

鄂东南铜绿山大型铜铁金矿床成矿岩体年代学、 地球化学特征及成矿意义

张世涛^{1,2}, 陈华勇^{1,3*}, 韩金生¹, 张宇¹, 初高彬^{1,2},
魏克涛⁴, 赵逸君⁵, 程佳敏^{1,2}, 田京^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广东 广州 510640; 4. 湖北省地质局第一地质大队, 湖北 大冶 435100; 5. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要: 通过详细的野外地质调查及室内岩相学观察, 在鄂东南铜绿山矿区新发现的深部矿体中厘定出两类中酸性侵入岩与夕卡岩矿化密切相关, 分别为石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩, 两者在岩相上呈过渡关系。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年表明, 两者形成时代基本一致, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为(141.0±0.8) Ma 和(141.3±1.1) Ma, 属长江中下游地区早白垩世构造岩浆活动的产物。两类岩浆岩都具有高硅($\text{SiO}_2 > 63\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.38\% \sim 8.22\%$)、富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$)和准铝质等特征, 属 I 型高钾钙碱性花岗岩系列。在微量元素组成上, 两者都具有高 Sr 和贫重稀土元素(Y 和 Yb)等特征, 显示出埃达克质岩的地球化学属性, 可能是富集地幔源区的碱性玄武岩岩浆混染下地壳物质经同化混染分离结晶(AFC)过程形成。此外, 两类岩浆岩都富含角闪石、磁铁矿和榍石, 且锆石微量元素 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值较高(347~1231), 指示岩浆形成源区为高氧逸度和富水环境, 有利于铜铁金等成矿元素在岩浆熔体中富集。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 埃达克质岩; 铜绿山铜铁金矿床; 鄂东南矿集区

中图分类号: P595; P611 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)03-0240-17

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.03.002

Geochronology, geochemistry, and mineralization of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit, Edongnan ore district, China

ZHANG Shi-tao^{1,2}, CHEN Hua-yong^{1,3*}, HAN Jin-sheng¹, ZHANG Yu¹, CHU Gao-bin^{1,2},
WEI Ke-tao⁴, ZHAO Yi-jun⁵, CHENG Jia-min^{1,2} and TIAN Jing^{1,2}

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou 510640, China;

4. The First Geological Team of Hubei Geological Bureau, Daye 435100, China;

5. Geological Survey of Hubei Province, Wuhan 430034, China

Abstract: The quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in the Tonglūshan deposit are distinguished based on detailed geological field investigations and petrographic observations, and found to be closely related to Cu-Fe-Au skarn mineralization. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating provides weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of (141.0±0.8) Ma and (141.3±1.1) Ma for the quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry, respectively, indicating they were both formed during the Early Cretaceous in the Middle-Lower Yangtze River area. They are characterized by high silicon ($\text{SiO}_2 > 63\%$), and are alkali-rich ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.38\% - 8.22\%$), aluminum-rich ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$), and show high-potassium calc-alkaline and I-type granite series features. They are also rich in Sr

收稿日期(Received): 2017-11-05; 改回日期(Revised): 2017-12-26; 接受日期(Accepted): 2017-12-29

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511035); 中国科学院创新交叉团队项目(Y433131A07); 国家自然科学基金(41502065)

作者简介: 张世涛(1989-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 2224055145@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Hua-yong, E-mail: huayongchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292708

and poor in heavy rare earth element (HREE) (Y and Yb) contents, showing geochemical characteristics of adakitic rocks, and may have been derived from an enriched mantle source where alkaline basaltic magma mixed with lower crustal material by assimilation and fractional crystallization (AFC) process. Moreover, they both contain abundant magmatic amphibole, magnetite, and titanite, and have high Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios (347 - 1231) of zircon. This implies that the magma formed in an environment with a high oxygen fugacity and hydrous-rich melt, which cause enrichment of ore-forming elements such as copper, iron, and gold in the magmatic melt.

Key words: zircon U-Pb dating; geochemistry; adakitic rock; Tonglushan Cu-Fe-Au deposit; Edongnan ore district

0 引 言

夕卡岩型矿床是中国最重要的矿床类型之一, 是中国铁、铜、钨、锡和铋矿的主要矿床类型, 是钼、铅锌、金、银及部分非金属矿产的主要来源^[1-2]。Meinert *et al.*^[3]通过大量的研究和总结认为, 与夕卡岩型铜、锌和钼矿有关的岩浆岩多为氧化性, 而与锡矿和金矿有关的岩浆岩多为还原性; 夕卡岩型铜矿与 I 型钙碱性花岗岩类密切相关, 并常伴随有网状脉、脆性断裂、角砾岩、强烈围岩蚀变及富含钙铁榴

石; 与夕卡岩型锡、钨和钼矿有关的岩体则显示出更强烈的壳源特征。在实践勘查过程中, 除这些岩浆岩标志外, 矿化远端的漂白大理岩、流体逃逸构造和蚀变晕等都可以作为重要的勘查标志^[3]。

鄂东南矿集区是长江中下游铜铁多金属成矿带的重要组成部分, 亦是中国重要的夕卡岩型铜铁多金属矿床的大型矿集区^[4-5]。区内产有铁山、程潮、张福山等大型夕卡岩铁(铜)矿床, 铜绿山、鸡冠咀等大型夕卡岩铜金(铁)矿床, 铜山口大型斑岩-夕卡岩型铜钨(钨)矿床, 阮家湾、龙角山、傅家山等中-大型夕卡岩钨(铜钨)矿床等(图 1), 以铜、铁为主要优

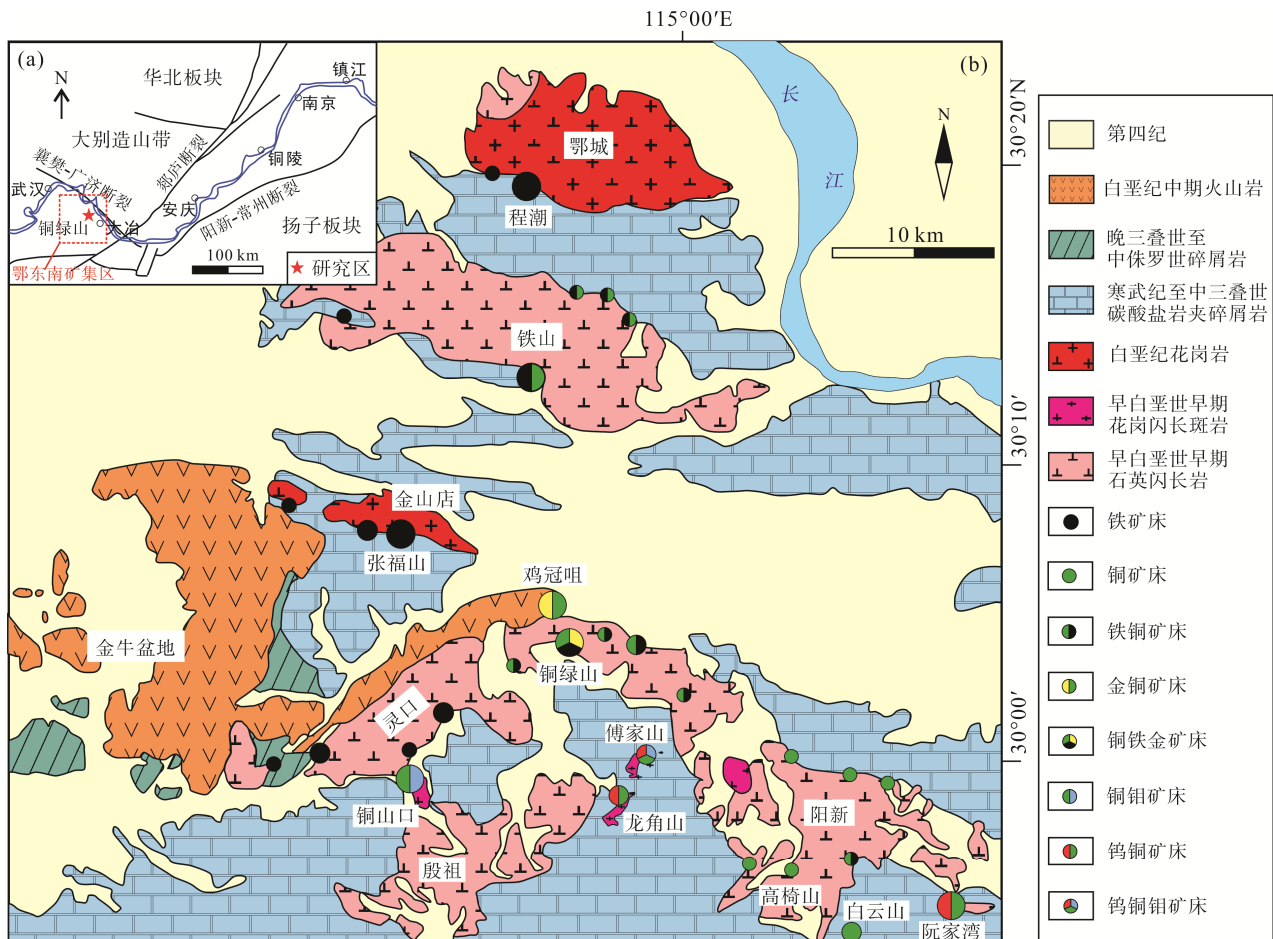


图 1 鄂东南地区岩浆岩及多金属矿床分布简图(据舒全安等^[6])

Fig.1 Geological map of Edongnan ore district in Southeast Hubei province showing main types of mineral deposits (after Shu *et al.*^[6])

势矿种,成矿类型齐全^[5-6]。位于矿集区中部的铜绿山铜铁金矿床,不仅具有悠久的开采历史,亦是目前国内发现最大的夕卡岩型铜多金属矿床之一^[7-8]。据统计,铜绿山矿床的Cu金属储量超过1.34 Mt(平均品位1.68%),Au金属储量81 t(平均品位0.45 g/t),铁矿石储量72 Mt(平均品位39.7%),伴生Co、Ag和Mo等多金属^[8-9]。

前人对铜绿山矿床的地质背景、控矿构造特征、成岩成矿年代学、岩石地球化学、成矿流体来源及演化、蚀变矿物SWIR光谱勘查等方面进行了详细的研究,深入探讨了矿床的成因机制和成矿模式^[4-17]。自2006年以来,随着两轮接替资源勘查项目的进行,在铜绿山矿区的深部新发现有隐伏矿体,如X III号矿体,III和IV号(深部)矿体,显著增加了矿床的金属储量^[8-9]。这些新发现的深部矿体及岩体,与铜绿山浅部矿体及岩体有何差异?系统的研究和相关报道还相对缺乏。此外,不同研究者对铜绿山及长江中下游地区早白垩世成矿岩体的分类命名、形成时代和成因类型方面还存在较大争议。如前人对铜绿山成矿岩体的命名有花岗闪长(斑)岩、石英二长闪长(玢)岩、石英闪长岩、石英正长闪长玢岩等,已报道的成岩年龄变化范围在136~146 Ma之间^[12-16]。区域上成矿岩体的成因仍有富集地幔结晶分异和(或)混染下地壳物质或下地壳部分熔融并发生壳幔相互作用等不同的成岩机制^[10,17-19]。

本文通过对铜绿山矿区深部两类成矿岩体的锆石U-Pb同位素定年及微量元素分析,紧密结合岩体野外地质及岩石地球化学特征,研究岩体的成岩时代、岩石成因类型、源区特征及与铜绿山夕卡岩矿床的成因联系,旨在为厘定铜绿山成矿岩浆岩类型,探讨鄂东南地区早白垩世中酸性侵入岩成因及其与铜铁金成矿事件的关系,为深入认识长江中下游地区燕山早期大规模中酸性岩浆岩侵位与巨量铜多金属成矿之间的关系提供新的理论依据。

1 地质背景及岩体特征

长江中下游地区位于扬子板块北缘,秦岭-大别山造山带和华北板块南侧,区域北侧以襄樊-广济断裂及郟庐断裂为界,南侧以阳兴-常州断裂为界(图1a),是我国重要的铜铁金多金属成矿带,自西向东依次分布有鄂东南、九瑞、安庆-贵池、铜陵、庐枞、宁芜和宁镇等七个中-大型矿集区^[5]。

鄂东南矿集区位于长江中下游成矿带的最西段,地处隆起至凹陷过渡的沉积环境,区内地层从古生界到中生界均有发育,古生界主要发育于西南部,中生界分布较为广泛,其中三叠系大冶组大理岩、白云质大理岩和蒲圻组砂页岩为该夕卡岩型铁铜多金属矿床最重要的赋矿围岩^[5-6]。区域内发育有大量中酸性侵入岩和火山岩,出露面积达1100 km²,约占全区面积23%。其中,火山岩主要发育于区内西南部,位于保安、金牛和灵乡镇之间,面积约200 km²,属继承式火山岩盆地,厚度约2000 m,自下而上可分为马架山组、灵乡组和大寺组,岩性包括英安岩、玄武岩、流纹岩、粗面岩等^[6,20]。

区内广泛发育的中酸性侵入岩,主要包括阳新、殷祖、灵乡、金山店、铁山和鄂城等六大岩体,以及铜绿山、铜山口、阮家湾、龙角山、傅家山等多个小岩株(图1b)。近年来,高精度锆石U-Pb年龄数据显示,区内岩浆活动可分为两期:早期辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长斑岩的时代集中于134~152 Ma,晚期花岗岩和火山岩的时代集中于127~134 Ma^[12,15-17,20]。在这些中酸性侵入体的周围,发育规模不等的(斑岩-)夕卡岩型铜铁金矿床(图1b)。在空间上,这些矿床多产于侵入体与围岩的接触带,且存在一个岩体周围发育多个不同矿化元素组合的矿床。如在铜绿山石英二长闪长(玢)岩体的周围,自西向东,发育有鸡冠咀铜金矿床、桃花咀铜铁矿床、铜绿山铜铁金矿床和石头咀铜铁矿床^[10,15]。目前,已发表的成矿年龄数据,如辉钼矿Re-Os、金云母Ar-Ar、楣石U-Pb等,表明鄂东南地区(斑岩-)夕卡岩矿床的形成时代集中于135~143 Ma,与区域内的早白垩世岩浆活动密切相关^[12,15,16,21]。

铜绿山铜铁金矿床位于研究区中部,阳新岩体的西北端,大冶复式向斜南翼与NNE向下陆-姜桥断裂交汇处,距大冶市区西南约3 km处(图1b)。矿区内出露的地层主要为下三叠统大冶组碳酸盐岩,自下而上可分为7个岩性段(T₁dy¹~T₁dy⁷),岩性主要为灰岩及白云质灰岩,沿NNE向构造呈隐伏状的断块出现。其中,与成矿密切相关的是第5和第6岩性段的大理岩和白云质大理岩^[8,22]。受NWW向断裂-破碎带和NNE向褶皱-断裂构造作用及早白垩世岩浆侵入作用的控制,灰岩和白云质灰岩均已变质为大理岩/白云质大理岩或夕卡岩,且多呈捕虏体或残留体存在(图2)。

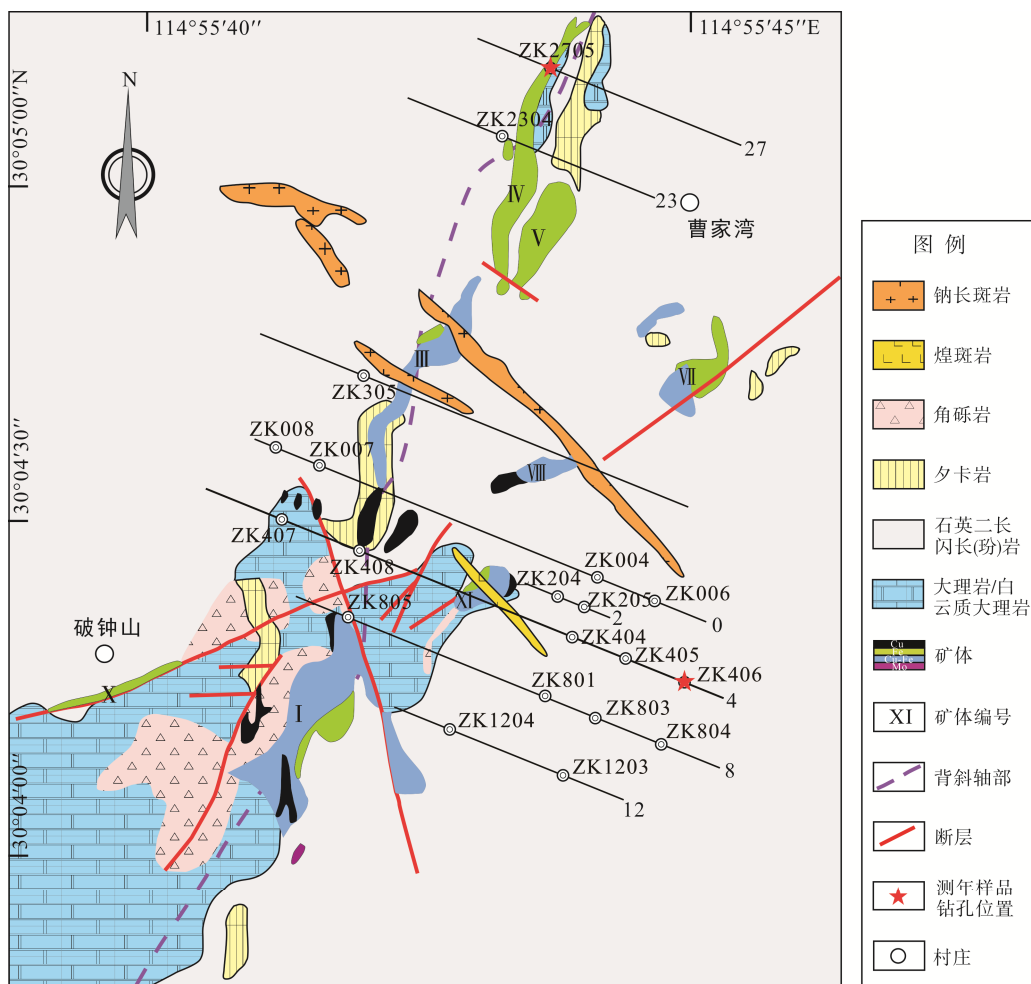


图 2 铜绿山铜铁金矿床地质简图(据舒全安等^[6]和 Li *et al.*^[12])

Fig.2 Geological map of Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit (after Shu *et al.*^[6] and Li *et al.*^[12])

矿体在空间上主要沿 NNE 向断裂产于石英二长闪长(玢)岩与大理岩的接触带,其展布与马叫-铜绿山横跨背斜轴(22°)的走向一致(图 2)。该背斜的核部为大冶组下部第 3 和 4 岩性段的含夕卡岩条带的大理岩/白云质大理岩,两翼的地层为第 5、6 和 7 岩性段的白云质大理岩/大理岩。矿体主要呈透镜状、似层状成群出现,且单个矿体具有中间厚、边缘薄的特点。在接触带与构造破碎带交叉的复合部位往往出现厚大的富矿体(如 III 号矿体)。在矿区内,岩体与围岩呈多种类型的接触构造,如楔状接触、叠瓦状接触、岛链状接触、平缓接触和围岩捕掳体等,并形成受控于接触构造的多种形态和产状的夕卡岩矿体及少量角砾岩型矿体(图 2、3)。以往发现的矿体主要集中在矿区浅部主背斜的核部和东翼,如 I、III、IV、V、VII 及 XI 矿体等(图 2)。近年来,在接替资源勘查项目的支持下,在铜绿山主背斜西翼深部和 XI 号矿体东侧深部,发现了隐伏的 XIII 号矿体及深部 III 和 IV 号矿体^[8-9]。

通过详细的野外地质调查、20 个钻孔的岩芯编

录及室内岩相学观察,在铜绿山矿区范围内,厘定出的岩浆岩类型主要包括石英二长闪长岩、石英二长闪长玢岩、闪长玢岩、花岗岩、钠长斑岩和云母煌斑岩。其中,闪长玢岩、花岗岩、钠长斑岩和云母煌斑岩主要呈脉状侵入石英二长闪长(玢)岩中。矿区内分布最广泛且与成矿密切相关的是石英二长闪长岩,呈岩株体侵入三叠统大冶组碳酸盐岩中,出露面积约 11 km²。总体上,自东南深部向西北浅部,发生较为有规律的岩相变化,由粗粒石英二长闪长岩(中深成相)、中粗粒石英二长闪长岩(中浅成相)向中细粒石英二长闪长岩(浅成相)过渡。因此,推测铜绿山岩体可能是由东南深部向西北浅部侵位。近年来,铜绿山新发现的 XIII 号矿体,位于矿区东南侧 1 号至 14 号勘探线间,埋深在标高-365 m~-1275 m 之间,走向 NNE,倾向 SEE,倾角 45°~75°,这也与铜绿山成矿岩体自东南深部至北西浅部侵位的方式相吻合。另外,前人年代学及岩石地球化特征研究表明^[10],铜绿山与东南侧的阳新岩体具有同源特征,

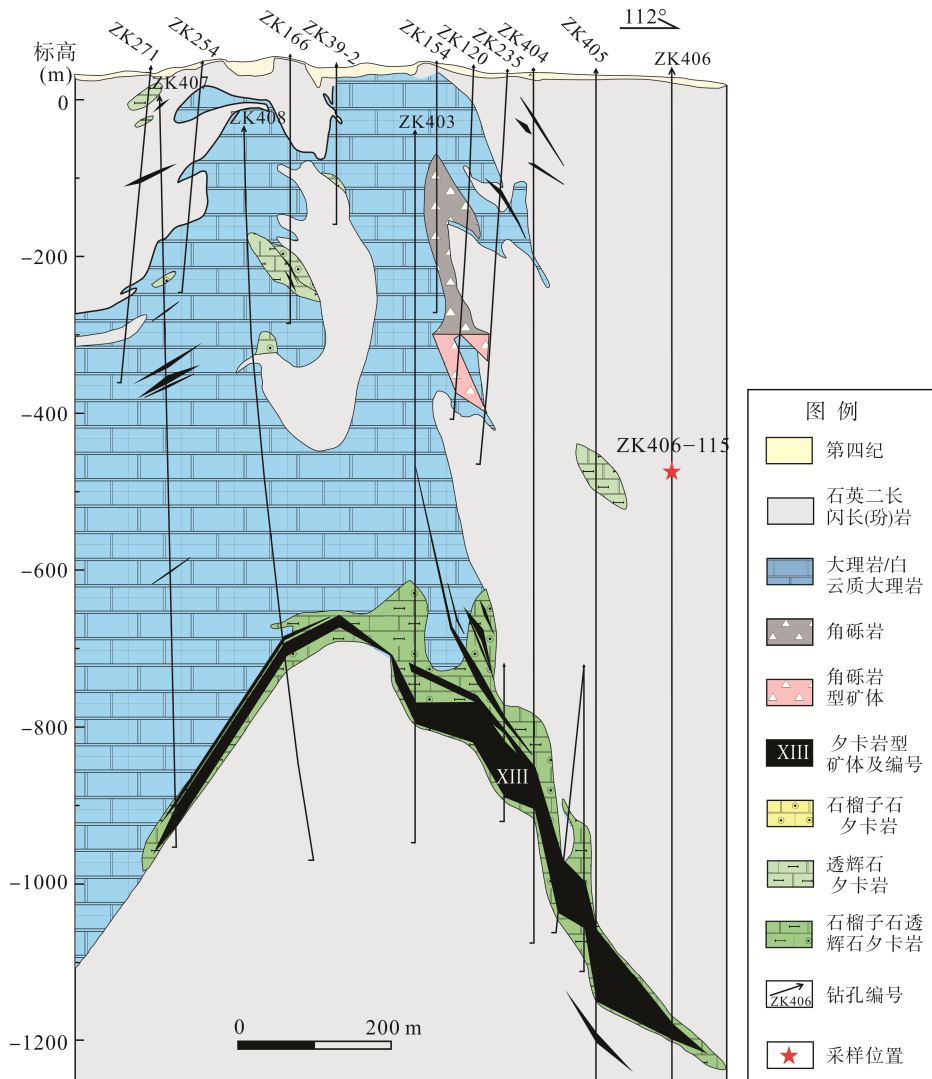


图3 铜绿山铜铁金矿床 4#勘探线地质剖面图

Fig.3 Geological map of section-line 4# in Tonglushan Cu-Fe-Au deposit

铜绿山岩体可能是阳新大岩基的边缘相或者补体相。因此,我们推测铜绿山岩体从东南深部向北西浅部侵位是大致合理的。

此外,在铜绿山矿区内接触带附近,局部可见石英二长闪长玢岩与石英二长闪长岩呈渐变过渡,且二者周围都发育夕卡岩及矿化,如 ZK408 深部接触带(-839.6~-889.4 m)和 ZK2705(-415.8~-464.2 m),主要以石英二长闪长玢岩为主,夹夕卡岩及矿化。与常见的浅成相玢岩不同,铜绿山石英二长闪长玢岩主要见于接触带附近,与侵位深度的相关性不明显,这可能是由于岩浆在结晶过程中,遇到较冷的碳酸盐岩围岩时,发生温度骤降而导致熔体中挥发分及成矿元素析出,残余熔体迅速冷凝固结晶的结果。

石英二长闪长岩主要呈灰色-灰白色,以粗粒二长结构为主,局部呈似斑状结构或中细粒二长结构,多见钾长石分布于自形-半自形斜长石粒间,在矿区

深部可见钾长石大斑晶包裹自形的斜长石、角闪石、楣石等,块状构造,主要由斜长石(50%~60%)、角闪石(15%~20%)、钾长石(约 15%)、石英(约 15%)及少量的黑云母组成。副矿物有磁铁矿、楣石、磷灰石、锆石和独居石等(图 4a、b、c)。根据国际地质科学联合会(IUGS)的岩石分类,闪长岩类中的钾长石体积含量占长石总量的 10%~35%,斜长石占长石总量的 65%~90%,即属于二长闪长岩。

石英二长闪长玢岩主要呈灰白色-淡粉色,具斑状结构和二长结构,块状构造,斑晶含量约占总体积的 70%~80%,斑晶主要由斜长石(50%~55%)、角闪石(约 15%)和钾长石(约 8%)及少量的石英和黑云母组成,局部可见钾长石斑晶中包裹自形的角闪石和楣石,基质主要包括石英、钾长石及少量斜长石,副矿物组合与石英二长闪长岩相似,包括磁铁矿、楣石、磷灰石、锆石和独居石等(图 4d、e、f)。

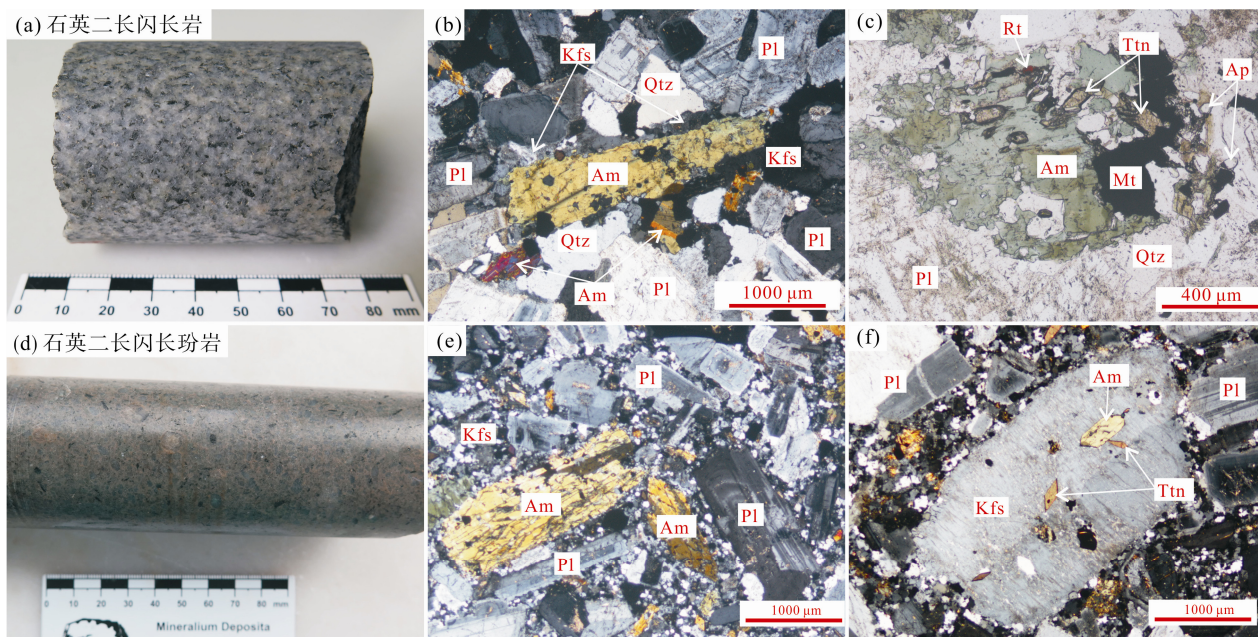


图 4 铜绿山矿区石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩岩相学特征

Fig.4 Hand specimen and photomicrograph of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglùshan deposit (a) 石英二长闪长岩(手标本); (b) 石英二长闪长岩具二长结构(正交偏光); (c) 石英二长闪长岩的主要副矿物(单偏光); (d) 石英二长闪长玢岩(手标本); (e) 石英二长闪长玢岩具斑状结构(正交偏光); (f) 石英二长闪长玢岩中的钾长石斑晶包裹自形的角闪石和榍石(正交偏光)。

Pl-斜长石; Am-角闪石; Q-石英; Kfs-钾长石; Ttn-榍石; Ap-磷灰石; Mt-磁铁矿; Rt-金红石。

(a) Hand specimen of the quartz monzodiorite; (b) the quartz monzodiorite with monzonitic texture, under the cross-polarized light; (c) the accessory minerals of the quartz monzodiorite, under the single-polarized light; (d) hand specimen of the quartz monzodiorite porphyry; (e) the quartz monzodiorite porphyry with porphyritic texture; (f) the euhedral amphibole and titanite are wrapped in the phenocryst of K-feldspar from a quartz monzodiorite porphyry.

Pl-Plagioclase; Am-amphibole; Qtz-Quartz; Kfs-K-feldspar; Ttn-Titanite; Ap-Apatite; Mt-Magnetite; Rt-Rutile.

2 样品采集及分析方法

本次研究的样品均产自铜绿山矿区的钻孔岩芯,较为新鲜。石英二长闪长岩样品(ZK406-115, -470.7 m) 产自铜绿山矿区东南侧隐伏Ⅲ号矿体钻孔中(图 3); 石英二长闪长玢岩样品(ZK2705-140, -430.3 m) 产自矿区北侧Ⅳ号深部矿体(图 2)。对两件样品的锆石进行常规重砂分选后,在双目镜下挑选出晶形完好和具有代表性的锆石颗粒进行制靶,然后对锆石进行透射光、反射光观察以及阴极发光(CL)照相。通过对比,选择环带清晰、无裂缝且无包裹体的位置进行锆石 U-Pb 年龄测试。

锆石 U-Pb 同位素测年及微量元素组成分析在南京聚谱检测科技有限公司完成。193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由 Teledyne Cetac Technologies 制造,型号为 Analyte Excite。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技(Agilent Technologies) 制造,型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,能量密度为 6.0 J/cm^2 , 束斑直径为 $35 \mu\text{m}$, 频率为 8 Hz,

共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标准锆石 GJ-1 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标,以 Si 为内标来标定锆石中的 Pb 元素含量,以 Zr 为内标来标定锆石中其余微量元素含量^[23-24]。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成^[23,25]。

同时,对 7 件全岩样品进行了全岩主量、微量及稀土元素组成分析,相关的测试在澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。首先,将样品用碳化钨钢研磨体磨至 0.075 mm 左右,然后进行主、微量元素及稀土元素的分析测试。主元素采用 X 荧光光谱仪(AXIOS)进行分析。微量元素和稀土元素用美国 Agilent 7700x 型等离子体质谱仪进行分析。

3 分析结果

3.1 全岩主元素组成

铜绿山石英二长闪长(玢)岩的全岩主、微量元素及稀土元素分析结果见表 1。石英二长闪长岩和

石英二长闪长玢岩的主元素组成相似, 两者具有相近的 Al_2O_3 (15.62%~16.73%), CaO (3.32%~5.02%) 和全碱含量 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.38\%\sim 8.22\%$)。与石英二长闪长岩相比 ($\text{SiO}_2=63.08\%\sim 63.90\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=4.33\%\sim 4.82\%$, $\text{MgO}=1.46\%\sim 1.83\%$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.24\%\sim 0.28\%$), 石英二长闪长玢岩具有较高的 SiO_2 (63.15%~67.11%),

较低的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\dagger}$ (3.34%~4.10%), MgO (1.05%~1.18%) 和 P_2O_5 (0.16%~0.22%) 含量。在 TAS 图解中, 所有样品点都落入石英二长岩区域 (图 5); 它们的 A/CNK 值在 0.79~0.94 之间, 在 A/CNK-A/NK 图解上, 所有样品点均落入准铝质花岗岩区域 (图 6a); 两者的 $\text{Na}_2\text{O}>\text{K}_2\text{O}$, 且所有样品点均落入高钾钙碱性系列区域 (图 6b)。

表 1 铜绿山矿区石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的主元素(%), 微量元素和稀土元素($\mu\text{g/g}$)分析结果

Table 1 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) concentrations of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglūshan deposit

样品编号	ZK406-115	ZK803-04	ZK1203-39	ZK2705-140	ZK408-71	ZK2705-137B	ZK006-122
岩性	石英二长闪长岩			石英二长闪长玢岩			
SiO_2	63.08	63.90	63.43	64.18	63.15	66.13	67.11
TiO_2	0.57	0.52	0.53	0.45	0.47	0.41	0.39
Al_2O_3	16.62	16.62	16.73	16.45	16.56	15.62	15.91
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\dagger}$	4.82	4.33	4.47	3.34	4.10	3.61	3.54
MnO	0.10	0.08	0.10	0.12	0.10	0.11	0.11
MgO	1.83	1.54	1.46	1.06	1.18	1.13	1.05
CaO	4.54	4.31	4.53	5.02	4.59	3.9	3.32
Na_2O	4.35	4.52	4.46	4.81	4.74	4.55	4.71
K_2O	3.03	2.87	3.03	3.41	3.10	3.30	2.93
P_2O_5	0.28	0.24	0.24	0.22	0.22	0.19	0.16
LOI	0.60	0.76	0.69	1.06	0.89	0.73	0.57
Total	99.82	99.69	99.67	100.12	99.10	99.68	99.80
A/CNK	0.89	0.90	0.89	0.79	0.85	0.86	0.94
$\text{Mg}^{\#}$	40	39	37	36	34	36	35
Sc	6.0	5.0	5.0	5.1	5.9	4.8	3.9
V	72	60	62	59	77	54	45
Cr	18	12	16	25	30	15	38
Ni	6.0	5.0	5.0	5.6	5.2	5.0	6.5
Co	8.0	7.0	8.0	5.7	6.2	6.5	6.4
Be	1.90	1.80	1.70	2.35	2.31	2.18	2.31
Cs	2.21	2.19	2.56	0.54	0.46	0.41	1.41
Rb	95.4	95.3	98.9	54.1	50.3	68.7	87.3
Ba	921	894	994	851	854	1350	940
Th	13	11	12.05	9.29	9.85	12.4	10
U	2.98	2.65	3.39	2.36	1.72	3.16	2.75
Nb	17.1	16.8	17.3	13.4	15.3	13.9	11.8
Ta	1.20	1.10	1.10	0.79	0.87	0.78	0.75
Pb	9.0	8.0	7.0	9.7	7.0	7.7	9.5
Sr	976	937	960	1040	1115	897	821
Zr	200	197	201	181	201	186	176
Hf	5.2	4.9	5.0	4.7	5.0	4.8	4.6
Y	17.5	15.9	16.0	11.0	12.8	10.6	7.9
Ga	22.5	22.3	22.4	21.4	21.9	20.6	21.5
W	1.00	1.00	2.00	0.50	0.60	0.40	1.20
Sn	1.00	1.00	1.00	1.60	1.40	1.40	1.60
La	55.4	51.8	52.6	45.4	42.4	43.3	41.2

(续表 1)

样品编号	ZK406-115	ZK803-04	ZK1203-39	ZK2705-140	ZK408-71	ZK2705-137B	ZK006-122
岩性	石英二长闪长岩			石英二长闪长玢岩			
Ce	104	95.6	98.3	85.3	86.1	80.6	74.3
Pr	10.9	9.9	10.2	8.4	8.91	7.83	7.27
Nd	39.6	35.4	36.1	31.5	33.7	29.5	26.7
Sm	6.78	5.81	5.8	4.93	5.53	4.49	3.93
Eu	1.89	1.68	1.74	1.41	1.6	1.3	1.12
Gd	4.58	4.02	4.15	3.75	4.09	3.36	2.97
Tb	0.58	0.54	0.55	0.46	0.49	0.41	0.33
Dy	3.20	3.02	2.93	2.38	2.70	2.24	1.68
Ho	0.61	0.57	0.54	0.42	0.50	0.40	0.31
Er	1.66	1.45	1.45	1.16	1.37	1.08	0.86
Tm	0.25	0.22	0.22	0.17	0.21	0.16	0.12
Yb	1.55	1.39	1.39	1.11	1.29	1.02	0.80
Lu	0.24	0.22	0.23	0.18	0.21	0.18	0.13
REE	230.7	211.6	216.2	186.6	189.1	175.9	161.7
LREE/HREE	17.2	17.5	17.9	18.4	16.4	18.9	21.5
(La/Yb) _N	24.2	25.2	25.6	27.6	22.2	28.7	34.8
Sr/Y	55.8	58.9	60.0	94.5	87.1	84.6	104
δEu	0.98	1.01	1.03	0.96	0.99	0.98	0.96

注: LOI 为烧失量; A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔比; Mg[#] = MgO / (MgO + Fe₂O₃¹) 摩尔比。

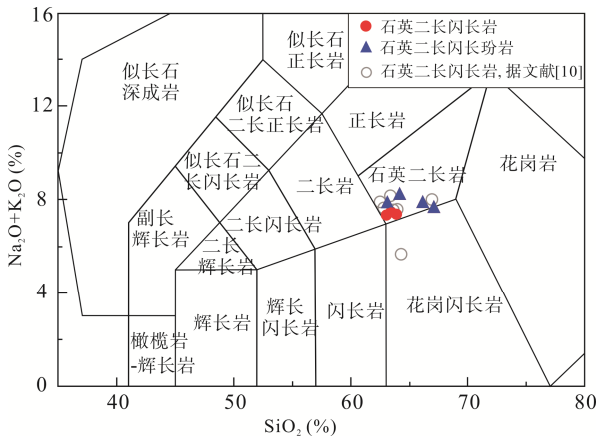


图 5 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩 TAS 图解(底图据 Middlemost^[26])

Fig.5 TAS diagram for quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglushan deposit (after Middlemost^[26])

3.2 全岩微量元素及稀土元素组成

铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的稀土元素, 具有相似的球粒陨石标准化分布模式特征, 均呈右倾型, 且 Eu 异常不明显(δEu=0.96~1.03)。其中, 石英二长闪长岩的稀土总量较高(ΣREE=211.6~230.7 μg/g), LREE=200.2~218.1 μg/g, HREE=11.4~12.7 μg/g; 而石英二长闪长玢岩的稀土总量稍低(ΣREE=161.7~189.1 μg/g), LREE=154.5~178.2 μg/g 之间,

HREE=7.2~10.9 μg/g(表 1)。相对于石英二长闪长岩(LREE/HREE=17.2~17.9, (La/Yb)_N=24.2~25.6), 石英二长闪长玢岩(LREE/HREE=16.4~21.5, (La/Yb)_N=22.2~34.8)呈现出更加明显的轻重稀土分异特征(图 7a)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 7b), 石英二长闪长玢岩与石英二长闪长岩的微量元素组成相似, 均显示出强烈亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 富集大离子亲石元素 Rb 和 Ba 及高场强元素 Th 和 U。前者更加亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素。

3.3 锆石 U-Pb 年龄及微量元素组成

样品 ZK406-115 为粗粒石英二长闪长岩, 锆石裂缝较少, 多为无色透明, 少数呈浅黄色到棕色, 自形至半自形柱状, 粒径长 50~150 μm, 长宽比例多在 2~4 之间。CL 图像显示, 大多数锆石颗粒具有清晰的振荡环带, 为典型的岩浆锆石(图 8a)。本次共分析了 19 个锆石点, 其 Th 含量为 155~661 μg/g, U 含量为 175~440 μg/g, Th/U 比值在 0.76~1.50 之间(表 2), 与岩浆锆石一致。19 个岩浆锆石测试点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(138.9±1.9) Ma~(142.3±1.7) Ma, 加权平均年龄为(141.0±0.8) Ma (n=19, MSWD=0.33)(图 8b)。锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈重稀土富集型, 且具有明显的 Ce 正异常, 与典型岩浆锆石特征一致(图 8c、表 3)^[31]。

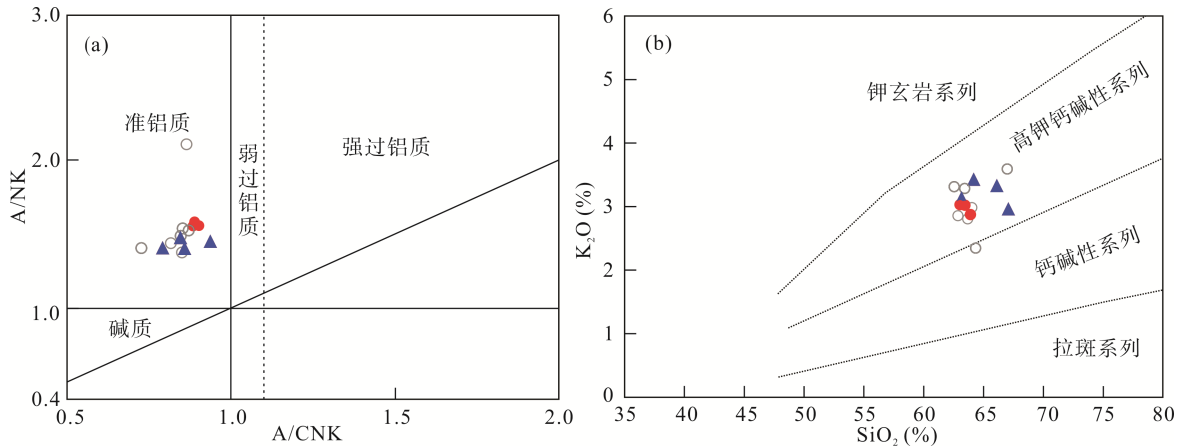


图6 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩 A/NK-A/CNK (a, 据 Maniar *et al.*^[27])和 K₂O-SiO₂ 图解(b, 据 Richter^[28])
Fig.6 A/NK vs. A/CNK (a, after Maniar *et al.*^[27]) and K₂O vs. SiO₂ (b, after Richter^[28]) plots for quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglūshan deposit

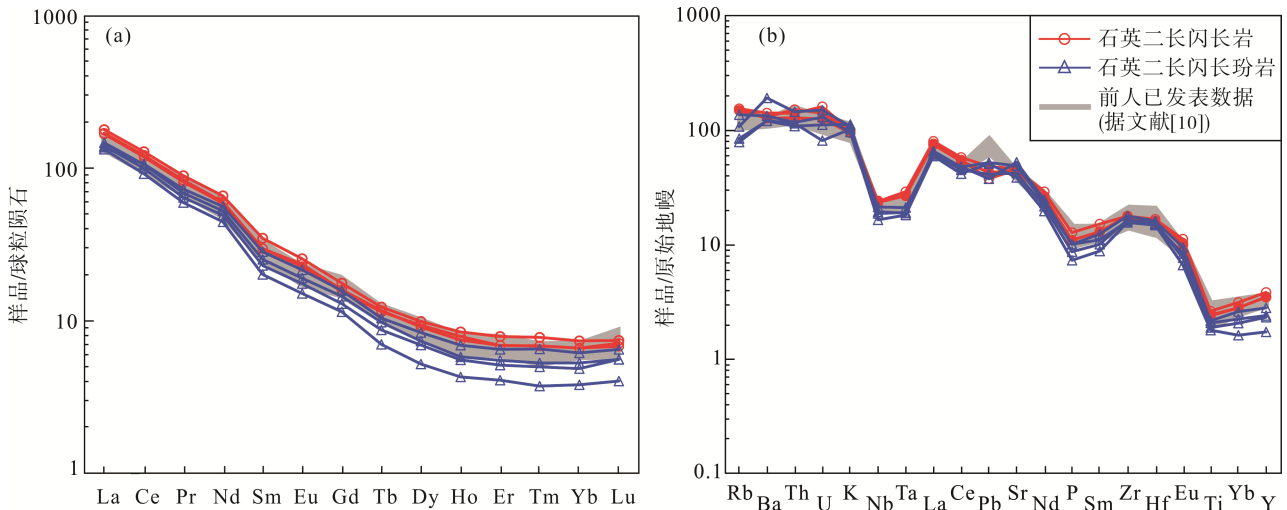


图7 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (球粒陨石标准化值据 Boynton^[29]; 原始地幔标准化值据 Sun *et al.*^[30])
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for the quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in the Tonglūshan deposit (chondrite from Boynton^[29], primitive mantle from Sun *et al.*^[30])

样品 ZK2705-140 为粗粒石英二长闪长玢岩, 与石英二长闪长玢岩相似, 锆石多为无色透明, 少数呈浅黄色到棕色, 自形至半自形柱状, 粒径长 50~200 μm, 长宽比例多在 2~4 之间。CL 图像显示, 大多数锆石颗粒具清晰的振荡环带(图 8d)。本次共分析了 18 个锆石点, 其 Th 含量为 178~535 μg/g, U 含量为 189~373 μg/g, Th/U 比值在 0.90~1.43 之间(表 2)。18 个岩浆锆石测试点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 (139.5±2.0) Ma~(143.0±2.4) Ma 之间, 加权平均年龄为 (141.3±1.1) Ma (n=18, MSWD=0.21)(图 8e)。锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线亦呈重稀土富集型, 且具有明显的 Ce 正异常, 与典型岩浆锆石特征一致(图 8f、表 3)。

4 讨论

4.1 岩体的形成时代

前人曾对铜绿山矿区成矿岩体进行了较多的同位素年代学研究。梅玉萍等^[13]对铜绿山南露天采坑的石英正长闪长玢岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 获得的成岩年龄为 (146±2) Ma (n=12, MSWD=3.0); Li *et al.*^[12]对铜绿山矿区西侧地表的石英闪长岩进行岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得成岩年龄为 (136.0±1.5) Ma (n=12, MSWD=0.56); Xie *et al.*^[15]对铜绿山南露天采坑附近的石英闪长岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 获得成岩年龄为 (140±2) Ma

($n=15$, $MSWD=0.7$); 黄圭成等^[14]对铜绿山北露天采坑东坡的石英正长闪长玢岩进行锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年, 获得成岩年龄为(140 ± 2) Ma($n=18$, $MSWD=2.6$); Li *et al.*^[16]对采自铜绿山矿区东南侧 ZK405 深部 1221 m 处的石英二长闪长岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得的成岩年龄为($142.0\pm$

1.0) Ma($n=16$, $MSWD=0.93$)。根据国际地质科学联合会 (IUGS) 的岩石分类, 结合相关文献中的岩相学特征描述, 发现以上测年样品主要为铜绿山矿区浅部的石英二长闪长岩。这些年龄数据显示, 铜绿山矿区成矿岩体的形成时代在 136~146 Ma 之间, 具有较大的变化范围(图 9)。

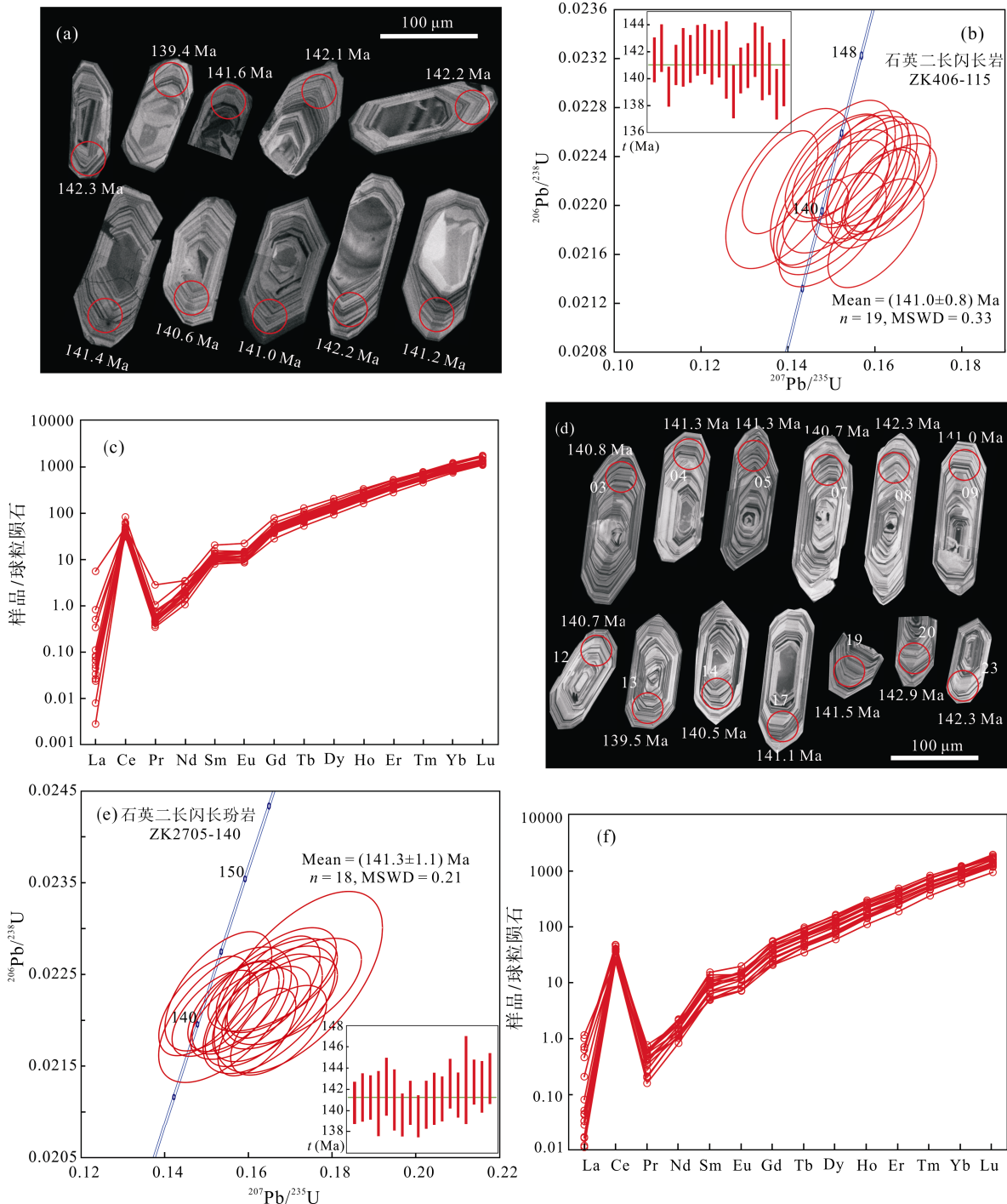


图 8 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩锆石 CL 图像(a, d)、U-Pb 年龄谐和图(b, e) 及稀土元素球粒陨石标准化分布模式(c, f)

Fig.8 Cathodoluminescence (CL) images (a, d), U-Pb concordia diagrams (b, e) and chondrite-normalized REE patterns (c, f) of zircons from quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglushan deposit

表2 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb isotopic compositions of zircon from quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglushan deposit

点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
石英二长闪长岩 ZK406-115													
1	411	364	1.13	0.05349	0.00222	0.16294	0.00649	0.02218	0.00026	153.3	5.7	141.4	1.6
2	256	277	0.92	0.04977	0.00247	0.15199	0.00723	0.02232	0.00028	143.7	6.4	142.3	1.7
3	282	297	0.95	0.04875	0.00188	0.14567	0.00543	0.02186	0.00023	138.1	4.8	139.4	1.5
4	322	307	1.05	0.05301	0.00198	0.16132	0.00590	0.02212	0.00023	151.9	5.2	141.0	1.5
5	509	381	1.34	0.05194	0.00274	0.15764	0.00799	0.02221	0.00034	148.6	7	141.6	2.2
6	276	289	0.96	0.04588	0.00202	0.13822	0.00575	0.02219	0.00028	131.5	5.1	141.5	1.8
8	299	298	1.00	0.05074	0.00241	0.15554	0.00712	0.02229	0.00029	146.8	6.3	142.1	1.9
10	302	279	1.08	0.04955	0.00259	0.15108	0.00774	0.02231	0.00029	142.9	6.8	142.2	1.8
12	661	440	1.50	0.05170	0.00206	0.15847	0.00641	0.02221	0.00032	149.4	5.6	141.6	2
13	171	175	0.98	0.05312	0.00272	0.16096	0.00783	0.02225	0.00028	151.5	6.8	141.9	1.7
14	155	196	0.79	0.05055	0.00344	0.15033	0.00949	0.02218	0.00045	142.2	8.4	141.4	2.8
15	288	270	1.07	0.05016	0.00284	0.15030	0.00815	0.02180	0.00031	142.2	7.2	139	1.9
16	183	240	0.76	0.05262	0.00211	0.15969	0.00640	0.02205	0.00027	150.4	5.6	140.6	1.7
18	444	343	1.29	0.05379	0.00245	0.16366	0.00696	0.02211	0.00026	153.9	6.1	141.0	1.6
19	237	264	0.90	0.05067	0.00234	0.15668	0.00729	0.02230	0.00032	147.8	6.4	142.2	2.0
20	342	350	0.98	0.04573	0.00325	0.14010	0.00951	0.02214	0.00043	133.1	8.5	141.2	2.7
22	259	290	0.89	0.04901	0.00250	0.15106	0.00809	0.02207	0.00031	142.8	7.1	140.7	1.9
24	210	255	0.82	0.05367	0.00254	0.16025	0.00729	0.02177	0.00029	150.9	6.4	138.9	1.9
25	285	297	0.96	0.04986	0.00328	0.15093	0.00940	0.02203	0.00039	142.7	8.3	140.5	2.5
石英二长闪长玢岩 ZK2705-140													
3	415	304	1.37	0.05062	0.00244	0.15215	0.00686	0.02208	0.00031	143.8	6	140.8	2
4	299	261	1.15	0.04930	0.00249	0.14949	0.00719	0.02216	0.00036	141.5	6.4	141.3	2.3
5	404	318	1.27	0.05163	0.00252	0.15700	0.00757	0.02216	0.00033	148.1	6.6	141.3	2.1
7	284	264	1.08	0.05163	0.00390	0.15442	0.01047	0.02206	0.00049	145.8	9.2	140.7	3.1
8	260	230	1.13	0.04980	0.00292	0.15283	0.00843	0.02232	0.00043	144.4	7.4	142.3	2.7
9	368	283	1.30	0.05436	0.00349	0.16495	0.01041	0.02211	0.00046	155	9.1	141.0	2.9
11	393	290	1.35	0.05582	0.00261	0.16723	0.00757	0.02189	0.00032	157	6.6	139.6	2.0
12	223	247	0.90	0.05346	0.00316	0.15894	0.00847	0.02207	0.00033	149.8	7.4	140.7	2.1
13	535	373	1.43	0.05386	0.00203	0.16205	0.00615	0.02187	0.00032	152.5	5.4	139.5	2
14	320	280	1.14	0.05408	0.00307	0.16231	0.00833	0.02204	0.00036	152.7	7.3	140.5	2.3
16	420	302	1.39	0.05428	0.00299	0.16454	0.00867	0.02214	0.00039	154.7	7.6	141.1	2.4
17	337	302	1.11	0.05181	0.00233	0.15694	0.00686	0.02213	0.00033	148	6	141.1	2.1
18	275	229	1.20	0.05476	0.00257	0.16601	0.00733	0.02236	0.00037	156	6.4	142.6	2.3
19	241	261	0.92	0.05520	0.00320	0.16748	0.00913	0.02219	0.00033	157.2	7.9	141.5	2.1
20	178	189	0.94	0.05699	0.00497	0.17193	0.01328	0.02242	0.00065	161.1	11.5	142.9	4.1
21	386	281	1.37	0.05411	0.00349	0.16581	0.01021	0.02239	0.00033	155.8	8.9	142.7	2.1
23	249	243	1.02	0.05586	0.00357	0.17075	0.01074	0.02231	0.00038	160.1	9.3	142.3	2.4
26	345	273	1.26	0.05369	0.00301	0.16666	0.00947	0.02244	0.00038	156.5	8.2	143.0	2.4

本文选取的测年样品均采自铜绿山矿区新发现隐伏矿体的相关钻孔。矿区东南侧中深部位的石英二长闪长岩(ZK406-115)和北侧中深部位的石英二长闪长玢岩(ZK2705-140)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为(141.0 \pm 0.8) Ma 和(141.3 \pm 1.1) Ma。这一

结果与 Li *et al.*^[16]获得的铜绿山深部石英二长闪长岩的成年年龄在误差范围一致, 且与 Xie *et al.*^[15]和 Li *et al.*^[16]前后获得的铜绿山夕卡岩成矿阶段的多件金云母 Ar-Ar 年龄非常吻合(图 9)。数值模拟显示, 单一岩体形成>200 °C 的地热场持续时间

<0.8 Ma^[32]; 另外, 目前越来越多的高精度同位素测年结果表明, 单一岩浆-热液系统的持续时间相对较短(<1 Ma)^[33-35]。铜绿山岩体的出露规模相对

较小, 岩浆-热液系统持续的时间也应该相对短暂。因此, 本文将约 141 Ma 作为铜绿山成矿岩体的结晶年龄是合理的。

表 3 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的锆石稀土元素($\mu\text{g/g}$)组成
Table 3 Rare earth element concentrations ($\mu\text{g/g}$) of zircons from quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglushan deposit

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	δEu	δCe	$\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$
石英二长闪长岩 ZK406-115																		
ZK406-115-01	0.01	46.86	0.07	1.55	2.96	1.09	15.99	4.88	57.87	22.25	107.46	24.83	254.13	56.66	597	0.39	192.1	347
ZK406-115-02	0.03	34.64	0.06	1.15	1.92	0.84	10.30	3.17	37.90	15.32	75.37	17.91	188.67	42.85	430	0.46	141.3	437
ZK406-115-03	1.69	39.50	0.34	2.06	2.20	0.86	10.90	3.50	42.18	16.69	81.55	19.45	203.14	42.77	467	0.44	11.9	475
ZK406-115-04	0.01	36.80	0.05	1.12	2.32	1.03	11.54	3.77	42.97	16.82	82.12	19.34	199.88	44.24	462	0.50	190.6	476
ZK406-115-05	0.01	49.75	0.07	1.45	2.67	1.10	13.84	4.53	52.45	20.05	97.43	22.38	232.03	52.51	550	0.44	210.0	480
ZK406-115-06	0.02	36.83	0.06	1.03	2.08	0.88	10.66	3.49	40.65	15.68	77.25	18.86	200.25	40.94	449	0.46	172.6	490
ZK406-115-08	0.01	39.31	0.07	1.48	2.26	1.05	12.41	3.86	46.39	17.53	84.19	19.78	207.97	43.00	479	0.48	159.3	515
ZK406-115-10	0.00	36.92	0.06	1.13	2.30	1.04	10.83	3.41	41.60	16.17	79.86	18.36	194.56	44.08	450	0.52	183.8	547
ZK406-115-12	0.03	66.41	0.13	2.02	3.92	1.63	20.21	5.99	65.58	23.99	109.92	24.86	247.53	51.26	623	0.45	144.7	548
ZK406-115-13	0.02	29.64	0.05	0.79	1.86	0.67	10.34	3.32	39.22	15.13	72.06	16.59	166.58	35.68	392	0.37	172.7	570
ZK406-115-14	0.00	24.52	0.07	1.03	1.80	0.92	9.43	3.00	36.60	14.64	71.35	17.57	175.04	36.94	393	0.54	111.4	577
ZK406-115-15	0.00	34.70	0.06	1.20	1.98	0.87	11.53	3.52	40.86	15.83	77.15	18.20	191.61	41.00	439	0.43	166.2	588
ZK406-115-16	0.01	25.66	0.04	0.63	1.53	0.62	7.20	2.46	29.48	11.58	58.13	14.52	154.55	34.77	341	0.47	166.1	602
ZK406-115-18	0.02	46.76	0.09	1.25	2.52	1.06	13.33	4.21	49.17	19.65	98.95	23.73	244.19	56.05	561	0.45	138.4	603
ZK406-115-19	0.10	35.60	0.05	1.02	2.22	0.99	11.22	3.65	46.08	18.50	92.40	22.15	233.95	53.12	521	0.49	112.4	606
ZK406-115-20	0.25	39.72	0.09	1.10	1.95	0.75	9.70	3.09	39.21	14.87	71.45	17.34	182.01	37.61	419	0.43	64.6	613
ZK406-115-22	0.02	39.41	0.05	1.00	2.09	0.67	13.18	4.09	49.28	19.53	93.38	21.67	214.52	45.63	505	0.30	190.9	632
ZK406-115-24	0.01	31.17	0.05	0.84	1.71	0.62	9.58	3.08	36.81	14.73	71.30	16.46	165.80	36.24	388	0.37	162.3	634
ZK406-115-25	0.15	30.66	0.05	0.99	1.79	0.76	9.64	3.02	35.06	13.56	68.53	16.32	172.20	38.74	391	0.44	83.0	654
石英二长闪长玢岩 ZK2705-140																		
ZK2705-140-03	0.01	31.96	0.08	1.05	1.97	1.09	10.15	3.07	34.15	13.49	64.38	17.16	175.79	41.84	396	0.60	116.9	473
ZK2705-140-04	0.00	22.65	0.04	0.66	1.23	0.66	7.23	2.34	26.89	11.63	54.83	14.79	153.17	37.41	334	0.53	158.9	768
ZK2705-140-05	0.19	30.91	0.09	1.08	1.91	1.19	11.67	3.43	41.22	16.15	77.07	20.34	206.88	50.71	463	0.59	54.9	581
ZK2705-140-07	0.03	35.74	0.07	1.13	2.38	1.08	11.93	4.01	46.82	19.55	92.50	24.17	232.53	52.70	525	0.50	127.8	451
ZK2705-140-08	0.02	29.61	0.03	0.89	2.07	0.83	9.79	3.09	36.90	15.49	71.65	18.99	188.34	44.93	423	0.47	227.1	426
ZK2705-140-09	0.01	24.95	0.05	0.87	1.74	0.86	8.75	2.74	31.73	12.94	59.69	16.14	170.64	39.03	370	0.55	130.7	440
ZK2705-140-11	0.01	32.18	0.07	1.06	2.13	1.13	12.42	3.89	44.69	18.42	87.74	23.24	235.04	55.97	518	0.52	132.4	539
ZK2705-140-12	0.14	20.19	0.05	0.61	0.99	0.65	5.74	2.06	24.22	10.53	53.68	15.01	154.88	41.62	330	0.65	55.8	1174
ZK2705-140-13	0.01	37.95	0.07	1.26	2.97	1.46	14.37	4.56	50.63	19.87	92.94	24.03	235.61	59.00	545	0.56	158.2	348
ZK2705-140-14	0.22	38.46	0.07	1.33	2.69	1.02	13.91	4.30	52.94	21.33	101.16	26.25	254.47	54.74	573	0.41	72.4	393
ZK2705-140-16	0.22	32.74	0.06	1.28	1.59	0.99	10.45	3.19	39.85	16.81	84.36	23.59	245.20	62.75	523	0.55	65.5	1107
ZK2705-140-17	0.01	24.72	0.02	0.70	1.36	0.65	7.34	2.19	25.83	11.09	53.20	14.95	159.29	38.98	340	0.50	262.7	727
ZK2705-140-18	0.01	23.18	0.05	0.72	1.38	0.82	8.33	2.70	32.38	13.49	66.15	17.40	172.61	44.10	383	0.57	133.0	723
ZK2705-140-19	0.36	19.59	0.07	0.79	0.95	0.53	5.32	1.62	19.04	7.92	39.41	11.45	123.51	30.18	261	0.56	28.6	905
ZK2705-140-20	0.01	20.43	0.02	0.49	1.04	0.54	6.85	2.24	27.24	11.39	59.47	16.24	170.55	46.16	363	0.46	272.7	1178
ZK2705-140-21	0.06	28.64	0.04	1.02	1.79	0.99	10.54	3.30	38.21	15.71	76.75	19.89	197.16	50.40	445	0.54	123.2	615
ZK2705-140-23	0.00	19.07	0.03	0.68	0.96	0.66	5.40	2.04	23.09	10.15	51.58	14.55	151.43	42.78	322	0.69	212.5	1231
ZK2705-140-26	0.01	24.32	0.04	0.46	1.35	0.77	8.48	2.71	32.76	14.05	68.71	18.82	190.73	50.76	414	0.53	166.1	921

注: $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$; $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$; $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}_{\text{锆石}} = (\text{Ce}_{\text{锆石}} - \text{Ce}_{\text{锆石}/D_{\text{Ce(III)}}}) / (\text{Ce}_{\text{锆石}/D_{\text{Ce(IV)}}} - \text{Ce}_{\text{锆石}})$ 。

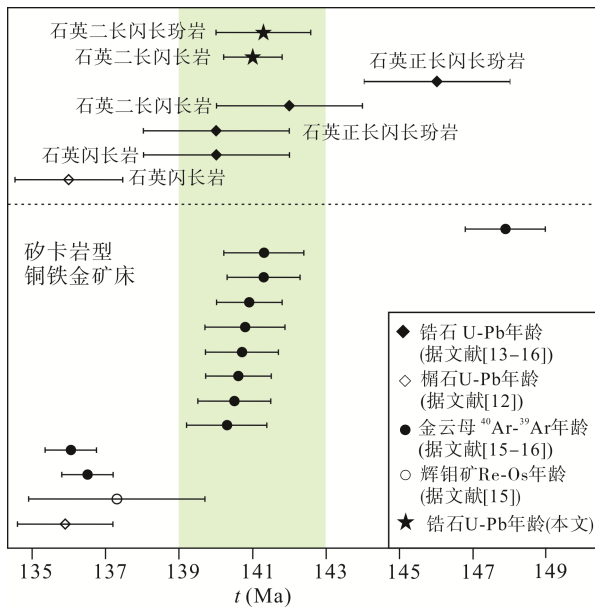


图9 铜绿山矿区石英二长闪长(玢)岩与夕卡岩型铜铁金矿成矿年龄统计图

Fig.9 Diagenetic age of dioritic rocks incorporating with mineralization age of Cu-Fe-Au skarn deposit at Tonglushan

4.2 岩石成因类型及源区特征

结合前人对铜绿山岩体的成因研究^[10,17], 本文通过详细的岩相学和全岩地球化学特征综合分析, 认为铜绿山深部的石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩同属 I 型高钾钙碱性花岗岩系列。主要依据如下: (1) 两类岩石在副矿物组合上都明显富含磁铁矿和榍石, 指示岩浆形成于相对较高的氧逸度环境; (2) 铝饱和指数 A/CNK 值 < 1.0, 在 0.79~0.94 之间, 都落入准铝质花岗岩区域(图 6a); (3) 全岩 Na₂O 含量较高, K₂O/(K₂O+Na₂O) 比值较低为 0.38~0.41; (4) 经 CIPW 标准矿物计算, 两类岩石都几乎不含刚玉; (5) P₂O₅ 含量随着 SiO₂ 增高而呈现降低的趋势(图 10), 这是因为磷灰石一般在铝不饱和岩浆中的溶解度很低, 由于它们优先结晶, 使残余岩浆的 P₂O₅ 含量越来越低。

铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩都具有高硅(SiO₂=63.08%~67.11%)、富铝(Al₂O₃=15.62%~16.73%)、高 Sr(821~1115 μg/g)、低 Y(7.9~17.5 μg/g) 和 Yb(0.80~1.55 μg/g) 等特征, 显示出埃达克质岩的地球化学特征(表 1)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图显示(图 7a), 两类岩石都明显的亏损 HREE 和 Y, 说明源区残留石榴子石, Eu 异常不明显说明斜长石在源区不稳定^[36]。目前, 学术界对埃达克岩和埃达克质岩的成因机制, 主要有以下几种认识: (1) 与俯冲板片部分熔融有关的埃达克岩; (2) 增厚的下地壳部分熔融形成的埃达克质岩; (3) 拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩; (4) 基性岩浆高

压分异形成的埃达克质岩和(5) 富集地幔结晶分异或混染下地壳物质等成因^[17,36-39]。

俯冲板片部分熔融形成的埃达克岩一般都具有较高的 MgO 含量和 Mg[#] 值, 这主要是由于俯冲板片部分熔融形成的低镁中酸性埃达克质熔体, 在上升过程中穿过弧下地幔楔时, 与地幔橄榄岩反应而导致高 MgO 和 Mg[#] 的岩浆产出^[36,38]。拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克质岩, 由于下地壳拆沉到下伏地幔过程中, 可能经历了与地幔橄榄岩的反应过程, 因而普遍具有较高的 MgO 含量、Mg[#] 值及 Cr 和 Ni 含量^[38]。铜绿山两类岩石的 MgO 含量 (<2%、Mg[#](40~47)、Cr 含量(12~38 μg/g) 和 Ni 含量(5.0~6.5 μg/g) 均较低, 且研究区距离俯冲板块边界甚远, 因而不可能直接来源于俯冲的古太平洋板片或拆沉下地壳部分熔融。基性岩浆高压分异形成的埃达克质岩是由基性母岩浆在相对高压环境下通过分异作用形成的岩石, 通常与一系列有成因联系的中基性岩石密切共生^[38,40]。在铜绿山矿区未发现与石英二长闪长(玢)岩同期的中基性岩类。Wang *et al.*^[41] 报道了大别山造山带早白垩世(142~143 Ma) 低 Cr 含量(2.1~24 μg/g) 和 Ni 含量(1.4~9.6 μg/g) 的埃达克质侵入岩, 证明了它们主要来自于加厚的角闪岩相或含金红石的榴辉岩相部分熔融。而紧邻的鄂东南地区, 现今的地壳厚度仅为 30~31 km^[42], 而区内大量的(134~152 Ma) 斑岩-夕卡岩型矿床都保存较好, 证明该区自早白垩世至今的地壳抬升或剥蚀程度应 < 5 km, 因而这些成矿岩体不太可能来自加厚的下地壳部分熔融^[17]。

前人通过对铜绿山岩体进行详细的 Sr-Nd-Pb 同位素组成研究表明, 铜绿山石英二长闪长岩与长江中下游地区同时代富集地幔成因的基性岩浆具有相似的同位素组成特征^[10,17]。此外, 对铜绿山石英二长闪长岩的矿物化学成分研究发现, 角闪石和黑云母都显示出壳幔混合来源的特征^[10]。通常情况下, 富集地幔一般不能直接形成中酸性岩浆岩, 主要是通过碱性玄武质岩浆混染下地壳物质经过 AFC 过程形成中酸性岩浆岩^[10]。石英二长闪长玢岩与石英二长闪长岩具有相似的矿物组成及地球化学特征, 二者应属于同源岩浆岩。结合前人已发表的数据, 我们发现铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的 SiO₂ 和 Fe₂O₃^T、MgO、Al₂O₃、CaO、TiO₂、P₂O₅ 及 Sc、Cr、V、Nb、Y 和 Yb 之间, 都存在明显的负相关性, 证明有镁铁质矿物的分离结晶作用(图 10)。因此, 我们认为铜绿山深部的石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩可能来自富集地幔源区的碱性玄武质岩浆混染下地壳物质经 AFC 过程形成。

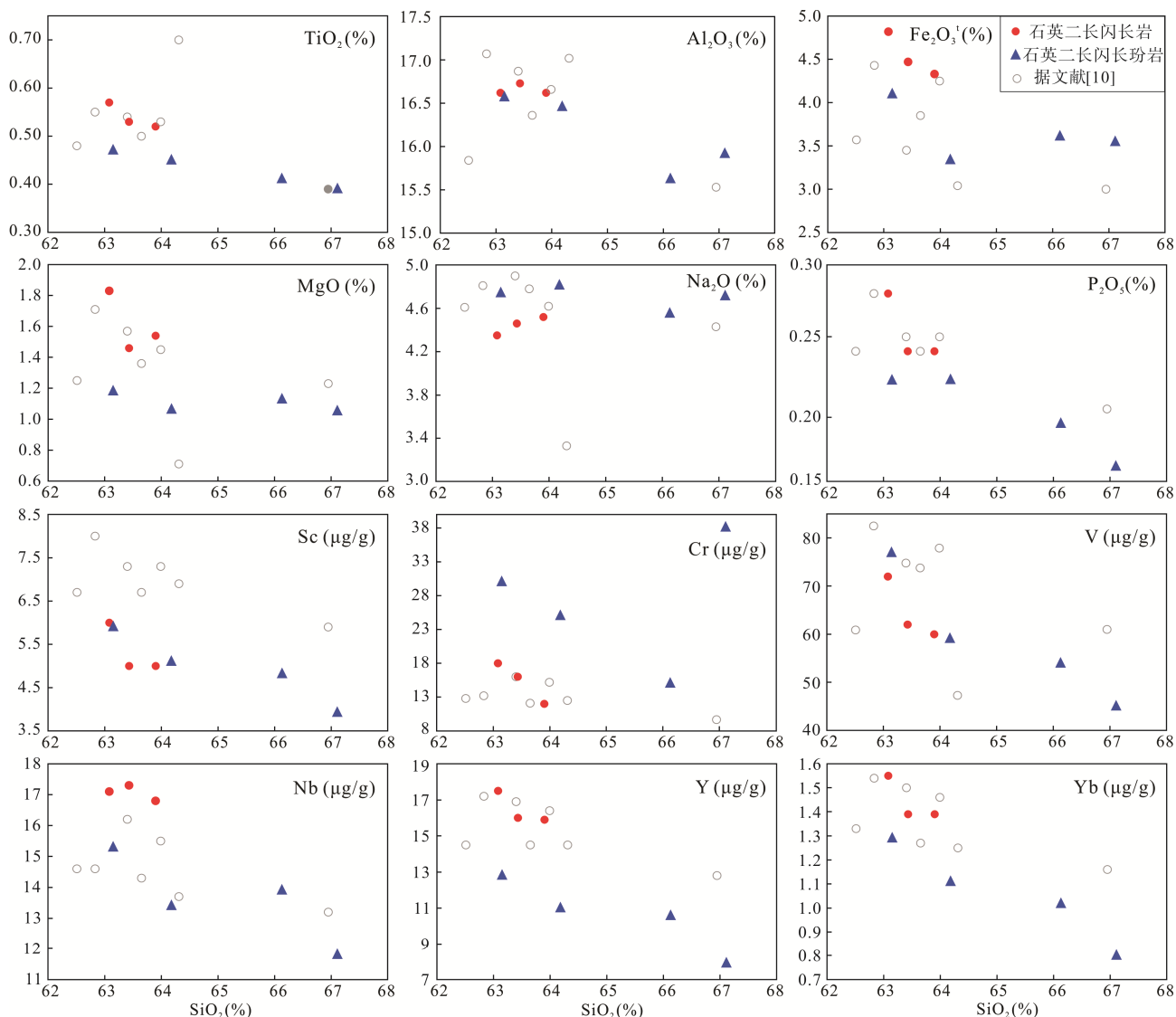


图 10 铜绿山矿区石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的 $\text{SiO}_2(\%)$ 与主、微量元素相关图解

Fig. 10 Relationship between SiO_2 with major, trace elements of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglushan deposit

4.3 与夕卡岩成矿的关系

铜绿山矿区深部石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩与夕卡岩及铜铁金矿化在空间上密切相关。结合前人已发表的铜绿山成岩成矿年龄数据^[13-14]及本文对这两类岩石的年代学研究,也证实了它们都是铜绿山矿床的成矿岩体。那么,是什么因素能使岩浆富集这些成矿元素呢?

大量研究表明,高氧逸度和富水岩浆对斑岩铜矿的形成极其重要,通常氧逸度以高 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ (>300) 比值及 δEu (0.4~0.8) 为标志^[43-44]。铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩中锆石的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值范围分别为 347~654 (平均值为 547) 和 348~1231 (平均值为 722) (表 3), 甚至高于西藏玉龙斑岩铜矿带 (201~

334)^[43] 和智利 Chuquicamata El Abra 斑岩铜矿带 ($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+} > 300$)^[45]。在 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ - δEu 图解中(图 11), 铜绿山深部石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩的氧逸度与世界级大型-超大型斑岩铜矿类似。前人已发表的铜绿山石英二长闪长岩中黑云母的 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})$ 比值在 0.08~0.19 之间^[10], 石英二长闪长(玢)岩中角闪石成分计算得出的氧逸度大于 $\text{NNN}+1$ ^[47], 这些都证明铜绿山岩体具有较高的氧逸度。高氧逸度有利于 Cu、Au 等亲铜元素在岩浆熔体中以硫酸盐的形式高度富集, 同时能够阻止它们在岩浆结晶早期进入到硅酸盐矿物相中, 而作为不相容元素在熔体中富集^[45,46,48]。此外, 铜绿山这两类岩石中富含角闪石, 显示出熔体富水的特征。前人通过角闪石矿物成分计算得出铜绿山石英二长闪长

(玢)岩熔体中的含水量在 3.6%~4.8%之间^[47]。岩浆熔体中水含量越高,越有利于成矿元素聚集和水流体出溶。因此,这些高氧逸度和富水的特征都指示铜绿山岩体具有良好的铜矿化潜力。

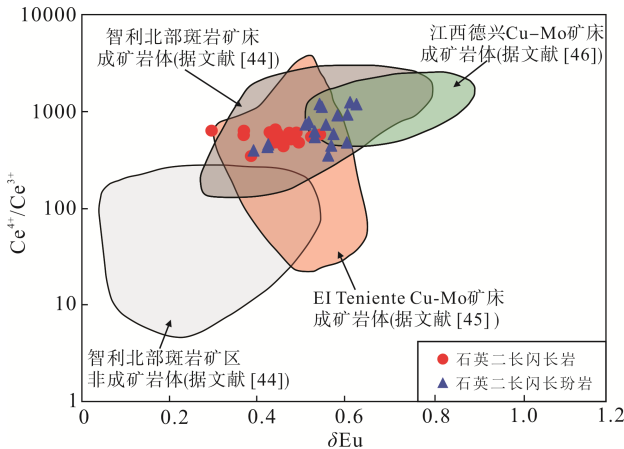


图 11 铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长岩玢岩 Ce^{4+}/Ce^{3+} - δEu 图解

Fig.11 Ce^{4+}/Ce^{3+} vs. δEu diagram of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglūshan deposit

围绕着铜绿山小岩株体,目前已发现了铜绿山大型铜铁金矿床和鸡冠咀大型铜金矿床,以及产于岩株体边部的桃花咀、石头咀和铜山等中小型铜铁(金)矿床^[15]。这些夕卡岩矿床主要分布在矿田的有利构造部位,受区域内褶皱、断裂及侵入岩体的控制,如铜绿山铜铁金矿床位于大冶复式向斜南翼与下陆-姜桥断裂的交汇处^[8,22]。近年来,铜绿山矿区深部 XIII 号矿体和鸡冠咀矿区深部 VII 号矿体的找矿勘查成果^[9]也表明,在铜绿山矿田深部仍具有较大找矿勘查潜力。因此,我们认为在铜绿山岩株体边部及深部,沿着有利的构造部位及深部接触带,仍具有寻找类似夕卡岩型铜铁(金)矿床的潜力。

5 结论

(1) 基于详细的野外地质调查和室内岩相学观察,在铜绿山矿区深部厘定出石英二长闪长岩和石英二长闪长岩玢岩,均与夕卡岩及铜铁金矿化密切相关,它们的成岩时代为约 141 Ma,属长江中下游地区早白垩世构造岩浆活动的产物。

(2) 岩石地球化学特征表明,铜绿山石英二长闪长岩和石英二长闪长岩玢岩同属 I 型高钾钙碱性花岗岩系列,且具有埃达克质岩的地球化学特征,可能起源于富集地幔源区的碱性玄武质岩浆混染下地

壳物质经 AFC 过程形成。

(3) 高氧逸度和富水特征是铜绿山铜铁金成矿的重要控制因素,在铜绿山矿田边部及深部仍具有一定的找矿勘查潜力。

野外工作得到湖北省地质局第一地质大队和大冶有色公司铜绿山矿领导的大力支持,锆石 U-Pb 同位素定年得到南京聚谱检测科技有限公司李亮工程师的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 赵一鸣. 夕卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 113-120.
Zhao Yi-ming. Some new important advances in study of skarn deposit[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 113-120 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵一鸣, 林文蔚. 中国夕卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-411.
Zhao Yi-ming, Lin Wen-wei. Skarn Deposits of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-411 (in Chinese).
- [3] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits[J]. Econ Geol, 2005, 100th anniversary volume: 299-336.
- [4] 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 鄂东南铜绿山矿田夕卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 227-239.
Xie Gui-qing, Zhao Hai-jie, Zhao Cai-sheng, Li Xiang-qian, Hou Ke-jun, Pan Huai-jun. Re-Os dating of molybdenite from Tonglūshan ore district in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 227-239 (in Chinese with English abstract).
- [5] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-397.
Chang Yin-fo, Liu Xiang-pei, Wu Yan-chang. The Copper-Iron Belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-380 (in Chinese).
- [6] 舒全安, 陈培良, 程建荣. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 1-532.
Shu Quan-an, Chen Pei-liang, Cheng Jian-rong. The Geology of Iron and Copper Deposit in Eastern Hubei Province, China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 1-532 (in Chinese with English abstract).
- [7] 魏克涛, 李享洲, 张晓兰. 铜绿山铜铁矿床成矿特征及找矿前景[J]. 资源环境与工程, 2007, 21: 41-56.
Wei Ke-tao, Li Xiang-zhou, Zhang Xiao-lan. The characteristics of Tonglūshan copper iron deposit and its prospecting future[J]. Resour Environ Eng, 2007, 21: 41-56 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张世涛, 陈华勇, 张小波, 张维峰, 许超, 韩金生, 陈觅. 短波红外光谱技术在夕卡岩型矿床中应用——以鄂东南铜绿山铜铁金矿床为例[J]. 矿床地质, 2017, 36(6): 1263-1288.
Zhang Shi-tao, Chen Hua-yong, Zhang Xiao-bo, Zhang Wei-feng, Xu Chao, Han Jin-sheng, Chen Mi. Application of short

- wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of skarn deposit: A case study of the Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit, Edongnan ore district, Hubei Province[J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(6): 1263–1288 (in Chinese with English abstract).
- [9] 湖北省地质局第一地质大队. 湖北省大冶市铜绿山铜矿接替资源勘查(深部普查)报告[R]. 2010: 1–115. The First Geological Brigade of Hubei Geological Bureau. The continued resources exploration report of Tonglūshan Copper deposit, Daye, Hubei Province[R]. 2010: 1–115 (in Chinese).
- [10] 赵海杰, 毛景文, 向君峰, 周振华, 魏克涛, 柯于富. 湖北铜绿山矿床石英闪长岩的矿物学及 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 768–784. Zhao Hai-jie, Mao Jing-wen, Xiang Jun-feng, Zhou Zhen-hua, Wei Ke-tao, Ke Yu-fu. Mineralogy and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of quartz diorite in Tonglūshan deposit, Hubei Province[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(3): 768–784 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zhao H J, Xie G Q, Wei K T, Ke Y F. Mineral compositions and fluid evolution of the Tonglūshan skarn Cu-Fe deposit, SE Hubei, east-central China[J]. *Int Geol Rev*, 2012, 54(7): 737–764.
- [12] Li J W, Deng X D, Zhou M F, Liu Y S, Zhao X F, Guo J L. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglūshan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China[J]. *Chem Geol*, 2010, 270: 56–67.
- [13] 梅玉萍, 李华芹, 陈富文. 鄂东南铜绿山矿区石英正长闪长玢岩 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球学报*, 2008, 29(6): 805–810. Mei Yu-ping, Li Hua-qin, Chen Fu-wen. SHRIMP U-Pb zircon dating of the quartz orthoclase diorite porphyrite from the Tonglūshan ore field in eastern Hubei Province and its geological implication[J]. *Acta Geosci Sinica*, 2008, 29(6): 805–810.
- [14] 黄圭成, 夏金龙, 丁丽雪, 金尚刚, 柯于富, 吴昌雄, 祝敬明. 鄂东南地区铜绿山岩体的侵入期次和物源: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1392–1408. Huang Gui-cheng, Xia Jin-long, Ding Li-xue, Jin Shang-gang, Ke Yu-fu, Wu Chang-xiong, Zhu Jing-ming. Stage division and origin of Tonglūshan pluton in southeast Hubei Province: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Geol China*, 2013, 40(5): 1392–1408 (in Chinese with English abstract).
- [15] Xie G Q, Mao J W, Zhao H J, Wei K T, Jin S G, Pan H J, Ke Y F. Timing of skarn deposit formation of the Tonglūshan ore district, southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implications[J]. *Ore Geol Rev*, 2011, 43: 62–77.
- [16] Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, Deng X D, Cohen B, Bi S J, Zhao X F, David S. Longevity of magmatic-hydrothermal systems in the Daye Cu-Fe-Au District, eastern China with implications for mineral exploration[J]. *Ore Geol Rev*, 2014, 57: 375–392.
- [17] Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Ma C Q, Souza Z S, Vasconcelos P. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2009, 157: 383–409.
- [18] Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, Xu J F, Liu W, Li C F, Bai Z H, Xiong X L. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in South-east Hubei, East China[J]. *Resour Geol*, 2004, 54(2): 137–152.
- [19] 蒋少涌, 李亮, 朱碧, 丁昕, 姜耀辉, 顾连兴, 倪培. 江西武山铜矿花岗岩闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1679–1690. Jiang Shao-yong, Li Liang, Zhu Bi, Ding Xin, Jiang Yao-hui, Gu Lian-xing, Ni Pei. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granodiorite from the Wushan copper deposit, Jiangxi Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(8): 1679–1690.
- [20] 李瑞玲, 朱乔乔, 侯可军, 谢桂青. 长江中下游金牛盆地花岗岩斑岩和流纹斑岩的锆 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(10): 3347–3360. Li Rui-ling, Zhu Qiao-qiao, Hou Ke-jun, Xie Gui-qing. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of granite porphyry and rhyolite porphyry from Jingniu basin in the Middle-Lower Yangtze River Belt and its geological significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2012, 28(10): 3347–3360 (in Chinese with English abstract).
- [21] Deng X D, Li J W, Zhou M F, Zhao X F, Yan D R. In-situ LA-ICPMS trace elements and U-Pb analysis of titanite from the Mesozoic Ruanjiawan W-Cu-Mo skarn deposit, Daye district, China[J]. *Ore Geol Rev*, 2015, 65: 990–1004.
- [22] 刘继顺, 马光, 舒广龙. 湖北铜绿山夕卡岩型铜铁矿床中隐爆角砾岩型金(铜)矿体的发现及其找矿前景[J]. *矿床地质*, 2005, 24(5): 527–536. Liu Ji-shun, Ma Guang, Shu Guang-long. Discovery of crypt-explosive breccia type Cu (Au) orebodies in Tonglūshan skarn-type Cu-Fe deposit of Hubei Province and ore-searching vista[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(5): 527–536 (in Chinese with English abstract).
- [23] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chin Sci Bull*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [24] Hu Z C, Liu Y S, Chen L, Zhou L, Li M, Zong K Q, Zhu L Y, Gao S. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution[J]. *J Anal At Spectrom*, 2011, 26(2): 425–430.
- [25] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *J Petrol*, 2010, 51: 537–571.
- [26] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 37: 215–224.
- [27] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [28] Richter F M. Simple models for trace element fractionation during melt segregation[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 77: 333–344.

- [29] Boynton. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]// Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry Developments in Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 115–1522.
- [30] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geol Soc London Spec Publ, 1989, 42(1): 313–345.
- [31] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Rev Mineral Geochem, 2003, 53(1): 27–62.
- [32] Cathles L M, Erendi A H J, Barrie T. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event?[J] Econ Geol, 1997, 92: 766–771.
- [33] Zeh A, Ovtcharova M, Wilson A H, Schaltegger U. The Bushveld Complex was emplaced and cooled in less than one million years: Results of zirconology, and geotectonic implications [J]. Earth Planet Sci Lett, 2015, 418: 103–114.
- [34] Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z, Zhang D L. *In situ* LA-MC-ICPMS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin polymetallic mineralization[J]. Ore Geol Rev, 2011, 43: 235–242.
- [35] Zhang R Q, Lu J J, Lehmann B, Li C Y, Li G L, Zhang L P, Guo J, Sun W D. Combined zircon and cassiterite U-Pb dating of the Piaotang granite-related tungsten-tin deposit, southern Jiangxi tungsten district, China[J]. Ore Geol Rev, 2017, 82: 268–284.
- [36] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magma by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662–665.
- [37] Castillo P R. Adakite petrogenesis[J]. Lithos, 2012, 134–135: 304–316.
- [38] 许继峰, 邬建斌, 王强, 陈建林, 曹康. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 7–13.
Xu Ji-feng, Wu Jian-bin, Wang Qiang, Chen Jian-lin, Cao Kang. Research advances of adakites and adakitic rocks in China[J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 2014, 33(1): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- [39] Rapp R P and Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. J Petrol, 1995, 36(4): 891–931.
- [40] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. Earth Planet Sci Lett, 2006, 243: 581–593.
- [41] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Jian P, Zhao Z H, Li C F, Xu W, Ma J L, He B. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2609–2636.
- [42] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周永桂. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–235.
Zhai Yu-sheng, Yao Shu-zhen, Lin Xin-duo, Zhou Xun-ruo, Wan Tian-feng, Jin Fu-quan, Zhou Yong-gui. Fe-Cu(Au) metallogeny of the Middle-Lower Yangtze River Region[M]. Beijing: Geological publishing House, 1992: 1–235 (in Chinese).
- [43] Liang H Y, Campbell I H, Allen C. Zircon Ce⁴⁺/Ce³⁺ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet[J]. Mineral Deposita, 2006, 41: 152–159.
- [44] Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144(3): 347–364.
- [45] Munoz M, Charrier R, Fanning C M. Zircon trace elements and O-Hf isotope analysis of mineralized intrusions from El Teniente ore deposit, Chilean Andes: Constrains on the source and magmatic evolution of porphyry Cu-Mo related Magmas [J]. J Petrol, 2012, 53(6): 1091–1122.
- [46] Zhang H, Ling M X, Liu Y L, Tu X L, Wang F Y, Li C Y, Liang H Y, Yang X Y, Arndt N T, Sun W D. High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, Southeastern China[J]. J Geol, 2013, 121(3): 289–305.
- [47] Duan D F, Jiang S Y. *In situ* major and trace element analysis of amphiboles in quartz monzodiorite porphyry from the Tonglvshan Cu-Fe (Au) deposit, Hubei Province, China: Insights into magma evolution and related mineralization[J]. Contrib Mineral Petrol, 2017, 172(36): 1–17.
- [48] Sun W D, Liang H Y, Ling M X, Zhan M Z, Ding X, Zhang H, Yang X Y, Li Y L, Ireland T R, Wei Q R, Fan W M. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2013, 103: 263–275.