

# 滇西兰坪盆地西缘火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其大地构造意义

范金伟<sup>1</sup> 杨天南<sup>1</sup> 梁明娟<sup>1,2</sup> 史鹏亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:** 青藏高原东南缘“三江”复合造山成矿带南、北两段发育若干火成岩带, 其间的时空关系并不清晰, 原因在于位于构造带中段的兰坪盆地内火山岩缺乏年代学、地球化学制约。兰坪盆地西侧火山岩带由下至上由安山质晶屑凝灰岩、安山质集块-块状安山岩、玄武质熔岩组成, 上部玄武质熔岩夹紫红色泥岩, 并被紫红色泥岩覆盖。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 火山岩下部的晶屑凝灰岩形成时代为 238 Ma, 中段安山岩喷发时间为 233 Ma, 上段玄武质熔岩形成时代为 229 Ma。这套火山岩属于钙碱性-高钾钙碱性系列, 具有高  $Al_2O_3$  和低  $MnO$ 、 $P_2O_5$  和  $TiO_2$  的特征, 具有轻稀土元素富集的右倾型配分模式, 无明显  $Eu$  异常。安山岩相对富集  $La$ 、 $U$  等大离子亲石元素,  $Nb$ 、 $Ta$  等高场强元素明显亏损, 具有俯冲带弧火山岩典型特征, 而玄武质熔岩具有富集型洋中脊玄武岩地球化学特征。结合其野外产状(覆于石炭纪陆缘碎屑岩之上), 地球化学特点及其随时间变化规律, 认为这套岩石形成于陆缘弧环境, 而晚期岩浆活动可能与俯冲板片脱离、拆沉过程有关。兰坪盆地西缘火山岩与造山带内其他同时代火成岩一起组成一条近连续的大型岩浆岩带, 带内绝大部分岩浆岩具有弧岩岩浆构造属性, 部分显示板内岩浆岩地球化学特征。这条岩浆岩带可与具同等规模的龙木错-双湖(澜沧江)-昌宁-孟连缝合带对应, 推测其为该缝合带所代表的古特提斯主洋盆向西(南)向东、北(东)方向俯冲过程的产物。

**关键词:** 兰坪盆地; 火山岩带; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 古特提斯

中图分类号: P588.14; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0471-20

## LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemistry of volcanic rocks on the western margin of Lanping Basin in western Yunnan and their tectonic implications

FAN Jin-wei<sup>1</sup>, YANG Tian-nan<sup>1</sup>, LIANG Ming-juan<sup>1,2</sup> and SHI Peng-liang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A curved belt consisting of terranes or blocks and associated Late Paleozoic-Early Mesozoic sutures features the southeastern part of the Tibetan Plateau. It is the Sanjiang (Three-Rivers) multiple orogenic and ore-forming belt. In spite of numerous studies, its Paleotethyan (Late Paleozoic to Early Mesozoic) tectonic evolution remains a topic of much controversy. Recently published geochronological and geochemical data derived from modern techniques have revealed several magmatic zones with variable tectonic affinity. However, the temporal and spatial distribution pattern of the magmatic rocks didn't appear, mainly due to the absence of high quality data from some regions. As the Lanping Basin is located in the middle portion of the Sanjiang orogenic belt, the time and tectonic affinity of the volcanic rocks in this basin play a significant role in revealing the connection

收稿日期: 2014-03-01; 修订日期: 2014-05-04

基金项目: 国家 973 计划项目(2009CB421001); 国家地质调查项目(1212011121065); 国际对比计划项目(IGCP-SIDA-600)

作者简介: 范金伟(1987-), 男, 在读硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: 845902057@qq.com; 通讯作者: 杨天南, 研究员, E-mail: yangtn@cags.ac.cn

between the magmatic zones in the southern and northern segments of the Sanjiang belt. This study focused on the volcanic rocks exposed on the western margin of the Lanping Basin where high-quality geochronological and geochemical data are rare. The volcanic rocks in western Lanping Basin consist of andesitic tuff in the lower segment, andesite in the middle segment, and basaltic lava at the top. This volcanic sequence is developed upon the Carboniferous terrigenous clastics. The basaltic lavas are interlayered with reddish mudstone. The content of mudstone increases upwards. Geochemical data demonstrate that these volcanic rocks are of calc-alkaline or high-K calc-alkaline series, characterized by high  $Al_2O_3$  and very low  $TiO_2$ ,  $MnO_2$ , and  $P_2O_5$  content. The andesitic samples exhibit arc-like chondrite- or primitive-mantle-normalized trace element pattern, whereas the basaltic lava displays enriched-middle-oceanic-ridge-basalt pattern. These features, combined with the field relationship, suggest that these volcanic rocks were formed in a continental arc setting. New LA-ICP-MS zircon U/Pb dating results indicate that the bottom crystal tuff was formed at 238 Ma, the andesite of the middle segment at 233 Ma, and the basaltic lava at the top of the volcanic sequence erupted at 229 Ma. These new data suggest that, at the end of the subduction, the breakup of the subducted slab might have taken place which led to the uprising of asthenosphere and induced partial melting of the enriched mantle wedge. The new data obtained by the authors have filled the spatial gap of geochronological data in the Sanjiang orogenic belt. As a result, a large scale (with a length  $>2\ 000$  km) successive arc-like volcanic belt along the entire Sanjiang belt has become clear. Such a large arc-volcanic belt should be affiliated to a large-scale subduction zone (suture). Synthesizing available geological, geochemical, and geochronological data, the authors hold that the eastward or northeastward subduction of the Paleotethys along the Longmu Co-Shuanghu(-Lancangjiang)-Changning-Menglian suture probably resulted in the formation of the large-scale volcanic belt.

**Key words:** Lanping Basin; volcanics belt; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Paleotethyan

西南“三江”造山带位于东特提斯构造域东南缘(图 1),比较完整地记录了特提斯构造演化过程(Mo *et al.*, 1994; Metcalfe, 1996, 2013)其中古特提斯阶段构造演化的地质记录最为完整(李才, 1987, 2008; 莫宣学等, 1993, 2001; Mo *et al.*, 1994; 孙晓猛等, 1999; 潘桂棠等, 2002; 侯增谦等, 2004; 彭头平, 2006; 彭头平等, 2006; 李才等, 2006, 2008; Peng *et al.*, 2008, 2013; 范蔚茗等, 2009; Yang *et al.*, 2011, 2012, 2013)。基于上世纪 70~80 年代完成的 1:20 万区域地质调查资料,前人针对“三江”造山带开展了大量研究工作,进而划分了大地构造单元,并提出了若干古特提斯构造演化模型(Mo *et al.*, 1994; 钟大赉等, 1998; 王立全等, 1999; Wang *et al.*, 2000; 莫宣学等, 2001; Reid *et al.*, 2005; Jian *et al.*, 2008; Fan *et al.*, 2010; 王保弟等, 2011a, 2011b; Zi *et al.*, 2012a, 2012b)。分析前人成果发现,以兰坪—维西为界,“三江”复合造山成矿带南、北两段的大地构造单元划分方案不尽相同,由此构建了难以完全对应的构造演化模型:① 维西以北发育 3 条蛇绿岩带,而“三江”南段仅发育两条蛇绿岩带;② “三江”北段发育两套弧岩带,其间为区域性角度不整合(Yang *et al.*, 2012),

而在“三江”南段同时代的角度不整合并不明显;③ 南、北两段的大地构造演化模型几乎完全无法对比(钟大赉等, 1998; Fan *et al.*, 2010; Zi *et al.*, 2012a, 2012b)。而近年来新发表的大量年代学数据表明,“三江”南、北两段可能具有相似的晚古生代—早中生代岩浆活动历史,暗示其可能具有相同的构造演化过程。鉴于此,了解位于南、北“三江”造山带衔接部位的兰坪盆地岩浆活动时代及构造属性具有重要意义。

前人的研究主要针对兰坪盆地东侧的火山岩带展开(如牟传龙等, 2002; 简平等, 2003; 高睿等, 2010; 王保弟等, 2011a; Zi *et al.*, 2012a, 2012b; Wang *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013)。而盆地西侧的火山岩带由于出露不连续,更兼变形强烈,研究程度相对较低,特别是高质量年代学、地球化学数据相对匮乏。这种现状影响了对“三江”复合造山成矿带火成岩时空分布规律的认识,不利于构建合理的构造演化模型。为此,本文选择出露于兰坪盆地西缘的火山岩为研究对象,通过详细的野外考察,确定其产出状态,采集岩石样品开展同位素年代学、全岩地球化学研究,以确定火山活动时代,探讨构造背景,并结合前人资料讨论其大地构造意义。

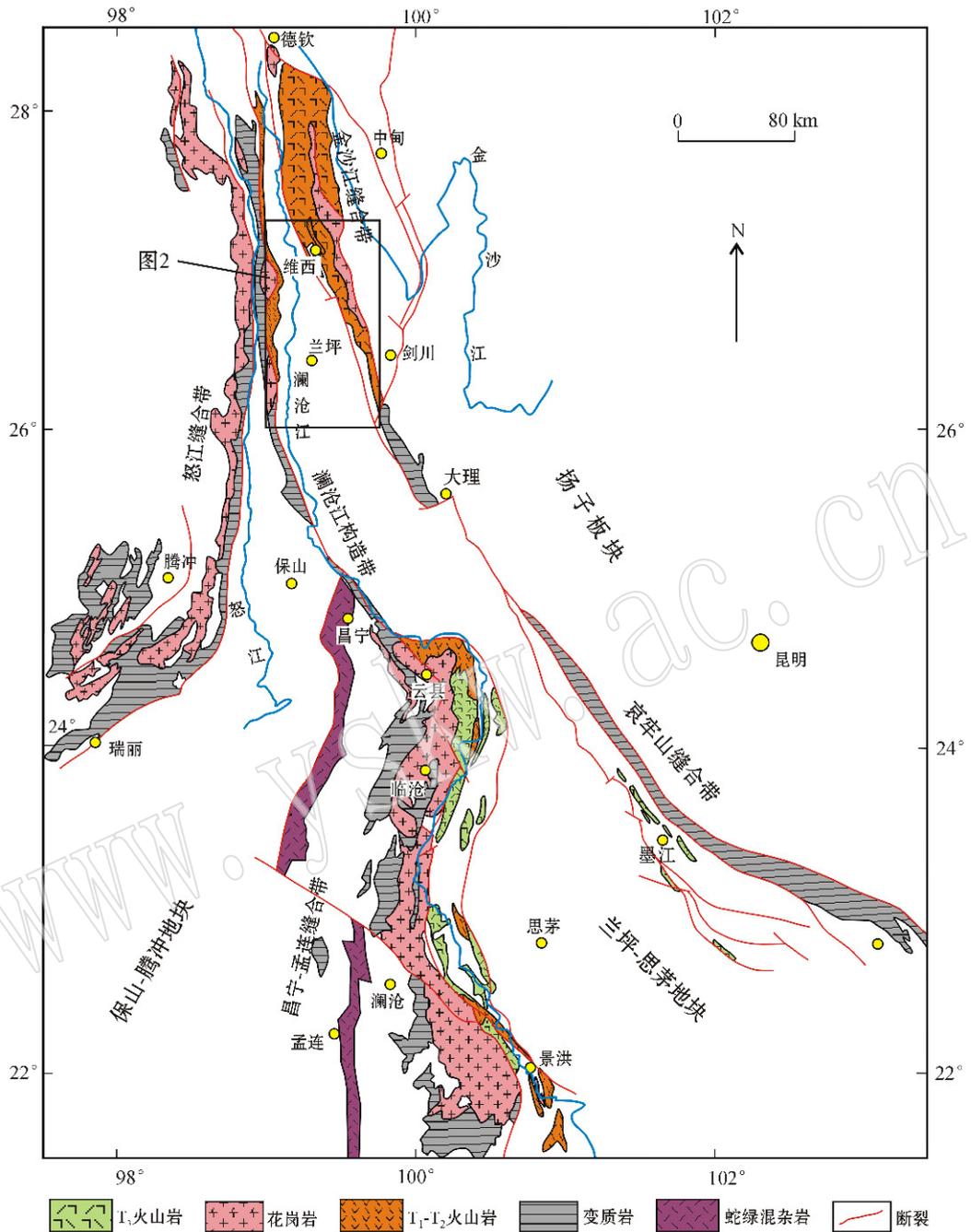


图1 滇西“三江”地区三叠纪岩浆岩分布简图[据 Peng 等(2006, 2008, 2013)、范蔚若等(2009)、Hennig 等(2009)、Wang 等(2010)修改]

Fig. 1 Simplified geological map of the Sanjiang orogenic belt in western Yunnan, showing spatial distribution of Triassic igneous rocks (modified after Peng *et al.*, 2006, 2008, 2013; Fan Weiming *et al.*, 2009; Hennig *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010)

## 1 区域地质背景

### 1.1 大地构造背景

“三江”复合造山成矿带北-北东侧以西金沙江(玉树)-甘孜-理塘缝合带(Yang *et al.*, 2012)为界。

该带以北为巴颜喀拉-松潘-甘孜逆冲褶皱带, 东以点苍山-哀牢山构造带为界, 其东为扬子板块(华南板块), 西侧边界尚存在争议, 根据现有数据, 我们趋向于龙木错-双湖(-澜沧江)-昌宁-孟连缝合带代表“三江”复合造山成矿带西侧边界, 由此限定“三江”复合造山成矿带由东(北)羌塘-昌都地块、中咱(西

义敦)微地块、兰坪-思茅地块及其叠覆其上或分布其间的若干岩浆岩带所组成(图1)。莫宣学等(1993)通过综合1:20万区域地质资料以及其他研究成果,提出了14个不同时代、具有不同构造属性的火山岩带。其中,分布于中咱微陆块与东羌塘地块之间的一系列超基性岩、枕状玄武岩、少量辉长岩、斜长花岗岩岩块被定义为金沙江蛇绿岩带(莫宣学等,1993;孙晓猛等,1999;Jian *et al.*, 2008),而中咱微陆块以东的基性-超基性岩块被划归为甘孜-理塘蛇绿混杂带。

逐渐积累的年代学、地球化学数据以及构造地质学研究显示,出露于东羌塘地块北部(玉树地区)和中咱微陆块东北部(义敦地区)的晚三叠世火山-沉积岩具有相同的岩石组成、地层结构、变形历史、年代学-地球化学特征,两者共同组成了大型玉树-义敦陆缘弧岩浆岩带,代表西金沙江-甘孜-理塘古特提斯洋向南俯冲的产物(Yang *et al.*, 2012)。晚三叠世火山碎屑岩底部为区域性角度不整合(三江造山带地质图编委会,1986),不整合面之下发育另一套火山-碎屑岩地层组合。现有的年代学数据表明,其形成于中二叠世-早中三叠世,很可能构成一条西起东羌塘地块南缘(如张洪瑞等,2010),往东经杂多(Yang *et al.*, 2011)和维西(王保弟等,2011a),往南(Peng *et al.*, 2008;范蔚茗等,2009)延伸并纵贯整个“三江”构造带的大型岩浆岩带。位于该岩浆岩带中部兰坪盆地西缘的火山岩很可能属于上述大型岩浆岩带的一部分,但目前尚缺乏精确的年代学、地球化学数据制约。

## 1.2 兰坪盆地地质特点

位于“三江”造山带中南段的兰坪-思茅地块(图1)是“三江”造山带的重要组成部分,大体呈北北西-南南东向延伸,东西两侧分别以哀牢山缝合带和澜沧江-昌宁-孟连缝合带为界。兰坪盆地位于该地块的北端(图2),衔接“三江”造山带的南、北两段。根据1:20万区域地质调查资料(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>,1984<sup>②</sup>;Wang *et al.*, 2013),兰坪盆地基底由元古宙(?)变质岩、强烈变形的晚古生代-早中生代火山-沉积岩组成,沉积盖层为中新生代红色陆相沉积地层。变质岩主要分布在盆地东侧的点苍山及西侧的碧罗雪山一带,包括下元古界沟头箐群和中元古界苍山群,由低角闪岩相和高绿片岩相片麻岩

(包括长英质片麻岩、云母片岩、大理岩和斜长角闪岩)组成。这些变质岩被认为是扬子板块结晶基底的一部分(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>;沙绍礼等,1999,2000;刘俊来等,2008;Zi *et al.*, 2012a, 2012b;Wang *et al.*, 2013)。新近发表的同位素年代学数据表明变质岩系中的长英质片麻岩主体为糜棱岩化三叠纪侵入岩(刘俊来等,2008;李宝龙等,2008;戚学祥等,2010),表明这些结晶基底受到了古特提斯阶段岩浆活动的改造。晚古生代-早中生代地层呈带状、不规则状展布在盆地的两侧,由二叠-三叠纪台地相碳酸盐、(滨)浅海相、海陆交互相陆缘碎屑岩以及火山岩组成,发育同时代侵入岩。侏罗系-第三系陆相地层则广泛分布在盆地的内部,主要为湖盆相-河流相碎屑岩(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>,1984<sup>②</sup>)及少量火山岩(Yang *et al.*, 2013)。

1:20万区域地质调查建立了复杂的火山岩岩性-时代格架(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>,1984<sup>②</sup>)。不同地区的火山岩具有不同的岩石组合,因而被赋予了不同岩石地层单位名称(图2、表1)。总体而言,位于盆地北东、东侧的火山岩地层(人支雪山组、攀天阁组)主要由流纹岩组成,含少量玄武岩(王保弟等,2011a;Zi *et al.*, 2012b);位于盆地西侧的崔依比组由玄武岩、安山岩、少量流纹岩组成;位于盆地南部的火山岩(忙怀组、小定西组)由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩组成(Peng *et al.*, 2006a, 2006b, 2008;Fan *et al.*, 2010)。

本文研究区位于兰坪-思茅盆地北西缘澜沧江沿岸的石登-营盘地区。火山岩组合由下往上依次为:灰紫色安山质晶屑凝灰岩,厚度超过100 m;灰紫色厚层-块状安山质火山角砾岩、集块岩、块状安山岩,厚度超过90 m;发育杏仁构造的块状玄武质、玄武安山质熔岩,厚度约50 m。玄武质、玄武安山质熔岩中夹有紫红色粉砂-泥岩夹层,往上夹层增多,渐变为中-薄层状紫红色细粉砂岩、泥岩组合。该火山岩组合位于大型倒转背斜核部(未刊资料),下伏地层未见出露。根据1:20万兰坪幅资料(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>),这套火山岩发育于石炭纪碎屑岩-生物碎屑岩之上。由于缺乏合适的测年手段,更兼褶皱构造未被揭示,当时认为这套火山岩属于石炭纪。

样品采自石登以北约1 km火山岩组合下部层位的晶屑凝灰岩、中部层位的安山质集块岩、安山岩

① 云南省地质局. 1974. 兰坪幅(G-47-X VI)1:20万区域地质调查报告及地质图.

② 云南省地质矿产局. 1984. 维西幅(G-47-X)1:20万区域地质调查报告及地质图.

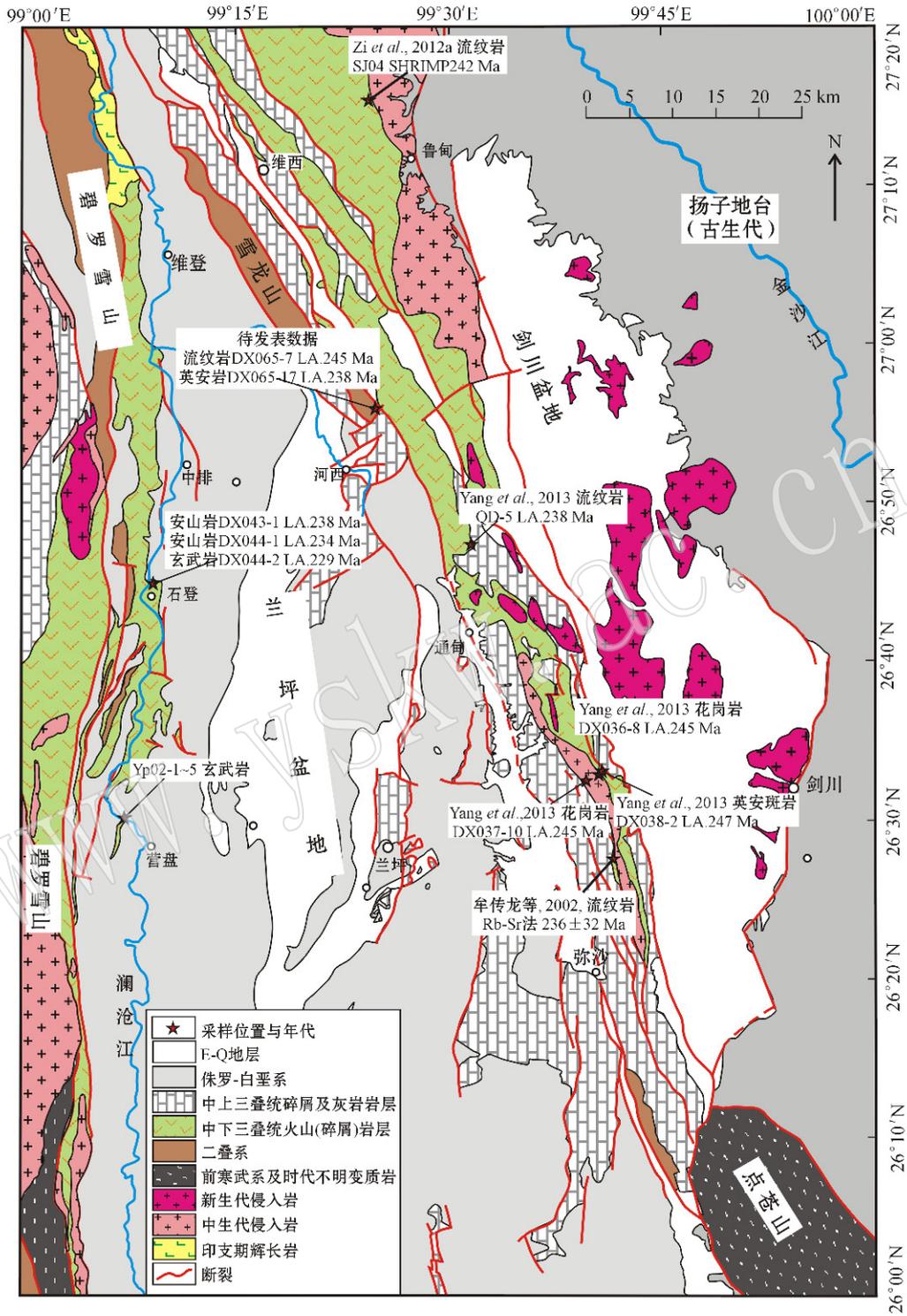


图2 兰坪盆地(维西-兰坪地区)地质简图[据云南省地矿局(1974<sup>①</sup>, 1984<sup>②</sup>), 年龄数据来自牟传龙等(2002)、Zi等(2012b)、Yang等(2013)]

Fig. 2 Geological map of Lanping Basin (Weixi-Lanping region) (modified after YBGMR, 1974<sup>①</sup>, 1984<sup>②</sup>; age data after Mou Chuanlong et al., 2002; Zi et al., 2012b; Yang et al., 2013)

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪幅(G-47-X VI)1:20万区域地质调查报告及地质图.  
 ② 云南省地质矿产局. 1984. 维西幅(G-47-X)1:20万区域地质调查报告及地质图.

表 1 江达-维西弧中南段(德钦-兰坪地区)火山岩地层年代学数据

Table 1 Geochronologic data of volcanic rocks from the middle-southern part of the Jiangda-Weixi volcanic arc (Deqin-Lanping region)

地层	岩石类型	样品号	年龄/Ma	测试方法	资料来源	
原人支雪山组	玄武岩	JJD02-1	246.1 ± 2.0	LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	JJD03-2	244.6 ± 2.6	SHRIMP U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	JJD03-9	246.7 ± 3.1	LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	LCTK0-1	246.6 ± 2.4	LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	JJD03-1	247.4 ± 2.1	LA-ICPMS U-Pb	王保弟等 2011b	
	流纹岩	JJD03-11	249.1 ± 1.6	LA-ICPMS U-Pb	王保弟等 2011b	
原攀天阁组	流纹岩		235 ± 17	全岩 Rb-Sr 法	王立全等 2002	
	流纹岩		236 ± 32	全岩 Rb-Sr 法	牟传龙等 2002	
	流纹岩	YZ01-1	247.7 ± 1.7	LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	YZ01-12	248.5 ± 2.3	LA-ICPMS U-Pb	Wang <i>et al.</i> , 2013	
	流纹岩	DX065-7	244.4 ± 5.1	LA-ICPMS U-Pb	待发表数据	
原攀天 下段	流纹岩	SJ22	247 ± 3	SHRIMP U-Pb	Zi <i>et al.</i> , 2012b	
阁组 上段	流纹岩	SJ33	246 ± 3	SHRIMP U-Pb		
原歪古村组	英安质凝灰岩	DX038-2	246.5 ± 6.3	LA-ICPMS U-Pb	Yang <i>et al.</i> , 2013	
原崔依 比组	下段下	钠长玄武岩	10SJ28	245 ± 4	SHRIMP U-Pb	Zi <i>et al.</i> , 2012b
	下段上	流纹岩	SJ04	242 ± 3	SHRIMP U-Pb	
	上段下	玄武岩	SJ82	237 ± 5	SHRIMP U-Pb	
	上段上	流纹英安岩	SJ44	239 ± 3	SHRIMP U-Pb	
原崔依比组	流纹岩(岩心)	QD-5	237.7 ± 3.3	LA-ICPMS U-Pb	Yang <i>et al.</i> , 2013	
	英安岩	DX065-17	237.5 ± 4	LA-ICPMS U-Pb	待发表数据	
	安山岩	DX043-1	237.9 ± 3.5	LA-ICPMS U-Pb	本文	
	安山岩	DX044-1	233.6 ± 3.0	LA-ICPMS U-Pb	本文	
	玄武岩	DX044-2	229.2 ± 3.8	LA-ICPMS U-Pb	本文	

以及营盘北西约 8 km 火山岩组合上部层位的玄武质、玄武安山质火山熔岩(图 2、图 3a)。安山岩具斑状结构、块状构造,斑晶约占 20%~25%,由长条状、宽板状斜长石及少量辉石组成;基质约占 75%~80%,由不规则排列的斜长石、玻璃质及少量不透明矿物组成,显示典型安山结构,具微弱绿泥石化蚀变(图 3b、3c)。块状玄武岩具斑状结构、气孔构造,斑晶含量约为 30%~40%,由斜长石、辉石、伊丁石化橄榄石及少量角闪石组成;基质约占 60%~70%,具间粒-间隐结构,由不规则排列的针状斜长石及充填其间的细小辉石、玻璃质及少量不透明矿物组成(图 3d)。

## 2 分析测试方法

选择 9 件相对新鲜的样品进行全岩地球化学测试分析,另外 3 件样品用于挑选锆石。锆石挑选由河北省廊坊市地岩矿物分选有限公司完成。首先通过常规粉碎、重、磁选方法从样品中分离出锆石颗粒,然后在双目镜下进行人工挑纯。将挑选出的锆

石颗粒粘贴在环氧树脂靶表面,并进行研磨抛光,直至锆石核裸露。在分析测试之前先对锆石进行反射光、透射光和阴极发光(CL)图像采集,确定锆石颗粒形态和内部结构(核、边、包裹体结构及裂隙等),以便选定合适的分析点位。锆石 CL 图像采集在北京离子探针中心使用与 HITHCH S-3000N 型扫描电镜相连接的 Gatan Chroma 阴极发光仪完成。

锆石 U-Pb 同位素比值测定在中国科学技术大学 LA-ICP-MS 实验室完成。使用四极杆等离子质谱仪(型号:PerkinElmer Elan DRCII),熔样系统为 193 nm 波长 ArF 准分子激光剥蚀系统(型号:GeoLas Pro)。激光束斑直径 44  $\mu\text{m}$ ,激发频率 10 Hz,总能量密度 10  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。采用高纯 He(99.999%)作为剥蚀物质的载气,使用标准锆石 91500 进行分馏校正。详细测试分析过程参见文献(Yuan *et al.*, 2008)。原始数据处理通过 Excel 制表软件中加载宏程序 LaDating@Zrn 完成,普通 Pb 校正使用 Anderson(2002)推荐的方法。加权平均年龄计算与谐和图的绘制运用 Ludwig(2003)编制的 Isoplot/Exver3.0 软件完成。

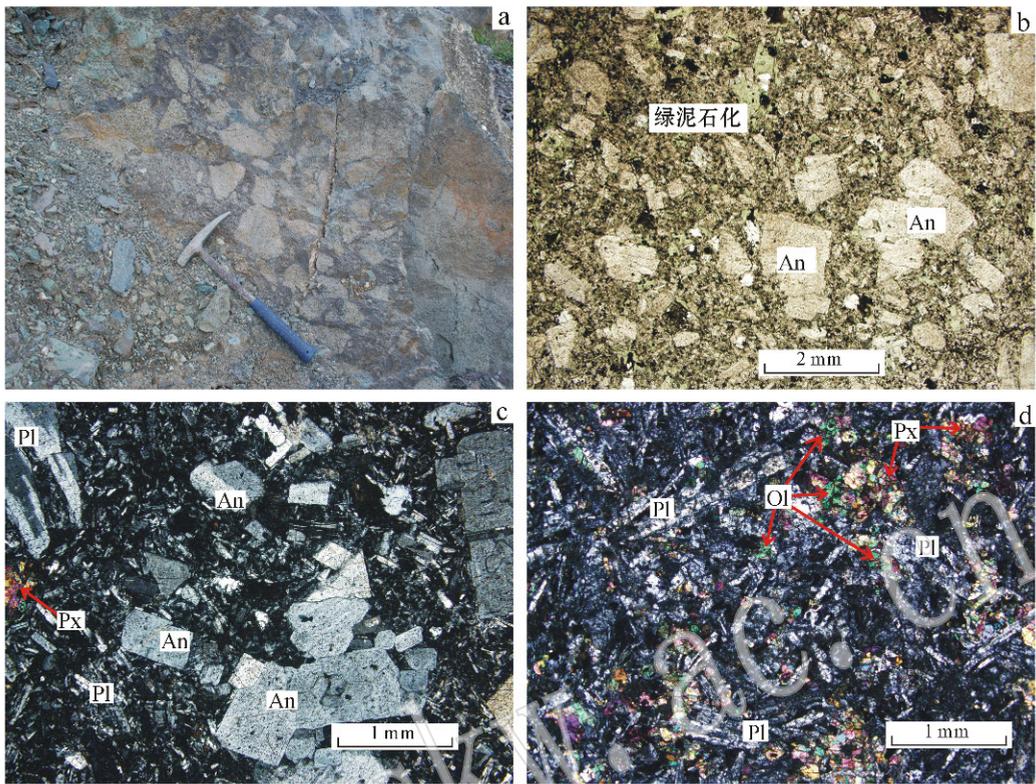


图3 火山岩野外和显微照片

Fig. 3 Field photograph and microphotographs of volcanic rocks

a—火山碎屑岩的野外露头; b—绿泥石化安山岩, 单偏光; c—辉石安山岩的安山结构, 正交偏光; d—橄辉玄武岩, 正交偏光; An—钠长石; Pl—斜长石; Px—辉石; Ol—橄榄石

a—photograph showing the outcrop of volcanic rocks; b—microphotograph of the partially chloritized andesite (plainlight); c—microphotograph showing andesitic texture of pyroxene andesite (crossed nicols); d—microphotograph of olivine-bearing basalt (crossed nicols);

An—actinolite; Pl—plagioclase; Px—pyroxene; Ol—olivine

9 件样品经去皮后研磨至 200 目, 送中国地质科学院国家地质实验测试中心开展全岩主、微量元素含量分析。主量元素含量测试分析运用 X 射线荧光光谱仪(3080E-PW4400)完成,  $Fe_2O_3$ 、 $FeO$  含量分析通过化学法完成; 微量元素含量测试分析运用等离子质谱仪(ICP-MS, X-series)完成。其中主量元素的分析误差小于 2%, 大部分微量元素的分析误差小于 5%~8%, 过渡族元素含量精度好于 10%。

### 3 测试结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 测年结果

##### 3.1.1 样品 DX043-1

采自火山岩下部层位的安山质晶屑凝灰岩样品 DX043-1(GPS 坐标: N 26°45.527', E 99°09.545') 的多数锆石颗粒无色透明, 棱角状, 半自形柱形, 颗

粒较小(50~200  $\mu m$ ), 长宽比在 1~2.5 之间, CL 图像显示多数锆石发育明显振荡环带, 部分锆石发育核-幔结构, 核部呈暗色浑圆状, 边部色调较浅、具环带(图 4)。

选择其中 24 颗锆石进行分析(分析点位见图 4), 数据列于表 2。U 含量范围在  $43.05 \times 10^{-6}$ ~ $481.57 \times 10^{-6}$  之间, Th 含量范围为  $40.17 \times 10^{-6}$ ~ $252.99 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.27~0.93, 具有岩浆成因锆石特征。具有核-幔结构的锆石核部的测点 5 和 11 给出了较老的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄:  $2116 \pm 58$  Ma 和  $331 \pm 10$  Ma。其它 22 个测点位于完整振荡环带内, 其  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄值介于  $229 \pm 8$ ~ $259 \pm 9$  Ma 之间, 其中 12、22 号点年龄谐和度偏低, 19 号点年龄值偏大, 其余 19 个测点在谐和图上分布于谐和线上或谐和线附近, 集中成群, 其加权平均  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄为  $237.9 \pm 3.5$  Ma (MSWD=0.74) (图 5a), 代表了

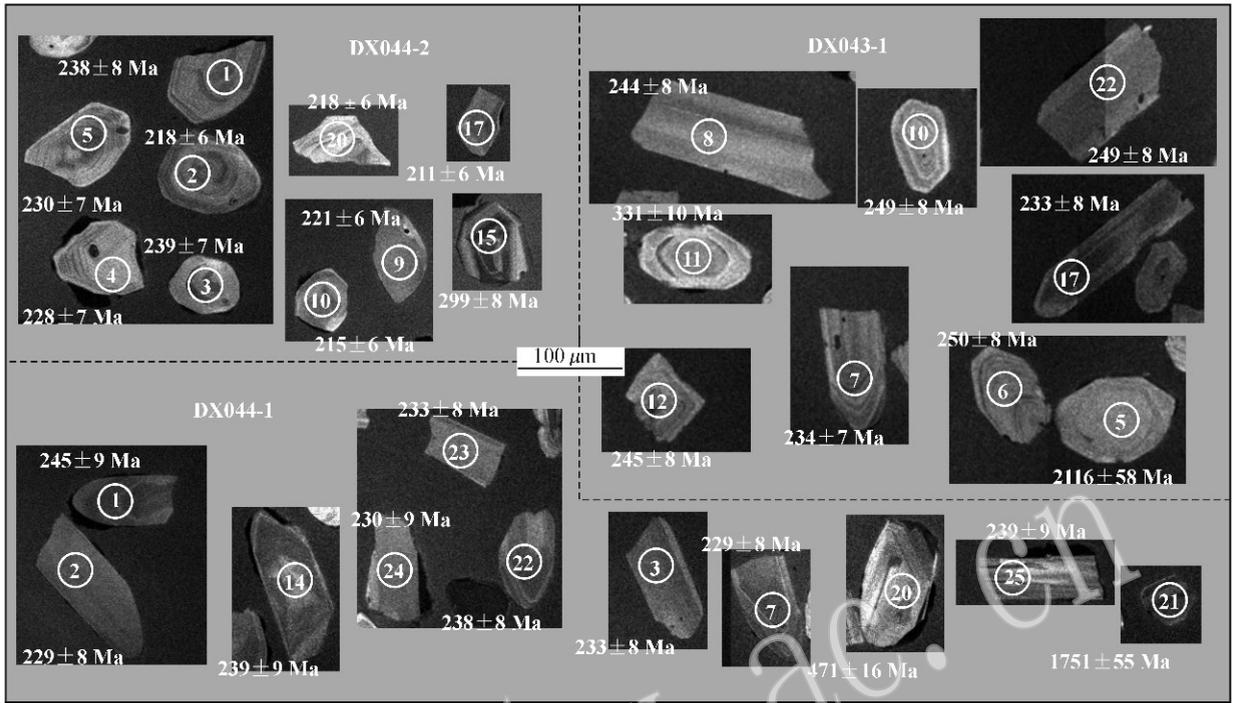


图 4 锆石阴极发光图像及测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄

Fig. 4 CL images of zircons showing the locations of analytical spots and associated  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  apparent ages

该岩浆结晶的年龄。

### 3.1.2 样品 DX044-1

安山质集块岩样品 DX044-1 (GPS 坐标: N 26° 44.952', E 99° 09.475') 取自火山岩组合中部层位。锆石颗粒多为灰黑色或无色透明, 棱角状、半自形柱状, 少数浑圆形, 长约 50~200  $\mu\text{m}$ , 长宽比在 1~3 之间。CL 图像显示多数锆石发育较为紧闭的振荡环带, 部分锆石发育有核-幔结构, 核部显暗色浑圆状, 发育环带结构, 边部色浅, 也发育环带(图 4)。

选择其中 32 颗较大锆石进行了原位分析。除了 23 号测点给出了异常高的 U、Th 含量和 Th/U 值(分别为  $1176.18 \times 10^{-6}$ 、 $1905.32 \times 10^{-6}$  和 1.62)外, 其余 31 个测点的 U 含量范围为  $130.10 \times 10^{-6}$ ~ $601.08 \times 10^{-6}$ , Th 含量范围为  $82.19 \times 10^{-6}$ ~ $586.17 \times 10^{-6}$ , Th/U 值 0.34~1.07。测点 20 和 21 给出了较老  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值:  $471 \pm 16$  Ma 和  $1751 \pm 55$  Ma。其余 30 个测点的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $224 \pm 8$ ~ $245 \pm 9$  Ma 之间, 均具较高谐和度, 其加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $233.6 \pm 3.0$  Ma (MSWD=0.43)(图 5c、5d)。

### 3.1.3 样品 DX044-2

玄武岩样品 DX044-2 采自火山岩组合上部层

位, 为含大量杏仁构造的玄武质熔岩(GPS 坐标: N 26° 44.952', E 99° 09.475')。该样品锆石含量较少, 仅分选出 92 颗。总体为灰黑色及无色透明, 浑圆状至半自形短柱状。颗粒较小, 粒径在 40~150  $\mu\text{m}$  之间, 长宽比 1~2.5。CL 图像显示多数锆石发育有较为密集的振荡环带, 部分锆石发育有核-幔结构, 核部暗色浑圆状, 具环带结构, 边部浅色, 环带发育(图 4)。

选择其中 20 颗较大锆石开展原位分析, U 含量范围为  $99.33 \times 10^{-6}$ ~ $372.42 \times 10^{-6}$ , Th 含量范围为  $57.30 \times 10^{-6}$ ~ $371.75 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.40~1.14。测点 12 和 15 给出较老  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄:  $275 \pm 8$  和  $299 \pm 8$  Ma。其余 18 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $211 \pm 6$ ~ $239 \pm 7$  Ma 之间, 其中 13 个测点的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值集中分布于谐和线上或其附近, 集中成群, 其加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为  $229.2 \pm 3.8$  Ma (MSWD=0.78)(图 5b)。

从上述测年结果看出, 位于火山岩下部层位的晶屑凝灰岩形成时代最早(238 Ma), 中部层位的安山质集块岩次之(234 Ma), 而层位最高的玄武质熔岩形成时代最晚(229 Ma)。本文测年数据很好限定了这套火山岩形成时代在 238~229 Ma 之间。

表 2 兰坪盆地火山岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyzed data for samples of volcanic rocks from Lanping Basin

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U		校正的同位素组成		校正的同位素年龄/Ma								
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Pb*	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$					
DX043-1, 安山岩, 加权平均值 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=237.9 \pm 3.5 \text{ Ma}$ , $n=19$ , MSWD=0.74															
1	69.01	156.46	6.65	0.44	0.002 21	0.244 17	0.013 8	0.036 61	0.001 21	138	107	222	11	232	8
2	69.16	114.39	5.23	0.60	0.002 51	0.276 17	0.015 65	0.037 10	0.001 25	426	104	248	12	235	8
3	252.99	311.63	15.55	0.81	0.002 02	0.289 66	0.013 28	0.038 56	0.001 24	402	83	258	10	244	8
4	60.30	109.88	4.84	0.55	0.002 37	0.239 02	0.014 74	0.036 64	0.001 24	95	101	218	12	232	8
5	40.17	43.05	23.07	0.93	0.004 78	7.278 88	0.313 04	0.388 60	0.012 43	2 188	56	2 146	38	2 116	58
6	87.38	164.15	7.68	0.53	0.002 30	0.267 42	0.015 67	0.039 50	0.001 31	154	101	241	13	250	8
7	139.34	237.98	10.58	0.59	0.002 01	0.243 01	0.012 72	0.036 95	0.001 19	100	84	221	10	234	7
8	46.11	74.76	3.52	0.62	0.002 71	0.246 81	0.017 52	0.038 56	0.001 33	65	111	224	14	244	8
9	90.23	119.06	6.75	0.76	0.009 82	0.256 15	0.056 59	0.036 90	0.001 50	211	368	232	46	234	9
10	61.30	127.90	5.99	0.48	0.002 24	0.291 94	0.014 87	0.039 39	0.001 29	407	78	260	12	249	8
11	79.07	114.47	7.57	0.69	0.002 16	0.394 57	0.019 55	0.052 67	0.001 61	393	90	338	14	331	10
12	83.22	127.98	6.23	0.65	0.002 41	0.331 91	0.015 95	0.038 82	0.001 26	685	82	291	12	245	8
13	77.93	107.70	5.30	0.72	0.002 80	0.259 78	0.018 36	0.038 98	0.001 32	143	129	234	15	247	8
14	131.92	481.57	19.64	0.27	0.001 93	0.262 05	0.012 09	0.036 58	0.001 16	283	87	236	10	232	7
15	116.18	154.08	7.40	0.75	0.002 77	0.281 25	0.017 78	0.037 53	0.001 23	395	107	252	14	237	8
16	213.59	251.76	12.22	0.85	0.001 97	0.266 83	0.012 73	0.037 67	0.001 22	256	86	240	10	238	8
17	146.55	191.60	9.78	0.76	0.005 55	0.250 81	0.032 74	0.036 82	0.001 23	167	232	227	27	233	8
18	91.57	192.27	8.57	0.48	0.002 02	0.269 06	0.013 15	0.038 22	0.001 18	274	93	242	11	242	7
19	105.06	153.69	7.76	0.68	0.002 24	0.275 99	0.015 53	0.040 92	0.001 43	182	100	247	12	259	9
20	62.44	94.55	4.34	0.66	0.002 49	0.271 66	0.015 59	0.036 68	0.001 25	380	98	244	12	232	8
21	104.06	144.13	6.50	0.72	0.002 12	0.253 39	0.013 28	0.036 11	0.001 21	215	96	229	11	229	8
22	153.48	184.87	9.52	0.83	0.002 53	0.317 45	0.017 51	0.039 45	0.001 30	505	96	280	13	249	8
23	111.63	183.93	8.28	0.61	0.002 19	0.285 96	0.013 77	0.036 59	0.001 15	485	81	255	11	232	7
24	80.36	150.59	7.61	0.53	0.004 01	0.269 95	0.026 32	0.038 89	0.001 22	211	173	243	21	246	8

续表 2-1  
Continued Table 2-1

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	校正的同位素组成			校正的同位素年龄/Ma									
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$					
DX044-1, 安山岩, 加权平均值 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 233.6 \pm 3.0 \text{ Ma}$ , $n = 30$ , MSWD = 0.43																	
1	215.16	468.04	21.43	0.46	0.049 86	0.049 86	0.049 86	0.049 86	0.001 37	0.049 86	0.001 37	189	97	242	11	245	9
2	151.55	329.52	13.99	0.46	0.049 20	0.002 24	0.246 30	0.014 04	0.001 27	0.036 09	0.001 27	157	107	224	11	229	8
3	255.97	402.08	18.51	0.64	0.050 27	0.002 14	0.255 50	0.013 59	0.001 24	0.036 77	0.001 24	208	101	231	11	233	8
4	410.92	419.93	20.31	0.98	0.050 28	0.002 20	0.252 64	0.013 79	0.001 27	0.036 27	0.001 27	208	104	229	11	230	8
5	172.55	332.47	14.13	0.52	0.050 50	0.002 19	0.249 88	0.013 52	0.001 30	0.035 75	0.001 30	218	104	226	11	226	8
6	283.90	497.76	22.33	0.57	0.051 05	0.002 00	0.262 72	0.012 74	0.001 30	0.037 20	0.001 30	243	93	237	10	235	8
7	279.34	537.88	23.19	0.52	0.049 19	0.001 93	0.246 13	0.012 00	0.001 22	0.036 15	0.001 22	157	87	223	10	229	8
8	172.10	276.86	13.08	0.62	0.051 17	0.002 22	0.272 76	0.014 77	0.001 35	0.037 89	0.001 35	249	96	245	12	240	8
9	146.24	333.39	14.34	0.44	0.051 92	0.002 44	0.261 53	0.015 36	0.001 32	0.036 57	0.001 32	282	104	236	12	232	8
10	274.09	528.80	23.43	0.52	0.048 99	0.001 91	0.252 05	0.012 19	0.001 28	0.037 03	0.001 28	147	87	228	10	234	8
11	121.67	275.22	12.46	0.44	0.050 50	0.002 53	0.262 59	0.019 54	0.001 32	0.037 71	0.001 32	218	110	237	16	239	8
12	221.82	480.43	22.50	0.46	0.051 41	0.003 32	0.268 31	0.023 88	0.001 36	0.037 85	0.001 36	259	141	241	19	239	8
13	464.89	527.39	24.97	0.88	0.054 27	0.002 22	0.276 55	0.014 00	0.001 30	0.036 27	0.001 30	382	89	248	11	230	8
14	196.49	239.33	12.11	0.82	0.049 83	0.003 83	0.259 63	0.027 19	0.001 41	0.037 79	0.001 41	187	156	234	22	239	9
15	82.19	241.01	10.17	0.34	0.046 22	0.002 18	0.235 54	0.013 89	0.001 36	0.036 93	0.001 36	9	94	215	11	234	8
16	362.03	528.00	25.48	0.69	0.051 72	0.002 08	0.274 06	0.013 59	0.001 38	0.038 46	0.001 38	273	88	246	11	243	9
17	291.38	391.24	17.78	0.74	0.052 20	0.002 21	0.260 06	0.013 72	0.001 27	0.035 89	0.001 27	294	93	235	11	227	8
18	261.83	539.33	23.26	0.49	0.050 37	0.002 12	0.252 53	0.013 24	0.001 27	0.036 29	0.001 27	212	94	229	11	230	8
19	253.21	445.41	20.17	0.57	0.049 15	0.001 91	0.254 09	0.012 22	0.001 27	0.037 26	0.001 27	155	86	230	10	236	8
20	101.72	249.57	22.03	0.41	0.054 41	0.002 33	0.271 32	0.030 43	0.002 74	0.075 88	0.002 74	388	93	459	20	471	16
21	118.03	130.10	54.24	0.91	0.120 60	0.005 03	5.273 02	0.272 77	0.011 25	0.312 17	0.011 25	1 965	72	1 865	44	1 751	55
22	228.36	489.00	21.60	0.47	0.046 86	0.001 99	0.244 25	0.012 94	0.001 34	0.037 61	0.001 34	42	86	222	11	238	8
23	1 905.32	1 176.18	67.17	1.62	0.055 12	0.002 10	0.281 54	0.013 13	0.001 31	0.036 85	0.001 31	417	82	252	10	233	8
24	376.06	352.96	18.69	1.07	0.053 95	0.005 24	0.269 87	0.034 59	0.001 43	0.036 28	0.001 43	369	201	243	28	230	9
25	175.34	275.06	14.76	0.64	0.053 42	0.006 40	0.278 68	0.040 24	0.001 43	0.037 84	0.001 43	347	248	250	32	239	9
26	147.15	315.67	13.67	0.47	0.053 91	0.003 45	0.265 66	0.023 17	0.001 25	0.035 74	0.001 25	367	140	239	19	226	8
27	335.44	400.58	19.35	0.84	0.058 48	0.002 61	0.299 64	0.016 64	0.001 37	0.037 14	0.001 37	548	95	266	13	235	8
28	201.31	473.17	19.80	0.43	0.055 71	0.002 22	0.273 11	0.013 43	0.001 28	0.035 34	0.001 28	441	86	245	11	224	8
29	586.17	601.08	31.50	0.98	0.052 32	0.002 42	0.279 04	0.016 12	0.001 40	0.038 63	0.001 40	300	102	250	13	244	9
30	226.58	477.16	20.91	0.47	0.051 38	0.001 93	0.261 60	0.012 09	0.001 28	0.036 76	0.001 28	258	83	236	10	233	8
31	208.56	446.13	19.49	0.47	0.053 10	0.002 13	0.269 18	0.013 41	0.001 28	0.036 74	0.001 28	333	88	242	11	233	8
32	399.55	495.70	23.62	0.81	0.059 40	0.002 45	0.296 94	0.015 17	0.001 32	0.036 38	0.001 32	582	87	264	12	230	8

续表 2-2

Continued Table 2-2

分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U			校正的同位素组成			校正的同位素年龄/Ma				
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Pb*	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	
DX044-2, 玄武岩, 加权平均值 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 229.2 \pm 3.8 \text{ Ma}$ , $n = 13$ , $\text{MSWD} = 0.78$														
1	80.31	99.33	4.79	0.81	0.058 23	0.002 77	0.294 09	0.017 46	0.037 65	0.001 24	262	14	238	8
2	149.55	199.04	8.69	0.75	0.050 13	0.002 36	0.237 54	0.013 88	0.034 43	0.001 04	216	11	218	6
3	161.67	216.90	10.51	0.75	0.052 87	0.002 15	0.273 13	0.013 91	0.037 75	0.001 13	245	11	239	7
4	83.90	104.33	4.98	0.80	0.073 24	0.003 75	0.356 31	0.022 65	0.036 08	0.001 18	309	17	228	7
5	206.15	264.38	12.40	0.78	0.051 08	0.001 76	0.258 39	0.011 07	0.036 35	0.001 06	233	9	230	7
6	192.99	232.07	11.16	0.83	0.050 27	0.001 91	0.257 38	0.012 25	0.036 97	0.001 07	233	10	234	7
7	369.54	372.42	18.27	0.99	0.047 84	0.002 04	0.239 91	0.012 79	0.036 49	0.001 09	218	10	231	7
8	57.30	144.03	6.74	0.40	0.051 06	0.004 10	0.258 50	0.025 18	0.036 72	0.001 07	233	20	232	7
9	214.28	255.55	11.80	0.84	0.057 57	0.002 05	0.276 06	0.012 26	0.034 84	0.001 02	248	10	221	6
10	234.60	255.92	11.63	0.92	0.059 75	0.002 20	0.280 51	0.012 88	0.033 99	0.001	251	10	215	6
11	190.48	217.05	10.26	0.88	0.053 69	0.002 60	0.261 81	0.015 71	0.035 27	0.001 06	236	13	223	7
12	193.07	284.96	15.50	0.68	0.048 94	0.001 98	0.295 37	0.014 91	0.043 63	0.001 27	263	12	275	8
13	174.07	245.84	11.41	0.71	0.055 91	0.002 10	0.278 08	0.013 08	0.036 46	0.001 06	249	10	231	7
14	215.67	270.77	12.89	0.80	0.050 45	0.003 70	0.245 45	0.022 94	0.035 28	0.001 02	223	19	224	6
15	247.14	281.66	17.76	0.88	0.052 21	0.001 90	0.343 04	0.015 57	0.047 50	0.001 34	299	12	299	8
16	212.16	292.02	14.82	0.73	0.052 27	0.004 27	0.252 28	0.025 74	0.035 00	0.001 04	228	21	222	6
17	371.75	324.71	15.59	1.14	0.076 87	0.002 86	0.352 85	0.016 35	0.033 34	0.001 01	307	12	211	6
18	143.91	208.90	9.71	0.69	0.054 29	0.002 63	0.272 11	0.016 38	0.036 42	0.001 12	244	13	231	7
19	89.28	129.25	6.29	0.69	0.058 01	0.004 24	0.306 82	0.027 10	0.037 10	0.001 27	272	21	235	8
20	122.98	161.27	7.64	0.76	0.047 57	0.003 05	0.225 84	0.018 65	0.034 43	0.000 97	207	15	218	6

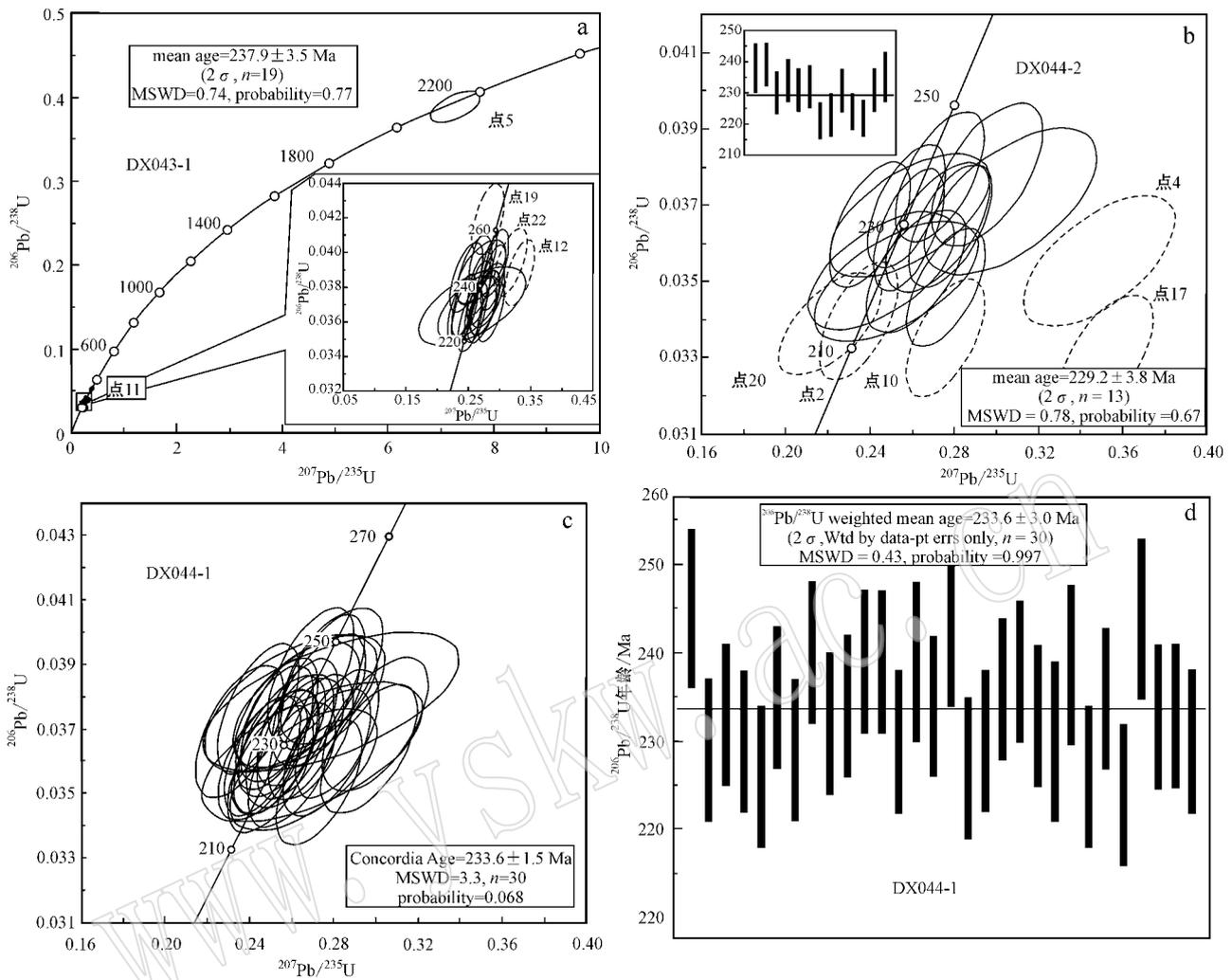


图 5 锆石谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值图

Fig. 5 Concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb data for samples and their weighted average  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages

## 3.2 全岩地球化学

### 3.2.1 常量元素

全岩元素含量分析针对集块岩、熔岩展开,未分析晶屑凝灰岩成分。安山质集块岩、玄武质熔岩样品  $\text{SiO}_2$  含量在 41.81% ~ 59.32% 之间(表 3),平均 51.0%;全碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )含量介于 2.36% ~ 6.58% 之间, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (除  $\text{Yp02-1}$  的 4.14 外)为 0.011~0.53; $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  含量变化较大,分别在 1.5% ~ 9.4% 和 2.65% ~ 15.08% 之间; $\text{FeO}^T$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ )含量中等,介于 6.97% ~ 12.48% 之间,平均为 9.60%; $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高,在 14.36% ~ 20.71% 之间,平均为 16.65%; $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{TiO}_2$  含量较低,分别为 0.94% ~ 0.26%、0.15% ~ 0.52% 和 0.87% ~ 1.41%。Harker 图解(图略)显示  $\text{FeO}^T$ 、

$\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$  及  $\text{MgO}$  与  $\text{SiO}_2$  具有明显负相关性,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  则没有显示相关性。在  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$  图解中(图 6a),火山岩样品位于安山岩和亚碱性玄武岩区域; $\text{Th} - \text{Co}$  投点(图 6b)显示火山岩为钙碱性-高钾钙碱性/橄榄粗玄武岩系列安山岩、亚碱性玄武岩。

### 3.2.2 微量元素

稀土元素总量变化较大(表 3),为低-中等含量( $49.67 \times 10^{-6} \sim 277.95 \times 10^{-6}$ )。其中轻稀土元素总量为  $34.82 \times 10^{-6} \sim 253.27 \times 10^{-6}$ ,重稀土元素总量为  $14.85 \times 10^{-6} \sim 24.78 \times 10^{-6}$ , $\text{LREE}/\text{HREE}$  介于 2.34~10.26 之间。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 1.59~9.25,反映轻、重稀土元素之间的分馏程度较高;另外  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  和  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$  分别是 1.15~5.08 和 1.30~

表3 兰坪盆地火山岩样品主( $w_B/\%$ )、微量( $w_B/10^{-6}$ )元素分析数据表Table 3 Major ( $w_B/\%$ ) and trace ( $w_B/10^{-6}$ ) elements analytical data for samples of volcanic rocks from Lanping Basin

样品编号	YP02-1	YP02-2	YP02-3	YP02-4	YP02-5	DX043-1	DX044-1	DX044-2	DX044-4
岩石类型	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	安山岩	安山岩	玄武岩	安山岩
SiO <sub>2</sub>	48.14	48.29	41.81	51.34	47.06	55.23	59.32	48.51	55.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.19	16.31	16.89	14.36	16.54	16.91	16.75	20.71	16.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.53	7.01	1.83	8.53	3.96	7.93	3.83	2.03	1.65
FeO	3.54	2.86	8.91	3.95	5.84	3.83	2.44	6.43	5.32
K <sub>2</sub> O	2.9	0.051	0.044	0.31	0.07	1.36	1.6	0.15	0.085
Na <sub>2</sub> O	0.7	3.6	3.74	2.05	4.75	2.55	4.4	5.81	6.49
MgO	3.96	6.33	15.08	5.93	10.07	4.1	2.65	6.8	3.34
MnO	0.094	0.14	0.21	0.19	0.17	0.11	0.15	0.26	0.14
CaO	8.8	9.4	3.38	7.57	5.4	1.5	3.95	2.35	4.87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.4	0.21	0.15	0.52	0.28	0.26	0.23	0.27	0.21
TiO <sub>2</sub>	1.22	1.07	1.18	1.33	1.28	1.41	0.87	1.37	0.93
CO <sub>2</sub>	3.73	1.11	0.34	0.51	0.086	0.34	1.2	0.43	2.23
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3.82	2.88	6.68	3.32	4.38	4.44	2.42	5.2	3.36
LOI	7.5	4.79	6.34	3.91	4.53	4.13	3.3	4.99	4.41
Total	99.02	99.26	100.24	99.91	99.89	99.97	99.81	100.32	100.54
La	29.2	10.9	5.26	27.6	10.4	71.2	32.4	43.6	31.1
Ce	49.1	24.2	13.6	56	23.3	111	62.7	96.5	57.2
Pr	6.16	3.38	2.08	7.08	3.25	12.3	7.61	11.2	6.55
Nd	26.6	14.9	10.1	30.2	15.2	47.4	30.3	43.5	25.9
Sm	5.34	3.6	2.87	6.43	3.84	8.82	5.97	8.75	5.15
Eu	1.85	1.41	0.91	2.17	2.68	2.55	1.73	2.31	1.41
Gd	5.47	4.13	3.65	6.63	4.48	8.52	5.66	7.86	4.93
Tb	0.78	0.68	0.65	0.99	0.74	1.12	0.89	1.17	0.72
Dy	4.73	4.28	4.24	5.94	4.31	6.27	5.28	6.68	4.39
Ho	0.85	0.87	0.81	1.14	0.86	1.17	1.07	1.25	0.82
Er	2.53	2.43	2.52	3.3	2.23	3.5	3.16	3.61	2.46
Tm	0.37	0.37	0.39	0.46	0.31	0.48	0.49	0.53	0.37
Yb	2.28	2.28	2.24	2.76	1.78	3.14	2.96	3.15	2.35
Lu	0.37	0.34	0.35	0.46	0.29	0.48	0.48	0.53	0.38
Y	22.6	21.4	20.3	29.8	21	31.5	27.2	33.3	22.4
Ba	1545	49.9	19.1	82.2	61.7	398	327	79.8	47.1
Co	33.2	38.6	53.8	29.1	42.2	44.5	14.5	26.6	22.1
Cr	172	197	262	90.7	245	191	7.21	43.4	10.6
Cu	17.5	4.7	10.3	74	9.03	13.9	12.3	9.06	12.5
Ni	59.7	116	138	57.8	128	67.9	6.91	18.4	19.1
Sr	115	730	57.9	592	434	263	530	612	437
Th	1.35	0.79	0.42	5.64	0.69	7.7	9.3	11.3	9.37
V	234	228	190	179	179	186	116	231	169
Zn	89.5	66	122	88.6	91.9	144	91.8	113	75.5
Pb	3.93	5.93	0.61	13.2	2.99	6.8	15	8.41	11.3
Rb	78	1.04	0.73	10.5	1.22	69.3	50.7	6	2.52
Nb	8.33	6.56	2.46	10.5	5.19	18.5	17.9	18.7	14
Ta	0.59	0.45	0.23	0.71	0.4	1.44	1.38	1.46	1.14
Zr	117	90.7	79.5	149	73.4	192	177	195	152
Hf	2.63	2.17	2.01	3.51	1.94	5.16	4.71	5.06	4.05
U	0.48	0.17	0.21	1.05	0.29	1.79	2.52	4.02	2.47
Ga	22.2	14.4	11.4	18.8	12.9	15.5	17.7	20.8	16
Sc	24.5	34.2	35.2	26.1	24	25.3	13.8	27.3	18.9
ΣREE	135.63	73.77	49.67	151.16	73.67	277.95	160.7	230.64	143.73
LREE/HREE	6.80	3.80	2.34	5.97	3.91	10.26	7.04	8.31	7.75
(La/Yb) <sub>N</sub>	8.65	3.23	1.59	6.76	3.95	15.32	7.40	9.35	8.94
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.44	1.91	1.15	2.70	1.70	5.08	3.42	3.14	3.80
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	1.84	1.51	1.30	1.79	1.92	2.21	1.47	1.85	1.62
δEu	1.04	1.11	0.86	1.01	1.97	0.89	0.90	0.84	0.84
δCe	0.82	0.93	0.96	0.92	0.94	0.82	0.91	1.01	0.90

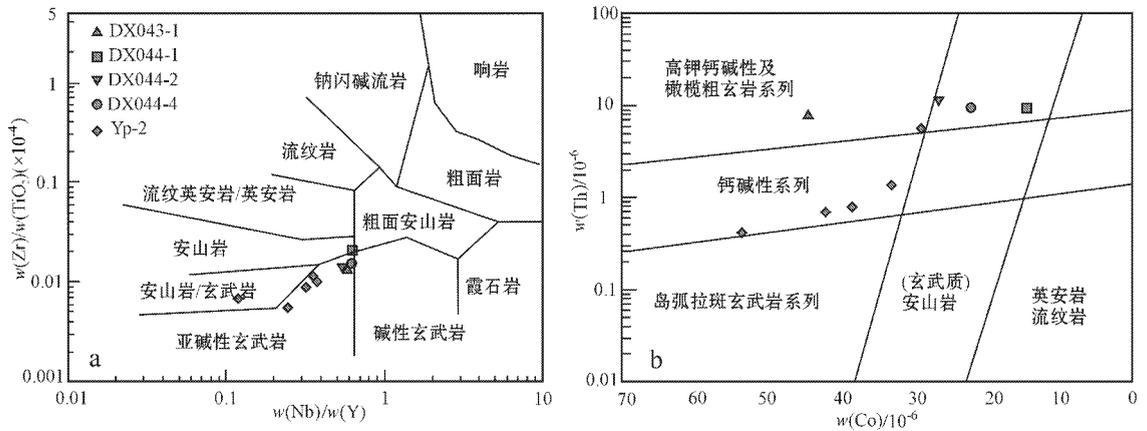


图 6 火山岩类型及系列判别的  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  图解 (a, 据 Winchester 和 Floyd, 1977) 和  $Th - Co$  图解 (b, 据 Hastie 等, 2007)

Fig. 6  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  (a, after Winchester and Floyd, 1977) and  $Th - Co$  (b, after Hastie *et al.*, 2007) discrimination diagrams of types and series of volcanic rocks

2.11 表明轻稀土元素分馏程度较高, 而重稀土元素分馏程度较低。 $\delta Eu$  和  $\delta Ce$  分别介于 0.84 ~ 1.11 (除 YP02-5 给出的 1.97 外) 和 0.82 ~ 1.11 之间,  $Eu$  和  $Ce$  异常不明显。6 件安山岩样品球粒陨石标准化稀土元素配分曲线与弧岩浆岩一致, 3 件玄武岩样品类似于富集型洋中脊玄武岩 (图 7a)。

在原始地幔标准化微量元素图解 (图 7b) 中, 6 件安山岩样品显示明显的  $Nb, Ta$  ( $0.26 < Nb/La < 0.60$ ,  $0.020 < Ta/La < 0.044$ ) 和  $Zr, Hf$  等高场强元素 (HFSE) 亏损, 具有弧火山岩特点。 $Sr$  元素既有亏损也有富集, 显然与样品中斜长石含量有关。如果不考虑易受后期流体活动影响的  $Rb, Ba$  两元素, 与稀土元素配分曲线一样, 3 件玄武岩样品的初始地幔标准化曲线接近富集型洋中脊玄武岩, 但显示中等  $Nb, Ta$  亏损。样品相容元素  $Ni, Cr$  含量分别是  $6.91 \times 10^{-6} \sim 138 \times 10^{-6}$  和  $7.21 \times 10^{-6} \sim 262 \times 10^{-6}$  均低于原生玄武岩浆范围 ( $Ni = 300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ ,  $Cr = 300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ ; Frey *et al.*, 1978)。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因讨论

在  $La/Sm - La$  (图 8) 中, 所有样品投点在一条倾斜的直线上, 显示轻重稀土元素含量并不同步增加, 表明安山岩-玄武岩浆为地幔不同程度部分熔融的产物, 而非同一母岩浆结晶分异的结果。一般认为玄武岩源自地幔岩石局部熔融, 玄武岩的  $Zr/Nb$  值

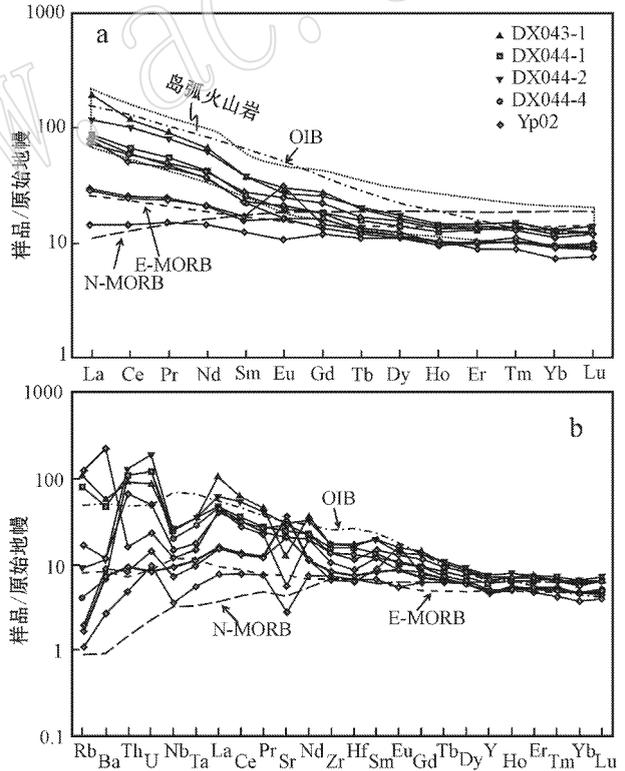


图 7 样品的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图 (a, 标准化值据 Taylor 和 McLennan, 1985) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b, 标准化值、OIB、N-MORB、E-MORB、弧火山岩数据根据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle normalized spider diagrams (b, normalization values and data of OIB, N-MORB, E-MORB and arc-volcanic rocks after Sun and McDonough, 1989) of volcanics samples

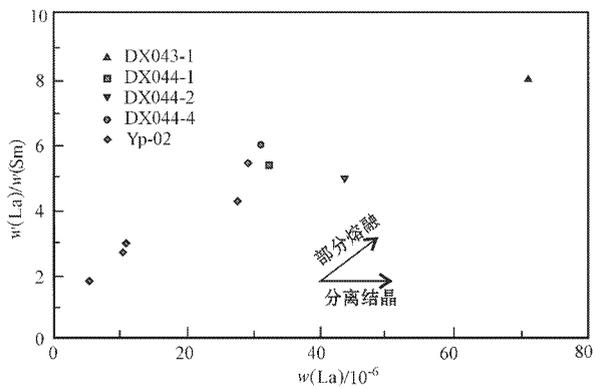


图 8 岩石成因判别的 La/Sm - La 图

Fig. 8 La/Sm - La petrogenetic discrimination diagram

与源区地幔性质有关。源自亏损地幔玄武岩的  $Zr/Nb > 18$ , 而源自过渡型、富集型地幔玄武岩的  $Zr/Nb < 18$  (Roex *et al.*, 1983)。本文样品  $Zr/Nb$  值除 YP02-3 为 32.32 外, 其余在 9.89~14.19 之间, 可能反映其主要由过渡型或富集型地幔部分熔融产生。在 Nb - Zr 图和 Y - Zr 图解 (图略) 中, 所有样品落在过渡或富集地幔源区, 因而该火山岩组合可能源自于过渡型或富集型地幔不同程度的部分熔融。

前已述及, 本文报道的火山岩属钙碱性-高钾钙碱性/橄榄粗玄武岩系列。标准化稀土、微量元素配分样式 (图 7) 高  $Al_2O_3$  和低  $TiO_2$ 、Ni、Cr 含量, Nb、Ta 亏损以及介于 0.28~0.58 之间的  $(Nb/La)_N$  值, 均指示兰坪盆地西缘的火山岩总体具有弧火山岩的性质, 可能形成于俯冲环境。笔者推测洋壳俯冲、变质脱水过程产生的流体交代地幔楔, 形成过渡型或富集地幔, 其局部熔融产生岩浆, 岩浆上升、喷发形成弧火山岩组合。需要指出的是, 3 件玄武岩样品的稀土、微量元素标准化曲线 (图 7) 显示富集型洋中脊玄武岩特点。锆石同位素测年结果表明具有典型弧岩浆特点的安山岩形成较早 (238~234 Ma), 而具有富集型洋中脊玄武岩特点的熔岩形成较晚 (229 Ma)。且在该火山岩序列中, 安山质火山岩体积明显大于玄武质熔岩 (前者出露厚度至少是后者的 4 倍)。鉴于上述地球化学性质随时间变化规律, 笔者认为具有富集型洋中脊玄武岩地球化学特点的晚期玄武岩浆可能与俯冲板片的断离、拆沉有关: 洋壳俯冲晚期, 发生高压变质的俯冲板片发生断离、拆沉, 引发软流圈上涌, 造成被俯冲作用富集的地幔楔再次发

生部分熔融。

本文研究的弧火山岩发育于石炭纪陆缘碎屑岩地层之上 (云南省地质矿产局, 1974)<sup>①</sup>, 火山岩内包含较多具有古老表面年龄的俘获锆石, 这些特点表明这套火山岩形成于陆缘环境。上述推论与其他地球化学指标吻合: ① 安山岩-玄武岩 Th/Ta 比值为 1.73~8.21, 指示其为大陆板内和陆缘弧环境 (图 9a) (Gorton and Schandl, 2000); ② 在 Zr/Y - Zr 图解 (图 9b) 中, 安山岩样品落在陆缘弧区, 而玄武岩在板内靠近 MORB 区域 (Pearce and Norry, 1979; Pearce, 1983; 夏林圻等, 2007); ③ 在常用的 Hf/3 - Th - Ta 和 Th/Yb - Ta/Yb 判别图解 (图 9c、9d) 中 (Wood, 1980; Pearce, 1983), 安山岩样品同样落在了岛弧或活动陆缘弧区, 而玄武岩落在板内玄武岩和 MORB 区域或靠近 MORB 区域。由此说明该玄武岩主要为板内玄武岩特性, 同时具有一定的洋中脊玄武岩 (MORB) 的属性, 而这也印证了稀土和微量元素标准化图解所显示的地球化学特征。

#### 4.2 区域大地构造意义

本文报道的新数据表明兰坪盆地西缘火山岩与东缘火山岩形成时代相同。综合现有数据, 同时代火山岩广泛发育于整个“三江”复合构造成矿带内, 如吐沱河、玉树地区的那义雄组 (青海省地质矿产局, 1991; Yang *et al.*, 2011), 德钦地区的人支雪山组 (王保弟等, 2011a; Wang *et al.*, 2013), 维西地区的攀天阁组和崔依比组 (Zi *et al.*, 2012b); “三江”构造带南段 (云县-景洪弧火山岩带) 的忙怀组和小定西组 (彭头平, 2006; 彭头平等, 2006; Peng *et al.*, 2008; 范蔚茗等, 2009; Wang *et al.*, 2010), 以及本文所报道的兰坪盆地西缘的火山岩。它们不仅形成时代相近 (晚二叠世—早中三叠世), 而且岩石组合类型相似, 均位于中晚三叠世之间的区域性角度不整合之下 (三江造山带地质图编委会, 1986)。鉴于此, 笔者认为这些火山岩与同时代的侵入岩, 如德钦地区的羊拉岩体和白马雪山岩体 (高睿等, 2010; 王彦斌等, 2010; Zi *et al.*, 2012a), 维西的鲁甸花岗岩体 (牟传龙等, 2002; 简平等, 2003; Yang *et al.*, 2013), 兰坪的碧罗雪山岩体 (刘登忠等, 1999), “三江”构造带南段的临沧花岗岩体 (施小斌等, 2006; 聂飞等, 2012; 孔会磊等, 2012; Hennig *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2013) 以及位于变质

① 云南省地质局, 1974. 兰坪幅 (G-47-X VI) 1:20 万区域地质调查报告及地质图。

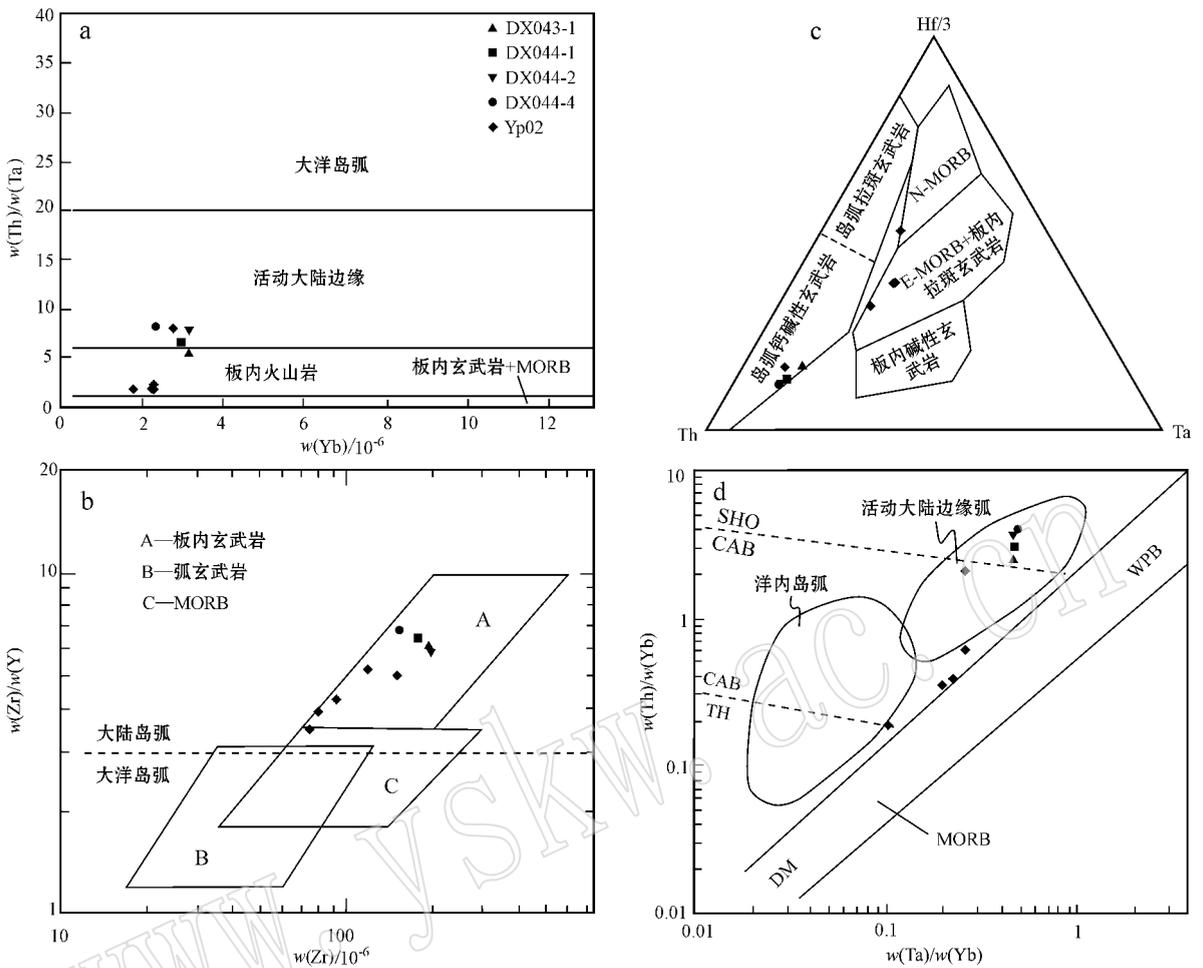


图 9 构造环境判别的  $\text{Th}/\text{Ta}-\text{Yb}$  (a, 据 Gorton 和 Schandl, 2000),  $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$  (b, 据 Pearce, 1983; 夏林圻等, 2007),  $\text{Hf}/3-\text{Th}-\text{Ta}$  (c, 据 Wood, 1980) 和  $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$  图解 (d, 据 Pearce, 1983)

Fig. 9  $\text{Th}/\text{Ta}-\text{Yb}$  (a, after Gorton and Schandl, 2000),  $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$  (after Pearce, 1983; Xia Linqi *et al.*, 2007),  $\text{Hf}/3-\text{Th}-\text{Ta}$  (c, after Wood, 1980) and  $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$  (d, after Pearce, 1983) discrimination diagrams for tectonic environment

岩带内的变形花岗岩、花岗闪长岩(刘俊来等, 2008; 李宝龙等, 2008; 戚学祥等, 2010)(图 1), 共同组成了一条长达 2 000 余公里、大致完整、连续的弧岩浆岩带。

该岩浆岩带的空间延伸及展布, 暗示在“三江”复合造山成矿带内应该存在一条相对连续的、与之对应的古特提斯缝合带。金沙江缝合带的规模显然与该弧岩浆岩带的规模不匹配。根据现有资料, 与该岩浆岩带时代吻合、规模对应的缝合带唯有龙木错-双湖(澜沧江)-昌宁-孟连古特提斯缝合带。笔者认为古特提斯主洋盆沿该缝合带由西(南)向东-北东方向俯冲, 可能是形成横贯整个“三江”复合造山成矿带的晚二叠世-早中三叠世陆缘弧岩浆岩带

的原因。

上述推论与其他资料吻合: ①“三江”造山带北西段出露于羌塘中部的龙木错-双湖缝合带(李才, 1987, 2008)榴辉岩(李才等, 2006)变质年龄在 240~230 Ma 之间(Kapp *et al.*, 2000), 与弧岩浆岩时代相当或略晚于弧岩浆岩。而沿金沙江缝合带迄今未发现高压变质岩。②“三江”复合造山成矿带中段芒康附近发育一条基性-超基性岩带(四川地质矿产局, 1986)<sup>①</sup>, 其可能代表澜沧江缝合带的蛇绿岩残片。该带两侧岩石组成完全不同, 西侧为吉塘群、嘉玉桥群变质岩(李璞, 1955), 古生物化石(王克勇, 1997, 1998)表明其形成时代为石炭-二叠纪。最近李才等(2008)在这套前变质岩中发现了冰积

① 四川省地质矿产局, 1986. 芒康幅 1:20 万地质图。

砾岩指示其具有冈瓦纳亲缘性。该碱性-超碱性岩带东侧为江达-维西弧岩浆岩带,而金沙江缝合带两侧地块(东羌塘-昌都、中咱)均具有亲扬子型基底及古生代地层-古生物组合。③位于“三江”复合造山成矿带南段西侧的昌宁-孟连缝合带很早就被认为是划分亲冈瓦纳与亲扬子陆块群之间的界线(钟大赉,1998),且代表着古特提斯主洋盆残迹(莫宣学等,2001;潘桂棠等,2002),而其东侧的南澜沧江弧岩浆岩带,包括临沧花岗岩体(Hennig *et al.*, 2009;高睿等,2010;孔会磊等,2012;聂飞等,2012;Peng *et al.*, 2013;Dong *et al.*, 2013)及云县-景洪弧火山岩带(彭头平等,2006;彭头平,2006;Peng *et al.*, 2008;范蔚茗等,2009;Wang *et al.*, 2010),即为古特提斯主洋壳向东俯冲、随后陆陆碰撞的产物。

## 5 结论

(1)分布于兰坪盆地西缘的安山岩-玄武岩组合形成于中三叠世 238~229 Ma 之间,而不是前人所认为的石炭纪或晚三叠世。

(2)这套火山岩的主体为位于中下部层位、具有典型弧岩浆岩地球化学特点的安山岩,其余为位于上部层位、具有富集型洋中脊玄武岩属性的玄武质熔岩。

(3)结合野外关系、年代学、地球化学结果,兰坪盆地西缘中三叠世安山岩形成于陆缘弧环境,具富集型洋中脊玄武岩属性的熔岩可能与俯冲晚期俯冲板片的断离、拆沉过程有关。

(4)该火山岩和“三江”复合造山带北段、南段广泛分布的同时代火山岩及花岗岩、花岗闪长岩共同组成了一条横贯整个造山带的大型陆缘弧岩浆岩带,为龙木错-双湖(-澜沧江)-昌宁-孟连古特提斯主洋盆自西(南)向东、北东方向俯冲过程的产物。

致谢 中国科学技术大学侯振辉博士在锆石测年过程中提供了很大帮助,北京 SHRIMP 中心周丽芹博士协助完成锆石阴极发光图像制作,两位匿名审稿人提供了有益修改建议,在此一并表示感谢!

## References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do

- not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 29: 59~79.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and the petrological and geochemical constraints on Lincang granite in Western Yunnan, China: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 282~294.
- Edit Committee of the Sanjiang Geological Map. 1986. Geological Map of the Jinshajiang, Lancangjiang, Nujiang Regions, Scale 1:1 000 000 [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Fan Weiming, Pong Touping and Wang Yuejun. 2009. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys [J]. *Earth Science Frontiers*, 16 (6): 291~303 (in Chinese with English abstract).
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Zhang Aimei, *et al.* 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China [J]. *Lithos*, 119: 553~568.
- Frey F A, Green D H and Roy S D. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data [J]. *Journal of Petrology*, 19(3): 463~513.
- Gao Rui, Xiao Long, He Qi, *et al.* 2010. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Granites in Weixi-Deqin, West Yunnan [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35 (2): 186~200 (in Chinese with English abstract).
- Gorton M P and Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 1 065~1 073.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, *et al.* 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram [J]. *Journal of Petrology*, 48(12): 2 341~2 357.
- Hennig D, Lehmann B, Frei D, *et al.* 2009. Early Permian seafloor to continental arc magmatism in the eastern Paleo-Tethys: U-Pb age and Nb-Sr isotope data from the southern Lancangjiang zone, Yunnan, China [J]. *Lithos*, 113: 408~422.
- Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, *et al.* 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109~120 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi and Sun Xiaomeng. 2003. SHRIMP dating of Baimaxueshan and Ludian granitoid batholiths, northwestern Yunnan Province, and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 337~342 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Liu Dunyi and Sun Xiaomeng. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 371~384.

- Kapp P, Yin A, Manning C E, *et al.* 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet [J]. *Geology*, 28(1): 19~22.
- Kong Huilei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, *et al.* 2012. Petrogenesis of Lincang granites in Sanjiang area of western Yunnan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotop [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1438~1452 in Chinese with English abstract).
- Li Baolong, Ji Jianqing, Fu Xiaoyue, *et al.* 2008. Zircon Shrimp dating and its implications of the metamorphic rocks in Ailao Shan-Diancang Mountain Ranges, west Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2322~2330 in Chinese with English abstract).
- Li Cai. 1987. The Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang Plate Suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permian-Carboniferous system in northern Xizang, China [J]. *Journal of Changchun College of Geoscience*, 17(2): 155~166 in Chinese with English abstract).
- Li Cai. 2008. A review on 20 years' study of the Longmu Co-Shuanghu-Lancang River suture zone in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Geological Review*, 54(1): 105~119 in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Xie Yaowu, Jiang Guangwu, *et al.* 2008. Glacial-marine diamictite of Gondwana facies in the Gyitang area, eastern Tibet, China, and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1654~1658 in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, *et al.* 2006. Discovery of eclogite and its geological significance in Qiangtang area, central Tibet [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 51(1): 70~74 in Chinese).
- Li Pu. 1955. A primary study of the Eastern Tibet Geology [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 52: 62~71 in Chinese).
- Liu Dengzhong, Wang Guozhi, Li Youguo, *et al.* 1999. The new development of isotopic geochronology at the northern part of the Lancang River Suture Zone [J]. *Regional Geology of China*, 18(3): 334~335 in Chinese).
- Liu Junlai, Wang Anjian, Cao Shuyun, *et al.* 2008. Geochronology and tectonic implication of migmatites from Diancangshan, Western Yunnan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 413~420 in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/EX, rev. 3.00, A geochronological toolkit for Microsoft Excel [A]. Berkeley Geochronology Center Special Publication [C], 4: 71.
- Metcalfe I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43: 605~623.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1~33.
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, *et al.* 2001. Volcanic petro-tectonic assemblages in the Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics [J]. *Geological Journal of China University*, 7(2): 121~138 in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu and Lu Fengxiang. 1994. Volcanism and the evolution of Tethys in Sanjiang area, southwestern China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 325~333.
- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, *et al.* 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~267 in Chinese).
- Mou Chuanlong and Yu Qian. 2002. The age of volcanic rock of the Pantiange Formation in the Lanping basin, Yunnan province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 26(4): 289~292 in Chinese with English abstract).
- Nie Fei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, *et al.* 2012. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology of the Triassic granites in the Changning-Menglian suture zone and their implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1465~1476 in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Li Xingzhen, Wang Liquan, *et al.* 2002. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 701~707 in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1983. The role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [A]. Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Nantwich Cheshire: Shiva publications, 230~249.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Yb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33~47.
- Peng Touping. 2006. The Post-collisional Magmatism for the Southern Lancangjiang Tectonic Zone, Southwestern China: Petrogenesis and Its Tectonic implications [D]. PhD Thesis, Chinese Academy of Sciences, 1~108 in Chinese with English abstract).
- Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2006. SHRIMP Zircon U-Pb geochronology of early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implication [J]. *Science in China, Ser. D, Earth Sciences*, 36(12): 123~132 in Chinese).
- Peng Touping, Wang Yuejue, Zhao Guochun, *et al.* 2008. Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: Geochronological and geochemical constraints on their petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithology*, 102: 358~373.
- Peng Touping, Wilde S A, Wang Yuejun, *et al.* 2013. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: petrogenesis and implications for the evolution of Paleo-Tethys [J]. *Lithology*, 168~169: 15~32.
- Qi Xuexiang, Zhu Luhua, Li Huaqi, *et al.* 2010. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating for mylonitized granite from the Ailaoshan-Jinshajiang tectonic zone in the eastern Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 357~369 in Chinese with English abstract).
- Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geol-

- ogy of Qinghai Province[ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~66( in Chinese ).
- Reid A J, Wilson Ch J L and Liu Shun. 2005. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau[ J ]. *Journal of Structural Geology*, 27: 119~137.
- Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, *et al.* 1983. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouver triple junction and 11 degree east[ J ]. *Journal of Petrology*, 24( 3 ): 267~318.
- Sha Shaoli, Bao Junyue, Jin Yachang, *et al.* 1999. The new development of isotopic geochronology of the Diancang MTS metamorphic zone[ J ]. *Yunnan Geology*, 18( 1 ): 63~66( in Chinese with English abstract ).
- Sha Shaoli and Liu Yuchun. 2000. A preliminary study on the orthogneiss of Diancang Mountain, Dali[ J ]. *Yunnan Geology*, 19( 3 ): 260~269( in Chinese with English abstract ).
- Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Liu Hailing, *et al.* 2006. Thermochronological analyses on the cooling history of the Lincang Granitoid Batholith, Western Yunnan[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22( 2 ): 465~479( in Chinese with English abstract ).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[ J ]. *Geological Society of London, Special Publications*, 42: 313~345.
- Sun Xiaomeng, Yang Zunyi, Zhang Meisheng, *et al.* 1999. On the stratigraphy and tectonic evolution of the Jinsha River Paleo-Tethys orogenic belt in NW Yunnan province[ J ]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29( 1 ): 20~24( in Chinese with English abstract ).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[ M ]. Blackwell: Oxford Press, 1~312.
- Wang Baodi, Wang Liqun, Chen Jianlin, *et al.* 2013. Triassic three-stage collision in the Paleo-Tethys: Constraints from magmatism in the Jiangda-Degen-Weixi continental margin arc, SW China[ J ]. *Gondwana Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.023>.
- Wang Baodi, Wang Liqun, Qiangba Zaxi, *et al.* 2011b. Early Triassic collision of northern Lancangjiang suture: Geochronological, geochemical and Hf isotope evidences from the granitic gneiss in Leiwuqi area, East Tibet[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 27( 9 ): 2752~2762( in Chinese with English abstract ).
- Wang Baodi, Wang Liqun, Wang Dongbing, *et al.* 2011a. Zircon U-Pb dating of volcanic rocks from Renzhixueshan Formation in Shangdie rift basin of Sanjiang area and its geological implications[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30( 1 ): 25~33( in Chinese with English abstract ).
- Wang Keyong. 1997. Identification of fossils from the Jietang Group, Chaya-Zuogong region, eastern Tibet and geological implications[ J ]. *Regional Geology of China*, 16( 3 ): 245~248( in Chinese ).
- Wang Keyong. 1998. New advance in the study of the Jiayuqiao Group in the Nujiang Bridge-Bamda area, Baxoi, eastern Tibet[ J ]. *Regional Geology of China*, 17( 1 ): 105~111( in Chinese with English abstract ).
- Wang Liqun, Pan Guitang, Li Dingmou, *et al.* 1999. The Spatio-temporal framework and geological evolution of the Jinshajiang arc-basin system[ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 73( 3 ): 206~218( in Chinese with English abstract ).
- Wang Xiaofeng, Metcalfe I, Jian Ping, *et al.* 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution[ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 675~690.
- Wang Yanbin, Han Juan, Zeng Pusheng, *et al.* 2010. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in Yangla copper deposit, Deqin Country, Yunnan, Southwest China[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 26( 6 ): 1833~1844( in Chinese with English abstract ).
- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Fan Weiming, *et al.* 2010. Petrogenesis of late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys: Geochronological and geochemical constraints[ J ]. *Lithos*, 120( 3~4 ): 529~546.
- 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: 325~343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[ J ]. *Earth and Planetary Science letters*, 50( 1 ): 11~30.
- Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26( 1 ): 77~89( in Chinese with English abstract ).
- Yang Tiannan, Hou Zengqian, Wang Yue, *et al.* 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garze-Litang suture[ J ]. *Tectonics*, 31, TC4004, doi:10.1029/2011TC003044.
- Yang Tiannan, Liang Mingjuan, Fan Jinwei, *et al.* 2013. Paleogene sedimentation, volcanism and deformation in eastern Tibet: Evidence from structures, geochemistry and zircon U-Pb dating in the Jianchuan Basin, SW China[ J ]. *Gondwana Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.014>.
- Yang Tiannan, Zhang Hongrui, Liu Yanxue, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[ J ]. *Chemical Geology*, 284: 270~282.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[ J ]. *Chemical Geology*, 247: 100~118.
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2010. Subduc-

- tion-related quartz syenite porphyries in the eastern Qiangtang terrane, Qinghai-Xizang Plateau: Constraints from geochemical analyses [ J ]. *Geological Review*, 56( 3 ): 403 ~ 412( in Chinese with English abstract ).
- Zi Jianwei, Cawood P A, Fan Weiming, *et al.* 2012a. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang Orogen ( SW China ) in response to closure of the Paleotethys [ J ]. *Lithos*, 140 ~ 141 : 166 ~ 182.
- Zi Jianwei, Cawood P A, Fan Weiming, *et al.* 2012b. Triassic collision in the Paleotethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China [ J ]. *Lithos*, 144 ~ 145 : 145 ~ 160.
- Zhong Dalai. 1998. Paleotethyan Orogenic Belt in West Sichuan and West Yunnan [ M ]. Beijing : Science Press, 1 ~ 23( in Chinese ).
- ### 附中文参考文献
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录 [ J ]. *地学前缘*, 16( 6 ): 291 ~ 303.
- 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 2010. 滇西西德钦-德钦一带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因 [ J ]. *地球学报——中国地质大学学报*, 35( 2 ): 186 ~ 200.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化及成矿系统 [ J ]. *地质学报*, 78( 1 ): 109 ~ 120.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003. 滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [ J ]. *地球学报*, 24( 4 ): 337 ~ 342.
- 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 等. 2012. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束 [ J ]. *岩石学报*, 28( 5 ): 1438 ~ 1452.
- 李宝龙, 李建清, 付孝悦, 等. 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [ J ]. *岩石学报*, 24( 10 ): 2322 ~ 2330.
- 李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界 [ J ]. *长春地质学院学报*, 17( 2 ): 155 ~ 166.
- 李才. 2008. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年 [ J ]. *地质论评*, 54( 1 ): 105 ~ 119.
- 李才, 谢尧武, 蒋光武, 等. 2008. 藏东吉塘地区冈瓦纳相冰海杂砾岩的特征及其意义 [ J ]. *地质通报*, 27( 10 ): 1654 ~ 1658.
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 2006. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义 [ J ]. *科学通报*, 51( 1 ): 70 ~ 74.
- 李璞. 1955. 西藏东部地质的初步认识 [ J ]. *科学通报*, 52 : 62 ~ 71.
- 刘登忠, 王国芝, 李佑国, 等. 1999. 澜沧江结合带北段同位素地质年代学研究新进展 [ J ]. *中国区域地质*, 18( 3 ): 334 ~ 335.
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等. 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵 [ J ]. *岩石学报*, 24( 3 ): 413 ~ 420.
- 莫宣学, 邓晋福, 董方洌, 等. 2001. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义 [ J ]. *高校地质学报*, 7( 2 ): 121 ~ 138.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 267.
- 牟传龙, 余谦. 2002. 云南兰坪盆地攀天阁组火山岩的 Rb-Sr 年龄 [ J ]. *地层学杂志*, 26( 4 ): 289 ~ 292.
- 聂飞, 董国臣, 莫宣学, 等. 2012. 滇西昌宁-孟连带三叠纪花岗岩地球化学、年代学及其意义 [ J ]. *岩石学报*, 28( 5 ): 1465 ~ 1476.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分 [ J ]. *地质通报*, 21( 11 ): 701 ~ 707.
- 彭头平. 2006. 澜沧江南带三叠纪碰撞后岩浆作用、岩石成因及其构造意义( 博士学位论文 [ D ] ). 中国科学院, 1 ~ 108.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义 [ J ]. *中国科学, D 辑, 地球科学*, 36( 12 ): 123 ~ 132.
- 戚学祥, 朱路华, 李化启, 等. 2010. 青藏高原东缘哀牢山-金沙江构造带糜棱状花岗岩的 LA-ICPMS U-Pb 定年及其构造意义 [ J ]. *地质学报*, 84( 3 ): 357 ~ 369.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 662.
- 三江造山带地质图编图委员会. 1986. 金沙江、澜沧江和怒江地区地质图( 1:1000000 [ M ] ). 北京: 地质出版社.
- 沙绍礼, 包俊跃, 金亚昌, 等. 1999. 点苍山变质带同位素年代学研究新进展 [ J ]. *云南地质*, 18( 1 ): 63 ~ 66.
- 沙绍礼, 刘宇淳. 2000. 大理点苍山正片麻岩初步研究 [ J ]. *云南地质*, 19( 3 ): 260 ~ 269.
- 施小斌, 邱学林, 刘海龄, 等. 2006. 滇西临沧花岗岩基冷却的热年代学分析 [ J ]. *岩石学报*, 22( 2 ): 465 ~ 479.
- 孙晓猛, 杨遵仪, 张梅生, 等. 1999. 滇西北金沙江古特提斯造山带地层及构造演化 [ J ]. *长春科技大学学报*, 29( 1 ): 20 ~ 24.
- 王保弟, 王立全, 强巴扎西, 等. 2011b. 早三叠世北澜沧江结合带碰撞作用: 类乌齐花岗岩片麻岩年代学、地球化学及 Hf 同位素证据 [ J ]. *岩石学报*, 27( 9 ): 2752 ~ 2762.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等. 2011a. 三江上叠裂谷盆地人支雪山组火山岩锆石 U-Pb 定年与地质意义 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 30( 1 ): 25 ~ 33.
- 王克勇. 1997. 藏东察雅-左贡地区吉塘群化石的发现及其意义 [ J ]. *中国区域地质*, 16( 3 ): 245 ~ 248.
- 王克勇. 1998. 藏东八宿怒江桥-邦达一带嘉玉桥群研究的新进展 [ J ]. *中国区域地质*, 17( 1 ): 105 ~ 111.
- 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等. 1999. 金沙江弧-盆系时空结构及地史演化 [ J ]. *地质学报*, 73( 3 ): 206 ~ 218.
- 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等. 2010. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义 [ J ]. *岩石学报*, 26( 6 ): 1833 ~ 1844.
- 夏林圻, 夏迎春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 26( 1 ): 77 ~ 89.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨天南, 等. 2010. 青藏高原北羌塘南缘俯冲型石英正常斑岩的发现: 来自地球化学分析证据 [ J ]. *地质论评*, 56( 3 ): 403 ~ 412.
- 钟大赉. 1998. 川滇西部古特提斯造山带 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 231.