

青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义^{*}

边千韬¹ Pospelov I. I.² 李惠民³ 常承法¹ 李继亮¹

BIAN QianTao¹, Pospelov I. I.², LI HuiMin³, CHANG ChengFa¹ and LI JiLiang¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 109017, Russia

3. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 109017, Russia

3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2007-03-05 收稿, 2007-05-10 改回.

Bian QT, Pospelov II, Li HM, Chang CF and Li JL. 2007. Discovery of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai province, and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):925–934

Abstract The adakite was recently revealed in the Buqingshan ophiolite complex, a western sector of the A'nyemaqen ophiolite belt in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau. The adakite consists of granodiorite-tonalite intruded in the Early Paleozoic ophiolite complex. The mineralogical phases present in the adakite are mainly plagioclase, quartz, hornblende, biotite, rare pyroxene and potassium feldspar; and accessory phases are apatite, zircon, sphene and magnetite etc. The adakite is calc-alkaline, and characterized by high SiO_2 (63.65% ~ 71.59%), high Al_2O_3 (14.81% ~ 16.11%), high Na_2O (4.68% ~ 5.33%) and $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.48 ~ 3.08, av. 2.39) ratios, high Sr (444.08×10^{-6} ~ 560.41×10^{-6}) and Sr/Y (50.8 ~ 105.3), rich in large ion lithophile elements (LILE), depleted in high strength field elements (HFSE), weakly negative Eu anomalies, strong depletion of heavy rare earth elements (e.g., $\text{Yb} = 0.38 \times 10^{-6}$ ~ 0.74×10^{-6}) and Y (4.93×10^{-6} ~ 11.03×10^{-6}), high La/Yb (44.93 ~ 90.97), positive Ba and Pb but negative Nb and P anomalies. These geochemical characteristics suggest that the Buqingshan adakite belongs to typical adakite (O-type, HSA). A TIMS zircon U-Pb age of 402 ± 24 Ma for the adakite have been obtained. The Buqingshan adakite was most probably derived by the partial melting of the subducting Kunlun-Qilian-Qinling oceanic crust (basaltic oceanic crust plus its overlying sediment) at garnet amphibolite-facies condition. The discovery suggests that the part of the Kunlun-Qilian-Qinling oceanic crust of the study area was subducted northward, and the subduction zone was situated to the south of the A'nyemaqen ophiolite belt in the end-Early Paleozoic period. It is also of implication that porphyry-type and hydrothermal-type Au, Ag, Cu, Mo mineralization related with typical adakite probably existed in the A'nyemaqen ophiolite belt.

Key words Adakite, Geochemistry, End-Early Paleozoic, A'nyemaqen Ophiolite Belt, Tibetan plateau

摘要 在青藏高原北部阿尼玛卿蛇绿岩带布青山段首次发现了埃达克岩, 它们多呈不规则岩脉状侵入于布青山地区北部早古生代蛇绿混杂岩中。其岩性为花岗-英云闪长岩, 主矿物有斜长石、石英、黑云母、角闪石、少量钾长石和辉石; 副矿物有榍石、磷灰石、锆石和磁铁矿等。属钙碱系列, 具典型(I类、O型、HSA)埃达克岩的地球化学特征, 表现为: 高 SiO_2 (63.65% ~ 71.59%), 高 Al_2O_3 (14.81% ~ 16.11%), 高 Na_2O (4.68% ~ 5.33%) 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.48 ~ 3.08, 平均 2.39), 高 Sr (444.08×10^{-6} ~ 560.41×10^{-6}) 和 Sr/Y (50.8 ~ 105.3), HREE 强烈亏损, 低 Yb (0.38×10^{-6} ~ 0.74×10^{-6}), 高 La/Yb (44.93 ~ 90.97), 弱负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.74 \sim 0.90$), 富集大离子亲石元素 (LILE), 亏损高场强元素 (HFSE), Ba、Pb 正异常而 Nb、P 负

^{*} 国家自然科学基金重点项目(40334044)、国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412602)、国家自然科学基金(批准号: 49872077)和中国科学院卢嘉锡基金资助。

第一作者简介: 边千韬, 1945年生, 博士, 研究员, 从事大地构造学、岩石学及矿床学研究, E-mail: bianqt@mail.igcas.ac.cn

异常。获得布青山埃达克岩的锆石 TIMS U-Pb 年龄为 $402 \pm 24\text{Ma}$ 。布青山埃达克岩熔体来自俯冲的昆祁秦洋壳(含海洋沉积物)在石榴石角闪岩相条件下部分熔融,主要残留相为石榴石($\pm$ 角闪石)。布青山埃达克岩的发现指示早古生代末期洋壳(昆祁秦多岛洋的一部分)俯冲作用的存在,俯冲方向朝北(现在方位),此前,俯冲带发生长时间的向洋迁移,早古生代末期俯冲带已后退到阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南;暗示典型埃达克岩也可以形成于洋壳俯冲晚期;提示阿尼玛卿蛇绿岩带可能与典型埃达克岩有关的 Au、Ag、Cu、Mo 等热液和斑岩矿床。

关键词 埃达克岩;地球化学;早古生代末期;青藏高原;阿尼玛卿蛇绿岩带

中图法分类号 P588.122; P534.4; P594.1

1 引言

埃达克岩最先发现于阿留申 adak 岛(Kay, 1978)。12年后,Defant and Drummond(1990)参考 Kay(1978)的工作成果提出了埃达克岩(adakite)的概念。此后,埃达克岩研究风靡世界地学界。这是因为埃达克岩不仅蕴含着重要的地球动力学信息,而且与 Cu、Au 成矿作用有密切关系。近十几年来中国各地发现了许多埃达克岩(张旗等,2003 及其所列参考文献)。但东昆仑造山带(包括阿尼玛卿山)尚未见埃达克岩的报道。近来,我们在阿尼玛卿蛇绿岩带布青山段发现了埃达克岩。此岩石最早被视为海西期斜长花岗岩^①,后来被视为加里东末期岛弧型花岗-英云闪长岩(边千韬等,1999a),我们最近的研究结果表明:此岩石是典型埃达克岩,布青山地区存在多个埃达克岩体,对进一步研究阿尼玛卿造山带及邻区地球动力学和大地构造有重要意义。本文着重讨论其地球化学特征与地球动力学意义。

2 地质概况

近东西向延伸、长逾 1200km 的东昆仑南缘蛇绿混杂岩带夹持于北面的昆祁秦缝合系和南面的古特提斯缝合系之间,既为二者的分界线,又包含有二者的成分。昆祁秦缝合系是由新元古代末期-早古生代昆祁秦多岛洋于晚奥陶世-晚志留世闭合形成的(Bian *et al.*, 2001)。东昆仑南缘蛇绿混杂岩带北侧的东昆仑地区分布着一些年龄为 467~413Ma 的岛弧型中酸性侵入岩体(许荣华等,1990; Pan *et al.*, 1996; 张智勇等,1998),指示东昆仑早古生代岛弧的存在。东昆仑南缘蛇绿混杂岩带的东段便是北西西向延伸、长逾 400km、宽约 10~20km 的阿尼玛卿蛇绿混杂岩带(图 1a)。长约 90km 的布青山蛇绿混杂岩位于阿尼玛卿蛇绿岩带西段(图 1b),它由一系列构造岩片构成,其中包含早古生代和早石炭—早二叠世两期蛇绿岩(边千韬等,1999b; Bian *et al.*, 2004);自北而南可大致划分为 3 个亚带:(i)以晚石炭—早二叠世生物碎屑及生物礁灰岩(形成于古特提斯多岛洋北岸滨、浅海环境)岩片为主;(ii)以早古生代蛇绿混杂岩岩片(原属昆祁秦缝合系)为主,其中可能含有前寒武纪微地块的岩片;(iii)以早石炭—早二叠世蛇绿混杂岩岩片(原属古特提斯缝合系)为主。早古生代和早石炭—早二叠世两套蛇

绿混杂岩中包含了几乎所有的蛇绿岩岩石单元。早二叠世巨厚磨拉石角度不整合在早古生代蛇绿混杂岩之上。早三叠世磨拉石角度不整合在早石炭—早二叠世蛇绿混杂岩之上。

已发现的 5 个大小不等的埃达克岩体均侵入于早古生代蛇绿混杂岩(ii 亚带)中(图 1c)。埃达克岩体主要呈 NWW 向展布的岩脉产出。其中最大的一个岩体位于得力斯坦沟和亿可哈拉尔沟之间,长约 10km,宽约 0.3~2.5km,面积约 10km²,有分支现象,为一条不规则岩脉。其次一个埃达克岩体位于亿可哈拉尔沟以东,近 EW 向展布,长约 5km,宽约 200~300m。其余岩体均较小。岩体中有变质橄榄岩捕虏体。可见早二叠世磨拉石不整合于埃达克岩体之上,磨拉石底部见有埃达克岩砾石,指示埃达克岩于早二叠世之前侵位。

3 岩石学特征

布青山埃达克岩(花岗-英云闪长岩)块状构造,微显似斑状结构。主矿物有斜长石(45%~60%),石英(20%~30%),钾长石少量(约 10%),暗色矿物(黑云母、角闪石和辉石)(10%~15%),与埃达克岩的主矿物组合(斜长石+石英+角闪石+黑云母+辉石,Defant and Drummond, 1990)一致;副矿物有榍石、磷灰石、锆石和磁铁矿等,与埃达克岩最常见的副矿物组合(磷灰石+锆石+榍石+钛磁铁矿或磁铁矿, Martin *et al.*, 2005)一致。

布青山埃达克岩斜长石双晶有错动和扭曲现象,石英普遍具波状消光,部分有亚晶粒化现象,指示岩石受到了动力变质。岩石还有蚀变现象,部分斜长石被粘土及云母小片交代;部分暗色矿物发生绿泥石化、碳酸盐化及绿帘石化。

4 分析方法

在亿可哈拉尔沟西埃达克岩体上采了 3 件地球化学样品(YK-5、YK-7、YK-9)和 1 件 6 kg 重锆石 U-Pb 同位素定年样品(YK-6),在得力斯坦沟采了 1 件地球化学样品(DL-36),采样位置见图 1c。

① 青海省地质局, 1973. 中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 200000, 加鲁河幅(1-47-III)。

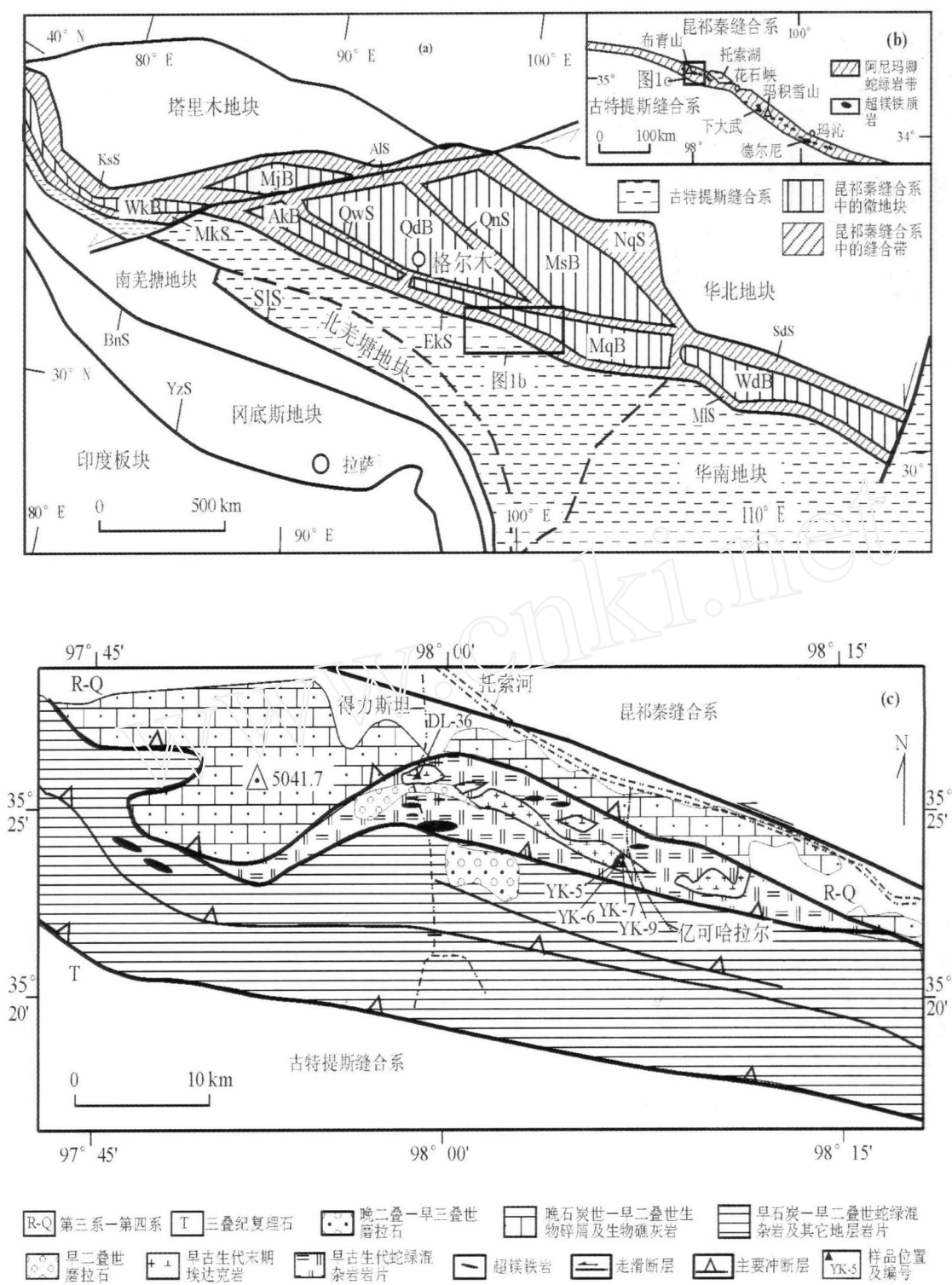


图1 阿尼玛卿蛇绿岩带大地构造位置图(a)(据 Bian *et al.* , 2004). 布青山段蛇绿混杂岩的位置(b)和布青山段蛇绿混杂岩地质略图(c)

昆祁秦缝合系中的微地块: WkB-西昆中; MjB-米兰河-金雁山; MsB-中-南祁连; QdB-柴达木; AkB-阿牙克库木; MqB-玛沁; WdB-秦中-大别. 缝合带: KsS-库地-苏巴什; MkS-麻扎-康西瓦; AIS-阿尔金; NqS-北祁连; QnS-柴达木北缘; QwS-祁漫塔格-乌妥; EkS-东昆仑南缘; SdS-商丹; MIS-勉略; SIS-双湖-澜沧江; BnS-班公湖-怒江; YzS-雅鲁藏布江

Fig.1 Sketch map showing the tectonic setting of the A'nyemaqen ophiolite belt(a), Sketch map showing the location of the Buqingshan ophiolite complex(b) and Simplified geological map of the Buqingshan ophiolite complex(c)

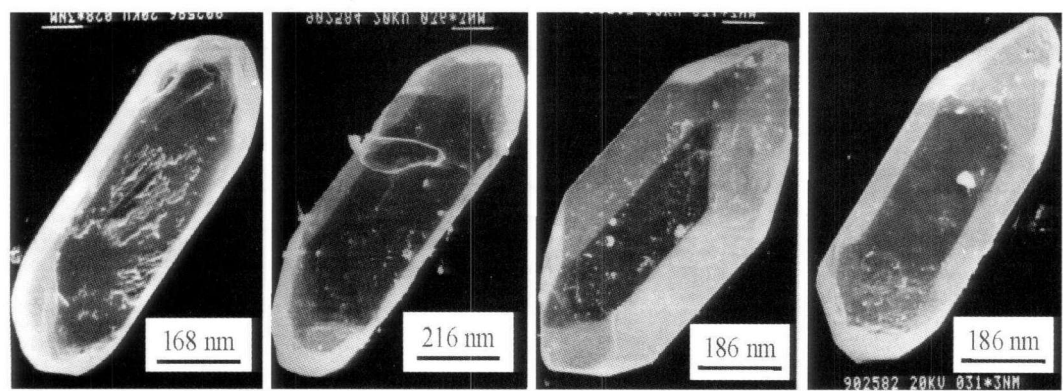


图2 布青山埃达克岩(YK-6)锆石电镜照片
Fig.2 Scanning electron microscope photographs of zircons from the Buqingshan adakite (YK-6)

表1 布青山埃达克岩(样品 YK-6)多颗粒等份锆石 TIMS-ID U-Pb 分析结果
Table 1 Results of U-Pb TIMS-ID analyses of multigrain aliquots zircons from the Buqingshan adakite (YK-6)

样品	重量 (μg)	浓度 (×10 ⁻⁶)		普通铅 含量 (ng)	原子比率					表面年龄值(Ma)			
		U	Pb		²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰³ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
A1	20	649	44	0.026	1982	0.1617	0.06349(68)	0.4792(68)	0.05475(45)	396.8±4.2	397.5±4.6	401.9±18	
A2	30	693	40	0.036	1994	0.1320	0.05531(37)	0.4169(34)	0.05468(23)	347.0±2.3	353.8±2.5	399.0±9.4	
A3	20	656	49	0.230	217	0.1370	0.05545(33)	0.4123(107)	0.05392(131)	347.9±2.1	350.5±7.7	367.9±55	

²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 已对实验空白(Pb=0.050ng, U=0.002ng)及稀释剂作了校正,其它原子比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素;括号内的数字为2σ绝对误差。

常量元素分析由中国科学院地质与地球物理研究所元素分析实验室用 XRF 方法完成,分析误差为 1%~2%。微量元素分析由中国科学院地质与地球物理研究所电感耦合等离子质谱(ICP-MS)实验室用 ICP-MS 方法完成,测量仪器为英国 VG 公司生产的 PQ2 Turbo ICP-MS,分析误差为 1%~9%(大部分<5%)。

锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质调查局天津地质矿产研究所用改进的 Krogh 程序(1973,1982a,b)完成。根据晶形、大小、颜色及透明度选择了 3 等份锆石作为分析样品,每个等份都是由 5~10 粒具相同特征的锆石组成。所有锆石颗粒在热的浓硝酸中清洗 1h。清洗后的锆石用净化的浓氢氟酸在 Teflon 密闭容器内、温度 195℃ 条件下、溶解约 48h。使用²⁰⁸Pb-²³⁵U 混合稀释剂将溶液稀释。U、Pb 含量和同位素比值测定在 VG354 质谱计上用高灵敏度 Daly 检测器进行。实验室全流程 U、Pb 空白分别为 0.050ng 和 0.002ng,年龄计算采用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 1995)。

5 年龄

分析了 3 等份锆石,结果列入表 1。第 1 等份锆石为浅黄棕色、透明、细长柱状晶体;第 2 等份为浅黄棕色、透明、短柱状晶体;第 3 等份为浅黄色、透明、柱状晶体。这 3 等份锆

石自形度均高,全为岩浆结晶形成(图 2)。其锆石数据构成一条很好的不一致线,与谐和线的上交点年龄为 402±24Ma(图 3a),此年龄与埃达克岩侵入于早古生代蛇绿混杂岩并被早二叠世磨拉石超覆的地质事实吻合,应代表埃达克岩的形成年龄;此年龄还与东昆仑地区 467~413Ma 的岛弧型中酸性侵入岩体中最年轻岩体的年龄在误差范围内一致。第 2 和第 3 等份锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄统计权平均值 347.5±1.5Ma(图 3b)正好与早石炭世古特提斯洋强烈打开的时间吻合,可能是这次强烈构造-热事件的反映。不一致线与谐和线的下交点年龄为 29±150Ma,无地质意义。不一致线未通过原点,指示没有现在 Pb 丢失(在样品制备过程中没有 Pb 丢失)。

6 地球化学

布青山埃达克岩的常量元素、微量元素和稀土元素分析结果列入表 2。埃达克岩的地球化学特征为:SiO₂≥56.0%,Al₂O₃≥15.0%,MgO<3%,贫 Y 和 Yb(Y<18×10⁻⁶,Yb≤1.9×10⁻⁶),Sr>400×10⁻⁶,LREE 富集,无 Eu 异常或有轻微的负 Eu 异常,较高的过渡族元素如 Cr(30×10⁻⁶~50×10⁻⁶),Ni(20×10⁻⁶~40×10⁻⁶)(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)。

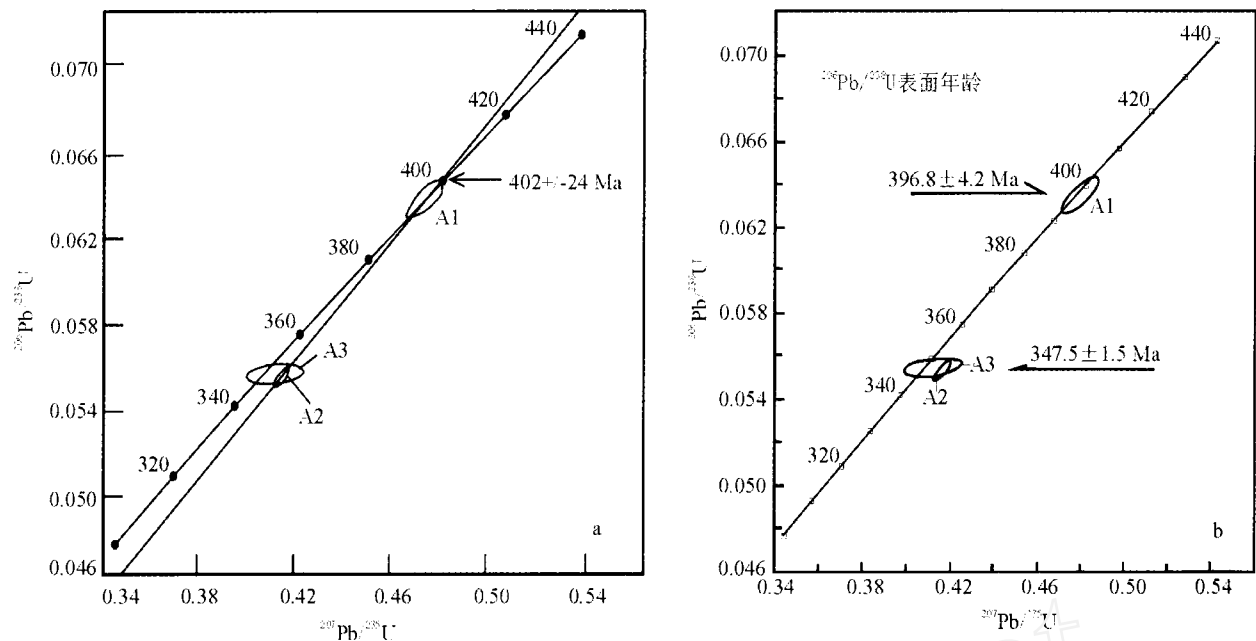


图3 布青山埃达克岩(YK-6)锆石 U-Pb 分析结果谐和图
Fig. 3 Concordia diagram showing the results of U-Pb zircon analyses of the Buqingshan adakite (YK-6)

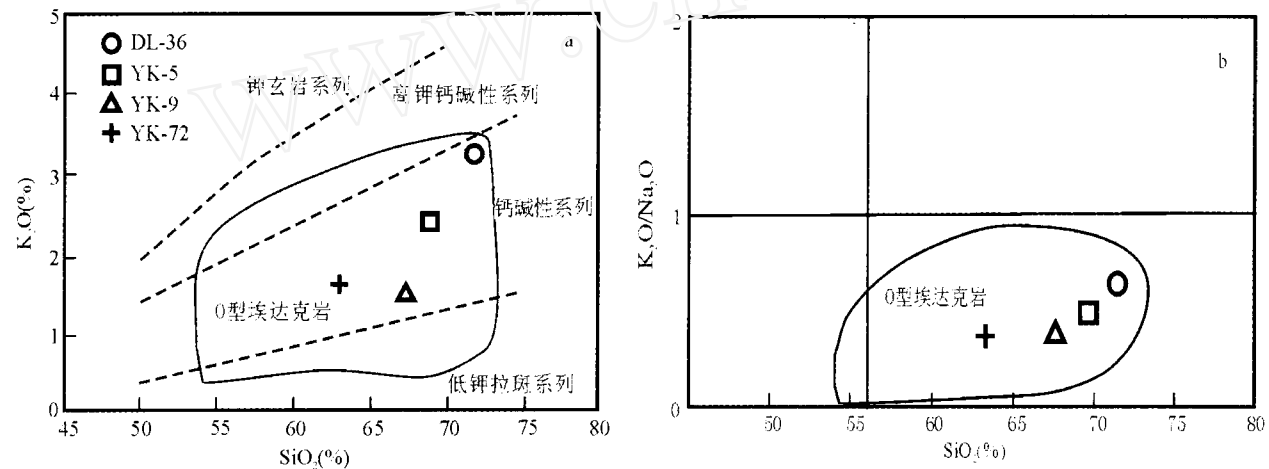


图4 布青山埃达克岩的 SiO₂-K₂O 图(a)和 (K₂O/Na₂O)-SiO₂ 图(b). 0 型埃达克岩范围据 Martin(1993)
Fig. 4 SiO₂-K₂O diagram (a) and SiO₂-(K₂O/Na₂O) diagram (b) for the Buqingshan adakite

布青山埃达克岩常量元素特征为, SiO₂ (63.65% ~ 71.59%) ≥ 56.0%, 高 Al₂O₃ (14.81% ~ 16.11%), MgO (0.52% ~ 2.30%) < 3%, Mg[#] 值 [100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)] 为 15.99 ~ 43.48, 平均 31.31, 高 Na₂O (4.68% ~ 5.33%) > 3.5% 和 Na₂O/K₂O (1.48 ~ 3.08, 平均 2.39)。样品投影点在 SiO₂-K₂O 图(图 4a)中落入钙碱系列和 O 型埃达克岩范围, 在 (K₂O/Na₂O)-SiO₂ 图(图 4b)中落入 O 型埃达克岩范围。

布青山埃达克岩的微量元素特征为, 富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE), ΣREE = 140.30 × 10⁻⁶ ~ 143.77 × 10⁻⁶, LREE 与重稀土元素(HREE)分馏明显, HREE 强烈亏损(图 5a), Yb (0.38 × 10⁻⁶ ~ 0.74 × 10⁻⁶) ≤ 1.90 × 10⁻⁶, La/Yb (44.93 ~ 90.97) > 20, (La/Yb)_N

(32.23 ~ 65.26) > 10, 弱负 Eu 异常(δEu = 0.74 ~ 0.90)。高场强元素(HFSE)亏损, 在 N-MORB 标准化微量元素蛛网图上呈现明显的 Nb、Ta、P 负异常谷(图 5b)。高 Sr (444.08 × 10⁻⁶ ~ 560.41 × 10⁻⁶), 低 Y (4.93 × 10⁻⁶ ~ 11.03 × 10⁻⁶), Sr/Y 值 (50.8 ~ 105.3) ≥ 40.0, 高 Cr (137.89 × 10⁻⁶ ~ 172.83 × 10⁻⁶) 和 Ni (32.30 × 10⁻⁶ ~ 88.46 × 10⁻⁶)。样品投影点在 Y-Sr/Y (图 6a) 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图解(图 6b)上均落在 adakite 区。

7 类型

张旗等(2004)归纳出 6 类埃达克岩, 并将其中典型的埃

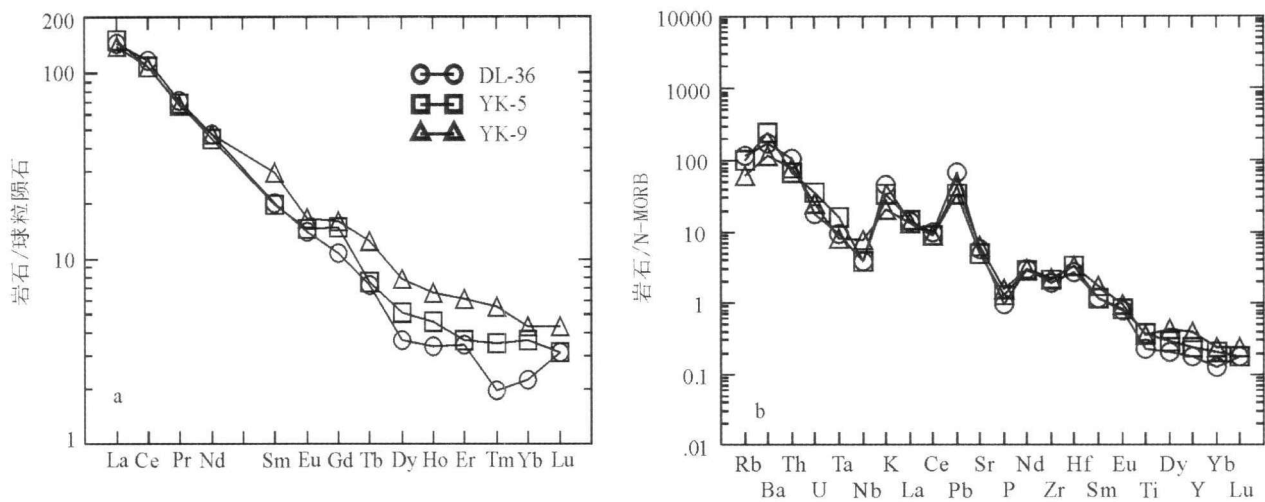


图5 布青山埃达克岩 REE 分布型式(a)和 N-MORB 标准化微量元素蛛网图(b).
球粒陨石和 N-MORB 值据 Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and N-MORB-normalized trace element spidergrams (b) for the Buqingshan adakite

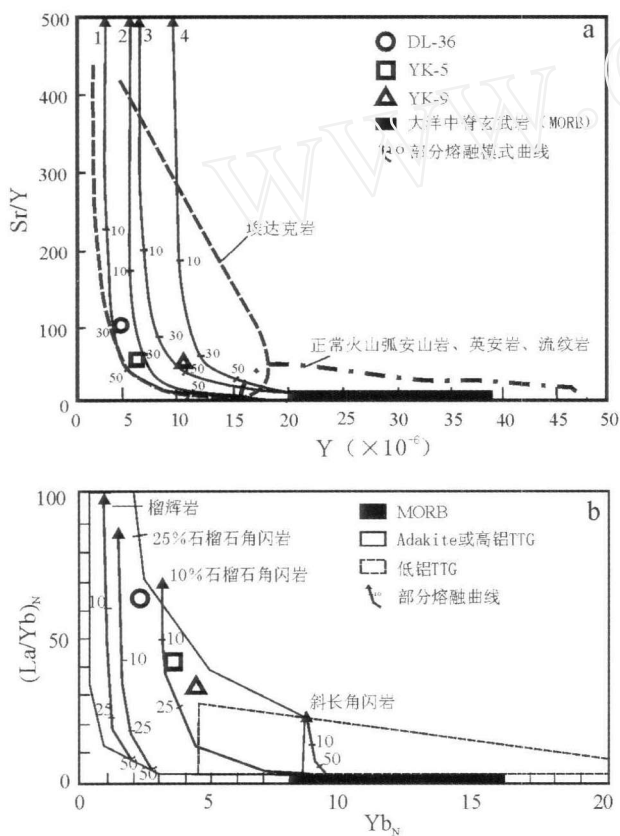


图6 布青山埃达克岩的 Y-Sr/Y 图解(a) (据 Defant and Kepezhinskias, 2001) 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图解(b) (据 Drummond and Defant, 1990). 图6a中曲线: 1-榴辉岩(石榴石/辉石=50/50); 2-角闪石榴石岩(石榴石/角闪石=50/50); 3-角闪榴辉岩(角闪石/石榴石/辉石=10/40/50); 4-石榴石角闪岩(石榴石/角闪石=10/90)
Fig. 6 Y vs. Sr/Y (a) and (La/Yb)_N vs. Yb_N (b) diagrams for the Buqingshan adakite

达克岩(I类)归于O型埃达克岩。由表2可以看出,布青山埃达克岩的地球化学参数与典型的埃达克岩一致。因此,布青山埃达克岩应属典型的埃达克岩(I类),当然也属于O型埃达克岩。

Martin *et al.* (2005) 将埃达克岩分为高硅埃达克岩(HSA)和低硅埃达克岩(LSA)两类,前者的地球化学特征为高硅($\text{SiO}_2 > 60\%$),低 MgO (0.5% ~ 4%), $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} < 11\%$, $\text{Sr} < 1100 \times 10^{-6}$ 。布青山埃达克岩的地球化学特征与HSA 完全符合(见表2),其在判别图上的投影点落入HSA 区(图7),它们的原始地幔标准化微量元素蛛网图很相似(图略),表明布青山埃达克岩属于高硅埃达克岩(HSA)。综上所述,布青山埃达克岩属于典型(I类、O型、HSA)埃达克岩。

8 讨论

8.1 岩石成因

上文论述了布青山埃达克岩为典型(I类、O型、HSA)埃达克岩。通常认为此类型的埃达克岩是由俯冲板片熔融形成的(Kay, 1978; Defant and, Drummond 1990; Drummond and Defant 1990; Peacock *et al.*, 1994; 张旗等, 2001, 2004; Martin *et al.*, 2005)。俯冲板片玄武岩部分熔融形成的熔体以富 Ba、Rb、Sr、U 和 Pb 为特征,而俯冲沉积物部分熔融形成的熔体富 Th 和 LREE (Hawkesworth *et al.*, 1997; Guo *et al.*, 2006)。因此,用 Th/Yb-Th/Sm 图可以判断埃达克岩的源区情况。布青山埃达克岩在 Th/Yb-Th/Sm 图(图8)上的投影点大致落在 MORB 和海洋沉积物熔体连线之上、并处于二者之间的位置,暗示其源岩既有洋壳玄武岩也有海洋沉积物,或称含海洋沉积物的俯冲板片。布青山埃达克岩产于蛇绿混

表2 布青山埃达克岩的常量元素 (wt%) 和微量元素 (×10⁻⁶) 分析结果

Table 2 The whole rock analyses of major (wt%) and trace elements (×10⁻⁶) of the Buqingshan adakite

	DL-36	YK-5	YK-9	YK-72	典型埃达克岩
SiO ₂	71.59	68.77	67.28	63.65	≥56.0
TiO ₂	0.29	0.47	0.46	0.65	
Al ₂ O ₃	14.81	14.97	16.11	15.59	≥15.0(很少小于)
Fe ₂ O ₃	0.43	0.90	0.77	1.26	
FeO	0.84	1.43	1.81	3.12	
MnO	0.01	0.05	0.04	0.07	
MgO	0.52	1.22	1.37	2.30	<3(很少大于6)
CaO	1.51	2.46	3.50	2.86	
Na ₂ O	4.87	4.74	4.68	5.33	3.5≤Na ₂ O%≤7.5
K ₂ O	3.28	2.39	1.52	1.78	
P ₂ O ₅	0.11	0.15	0.18	0.23	
LOI	1.24	1.91	1.58	2.08	
Total	99.50	99.46	99.30	100.25	
Mg [#]	15.99	31.45	34.29	43.48	
Na ₂ O/ K ₂ O	1.48	1.98	3.08	2.99	>2.00
La	34.57	35.73	33.25	—	
Ce	71.87	66.94	66.71	—	
Pr	6.79	6.52	6.47	—	
Nd	21.95	20.96	22.01	—	
Sm	3.09	3.03	4.46	—	
Eu	0.81	0.85	0.97	—	
Gd	2.22	3.03	3.39	—	
Tb	0.27	0.28	0.47	—	
Dy	0.93	1.31	1.99	—	
Ho	0.19	0.26	0.37	—	
Er	0.57	0.60	1.01	—	
Tm	0.05	0.09	0.14	—	
Yb	0.38	0.62	0.74	—	<1.90
Lu	0.08	0.08	0.11	—	
ΣREE	143.77	140.30	142.00		
LREE/ HREE	29.65	21.38	16.47		
Eu/Eu [*]	0.90	0.85	0.74		
La/Yb	90.97	57.63	44.93		>10.0~20.0
(La/Yb) _N	65.26	41.34	32.23		>10
Th	12.70	8.17	9.47	—	
U	0.85	1.70	1.16	—	
Cr	172.83	137.89	143.04	—	
Co	5.09	9.59	9.81	—	
Ni	32.30	88.46	78.03	—	
Cu	12.11	12.71	12.27	—	
Zn	34.94	49.05	56.36	—	
Pb	20.34	10.00	13.16	—	
Bi	0.04	0.08	0.12	—	
Rb	65.43	54.86	33.45	—	
Sr	519.21	444.08	560.41	—	>400, <1100
Y	4.93	6.86	11.03	—	≤18.00
Zr	142.97	158.33	160.34	—	
Nb	8.73	9.01	18.14	—	
Hf	5.60	6.59	6.64	—	
Ta	1.21	2.10	1.07	—	
Sn	1.60	1.31	2.46	—	
Cs	0.78	0.70	1.05	—	
Ba	1081.90	1497.80	743.70	—	
Sr/Y	105.3	64.7	50.8		≥40.0

注：典型埃达克岩据张旗等(2004)和 Martin *et al.* (2005)

杂岩带中,也支持其俯冲板片部分熔融成因。实验岩石学的资料显示,在1~4GPa的条件下,蚀变玄武岩熔融形成熔体的Mg[#]小于0.5,为低镁埃达克岩,其形成可能直接由板片熔融形成,也可能与俯冲板片的熔融深度较浅有关(Martin, 1999)。布青山埃达克岩的Mg[#](0.16~0.43)<0.5,也支持其俯冲板片熔融成因,暗示其由俯冲板片熔融形成的熔体未与地幔楔发生明显的熔体-岩石反应。

布青山埃达克岩强烈亏损HREE(Yb_N=2.34~4.35)指示源区残留相中有石榴石,而且Y/Yb值(11.06~14.91)>10及(Ho/Yb)_N值(1.26~1.50)>1.2进而指示残留相主要是石榴石(±角闪石)。这是因为HREE(特别是Yb、Lu)在石榴石中的分配系数最大,Dy和Ho在角闪石中的分配系数最大(Sisson,1994),当石榴石是主要残留相时,形成的熔体具有倾斜的HREE配分型式(Y/Yb>10,(Ho/Yb)_N>1.2);而当角闪石是主要残留相时,形成的熔体具有平坦的HREE配分型式(Y/Yb≈10,(Ho/Yb)_N≈1)。布青山埃达克岩(Y/Yb=11~15,(Ho/Yb)_N=1.3~1.5)与石榴石为主要残留相一致。此外,石榴石除强烈富集HREE外,还富集Y、Nb、Ta、P等高场强元素,当石榴石为主要残留物时,熔体还表现为HFSE强烈亏损;布青山埃达克岩的高场强元素(HFSE)强烈亏损,在N-MORB标准化微量元素蛛网图上呈现明显的Nb、Ta、P负异常谷(图5b),也与石榴石为主要残留物吻合。另外,图5还表现出Ba相对于Rb和Th富集,指示角闪石不是主要残留物,因为角闪石中Ba的分配系数高于Rb和Th(Green, 1994; Foley *et al.*, 1996),Ba相对于Rb和Th富集是由于角闪石大量熔融的结果;如果角闪石是主要残留物,则Ba相对于Rb和Th亏损。布青山埃达克岩样品在图6b上的投影点靠近石榴石角闪岩部分熔融曲线,暗示其熔体来自石榴石角闪岩的部分熔融。因此,布青山埃达克岩熔体是在高压(>1.2GPa,即相当于俯冲洋壳的俯冲深度约75~85km)条件下由俯冲洋壳(含海洋沉积物)变质成的石榴石角闪岩部分熔融形成,主要残留物为石榴石(±角闪石)。

8.2 地质意义

布青山早古生代末期典型(I类,O型,HSA)埃达克岩的发现进一步说明当时还有洋壳俯冲作用。埃达克岩比正常岛弧岩岩浆更靠近海沟(Defant and Drummond, 1990),因此,从埃达克岩到正常岛弧岩浆岩的方向,代表了洋壳的俯冲方向。早古生代末期(中—晚志留世)正常岛弧岩浆岩位于布青山埃达克岩以北的东昆仑地区,指示洋壳向北俯冲(现在方位)。那么当时的海沟应当位于布青山埃达克岩以南,即位于阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南。暗示当时俯冲带已向洋迁移,后退到阿尼玛卿带以南,致使俯冲板片部分熔融产生的埃达克岩浆侵入到早期(主要为奥陶纪)洋壳俯冲形成的增生楔中。据此可以重建当时的板块构造体制(图9),可以推论阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南可能存在中—晚志留世蛇绿混杂岩。

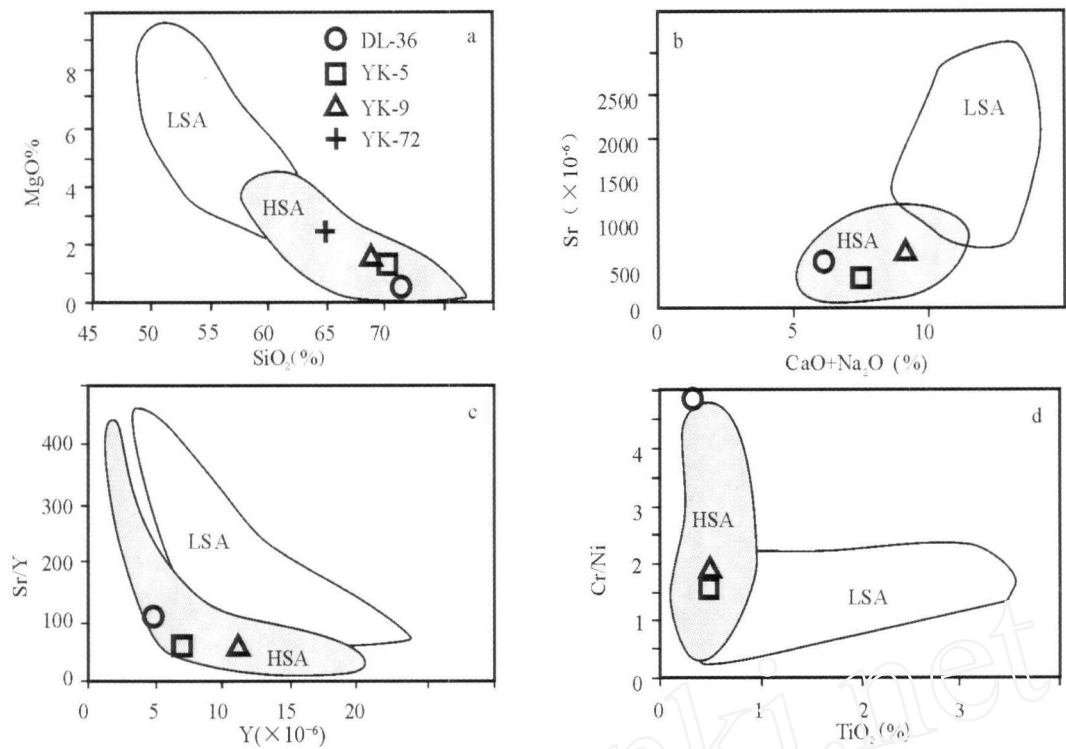


图7 布青山埃达克岩的 MgO-SiO₂ (a), Sr-(CaO + Na₂O) (b), (Sr/Y)-Y (c) and (Cr/Ni)-TiO₂ (d) 图解 (HSA 和 LSA 范围据 Martin *et al.*, 2003)
Fig. 7 MgO vs. SiO₂ (a); Sr vs. (CaO + Na₂O) (b); (Sr/Y) vs. Y (c); and (Cr/Ni) vs. TiO₂ (d) diagrams for the Buqingshan adakite

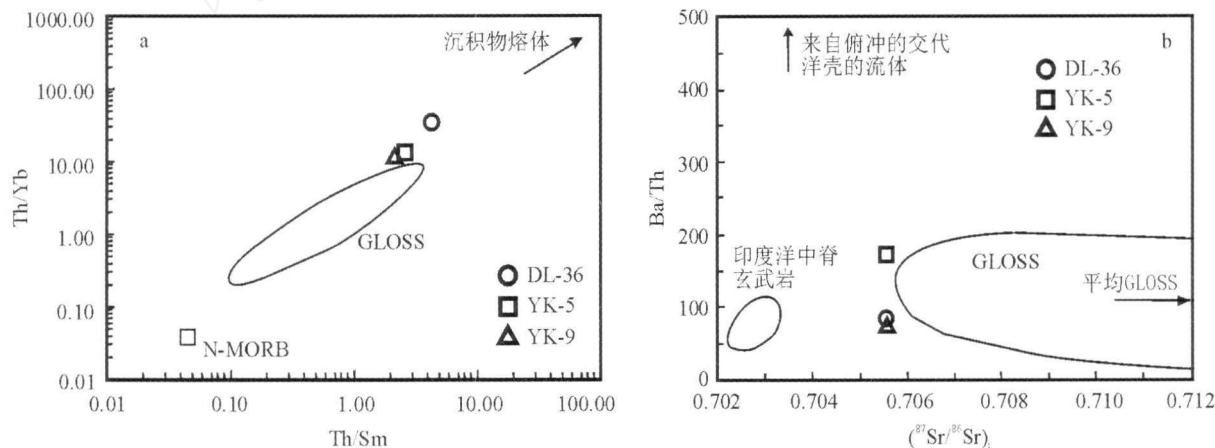


图8 布青山埃达克岩的 Th/Yb-Th/Sm (a) 和 Ba/Th-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (b) 图解
N-MORB 据 Sun and McDonough (1989), 印度洋中脊玄武岩据 Rehkämper and Hofmann (1997), 全球俯冲沉积物 (GLOSS) 据 Plank and Langmuir (1998), 图解 b 中来自俯冲的交代洋壳的流体成分据 Turner *et al.* (1997)
Fig. 8 (a) Th/Yb vs Th/Sm and (b) Ba/Th vs (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i diagrams for the Buqingshan adakite

一般认为典型埃达克岩形成于洋壳俯冲初期,这主要是考虑满足年轻洋壳的条件。而布青山埃达克岩的发现表明,洋壳俯冲晚期也可以形成典型埃达克岩。因为此时洋盆已萎缩得很小,洋壳从洋中脊形成到俯冲经历的距离和时间都短,也可以满足年轻洋壳的条件。

典型埃达克岩常与 Au、Ag、Cu、Mo 等热液和斑岩矿床密切共生,成矿物质来源于埃达克质岩浆 (Martin, 1999)。布青山典型埃达克岩的发现提示,在阿尼玛卿蛇绿岩带应注意

寻找与典型埃达克岩有关的 Au、Ag、Cu、Mo 等热液和斑岩矿床。

9 结论

(1) 布青山埃达克岩的地球化学特征表明其属典型 (I 类, O 型, HSA) 埃达克岩。其锆石 TIMS U-Pb 年龄为 402

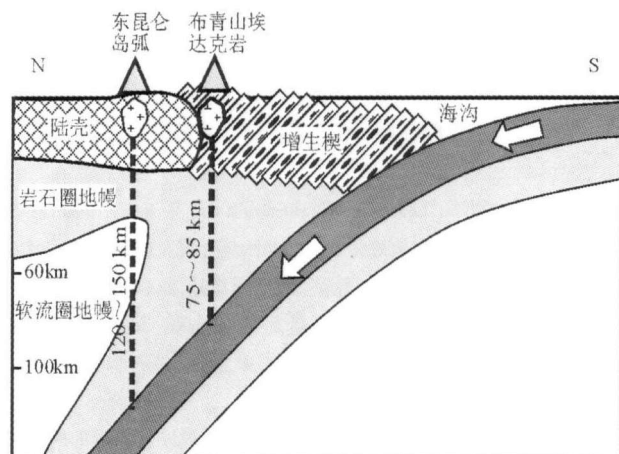


图9 重建的早古生代末期南北向穿过布青山及邻近地区的板块构造体制

Fig. 9 Tectonic reconstruction of N-S section through the Buqingshan area and neighboring region in the end-Early Paleozoic

$\pm 24\text{Ma}$ 。

(2)布青山埃达克岩熔体是在高压($>1.2\text{GPa}$ ，即相当于俯冲洋壳的俯冲深度约75~85km)条件下由俯冲洋壳(含海洋沉积物)变质成的石榴石角闪岩部分熔融形成，主要残留物为石榴石($\pm$ 角闪石)。

(3)布青山埃达克岩的发现指示早古生代末期存在洋壳俯冲作用，俯冲方向朝北(现在方位)，俯冲带位于阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南。暗示此前俯冲带发生过长时间的向洋(向南)迁移，阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南可能存在中—晚志留世蛇绿岩。

(4)布青山埃达克岩的发现暗示典型埃达克岩也可以形成于洋壳俯冲晚期。

(5)阿尼玛卿蛇绿混杂岩带可能存在与典型埃达克岩有关的Au、Ag、Cu、Mo等热液和斑岩矿床。

致谢 本文写作过程中得到了张旗研究员的指导，二位审稿人提出了宝贵修改意见，谨此一并致谢。

References

Bian QT, Luo XQ, Li DH, Cheng HH and Zhao DS. 1999a. Zircon U-Pb age of granodiorite-tonalite in the A'nyemaqen ophiolitic belt and its tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 34: 420–426 (in Chinese with English abstract)

Bian QT, Luo XQ, Li DH, Li HS, Chen HH and Zhao DS. 1999b. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous-Early Permian ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai Province, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34: 523–524 (in Chinese with English abstract)

Bian QT, Gao SL, Li DH, Ye ZR, Chang CF and Luo XQ. 2001. A study of the Kunlun-Qilian-Qinling suture system. *Acta Geologica Sinica*, 75: 364–374

Bian QT, Li DH, Pospelov I, Yin LH, Li HS, Zhao DS, Chang CF, Luo XQ, Gao SL, Astrakhantsev O and Chamov N. 2004. Age,

geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 577–596

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665

Defant MJ and Kepezhinskis P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82: 67–69

Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95: 21503–21521

Foley SF, Jackson SE, Fryer BJ, Greenough JD and Jenner GA. 1996. Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in an alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM-ICP-MS. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 629–638

Green TH. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis-Sedona 16 years later. *Chem. Geol.*, 117: 1–36

Guo Z, Wilson M, Liu J and Mao Q. 2006. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the northern Tibetan Plateau: constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms. *J. Petrol.*, 47: 1177–1220

Hawkesworth C, Turner S, Peate D, McDermott F and van Calsteren P. 1997. Elemental U and Th variations in island arc rocks: Implications for U-series isotopes. *Chem. Geol.*, 139: 207–221

Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4: 117–132

Krogh TE. 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37: 485–494

Krogh TE. 1982a. Improved accuracy of U-Pb ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 637–649

Krogh TE. 1982b. Improved accuracy of U-Pb zircon dating by selection of more concordant fractions using a high gradient magnetic separation technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 212–220

Ludwig KR. 1995. ISOPLLOT: A plotting and regression program for radiogenic isotope data. US Geological Survey Open File Report, 1–45

Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust-comparison with modern processes. *Lithos*, 30: 373–388

Martin H. 1999. The adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429

Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1–24

Pan YS, Zhang YQ, Chen TE, Zhou WM, Xu RH, Wang DA, Xie YW and Luo H. 1996. Feature and evolution of the Early Paleozoic geology in Kunlun Mts. *Science in China(D)*, 26: 302–307

Peacock SM, Rushmer T and Thompson AB. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121: 227–244

Petford N and Gallagher K. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 193: 483–499

Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, 145: 325–394

Rehkämper M and Hofmann AW. 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian ocean MORB. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 147: 93–106

Sisson TW. 1994. Homblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe. *Chem. Geol.*, 117: 331–334

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313–345

Turner S, Hawkesworth C, Rogers N, Bartlett J, Worthington T, Hergt

- J, Pearce J and Smith I. 1997. ^{238}U ^{230}Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec island arc. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 4855 – 4884
- Xu RH, Harris NBW, Lewis CL, Hawkesworth CJ and Zhang YQ. 1990. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. In: *The Geological Evolution of Tibet*. Beijing: Science Press, 282 – 302 (in Chinese)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu HT, Wang YL and Li ZT. 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China, Annex: controversies over differing opinions for adakites in China. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 385 – 400
- Zhang Q, Xu JF, Wang Y, Xiao L, Liu HT and Wang YL. 2004. Diversity of adakite. *Geological Bulletin of China*, 23(9 – 10): 959 – 965 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZY, Wang J, Gu FB and Liu YC. 1998. Features of granite in the orogenic belt. *Regional Geology of China (sup.)*: 56 – 61 (in Chinese)
- 边千韬, 罗小全, 李涤微, 陈海泓, 赵大升. 1999a. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗-英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义. *地质科学*, 34(4): 420 – 426
- 边千韬, 罗小全, 李涤微, 李红生, 陈海泓, 赵大升. 1999b. 阿尼玛卿山早古生代和早石炭—早二叠世蛇绿岩的发现. *地质科学*, 34(4): 523 – 524
- 许荣华, Harris NBW, Lewis CL, Hawkesworth CJ, 张玉泉. 1990. 拉萨至格尔木的同位素地球化学. 见: *中-英青藏高原综合地质考察队. 青藏高原地质演化*. 北京: 科学出版社, 282 – 302
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造成矿意义. *岩石学报*, 17(2): 236 – 144
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景, 附: 《国内关于埃达克岩的争论》. *地学前缘 (中国地质大学. 北京)*, 10(4): 385 – 400
- 张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 2004. 埃达克岩的多样性. *地质通报*, 23: 959 – 965
- 张智勇, 王瑾, 古风宝, 刘永成. 1998. 造山带花岗岩的特点: 以秦昆接合部造山带为例. *中国区域地质 (增刊)*: 56 – 61

附中文参考文献

边千韬, 罗小全, 李涤微, 陈海泓, 赵大升. 1999a. 阿尼玛卿蛇绿岩带