

文章编号: 0258-7106 (2021) 03-0587-16

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2021.03.012

秘鲁中部超大型特罗莫克斑岩-矽卡岩铜钼矿地质特征及区域成矿作用^{*}

金露英¹, 秦克章^{2,3,4}, 张西平¹, 赵俊兴^{2,3}, 曾敏¹

(1 中国铜业有限公司, 北京 100082; 2 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 4 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

摘要 秘鲁中部莫罗科查地区在板块俯冲引发的中新世构造-岩浆-热液作用下, 形成了斑岩型、矽卡岩型、浅成低温热液型等多种铜钼铅锌多金属矿化。文章选取该地区超大型特罗莫克铜钼矿床为典型矿床实例, 通过岩石学、岩相学和年代学系统研究, 深入剖析矿床的蚀变类型和矿化地质特征, 并结合区域岩浆-热液作用过程, 总结其区域成矿特点, 以期为该区资源勘查工作提供参考。研究结果表明, 作为典型的斑岩-矽卡岩型矿床, 特罗莫克铜钼矿的成矿期花岗闪长岩、长石斑岩、石英斑岩及英安斑岩等多期岩体在 9.4~7.3 Ma 之间相继侵位, 并伴随形成多种蚀变矿化, 其中铜钼矿化主要形成于 8.0~7.8 Ma。矿区主要发育钾硅酸盐化、绢英岩化、绿泥石化、黏土化、矽卡岩化、角岩化等典型的斑岩矿床蚀变特征, 而矽卡岩中发育透闪石-阳起石-蛇纹石-滑石等多种钙质和镁质矽卡岩矿物。铜钼矿化以浸染状、细脉状、网脉状、块状等形式产出, 且矿化自中心向外围, 依次具有铜-钼→铅-锌→铅-银的元素分带。结合莫罗科查区域主要发育的 3 个持续了 3.5~0.3 Ma 的中新世岩浆热液中心(北侧 Codiciada 杂岩体、中部 Toromocho 岩体和西部 Ticlio 斑岩), 以及与之相关的蚀变和矿化特征, 笔者认为, 围绕岩浆热液中心, 区域成矿呈现中心斑岩-矽卡岩型、外围浅成低温热液脉型多金属矿化的分布规律, 矿化整体呈现自中心向外围的铜-钼-铅-锌-银规律性分带特征, 该类“多中心式”斑岩-矽卡岩成矿系统的蚀变-矿化规律应在未来区域矿产勘查工作中引起重视。

关键词 地质学; 斑岩-矽卡岩铜钼矿; 浅成低温多金属矿化; 地质特征; 特罗莫克; 秘鲁中部

中图分类号:P618.42

文献标志码:A

Geological characteristics of giant Toromocho porphyry-skarn Cu-Mo deposit and regional mineralization in central Peru

JIN LuYing¹, QIN KeZhang^{2,3,4}, ZHANG XiPing¹, ZHAO JunXing^{2,3} and ZENG Min¹

(1 China Copper Corporation Limited, Beijing 100082, China; 2 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3 Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China; 4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

In central Peru, the Morococha area is characterized by a variety of porphyry-, skarn-, and epithermal-type Cu-Mo-Pb-Zn-Ag polymetallic mineralization, resulting from the Miocene magmatic-hydrothermal activity during the plate subduction. This paper describes the geological characteristics of alteration and mineralization of the typical Toromocho porphyry-skarn Cu-Mo deposit in this area by utilizing petrological and petrographic observation and chronological analysis. Combined with regional magmatic-hydrothermal process, the authors summarize

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 41762011)、中国科学院青促会基金(2019070)资助

第一作者简介 金露英,女,1988年生,博士,从事矿产资源勘查及研究工作。Email:jinluying88@163.com

收稿日期 2020-09-06; 改回日期 2021-04-23。孟秋熠编辑。

regional mineralization characteristics and intend to provide some help to promote further mineral exploration. It is shown that granodiorite, feldspar porphyry, quartz porphyry and dacite porphyry in the Toromocho deposit intruded during 9.4~7.3 Ma, resulting in various kinds of alteration and mineralization, and the copper-molybdenum mineralization mainly occurred at 8.0~7.8 Ma. The main alteration types show typical porphyry-type alteration characteristics, including potassic, phyllitic, chloritic, argillic, skarn, hornfels, marble alteration, and carbonate and anhydrite in the skarn rocks. The calcic and magnesian skarn minerals in the Toromocho deposit are mainly composed of tremolite, actinolite, serpentine, talc, garnet and diopside. The mineralization in the Toromocho deposit occurs as disseminated, veinlet and stockwork veins in intrusions, skarns and hornfels, showing the distribution of Cu-Mo, Pb-Zn, Pb-Ag subzones from the center to the periphery. Combined with predominant three magmatic-hydrothermal centers (Codiciada complex, central Toromocho intrusions, and western Ticlio porphyry) within the duration period of 3.5~0.3 Ma in Morococha area and the associated alteration and mineralization features, the authors infer that mineralization in this area is characterized by inner porphyry-skarn type and outer epithermal vein-type polymetallic mineralization, and the element zonation from Cu to Cu-Zn and Pb-Zn-Ag was evolved from the center to the outer part. This multiple center porphyry-skarn mineralization system in this area should arouse due attention in future exploration.

Key words: geology, porphyry-skarn Cu-Mo deposit, epithermal polymetallic mineralization, geological characteristics, Toromocho, central Peru

环太平洋成矿域是全世界最重要的铜资源产地 (Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010)。近年来,成矿域内的斑岩Cu-Mo-Au成矿系统在时空关系、蚀变-矿化过程、流体演化过程、金属运移-沉淀机制、矿物及元素特征、构造背景等方面的研究均取得重要进展 (Arribas et al., 1995; Hedenquist et al., 1998; Heinrich, 2005; Waters et al., 2011; 宋国学等, 2018; Wang et al., 2019), 是建立与完善俯冲环境斑岩矿床成矿理论的重要研究基础。在斑岩成矿系统内常发育矽卡岩型和浅成低温铜(铅锌金银)多金属矿,例如北美 Butte 铜钼矿及主阶段矿脉 (Rusk et al., 2008)、智利 Collahuasi 铜矿及其 El Rosario 矿脉 (Masterman et al., 2005)、中国德兴斑岩铜矿-银山铜多金属矿 (Mao et al., 2011) 等。该类矿床常具有较高矿石品位和开采价值,其形成演化过程常与系统内岩浆特征、区域构造条件和围岩条件有直接联系 (Sillitoe, 2010; 林彬等, 2019)。深入剖析该类斑岩-矽卡岩型-浅成低温铜(铅锌金银)多金属成矿系统的岩浆-蚀变-矿化特征,建立相应的矿床地质模型,对于理解斑岩系统成矿过程具有重要的理论意义。

南美安第斯带发育一系列大型-超大型斑岩铜矿以及多个浅成低温脉状多金属矿床(又称 Cordilleran base metal veins, 科迪勒拉型贱金属矿床, Sawkins, 1972; Bendezú et al., 2008a), 例如 Colquijirca 铅锌银铜铋矿床 (Bendezú et al., 2003; 2008b)、Cerro de Pas-

co 锌铅银铋铜矿床 (Baumgartner et al., 2008)、San Cristobal 钨铜锌铅锌矿床 (Beuchat et al., 2004) 等。区域内超大型斑岩矿床与浅成低温脉状多金属矿床的成因联系是俯冲环境斑岩成矿系统研究的热点问题 (Kouzmanov et al., 2008a; 2008b; Catchpole et al., 2015a; 2015b)。特别是近年来,南美秘鲁莫罗科查区域的矿产勘查工作表明,大规模脉状铜铅锌银多金属矿周边常存在斑岩型铜矿的较大找矿前景,并显示出典型斑岩-浅成低温铜多金属成矿系统的成矿特征。因此,进一步建立典型斑岩(矽卡岩)-浅成低温铜(铅锌金银)多金属矿成矿系统特征标志,总结该类成矿系统重要成矿要素,对于区域勘查工作具有重要指导意义。

本文结合前人对秘鲁莫罗科查地区开展的区域成岩成矿时代、流体演化过程及矿质沉淀作用研究,通过详实的岩石学、岩相学、矿相学、年代学等研究手段,重点对该区成矿系统中的典型实例特罗莫克 (Toromocho) 斑岩-矽卡岩型铜钼矿的蚀变、矿化等基础地质特征进行深入研究,并对比总结区域岩浆-热液演化史及区域斑岩-矽卡岩-浅成低温脉状多金属成矿的特征,以期为该类成矿系统模型的建立以及区域矿产勘查突破提供参考。

1 莫罗科查区域地质概况及矿业发展史

秘鲁中部莫罗科查地区位于安第斯山陆缘造山

带,属于南美科迪勒拉铜多金属成矿带(Noble et al., 1999)。区域地层主要包括泥盆系Excelsior组的千枚岩、页岩、石英岩等沉积变质岩;二叠系Mitu组砾岩、砂岩红层,及灰绿色Catalina英安岩和安山岩(Rosas et al., 2007; Spikings et al., 2016);其上不整合覆盖三叠系-侏罗系Pucará组的厚层海相灰岩、白云岩和页岩沉积建造,夹凝灰岩和玄武岩,Pucará组的西侧底部具有硬石膏及石膏层(Basuki et al., 2008; Wotzlaw et al., 2014);白垩系底部Goyllarizquizga组红色砾岩、砂岩,及顶部Machay组灰岩(Nagell, 1960; Lepry, 1981)。

区域构造作用主要受控于白垩纪晚期开始的安第斯造山运动。伴随着秘鲁中部形成的Yauli穹窿(Rosas et al., 2007),穹窿北段的莫罗科查地区也形

成走向约为北西25°的拉长莫罗科查背斜(图1)。同时背斜西翼和东翼分别发育北西走向的Gertrudis和Potosí 2条逆冲断层及其他次级逆冲断层,2条断层倾角均在45~70°之间(Nagell, 1960)。此外区域发育一系列北北东向、北东东向次级断裂。

俯冲相关的区域钙碱性岩浆作用主要于14.8~7.3 Ma发育(Beuchat, 2003; Bendezú et al., 2012; Kouzmanov et al., 2008a; Bissig et al., 2008),形成闪长岩、细粒闪长岩、花岗闪长岩、石英二长岩、长石斑岩、石英斑岩、细晶岩、英安斑岩等侵入岩。

区域主要矿化类型包括斑岩型铜-钼矿化,矽卡岩型锌-铅-银-铜矿化、脉状锌-铅-银-铜多金属矿化和块状黄铁矿矿化(McLaughlin et al., 1935; Petersen, 1965; Bartos, 1989)。典型矿床为特罗莫

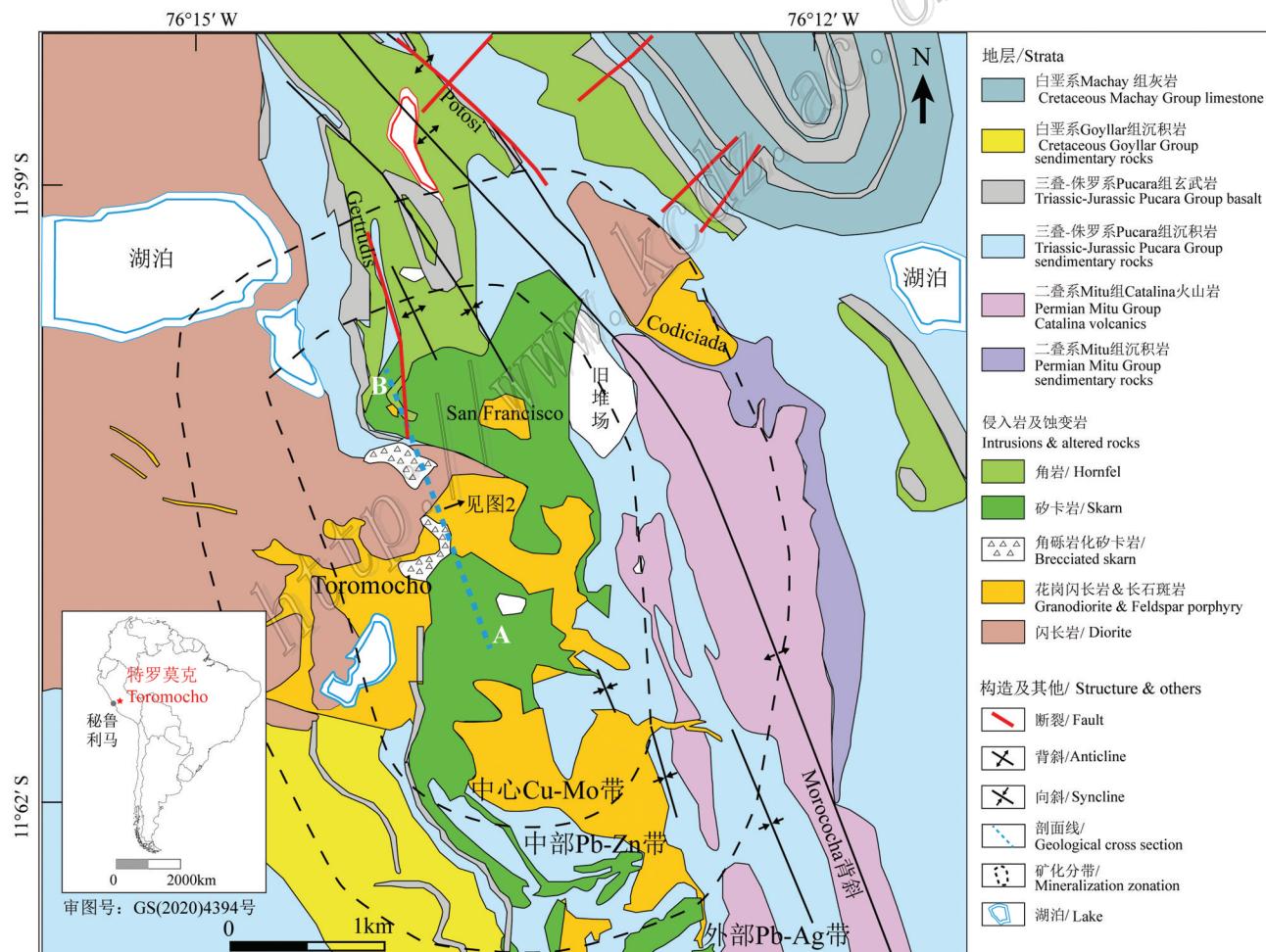


图1 特罗莫克铜钼矿床地质图(修改自SNC Lavalin, 2006),剖面图A-B见图2

Fig. 1 Geological map of the Toromocho Cu-Mo deposit (modified after SNC Lavalin, 2006), with geological cross section of A-B presented at Fig. 2

克斑岩-矽卡岩型铜钼矿, San Francisco 岩体外围的脉状多金属矿床及 Codiciada 岩体西侧的 Manto Italia 层状矿床。

区域矿业最初以开采利用银和铅矿石为主。1890年, San Francisco 地区发现富铜矿石(硫砷铜矿、黄铜矿)后,铜矿石也得以开发利用(McLaughlin et al., 1935)。1894年秘鲁铁路运输服务启用后,区域矿业的工业化发展开始起步(Catchpole, 2011)。1922年以前该区域主要开采 San Francisco 岩体中的多金属矿化,约1930年则以利用 Pucará 组碳酸盐中脉状矿为主,至1935年发现了 Catalina 火山岩中的连续脉状矿体后,该类矿体开发占主导(McLaughlin et al., 1935)。2004年泛美银业公司(Pan American Silver Corporation)收购区域大部分矿业资产后,主要开采利用区域矽卡岩和碳酸盐容矿的大脉状多金属矿体。区域上目前已发现的有经济价值的斑岩型矿床为特罗莫克铜钼矿。该矿床最早于1928年发现矿化,进一步勘查后,于1976年正式确认其经济潜力,后又实施了进尺约9万余米的勘查工作,查明了特罗莫克主矿体,至2006年共查明 18 亿 t 探明及控制级矿石资源量,铜品位 0.47%, 钼品位 0.016%, 银品位 6.8 g/t (SNC Lavalin, 2006)。

2 特罗莫克矿床地质特征

2.1 矿区地层及构造

特罗莫克矿区发育的最老岩相为二叠系 Catalina 火山岩(图1), 主要为英安岩、安山岩, 以及顶部的火山角砾岩、凝灰岩。其上为侏罗系 Pucará 组的灰岩、白云质灰岩及夹层页岩、砂岩, 顶部灰岩夹熔岩, 底部发育块状硬石膏和石膏体。

矿区发育不对称莫罗科查背斜, 背斜的东西两翼分别还有次级背斜及 Gertrudis 和 Potosí 2 条逆冲断层。伴随岩浆活动, 区域形成一系列剪切断层, 包括东西走向 San Antonio 断裂, 北西-南东向的 Huachamachay 和 San Gerardo 断层等。区域岩浆活动结束后, 地区持续抬升并形成穹窿状构造, 并在背斜轴部发育多条张性断裂, 其后又被脉体充填。在区域北部, 这些断裂走向为北东 50°, 南部走向为北东 70°。

2.2 矿区侵入岩及蚀变岩

2.2.1 侵入岩

特罗莫克矿区主要发育 Anticona 闪长岩、花岗闪长岩、长石斑岩、石英斑岩和英安斑岩 5 类侵入岩(图2, 图3a~c)。最早侵位的贫矿 Anticona 闪长岩体

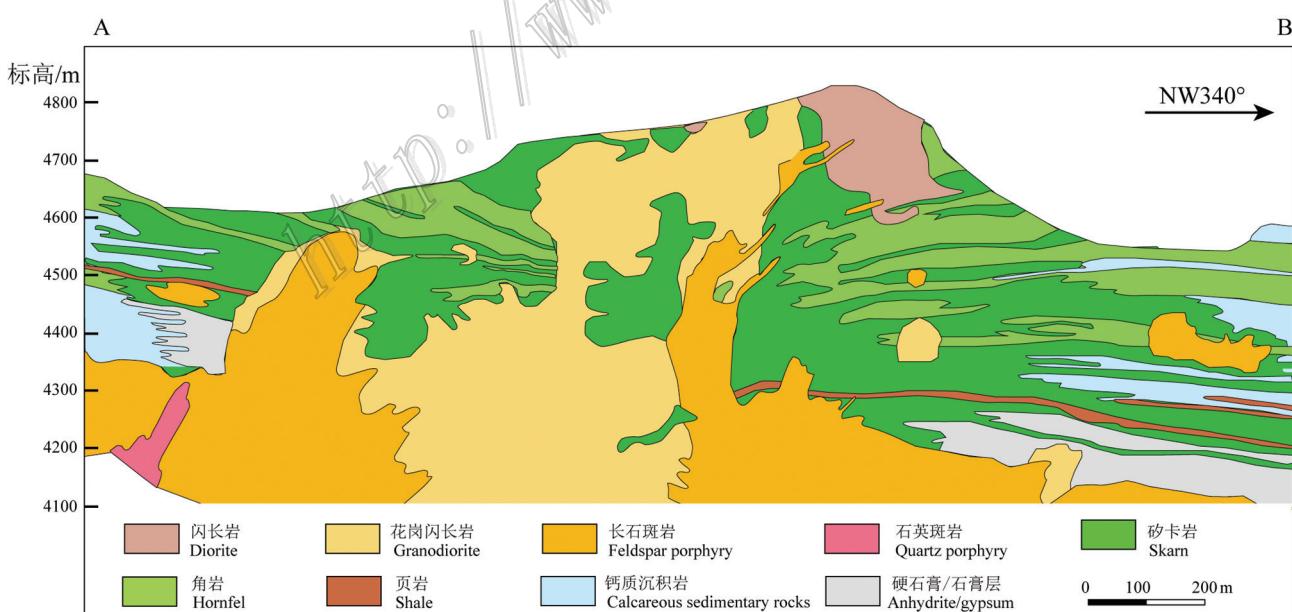


图2 特罗莫克铜钼矿床 27 西线剖面图(修改自 SNC Lavalin, 2006), 该剖面位置见图1中标注 A-B 剖面

Fig. 2 Geological cross section along exploration line 27W of the Toromocho Cu-Mo deposit (along the line A-B marked in Fig. 1)
(modified after SNC Lavalin, 2006)

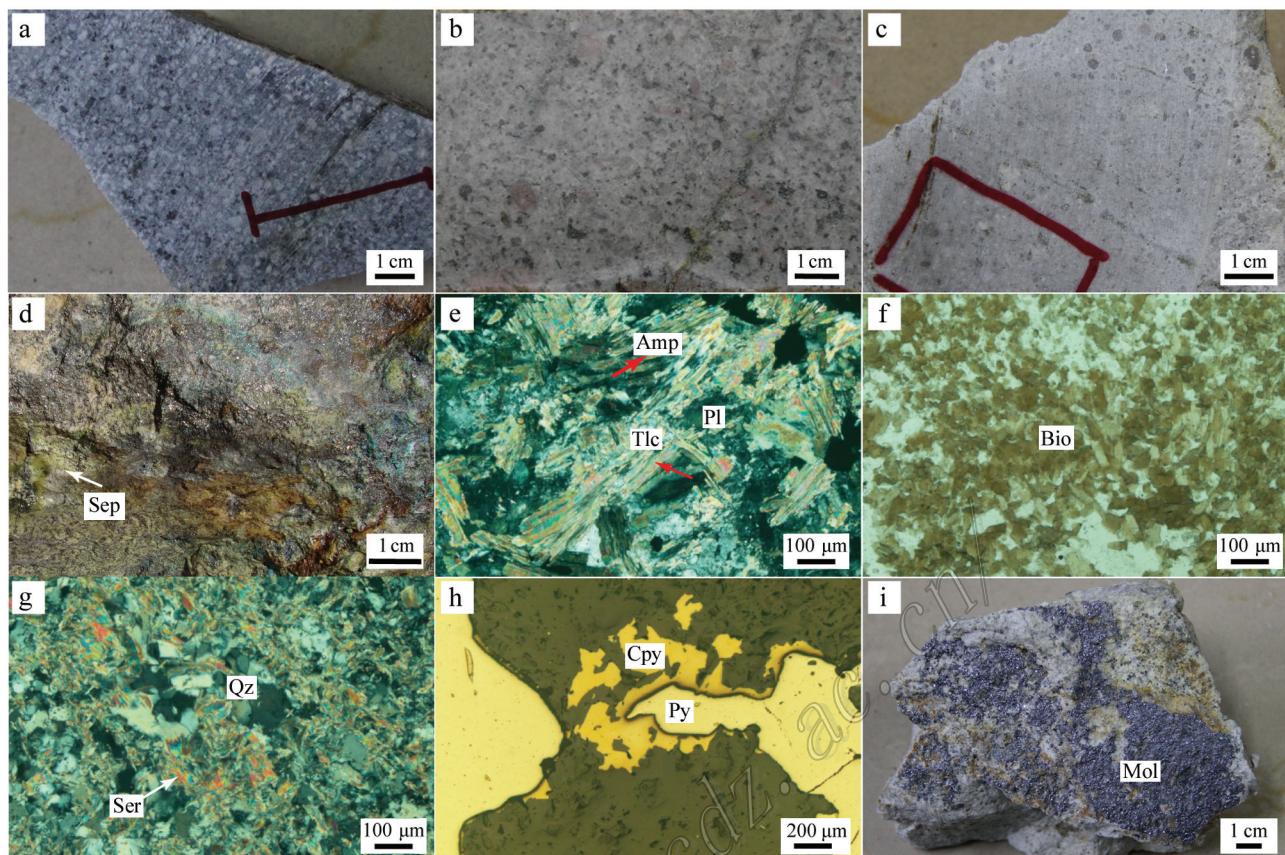


图3 特罗莫克铜钼矿典型岩石-蚀变-矿化照片

a. 闪长岩;b. 长石斑岩;c. 石英斑岩;d. 磁铁矿-蛇纹石矽卡岩;e. 滑石蚀变;f. 黑云母化蚀变;g. 绢云母化蚀变;

h. 黄铜矿-黄铁矿共生;i. 辉钼矿矿化;

矿物缩写:Amp—角闪石;Bio—黑云母;Cpy—黄铜矿;Mol—辉钼矿;Pl—斜长石;Py—黄铁矿;Qz—石英;Tlc—滑石;Sep—蛇纹石

Fig. 3 Photographs of typical intrusions-alteration-mineralization in the Toromocho Cu-Mo deposit

a. Diorite; b. Feldspar porphyry; c. Quartz porphyry; d. Magnetite-serpentine skarn; e. Talc alteration; f. Biotite alteration; g. Sericite alteration; h. Chalcopyrite and pyrite; i. Molybdenite

Mineral abbreviation: Amp—Amphibole; Bio—Biotite; Cpy—Chalcopyrite; Mol—Molybdenite; Pl—Plagioclase; Py—Pyrite; Qz—Quartz; Tlc—Talc; Sep—Serpentine

(图3a)大面积出露于矿区西侧及北西侧,等粒(粗粒)-似斑状结构。其后侵位的花岗闪长岩为矿区岩石,半自形等粒的中粗粒结构,局部为似斑状/斑状结构。之后与热液蚀变矿化紧密相关的长石斑岩(图3b)侵入到Anticona闪长岩、花岗闪长岩、火山岩及碳酸盐地层中,后又被石英斑岩(图3c)穿切。长石斑岩岩株具有斑状结构,斑晶含量35%~40%,其中石英斑晶含量约为5%~15%,斜长石斑晶约为5%~10%,钾长石斑晶为5%~10%,黑云母斑晶为3%~5%。基质为显微晶质结构。石英斑岩位于矿区西南部,斑状结构,基质为细晶质,石英斑晶含量高于10%,主要矿物有钾长石、斜长石、石英等。晚期英安

斑岩岩脉贯穿莫罗科查矿区的整个西南部,北西走向,宽约20~30 m。

前人研究表明莫罗科查矿区岩浆岩为正常的钙碱性,中至高钾英安质至流纹质岩石组成。不相容元素亏损Nb、Ta和Ti,富集Pb和大离子亲石元素,显示俯冲有关岩浆岩特征。低Sr含量显示非埃达克岩组成。除长石斑岩外,所有岩石的REE模式都非常相似,主要显示由于角闪石和/或磷灰石分馏造成的LREE亏损,且无明显的Eu负异常(Kouzmanov et al., 2008b)。

2.2.2 矽卡岩

岩浆热液流体交代矿区Pucará组灰岩、白云质

灰岩和白云岩,形成了钙质矽卡岩和镁质矽卡岩,包括透闪石-阳起石矽卡岩、磁铁矿-蛇纹石-滑石矽卡岩(图3d),及次要的石榴子石-镁橄榄石-透辉石矽卡岩、透辉石-绿帘石-硅灰石矽卡岩等。

透闪石-阳起石矽卡岩主要由透闪石、阳起石组成,含量可达50%以上,此外包括绿泥石、磁铁矿、滑石(图3e)等矿物。磁铁矿-蛇纹石矽卡岩,主要矿物包括叶蛇纹石、滑石、金云母、绿泥石、磁铁矿等,其中,蛇纹石、滑石含量可达10%以上,磁铁矿含量可达15%以上。石榴子石-镁橄榄石-透辉石矽卡岩、透辉石-绿帘石-硅灰石矽卡岩含量较少,为内矽卡岩赋存于接触带内部,主要矿物包括石榴子石、镁橄榄石、透辉石、绿帘石,及少量硅灰石、透闪石、阳起石等,其中,自岩体向围岩,石榴子石含量逐渐减少,且呈现红棕色—棕色—绿色的颜色分带。

2.2.3 角岩

矿区页岩、砂岩等围岩经热接触变质作用,主要形成了透辉石-绿泥石角岩,少量绿帘石角岩和硅灰石角岩。

透辉石-绿泥石角岩为容矿岩石,主要由斜长石、钾长石、石英、透辉石、透闪石、黑云母(图3f)和绿泥石组成。

2.3 蚀变组合与脉体

矿区主要蚀变类型(图3,4)为与斑岩型相关的钾硅酸盐化、绢英岩化(图3g)、绿泥石化、黏土化,以及与矽卡岩型相关的矽卡岩化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等,整体围绕成矿岩体中心,呈现自深部向浅部、自中心向外围钾硅酸盐化—绢英岩化—矽卡岩化的蚀变分带。

钾硅酸盐蚀变表现为角闪石蚀变成次生黑云母,早期黑云母脉(即EB脉),早期石英细脉(A脉)和石英-黄铜矿-钾长石细脉(B脉)两侧的钾长石、黑云母蚀变晕等。该阶段还形成磁铁矿脉(M脉),不含蚀变晕的石英细脉,及石英-黄铜矿±黄铁矿脉、石英-辉钼矿±黄铁矿脉、缝合线状辉钼矿脉等。钾硅酸盐蚀变、含蚀变晕的B脉及辉钼矿细脉主要赋存于深部的侵入岩中。

绢英岩化表现为斜长石、钾长石、黑云母等被绢云母等矿物替代,以及石英-黄铁矿脉两侧的绢云母蚀变晕(D脉)。该阶段也形成含黄铜矿、辉钼矿的脉体。绢英岩化蚀变及含黄铁矿脉体主要分布在矿床中深部,钾硅酸盐化外围的岩体中。

绿泥石化及硬石膏化,表现为暗色矿物例如角闪石、黑云母被绿泥石交代,形成石英-绿泥石脉、石膏脉、硬石膏脉等脉体。绿泥石蚀变主要分布在矿

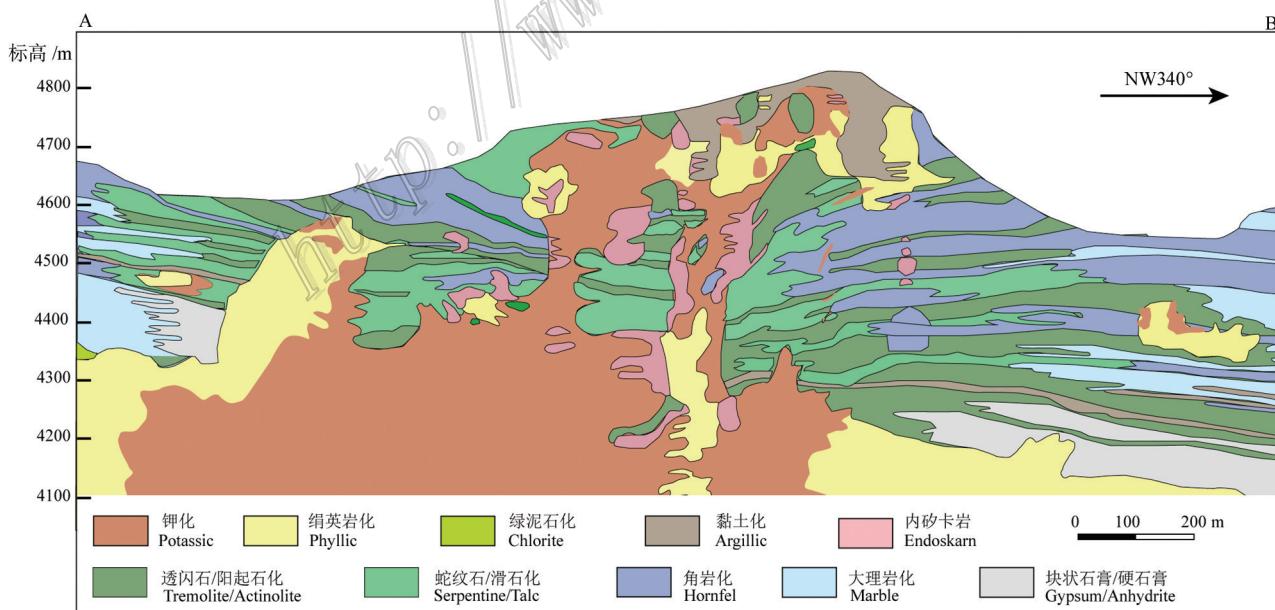


图4 特罗莫克铜钼矿27西线蚀变特征图(修改自SNC Lavalin, 2006),该剖面位置见图1中标注A-B剖面

Fig. 4 Alteration characteristics of exploration line 27W in the Toromocho Cu-Mo deposit (along the line A-B marked in Fig. 1)
(modified after SNC Lavalin, 2006)

床中浅部火山岩中。

黏土化表现为斜长石、钾长石等矿物及裂隙被高岭石、伊利石、蒙脱石等矿物交代填充。黏土化主要分布于矿床浅部岩体中,部分叠加于中深部钾硅酸盐、绢英岩蚀变带。该阶段同时在浅部形成石英-黄铁矿-方铅矿-闪锌矿脉、石英-萤石脉、碳酸盐脉等脉体。

矽卡岩型蚀变矿物包括种类繁多的钙质和镁质矿物。早期干矽卡岩阶段形成的石榴子石、透辉石、硅灰石及镁橄榄石等矿物,主要分布于岩体与地层接触带的接触部位。之后上述矿物被湿矽卡岩阶段的钙质绿帘石、阳起石、透闪石、绿泥石、金云母及镁质蛇纹石、滑石等含水矿物交代,形成多种类型矽卡岩。矽卡岩中发育石英-黄铜矿-黄铁矿细脉(含阳起石蚀变晕)、黄铜矿(\pm 黄铁矿)、石英-闪锌矿-方铅矿细脉等,也产出磁铁矿、黄铁矿-黄铜矿-磁铁矿、闪锌矿-方铅矿-萤石矿石,以及磁黄铁矿、辉钼矿、毒砂、硫砷铜矿、砷黝铜矿、黝铜矿等矿物。

此外,除了斑岩-矽卡岩型矿床的普遍蚀变特征外,矿区还发育含浸染状、细脉状(石膏-)硬石膏的硫酸盐带,从次生富集带底部一直向下延伸几百米。该硫酸盐带总体呈碗状形态。局部与矽卡岩和角岩互层产出。

2.4 矿化特征及元素分带

特罗莫克铜钼矿体(图5)出露于海拔4600~

4800 m,主要以斑岩型矿化、矽卡岩型矿化、角岩型矿化等形式产出,矿体呈倒置锥形,平面展布约为2 km \times 2 km,通常延伸至地表以下500~600 m。矿体约60%赋存于侵入岩中,40%赋存于矽卡岩和角页岩中。

斑岩型铜、钼矿化以浸染状黄铜矿、辉钼矿,以及细脉状及网脉状石英-黄铜矿 \pm 黄铁矿脉(图3h)、石英-辉钼矿 \pm 黄铁矿脉(图3i)、石英-方铅矿-闪锌矿 \pm 黄铜矿 \pm 萤石脉等形式,赋存于花岗闪长岩、长石斑岩、石英斑岩中,含黄铜矿及辉钼矿的脉体宽度常为0.5~2 cm,含黄铁矿、方铅矿和闪锌矿的脉体相对较宽,常为0.5~5 cm。部分矿化赋存于热液角砾岩中。自地表至地表以下200~400 m范围内,发育不规则不连续的次生富集带,相比于南美地区产出典型次生富集带的El Salvador, Escondida, Chuquicamata等铜矿床,特罗莫克铜矿次生富集带发育程度相对较弱,矿石矿物辉铜矿和铜蓝主要呈斑杂状、不连续脉状产出,局部围绕断裂带富集。此外,次生富集带还具有较高的银品位(6~7 g/t),主要矿石矿物为辉银矿。

矽卡岩型铜矿化以网脉状、块状、团块状、层状矿化赋存于透闪石/阳起石矽卡岩,磁铁矿-蛇纹石-滑石矽卡岩中,最高铜品位位于角砾化矽卡岩中。矿石矿物主要包括黄铜矿、硫砷铜矿及砷黝铜矿、方铅矿、闪锌矿等。

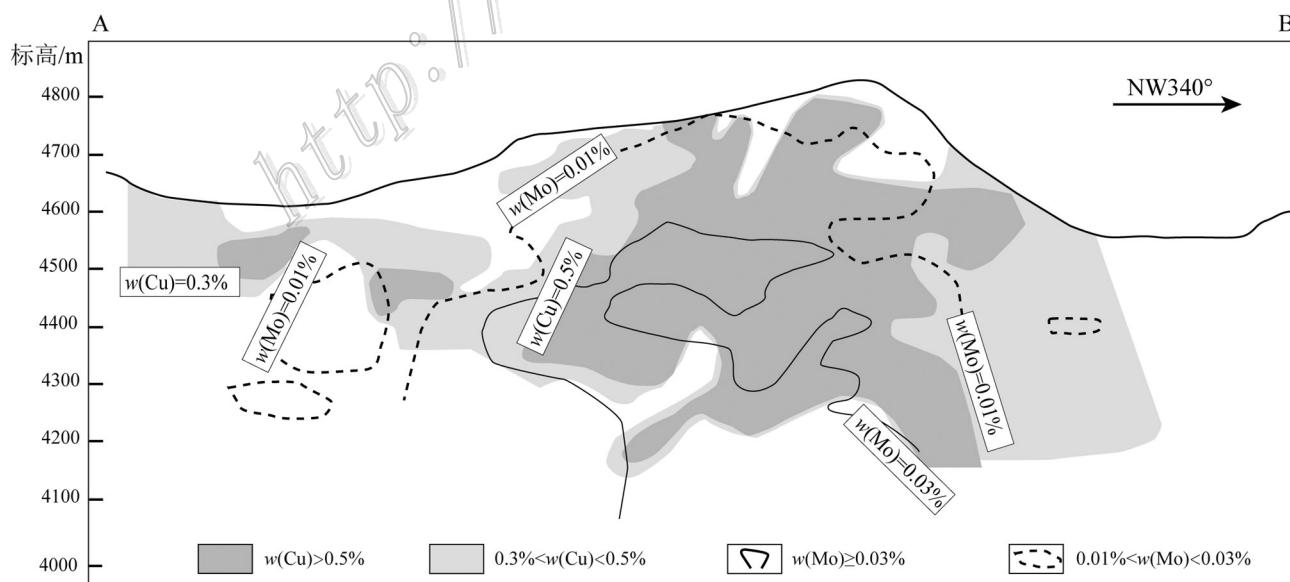


图5 特罗莫克铜钼矿27西线铜、钼品位等值线图(修改自SNC Lavalin, 2006)

Fig. 5 Cu and Mo grade contour map of exploration line 27W in the Toromocho Cu-Mo deposit(modified after SNC Lavalin, 2006)

角岩型铜矿化主要以星点状或黄铜矿细脉形式产出于矿床浅部。

矿床空间上具有典型的元素分带,垂向上自深向浅,具有钼、铜、铅锌银的元素分带(图5),且矿床浅部尤其构造薄弱带具有较高含量的砷元素;水平方向上自中心向外围,依次为铜-钼、铅-锌、铅-银的元素分带(图1);空间上元素分带与矿石矿物分布规律相一致,辉钼矿主要分布在深部中心,黄铜矿位于矿床中深部,辉铜矿呈不连续层状在上部,方铅矿、

闪锌矿、硫砷铜矿、砷黝铜矿及含银矿物(辉银矿、螺旋硫银矿等)等赋存于矿床浅部。

3 试验测试及分析结果

本文选取了矿区典型的闪长岩、英安斑岩进行锆石原位LA-ICP-MS U-Pb年龄测试工作。分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所利用Agilen 7500a 4级杆质谱仪和193 nm激光取样系统完成,实

表1 锆石U-Pb同位素和年龄结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data and age of the Toromoch Cu-Mo deposit

测点	w(B)/10 ⁻⁶			238U/232Th			207Pb/206Pb			207Pb/235U			206Pb/238U			207Pb/235U			206Pb/238U		
	Th	U	Pb*		比值		比值	1σ		比值	1σ		比值	1σ		年龄/M	1σ	年龄/Ma	1σ		
TM-4-01	148	195	0.52	1.32	0.04924	0.02452	0.01502	0.00737	0.00221	0.00019	15.0	7.0	14.0	1.0							
TM-4-02	264	532	1.29	2.02	0.05874	0.01032	0.01684	0.00287	0.00208	0.00009	17.0	3.0	13.4	0.6							
TM-4-05	1104	3676	9.52	3.33	0.04771	0.00228	0.01536	0.00068	0.00234	0.00006	15.5	0.7	15.1	0.4							
TM-4-06	234	503	1.33	2.15	0.05864	0.01408	0.01706	0.00400	0.00211	0.00011	17.0	4.0	13.6	0.7							
TM-4-07	484	445	1.31	0.92	0.06842	0.01190	0.02058	0.00341	0.00218	0.00012	21.0	3.0	14.0	0.8							
TM-4-08	586	4725	10.2	8.06	0.05248	0.00196	0.01510	0.00052	0.00209	0.00005	15.2	0.5	13.5	0.3							
TM-4-10	212	324	1.17	1.53	0.04876	0.01789	0.01491	0.00540	0.00222	0.00013	15.0	5.0	14.3	0.8							
TM-4-12	122	215	0.60	1.76	0.05589	0.02131	0.01789	0.00670	0.00232	0.00017	18.0	7.0	15.0	1.0							
TM-4-14	285	747	1.84	2.62	0.05101	0.00807	0.01552	0.00238	0.00221	0.00009	16.0	2.0	14.2	0.6							
TM-4-16	85	202	0.48	2.36	0.05271	0.02486	0.01540	0.00715	0.00212	0.00018	16.0	7.0	14.0	1.0							
TM-4-21	105	214	0.68	2.04	0.04605	0.01609	0.01387	0.00475	0.00218	0.00015	14.0	5.0	14.1	1.0							
TM-4-22	331	441	2.43	1.33	0.06573	0.02297	0.01949	0.00668	0.00215	0.00014	20.0	7.0	13.8	0.9							
TM-4-23	602	806	2.23	1.34	0.04802	0.00704	0.01460	0.00207	0.00221	0.00009	15.0	2.0	14.2	0.6							
TM-4-24	57	130	2.05	2.27	0.04605	0.00637	0.02887	0.00360	0.00455	0.00027	29.0	4.0	29.0	2.0							
TM-4-25	104	179	0.46	1.73	0.05680	0.02259	0.01768	0.00691	0.00226	0.00017	18.0	7.0	15.0	1.0							
TM-9-02	97	210	0.45	2.15	0.04949	0.02272	0.01556	0.00706	0.00228	0.00016	16.0	7.0	15.0	1.0							
TM-9-06	197	744	2.41	3.77	0.04807	0.00929	0.01423	0.00269	0.00215	0.00008	14.0	3.0	13.8	0.5							
TM-9-08	126	351	0.91	2.78	0.06516	0.01222	0.02104	0.00381	0.00234	0.00012	21.0	4.0	15.1	0.8							
TM-9-12	170	662	1.64	3.89	0.04664	0.00702	0.01521	0.00222	0.00237	0.00009	15.0	2.0	15.3	0.6							
TM-9-13	475	1563	4.43	3.29	0.05899	0.00686	0.01938	0.00216	0.00238	0.00008	19.0	2.0	15.3	0.5							
TM-9-15	92	186	0.52	2.01	0.05813	0.02049	0.01915	0.00657	0.00239	0.00020	19.0	7.0	15.0	1.0							
TM-9-18	201	268	0.70	1.34	0.04995	0.01679	0.01530	0.00506	0.00222	0.00014	15.0	5.0	14.3	0.9							
TM-9-20	393	623	1.62	1.59	0.04764	0.00791	0.01446	0.00234	0.00220	0.00009	15.0	2.0	14.2	0.6							
TM-9-23	180	383	0.98	2.12	0.04792	0.01418	0.01516	0.00437	0.00229	0.00016	15.0	4.0	15.0	1.0							
TM-9-26	148	255	0.75	1.72	0.04605	0.01610	0.01340	0.00458	0.00211	0.00016	14.0	5.0	14.0	1.0							
TM-9-27	143	201	0.52	1.41	0.04691	0.02378	0.01381	0.00691	0.00214	0.00018	14.0	7.0	14.0	1.0							
TM-9-28	2155	1897	6.06	0.88	0.04606	0.00426	0.01473	0.00131	0.00232	0.00006	15.0	1.0	14.9	0.4							
TM11-01	914	1829	2.76	2.00	0.04925	0.00545	0.00863	0.00092	0.00127	0.00004	8.7	0.9	8.2	0.3							
TM11-03	277	414	0.63	1.49	0.05198	0.02253	0.00890	0.00376	0.00124	0.00012	9.0	4.0	8.0	0.8							
TM11-04	704	992	1.50	1.41	0.05879	0.00956	0.00957	0.00150	0.00118	0.00006	10.0	2.0	7.6	0.4							
TM11-05	405	997	1.39	2.46	0.06100	0.01015	0.00984	0.00157	0.00117	0.00006	10.0	2.0	7.5	0.4							
TM11-09	397	774	1.04	1.95	0.04897	0.01824	0.00788	0.00284	0.00117	0.00011	8.0	3.0	7.5	0.7							
TM11-11	381	717	0.94	1.88	0.08365	0.01755	0.01309	0.00259	0.00113	0.00008	13.0	3.0	7.3	0.5							
TM11-17	292	540	0.75	1.85	0.05232	0.01618	0.00856	0.00260	0.00119	0.00007	9.0	3.0	7.7	0.5							
TM11-22	259	359	0.56	1.39	0.06270	0.02288	0.01097	0.00392	0.00127	0.00009	11.0	4.0	8.2	0.6							
TM11-24	341	536	0.88	1.57	0.05295	0.01403	0.00976	0.00253	0.00134	0.00008	10.0	3.0	8.6	0.5							
TM11-25	833	2192	3.17	2.63	0.05088	0.00444	0.00908	0.00075	0.00129	0.00004	9.2	0.8	8.3	0.3							

验过程中所使用的激光束直径为 $44\text{ }\mu\text{m}$,样品剥蚀时间约50 s,频率为8 Hz。详细仪器条件和分析过程可参见徐平等(2004)。锆石U-Pb年龄校正采用91500标准锆石外部校正法,同位素年龄误差为 1σ 。数据处理使用Glitter软件,作图采用Isoplot软件(Ludwig,2003)完成。测试结果及年龄数据见表1。

所测试的锆石粒径约50~150 μm ,半自形粒状,CL图像显示锆石震荡环带发育,锆石Th/U比为0.12~1.14,U-Pb同位素年龄在误差范围内谐和。其中,闪长岩样品(TM4)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(14.1\pm0.3)\text{ Ma}$ (MSWD=1, n=14),闪长岩样品(TM9)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(14.7\pm0.4)\text{ Ma}$ (MSWD=0.76, n=12),英安斑岩样品(TM11)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(8.0\pm0.27)\text{ Ma}$ (MSWD=0.92, n=10)。年龄图见图6。

4 区域成矿特征及启示

4.1 区域岩浆-热液演化史

莫罗科查地区最早阶段贫矿的Anticona闪长岩和Condiciada细粒闪长岩约于14 Ma侵位,中期9.4~7.7 Ma一系列闪长质、花岗闪长质、石英二长质岩株侵位到地层及先存闪长岩中,最晚阶段的英安斑岩岩脉于8~7.3 Ma侵位(表2),呈北西西向贯穿整个莫罗科查区域。区域岩浆-热液时代总结于表2和图7中。Catchpole等(2015a)通过对该区域岩浆-热液系统开展U-Pb,Re-Os和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究,提出莫罗科查地区主要存在3个独立的岩浆-热液活动中心,分别为Codiciada,Toromocho和Ticlio中心(图8)。

(1) 区域北部Codiciada岩体为最早的岩浆-热液中心,杂岩体中的角闪石斑岩、石英长石斑岩、细晶岩形成于9.5~9.3 Ma(Bendezú et al., 2012),斑岩型矿化中的辉钼矿、矽卡岩中的热液榍石和金云母形成于9.3~8.8 Ma(Catchpole et al., 2015a)。岩体西侧及西北侧的Manto Italia多金属矿的矽卡岩中冰长石年龄为6.2~6.0 Ma(Catchpole et al., 2015a),岩体西侧边部脉状多金属矿化中的冰长石和白云母形成于5.8~5.7 Ma(Catchpole et al., 2015a)。基于上述年代学研究可知Codiciada岩浆-热液时限约为3.5 Ma。

(2) 区域中部特罗莫克岩浆热液中心,该中心发育多期次岩浆活动,成矿前闪长岩形成于14.7~14.1 Ma(Kouzmanov et al., 2008a; 2008b; Bendezú et al., 2012; 本文),其后与成矿较为密切的侵入岩主要形成于9.4~7.3 Ma。区域较早的花岗闪长岩/斑岩形成于9.4~8.0 Ma,其中,特罗莫克容矿的花岗闪长岩/斑岩形成于 $(8.45\pm0.05)\text{ Ma}$;北缘具有蚀变矿化的San Francisco斑岩形成于9.4~9.1 Ma(Beuchat, 2003; Bendezú et al., 2012);南部Yantac岩体形成于8.8~8.0 Ma(Beuchat, 2003; Bendezú et al., 2012)。主成矿的长石斑岩和石英斑岩于8.5~7.7 Ma侵位(Kouzmanov et al., 2008b),晚期英安斑岩于8.0~7.3 Ma侵位(Kouzmanov et al., 2008b; 本文)。

斑岩型矿化的辉钼矿年龄为8.0~7.8 Ma(Beuchat, 2003),热液黑云母年龄为7.2~6.8 Ma(Beuchat, 2003; Kouzmanov et al., 2008b),北缘San Francisco斑岩中热液蚀变白云母年龄为6.7 Ma(Catchpole et al., 2015a),南部Yantac区域Porvenir矽卡岩金云母年龄为7.2 Ma(Beuchat, 2003)。上述年代学研究表明,特罗莫克中心的岩浆-热液时限约为2 Ma。

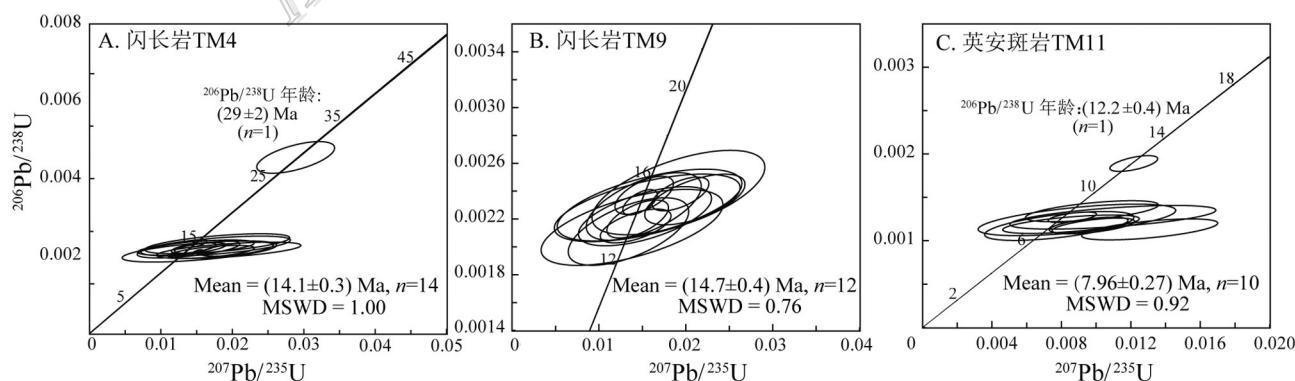


图6 特罗莫克铜钼矿闪长岩及英安斑岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams of diorite and dacite porphyries in the Toromocho Cu-Mo deposit

表 2 莫罗科查地区岩浆-热液系统时代表

Table 2 Age data of the magmatic-hydrothermal system from Morococha area

	矿区名称	岩性/矿物	方法	时代/Ma	参考文献
侵入岩	Anticona	闪长岩	锆石 U-Pb	14.07~14.11	Beuchat, 2003; Kouzmanov et al., 2008b
	Codiciada	细粒闪长岩	锆石 U-Pb	14.31±0.04	Bendezú et al., 2012
	Codiciada	角闪石斑岩、石英长石斑岩、细晶岩	钾长石 Ar-Ar, 锆石 U-Pb	9.29~9.50	Bendezú et al., 2012
	San Francisco	San Francisco 斑岩	锆石 U-Pb	9.11~9.42	Beuchat, 2003; Bendezú et al., 2012
	Yantac	Yantac 斑岩	锆石 U-Pb, 黑云母、钾长石 Ar-Ar, 黑云母 K-Ar	8.01~8.81	Eyzaguirre et al., 1975; Beuchat, 2003; Bendezú et al., 2012
	Ticlio	花岗闪长岩	锆石 U-Pb	8.31±0.03	Bendezú et al., 2012
		闪长岩	锆石 U-Pb	14.1~14.7	本文
		花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	8.45±0.05	Kouzmanov et al., 2008b
	Toromocho	长石斑岩	锆石 U-Pb	7.73±0.02	Kouzmanov et al., 2008b
		石英斑岩	锆石 U-Pb	7.75±0.13	Kouzmanov et al., 2008b
		英安斑岩	锆石 U-Pb	7.26±0.02	Kouzmanov et al., 2008b
		英安斑岩	锆石 U-Pb	7.96±0.27	本文
斑岩型蚀变矿化	Codiciada	辉钼矿	辉钼矿 Re-Os	9.26±0.03	Catchpole et al., 2015a
	Ticlio	白云母	白云母 Ar-Ar	8.04±0.14	Catchpole et al., 2015a
	Toromocho	辉钼矿	辉钼矿 Re-Os	7.97±0.11	Beuchat, 2003
		辉钼矿	辉钼矿 Re-Os	7.77±0.11	Beuchat, 2003
	San Francisco	热液黑云母	黑云母 K-Ar	7.2±0.3	Eyzaguirre et al., 1975
		热液黑云母	黑云母 Ar-Ar	6.81±0.14	Kouzmanov et al., 2008b
		白云母	白云母 Ar-Ar	5.72~6.74	Catchpole et al., 2015a
	Codiciada	榍石	榍石 U-Pb	9.30±0.20	Catchpole et al., 2015a
		矽卡岩中金云母	金云母 Ar-Ar	8.81±0.18	Kouzmanov et al., 2008b
矽卡岩型蚀变矿化	Yantac (Porvenir)	矽卡岩中金云母	金云母 Ar-Ar	7.2±0.2	Beuchat, 2003
		矽卡岩中金云母	金云母 Ar-Ar	6.93±0.3	Catchpole, 2011
	Gertrudis	矽卡岩中金云母	金云母 Ar-Ar	6.42±0.19	Beuchat, 2003
		冰长石	冰长石 Ar-Ar	6.0~6.23	Catchpole et al., 2015a
	Codiciada (Manto Italia)	冰长石	冰长石 Ar-Ar	5.78±0.10	Catchpole et al., 2015a
脉状多金属蚀变矿化	Sulfurosa	白云母	冰长石 Ar-Ar	8.1±0.5	Catchpole et al., 2015a
	Sulfurosa	独居石	独居石 U-Pb	8.26±0.18	Catchpole et al., 2015a
	Sulfurosa (Manuelita)	冰长石	冰长石 Ar-Ar	7.6±0.3	Catchpole et al., 2015a

(3) 区域西侧 Ticlio 岩浆热液中心规模相对较小, 花岗闪长斑岩成岩年代为 8.3 Ma (Bendezú et al., 2012), 斑岩体中热液蚀变白云母的 Ar-Ar 冷却年龄为 8.0 Ma (Catchpole et al., 2015a), 其岩浆-热液时限为 0.3 Ma。

此外, 区域东南侧 Sulfurosa 地区还独立发育一期 8.3~8.1 Ma 的多金属矿化 (Catchpole et al., 2015a)。

综合上述研究可知, 莫罗科查区域岩浆活动活跃于 14.7~7.3 Ma, 主成矿期岩浆主要侵位于 9.5~7.7 Ma, 斑岩型蚀变矿化主要发育于 9.3~6.74 Ma, 矽卡岩型蚀变矿化主要产出于 9.3~6.0 Ma, 区域脉状多金属蚀变矿化主要形成于 5.8~5.7 Ma, 与成矿相关的岩浆-热液活动时限为 3.5~0.3 Ma。

4.2 区域蚀变矿化特征

莫罗科查区域矿化类型包括斑岩型、矽卡岩型、

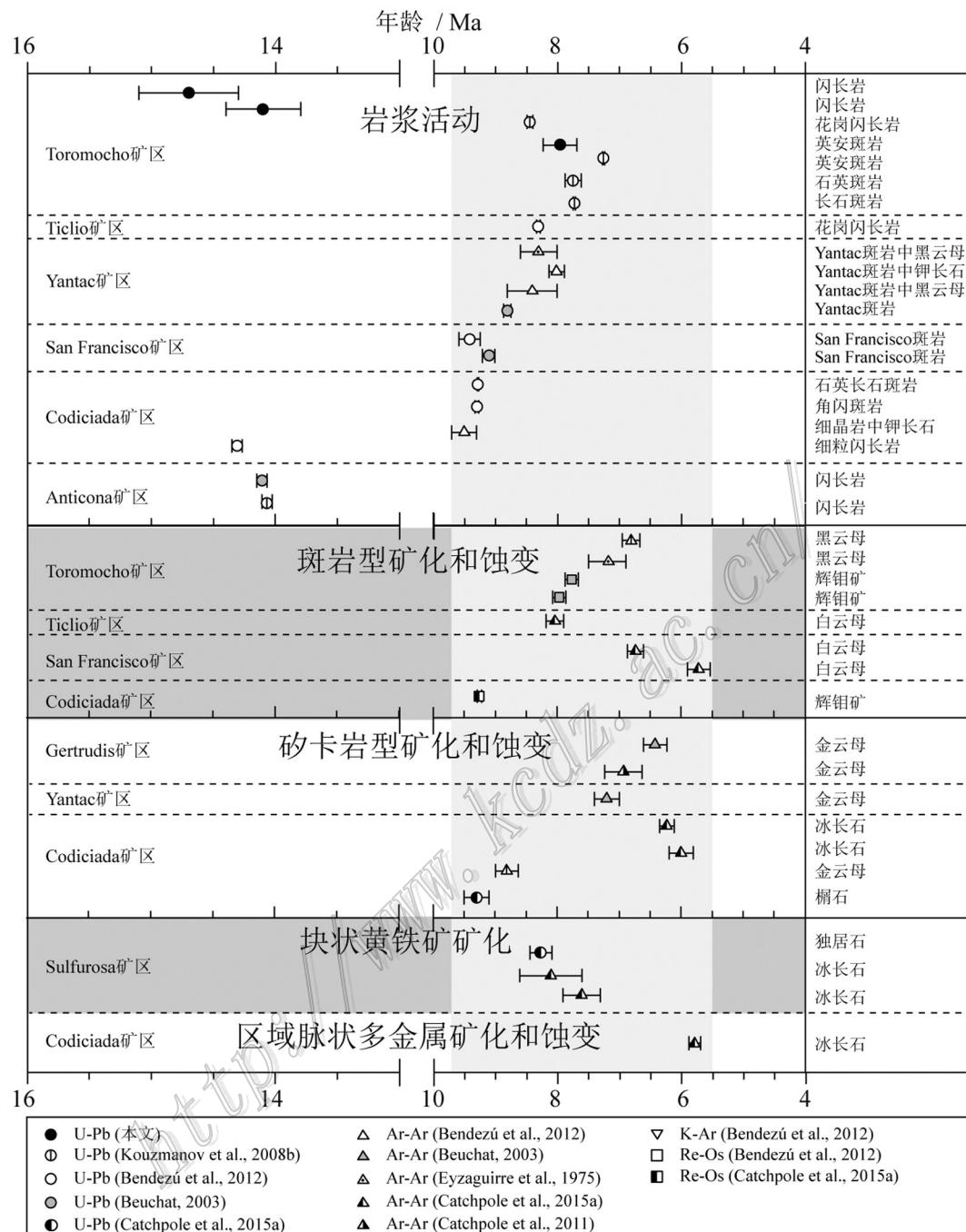


图7 秘鲁莫罗科查地区岩浆-热液系统时代图

Fig. 7 Summary diagram for the time of magmatic-hydrothermal system in Morococha area

斑岩-矽卡岩型、浅成低温脉状多金属型、块状黄铁矿型等。围绕各岩浆-热液中心,内部主要发育斑岩型蚀变矿化,岩体与碳酸盐地层接触带发育矽卡岩矿化,外部发育脉状多金属矿化(图8)。脉状矿化分布主要受控于北北东和北东东走向的次级断裂。区域上具有中心富铜,中间过渡带富锌-铜,外带富锌-

铅-银的分带特征(Kouzmanov et al., 2008a; Catchpole et al., 2015b)。

(1) 区域北部 Codiciada 岩浆-热液中心,岩体中发育强烈的钠-钙蚀变及钾硅酸盐蚀变,且被绢云母蚀变叠加,可见石英-黄铁矿-黄铜矿、石英-辉钼矿±黄铁矿脉、石英-磁铁矿脉、石英-黄铁矿脉等脉体

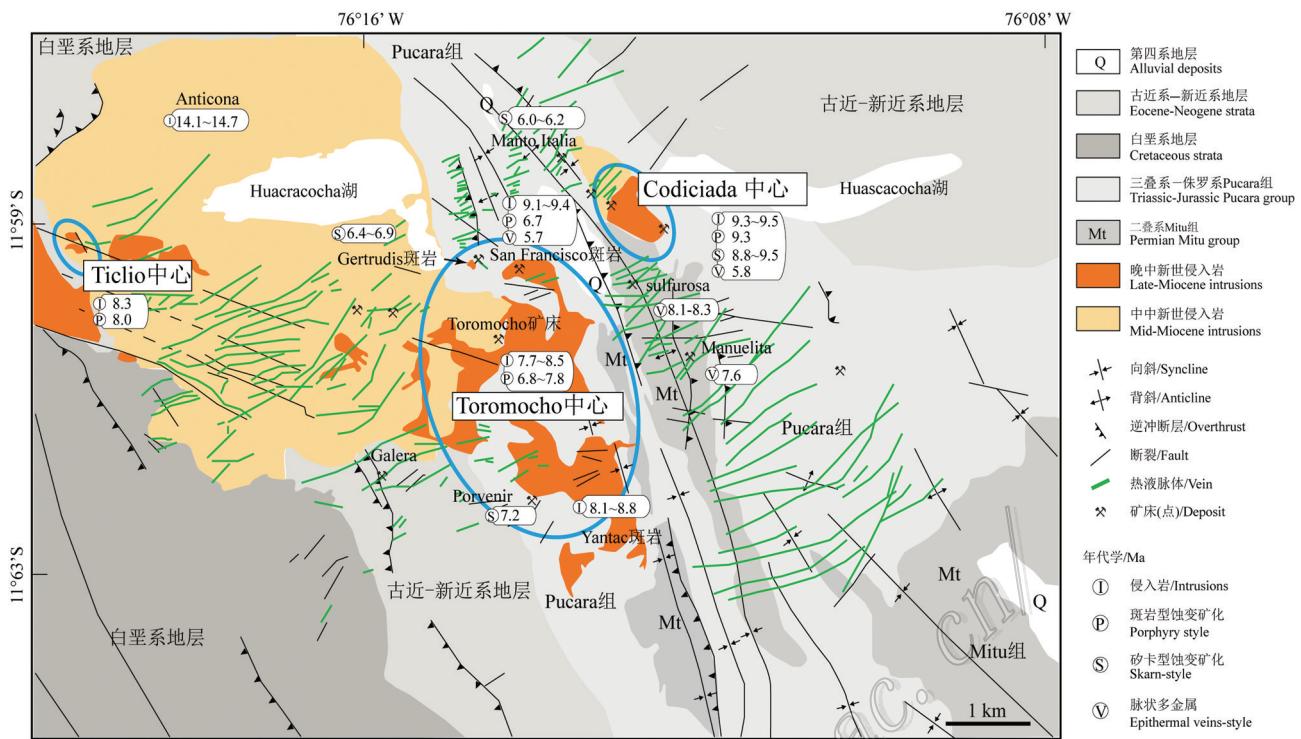


图8 秘鲁中部莫罗科查地区主要岩浆-热液中心及矿化特征(据Catchpole et al., 2015a修改)

Fig. 8 Magmatic-hydrothermal centers and mineralization in Morococha area, central Peru (modified after Catchpole et al., 2015a)

(Bendezú et al., 2008b),显示斑岩型Cu-Mo矿化的潜力。围绕岩体发育多处矽卡岩型多金属矿化,矽卡岩主要为交代灰岩、白云岩、白云质灰岩形成的镁质蛇纹石-磁铁矿±金云母矽卡岩、透闪石-绿帘石-蛇纹石-绿泥石-滑石矽卡岩、钙铁榴石-透辉石-绿帘石矽卡岩等(Kouzmanov et al., 2008a),主要金属矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等。目前有经济价值的仅为产出在岩体西侧和西北侧的块状Manto Italia矿体(Paliza et al., 2008),局部矿体厚度达20 m(Catchpole, 2011),该矿体为Zn、Pb、Ag和Cu重要来源。

(2) 区域中部特罗莫克岩浆热液中心,前已述及,发育典型的斑岩-矽卡岩型蚀变及Cu-Mo矿化,为目前莫罗科查区域唯一具有经济价值的斑岩型矿床。且该岩浆-热液中心北缘的San Francisco岩体中发育细脉浸染状Cu-Mo矿化,可见石英-黄铁矿-辉钼矿脉,岩体与地层接触带发育矽卡岩型矿化。该中心西北部Gertrudis岩体边部发育阳起石矽卡岩、绿泥石-磁铁矿-蛇纹石矽卡岩及少量脉状矿化。该中心南部Yantac区域发育Porvenir矽卡岩型蚀变矿化。

(3) 区域西侧Ticlio岩浆热液中心,其核部为高密度的石英网脉,向外具有强烈的钾长石蚀变,并发

育磁铁矿脉及石英-磁铁矿细脉,及浸染状黄铜矿及斑铜矿,向外为强烈的黄铁矿-石英-绢云母蚀变和矽卡岩矿化(Bendezú et al., 2008a),具有斑岩-矽卡岩型Cu矿化的潜力。

莫罗科查区域,除了大量产出的斑岩-矽卡岩型矿化之外,另一成矿特征即为区域上大规模分布的Zn-Pb-Ag-Cu脉状/交代矿化(图8),展布范围约50 km²,这类脉体受控于优势构造方位,围绕各主要的岩浆-热液中心,于北北东向和北东东向的次级断裂中产出,走向长度可达2 km,垂向延伸常超过1 km,海拔高度常在5100~4000 m(Kouzmanov et al., 2008a)。其中,张性断裂中充填的热液脉体含矿性较好,主要矿石矿物包括闪锌矿、方铅矿、黝铜矿-砷黝铜矿、黄铜矿、硫砷铜矿,其中,银以碲银矿及黝铜矿-砷黝铜矿中微量元素的形式存在(Catchpole et al., 2012);剪切作用形成的断裂中则以充填石英等脉石矿物位置,矿石矿物成分散团块状产出,含矿性较弱(例如Huachamachay断层区域)。脉状矿化多切穿区域性侵入岩、地层、矽卡岩型矿体,其产出时代通常略晚于斑岩型及矽卡岩型矿化,但局部地区例如东南部Sulfurosa地区发育的脉状及块状黄铁矿矿化形成时代与斑岩型矿化相近。

5.3 区域矿产勘查启示

基于上述莫罗科查区域已发现矿点的年代学、蚀变矿化特征、空间分布规律可知,本区域具有斑岩(-矽卡岩)型 Cu-Mo—浅成低温脉状 Pb-Zn-Ag-Cu 成矿系统的典型地质特征。近些年,随着全球矿产勘查工作的不断推进,斑岩-矽卡岩-浅成低温铜多金属矿成矿系统的研究也越来越深入(Sillitoe, 2010),该系统中最为典型的包括北美 Butte 铜钼矿及主阶段矿脉(Rusk et al., 2008)、中国德兴斑岩铜矿-银山铜多金属矿(Mao et al., 2011)、智利 Collahuasi 铜矿及其 El Rosario 矿脉(Masterman et al., 2005)、智利 Chuquicamata 铜矿及主阶段脉(Ossandón et al., 2001)、Escondida 铜矿及第 3 阶段脉(Padilla Garza et al., 2001)等。对于典型的斑岩-矽卡岩-浅成低温多金属成矿系统,秦克章等(2014)、叶天竺等(2017)和金露英等(2020)通过研究典型成矿地质体与矿体的时空关系、围岩特征、蚀变分带、脉体-金属矿物组合、元素分带等关键要素构建典型斑岩 Cu-Mo、Cu-Au、Mo 矿和多金属矿成矿系统的地质模型。

成矿系统中斑岩矿床具有典型的中心面状蚀变分带特征,发育矽卡岩型蚀变矿化主要受控于围岩特征,即围岩条件一般为灰岩、白云质灰岩、泥质砂岩、泥岩、千枚岩、火山碎屑岩等。这类斑岩-矽卡岩成矿系统一般具有多个岩浆-热液中心特征和浅侵位的岩浆活动,例如莫罗科查区域主要发育 3 个岩浆热液中心(北侧 Codiciada 杂岩体、中部特罗莫克岩体和西部 Ticlio 斑岩),例如冈底斯成矿带东段甲玛超大型铜多金属矿床发育多个岩浆热液中心,产出矽卡岩型、斑岩型、角岩型、Manto 型和独立金矿体多种类型矿体(唐菊兴等,2011;林彬等,2019)。成矿系统中浅成低温脉状多金属矿床的形成,则通常与火山岩-次火山岩密切相关,如特罗莫克矿床的英安岩、安山岩、凝灰岩等,且区域上的次级断裂将控制脉状矿体的分布(特罗莫克矿区,北北东和北东东)。中国德兴地区的斑岩-浅成低温脉状多金属矿床的套合可能主要受控于早-中侏罗世多期岩浆作用(李晓峰等,2012),其中,主要的脉状铅锌银成矿与早-中侏罗世火山-次火山岩有关(银山矿床),其走向受控于区域次级断裂(李晓峰等,2012;刘玄,2013)。

因此下步区域矿产勘查工作,应注重以全球斑岩(-矽卡岩)-浅成低温成矿系统成矿模型指导,重点关注围岩条件、区域断裂分布和岩浆活动条件,详细比对剖析已知的典型特罗莫克铜钼矿基础地质特征

及其与脉状矿化的联系,综合运用地球化学、地球物理各类勘查方法(吴小娟等,2015;汪东波等,2016;陈念等,2017),这将为区域找矿勘查工作突破带来帮助。

5 结 论

(1) 特罗莫克超大型铜钼矿床位于秘鲁中部莫罗科查地区,为典型的斑岩-矽卡岩型铜钼矿床。蚀变矿化主要与中新世 8.5~7.7 Ma 长石斑岩、石英斑岩等密切相关。蚀变整体呈现自深部向浅部、自中心向外围钾硅酸盐化—绢英岩化—(钙质和镁质)矽卡岩化分带。矿化呈细脉浸染状产出侵入岩、矽卡岩和角页岩中,空间上自深部中心向浅部外围依次呈现钼、铜、铅锌银的元素分带特征。

(2) 秘鲁莫罗科查地区主要发育 Codiciada, Tormocho 和 Ticlio 3 个岩浆-热液中心,岩浆-热液系统演化持续 3.5~0.3 Ma, 区域整体具有中心斑岩-矽卡岩型铜钼矿—外围浅成低温脉状铜铅锌银矿的统一成矿系统特征,其中脉状矿化受北北东向、北东东走向断裂控制。

(3) 以斑岩(-矽卡岩)-浅成低温脉状铜多金属成矿系统研究成果为指导,结合区域成矿规律,对照典型特罗莫克矿床的地质及成矿特征,重点关注岩浆活动、围岩、构造条件,应用多种勘查技术手段,未来区域矿产勘查工作有望取得新进展。

致 谢 中铝秘鲁矿业公司 Eduardo Rivera Pinares 工程师在成文过程中给予了大力帮助;中国铝业集团有限公司江少卿教授级高工给予了建议和启发,在此一并致以衷心的感谢。感谢两位审稿人给予的宝贵意见和建议。

References

- Arribas A, Hedenquist J W, Itaya T, Okada T, Concepción R A and García J S. 1995. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines[J]. Geology, 23(4): 337-340.
- Bartos P J. 1989. Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationship to underlying porphyry copper deposits[J]. Econ. Geol., 84: 1671-1683.
- Basuki N I, Taylor B E and Spoone E T C. 2008. Sulfur isotope evidence for thermochemical reduction of dissolved sulfate in Mississ-

- sippi Valley-type zinc-lead mineralization, Bongara area, northern Peru[J]. *Econ. Geol.*, 103:783-799.
- Baumgartner R, Fontboté L and Vennemann T. 2008. Mineral zoning and geochemistry of epithermal polymetallic Zn-Pb-Ag-Cu-Bi mineralization at Cerro de Pasco, Peru[J]. *Econ. Geol.*, 103:493-537.
- Bendezú A, Catchpole H, Kouzmanov K, Fontboté L and Astorga C. 2008a. Miocene magmatism and related porphyry and polymetallic mineralization in the Morococha district, Central Peru[C]. XIII Congreso Latinoamericano de Geología, Lima, Peru. 6.
- Bendezú R, Page L, Spikings R, Pecskay Z and Fontboté L. 2008b. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alunite ages from the Colquijirca district, Peru: Evidence of a long period of magmatic SO_2 degassing during formation of epithermal Au-Ag and Cordilleran polymetallic ores [J]. *Mineralium Deposita*, 43:777-789.
- Bendezú R, Fontboté L and Cosca M. 2003. Relative age of Cordilleran base metal lode and replacement deposits and high sulfidation Au-(Ag) epithermal mineralization in the Colquijirca mining district, central Peru[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 683-694.
- Bendezú R, Kouzmanov K, Ovtcharova M, Spikings R, and Fontboté L. 2012. Timing of porphyry emplacement in the Miocene Morococha district, central Peru: U-Pb and Ar-Ar geochronological record[C]. 34th International Geological Congress, Proceedings. 6.
- Beuchat S. 2003. Geochronological, structural, isotope and fluid inclusion constraints of the polymetallic Domo de Yauli district, Peru (dissertation for Doctor degree) [D]. University of Geneva. 180.
- Beuchat S, Moritz R and Pettke T. 2004. Fluid evolution in the W-Cu-Zn-Pb San Cristobal vein, Peru: Fluid inclusion and stable isotope evidence[J]. *Chemical Geology*, 210: 201-224.
- Bissig T, Ulrich T D, Tosdal R M, Friedman R and Ebert S. 2008. The time-space distribution of eocene to miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenetic implications[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 26: 16-35.
- Catchpole H. 2011. Porphyry-related polymetallic mineralization in the Morococha district, central Peru: Mineralization styles, timing and fluid evolution (dissertation for doctor degree)[D]. University of Geneva. 1-288.
- Catchpole H, Kouzmanov K and Fontboté L. 2012. Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned Cordilleran base metal district, Morococha, central Peru[J]. *Canadian Mineralogist*, 50: 719-743.
- Catchpole H, Kouzmanov K, Bendezú A, Ovtcharova M, Spikings R, Stein H and Fontboté L. 2015a. Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system—morococha district, Peru[J]. *Mineralium Deposita*, 50: 895-922.
- Catchpole H, Kouzmanov K, Putlitz B, Seo J H and Fontboté L. 2015b. Zoned base metal mineralization in a porphyry system origin and evolution of mineralizing fluids in the Morococha district, Peru[J]. *Econ. Geol.*, 110: 39-71.
- Chen N, Mao J W, Fan C L and Chen Y M. 2017. Alteration-mineralization characteristics and three-dimensional exploration model of Don Javier porphyry copper-molybdenum deposit, Peru[J]. *Mineral Deposits*, 36(3):705-718(in Chinese with English abstract).
- Eyzaguirre V R, Montoya D E, Silberman M L and Noble D C. 1975. Age of igneous activity and mineralization, Morococha district, central Peru[J]. *Econ. Geol.*, 70:1123-1126.
- Hedenquist J W, Arribas A and Reynolds T J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far southeast-lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. *Econ. Geol.*, 93(4): 373-404.
- Heinrich C A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study[J]. *Mineralium Deposita*, 39(8): 864-889.
- Jin L Y, Qin K Z, Li G M, Zhao J X and Li Z Z. 2020. Characteristics, controlling factors and exploration implications of porphyry molybdenum-hydrothermal vein-style lead-zinc-silver metallogenic systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3813-3839(in Chinese with English abstract).
- Kouzmanov K, Bendezú A, Catchpole H, Ageneau M, Pérez J A and Fontboté L. 2008a. The Miocene Morococha district, central Peru: Large scale epithermal polymetallic overprint on multiple intrusion-centered porphyry systems[C]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Pacific Rim Congress Gold Coast, Queensland, Australia. 117-121.
- Kouzmanov K, Ovtcharova M, Von Quadt A, Guillong M, Spikings R, Schaltegger U, Fontboté L and Rivera L. 2008b. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints for the timing of magmatism and mineralization in the giant Toromocho porphyry Cu-Mo deposit, central Peru[C]. XIII Congreso Latinoamericano de Geología, Lima, Peru. 6p.
- Lepry L A J. 1981. The structural geology of the Yauli Dome region, Cordillera Occidental, Peru (dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Davis H G. University of Arizona. 1-100.
- Li X F, Hu R Z, Wei X L, Xiao R, Xiao N, Wang C Y and Yang J. 2012. Mineral deposits types, mineralization features and genesis relationship between Jinshan gold deposit and Dexing porphyry copper deposit, northeastern Jiangxi Province, South China[J]. *Geological review*, 58(1): 82-90(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Tang P, Zheng W B, Hall G, Chen G L and Zhang Z K. 2019. Polycentric complex mineralization model of porphyry system: A case study of Jiama superlarge deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1204-1222(in Chinese with English abstract).
- Liu X. 2013. Magmatic, metallogenic and exhumational processes of the mid-Jurassic porphyry ore systems in the Dexing ore district, Jiangxi Province, SE China (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Fan H R. Beijing: University of Chinese Academy of

- Sciences. 1-210(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for microsoft excel[R]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication. 4:1-70.
- Masterman G J, Cooke D R, Berry R F, Walshe J L, Lee AW and Clark A H. 2005. Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile[J]. *Econ. Geol.*, 100:835-862.
- Mao J W, Zhang J D, Pirajno F, Ishiyama D, Su H M, Guo C L and Chen Y C. 2011. Porphyry Cu-Au-Mo-epithermal Ag-Pb-Zn-dis-tal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi province, East China—a linked ore system[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 203-216.
- McLaughlin D H and Graton L C. 1935. Copper in the Cerro de Pasco and Morococha districts, department of Junin, Peru[C]. Copper resources of the world (XVI International Geological Congress). 513-544.
- Nagell R H. 1960. Ore controls in the Morococha district, Peru[J]. *Econ. Geol.*, 55: 962-984.
- Noble D C and McKee E H. 1999. The miocene metallogenic belt of central and northern Perú[J]. Society of Economic Geologists Special Publication, 7: 155-193.
- Ossandón G, Fréraut R, Gustafson L B, Lindsay D D and Zentilli M. 2001. Geology of the Chuquicamata mine: A progress report[J]. *Econ. Geol.*, 96: 242-270.
- Padilla Garza R A, Titley S R and Pimentel F. 2001. Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile[J]. *Econ. Geol.*, 96: 307-324.
- Paliza R and Chavez W X. 2008. Characterization of the alteration and mineralization of the manto Italia orebody, Morococha district, Peru[C]. XIII Congreso Latinoamericano de Geología, Lima.1-8.
- Petersen U. 1965. Regional geology and major ore deposits of central Peru[J]. *Econ. Geol.*, 60: 407-476.
- Qin K Z, Xia D X, Li G M, Xiao B, Duo J, Jiang G W and Zhao J X. 2014. Qulong porphyry-skarn Cu-Mo deposit in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-328(in Chinese).
- Rosas S, Fontbote L and Tankard A. 2007. Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucara basin, central Peru[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 24: 1-24.
- Rusk B G, Reed, M H and Dilles J H. 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana[J]. *Econ. Geol.*, 103: 307-334.
- Sawkins F J. 1972. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics[J]. *Journal of Geology*, 80: 377-397.
- Seedorff E, Dilles J, Proffett J, Einaudi M, Zurcher L, Stavast W, Johnson D and Barton M. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[J]. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume, 29: 251-298.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105: 3-41.
- SNC Lavalin. 2006. Toromocho project pre-feasibility study[M]. 1-81.
- Song G X, Qin K Z, Li G M and Wang L. 2018. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold polymetallic deposits and prospects[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3):748-762(in Chinese with English abstract).
- Spikings R, Reitsma M J, Boekhout F, Miškovic A, Ulianov A, Chiari-dia M, Gerdes A and Schaltegger U. 2016. Characterisation of triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea[J]. *Gondwana Research*, 35: 124-143.
- Tang J X, Deng S L, Zheng W B, Ying L J, Wang X W, Zhong K H, Qin Z P, Ding F, Li F J, Tang X Q, Zhong Y F and Peng H J. 2011. An exploration model for Jiama copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2):179-196(in Chinese with English abstract).
- Waters P J, Cooke D R, Gonzales R I and Phillips D. 2011. Porphyry and epithermal deposits and 40Ar/39Ar geochronology of the Ba-guo district, Philippines[J]. *Econ. Geol.*, 106(8): 1335-1363.
- Wang D B, Jiang S Q and Dong F L. 2016. Geological exploration of the Rongna porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, northern Tibet[J]. *Geology in China*, 43(5): 1599-1612(in Chinese with English abstract).
- Wang L, Qin K Z, Song G X and Li G M. 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and sub-classification[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 434-456.
- Wotzlaw J F, Guex J, Bartolini A, Gallet Y, Krystyn L, McRoberts C A, Taylor D, Schoene B and Schaltegger U. 2014. Towards accurate numerical calibration of the Late Triassic: High-precision U-Pb geochronology constraints on the duration of the Rhaetian[J]. *Geology*, 42: 571-574.
- Wu X J, Xiao C C, Yang R H, Li Z Z and Cui Z Y. 2015. Information extraction of typical alteration zone of porphyry copper deposit and delineation of prospective areas in southern Peru[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(11): 1802-1809(in Chinese with English abstract).
- Xu P, Wu F Y, Xie L W and Yang Y H. 2004. Hf isotopic composition of the standard zircons for U-Pb dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 29: 1642-1648(in Chinese with English abstract).
- Ye T Z, Wei C S, Wang Y W, Zhu X Y, Pang Z S, Yao S Z and Qin K Z. 2017. Prospecting prediction theory and method of prospecting area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 356-406(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈念,毛景文,范成龙,陈玉明.2017.秘鲁Don Javier斑岩型铜钼矿床矿化蚀变特征及矿床三维勘查模型[J].*矿床地质*,36(3):705-718.
- 金露英,秦克章,李光明,赵俊兴,李真真.2020.斑岩铜-热液脉状铅锌银矿成矿系统特征、控制因素及勘查指示[J].*岩石学报*,36(12): 3813-3839.

- 李晓峰,胡瑞忠,韦星林,肖荣,肖宁,王翠云,杨锋. 2012. 江西德兴地区主要矿床类型、成矿地质特征及其成因关系[J]. 地质评论, 58(1): 82-90.
- 林彬,唐菊兴,唐攀,郑文宝, Greg Hall,陈国良,张忠坤. 2019. 斑岩成矿系统多中心复合成矿作用模型——以西藏甲玛超大型矿床为例[J]. 矿床地质, 38(6):1204-1222.
- 刘玄. 2013. 江西德兴地区中侏罗世斑岩成矿系统岩浆-流体-成矿作用及抬升剥蚀历史研究[D]. 导师:范宏瑞. 北京:中国科学院大学. 1-210.
- 秦克章,夏代祥,李光明,肖波,多吉,蒋光武,赵俊兴. 2014. 西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床[M]. 北京:地质出版社. 1-328.
- 宋国学,秦克章,李光明,王乐. 2018. 中硫型浅成低温热液金多金属矿床基本特征、研究进展与展望[J]. 岩石学报, 34(3): 748-762.
- 唐菊兴,邓世林,郑文宝,应立娟,汪雄武,钟康惠,秦志鹏,丁枫,黎枫信,唐晓倩,钟裕峰,彭慧娟. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质,30(2):179-196.
- 汪东波,江少卿,董方浏. 2016. 藏北多龙矿集区荣那斑岩铜矿找矿突破的实践[J]. 中国地质, 43(5):1599-1612.
- 吴小娟,肖晨超,杨日红,李忠忠,崔振营.2015. 秘鲁南部斑岩铜矿典型蚀变带矿物信息提取及找矿远景区圈定[J]. 地球科学:中国地质大学学报,40(11): 1802-1809.
- 徐平,吴福元,谢烈文,杨岳衡. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报,49(14): 1403-1410.
- 叶天竺,韦昌山,王玉往,祝新友,庞振山,姚书振,秦克章. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京:地质出版社. 356-406.