

黔西北普宜地区下三叠统嘉陵江组沉凝灰岩 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、 微量元素特征及其地质意义

缪宇¹⁾, 吴亮¹⁾, 肖长源¹⁾, 李锁明¹⁾, 李致伟¹⁾, 宋文婷²⁾, 田瑜峰¹⁾

1) 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明, 650001; 2) 云南工商学院, 昆明, 650001

拟刊于
V. 67
No. 2

内容提要:早三叠世时期频繁的火山事件是导致全球性气候和海洋环境异常的主要原因,前人对早三叠世重要界线时期的火山事件地层开展了大量研究,但对典型界线时期以外的其他火山事件地层却鲜有报道。本文以上扬子西南普宜地区嘉陵江组两件沉凝灰岩为研究对象开展了岩石学、岩相学、锆石年代学及微量元素组合特征等方面的研究。沉凝灰岩样品具有典型岩浆锆石的内部结构和微量元素组合特征,两组沉凝灰岩锆石谐和年龄分别为 250.6 ± 0.6 Ma 和 249.1 ± 0.8 Ma,代表了母岩岩浆中新生锆石的结晶年龄。沉凝灰岩母岩主要以酸性花岗岩类为主,次为中性正长岩类和少量基性岩类。嘉陵江组沉凝灰岩与二叠系—三叠系界线(PTB)凝灰岩及 Olenekian—Anisian 界线(OAB)绿豆岩具有同源性,形成于活动大陆边缘的碰撞造山环境,源区很可能位于中越边境地区长山构造岩浆带—十万大山火山带,且在陆壳碰撞过程中源区地壳处于持续的增厚阶段,下地壳增厚部位的部分熔融形成补给岩浆上涌并使早期结晶矿物发生了部分熔蚀。本文嘉陵江组沉凝灰岩样品 250.6 ± 0.6 Ma 年龄对应着 Smithian—Spathian 界线时期的全球性降温及短期生物复苏事件; 249.1 ± 0.8 Ma 年龄的样品对应 Spathian 亚阶中期极端高温气候和生物再次灭绝事件,再次证明了早三叠世时期频繁的火山活动是导致气候改变和生物周而复始新生和灭绝的重要因素。其原因可能是阳伞效应和温室效应等因素综合反馈的结果,但具体证据仍需要将来更多学科综合研究成果的约束。

关键词:嘉陵江组;沉凝灰岩;锆石 U-Pb 年代学;锆石微量元素;生物迟缓复苏

扬子陆块西南位于滇、黔、桂三省交界处,属扬子陆块南部被动边缘构造带。早—中三叠世时期,由于古特提斯洋未完全闭合,上扬子西南缘发育稳定的被动大陆边缘沉积盆地(吴应林等,1995;陈沈强等,2017),在此沉积盆地中广泛沉积了以碳酸盐岩为主的下一中三叠统地层(张英利等,2016),中三叠统底部处常发育有黄绿色含豆粒的富锂玻屑沉凝灰岩(绿豆岩)层(赵飞等,2019)。该绿豆岩层作为印支期火山事件黏土层通常被用作划分下一中三叠统的界线地层,同时其也是划分 Olenekian(奥伦尼克阶)—Anisian(安妮阶)界线(OAB)的重要等时标志层(管东东等,2017;谭梅等,2016;孙艳等,2017))。

近年来随着同位素测年技术的进步,OAB 界线

年龄也在不断刷新并逐渐趋于其真实年龄。早期年代学研究中认为早三叠世跨度较大,OAB 界线年龄也主要集中于 $230\sim240$ Ma 范围(胡世玲等,1996;王彦斌等,2004)。多重地层学证据表明:晚二叠世末期生物大灭绝事件至中三叠世 Anisian(安妮阶)已全面复苏(Lehrmann et al., 2003; Payne et al., 2006; Tong Jinnan et al., 2007),加之二叠纪—三叠纪年代界线(PTB)已限定在 252 Ma 附近(Mundil et al., 2004),因此生物的全面复苏则至少需要 12 Ma 以上,这显然不符合生物复苏间期一般少于的 2 Ma 规律(Erwin, 1998)。近年来报道的年代学数据已趋于 247 Ma 附近(郑连弟等,2010;黄虎等,2012;王宁祖等,2019),同时根据 Lehrmann 等(2006)对贵州刀山剖面 OAB 界线沉凝灰岩锆石 U-Pb TIMS 高精

注:本文为中国地质调查局基础性公益性综合地质调查项目“乌蒙山岩溶山区昭通—毕节区域地质调查”(编号:DD20191012)的成果。

收稿日期:2020-07-13;改回日期:2020-12-04;网络首发:2021-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.*.*

作者简介:缪宇,男,1988 年生,2017 年毕业于中国地质大学(北京),获硕士学位,工程师,主要从事资源勘查、区域地质研究工作;Email: 361583884@qq.com。

度测量结果,国际地层表(2017、2020)也将 OAB 界线年龄更新至 247.2 Ma,晚二叠世末期生物大灭绝至复苏间期也限定在 6 Ma 左右。相较于生物复苏的正常规律该复苏间期远长于其他时期的生物复苏(谢韬等,2013;Erwin, 1998),说明在早三叠世时期必定存在间歇性的环境恶化事件造成了生物类群周而复始的新生和灭绝(Galfetti et al., 2007a, 2007b),从而导致该时期海洋生态系统的多次延迟重建。

同位素研究表明早三叠世时期上扬子西南具有频繁的火山活动(梁金城等,2001; Payne et al., 2006),这一系列火山活动构成了间歇性环境恶化事件的重要因素之一(梁丹等,2011; Sun Yadong et al., 2012; 谢韬等,2013)。虽然前人对 OAB 界线绿豆岩开展了大量研究,但该界线黏土层仅代表了其中一次具有区域代表性的火山活动(向坤鹏等,2019; 王宁祖等,2019)和 Olenekian 晚期的一次海洋缺氧事件(Takahashi et al., 2009),而早三叠世其他时期的火山事件却鲜有报道。因此,本文获得黔西北普宜地区嘉陵江组地层中沉凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及微量元素数据,旨在对早三叠世生物的迟缓复苏过程中重要火山事件年代学及其源区背景进行约束,结合前人研究成果,为早三叠世时期扬子西南缘火山作用过程及海洋生态系统的多次延迟重建提供重要依据。

1 区域地质背景

研究区属上扬子陆块(IV-4-1)南部被动边缘构造带,位于黔北隆起区(IV-4-1-3)之毕节弧形褶皱带IV-4-1-3(2)中部(图 1b, 据王宁祖等,2019)。区内未发现岩浆岩出露,构造以古生代北东—南西向断裂和褶皱为主,仅局部发育有中生代以来的断裂(图 1a)。

区内出露地层除缺失泥盆系—石炭系和白垩系沉积外,从古生界—中生界均有分布(图 1a)。其中分布最广的为寒武系,次为三叠系。三叠系多呈北东—南西向带状对称分布于盆地两翼,表现为稳定沉积的特征,后期受构造影响程度较低。根据沉积特征、岩性组合、生物面貌及接触关系等依据,区内三叠系自下而上可分为:下三叠统夜郎组(T_1y)和嘉陵江组(T_1j)、中三叠统关岭组(T_2g)及 T—J 之交的二桥组(T_3e);上三叠统地层因印支运动造成的地壳抬升而部分缺失(张衡等,2019),因而关岭组(T_2gl)与二桥组(T_3e)地层多以平行不整合的形式接触。

2 地层特征及样品描述

前人对扬子西南地区下—中三叠统地层沉积古地理研究显示:早—中三叠世期间扬子西南缘整体为一套未完全闭合的古特提斯洋阶段的被动大陆边缘沉积(韦一等,2014; 朱民等,2016; 陈沈强等,2017),以局限台地相及浅海陆棚相沉积为主(朱忠发等,1986)。普宜地区嘉陵江组(T_1j)地层与其下伏夜郎组(T_1y)地层、上覆关岭组(T_2g)地层均为整合接触关系,为一套早三叠世奥伦尼克阶台地相碳酸盐岩为主的地层。向斜两翼嘉陵江组地层岩性呈对称重复出现,地层据岩性差异由下至上细分为四段(图 2),第一段(T_1j^1)岩性以亮晶灰岩、泥晶灰岩夹鲕粒灰岩及纹层状灰岩为主;第二段(T_1j^2)岩性以泥岩、泥质粉砂岩等陆源碎屑岩为主,局部发育黏土岩及溶塌角砾状白云岩(图 3a),可见水平层理和少量双壳类化石;第三段(T_1j^3)岩性以致密块状灰岩夹少量碎屑岩为主;第四段(T_1j^4)岩性为微晶至泥晶白云岩为主,局部夹黏土岩和含碳质白云岩(图 3b)。

本次分析测试样品分别取自研究区北部向斜两翼 PM002、PM006 剖面嘉陵江组二段及四段下部沉凝灰岩(图 1、2),并依次编号为 PM002-2rz、PM006-33rz。样品 PM002-2rz 为一套浅黄绿色水白云母化沉凝灰岩(图 3c),其物理和化学性质与中三叠统关岭组底部绿豆岩相似(朱立军,1994; 赵飞等,2019),具有中酸性凝灰岩在海水作用下搬运分解后沉积的特征。镜下岩相学特征显示:岩石主要由残余晶屑(约 10%)和泥质火山碎屑(约 90%)组成,其中晶屑以他行粒状石英(Q)、长石(Fs)为主,具明显的熔蚀港湾状碎屑边缘(图 3e),局部含少量火山岩屑(VRF)、氧化铁质(FeO);泥质火山碎屑颗粒细小,多呈弯曲蠕虫状、鳞片状集合体,主要为伊利石亚族黏土矿物,多为水白云母(Hm);含少量铁质及氧化铁质(FeO)。样品 PM006-33rz 为一套灰白色黏土化沉凝灰岩(图 3d),岩石主要由颗粒细小的隐晶状火山碎屑组成(>90%),凝灰结构,成分主要为火山灰、火山玻璃,见少量晶屑。晶屑主要为石英(Q)、少量为长石(Fs)及火山岩屑(VRF),局部发育有石英及长石细脉(图 3f);火山灰及火山玻璃多发生脱玻化、黏土化等作用,析出较多铁质、并氧化为褐色氧化铁质(FeO)。

3 分析方法

野外共采集到普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩样品

两件($>10\text{kg}$)，采样过程中避免了相邻层位和外来物质的污染，样品真实可靠。锆石挑选、制靶、锆石阴极发光(CL)镜下显微结构照片观察、U-Pb年代学及微量元素分析均由北京锆年领航科技有限公司完成。

将样品粉碎分选后，在镜下挑选出高纯度、形态完整且表面光滑的锆石制成环氧树脂样品靶，然后抛光至锆石中心，使锆石表面光滑，内部结构显露。然后对已经抛光好的样品靶进行透/反射光和阴极

发光(CL)显微结构观察和照相，以检查锆石的内部结构的完整程度，以便在分析测试时合理避开破裂和包裹体的部位，并在此基础上选取合适的年龄测量部位。测试过程中，采用由法国 ESI 公司制造的 NWR193 型激光剥蚀系统进行锆石表面激光剥蚀，激光束斑直径分别为 $32/24\mu\text{m}$ ，频率为 5Hz ，共剥蚀 40s ；剥蚀气溶胶由氦气送至德国耶拿 ICP-MS 电感耦合等离子质谱仪并完成测试。采用 NIST610 标准物质对仪器进行误差校正，并采用标准锆石 91500

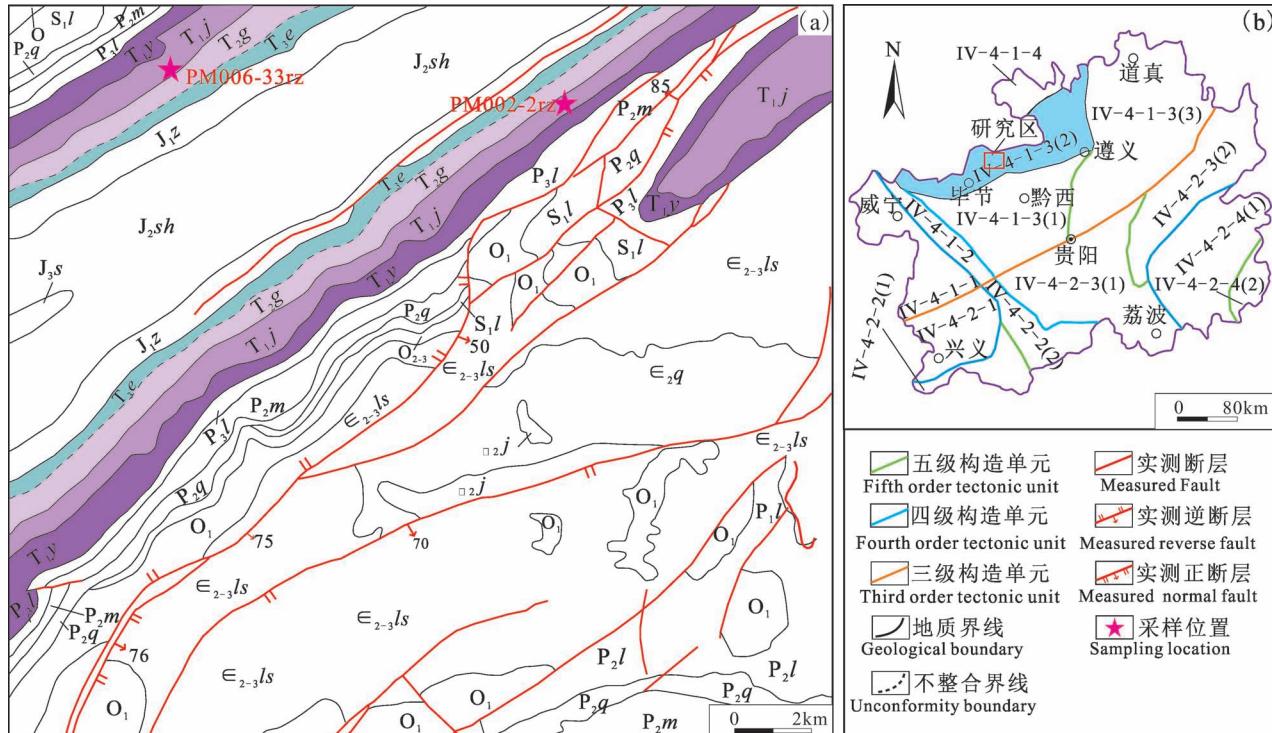


图 1 研究区地质简图(a)及构造纲要图(b,据王宁祖等,2019 修改)

Fig. 1 Geological map (a) and tectonic outline of the study area (b, modified after Wang Ningzu et al., 2019) (a) 地质图: J_3s —遂宁组; J_2sh —沙溪庙组; J_1z —自流井组; T_3e —二桥组; T_2g —关岭组; T_1j —嘉陵江组; T_1y —夜郎组; P_3l —龙潭组; P_2m —茅口组; P_2q —栖霞组; P_2l —梁山组; S_1l —龙马溪组; O_{2-3} —中上奥陶统; O_1 —下奥陶统; $\epsilon_{2-3}ls$ —娄山关组; ϵ_2q —清虚洞组

(a) Geological map: J_3s —Suining Formation; J_2sh —Shaximiao Formation; J_1z —Ziliujing Formation; T_3e —Erqiao Formation; T_2g —Guanling Formation; T_1j —Jialingjiang Formation; T_1y —Yelang Formation; P_3l —Longtan Formation; P_2m —Maokou Formation; P_2q —Qixia Formation; P_2l —Liangshan Formation; S_1l —Longmaxi Formation; O_{2-3} —Middle and Upper Ordovician; O_1 —Lower Ordovician; $\epsilon_{2-3}ls$ —Lou shanguan Formation; ϵ_2q —Qingxudong Formation

(b) 构造分区: IV-4-1-1—威宁穹盆构造变形区; IV-4-1-2—六盘水北西向褶断带; IV-4-1-3 (1)—织金穹盆构造变形区; IV-4-1-3 (2)—毕节弧形褶皱带(本次研究区); IV-4-1-3 (3)—凤冈南北向隔槽式褶皱变形区; IV-4-1-4—赤水平缓褶皱变形区; IV-4-2-1—兴义穹盆构造变形区; IV-4-2-2 (1)—册亨东西向紧闭褶皱变形区; IV-4-2-3 (1)—都匀南北向隔槽式褶皱变形区; IV-4-2-3 (2)—铜仁复式褶皱变形区; IV-4-2-4 (1)—榕江开阔复式褶皱变形区; IV-4-2-4 (2)—黎平紧闭复式褶皱变形区

(b) Tectonic units: IV-4-1-1—Weining dome and basin structural deformation area; IV-4-1-2—Liupanshui NW-trending fold and fault belt; IV-4-1-3—Northern Guizhou uplift area; IV-4-1-3 (1)—Zhijin dome and basin structural deformation area; IV-4-1-3 (2)—Bijie arc-like fold belt (this study area); IV-4-1-3 (3)—Fenggang North—South wide spaced synclines deformation area; IV-4-1-4—Chishui gentle fold deformation area; IV-4-2-1—Xingyi dome and basin structural deformation area; IV-4-2-2 (1)—Ceting East—West tight fold deformation area; IV-4-2-3 (1)—Duyun North—South wide spaced synclines deformation area; IV-4-2-3 (2)—Tongren compound fold deformation area; IV-4-2-4 (1)—Rongjiang open compound fold deformation area; IV-4-2-4 (2)—Liping tight compound fold deformation area

组	段	岩 性	采样位置及沉积构造	地 层 描 述
中三叠统 关岭组 T_2g	一段			下部为中层状灰白色角砾状白云岩，上部为中层状泥质白云岩。上部发育较大量的双壳类化石(未分)。
下三叠统 嘉陵江组 T_1j	四段		PM006-33rz	底部为灰白色泥晶白云岩，上覆厚约0.5 m的灰色沉凝灰岩层以及厚约1 m的灰黑色含碳质白云岩；中部为中-厚层状灰白色泥质白云岩；上部为中-厚层状灰白色白云岩泥晶白云岩。
	三段			下部为中层状灰色、灰白色灰岩夹薄层状浅灰黄、色泥岩，中部及上部为中-厚层状灰黑色致密块状灰岩。局部可见缝合线构造。
	二段		PM002-2rz	底部为灰白色泥质白云岩，上覆厚约2 m的浅黄绿色沉凝灰岩层以及厚约5 m的灰黄色溶塌角砾状白云岩；中部及上部为薄层状浅灰黄、浅灰绿泥岩夹泥质粉砂岩，可见水平层理及少量双壳类化石(未分)。
	一段		40m 0	下部为薄层状灰、深灰色泥灰岩为主，中部及上部为中-厚层状亮晶灰岩，泥晶灰岩夹薄-中层状鲕粒灰岩及纹层状灰岩。局部可见缝合线构造。
	三段			下部为薄层状紫红、暗紫(夹灰绿)色泥岩，中部及上部为薄层状紫灰色粉砂质泥岩夹同色泥质粉砂岩。整体发育有水平层理及波状层理。
下三叠统 夜郎组 T_1y				

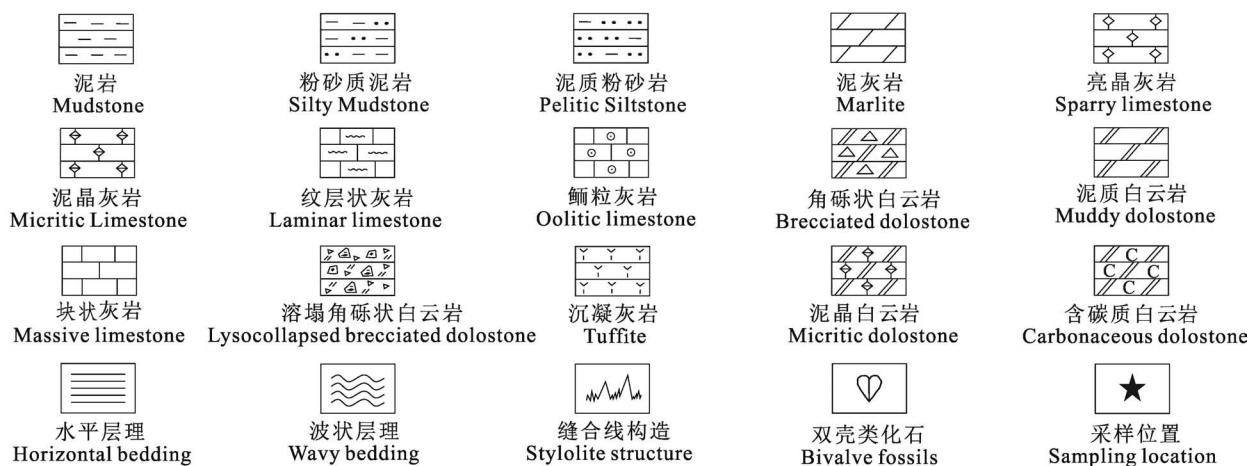


图 2 普宜地区嘉陵江组剖面地层柱状图

Fig. 2 Sectional stratigraphic histogram of the Jialingjiang Formation in the Puyi area



图3 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩岩石野外特征(a) — (d) 及显微结构(e) — (f)

Fig. 3 The field (a) — (d) and microscopic pictures (e) — (f) of the tuffites from the Jialingjiang Formation in the Puyi area
 (a) PM002 嘉陵江组二段底部沉凝灰岩出露剖面野外照片; (b) PM006 嘉陵江组四段底部沉凝灰岩出露剖面野外照片; (c) PM002-2rz 样品水白云母化沉凝灰岩、采样层位; (d) PM006-33rz 样品黏土化沉凝灰岩、采样层位; (e) 水云母化沉凝灰岩正交偏光镜下照片; (f) 黏土化沉凝灰岩正交偏光镜下照片。VRF—火山岩岩屑; Fs—长石; Q—石英; Hm—水白云母; FeO—氧化铁质
 Field photos: (a) the PM002 tuffite outcrop profile, (b) the PM006 tuffite outcrop profile, (c) hydromuscovitized tuffite of the PM002-2rz sample, (d) clayed tuffite of the PM006-33rz sample; Micrographic photos with crossed polars: (e) hydromuscovitized tuffite, (f) clayed tuffite. VRF—volcanic rock fragments; Fs—feldspar; Q—quartz; Hm—hydromuscovite; FeO—ferric oxide

作为样品数据误差校正,保证了分析测试数据的可靠性。加权平均年龄计算采用 $^{206}\text{Pb} / {^{238}\text{U}}$ 表面年龄数据(Griffin et al., 2004),具95%的置信度。对谐和度低于90%、表面不平及打穿点位进行舍弃。两件样品分别测试点位40、32个,分别舍弃点位5个,取有效数据点35、27个。有效数据点数据采用ICP-MSDateCal软件进行后期处理,并利用Isoplot 4.0软件绘制而成图。具体分析测试结果见表1。

4 测试结果

4.1 锆石晶体特征

锆石岩相学(CL图像)显示2件沉凝灰岩样品中的锆石大部分具有清晰的内部结构(图4):锆石韵律环带发育,环带较窄且明亮分明,环带密度大,表现为酸性(花岗质)高黏度岩浆中锆石缓慢结晶的特征(李灵惠等,2016)。少量锆石具有较宽且反差较小的板状韵律环带或均匀的面状环带,表现为快速冷却结晶的基性岩浆锆石的特征,如样品PM002-2rz中锆石颗粒14、18;样品PM006-33-rz中锆石颗粒11、12。

PM002-2rz样品中的锆石晶体多呈自形柱状,粒径为100~150 μm,长宽比2:1~3:1,晶棱锋锐,晶面简单,如锆石颗粒13、20、23;少数锆石晶体呈自形短柱状或次圆状,粒径为30~100 μm,长宽比1:1~1.5:1,部分晶棱钝化,如锆石颗粒3、10、33、38。与上述样品略有不同的是,PM006-33-rz样品中锆石晶体形态种类较多,晶体粒径整体较小,自形程度也略低。其中,多数锆石晶体呈短柱状或次圆状,粒径为30~80 μm,长宽比1:1~1.5:1,局部晶棱钝化,如锆石颗粒2、9、20、24;部分锆石晶体则呈半自行柱状,粒径为30~120 μm,长宽比2:1~3:1,如锆石颗粒4、10、31。少数锆石晶体颗粒呈不完整断柱状,如锆石颗粒14、21,推测其一定程度上受后期构造作用或火山爆发炸裂所致。

4.2 锆石微量元素组合特征

两件沉凝灰岩样品中计算年龄所用的锆石微量元素地球化学数据显示(表1):PM002-2rz样品中锆石稀土元素丰度较高, ΣREE 为 $615.0 \times 10^{-6} \sim 2678.4 \times 10^{-6}$ (平均 1625.3×10^{-6}), LREE/HREE =0.003~0.025(平均0.01);PM006-33rz样品中锆石稀土元素较前者略低, ΣREE 为 $497.7 \times 10^{-6} \sim 3165.7 \times 10^{-6}$ (平均 1481.9×10^{-6}), LREE/HREE =0.003~0.065(平均0.01)。二者稀土元素含量相近,且均表现为轻稀土元素强烈亏损,重稀土元素强

烈富集的特征。两件样品中锆石REE球粒陨石标准化后表现出高度一致的左倾配分曲线(图5b,d),重稀土呈逐步增长的趋势,Ce显示强烈的正异常,Eu显示强烈的负异常,均与岩浆成因锆石的特征一致(Whitehouse et al., 2003;赵志丹等,2018)。锆石中Eu的负异常通常与母体岩浆中斜长石结晶分异或是在较还原的环境下结晶的结果(Hennann et al., 2001);但锆石中的Ce的正异常往往是因为氧化条件下 Ce^{3+} 氧化为 Ce^{4+} 有关,代表了锆石结晶形成时的氧化环境(Rubatto et al., 2002),因此Eu的负异常形成于较还原环境的假设不成立。由此可得出沉凝灰岩是在氧化环境的源区条件下形成,并在锆石结晶过程母岩岩浆已形成了大量斜长石。

锆石U,Th含量及Th/U比值一定程度上可以作为不同成因类型锆石的判断依据,一般来说岩浆成因锆石中U,Th含量较高,Th/U比值往往>0.1,从而区别于变质成因锆石(Hoskin, 2003; Croft et al., 2003)。PM002-2rz样品中锆石Th含量为 $63 \times 10^{-6} \sim 386 \times 10^{-6}$ (平均 116.13×10^{-6})、U含量 $146 \times 10^{-6} \sim 678 \times 10^{-6}$ (平均 371×10^{-6}), $\text{Th}/\text{U}=0.19 \sim 1.17$ (平均0.33);PM006-33rz样品中锆石Th含量为 $54 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$ (平均 112×10^{-6})、U含量为 $224 \times 10^{-6} \sim 579 \times 10^{-6}$ (平均 362×10^{-6}), $\text{Th}/\text{U}=0.16 \sim 0.49$ (平均0.31)。两件样品中锆石U,Th含量及Th/U值较为一致(表2),除两个测点外($\text{Th}/\text{U}=0.19$ 、0.16)、其余测点 Th/U 值均>0.2(图5a,c)。结合锆石岩相学特征和微量元素异常特征,说明两件沉凝灰岩样品中锆石均为岩浆成因锆石(宋国学等,2010),且很可能来源于同一源区。

4.3 锆石U-Pb年龄

普宜地区沉凝灰岩锆石U-Pb年龄测试结果显示[表2,取 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄值]:两件沉凝灰岩样品锆石U-Pb年龄中分别存在两组锆石(图6),其中第一组锆石均位于谐和曲线上,为封闭的同位素体系中形成的锆石;第二组锆石则位于不一致曲线上,毗邻谐和曲线上,表示一定程度上有少量Pb丢失或U获得(张建岭等,2018)。其中PM002-2rz样品35个测点中第一组锆石谐和年龄为 250.6 ± 0.6 Ma ($\text{MSWD}=0.95, n=33$),加权平均年龄为 249.7 ± 1.1 Ma ($\text{MSWD}=0.68, n=33$);第二组年龄两颗锆石年龄分别为 835.6 ± 12.0 Ma、 919.5 ± 12.0 Ma(图5a)。PM006-33rz样品27个测点中第一组锆石谐和年龄为 249.1 ± 0.8 Ma ($\text{MSWD}=0.080, n=25$),加权平均年龄为 249.1 ± 1.5 Ma ($\text{MSWD}=1.30, n=$

表1 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩样品微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Zircon trace elements ($\times 10^{-6}$) analysis for the tuffite samples from the Jialingjiang Formation in the Puyi area

样品和测点	样品 PM002-2rz															
	PM002 -2-3	PM002 -2-4	PM002 -2-5	PM002 -2-6	PM002 -2-7	PM002 -2-8	PM002 -2-9	PM002 -2-10	PM002 -2-11	PM002 -2-12	PM002 -2-13	PM002 -2-14	PM002 -2-15	PM002 -2-16	PM002 -2-17	PM002 -2-18
	0.001	0.004	0.006	0.001	0.001	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.016	0.001	0.001	0.001	0.005
La	0.85	1.61	1.66	0.87	1.01	1.16	1.02	1.40	0.92	0.80	1.69	0.91	0.90	1.13	0.79	0.96
Ce	0.05	0.12	0.08	0.04	0.04	0.07	0.09	0.07	0.05	0.04	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05
Pr	0.79	2.25	1.3	0.99	1.02	1.47	1.62	1.24	1.3	1.03	1.42	1.22	1.02	0.98	0.92	1.28
Nd	4.00	8.63	3.72	2.89	3.35	5.90	6.59	4.88	4.20	3.32	4.34	4.29	3.96	4.23	3.78	5.07
Sm	0.05	0.12	0.05	0.02	0.04	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.08	0.05	0.06	0.03	0.03	0.08
Eu	36.0	65.0	30.6	28.5	28.3	44.8	56.5	39.3	37.4	25.9	36.9	37.5	35.0	36.2	30.3	36.9
Gd	16.4	26.6	13.1	11.9	11.4	18.2	24.6	15.8	14.8	10.6	14.2	16.2	14.4	14.4	12.4	15.4
Dy	250.6	354.6	184.4	170.6	156.7	251.8	334.7	217.3	206.1	150.2	193.7	228.8	199.9	204.2	168.5	213.8
Ho	105.0	137.3	74.7	69.9	63.3	99.4	134.2	84.8	83.6	60.1	76.2	91.8	79.4	81.1	67.9	86.6
Er	533.3	654.0	374.4	351.0	314.5	477.2	662.0	410.2	412.3	296.1	369.8	454.0	395.0	397.8	327.5	425.6
Tm	111.3	129.5	77.5	71.2	64.0	95.3	131.8	82.2	82.8	60.0	72.1	93.7	80.3	81.1	65.9	87.1
Yb	966.0	1075.0	667.0	623.0	549.0	812.0	1132.0	696.6	717.0	517.9	619.7	804.0	695.0	682.0	561.7	742.0
Lu	188.4	204.2	129.7	121.6	108.3	157.1	216.3	134.3	141.9	100.6	119.4	158.2	132.8	133.1	109.7	148.1
Y	3276	4231	2349	2176	1992	3085	4249	2670	2659	1891	2367	2890	2501	2575	2122	2715
Hf	13364	12850	13189	12794	12976	12482	12774	12707	12673	13108	12443	12982	13350	12871	12947	12986
Ta	0.91	0.65	0.76	0.60	0.65	0.58	0.74	0.61	0.63	0.41	0.60	0.63	0.61	0.72	0.42	0.63
Nb	1.02	0.95	0.84	0.71	0.92	0.96	1.03	0.87	0.84	0.55	1.01	0.86	0.86	1.00	0.69	0.87
Sc	318.6	320.5	294.4	286.6	276.7	332.8	364.5	286.0	313.9	274.0	286.5	322.1	298.3	282.1	288.9	321.2
Ti	7.57	9.72	7.49	8.16	8.67	10.86	10.07	8.91	9.72	10.06	9.68	9.73	9.10	9.36	11.65	11.38
Σ REE	2212.7	2658.9	1558.3	1452.6	1300.9	1964.5	2701.5	1688.1	1702.4	1226.6	1509.6	1890.7	1637.8	1636.3	1349.4	1763.0
LREE	5.7	12.7	6.8	4.8	5.5	8.7	9.4	7.7	6.5	5.2	7.6	6.6	6.0	6.4	5.6	7.4
HREE	2207.0	2646.2	1551.4	1447.7	1295.5	1955.8	2692.1	1680.5	1695.9	1221.3	1502.0	1884.2	1631.8	1629.9	1343.9	1755.5
δ Eu	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
δ Ce	5.39	4.01	6.02	6.72	6.99	4.74	3.36	6.17	5.69	6.14	7.25	3.79	4.85	7.25	5.27	5.83
样品和测点	样品 PM002-2rz															
	PM002 -2-19	PM002 -2-20	PM002 -2-21	PM002 -2-22	PM002 -2-23	PM002 -2-24	PM002 -2-25	PM002 -2-26	PM002 -2-27	PM002 -2-28	PM002 -2-29	PM002 -2-30	PM002 -2-31	PM002 -2-32	PM002 -2-33	PM002 -2-34
	0.001	0.001	0.031	0.007	0.058	0.001	0.003	0.013	0.018	0.001	0.001	0.003	0.013	0.001	0.001	0.001
La	0.98	1.00	2.85	0.87	8.74	0.93	0.83	1.42	0.81	1.28	0.93	1.03	1.18	0.65	1.58	1.23
Ce	0.04	0.05	0.35	0.04	0.50	0.08	0.06	0.08	0.05	0.08	0.07	0.08	0.08	0.04	0.09	0.09
Pr	0.84	1.05	5.22	0.94	7.11	1.54	1.14	1.8	1.06	1.78	1.32	1.6	1.72	0.82	1.74	1.94
Nd	3.49	4.29	8.83	3.37	11.39	4.88	3.85	4.59	4.22	5.37	4.27	5.43	6.69	2.88	6.32	6.48
Sm	0.12	0.07	0.29	0.05	0.34	0.05	0.04	0.11	0.05	0.15	0.05	0.08	0.06	0.05	0.05	0.11
Eu	29.4	37.2	49.7	30.5	55.1	40.9	31.4	34.0	36.3	36.0	32.1	45.4	56.5	29.0	43.2	48.1
Gd	11.5	15.5	15.7	12.4	16.6	16.8	12.3	11.4	15.6	13.0	13.2	18.7	24.1	12.7	17.7	18.8
Dy	155.2	218.4	192.4	173.3	189.2	229.9	167.4	143.1	219.8	166.0	180.8	259.5	339.0	184.7	243.3	248.1
Ho	60.4	88.7	71.5	70.7	65.7	92.7	66.7	51.3	88.4	61.2	71.4	102.6	137.1	76.6	95.7	95.8
Er	294.7	441.0	327.0	348.0	283.4	458.7	326.6	230.0	435.7	280.8	350.8	503.0	660.0	385.0	463.6	455.6
Tm	61.3	88.4	63.3	70.2	50.6	92.0	65.3	45.5	88.0	54.7	70.0	102.2	132.9	79.4	93.0	90.7
Yb	516.0	757.0	543.0	614.1	396.0	782.0	540.1	398.0	750.0	467.0	605.0	849.0	1106.0	696.0	779.0	767.0
Lu	103.4	148.9	103.7	120.7	74.3	155.4	107.4	76.3	146.6	90.9	117.5	166.1	213.0	135.5	154.1	145.0
Y	1887	2756	2109	2213	1923	2932	2118	1590	2778	1881	2264	3219	4260	2439	3021	3024
Hf	13174	12742	10882	12868	11647	12425	12527	12242	12864	12266	12882	12788	12759	12822	12394	
Ta	0.52	0.70	0.64	0.55	1.17	0.67	0.44	0.59	0.64	0.53	0.52	0.62	0.76	0.61	0.73	0.56
Nb	0.78	1.01	1.20	0.78	2.19	1.01	0.64	0.79	0.83	0.76	0.69	0.99	1.19	0.93	1.09	0.94
Sc	314.6	312.2	298.7	303.0	233.2	321.4	281.5	340.0	360.2	369.8	291.5	330.7	326.1	295.5	300.9	346.0
Ti	9.03	7.88	23.10	8.90	2.12	10.45	13.00	14.00	9.17	12.76	10.06	10.00	9.41	8.44	9.51	13.40
Σ REE	1237.4	1801.6	1383.8	1445.1	1159.0	1875.9	1323.2	997.6	1786.6	1178.3	1447.4	2054.7	2678.4	1603.3	1899.3	1878.9
LREE	5.5	6.5	17.6	5.3	28.2	7.5	5.9	8.0	6.2	8.7	6.6	8.2	9.7	4.4	9.8	9.9
HREE	1231.9	1795.1	1366.3	1439.9	1130.9	1868.4	1317.2	989.6	1780.4	1169.6	1440.8	2046.5	2668.6	1598.9	1889.6	1869.1
δ Eu	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
δ Ce	6.90	6.11	2.46	6.52	5.15	3.69	4.37	5.31	4.47	4.81	4.40	4.09	4.14	4.96	5.31	4.27

样品和测点	样品 PM002-2rz			样品 PM006-33rz											
	PM002 -2-36	PM002 -2-38	PM002 -2-40	PM006 -33-1	PM006 -33-2	PM006 -33-3	PM006 -33-4	PM006 -33-5	PM006 -33-6	PM006 -33-8	PM006 -33-9	PM006 -33-10	PM006 -33-11	PM006 -33-12	PM006 -33-13
La	0.210	0.010	0.001	0.001	0.025	0.001	0.001	0.001	0.071	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Ce	1.74	12.30	1.15	0.84	1.24	1.05	1.64	0.79	1.06	1.57	1.07	10.26	0.97	0.90	0.91
Pr	0.13	0.02	0.09	0.04	0.09	0.06	0.15	0.05	0.14	0.14	0.12	0.03	0.10	0.03	0.08
Nd	1.48	0.199	1.45	0.95	2.29	0.99	2.48	0.93	1.69	3.11	2.24	0.63	2.00	0.52	2.11
Sm	3.90	1.03	4.76	3.36	7.16	2.97	7.00	3.70	6.06	9.83	7.84	1.67	6.08	1.45	5.54
Eu	0.10	0.11	0.10	0.02	0.12	0.01	0.17	0.01	0.05	0.10	0.12	0.15	0.20	0.01	0.15
Gd	26.5	8.1	34.0	30.30	56.60	20.80	48.50	27.30	46.60	71.10	67.20	11.70	36.40	15.10	43.70
Tb	9.0	3.9	13.5	12.83	21.68	8.59	17.85	11.38	19.06	27.80	28.48	4.13	13.72	6.42	17.50
Dy	117.1	57.9	176.0	180.2	296.8	110.5	237.9	161.4	273.2	372.0	411.9	55.1	181.3	93.0	234.0
Ho	44.3	24.4	67.9	69.4	110.3	42.4	87.7	62.1	106.9	133.0	161.1	21.3	68.1	37.4	85.8
Er	213.5	131.3	326.6	344.3	523.1	208.1	422.3	304.2	511.4	612.0	785.0	107.2	319.8	186.7	412.0
Tm	43.8	29.6	65.1	67.9	101.4	42.4	83.2	61.6	104.0	118.2	154.9	23.7	64.7	39.8	78.0
Yb	383.0	286.9	556.0	583.0	859.0	366.0	701.0	526.0	890.0	967.0	1297.0	218.0	545.0	349.2	679.0
Lu	69.1	59.3	106.1	113.5	161.3	72.3	135.6	101.4	168.8	180.5	248.7	43.8	104.0	68.5	123.7
Y	1387	784	2157	2466	3826	1353	3057	2173	3735	4520	5569	688	2380	1322	2970
Hf	11758	12574	12123	12372	12206	12177	11512	12445	12435	12058	12197	13011	12252	12392	12014
Ta	0.36	3.20	0.91	0.40	0.57	0.28	0.54	0.46	0.56	0.47	0.77	1.38	0.44	0.54	0.72
Nb	0.72	2.77	1.45	0.72	0.85	0.50	1.01	0.51	0.74	0.89	1.14	1.62	0.57	0.57	0.64
Sc	295.0	252.3	376.8	253.8	265.9	258.7	279.1	254.8	301.9	278.6	350.1	190.1	263.0	210.3	307.0
Ti	17.20	5.10	10.92	10.51	9.53	12.92	11.24	9.44	9.62	10.46	10.89	4.70	8.90	6.54	2.12
ΣREE	913.8	615.0	1352.8	1406.6	2141.1	876.2	1745.5	1260.9	2129.0	2496.4	3165.7	497.7	1342.4	799.0	1682.5
LREE	7.6	13.7	7.6	5.2	10.9	5.1	11.4	5.5	9.1	14.8	11.4	12.7	9.4	2.9	8.8
HREE	906.3	601.3	1345.2	1401.4	2130.2	871.1	1734.1	1255.4	2120.0	2481.6	3154.3	484.9	1333.0	796.1	1673.7
δEu	0.02	0.08	0.02	0.004	0.013	0.003	0.020	0.003	0.007	0.008	0.011	0.075	0.032	0.004	0.021
δCe	2.48	169.95	4.08	5.91	3.78	5.43	3.48	4.60	1.97	3.38	2.68	95.94	2.96	9.57	3.70
样品和测点	样品 PM006-33rz														
	PM006 -33-14	PM006 -33-17	PM006 -33-18	PM006 -33-19	PM006 -33-20	PM006 -33-21	PM006 -33-23	PM006 -33-24	PM006 -33-26	PM006 -33-27	PM006 -33-28	PM006 -33-29	PM006 -33-30	PM006 -33-31	PM006 -33-32
La	0.003	0.001	0.001	0.025	0.001	0.001	0.001	0.071	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.003
Ce	0.69	1.09	1.03	1.24	1.05	1.64	0.79	1.06	1.57	1.07	10.26	0.97	0.90	0.91	0.69
Pr	0.02	0.05	0.02	0.09	0.06	0.15	0.05	0.14	0.14	0.12	0.03	0.10	0.03	0.08	0.02
Nd	0.57	1.06	0.42	2.29	0.99	2.48	0.93	1.69	3.11	2.24	0.63	2.00	0.52	2.11	0.57
Sm	2.02	3.90	1.95	7.16	2.97	7.00	3.70	6.06	9.83	7.84	1.67	6.08	1.45	5.54	2.02
Eu	0.01	0.05	0.01	0.12	0.01	0.17	0.01	0.05	0.10	0.12	0.15	0.20	0.01	0.15	0.01
Gd	20.50	33.3	15.2	56.60	20.80	48.50	27.30	46.60	71.10	67.20	11.70	36.40	15.10	43.70	20.50
Tb	8.55	14.17	6.40	21.68	8.59	17.85	11.38	19.06	27.80	28.48	4.13	13.72	6.42	17.50	8.55
Dy	123.7	203.4	89.5	296.8	110.5	237.9	161.4	273.2	372.0	411.9	55.1	181.3	93.0	234.0	123.7
Ho	49.7	79.4	36.5	110.3	42.4	87.7	62.1	106.9	133.0	161.1	21.3	68.1	37.4	85.8	49.7
Er	250.9	391.9	186.3	523.1	208.1	422.3	304.2	511.4	612.0	785.0	107.2	319.8	186.7	412.0	250.9
Tm	51.9	79.8	39.1	101.4	42.4	83.2	61.6	104.0	118.2	154.9	23.7	64.7	39.8	78.0	51.9
Yb	454.3	676	345	859.0	366.0	701.0	526.0	890.0	967.0	1297.0	218.0	545.0	349.2	679.0	454.3
Lu	88.6	126.6	65.7	161.3	72.3	135.6	101.4	168.8	180.5	248.7	43.8	104.0	68.5	123.7	88.6
Y	1650	2669	1187	3826	1353	3057	2173	3735	4520	5569	688	2380	1322	2970	1650
Hf	12815	12234	13086	12206	12177	11512	12445	12435	12058	12197	13011	12252	12392	12014	12815
Ta	0.36	0.65	0.48	0.57	0.28	0.54	0.46	0.56	0.47	0.77	1.38	0.44	0.54	0.72	0.36
Nb	0.65	1.12	0.78	0.85	0.50	1.01	0.51	0.74	0.89	1.14	1.62	0.57	0.57	0.64	0.65
Sc	226.0	255.4	198.0	265.9	258.7	279.1	254.8	301.9	278.6	350.1	190.1	263.0	210.3	307.0	226.0
Ti	9.64	10.14	5.80	9.50	12.94	11.24	9.45	9.67	10.43	10.84	4.75	8.91	6.54	2.12	9.62
ΣREE	1051.5	1610.7	787.3	2141.1	876.2	1745.5	1260.9	2129.1	2496.4	3165.7	497.7	1342.4	799.0	1682.5	1051.5
LREE	3.3	6.2	3.4	10.9	5.1	11.4	5.5	9.1	14.8	11.4	12.7	9.4	2.9	8.8	3.3
HREE	1048.2	1604.6	783.9	2130.2	871.1	1734.1	1255.4	2120.0	2481.6	3154.3	484.9	1333.0	796.1	1673.7	1048.2
δEu	0.003	0.010	0.002	0.013	0.003	0.020	0.003	0.007	0.008	0.011	0.075	0.032	0.004	0.021	0.003
δCe	9.63	6.48	14.34	3.78	5.43	3.48	4.60	1.97	3.38	2.68	95.94	2.96	9.57	3.70	9.63

表2 普宣地区嘉陵江组沉凝灰岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 Zircon U-Pb isotopic dating for the tuffite samples from the Jialingjiang Formation in the Puyi area

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)		
	Pb	Th	U	Th/U			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值
PM002-2-3	23	108	564	0.19	0.0518	0.0014	0.2756	0.0074	0.0392	0.0006	247	58
PM002-2-4	26	202	611	0.33	0.0520	0.0013	0.2785	0.0061	0.0394	0.0006	261	54
PM002-2-5	16	91	370	0.24	0.0544	0.0017	0.2987	0.0098	0.0402	0.0006	344	69
PM002-2-6	15	90	358	0.25	0.0519	0.0016	0.2833	0.0090	0.0398	0.0007	259	67
PM002-2-7	15	98	342	0.29	0.0529	0.0017	0.2892	0.0088	0.0401	0.0006	284	69
PM002-2-8	14	107	344	0.31	0.0506	0.0018	0.2753	0.0096	0.0397	0.0007	194	75
PM002-2-9	20	124	471	0.26	0.0521	0.0012	0.2873	0.0069	0.0402	0.0006	272	53
PM002-2-10	20	159	462	0.34	0.0523	0.0015	0.2816	0.0076	0.0395	0.0006	263	62
PM002-2-11	15	94	344	0.27	0.0508	0.0016	0.2737	0.0084	0.0395	0.0006	198	67
PM002-2-12	12	75	287	0.26	0.0521	0.0018	0.2850	0.0098	0.0399	0.0007	265	75
PM002-2-13	15	137	353	0.39	0.0523	0.0016	0.2781	0.0084	0.0388	0.0006	266	65
PM002-2-14	14	81	326	0.25	0.0510	0.0017	0.2762	0.0092	0.0396	0.0006	213	71
PM002-2-15	13	85	314	0.27	0.0529	0.0018	0.2889	0.0093	0.0400	0.0007	279	72
PM002-2-16	21	134	482	0.28	0.0521	0.0013	0.2846	0.0070	0.0399	0.0006	270	55
PM002-2-17	12	78	271	0.29	0.0493	0.0018	0.2715	0.0095	0.0402	0.0006	135	75
PM002-2-18	12	73	281	0.26	0.0519	0.0020	0.2758	0.0099	0.0391	0.0007	230	79
PM002-2-19	14	68	343	0.20	0.0517	0.0018	0.2820	0.0099	0.0398	0.0007	231	75
PM002-2-20	18	114	435	0.26	0.0513	0.0015	0.2781	0.0080	0.0395	0.0006	224	61
PM002-2-21	11	190	229	0.83	0.0500	0.0021	0.2740	0.0120	0.0393	0.0007	179	92
PM002-2-22	13	83	304	0.27	0.0531	0.0016	0.2945	0.0091	0.0402	0.0006	299	68
PM002-2-23	68	386	331	1.17	0.0712	0.0011	1.494	0.0220	0.1533	0.0022	950	32
PM002-2-24	14	95	336	0.28	0.0503	0.0016	0.2767	0.0086	0.0400	0.0006	186	69
PM002-2-25	12	87	282	0.31	0.0534	0.0019	0.2900	0.0100	0.0394	0.0006	308	79
PM002-2-26	10	75	256	0.29	0.0519	0.0033	0.2830	0.0170	0.0395	0.0009	230	130
PM002-2-27	14	71	325	0.22	0.0522	0.0017	0.2874	0.0092	0.0400	0.0006	256	69
PM002-2-28	10	85	228	0.37	0.0509	0.0021	0.2800	0.0120	0.0398	0.0007	196	87
PM002-2-29	13	92	314	0.29	0.0530	0.0019	0.2860	0.0100	0.0392	0.0006	283	75
PM002-2-30	16	109	375	0.29	0.0509	0.0015	0.2776	0.0084	0.0395	0.0006	221	66
PM002-2-31	27	170	630	0.27	0.0509	0.0013	0.2791	0.0080	0.0396	0.0006	218	57
PM002-2-32	14	71	329	0.22	0.0505	0.0015	0.2744	0.0079	0.0394	0.0006	187	60

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)							
	Pb	Th	U	Th/U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	测值	1σ	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	同位素年龄(Ma)
PM002-2-33	24	183	551	0.33	0.0518	0.0014	0.2790	0.0078	0.0390	0.0006	257	57	249	6	247	4	99
PM002-2-34	14	115	313	0.37	0.0510	0.0017	0.2751	0.0088	0.0393	0.0006	213	71	248	7	249	4	100
PM002-2-36	6	63	146	0.43	0.0528	0.0040	0.2920	0.0220	0.0397	0.0009	260	160	258	17	251	5	97
PM002-2-38	58	93	390	0.24	0.0690	0.0010	1.322	0.0210	0.1383	0.0021	890	32	854	9	836	12	98
PM002-2-40	29	182	678	0.27	0.0517	0.0011	0.2794	0.0062	0.0390	0.0006	256	47	250	5	247	4	99
样品 PM006-33-1																	
PM006-33-1	13	84	293	0.29	0.0501	0.0021	0.2740	0.0120	0.0398	0.0005	177	90	247	10	251	3	98
PM006-33-2	19	163	433	0.38	0.0508	0.0018	0.2701	0.0100	0.0384	0.0005	210	77	242	8	243	3	100
PM006-33-3	8	60	165	0.36	0.0498	0.0037	0.2700	0.0200	0.0396	0.0008	120	150	242	15	250	5	97
PM006-33-4	15	150	305	0.49	0.0520	0.0022	0.2850	0.0130	0.0397	0.0006	234	91	253	10	251	4	99
PM006-33-5	11	72	261	0.27	0.0497	0.0023	0.2800	0.0140	0.0406	0.0006	158	100	251	11	257	4	98
PM006-33-6	16	107	353	0.30	0.0495	0.0020	0.2697	0.0110	0.0393	0.0005	143	82	241	9	248	3	97
PM006-33-8	24	222	531	0.42	0.0504	0.0020	0.2732	0.0110	0.0394	0.0006	189	86	245	9	249	4	98
PM006-33-9	26	160	579	0.28	0.0514	0.0018	0.2814	0.0100	0.0397	0.0005	238	75	251	8	251	3	100
PM006-33-10	78	167	450	0.37	0.0744	0.0019	1.626	0.0490	0.1575	0.0025	1044	52	979	19	943	14	96
PM006-33-11	12	84	263	0.32	0.0545	0.0027	0.2970	0.0160	0.0399	0.0006	340	110	264	13	252	4	95
PM006-33-12	11	65	260	0.25	0.0523	0.0032	0.2890	0.0180	0.0397	0.0007	240	130	256	14	251	5	98
PM006-33-13	17	121	415	0.29	0.0504	0.0029	0.2910	0.0180	0.0411	0.0009	190	120	259	14	260	5	100
PM006-33-14	11	54	224	0.24	0.0529	0.0031	0.2880	0.0180	0.0400	0.0007	270	120	255	14	253	5	99
PM006-33-17	17	115	401	0.29	0.0516	0.0023	0.2790	0.0130	0.0394	0.0006	238	95	249	10	249	4	100
PM006-33-18	12	78	289	0.27	0.0521	0.0022	0.2810	0.0130	0.0396	0.0006	246	91	251	10	251	4	100
PM006-33-19	21	181	452	0.40	0.0544	0.0020	0.2832	0.0110	0.0382	0.0006	357	81	253	9	242	3	96
PM006-33-20	17	87	359	0.24	0.0526	0.0020	0.2850	0.0110	0.0398	0.0006	275	78	254	9	251	4	99
PM006-33-21	12	74	261	0.28	0.0528	0.0027	0.2720	0.0140	0.0381	0.0006	277	100	246	11	241	4	98
PM006-33-23	12	97	244	0.40	0.0497	0.0022	0.2720	0.0130	0.0396	0.0006	159	95	243	10	250	3	97
PM006-33-24	17	64	411	0.16	0.0501	0.0020	0.2639	0.0110	0.0385	0.0006	193	92	237	9	244	4	97
PM006-33-26	17	139	375	0.37	0.0511	0.0021	0.2776	0.0120	0.0395	0.0006	231	89	248	9	250	4	99
PM006-33-27	23	160	540	0.30	0.0516	0.0020	0.2740	0.0120	0.0383	0.0007	259	90	246	10	242	4	99
PM006-33-28	18	105	380	0.28	0.0515	0.0020	0.2816	0.0120	0.0396	0.0005	232	84	251	9	250	3	100
PM006-33-29	17	86	350	0.25	0.0534	0.0053	0.2950	0.0290	0.0398	0.0013	290	200	260	22	252	8	97
PM006-33-30	17	77	385	0.20	0.0535	0.0031	0.3020	0.0160	0.0405	0.0010	320	120	268	13	256	6	95
PM006-33-31	92	194	553	0.35	0.0734	0.0019	1.440	0.0440	0.1408	0.0022	1017	51	904	18	849	12	94
PM006-33-32	11	60	257	0.23	0.0493	0.0025	0.2730	0.0150	0.0397	0.0008	130	110	243	12	251	5	97

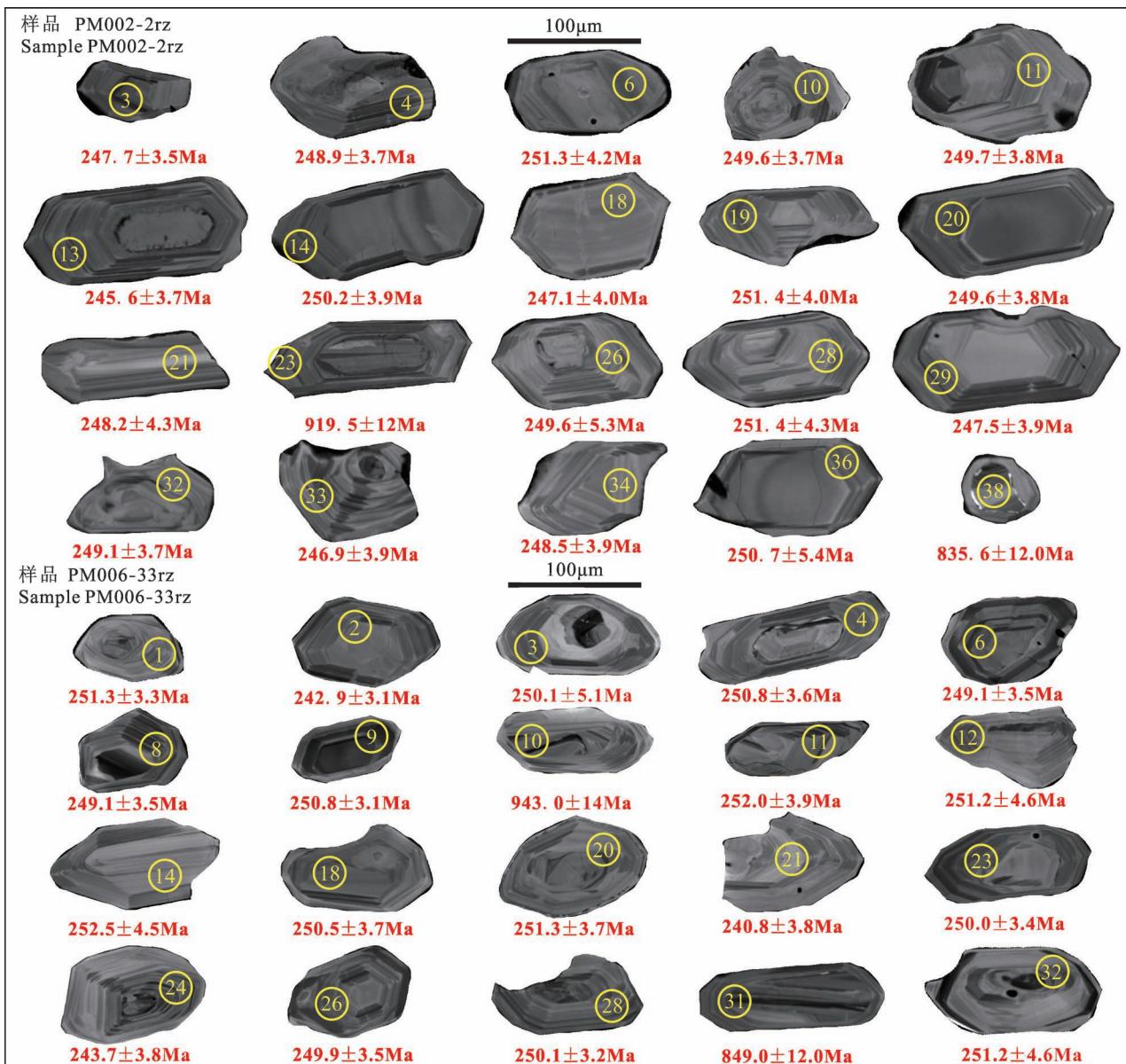


图 4 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石阴极发光(CL)图像及年龄(Ma)

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence (CL) images and ages (Ma) of the tuffites from the Jialingjiang Formation in the Puyi area

25);第二组年龄两颗锆石年龄分别为 849.0 ± 12.0 Ma、 943.0 ± 14.0 Ma(图 5b)。两件样品中第一组锆石谐和年龄较为集中,代表了母岩岩浆中新生锆石的结晶年龄;而第二组年龄值较大且分散,其可能代表了古老地壳熔融或岩浆上涌过程中捕获的继承锆石年龄,且由于第一组锆石谐和年龄整体为封闭体系年龄,因此上下交点年龄并不具有实际意义(Mezger et al., 2004)。

5 讨论

5.1 沉凝灰岩母岩约束

近年来,随着锆石学(Zirconology)在地学领域的发展,利用锆石微量元素对锆石类型、形成环境及其岩浆作用等深部过程的识别成为现实,也为物源区的限定提供了新的思路(杨甫等,2016;王家林等,2017;赵志丹等,2018)。

结合锆石 CL 图像和稀土元素特征,发现两件沉凝灰岩样品具有较高的相似性:大部分锆石具有酸性岩浆锆石典型的韵律环带特征;同时稀土元素表现为轻稀土强烈亏损,重稀土元素强烈富集,且具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常,均表现为岩浆成

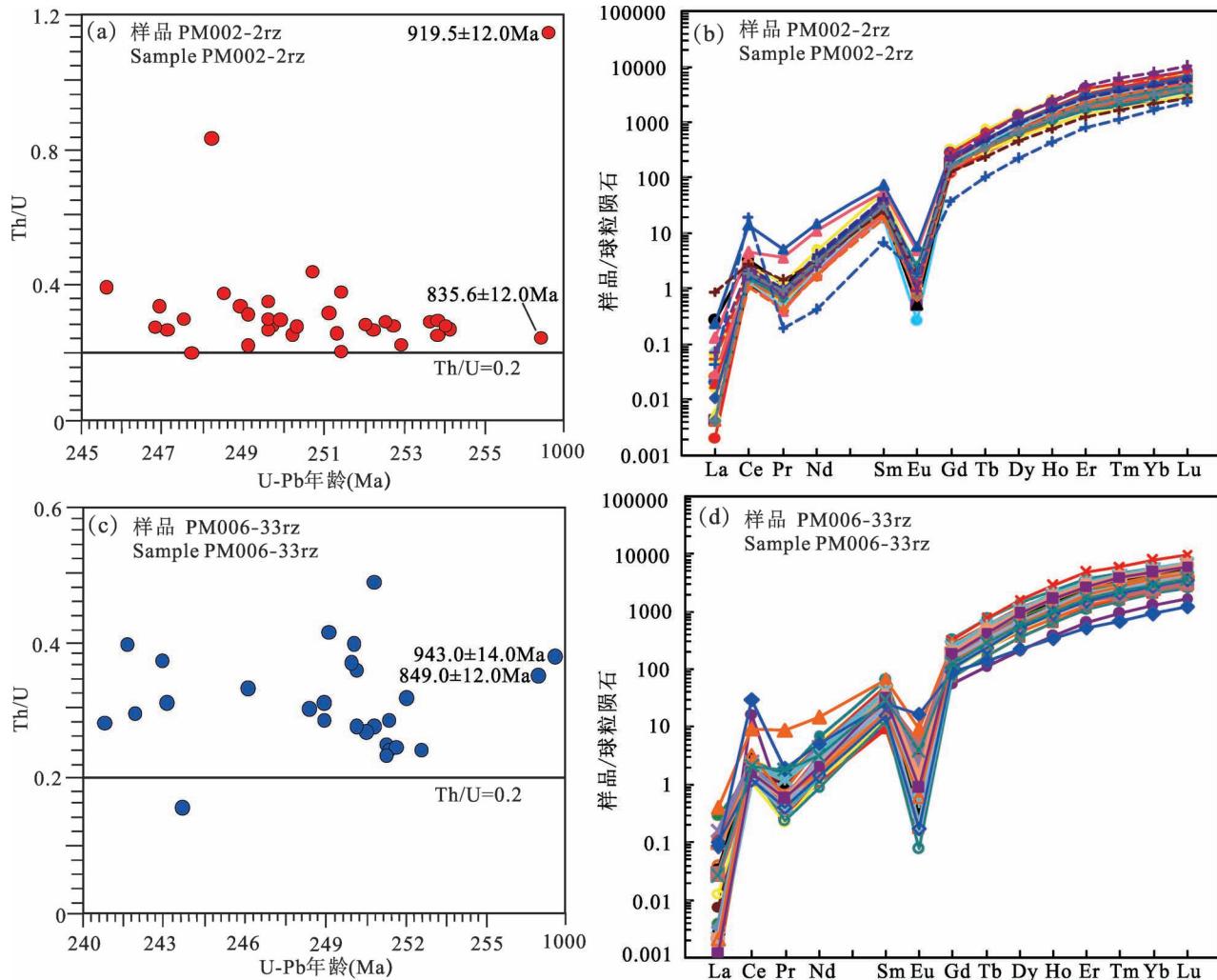


图 5 普宜地区嘉陵江组沉淀灰岩锆石球粒陨石标准化稀土配分曲线(b)、(d)和 Th/U 比值分布图(a)、(c)
(球粒陨石标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 5 Chondrite normalized REE patterns (b), (d) and Th/U ratios distribution (a), (c) of the zircons from the Jialingjiang Formation tuffites in the Puyi area (chondrite normalized value after Sun et al. , 1989)

因锆石的特征。Hf—U/Yb 图解(图 7a)中两件沉淀灰岩样品点均位于大陆锆石的范围, 锆石主要形成于岩浆演化中玄武质岩石的部分熔融 (Liu Yongsheng et al. , 2010), 区别于现今大洋中脊玄武岩的锆石(MORB)。La—(Sm/La)_N 图解(图 7b)中样品点处部分 La 元素偏低外均落于岩浆锆石区域内, 说明样品基本未受到后期热液氧逸度的影响, 均为岩浆成因锆石 (Hoskin, 2005)。Y—Th/Yb 图解(图 7c)中样品点均落于大陆花岗质岩浆锆石的范围内, 与上述结论一致。同时, Pb—Th 图解(图 6d)中指示这些锆石主要来源于 S 型花岗岩, 可能形成于与挤压碰撞有关的构造环境(赵振华, 2016; 王训练等, 2019)。

据 Belousova 等(2002)提出的锆石微量元素源岩判别图解对沉淀灰岩源岩进行了初步判别: U—Y 图解(图 8a)中沉淀灰岩锆石测点主要落于花岗岩、正长伟晶岩(歪碱正长岩)及部分基性岩重叠区域; Yb/Sm—Y 图解(图 8b)测点大部分落于花岗岩和基性岩重叠区域; Nb/Ta—Y 图解(图 8c)测点主要落于花岗闪长岩(英云闪长岩)区域, 部分落入正长伟晶岩(歪碱正长岩)区域; δCe—Y(图 8d)测点基本落于花岗岩(细晶浅色花岗岩)和正长伟晶岩重叠区域内。上述判别图解中二元空间重叠程度最高的为花岗岩类, 次为正长岩类及基性岩类, 暗示沉淀灰岩母岩可能以酸性岩花岗岩为主, 其次为中性正长岩类和基性岩类, 这些证据为沉淀灰岩的母岩提

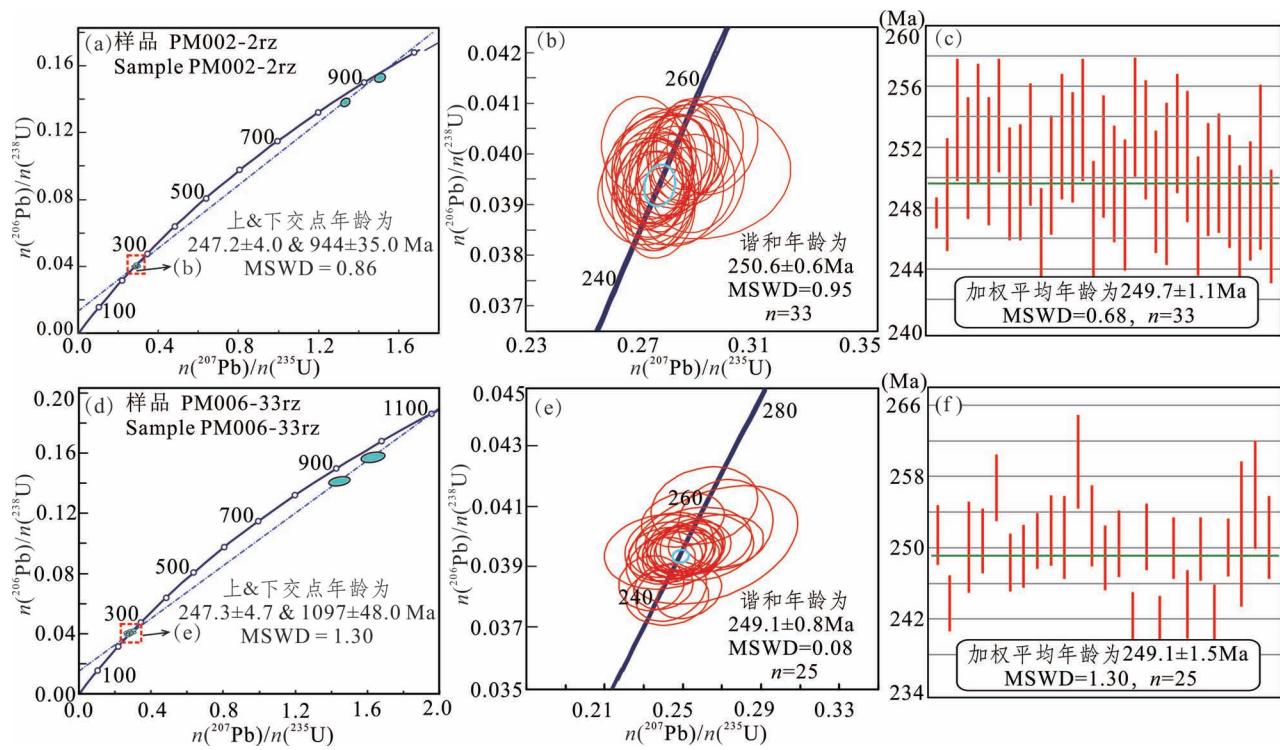


图 6 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和年龄谱图

Fig. 6 U-Pb concordia age and relative probability plots of the zircons from the Jialingjiang Formation tuffites in the Puyi area

供了约束条件。

值得强调的是,虽然前人基于多种岩石类型大数据二维核密度分布投影构建了锆石微量元素源岩判别图解,但却无法解决多类型岩石在二元空间中重叠部分的准确区分,且部分重叠区域存在一定统计学的弊端。因此,为了更加准确的鉴别出不同类型的源岩组合特征,Belousov 等(2002)利用大数据二进制转换的原理提出分类回归树木法(CART)作为对锆石微量元素源岩判别图解的补充判别,从而有效提高对源岩判别准确率。在 CART 图解中(图 9),PM002-2rz 样品 35 个测点中 5 个测点回归于小于 65% SiO₂ 花岗岩类,30 个测点回归于 70%~75% SiO₂ 花岗岩类;PM006-33rz 样品 27 个测点中 9 个测点回归于小于 65% SiO₂ 花岗岩类,16 个测点回归于 70%~75% SiO₂ 花岗岩类,此外还有两个测点回归于正长岩/二长岩类。同时,由于基性岩浆锆石往往在某些微量元素含量及组合特征上与中酸性岩浆锆石具有一定的相似性,因此结合锆石 CL 图像中含有少量基性岩浆锆石的特征,推测母岩岩浆中亦有少量基性岩浆参与。

综上所述,基本确定了沉凝灰岩母岩主要以酸

性花岗岩类为主,次为中性正长岩类和少量基性岩类。

5.2 源区构造环境及位置讨论

前文对沉凝灰岩中锆石类型和母岩进行了约束,沉凝灰岩中锆石很可能来源于与同碰撞过程中形成的 S 型花岗岩。在锆石微量元素构造判别图解中,沉凝灰岩锆石测点均落于与挤压碰撞有关的造山带环境(图 10a、b)和大陆弧环境(图 10c),指示物源区处于与造山带有关的构造背景。早三叠世时期,由于印支期碰撞造山过程中造成了火山的幕式喷发,火山灰经远距离搬运至扬子西南地区盆地沉积,这在扬子西南地区早三叠世地层中均有其火山—沉积响应的证据,其中最具有代表性的就是上扬子西南地区广泛分布的 Olenekian—Anisian 界线(OAB)处绿豆岩。

前人对绿豆岩源区构造环境及位置进行了一系列的约束,多数学者认为绿豆岩形成活动大陆边缘的碰撞造山环境。谭梅等(2016)和管东东等(2017)通过对黔西地区 OAB 界线绿豆岩的研究认为源区主要位于中越边境的长山构造岩浆带。印支早期,在古特提斯洋俯冲闭合的背景下东印支板块

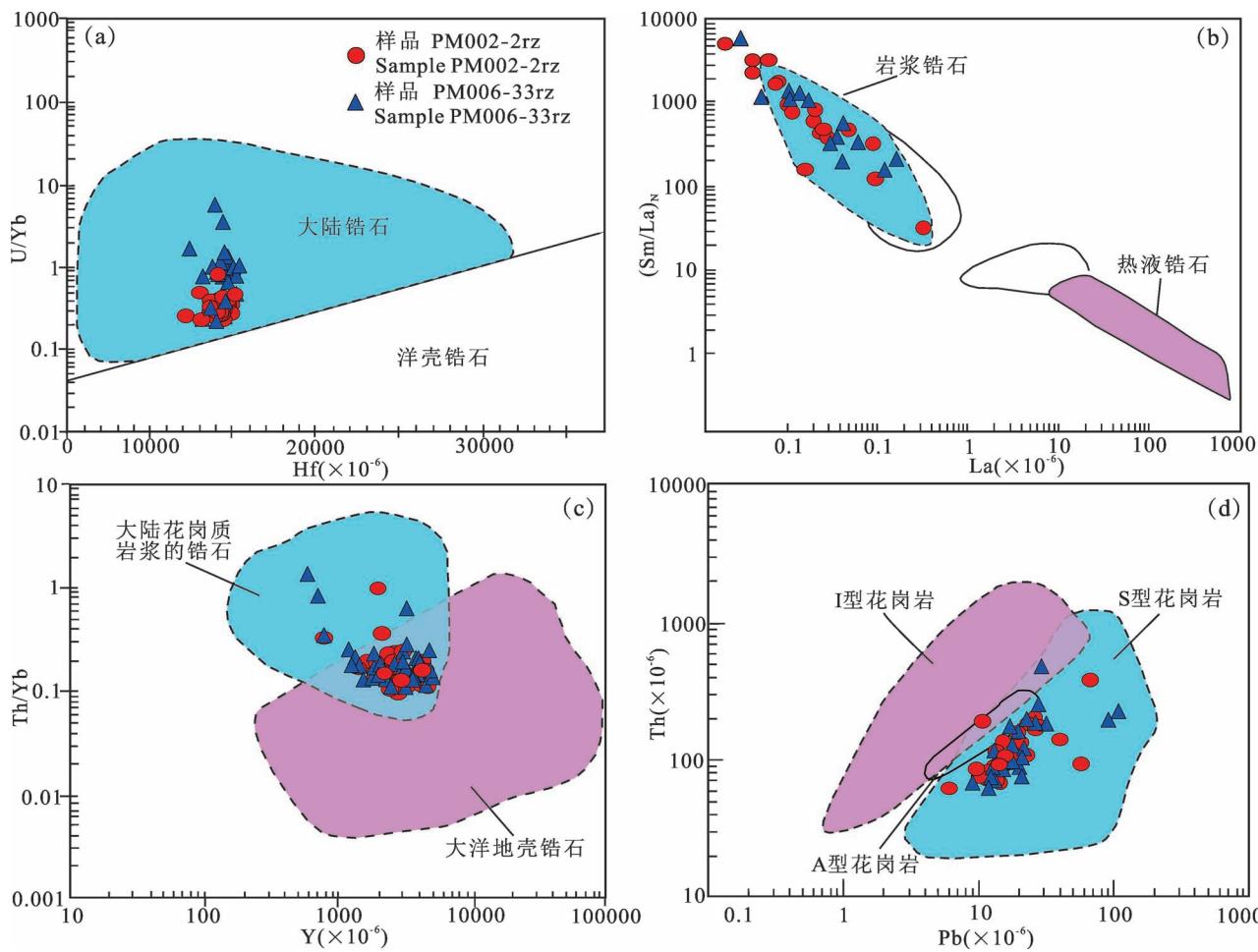


图 7 普宜地区嘉陵江组沉淀灰岩锆石类型判别图解:(a) Hf—U/Yb 图解(据 Grimes et al., 2007);(b) La—(Sm/La)_N 图解(据 Hoskin, 2005);(c) Y—Th/Yb 图解(据 Grimes et al., 2007);(d) Pb—Th 图解(据 Wang Qing et al., 2012)

Fig. 7 Different zircon types discrimination diagrams for the tuffites from the Jialingjiang Formation in the Puyi area: (a) Hf—U/Yb diagram (after Grimes et al., 2007); (b) La—(Sm/La)_N diagram (after Hoskin, 2005); (c) Y—Th/Yb diagram (after Grimes et al., 2007); (d) Pb—Th diagram (after Wang Qing et al., 2012)

与越北—华南板块在越南北部发生碰撞使华南板块发生挠曲形成长山褶皱带,并在碰撞造山过程形成一系列构造岩浆带,造成该时期频繁的火山活动和中酸性岩浆侵入(王疆丽等,2014)。在此同碰撞过程中侵位的过铝质花岗岩年龄在 259~245 Ma 之间(Hoa et al., 2008),与本文获得的沉淀灰岩 U-Pb 谐和年龄(250.6 ± 0.6 Ma、 249.1 ± 0.8 Ma)、PTB 界线凝灰岩年龄(252 Ma)及 OAB 界线绿豆岩年龄(247.2 Ma)基本一致;同时与过铝质花岗岩同期侵入的还有少量基性侵入体,具有双峰式岩浆组合的特征(Thuc et al., 1995),这也与本文沉淀灰岩母岩岩浆中具有少量基性岩浆的特征相符。向坤鹏等(2019)通过对右江盆地 OAB 界线绿豆岩与中越边境广西凭祥—十万大山火山带地球化学特征对比发

现,右江盆地绿豆岩与凭祥—十万大山早—中三叠世火山岩地球化学性质高度一致,均具有活动大陆边缘背景下形成的酸性、中酸性岩特征,这一结果同时与本文嘉陵江组沉淀灰岩及 PTB 界线凝灰岩特征高度一致(黄虎等,2012),从而佐证了上述研究对象均具有相同的源区。但无论是长山构造岩浆带抑或是凭祥—十万大山火山带,二者均为古特提斯洋俯冲闭合的背景下东印支板块与越北—华南板块在中越边境碰撞造山过程中形成的,均属印支期造山作用的产物。因此,笔者等在地理上大胆地将二者合并为同一源区,即中越边境长山构造岩浆带—十万大山火山带。

同时,部分学者通过对桂西南地区早三叠世中酸性火山岩的研究认为,这些火成岩主要形成于活

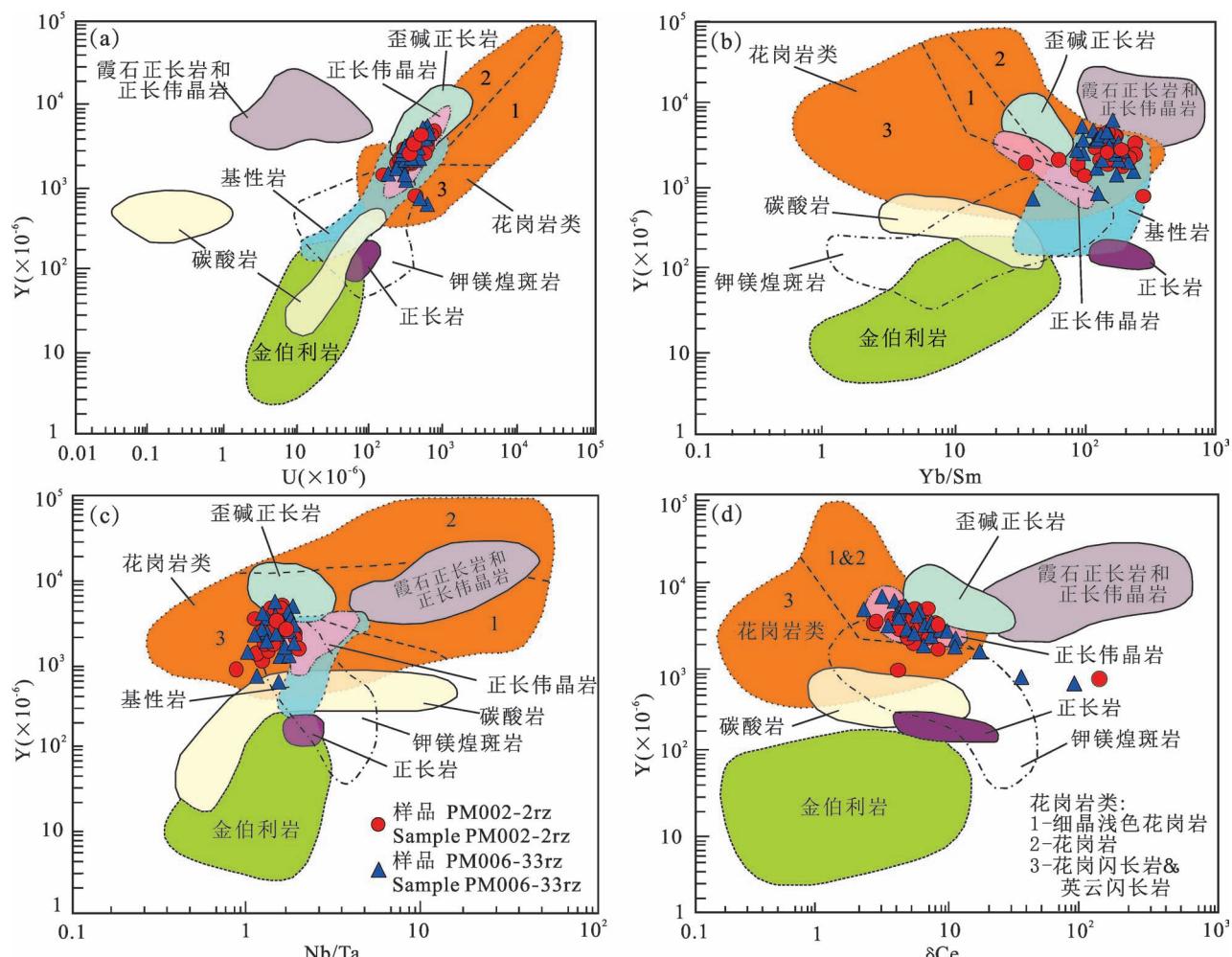


图8 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石微量元素源岩判别图解(据Belousova et al., 2002):

(a) U—Y 图解;(b) Yb/Sm—Y 图解;(c) Nb/Ta—Y 图解;(d) δCe —Y 图解

Fig. 8 Source rock discrimination diagrams of zircon trace elements for the Jialingjiang Formation in the Puyi area (after Belousova et al., 2002): (a) U—Y diagram; (b) Yb/Sm—Y diagram; (c) Nb/Ta—Y diagram; (d) δCe —Y diagram

动大陆边缘,很可能与太平洋库拉板块向亚洲板块俯冲的启动有关(梁金城等,2001)。早期俯冲作用过程中,深部上地幔物质上涌过程中混染了部分壳源物质并喷出和侵入于地表,形成一系列中酸性火山岩。对此,笔者等利用锆石Ti温度计对本文沉凝灰岩锆石形成的温压条件进行约束(Watson et al., 2006),计算结果显示:PM002-2rz样品锆石结晶温度最高为820℃,最低为620℃,平均739℃;PM006-33rz样品锆石结晶温度最高为764℃,最低为620℃,平均726℃。这一结果与平均下地壳温度基本一致,表示沉凝灰岩母岩岩浆主要来源于下地壳而非来源于深部上地幔。而且更多的证据表明,太平洋库拉板块向亚洲板块俯冲的起始时间为晚三叠世(唐杰等,2018),因此即便在早三叠世俯冲启

动阶段有小规模的岩浆活动也无法造成大量的火山灰喷发而提供充足的火山沉积物源。同时区域资料显示:扬子陆块西南缘OAB界线绿豆岩向南西表现为厚度增厚和层数增多的趋势(向坤鹏等,2019),暗示喷发源区应位于西南方向而非来自东方。综合以上因素,笔者等认为普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩母岩岩浆来源于太平洋库拉板块向亚洲板块俯冲的可能性极小。

综上所述,嘉陵江组沉凝灰岩与PTB界线凝灰岩、OAB界线绿豆岩均具有同源区不同期次喷发的特征,形成于活动大陆边缘的碰撞造山环境,源区主要位于中越边境长山构造岩浆带—十万大山火山带。

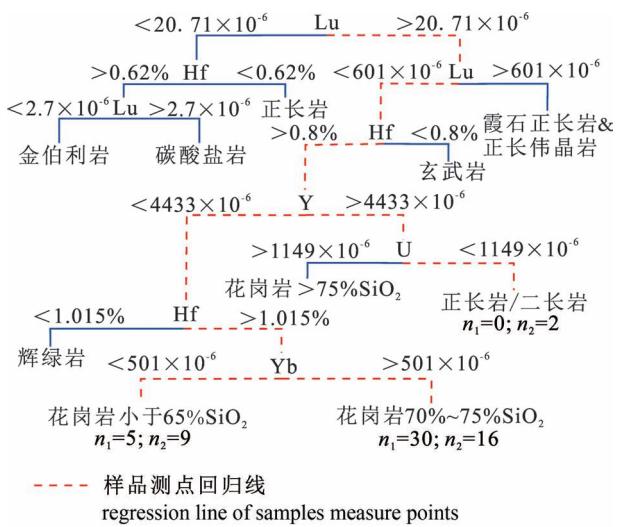


图 9 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石微量元素 CART
源岩判别图解(据 Belousova et al., 2002)

Fig. 9 Classification and regression trees (CART) discrimination diagram of zircon trace elements for the tuffites from the Jialingjiang Formation in the Puyi area (after Belousova et al., 2002)

5.3 沉凝灰岩锆石揭示的源区

地壳生长和增厚过程

沉凝灰岩镜下岩相学特征显示:部分石英和长石颗粒具有明显的熔蚀港湾状碎屑边缘(图 2e),说明岩浆形成过程中有后期补给岩浆的注入(赵志丹等,2018)。在早期岩浆上涌过程中岩浆房逐渐冷却,造成了岩浆中部分早期结晶矿物的析出。此后,随着高温补给岩浆的注入导致早期结晶的矿物被重新加热至矿物液相线温度,在已结晶矿物表面发生了重新熔融而形成港湾状结构,并随着高温补给岩浆的再次冷却使溶蚀结构得以保存并最终完成结晶。

锆石 Dy_N/Yb_N 和 U/Yb 比值的增加通常被解释为地壳的增厚现象(Liu Dong et al., 2014),沉凝灰岩锆石微量元素显示在 255~240 Ma 年龄段锆石由老至新 Dy_N/Yb_N 和 U/Yb 值呈缓慢增长的趋势(图 11a、b),说明在此时期地壳处于一个持续加厚的过程。同时,前文已确定了沉凝灰岩母岩岩浆主要来自于下地壳,因此推测源区内后期补给岩浆很可能来源于下地壳增厚过程的部分熔融。其中,255~

240 Ma 对应的是印支造山期,暗示自印支造山期以来中越边境地区随着陆壳碰撞过程中地壳处于持续增厚阶段,并造成下地壳增厚部位受深部高温加热发生部分熔融并形成补给岩浆后受压力的影响再次上涌,注入了早期温度已经下降的岩浆房中并发生热量和物质交换,造成部分早期岩浆中已结晶矿物表面发生了重新熔融并形成熔蚀结构。

5.4 沉凝灰岩年代学与早三叠世生物复苏过程的响应

前人对扬子西南地区早—中三叠世界线黏土岩进行了大量年代学的研究,同时也将 Olenekian—Anisian 的界线年龄约束在 247.2 Ma 附近(Lehrmann et al., 2006)。早三叠世时期是晚二叠世末期生物大灭绝至复苏的重要阶段,且该阶段频繁的火山活动是导致极端气候和生物迟缓复苏的重要因素(Erwin, 1998; Payne et al., 2006; Galfetti et al., 2007a; 谢韬等,2013),但早三叠世时期重要界线以外的火山事件却鲜有报道。究其原因主要在于早三叠世火山事件黏土岩并非如 OAB 界线黏土岩(绿豆岩)具有广泛而稳定分布的特征,该时期多层火山事件黏土岩往往分布不均,局部地区早三叠世沉凝灰岩层厚度极薄(<3cm)甚至未有出露,因此未能引起学者们的广泛关注。同时,近年来学者们的关注重点也主要针对于早三叠世生物地层及主要界线地层的研究,不可避免地弱化了对早三叠世其他时期火山事件地层的研究。

本文获得早三叠世嘉陵江组二段及四段下部两组沉凝灰岩谐和年龄分别为 250.6 ± 0.6 Ma 和 249.1 ± 0.8 Ma,第一组沉凝灰岩年龄略大于第二组,代表了早三叠世时期的两期火山事件。其中 250.6 ± 0.6 Ma 的年龄与 Smithian—Spathian (S—S) 亚阶界线年龄(250.7 Ma,据 Sun Yadong et al., 2012)基本一致,代表了该界线时期的一次重要的火山事件。早三叠世时期,频繁的火山活动诱发了长达 5 Ma 的超级温室期和多期大洋缺氧、硫化事件(Sun Yadong et al., 2012),但在 S—S 亚阶界线处却有一次明显的降温事件,导致全球海水碳、硫同位素同步正漂移,海洋生物也发生了初步的复苏(Song Huyue et al., 2019)。Galfetti 等(2007b)认为 S—S 亚阶界线的火山事件是导致此次降温事件的主要原因,该时期由于大规模的火山爆发,大量火山灰被喷发至大气层后形成了稳定的气溶胶层,阳伞效应隔绝了太阳辐射对地表的影响,气温因此降低,海洋初级生产力也随之繁盛。此次降温事件在区内具有较

好的沉积响应:嘉陵江组剖面地层特征显示(图2),经历过S—S界线火山事件后,嘉陵江组二段中—上部沉积岩类型由海相碳酸盐岩转变为泥岩及泥质粉砂岩为主的海相碎屑岩,粒度上也表现为由细变粗的特征,说明该时期存在一次海水由深变浅的海退事件。同时,海相碎屑岩中普遍发育的水平层理表明该时期沉积环境仍以稳定的低能静水环境为主,暗示该次海退事件规模可能较小,海平面下降幅度不大。该小规模海退事件则与全球性降温事件相吻合,气温的降低导致部分早期已消融的冰川初步恢复,全球海平面因此小幅度下降,海底缺氧环境也得以适当改善。海底生存环境的改善也引发了少量海生双壳类底栖生物的初步复苏,并沉积记录于嘉陵江组二段碎屑岩地层中。

249.1 ± 0.8 Ma 的年龄对应 Spathian 亚阶中期,嘉陵江组剖面地层特征显示(图2),嘉陵江组二段

海退沉积序列后,沉积岩类型由海相碎屑岩再次向海相碳酸盐岩转变,表现为该沉积期水体相对变深的海进退积序列,说明经历过S—S界线时期的降温及海退事件后,至 Spathian 亚阶中期气温已逐渐回升至 Smithian 亚阶中期的极端高温气候,冰川的再次消融导致了全球海平面的再次上升。同时,嘉陵江组四段沉凝灰岩上部发育有厚约 1 m 的含碳质白云岩(有机碳含量>1%),该黑色岩系层的出现反映了 Spathian 亚阶中期火山事件后海洋水体极端缺氧的还原环境,海水的缺氧和硫化导致前期复苏的生物再次灭绝,碳同位素也随之发生明显的负漂移(Sun Yadong et al., 2012)。前人研究发现,极端的高温气候往往与温室气体的大量排放有关(Algeo et al., 2012)。因此,推测该时期火山喷发或岩浆溢流过程中产生的大量甲烷和二氧化碳等火山温室气体被排放至大气层,从而再次加剧了温室效应,早期复

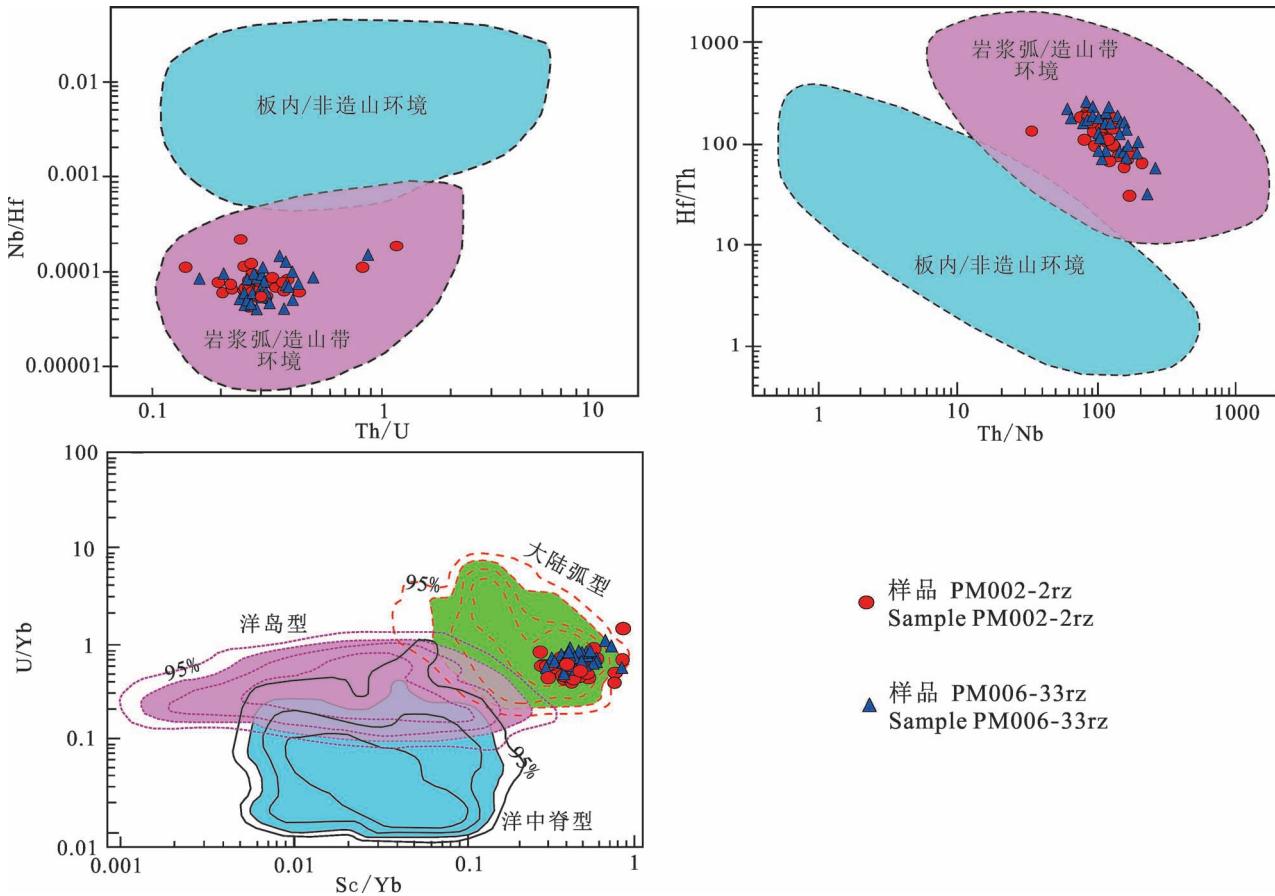


图 10 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石微量元素构造判别图解:(a) Hf—U/Yb 图解(据 Yang Jianghai et al., 2012);(b) La—(Sm/La)_N 图解(据 Yang Jianghai et al., 2012);(c) Y—Th/Yb 图解(据 Grimes et al., 2015)

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams of zircon trace elements for the Jialingjiang Formation in the Puyi area: (a) Hf—U/Yb diagram (after Yang Jianghai et al., 2012); (b) La—(Sm/La)_N diagram (after Yang Jianghai et al., 2012); (c) Y—Th/Yb diagram (after Grimes et al., 2015)

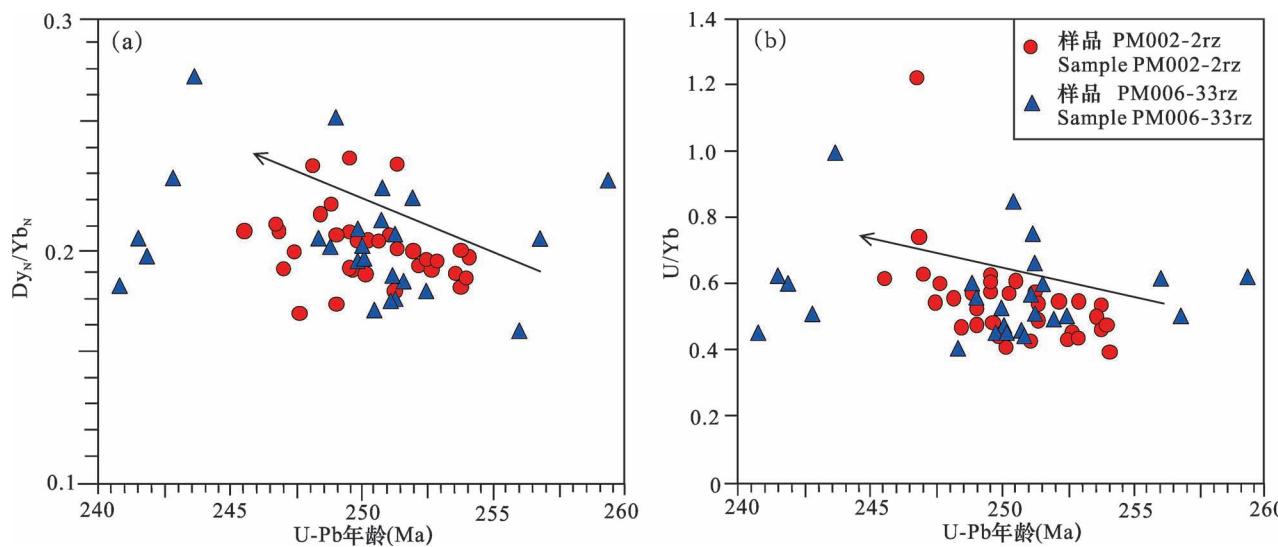


图 11 普宜地区嘉陵江组沉凝灰岩锆石 Dy_N/Yb_N (a) 和 U/Yb (b) 比值随时间变化的趋势图(据 Liu Dong et al. , 2014)

Fig. 11 Temporal variation of Dy_N/Yb_N (a) and U/Yb (b) ratios of zircons for the tuffites from the Jialingjiang Formation in the Puyi area (after Liu Dong et al. , 2014)

苏的海洋生态系统又随之遭受重创,而生物复苏进程也再一次被延缓。

值得深究的是:同样的火山事件,S—S 亚阶界线时期火山事件导致了全球性的降温事件,而 Spathian 亚阶中期的火山事件却加剧了温室效应,这显然有所矛盾。综合嘉陵江组多重地层学证据,笔者等认为其原因可能有以下几点:①S—S 亚阶界线沉凝灰岩厚度(约 2 m)远大于 Spathian 亚阶中期沉凝灰岩(约 0.5 m)厚度,暗示 Spathian 亚阶中期的火山事件规模可能要远小于 S—S 亚阶界线时期的火山事件,因此仅有少量火山灰进入大气层,未能完全形成稳定气溶胶层;②沉凝灰岩厚度差异同样暗示了 Spathian 亚阶中期火山活动可能以溢流相为主,次为喷出相,因此仅在岩浆溢流过程中有大量火山温室气体的排放,而喷发过程产生的火山灰较少;③生物地层显示,S—S 界线的火山事件虽导致全球气温降低,但由于此时海洋生产力仅初步恢复,少量底栖生物的复苏还不足以有效地降低大气中温室气体的含量;加之后期大气层中火山灰气溶胶的逐步减少,太阳辐射的逐渐加强和后期火山温室气体的排放也导致温室效应再次加剧。

简言之,其原因可能是单方面的,也可能是多因素综合反馈的结果,但具体证据就需要将来更多学科共同研究分析成果的约束。

6 结论

(1) 普宜地区嘉陵江组两件沉凝灰岩锆石内部结构和微量元素特征均显示样品具有岩浆锆石的特征,谐和年龄分别为 250.6 ± 0.6 Ma 和 249.1 ± 0.8 Ma,并且在古老地壳熔融或岩浆上涌过程中捕获了少量继承锆石。

(2) 沉凝灰岩样品锆石具有大陆 S 型花岗岩浆锆石的特征,母岩主要以酸性花岗岩类为主,次为中性正长岩类和少量基性岩类,形成于活动大陆边缘的碰撞造山环境,源区主要位于中越边境长山构造岩浆带—十万大山火山带,与二叠系—三叠系界线(PTB)凝灰岩及 Olenekian—Anisian 界线(OAB)绿豆岩具有同源区不同期次喷发的特征。

(3) 镜下岩相学特征表明沉凝灰岩母岩岩浆形成过程中有后期补给岩浆的注入而形成港湾状熔蚀结构,这可能与印支造山过程中源区下地壳增厚部位的部分熔融补给有关。

(4) 早三叠世时期频繁的火山活动是导致气候改变和生物周而复始的新生和灭绝的重要因素,其中普宜地区两组沉凝灰岩样品中 250.6 ± 0.6 Ma 年龄的样品对应着 Smithian—Spathian 界线时期的全球性降温及生物短期复苏事件; 249.1 ± 0.8 Ma 年龄的样品对应 Spathian 亚阶中期极端高温气候和生物再次灭绝事件。这可能是地质学、大气科学等多学

科因素综合反馈的结果,但具体机制仍需在将来继续进行约束。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈沈强,朱民,熊光耀,曾庆,周红飞,陈汉林,肖安战,贾东. 2017. 上扬子西南部晚三叠世古隆起演化及其构造意义. 大地构造与成矿学,41 (4) : 653 ~ 662.
- 管东东,赵飞,何碧,王宁祖,孔琳琳,王梓榕. 2017. 贵州省黔西县绿豆岩岩石地球化学特征及成因探讨. 资源信息与工程, 27 (12) : 46 ~ 50.
- 黄虎,杨江海,杜远生,黄宏伟,黄志强,谢春霞,胡丽沙. 2012. 右江盆地上二叠统一中三叠统凝灰岩年龄及其地质意义. 地球科学(中国地质大学学报),37 (1) : 125 ~ 138.
- 胡世玲,李曰俊,戴撞漠,蒲志平. 1996. 贵州绿豆岩激光质谱⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄. 岩石学报,12 (3) : 409 ~ 414.
- 李灵惠,周奇明,赵志丹,张超,妥天恩. 2016. 不同类型岩浆岩中锆石环带特征研究. 矿产与地质,30 (2) : 289 ~ 293.
- 梁丹,童金南,赵来时. 2011. 安徽巢湖平顶山西坡剖面早三叠世 Smithian-Spathian 界线底层研究. 中国科学: 地球科学, 42 (2) : 149 ~ 157.
- 梁金城,邓继新,陈懋弘,蒋柏昌,朱继姣. 2001. 桂西南早三叠世中酸性火山岩及其构造环境. 大地构造与成矿学,25 (2) : 141 ~ 148.
- 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. 岩矿测试,36 (6) : 649 ~ 658.
- 宋国学,秦克章,刘铁兵,李光明,申萍. 2010. 阿尔泰南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义. 岩石学报,26 (10) : 2946 ~ 2958.
- 谭梅,赵兵,周冰洋,张晓诗. 2016. 黔北大方地区二叠系—三叠系界线粘土及事件粘土地球化学特征及成因. 地质通报,35 (6) : 979 ~ 988.
- 唐杰,许文良,王枫,葛文春. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录. 中国科学: 地球科学,48 (5) : 549 ~ 583.
- 吴应林,颜仰基,秦建华. 1995. 扬子台地西缘早、中三叠世古地理重建. 岩相古地理,15 (3) : 17 ~ 33.
- 韦一,张宗言,何卫红,吴年文,杨兵. 2014. 上扬子地区中生代沉积盆地演化. 地球科学(中国地质大学学报),39 (8) : 1065 ~ 1078.
- 王训练,周洪瑞,王振涛,沈阳,于子栋,杨志华. 2019. 扬子板块西北缘早中泥盆世构造演化: 来自略阳地区踏坡组岩石学、锆石年代学和微量元素组成的约束. 地质学报,93 (12) : 2997 ~ 3037.
- 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. 矿物岩石,39 (1) : 82 ~ 91.
- 王疆丽,林方成,彭正,施美凤,王宏. 2014. 老挝—越南长山褶皱带似斑状角闪黑云二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质科技情报,33 (5) : 66 ~ 74.
- 王彦斌,刘敦一,姚建新,纪占胜,王立亭,武桂春. 2004. 黔西南下中三叠统界线年龄. 地质学报,78 (5) : 586 ~ 590.
- 王家林,李壮. 2017. 碎屑锆石微量元素对物源区的指示: 以辽东半岛辽河群为例. 地质科技情报,36 (2) : 36 ~ 57.
- 谢韬,周长勇,张启跃,胡世学,黄金元,文芝,丛峰. 2013. 罗平生物群下部凝灰岩锆石年龄及其地质意义. 地质论评,59 (1) : 159 ~ 164.
- 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—以右江盆地者堡段南一带凝灰岩为例. 地质论评,65 (2) : 319 ~ 334.
- 杨甫,陈刚,张文龙,田雯,田涛,赵雪娇. 2016. 锆石 U-Pb 定年与微量元素分析的地质应用. 科技导报,34 (18) : 221 ~ 229.
- 赵振华. 2016. 矿物微量元素组成用于火成岩构造背景判别. 大地构造与成矿学,40 (5) : 986 ~ 995.
- 张衡,李仁涛,巴金,李小平,马继跃. 2019. 川西南美姑地区下三叠统飞仙关组地球化学特征及其对物源和构造环境的指示意义. 矿物岩石,39 (3) : 52 ~ 59.
- 张建岭,许德如,于得水,王智琳,叶挺威,于亮亮,朱昱桦. 2018. 赣中山庄二长花岗岩的成因与构造背景: 岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学证据. 岩石学报,34 (6) : 1641 ~ 1656.
- 张英利,王宗起,王刚,李谦,林健飞. 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) : 55 ~ 72.
- 赵飞,何碧,张志玺,王宁祖,孙平原. 2019. 贵州省黔西县大寨地区中三叠统关岭组绿豆岩矿物学特征. 矿产与地质,33 (4) : 642 ~ 649.
- 朱忠发,王光新. 1986. 上扬子地台及其邻区早、中三叠世间绿豆岩沉积前后古地理. 石油与天然气地质,7 (4) : 344 ~ 355.
- 朱立军. 1994. 贵州早、中三叠世间绿豆岩粘土矿物学研究. 贵州工业大学学报,23 (5) : 19 ~ 24.
- 朱民,陈汉林,周静,杨树锋. 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.
- 赵志丹,刘栋,王青,朱弟成,董国臣,周肃,莫宣学. 2018. 锆石微量元素及其揭示的深部过程. 地学前缘,25 (6) : 124 ~ 135.
- 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. 地质学报,84 (8) : 1112 ~ 1117.
- Algeo T, Henderson C M, Ellwood B, Rowe H, Elswick E, Bates S. 2012. Evidence for a diachronous Late Permian marine crisis from the Canadian Arctic region. Geological Society of America Bulletin,124 (9 ~ 10) : 1448.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology,143 : 602 ~ 622.
- Chen Shengqiang, Zhu Min, Xiong Guangyao, Zeng Qing, Zhou Hongfei, Chen Hanlin, Xiao Ancheng, Jia Dong. 2017&. Evolution of the Late Triassic Paleo-uplift in the southwestern upper Yangtze Region and its tectonic significance. Geotectonica et Metallogenesis,41 (4) : 653 ~ 662.
- Croft F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry,53 (16) : 469 ~ 495.
- Erwin D H. 1998. The end and the beginning: recoveries from mass extinctions. Trends in Ecology & Evolution,13 (9) : 344 ~ 349.
- Galfetti T, Bucher H, Brayard A, Hochuli P A, Weissert H, Guodun K, Atudorei V, Guex J. 2007a. Late Early Triassic climate change: Insights from carbonate carbon isotopes, sedimentary evolution and ammonoid paleobiogeography. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,243 (3 ~ 4) : 394 ~ 411.
- Galfetti T, Hochuli P A, Brayard A, Bucher H, Weissert H, Vigran J O.

- 2007b. Smithian — Spathian boundary event : Evidence for global climatic change in the wake of the end-Permian biotic crisis. *Geology*, 35 (4) : 291 ~ 294.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hangh J K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust : A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 35 (7) : 643 ~ 646.
- Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, John B E. 2015. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170 (5 ~ 6) : 46.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearsona N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton : U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons, Precambrian Research, 131 (3 ~ 4) : 231 ~ 282.
- Guan Dongdong, Zhao Fei, Tong Yabo, Song Biao, Yang Zhenyu. 2010#. Geochemical characteristics and genesis of mungbean rocks in Qianxi County, Guizhou Province. *Resource Information and Engineering*, 27 (12) : 46 ~ 50.
- Hennann J, Rubatto D, Korsakov A, Shatsky V S. 2001. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141 (1) : 66 ~ 82.
- Hoskin P W O. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1) : 27 ~ 62.
- Hoskin P W O. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (3) : 637 ~ 648.
- Hoa T T, Anh T T, Phuong N T. 2008. Permo-Triassic in intermediate-felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina. *Geoscience*, 340 (2 ~ 3) : 112 ~ 126.
- Hu Shilin, Li Yuejun, Dai Zhuangmo, Pu Zhiping. 1996&. The laser mass-spectrometer ^{40}Ar - ^{39}Ar age of green pisolites of Guizhou Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12 (3) : 409 ~ 415.
- Huang Hu, Yang Jianghai, Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang, Xie Chunxia, Hu Lisha. 2012&. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from tuffs of the Upper Permian—Middle Triassic in Youjiang Basin, Guangxi Province and its geological significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (1) : 125 ~ 138.
- Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, Dillett P M, Wang Hongmei, Yu Youyi, Wei Jiayong. 2003. Permian—Triassic boundary sections from shallow-marine carbonate platforms of the Nanpan jiang Basin, South China: implications for oceanic conditions associated with the end-Permian extinction and its aftermath. *Palaeos*, 18 (2) : 138 ~ 152.
- Lehrmann D J, Ramezani J, Bowring S A, Martin M W, Montgomery P, Enos P, Payne J L, Orchard M J, Wang Hongmei, Wei Jiayong. 2006. Timing of recovery from the end-Permian extinction : geochronologic and biostratigraphic constraints from south China. *Geology*, 34 (12) : 1053 ~ 1056.
- Li Linghui, Zhou Qiming, Zhao Zhidan, Zhang Chao, Tuo Tianen. 2016&. Characteristics of zircon annulus in different types of magmatic rocks. *Mineral Resources and Geology*, 30 (2) : 289 ~ 294.
- Liang Dan, Tong Jinnan, Zhao Laishi. 2011. Lower Triassic Smithian—Spathian boundary at West Pinglingshan Section in Chaohu, Anhui Province. *Science China Earth Sciences*, 54 : 372 ~ 379.
- Liang Jinchen, Deng Jixin, Chen MaoHong, Jiang Bochang, Jiang Bochang, Zhu Jijiao. 2001&. The early Triassic intermediate-acid volcanic and its tectonic environment in Southwestern Guangxi. *Geotectonica et Metallogenica*, 25 (2) : 141 ~ 148.
- Liu Dong, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Niu Yaoling, Harrison TM. 2014. Zircon xenocrysts in Tibetan ultrapotassic magmas : Imaging the deep crust through time. *Geology*, 42 (1) : 43 ~ 46.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 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. *Journal of Petrology*, 51 (1 ~ 2) : 537 ~ 571.
- Mezger K, Krogstad E J. 2004. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages : An evaluation. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (1) : 127 ~ 140.
- Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe I, Renne P R. 2004. Age and timing of the end-Permian mass extinction : U/Pb geochronology on closed system zircons. *Science*, 305 : 1760 ~ 1763.
- Payne J L, Lehrmann D J, Christensen S, Wei J, Knoll A H. 2006. Environmental and biological controls on the initiation and growth of a Middle Triassic (Anisian) reef complex on the Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, China. *Palaeos*, 21 (4) : 325 ~ 343.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry : Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184 (1 ~ 2) : 123 ~ 138.
- Song Guoxue, Qin Kezhang, Liu Tiebing, Li Guangming, Shen Ping. 2010&. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircon from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10) : 2946 ~ 2958.
- Song Huyue, Du Yong, Algeo T J, Tong Jinnan, Owens J D, Song Haijun, Tian Li, Qiu Haiou, Zhu Yuanyuan, Lyons T W. 2019. Cooling-driven oceanic anoxia across the Smithian/Spathian boundary (mid-Early Triassic). *Earth-Science Reviews*, 195 : 133 ~ 146.
- Sun Yan, Gao Yun, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Gu Wenshuai, Li Jian, Zhang Lihong. 2017&. Zircon U-Pb Dating of 'Mung Bean Rock' in the Tongliang Area, Chongqing and Its Geological Significance. *Rock and Mineral Analysis*, 36 (6) : 649 ~ 658.
- Sun Yadong, Michael M J, Paul B W, Yan Chunbo, Chen Yanlong, Jiang Haishui, Wang Lina, Lai Xulong. 2012. Lethally hot temperatures during the early Triassic greenhouse. *Science*, 338 : 366 ~ 370.
- 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.
- Takahashi S, Oba M, Kaiho K, Yamakita S, Sakata S. 2009. Panthalassic oceanic anoxia at the end of the Early Triassic : A cause of delay in the recovery of life after the end-Permian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 274 (3 ~ 4) : 185 ~ 195.
- Tan Mei, Zhao Bing, Zhou Bingyang, Zhang Xiaoshi. 2016&. Geochemical characteristics and genesis of T/P boundary clay and event clay in Dafang area, Guizhou Province. *Geological Bulletin of China*, 35 (6) : 979 ~ 988.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Ge Wenchun. 2018&. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent : Mesozoic—Paleogene magmatic records in Northeast Asia. *Science*

- China Earth Sciences,48 (5) : 549 ~ 583.
- Thuc D D, Trung H. 1995. Magmatic formations of Vietnam. Hanoi: Sci. & Tech, Publ. House.
- Tong Jinnan, Zuo Jingxun, Chen Zhongqiang. 2007. Early Triassic carbon isotope excursions from South China : Proxies for devastation and restoration of marine ecosystems following the end-Permian mass extinction. Geological Journal,42 (3 ~ 4) : 371 ~ 389.
- Wang Jialin, Li Zhuang. 2017&. Trace element compositions in the detrital zircons as an indicator of source rock type : an example from Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China. Geological Science and Technology Information,36 (2) : 36 ~ 57.
- Wang Ningzu, Zhang Xiangwen, He Bi, Zhao Fei, Jin Canhai, Ren Guangming. 2019&. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mung bean rocks of the Middle Triassic Guanling Formation in Daizhai area of Qianxi County, Guizhou Province. J Mineral Petrol, 33 (4) : 642 ~ 649.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Yao Jianxin, Ji Zhansheng, Wang Liting, Wu Guichun. 2004&. Age Derermination of the Lower—Middle Triassic Boundary at Ganheqiao, Wangmo, Guizhou Province. Acta Geologica Sinica, 78 (5) : 586 ~ 590.
- Wang Qing, Zhu Dichen, Zhao Zhidan, Guan Qi, Zhang Xiaoqian, Sui Qinglin, Hu Zhaochu, Mo Xuanxue. 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet : Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. Journal of Asian Earth Sciences, 53 : 59 ~ 66.
- Wang Xunlian, Zhou Hongrui, Wang Zhentao, Shen Yang, Yu Zidong, Yang Zhihua. 2019&. Tectonic evolution of the northwestern Yangtze block in central China during the Early—Middle Devonian : constraints from petrology, zircon U-Pb dating and trace element composition of the Tapo Formation in the Lüeyang area. Acta Geologica Sinica, 93 (12) : 2997 ~ 3037.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151 (4) : 413 ~ 433.
- Wang Jiangli, Lin Fangcheng, Peng Zheng, Xuan Meifeng, Wang Hong. 2014&. LA-ICP-MS Zircon U-Pb isotopic age of porphyritic Hornblende—Biotite monzonitic graniye of Phia bioc pluton in Truong Son Fold Belt, Laos—Vietnam and its geological significance. Geological Science and Techonology Information, 33 (5) : 66 ~ 74.
- Wei Yi, Zhang zongyan, He Weihong, Wu Nianwen, Yang Bing. 2014&. Evolution of sedimentary basins in the upper Yangtze during Mesozoic. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 39 (8) : 1065 ~ 1078.
- Whitehouse M J, Platt J P. 2003. Dating high-grade metamorphism—constraints from rare-earth elements in zircon and garnet. Contributions to Mineralogy and Petrology, 145 (1) : 61 ~ 74.
- Wu Yinglin, Yan Yangji, Qin Jianhua. 1995&. Palaeogeographic reconstruction of the Western margin of the Yangtze platform during the Early and Middle Triassic. Sedimentary Faces and Palaeogeography, 15 (3) : 17 ~ 33.
- Xiang Kumpeng, An Yayun, He Yongzhong, Zhao Lei, Yi Chengxing, Liu Kuiyong, Zhang Housong, Huang Yong, Pan Yingjuan, Deng Xiaojie. 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, Zhebao, Youjiang basin. Geological Review, 65 (2) : 319 ~ 334.
- Xie Tao, Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Hu Shixue, Huang Jinyuan, Wen Wen, Cong Feng. 2013&. Zircon U-Pb age for the tuff before the Luoping biota and its geological implication. Geological Review, 59 (1) : 159 ~ 164.
- Yang Jianghai, Cawood P A, Du Yuansheng, Huang Hu, Huang Hongwei, Tao Ping. 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian—Triassic volcanogenic sediments in China. Sedimentary Geology, 261 ~ 262 : 120 ~ 131.
- Yang Fu, Chen Gang, Zhang Wenlong, Tian Wen, Tian Tao, Zhao Xuejiao. 2016&. Zircon U-Pb dating and its trace element analysis applied to geology. Science and Technology Review, 34 (18) : 221 ~ 229.
- Zhao Fei, He Bi, Zhang Zhixi, Sun Pingyuan. 2019&. Mineralogical characteristics of mung bean rock of the Middle Triassic Guanling Formation at DaZhai area in Qianxi County, Guizhou. Mineral Resources and Geology, 33 (4) : 642 ~ 649.
- Zhao Zhidan, Liu Dong, Wang Qing, Zhu Dichen, Dong Guocheng, Zhou Su, Mo Xuanxue. 2018&. Zircon trace elements and their use in probing deep processes. Earth Science Frontiers, 25 (6) : 124 ~ 135.
- Zhang Heng, Li Rentao, Ba Jin, Li Xiaoping, Ma Jiyue. 2019&. Geochemical characteristics of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Meigu area, Southwestern Sichuan and it significance for the provenance and tectonic setting. J Mineral Petrol, 39 (3) : 52 ~ 59.
- Zhang Jianling, Xu Deru, Yu Deshui, Wang Zhiling, Ye Tingwei, Yu Liangliang, Zhu Yihua. 2018&. Petrogenesis and tectonic setting of the Shanzhuang monzogranites in central Jiangxi Province, South China: Evidence from lithology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology. Acta Petrologica Sinica, 34 (6) : 1641 ~ 1656.
- Zhang Yingli, Wang Zongqi, Wang Gang, Li Qian, Lin Jianfei. 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) : 55 ~ 72.
- Zhen Liandi, Yao Jianxin, Tong Yabo, Song Biao, Wang Liting, Yang Zhenyu. 2010&. Zircon U-Pb Dating for the Boundary of Olenekian—Anisian at Wangmo, Guizhou Province. Acta Geologica Sinica, 84 (8) : 1112 ~ 1117.
- Zhu Lijun. 1994&. A Study of the clay mineralogy of green bean rock between the early and middle Triassic in Guizhou. Acta Guizhou Engineering College, 23 (5) : 19 ~ 24.
- Zhu Zhongfa, Wang Guanxin. 1986&. Paleogeography of before and after deposition of Green-Bean rock (altered tuff) between the early and middle Triassic in the Upper Yangtze Platform and its adjacent areas. Oil & Gas Geology, 7 (4) : 344 ~ 355.
- Zhu Min, Chen Hailin, Zhou Jing, Yang Shufeng. 2016&. Provenance of early Triassic in Yanyuan Basin, Upper Yangtze and its implication for the tectonic evolution. Earth Science, 41 (8) : 1309 ~ 1321.

Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, trace element characteristics of the Lower Triassic Jialingjiang Formation tuffites in the Puyi area, northwestern Guizhou, and their geological significance

MIAO Yu¹⁾, WU Liang¹⁾, XIAO Changyuan¹⁾, LI Suoming¹⁾,
LI Zhiwei¹⁾, SONG Wenting²⁾, TIAN Yufeng¹⁾

1) Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Kunming, 650001;

2) Technology and Business University, Kunming, 650001

Objectives: The frequent volcanic events in the Early Triassic period were the main causes of the global climate and marine environment anomalies. A lot of research on the volcanic events during the important boundary period of the Early Triassic have conducted, but few reports have been made on the other volcanic events stratas beyond the typical boundary.

Methods: In this paper, we carried out some researches of the Jialingjiang Formation tuffites in the Puyi area by petrology, petrography, zircon geochronology and trace elements assemblage characteristics in the Southwestern margin of the Upper Yangtze.

Results: Most of the tuffite zircons have the internal structures of acid magma zircon, the trace elements are characterized by a strong loss of LREE and strong enrichment of HREE; obvious positive Ce anomaly and negative Eu anomaly, and Th/U ratio > 0.2, which have the characteristics of typical magmatic zircon. The two groups of the zircons concordant ages are 250.6 ± 0.6 Ma and 249.1 ± 0.8 Ma, which correspond to the Smithian—Spathian (S—S) boundary and the middle Spathian substages in the early Triassic.

Conclusions: The parent rocks of the Jialingjiang Formation tuffites are mainly acid granites, followed by neutral syenites and a few basic rocks. The tuffites of Jialingjiang Formation have the homology with Permian—Triassic boundary (PTB) tuffites and Olenekian—Anisian boundary (OAB) mung bean rocks, which formed in the collision orogenic environment of active continental margin. The source area is probably located in the Changshan tectonomagmatic belt—Shiwandashan volcanic belt in the China—Vietnam border area. During the continental crust collision, the crust of the source area was in a continuous thickening stage, and the partial melting of the thickened lower crust formed the upwelling of supplementary magma caused the early crystalline minerals partially melting corrosion. Frequent volcanic events in the Early Triassic period were the main factors leading to climate change and biological rebirth and extinction, the reason may be the result of the comprehensive feedback of factors such as the parasol effect and the greenhouse effect. However, the specific evidence still needs to be constrained by the more comprehensive results of more disciplines in the future.

Key words: Jialingjiang Formation; tuffites; zircon U-Pb geochronology; zircon trace elements; biological retardation recovery

Acknowledgements: This research is supported by China Geological Survey Project (No. DD20191012). Thank the anonymous reviewers for their constructive comments on this research

First author: MIAO Yu, male, born in 1988, engaged in resource exploration and basic geology survey and research work. Email: 361583884@qq.com

Manuscript received on: 2016-07-22; Accepted on: 2017-10-11; Network published on: 2021-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.*.*; Edited by: ZHANG Yuxu

