al., 2006. The heavy minerals and provenances of the Neogene Guantao Formation in the Huanghua depression. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(3): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. S., Wang, G. Q., Cai, S. W., et al., 2007. Heavy mineral characteristics of surface sediments in the subaqueous Yangtze River delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. C., Chen, X. L., Chu, T. Q., 1997. A contrast analysis on the loads character of the Changjiang River and the Yellow River. *Geographical Research*, 16(4): 71—79 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. H., Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., et al., 2007. Spatial combination of paleoprovenance and depositional lobe of mid-lower Yanchang Formation in the northwest of Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 201—208 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Li, P., et al., 2006. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570—578 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. D., Lu, Y. C., Ruan, X. Y., 1996. Application of heavy minerals cluster analysis to study of clastic sources and stratigraphic correlation. *Geoscience*, 10(3): 397—403 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F., Wang, C. S., Li, G. Z., et al., 2006. Character of heavy minerals in Quaternary sediments in Yichang area and its relationship with cut-through of the Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(2): 117—121 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. Y., 1988. The origin and evolution of the Three Gorges of the Yangtze River. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 24(3): 466—473 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. Y., Li, X. S., 2000. Sedimentation and its indicative significance of the evolution of Yangtze River. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Sciences Edition)*, 23(4): 230—235 (in Chinese with English abstract).
- Ye, L. F., Xie, J. R., 1925. Geological structure and evolutionary history of physiography of Yangtze River basin, below Wushan. *Geological Report*, 7: 22—90 (in Chinese).
- Zhang, D. H., 1994. Neotectonics and quaternary environmental changes in Jiangnan basin. *Crustal Deformation and Earthquake*, 14(1): 74—80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 53(5): 577—582 (in Chinese).
- Zhao, H. G., Liu, C. Y., 2003. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409—415 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈静, 王哲, 王张华, 等, 2007. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义. *第四纪研究*, 27(5): 700—708.
- 窦衍光, 王昆山, 王国庆, 等, 2007. 长江水下三角洲沉积物碎屑矿物研究. *海洋科学*, 31(4): 22—31.
- 范代读, 李从先, 2007. 长江贯通时限研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 27(2): 121—131.
- 范代读, 李从先, Yokoyama, K., 等, 2004. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究. *中国科学 (D辑)*, 34(11): 1015—1022.
- 范代读, 李从先, Yokoyama, K., 2006. 河口地层独居石

- Th(U)-Pb 年龄对长江贯通时限的约束. 海洋地质动态, 22(7): 11—15.
- 和钟铎, 刘招君, 张峰, 2001. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展. 地质科技情报, 20(4): 29—32.
- 李长安, 2003. 长江洪水资源化的思考. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4): 461—466.
- 李长安, 张玉芬, 1997. 中国主要水系贯通和洪灾形成的地质因素分析. 大自然探索, 16(1): 61—65.
- 李承三, 1956. 长江发育史. 人民长江, (12): 3—6.
- 李春昱, 1933. 长江上游河谷之发展. 中国地质学会志, 13: 107—117.
- 李四光, 1924. 峡东地质及长江之历史. 中国地质学会志, 3(3—4): 351—391.
- 李双建, 王清晨, 李忠, 等, 2005. 库车坳陷库车河剖面重矿物分布特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 24(1): 53—61.
- 李珍, 焦养泉, 刘春华, 等, 1998. 黄骅坳陷高柳地区重矿物物源分析. 石油勘探与开发, 25(6): 5—7.
- 吕全荣, 1992. 长江口细颗粒沉积物的矿物特征和沉积分异. 上海地质, 43(3): 18—25.
- 马大铨, 杜绍华, 肖志发, 等, 2002. 黄陵花岗岩基的成因. 岩石矿物学杂志, 21(6): 151—162.
- 马永法, 李长安, 王秋良, 等, 2007. 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, 26(2): 40—44.
- 任美镔, 1958. 长江三峡概况. 地理知识, 3: 1—6.
- 沈丽琪, 1985. 沉积岩重矿物研究中的几个重要概念及其应用. 中国科学(B辑), 17(1): 70—78.
- 沈玉昌, 1965. 长江上游河谷地貌. 北京: 科学出版社, 85—144.
- 孙小霞, 李勇, 丘东洲, 等, 2006. 黄骅坳陷新近系馆陶组重矿物特征及物源区意义. 沉积与特提斯地质, 26(3): 61—66.
- 王昆山, 王国庆, 蔡善武, 等, 2007. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 7—11.
- 王腊春, 陈晓玲, 储同庆, 1997. 黄河、长江泥沙特性对比分析. 地理研究, 16(4): 71—79.
- 王世虎, 焦养泉, 吴立群, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地西北部延长组中下部古物源与沉积体空间配置. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 201—208.
- 王中波, 杨守业, 李平, 等, 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义. 沉积学报, 24(4): 570—578.
- 武法东, 陆永潮, 阮小燕, 等, 1996. 重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用——以东海陆架盆地西湖凹陷平湖地区为例. 现代地质, 10(3): 397—403.
- 向芳, 王成善, 李国忠, 等, 2006. 宜昌地区第四纪沉积物重矿物特征及其与三峡贯通的关系. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(2): 117—121.
- 杨达源, 1988. 长江三峡的起源与演变. 南京大学学报(自然科学版), 24(3): 466—473.
- 杨达源, 李徐生, 2000. 长江的沉积作用及其对长江演变的指示意义. 南京师范大学学报(自然科学版), 23(4): 230—235.
- 叶良辅, 谢家荣, 1925. 扬子江流域巫山以下地质构造与地文发育史. 地质汇报, 7: 22—90.
- 张德厚, 1994. 江汉盆地新构造与第四纪环境变迁. 地壳形变与地震, 14(1): 74—80.
- 张玉芬, 李长安, 王秋良, 等, 2008. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示. 科学通报, 53(5): 577—582.
- 赵红格, 刘池洋, 2003. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 21(3): 409—415.
- 中国地质科学院地矿所, 1977. 砂矿物鉴定手册. 北京: 地质出版社, 58—63.