

长江三峡的贯通：中下游和边缘海盆地的沉积记录

彭天柱¹, 张增杰^{1*}, 吴阳凡¹, 田云涛¹, 孙习林², 郭汝军³, J. Stephen Daly⁴

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082
2. 湖北大学, 资源与环境学院, 武汉 430062
3. 南京大学, 地理与海洋科学学院, 南京 210023
4. UCD School of Earth Science, University College Dublin, Dublin, Ireland

摘要 长江演化研究是揭示青藏高原东南缘构造隆升、亚洲季风演化和地貌格局变迁相互作用的关键切入点。三峡贯通常被视作长江形成的标志, 但“三峡贯通于何时?”这一关键科学问题, 虽经百余年研究, 仍然没有定论。伴随着三峡贯通, 青藏高原东南缘的碎屑物质被搬运至长江中下游和边缘海盆地(包括江汉盆地、苏北盆地和东海陆架盆地等)。因此, 在这些盆地中识别出青藏高原物质首次出现的层位, 是限定三峡贯通的有效途径。本文详细梳理了上述盆地的沉积学成果, 综述了地层年代和物源示踪研究进展(包括重矿物组合、单矿物年代学和同位素地球化学等), 概括了不同物源工具揭示的三峡贯通时限。大样本量的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据表明, 扬子克拉通内部中-新生界碎屑锆石 U-Pb 年龄已均一化, 物源示踪作用有限。新生代锆石在长江中下游盆地的出现, 常被视作三峡贯通的标志, 但由于供给量有限、盆地拦截作用和东部新生代火山活动, 利用该信号重建三峡贯通仍需谨慎。青藏高原新生代的快速隆升产生了大量年轻的碎屑热年代学颗粒(<10 Ma), 并且其滞后时间较短, 是揭示河流地貌演化的有效手段。未来的研究可侧重于利用新发展的沉积岩定年技术、碎屑热年代学和地貌模拟等, 在充分考虑青藏高原东南缘构造演化和东亚气候变迁的前提下, 从地球系统科学的角度全面解答这一科学难题。

关键词: 三峡, 青藏高原隆升, 物源示踪, 沉积记录

中图分类号: P512

收稿日期: 2025-09-25

项目资助: 国家自然科学基金项目(42571010; 42271008; 42171008)资助。

第一作者: 彭天柱(2002-), 男, 博士研究生, 主要从事低温热年代学和构造地貌学研究。E-mail: pengtzh3@mail2.sysu.edu.cn.

通讯作者: 张增杰(1988-), 男, 副教授, 主要从事河流地貌与沉积学研究。ORCID: 0000-0001-7627-9480. E-mail: zhangzj55@mail.sysu.edu.cn; zjzycug@gmail.com.

Formation of the Three Gorges: constraints from sedimentary archive in the middle-lower Yangtze River and marginal sea basins

PENG Tianzhu ¹, ZHANG Zengjie ¹, WU Yangfan¹, TIAN Yuntao ¹, SUN Xilin ²,

GUO Rujun ³, J. Stephen Daly ⁴

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, and Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China;
2. Faculty of Resources and Environment Science, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China;
3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023;
4. UCD School of Earth Science, University College Dublin, Dublin, Ireland

Abstract: The study of the Yangtze River evolution is key to revealing the interactions among tectonic uplift in the southeastern Tibetan Plateau, the evolution of the Asian monsoon, and changes in geomorphic patterns. The connection of the Three Gorges is often regarded as the marker for the formation of the Yangtze River. However, "When were the Three Gorges connected?" remains unresolved despite over a century of research. Following the connection of the Three Gorges, detrital materials from the southeastern Tibetan Plateau were transported to the middle and lower Yangtze River and its marginal sea basins. Therefore, identifying the stratigraphic horizon where materials from the Tibetan Plateau first appeared in these basins is an effective approach to constraining the formation of the Three Gorges. This study provides a detailed review of sedimentological studies from these basins, summarizes advances in stratigraphic dating and provenance tracing studies (including heavy minerals, single-mineral geochronology, and isotopic geochemistry), and synthesizes the timing of the Three Gorges connection as revealed by various provenance tools. Large data indicate that detrital zircon U-Pb ages from the Mesozoic-Cenozoic strata within the Yangtze Craton have been homogenized, limiting their utility for provenance tracing. Future research could focus on utilizing newly developed sedimentary dating techniques, detrital thermochronology, and geomorphic modeling. Under the premise of fully considering the tectonic evolution of the southeastern margin of the Tibetan Plateau and East Asian climate changes, a comprehensive solution to this scientific challenge should be pursued from the perspective of Earth system science.

Keywords: The Three Gorges; Tibet Uplift; provenance tracing; sedimentary archive

1 引言

新生代以来,在青藏高原隆升和东部地壳伸展减薄作用下,中国大陆地形格局由中生代的“西低东高”转变为现今的“西高东低”(汪品先, 2005)。作为亚洲第一大河,发源于青藏高原的长江自西向东横穿东亚大陆汇入太平洋,因此长江的形成可视为东亚东倾地形建立的标志。长江形成演化研究对理解青藏高原隆升、东亚地形变迁及季风演化具有重要意义(Zheng et al., 2013; 丁林等, 2025)。长江三峡位于四川盆地和江汉盆地之间(图 1),连接着长江上游和中下游的平原地区,因此三峡贯通是长江演化极为关键的一环,对此研究已有百余年之久,取得了大量成果,但在“三峡何时贯通?”这一关键科学问题上仍存在较大争议(Lee, 1924; Lin et al., 2024; Richardson et al., 2010; Wang et al., 2021; Yang et al., 2023; 张玉芬等, 2008)。

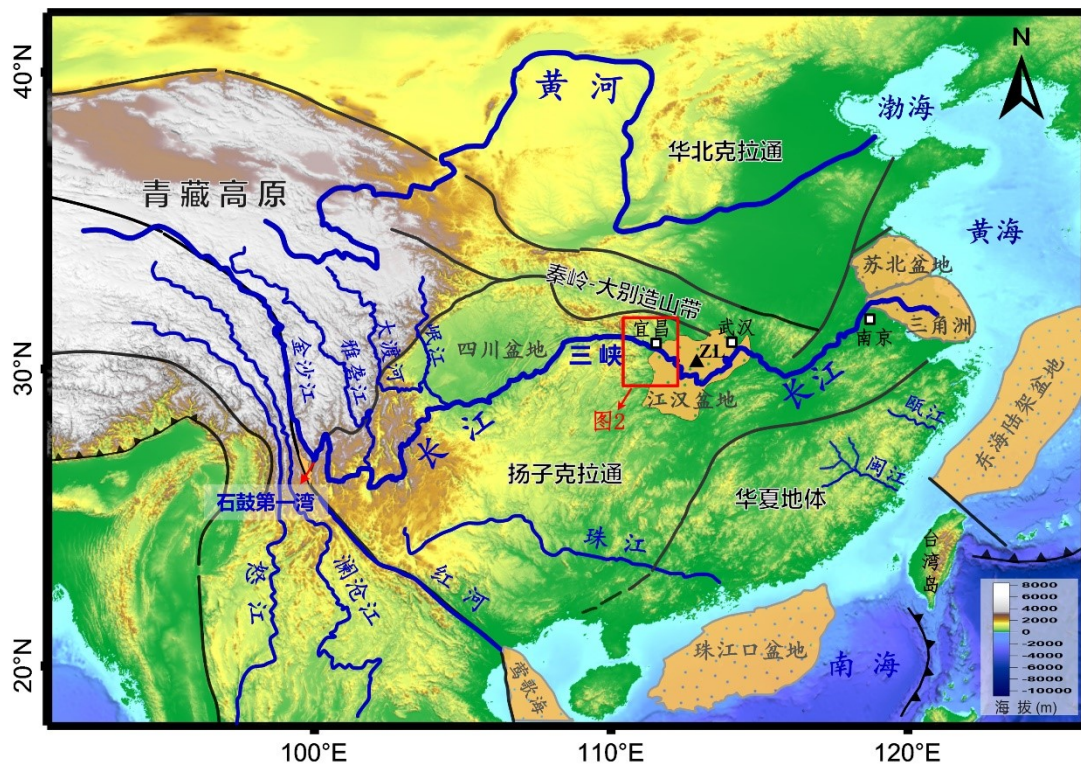


图 1 亚洲东部主要河流和新生代盆地分布图; ZL: 江汉盆地周老孔; 地理学上习惯将宜昌作为长江上游和中下游的分界点, 本文遵循这一传统

关于长江三峡贯通的具体时限, 概括而言, 可划分为“老”和“新”两个相对的观点: **(1) 三峡贯通于古近纪或更早:** 李四光和李春昱等老一辈地质学家通过构造格局演变、中生界岩性分析和地貌调查, 认为古长江在古近纪(老第三纪)就已切穿三峡(Lee, 1934; Lee and Chao., 1924)。低温热年代学研究显示四川盆地在始新世时(~40 Ma)发生区域性大规模剥蚀事件, 与此同时三峡东缘的黄陵背斜也经历了快速冷却事件(Ge et al., 2013; Hu et al., 2006), Richardson et al. (2010)据此推断三峡在始新世已经贯通。根据长江中下游新近系碎屑锆石 U-Pb 年龄物源研究, 一些学者推断在渐-中新世之交(~23

Ma)一条类似于长江的东流水系就已形成 (Yang et al., 2019; Zheng et al., 2013)。Jiao et al. (2021)重建了黄陵背斜附近长江三条支流的下切历史,认为三峡下切作用开始于早中新世,与低温热年代学模拟给出的三峡形成的时间一致(Yang et al., 2023a)。(2)贯通于第四纪:根据四川盆地和江汉-洞庭盆地水动力环境分析,杨达源和闰国年 (1992)认为三峡贯通导致这两大盆地的沉积环境在早更新世发生重大转变。结合三峡地貌和年代学研究, Li et al. (2001)将三峡层状地貌划分为两级夷平面和七级河流阶地,并提出在山原期夷平面之后因古长江重组而形成现今的深切河谷,即三峡贯通于早更新世。江汉盆地和长江三角洲沉积学研究,揭示出在早更新世物源发生突变,青藏高原东缘物质被输送至长江中下游(张玉芬等, 2008; Yang et al., 2008)。江汉盆地环境磁学及重矿物组合特征表明早更新世时盆地物源发生较大转变(康春国等, 2009; 张玉芬等, 2008),这可能是由长江贯通三峡所致。Yang et al. (2006)对三角洲 PD 孔开展的物源示踪研究,发现年龄小于 25 Ma 的碎屑独居石在更新统才出现,据此推断长江在第四纪才发育为一条源于青藏高原的大河。

三峡贯通主要的研究手段主要包括河流地貌和地貌模拟(Jiao et al., 2022; Li et al., 2001; Tian et al., 2025)、低温热年代学(Richardson et al., 2010; Su et al., 2024; Yang et al., 2023)和物源示踪(Wang et al., 2022; Zheng et al., 2013)等。河流地貌研究是约束大河演化的有效途径,其中河流阶地和夷平面等能够指示其演化历程(Pan et al., 2009; Xiong et al., 2024)。三峡在下切过程中形成了多级阶地,对其进行年代学研究可以限定三峡贯通年龄的最小值(Li et al., 2001)。三峡贯通后,四川盆地和黄陵岩基的剥蚀模式将会发生巨大改变,因此低温热年代学可以有效指示三峡切穿的时限。青藏高原东南缘是长江泥沙最主要的供给者(Sun et al., 2016; Vezzoli et al., 2016; Zhang et al., 2021b),随着三峡贯通,高原东南缘的碎屑物质将被搬运至长江中下游盆地(包括江汉盆地、长江三角洲和东海陆架盆地等;图 1)。因此在沉积记录中识别出青藏高原物质首次出现的层位,结合相关的年代学方法,可以有效的限定三峡贯通的时限(Yang et al., 2006; Zheng et al., 2013; 张玉芬等, 2008)。

新生代以来,中国东部盆地经历了由裂陷向拗陷转变的过程(Ren et al., 2002),在江汉盆地、苏北盆地、长江三角洲和东海陆架盆地等发育了巨厚新生代沉积(图 1)。同时,在长江中下游的宜昌、武汉、安庆和南京等地沉积一套河流相砂砾层(Wang et al., 2022; Zheng et al., 2013),这些新生代地层的年龄及物质来源是揭示“长江何时切穿三峡?”的关键。虽然已有文章评述了长江演化过程(郭汝军等, 2023; 林旭等, 2025; 杨超群等, 2024; 郑洪波等, 2017),但还未见专门从沉积学角度详述三峡贯通的研究。本文详细梳理了近二十年以来长江中下游和边缘海盆地的研究成果,综述了不同物源指标揭示的三峡贯通时限,并指出了存在的问题和未来研究方向,以期为您解答“三峡贯通于何时?”提供系统性的回顾和新的途径。未来的长江演化研究,应将青藏高原东南缘构造隆升和长江中下游盆地沉积记录结合起来,从“源-汇”系统和流域整体的视角揭示这一大河的演化。

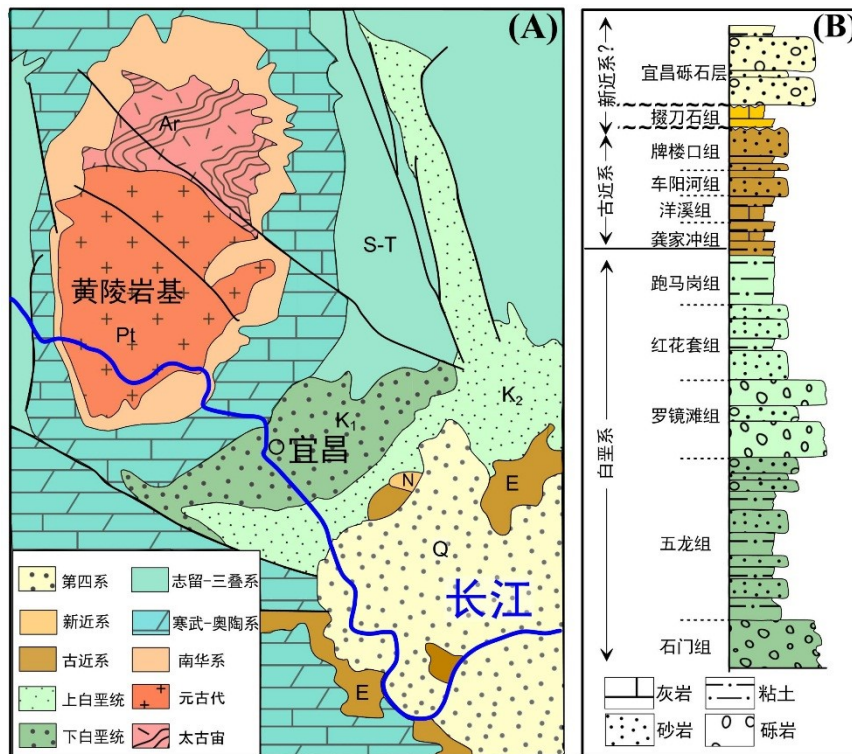


图 2 (A)江汉盆地西缘区域地质图及(B)中-新生代地层柱状图

2 江汉盆地

江汉盆地是长江东出三峡后流经的第一个大型沉积盆地(图 1), 它发育在燕山期褶皱基底之上, 经历了白垩纪-新生代多幕裂陷作用, 是一个陆内裂陷盆地(Wu et al., 2018)。江汉盆地保存了连续的中-新生代地层, 是揭示三峡贯通最为直接的沉积记录。江汉盆地西缘新近系和古近系之间存在明显的角度不整合, 不整合面之下是一套始新统的河湖相地层, 之上主要为一套巨厚松散状砂砾层, 标志着一次重大的沉积环境转变(Wang et al., 2014; Wei et al., 2020; 李庭等, 2010)。

2.1 江汉盆地西缘

2.1.1 江汉盆地西缘中-新生代地层

江汉盆地西缘白垩系包括下白垩统石门组、五龙组和上白垩统罗镜滩组、红花套组和跑马岗组(图 2; 雷奕振等, 1987)。石门组由灰黄色砾岩与粉砂岩组成, 为一套洪积扇沉积(图 3)。五龙组下部为砖红色砂岩、泥岩和粉砂岩互层, 上部为巨厚层状砂岩, 显示辫状河沉积特点(图 3)。罗镜滩组由红白色块状砾岩和薄-层状砂岩组成, 含花岗岩砾石(渠洪杰等, 2014), 碎屑锆石 U-Pb 年龄分布出现了 800-900 Ma 的特征年龄峰值, 指示了黄陵岩基结晶基底的剥露及江南造山带的物质供给(Lin et al., 2024; Shen et al., 2012a)。红花套组和跑马岗组均由块状红色细粒砂岩、粉砂岩和泥岩组成, 指示湖泊相沉积环境(Wang et al., 2014; 向芳, 2004)。盆地西缘新生界包括龚家冲组、洋溪组、车阳

河组、牌楼口组、掇刀石组和宜昌砾石层(图 3)。古新统龚家冲组与下伏跑马岗组整合接触, 由棕红色砂岩和泥岩组成, 延续了湖相沉积环境。下始新统洋溪组主要由泥岩、粉砂岩和灰岩组成, 中-上始新统车阳河组和牌楼口组则为块状砂岩(图 3), 指示了从湖泊相向辫状河或曲流河的转变。掇刀石组主要由灰色粉砂岩和灰岩组成, 含有丰富的脊椎动物化石(阎德发, 1978)。

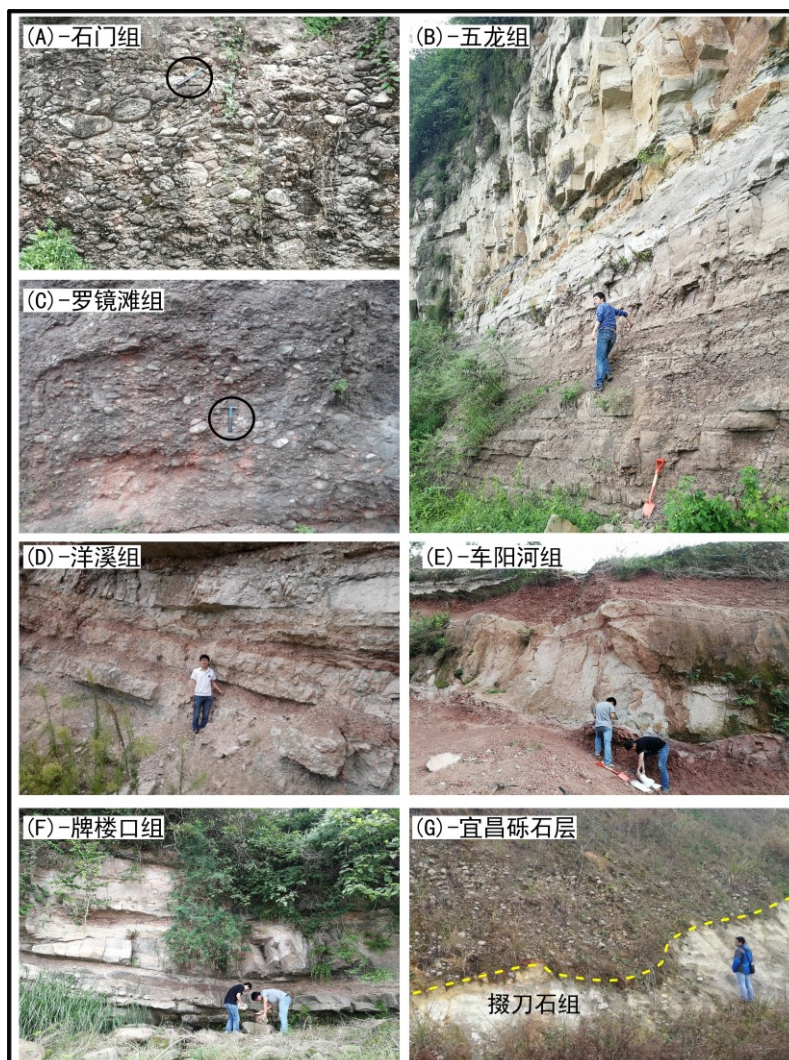


图 3 江汉盆地西缘中-新生代地层典型露头

(A)下白垩统石门组-块状砾岩;(B)下白垩统五龙组-下部为泥岩和粉砂岩互层, 上部为巨厚层状砂岩;(C)上白垩统罗镜滩组-块状砾岩;(D)下始新统洋溪组-薄层泥岩、粉砂岩与中厚层灰岩互层;(E)中始新统车阳河组-块状砂岩与粉砂岩互层;(F)上始新统牌楼口组-块状砂岩, 含粉砂岩与泥岩夹层;(G)厚层松散状宜昌砾石层与新近系掇刀石组呈不整合接触。

晚新生代, 江汉盆地西缘发育一套厚层砾石层, 显扇形分布, 扇顶位于宜昌猢亭, 向东延伸至白洋和松滋口, 通常称为“宜昌砾石层”(图 3)。通过区域地层对比和岩性划分, 前人将宜昌砾石层划分为下更新统云池组和善溪窑组(陈华慧和马祖陆, 1987)。砾石层分布面积逾 1000 km², 最大厚度达 120 m, 典型剖面出露于善溪窑、云池、李家院和白洋等地(魏传义等, 2020)。砾石分选磨圆较

好，砾径为 3-10 cm，发育叠瓦状构造，砾石最大扁平面指示古水流方向为南东；砾石岩性主要为石英岩和硅质岩，含少量花岗岩、流纹岩和闪长岩(Wang et al., 2014)。Wang et al. (2022)认为这套砂砾层为辫状河沉积，其下方为巨厚的始新统细粒河湖相地层，标志着沉积环境向河流相的转变。并且砾石层重矿物组合与下伏地层及现代长江支流明显不同，指示物源发生改变，因此很多学者认为它代表了三峡贯通(Wang et al., 2022; Wei et al., 2020; Zhang et al., 2022a)。

2.1.2 江汉盆地西缘物源研究进展

宜昌新生代地层的物源存在较大争议，主要有“近源”和“远源”两种观点。早期研究认为宜昌砾石层为近源沉积，因为其缺乏长江上游特征的峨眉山玄武岩砾石(Xiang et al., 2007)。而其他物源研究则证实了宜昌砾石层的物源与现代长江类似，包括碎屑锆石 U-Pb 年龄、钾长石 Pb 同位素组成和重矿物组合等(Lin et al., 2024; Wang et al., 2014; Zhang et al., 2021c; 康春国等, 2014)。宜昌砾石层的重矿物组合以锆石-绿帘石-白钛石-赤褐铁矿-钛铁-磁铁矿为特征，这与长江相似，而与其下伏基岩和江汉盆地西缘河流不同(Wei et al., 2020; 康春国等, 2014)。此外，宜昌砾石层的磁性特征与长江接近，指示其物源区为长江上游(Zhang et al., 2008; 张勇等, 2009)。江汉盆地西缘白垩系和始新统绝大多数钾长石的 Pb 同位素组成与黄陵岩基和秦岭一致，缺乏长江上游独有的高放射性成因 Pb 颗粒($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.4$)(图 4A&B)；而宜昌砾石层则含有大量长江上游独有的高放射性成因 Pb 长石颗粒($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.4$)(图 4C)。

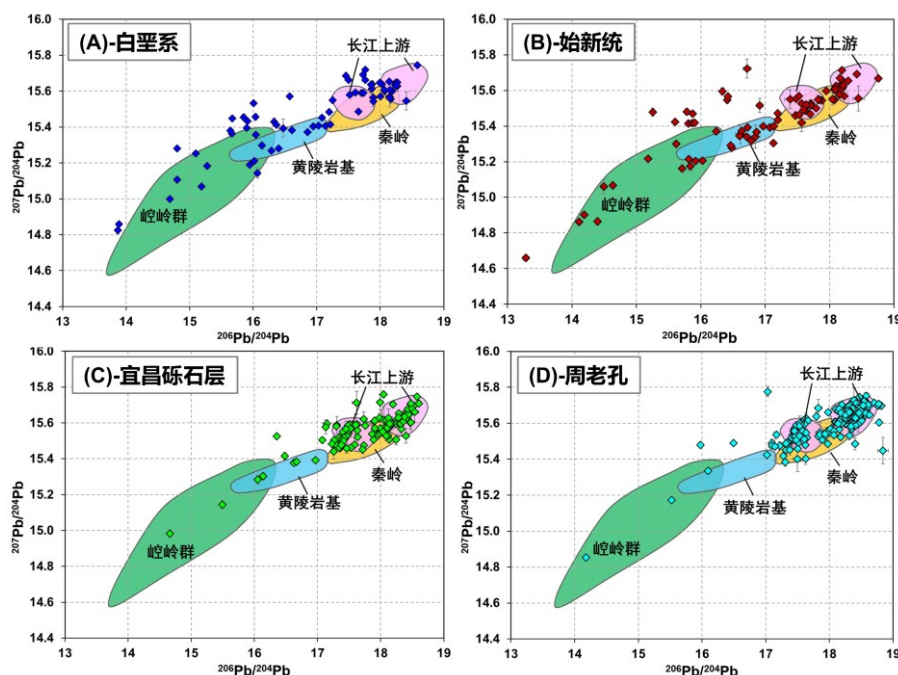


图 4 江汉盆地西缘中-新生代地层和周老孔碎屑钾长石 Pb 同位素组成及其与潜在物源区的对比

数据来源: (Zhang et al., 2022a)

本文收集了江汉盆地白垩系-第四系已发表的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据(图 5; Shen et al., 2012; Wang et al., 2014, 2022; Zhang et al., 2021c), 它们具有极其相似的碎屑锆石 U-Pb 年龄特征, 峰值主要集中在 150-360、400-500 Ma、700-900 Ma、1800-1900 Ma、2460-2500 Ma(图 5), 仅在中新统广华寺组和宜昌砾石层中出现了新生代碎屑锆石(<65 Ma)。新生代锆石仅出现在长江上游支流和金沙江(He et al., 2013), 因此新生代年轻的锆石的出现, 表明宜昌砾石层与三峡贯通密切相关。但是, 由于锆石具有极强的抗风化和抗机械磨蚀能力, 锆石可经历数次沉积旋回而保存, 碎屑锆石 U-Pb 年龄趋于均一化(Garzanti et al., 2021; Zhang et al., 2021c)。

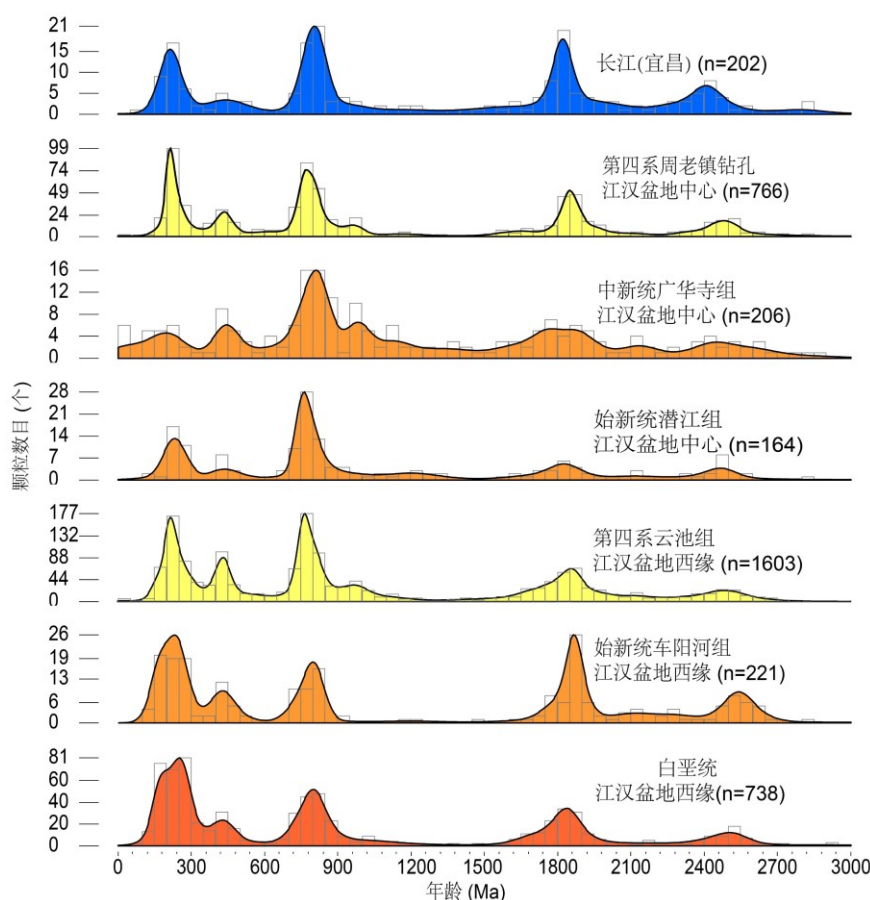


图 5 江汉盆地中-新生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

数据来源: 长江(He et al., 2013; Yang et al., 2012); 江汉盆地(Shen et al., 2012a, b; Sun et al., 2018; Wang et al., 2014, 2018a, 2022; Yang et al., 2019)

2.2 江汉盆地中部

江汉盆地中心的周老孔岩芯深约 300 m(图 1), 记录了晚上新世以来的地层信息, 是研究程度较深的沉积记录。对其开展物源分析, 检测出长江上游物质首次出现的层位可限定三峡贯通的时间。周老孔已有详细的磁性地层学研究: 布容-松山分界线(~0.78 Ma)位于 81 m 深处, 松山-高斯界线(2.58 Ma)位于 256 m 深处(张玉芬等, 2008), 根据沉积速率推断钻孔底部为~3 Ma。Li et al. (2022)对周老

孔开展了多心石英 ESR 测年, 将钻孔底部年龄矫正到 2.4 -2.5 Ma。磁性地层学的精确建立需要地层沉积连续, 且有独立的年代标定(如火山灰绝对定年等)。周老孔岩芯含有大量的粗碎屑沉积并不适合古地磁定年。最新的研究表明, 海平面的下降会导致长江“溯源侵蚀”, 使得江汉盆地发生沉积间断(Lai et al., 2025), 其磁性地层年龄很有可能被低估。ESR 定年方法具有古剂量率和年剂量率的不确定性, 仅适合第四纪沉积物的定年(Duval et al., 2020)。综上, 周老孔的地层年龄需借助其他绝对定年手段(如宇生核素等)的约束。

关于青藏高原东南缘物质在周老孔首次出现的层位, 不同物源指标给出了两种观点, 详述如下:

(1)早更新世(~1 Ma): 多种沉积学和矿物学研究显示, 周老孔在 110 m 深左右发生了明显的物源变化(康春国等, 2009; 杨建等, 2012; 张玉芬等, 2008)。重矿物组合分析显示, 以 104-120 m 的砾石层为界, 上段岩芯重矿物含量平均值为 2.11%, 含钛普通辉石首次出现, 反映了物源区的显著转变(康春国等, 2009; 杨建等, 2012)。磁性参数结果表明, 在深 100-110 m 附近, 磁性矿物含量和磁化率突然增大, 指示开始接受了上游物质(张玉芬等, 2008)。碎屑锆石 U-Pb 定年显示周老孔 87 m 处存在 14.8 和 16.5 Ma 的锆石颗粒, 表明长江在~0.8 Ma 已拓展至青藏高原(Wang et al., 2010)。碎屑白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄显示, 钻孔底部样品的年龄峰值与桐柏-大别山相似, 自 126 m 开始出现小于 70 Ma 的白云母, 与大渡河和岷江的信号一致, 表明主要物源区在早更新世拓展到青藏东南缘(Sun et al., 2018)。综上所述, 江汉盆地周老孔在约 1.12 Ma 多种物源指标发生突变, 与长江三角洲记录的物源突变时限一致(Fan et al., 2005; Yang et al., 2006; Yue et al., 2016)。

(2)晚上新世(及中新世): 单矿物年代学和同位素组成研究, 则显示三峡的贯通早于第四纪(Shao et al., 2012; Yang et al., 2019; Zhang et al., 2016)。江汉盆地周老孔全岩 Nd 同位素组成在 280-220 m 发生了变化, 可能与峨眉山大火成岩省的供给相关(Shao et al., 2012)。周老孔碎屑钾长石 Pb 同位素组成表明, 高放射性的 Pb 同位素特征在钻孔底部(262-265 m)出现, 显示了松潘-甘孜的物源特征(Zhang et al., 2016b)。碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明, 中新统广华寺组中首次出现了 <32 Ma 的锆石(图 5), 而长江中游普遍缺乏新生代锆石, 因此认为这些年轻的锆石来自青藏东南缘(Yang et al., 2019)。新生代以来青藏东南缘快速隆升(Clark et al., 2005; Tian et al., 2015), 而三峡以东的秦岭-大别山隆升缓慢(Reiners et al., 2003)。江汉盆地新生代地层碎屑磷灰石裂变径迹结果显示, 中新统广华寺组的 AFT 年龄峰值与黄陵背斜的一致, Yang et al. (2021)认为这代表了三峡的贯通。

综上所述, 江汉盆地中心的周老孔已开展了大量物源研究(杨建等, 2012; 张玉芬等, 2008; Sun et al., 2018; Zhang et al., 2016), 但其 300 m 岩芯仅覆盖晚上新世以来的沉积记录, 因此需要在江汉盆地中寻找更长时间尺度的地层, 以约束完整的长江演化过程。

大量物源示踪研究(包括碎屑锆石 U-Pb 年龄、碎屑钾长石 Pb 同位素、重矿物组合特征等)显示宜昌砾石层的源区是长江上游(康春国等, 2014; Wang et al., 2014; Zhang et al., 2021c), 推断其是三峡贯通的产物。但宜昌砾石层的年龄仍存争议, 有“更新世”和“中新世”两种观点。因此, 其所指示的三峡贯通时间还有待商榷。江汉盆地中心的中新统广华寺组虽然发现了新生代的锆石, 但相对于其他支流, 金沙江供给了很少的物质到长江中下游干流(Chappell et al., 2006), 中国东部大量存在的新生代火山岩也有可能提供年轻的锆石; 并且锆石极其稳定性, 可能经历数次沉积旋回, 形成极其相似的锆石 U-Pb 年龄谱。因此, 广华寺组新生代锆石出现或难以指示三峡的贯通。归纳而言, 江汉盆地西缘和中心沉积记录揭示的长江三峡贯通的争议, 可归因于地层年龄的不确定性和物源示踪手段的局限性。

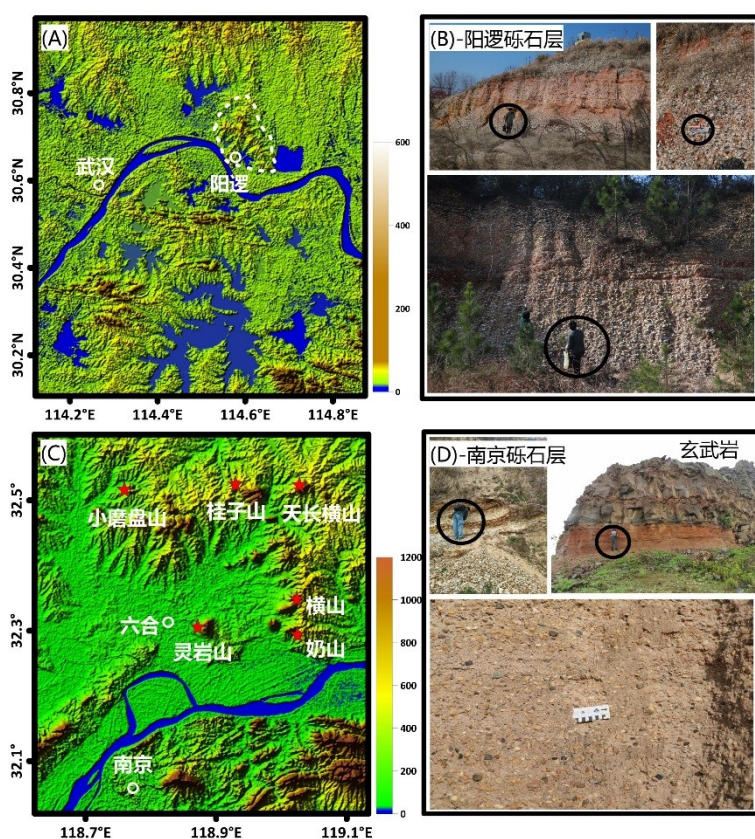


图 6 长江中下游晚新生代砾石层

(A)武汉阳逻砾石层分布及其(B)野外露头:棕红色砾石层,砾石分选磨圆好,成分以石英岩、脉石英、燧石和变质岩等为主。(C)南京六合砾石层分布及其(D)野外露头:上覆盖有玄武岩,砾石成分主要为石英岩、石英砂岩和硅质岩等为主

3 长江中下游晚新生代砾石层

在长江中下游分布一套巨厚河流相砂砾层, 这套地层的沉积年龄和物源是解译“三峡何时贯通?”的关键。它们出露于宜昌、武汉、安庆和南京等地, 厚约 30-100 m, 磨圆分选好, 砾石岩性

复杂(图 6)。前期地层对比及第四纪年代学研究将这套沉积物限定为更新统(Xiang et al., 2007; 梅惠等, 2009), 但南京六合砂砾层上覆玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 绝对定年结果显其为中新统(Zheng et al., 2013)。通过南京砾石层碎屑锆石 U-Pb 年龄物源研究, Zheng et al. (2013) 等认为长江诞生在~23 Ma 之前。然而, 江汉盆地(Wei et al., 2020; Zhang et al., 2008)和三角洲晚新生界物源研究显示(Gu et al., 2014; Yang et al., 2006), 晚上新世古长江仅仅局限于下扬子地区, 到早更新世连接青藏高原和太平洋的巨型长江才形成。

3.1 武汉阳逻砾石层

阳逻砾石层是长江沿岸出露较为典型的高阶地砾石层, 分布于长江武汉阳逻段北岸、大别山南麓(图 6)。在地貌上, 阳逻砾石层构成海拔 50~90 m 的基座阶地, 面积约 200 km², 最大厚度超过 20 m (图 6)。砾石主要为中粗-粗砾, 磨圆较好, 砾石岩性以石英岩、脉石英和燧石为主(图 6)。石英电子自旋共振测年(ESR)和热释光等测年方法被用来限定砾石层的沉积年龄, 指示其形成于更新世(黄宁生和关康年, 1993; 梅惠等, 2009)。有学者在阳逻砾石层中发现了新近纪的硅化木化石, 故提出其形成年代为中新世(Wang et al., 2022), 与南京砾石层的沉积时代一致(Zheng et al., 2013)。ESR 测年方法的精度较低, 且等效剂量和年剂量率具有一定的不确定性(Rink, 1997), 在出现更老的年龄的证据后, ESR 所测得年龄需要被重新考虑。

关于阳逻砾石层的物源, 目前仍存在较大争论, 有“长江来源说”和“大别来源说”两种观点。本文收集并对比分析了长江中下游砾石层和长江的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据(图 7), 结果显示阳逻砾石层的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱复杂, 包括~160 Ma、420 Ma、760 Ma、1850 Ma 和 2500 Ma 多个峰值, 与现代长江沉积物相似(图 7), 表明其主要受长江供给(Wang et al., 2022)。但砾石统计特征则表明其更有可能来自于大别山(王鹤源等, 2024), 砾石的组构分析也认为其是大别山南麓河流形成的冲洪积扇堆积物(王节涛等, 2021; 黄宁生和关康年, 1993)。碎屑钾长石 Pb 同位素组成表明, 阳逻砾石层含有大量低放射性成因 Pb 的钾长石颗粒($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 小于 17.5), 与大别山的信号特征一致, 而与长江中下游及扬子克拉通东部截然不同(图 8; Zhang et al., 2021c)。上述沉积学和地球化学证据均指示这套砾石层的主要物源区是大别山。此外, 阳逻砾石层中发掘出的大量古植物化石, 保存完整, 侧枝及木节可见(齐国凡等, 1997), 从另一个侧面反映出它们是经历短距离搬运后而沉积的。

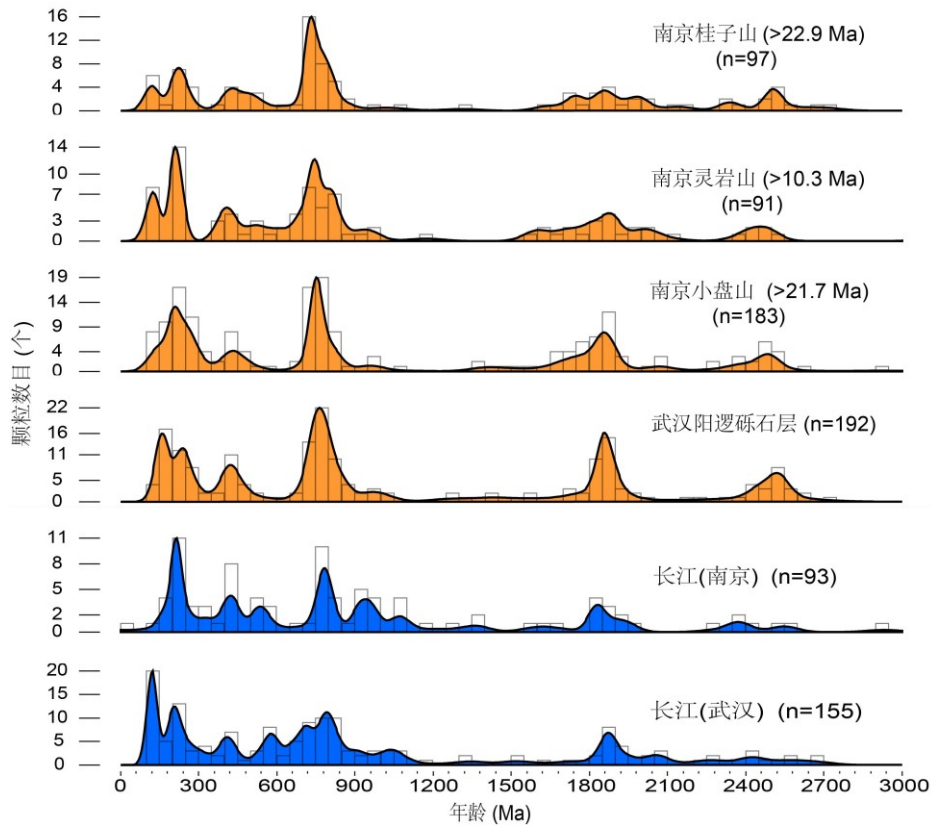


图 7 长江中下游砾石层和现代长江沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

数据来源：南京砾石层(Zheng et al., 2013)；阳逻砾石层(Wang et al., 2022; Zhang et al., 2021c)；现代长江(He et al., 2013)

3.2 南京砾石层

南京砾石层主要分布于长江北岸六合地区，包括灵岩山、桂子山和乃山等典型剖面(图 6; Wang et al., 2022; Zheng et al., 2013)。砾石层最大厚度约 50 m，砾石岩性主要为石英岩、石英砂岩和硅质岩等(图 6; Sun et al., 2021; Zhang et al., 2021c)。不同于其他缺乏绝对定年材料的典型剖面，南京砾石层被一套玄武岩覆盖(图 6)，能限定它的最小沉积年龄。Zheng et al. (2013)对灵岩山、小磨盘山和桂子山等剖面的玄武岩进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年研究，结果为 10.3 Ma、21.7 Ma 和 22.9 Ma；六合奶山和方山玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果为 16.9 和 9.5 Ma (杨晓东等，2018)；南京六合横山顶部玄武岩的测年结果为 9.5 Ma(Wang et al., 2022)；这些结果表明南京地区在新生代经历了多期次的火山活动，砾石层的沉积年龄在 23-10 Ma 之前。

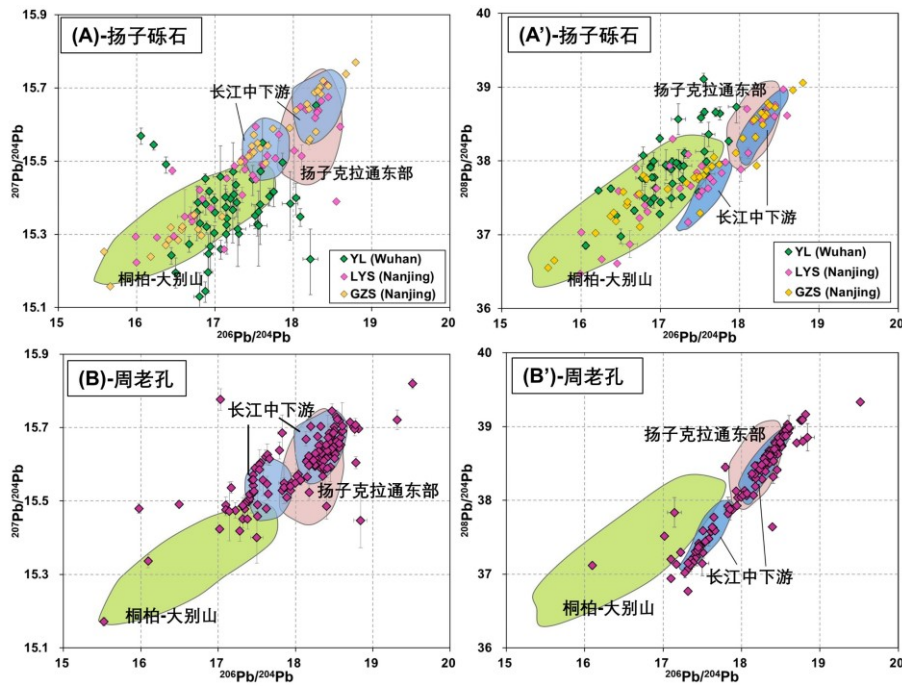


图 8 长江中下游砾石层和周老孔碎屑钾长石 Pb 同位素组成及其与潜在物源区的对比
数据来源: (Zhang et al., 2021c)

南京砾石层的物源也存在“长江源”和“大别源”两种观点(Sun et al., 2021; Zhang et al., 2021c; Zheng et al., 2013)。南京砾石层的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱与长江相似,都具有~250Ma、800Ma 和 1900Ma 左右的年龄峰(图 7)。前人结合上覆玄武岩年龄和碎屑锆石物源示踪,推断长江在晚渐新世就已形成(Zheng et al., 2013; 杨晓东等, 2018)。Sun et al. (2021)测定了南京砾石层和长江水系的碎屑白云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,发现南京砾石层的白云母和钾长石分别具有~220 Ma 和~120Ma 的年龄峰值,与长江截然不同,而与大别山、汉江、湘江和赣江的峰值非常相似。将南京砾石层碎屑钾长石 Pb 同位素组成与长江中下游、桐柏-大别山和扬子克拉通东部地区的数据进行对比分析,发现超过 40%的钾长石颗粒来自于桐柏-大别山,只有极少数颗粒显示出长江中上游的信号特征(图 8A),表明大别山为南京砾石层的主要物源区(Zhang et al., 2021c)。

长江三角洲及江汉盆地第四系的多种物源指标显示,早更新世以来,青藏高原东南缘已成为长江中下游最主要的沉积物供给者(He et al., 2013; Jia et al., 2010; Yang et al., 2006)。低温热年代学及古地理重建显示,渐新世以来青藏高原东南缘经历了数次强烈隆升,并达到了一定的高度(Hoke et al., 2014; Li et al., 2015; Wang et al., 2012),若此时存在一条连接青藏高原与东海的长江存在,那么其流域剥蚀模式应与现代长江相似。长江碎屑钾长石 Pb 同位素特征显示,大别山的沉积物供给十分有限,而新近系长江砾岩碎屑钾长石 Pb 同位素和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄物源的研究,显示大别山是这两处砾石层最为重要的物源区(Zhang et al., 2022b),这表明该古水系的源-汇系统与现代长江差别很大,

暗示着早中新世还不存在一条类似于现代长江的古水系。各地“长江砾岩”的物源和年龄并不一致，表明它们具有相对独立的地质历史。砾石层中的粗颗粒更多的反映了邻近源区的输入，而中-细砂层的单矿物(如锆石、钾长石和白云母)则显示出远源的信号特征(Wang et al., 2022)。以长江现代沉积物的主要粒度分布为基准(150-300 μm ; Wang et al., 2009)，或许可以更好的限定砾石层的物源，从而更客观地揭示长江演化。

4 三角洲及东海陆架盆地的沉积记录

4.1 长江三角洲

长江切穿三峡以后，携带了大量上游的碎屑物质在河口处沉积，因而在三角洲中找到青藏高原物质出现的初始层位，可以指示长江三峡的贯通(范代读等, 2004)。许多学者通过多种方法研究了三角洲晚新生代地层的物源，提出了不同的长江东流入海模型(Fan et al., 2005; Yang et al., 2006; Yue et al., 2024)。一些研究表明三角洲上新统主要来自于邻近地区，而第四系主要由长江上游供给(Fan et al., 2005; 贾军涛等, 2010)。DY03 钻孔的地球化学元素比值和碎屑锆石 U-Pb 年龄指示物源发生变化的层位的古地磁年龄为 3 Ma 左右(黄湘通等, 2009; 贾军涛等, 2010)。也有研究指出三角洲早更新世(~ 1.6 Ma)地层中已经存在以新生代锆石为特征的长江上游的物源信号(Yue et al., 2024)。碎屑独居石 U-Th-Pb 年龄表明长江在更新世早期(~ 1.2 Ma)便已形成与现今相似的流域格局(Yang et al., 2006)，这一结论与重矿物组成及矿物磁性特征等指示的物源突变层位时间相近(Liu et al., 2018; Yue et al., 2018; 王张华等, 2008)。第四纪时期存在数十次的海平面升降，长江三角洲发生剥蚀而造成了地层的间断甚至缺失，导致古地磁年龄变得年轻(赵希涛等, 2017)，并且钻孔当中同一层位的宇生核素埋藏年龄与古地磁年龄相差很大，也表明其沉积并不连续(Liu et al., 2022)。三角洲在上新世经历了强烈的化学风化，会导致一些不稳定的重矿物溶解(Andò et al., 2012; Yue et al., 2019)，进而影响物源判别的可靠性。

很多学者认为在晚上新世之前，古长江可能流经苏北盆地汇入东海(Yue et al., 2024; 黄湘通等, 2009; 贾军涛等, 2010)，因此苏北盆地可能保存了早期的长江演化信息。锆石 U-Pb 年龄和重矿物组合分析显示，长江三角洲在上新世主要接受邻区的物质输入(Yue et al., 2024)，而同期的苏北盆地锆石年龄谱与长江中上游的相似(Hao et al., 2023)。宇生核素测年表明与现代长江类似的物源特征先出现在三角洲北部的钻孔(Liu et al., 2022)，之后(~ 0.9 Ma)向南迁移到现代河口。Liu et al. (2025)对苏北盆地开展了详细的物源研究，发现上新世时盆地北部主要受长江影响，至更新世时盆地南部的

沉积物主要由长江供给，揭示了长江水道的南移。5 Ma 之前，由于浙闽隆起的阻挡，古长江很可能经由三角洲北部汇入南黄海(Liu et al., 2022)。

4.2 东海陆架盆地

东海陆架盆地是中国东部最大的近海盆地，形成于晚白垩世的裂谷作用(Ren et al., 2002)，其构造演化可划分为伸展-裂陷阶段，挤压-反转阶段和热沉降阶段三个阶段(Suo et al., 2015; Zhang et al., 2016a)。新生代地层厚约 10000 m，发育了古新统至第四系(Su et al., 2020)，包括始新统平湖组、渐新统花港组、中新世龙井组、玉泉组和柳浪组、上新世三潭组和第四系东海群等(Suo et al., 2015)。作为长江最终的“沉积汇”，东海陆架盆地的新生代地层记录了长江演化详细信息(Fu et al., 2021)。

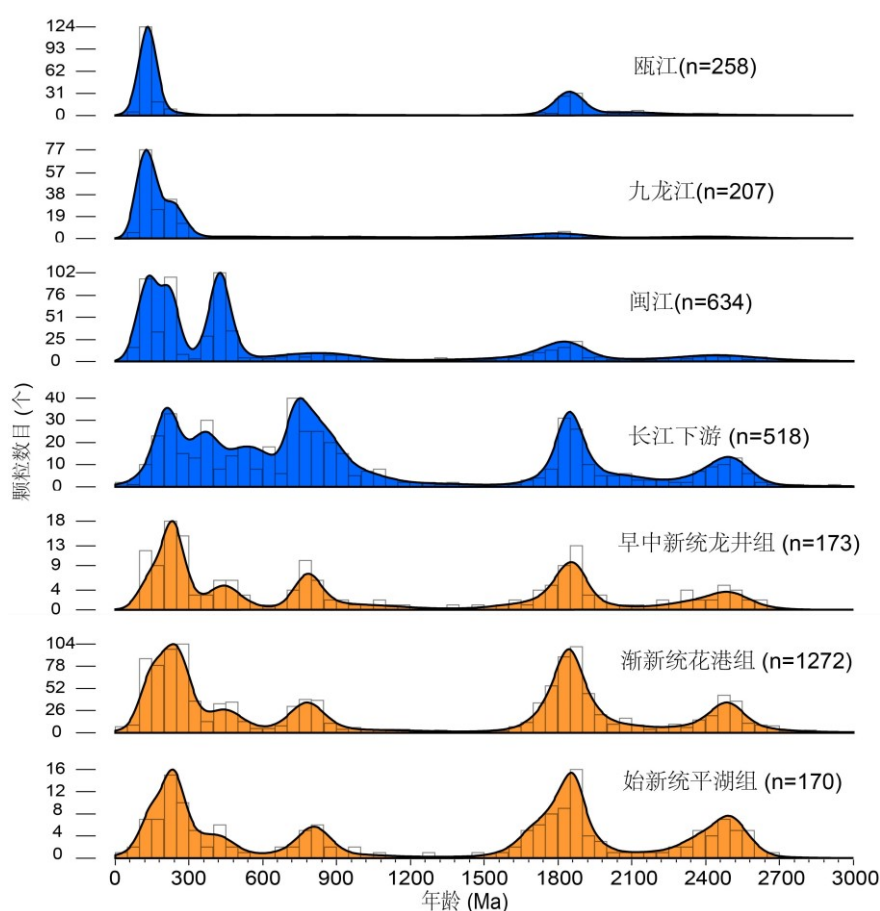


图 9 东海陆架盆地碎屑锆石 U-Pb 年龄分布与现代河流比较

数据来源：东海陆架盆地(Wang et al., 2018b; Zhang et al., 2018)；长江(He et al., 2013; Yang et al., 2012)；闽江和九龙江(Xu et al., 2016; Zhang et al., 2017a)；瓯江(Xu et al., 2007)

东海陆架盆地的碎屑锆石 U-Pb 年龄结果显示，始新统平湖组、渐新统花港组和中新统龙井组含有~2520 Ma、1860 Ma、780 Ma、420 Ma 和 240 Ma 等多个年龄峰(Wang et al., 2018b; Zhang et al., 2018)，这与现代长江沉积物的相似(图 9)；流经华夏地块的河流(包括闽江、瓯江和九龙江等)则缺

乏 1800 Ma 左右的年龄峰值, 表明这些地层的物质主要源自于长江(图 9)。多维标量分析(MDS)和蒙特卡洛模型进一步表明东海陆架盆地北部的渐-中新统主要由长江供给(Zhang et al., 2021a)。因此 Wang et al. (2018b)和 Zhang et al. (2021a)认为长江形成于早渐新世(~34 Ma)。最近的碎屑锆石 U-Pb 年龄示踪也表明自始新世开始, 盆地北部受到长江中上游物质的供给(Zhao et al., 2024)。然而, 江汉盆地的沉积记录并不支持长江在始-渐新世形成的观点; 沉积相分析显示, 江汉盆地在始-渐新世为湖相沉积, 表明当时并没有大型河流流经(戴世昭, 1997)。此外, 东海陆架盆地始新统-中中新统缺乏现代长江的特征锆石信号(~800 Ma), 而上中新统至第四系的锆石 U-Pb 年龄与长江相同(Fu et al., 2021), 表明长江形成于晚中新世。

碎屑锆石 U-Pb 年龄是目前东海陆架盆地物源研究的应用最多的示踪工具, 但其在约束长江贯通时间方面仍存在较大争议(Fu et al., 2021; Wang et al., 2018b; Zhang et al., 2021a), 主要表现在以下两方面: ①扬子克拉通的碎屑锆石 U-Pb 年龄信号已被均一化(Zhang et al., 2021c), 其示踪结果并不一定可靠, 特别是在长江这样流域地质背景复杂的大型河流; ②东海陆架盆地受邻近区域(东南沿海、华北克拉通和朝鲜半岛)影响较大(Fu et al., 2021; Shang et al., 2021), 而它们的碎屑锆石 U-Pb 年龄特征较为类似。

5 结论与展望

5.1 结论

本文详细梳理了近二十年以来长江三峡贯通的沉积学研究进展, 包括江汉盆地、中下游砾石层、长江三角洲和东海陆架盆地等。江汉盆地周老孔的多种物源指标(包括磁化率、重矿物组合和砾石统计等)在 1.1 Ma 发生了较大转变, 多数学者认为这指示了三峡贯通。然而, Nd 同位素和钾长石 Pb 同位素等表明第四纪之前(甚至中新世)长江三峡就已贯通。江汉盆地中心受邻近支流(如汉江和湘江等)和河道摆动等影响较大, 仅通过数量有限的钻孔, 很难准确限定三峡贯通。长江中下游广泛分布着一套新近系砂砾层, 被认为是三峡贯通的直接沉积。在南京六合地区, 该套砾石层顶部玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为早-中中新世, 其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱与长江的一致(图 6), 表明长江在早中新世就存在(Zheng et al., 2013)。然而钾长石 Pb 同位素和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄示踪显示, 这些砂砾层主要由邻近的大别山和扬子克拉通供给(Sun et al., 2021; Zhang et al., 2021c)。三角洲和东海陆架盆地是长江的沉积汇, 物源研究显示晚上新世三角洲主要受邻近源区的影响, 青藏高原物质在第四纪才到达; 但也有学者认为三角洲发育晚, 更早的长江沉积记录保存在苏北盆地(黄湘通等, 2009; 贾军涛等, 2010)。晚渐新世之后, 东海陆架盆地锆石 U-Pb 年龄谱与长江的相似, 多数研究者认为此时长江已形成。然而大数据分析显示, 晚中新世之前东海陆架盆地主要接受华北克拉通和朝鲜半岛

的物质供给, 缺少扬子克拉通的特征信号, 长江在晚中新世才贯通入海。上述研究表明, 长江三角洲和东海陆架盆地等受邻近源区(如大别山、华北克拉通和浙闽山地等)和河道改动影响较大, 在示踪三峡贯通存在着很大的不确定性和“遥相关”。未来的研究可利用新发展的新生代地层定年技术(尤其是同位素绝对定年)、碎屑热年代学和地貌模拟等, 在充分考虑青藏东南缘构造演化和东亚气候变迁的前提下, 从地球系统科学的角度准确解答这一科学难题。

5.2 展望

长江三峡的贯通会对青藏高原东南缘地貌格局、侵蚀模式和长江中下游盆地的碎屑物组成等产生重大影响; 因此从“源-汇”结合和流域整体的角度, 将青藏东南缘构造地貌演化(包括河谷下切、夷平面解体 and 剥蚀通量变化等)与中下游和边缘海盆地的沉积记录作为一个整体研究, 是约束三峡贯通乃至长江演化的有效途径。

5.2.1 青藏高原东南缘新生代构造隆升在长江中下游盆地的记录

低温热年代学数据显示, 长江上游的主要支流(包括雅砻江、大渡河和岷江等)在晚中新世均经历了快速下切(Clark et al., 2005; Tian et al., 2015), 多数学者将这期快速下切归因于青藏高原东南缘的构造隆升(Clark et al., 2005; Ouibet et al., 2010); 但近期地貌模拟研究显示, 金沙江向青藏高原内部的溯源拓展也会导致河谷快速下切(Rohrmann et al., 2023; Yu et al., 2025)。长江三峡贯通与晚中新世青藏东南缘河谷的快速下切存在何种联系? 目前这方面的研究仍相当薄弱。

若三峡在渐新世晚期(或始新世)已经贯通(Zheng et al., 2013, 2020), 晚中新世青藏高原东南缘的快速隆升应被长江中下游沉积盆地所记录。然而, 由于剖面(岩芯)等沉积记录较年轻和精确沉积年龄的匮乏, 青藏东南缘构造隆升事件与三峡贯通之间联系的研究较少。仅在苏北盆地和东海陆架盆地开展了碎屑锆石 U-Pb 年龄物源示踪研究(Fu et al., 2021), 揭示出现代长江水系格局在晚中新世才形成。未来的研究应将青藏东南缘构造隆升和长江中下游沉积盆地记录结合起来。紧邻三峡的江汉盆地和长江最终的“沉积汇”-东海陆架盆地, 沉积了厚达数千米的新生代地层, 蕴含了长江演化的丰富信息, 是解译青藏高原隆升和水系演化的关键沉积记录。

5.2.2 关于碎屑锆石 U-Pb 年龄示踪三峡贯通的思考

随着微区分析技术的快速发展, 锆石 U-Pb 年龄已成为最常用的单矿物示踪工具, 被广泛应用于长江演化研究, 并取得了一系列研究成果(Fu et al., 2021; Wang et al., 2022; Yang et al., 2019; Zheng et al., 2013)。目前长江流域已发表的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据数以万计, 是从大数据角度研

究长江演化及其“源-汇”过程的重要手段。随着研究的深入，碎屑锆石 U-Pb 年龄的局限性也引起研究者的关注，包括扬子克拉通锆石 U-Pb 年龄均一化和新生代锆石的物源意义等。详述如下：

(1) 扬子克拉通内部锆石 U-Pb 年龄信号的均一化

锆石是一种极其稳定的重矿物，并且 U-Pb 年龄体系封闭温度高，风化、搬运、沉积及埋藏等过程并不会改变锆石 U-Pb 年龄信号，它们可经历数次沉积旋回而保存下来(Garzanti et al., 2013)，来自不同构造单元的沉积物供给使得极其稳定矿物(如锆石等)携带的物源信号趋向于均一化。晚三叠纪，随着华南板块和华北板块碰撞，造成秦岭-大别中央造山带的隆起，大量因构造隆升而剥蚀下来的碎屑物质被西流古水系搬运至松潘-甘孜残余洋盆(Nie et al., 1994)。侏罗纪-白垩纪，古太平洋板块的俯冲致使中国东部发育安第斯型活动大陆边缘，而在中国西部还发育着新特提斯洋和大型内陆盆地；此时东亚大陆呈东高西低的地貌格局(汪品先, 2005)，大量碎屑物质被古河流向西搬运(She et al., 2012)，在江汉和四川盆地等沉积下来。新生代以来，随着欧亚-印度板块的碰撞，新特提斯洋消亡，青藏高原逐渐隆升为世界屋脊(Yin and Harrison, 2000)；中国东部在经历了断陷期和拗陷期之后，进入整体沉降阶段(Ren et al., 2002)。多种物源工具，包括碎屑锆石 U-Pb 年龄(Wissink and Hoke, 2016; Yang et al., 2012)、碎屑组分统计(Vezzoli et al., 2016)和碎屑白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年(Sun et al., 2016)等，都表明雅砻江、大渡河和岷江等是长江中下游干流最主要的碎屑物供给者，而这些河流主要流经松潘-甘孜地块及四川盆地西缘。东亚东倾地貌格局的形成，使得大量被搬运至西部的碎屑物质“东游”。因此，考虑到碎屑锆石的强稳定性，其 U-Pb 年龄记录的是扬子克拉通及其周缘的造山运动信息，物源示踪作用已十分有限。

在单颗矿物上同时获取结晶年龄、冷却年龄(或同位素组成)等多种物源信号，例如锆石的 U-Pb、裂变径迹测年(ZFT)和(U-Th)/He (ZHe)测年(Xu et al., 2017; 徐杰和姜在兴, 2019)，可以有效的指示物源区信息。新生代以来，青藏高原东南缘不同构造单元经历了截然不同的构造隆升和剥蚀历史(陶亚玲等, 2020)，因此将锆石 U-Pb、ZFT 和 ZHe 测年结合起来能有效地示踪沉积物的直接物源区(Cao et al., 2025)，进而约束水系演化。此外，与其他不稳定矿物结合(如钾长石、白云母和磷灰石等)，能很好地校正锆石的沉积再旋回(Blowick et al., 2021; O'Sullivan et al., 2020; Zhang et al., 2023)。

(2) 新生代锆石作为青藏高原物质抵达长江中下游的示踪标志？

青藏高原东南缘新生代岩浆活动活跃(Chung et al., 1998)，为长江上游流域提供了新生代碎屑锆石。金沙江含有大量新生代碎屑锆石(He et al., 2013; Yang et al., 2012)，并且这些锆石在长江中下游支流很少见。因此新生代锆石在长江中下游盆地的出现，常被视作三峡贯通的标志(Wang et al., 2022; Yang et al., 2019; Zhao et al., 2024)。然而，相对于青藏高原东南缘其它支流，金沙江供给了很少的碎屑物质到长江中下游(Chappell et al., 2006)，因此新生代锆石在长江沉积物中出现概率很低。江汉盆地

西缘宜昌砾石层分析了约 1200 颗锆石颗粒，才发现了两颗年轻锆石(Wang et al., 2022)。长江中下游盆地的拦截作用“trapping”也使得新生代锆石输送到长江下游较为困难(Yang et al., 2023b)。

5.2.3 新生界沉积年龄的精确约束

陆相新生代地层沉积年龄的精确约束是重建长江三峡贯通的关键。然而，由于陆相地层连续性差和绝对定年材料的缺乏，导致长江中下游新生代地层的沉积年龄仍没有很好地厘定。关于长江三峡贯通时限的争论，本质上可归为地层定年的不确定性(Wang et al., 2022; Wei et al., 2020; Xiang et al., 2007)。详细的野外调查和先进的定年技术现已能够从粗碎屑中获取可靠的沉积年龄，包括玄武岩 Ar-Ar 定年(Wang et al., 2022; Zheng et al., 2013)、宇生核素埋藏测年(Kong et al., 2009; McPhillips et al., 2016)、铁锰结核 Ar-Ar 和 U-Th-He 定年等(Deng et al., 2014; Dröllner et al., 2023)。南京砾石层上覆玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年(Zheng et al., 2013)，将长江形成时间大大推前。此外，宇宙成因核素埋藏定年法(^{10}Be 、 ^{21}Ne 和 ^{26}Al 等)为粗碎屑沉积提供了另一种直接定年手段(McPhillips et al., 2016)。将磁性地层与放射性同位素定年相结合，能获得更可靠的沉积记录时间约束(Li et al., 2022; Liu et al., 2022)。由于淋滤作用强烈，长江中下游新生代地层中铁锰结核发育(图 10)，是开展同位素绝对定年的良好材料(Deng et al., 2014; Dröllner et al., 2023)，能给出较好的沉积年龄约束，但目前这方面的研究仍比较薄弱。

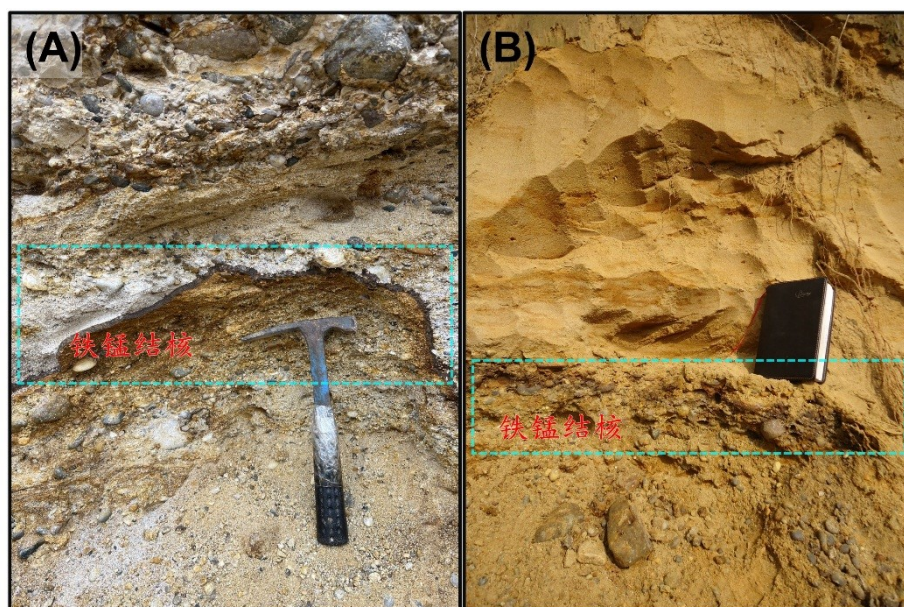


图 10. 长江中下游砾石层中的铁锰胶结层 (A) 南京六合横山剖面; (B) 宜昌云池剖面

5.2.4 地貌模拟在制约三峡贯通中的应用

近年来地貌模拟发展迅速(Salles et al., 2023)，为揭示三峡贯通提供了新思路。地貌模拟显示汇入四川盆地的乌江和汇入江汉盆地的沅江在~18 Ma 之前的下切速率截然不同，之后则一致，表明

三峡贯通于早中新世(Jiao et al., 2022)。Tian et al. (2025)利用 Badlands 模型重建了晚白垩世以来长江流域的地貌演变过程,显示四川盆地水系反转和江汉盆地持续裂陷,诱发了晚渐新世三峡贯通。上述模拟均依赖于降水量、初始古地形及隆升历史等先验参数,但长江流域的古地貌和古气候格局仍不明晰,使得地貌重建模型存在很大差异。随着长江流域构造地貌(低温热年代学等)和古气候重建研究的深入,地貌模拟研究将在长江地貌演化中扮演重要的角色。

致谢

感谢江华军、张岱、李亚伟、姚灯、苏建超、刘彧、翁绪和刘瑶等在长江中下游野外地质调查中提供的帮助。感谢编委、曹凯教授和林旭教授等提出的建设性意见,使本文提升很大。本研究受到国家自然科学基金项目(42571010; 42271008; 42171008)的资助。

References

- Andò S, Garzanti E, Padoan M, Limonta M. 2012. Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis. *Sediment Geol*, 280: 165-178
- Blowick A, Pe-Piper G, Piper D J W, Zhang Y Y, Tyrrell S. 2021. First-cycle sand supply and the evolution of the eastern Canadian continental margin: Insights from Pb isotopes in the Mesozoic Scotian Basin. *Geol Soc Am Bull*, 133(5-6): 1301-1319
- Cao, K., Wang, G., Harrison, T. M., Yuan, X., Leloup, P. H., Kusky, T. M., Cao, L., Shen, X., Cheng, Y., Yao, J., He, X., Zhu, Z., and Xie, S., 2025, Late Cenozoic river reorganization related to tectonic extrusion formed the modern drainage system in southeastern Tibet: Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 122, no. 40, p. e2424554122.
- 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. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 241(1): 79-94
- Chen J, Wang Z H, Chen Z Y, Wei Z X, Wei T Y, Wei W. 2009. Diagnostic heavy minerals in Plio-Pleistocene sediments of the Yangtze Coast, China with special reference to the Yangtze River connection into the sea. *Geomorphology*, 113(3-4): 129-136
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y, Xie Y, Li X, Wang K L, Wang P L J N. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *394(6695)*: 769-773
- Clark M K, House M A, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 33(6): 525-528
- Deng, X.-D., Li, J.-W., Vasconcelos, P. M., et al., 2014. Geochronology of the Baye Mn oxide deposit, southern Yunnan Plateau: Implications for the late Miocene to Pleistocene paleoclimatic conditions and topographic evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139: 227-247
- Dröllner, M., Barham, M., Kirkland, C. L., et al., 2023. Directly Dating Plio-Pleistocene Climate Change in the Terrestrial Record. *Geophysical Research Letters*, 50(8): e2023GL102928
- Duval M, Arnold L J, Rixhon G. 2020. Electron spin resonance (ESR) dating in Quaternary studies: evolution, recent advances and applications. *Quat Int*, 556: 1-10

- Fan D D, Li C X, Kazumi Y, Zhou B C, Li B H, Wang Q, Yang S Y, Deng B, Wu G X. 2005. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 48(10): 1718-1727
- 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 Asian Earth Sci*, 205: 11
- Garzanti E, Barbarano M, Andò S, Lenzi M, Deng K, Yang S Y. 2021. Provenance of Neogene sandstones in western Taiwan traced with garnet geochemistry and zircon geochronology. *Basin Res*, 33(3): 2069-2088
- Garzanti E, Vermeesch P, Andò S, Vezzoli G, Valagussa M, Allen K, Kadi K A, Al-Juboury A I A. 2013. Provenance and recycling of Arabian desert sand. *Earth-Sci Rev*, 120: 1-19
- Ge X, Shen C B, Yang Z, Mei L F, Xu S H, Peng L, Liu Z Q. 2013. Low-Temperature Thermochronology Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Exhumation of the Huangling Massif in the Middle Yangtze Block, Central China. *J Earth Sci*, 24(4): 541-552
- Hao S, Cheng Y, Gao B, Li X, Xu S, Luo D. 2023. Provenance changes of the Yangtze River Delta sediments since ~3.6 Ma: Evidence from heavy mineral assemblages and detrital zircon U–Pb ages spectra. *Quat Int*, 671: 33-43
- 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. *Chem Geol*, 360: 186-203
- Hoke, G. D., Liu-Zeng, J., Hren, M. T., et al., 2014. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene. *Earth and Planetary Science Letters*, 394(0): 270-278
- Hu S B, Raza A, Min K, Kohn B P, Reiners P W, Ketcham R A, Wang J Y, Gleadow A J W. 2006. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic evolution along a transect from the north China craton through the Qinling orogen into the Yangtze craton, central China. *Tectonics*, 25(6): 15
- 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. *Chin Sci Bull*, 55(15): 1520-1528
- Jiao R H, Fox M, Yang R. 2022. Late Cenozoic erosion pattern of the eastern margin of the Sichuan Basin: Implications for the drainage evolution of the Yangtze River. *Geomorphology*, 398: 11
- Jiao R H, Yang R, Yuan X P. 2021. Incision History of the Three Gorges, Yangtze River Constrained From Inversion of River Profiles and Low-Temperature Thermochronological Data. *J Geophys Res-Earth Surf*, 126(3): 16
- Lai Z P, Liu Y X, Wu Z Y, Xu Y T, Fang Z B, Montgomery D R. 2025. Headward incision of large rivers in response to glacial sea level fall. *Sci Adv*, 11(26): 10
- Lee C Y. 1934. The development of the upper Yangtze valley. *Bulletin of the Geological Society of China*, 13(1): 107-118
- Lee J S, Chao. Y T. 1924. Geology of the gorge district of the yangtze (from ichang to tze kuei) with special reference to the development of the gorges. 3(3-4): 351-392
- Li J, Xie S, Kuang M. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 41(2): 125-135
- Li, S., Currie, B. S., Rowley, D. B., et al., 2015. Cenozoic paleoaltimetry of the SE margin of the Tibetan Plateau: Constraints on the tectonic evolution of the region. *Earth and Planetary Science Letters*, 432: 415-424

- Li Y, Wei C, Li C, Guo R, Liu C, Zhang Y. 2022. Application and evaluation of multiple-centres ESR dating of Pliocene-Quaternary fluvial sediments: A case study from the Zhoula core from the Jiangnan Basin, middle Yangtze River basin, China. *Quaternary Geochronology*, 70: 101297
- Lin, X., Liu-Zeng, J., Jolivet, M., et al., 2024. Sedimentary provenance constraints on the Cretaceous to Cenozoic palaeogeography of the western margin of the Jiangnan Basin, South China. *Gondwana Research*, 125: 343-358
- Liu J H, Yue W, Chen J, Yue X Y, Zhang L M, Li Y L, Liu X B. 2025. Provenance of Plio-Pleistocene sediments of the Subei Basin, East China with implication for proto-Yangtze channelization. *J Asian Earth Sci*, 280: 15
- Liu X B, Chen J, Maher B A, Zhao B C, Yue W, Sun Q L, Chen Z Y. 2018. Connection of the proto-Yangtze River to the East China Sea traced by sediment magnetic properties. *Geomorphology*, 303: 162-171
- Liu Y, Liu X B, Wang S J, Xu S, Ellam R M, Fabel D, Chen J. 2022. Late Cenozoic channel migration of the proto-Yangtze River in the delta region: Insights from cosmogenic nuclide burial dating of onshore boreholes. *Geomorphology*, 407: 7
- McPhillips D, Hoke G D, Liu-Zeng J, Bierman P R, Rood D H, Niedermann S. 2016. Dating the incision of the Yangtze River gorge at the First Bend using three-nuclide burial ages. *Geophys Res Lett*, 43(1): 101-110
- Nie S Y, An, Yin, David, B., Rowley, Yugan, Jin. 1994. Exhumation of the Dabie Shan ultra-high-pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence, central China. *Geology*, 22(11): 999-1002
- Pan B T, Su H, Hu Z B, Hu X F, Gao H S, Li J J, Kirby E. 2009. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China. *Quat Sci Rev*, 28(27-28): 3281-3290
- 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. *American Journal of Science*, 303(6): 489-518
- Ren J, Tamaki K, Li S, Junxia Z. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3): 175-205
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, Fowler A, Wipf M, Ellis M A, Yong L, Zhang Y. 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Solid Earth*, 113(B4): 23
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, Wipf M, Yong L. 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? *Geology*, 38(6): 551-554
- Rink W J. 1997. Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in quaternary science and archaeometry. *Radiat Meas*, 27(5-6): 975-1025
- Rink W J, Bartoll J, Schwarcz H P, Shane P, Bar-Yosef O. 2007. Testing the reliability of ESR dating of optically exposed buried quartz sediments. *Radiat Meas*, 42(10): 1618-1626
- Salles T, Husson L, Rey P, Mallard C, Zahirovic S, Boggiani B H, Coltice N, Arnould M. 2023. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale. *Science*, 379(6635): 918-922
- Shang Y, Nian X M, Zhang W G, Wang F. 2021. Yellow River's Contribution to the Building of Yangtze Delta During the Last 500 Years - Evidence From Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Geophys Res Lett*, 48(14): 10

- 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 Asian Earth Sci*, 45: 57-64
- She Z B, Ma C Q, Wan Y S, Zhang J Y, Li M, Chen L, Xu W J, Li Y Q, Ye L F, Gao J. 2012. An Early Mesozoic transcontinental palaeoriver in South China: evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *J Geol Soc*, 169(3): 353-362
- 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. *Sediment Geol*, 281: 194-207
- Shen C B, Mei L F, Peng L, Chen Y Z, Yang Z, Hong G F. 2012b. LA-ICPMS U-Pb zircon age constraints on the provenance of Cretaceous sediments in the Yichang area of the Jiangnan Basin, central China. *Cretac Res*, 34: 172-183
- Stockli D F, Najman Y M R. 2020. Earth's Dynamic Past Revealed by Detrital Thermochronometry. *Elements*, 16(5): 311-317
- Su A, Chen H H, Zhao J X, Zhang T W, Feng Y X, Wang C W. 2020. Natural gas washing induces condensate formation from coal measures in the Pinghu Slope Belt of the Xihu Depression, East China Sea Basin: Insights from fluid inclusion, geochemistry, and rock gold-tube pyrolysis. *Mar Pet Geol*, 118: 23
- SU, J., LIN, X., LI, C. a., MARC, J., WU, L., CHENG, F., DENG, B., WU, Z., CHEN, X., and HU, C., 2024, Late Mesozoic Exhumation of the Huangling Massif: Constraints on the Evolution of the Middle Yangtze River: *Acta Geologica Sinica*, v. 98, no. 1, p. 250-264.
- Sun X L, Li C A, Kuiper K F, Wang J T, Tian Y T, Vermeesch 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. *Basin Res*, 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. *Glob Planet Change*, 143: 88-99
- Sun, X., Kuiper, K. F., Tian, Y., et al., 2020. Impact of hydraulic sorting and weathering on mica provenance studies: An example from the Yangtze River. *Chemical Geology*, 532: 119359
- Sun X L, Tian Y T, Kuiper K F, Li C A, 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. *Geophys Res Lett*, 48(5): 12
- Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, Somerville I D, Yu S, Dai L M, Xu L Q, Cao X Z, Wang P C. 2015. Continental margin basins in East Asia: tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart basins. *Geol J*, 50(2): 139-156
- 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. *Geophys Res Lett*, 42(1): 29-35
- Tian Z H, Suo Y H, Ding X S, Han X, Song S S, Fu X J, Li S Z. 2025. Cenozoic surface Earth system evolution and dynamic palaeogeomorphic reconstruction from the Tibet Plateau to the Western Pacific linked by the Yangtze River. *J Geol Soc*, 182(3): 18
- 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. *Geomorphology*, 261: 177-192

- Wang E, Kirby E, Furlong K P, van Soest M, Xu G, Shi X, Kamp P J J, Hodges K V. 2012. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic. *Nat Geosci*, 5(9): 640-645
- Wang J T, Li C A, Yong Y, Lei S. 2010. Detrital Zircon Geochronology and Provenance of Core Sediments in Zhoulao Town, Jiangnan Plain, China. *J Earth Sci*, 21(3): 257-271
- Wang P, Zheng H, Chen L, Chen J, Xu Y, Wei X, Yao X. 2014. Exhumation of the Huangling anticline in the Three Gorges region: Cenozoic sedimentary record from the western Jiangnan Basin, China. *Basin Res*, 26(4): 505-522
- Wang P, Zheng H B, Liu S F, Hoke G. 2018a. Late Cretaceous drainage reorganization of the Middle Yangtze River. *Lithosphere*, 10(3): 392-405
- Wang P, Zheng H B, Wang Y D, Wei X C, Tang L Y, Jourdan F, Chen J, Huang X T. 2022. Sedimentology, geochronology, and provenance of the late Cenozoic "Yangtze Gravel": Implications for Lower Yangtze River reorganization and tectonic evolution in southeast China. *Geol Soc Am Bull*, 134(1-2): 463-486
- Wang W, Bidgoli T, Yang X H, Ye J R. 2018b. 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. *Geochem Geophys Geosyst*, 19(10): 3673-3688
- Wang Z Q, Chen Z Y, Li M T, Chen J, Zhao Y W. 2009. Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam. *Geomorphology*, 113(3-4): 217-229
- 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 A. 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. *Quat Int*, 550: 39-54
- Wissink G K, Hoke G D. 2016. Eastern margin of Tibet supplies most sediment to the Yangtze River. *Lithosphere*, 8(6): 601-614
- Wu L L, Mei L F, Liu Y S, Paton D A, Luo J, Yu L, Wang D L, Min C Z, Li M H, Guo L B, Wen H. 2018. The stratigraphic and structural record of the Cretaceous Jiangnan Basin, central China: Implications for initial rifting processes and geodynamics. *Cretac Res*, 90: 21-39
- Xiang F, Zhu L D, Wang C S, Zhao X X, Chen H D, Yang W G. 2007. Quaternary sediment in the Yichang area: Implications for the formation of the Three Gorges of the Yangtze River. *Geomorphology*, 85(3-4): 249-258
- Xiong J G, Zhang P Z, Deng C L, Picotti V, Liang H, Ren Z K, Wang W T, Kang H, Liu Q R, Zhao X D, Zhang X L, Zhang Y H, Li Y L, Zhang H P, Zhao X T. 2024. Neogene-Quaternary Channel Evolution and Provenance Shift of the Middle Yellow River. *J Geophys Res-Earth Surf*, 129(10): 33
- Xu J, Stockli D F, Snedden J W. 2017. Enhanced provenance interpretation using combined U-Pb and (U-Th)/He double dating of detrital zircon grains from lower Miocene strata, proximal Gulf of Mexico Basin, North. *Earth Planet Sci Lett*, 475: 44-57
- 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. *Precambrian Res*, 158(1-2): 51-78
- Yang C Q, Jiao R H, Zattin M, Shen C B, Wang Y, Feng W, Zou Y Y, Ge X. 2023a. Late Oligocene-Early Miocene incision of the Three Gorges and the initial establishment of an east-flowing Yangtze River. *Geomorphology*, 441: 9

- 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. *Terr 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. *Int Geol Rev*, 61(16): 1980-1999
- Yang J, Nie J S, Zhang H B, Rasmeni S K, Ncube L, van Niekerk H J, Zhao B J, Hu X F. 2023b. Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the provenance of the modern Zambezi River sand sediments, southern Africa. *Basin Res*, 35(3): 1053-1070
- Yang R, Li R Y, Su C, He J Q, Xu C C, Shi X H, Chen H L. 2024. Tracing drainage capture between the two large tributaries of the Yangtze River in the southeastern Tibetan plateau: Insights from detrital apatite fission-track thermochronology. *Quat Sci Adv*, 16: 8
- Yang S Y, Li C X, Yokoyama K. 2006. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River. *Earth Planet Sci Lett*, 245(3-4): 762-776
- 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. *Chem Geol*, 296: 26-38
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211-280
- Yue W, Jin B F, Zhao B C. 2018. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of the Yangtze Delta. *Sediment Geol*, 364: 42-52
- Yue W, Liu J T, Zhang D, Wang Z H, Zhao B C, Chen Z Y, Chen J. 2016. Magnetite with anomalously high Cr₂O₃ as a fingerprint to trace upper Yangtze sediments to the sea. *Geomorphology*, 268: 14-20
- Yue W, Yang S Y, Yue X Y, Zhao B C, Huang X T, Zhang L M, Li Y L, Chen J, Chen Z Y. 2024. Fingerprint of Plio-Quaternary - Quaternary detrital zircon geochronology: Implications for sediment provenances and geomorphological evolution of the Yangtze Delta. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 655: 12
- Yue W, Yang S Y, Zhao B C, Chen Z Y, Yu J J, Liu X B, Huang X T, Jin B F, Chen J. 2019. Changes in environment and provenance within the Changjiang (Yangtze River) Delta during Pliocene to Pleistocene transition. *Mar Geol*, 416: 12
- Zhang G H, Li S Z, Suo Y H, Zhang J P. 2016a. Cenozoic positive inversion tectonics and its migration in the East China Sea Shelf Basin. *Geol J*, 51: 176-187
- Zhang J Y, Krijgsman W, Lu Y C, Liu J S, Li X Q, Du X B, Wei W, Lin H. 2021a. Detrital zircon ages reveal Yangtze provenance since the early Oligocene in the East China Sea Shelf Basin. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 577: 10
- 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. *Mar Pet Geol*, 98: 733-745
- 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. *Chin Sci Bull*, 53(4): 584-590

- Zhang Y Z, Replumaz A, Leloup P H, Wang G C, Bernet M, van der Beek P, Paquette J L, Chevalier M L. 2017b. Cooling history of the Gongga batholith: Implications for the Xianshuihe Fault and Miocene kinematics of SE Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 465: 1-15
- Zhang Z J, Daly J S, Li C A, Tyrrell S, Badenszki E, Sun X L, Tian Y T, Yan Y. 2021b. Southeastern Tibetan Plateau serves as the dominant sand contributor to the Yangtze River: Evidence from Pb isotopic compositions of detrital K-feldspar. *Terr Nova*, 33(2): 195-207
- 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. 2022a. Sedimentary provenance perspectives on the evolution of the major rivers draining the eastern Tibetan Plateau. *Earth-Sci Rev*, 232: 43
- Zhang Z J, Daly J S, Yan Y, Badenszki E, Sun X L, Tian Y T. 2022b. Cenozoic reorganization of fluvial systems in eastern China: Sedimentary provenance of detrital K-feldspar in Taiwan. *Chem Geol*, 592: 11
- Zhang Z J, Daly S, Tian Y T, Wang Y J, Badenszki E, Sun X L, Liu Y M. 2023. Sedimentary recycling in Jianchuan Basin, SE Tibetan Plateau: A solution to the debate on the formation age of the First Bend (Yangtze River). *Geomorphology*, 440: 10
- Zhang Z J, Daly S J, Li C A, Tyrrell S, Sun X L, Badenszki E, Li Y W, Zhang D, Tian Y T, Yan Y. 2021c. Formation of the Three Gorges (Yangtze River) no earlier than 10 Ma. *Earth-Sci Rev*, 216: 14
- Zhang Z J, Tyrrell S, Li C A, Daly J S, Sun X L, Blowick A, Lin X. 2016b. Provenance of detrital K-feldspar in Jiangnan Basin sheds new light on the Pliocene-Pleistocene evolution of the Yangtze River. *Geol Soc Am Bull*, 128(9-10): 1339-1351
- Zhao Q, Zhu H T, Zou W, Qin L Z, Liu Q H. 2024. U-Pb detrital zircon ages from late Eocene to early Oligocene Pinghu formation of the East China Sea Shelf Basin: Inferences on synergistic effects between East Asia offshore sedimentation and major rivers supply. *Mar Pet Geol*, 162: 14
- Zheng H B, Clift P D, Wang P, Tada R J, Jia J T, He M Y, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 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. Geology*, 39(9): E244-E244

附中文参考文献

- 陈华慧, 马祖陆. 1987. 江汉平原下更新统. *地球科学*, (02): 129-135
- 戴世昭. 1997. 江汉盐湖盆地石油地质. 北京: 石油工业出版社.
- 丁林, 熊中玉, 田小龙, 等, 2025, 从造山带到青藏高原的隆升: 地质演化与气候变化的机理连通性: *科学通报*.
- 范代读, 李从先, K.Yokoyama, 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: 地球科学*, (11): 1015-1022
- 郭汝军, 魏传义, 李长安, 等. 2023. 长江演化百年谜题: 回溯与进展. *地震地质*, 45(01): 1-28
- 黄宁生, 关康年. 1993. 鄂东阳逻地区早更新世砾石层研究. *地球科学*, (05): 589-596+672
- 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等, 2009. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义. *第四纪研究*, 29(02): 299-307
- 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 2010. 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. *科学通报*, 55(Z1): 350-358
- 康春国, 李长安, 王节涛, 等. 2009. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示. *地球科学 (中国地质大学学报)*, 34(03): 419-427

- 康春国, 李长安, 张玉芬, 等. 2014. 宜昌砾石层重矿物组合特征及物源示踪分析. 地质学报, 88(02): 254-262
- 雷奕振, 关绍曾, 张清如, 等. 1987. 长江三峡生物地层(5)白垩纪-第三纪分册. 北京: 地质出版社.
- 李庭, 李长安, 康春国, 等. 2010. 宜昌砾石层的沉积环境及地貌意义. 中国地质, 37(02): 438-445
- 林旭, 陈孝康, 刘静, 等. 2025. 长江形成于何时? . 地质通报, 44(06): 949-981
- 梅惠, 李长安, 杨勇, 等. 2009. 长江中游阳逻砾石层沉积环境分析. 第四纪研究, 29(02): 370-379
- 齐国凡, 杨家驹, 徐瑞湖. 1997. 武汉地区晚第三纪三种被子植物硅化木研究. 辽宁地质, (02): 70-81
- 渠洪杰, 康艳丽, 崔建军. 2014. 扬子北缘黄陵地区晚中生代盆地演化及其构造意义. 地质科学, 49(04): 1070-1092
- 陶亚玲, 张会平, 葛玉魁, 等. 2020. 青藏高原东缘新生代隆升剥露与断裂活动的低温热年代学约束. 地球物理学报, 63(11): 4154-4167
- 汪品先. 2005. 新生代亚洲形变与海陆相互作用. 地球科学, (01): 1-18
- 王必金, 林畅松, 陈莹, 等. 2006. 江汉盆地幕式构造运动及其演化特征. 石油地球物理勘探, (02): 226-230+248+219-220
- 王鹤源, 王泽堃, 谷思莹, 等. 2024. 宜昌—武汉长江沿岸典型砾石层对比分析. 高校地质学报, 30(01): 47-55
- 王节涛, 裴来政, 张宏鑫, 等. 2021. 大别山南麓阳逻组砾石层砾石形貌学研究. 中国地质, 48(01): 139-148
- 王张华, 张丹, 李晓, 等. 2008. 长江三角洲晚新生代沉积物磁性特征和磁性矿物及其指示意义. 中国地质, (04): 670-682
- 魏传义, 刘春茹, 李长安, 等. 2020. 宜昌砾石层石英 Ti-Li 心 ESR 年龄及其对三峡贯通时限的指示. 地震地质, 42(01): 65-78
- 向芳. 2004. 长江三峡的贯通与江汉盆地西缘及邻区的沉积响应. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1-176
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(03): 379-396
- 徐论勋, 阎春德, 俞惠隆, 等. 1995. 江汉盆地地下第三系火山岩年代. 石油与天然气地质(02): 132-137
- 阎德发. 1978. 湖北荆襄地区掇刀石组的时代. 古脊椎动物与古人类, (01): 30-32+86
- 杨超群, 朱祥峰, 王亮, 等. 2024. 长江三峡的形成: 时间、证据及争议. 地球科学进展, 39(02): 124-139
- 杨达源, 闫国年. 1992. 长江三峡贯通的时代及其地质意义的研究. 北京: 科学出版社.
- 杨建, 李长安, 张玉芬, 等. 2012. 江汉平原沉积物中含钛普通辉石对长江演化的示踪. 地球科学(中国地质大学学报), 37(S1): 43-49
- 杨晓东, 赵希涛, 吴中海, 等. 2018. 南京六合地区新近纪玄武岩的 Ar-Ar 年龄结果及其地质意义. 第四纪研究 38(03), 705-710.
- 张勇, 张玉芬, 李长安, 等. 2009. 宜昌地区砾石层的磁性特征与物源分析. 第四纪研究, 29(02): 380-386
- 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, (05): 577-582
- 赵希涛, 胡道功, 吴中海, 等. 2017. 长江三角洲地区晚新生代地质与环境研究进展述评. 地质力学学报, 23(01): 1-64
- 郑洪波, 魏晓椿, 王平, 等. 2017. 长江的前世今生. 中国科学:地球科学, 47(04): 385-393