

长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪

贾军涛^{1,2,3}, 郑洪波², 杨守业³

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;
3. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 结合区域大地构造演化, 系统总结并讨论了长江流域火成岩的时空分布特征及其对长江中下游沉积物物源的指示意义. 结果表明, 长江流域岩体的时空分布特征与区域构造演化密切相关; 青藏高原新生代酸性侵入岩和火山岩以及云贵川高原晚二叠世峨眉山玄武岩及伴生酸性岩是长江上游地区的特征岩体; 汉江和湘江—赣江流域早古生代中酸性侵入岩是长江中游地区的特征岩体; 白垩纪中酸性侵入岩和火山岩是长江下游地区的特征岩体. 这一成果可直接用于指导长江中下游地区利用碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素进行物源示踪的工作. 在钻孔沉积物中准确识别出这些特征年龄信息, 并结合沉积物古地磁年代的标定对研究长江的地质演化历史具有重要指示意义.

关键词: 长江流域; 构造-岩浆事件; 岩石类型; 物源

中图分类号: P 587

文献标识码: A

Rock Types in Yangtze Drainage and Their Implications for Zircon U-Pb Provenance Study of Yangtze Sediments

JIA Juntao^{1,2,3}, ZHENG Hongbo², YANG Shouye³

(1. School of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. State Key Laboratory of Marine Geology, Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The igneous rocks of each subplates in the Yangtze drainage were discussed on the basis of their tectonic settings in order to provide finger-prints for the riverine sediments in the lower valley. Results indicate that the distribution of rock types is closely related to the evolution of tectonics in the Yangtze drainage. The Cenozoic felsic rocks in the Tibet Plateau and the late Permian basalts and concomitant felsic rocks of the Emeishan large igneous province in the adjacent

area around Sichuan, Yunnan and Guizhou province are typical rock bodies in the upper Yangtze drainage. Early Paleozoic felsic rocks outcrop primarily in the Cathaysian Block and Qinling Mountain, which are typical rock bodies in the middle reaches. Cretaceous felsic magmatic and volcanic rocks occurring mainly in volcanic basins along Yangtze River are dominant in the lower Yangtze basin. The recognition of the distribution of main igneous rock bodies in the whole Yangtze drainage basin will be of great help for sediment provenance study of the Yangtze River based on the methods in combination with detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis, which may result in uncovering of the evolution history of the Yangtze River.

Key words: Yangtze River; tectonic-magmatic event; rock type; provenance

长江是亚洲最长的河流, 其地质演化过程与青藏高原的隆升、亚洲现代地形格局的形成密切相关. 因此, 长江演化的研究一直备受地球科学界关注.

100 多年来, 众多学者针对长江的演化过程进行了大量的研究, 取得了很多有意义的认识, 也产生了很多争议. 比如, 当前普遍认为, 三峡的贯通是长江演化过程中的一个关键环节, 然而对三峡贯通的时限争议很大, 存在从白垩纪以前、渐新世—中新世、早更新世、中更新世和晚更新世等不同的认识^[1]. 争议产生的原因之一在于对长江上游物质到达中下游沉积盆地的方式和时限存在不同的认识^[2-6]. 由于长江流域面积广大, 源岩类型及其矿物组成复杂, 常规的元素及同位素地球化学及重矿物组合等物源示踪方法已难以满足长江沉积物物源示踪的需要. 结合碎屑锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素同步分析测试

收稿日期: 2009-08-01

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40830107)

作者简介: 贾军涛(1983—), 男, 理学博士, 主要研究方向为海洋地质与第四纪地质. E-mail: juntaojia@126.com

郑洪波(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为海洋地质与第四纪地质. E-mail: zhenghb@nju.edu.cn

进行沉积物物源示踪是当前国际上最为成熟的物源示踪方法^[7],将这种研究方法引入长江沉积物物源示踪的研究显得势在必行.

本文对长江流域不同构造单元岩体的年龄、分布特征及其与区域构造-岩浆事件的对应关系进行了系统的总结,目的是为利用沉积物碎屑锆石 U-Pb 年代对长江沉积物进行物源示踪研究,进而为探讨

长江贯通的时限提供证据.

1 长江流域区域构造划分

长江流域一级大地构造单元包括扬子地块、华夏地块、秦岭—大别褶皱带、松潘—甘孜褶皱带和昌都地块^[8](图1).

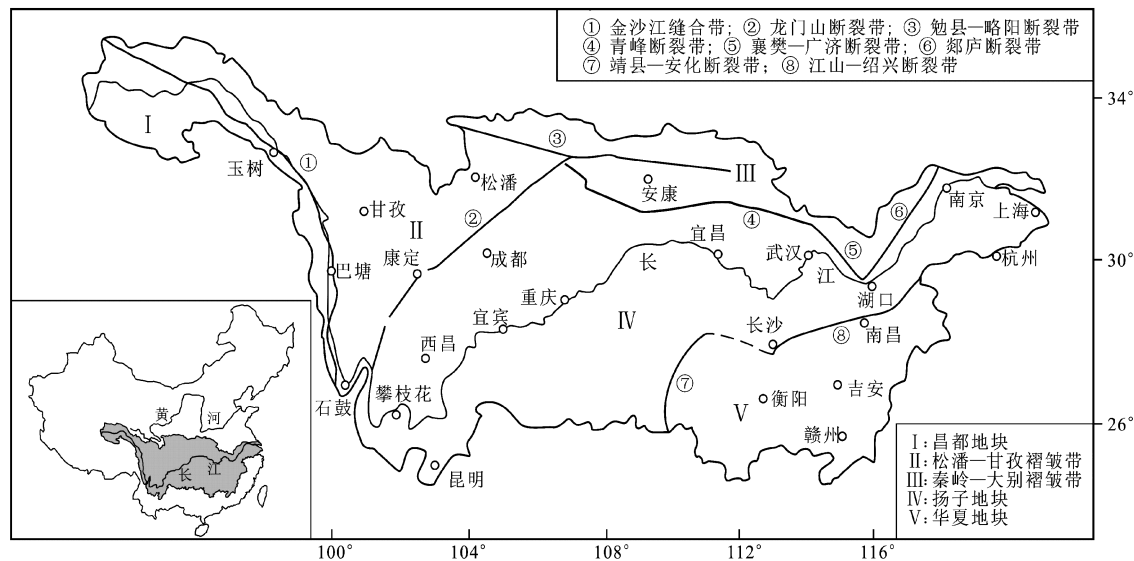


图1 长江流域大地构造单元区划图^[8]

Fig.1 Sketch map of the tectonic setting in the Yangtze drainage^[8]

扬子地块和华夏地块构成华南板块,是长江流域的主体.秦岭—大别褶皱带是华南板块和华北地块间的复合造山带.松潘—甘孜褶皱带位于青藏高原东部,晚三叠世—早侏罗世,与古中国大陆形成统一整体^[8].昌都地块以金沙江缝合带与松潘甘孜褶皱带相接,在早白垩世与古中国大陆完成拼合^[8].晚白垩世—新生代,随着印度板块与亚洲大陆碰撞、青藏高原的隆升,到晚第三纪长江流域现代地质地貌格局基本形成^[8].

2 长江流域岩浆岩的时空分布特征

本文根据已有地质资料及最新发表的岩体年龄数据^[9-19],结合中国大地构造演化的时间序列,按照区域大地构造区划,系统总结了长江流域太古宙—新生代火成岩的出露特征(表1和图2).

3 长江水系沉积物物源示踪研究方法

3.1 沉积物物源示踪在重建长江水系演化过程的作用

根据王鸿祯^[8]提出的关于长江演化的模式,中更新世之前的古长江分为黄陵背斜以东外流河和黄陵背斜以西内流河两条不连通的河段,而古金沙江不属古长江水系,而是经红河注入南海;现代长江是在中更新世以后通过贯通三峡,袭夺金沙江而逐步形成的.当前对于长江这样贯通的方式争议不大,争议的焦点在于长江贯通三峡的时限.

云南石鼓第一湾的形成和长江三峡的贯通是长江演化过程中的关键点,只有在第一湾形成和三峡贯通之后,来自长江上游的物质才能顺利到达下游地区.因此,在长江中下游地区追踪到来自长江上游的物质作为长江三峡贯通的依据^[2-6]是当前长江沉积物物源示踪研究的一个基本思路.

3.2 长江中下游地区已有物源示踪工作评述

当前,在长江中下游地区已经开展了利用元素—同位素地球化学^[2]、重矿物^[3]、磁性矿物^[4]和碎屑独居石年代学^[5-6]进行物源示踪的工作,简要介绍如下.

表 1 长江流域各构造单元太古宙—新生代岩体岩性、时代和出露面积统计表
Tab.1 Characteristics of terranes from Archean to Cenozoic in subplates of the Yangtze drainage

年代	昌都地块	松潘—甘孜褶皱带	秦岭—大别褶皱带	扬子地块	华夏地块
Cz	唐古拉山:中酸性岩; 9~11 Ma, 31~37 Ma, 40~56 Ma;500 km ² 芒康山:花岗岩;49 Ma; 250 km ²	沙鲁里山:花岗岩;55~ 65 Ma;1 000 km ² 金沙江 缝合带:中酸性岩;7~ 16 Ma, 30 ~ 62 Ma; 200 km ² 可可西里山:中酸性岩; 2~7 Ma, 18~33 Ma, 49~63 Ma;300 km ²		南京附近:玄武岩; 中新世—上新世; 1 000 km ²	武夷山:花岗岩;37 Ma; 0.6 km ²
K	唐古拉山:花岗岩;67~ 70 Ma;1 000 km ²	沙鲁里山:花岗岩;83~ 116 Ma;1 000 km ²	桐柏山:花岗岩;122~ 139 Ma;250 km ² 大别山:中酸性侵入岩; 80~137 Ma;1 800 km ²	长江下游:中酸性岩; 90~135 Ma;6 500 km ² ; 幕阜山:中酸性岩; 118~143 Ma;200 km ²	赣江上游:花岗岩; 124~136 Ma;1 500 km ² 武夷山:88~140 Ma; 700 km ² 武功山:花岗岩;126~ 144 Ma;10 km ²
J		大渡河—岷江上游地 区;150~198 Ma ^[10] ; 1 000 km ² 雅鲁江上游地区;168 Ma;810 km ² 可可西里山:花岗岩; 159~186 Ma;70 km ² 金沙江缝合带;158~ 197 Ma;200 km ²	北秦岭:花岗岩;148~ 189 Ma;1 500 km ² 桐柏山:花岗岩;156 Ma;285 km ²	康滇裂谷:花岗岩; 147~193 Ma;1 000 km ² 长江下游地区:中酸性 侵入岩;147~196 Ma; 1 000 km ²	南岭:酸性侵入岩; 149~188 Ma;8 500 km ² 幕阜山:花岗岩;165~ 183 Ma;3 000 km ² 武功山:花岗岩;161 Ma;250 km ² 九岭山:花岗岩;171 Ma ^[11] ;200 km ² 武夷山:花岗岩;146~ 189 Ma;3 000 km ² 衡山:花岗岩;149~176 Ma;350 km ²
T	金沙江缝合带:中酸性 岩;204~238 Ma;1 200 km ² ;中基性岩;208~ 242 Ma;9 000 km ²	沙鲁里山:花岗岩; 205~237 Ma;5 000 km ² 大渡河—岷江上游地 区:花岗岩;203~243 Ma;1 000 km ²	嘉陵江—汉江源区:花 岗岩;201~237 Ma; 5 000 km ²	康滇裂谷:花岗岩; 221~225 Ma;3 km ² 天目山:花岗岩;三叠 纪;400 km ²	南岭:花岗岩;204~239 Ma;3 000 km ² 雪峰山:花岗岩;203~ 218 Ma;750 km ² 衡山:花岗岩;200~233 Ma;2 000 km ²
P _{z2}	金沙江缝合带:酸性岩; 二叠纪;1 500 km ² ;蛇绿 岩;263~285 Ma, 296~ 362 Ma;900 km ²	可可西里山:闪长岩; 257 Ma;500 m ²	嘉陵江上游:酸性岩;泥 盆纪;200 km ² 汉江上游:酸性岩;泥盆 纪;620 km ² 伏牛山:花岗岩;262~ 287 Ma;1 200 km ²	康滇裂谷地区:玄武岩 为主,伴生中酸性岩; 257~263 Ma ^[12] ;25 万 km ² ;花岗岩;251~255 Ma ^[12] ;600 km ²	湘江上游地区:花岗岩; 266~267 Ma;340 km ² 赣江中游地区:花岗岩; 二叠纪;210 km ² 九岭山:花岗岩;二叠 纪;200 km ²
P _{z1}			嘉陵江源区:石英闪长 岩;454 Ma;18km ² 北秦岭:花岗岩;奥陶— 志留纪; 1 200 km ² 大巴山:石英闪长岩;志 留纪;270 km ² 大洪山:石英正长岩; 435~439 Ma ;23 km ²		南岭:花岗岩;416~458 Ma;9 000 km ² 衡山:花岗岩;志留纪; 340 km ² 武功山:花岗岩;428~ 462 Ma;81 km ² 九岭山:花岗岩;446 Ma;10 km ² 武夷山:花岗岩;奥陶— 志留纪; 1 300 km ²
P _{t3}		龙门山:花岗岩;748~ 809 Ma ^[13] ;1 500 km ² 大雪山:花岗岩;824~ 864 Ma;52 km ²	东秦岭:花岗岩;685~ 943 Ma;400 km ² 大巴山:变基性及酸性 岩;682~808 Ma ^[14] ; 1 200 km ² 武当山:流纹岩;750~ 755 Ma ^[14] ;1 750 km ² 桐柏山:双峰式火山岩; 新元古代 ^[14] ;1 500 km ² 大别山:花岗岩片麻岩; 754 ~ 824 Ma ^[15] ; 1 300 km ²	嘉陵江上游:基性—中 酸性岩;776~840 Ma; 10 000 km ² 米仓山:酸性岩为主; 796~876 Ma;3 000 km ² 康滇裂谷:花岗岩为主; 746~857 Ma;6 400 km ² 黄陵背斜:花岗岩; 744~834 Ma;1 000 km ²	梵净山:花岗岩;966 Ma;5 km ² 基性岩;814~831 Ma; 20 km ² 九岭山:花岗岩;818~ 828 Ma ^[11] ;4 000 km ² 庐山:花岗岩;823 Ma; 5 km ² 赣东北—皖南:蛇绿岩, 花岗岩;880~968 Ma; 30 km ² 怀玉山:花岗岩;779 Ma;100 km ² ;流纹岩; 817~827 Ma;700 km ²

续表					
年代	昌都地块	松潘—甘孜褶皱带	秦岭—大别褶皱带	扬子地块	华夏地块
Pt ₂		龙门山:火山—沉积岩,基性火山岩为主,酸性组分少;中元古代;1 500 km ²	伏牛山南麓:花岗岩;中元古代;380 km ²	康滇裂谷:花岗质片麻岩;1 007 Ma ^[16] ;17 km ² ;中基性火山岩;中元古代;5 000 km ²	贵州梵净山:变基性岩;中元古代;250 km ² 湘西冷家溪群:变中基性岩;中元古代;2 500 km ² 江西双桥山群:变火山—沉积岩,基性岩;中元古代;7 000 km ²
Pt ₁			秦岭:变中基性岩;1 657~1 987 Ma;4 500 km ² 大别山:花岗岩;2010~2147 Ma ^[15] ;300 km ² ;变中基性岩;古元古代;6 000 km ²	康滇裂谷:变基性岩;1 855~2 451 Ma;1 000 km ² 米仓山:双峰式火山岩;1 849 Ma;1 300 km ² ;变酸性岩;2 141~2 388 Ma;58 km ²	庐山:变质酸性岩为主;1 869 Ma;110 km ² 武夷山:变质基性岩;1 766 Ma;130 km ²
Ar			南秦岭:变中基性岩;2 657~2 693 Ma ^[17] ;75 km ² 大别山:变基性岩;2 741~2 811 Ma ^[18] ;10 km ²	黄陵背斜:崆岭变酸性岩和沉积岩;2 903~2 947 Ma ^[19] ;360 km ²	

注:岩体年龄未标注部分及岩体面积参见文献[10].

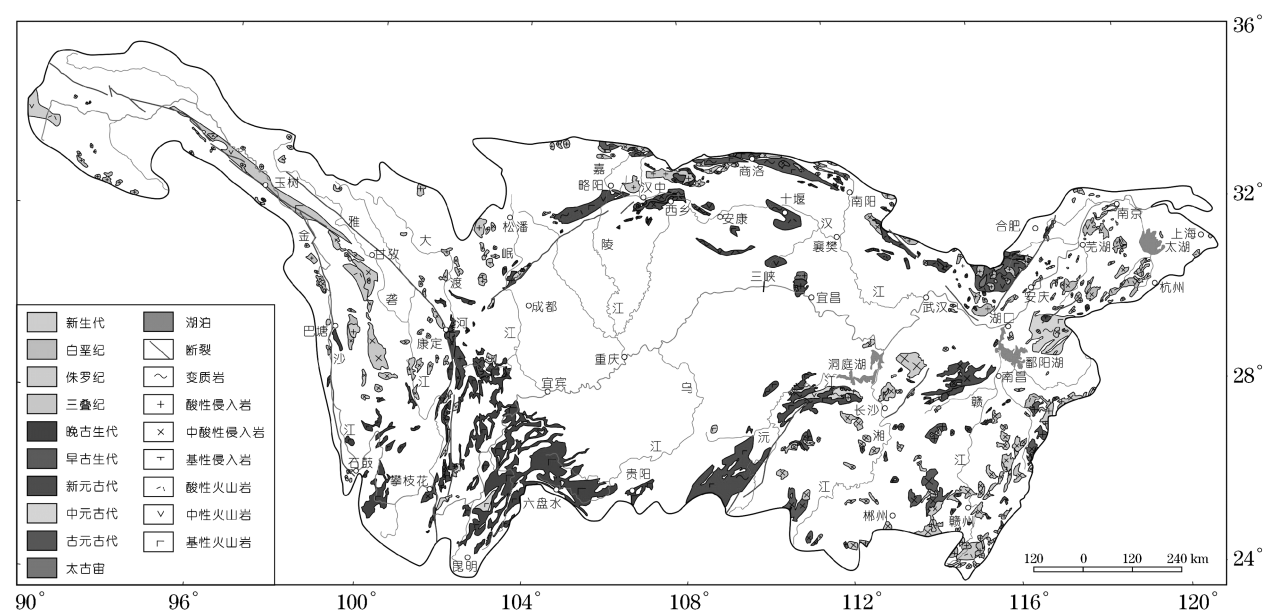


图 2 长江流域太古宙—新生代火成岩分布图
Fig.2 Distribution of igneous rocks in the Yangtze drainage from Archean to Cenozoic

杨守业等^[2]利用稀土元素和 Nd 同位素对长江三角洲 PD 孔细粒沉积物开展了元素和 Nd 同位素研究,认为来自长江上游的物质在早更新世开始到达下游地区,现代意义的长江形成.陈静等^[3]认为在长江流域紫苏辉石仅在上游峨眉山玄武岩中才发育,因而将沉积物中紫苏辉石的出现作为长江贯通的标志,认为长江三峡在晚更新世贯通.张玉芬等^[4]依据江汉盆地钻孔沉积物磁化率的变化,认为在早更新世晚期磁化率的突然增强是物源突变的结果,来自峨眉山玄武岩的铁磁性矿物开始出现,代表长

江三峡已经贯通.范代读等^[5]和 Yang 等^[6]提出长江流域<25 Ma 的中酸性侵入岩仅出露在长江上游的青藏高原地区,因而将长江三角洲地区 PD 孔和 PD-99 孔沉积物中年轻独居石的出现作为长江贯通的标志,认为长江三峡在早更新世早期贯通.

当前开展的沉积物源示踪工作各有缺点:①沉积物全岩地球化学具有多解性;②长江流域很多岩体,不止峨眉山玄武岩中含有紫苏辉石,米仓山北麓新元古代苏长岩、康滇裂谷新元古代苏长岩和大别山地区太古宙紫苏石榴黑云母片麻岩中均含有紫苏

辉石^[9];③早在1983年,Karlin等^[20]就注意到成岩作用会使得磁性矿物发生大量溶解,形成次生磁性矿物,磁化率的变化受成岩作用的影响;④独居石的U-Pb同位素体系封闭温度相对较低^[21],容易受到后期热事件的影响。

3.3 长江流域碎屑锆石U-Pb年代物源示踪研究思路

长江流域岩体的时空分布特征(表1和图2)与区域构造岩浆事件密切相关,将碎屑锆石U-Pb年龄与构造岩浆事件相联系应是利用碎屑锆石U-Pb年代学进行物源示踪的根本途径。

太古宙—元古宙是长江流域主体华南板块陆壳增生和改造的重要时期^[15],因而元古宙(尤其是新元古代)岩体在长江流域广布,尽管太古宙岩体出露局限,但该期年龄信息在扬子地块及华夏地块岩体的碎屑锆石和继承锆石^[15,18-19]中也广为发现,因此需要结合锆石U-Pb定年和Hf同位素分析同步进行物源示踪才能进一步明确长江沉积物中古老年年龄信息所代表的物源意义。早古生代,华南板块的东南发生陆壳增生^[15],因而在华夏地块的湘江和赣江流域加里东期花岗岩广布。晚古生代,扬子地块西缘发生地幔柱上涌^[10,12],在云贵川高原大面积出露晚二叠世玄武岩及伴生酸性岩。三叠纪,华南板块与华北板块以及藏滇板块与华南板块发生碰撞拼合^[8],此期也是华夏地块陆壳增生的重要时期^[8],因而三叠纪岩体在秦岭、松潘甘孜褶皱带、康滇裂谷地区和湘江—赣江流域出露较多。侏罗纪,华夏地块陆壳增生继续进行并持续到中侏罗世^[8],因而岩体主要出露在湘江—赣江流域;岩体在松潘甘孜地区、秦岭和长江下游地区的出露也与区域构造岩浆活动对应^[8]。白垩纪,受晚三叠世—早侏罗世华南板块与华北板块碰撞后应力释放以及太平洋板块的西向俯冲的作用^[8],在中国东南部滨太平洋构造域发生强烈的构造岩浆活动,因而在长江流域岩体主要出露在长江下游地区和东大别山。新生代,随着特提斯洋的退缩及最终闭合^[8],构造岩浆活动主要发生在青藏地区,因而青藏高原地区出露中酸性侵入岩和火山岩。

4 结论

新生代酸性侵入岩和火山岩以及晚二叠世峨眉山玄武岩及伴生酸性岩是长江上游的特征岩体;早古生代(奥陶纪—侏罗纪)中酸性侵入岩是长江中

游地区(湘江和赣江流域)特征岩体;白垩纪中酸性侵入岩和火山岩是长江下游地区的特征岩体。

根据长江流域岩体时空分布特征总结出来的这些规律可以有效地指导在长江中下游地区利用碎屑锆石U-Pb年代开展沉积物源示踪的工作,这项工作需与Hf同位素分析结合开展,以进一步明确碎屑锆石的物源区。在钻孔沉积物中追踪来自长江上游的物质,并结合古地磁定年确定沉积物年代应是解决长江三峡贯通时限,重建长江演化历史的途径。

考虑到长江流域物源区的多样性与源岩的复杂性,在长江下游地区进行沉积物源示踪,要综合矿物组合分析、元素地球化学、同位素地球化学和单矿物年代学的研究方法进行系统研究。

参考文献:

- [1] 范代读,李从先.长江贯通时限研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(2):121.
FAN Daidu, LI Congxian. Reviews on researches of timing of the Yangtze draining the Tibetan Plateau to the East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 121.
- [2] 杨守业,韦刚健,夏小平,等.长江口晚新生代沉积物的物源研究:REE和Nd同位素制约[J].第四纪研究,2007,27(3):339.
YANG Shouye, WEI Gangjian, XIA Xiaoping, et al. Provenance study of the late Cenozoic sediments in the Changjiang delta: REE and Nd isotopic constraints [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(3): 339.
- [3] 陈静,王哲,王张华,等.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[J].第四纪研究,2007,27(5):700.
CHEN Jing, WANG Zhe, WANG Zhanghua, et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang river delta [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 700.
- [4] 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.
ZHANG Yufen, LI Chang'an, WANG Qiuliang, et al. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 584.
- [5] 范代读,李从先, Yokoyama K, 等.长江三角洲晚新生代地层独居石年龄与长江贯通时间研究[J].中国科学: D 辑, 2004, 34(11): 1015.
FAN Daidu, LI Congxian, Yokoyama K, et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time [J]. Science in China, Series D, 2005, 48: 1718.
- [6] YANG Shouye, LI Congxian, Yokoyama K, et al. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Yangtze Delta: implications for sediment provenance and development history of the Yangtze River [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245: 762.

- [7] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from Hf in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399: 252.
- [8] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1985.
WANG Hongzhen. Atlas of the palaeogeography of China[M]. Beijing: Cartographic Publishing House, 1985.
- [9] 马丽芳. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
MA Lifang. Geological atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [10] Zhang H F, Zhang L, Harris N, et al. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152: 75.
- [11] 钟玉芳, 马昌前, 余振兵, 等. 江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb 年代学[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005, 30 (10): 685.
ZHONG Yufang, MA Changqian, SHE Zhenbing, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Jiuling granitic complex batholith in Jiangxi province [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(10): 685.
- [12] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 3084.
- [13] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248: 286.
- [14] LING Wenli, REN Bangfang, DUAN Ruichun, et al. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(14): 2192.
- [15] ZHENG Yongfei, ZHANG Shaobing. Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 1.
- [16] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2002, 113: 135.
- [17] 秦克令, 邹湘华, 何世平. 陕, 甘, 川交界处摩天岭区碧口群层序及时代划分[J]. *西安地质矿产研究所刊*, 1990, 30: 1.
QIN Keling, ZOU Xianghua, HE Shiping. Stratigraphic succession and age of Bikou Group of Motianling, adjoining region of Shaanxi Province and Gansu Province [J]. *Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science*, 1990, 30: 1.
- [18] WU Yuanbao, CHEN Daogong, XIA Qunke, et al. In-situ trace element analyses and Pb-Pb dating of zircons in granulite from Huangtuling, Dabieshan by LAM-ICP-MS [J]. *Science in China: Series D*, 2003, 46: 1161.
- [19] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. *Geology*, 2000, 28: 11.
- [20] Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent hemipelagic sediments [J]. *Nature*, 1983, 303: 327.
- [21] WAN Yusheng, LIU Dunyi, JIAN Ping. Comparison of SHRIMP U-Pb dating of monazite and zircon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 1501.

(上接第 1353 页)

- [3] Baysore J K. Laser beam welding and formability of tailored blanks [J]. *Welding Journal*, 1995, 74 (10): 345.
- [4] 姜银方, 杨继昌, 陈伟. 拼焊板冲压成形研究的现状和发展趋势[J]. *汽车工程*, 2003, 25(4): 410.
JIANG Yinfang, YANG Jichang, CHEN Wei. The status quo and trends of tailor welded blanks [J]. *Automotive Engineering*, 2003, 25(4): 410.
- [5] 邱晓刚. 焊缝对拼焊板成形性能的影响[J]. *理化检验: 物理分册*, 2005, 41(4): 166.
QIU Xiaogang. The influence of the weld seam on formability performance of tailor-welded blank [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2005, 41(4): 166.
- [6] 阎启, 曹能, 余宁峰. 激光拼焊板成形性能的试验研究[J]. *应用激光*, 2003, 23(2): 71.
YAN Qi, CAO Neng, YU Ningfeng. Experimental study on formability of blanks after laser welding [J]. *Applied Laser*, 2003, 23(2): 71.
- [7] Meinders T, van den Berg A. Deep drawing simulations of tailored blanks and experimental verification [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103: 65.
- [8] Abdullah K, Wild P M, Jeswiet J J, et al. Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 112(1): 91.
- [9] 张立玲, 高峰, 张庆, 等. 拼焊板焊缝力学性能实验研究[J]. *机械设计与制造*, 2006(8): 113.
ZHANG Liling, GAO Feng, ZHANG Qing, et al. Experimental investigation on the mechanical properties of weld metal in tailor welded blanks [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2006(8): 113.
- [10] Wang B Y, Shi M F, Sadmia H, et al. Structural performance of tailor welded sheet steels [J]. *SAE Technical Paper Series*, 1995(104): 222.