

红河沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及河流演化*

赵晓逸 乔培军 崔宇驰 邵 磊

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘 要 受新生代青藏高原隆升的强烈影响, 亚洲水系展布经历了复杂的演化过程。现代红河作为南海西北部重要的沉积物搬运通道, 是南海盆地“源-汇”体系的关键组成部分, 揭示红河演变过程对于区域古地理恢复具有重要意义。本研究使用碎屑锆石 U-Pb 年代学方法, 对现代红河水系沉积物进行分析, 发现现代红河沉积物以喜山期 (30—40 Ma)、印支期 (240—260 Ma)、加里东期 (440—460 Ma)、晋宁期 (750—1000 Ma)、吕梁期 (1700—2000 Ma) 和古老基底增长期 (2300—3000 Ma) 的锆石年龄组分为特征, 物源主要来自扬子克拉通西南部哀牢山—大象山和印支地块北部; 同时认为, 现代红河在早中新世仅是越南北部地区的近源小河, 伴随着新近纪青藏高原东南部云贵高原的持续隆升, 红河沿哀牢山—红河走滑断裂带溯源侵蚀, 直至更新世, 现代红河沉积物全面覆盖莺歌海盆地。

关键词 红河 莺歌海盆地 锆石定年 物源 河流演化

第一作者简介 赵晓逸, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 专业方向为海洋地质学与古环境。E-mail: exiaoyi@tongji.edu.cn。

通讯作者简介 乔培军, 男, 1979 年生, 高级工程师, 主要从事沉积古环境和沉积物源研究。E-mail: qiaopeijun@tongji.edu.cn。

中图分类号: P597 文献标志码: A

U-Pb age characteristics of detrital zircons in sediments from the Red River and its implications for fluvial evolution

ZHAO Xiaoyi QIAO Peijun CUI Yuchi SHAO Lei

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract The distribution of the Asian drainage network has undergone a complex evolution due to the Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau. As a critical transport channel located northwest of the South China Sea, the Red River plays a pivotal role in the source-to-sink sedimentary system of the South China Basin. Therefore, reconstructing its evolutionary history is essential for understanding regional paleogeographic patterns. In this study, detrital zircon U-Pb chronology was employed to analyze sediments from the Red River system. The results reveal six major age groups: Himalayan orogeny (30–40 Ma), Indosinian orogeny (240–260 Ma), Caledonian orogeny (440–460 Ma), Jinningian orogeny (750–1000 Ma), Luliangian orogeny (1700–2000 Ma), and the Ancient Crust Growth Period (2300–3000 Ma). These findings indicate that the southwestern Yangtze Craton (Ailao Shan and Day Nui Con Voi Belts) and the northern IndoChina Block are the primary sources of the Red River sediments.

* 国家自然科学基金项目(编号: 42076066)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42076066)]

收稿日期: 2024-12-03 改回日期: 2025-01-07

Furthermore, it is proposed that during the Early Miocene, the modern Red River was initially a minor river in northern Vietnam. Subsequently, with the continuous uplift of the Yunnan-Guizhou Plateau in the southeastern part of the Tibetan Plateau, the Red River experienced headward erosion along the Ailao Shan-Red River strike-slip fault zone during the Neogene. By the Pleistocene, sediments transported by the modern Red River had covered the entire Yinggehai Basin.

Key words the Red River, Yinggehai Basin, zircon dating, provenance, fluvial evolution

About the first author ZHAO Xiaoyi, born in 1999, a master degree candidate, majors in marine geology and palaeogeographic reconstruction. E-mail: exiaoyi@tongji.edu.cn.

About the corresponding author QIAO Peijun, born in 1979, a senior engineer, is engaged in research on sedimentary palaeoenvironment and sediment provenance. E-mail: qiaopeijun@tongji.edu.cn.

新生代的青藏高原隆升塑造了亚洲壮观的河流体系,造就了大江大河的形成演化,也引发了河流之间的袭夺与流域更迭,一直是全球环境演变研究的热点问题 (Brookfield, 1998; Clark *et al.*, 2004; Clift *et al.*, 2006a; Zhang *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2024)。其中,红河袭夺与否就是长期争议的问题之一 (Hoang *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022; He *et al.*, 2023)。红河水系作为南海西北部重要的沉积物输送通道,直接影响着莺歌海盆地的沉积充填过程,构建其演变过程不仅有助于深刻理解流域内的古地理特征,而且对建立青藏高原东南缘新生代沉积“源-汇”体系具有重要意义。

自部分学者基于青藏高原地貌特征和河流系统几何形态提出“红河袭夺”假说以来,有关红河形成演化过程的研究往往是从大型水系的视角展开,争议很大。为验证这一假说,学者们使用钾长石 Pb 同位素、沉积物 Nd 同位素、锆石 U-Pb 年代学、白云母 Ar-Ar 热年代学和磷灰石裂变径迹等多种物源分析方法,对红河现代沉积物及流域盆地内砂岩样品进行“源-汇”对比分析,并结合河流侵蚀量与莺歌海盆地沉积量差异,认为新生代期间红河水系曾与长江上游连通,其源头及上游地区曾发生过河流袭夺,但对于袭夺事件发生时间的约束从晚白垩世至更新世均有论证 (Clark *et al.*, 2004; Clift and Sun, 2006; Wang *et al.*, 2019a; Clift *et al.*, 2020; He *et al.*, 2023)。由于大型“古红河”物源特征尚不清晰,另有一些学者对于大型“古红河”水系存在证据的可靠性提出质疑,主张现有证据仅能充分证明现代红河自某一时期以来没有发生过大规模的流域缩减 (Hoang *et al.*, 2009;

Zhao *et al.*, 2015; Wissink *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2024)。可见,受限于对红河流域及周边物源的系统认识,红河的发育演化过程及是否发生袭夺等科学问题至今悬而未决。一直以来,锆石 U-Pb 年代学方法在南海河流体系重建中得到广泛应用 (Cao *et al.*, 2018, 2023; Cui *et al.*, 2019; Shao *et al.*, 2016, 2019), 莺歌海盆地作为红河沉积物最主要的汇聚区,利用可靠的红河物源锆石年龄标志进行物源示踪,能够为揭示红河水系演变过程提供直接证据。

在前人研究成果基础上,文中通过对现代红河及周边支流沉积物开展碎屑锆石 U-Pb 定年研究,揭示红河及其支流沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系特征,建立红河水系锆石年龄的识别标志,利用定性-定量物源分析方法,比较新构建的红河物源信号与已发表的盆地物源信号之间的相似性,探讨现代红河水系的形成过程及流域演化,以期对南海西北部古地理重建提供更多证据。

1 区域地质背景

现代红河 (Red River) 发源于云南中部,沿哀牢山—红河断裂带注入北部湾,全长约 750 km,是莺歌海盆地沉积物的重要输入源。其主要支流为泸江 (Lo River) 和沱江 (Da River),分别发源于云南省剑川老君山及点苍山,在越南越池地区汇入红河下游 (图 1)。红河上游源区西北部与羌塘地块相邻,东北部与松潘—甘孜地块衔接,前者主要发育上泥盆统一三叠系、侏罗系—新生界,少量出露早古生代和元古代褶皱结晶基底 (Sun *et al.*, 2022),后者则以三叠系半深海—深海相复理石沉积地层为主 (Pan and Hu, 2024)。现代红河流域

主要涉及华南扬子克拉通西南部和印支地块北部, 2 个地块以哀牢山—马江缝合带为界, 于晚三叠世印支期发生碰撞拼贴, 在华南板块南侧形成越北印支造山带 (Faure *et al.*, 2014)。红河流域内地层发育齐全, 自太古界至第四系均有出露, 红河干流两岸沿哀牢山—红河断裂带出露大量前寒武系古老地层, 红河北侧支流泸江穿越扬子克拉通西南部, 流域内以古生代地层为主, 红河南侧支流沱江沿越北印支造山带而下, 流域内以中生代地层为主 (图 1)。众所周知, 华南扬子克拉通具有十分古老的陆壳基底 (3.2~3.4 Ga), 前寒武纪早期至中生代经历了多期板块汇聚与裂解, 吕梁期、晋宁期、加里东期和印支期岩浆活动发育 (Nam *et al.*, 2003; Faure *et al.*, 2014; Cui *et al.*, 2021; Hieu *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2023)。伴随着新生代红河断裂带的旋转走滑, 红河流域广泛发育喜山期岩浆岩体 (Pham *et al.*, 2020)。流域内多样的基岩类型和年龄宽泛的碎屑岩为红河提供了丰富的碎屑物质。

2 样品与方法

本研究沿红河水系采集现代河流砂岩样品 6 个, 其中样品 H-4 和样品 H-3 采自中国境内红河

上游河段 (元江), 样品 V9-2-1 和 V9-4-1 采自越南境内红河下游河段, 样品 V9-1-1 采自红河北侧支流泸江, 样品 V9-3-1 采自红河河口三角洲。另收集已发表的红河南侧支流沱江砂岩样品 BLR-1、老街盆地中新世样品 4V-415、安沛盆地晚中新世样品 4V-316 和莺歌海盆地晚渐新世—更新世样品共 19 件, 样品位置及相关信息见图 1 和表 1。

研究样品首先进行锆石分选及制靶工作, 每件样品随机挑选 200 颗碎屑锆石平铺排列, 在双面胶上用环氧树脂进行固定, 待环氧树脂固化后对锆石靶进行抛光, 以确保能够获得锆石颗粒内部结构的剖面。在扫描电镜下拍摄可观察锆石内部结构特征的阴极发光 (CL) 照片后, 使用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 完成 U-Pb 定年测试。测试使用的激光剥蚀系统 (LA) 为 New Wave 213 nm, 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 为 Thermo Elemental X-Series。激光剥蚀过程以 He 气作为载气、Ar 气为补偿气, 激光斑束直径为 30 μm , 剥蚀频率为 10 Hz; 测试以国际标准锆石 91500 ($1065.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$) 为外标, 并使用锆石标样 Plesovice ($337.1 \pm 0.4 \text{ Ma}$) 加以校正。分析

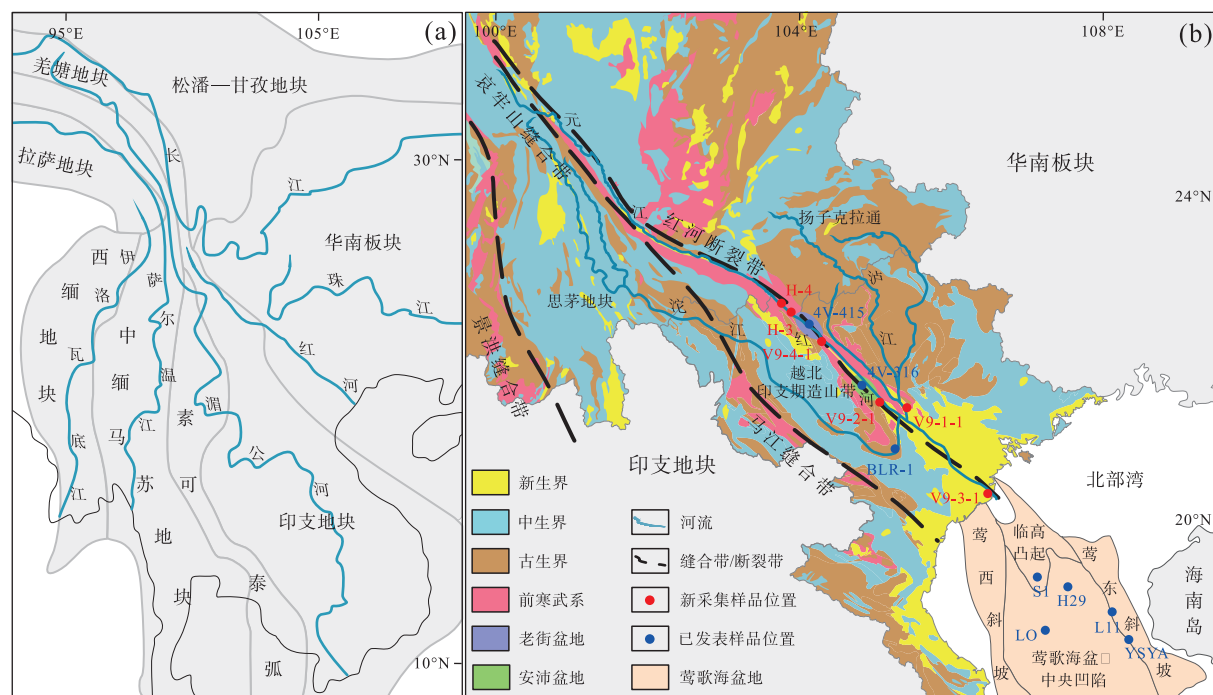


图 1 青藏高原东南部构造单元 (a)、红河流域地质图与样品位置 (b)

Fig. 1 Tectonic units of southeastern Tibetan Plateau (a), geological map of drainage area of modern Red River and sample locations (b)

表 1 本文使用的样品信息

Table 1 Information of river sand samples from this paper and related studies

样号/井号	数量/件	位置	时代	纬度	经度	数据来源
H-4	1	红河上游(中国)	现代	22.7081°N	103.7382°E	本文
H-3	1	红河上游(中国)	现代	22.5672°N	103.8944°E	本文
V9-4-1	1	红河下游(越南)	现代	22.1653°N	104.3403°E	本文
V9-2-1	1	红河下游(越南)	现代	21.4457°N	105.1217°E	本文
V9-1-1	1	泸江下游(越南)	现代	21.3649°N	105.3901°E	本文
BLR-1	1	沱江下游(越南)	现代	20.8425°N	105.3576°E	Wang <i>et al.</i> , 2019b
V9-3-1	1	红河河口三角洲	现代	20.2905°N	106.5586°E	本文
4V-415	1	老街盆地	中中新世	/	/	Hoang <i>et al.</i> , 2009
4V-316	1	安沛盆地	晚中新世	/	/	Hoang <i>et al.</i> , 2009
S1	1	莺歌海盆地	晚渐新世—更新世	/	/	Wang <i>et al.</i> , 2020
H29	1			/	/	Wang <i>et al.</i> , 2016
YSYA	1			/	/	Yan <i>et al.</i> , 2011
LO	7			/	/	Wang <i>et al.</i> , 2019b
L11	6			/	/	Wang <i>et al.</i> , 2019c
/	29	羌塘地块	前寒武纪—新生代	/	/	据 Cui <i>et al.</i> , 2024, 修改
/	17	松潘—甘孜地块	前寒武纪—新生代	/	/	据 Pan and Hu, 2024, 修改
/	38	红河上游源区	前寒武纪—新生代	/	/	据 Cui <i>et al.</i> , 2024, 修改
/	84	红河下游源区	前寒武纪—新生代	/	/	据 Cui <i>et al.</i> , 2024, 修改

过程中, 每 7 颗锆石样品为一组, 每组测试前后分析 2 次 91500 标准, 单个锆石颗粒分析时间包含 20 s 空白信号和 50 s 样品信号。对每个锆石颗粒进行测试时, 侧重选择锆石中环带明显且靠近边缘的位置, 以期获得单颗粒锆石最新的年龄数据。测试结束后, 使用软件 ICPMSDataCal 10.2 对同位素比值和年龄数据进行处理。处理过程中, 对每件样品获取的 100~208 颗锆石使用 Andersen (2002) 的方法进行普通 Pb 校正, 使用 Compston 等 (1992) 的方法确定锆石的最佳年龄值。删去谐和度<80%、不确定度>10% (1σ) 的数据, 使用 Isoplot 和 DensityPlotter 软件绘制锆石 U-Pb 年龄谐和图和频率图, 分析单件锆石样品的 U-Pb 年龄。使用 DZmds 绘制多维相关性分析图 (Multidimensional scaling, 简称 MDS), 利用投影到三维坐标系中样品点之间的距离, 定量比较多个锆石样品之间年龄组分的相似性 (Vermeesch, 2013)。使用 DZmix 模拟不同河段及支流沉积物在河口处的混合模型 (Monte Carlo Model), 与河口实测样品结果进行互相关分析检验 (Cross-correlation test), 评估不同源区对河口沉积物的贡献量 (Saylor and Sundell, 2016)。样品分析测试工作在同济大学海洋

地质国家重点实验室完成。

3 现代红河沉积物锆石年代学

对 6 件样品 876 颗锆石颗粒进行锆石 U-Pb 年龄测试后, 共得到有效年龄值 746 个。阴极发光照相 (CL) 与 Th/U 值分布图显示, 碎屑锆石颗粒以次棱角状—次圆状为主, 大小为 100~180 μm , 其中红河河口三角洲样品中碎屑锆石颗粒相对较小, 磨圆度更高, 呈次圆状—圆状, 绝大部分碎屑锆石颗粒发育完整的韵律环带 (图 2-a), Th/U>0.4 (图 2-b), 显示岩浆岩成因。Th/U<0.1 的碎屑锆石颗粒年龄以 60—80 Ma 为主, 且主要出现在红河上游样品中。

区域内具有代表性的岩浆—热事件主要包括喜山期 (~66 Ma 以来)、燕山期 (135—205 Ma)、印支期 (205—257 Ma)、加里东期 (400—570 Ma)、晋宁期 (700—1000 Ma)、吕梁期 (1700—2000 Ma) 和古老基底增长期 (2300—3100 Ma)。碎屑锆石 U-Pb 同位素定年结果 (图 3) 显示, 采集于红河上游元江河段的样品 H-4 和 H-3 中均不包含古元古代至太古代锆石, 其年龄组分以喜山期、印支期和晋宁期为主, 其中样品 H

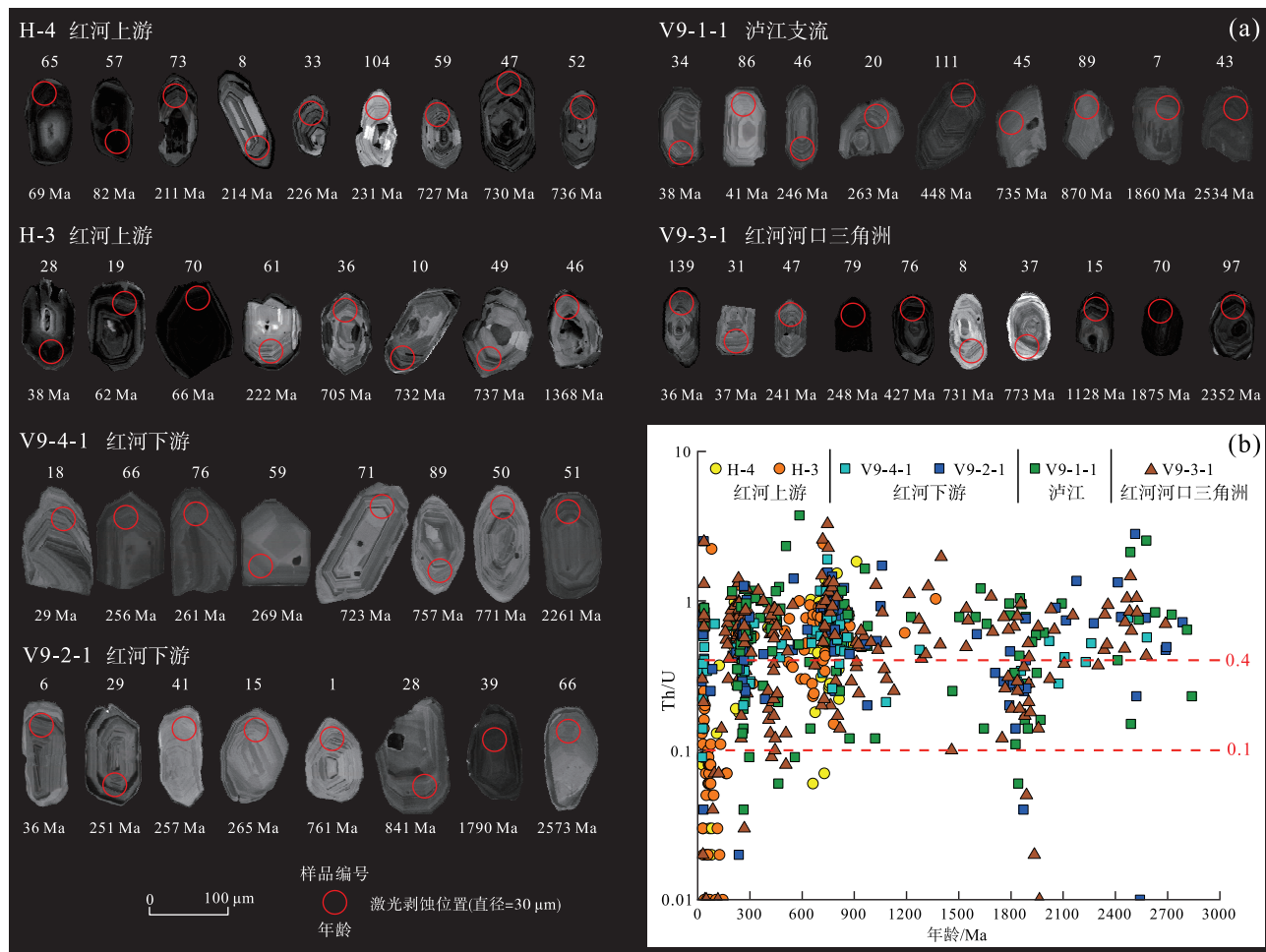


图 2 现代红河沉积物样品锆石 CL 图 (a) 及 Th/U 值分布 (b)

Fig. 2 CL images of representative zircon grains (a), and Th/U ratio from modern Red River sand samples (b)

-3 显示出独特的 53 Ma 新生代年龄峰。红河下游的样品 V9-4-1 和样品 V9-2-1 的碎屑锆石年龄谱系以明显的印支—晋宁期双峰和喜山期次峰为特征, 包含少量的吕梁期及更古老基底锆石。红河北侧支流泸江样品 V9-1-1 的碎屑锆石年龄谱跨度更广, 以明显的印支期主峰和加里东—晋宁—吕梁期次峰为特征, 含少量的喜山期及古老基底锆石。值得注意的是, 该样品中晋宁期的峰值年龄更早, 集中在 ~843 Ma, 与红河干流样品中晋宁期峰值集中在 730—750 Ma 不同。红河南侧支流沱江沉积物样品 BLR-1 的碎屑锆石年龄谱系以加里东晚期主峰 (414 Ma) 为特征, 远超喜山—印支期次峰, 包含少量前寒武纪的古老锆石 (Wang *et al.*, 2019b)。样品 V9-3-1 位于红河河口三角洲, 碎屑锆石年龄谱系以明显的印支期主峰和喜山期、加里东期次峰为特征, 包含大量前寒武纪的古老锆

石, 主要显示 6 组年龄峰, 分别对应喜山期 (35 Ma)、印支期 (247 Ma)、加里东期 (432 Ma)、晋宁期 (751 Ma 和 927 Ma)、吕梁期 (1885 Ma) 和古老基底增长期 (2482 Ma) 的岩浆活动。

4 现代红河沉积物来源

现代红河源自哀牢山缝合带北端, 沿哀牢山—红河断裂带注入北部湾, 流域覆盖扬子克拉通西南部和印支地块北部。Clift 等 (2006b) 认为现代红河沉积物主要是从中国西南部盆地 (思茅盆地和楚雄盆地等) 中—新生代地层中循环而来的。Hoang 等 (2009) 认为松潘—甘孜地块和扬子克拉通是现代红河沉积物的主要来源。文中收集的数据汇总了羌塘地块、松潘—甘孜地块、红河上游源区和红河下游源区 4 个地区的碎屑锆石年龄谱系 (表

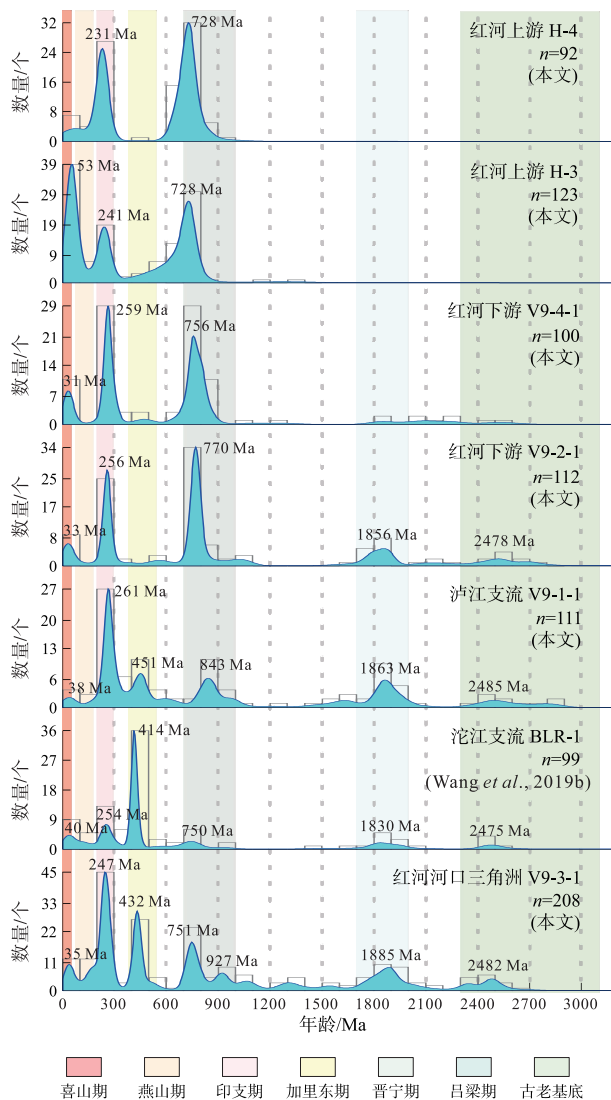


图 3 现代红河水系沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱

Fig. 3 Detrital zircon U-Pb age spectrum of modern Red River sediments

1), 与本研究开展对比分析(图 4-a)。

如图 4 所示, 现代红河流域之外的羌塘地块源区和松潘—甘孜地块源区碎屑锆石 U-Pb 年龄谱均发育有前寒武系—古生代年龄峰值, 但是两者差异明显。羌塘地块锆石年龄谱在中—新生代期间存在多期峰值, 其中 ~105 Ma 和 ~40 Ma 年龄峰对应拉萨板块拼合的背景下, 羌塘北部逆冲推覆带在早白垩世—古新世 (120—65 Ma) 和始新世 (55—35 Ma) 扩展的 2 个构造演化阶段 (毕文军等, 2023); 早—中侏罗世的锆石年龄 (~175 Ma) 代表了羌塘地块的洋陆转换活动 (刘池洋等, 2016)。而松潘—甘孜地块源区锆石年龄谱仅显示出中生代印支

晚期单峰 (216 Ma), 与区域内晚三叠世大规模俯冲造山作用有关 (朱弟成等, 2021)。

在现代红河流域范围内, 显生宙以来发生了古生代扬子—华夏陆块碰撞拼贴、中生代印支—华南地块碰撞拼合以及新生代青藏高原隆升造成的地块旋转走滑等一系列构造事件。Pham 等 (2020) 对红河沿岸岩体进行年代学研究指出, 红河走滑断裂带内发育大量始新世—渐新世花岗岩。Hieu 等 (2022) 对红河走滑断裂带基岩进行锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 发现区域内出露有 2800—2900 Ma 的古老地体, 且元古代期间岩浆作用十分活跃。复杂的板块拼合背景与活跃的岩浆活动使得现代红河源区的锆石年龄谱十分复杂。稍有不同的是, 红河上游源区晋宁期年龄峰以早期的 800—1000 Ma 为特征, 而红河下游源区则呈现晋宁晚期 (750—850 Ma) 峰值。依据以上特征, 红河河口三角洲样品的锆石年龄谱与红河下游样品更为接近, 泸江和沱江支流向主河道补充了加里东期锆石。红河上游样品中独特的 53 Ma 年龄峰在红河河口三角洲样品中未能显示出来 (图 3; 图 4)。

已有研究在讨论红河物源演化中, 认为印支半岛缺乏古老锆石, 把加里东期、晋宁期以及更老的碎屑锆石归于羌塘地块或松潘—甘孜地块来源 (徐强等, 2020)。对比以上潜在源区单元和红河河口三角洲沉积物的锆石年龄谱可以发现, 依据前寒武纪—古生代古老锆石年龄组分特征判定红河沉积物来源存在很大的局限性。由于锆石 U-Pb 年代学方法难以区分相同年龄碎屑锆石的准确来源, 若要区分不同源区的贡献, 则需要依靠各源区相对独特的锆石年龄组分。而加里东期、晋宁期、吕梁期和古老基底增长期的锆石年龄组分在现代红河下游越南界内的地层中均有出现, 应该无法作为判别羌塘地块或松潘—甘孜地块物质来源的依据。图 4 显示, 红河河口三角洲样品中碎屑锆石年龄谱系, 缺失指示羌塘地块或松潘—甘孜地块物源的燕山—印支晚期特征峰值, 说明现代红河流域可以在缺乏羌塘及松潘—甘孜地块物源供给的情况下, 同样发育有前寒武纪及古生代古老碎屑锆石。使用 DZmix 对现代红河水系不同河段的沉积物样品进行逼近分析, 得到的 Monte Carlo 模拟结果 (图 5-b) 显示, 红河下游及支流流域对河口三角洲的沉积物贡献率占红河水系的 81.2%, 而红河上游河段的贡献率

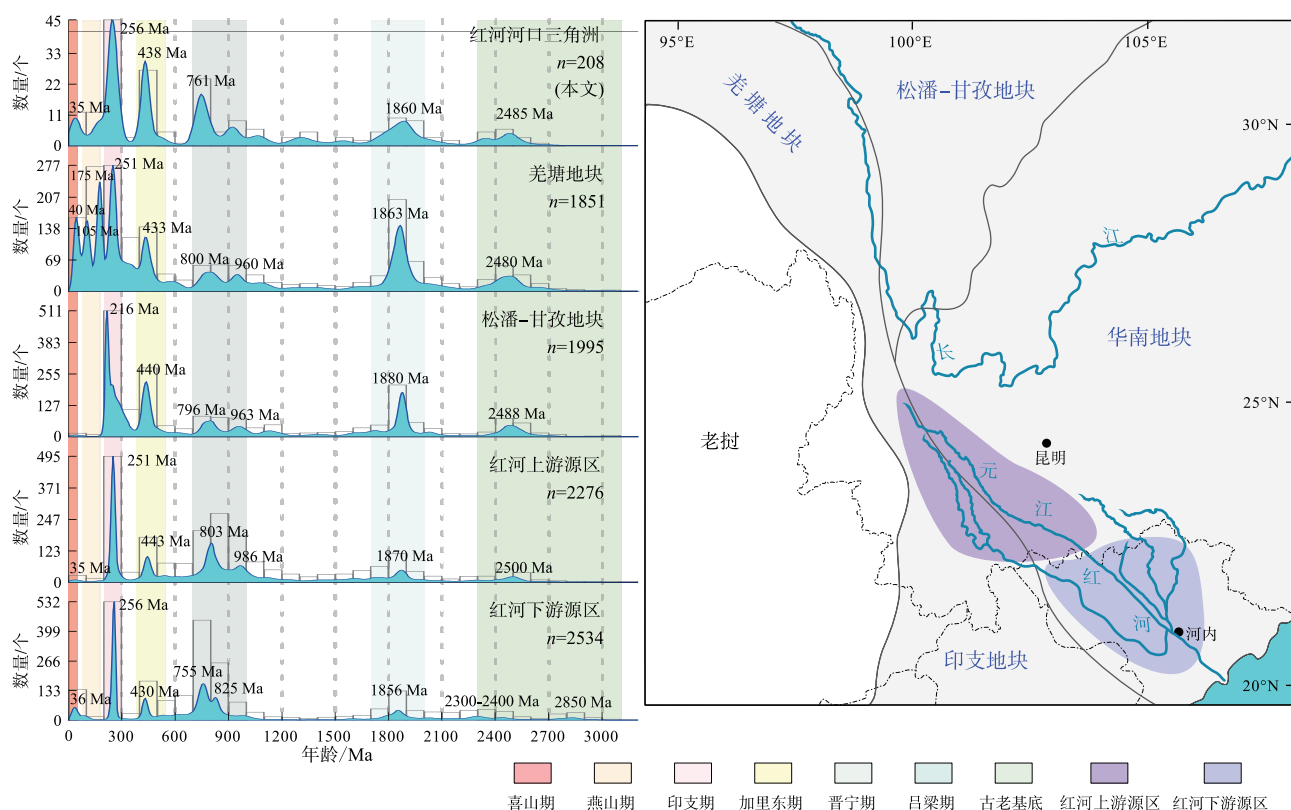


图 4 现代红河沉积物及其潜在源区锆石 U-Pb 年龄谱图

Fig. 4 Detrital zircon U-Pb age spectrum of the modern Red River and its potential source areas

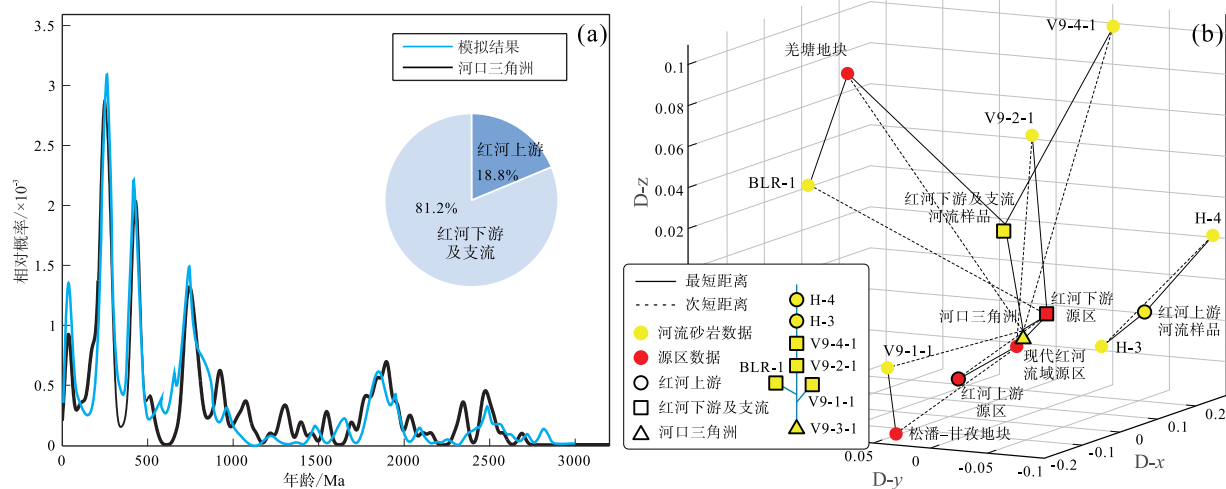


图 5 现代红河不同河段沉积物 Monte Carlo 混合模型 (a) 与潜在源区多维相关性 (MDS) 分析图 (b)

Fig. 5 Monte Carlo Model of modern riversands (a), multidimensional scaling plot of the potential sources (b) for the Red River system

仅占 18.8% (图 5-a)。使用多维相关性分析方法定量分析现代红河水系沉积物与潜在源区的碎屑锆石组分之间的相似性, 显示红河河口三角洲样品与现代红河流域源区及红河下游源区更为接近, 远离羌塘地块和松潘—甘孜地块 (图 5-b)。

因此, 可以认为现代红河流域内的基岩是红河沉积物主要的物源供给区, 完全能够提供沉积物中各年龄峰值的碎屑锆石, 无需羌塘地块或松潘—甘孜地块等远物源区额外供给, 30—40 Ma 的喜山期锆石年龄峰可作为特征标志用于指示红河流

域走滑断裂带源区特点，它的出现代表现代红河水系的形成。

5 红河形成演化

河流沉积物是河流发育过程及源区变迁的直接产物，接受沉积充填的沉积盆地则保存了河流水系演变的各种信息，通过对盆地碎屑沉积物开展源汇对比分析，能够准确揭示河流形成演变过程（徐杰和姜在兴，2019；王平等，2022）。

5.1 红河三角洲汇聚区物源示踪

老街盆地和安沛盆地沿红河断裂带分布，红河贯穿整个盆地（图 6）。安沛盆地中中新世沉积物样品 4V-316 的碎屑锆石年龄集中分布在 500—800 Ma，为盆地周边近源岩体剥蚀沉积的产物；老

街盆地晚中新世沉积物样品 4V-415 的碎屑锆石年龄谱表现出喜山期（33 Ma）主峰和印支期（253 Ma）、晋宁期（731 Ma）次峰，以及少量古元古代锆石，与现代红河下游样品 V9-4-1 和 V9-2-1 的碎屑锆石年龄谱系（图 3）十分接近。但是，与现代红河河口三角洲相比，均明显缺乏加里东期的峰值（图 3；图 4；图 6）。

莺歌海盆地是受红河走滑断裂控制的断陷盆地，接受来自周缘印支地块、扬子克拉通和海南岛的碎屑物质，红河水系是盆地重要的沉积物输送源。Clift 和 Sun（2006）通过比较新生代莺歌海盆地沉积物总量、现代红河流量以及河流入海口沉积物总量，推测在新生代可能存在着比现代红河规模更大的“古红河”水系，后因发生流域袭夺而变小。图 6 显示，莺歌海盆地西北部下中新统 S1-1

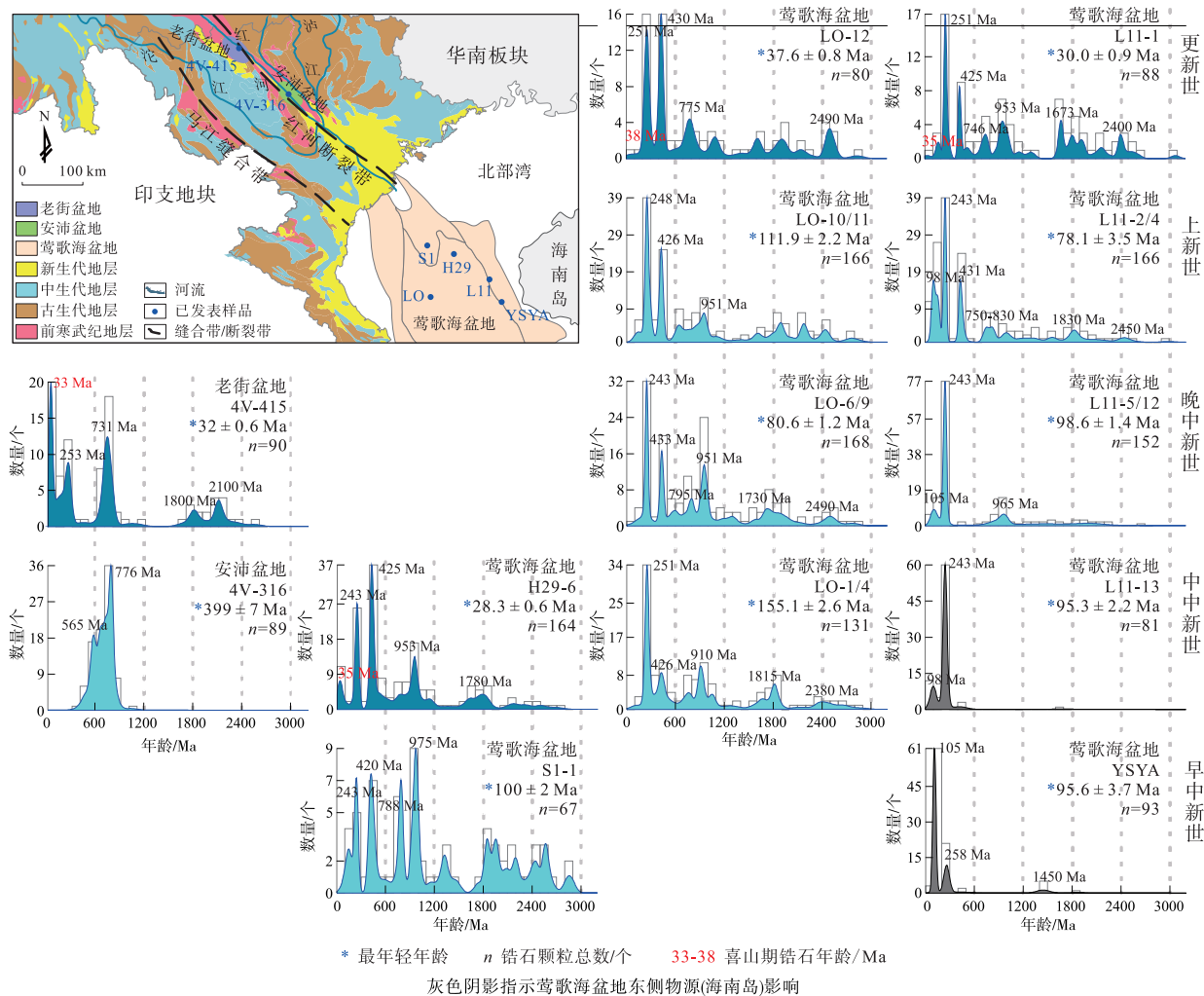


图 6 莺歌海盆地、老街盆地及安沛盆地锆石年龄谱

Fig. 6 Zircon age spectrum of Yinggehai Basin, Lao Cai Basin and Yen Bai Basin

样品碎屑锆石呈现出复杂的年龄峰值,但盆地东部同时期 YSYA 样品仅以简单的燕山—印支期年龄峰为特征,包含较少的中元古代 (1450 Ma) 锆石。一般认为,包含复杂碎屑锆石年龄组分的样品主要来自扬子克拉通与印支地块的物源输入,仅包含相对简单的燕山—印支期锆石年龄组分的样品则来自海南岛源区 (Cao *et al.*, 2015)。由于该时期盆地中的样品均未出现喜山期碎屑锆石,暗示现代红河尚未形成。中中新世,来自扬子克拉通与印支地块的碎屑物质大量输送至莺歌海盆地中北部,莺歌海盆地北部 H29-6 及中部 LO-1/4 样品中碎屑锆石年龄谱系均显示出多峰的特征,还出现 35 Ma 的碎

屑锆石,年龄谱系特征与现代红河河口三角洲样品十分类似。但是,同时期盆地东部莺东斜坡 L11-13 样品依旧表现为简单的印支—燕山期峰值,呈现海南岛物源的特点。晚中新世到上新世,盆地中部 LO-6/9 及 LO-10/11 样品中碎屑锆石年龄谱系特征与中中新世 LO-1/4 样品基本相同,显示出多峰的特征,盆地东部莺东斜坡的样品中老锆石含量也逐步增加,上新统 L11-2/4 样品中老锆石含量比例与盆地中部基本相同,说明红河来源沉积物的影响范围不断扩大。到更新世,盆地中部和东部样品 LO-12 和 L11-1 碎屑锆石年龄谱系特征基本一致,均发育有喜山期碎屑锆石,显示红河沉积物全

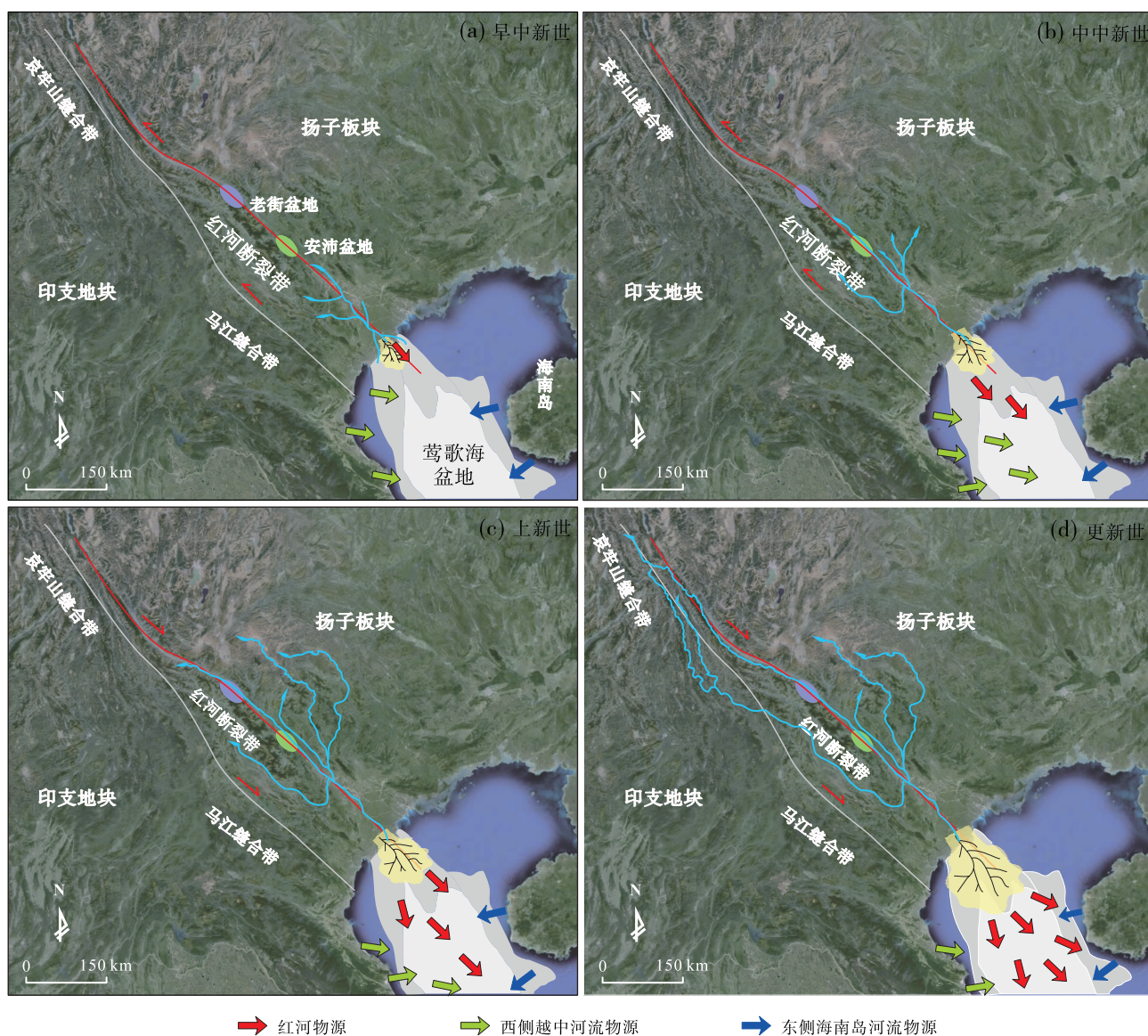


图 7 中新世—更新世现代红河演变过程示意图

Fig. 7 Schematic map of the Miocene-Pleistocene evolution of modern Red River system

面覆盖莺歌海盆地。可以看出, 自早中新世以来红河沉积物在莺歌海盆地从西北向东南方向逐渐推进, 直到更新世才覆盖了整个盆地。

5.2 红河演变过程

新生代青藏高原的隆升造就了周边众多水系的发育演化, 强烈的剥蚀与环境变迁使古地貌格局发生剧烈改变, 造成古河流的恢复与重建工作十分困难。在系统分析河流潜在源区的基础上, 开展河流沉积物源汇对比分析, 是重建河流演化史的途径之一。根据文中研究结果可以认为, 红河在早中新世还仅是一条近源小河, 之后逐步发育壮大, 大约在更新世才基本达到现代规模(图 7)。早中新世, 红河主要发育在越南北部沿岸地区, 规模局限, 向莺歌海盆地输送有限的碎屑物质; 到中中新世, 伴随云贵高原的逐步隆升, 红河沿哀牢山—红河走滑断裂带向西北逐步延伸, 进入老街盆地; 晚中新世起, 伴随着区域内云贵高原的持续隆升, 红河进一步发生溯源侵蚀, 流域范围向内陆方向拓展; 直到更新世, 现代红河水系基本形成, 经红河水系输送的碎屑物质广泛覆盖在莺歌海盆地。

6 结论

使用碎屑锆石 U-Pb 年代学方法对现代红河沉积物进行分析, 归纳了现代红河沉积物锆石年龄组分特征及主要物质来源, 建立了红河发育演变模式, 回应了红河袭夺事件的争议, 为南海西北部古地理重建提供了重要的理论基础。具体认识如下:

1) 现代红河沉积物以喜山期(30—40 Ma)、印支期(240—260 Ma)、加里东期(440—460 Ma)、晋宁期(750—1000 Ma)、吕梁期(1700—2000 Ma)和古老基底增长期(2300—3000 Ma)的锆石年龄组分为特征。物源主要来自哀牢山—大象山和印支地块北部, 30—40 Ma 的喜山期锆石年龄峰可作为特征物源信息, 为判别红河来源沉积物的标志; 红河沉积物中包含的前寒武系古老锆石组分完全可以由红河下游越北及越中周边源区提供。

2) 现代红河在早中新世只是越南北部地区的近源小河。伴随新近纪云贵高原的持续隆升, 红河沿哀牢山—红河走滑断裂带溯源侵蚀, 逐步扩展; 更新世以来, 在全球高海平面影响下, 现代红河输

送的陆源碎屑物质广泛覆盖在莺歌海盆地中。

致谢 感谢越南河内矿业地质大学 Nguyen Huu Hiep 教授和 Tran Thi Huyen 硕士对野外样品采集工作的帮助!

参考文献 (References)

- 毕文军, 张佳伟, 李亚林, 邓玉珍. 2023. 西藏中部羌塘地体白垩纪以来隆升剥露过程. 地学前缘, 30(2): 18–34. [Bi W J, Zhang J W, Li Y L, Deng Y Z. 2023. The uplift and exhumation processes in the Qiangtang terrane of Central Tibet since the Cretaceous. Earth Science Frontiers, 30(2): 18–34]
- 刘池洋, 郑孟林, 杨兴科, 何碧竹, 任战利, 郭佩. 2016. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存. 地质学报, 90(11): 3259–3281. [Liu C Y, Zheng M L, Yang X K, He B Z, Ren Z L, Guo P. 2016. Evolution and late modification of Mesozoic marine Qiangtang Basin and its hydrocarbon occurrence. Acta Geologica Sinica, 90(11): 3259–3281]
- 王平, 陈玺贇, 朱龙辰, 谢鸿森, 吕开来, 魏晓椿. 2022. 碎屑锆石 U-Pb 年代学定量物源分析的基本原理与影响因素: 以现代河流砂为例. 沉积学报, 40(6): 1599–1614. [Wang P, Chen X Y, Zhu L C, Xie H S, Lü K L, Wei X C. 2022. Principles and biases of quantitative provenance analysis using detrital zircon U-Pb geochronology: insight from modern river sands. Acta Sedimentologica Sinica, 40(6): 1599–1614]
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地学报, 21(3): 379–396. [Xu J, Jiang Z X. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(3): 379–396]
- 徐强, 李冬, 朱伟林, 王英民. 2020. 晚中新世红河海底扇碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 物源区制约及红河袭夺事件探讨. 沉积与特提斯地质, 40(3): 20–30. [Xu Q, Li D, Zhu W L, Wang Y M. 2020. SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons: discussions on provenance control and the Red River Capture Event. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40(3): 20–30]
- 朱弟成, 王青, 詹琼窰, 谢锦程. 2021. 三江北段晚三叠世构造—岩浆作用和几个相关的科学问题. 沉积与特提斯地质, 41(2): 232–245. [Zhu D C, Wang Q, Zhan Q Y, Xie J C. 2021. Late Triassic tectono-magmatism of northern Sanjiang and associated several scientific problems. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41(2): 232–245]
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb. Chemical Geology, 192: 59–79.
- Brookfield M E. 1998. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. Geomorphology, 22: 285–312.
- Cao L C, Jiang T, Wang Z F, Zhang Y Z, Sun H. 2015. Provenance of Upper Miocene sediments in the Yinggehai and Qiongdongnan basins,

- northwestern South China Sea: evidence from REE, heavy minerals and zircon U-Pb ages. *Marine Geology*, 361: 136–146.
- Cao L C, Shao L, Qiao P J, Zhao Z G, van Hinsbergen D J J. 2018. Early Miocene birth of modern Pearl River recorded low-relief, high-elevation surface formation of SE Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 496: 120–131.
- Cao L C, Shao L, Van Hinsbergen D J J, Jiang T, Xu D, Cui Y C. 2023. Provenance and evolution of East Asian large rivers recorded in the East and South China Seas: a review. *GSA Bulletin*, 135: 2723–2752.
- Chen Y, Yan M D, Fang X M, Song C H, Zhang W L, Zan J B, Zhang Z G, Li B S, Yang Y P, Zhang D W. 2017. Detrital zircon U-Pb geochronological and sedimentological study of the Simao Basin, Yunnan: implications for the Early Cenozoic evolution of the Red River. *Earth and Planetary Science Letters*, 476: 22–33.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W, Wang E, Chen L. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23(1): TC1006.
- Clift P D, Sun Z. 2006. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: implications for Tibetan uplift and monsoon intensification. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111: B06405.
- Clift P D, Blusztajn J, Nguyen A D. 2006a. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. *Geophysical Research Letters*, 33: L19403.
- Clift P D, Carter A, Campbell I H, Pringle M S, Van Lap N, Allen C M, Hodges K V, Tan M T. 2006b. Thermochronology of mineral grains in the Red and Mekong Rivers, Vietnam: provenance and exhumation implications for Southeast Asia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7: Q10005.
- Clift P D, Carter A, Wysocka A, Hoang L V, Zheng H B, Neubeck N. 2020. A Late Eocene-Oligocene through-flowing river between the Upper Yangtze and South China Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 21(7): e2020GC009046.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Z C, Guogan M A. 1992. Zircon U-Pb ages for the early Cambrian time-scale. *Journal of the Geological Society*, 149: 171–184.
- Cui Y C, Shao L, Qiao P J, Pei J X, Zhang D J, Tran H. 2019. Upper Miocene-Pliocene provenance evolution of the Central Canyon in Northwestern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 223–235.
- Cui Y C, Shao L, Li Z X, Zhu W L, Qiao P J, Zhang X T. 2021. A Mesozoic Andean-type active continental margin along coastal South China: new geological records from the basement of the northern South China Sea. *Gondwana Research*, 99: 36–52.
- Cui Y C, Shao L, Li Z X, Elders C, Stattegger K, Zhu W L, Li S Z, Zhao X X, Qiao P J, Zhang H. 2024. Early Cenozoic drainage network and paleogeographic evolution within the SE Tibetan Plateau and its surrounding area: synthetic constraints from onshore-offshore geological dataset. *Earth-Science Reviews*, 258: 104932.
- Faure M, Lepvrier C, Van Nguyen V, Van Vu T, Lin W, Chen Z C. 2014. The South China Block-IndoChina collision: where, when, and how? *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260–274.
- He J, Garzanti E, Jiang T, Barbarano M, Liu E T, Chen S, Liao Y T, Li X P, Wang H. 2023. Evolution of eastern Asia river systems reconstructed by the mineralogy and detrital-zircon geochronology of modern Red River and coastal Vietnam river sand. *Earth-Science Reviews*, 245: 104572.
- Hieu P T, Lei W X, Minh P, Thuy N T B, Phuc L D, Luyen N D. 2022. Archean to Paleoproterozoic crustal evolution in the Phan Si Pan zone, Northwest Vietnam: evidence from the U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry. *International Geology Review*, 64(1): 96–118.
- Hoang L V, Wu F Y, Clift P D, Wysocka A, Swierczewska A. 2009. Evaluating the evolution of the Red River system based on in situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10: Q11008.
- Nam T N, Toriumi M, Sano Y, Terada K, Thang T T. 2003. 2. 9, 2. 36, and 1. 96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Viet Nam: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(7): 743–753.
- Pan Y D, Hu X M. 2024. A database of detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes from the Songpan-Ganzi and Western Qinling terranes. *Geoscience Data Journal*, 11: 394–404.
- Pham T T, Shellnutt J G, Tran T A, Lee H Y. 2020. Petrogenesis of Eocene to Early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China Block. *Lithos*, 372: 105640.
- Saylor J E, Sundell K E. 2016. Quantifying comparison of large detrital geochronology data sets. *Geosphere*, 12(1): 203–220.
- Shao L, Cao L C, Pang X, Jiang T, Qiao P J, Zhao M. 2016. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255–269.
- Shao L, Cui Y C, Stattegger K, Zhu W L, Qiao P J, Zhao Z G. 2019. Drainage control of Eocene to Miocene sedimentary records in the southeastern margin of Eurasian Plate. *GSA Bulletin*, 131: 461–478.
- Sun Y G, Li B L, Sun F Y, Ding Q F, Dong J L, Qian Y, Li Y J, Yao Z. 2022. Late Cretaceous K-rich rhyolitic crystal tuffs from the Chuduoqu area in eastern Qiangtang Subterranean: evidence for crustal thickening of the central Tibetan Plateau prior to India-Asia collision. *Acta Geochimica*, 41(1): 147–163.
- Vermeesch P. 2013. Multi-sample comparison of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 341: 140–146.
- Wang C, Liang X Q, Foster D A, Xie Y H, Tong C X, Pei J X, Fu J G, Jiang Y, Dong C G, Zhou Y, Wen S N. 2016. Zircon U-Pb geochronology and heavy mineral composition constraints on the provenance

- of the Middle Miocene deep-water reservoir sedimentary rocks in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 819–834.
- Wang C, Liang X Q, Foster D A, Liang X R, Zhang L, Su M. 2019a. Provenance and drainage evolution of the Red River revealed by Pb isotopic analysis of detrital K-Feldspar. *Geophysical Research Letters*, 46(12): 6415–6424.
- Wang C, Liang X Q, Foster D A, Tong C X, Liu P, Liang X R, Zhang L. 2019b. Linking source and sink: detrital zircon provenance record of drainage systems in Vietnam and the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. *GSA Bulletin*, 131: 191–204.
- Wang C, Liang X Q, Foster D A, Liang X R, Tong C X, Liu P. 2019c. Detrital zircon ages: a key to unraveling provenance variations in the eastern Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. *AAPG Bulletin*, 103(7): 1525–1552.
- Wang C, Zeng L T, Lei Y P, Su M, Liang X Q. 2020. Tracking the detrital zircon provenance of Early Miocene sediments in the continental shelf of the northwestern South China Sea. *Minerals*, 10(9): 752.
- Wissink G K, Hoke G D, Garzzone C N, Jing L Z. 2016. Temporal and spatial patterns of sediment routing across the southeast margin of the Tibetan Plateau: insights from detrital zircon. *Tectonics*, 35(11): 2538–2563.
- Yan Y, Carter A, Palk C, Brichau S, Hu X. 2011. Understanding sedimentation in the Song Hong – Yinggehai Basin, South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12: Q06014.
- Zhang Z J, Daly J S, Yan Y, Lei C, Badenszki E, Sun X L, Tian Y T. 2021. No connection between the Yangtze and Red Rivers since the Late Eocene. *Marine Geology*, 129: 105115.
- Zhang Z J, Daly J S, Tian Y T, Tyrrell S, Sun X L, Badenszki E, Qin Y H, Cheng Z Y, Guo R J. 2022. Sedimentary provenance perspectives on the evolution of the major rivers draining the eastern Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 232: 104151.
- Zhao M, Shao L, Liang J S, Li Q Y. 2015. No Red River capture since the Late Oligocene: geochemical evidence from the northwestern South China Sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 122: 185–194.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)

2026 年“准噶尔盆地古地理、古环境与油气勘探” 专 辑 征 稿

准噶尔盆地作为中国第二大内陆盆地，不仅是欧亚大陆腹地重要的地质构造单元，更是中国油气资源战略接替区。盆地自晚古生代以来经历多期构造变革，古地理与古环境发生重要演变，形成了多套优质的烃源岩、规模储集层与有利的储盖组合。近年来，准噶尔盆地的油气勘探不断取得新突破（如全球最大的砾岩油藏的发现、全国页岩油百万吨级开发示范区的建立等），但同时也面临着诸多挑战，尤其是构造古地理、岩相古地理、古环境等基础地质问题还存在较大争议，在一定程度上制约了勘探进程。

针对目前准噶尔盆地的勘探研究现状，《古地理学报》拟于 2026 年在本刊组织“准噶尔盆地古地理、古环境与油气勘探”专辑，以推动这些基础地质学科的发展和准噶尔盆地的油气勘探发现。专辑包括（但不限于）以下主题：（1）准噶尔盆地构造演化与构造古地理；（2）准噶尔盆地源汇系统与岩相古地理；（3）准噶尔盆地古环境、古气候与烃源岩；（4）准噶尔盆地沉积体系与规模有效储集层；（5）准噶尔盆地最新油气勘探理论与实践。

征稿要求：（1）论文类型：研究论文，综述性文章；（2）论文应属于作者的原创成果，尚未在正式出版物上发表；（3）论文主题鲜明、内容具有创新性较高的学术或应用价值；（4）论文各部分完整，论文格式请参考《古地理学报》征稿简则。

组稿专家：李 攀：中国石油勘探开发研究院高级工程师、《古地理学报》编委

肖冬生：中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院院长、高级工程师

郑孟林：中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院教授

李 涤：中国地质大学（北京）教授

《古地理学报》编辑部

2025 年 9 月