

doi: 10.12029/gc20220211

赵亚云, 刘晓峰, 杨春四, 张小强, 刘远超, 郑常云, 龚福志, 华康. 2022. 西藏唐格砂卡岩型铜多金属矿床 A 型花岗岩的识别及其对成岩成矿的指示[J]. 中国地质, 49(2): 496–517.

Zhao Yayun, Liu Xiaofeng, Yang Chunsu, Zhang Xiaoqiang, Liu Yuanchao, Zheng Changyun, Gong Fuzhi, Hua Kang. 2022. Recongnition of A-type granite and its implication for magmatism and mineralization in Tangge skarn-type Cu-polymetallic deposit, Tibet [J]. Geology in China, 49(2): 496–517 (in Chinese with English abstract).

# 西藏唐格砂卡岩型铜多金属矿床 A 型花岗岩的识别及其对成岩成矿的指示

赵亚云<sup>1</sup>, 刘晓峰<sup>1</sup>, 杨春四<sup>2</sup>, 张小强<sup>3</sup>, 刘远超<sup>1</sup>, 郑常云<sup>1</sup>, 龚福志<sup>1</sup>, 华康<sup>1</sup>

(1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 西藏拉萨 850003; 2. 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东广州 510640; 3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局七总队, 贵州贵阳 550005)

**提要:**【研究目的】唐格砂卡岩型铜多金属矿区位于南冈底斯陆缘火山-岩浆弧西段, 区内铜多金属成矿与石英斑岩体成岩作用关系密切, 但对区内发育的石英斑岩体研究较少, 对于进一步理解矿床成因与指导找矿勘查有一定制约。【研究方法】本文首次报道了区内石英斑岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素结果。【研究结果】石英斑岩表现出富硅 ( $\text{SiO}_2=73.97\% \sim 76.85\%$ )、富铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3=13.03\% \sim 14.06\%$ )、高钾 ( $\text{K}_2\text{O}=2.2\% \sim 4.68\%$ )、高  $\text{FeO}^{\text{T}}$  ( $0.97\% \sim 1.80\%$ )、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  (3.57 ~ 8.22)、A/CNK (1.14 ~ 4.24) 特征; 稀土元素总量高 ( $\sum \text{REE}=478.59 \times 10^{-6} \sim 532.71 \times 10^{-6}$ )、稀土配分曲线呈明显的右倾型或“海鸥型”; 富集 Rb、Th、U、K、Pb 大离子亲石元素 (LILE), 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti、P 及大离子亲石元素 Ba、Sr 等元素; Rb 含量低 ( $69.64 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$ , 小于  $270 \times 10^{-6}$ ),  $10000\text{Ga}/\text{Al}=2.54 \sim 2.71$ , 显示出后碰撞铝质 A 型花岗岩的地球化学特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(78.0 \pm 0.9)\text{Ma}$ , 表明其形成时代为晚白垩世。石英斑岩中锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为正值 (1.5 ~ 5.3, 均值 3.6), 显示了较均一的 Hf 同位素组成; Hf 同位素二阶段模式年龄  $T_{\text{DM}}=1052 \sim 806 \text{Ma}$ , 均值 912 Ma ( $< 1.0 \text{Ga}$ ), 指示岩浆主要来源于新生生长英质下地壳的部分熔融。【结论】结合区域地质资料, 认为唐格铝质 A 型花岗岩是形成于印度大陆向北俯冲于欧亚大陆引起的碰撞后伸展构造环境。唐格石英斑岩中 Cu、Pb、Zn、Au 背景含量较高, 说明铝质 A 型花岗岩为唐格砂卡岩型铜多金属矿提供了一定的成矿物质。冈底斯带自东向西在 69 ~ 89 Ma 至少存在一次与晚白垩世岩浆作用有关的铜多金属成矿作用, 其唐格砂卡岩型铜多金属矿是冈底斯带中段南部在燕山晚期造山后岩浆活动的成矿响应。

**关键词:** 铜多金属矿床; 砂卡岩; 铝质 A 型花岗岩; 锆石 U-Pb; 地球化学; Hf 同位素; 矿产勘查工程; 唐格; 西藏  
**创新点:** 唐格矿区晚白垩世铝质 A 型花岗岩的发现不仅能够极大地促进唐格砂卡岩型铜多金属矿的勘查找矿, 而且还推动了朱诺整装勘查区及周边扩大找矿方向和新的找矿思路。

中图分类号: P597; P618.41; P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0496-22

## Recongnition of A-type granite and its implication for magmatism and mineralization in Tangge skarn-type Cu-polymetallic deposit, Tibet

ZHAO Yayun<sup>1</sup>, LIU Xiaofeng<sup>1</sup>, YANG Chunsu<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoqiang<sup>3</sup>, LIU Yuanchao<sup>1</sup>,

收稿日期: 2019-11-20; 改回日期: 2022-03-08

基金项目: 中国地质调查局项目 (121201004000160901-47, WKZB1911BJM300369-001) 和西藏自治区专项基金项目 (201904, ZXZJ2020005, 54000021210200001048) 联合资助。

作者简介: 赵亚云, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事青藏高原矿产勘查与研究工作; E-mail: 1019517293@qq.com。

ZHENG Changyun<sup>1</sup>, GONG Fuzhi<sup>1</sup>, HUA Kang<sup>1</sup>

(1. NO.2 Geological Team, Geological Mining exploration and exploitation Bureau of Tibet autonomous region, Lhasa 850003, Tibet, China; 2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. NO.7 Geological Team, Non-ferrous metals and Nuclear industry geological exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, Guizhou, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** The mineralization of Tangge skarn-type Cu-polymetallic ore district, located in the western part of the Gangdese volcano-magmatic arc, is closely related to the diagenesis of quartz porphyry in the mining area. There is little research on the quartz porphyry developed in the mining area, which restricts the further understanding of the genesis of the deposit and the guidance of prospecting and exploration. **[Methods]** We firstly reports zircon U-Pb age and Hf isotope, and petrogeochemistry of quartz porphyry in the Tangge ore district. **[Results]** The quartz porphyry is characterized by high silicon ( $\text{SiO}_2=73.97\%-76.85\%$ ), aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3=13.03\%-14.06\%$ ), potassium ( $\text{K}_2\text{O}=2.2\%-4.68\%$ ),  $\text{FeO}^{\text{T}}(0.97\%-1.80\%)$  contents, and high  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  ratios (3.57–8.22) and A/CNK= values(1.14–4.24). The quartz porphyry have high REE ( $\sum \text{REE}=478.59 \times 10^{-6}-532.71 \times 10^{-6}$ ) and its chondrite-normalized REE distribution patterns diagram show obvious right-leaning or “gull” type. They are enriched in Rb, Th, U, K and Pb, depleted in Nb, Ta, Ti, P, Ba and Sr. The low contents of Rb ( $69.64 \times 10^{-6}-249.00 \times 10^{-6}$ , less than  $270 \times 10^{-6}$ ) and high  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  ratios (2.54–2.71), indicate that the quartz porphyry are post-collisional and aluminous A-type granite. LA-ICP-MS zircon dating for quartz porphyry yields a weighted mean age of  $(78.0 \pm 0.9)$  Ma, suggesting that they formed in the Late Cretaceous. Their zircons have positive  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values (+1.5 – +5.3, averages of +3.6), showing a relatively homogeneous Hf isotopic composition. Two-stage Hf model ages ( $T_{2\text{DM}}=1052-806$  Ma, averages of 912 Ma, less than 1.0 Ga), indicate that they were mainly generated by partial melting of the juvenile felsic lower crust. **[Conclusions]** Combined with previous research, we proposed that the Tangge quartz porphyry were formed in the post-collisional extensional tectonic environment, which was resulted from the northward subduction of the Indian continent to the Eurasian continent. Tangge quartz porphyry has relatively high background content of Cu, Pb, Zn and Au, which suggest that genetical relationship between the aluminous A-type granitic magmatism and Tangge skarn-type Cu mineralization. It is inferred that Gangdese Belt at least develops a period of Cu polymetallic mineralization related to Late Cretaceous magmatism during 69–89 Ma, however, Tangge skarn-type Cu polymetallic deposits response to magmatism in the middle segment of the Southern Gangdese Belt during late Yanshanian.

**Key words:** Copper polymetallic deposit; skarn; aluminous A-type granite; zircon U - Pb age; geochemistry; Hf isotope; mineral exploration engineering; Tangge; Tibet

**Highlights:** The discovery of Late Cretaceous aluminous A-type granite can not only greatly promote the exploration and prospecting of tangge skarn copper polymetallic deposit in ore district, but also promote the expansion of prospecting direction and new prospecting ideas in Zhunuo integrated exploration area and its surroundings.

**About the first author:** ZHAO Yayun, male, born in 1988, engineer, mainly engaged in research and geological mineral exploration in Qinghai-Tibetan Plateau; E-mail: 1019517293@qq.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. 121201004000160901-47, No. WKZB1911BJM300369-001) and the geological prospecting fund of Tibet Autonomous Region (No.201904, No. ZXZJ2020005, No. 54000021210200001048).

## 1 引言

冈底斯带位于青藏高原的西南部(图1a, b),具有得天独厚的岩浆作用及其成矿作用,在青藏高原碰撞造山与成矿作用研究方面取得了重大成果进展引人瞩目(侯增谦等,2003;Hou et al., 2009;秦克

章等,2014;Huang et al.,2020;Tang et al.,2021;赵亚云等,2021;Yang et al.,2022)。近年来,前人在冈底斯带白垩纪岩浆作用(和钟铎等,2006;Wen et al., 2008;何利等,2009;Ji et al., 2009;管琪等,2010;Zhang et al., 2010;江军华等,2011;刘建兵等,2012;曲晓明等,2012;丁鹏飞等,2014;关俊雷等,2014;

谢龙等,2015;张乐,2015;Zhu et al.,2017;秦松等,2018;邱婵媛等,2018;张泽明等,2019)和矿床成因研究方面取得了丰硕的研究成果(赵元艺等,2011;高顺宝等,2011;余红霞等,2011;定立等,2012;王江朋等,2012;姚晓峰等,2012,2013;李小赛等,2013;王力圆等,2014;于玉帅等,2015;张乐,2015;田坎等,2019),如冈底斯岩浆岩带的岩浆作用是幕式的,具有3个明显的强烈爆发高峰期及爆发期后的次级小高峰,前者分别为晚白垩世(95~90 Ma)、早始新世(52~48 Ma)和早一中中新世(18~14 Ma),后者分别为晚白垩世(70~65 Ma、78~73 Ma)、渐新世(30~23 Ma)和晚中新世(10~8 Ma);冈底斯带内岩浆作用与其斑岩-矽卡岩型铜多金属成矿作用密切,其冈底斯成矿带又位于南冈底斯岩基之中,是中国重要的铜矿资源富集区,已探明的驱龙、甲玛、厅宫、雄村、朱诺、尕尔穷、帮布勒、尼雄等超大型—大型斑岩铜多金属矿床,铜矿资源量超过3000万t。以上成果为认识和理解冈底斯带白垩纪岩浆作用时空格架和成矿作用提供了丰富的资料。

唐格矽卡岩型铜多金属矿床位于西藏昂仁县亚木乡萨拉达村北,为西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队在开展的“西藏昂仁—谢通门朱诺铜矿整装勘查区矿产调查与找矿预测”时发现的一处具有巨大铜成矿潜力的矿床,其Cu+Pb+Zn资源量9.96万t,伴生银200.28 t(在MRAS2.0操作平台下,对其资源量进行最小找矿靶区预测,其预测结果为铜资源量44.78万t),成为了近年来取得重大找矿突破的斑岩型-矽卡岩型铜-钼多金属成矿带的重要组成部分。矿区内岩浆侵入活动强烈,出露的岩石主要有石英斑岩、花岗闪长岩和闪长玢岩(图1c)。对于唐格铜多金属矿床,前人不仅开展了详细的调查和找矿勘查工作<sup>①</sup>,而且还进行了详细的矿床地质特征和流体包裹体研究(申亚辉,2016),结果表明铜多金属矿化与石英斑岩体的关系密切,成矿与深部岩浆流体密切相关。虽然前人已取得初步研究成果,但是对于区内发育的岩浆岩研究较少,这对进一步理解矿床成因和找矿勘查有一定制约作用。

本文选取与矿化有关的石英斑岩为研究对象,开展详细的野外地质学、岩相学、地球化学和锆石

U-Pb年代学与Lu-Hf同位素研究,总结其野外地质和岩相学特征,厘定其成岩时代,探讨岩石成因,试图对晚白垩世岩浆演化与成矿提供新的制约。

## 2 地质概况

唐格矿区位于南冈底斯陆缘火山-岩浆弧西段(潘桂棠等,2006;赵亚云等,2017),矿区出露地层主要为侏罗系一下白垩统桑日群(麻木下组和比马组)和古近系典中组两套火山-沉积岩石组合及第四系(图1c)。麻木下组( $J_3-K_1m$ )岩石类型为粉砂岩、泥晶灰岩、生物碎屑灰岩,与上覆地层比马组呈整合接触。比马组( $K_1b$ )以中酸性火山喷发岩与沉积岩为主,可以分为3个段:一岩段为土灰色厚层状凝灰质砂岩;二岩段岩石类型有灰色条带状灰岩夹透镜状矽卡岩、褐色碎裂状矽卡岩、孔雀石化石英脉;三岩段为深灰色厚层状砂岩。典中组( $E_1d$ )为一套安山质晶屑凝灰岩,与下伏比马组呈角度不整合接触。构造发育,为北东向和近南北向的断裂构造。断层处见破碎带,破碎带蚀变极强,地表所见蚀变类型主要有褐铁矿化、钾化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、硅化等。破碎带裂隙充填石英、硫化物、绢云母、绿泥石、方解石等细脉。矿区内火山及岩浆活动强烈,火山岩主要以林子宗群典中组火山地层的形式产于区内的西部,侵入岩主要为石英斑岩、花岗闪长岩、黑云花岗闪长岩及脉状产出的闪长玢岩脉,其中石英斑岩体与矽卡岩成矿密切相关。

矿区目前发现4条矽卡岩带,圈定4个铜多金属矿(化)体(图1c),均产于比马组二段矽卡岩及矽卡岩化灰岩中,呈层状或似层状产出。矿化主要发育在大理岩、凝灰岩、火山角砾岩及其中的矽卡岩。矿石矿物主要为闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、含方铅矿和黄铜矿。脉石矿物主要为石榴石、透辉石、绿帘石、绿泥石、硅灰石、石英、方解石等。蚀变主要有石榴子石化、辉石化、硅灰石化、绿帘石化、绿泥石化、硅化以及碳酸盐化。Ⅱ号铜矿化矽卡岩带为主矿带,产状 $4^\circ \angle 65^\circ \sim 78^\circ$ ,长1600 m,宽20~180 m。其中Ⅱ-1铜多金属主矿体。控制长390~487 m,厚度1.4~30.5 m(平均厚度8.0 m),控制斜深155 m,平均品位:Cu 1.40%、Pb 1.03%、Zn 2.34%、Ag 116.19 g/t,估算Cu+Pb+Zn资源量约9.96万t,伴生银约200.28 t。

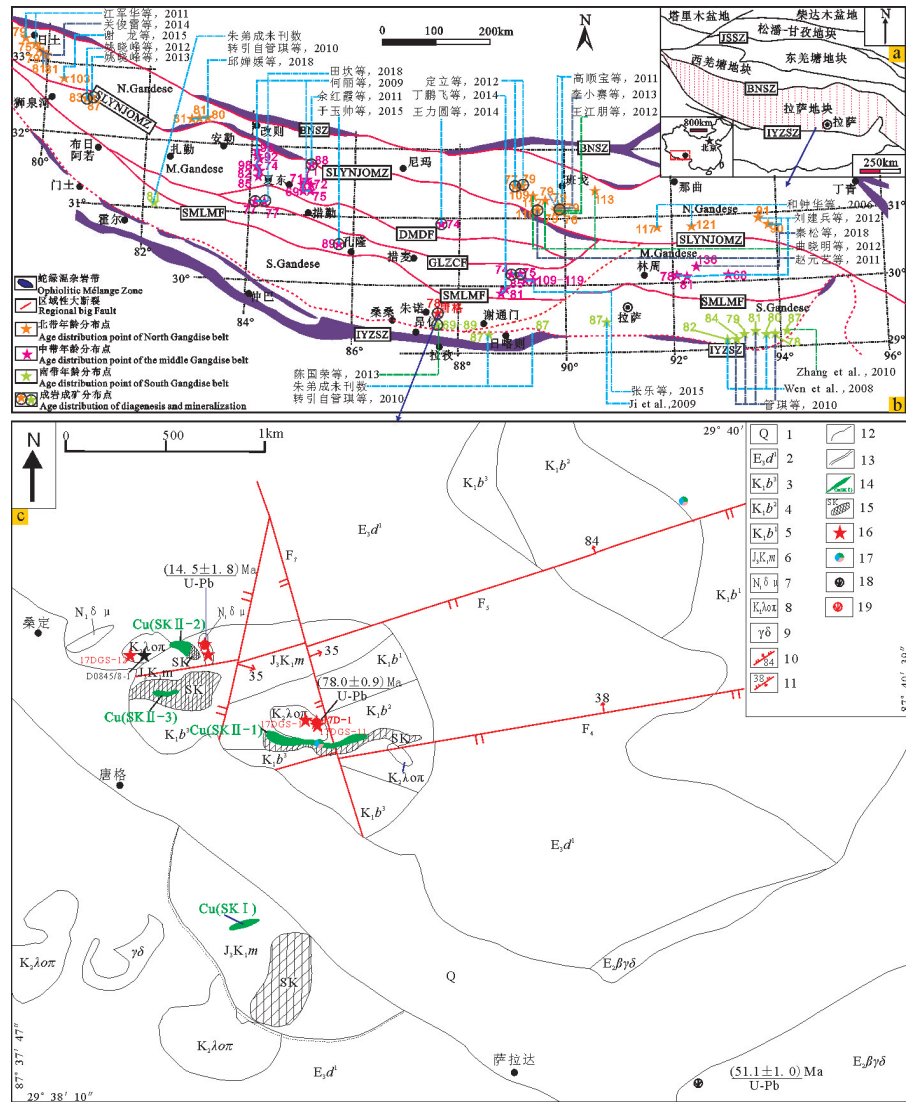


图1 研究区大地构造位置(a)(底图据赵亚云等,2019)、冈底斯带白垩世花岗岩时空格架分布图(b)(底图据朱弟成等,2006)、西藏昂仁县唐格地质简图(c)

IYZSZ—印度河—雅鲁藏布江缝合带;SMLMF—沙莫勒—麦拉—洛巴堆—米拉山断裂;GLZCF—噶尔—隆格尔—扎日南木错—错麦断裂带;DDMF—达瓦错—马尔下—德庆断裂;SLYNJOMZ—狮泉河—拉果错—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带;BNSZ—班公湖—怒江缝合带;JSSZ—金沙江缝合带;N.Gandese—北冈底斯带(或北部拉萨地块);M.Gandese—中冈底斯带(或中部拉萨地块);S.Gandese—南冈底斯带(或南部拉萨地块);1—第四系;2—典中组一段;3—比马组三段;4—比马组二段;5—比马组一段;6—麻木下组;7—闪长玢岩;8—石英斑岩;9—花岗闪长岩;10—正断层;11—逆断层;12—地质界线;13—角度不整合;14—砂卡岩型矿体;15—砂卡岩;16—采样位置及编号;17—矿产地;18—同位素年龄;19—本次同位素年龄

Fig.1 The geotectonic location of the study area (a) (after Zhao Yayun et al., 2019),distribution map of temporal and spatial framework of Cretaceous granites in Gangdese belt (b) (after Zhu Dicheng et al.,2006), and geological map of Tange in Angren County, Tibet (c)

IYZSZ— Indus River— Yarlung— Tsangpo Suture Zone; SMLMF— Shamole— Maila— Luobadui— Milashan Fault; GLZCF— Geer— Longgeer— Zharinannmuco— Cuomai Fault; DDMF— Dawacuo— Maerxia— Deqing Fault;SLYNJOMZ— Shiquan River— Laguocuo— Yongzhu— Jiali Ophiolitic Mélange Zone;BNSZ— Bangonghu— Nujiang Suture Zone;JSSZ— Jinshajiang Suture Zone;N.Gandese— Northern Gangdese (or Northern Lhasa subterranean); M.Gandese— Middle Gangdese (or Middle Lhasa subterranean); S.Gandese— Southern Gangdese (or Southern Lhasa subterranean); 1— Quaternary; 2— First Member of the Dianzhong Formation;3— Third Member of the Bima Formation;4— Second Member of the Bima Formation; 5— First Member of the Bima Formation;6— Mamuxia Formation;7— Diorite porphyrite;8— Quartz porphyry;9— Granodiorite;10— Normal fault; 11— Reverse fault;12— Geological boundary;13— Angular unconformity;14— Ore body of skarn— type;15— Skarn;16— Sampling location and number; 17— Ore field; 18— Isotopic age; 19— Isotopic age of this study

### 3 样品采集和岩相学

矿区内发育5个石英斑岩体,大小不等( $<0.2 \text{ km}^2$ ),呈岩株状产出与围岩呈侵入接触(图2a)。本次研究共采集5块样品,采样位置见图1c,地理坐标:17D-1和17DGS-1( $29^{\circ}39'11'' \text{ N}$ ,  $87^{\circ}38'45'' \text{ E}$ )、17DGS-11( $29^{\circ}39'10'' \text{ N}$ ,  $87^{\circ}38'44'' \text{ E}$ )、17DGS-12( $29^{\circ}39'20'' \text{ N}$ ,  $87^{\circ}38'09'' \text{ E}$ )、D0845/8-1( $29^{\circ}39'19'' \text{ N}$ ,  $87^{\circ}38'14'' \text{ E}$ )。石英斑岩主要为斑状结构,斑晶主要以石英、长石为主(图2b),约占20%。石英呈他形粒状,粒径为1~2 mm,具波状消光,见边缘被溶蚀呈圆状或港湾状(图2c,d);长石主要以斜长石为主,呈柱状,粒径为0.5~2 mm,表面见黏土化、绢云母化,较浑浊(图2d)。基质约占80%,呈显微嵌晶状,粒径多在0.02~0.2 mm,成分见主要为长石、石英,发育弱重结晶作用,颗粒多见略呈浑圆状,部分见围绕、交代斑晶矿物(图2d)。其中,长石见斜长石、碱性长石均可见,发育黏土化、绢云母化。另见少量细小鳞片状黑云母,发育弱的绿泥石化。

### 4 分析测试方法

本次研究选择17D-1进行锆石U-Pb年代学和锆石Hf同位素测试,其余4件样品进行地球化学测试。锆石分选在河北廊坊区域地质调查研究所实验室完成,主、微量和稀土元素和锆石U-Pb测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,Hf同位素原位分析是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室测试完成。利用无污染标准技术对锆石进行分选,在双目显微镜下尽量挑选出无裂缝、无包体、透明干净的自形锆石颗粒,将其与标样一起置于环氧树脂中制靶,然后磨至一半,使锆石内部暴露。进而对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图像分析,以观察锆石的内部结构、选择无裂纹、无包裹体的部位测试点位。锆石LA-ICP-MS U-Pb测试仪器型号为Agilent7700型ICP-MS,激光剥蚀系统为美国Coherent公司的GeoLas2005准分子固体进样系统,激光斑束直径为32  $\mu\text{m}$ ,剥蚀

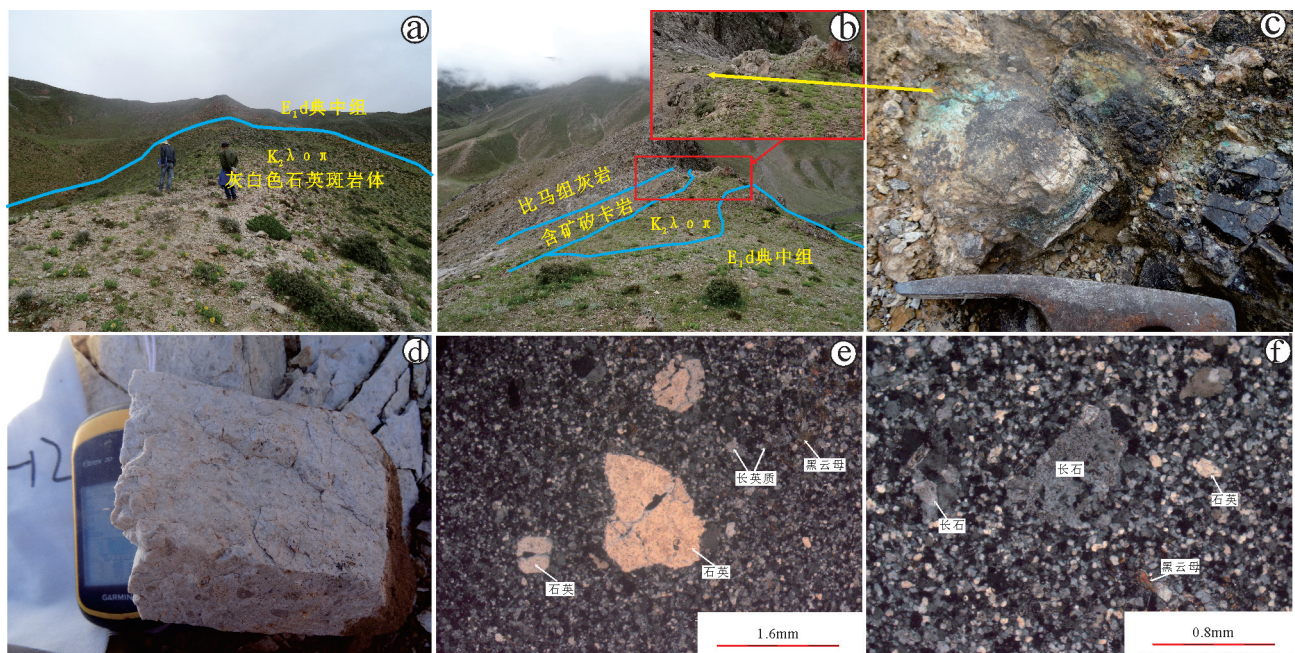


图2 唐格石英斑岩野外露头、岩石手标本及显微镜下特征

a—石英斑岩露头;b—砂卡岩带及接触关系露头;c—含矿砂岩;d—石英斑岩手标本;e,f—斑状结构

Fig.2 Photographs showing field and hand specimen characteristics for the Tangge quartz porphyry  
a—Outcrops of quartz porphyry; b—Sharn belt and contact outcrop; c—Ore-bearing sharn; d—Hand specimens of quartz porphyry; e,f—Porphyritic texture

深度为20~40  $\mu\text{m}$ 。采用He作为剥蚀物质的载气,测试过程中采用每隔5个测点中插入1个标准样品点,测试样品之前和之后分别插入2个91500和GJ-1测点。运用中国地质大学(武汉)开发的ICPMSDataCal 8.3处理信号(Liu et al.,2008),数据处理过程中采用91500标准锆石作为外标, $^{29}\text{Si}$ 作为内标。样品谐和图解和加权平均年龄采用Isoplot 3.0完成(Ludwig et al.,2003)。锆石Lu-Hf同位素原位分析点位同锆石U-Pb测年位置相同,测试仪器为Neptune Plus多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和RESOLUTION M-50激光剥蚀系统。激光剥蚀束斑为44  $\mu\text{m}$ ,频率为10 Hz,激光能量为100  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,分析数据包括20 s的背景信号和50 s的剥蚀信号。相关仪器运行条件及详细分析流程见吴福元等(2007)。全岩主量元素测定利用XRF分析完成,分析精度优于5%。全岩微量、稀土元素含量测定采用Agilent7500a型ICP-MS仪器上完成,元素含量大于 $10\times 10^{-6}$ 的分析误差小于5%,而含量小于 $10\times 10^{-6}$ 的分析误差小于10%。

## 5 分析测试结果

### 5.1 锆石U-Pb年代学

锆石U-Pb年代学结果见表1和图3b。锆石CL图像显示(图3a),锆石颗粒呈长柱状或柱状,长径为70~130  $\mu\text{m}$ ,宽为60~85  $\mu\text{m}$ ,长宽比为1:1~2:1,自形程度较好,具有清晰的内部结构和振荡环带,具有典型岩浆锆石特征(Belousova et al., 2002)。锆石的Th和U的含量高,Th含量为 $703\times 10^{-6}\sim 7585\times 10^{-6}$ ,U含量为 $1139\sim 12428\times 10^{-6}$ ,Th/U比值为0.39~0.66,同样也显示出典型岩浆锆石特征(Belousova et al., 2002;高一鸣等,2012)。本次研究共有20个测试点,其中测点4和9的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(431\pm 2.8)$  Ma和 $(445\pm 3.6)$  Ma,两者结果较为一致,应该为继承或捕获锆石(证据之一是锆石阴极发光照片颜色较其他锆石浅,环带不明显;证据之二是测点年龄离群)。测点8可能由于Pb丢失,明显偏离谐和曲线,予以剔除。剩余17个样品测点落在谐和线上及其附近(图3b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为74.1~78.0 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平

表1 唐格石英斑岩锆石LA-ICP-MS 锆石U-Pb同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircon from the quartz porphyry in Tange ore district

分析 点号	含量/ $10^6$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
17D-1 石英斑岩, 20个测点, 其中不包括测点4,8,9,年龄为 $(78.0\pm 0.9)$ Ma, MSWD=0.60														
1	247	4786	9041	0.53	0.04820	0.00116	0.08133	0.00194	0.01217	0.00010	79.2	1.8	78.0	0.7
2	155	2648	7221	0.37	0.04758	0.00168	0.07835	0.00279	0.01187	0.00009	76.6	2.6	76.1	0.6
3	227	4551	9419	0.48	0.04799	0.00107	0.07689	0.00170	0.01156	0.00008	75.2	1.6	74.1	0.5
4	229	703	1139	0.62	0.06002	0.00154	0.59526	0.01573	0.07152	0.00061	474.0	10	445.0	3.6
5	227	3621	8517	0.43	0.04781	0.00210	0.07869	0.00205	0.01194	0.00009	76.9	1.9	76.5	0.6
6	220	4103	9213	0.45	0.04777	0.00112	0.07986	0.00187	0.01209	0.00010	78.0	1.8	77.5	0.6
7	256	4969	10333	0.48	0.04749	0.00103	0.07808	0.00166	0.01189	0.00008	76.3	1.6	76.2	0.5
8	251	4399	9661	0.46	0.04717	0.00110	0.08318	0.00192	0.01276	0.00010	81.1	1.8	81.7	0.6
9	221	787	1194	0.66	0.05702	0.00139	0.54529	0.01302	0.06915	0.00046	442	8.6	431.0	2.8
10	221	4447	9413	0.47	0.04748	0.00136	0.07686	0.00178	0.01170	0.00008	75.2	1.7	75.0	0.5
11	268	5202	9982	0.52	0.04793	0.00132	0.08018	0.00173	0.01210	0.00008	78.3	1.6	77.5	0.5
12	273	5355	11288	0.47	0.04916	0.00100	0.08068	0.00161	0.01186	0.00007	78.8	1.5	76.0	0.4
13	247	5180	9431	0.55	0.04932	0.00098	0.08009	0.00164	0.01172	0.00009	78.2	1.5	75.1	0.6
14	275	5069	10416	0.49	0.04636	0.00152	0.08143	0.00221	0.01197	0.00009	79.5	2.1	76.7	0.5
15	177	2636	6751	0.39	0.04778	0.00216	0.07866	0.00234	0.01194	0.00009	76.9	2.2	76.5	0.6
16	243	4716	8978	0.53	0.04682	0.00107	0.07773	0.00172	0.01201	0.00008	76.0	1.6	77.0	0.5
17	373	7585	12428	0.61	0.04728	0.00095	0.07894	0.00157	0.01207	0.00008	77.1	1.5	77.3	0.5
18	157	2990	6607	0.45	0.04734	0.00121	0.07732	0.00197	0.01180	0.00009	75.6	1.9	75.6	0.5
19	295	5848	11313	0.52	0.04769	0.00098	0.07984	0.00161	0.01212	0.00008	78.0	1.5	77.7	0.5
20	250	4883	10222	0.48	0.04804	0.00111	0.07965	0.00181	0.01200	0.00008	77.8	1.7	76.9	0.5

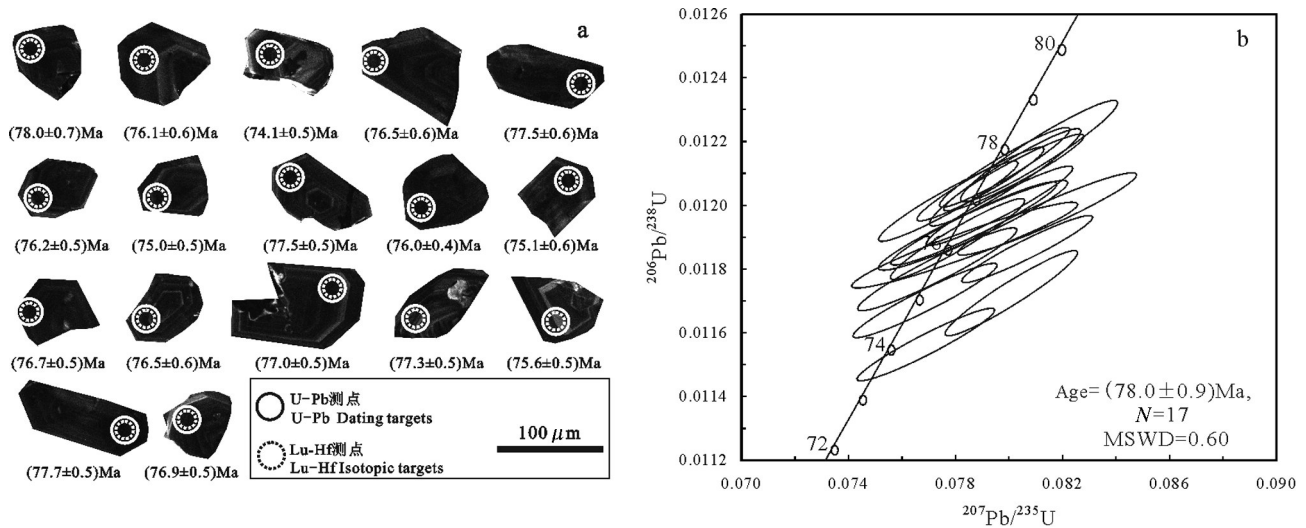


图3 唐格石英斑岩(17D-1)LA-ICP-MS 锆石CL图(a)和U-Pb年龄谐和图(b)

Fig.3 Representative cathodoluminescence(CL) (a) and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram (b) of zircon from the quartz porphyry (17D-1) in Tangge

均年龄为 $(78.0 \pm 0.9) \text{Ma}$  ( $N=17$ ;  $\text{MSWD}=0.60$ )。因此, $(78.0 \pm 0.9) \text{Ma}$ 可以代表石英斑岩的岩浆结晶年龄,其形成时代为晚白垩世。

## 5.2 Hf同位素特征

锆石有很低的Lu/Hf比值,因此,锆石在形成后基本没有明显的放射性成因Hf的积累,所以测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表其形成时体系的Hf同位素组成(陈道公等,2009)。本次锆石Hf同位素测点

的位置见图3a,测点的锆石Hf同位素测试结果见表2, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和两阶段模式年龄用岩体中各锆石测点年龄计算。本次研究14个测点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 $0.165483 \sim 0.312681$ (均值 $0.215414$ ), $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 $0.002940 \sim 0.006750$ (均值 $0.004009$ ), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 $0.282772 \sim 0.282884$ (均值 $0.282833$ )。所有测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 大于 $0.002$ ,表明这些锆石形成后有放射性成因Hf的积累(吴福元等,2007);锆石Hf同

表2 唐格石英斑岩锆石Lu-Hf同位素数据

Table 2 In situ Lu-Hf isotopic data of zircons from the quartz porphyry in Tangge ore district

测点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$T_{\text{DM1}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$
17D-1-01	78.0	0.236174	0.002104	0.005135	0.000065	0.282772	0.000013	0.282765	0.0	1.5	-0.85	763	1052
17D-1-02	76.1	0.187949	0.000210	0.003416	0.000011	0.282851	0.000008	0.282846	2.8	4.3	-0.90	608	871
17D-1-03	74.1	0.166660	0.001098	0.003121	0.000017	0.282822	0.000011	0.282818	1.8	3.3	-0.91	645	935
17D-1-06	77.5	0.217912	0.001650	0.003846	0.000015	0.282867	0.000008	0.282862	3.4	4.9	-0.88	590	834
17D-1-07	76.2	0.168475	0.000772	0.003060	0.000009	0.282780	0.000009	0.282775	0.3	1.8	-0.91	708	1031
17D-1-10	75.0	0.216528	0.000383	0.003881	0.000013	0.282856	0.000008	0.282850	3.0	4.4	-0.88	608	862
17D-1-11	77.5	0.212374	0.001478	0.003798	0.000031	0.282842	0.000010	0.282837	2.5	4.0	-0.89	628	891
17D-1-12	76.0	0.240076	0.000425	0.004393	0.000004	0.282828	0.000008	0.282821	2.0	3.4	-0.87	661	926
17D-1-13	75.1	0.251276	0.002059	0.004545	0.000038	0.282801	0.000012	0.282795	1.0	2.5	-0.86	706	987
17D-1-14	76.7	0.202583	0.000434	0.003500	0.000007	0.282825	0.000008	0.282820	1.9	3.4	-0.89	649	930
17D-1-16	77.0	0.188106	0.000773	0.003352	0.000003	0.282848	0.000007	0.282843	2.7	4.2	-0.90	611	877
17D-1-17	77.3	0.249521	0.000958	0.004390	0.000018	0.282869	0.000008	0.282862	3.4	4.9	-0.87	597	833
17D-1-18	75.6	0.165483	0.000524	0.002940	0.000007	0.282825	0.000008	0.282821	1.9	3.4	-0.91	639	929
17D-1-19	77.7	0.312681	0.002256	0.006750	0.000105	0.282884	0.000016	0.282874	4.0	5.3	-0.80	616	806

注:具体计算过程参见吴福元等(2007), $\lambda_{\text{Lu}}=1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ , $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.0332$ , $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Lu})_{\text{CHUR},0}=0.282772$ , $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.0384$ , $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Lu})_{\text{DM}}=0.28325$ , $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c=0.015$ (陈道公等,2009)。

位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为正值, 介于 1.5 ~ 5.3 (均值 3.6); 显示了较为均一的 Hf 同位素组成; 单阶段模式年龄范围为 590 ~ 763 Ma, 均值为 645 Ma; 二阶段模式年龄范围为 806 ~ 1052 Ma, 均值 912 Ma。

### 5.3 岩石地球化学特征

主量元素、微量元素及稀土元素结果见表 3、表 4、图 4、图 5。

唐格石英斑岩主量元素结果具有如下特征: (1)  $\text{SiO}_2=73.97\% \sim 76.85\%$ , 均值 75.10%,  $\text{K}_2\text{O}=2.2\% \sim 4.68\%$ , 均值 3.72%, 全碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) =  $2.58\% \sim 7.77\%$ , 均值为 5.37%, 在侵入岩  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  分类图上, 样品点投落到花岗岩区域 (图 4a); (2) 碱度率指数 (*A.R.*) 为 1.44 ~ 2.63, 均值 2.04, 在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  关系图上, 样品均落在钙碱-高钾钙碱性系列范围 (图 4b); (3) 富钾贫钠,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.50 \sim 5.79$  (均值 2.93), 其中 1 件样品  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=48.43$ , 富钾可能原因是岩石发育一定的钾化或斑岩中钾长石 (斑晶) 含量高造成; (4)  $\text{Al}_2\text{O}_3=13.03\% \sim 14.06\%$ , 均值 13.59%, 铝饱和指数 (*A/CNK*) 为 1.137 ~ 4.241 (均值 2.152), 在 *A/CNK-A/NK* 图解上 (图 4c), 样品均位于过铝质区域; (5)  $\text{FeO}^{\text{T}}$  高 ( $0.97\% \sim 1.80\%$ , 均值 1.40%,  $> 1\%$ ),  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  高 ( $3.57 \sim 8.22$ , 均值 5.91,  $> 2.6$ ), 具 A 型花岗岩的特征 (Whalen et al., 1987; 王强等, 2000); (6) 标准矿物中主要以石英 ( $Q=37.39 \sim 69.07$ , 均值 51.54)、碱性长石 ( $A=16.47 \sim 53.20$ , 均值 35.89) 为主, 其次含高含量刚玉 ( $C=2.1 \sim 11.7$ , 均值 6.7) 分子; (7) 岩石分异指数 (*DI*) =  $83.18 \sim 92.22$  (均值 88.12)。

稀土元素总量高 ( $\sum \text{REE}=478.59 \times 10^{-6} \sim 532.71 \times 10^{-6}$ , 均值  $510.17 \times 10^{-6}$ ), 较地壳岩浆岩平均值 ( $164 \times 10^{-6}$ ) 高近 3 倍。在 Sun and MacDonough (1989) C1 球粒陨石数据标准化的稀土配分模式图中 (图 5a), 3 件样品曲线呈明显的右倾型或“海鸥型”,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 1.90 ~ 9.63, 轻稀土较重稀土分馏明显, 具有极强或明显负铕异常 ( $\delta\text{Eu}=0.06 \sim 0.52$ , 均值 0.22)。另 1 件样品可能受后期热液蚀变的影响, 在稀土配分模式图中 (图 5a) 中具右倾型, 无铕异常 ( $\delta\text{Eu}=1$ )。微量元素方面, Rb 含量介于  $69.64 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$  (均值  $179.71 \times 10^{-6}$ , 小于  $270 \times 10^{-6}$ , 具 A 型花岗岩特征, 王强等, 2000), Ba 含量介于  $129 \times 10^{-6} \sim 451.9 \times 10^{-6}$  (均值  $247.40 \times 10^{-6}$ ), Sr 含量介于

表 3 唐格石英斑岩体主量元素分析结果 (%) 及特征参数  
Table 3 Major elements composition and characteristic parameters of the quartz porphyry pluton in Tangge ore district

样号	17GS-1	17GS-11	17GS-12	D0845/8-1
SiO <sub>2</sub>	73.97	75.08	76.85	74.51
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.05	0.27	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.47	13.03	14.06	13.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.53	0.59	0.44	1.23
FeO	1.32	1.03	0.57	0.15
MnO	0.02	0.01	0.00	0.03
MgO	0.22	0.19	0.27	0.34
CaO	0.79	0.72	0.17	1.62
Na <sub>2</sub> O	3.07	3.09	0.38	0.07
K <sub>2</sub> O	4.6	4.68	2.2	3.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.01	0.04	0.11
LOI	1.59	1.46	4.58	-
Total	100.15	100.15	99.98	99.84
A/NK	1.34	1.28	4.68	3.65
A/CNK	1.18	1.14	4.24	2.06
AR	2.51	2.63	1.44	1.58
R1	2748	2801	4649	4256
R2	365	347	322	479
FeOT	1.8	1.56	0.97	1.26
FeO <sup>T</sup> /MgO	8.17	8.22	3.58	3.7
A/MF	4.34	4.83	6.85	5.23
C/MF	0.46	0.49	0.15	1.11
分异指数(DI)	91.42	92.33	85.54	83.18
石英(Q)	37.49	37.82	69.07	61.78
碱性长石(A)	53.2	52.55	16.47	21.35
斜长石(P)	1.52	4.2	0	1.74
钙长石(An)	0.79	2.24	0	1.69
钠长石(Ab)	26.35	26.49	2.84	0.61
正长石(Or)	27.58	28.02	13.63	20.79
刚玉(C)	3.2	2.1	11.69	9.8
紫苏辉石(Hy)	2.51	1.85	1.29	1.74
钛铁矿(Il)	0.12	0.09	0.54	0.55
磁铁矿(Mt)	0.78	0.87	0.47	0.65
磷灰石(Ap)	0.06	0.03	0.09	0.26
锆石(Zr)	0.02	0.02	0.04	

注: 主量元素单位为%;  $\text{FeOT}=\text{FeO}+0.8998 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 标准矿物由 GeokitPro 软件 (专业版) 直接计算获得。

$13.69 \times 10^{-6} \sim 111.35 \times 10^{-6}$  (均值  $65.18 \times 10^{-6}$ ),  $(\text{Nb} + \text{Y} + \text{Ce} + \text{Zr})$  含量总和为  $192.89 \times 10^{-6} \sim 274.42 \times 10^{-6}$  (均值  $221.32 \times 10^{-6}$ ), 其中 2 件样品 10000Ga/Al 比值为 2.54 ~ 2.71 (均值 2.63), 另外 2 件样品由于强过铝



表4 唐格石英斑岩体微量和稀土元素分析结果及特征参数  
Table 4 Trace and rare earth elements analysis of results and characteristic parameters of the quartz porphyry pluton in Tange ore district

样号	17GS-1	17GS-11	17GS-12	D0845/8-1
Cr	9.59	7.17	12.50	35.20
Co	1.27	0.70	0.99	3.60
Ni	2.49	1.75	1.32	16.70
Cu	4.32	4.30	3.66	11.00
Zn	18.98	25.58	10.13	34.90
Ga	19.38	17.56	12.93	-
Mo	0.33	0.43	0.38	-
W	0.73	0.60	21.87	-
Sn	12.19	9.54	12.08	-
Ag	0.05	0.04	0.04	-
Au	1.08	4.51	1.06	-
Rb	188.60	211.60	69.64	249.00
Ba	182.72	129.00	451.90	226.00
Th	20.60	20.61	14.13	47.60
U	4.89	4.66	1.82	10.50
Nb	19.47	20.90	11.55	-
Ta	1.74	1.87	1.28	1.20
La	14.69	15.47	28.99	21.88
Ce	32.89	33.00	53.02	45.16
Pb	16.38	28.73	7.67	34.5
Pr	4.93	5.06	6.84	6.01
Sr	100.30	111.35	13.69	35.4
Nd	21.19	18.10	25.61	24.31
Sm	6.90	7.14	5.45	5.30
Zr	99.19	92.49	186.44	150
Hf	8.58	5.73	6.67	5.40
Eu	0.18	0.15	0.86	1.69
Gd	7.46	7.34	4.39	4.89
Tb	1.33	1.33	0.74	0.75
Dy	8.90	9.00	4.40	4.38
Ho	1.74	1.83	0.83	0.86
V	49.98	46.50	23.42	21.29
Er	5.39	5.66	2.51	2.33
Tm	0.76	0.83	0.33	0.38
Yb	5.01	5.85	2.16	2.37
Lu	0.69	0.81	0.29	0.36
Nb/Ta	11.19	11.16	9.00	-
Zr/Hf	11.57	16.14	27.95	27.78
Rb/Sr	1.88	1.90	5.09	7.03
Ba/La	1.22	0.82	1.53	1.02
Nb*	0.31	0.33	0.28	-
Zr*	1.06	0.96	2.47	1.58
Nb+Y+Ce+Zr	201.53	192.89	274.42	216.45
10000Ga/Al	2.72	2.55	1.74	1.9
ΣREE	517.77	532.71	511.59	520.69
LREE	80.78	78.92	120.77	93.49
HREE	31.28	32.66	15.64	26.53
LREE/HREE	2.58	2.42	7.72	4.24
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.1	1.9	9.63	4.54
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.37	1.4	3.44	2.07
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.02	1.01	1.09	1.04
δEu	0.08	0.06	0.52	0.22
δCe	0.94	0.91	0.89	0.92

注:微量元素单位为 $10^{-6}$ , Au元素单位为 $10^{-9}$ 。

质,富铝造成10000Ga/Al比值偏低(1.74~1.90)。在Sun and MacDonough(1989)原始地幔数据标准化的微量元素蛛网图中(图5b),大离子亲石元素(LILE)中Rb、Th、U、K、Pb明显富集,Ba、Sr亏损;高场强元素(HFSE)中,Nb、Ta、Ti、P亏损明显,但Hf、Zr相对富集,这与岛弧型花岗岩存在明显差异(曲晓明等,2012)。以上岩石地球化学特征显示出A型花岗岩特征。中国碱性花岗岩Cu、Pb、Zn、Au平均含量分别为 $3.5\times 10^{-6}$ 、 $29\times 10^{-6}$ 、 $33\times 10^{-6}$ 、 $0.3\times 10^{-9}$ (史长义,2008),唐格石英斑岩体的Cu含量为 $3.66\times 10^{-6}$ ~ $11\times 10^{-6}$ (高于中国碱性花岗岩背景值1~3倍);Pb、Zn含量分别为 $34.5\times 10^{-6}$ 、 $34.9\times 10^{-6}$ (均高于中国碱性花岗岩背景值1倍多);Au含量为 $1.06\times 10^{-9}$ ~ $4.51\times 10^{-9}$ (高于中国碱性花岗岩背景值3.5~15倍)。

## 6 讨 论

### 6.1 岩石成因

花岗岩通常被分为I型、S型和A型(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Eby, 1990, 1992; King et al., 1997; Chappell and White, 2001; Bonin, 2007)。A型花岗岩则是一类具有特殊地球化学特征以及特定构造背景的花岗岩,且A型花岗岩分为(过)碱性A型花岗岩(AAG)和铝质A型花岗岩(ALAG)(Loiselle and Wones, 1979; 刘昌实等, 2003; 张磊等, 2013)。A型花岗岩判别指标主要有3个:(1)矿物学标志,如碱性A型花岗岩在通常情况下有碱性暗色矿物(如钠闪石-钠铁闪石、霓石-霓辉石、铁橄榄石等)、铝质A型花岗岩通常不含有以上矿物(可见少量裂隙分布的黑云母等),以含碱性长石和斜长石两类长石矿物为主;(2)岩石类型标志,A型花岗岩几乎囊括了除典型S、I型花岗岩以外的其他花岗岩类,但有些高分异的I型花岗岩与其不好分辨(只好借助其他地球化学特征来区分);(3)地球化学标志,①A型花岗岩全铁 $FeO^T$ 含量高,一般大于1%,高分异I型花岗岩一般小于1%(王强等,2000);②A型花岗岩一般具有 $K_2O=4.0\% \sim 6.0\%$ 、 $CaO < 1.8\%$ (I型, $CaO > 1.8\%$ );③A型花岗岩 $FeO^T/MgO$ 比值大,一般大于2.6,而典型I型和S型比值小,分别为2.27和2.38(Whalen et al., 1987);④A型花岗岩Eu的负异常和“海鸥型”配分曲线(Whalen et al., 1987; 江彪等, 2012);⑤高的10000Ga/Al比值(一般大于2.6,

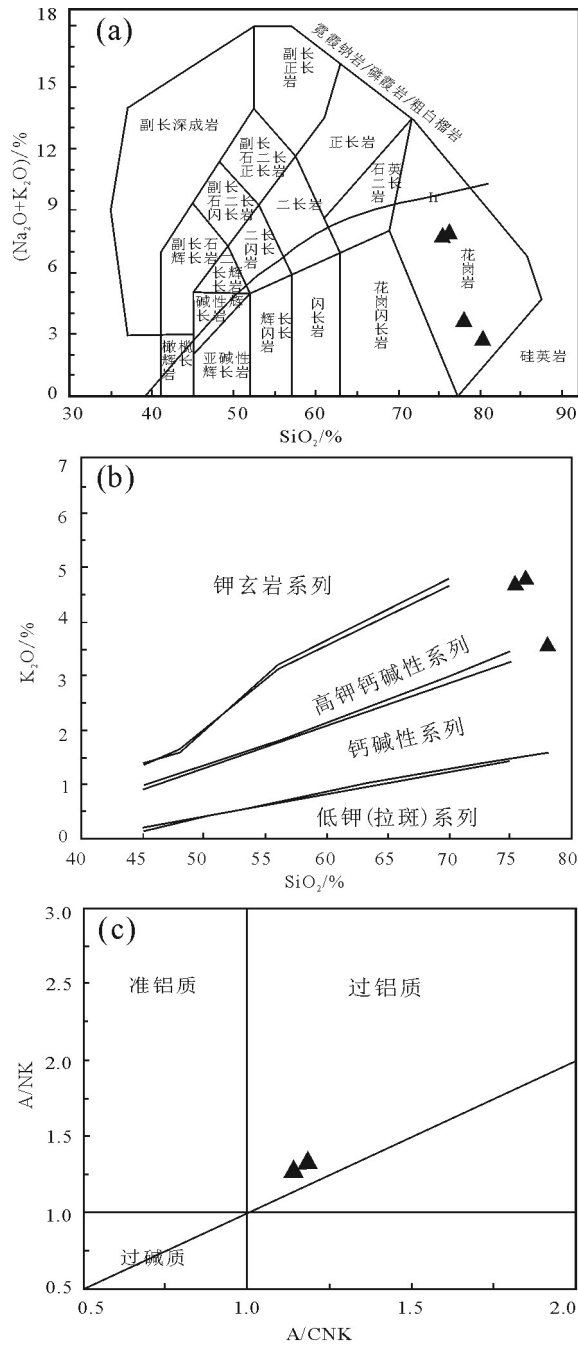


图4 唐格石英斑岩体 TAS图(a)(底图据 Le Maitre,2002)、 $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图(b)(底图据 Peccerillo and Taylor,1976)、 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图(c)(底图据 Maniar and Piccoli,1989)  
 Fig.4 TAS diagram (a) (after Le Maitre,2002) and  $\text{SiO}_2$  v.s.  $\text{K}_2\text{O}$  plot (b) (after Peccerillo and Taylor,1976) and  $A/\text{CNK}$  v.s.  $A/\text{NK}$  plot (c) (after Maniar and Piccoli,1989) of the quartz porphyry pluton in Tange ore district

Whalen et al.,1987; 洪大卫等, 1995); ⑥A型花岗岩具有低的Rb含量( $< 270 \times 10^{-6}$ ), 并且具有相对高的

Ba、Sr、 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 、Ga含量(王强等, 2000); ⑦形成温度一般高于 $800^\circ\text{C}$ (I型为 $764^\circ\text{C}$ )(王强等, 2000)。

唐格石英斑岩富硅(75.10%)、高 $\text{K}_2\text{O}$ (其中2件样品大于4.6%, 均值3.72%, 与A型花岗岩类似)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (13.59%)、 $\text{FeO}^T$ (1.40%,  $> 1\%$ , 明显不同于高分异I型花岗岩, 符合A型花岗岩特征)、 $\text{FeO}^T/\text{MgO}$ 比值(5.91,  $> 2.6$ , 明显高于I和S型花岗岩), 低CaO(0.83%, 小于1.8%, 明显与I型花岗岩不符), 显示出典型A型花岗岩的特征(Whalen et al.,1987; 王强等, 2000)。唐格石英斑岩明显负钨异常( $\delta\text{Eu} = 0.22$ )和稀土配分模式曲线呈“海鸥型”特征符合典型A型花岗岩稀土元素特征(Whalen et al.,1987; 江彪等, 2012)。微量元素Rb(均值 $179.71 \times 10^{-6}$ (远远小于 $270 \times 10^{-6}$ ))、Ba(均值 $247.40 \times 10^{-6}$ )、Sr(均值 $65.18 \times 10^{-6}$ )、 $(\text{Nb} + \text{Y} + \text{Ce} + \text{Zr})$ (均值 $221.32 \times 10^{-6}$ )含量也显示出A型花岗岩的特征(王强等, 2000)。除2件样品可能受后期蚀变的影响(主要是硅化和含铝矿物增多)外, 另外2件样品(17DGS-1和17DGS-11)的10000Ga/Al比值为2.54~2.71(均值2.63), 与后造山(PA型)花岗岩的比值相似(2~4; 洪大卫等, 1995), 在A型花岗岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 判别图解(图6a)(Collins et al., 1982)和10000Ga/Al- $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}$ 判别图解(图6b)(Whalen et al., 1987)中, 2件样品均落入A型花岗岩区域内。Rb、Th、U、K和Pb明显富集, Ba和Sr亏损; 高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti和P亏损明显, 但Hf和Zr相对富集, 这与岛弧型花岗岩存在明显差异(曲晓明等, 2012)。唐格石英斑岩矿物裂隙间发育黑云母, 表现出A型花岗岩的特征。成岩矿物主要为石英、碱性长石和斜长石及出现高含量刚玉(C)分子(6.7)及过铝质( $A/\text{CNK} = 1.18 \sim 4.24$ )特征, 符合铝质A型花岗岩特征(刘昌实等, 2003)。综上所述, 唐格石英斑岩显示出铝质A型花岗岩特征。

A型花岗岩的成因模式包括:(1)地幔碱性玄武质岩浆分离结晶的产物, 在其上升过程中可能遭受过地壳物质的混染(Eby, 1990); (2)地幔镁铁质岩浆与地壳岩浆混合(Yang et al., 2006); (3)花岗质熔体抽提后的下地壳麻粒岩残留体在高压下的低程度部分熔融, 该类麻粒岩残留体明显富F和Cl等挥发分(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; King

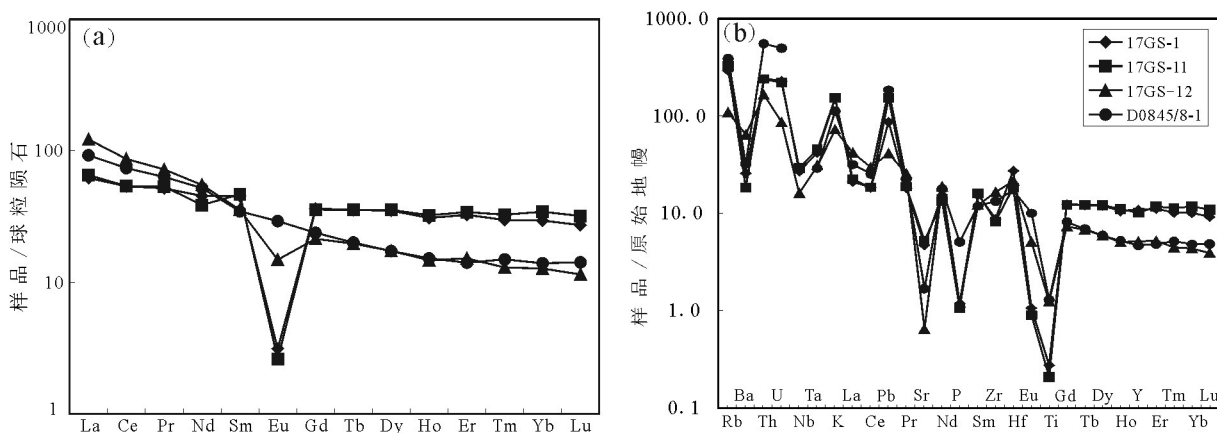


图5 唐格石英斑岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)、原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)  
(原始地幔值和球粒陨石值据 Sun et al., 1989); 图中样品代号见表4

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram(b) of the quartz porphyry pluton in Tangge ore district (normalized values after Sun et al., 1989); See Table 4 for sample code in the figure

et al.,1997); (4)底侵的I型英闪质地壳重熔 (Skjerlie et al., 1993); (5)下地壳底垫的玄武质岩石部分熔融(Frost et al.,1999); (6)下地壳I型岩浆结晶分异(Jiang et al., 2009); (7)麻粒岩相变质沉积岩在高温下部分熔融的产物(>960°C)(Huang et al., 2011; Sun et al., 2011)。

Nb-Ta和Zr-Hf为强不相容元素,在侵蚀和变质作用过程中比较稳定,因此,可以示踪原始岩浆源区的特征(赵亚云,2016;曾令森等,2017;赵亚云等,2018,2019,2020,2021)。样品的Nb/Ta比值为9.00~11.19(均值10.45),其中2件样品的比值大于11,接近大陆地壳平均值11(Taylor et al., 1985),Zr/Hf比值为11.57~27.95(均值20.02),低于大陆地壳值为33(Taylor et al., 1985),暗示岩浆物质源区主要来自地壳物质。样品Nb\*值为0.28~0.33(均值0.31),小于1;Zr\*值0.96~2.47(均值1.52),大于1,表明岩石物质源区来自地壳物质或花岗质岩石或具同化混染的玄武质岩石,同时有基性的火山物质混入。Ti元素的亏损被认为可以指示岩浆是在富含流体的源区条件下形成的(曲晓明等,2001),Eu、Sr负异常说明岩浆源区物质在发生部分熔融时斜长石等富Eu矿物略有残留,结合岩石的Rb/Sr比值1.88~7.03(均值3.98)和Ba/La比值0.82~1.53(均值1.15),均更接近地壳和远离地幔的比值(Rb/Sr地壳比值0.35,地幔值0.034, Taylor et al., 1985; Ba/La地壳值9.6和地幔值25, Weaver, 1991),表明岩石

源于下地壳部分熔融。在La-La/Sm图解中(图6c)(赵亚云,2016),岩石演化过程明显受控于部分熔融作用。

锆石Hf同位素组成可以记录壳幔混合岩浆二端元的初始信息。岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以判断岩石的成岩过程及岩浆性质等,其中具有低 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值( $<0$ )和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值( $<0.2828$ )指示古老地壳或经过地壳混染的源区环境;较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值( $>0$ )和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值( $>0.2828$ ),尤其是接近亏损地幔(DM)线的锆石Hf同位素,往往指示直接来自地幔或由幔源物质分异的新生壳源物质(Griffin et al., 2002; Iizuka et al., 2017; 张林奎等, 2019)。拉萨地体锆石Hf同位素研究表明(张立雪等, 2013):南部拉萨地体(南冈底斯带)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值,Hf同位素模式年龄 $<1.0$  Ga,显示新生地壳特征;中部拉萨地体(中冈底斯带)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主体为负,也有正值,Hf同位素模式年龄 $>1.5$  Ga,显示古老成熟地壳特征;北部拉萨地体(北冈底斯带)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值,Hf同位素模式年龄 $0.8\sim1.0$  Ga,显示新生地壳特征。本次研究区的唐格石英斑岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+1.5\sim+5.3$ (均值 $+3.6$ )、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282772\sim0.282884$ (均值 $0.282833$ )及相对较古老的地壳模式年龄( $0.8\sim1.0$  Ga,均值 $0.9$  Ga),这一结果与Hf同位素填图结果吻合,进一步暗示该地区存在元古宙古老基底,显示新生地壳特征,说明源区可能为硅铝质地壳(田坎等,2018),这与King et al.(1997)认为过铝质A型花

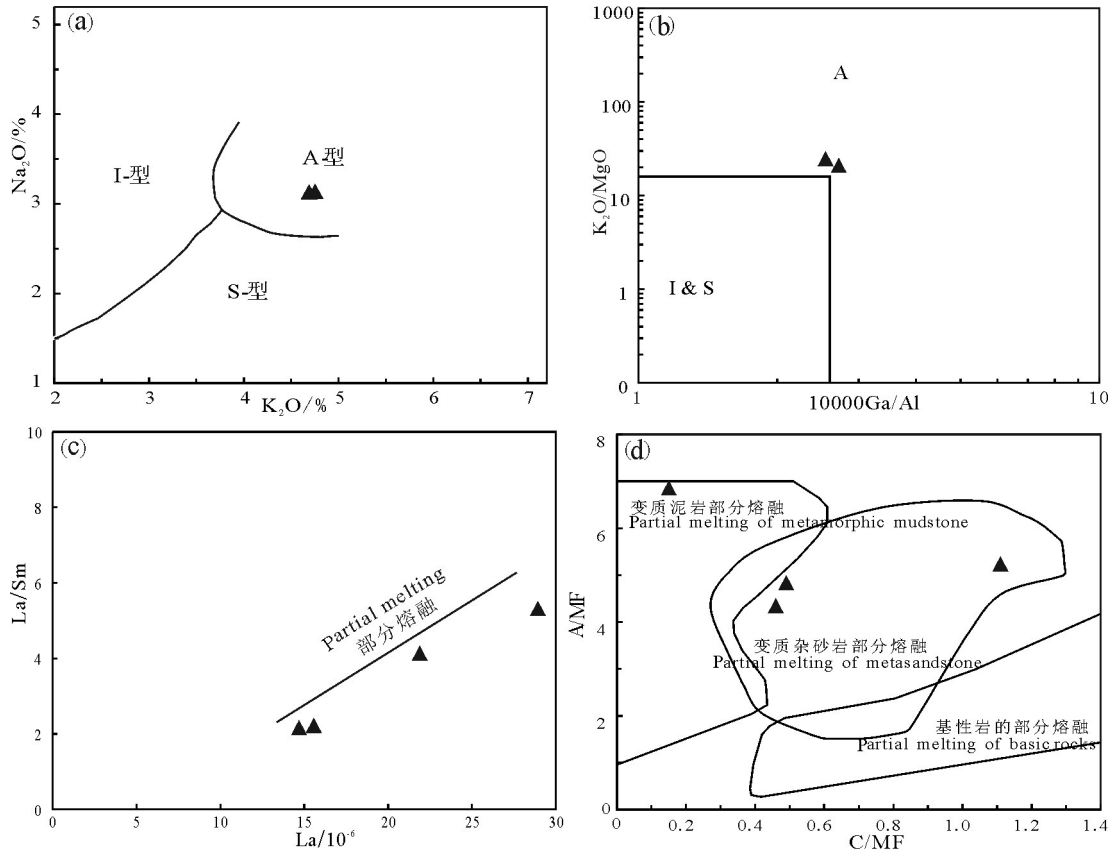


图6 唐格石英斑岩体K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O图(a, 底图据Collins et al.,1982)、10000Ga/Al–K<sub>2</sub>O–MgO图(b, 底图据Whalen et al.,1987)、La–La/Sm图(c, 底图据赵亚云,2016)、A/MF–C/MF图(d, 底图据Alther et al.,2000)

Fig.6 K<sub>2</sub>O–Na<sub>2</sub>O (a, after Collins, W J et al.,1982) and 10000Ga/Al–K<sub>2</sub>O–MgO (b, after Whalen et al.,1987) and La–La/Sm(c, after Zhao Yayun, 2016) and A/MF–C/MF (d, after Alther et al.,2000) diagram of the quartz porphyry pluton in Tangge ore district

花岗岩由下地壳长英质的陆壳岩石部分熔融形成的观点一致;同样,岩体中Sr、Eu和Ba的负异常以及高场强元素的亏损等地球化学特征进一步暗示岩石熔融的源岩可能以长英质陆壳岩石为主(吴福元等,2002;黄明达等,2019),同时也具有幔源物质混入的成因。在C/MF–A/MF图解(图6d)中,3件样品全部落入到变质杂砂岩部分熔融区域和1件落入到变质泥岩部分熔融区,表明物质源区主要来源于富含水的下地壳熔融的贡献。因此,以上结果表明,唐格铝质A型花岗岩与拉萨地块元古宙新生长英质下地壳的部分熔融有关。

### 6.2 岩浆作用时限

大量研究结果表明(表5,图1b),冈底斯带内白垩纪岩浆活动强烈(65.1~136 Ma),从早白垩世持续到晚白垩世,不存在前人认为在80~70 Ma冈

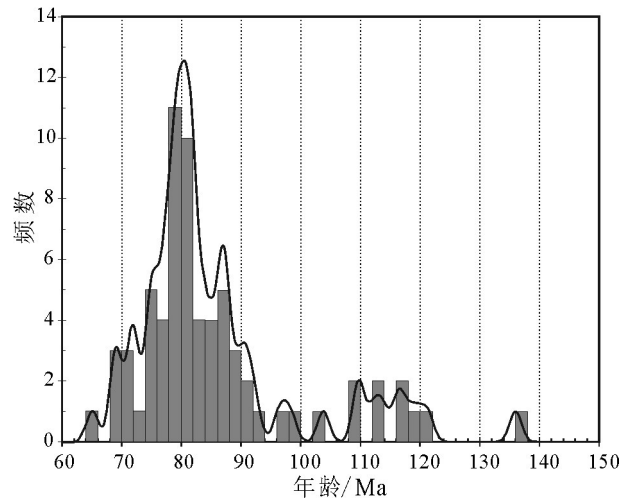


图7 冈底斯成矿带白垩世成岩时代分布图  
Fig.7 The distribution of Cretaceous diagenetic age in Gangdese metallogenic belt

表5 冈底斯成矿带白垩世成岩时代及成矿特征

序号	大地构造单元位置	地区	岩体类型	测试对象及方法	年龄/Ma	岩石成因类型	形成环境	矿床类型及矿化类型	资料来源
1	南冈底斯带中段SW	唐格	石英斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	78.0±0.9	A型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Pb-Zn	本次
2	南冈底斯带中段SW	那给	角闪石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	84.4±1.0	I型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	陈国荣等, 2013
3	南冈底斯带中段SW	那给	角闪石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	89.2±2.2	I型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	陈国荣等, 2013
4	南冈底斯带中段SW	那给	角闪石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	83.6±1.8	I型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	陈国荣等, 2013
5	南冈底斯带中段SW	那给	角闪石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	69.19±0.63	I型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	陈国荣等, 2013
6	南冈底斯带中段SW	那给	角闪石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	71.7±1.4	I型花岗岩	后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	陈国荣等, 2013
7	南冈底斯带东段	朗县—米林县	黑云花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	84.2±1.1	埃达克岩	岩石圈断离		管琪等, 2010
8	南冈底斯带东段	朗县—米林县	粗粒花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.3±0.4	埃达克岩	岩石圈断离		管琪等, 2010
9	南冈底斯带东段	朗县—米林县	英云闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.3±0.9	埃达克岩	岩石圈断离		管琪等, 2010
10	南冈底斯带东段	朗县—米林县	英云闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	78.1±0.6	埃达克岩	岩石圈断离		管琪等, 2010
11	南冈底斯带西段	霍尔县北东	花岗岩类	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81				朱弟成未刊数据转引
12	南冈底斯带中段	日喀则北西	花岗岩类	锆石 LA-ICPMS U-Pb	87				自管琪等, 2010
13	南冈底斯带中段	日喀则北西	花岗岩类	锆石 LA-ICPMS U-Pb	87				朱弟成未刊数据转引
14	南冈底斯带东段	曲水	花岗岩类	锆石 LA-ICPMS U-Pb	87		岩石圈断离		自管琪等, 2010
15	南冈底斯带东段	朗县	黑云花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	82	埃达克岩	岩石圈断离		Ji et al., 2009
16	南冈底斯带东段	朗县	英云闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	80	埃达克岩	岩石圈断离		Wen et al., 2008
17	南冈底斯带东段	米林县	英云闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	87	埃达克岩	岩石圈断离		Wen et al., 2008
18	冈底斯弧背断隆带NE	嘉黎色日绒	黑云母花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	136.0±1.6	S型花岗岩	后碰撞		Zhang et al., 2010
19	冈底斯北带东段	班戈雪如	二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.25±0.79		后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	秦松等, 2018
20	冈底斯北带东段	班戈雪如	斑状二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.72±0.51		后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	高顺宝等, 2011
21	冈底斯北带东段	班戈雪如	中粒二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.72±0.50		后碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	高顺宝等, 2011
22	冈底斯北带东段	班戈查湖拉	细粒斑状花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	76.10±0.40		同碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	王江朋等, 2012
23	冈底斯中带西段	措勤NW甲布	中粒似斑状钾长花岗岩	钾长石 Ar-Ar	71.89±1.8	I-S型花岗岩	同碰撞	矽卡岩型 Cu-Fe	王江朋等, 2012
24	冈底斯中带西段	措勤NW甲布	中粒钾长花岗岩	钾长石 Ar-Ar	72.58±3.4	I-S型花岗岩	同碰撞		何丽等, 2009
25	冈底斯中带西段	措勤NW甲布	中粒钾长花岗岩	全岩 K-Ar	65.1±1.0	I-S型花岗岩	同碰撞		何丽等, 2009
26	冈底斯中带西段	措勤NW甲布	细粒似斑状钾长花岗岩	全岩 K-Ar	71.4±1.1	I-S型花岗岩	同碰撞		何丽等, 2009
27	冈底斯中带西段	措勤NW甲布	细粒似斑状钾长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	69.1±2.6	I-S型花岗岩	同碰撞		何丽等, 2009
28	冈底斯中带西段	措勤NW可如勒	石英闪长岩	全岩 Ar-Ar	96.47	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009
29	冈底斯中带西段	措勤NW可如勒	石英闪长岩	全岩 Ar-Ar	92.45	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009
30	冈底斯中带西段	措勤NW可如勒	中粒角闪黑云母花岗岩闪长岩	全岩 K-Ar	74.5	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009
31	冈底斯中带西段	措勤NW呷龙—龙勒	中粒角闪黑云母花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	98.2±2.0	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009
32	冈底斯中带西段	措勤NW呷龙—龙勒	中粒角闪黑云母花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	82.7±3.1	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009
33	冈底斯中带西段	措勤NW呷龙—龙勒	中粒角闪黑云母花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	85.5±2.6	I型花岗岩	活动大陆边缘		何丽等, 2009

续表1

序号	大地构造单元位置	地区	岩石类型	测试对象及方法	年龄/Ma	岩石成因类型	形成环境	矿床类型及矿化类型	资料来源
34	冈底斯北带西段	日土县日松	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.59±0.32		后碰撞伸展		江军华等, 2011
35	冈底斯北带西段	日土县日松	闪长玢岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	75.9±1.20		后碰撞伸展		江军华等, 2011
36	冈底斯北带西北段	班戈多巴区被沙矿化区	细粒斑状花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	77.37±0.55	I型花岗岩	同碰撞-后碰撞	砂卡岩型 Fe-Cu	定立等, 2012
37	冈底斯北带西北段	班戈多巴区再阿矿区	中细粒花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.78±0.99	I型花岗岩	同碰撞-后碰撞	砂卡岩型 Fe-Cu	定立等, 2012
38	冈底斯中段	金达北	花岗岩闪长岩	锆石 SHRIMP U-Pb	68.8±1.6	I型花岗岩	碰撞后伸展		刘建兵等, 2012
39	冈底斯中段	扎雪	钾长花岗岩	黑云母 K-Ar	78.2±1.2	S型花岗岩	碰撞后伸展		刘建兵等, 2012
40	冈底斯中段	扎雪	钾长花岗岩	黑云母 K-Ar	81.5±1.4	S型花岗岩	碰撞后伸展		刘建兵等, 2012
41	冈底斯中段	桑巴北部	黑云母钾长花岗岩	黑云母 K-Ar	90.8±1.81	S型花岗岩	碰撞后伸展		刘建兵等, 2012
42	冈底斯中段	桑巴北部	二云母钾长花岗岩	黑云母 K-Ar	91.2±1.80	S型花岗岩	碰撞后伸展		刘建兵等, 2012
43	冈底斯北带	班戈县普保镇更乃岩体	似斑状二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	78.7±1.7	I-S型花岗岩	同碰撞	砂卡岩型 Fe-Cu	李小寨等, 2013
44	冈底斯弧背断隆带	则学地区俄穷瓦	细粒黑云母石英二长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	85.58±0.66	I型花岗岩	陆缘弧环境		丁鹏飞等, 2014
45	冈底斯弧背断隆带	则学地区俄穷瓦	细粒黑云母二长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.78±0.74	I型花岗岩	陆缘弧环境		丁鹏飞等, 2014
46	冈底斯中带	吉瓦地区	花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	74.8±1.6	I型花岗岩	火山弧环境	岩浆热液热液型 Au矿	王力圆等, 2014
47	冈底斯北带西段	日土县—拉梅拉山口	钾长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	79.4±0.4	I型花岗岩	后碰撞		关俊雷等, 2014
48	冈底斯北带西段	日土县—拉梅拉山口	二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.0±0.5	I型花岗岩	后碰撞		关俊雷等, 2014
49	冈底斯北带西段	日土县—拉梅拉山口	花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.3±0.5	I型花岗岩	后碰撞		关俊雷等, 2014
50	冈底斯中北部地区	昂仁县孔隆乡日阿	黑云母花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	89.9±1.6	I型花岗岩	后碰撞		于玉帅等, 2015
51	冈底斯中北部	永珠地区可嘎	黑云母花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	109.8±1.4	I型花岗岩	火山弧-碰撞	日阿砂卡岩型 Cu矿床	张乐, 2015
52	冈底斯中北部	永珠地区可嘎	似斑状二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	119.2±1.7	I型花岗岩	火山弧-碰撞		张乐, 2015
53	冈底斯中北部	永珠地区桑心日	二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	75.10±0.47	I型花岗岩	后碰撞	桑心日砂卡岩型 Cu矿	张乐, 2015
54	冈底斯中北部	永珠地区桑心日	似斑状二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	74.99±0.57	I型花岗岩	后碰撞	桑心日砂卡岩型 Cu矿	张乐, 2015
55	冈底斯中北部	尼玛县中仓乡南50km 拔拉扎	含矿二长花岗岩斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	88.0±1.6	埃达克岩	碰撞后伸展	拔拉扎斑岩-砂卡岩矿床	余红霞等, 2011
56	冈底斯北带西段	革吉县北西	花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	83.2±0.7		弧-陆碰撞	杂尔旁砂卡岩型 Cu-Au矿	姚晓峰等, 2012
57	冈底斯弧背断隆带西	帮布勒	石英斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	77.2±0.8	I型花岗岩	后碰撞	砂卡岩型 Pb-Zn-Cu	田坎等, 2018
58	冈底斯弧背断隆带西	帮布勒	石英斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	77.3±0.7	I型花岗岩	后碰撞	砂卡岩型 Pb-Zn-Cu	田坎等, 2018
59	北冈底斯带中段	色林错南、纳木错北	钾长花岗岩、花岗闪长斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	109.6±1.4	A型花岗岩	后碰撞		曲晓明等, 2012
60	北冈底斯带中段	色林错南、纳木错北	钾长花岗岩、花岗闪长斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	112.2±0.9	A型花岗岩	后碰撞		曲晓明等, 2012
61	北冈底斯带中段	色林错南、纳木错北	钾长花岗岩、花岗闪长斑岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	113.7±0.5	A型花岗岩	后碰撞		曲晓明等, 2012
62	北冈底斯带西	扎独顶	二长花岗岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	103.8±1.0	A型花岗岩	后碰撞		谢龙等, 2015
63	北冈底斯带东	桑巴	巨斑状黑云母花岗岩	锆石 SHRIMP U-Pb	117.2±1.6	I型花岗岩	后碰撞		和钟铨等, 2006
64	北冈底斯带东	建多	斑状花岗岩闪长岩	锆石 SHRIMP U-Pb	121.2±1.7	I型花岗岩	后碰撞		和钟铨等, 2006
65	北冈底斯带东	奇索	花岗岩闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	116	I型花岗岩	后碰撞	砂卡岩型 Cu	赵元艺等, 2011
66	冈底斯北带西段	革吉县北西	石英闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	87.1±0.4		弧-陆碰撞	杂尔旁砂卡岩型 Cu-Au矿	姚晓峰等, 2013
67	冈底斯带西北缘	别若则错(革吉一改则)	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.4±0.9		后碰撞		邱焯媛等, 2018
68	冈底斯带西北缘	别若则错(革吉一改则)	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	81.8±1.0		后碰撞		邱焯媛等, 2018
69	冈底斯带西北缘	别若则错(革吉一改则)	闪长岩	锆石 LA-ICPMS U-Pb	80.6±1.0		后碰撞		邱焯媛等, 2018

底斯带上出现岩浆活动静宁期(Wen et al.,2008),反而该时期是岩浆活动的峰期( $\sim 79$  Ma达到顶峰,图7),白垩纪岩浆岩主要分布在冈底斯南缘和冈底斯北缘,岩石成因类型以I型花岗岩为主,次为I-S过渡型、S型及少部分A型花岗岩;东部以特有的埃达克质岩为特征。从表4可以看出,冈底斯带上与成矿作用有关的花岗岩为晚白垩世侵入岩,成矿作用类型主要为矽卡岩型铜多金属成矿作用,与成矿有关的岩石类型为I型花岗岩为主,其次为A型和埃达克质花岗岩。因此,推断认为在燕山晚期,冈底斯带上在69.2~89.9 Ma至少存在一次与晚白垩世岩浆作用关系密切的铜多金属成矿作用。

本次获得的唐格石英斑岩成岩年龄为( $78\pm 0.9$ ) Ma,形成时代为晚白垩世,也是首次在冈底斯带上发现铝质A型花岗岩与矽卡岩成矿事件,将会为朱诺整装勘查区及周边扩大找矿方向和新的找矿思路。

申亚辉(2016)对唐格矿床流体包裹体研究表明,成矿流体与朱诺斑岩铜矿的流体演化具有一定的相似性,认为唐格矿床的成矿流体可能来自于朱诺大型斑岩铜矿,属于流体迁移演化的产物。通过本次整装勘查项目组在唐格矿区内开展精细地质工作并采集成矿地质体,即石英斑岩体的样品分析研究表明,唐格矿区的石英斑岩为晚白垩世后碰撞的A型花岗岩,应该不是朱诺大型斑岩铜矿(中新世)流体迁移的产物,即不属于中新世朱诺斑岩-矽卡岩成矿系统。

### 6.3 区域构造演化的指示

冈底斯带的形成与新特提斯洋的打开、俯冲和闭合等演化密切相关。潘桂堂等(2006)研究表明,新特提斯洋俯冲始于早侏罗世或晚三叠世,直到晚白垩世时班公湖-怒江洋最终消亡,亚洲大陆与冈底斯复合岛弧发生强烈的弧陆碰撞作用。而一个典型的造山带的构造演化序列是:俯冲消减-碰撞-后碰撞-造山后-板内,每个阶段的岩浆岩具有一定的地球化学特征,因此可以根据岩浆岩的地球化学特征来判别其产出的构造环境(江彪等,2012)。A型花岗岩的产出往往能够指示一定的构造意义,其形成均与地壳的拉张作用有关,从而引起众多学者的高度关注。研究表明A型花岗岩可细分为非造山和造山后两类(Eby, 1990; 洪大卫等, 1995; 江彪等, 2012),即A1和A2型,它们具有不同的物质来源

并分别对应于不同的大地构造环境,其中,A1型来源于似大洋岛屿玄武岩但侵入于大陆裂谷或在板内岩浆作用期间侵入,形成于大陆岩石圈稳定之后的拉张阶段,是裂谷活动开始的征兆;A2型花岗岩则直接起源于经历了陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳或板下地壳,标志造山作用结束后不久即开始的拉张,其规模和深度均较小,是造山作用结束的标志(洪大卫等,1995)。

在10000Ga/Al-R1(图8a,洪大卫等,1995)及Y-Nb-Ce构造环境判别图(图8b,Eby, 1990)中,本次研究样品均落入后造山花岗岩区域。同时在Maniar and Piccoli(1989)提出的多组主元素花岗岩类构造环境判别图解(图8c、d)中,多数样品显示为造山后花岗岩类(POG)区域,因此,反映了岩浆生产环境为造山后构造环境背景。高钾富碱性铝质长英质岩属于造山后岩浆岩系列(Bonin, 2004)。后造山碱性花岗岩则是紧随区域造山运动的结束而发生的。后造山碱性花岗岩的出现,标志着区域造山作用的结束(朱笑青等,2006),本次研究结果与该时期冈底斯带南部的构造演化是一致的(张泽明等,2019)。

冈底斯岩带在晚白垩世(85~68 Ma)经历了弧上伸展构造作用,岩浆作用持续活动,可能与新特提斯洋板片的北向斜俯冲相关(高家昊等,2017)。本次获得石英斑岩岩体成岩年龄为( $78.0\pm 0.9$ )Ma,即白垩纪末期开始的新特提斯闭合,在印度-欧亚大陆碰撞后伸展构造背景环境下岩浆起源于下地壳的过铝质-强过铝质的富含泥质的杂砂岩、泥岩部分熔融形成岩浆。研究结果为白垩纪两大板块碰撞结束进入造山后伸展构造体制转换提供了岩石学证据和年代学约束。尤其冈底斯带上在白垩纪发育的不同构造环境下形成的不同类型的花岗岩(表5)完全响应了拉萨地块在白垩世从俯冲-碰撞到造山后-伸展构造活动。

### 6.4 对成矿的指示

唐格晚白垩世石英斑岩(铝质A型花岗岩)的发现不仅能够极大地促进唐格矽卡岩型铜多金属矿的勘查找矿,而且还能推动朱诺整装勘查区及周边扩大找矿方向和新的找矿思路。结合冈底斯带上晚白垩世成岩时代与矽卡岩型Cu-Pb-Zn-Fe多金属成矿事实,如南冈底斯带唐格矽卡岩型铜铅锌

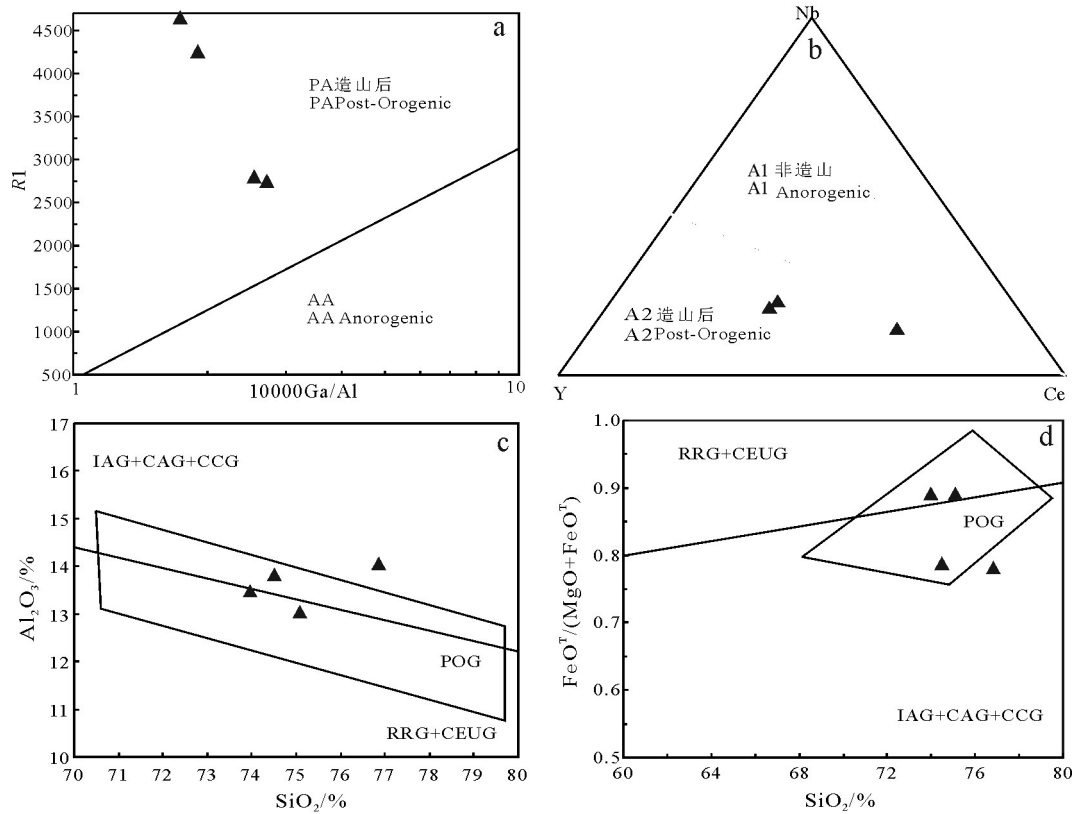


图8 唐格石英斑岩体 10000Ga/Al-R1(a, 底图据洪大卫等, 1995)、Y-Nb-Ce(b, 底图据 Eby, 1990)、SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c)和 SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>7</sup>/(MgO+FeO<sup>7</sup>)构造环境判别图(d, 底图据 Maninar and Piccoli, 1989)  
IAG—岛弧花岗岩;RRG—与裂谷有关花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩;CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩;CCG—大陆碰撞花岗岩;POG—造山后花岗岩

Fig.8 10000Ga/Al-R1(a, after Hong Dawei et al., 1995), Y-Nb-Ce(b, after Eby 1990), SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c) and SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>7</sup>/(MgO+FeO<sup>7</sup>) (d, after Maninar and Piccoli, 1989) tectonic diagram of the quartz porphyry pluton in Tangge ore district  
IAG—Island-arc granite;RRG—Granite related to rift;CAG—Continent-arc granite;ECUG—Continent emergence uplift granite;CCG—Continent-collision granite;POG—Post-orogenic granite

矿床(石英斑岩成岩年龄,(78±0.9)Ma,本次)、那给砂卡岩型铜矿矿点(石英闪长岩,(83.6±1.8)Ma<sup>⑨</sup>),中冈底斯带桑心日砂卡岩型铜矿点(二长花岗岩(75.1±0.4)Ma、似斑状二长花岗岩(74.9±0.5)Ma,张乐,2015)、吉瓦岩浆热液型金矿化点(花岗闪长岩,(74.8±1.6)Ma,王力圆等,2014)、日阿砂卡岩型铜多金属矿床(黑云母花岗岩,(89.9±1.6)Ma,于玉帅等,2015)、拔拉扎斑岩-砂卡岩型矿床(含矿二长花岗岩,(88.0±1.6)Ma,余红霞等,2011)、帮布勒砂卡岩型铅锌铜矿床(石英斑岩,(77.2±0.8)Ma~(77.3±0.7)Ma,田坎等,2018),北冈底斯带雪如砂卡岩型铜铁矿(二长花岗岩-斑状二长花岗岩,79.2~79.7 Ma,高顺宝等,2011;王江朋等,2012)、查朗拉砂卡岩型铜铁矿(细粒斑状花岗岩,(76.1±0.4)Ma,王江

朋等,2012)、梭沙砂卡岩型铁铜矿(细粒斑状花岗闪长岩,(77.3±0.5)Ma,定立等,2012)、再阿砂卡岩型铁铜矿(中细粒花岗闪长岩,(79.7±0.9)Ma,定立等,2012)、尕尔穷砂卡岩型铜金矿(花岗斑岩,(83.2±0.7)Ma;石英闪长岩,(87.1±0.4)Ma,姚晓峰等,2012),认为唐格砂卡岩型铜多金属矿可能是冈底斯带中段南部在燕山晚期造山后岩浆活动的成矿响应,冈底斯带自东向西在69~89 Ma至少存在一次铜多金属成矿作用。因此,以上这种认识在具有晚白垩世A型、I型花岗岩性质的富碱、钙碱性、铝质侵入岩分布区寻找与这些岩浆活动有成因联系的矿床提供了理论基础。对唐格石英斑岩体内主要成矿元素微量元素分析发现,岩体Cu含量为 $3.66 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}$ (高于中国碱性花岗岩背景值



1~3倍);Pb、Zn含量分别为 $34.5\times 10^{-6}$ 、 $34.9\times 10^{-6}$ (均高于中国碱性花岗岩背景值1倍多);Au含量为 $1.06\times 10^{-6}\sim 4.51\times 10^{-9}$ (高于中国碱性花岗岩背景值3.5~15倍),中国碱性花岗岩Cu、Pb、Zn和Au平均含量分别为 $3.5\times 10^{-6}$ 、 $29\times 10^{-6}$ 、 $33\times 10^{-6}$ 、 $0.3\times 10^{-9}$ (史长义,2008),这一结果与目前唐格矿区的水系沉积物异常(Au和Cu异常)及矿体有用组分分析结果吻合,暗示石英斑岩体与成矿有密切的关系,推测铝质A型花岗岩为唐格砂卡岩型铜多金属矿提供了一定的成矿物质。

## 7 结 论

(1)唐格石英斑岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $(78\pm 0.9)\text{Ma}$ ,其形成时代为晚白垩世。

(2)石英斑岩表现出富硅、铝,高钾、 $\text{FeO}^T$ ,高 $\text{FeO}^T/\text{MgO}$ 比值(均值5.91, >2.6),富钾过铝质特征。稀土元素总量高,富集Rb、Th、U、K、Pb、相对富集Hf、Zr,亏损Nb、Ta、Ti、P及Ba、Sr等元素,Rb含量低,显示出后碰撞铝质A型花岗岩的地球化学特征。

(3)石英斑岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值(1.5~5.3)、Hf同位素二阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}=806\sim 1052\text{Ma}$ ,显示了较均一的Hf同位素组成,具新生地壳特征,指示岩浆主要来源于新生生长英质下地壳的部分熔融,认为唐格铝质A型花岗岩是形成于印度大陆向北俯冲欧亚大陆引起的碰撞后伸展构造环境。

(4)唐格石英斑岩中成矿元素Cu、Pb、Zn、Au具有较高的背景值,推测铝质A型花岗岩为唐格砂卡岩型铜多金属矿提供了一定的成矿物质。综合冈底斯带上晚白垩世岩浆作用与成矿作用特征,认为冈底斯带自东向西在69~89 Ma至少存在一次铜多金属成矿作用,唐格砂卡岩型铜多金属矿可能是冈底斯带中段南部在燕山晚期造山后岩浆活动的成矿响应。

**致谢:**感谢项目组成员在野外样品采集过程中的大力帮助,以及编辑和两位匿名审稿人认真评阅稿件,并提出许多宝贵意见。

## 注释

①西藏自治区地质调查院二分院(次琼等). 2010. 西藏朱诺地区矿产远景调查报告[R].

②西藏自治区地质调查院一分院(陈国荣等). 2013. 西藏亚模区域地质调查报告[R].

## References

- Alther R, Holl A, Hegner E. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50: 51-73.
- Belousova E A, Griffin W L, Suzanne Y O R, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602-622.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97, 1-29.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geol.*, 8: 173-174.
- Chen Daogong, Zhi Xiachen, Yang Haitao. 2009. *Geochemistry* [J]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1-445 (in Chinese).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granite with particular reference to Southeast Australia [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80(2): 189-200.
- Ding Li, Zhao Yuanyi, Yang Yongqiang, Cui Yubin, Lü Lina. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of ore-bearing granite in skarn-type iron polymetallic deposits of Duoba area, Baingoin County, Tibet, and their significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 479-496 (in Chinese with English abstract).
- Ding Pengfei, Wei Qirong, Wang Cheng, Zhang Xiaoqiang, Sun Ji, Bu Tao, Liu Xiaonian, Wang Jingyuan, Gao Manxin. 2014. Chronology, geochemical characteristics and tectonic settings of the late Yanshanian granitoids in Zexue area, Tibet [J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(4): 37-47 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115-134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20: 641-644.
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced Rapakivi-type anorogenic granite [J]. *J. Petrol.*, 40 (12): 1771-1802.
- Gao Jiahao, Zeng Lingsen, Guo Chunli, Li Qiuli, Wang Yaying. 2017. Late Cretaceous tectonics and magmatism in Gangdese batholith, Southern Tibet: A record from the mafic-dioritic dike swarms within the Baidui Complex, Lhasa [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (8): 2412-2436 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shunbao, Zheng Youye, Xie Mingcheng, Zhang Zong, Yan Xuexin, Wu Bin, Luo Junjie. 2011. Geodynamic setting and mineralizational implication of the Xueru intrusion in Ban'ge, Tibet [J]. *Earth Science—Journal of China University of*

- Geosciences, 36(4): 729–739(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Luo Maochen, Leng Qiufeng, Wang Liqiang, Yang Hairui, Pu Buciren. 2012. A study of diagenetic and metallogenic geochronology of the Dagbo Cu(Mo) deposit in Quxur County of Tibet and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 613–623(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S and Zhou X M. 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.
- Gong Xuejing, Zeng Jianhui, Cao Dianhua. 2019. Sr–Nd and zircon Hf–O isotopic constraints on the petrogenesis of the ore-bearing granitic porphyry at Lengshuikeng, Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 46(4): 818–831(in Chinese with English abstract).
- Guan Junlei, Geng Quanru, Wang Guozhi, Peng Zhimin, Zhang Zhang, Kou Fude, Cong Feng, Li Na. 2014. Geochemical, zircon U–Pb dating and Hf isotope compositions studies of the granite in Ritu County–Lameila Pass area, North Gangdese, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1666–1684(in Chinese with English abstract).
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Zhang Liangliang, Liu Min, Li Xiaowei, Yu Feng, Mo Xuanxue. 2010. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo–Tethyan ridge subduction? [J] *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2165–2179(in Chinese with English abstract).
- He Li, Ma Rongze, Song Chunyan. 2009. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Late Cretaceous intrusive rocks in Cuoqin, Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(5): 31–39(in Chinese with English abstract).
- He Zhonghua, Yang Deming, Wang Tianwu. 2006. The determination of early Cretaceous post-collision granitoids in Sangba area of Gangdese tectonic belt and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 185–193(in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, Jin Manyuan. 1995. Tectonic environment classification and identification of alkaline granites[J]. *Science in China(Series B)*, 25(4): 418–427(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, Gao Yongfeng, Du Andao, Huang Wei. 2003. Porphyry copper belt molybdenite Re–Os age: Duration of mineralization and dynamics background application in Gangdese, Tibetan Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 33(7): 610–618(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, Meng X J, Li Z Q, Beaudoin G, Rui Z Y, Gao Y F, Zaw Khin. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 39: 25–51.
- Hu Peiyuan, Li Cai, Wu Yanwang, Xie Chaoming, Wang Ming, Li Jiao. 2016. A back-arc extensional environment of the Early Carboniferous Paleo-Tethys Ocean in Tibetan Plateau: Evidences from A-type granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 1219–1231(in Chinese with English abstract).
- Huang H Q, Li H, Li W X, Li Z X. 2011. Formation of high  $\delta^{18}\text{O}$  fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, Southern China[J]. *Geology*, 39(10): 903–906.
- Huang Mingda, Cui Xiaozhuang, Cheng Aiguo, Ren Guangming, He Huzhuang, Cheng Fenglin, Zhang Hengli, Zhang Jianqiang, Ren Fei. 2019. Late Paleoproterozoic A type granitic rocks in the northern Yangtze block: Evidence for breakup of the Columbia supercontinent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 565–584(in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Ren M H, Liang W, Li G M, Kelly Heilbronn, Dai Z W, Wang Y Y, Zhang L. 2020. Origin of the Oligocene Tuolangla porphyry-skarn Cu–W–Mo deposit in Lhasa terrane, southern Tibet, China *Geology*, 3(3): 369–384. doi: 10.31035/cg2020047.
- Iizuka T, Yamaguchi T, Itano K, Hibiya Y, Suzuki K. 2017. What Hf isotopes in zircon tell us about crust–mantle evolution[J]. *Lithos*, 274/275:304–327.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L. 2009. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 262(3): 229–245.
- Jiang Biao, Gong Qingjie, Zhang Jing, Ma Nan. 2012. Late Cretaceous aluminium A-type granites and its geological significance of Dasongpo Sn deposit, Tengchong, West Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1477–1492(in Chinese with English abstract).
- Jiang Junhua, Wang Ruijiang, Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Wang Zhenzhong. 2011. Crustal extension of the Bangong Co arc zone, western Tibetan plateau, after the closure of the Tethys oceanic basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1021–1032(in Chinese with English abstract).
- Jiang N, Zhang S Q, Zhou W G, Liu Y S. 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 158(1): 113–130.
- King P L, White A J R, Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites of the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 36: 371–391.
- Li Xiaosai, Zhao Yuanyi, Wang Jiangpeng, Xu Hong. 2013. Geochemical characteristics, chronology and significance of Gengnai skarn-type iron polymetallic deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1679–1693(in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4):

- 573–591 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianbin, Na Xiaohong, Zhang Zhong, Wang Liming. 2012. Dating and geochemistry of the Late Cretaceous granitoids near Menba area in Gangdise Belt and their tectonic setting[J]. *Global Geology*, 31(4): 638–647(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Ecology*, 257: 34–43.
- Le Maitre R W. 2002. Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Sub– commission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Cambridge University Press.
- Loiselle M, Wines D. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[M]. Geological Society of America Abstracts with Program: 468.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4:1–71.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A– type granite, northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1/2): 89–106.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Li Guangming, Zhao Zhidan, Geng Quanru, Liao Zhongli. 2006. Spatial–temporal framework of the Gangdise Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521–533(in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A, 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.
- Qin Song, Sun Chuanmin, Zhang Jianbo, Zhang Wei, Ding Daiguo, and Ni Maciren. 2018. LA– ICP– MS zircon U– Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of Early Cretaceous granites in the Serirong area of North– Central Gangdise, Tibet[J]. *Geochimica*, 47(2): 182–195(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Xia Daixiang, Duo Ji, Li Guangming, Jiang Guangwu, Xiao Bo, Zhao Junxing .2014. Porphyry– skarn type Cu– Mo ore deposits in Qulong, Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1–316(in Chinese).
- Qiu Chanjuan, Xiao Jingru, Wei Yongfeng, Luo Wei, Yang Yamin, Xiao Yuanfu. 2018. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and geochemical analysis of the Late Cretaceous diorite in the Bieruozeuco area, Northwest margin of the Gangdise Belt, Tibet, and their geological significanes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2215–2226(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Huang Wei. 2001. Gangdise porphyry copper deposit belt: The second "Yulong" copper deposit belt in Tibet? [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 355–366(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Du Dedao, Chen Hua. 2012. Ages of post– collisional A– type granite and constraints on the closure of the oceanic basin in the middle segment of the Bangonghu– Nujiang suture, the Tibetan plateau[J]. *Geochimica*, 41(1):1–14(in Chinese with English abstract).
- Shi Changyi, Yan Mingcai, Chi Qinghua. 2008. China granite chemical element abundance[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–124(in Chinese).
- Shen Yahui. 2016. Fluid Inclusion Studies of the Tangge Cu–Pb–Zn Polymetallic Skarn Deposits, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–65(in Chinese with English abstract).
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1993. Fluid–absent melting behaviour of a F– rich tonalitic gneiss at mid– crustal pressure: Implications for the generation of anorogenic granites[J]. *J. Petrol.*, 34(4): 785–815.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication, 313–345.
- Sun Y, Ma C Q, Liu Y Y, She Z B. 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Late Triassic aluminous A–type granites in southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1117–1131.
- Tang J X, Yang H H, Song Y, Wang L Q, Liu Z B, Li B L, Lin B, Peng B, Wang G H, Zeng Q G, Wang Q, Chen W, Wang N, Li Z J, Li Y B, Li Y B, Li H F, Lei C Y. 2021. The copper polymetallic deposits and resource potential in the Tibet Plateau[J]. *China Geology*, (4): 1–16. doi:10.31035/cg2021016.
- Tian Kan, Zheng Youye, Gao Shunbao, Jiang Junsheng, Xu Jing, Zhang Yongchao. 2019. Petrogenesis and geological implications of Late Cretaceous intrusion from the Bangbule Pb– Zn– Cu deposit, western Gangdise, Tibet[J]. *Earth Science*, 44(6): 1905–1922(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangpeng, Zhao Yuanyi, Cui Yubin, Lü Lina, Xu Hong. 2012. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of important skarn type iron (copper) polymetallic deposits in Baingoin County of Tibet and geochemical characteristics of granites[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(9):1435–1450(in Chinese with English abstract).
- Wang Liyuan, Zheng Youye, Gao Shunbao, Li Weiliang, Xue Zhaolong. 2014. The Upper Cretaceous magmatism from Gangzai pluton in Middle– Gangdise, Jiwa, Tibet and its tectonic significance[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 45(8): 2740–2751(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2000. The ascertainment of Late– Yanshanian A–type granite in Tongbai– Dabie orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297–306 (in

- Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381–397.
- Wen D R, Chung S L, Song B, Iizuka Y, Yang H J, Ji J, Liu D, Gallet S. 2008. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 105: 1–11.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407–419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187: 143–173.
- Xie Long, Dun Du, Zhu Lidong, Ni Maciren, Yang Wenguang, Tao Gang, Li Chao, He Bi, He Yuan. 2015. Zircon U–Pb geochronology, geochemistry and geological significance of the Zhaduding A-type granites in Northern Gangdise, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(5): 1214–1227(in Chinese with English abstract).
- Yang H H, Wang Q, Li Y B, Lin B, Song Y, Wang Y Y, He W, Li H W, Li S, Li J L, Liu C C, Feng S B, Xin T, Fu X L, Liang X J, Zhang Q, Wang B Q, Li Y. 2022. Geology and mineralization of the Tiegelongnan giant porphyry–epithermal Cu (Au, Ag) deposit (10 Mt) in western Tibet, China: A review[J]. *China Geology*, 5(1): 137–160. doi:10.31035/cg2022001.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Simon A, Wilde, Chu M F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1): 89–106.
- Yao Xiaofeng, Tang Juxing, Li Zhijun, Deng Shilin, Ding Shuai, Hu Zhenghua, Zhang Zhi. 2012. Magma origin of two plutons from Gaerqiong Copper–gold deposit and its geological significance, Western Bangonghu–Nujiang Metallogenic Belt, Tibet: Implication from Hf isotope characteristics[J]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition)*, 42(2): 188–197(in Chinese with English abstract).
- Yao Xiaofeng, Tang Juxing, Li Zhijun, Deng Shilin, Ding Shuai, Hu Zhenghua, Zhang Zhi. 2013. The redefinition of the ore-forming porphyry's age in Gaerqiong skarn-type gold–copper deposit, Western Bangong lake–Nujiang river metallogenic belt, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 59(1): 193–200(in Chinese with English abstract).
- Yu Hongxia, Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Baodi, Wu Jianbin, Liang Huaying. 2011. Geochemistry and origin of Late Cretaceous (~90 Ma) ore-bearing porphyry of Balazha in Mid–Northern Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2011–2022(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Dai Pingyun, Gao Yuan, Liu Yingchao, Xiu Di. 2015. Geochronology and genesis of the magmatism in the Ri' a copper polymetallic deposit of the Nixiong orefield, Coqen, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(1): 118–133(in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Gao Li'e, Guo Chunli, Hou Kejun, Wang Qian. 2017. Early Cretaceous forearc extension of the Gangdese continental arc, Southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2377–2394(in Chinese with English abstract).
- Zhang Le. 2015. Geochronology and Geochemistry of the Yongzhu Granitoids in Middle–North Gangdese, Tibet[D]. A Dissertation Submitted to Jilin University for Master's Degree. 1–84(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Lü Xinbiao, Liu Ge, Chen Jun, Chen Chao, Gao Qi, Liu Hong. 2013. Characteristics and genesis of continental back-arc A-type granites in the eastern segment of the Inner Mongolia–Da Hinggan Mountains orogenic belt[J]. *Geology in China*, 40(3): 869–884(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lixue, Wang Qing, Zhu Dicheng, Lia Lili, Wu Xingyuan, Liu Sheng'ao, Hu Zhaochu, Zhao Tianpei. 2013. Mapping the Lhasa Terrane through zircon Hf isotopes: Constraints on the nature of the crust and metallogenic potential[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3681–3688(in Chinese with English abstract).
- Zhang Linkui, Li Guangming, Cao Huawen, Zhang Zhi, Fu Jiangang, Xia Xiangbiao, Dong Suiliang, Liang Wei, Huang Yong. 2019. Zircon geochronology and Hf isotope compositions of the granitic gneiss from Cuonadong in South Tibet and its insights for the evolution of the Proto–Tethys[J]. *Geology in China*, 46(6): 1312–1335(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Ding Huixia, Dong Xin, Tian Zuolin. 2019. Formation and evolution of the Gangdese magmatic arc, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 275–294(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, Wang J L, Dong X, Shen K. 2010. Late Cretaceous chamockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo–Tethyan mid-ocean ridge subduction? [J]. *Gondwana Research*, 17: 615–631.
- Zhao Yayun. 2016. Petrology, geochemistry characteristics and geological significance of Paleozoic granites in Middle Longshou Mountains, Gansu Province[D]. Nanchang: East China University of Technology, 1–79(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yayun, Liu Xiaofeng, Liu Yuanchao, Liu Bo, Fu Hailong, Lü Jinliang, Zhang Changyun. 2017. Copper metallogenic favourable condition analysis of Cimabanshuo, Zhunuo copper mining area outer, in Tibet[J]. *Gansu Geology*, 26(4): 28–36(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Zhao Yayun, Liu Xiaofeng, Liu Yuanchao, Ci Qiong, Xiao Lanbin, Li Li, Zhang Xiaoqiang. 2018. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of Youqiumi porphyry pluton in Cimabanshuo area, in Tibet[J]. Earth Science, 43(12): 4551-4565(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yayun, Yang Chunsi, Lü Jinliang, Liu Xiaofeng, Liu Bo, Zheng Changyun, Liu Yuanchao, Li Li, Fu Hailong. 2019. Its significance and geochemical characteristics, zircon U-Pb age of the Linzizong Group Volcanic rocks in Luobuzhen Orefield, Tibet[J]. Geoscience, 33(1): 73-85(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yayun, Liu Xiaofeng, Liu Yuanchao, Ci Qiong, Zheng Changyun, Yang Chunsi, Li Li, Fu Hailong. 2020. Petrogenesis and metallogenic implication of ore-bearing rock mass of copper polymetallic ore occurrence in Duorenze-Sangaka Areas, Angren County, Tibet[J]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 50(5): 1323-1339 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yayun, Liu Yuanchao, Ci Qiong, Liu Xiaofeng, Gong Fuzhi, Li Jun. 2021. Geochemical characteristics and ore-bearing potential of porphyry pluton in Beimulang Ore District, Angren County in Tibet[J]. Gansu Geology, 30(4): 38-55 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Cui Yubin, Lü Lina, Shi Denghua. 2011. Chronology, geochemical characteristics and the significance of Shesuo copper polymetallic deposit, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2132-2142(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, Wang Liqian, Liao Zhongli, Zhao Zhidan, Dong Guocheng, Zhou Changyong. 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3):534-546(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, Zhao Z D, Mo X X.2017. Raising the Gangdese Mountain in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,122(1):214-223.
- ### 附中文参考文献
- 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 2009. 地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1-445.
- 定立, 赵元艺, 杨永强, 崔玉斌, 吕立娜. 2012. 西藏班戈县多巴区砂卡岩型铁多金属矿床含花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4):479-496.
- 丁鹏飞, 魏启荣, 王程, 张小强, 孙骥, 卜涛, 刘小念, 王敬元, 高满新. 2014. 西藏则学地区俄旁瓦二长岩体的年代学、岩石地球化学特征及构造环境分析[J]. 地质科技情报, 33(4):37-47.
- 高家昊, 曾令森, 郭春丽, 李秋立, 王亚莹. 2017. 藏南冈底斯岩基晚白垩世构造岩浆作用:以拉萨白垩复合岩体中一基性岩脉群为例[J]. 岩石学报, 33(8): 2412-2436
- 高顺宝, 郑有业, 谢名臣, 张众, 闫学欣, 武斌, 罗俊杰. 2011. 西藏班戈地区雪如岩体的形成环境及成矿意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 36(4):729-739.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 罗茂澄, 冷秋锋, 王立强, 杨海锐, 普布次仁. 2012. 西藏曲水县达布斑岩铜(钼)矿床成岩成矿年代学研究[J]. 地球学报, 33(4): 613-623.
- 龚雪婧, 曾建辉, 曹殿华. 2019. 江西冷水坑矿床含花岗岩斑岩的 Sr-Nd 及锆石 Hf-O 同位素研究[J]. 中国地质, 46(4): 818-831.
- 关俊雷, 耿全如, 王国芝, 彭智敏, 张璋, 寇福德, 丛峰, 李娜. 2014. 北冈底斯带日土县-拉梅拉山口花岗岩体的岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 30(6): 1666-1684.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 张亮亮, 刘敏, 李小伟, 于枫, 莫宣学. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩:新特提斯洋脊俯冲的产物? [J]. 岩石学报, 26(7): 2165-2179.
- 何利, 马润则, 宋春彦. 2009. 西藏措勤晚白垩世侵入岩地球化学特征及构造环境[J]. 地质科技情报, 28(5): 31-39.
- 和钟铎, 杨德明, 王天武. 2006. 冈底斯带桑巴区早白垩世后碰撞花岗岩类的确定及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 185-193.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄:成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学(D辑), 33(7): 610-618.
- 洪大卫, 王式洗, 韩宝福, 靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. 中国科学(B辑), 25(4): 418-427.
- 胡陪远, 李才, 吴彦旺, 解超明, 王明, 李娇. 2016. 青藏高原古特提斯洋早石炭世弧后拉张:来自 A 型花岗岩的证据[J]. 岩石学报, 32(4): 1219-1231.
- 黄明达, 崔晓庄, 程爱国, 任光明, 何虎庄, 陈凤霖, 张恒利, 张建强, 任飞. 2019. 扬子北缘晚古元古代 A 型花岗质岩石:Columbia 超大陆裂解的证据[J]. 地质学报, 93(3): 565-584.
- 江彪, 龚庆杰, 张静, 马楠. 2012. 滇西腾冲大松坡锡矿区晚白垩世铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(5): 1477-1492.
- 江军华, 王瑞江, 曲晓明, 辛洪波, 王振中. 2011. 青藏高原西部班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后的地壳伸展作用[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 36(6): 1021-1032.
- 李小赛, 赵元艺, 王江朋, 许虹. 2013. 西藏更乃砂卡岩型铁多金属矿床地球化学特征年代学及意义[J]. 地质学报, 87(11):1679-1693.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 9(4): 573-591.
- 刘建兵, 那晓红, 张忠, 王立明. 2012. 冈底斯带门巴区晚白垩世花岗岩年代学、地球化学及构造背景[J]. 世界地质, 31(4):638-647.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3):521-533.
- 秦克章, 夏代祥, 多吉, 李光明, 蒋光武, 肖波, 赵俊兴. 2014. 西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床[M]. 北京:科学出版社,1-316.
- 秦松, 孙传敏, 张剑波, 张伟, 丁代国, 尼玛次仁.2018. 冈底斯带中北部色日绒地区早白垩世花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 47(2): 182-195.
- 邱婵媛, 肖倩茹, 魏永峰, 罗巍, 杨亚民, 肖渊甫. 2018. 冈底斯带西北缘别若则错地区晚白垩世闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、

- 地球化学及地质意义[J]. 地质学报, 92(11): 2215-2226.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. 矿床地质, 20(4): 355-366.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 陈华. 2012. 西藏班公湖—怒江缝合带中段碰撞后A型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. 地球化学, 41(1): 1-14.
- 史长义, 鄢明才, 迟清华. 2008. 中国花岗岩类化学元素丰度[M]. 北京: 地质出版社, 1-124.
- 申亚辉. 2016. 西藏唐格砂卡岩铜铅锌多金属矿床流体包裹体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-65.
- 田坎, 郑有业, 高顺宝, 姜军胜, 徐净, 张永超. 2019. 西藏冈底斯西段帮布勒Pb-Zn-Cu矿床晚白垩世岩浆岩成因及意义[J]. 地球科学, 44(6): 1905-1922.
- 王力圆, 郑有业, 高顺宝, 李伟良, 薛兆龙. 2014. 西藏吉瓦地区中冈底斯带岗在岩体晚白垩世的岩浆作用及构造意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 45(8): 2740-2751.
- 王江朋, 赵元艺, 崔玉斌, 吕立娜, 许虹. 2012. 西藏班戈地区重要砂卡岩型铁(铜)多金属矿床LA-ICP-MS锆石U-Pb测年与花岗岩地球化学特征[J]. 地质通报, 31(9): 1435-1450.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期A型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297-306.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 解龙, 顿都, 朱利东, 尼玛次仁, 杨文光, 陶刚, 李超, 何碧, 和源. 2015. 西藏北冈底斯扎独顶A型花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质, 42(5): 1214-1227.
- 姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 丁帅, 胡正华, 张志. 2012. 班怒带西段尕尔穷铜金矿两套侵入岩源区及其地质意义——来自Hf同位素特征的指示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 188-197.
- 姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 丁帅, 胡正华, 张志. 2013. 班公湖—怒江带西段尕尔穷砂卡岩型铜金矿含矿母岩成岩时代的重新厘定及其地质意义[J]. 地质论评, 59(1): 193-200.
- 余红霞, 陈建林, 许继峰, 王保弟, 邬建斌, 梁华英. 2011. 拉萨地块中北部晚白垩世(约90 Ma)拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 27(7): 2011-2022.
- 于玉帅, 杨竹森, 戴平云, 田世洪, 高原, 刘英超, 修迪. 2015. 西藏措勤尼雄矿田日阿铜多金属矿床岩浆活动时代及成因[J]. 中国地质, 42(1): 118-133.
- 曾令森, 高利娥, 郭春丽, 侯可军, 王倩. 2017. 西藏南部冈底斯大陆弧早白垩纪弧前伸展作用[J]. 岩石学报, 33(8): 2377-2394.
- 张乐. 2015. 西藏冈底斯中北部永珠地区花岗岩类年代学与地球化学[D]. 吉林大学硕士学位论文, 1-84.
- 张磊, 吕新彪, 刘阁, 陈俊, 陈超, 高奇, 刘洪. 2013. 兴蒙造山带东段大陆弧后A型花岗岩特征与成因[J]. 中国地质, 40(3): 869-884.
- 张立雪, 王青, 朱弟成, 贾黎黎, 吴兴源, 刘盛遨, 胡兆初, 赵天培. 2013. 拉萨地体锆石Hf同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束[J]. 岩石学报, 29(11): 3681-3688.
- 张林奎, 李光明, 曹华文, 张志, 付建刚, 夏祥标, 董随亮, 梁维, 黄勇. 2019. 藏南错那洞花岗质片麻岩锆石年龄、Hf同位素及其对原特提斯洋演化的启示[J]. 中国地质, 46(6): 1312-1335.
- 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 田作林. 2019. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. 岩石学报, 35(2): 275-294.
- 赵亚云. 2016. 龙首山中段古生代花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义[D]. 南昌: 东华理工大学, 1-79.
- 赵亚云, 刘晓峰, 刘远超, 刘波, 付海龙, 吕金梁, 郑常云. 2017. 西藏朱诺矿区外围次玛班硕地区铜成矿有利条件分析[J]. 甘肃地质, 26(4): 28-36.
- 赵亚云, 刘晓峰, 刘远超, 次琼, 肖兰斌, 李莉, 张小强. 2018. 西藏次玛班硕地区由秋米斑岩体锆石U-Pb年龄、地球化学特征[J]. 地球科学, 43(12): 4551-4565.
- 赵亚云, 杨春四, 吕金梁, 刘晓峰, 刘波, 郑常云, 刘远超, 李莉, 付海龙. 2019. 西藏罗布真矿区林子宗群火山岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及意义[J]. 现代地质, 33(1): 73-85.
- 赵亚云, 刘晓峰, 刘远超, 次琼, 郑常云, 杨春四, 李莉, 付海龙. 2020. 西藏昂仁县多仁则—桑阿卡地区铜多金属矿点含矿岩体成因及成矿意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1323-1339.
- 赵亚云, 刘远超, 次琼, 刘晓峰, 龚福志, 李军. 2021. 西藏昂仁县北姆朗矿区斑岩体地球化学特征及含矿性分析[J]. 甘肃地质, 30(4): 38-55.
- 赵元艺, 崔玉斌, 吕立娜, 石登华. 2011. 西藏舍索砂卡岩型铜多金属矿床年代学与地球化学特征及意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2132-2142.
- 朱弟成, 潘桂堂, 莫宣学, 王立全, 廖忠礼, 赵志丹, 董国臣, 周长勇. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. 岩石学报, 22(3): 534-546.