

西藏改则地区阿布山岩体岩石地球化学、 年代学及地质构造意义

黄强太^{1,2,3}, 张霄^{1,2,3}, 夏中宇^{1,2,3}, 石晓龙^{1,2,3}
王志龙⁴, 胡西冲^{1,2,3}, 郑浩^{1,2,3}, 夏斌^{1,2,3*}

1. 中山大学 海洋学院, 广州 510006; 2. 海洋石油勘探开发广东省普通高校重点实验室, 广州 510006;
3. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广州 510006; 4. 广东清远市建设工程质量监测站, 广东 清远 511515

摘要:青藏高原西部改则地区的阿布山岩体位于班公湖—怒江缝合带北侧, 岩性以闪长玢岩为主。岩石化学上表现为高 K_2O (1.11%~3.95%), 高 Na_2O (平均4.01%), 高 Al_2O_3 (>15%, 平均16.78%), 低 MgO (<3%, 平均2.69%), 显示为中钾钙碱性-高钾钙碱性过渡的特征。微量元素显示富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th等)、亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti等)。稀土元素配分图显示为右倾模式, 说明是轻稀土富集型, δEu 平均为0.89, δCe 平均为0.91, 具有弱铕、铈异常, 具有典型岛弧火山岩的特征。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为 113.3 ± 1.1 Ma、 113.6 ± 1.3 Ma, 表明在早白垩世晚期班公湖—怒江洋盆北向俯冲消减过程中, 导致地幔楔部分熔融, 形成岛弧岩浆, 由于持续俯冲消减作用使得下地壳发生部分熔融, 形成花岗岩熔体, 并且向地壳浅部侵位、冷凝结晶形成。

关键词: 阿布山岩体; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 改则; 西藏

中图分类号: P597 文章编号: 1007-2802(2016)03-0515-12 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.03.015

Geochemistry, Geochronology and Tectonic Significance of the Abushan Intrusive Body in the Gerze Area, Tibet, China

HUANG Qiang-tai^{1,2,3}, ZHANG Xiao^{1,2,3}, XIA Zhong-yu^{1,2,3}, SHI Xiao-long^{1,2,3}
WANG Zhi-long⁴, HU Xi-chong^{1,2,3}, ZHENG Hao^{1,2,3}, XIA Bin^{1,2,3*}

1. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Envelopment, Guangdong University, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou 510006, China; 4. Qingyuan Construction Quality Inspection Station, Qingyuan Guangdong 511515, China

Abstract: The Abushan intrusive body is located tectonically in the northern part of the Bangonghu-Nujiang Suture Zone (BNSZ), geographically in the western Tibetan Plateau. It consists mainly of diorite porphyry, with high contents of K_2O (1.11% - 3.95%), Na_2O (average 4.01%), and Al_2O_3 (average 16.78%, totally > 15%), low contents of MgO (average 2.69%, mostly less than 3%), and the transitional characteristics of medium-K to high-K calc-alkaline series. In addition, the intrusive rocks are rich in LREE, such as Rb, Ba, Th, but depleted in high field strength elements (HFSE) including Nb, Ta and Ti, with right-declined REE distribution patterns, and weak Eu and Ce anomalies (average δEu value of 0.89 and average δCe of 0.91). These are characteristics of the typical island arc volcanic rock. The zircon LA-ICP-MS U-Pb weighted ages of two diorite porphyry samples are 113.3 ± 1.1 Ma and 113.6 ± 1.3 Ma. Therefore, it is believed that the northward subduction of the Bangonghu-Nujiang oceanic basin at the Early Cretaceous resulted in the formation of island arc magma which was derived from the partial melting of mantle wedge. The continuing oceanic plate subduction and the uplift of original island arc magma resulted in the partial melting of the lower crust to form the andesitic

收稿日期: 2015-04-17 收到, 2015-08-09 改回

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212011221087, 1212011221088); 矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目 (201304)

第一作者简介: 黄强太 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 特提斯构造演化. E-mail: huangqiangtai@163.com.

* 通讯作者简介: 夏斌 (1959-), 男, 教授, 研究方向: 构造与成矿、油气盆地分析. E-mail: Xb698xy@qq.com.

melt which was then intruded into the shallow level of the crust and then crystallized to form the diorite porphyry.

Key words: Abushan rock mass; geochemistry; zircon U-Pb dating; Gerze; Tibet

班公湖—怒江缝合带贯穿青藏高原内部,代表了劳亚-冈瓦纳大陆之间消失的特提斯洋,是一条重要的岩相构造带(Pan *et al.*, 2012),主要发育侏罗纪复理石建造、蛇绿混杂岩等(西藏自治区地质矿产局, 1993),并且存在明显的地球物理异常特征(Haines *et al.*, 2003; 赵文津等, 2004; 潘桂棠等, 2004),也是一条重要的成矿带(曲晓明和辛洪波, 2006; 李光明等, 2007; 李金祥等, 2008; 余宏全等, 2009; 辛洪波等, 2009; 耿全如等, 2011, 2012; 曲晓明等, 2012)。由于其在青藏高原演化史上的特殊地位受到国内外地质学家的广泛关注和研究,主要集中在该洋盆的形成和闭合时间,一般认为洋盆扩展形成于晚三叠世—早侏罗世,在中侏罗世俯冲消减,晚侏罗世—早白垩世晚期闭合(Yin and Harrison, 2000; 肖序常和李廷栋, 2000; 潘桂堂等, 2004; 邱瑞照等, 2004; 李金祥等, 2008; 康志强等, 2008, 2010),其中对洋盆闭合时代和洋盆俯冲极性争议最大,闭合时间从晚侏罗世—晚白垩世均有(Yin and Harrison, 2000; 潘桂堂等, 2004; 邱瑞照等, 2004; 李金祥等, 2008; 康志强等, 2008, 2010; 耿全如等, 2011, 2012; Zhu *et al.*, 2011)。俯冲极性主要为洋内俯冲(张旗和杨瑞英, 1985; 史仁灯, 2005)、南向俯冲(Qiu *et al.*, 2006; 朱弟成等, 2006; Huang *et al.*, 2015)、北向俯冲(Zhang *et al.*, 2007)和双向俯冲(曹圣华等, 2004, 2006; 潘桂棠等, 2004; 李金祥等, 2008; 杜德道等, 2011)。但是以上认为俯冲的观点在野外缺少明显的洋陆俯冲形成的岛弧型岩石来证明(张玉修, 2007; 李建峰, 2009; 黄强太, 2013)。

因此,笔者以改则西阿布山地区出露的闪长岩为研究对象,对其进行了地球化学、形成时代研究,并系统探讨了其构造成因和地球动力学背景,从而研究班公湖—怒江缝合带在本地区的俯冲极性。

1 区域地质背景

青藏高原是地球上抬升最高的构造单元,是在一系列特提斯洋陆转换的基础上发展而成的,青藏高原特提斯域是由一系列多个近东西向延伸的地块组成,由北向南依次为祁连山、昆仑、松潘—甘孜、羌塘、冈底斯和喜马拉雅地块(图 1a)。作为羌塘地块和冈底斯地块的分界线,班公湖—怒江缝合带东西延伸全长约 2000 km,南北宽度变化较大,从

十几千米到近百千米。带内物质组成复杂、构造变形多样、岩浆活动强烈和成矿条件较好,因此是青藏高原上一条重要构造带和成矿带。

研究区位于班公湖—怒江缝合带西段改则县地区,南北跨 3 个二级构造单元,分别为南羌塘地体、班公湖—怒江缝合带和冈底斯地体(图 1a、1b)。测区分布在南羌塘地体中,出露的地层主要为亭贡组(T_3t),该组主要是一套河流相粗碎屑岩建造,以浅灰-紫灰色砾岩为主,夹少量灰色细-粗砂岩,与上覆地层阿布山组呈角度不整合接触(陈玉禄等, 2006)。本文研究对象是亭贡组中的侵入岩,岩性主要以细粒-中粒闪长岩为主,岩体呈岩株状产出(图 2a、2b),出露面积约 10 km²,平面上呈方形展布,接触面产状为 20°∠70°,在接触带处多发生角岩化。

2 岩相学特征

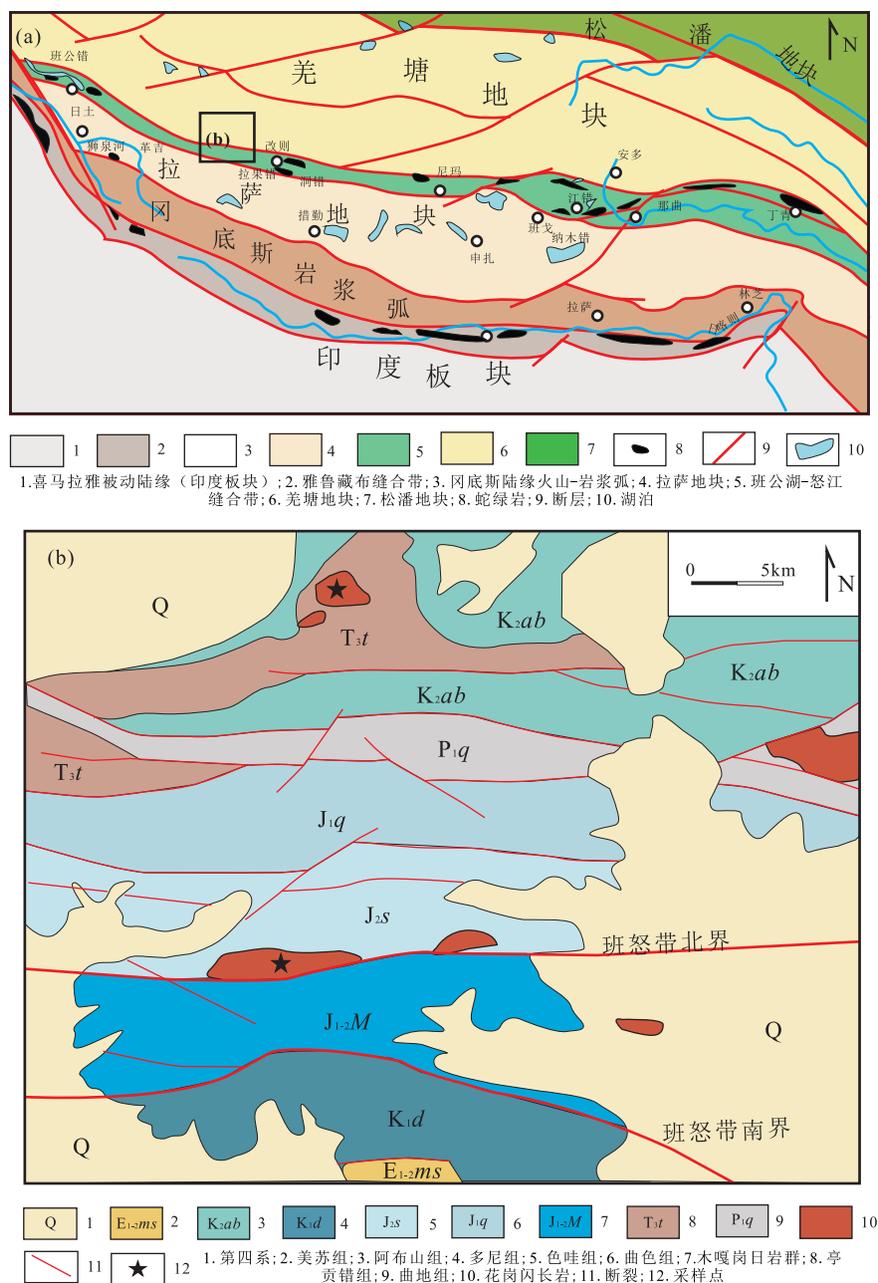
岩石显微结构为半自形-自形粒状结构,局部隐斑状结构,岩石基本上由同一世代的结晶矿物组成,部分呈似斑状结构,斑晶矿物有角闪石及聚斑斜长石。

斑晶成分的数量约为 15%,斑晶的粒度以少量的角闪石斑晶形体较大,有 5 mm,其余的斜长石斑晶形体细小,一般呈 1.5 mm,以聚合斑晶形式较为多见。个别角闪石呈筛状嵌晶结构分布,有的蚀变绿帘石集合体,一般保留有板状、长柱状结构(图 2c、2d)。

基质部分主要由斜长石、柱粒状角闪石及不规则粒状钾长石、石英等组成。斜长石具半自形柱状粒状结构,不规则粒状结构,其余角闪石、钾长石、石英的粒度变化很大,石英或钾长石呈极不规则细粒体微粒体分布于斜长石间隙中。角闪石呈柱状、长柱状,有的为规则六边菱形结构切面,斜长石自形度次之,以半自形为主,少量呈自形状(图 2e、2f)。石英及钾长石均呈他形;斜长石较新鲜,一般见聚片双晶结构,双晶缝细密均匀,斜长石的环带结构发育,一般为多环不连续环带,正交偏光可见清晰的环带边界;部分角闪石,呈斑状矿物,内包较多石英及柱粒状斜长石,呈嵌晶结构,少量转变为绿帘石。

3 样品及测试方法

样品分别采自南部和北部岩体,南部采集 6 件



a-青藏高原地质构造简图;b-研究区区域地质构造简图

图1 研究区区域地质构造简图

Fig.1 Simplified tectonic and geological maps of the studying area

新鲜样品,其中 KJ001 进行同位素测年,样品岩性为闪长玢岩;北部岩体采集 3 件新鲜样品,其中 D1128 进行同位素测年,岩性为闪长玢岩。具体位置见图 1b 所示。

3.1 主、微量元素测试

采用碱熔法制成玻璃饼,用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定样品的主量元素,分析精度优于 1%。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学国家重点实验室完成。

样品的微量元素分析测试在 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 完成。ICP-MS 分析的相关仪器工作条件和方法见相关文献 (刘颖等, 1996; 李献华等, 2002), 实验测试的重现性基于对实验室和国际标准样品 (GSR-1, GSR-2, GSR-3, G-2, BHVO-2, W-2, AGV-2, SY-4) 的同步分离和分析。微量元素中含量大于 10×10^{-6} 的样品分析精度优于 5% (2σ), 含量少于 10×10^{-6} 的样品的分析精度优于 10% (2σ), 所有稀土元素的分析精度优于 5% (2σ)。

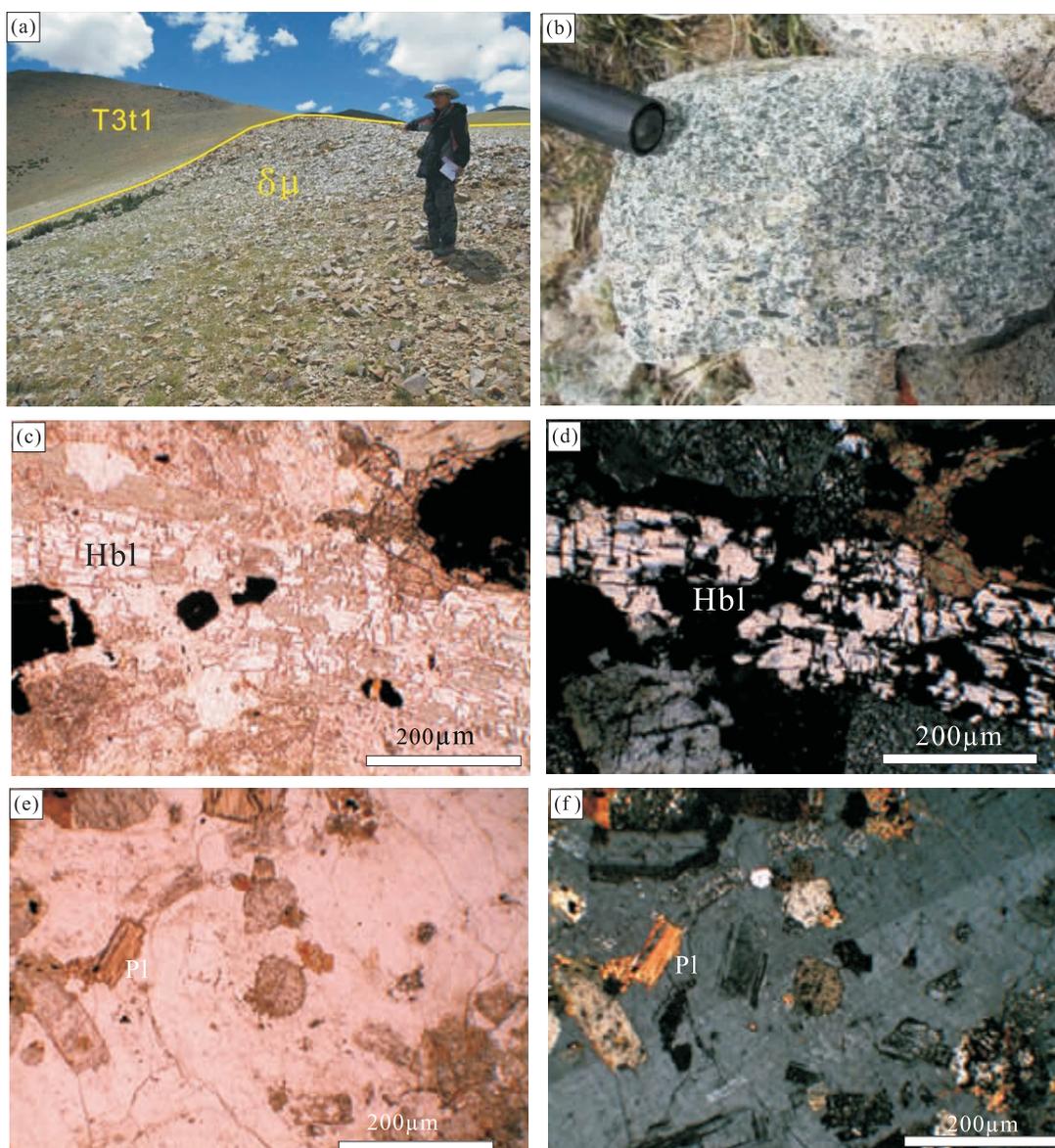


图2 阿布山岩体野外出露概况及镜下(单偏光+正交)照片(Pl-斜长石;Hbl-角闪石)

Fig.2 Photos of field outcrop and specimen and microphotographs

(plane-polarized light+cross-polarized light) of rocks of the Abushan intrusive body

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试

为了挑选到足量、大小合适、晶型良好的锆石颗粒,将 2 kg 左右的样品放在碎样机中粉碎到 1 cm^3 ,然后放入直径 20 cm 的不锈钢研磨钵中,置于震动磨样机中 5 min。最后放在铝质淘沙盘中淘洗富集锆石,最后在双目镜下人工挑选锆石。整个分选流程使用装置彻底清洗,避免样品混染。

将待测锆石以环氧树脂固定,抛光至暴露出锆石中心面,用反光、透光及阴极发光(CL)照相,在中国科学院广州地球化学研究所激光剥蚀系统上完成 U-Pb 测年。应用标准锆石 TEM(417 Ma)进行元素间的分馏校正,并用标准锆石 SL13(572 Ma, $U = 238 \mu\text{g/g}$)标定样品的 U、Th 及 Pb 含量量(Comp-

ston *et al.*, 1984; 宋彪等, 2002)。详细实验流程和原理见 Zhang 等(2007)和 Liu 等(2010)。锆石 U-Pb 分析结果数据处理使用 Ludwig (2003) 提供的 Isoplot 软件,数据处理过程见简平等(2003),单个数据点的误差均为 1σ ,采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。

4 地球化学及年代学

4.1 主量元素特征

由阿布山岩体主量元素分析结果(表 1)可见其 SiO_2 含量为 53.14% ~ 59.80%, 平均为 57.16%; Al_2O_3 含量较高,为 15.59% ~ 18.07%, 平均 16.78%; K_2O 含量变化较大,1.11% ~ 3.95%, 平均

为 2.72%，显示出中钾-高钾状态；Na₂O 含量为 3.02% ~ 6.24%，平均为 4.01%；K₂O/Na₂O 值为 0.18~1.03，显示 Na₂O 相对富集；同时显示出具有相对较低的 MgO 含量，(1.77% ~ 3.56%)，Mg[#] = 19.97~27.55，平均为 24.8。

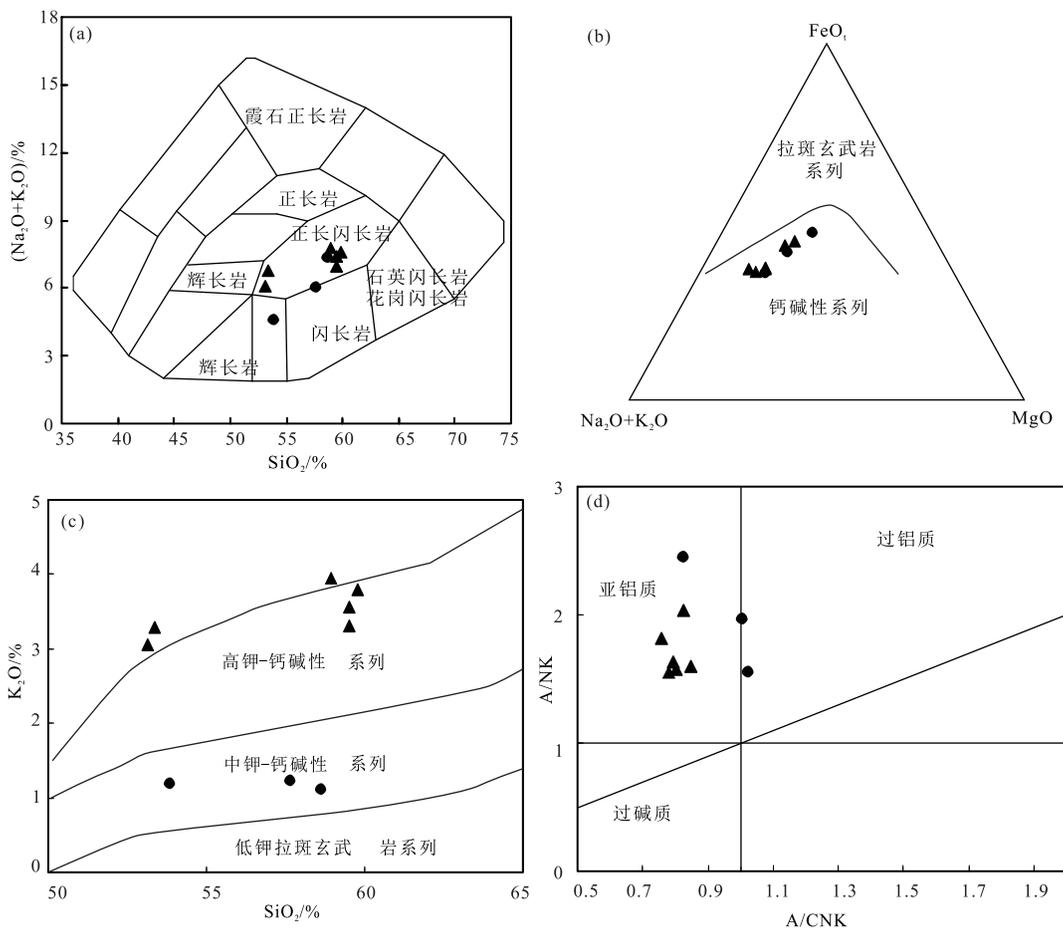
由主量元素 SiO₂-K₂O+Na₂O 所投图(图 3a)显示，样品都落入到闪长岩区域，TFeO-K₂O + Na₂O-MgO 图(图 3b)显示样品为钙碱性岩石，SiO₂-K₂O 图(图 3c)显示样品落入到中钾钙碱性系列和高钾钙碱性系列中，A/CNK-A/NK 图(图 3d)显示样品为亚铝质。

4.2 微量(稀土)元素特征

由阿布山岩体微量(稀土)元素分析结果(表 1, 图 4)可以看出，样品富集 Rb、Th 等大离子亲石元素，亏损 Ta、Nb、Ti、P 等高场强元素，与典型的岛弧型火山岩一致。Ti 的亏损可能是由含水地幔楔熔融过程中富 Ti 矿物的难溶性决定的，而 P 的亏损则是由于这些地幔熔体本身贫 P 的原因。

由稀土元素分析结果(表 1)看出，南部的样品

稀土总含量(152.14×10⁻⁶ ~ 193.83×10⁻⁶)比北部的样品稀土总含量(51.8×10⁻⁶ ~ 63.97×10⁻⁶)高，主要表现在 Nb 元素的强烈亏损，说明北部岩体受到地壳混染作用强烈。南部样品 LREE/HREE 为 7.36~9.27，北部样品 LREE/HREE 为 3.08~4.23，说明二者都是轻稀土富集型。(La/Yb)_N = 8.35 ~ 10.8，北部为 2.69~3.53，说明为轻稀土富集型，北侧轻稀土富集不明显。δEu = 0.81~0.98，平均为 0.89，显示出没有明显的铕正、负异常，指示了岩浆中几乎没有长石的分离结晶，说明岩浆的分离结晶作用不明显。δCe = 0.77~1.05，平均为 0.91，具有弱铈异常，表明有俯冲带物质、洋底沉积物或少量脱水流体以再循环的方式进入到岩浆源区(Shimizu and Masuda, 1977; 邓万明等, 2001; 郎兴海等, 2014)。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 5)中，南部和北部样品都显示出相似的分配曲线，均为右倾模式，相对富集轻稀土元素，亏损重稀土元素，轻、重稀土元素分馏较弱，分配曲线较为平缓。



a 图据 Cox 等(1979); b 图据 Irvine 和 Baragar(1971); c 图据 Gill(1981); d 图据 Peccerillo 和 Taylor(1976)

图 3 阿布山岩体主量元素投图

Fig.3 Diagrams of major elements of the Abushan intrusive rock

表 1 阿布山岩体主量元素 (%) 和微量 (稀土) 元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

样品编号	D3305-1	D3307-1	D3605-1	KJ001	D7005	D1048-01	D1128	D3092-1	D7055-1
SiO ₂	58.95	59.50	59.80	59.50	53.38	53.14	53.86	57.66	58.64
TiO ₂	0.73	0.71	0.71	0.77	1.04	0.83	0.63	0.60	0.50
Al ₂ O ₃	16.36	16.26	16.34	15.59	16.91	16.81	16.87	18.07	17.84
Fe ₂ O ₃	0.85	0.88	0.83	0.84	1.16	1.15	1.10	0.97	0.84
FeO	4.82	5.01	4.71	4.75	6.55	6.50	6.21	5.51	4.76
MnO	0.17	0.14	0.14	0.15	0.19	0.16	0.18	0.11	0.14
MgO	2.18	2.53	1.77	2.32	3.07	3.33	3.56	2.95	2.54
CaO	5.72	4.99	5.49	5.56	7.14	6.64	7.46	4.80	3.26
Na ₂ O	3.83	3.82	3.83	3.64	3.49	3.02	3.40	4.79	6.24
K ₂ O	3.95	3.57	3.79	3.30	3.28	3.06	1.19	1.23	1.11
P ₂ O ₅	0.36	0.33	0.36	0.27	0.49	0.35	0.15	0.15	0.14
烧失量	1.02	1.29	1.44	1.39	1.89	3.84	4.12	2.22	2.94
总共	98.94	99.03	99.21	98.08	98.59	98.83	98.73	99.06	98.95
Cu	41.20	32.70	17.10	25.00	58.80	288.00	28.06	39.10	13.98
Pb	4.70	5.10	23.40	72.80	19.20	14.10	15.11	14.83	12.93
Zn	44.30	26.50	79.00	80.40	90.10	100.00	78.40	73.40	74.00
Cr	102.00	22.90	38.60	38.40	43.30	44.60	37.60	32.20	24.90
Ni	71.00	5.00	11.00	12.40	9.57	5.57	5.91	6.17	5.49
Co	20.10	17.70	20.30	17.90	23.60	23.00	19.70	24.80	17.80
Li	38.60	20.30	16.10	29.30	21.50	32.60	37.22	35.20	21.29
Rb	180.00	61.20	118.00	107.00	97.20	103.00	43.00	54.40	42.80
Sb	0.06	0.12	0.08	1.07	0.44	0.42	0.82	1.25	0.87
Bi	0.13	0.09	0.14	0.23	0.12	0.17	0.10	0.12	0.08
Sr	58.70	980.00	844.00	751.00	1054.00	678.00	503.40	635.30	629.70
Nb	16.60	15.60	9.80	8.60	14.60	13.30	7.60	6.60	7.90
Ta	2.40	2.70	1.10	1.39	0.40	0.90	1.00	2.50	0.60
Zr	166.00	275.00	180.00	186.00	168.00	150.00	73.25	89.95	78.82
Hf	4.10	10.80	3.30	7.20	\	\	\	\	\
Be	2.37	3.25	2.16	1.93	1.96	2.33	0.88	1.01	0.64
Sn	2.10	3.50	1.69	2.51	1.57	1.68	1.23	1.43	1.12
Au	1.74	0.70	0.68	17.60	4.15	1.06	1.03	7.91	2.18
Ag	0.05	0.08	0.10	0.10	0.07	0.11	0.09	0.10	0.06
U	2.35	2.58	1.21	1.70	1.11	2.11	0.93	0.64	0.94
Th	14.10	9.41	11.50	11.20	9.40	15.10	3.84	2.93	3.33
Ti	4393.50	4230.20	4282.90	4622.80	6233.80	5000.00	3751.56	3613.25	3022.67
P	1571.30	1441.90	1550.40	1183.10	2142.10	1513.70	649.49	664.45	618.25
K	32804.80	29654.40	31420.20	27403.70	27178.90	25358.30	9905.75	10206.38	9243.83
La	40.97	38.42	39.31	34.31	41.58	41.02	12.36	9.65	9.83
Ce	74.49	71.05	72.33	58.03	71.71	81.21	17.70	16.80	16.60
Pr	9.30	9.05	8.14	7.09	9.32	8.78	2.57	2.44	2.44
Nd	34.94	34.30	32.24	27.53	37.56	35.45	11.90	12.00	10.10
Sm	7.42	7.19	6.71	5.56	8.06	6.73	2.85	2.91	2.19
Eu	1.94	1.92	1.65	1.43	2.11	1.76	0.99	0.95	0.74
Gd	6.38	6.25	5.83	4.15	6.99	6.03	3.50	3.22	2.41
Tb	0.95	0.94	0.90	0.84	1.04	0.85	0.62	0.57	0.40
Dy	5.31	5.08	4.86	6.03	5.71	4.87	4.23	3.50	2.61
Ho	1.09	1.09	1.04	1.02	1.20	1.06	1.00	0.76	0.60
Er	2.98	2.95	2.86	3.25	3.06	2.66	2.44	3.76	1.52
Tm	0.47	0.46	0.45	0.45	0.55	0.49	0.52	0.38	0.36
Yb	3.04	2.88	2.87	2.45	3.57	2.92	3.29	2.32	2.00
Lu	0.45	0.44	0.43	0.40	0.57	0.45	0.48	0.35	0.35
Y	27.92	28.16	25.45	28.29	33.65	27.47	28.70	20.90	16.60

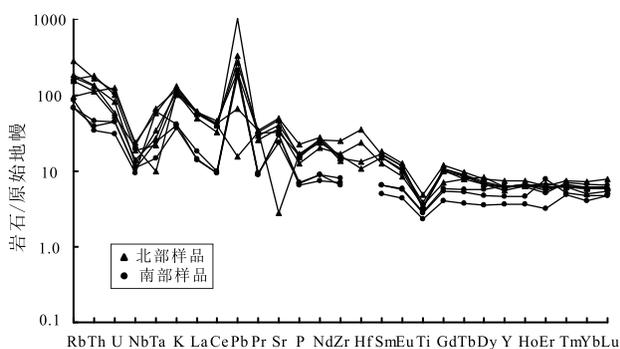


图4 阿布山岩体微量元素蛛网图
Fig.4 The trace elements spider diagram of the Abushan intrusive rock

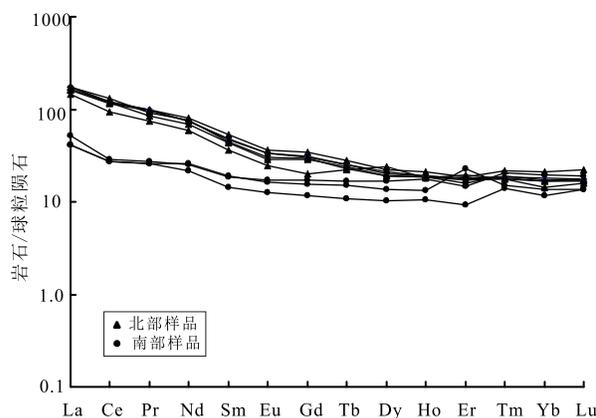


图5 阿布山岩体稀土元素配分图
Fig.5 The REE distribution patterns of the Abushan intrusive rock

4.3 锆石 U-Pb 年龄

用于锆石 U-Pb 测年的样品为南部(KJ001)和北部(D1128)岩体进行了测试结果见表2。锆石 CL 图像、测点位置如图6所示,锆石 LA-ICP-MS 分析结果见表。在双目镜下观察锆石呈淡黄色,具玻璃光泽,无色透明-半透明颗粒,多数锆石颗粒较大,粒径为 50~200 μm。晶形较好,大多呈双锥状,棱角分明。CL 图像上显示锆石具有典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构,属于岩浆锆石的产物。

由表2可知,两组锆石的Th/U值大于0.3(平均为0.60),属于典型的岩浆锆石(Belousova *et al.*, 2002)。利用 Isoplot3 (Ludwig, 2003) 程序进行协和曲线投影和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄计算,得出

KJ001 样品加权平均年龄为 $113.1 \pm 1.1 \text{ Ma}$, D1128 样品加权平均年龄为 $113.6 \pm 1.3 \text{ Ma}$ (图7),代表了岩浆的结晶年龄,表明阿布山岩体的侵入时间为早白垩世晚期,二者为同一期岩浆活动。

5 讨论

5.1 形成构造背景

阿布山岩体具有富集大离子亲石元素(Rb、Th等)、轻稀土元素(La、Ce等)富集以及高场强元素(Nb、Ta、Ti等)亏损的特点,显示出与俯冲相关的岩浆的特点(Perfit *et al.*, 1980; Miller *et al.*, 1999; 郎兴

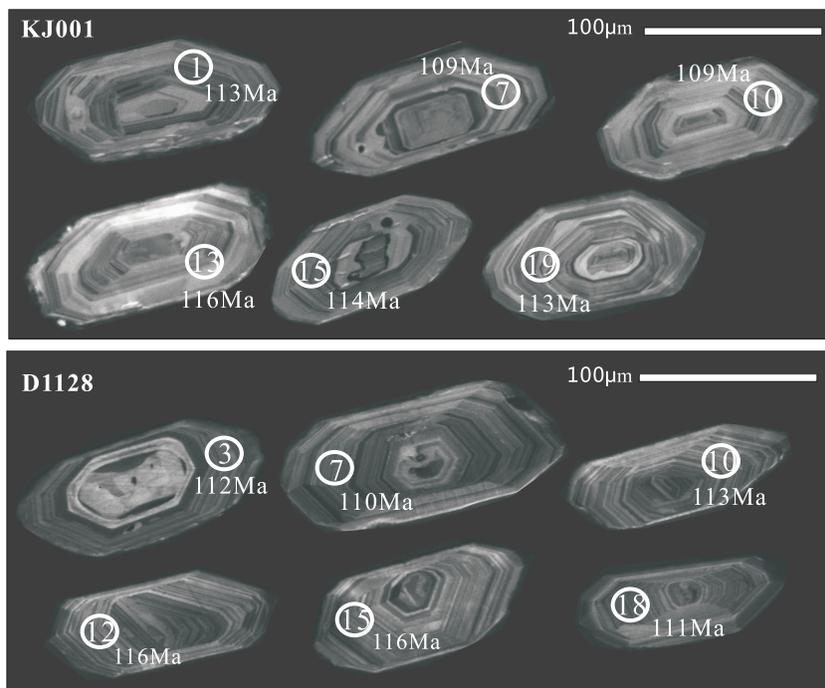


图6 阿布山岩体锆石部分 CL 图及点位图
Fig.6 CL images and LA-ICP-MS analytical spots of the zircon grains from the Abushan intrusive body

表 2 阿布山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data of zircon from the Abushan intrusive body

测点号	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	×10 ⁻⁶			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ
KJ001-1	205.73	275.68	0.75	0.05	0.00362	0.12	0.00838	0.02	0.00030	113.46	1.87410
KJ001-2	240.08	266.35	0.90	0.05	0.00389	0.12	0.00906	0.02	0.00031	115.03	1.94950
KJ001-3	316.87	402.49	0.79	0.05	0.00316	0.12	0.00755	0.02	0.00028	113.36	1.79720
KJ001-4	473.40	459.72	1.03	0.05	0.00319	0.12	0.00778	0.02	0.00027	110.28	1.71440
KJ001-5	299.23	387.71	0.77	0.04	0.00292	0.11	0.00697	0.02	0.00029	110.99	1.82380
KJ001-6	230.76	257.95	0.89	0.05	0.00323	0.11	0.00819	0.02	0.00034	114.62	2.15470
KJ001-7	826.29	679.38	1.22	0.04	0.00251	0.10	0.00606	0.02	0.00027	109.92	1.68500
KJ001-8	216.70	224.44	0.97	0.06	0.00430	0.15	0.01077	0.02	0.00034	118.26	2.14950
KJ001-9	417.91	425.15	0.98	0.05	0.00281	0.13	0.00729	0.02	0.00029	114.87	1.81290
KJ001-10	318.60	343.15	0.93	0.05	0.00311	0.11	0.00710	0.02	0.00027	109.60	1.70390
KJ001-11	165.20	239.11	0.69	0.06	0.00394	0.14	0.00938	0.02	0.00028	115.05	1.78150
KJ001-12	364.69	403.45	0.90	0.04	0.00271	0.11	0.00639	0.02	0.00028	115.26	1.79330
KJ001-13	203.89	264.18	0.77	0.05	0.00345	0.13	0.00821	0.02	0.00027	116.03	1.70170
KJ001-14	234.13	311.20	0.75	0.06	0.00385	0.14	0.00906	0.02	0.00029	115.28	1.81500
KJ001-15	376.72	333.93	1.13	0.05	0.00284	0.11	0.00689	0.02	0.00026	114.77	1.63510
KJ001-16	264.33	298.55	0.89	0.05	0.00336	0.13	0.00788	0.02	0.00029	114.33	1.85300
KJ001-17	236.03	311.45	0.76	0.05	0.00331	0.12	0.00766	0.02	0.00028	113.84	1.80170
KJ001-18	281.25	337.47	0.83	0.06	0.00298	0.13	0.00708	0.02	0.00024	112.86	1.52430
KJ001-19	305.51	364.55	0.84	0.05	0.00296	0.12	0.00751	0.02	0.00025	113.37	1.56940
KJ001-20	255.73	336.81	0.76	0.05	0.00313	0.12	0.00720	0.02	0.00024	109.90	1.51830
D1128-1	44.54	876.77	0.05	0.05	0.00307	0.12	0.00738	0.02	0.00026	114.69	1.63750
D1128-2	383.00	811.07	0.47	0.06	0.00511	0.16	0.01440	0.02	0.00033	116.28	2.10070
D1128-3	78.84	387.21	0.20	0.06	0.00434	0.15	0.01074	0.02	0.00031	112.57	1.96430
D1128-4	77.45	743.97	0.10	0.05	0.00314	0.12	0.00763	0.02	0.00029	109.89	1.86620
D1128-5	135.79	757.14	0.18	0.05	0.00342	0.12	0.00819	0.02	0.00035	118.77	2.22630
D1128-6	382.60	1039.30	0.37	0.05	0.00258	0.12	0.00658	0.02	0.00026	110.22	1.65600
D1128-7	325.34	781.87	0.42	0.06	0.00397	0.14	0.00949	0.02	0.00032	110.67	2.00940
D1128-8	178.58	1058.44	0.17	0.04	0.00232	0.10	0.00561	0.02	0.00026	110.63	1.65810
D1128-9	294.47	828.54	0.36	0.05	0.00248	0.12	0.00591	0.02	0.00028	114.93	1.79950
D1128-10	132.10	616.31	0.21	0.05	0.00276	0.11	0.00703	0.02	0.00029	113.51	1.85850
D1128-11	262.90	537.23	0.49	0.05	0.00298	0.12	0.00720	0.02	0.00032	116.03	2.01530
D1128-12	194.20	566.41	0.34	0.06	0.00475	0.17	0.01331	0.02	0.00033	116.59	2.08110
D1128-13	291.22	751.41	0.39	0.06	0.00460	0.16	0.01136	0.02	0.00029	112.84	1.84440
D1128-14	172.43	1051.63	0.16	0.04	0.00204	0.11	0.00521	0.02	0.00027	113.69	1.69190
D1128-15	204.71	663.85	0.31	0.06	0.00454	0.15	0.01157	0.02	0.00033	116.72	2.06700
D1128-16	10.70	232.57	0.05	0.07	0.00494	0.16	0.01070	0.02	0.00045	115.37	2.83010
D1128-17	40.10	331.14	0.12	0.06	0.00455	0.14	0.01068	0.02	0.00040	117.43	2.55360
D1128-18	529.62	618.80	0.86	0.05	0.00343	0.12	0.00747	0.02	0.00030	111.08	1.91610

海等, 2014); 岩石具有弱的负铈异常 ($\delta\text{Ce} = 0.77 \sim 1.05$, 平均为 0.91)、Th/La 值为 0.23~0.37, 平均为 0.31; Ce/Pb 值为 0.80~15.85 (<20), 平均为 5.19, 反映受流体交代作用及俯冲沉积物加入影响的俯冲带岩浆岩的特征 (Shimizu and Masuda, 1977; 邓万

明等, 2001; 任涛等, 2011; 郎兴海等, 2014)。选取不活动元素进行构造环境判别, 在 Y-Nb 的判别图 (图 8a) 中, 样品都落入到同碰撞火山岩和弧火山岩区域中, 而在 Y+Nb-Rb 判别图 (图 8b) 中, 样品都落入到火山弧的范围之中。在 Y-Sr/Y 图解 (图 8c) 中,

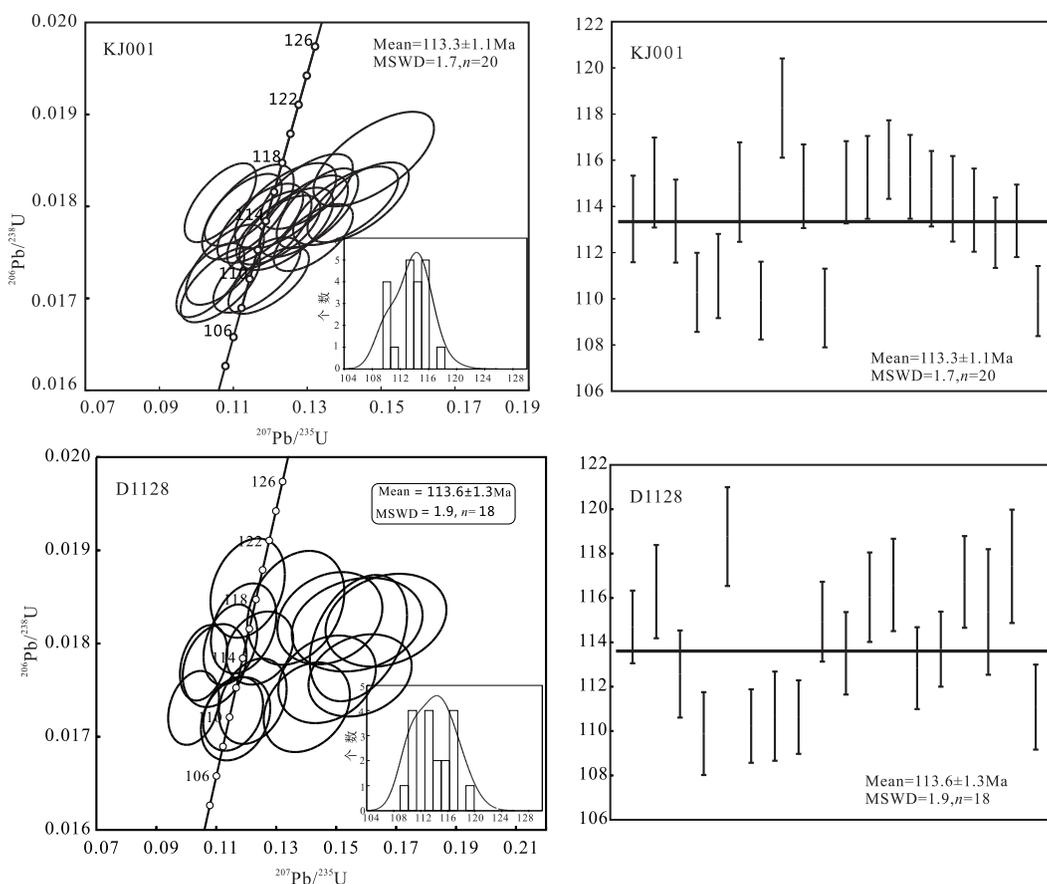


图7 阿布山岩体锆石年龄协和图

Fig.7 Diagrams of LA-ICP-MS U-Pb Concordia ages of the zircon grains from the Abushan intrusive body

样品都落入到典型岛弧火山岩区域中,在 $(Yb)_N - (La/Yb)_N$ 图解(图 8d)中,样品也都落入到典型岛弧火山岩区域中。

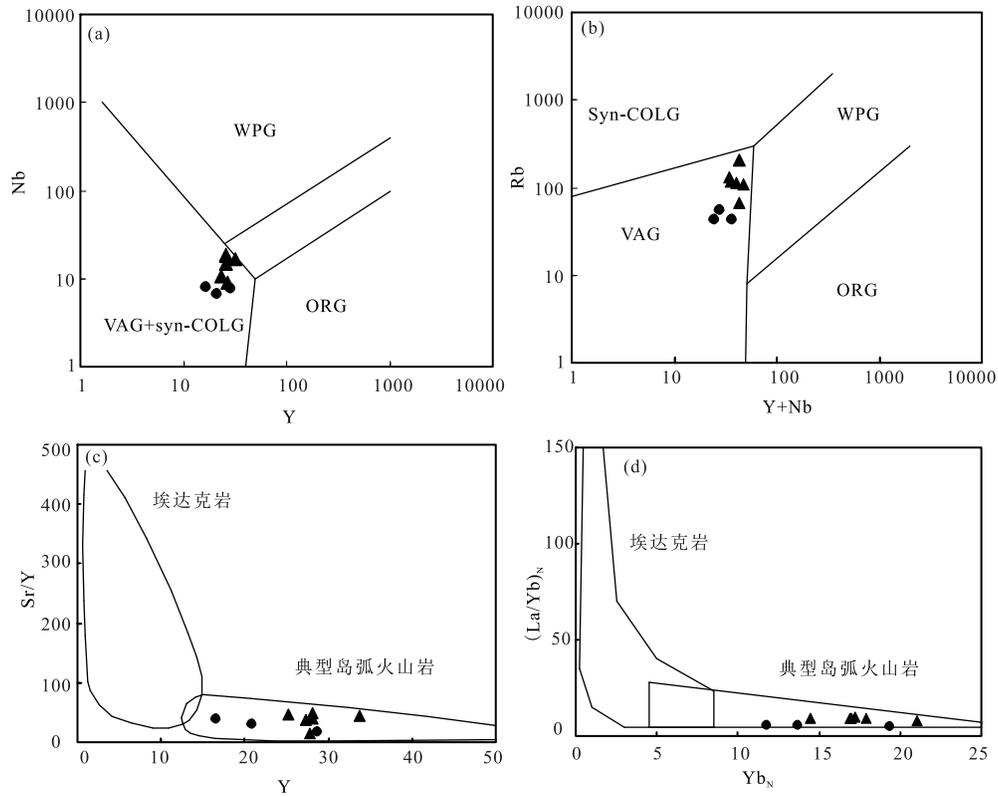
综上所述,可以认为阿布山岩体形成于岛弧构造环境,与东北部的多不杂矿区成矿岩体形成的构造环境一致(李光明等,2007;李金祥等,2008;余宏全等,2009;辛洪波等,2009;耿全如等,2012)。

近年来,随着国家对西藏基础地质工作的支持,特别是在班公湖—怒江成矿带部署一系列的地质矿产调查项目,越来越多的地质学家对该带进行了大量的年代学、岩石学成因和成矿成因等研究(李光明等,2007;李金祥等,2008;余宏全等,2009;辛洪波等,2009;耿全如等,2012),结果都显示在早白垩世期间,特提斯洋北向俯冲形成一系列的岛弧火山岩。本文所获得的 2 个岩体的年龄分别为 113.1 ± 1.1 Ma、 113.6 ± 1.3 Ma,结合其大地构造位置处于班公湖—怒江缝合带北缘,班公湖—怒江洋盆在早白垩世晚期发生大规模北向俯冲。

5.2 岩石成因

前人研究认为亲石岩浆元素(如 Ta、Th、La 和

Ce)和亲岩浆元素(Zr、Hf 和 Sm)的 H-(H/M)图解中(赵振华,1997),水平排列的岩石为分离结晶成因的,而倾斜排列的岩石为部分熔融成因(李昌年,1992)。本文中的样品在这类判别图中(图 9)显示都是为倾斜排列,说明其为部分熔融作用的产物,而非基性岩浆分异结晶形成的。在研究区东北部的多不杂矿区中,成矿岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值平均为 0.706239, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 值平均为 0.512437, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值平均为 -2.25(辛洪波等,2009;耿全如等,2012),这些特征反映为壳-幔同熔型。而一般认为花岗岩岩浆不可能直接来源于地幔的部分熔融(Taylor and McLennan,1985),地幔橄榄岩的部分熔融至多能产生相当于高镁安山质成分的岩浆(Hofmann,1988)。研究区阿布山岩体的 SiO_2 含量平均为 57.16%,接近 60%,MgO 含量平均为 2.69% (<5%), $\text{Mg}^\#$ 值平均为 24.8 (<50),这些都与玄武质岩石部分熔融形成的中酸性岩浆的特征相似(Rapp *et al.*,1999),而与地幔直接部分熔融形成的花岗质岩浆差别较大(Kamei *et al.*,2004;Jiang *et al.*,2006)。综上所述,笔者认为研究区内的闪长岩



VAG-火山弧花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩

图 8 阿布山岩体构造环境判别图

Fig.8 The tectonic environment discrimination diagram of the Abushan intrusive rocks

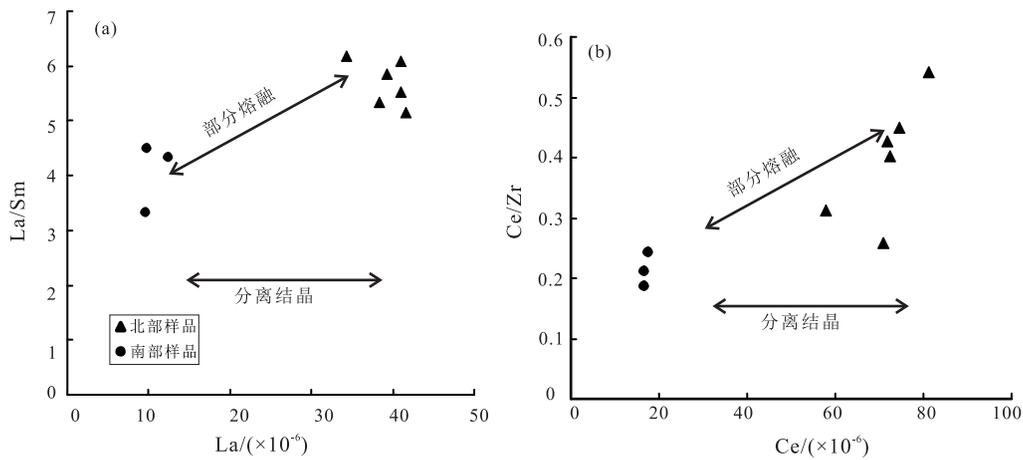


图 9 阿布山岩体的 La-(La/Sm) 和 Ce-(Ce/Zr) 关系图解

Fig.9 La-(La/Sm) and Ce-(Ce/Zr) diagrams for the Abushan intrusive rocks

岩浆应该是下地壳物质的部分熔融形成的,其形成机制为:在早侏罗世或更早,班公湖—怒江特提斯洋北向开始俯冲,洋壳板片的俯冲消减作用导致地幔楔部分熔融,形成岛弧岩浆,岛弧岩浆底侵加入到岛弧地壳的底部 (Atherton and Petford, 1993);到早白垩世,由于受到洋壳板片持续俯冲消减作用,使得初期形成的岛弧岩浆与下地壳发生部分熔融,形成花岗质熔体 (张宏飞等, 2007), 并且向地壳浅

部位位、冷凝结晶形成阿布山岩体,这种机制很好地解释了阿布山岩体具有典型岛弧型花岗岩的地球化学特征。

6 结论

(1) 阿布山岩体 SiO_2 含量为 53.14% ~ 59.8%, 平均为 57.16%; K_2O 含量为 1.11% ~ 3.95%, 平均为 2.72%, 变化大显示出中钾-高钾状态; Na_2O 含量

为 3.02%~6.24%, 平均为 4.01%, 属于中-高钾钙碱性系列岩石; 岩体富集大离子亲石元素 (Rb、Th 等), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti 等), 具有典型岛弧火山岩的特征。

(2) 阿布山岩体南部和北部闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 113.1 Ma 和 113.6 Ma, 均为早白垩世晚期岩浆活动的产物。

(3) 阿布山岩体是班公湖—怒江缝合带北向俯冲, 导致地幔楔部分熔融, 形成岛弧岩浆, 由于持续俯冲消减作用使得初始形成岛弧岩浆与下地壳发生部分熔融, 形成花岗质熔体, 而后向地壳浅部侵位、冷凝固晶形成。

致谢: 野外地质调查过程中得到了西藏地调院刘鸿飞院长、西藏区调队曾庆高总工、西藏驱龙铜矿蒋光武总工的指导和帮助, 岩石薄片分析得到了南京大学周国庆教授的指导和帮助, 在此一并感谢。

参考文献 (References):

- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416): 144-146
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 606-622
- Compston W, Williams I S, Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89(S02): B525-B534
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. *The interpretation of igneous rocks*. London: Allen and Unwin
- Gill J B. 1981. *Orogenic andites and plate tectonics*. Berlin: Springer.
- Haines S S, Klempner S L, Brown L, Guo J R, Mechie J, Meissner R, Ross A, Zhao W J. 2003. INDEPTH III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Tibet. *Tectonics*, 22(1): 1001
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: The relationship between mantle, continental, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297-314
- Huang Q T, Li J F, Cai Z R, Xia L Z, Yuan Y J, Liu H C, Xia B. 2015. Geochemistry, geochronology, Sr-Nd isotopic compositions of jiang tso ophiolite in the middle segment of the Bangong-Nujiang suture zone and their geological significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(2): 389-401
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Journal of Earth Science*, 8, 523-548
- Jiang Y H, Jiang S Y, Liang H F, Dai B Z. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4): 617-633
- Kamei A, Owada M, Nagao T, Shiraki K. 2004. High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, Southern Japan arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions. *Lithos*, 75(3-4): 359-371
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Cao Chang G, Zong K Q, Wang D B. 2010. 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. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Ludwig K R. 2003. *User's manual for isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel*. Berkeley: Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 1-71
- Miller C, Schuster R, Klötzli U, Frank W, Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399-1424
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P, Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3-14
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamou area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81
- Perfit M R, Gust D A, Bence A E, Arculus R J, Taylor S R. 1980. Chemical characteristics of island-arc basalts: Implications for mantle sources. *Chemical Geology*, 30(3): 227-256
- Qiu R Z, Zhou S, Li T D, Deng J F, Xiao Q H, Wu Z X, Cai Z Y. 2006. The tectonic-setting of ophiolites in the western Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2-3): 215-228
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356
- Shimizu H, Masuda A. 1977. Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation. *Nature*, 266(5600): 346-348
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1-132
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211-280
- Zhang K J, Zhang Y X, Li B, Zhong L F. 2007. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: Constraints on provenance and pre-Cenozoic tectonic evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3-4): 604-616
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2): 241-255
- 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 陈鲁根. 2004. 班公湖—怒江结合带南侧

- 孤-盆系时空结构与演化特征. 中国地质, 31(1): 51-56
- 曹圣华, 邓世权, 肖志坚, 廖六根. 2006. 班公湖—怒江结合带西段中特提斯多岛弧构造演化. 沉积与特提斯地质, 26(4): 25-32
- 陈玉禄, 徐天德, 张宽忠, 勾永东, 文建华. 2006. 西藏改则地区上三叠统共组组的建立及其意义. 地质通报, 25(12): 1409-1412
- 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 2001. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究. 地质科学, 36(3): 304-318
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 辛洪波, 刘治博. 2011. 西藏班公湖—怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据. 岩石学报, 27(7): 1993-2002
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 彭智敏, 张璋. 2011. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景初步研究. 地质通报, 30(8): 1261-1274
- 耿全如, 彭智敏, 张璋, 潘桂棠, 王立全, 关俊雷, 贾宝江, 刁志忠. 2012. 班公湖—怒江成矿带及邻区特提斯演化与成矿地质背景. 北京: 地质出版社, 1-219
- 黄强太. 2013. 西藏江错-安多蛇绿岩地球化学特征及其构造演化研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘, 10(4): 439-456
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 王保弟. 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 24(2): 303-314
- 康志强, 许继峰, 王保弟, 陈建林. 2010. 拉萨地块北部去申拉组火山岩: 班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 26(10): 3106-3116
- 郎兴海, 唐菊兴, 谢富伟, 李志军, 黄勇, 丁枫, 杨欢欢, 周云, 王勤. 2014. 西藏雄村矿区南部玢岩的地质年代学、岩石地球化学及其地质意义. 大地构造与成矿学, 38(3): 609-620
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 57-117
- 李光明, 李金祥, 秦克章, 张天平, 肖波. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体证据. 岩石学报, 23(5): 935-952
- 李建峰. 2009. 洞错、日土蛇绿岩及班公湖—怒江缝合带西段构造演化. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 李金祥, 李光明, 秦克章, 肖波. 2008. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约. 岩石学报, 24(3): 531-543
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289-294
- 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
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖—怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. 地学前缘, 11(4): 371-382
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 李金发, 肖庆辉, 蔡志勇. 2004. 西藏班公湖—怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定-兼论班公湖—怒江蛇绿岩带形成时代. 中国地质, 31(3): 262-268
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境. 地质通报, 25(7): 792-799
- 曲晓明, 赵元艺, 辛洪波. 2012. 西藏班公湖—怒江成矿带找矿远景区评价. 青藏专项验收报告
- 任涛, 钟宏, 陈金法, 朱维光, 张兴春. 2011. 云南中甸地区浪都高钾中酸性侵入岩的地球化学特征. 矿物学报, 31(1): 43-54
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义. 矿床地质, 28(6): 737-746
- 史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考. 地质论评, 51(6): 681-693
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26-30
- 西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社
- 肖序常, 李廷栋. 2000. 青藏高原的构造演化与隆升机制. 广州: 广东科技出版社
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 刘鸿飞, 赵元艺, 黄玮. 2009. 藏西班公湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及 Pb、Sr、Nd 同位素特征. 矿床地质, 28(6): 785-792
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 宗克清, 蔡宏明, 袁洪林. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 23(6): 1347-1353
- 张旗, 杨瑞英. 1985. 西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类的深成岩及其地质意义. 科学通报, (16): 1243-1245
- 张玉修. 2007. 班公湖—怒江缝合带中西段构造演化. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 赵文津, 刘葵, 蒋忠惕, 吴珍汉, 赵逊, 史大年, 熊嘉育, Mechie J, Brown L, Hearn T, Guo J R, Haines S S. 2004. 西藏班公湖—怒江缝合带: 深部地球物理结构给出的启示. 地质通报, 23(7): 623-635
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 王立全, 廖忠礼, 赵志丹, 董国臣, 周长勇. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束. 岩石学报, 22(3): 534-546

(本文责任编辑: 龚超颖)