https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.400



扬子西南缘晚三叠世一早侏罗世盆山格局演化过程: 来自楚雄盆地碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据

颜照坤^{1,2,3},颜晨雨¹,邵崇建¹,张自力⁴,叶婷婷¹,张代柱¹,任 聪⁴,聂 舟⁴, 赵少泽³,龚楚雲¹,赵文武¹

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013

2. 自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京100037

3. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都 610059

4. 中国石油西南油气田公司,四川成都 610041

摘 要:印支期扬子西南缘沉积盆地大地构造性质及盆山格局演化过程长期存在较大分歧.对楚雄盆地西侧祥云剖面上三叠 统一下侏罗统砂岩样品进行碎屑锆石U-Pb定年和碎屑物源分析.结果显示,上三叠统云南驿组和罗家大山组碎屑物源主要 来自上扬子地区的中一下三叠统和二叠系,而上三叠统白土田组和下侏罗统冯家河组碎屑物源主要来自松潘一甘孜地体和康 滇古陆.结合沉积环境演变和区域地质背景,认为在晚三叠世早期,区域内造山作用相对较弱,楚雄盆地碎屑物源供给不足, 为欠补偿盆地;晚三叠世晚期一早侏罗世,虽然楚雄盆地的构造演化受哀牢山造山带逆冲推覆作用的控制,但是楚雄盆地的沉 积充填过程主要受控于快速崛起的松潘一甘孜造山带.

关键词: 楚雄盆地;印支期;盆山格局;扬子西南缘;锆石U-Pb定年;构造地质学.

中图分类号: P541 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1259-12 **收稿日期:** 2022-06-01

Evolution of Basin-Range Pattern in Southwest Margin of Yangtze Block during Late Triassic to Early Jurassic: Evidence of Detrital Zircon U-Pb Geochronology from Chuxiong Basin

Yan Zhaokun^{1,2,3}, Yan Chenyu¹, Shao Chongjian¹, Zhang Zili⁴, Ye Tingting¹, Zhang Daizhu¹, Ren Cong⁴, Nie Zhou⁴, Zhao Shaoze³, Gong Chuyun¹, Zhao Wenwu¹

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

- 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
- 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 4. Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China
- **基金项目:**国家自然科学基金项目(No.41502116);自然资源部深地动力学重点实验室自主(开放)研究课题(No.J1901);四川省科技计划项目 (No.2019YJ0468).

作者简介:颜照坤(1983—),男,副教授,博士,从事沉积盆地动力学与成矿成藏作用研究.ORCID:0000-0002-0708-1849. E-mail: yzk517@163.com

- **引用格式:**颜照坤,颜晨雨,邵崇建,张自力,叶婷婷,张代柱,任聪,聂舟,赵少泽,龚楚雲,赵文武,2023.扬子西南缘晚三叠世一早侏罗世盆山 格局演化过程:来自楚雄盆地碎屑锆石U-Pb年代学的证据.地球科学,48(4):1259-1270.
- Citation: Yan Zhaokun, Yan Chenyu, Shao Chongjian, Zhang Zili, Ye Tingting, Zhang Daizhu, Ren Cong, Nie Zhou, Zhao Shaoze, Gong Chuyun, Zhao Wenwu, 2023. Evolution of Basin-Range Pattern in Southwest Margin of Yangtze Block during Late Triassic to Early Jurassic: Evidence of Detrital Zircon U-Pb Geochronology from Chuxiong Basin. Earth Science, 48(4):1259-1270.

Abstract: There exist divergent views about the Indosinian tectonic nature of basin and the evolution of basin-range pattern in the southwest margin of the Yangtze block. Detrital zircon U-Pb dating and detrital provenance analysis of sandstone samples from the Upper Triassic-Lower Jurassic of Xiangyun Section in the western Chuxiong basin were carried out. The results show that the detrital sources of the Upper Triassic Yunnanyi Formation and Luojiadashan Formation are mainly from the Middle-Lower Triassic and Permian in the Upper Yangtze region. The detrital sources of the Upper Triassic Baitutian Formation and the Lower Jurassic Fengjiahe Formation are mainly from the Songpan-Ganzi terrane and Kangdian ancient land. Combined with the sedimentary environment evolution and regional geological setting, it is considered that the orogeny is relatively weak during the earlier Late Triassic, and Chuxiong basin is an underfilled basin, whose clastic source supply is insufficient. From the later Late Triassic to Early Jurassic, the tectonic evolution of Chuxiong basin was controlled by the thrust nappe of Ailaoshan orogenic belt, but the sedimentary filling process of Chuxiong basin was mainly controlled by the rapid rise of Songpan-Ganzi orogenic belt. **Key words:** Chuxiong basin; Indosinian; basin-range pattern; southwest margin of Yangtze block; zircon U-Pb dating; structural geology.

0 引言

伴随着扬子西缘印支运动的开启,受洋盆闭 合、陆一陆碰撞、弧一陆碰撞等区域构造事件的影 响,盆山格局和沉积环境均发生了巨大转变,形成 了一系列造山带及前陆盆地,海水逐渐从该地区退 出,盆地由海相沉积转变为陆相沉积(许志琴等, 1992). 与扬子西缘的四川盆地相比,关于扬子西南 缘的楚雄盆地晚三叠世盆地性质和盆山格局演化 特征的认识存在很大分歧,包括周缘前陆盆地、弧 后前陆盆地、裂谷盆地等观点(郭佩和李长志, 2013). 这可能与扬子西南缘较复杂的地质构造有 关:一方面,由于遭受晚二叠世峨眉山地幔柱的破 坏,扬子西南缘基底构造复杂,在中一晚三叠世金 沙江-哀牢山古特提斯洋闭合(巩小栋等, 2020; 曾庆高等, 2020)的构造背景下,该地区可能具有特 殊的"盆山格局"演化过程;另一方面,后期受到哀 牢山一红河大型剪切带的改造(Tapponnier et al., 1990; Li et al., 2017),导致初始的"盆山格局"遭到 严重破坏.

沉积地层可以真实地记录毗邻造山带的隆升、 剥蚀过程,是恢复盆山格局及演化过程的关键研究 素材(Dickinson et al., 1983; 胡修棉等, 2021).通 过沉积记录物源分析可以追索母岩性质、约束物源 区的构造事件或背景,重建源汇过程,进而约束盆 山格局的演化过程(徐亚军等, 2007).近年来,随着 微区原位同位素分析技术的日益成熟和在物源分 析中的广泛应用,使得可以从沉积地层中获取更 多、更准确的盆山耦合关系信息.本文通过对楚雄 盆地上三叠统一下侏罗统碎屑岩进行系统采样,利 用碎屑锆石 U-Pb年龄数据进行物源分析,结合区 域地质资料,探讨晚三叠世一早侏罗世扬子西南缘 构造复杂区的盆山格局演化过程,为扬子西南缘印 支期板块汇聚过程与造山带动力学研究提供证据.

1 区域地质背景

楚雄盆地位于扬子地块西南缘,现今保存下来 的三叠纪楚雄盆地西南部被红河断裂和哀牢山断 裂所截,北部的西侧被程海断裂截切,东侧可延伸 至在禄丰、禄劝和武定以北(图1),在构造型式和沉 积相配置上均不完整(许效松等,1999),表明三叠 纪的楚雄盆地受后期构造改造较大.此外,对程海 断裂以西的丽江地区构造格架和三叠系沉积特征 的研究表明,该地区与东侧的推覆体属于同一个推 覆体系,整体为一个自西向东发展的推覆楔状体, 与楚雄盆地发展密切相关,并发育具有多期次不整 合面的楔顶沉积(谭富文等,2004).因此,本次研究 的楚雄盆地范围包括丽江地区.

我国西南三江地区发育多条与古特提斯洋闭合 相关的碰撞造山带,是研究"板块汇聚过程与造山带 动力学"的理想地区.哀牢山缝合带是三江特提斯构 造域东缘一条重要的古特提斯缝合带,介于扬子地 块和兰坪-思茅地体之间(图1),多数学者认为该缝 合带的闭合发生在三叠纪(许志琴等,1992;现小栋 等,2020).但是,关于哀牢山洋盆的闭合过程存在很 大争议,特别是对于三叠纪扬子地块西南缘的板块 边界类型长期存在"被动大陆边缘"(许效松等, 1999)和"活动大陆边缘"(陈根文和吴延之,1999)两 种截然不同的观点,严重影响了对该地区古特提斯 洋盆闭合过程、盆山格局演化的认识.

侏罗纪一白垩纪,扬子地块和兰坪一思茅地体





AMLS. 阿尼玛卿一勉略缝合带; ALS. 哀牢山缝合带; BNS. 班公湖一怒江缝合带; BST. 保山地体; GLS. 甘孜一理塘缝合带; JS. 金沙江 缝合带; LST. 兰坪一思茅地体; LT. 拉萨地体; NCB. 华北陆块; QT. 羌塘地体; SDS. 商丹缝合带; SGT. 松潘一甘孜地体; YD. 义敦地体

已经拼合,该区域盆地进入陆内演化阶段,主要表 现为裂陷或坳陷(杨庆道等, 2017),发育巨厚的陆 相沉积,总体上这一时期对三叠纪盆地的改造较 弱.新生代则是楚雄盆地遭受强烈改造的一个时 期,在新生代印度板块与欧亚板块的碰撞、以及碰 撞后的运动调整过程中,沿着哀牢山-红河剪切带 发育的大规模走滑剪切作用,虽然在走滑时间、走 滑幅度等方面存在一些争议(Gan et al., 2022),但 是一般认为兰坪一思茅地体相对于扬子地块向南 逃逸 500 km 以上(Tapponnier et al., 1990; Li et al., 2017). 楚雄盆地西南缘三叠系缺少边缘相 沉积,被认为是盆地西南缘遭到了哀牢山一红河剪 切带破坏的重要证据(许效松等,1999).因此,在三 叠纪曾经与楚雄盆地毗邻的地体或造山带,现今可 能已经沿着剪切带向南位移到数百千米之外,这也 给楚雄盆地物源分析、盆山格局研究带来了很大 难度.

2 样品与研究方法

2.1 样品描述

楚雄盆地西部发育较完整的晚三叠世一侏罗 纪地层,本次采集了4个砂岩样品.样品XY06为上 三叠统云南驿组下段粗砂岩,样品XY07为上三叠 统罗家大山组下段中砂岩,样品XY05为上三叠统 白土田组上段中砂岩,样品XY04为下侏罗统冯家 山组下段细砂岩(图2,图3).

2.2 测试方法与数据处理

野外采集新鲜的岩石样品,经淘洗、磁选和重 液分选,获得碎屑锆石颗粒,锆石制靶和碎屑锆石 U-Pb年龄测定在英国伦敦大学学院(UCL)伦敦地 质年代学中心完成,测试使用与 New Wave NWR 193 nm 激光剥蚀系统连接的 Agilent 7700 型等离子 体质谱仪(ICPMS).并以国际标样 GJ-1(Jackson *et al.*, 2004)和 91500(Wiedenbeck *et al.*, 2004)进 行矫正.年龄数据用 Glitter软件处理(Griffin *et al.*,



图 2 楚雄盆地及邻区地质简图 Fig. 2 Simplified geological maps of Chuxiong basin and adjacent regions

2008). 锆石年龄核密度估计图(Kernel Density Estimates, KDE) 和 多 维 定 标 图 (Multi-dimensional Scaling, MDS) 采 用 IsoplotR 分 析 处 理 软 件 完 成 (Vermeesch *et al.*, 2016).

3 结果

楚雄盆地西部祥云地区上三叠统一下侏罗统4 个砂岩样品的碎屑锆石 U-Pb 定年结果(附表1) 如下:

(1)上三叠统云南驿组.样品XY06为云南驿组
下段粗砂岩,共测试了110颗碎屑锆石,U-Pb年龄
协和度较高(≥90%)的年龄数据有97个,最小年龄
为234 Ma,最大年龄为2.7 Ga. 97个年龄数据中超

过 50% 的年龄数据(50个)集中在 234~272 Ma年龄区间,锆石年龄 KDE 图表现出显著的~247 Ma 年龄峰;剩余的年龄主要分布在 480~830 Ma年龄 区间,没有明显的年龄峰(图 4a).

(2)上三叠统罗家大山组.样品XY07为罗家大 山组下段中砂岩,共测试了110颗碎屑锆石,U-Pb 年龄协和度较高(≥90%)的年龄数据有59个,最小 年龄为228 Ma,最大年龄为1.9 Ga.59个年龄数据 几乎全部(56个)集中在228~281 Ma年龄区间,锆 石年龄 KDE 图表现出显著的~260 Ma年龄峰 (图4b).

(3)上三叠统白土田组.样品XY05为白土田组 上段中砂岩,共测试了140颗碎屑锆石,U-Pb年龄

地质年代		地层系统		厚度 (m)	岩性剖面		岩 性 描 述		沉积环境
中侏罗世		张河组		_	10000000000				
	174 Ma		上段	-					
早侏罗世 201 Ma		冯家河组	下段	6 000 - - - - 5 000 -	- X	Y04	紫红色泥岩及 成韵律,泥岩 杂斑或团块	灰绿色砂岩组 中常发育绿色	湖泊 和 三角洲
晚 三 叠 世	造 時 1 209 Ma	白土田组	上段下段	-	▲ X	Y05	主要为灰黄色4 英砂岩,底部为 长石石英砂岩	田粒含长石石 文育细-中粒	三角洲 和 河湖沼泽
	诺 利 期 227 Ma	罗家大山组	上段	4 000 -		_	灰色含长石石 砂岩夹页岩及	英砂岩、粉 煤层	三角洲 和 滨海沼泽
			中段	3 000 -			灰色、灰绿色 质泥岩,含硅 部位灰色厚层	页岩和粉砂 质结核,顶 细砂岩	半深海
			下段	2 000 -	▲ X ¹	X Y07	深灰色安山玄; 火山角砾凝灰; 深灰色细砂岩;	武质凝灰岩、 岩及灰质、 、粉砂岩	浅海陆棚
	卡 尼 期 237 Ma	云 南 驿 组	上段				绿黄色钙质、 夹粉砂岩及泥	粉砂质页岩 灰岩透镜体	滨海
			中段	- 1 000 -		_	灰色灰岩, 间夹 粉砂岩、底部为	表黄绿色页岩、 D泥灰岩	碳酸盐 台地
			下段		× × × ×	Y06	暗绿色、黄褐 黑色、黄绿页	色粉砂岩, 岩夹粉砂岩	浅海陆棚
00	• • • • 研	岩	E	1883年1月	砂岩	920	泥质粉砂岩	■ 页岩	
1990 - SA		一粗砂	岩 🛙	1920年 税	砂岩	<u>n 1 n</u>	凝灰岩 角砾凝灰岩	■泥岩	▶ ─ ─ 灰岩
图 3 楚雄盆地祥云剖面上三叠统一下侏罗统综合柱状图									



协和度较高(≥90%)的年龄数据有122个,最小年龄248 Ma,最大年龄2.7 Ga.该样品的锆石年龄数据主要分布在4个年龄区间:250~470 Ma、740~870 Ma、1.7~2.0 Ga和2.3~2.5 Ga,锆石年龄KDE图表现出多个年龄,其中最显著的年龄峰为~1.8 Ga(图4c).

(4)下侏罗统冯家山组.样品XY04为冯家山组 下段细砂岩,共测试了110颗碎屑锆石,U-Pb年龄 协和度较高(≥90%)的年龄数据有95个,最小年龄 249 Ma,最大年龄 2.7 Ga. 该样品的锆石年龄数据 主要分布在4个年龄区间:250~470 Ma、740~ 1000 Ma、1.7~1.9 Ga和 2.4~2.7 Ga,锆石年龄 KDE图表现出多个年龄,其中最显著的年龄峰为 ~1.8 Ga,锆石年龄KDE图表现出多个峰值(图4d).

4 讨论

4.1 碎屑物源分析

本次利用碎屑锆石 U-Pb 年龄进行物源分析







a~d. 分别为本文XY06、XY07、XY05、XY04样品碎屑锆石KDE图; e. TT指上扬子地区中三叠统火山灰夹层获得的锆石年龄(Yan et al., 2019; 李宸等, 2020; 刘建清等, 2021); f. PCT指上扬子地区中、晚二叠世碎屑岩和火山灰(包括峨眉山玄武岩及沉积岩中的火山灰夹层)的锆石年龄(He et al., 2007; Zhonget al., 2014; Huang et al., 2016; Huang et al., 2018); g. SG指松潘一甘孜地区下、中三叠统碎屑锆石年龄(Weislogel et al., 2006, 2010; Enkelmann et al., 2007; Ding et al., 2013); h.YD指义敦地体南部下、中三叠统碎屑锆石年龄(Wang et al., 2013); i. ALS指哀牢山地区志留系和泥盆系碎屑锆石年龄(Xia et al., 2016); j. KD指康滇古陆地区前二叠纪地层锆石年龄(Zhou et al., 2006; Sun et al., 2009; Wang et al., 2012)

时,为了避免出现"单纯依靠视觉分析容易受到主 观判断的影响",首先采用 IsoplotR 分析处理软件 (Vermeesch et al., 2016)绘制了 MDS 图(图 5),对 各组年龄数据的相似度进行分析.样品及潜在物源 区的 10 组年龄数据(包括 4 个样品的锆石年龄数据 和 6 个潜在物源区锆石年龄数据)在 MDS 图中分布 于两个区域(图 5),表明这 10 组年龄数据总体上可 以划分为两类.其中,样品 XY07、XY06 与潜在物源 区 PCT、TT 具有较强的亲缘关系;样品 XY05、 XY04 与潜在物源区 KD、SG、YD、ALS 具有较强的 亲缘关系.在此基础上,对于每个样品所代表的地 层的碎屑物源进行详细分析.

(1)上三叠统云南驿组碎屑物源分析.XY06样 品采自上三叠统云南驿组下段,该地层沉积于卡尼 期(227~237 Ma)的早期,而XY06样品碎屑锆石年 龄主要分布于236~260 Ma(图4a'),因此该样品碎 屑锆石年龄相对于地层年龄具有非常年轻的特点, 并可能存在与地层年龄相同的碎屑锆石,表明在地 层沉积过程中,可能存在同时期(或稍早)的火山喷 发. MDS图显示 XY06样品年龄数据与TT(上扬子 地区中一下三叠统火山灰夹层获得的锆石年龄)具 有较强的亲缘关系(图5).另外,详细对比200~ 300 Ma区间的年龄直方图(图4a'和图4e')发现两 者具有很好的对应关系.因此,推断在卡尼期盆地 发育早期,上扬子地区的云南罗平、云南盐津、重庆 铜梁、广西凤金山、贵州关刀、贵州望谟县、贵州青 岩、贵州遵义等地区的中一下三叠统中发育的 246~248 Ma、238~239 Ma等多期次的凝灰岩夹层 (刘建清等, 2021),为云南驿组提供了大量的年轻 锆石.根据XY06样品碎屑锆石年龄峰~247 Ma,推 测上扬子地区广泛分布的中三叠统底部~247 Ma 的"绿豆岩"(Yan et al., 2019; 李宸等, 2020)可能 是最主要的碎屑锆石来源.

(2)上三叠统罗家大山组碎屑物源分析.XY07 样品采自上三叠统罗家大山组下段,虽然只获得了 59个有效年龄数据,但是该样品的锆石年龄数据非 常集中,并且 MDS 图显示,其位置与上扬子地区 中、晚二叠世碎屑岩和火山灰的锆石年龄数据 (PCT)的位置几乎重合(图5),显示了极高的亲缘 性.详细对比200~300 Ma区间的年龄直方图(图 4b'和图4f')发现两者也具有极好的对应关系.前 人研究发现上扬子地区晚二叠世碎屑岩的物源主 要来自峨眉山玄武岩,并且碎屑锆石具有~260 Ma







距离越近的年龄数,其亲缘关系越强;实线代表亲缘关系较强, 虚线代表亲缘关系较弱

的年龄峰(He et al., 2007),并且在中、晚二叠世地 层中发育多期次火山灰(He et al., 2007; Zhong et al., 2014; Huang et al., 2016, 2018).因此,推断 在罗家大山组沉积时期,为盆地提供碎屑物源的主 要是中、晚二叠世地层(包括峨眉山玄武岩及沉积 岩中的火山灰夹层),表明碎屑物源仍然来自于上 扬子地区,物源区没有发生明显改变,只是随着 中一下三叠统地层剥蚀殆尽,下伏的二叠系成为主 要的碎屑物源.

(3)上三叠统白土田组与下侏罗统冯家山组碎 屑物源分析.KDE图显示样品XY05和XY04的年 龄分布具有较强的相似性,MDS图也显示两者具有 很好的亲缘关系(图5).因此,初步判断白土田组与 冯家山组具有相同的物源区,且明显不同于云南驿 组、罗家大山组的碎屑物源区,且明显不同于云南驿 组、罗家大山组的碎屑物源区,包义敦)地体、哀牢山均 为可能的碎屑物源区(图5).根据MDS图显示的亲 缘关系,最主要的物源区可能来自康滇古陆、松 潘一甘孜(含义敦)地体,而紧邻楚雄盆地的哀牢山 并非主要物源区(图5).另外,晚三叠世晚期一早侏 罗世地层的碎屑锆石磨圆度较好,具有再旋回锆石 的特征,晚三叠世盆地西侧和盆地北侧的古水流方 向均为自北向南(谭富文等,2004),也表明该时期 盆地北部的相对较远的松潘一甘孜(含义敦)地体 是主要物源区.

根据上文对晚三叠世一早侏罗世楚雄盆地碎 屑物源的分析,该阶段盆地的碎屑物源发生了一次 巨大的转变,据此将这一时期楚雄盆地的沉积充填 过程划分为两个阶段:①晚三叠世早期,楚雄盆地 处于初始形成阶段,碎屑物源较简单,主要来自上 扬子地区的中一下三叠统和二叠系,由于这些地层 中发育多期次火山灰以及再旋回的年轻锆石,导致 碎屑锆石以年轻碎屑锆石为主(小于280 Ma);②晚 三叠世晚期一早侏罗世,楚雄盆地的碎屑物源变得 复杂,可能接受了多个物源区的碎屑物源,导致碎 屑锆石年龄更为复杂,含有大量年龄较老的锆石.

4.2 盆山格局演化模式探讨

根据上文的碎屑物源分析,结合前人的研究成 果,本文在分析哀牢山和松潘一甘孜造山带对楚雄 盆地演化影响的基础上,探讨扬子西南缘盆山格局 演化过程.

(1)哀牢山造山带与楚雄盆地耦合关系探讨. 目前多数学者认为晚三叠世楚雄盆地的大地构造 性质为"前陆盆地",但仍存在周缘前陆盆地和弧后 前陆盆地两种不同认识,这两种观点均认为晚三叠 世楚雄盆地的构造演化和沉积充填过程与西侧的 哀牢山造山带有关,并认为楚雄盆地碎屑物源主要 来自哀牢山造山带.但是,本文认为晚三叠世哀牢 山造山带的造山作用是有限的,依据包括以下两方 面:首先,在云南驿组和罗家大山组沉积时期,碎屑 物源主要来自于下伏的中、下三叠统和二叠系,更 老的地层尚未剥露至地表,表明该阶段哀牢山并未 发生强烈的逆冲推覆作用,也没有发生强烈的剥蚀 作用;其次,在白土田组和冯家山组沉积时期,盆地 的碎屑物源主要来自康滇古陆、松潘一甘孜(含义 敦)地体,而哀牢山造山带并非主要物源区.

上述分析表明,晚三叠世一早侏罗世哀牢山造 山带与楚雄盆地并未表现出很好的耦合关系.根据 上文碎屑物源的分析认为造成这种现象的原因有 以下两种可能:一种可能是哀牢山洋盆并非一个成 熟的洋盆,仅发育为一个小的洋盆后,即发生闭合, 形成一个造山作用较弱的"缝合带";另一种可能 是,晚三叠世早期,楚雄盆地为一个"裂谷盆地",一 些学者即持这样的观点(吴根耀和矢野孝雄,1993; 杨庆道等,2017).根据印支期区域内多个板块汇聚 的地球动力学背景,笔者认为前者的可能性更大.

(2)松潘-甘孜造山带与楚雄盆地耦合关系

探讨.松潘一甘孜造山带南东侧发育四川盆地、盐 源盆地、楚雄盆地等印支期沉积盆地(图1),大量的 研究表明松潘一甘孜造山带是晚三叠世四川盆地 的主要物源区(邓飞等, 2008; Zhu et al., 2017),并 且最近的研究认为在晚三叠世早期松潘一甘孜造 山带即成为主要物源区(Yan et al., 2019). 位于楚 雄盆地北侧的盐源盆地同样发育较完整的三叠系, 前人对其碎屑物源的研究认为盆地在早三叠世一 晚三叠世早期接受来自康滇古陆的碎屑物源,晚三 叠世中晚期开始接受来自松潘一甘孜造山带的碎 屑物源(Yan et al., 2019),这样的碎屑物源演化与 楚雄盆地一致.另外,根据区域三叠系分布情况,盐 源盆地可能与楚雄盆地北部的宁蒗地区连为一体, 鉴于盐源盆地上三叠统厚度较小(约2km),而楚雄 盆地上三叠统最厚可达 9~10 km (杨庆道等, 2017),据此推测盐源盆地属于楚雄盆地边缘的一 个次级盆地.

根据上述分析,认为晚三叠世松潘一甘孜造山 带的造山作用具有明显的时空差异性.在晚三叠世 早期,北东段快速隆升,为四川盆地提供大量碎屑 物源;在晚三叠世中、晚期,南西段开始快速隆升, 成为楚雄盆地及盐源盆地的主要物源区.据研究白 垩纪楚雄盆地的主要物源来自松潘一甘孜造山带 (姜磊等,2018),结合楚雄盆地侏罗系和白垩系较 连续的碎屑岩地层,可以认为在晚三叠世一白垩纪 较长的地质历史时期,松潘一甘孜造山带持续为楚 雄盆地提供物源.

(3)扬子西南缘盆山格局演化过程.在晚三叠 世早期,根据上文的碎屑物源分析,该阶段物源主 要来自上扬子地区的中一下三叠统和二叠系,很少 来自哀牢山造山带、松潘一甘孜造山带的碎屑物 源,据此认为扬子西南缘的哀牢山造山带、松潘一 甘孜造山带的造山作用也较弱.该阶段楚雄盆地的 沉积范围较为有限,主要分布于靠近哀牢山的狭长 区域(许效松等,1999).此外,该阶段盆地以深水环 境的细粒沉积为主(图3),反映了该阶段的盆地属 于碎屑物源供给不足的欠补偿盆地,这可能与物源 区岩石组成有关(因为此阶段提供物源的上扬子地 区中一下三叠统和二叠系主要为碳酸盐岩).因此, 认为该阶段楚雄盆地为受哀牢山弱造山作用控制 下的沉积盆地(图6a).

在晚三叠世晚期一早侏罗世,在古特提斯分支 洋盆闭合、板块持续汇聚(许志琴等,1992)的构造



Fig. 6 Evolution model for the Late Triassic-Early Jurassic basin-range pattern in the southwest Yangtze block ALS. 哀牢山; CB. 楚雄盆地; KD. 康滇古陆; QLS: 羌塘一兰坪一思茅地体; SB: 四川盆地; SG-YT: 松潘一甘孜地体与义敦地体; YB: 盐源 盆地; YZB: 扬子陆块; 红色五角星为本文样品位置

背景下,哀牢山造山带和松潘一甘孜造山带的造山 作用增强,在哀牢山造山带向东逆冲推覆的作用 下,楚雄盆地持续沉降并向东超覆(谭富文等, 2004).此外,该阶段盆地由深水环境转变为三角洲 为主的浅水环境,沉积物粒度相对较粗,部分层位 发育砾岩(图3),反映该阶段碎屑物源供给较充分, 与晚三叠世早期相比碎屑物源发生了很大变化.根 据上文分析该阶段楚雄盆地的碎屑物源并非主要 来自哀牢山,而是松潘一甘孜(包括义敦)造山带, 因此,推断该阶段松潘一甘孜(包括义敦)造山带具 有更强的造山作用,形成更高的地形(Zhan et al., 2018),导致这一时期松潘一甘孜造山带为楚雄盆 地提供了大量碎屑物源(图6b).

5 结论

根据上文对上三叠统一下侏罗统沉积序列、碎 屑物源等的系统分析,获得以下几方面认识:

(1)在晚三叠世早期,楚雄盆地云南驿组和罗家大山组的碎屑物源主要来自于上扬子地区的中、下三叠统和二叠系,更老的地层尚未剥露至地表, 表明该阶段哀牢山并未发生较强的逆冲推覆作用和强烈的剥蚀作用,楚雄盆地为一个欠补偿盆地.

(2)在晚三叠世晚期一早侏罗世,在古特提斯 分支洋盆闭合、板块持续汇聚的大地构造背景下, 哀牢山造山带向东逆冲推覆作用增强,导致楚雄盆 地持续沉降并向东超覆.但是楚雄盆地的碎屑物源 并非主要来自哀牢山,而是主要来自松潘一甘孜造 山带,认为该阶段松潘一甘孜造山带可能具有更强 的造山作用,形成更高的地形,为盆地提供大量碎 屑物源.

(3)根据碎屑锆石 U-Pb 年代学数据首次确认 了松潘一甘孜造山带对楚雄盆地沉积充填过程的 重要影响,并认为晚三叠世松潘一甘孜造山带的造 山作用具有明显的时空差异性.在晚三叠世早期, 松潘一甘孜造山带北东段快速隆升,为四川盆地提 供大量碎屑物源;在晚三叠世中、晚期,南西段开始 快速隆升,成为楚雄盆地及盐源盆地的主要物源区.

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵建议.感谢英 国伦敦大学学院(UCL)伦敦地质年代学中心 Vermeesch P.教授和中山大学田云涛教授在实验和 论文撰写过程中给予的帮助.

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

References

Chen, G. W., Wu, Y.Z., 1999. The Formation and Evolution of Chuxiong Back-Arc Foreland Basin. Yunnan Geology, 18(4): 392-397(in Chinese with English abstract).

Deng, F., Jia, D., Luo, L., et al., 2008. The Contrast be-

tween Provenances of Songpan-Garze and Western Sichuan Foreland Basin in the Late Triassic: Clues to the Tectonics and Palaeogeography. *Geological Review*, 54 (4): 561-573(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 Soci*ety of America Bulletin, 94(2): 222. https://doi.org/ 10.1130/0016-7606(1983)94222: ponaps>2.0.co;2
- Ding, L., Yang, D., Cai, F. L., et al., 2013. Provenance Analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi Turbidites in Northern Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34-48. https://doi.org/10.1002/tect.20013
- Enkelmann, E., Weislogel, A., Ratschbacher, L., et al., 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi Basin Filled? A Provenance Study. *Tectonics*, 26(4): TC4007. https://doi.org/10.1029/2006tc002078
- Gan, W. J., Molnar, P., Zhang, P. Z., et al., 2022. Initiation of Clockwise Rotation and Eastward Transport of Southeastern Tibet Inferred from Deflected Fault Traces and GPS Observations. GSA Bulletin, 134(5/6): 1129– 1142. https://doi.org/10.1130/b36069.1
- Gong, X.D., Tang, Y., Qin, Y.D., et al., 2020. Late Triassic Collision of Jinshajiang Suture Belt: Geochronological, Geochemical and Hf Isotope Evidences from Quartz Monzonite in Gonjo Area. *Earth Science*, 45(8): 2905– 2919(in Chinese with English abstract).
- Griffin, W.L., Powell, W.J., Pearson, N.J., et al., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS. In: Sylvester, P., ed., Laser Ablation-IPS-MS in the Earth Sciences, Current Practices and Outstanding Issues.Mineralogical Association of Canada, 40: 308-311.
- Guo, P., Li, C.Z., 2013. A Summary of the Nature of Chuxiong Basin. *Ground Water*, 35(5): 194-196(in Chinese).
- 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 Sciences Letters*, 255(3–4): 306–323. https://doi. org/10.1016/j.epsl.2006.12.021
- Hu, X.M., Xue, W.W., Lai, W., et al., 2021. Sedimentary Basins in Orogenic Belt and Continental Geodynamics.

Acta Geologica Sinica, 95(1): 139-158(in Chinese with English abstract).

- Huang, H., Cawood, P. A., Hou, M. C., et al., 2018.
 Provenance of Late Permian Volcanic Ash Beds in South China: Implications for the Age of Emeishan Volcanism and Its Linkage to Climate Cooling. *Lithos*, 314/ 315: 293-306. https://doi. org/10.1016/j. lithos.2018.06.009
- Huang, H., Cawood, P.A., Hou, M.C., et al., 2016. Silicic Ash Beds Bracket Emeishan Large Igneous Province to < 1 M.y. at ~ 260 Ma. *Lithos*, 264: 17-27. https:// doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.013
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation– Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry to In Situ U–Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69. https://doi.org/10.1016/j. chemgeo.2004.06.017
- Jiang, L., Deng, B., Liu, S.G., et al., 2018. Differential Uplift and Fragmentation of Upper Yangtze Basin in Cenozoic. *Earth Science*, 43(6): 1872-1886(in Chinese with English abstract).
- Li, C., Lang, X.H., Deng, Y.L., et al., 2020. Geochronological and Geochemical Characteristics of the Claystone (Mung Bean Rock) at the Bottom of the Leikoupo Formation in the Emeishan Area, Sichuan Basin, China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 39(4): 810-825(in Chinese with English abstract).
- Li, S. H., Advokaat, E. L., van Hinsbergen, D. J. J., et al., 2017. Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic– Cenozoic Paleolatitudinal and Rotational History of Indochina and South China: Review and Updated Kinematic Reconstruction. *Earth–Science Reviews*, 171: 58–77. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.007
- Liu, J.Q., He, L., Chen, F.L., et al., 2021. Studies on the Chronology and Geochemistry of the Green Pisolites at the Bottom of the Middle Triassic Guanling Formation in Yanjin Area, Northeastern Yunnan Province. Acta Petrologica Sinica, 37(7): 2245-2255(in Chinese with English abstract).
- Sun, W. H., Zhou, M. F., Gao, J. F., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Geochronological and Lu-Hf Isotopic Constraints on the Precambrian Magmatic and Crustal Evolution of the Western Yangtze Block, SW China. Precambrian Research, 172(1/2): 99-126.
- Tan, F.W., Yin, F.G., Xu, X.S., et al., 2004. Relationship

of Tectonics to Sedimentary Evolution of Chuxiong Foreland Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 345-352(in Chinese with English abstract).

- Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P. H., et al., 1990. The Ailao Shan/Red River Metamorphic Belt: Tertiary Left-Lateral Shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(6257): 431-437. https://doi.org/10.1038/ 343431a0
- Vermeesch, P., Resentini, A., Garzanti, E, 2016. An R Package for Statistical Provenance Analysis. Sedimentary Geology, 336: 14-25. https://doi.org/10.1016/j. sedgeo.2016.01.009
- Wang, B. Q., Wang, W., Chen, W. T., et al., 2013. Constraints of Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes on the Provenance of the Triassic Yidun Group and Tectonic Evolution of the Yidun Terrane, Eastern Tibet. *Sedimentary Geology*, 289: 74-98. https://doi.org/ 10.1016/j.sedgeo.2013.02.005
- Wang, L. J., Yu, J. H., Griffin, W. L., et al., 2012. Early Crustal Evolution in the Western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf Isotopes on Detrital Zircons from Sedimentary Rocks. *Precambrian Research*, 222/223: 368-385. https://doi. org/10.1016/j. precamres.2011.08.001
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2006. Detrital Zircon Provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi Complex: Sedimentary Record of Collision of the North and South China Blocks. *Geology*, 34 (2): 97. https://doi.org/10.1130/g21929.1
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2010. Detrital Zircon Provenance from Three Turbidite Depocenters of the Middle–Upper Triassic Songpan–Ganzi Complex, Central China: Record of Collisional Tectonics, Erosional Exhumation, and Sediment Production. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11–12): 2041–2062. https://doi.org/ 10.1130/b26606.1
- Wiedenbeck, M., Hanchar, J. M., Peck, W. H., et al., 2004. Further Characterisation of the 91500 Zircon Crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9-39. https://doi. org/10.1111/j. 1751-908x. 2004. tb01041.x
- Wu, G. Y., Takao, Y., 1993. Late Triassic Sedimentary. Gravity Flow Deposits in Central Yunnan and Their Geological Significances. *Geotectonica et Metallogenia*, 17(4): 305-313(in Chinese with English abstract).

- Xia, X. P., Nie, X. S., Lai, C. K., et al., 2016. Where was the Ailaoshan Ocean and When did It Open: A Perspective Based on Detrital Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence. *Gondwana Research*, 36: 488-502. https:// doi.org/10.1016/j.gr.2015.08.006
- Xu, X.S., Yin, F.G., Wan, F., et al., 1999. The Nature of the Chuxiong Basin and Evolution of Sedimentary Sequences. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 19 (5): 1-11(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.J., Du, Y.S., Yang, J.H., 2007. Prospects of Sediment Provenance Analysis. *Geological Science and Technology Information*, 26(3): 26-32(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Hou, L.W., Wang, Z.X., et al., 1992. Orogenic Processes of the Songpan-Garze Orogenic Belt of China. Geological Publishing House, Beijing, 199 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z. K., Dong, S. L., Li, Y., et al., 2019. Detrital Zircon U - Pb Geochronology of the Triassic Sandstones from the Yanyuan Basin of Southwestern Sichuan, China. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1974– 1975. https://doi.org/10.1111/1755-6724.13844
- Yang, Q.D., Chen, M.C., Mao, S.E., et al., 2017. Important Deep-Buried Geological Discovery and Its' Significance in Chuxiong Basin of Mid-Yunnan Province. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 39 (S2): 287-296(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q.G., Wang, B.D., Xiluo, L.J., et al., 2020. Suture Zones in Tibetan and Tethys Evolution. *Earth Science*, 45(8): 2735-2763(in Chinese with English abstract).
- Zhan, Q. Y., Zhu, D. C., Wang, Q., et al., 2018. Constructing the Eastern Margin of the Tibetan Plateau during the Late Triassic. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12): 10449-10459. https://doi.org/ 10.1029/2018jb016353
- Zhong, Y. T., He, B., Mundil, R., et al., 2014. CA-TIMS Zircon U-Pb Dating of Felsic Ignimbrite from the Binchuan Section: Implications for the Termination Age of Emeishan Large Igneous Province. *Lithos*, 204: 14–19. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.005
- Zhou, M., Ma, Y., Yan, D., et al., 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic Arc Assemblage in the Western Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144(1-2): 19-38. https://doi. org/ 10.1016/j.precamres.2005.11.002

Zhu, M., Chen, H. L., Zhou, J., et al., 2017. Provenance Change from the Middle to Late Triassic of the Southwestern Sichuan Basin, Southwest China: Constraints from the Sedimentary Record and Its Tectonic Significance. *Tectonophysics*, 700/701: 92–107. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2017.02.006

附中文参考文献

- 陈根文,吴延之,1999. 楚雄弧后前陆盆地的形成及演化. 云南地质,18(4):392-397.
- 邓飞, 贾东, 罗良, 等, 2008. 晚三叠世松潘甘孜和川西前陆 盆地的物源对比:构造演化和古地理变迁的线索. 地质 论评, 54(4): 561-573.
- 巩小栋, 唐渊, 秦雅东, 等, 2020. 晚三叠世金沙江结合带碰 撞作用: 贡觉石英二长岩年代学、地球化学及Hf同位素 证据. 地球科学, 45(8): 2905-2919.
- 郭佩,李长志,2013. 楚雄盆地的性质综述. 地下水,35(5): 194-196.
- 胡修棉, 薛伟伟, 赖文, 等, 2021. 造山带沉积盆地与大陆动 力学. 地质学报, 95(1): 139-158.
- 姜磊,邓宾,刘树根,等,2018.上扬子盆地新生代差异抬升 剥蚀与分异过程.地球科学,43(6):1872-1886.

- 李宸, 郎兴海, 邓煜霖, 等, 2020. 四川盆地峨眉山雷口坡组 底部黏土岩(绿豆岩)的年代学及地球化学特征. 矿物岩 石地球化学通报, 39(4): 810-825.
- 刘建清,何利,陈风霖,等,2021.滇东北盐津地区中三叠统 关岭组底部绿豆岩年代学及地球化学研究.岩石学报, 37(7):2245-2255.
- 谭富文, 尹福光, 许效松, 等, 2004. 楚雄前陆盆地的构造特 征与沉积演化. 大地构造与成矿学, 28(3): 345-352.
- 吴根耀, 矢野孝雄, 1993. 滇中地区晚三叠世的重力流沉积 及其地质意义. 大地构造与成矿学, 17(4): 305-313.
- 许效松, 尹福光, 万方, 等, 1999. 楚雄盆地性质与沉积层序 演化. 岩相古地理, 19(5): 1-11.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海, 2007. 沉积物物源分析研究进展. 地质科技情报, 26(3): 26-32.
- 许志琴,侯立玮,王宗秀,1992.中国松潘一甘孜造山带的 造山过程.北京:地质出版社.
- 杨庆道,陈明春,卯升俄,等,2017. 滇中楚雄盆地地腹构 造一沉积特征重要发现及地质意义. 云南大学学报(自 然科学版),39(S2):287-296.
- 曾庆高, 王保弟, 西洛郎杰, 等, 2020. 西藏的缝合带与特提 斯演化. 地球科学, 45(8): 2735-2763.