

# 哀牢山新元古代斜长角闪岩的形成时代、 地球化学特征及其大地构造意义

蔡永丰<sup>1,2,3</sup>, 王岳军<sup>2,4</sup>, 刘汇川<sup>1,3</sup>, 马莉燕<sup>5</sup>, 邢晓婉<sup>1,3</sup>, 刘雷<sup>6</sup>

(1.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, 广东 广州 510640; 2.中山大学 地球科学系, 广东 广州 510275; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州, 510275; 5.桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 6.中国建筑材料工业地质勘查中心 宁夏总队, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 哀牢山带内零星发育一些变基性岩, 如斜长角闪岩、变辉长岩和变辉绿岩等, 它们主要呈似层状、透镜状、碗豆状或碎片状分布于哀牢山群中。这些变基性岩对研究扬子板块西南缘的大地构造属性具有重要意义。目前关于它们的形成时代、岩石成因及其大地构造意义尚不明确。本文对采自哀牢山群中的斜长角闪岩进行了系统的地球化学分析和锆石 U-Pb 年代学测试。岩石地球化学分析表明, 斜长角闪岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 46.85%~49.03%, 具有较高的  $\text{FeO}_x$ (11.56%~13.09%)、 $\text{MgO}$ (6.83%~11.57%)和  $\text{TiO}_2$ (1.71%~2.22%)含量, 样品的全碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )含量为 1.61%~2.26%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值为 1.88~9.25。样品相对富集轻稀土元素, 轻、重稀土元素分馏程度相对较强( $(\text{La}/\text{Yb})_N=6.55\sim 7.52$ ), 稀土总量为 112~130  $\mu\text{g/g}$ 。样品的 Sr、P 呈负异常, 无明显 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.97\sim 1.03$ ); Nb、Ta 亏损不明显, Nb 含量变化于 14.28~18.43  $\mu\text{g/g}$ , 与世界上一些典型的富 Nb 玄武岩类似。定年结果显示斜长角闪岩的形成年龄为  $814\pm 12$  Ma, 表明哀牢山带在新元古代时期 (~814 Ma)存在基性岩浆活动。综合分析认为该富 Nb 岩石形成于弧后盆地环境, 初步认为其岩石成因与新元古代俯冲体制下导致的弧后拉张作用有关。

**关键词:** 锆石 U-Pb 定年; 新元古代; 斜长角闪岩; 弧后盆地; 哀牢山

中图分类号: P595; P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2014)01-0168-013

红河-哀牢山构造带位于扬子板块西南缘, 总体上呈 NW-SE 向展布于云南省中南部, 北西端起始于南涧县五顶山, 向南东逐渐变宽并经墨江-元阳-金平延伸进入越南境内, 向西北延伸可与点苍山相接。作为滇西特提斯构造带与华南大陆的交接地带(图 1), 该构造带历来备受研究者的关注。已有的研究表明该构造带历经了复杂的特提斯演化过程(莫宣学等, 1993; 张旗等, 1996; 刘福田等, 2000; 方维萱等, 2002; 闫全人等, 2005; 沈上越等, 1998; Trung

et al., 2006; Jian et al., 2009; Wang et al., 2010b; Qi et al., 2012), 之后在喜马拉雅期印度板块与欧亚板块俯冲碰撞的作用下(Tapponnier et al., 1990; Leloup et al., 1995), 于始新世-中新世发生大规模走滑作用(吴海威等, 1989; 钟大赉等, 1991; Leloup et al., 1993, 1995, 2001), 从而形成了包含各类不同性质和来源的岩石、地层及构造单元, 共同构成了具有多期次构造变形变质和岩浆活动的构造带。以往的研究显示带内岩浆岩的侵入时代主要是晚古生代-中

收稿日期: 2013-04-18; 改回日期: 2013-07-12

项目资助: 国家自然科学基金项目(批准号: 41190073, 40825009, 40830319)联合资助。

第一作者简介: 蔡永丰(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石大地构造研究。Email: caiyongfeng@gig.ac.cn

生代和新生代(莫宣学等, 1993; 肖龙等, 2003; 张学书等, 2004; Lepvrier et al., 2004; 张玉泉等, 2004; Lan et al., 2000; 李宝龙等, 2008; 邓家潘, 1987; 董云鹏等, 2000; Zhang and Scharer, 1999; Wang et al., 2001; Qi et al., 2012)。而有关构造带内新元古代岩浆

活动的报道较少, 特别是缺少新元古代基性-变基性岩类的研究资料。因此, 本文选择哀牢山群内斜长角闪岩进行了锆石 U-Pb 年代学测定和地球化学分析, 获得了新元古代年龄信息, 为深入理解哀牢山构造带新元古代的构造格局提供了重要依据。

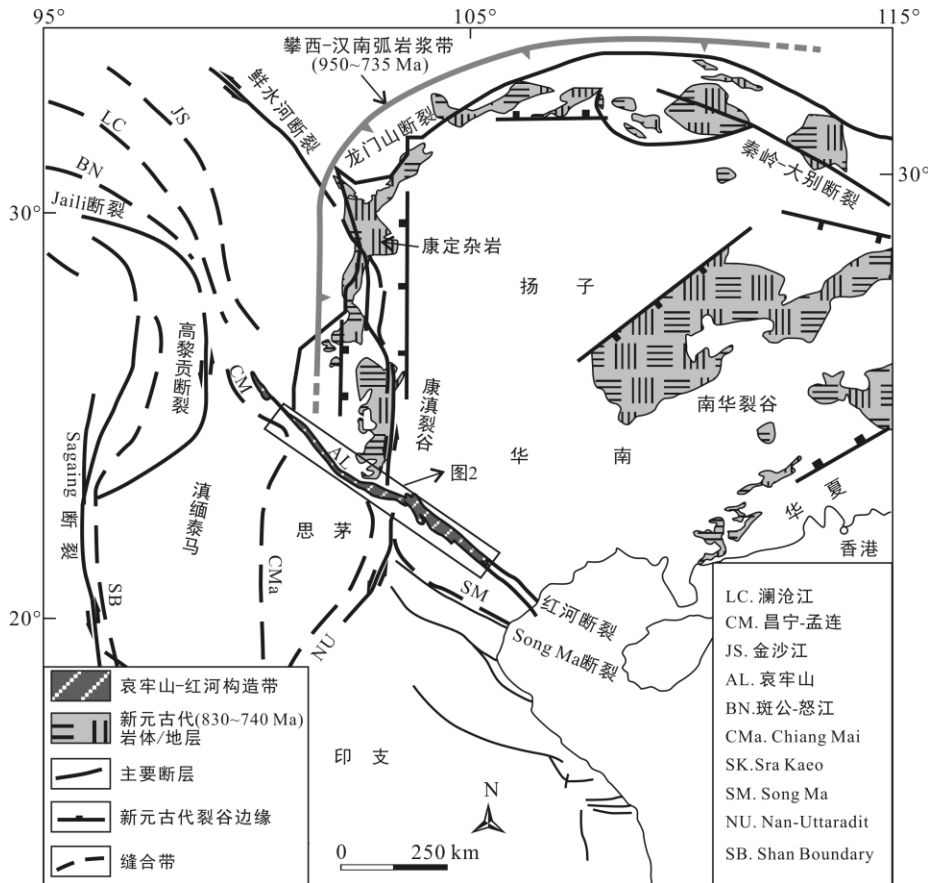


图 1 哀牢山带及其邻区地质简图(据 Leloup et al., 1995; Wang et al., 2010a; Zhao et al., 2011; Lin et al., 2012 改编)

Fig.1 Simplified geotectonic map showing the Ailaoshan zone and surrounding areas

## 1 区域地质背景与样品描述

哀牢山群变质岩系是一套混合岩化强烈的中深变质岩, 总体呈 NW-SE 向狭窄条带状延伸, 延伸长度达 500 km 左右, 宽 20~30 km, 东西两侧分别被红河断裂和哀牢山断裂所限(图 1, 2a)。哀牢山构造带具有双变质带特征, 大致以哀牢山断裂为界, 其上盘为低压高温变质带, 下盘为高压低温变质带(段新华和赵鸿, 1981; 崔军文, 1987; 王义昭和丁俊, 1996; 李宝龙等, 2008), 东侧的低压高温变质带由角闪岩相-绿片岩相的片麻岩、角闪岩、大理岩等组成, 并发生强烈糜棱岩化; 西侧的高压低温变质带由低绿片岩相片岩、千枚岩和板岩等组成。变质带内由于变质变形作用的叠加改造以及强烈的混合岩化作

用, 使其原岩面貌和层理特征基本消失, 地层层序难以恢复, 层位时代也难以确定。前人根据带内深变质岩系 Rb-Sr、Sm-Nd 和 K-Ar 等同位素地质年代学的测定结果, 普遍把哀牢山的深变质岩系归属于下元古界的哀牢山群(云南省地质矿产局, 1990; 翟明国等, 1990; 王义昭和丁俊, 1996; 朱炳泉等, 2001), 是扬子板块结晶基底的组成部分(云南省地质矿产局, 1990; 王义昭和丁俊, 1996; 吴根耀等, 2000)。本构造带广泛分布下元古界, 该地层为一套混合岩化强烈的变质岩系, 1965 年云南区调队将该变质岩系命名为哀牢山群, 1973 年进一步从下至上依次划分为小羊街组、阿龙组、凤港组和乌都坑组(云南省地质矿产局, 1990)。该群出露面积约 3800 km<sup>2</sup>, 与相邻的下古生界及中生界均呈断层接触关系。其中阿龙组和乌都坑组的岩石类型及其组合特

征接近,二者有可能是同一地层经后期构造作用而重复出现,总体上看哀牢山深变质岩系可能为一个轴面倾向 NE 的复式倒转背斜构造(云南省地质矿产局,1990;王义昭和丁俊,1996)。

本文所研究斜长角闪岩呈似层状产出于哀牢山群阿龙组内(图 2b),样品采集的 GPS 点位为 N23°02'38.3", E102°45'33.3"。其围岩是片麻状花岗岩,与斜长角闪岩互层产出,整体走向与哀牢山带的走向基本一致,可见片麻理,局部可见混合岩化作用。斜长角闪岩层厚约 0.2 m,未见明显构造变形。斜长角闪岩样品手标本呈灰黑色,显微镜下呈纤状-鳞片粒状变晶结构,块状-片麻状构造,可见变余的斜长石斑晶(1~5 mm),部分斜长石发生泥化和绢云母化(图 3)。主要矿物为角闪石(55%)、斜长石(30%)、石英(8%)和黑云母(5%),副矿物为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石和榍石等;其中角闪石呈绿色-淡绿色,它形粒状或柱状,粒径为 0.1~2 mm,呈半包围状镶嵌于斜长石之间,局部可见定向排列,偶见铁质析出;斜长石呈它形粒状或柱状,粒径为

0.5~2.5 mm,绢云母化明显,局部发生泥化;黑云母呈褐色,粒径为 0.1~1 mm,局部蚀变为绿泥石、绿帘石。

## 2 分析方法

### 2.1 主、微量元素分析测试

主、微量元素分析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完成,分析方法详见李献华等(2002)和刘颖等(1996)。主量元素分析是在 Rigaku ZSX100e 的 X 荧光光谱仪上完成的,微量元素的分析则在 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)上完成。主量元素的分析精度优于 1%,微量元素的分析精度大都优于 5%。

### 2.2 锆石 U-Pb 同位素定年

用于 U-Pb 年龄测定的样品(10HH-67A)用常规的重选和磁选技术分选出锆石。将锆石样品颗粒和锆石标样 Plésovice 或 TEMORA 和 Qinghu 粘贴在环氧树脂靶上,然后抛光使其暴露一半晶面。对锆石进

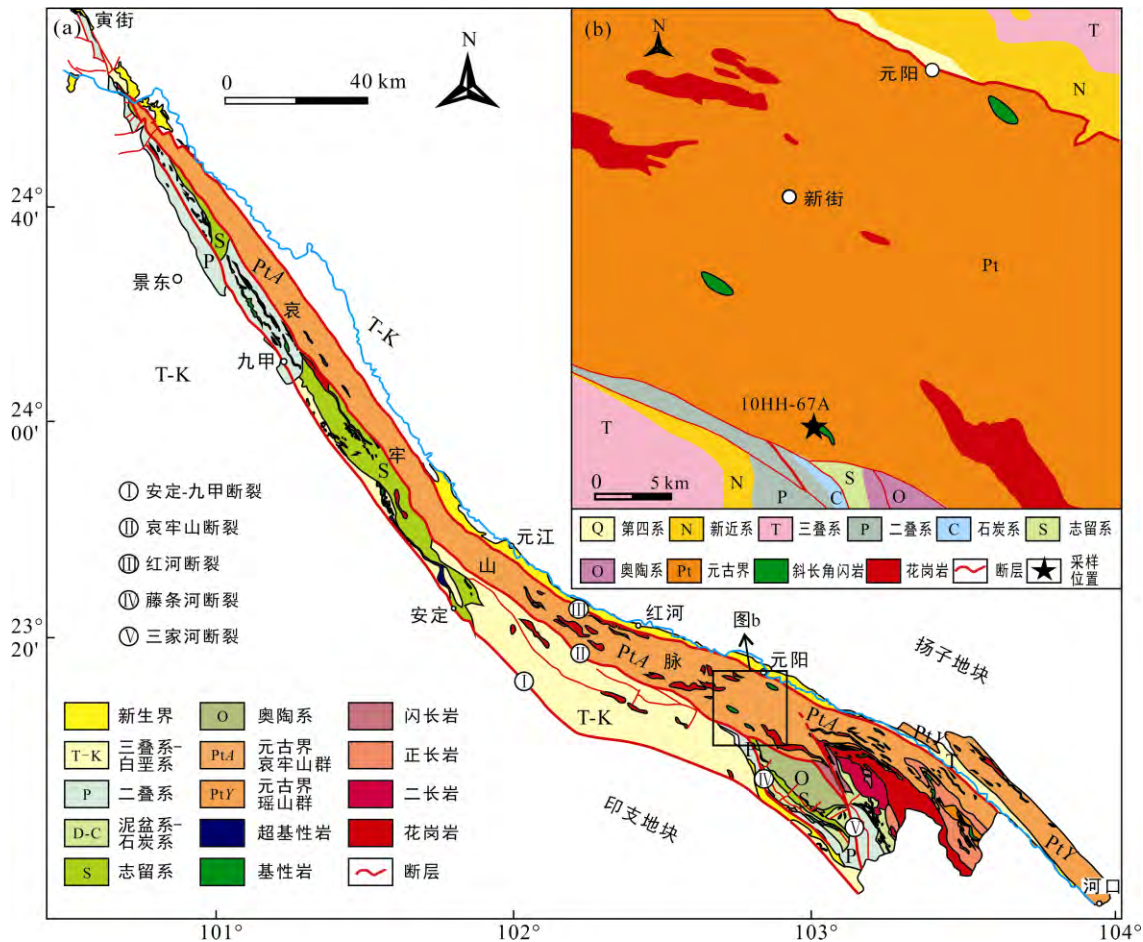


图 2 哀牢山带及元阳地区斜长角闪岩地质简图

Fig.2 Schematic geological maps of the Ailaoshan zone and distribution of the amphibolites in the Yuanyang area

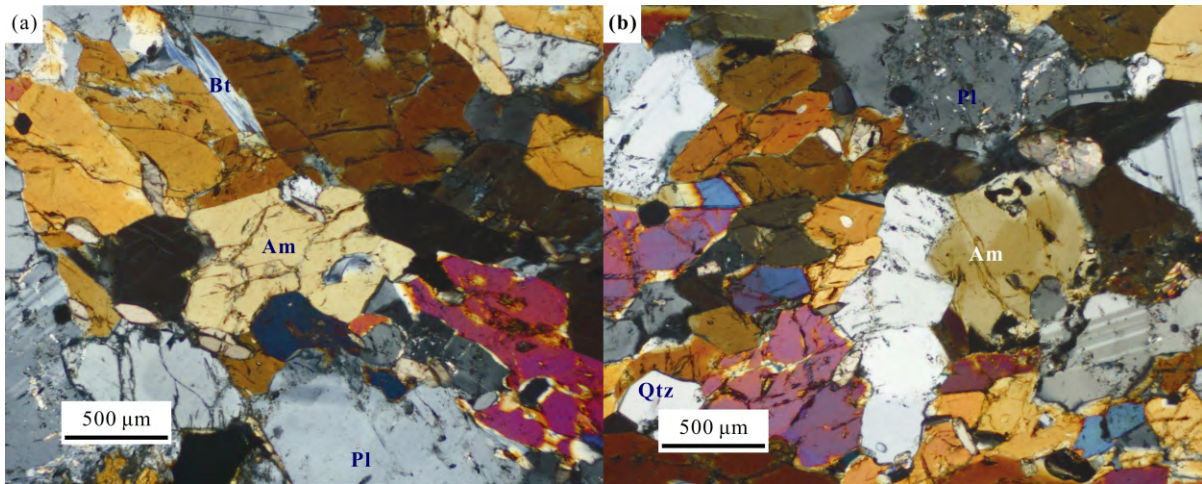


图 3 斜长角闪岩代表性显微照片(Am. 角闪石; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Qtz. 石英)

Fig.3 Photomicrographs of the representative amphibolites along the Ailaoshan zone

行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图像分析, 以检查锆石的内部结构、帮助选择适宜的测试点位。样品靶在真空下镀金以备分析。

样品 10HH-67A 的锆石 U-Pb 同位素分析在香港大学用 VG PQ-Excel ICP-MS 激光离子探针完成, 激光剥蚀系统为 213 nm Nd-YAG, 详细分析方法见 Xia et al. (2004)。样品的加权平均年龄及谐和图的绘制采用 Isoplot3.0 (Ludwig, 2001) 完成, 分析及计算误差均为  $1\sigma$ 。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 定年

采自于元阳县一碗水村的斜长角闪岩样品 10HH-67A 的锆石 U-Pb 定年结果见表 1。用于定年的锆石呈半透明到透明状, 以透明状为主, 颜色以浅棕、浅褐及褐色为主。锆石绝大多数呈柱状, 长度一般为 80~120  $\mu\text{m}$ , 内部发育较宽的环带结构或条带状结构(图 4), 其 Th/U 比值高(0.10~1.20), 大部分大于 0.2(表 1), 具典型的岩浆成因锆石特征。对样品 10HH-67A 进行了 26 个点的分析, 其中 10 个测试点给出了  $814 \pm 12 \text{ Ma}$  (MSWD=1.01) 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄(图 4), 代表了其成岩年龄, 另外还有 4 个测试点各给出了 1150 Ma、1146 Ma、2087 Ma 和 2740 Ma 的较老  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 代表了继承锆石年龄, 这些继承锆石可能来自扬子板块结晶基底 (Wang et al., 2012 及其参考文献), 这也暗示哀牢山群至少应包含有早中元古代地层。

#### 3.2 岩石地球化学特征

斜长角闪岩的化学成分分析数据见表 2。从表 2

可以看出, 这些斜长角闪岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量为 46.85%~49.03%, 属碱性岩, 类似于碱性玄武质岩石(图 5a), 样品 MgO 含量为 6.83%~11.57%,  $\text{FeO}_t$  含量为 11.56%~13.09%,  $\text{TiO}_2$  含量为 1.71%~2.22%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 10.84%~14.47%; 全碱( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ )含量为 1.61%~2.26%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值为 1.88~9.25; Ni 含量为 100~130  $\mu\text{g/g}$ , Cr 含量为 103~556  $\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Mg}^\#$  在 52~68 之间, 低于原生岩浆  $\text{Mg}^\#$  (Wilson, 1989), 反映岩浆可能经历了一定程度的分异作用或同化混染了少量地壳物质。

斜长角闪岩的稀土总量较高( $\sum\text{REE}=112\sim130 \mu\text{g/g}$ ), 远高于原始地幔(PM)的含量(7.43  $\mu\text{g/g}$ ), 也高于洋脊玄武岩(N-MORB=39.11  $\mu\text{g/g}$ , E-MORB=49.09  $\mu\text{g/g}$ ), 低于洋岛玄武岩(OIB=198.96  $\mu\text{g/g}$ )。在球粒陨石标准化曲线图上(图 6a), 样品的轻、重稀土元素

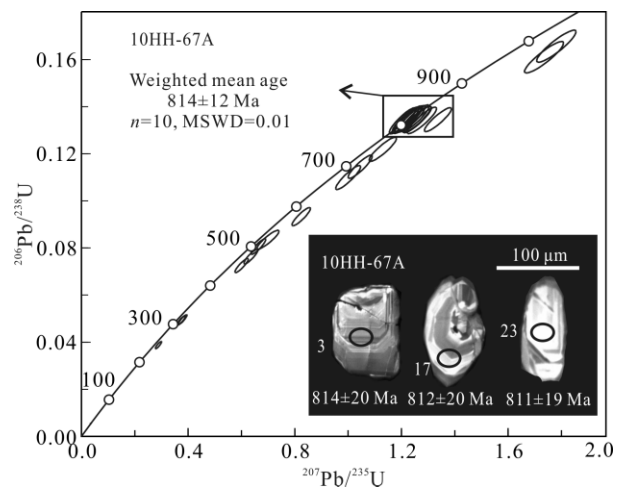


图 4 哀牢山带斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及其代表性锆石阴极发光图像及测点年龄

Fig.4 U-Pb concordia diagram and CL images for zircons in the amphibolite along the Ailaoshan zone

表 1 牢山带斜长角闪岩锆石 U-Pb 同位素测试结果  
Table 1 Zircon U-Pb dating results for the amphibolite along the Ailaoshan zone

点号	元素含量( $\mu\text{g/g}$ )		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
10HH-67A, 斜长角闪岩													
10HH-67A-01	105	112	0.94	0.0672	0.002	1.1298	0.03	0.1219	0.003	856	58	741	18
10HH-67A-02	206	355	0.58	0.0781	0.002	1.7348	0.04	0.1610	0.004	1150	50	962	23
10HH-67A-03	71	156	0.45	0.0662	0.002	1.2276	0.03	0.1346	0.003	813	49	814	20
10HH-67A-04	542	901	0.60	0.0659	0.002	1.0001	0.03	0.1099	0.003	806	54	672	18
10HH-67A-05	229	191	1.20	0.0678	0.002	1.2577	0.03	0.1346	0.003	861	56	814	20
10HH-67A-06	88	293	0.30	0.0541	0.001	0.2888	0.01	0.0388	0.001	372	57	245	6
10HH-67A-07	55	566	0.10	0.0679	0.002	1.2599	0.03	0.1345	0.003	865	52	814	20
10HH-67A-08	144	178	0.81	0.0656	0.002	1.2153	0.03	0.1343	0.003	794	58	812	19
10HH-67A-09	149	485	0.31	0.0672	0.002	1.2513	0.03	0.1351	0.003	843	52	817	20
10HH-67A-10	380	416	0.91	0.1291	0.003	6.6491	0.17	0.3738	0.010	2087	44	2047	46
10HH-67A-11	211	891	0.24	0.0662	0.002	1.0456	0.03	0.1145	0.003	813	52	699	18
10HH-67A-12	108	323	0.33	0.0666	0.002	1.2377	0.03	0.1348	0.003	833	52	815	20
10HH-67A-13	426	634	0.67	0.0598	0.002	0.6995	0.03	0.0835	0.002	594	56	517	15
10HH-67A-14	79	117	0.67	0.0553	0.001	0.3733	0.01	0.0491	0.001	433	59	309	8
10HH-67A-15	72	152	0.47	0.0556	0.001	0.3795	0.01	0.0496	0.001	435	62	312	8
10HH-67A-16	323	393	0.82	0.0472	0.001	0.0354	0.00	0.0055	0.000	61	63	35	1
10HH-67A-17	57	155	0.36	0.0660	0.002	1.2220	0.03	0.1343	0.003	806	53	812	20
10HH-67A-18	294	1155	0.25	0.0734	0.002	1.3669	0.03	0.1351	0.003	1033	52	817	19
10HH-67A-19	332	539	0.62	0.1897	0.005	11.9528	0.30	0.4568	0.012	2740	41	2425	51
10HH-67A-20	416	593	0.70	0.0596	0.002	0.6629	0.02	0.0806	0.002	591	28	500	12
10HH-67A-21	84	182	0.46	0.0689	0.002	1.2766	0.03	0.1342	0.003	896	54	812	19
10HH-67A-22	199	708	0.28	0.0600	0.002	0.6005	0.02	0.0725	0.002	606	54	451	11
10HH-67A-23	83	179	0.46	0.0652	0.002	1.2045	0.03	0.1340	0.003	789	52	811	19
10HH-67A-24	108	372	0.29	0.0779	0.002	1.7808	0.05	0.1656	0.004	1146	50	988	23
10HH-67A-25	108	1013	0.11	0.0603	0.002	0.6357	0.02	0.0764	0.002	617	86	474	12
10HH-67A-26	230	1608	0.14	0.0640	0.002	0.8241	0.02	0.0933	0.002	743	54	575	14

表 2 哀牢山带斜长角闪岩的主量元素(%)和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )分析结果

Table 2 Major (%) and trace element ( $\mu\text{g/g}$ ) compositions of the Neoproterozoic amphibolites along the Ailaoshan zone

样号	10HH-67A	10HH-67D	10HH-67F	10HH-69A	10HH-69E	样号	10HH-67A	10HH-67D	10HH-67F	10HH-69A	10HH-69E
SiO <sub>2</sub>	48.55	49.03	48.87	47.29	46.85	Nb	16.2	14.3	16.0	16.6	18.4
TiO <sub>2</sub>	1.84	1.71	1.84	2.22	2.20	Cs	0.27	0.06	0.34	1.18	0.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.89	10.84	11.97	14.38	14.47	Ba	77	31	137	139	130
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.90	12.85	13.13	14.54	14.48	La	20.19	18.62	21.00	20.96	21.89
MgO	10.09	11.57	9.97	6.83	6.98	Ce	46.27	41.75	47.04	49.28	48.84
CaO	10.70	9.99	10.33	11.61	11.88	Pr	6.30	5.70	6.24	7.02	6.55
K <sub>2</sub> O	0.23	0.16	0.25	0.62	0.46	Nd	27.17	24.56	27.72	26.89	27.38
Na <sub>2</sub> O	2.03	1.46	2.01	1.17	1.20	Sm	5.58	5.09	5.67	5.46	5.61
MnO	0.17	0.16	0.16	0.19	0.20	Eu	1.76	1.58	1.79	1.81	1.79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.21	0.24	0.29	0.29	Gd	5.14	4.92	5.37	5.27	5.39
LOI	1.21	1.87	1.11	0.70	0.85	Tb	0.84	0.77	0.87	0.86	0.88
Total	99.86	99.85	99.89	99.85	99.85	Dy	4.34	4.16	4.48	4.95	4.84
Mg <sup>#</sup>	65	68	64	52	53	Ho	0.86	0.81	0.89	1.11	0.98
Sc	41.2	43.2	40.5	35.2	36.6	Er	2.15	2.04	2.18	2.57	2.48
V	311	300	304	326	337	Tm	0.30	0.28	0.31	0.38	0.37
Cr	438	556	417	103	104	Yb	1.94	1.82	2.00	2.30	2.29
Co	56.4	57.3	53.2	50.2	48.5	Lu	0.29	0.27	0.30	0.33	0.34
Ni	119	130	117	100	100	Hf	3.88	3.50	3.95	3.87	3.65
Ga	16.3	14.9	16.3	17.7	18.4	Ta	1.11	1.00	1.16	1.20	1.21
Rb	5.11	2.12	6.00	11.85	12.73	Pb	5.15	4.37	5.16	13.37	13.23
Sr	458	298	487	238	242	Th	2.36	2.03	2.46	2.90	2.93
Y	21.6	19.4	22.5	23.0	23.6	U	0.55	0.45	0.56	0.65	0.65
Zr	142	130	148	141	141	$\Sigma$ REE	123.13	112.37	125.87	129.20	129.61

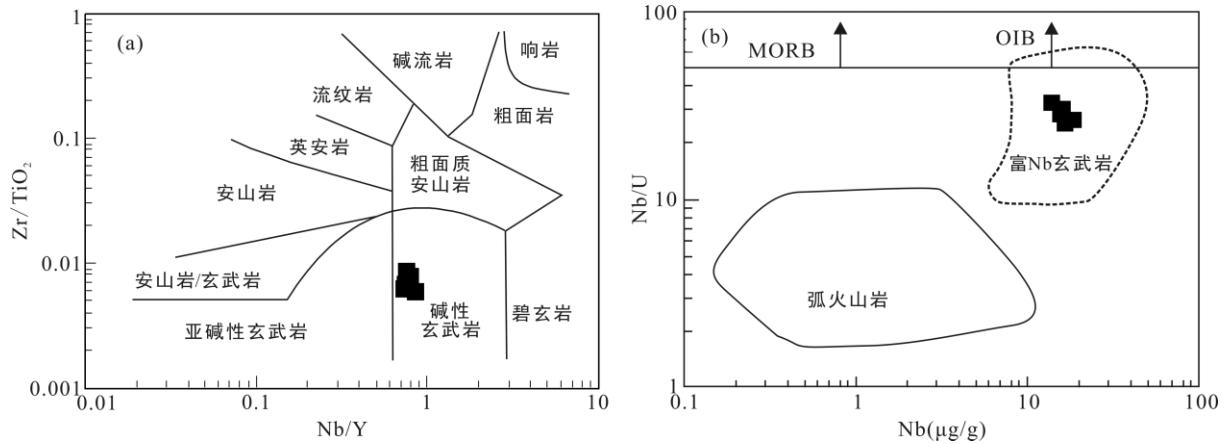


图 5 哀牢山带斜长角闪岩 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> (Winchester and Floyd, 1977)和 Nb-Nb/U (Kepezhinaskas et al., 1996)图解  
 Fig.5 Plots of Nb/Y vs. Zr/TiO<sub>2</sub> and Nb vs. Nb/U for the amphibolites along the Ailaoshan zone

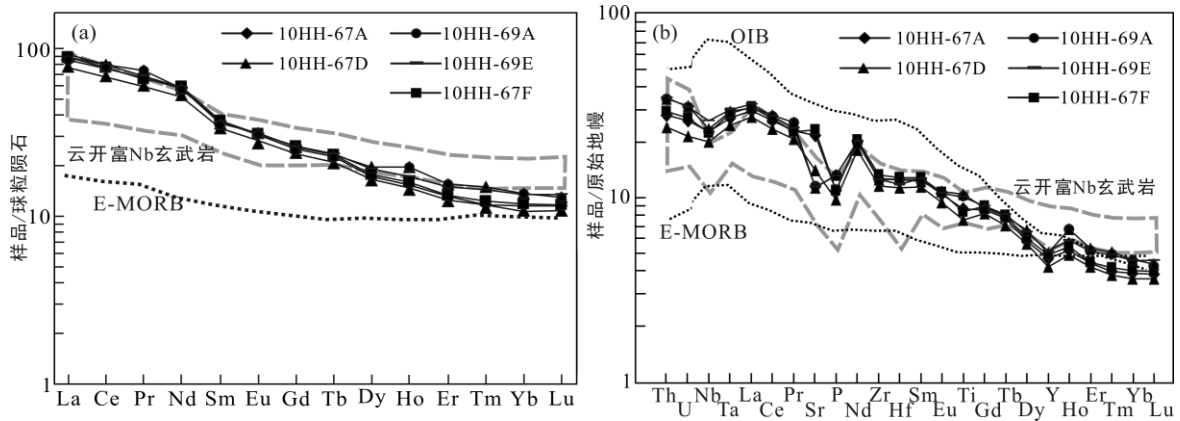


图 6 哀牢山带斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized trace element spidergram for the amphibolites along the Ailaoshan zone

分馏程度相对较强, (La/Yb)<sub>N</sub>值为6.55~7.52, (Gd/Yb)<sub>N</sub>为1.90~2.23, Eu异常不明显(δEu=0.97~1.03)。样品的Sr、P呈弱负异常, 无明显Ti异常。斜长角闪岩具有较高的Nb含量(14.3~18.4 μg/g), 远高于洋内弧玄武岩的Nb含量(<2 μg/g, Martin et al., 2005); Nb/La比值为0.76~1.14, Nb/U比值为25.5~38.2, 类似于Sajona et al. (1994)定义的富Nb玄武岩, 且在相关图解中也落入了富Nb玄武岩范围内(图5b)。岩石样品不相容元素Nb/Ta比值为14~16, Zr/Hf比值为34~39, 分别略低于和接近原始地幔组成(Nb/Ta=17, Zr/Hf=36; Sun and McDonough, 1989)。其原始地幔标准化蛛网图分布形式和REE配分模式均与华南云开地区富Nb玄武岩相似(图6a, b), 而明显不同于OIB和E-MORB。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因和形成构造环境

研究表明, Al、Ca、Mg和高场强元素(HFSE) Nb、

Ta、Ti、Zr、Hf、Y以及REE等在变质过程中能保持稳定; 而低场强元素(LFSE) K、Na、Cs、Rb、Sr、Ba等在变质作用过程中为活泼性元素容易发生迁移。本文研究的斜长角闪岩具有较稳定的K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O含量, Th、Rb、Sr的含量变化范围也较小, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O/Rb比值亦相对稳定, 表明变质作用没有明显改变源区的化学组分。因此, 斜长角闪岩在变质过程中可视为等化学过程, 这些稳定性较高的元素可以用来讨论其岩石成因和形成环境等(如Wang et al., 2003, 2004; 周云等, 2013)。斜长角闪岩的Nb/Y比值为0.71~0.78, 类似于碱性玄武岩系列, 在Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y图解中(Winchester and Floyd, 1977), 样品点落在了碱性玄武岩区域内(图5a)。样品相对富集LILE和REE, 具有较高的Zr、Nb和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量, (Nb/Th)<sub>N</sub>和Nb/U比值较高, Zr/Nb比值相对低, 这些特征与富Nb玄武质岩石的组分特征类似(如Sajona et al., 1994; Zhang et al., 2012; Wang et al., 2013)(图6a, b),

而与 OIB, N-MORB(Sun and McDonough, 1989; Martin et al., 2005)不同。富 Nb 玄武质岩石的形成普遍被认为与俯冲事件相关(Stern and Hanson, 1991; Shimoda et al., 1998), 并且在时空上常常与埃达克岩、高镁安山岩和“正常”弧火山岩伴生(Defant et al., 1991; Viruete et al., 2007)。在本区也发现了同时代的类似于埃达克质岩石的花岗闪长岩和具有“正常”岛弧特征的角闪辉长岩(Qi et al., 2012)。因此, 这一岩石组合特征表明本文研究的富 Nb 斜长角闪岩的形成很可能与本区新元古代时期的俯冲事件有关。

Woodhead et al. (1993)和Gamble et al. (1994)在比较了岛弧玄武岩和弧后玄武岩的特征后认为岛弧玄武岩比弧后玄武岩具有更低的 V、Ti、Zr、Nb 含量。岛弧玄武岩中 Nb 含量通常小于 2  $\mu\text{g/g}$ (Pearce and Peate, 1995; Martin et al., 2005)。本文研究的所有斜长角闪岩样品 Nb 的含量均大于 2  $\mu\text{g/g}$ (14.3~18.4  $\mu\text{g/g}$ )(表 2), 表明其并非直接形成于岛弧环境。这是因为高场强元素 Nb 主要富集在金红石和锆石等副矿物中, 当其源区在熔融程度较低而残留有这些副矿物时, 其形成的岩浆 Nb 的含量就会偏低(如岛弧环境); 在拉伸环境中, 其熔融程度较高时, 金红石和锆石等副矿物会进入熔体相, 因而形成的岩浆相对富 Nb(如弧后环境和洋中脊环境)。本文的斜长角闪岩 Ti/V 比值为 32.98~41.60, 平均值为 37.16, 明显高于平均 MORB 的 Ti/V 比值(Woodhead et al., 1993)。Ti 是不相容元素, V 是中等相容元素, 相对较高的 Ti/V 比值有三种可能性, 一是其源区比 MORB 的源区相对富集 Ti; 二是其熔融程度相对 MORB 低; 三是早期结晶相矿物尖晶石和单斜辉石具有高的 Ti/V 比值(Woodhead et al., 1993; Pearce and Parkinson, 1993)。由于 Ti、Nb 等元素在地幔中主要富集在金红石、榍石等副矿物中, 而斜长角闪岩的 Zr/Nb 比值与 MORB 大致相当, 故其相对高的 Ti/V 比值更可能是由于相对低的熔融程度而造成的, 而造成这种相对于 MORB 低的熔融程度可能与其拉张程度相对低有关(如 Woodhead et al., 1993), 这也暗示了其构造背景更可能是弧后环境, 而不是洋中脊环境, 因为前者拉张程度相对后者弱。另外, 斜长角闪岩微量元素的变化特征整体上与洋脊玄武岩类似(图 6), 但同时又相对富集 LREE, 相对相邻元素具有一定程度的 Nb、Ta、Zr、Hf 亏损, 类似于岛弧玄武岩的特征, 这种具有洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩双重组分特征的玄武岩正是弧后盆地玄武岩的典型特征(Gamble et al., 1994; Gribble et al., 1996)。

Huang et al. (2000)的研究结果表明在 MgO 含量大于 6%时,  $\text{FeO}_t$  的含量反映了其形成的深度, 即  $\text{FeO}_t$  的含量越高, 其形成的深度越深。由表 2 可知, 斜长角闪岩的 MgO 含量均大于 6%, 其  $\text{FeO}_t$  为 11.56%~13.09%, 低于现代岛弧的  $\text{FeO}_t$  的平均含量(12%~17%, Pearce and Peate, 1995), 而接近弧后盆地的玄武岩的  $\text{FeO}_t$  含量(11%~14%), 这也说明其构造背景更可能与弧后环境相似。另外, 从源区特征上看, 早期阶段的弧后盆地由于受俯冲作用的影响, 其 MORB 型的地幔源区往往会受到俯冲流体/熔体的改造, 从而形成的玄武岩也通常保留有俯冲流体/熔体的地球化学特征。本文研究的斜长角闪岩所表现出来的地球化学特征与世界上的一些典型的受到俯冲流体/熔体交代作用的弧后盆地玄武岩(Pearce and Peate, 1995; Gribble et al., 1996; Wang et al., 2007; Fan et al., 2010; Zhang et al., 2012)的特征类似, 而与 MORB 相异, 说明其源区受到了一定程度的俯冲流体/熔体的改造, MORB 型地幔与俯冲组分相互作用产生玄武质岩石正是弧后盆地玄武岩的特征(Gribble et al., 1996)。综上认为哀牢山带新元古代(~814 Ma)的斜长角闪岩形成于弧后盆地环境(图 7)。这一结论也可以得到区域地质资料的支持, 如南华裂谷 820~730 Ma 的沉积物被认为与弧后扩张作用有关(Zhao et al., 2011); 川西盐边群的新元古代(800~1000 Ma)碎屑沉积物以及康定群内的新元古代(约 800~830 Ma)玄武质岩石也均被认为形成于弧后盆地环境(Zhou et al., 2006; 杜利林等, 2007)。

#### 4.2 构造意义

目前在哀牢山带及其邻近地区相继报道有新元古代花岗岩浆作用。如李宝龙等(2012)在金平地区识别有 748~801 Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄)的片麻状花岗岩, Qi et al. (2012)在元阳地区识别出了 761 $\pm$ 11 Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄)的花岗闪长岩。在哀牢山构造带北延的点苍山杂岩中报道有 842~833 Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄)的混合岩花岗岩质脉(刘俊来等, 2008), 并认为它们的形成与扬子地块新元古代演化早期阶段周缘地区的板块俯冲与消减作用密切相关; 点苍山黑云母片麻岩的形成年龄为 770 $\pm$ 5 Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -1.4\sim-2.2$ )(Lin et al., 2012); 与哀牢山带相邻的瑶山群中眼球状花岗质糜棱岩的形成时间为 828 $\pm$ 6.2 Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 李宝龙等, 2012)。但新元古代基性岩浆活动少有报道, 目前仅有元阳

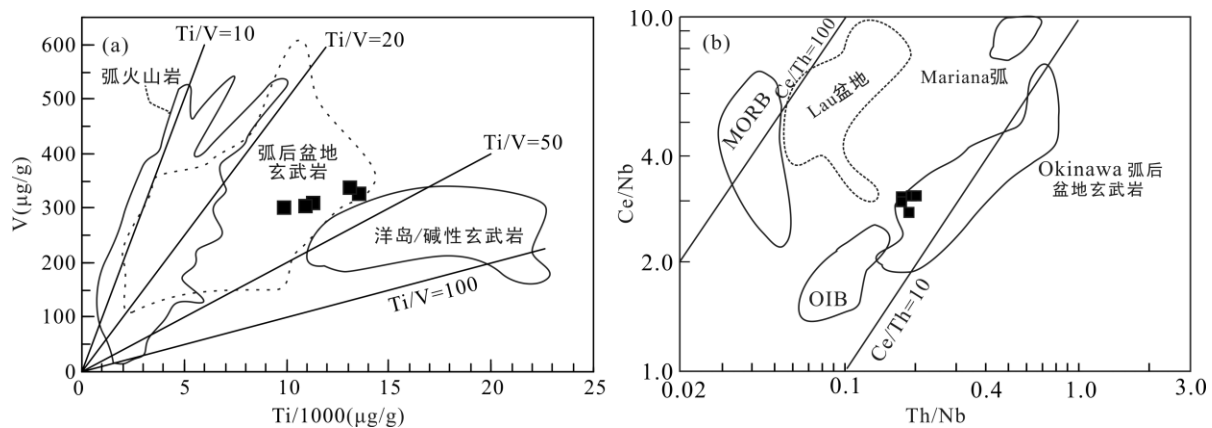


图 7 哀牢山带斜长角闪岩的  $Ti/10000-V$  (a, 据 Shervais, 1982) 和  $Th/Nb-Ce/Nb$  (b, 据 Sandeman et al., 2006; Taylor and Martinez, 2003) 图解

Fig. 7 Plots of  $Ti/10000$  vs.  $V$  and  $Th/Nb$  vs.  $Ce/Nb$  for the amphibolites along the Ailaoshan zone

地区  $769 \pm 7$  Ma 的角闪辉长岩(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, Qi et al., 2012), 其形成被认为与新元古代印支地块和扬子地块之间的古洋壳双向俯冲碰撞有关。

本文研究得到的新元古代斜长角闪岩与扬子板块西缘普遍发育的新元古代岩浆岩(Li et al., 1999, 2003; Zhu et al., 2008; Zhou et al., 2002; Munteanu et al., 2010; Zhao and Zhou, 2007; Wang et al., 2008; Zheng et al., 2007; Wu et al., 2006; Zhao and Guo, 2012; Zhao and Cawood, 2012; Dong et al., 2011, 2012; Zhou et al., 2012) 具有相似的形成时代。如扬子西缘康定片麻状花岗岩形成于  $(795 \pm 11) \sim (797 \pm 10)$  Ma、公差和米易花岗片麻岩的形成时代分别为  $824 \pm 14$  Ma 和  $764 \pm 9$  Ma、格宗花岗岩的形成年龄为  $864 \pm 8$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Zhou et al., 2002); 四川攀枝花花岗闪长岩和米易石英闪长岩的形成时代各为  $759 \pm 11$  Ma 和  $775 \pm 8$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Li et al., 2003); 川西同德花岗闪长岩和辉长闪长岩形成于  $813 \pm 14$  Ma 和  $820 \pm 13$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Sinclair, 2001); 攀枝花辉长岩的形成时代为  $746 \pm 10$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Zhao and Zhou, 2007); 川西沙坝辉长岩的形成时代为  $752 \pm 11$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Li et al., 2003); 川西盐边角闪辉长岩形成于  $(761 \pm 14) \sim (825 \pm 12)$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, Zhu et al., 2008); 扬子西缘碧口地块东段勉(县)-略(阳)-宁(强)三角区的蛇绿岩中镁铁质岩石的形成时代为  $(815 \pm 24) \sim (827 \pm 14)$  Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 闫全人等, 2007); 碧口地块西段碧口一带董家河蛇绿岩中辉长岩形成于  $839 \pm 8$  Ma (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 赖绍聪等, 2007)。目前对这些新元古代岩浆岩

的成因仍存在较大争议, 有地幔柱岩浆活动、岛弧岩浆作用及板块-裂谷岩浆活动产物 3 种不同的模型(Li et al., 1999; Zhu et al., 2008; Zhou et al., 2002; Munteanu et al., 2010; Zhao and Zhou, 2007; Zhao et al., 2011; Wang et al., 2008; Zheng et al., 2007; Wu et al., 2006)。但根据区域构造以及构造地层、火成岩石学和地球化学、同位素年代学等资料综合研究, 扬子地块西南缘新元古代发育有弧沟系活动大陆边缘与俯冲碰撞造山作用(Zhou et al., 2002; 颜丹平等, 2002; 裴先治等, 2009)。Zhou et al. (2002) 认为康定杂岩发育具岛弧性质的花岗片麻岩及混合花岗岩、公差穹隆核部杂岩中发育具岛弧特征的片麻岩和混合花岗岩、格宗变质穹隆核部杂岩中花岗岩具岛弧性质, 后龙门山轿子顶穹隆构造核部基底岩系中的通木梁群为岛弧型钙碱性火山岩系(裴先治等, 2009), 这些岩系应该代表了新元古代时期一个与俯冲带有关的板块边缘(颜丹平等, 2002; Zhou et al., 2002; Zhao et al., 2011)。本文所研究的斜长角闪岩形成于  $814 \pm 12$  Ma, 具有弧后盆地玄武岩地球化学属性, 结合在攀西裂谷带-汉南分布有长达 1000 km 的新元古代弧岩浆(图 1a)(Zhou et al., 2002; Zhao et al., 2011; 颜丹平等, 2002), 我们倾向于认为哀牢山带在这一时期( $\sim 814$  Ma) 存在与俯冲作用相关的基性岩浆活动。

## 5 结 论

获得哀牢山带内呈透镜状产出的斜长角闪岩中的锆石 U-Pb 年龄为  $814 \pm 12$  Ma, 为新元古代, 表明该构造带发育有新元古代基性岩浆活动。岩石地球化学研究表明, 该斜长角闪岩具有富 Nb 玄武质岩



石地球化学属性, 结合扬子西缘同期岩石的地球化学属性, 该富 Nb 岩石被解释为弧后盆地产物, 它的形成与扬子西南缘新元古代俯冲消减作用下的弧后拉张关系密切。

致谢: 两位不具名的审稿专家对本文提出了建设性修改意见和建议, 编辑部老师给予了热情的帮助, 笔者在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献(References):

- 崔军文. 1987. 哀牢山变质岩的原岩建造及其构造意义. 中国区域地质, 4: 349-357.
- 邓家潘. 1987. 云南“三江”地区基性超基性岩带划分、特征及形成环境的探讨. 云南地质, 2: 114-131.
- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 邓尚贤. 2000. 哀牢山构造带两类基性火山岩地球化学及其构造意义. 地球化学, 29(1): 6-13.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 周喜文, 任留东, 王彦斌, 杨铸生. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据. 地质学报, 81(11): 1562-1577.
- 段新华, 赵鸿. 1981. 论哀牢山-藤条河断裂-古板块俯冲带. 地质学报, 55(4): 258-266.
- 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 苏文超. 2002. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化. 大地构造与成矿学, 26(1): 28-36.
- 赖绍聪, 李永飞, 秦江峰. 2007. 碧口群西段董家河蛇绿岩地球化学及LA-ICP-MS锆石U-Pb定年. 中国科学(D辑), 37(增刊): 262-270.
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 龚俊峰, 宋彪, 庆建春, 张臣. 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石SHRIMP定年及其地质意义. 岩石学报, 24(10): 2322-2330.
- 李宝龙, 季建清, 王丹丹, 马宗晋. 2012. 滇南新元古代的岩浆作用: 来自瑶山群深变质岩SHRIMP锆石U-Pb年代学证据. 地质学报, 86(10): 1584-1591.
- 李献华, 刘颖, 涂湘林. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的ICP-AES和ICP-MS准确测定: 酸溶与碱溶分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289-294.
- 刘福田, 刘建华, 何建坤, 游庆瑜. 2000. 滇西特提斯造山带下扬子地块的俯冲板片. 科学通报, 45(1): 79-84.
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 邹运鑫, 唐渊, 陈越. 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. 岩石学报, 24(3): 413-420.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用ICP-MS准确测定岩石样品中的40余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社: 178-235.
- 裴先治, 李佐臣, 丁三平, 李瑞保, 冯建赞, 孙雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩: 锆石SHRIMP U-Pb年龄和岩石地球化学及其构造意义. 地学前缘, 16(3): 231-249.
- 沈上越, 魏启荣, 程惠兰, 莫宣学. 1998. “三江”哀牢山-李仙江带火山岩构造岩浆类型. 矿物岩石, 18(2): 18-24.
- 王义昭, 丁俊. 1996. 云南哀牢山中深变质岩系构造变形特征及演变. 特提斯地质, 20: 52-69.
- 吴根耀, 吴浩若, 钟大赉, 邝国敦, 季建清. 2000. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩. 现代地质, 14(4): 393-400.
- 吴海威, 张连生, 嵇少丞. 1989. 红河-哀牢山断裂带——喜山期陆内左行走滑剪切带. 地质科学, 1: 1-8.
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 何斌. 2003. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉山幔柱关系——地球化学证据. 岩石学报, 19(1): 38-48.
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, John MAL PAS. 2002. 华南在Rodinia古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与Seychelles地块的对比. 地学前缘, 9(4): 249-256.
- 闫全人, 王宗起, 刘树文, 李秋根, 张宏远, 王涛, 刘敦一, 石玉若, 简平, 王建国, 张德会, 赵建. 2005. 西南三江特提斯洋扩张与晚古生代东冈瓦纳裂解: 来自甘孜蛇绿岩辉长岩的SHRIMP年代学证据. 科学通报, 50(2): 158-166.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县-勉县段蛇绿岩块-铁镁质岩块的SHRIMP年代及其意义. 地质论评, 53(6): 755-764.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 翟明国, 从柏林, 乔广生, 张儒瑗. 1990. 中国滇西南造山带变质岩的Sm-Nd和Rb-Sr同位素年代学. 岩石学报, 6(4): 1-11.
- 张旗, 周德进, 赵大升, 彭兴阶, 罗万林, 刘祥品. 1996. 滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回: 岩浆活动记录和深部过程讨论. 岩石学报, 12(1): 17-28.
- 张学书, 秦德先, 范柱国, 刘光亮. 2004. 金平地区二叠纪玄武岩与铜镍矿成因关系初探. 地质与勘探, 40(5): 49-55.
- 张玉泉, 夏斌, 梁华英, 刘红英, 林清茶. 2004. 云南大平糜棱岩化花岗岩的锆石特征及其地质意义. 高校地质学报, 10(3): 378-384.

- 钟大赉, 王毅, 丁林. 1991. 滇西高黎贡陆内第三纪走滑断裂及其伴生拉张构造. 岩石圈构造演化开放研究实验室年报(中国科学院地质研究所). 北京: 中国科学技术出版社: 18–24.
- 周云, 梁新权, 梁细荣, 伍式崇, 蒋英, 温淑女, 蔡永丰. 2013. 湖南锡田含W-Sn A型花岗岩年代学与地球化学特征. 大地构造与成矿学, 37(3): 511–529.
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 王江海, 邓尚贤. 2001. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究. 前寒武纪研究进展, 24(2): 75–82.
- Defant M J, Richerson P M, DeBoer J Z, Stewart R H, Maury R C, Bellon H, Jackson T E and Restrepo J F. 1991. Andesite and dacite genesis via contrasting processes: The geology and geochemistry of El Valle volcano, Panama. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106: 309–324.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Chen Q, Zhang X N, Li W, He D F and Zhang G W. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Precambrian Research*, 196: 247–274.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Zhang X N, Chen Q, Yang C and Yang Z. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif. *Precambrian Research*, 189: 66–90.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, Zhang F F and Zhang Y Z. 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China. *Lithos*, 119(3–4): 553–568.
- Gamble J A, Wright I C, Woodhead J D and McCulloch M T. 1994. Arc and backarc geochemistry in the southern Kermadec arc-Ngatoro Basin and off shore Taupo Volcanic Zone, SW Pacific. *Geological Society, London, Special Publications*, 81: 193–212.
- Gribble R F, Stern R J, Bloomer S H, Stüben D, O’Hearn T and Newman S. 1996. MORB mantle and subduction components interact to generate basalts in the southern Mariana Trough back-arc basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 2153–2166.
- Huang Y, Hawkesworth C, Smith I, Calsterena P V and Black P. 2000. Geochemistry of late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: Implications for mantle enrichment processes. *Chemical Geology*, 164: 219–238.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, Zhang Q, Wang Y Z, Sun X M and Zhang W. 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. *Lithos*, 113: 748–766.
- Kepezhinaskas P K, Defant M J and Drummond M S. 1996. Progressive enrichment of island-arc mantle by melt-peridotite interaction from Kamchatka adakites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 1217–1229.
- Lan C Y, Chung S L, Shen J S, Lo C H, Wang P L, Hoa T T, Thanh H H and Mertzman S A. 2000. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 267–280.
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, Kienast J R, Harrison T M, Trinh P T, Replumaz A and Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research*, 106: 6683–6732.
- Leloup P H and Kienast J R. 1993. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: The Ailao Shan Red River, People’s Republic of China. *Earth and Planetary Science Letters*, 118: 213–234.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Scharer U, Zhong D L, Liu X H, Zhang L S, Ji S C and Trinh P T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China): Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 2513–2584.
- Lepvrier C, Maluski H, Tich V V, Leyreloup A, Thi P T and Vuong N V. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393: 87–118.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171–181.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian*

- Research*, 122: 85–109.
- Lin T H, Chung S L, Chiu H Y, Wu F Y, Yeh M W, Searle M P and Iizuka Y. 2012. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from the Ailao Shan-Red River shear zone on the tectonic and crustal evolution of southwestern China. *Chemical Geology*, 291: 23–37.
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, No. 1a: 56.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24.
- Munteanu M, Wilson A, Yao Y, Harris C, Chunnnett G and Luo Y. 2010. The Tongde dioritic pluton (Sichuan, SW China) and its geotectonic setting: Regional implications of a local-scale study. *Gondwana Research*, 18: 455–465.
- Pearce J A and Parkinson I J. 1993. Trace element models for mantle melting: Application to volcanic arc petrogenesis. *The Geological Society*, London, Special publications. 76: 373–403.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–286.
- Qi X X, Zeng L S, Zhu L H, Hu Z C and Hou K J. 2012. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic systematics of the Daping plutonic rocks: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the northeastern margin of the Indochina block, Southwest China. *Gondwana Research*, 21: 180–193.
- Sajona F G, Bellon H, Maury R C, Pubellier M, Cotton J and Rangin C. 1994. Magmatic response to abrupt changes in tectonic setting: Pliocene-Quaternary calc-alkaline lavas and Nb-enriched basalts of Leyte and Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 237: 47–72.
- Sandeman H A, Hanmer S, Tella S, Armitage A A, Davis W J and Ryan J J. 2006. Petrogenesis of Neoproterozoic volcanic rocks of the MacQuoid supracrustal belt: A back-arc setting for the northwestern Hearne subdomain, western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research*, 144(1–2): 140–165.
- Shervais J W. 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 101–118.
- Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, Ishizaka K and Jahn B M. 1998. Setouchi high-Mg andesites revisited: Geochemical evidence for melting of subducting sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 479–492.
- Sinclair J A. 2001. Petrology, geochemistry, and geochronology of the “Yanbian ophiolite suite”, South China: Implications for the western extension of the Sibao Orogen. Honours Thesis, The University of Western Australia, Perth: 69.
- Stern R A and Hanson G N. 1991. Archean high-Mg granodiorite: A derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of Mantle Origin. *Journal of Petrology*, 32(1): 201–238.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Scharer U, Zhou D, Wu H, Liu X, Ji S, Zhang L and Zhong J. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437.
- Taylor B and Martinez F. 2003. Back-arc basin basalt systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 481–497.
- Trung N M, Tsujimori T and Itaya T. 2006. Honvong serpentinite body of the Song Ma fault zone, Northern Vietnam: A remnant of oceanic lithosphere within the Indochina-South China suture. *Gondwana Research*, 9(1–2): 225–230.
- Virue J E, Contreras F, Stein G, Urien P, Joubert M, Pérez-Estaun A, Friedman R and Ullrich T. 2007. Magmatic relationships and ages between adakites, magnesian andesites and Nb-enriched basalt-andesites from Hispaniola: Record of a major change in the Caribbean island arc magma sources. *Lithos*, 99: 151–177.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123–133.
- Wang L J, Yu J H, Griffin W L and O’Reilly S Y. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks. *Precambrian Research*,

- 222: 368–385.
- Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Bao Z W, Zhao Z H, Wang Y X, Jian P, Yang Y H and Chen L L. 2010a. Petrology, geochronology and geochemistry of ca. 780 Ma A-type granites in South China: Petrogenesis and implications for crustal growth during the breakup of supercontinent Rodinia. *Precambrian Research*, 178: 185–208.
- Wang X L, Zhao G C, Zhou J C, Liu Y S and Hu J. 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gondwana Research*, 14: 355–367.
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Peng T P and Li C W. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks around the Chenzhou-Linwu fault in South China: Implication for the lithospheric boundary between the Yangtze and the Cathaysia Blocks. *International Geology Review*, 45(3): 263–286.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, Guo F, Zhang H F and Peng T P. 2004. Geochemical,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang Mountains and implications for the ca. 1800 Ma event of the North China Craton. *Precambrian Research*, 135: 55–77.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Peng T P, Zhang F F, Zhang Y H and Bi X W. 2010b. 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. *Lithos*, 120: 529–546.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhang Y H and Zhang Y Z. 2013. Origin of paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 160: 37–54.
- Wang Y J, Zhao G C, Fan W M, Peng T P, Sun L H and Xia X P. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province: Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 154: 107–124.
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis, London: Unwin Hyman: 1–466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343.
- Woodhead J, Eggins S and Gamble J. 1993. High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: Evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 114: 491–504.
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Zhang S B, Liu X M and Wu F Y. 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146: 179–212.
- Xia X P, Sun M, Zhao G C, Li H M and Zhou M F. 2004. Spot zircon U-Pb isotope analysis by ICP-MS coupled with a frequency quintupled (213 nm) Nd-YAG laser system. *Geochemical Journal*, 38: 191–200.
- Zhang A M, Wang Y J, Fan W M, Zhang Y Z and Yang J. 2012. Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc-back-arc basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite. *Precambrian Research*, 220: 217–233.
- Zhang L S and Scharer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 67–85.
- Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222: 13–54.
- Zhao G C and Guo J H. 2012. Precambrian geology of China: Preface. *Precambrian Research*, 222: 1–12.
- Zhao J H and Zhou M F. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152: 27–47.
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P and Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*, 39: 299–302.
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li Y B, Li X H, Li Z X and Wu F Y. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96(1–2): 127–150.
- Zhou J B, Wilde S A, Liu F L and Han J. 2012. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotope study of the Neoproterozoic Haizhou

- Group in the Sulu orogen: Provenance and tectonic implications. *Lithos*, 136: 261–281.
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, Malpas J and Leshner C M. 2002. Neo-proterozoic arc-related mafic intrusions in the northern margin of South China: Implications for accretion of Rodinia. *Journal of Geology*, 110: 611–618.
- Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, Xia X P, Zhao J H and Sun M. 2006. The Yanbian terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block. *Precambrian Research*, 144(1–2): 19–38.
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, Deng H L, He D F, Wu K W and Bai Z J. 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China. *Precambrian Research*, 164(1–2): 66–85.

## Geochronological and Geochemical Characteristics of the Neoproterozoic Amphibolite from Ailaoshan Zone, Western Yunnan and its Tectonic Implications

CAI Yongfeng<sup>1,2,3</sup>, WANG Yuejun<sup>2,4</sup>, LIU Huichuan<sup>1,3</sup>, MA Liyan<sup>5</sup>,  
XING Xiaowan<sup>1,3</sup> and LIU Lei<sup>6</sup>

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 5. College of Geosciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 6. Geological Exploration Center of China Building Material Industry, Ningxia General Team, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** Some small-sized outcrops of metabasic rocks (e.g., amphibolite, metagabbro and metadiabase) occur mainly as lens, pods and fragments in the Ailaoshan Complex along the Ailaoshan zone, which were previously mapped as Proterozoic basement. These rocks provide possibility for better understanding the tectonic setting of the SW margin of the Yangtze Block in South China, however, their formation time, petrogenesis and tectonic implications are poorly documented so far. The petrological, geochemical and zircon U-Pb geochronological data for the plagioclase amphibolites in the Ailaoshan Complex are reported in this paper. Geochemical analyses show that the amphibolites have SiO<sub>2</sub> contents ranging from 46.85% to 49.03% and with relatively high FeO<sub>t</sub> (11.56%~13.09%), MgO (6.83%~11.57%) and TiO<sub>2</sub> contents (1.71%~2.22%), K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O vary from 1.61% to 2.26% with Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O ratios of 1.88~9.25. The rocks are characterized by enriched LREE ((La/Yb)<sub>N</sub>=6.55~7.52) and Nb (Nb=14.28~18.43 μg/g). On primitive mantle-normalized trace element diagrams, the rocks show no obvious Nb and Ta anomalies and significant Sr-P depletion, displaying geochemical characteristics similar to those of the Yunkai (South China) back-arc basin basalt. Zircon U-Pb dating of the amphibolite yields a mean age of 814±12 Ma. In conjunction with other geological observations, it is proposed that there was an Early Neoproterozoic (~814 Ma) arc-back-arc setting along the Ailaoshan zone in the SW margin of the Yangtze Block.

**Keywords:** Ailaoshan zone; Early Neoproterozoic; amphibolite; U-Pb geochronology; back-arc basin