

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.138>



# 丽江盆地早三叠世砂岩物源特征 及其对扬子西南构造的约束

朱 民<sup>1</sup>, 孟立丰<sup>2\*</sup>, 李 也<sup>3</sup>, 陈新伟<sup>4</sup>, 吴鸿翔<sup>5</sup>

1. 九江学院旅游与地理学院,江西九江 332005
2. 浙江工业大学化学工程学院,浙江杭州 310014
3. 九江学院资源与环境学院,江西九江 332005
4. 成都理工大学地球与行星科学学院,四川成都 610059
5. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081

**摘要:** 丽江盆地作为扬子西南边缘地区多板块交汇带,对其下三叠统沉积物源的研究可揭示扬子西南地区的沉积“源-汇系统”及其与西部冈瓦纳弧盆体系的时空关系。野外观测与镜下鉴定显示鹤庆腊美组砂岩均来自近距离的长英质火山岩物质,且碎屑锆石分别呈现~254 Ma 和~255 Ma 单一年龄峰值,与峨眉山大火成岩省中酸性岩浆活动时间一致,与板内/非造山环境岩浆锆石具有锆石微量元素一致性,而区别于弧造山带; Lu-Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值表明其与峨眉山大火成岩省的长英质岩类有关系; 全岩地球化学数据显示腊美组与峨眉山流纹岩、粗面岩、正长岩具有主微量元素一致的特征。综合分析得腊美组物源来自近源搬运的峨眉山流纹岩、粗面岩和正长岩。早三叠世期间丽江盆地仍为被动陆缘沉积,主要接受来自峨眉山大火成岩省的物质,无西部弧盆体系物质来源。

**关键词:** 下三叠统; 丽江盆地; 物源分析; 碎屑锆石 U-Pb; 年代学; 全岩地球化学; Lu-Hf; 同位素。

中图分类号: P531

文章编号: 1000-2383(2025)11-4424-18

收稿日期: 2025-04-21

## Provenance of Early Triassic Clastic Rocks and Its Constraint on Tectonic Evolution of Lijiang Basin, Upper Yangtze Block

Zhu Min<sup>1</sup>, Meng Lifeng<sup>2\*</sup>, Li Ye<sup>3</sup>, Chen Xinwei<sup>4</sup>, Wu Hongxiang<sup>5</sup>

1. College of Tourism and Geography, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China
2. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China
3. College of Resources and Environment, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China
4. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Lijiang basin is a multi-plate confluence zone located in the southwestern margin of the Yangtze block. The study for the provenance of the Lower Triassic reveals the source-sink system of the southwestern Yangtze block and its spatio-temporal relationship with the western Gondwana arc basin system. Field observations and microscopic identification show that the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 42062014); 江西省教育厅科学技术研究项目(No. A00129)。

**作者简介:** 朱民(1984—),男,副教授,博士,主要从事沉积学、造山带和盆地构造分析。ORCID: 0000-0002-8002-2159. E-mail: 237623510@qq.com

\* 通讯作者: 孟立丰, E-mail: lifengmeng@zjut.edu.cn

**引用格式:** 朱民, 孟立丰, 李也, 陈新伟, 吴鸿翔, 2025. 丽江盆地早三叠世砂岩物源特征及其对扬子西南构造的约束. 地球科学, 50(11):4424—4441.

**Citation:** Zhu Min, Meng Lifeng, Li Ye, Chen Xinwei, Wu Hongxiang, 2025. Provenance of Early Triassic Clastic Rocks and Its Constraint on Tectonic Evolution of Lijiang Basin, Upper Yangtze Block. *Earth Science*, 50(11):4424—4441.

sandstones of the Lamei Formation in Heqing region are mainly derived from the proximal transport of felsic volcanic rocks. The detrital zircons exhibit single age peaks of  $\sim 254$  Ma and  $\sim 255$  Ma, corresponding to the timing of felsic magmatic activity in the Emeishan Large Igneous Province (ELIP), and are consistent with interior/non-orogenic magmatic zircon trace element signatures, distinguishing them from those in arc orogenic belts. The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the Lu-Hf isotopic analysis indicate the provenance of the sandstones of Lamei Formation are from the felsic rocks of the ELIP. Whole-rock geochemical data show that the Lamei Formation shares similar trace element characteristics with the Emeishan rhyolites, porphyries and syenites. A comprehensive analysis suggests that the materials of the Lamei Formation originate from the proximal transport of rhyolite, trachyte and syenite from ELIP. During the Early Triassic, the Lijiang basin functioned as a passive continental margin sedimentation area, primarily receiving materials from the ELIP, with no contributions from the western arc-basin system.

**Key words:** Lower Triassic; Lijiang basin; provenance analysis; detrital zircon U-Pb age; chronology; whole-rock geochemistry; Lu-Hf; isotope.

## 0 引言

晚古生代末-早中生代早期,扬子板块西南经历了西部古特提斯洋俯冲-闭合(Zi *et al.*, 2012; Metcalfe, 2013)引起的盆-山演化及峨眉山大火成岩省(ELIP)构造岩浆热事件(Chung and Jahn, 1995; Xu *et al.*, 2001, 2010; Shellnutt *et al.*, 2009; Hei *et al.*, 2018),导致扬子西部由冈瓦纳(羌塘-中咱-印支等)多弧盆体系(潘桂棠等,2001)为基础的三江造山带的逐步形成,以及响应性的川西南、盐源-丽江、楚雄等前陆盆地的诞生(Zhao and Coe, 1987; 潘桂棠等, 2001; 雷永良等, 2010; Dong *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2020).丽江盆地在此期间由早中三叠世的被动陆缘沉积转化为晚三叠世的前陆盆地沉积(崔克信,2004;马永生等,2009)并被较为完整的保留下来,记录了其周缘地质事件关键的源-汇信息,是分析扬子及其西部盆山演化的重要窗口(Burchfiel and Chen, 2013).古特提斯洋闭合相关火成岩年代学(Wang *et al.*, 2014)及古地磁数据(李朋武等,2009)显示扬子西南与冈瓦纳弧盆系碰撞具有南早(滇南,早三叠世印度期)北(川西北甘孜-理塘,晚三叠世卡尼期)晚穿时性.毗邻盆地东侧的康滇古陆在中生代期间始终处于抬升状态,其上覆ELIP被认为可能与其两侧盆地的形成存在密切联系(Xu *et al.*, 2001; 何斌等, 2006; Zhu *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2022b).因此,丽江盆地早三叠世物源来自何处,沉积物质组成如何,是否已经开始接受来自西部冈瓦纳弧盆系的物质,可反映扬子西北地区与冈瓦纳碰撞的时限和地点,关系到其是否开始受西部三江造山带初始隆升的影响和控制.

已报道基于全岩地球化学与碎屑锆石U-Pb年代学成果表明扬子西南川、滇、黔地区早三叠世飞

仙关组(张英利等, 2016; Zhu *et al.*, 2018; Meng *et al.*, 2022; 周寅生等, 2022; 邓旭升等, 2025)、青天堡组(朱民等, 2016; 韩超, 2023)碎屑岩具有部分相似的沉积学建造、砂岩碎屑组分以及年代学特征,体现在砂岩组分中较高的各类板条状、微晶状火山岩屑(含量40%以上),一定含量的石英和长石(5%~20%)及碳酸盐岩组分(10%~20%),以及以不透明矿物(磁铁矿、赤褐铁矿)为特点的填隙物,同时以247~268 Ma年龄的且多集中在~256至~261 Ma单峰值、部分伴有零星的新元古代颗粒(700~1 000 Ma)碎屑锆石年代学(宋芳等, 2024)为特点,并伴有部分相似的全岩地球化学属性,多元证据均一致指向扬子板内的峨眉山大火成岩省(ELIP)火山岩物源,且主要为其位列中部序列的高钛玄武岩(Xu *et al.*, 2001; 周寅生等, 2022; 韩超, 2023; 邓旭升等, 2025),而与西部的三江造山带无关(朱民等, 2016; Zhu *et al.*, 2018).丽江盆地早三叠世沉积特征和砂岩物质组成如何,物源来自扬子板内还是与西部冈瓦纳弧盆系有关,目前尚未清楚.故需要结合丽江盆地下三叠统沉积学特征、砂岩碎屑组分、全岩地球化学和碎屑锆石年代学,结合锆石微量元素以及Hf同位素进一步分析,探讨其物源特征及其相应的构造演化过程.

## 1 区域地质背景

丽江盆地位于扬子板块西南边缘,西部紧邻羌塘-昌都板块和中咱地块(图1c),北部近维西-木里一带与义墩岛弧相望,南部延伸至大理-临沧一线,东部以深大断裂与康滇古陆相隔,东北部大致以宁南-永胜一线为边界(四川省地质矿产研究所专题研究组,1987)与盐源盆地相连,地处多板块汇聚拼

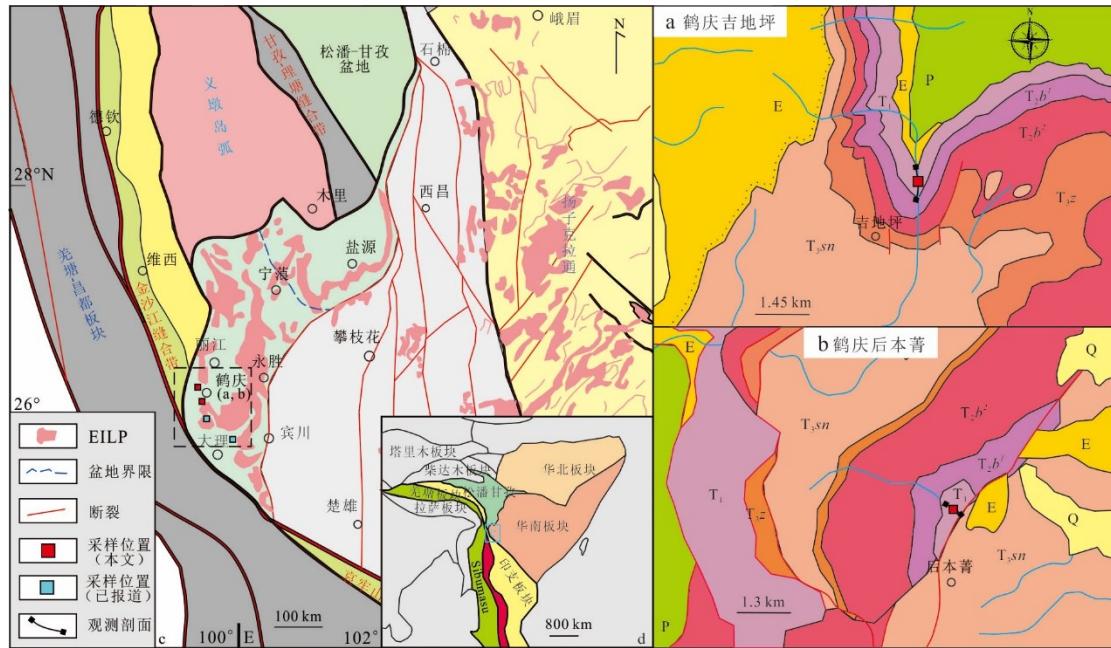


图 1 丽江盆地及邻区地质简图

Fig.1 Simplified geologic map of the Lijiang basin and its adjacent areas

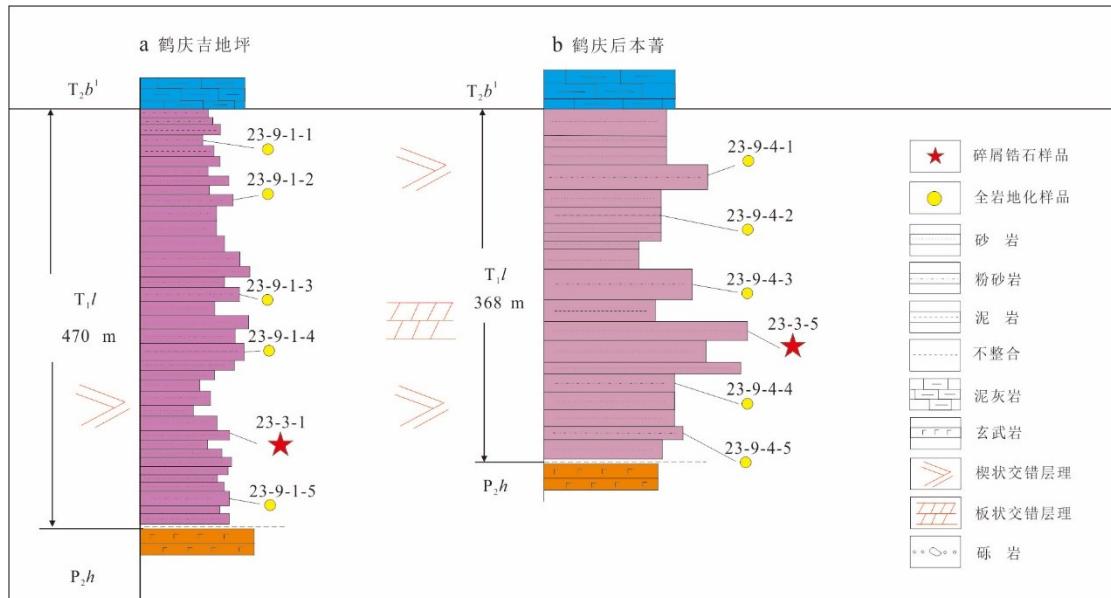
a, b. 据云南省地质局(1966); c. 据 Munteanu *et al.*(2013)修改; d. 据 Metcalfe(2013)修改

图 2 丽江地区早三叠世腊美组野外实测剖面(a, b) (剖面位置见图 a, b)

Fig.2 Stratigraphic columns (a, b) of the Early Triassic Lamei Formation in Lijiang area

合带(图 1d). 区内三叠系下、中、上统出露齐全, 分布广泛, 其中下统为暗紫红色至灰色的滨浅海相碎屑岩(四川省地质矿产研究所专题研究组, 1987), 西、北较厚, 南、东较薄. 位于盆地内部的下三叠统( $T_1$ )在云南永胜、宁蒗、丽江、鹤庆、大理等地区为一套碎屑岩沉积, 富含瓣鳃类 *Eumorphotis inaequostata* 及植物化石, 向东与四川盐源甲米地区青天

堡组相连; 在丽江大东-宁蒗马家村一线以北, 永宁-三江口以南地区则为一套碳酸盐岩沉积, 并含 *Claraia wangii* 组合瓣鳃类、上部含 *Eumorphotis multiformis* 等化石, 向东与盐源左所连为一片. 其中剖面出露较好的鹤庆地区下三叠统砂岩从古生物组合与盐源、大理地区的青天堡组、川黔一带地区飞仙关组、永宁镇组乃至至义敦、马尔康、雅江地区下

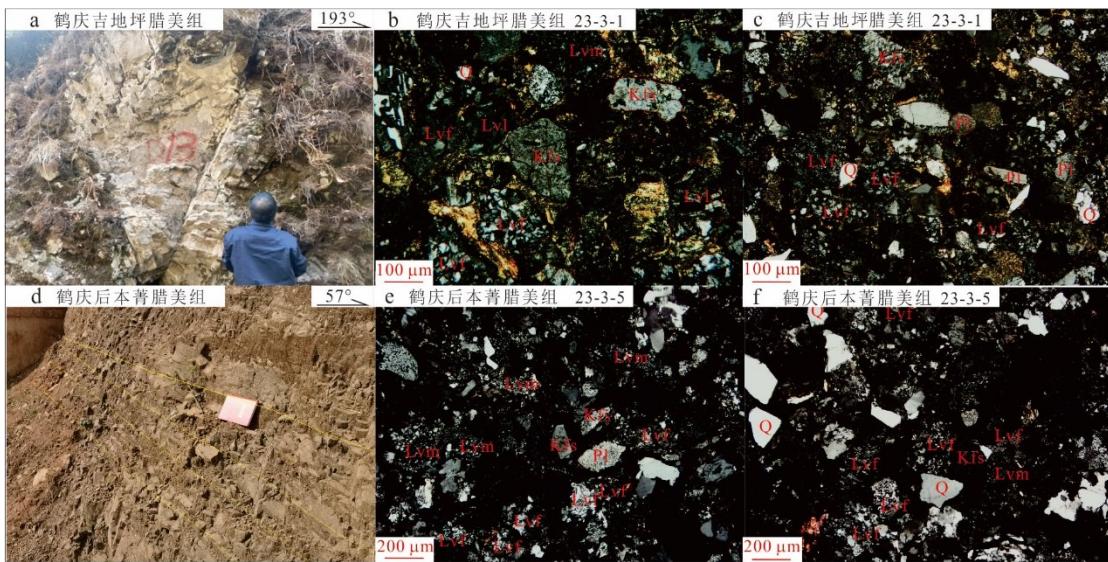


图3 吉地坪和后本菁剖面早三叠世腊美组样品野外(a, d)及镜下(b, c, e, f)正交偏光特征

Fig.3 Field work of the Early Triassic Lamei Formation in Jidiping (a), Houbenjing (d) and their micro photographs (b, c, e, f) for sandstone samples

黄实线为层理,黄虚线为交错层理. Q. 石英;Kfs. 钾长石;Lvf. 长英质火山岩屑;Lvm. 微晶火山岩屑;Lvl. 板条状火山岩屑;Pl. 斜长石

三叠统皆可对比,同属于印度-奥伦尼克期. 鹤庆下三叠统目前尚未有正式命名,早期曾分别被称为“丽江群”和“白山洛可组”,现已废弃. 考虑到鹤庆与丽江地区下三叠统相连且具有可对比性,故沿用丽江地区的“腊美组( $T_1l$ )”作为本研究的组名. 腊美组虽与周围同期沉积古生物可对比,但其砂岩碎屑组分、野外露头沉积特点与构造特征却和其他组别不尽相同,意味着其物质组成和来源与其他地区可能存在差异,需要个体化深入分析.

本次研究分布于鹤庆县城所在地以西以南约20 km的后本菁(图3d)和吉地坪村(图3a)紫红色碎屑岩,厚度多在350 m以上,主体为一套中粒砂岩夹泥页岩,报道显示其底部存在一套约10 m厚的砾岩与二叠系玄武岩组或黑泥哨组( $P_2h$ )呈平行不整合接触,顶部与上覆中三叠世北衙组一段整合接触(云南省地质局,1966). 野外测量吉地坪村(图2a)及后本菁村(图2b)剖面. 两者总厚度野外观测分别为470 m和368 m,具有相似的沉积构造和岩石组成,总体呈中厚层中细粒砂岩夹薄层泥页岩组合,风化破碎较明显,局部可见交错层理,后本菁较吉地坪剖面更明显(图3a, 3c);主要为中细粒岩屑砂岩,野外剖面底部未见砾岩,底部至顶部粒度大致由粗到细,但不明显,吉地坪剖面细粒砂岩和泥页岩主要赋存于剖面顶部,后本菁剖面则存于剖面中部.

## 2 样品和实验方法

本次研究采集野外新鲜吉地坪和后本菁剖面腊美组中粒砂岩各一份,用以进行砂岩碎屑组分鉴定、砂岩碎屑锆石U-Pb定年、Hf同位素分析,两个剖面另采集各5份细砂岩、粉砂-泥页岩进行全岩地球化学分析. 砂岩碎屑组分样品前期碎样和薄片加工在廊坊市诚信地质公司完成,镜下鉴定及统计在浙江大学地球科学部岩石实验室完成. 依据Gazzi-Dickinson砂岩碎屑颗粒统计模型,除样品需要新鲜及颗粒方便识别的要求外,砂岩中杂质或胶结物含量须小于25%,且不能有过高碳酸盐颗粒. 碎屑锆石制靶和实验以及Hf同位素测试在廊坊诚信地质有限公司完成. 锆石定年采用Thermofisher CAP RQ型ICPMS及与之配套的Cetate Analyte HE激光剥蚀系统. 采用单点剥蚀方式,激光剥蚀所用斑束直径为25  $\mu\text{m}$ , U-Pb定年测试采用人工合成的硅酸盐玻璃NIST 610和NIST 612作为外标进行元素校正(Pearce *et al.*, 1997),以国际标准锆石91500样品作为外标进行U-Pb同位素分馏效应校正. 每测定6个样品前后重复测定两个标准锆石91500对样品进行校正,并使用Plesovice作为监控测试的准确度和精度. 后采用GLITTER(4.0)程序处理数据,各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot 4.15程序计算,锆石年龄核密度估计图

(Kernel Density Estimates, KDE)采用 Density Plotter 8.4(Java)完成. 对于测试年龄大于 1 000 Ma 的样品, 因具有放射性的 Pb 大量存在而应用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  的表面年龄; 对于小于 1 000 Ma 的样品因其 Pb 含量少和 Pb 校正的不稳定性, 采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表面年龄. 不谐和度大于 10% 或普通铅校正大于 2% 的数据不予应用. Hf 同位素则以 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统和多接收器型号电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS), 使准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 能量密度为 3.5 J/cm<sup>2</sup>, 束斑直径为 50  $\mu\text{m}$ , 频率为 8 Hz, 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 MC-ICP-MS 完成测试. 测试过程中每隔 5 颗样品锆石, 依次测试 1 颗标准锆石(包括 GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai), 以检验锆石 Hf 同位素比值数据质量. 全岩地球化学实验在廊坊诚信地质公司完成测试. 将野外采集 2 个剖面合计 10 份样品进行清理, 剔除其表面风化部分并粉碎, 得到 200 目以下规格, 研磨后测试, 分析误差小于 5%.

### 3 结果

#### 3.1 砂岩碎屑组分特征

(1) 鹤庆吉地坪(样品 23-3-1)砂岩. 砂岩由石英(含量~5%)、长石(含量~5%)、岩屑(含量~60%)和填隙物(含量~30%)组成, 偶见黑云母(图 3b, 3c). 呈不规则粒状, 磨圆度较差, 次棱角状为主, 具波状消光, 粒径为 0.06~0.50 mm. 钾长石(Kfs)含量多于斜长石(Pl)且土化蚀变, 粒径与石英相当. 斜长石为板条状、次棱角状-次圆状, 具聚片双晶, 有绢云母化、土化蚀变. 黑云母为片状, 具褐黄-浅褐黄多色性, 平行消光, 片径(长向方向)在 0.10~0.40 mm. 岩屑形状不规则, 岩屑粒径均为 0.10~0.40 mm, 磨圆度较好, 次圆状为主, 主要为长英质(Lvf)和微晶状火山岩屑(Lvm), 包括中酸性喷出岩、花岗岩、凝灰岩, 未见板条状火山岩屑(Lvl), 另同时见石英岩、泥质粉砂岩岩屑. 填隙物有同成分机械碎细物、云母、粘土矿物和不透明矿物. 孔隙式胶结, 云母为鳞片状, 可能为火山尘蚀变产物, 含量约为 15%. 粘土矿物颗粒微细, 集中不均匀分布, 含量约为 5%. 不透明矿物为不规则粒状, 不显光性, 粒径为 0.02~0.15 mm, 散状分布, 为赤、褐铁矿, 含量小于 5%. 偶见鳞片状海绿石, 绿色, 干涉色受自身颜色影响, 呈不规则状集合体分布, 集合体粒径 0.15 mm 砂岩碎

屑颗粒计点统计显示吉地坪腊美组的碎屑颗粒共计 901 颗(附表 1), 其中石英 Q (Qm+Qp) 共计 192 粒, 长石 F 为 160 粒, 岩屑为 549 粒.

(2) 鹤庆后本菁(样品 23-3-5)砂岩. 砂岩由石英(含量~10%)、长石(含量~5%)、岩屑(含量~65%)和填隙物(含量~20%)组成(图 3e, 3f). 石英为他形粒状, 磨圆度一般, 次棱角状-次圆状, 无色透明, 具波状消光, 粒径为 0.06~0.50 mm. 长石以钾长石(Kfs)为主, 轻微土化蚀变, 少量斜长石(Pl), 具聚片双晶, 有绢云母化、土化蚀变, 为板条状、不规则粒状, 粒径与石英相当, 磨圆度一般, 次棱角状-次圆状. 岩屑形状不规则, 磨圆度较好, 次圆状为主, 主要为长英质(Lvf)和微晶状火山岩屑(Lvm), 成分有中酸性喷出岩、凝灰岩、石英岩等, 粒径为 0.10~0.60 mm. 填隙物有同成分机械碎细物、火山尘、粘土矿物和不透明矿物(赤褐铁矿). 孔隙式胶结, 火山尘多已脱玻化, 含量不足 5%. 粘土矿物颗粒微细, 不均匀分布且含量不足 5%. 不透明矿物为不规则粒状, 不显光性, 填隙状分布, 含量约为 10%. 偶见鳞片状海绿石, 绿色, 呈不规则状集合体分布, 集合体粒径为 0.20 mm. 砂岩碎屑颗粒计点统计显示后本菁腊美组的碎屑颗粒共计 938 颗(附表 1), 其中石英 Q (Qm+Qp) 共计 222 粒, 长石 F 为 157 粒, 岩屑为 559 粒.

#### 3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、锆石微量元素及 Lu-Hf 同位素特征

**3.2.1 鹤庆吉地坪砂岩** 砂岩样品(23-3-1)搜集 76 个点中共获得谐和度大于等于 90% 的有效年龄数据(图 5a, 5b), 其 U-Pb 年龄变化范围为 239~264 Ma, 呈现单一主峰为~254 Ma, 无零散年龄颗粒(附表 4). 锆石颗粒形态总体呈现颗粒状和短柱状, 晶型颗粒完整, 次棱角-次圆状, 局部可见破碎带和包裹体颜色较暗, 环带发育, 粒径大部分在 100~120  $\mu\text{m}$ , 长宽比在 1.5:1~1.8:1(图 4a), Th/U 比值均  $>0.1$ (图 5a). 对所有测试的 77 个点进行微量元素测试分析(附表 5), 所有锆石颗粒显示明显的 Eu 负异常, 其中 62 颗锆石具有轻稀土亏损、重稀土富集且曲线明显上倾的特征, 伴有明显的 Ce、Sm 正异常, 显示典型的岩浆来源(Corfu, 2003; Hoskin, 2003); 14 颗锆石颗粒(如图 4a 中 9 号、79 号)显示 Ce 略正异常、轻稀土与重稀土均富集且分别呈下倾和上倾曲线的特征(图 6a), 见核边和增生结构颗粒, 显示非典型岩浆锆石. 76 颗锆石微量元素测定结果显示 Nb 含量为  $2.34 \times 10^{-6}$ ~ $114.95 \times$

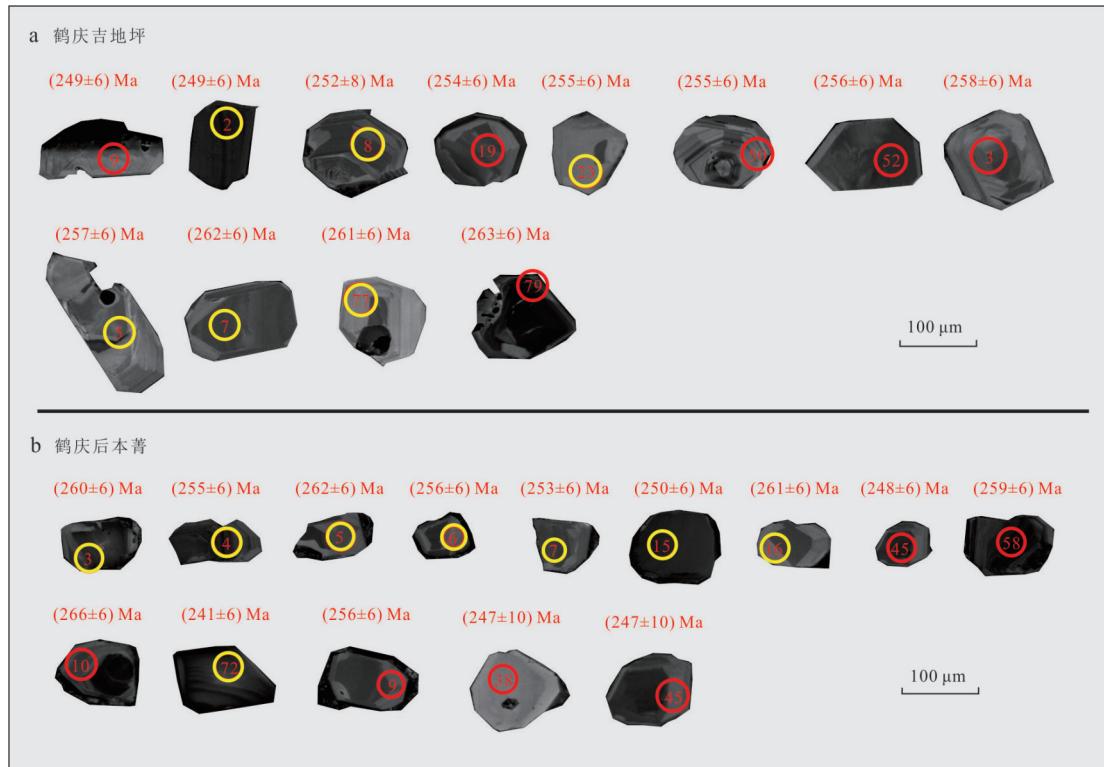


图4 丽江吉地坪剖面(a)和后本菁剖面(b)下三叠统样品典型锆石颗粒阴极发光照片

Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb representative cathode-luminescence (CL) from samples of the Lower Triassic in Jidiping (a) and Houbenjing (b) areas

红圈代表年龄,黄圈代表Hf点位

$10^{-6}$ , Hf含量为 $6.206.7 \times 10^{-6} \sim 11.322 \times 10^{-6}$ , Th含量为 $23.78 \times 10^{-6} \sim 681.46 \times 10^{-6}$ , U含量为 $43.79 \times 10^{-6} \sim 924.94 \times 10^{-6}$ , Ta含量为 $0.92 \times 10^{-6} \sim 16.69 \times 10^{-6}$ , Zr含量为 $0.40 \sim 0.46$ . Th/Nb比值为 $1.67 \sim 31.19$ , Hf/Th比值为 $14.26 \sim 305.97$ , Nb/Hf比值除一粒锆石(0.02)外,均小于0.01, Th/U比值为 $0.33 \sim 12.61$ , Nb/Ta比值为 $2.52 \sim 13.81$ , Zr/Hf比值为 $37.81 \sim 70.82$ . 上述14颗锆石的La元素含量较高,为 $4.13 \sim 990.59$ , Th/U比值为 $0.41 \sim 1.42$ , 数值并不分散, Nb/Ta比值为 $2.57 \sim 7.64$ , 平均值为4.16, Zr/Hf比值为 $40.67 \sim 64.64$ , 平均值为56.72, 数值较为均一. 而岩浆锆石Nb/Ta比值为 $1.0 \sim 4.6$ , 变质锆石为 $0.3 \sim 1.3$ (Tomaschek *et al.*, 2003), 考虑到其重稀土含量不低(李长民, 2009), 因而并不考虑变质锆石. 结合其稀土元素配分模式图以及阴极发光图特征, 推测其为岩浆锆石后期受热液改造导致的轻稀土富集, 其中高La元素含量应与其内包裹体有关(Zhong *et al.*, 2018; Zou *et al.*, 2019).

样品23-3-1中的249~263 Ma年龄10个锆石颗粒作Lu-Hf同位素测试(附表8). 除了一个锆石

的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} > 0.002$ (样品23-3-1-2, 0.002 199)外, 其余9个锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比率均小于0.002. 这一观察结果表明, 在锆石形成后Hf的累积可以忽略不计, 所测量的Hf同位素可能反映出锆石系统在其形成时的特征(Wu *et al.*, 2008). 碎屑锆石表现出 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $T_{\text{DM}}$ 年龄的范围. 249~263 Ma的锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.282\,634 \sim 0.282\,807$ , 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $0.5 \sim 6.7$ (图7b),  $T_{\text{DM}}$ 为 $636 \sim 859$  Ma,  $T_{\text{DM}}^{\text{c}}$ 为 $856 \sim 1\,244$  Ma,  $f_{\text{Lu/Hf}}$ 的平均值为-0.96.

**3.2.2 鹤庆后本菁砂岩** 砂岩样品(23-3-5)中共计75个点获得谐和度大于等于90%的有效年龄数据(图5c, 5d), 其U-Pb年龄变化范围为243~808 Ma, 主峰值呈现较为单一年龄峰为~255 Ma, 另有706 Ma和808 Ma零散年龄2颗分布(附表6). 锆石颗粒形态总体呈现颗粒状和短柱状, 晶型颗粒完整, 次棱角状, 局部可见破碎带, 颜色较暗, 环带发育, 粒径大部分在 $80 \sim 110 \mu\text{m}$ , 长宽比在 $1.8:1 \sim 1.2:1$ (图5b), Th/U比值均 $> 0.1$ (图5b). 在对所有测试的75个点进行微量元素测试分析, 结果见附表7. 所有锆石颗粒显示明显的Eu负异常, 61个锆石颗粒具有

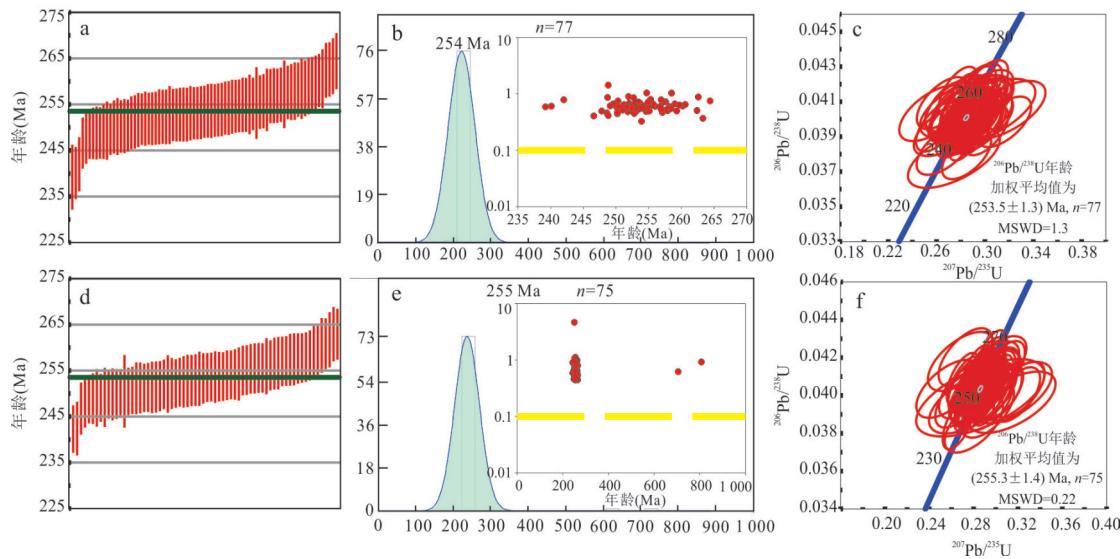


图 5 丽江吉地坪(a, b)和后本菁(c, d)地区剖面早三叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱及协和图

Fig.5 U-Pb concordia and histogram diagrams of Jidiping (a, b) and Houbenjing (c, d) detrital zircons

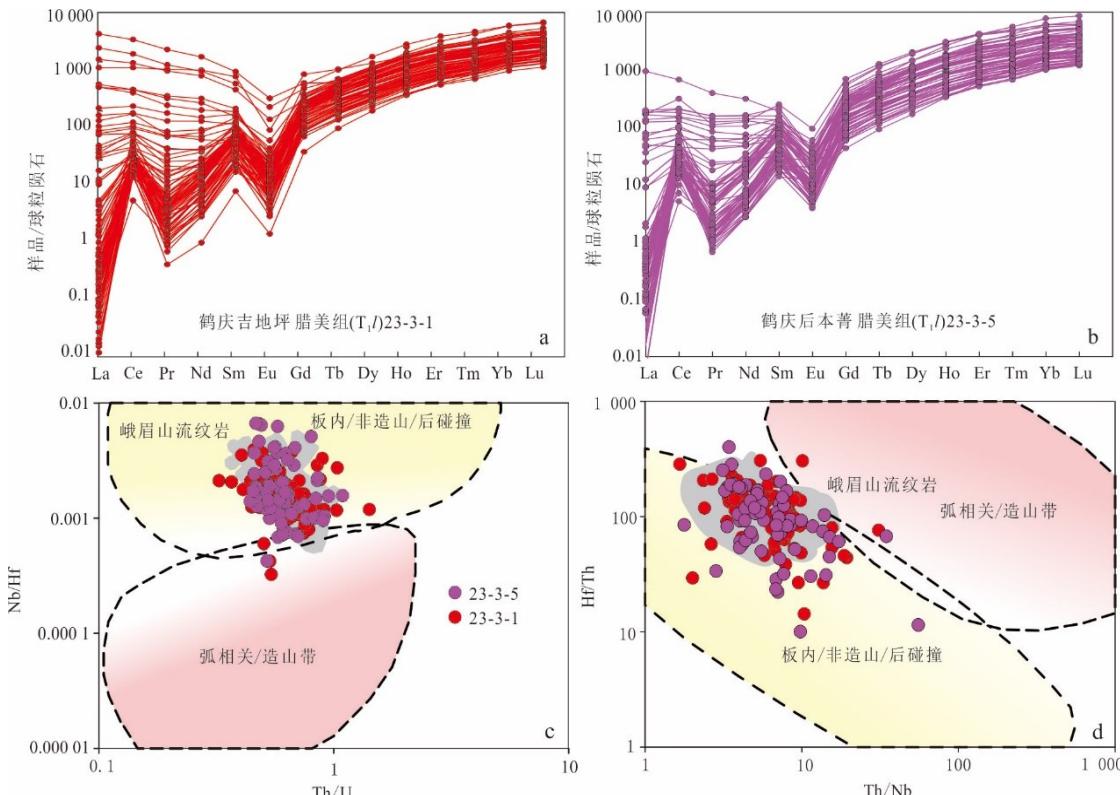


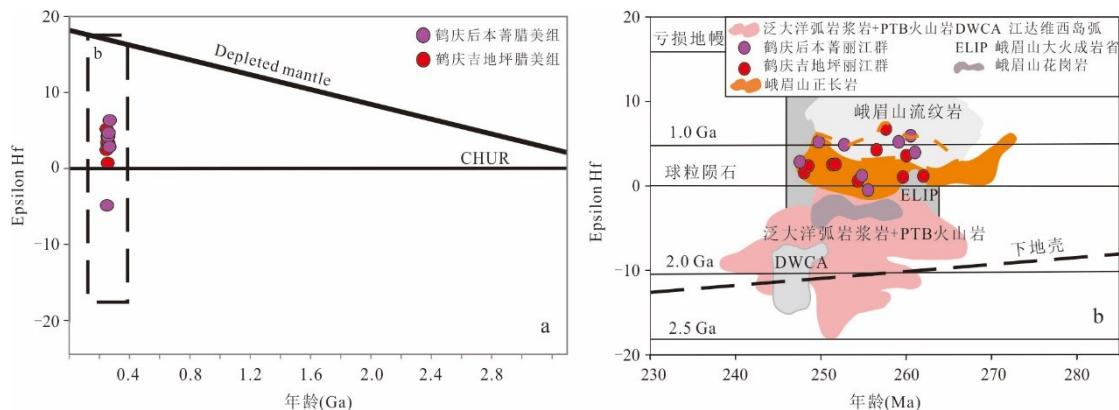
图 6 腊美组稀士元素 CL 球粒陨石配分模式(a, b)和微量元素 Hf/Th-Th/Nb(c, d)判别图解

Fig.6 The CL chondrite-normalized rare earth element diagrams (a, b) and Hf/Th-Th/Nb discriminating (c, d) for the detrital zircons of the Lamei sandstones

球粒陨石稀士元素含量参照 Sun and McDonough (1989);微量元素判别图据 Yang *et al.* (2012), 峨眉山流纹岩数据据 Xu *et al.* (2008); Shellnutt *et al.* (2009); Hei *et al.* (2018)

自 La 至 Lu 元素的显著增长特征, 曲线为明显的上倾, 显示为 Ce、Sm 正异常, 显示高温岩浆来源 (Corfu, 2003; Hoskin *et al.*, 2003); 1 颗锆石 (图 4b 中 45

号) 显示轻稀土富集的下倾曲线以及重稀土上倾曲线特征; 13 颗粒锆石 (如图 4b 中 9 号、38 号) 显示轻稀土较为富集和平坦, Ce、Sm 略微正异常, 以及重

图7 吉地坪和后本菁剖面腊美组碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与U-Pb年龄的关系Fig.7 Plot of zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age (Ma) for the Lamei Formation in Jidiping and Houbenjing areas

峨眉山流纹岩数据据 Xu et al. (2010); Hei et al. (2018); Huang et al. (2022a); 峨眉山玄武岩数据据 Xu et al. (2001, 2008); Xiao et al. (2004); Shellnutt et al. (2009); Zhong et al. (2009); 峨眉山正长岩数据据 Xu et al. (2008); Shellnutt et al. (2009); 泛大洋弧岩浆岩(He et al., 2018; Shen et al., 2018; Wang et al., 2021) + 华南 PTB 火山岩数据(高秋灵, 2013; He et al., 2014; 王曼等, 2018; Wang et al., 2019)以及江达维西弧长英质火山岩数据(Wang et al., 2014)

稀土上倾曲线的特征(图 6b). 所有 75 颗锆石微量元素测定显示 Nb 含量为  $1.48 \times 10^{-6} \sim 99.27 \times 10^{-6}$ , Hf 含量为  $5.639.4 \times 10^{-6} \sim 11.370 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $20.11 \times 10^{-6} \sim 747.18 \times 10^{-6}$ , U 含量为  $33.09 \times 10^{-6} \sim 939.06 \times 10^{-6}$ , Th/Nb 比值为  $1.78 \sim 195.71$ , Hf/Th 比值为  $10.02 \sim 401.08$ , Nb/Hf 比值除 2 粒锆石(0.01)外, 均小于 0.01, Th/U 比值为  $0.44 \sim 4.66$ , Nb/Ta 比值为  $2.23 \sim 6.62$ , Zr/Hf 比值为  $40.88 \sim 73.80$ . 上述 14 颗锆石的 La 元素含量较高, 为  $5.87 \sim 223.74$ , Th/U 比值为  $0.53 \sim 1.11$ , 数值并不分散, Nb/Ta 比值为  $2.46 \sim 6.62$ , 平均值为 3.75, Zr/Hf 比值为  $49.20 \sim 73.80$ , 平均值为 61.28. 显示其重稀土含量不低(李长民, 2009), 因而并不考虑变质锆石. 结合其稀土元素配分模式图以及阴极发光图特征, 推测其与吉地坪砂岩锆石类似, 均为后期受热液改造的岩浆锆石.

样品 23-3-5 中选取 8 个 248~262 Ma 锆石颗粒作 Lu-Hf 同位素测试(附表 9). 除了一个锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} > 0.002$ (样品 23-3-5-3, 0.002 221)外, 其余 7 个锆石颗粒的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比率均小于 0.002. 这一观察结果表明, 在锆石形成后 Hf 的累积可以忽略不计, 所测量的 Hf 同位素可能反映出锆石系统在其形成时的特征(Wu et al., 2008). 碎屑锆石表现出  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和  $T_{\text{DM}}$  年龄的范围. 248~262 Ma 的锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282 606 到 0.282 782, 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -0.5 到 5.9(图 7b),  $T_{\text{DM}}$  为 709~932 Ma,  $T_{\text{DM}}^{\text{c}}$  为 908~1 313 Ma,  $f_{\text{Lu/Hf}}$  的平均值为 -0.95.

### 3.3 全岩地球化学特征

**3.3.1 鹤庆吉地坪腊美组样品** 腊美组的细砂岩、粉砂-泥岩(样品 23-3-1)5 个样品与后元古代澳大利亚页岩(PAAS)相比, 表现出略低的  $\text{SiO}_2$ (56.18%~67.86%, 平均值为 62.25%),  $\text{PAAS}=62.8\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (13.42%~16.57%, 平均值为 14.95%),  $\text{PAAS}=18.9\%$ 、 $\text{MgO}$ (0.76%~1.65%, 平均值为 1.19%),  $\text{PAAS}=2.20\%$ ), 略高的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5.02%~9.01%, 平均值为 7.59%),  $\text{PAAS}=7.22\%$ )、 $\text{Na}_2\text{O}$ (1.12%~1.66%, 平均值为 1.38%,  $\text{PAAS}=1.2\%$ )和较高的  $\text{K}_2\text{O}$ (5.4%~7.5%, 平均值为 6.10%),  $\text{PAAS}=3.7\%$ )含量, 全碱( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )(5.95%~8.97%, 平均值为 7.48%),  $\text{PAAS}=4.9\%$ )高.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.24$ , 小于 PAAS 的 0.30, 显示成熟度略低, 同时  $\text{CaO}$  含量极低(0.28%,  $\text{PAAS}=1.3\%$ ).

样品的微量元素测试结果如附表 2. 微量元素蛛网图(图 8a)显示砂岩样品除 Rb、Ba、Th、U、Sr 等大离子亲石元素外, 其余元素含量相对于上地壳明显富集, 同时伴有 Ba、Sr 和 Ti 的负异常; 样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式(图 8c)显示  $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.61 \sim 0.63$ , 负 Eu 异常并不明显,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.38 \sim 9.03$ , 平均值为 8.19, 呈轻稀土略微富集, 重稀土较为平坦的分布模式.

**3.3.2 鹤庆后本菁腊美组样品** 后本菁粉砂岩-泥岩(样品 23-3-5)5 个样品(附表 3)表现出较后元古代澳大利亚页岩(PAAS)相比略高的  $\text{SiO}_2$ (65.17%~71.58%, 平均值为 66.62%),  $\text{PAAS}=62.8\%$  和

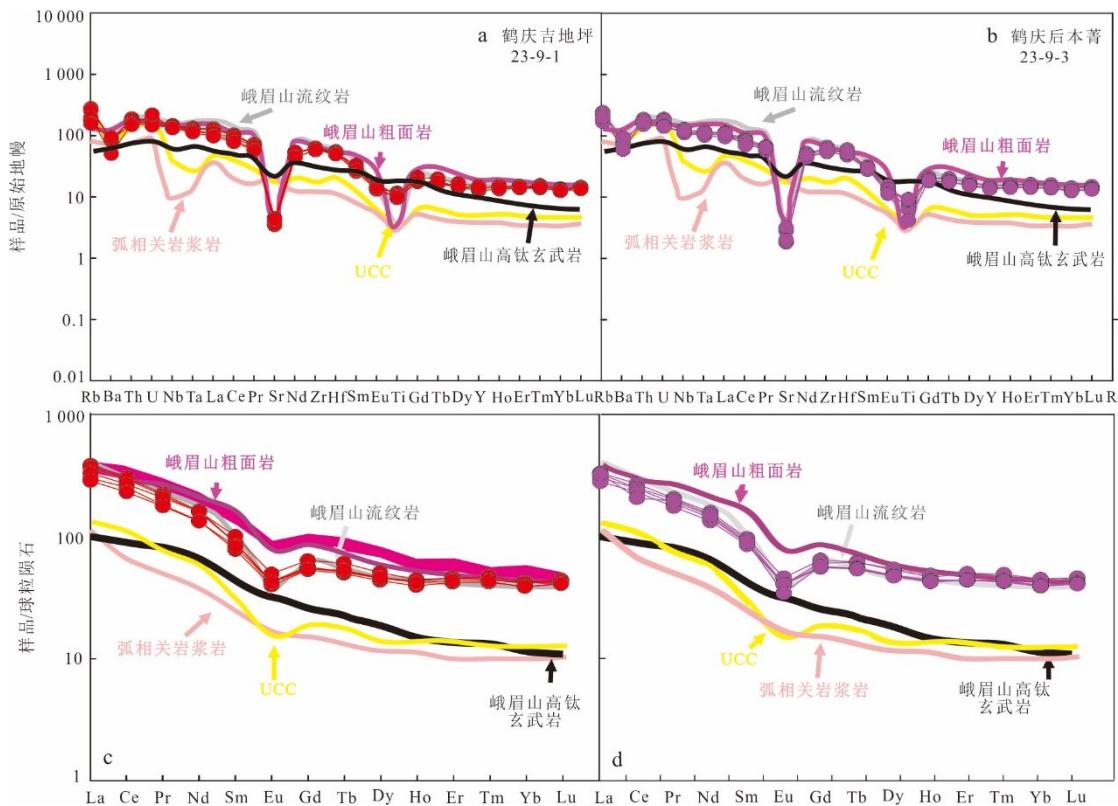


图 8 腊美组样品微量元素蛛网(a, b)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式(c, d)

Fig.8 The spider web of trace elements (a, b) and the standardized distribution model diagram of rare earth element chondrites (c, d) of the Lamei Formation samples

球粒陨石和原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough(1989), UCC 标准数据引自 Taylor and McLennan(1985)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5.95%~9.48%, 平均值为 7.68%, PAAS=7.22%), 略低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (11.85%~13.50%, 平均值为 13.00%, PAAS=18.9%), 较高的  $\text{K}_2\text{O}$ (5.36%~6.68%, 平均值为 6.28%, PAAS=3.7%), 较低的  $\text{Na}_2\text{O}$ (0.14%~1.26%, 平均值为 0.56%, PAAS=1.2%) 和  $\text{MgO}$ (0.32%~1.16%, 平均值为 0.69%, PAAS=2.20%), 全碱( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )平均含量(5.50%~7.66%, 平均值为 6.85%, PAAS=4.9%)较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0.20$ , 小于 PAAS 的 0.30, 显示成熟度略低, 同时  $\text{CaO}$  含量低(0.31%, PAAS=1.3%)。

样品的微量元素测试结果如附表 2. 微量元素蛛网图(图 8b)显示砂岩样品除大离子亲石元素外, 其余元素含量相对于上地壳明显富集, 同时伴有  $\text{Ba}$ 、 $\text{Sr}$  和  $\text{Ti}$  的负异常; 样品的球粒陨石标准化 REE 配分模式(图 8d)显示  $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.61\sim0.63$ , 平均值为 0.55, 负  $\text{Eu}$  异常并不明显,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.15\sim8.18$ , 平均值为 7.58, 显示轻稀土略富集, 重稀土较为平坦的分布模式。

## 4 讨论

### 4.1 腊美组砂岩的古风化特征

碎屑颗粒的风化、剥蚀作为沉积“源-汇系统”(source-to-sink system)分析至关重要的因素, 需要多方考虑。源岩的化学风化强度受其化学成分、风化持续时间、气候条件以及大地构造等因素控制(何谋春等, 2023)。碎屑颗粒在源岩风化过程中,  $\text{Na}、\text{K}、\text{Ca}$  元素被大量释放, 其在风化壳或沉积物中的残留量是源岩化学风化强度评价的敏感指标(Nesbitt *et al.*, 1997)。沉积岩的化学变异指数(CIA)作为反映沉积岩源区化学风化作用程度(Nesbitt and Young, 1982)参数, 可定性反映古气候环境, 并在粒度不同碎屑岩及火成岩、变质岩中均有报道。CIA 值以 80 和 60 为界, 大于 80(CIA=80~100)表明较强源区风化作用, 介于 60~80(CIA=60~80)表明风化强度中等, 小于 60 则表明初级风化强度。CIA 联合 A-CN-K 判别图(Fedo *et al.*, 1995)可对物源风化作用趋势及其源岩成分追溯(Nesbitt and Young, 1982),

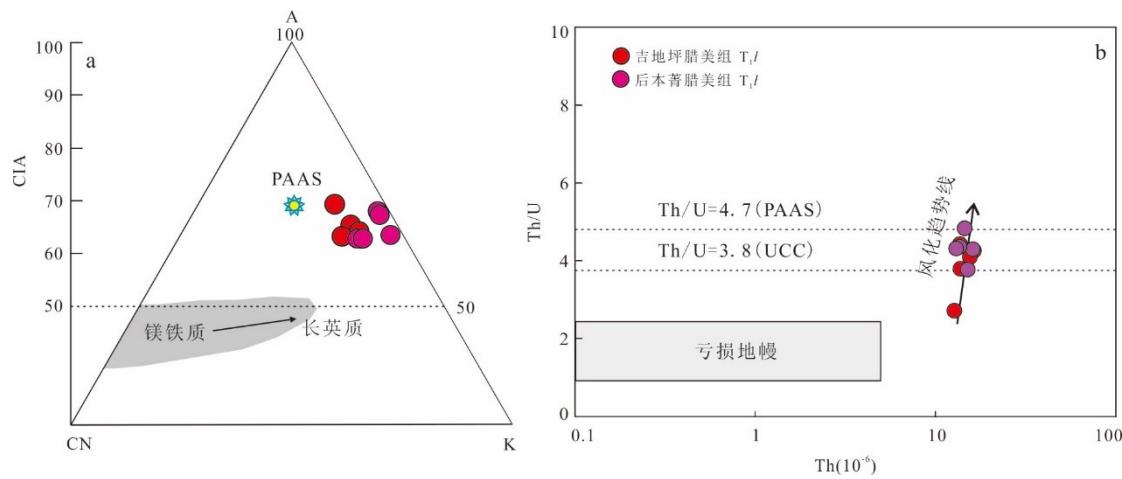


图9 腊美组细碎屑岩全岩主量元素 A-CN-K(a)及微量元素 Th/U-Th 比值(b)  
Fig.9 Geochemical relations of A-CN-K (a) and Th/U-Th (b) for the samples from Lamei Formation

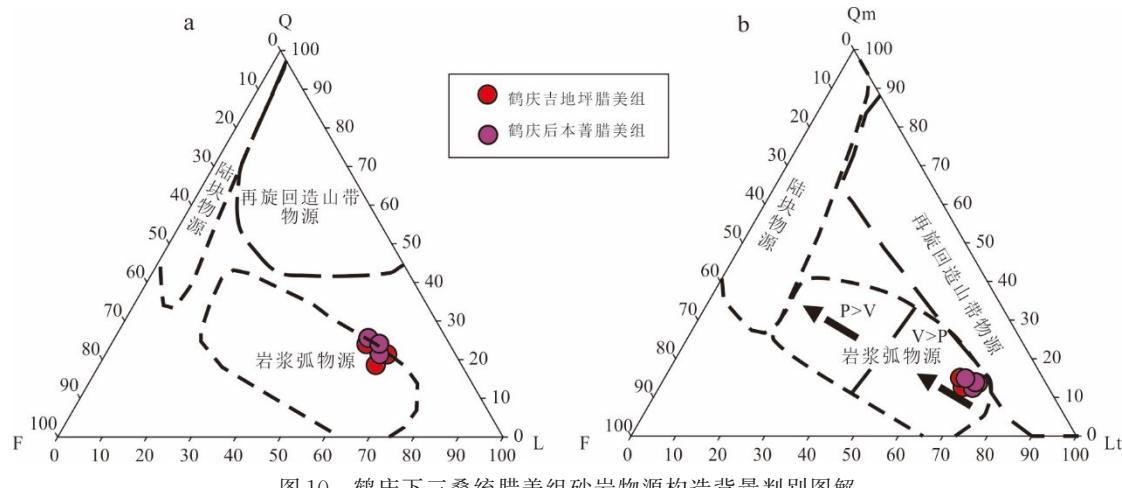


Fig.10 Modal composition triangle diagrams for the samples from Lamei Formation in the Lower Triassic from Heqing  
a.Q-F-L; b. Qm-F-Lt (Dickinson *et al.*, 1983; 部分数据引自高崇龙等,2024). V. 火山岩组分; P. 深成岩组分

并能较好分析母岩地球化学组分. 沉积岩成分变异指数ICV(Cox *et al.*, 1995)代表细碎屑岩沉积物成分成熟度, 其值以1为界, 大于1表明岩石成分不成熟, 代表活动构造环境中的初次沉积, 小于1则显示为岩石处于较为平静的构造活动环境, 同时再循环程度较强. 另外, 沉积岩全岩微量元素的Th/U-Th比值与风化作用强度呈正相关, 不同比值揭示不同源区背景及风化强度(McLennan, 1993). 腊美组10个细碎屑岩样品显示CIA值范围为62.79~69.58, 平均值为65.27, 投点于A-CN-K判别图中等强度风化区域且呈非线性式分布, 其ICV值显示范围为1.12~1.57, 均大于1, 表明其岩石成分不成熟, 形成于活动构造环境中的初次沉积; 同时源岩经历了中等强度的化学风化, 且风化程度趋向一致. 腊美组80%的样品Th/U比值为3.80~4.83, 平均

值为4.09, 大于UCC的3.80, 表明其离源岩区较近且经历了较强的构造抬升运动并接受快速剥蚀沉积, 也侧面反映了其碎屑岩组分不成熟(图9).

#### 4.2 腊美组物源综合分析

峨眉山大火成岩省主要由玄武岩、超基性-基性侵入岩、正长岩、粗面岩、流纹岩和花岗质岩石组成(Xu *et al.*, 2001, 2010; Xiao *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2022b). 腊美组砂岩碎屑组分均以少石英、长石, 多岩屑特别长英质和微晶状火山岩屑, 未见明显板条状岩屑及碳酸盐岩颗粒, 结合其石英和长石颗粒均次棱角状.Gazzi-Dickinson砂岩碎屑组分投点Q-F-L图(图10a)和Qm-F-Lt图(图10b)腊美组均落在岩浆弧物源区, 其中Qm-F-Lt图中, 投点区域位于岩浆弧物源中的火山岩物质为主、侵入岩物质

为辅的区域( $V > P$ ),显示物源与火山喷发物质有较多关联性,与薄片镜下鉴定结论一致。观察野外剖面沉积学特征,反映腊美组两个剖面来源具有同一性且为搬运距离不远的长英质岩浆岩。

两个样品碎屑锆石分别呈现 $\sim 254$  Ma(图 11c)和 $\sim 255$  Ma(图 11b)单一年龄峰值,在峨眉山大火成岩省(ELIP)幕式岩浆事件范围内,与其中的中酸性岩浆活动(251~255 Ma)(Zhong *et al.*, 2007, 2009; Xu *et al.*, 2008; Shellnutt *et al.*, 2008)时间一致,而晚于峨眉山玄武岩为主的主喷发期(259~261 Ma)(Zhong *et al.*, 2007; He *et al.*, 2007; Shellnutt *et al.*, 2009),同时又与古特提斯洋闭合及华南周缘大洋汇聚板块边缘岩浆弧活动(300~200 Ma)在同一时限。锆石阴极发光图下两个砂岩的颗粒晶型完整,呈次棱角-次圆状,局部可见破碎带和包裹体,颜色较暗,环带发育,同样显示近距离岩浆锆石来源。其锆石微量元素 Nb/Hf、Th/U 以及 Hf/Th、Th/Nb 比值均与板内/非造山环境岩浆锆石(Yang *et al.*, 2012)范围一致(图 6c, 6d),而区别于弧造山带,且大部分与峨眉山流纹岩(Xu *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2017; Hei *et al.*, 2018)区域(图 6c, 6d)有较好匹配度。对两个样品 18 个 Hf 同位素投点测试显示其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  仅一个为负值且在 CHUR(0) 线附近,其余均为正值。这一结果与  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值以负为主的古特提斯洋闭合相关江达维西岛弧(DWCA)、泛大洋弧岩浆岩和华南 PTB 火山岩(图 7b)无直接关联,而与以  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  正值为主的 ELIP 长英质岩类有关系(图 7b),综合考虑物源排除扬子板外来源,仅考虑板内的 ELIP 长英质岩类。

腊美组全岩地球化学主量元素分析显示较 PAAS 略低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、较高的  $\text{K}_2\text{O}$  和全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量,略低的  $\text{MgO}$ 、较低的  $\text{CaO}$  含量和  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值,成熟度略低。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  比值显示砂岩为被动陆缘沉积(图 11a),与已报道的结论(崔克信, 2004; 马永生等, 2009)相一致。微量元素蛛网图(图 8a, 8b)显示砂岩样品具较明显的 Sr、Ba、Ti 负异常,与 Nb、Ta 明显负异常的弧相关岩浆岩,以及与有 Nb 和 Sr 负异常的峨眉山玄武岩相异,而与 Sr、Ba、Ti 负异常、整体元素较富集的峨眉山流纹岩及粗面岩有高度相似性;REE 配分模式图(图 8c, 8d)显示腊美组砂岩与轻稀土略富集、重稀土较平坦且略负 Eu 异常的峨眉山流纹岩和粗面岩有高度相似性,而相异于无 Eu 异常曲线缓倾的峨眉山玄武岩模

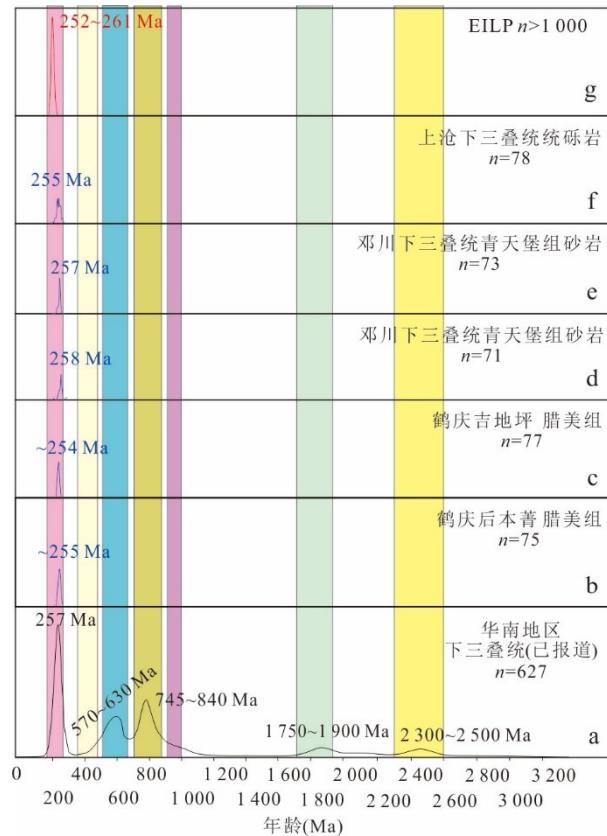


图 11 丽江盆地鹤庆吉地坪(c)、后本菁腊美组(b)(本文)与大理邓川青天堡组(d, e)、上沧下三叠统砾岩(韩超, 2023)(f)以及已报道华南地区(a)下三叠统(张英利等, 2016; Zhu *et al.*, 2018; 缪宇等, 2021; Meng *et al.*, 2022; 周寅生等, 2022; 邓旭升等, 2025)和 EILP(g)碎屑锆石年龄谱对比图

Fig. 11 Probability density plots and histograms of detrital zircon U-Pb ages for the Lamei Formation from the Heqing Jidiping (c) and Houbenjing (b), Qingtianbao Formation from Dengchuan (d, e), the Lower Triassic from Shangcang (f), EILP(g) and South China block (a, published)

式。Sc 元素常用以示踪镁铁质源岩, Th 常富集于长英质火山岩中, Th/Sc、Zr/Sc 等均是常用源区示踪指标(McLennan, 1993),而 Zr、Ti 之间相关性可用以判断岩浆活动构造环境和火成岩类型(Pearce, 1982)。Co/Th-La/Sc、Th/Sc-Zr/Sc 和 Ti-Zr 比值图共同显示腊美组砂岩主体接近和处于长英质火山岩来源区域(图 12c),其中 Ti-Zr 比值提示砂岩来源于板内,且其线性分布的样品暗示来源具有同一性。考虑腊美组砂岩碎屑组分特点,结合其碎屑锆石主峰值以及 Hf 同位素的投点区域,认为其物源与弧岩浆岩无关,而主要来源于板内近源搬运的 ELIP 流

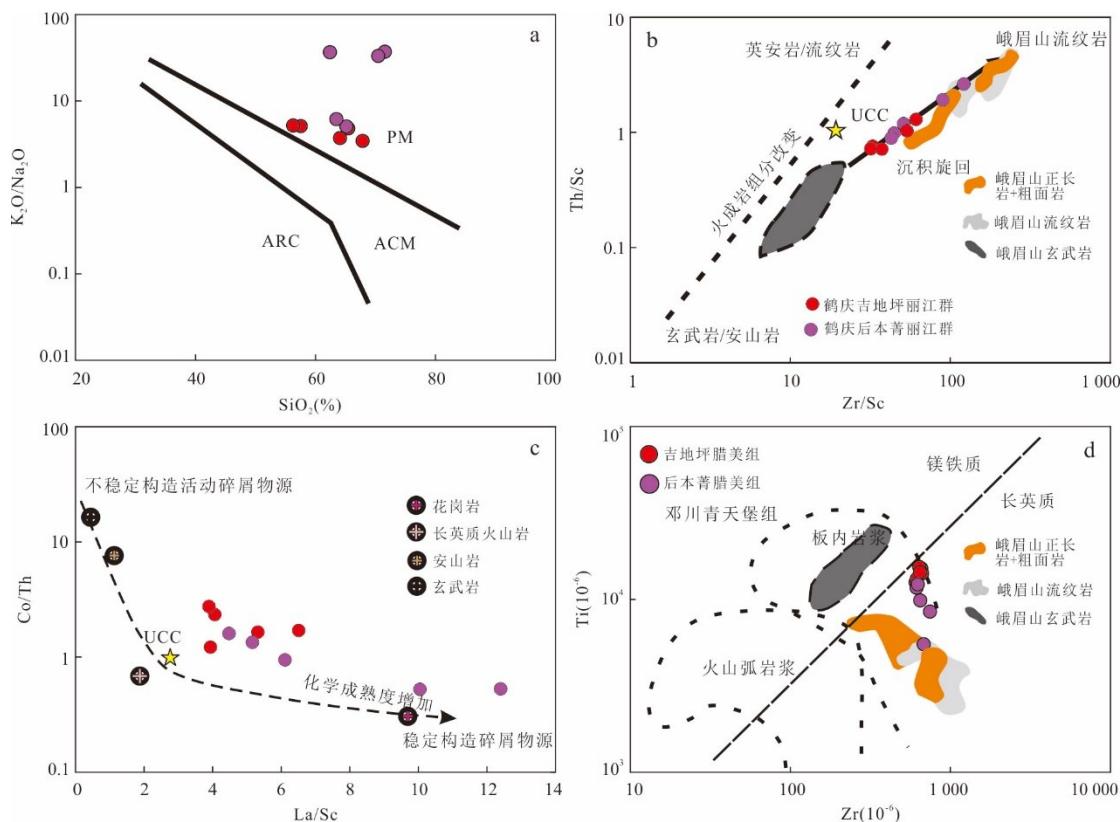
图12 腊美组砂岩  $K_2O/Na_2O-SiO_2$ (a)、 $Th/Sc-Zr/Sc$ (b)、 $Co/Th-La/Sc$ (c)和 $Ti-Zr$ (d)比值

Fig.12 Ratio of  $K_2O/Na_2O-SiO_2$ (a),  $Th/Sc-Zr/Sc$ (b),  $Co/Th-La/Sc$ (c) and  $Ti-Zr$ (d) in sandstone of Lamei Formation  
UCC 数据引自 Taylor and McLennan (1985), 峨眉山正长岩+粗面岩数据自 Xu *et al.* (2008); Shellnutt *et al.* (2009); Zhong *et al.* (2009); 峨眉山流纹岩数据自 Xu *et al.* (2010); Cheng *et al.* (2017); Hei *et al.* (2018); Huang *et al.* (2022a)

纹岩、粗面岩、正长岩为主的长英质火山岩。

位于本次研究区域以南 70 km 的洱源县邓川镇地区已报道青天堡组的砂岩物源特征。其以~257 Ma 和~258 Ma 的碎屑锆石年龄主峰值为标志, 以与腊美组相似的全岩地球化学主微量元素特征、Hf 同位素  $\epsilon_{Hf}(t)$  范围 (+1.6~+5.9), 结合其砂岩碎屑(包括副矿物锆石)颗粒的特点, 显示其为近源搬运的峨眉山高钛玄武岩和流纹岩(韩超, 2023)来源, 这一结论也为其多种方法所得分析互为印证。青天堡组与腊美组在砂岩碎屑组分、碎屑锆石年龄峰值以及全岩地球化学数据提示两者物源具有相似性但又有区别, 前者以峨眉山大火成岩省高钛玄武岩为主。另一方面, 在邓川以南的上沧地区对早三叠世流纹质砾石样品(Tcg4)的相同方法研究, 显示其(Huang *et al.*, 2022a; 韩超, 2023)除砂岩碎屑组分相异外, 与鹤庆腊美组相似, 物质主要为峨眉山流纹岩单一来源。故邓川、鹤庆和上沧三地, 砂岩、砾石物源均与峨眉山流纹岩有直接联系, 且对峨眉山玄武岩剥蚀有直接响应。已报道峨眉山流

岩主要出露在鹤庆以南大理宾川和以东的攀枝花一带, 且含有地壳重熔和峨眉山高钛玄武岩同化-分异结晶两类来源(Hei *et al.*, 2018), 后者被认为是上沧下三叠统砾石的主要物质来源(Huang *et al.*, 2022a; 韩超, 2023)。另后本菁砂岩中含 706 Ma 和 808 Ma 年龄颗粒, 此赋存于早三叠世沉积的新元古代颗粒在扬子西南被广泛报道(Yang *et al.*, 2014; 张英利等, 2016; 朱民等, 2016; 周寅生等, 2022; 邓旭升等, 2025), 被认为是来源于扬子基底再旋回沉积或峨眉山大火成岩省岩浆的捕获晶或围岩。但前者再循环沉积或前寒武系基底会产生高  $Al_2O_3/TiO_2$  值、低 ICV 值以及少量沉积/变质岩屑(邓旭升等, 2025)。腊美组砂岩中可见零星石英岩屑, 但具有不高的  $Al_2O_3/TiO_2$  值(6.06~13.42, 平均值为 7.57)、大于 1 的 ICV 值, 结合岩相古地理(崔克信, 2004; 马永生等, 2009)及所报道扬子西南早三叠沉积物源特点, 认定此年龄颗粒更倾向于来自峨眉山大火成岩省岩浆的捕获晶或围岩。结合以上分析, 可知丽江盆地鹤庆早三叠世腊美组与南部的

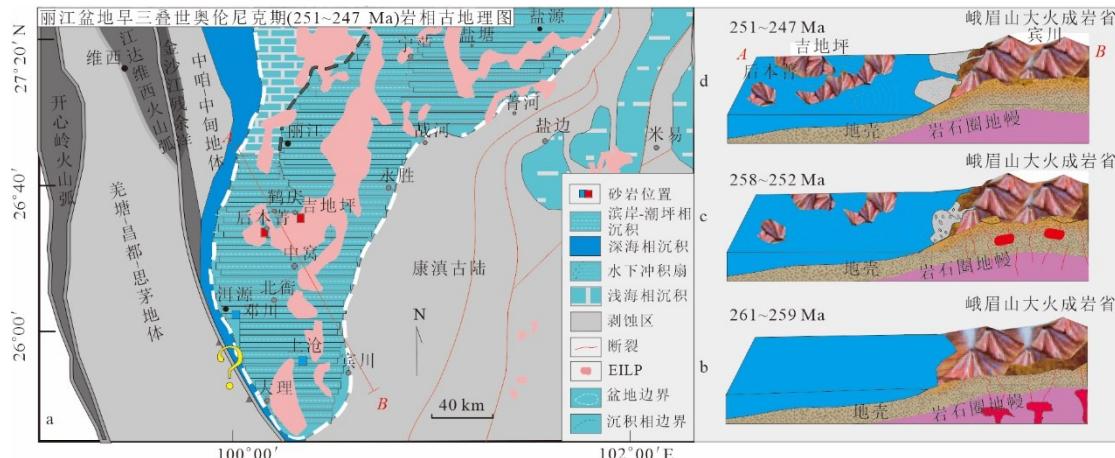


图 13 早三叠世丽江盆地岩相古地理(a)和构造演化(b~d)

Fig.13 The lithofacies and paleogeographic sketch (a) and the tectonic evolution (b-d) of Lijiang area in Early Triassic  
据四川省地质矿产研究所专题研究组(1987);崔克信(2004);马永生等(2009)

上沧流纹质砾石和邓川青天堡组砂岩物源为近源的宾川、攀枝花一带的峨眉山流纹岩及中基性火山岩,反映丽江盆地南部下三叠统沉积物源来自扬子板内,与其西部造山带和岛弧无关联。

目前已报道的如川西南的峨眉、马边、美姑、盐源,鹤庆地区,贵州的会泽,川西的都江堰、宝兴(Meng *et al.*, 2022)等地区,下三叠统碎屑岩均与康滇古陆及其上的峨眉山大火成岩省有关(Yang *et al.*, 2012, 2014; Huang *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2016),仍然未发现与造山带/弧岩浆来源有关。但在南部右江盆地滇黔桂一带研究显示:右江盆地下三叠统碎屑岩(Yang *et al.*, 2012, 2014)有造山带/弧岩浆岩的来源,盆地南边(晚二叠世期间)较北部(晚二叠世末期至早三叠世)更早开始出现造山带/弧岩浆岩物质(韩超, 2023),并被认为是来自于古特提斯洋的西向俯冲,显示盆地早三叠世已经开始由南向北接受西南印支造山带的影响。华南西部早三叠世期间在右江盆地区域已经开始盆山转换,在丽江盆地仍然为被动陆缘沉积。

#### 4.3 丽江盆地早三叠世岩相古地理及构造特征分析

根据 1:20 万地质调查报告和前期研究成果(四川省地质矿产研究所专题研究组, 1987; 崔克信, 2004; 马永生等, 2009),联合腊美组砂岩碎屑年齡分布,编制了早三叠世丽江盆地及其周缘岩相古地理特征(图 13a)和构造演化图(图 13b~13d)。

早三叠世期间,丽江盆地西部、西北部与古特提斯分支的金沙江洋相连,北部、东北部与盐源盆地水体相通,东部、东南和西南则为康滇古陆和以

羌塘-昌都-思茅地体为代表的冈瓦纳多弧盆体系为沉积范围所限(图 13a)。盆地大体以丽江-吉地坪-中窝-北衙一线分为东西两个沉积相区。东部盐源-宁蒗-永胜-宾川-大理一线发育滨岸水下冲积扇-河口湾-潮间砂泥混合坪相沉积,沉积物以成熟度较低的陆源碎屑为主,局部含有碳酸盐薄层,岩石组合自东向西由古陆至盆地大体呈砾岩-含砾砂岩-粗砂岩-中细粒砂岩分布,碎屑流成因,部分具大型板状交错层理的细粒碎屑多为牵引流特征,在盐源-宁蒗-永胜-宾川一带发育砾岩、含砾砂岩和玄武岩屑砂岩大型冲积扇,在永胜、宾川两地分别发育两个小型冲积扇,分布范围较小,砾岩-含砾砂岩含量不到 10%(四川省地质矿产研究所专题研究组, 1987);西部在鹤庆-洱源-大理一线发育潮上-潮间砂泥混合坪相沉积,沉积颗粒较细,以粉砂岩或泥页岩为主,不见砾岩,岩石组合主要为岩屑砂岩和凝灰质泥岩,颜色以紫红色为主,砂岩以粉砂为主,火山岩碎屑含量超过 90%,含微量海绿石,胶结物多见铁染泥质,沿盆地西南部边缘地区的邓川-大理地区局部有小型冲积扇,分布有砾岩(韩超, 2023)。可见盆地形成过程中受东部古陆影响较大。

晚二叠世末期(261~252 Ma),丽江盆地东侧的康滇古陆受峨眉山地幔柱上升而持续抬升(四川省地质矿产研究所专题研究组, 1987; 何斌等, 2006)发生了峨眉山大火成岩省的主喷发事件(图 13b)。扬子西南以宾川和攀枝花一带为中心,在 261~258 Ma 期间先后形成了地幔来源的低钛玄武岩、高钛玄武岩及基性-超基性侵入岩;随后在 258~252 Ma 期间因地壳物质的加入,由玄武岩结

晶分异形成中酸性岩浆的流纹岩(Hei *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2022b)、粗面岩(Xu *et al.*, 2010)等覆盖于玄武岩之上(图13c),同时局部开始风化剥蚀;至早三叠世(251~247 Ma)抬升于地表的大火成岩省玄武岩、流纹岩等受风化剥蚀被就近搬运为其西侧的丽江盆地提供物源(图13d),因物质组分比率差异而呈现出流纹岩或高钛玄武岩为主或混合物源等特征.因此,早三叠世期间丽江盆地仍为被动陆缘沉积,主要接受来自峨眉山大火成岩省的物质,无西部造山带和岛弧物质来源.金沙江洋此时为残余洋状态,意味着扬子与西部冈瓦纳弧盆体系在扬子西南地区并无碰撞.

## 5 结论

(1)野外观测与镜下鉴定、统计显示鹤庆腊美组砂岩均来自近源搬运的长英质火山岩物质.

(2)鹤庆腊美组两个砂岩样品碎屑锆石分别呈现~254 Ma和~255 Ma单一年龄峰值,为高温岩浆成因,与峨眉山大火成岩省中酸性岩浆活动(251~255 Ma)时间一致,与板内/非造山环境岩浆锆石具有锆石微量元素一致性,而区别于弧造山带.

(3)腊美组砂岩Hf同位素投点测试显示其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与以正值为主的ELIP长英质岩类有关系.

(4)全岩地球化学数据显示腊美组与峨眉山流纹岩、粗面岩、正长岩具有主微量元素一致的特征;对样品的CIA和ICV值分析,结合微量元素Th/U比值,显示腊美组砂岩离源岩区较近且经历了较强的构造抬升运动并接受快速剥蚀沉积.

(5)腊美组物源主要来自近源搬运的峨眉山大火成岩省的流纹岩、粗面岩和正长岩,早三叠世期间丽江盆地仍为被动陆缘沉积,无西部弧盆体系物质来源.

附表见<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.138>.

## References

- Burchfiel, B. C., Chen, Z. L., 2013. Tectonics of the Southeastern Tibetan Plateau and Its Adjacent Foreland. *Geological Society of America*, 210: 231. <https://doi.org/10.1130/mem210>
- Chen, H. L., Zhu, M., Chen, S. Q., et al., 2020. Basin-Orogen Patterns and the Late Triassic Foreland Basin Conversion Process in the Western Yangtze Block, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104311. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104311>
- Cheng, L. L., Wang, Y., Herrin, J. S., et al., 2017. Origin of K-Feldspar Megacrysts in Rhyolites from the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China. *Lithos*, 294/295: 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.10.018>
- Chung, S. L., Jahn, B. M., 1995. Plume-Lithosphere Interaction in Generation of the Emeishan Flood Basalts at the Permian-Triassic Boundary. *Geology*, 23(10): 889. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)0230889:pli-igo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)0230889:pli-igo>2.3.co;2)
- Corfu, F., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Cui, K. X., 2004. Atlas of Palaeogeography and Its Evolution in Southwest China. Seismological Press, Beijing, 25–130 (in Chinese).
- Deng, X. S., Yang, J. H., He, B., et al., 2025. Response of Lower Triassic Clastic Rocks in Northwest Guizhou to Emei Mountain Igneous Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(4): 1293–1307 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., et al., 1983. Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94222:ponaps>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94222:ponaps>2.0.co;2)
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Neubauer, F., et al., 2011. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.002>
- Fedo, C. M., Wayne Nesbitt, H., Young, G. M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10): 921. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)0230921:uteopm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)0230921:uteopm>2.3.co;2)
- Gao, C. L., Wang, J., Liu, M., et al., 2024. Boundary Changes of Jurassic - Cretaceous Prototype Basin of Southern Junggar and Responses of Sedimentary Provenance and Depositional Systems. *Earth Science*, 49(1): 103–122 (in Chinese with English abstract).

- Gao, Q. L., 2013. Felsic Volcanism in South China across the Permian - Triassic Boundary (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Han, C., 2023. Provenance of the Late Permian-Early Triassic Clastic Rocks in the Western Margin of the South China and Its Implications for the Subduction Polarity of the Paleo - Tethyan Branch Ocean (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- He, B., Xu, Y. G., Huang, X. L., et al., 2007. Age and Duration of the Emeishan Flood Volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Silicic Ignimbrites, Post-Volcanic Xuanwei Formation and Clay Tuff at the Chaotian Section. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3/4): 306–323. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.021>
- He, B., Xu, Y. G., Xiao, L., et al., 2006. Sedimentary Responses to Uplift of Emeishan Mantle Plume and Its Implications. *Geological Review*, 52(1): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- He, B., Zhong, Y. T., Xu, Y. G., et al., 2014. Triggers of Permo - Triassic Boundary Mass Extinction in South China: The Siberian Traps or Paleo-Tethys Ignimbrite Flare - Up?. *Lithos*, 204: 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.011>
- He, H. Y., Wang, Y. J., Qian, X., et al., 2018. The Bangxi-Chenxing Tectonic Zone in Hainan Island (South China) as the Eastern Extension of the Song Ma - Ailaoshan Zone: Evidence of Late Paleozoic and Triassic Igneous Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 274–291. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.032>
- He, M. C., Ding, Z. J., Wang, X., et al., 2023. Geochemical Characteristics of Niutitang Formation in Zoumazhen Area, Hefeng, Hubei Province: Provenance, Paleoweathering, Sedimentary Environment and Tectonic Setting. *Earth Science*, 48(9): 3280–3295 (in Chinese with English abstract).
- Hei, H. X., Su, S. G., Wang, Y., et al., 2018. Rhyolites in the Emeishan Large Igneous Province (SW China) with Implications for Plume-Related Felsic Magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 344–365. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.05.032>
- Hoskin, P. W. O., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Huang, H., Cawood, P. A., Hou, M. C., et al., 2022a. Zircon U-Pb Age, Trace Element, and Hf Isotopic Constraints on the Origin and Evolution of the Emeishan Large Igneous Province. *Gondwana Research*, 105: 535–550. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.09.023>
- Huang, H., Huyskens, M., Yin, Q. Z., et al., 2022b. Eruptive Tempo of Emeishan Large Igneous Province: Relations to Biotic Crises and Paleoclimate Changes around the Guadalupian-Lopingian Boundary. *Geology*, 50(9): 1083–1087.
- Huang, H., Du, Y. S., Yang, J. H., et al., 2014. Origin of Permian Basalts and Clastic Rocks in Napo, Southwest China: Implications for the Erosion and Eruption of the Emeishan Large Igneous Province. *Lithos*, 208/209: 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.022>
- Lei, Y. L., Li, B. L., Chen, Z. X., 2010. Tectonic Evolution on the Western Border Area of Upper Yangtze Plate. Geological Publishing House, Beijing, 1–181 (in Chinese).
- Li, C. M., 2009. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons. *Geological Survey and Research*, 32(3): 161–174 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. W., Gao, R., Guan, Y., et al., 2009. Paleomagnetic Constraints on the Closure Time of Paleo-Tethys: Implications for the Tectonic Setting of Formation of Triassic Songpan-Ganzi Flysch Complex. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 39–50 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Chen, H. D., Wang, G. L., 2009. Sequence Stratigraphy and Paleogeography of South China. Science Press, Beijing, 116–152 (in Chinese).
- McLennan, S. M., 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Metcalf, I., 2013. Gondwana Dispersion and Asian Accretion: Tectonic and Palaeo-Geographic Evolution of Eastern Tethys. *J. Asian Earth Sci.*, 66: 1–33.
- Meng, L. F., Chen, W., Shen, T., et al., 2022. A Study on the Provenance of Early to Late Triassic Clastic Rocks from the Northwestern Sichuan Basin, Southwestern China: Constraints on the Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Western Yangtze Block. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1–12.
- Miao, Y., Tian, Y. F., Wu, L., et al., 2021. Zircon U-Pb Chronology, Petrochemistry and Its Implications for Rodinia Supercontinent Tectonic Evolution in the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Daibu Area, Southwest of Upper Yangtze. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3739–3757 (in Chinese with English abstract).
- Munteanu, M., Yao, Y., Wilson, A. H., et al., 2013.

- Panxi Region (South West China): Tectonics, Magmatism and Metallogenesis. A Review. *Tectonophysics*, 608: 51–72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.008>
- Nesbitt, H. W., Fedo, C. M., Young, G. M., 1997. Quartz and Feldspar Stability, Steady and Non-Steady-State Weathering, and Petrogenesis of Siliciclastic Sands and Muds. *The Journal of Geology*, 105(2): 173–192.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, X. Z., et al., 2001. The Tectonic Framework and Spatial Allocation of the Archipelagic Arc Basin Systems on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. Orogenic Andesites and Related Rocks. John Wiley and Sons, New York, 528–548.
- Pearce, N. J. G., Perkins, W. T., Westgate, J. A., et al., 1997. A Compilation of New and Published Major and Trace Element Data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 Glass Reference Materials. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115–144. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1997.tb00538.x>
- Shellnutt, J. G., Wang, C. Y., Zhou, M. F., et al., 2009. Zircon Lu-Hf Isotopic Compositions of Metaluminous and Peralkaline A-Type Granitic Plutons of the Emeishan Large Igneous Province (SW China): Constraints on the Mantle Source. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.12.003>
- Shellnutt, J. G., Zhou, M. F., Yan, D. P., et al., 2008. Longevity of the Permian Emeishan Mantle Plume (SW China): 1 Ma, 8 Ma or 18 Ma? *Geological Magazine*, 145(3): 373–388. <https://doi.org/10.1017/s0016756808004524>
- Shen, L. W., Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., et al., 2018. Subduction-Related Middle Permian to Early Triassic Magmatism in Central Hainan Island, South China. *Lithos*, 318/319: 158–175. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.009>
- Sichuan Institute of Geology and Mineral Resources, 1987. Triassic Stratigraphy and Sedimentary Facies of Yanyuan-Lijiang Region. Geological Publishing House, Beijing, 48–104 (in Chinese).
- Song, F., He, Y. Y., Niu, Z. J., et al., 2024. Nanhuan-Sinian Sedimentary Strata Correlation and Its Provenance Feature in Southeastern Part of South China Block: Implications for Tectonic Evolution. *Earth Science*, 49(9): 3411–3427 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Tomaschek, F., Kennedy, A. K., Villa, I. M., et al., 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece—Recrystallization and Mobilization of Zircon during High-Pressure Metamorphism. *Journal of Petrology*, 44(11): 1977–2002. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg067>
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Chen, J. L., et al., 2014. Triassic Three-Stage Collision in the Paleo-Tethys: Constraints from Magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi Continental Margin Arc, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 475–491. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.023>
- Wang, M., Zhong, Y. T., Hou, Y. L., et al., 2018. Source and Extent of the Felsic Volcanic Ashes at the Permian-Triassic Boundary in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 36–48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. D., Cawood, P. A., Zhao, L. S., et al., 2019. Convergent Continental Margin Volcanic Source for Ash Beds at the Permian-Triassic Boundary, South China: Constraints from Trace Elements and Hf-Isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 519: 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.02.011>
- Wang, Y. N., Wang, Q. F., Deng, J., et al., 2021. Late Permian-Early Triassic Mafic Dikes in the Southwestern Margin of the South China Block: Evidence for Paleo-Pacific Subduction. *Lithos*, 384/385: 105994. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.105994>
- Wu, F. Y., Zhang, Y. B., Yang, J. H., et al., 2008. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints on the Early Archean Crustal Evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3/4): 339–362. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.10.002>
- Xiao, L., Xu, Y. G., Mei, H. J., et al., 2004. Distinct Mantle Sources of Low-Ti and High-Ti Basalts from the Western Emeishan Large Igneous Province, SW China:

- Implications for Plume - Lithosphere Interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3/4): 525–546. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.002>
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Jahn, B. M., et al., 2001. Petrologic and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan Flood Basalts in Southwestern China. *Lithos*, 58(3/4): 145–168. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00055-X)
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Shao, H., et al., 2010. Silicic Magmas from the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China: Petrogenesis and Their Link with the End-Guadalupian Biological Crisis. *Lithos*, 119(1/2): 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.04.013>
- Xu, Y. G., Luo, Z. Y., Huang, X. L., et al., 2008. Zircon U-Pb and Hf Isotope Constraints on Crustal Melting Associated with the Emeishan Mantle Plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084–3104. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.019>
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2012. Large Igneous Province and Magmatic Arc Sourced Permian-Triassic Volcanogenic Sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261/262: 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.018>
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2014. A Sedimentary Archive of Tectonic Switching from Emeishan Plume to Indosinian Orogenic Sources in SW China. *Journal of the Geological Society*, 171(2): 269–280. <https://doi.org/10.1144/jgs2012-143>
- Yu, W. C., Algeo, T. J., Du, Y. S., et al., 2016. Mixed Volcanogenic-Lithogenic Sources for Permian Bauxite Deposits in Southwestern Youjiang Basin, South China, and Their Metallogenic Significance. *Sedimentary Geology*, 341: 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.016>
- Yunnan Geological Bureau, 1966. 1: 200 000 Regional Geological Survey Report of Heqing Area, 35–46 (in Chinese).
- Zhang, Y. L., Wang, Z. Q., Wang, G., et al., 2016. Chromian Spinel, Zircon Age Constraints on the Provenance of Early Triassic Feixianguan Formation Sandstones from Huize Area, Upper Yangtze Region. *Geological Review*, 62(1): 54–72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. X., Coe, R. S., 1987. Palaeomagnetic Constraints on the Collision and Rotation of North and South China. *Nature*, 327(6118): 141–144. <https://doi.org/10.1038/327141a0>
- Zhong, H., Zhu, W. G., Chu, Z. Y., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology, Geochemistry, and Nd-Sr Isotopic Study of Contrasting Granites in the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Chemical Geology*, 236(1–2): 112–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.09.004>
- Zhong, H., Zhu, W. G., Hu, R. Z., et al., 2009. Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of the Panzhihua A-Type Syenitic Intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China and Implications for Growth of Juvenile Crust. *Lithos*, 110(1–4): 109–128. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.12.006>
- Zhong, S. H., Feng, C. Y., Seltmann, R., et al., 2018. Can Magmatic Zircon be Distinguished from Hydrothermal Zircon by Trace Element Composition? The Effect of Mineral Inclusions on Zircon Trace Element Composition. *Lithos*, 314/315: 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.029>
- Zhou, M. F., Zhao, J. H., Qi, L., et al., 2006. Zircon U-Pb Geochronology and Elemental and Sr-Nd Isotope Geochemistry of Permian Mafic Rocks in the Funing Area, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0030-y>
- Zhou, Y. S., Yang, J. H., Huang, Y., et al., 2022. Provenance of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Southwestern Guizhou Province and Reconstruction of Volcanic Denudation Sequence in the Emeishan Large Igneous Province. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2348–2364 (in Chinese with English abstract).
- Zi, J. W., Cawood, P. A., Fan, W. M., et al., 2012. Triassic Collision in the Paleo-Tethys Ocean Constrained by Volcanic Activity in SW China. *Lithos*, 144/145: 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.020>
- Zou, X. Y., Qin, K. Z., Han, X. L., et al., 2019. Insight into Zircon REE Oxy-Barometers: A Lattice Strain Model Perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 506: 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.031>
- Zhu, M., Chen, H. L., Yu, L., et al., 2018. Provenance of the Early Triassic in the Southwestern Sichuan Basin, Upper Yangtze, and Its Implications for Tectonic Evolution. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(1): 70–83. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0092>
- Zhu, M., Chen, H. L., Zhou, J., et al., 2016. Provenance of Early Triassic in Yanyuan Basin, Upper Yangtze and Its Implication for the Tectonic Evolution. *Earth Science*, 41(8): 1309–1321 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 崔克信, 2004. 中国西南区域古地理及其演化图集. 北京: 地震出版社.
- 邓旭升, 杨江海, 何犇, 等, 2025. 黔西北下三叠统碎屑岩对峨眉山大火成岩省的响应. 沉积学报, 43(4): 1293—1307.
- 高崇龙, 王剑, 刘明, 等, 2024. 淮南侏罗-白垩纪原型盆地边界变迁及其沉积物源响应. 地球科学, 49(1): 103—122.
- 高秋灵, 2013. 华南二叠-三叠之交的长英质火山作用. 武汉: 中国地质大学.
- 韩超, 2023. 华南西缘晚二叠世-早三叠世碎屑岩物源分析及其对古特提斯分支洋俯冲极性的约束(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等, 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义. 地质论评, 52(1): 30—37.
- 何谋愈, 丁振举, 王翔, 等, 2023. 湖北鹤峰走马镇地区牛蹄塘组岩石地球化学特征: 物源、古风化、沉积环境和构造背景. 地球科学, 48(9): 3280—3295.
- 雷永良, 李本亮, 陈竹新, 等, 2010. 上扬子板块西部边界地区构造演化. 北京: 石油工业出版社.
- 李长民, 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究, 32(3): 161—174.
- 李朋武, 高锐, 管烨, 等, 2009. 古特提斯洋的闭合时代的古地磁分析: 松潘复理石杂岩形成的构造背景. 地球学报, 30(1): 39—50.
- 马永生, 陈洪德, 王国力, 2009. 中国南方构造-层序岩相古地理图集: 震旦纪-新近纪. 北京: 科学出版社.
- 缪宇, 田瑜峰, 吴亮, 等, 2021. 上扬子西南待补地区飞仙关组年代学、岩石地球化学及其对 Rodinia 超大陆构造演化的指示. 地质学报, 95(12): 3739—3757.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴旺, 等, 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. 沉积与特提斯地质, 21(3): 1—26.
- 四川省地质矿产研究所专题研究组, 1987. 盐源-丽江地区三叠纪地层及沉积相. 北京: 地质出版社.
- 宋芳, 何垚砚, 牛志军, 等, 2024. 华南板块东南部南华纪-震旦纪沉积地层区域对比、物源特征及构造演化. 地球科学, 49(9): 3411—3427.
- 王曼, 钟玉婷, 侯莹玲, 等, 2018. 华南地区二叠纪-三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模. 岩石学报, 34(1): 36—48.
- 云南省地质局, 1966. 鹤庆地区 1:20 万区域地质调查报告, 35—46.
- 张英利, 王宗起, 王刚, 等, 2016. 上扬子会泽地区早三叠世飞仙关组砂岩物源特征: 来自重矿物铬尖晶石和碎屑锆石的限定. 地质论评, 62(1): 54—72.
- 周寅生, 杨江海, 黄燕, 等, 2022. 黔西南下三叠统飞仙关组沉积物源分析对峨眉山大火成岩省火山剥蚀序列的重建约束. 地质学报, 96(7): 2348—2364.
- 朱民, 陈汉林, 周静, 等, 2016. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义. 地球科学, 41(8): 1309—1321.