

长江形成于何时?

林旭¹, 陈孝康¹, 刘静², 吴中海³, 胡程伟¹, 吴瑞彤⁴, 董延钰^{5*}, 秦李双¹, 向润知¹, 安正阳¹, 卢航³
LIN Xu¹, CHEN Xiaokang¹, LIU Jing², WU Zhonghai³, HU Chengwei¹, WU Ruitong⁴, DONG Yanyu^{5*}, QIN Lishuang¹, XIANG Runzhi¹, AN Zhengyang¹, LU Hang³

1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002;
2. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
4. 三峡地区地质灾害与生态环境协同创新中心, 湖北宜昌 443002;
5. 山东省地质科学研究所, 济南 250013

1. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
2. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Institute of Geological Mechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China;
4. Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in the Three Gorges Region, Yichang 443002, China;
5. Shandong Academy of Geological Sciences, Jinan 250013, China

摘要: 长江是亚洲最长的河流, 是直接连通青藏高原和太平洋的大河, 通过研究长江的形成与演化, 可以广泛了解东亚地区的地质构造和气候变化。但是其何时形成和具体的演变过程一直未有定论。鉴于此, 我们对长江流域目前已经发表的有关长江发育和演化的沉积学、地球化学等数据结果进行系统的搜集、整理和对比, 从构造演化和气候变化的大背景入手, 讨论长江的演化过程, 结果表明: (1) 晚中生代, 四川盆地发育南流的大河, 江汉盆地和望江盆地在此时由于断陷作用, 成为区域汇水中心。长江流域的上游、中游和下游此时处于分段演化阶段。(2) 江汉盆地、望江盆地、南黄海盆地和东海盆地在 60-35 Ma 处于强烈断陷阶段, 继续成为局部的汇水中心, 而青藏高原东南缘在晚始新世逐渐出现的季风气候则有利于维系大型河流的流动。此时发源于青藏高原东南缘、秦岭和黄陵背斜以西的古红河开始流入南海, 称为原长江演化阶段。(3) 青藏高原在约 20 Ma 发生整体垂向隆升和侧向挤出, 导致云贵高原发生强烈的剥露过程, 从而引起原先南流的古红河彻底解体。长江三峡在中中新世经历了显著的下切过程, 导致江汉盆地、南京地区和东海盆地内堆积了来自长江上游的碎屑物质, 此时称为始长江演化阶段。(4) 金沙江、雅砻江、大渡河等河流的下游在上新世出现面积巨大的普格达古湖, 出现河湖共存的现象。长江流域广泛分布的同期砾石层, 以及长江三峡地区发育的宽谷, 表明此时长江的水动力搬运能力明显增强。华南地区类似现今的山-河-海分布模式在上新世已经出现, 此时称为长江的成熟阶段。(5) 普格达古湖在 2-1 Ma 彻底解体, 导致长江的干支流发生重组。长江上游在 0.7-0.5 Ma 发生的新一期快速下切导致金沙江、大渡河、长江三峡地区再次发育河流阶地。随着东海和黄海在中更新世均被海水覆盖, 长江上游与下游侵蚀基准面之间的地势差异显著下降, 导致长江下游以堆积过程为主, 开始逐渐出现三角洲的形态, 表明长江流域在第四纪已经进入老年阶段。在青藏高原及周边山脉的隆升过程中, 构造过程与气候变化和局部随机效应(如山体滑坡)相互作用, 决定了长江流域的河流地貌的发展。

关键词: 长江; 造山带; 沉积盆地; 物源示踪; 演化过程

Abstract: The Yangtze River, as the longest river in Asia, serves as a direct link connecting the Tibetan Plateau and the Pacific Ocean. Delving into the formation and evolution of the Yangtze River can provide invaluable insights into the geological structure and climate changes occurring in East Asia. However, there is currently no consensus regarding the

¹资助项目: 国家自然科学基金(41972212; 42030305); 湖北省楚天学者人才计划(8210403)

作者简介: 林旭(1984-), 男, 博士, 副教授, 从事青藏高原隆升和中国大河起源研究。E-mail: hanwuji-life@163.com.

*通信作者: 董延钰(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事第四纪地质学的研究。E-mail: 76000932@qq.com.

precise timing of its formation or the specific details of its evolutionary process. To address this research gap, we conducted a comprehensive review, analysis, and comparison of existing sedimentological and geochemical data on the development and evolution of the Yangtze River Basin. Our study begins by examining the context of tectonic evolution and climate change, and subsequently delves into a discussion on the evolutionary process of the Yangtze River. The results of our analysis reveal the following: (1) During the Late Mesozoic, a large river system formed in the Sichuan Basin that flowed southward. Additionally, tectonic subsidence during this period turned the Jiangnan Basin and Wangjiang Basin into regional drainage centers. As a result, the upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River Basin experienced segmented evolution. (2) Between 60 and 35 Ma, significant subsidence occurred in the Jiangnan Basin, Wangjiang Basin, South Yellow Sea Basin, and East China Sea Basin, which continued to function as local drainage centers. During this time, the Jiangnan Basin developed extensive salt lake deposits, suggesting the absence of major inflowing or outflowing rivers. However, the Paleo-Red River flowed into the South China Sea, marking the early phase of the evolution of the proto-Yangtze River during this time. (3) Approximately 20 Ma, the Tibetan Plateau experienced vertical uplift and lateral extrusion, triggering extensive exhumation processes in the Yungui Plateau. As a result, the Paleo-Red River, which previously flowed southward, disintegrated entirely. In the Middle Miocene, the Three Gorges of the Yangtze River underwent significant incision, leading to the deposition of sedimentary material from the upstream Yangtze River in the Jiangnan Basin, Nanjing area, and East China Sea Basin. Consequently, the Yangtze River, with a length exceeding 6000 km, emerged during the Miocene epoch, marking the onset of the evolutionary stage of the Yangtze River. (4) During the Pliocene, the downstream areas of rivers such as the Jinsha River, Yalong River, and Dadu River were affected by heavy rainfall to appear the large-scale landslides, leading to the formation of extensive Paleo-Xigeda Lake. Additionally, the formation of thick gravel layers was observed in various regions, including the Jiachuan Basin, Dadu River and Minjiang River basins, Wangjiang Basin, and the Nanjing area. The wide canyon formed in the Three Gorges region of the Yangtze River. These geological changes suggest a substantial enhancement of the hydraulic transport capacity of the Yangtze River compared to the Middle Miocene. During the Pliocene, the South China region exhibited a similar mountain-river-sea distribution pattern as is observed today, representing a developmental stage of the Yangtze River. (5) Between 2 and 1 Ma, Paleo-Xigeda Lake completely disintegrated, resulting in significant reorganization of the main and tributary streams in the Yangtze River. This process brought about notable changes in sediment sources in both the Jiangnan Basin and the Yangtze River Delta. Subsequently, a new phase of rapid incision took place in the upstream Yangtze River around 0.7-0.5 Ma, leading to the reestablishment of river terraces in the Jinsha River, Dadu River, and the Three Gorges region. During the middle Pleistocene, as the East China Sea and Yellow Sea became submerged by seawater, the continued incision in the upstream Yangtze River combined with the influence of the seawater in the lower reaches resulted in a significant reduction in the topographic difference between the upstream and downstream erosion levels of the river. Consequently, there was a shift toward deposition processes in the lower reaches, leading to the gradual development of a deltaic landform. These changes indicate the entrance of the Yangtze River Basin into a mature stage during the Quaternary. The development of fluvial landforms in the Yangtze River Basin was influenced by the interplay of tectonic processes, climate change, and local stochastic effects such as landslides, particularly during the uplift processes of the Tibetan Plateau and the surrounding mountains.

Key words: Yangtze River; Orogenic belt; Sedimentary basin; Source tracing; Evolution process

河流的大小是相对的，没有固定的标准来定义什么样的河流可以被称为大河，但流域面积和河流长度是两个重要因素（Miall, 2006；林旭等，2023a）。地球上一些被广泛认可为大河的例子包括尼罗河（ $3.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，6650 km）、亚马孙河（ $7.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，6400 km）、密西西比河（ $3.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，3767 km）、长江（ $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，6300 km）、黄河（ $0.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，5464 km）等。大河演化研究具有重要的地质意义（Potter, 1978）。首先，大河在流经不同地质单元和构造

带时，受到地质构造活动的影响，形成不同特征的河道和特定的流向(Twidale, 2004)。这些特征可以提供有关地表抬升、断裂活动和盆地拗陷等地质事件的重要线索(Ashworth and Lewin, 2012)。其次，河流是地球上水循环系统的重要组成部分，其水量和流速受到降水和蒸发的影响，因此大河的演化可以反映气候变化(Nijssen et al., 2001)。通过研究河流沉积物，地貌学家可以重建过去的气候状况和环境变迁(Blum and Törnqvist, 2000)。此外，大河演化研究对于资源开发和环境保护也具有重要意义(Best, 2019)。

青藏高原是世界上最高的高原，平均海拔在4500 m以上。由于其高海拔和冰雪覆盖，孕育了一系列的大河，如长江、黄河、印度河和湄公河等(图1)，因此而被称为亚洲水塔(Liu-Zeng et al., 2008; Yang et al., 2012a; Yao et al., 2022)。青藏高原的隆升和剥蚀过程导致大量的碎屑物质从高原上被河流侵蚀和搬运至周围的边缘海，构成了地球上规模庞大的源-汇系统(Clift et al., 2004; 图1)。因此，青藏高原的隆升剥蚀对亚洲边缘海沉积起到重要的驱动作用。通过分析边缘海沉积物中的颗粒形态、矿物组成和地层序列，研究人员可以获得发源于青藏高原的大河的形成时间(Lei et al., 2019; Wang et al., 2019; Clift et al., 2020; Najman et al., 2023)。这其中长江的形成与演化研究尤为重要，这主要体现在：首先，长江是亚洲最长的河流，直接连通青藏高原和太平洋，研究长江的形成与演化可以广泛了解东亚的地质构造和气候变化(明庆忠等, 2013; Zhang et al., 2019a; Lin et al., 2024a)。其次，长江流域是中国人口最多、经济最发达的地区之一。长江的形成和演化直接关系到长江流域的水资源分布、水质状况、土壤侵蚀和岩溶发育等环境问题(Yang et al., 2019; Chen et al., 2022)。研究长江的形成与演化还可以为保护和恢复长江流域的生态系统提供借鉴(Best, 2019)。

但对于长江的形成时代，目前研究者尚没有达成一致的共识(林旭等, 2023b; Cui et al., 2024)。长江以宜昌和湖口为分界点可以划分为上游、中游和下游(图1)。对于长江的形成时代的研究主要集中在上游的第一弯，中游的长江三峡和下游的长江三角洲。研究者基于对长江流域古老地层和古地貌的研究，认为长江曾经是一个古老的河流，形成于白垩纪或古新世(Lee, 1924; Lee, 1935; Barbour, 1936; 沈玉昌, 1965; Wang et al., 2018a)。然而，近年来一些学者基于地质地貌、地球化学、数值模拟研究提出了新的观点，认为长江的形成时间相对较晚，发生在渐新世(Cao et al., 2019; Zhang et al., 2021a; Tian et al., 2024)、中新世(Zheng et al., 2013a; Yang et al., 2017; Fu et al., 2021)、上新世(Zhang et al., 2019a; Sun et al., 2021)或更新世(Zhang et al., 2008; Kang et al., 2021; Huang et al., 2023; 姜月华等, 2023)。可见，随着时间的推移和新方法的使用，有关长江的形成时代不仅没有得到很好的解决，同时还导致分歧越来越明显。另外，这些研究通常只关注于长江的某一段，因而上述有关长江的形成时代是分段的长江形成时代，还是整个长江流域的形成时代，至今还没有系统的研究。

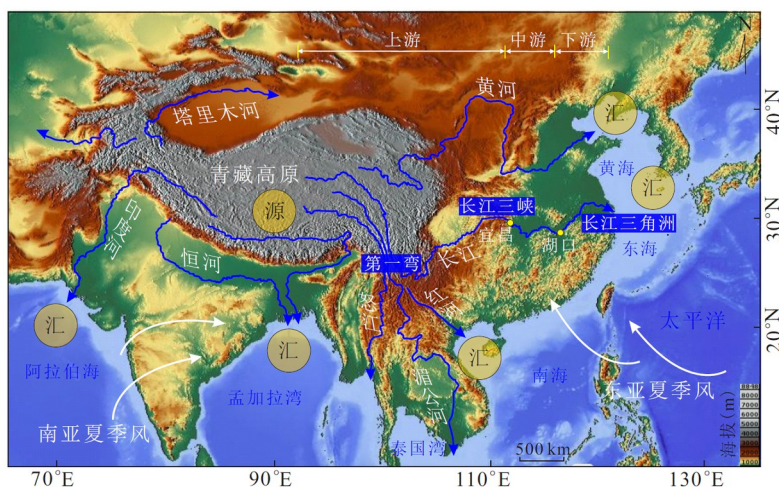


图1 发源于青藏高原的主要大河。青藏高原隆升剥蚀和亚洲边缘海的沉积通过大型河流的联系，构建了规模宏

大的源-汇系统

Fig. 1 The Tibetan Plateau is the birthplace of major rivers in Asia. The uplift and denudation of the Tibetan Plateau and the sedimentation of the Asian marginal sea have formed a large-scale source-sink system through the connection of these large rivers

自 2000 年以来，有关长江形成时代的研究积累了丰富的数据，从整个流域的角度出发，对这些数据仔细整理和分析，可以提供长江流域全面的水系演化信息。因而，基于长江形成时代研究的意义和现存的争议，我们系统搜集长江形成时代已报道的研究结果，经过综合分析和讨论，建立长江的演化过程和形成时代的完整框架，从而深入理解青藏高原隆升、东亚环境变化、亚洲边缘海沉积之前的耦合作用。

1 研究背景

1.1 长江形成的构造和气候背景

构造活动对大型河流的形成和演化过程有着重要的控制作用 (Potter, 1978; Tandon and Sinha, 2022)。板块间的会聚导致河流的流向出现改变，引起水系重组(Brookfield, 1998)。长江流域位于特提斯和太平洋构造域(Zheng et al., 2013b; 林旭等, 2023b)。特提斯构造域形成于古生代，构造演化过程延伸至新生代早期(Li et al., 2018a)，其中生代和新生代的闭合过程奠定了长江上游的地貌形态(Wang et al., 2022a)。长江中下游流经华南板块(图 2a)，自中生代以来华南板块受西太平洋板块俯冲的影响出现挤压隆升和拉张断陷(Li et al., 2014)。这些构造过程深刻影响了华南板块的山脉走向、盆地分布和河流流向(Su et al., 2023; Lin et al., 2024a)。

气候变化也对大河的发育有着重要的控制作用(Nijssen et al., 2001; Blum, 2022)。气候控制下的降水是大河形成和发育的重要因素。充足的降水导致水流的增加和集中，大量径流与地表形成的河道相互作用，将水流聚集起来形成水系网络，从而促进大河的形成。大约 25 Ma 前，随着青藏高原的整体隆起，新特提斯洋西退，全球气候逐渐变冷，增强的海陆热力性差异等因素对亚洲季风的形成起到了重要作用(Wu et al., 2022; Lu et al., 2023)。长江流域位于南亚热带季风和东亚亚热带季风的活动范围内(图 2b)，季风期间出现的强降水搬运了流域内大量的沉积物，因而对长江河道地貌演化和沉积过程起着重要作用(Clift et al., 2004)。

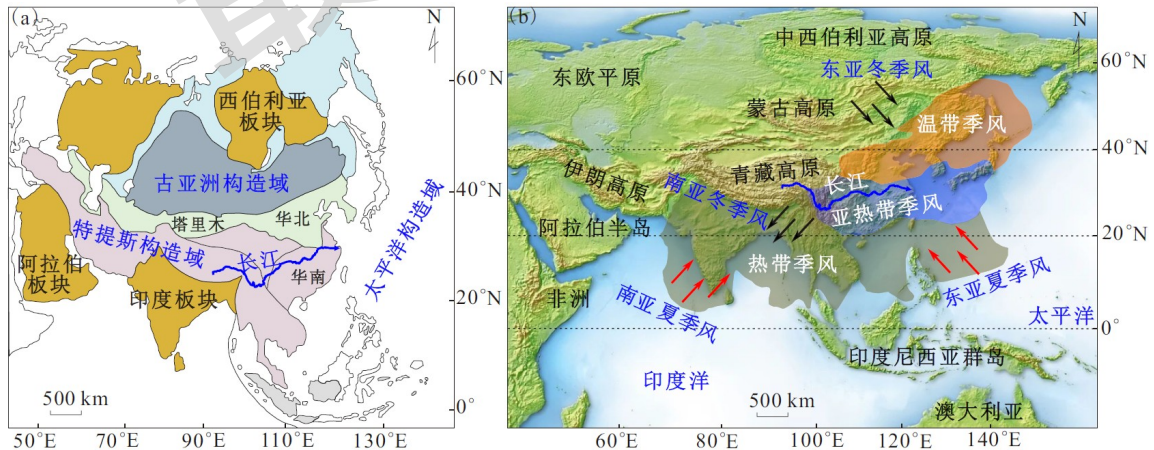


图 2 控制长江发育的因素

Fig. 2 Factors controlling the development of Yangtze River

a. 长江在全球构造背景下的位置 (据 Zheng et al., 2013b 修改); b. 长江在全球气候背景下的位置 (据林旭等, 2023b 修改)

1.2 造山带和沉积盆地

地壳中山脉与盆地之间相互作用和共同演化的过程，被称为盆山耦合（Dong et al., 2022）。盆山耦合的过程涉及到山脉抬升、盆地沉积物堆积、河流形成等现象（林旭等, 2023a）。这种相互作用和共同演化过程对地壳构造、地貌形成和沉积物分布等都有重要的影响。沿着长江流域分布的造山带主要有横断山、川东-湘鄂西山地、秦岭-大别山、黄陵背斜和江南造山带（图3）。剑川盆地、莺歌海盆地、楚雄盆地、四川盆地是长江上游的主要盆地。长江中游的盆地包括江汉盆地。望江盆地、南黄海盆地和东海盆地是长江下游的主要盆地。

1.2.1 横断山

横断山是青藏高原东南缘一系列近南北走向平行山脉的总称（图3），平均海拔4000 m以上，是唯一兼有太平洋和印度洋水系的地区。横断山位于印度板块与亚洲大陆碰撞挤压带东南缘，地质构造总体表现为紧束式挤压构造（Morley, 2002; Clark et al., 2005）。横断山在120-80 Ma的剥露过程响应了拉萨板块与亚洲大陆南缘的会聚过程（Liu-Zeng et al., 2018; Tao et al., 2022）。60-40 Ma，印度与亚洲大陆碰撞引起区域内地壳挤压变形、地幔上涌、碱性岩浆岩侵入与火山喷发和走滑拉分盆地形成（Deng et al., 2014）；37-20 Ma，挤压性右旋走滑的鲜水河和红河断裂带开始活动，伴有深熔花岗岩（脉）侵入，川滇地块内部的高原面缓慢抬升（Cao et al., 2022; Lei et al., 2022）；17-7 Ma，挤压性左旋走滑的鲜水河断裂构成了横断山东缘地貌边界，变质核杂岩剥露和青藏地块向南逃逸导致长江支流下切侵蚀（Wang et al., 2014a; Wang et al., 2017）；5-3 Ma，印度板块持续向北俯冲，使挤压剪切带重新活化，横断山的断裂带发生大规模重组过程，形成现今区域内地块的基本构造格架（Wang and Burchfiel, 2000; Kirby et al., 2002; Zhang et al., 2017a）。

1.2.2 川东-湘鄂西山地

川东-湘鄂西山地位于四川盆地和江汉盆地之间（图3）。川东山地主要由平行岭谷组成，构成其主体部分的30多条山脉皆呈北东走向，总体呈向北西向突出的弧形构造带（Liu et al., 2021）。川东平行岭谷地区背斜紧闭向斜宽缓，属于典型的侏罗山阻挡式褶皱（Wang et al., 2013）。湘鄂西山地形态上表现为北北东-北东向，宽约220 km，复向斜和复背斜相间发育，呈现背斜宽、向斜窄的特征，属于典型的侏罗山式滑脱褶皱（Yan et al., 2003）。湘鄂西山地向川东华蓥山构造变形的发展时代从165 Ma到95 Ma，具有递进变新的趋势（Li et al., 2012），到中新世（20-10 Ma）整个川东-湘鄂西山地再次快速隆升并最终定型（Tian et al., 2018a; Feng et al., 2023）。川东-湘鄂西山地中生代的隆升主要受控于太平洋板块的俯冲挤压效应，新生代晚期的快速隆升主要是青藏高原向东构造挤压作用所致（Li et al., 2023）。

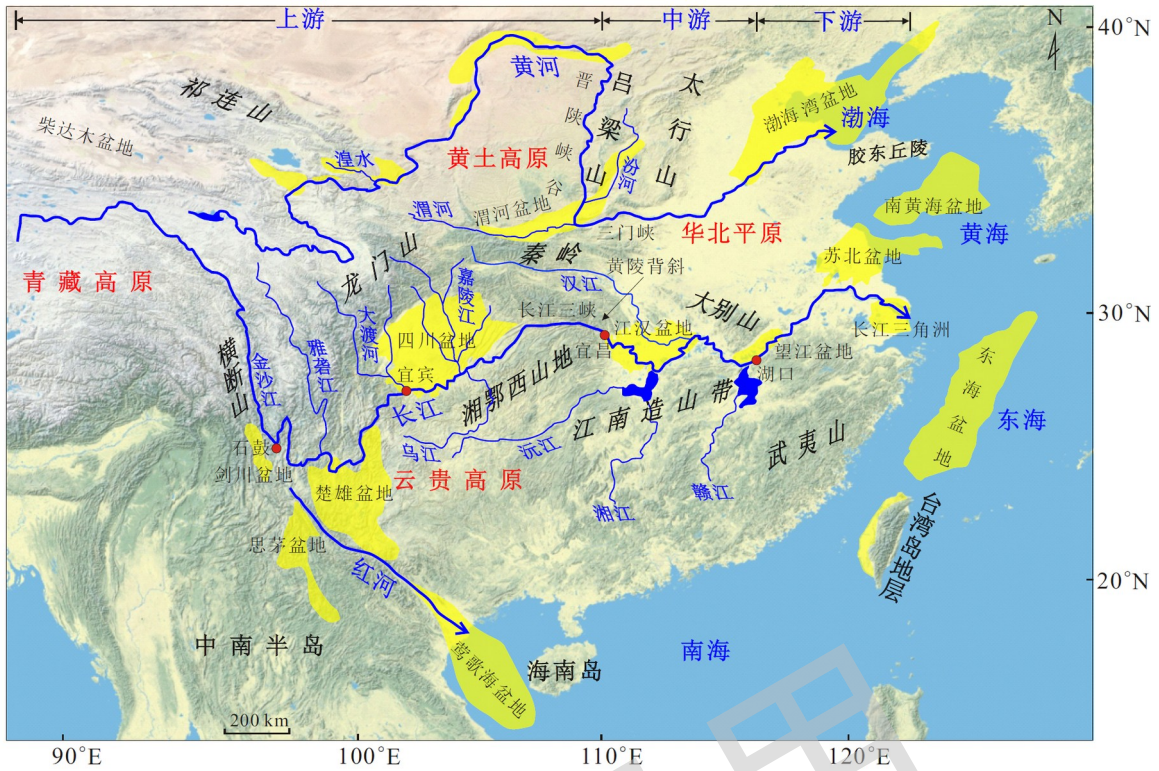


图3 长江流域的主要造山带和盆地（宜昌和湖口成为长江上游、中游和下游的分界点）

Fig. 3 Main orogenic belts and basins in the Yangtze River Basin

1. 2. 3 秦岭-大别山

秦岭山脉东西长约 800 km，位于华北和华南板块之间（图 3）。秦岭造山带的发展涉及到大洋板块俯冲、弧后盆地扩张、不同陆块/地体分离与拼合以及造山期后强烈陆内变形（Meng and Zhang, 2000; Dong and Santosh, 2016）。在晚白垩世到古近纪，秦岭造山带经历了缓慢隆升（Lin et al., 2023a），造山带早期的构造地貌被大幅度剥蚀和夷平。随后秦岭整体在 32-22 Ma、12-8 Ma 和 4 Ma 又发生多期次隆，并最终在中中新世形成现今长江和黄河两大水系的分水岭（Enkelmann et al., 2006; Lin et al., 2023a）。大别山西段呈北西-南东走向，东段呈北东-南西走向，是长江与淮河的分水岭（Deng et al., 2023）。大别山是华南板块与华北板块在中晚三叠纪碰撞的产物。磷灰石和锆石低温热年代学结果限定了大别山在 140-110、70 和 45-34 Ma 发生剥露事件，这主要由西太平洋板块向亚洲大陆北西向俯冲所致（Grimmer et al., 2002; Hu et al., 2006）。大别山在 20-13 Ma 的快速剥露受印度-亚洲大陆碰撞的远程效应的影响（Xu et al., 2005; Ding et al., 2021）。

1. 2. 4 黄陵背斜

黄陵背斜位于江汉盆地西缘（图 3），南北长约 75 km，东西宽近 40 km，在构造上表现为轴向近南北的不对称短轴背斜构造，核心部分由前震旦系结晶杂岩组成，西翼陡东翼缓，依次由震旦系到三叠系地层组成，层间大都呈连续的整合或假整合接触（Su et al., 2023）。低温热年代学结果表明，晚侏罗世至晚白垩世早期（157-92 Ma），受秦岭-大别造山带和雪峰陆内造山带双向挤压作用的影响，北北东向的黄陵背斜形成并作为独立构造单元发生强烈剥露作用（Su et al., 2023）；新生代的构造事件主要表现为始新世（45-40 Ma；Richardson et al., 2010）和早中新世（23-18 Ma）的快速剥露（Jiao et al., 2021; Yang et al., 2023）。

1. 2. 5 江南造山带

江南造山带位于华南板块内部，长约 1500 km、宽 200 km。江南造山带是新元古代末期（860-800 Ma）扬子板块与华夏板块俯冲、碰撞期形成的狭长造山带，在中-新生代经历强烈的

陆内构造变形 (Li et al., 2014; Lin et al., 2024a)。锆石和磷灰石裂变径迹 (FT) 和(U-Th)/He 年龄揭示其在 80-50、47-30 和 18-10 Ma 出现三期较强烈的剥露过程 (Shi et al., 2013; Shen et al., 2020)。在 60-40 Ma 发生的快速剥露过程和江汉盆地周缘发生的构造变形同期, 导致上扬子板块内各个盆地之间相互分隔 (林旭和刘静, 2019)。随后, 在 19-15 Ma 再次发生快速剥露, 这主要和印度板块与亚洲大陆碰撞的远程效应向东传递有关 (Tang et al., 2014; Wang et al., 2018b)。

1.2.6 剑川盆地

剑川盆地位于横断山东南缘, 处于长江第一湾附近 (图 1), 盆地南北长约 100 km, 东西宽约 40 km (图 4a)。古新统勐野井组 (E_{1m}) 为咸水湖相沉积 (图 4b), 主要由钙质粉砂岩、泥岩、白云岩以及含石膏中-薄层粉砂岩、泥岩组成 (沈青强等, 2017)。始新统宝相寺组 (E_{2b}) 为河流相堆积, 由砾岩和砂岩组成, 砾石成分主要为灰岩 (Zhang et al., 2023a)。始新统金丝厂组 (E_{2js}) 出现细砾岩、砂岩、钙质粉砂岩, 具平行层理, 沉积环境为河流相 (Wu et al., 2018)。上始新统九子岩组 (E_{2jz}) 的泥灰岩、泥岩与灰岩出现多个沉积旋回, 属于湖相沉积 (Zheng et al., 2021)。上始新统双河组 (E_{2s}) 由中厚层砂岩、粉砂岩以及薄层泥岩组成, 中部夹有砾岩层, 属于三角洲相 (Feng et al., 2021)。上始新统剑川组 (E_{2jc}) 主要为厚层含泥灰岩、凝灰岩、角砾岩和极薄层粉砂质泥岩 (沈青强等, 2017)。上新统三营组 (N_{2sh}) 主要为砾岩、砂岩夹泥岩、炭质泥岩及煤线, 属于河流和湖相堆积 (Wei et al., 2016; 沈青强等, 2017; He et al., 2021)。

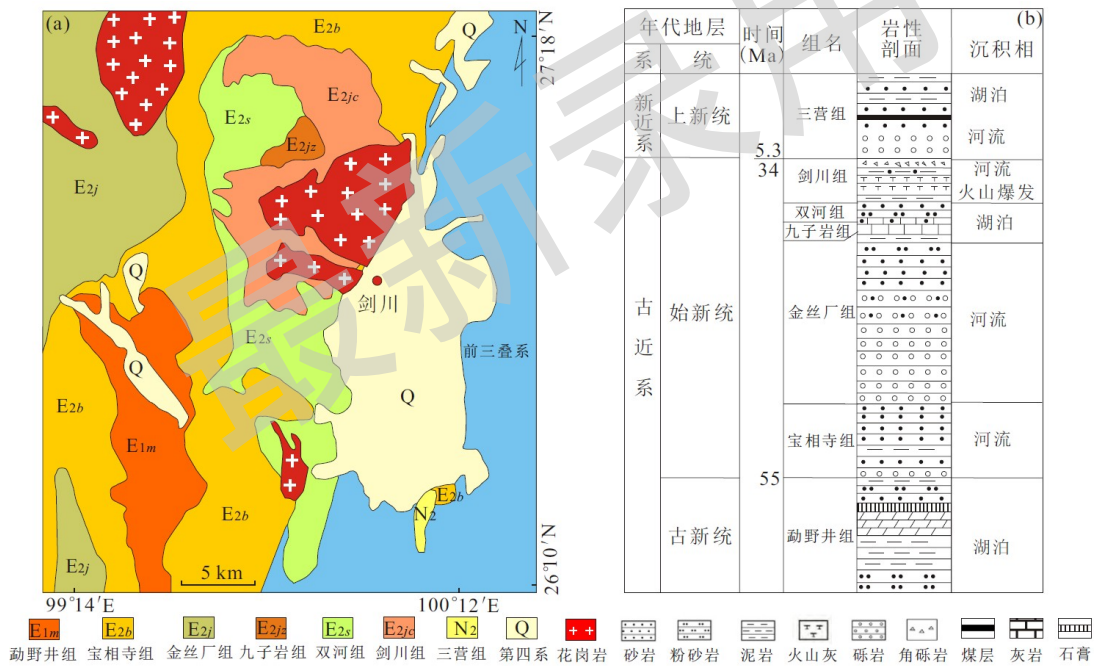


图 4 剑川盆地

Fig. 4 Jianchuan Basin

a. 剑川盆地地质图 (据沈青强等, 2017 修改); a. 剑川盆地新生代地层柱状图 (据沈青强等, 2017 修改)

1.2.7 莺歌海盆地

莺歌海盆地是南海北部大陆架发育的新生代走滑伸展型盆地, 由东南部的莺歌海中央坳陷和西北部的河内坳陷组成 (Wang et al., 2019; 图 5a)。莺歌海盆地新生代最大沉积厚度超过 17 km (姚翔, 2019; 图 5b)。岭头组 (E_2l) 地层目前尚未钻透, 现有的钻井资料显示其沉积环境主要为湖泊环境, 砾砂岩、砾岩与泥质砂岩呈不等厚互层 (姚翔, 2019)。崖城组 (E_3y) 下

部沉积处于海陆过渡环境，中、上部沉积已完全变为滨浅海相，出现砂岩、泥岩和页岩。陵水组 (E_3l) 属于盆地断陷晚期的产物，该组下部为海陆过渡相沉积，中上部以海相沉积为主，局部出现半深海相，由泥岩、页岩和砂岩互层构成。三亚组 (N_{1s}) 属于浅海-半深海沉积体系，主要由砂岩、粉砂质泥岩组成。梅山组 (N_{1m}) 为浅海-半深海沉积体系，出现砂岩和泥岩。黄流组 (N_{1h}) 主要为滨海沉积体系，出现泥岩和砂岩。莺歌海组 (N_{2y}) 由厚层块状泥岩组成，夹薄层粉砂岩、泥质砂岩、细砂岩，为浅海-半深海沉积体系。乐东组 (Q_1l) 主要由黏土为主，夹薄层粉砂、细砂，富含生物碎屑 (姚翔, 2019)。

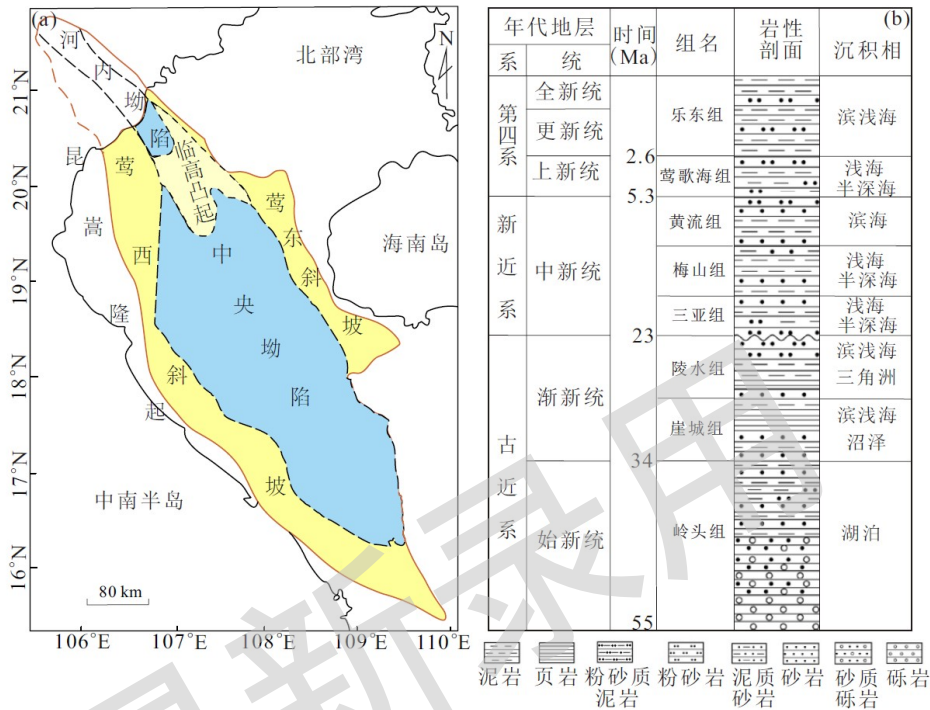


图 5 莺歌海盆地

Fig. 5 Yinggehai Basin

a. 莺歌海盆地构造单元划分图 (据姚翔, 2019 修改); b. 莺歌海盆地新生代沉积地层柱状图 (据姚翔, 2019 修改)

1.2.8 楚雄盆地

楚雄盆地位于云贵高原西部 (图 3)，盆地沉积盖层主要为中生界上三叠统至新生界始新统 (杨庆道, 2014; 图 6a)。高峰寺组 (K_{1g}) 岩性为石英砂岩夹泥岩，底部有底砾岩，以河流相为主 (吕财, 2014; 图 6b)。普昌河组 (K_{1p}) 岩性以石英砂岩、钙质泥岩及泥灰岩为主，属于湖相。随着晚白垩世发生海侵，沉积范围向盆地东部扩展。马头山组 (K_{2m}) 出现砂岩、粉砂岩与泥岩组成的韵律层。江底河组 (K_{2j}) 由泥岩、粉砂质泥岩组成 (杨庆道, 2014; 图 6b)。东部坳陷白垩统地层发育少量薄层石膏质泥岩，总体以河流相为主 (吕财, 2014)。古近系地层由古新统元永井组 (E_{1y}) 和始新统赵家店组 (E_{2z}) 组成 (Zhao et al., 2021a)。元永井组由厚层钙质泥岩夹薄层钙质粉砂岩构成，以湖相为主 (吕财, 2014)。始新统赵家店组由厚层岩屑砂岩与中-厚层细粒石英砂岩互层组成，以河流相为主。盆地内缺失中新统，上新统砂砾岩沿部分大断裂零星分布 (杨庆道, 2014)。

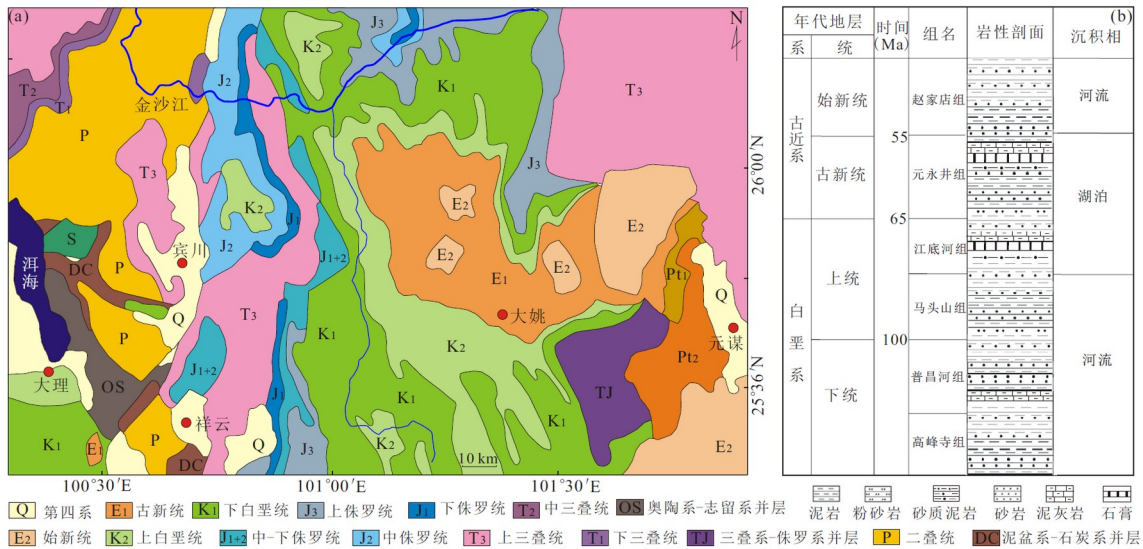


图 6 楚雄盆地

Fig. 6 Chuxiong Basin

a. 楚雄盆地地质图（据杨庆道, 2014 修改）； b. 楚雄盆地沉积地层柱状图（据吕财, 2014 修改）

1.2.9 四川盆地

四川盆地位于青藏高原和扬子板块之间（图 3）。白垩系分布于川西、川北及川南的山前拗陷区（邓宾, 2013；图 7a）。下白垩统天马山组 (K_{1t}) 为泥岩夹厚层至块状砾岩及砂岩，普遍存在底砾岩，以三角洲相、河流相、湖相和冲积扇相为主（杨国臣, 2010；图 7b）。上白垩统包括夹关组 (K_{2j}) 和灌口组 (K_{2g})，夹关组为块状砾岩、砂岩夹泥岩，以河流相为主，局部出现沙漠相；灌口组为泥质粉砂岩和薄层泥灰岩，含薄层石膏和钙芒硝，出现浅湖相和三角洲相。四川盆地的古近系-新近系主要分布在川西拗陷，又可分为名山组 (E_{1-2m})、芦山组 (E_{2-3l}) 和凉水井组 (N_{2l})。名山组以细粒沉积为主，夹石膏、钙芒硝层，出现滨湖、浅湖和湖沼相（杨国臣, 2010）；芦山组分布更加局限，以泥岩、泥质粉砂岩为主，夹粉砂岩、薄层泥灰岩，存在滨湖相和浅湖相。凉水井组（大邑砾岩）以砾岩与黏土组成，属于河流相沉积（杨国臣, 2010）。第四系广泛分布于成都平原，以河-湖相砂砾、粉砂、黏土等为主。

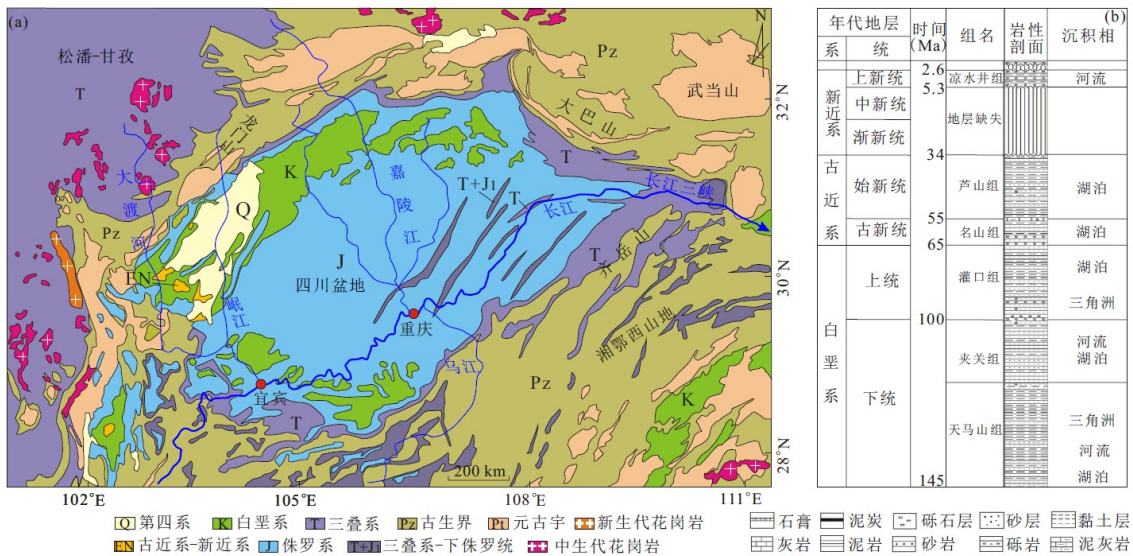


图 7 四川盆地

Fig. 7 Sichuan Basin

a. 四川盆地地质图（据邓宾, 2013 修改）； b. 四川盆地沉积地层柱状图（据杨国臣, 2010 修改）

1.2.10 江汉盆地

江汉盆地是夹持于秦岭-大别造山带与江南造山带之间的断陷盆地（图 3）。盆地边缘白垩系地层包括石门组（ K_{1s} ）、五龙组（ K_{1w} ）、罗镜滩组（ K_{2l} ）、红花套组（ K_{2h} ）及跑马岗组（ K_{2p} ；林旭等, 2023b）。盆地内部缺失下白垩统，上白垩统为渔洋组（ K_{2y} ；戴世昭, 1997）。宜昌地区石门组底部以厚层-块状砾岩角度不整合在奥陶系或二叠系灰岩之上，属于山麓近源堆积（Lin et al., 2024a）。五龙组岩性以细、中粒砂岩为主，夹粉砂岩和粉砂质泥岩及少量砾岩和黑色泥岩透镜体，为山麓洪积-河流相沉积（Shen et al., 2012）。罗镜滩组主要由厚层块状砾岩组成，夹少量砂岩透镜体，属于山麓洪积相。红花套组主要为块状细砂岩夹薄层泥岩，属于河流三角洲-滨湖沉积相。跑马岗组为中层细砂岩、粉砂岩与泥岩、砂泥岩互层，属于滨湖-浅湖沉积相。盆地内渔洋组的岩性下粗上细，变化较大，主要由一套砂岩为主的碎屑沉积组成，夹膏泥岩和薄层泥岩。

盆地边缘新生代地层包括古近系龚家冲组（ E_{1g} ）、洋溪组（ E_{2y} ）、车阳河组（ E_{2ch} ）、牌楼口组（ E_{2p} ；张洋等, 2023），新近系掇刀石组（ N_d ），第四系云池组（ Q_{1y} ）和善溪窑组（ Q_{2s} ）；在盆地内部与之对应是古近系沙市组（ E_{1s} ）、新沟嘴组（ E_{2x} ）、荆沙组（ E_{2js} ）、潜江组（ E_{2-3q} ）和荆河镇组（ E_{3jh} ），新近系广化寺组（ N_{1g} ）和第四系平原组（ Q_p ；戴世昭, 1997；图 8b）。

古新统龚家冲组下部为中-厚层砂岩，夹泥质粉砂岩和粉砂质泥岩（Lin et al., 2024）；中上部为含钙质结核的粉砂质泥岩夹砂岩和泥灰岩；底部以厚层块状砾岩或含砾砂岩为主，属于滨湖相沉积。沙市组下段主要为盐岩、膏泥岩、钙芒硝泥岩夹砂岩（张洋等, 2023）；上段以泥岩为主，含玄武岩夹层。洋溪组为一套中-厚层泥质灰岩夹泥岩和砂岩，属于浅湖沉积相。新沟嘴组以泥岩、膏泥岩和砂岩为主，属于典型的盐湖沉积。车阳河组岩性为厚层砂岩夹薄层泥岩和粉砂岩，砂岩中斜层理发育，主要为三角洲沉积相。荆沙组为一套泥岩夹薄层粉砂岩和砂岩，代表河流相沉积（戴世昭, 1997）。牌楼口组岩性为厚层块状砂岩、粉砂岩和砂质泥岩，属于滨湖相和三角洲沉积相。潜江组和荆河镇组主要以泥岩为主，夹泥膏岩、油页岩，为湖相沉积。广化寺组由黏土岩和粉砂岩、含砾砂岩、砾岩组成韵律层，属于河流相沉积。掇刀石组主要为厚层块状泥灰岩夹黏土，底部有砾石层（Kang et al., 2021），属于河湖相沉积。云池组下部为砾石层，上部为粉砂和细砂互层。砾石成分以石英质砾石为主，磨圆较好，粒径多在 2-10 cm 左右；善溪窑组分为上下两部分，下层为砾石层，上部为砂层，具有交错层理（林旭等, 2023c），均属于河流相沉积。盆地内第四系平原组为河湖相的黏土、砾石夹松砂层（戴世昭, 1997）。

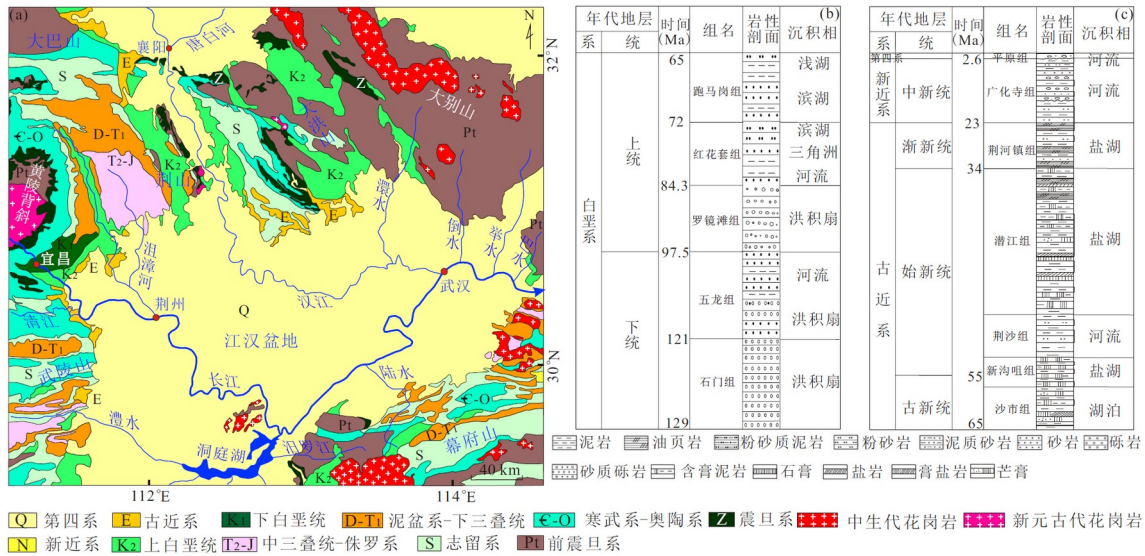


图 8 江汉盆地

Fig. 8 Jianghan Basin

a. 江汉盆地地质图 (据张洋等, 2023 修改); b. 江汉盆地沉积地层柱状图 (据戴世昭, 1997 修改)

1.2.11 望江盆地

望江盆地位于长江下游分布 (图 9a), 中-新生代陆相地层发育较为完整 (Xu et al., 2021)。汪公庙组 (K_{1w}) 可分为三段, 下部由砾岩、含砾粗砂岩、砂岩、钙质粉砂岩互层组成 (张义楷, 2003; 吴跃东, 2009; 图 9b); 中部出现凝灰质砾岩、凝灰质角砾岩, 局部夹钙质粉砂岩; 上部由长石石英砂岩、粉砂岩、钙质粉砂岩组成, 为河流、三角洲和湖泊相。浦口组 (K_{1p}) 出现砾岩、含砾粗砂岩、中细砂岩。赤山组 (K_{2c}) 由中细粒砂岩夹砾岩透镜体组成。浦口组和赤山组为洪积扇和河流相。望虎墩组 (E_{1w}) 由砾岩、砂砾岩、含砾砂岩和砂岩构成, 主要为河流和湖相 (张义楷, 2003; 吴跃东, 2009)。痘姆组 (E_{1d}) 由细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩夹含砾粗砂岩组成, 属于河流和湖相。双塔寺组 (E_{2sh}) 出现砾岩、含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩夹含砾细砂岩, 为河流和湖泊相沉积。上新统安庆组 (N_{2a}) 以砾石层和细砂层为主, 发育斜层理, 部分地层延伸到早更新世, 主要为河流相, 砾石分选性和磨圆度良好 (吴跃东, 2009; Lin et al., 2023b)。

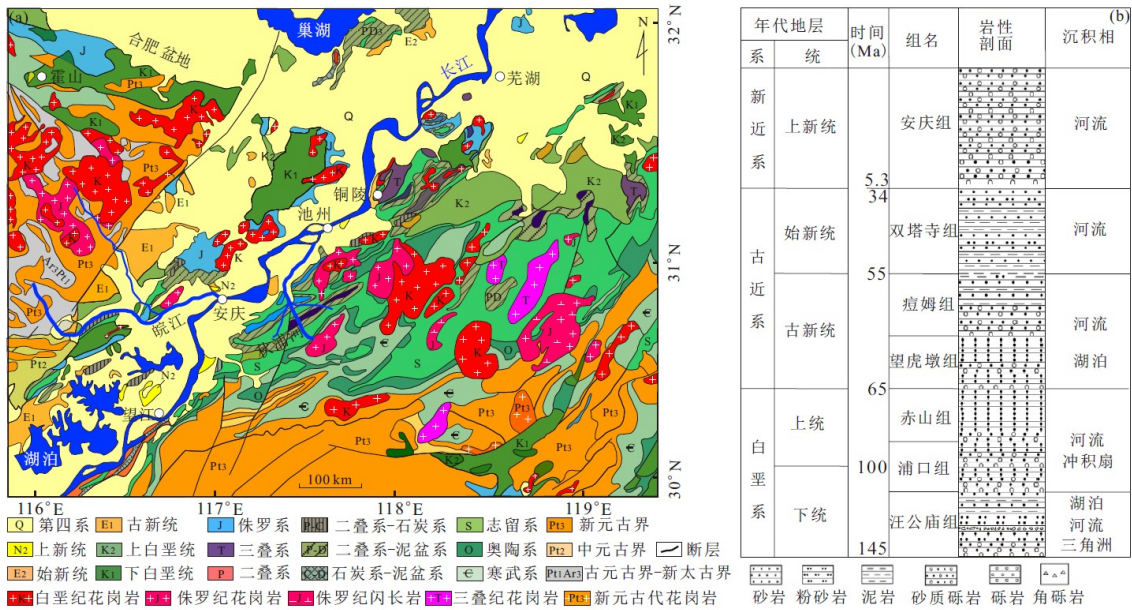


图9 望江盆地

Fig. 9 Wangjiang Basin

a. 望江盆地地质图 (据 Lin et al., 2023b 修改) ; b. 望江盆地沉积地层柱状图 (据张义楷, 2003 修改)

1.2.12 南黄海盆地

南黄海盆地位于胶东半岛南部, 陆上部分属苏北盆地 (图 10a)。南黄海盆地晚白垩纪-古近纪处于区域伸展、强烈断陷阶段, 新近纪以来整体沉降 (Zhu et al., 2020)。南黄海盆地主要由北部拗陷、中部隆起、南部拗陷和勿南沙隆起 4 个一级构造单元组成 (图 10a)。阜宁组 (E_{1f}) 主体为泥岩与细砂岩互层, 以河流相、湖相和三角洲相为主 (姚翔, 2019; 图 10b)。戴南组 (E_{2d}) 上部由泥岩与粉砂岩、细砂岩呈不等厚互层组成, 下部出现泥岩与薄层粉砂岩互层, 为湖相和三角洲相。三垛组 (E_{2s}) 中上部由泥岩夹砂岩构成, 下部为块状砂岩、含砾砂岩, 属于河流相和三角洲相。下盐城组 (N_{1y}) 底部为粉砂质泥岩与粗砂岩、含砾砂岩互层; 上盐城组 (N_{2y}) 为河流相砂砾岩。东台组出现河湖相夹海侵层, 主要为砂质黏土与砂砾互层沉积。

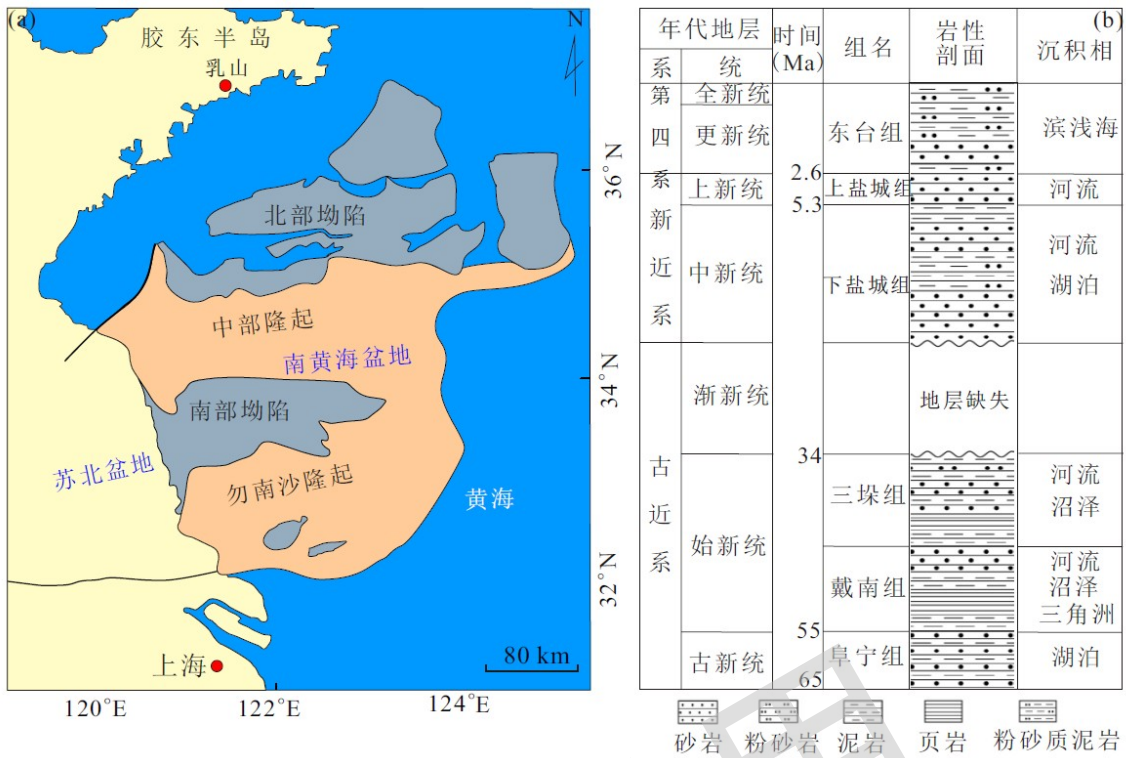


图 10 南黄海盆地

Fig. 10 South Yellow Sea Basin

a. 南黄海盆地构造单元划分图（据姚翔，2019 修改）； b. 南黄海盆地新生代地层柱状图（据姚翔，2019 修改）

1.2.13 长江三角洲

长江三角洲位于黄海和东海之间（图 11a）。现长江三角洲处于南黄海盆地勿南沙隆起上沉积地层较薄（谢建磊，2017）。随着南黄海盆地向南东方向逐渐扩张，现长江三角洲开始接受沉积，逐渐形成一套较厚的松散层沉积。崇明组（ N_{2c} ）以砂岩为主，夹杂黏土和黏土质粉砂，属于河流、湖泊和冲积扇相（谢建磊，2017；图 11b）。安亭组（ Q_{1a} ）以黏土、黏土质粉砂为主，为河流相。洙泾组（ Q_{1zh} ）以粉砂、泥质粉砂以及黏土为主，属河流和湖泊相。周浦组（ Q_{1zp} ）以粉砂质黏土、细砂、粉砂为主，整体属于湖相沉积。宝山组（ Q_{2b} ）和嘉定组（ Q_{2j} ）包含黏土、黏土质粉砂，主要为河流相沉积。长江三角洲上更新统开始出现浅海相沉积，全新统演变为河口-滨海相沉积。

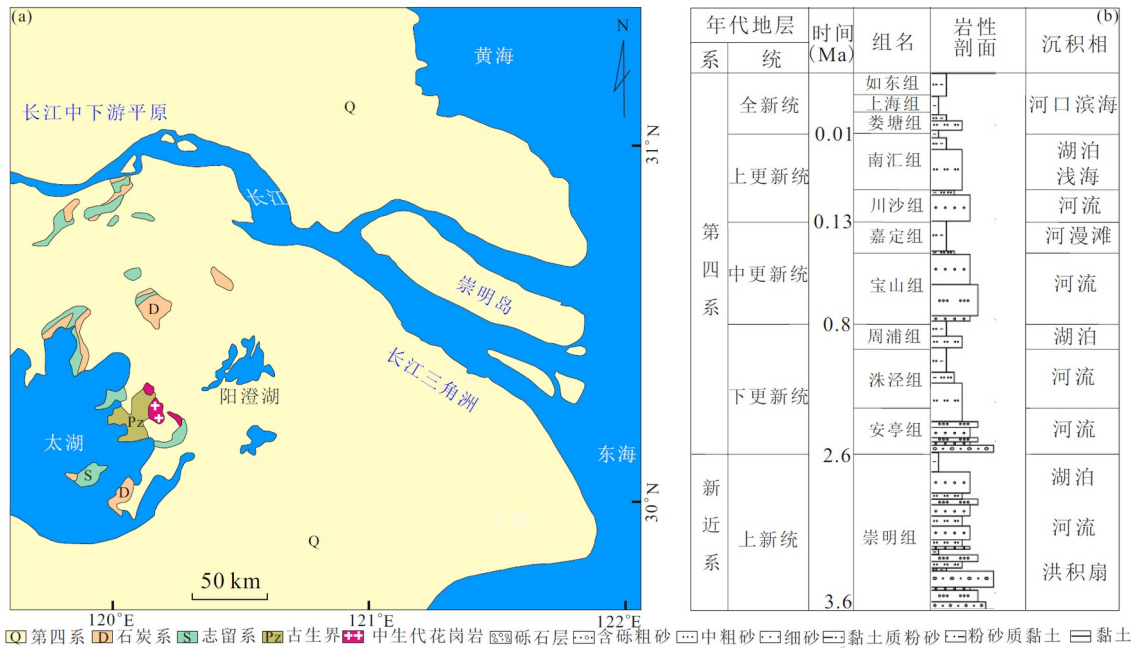


图 11 长江三角洲

Fig. 11 Yangtze River Delta

a. 长江三角洲地质图 (据谢建磊, 2017 修改); b. 长江三角洲地层柱状图 (据谢建磊, 2017 修改)

1.2.14 东海盆地

东海盆地是西太平洋构造域的组成部分, 盆地大体呈北东向分布 (图 3), 自西向东依次被划分为浙闽隆起带、西湖坳陷带、琉球隆起带 (姚翔, 2019; 图 12a)。月桂峰组 (E_{1y}) 以泥岩为主 (图 12b), 沉积环境为湖相和浅海相。灵峰组 (E_{1l}) 性以泥岩为主, 夹薄层钙粉砂岩、细砂岩, 属于浅海相。明月峰组 (E_{1m}) 是一套滨海沼泽相地层, 以泥岩夹钙质粉砂为主, 地层顶部夹多层黑色煤层。瓯江组 (E_{2o}) 以砂岩夹泥岩为主, 属于滨浅海相。温州组 (E_{2w}) 沉积环境主体为海相, 岩性为细砂岩、粉砂岩和粉砂质泥岩。平湖组 (E_{2p}) 岩性主要为粉砂岩和粉砂质砂岩, 局部含煤层、泥晶灰岩、砂质灰岩、白云质泥岩, 沉积环境为一套海陆过渡相的半封闭海湾沉积。花港组 (E_{3h}) 岩性为粉砂质泥岩与泥质粉砂岩、细砂岩、含砾砂岩、砂砾岩等, 主要为河流相、湖泊相和三角洲相。龙井组 (N_{1l}) 包含泥岩、粉砂岩、砂岩、含砾砂岩, 属于河流和浅湖相。玉泉组 (N_{1y}) 为河流-湖泊相泥岩、粉砂岩夹砂岩沉积。柳浪组 (N_{1l}) 为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、含砾砂岩、砂砾岩, 主要为河流相。三潭组 (N_{2s}) 为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹砂岩, 富含海相化石。东海群 (Qd) 由黏土、粉砂质黏土砂层组成, 为海相地层。

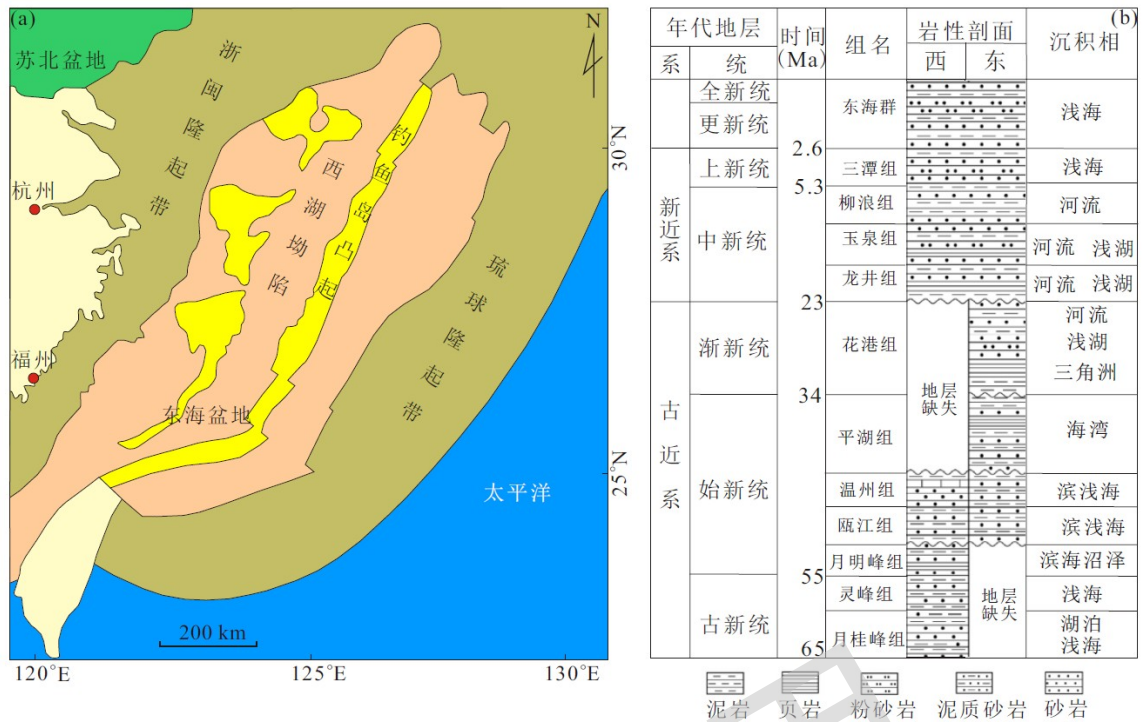


图 12 东海盆地

Fig. 12 East China Sea Basin

a. 东海盆地构造单元划分图 (据姚翔, 2019 修改); b. 东海盆地新生代地层柱状图 (据姚翔, 2019 修改)

1.3 大河演化研究方法简介

研究大河的形成时代有多种方法, 主要包括分析地貌特征、研究沉积物组成、调查基岩剥露时间、进行数值模拟、比较生物遗传谱系等 (图 13)。

地貌特征, 如河床形态、阶地和峡谷, 可以对大河的形成和演化提供有价值的见解 (Li et al., 2001; 赵希涛等, 2015)。河床形态是研究大河演变的直接记录。研究人员通过研究河道形态 (曲流、辫状和直流河道), 可以深入了解河流的动力学过程 (如流速、沉积物搬运和沉积模式; Kellerhals et al., 1976; Finnegan et al., 2007)。例如, 曲流河的存在表明一个成熟和稳定的河流演化阶段, 而辫状河表明一个更加动态和积极变化的河流系统 (Lewin and Ashworth, 2014; Figure 13)。此外, 阶地是过去河道的残余物, 存在于比现在河床更高的海拔。通过研究这些阶地的高度、宽度和组成, 科学家可以重建河流下切的历史 (Li et al., 2001; Lewin and Gibbard, 2010)。这些信息对于理解塑造河道的构造活动和/或气候变化至关重要 (Liu et al., 2023)。峡谷通常由河流在很长一段时间内持续侵蚀形成 (图 12)。这些峡谷的垂直崖壁和暴露的岩层为了解河流的演化过程提供了直观的记录 (Twidale, 2004; Whipple, 2004)。通过研究峡谷基岩的剥露时间, 研究人员可以推断河流形成的年龄 (Clark et al., 2005; Lin et al., 2021)。低温年代学技术通过研究对温度变化敏感的矿物来测量基岩的冷却历史。锆石和磷灰石的裂变径迹 (FT) 测年提供了岩石冷却到 240 到 120 °C 特定温度以下的时间 (Bernet and Garver, 2005)。锆石和磷灰石的 (U-Th)/He 定年可以提供基岩在 180 ~ 70 °C 温度范围内的冷却历史 (Reiners and Brandon, 2006; Lin et al., 2019)。峡谷最上部岩洞内的碎屑沉积物中的石英宇宙成因核素的年龄是河流早期存在的直接证据 (Granger et al., 2001; Figure 12)。

河流沉积物的物源对比研究主要包括确定沉积物的起源或来源 (Weltje and von Eynatten, 2004), 可以为了解特定流域内的地质历史、构造活动和沉积物搬运路径提供重要见解 (Caracciolo, 2020)。通过分析沉积物中存在的矿物, 地质学家可以识别和比较它们的外部特

征，如颗粒形状、大小和颜色，从而获得沉积物的移动距离等方面的信息（Blair and McPherson, 1999）。此外，地质学家还可以分析矿物的内部的地球化学组成，如元素组成或同位素比率，获取与潜在源区匹配的信息（McLennan et al., 1993）。例如，碎屑磷灰石的地球化学组成在不同的河流流域不同，使其成为识别物源的目标矿物（O'Sullivan et al., 2018; Figure 12）。钾长石颗粒中的 Pb 同位素比率可以显示特定地质区域的物质组成特征（Tyrrell et al., 2012）。由于锆石在多个地质单元之间的 U-Pb 年龄存在差异，因此被广泛认为是大型河流中最常用的物源示踪矿物之一（Yang et al., 2012a; He et al., 2013; Lin et al., 2024b,c）。此外，当结合各种地层测年方法，如放射性同位素、宇宙核素、光释光测年以及磁性地层学，地质学家可以准确地建立年代学信息，揭示大河随时间的形成年龄（Banner, 2004; Ivy-Ochs and Kober, 2008; Zhang et al., 2008）。

数值模拟方法是通过分析大河实际形成和演化的各种因素后模拟大河年龄的有效方法（Hancock and Anderson, 2002）。首先收集与河流所在地区有关的现有地质信息，包括侵蚀、沉积物搬运、河流动力学和气候变化等重要因素（Brown and Pasternack, 2019）。随后，使用专门的软件或编程语言来创建能够模拟河流形成过程的数值模型。然后进行多次模拟实验，控制相关参数来研究它们对河流形成的影响。这可能需要对地质条件、环境因素或其他属性进行调整。最后，通过将模拟结果与现场观测、地质数据和其他可用信息进行比较，验证模型的准确性。数值模拟是一个复杂的过程，需要仔细考虑它的假设、限制条件和不确定性。

生物遗传比较可以为河流系统的演化过程提供有价值的见解（Waters et al., 2020）。首先，研究人员从目标河流系统的不同位置收集基因样本。这些样本可能包括从河流生物（如鱼类、无脊椎动物或植物）中提取的脱氧核糖核酸（DNA；Deiner and Altermatt, 2014）。接下来对从样品中获得的遗传物质开展 DNA 测序或基因分型。这种分析将有助于确定种群内的遗传变异和模式。研究人员随后构建发育树系统，用于说明生物体与其他生物体之间潜在的演化关系（Avice, 1989）。最后，通过将遗传数据与地质环境信息相结合，研究人员可以重建影响水系形成和发展的地质过程（Chen et al., 2023）。

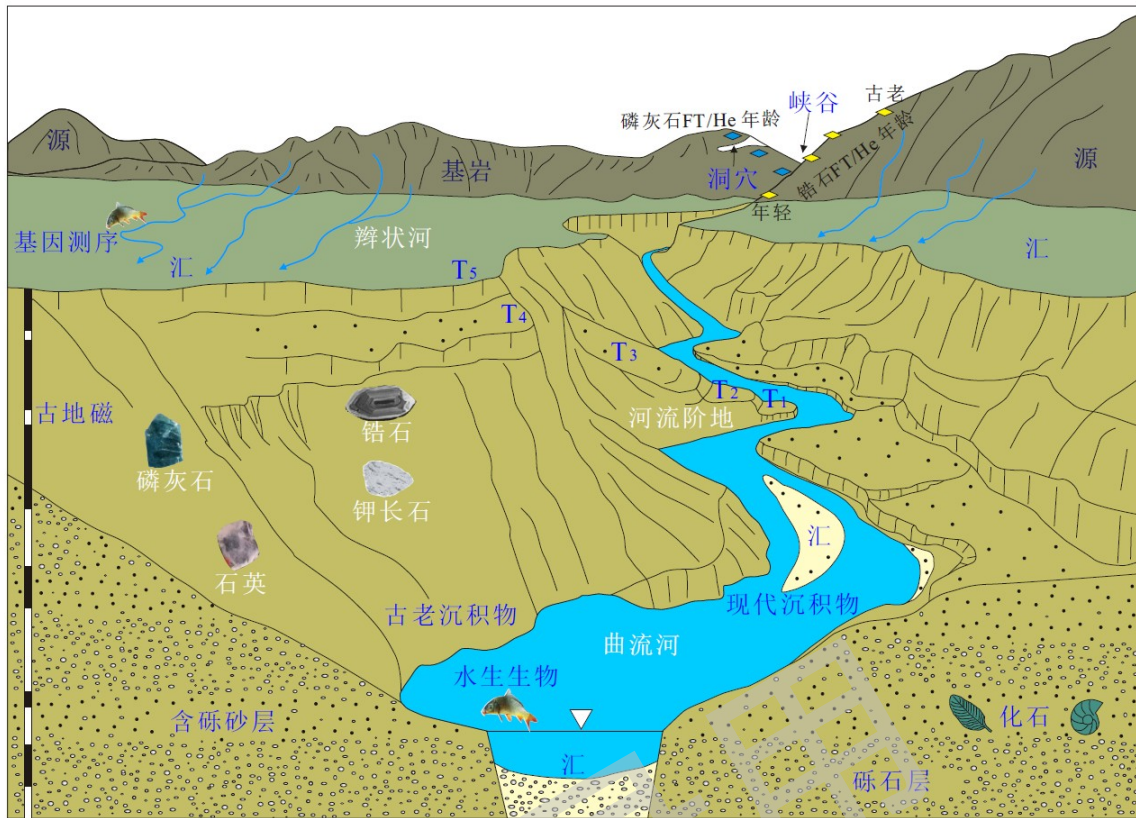


图 13 大河演化研究的主要方法（包括地貌特征分析、沉积物组成分析、岩石下切速率计算、数值模拟和古生物 DNA 测序等）

Fig. 13. Main methods for studying the evolution of large rivers

1.4 长江演化研究进展

1.4.1 长江上游

青藏高原东缘的晚中生代盆地记录了源-汇系统的发展和气候变化等重要信息，同样也记录了连接造山带和沉积盆地的大河形成时代（Li et al., 2018b; 刘栋梁等, 2022）。

通过砂岩岩石学和碎屑锆石 U-Pb 年代学的研究，Li et al. (2018b) 对四川盆地侏罗-白垩统地层的物源进行了约束，发现物源主要来自龙门山、松潘-甘孜复理石带和南秦岭，同时江南造山带也贡献了部分物源（图 14（1））。此时主要发育向南和南东方向流动的大河，随后被北东向的河流取代。通过重矿物分析，结合碎屑磷灰石、金红石和锆石 U-Pb 年龄谱对比，Deng et al. (2018) 研究了青藏高原东南缘西昌、楚雄盆地下白垩统至古近系的地层特征和河流水系演化（图 14（2））。结果表明晚白垩世向南流动的大河将扬子克拉通北部和西部的同期造山带剥蚀物质搬运至上述盆地。重矿物组成和碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比结果表明，曾经有一条大陆尺度的河流自四川盆地经会理盆地、楚雄盆地向南流入新特提斯洋（Zhao et al., 2021a; 图 14（3））。兰坪盆地白垩统地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、岩石学结果表明，沉积物主要来源于松潘-甘孜地块的再循环沉积物，部分来自四川盆地和南羌塘地块（Wang et al., 2021; Lai et al., 2023; 图 14（4））。岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和古流向结果表明，晚白垩世时期思茅盆地内的碎屑物质来源于秦岭造山带（Wang et al., 2014b; 图 14（5）），当时发育的大河甚至向南延伸至老挝的芒赛盆地（Wang et al., 2020）、泰国的呵叻盆地（Carter and Bristow, 2003）和泰国湾（Nguyen et al., 2021）。

在晚白垩纪连通四川、楚雄、思茅和呵叻盆地的古大河在古近纪因区域隆起发生中断，继而发育了新的大河系统（He et al., 2023; Zhao et al., 2023a）。古红河在古近纪被认为是一条连

接青藏高原和南海的大陆尺度的河流，现今在四川盆地的长江河段以及在青藏高原的金沙江、雅砻江等河流是其上游支流（Clark et al., 2004；图 14（6））。碎屑磷灰石 FT 和 (U-Th)/He 年龄结合热历史模拟结果显示，四川盆地内的地层在约 45-40 Ma 经历了快速剥露，出现了约 1-4 km 的广泛侵蚀，这很可能是对长江水系演化的响应（Richardson et al., 2008; Yang et al., 2017; 图 14（7））。长江第一弯指示着长江停止向南流转向北东方向，它是了解现代长江形成的关键区域。思茅盆地和剑川盆地古新统至渐新统地层的沉积学、碎屑钾长石 Pb 同位素和碎屑锆石 U-Pb 年龄谱分析结果表明，古红河约在 37-35 Ma 解体（Chen et al., 2017; Feng et al., 2021; He et al., 2021; Zheng et al., 2022; Zhang et al., 2017b, 2023a; 图 14（8））。莺歌海盆地古近系地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比结果表明沉积物来自多个源区，主要包括古红河和海南岛的河流，此外中南半岛中部以及松潘-甘孜地块可能还有次要贡献（Wang et al., 2019; 图 14（9））。然而，沉积相分析显示，剑川盆地上始新统地层要由山间断陷盆地中的冲积扇、湖泊、扇三角洲和辫状河流相组成，结合古水流方向，表明这些沉积物大部分来自当地（Wei et al., 2016; 图 14（10））。Wissink et al. (2016) 利用锆石 U-Pb 年龄和古流向数据，对分布在青藏高原东南边缘被认为与古河流连通有关的始新统至更新统沉积地层进行了研究，发现没有证据表明长江上游发生过河流袭夺事件，不支持古长江和古红河之间在新生代存在连接（图 14（11））。青藏高原东南缘古近系地层物源特征和古水流测量结果表明，沉积物来源于本地源区而非外来河流的输入，并不支持古红河存在更大流域的模型（Zhang et al., 2019b; Cao et al., 2023）。

在渐新世之前，长江流域的规模比现在要小得多，从渐新世到中新世的长江处于动态调整过程（He et al., 2023）。碎屑锆石 U-Pb 年代学和沉积学结果表明，剑川盆地晚渐新世及以后的锆石物源主要来自盆地周围的局部侵蚀，表明南流的古红河在此时其北部物源区消失（Yan et al., 2012; 图 14（12））。通过对金沙江三条支流的纵剖面数值模拟，结合区域构造和地貌解释（Cao et al., 2019; 图 14（13）），第一弯下切的起始时间被限制在 28-20 Ma（Zhang et al., 2022a; 图 14（14））。长江第一弯石鼓附近的峡谷壁上洞穴沉积物的宇宙核素埋藏年龄显示，金沙江在约 18-9 Ma 发生约 1 km 的下切（McPhillips et al., 2016; 图 14（15））。通过对虎跳峡的贯通和下切过程开展数值模拟分析，结果显示其初始的贯通应形成于 15 Ma 前后（郑勇等, 2022; 图 14（16））。岩相学、重矿物、Sr-Nd 同位素以及锆石 U-Pb 年代学数据表明，南流的金沙江在第一弯被长江袭夺，现在的红河和长江的水系格局在中中新世开始形成（He et al., 2023; 图 14（17））。Jiao et al. (2022) 使用碎屑石英的宇宙成因核素 ^{10}Be 年龄计算了乌江流域的平均侵蚀速率后推断其下切历史，结果显示乌江在 21-16 Ma 出现快速下切（图 14（18））。基岩低温热年代学数据表明安宁河断裂和则木河断裂之间的山体在约 13-5 Ma 发生快速下切，推断区域内的河流形成于约 13 Ma 前（Wang et al., 2017; Yang et al., 2017; 图 14（19））。同期的河流快速下切事件也发生在怒江（Liu-Zeng et al., 2018）、澜沧江（Nie et al., 2018; Ge et al., 2023）、雅砻江（Tao et al., 2022）、岷江（Tian et al., 2018b）等河流。莺歌海盆地的钾长石 Pb 同位素、碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比和全岩 Nd 同位素数据显示，古红河的大规模河流袭夺事件应该发生在约 23 Ma 之前（Clift et al., 2008; Wang et al., 2019; 图 14（20））。海南岛东南部沉积盆地的下中新统砂岩的物源主要来自海南岛，这可能因为古红河上游被长江袭夺，导致其沉积物供应大幅减少，使得区域性沉积物广泛沉积（Lyu et al., 2021; 图 14（21））。但是锆石 U-Pb 年龄数据表明自渐新世到中新世，上游长江依然没有发生倒流，但不是向南流入红河，而是通过楚雄盆地和思茅盆地向西南流入万象盆地（Guo et al., 2022; 图 14（22））。

河流的地貌过程在较大程度上促进了淡水鱼类的多样性演化，反之，重建淡水鱼类的地理动态亦可对河流系统的时空演变进行重演。在东亚特有的鲤科鱼类中，一些底栖鱼类产黏性卵或沉性卵，而另一些则产漂流性卵。漂流性卵被认为是东亚特有的鲤科鱼类在季风气候及大河

环境中生存的关键特征。在距今约 23 Ma, 东亚特有的鲤科鱼类的祖先分布在古红河、古珠江水系, 此时古金沙江大致沿着现代红河的河道流入南海。在距今约 18 Ma, 东亚特有的鲤科鱼类扩散到长江流域, 现代长江水系已形成 (Chen et al., 2023; 图 14 (23))。鲤科鱼类东亚特有类群在大约 15 Ma 再次演化出产黏性卵鱼类, 恰巧与这一类群的净分化速率上升至峰值和强烈的东亚夏季风相耦合。这表明长江水系可能在当时已形成高生产力的江湖复合生态系统 (Chen et al., 2023; 图 14 (24))。但是云贵高原 51 个地区 36 种裂腹鱼属线粒体 DNA 细胞色素 b 序列分析, 结合分子钟校正结果表明, 中新世晚期 (10 Ma) 和上新世 (4 Ma) 是裂腹鱼属交替形成的重要时期。珠江的裂腹鱼属起源于金沙江, 不支持古金沙江经剑川盆地汇入红河的假设 (Yang et al., 2012b)。

剑川盆地和元谋盆地上新统沉积物的云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果表明, 金沙江上游与红河直到上新世断开了联系, 雅砻江同时向南流入元谋盆地 (Sun et al., 2020; 图 14 (25))。金沙江下游存在多达 8 级的河流阶地, 依照河谷平均下切速率外推, 此段的古夷平面解体的时间为 5.5 Ma, 即现代金沙江水系形成于这一时间之后 (Su et al., 2019; 图 14 (26))。昔格达组主要由灰绿色、灰黄色河湖相黏土、粉砂、粉砂质黏土组成, 分布于青藏高原东南缘大江大河的干支流河谷中, 大致呈南北向带状断续分布 (Kong et al., 2009; Yang et al., 2020)。不同地点昔格达组地层获得的沉积年代差异颇大, 从 4.2 到 0.2 Ma 不等 (Zheng et al., 2023)。金沙江在攀枝花段形成的昔格达组砾石层底界年龄约为 4.2 Ma, 表明早上新世金沙江已经出现 (赵希涛等, 2008; 图 14 (27))。通过对昔格达组 and 现代河砂开展碎屑钾长石 Pb 同位素、碎屑锆石 U-Pb 年龄综合分析, 揭示了金沙江在 4.2 Ma 东流 (Zhang et al., 2017b; Zhao et al., 2021b; 图 14 (28)), 但其主要支流 (大渡河、雅砻江、安宁河) 上新世的水系形态与现代有所不同, 金沙江其现今形态出现于早更新世 (1.3 Ma; Deng et al., 2021; Zhao et al., 2021b)。数值模拟结果表明进入第四纪 (2 Ma) 以来, 虎跳峡再次快速下切, 剥蚀深度达到 3 km, 最终形成了现今金沙江的地貌样式 (郑勇等, 2022)。昔格达古湖底部沉积物的宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 埋藏时间结合锆石 U-Pb 年龄分布特征, 说明金沙江在 1.7-1.3 Ma 东流 (Kong et al., 2009, 2012)。金沙江巧家-蒙姑段发育的最老河流阶地出现于 1.8 Ma, 金沙江下游现代河谷的形成时代不晚于早更新世 (Liu et al., 2023; 图 14 (29))。碎屑锆石 U-Pb 年龄物源示踪结果表明, 上新统昔格达组沿现代安宁河分布, 其年龄谱与现代大渡河相似, 表明安宁河与大渡河此时存在物源联系 (Yang et al., 2020; 图 14 (30))。在 3.6 Ma, 岷江在成都平原形成大型冲积扇 (大邑砾岩), 李勇等 (2005) 据此推测岷江至少在晚上新世形成 (图 14 (31))。低温热年代学、数值模拟和宇宙成因核素数据显示, 安宁河源头的基岩在 2.4-2 Ma 时加快冷却, 导致安宁河和大渡河在此时发生袭夺 (Yang et al., 2020; Yang et al., 2022; 图 14 (32))。安宁河在 1.0 Ma 开始发育明显的河流阶地 (He et al., 2015; 图 14 (33))。大渡河和安宁河在 0.6-0.5 Ma 后形成各自独立的水系 (Zheng et al., 2023)。

1.4.2 长江中游

结合河流纵剖面分析, 早期有学者认为四川盆地晚白垩世受构造隆升控制形成的褶皱带成为向东流入江汉盆地和向西流入四川盆地的河流分水岭 (Wang et al., 2013; 图 14 (34))。然而, 磷灰石和锆石热年代学和热历史模拟结果表明, 黄陵背斜在 157-132、119-106 和 114-72 Ma 发生快速剥露 (Su et al., 2023; 图 14 (35)), 这导致三峡地区出现较高的地貌起伏, 结合沉积学地质记录 (Shen et al., 2012), 暗示黄陵背斜可能自白垩世以来发展为古长江中游的分水岭 (Lee, 1924; 图 14 (36))。但也有研究者认为这一分水岭出现于 0.7 Ma 以前 (Huang et al., 2023; 图 14 (37))。

在长江三峡地区的中生代至新生代地层中, 碎屑锆石 U-Pb 年龄结合古流向测量和砂岩组分结果揭示, 古长江中游的流向在晚白垩纪开始反转, 紧接着在始新世逐渐向西袭夺 (Wang et al., 2018a; 图 14 (38))。江汉盆地西部新生代地层的沉积相、古流向、砂岩组分以及锆石 U-

Pb年代学结果显示 (Shen et al., 2012; 图 14 (39)), 黄陵背斜始新世 (45-40 Ma) 的剥露与长江三峡地区的河谷侵蚀同步进行 (Richardson et al., 2010; 图 14 (40)), 由于长江上游逐渐被长江中游袭夺, 这一水系重组导致了长江三峡地区局部侵蚀速率加快 (Wang et al., 2014c; Yang et al., 2017)。由于江汉盆地在始新世存在蒸发岩和湖相沉积, 因而长江三峡的贯通应晚于 36 Ma (Zheng et al., 2013a; 图 14 (41))。Lin et al. (2024) 对江汉盆地西部的古近系砂岩进行了碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比, 与潜在物源区已发表的锆石 U-Pb 年龄 (He et al., 2013; Yu et al., 2020)、古流向数据和古地磁年龄相结合 (戴世昭, 1997), 结果表明长江上游物质直到 34 Ma 依然未出现, 古近系的沉积物主要来自江南造山带 (图 14 (42))。综合考虑了构造运动、古气候及海平面变化等影响河流发展的关键因素, 并将这些因素输入 Badlands 古地貌模拟软件, 结果表明长江三峡在 26 Ma 发生贯通 (Tian et al., 2024; 图 14 (43))。磷灰石 FT 和 (U-Th) / He 数据模拟长江三峡的初始下切时间为晚渐新世-早中新世 (Yang et al., 2023; 图 14 (44))。基于河道长剖面反演模型和低温热年代学资料, Jiao et al. (2020) 重建了长江三峡地区基岩支流的下切历史, 结果表明快速下切发生在早中新世 (21-18 Ma; 图 14 (45)), 并引起四川盆地发生超过 2 km 的剥蚀 (Shen et al., 2009; Yang et al., 2017)。长江三峡存在多个夷平面, 海拔 1200-800 m 处的夷平面可能形成于晚上新世 (3.6 Ma), 古长江在这一时期已经穿过长江三峡地区 (Li et al., 2001; 图 14 (46)), 随后长江在 1.2-0.7 Ma 发生下切形成年轻的 V 形谷 (Huang et al., 2023)。

江汉盆地新生代沉积物的锆石 U-Pb 年代学和重矿物数据表明, 新生代早期江汉盆地的沉积物主要来自附近的山脉 (Wu et al., 2017b; Yu et al., 2018; 图 14 (47)), 其中长江最大的支流汉江在始新世已经出现 (张洋等, 2023; 图 14 (48))。然而, 在约 25 Ma 时江汉盆地出现来自于羌塘和松潘-甘孜地块的新生代岩浆锆石 (32-16 Ma), 说明长江三峡在晚渐新世和早中新世之间已经形成 (Yang et al., 2019; 图 14 (49))。但是江汉盆地上新统-更新统碎屑沉积物中钾长石 Pb 同位素测定结果表明, 松潘-甘孜地块的钾长石在约 3.4 Ma 时进入江汉盆地 (Zhang et al., 2021b; 图 14 (50))。此外, 钾长石 Pb 同位素数据还记录了汉江在约 1.8 Ma 时首次向江汉盆地输送碎屑物质 (Zhang et al., 2016)。碎屑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和锆石 U-Pb 年龄谱对比和古地磁年龄限制长江上游物质在 2.6 Ma 出现在江汉盆地 (Sun et al., 2018; 图 14 (51))。江汉盆地上新统和更新统沉积物的微量元素、稀土元素和全岩 Nd 同位素在 2.3-1.2 Ma 发生变化, 长江上游的峨眉山大火成岩省的碎屑物质的输入是引起这一现象的主要原因 (Shao et al., 2012, 2015; 图 14 (52))。江汉盆地中部的周老钻孔从 160 m 到顶部的 Cd 含量显著变高, 表明长江三峡以西的长江上游, 特别是金沙江流域的沉积物输入起到重要作用, 结合地层的古地磁年龄, 这意味着长江三峡河谷的下切发生在 1.8 Ma 前后 (Li et al., 2021; 图 14 (53))。地层古地磁年代学和物源研究结果显示周老钻孔在 110 m 深度处重矿物含量和组成发生明显变化 (Zhang et al., 2008), 长江上游物质在约 1.2 Ma 出现在江汉盆地 (Kang et al., 2021; 图 14 (54))。江汉盆地宜昌地区地表保留的砂砾石层的重矿物组合、碎屑钾长石主微量元素和碎屑锆石 U-Pb 年龄物源结果, 结合所在地层的时代表明, 长江上游物质出现的时间约为 1.2 Ma (Wei et al., 2020; 林旭等, 2023c; 图 14 (55))。但是碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比和沉积学结果显示, 江汉盆地宜昌地区在 0.75 Ma 出现长江上游物质的信号 (Xiang et al., 2007; 图 14 (56))。周老钻孔在 0.8 Ma 时出现两颗晚新生代锆石年龄为 14.8 和 16.5 Ma, 它们的存在表明长江的源头在此时已经达到了青藏高原内部 (Wang et al., 2010; 图 14 (57))。

1.4.3 长江下游

长江下游的新生代地层比长江上游的四川盆地、长江中游的江汉盆地更广泛。国内外研究者对此开展了广泛的研究, 从而约束长江上游和中游物质何时进入长江下游。

望江盆地白垩纪时的物源主要来自北部的大别山和南部的江南造山带, 表现出近源堆积的特征 (王毅等, 2023)。在苏北盆地高邮拗陷中, 古新统阜宁组为封闭的盐湖沉积 (Fu et al.,

2023)。Lin et al. (2014) 对苏北盆地始新统戴南组进行了详细的锆石 U-Pb 测年和全岩地球化学分析, 指出其物源主要来自扬子克拉通和大别-苏鲁造山带(图 14 (58))。南黄海盆地古新统阜宁组的沉积物主要来源于大别-苏鲁造山带、华北和华南板块(Zhu et al., 2020; 图 14 (59))。东海盆地在始新世发生了物源变化, 华北板块和朝鲜半岛提供了大部分碎屑物质, 形成了一条长约 1500 km 连接上述地区的大河(Fu et al., 2022a; 图 14 (60))。台湾岛古近系砂岩中的碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱以燕山期(180-67 Ma)的锆石为主, 物源主要位于华南板块的沿海地区(Lan et al., 2016; 图 14 (61))。

长江下游南京地区与河流沉积物互层的玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比共同限定了长江的连通发生在 23 Ma (Zheng et al., 2013a), 此时的长江以河床负荷为主要特征, 具有更高的水流能量和更长的流程, 流入东海陆架盆地(Wang et al., 2022b; 图 14 (62))。相比之下, 一些研究倾向于认为长江下游的形成历史较为年轻, 例如根据南京地区的砾石层中的碎屑白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱和钾长石 Pb 同位素对比研究, 部分研究者认为长江的形成不早于晚中新世(Sun et al., 2021), 但早于上新世(Zhang et al., 2021b; 图 14 (63))。望江盆地晚新生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄谱对比结果表明, 上新统安庆组砾石层的砂质物质主要来源于长江(Lin et al., 2023b; 图 14 (64))。望江盆地长江河谷底部砾石含量超过 50%, 砾石的磨圆较好, 砾径约 2~3 cm, 砂质充填, 表明是上新世-早更新世古长江冲积作用的产物(王毅等, 2023; 图 14 (65))。

苏北盆地的钻孔样品揭示长江下游在 4.8-4.2 Ma 流经苏北盆地, 表明长江三峡的形成时间可能早于或等于 4.8 Ma (Shu et al., 2021; 图 14 (66))。通过对苏北盆地钻孔的粒度、有孔虫和介形虫进行全面分析, Cheng et al. (2019) 发现在 3-1 Ma 的沉积环境中存在长江的物质信号。新的宇宙成因核素埋藏年龄结合岩相和物源研究结果表明, 长江在约 5 Ma 首先进入长江三角洲北部(Liu et al., 2022a; 图 14 (67))。南黄海盆地钻孔的 Sr-Nd 同位素物源分析表明, 在 3.5-0.8 Ma 以长江的物质为主, 由于受到东部沿海陆架盆地沉降的影响, 长江主河道向现代长江三角洲的方向迁移(Zhang et al., 2019a; 图 14 (68))。这也被长江三角洲钻孔在 3.2 -0.9 Ma 出现长江上游物质所证实(Fan et al., 2005; Jia et al., 2010; 图 14 (69)), 并在 0.57 Ma 进一步向南移动(Liu et al., 2022a)。然而, 对长江三角洲钻孔沉积物的重矿物和碎屑磁铁矿的地球化学分析表明, 上新统沉积物主要来自当地的小河(Yue et al., 2018)。根据高分辨率的磁性层序、锆石 U-Pb 年龄谱和重矿物组合分析, Hao et al. (2023) 发现长江三角洲的沉积物在 3.6-3.4 Ma 主要来自汉江、湘江和赣江; 自 2.8 Ma 以来, 出现了长江上游的物质, 现代长江的水系格局自此形成(图 14 (70))。长江三角洲沉积钻孔的地球化学元素、辉石和磁铁矿颗粒含量变化和磁性地层学结果共同约束了长江上游物质在 1.2-1.0 Ma 出现(Yang et al., 2006; Gu et al., 2014; Yue et al., 2019; 图 14 (71))。

长江三角洲的底界年龄为上新世, 因而更长时间尺度的长江演化信息需要到长江下游另外的盆地里寻找。东海盆地北部渐新统-中新统地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄对比结果揭示了长江在 34 Ma 已形成; 中新世 (< 23 Ma) 长江流域进一步向南延伸, 到达现在台湾岛的位置(Zhang et al., 2021a; 图 14 (72))。在晚中新世之前, 黄海盆地和东海盆地的锆石年龄相对稳定, 主要来自华北克拉通和朝鲜半岛的河流, 但是自晚中新世以来接收了与现今长江相似的碎屑沉积物(Fu et al., 2021; 图 14 (73))。台湾岛下中新统地层的物源已到达长江下游地区, 尽管从扬子克拉通向台湾岛输送沉积物的机制尚不清楚, Lan et al. (2016) 推测闽江可能在早中新世比现在更大, 向北深入扬子克拉通, 然后在晚中新世被长江袭夺(Fu et al., 2022b; 图 14 (74))。台湾岛西麓中新统砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄与长江流域中新世和现代沉积物的年龄谱相似, 此外也受到近源河流, 甚至黄河的影响(Zhang et al., 2017c; 图 14 (75))。然而, 林旭等(2023d) 对台湾岛北部的中新统地层已经发表的碎屑钾长石 Pb 同位素结果(Zhang et al., 2022b) 与现今长江(Zhang et al., 2021b) 和黄河下游(林旭等, 2023b) 进行对比后, 发

现黄河在中新世没有出现在上述区域，而主要受长江下游的物质影响（Zhang et al., 2022b; 图 14（76））。

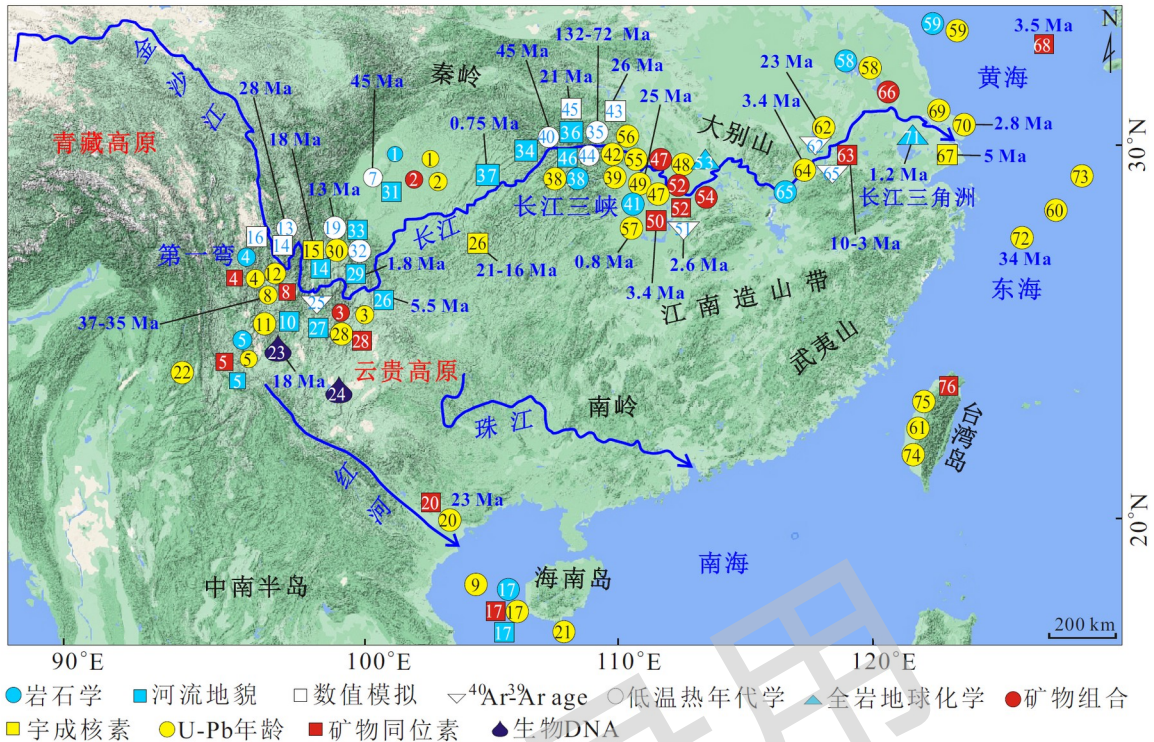


图 14 长江形成时代研究结果位置分布图

Fig. 14. The location distribution of the research results of the formation time of the Yangtze River.

文献来源：1. Li et al. (2018b); 2. Deng et al. (2018); 3. Zhao et al. (2021a); 4. Wang et al. (2021); 5. Wang et al. (2014c); 6. Clark et al. (2004); 7. Richardson et al. (2008); Yang et al. (2017); 8. Chen et al. (2017); Feng et al. (2021); He et al. (2021); Zheng et al. (2021); Zhang et al. (2023a); 9. Wang et al. (2019); 10. Wei et al. (2016); 11. Wissink et al. (2016); 12. Yan et al. (2012); 13. Cao et al. (2019); 14. Zhang et al. (2022a); 15. McPhillips et al. (2016); 16. 郑勇等(2022b); 17. He et al. (2023); 18. Jiao et al. (2022); 19. Wang et al. (2017); Yang et al. (2017); 20. Clift et al. (2008); Wang et al. (2019); 21. Lyu et al. (2021); 22. Guo et al. (2022); 23. Chen et al. (2023); 24. Yang et al. (2012b); 25. Sun et al. (2020); 26. Su et al. (2019a); 27. 赵希涛等(2008); 28. Zhang et al. (2017b); Zhao et al. (2021b); 29. Liu et al. (2023); 30. Yang et al. (2020); 31. Li et al. (2005); 32. Yang et al. (2020); 33. He et al. (2015); 34. Wang et al. (2013); 35. Su et al. (2023); 36. Lee (1924); 37. Huang et al. (2023); 38. Wang et al. (2018a); 39. Shen et al. (2012); 40. Richardson et al. (2010); 41. Zheng et al. (2013a); 42. Lin et al. (2024); 43. Tian et al. (2024); 44. Yang et al. (2023); 45. Jiao et al. (2021); 46. Li et al. (2001); 47. Wu et al. (2017a); Yu et al. (2018); 48. 张洋等(2023b); 49. Yang et al. (2019); 50. Zhang et al. (2021b); 51. Sun et al. (2018); 52. Shao et al. (2012, 2015); 53. Li et al. (2021); 54. Kang et al. (2021); 55. Wei et al. (2020); 林旭等(2023c); 56. Xiang et al. (2007); 57. Wang et al. (2010); 58. Lin et al. (2014); 59. Zhu et al. (2020); 60. Fu et al. (2022a); 61. Lan et al. (2016); 62. Zheng et al. (2013a); Wang et al. (2022b); 63. Sun et al. (2021); Zhang et al. (2021b); 64. Lin et al. (2023b); 65. 王毅等(2023a); 66. Shu et al. (2021); 67. Liu et al. (2022a); 68. Zhang et al. (2019a); 69. Fan et al. (2005); Jia et al. (2010); 70. Hao et al. (2023); 71. Yang et al. (2006); Gu et al. (2014); Yue et al. (2019); 72. Zhang et al. (2021a); 73. Fu et al. (2021); 74. Lan et al. (2016); Fu et al. (2022b); 75. Zhang et al. (2017c); 76. Zhang et al. (2022b); 林旭等(2023b).

2 讨论

2.1 白垩纪（145–65 Ma）长江演化

晚中生代，东亚地区的东缘和南缘同时受到西太平洋和新特提斯洋的俯冲，华南地区在 140-120 Ma 和 110-80 Ma 分别发生了两期地壳伸展过程 (Li et al., 2014; 图 15a)。伸展作用导致盆地、地堑和伸展穹丘的发育，江汉盆地和望江盆地在此时开始断陷 (Xu et al., 2021; Su et al., 2023)。在白垩纪时期，青藏高原地区经历了剧烈的构造变形 (Ding et al., 2022)；秦岭山脉位于华北克拉通和华南板块之间，在 103-70 Ma 经历了显著的剥露过程 (Lin et al., 2023a)；湘鄂西山地在白垩纪由于地壳缩短而发生垂向抬升 (Feng et al., 2023)。在四川盆地的西部、北部和东部都发育了同期的沉积地层 (Meng et al., 2005; Li et al., 2018b)。因而，造山带的隆升和盆地的交替出现导致地形差异突出，有利于大河的发育 (Lin et al., 2024a)。由于青藏高原在白垩纪还未向东发生横向扩展，四川盆地南部的云贵高原还未强烈隆升，导致区域内的地形相对平坦 (Liu et al., 2022b)。另外，四川盆地在白垩纪并未发生明显的断陷过程，盆地内广泛分布水平状的侏罗统砂岩 (Liu et al., 2021; 图 7a)，这都有利于发源于秦岭、青藏高原的大河向南流入新特提斯洋。长江三峡地区在中生代处于剥露状态，峡区内零星分散着白垩统地层，发展为区域分水岭 (林旭等, 2023b)。江汉盆地在此时由于断陷作用，成为区域汇水中心，汇入其中的河流与流入四川盆地的河流相比，其流域面积更小 (张洋等, 2023; 图 8a)。类似的情况也发生在长江下游的望江盆地 (张义楷, 2003; 图 9a)。因而此时长江流域的上游、中游和下游处于分段演化阶段。

2.2 古近纪 (65-33 Ma) 长江演化

印度板块与亚洲大陆在约 65-60 Ma 发生碰撞 (Ding et al., 2022; Ibarra et al., 2023)。青藏高原海拔高于 4 km 的东西向山脉于 55 和 45 Ma 在南部和中部分别形成 (Ding et al., 2022)。藏东南地区在 50 Ma 受东北信风控制，出现炎热干燥的气候，形成了大规模的风成沙丘沉积，海拔仅约 700 m，生长着代表干燥气候的棕榈植物群 (Zheng et al., 2022; Zhao et al., 2023b)。藏东南地区约 36 Ma 抬升为现今的高度 (3800 m; Hoke et al., 2014; Zhao et al., 2023b)。受到青藏高原东扩的影响，秦岭山脉、湘鄂西山地、黄陵背斜在 50-35 Ma 发生快速隆升 (Tian et al., 2018a)。四川盆地内的早新生代地层零星分布在靠近龙门山的山麓地带，说明盆地内此时主要以剥蚀为主 (Richardson et al., 2008; 图 7a)。云贵高原在新生代早期并未广泛隆升 (Liu et al., 2022b)。亚洲季风大约在 35 Ma 从热带地区向北扩展至亚热带地区，位置大致相当于现在的云贵高原 (Sorrel et al., 2017; Fang et al., 2022; Yuan et al., 2023)。此时发源于青藏高原东南缘、秦岭和黄陵背斜以西的古红河开始流入南海 (Clift et al., 2008)。四川盆地在新生代没有经历断陷过程，但是江汉盆地、望江盆地、南黄海盆地和东海盆地在新生代早期 (60-35 Ma) 处于强烈断陷阶段，因此继续发展为局部的汇水中心 (Xu et al., 2021)。在始新世 (约 50-34 Ma) 华南地区形成温暖干燥的气候 (Lu et al., 2023)。因而在黄陵背斜以东的长江中下游的盆地广泛发育盐湖沉积，暗示了此时没有大型外流河流入或流出。而青藏高原东南缘在晚始新世逐渐出现的季风气候则有利于维系大型河流的流动。尽管剑川盆地的研究结果约束了金沙江可能在 37-35 Ma 东流，但综合考虑莺歌海盆地和江汉盆地的研究结果，说明此时东流的金沙江继续汇入古红河向南流动 (图 15b)。

尽管也有研究者认为古红河水系不存在，类似现今的长江上游水系自始新世以来就已经存在 (Wissink et al., 2016; Cao et al., 2023)。但是如下的证据并不支持这一结论：首先在四川盆地内部古新世和始新世地层零星分布，说明盆地内主要以侵蚀过程为主。其次，始新世时莺歌海内发育的巨型冲积扇，不太可能由目前短小的红河衍生。换句话说，流域面积广的古红河是这一冲积扇的主要塑造者。再者，江汉盆地西部的古新世和始新世沉积地层和长江上游没有明显的物源联系。此时在江汉盆地内部发育厚层的盐湖沉积，说明没有受到大型外流河流入或流出的影响。

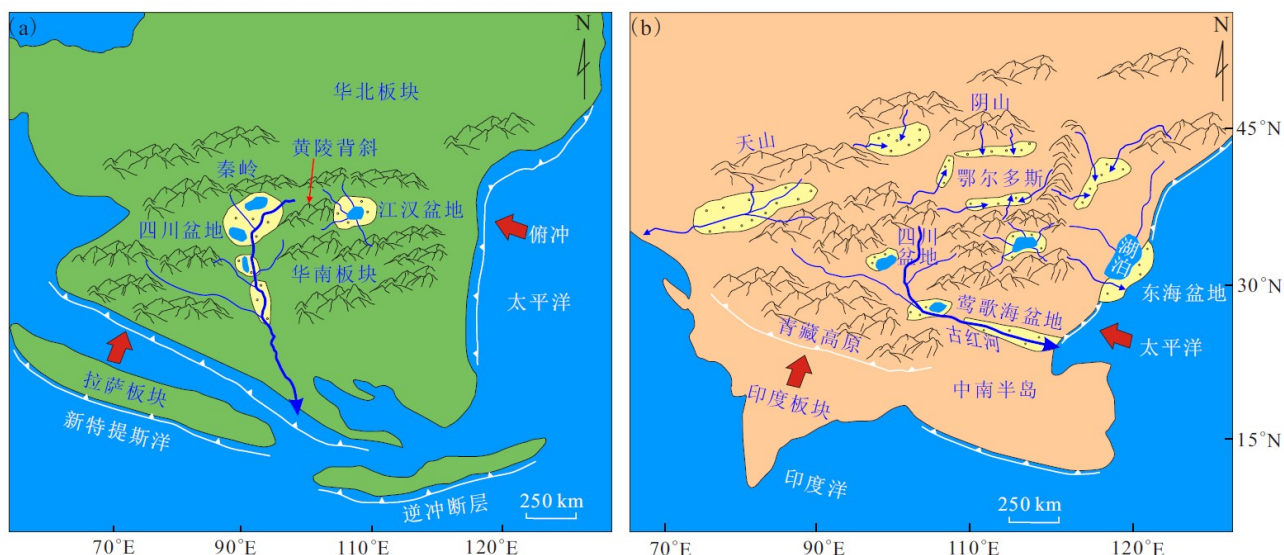


图 15 古地理重建图

Fig. 15 Paleogeographic reconstruction map

(a) 白垩纪长江演化重建; (b) 古近纪长江演化重建

2.3 新近纪-第四纪 (23-0 Ma) 长江演化

印度板块向亚洲大陆俯冲岩石圈的剥离和上涌是青藏高原地表隆升的主要驱动机制，高原在约 20 Ma 发生整体隆升 (Lin et al., 2019; Ding et al., 2022)，对南亚和东亚地貌的形成起到重要影响，并改组了区域大气环流 (Lu et al., 2023)。磷灰石和锆石低温热年代学数据结果表明，藏东南地区 20 Ma 至今的剥露速率和总体剥露量明显变快和增大 (Clark et al., 2005; Liu-Zeng et al., 2018)。云贵高原在中中新世的隆升导致原先南流的古红河彻底解体 (He et al., 2023; 图 16a)。亚洲季风在中中新世向北扩展至 30-36°N，已经完全涵盖了长江流域 (Wu et al., 2022)。金沙江、澜沧江、怒江在 20-15 Ma 发生了强烈的下切过程，著名的三江并流奇观在此时已经出现 (Brookfield, 1998; Liu-Zeng et al., 2008)。来自莺歌海盆地的物源对比结果也表明，红河和长江彼此分隔的河流形态自中中新世出现 (Wang et al., 2019)。乌江和长江三峡在中中新世经历了显著的下切过程，导致江汉盆地内堆积了来自长江上游的碎屑物质 (Yang et al., 2019)，同期的长江上游物质信号出现在南京地区 (Zheng et al., 2013a)、东海盆地 (Fu et al., 2021)。黄陵背斜以东的长江中下游盆地在中新世结束了拗陷，整体进入沉降阶段 (戴世昭, 1997; Wu et al., 2017)。青藏高原的隆升加大了与边缘海盆地之间的地势差异，产生的碎屑物质通量陡然增加，在河流的搬运下进入高原周围的边缘海 (Clift et al., 2004)。东海盆地在 23-18 Ma 时显著加快的沉积速率，单纯由流域较小的河流难以维系，这极有可能是长江在这一期已经完成了其上游、中游和下游的完整连通，将青藏高原、四川盆地、江汉盆地的碎屑沉积物进行侵蚀、搬运的结果。由于东海盆地南部和台湾岛此时已经处于海洋沉积环境 (Zhu et al., 2019)，因而长江的物质主要通过海流搬运的方式向太平洋扩散。

青藏高原在上新世已经整体隆升至和现今海拔相差无几的高度，东亚地区出现了典型的亚洲季风环流以及类似现今的地貌特征 (Lu et al., 2023)。受此影响，金沙江、雅砻江、大渡河等河流的下游由于强降雨形成的滑坡导致面积巨大的昔格达古湖出现 (Zhao et al., 2021b)，打破了中中新世长江上游的演化模式，从而出现河湖共存的现象。在剑川盆地出现的上新统三营组砾岩 (Kong et al., 2009)、金沙江攀枝花段的昔格达组砾岩 (赵希涛等, 2008)、四川盆地西部的大渡河和岷江流域出现的大邑砾岩 (李勇等, 2005)，长江三峡地区此时因长江东流的侵蚀而发育宽谷 (Li et al., 2001)，望江盆地出现的安庆砾石层 (Lin et al., 2023b)，南京地区

发育的雨花台砾石层 (Zhang et al., 2019a), 长江三角洲 (Liu et al., 2022a)、南黄海盆地出现沉积速率明显加快的现象 (Zhang et al., 2019a), 表明此时长江流域的水动力搬运能力比中中新世明显增强。随着东海盆地逐步发生海侵而整体被海水覆盖 (Cheng et al., 2023), 加上构造沉降过程, 导致长江下游逐步由南黄海盆地向南移动而进入东海 (Zhang et al., 2019a; Liu et al., 2022a)。因而, 华南地区类似现今的山-河-海分布模式在上新世已经出现。

进入第四纪, 亚洲季风进一步增强 (Lu et al., 2023)。先前保留在金沙江、雅砻江、大渡河的古普格达湖彻底解体 (Kong et al., 2012; Deng et al., 2021), 长江上游在青藏高原东南缘的干支流发生新的重组 (Zhao et al., 2021b)。金沙江、雅砻江、大渡河、岷江在 2-1 Ma 广泛出现下切过程 (Yang et al., 2020; 郑勇等, 2022; Liu et al., 2023), 江汉盆地、长江三角洲于此同时出现明显的物源变化 (Zhang et al., 2008; Kang et al., 2021), 表明长江流域在此时已经进入发展成熟阶段 (图 16b)。长江上游在 0.7-0.5 Ma 新一期的快速下切导致金沙江、大渡河、长江三峡地区再次发育河流阶地 (Huang et al., 2023)。而在长江中游的江汉盆地 (林旭等, 2021)、下游的长江三角洲 (Yue et al., 2018), 由于长江上游水系的调整和拓展, 出现了明显的物源变化现象。随着东海和黄海在中更新世均被海水覆盖, 长江上游持续的下切过程, 加上长江下游受到海水顶托的影响, 长江上游与下游侵蚀基准面之间的地势差异显著下降, 导致长江下游以堆积过程为主, 开始逐渐出现平原和三角洲的地貌形态。

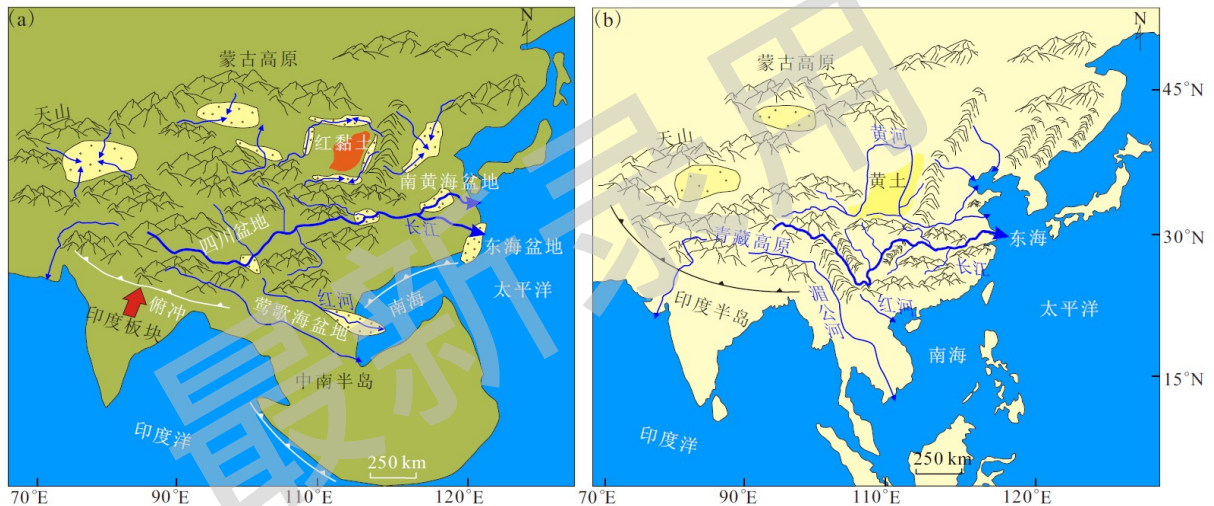


图 16 古地理重建图

Fig. 16 Paleogeographic reconstruction map

a. 新近纪长江演化重建; b. 第四纪长江演化重建

2.4 长江形成和演化的机制

在青藏高原及周边山脉的隆升过程中, 构造过程与气候变化和局部随机效应 (如山体滑坡) 相互作用, 决定了长江流域的河流地貌的发展 (Brookfield, 1998)。拉萨地块和羌塘地块约 120 Ma 时的碰撞导致青藏高原发生隆升, 对亚洲大陆内部的平流空气起到机械屏障的作用, 导致来自印度洋/太平洋的潮湿空气的影响增加 (Farnsworth et al., 2019; Wang et al., 2022a)。西太平洋板块向亚洲大陆俯冲导致整个华南板块向北西方向发生地壳缩短 (Li et al., 2014; 图 17a), 川东和湘鄂西山地逐渐变形, 在晚白垩世期间发生快速剥露 (Feng et al., 2023)。四川盆地白垩纪的沉积中心迁移和古地理的时空演化与华南板块顺时针旋转引起的多阶段陆内俯冲密切相关 (Meng et al., 2005; Li et al., 2018b)。加上长江三峡地区的阻隔, 在四川盆地发育类似现今密西西比河的流域形态 (Wang et al., 2020; Su et al., 2023)。构造活动导致华南板块出现盆地断陷和造山带剥露, 从而奠定了长江中生代的主要流向 (Lin et al., 2024a; 图 17i)。但也

有学者发现四川盆地、兰坪盆地和思茅盆地在白垩纪出现干旱气候 (Li et al., 2016; Wu et al., 2017a; 图 17e), 因而青藏高原东缘白垩世时期展现了一个复杂的水系演化模式 (Wang et al., 2021), 在大河流动的同时部分区域出现盐湖、沙丘等干旱地貌特征 (Wu et al., 2023)。

新生代以来, 由于华南板块的俯冲和印度-亚洲大陆的碰撞, 三江地区发生了强烈的变形和断续的岩浆活动 (Deng et al., 2014; Liu-Zeng et al., 2018)。大约在 45-30 Ma, 印度板块向下俯冲和回撤导致岩石圈缩短, 地壳浅部和深部分别出现褶皱-逆冲和剪切, 并伴随着多次岩浆活动 (Liu-Zeng et al., 2008; Deng et al., 2014; 图 17b)。江汉盆地中新统地层和宜昌第四系砾石层中发现的新生代岩浆锆石来源于此 (Yang et al., 2019; 林旭等, 2023c), 但并不是同期搬运沉积的, 而是经历了沉积再循环后被金沙江搬运而下 (Wang et al., 2010; Yang et al., 2019; 林旭等, 2023c)。古近纪早期, 金沙江、澜沧江和怒江等大河在青藏高原东南缘的间隔较广, 坡度较低, 向南流入近似平行的峡谷, 然后呈扇形向东南流入不同的海域 (Brookfield, 1998), 此时干旱的气候影响了大河的规模 (图 17f)。但是在古近纪晚期, 青藏高原东南缘与中南半岛之间的差异剪切、顺时针旋转和季风气候导致了这些大河的流向开始发生调整 (Brookfield, 1998; 图 17g), 金沙江在这一阶段的流向被认为是高度动态的 (Chen et al., 2017)。此时河道被限制在与走滑断裂有关的构造带上, 形成了长江第一弯, 这是现代长江形成的重要步骤 (Zheng et al., 2021; 图 17j)。

中新世强化的构造变形和亚洲季风可能引发了藏东南一系列的河流袭夺和整合 (Clark et al., 2004; Yan et al., 2012; Yang et al., 2020)。印度板块和华南板块在 20-10 Ma 的双向俯冲使得三江地区发生弯曲, 三江地区南部表现为块体旋转、挤压和剪切, 三江地区东部出现拉张和幔源扰动 (Deng et al., 2014; Zhang et al., 2023b)。玉龙冲断带晚渐新世-早中新世的逆冲作用使金沙江第一弯附近的支流向北流 (图 17c), 随后由冲断作用引起的局部基准面下降引起长江快速向上游侵蚀 (Zhang et al., 2022a)。从气候上看, 亚洲季风的增强导致区域内的气候环境更加湿润 (Wu et al., 2022; 图 17h), 有利于大型河流的稳定流动。长江三峡的贯通是对四川盆地水系反转和江汉盆地、南黄海盆地基准面下降的响应 (Wang et al., 2014c; Jiao et al., 2022; Tian et al., 2024), 这导致长江中下游的高侵蚀速率向三峡地区的上游传播 (Zheng et al., 2013a; Lan et al., 2016; Yang et al., 2023)。因而在江汉盆地、望江盆地、南黄海盆地和东海盆地此时广泛分布的粗粒沉积物是对这一构造断陷过程和亚洲夏季风增强的响应 (Wang et al., 2022b; 图 16k)。秦岭在中中新世的隆升分隔了东流的长江和局部发育的黄河流域 (Lin et al., 2023a)。华南板块内部的武夷山-南岭山脉的进一步抬升引起了东亚地区的水系格局调整和流域划分, 导致长江、珠江和闽江现代河流体系的建立 (Yan et al., 2018)。

在晚中新世, 河流袭夺和水系整合带来的增强侵蚀力推动了三江地区的大河出现了 1-2 km 的侵蚀 (Nie et al., 2018; Ge et al., 2023; Rohrmann et al., 2023), 这得到南海盆地 (Clift et al., 2004) 和东海盆地 (Fu et al., 2021) 同期沉积过程的响应。青藏高原东南缘断裂活动在上新世 (5-3 Ma) 的活动 (Wang and Burchfiel, 2000; Kirby et al., 2002; 图 17c), 加上亚洲季风处于增强阶段 (Lu et al., 2023; 图 16h), 导致长江上游河流发生局部堰塞, 出现面积广大的湖泊 (Kong et al., 2009; 图 17l)。构造和气候因素共同导致了长江三峡地区在 3.6 Ma 发生快速下切 (Li et al., 2001)。望江盆地和南京附近出现上新统砾石层, 长江三角洲的物源发生巨大变化, 这与上新世以来青藏高原的持续隆升、季风气候和中国东部沿海的加速沉降有关 (Wang, 2004)。青藏高原东南缘的程海断裂在早更新世的侧向运动 (图 17d), 最终导致昔格达古湖发生外溢, 在亚洲季风的共同作用下, 引发长江上游干支流下切, 导致水系重组 (Kong et al., 2012; Zhao et al., 2021a; 图 17m)。金沙江巧家-蒙姑段河谷在更新世以来至少发生了五次滑坡堵江堰塞事件, 导致河谷强烈加积, 这是对区域构造抬升和气候变化的响应, 河谷的发育模式以反复的“下切-滑坡-堰塞-堆积-下切”过程为主 (Liu et al., 2023)。

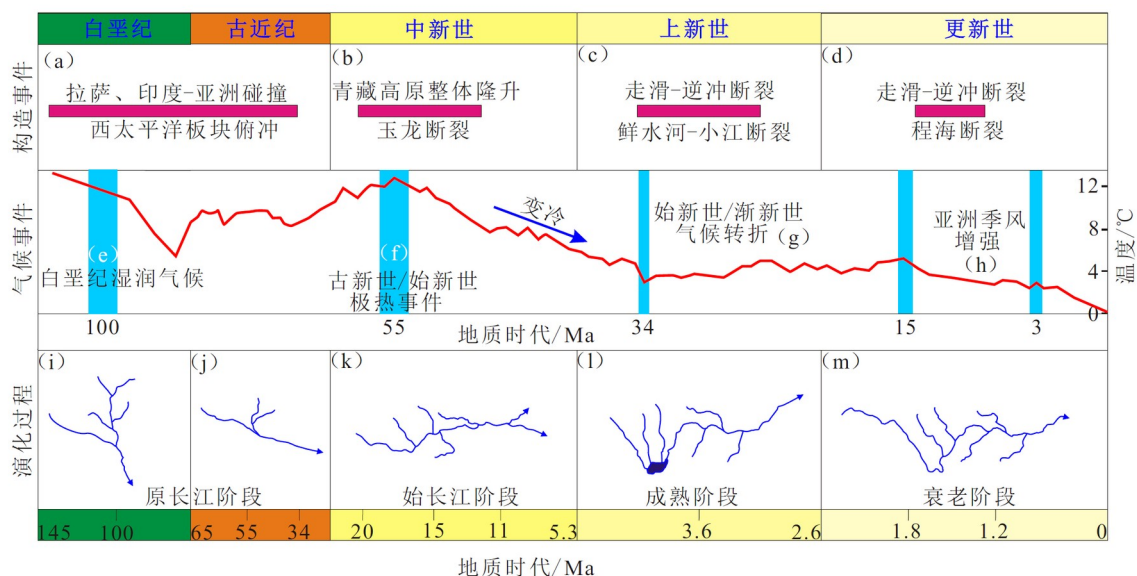


图 17 构造和气候事件影响长江发育

Fig. 17 Structural and climatic events affecting the development of the Yangtze River

a-d. 中生代-新生代长江流域主要构造事件 (Deng et al., 2014; Li et al., 2014; Kong et al., 2009); e-h. 中生代-新生代长江流域主要气候事件 (Zachos et al., 2008; Huber et al., 2018; Farnsworth et al., 2019; Lu et al., 2023); i, j. 白垩纪和古近纪长江向南和南东方向流, 属于原长江阶段; k. 中新世长江完成了全流域的连通, 开始向东流, 处于始长江阶段; l. 长江在上新世进入成熟阶段; m. 长江流域在第四纪进入衰老阶段

2.5 研究展望

长江流域中生代和新生代地貌演化的驱动机制是一个综合作用的结果, 这主要通过其对局部或区域相对基准面、坡度变化和气候变化的响应而实现 (Fan et al., 2008)。尽管科研工作者早就认识到河流的出现是构造活动或气候变化的产物 (Demoulin et al., 2017), 但在这个记录中分离出导致河流形成的因素常常很复杂, 因为河流的发育过程与许多其他控制因素 (例如气候、岩性) 和反馈机制 (例如侵蚀导致的均衡抬升) 相互作用。因此, 尽管近年来对河流演化的多重控制因素的理解和建模有了快速进展, 但是对构造作用和气候变化的推断通常依赖于一系列简化条件, 如均匀的基岩侵蚀性和降雨量, 恒定且均匀的抬升速率和沉积物负荷 (Demoulin et al., 2017)。数值模拟仍然需要结合实地考察和其他研究方法的结果来获得更准确的结论。实际上河流地貌能够在数百万年的时间尺度上对构造扰动做出瞬态响应, 保存在阶地或附近的地层可以记录和保留地貌对构造作用的侵蚀响应。但由于地表侵蚀作用导致相应的河流侵蚀地貌不复存在或保存不完整, 例如长江流域的河流阶地形成时代普遍不超过 2 Ma, 这相对于长江中新世和上新世的发育存在较大的年代断档, 因而保留在沉积盆地的地层对于大河起源研究则变得特别有价值。不同的研究者从河流阶地或者盆地沉积记录去研究长江的形成时代往往存在较大差异。

物种对地理环境变化的反应速度因物种而异。一些物种可以对环境变化做出相对迅速的适应或迁移, 而对于其他物种来说, 这个过程可能相对较慢。总的来说, 物种对地理环境变化的反应速度是一个复杂的过程, 取决于物种的适应能力、迁移能力以及其他影响因素的综合效应, 利用生物基因谱系对比研究大河的形成时代是一种间接方法, 依赖于分子钟估计和基因演化的假设。因而单纯依靠某一物种的 DAN 基因谱系对比去研究大河的形成时代需要谨慎。

在长江的演化研究中, 对于物源示踪研究的数量在继续增加, 而不同地点和地层的物源特征的复杂性和异质性将进一步被揭示出来。对于长江流域新兴的物源示踪分析方法, 例如, 碎屑白云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学, 在满足源-汇对比研究中样品的代表性和多样本对比的要

求下, 还需要投入大量工作, 因为和碎屑锆石 U-Pb 年龄分析相比 ($n > 90$), 其每个样品分析的单颗粒矿物数量明显偏少 ($20 < n < 70$)。然而, 长江流域碎屑锆石 U-Pb 年龄物源示踪研究面临最大的挑战是其上游、中游和下游的峰值年龄重叠。尤其在晚三叠纪当松潘-甘孜复理石带堆积了大量来自扬子克拉通的碎屑物质, 这些复理石带的物质现今又被长江干支流搬运到扬子克拉通, 导致与扬子克拉通自身的锆石 U-Pb 年龄信号很难区分。为了解决这些问题, 部分研究者已经注意到多物源示踪方法联合使用的优势。然而, 在实际研究中, 由于测试数据偏少和潜在物源区相对应的目标矿物的地球化学信息较少的问题, 导致多物源示踪方法在使用过程中, 仍然很难起到相互检验或者补充的作用。对于当前可用的大数据集, 例如碎屑锆石 U-Pb 年代学, 不应忽视取样偏差的问题, 特别是在陆上和海洋大型沉积盆地中存在较少的深部钻孔数量和较低的钻孔取样分辨率, 这导致跨不同盆地比较物源特征的尝试可能会产生不可靠的结果。考虑到长江的流域面积过大, 仍然需要更大的样品量覆盖, 从而进一步在适当的尺度上定义潜在的源地区。

总而言之, 推断大型古河流的沉积物搬运系统是物源分析中较为困难的问题之一。因而除了常用的物源示踪方法外, 利用统计模型来辅助物源分析, 可以提高推断的可靠性。例如使用聚类分析、主成分分析、逆蒙特卡罗模拟等方法将多个特征进行综合考虑, 以识别不同的源区对汇区的贡献。此外, 与世界上其他大河的物源示踪研究相比, 长江流域的物源贡献量化研究目前还没有更加系统的研究。

3 结论

基于长江形成时代研究的意义和现存的争议, 我们系统搜集长江形成时代已报道的研究结果, 经过综合分析和讨论, 建立长江形成时代的完整框架, 从而深入理解青藏高原隆升、东亚环境变化、亚洲边缘海沉积的耦合作用。得到的主要结论如下:

(1) 晚中生代, 东亚地区的东缘和南缘同时受到西太平洋板块和新特提斯洋板块的俯冲。四川盆地的西部、北部和东部的造山带受此影响经历了显著的剥露过程, 而盆地内部广泛分布的水平状侏罗统砂岩并未发生明显的断陷过程, 导致地形差异突出, 这有利于南流的大河的发育。江汉盆地和望江盆地在此时由于断陷作用, 成为区域汇水中心, 汇入其中的河流与流入四川盆地的河流相比, 其流域面积更小。此时长江流域的上游、中游和下游处于分段演化阶段。

(2) 四川盆地在新世代没有经历断陷过程, 盆地内此时主要以剥蚀为主, 发育外流的大河。黄陵背斜以东的长江中下游地区出现强烈断陷, 因此继续成为局部的汇水中心, 其中江汉盆地广泛发育盐湖沉积, 暗示了此时没有大型外流河流入或流出。而青藏高原东南缘在晚始新世逐渐出现的季风气候则有利于维系大型河流的流动。此时发源于青藏高原东南缘、秦岭和黄陵背斜以西的古红河开始流入南海。

(3) 青藏高原在约 20 Ma 发生整体垂向隆升和侧向挤出, 导致云贵高原发生强烈的剥露过程, 从而引起原先南流的古红河彻底解体, 红河和长江彼此分隔的河流形态自中中新世出现。亚洲季风在中中新世向北扩展至温带地区, 已经完全涵盖了长江流域。长江三峡在中中新世经历了显著的下切过程, 江汉盆地、南京地区和东海盆地内堆积了来自长江上游的碎屑物质。因而, 长度超过 6000 km 东流的长江在中中新世已经出现。

(4) 上新世金沙江、雅砻江、大渡河等下游形成的滑坡导致面积巨大的昔格达古湖出现, 打破了中中新世长江上游的演化模式, 从而出现河湖共存的现象。在剑川盆地、大渡河和岷江、望江盆地、南京地区发育厚层砾石层, 以及长江三峡地区发育的宽谷, 表明此时长江的水动力搬运能力比中中新世明显增强。随着东海盆地逐步发生海侵而整体被海水覆盖。因而, 华南地区类似现今的山-河-海分布模式在上新世已经出现。

(5) 昔格达古湖在 2-1 Ma 彻底解体, 导致长江的干支流发生新的重组, 江汉盆地、长江三角洲于此同时出现物源变化。长江上游在 0.7-0.5 Ma 发生新一期的快速下切导致金沙江、大渡河、长江三峡地区发育河流阶地, 在长江中游的江汉盆地、下游的长江三角洲出现了物源变化

现象。随着东海和黄海在中更新世均被海水覆盖，长江上游持续的下切过程，加上长江下游受到海水顶托的影响，长江上游与下游侵蚀基准面之间的地势差异显著下降，导致长江下游以堆积过程为主，开始逐渐出现三角洲的形态，表明长江流域在第四纪已经进入成熟阶段。

References

- Ashworth P J, Lewin J. 2012. How do big rivers come to be different?[J]. *Earth-Science Reviews*, 114(1-2): 84–107.
- Avice J C. 1989. Gene trees and organismal histories: a phylogenetic approach to population biology[J]. *Evolution*, 43(6): 1192–1208.
- Barbour G B. 1936. Physiographic history of the Yangtze[J]. *The Geographical Journal*, 87(1): 17–32.
- Banner J L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 65(3-4): 141–194.
- Bernet M, Garver J I. 2005. Fission-track analysis of detrital zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 205–237.
- Best J. 2019. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature Geoscience*, 12(1): 7–21.
- Blair T C, McPherson J G. 1999. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1): 6–19.
- Blum M D, Törnqvist T E. 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward[J]. *Sedimentology*, 47: 2–48.
- Blum M D. 2022. Large river systems and climate change[J]. *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Second Edition, 916–957.
- Brookfield M E. 1998. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards[J]. *Geomorphology*, 22(3-4): 285–312.
- Brown R A, Pasternack G B. 2019. How to build a digital river[J]. *Earth-Science Reviews*, 194: 283–305.
- Cao K, Wang G, Leloup P H, et al. 2019. Oligocene-Early Miocene topographic relief generation of southeastern Tibet triggered by thrusting[J]. *Tectonics*, 38(1): 374–391.
- Cao K, Tian Y, van der Beek P, et al. 2022. Southwestward growth of plateau surfaces in eastern Tibet[J]. *Earth-Science Reviews*, 104160.
- Cao L, Shao L, van Hinsbergen D J J, et al. 2023. Provenance and evolution of East Asian large rivers recorded in the East and South China Seas: A review[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1–31.
- Carter A, Bristow C S. 2003. Linking hinterland evolution and continental basin sedimentation by using detrital zircon thermochronology: a study of the Khorat Plateau Basin, eastern Thailand[J]. *Basin Research*, 15(2): 271–285.
- Caracciolo L. 2020. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development[J]. *Earth-Science Reviews*, 209: 103226.
- Chen Y, Yan M, Fang X, et al. 2017. Detrital zircon U–Pb geochronological and sedimentological study of the Simao Basin, Yunnan: Implications for the Early Cenozoic evolution of the Red River[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 476: 22–33.
- Chen Z, Xu K, Watanabe M. 2022. Dynamic hydrology and geomorphology of the Yangtze River[M]. *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Second Edition, 687–703.
- Chen F, Xue G, Wang Y, et al. 2023. Evolution of the Yangtze River and its biodiversity[J]. *The Innovation*, 4(3):1-3.
- Cheng Y, Li X, Shu J, et al. 2019. Sedimentary evolution and transgressions of the western Subei Basin in Eastern China since the Late Pliocene[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 93(1): 155–166.
- Cheng H, Suo Y, Ding X, et al. 2023. Neogene morphotectonic evolution of the East Asian Continental Shelf[J]. *Geomorphology*, 445: 108975.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from

- large-scale drainage patterns[J]. *Tectonics*, 23(1):1-24.
- Clark M K, House M A, Royden L H, et al. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 33(6): 525-528.
- Clift P D, Layne G D, Blusztajn J. 2004. Marine sedimentary evidence for monsoon strengthening, Tibetan uplift and drainage evolution in East Asia[J]. *Continent-Ocean Interactions in the East Asian Marginal Seas*, Geophys. Monogr. Ser, 149: 255-282.
- Clift P D, Long H V, Hinton R, et al. 2008. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): 1-29.
- Clift P D, Carter A, Wysocka A, et al. 2020. A Late Eocene-Oligocene through-flowing river between the Upper Yangtze and South China Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(7): e2020GC009046.
- Cui Y, Shao L, Li Z X, et al. 2024. Early Cenozoic drainage network and paleogeographic evolution within the SE Tibetan Plateau and its surrounding area: Synthetic constraints from onshore-offshore geological dataset[J]. *Earth-Science Reviews*, 258, 104932.
- Demoulin A, Mather A, Whittaker A. 2017. Fluvial archives, a valuable record of vertical crustal deformation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 166: 10-37.
- Deng J, Wang Q, Li G, et al. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268-299.
- Deng B, Chew D, Jiang L, et al. 2018. Heavy mineral analysis and detrital U-Pb ages of the intracontinental Paleoyangtze basin: Implications for a transcontinental source-to-sink system during Late Cretaceous time[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 130(11-12): 2087-2109.
- Deng B, Chew D, Mark C, et al. 2021. Late Cenozoic drainage reorganization of the paleo-Yangtze river constrained by multi-proxy provenance analysis of the Paleo-lake Xigeda[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 133(1-2): 199-211.
- Deng T, Hu X, Chew D, et al. 2023. Early Jurassic initiation of the modern drainage pattern of the Dabie orogen (East China) revealed by a multi-proxy provenance approach[J]. *Basin Research*, 36(1): e12834.
- Deiner K, Altermatt F. 2014. Transport distance of invertebrate environmental DNA in a natural river[J]. *PloS one*, 9(2), 1-8.
- Ding R, Chang Y, Min K, et al. 2021. Post-orogenic topographic evolution of the Dabie orogen, Eastern China: Insights from apatite and zircon (U-Th)/He thermochronology[J]. *Geomorphology*, 374: 107487.
- Ding L, Kapp P, Cai F, et al. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652-667.
- Dong Y, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40.
- Dong Y, Shi X, Sun S, et al. 2022. Co-evolution of the Cenozoic tectonics, geomorphology, environment and ecosystem in the Qinling Mountains and adjacent areas, Central China[J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(2): 100032.
- Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. 2006. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5-6): 651-671.
- Fan D, Li C, Yokoyama K, et al. 2005. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 48: 1718-1727.
- Farnsworth A, Lunt D J, Robinson S A, et al. 2019. Past East Asian monsoon evolution controlled by paleogeography, not CO₂[J]. *Science Advances*, 5(10): eaax1697.
- Fang X, Guo Z, Jiang D, et al. 2022. No monsoon-dominated climate in northern subtropical Asia before 35 Ma[J].

- Global and Planetary Change, 218: 103970.
- Feng Y, Song C, He P, et al. 2021. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Jianchuan Basin, southeastern Tibetan Plateau, and its implications for tectonic and paleodrainage evolution[J]. *Terra Nova*, 33(6): 560-572.
- Feng Q, Qiu N, Wu H, et al. 2023. Thermo-kinematic constraints on restoration of the Eastern Sichuan fold-and-thrust belt, South China[J]. *Tectonics*, 42(9): e2022TC007630.
- Finnegan N J, Sklar L S, Fuller T K. 2007. Interplay of sediment supply, river incision, and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3): 1-17.
- Fu X, Zhu W, Geng J, et al. 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, Yang R, Zhu W, et al. 2022a. Initiation of a “lost” large river on the East Asia margin in the Middle Eocene[J]. *Preprints*, 2022030017.
- Fu X, Hu L, Zhu W, et al. 2022b. Miocene provenance changes in Taiwan caused by southward input of sediments from East China Sea Basin[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 849181.
- Fu Q, Hu Z, Feng D, et al. 2023. Restoration and evolution of the Paleogene shale sedimentary environment in the Subei Basin, China[J]. *ACS omega*, 1-12.
- Ge Y, Fox M, Liu-Zeng J, et al. 2023. Incision history of the Mekong River valley revealed by spatially differential exhumation[J]. *Geomorphology*, 435: 108730.
- Granger D E, Fabel D, Palmer A N. 2001. Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in Mammoth Cave sediments[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 113(7): 825-836.
- Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. 2002. Cretaceous–Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China)[J]. *Tectonophysics*, 359(3-4): 225-253.
- Gu J, Chen J, Sun Q, et al. 2014. China's Yangtze delta: Geochemical fingerprints reflecting river connection to the sea[J]. *Geomorphology*, 227: 166-173.
- Guo R, Sun X, Li Y, et al. 2021. Cenozoic evolution of the Yangtze River: Constraints from detrital zircon UPb ages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 579: 110586.
- Hao S, Cheng Y, Gao B, et al. 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[J]. *Quaternary International*, 671: 33-43.
- Hancock G S, Anderson R S. 2002. Numerical modeling of fluvial strath-terrace formation in response to oscillating climate[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(9): 1131-1142.
- He M, Zheng H, 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: 186-203.
- He Z, Zhang X, Bao S, et al. 2015. Multiple climatic cycles imprinted on regional uplift-controlled fluvial terraces in the lower Yalong River and Anning River, SE Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 250: 95-112.
- He M, Zheng H, Clift P D, et al. 2021. Paleogene Sedimentary Records of the Paleo-Jinshajiang (Upper Yangtze) in the Jianchuan Basin, Yunnan, SW China[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(6): e2020GC009500.
- He J, Garzanti E, Jiang T, et al. 2023. Evolution of eastern Asia river systems reconstructed by the mineralogy and detrital-zircon geochronology of modern Red River and coastal Vietnam river sand[J]. *Earth-Science Reviews*, 104572.
- Hoke G D, Liu-Zeng J, Hren M T, et al. 2014. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 394: 270-278.

- Hu S, Kohn B P, Raza A, et al. 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 H, Xiang F, Zhang D, et al. 2023. New evidence from heavy minerals and detrital zircons in Quaternary fluvial sediments for the evolution of the upper Yangtze River, South China[J]. *Quaternary Research*, 113: 162-181.
- Huber B T, MacLeod K G, Watkins D K, et al. 2018. The rise and fall of the Cretaceous Hot Greenhouse climate[J]. *Global and Planetary Change*, 167: 1-23.
- Ibarra D E, Dai J, Gao Y, et al. 2023. High-elevation Tibetan Plateau before India–Eurasia collision recorded by triple oxygen isotopes[J]. *Nature Geoscience*, 16(9): 810-815.
- Ivy-Ochs S, Kober F. 2008. Surface exposure dating with cosmogenic nuclides[J]. *E&G Quaternary Science Journal*, 57(1/2): 179-209.
- Jia J T, Zheng H B, Huang X T, et al. 2010. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River[J]. *Science Bulletin*, 55: 1520-1528.
- Jiao R, Yang R, Yuan X. 2021. Incision history of the Three Gorges, Yangtze River constrained from inversion of river profiles and low-temperature thermochronological data[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(3): 2020JF005767.
- Jiao R, 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[J]. *Geomorphology*, 398: 108025.
- Kang C, Li C A, Wei C, et al. 2021. Heavy mineral assemblage variation in late Cenozoic sediments from the Middle Yangtze River Basin: Insights into basin sediment provenance and evolution of the Three Gorges Valley[J]. *Minerals*, 11(10): 1-13.
- Kellerhals R, Church M, Bray D I. 1976. Classification and analysis of river processes[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(7): 813-829.
- Kong P, Granger D E, Wu F Y, et al. 2009. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1-2): 131-141.
- Kong P, Zheng Y, Caffee M W. 2012. Provenance and time constraints on the formation of the first bend of the Yangtze River[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(6): 1-15.
- Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Tectonics*, 21(1): 1-18.
- Lai Z, Zhao Q, Yan Y, et al. 2023. Mesozoic evolution of large-scale drainage systems in the Indochina Block: evidence from paleomagnetic and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of the Geological Society*, jgs2023-084.
- Lan Q, Yan Y, Huang C Y, et al. 2016. Topographic architecture and drainage reorganization in Southeast China: Zircon U-Pb chronology and Hf isotope evidence from Taiwan[J]. *Gondwana Research*, 36: 376-389.
- Lee J S. 1924. Geology of the gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the gorges[J]. *Bull Geol Soc China*, 3: 351-391.
- Lee C Y. 1934. The development of the upper Yangtze valley[J]. *Bull Geol Soc China*, 3: 107-118.
- Lei C, Clift P D, Ren J, et al. 2019. A rapid shift in the sediment routing system of Lower-Upper Oligocene strata in the Qiongdongnan Basin (Xisha Trough), Northwest South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 104: 249-258.
- Lei H, Shen X, Liu X, et al. 2022. Oligocene-early Miocene rapid exhumation along the Xianshuihe fault system: Implications for the growth of the Southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 240: 105443.
- Lewin J, Gibbard P L. 2010. Quaternary river terraces in England: forms, sediments and processes[J]. *Geomorphology*, 120(3-4): 293-311.
- Lewin J, Ashworth P J. 2014. Defining large river channel patterns: Alluvial exchange and plurality[J]. *Geomorphology*, 215: 83-98.

- Li J, Xie S, Kuang M. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation[J]. *Geomorphology*, 41(2-3): 125-135.
- Li J, Zhang Y, Dong S, et al. 2012. Late Mesozoic–Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China[J]. *Tectonophysics*, 570: 163-183.
- Li J, Zhang Y, Dong S, et al. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134: 98-136.
- Li Y, He D, Chen L, et al. 2016. Cretaceous sedimentary basins in Sichuan, SW China: Restoration of tectonic and depositional environments[J]. *Cretaceous Research*, 57: 50-65.
- Li S, Zhao S, Liu X, et al. 2018a. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 37-75.
- Li Y, He D, Li D, et al. 2018b. Sedimentary provenance constraints on the Jurassic to Cretaceous paleogeography of Sichuan Basin, SW China[J]. *Gondwana Research*, 60: 15-33.
- Li Y, Zhao J, Wei C, et al. 2021. Cadmium and clay mineral analysis of late Pliocene–Pleistocene deposits from Jiangnan Basin, central China: Implications for sedimentary provenance and evolution of the Yangtze River[J]. *Quaternary International*, 598: 1-14.
- Li J, Dong S, Cawood P A, et al. 2023. Cretaceous long-distance lithospheric extension and surface response in South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 104496.
- Lin C M, Zhang X, Zhang N, et al. 2014. Provenance records of the North Jiangsu Basin, East China: Zircon U–Pb geochronology and geochemistry from the Paleogene Dainan Formation in the Gaoyou Sag[J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(1): 99-114.
- Lin X, Tian Y, Donelick R A, et al. 2019. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northeastern edge of the Tibetan plateau: Evidence from modern river detrital apatite fission-track age constraints[J]. *Journal of Asian earth sciences*, 170: 84-95.
- Lin X, Jolivet M, Liu-Zeng J, et al. 2021. Mesozoic-Cenozoic cooling history of the Eastern Qinghai Nan Shan (NW China): Apatite low-temperature thermochronology constraints[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 572: 110416.
- Lin X, Liu-Zeng J, Wu L, et al. 2023a. Meso–Cenozoic exhumation in the South Qinling Shan (Central China): Recorded by detrital apatite fission-track dating of modern river sediments[J]. *Minerals*, 13(10): 1-18.
- Lin X, Li C, Liu-Zeng J, et al. 2023b. Detrital zircon U-Pb age analysis of Late Pliocene deposits from the lower Yangtze River, South China: Implications for sedimentary provenance and evolution of the Yangtze River[J]. *Journal of Earth Science*, doi: 10.1007/s12583-023-1961-9.
- Lin X, Liu-Zeng J, Jolivet M, et al. 2024a. Sedimentary provenance constraints on the Cretaceous to Cenozoic palaeogeography of the western margin of the Jiangnan Basin, South China[J]. *Gondwana Research*, 125: 343-358.
- Lin X, Xu Q, Barham M, et al. 2024b. Tracing the source areas of detrital zircon and K-feldspar in the Yellow River Basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 104718.
- Lin X, Jolivet M, Liu-Zeng J, et al. 2024c. Paleozoic-Mesozoic multistage tectonic evolution of the North Qilian Shan revealed by detrital zircon U-Pb and fission-track double dating. *Geomorphology*, 466: 109447.
- Liu S, Yang Y, Deng B, et al. 2021. Tectonic evolution of the Sichuan basin, southwest China[J]. *Earth-Science Reviews*, 213: 103470.
- Liu Y, Liu X, Wang S, et al. 2022a. Late Cenozoic channel migration of the proto-Yangtze River in the delta region: Insights from cosmogenic nuclide burial dating of onshore boreholes. *Geomorphology*, 407: 108228.
- Liu Y, Wang S, Xu S, et al. 2022b. New chronological constraints on the Plio-Pleistocene uplift of the Guizhou Plateau, SE margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Geochronology*, 67: 101237.

- Liu F, Gao H, Li Z, et al. 2023. Geochronological and sedimentological study of the fluvio-lacustrine deposits from Shigu to Longjie: Implications for the evolution of the lower Jinsha River since the Early Pleistocene[J]. *Water*, 15(20): 1-19.
- Liu-Zeng J, Tapponnier P, Gaudemer Y, et al. 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan plateau: Implications for topographic relief evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F4): 1-26.
- Liu-Zeng J, Zhang J, McPhillips D, et al. 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.
- Lu H, Feng H, Lyu H, et al. 2023. Formation and evolution of the Asian landscape during the Cenozoic[J]. *The Innovation Geoscience*, 1(2): 100020-1.
- Lyu C, Li C, Chen G, et al. 2021. Zircon U–Pb age constraints on the provenance of Upper Oligocene to Upper Miocene sandstones in the western Qiongdongnan Basin, South China sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 126: 104891.
- McPhillips D, Hoke G D, Liu-Zeng J, et al. 2016. Dating the incision of the Yangtze River gorge at the First Bend using three-nuclide burial ages[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(1): 101-110.
- Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 323(3-4): 183-196.
- Meng Q R, Wang E, Hu J M. 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the South China block[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(3-4): 396-410.
- Miall A D. 2006. How do we identify big rivers? And how big is big?[J]. *Sedimentary Geology*, 186(1-2): 39-50.
- Morley C K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike–slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 347(4): 189-215.
- Najman Y, Zhuang G, Carter A, et al. 2023. When did the Indus River of South-Central Asia take on its “modern” drainage configuration?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 136(7-8), 2815-2830.
- Nie J, Ruetenik G, Gallagher K, et al. 2018. Rapid incision of the Mekong River in the middle Miocene linked to monsoonal precipitation[J]. *Nature Geoscience*, 11(12): 944-948.
- Nijssen B, O'Donnell G M, Hamlet A F, et al. 2001. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic change*, 50: 143-175.
- Nguyen T A, Fyhn M B, Kristensen J Å, et al. 2021. Provenance of the Phuquoc Basin fill, southern Indochina: Implication for Early Cretaceous drainage patterns and basin configuration in Southeast Asia[J]. *Gondwana Research*, 98: 166-190.
- Reiners P W, Brandon M T. 2006. Using thermochronology to understand orogenic erosion[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34: 419-466.
- Potter P E. 1978. Significance and origin of big rivers[J]. *The Journal of Geology*, 86(1): 13-33.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 113(B4): 1-23.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? [J]. *Geology*, 38(6): 551-554.
- Rohrmann A, Kirby E, Schwanghart W. 2023. Accelerated Miocene incision along the Yangtze River driven by headward drainage basin expansion[J]. *Science Advances*, 9(36): eadh1636.
- Shao L, Yuan S, Kang C, et al. 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: 57-64.

- Shao L, Yuan S, Kang C, et al. 2015. Changing provenance of late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 6(4): 605-615.
- Shi H C, Shi X B, Yang X Q, et al. 2013. The exhumation process of Mufushan granite in Jiangnan uplift since Cenozoic: Evidence from low-temperature thermochronology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(3): 273-286.
- Shen C B, Mei L F, Xu S H. 2009. Fission track dating of Mesozoic sandstones and its tectonic significance in the Eastern Sichuan Basin, China[J]. *Radiation Measurements*, 44(9-10): 945-949.
- Shen C B, Donelick R A, O'Sullivan P B, et al. 2012. 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. *Sedimentary Geology*, 281: 194-207.
- Shen C B, Hu D, Min K, et al. 2020. Post-orogenic tectonic evolution of the Jiangnan-Xuefeng Orogenic Belt: Insights from multiple geochronometric dating of the Mufushan Massif, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 31: 905-918.
- Shu Q, Zhao Z, Zhao Y, et al. 2021. Magnetic properties of late Cenozoic sediments in the Subei Basin: Implications for the Yangtze River run-through time[J]. *Journal of Coastal Research*, 37(1): 122-131.
- Sorrel P, Eymard I, Leloup P H, et al. 2017. Wet tropical climate in SE Tibet during the Late Eocene[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 1-11.
- Su H, Dong M, Hu Z. 2019. Late Miocene birth of the Middle Jinsha River revealed by the fluvial incision rate[J]. *Global and Planetary Change*, 183: 103002.
- Su J, Lin X, Li C A, et al. 2023. Late Mesozoic exhumation of the Huangling Massif: Constraints on the evolution of the middle Yangtze River[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 98(1), 250-264.
- Sun X, Kuiper K F, Wang J, et al. 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, Kuiper K F, Tian Y, et al. 2020. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mica dating of late Cenozoic sediments in SE Tibet: implications for sediment recycling and drainage evolution[J]. *Journal of the Geological Society*, 177(4): 843-854.
- Sun X, Tian Y, Kuiper K F, et al. 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.
- Tao Y, Zhang H, Zhang J, et al. 2022. Late Cretaceous–Early Cenozoic exhumation across the Yalong thrust belt in eastern Tibet and its implications for outward plateau growth[J]. *Global and Planetary Change*, 216: 103897.
- Tang S L, Yan D P, Qiu L, et al. 2014. Partitioning of the Cretaceous Pan-Yangtze Basin in the central South China Block by exhumation of the Xuefeng Mountains during a transition from extensional to compressional tectonics?[J]. *Gondwana Research*, 25(4): 1644-1659.
- Tandon S K, Sinha R. 2022. *Geology of large river systems*[J]. *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Second Edition, 7-41.
- Tian Y, Kohn B P, Qiu N, et al. 2018a. Eocene to Miocene out-of-sequence deformation in the Eastern Tibetan Plateau: Insights from shortening structures in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2): 1840-1855.
- Tian Y, Li R, Tang Y, et al. 2018b. Thermochronological constraints on the late Cenozoic morphotectonic evolution of the Min Shan, the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 37(6): 1733-1749.
- Tian Z, Suo Y, Ding X, et al. 2024. Cenozoic surface Earth system evolution and dynamic paleogeomorphic reconstruction from the Tibet Plateau to the Western Pacific linked by the Yangtze River[J]. *Journal of the Geological Society*, jgs2023-183.
- Twidale C R. 2004. River patterns and their meaning[J]. *Earth-Science Reviews*, 67(3-4): 159-218.
- Tyrrell S, Haughton P D, Daly J S, et al. 2012. The Pb isotopic composition of detrital K-feldspar: A tool for

constraining provenance, sedimentary processes and paleodrainage[J]. *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 42: 203-217.

- O'Sullivan G J, Chew D M, Morton A C, et al. 2018. An integrated apatite geochronology and geochemistry tool for sedimentary provenance analysis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(4): 1309-1326.
- Wang P. 2004. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia[J]. *Geophysical Monograph Series*, 149: 1-22.
- Wang E, Burchfiel B C. 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 413-423.
- Wang J, Li C A, Yang Y, et al. 2010. Detrital zircon geochronology and provenance of core sediments in Zhoula Town, Jiangnan plain, China[J]. *Journal of Earth Science*, 21(3): 257-271.
- Wang P, Zheng H, Liu S. 2013. Geomorphic constraints on middle Yangtze River reversal in eastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 69: 70-85.
- Wang E, Meng K, Su Z, et al. 2014a. Block rotation: Tectonic response of the Sichuan basin to the southeastward growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe-Xiaojiang fault[J]. *Tectonics*, 33(5): 686-718.
- Wang L, Liu C, Gao X, et al. 2014b. Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, southeastern Tibetan Plateau: whole-rock geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic constraints[J]. *Sedimentary Geology*, 304: 44-58.
- Wang P, Zheng H, Chen L, et al. 2014c. Exhumation of the Huangling anticline in the Three Gorges region: Cenozoic sedimentary record from the western Jiangnan Basin, China. *Basin Research*, 26(4): 505-522.
- Wang H, Tian Y, Liang M. 2017. Late Cenozoic exhumation history of the Luoji Shan in the southeastern Tibetan Plateau: insights from apatite fission-track thermochronology[J]. *Journal of the Geological Society*, 174(5): 883-891.
- Wang P, Zheng H, Liu S, et al. 2018a. Late Cretaceous drainage reorganization of the middle Yangtze River. *Lithosphere*, 10(3): 392-405.
- Wang Y, Zhang J, Zhang B, et al. 2018b. Cenozoic exhumation history of South China: A case study from the Xuefeng Mt. Range[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 173-189.
- Wang C, Liang X, Foster D A, et al. 2019. Detrital zircon ages: A key to unraveling provenance variations in the eastern Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 103(7): 1525-1552.
- Wang L, Shen L, Liu C, et al. 2020. Evolution of the paleo-Mekong River in the Early Cretaceous: Insights from the provenance of sandstones in the Vientiane Basin, central Laos[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 545: 109651.
- Wang L, Shen L, Liu C, et al. 2021. The Late Cretaceous source-to-sink system at the eastern margin of the Tibetan Plateau: Insights from the provenance of the Lanping Basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 12(3): 101102.
- Wang L, Ding L, Garzanti E, et al. 2022a. Mid-Cretaceous drainage reorganization and exorheic to endorheic transition in Southeast Tibet[J]. *Sedimentary Geology*, 439: 106221.
- Wang P, Zheng H, Wang Y, et al. 2022b. Sedimentology, geochronology, and provenance of the late Cenozoic "Yangtze Gravel": Implications for Lower Yangtze River reorganization and tectonic evolution in southeast China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 134(1-2): 463-486.
- Wang L, Malkowski M A, Cai F, et al. 2023. A climate-driven transcontinental drainage system in the southeast Tibetan Plateau during the Early Cretaceous[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 248: 105615.
- Waters J M, Burrige C P, Craw D. 2020. River capture and freshwater biological evolution: A review of galaxiid fish vicariance[J]. *Diversity*, 12(6): 1-15.

- Weltje G J, von Eynatten H. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook[J]. *Sedimentary Geology*, 171(1-4): 1-11.
- Wei H H, Wang E, Wu G L, et al. 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.
- Wei C, Voinchet P, Zhang Y, et al. 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.
- Whipple K X. 2004. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32: 151-185.
- Wissink G K, Hoke G D, Garzzone C N, et al. 2016. Temporal and spatial patterns of sediment routing across the southeast margin of the Tibetan Plateau: Insights from detrital zircon[J]. *Tectonics*, 35(11): 2538-2563.
- Wu J, Zhang K, Xu Y, et al. 2018. Paleoelevations in the Jianchuan Basin of the southeastern Tibetan Plateau based on stable isotope and pollen grain analyses[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 510: 93-108.
- Wu F, Fang X, Yang Y, et al. 2022. Reorganization of Asian climate in relation to Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 684-700.
- Wu C, Liu C, Yi H, et al. 2017a. Mid-Cretaceous desert system in the Simao Basin, southwestern China, and its implications for sea-level change during a greenhouse climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 468: 529-544.
- Wu L, Mei L, Liu Y, et al. 2017b. 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 C, Sun X, Li G, et al. 2023. Cretaceous mountain building processes triggered the aridification and drainage evolution in east Asia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1-15.
- Xiang F, Zhu L, Wang C, et al. 2007. Quaternary sediment in the Yichang area: Implications for the formation of the Three Gorges of the Yangtze River[J]. *Geomorphology*, 85(3-4): 249-258.
- Xu C, Zhou Z, Van Den Haute P, et al. 2005. Apatite-fission-track geochronology and its tectonic correlation in the Dabieshan orogen, central China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 48: 506-520.
- Xu X, Zuza A V, Chen L, et al. 2021. Late Cretaceous to early Cenozoic extension in the Lower Yangtze region (East China) driven by Izanagi-Pacific plate subduction[J]. *Earth-Science Reviews*, 221: 103790.
- Yao T, Bolch T, Chen D, et al. 2022. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 618-632.
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 361(3-4): 239-254.
- Yan Y, Carter A, Huang C Y, et al. 2012. Constraints on Cenozoic regional drainage evolution of SW China from the provenance of the Jianchuan Basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3): 1-12.
- Yan Y, Yao D, Tian Z X, et al. 2018. Tectonic topography changes in Cenozoic East Asia: A landscape erosion-sediment archive in the South China Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(6): 1731-1750.
- Yang S, Zhang F, Wang Z. 2012a. Grain size distribution and age population of detrital zircons from the Changjiang (Yangtze) River system, China[J]. *Chemical Geology*, 296: 26-38.
- Yang J, Yang J X, Chen X Y. 2012b. A re-examination of the molecular phylogeny and biogeography of the genus *Schizothorax* (Teleostei: Cyprinidae) through enhanced sampling, with emphasis on the species in the Yunnan-Guizhou Plateau, China[J]. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 50(3): 184-191.
- Yang Z, Shen C, Ratschbacher L, et al. 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, Shen C, Zattin M, et al. 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 R, Suhail H A, Gourbet L, et al. 2020. Early Pleistocene drainage pattern changes in Eastern Tibet: Constraints from provenance analysis, thermochronometry, and numerical modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115955.
- Yang Y, Xu S, Binnie S A, et al. 2022. Late Cenozoic locally landslide-dammed lakes across the Middle Yangtze River[J]. *Geomorphology*, 413: 108366.
- Yang C, Jiao R, Zattin M, et al. 2023. Late Oligocene–Early Miocene incision of the Three Gorges and the initial establishment of an east-flowing Yangtze River. *Geomorphology*, 441: 108897.
- Yu X, Liu C, Wang C, et al. 2020. Eolian deposits of the northern margin of the South China (Jiangnan Basin): Reconstruction of the Late Cretaceous East Asian landscape in central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104390.
- Yuan T, Xu H, Liu G, et al. 2023. Eocene dry eolian system in the Jiachuan Basin, southeastern Tibetan Plateau: Implications for regional wind regime and paleoclimate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 111949.
- Yue W, Jin B, Zhao B. 2018. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of the Yangtze Delta[J]. *Sedimentary Geology*, 364: 42-52.
- Yue W, Yang S, Zhao B, et al. 2019. Changes in environment and provenance within the Changjiang (Yangtze River) Delta during Pliocene to Pleistocene transition[J]. *Marine Geology*, 416: 105976.
- Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics[J]. *Nature*, 451(7176): 279-283.
- Zhao X, Zhang H, Hetzel R, et al. 2021a. Existence of a continental-scale river system in eastern Tibet during the late Cretaceous–early Palaeogene[J]. *Nature communications*, 12(1): 7231.
- Zhao X, Zhang H, Tao Y, et al. 2021b. Pliocene to Early Pleistocene drainage reorganization in eastern Tibet inferred from detrital zircons[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(20): e2021GL094563.
- Zhao X, Zhang H, Lease R O, et al. 2023a. Early Cenozoic drainage evolution and surface uplift of the eastern Tibetan Plateau: Insights from the Ninglang Basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(19): e2023GL105499.
- Zhao C, Xiong Z, Farnsworth A, et al. 2023b. The late Eocene rise of SE Tibet formed an Asian ‘Mediterranean’ climate[J]. *Global and Planetary Change*, 231: 104313.
- Zhang Y F, Li C, Wang Q L, et al. 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 584-590.
- Zhang Z, Tyrrell S, Li C, et al. 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 Y Z, Replumaz A, Leloup P H, et al. 2017a. Cooling history of the Gongga batholith: Implications for the Xianshuihe Fault and Miocene kinematics of SE Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 1-15.
- Zhang Z, Daly J S, Li C, et al. 2017b. Sedimentary provenance constraints on drainage evolution models for SE Tibet: Evidence from detrital K-feldspar[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(9): 4064-4073.
- Zhang X, Huang C, Wang Y, et al. 2017c. 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 J, Wan S, Clift P D, et al. 2019a. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: Tectonic or climate forcing?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 216: 74-88.

- Zhang P, Najman Y, Mei L, et al. 2019b. Palaeodrainage evolution of the large rivers of East Asia, and Himalayan-Tibet tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 192: 601-630.
- Zhang J, Krijgsman W, Lu Y, et al. 2021a. Detrital zircon ages reveal Yangtze provenance since the early Oligocene in the East China Sea Shelf Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110548.
- Zhang Z, Daly J S, Tyrrell S, et al. 2021b. Formation of the three Gorges (Yangtze River) no earlier than 10 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 216: 103601.
- Zhang D, Cao K, Yuan X, et al. 2022a. Late Oligocene-early Miocene Origin of the First Bend of the Yangtze River explained by thrusting-induced river reorganization[J]. *Geomorphology*, 411: 108303.
- Zhang Z, Daly J S, Yan Y, et al. 2022b. Cenozoic reorganization of fluvial systems in eastern China: Sedimentary provenance of detrital K-feldspar in Taiwan[J]. *Chemical Geology*, 592: 120740.
- Zhang Z, Daly J S, Tian Y, et al. 2023a. Sedimentary recycling in Jianchuan Basin, SE Tibetan Plateau: A solution to the debate on the formation age of the First Bend (Yangtze River)[J]. *Geomorphology*, 440: 108888.
- Zhang Y, Yan D P, Qiu L, et al. 2023b. Stepwise growth of the southeastern Tibetan Plateau: Structural and thermochronological evidence from the Panxi tectonic belt[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 621: 111542.
- Zheng H, Clift P D, Wang P, et al. 2013a. Pre-miocene birth of the Yangtze River[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(19): 7556-7561.
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. 2013b. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189-1206.
- Zheng H, Clift P D, He M, et al. 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 Y, Li H, Pan J, et al. 2023. Mid-Pleistocene drainage rearrangement of the Dadu River in response to plate convergence in southeastern Tibet[J]. *Quaternary Research*, 1-18.
- Zheng H, Yang Q, Cao S, et al. 2022. From desert to monsoon: irreversible climatic transition at ~ 36 Ma in southeastern Tibetan Plateau[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9(1): 1-14.
- Zhu W L, Zhong K, Fu X W, et al. 2019. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view[J]. *Earth-Science Reviews*, 190: 89-111.
- Zhu X, Shen C, Zhou R, et al. 2020. Paleogene sediment provenance and paleogeographic reconstruction of the South Yellow Sea Basin, East China: Constraints from detrital zircon UPb geochronology and heavy mineral assemblages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 553: 109776.

附中文参考文献

- 戴世昭. 1997. 江汉盐湖盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 邓宾. 2013. 四川盆地中-新生代盆-山结构与油气分布[D]. 成都: 成都理工大学博士学位论文.
- 姜月华, 陈立德, 向芳, 等. 2023. 长江演化及其对洪涝灾害防治的启示[J]. *中国地质*, 50 (04): 975-1003.
- 李勇, 曹叔尤, 周荣军, 等. 2005. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J]. *地质学报*, 79(1): 28-37.
- 林旭, 刘静. 2019. 江汉和洞庭盆地与周缘造山带盆山耦合研究进展[J]. *地震地质*, 41(2): 499-520.
- 林旭, 刘海金, 吴中海, 等. 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, 刘静, 刘海金. 2023a. 黄河形成于何时? [J]. *地球科学*, 49(6): 2158-2185..
- 林旭, 刘静, 刘维明, 等. 2023b. 黄河和长江发育与演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 林旭, 李玲玲, 刘静, 等. 2023c. 长江早更新世向江汉盆地输送碎屑物质: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄的约束[J]. *地球科学*, 48(11): 4214-4228.
- 林旭, 刘静, 刘海金, 等. 2023d. 中新世黄河水系演化重建: 来自钾长石 Pb 同位素的约束[J]. *地质学报*, 97(10): 3438-3455.

- 刘栋梁, 李海兵, 王平, 等. 2022. 南海北部盆地新生代物源对周边主要河流演化的响应[J]. 地质学报, 96(8): 2761-2774.
- 吕财. 2014. 楚雄盆地拗陷演化及油气成藏条件研究[D]. 武汉: 长江大学硕士学位论文.
- 明庆忠, 潘保田, 苏怀, 等. 2013. 金沙江河谷——水系演化的崩滑外动力作用研究 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 33 (05): 1-8.
- 沈玉昌. 1965. 长江上游的地貌[M]. 北京: 地质出版社.
- 沈青强, 曹凯, 王国灿, 等. 2017. 剑川-兰坪盆地古近纪沉积-构造变革及其区域构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 41(01): 23-41.
- 王毅, 郭炳跃, 郭东峰, 等. 2023. 长江安庆段河谷区第四系沉积特征与古河道演化[J]. 华东地质, 1-17.
- 谢建磊. 2017. 长江三角洲地区上新世以来主要气候转型事件的沉积响应研究[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文.
- 姚翔. 2019. 东亚陆缘新生代裂谷盆地残余沉降及其成因[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.
- 杨国臣. 2010. 四川盆地晚侏罗世-至新近纪层序充填及构造-岩相古地理演化[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.
- 杨庆道. 2014. 楚雄盆地构造演化及油气成藏条件研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)博士学位论文.
- 吴跃东. 2009. 大别造山带东南缘中新世盆地沉积构造演化[D]. 成都: 成都理工大学博士学位论文.
- 赵希涛, 胡道功, 张永双. 2008. 四川攀枝花昔格达组下伏砾石层成因和时代探讨与古金沙江河谷发育[J]. 地球学报, 29(1): 1-12.
- 赵希涛, 吴中海, 冯玉勇, 等. 2015. 金沙江“长江第一湾”段河谷地貌, 沉积与发育[J]. 地质通报, 34(1): 83-103.
- 张义楷. 2003. 望江-潜山盆地形成演化与含油气系统研究[D]. 西安: 西北大学博士学位论文.
- 张洋, 陈孝康, 林旭, 等. 2023. 江汉盆地新生代早期河流演化研究: 来自地表河流和盆地钻孔碎屑锆石 U-Pb 年龄的约束[J]. 地质科技通报, 42 (06): 106-117.
- 郑勇, 李海兵, 潘家伟, 等. 2022. 长江第一弯虎跳峡的贯通——来自于地表地貌和弹性挠曲的数值模拟分析 [J]. 地质学报, 96(8): 2942-2954.