

# 云南个旧西区贾沙辉长-二长岩体 SIMS 锆石 U-Pb 定年及地球化学研究

张颖<sup>1,2</sup>, 黄智龙<sup>1\*</sup>, 罗泰义<sup>1</sup>, 钱志宽<sup>1,2</sup>, 张嘉玮<sup>1,2</sup>, 孙建博<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 为确定云南省个旧地区晚中生代大规模岩浆活动过程中基性端元的时限、地幔源区特点及大地构造环境, 选取贾沙辉长-二长岩体为对象进行年代学和地球化学研究。贾沙辉长-二长岩体位于个旧西区, 岩性主要为辉长岩和二长岩。锆石 U-Pb 同位素测年结果表明, 岩石侵位时代为(84.0±0.6) Ma, 属于晚白垩世, 与个旧地区花岗岩、碱性岩和煌斑岩形成年代范围一致(76~85 Ma)。贾沙岩体的辉长岩和二长岩 SiO<sub>2</sub> 为 47.3%~60.0%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 为 7.31%~10.1%。稀土含量较高, 轻稀土富集重稀土亏损, Eu 异常不明显。相对于原始地幔, 贾沙岩体富集轻稀土和大离子亲石元素 Rb、K、Pb, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P。地球化学研究显示贾沙岩体母岩浆起源于与俯冲有关的交代地幔, 由石榴子石二辉橄榄岩经历了较低程度的(<5%) 部分熔融形成。原始岩浆在就位过程中经历了广泛的地壳混染和橄榄石、辉石的分离结晶作用。二长岩由辉长岩浆结晶分异作用形成。研究显示, 贾沙辉长-二长岩体是晚白垩世滇东南-桂西地区大规模岩浆活动的产物, 表明这些岩浆岩形成于统一的岩石圈伸展的动力学背景下。

**关键词:** 辉长岩; 二长岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 伸展环境; 云南省

中图分类号: P59; P581 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)06-0523-21

## The geochemistry and SIMS U-Pb zircon dating of the Jiasha gabbroic-monzonitic intrusion in Gejiu district, Yunnan Province

ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1\*</sup>, LUO Tai-yi<sup>1</sup>, QIAN Zhi-kuan<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Jia-wei<sup>1,2</sup> and SUN Jian-bo<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

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

3. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum Group Co., Ltd, Xi'an 710075, China

**Abstract:** The Jiasha intrusion, located in the western Gejiu district, consist of gabbros and monzonites. We conducted geochronological and geochemical studies to understand the timing, mantle source and tectonic environment of the Jiasha intrusion, a basic end-member of the late-Mesozoic magma activities in the Gejiu area. These rocks have zircon U-Pb ages of ~84.0 Ma, synchronous with granitic, alkaline and lamprophyric rocks and Sn mineralization in the Gejiu area (76.0–85.0 Ma). Both gabbros and monzonites have variable SiO<sub>2</sub> (47.3%–60.0%) and K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O (7.31%–10.12%). They have high REE contents, and display LREE-enriched chondrite-normalized patterns with slightly Eu anomalies. In the primitive mantle-normalized spidergram, both of them are enriched in LILE including REE, Rb, K and Pb but depleted in HSFIE including Nb, Ta, Ti and P. Our research suggests that monzonites have formed the gabbroic magma by fractional crystallization. Geochemical data indicate that the parental magma of the Jiasha intrusion have derived from subduction-related metasomatized mantle, and have formed by low-degree partial melting (<5.0%) of garnet-lherzolite. The primary magmas have

收稿日期(Received): 2013-01-21; 改回日期(Revised): 2013-05-02; 接受日期(Accepted): 2013-05-10

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(2008186); 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(SKLOGD-ZY125-02)

作者简介: 张颖(1981-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: zhangying2701@sina.com

\* 通讯作者(Corresponding author): Huang Zhi-long, E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5895938

undergone extensive crustal contamination and fractional crystallization of olivine and pyroxene during emplacement. Our study suggests that the Jiasha intrusion has an age similar to the magma activities in the nearby Diandongnan-Guixi area, indicating that production of these magmatic rocks are possibly related to extension of lithosphere.

**Key words:** gabbros; monzonites; SIMS U-Pb zircon dating; geochemistry; extensional setting; Yunnan Province

## 0 引言

晚中生代时期, 华南西部的滇东-桂西地区岩浆活动强烈, 主要发育有基性岩、中性岩和酸性岩。该区亦是我国重要的 Sn、W、Cu、Ag、Pb 和 Zn 等有色金属资源分布区。个旧、大厂、都龙、白牛厂一系列世界级的锡多金属矿床皆产于此。其中个旧地区中生代岩浆活动更为强烈。发育有花岗质岩石、辉长岩、碱性岩和煌斑岩等<sup>[1-2]</sup>。前人对花岗岩进行过较多研究<sup>[3-11]</sup>。其中 Cheng *et al.*<sup>[11]</sup>认为个旧地区花岗岩形成过程中有少量地幔物质输入, 是一种壳幔同熔型花岗岩。而黎应书等<sup>[10]</sup>则认为个旧地区花岗岩是幔源成因花岗岩。加之个旧西区和东区发育的基性-超基性岩及煌斑岩, 可见, 个旧地区晚中生代的岩浆活动与地幔关系密切。为探讨地幔性质及演化, 通常基性、超基性岩可作为直接的、理想的研究对象。

基性岩在地球上分布广泛, 形态多样, 成因复杂。在探究地幔性质、壳幔相互作用以及地球各圈层物质循环等方面有重要意义<sup>[12]</sup>。而作为个旧地区晚中生代岩浆活动基性端元代表的贾沙辉长岩可作为该时期地幔性质研究的良好探针。如前所述, 前人对个旧地区花岗质岩石进行了岩石学、年代学及地球化学等方面详细的研究, 而对贾沙辉长-二长岩体的系统性研究却相对薄弱。陆杰<sup>[5]</sup>报道过云锡公司地勘队在 1975 年对贾沙辉长-二长岩体中的黑云母进行 Ar-Ar 同位素测年研究, 得到年龄值范围为 91.0~119 Ma 之间。王兴阵等<sup>[7]</sup>对其进行过地球化学方面的研究, 认为贾沙岩体来源于富集地幔。受限于以往的测试手段和实验条件, 贾沙岩体 91.0~119 Ma 的年龄跨度较大, 难以令人信服。因此, 本次研究通过选取贾沙辉长-二长岩体为研究对象, 对其进行更为精确的 SIMS 锆石 U-Pb 测年、主元素和微量元素地球化学研究, 以期解决如下几个方面的问题: (1) 精确厘定贾沙岩体的形成年龄; (2) 探讨地幔源区特点和岩石形成过程; (3) 探明滇东南-桂西

地区晚白垩纪大规模岩浆活动的动力学机制。

## 1 区域地质背景

个旧地区在大地构造位置上隶属于华夏地块西部的右江盆地(图 1)。其北部为扬子陆块, 西南面为哀牢山变质带, 南部为越北古陆。印支期形成了个旧地区主要的地质层: 上三叠统火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩; 中三叠统法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩和玄武质熔岩, 中三叠统个旧组碳酸盐岩; 下三叠统红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩。个旧是世界上最大规模的锡多金属矿田, 有色金属储量超过 1000 万 t, 锡资源量超过 200 万 t。矿区内断裂发育, 小江岩石圈断裂南缘的南北向个旧断裂将矿区划分为东、西两区(图 2)。其中西区 1100 km<sup>2</sup>, 东区近 600 km<sup>2</sup>, 矿床多位于东区, 汇集了个旧金属总储量的 90%。旧地东区的岩体主要为燕山期复式花岗岩体, 除白沙冲岩体外、马拉格-松树脚、老厂-卡房花岗岩体均为隐伏岩体。

个旧西区发育有乍甸-猛宗复式向斜, 其轴部有四角山-轿顶山次一级向斜。NNE 向纵向断裂较发育, 其中轿顶山断裂沿乍甸-猛宗复式向斜轴部延伸, 控制了西区岩浆岩的分布。沿轿顶山断裂两侧, 由南向北依次分布有贾沙辉长-二长岩体、龙岔河花岗岩体、神仙水花岗岩体以及白云山和长岭岗霞石正长岩体。本次研究的贾沙辉长-二长岩体位于西区贾沙一带, 岩体为一椭圆形岩盖, 面积约为 30 km<sup>2</sup>, 由辉长岩和二长岩组成。辉长岩与二长岩在岩体中呈不规则状分布。岩性变化范围通常从数米到几十米不等。岩体西南部侵入于上三叠统泥质灰岩中, 西北侧与龙岔河花岗岩体接触, 北侧、东侧、南侧与神仙水花岗岩体接触。岩体内有大量花岗岩脉、正长岩脉贯入, 致使岩体被分割。

## 2 岩石学特征

贾沙岩体主要由辉长岩和二长岩构成(图 3a 和 d)。

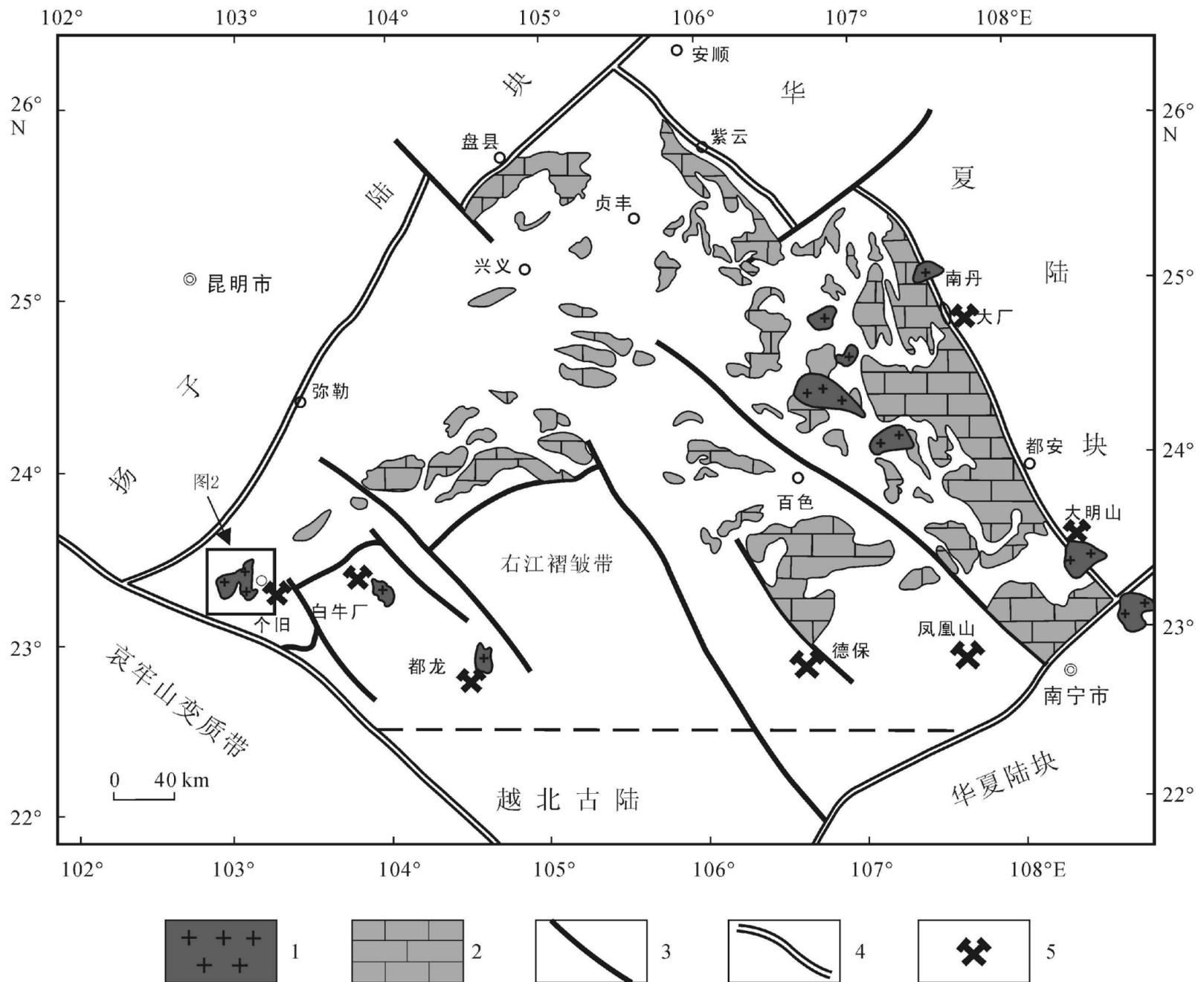


图1 右江褶皱带内构造、矿床分布及周边构造单元位置示意图(据文献[13]修改)

Fig.1 Structure and deposit distribution in the Youjiang fold belt and locations of surrounding tectonic units

1-花岗岩; 2-碳酸盐地层; 3-断裂; 4-地质单元边界; 5-锡矿床。

1-granite; 2-carbonate formations; 3-fault; 4-geologic unit boundaries; 5-tin ore deposit.

贾沙辉长岩主要矿物组成有斜长石、辉石和钾长石。副矿物包括角闪石、黑云母、磷灰石、榍石、褐帘石、钛铁矿和磁铁矿等。磷灰石、榍石、褐帘石多呈自形、半自形状, 穿插或镶嵌于钾长石等矿物中; 萤石多呈不规则形态充填于其他矿物颗粒间; 磁铁矿则主要分布于辉石、角闪石和黑云母等暗色矿物的边缘。辉石多已发生蚀变, 蚀变的辉石外围常有角闪石分布。部分黑云母和角闪石发生了绿泥石化, 长石发生了绢云母化等(图 3b)。尽管辉石发了较强的蚀变, 但是局部区域仍可见到典型的辉长结构(图 3c)。二长岩样品在颜色上较辉长岩浅, 暗色矿物含量降低。主要矿物有斜长石、钾长石、云母、角闪石、辉石和石英等(图 3e 和图 f)。副矿物主要是磷灰石、榍石、磁铁矿和锆石等。

### 3 分析方法

#### 3.1 主元素和微量元素分析

主元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成, 检测仪器为 X 荧光光谱仪(PANalytical AXIOS)。按要求制备的定量样品, 煅烧后加入  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2$  助熔物, 充分混和后, 放置在自动熔炼仪中, 使之在  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  以上熔融; 熔融物倒出后形成扁平玻璃片, 再用 X 荧光光谱分析。本方法分析的结果以氧化物表示。例如本方法里的铁是指全铁的含量, 以氧化亚铁表示, 而非三氧化二铁的含量。分析精度优于 5%。

微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室 ICP-MS 分析室完成。使用 Perkinelmen

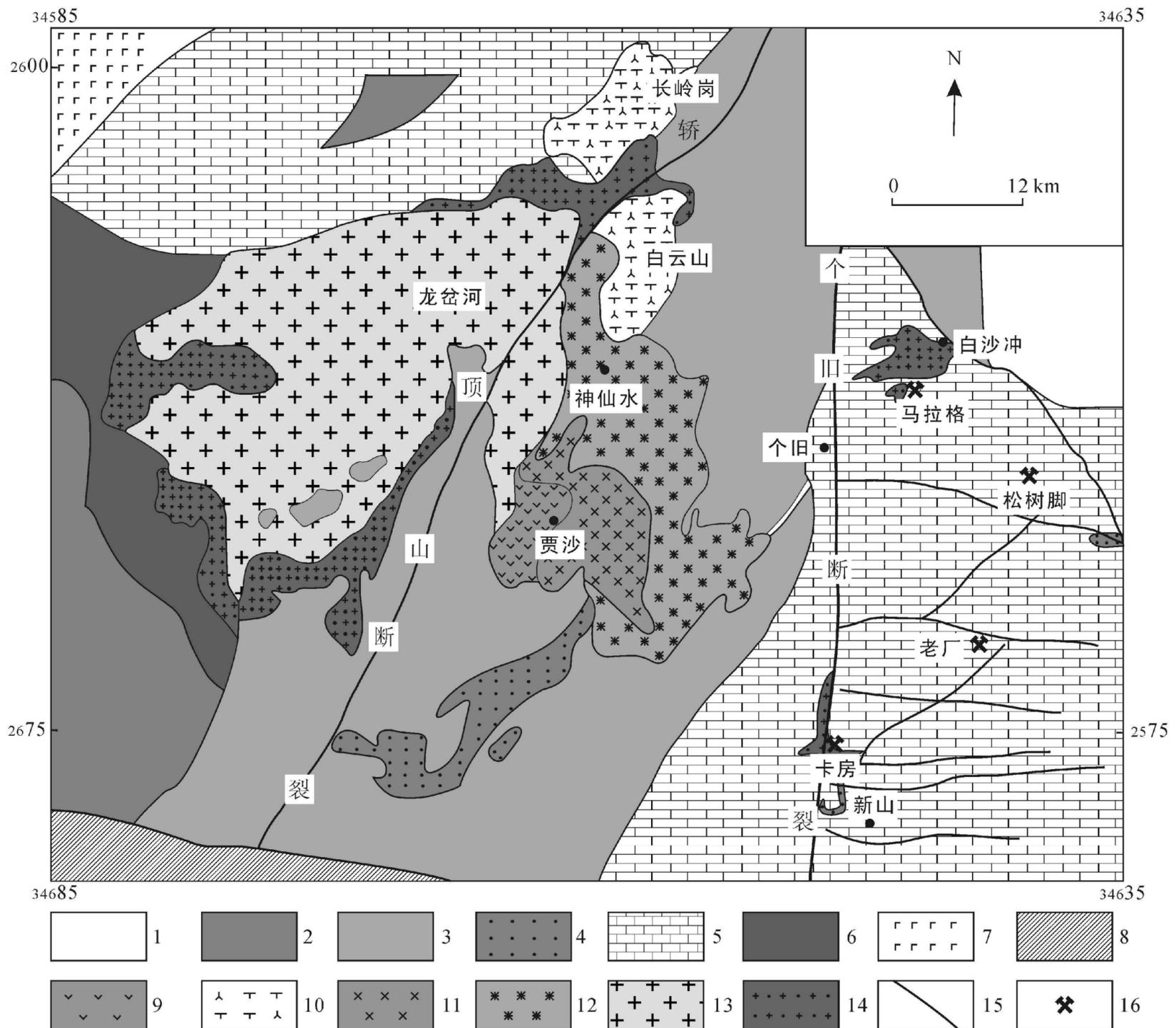


图2 云南个旧地区地质示意图(据文献[14]修编)

Fig.2 Sketch showing the geology in Gejiu area

1-第四系沉积物; 2-上三叠统火把冲组板岩、砂岩、砂砾岩; 3-中三叠统法郎组砂岩、页岩夹凝灰岩; 4-中三叠统法郎组变玄武质熔岩; 5-中三叠统个旧组碳酸盐岩; 6-下三叠统红色砂岩夹绿色砂岩、泥灰岩; 7-二叠纪峨眉山玄武岩; 8-哀牢山变质带; 9-辉长岩; 10-霞石正长岩; 11-二长岩; 12-碱长花岗岩体; 13-斑状黑云母花岗岩; 14-等粒黑云母花岗岩; 15-断裂; 16-矿区。

1-Quaternary sediments; 2-Upper Triassic slate, sandstone and glutinite of Huobachong Formation; 3-Middle Triassic sandstone, shale of the Falang Formation; 4-Middle Triassic basaltic lava of the Falang Formation; 5-Middle Triassic carbonate rock of the Gejiu Formation; 6-Lower Triassic purple sandstone intercalated with green sandstone and marlite of the Gejiu Formation; 7-Permian Ermei Mountain basalt; 8-Ailaoshan Mt. metamorphic zone; 9-gabbro-monzonite complex; 10-Nepheline Syenite; 11-monzonite; 12-alkali feldspar granite; 13-porphyrific biotite granite; 14-equigranular biotite granite; 15-fault; 16-mine.

公司生产的 ELAN DRC-e 型高分辨等离子质谱仪测试, 精度优于 10%。样品处理过程如下: 准确称取 50 mg 样品(200 目)放入装有洗净的聚四氟乙烯塑料溶样罐的不锈钢衬套中, 加入 1 mL HF, 在电热板上蒸干以去掉大部份  $\text{SiO}_2$ , 再加入 1 mL HF 和 0.5 mL  $\text{HNO}_3$ , 盖上盖拧紧, 在烘箱中于 200 °C 分解 40 h, 取出冷却后, 于电热板上低温蒸至近干, 加入 1 mL  $\text{HNO}_3$  再蒸干, 重复一次。最后加入 2 mL  $\text{HNO}_3$  和 5 mL 蒸馏水, 重新盖上盖子密封, 于 130 °C 溶解残渣 3 h,

再取出, 冷却后加入 500 ng Rh 内标溶液, 转移至 50 mL 离心管中待测。具体分析过程见文献[15]。稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )、轻重稀土比值(LREE/HREE)、( $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ )、 $\delta\text{Eu}$  的计算以及稀土元素分布模式图和微量元素蛛网图的制作根据 Geokit 软件<sup>[16]</sup>完成。

### 3.2 SIMS 锆石 U-Pb 定年

用于 U-Pb 年龄测定的样品(HTWP-02)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

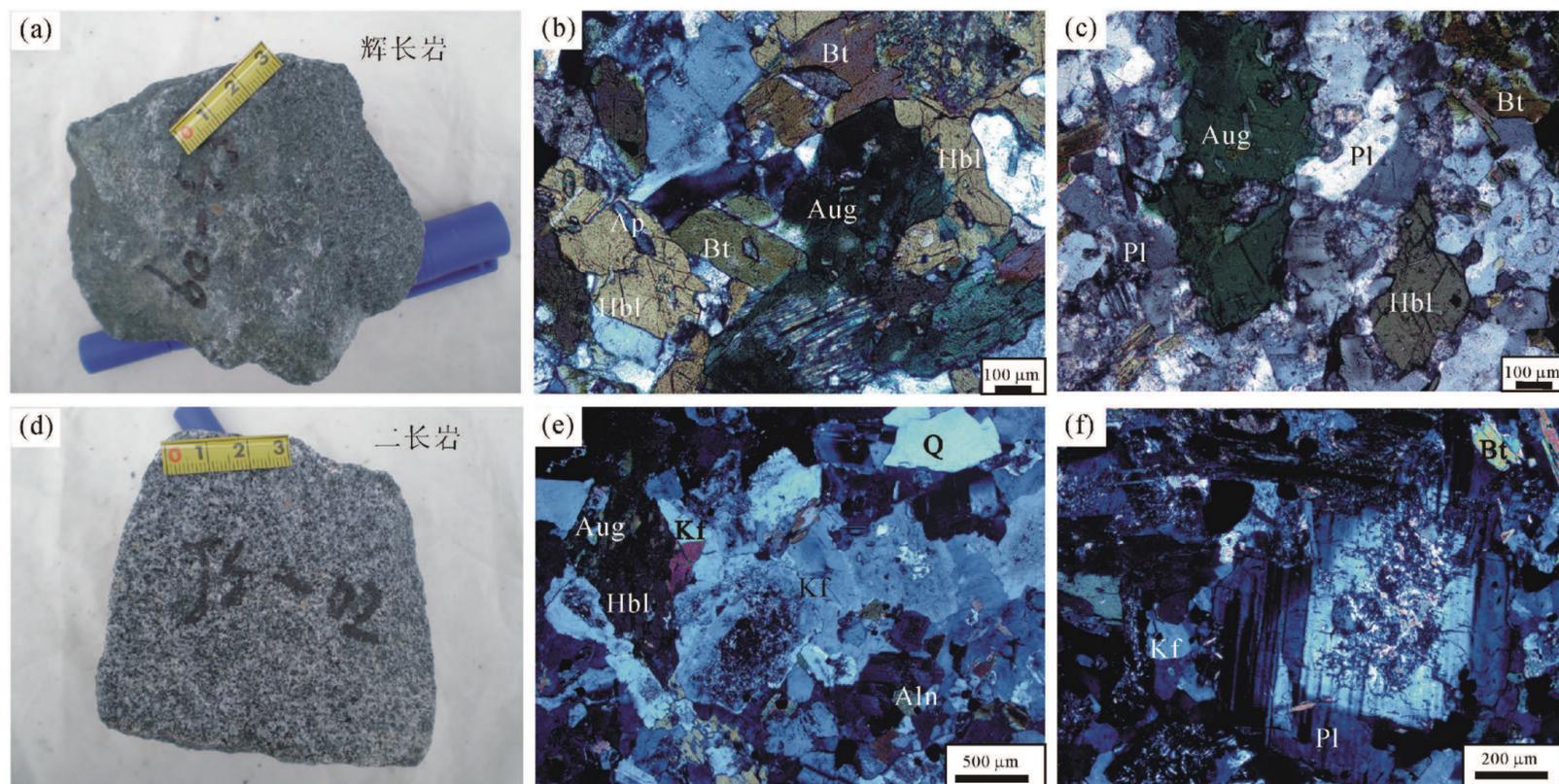


图3 贾沙岩体镜下特征

Fig.3 Microscopic photographs of the Jiasha body

Aug-普通辉石; Ap-磷灰石; Bt-黑云母; Hbl-通角闪石; Kf-钾长石; Pl-斜长石; Q-石英。

Aug-augite; Ap-apatite; Bt-biotite; Hbl-hornblende; Kf-potassium feldspar; Pl-plagioclase; Q-quartz.

标样TEMORA<sup>[17]</sup>和Qinghu<sup>[18]</sup>粘贴在环氧树脂靶上,然后抛光使其曝露一半晶面。对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图象分析,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。

U、Th和Pb的测定在中国科学院地质与地球物理研究所CAMECA IMS-1280二次离子质谱仪(SIMS)上进行,详细分析方法见文献[18]。锆石标样与锆石样品以1:3比例交替测定。U-Th-Pb同位素比值用标准锆石TEMORA (417 Ma)<sup>[16]</sup>校正获得,U含量采用标准锆石91500 (81 μg/g)<sup>[19]</sup>校正获得,以长期监测标准样品获得的标准偏差 (1 SD = 1.50%)<sup>[20]</sup>和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差,以标准样品Qinghu(159.5 Ma)<sup>[18]</sup>作为未知样监测数据的精确度。普通Pb校正采用实测<sup>204</sup>Pb值。由于测得的普通Pb含量非常低,假定普通Pb主要来源于制样过程中带入的表面Pb污染,以现代地壳的平均Pb同位素组成<sup>[21]</sup>作为普通Pb组成进行校正。同位素比值及年龄误差均为1σ。数据结果处理采用ISOPLOT软件<sup>[22]</sup>完成。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

贾沙辉长岩中的锆石多以灰白色、淡棕色为主,

颗粒较小,多呈不规则状,一般介于30~100 μm之间(图4a)。阴极发光(CL)图像显示大部分锆石具有明显的密集震荡环带,表明是岩浆锆石。本次研究选取了17个颗粒进行17个点的测定,其中点HC-5@1因U和Th含量过高而去除(U为13927 μg/g, Th为5212 μg/g)。从所测的同位素比值和年龄数据(见表1)可以看出锆石具有较高的Th/U值(0.21~0.72),属于岩浆成因锆石范围<sup>[23-24]</sup>。16个有效测点的Th含量变化于189~1471 μg/g之间,U含量变化于394~3431 μg/g之间,且两者呈现较好的正相关关系,与岩浆锆石特征一致。

分析结果在谐和图上呈密集分布(图4b和c),表明锆石形成以后,U-Pb同位素体系保持了封闭,故测定值可信。锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄为(84.0±0.6)Ma,MSWD(of concordance)值为0.10。

### 4.2 主元素

贾沙辉长-二长岩体的主元素和微量元素分析数据见表2。辉长岩样品与中国及世界辉长岩的平均化学成分相比<sup>[25]</sup>,富硅(SiO<sub>2</sub>为47.3%~53.5%,平均50.9%),富碱(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O=7.4%~8.9%)、富铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为17.0%~20.1%),CaO为5.40%~7.80%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为6.7%~9.4%,TiO<sub>2</sub>为0.80%~1.30%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为0.30%~1.20%。同典型的板内玄武岩(TiO<sub>2</sub>>2.00%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>0.30%)<sup>[26]</sup>相

表 1 贾沙岩体 SIMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果  
Table 1 The zircon U-Pb dating of Jiasha pluton by SIMS method

分析号	U ( $\mu\text{g/g}$ )	Th ( $\mu\text{g/g}$ )	Th/U	$f_{206}^{\#}$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$t_{207/235}$ (Ma)	$\pm 1\sigma$ (%)	$t_{206/238}$ (Ma)	$\pm 1\sigma$ (%)
HC-5@1	13927	5212	0.374	0.59	0.0475	2.30	0.0810	3.47	0.0124	2.60	79.1	2.6	79.2	2.0
HC-5@2	955	574	0.601	0.03	0.0477	1.75	0.0859	2.32	0.0131	1.52	83.7	1.9	83.6	1.3
HC-5@3	2137	559	0.262	0.02	0.0478	1.09	0.0884	1.86	0.0134	1.50	86.0	1.5	86.0	1.3
HC-5@4	1387	354	0.255	0.00	0.0476	1.39	0.0863	2.05	0.0132	1.50	84.0	1.7	84.2	1.3
HC-5@5	1243	458	0.369	0.23	0.0471	1.83	0.0846	2.38	0.0130	1.52	82.4	1.9	83.3	1.3
HC-5@6	911	244	0.267	0.00	0.0493	1.69	0.0887	2.26	0.0130	1.50	86.3	1.9	83.5	1.2
HC-5@7	2168	986	0.455	0.08	0.0480	1.45	0.0887	2.13	0.0134	1.56	86.3	1.8	85.8	1.3
HC-5@8	1013	716	0.707	0.06	0.0477	1.62	0.0863	2.23	0.0131	1.54	84.1	1.8	84.1	1.3
HC-5@9	1007	282	0.280	0.00	0.0480	1.64	0.0877	2.24	0.0132	1.53	85.4	1.8	84.8	1.3
HC-5@10	927	256	0.276	0.00	0.0467	1.73	0.0847	2.30	0.0132	1.51	82.5	1.8	84.3	1.3
HC-5@11	1529	506	0.331	0.07	0.0472	2.22	0.0854	2.68	0.0131	1.51	83.2	2.1	84.0	1.3
HC-5@12	394	285	0.723	0.09	0.0468	3.91	0.0830	4.21	0.0129	1.56	81.0	3.3	82.4	1.3
HC-5@13	1234	374	0.303	0.00	0.0484	2.14	0.0856	2.62	0.0128	1.51	83.4	2.1	82.2	1.2
HC-5@14	3431	1471	0.429	0.03	0.0480	0.85	0.0879	1.74	0.0133	1.51	85.5	1.4	85.1	1.3
HC-5@15	1504	435	0.289	0.09	0.0464	1.84	0.0838	2.37	0.0131	1.51	81.7	1.9	83.9	1.3
HC-5@16	921	189	0.205	0.03	0.0475	1.61	0.0856	2.21	0.0131	1.51	83.4	1.8	83.7	1.3
HC-5@17	1400	507	0.362	0.18	0.0483	1.48	0.0874	2.12	0.0131	1.51	85.1	1.7	84.0	1.3

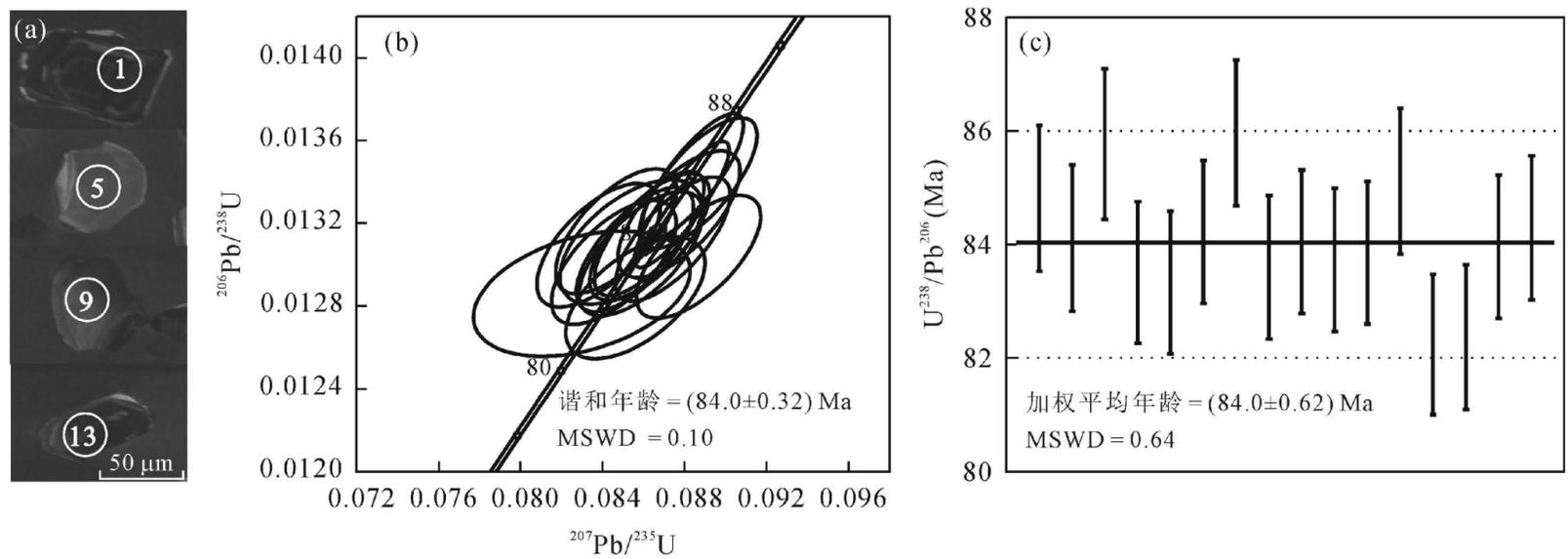


图 4 贾沙辉长岩锆石 CL 图像与锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig.4 CL images of zircons and zircon U-Pb concordia diagram of the Jiasha gabbro

比, 贾沙辉长岩具有富  $Al_2O_3$ 、富  $P_2O_5$ 、低  $TiO_2$  的特点。此外, 贾沙辉长岩的主元素特征又明显不同于岛弧玄武岩( $Al_2O_3 < 16\%$ ,  $TiO_2 < 1\%$ ,  $P_2O_5 < 0.30\%$ ) 和活动大陆边缘玄武岩( $Al_2O_3 > 17.0\%$ ,  $TiO_2 < 1.20\%$ ,  $P_2O_5 < 0.40\%$ )<sup>[26]</sup>。

二长岩样品的  $SiO_2$  为  $54.5\% \sim 60.0\%$ , 平均  $57.6\%$ 。 $K_2O + Na_2O$  为  $7.3\% \sim 10.1\%$ , 平均  $8.70\%$ ;  $Al_2O_3$  为  $16.5\% \sim 18.6\%$ , 平均  $17.2\%$ ;  $CaO$  为  $3.90\% \sim 5.60\%$ , 平均  $4.90\%$ ;  $Fe_2O_3$  为  $5.60\% \sim 7.20\%$ , 平均  $6.50\%$ ;  $TiO_2$  为  $0.60\% \sim 1.10\%$ , 平均  $0.80\%$ ;  $P_2O_5$  为  $0.30\% \sim 0.70\%$ , 平

均  $0.50\%$ 。

在全碱-硅(TAS)图解(图 5)<sup>[27]</sup>中, 贾沙岩体的样品从辉长岩向二长岩过渡。辉长岩的  $Mg\#$  值为  $34.8 \sim 47.5$ , 平均  $40.3$ 。二长岩的  $Mg\#$  值为  $24.2 \sim 43.7$ , 平均  $36.6$ 。贾沙岩体  $Mg\#$  值较低, 反映了岩浆的演化程度较高。该岩体的固结指数  $SI$  为  $6.3 \sim 19.9$ , 平均  $13.5$ 。贾沙岩体如此之低的  $SI$  值, 反映该岩体在岩浆演化过程中分离结晶程度较高。在哈克图解(图 6)上, 样品的  $CaO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$ 、 $Fe_2O_3$  与  $MgO$  呈正相关关系, 而  $K_2O$ 、 $Na_2O$  和  $SiO_2$  则与  $MgO$  呈负相

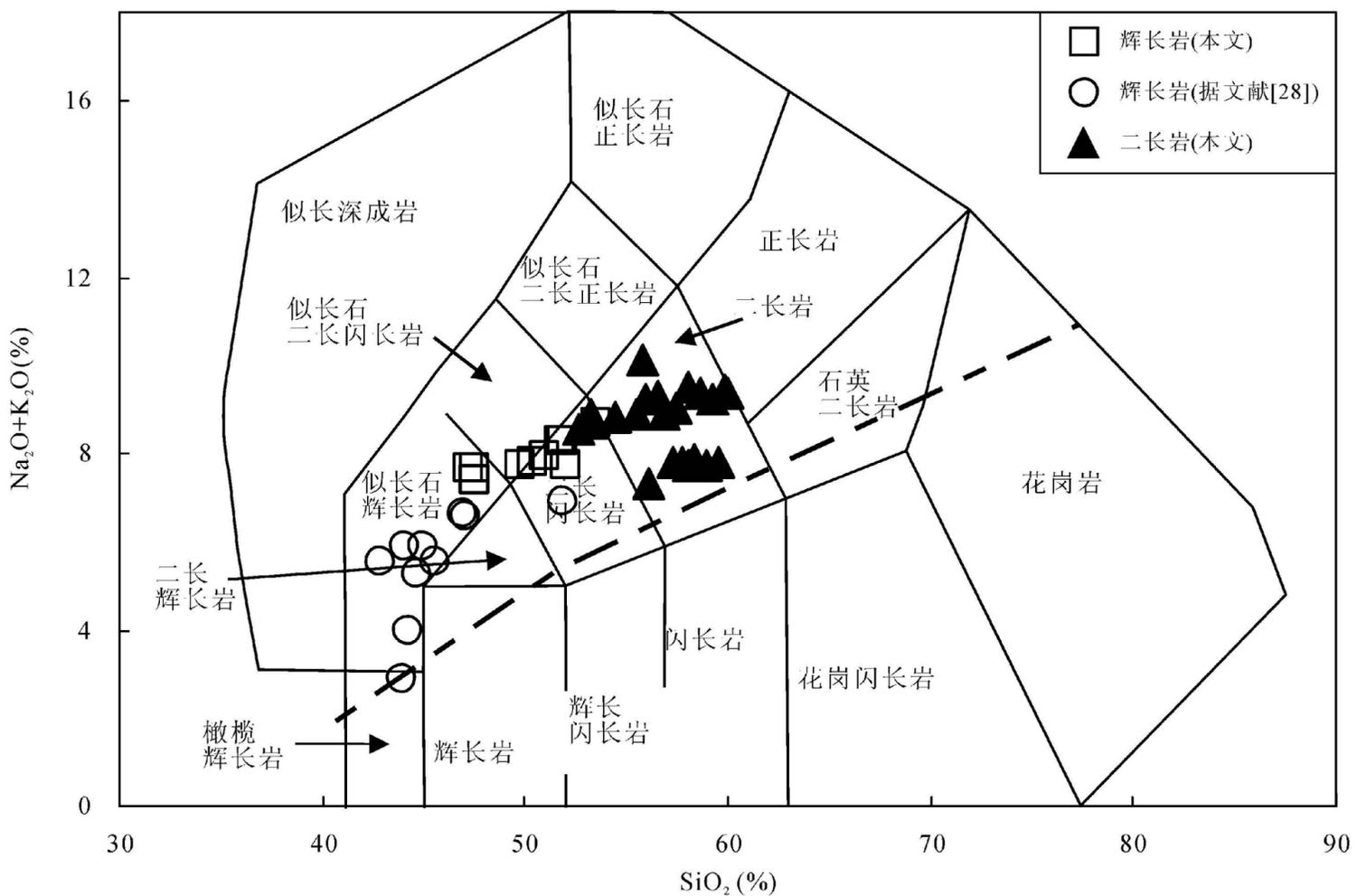


图 5 贾沙岩体全碱-硅(TAS)图解

Fig.5 TAS diagram of the Jiasha body

表2 贾沙岩体主元素(%)和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )组成  
Table 2 Major (%) and trace ( $\mu\text{g/g}$ ) element compositions of the Jiasha pluton

岩性	辉长岩										二长岩									
	HTWP-02	HTW-08	HTW-09	HTW-18	HTW-19	HTW-20	JS-7	JS-9	JS-10	JS-11	HTWP-04	HTWP-05	HTW-17	HTW-01	HTW-02	HTW-03				
SiO <sub>2</sub>	47.5	51.9	51.7	49.8	50.4	51.0	53.5	47.3	47.5	52.0	53.3	53.3	52.7	57.3	58.4	58.0				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.0	17.7	17.5	17.8	18.2	18.0	17.5	17.5	18.2	17.0	20.1	20.1	19.7	17.0	17.1	17.1				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.25	8.16	8.24	8.37	8.67	8.26	7.92	9.31	9.40	8.30	6.83	6.83	7.10	6.68	6.67	6.69				
CaO	5.85	6.35	6.39	7.24	7.47	7.08	5.42	6.88	7.77	6.15	6.04	6.04	6.30	5.31	5.31	5.33				
MgO	3.38	3.41	3.49	3.32	3.42	3.22	2.13	4.01	4.08	3.79	1.32	1.30	1.35	2.37	2.36	2.37				
Na <sub>2</sub> O	2.99	3.06	3.03	3.13	3.01	3.20	3.19	2.20	2.65	2.92	2.80	2.87	2.52	2.78	2.79	2.77				
K <sub>2</sub> O	4.42	5.22	5.27	4.59	4.80	4.74	5.52	5.48	5.01	4.82	5.92	6.00	6.06	5.00	5.05	4.99				
TiO <sub>2</sub>	1.02	1.12	1.14	1.02	1.04	0.99	1.27	1.19	1.24	1.25	0.82	0.81	0.86	1.01	0.99	1.00				
MnO	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.14	0.14	0.17	0.17	0.15	0.16	0.16	0.16	0.11	0.11	0.11				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.02	0.91	0.92	1.00	1.06	0.98	0.56	1.11	1.15	0.76	0.27	0.28	0.28	0.53	0.53	0.52				
LOI	5.27	1.41	1.13	1.65	1.82	2.26	0.72	2.62	1.94	1.16	1.43	2.18	1.56	1.44	1.26	1.53				
Total	98.6	99.9	99.4	98.7	100.5	100.5	98.3	98.5	99.8	98.7	99.7	100.0	99.3	99.9	101.0	100.5				
Mg <sup>#</sup>	45	45	46	44	44	44	35	46	46	47	28	28	27	41	41	41				
Ba	4070	2890	2890	3370	3550	3450	2270	3870	3700	2310	3250	3450	3650	2030	2040	1950				
Rb	204	227	227	182	180	192	189	211	192	216	224	254	193	224	225	220				
Sr	2000	1380	1380	1840	1890	1870	1060	1960	1800	1070	2400	2450	2580	894	900	862				
Ta	2.07	1.62	1.62	1.90	1.91	2.11	2.56	2.10	2.13	2.15	2.71	2.86	2.94	1.75	1.79	1.78				
Nb	45.9	33.8	33.8	42.9	44.0	44.6	53.1	47.5	47.8	40.7	58.3	61.5	63.7	35.6	34.6	35.2				
Hf	7.97	8.79	8.79	7.73	7.49	8.42	8.78	7.06	6.93	8.13	7.81	9.05	8.25	6.25	8.25	6.87				
Zr	398	430	430	393	407	426	447	372	351	384	469	518	467	269	382	299				
Th	63.7	50.2	50.2	67.5	64.0	68.7	48.2	59.5	56.9	50.8	64.3	71.2	64.5	41.6	49.0	42.8				
U	10.5	7.4	7.4	10.9	9.8	14.2	6.9	9.8	8.6	6.8	9.6	13.4	6.9	5.8	7.2	7.4				
Cr	9.16	10.5	10.5	10.3	7.84	13.0	5.57	6.91	6.59	10.6	8.99	12.0	5.24	17.6	14.8	13.2				
Ni	11.7	11.2	11.2	12.3	12.6	13.8	5.12	13.9	13.6	14.0	4.34	6.31	2.91	10.6	6.55	7.19				
Sc	9.94	12.6	12.6	9.17	9.48	10.3	11.3	11.0	11.3	15.1	4.38	4.20	3.95	14.1	14.5	12.5				
V	139.00	128	128	136	143	148	99	172	171	148	97.0	99.5	106	104	105	96.7				
Pb	47.73	35.2	35.2	55.9	57.6	63.7	43.9	39.6	37.8	28.0	69.3	83.1	56.0	43.1	38.0	37.3				
Co	38.10	39.0	39.0	48.6	46.2	56.3	57.0	39.7	57.7	52.1	60.1	73.1	72.2	83.8	74.8	88.7				
La	222	180	180	222	224	214	171	213	230	169	213	223	232	132	132	115				
Ce	385	318	318	381	392	372	307	386	407	310	353	370	386	234	234	217				
Pr	40.00	33.7	33.7	39.7	40.3	40.4	33.0	41.8	42.6	34.0	34.9	36.2	38.1	25.6	25.6	24.6				
Nd	134	116	116	132	135	135	111	145	142	116	112	116	119	89.5	88.1	84.6				
Sm	19.3	17.6	17.6	19.3	20.0	19.6	16.3	22.0	20.7	18.0	15.8	16.3	17.2	13.2	13.1	13.6				

(续表 2)

岩性		二长岩																
		HTWP-02	HTW-08	HTW-09	HTW-18	HTW-19	HTW-20	JS-7	JS-9	JS-10	JS-11	HTWP-04	HTWP-05	HTW-17	HTW-01	HTW-02	HTW-03	
Eu	3.97	3.56	3.93	4.31	4.01	3.99	5.57	5.09	4.21	3.64	3.67	3.81	2.68	2.63	3.13			
Gd	12.0	11.4	11.5	12.1	10.7	12.3	16.6	16.0	13.9	9.56	10.4	10.1	8.27	8.21	10.9			
Tb	1.58	1.48	1.54	1.60	1.61	1.50	1.79	1.71	1.62	1.43	1.46	1.48	1.27	1.26	1.28			
Dy	6.99	6.64	6.75	6.98	6.74	7.19	7.48	7.35	7.08	6.59	6.82	6.85	6.08	5.99	5.60			
Ho	1.28	1.26	1.19	1.30	1.26	1.44	1.38	1.36	1.29	1.32	1.37	1.33	1.16	1.22	1.14			
Er	3.32	3.37	3.26	3.41	3.17	3.83	3.62	3.47	3.41	3.34	3.80	3.83	2.97	3.09	3.00			
Tm	0.38	0.44	0.43	0.41	0.40	0.52	0.42	0.41	0.45	0.45	0.49	0.49	0.41	0.45	0.40			
Yb	2.55	2.63	2.53	2.50	2.72	3.54	2.84	2.79	2.96	2.83	3.08	2.93	2.68	2.76	2.80			
Lu	0.36	0.40	0.35	0.36	0.38	0.51	0.39	0.38	0.43	0.40	0.44	0.42	0.41	0.42	0.38			
ΣREE	833	696	826	844	812	673	848	881	682	758	793	824	520	519	483			
ΣLREE	804	669	798	816	785	642	813	847	651	732	765	796	497	495	458			
ΣHREE	28.5	27.6	27.6	28.7	27.0	30.8	34.6	33.5	31.1	25.9	27.9	27.4	23.2	23.4	25.5			
ΣLREE/ΣHREE	28.2	24.3	28.9	28.4	29.1	20.8	23.5	25.3	20.9	28.3	27.5	29.0	21.4	21.2	18.0			
(La/Yb) <sub>N</sub>	62.4	49.1	62.9	64.3	56.4	34.6	53.8	59.1	41.0	54.0	51.9	56.8	35.3	34.3	29.5			
δEu	0.74	0.72	0.74	0.78	0.77	0.83	0.85	0.82	0.78	0.84	0.81	0.81	0.73	0.72	0.76			
岩性		二长岩																
		HTW-04	HTW-05	HTW-06	HTW-07	SFZ-01	SFZ-02	WC-01	WC-02	WC-03	WY-01	WY-02	WY-03	WY-04	WY-05	JS-2	JS-5	
SiO <sub>2</sub>	57.7	59.0	59.6	56.5	56.8	57.4	54.5	56.0	58.1	60.0	58.6	55.5	59.3	59.9	56.1	55.9		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.1	16.6	16.7	18.6	17.3	17.4	17.5	17.4	17.1	16.9	17.2	16.5	17.5	17.0	16.5	18.2		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.85	6.29	6.19	7.05	6.44	6.54	6.93	6.79	6.20	5.56	6.02	5.84	5.97	5.98	7.24	6.95		
CaO	5.38	4.92	4.87	4.32	4.62	4.64	5.35	5.23	4.73	4.60	4.87	4.48	4.86	4.59	5.56	3.87		
MgO	2.43	2.28	2.23	1.62	1.93	1.94	2.24	2.18	1.97	1.62	1.80	1.72	1.74	1.76	2.84	1.12		
Na <sub>2</sub> O	2.77	2.69	2.74	3.35	3.19	3.21	3.56	3.42	3.31	3.38	3.48	3.31	3.76	3.36	2.50	3.57		
K <sub>2</sub> O	5.02	5.01	5.08	5.96	5.74	5.82	5.26	5.84	6.19	6.03	5.91	5.62	5.49	6.07	4.81	6.55		
TiO <sub>2</sub>	1.01	0.93	0.91	1.04	0.79	0.78	0.84	0.82	0.75	0.65	0.71	0.69	0.70	0.70	1.08	0.62		
MnO	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.13	0.14		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.52	0.49	0.49	0.45	0.57	0.57	0.65	0.63	0.57	0.50	0.55	0.55	0.54	0.55	0.59	0.28		
LOI	1.36	1.25	1.53	1.34	1.56	1.61	1.31	1.26	0.86	0.59	0.81	0.52	0.64	0.44	1.12	0.83		
Total	101	99.9	101	101	99.4	101	98.8	101	101	101	101	95.3	101	101	98.8	98.2		
Mg <sup>#</sup>	41	42	42	31	37	37	39	39	39	37	37	37	37	37	44	24		
Ba	1960	1790	1790	2030	2170	2280	2990	2890	2570	2650	2520	2600	2250	2500	1800	1260		
Rb	213	226	234	211	258	267	213	218	223	250	238	260	236	248	211	152		
Sr	837	795	812	896	1140	1150	1630	1580	1360	1510	1570	1650	1370	1510	832	883		
Ta	1.84	1.91	1.85	2.16	2.20	2.29	2.31	2.15	2.03	2.97	2.13	2.08	2.04	2.62	1.91	3.13		

(续表 2)

岩性		二长岩														
样号	HTW-04	HTW-05	HTW-06	HTW-07	SFZ-01	SFZ-02	WC-01	WC-02	WC-03	WY-01	WY-02	WY-03	WY-04	WY-05	JS-2	JS-5
Nb	36.0	35.2	33.5	52.9	43.2	45.8	43.9	40.6	39.5	43.0	41.4	42.6	40.4	45.3	35.1	71.8
Hf	8.57	6.20	5.98	11.0	7.43	9.92	10.0	10.50	10.19	7.20	7.61	7.55	7.55	6.42	6.75	9.84
Zr	373	261	243	518	354	494	472	523	475	314	333	355	373	298	308	512
Th	45.3	44.0	46.3	71.2	73.7	69.5	82.8	87.3	87.3	60.8	67.7	63.7	75.9	78.9	44.5	13.1
U	7.45	7.68	7.71	6.62	9.52	9.34	12.6	13.3	13.8	12.3	11.3	10.5	14.4	10.9	5.65	5.74
Cr	13.1	23.4	14.1	14.7	4.52	19.1	7.76	12.2	7.08	10.6	6.90	9.86	12.3	6.14	10.3	4.80
Ni	7.42	12.7	8.90	7.02	4.17	9.87	6.48	8.35	5.84	6.79	4.79	5.73	6.67	4.01	8.79	3.43
Sc	12.8	11.5	11.9	8.63	9.16	8.08	7.72	7.99	7.53	9.84	9.09	9.75	8.94	8.62	16.0	7.12
V	96.8	75.7	74.4	57.0	73.5	74.2	93.1	90.0	78.4	87.0	93.4	91.7	86.1	83.1	108	31.2
Pb	37.9	37.2	35.6	53.2	47.6	48.5	61.9	51.3	49.5	60.2	63.7	58.5	58.2	61.4	30.6	38.4
Co	69.6	75.0	65.0	53.8	56.2	55.8	48.6	51.1	66.6	76.4	60.4	55.2	52.0	52.7	78.9	61.0
La	130	101	125	220	185	194	257	246	219	186	190	183	198	182	144	87.3
Ce	243	193	229	385	318	338	461	431	380	312	324	321	323	307	260	190
Pr	26.1	22.3	25.2	39.4	32.8	34.5	46.7	44.9	39.6	32.4	34.7	33.2	32.1	31.5	28.1	20.2
Nd	87.4	80.1	88.1	128	111	112	156	152	132	105	108	105	102	102	96.1	68.0
Sm	14.0	12.9	13.2	18.7	15.3	16.9	22.3	20.9	18.9	15.4	15.6	14.8	14.5	14.4	14.9	11.1
Eu	3.31	3.06	3.14	3.59	3.83	3.95	5.16	4.98	4.40	3.42	3.61	3.42	3.42	3.29	3.48	2.94
Gd	11.7	10.8	10.9	14.2	12.3	12.9	16.9	16.3	14.9	11.1	10.7	9.53	10.1	9.84	11.5	8.95
Tb	1.36	1.25	1.32	1.66	1.43	1.55	1.89	1.72	1.58	1.33	1.32	1.19	1.24	1.22	1.34	1.24
Dy	5.93	5.46	5.70	7.20	6.06	6.65	7.45	7.08	6.21	5.78	5.42	5.11	4.99	5.41	6.36	6.03
Ho	1.21	1.09	1.10	1.40	1.18	1.31	1.41	1.32	1.16	1.07	1.00	0.95	0.93	1.00	1.22	1.24
Er	3.24	2.92	2.94	3.83	3.30	3.53	3.88	3.63	3.10	2.88	2.69	2.52	2.49	2.61	3.18	3.40
Tm	0.43	0.37	0.39	0.50	0.41	0.43	0.50	0.47	0.42	0.36	0.32	0.34	0.30	0.36	0.42	0.47
Yb	2.79	2.52	2.41	3.25	2.78	2.96	3.12	2.94	2.76	2.49	2.16	2.18	2.12	2.34	2.77	3.09
Lu	0.40	0.34	0.34	0.45	0.38	0.45	0.45	0.41	0.39	0.37	0.33	0.30	0.30	0.33	0.40	0.45
ΣREE	531	437	509	827	694	729	984	934	824	680	700	683	695	663	574	404
ΣLREE	504	412	484	795	666	699	948	900	794	654	676	660	673	640	547	380
ΣHREE	27.0	24.8	25.1	32.5	27.8	29.8	35.6	33.9	30.5	25.3	23.9	22.1	22.5	23.1	27.2	24.9
ΣLREE/ΣHREE	18.7	16.6	19.3	24.5	23.9	23.5	26.6	26.6	26.0	25.8	28.2	29.9	30.0	27.7	20.1	15.3
(La/Yb) <sub>N</sub>	33.4	28.7	37.2	48.6	47.7	47.0	59.1	60.0	56.9	53.6	63.1	60.2	67.0	55.8	37.3	20.3
δEu	0.77	0.77	0.78	0.65	0.83	0.79	0.78	0.80	0.77	0.76	0.81	0.82	0.82	0.80	0.78	0.87

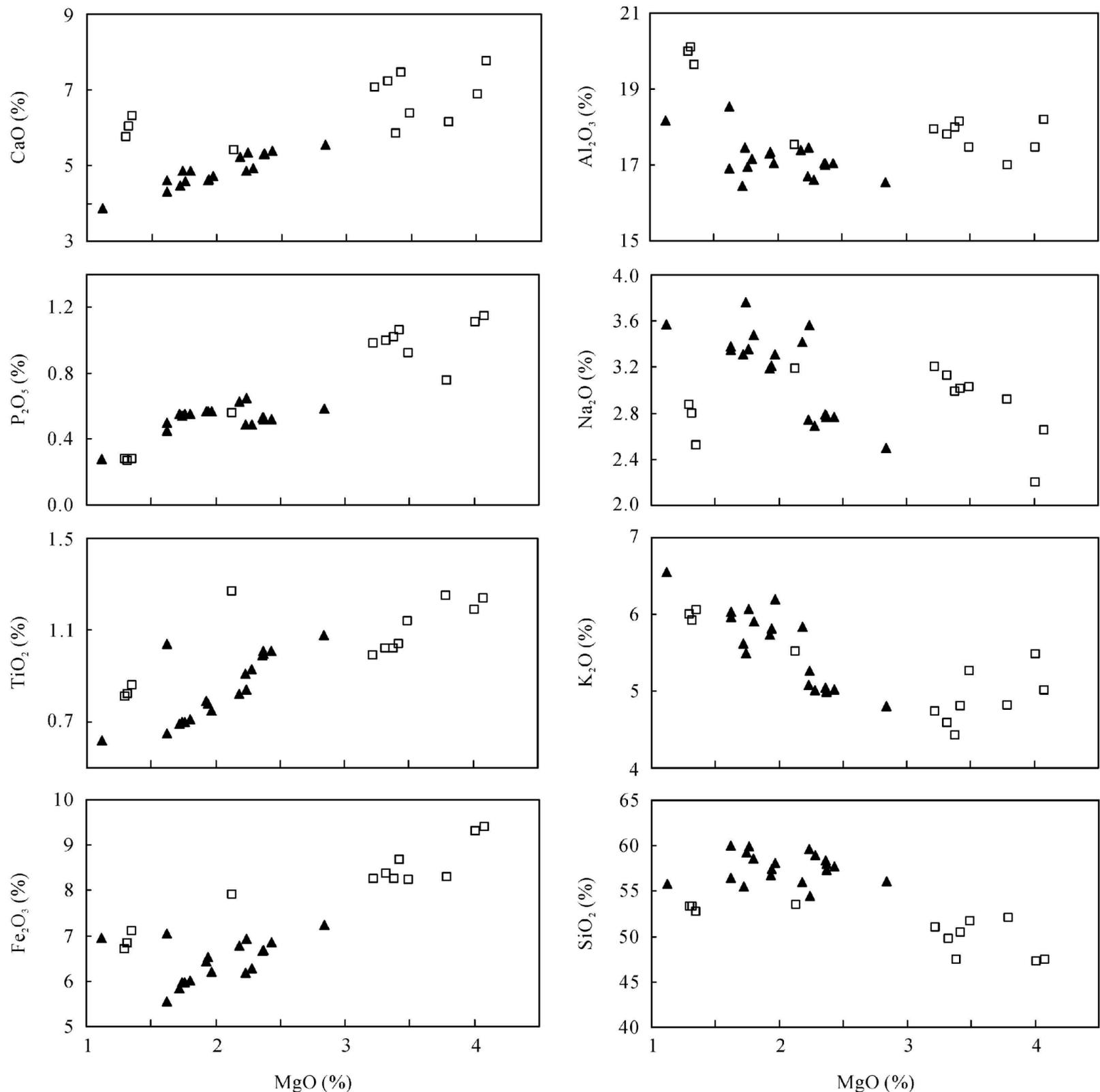


图6 贾沙岩体哈克图解(样品符号同图5)

Fig.6 Harker diagram of the Jiasha body (Symbol is as Fig.5)

关系。结合该岩体较低的镁指数及  $\text{TiO}_2$  含量, 表明该岩体经历了长石矿物、磷灰石以及铁镁质矿物的分离结晶。

#### 4.3 微量元素和稀土元素

贾沙辉长-二长岩体的微量元素和稀土元素的数据列于表2中。辉长岩的稀土元素数据显示, 稀土总量较大,  $\sum\text{REE}$  在  $673\sim 881\ \mu\text{g/g}$  之间, 平均  $789\ \mu\text{g/g}$ 。明显高出 Sun *et al.*<sup>[29]</sup> 给出的 N-MORB ( $39.1\ \mu\text{g/g}$ )、E-MORB ( $49.1\ \mu\text{g/g}$ ) 和 OIB ( $198\ \mu\text{g/g}$ )。轻稀土( $\sum\text{LREE}$ ) 含量为  $642\sim 847\ \mu\text{g/g}$ , 平均  $756\ \mu\text{g/g}$ 。重稀土( $\sum\text{HREE}$ ) 含量为  $25.9\sim 34.6\ \mu\text{g/g}$ , 平均  $29.2\ \mu\text{g/g}$ 。轻稀土富集,

( $\text{La/Yb}$ )<sub>N</sub> 为  $34.7\sim 64.3$ , 平均  $53.9$ 。具弱的 Eu 负异常,  $\text{Eu/Eu}^*$  比值为  $0.72\sim 0.85$ 。

同辉长岩稀土特征相似, 二长岩稀土总量也较大,  $\sum\text{REE}$  在  $404\sim 984\ \mu\text{g/g}$  之间, 平均  $652\ \mu\text{g/g}$ , 轻稀土含量为  $380\sim 948\ \mu\text{g/g}$ , 平均  $625\ \mu\text{g/g}$ 。重稀土含量为  $22.1\sim 35.6\ \mu\text{g/g}$ , 平均  $26.7\ \mu\text{g/g}$ 。轻稀土富集, ( $\text{La/Yb}$ )<sub>N</sub> 为  $20.3\sim 67.0$ , 平均  $46.1$ 。Eu 负异常不明显,  $\text{Eu/Eu}^*$  比值在  $0.65\sim 0.87$  之间。由以上可知出贾沙岩体轻稀土富集, 重稀土亏损, 稀土分布模式呈右倾型(图7a和c)。

由微量元素测试结果及原始地幔标准化蛛网图(图7b和7d)可知, 相对于原始地幔, 贾沙岩体富集大离子亲石元素, 如 Rb、K 和 Pb 以及轻稀土(LREE), 亏

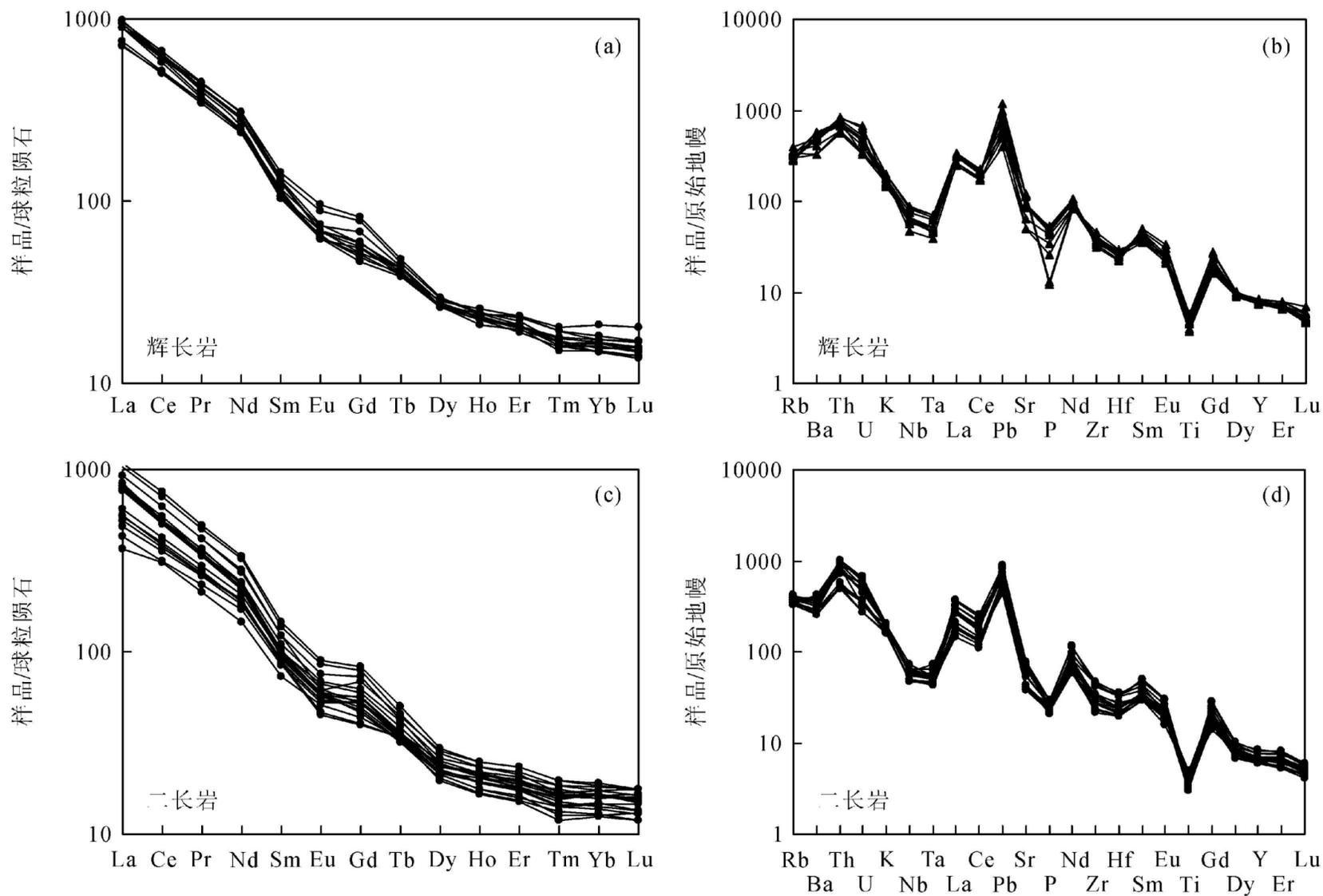


图7 贾沙岩体稀土元素分布模式和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Jiasha body

损高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta 和 P。

## 5 讨论

### 5.1 地壳混染与分离结晶

地壳混染是指地幔来源的玄武质熔体在上升过程中同化了围岩,致使玄武质熔体在微量元素和同位素特征上发了一定的变化<sup>[30]</sup>。地壳物质中大离子亲石元素含量较高。相对于地幔原始岩浆,被地壳

物质混染过的岩浆具有较低的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值和较高的 Zr/Nb 和 Th/Nb 比值。贾沙辉长岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值为  $-6.25 \sim -5.49$ <sup>[11]</sup>。贾沙辉长岩的 Zr/Nb 比值为 7.34~12.7, 变化范围较大, 接近下地壳成分(图 8a), 表明岩浆上升过程中发生了地壳混染。Th 和 Nb 都是强不相容元素, 通常部分熔融和结晶分异过程都不影响 Th/Nb 比值, 所以 Th/Nb 比值有着和同位素体系相似的示踪能力, 故它能反映岩浆是否受过混染<sup>[33]</sup>。贾沙辉长岩 Th/Nb 比值为 0.91~1.57, 均值为 1.34,

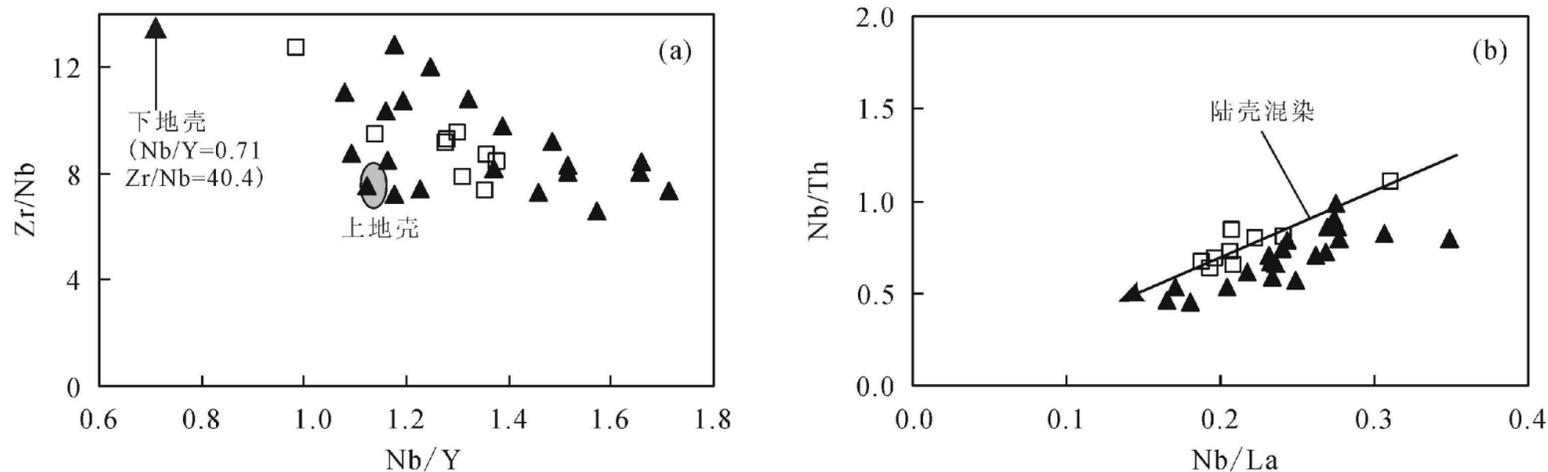


图8 贾沙辉长岩的 Zr/Nb-Nb/Y 和 Nb/Th-Nb/La 图解(样品符号同图5)

Fig.8 Diagram of Zr/Nb vs. Nb/Y and Nb/Th vs. Nb/La for the Jiasha gabbros (Symbol is as Fig.5)

上、下地壳平均成分分别引自文献[31]和[32]。

The average compositions of the upper and lower crust are after [31] and [32], respectively.

介于原始地幔和下地壳之间,说明贾沙辉长岩浆遭受了地壳物质的混染<sup>[34]</sup>。而Nb/Th和 Nb/La的正相关关系(图8b)表明富Th、亏损Nb的陆壳物质加入到了岩浆中<sup>[35]</sup>。辉长岩较高的Th/U比值(4.84~7.44)也明显高于MORB (约3.00)和OIB (约3.40),表明受到了壳源物质的混染(约5.00)<sup>[36]</sup>。岩浆被地壳混染的程度可用(Th/Yb)<sub>PM</sub>比值进行演绎<sup>[37]</sup>。相对于上地壳(28.0)<sup>[31]</sup>,贾沙辉长岩(Th/Yb)<sub>PM</sub>比值为79.0~155,明显高于上地壳,也支持了地壳物质混入这一结论。此外,贾沙辉长岩锆石的 $\epsilon_{Nd}(t)$  (-4.84~2.50)值范围大<sup>[11]</sup>,也表明地壳混染的发生。

通常, Sr、Nd同位素的变化可以反映岩浆上升迁移到浅部地壳过程中地壳混染的影响。例如, Sr、Nd同位素同SiO<sub>2</sub>之间的线性关系表明地幔起源的岩浆遭受了地壳混染,并可能经历了混染-分离-结晶(AFC)过程<sup>[38-41]</sup>。如图9所示,贾沙辉长岩的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>同SiO<sub>2</sub>呈现正线性相关关系,而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 则同SiO<sub>2</sub>呈现负线性相关关系,表明辉长岩形成过程中

发生了地壳混染。

贾沙岩体的辉长岩和二长岩具有类似的地球化学特征: 稀土分馏强烈((La/Yb)<sub>N</sub> 比值为 20.3~67.0); 高的 Sr/Y 比值(23.5~69.4); 富集大离子亲石元素 K、Sr、Ba 和 LREE; 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 和 HREE。Zr、Th、Nb 和 Yb 都是不相容元素,通常部分熔融和结晶分异过程都不影响其比值,辉长岩的 Zr/Nb 比值为 7.34~12.7, Th/Yb 比值为 13.6~26.7, Th/Nb 比值为 0.91~1.57, 而二长岩的 Zr/Nb 比值为 6.57~12.9, Th/Yb 比值为 4.24~35.8, Th/Nb 比值为 0.18~2.21, 两者在不相容元素比值上一致,再结合辉长岩同二长岩在空间上的产出以及矿物组合特征(图3)关系,表明两者由同源岩浆演化而来。

分离结晶作用是岩浆演化过程中非常重要的阶段。对中基性岩浆而言,在结晶分异过程中,富铁镁质矿物的结晶分异作用十分普遍。通常用Mg、Cr和Ni等的含量来确定岩浆岩的分离结晶作用。如果MgO、Cr及Ni含量很高则说明岩浆的来源接近于

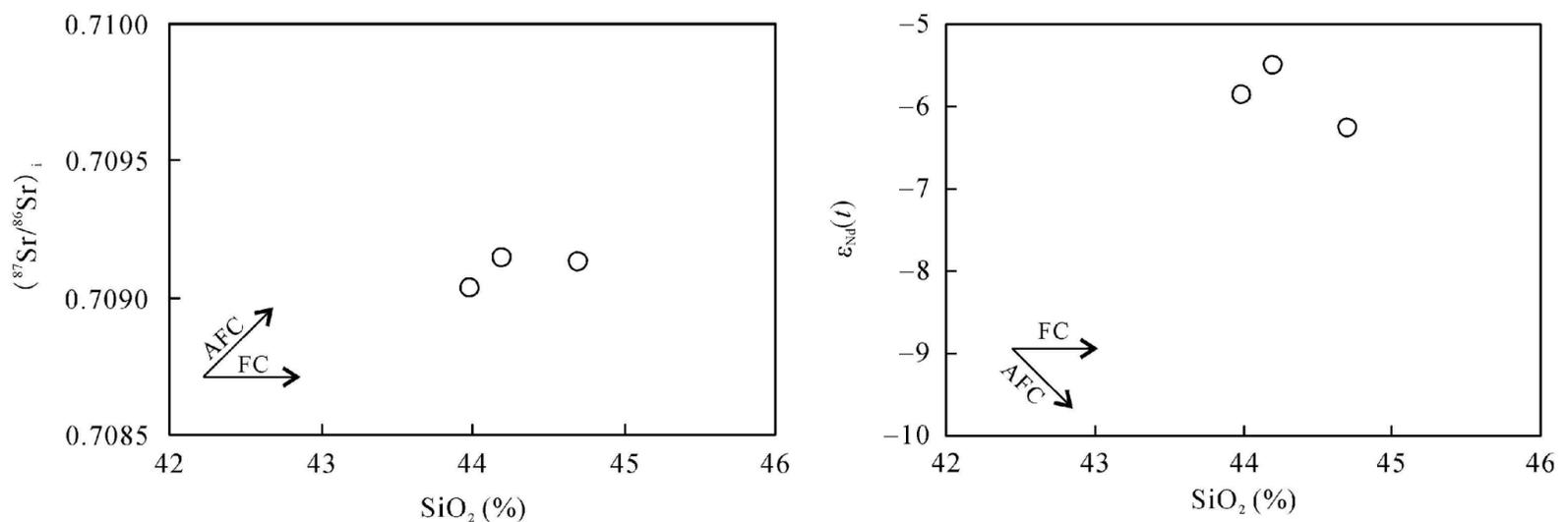


图9 贾沙辉长岩(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>-SiO<sub>2</sub>和 $\epsilon_{Nd}(t)$ -SiO<sub>2</sub>图解(图中数据据文献[11])

Fig.9 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> vs. SiO<sub>2</sub> and  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs. SiO<sub>2</sub> diagram of the Jiasha pluton (data from [11])

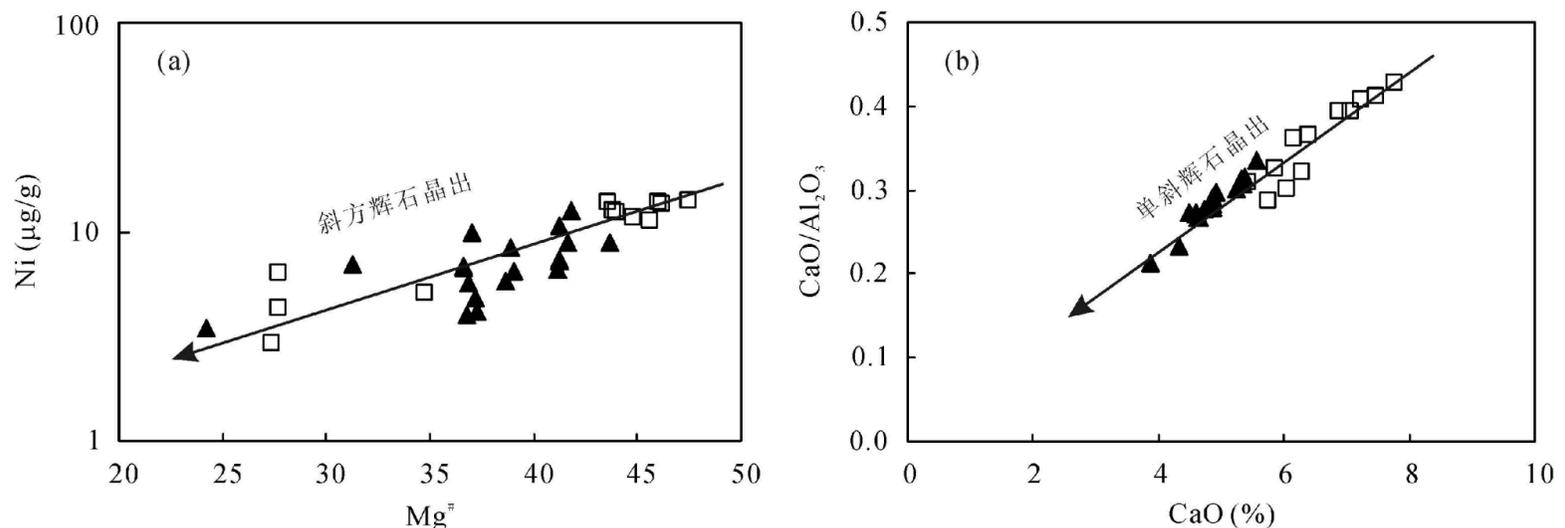


图10 贾沙中基性岩体斜方辉石(a)及单斜辉石(b)分离结晶作用图解(样品符号同图5)

Fig.10 Trend for orthopyroxene (a) and clinopyroxene (b) fractional crystallization of the intermediate to mafic body in Jiasha (Symbol is as Fig.5)

原始地幔,如其含量较低则说明经历了橄榄石、辉石等的分离结晶作用<sup>[42]</sup>。

通常,地幔来源的原始岩浆具有高的Ni (> 400  $\mu\text{g/g}$ , Cr > 1000  $\mu\text{g/g}$ )<sup>[25]</sup>, 高的Mg<sup>#</sup>值(73~81)<sup>[43]</sup>。贾沙辉长岩的MgO最低值为2.13%, Ni为5.12  $\mu\text{g/g}$ , Cr为5.57  $\mu\text{g/g}$ , 与Cheng *et al.*<sup>[11]</sup>所得到的辉长岩MgO最低值为2.85%, Ni为9.60  $\mu\text{g/g}$ , Cr为5.90  $\mu\text{g/g}$ 一致; 二长岩的MgO最低为1.12%, Ni为2.91  $\mu\text{g/g}$ , Cr为4.52  $\mu\text{g/g}$ 。如此低的MgO、Cr及Ni含量表明岩体是原始岩浆演化后的产物,并且在演化过程中经历了辉石等矿物的分离结晶作用<sup>[44]</sup>。此外轻重稀土元素的分馏、Eu异常以及微量元素的选择性富集也显示了分离结晶作用的存在。贾沙岩体的Ni含量随着Mg<sup>#</sup>值的减小呈现下降的趋势(图10a),表明岩浆上升过程经历了斜方辉石的分离结晶作用。CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值随着CaO含量的降低而不断减小(图10b),并且随着Mg<sup>#</sup>值的减小Cr含量逐渐降低,表明发生了单斜辉石的晶出<sup>[45]</sup>。在主元素哈克图解(图6)上, SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O与MgO呈现出负相关关系, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO与MgO呈现出正相关关系,以及Eu的异常都暗示了岩浆演化过程中发生了斜长石的结晶分异作用。辉长岩Ni含量为2.90~14.0  $\mu\text{g/g}$ , 二长岩的Ni含量为3.40~12.7  $\mu\text{g/g}$ , 如此低的Ni含量表明大量橄榄石从母岩浆中彻底分离出去,与岩石中不出现橄榄石相符<sup>[42]</sup>。

如前所述,贾沙辉长岩因较高的长石含量而导

致颜色较一般辉长岩浅。辉长岩的MgO含量为2.13%~4.08%, 二长岩的MgO为1.12%~2.84%。辉长岩的Mg<sup>#</sup>值为34.8~47.5, 平均44.2。二长岩的Mg<sup>#</sup>值为24.2~43.7, 平均36.6。由此判断岩浆不是与地幔橄榄岩平衡的原始地幔熔体。辉长岩的Eu负异常不明显(Eu/Eu\*为0.70~0.90), 也表明它不是堆晶的产物而是结晶分异的产物。

## 5.2 源区特征

综合本文及其他学者测试的贾沙辉长岩的数据<sup>[5,8,11]</sup>, 贾沙辉长岩样品中SiO<sub>2</sub>含量最低为43.0%, Mg最高为9.44%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>最高为13.9%, V最高为318  $\mu\text{g/g}$ , Cr最高为327  $\mu\text{g/g}$ , Ni最大值为104  $\mu\text{g/g}$ , 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值最大为2.17, 表明贾沙岩体的母岩浆不可能来自地壳<sup>[46]</sup>。在Zr/Yb-Nb/Yb、Ta/Yb-Nb/Yb和Nb/Ha-Nb/Zr图解(图11)中, 样品落在地幔序列里或附近。表明贾沙辉长岩体源区应该是地幔。

贾沙辉长岩的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>值为0.7091~0.7095,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-6.25~-5.49<sup>[11]</sup>, 表现出富集的特征。在(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>-K<sub>2</sub>O图解(图12)上, 辉长岩样品落在EMII附近, 表明辉长岩起源于富集地幔。王兴阵<sup>[8]</sup>也指出, 贾沙岩体是起源于富集地幔的岩浆结晶分异的产物。综合上述研究, 贾沙辉长岩和二长岩是来自地幔的玄武质岩浆经过地壳混染之后结晶分异的产物。

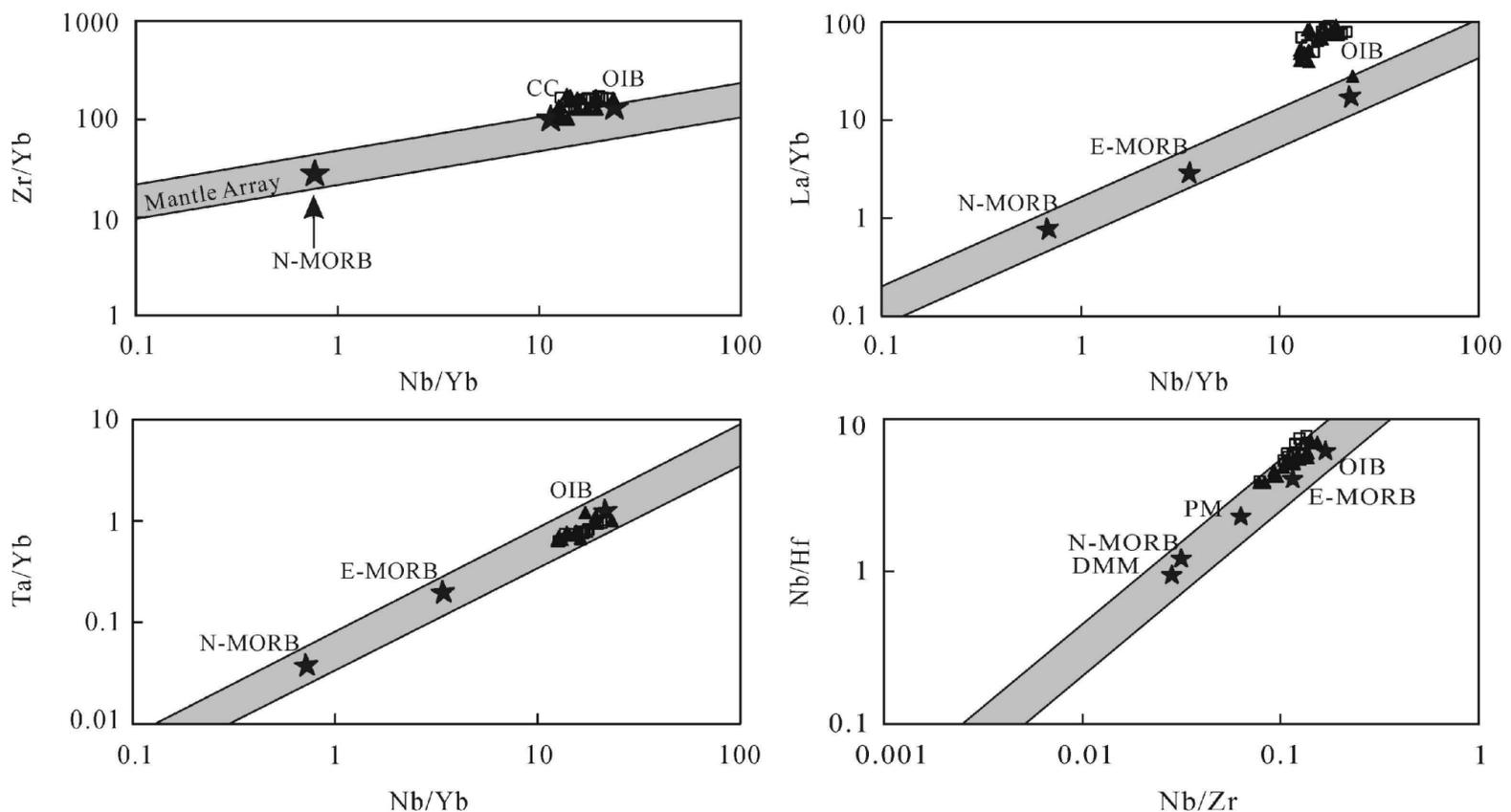


图11 贾沙岩体的微量元素比值变异图解(样品符号同图5)

Fig.11 Plot of trace element ratios of the Jiasha body (Symbol is as Fig.5)  
OIB、MORB、E-MORB 和 N-MORB 的数值据文献[36]; 上地壳平均值据文献[31]。

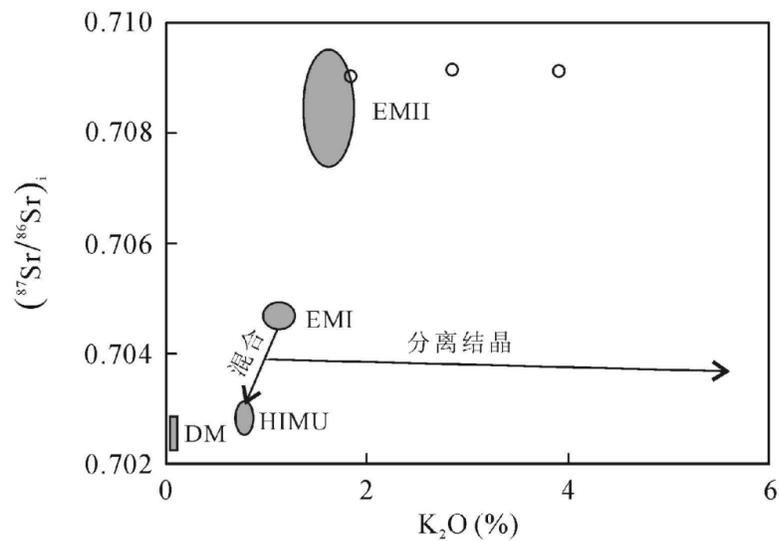


图12 贾沙岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解(数据来源于文献[11], 底图据文献[47])

Fig.12  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  diagram of the Jiasha pluton (data from [11], after [47])

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图7b和d)上, 贾沙辉长岩和二长岩亏损Nb、Ta和Ti。Nb、Ta和Ti的亏损通常是由于原始岩浆中榍石或金红石的分离结晶引起的。但是不管是榍石还是金红石的分离结晶, 不但引起Nb、Ta和Ti负异常, 而且还导致Zr、Hf的亏损和Nb/Ta比值的增加<sup>[48-49]</sup>。这与贾沙辉长岩和二长岩Zr、Hf的亏损一致。贾沙辉长岩Nb/Ta比值为18.9~23.0, 与形成于不同时代的基性岩墙(脉)群及太古宙基性火山岩的值一致, 都具有明显高于球粒陨石的值(17.3~17.6)<sup>[50]</sup>。贾沙辉长岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.7090,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-5.49~-6.25, 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-4.84~2.50, 表现出地幔端元演化的趋势<sup>[11]</sup>。此外, 贾沙辉长岩高 $\text{SiO}_2$ 、低 $\text{MgO}$ 的特点也表明地壳混染在岩浆上升和演化过程中所起到的作用有限。因此, 贾沙岩体Nb、Ta和Ti亏损的特点是继承于源区的结果。已有研究也表明, 富集大离子亲石元素(LILE)、亏损高场强元素(HFSE)如Nb、Ta和Ti是地幔源区被俯冲板片来源的流体或俯冲沉积物交代的结果<sup>[51]</sup>。贾沙辉长岩和二长岩的 $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{PM}}$ 值(分别为0.14~0.25和0.15~0.60)与与俯冲有关的铁镁质岩一致, 也表明地幔物质被俯冲物质改造过(图13)。

根据大地构造历史, 古特提斯洋在晚二叠世到中三叠世之间关闭<sup>[53]</sup>。滇缅泰马、印支、思茅和华南板块的最终拼合是在晚三叠世<sup>[54]</sup>。个旧地区在晚燕山期未有板块俯冲事件发生。因此, 推断贾沙辉长岩所体现出的俯冲特征, 应是继承了地幔源区地球化学特征的结果。

全岩的稀土含量主要受地幔组成和部分熔融程度所控制, 所以稀土元素被广泛应用于判断岩浆起

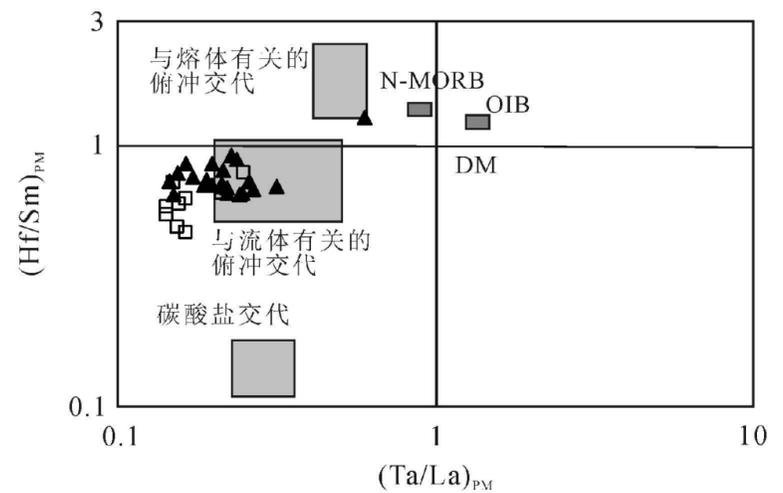


图13 贾沙辉长岩的 $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{PM}}$ - $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{PM}}$ 图解<sup>[52]</sup>(样品符号同图5)

Fig.13 Plots of  $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{PM}}$  vs.  $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{PM}}$ <sup>[52]</sup> for the Jiasha gabbros (Symbol is as Fig.5)

OIB-洋岛玄武岩; N-MORB-正常的洋中脊玄武岩; DM-亏损地幔。

源以及对地幔熔融程度和变化的限定<sup>[55]</sup>。根据分配系数可知, 稀土元素在地幔橄榄岩熔融过程中是中度不相容元素, 因此它们的浓度和比值不因地幔亏损和流体的输入而有大的影响<sup>[51]</sup>。此外, 在原始岩浆中Yb ( $D_{\text{garnet}/\text{melt}} = 6.6$ )含量受地幔橄榄岩熔融过程中残留的石榴子石的影响<sup>[56]</sup>。由地幔橄榄岩部分熔融产生的熔体, 伴随着石榴子石的残留, 表现出低Yb含量, 高LREE(如La和Sm)/Yb比值的特征; 在石榴子石中, Sm ( $D_{\text{garnet}/\text{melt}} = 0.22$ )相对于La ( $D_{\text{garnet}/\text{melt}} = 0.01$ )有高的分配系数<sup>[57]</sup>, Yb ( $D_{\text{garnet}/\text{melt}} = 6.6$ )相对于Sm ( $D_{\text{garnet}/\text{melt}} = 0.25$ )有更高的分配系数<sup>[56]</sup>。由于稀土元素分布模式主要受源区组成的亏损或富集所控制, 起源于尖晶石-二辉橄榄岩相的部分熔体, 应该表现出相对平缓的熔融趋势<sup>[58]</sup>, 因为尖晶石中La ( $D_{\text{spinel}/\text{melt}} = 0.01$ )、Sm ( $D_{\text{spinel}/\text{melt}} = 0.01$ )和Yb ( $D_{\text{spinel}/\text{melt}} = 0.01$ )有着相似的分配系数<sup>[57]</sup>。基于以上讨论, 在Sm/Yb-Sm图解中, 贾沙岩体样品投影于石榴子石-尖晶石熔融曲线的上方。由于地壳混染会使Sm/Yb和La/Sm比值增高, 因此贾沙岩体的原始熔体投影应靠近石榴子石-二辉橄榄岩熔融趋势线, 暗示贾沙岩体有着石榴子石-二辉橄榄岩的地幔起源。在Sm/Yb-Sm图解(图14)中, 计算结果表明贾沙岩体是由石榴子石-二辉橄榄岩经历了较低程度的(<5%)部分熔融形成。

### 5.3 构造环境

在Nb-Zr-Y图解(图15a)中, 样品落在板内碱性玄武岩范围内, 在 $\text{TiO}_2$ - $\text{MnO}$ - $\text{P}_2\text{O}_5$ 图解(图15b)中, 多数样品落在大洋岛碱性玄武岩和钙碱性玄武岩交

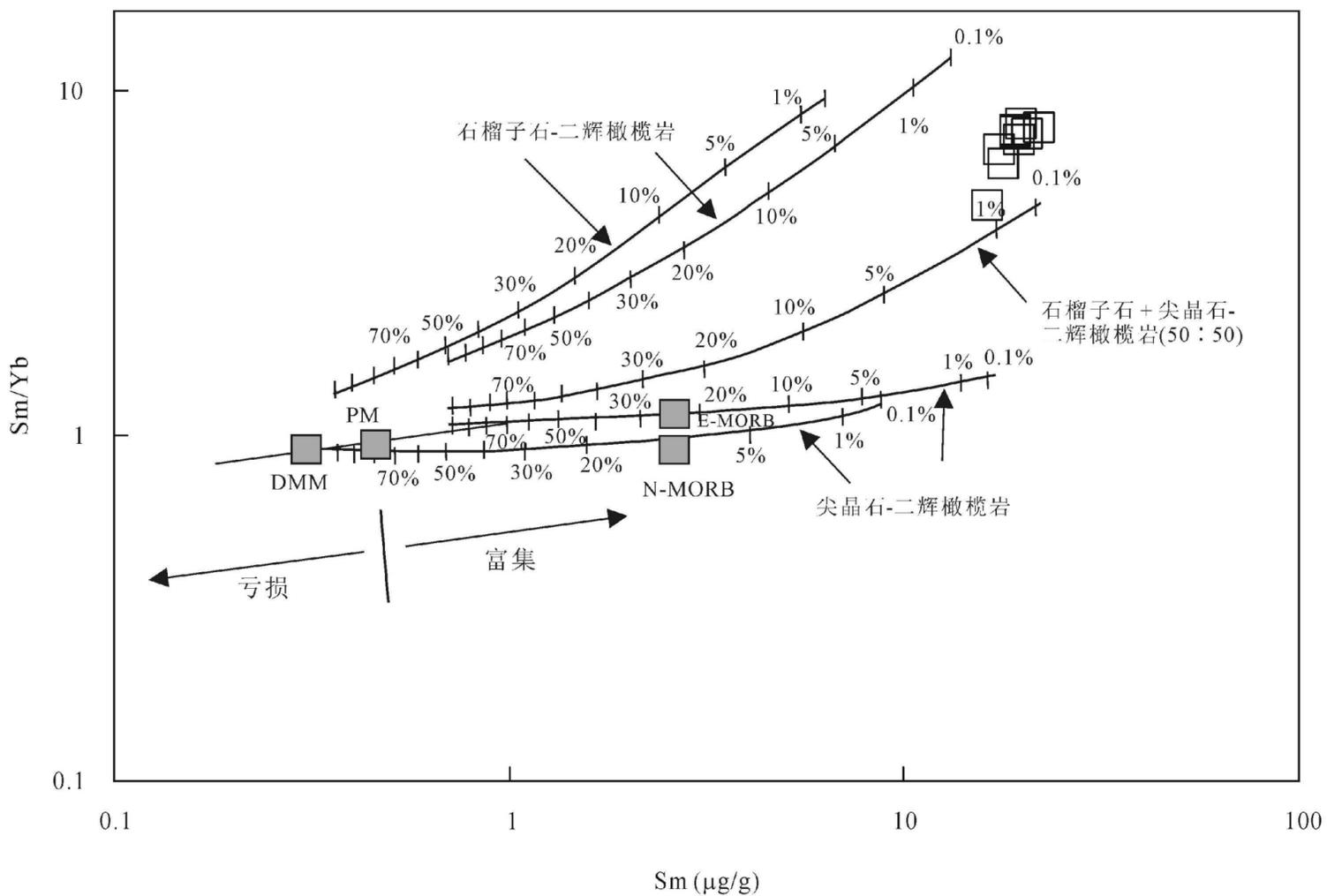


图 14 贾沙辉长岩的 Sm/Yb-Sm 图解(样品符号同图 5)

Fig.14 Sm/Yb vs. Sm diagram of intermediate-basic rock from Jiasha (Symbol is as Fig.5)

熔融曲线为尖晶石-二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol 0.530 + opx 0.270 + cpx 0.170 + sp 0.030 和 ol 0.060 + opx 0.280 + cpx 0.670 + sp 0.110)<sup>[59]</sup>和石榴子石-二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol 0.600 + opx 0.200 + cpx 0.100 + gt 0.100 和 ol 0.030 + opx 0.160 + cpx 0.880 + gt 0.090)<sup>[60]</sup>。矿物/基质分配系数以及 DMM 引自文献[57]; PM、N-MORB 和 E-MORB 组成引自文献[29]。每条曲线上的数字对应于给定地幔源区的部分熔融程度。

Melt curves are drawn for spinel-lherzolite (with mode and melt mode of ol 0.530 + opx 0.270 + cpx 0.170 + sp 0.030 and ol 0.060 + opx 0.280 + cpx 0.670 + sp 0.110; respectively)<sup>[59]</sup> and for garnet-lherzolite (with mode and melt mode of ol 0.600 + opx 0.200 + cpx 0.100 + gt 0.100 and ol 0.030 + opx 0.160 + cpx 0.880 + gt 0.090; respectively)<sup>[60]</sup>. Mineral/matrix partition coefficients and DMM are from the compilation of [57]; PM, N-MORB and E-MORB compositions are from Sun *et al.*<sup>[29]</sup>. Tick marks on each curve (or line) correspond to degrees of partial melting for a given mantle source.

界的位置。在 Ti-Zr 图解(图 15c)中, 大部分样品落在板内玄武岩的范围内, 少数样品落在板内玄武岩与火山弧玄武岩交界的位置。在 Nb/Th-Y 图解(图 15d)中, 所有样品都落在弧岩浆岩的范围内。通过判别图解并结合前面所述的主元素、微量元素的综合研究, 可知贾沙辉长岩和二长岩形成于陆内拉张环境下, 由于其起源于与俯冲有关的交代地幔, 并且在岩体形成过程中受到了地壳混染, 从而导致在地化特征上显示出弧岩浆岩特征。

#### 5.4 地球动力学意义

由 SIMS 锆石 U-Pb 定年得知, 贾沙岩体形成于约 84 Ma, 为晚白垩世。在个旧地区, 花岗岩、碱性正长岩、霞石正长岩、煌斑岩、云煌岩、闪长玢岩和超基性岩墙均形成于 76~91 Ma 期间<sup>[13,14,64-69]</sup>。可见, 贾沙辉长岩和二长岩是个旧地区晚白垩世大规

模成岩作用的一部分。在个旧地区, 基性岩与碱性岩成岩时代一致, 代表了一种双峰式的岩浆活动, 暗示了该地区在晚白垩世时处于伸展的环境。个旧地区位于华南西部, 毗邻三江-特提斯构造域, 特殊的构造位置决定了判断该地区动力学环境的复杂性。尽管个旧地区西邻三江特提斯构造带, 但岩浆、地层、古地磁数据研究表明古特提斯洋在晚二叠世到中三叠世之间关闭<sup>[53]</sup>。滇缅泰马、印支、思茅和华南板块的最终拼合是在晚三叠纪<sup>[54]</sup>。范蔚茗等<sup>[70]</sup>认为西南三江地区古特提斯主洋盆的俯冲闭合可能直到早三叠世晚期才完成, 古特提斯在该区的最终演化结束于三叠纪末。Zi *et al.*<sup>[71-72]</sup>认为Qamdo-思茅地体(印支)和华南板块沿着金沙江-哀牢山和Song Ma缝合带的初始碰撞、拼合发生在早三叠世。而印度-亚洲大陆的碰撞发生在65 Ma左右<sup>[73]</sup>。由以上分析可知, 贾沙辉长-二长岩体的成岩时间晚于古

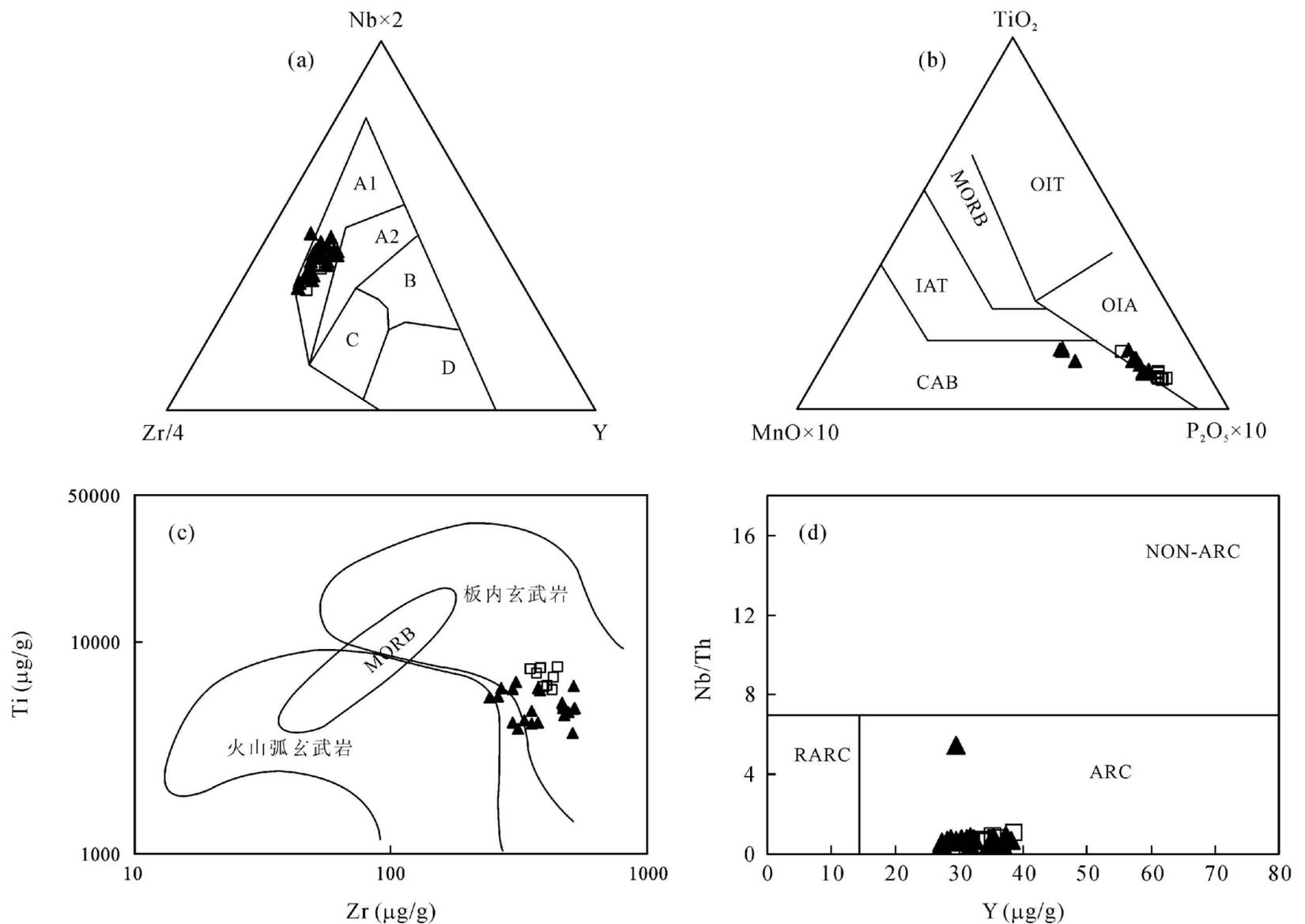


图 15 构造环境判别图解(样品符号同图 5)

Fig.15 Tectonic environment discrimination diagrams (Symbol is as Fig.5)

(a) 据文献[61]; (b)和(c) 据文献[62]; (d) 据文献[63]。

AI-板内碱性玄武岩; AII-板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B-E型MORB; C-板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D-N-MORB和火山弧玄武岩; CAB-钙碱性玄武岩; IAT-岛弧拉斑玄武岩; OIT-大洋岛拉斑玄武岩; MORB-洋中脊玄武岩; OIA-大洋岛碱性玄武岩; ARC-弧岩浆岩; RARC-难熔的弧岩浆岩; NON-ARC-非弧岩浆岩。

AI- intraplate alkaline basalts; AII- intraplate alkaline basalts and intraplate tholeiites; B- E-MORB; C- intraplate tholeiites and volcanic arc basalt; D- N-MORB and volcanic arc basalt; CAB- calc-alkaline basalts; IAT- island arc tholeiite; OIT- oceanic island tholeiite; MORB- mid ocean ridge basalts; OIA- oceanic islands alkaline basalts; ARC- arc magmatic rock; RARC- refractory arc magmatic rock; NON-ARC- non-arc magmatic rock.

特提斯的洋闭, 而早于印度-欧亚大陆的碰撞, 因此这两次事件对其形成的影响可予以排除。因此, 个旧地区晚中生代岩浆岩的形成应该是受控于太平洋构造体制的影响。

由特提斯构造域演化历史可知, 在泥盆纪到早石炭世时期古特提斯洋(澜沧江)板片向华南板块之下俯冲, 来源于板片的流体或熔体交代上覆地幔形成了具有交代特征的岩石圈地幔<sup>[74]</sup>。在二叠纪末期<sup>[72]</sup>或早三叠世晚期<sup>[70]</sup>, 古特提斯洋关闭过程中发生了特提斯洋壳向扬子板块之下的俯冲, 俯冲的洋壳板片导致了交代地幔的产生。而滇东南-桂西地区恰好处于华南板块和扬子板块的交汇部位, 两板块之下的地幔在上述不同时期都发生了交代作用, 而贾沙辉长岩的地球化学特征则恰好的反映了这种交代地幔的特点。到早白

垩世时期(135 Ma 左右), 由于太平洋板块沿平行于欧亚大陆边缘走滑, 引致大陆岩石圈发生大规模伸展, 进而华南发生了大规模的岩石圈伸展作用, 不仅出现一系列伸展盆地、变质核杂岩, 还伴随火山活动和花岗质岩浆的侵位<sup>[75]</sup>。伴随着伸展作用发生了地幔上涌, 进而发生了大规模的成岩成矿作用。在个旧地区, 基性岩浆沿个旧断裂、轿顶山断裂等上升, 并触发了地壳物质的熔融, 形成了个旧地区晚中生代大规模的岩浆活动, 而贾沙辉长岩则是该岩浆活动的基性端元的代表。

## 6 结 论

(1) SIMS 锆石 U-Pb 定年结果表明贾沙岩体形成

于(84.0±0.6) Ma, 与个旧花岗质岩石及碱性岩同为滇东南-桂西大规模成岩成矿事件的产物。

(2) 贾沙辉长岩和二长岩整体上具有富碱、变化的 Si、Mg、低 Ti 的特点。地球化学特征上表现为富集大离子亲石元素 K、Sr、Ba 和 Pb 以及轻稀土, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P 等。

(3) 贾沙辉长-二长岩体是同源岩浆结晶分异的产物, 由地幔来源的玄武质岩浆结晶分异而成。岩浆起源于受古俯冲事件交代过的地幔, 是由石榴子石-二辉橄榄岩经历了较低程度的 (<5%) 部分熔融形成。在岩浆上升、侵位过程中发生了橄榄石和辉石的分离结晶, 并发生了一定程度的地壳混染。

(4) 贾沙辉长-二长岩体的形成与滇东南-桂西地区成岩成矿高峰一致, 受控于太平洋构造域的影响, 均形成于岩石圈伸展的动力学环境。

香港大学陈伟博士对本文提出了宝贵的修改意见; 野外采样过程中得到了中国科学院地球化学研究所冷成彪博士、成都理工大学叶永钦同学的大力帮助; 实验过程中, 得到了中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室胡静高级工程师、李亮、黄艳和包广萍实验员的指导和帮助; 在此一并致以诚挚的谢意。

#### 参考文献(References):

- [1] 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 杨宗喜, 冯佳睿. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1455-1467.  
Mao Jing-wen, Cheng Yan-bo, Guo Chun-li, Yang Zong-xi, Feng Jia-rui. Gejiu tin polymetallic ore-field: Deposit model and discussion for several points concerned [J]. Acta Geol Sinica, 2008, 82(11): 1455-1467 (in Chinese with English abstract).
- [2] 秦德先, 黎应书. 个旧锡多金属矿床地质研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-173.  
Qin De-xian, Li Ying-shu. Studies on the geology of the Gejiu Sn-Cu deposit [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-173 (in Chinese).
- [3] 汪自芬. 关于个旧锡矿成矿作用的几个问题的探讨[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 154-163.  
Wang Zi-fen. Discussion on some problems in mineralization of Gejiu tin deposit [J]. Acta Geol Sinica, 1983, 57(2): 154-163 (in Chinese).
- [4] 陈吉琛. 云南 S 型和 I 型两类花岗岩划分对比的初步探讨[J]. 云南地质, 1983, 2(1): 28-37.  
Chen Ji-chen. Preliminary study on the comparison of S and I type granite in Yunnan Province [J]. Yunnan Geol, 1983, 2(1): 28-37 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陆杰. 个旧岩浆杂岩体的地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1984.

- Lu Jie. Geochemistry of igneous complex in Gejiu [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1984 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李家和. 个旧花岗岩特征及成因研究[J]. 云南地质, 1985, 4(4): 327-352.  
Li Jia-he. Characteristic and original study on granites in Gejiu area [J]. Yunnan Geol, 1985, 4(4): 327-352 (in Chinese with English abstract).
- [7] 伍勤生, 刘青莲. 个旧含锡花岗岩杂岩体的成因演化及成矿[J]. 桂林工学院学报, 1986, 6(3): 229-238.  
Wu Qin-sheng, Liu Qing-lian. Genesis, evolution and mineralization of a complex formed from granite magma in Gejiu, Yunnan [J]. J Guilin Colleg Geol, 1986, 6(3): 229-238 (in Chinese).
- [8] 王兴阵. 个旧岩浆杂岩地质地球化学及成因研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.  
Wang Xing-zhen. Research on the geological and geochemical features and the petrogenesis of Gejiu complex, Yunnan Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academic of Sciences, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [9] 莫国培. 个旧超大型锡多金属矿区花岗岩成因类型[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 413-417.  
Mo Guo-pei. Genetic type of granites in Gejiu super large tin polymetallic deposit [J]. Mineral Resour Geol, 2006, 20(4): 413-417 (in Chinese with English abstract).
- [10] 黎应书, 秦德先, 陈爱兵, 洪托, 周年胜. 个旧含锡花岗岩幔源成因证据[J]. 有色金属, 2007, 59(3): 20-26.  
Li Ying-shu, Qin De-xian, Chen Ai-bing, Hong Tuo, Zhou Nian-sheng. Genesis evidences on source-of-the-mantle of tinny granite in Gejiu tin ore deposits [J]. China Nonfer Metal, 2007, 59(3): 20-26 (in Chinese with English abstract).
- [11] Cheng Yanbo, Mao Jingwen. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan Province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. Lithos, 2010, 120(3/4): 258-276.
- [12] 赵军红. 福建省基性岩的年代学和地球化学: 晚中生代以来中国东南部地幔演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.  
Zhao Jun-hong. Chronology and geochemistry of mafic rocks from Fujian Province: Implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academic of Sciences, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [13] 陈懋弘, 程彦博, 章伟, 杨宗喜, 陆刚. 右江褶皱带燕山期岩浆作用与成矿作用初步研究[C]//陈毓川, 薛春纪, 张长青. 第九届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 241-242.  
Chen Mao-hong, Cheng Yan-bo, Zhang Wei, Yang Zong-xi, Lu Gang. A preliminary study on the magmatism and mineralization during Yanshannian epoch in Youjiang fold belt [C]//Chen Yu-chuan, Xue Chun-ji, Zhang Chang-qing. The Proceeding of the 9th National Conference of Mineral Deposits, China. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 241-242 (in Chinese).

- [14] 陈毓川, 朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 209–211.  
Chen Yu-chuan, Zhu Yu-sheng. Metallogenic Model of Mineral Deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 209–211 (in Chinese).
- [15] Qi Liang, Hu Jing, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostand Newsl*, 2000, 24(1): 51–63.
- [16] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459–464.  
Lu Yuan-fa. GeoKit – A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459–464.
- [17] Black L P, Kamo S L, Allen C M, Davis D W, Aleinikoff J N, Valley J W, Mundil R, Chambell I H, Korsch R J, Williams K I, Foudoulis C. Improved  $^{206}\text{Pb}/\text{U}$  microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect: SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards [J]. *Chem Geol*, 2004, 205(1/2): 115–140.
- [18] Li Xian-hua, Liu Yu, Li Qiu-li, Guo Chun-hua, Chamberlain K R. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2009, 10(4): Q04010, doi:10.1029/2009GC002400.
- [19] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses [J]. *Geostand Newsl*, 1995, 19(1): 1–23.
- [20] Li Qiu-li, Li Xian-hua, Liu Yu, Tang Guo-qiang, Yang Jin-hui, Zhu Wei-guang. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique [J]. *J Anal Atom Spect*, 2010, 25(7): 1107–1113.
- [21] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1975, 26(2): 207–221.
- [22] Ludwig K R. Users manual for Isoplot/Ex Rev. 2.49 [K]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2001, 1a: 56.
- [23] Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. Internal structures of zircon from Archaean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 132(3): 288–299.
- [24] Claesson S, Vetrin V, Bayan O T, Downes H. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Paleozoic [J]. *Lithos*, 2000, 51(1/2): 95–108.
- [25] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1–340.  
Qiu Jia-xiang. Petrology of Magmatic Rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 1–340 (in Chinese).
- [26] Wilson M. Igneous Petrogenesis [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [27] Middlemost E A K. Naming materials in magma/igneous rock system [J]. *Earth Sci Rev*, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [28] Cheng Yan-bo, Spandler C, Mao Jing-wen, Rusk B G. Granite, gabbro and mafic microgranular enclaves in the Gejiu area, Yunnan Province, China: A case of two-stage mixing of crust- and mantle-derived magmas [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2012, 164(4): 659–676.
- [29] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [M]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42: 313–346.
- [30] Xu Haijin, Ma Changqian, Song Yanru, Zhang Junfeng, Ye Kai. Early Cretaceous intermediate-mafic dykes in the Dabie orogen, eastern China: Petrogenesis and implications for crust-mantle interaction [J]. *Lithos*, 2012, 154: 83–99.
- [31] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1–312.
- [32] Weaver B, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust [J]. *Nature*, 1984, 310(5978): 575–577.
- [33] Condie K C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, 2003, 4(1): 1005.
- [34] 王劲松, 周家喜, 杨德智, 刘金海. 黔东南宰便辉绿岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究 [J]. *地质学报*, 2012, 86(3): 460–469.  
Wang Jin-song, Zhou Jia-xi, Yang De-zhi, Liu Jin-hai. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Zaibian diabase, SE Guizhou Province, SW China [J]. *Acta Geol Sinica*, 2012, 86(3): 460–469 (in Chinese with English abstract).
- [35] Zhu Wei-guang, Zhong Hong, Li Xian-hua, He De-feng, Song Xie-yan, Ren Tao, Chen Zhong-quan, Sun Hui-si, Liao Jin-qing. The early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong, SE China: Age, origin, and tectonic significance [J]. *Lithos*, 2010, 119(3/4): 313–329.
- [36] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(3): 267–309.
- [37] Qi Liang, Zhou Mei-fu. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China [J]. *Chem Geol*, 2008, 248(1): 83–103.
- [38] Conticelli S. The effect of crustal contamination on ultrapotassic magmas with lamproitic affinity: Mineralogical, geochemical and isotope data from the Torre Alfina lavas and xenoliths, Central Italy [J]. *Chem Geol*, 1998, 149(1/2): 51–81.
- [39] DePaolo D J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallisation [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 53(2): 189–202.

- [40] Piochi M, Ayuso R A, De Vivo B, Somma R. Crustal contamination and crystal entrapment during polybaric magma evolution at Mt. Somma-Vesuvius volcano, Italy: Geochemical and Sr isotope evidence [J]. *Lithos*, 2006, 86(3/4): 303–329.
- [41] Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P. Metasomatic mantle source and crustal contamination for the formation of the Neoproterozoic mafic dike swarm in the northern Yangtze Block, South China [J]. *Lithos*, 2010, 115(1–4): 177–189.
- [42] Caroline J, Stefan J, Edgar H, Jasper B. Petrogenesis of Tertiary mafic alkaline magmas in the Hoheifel, Germany [J]. *J Petrol*, 2006, 47(8): 1637–1671.
- [43] Sharma M. Siberian traps [M]//Mahoney J J, Coffin M F. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Washington D C: American Geophysical Union, 1997: 273–295.
- [44] Richter K. A comparison of basaltic volcanism in the Cascades and western Mexico: Compositional diversity in continental arcs [J]. *Tectonophysics*, 2000, 318(1–4): 99–117.
- [45] Green T H. Island arc and continent-building magmatism: A review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry [J]. *Tectonophysics*, 1980, 63(1–4): 367–385.
- [46] Yang Jin-hui, Chung Sun-lin, Wilde S A, Wu Fu-yuan, Chu Mei-fei, Lo Ching-hua, Fan Hong-rui. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence [J]. *Chemical Geology*, 2005, 214(1/2): 99–125.
- [47] Jackson M G, Dasgupta R. Compositions of HIMU, EM1 and EM2 from global trends between radiogenic isotopes and major elements in ocean island basalts [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 276(1/2): 175–186.
- [48] Tiepolo M, Oberti R, Vannucci R. Trace-element incorporation in titanite: constraints from experimentally determined solid/liquid partition coefficients [J]. *Chem Geol*, 2002, 191(1–3): 105–119.
- [49] Klemme S, Prowatke S, Hametner K, Günther D. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: Implications for subduction zones [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(9): 2361–2371.
- [50] 赵振华, 熊小林, 王强, 乔玉楼. 铌与钽的某些地球化学问题[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 304–320.  
Zhao Zhen-hua, Xiong Xiao-lin, Wang Qiang, Qiao Yu-lou. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta [J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 304–320 (in Chinese with English abstract).
- [51] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the compositions of volcanic arc magmas [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1995, 23: 251–285.
- [52] Hofmann A W, Jochum K P. Source characteristics derived from very incompatible trace elements in Mauna Loa and Mauna Kea basalts, Hawaii Scientific Drilling Project [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101 (B5): 11831–11839.
- [53] Li Pengwu, Gao Rui, Cui Junwen, Guan Ye. Paleomagnetic analysis of eastern Tibet: Implications for the collisional and amalgamation history of the Three Rivers Region, SW China [J]. *J Asian Earth Sci*, 2004, 24(3): 291–310.
- [54] Cai Jian-xin, Zhang Kai-jun. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic [J]. *Tectonophysics*, 2009, 467(1–4): 35–43.
- [55] Zhao Jun-hong, Zhou Mei-fu. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction related metasomatism in the upper mantle [J]. *Precamb Res*, 2007, 152(1/2): 27–47.
- [56] Johnson K T M. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 133(1/2): 60–68.
- [57] McKenzie D, O’Nions R K. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations [J]. *J Petrol*, 1991, 32(5): 1021–1091.
- [58] Green N L. Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from the Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system [J]. *Lithos*, 2006, 87(1/2): 23–49.
- [59] Kinzler R J. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(B1): 853–874.
- [60] Walter M J. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere [J]. *J Petrol*, 1998, 39(1): 29–60.
- [61] Meschede M. A method of discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental thoeiites with the Nb–Zr–Y diagram [J]. *Chem Geol*, 1986, 56(3/4): 207–218.
- [62] Rollison H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: Longman, 1993: 1–352.
- [63] Swinden H S, Jenner G A, Fryer B J, Hertogen J, Roddick J C. Petrogenesis and paleotectonic history of the Wild Bight Group, an Ordovician rifted island arc in central Newfoundland [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 105(2): 219–241.
- [64] 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 吴德成, 黄惠明. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *地质论评*, 2006, 52(3): 409–414.  
Cai Ming-hai, He Long-qing, Liu Guo-qing, Wu De-cheng, Huang Hui-ming. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore district, Guangxi and their geological significance [J]. *Geoll Rev*, 2006, 52(3): 409–414 (in Chinese with English abstract).
- [65] 梁婷, 陈毓川, 王登红, 蔡明海. 广西大厂锡多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–235.  
Liang Ting, Chen Yu-chuan, Wang Deng-hong, Cai Ming-hai. *Geology and Geochemistry of the Dachang Tin Polymetallic Deposit, Guangxi* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–235 (in Chinese).
- [66] 程彦博, 毛景文, 谢桂清, 陈懋弘, 赵财胜, 杨宗喜, 赵海杰, 李向前. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1478–1493.

- Cheng Yan-bo, Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Chen Mao-hong, Zhao Cai-sheng, Yang Zong-xi, Zhao Hai-jie, Li Xiang-qian. Petrogenesis of the Laochang-Kafang granite in the Gejiu area, Yunnan Province: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb dating [J]. *Acta Geol Sinica*, 2008, 81(11): 1478–1493 (in Chinese with English abstract).
- [67] 程彦博, 毛景文, 陈懋弘, 杨宗喜, 冯佳睿, 赵海杰. 云南个旧锡矿田碱性岩和煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1082–1093.
- Cheng Yan-bo, Mao Jing-wen, Chen Mao-hong, Yang Zong-xi, Feng Jia-rui, Zhao Hai-jie. LA-ICP-MS zircon dating of the alkaline rocks and lamprophyres in Gejiu area and its implications [J]. *Geol China*, 2008, 35(6): 1082–1093 (in Chinese with English abstract).
- [68] 程彦博, 毛景文, 谢桂清, 陈懋弘, 杨宗喜. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(3): 297–312.
- Cheng Yan-bo, Mao Jing-wen, Xie Gui-qin, Chen Mao-hong, Yang Zong-xi. Zircon U-Pb dating of the granites in Gejiu supergiant tin polymetallic ore-field and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(3): 297–312 (in Chinese with English abstract).
- [69] 张颖, 黄智龙, 罗泰义, 钱志宽. 云南个旧西区神仙水岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 515–524.
- Zhang Ying, Huang Zhi-long, Luo Tai-yi, Qian Zhi-kuan. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and petrogenesis of Shenxianshui granite in Gejiu, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2011, 31(3): 515–524 (in Chinese with English abstract).
- [70] 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 291–302.
- Fan Wei-ming, Peng Tou-ping, Wang Yue-jun. Triassic magmatism in the southern Lancangjiang zone, southwestern China and its constraints on the tectonic evolution of Paleo-Tethys [J]. *Earth Sci Front*, 2009, 16(6): 291–302 (in Chinese with English abstract).
- [71] Zi Jian-wei, Cawood P A, Fan Wei-ming, Tohver E, Wang Yue-jun, McCuaig T C. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang Orogen (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys [J]. *Lithos*, 2012, 140–141: 166–182.
- [72] Zi Jian-wei, Cawood P A, Fan Wei-ming, Wang Yue-jun, Tohver E, McCuaig T C, Peng Tou-ping. Triassic collision in the Paleo-Tethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China [J]. *Lithos*, 2012, 144–145: 145–160.
- [73] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 135–148.
- Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Deng Jin-fu, Dong Guo-chen, Zhou Su, Guo Tie-ying, Zhang Shuang-quan, Wang Liang-liang. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. *Earth Sci Front*, 2003, 10(3): 135–148 (in Chinese with English abstract).
- [74] Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Zhang Ming. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt [J]. *Lithos*, 2004, 78(3): 291–305.
- [75] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qü W J, Du An D, Ye H H, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F, Yang Z Q. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72(18): 4607–4626.