

江汉盆地沉积物微量元素特征 与长江上游水系拓展

袁胜元^{1,2} 李长安² 张玉芬² 邵 磊² 王节涛²

(1. 许昌学院城市与环境学院, 河南 许昌 461000; 2. 中国地质大学 1) 地球科学学院; 2) 生物地质与环境地质教育部重点实验室; 3. 地球物理与空间信息学实验室; 4) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 江汉盆地是长江出三峡后第一个大型卸载区, 近 2.77 Ma 以来堆积了近 300 m 的碎屑沉积物, 主要由河流相和湖沼相组成, 形成了多个沉积旋回。选择江汉盆地中心位置的 ZL 钻孔, 利用 ICP-MS 方法, 展开微量元素组成分析, 研究了新近纪以来江汉盆地沉积物物源的变化。结果表明, 上新世以来微量元素化学组成的离散程度逐渐减小, 且趋近上壳平均值, 可能反映了物源供应区范围的扩展过程。1.25 Ma B.P. 以来, 多种微量元素含量及 Th/Sc、Co/Th、La/Sc、Cr/Cu 等比值变化很小, 现代意义整体长江可能形成于 1.25 Ma B.P. 以后。

关键词: 微量元素; 水系拓展; 物源; 江汉盆地; 长江上游

中图分类号: TE121.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)04-1042-

近百年来, 长江的地质演化是地学界关注的核心科学问题。当前的研究认为长江东流是青藏高原隆升、亚洲地形倒转和季风气候演化的直接结果^[1-3], 在这一过程中, 新生代强烈的构造隆升造成青藏高原地区风化和剥蚀作用加强, 剥蚀物质经河流搬运并沉积于河流中下游盆地地区, 同时将高原隆升、基岩风化及上游水系演化的信息保存在这些盆地的沉积物中。因此, 对沉积物展开物源示踪研究有助于揭示这些地质地程。部分学者采用沉积学、矿物学及地球化学方法对发源于青藏高原的一系列大型河流沉积物来源及源区风化剥蚀历史进行了探索^[4-10], 并对长江上游水系演化过程进行了讨论, 尽管尚存分歧, 但古长江由东向西拓展的说法依然引起众多研究者的关注。

位于长江中游的江汉盆地因其在长江演化研究中的特殊地位, 近年来颇受关注。近年来对江汉盆地

钻孔沉积岩心及周边河流沉积物开展的多项研究中, 锆石年龄谱^[11]、重矿物组合^[12]、磁学特征^[13]、含钛普通辉石^[14]以及砾石层沉积特征^[15,16]等研究均显示出江汉盆地沉积物源在 1.1 Ma 以来出现明显变化, 认为长江三峡最后贯通的时间不晚于 1.1 Ma。这些研究对长江上游水系拓展过程的研究尚显不足。微量元素由于其在风化、搬运、沉积和成岩过程中变化较小^[17], 因此常被做为一种示踪剂对河流沉积物进行物源追踪^[18,19]。基于这些性质, 微量元素做为重要的信息载体被应用于长江及周边河流域演化历史的研究^[6,9,20], 但针对江汉盆地沉积物开展的类似研究较少。

本研究以江汉盆地 ZL 钻孔为依托, 利用 ICP-MS 方法对钻孔岩心进行分析, 讨论了江汉盆地晚新生代沉积物微量元素特征对长江上游水系拓展的指示意义。

收稿日期: 2012-03-12; **改回日期:** 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971008, 40771213), 生物地质与环境地质教育部重点实验室开放基金项目(BGEG1007)、许昌学院 2012 科研课题(2012094)共同资助。

作者简介: 袁胜元, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事第四纪地质学方面的研究; E-mail: qshengy@163.com。

通讯作者: 李长安, 男, 1956 年生, 博士生导师, 主要从事地貌学及第四纪地质学方面的研究; E-mail: chanli@cug.edu.cn。

1 样品采集与处理

江汉盆地也是长江出三峡后第一个大型卸载盆地,研究钻孔位于盆地中部、湖北省监利县境内(图 1),钻孔深 300.49 m,取心率为 93%。

沉积物中细粒组分微量元素组成与源岩最为接近^[2],因此,从钻孔岩心粉砂层分取 47 个样品,在高纯水中过 250 目筛,于无尘环境下自然风干,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用美国安捷伦科技公司 Agilent 7500a 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。具体的处理过程为:(1)将样品置于烘箱中,于 105℃烘干 12 h;(2)准确称取粉末样品 50±1 mg 置于 Teflon 坩埚中,用 18 MΩ.cm 高纯去离子水润湿,依次缓慢加入 1.5 ml 高纯硝酸,1.5 ml 高纯氢氟酸;(3)置于烘箱中于 190±5℃加热 48 h 以上,冷却后蒸干,加入 1 ml HNO₃ 并再次蒸干;(4)加入 3ml 30% HNO₃,于烘箱中在 190 ±5℃条件下加热 12 h 以上,将溶液转入聚乙烯料瓶中,用 2% HNO₃ 稀释至 100g 后上机测试。测试过程中利用 AGV-2,BHVO-2,BCR-2,RGM-1,GSR-1 等 5 个标样和 4 个重复样对测试的精度和准确度进行了监控,微量元素分析误差小于 3%,分析结果可靠。

为了对比 ZL 钻孔与长江上游现代河流沉积物的微量元素特征,本研究对长江上游干支流现代河流样品进行了采集。采样位置包括支流下游及支流汇入点上、下游长江河道,以及金沙江下游基性火成岩分布区,具体采样点见图 2。

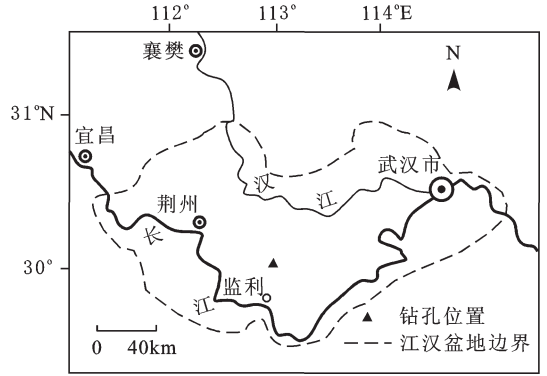


图 1 江汉盆地及 ZL 钻孔位置示意图
Fig.1 Location of Jianghan Basin and drill core ZL

2 钻孔岩心年代序列构建

岩心以不同颜色的粘土、粉砂、砂及砾石等不同岩性的沉积物组成,由下到上显示了几个河-湖相沉积旋回。岩心沉积年代是在磁性地层研究的基础上确定的(图 3)。Brunhes 正极性世与 Matuyama 反极性世(B/M)界线,位于深度 82 m 处。对比于国际标准年表,Matuyama 负极性世与 Gauss 正极性世(M/G)的界限(年龄为 2.58 Ma),位于深度 260 m 处。根据沉积速率推算,整个剖面的底部 300.49 m 深度的磁性年龄为 2.77 Ma^[13,22]。

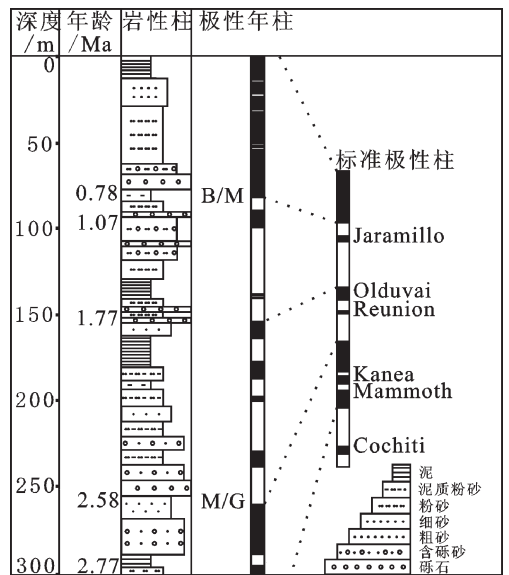


图 3 钻孔岩性柱及年代序列
Fig.3 Lithologic column and chronological sequence

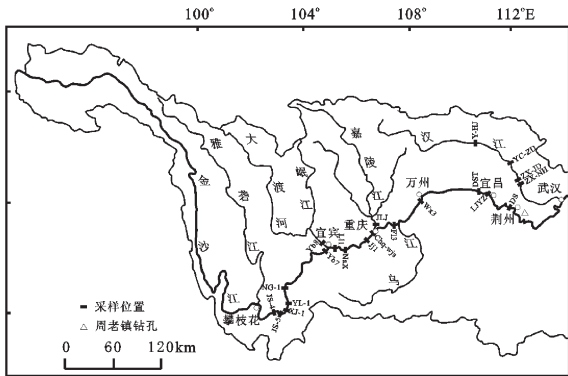


图 2 长江现代沉积物样品采集点分布
Fig.2 Sampling points of surface layer sediments along the Yangtze River

3 结 果

ZL 孔微量元素比值变化显示了一定的阶段性(图 4),对 Th/Sc、La/Sc、Th/Co、La/Ni、Cr/Th、Zr/Hf、Cr/Cu 等元素比值进行了有序聚类分析,结果显示,当误差函数值为 6~10 时,可以将 ZL 钻孔划分为以下 4 个沉积阶段:300~287 m (I)、287~205 m (II)、205~117 m (III)和 117 m 以上(IV)(图 4)。

4 个阶段微量元素显示了不同的变化特征。统计数据显示,阶段 I 不同样品间微量元素差距不大, Th/Sc、La/Sc、Th/Co、La/Ni、Cr/Th、Zr/Hf、Cr/Cu 值的变异系数最大为 12.9%,最小不足 0.1%,平均极差为 0.19。阶段 II 上述比值变异系数最大为 37.6%,最小为 4.1%;平均极差为 2.2。阶段 III 上述比值变异系数最大为 47.1%,最小为 2.0%;平均极差为 2.9。阶段 IV 上述比值变异系数最大为 32.4%,最小为 1.5%;平均极差为 1.32。

阶段 I 多项微量元素比值与整个钻孔其他阶段差别较大,如 La/Sc、Th/Co、La/Ni、Cr/Th、Zr/Hf 等,可能与钻孔这一深度已达基岩有关,属第四纪以前的沉积。本区自白垩纪开始接受一套以湖相红色砾岩为主的磨拉石沉积,中始新世以后,以河流-三角洲沉积和浅水氧化型湖泊沉积为主,物源也主要来自于盆地西部^[23]。此外,这一阶段较高的 La/Sc 及较低的 Co/Th 值也反应出物质成分更接近长英质岩类^[24],可能揭示盆地内河流向西部黄陵背斜溯源侵蚀的开始。阶段 II 可能代表了江汉盆地初始形成期,波动不大的微量元素比值与盆地周缘地区物源

供给相对简单、变化不大有一定关系。阶段 III 是钻孔岩心微量元素变化最剧烈的阶段,是河流水系的剧烈调整期。阶段 IV 的多种微量元素比值变化明显趋于平稳,说明水系已没有大规模调整,水系结构主体已经完成,水系演化进入了定型期。

4 讨 论

4.1 元素比值特征与长江上游水系拓展

盆地沉积是大范围大陆剥蚀区提供的,流域面积越大,沉积物平均化学组成越接近上部陆壳平均值。Th/Sc-Co/Th、La/Sc-Co/Th、Cr/Cu-Zr/Y 散点图显示,元素比值分布除阶段 I 外,II~IV 阶段明显更趋于集中,并逐渐接近上部陆壳平均水平(图 5),可能表明了第四纪以来江汉盆地物源区范围有一个明显扩大的过程。

4.2 沉积物成熟度与微量及元素揭示的物源变化

碎屑沉积中 SiO₂ 与 \sum REE、Y、Th、U 呈明显负相关关系,而 SiO₂ 含量是沉积物物成熟度的一种标志,其含量越大,沉积物成熟度往往也较高,因此可以认为,沉积物中 \sum REE、Y、Th、U 含量的减少可能是沉积物成熟度增加的标志之一。沉积物成熟度增加与搬运距离有密切关系,在其他条件不变的情况下搬运距离越远,沉积物的成熟度越大。ZL 钻孔 \sum REE、Y、Th、U 平均值变化趋势可能表达了第四纪以来主要物源由近及远的变化,暗示了古长江由东向西发展的历史(图 6)。

4.3 ZL 钻孔及现代长江样品微量元素比较

图 7 中 A 区为 ZL 钻孔 286 m 以下的样品, B

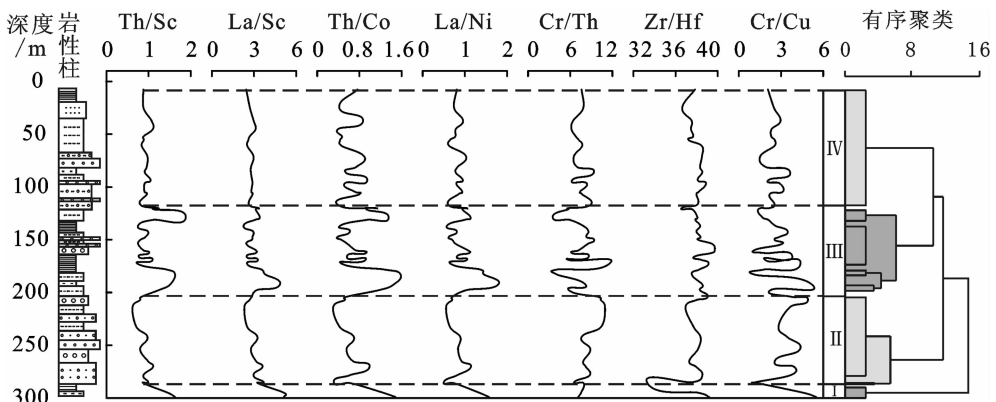


图 4 基于有序聚类分析的物源变化阶段划分

Fig.4 Division of sediment provenance based on order clustering analysis

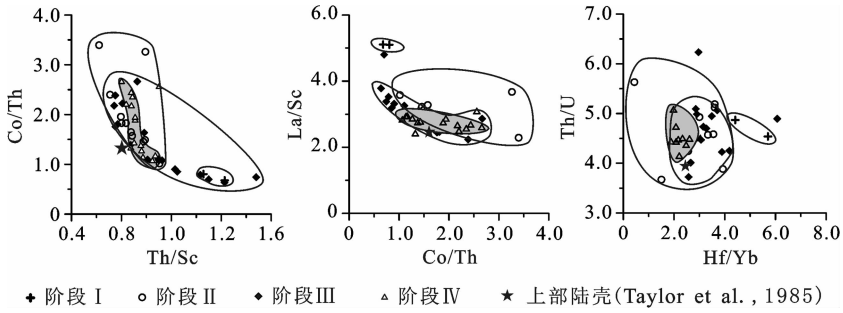


图 5 元素比值散点图
Fig.5 Scatter diagram of element ratios

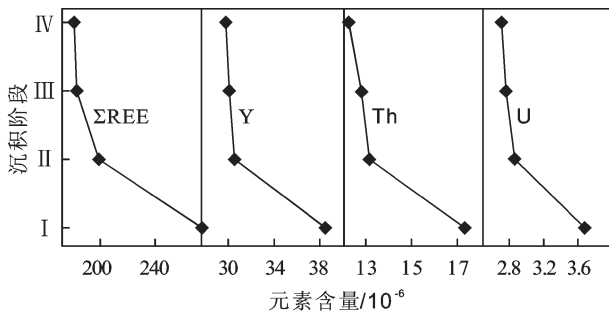


图 6 4 个物源阶段 Y、Th、U 及 Σ REE 平均含量变化
Fig.6 Variation of average content of Y, Th, U and Σ REE in the four provenance stages

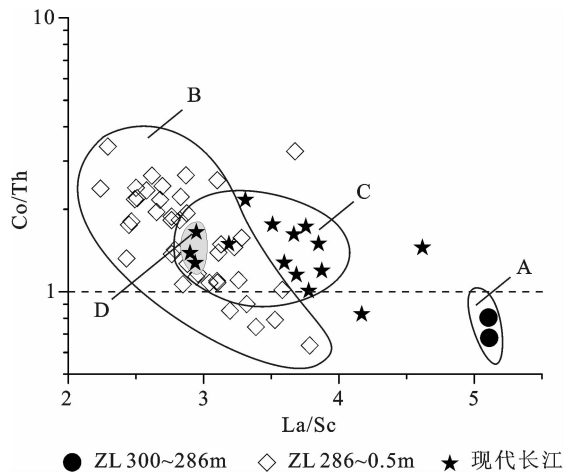


图 7 ZL 钻孔及长江上游表层沉积 La/Sc—Co/Th 图解
Fig.7 Discrimination plots of La/Sc versus Co/Th in surface layer sediments of the upper reaches of the Yangtze River

区为 286 m 到地表的样品, C 区为现代长江沉积物, 从图中尽管不能严格区分 ZL 钻孔第 II、III、IV 阶段沉积, 但 286 m 以下样品明显富集 La、Th 而亏损 Co 和 Sc 特征十分明了, 说明 ZL 钻孔底部沉积物受长英质岩类的影响比上部更为明显, 其物源供给中长英质岩类的贡献较大, 物源与上部明显不同。图 7 还显示, 多数现代长江样品(C 区) $Co/Th > 1$, 可见现代长江沉积物中铁镁质源岩的影响比较明显。而宜昌附近的样品(D 区)则表现出与钻孔中样品更为接近的特点, 因此, 可以认为, 自 2.68 Ma B.P. 以来, 江汉盆地沉积物源更多地受控于铁镁质源岩的影响, 这一结果与长江河口 PD 钻孔的研究结果一致^[8]。可能暗示了江汉盆地从这一时期开始接受了不同于 2.68 Ma B.P. 以前物源供给, 结合前文对图 4 的分析, 本文认为东西整体意义的长江从 2.68 Ma B.P. 开始形成, 到第 IV 阶段(1.25 Ma B.P. 以后)最终完成。

5 结论与建议

通过对江汉盆地 ZL 钻孔岩心沉积物微量及稀

土元素分析, 本文得出如下结论:

- (1) 多种微量元素比值分布自上新世以来越来越集中, 且逐渐接近上部陆壳平均值, 可能是长江上游水系拓展的表现。
- (2) ZL 钻孔岩心沉积物微量及稀土元素特征在 1.25 Ma B.P. 以后变化很小, 暗示了这一时期江汉盆地物源已趋于稳定, 而现代意义整体长江最终形成很可能是造成这一结果的原因。
- (3) 与 SiO_2 含量常呈负相关的 Σ REE、Y、Th、U 等自上新世后逐渐减少, 可能暗示了江汉盆地沉积物搬运距离有一个由近及远的过程。

在运用物源示踪方法研究长江演化的研究中, 以长江上游物质开始进入三峡以东地区作为长江三峡贯通指示的思想已普遍为人所接受。在长江中

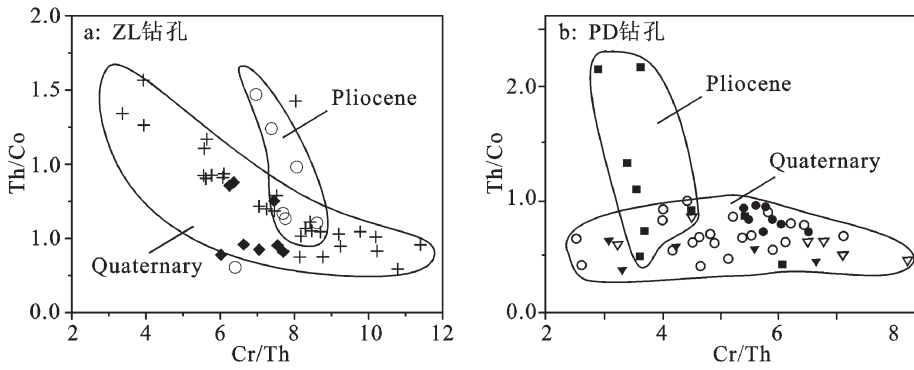


图 8 ZL 孔与 PD 孔(Yang et al, 2006)Cr/Th-Th/Co 图解比较

Fig.8 Comparison of discrimination plots of Cr/Th versus Th/Co in drill hole ZL and PD (after Yang et al., 2006)

游^[11-16,25]及下游地区^[8-10,26]展开的一系列研究均以此为基础,以沉积地层中不同时段沉积物与现代长江沉积物的亲缘关系为依据来约束长江三峡的贯通时限,提出了 1.1 Ma、3.2 Ma、上新统、0.7 Ma 等观点。这些观点中似乎忽视了三峡以西大型支流被袭夺对中下游沉积物组成的影响,应该进一步讨论不同研究者提出的三峡贯通证据是否为这些间歇性袭夺事件的影响。

此外,ZL 孔与长江口地区的 PD 孔^[8]的比较中可以看出(图 8),PD 孔第四纪沉积物 Cr/Th 偏低,而 ZL 孔则相反,这种差异可能与长江下游表壳岩系对 PD 孔的影响有关。因此,江汉盆地与长江河口地区物源变化的影响因素是存在一定差异的,在长江河口区进物长江物源分析时应该重视长江下游地区的影响。

参考文献(References):

- [1] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系 [J]. 第四纪研究, 1998, (3):213-221.
Wang Pinxian. Deformation of Asia and global cooling: searching links between climate and tectonics [J]. Quaternary Sciences, 1998, (3):213-221(in Chinese with English abstract).
- [2] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1):1-17.
Wang Pinxian. Cenozoic deformation and distory of sea-land interactions in Asia [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(1):1-17(in Chinese with English abstract).
- [3] 郑洪波, 汪品先, 刘志飞, 等. 东亚东倾地形格局的形成与季风系统演化历史寻踪[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11):1150-1160.
Zheng Hongbo, Wang Pinxian, Liu Zhifei, et al. Carving the history of east Asia's east-tilting topography and east Asia Monsoon [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11):1150-1160(in Chinese

with English abstract).

- [4] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. Tectonics, 2004, 23(1):1006-1029.
- [5] Clift P D, Carter A, Campbell I H. Thermochronology of Mineral Grains in the Red and Mekong Rivers,Vietnam:Provenance and Exhumation Implications for Southeast Asia [J]. Geochemistry, Gephysics, Geosystems, 2006, 7(10):Q10005-Q10010.
- [6] Clift P D, Long H V, Hinton R, et al. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments [J]. Geochem. Geophys. Geosyst., 9, Q04039, doi:10.1029/2007GC001867.
- [7] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? [J]. Geology, 2010, 38(6): 551-554.
- [8] Yang S Y, Li C X, Yokoyama K. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245(3-4):762-776.
- [9] 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2):299-307.
Huang Xiangtong, Zheng Hongbo, Yang Shouye, et al. Investigation of sedimentary geochemistry of core DY03 in the Yangtze Delta: implications to tracing provenance [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(2):299-307(in Chinese with English abstract).
- [10] 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J]. 科学通报, 2010, 55(4-5):350-358.
Jia Juntao, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: implication for the evolution of the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(4-5):350-358(in Chinese).
- [11] Wang J T, Li C A, Yang Y, Shao L. Detrital zircon geochronology and provenance of core sediments in Zhoulao Town, Jiangnan

- Plain, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(3):257-271.
- [12] 康春国, 李长安, 王节涛, 等. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(3):419-427.
- Kang Chunguo, Li Changan, Wang Jietao, et al. Heavy minerals characteristics of sediments in Jianghan Plain and its indication to the forming of the Three Gorges [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(3):419-427(in Chinese with English abstract).
- [13] 张玉芬, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示[J]. *科学通报*, 2008, 53(5):577-582.
- Zhang Yufen, Li Changan, Wang Qiuliang, et al. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jianghan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5):577-582(in Chinese).
- [14] 杨建, 李长安, 康春国, 等. 江汉平原沉积物中普通辉石的特征及物源示踪意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5):1000-1007.
- Yang Jian, Li Changan, Kang Chunguo, et al. Augite in Jianghan Plain sediments and its implication to source tracing [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29 (5):1000-1007 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(2):40-44.
- Ma Yongfa, Li Changan, Wang Qiuliang, et al. Statistics of gravels from a bore in Zhoulao town, Jianghan Plain and its relationship with cut-through of the Yangtze Three Gorges, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(2):40-44(in Chinese with English abstract).
- [16] 王秋良, 胡思辉, 李长安. 周老镇钻孔砾石层重矿物特征及地质意义[J]. *中国地质*, 2009, 26(4):878-884.
- Wang Qiuliang, Hu Sihui, Li Changan. Heavy mineral characteristics of gravel layers in the Zhoulao Town borehole [J]. *Geology in China*, 2009, 34(4):878-884(in Chinese with English abstract).
- [17] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. New York:Oxford University Press, 1985.
- [18] Henderson P. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements[J]. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984, 2:1-32.
- [19] Chakrapani G J. Major and trace element geochemistry in upper Ganga river in the Himalayas, India [J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(2):189-201.
- [20] Thomas R G, Eberth D A, Deino A L, et al. Composition, radioisotopic ages, and potential significance of an altered volcanic ash (bentonite) from the Upper Cretaceous Judith River Formation, Dinosaur Provincial Park, southern Alberta, Canada [J]. *Cretaceous Research*, 1990, 11(2):125-162.
- [21] Cullers R L, Barrett T, Carlson R, et al. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, USA [J]. *Chemical Geology*, 1987, 63(3/4):275-297.
- [22] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B4):6093-6095.
- [23] 王步娥. 江汉多旋回叠合盆地形成及沉积充填响应[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(3):261-267.
- Wang Bu'e. The formation mechanism and filling response of the Jianghan multicycle superimposed basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(3):261-267(in Chinese with English abstract).
- [24] 周炼, 高山, 刘勇胜, 等. 扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 32(1):29-38.
- Zhou Lian, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Geochemistry and Implications of Clastic Sedimentary Rocks from the Northern Margin of Yangtze Craton [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32 (1):29-38 (in Chinese with English abstract).
- [25] 向芳, 朱利东, 王成善, 等. 宜昌地区第四纪沉积物中玄武岩砾石特征及其与长江三峡贯通的关系 [J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(2):6-10.
- Xiang Fang, Zhu Lidong, Wang Chengshan, et al. Character of basaltic gravels in Quaternary sediments in Yichang area and its relationship with formation of Yangtze Three Gorges [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28 (2):6-10 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2):164-167.
- Yang Shouye, Li Congxian, Research progress in REE tracer for sediment source [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2):164-167(in Chinese with English abstract).

Trace element characteristics of sediments in Jiangnan Basin: Implications for expansion of the upper reaches of the Yangtze River

YUAN Sheng-yuan^{1,2}, LI Chang-an², ZHANG Yu-feng², SHAO Lei², WANG G Jie-tao²

(1. College of Urban Planning & Environment Science, Xuchang University, Xuchang 461000, Henan, China; 2. 1) Faculty of Sciences; 2) Key Lab of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education; 3) Institute of Geophysics and Geomatics; 4) State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The Jiangnan Basin is the largest basin after the Yangtze River flows through the Three Gorges. Sediments of more than 300 m thick have been deposited in the basin since 2.77 Ma B.P. They are mainly composed of fluvial and lacustrine deposits. Meanwhile, there are also several sedimentary cycles. In order to find out the provenance change of the sediments, the authors studied the trace elements in the samples collected from ZL borehole by using the ICP-MS. The dispersion extent of the trace element compositions of these samples has become less with the decrease of the depth since Pliocene, and tended to be close to the mean value of the upper crust. This suggests that the drainage area has become larger. Values of \sum REE, Y, Th, U and ratios of Th/Sc, Co/Th, La/Sc, Cr/Cu become smaller, suggesting that modern Yangtze River was probably formed after 1.25 Ma B.P.

Key words: trace element; expansion of river drainage; provenance; Jiangnan Basin; upper reaches of the Yangtze River

About the first author: YUAN Sheng-yuan, male, born in 1971, doctor, engages in the study of geomorphology and Quaternary geology; E-mail: qshengyt@163.com.

About the corresponding author: LI Chang-an, male, born in 1956, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of geomorphology and Quaternary geology; E-mail: chanli@cug.edu.cn.