

东昆中隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究^{*}

李碧乐 孙丰月 于晓飞 钱烨 王冠 杨延乾

LI BiLe, SUN FengYue, YU XiaoFei, QIAN Ye, WANG Guan and YANG YanQian

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2011-11-11 收稿, 2012-02-01 改回.

Li BL, Sun FY, Yu XF, Qian Y, Wang G and Yang YQ. 2012. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1163–1172

Abstract Studies of petrology and geochemistry indicate the high-K calc-alkaline diorite groups are located in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt. This suite of dioritic rocks are enriched in LILE (such as K, Ba, Rb), LREE and more mobile incompatible elements (such as Th, U), relatively depleting in HFSE (such as Nb, Ta, Ti, P), similar to the characteristics of Andean-type active continental margin magma. It is suggested that a mixture, between basaltic magma derived from partial melting of metasomatized mantle and acidic magma derived from crustal material, produces the dioritic magma. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the diorite in the Asiha intrusions was formed at ~244Ma, which in Early Indosinian period.

Key words K-rich calc-alkaline intrusion; Petrogenesis; Tectonics setting; U-Pb dating; Eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt

摘 要 岩石学、岩石地球化学研究表明,东昆中隆起带东段分布一套高钾的钙碱性闪长岩系列岩石。岩石明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)、LREE 和活泼的不相容元素(如 Th、U),相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P),具安第斯型活动大陆边缘岩浆岩特征。该闪长岩属混合成因,即由交代地幔的部分熔融形成基性岩浆,与地壳物质熔融形成的酸性岩浆混合形成。阿斯哈闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄值为 244Ma 左右,属印支早期。

关键词 高钾钙碱性侵入岩;岩石成因;构造背景;U-Pb 年龄;东昆中隆起带

中图法分类号 P588.122; P597.3

研究表明,高钾的钙碱性火成岩可形成于不同的构造背景,主要有 B 型俯冲的安第斯型大陆边缘和 A 型俯冲的陆陆碰撞造山带,且二类造山带的岩石化学特征存在明显的差别(Foley, 1992; Rogers *et al.*, 1998; 郭正府等, 1998; 王岳军等, 2001; Putirka and Busby, 2007; Boztug *et al.*, 2007; 张泽明等, 2009; 杨崇辉等, 2011)。众多的研究者都强调晚海西至印支期东昆中隆起带存在安第斯型岩浆弧(罗照华等, 1999; 袁万明等, 2000; 孙丰月等, 2003^①),该时期巴颜喀拉洋持续向东

昆仑地区斜向俯冲(许志琴等, 2001)。就东昆仑造山带而言,有关安第斯型岩浆弧高钾钙碱性火成岩岩石化学特征以及成因等问题的研究很少,巴颜喀拉洋闭合的具体时限也很模糊。本文选取东昆中东段闪长岩类进行地球化学特征及测年研究,旨在揭示岩石成因和成岩构造背景。对该类问题的深入研究,将有助于深化东昆仑地区岩浆演化和成岩成矿地质背景方面的认识。

^{*} 本文受中国地质调查局地质大调查项目(1212011086020)资助。

第一作者简介: 李碧乐,男,1965 年生,博士,教授,矿床学专业, E-mail: libl@jlu.edu.cn

^① 孙丰月,陈国华,迟效国,李碧乐,赵俊伟. 2003. 新疆-青海东昆仑成矿带成矿规律和找矿方向综合研究. 中国地质调查局地质调查项目科研报告

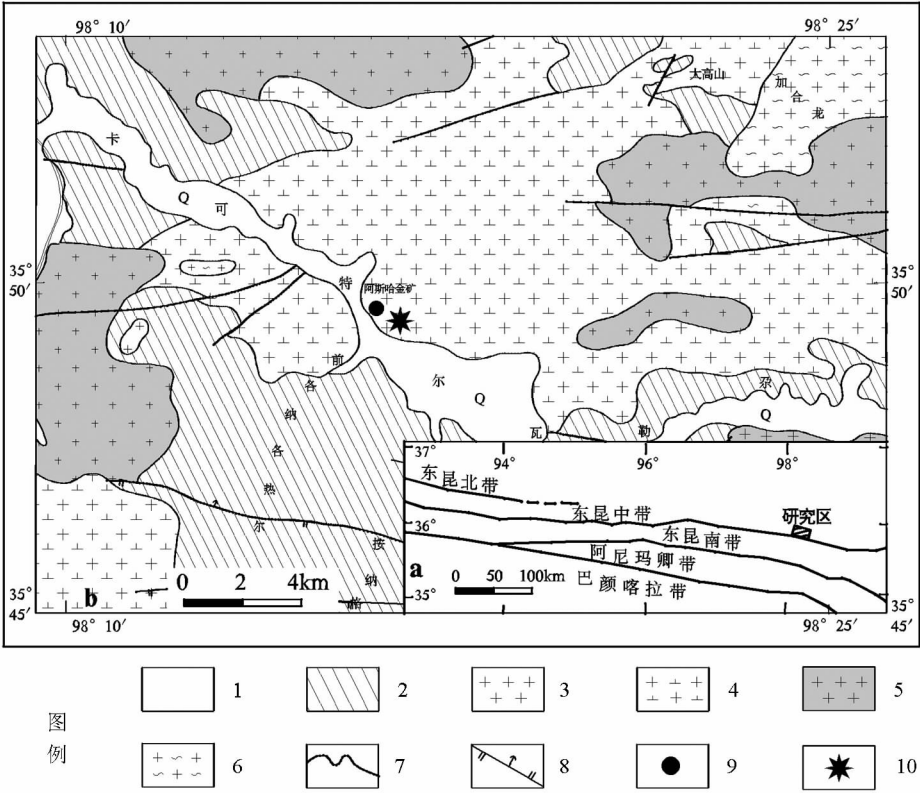


图 1 沟里地区阿斯哈闪长岩-花岗闪长岩分布区地质简图(据青海省地质局,1973 修编)
1-第四系;2-古元古代金水口群白沙河组;3-早中生代肉红色花岗岩、钾质花岗岩;4-晚古生代-早中生代灰白色中粗粒花岗闪长岩、闪长岩;
5-晚古生代-早中生代灰白色-肉红色花岗岩、钾质花岗岩;6-早古生代灰白色片麻状斜长花岗岩;7-地层界线;8-断层;9-金矿点;10-样品采集点

Fig.1 The sketch geological map of the Asiha diorite-granodiorite district from Gouli area

西-印支期岩浆活动占主导地位,具有多旋回构造-岩浆活动特点,为一多期叠加的陆缘、陆内岩浆弧。

1 地质背景

东昆仑造山带隶属于柴达木陆块南缘(王鸿祯等,1990),其内发育东昆北、中和南 3 条近 EW 向平行展布的断裂带,前人据此将东昆仑造山带划分为东昆北、中和南 3 个构造带(姜春发等,1992,2000)。昆中和昆南断裂带均延伸 1000km 以上,北倾,上陡下缓,为较强的地震带和重力、磁力梯度带(崔军文等,1992;崔军文,1997;肖序常和王军,1998;袁万明等,2000)。昆北断裂带长 700km 左右,多被第四系覆盖。孙丰月等(2003)认为东昆仑地区三个构造带实际上是东昆北加里东弧后裂陷带、东昆中基底隆起及花岗岩带(以下简称东昆中隆起带)、东昆南复合拼贴带,再往南即为阿尼玛卿和巴颜喀拉构造带(图 1a)。该造山带经历了多期次的造山作用,具有复杂地球动力学演化史。东昆中隆起带位于昆北和昆中断裂之间,以昆中断裂为界南接东昆南复合拼贴带,带内基底变质岩系和各期花岗岩大面积出露。岩浆活动极为强烈,以花岗闪长岩、闪长岩、二长花岗岩为主,分布面积最大,其次是碱长花岗岩,另有少量镁铁质和超镁铁质侵入岩出露。岩浆活动从前晋宁期至燕山期均有表现,以晚海

2 岩相学特征和样品描述

研究区位于东昆中隆起带东段,清水泉至卡可特尔一带,按照 1:20 万区域调查(青海省地质局,1973^①)和 1:5 万矿产调查(长安大学和青海有色地质勘查局地质八队,2007^②)侵入岩岩石单元划分,属清水泉单元。区内出露岩石以花岗质侵入岩为主(占基岩面积的 60% 以上),古元古界金水口群白沙河组以残留体形式分布在岩体中。花岗质侵入岩主要有花岗闪长岩、闪长岩,呈岩基状产出,面积约 300km²,呈 NWW 向与昆中断裂及昆中带平行分布(图 1b)。岩体中普遍含有暗色岩石包体,包体直径一般为 0.1~1m。包体岩性单一,主要为角闪辉长岩。包体中可见晶体较粗大

① 青海省地质局. 1973. 1:20 万加鲁河幅区域地质调查报告
② 长安大学和青海有色地质勘查局地质八队. 2007. 青海省都兰县沟里地区 147E003010(沟里乡)1:5 万矿产地质、水系沉积物测量综合调查成果报告

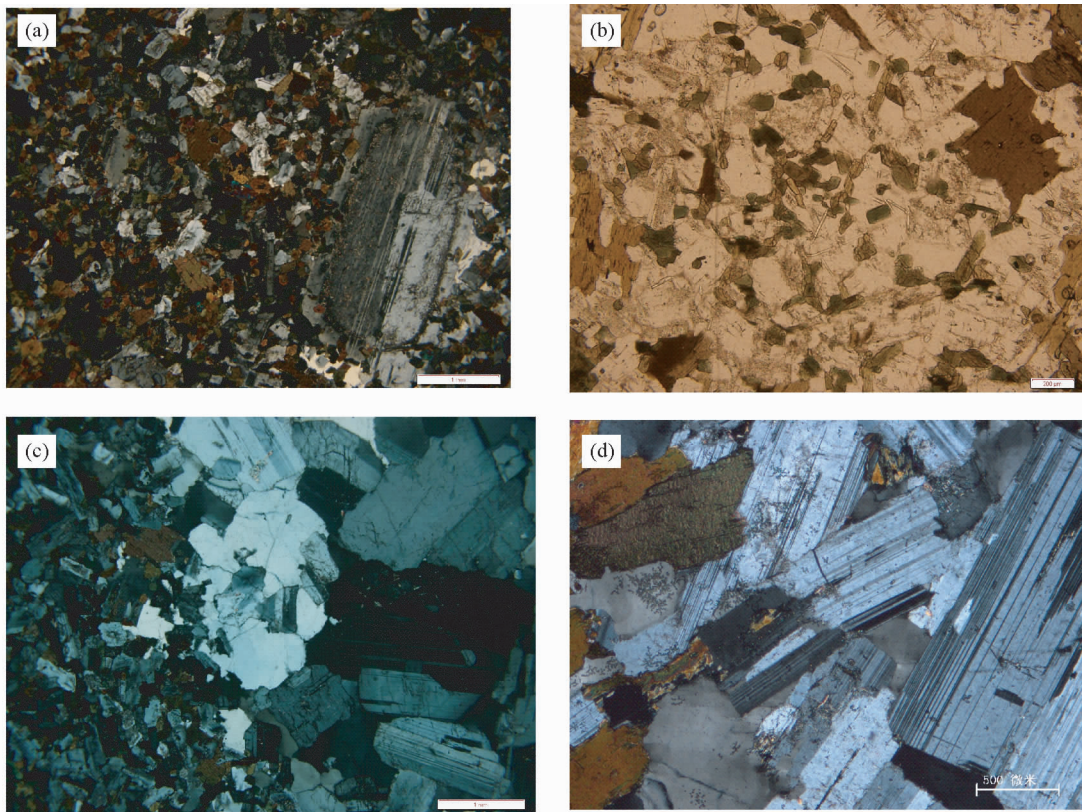


图2 阿斯哈闪长岩和角闪辉长岩包体的显微照片

(a)-角闪辉长岩包体中发育斜长石斑晶(正交偏光);(b)-角闪辉长岩包体中的针状磷灰石(单偏光);(c)-角闪辉长岩包体与寄主岩闪长岩接触处石英和斜长石中包裹细粒斜长石(正交偏光);(d)-阿斯哈闪长岩的镜下照片(正交偏光,描述见正文)

Fig.2 Microphotographs of the Asiha diorite and hornblende gabbro enclaves

的斜长石斑晶(图2a,样品ASH-12),包体中显示快速冷却形成的针状磷灰石发育(图2b,样品ASH-15),包体与寄主岩闪长岩接触处石英和斜长石均包裹包体的细粒斜长石(图2c,样品ASH-B17-1)。

本文12件样品取自都兰县沟里地区卡可特河河东阿斯哈金矿附近的闪长岩体。该岩体与围岩之间呈侵入接触或断层接触,南界向SW陡倾,北界与花岗岩接触处,亦向SW陡倾。南界外接触带常见混合岩化或发育密集的脉岩群。岩体边部相带一般为中-细粒结构,宽度20~50m;中部相带为中-粗粒结构,相带之间呈渐变关系。该岩体在1:20万区域调查和1:5万矿产调查均被划归为海西期花岗闪长岩,但阿斯哈一带岩体SiO₂含量偏低,应属闪长岩类。

岩石颜色为灰白色-灰色,中-粗粒结构,块状构造。主要矿物特征为:斜长石(50%~60%):半自形板状,聚片双晶发育,可见卡-钠联合双晶,其内包裹体发育,斜长石粒径在1~2.5mm。石英(5%~15%):他形不规则形态,充填在板状斜长石等矿物之间。黑云母(10%~15%):半自形-他形,暗褐-浅褐色,粒径在0.5~2mm,局部有绿泥石化。角闪石(10%~13%):半自形-他形,可见两组斜交解理。副矿物:少量的锆石、榍石、磁铁矿等(图2d,样品ASH-13)。

3 分析方法

3.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

用于锆石年龄测定的样品均采自阿斯哈金矿区硐口新鲜岩石露头,锆石的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双目镜下仔细挑选表面平整光洁且具不同长宽比例、不同柱锥面特征、不同颜色的锆石颗粒,再将这些锆石粘在双面胶上,用无色透明环氧树脂固定,待环氧树脂固化之后对其表面抛光至锆石中心。在原位分析之前,通过反射光和CL图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点。锆石制靶、反射光、阴极发光以及锆石U-Pb年龄测定和微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为32μm,激光剥蚀样品的深度为20~40μm;实验中采用He作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用NIST SRM610作为外标,²⁹Si作为内标元素(锆石中SiO₂含量为32.8%,袁洪林等,2003),详细的测试过程见文献(Yuan *et al.*, 2004);普通铅校正采用Anderson(2002)推

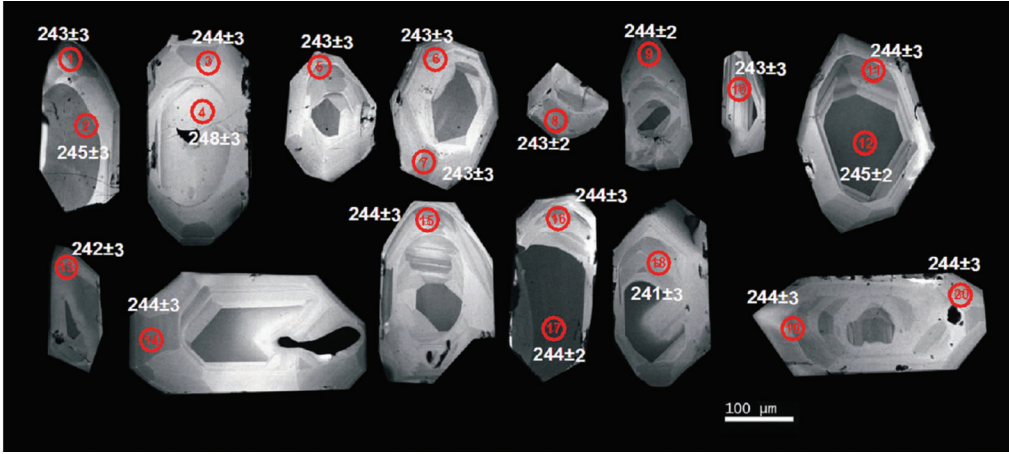


图3 阿斯哈闪长岩锆石 CL 图像

圆圈数字代表 U-Pb 分析点,编号同表 1

Fig.3 CL images of zircons from Asiha diorite

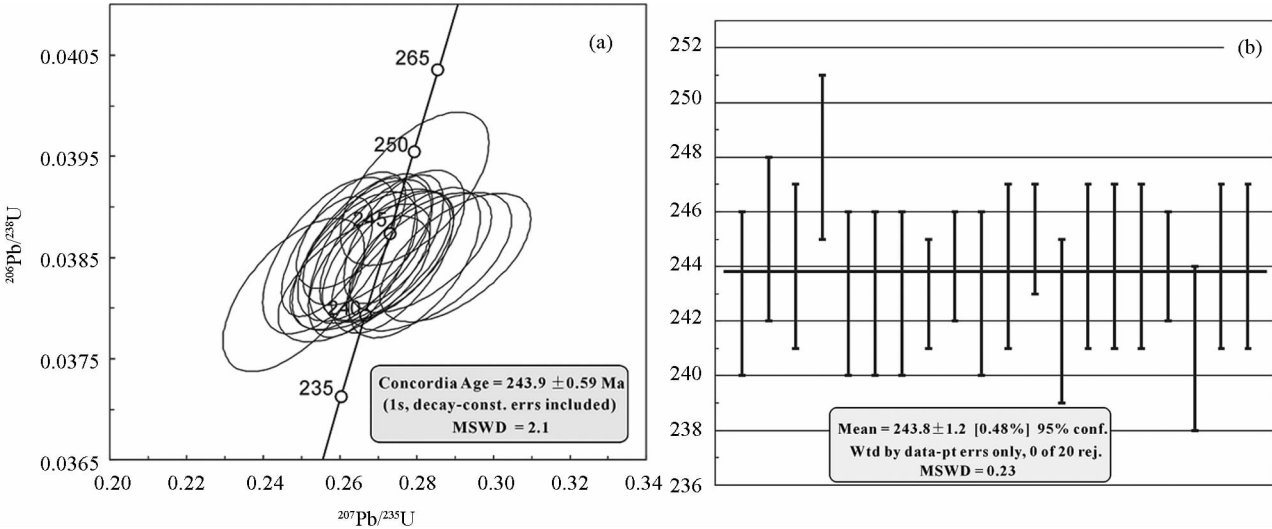


图4 阿斯哈闪长岩锆石的 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄(b)

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average ages diagram (b) from Asiha diorite

荐的方法;样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATECAL 程序 (Liu *et al.*, 2008, 2010);年龄计算及谐和图的绘制采用 Ludwig(2003)编写的 Isoplot 程序。

3.2 岩石地球化学测试

样品的常量和微量元素在吉林大学测试实验中心测定。常量元素的测定采用 X-射线荧光光谱仪 (PW1401/10) 测定 (GB/T14506.28-93),相对标准偏差为 2% ~ 5%。微量元素和稀土元素分析采用美国安捷伦科技有限公司 Agilent 7500A 型耦合等离子体质谱仪测试 (Z/T0223-2001),样品测试经国际标样 BHVO-2、BCR-2 和国家标样 GBW07103、GBW07104 监控,微量元素和稀土元素的分析精度为:元素含量大于 10×10^{-6} 的误差小于 5%,小于 10×10^{-6} 的误差小于 10%。

4 测试结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

样品 ASH-2[#]-硐口 (闪长岩) 中锆石主要为长柱状,少数为短柱状,个别为粒状。多数锆石颗粒自形程度较好,部分呈断头晶出现,具有清晰的韵律环带结构,不发育震荡环带,具岩浆结晶锆石特征 (图 3)。20 个分析点测试结果 (表 1) 显示 U 含量 ($213.4 \times 10^{-6} \sim 552.1 \times 10^{-6}$)、Th 含量 ($128.5 \times 10^{-6} \sim 443.0 \times 10^{-6}$) 和 Th/U 比值 1.07 ~ 1.74,该样品所测定的锆石具岩浆成因性质。20 个锆石点数据较集中,落在谐和线上及其附近,20 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 分析数据的加权平均年龄为 $243.8 \pm 1.2\text{Ma}$,MSWD = 0.23;谐和年龄值 $243.9 \pm 0.59\text{Ma}$,

表 1 阿斯哈闪长岩体中锆石 U-Pb 同位素 LA-ICP-MS 定年
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating of Asihla diorite

测点号	Th		U	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	Pb	($\times 10^{-6}$)			比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ
ASH-2#-锆口-01	19.7	255.3	433.5	1.7	0.054	0.0028	0.2833	0.0142	0.0385	0.0005	369	113	243	3	237	7	243	3	237	7
ASH-2#-锆口-02	22.4	404.3	448.8	1.11	0.0523	0.002	0.274	0.0086	0.0387	0.0004	297	68	245	3	235	6	245	3	235	6
ASH-2#-锆口-03	12.5	164.6	283	1.72	0.0507	0.0019	0.2658	0.0092	0.0385	0.0005	229	76	244	3	217	7	244	3	217	7
ASH-2#-锆口-04	10	154.3	213.4	1.38	0.0523	0.0025	0.2795	0.0128	0.0392	0.0005	297	103	248	3	227	7	248	3	227	7
ASH-2#-锆口-05	12.8	199.1	276.7	1.39	0.0505	0.0022	0.2639	0.0108	0.0385	0.0005	218	93	243	3	234	7	243	3	234	7
ASH-2#-锆口-06	13.8	186.1	307.2	1.65	0.0529	0.0022	0.2794	0.0113	0.0385	0.0005	326	90	243	3	250	9	243	3	250	9
ASH-2#-锆口-07	15.3	207.2	338.8	1.64	0.052	0.0021	0.2737	0.0105	0.0385	0.0005	285	85	243	3	246	8	243	3	246	8
ASH-2#-锆口-08	13.8	181.2	305.5	1.69	0.0507	0.002	0.2679	0.0104	0.0384	0.0004	227	89	241	8	234	8	241	8	234	8
ASH-2#-锆口-09	16.4	217.3	356.6	1.64	0.053	0.0024	0.281	0.0122	0.0386	0.0004	330	99	244	2	248	8	244	2	248	8
ASH-2#-锆口-10	11.2	184.4	231.5	1.26	0.051	0.0028	0.2679	0.0138	0.0385	0.0005	242	118	243	3	245	9	243	3	245	9
ASH-2#-锆口-11	14.4	204.7	306.4	1.5	0.0551	0.0026	0.2901	0.013	0.0385	0.0004	416	99	244	3	248	8	244	3	248	8
ASH-2#-锆口-12	19.3	361.8	386.3	1.07	0.0493	0.0018	0.2629	0.0094	0.0388	0.0004	161	82	237	8	235	6	245	2	235	6
ASH-2#-锆口-13	12.3	175.7	268.3	1.53	0.05	0.0025	0.2636	0.0131	0.0383	0.0004	194	113	242	3	226	8	242	3	226	8
ASH-2#-锆口-14	15.1	193.9	331.5	1.71	0.0504	0.0021	0.267	0.011	0.0387	0.0004	213	94	240	9	244	8	244	9	244	8
ASH-2#-锆口-15	10.4	145.3	221.5	1.53	0.0521	0.0024	0.2736	0.0125	0.0386	0.0005	288	102	244	3	252	9	244	3	252	9
ASH-2#-锆口-16	11.4	143.7	249.6	1.74	0.0488	0.0022	0.2572	0.0115	0.0385	0.0005	139	99	244	3	243	8	244	3	243	8
ASH-2#-锆口-17	26.4	443	552.1	1.25	0.0483	0.0015	0.2567	0.0079	0.0385	0.0004	116	68	232	6	241	6	244	2	241	6
ASH-2#-锆口-18	12.4	169.6	268.6	1.58	0.0473	0.0023	0.2479	0.0122	0.0381	0.0005	65	105	225	10	241	3	241	3	243	8
ASH-2#-锆口-19	12.6	160.4	275.2	1.72	0.0507	0.0023	0.2666	0.0116	0.0386	0.0005	227	99	240	9	244	3	244	9	244	3
ASH-2#-锆口-20	12.1	128.5	265	2.06	0.0515	0.0022	0.2726	0.0113	0.0385	0.0004	265	94	245	3	260	10	244	3	260	10

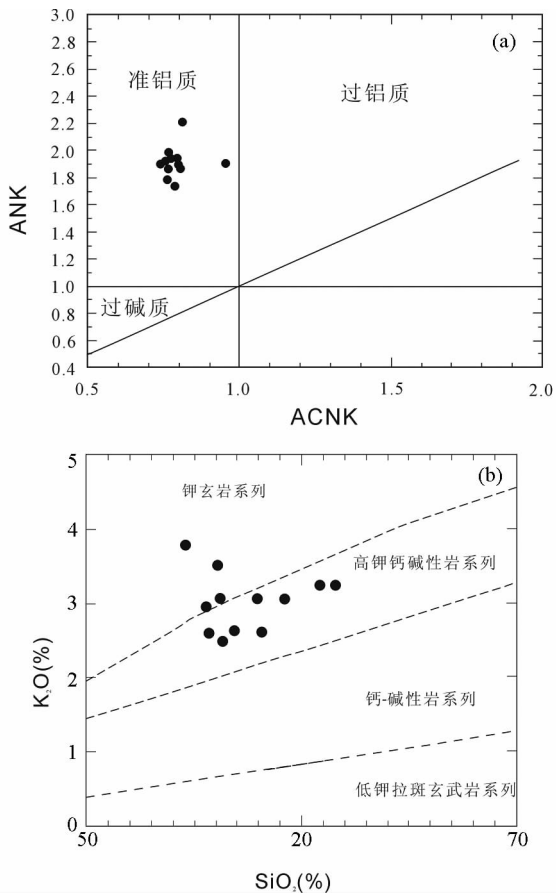


图 5 阿斯哈闪长岩的 ACNK-ANK 图解 (a) 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (b)

Fig. 5 ACNK-ANK diagram (a) and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (b) of Asihla diorite

MSWD = 2.1, 二者十分接近 (图 4)。244Ma 应代表闪长岩的侵位年龄, 属早印支期。刘成东等 (2004) 测得西部加鲁河花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $242 \pm 6\text{Ma}$, 与本区闪长岩近一致。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

阿斯哈闪长岩主量元素中 (表 2), 样品的 SiO_2 含量变化范围为 54.56% ~ 61.58%, 属中性-中偏酸性岩石。在硅-碱图 (图略) 中, 样品全部落入亚碱性区域。在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{FeO}^T$ 图解 (图略) 上, 样品全部落入钙碱性区域。样品的 Al_2O_3 含量为 14.62% ~ 16.38%, 在 ACNK-ANK 图解 (图 5a) 上, 样品全部落入准铝质区域。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 5b) 上, 样品主要落入高钾钙碱性区域, 部分落入钾玄岩区域。岩石主量元素中 CaO 、 MgO 、 FeO^T 、 P_2O_5 和 TiO_2 与 SiO_2 呈负相关, 表明存在着辉石、磷灰石、钛铁矿等矿物的显著分离结晶作用 (李献华等, 2000), 而 K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 基本呈正相关。

表2 沟里地区闪长岩主量元素 (wt%) 和微量元素含量 (×10⁻⁶)
Table 2 Contents of major elements (wt%) and trace elements (×10⁻⁶) of acid intrusive rocks of Asiha diorite

样品号	ASH-13	ASH-16	ASH-17	ASH-18	ASH-19	ASH-20	ASH-22	ASH-27	ASH-66	ASH-68	ASH-70	ASH-71
SiO ₂	56.86	57.92	56.22	55.70	60.82	56.06	54.56	61.58	59.22	58.16	55.56	56.30
TiO ₂	1.24	1.15	1.34	1.39	1.03	1.15	1.52	1.00	1.20	1.11	1.36	1.34
Al ₂ O ₃	15.79	16.05	15.80	15.04	15.19	15.48	15.32	15.79	14.62	15.39	14.95	16.38
Fe ₂ O ₃	1.36	1.40	6.53	7.86	5.82	6.20	2.84	4.83	4.55	4.27	6.34	5.90
FeO	5.48	5.17	1.32	0.49	0.35	1.41	6.14	1.24	2.61	2.52	2.47	1.81
MnO	0.15	0.10	0.14	0.19	0.12	0.19	0.13	0.07	0.17	0.15	0.13	0.11
MgO	4.63	4.29	5.01	6.02	3.64	4.15	5.28	3.82	4.26	4.61	5.54	4.98
CaO	6.91	6.39	6.67	6.43	5.79	6.31	5.96	4.51	6.01	6.87	6.75	6.97
Na ₂ O	3.10	3.13	3.13	3.01	3.20	2.54	2.51	2.91	2.98	3.17	2.83	2.88
K ₂ O	2.64	3.07	3.07	2.60	3.25	3.51	3.78	3.25	3.07	2.62	2.95	2.49
P ₂ O ₅	0.29	0.27	0.30	0.31	0.25	0.27	0.30	0.30	0.25	0.27	0.33	0.32
LOI	1.45	1.15	0.52	1.00	0.60	2.72	1.91	0.67	1.14	0.86	0.51	0.45
Total	99.91	100.1	100.1	100.0	100.1	99.99	100.2	99.96	100.1	99.99	99.73	99.94
Cr	47.8	44.8	49.13	61.46	33.27	43.04	45.8	49.67	44.01	44.89	61.97	50.76
Ni	26.8	24.59	26.25	32.34	19.66	23.9	28.74	22.56	21.62	21.52	29.34	28.47
Co	26.05	25.79	28.52	31.36	21.04	26.06	31.44	18.95	22.42	20.93	31.31	29.38
V	167.6	170.2	194.6	201.4	138.6	169	199.1	126.9	151.6	163.7	226.4	203.5
Sc	12.89	16.41	12.47	27.99	10.99	15.15	8.877	9.369	12.56	11.86	18.17	16.26
Rb	43.33	103.1	52.4	69.31	80.79	89.25	43.76	99.37	87.63	66.25	104.6	84.27
Ba	445.2	773.7	649.8	632.3	606.3	570.8	634.5	823.6	488.1	409.1	580.4	602.4
Sr	475.2	461.3	399.8	451.4	429.0	350.0	333.3	415.3	362.2	452.3	402.1	485.6
Nb	10.72	11.77	11.51	12.81	10.83	13.01	15.08	13.22	10.97	10.16	13.79	12.18
Ta	0.763	0.845	0.742	0.775	0.726	0.849	0.777	0.935	0.773	0.606	0.810	0.662
Zr	347.1	165.3	215	171.7	273.5	265.3	163.1	269.4	218	129.3	128.5	168.2
Pb	10.14	11.07	8.40	11.51	13.26	8.81	11.62	12.44	8.96	8.88	9.34	9.20
Zn	79.66	96.24	93.32	110.3	88.14	93.64	127.2	85.3	70.37	60.4	94.92	101
Th	7.42	12.23	7.78	11.18	11.81	14.85	9.151	11.94	12.73	11.19	19.83	7.46
U	1.59	1.80	1.09	1.24	1.53	1.96	1.59	1.42	1.77	1.36	1.65	1.24
La	22.56	29.27	21.93	28.74	25.15	26.84	21.82	24.3	24.43	23.93	33.2	24.18
Ce	48.8	63.78	48.97	63.39	53.24	61.77	55.01	53.91	52.6	55.3	78.71	54.13
Pr	5.993	7.681	6.333	8.021	6.492	7.789	6.685	6.741	6.582	6.848	9.618	6.346
Nd	24.22	30.32	26.19	32.66	25.55	31.6	27.08	27.21	26.74	27.57	38.95	24.96
Sm	4.67	5.864	5.362	6.636	4.895	6.293	5.434	5.319	5.418	5.449	7.978	4.907
Eu	1.232	1.35	1.171	1.387	1.118	1.265	1.043	1.23	1.124	1.322	1.463	1.26
Gd	4.351	5.457	4.964	6.18	4.519	5.776	5.099	4.77	4.882	4.919	7.591	4.622
Tb	0.652	0.832	0.763	0.946	0.664	0.878	0.796	0.697	0.745	0.728	1.13	0.666
Dy	3.603	4.589	4.227	5.274	3.641	4.93	4.444	3.749	4.23	4.044	6.342	3.656
Ho	0.704	0.869	0.793	1.008	0.706	0.949	0.848	0.684	0.797	0.746	1.172	0.693
Er	2.032	2.573	2.267	2.949	2.06	2.796	2.485	1.955	2.26	2.169	3.362	1.942
Tm	0.302	0.365	0.320	0.415	0.298	0.394	0.348	0.279	0.318	0.310	0.473	0.287
Yb	1.844	2.357	2.041	2.66	1.895	2.568	2.225	1.8	2.025	1.993	2.948	1.786
Lu	0.31	0.362	0.317	0.408	0.297	0.387	0.340	0.284	0.307	0.305	0.431	0.272
Y	20.28	25.85	21.37	29.82	20.53	26.98	21.06	19.48	22.61	22.62	34.83	21.82
ΣREE	141.6	181.5	147.0	190.5	151.1	181.2	154.7	152.4	155.1	158.1	228.2	151.5
δEu	0.82	0.72	0.68	0.65	0.71	0.63	0.60	0.73	0.66	0.77	0.57	0.80
Rb/Sr	0.091	0.223	0.131	0.154	0.188	0.255	0.131	0.239	0.242	0.146	0.260	0.174
(La/Yb) _N	8.25	8.37	7.24	7.28	8.95	7.04	6.61	9.10	8.13	8.09	7.59	9.13
(La/Sm) _N	3.04	3.14	2.57	2.72	3.23	2.68	2.53	2.87	2.84	2.76	2.62	3.10
Zr/Y	17.12	6.39	10.06	5.76	13.32	9.83	7.74	13.83	9.64	5.72	3.69	7.71
Nb/Ta	14.05	13.93	15.51	16.53	14.92	15.32	19.41	14.14	14.19	16.77	17.02	18.40
La/Nb	2.10	2.49	1.91	2.24	2.32	2.06	1.45	1.84	2.23	2.36	2.41	1.99

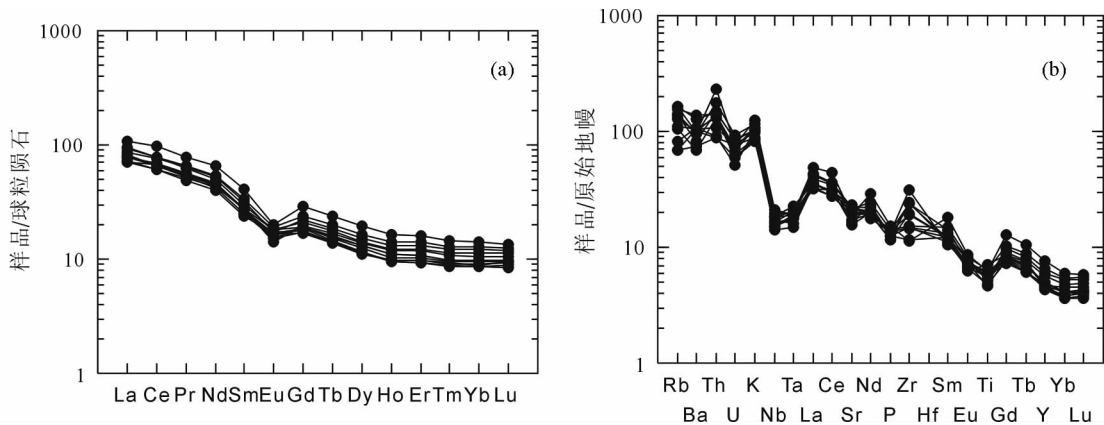


图6 阿斯哈闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, primitive mantle values after Sun and Mcdonough, 1989) of Asiha diorite

4.2.2 微量元素

稀土总量为 $141.6 \times 10^{-6} \sim 228.2 \times 10^{-6}$, 平均 169.7×10^{-6} 。在稀土配分模式图(图 6a)上, 各稀土配分曲线几近一致, 显示同源岩浆演化特点。 $(La/Yb)_N$ 为 $6.61 \sim 9.13$, $(La/Sm)_N$ 为 $2.53 \sim 3.23$, 变化范围较小, 表明后期岩浆分异不强烈。稀土配分曲线明显右倾, 即强烈富集轻稀土, 轻重稀土分馏明显。LREE 的总量与 ΣREE 呈同消长, 而重稀土总量变化小, 表明岩体 ΣREE 的差别主要是由 LREE 引起的。 δEu 为 $0.57 \sim 0.82$, 为负 Eu 异常至弱的负 Eu 异常, 表明该岩体经历了一定的斜长石的分离结晶作用, 或源区有一定的斜长石残留。高 SiO_2 与低 SiO_2 样品 Eu 异常相似, 表明地壳混染过程不是控制岩浆 REE 演化的主要途径。

原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)显示, 闪长岩微量元素配分模式近一致。相对于原始地幔, 岩石明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)和活泼的不相容元素(如 Th、U), 相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P), Ta、Nb 和 Ti 具“TNT”负异常, P 和 Ti 的亏损可能受到了磷灰石和钛铁矿分离结晶作用的影响。 $Rb/Sr = 0.091 \sim 0.260$, Nb/Ta 为 $13.93 \sim 19.41$, Zr/Y = $3.69 \sim 17.12$, La/Nb 比值在 $1.45 \sim 2.49$ 。

5 讨论

5.1 岩浆源区和岩石成因

区域上这套侵入岩系侵入到前寒武纪变质基底中, 岩石组合主体为花岗闪长岩-闪长岩的中酸性岩石组合, 其岩石化学组成显示为具有陆壳色彩的高钾钙碱性岩系特点, 该岩系在东昆中带大面积出露。现已认识到, 镁铁质岩石部分熔融或镁铁质岩浆分离结晶只能产生少量的花岗岩(Wager and Brown, 1967)。岩石中发育大量的细粒角闪辉长岩包体, 包体中出现晶体较粗大的斜长石斑晶, 显示快速冷却形成的

针状磷灰石发育, 上述现象暗示岩浆具混合作用特点。刘成东等(2004)通过研究区西部加鲁河两侧花岗闪长岩中的角闪辉长岩包体的岩相学研究, 证实为岩浆混合成因。

阿斯哈闪长岩的主量元素 CaO 、 MgO 、 FeO^T 、 P_2O_5 和 TiO_2 与 SiO_2 呈负相关, 而 K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 基本呈正相关, 岩浆具有一致的演化趋势, 表明它们为同源岩浆演化的产物。岩石明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)、LREE 和活泼的不相容元素(如 Th、U), 相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P), 显示岛弧或活动大陆边缘弧岩浆特点。岩石显示明显的 Ta、Nb 和 Ti 具“TNT”负异常, Sun and McDonough (1989)认为主要显示俯冲带幔源岩石的成分特点, McKenzie (1989)则指出岩浆受到地壳物质的混染, 或者岩浆源区残留有富 Nb、Ta 和 Ti 的矿物(如金红石、钛铁矿等)也可造成“TNT”亏损。 Rb/Sr 比值($0.091 \sim 0.260$)介于上地幔值(0.034)与地壳值(0.35)之间(Taylor and McLennan, 1995), 反映出壳幔混合源的特点。Nb/Ta 比值($13.93 \sim 19.41$, 平均 15.85)总体低于地幔平均值 17.5 (Sun and McDonough, 1989), 亦显示壳幔混合的特点。

5.2 构造背景

在 $Al_2O_3 + MgO + FeO^T$ 图解(图 7a)上, 样品均落入岛弧及活动大陆边缘区域。 Zr/Y 比值($3.69 \sim 17.11$)平均 9.23 , 11 个样品在 $3.69 \sim 13.83$ 之间, 主体介于大陆边缘安山岩的范围之内($Zr/Y = 4 \sim 12$, Condie, 1989), 显示出活动大陆边缘弧的特性。La/Nb 比值($1.45 \sim 2.49$)平均 2.12 , 9 个样品在 $1.99 \sim 2.49$ 之间; 在活动大陆边缘区, La/Nb 比值高(>2)是普遍可见的现象(Salters and Hart, 1991)。由于本区闪长岩是区域大面积分布的花岗质侵入岩(花岗闪长岩)的组成部分, 二者化学成分和岩相方面表现为渐变过渡关系, 故采用花岗岩的 R_1 - R_2 构造判别图解。在 R_1 - R_2 图解(图

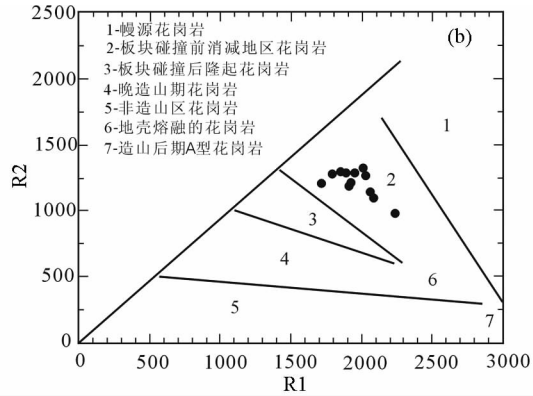
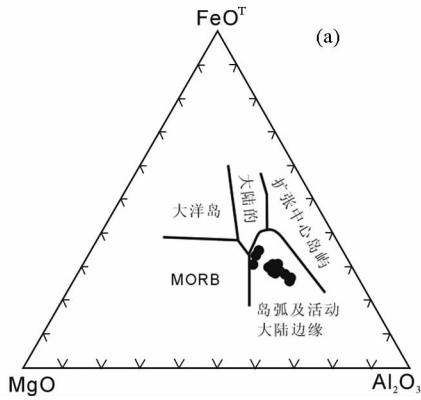


图7 阿斯哈闪长岩的 $\text{MgO-FeO}^{\text{T}}\text{-Al}_2\text{O}_3$ 图解(a)和 $\text{R}_1\text{-R}_2$ 图解(b)

Fig. 7 $\text{MgO-FeO}^{\text{T}}\text{-Al}_2\text{O}_3$ diagram (a) and $\text{R}_1\text{-R}_2$ diagram (b) of Asiha diorite

7b)上,样品落入碰撞前区域,相当于活动板块边缘,但已开始向同碰撞环境演化。俯冲带内岩石的高钾钙碱性特征以及俯冲板片已下插至远离海沟的较大深度的昆中带大陆壳内,暗示俯冲已进入晚期阶段。

洋壳俯冲的另一证据是区域上与洋壳俯冲有关的蛇绿岩发育。东昆仑南缘阿尼玛卿发育一条醒目的蛇绿岩带,该带东起玛沁,向西经玛积雪山、托素湖至布青山,全长300余千米,南北宽10~20km (Molnar *et al.*, 1987; Burchfiel *et al.*, 1989)。蛇绿岩呈构造岩块断续地沿东昆仑南缘断裂带分布,存在两期蛇绿岩,早期蛇绿岩属早古生代, (边千韬等, 2001),晚期蛇绿岩的围岩是晚石炭世至早中三叠世地层(杨经绥等, 2005)。对于晚期蛇绿岩,姜春发等(1992)获得玛积雪山蛇绿岩中的火山岩同位素年龄260Ma,杨经绥等(2005)测得位于德尔尼超镁铁质岩北侧的德-恰花岗质杂岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $250 \pm 20\text{Ma}$,并认为与洋壳俯冲有关,而且阿尼玛卿洋盆关闭时间在早三叠世。阿尼玛卿晚期蛇绿岩与本区闪长岩在时空分布、构造背景方面具有一致性。

研究表明,随着俯冲洋壳年龄的变轻,板块的俯冲角度会逐渐变小,导致所形成的岩浆弧逐渐向大陆板块内部延伸 (Busby, 2004; Barbarin, 2005)。而且,大洋板块可以深俯冲到660km的地幔过渡带,俯冲板片脱水导致地幔部分熔融是火山弧、弧后和板内岩浆作用的源区 (Zhao *et al.*, 2007; Maruyama *et al.*, 2007)。随着俯冲深度的增加,温度和压力升高,俯冲板片和携带的沉积物发生变质、脱水,形成俯冲带流体。来自俯冲板片的流体在一定深度范围内的各种深度上,降低熔点促进地幔的部分熔融,直接交代地幔发生部分熔融。对于本区而言,始于海西晚期的巴颜喀拉洋的俯冲作用持续至印支早期,大洋板块沿现今的东昆南断裂带附近俯冲至东昆中带,俯冲带流体交代地幔,使其部分熔融形成基性岩浆。俯冲作用导致深俯冲带之上、远离海沟的大陆一侧的东昆中隆起带地壳发生强烈伸展和岩石圈减薄(海沟处强烈的正面俯冲挤压导致后缘的伸展),引发大规模的底侵作用。由底侵作用带来巨量的热能,导致地壳物质熔融,形成

大规模的花岗质岩浆。酸性岩浆与基性岩浆发生混合,形成成分较为均一的大面积分布的中酸性侵入岩,区域上构成了规模宏伟的东昆仑巨型岩浆岩带,而现存的暗色包体则为基性岩浆的残留体。至于岩石高钾的原因,俯冲带上流体携带的沉积物可使钾含量增高,但从本区的深俯冲特点以及侵位到闪长岩中的同碰撞壳源花岗岩的高钾特征来看,底侵导致地壳物质的熔融,钾应该主要来自地壳。

6 结论

(1) 东昆中隆起带东段印支早期发育一套高钾的钙碱性侵入岩,在化学成分上属于闪长岩系列岩石,以富含斜长石、少角闪石等暗色矿物为特征,岩石中 CaO 、 MgO 、 FeO^{T} 、 P_2O_5 、 TiO_2 与 SiO_2 呈负相关, K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 基本呈正相关,岩浆具有一致的演化趋势,为同源岩浆演化的产物。

(2) 岩石明显富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Rb)、LREE 和活泼的不相容元素(如 Th、U),相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P), Rb/Sr、Nb/Ta 等特征显示岩浆具壳幔混合特点。

(3) 岩石具有碰撞前(俯冲晚期)安第斯型活动大陆边缘特征,岩浆由俯冲过程中俯冲带流体交代地幔,地幔部分熔融形成的基性岩浆与地壳物质熔融形成的酸性岩浆混合形成。

(4) 获得闪长岩岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄值为 $243.8 \pm 1.2\text{Ma}$,谐和年龄值 $243.9 \pm 0.59\text{Ma}$,为印支早期。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: Nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80:

155–177

- Bian QT, Luo XQ, Li DH, Zhao DS, Chen HH, Xu GZ, Chang CF and Gao YL. 2001. Geochemistry and formation environment of the Buqingshan ophiolite complex, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 75 (1): 45–55 (in Chinese with English abstract)
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Boztug D, Arelhart G, Platevoet B, Harlavan B and Bonin B. 2007. High-K, calc-alkaline I-type granitoids from the composite Yozgat batholith generated in a post-collisional setting following continent-oceanic island arc collision in central Anatolia, Turkey. *Mineralogy and Petrology*, 91(3): 191–223
- Burchfiel BC, Molnar P, Zhao ZY, Liang KY, Wang SJ, Huang MM. 1989. Geology of the Ulugh Muztagh area, northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 94: 57–70
- Busby C. 2004. Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: A case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, Mexico. *Tectonophysics*, 392: 241–277
- Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23: 1–18
- Cui JW, Zhu H and Wu CD. 1992. *Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 1–164 (in Chinese with English abstract)
- Cui JW. 1997. Tectonic evolution of the Himalayan collision belt. *Acta Geologica Sinica*, 71 (2): 105–112 (in Chinese with English abstract)
- Foley S. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181–185
- Guo ZF, Deng JF, Xu ZQ, Mo XX and Luo ZH. 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the eastern Kunlun. *Geosciences*, 12(3): 234–352 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CF, Yang JS, Feng BG, Zhu ZZ, Zhao M and Chai YC. 1992. *Opening-closing Tectonics of Kunlun Mountains*. Beijing: Geological Publishing House, 183–217 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CF, Wang ZQ and Li JY. 2000. *Opening-closing Tectonics of The Central Orogenic Belt*. Beijing: Geological Publishing House, 1–54 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Liu Y, Lee CY, Chen ZH, Yu JS and Gui XT. 2000. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology. *Geochimica*, 29 (6): 513–520 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2004. Mixing events between the crust and mantle-derived magmas in eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 828–834
- Liu HS, Hu ZC, Gao S, Detlef Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Zong KQ and Wang DB. 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
- Luo ZH, Deng JF, Cao YQ, Guo ZF and Mo XX. 1999. On Late Paleozoic-Early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of eastern Kunlun, Qinghai Province. *Geoscience*, 13(1): 51–56 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. *User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 70
- Mckenzie DP. 1989. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95: 53
- 72
- Maruyama S, Santosh M and Zhao P. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core mantle boundary. *Condwana Res.*, 11: 7–13
- Molnar P, Burchfiel BC, Zhao ZY, K'uangyi L, Wang SJ and Huang M. 1987. Geologic evolution of northern Tibet: Results of an expedition to Ulugh Muztagh. *Science*, 235: 299–305
- Putirka K and Busby C. 2007. The tectonic significance of high-K₂O volcanism in the Sierra Nevada, California. *Geology*, 35(10): 923–926
- Rogers NW, James D and Kelly SP. 1998. The generation of potassic lavas from the eastern Vinmga Province, Rwanda. *J. Petrol.*, 39: 1223–1247
- Salters VJM and Hart SR. 1991. The mantle sources of ocean ridges, island arcs: The Hf-isotope connection. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 364–380
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42: 313–345
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265
- Wager LR and Brown GM. 1967. *Layered Igneous Rocks*. San Francisco: Freeman WH & Co., 150–203
- Wang HZ, Yang SN and Liu BP. 1990. *Tectonopaleogeography and Palaeobiogeography of China and Adjacent Regions*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–17 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F and Li X. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in Southeast Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 169–175 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC and Wang J. 1998. A brief review of tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Review*, 44(4): 372–381 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Li HB, Yang JS and Chen W. 2001. A large transpression zone at the south margin of the east Kunlun Mountains and oblique subduction. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 156–163 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Liu ZX. 2011. Petrogenesis and geodynamic setting of Jiandeng potassic granite at the end of the Neoproterozoic in Zanzhuang Complex, North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 61–78 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu ZQ, Li HB and Shi RD. 2005. The paleo-Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A'nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 369–379 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2411–2421
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Ling HM. 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
- Yuan WM, Mo XX, Yu XH and Luo ZH. 2000. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of eastern Kunlun Mountain. *Geol. Rev.*, 46(2): 203–211 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Wang JL, Dong X, Zhao GC, Yu F, Wang W, Liu F and Geng GS. 2009. Petrology and geochronology of the charnockite from the southern Gangdise belt, Tibet: Evidence for the Andean-type orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1707–1720 (in Chinese with English abstract)
- Zhao DP, Maruyama S and Omori S. 2007. Mantle dynamics of western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics. *Gondwana Res.*, 11: 120–131

附中文参考文献

- 边千韬, 罗小泉, 李涤徽, 赵大升, 陈海泓, 徐贵忠, 常承法, 高延林. 2001. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿岩混杂岩的地球化学性质及形成环境. 地质学报, 75(1): 45–55
- 崔军文, 朱红, 武长得. 1992. 青藏高原岩石圈变形及其动力学. 北京: 地质出版社, 1–164
- 崔军文. 1997. 喜马拉雅碰撞带的构造演化. 地质学报, 71(2): 105–112
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 莫宣学, 罗照华. 1998. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程. 现代地质, 12(3): 234–352
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 朱志直, 赵民, 柴耀楚. 1992. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 183–217
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社, 1–54
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄嵎, 陈正宏, 于津生, 桂训唐. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: I. 岩石学 and 同位素地质年代学. 地球化学, 29(6): 513–520
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报, 49(6): 596–602
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 郭正府, 莫宣学. 1999. 青海省东昆仑地区晚古生代-早中生代火山活动与区域构造演化. 现代地质, 13(1): 51–56
- 王鸿祯, 杨森南, 刘本培. 1990. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–17
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 李旭. 2001. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征. 岩石学报, 17(1): 169–175
- 肖序常, 王军. 1998. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述. 地质论评, 44(4): 372–381
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥, 陈文. 2001. 东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用. 地质学报, 73(2): 156–163
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 宋会侠, 万渝生, 颜炳强, 刘增校. 2011. 赞皇杂岩中太古宙末期晋等钾质花岗岩的成因及动力学背景. 地学前缘, 18(2): 61–78
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 史仁灯. 2005. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系. 岩石矿物学杂志, 24(5): 369–379
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511–1520
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录. 地质论评, 46(2): 203–211
- 张泽明, 王金丽, 董昕, 赵国春, 于飞, 王伟, 刘峰, 耿官升. 2009. 青藏高原冈底斯带南部的紫苏花岗岩安第斯型造山作用的证据. 岩石学报, 25(7): 1707–1720