

四川沐川地区中三叠统凝灰岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义*

文俊^{1,2,3}, 任光明⁴, 庞维华⁴, 赵俊兴^{1**}

(1 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000; 3 四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模创新工作室, 四川 乐山 614000; 4 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要 中国西南地区中三叠世雷口坡组或关岭组下部及底部普遍发育多层凝灰岩。已有研究显示, 早三叠世一中三叠世出现了生态环境间歇性恶化和生物迟滞复苏, 划分中国中三叠统安尼阶-拉丁阶界线的标志化石还未寻找到, 这些问题是否与火山活动有关, 值得进一步研究。文章对四川沐川地区河口剖面中三叠统雷口坡组下部的凝灰岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学研究, 获得中三叠统安尼阶-拉丁阶界线年龄为 $(242.5 \pm 1.2) \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.93, n=22$), 此年龄结果与国际地层年代表(2020 版)建议的安尼阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma)较为吻合, 证实沐川地区雷口坡组沉积时代为中三叠世安尼期和拉丁期。凝灰岩岩石地球化学特征显示出明显富 K_2O 、 MgO , 明显负锶异常的特征, 其物源可能来自古特提斯洋俯冲作用形成的大陆岩浆弧。多次次的火山活动可能是导致早三叠世一中三叠世生态环境间歇性恶化和生物迟滞复苏的重要原因, 安尼期-拉丁期交替时期发生的火山活动可能影响了生物的演化, 故难以寻找到划分中国中三叠统安尼阶-拉丁阶界线的标志化石, 加强对中三叠世火山活动的研究, 对中国三叠系划分方案、中三叠世地层划分对比及探索三叠纪生物演化与复苏具有重要意义。

关键词 地球化学; 凝灰岩; 锆石 U-Pb 定年; 雷口坡组; 拉丁阶; 沐川

中图分类号: P588.22

文献标志码: A

Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of tuff from Middle Triassic in Muchuan area, Sichuan Province

WEN Jun^{1,2,3}, REN GuangMing⁴, PANG WeiHua⁴ and ZHAO JunXing¹

(1 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 No.207 Geological Team of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China; 3 Zhang Jinyuan model worker Innovation Studio of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China; 4 Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract

There are multi-storey tuffs in the lower part and bottom of the Middle Triassic Leikoupo Formation or Guanling Formation in southwest China. Previous studies have shown that there was an intermittent deterioration of the ecological environment and the recovery of biological hysteresis in the Early-Middle Triassic. The marked fossils of the Middle Triassic Anisian-Latinian boundary in China have not been found. Whether these problems

* 本文得到四川省自然资源厅省政府性投资地质勘查项目(编号:DZ202002)和四川省自然资源厅科技项目(编号:kj-2022-6)联合资助
第一作者简介 文俊, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事区域地质调查与战略性关键金属矿产调查研究。Email: wjun9936@sina.com

** 通讯作者 赵俊兴, 男, 1970 年生, 教授, 主要从事储层沉积学、含油气盆地分析研究。Email: zhaojx@cdut.edu.cn

收稿日期 2021-03-22; 改回日期 2022-04-29。孟秋熠编辑。

are related to volcanic activity deserves further study. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and lithogeochemistry of tuff in the lower part of Middle Triassic Leikoupo Formation in Hekou section, Muchuan area, Sichuan Province were studied. The age of the Middle Triassic Anisian-Latinian boundary is $(242.5 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.93, $n=22$), which is basically consistent with the 242 Ma age of the Anisian-Latinian boundary recommended by the international stratigraphical timetable (2020 edition). It is confirmed that the sedimentary age of the Leikoupo Formation in Muchuan area is Middle Triassic Anisian period and Latinian period. The lithogeochemistry characteristics of tuff show obvious enrichment of K_2O , MgO and obvious negative Eu anomalies, its provenance may come from continental magmatic arc formed by subduction of the Paleotethys Ocean. Multistage volcanic activities may be an important cause of intermittent deterioration of ecological environment and delayed recovery of organisms in the Early-Middle Triassic. Volcanic activities during the Anisian-Latinian alternating period may affect biological evolution, so it's hard to find the marked fossils of the Middle Triassic Anisian-Latinian boundary in China. Strengthening the study of volcanic activities in the Middle Triassic is of great significance to the division scheme of Triassic in China, the stratigraphic division and correlation of Middle Triassic, and the exploration of Triassic biological evolution and recovery.

Key words: geochemistry, tuff, zircon U-Pb dating, Leikoupo Formation, ladinian, Muchuan

自显生宙以来,地球生物经历了5次灭绝,其中,二叠纪—三叠纪之交的生物灭绝事件导致了全球绝大多数的生物灭绝(任光明等,2019),至中三叠世生物才逐步得到复苏,三叠系研究是地学研究的热点之一(Martin et al., 2001; Lehrmann et al., 2006; Hu et al., 2011; Luo et al., 2017; Keeble et al., 2018)。

国际地层委员会三叠系分会于1991年正式确定将三叠系划分为3统7阶(童金南等,2019),随后,三叠纪年代地层学研究主要集中于各阶年代地层界线层型(GSSP,俗称“金钉子”)的选定上。由于全球各地三叠系差异较大,三叠系各阶GSSP选定工作困难重重。中国南方的浙江长兴煤山在2000年被确定为三叠系底界(印度阶)的GSSP(Yin et al., 2001)。随后,拉丁阶和卡尼阶的GSSP也分别在2005年和2008年被正式确定,其中,拉丁阶的底界层型选定为意大利阿尔卑斯地区的Bagolino剖面,以菊石 *Eoprotrachyceras curionii* 的FAD(首现点)为标志,辅助标志牙形石是 *Budurovignathus praehungaricus*。但这些菊石和牙形石在中国至今都还未发现,也未在拉丁阶底界附近识别出具有特征性的环境事件,碳同位素在该界线附近没有显著波动,因此,国际上定义拉丁阶底界标志化石在中国难以运用,在一定程度上影响了中国的相关地层学和地质学研究(童金南等,2019)。因此,中国拉丁阶的底界层型剖面的选定对中国三叠系划分及与国际标准的统一是至关重要的。目前,贵州罗甸关刀剖面

被选定为中国的拉丁阶层型剖面,但发现的菊石化石非常稀少,还没有找到作为拉丁阶底界定义的菊石标志化石。可见,菊石标志化石的识别可为拉丁阶层型剖面的建立提供重要古生物依据。但由于不同地区沉积古地理格局和沉积体系存在一定的差异,制约着古生物的分布,进而影响全球及中国区域地层对比。

中国西南地区早-中三叠世之交的雷口坡组或关岭组下部及底部普遍发育多层斑脱岩化凝灰岩或水云母黏土岩,因其层面上常分布分布大小不等的黄褐色扁豆状硅质结核颗粒,故该黏土岩又名“绿豆岩”,其厚度一般0.30~2.50 m,分布较稳定。其底部的凝灰岩常作为划分中三叠统与下三叠统的标志层(T_2/T_1),众多学者对其年龄进行了研究(Lehrmann et al., 2006; Ovtcharova et al., 2006; 郑连弟等,2010; 谢韬等,2013; 孙艳等,2017; 马圣钊等,2019; 任光明等,2019; 王宁祖等,2019; 李宸等,2020),均发现底部的凝灰岩年龄与国际地层年代表(2020版)建议的下三叠统奥伦尼克阶/中三叠统安尼阶(Olenekian-Anisian)界线年龄247.2 Ma高度吻合。马圣钊等(2019)在四川广安市谢家湾村中三叠统雷口坡组剖面采集凝灰岩样品获得的锆石U-Pb年龄为 $(242.5 \pm 0.7) \text{ Ma}$,此年龄值与最新国际地层年代表(2020版)界定的中三叠统安尼阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma)较为接近,但马圣钊等(2019)将其解释为早-中三叠世晚阶段火山喷发沉积活动的记录。本次在沐川地区雷口坡组下部(非底部)获得的凝灰岩年龄为

(242.5 ± 1.2) Ma, 接近于中三叠统安尼阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma), 本次获得的凝灰岩年龄为更加深入的研究中三叠统安尼阶-拉丁阶界线时限提供了资料。因此, 开展沐川地区中三叠统拉丁阶底界凝灰岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学研究, 对研究中国三叠系划分方案, 特别是对中国中三叠世地层划分对比及中三叠统安尼阶-拉丁阶界线层型剖面的建立, 和研究三叠纪生物复苏与辐射等方面都具有重要意义。

1 地层概况及采样层位

沐川地区位于扬子陆块西缘、四川盆地西南缘(图1a)。自古生代以来, 四川盆地整体处于被动大陆边缘环境, 以沉积海相碳酸盐地层为主(汪泽成, 2002), 广泛发育三叠纪地层。本次在沐川地区建和乡河口村测得中三叠统完整剖面, 其中, 雷口坡组厚度为450 m, 与下伏地层嘉陵江组呈整合接触, 与上覆地层上三叠统须家河组呈平行不整合接触(黄涵宇等, 2002)(图1b)。

沐川地区的雷口坡组主要为一套灰色、灰黄色白云岩夹膏溶角砾岩及灰岩, 通常在中三叠统雷口坡组底部稳定分布一层灰绿色沉凝灰岩(俗称“绿豆岩”), 其层厚0.34~1.44 m, 底部的灰绿色凝灰岩与下伏嘉陵江组灰黄色白云岩夹膏溶角砾岩呈整合接触(图1c), 本次在沐川地区雷口坡组下部(底部的沉凝灰岩之上)新发现了一层灰绿色沉凝灰岩(图1d)。本次针对沐川地区河口剖面中三叠统雷口坡组下部(非底部)的凝灰岩采集了一系列样品(具体层位见图1c)。该层凝灰岩厚度约1.20 m, 具块状构造(图1e、f), 呈浅灰绿色、灰白色(图1g), 镜下可见凝灰质结构、火山灰结构, 大部分火山碎屑蚀变为黏土矿物, 主要由黏土矿物组成, 有少量火山玻璃和石英(图1h)。

2 样品制备及分析方法

本文采集的沐川地区的约10 kg的凝灰岩和5件相对新鲜的凝灰岩样品(具体层位见图1c)进行锆石分选和全岩碎样, 首先将用于锆石 U-Pb 年代学测试的凝灰岩样品破碎至100目, 经浮选和电磁选后, 经淘洗、挑选出单颗粒锆石。之后, 手工挑出晶形完好和色泽度好的锆石用环氧树脂固定于样品靶上。

样品靶表面经研磨抛光, 直至磨至锆石晶体近中心新鲜切面。对靶上锆石进行镜下透射光、反射光照相后, 再对锆石进行阴极发光(CL)图像分析, 锆石 CL 实验是在北京离子探针中心扫描电子显微镜实验室完成。最后根据阴极发光照射分析结果选择典型的岩浆锆石来进行锆石 U-Pb 测年分析。

锆石 U-Pb 测年工作是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, 仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 和 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用束斑直径为25 μm , 频率为10 Hz, 能量密度约2.5 J/ cm^2 , 以 He 为载气。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 K-1 进行调试仪器, 使之达到最佳状态, 锆石 U-Pb 定年以锆石 K-1 为外标, $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 以锆石 M127($w(\text{U})$ 为 923×10^{-6} , $w(\text{Th})$ 为 439×10^{-6} , $\text{Th}/\text{U}=0.475$) 为外标进行校正(Nasdala et al., 2008)。测试过程中每测定5~7个样品前后重复测定2个锆石 K-1 对样品进行校正, 并测量1个锆石 Plesovice 标准物质, 以保证测试的精确度。最后数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2010), 测量过程中 ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 在计算时剔除。锆石年龄谐和图采用 Isoplot 3.0 程序作图, 详细作图过程可参见文献(侯可军等, 2009)。本次实验以测试过程中离子信号稳定、锆石测点 Th-U 量在有效检测范围内、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和度大于95%为条件, 确定参与年龄计算的有效数据。

将5件岩石样品进行碎样至200目以下用于测试主量、微量、稀土元素。主量、微量、稀土元素分析测试是在澳实分析检测(广州)有限公司完成的, 测试方法如下: 采用荷兰生产的 PANalytical PW2424 型 X 射线荧光光谱仪测量主量元素。首先称取两份试样, 一份试样中加入含硝酸锂的硼酸锂-硝酸锂熔融助熔剂, 充分混合后, 高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后, 再用 X 射线荧光光谱仪分析主量元素含量。同时另一份试样放入马弗炉中, 于 1000°C 灼烧, 冷却后称重, 样品加热前后的重量差即是烧失量。采用美国生产的 Agilent 5110 型电感耦合等离子体发射光谱与 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱测量微量元素, 试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解后, 用稀盐酸定容, 再用电感耦合等离子体发射光谱进行分析, 若 Bi、Hg、Mo、Ag、

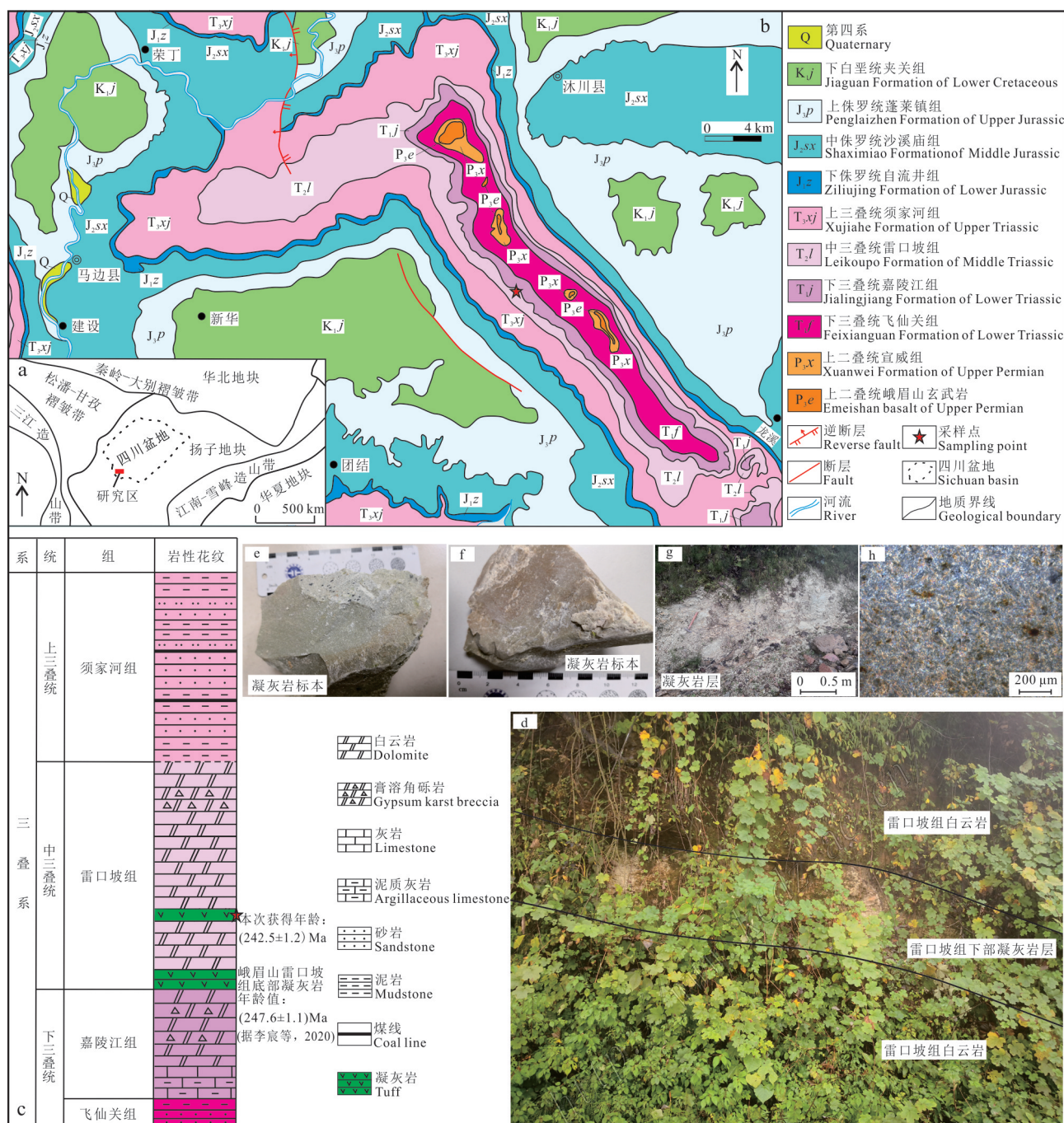


图1 沐川地区构造位置图(a, 据文俊等, 2022)、沐川地区区域地质简图(b)、沐川地区雷口坡组与嘉陵江组界线附近地层柱状图(c, 峨眉山雷口坡组底部凝灰岩年龄数据据李宸等, 2020)、沐川地区雷口坡组下部凝灰岩野外露头(d, g)、沐川地区雷口坡组下部凝灰岩标本(e, f)与显微照片(h)

Fig.1 Structural location map of Muchuan area (a, after Wen et al., 2022), regional geological sketch map of Muchuan area (b), stratigraphic histogram near the boundary between Leikoupo Formation and Jialingjiang Formation in Muchuan area (c, age data of tuff at the bottom of Leikoupo Formation in Emeishan after Li et al., 2020), field outcrop of tuff at the lower part of Leikoupo Formation in Muchuan area (d, g), tuff specimen (e, f) and micrograph (h) at the the lower part of Leikoupo Formation in Muchuan area

W元素含量较高,需要做相应稀释,再用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析,元素之间的光谱

干扰得到矫正后,即是最后的分析结果。采用美国生产的Agilent 7900型电感耦合等离子体质谱测量

稀土元素,往试样中加入硼酸锂($\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)熔剂,混合均匀,在熔炉中于 1025°C 熔融。待熔融液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸消解并定容,然后用等离子体质谱仪分析得到稀土元素含量。澳实分析检测(广州)有限公司采用上述测试方法、仪器和流程能够保证样品测试精度。主量元素分析精度和准确度优于5%,微量、稀土元素分析精度和准确度均优于10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

凝灰岩样品中锆石的阴极发光和透射光照片见图2。大部分锆石呈无色透明,多呈长-短板状晶形,自形-半自形晶,具有环带结构,锆石粒径长 $\times$ 宽一般为 $(80\sim 400)\mu\text{m}\times(50\sim 100)\mu\text{m}$,锆石颗粒边缘没有变质成因的增生边,显示为岩浆成因锆石。从锆石的阴极发光图像来看,锆石具有典型的岩浆震荡环带,部分锆石核幔结构清楚,如点 MC-3、MC-5、MC-7、MC-19、MC-28、MC-34、MC-35,核部颜色较深,内部有一定的环带结构,与边缘界线清楚,显示岩浆锆石结构特征(图2)。锆石测点 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 范围分别为 $57.4\times 10^{-6}\sim 2040\times 10^{-6}$ 和 $142\times 10^{-6}\sim 2300\times 10^{-6}$, Th/U 之比为 $0.19\sim 1.40$,表现出锆石都具有岩浆成因的特点(表1)。

从表1 锆石 U-Pb 测年分析结果中可以看出,沐川地区雷口坡组凝灰岩(MC01)37个锆石测点数值中,仅有MC-6(捕获锆石)在242 Ma 之外, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为1103.0 Ma,记录了区域上晋宁期岩浆活动。其余36个锆石测点均在242 Ma 附近,242 Ma 附近的锆石年龄做谐和图,锆石均落入谐和曲线及其附近(图3),表明其数据较为可靠。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄为 $(242.5\pm 1.2)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.93$, $n=22$) (图3),代表沐川地区雷口坡组下部凝灰岩的喷发沉积年龄。

3.2 岩石地球化学特征

从表2 可以看出,沐川地区凝灰岩主量元素 $w(\text{SiO}_2)$ 为 $62.46\%\sim 63.12\%$ (平均 62.74%),具中酸性岩特征; $w(\text{TiO}_2)$ 为 $0.21\%\sim 0.26\%$ (平均 0.23%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 $14.63\%\sim 15.23\%$ (平均 14.89%), $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 $1.42\%\sim 1.49\%$ (平均 1.46%), $w(\text{MgO})$ 为 $6.53\%\sim 6.66\%$ (平均 6.60%), $w(\text{CaO})$ 为 $0.45\%\sim 0.49\%$ (平均 0.47%), $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 $0.03\%\sim 0.05\%$ (平均 0.04%), $w(\text{K}_2\text{O})$

为 $7.80\%\sim 7.94\%$ (平均 7.87%), $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为 $0.18\%\sim 0.21\%$ (平均 0.20%)。总体上研究区的凝灰岩具有富硅、铝、钾、镁,贫铁、钠、磷、钛的特征。

5 件样品稀土总量 ΣREE 介于 $119.24\times 10^{-6}\sim 125.15\times 10^{-6}$,轻、重稀土元素比值 LREE/HREE 为 $3.92\sim 4.10$,稀土元素配分图解(图4a)显示略右倾的曲线,且轻稀土元素倾斜($\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}=2.11\sim 2.21$),重稀土元素相对平缓($\text{Tb}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=1.61\sim 1.73$), $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 为 $4.26\sim 4.45$,具有极明显负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.14\sim 0.16$)。另外,凝灰岩没有明显的负铈异常($\delta\text{Ce}=1.06\sim 1.09$),也证实其火山灰沉积的特征。

从表2 可以看出,沐川地区凝灰岩微量元素 $w(\text{Th})$ 为 $30.9\times 10^{-6}\sim 31.4\times 10^{-6}$ (平均 31.2×10^{-6}), $w(\text{Hf})$ 为 $4.90\times 10^{-6}\sim 5.30\times 10^{-6}$ (平均 5.10×10^{-6}), $w(\text{Zr})$ 为 $157\times 10^{-6}\sim 172\times 10^{-6}$ (平均 165×10^{-6}), $w(\text{U})$ 为 $10.2\times 10^{-6}\sim 11.0\times 10^{-6}$ (平均 10.6×10^{-6}), $w(\text{Rb})$ 为 $257\times 10^{-6}\sim 260\times 10^{-6}$ (平均 259×10^{-6}), $w(\text{Nb})$ 为 $13.1\times 10^{-6}\sim 13.6\times 10^{-6}$ (平均 13.3×10^{-6}), $w(\text{Ta})$ 为 $1.30\times 10^{-6}\sim 1.50\times 10^{-6}$ (平均 1.40×10^{-6}), $w(\text{Li})$ 为 $402\times 10^{-6}\sim 410\times 10^{-6}$ (平均 406×10^{-6}),Li 元素较为富集。从微量元素蛛网图(图4b)中可以看出,Li、Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素明显富集,Ba、Nb、Sr 等高场强元素相对亏损。

4 讨论

4.1 中三叠统安尼阶-拉丁阶界线年龄及雷口坡组沉积时代

国际地层委员会三叠系分会(STS)于2005年将拉丁阶的底界层型选定为意大利阿尔卑斯地区的Bagolino 剖面,以菊石 *Eoprotrachyceras curionii* 的FAD 为标志,辅助标志牙形石是 *Budurovignathus prachungaricus*,但这些菊石和牙形石在中国至今都还未发现(童金南等,2019)。目前,中国将早三叠世一中三叠世生物和环境演变研究经典的贵州罗甸关刀剖面作为拉丁阶的底界层型剖面,但在此剖面上还没有找到作为拉丁阶底界定义的菊石标志化石,也未在拉丁阶底界附近识别出具有特征性的环境事件,碳同位素在该界线附近没有显著波动,因此,不具进行地层识别和对比的潜力(童金南等,2019)。综上所述,拉丁阶的底界层型剖面在中国的选定和运用较为艰难。

Mundil 等(1996)在南阿尔卑斯层型剖面所在地区拉丁阶底界之下的 *N. secedensis* 带下部两层火山

表 1 沐川地区雷口坡组下部凝灰岩锆石 U-Pb 测年分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of tuff from lower Leikoupo Formation in Muchuan area

测点号	$w(\text{B})/10^{-6}$			$^{232}\text{Th}/$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		谐和
	Pb	Th	U	^{238}U	比值	2σ	比值	2σ	比值	2σ	年龄/Ma	2σ	年龄/Ma	2σ	年龄/Ma	2σ	度
MC01-1	12.0	74.7	282.9	0.26	0.2710	0.0250	0.0388	0.0009	0.0493	0.0047	242.0	20.0	245.6	5.4	130.0	190.0	99
MC01-2	13.0	205.6	240.1	0.86	0.2800	0.0120	0.0377	0.0006	0.0519	0.0022	251.4	9.3	238.2	4.0	243.0	89.0	95
MC01-3	16.8	105.5	358.0	0.29	0.2650	0.0140	0.0377	0.0007	0.0491	0.0022	238.0	11.0	238.4	4.3	136.0	96.0	100
MC01-4	8.9	63.2	217.5	0.29	0.2810	0.0230	0.0366	0.0007	0.0530	0.0040	250.0	18.0	231.8	4.6	280.0	160.0	92
MC01-5	18.0	99.6	389.3	0.26	0.2700	0.0180	0.0388	0.0010	0.0479	0.0030	242.0	15.0	245.7	6.0	90.0	140.0	98
MC01-6	77.3	144.4	342.0	0.42	2.0680	0.0630	0.1866	0.0036	0.0771	0.0019	1137.0	21.0	1103.0	19.0	1118.0	48.0	97
MC01-7	14.6	86.7	322.6	0.27	0.2790	0.0140	0.0384	0.0008	0.0499	0.0032	249.0	11.0	242.7	4.7	200.0	120.0	97
MC01-8	32.1	133.4	716.0	0.19	0.2787	0.0095	0.0382	0.0007	0.0506	0.0015	249.1	7.5	241.8	4.3	204.0	62.0	97
MC01-9	13.4	95.3	328.6	0.29	0.2730	0.0110	0.0369	0.0007	0.0520	0.0021	244.6	9.0	233.7	4.3	256.0	91.0	95
MC01-10	19.2	106.8	413.0	0.26	0.2810	0.0180	0.0383	0.0011	0.0510	0.0033	251.0	14.0	242.2	6.7	210.0	140.0	96
MC01-11	13.3	75.6	269.2	0.28	0.3140	0.0250	0.0427	0.0012	0.0539	0.0042	276.0	20.0	269.4	7.7	320.0	170.0	98
MC01-12	12.5	74.2	332.0	0.22	0.2670	0.0220	0.0386	0.0014	0.0506	0.0037	240.0	18.0	244.0	8.6	200.0	160.0	98
MC01-13	13.1	82.2	344.0	0.24	0.2740	0.0290	0.0384	0.0012	0.0528	0.0054	245.0	23.0	243.2	7.4	300.0	230.0	99
MC01-14	16.2	89.3	358.1	0.25	0.2740	0.0160	0.0401	0.0007	0.0504	0.0026	245.0	12.0	253.3	4.1	180.0	110.0	97
MC01-15	8.2	90.6	201.7	0.45	0.2760	0.0400	0.0383	0.0016	0.0536	0.0082	246.0	32.0	242.3	10.0	300.0	340.0	98
MC01-16	10.8	89.1	221.7	0.40	0.2700	0.0180	0.0381	0.0012	0.0517	0.0032	241.0	15.0	241.2	7.3	240.0	140.0	100
MC01-17	23.3	215.0	579.0	0.37	0.2460	0.0220	0.0383	0.0018	0.0474	0.0028	223.0	18.0	242.0	11.0	70.0	130.0	92
MC01-18	12.1	63.1	292.1	0.22	0.2770	0.0120	0.0400	0.0008	0.0514	0.0022	247.4	9.5	252.6	4.7	227.0	91.0	98
MC01-19	54.4	356.0	1173.0	0.30	0.4970	0.0280	0.0346	0.0006	0.1032	0.0052	404.0	18.0	219.0	4.0	1578.0	89.0	41
MC01-20	17.6	345.0	371.0	0.93	0.2710	0.0190	0.0388	0.0020	0.0502	0.0038	243.0	15.0	245.0	12.0	190.0	170.0	99
MC01-21	24.9	313.1	495.6	0.63	0.2720	0.0170	0.0378	0.0008	0.0514	0.0032	243.0	13.0	239.1	5.2	230.0	130.0	98
MC01-22	7.4	99.3	142.3	0.70	0.2680	0.0270	0.0388	0.0013	0.0492	0.0044	239.0	22.0	245.5	8.4	140.0	190.0	97
MC01-23	19.3	349.0	392.0	0.89	0.2900	0.0210	0.0388	0.0012	0.0533	0.0039	258.0	17.0	245.6	7.3	300.0	160.0	95
MC01-24	10.0	109.7	209.9	0.52	0.2670	0.0160	0.0390	0.0007	0.0485	0.0028	239.0	13.0	246.3	4.4	100.0	120.0	97
MC01-25	43.2	1055.0	946.0	1.12	0.2511	0.0088	0.0339	0.0007	0.0519	0.0014	227.3	7.2	214.9	4.3	269.0	63.0	94
MC01-26	26.3	347.2	531.0	0.65	0.2700	0.0150	0.0376	0.0007	0.0505	0.0026	242.0	12.0	238.2	4.6	190.0	110.0	98
MC01-27	10.0	218.7	194.5	1.12	0.2870	0.0180	0.0361	0.0008	0.0559	0.0034	258.0	15.0	228.5	4.9	410.0	140.0	88
MC01-28	10.7	57.4	256.9	0.22	0.2730	0.0190	0.0380	0.0008	0.0506	0.0034	244.0	15.0	240.5	4.8	180.0	140.0	99
MC01-29	20.6	443.0	343.6	1.29	0.4070	0.0150	0.0381	0.0006	0.0748	0.0023	345.4	11.0	241.3	3.6	1027.0	65.0	65
MC01-30	20.9	124.0	493.0	0.25	0.2710	0.0140	0.0381	0.0007	0.0503	0.0024	243.0	11.0	241.2	4.2	190.0	100.0	99
MC01-31	11.0	101.0	242.4	0.42	0.2630	0.0190	0.0383	0.0008	0.0499	0.0033	235.0	15.0	242.4	5.2	150.0	140.0	97
MC01-32	16.8	430.0	307.0	1.40	0.2650	0.0170	0.0384	0.0009	0.0508	0.0034	238.0	13.0	243.2	5.4	200.0	140.0	98
MC01-33	12.6	77.6	288.0	0.27	0.2710	0.0220	0.0390	0.0009	0.0503	0.0038	242.0	18.0	246.9	5.7	180.0	160.0	98
MC01-34	118.6	2040.0	2300.0	0.89	0.2780	0.0120	0.0372	0.0012	0.0542	0.0016	249.1	9.8	235.1	7.3	374.0	65.0	94
MC01-35	11.2	90.7	292.0	0.31	0.2600	0.0360	0.0382	0.0016	0.0489	0.0057	234.0	29.0	241.5	10.0	130.0	250.0	97
MC01-36	19.7	189.1	396.0	0.48	0.3040	0.0210	0.0400	0.0010	0.0555	0.0042	269.0	16.0	252.6	6.0	390.0	160.0	94
MC01-37	12.4	82.9	313.9	0.26	0.2440	0.0160	0.0332	0.0014	0.0531	0.0035	222.0	13.0	210.7	9.0	310.0	140.0	95

凝灰岩的同位素测年结果为 $(241.2 \pm 0.8/-0.6)\text{Ma}$, 估算拉丁阶的底界年龄为 241 Ma。由于 *N.secedensis* 带略晚于 *E.curionii* 带 (Brack et al., 2005), 因此 Mundil 等 (1996) 估算的拉丁阶底界年龄 (241 Ma) 略晚于最新国际地层年代表 (2020 版) 界定的安尼阶-拉丁阶界线年龄 (242 Ma)。Wotzlav 等 (2018) 根据

新的高精度同位素测年并结合旋回地层学研究, 更精确地估算出该界线的年龄值为 241.464 Ma, 同样略晚于最新国际地层年代表 (2020 版) 界定的安尼阶-拉丁阶界线年龄 (242 Ma)。Liu 等 (2018) 在山西西部二马营组上段中部和铜川组二段底部 2 个锆石 U-Pb 年龄分别为 $(243.53 \pm 0.21)\text{Ma}$ 和 (241.48 ± 0.07)

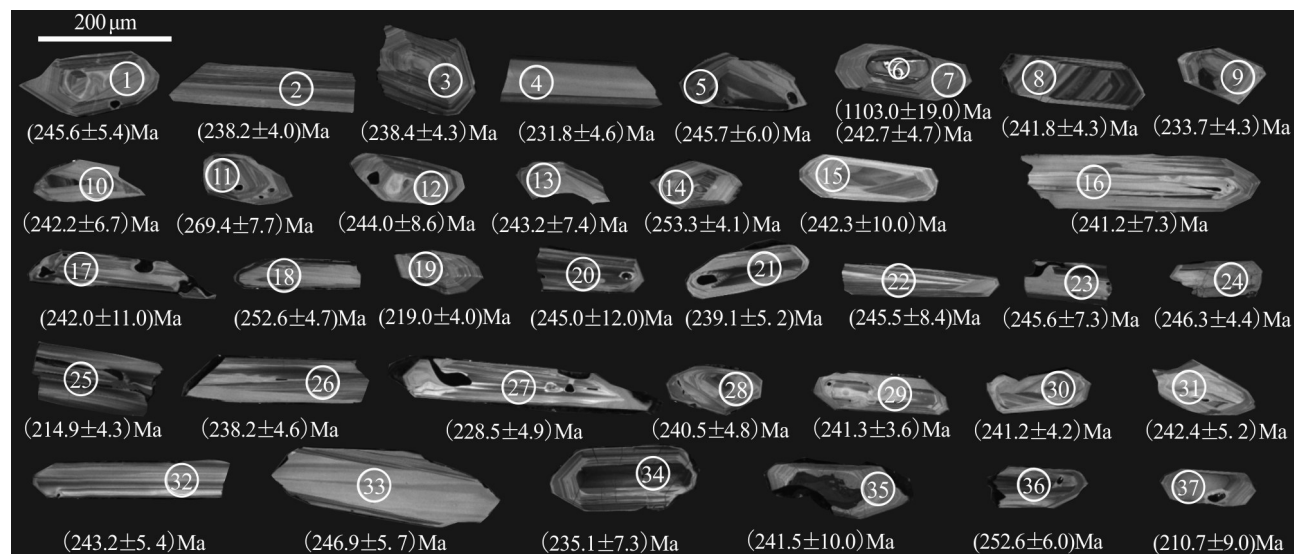


图 2 川南沐川地区雷口坡组下部凝灰岩锆石阴极发光图像

Fig.2 Zircon cathodoluminescence image of tuff from lower Leikoupo Formation in Muchuan area, southern Sichuan

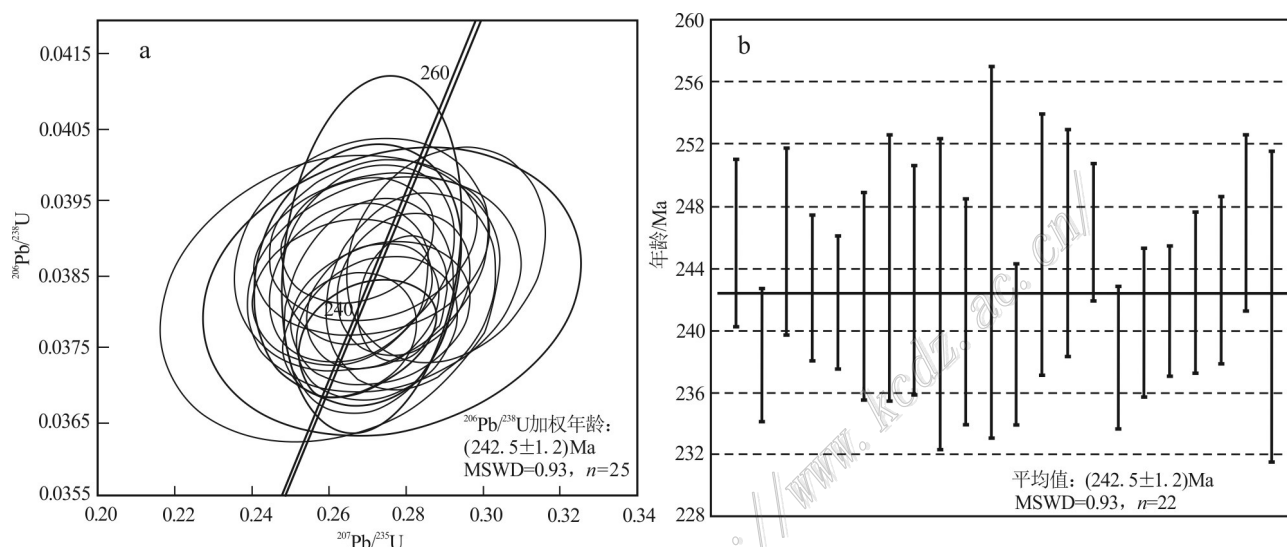


图 3 沐川地区雷口坡组下部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权年龄平均值(b)

Fig.3 Zircons U-Pb ages concordant diagram(a) and weighted average age(b) of tuff from lower Leikoupo Formation in Muchuan area

Ma,与意大利拉丁阶层型剖面地区同位素测年结果比较,这2个年龄值都很接近于拉丁阶的底界。四川广安市谢家湾村中三叠统雷口坡组剖面的凝灰岩样品获得的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (242.5 ± 0.7) Ma(马圣钊等,2019),此年龄值与最新国际地层年代表(2020版)界定的安尼阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma)较为接近。

本次获得雷口坡组下部(非底部)凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 (242.5 ± 1.2) Ma($\text{MSWD}=0.93, n=22$),虽

说其精度误差没有 TIMS 法高,这主要是由于分析方法不同所导致的,其年龄值与最新国际地层年代表(2020版)建议的安尼阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma)以及 Mundil 等(1996)获得的拉丁阶的底界年龄(241 Ma)和 Wotzlaw 等(2018)获得的拉丁阶的底界年龄(241.464 Ma)在误差范围内基本一致,显然雷口坡组下部为与安尼阶相近的地层,雷口坡组上部跨入拉丁阶,沐川地区雷口坡组沉积时代为中三叠世安尼期和拉丁期,与前人得到的雷口坡组底部凝

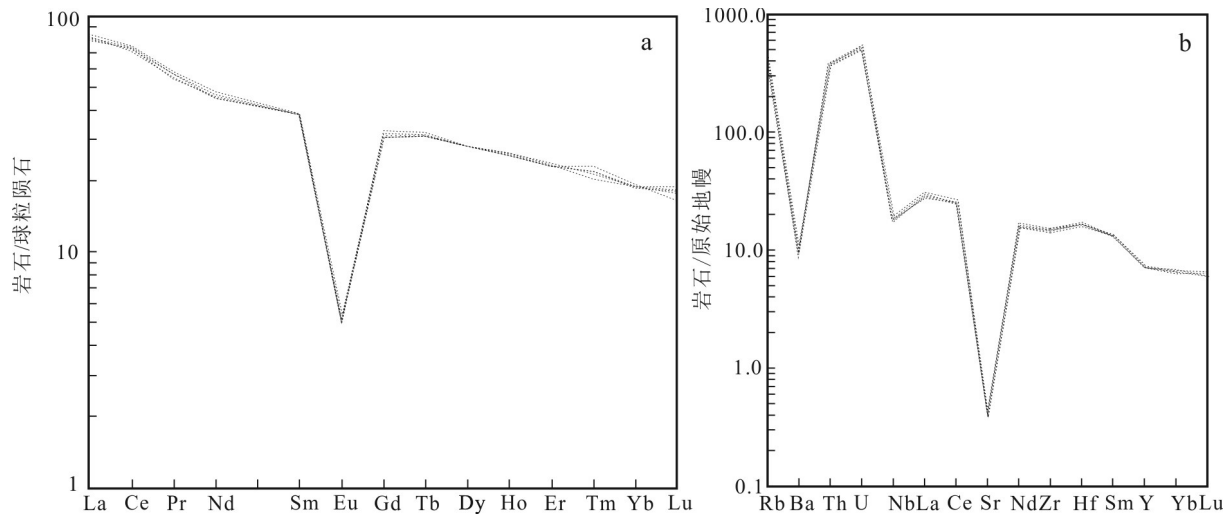


图4 沐川地区雷口坡组下部凝灰岩稀土配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

(稀土、微量元素标准化数值据 Sun et al.,1989)

Fig.4 REE distribution map(a) and trace element cobweb map(b) of tuff in the lower part of Leikoupo Formation in Muchuan area (standardized values of rare earth and trace elements after Sun et al.,1989)

灰岩为下三叠统奥伦尼克阶/中三叠统安尼阶(Olenekian-Anisian)界线的认识相一致。同时,沐川地区雷口坡组下部凝灰岩年龄的获得及该火山事件的识别,为研究中国三叠系划分方案、中三叠统安尼阶-拉丁阶界线的时代、区域地层对比,以及探索三叠纪生物复苏与辐射等热点进一步提供年代学依据。已有研究显示,在中三叠世 240 Ma 左右,哀牢山洋向东西两侧俯冲,在洋盆东侧的华南地块西缘发育火山弧和弧后盆地,随着洋壳的俯冲消减,洋盆于晚三叠世(230 Ma)最终关闭,导致陆-陆碰撞(Xu et al.,2019)。而本次在沐川地区雷口坡组下部发现凝灰岩并获得其年龄,进一步确定了晚二叠世末期到中三叠世拉丁期华南地块西南缘存在强烈的多期火山活动,其可能与华南西南缘陆块的裂解与汇聚有关。

4.2 中三叠统拉丁阶底界附近凝灰岩的成因

研究区凝灰岩具高硅、铝、镁、钾,低铁、钛,与中酸性岩浆岩的化学成分相似(路风香等,2012); $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值介于 0.014~0.018,均小于 0.02,表明凝灰岩属于酸性火山灰成因(陈好寿,1994);具有极明显负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.14\sim0.16$),也证实其为酸性火山喷发物(Liu et al.,2017)。在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2\text{-Nb}/\text{Y}$ 图解(图 5a)中,研究区拉丁阶底界附近凝灰岩样品及西南地区的 T_1/T_2 界线凝灰岩样品均落入英安岩区,表明研究区拉丁阶底界附近凝灰岩的形成可能与中酸

性岩浆作用有关。李宸等(2020)、刘建清等(2021)分别对峨眉山雷口坡组和盐津地区关岭组(与雷口坡组层位相当)凝灰岩进行研究发现,均具有长英质火山岩的特征,表明可能与中酸性岩浆活动有成因联系,均与本文的认识相符。

研究区位于华南板块西北部,中三叠统属于典型的海相碳酸盐岩台地环境,火山喷发物质在沉积成岩过程中其化学组分会发生变化,而 Nb、Ta、Zr、Hf、Th、Sc、REE 等化学活动性较弱,能够保存原始火山物质的化学成分特征,可作为凝灰岩物源属性的判别依据(Taylor et al.,1985)。在 Ti-Zr 图解(图 5b)中,研究区拉丁阶底界附近凝灰岩样品及西南地区的 T_1/T_2 界线凝灰岩样品全部落入长英质弧岩浆范围内。另外,样品的 REE 配分模式为右倾型,相对富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(Nb、Ta 等),具有明显的 Eu 负异常,表现出与大洋俯冲消减作用有关得到岛弧/陆缘弧火山岩相似的地球化学特征(Condie,1985;He et al.,2014)。综上所述,笔者认为拉丁阶底界附近凝灰岩的原岩应该是火山活动产生的中酸性火山物质。火山喷发的中酸性火山灰经过搬运后,在海相碳酸盐台地环境下沉积,在富镁的环境下水解风化形成黏土矿物,又在富钾的地下水作用下转变成以蒙脱石、水云母为主的黏土岩。

表 2 沐川地区雷口坡组下部凝灰岩主量元素($w(B)/\%$)和微量元素($w(B)/10^{-6}$)分析结果
 Table 2 Analysis results of major elements($w(B)/\%$) and trace elements($w(B)/10^{-6}$) in tuff of lower Leikoupo Formation in Muchuan area

组分	凝灰岩					组分	凝灰岩				
	HK01	HK02	HK03	HK04	HK05		HK01	HK02	HK03	HK04	HK05
SiO ₂	62.51	62.46	63.12	62.56	63.06	Y	32.7	31.9	32.1	32.5	32.4
TiO ₂	0.23	0.24	0.21	0.26	0.22	Tl	0.36	0.35	0.37	0.34	0.36
Al ₂ O ₃	14.90	15.23	14.80	14.63	14.91	Pb	4.40	4.50	4.30	4.40	4.60
TF ₂ O ₃	1.49	1.46	1.42	1.45	1.48	Bi	1.12	1.07	1.11	1.09	1.02
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Th	31.40	31.4	31.2	30.9	31.0
MgO	6.59	6.66	6.53	6.62	6.58	U	10.6	11.0	10.2	10.9	10.5
CaO	0.47	0.49	0.49	0.46	0.45	Nb	13.2	13.4	13.1	13.2	13.6
Na ₂ O	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	Ta	1.40	1.40	1.30	1.50	1.40
K ₂ O	7.80	7.94	7.86	7.93	7.80	Zr	172	157	169	159	170
P ₂ O ₅	0.19	0.20	0.18	0.21	0.20	Hf	5.20	5.00	5.30	4.90	5.10
烧失量	4.85	4.83	4.82	4.84	4.82	La	19.0	20.3	19.2	20.1	19.8
总量	99.07	99.55	99.46	99.01	99.56	Ce	44.0	46.1	44.5	45.9	46.2
Li	403	407	406	410	402	Pr	5.22	5.55	5.26	5.33	5.49
Be	4.03	3.85	4.01	3.92	4.01	Nd	20.9	22.3	20.8	21.5	22.1
Sc	3.20	3.30	3.20	3.30	3.10	Sm	5.82	5.93	5.86	5.91	5.87
V	5.00	5.00	6.00	4.00	5.00	Eu	0.29	0.31	0.29	0.32	0.30
Cr	3.00	<1.00	2.00	3.00	<1.00	Gd	6.31	6.73	6.71	6.52	6.49
Co	0.90	0.70	0.80	0.90	0.70	Tb	1.17	1.18	1.16	1.15	1.20
Ni	1.10	1.10	1.20	1.00	1.10	Dy	7.06	7.08	7.10	7.02	7.09
Cu	3.00	3.00	3.20	3.10	3.00	Ho	1.45	1.48	1.43	1.49	1.51
Zn	34.0	30.0	32.0	30.0	35.0	Er	3.81	3.91	3.85	3.96	3.88
Ga	21.3	21.2	21.0	21.5	21.1	Tm	0.55	0.56	0.54	0.59	0.52
Rb	257	260	258	260	259	Yb	3.20	3.27	3.22	3.29	3.19
Sr	8.90	8.90	8.80	9.00	8.70	Lu	0.46	0.45	0.48	0.42	0.45
Mo	1.95	1.75	1.84	1.95	1.80	ΣREE	119.24	125.15	120.40	123.5	124.09
Cd	0.06	0.09	0.08	0.07	0.06	LREE	95.23	100.49	95.91	99.06	99.76
In	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	HREE	24.01	24.66	24.49	24.44	24.33
Sb	0.41	0.39	0.40	0.42	0.39	LREE/HREE	3.97	4.08	3.92	4.05	4.10
Cs	10.0	10.2	10.1	10.3	10.2	La _N /Yb _N	4.26	4.45	4.28	4.38	4.45
Ba	74.9	61.1	70.6	71.3	65.9	δEu	0.15	0.15	0.14	0.16	0.15
W	3.90	4.00	3.80	4.10	3.70	δCe	1.08	1.06	1.09	1.09	1.09

注:比例单位为1。

4.3 火山活动对中三叠纪生物复苏及中国安尼阶-拉丁阶界线层型剖面选择的影响

二叠纪—三叠纪之交的全球性生物灭绝事件(PTB生物灭绝事件)导致了90%以上海洋生物和70%的陆生脊椎动物及大多数植物属种灭绝(Stanley et al.,1994),直到中三叠世全球生态系统才得以复苏(Hu et al.,2011)。生物灭绝事件从晚二叠世

(260 Ma)延续到了中三叠世初期(247 Ma),持续时间达13 Ma(殷鸿福等,2013)。已有研究表明,中三叠世安尼期是PTB生物灭绝事件之后生物全面复苏与辐射的重要时期(Hu et al.,1994;黄金元等,2010),生物系统经历了5~7 Ma之久才实现了完全复苏(童金南等,2009;周长勇等,2017),这正好是生物迟滞复苏的表现(童金南等,2005)。探索三叠纪生物迟

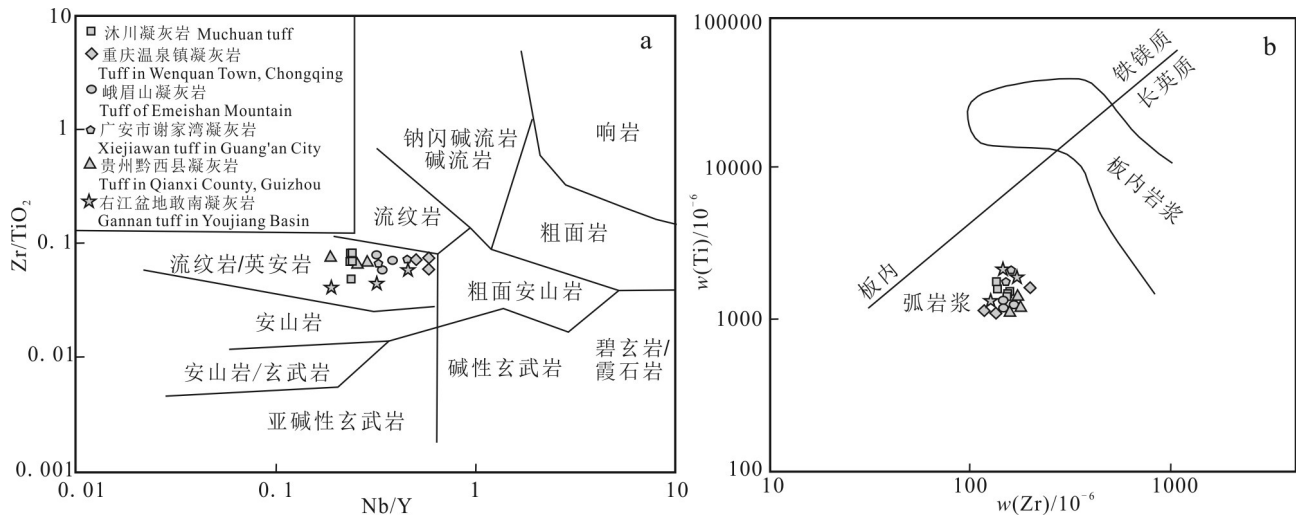


图5 沐川地区雷口坡组下部凝灰岩 Zr/TiO_2 -Nb/Y 图解(a, 据 Winchester et al., 1977)和 Zr-Ti 图解(b, 据 Pearce, 1982)

重庆温泉镇及四川广安市谢家湾凝灰岩数据来自马圣钞等, 2019; 贵州黔西县凝灰岩数据来自王宁祖等, 2019;

右江盆地敢南凝灰岩数据来自向坤鹏等, 2019

Fig.5 The Zr/TiO_2 -Nb/Y diagram(a, after Winchester et al., 1977) and Zr-Ti diagram(b, after Pearce, 1982) of claystone samples from the lower part of the Leikoupo Formation in the Muchuan area

data of Wenquan town tuff in Chongqing and Xiejiawan tuff in Guang'an City, Sichuan after Ma et al., 2019;

data of Qianxi County tuff in Guizhou Province after Wang et al., 2019; data of Gannan tuff in Youjiang Basin after Xiang et al., 2019

滞复苏的原因一直是国际地学界的研究热点。近年大量研究资料表明,多期次的火山活动因岩浆脱气作用释放出 CO_2 、 SO_2 等气体 (Self et al., 2006)、岩浆与富含有机质沉积岩或油气发生接触热变质作用产生 CO_2 、 CH_4 等气体 (Svensen et al., 2004)、火山灰 (Robock, 2000) 及火山作用引发的黑炭事件 (Shen et al., 2011) 等加剧了全球气候及生态环境恶化。PTB 生物灭绝后,中三叠世一晚三叠世生态环境普遍出现间歇性环境恶化事件 (Tong et al., 2007) 和生物群迟滞复苏及不连续性演化现象 (Payne et al., 2004),该时期被称为突变期 (童金南等, 2014),可能与多期次火山活动存在某种特殊的联系 (任光明等, 2019)。火山活动形成火山-沉积地层时,可能会导致气候及生态环境恶化,进而使生物演化变得缓慢甚至灭绝。中三叠世安尼期是生态系统得到全面复苏与辐射的时期,罗平生物群是三叠纪生物全面复苏与辐射的标志性生物群,它是以食物链顶端的海洋爬行动物为主而重建的正常海洋生态系统 (Hu et al., 2011; 张杰等, 2018)。国际地层委员会三叠系分会 (STS) 将拉丁阶的底界层型选定为意大利阿尔卑斯地区的 Bagolino 剖面,以菊石 *Eoprotrochyceras curionii* 的 FAD 为标志,辅助标志牙形石是 *Budurovig-*

nathus praehungaricus, 但这些菊石和牙形石在中国至今都还未发现 (童金南等, 2005)。这是否与安尼期末期或拉丁阶初期的火山活动导致的环境恶化有关? 本次在沐川地区雷口坡组下部发现了喷发时代为 $(242.5 \pm 1.2) Ma$ 的凝灰岩,另外在四川广安市谢家湾村中三叠统雷口坡组也同样存在喷发时代为 $(242.5 \pm 0.7) Ma$ 的凝灰岩 (马圣钞等, 2019),证实了四川地区安尼期-拉丁期交替时期又发生了火山活动。安尼期-拉丁期交替时期发生的火山活动可能影响了生物的演化,甚至导致了部分生物死亡绝灭,故而难以寻找到标志化石划分中国中三叠统安尼阶-拉丁阶界线,但也有可能在受火山活动影响较小的和平区域可以寻找到标志化石,建议加深对中三叠世火山活动的研究,为中国三叠系划分方案、中三叠世地层划分对比及探索三叠纪生物演化-复苏等提供资料。

5 结 论

(1) 获得沐川地区中三叠统安尼阶拉-丁阶界线年龄为 $(242.5 \pm 1.2) Ma$ (MSWD=0.93, $n=22$),在误差范围内与最新国际地层年代表 (2020 版) 建议的安尼

阶-拉丁阶界线年龄(242 Ma)完全吻合,说明雷口坡组下部为与安尼阶相近的地层,雷口坡组上部跨入拉丁阶,沐川地区雷口坡组沉积时代为中三叠世安尼期和拉丁期,与前人得到的雷口坡组底部凝灰岩为下三叠统奥伦尼克阶/中三叠统安尼阶(Olenekian-Anisian)界线的认识相一致,为研究中国三叠系划分方案、中三叠世地层划分对比进一步提供年代学依据。

(2) 沐川地区中三叠统安尼阶-拉丁阶界线附近的凝灰岩显示出明显富 K_2O 、 MgO ,明显负锶异常的特征,其物源可能来自古特提斯洋俯冲作用形成的大陆岩浆弧。多期次的火山活动可能是导致早-中三叠世生态环境间歇性恶化和生物迟滞复苏的重要原因,安尼期-拉丁期交替时期发生的火山活动可能影响了生物的演化,故而难以寻找到标志化石划分中国中三叠统安尼阶-拉丁阶界线,加深对中三叠世火山活动的研究,可为中国三叠系划分方案、中三叠世地层划分对比及探索三叠纪生物演化-复苏等提供资料。

致谢 衷心感谢审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见。

References

- Brack P, Rieber H, Nicora A and Mundil R. 2005. The global boundary stratotype section and point (GSSP) of the Ladinian stage (Middle Triassic) at Bagolino (Southern Alps, Northern Italy) and its implications for the Triassic time scale[J]. *Episodes*, 28(4):233-244.
- Chen H S. 1994. Isotopic geochemistry research[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. 330-333 (in Chinese).
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. *The Journal of Geology*, 94(6):845-864.
- He B, Zhong Y T, Xu Y G and Li X H. 2014. Triggers of Permo-Triassic boundary mass extinction in South China: The Siberian traps or paleo-Tethys ignimbrite flare-up[J]. *Lithos*, 204:258-267.
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4):481-492 (in Chinese with English abstract).
- Hu S X, Zhang Q Y, Chen Z Q, Zhou C Y, Lv T, Xie T, Wen W, Huang J Y and Benton M J. 2011. The Luoping biota: Exceptional preservation, and new evidence on the Triassic recovery from end-Permian mass extinction[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 278(1716):2274-2283.
- Huang H Y, He D F, Li Y Q and Fan H D. 2002. Determination and formation mechanism of the Luzhou paleo-uplift in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1):102-120 (in Chinese with English abstract).
- Huang J Y, Zhang K X, Zhang Q Y, Lü T, Zhou C Y and Hu S X. 2010. Discovery of Middle Triassic conodont clusters from Luoping Fauna, Yunnan Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 35(4):512-514 (in Chinese with English abstract).
- Keeble E, Whiteside D and Benton M J. 2018. The terrestrial fauna of the Late Triassic pant-y-ffynnon Quarry fissures, South Wales, UK and a new species of *Clevosaurus* (Lepidosauria: Rhynchocephalia)[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 129(2):99-119.
- Lehrmann D J, Ramezani J, Bowring S A, Martin M W, Montgomery P, Enos P, Payne J L, Orchard M J, Wang H M and Wei J Y. 2006. Timing of recovery from the end-Permian extinction: Geochronologic and biostratigraphic constraints from south China[J]. *Geology*, 34(12):1053-1056.
- Li C, Lang X H, Deng Y L, Wang X H, Li Z and Yang Z Y. 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[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(4):810-825 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Ramezani J, Li L, Shang Q H, Xu G H, Wang Y Y and Yang J S. 2018. High-precision temporal calibration of Middle Triassic vertebrate biostratigraphy: U-Pb zircon constraints for the Sinokanemeyeria Fauna and Yonghesuchus[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 56(1):16-24.
- Liu Y and Hou Z Q. 2017. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonate-syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning-Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137:35-79.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K and Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2):537-571.
- Lu F X and Sang L K. 2012. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House. 43-53 (in Chinese).
- Luo M, Hu S X, Benton M J, Shi G R, Zhao L S, Huang J Y, Song H J, Wen W, Zhang Q Y, Fang Y H, Huang Y G and Chen Z Q. 2017. Taphonomy and palaeobiology of Early Middle Triassic coprolites from the Luoping biota, southwest China: Implications for reconstruction of fossil food webs[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474:232-246.
- Ma S C, Wang D H, Sun Y, Li C and Zhong H R. 2019. Geochronology and Geochemical Characteristics of lower-middle triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium de-

- posi[J]. *Earth Science*, 44(2):427-440 (in Chinese with English abstract).
- Martin M W, Bowring S A and Enos S A. 2001. Timing of Lower Triassic carbonate bank buildup and biotic recovery following the End-Permian extinction across the Nanpangjiang Basin, South China[J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 33:201.
- Mundil R, Brack P, Meier M, Rieber H and Oberli F. 1996. High resolution U-Pb dating of Middle Triassic volcanics: Time-scale calibration and verification of tuning parameters for carbonate sedimentation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 141(1-4): 137-151.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson J M, Corfu F, Drr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A and Reiners P W. 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3):247-265.
- Ovtcharova M, Bucher H, Schaltegger U, Galfetti T, Brayard A and Guex J. 2006. New Early to Middle Triassic U-Pb ages from South China: Calibration with ammonoid biochronozones and implications for the timing of the Triassic biotic recovery[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3-4):463-475.
- Payne J L, Lehmann D J, Wei J, Wei J Y, Orchard M J, Schrag D P and Knoll A H. 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction[J]. *Science*, 305: 506-509.
- Pearce J. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, andesites: Orogenic andesites and related rocks[M]. Chichester: Wiley. 525-548.
- Ren G M, Zhu T X, Pang W H, Wang L Q, Jin C H, Lu J Y, Wen J, Zhang P and Zhou Y. 2019. Zircon U-Pb dating for the Olenekian-Anisian boundary in northwestern Guizhou Province and adjacent area, and its implications for biological recovery[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):2770-2784 (in Chinese with English abstract).
- Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 38:191-219.
- Self S, Widdowson M, Thordarson T and Jay A E. 2006. Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2):518-532.
- Shen W J, Sun Y G, Lin Y T, Liu D H and Chai P X. 2011. Evidence for wildfire in the Meishan section and implications for Permian Triassic events[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(7): 1992-2006.
- Stanley S M and Yang X N. 1994. A double mass extinction at the end of the Paleozoic Era[J]. *Science*, 266:1340-1344.
- Sun S S and McDonough W S. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 42(1):313-345.
- Sun Y, Gao Y, Wang D H, Dai H Z, Gu W S, Li J and Zhang L H. 2017. Zircon U-Pb dating of 'Mung Bean Rock' in the Tongliang area, Chongqing and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6):649-658 (in Chinese with English abstract).
- Svensen H, Planke S, Mørth-Jensen A, Jamveit B, Myklebust R, Eidem T R and Rey S S. 2004. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming[J]. *Nature*, 429:542-545.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 94(4):57-72.
- Tong J N, Zhang S X, Zuo J X and Xiong X Q. 2007. Events during Early Triassic recovery from the End-Permian extinction[J]. *Global and Planetary Change*, 55(1):66-80.
- Tong J N and Wang D H. 2005. Triassic chronostratigraphy and biotic recovery[J]. *Advances in Earth Science*, 20(12):1321-1326 (in Chinese with English abstract).
- Tong J N and Yin H F. 2009. Advance in the study of Early Triassic life and environment[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3):497-508 (in Chinese with English abstract).
- Tong J N, Huang Y F and Liang L. 2014. Early Triassic biological-environmental-chronological stratigraphy[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2):144-156 (in Chinese with English abstract).
- Tong J N, Chu D L, Liang L, Shu W C, Song H J, Song T, Song H Y and Wu Y Y. 2019. Triassic integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 49(1): 194-226 (in Chinese with English abstract).
- Wang N Z, Zhang X W, He B, Zhao F, Jin C H and Ren G M. 2019. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mung bean rocks of the Middle Triassic Guanling Formation in Dazhai area of Qianxi County, Guizhou Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(1):82-91 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z C. 2002. Structural sequence and natural gas exploration in Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Press. 1-287 (in Chinese).
- Wen J, Liu Z C, Zhao J X, Zhu H L, Zhang H F, Zhang J Y, Chen D F, Zhong H R, Guo W Y, You X J, Zhao W, Ling M Q, Li P C and He Y G. 2022. Enrichment regularity, sedimentary environment and metallogenic model of niobium-rare earth polymetallic enrichment layer in bottom of Xuanwei Formation in Muchuan area, South Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2):592-615 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20(4):325-343.
- Wotzlaw J F, Brack P and Storck J C. 2018. High-resolution stratigraphy and zircon U-Pb geochronology of the Middle Triassic Buchenstein Formation (Dolomites, northern Italy): Precession-forcing of hemipelagic carbonate sedimentation and calibration of the Anisian-Ladinian boundary interval[J]. *Journal of the Geological Society*, 175(1):71-85.
- Xiang K P, An Y Y, He Y Z, Zhao L, Yi C X, Liu K Y, Zhang H S, Huang Y, Pan Y J and Deng X J. 2019. Provenance of the volcanic ash in the bottom of Middle Triassic, southwest margin of the South China plate: A case study of the tuff in Gannan region, Zhe-

- bao, Youjiang basin[J]. Geological Review, 6(2):319-334(in Chinese with English abstract).
- Xie T, Zhou C Y, Zhang Q Y, Hu S X, Huang J Y, Wen W and Cong F. 2013. Zircon U-Pb age for the tuff before the Luoping Biota and its geological implication[J]. Geological Review, 59(1):159-164 (in Chinese with English abstract).
- Xu J, Xia X, Lai C, Long X and Huang C. 2019. When did the Paleotethys Ailaoshan Ocean close: New insights from detrital zircon U-Pb age and Hf isotopes[J]. Tectonics, 38(5):1798-1823.
- Yin H F, Zhang K X, Tong J N, Yang Z Y and Wu S B. 2001. The global stratotype section and point(GSSP) of the Permian-Triassic boundary[J]. Episodes, 24(2):102-114.
- Yin H F and Song H J. 2013. Mass extinction and Pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition[J]. Science in China Series: Earth Sciences, 43(10):1539-1552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Chen L, Shi J B, Jin C H and Ren G M. 2018. Reptile trace fossils found in Middle Triassic Guanling Formation of northeast Yunnan area[J]. Geological Bulletin of China, 37(10):1798-1800 (in Chinese with English abstract).
- Zheng L D, Yao J X, Tong Y B, Song B, Wang L T and Yang Z Y. 2010. Zircon U-Pb dating for the Boundary of Olenekian-Anisian at Wangmo, Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sinica, 84(8):1112-1117(in Chinese with English abstract).
- Zhou C Y, Zhang Q Y, Huang J Y, Hu S X, Wen W and Xie T. 2017. The first discovery of marine reptile fossils from the Early Triassic of the Nanpanjiang Basin[J]. Geological Bulletin of China, Geological Bulletin of China, 36(1):168-171(in Chinese with English abstract).
- 路凤香, 桑隆康. 2012. 岩石学[M]. 北京:地质出版社. 43-53.
- 马圣钊, 王登红, 孙艳, 李超, 钟海仁. 2019. 中国西南部 T₁/T₂ 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义[J]. 地球科学, 44(2):427-440.
- 任光明, 朱同兴, 庞维华, 王立全, 金灿海, 卢君勇, 文俊, 张鹏, 周洋. 2019. 黔西北及邻区安尼阶底界锆石 U-Pb 定年及对生物复苏的启示[J]. 地质学报, 93(11):2770-2784.
- 孙艳, 高允, 王登红, 代鸿章, 顾文帅, 李建, 张丽红. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩矿测试, 36(6):649-658.
- 童金南, 王德珏. 2005. 三叠纪年代地层与生物复苏[J]. 地球科学进展, 20(12):1321-1326.
- 童金南, 殷鸿福. 2009. 早三叠世生物与环境研究进展[J]. 古生物学报, 48(3):497-508.
- 童金南, 黄云飞, 梁蕾. 2014. 早三叠世生物-环境-年代地层研究[J]. 地质学前沿, 21(2):144-156.
- 童金南, 楚道亮, 梁蕾, 舒文超, 宋海军, 宋婷, 宋虎跃, 吴玉祥. 2019. 中国三叠纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学:地球科学, 49(1):194-226.
- 汪洋成. 2002. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京:地质出版社. 1-287.
- 王宁祖, 张向文, 何碧, 赵飞, 金灿海, 任光明. 2019. 贵州省黔西县大寨地区中三叠统关岭组绿豆岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 39(1):82-91.
- 文俊, 刘治成, 赵俊兴, 竹合林, 张航飞, 张金元, 陈东方, 钟海仁, 郭文彦, 游学军, 赵伟, 凌茂前, 李鹏程, 何永刚. 2022. 川南沐川地区宣威组底部铈-稀土多金属富集层富集规律、沉积环境与成矿模式[J]. 地质学报, 96(2):592-615.
- 向坤鹏, 安亚运, 贺永忠, 赵磊, 易成兴, 刘奎勇, 张厚松, 黄勇盘, 应娟, 邓小杰. 2019. 华南板块西南缘中三叠统底部火山灰来源:以右江盆地者堡敢南一带凝灰岩为例[J]. 地质论评, 6(2):319-334.
- 谢韬, 周长勇, 张启跃, 胡世学, 黄金元, 文斌, 丛峰. 2013. 罗平生物群下部凝灰岩锆石年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 59(1):159-164.
- 殷鸿福, 宋海军. 2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合[J]. 中国科学:地球科学, 43(10):1539-1552.
- 张杰, 陈琳, 史俊波, 金灿海, 任光明. 2018. 滇东北地区中三叠统关岭组中发现爬行类足迹化石[J]. 地质通报, 37(10):1798-1800.
- 郑连弟, 姚建新, 全亚博, 宋彪, 王立亭, 杨振宇. 2010. 贵州南部地区安尼阶底界锆石 SHRIMP 年龄结果[J]. 地质学报, 84(8):1112-1117.
- 周长勇, 张启跃, 黄金元, 胡世学, 文斌, 谢涛. 2017. 南盘江盆地首次发现早三叠世海生爬行动物化石[J]. 地质通报, 36(1):168-171.

附中文参考文献

- 陈好寿. 1994. 同位素地球化学研究[M]. 杭州:浙江大学出版社. 330-333.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4):481-492.
- 黄涵宇, 何登发, 李英强, 范慧达. 2002. 四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制[J]. 地质学前沿, 26(1):102-120.
- 黄金元, 张克信, 张启跃, 吕涛, 周长勇, 胡世学. 2010. 云南中三叠世罗平生物群中首次发现牙形石齿串[J]. 地球科学中国地质大学学报, 35(4):512-514.
- 李宸, 郎兴海, 邓煜霖, 王旭辉, 李壮, 杨宗耀. 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[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(4):810-825.