

· 专题研究 ·

冈底斯中段阿木雄杂岩体岩石成因及地质意义

夏文杰^{1,2}, 杨竹森², 官玮琦¹, 张霖原³

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 冈底斯南缘发育大量的岩浆岩, 前人对这条岩浆岩带东段的研究完善了冈底斯南缘的大地构造框架和岩石圈结构及演化理论体系, 而关于冈底斯南缘中段岩浆作用的研究相对较少。本文对中段阿木雄杂岩体的角闪辉长岩和黑云二长花岗岩进行了详细的岩石学、年代学及地球化学研究, 以期阐明岩浆成因并探究岩浆源区深部地质过程。阿木雄杂岩体中黑云二长花岗岩和角闪辉长岩锆石 U-Pb 年龄均为 49 Ma, 属于始新世同期岩浆作用产物。地球化学特征显示黑云二长花岗岩属于 I 型高钾钙碱性花岗岩, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具低正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-0.2 \sim +2.6$), Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 为 1 136 ~ 393 Ma; 角闪辉长岩主量元素特征属于典型的辉长岩, $\text{Mg}^\#$ 值接近于原始的玄武质岩浆, 稀土元素配分曲线平缓右倾, 无 Eu 亏损, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有高正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+5.1 \sim +16.8$) 和年轻的 t_{DM}^{C} 年龄 (798 ~ 46 Ma)。分析后认为角闪辉长岩源于受过板片流体交代的亏损地幔, 而黑云二长花岗岩源于新生地壳的部分熔融并有少量古老地壳贡献, 且岩浆经过一定程度的分异作用。结合前人和本文研究认为该区的古老地壳物质来自于古老的拉萨地块, 并通过对比同时期冈底斯岩浆岩带的岩浆作用, 认为阿木雄杂岩体岩浆作用的主要诱发机制可能为北向俯冲的新特提斯洋板片断离。

关键词: 锆石 Hf 同位素; 岩石成因; 壳幔相互作用; 阿木雄杂岩体; 冈底斯中段南部

中图分类号: P588.12; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)02-0141-18

The petrogenesis of Amuxiong gabbro-granite complex in the middle segment of Gangdise belt

XIA Wen-jie^{1,2}, YANG Zhu-sen², GUAN Wei-qi¹ and ZHANG Lin-yuan³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Large quantities of magmatic rocks are developed on the southern margin of Gangdise belt. Previous studies mainly focused on the eastern part of this magmatic rock belt, which completed the theory of the tectonic framework and lithospheric structure as well as the evolution of the southern margin of the Gangdise belt. The Amuxiong complex is in the middle part of the magmatic rock belt on the southern margin of the Gangdise belt. The authors described zircon U-Pb geochronology, zircon Hf isotope and whole-rock geochemical analyses of hornblende gabbro and biotite monzonitic granite of the Amuxiong complex, discussed the emplacement order of these two types of magma, and clarified the genesis of magma and the hypogene geological process of the magma source area. The zircon U-Pb dating results of the biotite monzonitic granite and the hornblende gabbro are both at 49 Ma, suggesting magmatism of the Eocene period. The biotite monzonitic granite is I-type calc-alkaline granite, characterized by

收稿日期: 2019-05-13; 接受日期: 2020-02-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2016YFC0600300); 中国地质调查局地质调查项目(DD20179172)

作者简介: 夏文杰(1995-), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, E-mail: xblxwj@163.com; 通讯作者: 杨竹森(1964-), 男, 博士, 研究员, 长期从事矿床学及矿床地球化学研究, E-mail: yangzhusen@vip.sina.com。

enrichment of the large ion lithophile elements (LILE), and depletion of the high field strength elements (HFSE), with the small positive $\varepsilon\text{Hf}(t)$ value of $-0.2 \sim +2.6$ and the Hf isotopic crustal model age t_{DM}^{C} of $1\,136 \sim 393$ Ma, suggesting that this hornblende gabbro belongs to typical gabbro. The rare earth element patterns show a gentle right wing, with very slight negative Eu anomalies, whereas the trace element pattern shows the enrichment of LILE and depletion HFSE, with the high positive $\varepsilon\text{Hf}(t)$ value of $+5.1 \sim +16.8$ and the young t_{DM}^{C} age of $798 \sim 46$ Ma. The analytical results suggest that the hornblende gabbro was derived from the depleted mantle that had undergone lamellar fluid replacement, and that, after some differentiation, the magma of monzonite was derived from partial melting of juvenile lower crust and a small amount of old continental crust. There have been some disputes about the origin of the ancient materials in this area. Based on the analysis of previous results and the characteristics of magmatic rocks in this study, the authors hold that the contribution of the ancient materials came from the old Central Lhasa subterranean. By comparing the magmatism of the Gangdise magmatic belt in the same period, it is concluded that the main inducing mechanism of the magmatism of the Amuxiong complex might have been plate break off.

Key words: zircon Hf isotope; petrogenesis; crust-mantle interaction; Amuxiong complex; the southern middle segment of Gangdise belt

Fund support: Key Project of National Key Research and Development Plan of China (2016YFC0600300); Project of China Geological Survey (DD20179172)

青藏高原的形成经历了羌塘、拉萨等地块从冈瓦纳大陆裂解、向北漂移与碰撞拼贴等一系列过程,最终以印度大陆与亚洲大陆的陆陆碰撞而终结,它以连续发育并完好保存的大陆聚合过程、清楚明确的板块边界、各种标志性的地质记录以及规模的宏大的成矿事件成为研究大陆动力学、碰撞造山与成矿作用的最佳地区(Yin and Harrison, 2000; 侯增谦等, 2008; Hou *et al.*, 2009; 许志琴等, 2011; Zhu *et al.*, 2013)。伴随新生代印亚陆陆碰撞这一过程,拉萨地块内发生了强烈的岩浆活动,集中形成了西藏80%的岩浆岩(莫宣学等, 2005; Zhu *et al.*, 2011),其中以拉萨地块南部的冈底斯岩浆岩带规模最为宏大(Mo *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2009, 2018)。

冈底斯岩浆岩带位于拉萨地体南部,沿雅鲁藏布江缝合带北侧近东西平行展布,主要由南部以花岗岩类为主要组成的岩基带和北部以林子宗群为主要组成的火山岩带组成(莫宣学等, 2005; Chung *et al.*, 2005; Wen *et al.*, 2008)。大量研究结果表明岩浆活动从晚三叠世(约210 Ma)(Zhu *et al.*, 2018)一直持续到中新世(约13 Ma),其中,古新世—始新世(65~41 Ma)时期岩浆活动最为强烈,并在52 Ma左右达到高峰(莫宣学等, 2003; 侯增谦等, 2006a; Ji *et al.*, 2009)。前人对带中古新世—始新世岩浆岩特别是基性岩浆岩的岩石成因及岩浆起源与演化等方面的研究,揭示了印度—亚洲大陆碰撞过程及深部壳幔相互作用过程(江万等, 1998; 莫

宣学等, 2003, 2005; 董国臣等, 2006, 2008; 纪伟强等, 2009; Ji *et al.*, 2009; 孟元库等, 2018),认为已俯冲的新特提斯洋壳板片发生了回卷并在53 Ma与印度大陆断离(Zhu *et al.*, 2015, 2018),同时发生了幔源基性岩浆底侵与地壳增厚(Mo *et al.*, 2007, 2009; Wang *et al.*, 2015)以及印度大陆岩石圈的撕裂(侯增谦等, 2006b)。但是,以往的研究特别是对基性岩浆岩的研究主要集中在冈底斯岩浆岩带的东段,对冈底斯带中段和西段的研究较少,限制了现有认识向西的推广。

笔者近年在冈底斯岩浆岩带中段昂仁县阿木雄一带工作,于始新世花岗岩岩基中发现同时侵位的辉长岩岩株,并在两者过渡带发现有细粒闪长岩出露,构成花岗岩—辉长岩杂岩体,于是对其中的花岗岩和辉长岩进行了岩石学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素地球化学研究,并在此基础上探讨了二者的岩浆源区及岩石成因,阐明了其构造背景和深部动力学过程,以期对揭示冈底斯岩浆岩带中段始新世岩浆活动的深部壳幔作用特征提供有益帮助。

1 地质背景与样品特征

青藏高原从北向南包括松潘—甘孜、北羌塘、南羌塘、拉萨、喜马拉雅地块和分割其间的金沙江、龙木错—双湖、班公湖—怒江、雅鲁藏布江缝合带(Yin

and Harrison, 2000), 其中拉萨地块以南部的洛巴堆-米拉山断裂带(LMF)和北部的狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带(SNMZ)为界, 分为南拉萨、中拉萨和北拉

萨3个次级地块(Zhu *et al.*, 2009, 2011, 2013), 阿木雄辉长岩-花岗岩杂岩体即位于南拉萨次级地块中段南部(图1a)。

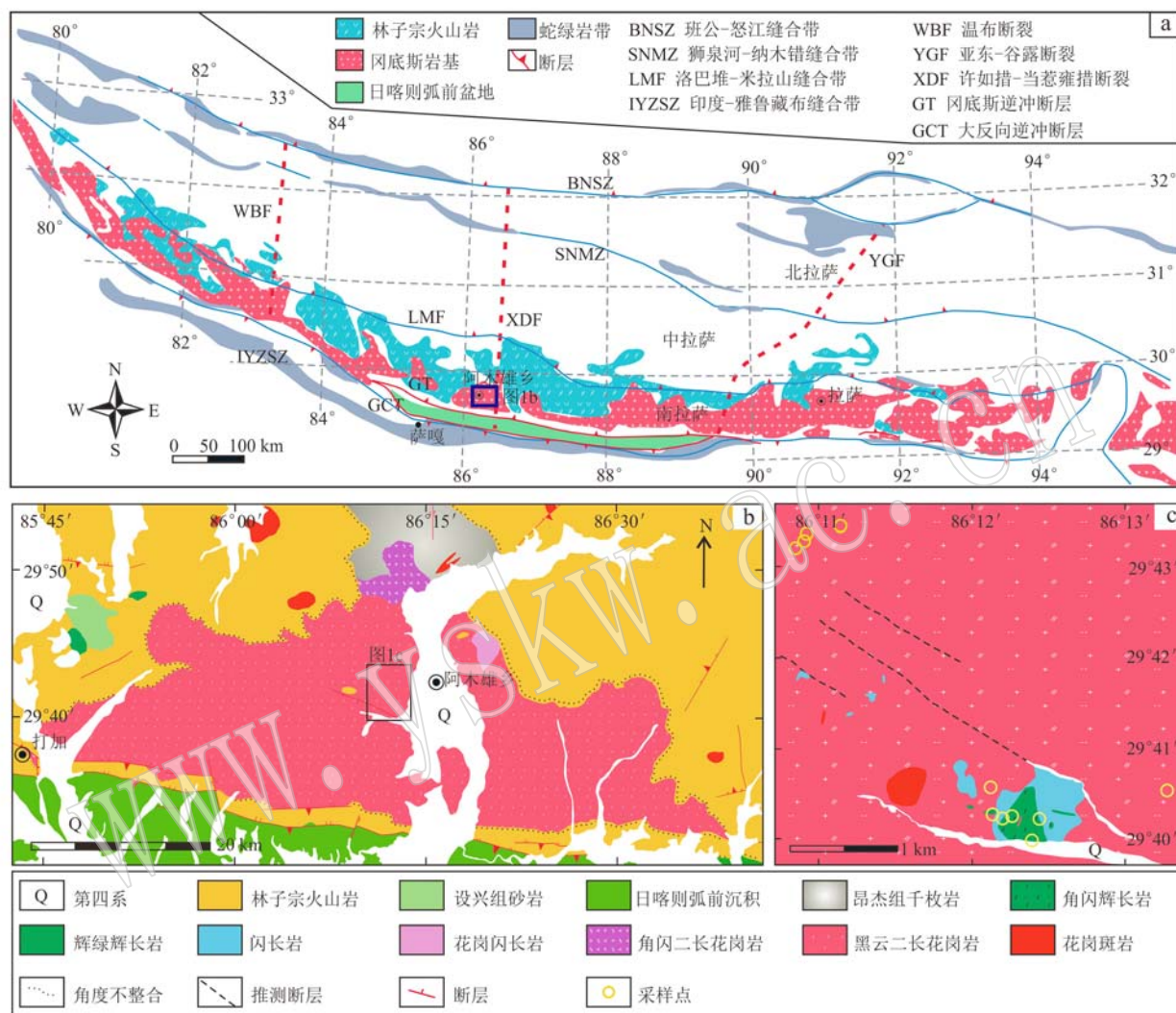


图1 冈底斯岩基分布图[a, 据Zhu等(2018)修改]、阿木雄杂岩体地质图[b, 据张振利等(2003)^①修改]和研究区地质图(c)

Fig. 1 Regional geological map of Gangdise batholith (a, modified after Zhu *et al.*, 2018), geological map of Amuxiong batholith (b, modified after Zhang Zhenli *et al.*, 2003)^① and geological map of the study area (c)

南拉萨次级地块东段和西段具有幔源玄武质岩浆底侵形成的新生下地壳, 中段具有被幔源岩浆强烈改造的古老下地壳(Hou *et al.*, 2015), 其上发育规模巨大的冈底斯岩岩浆带(图1a), 局部出露石炭系-二叠系海相碎屑岩和碳酸盐岩(中段)、侏罗系-白垩系弧火山-沉积岩系(东段)以及上侏罗统-下白垩统则弄群火山-沉积岩系和下白垩统捷嘎组碳酸盐岩(西段)。冈底斯岩岩浆带主体包括南部的大规

模同碰撞花岗质岩基带和北部的以林子宗群中酸性火山岩为代表的巨厚钙碱性火山岩带(莫宣学等, 2003, 2005, 2009; 侯增谦等, 2006a; Chung *et al.*, 2005; Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2011), 岩浆活动从晚三叠世(约205 Ma)到中新世(18~13 Ma), 其中在古新世-始新世(65~41 Ma)最为剧烈, 由已俯冲的新特提斯洋壳板片回卷并在53 Ma左右断离引起(Zhu *et al.*, 2015, 2018; 孟元

① 张振利, 田立富, 范永贵, 等. 2003. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告桑桑区幅.

库等, 2018)。冈底斯岩基带紧邻南侧的雅鲁藏布江缝合带或日喀则弧前盆地, 主要由二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等构成的复合式岩基组成(董国臣等, 2008; Ji *et al.*, 2009; 莫宣学等, 2009; 邱检生等, 2015; 孟元库等, 2018), 在南缘与南北向裂谷带交切地段还发育有基性小岩体带, 主要岩性为辉长苏长岩、角闪辉长岩、辉石岩等(董国臣等, 2008), 与平行于雅鲁藏布江蛇绿岩带以北的航磁异常带相对应(熊盛青等, 2001)。花岗质岩基中常见有暗色镁铁质包体, 被认为是岩浆混合作用的产物(江万等, 1998; 董国臣等, 2006, 2008)。岩基中基性岩和中酸性岩的 Sr-Nd 同位素和 Hf 同位素组成均表明岩浆整体来自于亏损源区, 并存在一定古老地壳物质的贡献(莫宣学等, 2005; Ji *et al.*, 2009)。

阿木雄辉长岩-花岗岩杂岩体位于日喀则地区昂仁县阿木雄乡, 处于南拉萨次级地块中段南部, 当惹雍错-许如错南北向裂谷南端。该杂岩体主要岩性为黑云二长花岗岩, 呈岩基形式侵入于下二叠统昂杰组板岩和古新统-始新统林子宗群火山岩中, 出露面积约 820 km²(图 1b), 另有少量闪长岩、角闪辉长岩、花岗斑岩和花岗闪长岩呈小岩株侵入于黑云二长花岗岩中(图 1c)。闪长岩与黑云二长花岗岩间界线截然, 但冷凝边和烘烤边不发育, 显示脉动侵入接触关系; 角闪辉长岩侵位于闪长岩岩株内, 具有中部粒度粗(达 1.5 cm)、边部粒度细(4~5 mm)的特征, 与闪长岩间界线过渡, 显示涌动侵入接触关系。采样区域南距 219 国道约 29 km, 采集了角闪辉长岩和黑云二长花岗岩样品(图 1c、表 1)。

表 1 阿木雄杂岩体样品特征和分析方法
Table 1 Characteristics and analytical methods for Amuxiong complex samples

岩性	样品号	纬度	经度	样品特征	分析测试项目
角闪辉长岩	SMC16-20	29°40'4.00"	86°12'24.00"	粗粒结构, 粒径 6~8 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析
	SMC15-4-2	29°40'4.63"	86°12'5.81"	中粒结构, 粒径 2~4 mm, 角闪石 45%, 斜长石 50%, 少量石英和正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-5-1	29°40'3.59"	86°12'12.38"	粗粒结构, 粒径 6~8 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-5-2	29°40'3.59"	86°12'12.38"	粗粒结构, 粒径 6~8 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-5-3	29°40'3.59"	86°12'12.38"	粗粒结构, 粒径 6~8 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-6-1	29°40'3.60"	86°12'14.24"	粗粒结构, 粒径 6~10 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-6-2	29°40'3.60"	86°12'14.24"	粗粒结构, 粒径 6~10 mm, 角闪石 50%, 斜长石 45%, 少量正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-8-1	29°39'58.21"	86°12'17.46"	粗粒结构, 粒径 8~12 mm, 角闪石 45%, 斜长石 50%, 少量石英和正长石	主量和微量元素分析
	SMC15-8-2	29°39'58.21"	86°12'17.46"	粗粒结构, 粒径 8~12 mm, 角闪石 45%, 斜长石 50%, 少量石英和正长石	主量和微量元素分析
黑云二长花岗岩	PJ16-22-1	29°40'4.00"	86°12'24.00"	中粒结构, 粒径 2~4 mm, 角闪石 45%, 斜长石 50%, 少量石英和正长石	主量和微量元素分析
	SMC16-154	29°40'17.94"	86°12'2.33"	似斑状结构, 正长石斑晶 5%, 粒径 8~10 mm; 基质中粗粒结构, 粒径 2~5 mm, 石英 30%, 正长石 30%, 斜长石 25%, 黑云母 10%	锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析
	PJ16-2-3	29°40'24"	86°13'14"	中粒结构, 粒径 2~4 mm, 石英 30%, 正长石 40%, 斜长石 20%, 黑云母 10%	主量和微量元素分析
	PJ16-2-4	29°40'24"	86°13'14"	中粒结构, 粒径 2~4 mm, 石英 30%, 正长石 40%, 斜长石 20%, 黑云母 10%	主量和微量元素分析
	PJ17-8-1	29°43'16.66"	86°11'5.83"	似斑状结构, 正长石斑晶 5%~10%, 粒径 8~15 mm; 基质中粗粒结构, 粒径 2~5 mm, 石英 30%, 正长石 30%, 斜长石 25%, 黑云母 10%~15%	主量和微量元素分析
	PJ17-9-1	29°43'7.01"	86°10'52.15"	似斑状结构, 正长石斑晶 5%~10%, 粒径 8~15 mm; 基质中粗粒结构, 粒径 2~5 mm, 石英 30%, 正长石 30%, 斜长石 20%, 黑云母 10%~15%	主量和微量元素分析
	PJ17-10-1	29°43'11.73"	86°10'55.64"	似斑状结构, 正长石斑晶 5%~10%, 粒径 8~15 mm; 基质中粗粒结构, 粒径 2~5 mm, 石英 30%, 正长石 30%, 斜长石 20%, 黑云母 10%~15%	主量和微量元素分析
	PJ17-12-1	29°43'13.62"	86°10'55.72"	似斑状结构, 正长石斑晶 5%~10%, 粒径 8~15 mm; 基质中粗粒结构, 粒径 2~5 mm, 石英 30%, 正长石 30%, 斜长石 20%, 黑云母 10%~15%	主量和微量元素分析

黑云二长花岗岩为大岩基侵位, 呈浅灰色, 风化面呈黄白色, 似斑状结构, 块状构造(图 2a), 斑晶为正长石、石英, 含量 10%~20%, 粒径 5~8 mm 左右。基质粒径 2 mm 左右, 主要矿物为石英(25%~30%)、正长石(20%~30%)、斜长石(25%~

35%)、黑云母(10%)和少量磁铁矿(<5%)。石英为它形粒状, 可见熔蚀残余结构, 有石英碎片包裹在长石中, 这种石英形成早于正常岩浆结晶时期。正长石呈它形粒状、板条状, 它形粒状者粒径较大, 为条纹长石, 板条状者粒径较小, 常被包裹于大颗粒长

石中。斜长石为半自形板条状, 粒径较小, 可见斜长石环带、聚片双晶和卡钠复合双晶(图 2b、2c)。

角闪辉长岩呈岩株状侵入在黑云二长花岗岩岩基中, 岩石呈深灰绿色-黑色, 中粗粒状结构, 块状构造(图 2d)。主要矿物为角闪石(40% ~ 70%)、斜长石(30% ~ 45%)和少量磁铁矿(5% ~ 10%)、黑云母(<5%)和榍石(<5%)。角闪石多呈短柱状自形晶, 粒径约 0.4 ~ 1.5 cm, 具有生长分带, 可分为早、中、晚 3 个世代, 其中常包裹有斜长石和磁铁矿。

斜长石呈自形和半自形板柱状, 部分具有宽的聚片双晶和环带结构, An 牌号范围为 43 ~ 57, 也有早、中、晚 3 个生长世代, 早世代斜长石被包裹于早世代角闪石中, 中世代斜长石粒度较大, 常包裹有角闪石和磁铁矿, 晚世代斜长石主要为基质中的斜长石(图 2e、2f)。在大部分样品中可见自形斜长石与角闪石互嵌形成的辉长结构。岩株内见有伟晶状石英闪长质包体。

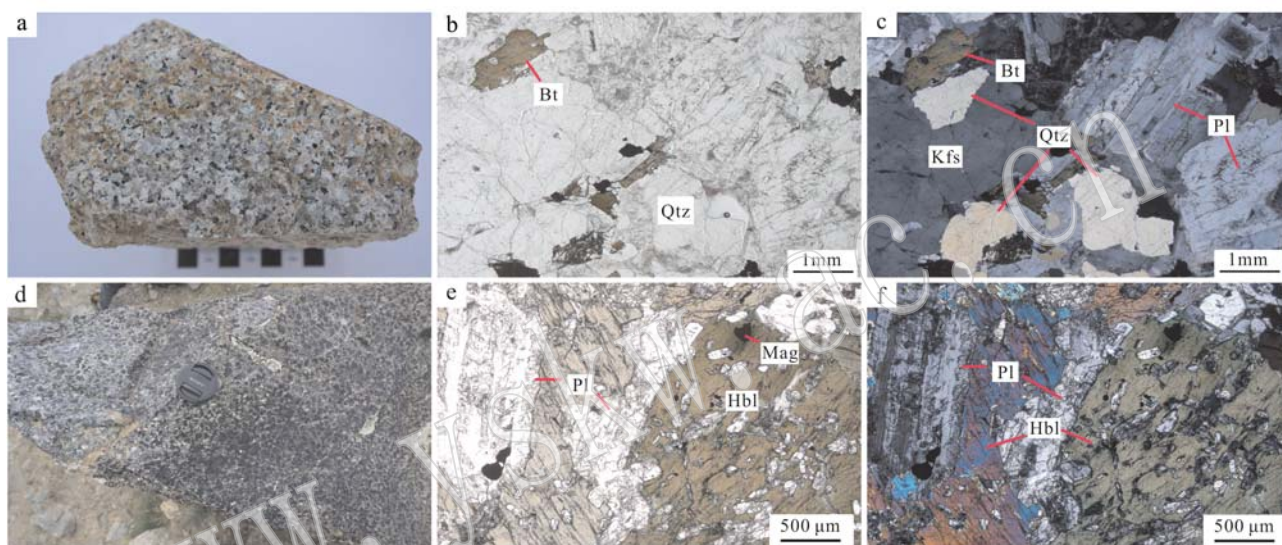


图 2 黑云二长花岗岩和角闪辉长岩手标本及镜下照片

Fig. 2 Field photographs and microphotographs of biotite monzonitic granite and hornblende gabbro

a—黑云二长花岗岩手标本; b—黑云二长花岗岩, 单偏光; c—黑云二长花岗岩, 长石为自形-半自形板状, 石英呈它形充填于长石和黑云母间, 具典型的花岗结构, 正交偏光; d—角闪辉长岩手标本; e—角闪辉长岩, 单偏光; f—角闪辉长岩, 角闪石呈自形-半自形柱状或近六边形, 斜长石呈自形-半自形板状, 偶见自形小颗粒斜长石被角闪石包裹, 正交偏光; Bt—黑云母; Hbl—普通角闪石; Kfs—钾长石; Pl—斜长石;

Qtz—石英; Mag—磁铁矿(矿物缩写据沈其韩, 2009)

a—field photograph of biotite monzonitic granite; b—biotite monzonitic granite, plainlight; c—biotite monzonitic granite, showing granitic texture, crossed nicols; d—field photograph of hornblende gabbro; e—hornblende gabbro, plainlight; f—hornblende gabbro, showing gabbro texture, crossed nicols; Bt—biotite; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Mag—magnetite (mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

2 分析方法

主微量元素分析方法: 野外采集新鲜无蚀变、未风化的样品, 清洗干净然后完成磨制探针片, 200 目粉末制备, 挑选单矿物等样品处理工作。将粉末送至国家地质实验测试中心进行主微量元素测定。主量元素的分析是在荷兰帕纳科公司 Axios 波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)上完成, 分析误差低于 5%; 通过化学滴定法测得 Fe_2O_3 , 再使用总铁计算出 FeO 含量; 微量元素的分析则使用 ICP-MS 完成, 分

析精度好于 10%。

锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素分析方法: 将完成制靶的锆石打磨抛光, 然后拍摄阴极发光图像, 用于测定时选取锆石颗粒和测试部位。测试在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 利用 Neptune plus 型多接收等离子体质谱仪应用 LA-Q/MC-ICP-MS 锆石 U-Pb、Hf 同位素及微量元素同时完成测定。实验采用 Coherent Geolas Pro 型激光剥蚀取样, Agilent 7700x 型四级杆等离子体质谱仪, 测试束斑直径为 32 μm ; 锆石 U-Pb 年龄测试误差不超过年龄的 5%, 锆石年龄

标定标样为 91500 标准锆石,内标元素为 Si,成分标定标样为 NIST610,详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015)。锆石原位微区 Hf 同位素详细测试流程可参照文献(侯可军等, 2007; Meng *et al.*, 2014)。数据处理采用软件 Glitter 4.4 (Van Achterbergh *et al.*, 2001)完成,锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和加权平均年龄计算均采用 Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2003)获得。

3 全岩主、微量地球化学特征

对 5 个黑云母二长花岗岩采样点的 6 件样品和 5 个角闪辉长岩采样点的 9 件样品共计 15 件样品进行了岩石主、微量元素含量分析,分析结果见表 2。

3.1 主量元素

黑云二长花岗岩主量元素 SiO_2 含量为 68.83% ~ 72.94%,在 $R_2 - R_1$ 图解(图 3a)中,落在二长花岗岩区和花岗闪长岩区。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.07 ~ 1.87,里特曼指数 σ 为 1.72 ~ 2.54,在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图 3b)中落入高钾钙碱性系列和钾玄岩的范围。 Al_2O_3 含量为 13.47% ~ 14.64%, A/CNK 范围为 1.01 ~ 1.04,属于准铝质的范围。 P_2O_5 含量为 0.08% ~ 0.11%,显示出贫磷的特征。分异指数(DI)为 83.7 ~ 86.9。

角闪辉长岩主量元素 SiO_2 含量为 43.81% ~ 51.00%, Al_2O_3 含量为 14.94% ~ 18.10%, Fe_2O_3 含量为 3.61% ~ 8.09%, FeO 含量为 5.04% ~ 7.04%, CaO 含量为 8.75% ~ 12.47%, Na_2O 含量为 1.66% ~ 2.98%, K_2O 含量为 0.60% ~ 1.57%,与代表性的辉长岩成分接近。在 $R_2 - R_1$ 分类图解(图 3a)中,落在(橄榄)辉长岩区;在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图 3b)上属于钙碱性-高钾钙碱性系列。其中 MgO 含量为 4.57% ~ 9.22%, $\text{Mg}^\#$ 值在 40 ~ 66 之间。

3.2 微量及稀土元素

黑云二长花岗岩的稀土元素总量为 140.51×10^{-6} ~ 271.06×10^{-6} ,球粒陨石标准化配分曲线右倾,中稀土元素轻度亏损,重稀土元素部分曲线略微翘起(图 4a),具中等程度的 Eu 异常, Eu/Eu^* 为 0.50 ~ 0.76。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 12.92 ~ 21.88, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 5.44 ~ 6.79, $(\text{Ho}/\text{Yb})_N$ 为 0.86 ~ 0.95,显示轻重稀土元素有明显的分馏。黑云二长花岗岩的微量元素原始地幔标准化蜘蛛图(图 4b)中显示高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti 的强烈亏损,而大

离子亲石元素 Pb、Th、U 和 Rb 强烈富集,K 相对富集。岩石的 Zr/Nb 值为 11.85 ~ 15.10, Sr/Y 值为 7.49 ~ 45.00。

角闪辉长岩的稀土元素总量为 40.42×10^{-6} ~ 114.79×10^{-6} ,球粒陨石标准化的配分曲线平缓右倾(图 4a),Eu 异常不明显(Eu/Eu^* 为 0.86 ~ 1.10)。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 4.16 ~ 6.99, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 1.77 ~ 3.34,显示轻稀土元素相对重稀土元素有一定程度的富集,且发生了一定的分馏。角闪辉长岩的微量元素 Nb 含量为 1.60×10^{-6} ~ 7.00×10^{-6} ,Zr 含量为 34.8×10^{-6} ~ 142×10^{-6} ,Th 含量为 1.66×10^{-6} ~ 11.0×10^{-6} ,U 含量为 0.40×10^{-6} ~ 1.75×10^{-6} ,在原始地幔标准化蜘蛛图(图 4b)中显示高场强元素 Nb 和 Ta 强烈亏损,Zr 和 P 相对亏损,而大离子亲石元素 Pb 强烈富集,U、Th、Rb、K 和 Sr 相对富集。岩石的 Zr/Nb 值为 11.29 ~ 25.96, Sr/Y 值为 17.81 ~ 76.10。

4 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素

对 1 件黑云二长花岗岩样品(SMC16-154-1)的 20 颗锆石和 1 件角闪辉长岩样品(SMC16-20-1)的 19 颗锆石进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,结果见表 3。在样品的定年锆石测点附近或特征相同部位进行 LA-ICP-MS Hf 同位素分析,各获得 12 颗锆石 Hf 同位素的测试结果(表 4)。

4.1 锆石 U-Pb 年代学

黑云二长花岗岩的锆石颗粒晶型较好,多为自形-半自形柱状,粒径为 100 ~ 220 μm ,长宽比为 1:1 ~ 2:1,具有细密的韵律生长环带(图 5a),Th/U 值为 0.90 ~ 2.06,说明锆石为岩浆成因(Belousova *et al.*, 2002; 吴元保等, 2004)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图 5a)上,所获 20 个测点的测试结果均位于谐和线附近,表明定年结果可靠。单颗粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 52.1 ~ 46.0 Ma 之间,加权平均年龄为 49.05 ± 0.94 Ma (MSWD = 1.3) (图 5b),可代表黑云二长花岗岩的结晶年龄。

角闪辉长岩的锆石颗粒多数为浑圆状,少数为短柱状,粒径为 80 ~ 160 μm ,长宽比为 1:1 ~ 1.2:1,具有较宽的平行生长环带(图 5c),Th/U 值为 1.05 ~ 2.09,显示岩浆成因锆石特征(Belousova *et al.*, 2002; 吴元保等, 2004)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图 5c)上,19 个测点的测试结果均位于谐和

表2 阿木雄杂岩体角闪辉长岩和黑云二长花岗岩主要元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Chemical compositions of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) for hornblende gabbro and biotite monzonitic granite of Amuxiong complex																
岩性	角闪辉长岩										黑云二长花岗岩					
	样品号	SMC15-4-2	SMC15-5-1	SMC15-5-2	SMC15-5-3	SMC15-6-1	SMC15-6-2	SMC15-8-1	SMC15-8-2	PJ16-22-1	PJ16-2-3	PJ16-2-4	PJ17-8-1	PJ17-9-1	PJ17-10-1	PJ17-12-1
SiO ₂	49.77	43.81	48.89	45.21	49.73	48.63	50.98	51.00	43.86	72.94	71.86	68.83	71.40	72.75	72.61	
TiO ₂	1.01	1.38	0.85	1.80	1.08	1.15	1.16	1.14	1.55	0.33	0.29	0.28	0.42	0.44	0.39	
Al ₂ O ₃	16.75	18.10	15.44	14.94	15.08	16.58	17.30	17.40	16.69	13.95	14.38	14.64	14.12	13.47	13.65	
Fe ₂ O ₃	3.61	7.67	2.82	8.09	3.64	4.02	4.31	4.13	8.78	1.15	0.87	0.95	1.56	1.27	1.20	
FeO	5.97	7.04	5.95	7.52	6.03	6.15	5.04	5.17	6.62	0.92	0.94	1.00	1.12	1.19	1.12	
MnO	0.17	0.16	0.19	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.18	0.06	0.05	0.05	0.08	0.07	0.07	
MgO	5.85	5.22	9.22	6.48	7.16	6.23	4.59	4.57	6.00	0.76	0.68	0.71	0.73	0.79	0.67	
CaO	9.89	12.47	11.04	11.22	11.88	11.27	8.75	8.88	10.59	1.76	1.75	2.16	1.93	2.00	1.89	
Na ₂ O	2.55	1.87	1.84	1.66	1.94	2.04	2.88	2.98	2.50	2.97	2.98	3.02	3.33	3.37	3.47	
K ₂ O	1.36	0.60	1.45	0.82	1.28	1.16	1.57	1.56	0.65	5.02	5.59	4.70	4.49	3.79	3.72	
P ₂ O ₅	0.19	0.08	0.17	0.16	0.18	0.19	0.34	0.36	0.15	0.09	0.08	0.08	0.11	0.10	0.10	
LOI	1.18	0.95	1.25	0.94	0.82	1.25	1.41	1.23	1.28	0.31	0.21	3.25	0.78	0.51	0.41	
TOTAL	98.30	99.35	99.11	99.01	98.99	98.85	98.50	98.59	98.85	100.26	99.68	99.67	100.07	99.75	99.30	
Mg [#]	53.09	40.04	65.95	43.85	57.85	53.22	47.86	47.84	42.43	40.95	41.31	40.57	34.04	37.66	35.20	
A/CNK	0.71	0.69	0.63	0.62	0.58	0.66	0.77	0.77	0.69	1.03	1.02	1.05	1.02	1.01	1.04	
A/NK	2.96	4.86	3.36	4.13	3.29	3.60	2.69	2.64	3.47	1.35	1.31	1.46	1.37	1.40	1.40	
K ₂ O/Na ₂ O	0.53	0.32	0.79	0.49	0.66	0.57	0.55	0.52	0.26	1.69	1.88	1.56	1.35	1.12	1.07	
DI	30.79	18.98	24.65	19.33	24.57	24.72	37.36	37.51	24.52	86.12	86.82	83.53	84.61	84.42	85.12	
Li	24.10	11.60	18.60	9.46	13.20	14.90	14.80	13.90	19.30	20.40	15.70	48.60	19.90	18.50	29.80	
Co	35.60	50.40	41.70	59.10	37.50	34.00	27.20	29.10	44.00	3.60	3.46	2.99	3.50	3.60	3.33	
Ni	28.30	18.30	49.30	8.99	19.90	19.70	12.00	11.40	10.00	1.60	1.80	3.97	0.91	1.03	0.98	
Cu	32.60	89.40	21.90	126.00	49.00	53.90	42.10	43.30	65.00	5.00	<5	5.19	1.92	1.81	1.46	
Zn	81.7	76.4	80.6	85.2	71.6	83.1	116	117	95	40	39	36.5	58.1	54.1	37.3	
Rb	63.00	17.90	101.00	18.50	35.40	50.10	53.00	55.70	32.00	168	169	352	196	172	172	
Sr	524	691	536	588	589	647	688	696	641	285	324	459	246	233	254	
Mo	0.56	0.75	4.64	1.03	0.29	0.42	0.53	0.57	0.60	0.31	0.21	2.66	0.67	0.49	0.51	
Cs	9.92	10.80	5.62	2.44	3.94	5.99	5.07	5.17	22.00	4.34	3.50	22.90	5.76	5.29	4.77	
Ba	124	140	253	250	300	202	382	344	129	687	832	698	485	374	398	
Pb	7.84	6.69	7.34	5.56	7.47	5.82	32.50	31.10	21.00	33.00	30.00	36.20	29.00	17.10	19.00	

续表 2
Continued Table 2

岩性	角闪辉长岩														黑云二长花岗岩			
样品号	SMC15-4-2	SMC15-5-1	SMC15-5-2	SMC15-5-3	SMC15-6-1	SMC15-6-2	SMC15-8-1	SMC15-8-2	PJ16-22-1	PJ16-2-3	PJ16-2-4	PJ17-8-1	PJ17-9-1	PJ17-10-1	PJ17-12-1			
Th	7.50	1.66	2.83	2.66	4.24	3.00	4.26	4.44	11.00	12.00	11.00	38.30	34.90	47.80	45.10			
U	1.75	0.40	0.65	0.70	0.96	0.47	0.83	0.87	0.45	2.46	1.35	12.40	4.56	6.37	4.94			
Nb	6.00	1.60	2.49	2.85	3.33	2.93	5.47	5.52	7.00	13.00	10.00	10.40	16.10	16.30	15.60			
Ta	0.46	0.14	0.23	0.22	0.23	0.25	0.37	0.37	0.29	0.93	0.63	1.02	1.88	1.94	1.67			
Zr	67.30	34.80	49.20	47.30	67.30	50.10	142.00	83.10	79.00	154.00	151.00	149.00	231.00	212.00	216.00			
Hf	2.59	1.21	1.73	1.71	2.31	1.86	3.41	2.80	2.19	4.31	4.44	4.54	6.77	6.33	6.13			
La	19.20	6.18	9.97	8.23	9.89	9.98	16.70	17.70	12.30	38.40	38.00	30.50	66.10	64.30	56.00			
Ce	34.90	12.50	19.20	17.80	21.40	21.60	36.80	38.00	27.00	68.30	65.60	66.90	116.00	114.00	97.00			
Pr	4.27	1.77	2.65	2.71	3.21	3.17	5.46	5.52	3.62	7.19	6.65	6.49	12.20	12.10	10.40			
Nd	20.50	9.72	14.50	15.40	18.20	17.50	30.00	29.00	16.70	24.60	21.40	25.70	48.00	48.60	42.30			
Sm	3.71	2.07	2.91	3.24	3.61	3.50	5.57	5.50	3.73	4.23	3.61	3.62	7.30	7.07	6.52			
Eu	1.10	0.75	0.94	1.02	1.10	1.11	1.62	1.60	1.07	0.83	0.80	0.57	1.08	1.05	1.02			
Gd	3.59	2.09	3.03	3.32	3.65	3.60	5.28	5.31	3.82	3.70	2.84	2.29	5.93	5.73	5.35			
Tb	0.54	0.33	0.44	0.50	0.54	0.53	0.79	0.78	0.57	0.54	0.41	0.32	0.89	0.88	0.81			
Dy	3.39	2.06	2.81	3.03	3.33	3.31	4.78	4.78	3.33	3.06	2.29	1.62	5.18	4.93	4.59			
Ho	0.67	0.42	0.57	0.60	0.66	0.65	0.95	0.94	0.62	0.58	0.43	0.30	1.02	0.95	0.91			
Er	1.90	1.15	1.61	1.60	1.82	1.82	2.67	2.60	1.76	1.71	1.23	0.91	3.19	2.93	2.85			
Tm	0.29	0.17	0.23	0.23	0.25	0.25	0.37	0.37	0.25	0.28	0.19	0.14	0.49	0.47	0.45			
Yb	1.97	1.05	1.44	1.42	1.68	1.62	2.43	2.34	1.66	2.02	1.39	1.00	3.20	3.22	3.11			
Lu	0.31	0.16	0.22	0.21	0.25	0.25	0.37	0.35	0.25	0.31	0.22	0.15	0.48	0.50	0.47			
Y	15.40	9.08	12.50	13.20	15.00	14.10	21.70	21.10	36.00	24.00	17.00	10.20	31.80	31.10	29.70			
Sc	31.40	37.20	37.10	43.10	42.60	36.00	29.40	28.90	30.00	6.00	6.00	3.24	5.35	5.01	6.18			
8Eu	0.92	1.10	0.97	0.95	0.93	0.96	0.91	0.91	0.87	0.64	0.76	0.61	0.50	0.50	0.53			
ΣREE	96.34	40.42	60.52	59.31	69.59	68.89	113.79	114.79	76.68	155.75	145.06	140.51	271.06	266.73	231.78			
(La/Yb) _N	6.99	4.22	4.97	4.16	4.22	4.42	4.93	5.43	5.31	13.64	19.61	21.88	14.82	14.32	12.92			
(La/Sm) _N	3.34	1.93	2.21	1.64	1.77	1.84	1.94	2.08	2.13	5.86	6.80	5.44	5.85	5.87	5.54			
Rb/Sr	0.12	0.03	0.19	0.03	0.06	0.08	0.08	0.08	0.05	0.59	0.52	0.77	0.80	0.74	0.68			
Sr/Y	34.03	76.10	42.88	44.55	39.27	45.89	31.71	32.99	17.81	11.88	19.06	45.00	7.74	7.49	8.55			
Zr/Nb	11.22	21.75	19.76	16.60	20.21	17.10	25.96	15.05	11.29	11.85	15.10	14.33	14.35	13.01	13.85			

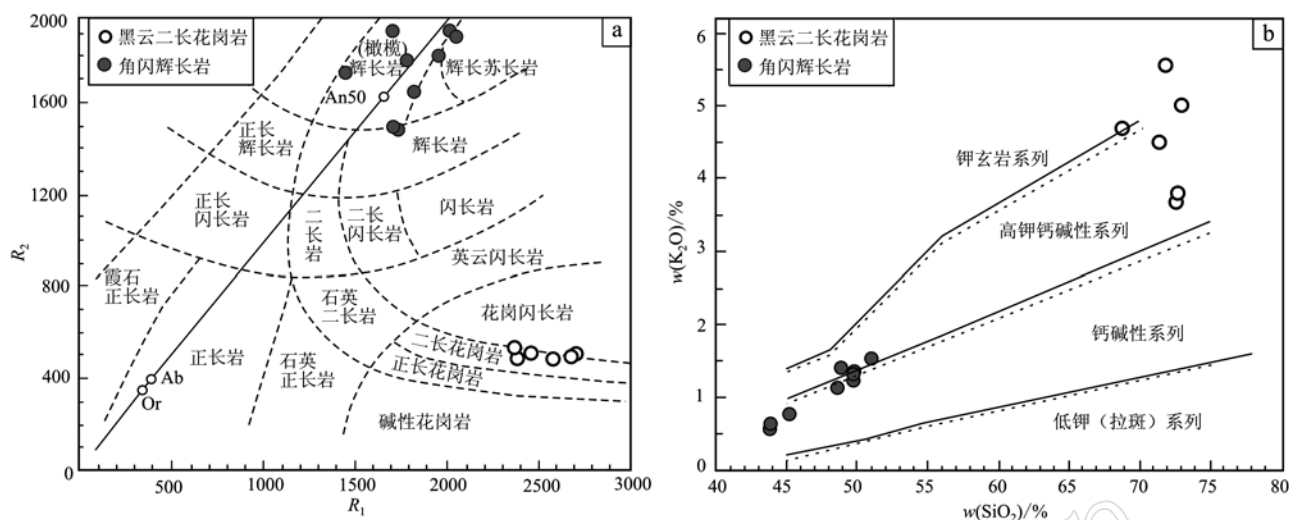


图3 R_2-R_1 岩浆岩分类图解(a, 底图据 De la Roche *et al.*, 1980)和 K_2O-SiO_2 图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig.3 R_2-R_1 diagram for magmatite classification (a, after De la Roche *et al.*, 1980) and K_2O-SiO_2 diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

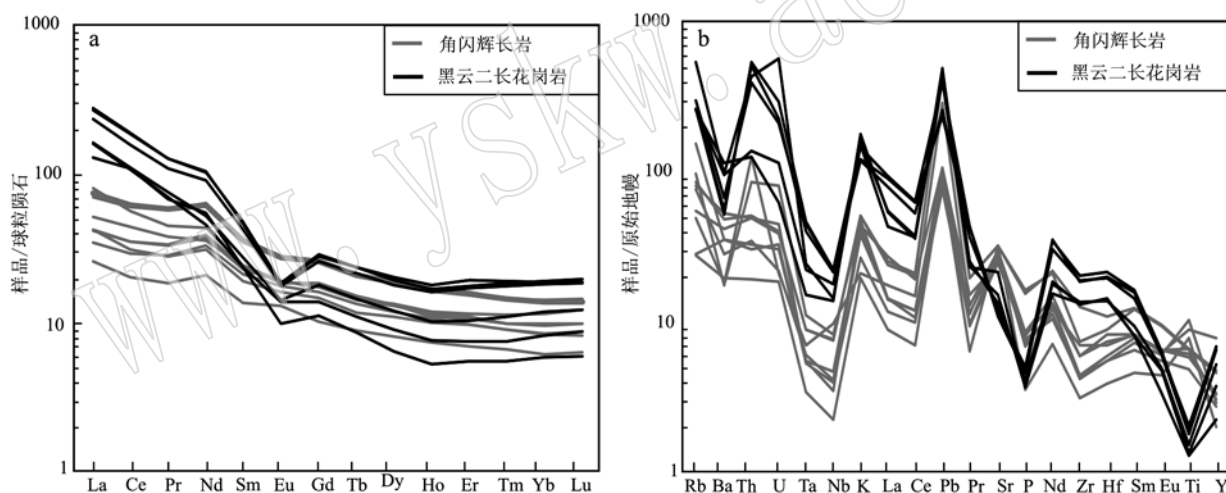


图4 稀土元素配分图(a)和微量元素蛛蛛图(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.4 REE patterns (a) and trace elements spidergrams (b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

线附近,表明定年结果可靠。单颗粒锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在52.3~47.6 Ma之间,加权平均年龄为 49.07 ± 0.64 Ma(MSWD = 2.5)(图5d),可代表角闪辉长岩的结晶年龄。

4.2 锆石 Hf 同位素

黑云二长花岗岩样品12颗锆石测点的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值范围为0.000779~0.002755,绝大部分小于0.002,说明锆石中的 ^{176}Lu 及由其衰变而成的 ^{176}Hf 的质量相对于 ^{177}Hf 的质量低很多,即这些锆石形成以后仅仅有少量放射性成因 ^{176}Hf ,故可以用所测 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值代表锆石结晶时的初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$

值(吴福元等,2007)。所测锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为0.282735~0.283067,利用各测点的U-Pb年龄计算的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为-0.2~+11.4,大部分在-0.2~+2.6之间(图6),亏损地幔模式年龄 t_{DM} 为729~274 Ma,地壳模式年龄 t_{DM}^c 为1136~393 Ma。样品的 $f_{Lu/Hf}$ 值为-0.97652~-0.91702,明显小于镁铁质地壳和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ (分别为-0.34和-0.72, Amelin *et al.*, 2000),因此地壳模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔中抽取的时间。

角闪辉长岩样品12颗锆石测点的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值范围为0.001254~0.003816,大部分小于0.002。

所测锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 887 ~ 0.283 220, 524 ~ 46 Ma, 地壳模式年龄 t_{DM}^C 为 798 ~ 46 Ma。样
利用各测点的 U-Pb 年龄计算的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值分布在 品的 $f_{Lu/Hf}$ 值为 -0.962 22 ~ -0.885 07, 同样地壳模式
+5.1 ~ +16.8 之间(图 6), 地幔模式年龄 t_{DM} 为 年龄更能反映源区物质从亏损地幔中抽取的时间。

表 3 阿木雄杂岩体角闪辉长岩和黑云二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 3 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircon from hornblende gabbro and biotite monzonitic granite of Amuxiong complex

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
SMC16-20-1-01	1 254.33	1 005.18	1.25	0.050 47	0.004 58	0.007 79	0.000 13	50.0	4.43	50.0	0.85
SMC16-20-1-02	4 664.60	2 586.59	1.80	0.048 48	0.002 25	0.007 44	0.000 10	48.1	2.18	47.8	0.65
SMC16-20-1-03	854.93	656.38	1.30	0.047 13	0.006 41	0.007 53	0.000 15	46.8	6.22	48.3	0.99
SMC16-20-1-04	1 056.86	585.32	1.81	0.056 28	0.007 61	0.007 91	0.000 17	55.6	7.32	50.8	1.10
SMC16-20-1-05	1 577.37	937.65	1.68	0.046 00	0.004 72	0.007 67	0.000 14	45.7	4.58	49.2	0.89
SMC16-20-1-06	4 093.21	2 261.79	1.81	0.047 14	0.002 70	0.007 46	0.000 11	46.8	2.62	47.9	0.69
SMC16-20-1-07	3 686.17	1 944.36	1.90	0.049 98	0.003 03	0.007 68	0.000 11	49.5	2.93	49.3	0.73
SMC16-20-1-08	1 765.46	1 235.07	1.43	0.051 45	0.004 59	0.007 86	0.000 13	50.9	4.43	50.5	0.84
SMC16-20-1-09	1 374.61	1 308.84	1.05	0.050 17	0.003 91	0.007 46	0.000 12	49.7	3.78	47.9	0.78
SMC16-20-1-10	2 729.81	1 464.09	1.86	0.049 22	0.003 50	0.007 56	0.000 12	48.8	3.39	48.5	0.76
SMC16-20-1-11	3 351.60	1 599.91	2.09	0.054 09	0.003 49	0.007 49	0.000 12	53.5	3.37	48.1	0.75
SMC16-20-1-12	929.42	795.66	1.17	0.050 91	0.006 10	0.007 86	0.000 15	50.4	5.89	50.5	0.97
SMC16-20-1-13	522.42	494.21	1.06	0.052 57	0.009 39	0.007 58	0.000 22	52.0	9.05	48.7	1.42
SMC16-20-1-14	2 383.67	1 392.84	1.71	0.061 78	0.005 46	0.008 04	0.000 17	60.9	5.22	51.6	1.08
SMC16-20-1-15	1 318.73	1 053.17	1.25	0.050 38	0.005 14	0.008 14	0.000 15	49.9	4.97	52.3	0.95
SMC16-20-1-16	2 630.86	1 934.71	1.36	0.050 85	0.003 22	0.007 72	0.000 12	50.4	3.11	49.6	0.76
SMC16-20-1-17	1 175.42	865.55	1.36	0.050 46	0.005 82	0.007 57	0.000 15	50.0	5.63	48.6	0.98
SMC16-20-1-18	930.24	802.32	1.16	0.049 64	0.006 48	0.007 83	0.000 16	49.2	6.27	50.3	1.02
SMC16-20-1-19	4 839.51	2 361.19	2.05	0.050 40	0.002 60	0.007 41	0.000 11	49.9	2.51	47.6	0.69
SMC16-154-1-01	152.72	152.18	1.00	0.043 83	0.019 79	0.007 86	0.000 29	43.6	19.25	50.5	1.87
SMC16-154-1-02	281.75	269.75	1.04	0.050 72	0.015 07	0.008 08	0.000 24	50.2	14.56	51.9	1.53
SMC16-154-1-03	115.06	92.30	1.25	0.060 94	0.036 85	0.007 29	0.000 42	60.1	35.27	46.8	2.66
SMC16-154-1-04	372.56	378.63	0.98	0.065 44	0.010 17	0.008 12	0.000 20	64.4	9.69	52.1	1.25
SMC16-154-1-05	358.54	353.98	1.01	0.059 23	0.011 41	0.007 48	0.000 21	58.4	10.94	48.0	1.31
SMC16-154-1-06	254.57	198.15	1.28	0.062 96	0.018 49	0.007 49	0.000 28	62.0	17.66	48.1	1.78
SMC16-154-1-07	326.33	265.57	1.23	0.041 37	0.014 13	0.007 36	0.000 23	41.2	13.77	47.2	1.45
SMC16-154-1-08	147.05	146.99	1.00	0.041 93	0.030 21	0.007 39	0.000 34	41.7	29.44	47.5	2.21
SMC16-154-1-09	158.94	166.21	0.96	0.048 50	0.022 14	0.007 59	0.000 30	48.1	21.44	48.8	1.95
SMC16-154-1-10	153.53	143.15	1.07	0.048 98	0.022 02	0.007 66	0.000 33	48.6	21.31	49.2	2.13
SMC16-154-1-11	290.98	252.58	1.15	0.052 72	0.015 76	0.007 17	0.000 26	52.2	15.20	46.0	1.66
SMC16-154-1-12	268.36	299.79	0.90	0.047 31	0.013 87	0.007 99	0.000 24	46.9	13.45	51.3	1.54
SMC16-154-1-13	185.10	188.08	0.98	0.061 34	0.020 09	0.007 78	0.000 29	60.4	19.22	50.0	1.85
SMC16-154-1-14	935.43	584.04	1.60	0.054 58	0.007 35	0.007 43	0.000 18	54.0	7.08	47.7	1.12
SMC16-154-1-15	93.98	99.48	0.94	0.045 35	0.044 64	0.008 08	0.000 55	45.0	43.36	51.9	3.49
SMC16-154-1-16	131.05	120.06	1.09	0.054 30	0.038 61	0.007 60	0.000 44	53.7	37.18	48.8	2.84
SMC16-154-1-17	345.46	167.58	2.06	0.052 60	0.026 92	0.007 92	0.000 35	52.0	25.97	50.8	2.21
SMC16-154-1-18	62.21	59.32	1.05	0.045 07	0.078 83	0.007 74	0.000 74	44.8	76.59	49.7	4.75
SMC16-154-1-19	86.45	91.02	0.95	0.037 97	0.040 88	0.008 02	0.000 45	37.8	39.99	51.5	2.88
SMC16-154-1-20	288.19	287.94	1.00	0.048 46	0.013 17	0.007 32	0.000 22	48.1	12.75	47.0	1.38

表4 阿木雄杂岩体角闪辉长岩和黑云二长花岗岩锆石 Hf 同位素结果

Table 4 Zircon Hf isotopic composition of hornblende gabbro and biotite monzonitic granite of Amuxiong complex

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
SMC16-20-1-01	50.0	0.043 875	0.001 433	0.282 920	0.000 027	5.22	6.27	476.7	722.6	-0.96
SMC16-20-1-02	47.8	0.088 803	0.002 678	0.283 168	0.000 038	14.02	14.99	122.1	161.2	-0.92
SMC16-20-1-03	48.3	0.060 773	0.001 910	0.283 012	0.000 040	8.50	9.50	347.7	514.5	-0.94
SMC16-20-1-04	50.8	0.097 189	0.002 574	0.283 069	0.000 027	10.49	11.52	270.6	386.9	-0.92
SMC16-20-1-05	49.2	0.079 906	0.002 327	0.283 047	0.000 032	9.72	10.72	301.0	436.8	-0.93
SMC16-20-1-06	47.9	0.078 686	0.002 320	0.283 120	0.000 032	12.30	13.28	193.0	271.4	-0.93
SMC16-20-1-07	49.3	0.042 441	0.001 365	0.282 923	0.000 031	5.35	6.39	470.3	714.0	-0.96
SMC16-20-1-08	50.5	0.061 252	0.002 039	0.282 914	0.000 037	5.02	6.06	492.6	735.9	-0.94
SMC16-20-1-09	47.9	0.043 043	0.001 422	0.282 887	0.000 030	4.05	5.06	523.7	797.9	-0.96
SMC16-20-1-10	48.5	0.114 219	0.003 584	0.283 191	0.000 036	14.82	15.77	90.6	111.2	-0.89
SMC16-20-1-11	48.1	0.125 680	0.003 816	0.283 220	0.000 036	15.84	16.78	46.4	45.6	-0.89
SMC16-20-1-12	50.5	0.036 129	0.001 254	0.282 923	0.000 030	5.35	6.42	469.0	713.4	-0.96
SMC16-154-1-01	50.5	0.025 345	0.000 779	0.282 757	0.000 020	-0.54	0.54	697.6	1 087.1	-0.98
SMC16-154-1-02	51.9	0.031 040	0.001 002	0.282 796	0.000 020	0.83	1.94	647.0	999.9	-0.97
SMC16-154-1-03	46.8	0.039 073	0.001 175	0.282 795	0.000 024	0.81	1.80	650.7	1 004.3	-0.96
SMC16-154-1-04	52.1	0.032 546	0.001 069	0.282 814	0.000 016	1.48	2.59	622.1	958.5	-0.97
SMC16-154-1-05	48.0	0.032 211	0.001 095	0.282 810	0.000 021	1.34	2.36	628.3	970.2	-0.97
SMC16-154-1-06	48.1	0.074 705	0.002 275	0.282 955	0.000 025	6.46	7.44	436.2	646.0	-0.93
SMC16-154-1-07	47.2	0.086 028	0.002 755	0.283 067	0.000 047	10.43	11.38	274.4	392.9	-0.92
SMC16-154-1-08	47.5	0.026 735	0.000 829	0.282 820	0.000 018	1.69	2.71	609.7	947.2	-0.98
SMC16-154-1-09	48.8	0.033 066	0.000 998	0.282 788	0.000 020	0.57	1.61	657.5	1 018.4	-0.97
SMC16-154-1-10	49.2	0.029 762	0.000 858	0.282 735	0.000 021	-1.29	-0.24	729.1	1 135.9	-0.97
SMC16-154-1-11	46.0	0.047 727	0.001 413	0.282 786	0.000 021	0.49	1.45	668.1	1 026.0	-0.96
SMC16-154-1-12	51.3	0.028 247	0.000 986	0.282 764	0.000 020	-0.29	0.80	691.5	1 071.3	-0.97

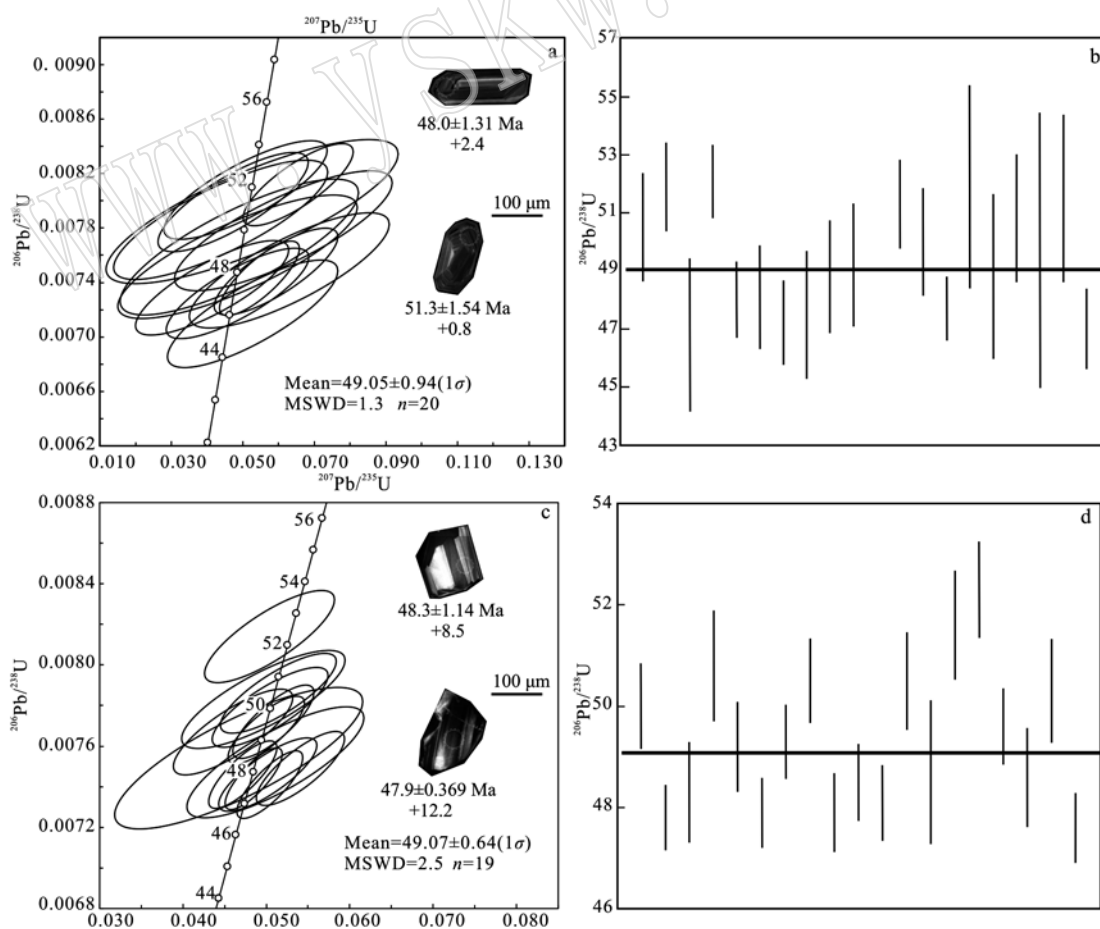


图5 锆石 CL 图和锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、b 为黑云二长花岗岩, c、d 为角闪辉长岩)

Fig. 5 CL images of zircon and U-Pb concordia diagram of zircon (a and b for biotite monzonitic granite, c and d for hornblende gabbro)

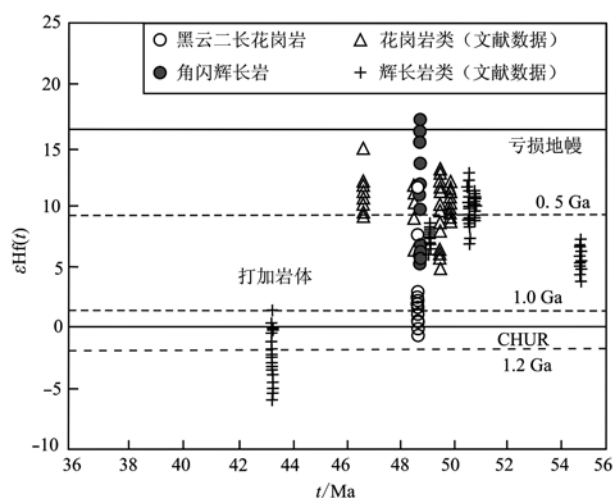


图6 锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 与 U-Pb 年龄图

Fig. 6 $\epsilon\text{Hf}(t)$ versus U-Pb age diagram of zircon
虚线为假设母岩浆源于亏损地幔源区的平均大陆地壳计算的 Hf 同位素 t_{DM}^{C} 年龄, 亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\,25$, 据 Griffin 等 (2000); 平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, 据 Griffin 等 (2002); 文献数据引自 Mo 等 (2009)、Ji 等 (2009)、Wang 等 (2015)
dashed lines represent Hf crustal model ages, which were calculated by assuming its parental magma to have been derived from an average continental crust that originated from the depleted mantle source, depleted mantle after Griffin *et al.*, 2000, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\,25$, average continental crust after Griffin *et al.*, 2002, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$; literature data after Mo *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015

5 讨论

5.1 成岩时代

阿木雄杂岩体的黑云二长花岗岩和角闪辉长岩中岩浆成因锆石的 U-Pb 定年结果显示, 单颗粒锆石结晶年龄分别介于 52.1 ~ 46.0 Ma 和 52.3 ~ 47.6 Ma 之间, 加权平均年龄分别为 49.05 ± 0.94 Ma 和 49.07 ± 0.64 Ma, 表明黑云二长花岗岩和角闪辉长岩侵位成岩时代非常接近, 均为始新世早期, 纠正了前人将黑云二长花岗岩归为白垩纪的认识 (张振利等, 2003)^①。这一结果与阿木雄杂岩体中角闪辉长岩涌动式侵入闪长岩岩株、闪长岩脉动式侵入黑云二长花岗岩的地质事实相符, 也与冈底斯岩基带东段曲水和仁钦则等地 52 ~ 40 Ma 的辉长质基性岩株侵入于花岗质岩基 (董国臣等, 2008) 的情况相似, 表明在冈底斯岩基岩带 65 ~ 41 Ma 岩浆强烈活

动时期 (Wen *et al.*, 2008; Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2011, 2018; 孟元库等, 2018), 花岗质岩基发育的同时伴随着辉长质基性岩株侵入活动不但在东段发生, 同样在中段也有发生。

5.2 岩石成因

5.2.1 黑云二长花岗岩

阿木雄杂岩体中黑云二长花岗岩属于高钾钙碱性-钾玄岩系列花岗岩 (图 3b), 其 A/CNK 值 (1.01 ~ 1.04) 均小于 1.1, 贫磷 (P_2O_5 为 0.08% ~ 0.11%, 均小于 0.2%), P_2O_5 与 SiO_2 呈一定负相关 (图 7a), 说明具有 I 型花岗岩特征 (邓晋福等, 2004)。岩石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -0.2 ~ +11.4, 大部分在 -0.2 ~ +2.6 之间 (图 6), Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^{C} 为 1 136 ~ 393 Ma, 并考虑杂岩体西部打加一带出现更低的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 (-6.0 ~ -5.9) 和更老的 t_{DM}^{C} 年龄 (1.35 ~ 1.33 Ga) (Wang *et al.*, 2015), 东部桑桑一带同时代花岗岩体具有相似的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 (-4.2 ~ +5.5) 和 t_{DM}^{C} 年龄 (919 ~ 512 Ma) (王睿强等, 2016), 表明岩浆源区并不是完全的新生壳源物质, 可能为新生壳源物质与古老壳源物质的混源 (董国臣等, 2006; Mo *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2015), 并且在野外及镜下观察中发现黑云二长花岗岩缺乏基性岩浆混合的特征 (如缺乏基性包体和斜长石环带等), 这排除了源于亏损地幔的基性岩浆与古老地壳熔融产生的岩浆混合的可能。石榴子石具有高的 Yb 和 Lu 的分配系数, 角闪石有高的 Dy 和 Ho 的分配系数, 由中稀土元素下凹、重稀土元素略上凸的稀土元素配分曲线 (图 4) 可知, 源区残留相为角闪石、金红石稳定的角闪岩相 (Rollinson, 1993), 而较低的 Sr/Y 值 (7.49 ~ 45.00) 和较高的 Yb 含量 ($> 2 \times 10^{-6}$) 等说明残留相中石榴子石较少 (Rapp *et al.*, 1991), 符合邓晋福等 (2004) 对 Roberts 和 Clemens (1993) 的研究做出的总结, 认为高钾钙碱性 I 型花岗岩最理想的源岩为水化的钙碱性和高钾钙碱性安山岩和玄武安山岩变质形成的角闪岩, 所以黑云二长花岗岩的来源可能为角闪岩相的新生下地壳并混入了一定的古老地壳物质。

黑云二长花岗岩的微量元素 La/Sm-La 图解 (图 8a) 表明, 岩浆经过了分离结晶, 并且 Sr/Y-SiO₂ (图 7b) 的负相关可能暗示存在长石的分离结

① 张振利, 田立富, 范永贵, 等. 2003. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告桑桑区幅.

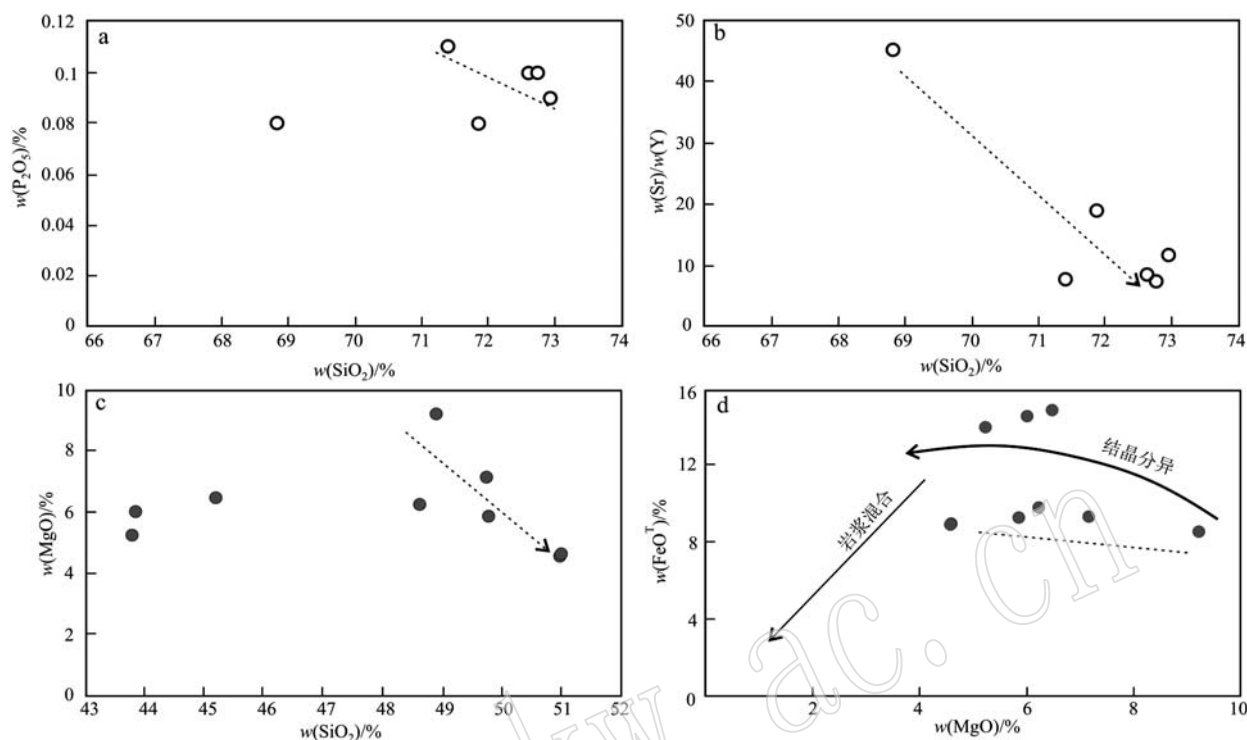


图7 黑云二长花岗岩 $P_2O_5 - SiO_2$ (a)、 $Sr/Y - SiO_2$ (b)图解和角闪辉长岩 $MgO - SiO_2$ (c)、 $FeO^T - MgO$ (d)图解
Fig. 7 $P_2O_5 - SiO_2$ (a) and $Sr/Y - SiO_2$ (b) diagrams for biotite monzonitic granite and $MgO - SiO_2$ (c), $FeO^T - MgO$ (d) diagrams for hornblende gabbro

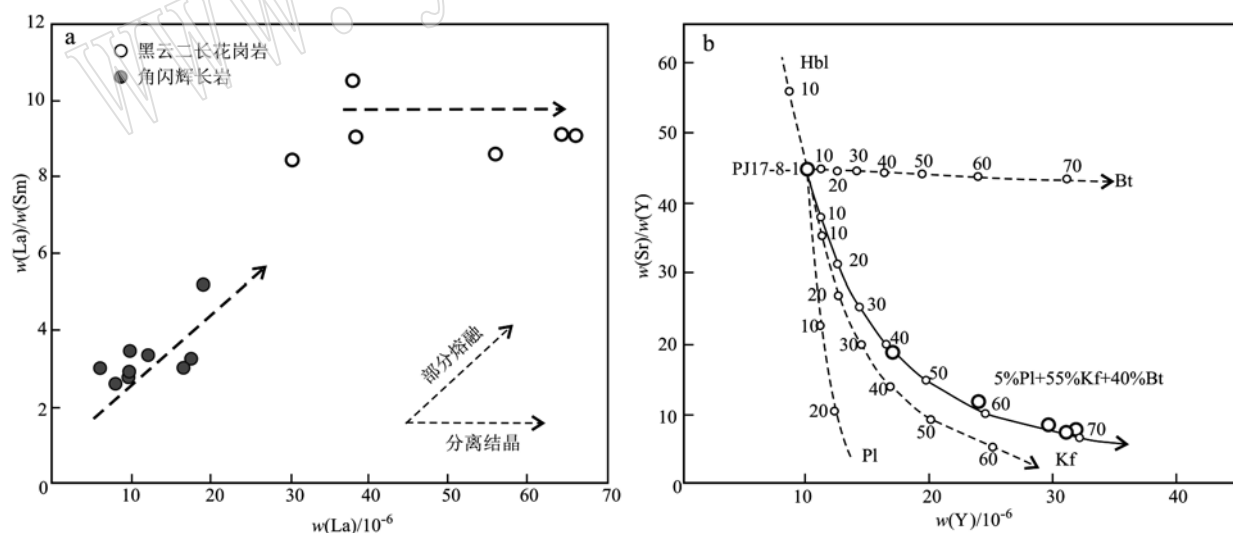


图8 $La/Sm - La$ 图解(a) 和 $Sr/Y - Y$ 图解(b)

Fig. 8 $La/Sm - La$ diagram (a) and $Sr/Y - Y$ diagram (b)

b 中虚线为元素随矿物分离结晶的变化, 分配系数值自 Bédard 等(2006); Bt—黑云母; Kf—钾长石; Hbl—角闪石; Pl—斜长石
dashed lines in b represent variation of the elements during the mineral fractional crystallizing, partition coefficients after Bédard *et al.*, 2006;
Bt—biotite; Kf—K-feldspar; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase

晶。选取分异系数最低($DI = 83.7$)且 CaO 和 Al_2O_3 含量最高的 PJ17-8-1 样品假定为分离结晶初期岩

浆, 通过 $Sr/Y - Y$ 图解模拟分离结晶过程(图 8b), 结果表明熔体至少发生了 40% ~ 70% 的分离结晶,

其中钾长石占比 55%，黑云母占比 40%，斜长石占比 5%，与岩石中存在早期大颗粒钾长石斑晶的事实相符。分离结晶的岩浆大规模脉动上侵，形成似斑状中粗粒黑云二长花岗岩岩基。

5.2.2 角闪辉长岩

阿木雄杂岩体中角闪辉长岩的主量元素含量接近典型辉长岩成分(图 3a), $Mg^\#$ 值(40 ~ 66)略低于原生玄武质岩浆(65 ~ 75; 邓晋福等, 2004), 显示幔源岩浆特征, 在 $La/Sm-La$ 图解(图 8a)中也显示其为地幔平衡部分熔融的结果。锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 +5.1 ~ +16.8 之间, 分布范围较大(图 6), Hf 同位素地壳模式年龄 t_{DM}^C 为 798 ~ 46 Ma, 反映岩浆的地幔源区具有年轻的弱亏损地幔特征(吴福元等, 2007)。岩石为钙碱性-高钾钙碱性系列(图 3b), 具有亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、P 和富集大离子亲石元素 Pb、U、Th、Rb、K、Sr 的特征(图 4b), 且 Zr/Nb 值为 11.29 ~ 25.96, 反映岩浆源区存在类似俯冲环境中的俯冲板片释放流体的交代作用(Chung *et al.*, 2005)。这些特征表明, 角闪辉长岩基性岩浆源自于被俯冲板片释放的流体交代后的弱亏损地幔的部分熔融, 较高的 Sr/Y 值(17.81 ~ 76.10)反映残留相中有石榴子石存在(Rapp *et al.*, 1991; 侯增谦等, 2006a)。

由角闪辉长岩的 $MgO-SiO_2$ 和 FeO^T-MgO 图

解(图 7c、7d)可以看出, 弱亏损地幔源区部分熔融形成的基性岩浆没有发生明显的结晶分异作用, 这也与岩石没有明显的 Eu 异常相一致。形成的基性岩浆发生了多次上升侵位, 并有壳源岩浆的加入, 表现在角闪辉长岩岩株外围存在较多的闪长岩, 其为早期上升的幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆混合的产物, 而后期不断上升的基性岩浆涌动式侵入于闪长岩岩株内, 结晶出由多个世代角闪石和斜长石组成的角闪辉长岩, 且具有轻稀土元素弱富集的特征(图 4a)。由于基性岩浆侵入于没有完全冷却的黑云二长花岗岩岩基内, 且岩浆富水(由角闪石成分计算的岩浆含水量为 5.0% ~ 5.9%), 在缓慢结晶条件下形成中粗粒角闪辉长岩。

5.3 深部壳幔作用过程

阿木雄杂岩体形成于 49 Ma, 处于冈底斯岩浆岩带大规模强烈活动时期(65 ~ 43 Ma), 与 53 Ma 已俯冲的新特提斯洋壳板片断离事件密切相关(Zhu *et al.*, 2015, 2018)。软流圈物质沿断离窗的上涌以及板片释放流体的交代作用, 引起楔形地幔区的部分熔融, 形成具有弧岩浆特征的弱亏损幔源基性岩浆, 底侵于下部地壳并部分上侵; 同时下地壳物质受热部分熔融产生壳源岩浆, 聚集于中上地壳内的岩浆房并发生分离结晶(图 9)。经历结晶分离后的酸性岩浆大规模上侵, 形成杂岩体的黑云二长花岗岩

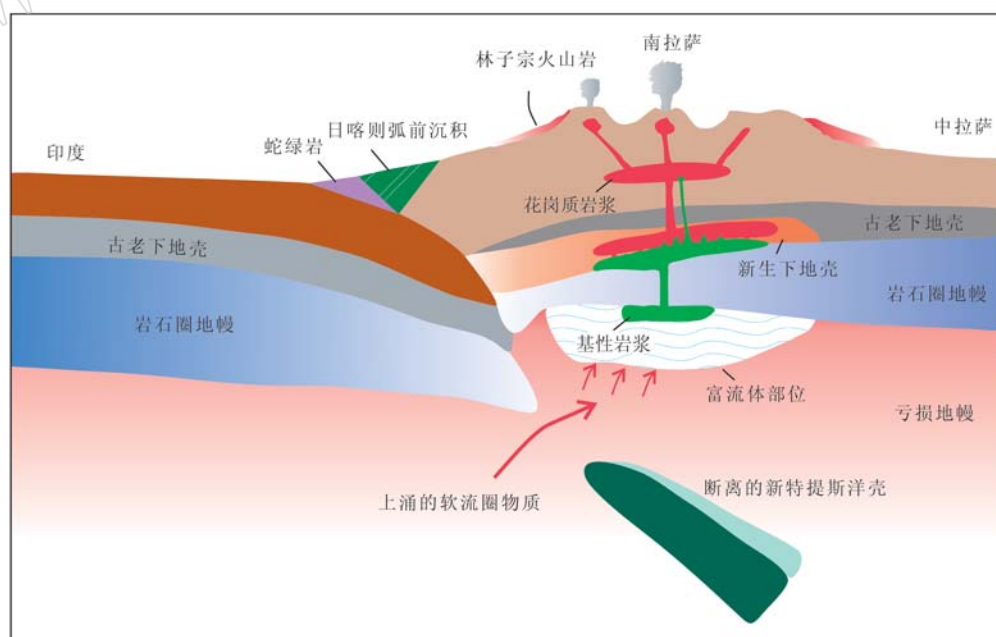


图 9 深部过程模拟图[据 Wang 等(2015)模型修改]

Fig. 9 Deep geodynamic model (modified after Wang *et al.*, 2015)

岩岩基,而随后上侵的基性岩浆形成杂岩体中的角闪辉长岩并可能与黑云二长花岗岩的接触部位发生少量的岩浆混合。相对于南拉萨次级地块东段同时期花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,中段的阿木雄黑云二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏低,向西的打加岩体(Wang *et al.*, 2015)更低(图6),表明南拉萨次级地块中段的花岗岩源区为受到新生幔源物质强烈改造的古老地壳(Hou *et al.*, 2015),有别于东段的新生下地壳源区(莫宣学等, 2005; Mo *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2015)。上文已表明,该期冈底斯岩浆岩带的花岗岩和辉长岩的形成与板片断离有关,在同样背景下形成的花岗岩类的同位素特征差异揭示了冈底斯东段和中段花岗质岩浆源区的不同,即存在不同富集组分的加入。研究区富集组分有两种来源,一是俯冲印度地壳,二是古老拉萨地块。本次研究认为中段岩浆加入的古老地壳物质为拉萨地块的古老地壳,不同于王睿强等(2016)和Chu等(2011)认为的古老地壳物质来自于下插的印度地壳。主要原因有两点:① 本文研究的角闪辉长岩为亏损地幔源区的玄武质岩浆,角闪辉长岩岩浆上侵而未带有前人所说印度地壳古老物质的特征,这表明印度地壳尚未影响到岩浆源区。② Gao等(2016)认为印度大陆并未大规模地俯冲到拉萨地块之下。综上,笔者认为该区黑云二长花岗岩的古老地壳物质来源不是印度地壳,而应该是古老拉萨地块。

6 结论

(1) 阿木雄黑云二长花岗岩和角闪辉长岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 49.05 ± 0.94 Ma、 49.07 ± 0.64 Ma,二者均为始新世同时期的岩浆活动产物。

(2) 黑云二长花岗岩是经过一定分离结晶作用的高钾钙碱性 I 型花岗岩,富集轻稀土元素,有中等的 Eu 亏损,微量元素富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。角闪辉长岩成分接近原生玄武质岩浆,稀土元素配分曲线平缓右倾,无 Eu 亏损,微量元素富集大离子亲石元素和亏损高场强元素。

(3) 黑云二长花岗岩的具有一个低正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围和较老的 Hf 同位素地壳模式年龄,结合其他特征,推断花岗岩源于新生下地壳与古老地壳的混源。角闪辉长岩具有高正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及年轻的 Hf 同

位素地壳模式年龄,说明辉长岩源于一个亏损地幔源区。

(4) 53 Ma 的新特提斯洋壳板片断离诱发软流圈物质上涌是引起角闪辉长岩岩浆上侵以及诱使下地壳部分熔融产生酸性岩浆侵位的主要因素。

致谢 野外工作期间,得到了西藏自治区昂仁县普觉矿区管理及技术团队的支持与帮助;野外和室内工作,得到了赵晓燕副研究员的帮助;论文写作过程中与吴昌烜博士进行了讨论并提出很好的建议,审稿人提出宝贵的审稿意见,在此一并表示感谢。

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(4): 4 205 ~4 225.
- Bédard J.H. 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archean crust and sub-continental lithospheric mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1 188 ~1 214.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143(5): 602 ~622.
- Chu Meifei, Chung Sunlin, O'Reilly S Y, *et al.* 2011. India's hidden inputs to Tibetan orogeny revealed by Hf isotope of Transhimalayan zircons and host rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 207(3 ~4): 479 ~486.
- Chung Sunlin, Chu Meifang, Zhang Yuquan, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 68(3 ~4): 173 ~196.
- De la Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, *et al.* 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using $R_1 - R_2$ diagrams and major element analyses: Its relationship and current nomenclature[J]. *Chemical Geology*, 29(1 ~4): 183 ~210.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, *et al.* 2004. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~381(in Chinese).
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2006. Magma mixing in middle part of Gangdise magma belt: Evidences from granitoid complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835 ~844(in Chinese with English abstract).
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2008. Grabbos from southern Gangdese: Implication for mass exchange between mantle

- and crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 201 ~ 203 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Lu Zhanwu, Klemperer S L, *et al.* 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya[J]. *Nature Geoscience*, 9: 555 ~ 560.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 ~ 147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3 ~ 4): 237 ~ 269.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to special issue[J]. *Ore geology reviews*, 36(1 ~ 3): 2 ~ 24.
- Hou Zengqian, Duan Lianfeng, Lu Yongjun, *et al.* 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Economic Geology*, 110: 1 541 ~ 1 575.
- Hou Zengqian, Wang Erqi, Mo Xuexuan, *et al.* 2008. Collision Orogenic and Metallogenesis of Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 983 (in Chinese).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 337 ~ 358 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zhao Zhidan, Gao Yongfeng, *et al.* 2006b. Tearing and dischronal subduction of the India continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in south Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 761 ~ 774 (in Chinese with English abstract).
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 262(3): 229 ~ 245.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Zhong Sunlin, *et al.* 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Science China(D-Earth Science)*, 39(7): 894 ~ 871 (in Chinese).
- Jiang Wan, Mo Xuanxue, Zhao Chonghe, *et al.* 1998. Granodiorites and their mafic microgranular enclaves from the Gangdise granite belt of the Qinghai-Xizang Plateau[A]. *Tethyan Geology*[C]. Beijing: Geological Publishing House, 22: 90 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, *et al.* 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2 400 ~ 2 418 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot, 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, California.
- Meng En, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2014. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 247: 92 ~ 109.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Gao Cunshan, *et al.* 2018. The identification of the Eocene magmatism and tectonic significance in the middle Gangdese magmatic belt, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 513 ~ 546 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, *et al.* 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281 ~ 290 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, *et al.* 2009. Mantle input to the crust in southern Gangdese, Tibet, during the Cenozoic: Zircon Hf isotopic evidence[J]. *Journal of Earth Science*, 20(2): 241 ~ 249.
- Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Niu Yaoling, *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96(1 ~ 2): 225 ~ 242.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Aisa collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135 ~ 148 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, *et al.* 2009. Cenozoic Collision Post-collision Igneous Rock of the Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 396 (in Chinese).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 ~ 81.
- Qiu Jiansheng, Wang Ruiqiang, Zhao Jiaolong, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Early Jurassic gabbro-granite complex in the middle segment of the Gangdese belt and its implications for tectonic evolution of Neo-Tethys: A case study of the Dongga pluton Xigaze[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3 569 ~ 3 580 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[J]. *Precambrian Research*, 51(1 ~ 4): 1 ~ 25.
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 22: 825 ~ 828.

- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. London: Longman Group UK Limited, 1~380.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D. Magmatism in ocean basins[C]. Geological Society Publication, 42: 313~345.
- Van Achterbergh E, Ryan C G, Jackson S E, *et al.* 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS[A]. Sylvester P J. Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences. Principles and Applications[C]. Mineralogical Society of Canada Short Course Series, 29: 239~243.
- Wang Qing, Zhu Dicheng, Cawood P A, *et al.* 2015. Eocene magmatic processes and crustal thickening in southern Tibet: Insights from strongly fractionated ca. 43 Ma granites in the western Gangdese Batholith[J]. Lithos, 239: 128~141.
- Wang Ruiqiang, Qiu Jiansheng, Yu Sibin, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the Sangsang granitic pluton in the middle segment of the Gangdese belt: Constraints on the petrogenesis and tectonic evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 22(1): 81~91(in Chinese with English abstract).
- Wen Daren, Liu Dunyi, Chung Sunlin, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. Chemical Geology, 252(3~4): 191~201.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Study on the mineralogy genesis of zircon and its constraints on the discussion of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Xiong Shengqing, Zhou Fuhong, Yao Zhengxu, *et al.* 2001. Aeromagnetic Survey in the Middle and Western Part of Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~217(in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jinsui, Li Haibing, *et al.* 2011. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1~33(in Chinese with English abstract).
- Yin An and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211~280.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, *et al.* 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. Chemical Geology, 268(3): 298~312.
- Zhu Dicheng, Wang Qing, Chung Sunlin, *et al.* 2018. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma [A]. Himalayan Tectonics: A Modern Synthesis[C]. Geological Society of London. Special Publications 483. <https://doi.org/10.1144/SP483.14>.
- Zhu Dicheng, Wang Qing, Zhao Zhidan, *et al.* 2015. Magmatic record of India-Asia collision[J]. Scientific Reports, 5: 14 289.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaolin, *et al.* 2011. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 301(1~2): 241~255.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 23(4): 1 429~1 454.
- ### 附中文参考文献
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1~381.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2006. 冈底斯岩浆岩带中岩浆混合作用: 来自花岗杂岩的证据[J]. 岩石学报, 22(4): 835~844.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2008. 西藏冈底斯南带辉长岩及其所反映的壳幔作用信息[J]. 岩石学报, 24(2): 203~210.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1~985.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337~358.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等. 2006b. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲——来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据[J]. 岩石学报, 22(4): 761~774.
- 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 等. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(7): 849~871.
- 江 万, 莫宣学, 赵崇贺, 等. 1998. 青藏高原冈底斯花岗岩带花岗闪长岩及其中岩石包体的岩石学特征[A]. 特提斯地质[C]. 北京: 地质出版社, 22: 90~96.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS 定年方法及应用[J]. 地质学报, 89(12): 2 400~2 418.
- 孟元库, 许志琴, 高存山, 等. 2018. 藏南冈底斯带中段始新世岩浆作用的厘定及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 34(3): 513~546.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281~290.

- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等. 2009. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 1~396.
- 邱检生, 王睿强, 赵姣龙, 等. 2015. 冈底斯中段早侏罗世辉长岩-花岗岩杂岩体成因及其对新特提斯构造演化的启示: 以日喀则东嘎岩体为例[J]. 岩石学报, 31(12): 3 569~3 580.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 王睿强, 邱检生, 喻思斌, 等. 2016. 西藏冈底斯中段桑桑花岗质岩体锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其对岩石成因和构造演化的制约[J]. 高校地质学报, 22(1): 81~91.
- 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[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589.
- 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 等. 2001. 青藏高原中西部航磁调查[M]. 北京: 地质出版社, 1~217.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 85(1): 1~33.

《岩石矿物学杂志》入选世界学术影响力 Q2 期刊

2019 年 10 月, 在中国期刊协会、中国科学技术期刊编辑学会、中国高校科技期刊研究会、全国高等学校文科学报研究会、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司联合召开的“2019 中国学术期刊未来论坛”上, 中国科学文献计量评价研究中心发布了《世界学术期刊影响力指数 WAJCI 年报》, 我刊入选世界学术影响力 Q2 期刊。下表是入选世界学术影响力 Q1、Q2 的地球科学综合和地质学期刊名单。

序号	刊名	WAJCI 指数	学科内 WAJCI 世界排名	类别
Q1期刊				
1	石油勘探与开发	2.169	29/200	地球科学综合
2	Geoscience Frontiers	1.759	46/200	
1	岩石学报	3.995	3/90	地质学
2	地质学报	3.255	9/90	
3	地球科学	2.911	10/90	
4	地质论评	2.801	13/90	
5	第四纪研究	2.108	21/90	
Q2期刊				
1	地学前缘	1.401	70/200	地球科学综合
2	Science China Earth Sciences	1.330	75/200	
1	Acta Geologica Sinica (English Edition)	1.749	24/90	地质学
2	地质与勘探	1.711	25/90	
3	中国地质	1.647	26/90	
4	沉积学报	1.510	29/90	
5	矿床地质	1.451	31/90	
6	地质通报	1.419	32/90	
7	古地理学报	1.388	34/90	
8	Applied Geophysics	1.135	39/90	
9	大地构造与成矿学	1.129	41/90	
10	岩石矿物学杂志	1.064	43/90	
11	地球化学	1.062	44/90	
12	Acta Geochimica	1.019	45/90	