

# 峨眉山大火成岩省赋 Nb-Ta-Zr 矿化正长岩脉的形成时代和锆石 Hf 同位素组成\*

王汾连<sup>1,2</sup> 赵太平<sup>1\*\*</sup> 陈伟<sup>3</sup> 王焰<sup>1</sup>

WANG FenLian<sup>1,2</sup>, ZHAO TaiPing<sup>1\*\*</sup>, CHEN Wei<sup>3</sup> and WANG Yan<sup>1</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 香港大学地球科学系, 香港

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

2013-05-10 收稿, 2013-08-25 改回.

Wang FL, Zhao TP, Chen WT and Wang CY. 2013. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic compositions of the Nb-Ta-Zr-bearing syenitic dikes in the Emeishan large igneous province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3519-3532

**Abstract** Both Nb-Ta-Zr-bearing and Nb-Ta-Zr-barren syenitic dikes of the Luku and Baicao ore districts in the Panxi region (SW China) are spatially associated with basalts, gabbroic and felsic (granitic and syenitic) intrusions of the ~260Ma Emeishan large igneous province (ELIP). The syenitic plutons, barren and mineralized dikes at Luku were dated to be  $255.6 \pm 2.0$ Ma,  $255.6 \pm 1.5$ Ma and  $256.7 \pm 4.4$ Ma, respectively. The syenitic pluton and mineralized dikes at Baicao were dated to be  $257.9 \pm 2.3$ Ma and  $257.8 \pm 1.3$ Ma, respectively. These age data indicated that the Nb-Ta-Zr mineralization hosted in the syenitic dikes are part of the ELIP. Mineralized dikes at Luku and Baicao have zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging mostly from +2 to +6 and  $-0.2 \sim +7.7$ , comparable to those of the spatially closely associated syenitic plutons (+1.0 ~ +6.6 in Luku and +2.1 ~ +6.2 in Baicao), implying that the mineralized dikes may have evolved from the syenitic magma. This is important for regional exploration of Nb-Ta-Zr deposits. We consider that the syenitic plutons and dikes may be the products of partial melting of underplated mafic cumulates.

**Key words** Nb-Ta-Zr mineralization; Zircon U-Pb age and Hf isotope; Syenitic dike; Panxi district; Emeishan large igneous province

**摘要** 攀西地区广泛发育 Nb-Ta-Zr 矿正长岩脉,它们在空间上与峨眉山大火成岩省的玄武岩、辉长岩及长英质岩体(正长岩和花岗岩)共生,但是否有成因联系并不清楚。本文对攀西地区炉库和白草两个 Nb-Ta-Zr 矿区中的正长岩体、无矿及含矿正长岩脉进行了锆石 LA-ICPMS 法 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素研究。研究表明,炉库矿区正长岩体和无矿正长岩脉锆石 U-Pb 年龄为  $255.6 \pm 2.0$ Ma 和  $255.6 \pm 1.5$ Ma,含矿正长岩脉为  $256.7 \pm 4.4$ Ma;白草矿区正长岩体和含矿正长岩脉形成时间为  $257.9 \pm 2.3$ Ma 和  $257.8 \pm 1.3$ Ma。这些年龄结果均显示攀西地区 Nb-Ta-Zr 矿化的形成时代与正长岩体一致,说明 Nb-Ta-Zr 矿化的形成与峨眉山大火成岩省紧密相关,为地幔柱成矿系统的一部分。两个矿区含矿正长岩脉的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为 +0.1 ~ +9.5(多数集中于 +2 ~ +6,炉库矿区)和  $-0.2 \sim +7.7$ (白草矿区),与正长岩体相似(炉库矿区为 +1.0 ~ +6.6,白草矿区为 +2.1 ~ +6.2),说明含矿岩脉与正长岩体有紧密成因联系。结合锆石年龄和 Hf 同位素研究初步认为,正长岩体和正长岩脉是峨眉山地幔柱岩浆底侵到下地壳底部的基性岩再次部分熔融的结果。

**关键词** Nb-Ta-Zr 矿; 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素; 正长岩脉; 攀西地区; 峨眉山大火成岩省

中图法分类号 P588.133; P597.3

\* 本文受国家基础研究发展计划(973项目)(2011CB808903)资助。

第一作者简介:王汾连,女,1986年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: fenlian0523@163.com

\*\* 通讯作者:赵太平,男,1963年生,研究员,岩石学专业,E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

~260Ma 地幔柱活动形成的峨眉山大火成岩省( Chung and Jahn ,1995; Xu *et al.* ,2001) 主要由大陆溢流玄武岩及共生的镁铁-超镁铁质岩体、花岗岩和碱性岩组成。与世界其它大火成岩省相比,峨眉山大火成岩省出露面积较小,但成矿作用类型多样,不仅赋含铜镍硫化物矿床,还形成了一

些大型钨钽磁铁铁矿床( Zhou *et al.* ,2008 ,2013) 并发育少量自然铜、Nb、Ta、Zr 矿化。这在世界其它大火成岩省中极为罕见。已有的关于其成矿作用的大量研究工作集中在铜镍硫化物矿床和钨钽磁铁铁矿床的成因方面,而对于区内与 Nb-Ta-Zr 矿化及相关的正长岩脉的形成时代、源区性质以及

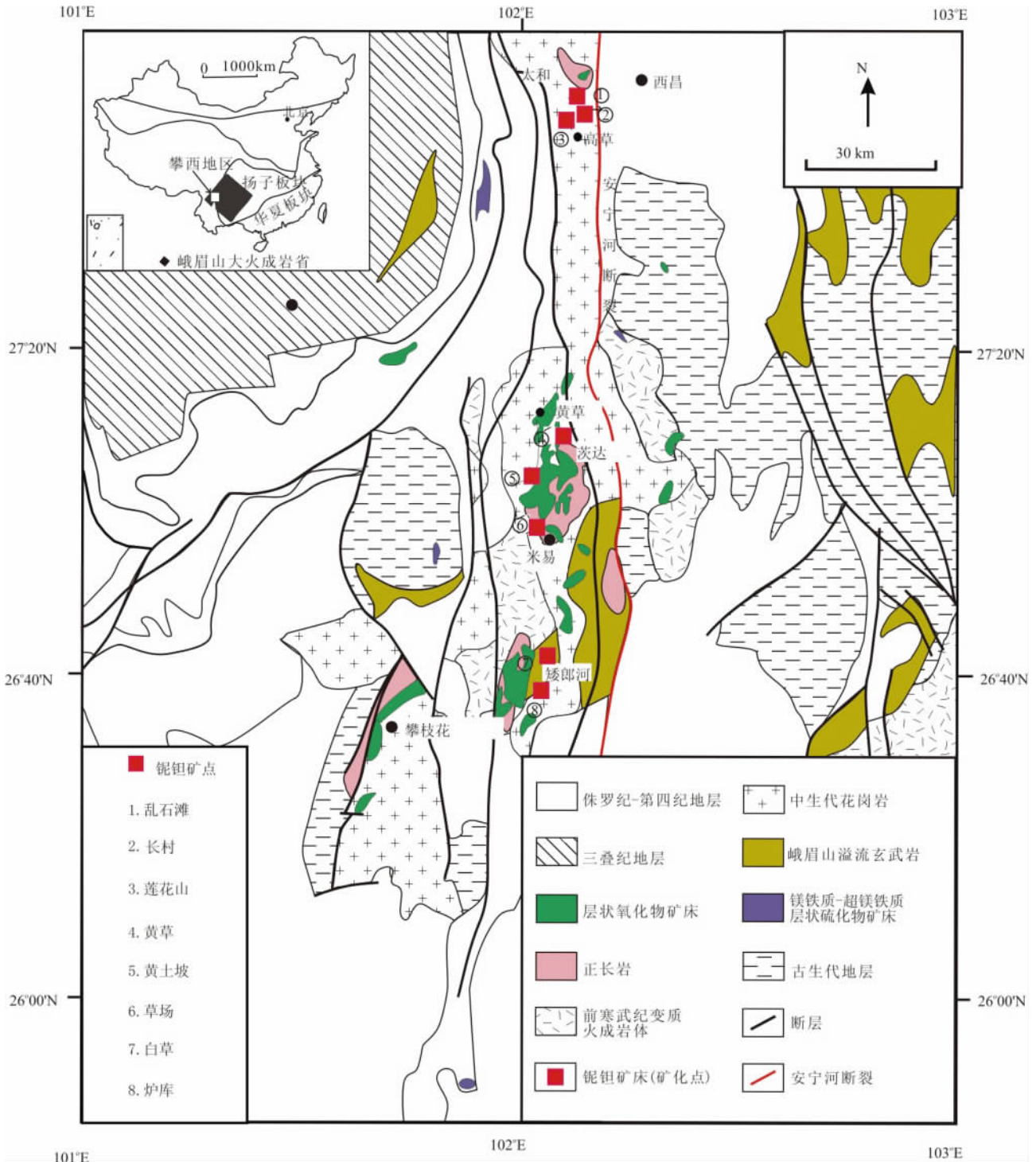


图1 攀西地区安宁河断裂带附近钨(钽)矿分布示意图(据贺金良,2004; Pang *et al.* ,2009)

Fig.1 Distribution of Nb-Ta ore deposits along the Anning river faults in Panxi area (after He ,2004; Pang *et al.* ,2009)

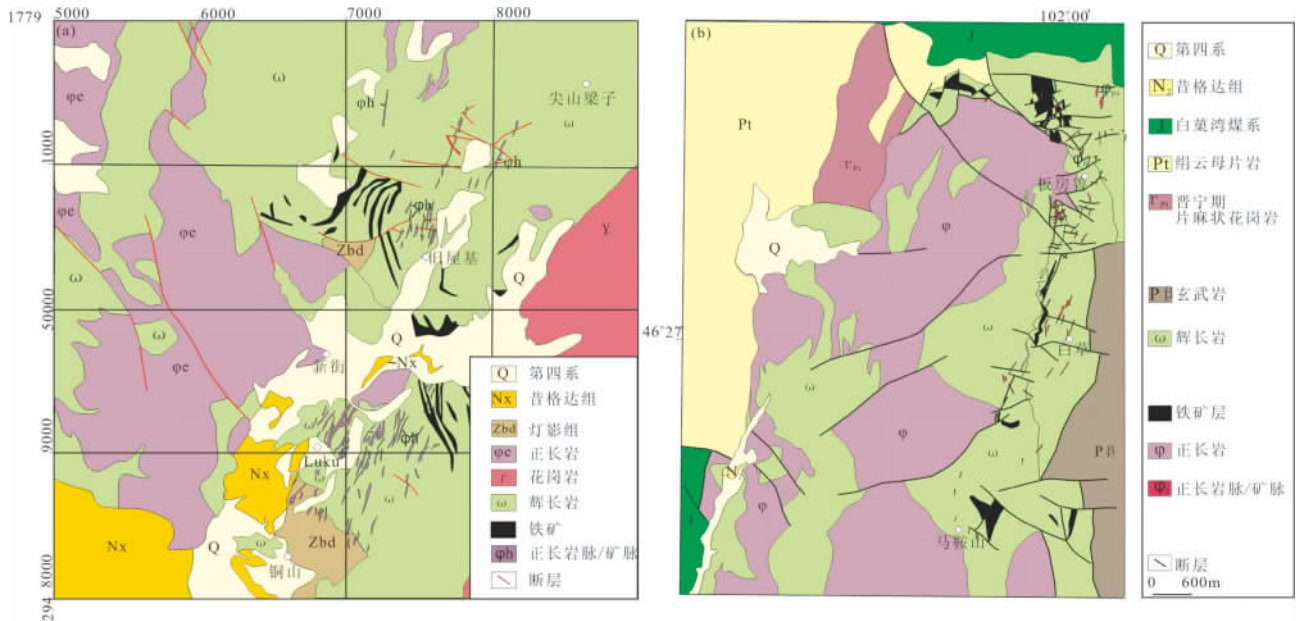


图2 攀西炉库和白草矿区钽铌矿区图(据四川省地质局403地质队,1965<sup>①</sup>;四川省地质局西昌地质队,1962<sup>②</sup>改编)  
Fig.2 Geoloigical maps of the Luku and Baicao Nb-Ta ore deposits in the Panxi region

它们与区内大型花岗岩体和正长岩体的成因联系并不清楚。

攀西地区位于峨眉山大火成岩省内部,是著名的钽铌磁铁矿床和铜镍硫化物矿床集聚区。20世纪60年代初期在该区发现了近30个Nb-Ta-Zr矿床(矿化点)(贺金良,2004),它们多赋存在正长岩脉中,在空间上与攀西地区广泛分布的长英质岩体密切相关。这些长英质岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄集中在260~257Ma,高峰期发生在260Ma(Xu et al.,2008),被认为是峨眉山地幔柱岩浆活动的产物(He et al.,2007;Shellnutt et al.,2007,2009,2011;Zhong et al.,2007,2009;Xu et al.,2008)。但是目前仍不清楚Nb-Ta-Zr矿化(床)和所赋存的正长岩脉以及附近的长英质岩体是否有成因联系。前人根据岩脉与辉长岩体的关系推测这些正长岩(矿)脉可能形成于印支期(杨铸生等,2007),但缺乏可靠的年龄数据支持。因此,精确测定该区Nb-Ta-Zr矿脉的形成时代对理解其与峨眉山大火成岩省的关系有重要意义。

锆石是Nb-Ta-Zr矿正长岩脉中的矿石矿物,其形成年龄应代表成矿年龄。前人对攀西地区炉库和白草两个矿区进行了详细勘察,确定其为具有成矿远景的中小型矿床。两个矿区野外出露较好,且距离很近,野外地质资料也翔实,保证采样的准确性与代表性,所以选择这两个矿区为代表。本文选取这两个矿区中的正长岩体、无矿及含矿正长岩脉进行LA-ICP-MS法锆石U-Pb定年,同时结合锆石Hf同位素组成,探讨本区Nb-Ta-Zr矿的物质来源。

## 1 地质背景

峨眉山大火成岩省位于扬子地块西缘和青藏高原东缘之间(图1)。扬子地块由一套太古代至中元古代结晶基底和新元古代(~600Ma)一早二叠纪碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩地层的沉积盖层组成(四川省地质矿产局,1991;Yan et al.,2003)。峨眉山大火成岩省覆盖面积超过 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,所形成的火山岩地层厚度从几百米到5千米不等,主要分布在中国的西南部和越南的北部,包括出露广阔的大陆溢流玄武岩以及在时空上关系密切的镁铁-超镁铁质岩体和少量花岗岩体和正长岩体,被认为与地幔柱活动有关(Chung and Johan,1995;Xu et al.,2001)。

攀枝花-西昌(攀西)地区出露的古老基底为一套以中-新元古代变质岩石为主的片麻岩组合(图1)。区内断裂以南北向安宁河断裂带为主,沿此断裂带由北至南,断续发育几个大型的层状镁铁-超镁铁质岩体,分别是太和、新街、红格和攀枝花岩体。围岩是同期稍早的玄武岩,并伴生有少量的花岗岩和正长岩,集中分布在50km宽、200km长的一个狭长带上。从北往南依次分布有太和花岗岩体( $261.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$ ,Xu et al.,2008)、黄草正长岩体( $258.9 \pm 0.7 \text{ Ma}$ ,Shellnutt et al.,2012)、茨达花岗岩体( $258.4 \pm 0.6 \text{ Ma}$ ,Shellnutt et al.,2012)及矮郎河花岗岩体( $255.2 \pm 3.6 \text{ Ma}$ ,Xu et al.,2008)。在这些长英质岩体附近发育Nb-Ta-Zr矿

① 四川省地质局403地质队.1965.会理路枯烧绿石伟晶岩矿区详细普查报告

② 四川省地质局西昌地质队.1962.会理白草钽铌矿区详细普查报告

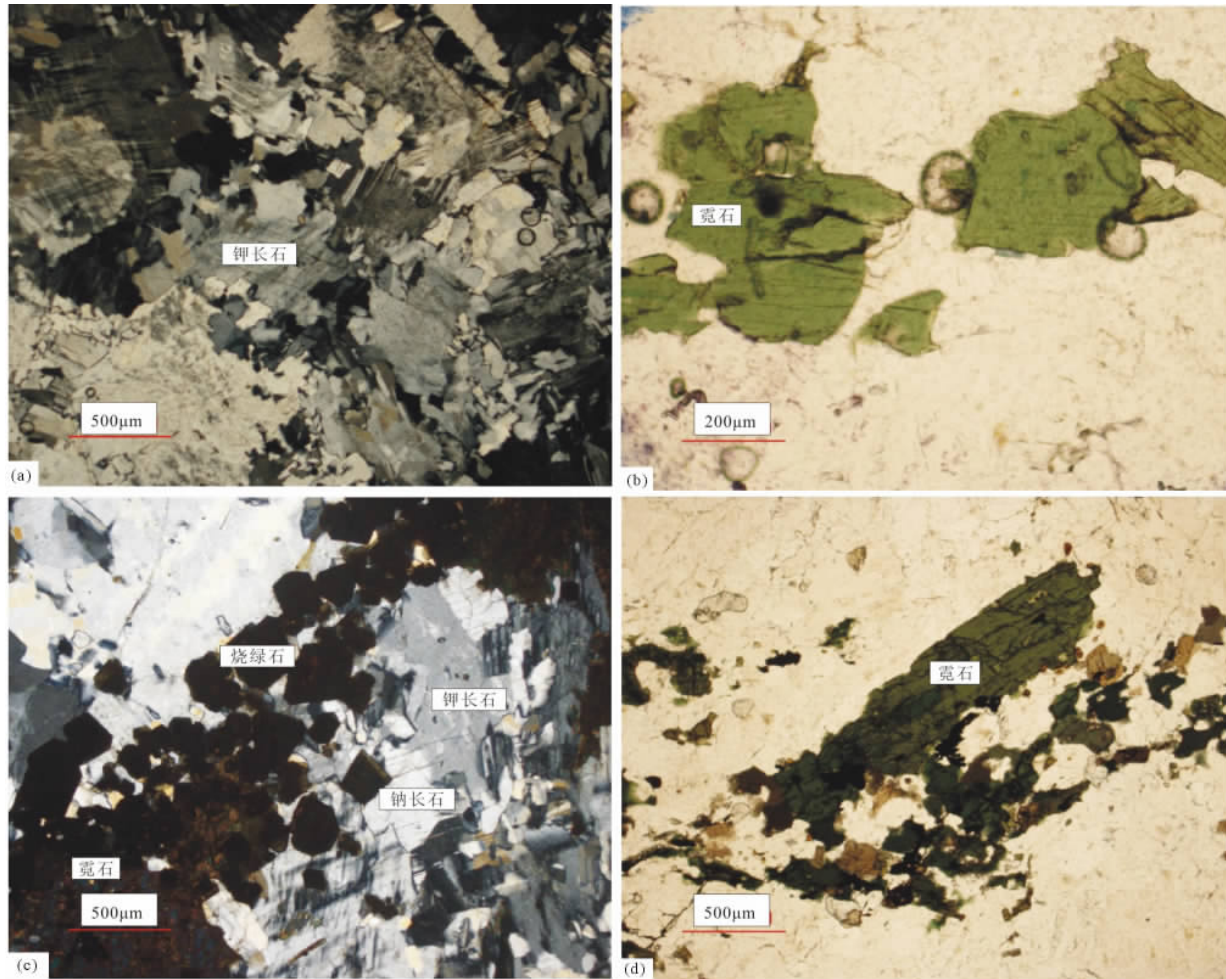


图3 无矿正长岩脉和含矿正长岩脉矿物显微照片

(a) 和 (b) 分别为炉库和白草矿区无矿正长岩脉矿物; (c) 和 (d) 分别为炉库和白草矿区含矿正长岩脉矿物

Fig. 3 Photomicrographs of minerals of syenite from the barren dikes in the Luku (a) and Baicao (b) areas and from the mineralized dikes in the Luku (c) and Baicao (d) areas

床及矿化点(贺金良 2004)。

20世纪60年代起开始对攀西地区 Nb-Ta 矿进行勘查,在西昌、德昌、会理、会东、米易等地区圈定了矿体,并估算了远景地质储量(贺金良 2004)。空间上,这些稀有金属矿床主要分布于红格、米易和西昌地区(图1),多数沿着安宁河大断裂分布,从北部的会理到南部的西昌,有成矿远景的主要是炉库、白草和莲花山等地(图1)。其中白草和炉库两地,经初查和详查被确定为小型 Nb-Ta-Zr 矿区(李立主 2001)。炉库和白草矿床位于盐边县境内,安宁河断裂带西侧(图1),两矿区相距很近,白草矿区位于炉库矿区北东方向 5km 左右。其西侧为碱性正长岩体,东侧为矮郎河花岗岩体,正长岩脉侵入于二叠纪镁铁-超镁铁质岩体中,距离正长岩体 0.5~1km,大体上分为无矿正长岩脉和含矿正长岩脉两类(图2)。各类岩脉在垂直方向上则呈平行或窄束的放射状排列,产出严格受裂隙控制。据统计,80%岩脉向西倾,且倾角较陡。规模上,含矿正长岩脉厚而长(1~20m 厚,50~500m 长),无矿正长岩脉

细而长(0.3~10m 厚,30~400m 长)。两矿区的正长岩体呈浅灰至黑灰色,中粒-粗粒结构,矿物成分以钾长石为主(常见微斜长石、条纹长石,约 50%~60%),其次是钠长石((30%) 暗色矿物含量较少,主要为角闪石、钠闪石及少量霓石(5%~10%)等,白草矿区正长岩体还含有较多黑云母。正长岩脉的主要矿物组成与正长岩体相似,主要组成矿物均为钾长石、钠长石及霓石等,不同的是矿物含量有所不同。含矿岩脉比无矿岩脉含有更多的钠长石和霓石及较少的钾长石(图3);无矿岩脉副矿物主要有钛铁矿、榍石、磷灰石等及少量矿石矿物锆石、烧绿石;而含矿岩脉副矿物主要为矿石矿物烧绿石和锆石,钛铁矿和榍石含量较无矿岩脉大大减少。

## 2 样品采集和分析方法

本文在炉库矿区采集 3 个锆石样品,分别为正长岩体(LK11-33, N26°36'54.22", E101°58'19.6"), 无矿正长岩脉

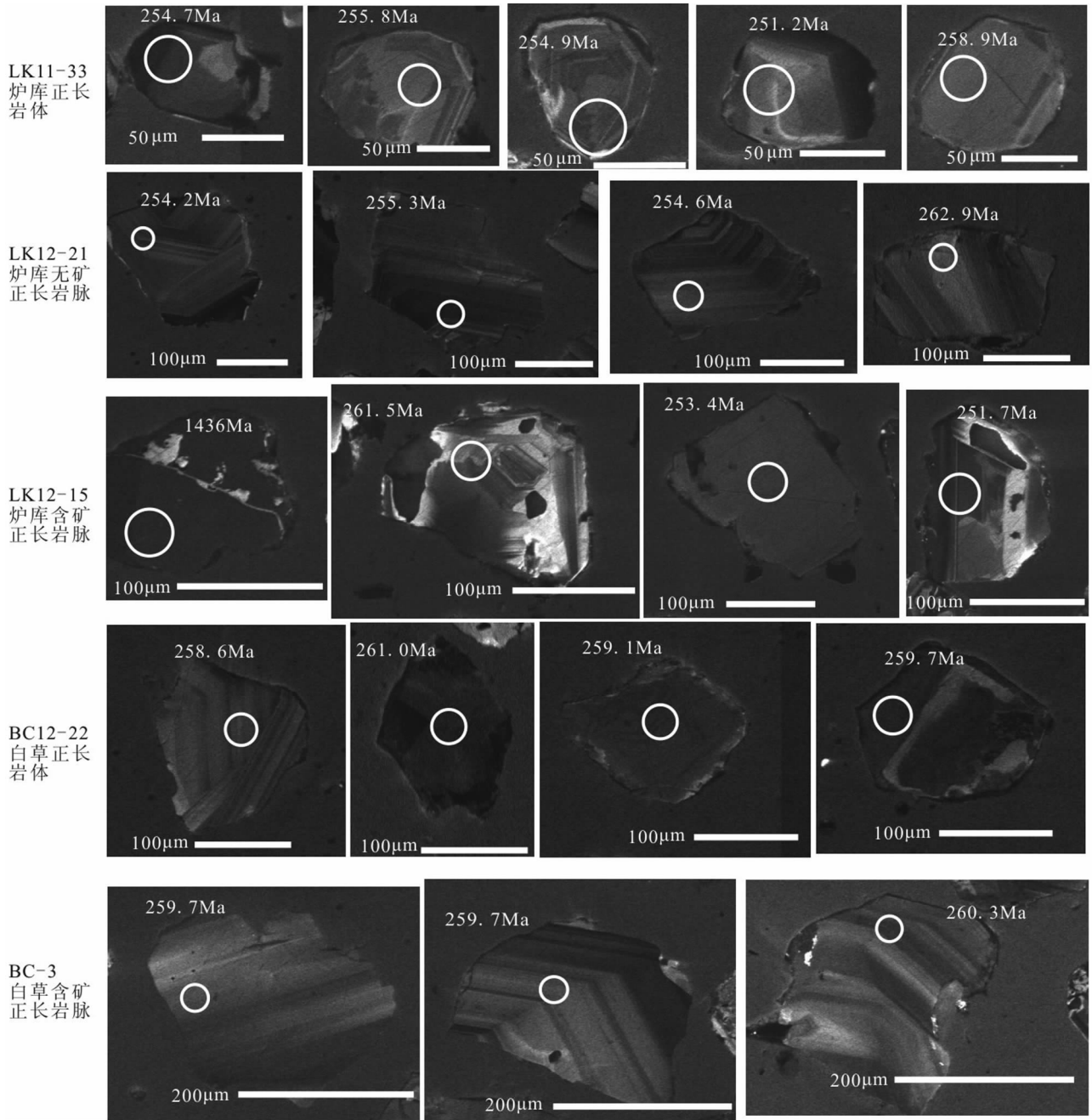


图4 炉库和白草 Nb-Ta-Zr 矿区正长岩体和正长岩脉中锆石的 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from syenitic plutons and dikes of the Luku and Baicao Nb-Ta-Zr deposits

(LK12-21,  $N26^{\circ}38'15.5''$ ,  $E101^{\circ}58'48.9''$ ) 和含矿正长岩脉 (LK12-15,  $N26^{\circ}37'3.0''$ ,  $E101^{\circ}58'40.5''$ ); 在白草地区采集 2 个锆石样品, 分别为正长岩体 (BC12-22,  $N26^{\circ}42'43.5''$ ,  $E102^{\circ}00'16.3''$ ) 和含矿正长岩脉 (BC-3,  $N26^{\circ}41'12.24''$ ,  $E102^{\circ}00'27.96''$ )。

锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室进行。其中锆石定年工作采用美国 Resonetics 公司生产的 RESolution M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-

MS 联机, 并带有一个独特的可以减少样品分馏的双室 (two-volume cell) 样品室和一个平滑激光剥蚀脉冲的 Squid 系统。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化, 使仪器达到最佳的灵敏度、最小的氧化物产率 ( $CeO/Ce < 3\%$ ) 和最低的背景值。采用标准锆石 TEMORA (417Ma) 作为测年外标, 所测元素激光斑束直径主要采用  $31\mu m$ , 频率为 8Hz, 详细的分析程序见涂湘林等 (2011)。

锆石 Hf 同位素在 Neptune 多道接收电感耦合等离子体质

谱仪(MC-ICPMS)和美国 resonetic 公司的 resolutionm-50 激光取样系统上进行。Hf 同位素测试点对应于相应的锆石 U-Pb 点。激光条件:束斑直径为  $44\mu\text{m}$ , 频率为 8Hz, 前背景时间、激光剥蚀时间及冲扫时间分别为 30s、30s、5s。剥蚀能量为  $80\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 数据标准化根据  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ , 质量歧视校正用指数法则进行, Yb 和 Lu 的干扰校正取  $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$  (Chu *et al.*, 2002) 和  $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$ , 而 Yb 分馏校正则根据  $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 1.35272$  用指数法则进行 (Wu *et al.*, 2006)。

锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素数据处理采用 ICPMSDataCal 6.7 软件 (Liu *et al.*, 2008)。U-Pb 谐和线和加权平均年龄的计算及绘图用 Isoplot3.0 软件完成 (Ludwig, 2003)。

### 3 分析结果

#### 3.1 岩体和岩脉的锆石年龄

不同岩性中锆石均为无色透明, 多为棱角状-次圆状, 长宽比为  $1:1 \sim 2:1$ , 颗粒较为粗大, 一般  $50 \sim 200\mu\text{m}$ 。含矿岩脉中的锆石颗粒更为粗大, 有些可达 5mm 左右。CL 图像显示锆石环带结构比较清晰 (图 4), 多数锆石 Th/U 比值大于 0.3 (表 1), 反映出它们岩浆成因的特征。

炉库正长岩体 (LK11-33) 中锆石的 Th 和 U 含量分别为  $97 \times 10^{-6} \sim 829 \times 10^{-6}$  和  $174 \times 10^{-6} \sim 496 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为  $0.34 \sim 1.67$ 。该样品 24 个点次分析显示  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄主要集中于  $250 \sim 260\text{Ma}$ , 除去离谐和线较远的 3 个数据点, 其余 21 个  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄的加权平均值为  $255.6 \pm 2.0\text{Ma}$  (MSWD = 0.97, 图 5), 代表该正长岩体的结晶年龄。

炉库无矿正长岩脉 (LK12-21) 中锆石的 Th 和 U 含量分别为  $59 \times 10^{-6} \sim 506 \times 10^{-6}$  和  $92 \times 10^{-6} \sim 399 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值  $0.62 \sim 1.79$ 。25 个数据点分析显示  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄亦主要集中于  $250 \sim 260\text{Ma}$ , 去掉偏离谐和线较远的 3 个数据点, 剩余 22 个  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄加权平均值为  $255.6 \pm 1.5\text{Ma}$  (MSWD = 0.69, 图 5), 代表该正长岩体的结晶年龄。

炉库含矿正长岩脉 (LK12-15) 样品具有更高的 Th ( $582 \times 10^{-6} \sim 5278 \times 10^{-6}$ ) 和 Th/U ( $4.09 \sim 140$ ) 及低的 U ( $10 \times 10^{-6} \sim 276 \times 10^{-6}$ ) 含量, 锆石 CL 图像显示有些锆石颗粒可能遭受过后期重结晶作用。除一个继承性锆石 (1436Ma), 其余锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $248 \sim 283\text{Ma}$ , 除去误差较大的数据点, 根据 23 个  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄获得加权平均值为  $256.7 \pm 4.4\text{Ma}$  (MSWD = 1.1, 图 5), 反应含矿正长岩脉形成年龄。

白草正长岩体 BC12-22 样品具有较低的 Th ( $2 \times 10^{-6} \sim 142 \times 10^{-6}$ ) 和 U ( $11 \times 10^{-6} \sim 509 \times 10^{-6}$ ) 含量及 Th/U 比值 ( $0.08 \sim 0.86$ ), 10 个  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和点得到加权平均年龄为  $257.9 \pm 2.3\text{Ma}$  (MSWD = 0.33, 图 6), 代表了正长岩体结晶年龄。

白草含矿正长岩脉 BC-3 中锆石的 Th 和 U 含量分别为  $95 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$  和  $118 \times 10^{-6} \sim 444 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值

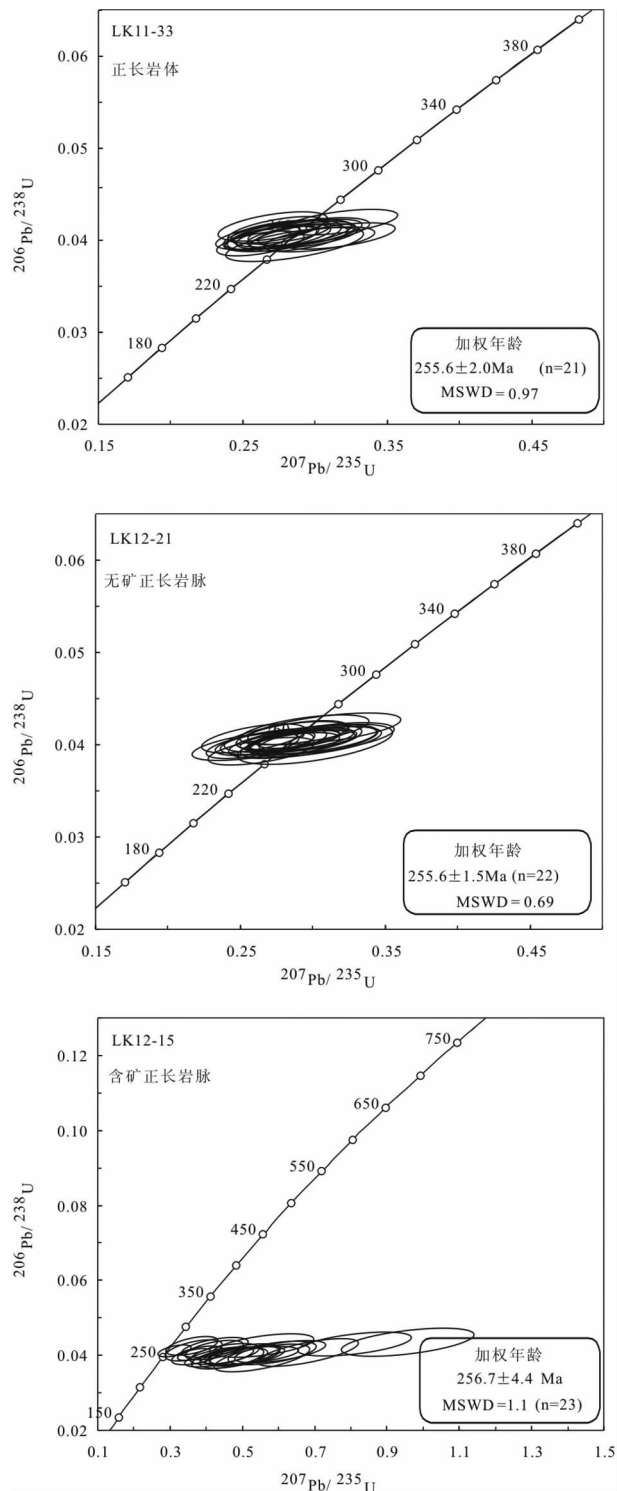


图 5 炉库 Nb-Ta-Zr 矿区正长岩体和正长岩脉的锆石年龄协和图

Fig. 5 Concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of syenitic plutons and dikes from the Luku Nb-Ta-Zr deposit

表1 攀西地区炉库和白草 Nb-Ta-Zr 矿区正长岩体及正长岩(矿)脉中锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of syenitic plutons and dikes from the Luku and Baicao Nb-Ta-Zr deposits

测点号	Th U		Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	(×10 <sup>-6</sup> )			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
LK11-33-1	139	262	0.53	0.0497	0.0032	0.2726	0.0165	0.0403	0.0006	245	13	254.7	4
LK11-33-2	177	231	0.77	0.0497	0.0030	0.2797	0.0166	0.0405	0.0006	250	13	255.8	4
LK11-33-3	145	431	0.34	0.0516	0.0025	0.2869	0.0137	0.0400	0.0006	256	11	252.9	3
LK11-33-4	107	174	0.61	0.0714	0.0062	0.4078	0.0366	0.0410	0.0007	347	26	259.3	4
LK11-33-5	267	360	0.74	0.0509	0.0028	0.2873	0.0158	0.0400	0.0005	256	12	252.9	3
LK11-33-6	278	305	0.91	0.0517	0.0031	0.2880	0.0174	0.0399	0.0007	257	14	252.4	4
LK11-33-7	219	470	0.47	0.0479	0.0024	0.2608	0.0126	0.0389	0.0005	235	10	246.2	3
LK11-33-8	251	328	0.77	0.0853	0.0070	0.5138	0.0477	0.0403	0.0007	421	32	255.0	4
LK11-33-9	211	337	0.63	0.0484	0.0028	0.2701	0.0155	0.0397	0.0006	243	12	251.0	4
LK11-33-10	97	185	0.53	0.0585	0.0043	0.3210	0.0219	0.0397	0.0007	283	17	251.2	4
LK11-33-11	144	200	0.72	0.0538	0.0037	0.2890	0.0194	0.0393	0.0007	258	15	248.2	5
LK11-33-12	291	295	0.98	0.0572	0.0030	0.3199	0.0160	0.0402	0.0006	282	12	254.1	4
LK11-33-13	155	244	0.64	0.0509	0.0032	0.2853	0.0179	0.0403	0.0007	255	14	254.5	4
LK11-33-14	279	403	0.69	0.0465	0.0024	0.2594	0.0131	0.0400	0.0005	234	11	252.5	3
LK11-33-15	188	470	0.40	0.0555	0.0029	0.3199	0.0160	0.0416	0.0005	282	12	262.5	3
LK11-33-16	362	377	0.96	0.0478	0.0025	0.2715	0.0136	0.0407	0.0006	244	11	257.4	4
LK11-33-17	162	238	0.68	0.0483	0.0029	0.2733	0.0161	0.0410	0.0007	245	13	259.0	4
LK11-33-18	112	255	0.44	0.0511	0.0029	0.2896	0.0172	0.0404	0.0006	258	14	255.1	4
LK11-33-19	303	419	0.72	0.0461	0.0022	0.2548	0.0119	0.0396	0.0005	230	10	250.4	3
LK11-33-20	174	412	0.42	0.0487	0.0025	0.2702	0.0136	0.0397	0.0006	243	11	251.2	3
LK11-33-21	829	496	1.67	0.0478	0.0022	0.2583	0.0118	0.0387	0.0005	233	9	245.1	3
LK11-33-22	238	350	0.68	0.0481	0.0024	0.2716	0.0137	0.0404	0.0005	244	11	255.4	3
LK11-33-23	228	447	0.51	0.0516	0.0024	0.2940	0.0140	0.0406	0.0005	262	11	256.6	3
LK11-33-24	205	360	0.57	0.0537	0.0029	0.2976	0.0158	0.0400	0.0005	265	12	252.8	3
LK12-21-01	137	168	0.82	0.0528	0.0029	0.2916	0.0155	0.0403	0.0005	260	12	254.7	3
LK12-21-02	506	399	1.27	0.0524	0.0021	0.2926	0.0118	0.0404	0.0004	261	9	255.4	2
LK12-21-03	171	234	0.73	0.0515	0.0026	0.2852	0.0140	0.0402	0.0005	255	11	254.2	3
LK12-21-04	192	189	1.02	0.0531	0.0029	0.2938	0.0151	0.0403	0.0005	262	12	254.7	3
LK12-21-05	177	250	0.71	0.0523	0.0027	0.2911	0.0149	0.0401	0.0005	259	12	253.4	3
LK12-21-06	59	95	0.62	0.0535	0.0038	0.3073	0.0216	0.0416	0.0007	272	17	262.9	4
LK12-21-07	70	99	0.71	0.0577	0.0042	0.3102	0.0215	0.0399	0.0007	274	17	252.5	4
LK12-21-08	194	224	0.87	0.0547	0.0031	0.3024	0.0163	0.0404	0.0006	268	13	255.2	3
LK12-21-09	126	165	0.76	0.0517	0.0032	0.2865	0.0175	0.0402	0.0006	256	14	254.0	4
LK12-21-10	120	131	0.91	0.0549	0.0039	0.3037	0.0208	0.0403	0.0007	269	16	254.6	4
LK12-21-11	199	245	0.81	0.0501	0.0027	0.2766	0.0150	0.0400	0.0005	248	12	252.8	3
LK12-21-12	231	305	0.76	0.0509	0.0025	0.2790	0.0134	0.0396	0.0005	250	11	250.2	3
LK12-21-13	170	205	0.83	0.0515	0.0028	0.2867	0.0155	0.0402	0.0006	256	12	254.0	4
LK12-21-14	192	256	0.75	0.0498	0.0027	0.2806	0.0155	0.0401	0.0006	251	12	253.5	4
LK12-21-15	251	241	1.04	0.0503	0.0033	0.2835	0.0178	0.0407	0.0007	253	14	256.9	4
LK12-21-16	166	207	0.80	0.0454	0.0031	0.2510	0.0168	0.0395	0.0006	227	14	249.5	4
LK12-21-17	61	92	0.66	0.0574	0.0047	0.3055	0.0219	0.0397	0.0009	271	17	250.9	5
LK12-21-18	217	291	0.75	0.0466	0.0025	0.2656	0.0140	0.0398	0.0005	239	11	251.4	3
LK12-21-19	319	178	1.79	0.0497	0.0032	0.2915	0.0182	0.0413	0.0007	260	14	260.6	4
LK12-21-20	147	226	0.65	0.0482	0.0028	0.2767	0.0153	0.0396	0.0006	248	12	250.1	4
LK12-21-21	149	210	0.71	0.0450	0.0027	0.2591	0.0145	0.0401	0.0006	234	12	253.3	4
LK12-21-22	326	322	1.01	0.0466	0.0025	0.2628	0.0131	0.0394	0.0006	237	11	248.9	4
LK12-21-23	416	348	1.19	0.0379	0.0022	0.2218	0.0126	0.0405	0.0005	203	10	255.8	3
LK12-21-24	179	229	0.78	0.0420	0.0027	0.2436	0.0154	0.0401	0.0006	221	13	253.6	4
LK12-21-25	159	246	0.65	0.0402	0.0026	0.2327	0.0146	0.0405	0.0006	212	12	256.2	4
LK12-45-1	1060	35	29.9	0.1685	0.0178	0.9368	0.0887	0.0423	0.0016	671	47	267.2	10
LK12-45-2	1029	55	18.6	0.0993	0.0092	0.5018	0.0430	0.0398	0.0011	413	29	251.7	7

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th	U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	(×10 <sup>-6</sup> )			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
	LK12-15-3	2114		53	40.0	0.0911	0.0072	0.4778	0.0388	0.0392	0.0011	397	27
LK12-15-4	2388	17	140	0.2173	0.0411	0.9136	0.1020	0.0450	0.0022	659	54	283.5	14
LK12-15-5	5278	2	2374	0.9204	0.1364	36.6328	7.1362	0.2495	0.0402	3684	195	1436.0	207
LK12-15-6	1921	276	6.96	0.0656	0.0034	0.3684	0.0182	0.0402	0.0006	318	13	254.3	4
LK12-15-7	1262	10	126	0.2894	0.0643	1.1449	0.0959	0.0420	0.0021	775	45	265.5	13
LK12-15-8	1468	69	21.2	0.0746	0.0057	0.4227	0.0322	0.0414	0.0009	358	23	261.5	6
LK12-15-9	1308	41	32.1	0.0681	0.0067	0.3654	0.0322	0.0412	0.0012	316	24	260.3	7
LK12-15-10	583	26	22.2	0.1156	0.0168	0.5573	0.0535	0.0393	0.0015	450	35	248.3	9
LK12-15-11	1430	35	41.1	0.0918	0.0098	0.4577	0.0407	0.0394	0.0012	383	28	248.9	8
LK12-15-12	1179	52	22.6	0.0685	0.0054	0.3758	0.0291	0.0401	0.0010	324	21	253.4	6
LK12-15-13	1531	12	125	0.1951	0.0301	0.8116	0.1082	0.0425	0.0027	603	61	268.4	17
LK12-15-14	932	51	18.3	0.0843	0.0078	0.4509	0.0404	0.0405	0.0011	378	28	255.8	7
LK12-15-15	754	46	16.3	0.1509	0.0143	0.9588	0.1141	0.0440	0.0016	683	59	277.8	10
LK12-15-16	1226	65	19.0	0.0619	0.0049	0.3610	0.0300	0.0425	0.0010	313	22	268.0	6
LK12-15-17	1621	30	54.7	0.1059	0.0087	0.5825	0.0500	0.0406	0.0012	466	32	256.6	8
LK12-15-18	1673	47	35.5	0.0889	0.0065	0.5056	0.0401	0.0402	0.0011	415	27	254.4	7
LK12-15-19	1985	16	126	0.2853	0.0410	1.1247	0.0995	0.0405	0.0018	765	48	255.6	11
LK12-15-20	1943	36	53.7	0.0977	0.0078	0.5138	0.0421	0.0398	0.0012	421	28	251.8	8
LK12-15-21	2075	30	70.3	0.1793	0.0212	0.9570	0.0769	0.0434	0.0015	682	40	274.1	9
LK12-15-22	1426	11	129	0.5092	0.1773	1.5868	0.2370	0.0423	0.0025	965	93	266.9	16
LK12-15-23	1810	40	45.1	0.1113	0.0105	0.6066	0.0521	0.0410	0.0011	481	33	259.3	7
LK12-15-24	1250	54	23.3	0.0754	0.0066	0.4222	0.0377	0.0420	0.0011	358	27	265.4	7
LK12-15-25	1582	33	48.0	0.1340	0.0136	0.6820	0.0576	0.0407	0.0015	528	35	257.1	9
LK12-15-26	1726	43	40.6	0.1421	0.0122	0.8107	0.0658	0.0429	0.0013	603	37	270.8	8
LK12-15-27	1048	256	4.09	0.0548	0.0032	0.3120	0.0174	0.0412	0.0006	276	13	260.2	4
LK12-15-28	668	54	12.3	0.0817	0.0074	0.4354	0.0388	0.0396	0.0010	367	27	250.3	6
LK12-15-29	1046	81	12.9	0.0898	0.0092	0.5208	0.0571	0.0401	0.0010	426	38	253.7	6
LK12-15-30	582	62	9.39	0.0929	0.0091	0.5567	0.0583	0.0424	0.0013	449	38	267.6	8
BC12-22-01	33	209	0.16	0.0503	0.0024	0.2838	0.0135	0.0411	0.0006	254	11	259.7	3
BC12-22-02	17	214	0.08	0.0542	0.0022	0.3059	0.0124	0.0410	0.0004	271	10	259.2	3
BC12-22-03	142	165	0.86	0.0483	0.0025	0.2751	0.0145	0.0409	0.0005	247	12	258.7	3
BC12-22-04	106	509	0.21	0.0485	0.0018	0.2746	0.0098	0.0410	0.0004	246	8	259.3	3
BC12-22-05	89	336	0.27	0.0475	0.0021	0.2718	0.0118	0.0413	0.0005	244	9	261.1	3
BC12-22-06	3	13	0.23	0.2128	0.0273	0.9389	0.0870	0.0430	0.0019	672	46	271.2	11
BC12-22-07	2	11	0.20	0.2534	0.0279	1.1315	0.1026	0.0412	0.0020	768	49	260.1	12
BC12-22-08	46	281	0.16	0.0481	0.0021	0.2675	0.0112	0.0406	0.0005	241	9	256.5	3
BC12-22-09	19	175	0.11	0.0491	0.0030	0.2686	0.0154	0.0405	0.0006	242	12	255.9	4
BC12-22-10	43	186	0.23	0.0575	0.0028	0.3181	0.0160	0.0403	0.0006	280	12	255.0	4
BC12-22-11	5	17	0.27	0.1746	0.0182	0.8241	0.0737	0.0395	0.0015	610	41	250.0	9
BC12-22-12	4	38	0.09	0.0734	0.0053	0.4223	0.0297	0.0420	0.0009	358	21	265.5	6
BC12-22-13	14	120	0.12	0.0563	0.0030	0.3131	0.0166	0.0406	0.0007	277	13	256.7	4
BC12-22-14	9	35	0.26	0.0728	0.0056	0.4046	0.0301	0.0416	0.0010	345	22	262.9	6
BC12-22-15	17	93	0.18	0.0511	0.0036	0.2807	0.0189	0.0404	0.0007	251	15	255.5	4
BC-3-01	186	238	0.78	0.0510	0.0020	0.2851	0.0105	0.0406	0.0005	255	8	256.4	3
BC-3-02	463	386	1.20	0.0494	0.0019	0.2763	0.0104	0.0404	0.0004	248	8	255.1	3
BC-3-03	105	134	0.79	0.0458	0.0027	0.2544	0.0146	0.0401	0.0006	230	12	253.3	3
BC-3-04	126	125	1.00	0.0497	0.0030	0.2893	0.0182	0.0411	0.0006	258	14	259.8	4
BC-3-05	203	224	0.91	0.0486	0.0026	0.2792	0.0144	0.0411	0.0006	250	11	259.8	4
BC-3-06	597	444	1.34	0.0475	0.0022	0.2684	0.0118	0.0404	0.0005	241	9	255.0	3
BC-3-07	405	319	1.27	0.0515	0.0023	0.2973	0.0128	0.0410	0.0005	264	10	259.3	3
BC-3-08	95	130	0.73	0.0498	0.0031	0.2853	0.0181	0.0412	0.0006	255	14	260.3	4



续表 1

Continued Table 1

测点号	Th U		Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	
	( × 10 <sup>-6</sup> )			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄( Ma)	1σ	年龄( Ma)	1σ
BC-3-09	349	283	1.23	0.0529	0.0025	0.2967	0.0134	0.0405	0.0004	264	10	255.8	3
BC-3-10	158	187	0.84	0.0553	0.0028	0.3070	0.0148	0.0404	0.0005	272	12	255.3	3
BC-3-11	204	206	0.99	0.0562	0.0027	0.3216	0.0150	0.0415	0.0005	283	12	262.1	3
BC-3-12	154	170	0.91	0.0502	0.0028	0.2790	0.0146	0.0408	0.0005	250	12	258.0	3
BC-3-13	219	212	1.04	0.0497	0.0029	0.2799	0.0153	0.0413	0.0006	251	12	260.7	3
BC-3-14	183	198	0.93	0.0501	0.0025	0.2810	0.0136	0.0408	0.0006	251	11	257.6	3
BC-3-15	188	190	0.99	0.0522	0.0028	0.2946	0.0159	0.0407	0.0006	262	12	257.5	3
BC-3-16	270	226	1.20	0.0549	0.0030	0.3102	0.0166	0.0409	0.0005	274	13	258.4	3
BC-3-17	213	171	1.24	0.0511	0.0028	0.2892	0.0163	0.0408	0.0006	258	13	257.5	4
BC-3-18	233	237	0.98	0.0542	0.0025	0.3037	0.0135	0.0404	0.0005	269	11	255.2	3
BC-3-19	138	118	1.16	0.0524	0.0034	0.2971	0.0192	0.0408	0.0007	264	15	257.8	4
BC-3-20	95	146	0.65	0.0555	0.0034	0.3135	0.0180	0.0413	0.0006	277	14	260.6	4
BC-3-21	356	311	1.14	0.0495	0.0019	0.2830	0.0106	0.0412	0.0005	253	8	260.5	3
BC-3-22	104	131	0.80	0.0516	0.0028	0.2920	0.0164	0.0411	0.0005	260	13	259.6	3
BC-3-23	700	420	1.67	0.0483	0.0018	0.2695	0.0099	0.0404	0.0004	242	8	255.6	3
BC-3-24	467	358	1.31	0.0500	0.0019	0.2831	0.0102	0.0411	0.0004	253	8	259.4	2
BC-3-25	163	208	0.79	0.0567	0.0025	0.3155	0.0134	0.0406	0.0005	278	10	256.6	3

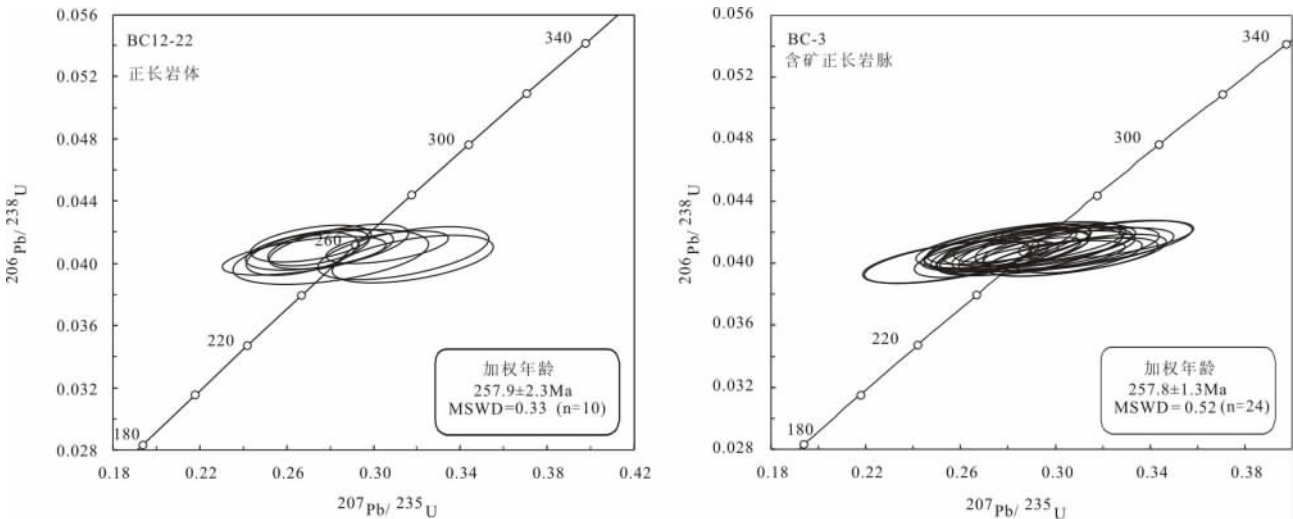


图 6 白草 Nb-Ta-Zr 矿区正长岩体和含矿正长岩脉的锆石年龄协和图

Fig. 6 Concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of syenitic plutons and dikes from the Baicao Nb-Ta-Zr deposit

为 0.78 ~ 1.67, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄亦主要集中于 255 ~ 260Ma, 去掉偏离谐和线较远的 1 个数据点, 剩余 24 个 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 分析点得出加权平均值为 257.8 ± 1.3Ma (MSWD = 0.52, 图 6), 反应含矿正长岩脉形成年龄。

3.2 锆石 Hf 同位素

炉库和白草地区正长岩体、无矿及含矿正长岩脉的锆石 Hf 同位素数据列于表 2。ε<sub>Hf</sub>(t) 值按侵位年龄计算。所有锆石的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值小于 0.004, 表明锆石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测定的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成。

形成于 256Ma 的炉库正长岩体 (LK11-33) 和无矿正长岩脉的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值 (LK12-21) 分别为 1 ~ 6.6 和 1.7 ~ 7.1, 对应的 t<sub>DM1</sub> 分别变化于 643 ~ 860Ma 和 620 ~ 828Ma。形成于 257Ma 的含矿正长岩脉 (LK12-15) 29 个 ε<sub>Hf</sub>(t) 测点值较之正长岩体和无矿岩脉表现出相对宽广的范围值, 为 0.1 ~ 9.5, 但多集中于 3 ~ 7, 对应的 t<sub>DM1</sub> 变化于 539Ma 和 938Ma 之间。白草矿区形成于 258Ma 的正长岩体 (BC12-22) 16 个 ε<sub>Hf</sub>(t) 测点值为 2.1 ~ 6.2, t<sub>DM1</sub> 为 645 ~ 814Ma, 而形成于 258Ma 的含矿岩脉 (BC-3) ε<sub>Hf</sub>(t) 为 -0.2 ~ 7.7, 对应的 t<sub>DM1</sub> 变化于 610Ma 和 906Ma 之间。

表2 炉库和白草 Nb-Ta-Zr 矿区正长岩体和正长岩脉锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of syenitic plutons and dikes from the Luku and Baicao Nb-Ta-Zr deposits

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LK11-33-1		0.060638	0.001547	0.282665	0.000038	1.9	832	1164	-0.95
LK11-33-2		0.023426	0.000603	0.282675	0.000028	2.2	804	1141	-0.98
LK11-33-4		0.048117	0.001397	0.282719	0.000037	3.8	753	1042	-0.96
LK11-33-5		0.049711	0.001261	0.282675	0.000040	2.2	814	1142	-0.96
LK11-33-6		0.037903	0.000978	0.282649	0.000032	1.3	847	1201	-0.97
LK11-33-7		0.059624	0.001515	0.282708	0.000041	3.4	770	1067	-0.95
LK11-33-8		0.055382	0.001382	0.282652	0.000035	1.4	848	1193	-0.96
LK11-33-9		0.048843	0.001217	0.282726	0.000035	4.0	741	1027	-0.96
LK11-33-10		0.043451	0.001149	0.282732	0.000046	4.2	732	1014	-0.97
LK11-33-11		0.042261	0.001093	0.282641	0.000035	1.0	860	1219	-0.97
LK11-33-12		0.062512	0.001657	0.282665	0.000034	1.8	835	1165	-0.95
LK11-33-13	255.6	0.025594	0.000628	0.282685	0.000032	2.5	791	1121	-0.98
LK11-33-14		0.045817	0.001138	0.282692	0.000037	2.8	789	1105	-0.97
LK11-33-15		0.045079	0.001189	0.282728	0.000034	4.1	738	1023	-0.96
LK11-33-16		0.070421	0.001359	0.282724	0.000028	3.9	746	1032	-0.96
LK11-33-17		0.092363	0.001758	0.282716	0.000037	3.6	763	1051	-0.95
LK11-33-18		0.028343	0.000526	0.282732	0.000023	4.2	724	1014	-0.98
LK11-33-19		0.075699	0.001536	0.282797	0.000033	6.5	643	866	-0.95
LK11-33-20		0.062709	0.001234	0.282774	0.000026	5.7	673	918	-0.96
LK11-33-21		0.058039	0.001117	0.282799	0.000030	6.6	637	863	-0.97
LK11-33-22		0.068708	0.001337	0.282769	0.000028	5.5	682	931	-0.96
LK11-33-23		0.027547	0.000509	0.282762	0.000025	5.3	682	946	-0.98
LK11-33-24		0.066291	0.001326	0.282696	0.000032	2.9	785	1095	-0.96
LK12-21-1		0.038302	0.000876	0.282661	0.000025	1.7	828	1173	-0.97
LK12-21-2		0.138054	0.003129	0.282803	0.000033	6.7	652	853	-0.91
LK12-21-3		0.063775	0.001467	0.282813	0.000029	7.1	620	830	-0.96
LK12-21-4		0.069735	0.001567	0.282712	0.000029	3.5	766	1058	-0.95
LK12-21-5		0.037226	0.000877	0.282699	0.000027	3.0	775	1088	-0.97
LK12-21-6		0.041874	0.000992	0.282687	0.000028	2.6	793	1115	-0.97
LK12-21-7		0.029378	0.000710	0.282746	0.000023	4.7	707	983	-0.98
LK12-21-8		0.035877	0.000799	0.282736	0.000024	4.4	722	1005	-0.98
LK12-21-9		0.033902	0.000797	0.282684	0.000026	2.5	794	1121	-0.98
LK12-21-10		0.058834	0.001345	0.282681	0.000026	2.4	806	1128	-0.96
LK12-21-11		0.033312	0.000768	0.282688	0.000024	2.7	789	1113	-0.98
LK12-21-12		0.034097	0.000785	0.282715	0.000024	3.6	751	1052	-0.98
LK12-21-13	255.6	0.042253	0.000952	0.282725	0.000021	3.9	740	1031	-0.97
LK12-21-14		0.037493	0.000843	0.282670	0.000025	2.0	816	1155	-0.97
LK12-21-15		0.088382	0.001888	0.282725	0.000025	4.0	751	1029	-0.94
LK12-21-16		0.046469	0.001047	0.282683	0.000025	2.5	799	1123	-0.97
LK12-21-17		0.028821	0.000671	0.282751	0.000026	4.9	699	970	-0.98
LK12-21-18		0.033150	0.000754	0.282742	0.000025	4.6	713	991	-0.98
LK12-21-19		0.029145	0.000702	0.282715	0.000027	3.6	749	1051	-0.98
LK12-21-20		0.058629	0.001369	0.282667	0.000029	1.9	827	1160	-0.96
LK12-21-21		0.067251	0.001434	0.282710	0.000021	3.4	768	1064	-0.96
LK12-21-22		0.038630	0.000861	0.282717	0.000028	3.7	749	1047	-0.97
LK12-21-23		0.052819	0.001203	0.282713	0.000030	3.5	760	1057	-0.96
LK12-21-24		0.037488	0.000834	0.282707	0.000028	3.3	763	1071	-0.97
LK12-21-25		0.052047	0.001112	0.282690	0.000037	2.7	791	1109	-0.97
LK12-45-01	267.2	0.183305	0.003889	0.282829	0.000035	7.2	649	830	-0.88
LK12-45-02	251.7	0.161835	0.003404	0.282778	0.000029	5.2	717	947	-0.90
LK12-45-03	248.0	0.121380	0.002659	0.282762	0.000032	4.7	727	979	-0.92
LK12-45-04	283.5	0.111266	0.002292	0.282752	0.000028	5.1	734	979	-0.93

续表 2

Continued Table 2

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LK12-45-06	254.3	0.159712	0.003372	0.282782	0.000020	5.4	711	939	-0.90
LK12-45-07	265.5	0.147062	0.003074	0.282626	0.000030	0.1	938	1280	-0.91
LK12-45-08	261.5	0.126585	0.002581	0.282809	0.000032	6.6	655	864	-0.92
LK12-45-09	260.3	0.191703	0.004029	0.282843	0.000035	7.5	631	805	-0.88
LK12-45-10	248.3	0.151879	0.003286	0.282802	0.000035	6.0	679	894	-0.90
LK12-45-11	248.9	0.184026	0.003635	0.282767	0.000042	4.7	739	977	-0.89
LK12-45-12	253.4	0.159108	0.003189	0.282804	0.000029	6.2	674	886	-0.90
LK12-45-13	268.4	0.168326	0.003291	0.282782	0.000035	5.7	709	929	-0.90
LK12-45-14	255.8	0.152953	0.003175	0.282730	0.000030	3.6	785	1052	-0.90
LK12-45-15	277.8	0.113273	0.002438	0.282720	0.000028	3.8	783	1054	-0.93
LK12-45-16	268.0	0.132329	0.002730	0.282774	0.000031	5.5	711	943	-0.92
LK12-45-17	256.6	0.129795	0.002736	0.282831	0.000036	7.3	626	819	-0.92
LK12-45-18	254.4	0.163342	0.003654	0.282786	0.000043	5.5	710	932	-0.89
LK12-45-19	255.6	0.171085	0.003403	0.282810	0.000033	6.4	670	875	-0.90
LK12-45-20	251.8	0.158995	0.003377	0.282695	0.000033	2.3	842	1134	-0.90
LK12-45-21	274.1	0.220281	0.004436	0.282787	0.000032	5.7	726	930	-0.87
LK12-45-22	266.9	0.148210	0.003012	0.282852	0.000029	8.2	599	769	-0.91
LK12-45-23	259.3	0.124170	0.002605	0.282743	0.000032	4.2	754	1016	-0.92
LK12-45-24	265.4	0.174711	0.003521	0.282771	0.000030	5.2	731	959	-0.89
LK12-45-25	257.1	0.175336	0.003714	0.282899	0.000034	9.5	539	676	-0.89
LK12-45-26	270.8	0.198091	0.003978	0.282816	0.000033	6.8	672	861	-0.88
LK12-45-27	260.2	0.118859	0.002606	0.282732	0.000022	3.9	769	1038	-0.92
LK12-45-28	250.3	0.166200	0.003427	0.282712	0.000033	2.8	818	1099	-0.90
LK12-45-29	253.7	0.171893	0.003462	0.282780	0.000037	5.3	715	943	-0.90
LK12-45-30	267.6	0.161708	0.003385	0.282769	0.000041	5.2	730	960	-0.90
BC12-22-1		0.007279	0.000146	0.282699	0.000026	3.0	767	1090	-1.00
BC12-22-2		0.007802	0.000181	0.282706	0.000030	3.3	757	1073	-0.99
BC12-22-3		0.033651	0.000784	0.282674	0.000027	2.1	813	1151	-0.98
BC12-22-4		0.012748	0.000244	0.282693	0.000023	2.8	776	1102	-0.99
BC12-22-5		0.013671	0.000249	0.282709	0.000024	3.4	755	1068	-0.99
BC12-22-6		0.007659	0.000155	0.282680	0.000034	2.4	793	1132	-1.00
BC12-22-7		0.007135	0.000151	0.282787	0.000031	6.2	645	890	-1.00
BC12-22-8	257.9	0.017817	0.000351	0.282717	0.000023	3.7	745	1050	-0.99
BC12-22-9		0.004711	0.000091	0.282723	0.000023	3.9	732	1035	-1.00
BC12-22-10		0.009677	0.000183	0.282685	0.000030	2.6	786	1121	-0.99
BC12-22-11		0.007483	0.000152	0.282684	0.000035	2.5	786	1121	-1.00
BC12-22-12		0.007990	0.000165	0.282675	0.000033	2.2	799	1142	-1.00
BC12-22-13		0.007288	0.000148	0.282740	0.000027	4.5	709	996	-1.00
BC12-22-14		0.009712	0.000251	0.282774	0.000027	5.7	664	920	-0.99
BC12-22-15		0.032049	0.000757	0.282674	0.000023	2.1	814	1152	-0.98
BC-3-01		0.067654	0.001484	0.282743	0.000031	4.4	731	1004	-0.96
BC-3-02		0.094804	0.002013	0.282701	0.000029	2.8	802	1104	-0.94
BC-3-03		0.032568	0.000672	0.282733	0.000022	4.2	729	1017	-0.98
BC-3-04		0.058952	0.001198	0.282719	0.000022	3.6	760	1056	-0.96
BC-3-05		0.032866	0.000689	0.282682	0.000021	2.4	800	1132	-0.98
BC-3-06		0.050356	0.001080	0.282716	0.000033	3.5	761	1060	-0.97
BC-3-07	257.8	0.082784	0.001709	0.282702	0.000036	2.9	794	1099	-0.95
BC-3-08		0.055321	0.001155	0.282728	0.000024	3.9	745	1033	-0.97
BC-3-09		0.078777	0.001636	0.282696	0.000024	2.7	801	1110	-0.95
BC-3-10		0.029119	0.000623	0.282700	0.000023	3.0	774	1091	-0.98
BC-3-11		0.023630	0.000521	0.282738	0.000022	4.4	720	1005	-0.98
BC-3-12		0.044820	0.000948	0.282777	0.000026	5.7	672	921	-0.97

续表 2

Continued Table 2

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
BC-3-13		0.041355	0.000900	0.282751	0.000027	4.8	708	978	-0.97
BC-3-14		0.035040	0.000776	0.282711	0.000029	3.4	762	1069	-0.98
BC-3-15		0.047089	0.001026	0.282691	0.000026	2.6	795	1116	-0.97
BC-3-16		0.085125	0.001815	0.282769	0.000030	5.3	699	948	-0.95
BC-3-17		0.075965	0.001707	0.282768	0.000032	5.2	699	949	-0.95
BC-3-18		0.031830	0.000685	0.282749	0.000024	4.7	707	981	-0.98
BC-3-19	257.8	0.055214	0.001230	0.282791	0.000028	6.1	657	892	-0.96
BC-3-20		0.022359	0.000467	0.282698	0.000024	3.0	774	1095	-0.99
BC-3-21		0.040946	0.000849	0.282741	0.000025	4.4	722	1002	-0.97
BC-3-22		0.074199	0.001519	0.282691	0.000027	2.6	805	1121	-0.95
BC-3-23		0.147028	0.003072	0.282846	0.000036	7.7	610	789	-0.91
BC-3-24		0.058493	0.001285	0.282710	0.000033	3.2	774	1077	-0.96
BC-3-25		0.046908	0.000950	0.282611	0.000024	-0.2	906	1296	-0.97

注: 锆石 Hf 同位素组成的计算参数为:  $^{176}\text{Lu}$  衰变常数  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$  (Soderlund *et al.*, 2004); 球粒陨石和亏损地幔的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  分别为 0.03321, 0.282772, 0.03842 和 0.28325 (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000); 上地壳  $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$  (Vervoort *et al.*, 1996)

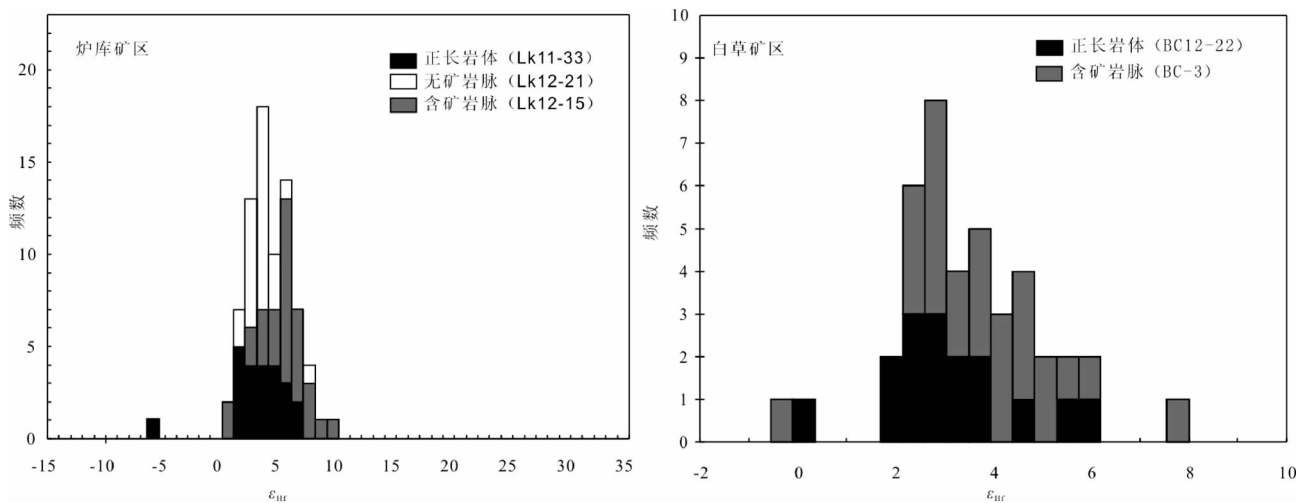


图7 炉库和白草矿区正长岩体及正长岩脉中锆石的 Hf 同位素组成

Fig. 7 Zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of syenitic plutons and dikes from the Luku and Baicao Nb-Ta-Zr deposits

## 4 讨论和结论

### 4.1 Nb-Ta-Zr 矿正长岩脉的时代及其与正长岩体的成因联系

本文测得的两个矿区中含矿正长岩脉锆石 U-Pb 年龄在炉库地区为  $256.7 \pm 4.4\text{Ma}$ , 白草矿区为  $257.8 \pm 1.3\text{Ma}$ 。同样, 炉库矿区正长岩体和无矿正长岩脉的锆石年龄分别是  $255.6 \pm 2.0\text{Ma}$  和  $255.6 \pm 1.5\text{Ma}$ , 白草矿区正长岩体的年龄为  $257.9 \pm 2.3\text{Ma}$ 。这些年龄结果表明, Nb-Ta-Zr 含矿正长岩脉的形成时代与矿区正长岩体和无矿正长岩脉在误差范围内是一致的, 为同一事件的产物。由于在空间上两个矿区含

矿和无矿的正长岩脉与正长岩体毗邻, 如正长岩脉多分布于正长岩体外 1~2km 范围内, 说明炉库和白草 Nb-Ta-Zr 矿床与正长岩体存在着成因联系。

研究区正长岩体和正长岩脉中用于定年的锆石都表现出岩浆成因的特征, 它们的 Hf 同位素组成特点能反映当时岩浆的组成。在炉库矿区, 含矿正长岩脉和正长岩体及无矿正长岩脉具有相似的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (1~8); 同样, 白草矿区的正长岩体和含矿正长岩脉的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值也表现出相似的变化范围 (2~6) (图 7), 说明含矿岩脉与正长岩体可能来自于相同的源区。我们对这些含矿正长岩脉和正长岩体进行了全岩地球化学分析, 发现含矿正长岩脉与正长岩体同为富 Na 的正长岩, 并随着  $\text{SiO}_2$  含量的变化, 含矿正长岩脉与正长岩体之间  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  等成分呈现很好的相关性 (王

汾连等,未发表数据)也说明这些含矿正长岩脉很可能为正长岩浆分异演化的产物。虽然含矿正长岩脉与同时代的矮郎河花岗岩体在空间上也毗邻,但它们的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值明显高于矮郎河花岗岩体中锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(-4.37 ~ -1.28; Xu *et al.*, 2008),表明两矿区中含矿岩脉的形成与矮郎河花岗岩体关系不大,而与正长岩体有关。

#### 4.2 攀西地区 Nb-Ta-Zr 矿化是峨眉山地幔柱成矿系统的一部分

在攀西地区,峨眉山大火成岩省由溢流玄武岩、镁铁-超镁铁质岩体和中性碱性岩体组成,被称为“三位一体”(张云湘等,1988)。炉库和白草两个矿区的正长岩体、无矿和含矿正长岩脉的锆石 U-Pb 年龄集中在 256 ~ 258 Ma,与峨眉山大火成岩省形成时间一致,更与该区与之紧密伴生的红格镁铁-超镁铁质岩体形成年龄一致(Zhong and Zhu, 2006),说明炉库和白草矿区含矿正长岩脉、正长岩体和无矿正长岩脉的形成与峨眉山大火成岩省的岩浆活动有直接联系。

通过对含矿正长岩脉及相关正长岩体及无矿正长岩脉的锆石年代学和 Hf 同位素研究发现,不仅单个矿区正长岩体与正长岩脉来自于同源区,正长岩体和正长岩脉也表现出一致的年龄和相似的锆石 Hf 同位素特征,且两矿区的正长岩体和正长岩脉在矿物组成和地球化学特征上也基本一致。这些都显示出含矿正长岩脉和正长岩体来自于相同的源区,说明两个矿区的 Nb-Ta-Zr 矿化是同一成矿事件的产物。两矿区正长岩体和正长岩脉的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值几乎都为正值,正的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值通常指示源岩具有较多的新生地壳组分的参与。当岩浆遭受古老地壳物质混染时,形成岩石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值将会降低,因此,具  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  最高值的样品可用来约束混合源区中新生地壳组分的 Hf 同位素组成。在本文研究中,两个矿区正长岩体和正长岩脉的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  的最高值为 +9.5 (图 7),远低于亏损地幔演化线在 260 Ma 时的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  (+16 ~ +17) (Vervoort and Blichert-Toft, 1999)。对应于最高的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,该锆石具有最低的模式年龄 539 Ma,也高于岩体岩脉侵位年龄(~258 Ma)。因此这些碱性岩浆不太可能为新生地壳部分熔融的产物。幔源岩石中的锆石结构简单,不具有老核新壳的特征,本文研究的两个矿区的正长岩体和岩脉中锆石 CL 图像正是显示出这种特征(图 4),同时由于这两个地区正长岩体的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值低于 MORB 的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(+20)而又高于地壳的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(Patchett and Tatsumoto, 1980; Salters, 1996; Nowell *et al.*, 1998; Chauvel and Blichert-Toft, 2001),因此其不可能来自于单一的亏损地幔或者地壳而是来自于一个混合的源区(亏损地幔和地壳混染)或者来自于类似于 OIB 的富集地幔(Shellnutt *et al.*, 2009)。炉库正长岩体中仅测得一粒锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  ( $t = 255.6\text{Ma}$ ) 为 -6 和白草矿区含矿岩脉中一粒锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  最低值为 -0.2,说明源区可能有少量地壳物质加入。因此,我们推测,本区炉库和白草矿区的含矿正长岩脉及相关正长

岩体就有可能是地幔柱岩浆活动造成的底侵在下地壳底部的基性岩再次部分熔融形成的产物。

地震成像研究揭示在峨眉山大火成岩省内带的下地壳有一个 P 波高速带(7.1 ~ 7.8 km/s,刘建华等,2000),前人解释为可能是随峨眉山地幔柱上升的地幔岩石在柱头处部分熔融,熔融产物玄武质岩浆再底侵于下地壳而形成(Xu *et al.*, 2004; Xu and He, 2007),同时对地震波速的岩石学限定说明底侵层由辉长岩和辉石岩组成(Zhu *et al.*, 2003),该底侵层的存在为本区正长岩体及岩脉的形成提供了前提条件。因此,我们认为赋存在正长岩脉中的 Nb-Ta-Zr 矿化是峨眉山地幔柱成矿系统的一部分。

## References

- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. *Regional Geology of Sichuan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 31-35, 396-403 (in Chinese)
- Chauvel C and Blichert-Toft J. 2001. A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 190(3-4): 137-151
- Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Milton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567-1574
- Chung SL and Jahn BM. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23(10): 889-892
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- He B, Xu YG, Huang XL, Luo ZY, Shi YR, Yang QJ and Yu SY. 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3-4): 306-323
- He JL. 2004. Ore-forming geological conditions and prospecting potential for Nb-Ta mineral deposits in Panzhihua-Xichang Region, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 24(4): 206-211 (in Chinese with English abstract)
- Li LZ. 2001. Geologic features and exploitation perspective of REE ore deposits in Panzhihua-Xichang region. *Acta Geologica Sichuan*, 21(3): 150-152 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FT, He JK *et al.* 2001. Study of seismic tomography in Panxi paleorift area of southwestern China. *Science in China (Series D)*, 44(3): 277-287
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43
- Ludwig KR. 2003. *User's Manual for ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*, Special Publication No. 4. Berkeley Geochronology Center, 71
- Nowell GM, Kempton PD, Noble SR, Fitton JG, Saunders AD, Mahoney JJ and Taylor RN. 1998. High precision Hf isotopic measurements of MORB and OIB by thermal ionization mass spectrometry: Insights

- into the depleted mantle. *Chemical Geology*, 149(3-4): 211-233
- Pang KN, Li CS, Zhou MF and Ripley EM. 2009. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the Late Permian Panzhihua layered gabbroic intrusion, SW China. *Lithos*, 110(1-4): 199-214
- Patchett PJ and Tatsumoto M. 1980. Hafnium isotope variations in oceanic basalts. *Geophysical Research Letters*, 7(12): 1077-1080
- Salters VJM. 1996. The generation of mid-ocean ridge basalts from the Hf and Nd isotope perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 141(1-4): 109-123
- Shellnutt JG and Zhou MF. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume. *Chemical Geology*, 243(3-4): 286-316
- Shellnutt JG, Wang CY, Zhou MF and Yang YH. 2009. Zircon Lu-Hf isotopic compositions of metaluminous and peralkaline A-type granitic plutons of the Emeishan large igneous province (SW China): Constraints on the mantle source. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 45-55
- Shellnutt JG, Jahn BM and Zhou MF. 2011. Crustally-derived granites in the Panzhihua region, SW China: Implications for felsic magmatism in the Emeishan large igneous province. *Lithos*, 123(1-4): 145-157
- Shellnutt JG, Denyszyn SW and Mundil R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China). *Gondwana Research*, 22(1): 118-126
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Tu XL, Zhang H, Deng WF, Ling MX, Liang HY, Liu Y and Sun WD. 2011. Application of RESOLUTION in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83-98 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD, Patchett PJ, Gehrels GE *et al.* 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379(6566): 624-627
- Vervoort JD and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3-4): 533-556
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 234(1-2): 105-126
- Xu YG, Chung SL, Jahn BM and Wu GY. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58(3-4): 145-168
- Xu YG, He B, Chung SL *et al.* 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32(10): 917-920
- Xu YG and He B. 2007. Thick and high velocity crust in Emeishan large igneous province, SW China: Evidence for crustal growth by magmatic underplating/intruding. In: Foulger G and Jurdy D (eds.). *The Origins of Melting Anomalies: Plates, Plumes, and Planetary Processes*. Geological Society of America Special Publication, 430: 841-858
- Xu YG, Luo ZY, Huang XL, He B, Xiao L, Xie LW and Shi YR. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084-3104
- Yan DP, Zhou MF, Song HL, Wang XW and Malpas J. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3-4): 239-254
- Yang ZS, Duan HM and Wang XJ. 2007. Geological features and range of reconnaissance of Nb-Ta deposits in the Panzhihua-Xichang Region, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 27(4): 248-254 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX, Luo YN and Yang CX. 1988. Panzhihua-Xichang Rift Zone. Beijing: Geological Publishing House, 1-325 (in Chinese)
- Zhong H and Zhu WG. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 41(6): 599-606
- Zhong H, Zhu WG, Chu ZY, He DF and Song XY. 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 236(1-2): 112-133
- Zhong H, Zhu WG, Hu RZ, Xie LW, He DF, Liu F and Chu ZY. 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, Southwest China and implications for growth of juvenile crust. *Lithos*, 110(1-4): 109-128
- Zhou MF, Arndt NT, Malpas J, Wang CY and Kennedy AK. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103(3-4): 352-368
- Zhou MF, Chen WT, Wang CY, Prevec SA, Liu PP and Howarth GH. 2013. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China. *Geoscience Frontiers*, 4(5): 481-502
- Zhu D, Luo TY, Gao ZM *et al.* 2003. Differentiation of the Emeishan flood basalts at the base and throughout the crust of Southwest China. *International Geology Review*, 45(5): 471-477

#### 附中文参考文献

- 贺金良. 2004. 四川攀西地区铌钽矿床成矿地质条件及找矿前景. *四川地质学报*, 24(4): 206-211
- 李立主. 2001. 论攀西地区稀有稀土矿的基本特征及开发前景. *四川地质学报*, 21(3): 150-152
- 刘建华, 刘福田, 何建坤等. 2000. 攀西古裂谷的地震成像研究-壳幔构造特征及其演化推断. *中国科学(D辑)*, 30(1): 9-15
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社, 31-35, 396-403
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. *地球化学*, 40(1): 83-98
- 杨铸生, 段惠敏, 王秀京. 2007. 四川攀西地区铌钽矿床的地质特征及找矿方向. *四川地质学报*, 27(4): 248-254
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社, 1-325