

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2025.01.010

# 西藏狮泉河蛇绿混杂岩中枕状熔岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年、岩石地球化学特征 及构造意义

龚福志, 魏铭, 宁建胜, 秦松楠, 旦增西绕

(西藏自治区地勘局第二地质大队, 拉萨 850000)

**摘要:** 对狮泉河蛇绿混杂岩中枕状熔岩进行了年代学、元素地球化学研究。用 LA-ICP-MS 技术测得安山质枕状熔岩锆石 U-Pb 年龄为  $125.3 \text{ Ma} \pm 3.3 \text{ Ma}$ , 为早白垩世中期。岩石具枕状构造和球状结构; 地球化学特征显示, 岩石具有较高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  含量, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  含量则相对较低, 属准铝质富钠贫钾钙碱性岩石; 所有测试样品的 REE 含量较低, 轻、重稀土分馏不明显, Eu 元素无异常; 相对富集 Rb、K、Ba、Sr 等大离子亲石元素及高场强元素 Th、U、Hf、Pb 等, 相对亏损 Nb、Zr、P、Ti 等, 在稀土元素球粒陨石标准化配分图和原始地幔蛛网图中图式与富集型大洋中脊玄武岩 E-MORB 相似。研究表明, 枕状熔岩可能形成于弧后盆地富集型大洋中脊环境, 由此认为, 狮泉河一带在早白垩世中期仍处于弧后盆地的深海环境, 为研究狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带的演化历史提供了直接的火山岩证据。

**关键词:** 狮泉河蛇绿混杂岩; 枕状熔岩; 早白垩世中期; 弧后盆地中 E-MORB; 西藏

**中图分类号:** P588.36; P597 **文献标识码:** A

## 0 引言

在青藏高原中部, 横亘着一条重要的构造结合带(图 1), 即班公湖-怒江缝合带(BNSZ), 该缝合带西起班公湖, 向东经改则、东巧、丁青、碧土, 向南与昌宁、孟连带相接, 是拉萨地块和羌塘地块的分界线<sup>[1]</sup>。在班怒缝合带南部还有一条结合带, 即狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带(SJM), 其西起狮泉河, 向东经永珠、嘉黎, 至察隅, 全长达 1000 km 以上, 但由于该蛇绿混杂岩带的蛇绿岩分布不连贯, 仅在狮泉河、古昌、拉果错、阿索、永珠、纳木错等地断续出露, 导致该带研究程度较低, 许多基础性重大问题悬而未决。近年来, 随着地质、矿产调查工作的深入开展, 在该结合带的找矿及研究工作取得了一系列进展。较多专家认为狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂

岩带是班公湖-怒江缝合带这一具有复杂结构的多岛弧盆体系的一部分<sup>[2-4]</sup>, 但狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带本身也是一个多岛弧盆体系, 其形成时代为晚三叠世-早白垩世<sup>[4-5]</sup>, 于早白垩世晚期消亡<sup>[6-7]</sup>。

本次依托在革吉县阿翁错地区开展的 1:5 万矿产地质调查工作, 对革吉县东北部的狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带中的枕状熔岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年和岩石地球化学研究, 探讨其形成的构造背景, 为该蛇绿混杂岩带演化历史的研究提供了直接的火山岩证据。

## 1 区域地质概况

研究区位于革吉县东北部, 距离县城约 35 km。研究区内蛇绿混杂岩带总体走向为近 EW 向至

收稿日期: 2024-08-20; 改回日期: 2024-12-10; 责任编辑: 沈名星

基金项目: 中国地质调查局项目(编号:121201233000160040)子项目的资助。

作者简介: 龚福志(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事西藏矿产地质调查工作。E-mail:115362039@qq.com

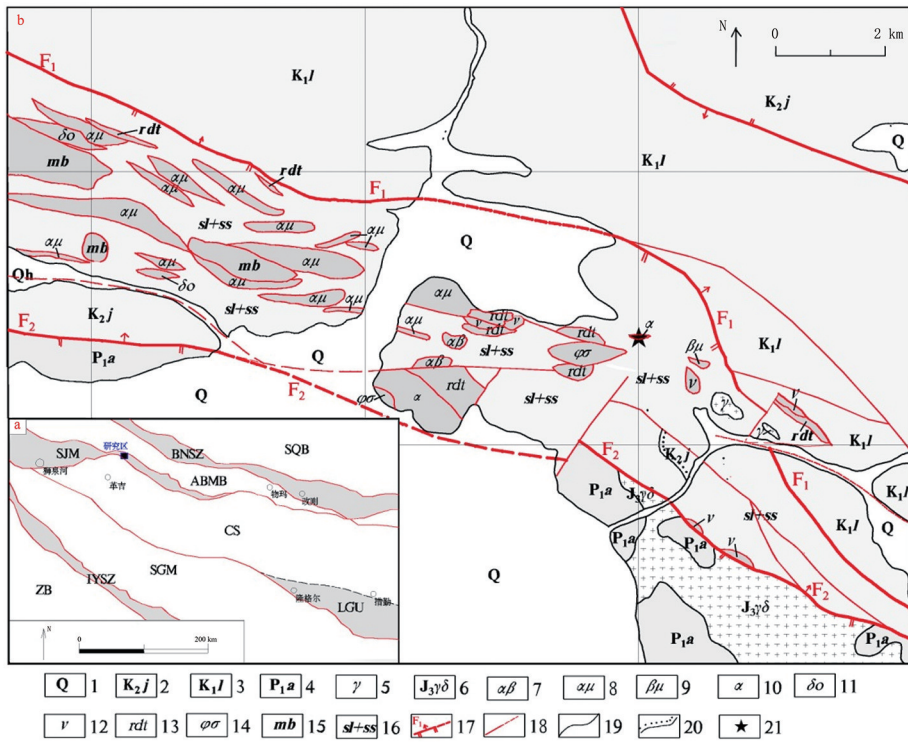


图1 研究区构造位置(a)及地质简图(b)

Fig.1 Sketch showing tectonic position (a) and Geology (b) of the study area

1. 全新统; 2. 竟柱山组; 3. 郎山组; 4. 昂杰组; 5. 花岗岩; 6. 晚侏罗世花岗闪长岩; 7. 安山玄武岩;
  8. 安山玢岩; 9. 辉绿玢岩; 10. 安山岩; 11. 石英闪长岩; 12. 辉长岩; 13. 异剥榴辉岩;
  14. 蛇纹石化辉橄岩; 15. 大理岩; 16. 板岩夹砂岩; 17. 主要实测(推测)逆断层及编号;
  18. 一般实测(推测)断层; 19. 地质界线; 20. 角度不整合界线; 21. 采样位置;
- SQB. 羌南地块; BNSZ. 班公湖-怒江缝合带; ABMB. 昂龙岗日-班戈岩浆岩带;
- SJM. 狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带; CS. 措勤-申扎岩浆岩带; LGU. 隆格尔-工布江达弧背断隆带;
- SGM. 南冈底斯岩浆岩带; IYSZ. 雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带; ZB. 仲巴地块

NW-SE 向, 带宽 3~6 km, 属于狮泉河蛇绿混杂岩的一部分, 区域上位于狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带的西段(图 1a), 南北分别为措勤-申扎岩浆岩带(CS)和昂龙岗日-班戈岩浆岩带(ABMB)。混

岩带北部与下白垩统郎山组呈断层接触(区域上见有角度不整合接触<sup>[2]</sup>), 南部与下二叠统昂杰组呈断层接触(图 2), 局部地段被晚白垩世的一套红色山间磨拉石建造(K<sub>2j</sub>)角度不整合覆盖。混杂岩带内

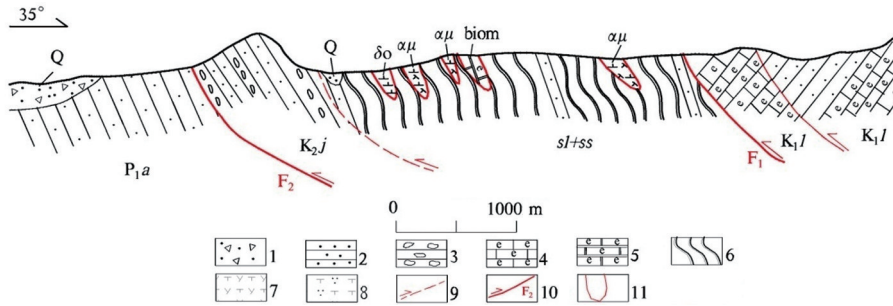


图2 研究区蛇绿混杂岩剖面图

Fig.2 Section of ophiolitic mélangé of the study area

1. 全新统; 2. 砂岩; 3. 砾岩; 4. 生物碎屑灰岩; 5. 生物微晶灰岩; 6. 板岩;
7. 安山玢岩; 8. 石英闪长岩; 9. 推测断层; 10. 逆冲断层及编号; 11. 岩块

主要由岩片与基质组成,基质主要为板岩,夹有砂岩、碳酸盐岩,构造岩片主要岩性有蛇纹石化辉橄岩、蚀变辉长岩、辉绿岩、玄武岩、安山质玄武岩、安山岩、硅质岩等。由于受到强烈构造肢解,蛇绿岩组成单元彼此孤立或呈断层接触,很难找到一个完整的连续剖面。本文样品采自其中的枕状熔岩。

## 2 岩石学特征

枕状熔岩岩片出露规模不大,长约 600 m,宽约 200 m,与四周呈断层接触。岩石岩性镜下鉴定为安山岩,呈灰色-暗绿色,斑状结构,枕状构造或块状构造,枕状体保存基本完好,大小不等,一般几十厘米到几米之间,多被压扁呈椭圆状(图 3a)。还见有气孔状构造和杏仁状构造,杏仁以石英为主。斑晶主要为斜长石(5%)和少量角闪石,斜长石发育有聚片双晶,具绿帘石化,粒径为 0.5 mm±。基质由玻璃质或微晶斜长石组成,具球颗结构(图 3b)。

## 3 锆石 U-Pb 同位素测定

### 3.1 锆石挑选及测试方法

为确定该枕状熔岩的形成时代,从其中一个蚀变和风化较弱的岩枕采集了大样,送至河北省区域地质矿产调查研究所(廊坊)进行锆石挑选。锆石按常规重力和磁选方法分选,在双目镜下挑纯,将分选

出的锆石晶体粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定制靶,待环氧树脂充分固化后,将锆石进行研磨至剩余约一半,使得锆石内部暴露,用于阴极发光(CL)研究和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素组成分析。

锆石 LA-ICP-MS 年代学测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。测试前进行了透射、反射光照相,并对锆石晶体进行阴极发光(CL)照相。测试采用标准测定程序,详细实验原理及流程见文献[8-9]。激光剥蚀分析采用孔径 32 μm,剥蚀深度 20~40 μm,激光脉冲为 6 Hz,激光能量密度为 10 J/cm<sup>2</sup>。同位素组成采用锆石 91500 进行外标校正,每隔 5 个样品分析点测 1 次标准锆石 91500 外标标准物质,以保证标准和样品的仪器条件完全一致。在 10 次锆石的分析前后各测 2 次 NISTSRM610,以 <sup>29</sup>Si 作内标来测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量。

### 3.2 测试结果

阴极发光(CL)照相显示,样品中的锆石均为半自形到自形,锆石的长度为 50~200 μm,长宽比为 1.5:1—2.5:1。部分锆石由于研磨而不完整。CL 图像显示其中 10 颗锆石具有清楚的振荡环带,内部无残核,外部无变质边,为典型的岩浆锆石<sup>[10-11]</sup>(图 4a),其余锆石环带不清或粒度过小。

锆石 U-Pb 同位素年龄测试结果(图 4b,表 1)显示,枕状熔岩样品 GS-1 的年龄加权平均值为 125.3 Ma±3.3 Ma(MSWD=1.2),为早白垩世中期。

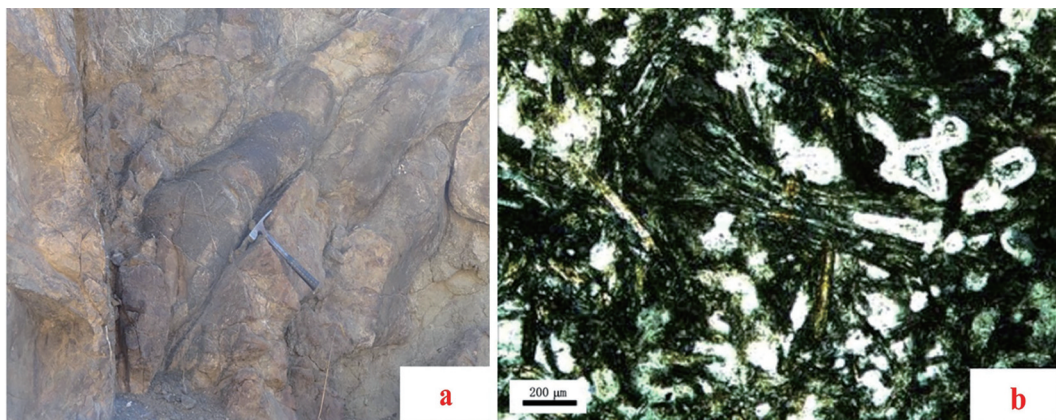


图 3 枕状熔岩野外露头(a)及显微球颗结构(b,正交偏光)照片

Fig. 3 Photo of outcrop (a) and variolitic structure (b) of pillow lava of the study area

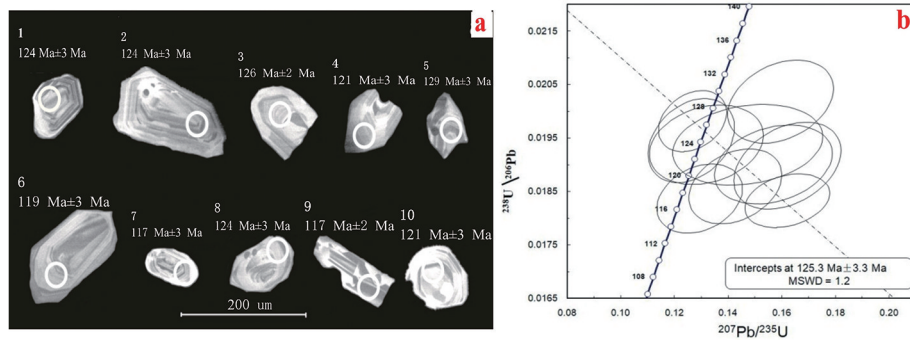


图4 枕状熔岩GS-1中的锆石阴极发光图像、测点位置及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(a)和U-Pb谐和图(b)

Fig. 4 Zircon CL image showing measurement position points and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age (a) and U-Pb concordia (b) of the pillow lava

表1 枕状熔岩LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis of the pillow lava

点号	$w(\text{Pb})$	$w(\text{Th})$	$w(\text{U})$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$1\sigma$
GS-1-1	5.60	131.07	231.05	0.57	0.0605	0.0098	0.1473	0.0185	0.0194	0.0005	124	3
GS-1-2	4.85	151.67	186.82	0.81	0.0521	0.0073	0.1319	0.0140	0.0194	0.0005	124	3
GS-1-3	10.91	308.63	437.76	0.71	0.0462	0.0033	0.1267	0.0084	0.0198	0.0004	126	2
GS-1-4	5.16	116.91	219.45	0.53	0.0610	0.0062	0.1569	0.0145	0.0190	0.0005	121	3
GS-1-5	6.04	134.75	238.28	0.57	0.0592	0.0059	0.1596	0.0130	0.0202	0.0005	129	3
GS-1-6	6.99	282.32	285.09	0.99	0.0580	0.0058	0.1427	0.0114	0.0186	0.0005	119	3
GS-1-7	7.14	238.89	299.19	0.80	0.0520	0.0057	0.1294	0.0105	0.0184	0.0004	117	3
GS-1-8	7.26	184.68	300.31	0.61	0.0491	0.0051	0.1263	0.0106	0.0195	0.0005	124	3
GS-1-9	15.21	785.07	526.36	1.49	0.0634	0.0045	0.1620	0.0104	0.0183	0.0003	117	2
GS-1-10	3.98	90.04	163.34	0.55	0.0645	0.0072	0.1621	0.0132	0.0190	0.0005	121	3

量单位:  $w_B/10^{-6}$ 。

## 4 地球化学特征

岩石地球化学样品取自枕状熔岩中选取新鲜蚀变弱的岩石。在无铁器污染的环境下破碎和研磨,选出过200目筛后的粉末用于岩石地球化学分析。测试分析在陕西核工业二〇三研究所分析测试中心完成,主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)测定;微量和稀土元素采用XRF、ICP-MS测定,分析精度优于5%。分析结果见表2。

### 4.1 主量元素

从分析结果(表2)可以看出,9件样品的烧失量LOI均较高,表明岩石经历了弱蚀变作用。样品的 $w(\text{SiO}_2) = 53.85\% \sim 66.01\%$ ,平均值为60.58%。

碱含量 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})_{\text{平均}} = 4.79\%$ ,且 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量高于 $\text{K}_2\text{O}$ , $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}) = 1.58 \sim 35.38$ ,均值为15.40。在去掉 $\text{CO}_2$ 及烧失量LOI后,其余主元素重新换算成100%,然后在碱-硅TAS图解(图5)上投图,样品点除1个落在玄武质粗面安山岩区、2个点落在英安岩区外,其余6个样品点均落在安山岩区,且除个别样品外,其余样品均落在亚碱性岩石区域。将亚碱性样品投在AFM图解(图6)上,全部都投在钙碱性系列区域。利特曼指数为0.60~2.19,平均值为1.39,属于钙碱性岩石。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较低,介于11.41%~14.40%之间,平均值为13.25%,铝饱和指数(A/CNK)均值为0.81, $A/\text{CNK} < A/\text{NK}$ ,在A/CNK—A/NK图解(图7)中所有样品点位于准铝质区域。综合以上特征,枕状熔岩属于准铝质富钠贫钾钙碱性岩石。

表 2 枕状熔岩主量元素、稀土元素及微量元素分析结果

Table 2 Analysis of REE, major and trace elements of the pillow lava

样号	GX-1	GX-2	GX-3	GX-4	GX-5	GX-6	GX-7	GX-8	GX-9
SiO <sub>2</sub>	63.47	58.45	60.73	53.85	61.40	59.63	60.44	66.01	61.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.75	14.35	13.45	14.40	13.71	13.90	13.11	11.41	12.18
FeO	3.24	3.60	4.09	5.93	4.00	3.59	4.28	3.67	3.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.31	2.59	2.84	2.96	3.09	3.07	3.29	2.59	2.76
MgO	3.85	3.53	4.16	7.01	3.84	4.58	4.96	4.00	5.16
CaO	3.91	5.21	6.83	6.40	5.33	3.64	4.33	3.48	4.65
Na <sub>2</sub> O	4.97	5.66	2.90	3.82	4.33	5.45	4.64	4.33	2.72
K <sub>2</sub> O	0.28	0.16	0.35	0.32	0.20	0.73	0.25	0.27	1.72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.10	0.13	0.14	0.14	0.11	0.10	0.15	0.13	0.14
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.35	0.30	0.32	0.34	0.33	0.33	0.30	0.27
CO <sub>2</sub>	1.85	2.38	1.09	0.98	0.83	1.77	0.96	1.23	1.89
LOI	5.10	6.22	4.42	4.85	3.85	5.25	4.42	4.05	6.02
$\sigma$	1.35	2.19	0.60	1.58	1.12	2.30	1.37	0.92	1.08
Mg <sup>#</sup>	67.92	63.60	64.44	67.81	63.10	69.45	67.37	66.01	73.00
A/NK	1.50	1.51	2.61	2.17	1.87	1.42	1.66	1.54	1.92
A/CNK	0.82	0.76	0.77	0.79	0.81	0.85	0.83	0.83	0.82
Y	12.5	14.4	11.8	12.5	15.7	14.0	14.8	13.3	9.56
La	2.24	2.13	1.92	3.19	2.15	1.67	1.72	2.42	1.69
Ce	4.75	4.84	3.90	5.88	5.62	4.10	4.03	6.78	3.51
Pr	0.66	0.85	0.60	0.76	0.70	0.56	0.55	0.77	0.53
Nd	3.00	3.61	2.51	3.32	3.12	2.81	3.01	3.28	2.56
Sm	1.16	1.15	1.02	0.85	1.10	1.03	1.25	0.97	0.76
Eu	0.54	0.44	0.31	0.31	0.43	0.38	0.38	0.40	0.34
Gd	1.14	1.39	1.14	1.37	1.53	1.42	1.37	1.35	0.93
Tb	0.31	0.29	0.27	0.28	0.32	0.33	0.29	0.27	0.25
Dy	1.76	1.80	1.61	1.88	2.22	1.88	2.14	1.75	1.17
Ho	0.50	0.53	0.41	0.44	0.54	0.48	0.49	0.47	0.35
Er	1.06	1.38	1.14	1.17	1.51	1.34	1.34	1.27	0.92
Tm	0.24	0.19	0.21	0.20	0.28	0.22	0.26	0.22	0.18
Yb	1.34	1.62	1.41	1.26	1.55	1.34	1.69	1.51	1.04
Lu	0.24	0.24	0.24	0.24	0.30	0.28	0.26	0.22	0.19
$w(\Sigma\text{REE})$	18.94	20.46	16.69	21.15	21.37	17.84	18.78	21.68	14.42
$w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$	1.87	1.75	1.60	2.09	1.59	1.45	1.40	2.07	1.87
$w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$	1.20	0.94	0.98	1.82	0.99	0.89	0.73	1.15	1.17
$\delta\text{Eu}$	1.44	1.06	0.88	0.88	1.01	0.96	0.89	1.07	1.24
Sc	27.8	29.3	33.5	38.0	32.7	37.2	33.9	31.6	29.8
Ti	1998	2174	1976	1790	2018	2092	2197	2115	1986
V	217	227	255	252	255	258	288	254	252
Cr	46.6	42.0	40.4	155	38.4	39.7	41.1	34.8	37.3
Cu	27.2	110	67.6	109	109	112	93.0	75.6	101
Zn	52.3	72.3	56.9	76.1	64.8	63.0	55.3	50.2	58.6
As	0.5	1.9	0.5	0.5	1.1	3.3	0.9	0.5	0.6
Sr	74.8	78.8	65.0	100	81.5	117	89.6	91.5	162
Zr	26.2	30.5	21.6	17.9	24.2	22.2	21.6	22.1	19.9
Ba	46.0	40.7	53.6	37.0	43.4	259	52.4	48.1	207
Pb	4.0	2.7	4.0	5.4	4.0	2.7	1.7	3.3	3.1
Rb	9.8	7.3	7.5	3.7	5.95	15.0	7.2	11.6	23.5
Th	0.51	0.47	0.87	0.97	0.72	0.36	0.71	0.90	0.84
U	0.25	0.32	0.39	0.35	0.56	0.32	0.27	0.35	0.26
Co	16.9	22.3	21.9	35.4	22.8	23.0	23.8	18.3	18.8
Ni	37.6	32.4	26.8	53.5	28.2	24.0	23.9	21.6	22.8
Nb	5.96	5.97	10.2	7.24	4.01	2.10	2.11	1.72	15.8

续表 2

样号	GX-1	GX-2	GX-3	GX-4	GX-5	GX-6	GX-7	GX-8	GX-9
Ta	0.55	0.78	0.45	0.60	0.45	0.60	0.61	0.95	0.80
Cs	0.28	0.18	0.27	0.19	0.18	0.14	0.16	0.31	0.22
Hf	1.42	1.68	1.40	1.33	1.49	1.24	1.24	1.52	1.28
W	0.80	0.80	0.94	1.09	0.95	1.09	3.36	2.01	2.72
Be	0.19	0.22	0.19	0.13	0.24	0.18	0.17	0.22	0.29
Ag	0.044	0.029	0.082	0.023	0.067	0.056	0.085	0.050	0.10
Sn	0.96	1.12	1.08	1.03	1.78	0.75	2.35	1.25	1.99
Mo	0.53	0.58	0.50	0.43	0.73	0.40	0.91	0.49	0.76
Sb	0.13	0.13	0.12	0.088	0.38	0.22	0.14	0.16	0.20
Bi	0.036	0.040	0.025	0.029	0.025	0.036	0.043	0.038	0.028
Au	2.08	3.52	4.92	1.25	2.46	2.25	3.21	3.44	5.50

注:量单位: $w_B/\%$ ;  $w_B$ (微量元素、稀土元素) $_B/10^{-6}$ ;  $Mg^{\#} = 100 \times MgO / (MgO + FeO \times 40.3/71.8)$ ;  $A/CNK = n(L_2O_3) / (n(CaO) + n(K_2O) + n(Na_2O))$ ,  $A/NK = n(L_2O_3) / (n(K_2O) + n(Na_2O))$ ,  $w(La)_N/w(Yb)_N$  据文献[12]球粒陨石标准化。

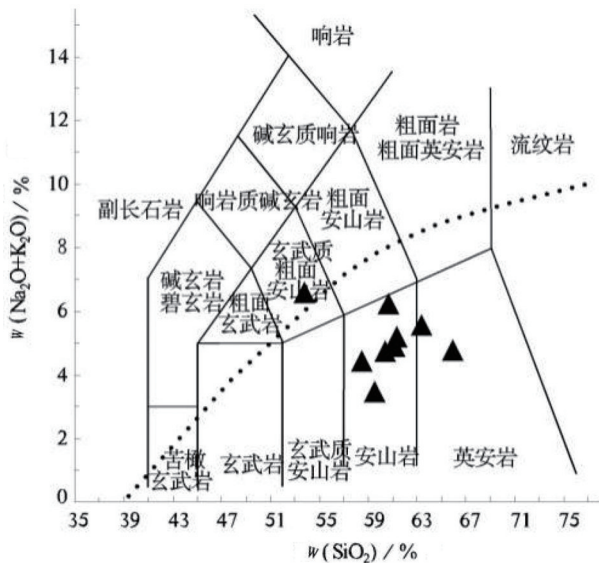


图 5 枕状熔岩 TAS 图解(底图据文献[13])

Fig. 5 TAS diagram of the pillow lava  
图中点线上部为碱性岩,下部为亚碱性岩

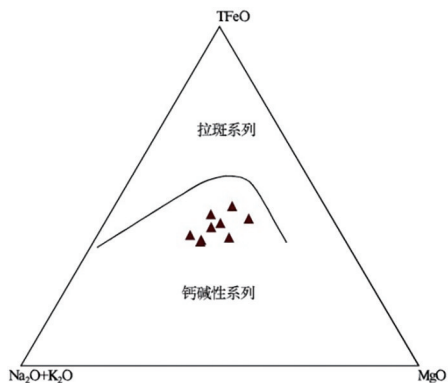


图 6 枕状熔岩 AFM 图解(底图据文献[14])

Fig. 6 AFM diagram of the pillow lava

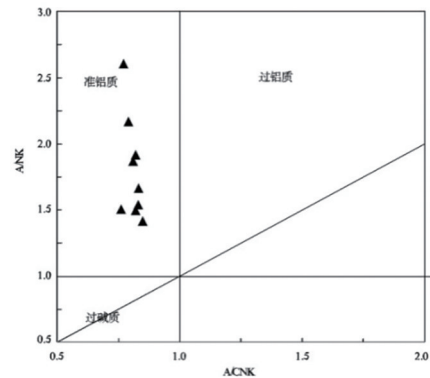


图 7 枕状熔岩铝饱和指数图解  
(底图据文献[15])

Fig. 7 the aluminium saturation index diagram of the pillow lava

4.2 稀土及微量元素

稀土及微量元素分析结果见表 2。稀土元素总量较小,  $w(\Sigma REE) = 14.42 \times 10^{-6} \sim 21.68 \times 10^{-6}$ , 平均为  $19.04 \times 10^{-6}$ ;  $w(La)_N/w(Yb)_N = 0.73 \sim 1.82$ , 平均值 1.10,  $w(LREE)/w(HREE) = 1.40 \sim 2.09$ , 平均值 1.74, 均表明轻、重稀土分馏不明显, 在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 8a)上表现为一条平坦略向右倾的曲线;  $\delta Eu = 0.88 \sim 1.44$ , 均值为 1.05, Eu 元素基本无异常。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)中, 岩石相对富集 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素及高场强元素 U、Hf、Pb 等, 相对亏损 Nb、Zr、P、Ti 等。

5 讨论

5.1 大地构造背景

枕状熔岩样品的地球化学结果表明, 岩石

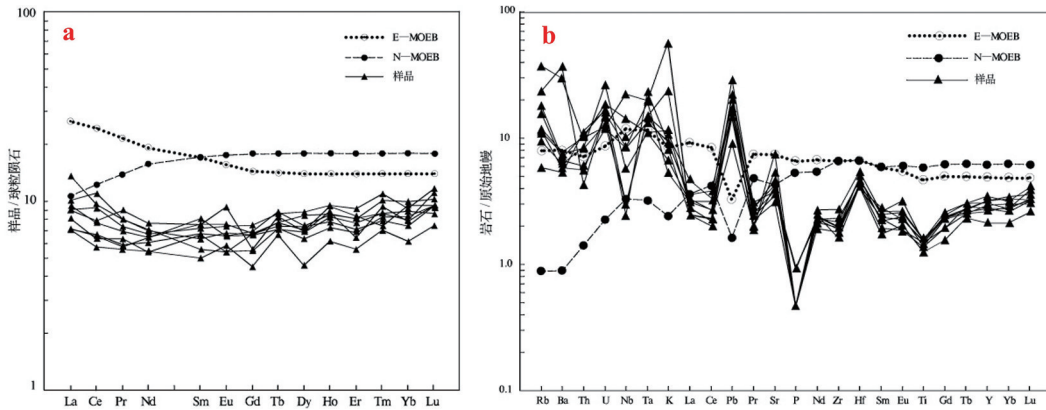


图 8 枕状熔岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 8 Diagram of chondrite-normalized REE pattern (a) and Primitive mantle-normalized spidergram (b) of the pillow lava

点线为 E-MORB;虚线为 N-MORB;标准化值及 MORB 值均据文献[12]

$w(K_2O) = 0.16\% \sim 1.72\%$ , 均值为  $0.48\%$ , 含量明显偏低, 在  $SiO_2 - K_2O$  图解(图 9)中除 1 个样品投在钙碱性系列区域外, 其余 8 件样品全部投在低钾(拉斑)系列中;  $w(\Sigma REE) = 14.42 \times 10^{-6} \sim 21.68 \times 10^{-6}$ , 平均值  $19.04 \times 10^{-6}$ , 其  $w(La)_N/w(Yb)_N = 1.02 \sim 2.53$ ,  $w(La)_N/w(Sm)_N$ 、 $w(Sm)_N/w(Yb)_N$  分别为  $1.38 \sim 3.75$  及  $0.64 \sim 0.87$ , 表明轻、重稀土分馏不明显, 在微量元素蛛网图中相对富集 Rb、K、Ba、U、Hf、Pb 等, 显著亏损 Nb、Ti、P 元素, 一般亏损 Ta 元素,  $w(Nb)/w(Ta)_{平均} = 10.07$ , 显示出强烈的岛弧火山岩的特性。

岩石中 Nb、Ti、P 元素的显著亏损、高 Th 含量、低  $w(Ba)/w(Th)$  比值及低  $w(U)/w(Th)$  比值 ( $w(Th) = 0.36 \sim 0.97$ ,  $w(Ba)/w(Th) = 38.14 \sim$

$719.17$ , 均值  $158.79$ ,  $w(U)/w(Th) = 0.31 \sim 0.89$ , 均值  $0.53$ ), 则暗示岩浆组分在形成过程中受到了俯冲沉积物熔体的影响<sup>[16]</sup>。熔岩中富 Pb 则可能是岩体上升过程中受到了壳源物质的混染<sup>[17]</sup>; 夏林圪等<sup>[18]</sup>在对北祁连山早古生代活动大陆边缘熔岩的岩石地球化学进行对比研究时发现, 成熟岛弧 ( $w(Y) < 20 \times 10^{-6}$ 、 $w(TiO_2) < 0.60\%$ 、 $w(Th)/w(Yb) > 0.60$ ) 与弧后扩张区 ( $w(Y) > 20 \times 10^{-6}$ 、 $w(TiO_2) > 0.60\%$ 、 $w(Th)/w(Yb) < 0.60$ ) 发育的火山岩具有明显的区别。本例中枕状熔岩的  $w(Y) = 9.56 \times 10^{-6} \sim 15.70 \times 10^{-6}$ 、 $w(TiO_2) = 0.27\% \sim 0.35\%$ 、 $w(Th)/w(Yb) = 0.29 \sim 0.81$ , 与成熟岛弧更为接近。

在 REE 球粒陨石标准化配分曲线(图 8)上枕状熔岩表现为一条稍右倾的曲线, 与富集型洋中脊玄武岩 E-MORB 的型式有相似性。但枕状熔岩 REE 总量更低(可能反映其来自于晚期阶段的岩浆源), 轻、重稀土分馏则不显著, 均稍低于 E-MORB 的  $2.66$ 、 $2.42$ 、 $1.10$ <sup>[12]</sup>, 同时显著亏损 Nb、Ti 元素, 一般亏损 Ta 元素,  $w(Nb)/w(Ta)_{平均} = 10.07$ , 表明岩石产于岛弧构造环境<sup>[16]</sup>, 与典型岛弧安山岩有显著差别, 而与富集型洋中脊关系密切。

与 N-MORB 相比, E-MORB 是一种少见的岩石类型, 主要出露在现代大洋中脊和海山之中, 如大西洋洋中脊<sup>[23-24]</sup>、东太平洋洋中脊<sup>[25-26]</sup>等, 但随着 Mariana 弧后盆地<sup>[27]</sup>、East Scotia 弧后盆地<sup>[28]</sup>等现代弧后盆地的深入研究发现, 在弧后盆地中也是可以出现 E-MORB 的, 且形成于弧后盆地演化的后期<sup>[27,29]</sup>。从大地构造位置(图 1a)看, 枕状熔岩属于

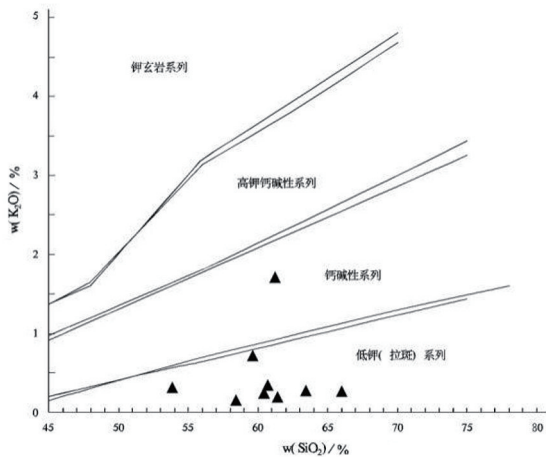


图 9 枕状熔岩  $SiO_2 - K_2O$  图解

(底图据文献[19])

Fig. 9  $SiO_2 - K_2O$  diagram of the pillow lava

狮泉河蛇绿混杂岩带的一部分,处于昂龙岗日-班戈岩浆弧带和措勤-申扎岩浆弧带之间,结合地球化学特征分析,说明其形成的构造环境可能是伴随班公湖-怒江洋南向俯冲形成的昂龙岗日-班戈岩浆弧带的弧后盆地,即原来认为的狮泉河小洋盆可能就是一个弧后盆地。岩浆源区可能为富集地幔,即随着狮泉河弧后盆地进一步的打开至后期成熟阶段,班公湖-怒江洋壳在南向俯冲作用及海沟后滚作用下,引起了新的地幔对流,使得周围的富集地幔上涌发生了部分熔融,产生了枕状熔岩的原始岩浆。

本例枕状熔岩产于蛇绿混杂岩带中,与产于现代大洋中脊的 E-MORB 相比,典型特征为贫 Ti、富 Pb。枕状熔岩中  $w(\text{TiO}_2) = 0.27\% \sim 0.35\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2) = 38.03 \sim 45.11$ ,  $w(\text{CaO})/w(\text{TiO}_2) = 11.0 \sim 22.8$ ,与 Mariana 和 Tonga 两地弧后盆地出现的 E-MORB 较为相似,这两地的 MORB 中  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$  普遍大于 20,  $w(\text{CaO})/w(\text{TiO}_2)$  大多介于  $10 \sim 20$ <sup>[27,30]</sup>,而一般 MORB 中  $w(\text{TiO}_2) = 0.7\% \sim 2.3\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$  大多  $10 \sim 20$  之间<sup>[30]</sup>。这种反常情况可用如下说法来解释:在大洋中脊情况下,玄武质熔体的分离结晶主要是在还原条件下进行,岩浆中氧逸度较低,钛铁矿结晶很晚,熔体中就相对富钛;而在弧后盆地的环境中,岩浆中的氧逸度明显增高,钛铁矿在早期就结晶分离析出,导致残余熔体中亏损了钛<sup>[30]</sup>。

关于安山岩的构造环境, Bailey 提出用  $w(\text{La})/w(\text{Yb})-w(\text{Sc})/w(\text{Ni})$  来划分 4 种构造类型的安山岩:低钾大洋岛弧型、大陆岛弧型、其他大洋岛弧型、安第斯型<sup>[20]</sup>,本例中枕状熔岩样品均落在大陆岛弧型与低钾大洋岛弧型之间(图 10),更靠近后者。这进一步暗示枕状熔岩可能来源于弧后盆地中的富集型洋中脊,形成环境与今日的西太平洋较为类似。

## 5.2 狮泉河洋的闭合时间

狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带虽然自西向东延伸达 1000 km 以上,但蛇绿混杂岩断续产出,仅在狮泉河、拉果错、永珠等几个地区有较好出露。郑有业等通过对该带中狮泉河蛇绿混杂岩中的闪长岩墙和辉长闪长岩墙进行锆石 SHRIMP 测年,分别获得  $165.8 \text{ Ma} \pm 1.7 \text{ Ma}$  和  $163.35 \text{ Ma} \pm 0.75 \text{ Ma}$  的等时线年龄,认为这可能代表狮泉河一带开始由扩张转化为俯冲消减的时间<sup>[31]</sup>,并发现狮泉河蛇绿混杂岩被下白垩统郎山组角度不整合覆盖,以此认为

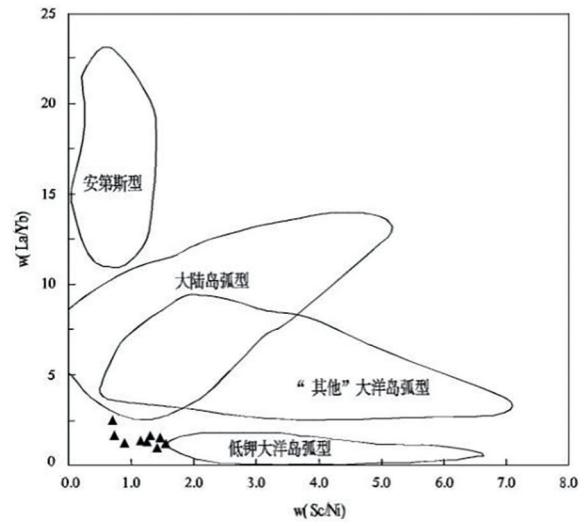


图 10 枕状熔岩 La/Yb—Sc/Ni 图解

(底图据文献[20—22])

Fig. 10 La/Yb-Sc/Ni diagram of the pillow lava

狮泉河带在早白垩世之前已经构造侵位<sup>[2]</sup>。徐梦婧则通过对果芒错和中仓蛇绿岩的研究,认为狮泉河-申扎-嘉黎弧后盆地打开时间从晚三叠世到中侏罗世,具有东早西晚的穿时现象,晚侏罗世开始南向俯冲,至早白垩世最终闭合<sup>[7]</sup>。

本次在狮泉河蛇绿混杂岩中枕状熔岩中采得锆石样品,获得 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $125.3 \text{ Ma} \pm 3.3 \text{ Ma}$ ,即早白垩世中期,根据地球化学特征,枕状熔岩可能形成于弧后盆地富集型洋中脊的环境;再者该熔岩具有枕状构造和球颗结构,这通常被认为是海底喷发(即水下环境)快速冷却的特征<sup>[32]</sup>,当球颗玄武岩发育于枕状熔岩边缘时,可作为深海环境的标志<sup>[33]</sup>。由此可以认为在早白垩世中期,狮泉河一带仍处于弧后盆地的深海环境。

在侏罗纪-早白垩世,随着班公湖-怒江洋盆的扩张及随后的双向俯冲,班怒缝合带西段进入弧盆体系演化阶段<sup>[4]</sup>,在该带南部、研究区北部形成了昂龙岗日-班戈火山岩浆弧带,从而导致狮泉河小洋盆也随之进入了弧后盆地演化阶段,本例枕状熔岩可能产于该弧后盆地演化后期的产物。

另外在研究区的局部,有一套山间磨拉石建造角度不整合在蛇绿混杂岩带上面,这套磨拉石建造属于上白垩统竟柱山组,在岩层的砾岩层中发现大量的紫红色硅质岩砾石,大小  $2 \sim 8 \text{ cm}$ ,磨圆较好,推测其来源于蛇绿混杂岩带的硅质岩,因此认为晚白垩世狮泉河小洋盆已完全闭合。



## 6 结语

(1) 狮泉河蛇绿混杂岩中的枕状熔岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $125.3 \text{ Ma} \pm 3.3 \text{ Ma}$ , 即早白垩世中期, 代表枕状熔岩的形成时代。

(2) 枕状熔岩属于准铝质富钠贫钾钙碱性岩石, 在稀土元素配分图和微量元素蛛网图中与 E-MORB 型较为相似, 但以贫 Ti 为特征区别于一般 E-MORB, 与产于弧后盆地中 E-MORB 特征一致, 据此认为枕状熔岩的形成背景为弧后盆地的富集型洋中脊的环境。

(3) 在早白垩世中期, 狮泉河-申扎-嘉黎混杂岩带西段仍处于弧后盆地的深海环境, 类似现代西太平洋。

### 参考文献:

- [1] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [2] 郑有业, 许荣科, 何来信, 等. 西藏狮泉河蛇绿混杂岩带——一个新的多岛弧系统的厘定及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(1): 13-19.
- [3] 刘庆宏, 肖志坚, 曹圣华, 等. 班公湖-怒江结合带西段多岛弧盆体系时空结构初步分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 15-21.
- [4] 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 班公湖-怒江带-羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1261-1274.
- [5] 白云山, 李莉, 牛志军, 等. 羌塘中部各拉丹冬一带鄂尔陇巴组火山岩特征及其构造环境[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 113-120.
- [6] 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 等. 班公湖-怒江结合带南侧弧-盆体系时空结构与演化特征[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 51-56.
- [7] 徐梦婧. 青藏高原狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带的构造演化[D]. 吉林大学, 2014.
- [8] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [9] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [10] Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, *et al.* Atlas of zircon textures[J]. Reviews Mineral Geochemistry, 2003, 53: 469-495.
- [11] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [12] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the ocean Basins[J]. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [13] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [14] Irvine T N and Barager W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.
- [15] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [16] Dilek Y, Furnes H, Shallo M. Geochemistry of the Jurassic Mirdita Ophiolite (Albania) and the MORB to SSZ evolution of a marginal basin oceanic crust[J]. Lithos, 2008, 100(1-4): 174-209.
- [17] 赵振华. 微量元素地球化学原理(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥. 北祁连山古海底火山作用与成矿[J]. 地球学报, 1999, 20(3): 259-264.
- [19] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey, Contrib[J]. Mineral Petrol, 1976, 58: 63-81.
- [20] Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. Chem. Geol, 1981, 32: 139-159.
- [21] Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. Jour. Geol, 1986, 94: 845-864.
- [22] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: identification and significance[J]. Lithos, 1989, 23: 1-18.
- [23] Frey F A, Walker N, Stakes D, *et al.* Geochemical characteristics of basaltic glasses from the major and famous axial valleys, Mid-Atlantic Ridge (36°-37°N): Petrogenetic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 115(1-4): 117-136.
- [24] Hémond C, Hofmann A W, Vlastélic I, *et al.* Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24°N[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7(12): Q12010.
- [25] Niu Y, Batiza R. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the Eastern Pacific mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(3-4): 471-483.
- [26] Niu Y L, Collerson K D, Batiza R, *et al.* The origin of E-type MORB at ridges far from mantle plumes: The East Pacific Rise at 11°20'N[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 7067-7087.
- [27] Gribble R F, Stern R J, Newman S, *et al.* Chemical and Isotopic Composition of Lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for Magmagenesis in Back-arc Basins

- [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(1): 125 - 154.
- [28] Fretzdorff S, Livermore R A, Devey C W, *et al.* Petrogenesis of the Back-arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(8): 1435 - 1467.
- [29] Gribble R F, Stern R J, Bloomer S H, *et al.* MORB mantle and subduction components interact to generate basalts in the southern Mariana Trough back-arc basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(12): 2153 - 2166.
- [30] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明. 喜马拉雅岩石圈构造演化-西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [31] 郑有业, 许荣科, 马国桃, 等. 锆石 SHRIMP 测年对狮泉河蛇绿岩形成和俯冲的时间约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 895 - 904.
- [32] 付永涛, 李继亮, 吴运高. 大别造山带宿松球状结构安山岩的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 254 - 262.
- [33] Furnes H. Variolitic structure in Ordovician pillow lava and its possible significance as an environmental indicator[J]. *Geology*, 1973, 1(1): 27 - 30.

## LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of pillow lava in Shiquan River ophiolitic mélangé zone and the tectonic significance

GONG Fuzhi, WEI Ming, NING Jiansheng, QIN Songlan, TENZIN Thyrab

(No. 2 Geological Party of Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,

Lhasa 850000, Tibet, China)

**Abstract:** This paper deals with Chronology and element geochemistry of the pillow lava. LA-ICP-MS zircon U-Pb age dating of the lava is  $125.3 \text{ Ma} \pm 3.3 \text{ Ma}$  corresponding to the middle of Cretaceous Period. Geochemistry of the lava is characterized by typical metaluminous calc-alkaline serial rocks with high Na and low K content; all analysis of samples collected by relatively high  $\text{SiO}_2$  and MgO, relatively low  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{TiO}_2$ , no obvious fractionation of LREE and HREE and Eu anomaly; relative enrichment of LILEs (Rb, K, Bs, Sr) and HFSE (Th, U, Hf, Pb etc.) and relative depletion of Nb, Zr, Ti etc. The data mentioned above and the chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized spider diagram of the pillow lava are all similar to E-MORB (enriched middle ocean ridge basalt). Therefore, the pillow lava may be formed in deep water environment of back-arc basin during the middle of Early Cretaceous Period. Results of the paper will provide direct evidence for studying evolution history of Shiquan River ophiolitic mélangé belt.

**Key Words:** Shiquan River ophiolitic mélangé zone; pillow lava; LA-MC-MS zircon U-Pb age; the middle of Cretaceous Period; E-MORB in the back-arc basin; Tibet