

doi:10.3799/dqkx.2015.081

青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体 年代学、地球化学及 Hf 同位素

刘金龙, 孙丰月*, 李 良, 赵菲菲, 王英德, 王 硕, 张宇婷

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 布青山构造混杂岩带中的哥日卓杂岩体与区域构造线方向不一致, 属于典型的“钉合岩体”, 对限定地体拼贴或增生的时间上限具有特殊的构造年代学意义。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示岩体形成于晚三叠世中期(似斑状花岗岩形成于 227 Ma, 闪长岩形成于 224 Ma)。在地球化学上, 似斑状花岗岩为高钾钙碱性系列, 高 Sr(479~573 $\mu\text{g/g}$), 低 Yb(1.03~1.20 $\mu\text{g/g}$), $\text{Mg}^\#$ 值为 48.7~51.8, 判断岩石属于埃达克岩类。岩石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -2.40~2.98, 判断岩石源于加厚陆壳部分熔融。闪长岩 Ti/Yb 值为 1930~2178, Nb/Ta 值为 15.9~17.4, 属混合成因。综合前人研究成果, 哥日卓托杂岩体形成于古特特斯洋闭合后碰撞环境, 并且标志同碰撞后碰撞的构造体制转换。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 埃达克岩; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)06-0965-17

收稿日期: 2014-09-15

Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes of Gerizhuotuo Complex Intrusion in West of Anyemaqen Suture Zone

Liu Jinlong, Sun Fengyue*, Li liang, Zhao Feifei, Wang Yingde, Wang Shuo, Zhang Yuting

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

Abstract: The Gerizhuotuo complex intrusion, a typical ‘stitching pluton’ with its long axis cutting regional structural lines, is significant in tectonic geochronology for providing an upper-age for the timing of plate collision. The zircon U-Pb dating results indicate that the pluton was formed in 227–224 Ma. Geochemically, porphyritic granite falls into the high-K calc-alkaline series, with high Sr(479–573 $\mu\text{g/g}$) and low Yb(1.03–1.20 $\mu\text{g/g}$) and $\text{Mg}^\#$ (48.7–51.8), being of the characteristics of adakitic rocks. The in situ zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value varies from -2.40 to 2.98, which suggests that the primary magma was derived from partial melting of lower crustal materials. Diorite also shows high-K calc-alkaline affinity, with a Ti/Yb ratio ranging from 1930 to 2178, Nb/Ta ratio ranging from 15.9 to 17.4. It is suggested that a mixture, between basaltic magma derived from partial melting of metasomatized mantle and acidic magma derived from crustal material, produced the dioritic magma. It is concluded that the pluton was formed in a post-collisional tensional environment.

Key words: zircon U-Pb age; zircon Hf isotope; adakitic rock; geochemistry; geochronology.

0 引言

哥日卓托杂岩体位于阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段, 阿尼玛卿构造带现今位于东昆仑造山带、西秦岭

造山带、松潘—巴颜喀拉造山带汇聚交接地区, 呈西—东走向(王永标等, 1997; 裴先治, 2001; 张国伟等, 2003; 李佐臣等, 2013)。该构造带经历了多期次的造山作用, 具有复杂的构造图像和拼合历史,

基金项目: 中国地质调查局项目“柴达木周缘及邻区成矿带地质矿产调查评价”(No. 1212011086020)。

作者简介: 刘金龙(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学研究。E-mail: liujinlong0815@yeah.net

* **通讯作者:** 孙丰月(1963—), E-mail: sfy@jlu.edu.cn

引用格式: 刘金龙, 孙丰月, 李良, 等, 2015. 青海阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段哥日卓托杂岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素. 地球科学——中国地质大学学报, 40(6): 965–981.

在中国大陆的形成演化中占据重要地位(殷鸿福和张克信,1997). 哥日卓托杂岩体切割区域主造山期构造线,属于典型的“钉合岩体”,限定了地体拼贴或增生的时间上限. 通过地球化学研究发现哥日卓托似斑状花岗岩具有埃达克岩特征,埃达克岩指与年轻(≤ 25 Ma)俯冲大洋岩石圈有关的新生代岛弧环境中的火山岩或侵入岩(Defant and Drummond, 1990). 近年来的研究表明,俯冲板片的熔融、玄武质岩浆的底侵及下地壳的拆沉是埃达克岩形成的重要深部动力学过程(Atherton and Petferd, 1993; 王焰等,2000; 王强等,2001; 汪洋等,2004; Wang *et al.*, 2008, 2010). 埃达克岩对于成矿作用有着十分重要的意义,大部分世界著名的 Cu-Au 矿床都与埃达克岩有关(Thiéblemont *et al.*, 1997; Mungall, 2002). 因此,本文拟通过哥日卓托杂岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学及 Hf 同位素研究工作,探讨其成因和地球动力学背景.

1 地质背景及样品描述

1.1 地质背景

孙丰月等(2003)在前人研究的基础上以昆北、昆中、昆南和阿尼玛卿南缘 4 条断裂为界,将东昆仑造山带由北向南依次划为昆北加里东弧后裂陷带、昆中基底隆起花岗岩带、昆南复合拼贴带、阿尼玛卿蛇绿混杂岩带和北巴颜喀拉造山带(图 1b)(姜春发和朱松年,1992). 阿尼玛卿蛇绿混杂岩带位于昆南断裂与阿尼玛卿南缘断裂之间,东部玛沁地区出露有灰绿色、黑灰色黑云斜长片麻岩、二云钠长片岩、角闪片麻岩、斜长角闪岩类、灰-灰白色薄层(或凸镜体)大理岩及混合岩等,可能为该带的基底(1 747~1 404 Ma)(青海省地质矿产局,1982). 石炭纪灰岩地层呈断块出露,下二叠统灰岩和砂板岩呈推覆体和断块产出,局部发育深海硅质岩. 区内华力西期的火山岩的岩石组合为玄武岩、安山岩、英安

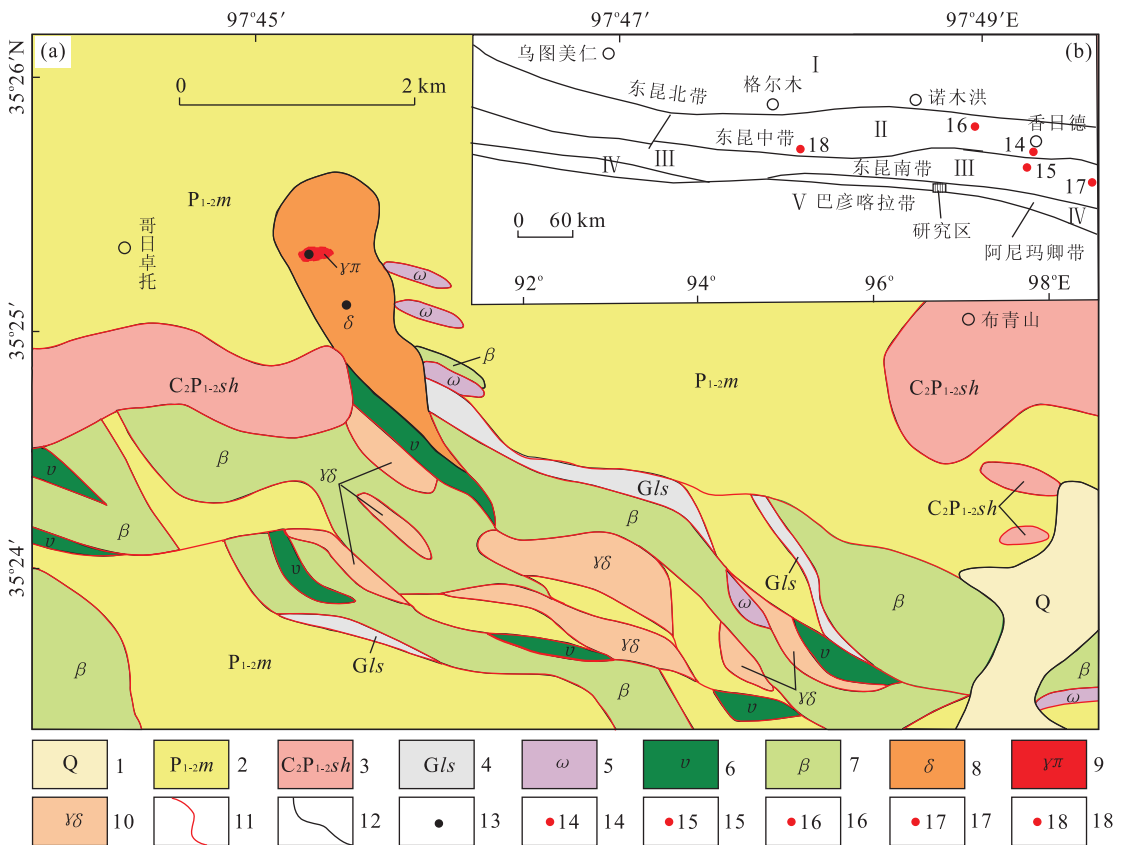


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

a. 据李瑞宝,2012;李佐臣等,2013 修改;b. 据孙丰月等,2003. 1. 第四系;2. 中下二叠统马尔争组;3. 上石炭统一中下二叠统树维门科组;4. 石炭纪哥日卓托洋灰岩;5. 石炭纪蛇纹岩;6. 石炭纪辉长岩;7. 石炭纪玄武岩;8. 三叠纪哥日卓托杂岩体;9. 三叠纪似斑状花岗岩;10. 志留纪花岗岩闪岩;11. 断层;12. 地质界线;13. 取样位置;14. 香加南山岩体;15. 哈拉杂吐花岗岩体;16. 诺木洪花岗岩体;17. 玛积雪山地区弧火山岩;18. 白日其利地区基性岩墙群

岩和少量的流纹岩以及成分相当的凝灰质岩石,分布于布青山一带。布青山群火山岩普遍被认为是阿尼玛卿蛇绿岩带的组成部分,3种不同类型的洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩和岛弧钙碱性玄武岩(青海省地质矿产局,1982)。火山岩中有较多洋中脊玄武岩,与堆晶辉长岩、变质橄榄岩等一起构成蛇绿岩,成为阿尼玛卿蛇绿岩带(边千韬等,1999)的组成部分。

研究区位于阿尼玛卿蛇绿混杂岩带西段,区内出露地层主要有中下二叠统马尔争组($P_{1-2}m$),其主要为复理石沉积组合;上石炭统一中下二叠统树维门科组($C_2P_{1-2}sh$),主要由具礁体特征的碳酸盐岩组成,是较典型的稳定性台地相碳酸盐岩沉积,碳酸盐岩呈推覆体产出,石炭系一二叠系北西向分布,与区域构造线一致。第四系地层(Q)为山地湖泊相沉积,下部为黄色砾石层,中部为中一细粒砂层,上部为钙质粘土及胶结固化粉砂岩。区内岩浆岩的南部主要有石炭纪 N-MORB 型蛇绿岩组合,主要包括蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩和玄武岩等,岩块平面上多呈透镜状近东西向展布(图 1a),与混杂带基质马尔争组($P_{1-2}m$)呈断层接触关系;志留纪花岗闪长岩近北西向展布;三叠纪哥日卓托杂岩体由似斑状花岗岩和闪长岩组成,出露面积约 1.5 km^2 ,平面上呈长条状近南北向展布,与区域构造线北西西—南东东向不一致,且南端切割断裂。区域构造以断裂为主,依走向主要分为近北西向、东西向等。

1.2 样品描述

本次测试样品采自哥日卓托杂岩体,似斑状花岗岩具斑状结构,斑晶($\sim 70\%$)主要为斜长石和石英;斜长石($\sim 50\%$),半自形板状,发育聚片双晶($1.00 \sim 3.00 \text{ mm}$),表面有弱绢云母化;石英($\sim 15\%$),半自形—他形粒状, $0.50 \sim 1.00 \text{ mm}$;钾

长石($\sim 5\%$),自形板状($0.50 \sim 1.00 \text{ mm}$);暗色矿物蚀变为绿泥石,推测原矿物为黑云母;基质为细粒石英($0.05 \sim 0.10 \text{ mm}$)和长石颗粒($0.05 \sim 0.20 \text{ mm}$),长石发育弱粘土化;副矿物主要有磁铁矿、锆石、绿帘石、榍石和磷灰石等(图 2a)。闪长岩为半自形花岗结构,主要矿物:斜长石($\sim 65\%$)发育聚片双晶, $0.25 \sim 1.00 \text{ mm}$,表面浑浊;角闪石($\sim 20\%$)他形柱状, $0.25 \sim 1.00 \text{ mm}$;辉石($\sim 5\%$)部分发育黑云母化, $0.25 \sim 1.00 \text{ mm}$;少量黑云母($\sim 3\%$)和石英($\sim 2\%$);偶尔可见橄榄石斑晶($\sim 2\%$);副矿物可见针柱状磷灰石大量的发育,此外有磁铁矿、锆石、绿帘石、榍石等(图 2b)。

2 分析方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

锆石挑选由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,将不同特征的锆石粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定;待其固化之后,将表面抛光至锆石中心。在测试前,通过反射光和 CL 图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征,以选择最佳测试点。锆石刻靶、反射光、阴极发光以及锆石 U-Pb 年龄测定和痕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 $32 \mu\text{m}$,激光剥蚀样品的深度为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$;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, ^{29}Si 作为内标元素(锆石中 SiO_2 的质量分数为 32.8% (袁洪林

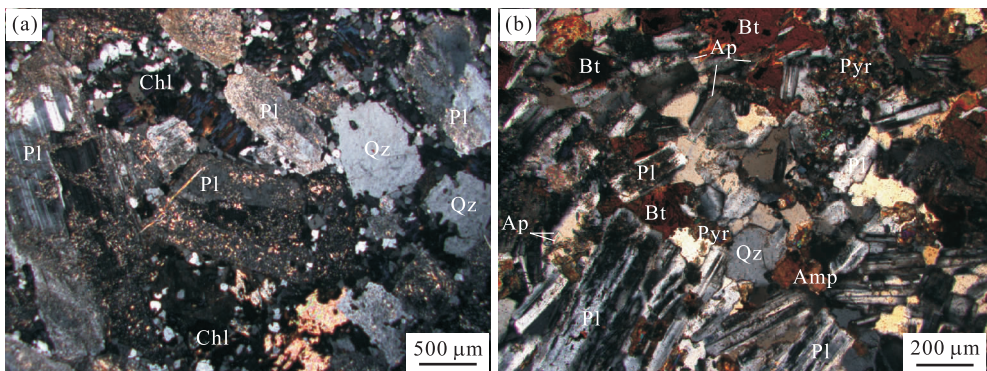


图 2 似斑状花岗岩和闪长岩的显微照片

Fig. 2 Microphotographs of the porphyritic granite and diorite rocks
Pl. 斜长石; Q. 石英; Pyr. 辉石; Amp. 角闪石; Bt. 黑云母; Ap. 磷灰石; Chl. 绿泥石

等, 2003)), 分析方法见 Yuan *et al.* (2004); 普通铅校正采用 Anderson(2002)推荐的方法; 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 Isoplot 程序(Ludwig, 2003).

2.2 岩石地球化学测试

本次实验主量及微量元素的分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试完成, 主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(飞利浦 PW2404)完成, 其中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 和 Na_2O 检测限为 0.015%, CaO 、 K_2O 和 TiO_2 检测限为 0.01%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MnO 和 P_2O_5 检测限为 0.005%; FeO 用容量法完成(检测限为 0.1%). 微量元素及稀土元素使用电感耦合等离子体质谱 Finigan MAT HR-ICP-MS(Element I型)完成, 详细分析流程见 Qian and Gregoire(2000).

2.3 锆石 Hf 同位素测试

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成. 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005(Lambda Physik, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国). 采用单点剥蚀模式, 斑束固定为 $44\ \mu\text{m}$. 详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu *et al.* (2012).

$^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}=1.132685$ 被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} (Fisher *et al.*, 2014). $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 的比值被用于计算 Hf(β_{Hf}) 和 Yb(β_{Yb}) 的质量偏差. 使用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=0.79639$ 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰(Fisher *et al.*, 2014). 使用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02656$ (Janne *et al.*, 1997)来扣除干扰程度相对较小的 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰. 分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICP-MS Data Cal(Liu *et al.*, 2010)完成.

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

似斑状花岗岩(GR-N3)中锆石主要为长柱状, 自形程度较好, 具有较为清晰的震荡环带结构, 显示岩浆锆石的特征(图 3). 它们的 U 含量为 $238 \times 10^{-6} \sim 925 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $131 \times 10^{-6} \sim 420 \times 10^{-6}$ (表 1), Th/U 含量比值为 0.22~0.97 之间, 符合岩浆锆石特征(Weaver, 1991). 其中, 有 13 个锆石点位数据均落在谐和线上及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据的加权平均年龄为 $227 \pm 1\ \text{Ma}$, MSWD = 0.072; 谐和年龄为 $226 \pm 1\ \text{Ma}$. 因此, 哥日卓托

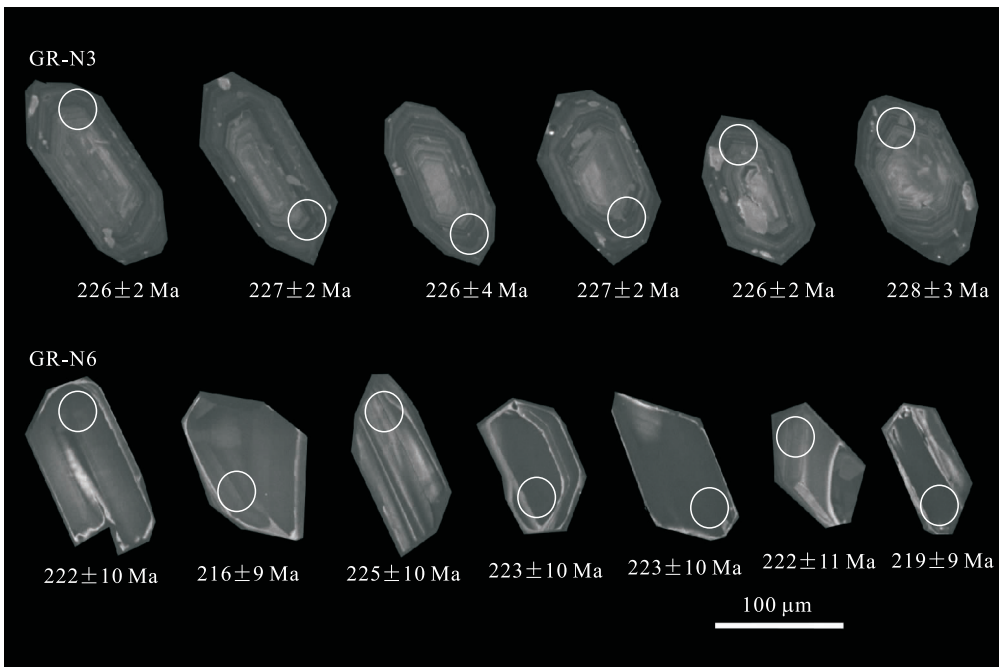


图 3 哥日卓托杂岩体部分锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons from the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

表 1 哥日卓托似斑状花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of porphyritic granite

测点	含量(10^{-6})			同位素比值及误差						年龄(Ma)及误差					
	^{238}U	^{232}Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
GR-N3-1	774	358	0.46	0.462 4	0.054 0	0.001 8	0.267 2	0.008 6	0.035 7	372	72	240	7	226	2
GR-N3-2	525	229	0.44	0.436 1	0.052 9	0.001 9	0.261 4	0.009 2	0.035 9	328	81	236	7	227	2
GR-N3-3	345	184	0.53	0.533 1	0.051 0	0.002 7	0.252 2	0.012 7	0.035 9	239	122	228	10	227	3
GR-N3-4	925	420	0.45	0.454 4	0.052 3	0.001 9	0.260 0	0.009 1	0.035 8	298	86	235	7	227	2
GR-N3-5	736	350	0.48	0.475 8	0.051 4	0.002 2	0.255 3	0.010 3	0.035 9	257	92	231	8	227	3
GR-N3-6	676	309	0.46	0.457 2	0.051 2	0.002 3	0.256 0	0.012 5	0.035 7	250	104	231	10	226	4
GR-N3-7	848	388	0.46	0.457 0	0.051 5	0.002 1	0.257 2	0.010 1	0.036 0	265	93	232	8	228	3
GR-N3-8	678	302	0.45	0.446 1	0.051 1	0.001 6	0.252 0	0.007 7	0.035 8	256	72	228	6	227	3
GR-N3-9	672	320	0.48	0.476 0	0.054 8	0.002 1	0.272 5	0.010 5	0.035 8	406	83	245	8	227	2
GR-N3-10	445	214	0.48	0.479 9	0.051 7	0.002 0	0.256 5	0.009 8	0.035 8	333	89	232	8	227	2
GR-N3-11	640	309	0.48	0.482 2	0.052 5	0.002 0	0.261 2	0.009 9	0.036 0	309	85	236	8	228	3
GR-N3-12	444	209	0.47	0.471 4	0.052 1	0.002 9	0.258 6	0.014 3	0.036 0	300	125	234	12	228	3
GR-N3-13	668	320	0.48	0.478 2	0.051 0	0.003 0	0.255 1	0.014 4	0.036 1	243	135	231	12	229	3
GR-N3-14	464	320	0.69	0.688 8	0.057 4	0.002 0	0.581 7	0.021 4	0.072 7	506	81	466	14	453	4
GR-N3-15	592	131	0.22	0.222 0	0.152 1	0.002 9	5.804 9	0.104 5	0.274 6	2 369	31	1 947	16	1 564	9

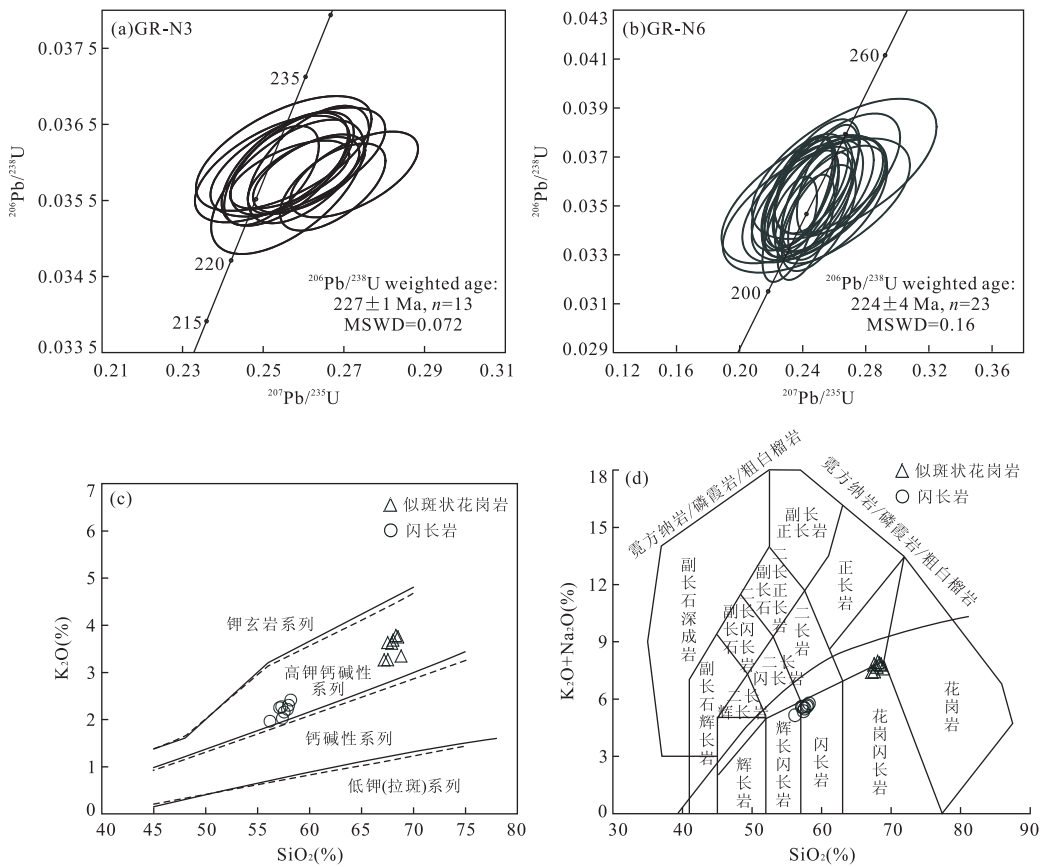


图 4 哥日卓托杂岩体似斑状花岗岩(a)、闪长岩(b)的 U-Pb 年龄协和图及其 TAS 图解(c)和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(d)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram for porphyritic granite (a) and diorite (b) in Gerizhuotuo complex intrusion, and TAS diagram (c) and $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ diagram (d) of the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

图 c 中分界线上为碱性,下方为亚碱性,据 Irvine and Baragar(1971)

杂岩体似斑状花岗岩结晶年龄为 227 Ma(图 4a),与闪长岩同属晚三叠世中期. 此外存在 2 个捕获锆

石, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 2 369 Ma、453 Ma.

表 2 哥日卓托闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of diorite in Gerizhuotuo complex intrusion

测点	含量(10^{-6})			同位素比值及误差						年龄(Ma)及误差					
	^{238}U	^{232}Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
GR-N6-1	347	203	0.58	0.053 4	0.004 7	0.258 1	0.023 5	0.035 1	0.001 6	344	188	233	19	222	10
GR-N6-2	457	258	0.56	0.050 6	0.002 1	0.244 5	0.012 2	0.035 1	0.001 5	220	94	222	10	222	9
GR-N6-3	492	407	0.83	0.049 4	0.002 0	0.231 8	0.011 4	0.034 0	0.001 4	165	93	212	9	216	9
GR-N6-4	473	382	0.81	0.051 5	0.002 1	0.242 2	0.011 9	0.034 1	0.001 4	261	92	220	10	216	9
GR-N6-5	412	207	0.50	0.048 6	0.004 0	0.238 2	0.020 2	0.035 6	0.001 6	128	181	217	17	225	10
GR-N6-6	309	231	0.75	0.049 1	0.003 1	0.238 4	0.016 0	0.035 2	0.001 5	153	139	217	13	223	9
GR-N6-7	183	124	0.68	0.049 6	0.003 7	0.242 7	0.019 0	0.035 5	0.001 5	176	164	221	16	225	10
GR-N6-8	240	139	0.58	0.052 9	0.007 7	0.266 3	0.038 6	0.036 5	0.001 9	325	300	240	31	231	12
GR-N6-9	313	146	0.47	0.049 9	0.003 3	0.249 2	0.017 8	0.036 2	0.001 5	192	148	226	14	229	10
GR-N6-10	223	111	0.50	0.051 8	0.003 2	0.252 6	0.017 0	0.035 4	0.001 5	277	136	229	14	224	9
GR-N6-11	268	243	0.91	0.051 4	0.004 4	0.251 4	0.022 2	0.035 5	0.001 6	261	184	228	18	225	10
GR-N6-12	362	168	0.46	0.049 2	0.002 2	0.241 1	0.012 8	0.035 6	0.001 5	155	102	219	10	226	9
GR-N6-13	381	254	0.67	0.050 9	0.006 1	0.247 1	0.029 9	0.035 3	0.001 7	235	255	224	24	223	11
GR-N6-14	384	213	0.56	0.049 0	0.002 2	0.240 0	0.012 5	0.035 6	0.001 5	148	101	218	10	225	9
GR-N6-15	306	144	0.47	0.048 7	0.002 8	0.238 5	0.014 9	0.035 5	0.001 5	134	128	217	12	225	9
GR-N6-16	657	564	0.86	0.051 6	0.002 2	0.256 0	0.012 9	0.036 1	0.001 5	266	94	231	10	228	9
GR-N6-17	495	466	0.94	0.052 1	0.002 4	0.251 0	0.013 4	0.035 0	0.001 5	290	101	227	11	222	9
GR-N6-18	313	153	0.49	0.052 5	0.005 1	0.262 0	0.026 2	0.036 3	0.001 6	306	208	236	21	230	10
GR-N6-19	421	209	0.50	0.051 7	0.005 8	0.250 5	0.028 3	0.035 3	0.001 6	272	236	227	23	223	10
GR-N6-20	263	151	0.57	0.051 7	0.008 2	0.248 7	0.039 2	0.035 0	0.001 8	271	326	226	32	222	11
GR-N6-21	400	248	0.62	0.049 5	0.007 0	0.239 8	0.033 8	0.035 3	0.001 7	171	298	218	28	223	11
GR-N6-22	263	237	0.90	0.052 8	0.002 9	0.250 3	0.015 5	0.034 5	0.001 4	320	121	227	13	219	9
GR-N6-23	656	529	0.81	0.050 6	0.003 7	0.244 3	0.019 1	0.035 1	0.001 5	223	162	222	16	223	9

哥日卓托杂岩体闪长岩(GR-N6)中锆石主要为柱状或粒状,还有少量呈断头晶出现. 锆石内部结构复杂,发育韵律环带或具有条痕状吸收的特点,部分不发光,具岩浆结晶锆石特征(图 3). 它们的 U 含量为 $46 \times 10^{-6} \sim 912 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $111 \times 10^{-6} \sim 564 \times 10^{-6}$. Th/U 含量比值为 0.62~2.42 之间(表 2),符合岩浆锆石 Th/U 含量比值 >0.4 的特征(Weaver, 1991). 其中 23 个锆石点数据较集中,均落在谐和线之上,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权值为 224 ± 4 Ma, MSDW = 0.16; 谐和年龄值为 223 ± 2 Ma, MSWD = 0.14(图 4b),属晚三叠世中期. 另外,有 2 个数据为统计离群点没有参与计算, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 515 Ma 和 510 Ma,为捕获锆石.

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素 似斑状花岗岩 SiO_2 含量为 67.19%~68.82%; Na_2O 和 K_2O 分别介于 4.02%~4.23%和 3.26%~3.78%之间;铝饱和指数 A/CNK = 0.98~1.06; MgO 和 $\text{Mg}^\#$ 分别介于 1.51%~1.77%和 48.66~51.75 之间(表 3). 在 TAS 图解中显示岩石为亚碱性(图 4c),在 SiO_2 - K_2O 图解中属于高钾钙碱性系列(图 4d).

哥日卓托杂岩体闪长岩 SiO_2 含量为 56.18%~58.19%; Na_2O 和 K_2O 分别介于 3.16%~3.37%和 1.96%~2.41%之间;铝饱和指数 A/CNK = 0.83~0.91; MgO 和 $\text{Mg}^\#$ 分别介于 4.21%~5.76%和 51.70~59.74 之间(表 3). 岩石样品在 TAS 图解中落入闪长岩范围内(图 4c);在 SiO_2 - K_2O 图解中岩石位于高钾钙碱性系列(图 4d).

3.2.2 微量元素 似斑状花岗岩稀土总量 ($\Sigma\text{REE} = 159 \times 10^{-6} \sim 197 \times 10^{-6}$) 低于闪长岩(表 3),配分曲线同样显示右倾(图 5a),重稀土总量 ($\text{HREE} = 8.5 \times 10^{-6} \sim 9.5 \times 10^{-6}$), (La/Yb)_N 为 24.6~35.8. Eu/Eu^* 值为 0.71~0.86,具有弱负 Eu 异常. 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5b),似斑状花岗岩相对于闪长岩富集大离子亲石元素(如 K、Rb)和活泼的不相容元素(如 Th、U)的趋势更明显,且亏损高场强元素(如 Nb、Ta、P、Ti)的趋势亦明显.

哥日卓托杂岩体闪长岩稀土总量 $\Sigma\text{REE} = 193 \times 10^{-6} \sim 223 \times 10^{-6}$ (表 3),在稀土配分模式图上曲线近一致(图 5a). 配分曲线显示右倾, (La/Yb)_N 为 15.5~13.6. Eu 具有弱的负异常, Eu/Eu^*

表 3 哥日卓托似斑状花岗岩和闪长岩主量元素、稀土元素和微量元素含量及有关参数

Table 3 Major, REE and trace element content and parameter of the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

样品	似斑状花岗岩										闪长岩							
	GR-Y3-1	GR-Y3-2	GR-Y3-3	GR-Y3-4	GR-Y3-5	GR-Y3-6	GR-Y3-7	GR-Y3-8	GR-Y6-1	GR-Y6-2	GR-Y6-3	GR-Y6-4	GR-Y6-5	GR-Y6-6	GR-Y6-7	GR-Y6-8		
SiO ₂	68.52	67.19	68.82	67.93	68.04	67.54	67.52	68.31	57.32	57.39	58.19	57.56	56.18	57.87	57.11	57.99		
TiO ₂	0.38	0.42	0.43	0.40	0.40	0.42	0.40	0.39	0.78	0.78	0.76	0.76	0.78	0.79	0.76	0.75		
Al ₂ O ₃	15.81	16.15	16.54	15.91	16.13	16.18	15.98	15.83	17.18	17.28	16.96	16.98	16.86	16.98	16.58	16.71		
FeO	2.56	2.59	2.66	2.51	2.40	2.38	2.32	2.38	5.29	5.74	5.27	4.86	5.34	5.33	5.31	5.49		
Fe ₂ O ₃	0.22	0.48	0.49	0.55	0.48	0.60	0.51	0.46	1.59	1.27	1.39	2.39	1.86	1.50	1.78	1.29		
Fe ₂ O ₃ ^T	3.06	3.36	3.45	3.34	3.15	3.24	3.09	3.11	7.47	7.65	7.25	7.80	7.79	7.42	7.68	7.39		
MnO	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15		
MgO	1.51	1.73	1.77	1.60	1.65	1.74	1.67	1.62	4.59	4.79	4.28	4.21	5.56	4.59	5.76	4.36		
CaO	2.62	3.38	3.47	2.79	2.36	3.08	2.72	2.56	6.55	6.20	6.30	6.73	7.17	6.24	5.94	6.67		
Na ₂ O	4.02	4.13	4.23	4.04	4.23	4.16	4.15	4.04	3.30	3.31	3.33	3.31	3.16	3.37	3.31	3.34		
K ₂ O	3.74	3.26	3.34	3.61	3.68	3.26	3.63	3.78	2.27	2.03	2.41	2.15	1.96	2.21	2.25	2.30		
P ₂ O ₅	0.16	0.17	0.18	0.16	0.15	0.17	0.16	0.16	0.30	0.31	0.28	0.29	0.31	0.29	0.29	0.28		
LOI	2.26	2.80	2.36	2.32	2.42	2.89	2.65	2.52	2.12	2.28	1.75	1.54	1.62	2.01	3.05	1.23		
Mg#	49.51	50.44	50.44	48.66	50.95	51.52	51.75	50.81	54.89	55.34	53.94	51.70	58.58	55.08	59.74	53.91		
Cr	39.2	43.2	52.5	53.9	42.8	49.5	47.1	46.4	53.4	88.3	82.5	100.0	136.0	88.4	149.0	81.1		
V	28.5	41.4	44.0	42.0	39.4	46.4	36.1	39.4	118.0	138.0	139.0	148.0	144.0	136.0	141.0	132.0		
Rb	140.0	129.0	118.0	144.0	136.0	130.0	149.0	143.0	82.7	78.0	91.3	79.5	68.1	82.8	89.0	78.6		
Ba	791	780	776	855	1032	844	723	891	710	648	670	698	661	685	671	648		
Sr	480	490	573	521	479	514	535	485	609	608	594	575	562	603	599	517		
Ce	79.1	78.3	78.3	87.5	78.2	87.4	73.1	83.4	82.8	84.6	94.2	94.4	82.0	90.1	82.5	91.6		
Pr	7.91	8.17	7.98	8.97	8.29	8.83	7.45	8.26	9.08	9.28	10.2	10.1	9.04	9.75	8.93	9.63		
Nb	18.1	19.6	20.4	19.9	19.4	19.4	20.1	19.3	22.3	21.8	24.0	25.5	21.4	23.0	19.9	23.0		
Ta	1.42	1.53	1.34	1.55	1.47	1.52	1.41	1.62	1.38	1.26	1.42	1.47	1.27	1.38	1.25	1.45		
Th	16.80	13.10	15.80	17.00	14.00	13.70	15.10	16.90	9.73	9.94	11.90	11.10	8.83	10.90	10.70	11.90		
U	3.41	2.91	3.26	3.27	2.99	2.74	2.75	3.64	2.76	2.85	3.31	2.67	2.32	3.71	2.47	3.12		
La	48.2	50.5	47.1	56.8	52.3	56.4	38.8	52.8	49.1	50.2	55.3	55.5	47.8	54.2	47.5	54.6		
Nd	26.8	27.3	25.7	29.3	26.9	29.5	26.4	27.6	34.2	34.3	37.5	38.2	34.1	35.8	32.3	35.7		
Sm	3.82	3.96	4.04	4.31	4.07	4.50	3.82	3.96	5.69	5.68	5.65	6.29	5.81	6.27	5.14	6.15		
Eu	0.92	1.02	1.08	1.11	0.89	1.11	0.84	0.93	1.49	1.42	1.38	1.56	1.55	1.41	1.27	1.44		
Gd	3.24	3.29	3.69	3.64	3.53	3.55	3.45	3.35	5.66	5.01	5.45	5.51	5.25	5.12	4.75	5.05		
Tb	0.441	0.488	0.461	0.473	0.488	0.535	0.415	0.501	0.816	0.788	0.815	0.889	0.805	0.828	0.829	0.821		
Dy	2.06	2.36	2.18	2.32	1.94	2.18	2.19	2.26	4.02	3.97	4.48	4.55	4.03	4.08	3.96	4.22		
Ho	0.362	0.436	0.39	0.409	0.375	0.429	0.409	0.404	0.795	0.788	0.826	0.841	0.783	0.79.0	0.781	0.826		
Er	1.04	1.17	1.17	1.16	1.09	1.18	1.16	1.16	2.21	2.38	2.49	2.35	2.26	2.28	2.15	2.42		
Tm	0.161	0.170	0.171	0.174	0.171	0.177	0.154	0.178	0.352	0.338	0.349	0.362	0.337	0.358	0.328	0.353		

续表 3

样品	似斑状花岗岩												闪长岩											
	GR-Y3-1	GR-Y3-2	GR-Y3-3	GR-Y3-4	GR-Y3-5	GR-Y3-6	GR-Y3-7	GR-Y3-8	GR-Y6-1	GR-Y6-2	GR-Y6-3	GR-Y6-4	GR-Y6-5	GR-Y6-6	GR-Y6-7	GR-Y6-8								
Yb	1.03	1.20	1.09	1.15	1.07	1.13	1.13	1.12	2.27	2.25	2.29	2.34	2.21	2.21	2.08	2.32								
Lu	0.158	0.172	0.157	0.164	0.159	0.163	0.146	0.172	0.345	0.342	0.341	0.349	0.317	0.340	0.320	0.340								
Y	10.3	11.3	10.8	11.1	10.4	11.3	11.3	11.0	20.2	19.7	21.8	21.9	19.7	21.2	19.1	21.3								
Li	34.7	42.3	44.8	38.3	39.0	44.7	38.8	33.6	23.5	23.7	22.0	16.1	23.0	23.4	26.8	17.2								
Be	2.24	2.56	2.80	2.60	2.56	2.57	2.63	2.34	1.67	1.59	2.12	1.78	1.50	1.67	1.59	1.75								
Sc	5.01	5.65	5.98	5.72	5.37	5.53	5.38	5.25	14.60	14.50	14.40	14.90	14.90	14.30	14.80	13.50								
Cr	39.2	43.2	52.5	53.9	42.8	49.5	47.1	46.4	53.4	88.3	82.5	100.0	136.0	88.4	149.0	81.1								
Co	7.90	8.82	8.84	9.65	9.17	9.50	9.04	8.84	25.70	26.10	24.90	26.60	28.50	24.60	29.40	24.10								
Ni	17.5	18.2	20.6	19.2	22.3	22.8	21.9	20.1	32.7	33.3	31.4	47.3	77.7	34.5	107.0	31.1								
Cu	43.3	145.0	50.3	53.6	49.3	31.9	19.5	39.3	53.2	48.4	23.2	32.0	86.2	26.8	65.5	49.5								
Zn	21.3	23.1	20.3	24.2	26.9	23.6	22.5	23.7	78.2	78.1	88.5	84.3	81.7	79.3	82.1	77.7								
Ga	16.6	17.7	21.0	18.4	17.6	18.2	18.2	17.0	18.3	19.2	20.2	20.2	18.0	19.2	18.3	18.7								
Mo	1.080	0.597	1.170	1.020	0.614	0.562	0.372	1.310	1.170	1.630	1.720	1.430	1.430	1.170	1.120	1.390								
Cd	0.029	0.022	0.058	0.033	0.036	0.029	0.018	0.016	0.082	0.084	0.132	0.079	0.088	0.103	0.099	0.081								
In	0.010	0.014	0.014	0.010	0.013	0.007	0.009	0.014	0.047	0.043	0.052	0.049	0.048	0.045	0.046	0.050								
Sb	0.342	0.369	0.019	0.464	0.443	0.367	0.366	0.390	0.491	0.472	0.460	0.392	0.272	0.376	0.434	0.404								
Cs	5.26	6.08	5.10	6.07	5.97	6.63	5.17	5.52	3.30	2.60	4.27	5.65	3.81	3.04	2.62	4.29								
W	0.742	0.862	0.856	0.872	0.942	0.811	0.735	1.380	0.893	0.991	1.290	0.970	0.984	0.988	0.957	1.080								
Tl	0.612	0.560	0.570	0.677	0.704	0.591	0.597	0.665	0.432	0.387	0.473	0.396	0.384	0.441	0.461	0.420								
Pb	15.6	16.6	17.8	18.7	17.5	16.6	15.8	17.1	18.0	16.1	20.7	20.0	16.5	18.9	16.4	18.9								
Bi	0.199	0.676	1.320	1.130	0.386	0.256	0.102	0.168	0.120	0.111	0.155	0.137	0.304	0.123	0.149	0.152								
∑REE	175	179	174	197	179	197	159	186	199	201	221	223	196	214	193	215								
Eu/Eu*	0.80	0.86	0.86	0.86	0.72	0.85	0.71	0.78	0.80	0.81	0.76	0.81	0.86	0.76	0.79	0.79								
LREE	167	169	164	188	171	188	150	177	182	185	204	206	180	198	178	199								
HREE	8.49	9.29	9.31	9.49	8.82	9.34	9.05	9.15	16.50	15.90	17.00	17.20	16.00	16.00	15.20	16.40								
Ti/Yb	2 217	2 099	2 366	2 099	2 253	2 236	2 138	2 088	2 060	2 079	1 997	1 961	2 130	2 133	2 178	1 930								
Nb/Ta	12.75	12.81	15.22	12.84	13.20	12.76	14.26	11.91	16.16	17.30	16.90	17.35	16.85	16.67	15.92	15.86								
Rb/Sr	0.29	0.26	0.21	0.28	0.28	0.25	0.28	0.29	0.14	0.13	0.15	0.14	0.12	0.14	0.15	0.15								
La _n /Yb	46.80	42.08	43.21	49.39	48.88	49.91	34.34	47.14	21.63	22.31	24.15	23.72	21.63	24.52	22.84	23.53								

注: 主量元素单位为%; 微量元素和稀土元素单位为 10⁻⁶.

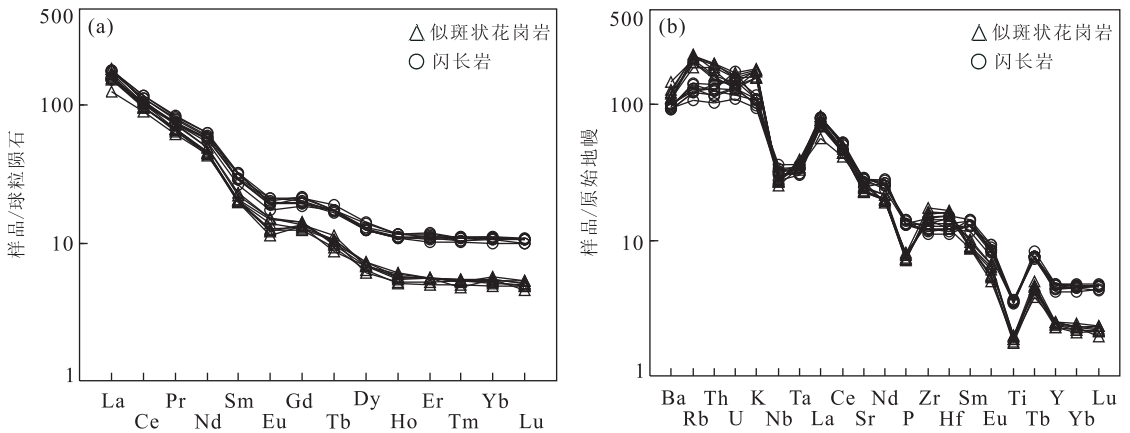


图 5 哥日卓托杂岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

图 a 据 Boynton, 1984;图 b 据 Sun and McDonough, 1989

表 4 哥日卓托似斑状花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of porphyritic granite

测点	<i>t</i> (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} (Hf)	<i>T</i> _{DM2} (Hf)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
GR-N3-1	227	0.034 827	0.001 178 063	0.282 704 974	0.000 031	-2.37	2.42	778.60	993.17	-0.96
GR-N3-2	227	0.032 923	0.000 981 160	0.282 694 081	0.000 016	-2.76	2.06	789.90	1 012.98	-0.97
GR-N3-3	227	0.026 893	0.000 850 136	0.282 567 376	0.000 013	-7.24	-2.40	964.96	1 260.91	-0.97
GR-N3-4	227	0.035 453	0.001 018 262	0.282 690 055	0.000 014	-2.90	1.92	796.36	1 021.21	-0.97
GR-N3-5	227	0.030 399	0.000 967 203	0.282 698 832	0.000 019	-2.59	2.23	782.91	1 003.51	-0.97
GR-N3-6	227	0.025 684	0.000 736 291	0.282 687 886	0.000 016	-2.97	1.88	793.48	1 023.15	-0.98
GR-N3-7	227	0.029 830	0.000 876 503	0.282 650 459	0.000 015	-4.30	0.54	849.03	1 097.94	-0.97
GR-N3-8	227	0.037 108	0.001 091 671	0.282 631 013	0.000 017	-4.99	-0.18	881.36	1 137.94	-0.97
GR-N3-9	227	0.033 516	0.000 965 924	0.282 663 415	0.000 015	-3.84	0.98	832.80	1 073.20	-0.97
GR-N3-10	227	0.033 976	0.000 980 800	0.282 648 025	0.000 015	-4.38	0.43	854.81	1 103.58	-0.97
GR-N3-11	227	0.037 791	0.001 192 679	0.282 720 995	0.000 018	-1.80	2.98	756.17	961.74	-0.96
GR-N3-12	227	0.027 231	0.000 814 808	0.282 670 349	0.000 016	-3.59	1.25	819.74	1 058.31	-0.98
GR-N3-13	227	0.036 322	0.001 099 730	0.282 679 551	0.000 015	-3.27	1.53	812.94	1 042.56	-0.97

值为 0.76~0.86. 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 5b),微量元素表现出了富集大离子亲石元素(如 K、Rb)和活泼的不相容元素(如 Th、U)的特征,相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、P、Ti).

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

似斑状花岗岩中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 567~0.282 721,ε_{Hf}(*t*)值介于-2.40~2.98, Hf 同位素单阶段模式年龄(*T*_{DM1})和二阶段模式年龄(*T*_{DM2})分别变化于 756~965 Ma 和 962~1 261 Ma 之间(表 4).

4 讨论

4.1 岩浆源区及岩石成因

4.1.1 似斑状花岗岩 哥日卓托杂岩体似斑状花

岗岩(227 Ma)和闪长岩(224 Ma)近于同时形成,可能是同源岩浆演化的结果,也可能具有不同的源区.如果二者是同源由分离结晶形成,闪长岩相对似斑状花岗岩应该显示更明显的 Eu 负异常及更低的轻稀土含量(Didier and Barbarin, 1991),但实际情况并非如此(图 5a).在反映岩浆演化方式的 MgO-FeO^T 相关图上,二者同样也不是沿着岩浆的分离结晶趋势演化,表明闪长岩和似斑状花岗岩具有不同的源区(图 6).

似斑状花岗岩富 SiO₂ (67.19%~68.82%), K₂O (3.26%~3.78%), 贫 MgO (1.51%~1.77%), MnO (0.06~0.08) 和 CaO (2.36~3.47%), 铝饱和指数 A/CNK=0.98~1.06, 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti, 反映了其壳源成因 (Mckenzie, 1989; 胡芳芳等,

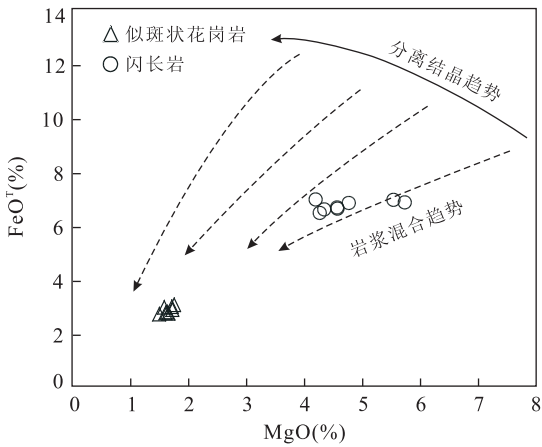


图 6 哥日卓托杂岩体的 MgO-FeO^T 图解

Fig. 6 MgO-FeO^T relation of the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

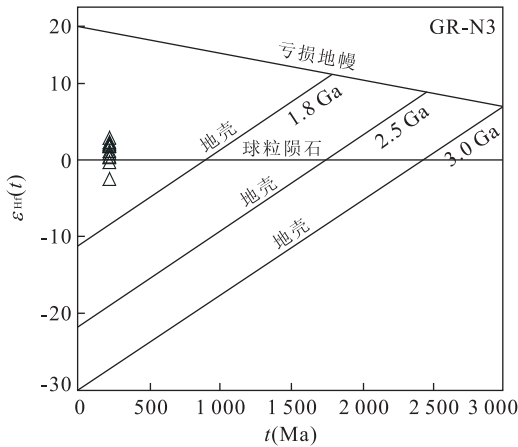


图 7 似斑状花岗岩的 Hf 同位素特征(据吴福元等, 2007)

Fig. 7 Hf isotopic compositions of porphyritic granite

2005). 岩石 Cr、Ni、Co、Sc 和 V 含量分别介于 $39.2 \times 10^{-6} \sim 53.9 \times 10^{-6}$ 、 $17.5 \times 10^{-6} \sim 22.8 \times 10^{-6}$ 、 $7.90 \times 10^{-6} \sim 9.65 \times 10^{-6}$ 、 $5.01 \times 10^{-6} \sim 5.98 \times 10^{-6}$ 和 $28.5 \times 10^{-6} \sim 46.4 \times 10^{-6}$ 之间, 显示岩石并没有与地幔发生相互作用. 岩石中岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2.40 \sim 2.98$, 锆石 Hf 同位素成分变化范围较小, 表明岩石源区均一(图 7). 结合其二阶段模式年龄 (T_{DM2}) ($962 \sim 1261$ Ma), 认为岩石源于中-新元古代陆壳部分熔融.

似斑状花岗岩具有高 Sr ($479 \sim 573 \mu\text{g/g}$), 高 Sr/Y 值 ($43.36 \sim 53.06$), 低 Yb ($1.03 \sim 1.20 \mu\text{g/g}$), 低 Y ($10.3 \sim 11.3 \mu\text{g/g}$), 判断岩石属于埃达克质岩类(图 8) (Defant and Drummond, 1990; Xu *et al.*, 2012). Eu 负异常微弱 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.71 \sim 0.86$), 表示在高压下形成 (Xiong *et al.*, 2005), 源区可能残留石榴子石、角闪石等. 有关埃达克岩成因

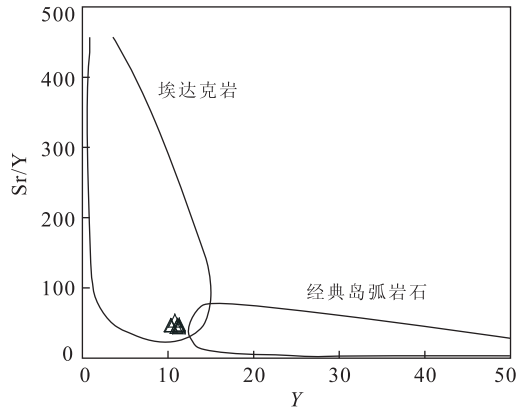


图 8 似斑状花岗岩 Sr/Y-Y 图解(Defant and Drummond, 1990)

Fig. 8 Sr/Y-Y relation of porphyritic granite

主要有以下几种模式: 俯冲板片部分熔融 (Defant and Drummond, 1990; Kay, 1978); 拆沉的下地壳熔融 (Huang *et al.*, 2008); 结晶分异作用影响 (Macpherson *et al.*, 2006); 岩浆混合作用 (Guo *et al.*, 2007); 加厚下地壳部分熔融 (Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2012).

岩石重稀土含量偏高 ($\text{HREE} = 8.5 \times 10^{-6} \sim 9.5 \times 10^{-6}$), La/Yb 比值较低 ($34.34 \times 10^{-6} \sim 49.91 \times 10^{-6}$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值很高 ($0.78 \sim 0.93$), 与板片熔融的埃达克岩有本质区别 (Defant and Drummond, 1990; Kay, 1978). 研究表明, 晚二叠世-中三叠世古特提斯洋北支的布青山-阿尼玛卿洋开始由扩张状态转变为收缩汇聚状态, 古特提斯洋北支洋壳开始由南向北朝东昆仑地块之下俯冲 (熊富浩等, 2011; Xiong *et al.*, 2012). 中三叠世古特提斯洋布青山-阿尼玛卿洋壳俯冲消减, 洋盆消失, 发生陆-陆斜向碰撞造山作用 (刘战庆等, 2011; 陈国超, 2014). 似斑状花岗岩形成于晚三叠世中期 (227 Ma), 因此排除俯冲洋壳形成的熔体与上覆地幔橄榄岩反应成因模式. 拆沉作用包括基性下地壳转变为榴辉岩, 迫使冷的、密度较大的岩石圈地幔沉入热的、浮力更大的软流圈中 (高山和金振民, 1997). 考虑到香日德巴隆地区同碰撞型花岗岩年龄为 231 Ma (Zhang *et al.*, 2011), 如此短暂的时间很难发生拆沉作用. 岩石中同样未发现可能与拆沉作用有关的榴辉岩捕虏体或者基性的残余体 (高山和金振民, 1997). 岩石 MREE 和 HREE 之间不是以上凹曲线模式分布 (图 4d), Eu/Eu^* 值为 $0.71 \sim 0.86$, 而且 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值和 SiO_2 的含量不存在明显的负相关性, 认为结晶分异过程不是控制岩浆演化的主要途径 (Macpherson *et al.*, 2006). 岩石地球

化学特征和锆石 Hf 同位素显示岩石源区为壳源,认为岩石由陆壳加厚作用引起的加厚地壳部分熔融形成(Yang *et al.*, 2012).

4.1.2 闪长岩 地壳中基性岩类(玄武质成分)的部分熔融形成化学成分偏基性的准铝质的花岗岩类(Wolf and Wyllie, 1989; Sisson *et al.*, 2005),大洋中脊玄武质岩石部分熔融只能产生 $Mg^\#$ 值小于 45 的熔体,但熔体只要与橄榄岩发生 10% 的混染便可以使熔体的 $MgO^\#$ 值从 45 上升到 55(Rapp and Watson, 1995). 哥日卓托闪长岩样品具有高 $Mg^\#$ 值(51.70~59.74)特点,显示其源区需要一种相对富镁的物质参与才能增高 $Mg^\#$ 值. 此外,基性岩浆结晶分异以具有明显的 Eu 负异常为特征,而岩石 Eu/Eu^* 值为 0.76~0.86,负 Eu 异常微弱. 考虑到 Nb、Ta 等高场强元素的明显亏损,认为源区可能残留石榴子石(张旗等,2008). 综上所述,岩石不可能是下地壳镁铁质物质直接部分熔融形成.

哥日卓托闪长岩具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常,认为岩浆源区可能有地壳物质加入,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)(McKenzie, 1989). 在岩石锆石 U-Pb 年龄中存在捕获锆石(515 Ma、510 Ma),与区域上前人研究成果一致,记录了东昆仑造山带原提特斯洋的裂解、俯冲和后碰撞事件(陆松年等,2002;张亚峰等,2010). 判断铁镁质基性岩浆未受到地壳物质的混染(或程度很少)的标志是 $Ti/Yb > 5\ 000$ (Hart, 1988);哥日卓托闪长岩 Ti/Yb 为 1 930~2 178,小于 5 000;Nb/Ta 值(15.86~17.35)小于地幔平均值 17.5(Sun and McDonough, 1989),而 Rb/Sr 值(0.12~0.15)介于地幔值 0.034 和地壳值 0.35 (Taylor and McLennan, 1995)之间. 此外,地壳物

质的特征包括高 Th、低 Nb,而地幔岩的特征有低 Th、高 Nb,如果铁镁质岩浆受到地壳混染必然会使得 Nb、Th 之间呈负相关(Muller *et al.*, 1992). 在图 9 中,显示岩石源区有壳源物质参与. 晚三叠世东昆仑地区壳幔岩浆混合广泛发育(谌宏伟等,2005;丁烁等,2011;李瑞宝,2012;陈国超,2014). 此外,哥日卓托杂岩体闪长岩发育显示快速冷却形成的针状磷灰石(Wyllie *et al.*, 1962),认为岩石为混合成因.

20 世纪 80 年代以来,国外学者提出“玄武岩底侵作用”是地壳中花岗质(长英质)岩浆形成的主要热能来源及地壳(垂向)增长的重要驱动因素(McKenzie, 1984; Tamura *et al.*, 2003). 研究显示,东昆仑地区普遍存在一期形成时代较新的幔源岩浆活动,可能是印支晚期幔源岩浆底侵事件或造山作用体制向造山后伸展体制转换的标志(罗照华等,2002;谌宏伟等,2005;高永宝等,2014). 中三叠世晚期以来古特特斯洋完全闭合,其南北两侧的巴颜喀拉地块与东昆仑地块发生碰撞(刘战庆等,2011;Zhang *et al.*, 2011;陈国超,2014). 哥日卓托闪长岩(224 Ma)略晚于似斑状花岗岩(227 Ma),应该是俯冲板片断裂,软流圈减压熔融,玄武质岩浆底侵至下地壳底部,引起下地壳物质部分熔融产生长英质岩浆并发生岩浆混合作用而形成的.

4.2 构造背景

Liegeois(1998)认为,碰撞后(post-collision)阶段是指洋盆消失和主碰撞发生之后到造山作用结束这一时段的造山过程. 后碰撞开始于一个陆内环境,主海洋已经关闭,但大陆块体之间仍然存在复杂的运动,包括块体之间的逆冲、旋转、逃逸或沿剪切带的大规模走滑、岩石圈拆沉、小型海洋板块的拉张、裂谷作用等. 哥日卓托杂岩体切割区域主造山期构

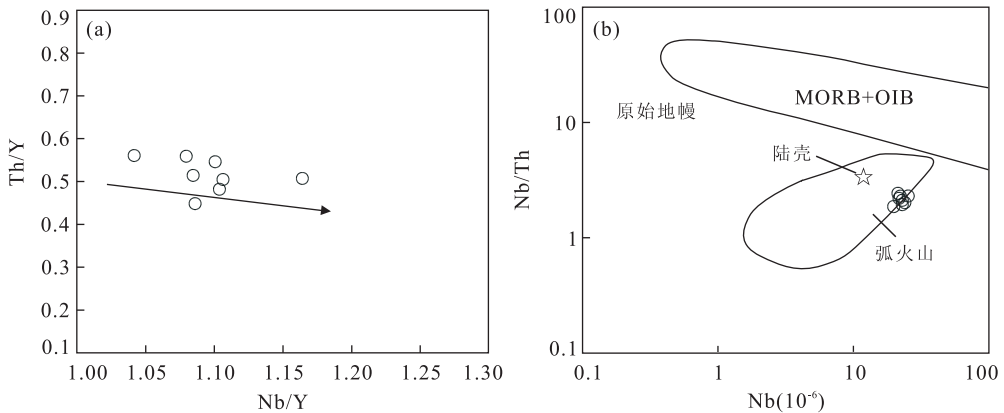


图 9 闪长岩 Nb/Y-Th/Y 图解(a)和 Nb-Th/Th 图解(b)

Fig. 9 Nb/Y-Th/Y diagram (a) and Nb-Th/Th diagram (b) for the diorite rocks

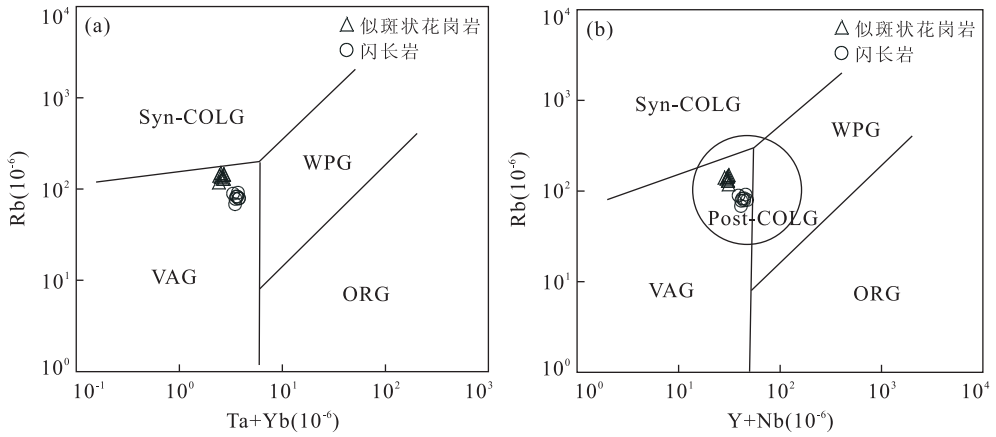


图 10 哥日卓托杂岩体的 (Ta+Yb)-Rb 图解(a)(Pearce *et al.*, 1984)和 (Y+Nb)-Rb 图解(b)(Pearce, 1996)
 Fig. 10 (Ta+Yb) vs Rb (a) and (Y+Nb) vs Rb (b) of the rocks in Gerizhuotuo complex intrusion

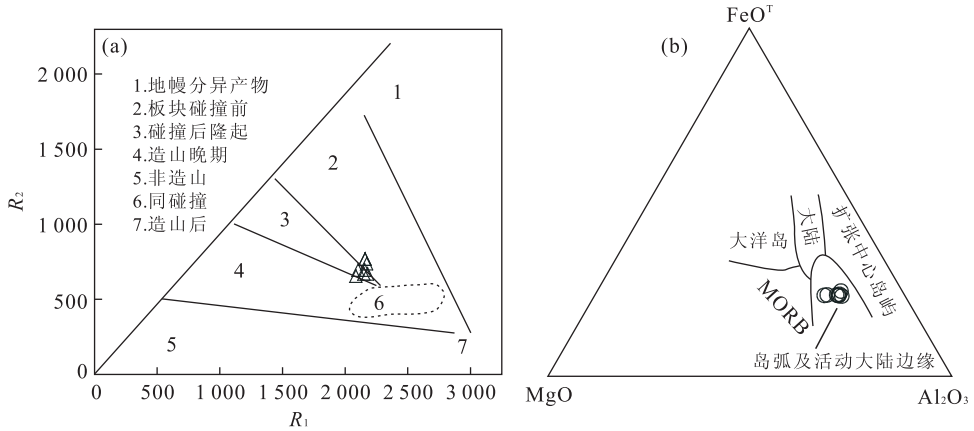


图 11 似斑状花岗岩 R_1 - R_2 判别图解(a)(Bachelor and Bowden, 1985)和闪长岩 FeO^T - MgO - Al_2O_3 判别图解(b)(Brown and Thorpe, 1984)

Fig. 11 R_1 - R_2 factor discrimination of porphyritic granite (a) and FeO^T - MgO - Al_2O_3 relations of diorite (b)

造线,说明岩体侵位时代晚于主造山期挤压收缩变形时间,从而间接地限制了后碰撞造山作用的下限. 岩石属高钾钙碱性系列,与后碰撞阶段形成的高钾钙碱性岩浆作用相一致. 在 (Ta+Yb)-Rb 和 (Y+Nb)-Rb 图解上,大致位于同碰撞和板内交界部位(图 10). 似斑状花岗岩在 R_1 - R_2 图解上,位于同碰撞向板块后碰撞隆起部位(图 11a);闪长岩在 FeO^T - MgO - Al_2O_3 图解上,位于岛弧及活动大陆边缘 (pearce 的术语是造山)(图 11b).

在东昆仑地区发现大量与板块俯冲作用有关的陆缘弧型花岗岩及基性岩墙群(图 1b),包括形成于活动大陆边缘构造环境的东昆仑造山带东段哈拉苏吐花岗岩体(256 Ma)、香加南山岩体(247 Ma)(陈国超,2014);东昆仑诺木洪花岗岩体(261 Ma)(Xiong *et al.*, 2012);下大武和玛积雪山地区也报道相同时间的弧火山岩(杨经绥等,2005);东昆仑造山带白日其

利地区发育有一套基性岩墙群(251 Ma)(熊富浩等, 2011). 由于布青山-阿尼玛卿洋的向北俯冲,东昆仑地区在这一时期发育安第斯型弧岩浆岩,从阿尔金断裂向东一直延伸到哇洪山断裂,形成规模巨大的岩浆岩带,构成东昆仑岩浆岩带的主体.

研究表明,中三叠世晚期-晚三叠世早期东昆仑地区巴颜喀拉地块和东昆仑地块处于陆陆碰撞阶段. 中三叠世晚期以来,以布青山构造混杂岩带早石炭世哈尔郭勒蛇绿岩(刘战庆等,2011)为代表的古特特斯洋完全闭合,导致其南北两侧的巴颜喀拉地块与东昆仑地块发生碰撞. 香日德巴隆地区的钾长花岗岩侵位年龄为 231 Ma,被认为同碰撞环境上地壳部分熔融的产物(Zhang *et al.*, 2011). 通过对东昆仑地区花岗岩年龄的统计,在 237~225 Ma 期间,有报道的岩浆活动相对较少,说明在这一时期东昆仑地区处于巴颜喀拉地块和东昆仑地块的陆陆碰

撞阶段。此外,中三叠统希里可特组海陆过渡相沉积是东昆仑地区由俯冲向碰撞转变的沉积记录;同时期东昆仑地区产生了广泛的地壳浅表构造层次、以原生层理(S_0)为变形面的、以弯滑褶皱作用为主导的褶皱变形,局部地段逆冲断裂尤其发育,铸就了东昆仑地区主期构造变形序列(D_2),并造区域断裂发生左行韧性走滑、东大滩同构造花岗岩的侵位以及阿尼玛卿段大型逆冲推覆构造(许志琴等,2006)。

哥日卓托杂岩体侵位时代(227 Ma、224 Ma)与东昆仑东段南缘洪水川地区具 adakite 岩石特征的和勒冈希里克特花岗岩体(225 Ma)侵位时代近于一致,切割了区域主造山期构造线,说明岩体侵位时代晚于主造山期挤压收缩变形时间,从而间接地限制了后碰撞造山作用的下限,标志东昆仑地区在225 Ma 左右进入后碰撞阶段(陈国超,2014)。沉积方面,八宝山组为一套陆相碎屑岩沉积组合,局部夹有陆相酸性火山岩,与下覆地层呈角度不整合接触关系,与上覆早侏罗世羊曲组之间呈平行不整合接触关系,说明东昆仑地区已经完全进入到后碰撞演化阶段。东昆仑东段南缘洪水川地区科科鄂阿龙岩体(218±1 Ma)具有 adakite 质岩石特征,形成于后碰撞环境;东昆仑东段乌图美仁地区那陵郭勒河花岗岩体形成时代为 225~214 Ma,地球化学特征显示其形成于造山晚期(常有英等,2009);210 Ma 左右各种成因的岩浆岩,显示在这一时期区域处于后碰撞环境(朱云海等,2003;童海奎等,2004;丁烁等,2011)。

5 结论

(1)哥日卓托杂岩体似斑状花岗岩岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 227±1 Ma,属晚三叠世中期;闪长岩年龄为 224±4 Ma,属晚三叠世中期。

(2)似斑状花岗岩具有埃达克岩类性质,源于加厚下地壳部分熔融;闪长岩为混合成因。

(3)哥日卓托杂岩体形成于古特特斯洋闭合后碰撞环境,并且标志同碰撞到后碰撞的构造体制转换。

References

Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.

Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust.

Nature, 362: 144-146.

Bachelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrologic Interpretation of Granitoid Rocks Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48: 43-55.

Bian, Q. T., Luo, X. Q., Chen, H. H., et al., 1999. Zircon U-Pb Age of Granodiorite-Tonalite in the A'nyemaqen Ophiolitic Belt and Its Tectonic Significance. *Chinese Journal of Geology*, 34(4): 420-426 (in Chinese with English abstract).

Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, 63-114.

Brown, G. C., Thorpe, R. S., Webb, P. C., 1984. The Geochemical Characteristics of Granitoids in Contrasting Arcs and Comments on Magma Sources. *Journal of the Geological Society*, 141: 411-426.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1982. Regional Geology of Qinghai Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chang, Y. Y., Li, J. F., Zhang, J., et al., 2009. Study of Environment and Chronology of Late Triassic Intrusive Rocks in East Nalingge River of Qinghai. *Northwestern Geology*, 42(1): 57-65 (in Chinese with English abstract).

Chen, G. C., 2014. Petrology, Genesis and Geological Significance of Late Paleozoic-Early Mesozoic Granitoids in East Kunlun Orogen (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

Chen, H. W., Luo, Z. H., Mo, X. X., et al., 2005. Underplating Mechanism of Triassic Granite of Magma Mixing Origin in the East Kunlun Orogenic Belt. *Geology in China*, 32(3): 385-395 (in Chinese with English abstract).

Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347: 662-665.

Didier, J., Barbarin, B., 1991. Enclaves and Granite Petrology. *Development in Petrology*, 13, Amsterdam.

Ding, S., Huang, H., Niu, Y. L., et al., 2011. Geochemistry, Geochronology and Petrogenesis of East Kunlun High Nb-Ta Rhyolites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 3603-3614 (in Chinese with English abstract).

Fisher, C. M., Vervoot, J. D., Hanchar, J. M., 2014. Guidelines for Reporting Zircon Hf Isotopic Data by LA-MC-ICPMS and Potential Pitfalls in the Interpretation of These Data. *Chemical Geology*, 363: 125-133.

Gao, S., Jin, Z. M., 1997. Delamination and Its Geodynamical Significance for the Crust-Mantle Evolution. *Geological*

- Science and Technology Information*, 16(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. B., Li, W. Y., Qian, B., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of the Granitic Rocks Related with Iron Mineralization in Yemaquan Deposit, East Kunlun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1647—1665 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Nakamura, E., Fan, W. M., et al., 2007. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing; Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661—692.
- Hart, S. R., 1988. Heterogeneous Mantle Domains; Signature Genesis and Mixing Chronologies. *Earth and Planetary Science Letters*, 90: 273—296.
- Hu, F. F., Fan, H. R., Yang, J. H., et al., 2005. Magma Mixing for the Origin of Granodiorite; Geochemical, Sr-Nd Isotopic and Zircon Hf Isotopic Evidence of Dioritic Enclaves and Host Rocks from Changshannan Granodiorite in the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 569—586 (in Chinese with English abstract).
- 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: 1391—1399.
- Huang, F., Li, S. G., Dong, F., et al., 2008. High-Mg Adakitic Rocks in the Dabie Orogen, Central China; Implications for Foundering Mechanism of Lower Continental Crust. *Chemical Geology*, 255: 1—13.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523—548.
- Janne, B. T., Catherine, C., Frances, A., 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: 248—260.
- Jiang, C. F., Zhu, S. N., 1992. Introduction to Tectonic Migration Theory. *Acta Geoscientia Sinica*, 25: 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Kay, R. W., 1978. Aleutian Magnesian Andesite; Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117—132.
- 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, Z. C., Pei, X. Z., Liu, Z. Q., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Gerizhuotuo Diorites from the Buqingshan Tectonic Mélange Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Their Geologic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1089—1103 (in Chinese with English abstract).
- Liegeois, J. P., 1998. Preface; Some Words on Post-Collisional Magmatism. *Lithos*, 45: 15—17.
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., 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*, 51(1—2): 537—571.
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43.
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011. Early Paleozoic Intermediate-Acid Magmatic Activity in Bairiqiete Area along the Buqingshan Tectonic Mélange Belt on the Southern Margin of East Kunlun; Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150—1167 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Wang, H. C., Li, H. K., et al., 2002. Redefinition of the 'Dakendaban Group' on the Northern Margin of the Qaidam Basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19—23 (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*, 4: 1—70.
- Luo, Z. H., Ke, S., Cao, Y. Q., et al., 2002. Late Indosinian Mantle-Derived Magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292—297 (in Chinese with English abstract).
- MacPherson, C. G., Dreher, S. T., 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.
- McKenzie, D., 1984. A Possible Mechanism for Epeirogenic Uplift. *Nature*, 307: 616—618.
- McKenzie, D. P., 1989. Some Remarks on the Movement of Small Melt Fractions in the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95: 53—72.
- Muller, D., Rock, N. M. S., Croves, D. L., 1992. Geochemical Discrimination between Shoshonitic and Potassic Volcan-

- ic Rocks from Different Tectonic Settings; A Pilot Study. *Mineralogy and Petrology*, 46: 259—289.
- Mungall, J. E. , 2002. Roasting the Mantle; Slab Melting and the Genesis of Major Au and Au-Rich Cu Deposits. *Geology*, 30: 915—918.
- Pearce, J. A. , 1996. Sources and Setting of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120—125.
- Pearce, J. A. , Harris, N. B. W. , Tindle, A. G. , 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956—983.
- Pei, X. Z. , 2001. Geological Evolution and Dynamics of the Miaulue-A'nyemaqen Tectonic Zone, Central China (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Qi, L. , Hu, J. , Gregoire, D. C. , 2000. Determination of Trace Elements in Granites by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507—513.
- Rapp, R. P. , Watson, E. B. , 1995. Dehydration Melting of Metabasalt an 8—32 kbar; Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931.
- Sisson, T. W. , Ratajeski, K. , Hankins, W. B. , et al. , 2005. Voluminous Granitic Magmas from Common Basaltic Sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(5): 635—661.
- Sun, F. Y. , Chen, G. H. , Chi, X. G. , et al. , 2003. Study of Metallogenic Regularity and Prospecting Direction in the East Kunlun Metallogenic Belt in Xinjiang-Qinghai. Geological Survey Project Research Report of China Geological Survey, Changchun.
- Sun, S. S. , McDonough, W. F. , 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implication for Mantle Composition and Processes. In: Saunder, A. D. , Norry, M. J. , eds. , Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society Special Publication* , 2: 313—345.
- Tamura, Y. , 2003. Andesites and Dacites from Daisen Volcano, Japan; Partial-to-Total Remelting of an Andesite Magma Body. *Journal of Petrology*, 44 (12): 2243—2260. doi:10. 1093/petrology/egg076
- Taylor, S. R. , McLennan, S. M. , 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265.
- Thiéblemont, D. , Stein, G. , Lescuyer, J. L. , 1997. Epithermal and Porphyry Deposits; The Adakite Connection. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 325: 103—109.
- Tong, H. K. , Wang, S. L. , Song, S. C. , et al. , 2004. Study on Volcanic Rocks and Their Structural Environment of Late Triassic Epoch in Chachaxiangka Area in Qinghai Province. *Earthquake Research in Plateau*, 16 (2): 38—48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. , Wyman, D. A. , Xu, J. F. , et al. , 2008. Eocene Melting of Subducting Continental Crust and Early Uplifting of Central Tibet; Evidence from Central-Western Qiangtang High-K Calc-Alkaline Andesites, Dacites and Rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272 (1—2): 158—171. doi:10. 1016/j. epsl. 2008. 04. 034
- Wang, Q. , Wyman, D. , Li, Z. X. , et al. , 2010. Eocene North-South Trending Dikes in Central Tibet; New Constrains on the Timing of East-West Extension with Implications for Early Plateau Uplifting? *Earth and Planetary Science Letters*, 298(1—2): 204—216.
- Wang, Q. , Wyman, D. A. , Xu, J. F. , et al. , 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China; Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609—2636.
- Wang, Q. , Zhao, Z. H. , Xiong, X. L. , et al. , 2001. Melting of the Underplated Basaltic Lower Crust; Evidence from the Shaxi Adakitic Sodic Quartz Diorite-Porphyrites, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30 (4): 353—362 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. , Deng, J. F. , Ji, G. Y. , 2004. A Perspective on the Geotectonic Setting of Early Cretaceous Adakite-Like Rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and Its Significance for Copper-Gold Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (2): 297—314 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. , Zhang, Q. , Qian, Q. , 2000. Adakite: Geochemical Characteristics and Tectonic Significance. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251—256 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B. , Huang, J. C. , Luo, M. S. , et al. , 1997. Paleo-Ocean Evolution of the Southern Eastern Kunlun Orogenic Belt during Hercy-Early Indosinian. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22 (4): 369—372 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, B. L. , 1991. The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Compositions; Trace Element and Isotopic Constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381—397.
- Wolf, M. B. , Wyllie, P. J. , 1989. The Formation of Tonalitic Liquids during the Vapor-Absent Partial Melting of Amphibolite at 10 kbar. *EOS*, 70: 506—518.
- Wu, F. Y. , Li, X. H. , Zheng, Y. F. , et al. , 2007. Lu-Hf Iso-

- topic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie, P. J., Cox, K. G., Biggar, G. M., 1962. The Habit of Apatite in Synthetic Systems and Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, 3(2):238—243.
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhagn, 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 Qinhai-Tibet Plateau: Implications for Magma Mixing during Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104:211—223.
- Xiong, X. L., Adam, T. J., Green, T. H., 2005. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning during Partial Melting of Hydrous Basalt: Implications for TTG Genesis. *Chemical Geology*, 218:339—359.
- Xu, H. J., Ma, C. Q., Zhang, J. F., et al., 2012. Early Cretaceous Low-Mg Adakitic Granites from the Dabie Orogen, Eastern China: Petrogenesis and Implications for Destruction of the Over-Thickened Lower Continental Crust. *Gondwana Research*, 23:190—207.
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2006. The Early Palaeozoic Terrene Framework and the Formation of the High-Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) Metamorphic Belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12):1793—1806 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Sun, J. F., Zhang, J. H., et al., 2012. Petrogenesis of Late Triassic Intrusive Rocks in the Northern Liaodong Peninsula Related to Decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf Isotope Evidence. *Lithos*, 153:108—128.
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Li, H. B., et al., 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—380 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4):339—342 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H., Gao, S., Liu, X., 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.
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Trace Element of Zircon of Cenozoic Intrusion in NE China by Laser-Ablation Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry. *Chinese Science Bulletin*, 48(14):1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Dong, Y. P., Lai, S. C., et al., 2003. Mianlue Structural Belt and Mianlue Suture at Southern Margin of Qinling-Dabie Orogen. *Science in China (Series D)*, 33(12):1121—1135 (in Chinese).
- Zhang, Q., Wang, Y. L., Jin, W. J., et al., 2008. Criteria for the Recongnition of Pre-, Syn- and Post-Orogenic Granitic Rocks. *Geological Bulletin of China*, 27(1):1—18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite at the Kekesha Area of Dulan County, Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1):80—85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. J., Klemperer, S., Bai, Z. M., et al., 2011. Crustal Structure of the Paleozoic Kunlun Orogeny from an Active-Source Seismic Profile between Moba and Guide in East Tibet, China. *Gondwana Research*, 19:994—1007.
- Zhu, Y. H., Zhu, Y. S., Lin, Q. X., et al., 2003. Characteristics of Early Jurassic Volcanic Rocks and Their Tectonic Significance in Haidewula, East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6):653—659 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 边千韬, 罗小全, 陈海泓, 等, 1999. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗岩—英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义. *地质科学*, 34(4):420—426.
- 常有英, 李建放, 张军, 等, 2009. 青海那陵郭勒河东晚三叠世侵入岩形成环境及年代学研究. *西北地质*, 42(1):57—65.
- 陈国超, 2014. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代花岗岩质岩石特征、成因及地质意义(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. *中国地质*, 32(3):385—395.

- 丁烁,黄慧,牛耀玲,等,2011. 东昆仑高 Nb-Ta 流纹岩的年代学、地球化学及成因. 岩石学报,27(2): 3603—3614.
- 高山,金振民,1997. 拆沉作用(delamination)及其壳—幔演化动力学意义. 地质科技情报,16(1): 1—8.
- 高永宝,李文渊,钱兵,等,2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. 岩石学报,30(6): 1647—1665.
- 胡芳芳,范宏瑞,杨进辉,等,2005. 胶东文登长山南花岗闪长岩体的岩浆混合成因:闪长质包体及寄主岩石的地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据. 岩石学报,21(3): 569—586.
- 姜春发,朱松年,1992. 构造迁移论概述. 中国地质科学院院报,25: 1—14.
- 李瑞宝,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.
- 李佐臣,裴先治,刘战庆,等,2013. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带哥日卓托闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义. 地质学报,87(8): 1089—1103.
- 刘战庆,裴先治,李瑞宝,等,2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动:来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据. 中国地质,38(5): 1150—1167.
- 陆松年,王惠初,李怀坤,等,2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. 地质通报,21(1): 19—23.
- 罗照华,柯珊,曹永清,等,2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 地质通报,21(6): 292—297.
- 裴先治,2001. 勉略—阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征(博士学位论文). 西安:西北大学.
- 青海省地质矿产局,1982. 青海省区域地质志. 北京:地质出版社.
- 孙丰月,陈国华,迟效国,等,2003. 新疆—青海东昆仑成矿带成矿规律和找矿方向综合研究. 长春:中国地质调查局地质调查项目科研报告.
- 童海奎,王树林,宋生春,2004. 青海省查查香卡地区晚三叠世火山岩岩石学及其构造环境. 高原地震,16(2): 38—48.
- 王强,赵振华,熊小林,等,2001. 底侵玄武质下地壳的熔融:来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学,30(4): 353—362.
- 汪洋,邓晋福,姬广义,2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报,20(2): 297—314.
- 王焰,张旗,钱青,2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学,35(2): 251—256.
- 王永标,黄继春,骆满生,等,1997. 海西—印支早期东昆仑造山带南侧古海洋盆地的演化. 地球科学——中国地质大学学报,22(4): 369—372.
- 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,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 锆石定年,元素和 Sr-Nd-H 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,2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. 地质学报,80(12): 1793—1806.
- 杨经绥,许志琴,李海兵,等,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—380.
- 殷鸿福,张克信,1997. 东昆仑造山带的一些特点. 地球科学——中国地质大学学报,22(4): 339—342.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,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.
- 张国伟,董云鹏,赖绍聪,等,2003. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学,33(12): 1121—1135.
- 张旗,王元龙,金惟俊,等,2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报,27(1): 1—18.
- 张亚峰,裴先治,丁仁平,等,2010. 东昆仑都兰可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义. 地质通报,29(1): 80—85.
- 朱云海,朱耀生,林启祥,等,2003. 东昆仑造山带海德乌拉一带早侏罗世火山岩特征及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报,28(6): 653—659.