

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.020



东昆仑按纳格角闪辉长岩体地球化学特征 及其对古特提斯洋演化的制约

赵旭¹, 付乐兵^{1*}, 魏俊浩¹, 赵玉京¹, 唐洋¹, 杨宝荣², 管波², 王晓云²

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 青海省有色地质矿产勘查局, 青海西宁 810007

摘要: 目前关于东昆仑地区二叠纪—三叠纪基性岩浆岩的研究极为薄弱, 这不仅限制了对该时期东昆仑地区地幔源区性质的理解, 也在一定程度上制约了对古特提斯洋演化历史的准确认识。对东昆仑东段按纳格角闪辉长岩体进行了锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究。结果显示: 角闪辉长岩的锆石 U-Pb 定年结果为 242 ± 2 Ma; 岩体具有较低的 SiO_2 (46.00%~52.40%) 及 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量 (3.07%~3.79%), 碱度 (δ) 值为 1.26~3.14; 另外, 岩石具有较高的 Al_2O_3 (17.35%~20.10%), MgO (4.65%~6.53%) 和 FeO^T (8.77%~11.07%) 含量, $\text{Mg}^\#$ 值为 68~75, 属于钙碱性系列。岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.72~5.48, δEu 为 0.87~1.00, 具有弱的轻重稀土分异和负铈异常, 其富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有低 Nb/Ta 值 (3.7~8.8), 显示岛弧岩浆岩的地球化学特征。全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.708 80~0.710 36) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-4.8~-3.4) 相对集中, 锆石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -4.9~-0.4。综合分析表明, 岩浆起源于俯冲板片流体交代的地幔楔, 为尖晶石相金云母二辉橄榄岩的部分熔融产物, 岩浆在上升侵位过程中未遭受明显地壳混染, 但经历了少量单斜辉石和斜长石的分离结晶作用。综合区域构造演化史以及同时代岩浆岩的年代学和地球化学特征, 认为按纳格角闪辉长岩体侵位于古特提斯洋北向俯冲的晚期, 该区古特提斯洋的最终闭合时间为中—晚三叠世。

关键词: 角闪辉长岩; 三叠纪; 古特提斯洋; 俯冲; 东昆仑造山带; 地质年代学; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)02-0354-17

收稿日期: 2017-07-08

Geochemical Characteristics of An'nage Hornblende Gabbro from East Kunlun Orogenic Belt and Its Constraints on Evolution of Paleo-Tethys Ocean

Zhao Xu¹, Fu Lebing^{1*}, Wei Junhao¹, Zhao Yujing¹, Tang Yang¹, Yang Baorong², Guan Bo², Wang Xiaoyun²

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Qinghai Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Exploration, Xining 810007, China

Abstract: At present, the research on Permian-Triassic basic magmatic rocks in East Kunlun orogenic belt is extremely weak, which not only limits the understanding of the nature of the mantle source in the study area during this period but also restricts the accurate understanding of the evolution processes of Paleo-Tethys Ocean. The zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and major and trace elements, as well as Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the An'nage hornblende gabbro in the East Kunlun orogenic belt are applied in this paper. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a weighted mean age of 242 ± 2 Ma for the intrusion. It is characterized by low SiO_2 (46.00%~52.40%), low $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (3.07%~3.79%) contents. In addition, it is enriched in Al_2O_3 (17.35%~20.10%), MgO (4.65%~6.53%) and FeO^T (8.77%~11.07%) with high $\text{Mg}^\#$ (68~75), indicating that

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41302065); 中国地质调查局项目 (Nos.12120114081401, 12120114000701); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No.CUGL170413)。

作者简介: 赵旭 (1994-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测研究。ORCID: 0000-0001-5645-400X. E-mail: 13387582979@163.com

* **通讯作者:** 付乐兵, ORCID: 0000-0003-4812-1525. E-mail: fulebing1212@126.com

引用格式: 赵旭, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2018. 东昆仑按纳格角闪辉长岩体地球化学特征及其对古特提斯洋演化的制约. 地球科学, 43(2): 354-370.

it belongs to the calc-alkaline series. This intrusion has low $(La/Yb)_N$ and Nb/Ta ratios, negative Eu anomalies, with enriched large-ion lithophile elements and depleted high field strength elements. All geochemical characteristics show that this intrusion is the result of typical island arc magmatic activity. Additionally, the samples have relatively uniform $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ ratios (0.708 80–0.710 36) and $\epsilon_{Nd}(t)$ values (–4.8 to –3.4), and relatively high $\epsilon_{Hf}(t)$ values (–4.9 to –0.4). According to the lithology, geochemical characteristics and isotopic compositions of the intrusion, we propose that the magma has not been significantly contaminated by the crust and it was derived from the low-degree partial melting (2%–10%) of the mantle wedge, which had undergone metasomatism induced by the fluid from the subducted slab. The mantle source was characterized by the spinel phase-phlogopite lherzolite. Slight fractional crystallization of pyroxene and plagioclase might also occur during the evolution of magma. In combination with the tectonic evolution of the East Kunlun orogenic belt and the geochronological and geochemical characteristics of contemporary intrusive rocks, it is concluded that the An'nage hornblende gabbro was produced at the late stage of Paleo-Tethys Ocean subduction, and the final closure timing of Paleo-Tethys Ocean should be the Middle Triassic to Late Triassic.

Key words: hornblende gabbro; Triassic; Paleo-Tethys Ocean; subduction; East Kunlun orogenic belt; geochronology; geochemistry.

0 引言

东昆仑造山带是青藏高原东北端一条巨型的构造岩浆岩带,带内岩浆活动频繁,主要集中在寒武纪(元古宙)、早古生代、晚古生代—早中生代、晚中生代—新生代4个时段,并分别与4个造山旋回相对应(莫宣学等,2007)(图1a,1b).其中的晚古生代—早中生代时期,东昆仑地区经历了古特提斯洋北向俯冲和板块碰撞造山两个阶段的构造运动,形成了大量与之相关的岩浆岩.前人对区域上该时期形成的中酸性岩浆岩做了大量研究,并将区域岩浆岩划分为安第斯型岛弧岩浆岩和碰撞—后碰撞岩浆岩两类.安第斯型岛弧岩浆岩多形成于240 Ma以前,主要为闪长岩—石英闪长岩,岩石类型多为钙碱性,普遍亏损高场强元素而富集大离子亲石元素,岩浆起源于地幔楔和下地壳部分熔融形成的混合岩浆(李碧乐等,2012;王冠等,2014).碰撞—后碰撞岩浆岩多形成于230 Ma以后,主要为含暗色包体花岗岩—花岗闪长岩,岩石类型多为富钾钙碱性,岩浆起源于加厚下地壳熔融(陈国超等,2013;罗明非等,2014;Li *et al.*, 2015).但是,Huang *et al.* (2014)通过系统研究后则认为250 Ma含镁铁质包体的花岗岩应属同碰撞花岗岩.因此,区域上中酸性岩浆岩形成的动力学背景与古特提斯洋演化过程之间的耦合关系尚存在争议,限制了人们对古特提斯洋演化历史的准确认识.

基性岩浆通常源于地幔的部分熔融,在洋壳俯冲过程中往往伴随着基性岩浆岩的生成(可产于岛弧和弧后).其中,产于岛弧的岩浆岩最显著特征是其富集大离子亲石元素而亏损高场强元素(Iwamo-

ri and Nakamura, 2015; Rawson *et al.*, 2016),而产于弧后盆地中的基性岩则往往同时表现出岛弧岩浆岩与洋中脊玄武岩的性质(Shinjo *et al.*, 1999; Fan *et al.*, 2010, 周文婷等, 2016);另外, Th、Nb、Ba等强活动性元素在俯冲板片与熔体中的含量差别很大,不同的壳幔反应过程所生成的基性岩中该类元素含量有较大差异(Woodhead *et al.*, 2001; Labanieh *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2015).因此,区域上基性岩的研究对于反演地幔源区性质、解析壳—幔交互作用并探讨成岩动力学背景意义重大.然而,有关东昆仑地区二叠纪—三叠纪基性岩浆岩的研究却极为薄弱,仅熊富浩等(2011)报道过白日其利镁铁质岩墙群(251 Ma),认为其为富集地幔的部分熔融产物,却缺少对源区成分的详细解剖.区域上二叠纪—三叠纪时期基性岩研究的不足不仅限制了对该时期东昆仑地区地幔源区性质的理解,也在一定程度上制约了对古特提斯洋演化历史的准确认识.

鉴于此,本文选取东昆仑东段沟里地区按纳格金矿床南侧的角闪辉长岩体为研究对象,开展锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、主微量元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学研究,以探讨岩体的侵位时代、岩石成因及地幔源区性质.同时,笔者梳理了区域构造—沉积—岩浆演化序列,探讨其成岩构造环境及深部动力学过程,以期能进一步限定古特提斯洋的演化过程.

1 地质背景以及岩石学特征

东昆仑造山带地处青藏高原北缘、柴达木地块东南缘、大陆中央造山带西北段,是我国造山带的重

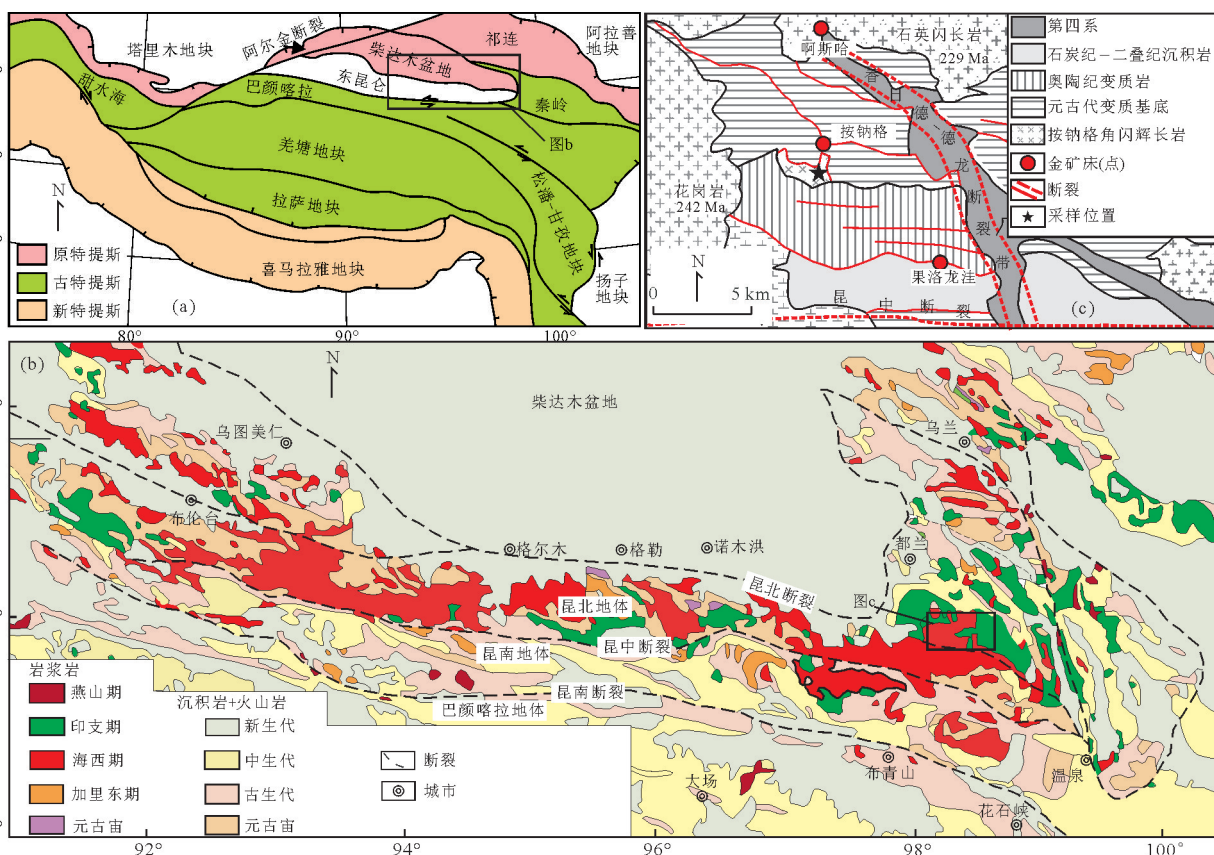


图 1 东昆仑造山带构造位置(a)、岩浆岩分布(b)和按纳格角闪辉长岩体地质简图(c)

Fig.1 Geotectonic framework (a) and magmatite distribution (b) of East Kunlun orogenic belt, and simplified geological map of the An'nage hornblende gabbro (c)

图 a 据 Xia *et al.* (2015a), 图 b 据 Xia *et al.* (2015b)

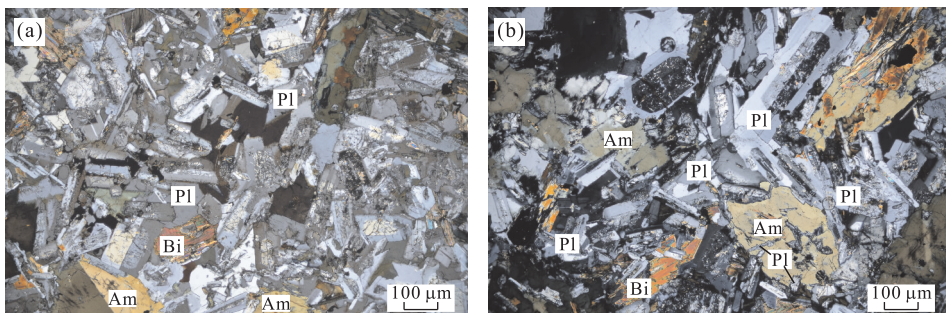


图 2 按纳格角闪辉长岩体镜下照片(正交光)

Fig.2 Microphotographs of An'nage hornblende gabbro

Am.角闪石; Bi.黑云母; Pl.斜长石

要组成部分(程裕淇, 1994)(图 1a). 东昆仑造山带为典型的复合造山带, 主要经历了早古生代的原特提斯洋以及晚古生代—早中生代古特提斯两期造山作用(马昌前等, 2015), 并且两期碰撞活动分别对应形成了如今的昆中断裂带(昆中缝合带)以及昆南断裂带(布青山蛇绿混杂岩带)(陈加杰等, 2016; 赵菲菲等, 2017). 以昆中断裂带和昆南断裂带为界, 东昆仑

造山带由北向南被划分为昆北地体、昆南地体、巴颜喀拉地体 3 个主要的构造单元(许志琴等, 2007)(图 1b). 研究区位于昆北地体中, 区内地层年代跨度较大, 中元古代小庙组分布于研究区北侧, 主要岩性为一套低角闪岩相变质岩; 晚元古代万宝沟群分布于小庙组南部, 由一套绿片岩相—中压绿帘角闪岩相变质岩组成, 与小庙组呈断层接触; 奥陶—志留纪纳

赤台群区域变质岩则分布于研究区中部,与北部万宝沟群呈断层接触。石炭—二叠纪浩特洛注组沉积岩主要分布于研究区南端,北部与纳赤台群呈断层接触。区内元古代—志留纪地层普遍发育强烈的韧性变形,但均为后期北西—近东西向脆性—脆韧性断裂所切割(图 1c)。

按纳格角闪辉长岩体出露于按纳格金矿区南侧的一小型岩株,岩体侵位于万宝沟以及纳赤台群地层中,出露面积约为 12 km²,岩体内部岩性单一,颜色结构无明显变化,均为灰黑色中—粗粒结构块状角闪辉长岩。本次测试的 6 件样品均采自地表新鲜、无脉、无裂隙露头,岩石主要由斜长石、角闪石、黑云母以及少量辉石组成(图 2)。斜长石呈自形—半自形长板状,粒径为 0.2~0.8 mm,多发育卡纳复合双晶,含量为 40%~50%,多数发育明显的环带结构,斜长石局部发育弱绿帘石化、绢云母化。普通角闪石含量约为 30%,呈半自形—他形柱状、板状,粒径介于 0.2~0.6 mm,简单双晶和聚片双晶较为发育,局部可见自形程度较好的斜长石被包裹在角闪石中,角闪石中常见节理发育,且节理夹角在 120°左右,表明其为结晶形成而非由辉石转变。黑云母多呈片状,粒径为 0.2~0.5 mm,含量为 15%~20%,辉石含量较少,镜下几乎不可见。另外岩石中可见少量榴石、锆石等副矿物以及极少量不透明矿物(主要为磁铁矿)。

2 测试方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析

测年锆石样品采样位置为 98°16′16″E, 35°45′30″N,样品的分选工作由河北省廊坊市区域地质调查研究所完成。按照标准程序破碎、用浮选和电磁法进行单矿物分选,并在双目镜下挑选表面平整且具有良好晶形的锆石颗粒制靶;将制好的靶抛光,然后在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相。

U-Pb 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室激光剥蚀等离子质谱仪(LA-ICP-MS)上完成,实验室使用 New Wave 213nm 激光取样系统与 Agilent7500s ICP-MS 联机装置,在分析过程中以 He 作为剥蚀物质的载气,激光束斑直径为 32 μm,频率为 5 Hz,每个测试流程的开头和结尾分别测 2 个 GJ-1 标样(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 608.5±1.5 Ma; Jackson *et al.*, 2004),测试 1

个 MT 标样(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 732±5 Ma; Black and Gulson, 1978),每个测试流程测试 10 个待测样品点。普通铅校正采用 Andersen(2002)方法,锆石加权平均年龄的计算及谐和图的绘制利用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2003)完成。本次共测试 17 颗锆石上的 17 个测点,测试数据见表 1。

锆石 Lu-Hf 同位素测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,所用仪器为 New Wave UP193 激光剥蚀系统及与其相连接的 Thermo Neptune Plus 多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS),以 He 作为载气,分析中使用的激光束斑直径为 44 μm,采用锆石 91500 和 MT 作为标样,其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值分别为 0.282 279±0.000 016 和 0.282 475±0.000 008, Hf 同位素测试点位置与 U-Pb 测试点一致,或者在同一颗锆石上相同环带内进行。详细流程参照 Hu *et al.*(2012)。

2.2 主、微量元素地球化学测试

用于主微量、Sr-Nd 同位素测试的样品均为 200 目以下的粉末样。主量元素在澳实分析检测(广州)有限公司完成,采用 X 荧光光谱仪测定(XRF),流程如下:称取 0.9 g 样品,煅烧后加入 9.0 g Li₂B₄O₇-LiBO₂ 固体助熔物,充分混匀,放置于自动熔炼仪中,保持 1 050~1 100 °C 使其熔融;熔融物倒出后置于扁平玻璃片上,用 XRF 荧光光谱分析,精度优于 5%。

微量和稀土元素分析在中国科学院贵阳地球化学研究所完成(表 2),采用 ICP-MS(ElanDRC-e)测定,分析流程如下:取 50 mg 样品于封闭溶样装置中,加入 1 mL HF 和 0.5 mL HNO₃,在低温电热板上蒸干,以去掉大部分 SiO₂,取下、冷却,加入 1 mL HF、1 mL HNO₃,加盖密封,放入已升温至 200 °C 的烘箱中,加热 12 h 以上,取出、冷却、去盖,加入 0.5 mL 1 μg/mL 的 Rh 内标溶液,在电热板上蒸干,加入 1 mL HNO₃再蒸干,重复一次。最后残渣用 6 mL 40% HNO₃在 140 °C 下封闭溶解 3 h,取出、冷却并将溶液转移至 50 mL 塑料试管中,待测;空白样品与样品同样处理,具体测试方法见漆亮和胡静(2000)。

2.3 全岩 Sr-Nd 同位素测试

Sr-Nd 同位素测试在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素实验室完成。Rb-Sr 同位素测试流程:将全岩样品和适量(⁸⁵Rb+⁸⁴Sr)混合稀释剂置于聚四氟乙烯溶样坩埚中并充分混合均匀,在坩埚中加入 HF-HClO₄ 混合酸分解样品;将溶解的样品

表 1 按纳格角闪辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析数据
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of An'age hornblende gabbro

点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素比值														年龄(Ma)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ		
An2-1	166	128	1.30	0.074 81	0.002 61	0.394 59	0.015 03	0.038 27	0.000 59	0.011 31	0.000 45	1 064	69	338	11	242	4	227	9		
An2-2	146	124	1.18	0.051 58	0.001 71	0.271 33	0.009 99	0.038 17	0.000 56	0.012 75	0.000 50	267	74	244	8	242	3	256	10		
An2-3	46	49	0.94	0.056 86	0.004 13	0.300 69	0.021 89	0.038 37	0.000 81	0.013 70	0.000 70	486	153	267	17	243	5	275	14		
An2-4	99	108	0.91	0.053 26	0.002 07	0.280 41	0.011 69	0.038 20	0.000 58	0.012 06	0.000 52	340	85	251	9	242	4	242	10		
An2-5	282	160	1.76	0.067 25	0.002 64	0.350 68	0.014 70	0.037 83	0.000 60	0.012 12	0.000 53	846	80	305	11	239	4	244	11		
An2-6	227	179	1.27	0.052 06	0.002 27	0.274 84	0.012 63	0.038 30	0.000 61	0.011 54	0.000 54	288	97	247	10	242	4	232	11		
An2-7	383	268	1.43	0.050 25	0.001 33	0.265 62	0.008 23	0.038 35	0.000 53	0.011 48	0.000 52	207	60	239	7	243	3	231	10		
An2-8	442	342	1.29	0.059 45	0.001 69	0.314 34	0.010 26	0.038 36	0.000 54	0.012 58	0.000 60	584	61	278	8	243	3	253	12		
An2-9	114	97	1.17	0.051 35	0.002 09	0.270 21	0.011 70	0.038 18	0.000 59	0.012 14	0.000 62	256	91	243	9	242	4	244	12		
An2-10	421	219	1.93	0.051 77	0.001 56	0.276 53	0.009 41	0.038 75	0.000 55	0.011 59	0.000 60	275	68	248	7	245	3	233	12		
An2-11	266	157	1.69	0.051 43	0.002 60	0.273 35	0.014 24	0.038 55	0.000 64	0.012 12	0.000 41	260	112	245	11	244	4	244	8		
An2-12	346	224	1.54	0.056 81	0.001 48	0.298 47	0.009 03	0.038 11	0.000 51	0.012 20	0.000 38	484	56	265	7	241	3	245	8		
An2-13	206	108	1.90	0.060 45	0.003 02	0.318 83	0.016 36	0.038 25	0.000 65	0.012 61	0.000 46	620	104	281	13	242	4	253	9		
An2-14	187	119	1.57	0.062 93	0.003 16	0.330 72	0.017 03	0.038 12	0.000 66	0.012 83	0.000 50	706	103	290	13	241	4	258	10		
An2-15	138	135	1.02	0.058 67	0.002 45	0.307 74	0.013 51	0.038 05	0.000 59	0.012 33	0.000 50	555	89	272	10	241	4	248	10		
An2-16	163	145	1.13	0.053 87	0.001 75	0.283 48	0.010 15	0.038 17	0.000 54	0.012 29	0.000 49	366	72	253	8	242	3	247	10		
An2-17	206	195	1.05	0.050 82	0.001 39	0.265 47	0.008 35	0.037 89	0.000 52	0.012 10	0.000 50	233	62	239	7	240	3	243	10		

表 2 按纳格角闪辉长岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})和稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major elements(%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) results of An'nage hornblende gabbro

样号	An1	An2	An3	An4	An5	An6
SiO ₂	51.20	52.40	51.40	49.80	51.40	46.00
Al ₂ O ₃	18.20	17.95	18.25	17.45	17.35	20.10
FeO ^T	8.92	8.77	10.04	11.07	10.10	8.86
TiO ₂	0.82	1.08	1.07	1.12	1.16	0.92
MnO	0.17	0.13	0.17	0.17	0.15	0.14
MgO	5.82	4.65	5.53	5.95	5.71	6.53
CaO	8.39	7.98	7.80	7.83	7.76	10.95
BaO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Na ₂ O	2.21	2.37	2.48	2.04	2.34	2.05
K ₂ O	1.01	1.42	0.90	1.34	1.30	1.02
P ₂ O ₅	0.09	0.15	0.10	0.10	0.10	0.06
LOI	2.04	2.39	1.57	2.40	1.69	2.55
Total	99.06	99.49	99.58	99.61	99.32	99.37
Na ₂ O+K ₂ O	3.22	3.79	3.38	3.38	3.64	3.07
FeO ^T /MgO	1.53	1.89	1.82	1.86	1.77	1.36
Mg [#]	72	68	69	68	69	75
δ	1.26	1.53	1.36	1.68	1.58	3.14
Li	33.8	35.3	23.9	15.1	13.9	12.5
Be	1.56	2.12	1.81	0.69	0.77	0.46
Sc	46.8	50.1	57.7	25.5	28.4	23.5
V	381	537	623	293	278	186
Cr	68.3	42.7	59.4	37.3	24.5	86.8
Co	158.0	139.0	164.0	56.1	59.5	65.6
Ni	73.3	66.2	83.1	33.7	27.8	45.3
Cu	21.5	33.2	88.9	35.9	35.2	10.2
Zn	223	225	283	124	145	109
Ga	37.3	42.3	41.1	17.4	17.3	17.3
Rb	74.3	105.0	69.6	43.7	45.5	33.2
Sr	655	714	621	241	256	273
Y	51.8	46.3	45.3	20.1	22.0	26.2
Zr	171.0	129.0	143.0	46.8	48.8	51.7
Nb	13.7	16.0	13.8	5.3	12.6	3.8
Cs	3.5	6.1	3.5	2.1	2.7	1.6
Ba	523	677	522	270	292	221
La	26.9	35.3	29.8	10.6	12.8	6.1
Ce	55.3	71.2	59.4	23.1	26.0	14.2
Pr	7.2	9.0	7.2	2.9	3.2	2.1
Nd	31.5	36.6	28.9	12.4	13.1	10.1
Sm	7.9	7.9	6.9	3.0	3.2	3.1
Eu	2.32	2.63	2.20	0.95	1.04	0.99
Gd	8.4	7.9	7.4	3.3	3.6	3.8
Tb	1.44	1.28	1.23	0.54	0.60	0.66
Dy	8.7	7.7	7.5	3.3	3.7	4.3
Ho	1.83	1.60	1.57	0.69	0.76	0.91
Er	5.28	4.68	4.58	2.01	2.22	2.63
Tm	0.77	0.68	0.66	0.29	0.32	0.38
Yb	4.85	4.34	4.21	1.84	1.99	2.40
Lu	0.73	0.65	0.64	0.28	0.30	0.36
Hf	4.39	3.94	4.23	1.52	1.64	1.68
Ta	3.71	1.82	2.37	0.73	1.72	0.82
Tl	0.37	0.53	0.36	0.25	0.25	0.17
Pb	11.0	16.2	12.2	5.1	5.9	4.7
Th	5.9	7.0	9.2	2.4	2.9	0.8
U	0.72	0.83	1.55	0.62	0.48	0.24
ΣREE	215	238	208	85	95	78
(La/Yb) _N	3.74	5.48	4.77	3.88	4.34	1.72
δEu	0.87	1.00	0.94	0.92	0.93	0.88

注:FeO^T为全铁含量;LOI为烧矢量;Mg[#] = 100 × Mg/(Ca + Fe),原子个数之比;碱度 δ = (Na₂O + K₂O)²/(SiO₂ - 43);δEu = 2Eu_N/(Sm_N + Gd_N)(Sun and McDonough, 1989),下标 N 为球粒陨石标准化值。

蒸干,反复加入 HClO₄ 以去除 HF;采用 Dowex50 阳离子交换技术分离 Rb 和 Sr;在 MAT261 可调多接收质谱计上直接完成 Rb、Sr 同位素比值测试, Rb、Sr 含量则采用同位素稀释质谱法测定,用 NBS987 标样对仪器和分析流程进行监控.Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.375 209 校正,⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 相对误差低于 1%.Sm-Nd 同位素测试流程:称取全岩样品两份,一份用于 Sm、Nd 浓度测定,一份用于 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值测定;在密封溶样器中用 HF-HClO₄ 混合酸将样品分解,加入 (¹⁴⁵Nd + ¹⁴⁹Sm) 混合稀释剂,并充分混合均匀.Sm、Nd 化学分离流程均在超净化实验室中进行,含量测定和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值分析分别在德国生产的 Finnigan on MAT26 和 Triton 多接收质谱仪上完成,用 La Jolla 标样对仪器准确性进行检测.Nd 同位素质量分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 900 校正,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 相对误差低于 0.5%.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石为自形一半自形柱状,无色—淡黄色,其长轴介于 200~500 μm,长宽比介于 1:1~3:1, CL 图像多显示弱环带结构、条带状结构(图 3),具有典型基性岩岩浆锆石的特征.锆石中 Th 含量为 46 × 10⁻⁶~442 × 10⁻⁶,U 含量为 49 × 10⁻⁶~342 × 10⁻⁶,Th 和 U 呈正相关,且 Th/U 值介于 0.91~1.93,均大于 0.40,进一步指示锆石的岩浆成因(Wu and Zheng, 2004).单颗粒锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 239~245 Ma,数据点均落在谐和线或其附近,加权平均年龄为 242 ± 2 Ma,MSDW = 0.28(图 4).因此角闪辉长岩体的形成年龄为 242 ± 2 Ma,为三叠纪岩浆活动的产物。

3.2 主、微量元素地球化学

如表 2 所示,岩石的 SiO₂ 含量为 46.00%~52.40%,属基性岩石;其(Na₂O + K₂O)含量为 3.07%~3.79%,K₂O/Na₂O 比值为 0.69~0.75,碱度(δ)值为 1.26~3.14,表明岩石属于亚碱性系列的辉长岩(图 5a).岩石的 MgO 含量为 4.65%~6.53%,FeO^T 含量为 8.77%~11.07%,Mg[#] 值较高(68~75),在图 5b 中样品均落在钙碱性区域.另外,样品的 Al₂O₃ 含量较高,为 17.35%~21.10%,CaO 含量为 7.76%~10.95%,具有高铝玄武质岩石特征.图 6 显示 MgO 与 SiO₂、Na₂O 大致呈负相关,而

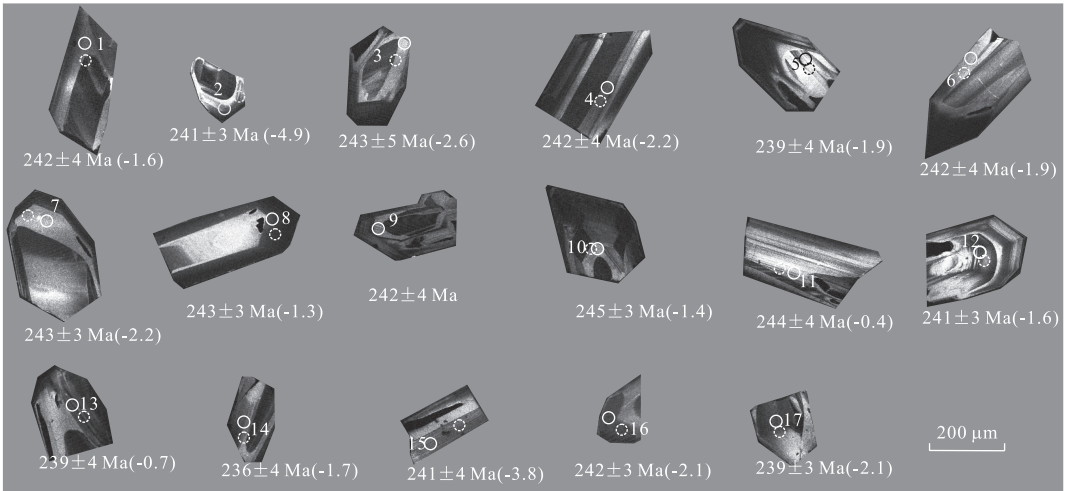


图 3 按纳格角闪辉长岩体样品 An2 典型锆石阴极发光图像(CL)

Fig.3 Zircon cathodoluminescence (CL) images of sample An2 for An'nage hornblende gabbro

图中虚线圈和实线圈分别代表 U-Pb 和 Hf 同位素分析测试点; 括号外数值表示年龄, 括号内数值表示锆石 Hf 同位素组成

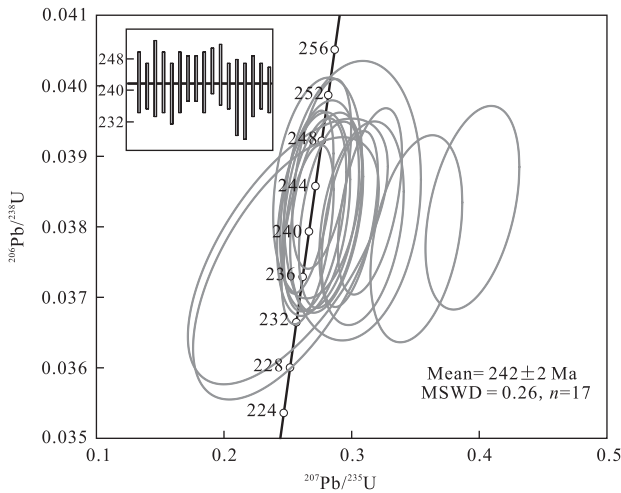


图 4 按纳格角闪辉长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram for An'nage hornblende gabbro

FeO^T、CaO、CaO/Al₂O₃、Cr 均与 MgO 呈弱正相关关系, 表明岩浆演化过程中可能经历了单斜辉石的分离结晶。

全岩样品稀土元素总含量(ΣREE)为 78 × 10⁻⁶ ~ 238 × 10⁻⁶, 具有较弱的轻重稀土分异(图 7a), 其 LREE/HREE 值为 0.88 ~ 2.16, (La/Yb)_N 值为 1.72 ~ 5.48, 其稀土球粒陨石标准化分布型式与典型高铝玄武质岩石大致相似(张宏飞和高山, 2012)。岩石具有较弱的负 Eu 异常, δEu 为 0.87 ~ 1.00, 表明岩浆演化过程中可能经历了斜长石的分离结晶作用。微量元素原始地幔标准化蛛网图上反映出岩石亏损高场强元素 Nb、P、Ti、Ce、Zr, 富集大

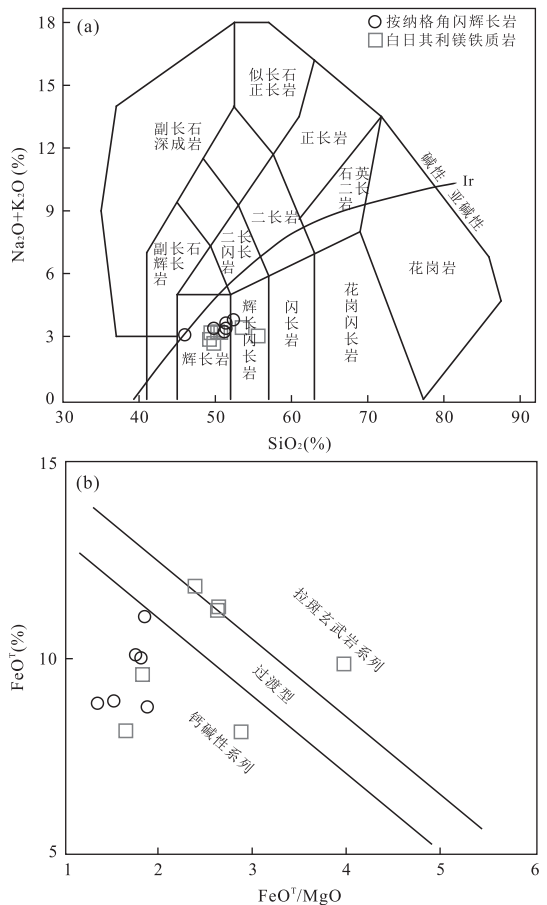


图 5 按纳格角闪辉长岩体 TAS 图解 (a) 和 FeO^T-FeO^T/MgO 图解 (b)

Fig.5 TAS diagram (a) and FeO^T vs. FeO^T/MgO diagram (b) for An'nage hornblende gabbro

图 a 底图据 Wilson (1989); 图 b 底图据 Miyashiro (1974); 白日其利镁质岩 (251 Ma) 数据据熊富浩等 (2011)

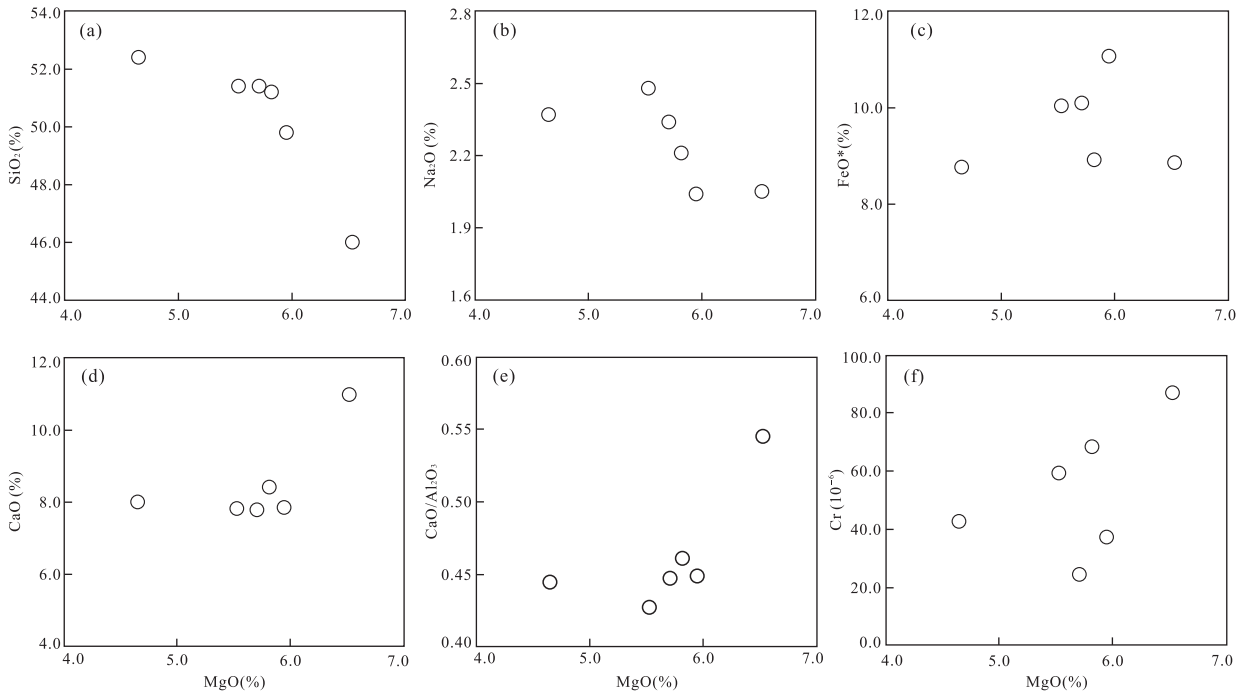


图 6 按纳格角闪辉长岩体哈克图解

Fig.6 Harker diagrams for An'nage hornblende gabbro

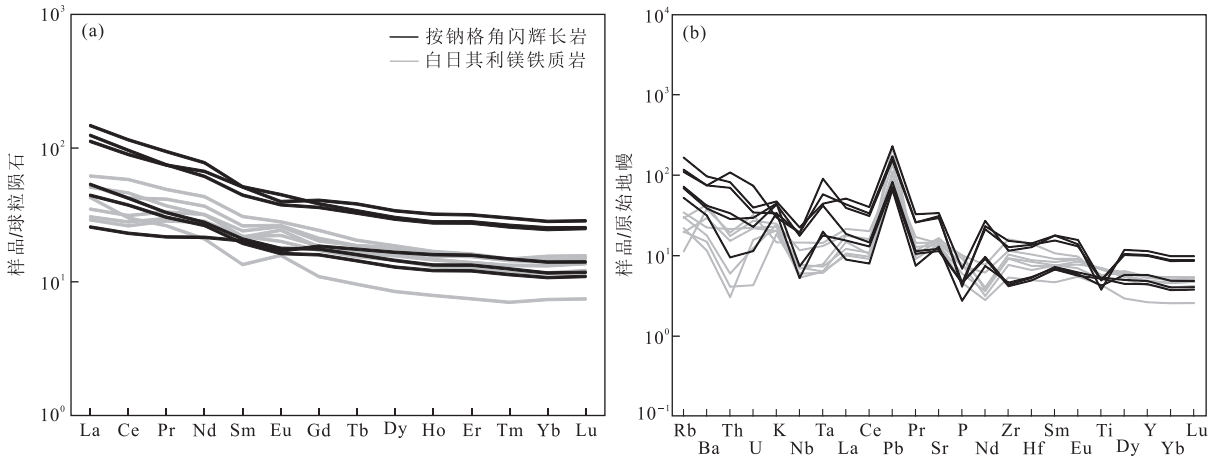


图 7 按纳格角闪辉长岩体球粒陨石标准化稀土元素分布模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 The chondrite-normalized REE pattern (a) and PM-normalized trace element spider diagram (b) of An'nage hornblende gabbro

表 3 按纳格角闪辉长岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of An'nage hornblende gabbro

样号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	1σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
An1	0.328	0.710 48	0.000 02	0.709 35	0.151 418	0.512 369	0.000 006	-3.9	1 326
An2	0.426	0.711 82	0.000 02	0.710 36	0.130 812	0.512 287	0.000 005	-4.8	1 405
An3	0.324	0.710 02	0.000 02	0.708 91	0.143 496	0.512 381	0.000 006	-3.4	1 287
An4	0.525	0.710 74	0.000 02	0.708 94	0.145 768	0.512 375	0.000 003	-3.6	1 303
An5	0.514	0.710 56	0.000 04	0.708 80	0.148 593	0.512 388	0.000 006	-3.4	1 289

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.196 7, (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512 638; t$ 代表成岩年龄(242 Ma); 同位素亏损地幔模式年龄 t_{DM2} 计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.213 7, (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513 15$.

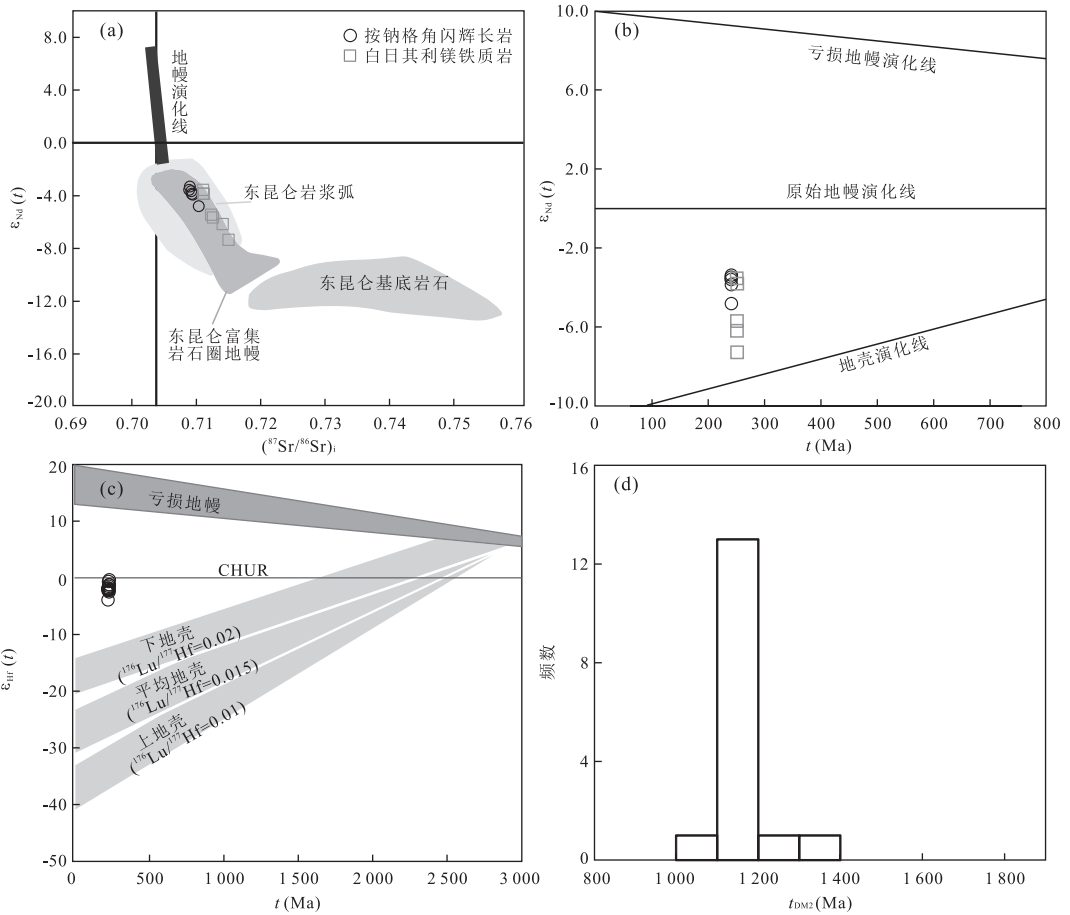


图 8 按纳格角闪辉长岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)-(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解(a), Nd 同位素图解(b), 锆石 Hf 同位素图解(c)和 Hf 同位素二阶段模式年龄直方图(d)

Fig.8 The $\epsilon_{Nd}(t)-(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ relations (a), Nd isotopic compositions (b), Hf isotopic compositions of zircons (c) and histogram of Hf isotopic two-stage model age (d) of An'nage hornblende gabbro

图中白日其利镁铁质岩数据来源同图 5; a 图中东昆仑基底数据来自陈宣华等(2011), 富集岩石圈地幔数据来自刘成东等(2003)以及熊富浩等(2011), 岩浆弧数据来自 Xiong *et al.*(2012)和刘成东等(2003)

表 4 按纳格角闪辉长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Hf isotopic data for zircon samples from An'nage hornblende gabbro

点号	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	t (Ma)	$\epsilon_{Hf}(0)$	$\epsilon_{Hf}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
An2-1	0.037 146	0.001 727	0.282 583	0.000 020	242	-6.7	-1.6	965	1 153	-0.95
An2-2	0.039 615	0.001 834	0.282 491	0.000 025	242	-9.9	-4.9	1100	1 318	-0.94
An2-3	0.036 556	0.001 650	0.282 557	0.000 027	243	-7.6	-2.6	1001	1 200	-0.95
An2-4	0.034 658	0.001 657	0.282 568	0.000 021	242	-7.2	-2.2	985	1 179	-0.95
An2-5	0.034 797	0.001 571	0.282 576	0.000 019	239	-6.9	-1.9	972	1 165	-0.95
An2-6	0.037 491	0.001 661	0.282 575	0.000 027	242	-7.0	-1.9	975	1 167	-0.95
An2-7	0.064 186	0.002 795	0.282 572	0.000 027	243	-7.1	-2.2	1010	1 181	-0.92
An2-8	0.022 967	0.001 044	0.282 590	0.000 034	243	-6.4	-1.3	938	1 136	-0.97
An2-10	0.048 051	0.002 033	0.282 592	0.000 037	245	-6.4	-1.4	960	1 139	-0.94
An2-11	0.051 703	0.002 161	0.282 619	0.000 037	244	-5.4	-0.4	925	1 092	-0.93
An2-12	0.086 838	0.003 532	0.282 594	0.000 038	241	-6.3	-1.6	999	1 148	-0.89
An2-13	0.043 328	0.001 806	0.282 611	0.000 036	242	-5.7	-0.7	927	1 103	-0.95
An2-14	0.025 801	0.001 089	0.282 577	0.000 029	241	-6.9	-1.7	957	1 158	-0.97
An2-15	0.041 244	0.001 818	0.282 522	0.000 036	241	-8.9	-3.8	1056	1 264	-0.95
An2-16	0.053 913	0.002 218	0.282 571	0.000 025	242	-7.1	-2.1	996	1 179	-0.93
An2-17	0.041 781	0.001 861	0.282 568	0.000 028	240	-7.2	-2.1	991	1 181	-0.94

注: $\epsilon_{Hf}(t)$ 采用 $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.033 2$ 和 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0} = 0.282 772$ 进行计算(Blichert-Toft *et al.*, 1997), t_{DM} 采用 $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.038 4$ 和 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} = 0.283 25$ 进行计算(Griffin *et al.*, 2004), ^{176}Lu 衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004).

离子亲石元素 K、Sr(图 7b);另外岩石 Nb/Ta 比值较低,仅为 3.7~8.8.

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学

岩石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.710 02~0.711 82, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.708 80~0.710 36(图 8a,表 3);其¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.512 287~0.512 388,ε_{Nd}(*t*) 值为 -4.8~-3.4,变化范围较小(图 8b),对应的二阶段模式年龄为 1 287~1 405 Ma.

锆石 Hf 同位素分析结果见表 4. 样品¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.022 967~0.086 838,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.001 044~0.003 532,绝大多数测试点的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值小于 0.002,表明锆石中衰变成因形成的 Hf 较少,因此所测得锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值即为其形成时的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值(吴福元等,2007).计算获得的ε_{Hf}(*t*)值介于 -4.9~-0.4(图 8c),对应的二阶段模式年龄为 1 091~1 319 Ma(图 8d),与前述 Nd 同位素二阶段模式年龄基本一致.

4 讨论

4.1 岩石成因

4.1.1 地壳混染与分离结晶 按纳格角闪辉长岩体具有一致的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i、ε_{Nd}(*t*)和ε_{Hf}(*t*)值,与 MgO 含量之间不存在明显相关关系,其 Mg[#] 值(68~75)较高且变化范围较小,表明岩浆未受到地壳混染.部分总分配系数相同或相近的元素比值受部分熔融和分离结晶作用影响较小,其比值之间的协变关系可以反映是否存在地壳混染作用以及混染程度(Campbell and Griffiths, 1993; Macdonald *et al.*, 2001).按纳格角闪辉长岩体的 La/Nb、Zr/Nb、Ta/Yb、Th/Yb 等比值相互之间没有线性关系,也进一步说明岩浆未受到地壳混染.

另外,按纳格角闪辉长岩体部分元素含量与 MgO 含量呈现出弱的线性关系表明岩浆演化过程中可能经历了一定程度的结晶分异作用(图 5).CaO/Al₂O₃ 比值整体上小于 0.5 且与 MgO 含量呈正相关,Cr 与 MgO 呈正相关,进一步暗示岩浆经历了单斜辉石的分离结晶作用(Naumann and Geist, 1999);岩石中微弱的负锆异常则表明其可能发生了一定程度的斜长石的分离结晶,这与斜长石作为包体存在于角闪石中的镜下特征相符合(图 2).另外,镜下可见斜长石发育较明显的环带结构,而以包体形式存在于角闪石中的斜长石不发育这种环带结构(图 2),这表明其经历了两个期次的斜长石结晶作

用:早期结晶产物呈包体被裹于角闪石中或成为环带斜长石的核部;而随着岩浆的演化,剩余岩浆基性成分降低,后结晶的斜长岩相对早期结晶的更偏酸性,形成环带斜长石的边部.因此,可以明确岩浆在上升过程中经历了一定程度的单斜辉石和斜长石的分离结晶作用.

4.1.2 源区性质 本文测试样品均采自地表新鲜露头且不含裂隙与细脉,全岩烧失量均小于 3%,表明测试的岩石样品不受后期风化作用以及流体作用的影响.另外前文已论述岩浆演化过程中未受到地壳混染且经历了较弱的分离结晶(具有较高 Mg[#]),因此岩体的地球化学特征(包括 Rb、Ba、Sr 等活性元素)主要受控于岩浆源区性质.

按纳格角闪辉长岩体具有低 SiO₂ 含量(46.00%~52.40%),高 MgO(4.65%~6.53%)和 FeO^T 含量(8.77%~11.07%);岩石中相容元素 Cr(24.5~86.8)、Ni(27.8~83.1)含量变化较大,稀土元素球粒陨石标准化分布型式与典型高铝玄武质岩石大致相似,为典型的钙碱性玄武质岩石,应为汇聚板块边缘地幔物质部分熔融的产物.另外,按纳格角闪辉长岩体中 Nb/Ta 值为 3.7~8.8, Zr/Hf 值为 29.8~38.0,相对于原始地幔中 Nb/Ta 值(17.7; Sun and McDonough, 1989)和 Zr/Hf 值(36.1; Sun and McDonough, 1989)明显偏低;该岩体相对较高的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值(0.708 80~0.710 36)和较低的ε_{Nd}(*t*) 值(-4.8~-3.4)亦偏离原始地幔端元同位素组成范围,均指示按纳格角闪辉长岩体的岩浆源区经历过一定程度的改造.

按纳格角闪辉长岩体为钙碱性岩石,富含 Al₂O₃,具有较高的 Mg[#] 值,富集大离子亲石元素 K、Sr,亏损高场强元素 Nb、P、Ti、Ce、Zr,具有典型俯冲带岩浆岩的地球化学特征(Kelemen *et al.*, 2013).在该背景下,其地幔源区演化过程有:(1)俯冲板片熔体上升交代地幔楔并发生部分熔融(Hawkesworth *et al.*, 1993; Sajona *et al.*, 2000);(2)俯冲板片脱水形成的流体交代地幔楔,地幔楔发生部分熔融(Ishikawa and Tera, 1999; Guo *et al.*, 2015).

由俯冲板片熔体交代地幔楔并发生部分熔融形成的熔体富含 Nb、Ti、P 等高场强元素(Sajona *et al.*, 2000),且具有较高的(La/Yb)_N 值(>30; Yogodzinski *et al.*, 1995),在区域上往往会形成埃达克岩—富镁安山岩—富钕玄武岩的岩石组合(赵振华等,2004).而按纳格角闪辉长岩体亏损 Nb、Ti、P 等高场强元素,(La/Yb)_N 比值很低(1.72~

5.48), 区域上同时代的岩浆岩中没有见到埃达克岩—富镁安山岩—富铌玄武岩的岩石组合. 因此, 按纳格角闪辉长岩体来源地幔楔可能经历了流体交代而非熔体交代.

俯冲板片流体交代的地幔楔部分熔融后形成的岩浆岩通常亏损高场强元素, 富集大离子亲石元素. 此外, 由于 Pb 和 Sr 在俯冲板片流体中具有很高的活动性, 由其交代的地幔楔熔融形成的岩浆会具有较高的 Pb 和 Sr 含量 (Brenan *et al.*, 1995; Class *et al.*, 2000). 按纳格角闪辉长岩体中亏损高场强元素 Nb、P、Ti、Zr, 富集大离子亲石元素 K、Sr、Pb, 其稀土元素和微量元素配分模式均与区域上俯冲板片流体交代过的地幔楔部分熔融形成的白日其利镁铁质岩 (熊富浩等, 2011) 的趋势大致相同 (图 7), 表明岩浆源区可能为经过俯冲板片流体交代的地幔楔. 岩体具有变化范围较大的 Sr/Nd 值 (20~73), 而 Th/Yb 值的范围 (主要在 1.2~2.2) 较小, 也说明了其源区地幔主要经历了流体交代而非熔体交代 (Woodhead *et al.*, 2001). 岩石中具有较高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值 (0.708 80~0.710 36), 负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-4.8~-3.4) 以及负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-4.9~-0.4), 具有富集地幔来源 Sr-Nd-Hf 同位素的特征 (图 8a~8c), 而富集岩石圈地幔的形成也与俯冲板片脱水形成流体的交代作用有关. 另外, 赵振华等 (2008) 认为俯冲板片脱水产生的流体中组分的变化可导致 Nb、Ta 的分异, 在从蓝片岩相到角闪岩相的进变质作用过程中, 由于缺少金红石, 板片脱水作用会释放出低于球粒陨石 Nb/Ta 比值的流体; 丁兴和孙卫东 (2013) 也认为当板片脱水作用主要发生在蓝片岩相向角闪岩相或者角闪榴辉岩相转变过程中时, 脱水矿物主要为硬柱石, 残留矿物主要为角闪石, 由于缺少金红石使流体具有较低的 Nb/Ta 值. 按纳格角闪辉长岩体的低 Nb/Ta 值 (3.7~8.8) 进一步指示其来源应为受板片流体交代过的地幔端元, 并且俯冲板片的脱水作用发生在蓝片岩相向角闪岩相或者角闪榴辉岩相转变过程中.

按纳格角闪辉长岩体是由板片流体交代过的地幔楔部分熔融形成, 金云母和角闪石是两类较常见的交代产物, 熔体在金云母稳定区域表现为高 Ba 和相对低 Rb 的特征, 而在角闪石稳定区域则与之相反 (Furman and Graham, 1999). 岩石中具有相对较高的 Rb/Sr 值 (>0.1), 较低的 Ba/Rb 值 (<20), 表明岩浆源区应富集金云母 (图 9a). 岩石经球粒陨石标准化后的 (Th/Yb)_N 值为 1.02~1.12, 没有明

显的重稀土分异, 暗示源区物质可能不含石榴石 (Pollock and Hibbard, 2010), 同时表明岩石熔融应发生在尖晶石稳定区域 (Wang *et al.*, 2002) (图 9b). 图 9c 显示岩浆来源为尖晶石二辉橄榄岩部分熔融, 图 9d 则进一步指示岩浆为尖晶石相金云母二辉橄榄岩的部分熔融产物, 且熔融程度为 2%~10%. 因此, 按纳格角闪辉长岩体岩浆来源应为成分为尖晶石相金云母二辉橄榄岩的地幔端元低程度部分熔融产物.

综上所述, 按纳格角闪辉长岩的岩浆源区应为俯冲板片流体交代的地幔楔, 俯冲板片的脱水作用发生在蓝片岩相向角闪岩相或者角闪榴辉岩相转变过程中, 流体交代后的地幔楔则由尖晶石相金云母二辉橄榄岩组成, 其具有低 Nb/Ta 比值、富集大离子亲石元素、亏损高场强元素等地球化学特征. 交代地幔楔 2%~10% 的低程度部分熔融即形成了按纳格角闪辉长岩体的母岩浆, 岩浆演化过程中经历了一定程度单斜辉石和斜长石的分离结晶作用, 但未受到明显的地壳混染.

4.2 构造环境

不少学者曾对东昆仑古特提斯洋的演化进行了研究, 昆南缝合带内德尔尼 (345 Ma; 陈亮等, 2003) 和哈尔郭勒 (333 Ma; 刘战庆等, 2011) 两处蛇绿岩的出现代表了古特提斯洋在早石炭世打开; 上二叠统格曲组和下伏石炭系浩特洛洼组之间的不整合面标志着二叠纪发生了重大构造事件, 格曲组底部的黄绿色水下磨拉石沉积组则被认为是阿尼玛卿—布青山古特提斯洋洋壳开始向北俯冲的同构造沉积响应 (李瑞保, 2012), 标志着古特提斯洋从早二叠世开始向北俯冲.

如前所述, 按纳格角闪辉长岩体形成年龄为 242 Ma, 其形成于俯冲带环境, 岩体中斜长石含量较高, Al₂O₃ 含量较高 (>17%), 具有活动板块边缘高铝玄武质岩石的特征 (桑康隆和马昌前, 2012); 岩石中相对较高的 Th/Nb 值 (0.22~0.67) 也指示其具有汇聚板块边缘玄武岩的特征 (>0.1; 李永军等, 2015); 图 10 中样品落在岛弧岩浆岩范围内. 因此, 按纳格角闪辉长岩体应形成于与古特提斯洋俯冲作用有关的岛弧环境中, 进一步表明早—中三叠世时期古特提斯洋仍然处于俯冲阶段, 其最终闭合时间晚于早三叠世. 这一观点也得到如下证据支持: (1) 昆中断裂以北出露大量早—中三叠世中酸性岩浆岩, 且多为岛弧岩浆活动的产物 (王冠等, 2014; 熊富浩, 2014); (2) 熊富浩等 (2011) 报道的白日其利镁

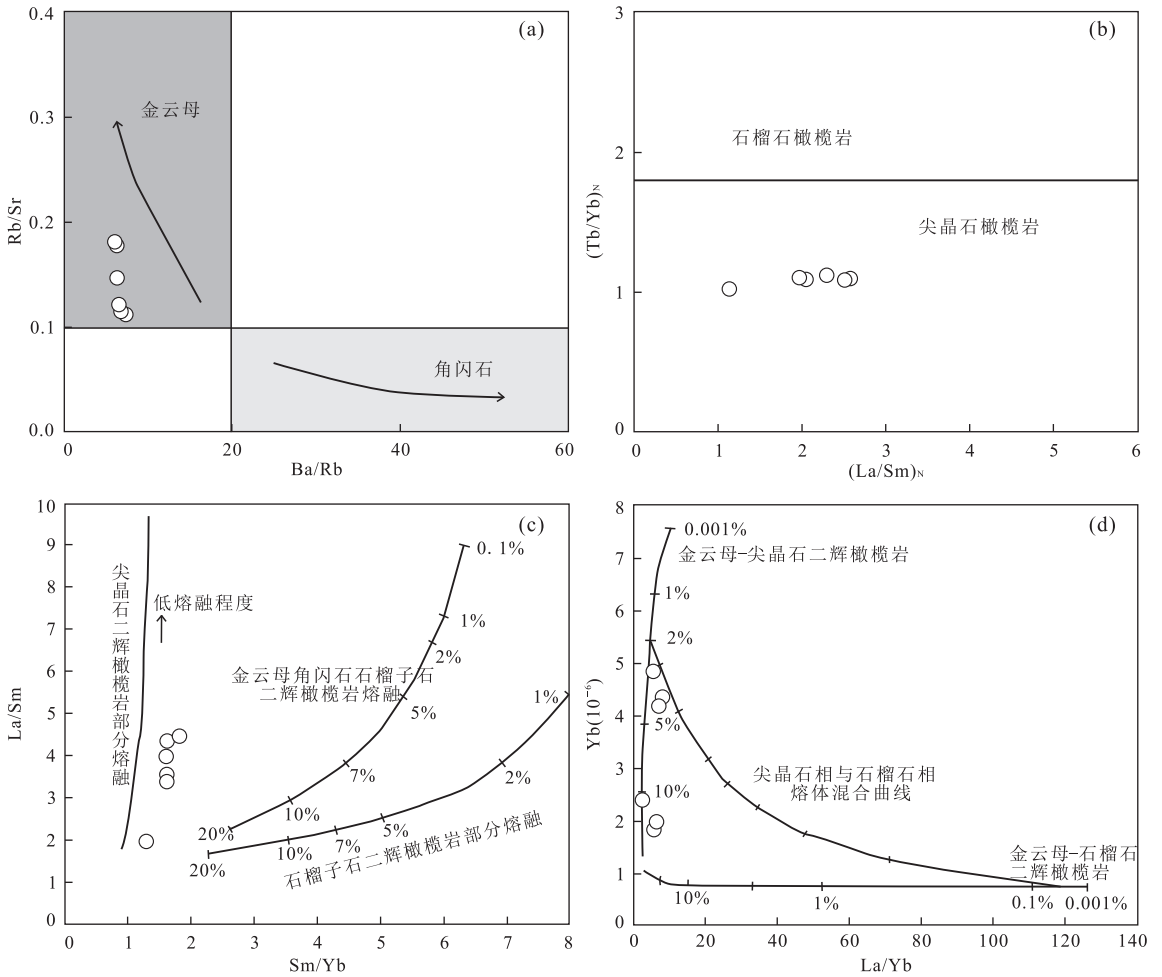


图 9 按纳格角闪辉长岩体源区成分判别图解

Fig.9 The discrimination diagrams of source composition for An'nage hornblende gabbro

图 a 数据来自 Furman and Graham (1999);图 c 数据来自柴凤梅等(2007);图 d 数据来自赵少卿等(2015);图 c 和 d 中带短横线曲线为地幔岩浆熔融程度趋势线

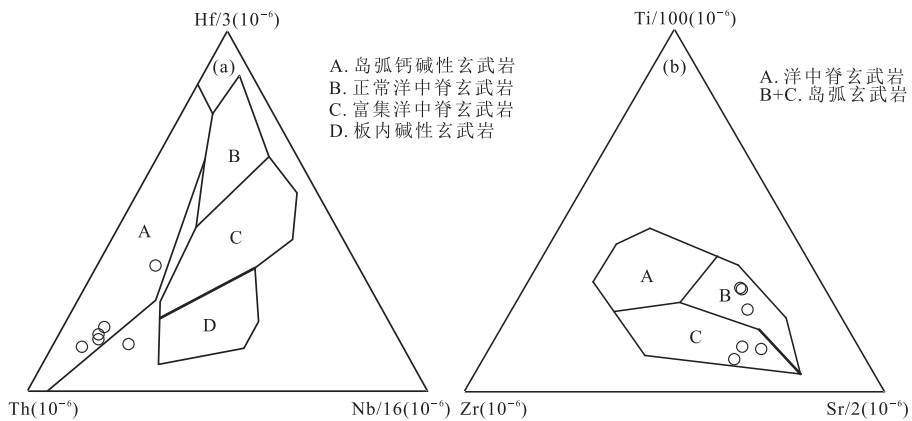


图 10 按纳格角闪辉长岩体 Hf/3-Th-Nb/16(a)和 Ti/100-Zr-Sr/2(b)构造环境判别图解

Fig.10 Hf/3-Th-Rb/16 (a) and Ti/100-Zr-Sr/2 (b) discrimination diagrams for An'nage hornblende gabbro

图 a 底图据 Wood *et al.*(1979);图 b 底图据 Pearce and Cann (1973)

铁质岩墙(251 Ma)也显示其形成于岛弧环境;(3) 中一晚三叠世,东昆仑出现了区域性的地层不整合,

不整合上覆地层为上三叠世鄂拉山组的陆相火山岩,下伏地层则为中三叠世海陆交互沉积相的闹仓

坚沟组沉积岩;(4)李瑞保(2012)统计了区域上不同期次的构造活动,显示东昆仑地区保存的早期褶皱构造变形、阿尼玛卿地区低角度自北向南韧性逆冲剪切变形构造发育时期为二叠纪—中三叠世,且其为古特提斯洋壳向北俯冲造山作用的变形纪录。以上证据进一步表明了古特提斯洋的俯冲作用持续至中—晚三叠世,而晚三叠世时期区域上大量同碰撞—后碰撞型岩浆岩的出现(陈国超等,2013;罗明非等,2014;Li *et al.*,2015)则表明古特提斯洋已完全闭合,区内进入碰撞造山阶段。

综上所述,古特提斯洋的闭合时间在中—晚三叠世,而在早三叠世以及中三叠世早期,东昆仑还处于古特提斯洋北向俯冲的环境。在该构造环境下,由流体交代后的地幔楔部分熔融形成的基性岩浆经历后期演化,并最终侵位形成按纳格角闪辉长岩体。

5 结论

(1)按纳格角闪辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 242 ± 2 Ma,指示按纳格角闪辉长岩体侵位于中三叠世。

(2)按纳格角闪辉长岩体起源于受俯冲板片流体交代过的地幔楔部分熔融,其源区成分为尖晶石相金云母二辉橄榄岩,部分熔融程度为 2%~10%。岩浆在后期演化过程中经历了一定程度的单斜辉石和斜长石分离结晶作用,但未受到明显的地壳混染。

(3)中—晚三叠世,东昆仑地区经历了古特提斯洋北向俯冲和陆内碰撞造山的构造体制转换,按纳格角闪辉长岩体产于古特提斯洋北向俯冲晚期。

致谢:感谢几位审稿人在论文评审过程中给本文提出的宝贵意见。

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. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)

Black, L. P., Gulson, B. L., 1978. The Age of the Mud Tank Carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3): 227–232.

Blichert-Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,

127 (3): 248–260. <https://doi.org/10.1007/s004100050278>

Brenan, J. M., Shaw, H. F., Ryerson, F. J., et al., 1995. Mineral-Aqueous Fluid Partitioning of Trace Elements at 900 °C and 2.0 GPa: Constraints on the Trace Element Chemistry of Mantle and Deep Crustal Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(16): 3331–3350. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00215-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00215-1)

Campbell, I. H., Griffiths, R. W., 1993. The Evolution of the Mantle's Chemical Structure. *Lithos*, 30(3–4): 389–399. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90047-g](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90047-g)

Chai, F. M., Parat, A., Zhang, Z. C., et al., 2007. Geochemistry of the Lamprophyre Dykes in the SW Margin of the Tarim Block and Their Source Region. *Geological Review*, 53(1): 11–21 (in Chinese with English abstract).

Chen, G. C., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2013. Geochronology and Genesis of the Helegang Xilikete Granitic Plutons from the Southern Margin of the Eastern East Kunlun Orogenic Belt and Their Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1525–1541 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. J., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Late Ordovician Granodiorite in Gouli Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: Implications on the Evolution of Proto-Tethys Ocean. *Earth Science*, 41(11): 1863–1882 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.129>

Chen, L., Sun, Y., Pei, X. Z., et al., 2003. Comprehensive Comparison of Paleo-Tethys Ophiolite and Its Geodynamic Significance—An Example from Dur'ngoi Ophiolite. *Science China Earth Science*, 33(12): 1136–1142 (in Chinese).

Chen, X. H., Yin, A., Gehrels, G. E., et al., 2011. Chemical Geodynamics of Granitic Magmatism in the Basement of the Eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 157–171 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Y. Q., 1994. Profiles of Regional Geology in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Class, C., Miller, D. M., Goldstein, S. L., et al., 2000. Distinguishing Melt and Fluid Subduction Components in Umnak Volcanics, Aleutian Arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1(6): 1–34. <https://doi.org/10.1029/1999gc000010>

Ding, X., Sun, W. D., 2013. Low Nb/Ta Ratios Amphibolite in Subduction Zone: The Enlightenment of the Genesis of Continental Crust. *Acta Geologica Sinica*, 87(S1): 68–

70 (in Chinese).

- Fan, W. M., Wang, Y. J., Zhang, A. M., et al., 2010. Permian Arc-Back-Arc Basin Development along the Ailaoshan Tectonic Zone: Geochemical, Isotopic and Geochronological Evidence from the Mojiang Volcanic Rocks, Southwest China. *Lithos*, 119(3-4): 553-568. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.010>
- Furman, T., Graham, D., 1999. Erosion of Lithospheric Mantle beneath the East African Rift System: Geochemical Evidence from the Kivu Volcanic Province. *Lithos*, 48(1-4): 237-262. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00031-6](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00031-6)
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Guo, F., Li, H. X., Fan, W. M., et al., 2015. Early Jurassic Subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and Geochemical Evidence from the Tumen Mafic Intrusive Complex. *Lithos*, 224-225: 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.014>
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M., et al., 1993. Mantle and Slab Contributions in ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21(1): 175-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.21.050193.001135>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391-1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Huang, H., Niu, Y. L., Nowell, G., et al., 2014. Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Implications for Continental Crust Growth through Syn-Collisional Felsic Magmatism. *Chemical Geology*, 370(4): 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010>
- Ishikawa, T., Tera, F., 1999. Two Isotopically Distinct Fluid Components Involved in the Mariana Arc: Evidence from Nb/B Ratios and B, Sr, Nd, and Pb Isotope Systematics. *Geology*, 27(1): 83. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0083:tidfci>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0083:tidfci>2.3.co;2)
- Iwamori, H., Nakamura, H., 2015. Isotopic Heterogeneity of Oceanic, Arc and Continental Basalts and Its Implications for Mantle Dynamics. *Gondwana Research*, 27(3): 1131-1152. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.003>
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to In Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Kelemen, P. B., Rilling, J. L., Parmentier, E. M., et al., 2013. Thermal Structure Due to Solid-State Flow in the Mantle Wedge beneath Arcs. In: Eiler, J., ed., Inside the Subduction Factory. American Geophysical Union, Washington, D.C. <https://doi.org/10.1029/138gm13>
- Labanieh, S., Chauvel, C., Germa, A., et al., 2012. Martinique: A Clear Case for Sediment Melting and Slab Dehydration as a Function of Distance to the Trench. *Journal of Petrology*, 53(12): 2441-2464. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egs055>
- Li, B. L., Sun, F. Y., Yu, X. F., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., 2012. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic Orogeny in East Kunlun Orogen (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, X. W., Huang, X. F., Luo, M. F., et al., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Mid-Triassic Lavas from East Kunlun, Northern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 32-47. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.03.009>
- Li, Y. J., Li, G. Y., Tong, L. L., et al., 2015. Discrimination of Ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for Tectonic Settings in Basalts. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(3): 14-21 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2003. Pb-Sr-Nd-O Isotope Characteristics of Granitoids in East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(6): 584-588 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185-194 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Luo, M. F., Mo, X. X., Yu, X. H., et al., 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age Dating, Petrogenesis and Tectonic Im-

- cations of the Late Triassic Granites from the Xiangride Area, East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229–3241 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Xiong, F. H., Yin, S., et al., 2015. Intensity and Cyclicity of Orogenic Magmatism: An Example from a Paleotethyan Granitoid Batholith, Eastern Kunlun, Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3555–3568 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald, R., 2001. Plume-Lithosphere Interactions in the Generation of the Basalts of the Kenya Rift, East Africa. *Journal of Petrology*, 42(5): 877–900. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.5.877>
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Naumann, T. R., Geist, D. J., 1999. Generation of Alkalic Basalt by Crystal Fractionation of Tholeiitic Magma. *Geology*, 27(5): 423. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0423:goabbc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0423:goabbc>2.3.co;2)
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90129-5)
- Pollock, J. C., Hibbard, J. P., 2010. Geochemistry and Tectonic Significance of the Stony Mountain Gabbro, North Carolina: Implications for the Early Paleozoic Evolution of Carolina. *Gondwana Research*, 17(2–3): 500–515. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.09.009>
- Qi, L., Hu, J., 2000. Determination of Trace Elements in Sediment and Granite by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Guangxi Chemical Industry*, (S1): 140–142 (in Chinese).
- Rawson, H., Keller, T., Fontijn, K., et al., 2016. Compositional Variability in Mafic Arc Magmas over Short Spatial and Temporal Scales: Evidence for the Signature of Mantle Reactive Melt Channels. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.056>
- Sang, L. K., Ma, C. Q., 2012. Petrology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Pubellier, M., et al., 2000. Magmatic Source Enrichment by Slab-Derived Melts in a Young Post-Collision Setting, Central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54(3–4): 173–206. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00019-0](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00019-0)
- Shinjo, R., Chung, S. L., Kato, Y., et al., 1999. Geochemical and Sr-Nd Isotopic Characteristics of Volcanic Rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the Evolution of a Young, Intracontinental Back Arc Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B5): 10591–10608. <https://doi.org/10.1029/1999jb900040>
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, G., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2014. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Diorite in Xiarihamu Ore District from East Kunlun and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(3): 876–891 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Plank, T., Walker, J. D., et al., 2002. A Mantle Melting Profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B1): ECV 5-1–ECV 5-21. <https://doi.org/10.1029/2001jb000209>
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London.
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., 1979. A Re-Appraisal of the Use of Trace Elements to Classify and Discriminate between Magma Series Erupted in Different Tectonic Settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2): 326–336. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(79\)90133-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90133-x)
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001. Hafnium Isotope Evidence for ‘Conservative’ Element Mobility during Subduction Zone Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331–346. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00453-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00453-8)
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569. <https://doi.org/10.1007/bf03184122>

- Xia, R., Wang, C. M., Qing, M., et al., 2015a. Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf-O Isotopes for the Nan'getan Granodiorites and Mafic Microgranular Enclaves in the East Kunlun Orogen: Record of Closure of the Paleo-Tethys. *Lithos*, 234—235: 47—60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.018>
- Xia, R., Wang, C. M., Qing, M., et al., 2015b. Molybdenite Re-Os, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Analysis of the Shuangqing Fe-Pb-Zn-Cu Skarn Deposit, East Kunlun Mountains, Qinghai Province, China. *Ore Geology Reviews*, 66: 114—131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.024>
- Xiong, F. H., 2014. Spatial-Temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Elements and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of the Early Mesozoic Mafic Dyke Swarms in East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (11): 3350—3364 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2012. The Origin of Mafic Microgranular Enclaves and Their Host Granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for Magma Mixing during Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104 (3—4): 211—224. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0187-1>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2007. The Mechanism of Collage, Collision and Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau, an Orogenic Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yogodzinski, G., Kay, R. W., Volynets, O. N., et al., 1995. Magnesian Andesite in the Western Aleutian Komandorsky Region: Implications for Slab Melting and Processes in the Mantle Wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107 (5): 505—519. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0505:maitwa>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0505:maitwa>2.3.co;2)
- Zhang, H. F., Gao, S., 2012. Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, F. F., Sun, F. Y., Liu, J. L., 2017. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Gneissic Granodiorite in Manite Area from East Kunlun, with Implications for Geodynamic Setting. *Earth science*, 42 (6): 927—940 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.073>
- Zhao, S. Q., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Quartz Diorites in Zhiduo Area, Qinghai Province. *Earth Science*, 40 (1): 61—76 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.005>
- Zhao, Z. H., Wang, Q., Xiong, X. L., 2004. Complex Mantle-Crust Interaction in Subduction Zone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23 (4): 277—284 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Xiong, X. L., Wang, Q., et al., 2008. Some Aspects on Geochemistry of Nb and Ta. *Geochimica*, 37 (4): 304—320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. T., Guo, G. L., Liu, X. D., et al., 2016. Geochemical Characteristics and Tectonic Significances of the Rocks from Northeastern Jiangxi Ophiolite. *Earth Science*, 41 (1): 84—96 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.006>

附中文参考文献

- 柴凤梅, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 张招崇, 等, 2007. 塔里木板块西南缘钾质煌斑岩地球化学及源区特征. 地质论评, 53 (1): 11—21.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等, 2013. 东昆仑造山带东段南缘和勒冈希里克特花岗岩体时代、成因及其构造意义. 地质学报, 87 (10): 1525—1541.
- 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2016. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约. 地球科学, 41 (11): 1863—1882. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.129>.
- 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等, 2003. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义——以德尔尼蛇绿岩为例. 中国科学: 地球科学, 33 (12): 1136—1142.
- 陈宣华, 尹安, Geheels, G. E., 等, 2011. 柴达木盆地东部基底花岗岩类岩浆活动的化学地球动力学. 地质学报, 85 (2): 157—171.
- 程裕淇, 1994. 中国区域地质概况. 北京: 地质出版社.
- 丁兴, 孙卫东, 2013. 俯冲碰撞带低 Nb/Ta 角闪岩: 对大陆地壳成因的启示. 地质学报, 87 (S1): 68—70.
- 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 等, 2012. 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. 岩石学报, 28 (4): 1163—1172.
- 李瑞保, 2012. 东昆仑造山带 (东段) 晚古生代—早中生代造山作用研究 (博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 李永军, 李甘雨, 佟丽莉, 等, 2015. 玄武岩类形成的大地构造环境 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值对比判别. 地球科学与环境学报, 37 (3): 14—21.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等, 2003. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征. 地球学报, 24 (6): 584—588.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造

- 带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义.地质学报,85(2):185-194.
- 罗明非,莫宣学,喻学惠,等,2014.东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义.岩石学报,30(11):3229-3241.
- 马昌前,熊富浩,尹烁,等,2015.造山带岩浆作用的强度和旋回性:以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例.岩石学报,31(12):3555-3568.
- 莫宣学,罗照华,邓晋福,等,2007.东昆仑造山带花岗岩及地壳生长.高校地质学报,13(3):403-414.
- 漆亮,胡静,2000.电感耦合等离子体质谱法测定花岗岩、沉积物中的微量元素.广西化工,(S1):140-142.
- 桑隆康,马昌前,2012.岩石学.北京:地质出版社.
- 王冠,孙丰月,李碧乐,等,2014.东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),44(3):876-891.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185-220.
- 熊富浩,2014.东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布、岩石成因及其地质意义(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 熊富浩,马昌前,张金阳,等,2011.东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学.岩石学报,27(11):3350-3364.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2007.造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及升降机制.北京:地质出版社.
- 张宏飞,高山,2012.地球化学.北京:地质出版社.
- 赵菲菲,孙丰月,刘金龙,2017.东昆仑马尼特地区片麻状花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造背景.地球科学,42(6):927-940.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.073>
- 赵少卿,付乐兵,魏俊浩,等,2015.青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景.地球科学,40(1):61-76.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.005>
- 赵振华,王强,熊小林,2004.俯冲带复杂的壳幔相互作用.矿物岩石地球化学通报,23(4):277-284.
- 赵振华,熊小林,王强,等,2008.铌与钽的某些地球化学问题.地球化学,37(4):304-320.
- 周文婷,郭国林,刘晓东,等,2016.赣东北蛇绿混杂岩岩石地球化学特征及构造意义.地球科学,41(1):84-96.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.006>