

doi:10.3799/dqkx.2014.049

青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩 年代学、地球化学及构造意义

张 硕^{1,2}, 史洪峰⁴, 郝海健^{1,2}, 李德威^{1,2,3*}, 吝 岩⁵, 冯旻譞²

1. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学青藏高原研究中心, 湖北武汉 430074
4. 南京地质矿产研究所, 江苏南京 210000
5. 陕西省核工业地调院, 陕西西安 710000

摘要: 青藏高原西部班公湖地区的日松岩体和甲维酸性岩脉位于班公湖蛇绿混杂岩带南侧, 岩石类型为英云闪长岩, 花岗闪长玢岩和花岗闪长岩, 显示中钾钙碱性—高钾钙碱性过渡的特征。元素地球化学组成表明, 岩石均具有埃达克岩特征, 表现为高的 SiO_2 ($63.05\% \sim 70.72\%$)、高 Al_2O_3 ($\geq 15\%$)、低 MgO ($0.97\% \sim 2.33\%$) $< 3\%$ 、高 Sr 含量 ($380.4 \times 10^{-6} \sim 625.0 \times 10^{-6}$)、Sr/Y (> 35)、低 HREE、Y ($5.64 \times 10^{-6} \sim 13.80 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.46 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-6}$)、轻重稀土分异明显 ($17.09 < (\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} < 48.51$)。日松花岗闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 82.0 ± 1.1 Ma; 甲维近东西走向的花岗闪长岩脉和近南北走向的花岗闪长玢岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 90.7 ± 1.2 Ma 和 82.9 ± 1.2 Ma。日松和甲维处埃达克岩均富钾贫钠, 低 Cr、Ni, 高 Th、Th/La、Th/U、Rb/Sr 以及相对低的 Sr/Y 和高 $\text{Mg}^\#$ ($43.09 \sim 54.35$) 等特征显示其为玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融形成。 $91 \sim 82$ Ma 的埃达克岩形成于后碰撞初期阶段, 为中特提斯洋闭合后板内热隆伸展、壳幔相互作用的产物, 可以作为班公湖地区由板块构造体制转向板内构造体制的标志。

关键词: 埃达克岩; 地球化学; 洋陆转换; 加厚下地壳; 班公湖; 中特提斯洋。

中图分类号: P588.121; P597.3 文章编号: 1000-2383(2014)05-0509-16 收稿日期: 2013-08-19

Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Cretaceous Adakites in Bangong Lake, Tibet

Zhang Shuo^{1,2}, Shi Hongfeng⁴, Hao Haijian^{1,2}, Li Dewei^{1,2,3*}, Lin Yan⁵, Feng Minxuan²

1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Research Center for Tibetan Plateau, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210000, China
5. Shaanxi Nuclear Industry Geology Surveying Institute, Xi'an 710000, China

Abstract: Risong rocks and Jiawei acid rock veins are located at Bangong Lake ophiolite mélangé belt, western Tibetan Plateau. The lithology is tonalite, corcovadite and granodiorite, displaying a transition from medium-K calc-alkaline series to high-K calc-alkaline series. Rocks show geochemical characteristics of adakites, having high content of SiO_2 ($63.05\% \sim 70.72\%$), Al_2O_3 ($\geq 15\%$), Sr ($380.4 \times 10^{-6} \sim 625.0 \times 10^{-6}$), Sr/Y ratio (> 35) and low content of MgO ($0.97\% \sim 2.33\%$) $< 3\%$, HREE, Y ($5.64 \times 10^{-6} \sim 13.80 \times 10^{-6}$) and Yb ($0.46 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-6}$). The differentiation is obvious between HREE and LREE ($17.09 < (\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} < 48.51$). Risong granodiorite is dated to 82.0 ± 1.1 Ma by zircon U-Pb dating method; east-west trend granodiorite and south-north trend corcovadite are dated to 90.7 ± 1.2 Ma, 82.9 ± 1.2 Ma respectively. Risong and Jiawei

基金项目: 中国地质调查局西藏 1:5 万聂拉木等 4 幅区域地质调查 (No.1212011121242); 中国地质调查局西藏 1:5 万日土县卡易错地区 4 幅区域地质调查 (No.1212011121246)。

作者简介: 张硕 (1989—), 男, 硕士在读, 主要从事大陆动力学、构造地质学的研究。E-mail: shuoz13@sina.cn

* 通讯作者: 李德威, E-mail: dewei89@sina.com

adakitic rocks are enriched in K and depleted in Na, and have low Cr, Ni, Sr/Y and high Th, Th/La, Th/U, Rb/Sr and $Mg^\#$ (43.09–54.35). These characteristics indicate that they were formed by partial melting of thickened lower crust which was caused by basaltic magma underplating. 91–82 Ma adakites were formed in the early stage after the collision as the product of both interplates thermal upwelling extension and crust-mantle interaction after the closure of Meso-Tethys. Outcropping of adakites in this period can mark the transition from the plate tectonic system to intraplate tectonic system.

Key words: adakite; geochemistry; ocean-continent transition; thickened lower crust; Bangong Lake; Meso-Tethys.

以班公湖—怒江蛇绿混杂岩带为代表的中特提斯具有独立的时空结构(李德威, 2008), 由于其在青藏高原演化史上的特殊地位长期受到地学界广泛关注. 然而对于该洋盆的演化时限至今仍未有统一认识, 一般认为该洋盆扩展形成于晚三叠—早侏罗世, 中侏罗世洋壳俯冲消减, 晚侏罗—早白垩世晚期闭合(肖序常和李廷栋, 1998; Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等, 2004, 2006; 邱瑞照等, 2004; 李金祥等, 2008; 康志强等, 2008, 2010; Zhu *et al.*, 2011). 其中尤其对于该洋盆的最终闭合时间存有较大争议, 闭合时间从晚侏罗—晚白垩世均有(Yin and Harrison, 2000; Kapp *et al.*, 2003; 邱瑞照等, 2004; 史仁灯, 2005; 潘桂棠等, 2006; 康志强等, 2008; 江军华等, 2011; 张向飞, 2011; Zhu *et al.*, 2011; 曲晓明等, 2012), 时间跨度之大及不确定性给该地区地质及矿产研究带来诸多不便. 晚白垩世沉积的竞柱山组(K_2j)、阿布山组(K_2a)的砾岩角度不整合于蛇绿岩和老地层之上, 标志着中特提斯洋洋陆转换的结束(李德威, 2008). 但是, 目前缺少对班公湖地区出露的以砾岩为底界竞柱山组的准确定年; 而且从班公湖—怒江缝合带闭合到隆升接受剥蚀, 再到沉降接受沉积, 需要较长的时间, 角度不整合的年龄可能并不能准确的代表班怒带碰撞结束的时间.

因此, 我们尝试从新的角度来研究班公湖地区中特提斯洋洋陆转换的时间, 以班公湖地区出露的埃达克岩为研究对象, 讨论其能否作为该地区从板块构造体制转向板内构造体制的一个标志.

2005 年以来, 已有学者在班公湖地区发现了埃达克岩或埃达克质岩, 并探讨了构造背景(蔡志勇等, 2005; Zhao *et al.*, 2008; 张向飞, 2011). 蔡志勇等(2005)在班公湖日土南部发现埃达克质的花岗闪长岩脉, 但并未对其进行年代学研究, 将其划属于冈底斯地块中新世由地壳加厚熔融形成的埃达克岩类别; Zhao *et al.* (2008)认为班公湖日土西南部 80 Ma 的埃达克岩是源于加厚地壳的部分熔融, 地壳加厚的成因是班公湖—怒江洋盆闭合后冈底斯和羌塘地块的碰撞挤压造成; 张向飞(2011)在日土县城北蛇

绿混杂岩带内发现具有埃达克岩特征的花岗闪长玢岩, 并测得锆石年龄为 96 Ma, 认为其形成与俯冲大洋板片的熔融有关(具体位置见图 1b). 由此可见, 目前关于班公湖地区埃达克岩时代及产出环境仍存在较大争议, 缺少系统的研究. 班公湖及邻区埃达克岩成因研究直接关系到对该地区花岗岩成因、地壳加厚机制、下地壳演化及成矿地质背景的正确认识, 也为中特提斯洋演化时限提供新的信息. 本文拟通过对班公湖地区不同时期埃达克岩体(脉)的野外地质调查以及岩石学、地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作, 系统的探讨其成因和地球动力学背景.

1 区域地质背景

青藏高原是地球上抬升最高的构造单元, 在一系列特提斯洋陆转换的基础上发展而成, 青藏特提斯构造域由多个近东西向延伸的地块组成, 由北向南依次为被缝合带分割的祁连山、昆仑、松潘—甘孜、羌塘、冈底斯和喜马拉雅地块(图 1a). 作为羌塘地块与冈底斯地块的分界线, 班公湖—怒江缝合带物质组成复杂、构造变形多样、岩浆活动强烈和成矿条件良好, 其以一系列近东西向呈线状展布的蛇绿岩岩片为标志, 横贯青藏高原中部, 向东延伸至滇西地区, 全长达约 2 000 km, 南北宽度变化从十几千米至近百千米.

研究区位于青藏高原西部班公湖地区, 南北跨越多个经历不同演化历史的大地构造单元, 分别为南羌塘地块、班公湖蛇绿混杂岩带、北冈底斯地块(图 1b). 中特提斯洋盆扩张阶段沉积的地层主要是晚三叠纪世日干配错群(T_3R), 岩性组合以碎屑岩和碳酸盐岩为主, 夹少量火山岩; 在洋盆萎缩阶段沉积的地层以侏罗纪—早白垩世的碎屑岩为主, 代表性地层有木嘎岗日群($J_{1-2}M$)、多仁组(J_3d)、日松组(J_3r)、沙木罗组(J_3K_{1s})、多尼组(K_1d)和郎山组(K_1l)等; 与此同时, 蛇绿混杂岩带北侧发育晚侏罗—早白垩世的岛弧型钙碱性花岗岩类岩浆岩体, 岩

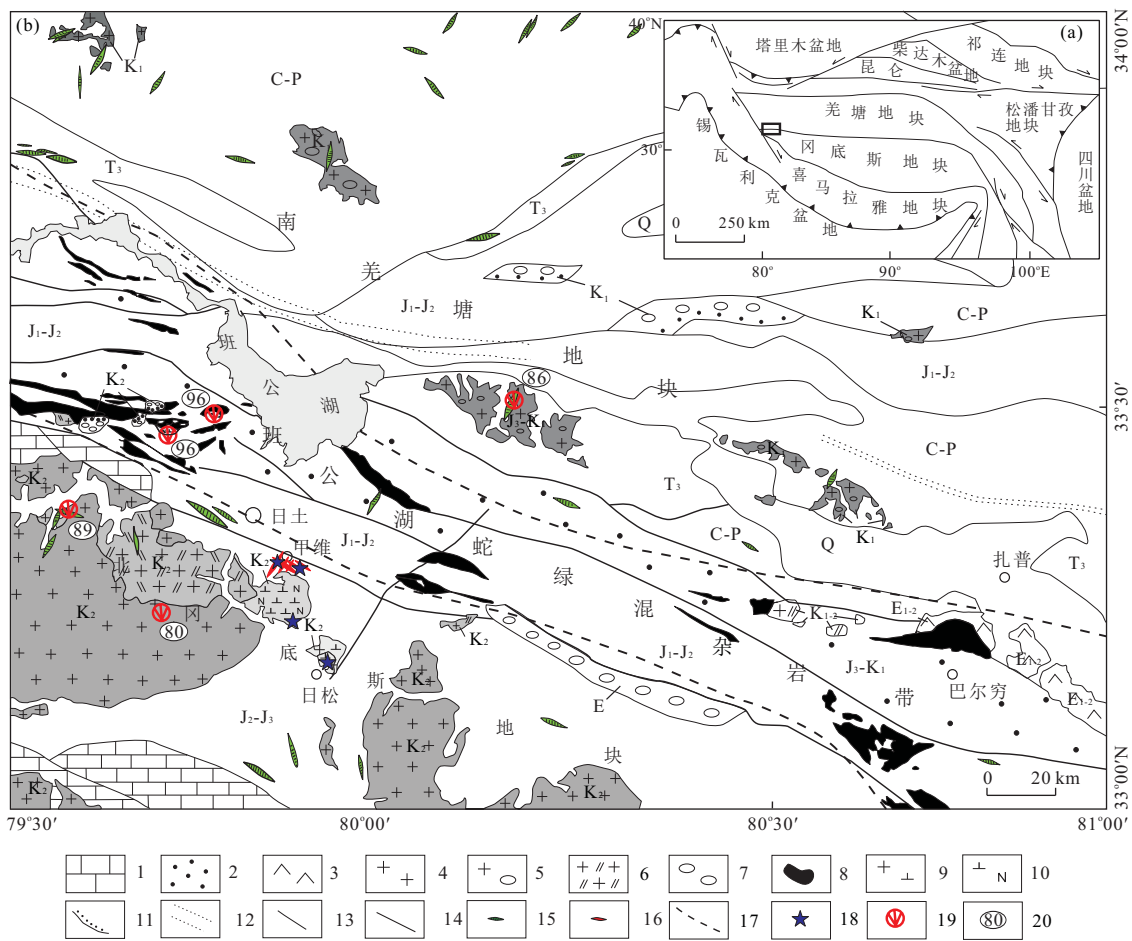


图 1 西藏班公湖地区地质

Fig.1 Simplified geological map of Bangong Lake, Tibet

a.构造背景图,据李德威,2003;b中 80 Ma 和 96 Ma 年龄为埃达克岩锆石年龄,数据参考 Zhao *et al.*,2008;张向飞,2011;86 Ma,89 Ma 为辉绿岩脉锆石年龄;1.早白垩世灰岩;2.晚侏罗世—早白垩世砂板岩;3.古近纪火山岩;4.晚白垩世花岗岩;5.早白垩世花岗岩;6.晚白垩世二长花岗岩;7.砾岩;8.蛇绿混杂岩;9.晚白垩世花岗闪长岩;10.晚白垩世英云闪长岩;11.角度不整合;12.韧性剪切带;13.地质界线;14.断层;15.辉绿岩脉;16.酸性岩脉;17.蛇绿混杂岩带;18.采样点;19.测年位置;20.测年结果(Ma)

体大多呈岩基、岩株产出,为班怒带北向俯冲的产物(曲晓明等,2012)。而蛇绿混杂岩带南侧北冈底斯地块大规模的中酸性岩浆侵入活动主要发生在晚白垩世,岩石组合为花岗斑岩、花岗闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩等。

由图 1b 可知,日松附近出露的岩体主要有花岗闪长岩体和英云闪长岩体,岩体呈岩株产出,侵入晚侏罗世多仁组(J_3d)石英砂岩夹深色条纹条带粉砂岩和日松组(J_3d)岩屑砂岩夹砾岩地层中,接触带处砂岩多发生角岩化。甲维处岩脉较发育,岩石类型为花岗闪长岩和花岗闪长玢岩,侵入晚侏罗世多仁组(J_3d)地层中,地理坐标为(79°49′36″E,33°19′21″N),海拔高度约 4 500 m;其中花岗闪长岩脉呈近东西走向,产状为 $165^\circ\angle 80^\circ$,延伸 60~150 m,脉宽 1.0~1.5 m;花岗闪长玢岩脉呈近南北向延伸,产状

为 $290^\circ\angle 82^\circ$,延伸 50~200 m,脉宽 2~3 m。野外可见此两组不同岩性多条近平行岩脉相互近垂直交叉。

2 岩相学特征

英云闪长岩和花岗闪长岩均为灰白色,半自形粒状结构,块状构造。英云闪长岩主要组成矿物有石英(25%)、斜长石(45%)和黑云母(12%)、角闪石(13%),次要矿物有钾长石(3%),副矿物有磷灰石、榍石(2%)等。花岗闪长岩主要组成矿物有斜长石(35%~45%)、石英(25%~35%)、角闪石(10%~15%)、钾长石(5%~10%),次要矿物有黑云母($<5\%$),副矿物有榍石和少量不透明钛铁氧化物等。斜长石:自形一半自形板状,普遍发育聚片双

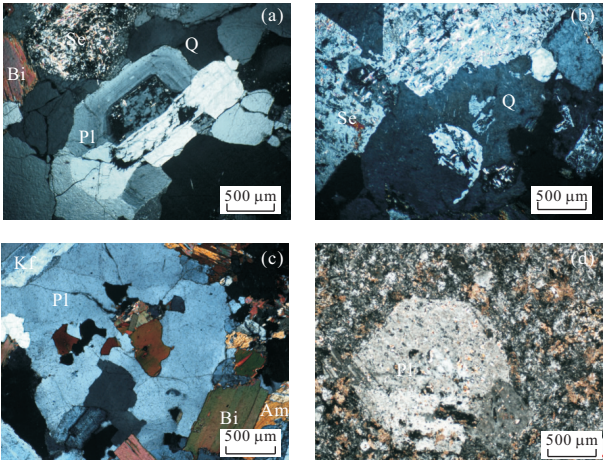


图 2 日松岩体和甲维岩脉样品显微照片(正交偏光)
Fig.2 Photomicrographs of samples
Q.石英;Pl.斜长石;Kf.钾长石;Bi.黑云母;Am.角闪石;Se.绢云母;
a.英云闪长岩;b.花岗闪长岩(日松岩体);c.花岗闪长岩(甲维岩脉);d.花岗闪长玢岩

晶、环带和筛孔状构造现象,部分有绢云母化,粒度 0.6~3.0 mm.石英:他形粒状,粒度 0.2~4.0 mm,晶体内部发育有少量裂纹.黑云母呈半自形—他形片状,粒度 0.4~1.0 mm.角闪石:粒度 0.5~3.0 mm.钾长石:多为条纹长石,粒度小于 2.0 mm(图 2a~图 2c).

花岗闪长玢岩:斑状结构,块状构造.斑晶约占 25%,基质约 75%.斑晶由斜长石组成,基质主要由斜长石、石英、绢云母等组成,且斜长石比石英多,颗粒细小,多为针状、长柱状.岩石受到了一定程度的蚀变,长石发生强烈的绢云母化.斜长石:斑晶斜长石为自形板状,颗粒大小为 0.5~3.0 mm,可见简单双晶和聚片双晶,表面发生绢云母化蚀变.基质斜长石多为长柱状、针状,粒径 0.1 mm 左右.石英:粒径 0.1~0.3 m,可见副矿物磁铁矿(图 2d).

3 样品采集和分析方法

本次用于测试分析的班公湖地区埃达克岩样品共采集 24 件:其中 21 件用于地球化学测试,日松花岗闪长岩体 3 件、英云闪长岩体 6 件;甲维花岗闪长岩脉 6 件,花岗闪长玢岩脉 6 件(采样位置见图 1b,对应的样品号见表 1).3 个大件用于做 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,分别采自日松花岗闪长岩体(B214-8-2),甲维花岗闪长岩脉(D4494-8)和花岗闪长玢岩脉(D4494-16).样品的主量、微量、稀土元素化学分析在武汉岩矿综合测试中心完成.

主量元素测定方法为 X-射线荧光熔片法

(XRF):准确称入 0.400 0 g 样品(预先经 110 ℃烘箱烘干 2 h,并冷却至室温)于铂—黄金坩埚内,在高温马弗炉 800 ℃烧 2 h 并冷却至室温,加入 4.000 g 四硼酸锂,搅匀后,滴加 0.2 mL 10% 溴化锂,放入 1 100 ℃自动熔样机熔融 10 min,用戴铂金头的坩埚钳取出,吹风冷却后脱模成片.分析仪器为英国帕纳科公司生产的波长色散型射线荧光光谱分析仪(XRF),测定过程中用国家标样监控,分析误差 < 2%.

微量、稀土元素分析仪器均为电感耦合等离子体质谱仪.微量元素测试方法除 Zr、Nb、Hf、Ta 采用过氧化钠熔融外,其余均通过 HF、HNO₃、HCl、HClO₄ 溶样,10% 盐酸提取;稀土元素通过 HNO₃、H₂SO₄、HClO₄、HF 熔样,王水提取.(ICP-MS)型号为美国热电公司 X7,分析精度优于 5%.

锆石单矿物分离是在河北省区域地质调查研究所完成,首先清洗样品表面以防外界杂质污染,然后将样品粉碎,进行重选和电磁选后再双目镜下挑纯.锆石制靶在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,首先将锆石贴在双面胶上,其次用环氧树脂固定,最后打磨抛光至锆石暴露.锆石结构图像系应用透射光、反射光和阴极发光(CL)采集,分别在中国地质大学(武汉)矿石学实验室和西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,仪器为加载于扫描电镜的 Mono CL3+ 型阴极发光装置.锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,锆石定年仪器为带有 Shield Torch 的 Agilent 7500a 型 ICP-MS;激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,激光器为 ComPex102 Excimer(工作物质 ArF,波长 193 nm).采用 He 作为剥蚀物质的载气,分析采用斑束直径为 30 μm,激光脉冲为 10 Hz,能量为 32~36 mJ,每个分析点的气体背景采集时间为 20 s,信号采集时间为 40 s.详细实验过程参见 Yuan *et al.* (2004).激光剥蚀方式为单点剥蚀,分析仪器校正采用标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化.ICP-MS 数据采集选用质量峰采点的跳峰方式.年龄计算以国际标准锆石 91500 作为外标校正,²⁹Si 作为内标,每测定 6 个分析点插入一次标样测定.以 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 软件计算测试结果,采用 Isoplot3.0 程序(Ludwig, 2003) 绘制谐和图.所获同位素比值和年龄误差均在 1σ 水平.

表 1 日松岩体和甲维岩脉主量元素(%)和微量元素(10^{-6})化学组成

Table 1 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of Risong rock mass and Jiawei dykes

样品号	甲维花岗闪长岩脉						甲维花岗闪长玢岩脉					
	D4494-2	D4494-3	D4494-4	D4494-5	D4494-6	D4494-7	D4494-10	D4494-11	D4494-12	D4494-13	D4494-14	D4494-15
SiO ₂	70.07	70.72	69.67	69.55	69.88	69.83	65.07	65.02	65.74	65.64	65.92	65.36
TiO ₂	0.42	0.40	0.43	0.40	0.41	0.42	0.65	0.65	0.66	0.60	0.61	0.60
Al ₂ O ₃	15.25	15.16	15.02	15.13	15.13	15.31	15.40	15.52	15.66	15.41	15.41	15.31
Fe ₂ O ₃	0.98	0.85	0.96	1.06	0.97	1.11	0.84	0.70	0.93	0.68	0.64	0.73
FeO	1.37	1.33	1.35	1.35	1.28	1.28	2.55	2.67	2.48	2.42	2.42	2.35
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
MgO	0.97	0.89	1.03	0.99	0.97	0.98	1.97	1.99	2.00	1.79	1.78	1.80
CaO	1.71	2.21	2.22	2.24	1.98	2.06	3.91	3.91	3.65	3.33	3.29	3.59
Na ₂ O	4.01	3.55	3.90	3.75	3.75	4.11	4.10	4.18	4.05	4.06	3.96	3.93
K ₂ O	2.68	2.73	2.50	2.61	2.67	2.58	2.67	2.38	2.32	2.50	2.42	2.48
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.19	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18
LOI	2.02	1.74	2.48	2.36	2.42	1.81	2.34	2.15	1.88	2.65	2.76	2.99
Total	99.64	99.74	99.73	99.61	99.63	99.66	99.74	99.42	99.62	99.32	99.44	99.37
Mg [#]	43.43	43.09	45.33	43.37	44.54	43.39	51.51	51.81	51.80	51.28	51.43	51.62
Ba	456.70	478.50	424.60	471.80	450.50	484.20	394.30	353.80	364.80	370.90	384.90	378.20
Sc	4.16	4.05	4.24	4.09	4.12	4.11	7.15	7.45	7.45	7.16	7.25	6.80
V	38.34	39.80	38.62	37.97	38.45	38.95	63.10	66.56	64.92	61.16	59.99	57.53
Cr	18.50	20.30	16.04	17.93	16.78	16.29	34.30	39.79	40.11	32.41	26.87	31.64
Co	5.39	5.52	5.47	5.56	5.45	5.75	9.88	10.11	10.97	9.57	9.44	9.30
Ni	11.52	12.16	12.42	11.55	10.99	11.79	30.15	31.64	31.60	29.37	28.37	27.43
Cu	30.99	23.29	25.23	29.32	27.88	28.38	29.38	31.07	35.35	25.18	25.93	30.13
Zn	70.71	83.12	79.86	62.28	77.66	64.93	47.09	47.50	52.82	42.67	43.44	41.66
Rb	80.90	82.05	75.40	81.08	88.06	74.12	83.07	79.64	89.72	82.75	84.06	79.93
Sr	450.00	464.60	442.60	455.60	402.10	490.00	432.80	427.80	413.80	400.10	380.40	381.70
Nb	9.36	9.26	8.52	8.59	9.36	8.62	11.96	9.85	11.32	10.63	11.10	11.12
Ta	0.94	0.84	0.80	0.95	0.93	0.75	1.22	0.82	1.18	1.00	1.01	1.04
Zr	190.30	193.80	187.40	184.50	191.00	189.80	173.50	172.70	174.00	166.80	161.80	167.20
Hf	5.80	5.90	5.60	5.40	5.80	5.70	4.60	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40
U	2.06	2.21	2.03	2.05	2.08	2.08	2.42	2.05	2.15	2.65	2.57	2.47
Th	9.15	9.02	8.20	8.12	8.34	8.28	9.62	8.06	8.88	9.75	9.61	9.29
Y	6.81	5.70	5.76	5.68	5.64	5.68	10.60	10.46	10.31	10.68	10.78	10.27
REE(10^{-6})	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La	31.01	29.93	30.84	31.37	31.02	30.88	31.19	30.14	29.91	29.61	30.26	29.06
Ce	52.66	49.34	50.26	51.06	50.48	49.38	56.82	55.06	52.03	54.22	55.60	52.89
Pr	5.04	4.80	4.90	4.99	4.94	4.94	5.99	5.82	5.83	5.71	5.83	5.63
Nd	16.94	16.11	16.45	16.67	16.36	16.45	21.11	20.57	20.61	20.19	20.51	19.88
Sm	2.90	2.71	2.76	2.77	2.77	2.83	3.83	3.64	3.75	3.66	3.65	3.56
Eu	0.83	0.85	0.84	0.87	0.84	0.86	1.04	1.02	1.02	0.96	0.97	0.96
Gd	2.37	2.23	2.22	2.16	2.12	2.20	3.10	3.05	2.96	3.03	2.89	2.97
Tb	0.32	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.44	0.45	0.45	0.43	0.44	0.43
Dy	1.54	1.32	1.36	1.38	1.32	1.36	2.31	2.33	2.30	2.29	2.32	2.22
Ho	0.27	0.22	0.23	0.22	0.22	0.22	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40
Er	0.71	0.56	0.58	0.56	0.56	0.57	1.12	1.11	1.11	1.16	1.16	1.13
Tm	0.11	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17
Yb	0.60	0.46	0.46	0.49	0.48	0.48	1.02	1.00	1.00	1.07	1.06	1.03
Lu	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.16	0.15	0.15	0.17	0.17	0.16
ΣREE	115.39	108.94	111.35	112.99	111.54	110.61	128.72	124.92	121.68	123.08	125.43	120.50
δEu	0.94	1.03	1.01	1.05	1.01	1.01	0.90	0.91	0.91	0.86	0.88	0.88
Dy/Yb	2.58	2.89	2.99	2.82	2.75	2.86	2.27	2.33	2.30	2.14	2.20	2.15

续表 1

样品号	日松花岗闪长岩体			日松英云闪长岩体					
	B202-1-1	B214-8-2	B214-7-4	B214-7-2	B214-8-1	B214-9-1	B215-12-1	B214-1-1a	B212-3-1
SiO ₂	66.08	64.58	65.32	64.45	64.43	65.11	63.05	64.66	65.22
TiO ₂	0.57	0.64	0.61	0.74	0.70	0.69	0.83	0.73	0.71
Al ₂ O ₃	16.59	16.47	15.90	16.36	16.16	16.09	16.73	16.29	16.08
Fe ₂ O ₃	0.43	0.48	0.48	0.54	0.52	0.50	0.59	0.53	0.51
FeO	2.43	2.71	2.73	3.07	2.92	2.86	3.33	3.03	2.91
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
MgO	1.63	2.08	1.82	2.24	2.13	2.04	2.33	2.11	2.29
CaO	3.90	3.00	3.86	4.37	3.83	3.26	4.65	3.94	3.60
Na ₂ O	4.22	4.27	3.75	3.95	3.97	4.10	3.99	4.02	4.01
K ₂ O	2.65	2.64	2.62	1.95	2.31	2.23	2.22	2.18	2.14
P ₂ O ₅	0.19	0.23	0.21	0.24	0.23	0.22	0.26	0.24	0.23
LOI	1.00	1.93	1.67	1.44	1.90	2.20	1.19	1.91	1.80
Total	100.15	99.52	99.46	99.89	99.63	99.83	99.76	100.20	100.05
Mg [#]	50.38	53.79	50.25	52.53	52.48	51.93	51.48	51.35	54.35
Ba	419.00	373.00	387.00	375.00	466.00	409.00	396.00	551.00	433.00
Sc	6.00	7.00	6.00	7.00	7.00	7.00	8.00	8.00	7.00
V	70.00	68.00	61.00	72.00	67.00	64.00	78.00	70.00	67.00
Cr	30.00	40.00	50.00	40.00	40.00	50.00	50.00	50.00	40.00
Co	9.00	10.00	9.00	12.00	10.00	10.00	12.00	11.00	9.00
Ni	25.00	24.00	23.00	25.00	25.00	26.00	29.00	25.00	26.00
Cu	24.00	26.00	30.00	27.00	26.00	30.00	19.00	31.00	29.00
Zn	46.00	48.00	47.00	53.00	53.00	52.00	63.00	54.00	54.00
Rb	82.70	99.90	76.80	55.90	61.90	68.60	74.80	64.60	52.40
Sr	447.00	527.00	480.00	519.00	614.00	625.00	599.00	507.00	546.00
Nb	12.10	11.80	12.40	12.90	13.20	13.10	14.50	13.30	12.80
Ta	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	1.00	0.80	0.90	0.90
Zr	166.00	160.00	199.00	192.00	192.00	175.00	184.00	202.00	200.00
Hf	4.50	4.20	5.00	4.60	4.70	4.30	4.40	5.10	5.10
U	1.04	1.76	2.06	1.39	1.39	1.14	1.24	1.29	1.73
Th	4.79	7.73	12.2	8.99	9.85	10.45	7.87	9.53	11.05
Y	11.10	11.80	10.90	13.20	13.40	13.30	13.80	12.80	12.70
REE(10 ⁻⁶)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La	27.40	27.00	35.10	31.50	34.50	31.80	34.50	30.80	32.40
Ce	48.10	50.30	62.90	58.70	63.20	60.30	64.20	58.70	59.40
Pr	4.96	5.52	6.55	6.26	6.73	6.23	6.84	6.25	6.20
Nd	17.40	19.90	22.20	21.80	23.30	22.00	24.00	22.00	21.70
Sm	2.91	3.41	3.83	3.94	4.03	3.88	4.26	4.00	3.84
Eu	1.09	1.08	1.15	1.22	1.21	1.18	1.39	1.21	1.13
Gd	2.70	3.09	3.17	3.24	3.41	3.28	3.58	3.35	3.21
Tb	0.38	0.43	0.43	0.48	0.48	0.50	0.51	0.48	0.46
Dy	2.18	2.33	2.21	2.52	2.59	2.69	2.72	2.57	2.52
Ho	0.41	0.43	0.44	0.51	0.54	0.54	0.56	0.51	0.51
Er	1.14	1.19	1.16	1.38	1.38	1.43	1.41	1.36	1.35
Tm	0.17	0.16	0.17	0.18	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19
Yb	1.15	1.07	0.96	1.19	1.23	1.25	1.21	1.16	1.21
Lu	0.16	0.15	0.15	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.18
ΣREE	110.15	116.06	140.42	133.10	142.98	135.46	145.54	132.75	134.3
δEu	1.17	1.00	0.98	1.01	0.97	0.98	1.06	0.98	0.96
Dy/Yb	1.90	2.18	2.12	2.30	2.11	2.15	2.25	2.22	2.08

注: Mg[#] = molar100(Mg/(Mg+Fe²⁺)), FeO=FeO+0.899 8 Fe₂O₃; δEu=2×Eu_N/(Sm_N+Gd_N), Eu_N, Sm_N, Gd_N 为球粒陨石标准化。

4 元素地球化学

4.1 主量元素地球化学

21 件样品的主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。日松岩体和甲维两组岩脉样品的 SiO₂ 含量介于 63.05%~70.72%, Al₂O₃ 含量较高 (15.02%~

16.73%)。在花岗岩类实际矿物含量 QAP 分类图解中(图 3a), 日松岩体显示花岗闪长岩和英云闪长岩两组岩性, 甲维两组岩脉样品全部落入花岗闪长岩区域(图 3a), 均与薄片鉴定结果一致。全碱-硅图解中, 所有样品显示亚碱性火成岩特征(图 3b), 对于亚碱性火成岩系列我们可以按 K₂O-SiO₂ 图解(图

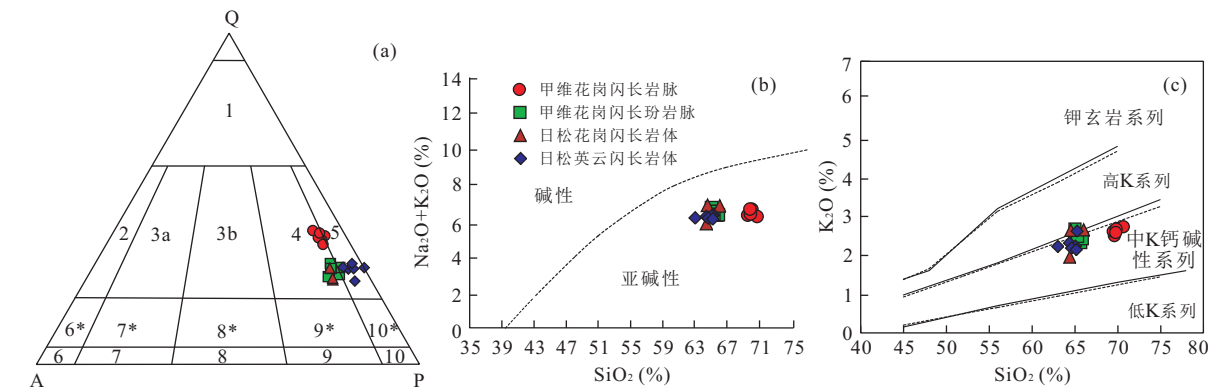


图 3 花岗岩实际矿物含量 QAP 分类(a)、全碱—硅(b)和 K₂O—SiO₂ 关系(c) (Irvine and Baragar, 1971; Peccerillo and Taylor, 1976; Streckeisen, 1976)

Fig.3 Relations of QAP、SiO₂ vs. (Na₂O+K₂O) and K₂O vs. SiO₂
1.富石英花岗岩;2.碱长花岗岩;3a.花岗岩;3b.二长花岗岩;4.花岗闪长岩;5.英云闪长岩

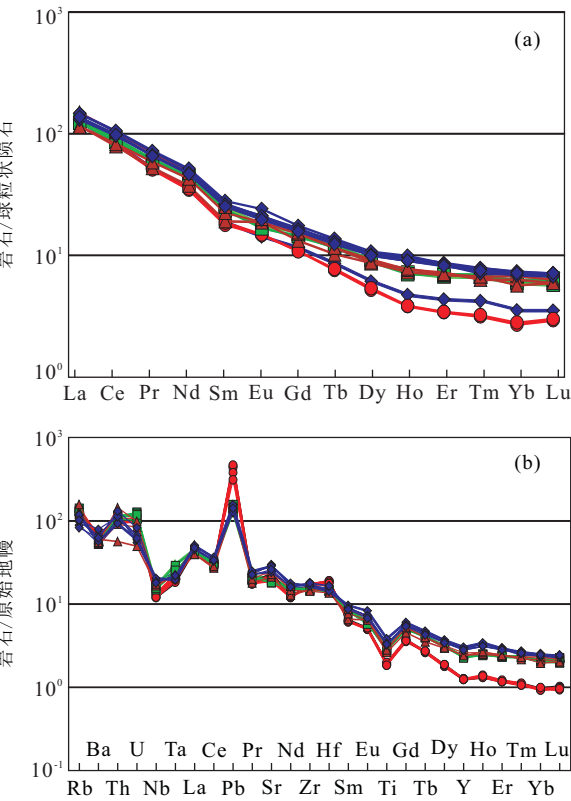


图 4 日松岩体和甲维岩脉稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化(b)(图例参考图 3,下同)(Sun and McDonough, 1989)

Fig.4 REE distribution pattens (a) and primitive mantle normalized incompatible element spidergram (b) of Risong rock mass and Jiawei dykes

3c)对其进一步分类,样品整体显示中钾钙碱性—高钾钙碱性过渡的特征(图 3c). K₂O/Na₂O 值为 0.49~0.77,显示 Na₂O 相对富集, K₂O 含量 1.95%~2.73%.样品具有相对较低的 MgO 含量

(0.89%~2.33%), Mg[#] 介于 43.09~54.35 之间 (Mg[#] = molar[Mg/(Mg+Fe²⁺)]).

4.2 稀土和微量元素地球化学

样品的ΣREE 变化在(108.9~145.54)×10⁻⁶, 总量较高.在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解(图 4a)上,显示轻稀土元素(LREE)富集,而重稀土元素(HREE)强烈亏损.(La/Yb)_N = 17.09~48.51, (Gd/Yb)_N = 1.94~4.04, (La/Sm)_N = 4.97~7.30, 轻重稀土元素分异明显, Yb 含量较低(0.46~1.25)×10⁻⁶.δEu 介于 0.86~1.17,显示极微弱正铕异常.

在原始地幔的微量元素标准化蛛网图(图 4b)上,样品显示亏损高场强元素(HFSE),如 Nb、Ta、Ti、Y、HREE 等;富集大离子亲石元素(LILE),如 Rb、Th、U、Sr 和 LREE.

5 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

日松岩体和甲维两组岩脉中选出的锆石 CL 图像、测点位置如图 5a、图 6a、图 7a 所示,锆石 LA-ICP-MS 分析结果见表 2.在双目镜下观察两组脉体锆石呈淡黄色,具玻璃光泽,无色透明至半透明颗粒.多数锆石颗粒较大,粒径介于 80~280 μm 之间,柱状晶体长宽比值变化较大,介于 1:1~5:1.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,属于岩浆结晶的产物,部分锆石内部含有残留核.

由表 2 可知,日松岩体和甲维两组岩脉中锆石的 U、Th 含量分别为 86.7×10⁻⁶~1 824×10⁻⁶ 和

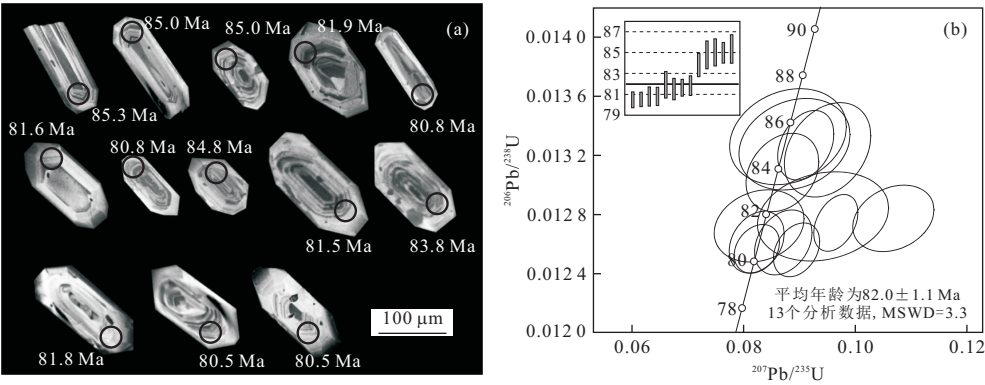


图 5 日松花岗闪长岩体(样品号 B214-8-2)中结晶的锆石阴极发光(a)和 U-Pb 年龄协和图(b)

Fig.5 Magmatic euhedral zircon CL images (a) and U-Pb concordant diagram (b) of granodiorite (Sample B214-8-2) in Risong

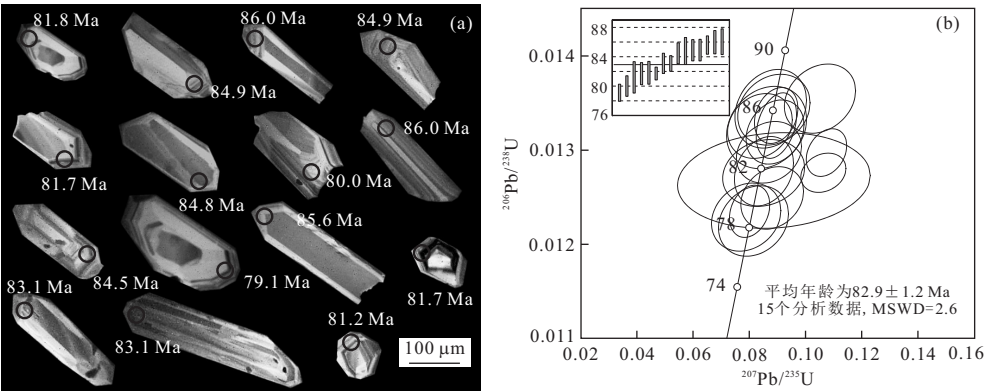


图 6 甲维花岗闪长玢岩脉(样品号 D4494-16)中结晶的锆石阴极发光(a)和 U-Pb 年龄协和图(b)

Fig.6 Magmatic euhedral zircon CL images (a) and U-Pb concordant diagram (b) of corcovadite-dykes (Sample D4494-16) in Jiawei

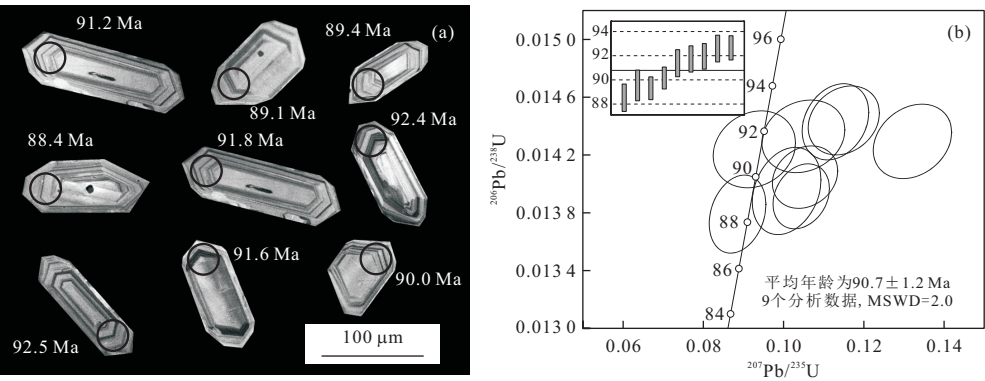


图 7 甲维花岗闪长岩脉(样品号 D4494-8)中结晶的锆石阴极发光(a)和 U-Pb 年龄协和图(b)

Fig.7 Magmatic euhedral zircon CL images (a) and U-Pb concordant diagram (b) of granodiorite-dykes (Sample D4494-8) in Jiawei

$53.9 \times 10^{-6} \sim 1.827 \times 10^{-6}$, Th/U 比值均大于 0.30 (0.30~3.29), 平均为 0.87, 应属于典型的岩浆锆石 (Belousova *et al.*, 2002). 利用 Isoplot3 (Ludwig, 2003) 程序进行了谐和曲线投影和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄的计算. 日松花岗闪长岩体 13 个锆石分析点

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比较集中, 在协和图上大多数点落在协和线及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $82.0 \pm 1.1\text{ Ma}$, $\text{MSWD}=3.3$ (图 5b). 甲维花岗闪长岩脉 9 个锆石分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $90.7 \pm 1.2\text{ Ma}$, $\text{MSWD}=2.0$, 一致线年龄图见(图 6b). 甲维

表 2 班公湖日松岩体和甲维岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircon age data of Risong rock mass and Jiawei dykes from Bangong Lake

点号	Pb (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/U	207Pb/206Pb			207Pb/235U			206Pb/238U			207Pb/235U			206Pb/238U		
					比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ	比值	1σ	1σ
B214-8-2-1	15.67	309.37	241.99	1.28	0.047 05	0.003 54	0.088 05	0.006 90	0.013 33	0.000 21	50.1	170.3	85.7	6.4	85.3	1.4			
B214-8-2-2	14.26	201.42	585.81	0.34	0.050 33	0.001 88	0.091 22	0.003 32	0.013 27	0.000 16	209.3	87.0	88.6	3.1	85.0	1.0			
B214-8-2-3	9.31	161.29	219.06	0.74	0.048 95	0.003 64	0.089 21	0.006 57	0.013 28	0.000 20	146.4	162.9	86.8	6.1	85.0	1.3			
B214-8-2-4	7.42	129.45	155.30	0.83	0.054 56	0.004 46	0.094 32	0.007 75	0.012 79	0.000 20	394.5	185.2	91.5	7.2	81.9	1.3			
B214-8-2-5	30.21	682.52	578.99	1.18	0.050 71	0.002 10	0.087 20	0.003 40	0.012 61	0.000 15	227.8	96.3	84.9	3.2	80.8	0.9			
B214-8-2-6	45.97	540.58	1 823.82	0.30	0.054 83	0.001 45	0.096 61	0.002 61	0.012 74	0.000 13	405.6	59.3	93.6	2.4	81.6	0.8			
B214-8-2-7	16.81	356.98	419.82	0.85	0.047 81	0.002 01	0.082 44	0.003 25	0.012 61	0.000 14	100.1	87.0	80.4	3.0	80.8	0.9			
B214-8-2-8	16.03	318.85	364.54	0.87	0.053 58	0.003 09	0.095 13	0.005 11	0.013 24	0.000 21	353.8	131.5	92.3	4.7	84.8	1.3			
B214-8-2-9	11.35	213.13	293.19	0.73	0.048 12	0.003 19	0.082 87	0.005 31	0.012 72	0.000 16	105.6	148.1	80.8	5.0	81.5	1.0			
B214-8-2-10	19.46	420.81	409.30	1.03	0.048 91	0.002 53	0.087 04	0.004 30	0.013 08	0.000 17	142.7	122.2	84.7	4.0	83.8	1.1			
B214-8-2-11	21.43	463.06	377.23	1.23	0.060 87	0.002 78	0.106 91	0.004 80	0.012 77	0.000 15	635.2	100.0	103.1	4.4	81.8	0.9			
B214-8-2-12	24.45	398.72	1 006.57	0.40	0.051 98	0.001 70	0.089 58	0.002 73	0.012 56	0.000 12	283.4	78.7	87.1	2.5	80.5	0.8			
B214-8-2-13	16.16	263.75	646.62	0.41	0.047 52	0.001 55	0.082 46	0.002 68	0.012 57	0.000 11	76.0	74.1	80.5	2.5	80.5	0.7			
D4494-8-1	9.86	261.57	260.47	1.00	0.046 61	0.003 33	0.092 37	0.006 79	0.014 25	0.000 18	27.9	162.9	89.7	6.3	91.2	1.1			
D4494-8-2	39.48	1 827.45	554.65	3.29	0.054 55	0.002 59	0.104 08	0.004 65	0.013 92	0.000 15	394.5	107.4	100.5	4.3	89.1	0.9			
D4494-8-3	12.06	323.25	318.56	1.01	0.052 84	0.003 11	0.100 44	0.005 66	0.013 96	0.000 20	320.4	130.5	97.2	5.2	89.4	1.3			
D4494-8-4	10.39	256.42	325.01	0.79	0.047 41	0.002 67	0.088 17	0.004 67	0.013 80	0.000 18	77.9	120.4	85.8	4.4	88.4	1.1			
D4494-8-5	9.48	225.12	277.75	0.81	0.052 90	0.003 47	0.104 61	0.006 84	0.014 34	0.000 17	324.1	154.6	101.0	6.3	91.8	1.1			
D4494-8-6	9.93	203.73	287.97	0.71	0.057 12	0.002 84	0.112 63	0.005 49	0.014 44	0.000 17	494.5	113.9	108.4	5.0	92.4	1.1			
D4494-8-7	14.59	332.91	441.36	0.75	0.057 67	0.002 89	0.114 71	0.005 87	0.014 45	0.000 16	516.7	83.3	110.3	5.3	92.5	1.0			
D4494-8-8	20.17	622.68	457.08	1.36	0.067 18	0.003 37	0.131 86	0.006 46	0.014 30	0.000 17	842.6	99.8	125.8	5.8	91.6	1.1			
D4494-8-9	14.57	411.75	391.98	1.05	0.054 48	0.002 88	0.105 03	0.005 39	0.014 06	0.000 14	390.8	86.1	101.4	5.0	90.0	0.9			
D4494-16-1	7.31	129.25	152.40	0.85	0.050 77	0.004 62	0.085 15	0.006 95	0.012 77	0.000 24	231.6	211.1	83.0	6.5	81.8	1.6			
D4494-16-2	7.02	101.65	153.58	0.66	0.047 34	0.004 50	0.083 71	0.007 61	0.013 25	0.000 23	64.9	214.8	81.6	7.1	84.9	1.4			
D4494-16-3	9.22	146.52	174.75	0.84	0.048 19	0.004 66	0.088 68	0.008 50	0.013 43	0.000 25	109.4	214.8	86.3	7.9	86.0	1.6			
D4494-16-4	8.49	133.78	204.38	0.65	0.050 00	0.002 69	0.089 55	0.004 74	0.013 26	0.000 23	194.5	128.7	87.1	4.4	84.9	1.5			
D4494-16-5	22.71	400.26	385.24	1.04	0.058 33	0.002 94	0.106 30	0.005 31	0.012 76	0.000 14	542.6	111.1	102.6	4.9	81.7	0.9			
D4494-16-6	4.90	67.12	99.32	0.68	0.048 21	0.005 20	0.086 07	0.009 41	0.013 24	0.000 29	109.4	237.0	83.8	8.8	84.8	1.8			
D4494-16-7	7.88	120.02	155.38	0.77	0.052 55	0.004 56	0.088 07	0.007 37	0.012 49	0.000 22	309.3	198.1	85.7	6.9	80.0	1.4			
D4494-16-8	5.85	83.19	126.02	0.66	0.049 71	0.005 09	0.087 54	0.008 42	0.013 44	0.000 28	189.0	277.7	85.2	7.9	86.0	1.8			
D4494-16-9	7.23	119.13	178.71	0.67	0.050 20	0.003 81	0.089 09	0.006 82	0.013 19	0.000 23	211.2	177.8	86.7	6.4	84.5	1.4			
D4494-16-10	13.05	244.50	256.34	0.95	0.047 81	0.002 90	0.080 02	0.004 74	0.012 35	0.000 18	100.1	127.8	78.2	4.5	79.1	1.2			
D4494-16-11	13.18	190.87	305.64	0.62	0.049 66	0.002 96	0.089 50	0.005 11	0.013 37	0.000 20	189.0	143.5	87.0	4.8	85.6	1.3			
D4494-16-12	5.13	80.65	109.52	0.74	0.050 52	0.003 67	0.085 02	0.009 63	0.012 75	0.000 23	220.4	240.7	82.9	9.0	81.7	1.5			
D4494-16-13	3.67	53.89	86.74	0.62	0.049 73	0.013 07	0.088 68	0.022 66	0.012 67	0.000 34	189.0	512.9	86.3	21.1	81.2	2.1			
D4494-16-14	5.75	93.85	150.69	0.62	0.049 31	0.004 17	0.086 92	0.007 66	0.012 97	0.000 22	161.2	188.9	84.6	7.2	83.1	1.4			
D4494-16-15	33.93	592.28	618.78	0.96	0.061 54	0.003 06	0.107 40	0.004 76	0.012 97	0.000 17	657.4	107.4	103.6	4.4	83.1	1.1			

花岗闪长玢岩脉 15 个锆石分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄给出了 82.9 ± 1.2 Ma, MSWD = 2.6, 一致线年龄图见图 7b. 表明日松岩体和甲维花岗闪长岩脉、花岗闪长玢岩脉的侵入时间均是晚白垩世, 其中日松岩体和甲维花岗闪长玢岩脉年龄接近, 应为同期岩浆活动产物.

6 讨论

6.1 岩石成因

6.1.1 埃达克岩地球化学特征 埃达克岩(Adakite)是 1990 年由 Defant and Drummond(1990)在研究阿留申群岛火山岩时提出的一种地球化学特征和成因特殊的中酸性火山岩或侵入岩, 其地球化学标志是: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, 高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$), $\text{MgO} < 3\%$, 贫 Y 和 Yb($\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$), Sr 含量高($> 400 \times 10^{-6}$), LREE 富集, 无 Eu 异常(或有轻微的负 Eu 异常)(Defant and Drummond, 1990). 埃达克岩产生最基本条件是地壳厚度应满足石榴角闪岩相或榴辉岩相稳定的最低深度(Garrison and Davidson, 2003), 其反映了一种高压构造体制, 具有重要的地球动力学意义.

岩石地球化学特征表明, 日松岩体和甲维花岗闪长岩脉、花岗闪长玢岩脉具有典型的埃达克岩特征: 高的 SiO_2 ($63.05\% \sim 70.72\%$)、高 Al_2O_3 ($\geq 15\%$), 低 MgO ($0.97\% \sim 2.33\%$) $< 3\%$, 高 Sr 含量 ($380.4 \times 10^{-6} \sim 625.0 \times 10^{-6}$, 平均值为 476.4×10^{-6}), 高 Sr/Y 比值(> 35), 低 HREE 和 Y ($5.64 \times 10^{-6} \sim 13.80 \times 10^{-6} < 18 \times 10^{-6}$, 平均值为 10.06×10^{-6}) 和 Yb ($0.46 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-6} < 1.9 \times 10^{-6}$,

平均值为 0.93×10^{-6}), 轻重稀土分异明显 ($17.09 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 48.51$, 平均值为 27.40). 在埃达克岩判别图上, 样品都落入埃达克岩区域(图 8).

6.1.2 岩石成因 班公湖地区晚白垩世埃达克岩可以通过埃达克质岩石的成因模型来探讨其成因. 埃达克岩最初被认为是年轻的(< 25 Ma)洋壳俯冲到一定深度发生部分熔融的产物(Defant and Drummond, 1990, 1993; Kay *et al.*, 1993). 近几年研究者又提出了其他几种成因模式, 如基性岩浆的分离结晶作用(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006)、拆沉下地壳熔融(Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006)、玄武质岩浆底侵成因(Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; Zhao *et al.*, 2008; 章凤奇等, 2010)和加厚下地壳部分熔融(Chung *et al.*, 2003; Gao *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006; 张旗等, 2001a, 2001b; 李德威, 2004; Tseng *et al.*, 2009; 刘建峰等, 2013).

Castillo *et al.* (1999) 认为埃达克岩可以在低压下通过基性岩浆分离结晶作用形成. 在低压下斜长石、角闪石的分离结晶会使 MREE 和 HREE 之间产生向下凹的稀土配分模式, 且 Dy/Yb 、 δEu 随 SiO_2 增高呈降低趋势(朱明田等, 2011), 而日松岩体和甲维埃达克质岩脉不具备此特征(图 4a)(表 1). 高压下基性岩浆通过角闪石和石榴石分离结晶也会产生埃达克岩(Macpherson *et al.*, 2006), 角闪石或石榴石的分离结晶会导致残留熔体中 Y/Yb 的升高, 而日松岩体和甲维埃达克质岩脉 Y/Yb 变化较小($9.65 \sim 12.62$). 并且由 La-La/Yb 图(图 10)可知, 本文研究的埃达克岩的岩浆主要通过部分熔融形成. 综上, 我们否定了基性岩浆的分离结晶作用模

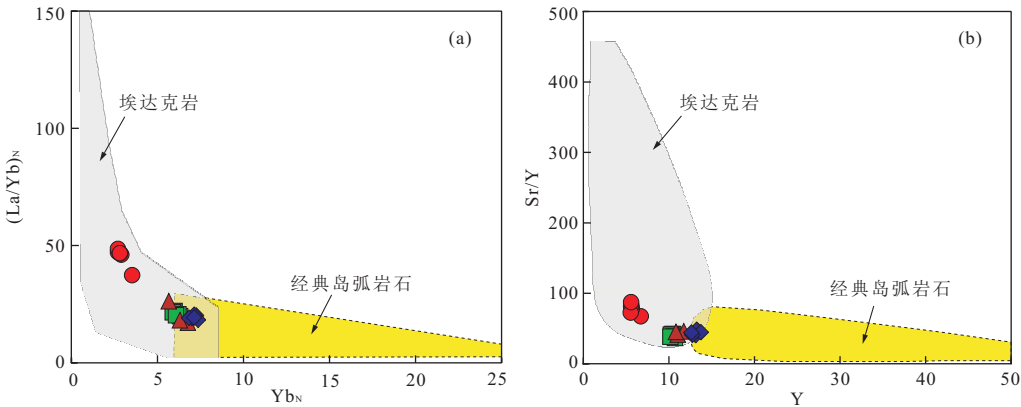


图 8 日松岩体和甲维花岗闪长(玢)岩脉(La/Yb)_N-Yb_N(a)和 Sr/Y-Y 判别(b)(Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005)
Fig.8 Plots of (La/Yb)_N vs Yb_N(a) and Sr/Y vs Y for the Risong rockmass and Jiawei granodiorite (corcovadite) dykes from Bangong Lake

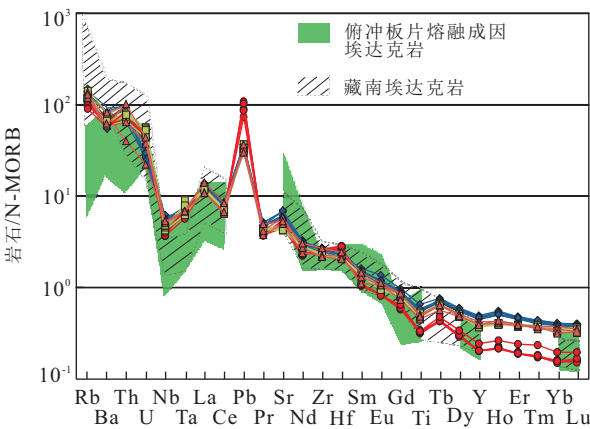


图 9 日松岩体和甲维花岗岩闪长(玢)岩脉 N-MORB 标准化的微量元素配分

Fig. 9 N-MORB normalized incompatible element spidergram for Risong rockmass and Jiawei anodiorite (corcovadite) dykes

注:俯冲板片熔融成因埃达克岩数据参考 Defant and Drummond, 1990; Kay *et al.*, 1993; Stern and Kilian, 1996.藏南埃达克岩数据参考 Chung *et al.*, 2003

式的可能性.拆沉下地壳部分熔融形成的熔体,在上升过程中不可避免会与上部地幔相互作用,形成的岩浆具较高的 MgO、Cr、Ni 含量 (Smithies, 2000; Prouteau *et al.*, 2001; Martin *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2006; 余红霞等, 2011), 而日松岩体和甲维埃达克质岩脉较低的 MgO、Cr、Ni 含量表明其不可能是源于拆沉下地壳的部分熔融, 而类似于底侵和加厚下地壳熔融形成的埃达克岩.

本文研究的北冈底斯地块中 91~82 Ma 的埃达克岩具有富钾贫钠的特征 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.30\sim2.03$, 平均值 1.60, 仍属于钠质), 以及高 K_2O 含量 (1.95%~2.73%, 平均 2.5%), 低 Cr (平均值 33×10^{-6}) 和 Ni (平均值 23×10^{-6}), 高的 Th 含量 (平均值 9×10^{-6})、Th/La 比值 (0.23~0.35, 平均 0.29)、Th/U (3.68~9.17, 平均 5.02) 和 Rb/Sr (0.10~0.22, 平均 0.17), 相对低的 Sr/Y (平均为 51) 以及 Ba、U 相对亏损, Rb、Th 相对富集等与俯冲洋壳熔融成因埃达克岩截然不同的特征, 而与加厚下地壳熔融成因的埃达克岩特征相似 (Chung *et al.*, 2003; 张旗等, 2003; Moyen, 2009; 朱明田等, 2011; 刘建峰等, 2013; 魏红艳等, 2012), 在图 9 上, 本文研究的 91~82 Ma 埃达克岩也显示与藏南加厚地壳熔融成因的埃达克岩特征相似的微量元素分布.

通过上述对于此期埃达克岩地球化学特征的分析可知, 其特征类似于加厚下地壳熔融形成的埃达

克岩, 但由加厚下地壳熔融形成的熔体一般 $\text{Mg}^\# < 40$ (Rapp and Watson, 1995), 而研究区埃达克岩具有相对较高的 $\text{Mg}^\#$ (43.09~54.35), 说明存在一定幔源物质的参与, 可能与幔源玄武质岩浆底侵作用有关. 笔者测得班公湖地区成群分布有 85.8~88.8 Ma 的代表板内伸展环境的辉绿岩脉 (图 1b), 岩脉源区显示壳幔混源特征, 表明此时班公湖地区存在幔源玄武质岩浆底侵下地壳事件.

因此, 我们认为班公湖地区晚白垩世埃达克岩 (91~82 Ma) 是由幔源玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融形成, 代表了一期热隆伸展事件.

6.2 动力学过程及对洋陆转换的指示意义

目前对于中特提斯洋盆的最终闭合时间仍存在有较大争议, 闭合时间从晚侏罗—晚白垩世均有, 而且从板块构造体制转向板内构造体制更是缺少明确可靠的标志. 由上述可知, 北冈底斯地块中 91~82 Ma 的埃达克岩是由幔源玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融形成, 因此不可能形成于俯冲背景. 从地球化学特征看, 91~82 Ma 的埃达克岩与玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融成因的安第斯类型埃达克岩相似 (Atherton and Petford, 1993), 但从构造背景来看却存在较大差异, 91~82 Ma 已经进入中特提斯洋闭合后的板内阶段, 不可能存在像安第斯类型的陆缘弧环境. 因为其原始地幔标准化蛛网图显示富集 LILE, 亏损 HFSE、Nb、Ti 明显亏损特征, 与后碰撞 I 型花岗岩微量元素特征相似 (Kuster and Harms, 1998); 在 (Y+Nb)-Rb 图中 (图 10b), 91~82 Ma 的埃达克岩大部分落入后碰撞花岗岩区域 (Post-COLG) 内, 所以不可能是形成于岛弧环境. 区域上康磊等 (2012) 获得班怒带西北缘具有埃达克岩特征的红其拉甫岩体锆石 U-Pb 年龄为 107 Ma, 认为其为缝合带后碰撞阶段地壳加厚的产物. 余红霞等 (2011) 认为冈底斯地块中北部 90~88 Ma 的具有埃达克质岩特征的拔拉扎含矿斑岩是班公湖—怒江洋盆碰撞闭合后拆沉下地壳部分熔融的结果, 形成于区域性的伸展环境. 而且笔者在班公湖地区首次发现晚白垩世 85.8~88.8 Ma 的代表板内伸展环境的辉绿岩脉, 界定出班公湖地区至少在 88.8 Ma 已完成洋陆转换进入板内 (图 1b). 因此班公湖地区 91~82 Ma 的埃达克岩最可能形成于后碰撞的初期阶段.

从构造背景分析, 区域上其形成的动力学机制可能是羌塘地块与冈底斯地块碰撞闭合后的一期松弛调整, 构造体制从碰撞期挤压转为碰撞后的板内

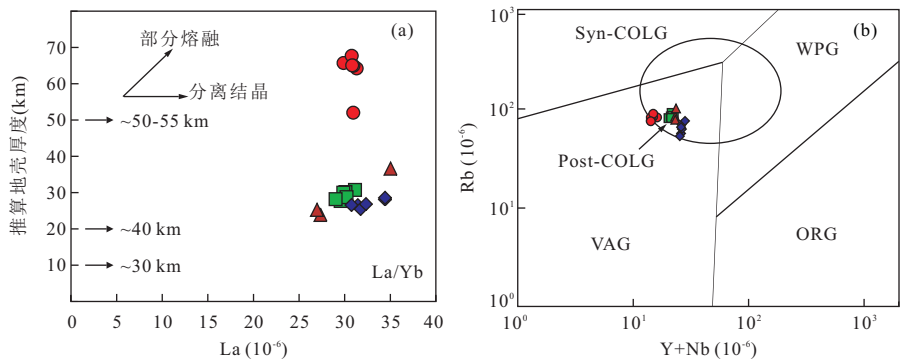


图 10 班公湖晚白垩世埃达克岩 La/Yb vs. La (a)(Chung *et al.*, 2009)和 Y+Nb vs. Rb(b)(Pearce, 1996)

Fig.10 The La/Yb vs. La diagram and Y+Nb vs. Rb diagram of late Cretaceous adakites from Bangong Lake zone

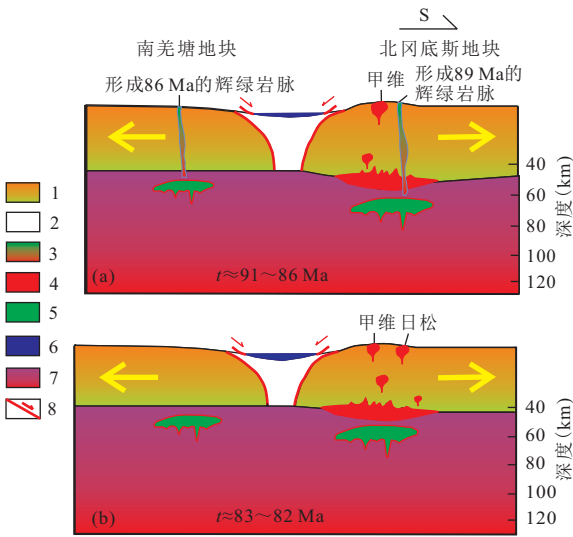


图 11 班公湖 91~82 Ma 埃达克岩成岩模式示意

Fig.11 The diagenetic model map of 91~82 Ma adakites from Bangong Lake zone

- 1.陆壳; 2.蛇绿混杂岩; 3.基性岩脉; 4.埃达克岩; 5.玄武质岩浆; 6. 竟柱山组; 7.地幔; 8.正断层

伸展,伸展导致压力降低,地幔部分熔融,形成初始的地幔玄武质岩浆,产生的地幔岩浆上升到壳幔界面附近和加厚的下地壳中,发生底侵作用.而且区域内广泛分布有晚白垩世 85.8~88.8 Ma 辉绿岩脉,年龄与本文研究的埃达克岩接近,说明此时期班公湖地区具备了幔源玄武质岩浆底侵下地壳作用的背景.下地壳部分熔融产生埃达克岩需具备两个条件:一是要达到石榴石稳定的地壳厚度(Rapp and Wstson, 1995),二是要达到足够的温度使地壳熔融. 91~82 Ma 的埃达克岩形成于冈底斯地壳加厚背景(Kapp *et al.*, 2003; Guynn *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2008),但由图 10a 可知,洋陆转换导致的地壳加厚并没有一直持续,91 Ma 时地壳厚度较大,之后处于

伸展减薄状态,但总体地壳厚度均大于 40 km,足以满足石榴石残留相的稳定条件;地幔玄武岩底侵加热和加厚地壳导致的温度升高提供了下地壳部分熔融所需热量.

根据上述班公湖地区发育的埃达克岩年龄及其成因分析,我们可以模拟出班公湖—怒江洋盆陆转换之后埃达克岩形成方式的示意图(图 11).

综上,我们得出班公湖地区 91~82 Ma 埃达克岩形成于中特提斯洋闭合后的板内伸展环境,成因是玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融形成,此期埃达克岩的出现可以作为班公湖地区由板块构造体制转向板内构造体制的标志,为班公湖地区中特提斯洋的演化时限提供可靠的信息.

7 结论

(1)班公湖地区蛇绿混杂岩带南侧日松花岗闪长岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 82 Ma,甲维花岗闪长岩脉和花岗闪长岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 91 Ma、83 Ma,均为晚白垩世岩浆活动产物;(2)日松岩体和甲维酸性岩脉具有典型埃达克岩的地球化学特征,成因判别与加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩特征相似,但岩石具有较高的 $Mg^\#$ (43.09~54.35),故最可能是幔源玄武质岩浆底侵加厚下地壳部分熔融形成;(3)本文 91~82 Ma 的埃达克岩形成于后碰撞初期阶段,可以作为班公湖地区由板块构造体制转向板内构造体制的标志.

致谢:张旗研究员对本文初稿提出许多有益的建议;两位匿名审稿人认真细致的审阅了本文并提出宝贵的修改意见和建议,对本文的改进起到重要作用;在此一并表示衷心的感谢!

References

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362: 144—146. doi: 10.1038/362144a0
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602—622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Cai, Z. Y., Qiu, R. Z., Xiong, X. L., et al., 2005. The Adakite-Like Intrusive Rocks Characteristics of Western Tibet and Their Prospecting Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 491—501 (in Chinese with English abstract).
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and Other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33—51. doi: 10.1007/s004100050467
- Chung, S. L., Chu, M. F., Ji, J. Q., et al., 2009. The Nature and Timing of Crustal Thickening in Southern Tibet: Geochemical and Zircon Hf Isotopic Constrains from Post-Collisional Adakites. *Tectonophysics*, 477: 36—48. doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.008
- Chung, S. L., Liu, D., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 11: 1021—1024. doi: 10.1130/G19796.1
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347: 662—665. doi: 10.1038/347662a0
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1993. Potential Example of the Partial Melting of the Subducted Lithosphere in Volcanic Arc. *Geology*, 21: 547—550. doi: 10.1130/0091-7613(1993)021
- Gao, S., Roberta, L. R., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892—897. doi: 10.1038/nature03162
- Garrison, J. M., Davidson, J. P., 2003. Dubious Case for Slab Melting in the Northern Volcanic Zone of the Andes. *Geology*, 31: 565—568. doi: 10.1130/0091-7613(2003)031
- Guynn, J. H., Kapp, P., Pullen, A., et al., 2006. Tibetan Basement Rocks near Amdo “Missing” Reveal Mesozoic Tectonism along the Bangong Suture, Central Tibet. *Geology*, 34(6): 505—508. doi: 10.1130/G22453.1
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139—155. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00007-X
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8: 523—548.
- Jiang, J. H., Wang, R. J., Qu, X. M., et al., 2011. Crustal Extension of the Bangong Lake Arc Zone, Western Tibetan Plateau, after the Closure of the Tethys Oceanic Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1021—1032 (in Chinese with English abstract).
- Kang, L., Xiao, P. X., Gao, X. F., et al., 2012. The Age and Origin of the Konjirap Pluton in Northwestern Tibetan Plateau and Its Tectonic Significances. *Acta Geologica Sinica*, 86(7): 1063—1076 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Dong, Y. H., et al., 2008. Cretaceous Volcanic Rocks of Zenong Group in North-Middle Lhasa Block: Products of Southward Subducting of the Slainajap Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303—314 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Wang, B. D., et al., 2010. Qushenla Formation Volcanic Rocks in North Lhasa Block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethy's Southward Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3106—3116 (in Chinese with English abstract).
- Kapp, P., Murphy, M. A., Yin, A., et al., 2003. Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution of the Shiquanhe Area of Western Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1029—1053. doi: 10.1029/2001TC001332
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Marquez, M., 1993. Evidence in Cerro-Pampa Volcanic Rocks for Lab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703—714.
- Kuster, D., Harms, U., 1998. Post-Collisional Potassic Granitoids from the Southern and Northwestern Parts of the Late Neo-proterozoic East African Orogen: A Review. *Lithos*, 45: 177—195. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00031-0
- Li, D. W., 2003. A New Model for Uplifting Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 593—600 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 2004. Late Cenozoic Intraplate Orogeny and Dynamic Metallogeny in the Southern Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 361—369 (in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Li, D. W., 2008. Three-Stage Tectonic Evolution and Metallogenic Evolution in the Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 723—742 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. X., Li, G. M., Qin, K. Z., et al., 2008. Geochemistry of Porphyries and Volcanic Rocks and Ore-Forming Geochronology of Duobuza Gold-Rich Porphyry Copper Deposit in Bangonghu Belt, Tibet: Constraints on Metallogenic Tectonic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 531—543 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. F., Chi, X. G., Zhao, Z., et al., 2013. Zircon U-Pb Age and Petrogenetic Discussion on Jianshetun Adakite in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 827—839 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 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 J. Petrol.*, 51: 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y., Hu, Z., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chem. Geol.*, 257: 34—43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, Berkeley, 4: 1—71.
- Macpherson, C. G., Dreher, S., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581—593. doi:10.1016/j.epsl.2005.12.034
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79: 1—24. doi:10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Moyen, J. F., 2009. High Sr/Y and La/Yb Ratios: The Meaning of the “Adakitic Signature”. *Lithos*, 112: 556—574. doi:10.1016/j.lithos.2009.04.001
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-Temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Zhu, D. C., Wang, L. Q., et al., 2004. Bangong Lake-Nu River Suture Zone—The Northern Boundary of Gondwanaland: Evidence from Geology and Geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 370—382 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 1996. Sources and Setting Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120—125.
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 68—81. doi:10.1007/BF00384745
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491—1521. doi:10.1093/petrology/37.6.1491
- Prouteau, G., Scaillet, B., Pichavant, M., et al., 2001. Evidence for Mantle Metasomatism by Hydrous Silicic Silicate Melts Derived from Subducted Oceanic Crust. *Nature*, 410: 197—200. doi:10.1038/35065583
- Qiu, R. Z., Zhou, S., Deng, J. F., et al., 2004. Dating of Gabbro in the Shemalagou Ophiolite in the Western Segment of the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt, Tibet—With a Discussion of the Age of the Bangong Co-Nujiang Ophiolite Belt. *Geology in China*, 31(3): 262—268 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Xin, H. B., Du, D. D., et al., 2012. Ages of Post-Collisional A-Type Granite and Constraints on the Closure of the Oceanic Basin in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, the Tibetan Plateau. *Geochimica*, 41(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8 ~ 32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi:10.1093/petrology/36.4.891
- Shi, R. D., 2005. Recognition of the Bangong Lake MOR- and SSZ-Type Ophiolites in the Northwestern Tibet Plateau and Its Tectonic Significance (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Smithies, R. H., 2000. The Archean TTG Series is not an Analogue of Cenozoic Adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115—125. doi:10.1016/S0012-821X(00)00236-3
- Stern, C. R., Kilian, R., 1996. Role of the Subducted Slab, Mantle Wedge and Continental Crust in the Generation of Adakites from the Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263—281.

doi:10.1007/s004100050155

- Streckeisen, A. L., 1976. Classification of the Common Igneous Rocks by Means of Their Chemical Composition: A Provisional Attempt. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Monatshefte*, 1: 1—15.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Nryy, M. J. eds., *Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Pub. L. Geo. L. Soc., London*, 42: 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tseng, C. Y., Yang, H. J., Yang, H. Y., et al., 2009. Continuity of the North Qilian and North Qinling Orogenic Belts, Central Orogenic System of China: Evidence from Newly Discovered Paleozoic Adakitic Rocks. *Gondwana Res.*, 16: 285—293. doi: 10.1016/j.gr.2009.04.003
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119—144. doi: 10.1093/petrology/egi070
- Wei, H. Y., Sun, D. Y., Ye, S. Q., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Its Geological Significance of the Granitic Rocks in the Yichun-Hegang Region, Southeastern Xiao Hinggan Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (Suppl.): 50—59 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. C., Li, T. D., 1998. The Effects of the Qinghai-Tibet Plateau Lithosphere Structure, Uplift Mechanisms to Continental Deformation. *Geological Review*, 44 (1): 112 (in Chinese).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rock in the Ningzhen Area of East China Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Geology*, 30: 1111—1114. doi: 10.1130/0091-7613(2002) 030
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006. Mesozoic Adakitic Rocks from the Xuzhou-Suzhou Area, Eastern China: Evidence for Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 230—240. doi: 10.1016/j.jseae.2005.03.010
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211—280. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Yu, H. X., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2011. Geochemistry and Origin of Late Cretaceous (~90 Ma) Ore-Bearing Porphyry of Balazha in Mid-Northern Lhasa Terrane, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (7): 2011—2022 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28 (3): 353—370. doi: 10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x
- Zhang, F. Q., Chen, H. L., Cao, R. C., et al., 2010. Discovery of Late Paleozoic Adakite from the Basement of the Hailaer Basin in NE China and Its Geological Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (2): 633—641 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001a. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from Adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36 (2): 248—255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001b. The Characteristics and Tectonic-Metallogenic Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Wang, Y. L., 2003. On the Relationship between Adakite and Its Tectonic Setting. *Geotectonica et Metallogenia*, 27 (2): 101—108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., 2011. Characteristics and Origin of the Acid Intrusive Rocks in the Bangong Ophiolitic Melange Zone in Ritu (Dissertation). Chengdu Technology University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T. P., Zhou, M. F., Zhao, J. H., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the 80 Ma Rutog Granitic Pluton, Northwestern Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane. *Geology*, 145 (6): 845—857. doi: 10.1017/S0016756808005025
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241—255. doi: 10.1016/j.epsl.2010.11.005
- Zhu, M. T., Wu, G., Xie, H. J., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of the Kekesai Intrusion in Western Tianshan, NW China and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (10): 3041—3054 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡志勇, 邱瑞照, 熊小林, 等, 2005. 西藏西部地区埃达克质侵入岩及铜金找矿意义. 大地构造与成矿, 29 (4): 491—501.

江军华,王瑞江,曲晓明,等,2011.青藏高原西部班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后的地壳伸展作用.地球科学——中国地质大学学报,36(6):1021—1032.

康磊,校培喜,高晓峰,等,2012.青藏高原西北缘红其拉甫岩体的岩石成因、时代及其构造意义.地质学报,86(7):1063—1076.

康志强,许继峰,董彦辉,等,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,等,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.

李德威,2003.青藏高原隆升机制新模式.地球科学——中国地质大学学报,28(6):593—600.

李德威,2004.青藏高原南部晚新生代板内造山与动力成矿.地质前缘,11(4):361—369.

李德威,2008.青藏高原及邻区三阶段构造演化与成矿演化.地球科学——中国地质大学学报,33(6):723—742.

李金祥,李光明,秦克章,等,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.

刘建峰,迟效国,赵芝,等,2013.内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论.岩石学报,29(3):827—839.

潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等,2006.冈底斯造山带的时空结构及演化.岩石学报,22(3):521—533.

潘桂棠,朱弟成,王立全,等,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.地质前缘,11(4):370—382.

邱瑞照,周肃,邓晋福,等,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,杜德道,等,2012.西藏班公湖—怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束.地球化学,41(1):1—14.

史仁灯,2005.西藏班公湖 MOR 型和 SSZ 型两套蛇绿岩的厘定及大地构造意义(博士学位论文).北京:中国地质科学院.

魏红艳,孙德有,叶松青,等,2012.小兴安岭东南部伊春—鹤岗地区花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,37(增刊):50—59.

肖序常,李廷栋,1998.青藏高原岩石圈结构、隆升机制及对大陆变形影响.地质论评,44(1):112.

余红霞,陈建林,许继峰,等,2011.拉萨地块中北部晚白垩世(约 90 Ma)拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因.岩石学报,27(7):2011—2022.

章凤奇,陈汉林,曹瑞成,等,2010.海拉尔盆地基底晚古生代 adakite 的发现及其地质意义.岩石学报,26(2):633—641.

张旗,钱青,王二七,等,2001a.燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示.地质科学,36(2):248—255.

张旗,王焰,钱青,等,2001b.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—244.

张旗,王焰,王元龙,2003.埃达克岩与构造环境.大地构造与成矿学,27(2):101—108.

张向飞,2011.班公湖蛇绿混杂岩带酸性侵入岩特征及成因(硕士学位论文).成都:成都理工大学.

朱明田,武广,解洪晶,等,2011.新疆西天山科克赛岩体年代学、地球化学及地质意义.岩石学报,27(10):3041—3054.