

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2025.02.009

引文格式: 李姿亭, 付晓伟, 董足华, 高顺莉, 李帅, 张伯成. 2025. 基于长江中下游及海域沉积物源揭示长江演化历史: 进展、挑战与展望[J]. 华东地质, 46(2): 171-190. (LI Z T, FU X W, DONG Z H, GAO S L, LI S, ZHANG B C. 2025. Revealing the evolutionary history of the Yangtze River based on sediments provenance in the middle and lower reaches and offshore regions: progress, challenges and prospects[J]. East China Geology, 46(2): 171-190.)

基于长江中下游及海域沉积物源揭示长江演化历史: 进展、挑战与展望

李姿亭¹, 付晓伟¹, 董足华², 高顺莉³, 李 帅³, 张伯成³

(1. 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092; 2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要: 长江作为连接青藏高原与西太平洋边缘海的关键纽带, 其演化历史是揭示东亚“构造-地貌-气候”耦合机制的重要切入点。目前, 学界围绕长江的形成及演化开展了大量研究, 运用构造地貌学、沉积学等多学科方法深入分析, 研究区域涵盖了上游的高原峡谷、三峡河流阶地, 中下游的砾石层、江汉盆地以及海域盆地等。然而, 关于长江的贯通时间, 学界仍存在较大争议, 提出了诸如始新世、中新世以前、晚中新世及早—中更新世之交等多种观点。文章基于长江中下游及海域的物源分析, 系统梳理了长江演化研究的方法与进展, 探讨了不同物源方法的适用性及面临的挑战。尽管多种物源方法为理解长江演化提供了重要证据, 但各类方法均存在一定局限性。高封闭温度物源分析方法(碎屑锆石 U-Pb 定年等)易受再旋回物质的显著干扰, 难以准确区分青藏高原东缘与长江中下游的物源贡献; 低封闭温度方法(裂变径迹、云母及钾长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年等)能反映青藏东缘的独特隆升剥蚀过程, 但相关研究较少。此外, 陆域沉积易受局部物源影响且沉积连续性差, 难以准确追溯长时间尺度的物源变化。相较而言, 海域沉积地层受局部物源影响较小, 且具有连续性好、年代标定精度高的优势。未来应加强多种同位素方法的联合应用, 并注重对东海盆地等海域沉积记录的研究, 结合沉积速率变化进行综合分析, 以期更有效地揭示长江的演化历史。

关键词: 长江演化; 物源分析; 同位素测年; 沉积记录; 东海盆地

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)02-171-20

新生代东亚地貌演化的核心命题之一, 是青藏高原隆升如何通过水系重组而影响区域乃至全球表层系统。长江作为连接地球上最高的高原(青藏高原)与最深的大洋(太平洋)的大型河流, 其演化历史为揭示东亚“构造-气候-地貌”耦合机制提供了独特的研究窗口(Zheng et al., 2015; 姜月华等, 2023)。

长江的形成与演化受到构造、地貌、气候等多重因素的影响, 围绕长江的贯通年龄和演化历

史, 前人开展了大量研究(Wei et al., 2016; Wu et al., 2016; Yan et al., 2012; Zheng et al., 2021)。一般认为, 长江是通过从下游至上游的一系列河流袭夺事件逐渐形成的(Clark et al., 2004)。因此, 学界尤其关注长江流域地理上的关键点——上游的丽江石鼓镇长江“第一湾”及三峡的形成。袭夺成因认为在青藏高原东南缘隆升作用的影响下, 流入四川盆地的河流通过溯源侵蚀作用, 将石鼓以上的金沙江纳入长江水系, 形成了“石鼓第一

* 收稿日期: 2025-02-25 修订日期: 2025-04-03 责任编辑: 袁静

基金项目: 国家自然科学基金项目“晚中新世长江演化及对青藏东缘快速隆升剥蚀的响应: 东海盆地沉积记录的约束(编号: 42476055)”和上海市科学技术委员会面上项目“东海盆地典型钻井古近纪物源演化及其对大型古水系形成的指示(编号: 22ZR1463300)”联合资助。

第一作者简介: 李姿亭, 2000 年生, 女, 硕士研究生, 主要从事沉积物源研究工作。Email: 2231649@tongji.edu.cn。

通信作者简介: 付晓伟, 1986 年生, 男, 副教授, 博士, 主要从事构造及沉积物源研究工作。Email: fu_xiaowei@tongji.edu.cn。

湾”(巴尔博等, 1935; 任美铎等, 1959)。围绕三峡的贯通时间问题, 众多学者基于三峡及四川盆地的抬升剥露历史(Richardson et al., 2010)、三峡河流阶地的形成过程(Li et al., 2001)及江汉盆地的地质记录(Wang et al., 2014)等开展了大量研究, 但对于长江的形成时间, 依旧存在较大的争议。

近年来, 物源示踪技术的广泛应用为破解这一难题提供了新的视角。碎屑锆石 U-Pb 同位素定年技术(Fu et al., 2021; Wang et al., 2021; Yang et al., 2012; Zheng et al., 2013; 陈玺贇等, 2022; 刘武生等, 2022)、碎屑长石 Pb 同位素定年技术(Zhang et al., 2022)和低温热年代学方法(Sun et al., 2021)等显著地提升了物源判别能力。本文聚焦长江中下游关键沉积区, 对其物源研究进展进行了系统评述, 探讨了不同物源方法的适用性。同时, 结合当前研究现状, 提出未来的重点研究方向, 建议采用多种同位素分析方法开展综合性研究, 为全面、深入揭示长江的演化过程提供关键证据。

1 地质背景

长江发源于青藏高原唐古拉山脉, 自西向东流经三级地貌阶梯后注入东海, 全长 6 300 km, 流

域面积达 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (He et al., 2013)。长江上游段(沱沱河—宜昌): 以青藏高原东南缘和横断山脉为主体, 平均海拔 4 000 m(图 1); 横断山脉位于四川盆地西侧, 此处高山与深切峡谷并存, 构成典型的河流侵蚀地貌, 反映出晚中新世以来持续快速的河流下切(Tian et al., 2015; Royden et al., 2008)。长江中游段(宜昌—湖口): 尽管区域内存在秦岭—大别山及华南内陆的山脉, 但总体海拔相对较低, 长江干流流经江汉盆地(图 1), 此区域地势平坦(海拔 $< 100 \text{ m}$), 河道纵比大幅度下降。长江下游段(湖口—河口)(图 1): 此段地势同样平坦, 河口地区三角洲自上新世开始堆积(Jia et al., 2010)。

长江流域跨越多个地质构造单元, 主要包括: ①松潘—甘孜地块: 该地块大部分区域被三叠纪复理石所覆盖(Weislogel et al., 2010); ②扬子克拉通: 其基底形成于新元古代, 在基底之上是古生代至中生代的碎屑岩和碳酸盐岩沉积; ③秦岭—大别造山带: 作为印支期碰撞造山带, 以发育高压—超高压变质岩为特征(Li et al., 2014); ④华夏地块: 其基底由 1.9~1.8 Ga 的古老岩石构成, 并且中生代岩浆岩在区域内大范围分布(Li et al., 2014; Xu et al., 2007)(图 2)。不同构造单元在漫长的地质时期中形成了错综复杂的源-汇关系(Weislogel et

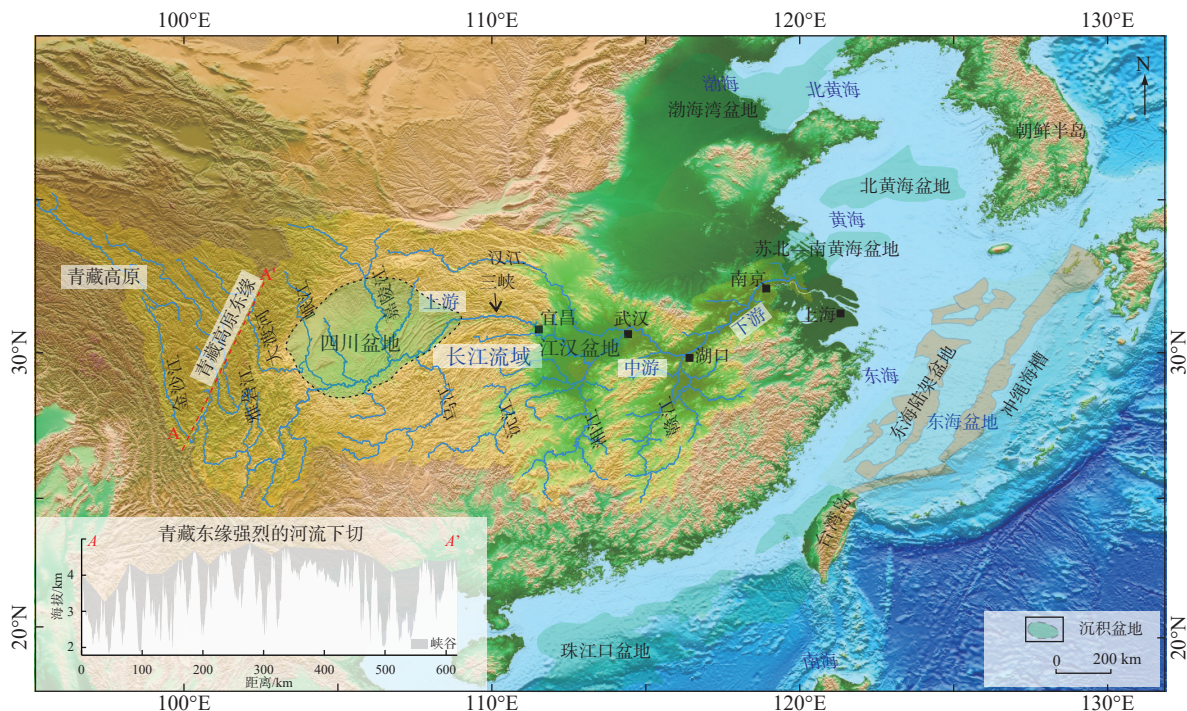


图1 长江流域地貌及水系分布简图(盆地区划修改自 Ren et al., 2002; Zhu et al., 2019)

Fig. 1 Geomorphology of the Yangtze River drainage basin (Basin division modified from Ren et al., 2002; Zhu et al., 2019)

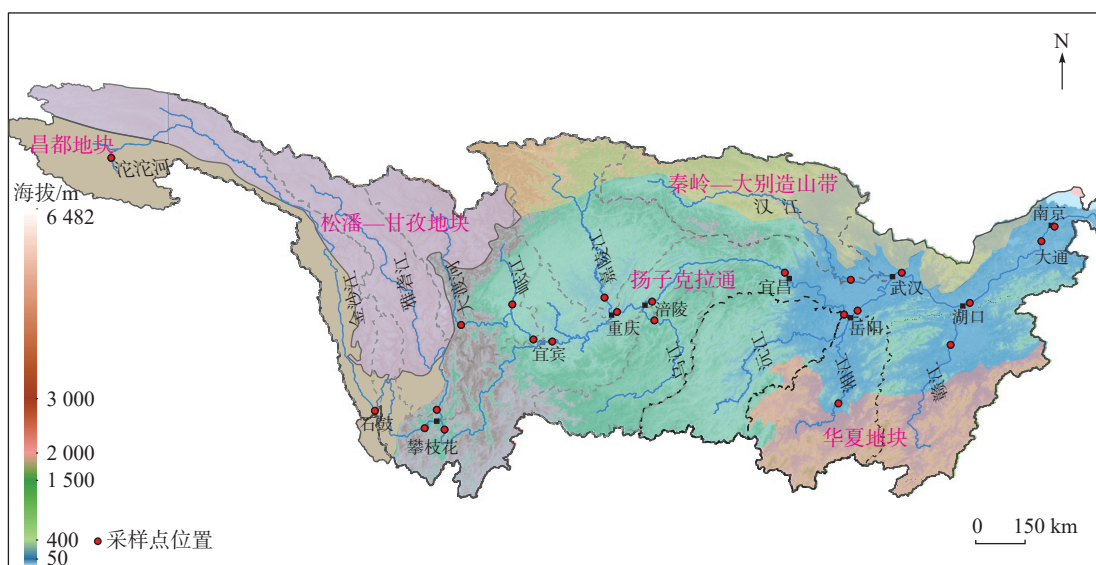


图2 长江流域大地构造单元区划及前人采样点位置分布图(修改自 He et al., 2013; Sun et al., 2018, 2021; Yang et al., 2009; Zhang et al., 2016, 2021; Zheng et al., 2013)

Fig. 2 Geotectonics of the Yangtze River drainage basin and distribution of previous sampling sites(Modified from He et al., 2013; Sun et al., 2018, 2021; Yang et al., 2009; Zhang et al., 2016, 2021; Zheng et al., 2013)

al., 2010)。

Vezzoli et al.(2016)对长江干流及主要支流进行了系统的岩石组分和重矿物特征分析。研究发现,不同支流的岩石矿物组成受出露岩石的显著影响。例如,汉江主要流经秦岭—大别造山带,其岩石组成以长石-岩屑-石英质变质碎屑为主,富含中-高级变质岩;在乌江和沅江流域内,主要分布着扬子克拉通沉积岩,岩石成分多为石英-岩屑和岩屑-石英质沉积碎屑砂,总体呈现出重矿物缺乏的特征;湘江和赣江流经的华夏地块,则以碎屑岩沉积为主,河流中长石-石英砂占主导地位,钾长石的含量明显偏高。

长江干流岩石组分从源头到下游呈现出明显的变化。在青藏高原的源头区域,砂的成分主要为岩屑-石英砂;至金沙江下游,砂的成分转变为长石-石英-岩屑砂,变质岩岩屑含量显著增加;进入四川盆地后,长江干流受到源自古生代碳酸盐岩和二叠纪玄武岩碎屑物质的强烈影响;而汉江汇入后,武汉以下河段变质岩比例大幅增加;在下游长约 650 km 的平坦河段,砂的成分在一定范围内波动,从长石-岩屑-石英砂到岩屑-长石-石英砂不等,但总体变化幅度较小,这反映了水动力对不同矿物的差异分选作用(Vezzoli et al., 2016)。通过对岩石组分及重矿物的正演模拟, Yang et al.

(2015)认为长江上游区域贡献了约 80% 的碎屑物质,主要由嘉陵江和岷江供给;而中下游的碎屑物质则主要来源于汉江,其他支流的贡献相对较少。

2 长江中下游物源年代学研究进展

物源研究可为大型水系演化提供直接证据,是地质历史时期水系演变与造山作用研究中应用最为广泛、最有效的方法之一(Najman et al., 2022; Ruiz et al., 2004; Zhuang et al., 2015; 黄学勇等, 2023)。长江中下游分布有大量的新生代沉积,涵盖的主要区域包括江汉盆地、长江砾石层、长江三角洲、苏北—南黄海盆地及东海盆地(Fu et al., 2021; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Zheng et al., 2015; 孙雅雄等, 2024; 王欣等, 2024; Wang et al., 2004; Xu et al., 2017; Zhu et al., 2020),这些沉积保存了长江形成和演化的重要地质信息。

2.1 碎屑锆石 U-Pb 年代学研究

在长江流域大量的物源研究中,碎屑锆石 U-Pb 测年法是研究长江形成及演化应用最为广泛的方法(Li et al., 2024; Wang et al., 2021; Yang et al., 2012; Zhang et al., 2022; Deng et al., 2017; Zheng et al., 2013; Yang et al., 2009; Wu et al., 2007; Fedo et

al., 2003)。锆石 U-Pb 同位素体系的封闭温度可达 900 ℃, 因此, 可以很好地记录其寄主岩石的结晶年龄或变质年龄。前人对于长江中下游开展了大量的碎屑锆石年代学物源示踪研究, 对长江贯通年龄进行了约束, 但是结果差异较大(表 1)。

目前, 学界针对长江干流及各个支流沉积物的碎屑锆石 U-Pb 年龄特征已开展了大量研究。例如, 杨蓉等(2010)发现, 在长江流域内的羌塘地块、义敦岛弧、松潘—甘孜地块、扬子克拉通、秦岭—大别造山带等区域, 广泛存在 200~300 Ma、400~500 Ma、750~850 Ma 和 1 800~2 000 Ma 等年龄组(图 3)。基于此, 我们认为仅依据锆石年龄难以判断各个区域的贡献。He et al.(2013)对长

江流域的主要支流及干流的沉积物进行了碎屑锆石 U-Pb 年龄测定, 在多数支流中普遍存在 200~300 Ma 和 700~800 Ma 2 个主要年龄峰值区间, 但长江不同支流的锆石 U-Pb 年龄组分存在明显的区别。在长江上游的嘉陵江, 超过 1 000 Ma 的锆石年龄组占比达 43%; 在乌江, 其占比最高达 60%; 而在中游的沅江、湘江、汉江及赣江, 超过 1 000 Ma 的锆石年龄组总体占比则相对较低(图 3, 图 4)。相比之下, 从四川盆地至崇明岛的长江干流, 其碎屑锆石年龄谱特征基本保持稳定。

利用碎屑锆石 U-Pb 定年研究长江流域剥蚀特征的可靠性存在一定争议。He et al.(2013)认为青藏高原东缘并非长江碎屑物质的主要来源, 并

表1 长江中下游主要物源示踪研究对比
Table 1 Comparison on provenance tracing in major research areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River

研究区域	主要依据	主要结论	文献来源	分歧焦点
江汉盆地	周老孔深 100 m 处中-粗颗粒成分和稳定磁性矿物成分明显增加	距今 1.17~1.12 Ma, 长江三峡贯通	张玉芬等, 2008	取样点是否客观揭示长江演化信息
	沉积相及物源分析显示, 黄陵背斜基岩从新近纪开始遭受剥蚀	长江至少在约 23 Ma 前已贯通	Wang et al., 2014	
长江砾石层及江汉盆地	新近纪以来, 长江砾石层的碎屑锆石 U-Pb 年龄组成未发生变化; 江汉盆地在渐新世之前为湖相沉积	长江形成于 36.5~23 Ma	Zheng et al., 2013	(1) 长江砾石层能否代表贯通后的长江干流沉积产物 (2) 碎屑锆石 U-Pb 年龄能否有效区分长江上游物源信息
	长江砾石层中钾长石的铅同位素组成与桐柏—大别山基本一致, 但与长江上游截然不同; 在江汉盆地, 周老孔 3.4 Ma 之后的钾长石铅同位素特征与长江上游一致	三峡的形成时间距今不超过 10 Ma	Zhang et al., 2021	
长江中下游砾石层	通过对长江砾石层开展系统的年代学和沉积物源分析, 发现其碎屑锆石 U-Pb 年龄特征与青藏高原的火山活动存在显著关联	长江于晚渐新世至早中新世时期已完成贯通	Wang et al., 2021	
长江砾石层及现今长江干流	长江砾石层中云母及钾长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄与现今长江上游的情况截然不同, 在贯通的长江但与长江中游源区的特征高度吻合	在晚中新世之前, 不存在贯通的长江	Sun et al., 2021	
长江三角洲	碎屑锆石 U-Pb 年龄显示, 自 3.2 Ma 以来长江三角洲的物源主要来自上游	距今 3.2 Ma, 长江已经形成	Jia et al., 2010	(1) 如何客观解释某一时期或层段的物源变化 (2) 不同区域沉积连续性差异大, 物源的变化是代表水系的演化, 还是反映沉积体系的变迁
边缘海盆地	东海盆地晚中新世地层中首次记录到与现今长江干流具有高度相似性的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱特征	现代长江侵蚀模式(以青藏高原东缘为主要物源)在晚中新世(约 10 Ma)确立	Fu et al., 2021	
	西湖凹陷渐新世碎屑锆石 U-Pb 年龄组成与现今长江相似	渐新世, 长江已经形成	Wang et al., 2018	
	台湾岛中新世开始物源发生突变, 碎屑钾长石铅同位素显示主要来自苏鲁—大别造山带	早中新世, 长江尚未贯通	Zhang et al., 2022	

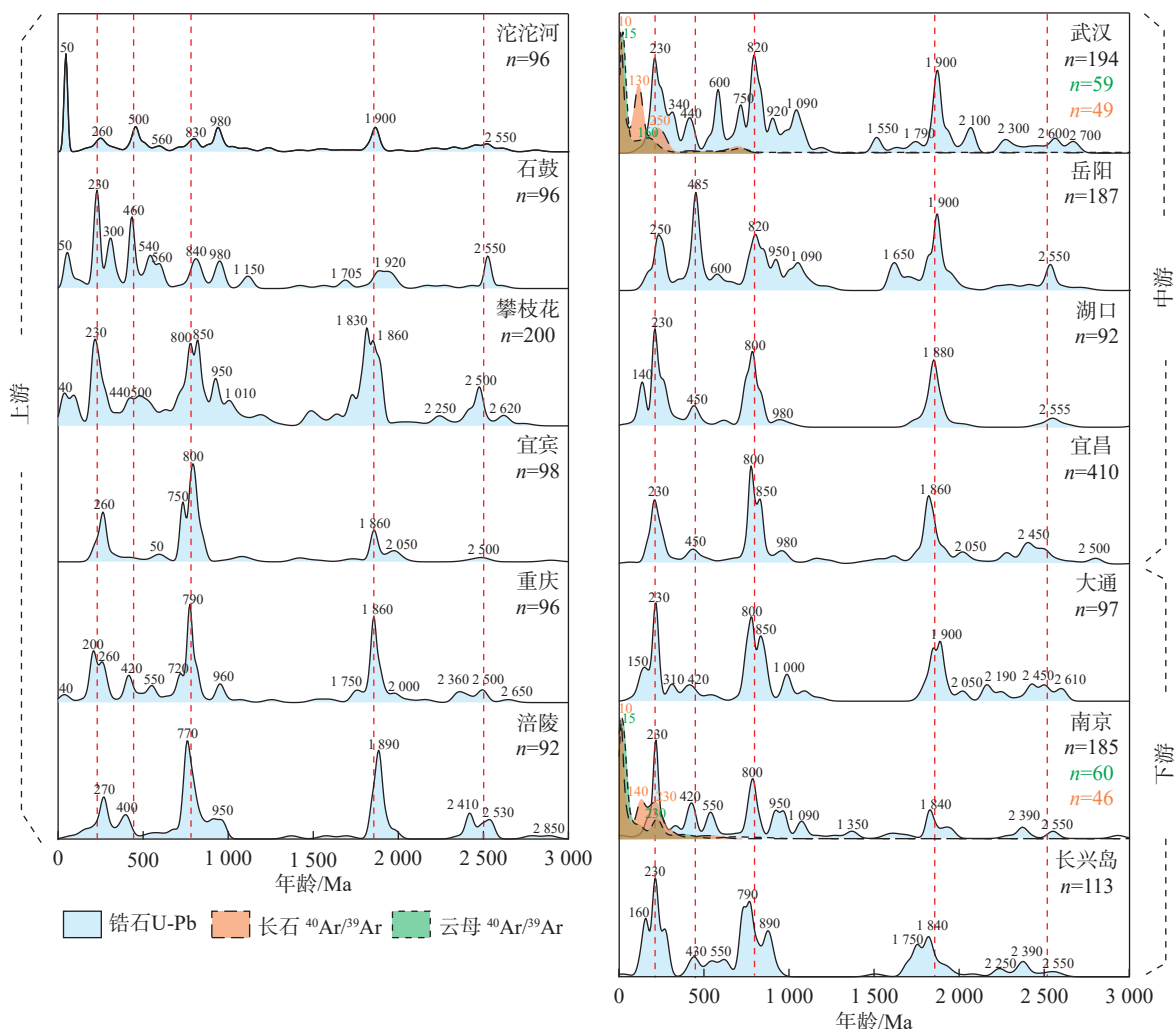


图3 长江干流流域碎屑锆石 U-Pb、云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 及长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图(数据来自 He et al., 2013; Sun et al., 2016, 2018; Wang P et al., 2014, 2021; Yang et al., 2009; Zhang et al., 2021, 2022; Zheng et al., 2013, 2015)

Fig. 3 Detrital zircon U-Pb, mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of the trunk stream of the Yangtze River drainage basin(Data sourced from He et al., 2013; Sun et al., 2016, 2018; Wang P et al., 2014, 2021; Yang et al., 2009; Zhang et al., 2021, 2022; Zheng et al., 2013, 2015)

强调人类活动对现今长江碎屑物质来源产生了重要影响。Vezzoli et al.(2016)注意到不同学者通过岩石学和重矿物综合分析得到的结果存在一定差异,进而提出仅依赖锆石等含量很低的矿物($0.02 \pm 0.02\%$),难以准确判断不同源区碎屑物质的贡献。Wissink and Hoke(2016)主要基于 He et al.(2013)的数据,通过分布混合模型等定量计算,发现雅砻江、大渡河、岷江为长江干流提供了绝大多数的碎屑物质,说明青藏高原东部边缘是长江碎屑物质的最主要贡献区,而这些区域同时也是长江流域的快速隆升剥蚀区,人为因素对现代长江沉积物产量的影响并不显著。

三峡贯通后,江汉盆地成为接纳长江上游物质的首个沉积区,因而受到格外关注。其西部新生代地层沉积相特征、河流古流向格局及锆石 U-Pb 年代学数据均表明,从始新世开始,三峡地区便持续遭受剥蚀,但这一现象应归因于陆内水系调整,并非意味着三峡已经贯通(Wang et al., 2014)。另外,江汉盆地渐新统广泛发育蒸发岩类及油页岩,同样不支持该时期有大型河流注入的观点(Zheng et al., 2011)。实际上,江汉盆地自上新世至始新世的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系涵盖了现代长江的所有特征年龄组,只是不同年龄组的占比与现代长江存在差异(图 5)。基于江汉盆地

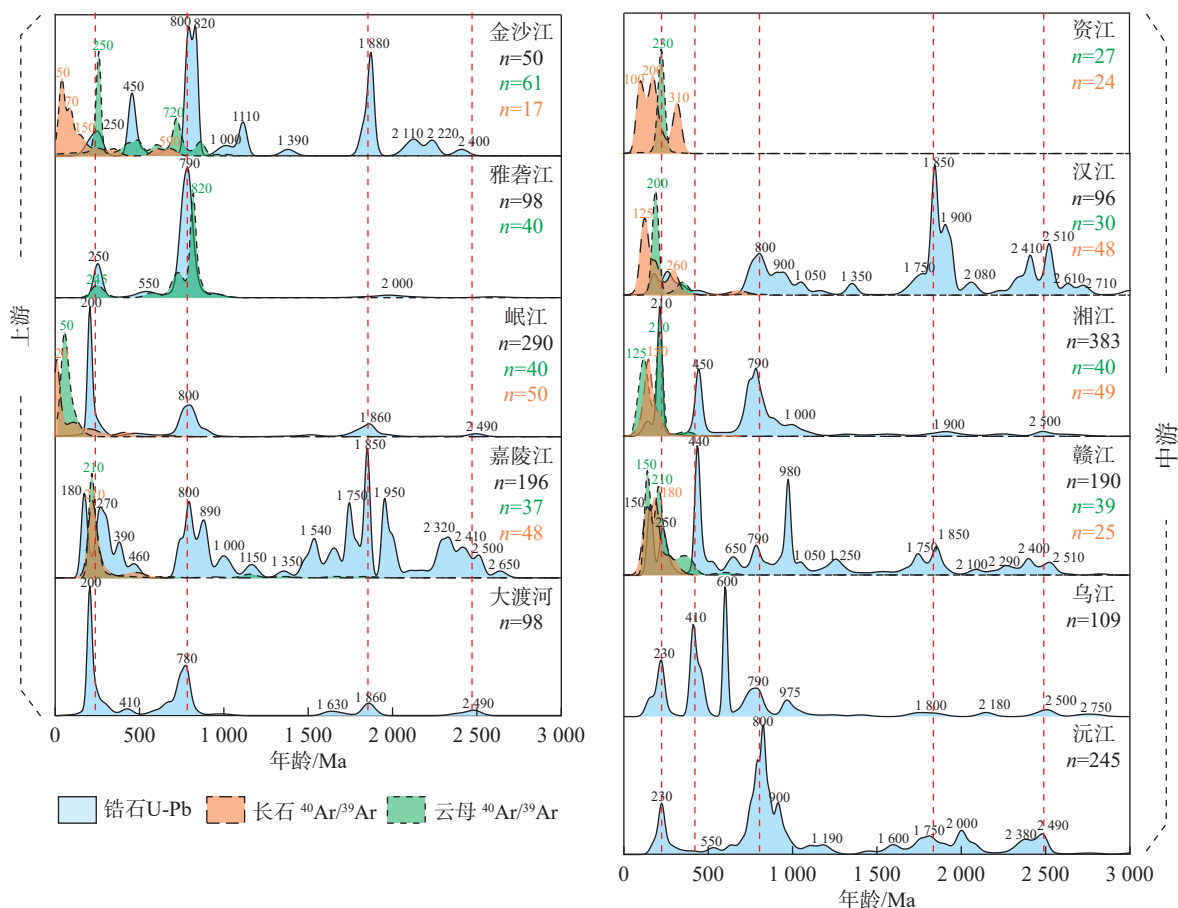


图4 长江支流流域碎屑锆石 U-Pb、云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图(数据来自 He et al., 2013; Sun et al., 2016, 2018; Wang P et al., 2014, 2021; Zhang et al., 2021, 2022; Zheng et al., 2013, 2015)

Fig. 4 Detrital zircon U-Pb, mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of the tributaries of the Yangtze River drainage basin(Data sourced from He et al., 2013; Sun et al., 2016, 2018; Wang P et al., 2014, 2021; Zhang et al., 2021, 2022; Zheng et al., 2013, 2015)

浅钻碎屑锆石 U-Pb 定年所开展的大量工作表明, 其年龄分布存在较大的时空差异(Wang et al., 2010)。如果根据当前江汉盆地有限的钻孔数据进行分析, 在上新世时期, 长江很可能尚未完成贯通。Wang et al.(2010)对江汉盆地晚新生代的沉积物进行碎屑锆石 U-Pb 测年发现, 在距今约 0.8 Ma 的沉积物中, 检测到 1 颗年龄 <17 Ma 的碎屑锆石。基于此, 可推断此时长江上游的源区已到达青藏高原东缘地区, 意味着现代长江水系格局在该时期已经形成。向芳等(2011)对宜昌地区 4 个不同年代的沉积物样本进行碎屑锆石 U-Pb 测年和阴极发光图像分析, 推断这些锆石的物源主要在三峡以东, 进一步综合沉积剖面的年龄标定, 认为长江的贯通时间可能不早于 0.75 Ma。

针对长江中下游广泛分布的长江砾石层, 学

界也开展了大量的碎屑锆石 U-Pb 定年及物源分析, 但据此获得的长江贯通时间也不尽相同。例如, Zheng et al.(2013)对长江下游南京附近长江砾石层中的玄武岩夹层进行了系统的碎屑锆石物源分析。研究发现, 自约 23 Ma 以来, 长江砾石层的年龄特征并未发生显著改变, 结合区域盆地沉积特征及气候演化情况, 可将长江的贯通时间限定在 36.5~23 Ma。Wang et al.(2021)对长江砾石层开展了更为系统的年代学和碎屑锆石物源分析, 并与相关盆地进行沉积对比, 认为长江形成于晚渐新世—早中新世, 之后向东汇入东海盆地。林旭等(2021, 2022)对宜昌砾石层进行了碎屑锆石 U-Pb 测年以及钾长石主微量元素分析, 认为长江直至早更新世时才实现贯通。

尽管有观点认为, 长江携带的碎屑物质可能

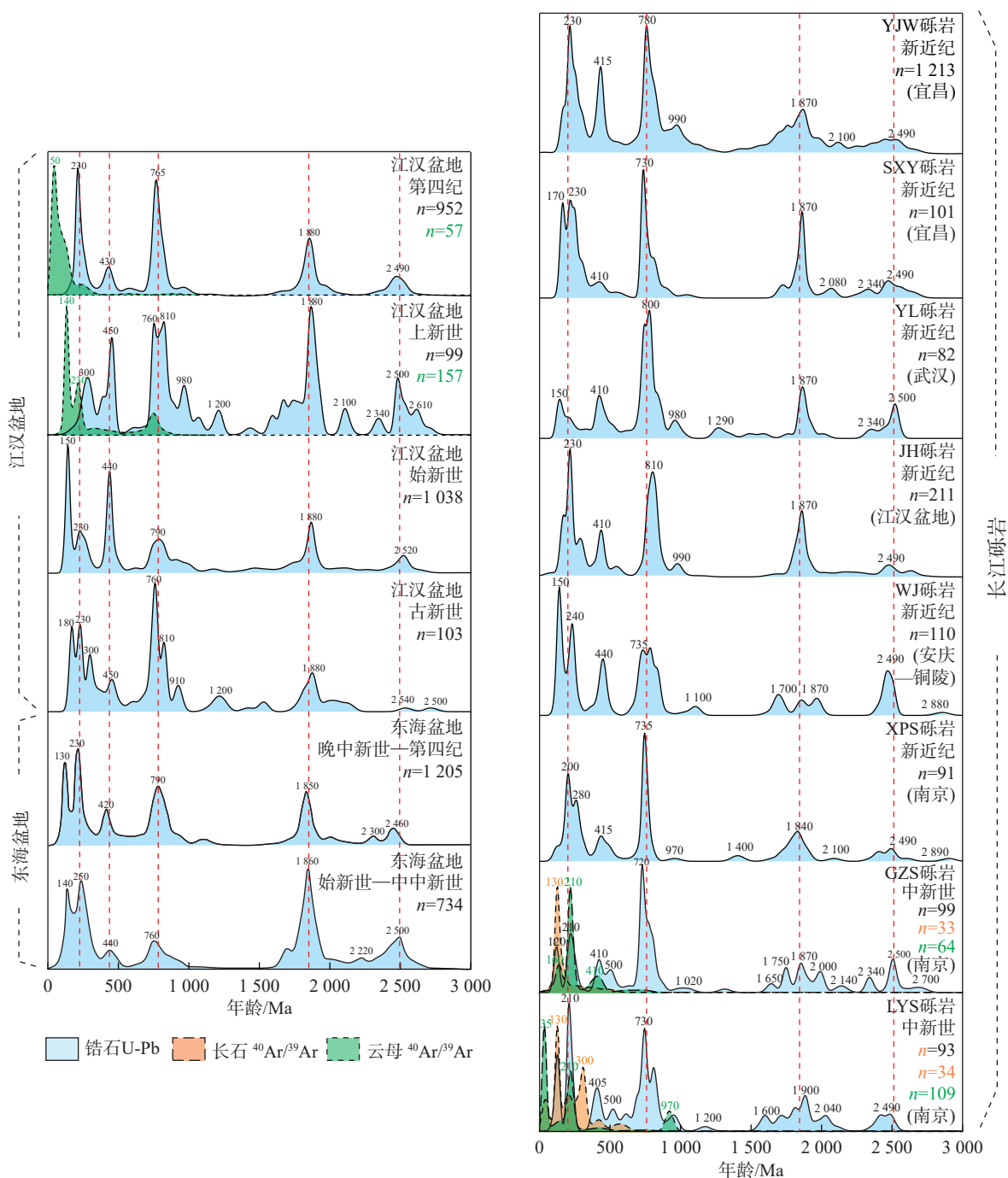


图5 长江流域地层碎屑锆石 U-Pb、云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱图(数据来自 Fu et al., 2021; Lin et al., 2024; Shen et al., 2012b; Wang J T et al., 2010; Wang P et al., 2014, 2018; Wu et al., 2017; Yang et al., 2019; Zheng et al., 2013)

Fig. 5 Detrital zircon U-Pb, mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of stratigraphic units in the Yangtze River drainage basin(Data sourced from Fu et al., 2021; Lin et al., 2024; Shen et al., 2012b; Wang J T et al., 2010; Wang P et al., 2014, 2018; Wu et al., 2017; Yang et al., 2019; Zheng et al., 2013)

被陆域新生代盆地大量截留,导致卸载至海域盆地的总量有限(Cliff, 2006; Zheng et al., 2013),但最新研究表明,东海盆地是长江碎屑物质最主要的沉积区(Fu et al., 2021; Wang et al., 2021)。由于

资料获取的限制以及油气勘探的特定需求,目前东海盆地古新世—早始新世的物源研究主要集中于东海南部的丽水—椒江凹陷。该区域古新世物源总体呈现出近物源、多物源的特征,其西侧物

源主要来自邻近凸起(陈春峰等, 2017a, 2017b; 付晓伟等, 2015a, 2015b); 进入始新世后, 该区域碎屑锆石年龄发生了重大改变, 出现大量约 220 Ma、1 800 Ma 及 2 500 Ma 的碎屑锆石年龄峰值(图 5)(Fu et al., 2021)。西湖凹陷晚始新世—渐新世的碎屑锆石 U-Pb 数据也呈现出基本一致的特征, 古老锆石(>1 000 Ma)占明显优势(约达 60%)(Fu et al., 2021; Wang et al., 2018; Zhang et al., 2018)。基于此, 部分学者认为长江在始新世时已经贯通。然而, Fu et al.(2021)对东海盆地开展了更为系统的碎屑锆石物源分析, 认为具有现今物源特征的长江形成于约 12 Ma; 而晚中新世之前的东海盆地受控于 1 条起源于朝鲜及华北的大型水系, 这一水系于中始新世首次出现, 并一直延续至中新世(Fu et al., 2022)。

苏北—南黄海盆地也积累了丰富的碎屑锆石 U-Pb 定年数据, 结果显示, 直至中新世, 长江水系仍未抵达该区域(Fu et al., 2021; Zhu et al., 2019)。直到 3.2 Ma, 长江携带的碎屑物质才对南黄海区域产生了显著影响(何梦颖等, 2019; 陈嘉诺等, 2024)。

2.2 碎屑长石的 Pb 同位素组成

钾长石基本不受沉积再旋回作用的影响, 在经历风化、搬运、沉积及成岩作用后, 其 Pb 同位素组成仍能反映源区特征(Tyrrel et al., 2006)。近期研究显示, 长江流域各个支流的碎屑钾长石 Pb 同位素组成($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)存在明显差异, 同时, 能与所流经的基岩区钾长石 Pb 同位素特征相匹配。例如, 宜昌地区长江干流碎屑钾长石的 Pb 同位素组成与流经四川盆地的长江支流(如岷江、嘉陵江)更为一致, 而金沙江对长江干流的碎屑物质供给并不明显(Zhang et al., 2014, 2022)。因而, 碎屑长石的 Pb 同位素组成可以作为判别长江水系不同河段及主要支流沉积物来源的有效方法。

Zhang et al.(2016)对江汉盆地周老孔沉积物开展了碎屑钾长石 Pb 同位素分析, 发现钻孔底部沉积物的 Pb 同位素组成与松潘—甘孜地块的 Pb 同位素组成高度吻合, 表明在晚上新世时期青藏高原东缘已成为江汉盆地的物源区(图 6)。Zhang et al.(2021)进一步对南京长江砾石层开展了碎屑

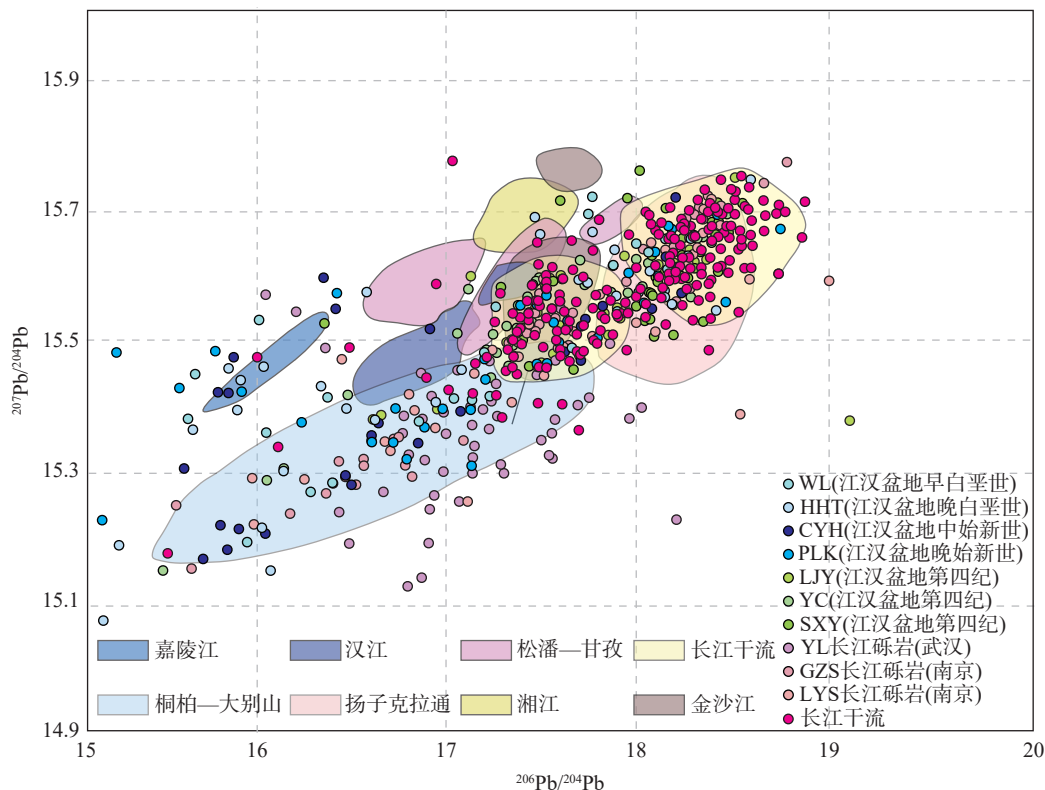


图6 长江流域砾石层钾长石 Pb 同位素比值图(数据引自 Zhang et al., 2016, 2021, 2022)

Fig. 6 Pb isotope ratio plots of potassium feldspar in the gravel layer of the Yangtze River drainage basin(Data sourced from Zhang et al., 2016, 2021, 2022)

钾长石 Pb 同位素研究,结果显示,雨花台组砾石层中绝大多数碎屑钾长石的 Pb 同位素组成均分布在桐柏—大别造山带和长江中下游水系 Pb 同位素组成范围内,与现代长江干流的钾长石 Pb 同位素组成存在显著差异,据此认为雨花台组砾石层不是长江干流沉积(图 6)。此外,学界对海域沉积物也开展了同样的研究工作。例如,研究发现台湾地区中新世物源发生突变,尽管部分学者认为这可能与长江的贯通存在关联,但台湾地区新生代沉积钾长石 Pb 同位素组成特征与现今长江干流存在明显区别,推断物源区主要是华北克拉通和苏鲁—秦岭—大别造山带,而非青藏高原(Zhang et al., 2017)。

2.3 云母和钾长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究

低温热年代学方法可用于揭示区域构造隆升剥蚀过程。云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素体系封闭温度为 $350\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Harrison et al., 2009),而钾长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 封闭温度则为 $200\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (McDougall and Harrison, 1999),两种矿物均适合开展低温热年代学研究。例如,江汉盆地更新世碎屑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究表明,其特征年龄(约 50 Ma)与现今长江基本一致(图 6),揭示在更新世时期,长江已经贯通(Sun et al., 2018)。Sun et al.(2021)对南京长江砾石层进行了碎屑白云母和钾长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析,结果显示,新生代的碎屑白云母和碎屑钾长石颗粒只出现在长江上游的金沙江和岷江中,其他支流特别是中下游支流则无该特征,且这一年龄峰值在长江中下游干流的现代沉积物中稳定存在,因此可将该信号作为物源示踪标志。然而,南京砾石层的白云母和钾长石年龄分布与现代长江沉积物的年龄分布有显著差异(图 3, 图 4, 图 5),现代长江沉积物中来自上游(岷江和金沙江)的年轻白云母颗粒和钾长石颗粒($<60\text{ Ma}$)在南京砾石层中不存在,这表明此时南京长江砾石层实际上与长江干流并无直接关联,而是近源沉积的产物,长江形成的时间仍需进一步厘清。

2.4 其他物源研究方法

除同位素年代学方法外,重矿物组合分析、元素地球化学以及定量统计分析等多学科方法体系已广泛应用于长江形成演化的相关研究中,为揭示长江的演化历史提供了重要视角。

作为沉积物源分析的传统方法,重矿物组合

分析被应用于长江三峡贯通关键层位的研究中。例如,康春国等(2014)发现宜昌砾石层重矿物组合特征与长江现代沉积物高度相似,而与江汉盆地西缘次级水系沉积物存在显著差异,据此认为三峡在 1.1 Ma 前已贯通。Wei et al.(2020)在前人研究基础上进一步结合周老孔沉积序列的辉石含量与磁化率特征变化进行综合分析,将三峡贯通时间精确限定至 1.12 Ma。此外,长江三角洲沉积记录同样为长江水系演化提供了重要线索。陈静等(2007)发现中更新世以来长江三角洲重矿物组合呈现多源混合特征,揭示此时长江已形成贯通东西的完整水系;而郑良烁(2013)通过重矿物组合分析发现,在 4.31~2.81 Ma 时期,苏北盆地重矿物组成特征与长江干流相似,推断此时长江已经贯通。

元素地球化学方法基于常量元素、微量元素及稀土元素(REE)配分模式等指标,可有效识别沉积物源区特征(丁大林等, 2021; 杨守业等, 2015; 于俊杰等, 2022)。袁胜元等(2012)通过微量及稀土元素分析,发现江汉盆地沉积物在 1.25 Ma 后微量及稀土元素变化趋于稳定,由此推断出长江的形成时间是距今 1.25 Ma。Shao et al.(2012, 2015)在江汉盆地上新世—第四纪地层中首次识别出峨眉山玄武岩的 Nd 同位素信号,据此认为具有现代长江沉积特征的物源系统在第四纪前已开始向该盆地输运沉积物。值得注意的是,元素地球化学指标易受成岩作用、风化改造等次生过程影响(毛光周和刘池洋, 2011),因而在具体应用中需结合区域构造-沉积背景,并综合运用多种方法进行物源分析。

当前,学界普遍认为长江流域碎屑物质主要来自上游的青藏高原东缘(Vezzoli et al., 2016; Wissink and Hoke, 2016; Zhang et al., 2014; Liu et al., 2008, 2018)。尽管学界通过不同方法获得的长江流域剥蚀特征存在差异,但一个不容忽视的客观事实是:长江流域上游的青藏高原东缘(包括龙门山及西秦岭)普遍表现为高山深切峡谷的地貌,高程落差达 $1\,500\sim 2\,500\text{ m}$ (Clift, 2006; Ding et al., 2022; Ouimet et al., 2010),且该区域的剥蚀速率比中下游地区几乎高出一个数量级(Reiners et al., 2003; Tian et al., 2015; Yang et al., 2017)。Chappell et al.(2006)对长江干流和主要支流的砂样进行了宇宙成因核素 ^{10}Be 侵蚀速率估算,进而通过流域

平均剥蚀速率来研究长江泥沙来源, 结果发现长江三角洲碎屑物质主要来自长江上游, 而中下游支流(沅江、湘江、汉江、赣江)仅贡献约 35% 的泥沙, 总体远低于上游的贡献。此外, 金沙江流域主体分布于青藏高原腹地, 其碎屑物质输入对长江中下游干流的贡献仍存在较大争议。例如, 长江干流钾长石 Pb 同位素组成(Zhang et al., 2014)和岩石组分(Vezzoli et al., 2016)等特征均不支持金沙江作为其主要碎屑物源, 而 Wissink and Hoke(2016)基于分布混合模型等定量计算却认为金沙江对长江碎屑物质有重要贡献。同时, 现今河流观测点的金沙江沉积物通量为 2.39 亿吨/年(林承坤, 1989), 下游大通河段沉积物通量为 4.83 亿吨/年(王腊春等, 1997)。上述认识上的矛盾, 可能是由于不同物源方法在判断不同支流物源贡献时存在局限性。

人类活动对长江流域内的源汇体系也造成了重大影响。Wang et al.(2008)对 1954—2005 年汉口站的月水流量和悬浮沉积物浓度记录进行研究, 结果显示, 1968 年丹江口水库的建立、上游大量水电站和水土保持工程的投产以及 2003 年三峡大坝的蓄水, 导致长江上游向中下游的沉积物输送量急剧下降, 而排水量则几乎没有变化。因此, 人类活动对通过现今长江中下游取样分析来研究长江干流源汇关系增加了潜在的不确定性。

综上所述, 锆石 U-Pb 年代学、钾长石 Pb 同位素组成、沉积物磁学特征、云母及钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学和重矿物组合分析等物源示踪技术已系统应用于长江中下游及海域沉积物, 对长江贯通年龄进行了约束。其中, 高封闭温度的锆石 U-Pb 定年方法获得的长江贯通时间通常为中新世之前(Wang et al., 2014, 2021; Zheng et al., 2013); 基于云母及钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等低封闭温度方法对长江砾石层的研究得到的长江贯通时间为晚中新世或更年轻(Sun et al., 2021; Zhang et al., 2021), 而长江砾石层可能为近源沉积, 无法代表长江干流的物源特征。相较而言, 不同学者针对海域沉积进行研究获得的物源特征则基本一致, 争议焦点在于何种物源特征能代表贯通后的长江, 基于此提出的长江贯通时间有渐新世(Wang et al., 2018)、中新世之前(Zhang et al., 2017)及晚中新世(Fu et al., 2021)等。

3 长江中下游物源研究问题分析

3.1 海陆域沉积记录的优势及局限性

越来越多的研究显示, 基于陆域盆地沉积或长江砾岩揭示长江演化, 存在较大的局限性。

(1) 局部物源影响大。例如, 江汉盆地磷灰石裂变径迹年代学研究表明, 其中新世地层存在时滞年龄跃迁, 表明物源发生明显转变, 代表了长江的贯通时间(Yang et al., 2021)。然而, Sun(2018)对江汉盆地多口钻井样品进行碎屑锆石和云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年时发现, 上新世时期江汉盆地还受控于汉江等局部水系, 这可能会对研究长江贯通时间造成干扰。现今, 除长江干流外, 还有沅江、湘江及汉江 3 条重要支流在江汉盆地与长江交汇(图 1), 并且河道迁移频繁, 因此长江沉积很容易受到支流物源的影响。这种情况下, 通过有限的钻孔稳定追溯长江干流的物源信号, 会面临较大挑战。同时, 长江中下游干流区域广泛发育的长江砾石层也面临此问题。例如, 南京长江砾石层曾被认为是长江干流沉积, 并基于此开展了大量的分析工作(Wang et al., 2021; Zheng et al., 2013)。然而, 近期研究发现, 南京长江砾石层的碎屑白云母同位素测年数据和钾长石 Pb 同位素组成, 与长江干流存在显著差异, 因此认为南京长江砾石层更可能是源自长江中下游支流(Sun et al., 2021)的局部物源沉积。

(2) 沉积连续性差, 记录不够完整, 精细年代划分难度大。长江砾石层广泛出露于长江中下游区域, 但沉积延续时间普遍较短(Wang et al., 2021)。例如, 南京长江砾石层作为研究程度较高的典型剖面, 其地质时代为 22.9~10.3 Ma(Zheng et al., 2013)。但因河流相沉积缺乏可靠的定年化石, 目前仅获得了火山岩零星定年数据(约 22 Ma、10 Ma、9 Ma)(Wang et al., 2021)。江汉盆地虽保留较完整的新生代沉积, 但中新世以来河流相沉积总体较薄, 同样缺乏更为精细的时间框架(Sun et al., 2021)。作为江汉盆地重要的标准钻孔, 周老孔的古地磁定年为长江中游的沉积演化提供了关键时间标尺, 但其钻孔底部 300.49 m 处的磁性年龄仅为 2.77 Ma(Zhang et al., 2008), 难以追溯更长时间尺度的物源变化。

相较而言, 海域盆地沉积记录在揭示青藏高

原及长江水系演化的研究中具有较为明显的优势:①地层更为连续。海域盆地新生代沉积,尤其是长江注入的东海盆地,虽受沉积沉降中心迁移的影响,局部地层存在不同程度的缺失,但从盆地尺度看,各个时期的地层均有发育,新生代累计厚度超过 10 000 m(Zhu et al., 2019);②资料丰富,地层定年相对可靠。基于石油工业逾百口探井和相关的古生物资料、同位素数据及地震地层对比,东海盆地已获得相对可靠的地层时代划分,并积累了大量连续样品。此外,地震测网几乎覆盖全盆地,海相发育段及火山岩夹层结合地震资料,可提供更为准确的时代约束;③受局部物源影响较小。碎屑锆石定年等物源分析表明,东海盆地新生代物源表现出明显的阶段性,新生代晚期受局部物源影响较小(Fu et al., 2021),更有可能反映远源区变化或水系调整的过程。

3.2 不同物源方法的优势及局限性

多种物源研究方法已被应用于长江形成及演化的研究中,其中同位素物源方法展现出巨大潜

力。按照封闭温度,同位素物源方法可划分为 2 类(表 2):①高封闭温度的物源方法,其中碎屑锆石 U-Pb 定年的应用最为广泛(Fu et al., 2021; Wang et al., 2021; Zheng et al., 2013);②较低封闭温度的测年方法,包括磷灰石裂变径迹法(Yang et al., 2021)、云母和长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等(Sun et al., 2018, 2021)。

锆石 U-Pb 及 Hf 同位素测年方法具有极强的稳定性,锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分别代表了锆石的结晶年龄及寄主岩石的初始 Hf 同位素组成,两者结合可区分不同物源区的地壳生长和演化历史(Vervoort et al., 2016),进而判别物源。然而,现今长江流域主要物源区是以松潘—甘孜地块为代表的青藏高原东缘(Wissink and Hoke, 2016),这一区域广泛发育三叠纪复理石沉积,其物源主要来自华北克拉通、华南及秦岭—大别造山带(Weislogel et al., 2010)。这一地质背景使得锆石 U-Pb 及 Hf 同位素(Cherniak and Watson, 2001)测年方法不可避免地受到沉积再旋回作用的影响,

表 2 多种同位素物源方法及其在长江流域研究中的应用

Table 2 Characteristics of multiple isotopic provenance methods and their applications in researching Yangtze River drainage basin

同位素物源方法		封闭温度/°C	优点	缺点	长江流域应用情况
高封闭温度	锆石 U-Pb	> 900	分布广泛，极为稳定，普通铅含量极低，测年准确，方法成熟可靠	在基性岩中含量低，易受沉积再旋回影响	应用最为广泛，为现有多 种观点提供了关键证据
	锆石 Lu-Hf		分布广泛，极为稳定，能够反映地壳演化，方法成熟可靠	在基性岩中含量低，易受沉积再旋回影响	长江现代沉积有大量的研究，但东海盆地尚无相关数据报道
较低封闭温度	云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	350~400	基本不受沉积再旋回影响，反映造山带剥露历史	易受风化作用影响，测试难度大，成岩后分选难度大	现今长江、江汉盆地及长江砾岩都有应用，可很好地区分青藏高原东缘物质与中下游物质
	长石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	200~250	基本不受沉积再旋回影响，反映造山带剥露历史	易受风化作用影响，测试难度大，成岩后分选难度大	现今长江、江汉盆地及长江砾岩都有应用，可很好地区分青藏东缘物质与中下游物质
	长石Pb	约450	沉积岩主要矿物组分基本不受沉积再旋回影响，不同地块Pb同位素差异较大，可通过电子探针薄片进行原位测试	不同源区有一定重叠	上游和下游均开展了大量研究，已证实能相对有效地区分出上游物源
	磷灰石 裂变径迹	约120	受沉积再旋回影响小，很好地反映造山带抬升剥露史	所需样品量大，海域盆地易受埋藏升温的影响	青藏高原应用极为普遍，积累了大量数据；长江流域沉积物相关研究极少，仅江汉盆地开展少量工作

导致通过特征年龄峰值识别青藏高原东缘物质来源的难度很大。

另外,考虑到不同时期,特别是在 12 Ma 前后,青藏高原东缘剥蚀速率存在明显差异(Yang et al., 2017),根据沉积物源特征与现今长江物源特征的对比,难以真正判断长江上、下游的贯通时间。首先,在长江贯通的早期,长江上游延伸至青藏高原,但青藏高原东缘的区域性剥蚀速率并不高(12 Ma 之前),或者未发生大规模的溯源侵蚀作用,其提供的碎屑物质相较于中一下游并无压倒性优势,其物源特征与现今长江存在明显差异。这种情况下,下游干流及长江三角洲的物源特征可能会发生一定变化,但与现今的长江应存在一定差异。其次,在现今长江的形成期,长江上游起源于青藏高原,且青藏高原东缘提供了大量的碎屑物质,在长江中一下游干流的碎屑物质中占绝对优势。此时,下游三角洲物源特征与现今长江三角洲基本一致,同时也导致了沉积区沉积速率和沉积通量的急剧增加。

因此,通过物源特征的相似性来判断长江的贯通时间存在较大局限性,应当寻找能够反映青藏高原东缘独特物源特征或独特造山过程的物源分析方法。低封闭温度的测年方法在揭示造山带隆升剥蚀过程方面展现了巨大的潜力。磷灰石裂变径迹完全退火温度为约 120 °C(Reiners and Brandon, 2006),低于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素体系的封闭温度,更能精准捕捉青藏高原东缘造山带的特征。长江上游的四川盆地及其周缘造山带虽在剥蚀历史和成因上存在争议,但学界普遍认可其晚中新世以来存在的快速剥蚀阶段(存在区域差异,剥蚀速率为 200~800 m/Ma)(Tian et al., 2015; Yang et al., 2017);长江下游大别造山带新生代以来,主要为后造山剥蚀-均衡抬升相互作用过程,剥蚀速率低,约为 20~60 m/Ma(Reiners et al., 2003),局部可能受庐断裂带活动的影响(Hu et al., 2006);此外,华南沿海新生代以来的剥蚀速率也很低(Tang et al., 2014)。长江流域内的这种区域差异性,为利用低温热年代学方法识别青藏高原碎屑物质提供了可能。同时,在高精度地层时代框架的约束下,碎屑磷灰石裂变径迹还能够获得时滞年龄,不仅可以反映造山带剥蚀速率的快慢,还有望定量计算出剥蚀速率(Gallagher et al., 1998)。值得注

意的是,Shen et al.(2012a)通过磷灰石裂变径迹和锆石 U-Pb 定年技术,揭示了扬子北缘黄陵古陆核和秦岭—大别造山带的剥蚀过程,为江汉盆地白垩纪地层的物源分析和沉积时代划分提供了关键依据。然而,磷灰石裂变径迹物源示踪研究多聚焦于长江上游青藏地区(Yang et al., 2017),对长江中下游的研究仍较为匮乏。未来研究中,建议加强长江中下游地区的磷灰石裂变径迹等低温热年代学物源示踪研究,从而更全面地揭示长江的演化历史。

4 长江演化研究展望

4.1 多种同位素方法的联合应用

目前,在长江的形成及演化研究中,学界已经开展了大量基于高封闭温度和低封闭温度同位素体系的物源研究。然而,针对青藏高原东缘隆升剥蚀过程的低封闭温度物源方法的应用仍相对较少,且现有研究多聚焦于长江流域的陆域沉积,边缘海盆地的相关研究较少。对于同样源自青藏高原的南亚孟加拉扇,其物源研究表明,锆石裂变径迹、磷灰石裂变径迹及金红石 U-Pb 定年等方法的综合应用能够很好地反映出喜马拉雅造山过程(Najman et al., 2019)。这一成果也为长江流域的物源研究提供了重要启示:多种低封闭温度物源方法的综合应用,或可有效区分青藏高原东缘的物源信息,进而为探究长江潜在的多阶段演化过程提供关键支撑。

4.2 加强海域研究

长时间尺度连续沉积的系统取样能够获得更为客观的物源解释。长江砾石层在中下游多个区域均有分布,但各剖面的纵向物源变化较小(Sun et al., 2021; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2021)。相比之下,东海盆地从古新世至第四纪可观察到 3 个明显的物源转变(Fu et al., 2021),其物源信号受局部源区影响较小,具有较高的可识别性。另外,针对东海盆地渐新世复杂的锆石年龄谱,有学者认为其主要受长江碎屑物质的影响(Wang et al., 2018)。但是,从更长的地质记录看,该年龄谱特征在中始新世时期已经存在(Fu et al., 2022),而通常认为这一时期江汉盆地仍是封闭湖盆,长江尚未贯通(Zheng et al., 2011)。基于此,东海盆地沉积

地层更有可能记录了长江形成及演化的全面信息。

4.3 沉积物源研究与沉积速率结合

鉴于地质历史时期青藏高原隆升的多阶段性和长江演化的复杂过程,仅通过沉积物源判断青藏高原碎屑物质首次搬运至东海盆地的年代学证据,难以精确约束长江的贯通时限。因此,除物源研究外,还应开展长江中下游及东海盆地沉积通量和沉积速率的研究工作。这些研究将有助于揭示更为全面、综合的长江源汇信息。

5 结论

(1)物源分析方法的多样性与局限性:长江演化研究中应用了多种物源分析方法,高封闭温度方法(如碎屑锆石 U-Pb 定年技术)易受沉积再旋回影响;低封闭温度方法(如磷灰石裂变径迹)更能反映造山带抬升剥露史。单一物源分析方法难以全面揭示长江演化过程,需综合运用多种物源分析方法,以弥补各方法的局限性。

(2)不同区域样品的可靠性:长江流域陆域沉积因易受局部物源影响、沉积连续性差及地层记录不够完整等原因,其高精度年代学划分存在困难,难以追溯更长时间尺度的物源变化;相较而言,海域沉积地层受局部物源影响较小,且具有连续性好、年代标定精度高的优势。

(3)未来研究方向:一是联合应用多种物源分析方法,特别是能够反映青藏高原东缘隆升剥蚀过程的同位素年代学方法;二是加强海域尤其是东海盆地连续沉积记录的研究;三是结合沉积速率变化进行综合分析。

References

- BARBOUR G. 1935. Physiographic history of the Yangtze [M]. XIE J R, trans. Beijing: The National Geological Survey of China and The Institute of Geology of the National Academy of Peking, 17-34 (in Chinese).
- CHAPPELL J, ZHENG H B, FIFIELD K. 2006. Yangtze River sediments and erosion rates from source to sink traced with cosmogenic ^{10}Be : Sediments from major rivers [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology: An International Journal for the Geo-Sciences*, 241(1): 79-94.
- CHEN J N, SUN G Y, WEN Y X, LI S Q, WANG X Y, LIU K, JIANG R, ZHOU X H. 2024. Grain sizes characteristics of sediments from QDQ2 borehole in the Yangtze River Delta since the Late Pleistocene and their paleoenvironmental significance [J]. *East China Geology*, 45(4): 466-477 (in Chinese with English abstract).
- CHEN J, WANG Z, WANG Z H, CHEN Z Y. 2007. Heavy mineral distribution and its provenance implication in Late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang River Delta [J]. *Quaternary Sciences*, 27(5): 700-708 (in Chinese with English abstract).
- CHEN C F, ZHONG K, ZHU W L, XU D H, WANG J, ZHANG B C. 2017a. Provenance of sediments and its effects on reservoir physical properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 963-972 (in Chinese with English abstract).
- CHEN C F, ZHU W L, FU X W, XU D H, ZHANG B C. 2017b. Provenance change and its influence in Late Paleocene, Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 45(10): 1522-1530, 1548 (in Chinese with English abstract).
- CHEN X Y, LYU K L, WANG P, HUANG X T, KONG X G. 2022. A Review of Research Progress on the Analytical Method of Large-n Detrital Zircon U-Pb Geochronology [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(6): 920-934 (in Chinese with English abstract).
- CHERNIAK D J, WATSON E B. 2001. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 172(1-2): 5-24.
- CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, WHIPPLE K X, BURCHFIEL B C, ZHANG X, TANG W, WANG E, CHEN L. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 23(1): TC1006.
- CLIFT P D. 2006. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4): 571-580.
- DENG K, YANG S Y, LI C, SU N, BI L, CHANG Y P, CHANG S C. 2017. Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: implications for sedimentary provenance of Taiwan and its source link with the east China mainland [J]. *Earth-Science Reviews*, 164: 31-47.
- DING L, KAPP P, CAI F L, GARZIONE C N, XIONG Z Y, WANG H Q, WANG C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652-667.
- DING D L, XU J S, WANG J L, LI G X, DING D, QIAO L L, YU J J. 2021. A brief introduction on dating methods of marine sediments [J]. *East China Geology*, 42(2): 217-228

- (in Chinese with English abstract).
- FEDO C M, SIRCOMBE K N, RAINBIRD R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277-303.
- FU X W, YANG R, ZHU W L, YANG S Y, GENG J H, ZHANG L Y. 2022. Initiation of a "lost" large river on the East Asia margin in the Middle Eocene. Preprints, 2022: 2022030017.
- FU X W, ZHU W L, CHEN C F, ZHONG K, XU C H. 2015a. Provenance of detrital zircons from the Upper Member of the Mingyuefeng Formation in the western slope of the Lishui-Jiaojiang Sag[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(12): 1987-2001.
- FU X W, ZHU W L, GENG J H, YANG S Y, ZHONG K, HUANG X T, ZHANG L Y, XU X. 2021. The present-day Yangtze River was established in the Late Miocene: evidence from detrital zircon ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 205: 104600.
- FU X W, ZHU W L, ZHONG K, CHEN C F. 2015. Discovery of Late Paleozoic detrital zircons in Lishui Sag, East China Sea, and its significance[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 43(6): 924-931 (in Chinese with English abstract).
- GALLAGHER K, BROWN R, JOHNSON C. 1998. Fission track analysis and its applications to geological problems[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26: 519-572.
- HARRISON T M, HEIZLER M T, HAVIV I, AVOUAC J P. 2009. Continuous thermal histories from muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: A497.
- HE M Y, MEI X, ZHANG X H, LIU J, GUO X W, ZHENG H B. 2019. Provenance discrimination of detrital zircon U-Pb dating in the core CSDP-1 in the continental shelf of South Yellow Sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(1): 85-95 (in Chinese with English abstract).
- HE M Y, ZHENG H B, CLIFT P D. 2013. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope data from the Yangtze River sands: implications for major magmatic events and crustal evolution in Central China[J]. *Chemical Geology*, 360-361: 186-203.
- HU S B, KOHN B P, RAZA A, WANG J Y, GLEADOW A J W. 2006. Cretaceous and Cenozoic cooling history across the ultrahigh pressure Tongbai-Dabie belt, central China, from apatite fission-track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 420(3-4): 409-429.
- HUANG X Y, GAO M S, HOU G H, ZHANG G, DANG X Z. 2023. Grain size characteristics and environmental response of marine sediments in Laizhou Bay[J]. *East China Geology*, 44(4): 402-414 (in Chinese with English abstract).
- JIA J T, ZHENG H B, HUANG X T, WU F Y, YANG S Y, WANG K, HE M Y. 2010. 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*, 55(15): 1520-1528.
- JIANG Y H, ZHOU Q P, NI H Y, CHEN L D, CHENG H Q, LEI M T, GE W Y, MA T, SHI B, CHENG Z Y, DUAN X J, SU J W, ZHU J Q, XIU L C, XIANG F, ZHU Z M, FENG N Q, XIE Z S, TAN J M, PENG K, GUO S Q, FU Y P, REN H Y, SUN J P, YANG Q, ZHU J L, WANG D H, LI M H, LIU G N, FAN C Z, WANG X F, SHI Y J, WANG H M, DONG X Z, CHEN H Y, HAO S F, DENG Y M, LI Y, XIAO Z Y, YANG H, LIU L, JIN Y, ZHANG H, MEI S J, QI Q J, LÜ J S, HOU L L, CHEN G, CHEN Z, JIA Z Y. 2023. Progress of environmental geological investigation and research in the Yangtze River Economic Zone[J]. *East China Geology*, 44(3): 239-261 (in Chinese with English abstract).
- KANG C G, LI C A, ZHANG Y F, SHAO L, JIANG H J. 2014. Heavy mineral characteristics of the Yichang gravel layers and provenance tracing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 254-262 (in Chinese with English abstract).
- LI J J, XIE S Y, KUANG M S. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation[J]. *Geomorphology*, 41(2): 125-135.
- LI X H, LI Z X, LI W X. 2014. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: a synthesis[J]. *Gondwana Research*, 25(3): 1202-1215.
- LI S H, NAJMAN Y, VERMEESCH P, BARFOD D N, MILLAR I, CARTER A. 2024. A critical appraisal of the sensitivity of detrital zircon U-Pb provenance data to constrain drainage network evolution in Southeast Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(2): e2023JF007347.
- LIN C K. 1989. Sediment and environment in Three Gorges and Gezhouba of the Yangtze River[M]. Nanjing: Nanjing University Press (in Chinese).
- LIN X J, ZENG J L, et al. 2024. Sedimentary provenance constraints on the Cretaceous to Cenozoic palaeogeography of the western margin of the Jianhan Basin, South China[J]. *Gondwana Research*, 125: 343-358.

- LIN X, LIU H J, WU Z H, LIU W M, ZHANG Y, CHEN J X. 2021. Provenance study on geochemical elements of detrital K-feldspar in Quaternary gravel layer in Yichang and its geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1024-1034 (in Chinese with English abstract).
- LIN X, WU Z H, ZHAO X T, ZHANG Y, CHEN J X, LIU H J. 2022. Detrital zircon U-Pb age characteristics of main rivers around Jiangnan Basin and implications of provenance tracing[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 43(1): 73-81 (in Chinese with English abstract).
- LIU W S, ZHAO H, ZHAO R Y, QIN J H, ZHANG X, JIANG J C, ZHAO C H, LI T J, WANG C H. 2022. The Constraints of Carbonaceous Mudstone Re-Os and Detrital Zircons U-Pb Isotopic Dating on the Diagenetic and Metallogenic Ages from the Dabaoshan Copper Deposit in Guangdong Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(2): 300-313(in Chinese with English abstract).
- LIU-ZENG J, TAPPONNIER P, GAUDEMER Y, DING L. 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan Plateau: implications for topographic relief evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F4): F04018.
- LIU-ZENG J, ZHANG J Y, MCPHILLIPS D, REINERS P, WANG W, PIK R, ZENG L S, HOKE G, XIE K J, XIAO P, ZHENG D W, GE Y K. 2018. Multiple episodes of fast exhumation since Cretaceous in southeast Tibet, revealed by low-temperature thermochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 490: 62-76.
- MAO G Z, LIU C Y. 2011. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 337-348 (in Chinese with English abstract).
- MCDUGALL I, HARRISON T M. 1999. Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method[M]. New York: Oxford University Press.
- NAJMAN Y, MARK C, BARFOD D N, CARTER A, PARISH R, CHEW D, GEMIGNANI L. 2019. Spatial and temporal trends in exhumation of the Eastern Himalaya and syntaxis as determined from a multi-technique detrital thermochronological study of the Bengal Fan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 131: 1607-1622.
- NAJMAN Y, SOBEL E R, MILLAR I, LUAN X W, ZAPATA S, GARZANTI E, PARRA M, VEZZOLI G, ZHANG P, WA AUNG D, PAW S M T L, LWIN T N. 2022. The timing of collision between Asia and the west Burma Terrane, and the development of the Indo-Burman Ranges[J]. *Tectonics*, 41(7): e2021TC007057.
- OUMET W, WHIPPLE K, ROYDEN L, REINERS P, HODGES K, PRINGLE M. 2010. Regional incision of the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Lithosphere*, 2(1): 50-63.
- REINERS P W, BRANDON M T. 2006. Using thermochronology to understand orogenic erosion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 419-466.
- REINERS P W, ZHOU Z Y, EHLERS T A, XU C H, BRANDON M T, DONELICK R A, NICOLESCU S. 2003. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology[J]. *American Journal of Science*, 303(6): 489-518.
- REN J Y, TAMAKI K, LI S T, ZHANG J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3-4): 175-205.
- RICHARDSON N J, DENSMORE A L, SEWARD D, WIPF M, YONG L. 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene?[J]. *Geology*, 38(6): 551-554.
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 321(5892): 1054-1058.
- RUIZ G M H, SEWARD D, WINKLER W. 2004. Detrital thermochronology—a new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador[J]. *Basin Research*, 16(3): 413-430.
- SHAO L, LI C A, YUAN S Y, KANG C T, WANG J T, LI T. 2012. Neodymium isotopic variations of the late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin: Implications for sediment source and evolution of the Yangtze River[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45(4): 57-64.
- SHAO L, YUAN S Y, LI C A, KANG C G, ZHU W J, LIU Y D, WANG J T. 2015. Changing provenance of late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 6(4): 605-615.
- SHEN C B, DONELICK R A, O'SULLIVAN P B, JONCKHEERE R, YANG Z, SHE Z B, MIU X L, GE X. 2012a. Provenance and hinterland exhumation from LA-ICP-MS zircon U-Pb and fission-track double dating of Cretaceous sediments in the Jiangnan Basin, Yangtze block, central China[J]. *Sedimentary Geology*, 281: 194-207.
- SHEN C B, MEI L F, PENG L, CHEN Y Z, YANG Z, HONG G F. 2012b. LA-ICP-MS U-Pb zircon age constraints on the provenance of Cretaceous sediments in the Yichang area of the Jiangnan Basin, central China[J]. *Cretaceous Research*, 34: 172-183.
- SUN X L, LI C, KUIPER K F, WANG J T, TIAN Y T, VER-

- MEESCH P, ZHANG Z J, ZHAO J X, WIJBRANS J R. 2018. Geochronology of detrital muscovite and zircon constrains the sediment provenance changes in the Yangtze River during the late Cenozoic[J]. *Basin Research*, 30(4): 636-649.
- SUN X L, LI C A, KUIPER K F, ZHANG Z J, GAO J H, WIJBRANS J R. 2016. Human impact on erosion patterns and sediment transport in the Yangtze River[J]. *Global and Planetary Change*, 143: 88-99.
- SUN X L, TIAN Y T, KUIPER K F, LI C, ZHANG Z J, WIJBRANS J R. 2021. No Yangtze River prior to the Late Miocene: evidence from detrital muscovite and K-feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(5): e2020GL089903.
- SUN Y X, ZHU X Y, QIU X M, LIU Q D, DUAN H L, QIU Y F. 2024. Characteristics of shale fractures in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 14(3): 414-424.
- TIAN Y T, KOHN B P, HU S B, GLEADOW A J W. 2015. Synchronous fluvial response to surface uplift in the eastern Tibetan Plateau: implications for crustal dynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(1): 29-35.
- TANG D L K, SEWARD D, WILSON C J N, SEWELL R J, CARTER A, PAUL B T. 2014. Thermotectonic history of SE China since the Late Mesozoic: insights from detailed thermochronological studies of Hong Kong[J]. *Journal of the Geological Society*, 171(4): 591-604.
- TYRRELL S, HAUGHTON P D W, DALY J S, KOKFELT T F, GAGNEVIN D. 2006. The use of the common Pb isotope composition of detrital K-feldspar grains as a provenance tool and its application to Upper Carboniferous paleodrainage, Northern England[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76(2): 324-345.
- VERVOORT J D, KEMP A I S. 2016. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 425: 65-75.
- VEZZOLI G, GARZANTI E, LIMONTA M, ANDÒ S, YANG S Y. 2016. Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets[J]. *Geomorphology*, 261: 177-192.
- WANG P X. 2004. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia[M]//CLIFT P, KUHNT W, WANG P, HAYES D. Continental-Ocean Interactions within East Asian Marginal Seas. Washington: American Geophysical Union, 1-22.
- WANG W, BIDGOLI T, YANG X H, YE J R. 2018. Source-to-sink links between East Asia and Taiwan from detrital zircon geochronology of the Oligocene Huagang Formation in the East China Sea Shelf Basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(10): 3673-3688.
- WANG J, CHANG S C, LU H B, ZHANG H C. 2014. Detrital zircon U-Pb age constraints on Cretaceous sedimentary rocks of Lingshan Island and implications for tectonic evolution of eastern Shandong, North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96: 27-45.
- WANG L C, CHEN X L, CHU T C. 1997. A contrast analysis on the loads character of the Changjiang River and the Yellow River[J]. *Geographical Research*, 16(4): 71-79 (in Chinese with English abstract).
- WANG J T, LI C A, YANG Y, SHAO L. 2010. Detrital zircon geochronology and provenance of core sediments in Zhoulao Town, Jiangnan Plain, China[J]. *Journal of Earth Science*, 21(3): 257-271.
- WANG H J, YANG Z S, WANG Y, SAITO Y, LIU J P. 2008. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s[J]. *Journal of Hydrology*, 349(3-4): 318-332.
- WANG P, ZHENG H B, WANG Y D, WEI X C, TANG L Y, JOURDAN F, CHEN J, HUANG X T. 2021. Sedimentology, geochronology, and provenance of the Late Cenozoic "Yangtze Gravel": implications for Lower Yangtze River reorganization and tectonic evolution in Southeast China[J]. *GSA Bulletin*, 134(1-2): 463-486.
- WANG X, HAN J Q, ZAN L, LI X L, PENG X P. 2024. Logging evaluation of shale oil in the second member of Funing Formation of Qintong Sag, Subei Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 14(3): 364-372.
- WEI C Y, VOINCHET P, ZHANG Y F, BAHAIN J J, LIU C R, KANG C G, YIN G M, SUN X L, LI C. 2020. Chronology and provenance of the Yichang gravel layer deposits in the Jiangnan Basin, middle Yangtze River Valley, China: implications for the timing of channelization of the Three Gorges Valley[J]. *Quaternary International*, 550: 39-54.
- WEI H H, WANG E, WU G L, MENG K. 2016. No sedimentary records indicating southerly flow of the paleo-Upper Yangtze River from the First Bend in southeastern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 32: 93-104.
- WEISLOGEL A L, GRAHAM S A, CHANG E Z, WOODEN J L, GEHRELS G E. 2010. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle-Upper Triassic Songpan-Ganzi complex, central China: record of collisional tectonics, erosional exhumation, and sediment produc-

- tion[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11-12): 2041-2062.
- WISSINK G K, HOKE G D. 2016. Eastern margin of Tibet supplies most sediment to the Yangtze River[J]. *Lithosphere*, 8(6): 601-614.
- WU L, MONIÉ P, WANG F, LIN W, JI W B, BONNO M, MÜNCH P, WANG Q C. 2016. Cenozoic exhumation history of Sulu terrane: implications from (U-Th)/He thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 672-673: 1-15.
- WU L L, MEI L F, LIU Y S, LUO J, MIN C Z, LU S L, LI M H, GUO L B. 2017. Multiple provenance of rift sediments in the composite basin-mountain system: Constraints from detrital zircon U-Pb geochronology and heavy minerals of the early Eocene Jiangnan Basin, Central China[J]. *Sedimentary Geology*, 349: 46-61.
- WU F, YANG J, WILDE S, LIU X, GUO J, ZHAI M. 2007. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea[J]. *Precambrian Research*, 159(3-4): 155-177.
- XIANG F, YANG D, TIAN X, LI Z H, LUO L. 2011. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons in the Quaternary sediments from the Yichang area of Hubei Province and its provenance significance[J]. *Mineralogy and Petrology*, 31(2): 106-114 (in Chinese with English abstract).
- XU X S, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L, WANG X L, PEARSON N J, HE Z Y. 2007. The crust of Cathaysia: age, assembly and reworking of two terranes[J]. *Precambrian Research*, 158(1-2): 51-78.
- XU C H, ZHANG L, SHI H S, BRIX M R, HUHMA H, CHEN L H, ZHANG M Q, ZHOU Z Y. 2017. Tracing an Early Jurassic magmatic arc from south to East China Seas[J]. *Tectonics*, 36(3): 466-492.
- YAN Y, CARTER A, HUANG C Y, CHAN L S, HU X Q, LAN Q. 2012. Constraints on Cenozoic regional drainage evolution of SW China from the provenance of the Jianchuan Basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3): Q03001.
- YANG J, GAO S, CHEN C, TANG Y Y, YUAN H L, GONG H J, XIE S W, WANG J Q. 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9): 2660-2673.
- YANG R, SEWARD D, ZHOU Z Y. 2010. Provenance study by U-Pb dating of the detrital zircons in the Yangtze River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(6): 73-83 (in Chinese with English abstract).
- YANG Z, SHEN C B, RATSCHBACHER L, ENKELMANN E, JONCKHEERE R, WAUSCHKUHN B, DONG Y P. 2017. Sichuan Basin and beyond: eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous-Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(6): 4712-4740.
- YANG C Q, SHEN C B, ZATTIN M, YU W. 2021. Formation of the Yangtze Three Gorges: insights from detrital apatite fission-track dating of sediments from the Jiangnan Basin[J]. *Terra Nova*, 33(5): 511-520.
- YANG C Q, SHEN C B, ZATTIN M, YU W, SHI S X, MEI L F. 2019. Provenances of Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin and implications for the formation of the Three Gorges[J]. *International Geology Review*, 61(16): 1980-1999.
- YANG S Y, WANG Z B, GUO Y, LI C X, CAI J G. 2009. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 56-65.
- YANG S Y, WEI G J, SHI X F. 2015. Geochemical approaches of tracing source-to-sink sediment processes and environmental changes at the East Asian continental margin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(5): 902-910 (in Chinese with English abstract).
- YANG S L, XU K H, MILLIMAN J D, YANG H F, WU C S. 2015. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: impact from natural and anthropogenic changes[J]. *Scientific Reports*, 5: 12581.
- YANG S Y, ZHANG F, WANG Z B. 2012. Grain size distribution and age population of detrital zircons from the Changjiang (Yangtze) River system, China[J]. *Chemical Geology*, 296-297: 26-38.
- YU J J, LIU P, LIN F Z, WANG J L, DING D L, PENG B, WU B, LAO J X. 2022. Sediment sources and environment evolution since 90 ka in Sansha Bay, Fujian Province[J]. *East China Geology*, 43(1): 30-39 (in Chinese with English abstract).
- YUAN S Y, LI C A, ZHANG Y F, SHAO L, WANG J T. 2012. Trace element characteristics of sediments in Jiangnan Basin: implications for expansion of the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Geology in China*, 39(4): 1042-1048 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Z J, DALY J S, LI C, TYRRELL S, SUN X L, BADENSZKI E, LI Y W, ZHANG D, TIAN Y T, YAN Y. 2021. Formation of the Three Gorges (Yangtze River) no earlier than 10 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 216:

- 103601.
- ZHANG Z J, DALY J S, TIAN Y T, TYRRELL S, SUN X L, BADENSZKI E, QIN Y H, CHENG Z Y, GUO R J. 2022. Sedimentary provenance perspectives on the evolution of the major rivers draining the eastern Tibetan Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 232: 104151.
- ZHANG X C, HUANG C Y, WANG Y J, CLIFT P D, YAN Y, FU X W, CHEN D F. 2017. Evolving Yangtze River reconstructed by detrital zircon U-Pb dating and petrographic analysis of Miocene marginal Sea sedimentary rocks of the Western Foothills and Hengchun Peninsula, Taiwan[J]. *Tectonics*, 36(4): 634-651.
- ZHANG Y F, LI C A, WANG Q L, CHEN L, MA Y F, KANG C G. 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 584-590.
- ZHANG J Y, LU Y C, KRIJGSMAN W, LIU J S, LI X Q, DU X B, WANG C, LIU X C, FENG L, WEI W, LIN H. 2018. Source to sink transport in the Oligocene Huagang Formation of the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 98: 733-745.
- ZHANG Z J, TYRRELL S, LI C A, DALY J S, SUN X L, BLOWICK A, LIN X. 2016. Provenance of detrital K-feldspar in Jiangnan Basin sheds new light on the Pliocene-Pleistocene evolution of the Yangtze River[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(9-10): 1339-1351.
- ZHANG X C, YAN Y, HUANG C Y, CHEN D F, SHAN Y H, LAN Q, CHEN W H, YU M M. 2014. Provenance analysis of the Miocene accretionary prism of the Hengchun Peninsula, southern Taiwan, and regional geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 26-39.
- ZHAO X D, ZHANG H P, HETZEL R, KIRBY E, DUVAL A R, WHIPPLE K X, XIONG J G, LI Y F, PANG J Z, WANG Y, WANG P, LIU K, MA P F, ZHANG B, LI X M, ZHANG J W, ZHANG P Z. 2021. Existence of a continental-scale river system in eastern Tibet during the Late Cretaceous-early Palaeogene[J]. *Nature Communications*, 12(1): 7231.
- ZHENG H B. 2015. Birth of the Yangtze River: age and tectonic-geomorphic implications[J]. *National Science Review*, 2(4): 438-453.
- ZHENG L S. 2013. The provenance analysis of Xinghua-2 core from the Late Miocene, Subei Basin[D]. Nanjing: Nanjing Normal University (in Chinese with English abstract).
- ZHENG H B, CLIFT P D, HE M Y, BIAN Z X, LIU G Z, LIU X C, XIA L, YANG Q, JOURDAN F. 2021. Formation of the first bend in the Late Eocene gave birth to the modern Yangtze River, China[J]. *Geology*, 49(1): 35-39.
- ZHENG H B, CLIFT P D, WANG P, TADA R, JIA J T, HE M Y, JOURDAN F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(19): 7556-7561.
- ZHENG H B, JIA D, CHEN J, WANG P. 2011. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? Comment[J]. *Geology*, 39(9): e244.
- ZHU X F, SHEN C B, ZHOU R J, XU J Y, ZHAO J X, WANG L, GE X. 2020. Paleogene sediment provenance and paleogeographic reconstruction of the South Yellow Sea Basin, East China: constraints from detrital zircon U-Pb geochronology and heavy mineral assemblages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 553: 109776.
- ZHU W L, ZHONG K, FU X W, CHEN C F, ZHANG M Q, GAO S L. 2019. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view[J]. *Earth-Science Reviews*, 190: 89-111.
- ZHUANG G S, NAJMAN Y, GUILLOT S, RODDAZ M, ANTOINE P O, MÉTAIS G, CARTER A, MARIVAUX L, SOLANGI S H. 2015. Constraints on the collision and the pre-collision tectonic configuration between India and Asia from detrital geochronology, thermochronology, and geochemistry studies in the Lower Indus Basin, Pakistan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 432: 363-373.

附中文参考文献

- 巴尔博. 1935. 扬子江流域地文发育史[M]. 谢家荣, 译. 北京: 实业部地质调查所国立北平研究院地质学研究所, 17-34.
- 陈嘉诺, 孙高远, 温永祥, 李思琦, 王鑫宇, 刘凯, 蒋仁, 周效华. 2024. 长江三角洲 QDQ2 钻孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *华东地质*, 45(4): 466-477.
- 陈静, 王哲, 王张华, 陈中原. 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[J]. *第四纪研究*, 27(5): 700-708.
- 陈春峰, 钟楷, 朱伟林, 徐东浩, 王军, 张伯成. 2017a. 东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响[J]. *石油与天然气地质*, 38(5): 963-972.
- 陈春峰, 朱伟林, 付晓伟, 徐东浩, 张伯成. 2017b. 东海椒江凹陷晚古新世物源变化[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 45(10): 1522-1530, 1548.
- 陈玺贇, 吕开来, 王平, 黄湘通, 孔兴功. 2022. 大样本量 (large-n)

- 碎屑锆石 U-Pb 年代学分析技术研究进展[J]. 岩矿测试, 41(6): 920-934.
- 丁大林, 徐继尚, 王继龙, 李广雪, 丁咚, 乔璐璐, 于俊杰. 2021. 海洋沉积物测年方法综述[J]. 华东地质, 42(2): 217-228.
- 付晓伟, 朱伟林, 陈春峰, 钟锴, 许长海. 2015a. 丽水—椒江凹陷西斜坡明月峰组上段碎屑锆石物源. 地球科学 (中国地质大学学报), 40(12): 1987-2001.
- 付晓伟, 朱伟林, 钟锴, 陈春峰. 2015b. 东海丽水凹陷晚古生代碎屑锆石的发现及其意义[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 43(6): 924-931.
- 何梦颖, 梅西, 张训华, 刘健, 郭兴伟, 郑洪波. 2019. 南黄海陆架区 CSDP-1 孔沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源判别[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 49(1): 85-95.
- 黄学勇, 高茂生, 侯国华, 张戈, 党显璋. 2023. 莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析[J]. 华东地质, 44(4): 402-414.
- 姜月华, 周权平, 倪化勇, 陈立德, 程和琴, 雷明堂, 葛伟亚, 马腾, 施斌, 程知言, 段学军, 苏晶文, 朱锦旗, 修连存, 向芳, 朱志敏, 冯乃琦, 谢忠胜, 谭建民, 彭轲, 郭盛乔, 伏永朋, 任海彦, 孙建平, 杨强, 朱继良, 王东辉, 李明辉, 刘广宁, 范晨子, 王新峰, 史玉金, 王寒梅, 董贤哲, 陈焕元, 郝社峰, 邓娅敏, 李云, 肖则佑, 杨海, 刘林, 金阳, 张鸿, 梅世嘉, 齐秋菊, 吕劲松, 侯莉莉, 陈刚, 陈孜, 贾正阳. 2023. 长江经济带环境地质调查研究进展[J]. 华东地质, 44(3): 239-261.
- 康春国, 李长安, 张玉芬, 邵磊, 江华军. 2014. 宜昌砾石层重矿物组合特征及物源示踪分析[J]. 地质学报, 88(2): 254-262.
- 林承坤. 1989. 长江三峡与葛洲坝的泥沙及环境[M]. 南京: 南京大学出版社.
- 林旭, 刘海金, 吴中海, 刘维明, 张洋, 陈济鑫. 2021. 宜昌第四纪砾石层钾长石主、微量元素物源研究及其地质意义[J]. 地质力学学报, 27(6): 1024-1034.
- 林旭, 吴中海, 赵希涛, 张洋, 陈济鑫, 刘海金. 2022. 江汉盆地河流碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其对物源研究的启示[J]. 地球学报, 43(1): 73-81.
- 刘武生, 赵鸿, 赵如意, 秦锦华, 张熊, 蒋金昌, 赵晨辉, 李挺杰, 王成辉. 2022. 炭质泥岩 Re-Os 和碎屑锆石 U-Pb 同位素定年对广东大宝山铜矿床成矿时代的约束[J]. 岩矿测试, 41(2): 300-313.
- 毛光周, 刘池洋. 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 33(4): 337-348.
- 任美镠, 包浩生, 韩同春, 王飞燕, 黄培华. 1959. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题[J]. 地理学报, (2): 135-155.
- 孙雅雄, 朱相羽, 邱旭明, 刘启东, 段宏亮, 仇永峰, 巩磊. 2024. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩裂缝特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 14(3): 414-424.
- 王腊春, 陈晓玲, 储同庆. 1997. 黄河、长江泥沙特性对比分析[J]. 地理研究, 16(4): 71-79.
- 王欣, 韩建强, 咎灵, 李小龙, 彭兴平. 2024. 苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段页岩油测井评价研究[J]. 油气藏评价与开发, 14(3): 364-372.
- 向芳, 杨栋, 田馨, 李志宏, 罗来. 2011. 湖北宜昌地区第四纪沉积物中锆石的 U-Pb 年龄特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 31(2): 106-114.
- 杨蓉, SEWARD D, 周祖翼. 2010. 长江流域现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(6): 73-83.
- 杨守业, 韦刚健, 石学法. 2015. 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(5): 902-910.
- 于俊杰, 刘平, 林丰增, 王继龙, 丁大林, 彭博, 武彬, 劳金秀. 2022. 福建三沙湾 90 ka 以来沉积物来源及环境演变研究[J]. 华东地质, 43(1): 30-39.
- 袁胜元, 李长安, 张玉芬, 邵磊, 王节涛. 2012. 江汉盆地沉积物微量元素特征与长江上游水系拓展[J]. 中国地质, 39(4): 1042-1048.
- 张玉芬, 李长安, 王秋良, 陈亮, 马永法, 康春国. 2008. 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, 53(5): 577-582.
- 郑良焯. 2013. 苏北兴化 2 孔晚中新世以来重矿物物源示踪研究[D]. 南京: 南京师范大学.

Revealing the evolutionary history of the Yangtze River based on sediments provenance in the middle and lower reaches and offshore regions: progress, challenges and prospects

LI Ziting¹, FU Xiaowei¹, DONG Zuhua², GAO Shunli³, LI Shuai³, ZHANG Bocheng³

(1. *State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield, CNPC, Panjin 124010, Liaoning, China*; 3. *Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China*)

Abstract: The Yangtze River, as a critical link between the Tibetan Plateau and the marginal seas of the western Pacific, serves as an important window for understanding the coupling mechanisms of tectonics, geomorphology, and climate in East Asia. Extensive research has been conducted on the formation and evolution of the Yangtze River, covering a wide range of regions from the upstream plateau gorges and river terraces in Three Gorges to the gravel layers in the mid-lower reaches, the Jiangnan Basin and offshore basins. These studies have employed multidisciplinary approaches such as tectonic geomorphology and sedimentology to in-depth analyse. However, the timing of the river's full connection remains highly debated, with hypotheses ranging from the Eocene, pre-Miocene, late Miocene, to the early-middle Pleistocene transition. Based on provenance analysis of sediments from the middle-lower Yangtze River and the offshore region, this study systematically reviews the methods and progress in the research on the Yangtze River's evolution, discussing the applicability and challenges of different provenance approaches. Although multiple provenance methods provide crucial evidence for understanding the river's evolution, each method has its limitations. High-closure-temperature provenance methods (e.g., detrital zircon U-Pb dating) are significantly affected by recycled materials, making it difficult to accurately distinguish sediment contributions from the eastern Tibetan Plateau and the middle-lower Yangtze River. Low closure temperature methods (e.g., fission track dating, mica and potassium feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating) can effectively reflect the unique uplift and erosion processes of the eastern marginal Tibetan Plateau, but such studies remain relatively scarce. Moreover, terrestrial sediments are often influenced by local sources and suffer from poor depositional continuity, making it challenging to trace long-term provenance changes. In contrast, marine sedimentary sequences are less affected by local sources and offer advantages such as better continuity and higher chronological precision. It should be highlighted in the combined application of multiple isotopic provenance methods and the research on recording marine sedimentation including East China Sea Basin in the future. A comprehensive analysis with the change of sedimentation rate is expected to effectively reveal the evolution of the Yangtze River.

Key words: Yangtze River; provenance analysis; isotopic dating; sedimentary records; East China Sea Basin