

# 关于建立斑岩型铜矿床勘查标识体系的初步探讨

李莎莎<sup>1,2,3</sup>, 陈华勇<sup>1\*</sup>, 汪礼明<sup>4</sup>

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院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.广东省有色地质勘查院, 广东 广州 510080; 4.广东省有色金属地质局, 广东 广州 510080)

**摘要:** 斑岩型铜矿床勘查标识体系, 是建立在全球超大型-大型斑岩型铜矿床丰富研究成果和勘查经验基础上, 凝练不同矿床之间的共性和差异性来作为斑岩型铜矿床普适性标志和区分标准, 探寻矿床特征与勘查方法之间的内在联系, 最大程度结合科研成果, 优选科学的勘查方案并给出评价依据, 构建以地质事实→成矿机制研究→勘查方法应用“三位一体”的勘查标识体系。该体系架构分为矿床地质、矿床成因机制和勘查方法三个部分。建立斑岩型铜矿床勘查标识体系将有利于增进对斑岩型铜矿床的有效勘查。本文以特提斯-喜马拉雅成矿域的西藏驱龙斑岩型铜-钼矿床、环太平洋东段成矿域的智利 El Teniente 斑岩型铜-钼矿床和中亚成矿域东部的蒙古 Oyu Tolgoi 斑岩型铜-金矿床三个超大型斑岩型铜矿床为例, 重点对比勘查标识体系中矿床地质和致矿岩体地球化学特征, 归纳提炼不同矿床之间的共性和差异, 对构建斑岩型铜矿(床)勘查标识体系进行初步探讨。研究结果显示: 产于不同构造环境下的三个斑岩型铜矿床中均发育钾化带、青磐岩化带和绢英岩化带; 铜矿化在钾化带和绢英岩化带中均有发育, 钼矿化更倾向于在含水蚀变如绢云母化带、石英-绢云母蚀变部位, 金矿化赋存于钾化带发育部位; 矿化中心向矿区外围硫化物具有斑铜矿→黄铜矿(+斑铜矿)→黄铁矿的分布规律, 铜矿化和钼矿化相叠加, 但高品位的铜钼矿体相分离。驱龙矿床未发育 El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床共有的(高级)泥化蚀变, 可能与其形成环境或剥蚀有关。在地球化学数据收集中, 为了确保数据分析的有效性提出筛选方法和程序。岩石地化数据结果显示: 致矿斑岩体主要由 30%~50%斜长石斑晶和 60%左右基质(石英、钾长石)组成, 均为高钾钙碱性、过铝质、埃达克质岩石, 具有相似的右倾型稀土元素配分模式; 但是致矿岩体的硅碱成分、稀土元素配分模式、Sr-Nd 同位素表现出与产出环境一致的变化规律, Sr/Y-Y 图解显示 El Teniente 矿床较驱龙矿床和 Oyu Tolgoi 矿床的致矿岩体表现出更典型埃达克岩特征。总之, 斑岩型铜矿勘查标识体系的提出和以三个矿床为例的初步探讨为下一步构建该勘查体系奠定了一定的基础。

**关键词:** 斑岩型铜矿床; 勘查标识体系; 蚀变矿化分带; 致矿岩体地球化学

**中图分类号:** P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2019)05-0991-019

## 0 引言

随着矿产资源形势的日益严峻和对矿产勘查要求的不断提高, 如何将地物化遥等工作与实际勘查紧密联系, 最大限度地将科研成果与勘查相结合,

给出科学优选勘查方案, 实现快速有效矿产勘查的重要性正日益凸显。叶天竺等(2014)提出当前矿产勘查尚处于一事一例的经验式阶段, 从理论到方法都没有系统化、综合化, 急需探索总结。

斑岩型铜矿床作为全球重要的矿床类型, 其铜

收稿日期: 2018-03-05; 改回日期: 2018-05-10

项目资助: 国家杰出青年科学基金项目(4172500034)资助。

第一作者简介: 李莎莎(1984-), 女, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: lisa.lee00@qq.com

通信作者: 陈华勇(1976-), 男, 研究员, 从事岩石学、矿物学及矿床学研究工作。Email: huayongchen@gig.ac.cn

储量占据全球探明铜储量 55%左右(Sillitoe, 2010),也是我国重要铜矿床类型之一。过去几十年里通过大量深入细致研究,人们对斑岩型铜矿成因机制认识程度和理解深度普遍高于其他类型矿床(侯增谦等, 2003)。大部分出露于地表的斑岩型铜矿已被找到,一些隐伏斑岩型铜矿床(如 Spence、Toki、Cadia East 等)在较为成熟的斑岩成矿模型(Sillitoe, 1972, 2010; Mithcell, 1973)指导下也被陆续发现(Holliday and Cooke, 2007)。

尽管对斑岩型铜矿成矿机制、找矿标志和物化遥等勘查方法的认识在不断进步和更新,但对矿床地质、矿床成因和勘查方法之间相互联系的研究还不够深入,局限了地质科研人员和勘查工作者在实际工作中的认识和交流,导致科研成果转化率偏低,也对如何进行有效的矿产勘查工作提出了新的挑战。因此,深刻揭示这种内在联系,进而建立斑岩型铜矿床勘查标识体系(identification criteria system for exploration of porphyry copper deposits, 简称 ICEPD),不论是对斑岩型铜矿系统认识、成矿潜力评价,还是对找矿指导均具有重要的意义。

建立斑岩型铜矿床勘查标识体系是一个庞大的系统工程,作为该项工作的起点和初步探讨,本文从全球研究程度较高的三个斑岩型矿床成矿域中各选取一个超大型斑岩型铜矿床——特提斯-喜马拉雅成矿域的西藏驱龙斑岩型铜-钼矿床、环太平洋东部成矿域的智利 El Teniente 斑岩型铜-钼矿床和中亚成矿域东部的蒙古 Oyu Tolgoi 斑岩型铜-金矿床为例,主要通过综合矿床地质和致矿岩体信息,着重研究数据收集、处理过程和对比致矿岩体的岩石地球化学特征,梳理三个不同形成环境中超大型斑岩型铜矿床地质和致矿岩体的异同,尝试提炼蚀变特征-致矿岩体岩石地球化学勘查标志,对构建斑岩型铜矿床勘查标识体系进行初步探讨并奠定研究基础。

## 1 斑岩型铜矿床勘查标识体系的提出与研究意义

### 1.1 斑岩型铜矿床勘查标识体系的提出

为深入研究矿床地质、成矿机制、勘查方法与实际运用中的联系,促进具体矿床类型快速、有效勘查,提出对研究程度较高、勘查成果与方法积累了丰富的斑岩型铜矿建立勘查标识体系(ICEPD),揭示斑岩型铜矿床的地质事实、形成机制和有效勘查

方法之间的有机关联并建立科学有效的数据库,以期为斑岩型铜矿床勘查提供一个较为完整的信息格架和快速判别标志体系,用以指导找矿实践。

斑岩型铜矿床勘查标识体系,是建立在全球三大斑岩型矿床成矿域中超大型-大型斑岩型铜矿床的研究成果和勘查经验的基础上,归纳提炼不同斑岩型铜矿床之间在矿床地质、矿床成因机制和勘查方法三个方面的共性和差异性来分别作为斑岩型铜矿床普适性标志和区分标准,探寻它们之间的有机联系,最大程度结合科研成果,优选科学的勘查方案并给出评价依据,构建地质事实→成矿机制研究→勘查应用“三位一体”的勘查标识体系。

斑岩型铜矿床勘查标识体系包括:①矿床基础地质信息,如致矿岩体性质、围岩特征、蚀变特征、矿体物理特征和构造控矿特征等;②成矿机制研究成果,如成矿流体性质、成矿演化过程和年代学研究等;③勘查方法分析和成果,如物探方法、化探方法和遥感解译方法,具体分析不同矿床所使用的勘查手段的有效性和优劣性。该体系的标识是以斑岩型铜矿床在这三个方面的共性和差异性作为斑岩型铜矿床勘查的普适性标识和区分标准。

斑岩型铜矿床勘查标识体系研究内容包括三个方面:①从已具备较为详细矿床地质和研究成果的全球三个斑岩型矿床成矿域中选取超大型-大型的典型矿床,分别对不同成矿域中斑岩型铜矿床的基础地质和成矿机制研究等关键信息进行提炼总结;②研究不同成矿域中矿床的物化探工作成果和方法,揭示不同方法在各个矿床有效性差异的地质控制因素;③对矿床信息和研究成果进行全面收集整理,建立斑岩型铜矿床勘查标识体系基础数据库。在结合勘查方法分析和对比不同成矿域所形成的斑岩型铜矿床的异同点(包括同一成矿带中成矿与非成矿之间差别)的基础上,构建斑岩型铜矿床综合信息大数据库,凝练区域尺度和矿床尺度的勘查标识,提出科学依据,形成“三位一体”的斑岩型铜矿勘查标识体系。最后,选取适合区域进行初步勘查验证,对勘查标识体系进行修正和补充。

### 1.2 研究意义

近年来,虽然斑岩型铜矿在找矿模型上更加精确,勘查研究也从宏观的异常到细微的查证(如精细蚀变矿物研究的突破等),但这些进展重点偏向局部领域,侧重于现象解释、方法创新或数据分析,而研究成果与矿产勘查之间一直未能紧密结合,这不仅制约了斑岩型矿床勘查效率,同时也限制了科研成

果在勘查实践中的应用。斑岩型铜矿床勘查标识体系与前人所提的找矿标志不同之处在于,除了总结斑岩型铜矿在矿床尺度上的找矿标志和所使用的勘查方法外,还探寻确定找矿标志与对应勘查方法的地质控制因素,提炼出适合斑岩型铜矿系统的普适性勘查标识指标,同时还提出具有不同地质特征的斑岩型铜矿床差异性勘查标识,以期对找矿部署提供区域和矿床多尺度勘查指导,并进行快速勘查设计。

斑岩型铜矿床勘查标识体系作为不同矿床类型“勘查标识体系”全面研究的一个起点与基础,其研究经验可供其他类型的矿床借鉴,用于建立类似的勘查标识体系。在获取相关科研成果的同时,快速建立起整体的思维格架,将勘查标识体系中的快速勘查方案运用到实际应用中,科学地指导找矿,减少资源耗费。因此,该勘查标识体系的建立不论是对科研人员的研究工作,还是对地质工作者的矿产勘查,都具有积极的指导意义。

## 2 建立斑岩型铜矿床勘查标识体系的信息集成与分析

斑岩型铜矿勘查标识体系是建立在不同斑岩型矿床矿床地质、矿床成因机制和勘查方法之间的共性和差异性基础上的。斑岩型铜矿床主要分布在环太平洋成矿域、中亚成矿域和特提斯成矿域(Cooke

and Hollings, 2005; Sillitoe, 2010),因此选取三个大成矿域中的超大型斑岩型铜矿床(图 1,表 1)作为研究对象,以矿床地质、数据筛选和致矿岩体地球化学特征为例,对斑岩型铜矿勘查标识体系进行初步探讨:①位于特提斯成矿域的西藏驱龙斑岩型铜-钼矿床,形成于陆-陆后碰撞伸展环境,成矿年龄为 17.6~16.4 Ma,矿体产于近地表或地表区域(郑有业等, 2004; 杨志明等, 2008b; Yang et al., 2009);②位于环太平洋东成矿域的智利中部 El Teniente 斑岩型铜-钼矿床,形成于陆缘弧环境,诱发机制为洋壳向陆壳俯冲,成矿年龄为 5.9~4.9 Ma,矿体在地表出露(Cooke and Hollings, 2005; Stern et al., 2010; Vry et al., 2010);③位于中亚成矿域的 Oyu Tolgoi 斑岩型铜-金矿床,形成于岛弧环境,源于洋壳向洋壳俯冲,成矿年龄为 372~370 Ma,为隐伏矿床,矿体埋深最深可达地表以下 1000 m 左右(Crane and Kavalieris, 2012; Poter, 2016)。

### 2.1 矿床地质信息

#### 2.1.1 西藏驱龙斑岩型铜-钼矿床——特提斯成矿域

西藏驱龙矿床位于西藏墨竹工卡县境内,距离拉萨市 80 km。在 1986~1988 年 1:20 万拉萨幅区域化探剖面时发现矿致异常,2002~2003 年野外初步勘查表明该矿床有望成为世界级超大型斑岩铜(钼)矿床(郑有业等, 2004)。目前,该矿床探明金属量铜 7.19 Mt,平均品位 0.4%,钼金属量 0.47 Mt,平均品位 0.03%。

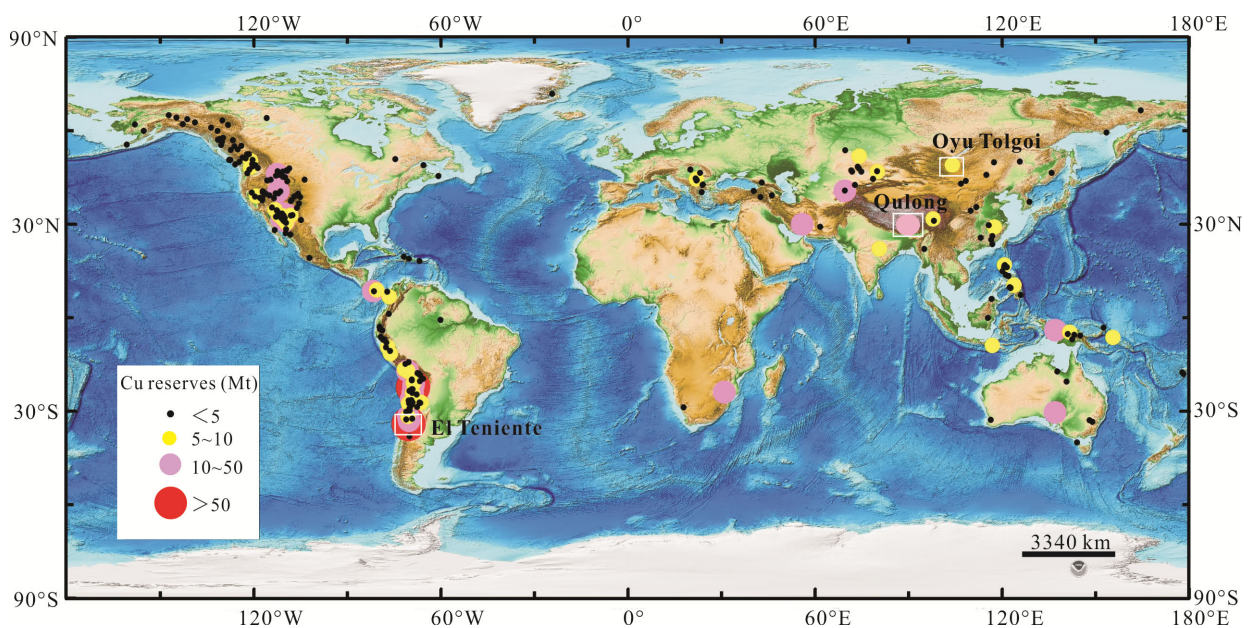


图 1 全球斑岩型铜矿床分布图(引自 Sun et al., 2017)

Fig.1 The distribution of porphyry deposits and selected deposits

表 1 驱龙矿床、El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床成矿地质特征对比  
Table 1 Major geological characteristics of the Qulong, El Teniente and Oyu Tolgoi deposits

矿床名称	中国西藏驱龙矿床	智利El Teniente矿床	蒙古Oyu Tolgoi矿床
矿种	Cu-Mo	Cu-Mo	Cu-Au
矿石量@品位	7.19 Mt @ 0.4% Cu, 0.47 Mt @0.03% Mo (金属量@品位)	12.4 Gt @ 0.62% Cu, 7.8 Gt @ 0.018% Mo, 金属量Cu 94.4 Mt, Mo 1.4 Mt	6.382 Gt @ 0.67% Cu, @ 0.29 g/t Au, 金属量Cu 42.76 Mt, Au 1850 t
围岩	叶巴组中酸性火山岩、火山碎屑岩和花岗斑岩	安山岩、英安岩和英安斑岩	辉石玄武岩、石英二长闪长岩
构造	矿区内无明显构造特征	矿床发育于北西向Codegua 断裂带和北东向Teniente断裂带交界处	矿床赋存于北东向断裂带中
致矿岩体	二长花岗斑岩	英安斑岩	石英二长闪长岩
矿体与规模	矿体呈浸染状、网脉状或数厘米脉状分布, 900 m×200 m	矿体呈网脉状赋存于矿区安山岩和英安质侵入岩中	矿体呈浸染状、脉状分布, 区内矿床呈北北东向分布, 2.5 km×1 km(>2) km
蚀变	钾化、青磐岩化, 石英-绢云母化	钠-钾化、钾化、钾化-青磐岩化、青磐岩化、绢英岩化, 近地表处局部呈泥化蚀变	钾化(黑云母-磁铁矿、钾长石化)、石英-绢云母、电气石-绢云母、中级泥化、高级泥化
矿石矿物	黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、斑铜矿、砷黝铜矿-黝铜矿、少量闪锌矿、方铅矿	黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿、黄铁矿	黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、斑铜矿、砷黝铜矿-黝铜矿、闪锌矿、方铅矿
脉石矿物	钾长石、黑云母、硬石膏、石英、绿帘石、绿泥石、绢云母、黏土矿物、石膏	磁铁矿、石英、硬石膏、钾长石、黑云母、阳起石、绿泥石、电气石、绢云母、碳酸盐、石膏	阳起石、磁铁矿、钠长石、榍石、黑云母、钾长石、石英、绢云母、电气石、绿泥石、伊利石、菱铁矿、镜铁矿、赤铁矿、叶腊石、明矾石、水铝石、绿帘石
参考文献	杨志明等, 2008b; Yang et al., 2009; 唐菊兴等, 2017	Cannell et al., 2005; Codelco Ltd., 2017	Crane and Kavalieris, 2012; Porter et al., 2016; Turquoise Hill Resources Ltd., 2016

驱龙矿床位于冈底斯斑岩型铜矿带的东段, 产于拉萨地体南缘的火山-岩浆带中, 形成于陆-陆后碰撞阶段的伸展环境。铜钼矿(化)体主要产于含矿斑岩体(二长花岗斑岩)与黑云母二长花岗岩的内外接触带中。目前圈定的 5 个铜矿(化)体长 350~1800 m, 宽 20~350 m, 铜矿化体及钼矿化体整体套合较好(但工业矿体明显分离), 表现为斑岩体全岩矿化, 并以含矿斑岩体为中心, 形成具有中心式、面状、环带分布的蚀变特征(图 2)。金属矿物为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、斑铜矿, 非金属矿物为石英、长石、硬石膏、黑云母、绢云母等(郑有业等, 2004; 杨志明等, 2008b; 张金树等, 2009; Yang et al., 2009)。

矿区地层为近 EW 向产出的下侏罗统叶巴组中酸性火山岩和火山碎屑岩, 赋矿围岩为中中新世花岗闪长岩。区内发育 3 套岩浆系统: 具有韧性变形的中侏罗世石英斑岩-花岗斑岩(西部斑岩)、与成矿有关的中中新世二长花岗斑岩(东部斑岩)、成矿晚期的中新世闪长玢岩(杨志明等, 2008b)。致矿岩体为产于矿区中东部的二长花岗斑岩(P 斑岩), 呈岩株状侵入于花岗闪长岩中, 出露面积约为 0.05~0.2 km<sup>2</sup>。岩石呈浅灰白色, 斑状结构, 斑晶以斜长石(15%, 粒度 1~

5 mm)、石英(5%~7%, 粒度 2~5 mm)、钾长石(3%~5%)为主, 含少量黑云母(<3%, 粒度<2 mm); 基质以石英、钾长石为主, 较浅部的 P 斑岩基质较细。此外, P 斑岩中不规则状石英较发育, 单向固结结构(UST)石英出现在 P 斑岩与花岗闪长岩的接触部位(杨志明等, 2008a, 2018b; 秦克章等, 2014)。

驱龙矿床的热液蚀变有三种类型: ①早期钾硅酸盐化蚀变(钾长石-黑云母化), 以发育钾长石、黑云母等含钾矿物为特征, 同时伴随广泛发育的硬石膏, 主要位于斑岩体内部及花岗闪长岩中; ②青磐岩化蚀变(绿帘石-绿泥石化), 主要发育绿帘石、绿泥石和碳酸盐化, 位于侏罗系叶巴组火山岩和花岗闪长岩中; ③长石分解蚀变(石英-绢云母-绿泥石-黏土化), 主要叠加在未蚀变岩石及早期蚀变组合上, 蚀变矿物主要为石英、绢云母、绿泥石、高岭石、黄铁矿, 以及少量的金红石(杨志明等, 2008b; Yang et al., 2009)。

根据驱龙矿床矿物组合、蚀变特征及脉体穿插关系, 可将蚀变作用和成矿作用分为三个阶段: ①早期阶段, 该阶段早期的蚀变和矿化与钾长石化蚀变有关, 极少量的浸染状铜矿化; 晚期以黑云母蚀



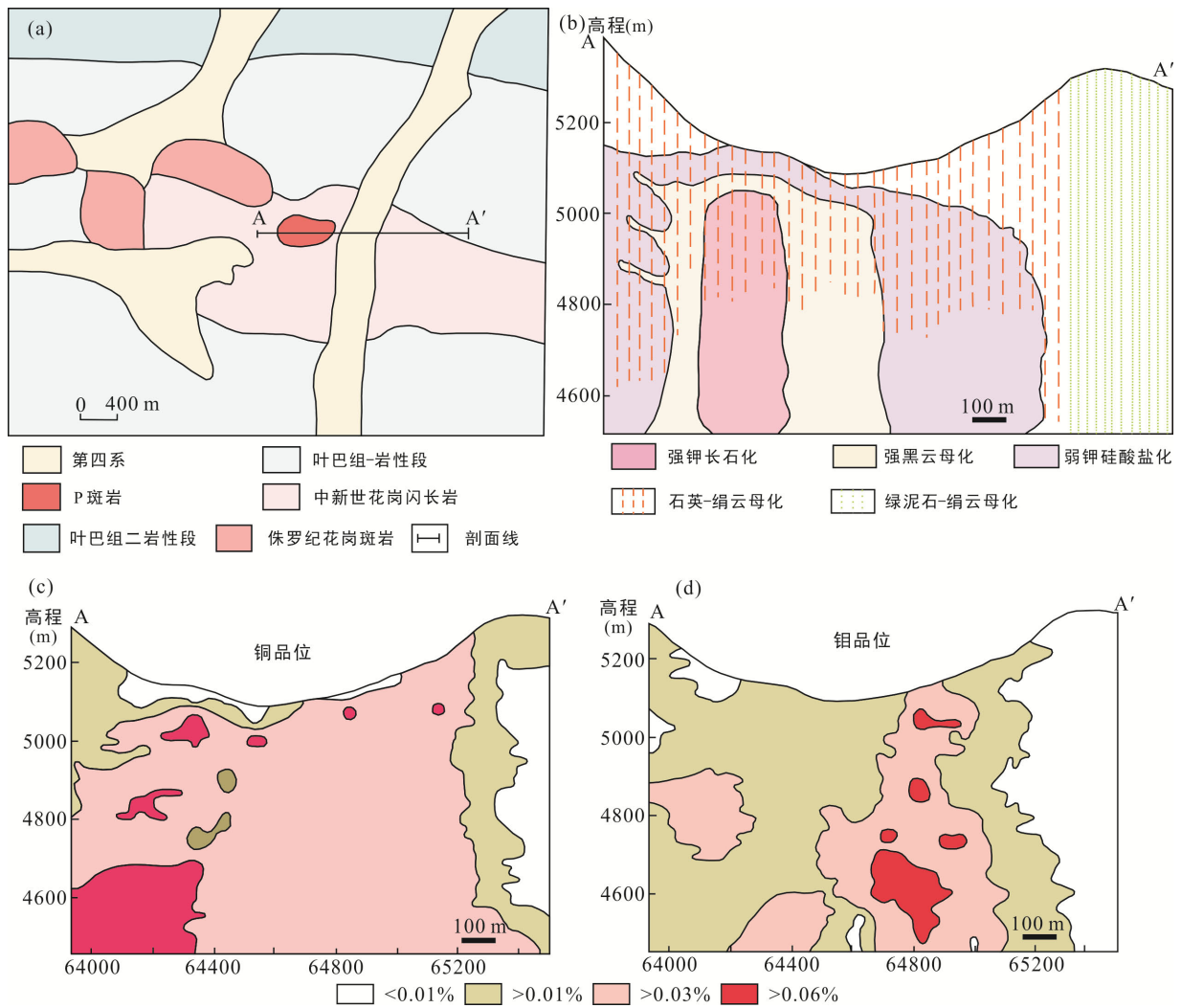


图 2 西藏驱龙矿床矿区地质简图(a)、蚀变剖面图(b)及矿化剖面图(c, d)(引自杨志明等, 2008b)

Fig.2 Geological map of the Qulong deposit (a) along with sections of alteration (b) and ore-grade distribution (c, d)

变为主, 发育黄铜矿±黑云母脉、石英-钾长石-辉钼矿±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿脉、石英-硬石膏±钾长石±黄铁矿脉及黑云母细脉; 驱龙矿床中 60%的铜矿化沉淀于该阶段; ②转换阶段, 处于钾硅酸盐蚀变向长石分解蚀变转换阶段, 驱龙矿床钼矿化主要形成于该阶段, 同时伴有大量的铜矿化形成, 无矿的青磐岩化蚀变也可能形成于该阶段, 脉体主要为石英-硬石膏-黄铜矿±辉钼矿±黄铁矿脉、石英-辉钼矿±硬石膏±黄铜矿±黄铁矿脉及绿帘石-石英脉; ③晚期阶段, 该阶段以长石分解蚀变为特征, 发育辉钼矿±黄铁矿±黄铜矿脉、黄铜矿-黄铁矿±硬石膏脉、黄铁矿±石英±硬石膏脉及石膏脉, 晚期蚀变阶段也产出铜、钼矿化, 矿化以引起绢云母-绿泥石化的黄铜矿-黄铁矿±硬石膏脉为主。石英、硬石膏贯穿整个矿床的形成阶段。钾化蚀变主要形成于①及②的早期, 青磐岩化蚀变形成于②的晚期, ③则主

要是长石分解蚀变(杨志明等, 2008b; Yang et al., 2009)。

### 2.1.2 智利 El Teniente 斑岩型铜-钼矿床——环太平洋东部成矿域

El Teniente 矿床位于智利首都圣地亚哥市西南约 70 km 处, 安第斯成矿带西部和智利中部斑岩成矿带内的晚中新世火山-岩浆弧带中北北西向 Codegua 断裂和北北东向 Teniente 断裂的交汇部位 (Camus, 1975; Cannell et al., 2005; Vry et al., 2010; Spencer et al., 2015)。该超大型矿床是世界上最大的地下开采铜矿, 探明铜矿石量 12.4 Gt(铜品位 0.62%)和钼矿石量 7.8 Gt(钼品位 0.018%)(Cannell et al., 2005; Vry et al., 2010; Spencer et al., 2015)。矿体主要赋存于中新世英安斑岩、Teniente 铁镁质杂岩体和矿区中部的 Braden 角砾岩筒边缘, 分别以 Teniente 侵入杂岩体为中心和铜品位  $>0.5\%$  为界线, 形成长

2.6 km、宽 2.0 km、深可达 800 m 的楔形体，从岩体中心向外随蚀变的变化，依次发育斑铜矿、黄铜矿和黄铁矿(图 3)。金属矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、

黄铁矿、辉钼矿、磁铁矿等，非金属矿物主要有硬石膏、石英、长石、绢云母等。铜-钼矿化主要以网脉状产出(Maksaev et al., 2004; Cannell et al., 2005)。

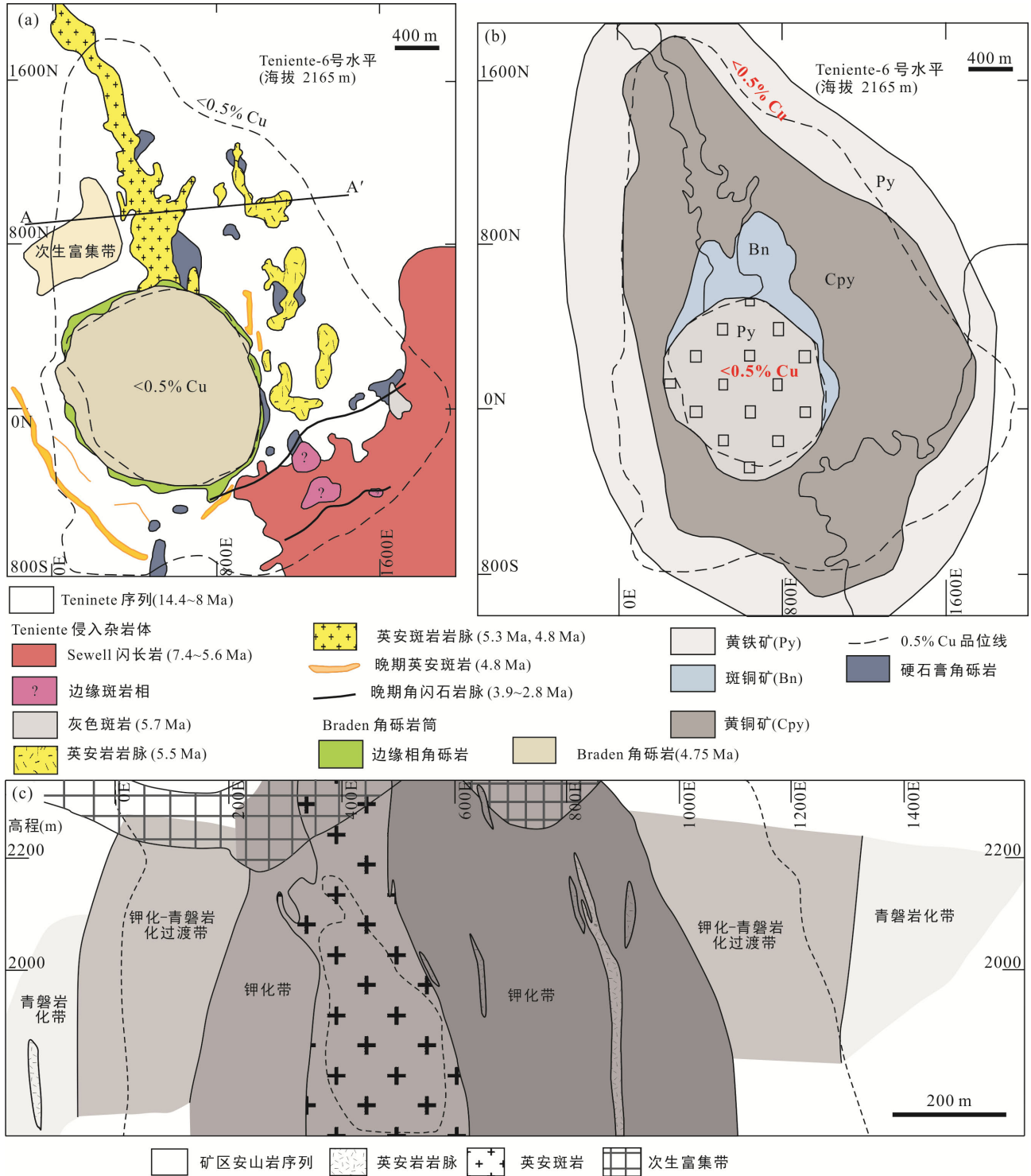


图 3 El Teniente 矿床矿区地质简图(a)、矿化分布图(b)和蚀变分带图(c)(引自 Cannell et al., 2005)

Fig.3 Simplified geological map of the El Teniente deposit (level 6, 2165 m) and maps showing the sulfide zonation (b), and late magmatic stage vein and/or alteration (c)

赋矿地层为暗灰色厚层、具黑云母蚀变和绢云母蚀变的铁镁质安山岩和火山碎屑岩杂岩体, 80%的矿体赋存于其中。岩石普遍发育斜长石斑晶, 斑晶直径 0.8~6 mm 不等。不透明矿物以磁铁矿为主, 伴随少量钛铁矿、硫化物和金红石。基质已发生强烈黑云母化, 副矿物为硬石膏、斜长石、硫化物、透闪石-阳起石和石英(Cannell et al., 2005; Cannell, 2008)。

英安斑岩作为 El Teniente 矿床的致矿岩体侵入至安山质围岩中, 发育钾化蚀变和网脉状成矿作用。英安斑岩(5.28±0.10 Ma)为北北西向长约 1300 m、宽约 200 m 的扁平岩墙, 其南部被 Braden 岩筒截断, 北部延伸至 0.5%铜品位圈之外, 在时空上均与铜钼矿化的脉体和钾化蚀变关系密切。英安斑岩为浅灰色至白色, 由斜长石斑晶(30%~50%)、黑云母(5%)和角闪石斑晶(已蚀变为绿泥石、绢云母、石英)、少量石英眼球和基质(45%~65%)组成。基质为细晶状石英、斜长石微晶、钾长石和少量铜铁硫化物、绢云母、绿泥石、硬石膏、锆石和磷灰石的集合体(Maksaev et al., 2004; Cannell et al., 2005; Cannell, 2008)。而矿区中部的 Braden 岩筒(4.7~4.6 Ma)为成矿后期侵入, 与成矿无直接联系。

El Teniente 矿床热液蚀变主要为早期磁铁矿化和绢英岩化蚀变、钠-钾长石化蚀变、钾化蚀变、青磐岩化蚀变、石英-绢云母化蚀变和泥化蚀变。①早期磁铁矿化和绢英岩化蚀变以磁铁矿、硬石膏、石英、绢云母和绿泥石为主要蚀变矿物, 可能与早期侵入的 Swell 石英闪长岩体有关, 该阶段不发育硫化物; ②钠-钾长石化蚀变以钠长石和钾长石为主要蚀变矿物, 发育在英安斑岩体和岩脉的局部或其周围; ③钾化蚀变主要发育在英安斑岩周边 100~400 m 的范围内, 蚀变矿物为石英、硬石膏、黑云母、钠-钾长石, 少量绢云母、绿泥石, 硫化物为黄铜矿和斑铜矿, 黑云母与硫化物共生, 矿石具有较高的 Cu 品位(>1%)和 Mo 品位(>0.01%); ④钾化-青磐岩化过渡带稍远离英安斑岩、位于较高海拔处(海拔 2000 m 以上), 蚀变矿物以绢云母、石英、硬石膏、绿泥石为主, 少量钠-钾长石、磁铁矿, 硫化物为黄铜矿和黄铁矿, 绢云母和绿泥石与硫化物共生, 其矿石品位 Cu 大多数>1%, Mo 大多在 0.01%~0.03%之间; ⑤青磐岩化蚀变位于远离英安斑岩的 0.5%铜品位圈外, 蚀变矿物为绿泥石、黄铁矿、石英、硬石膏、±绢云母、磁铁矿、钠-钾长石, 硫化物以黄

铁矿为主, 矿石品位较低(Cu<0.5%, Mo<0.01%); ⑥石英-绢云母化蚀变, 集中在远离英安斑岩岩脉的钾化-青磐岩化蚀变过渡带上(海拔 2000 m 以上), 蚀变矿物主要为石英、绢云母、硬石膏等; ⑦泥化蚀变, 主要分布在矿区 0.5%铜品位圈北西方位——Braden 岩筒北部和英安斑岩岩墙西部, 发育于地表以下 100~600 m, 由最上部淋滤层和低处富集层组成, 蚀变矿物主要为高岭石, 少量蒙脱石、明矾石和残余绢云母, 矿石矿物为辉铜矿和铜蓝(Cannell et al., 2005)。

根据 El Teniente 矿床的矿物组合、脉体穿插关系和热液蚀变可将成矿作用分为四个阶段: ①前成矿期阶段, 发育早期的磁铁矿化蚀变(磁铁矿、钙长石、石英、阳起石和硬石膏脉)和绢英岩化蚀变(石英±电气石、绢云母、绿泥石脉), 该阶段不发育硫化物; ②晚岩浆期阶段, 以网脉状石英-硬石膏-硫化物(±钠-钾长石-黑云母-金红石-绿泥石-绢云母脉)为特征, 蚀变类型以钠-钾长石蚀变、钾化蚀变和青磐岩化蚀变为主, 包含了整个矿床中 60%金属铜。③主热液期阶段, 以绢英岩化蚀变为主要特征, 脉体主要为石英、硬石膏和硫化物脉, 硫化物为黄铜矿、黄铁矿和辉钼矿(缺失斑铜矿), 该阶段发育有矿床中 30%金属铜。④晚热液期阶段, 为次生绢英岩化蚀变叠加在主热液阶段上, 该阶段与 Braden 岩筒和晚期英安岩侵入体有关, 蚀变热液脉主要集中在相关侵入体附近, 且在矿区南部最为发育。硫化物主要为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿和辉钼矿, 蕴含了 10%金属铜(Cannell et al., 2005)。

### 2.1.3 蒙古南部 Oyu Tolgoi 斑岩型铜-金矿床——中亚成矿域

Oyu Tolgoi 矿床位于蒙古国南戈壁省, 北距蒙古国首都乌兰巴托市 550 km, 南距中蒙边境 80 km, 地表除少量岩石出露外, 大部分岩石和矿体被残留坡积物和沙漠覆盖。20 世纪 80 年代初期蒙古-俄罗斯联合地球化学调查中, 在 Central Oyu 地区发现 Mo 异常, 而后经 Magma Copper 和 BHP Billiton 两家矿业公司对其进行地质填图、水流和沉积物检测、激发极化法调查后, 最后由 Ivanhoe Mines 矿业公司在 2000 年反向循环找矿计划的深孔找矿中见高品位铜矿化, 进而发现整个 Oyu Tolgoi 矿床。该矿床群为长 26 km 的北北东向成矿带, 由北向南依次分布 Ulan Khuud 矿床、Hugo Dummett North 矿床、Hugo Dummett South 矿床、Central Oyu Tolgoi 矿床、

Southwest Oyu Tolgoi 矿床、South Oyu Tolgoi 矿床、Heruga North 矿床、Heruga 矿床和 Javkhalant 矿床，共探明资源量 6.382 Gt，铜品位 0.67%，金品位 0.29 g/t，其中金属量铜 42.76 Mt、金 1805 t。Oyu Tolgoi 矿床以其铜金储量大、金属品位高、矿化范围广、矿体规模巨大等特点排名世界级超大型斑岩铜(金)矿床前列(Khashgerel et al., 2006; Crane and Kavalieris, 2012; Turquoise Hill Resources Ltd., 2017)。

Oyu Tolgoi 矿床位于蒙古南部 Gurvansayhan 岛弧地块中，该地块为活动于志留纪-早石炭世中亚弧-陆碰撞造山带的一部分。矿床由晚泥盆世石英二长闪长岩复合岩体侵入至 Gurvansayhan 岛弧地块钙碱性辉石玄武岩中形成，而后被火山沉积岩所覆盖(图 4)。区内构造发育，岩石变形强烈，矿床主要位于区域上北东向和北西向断层交汇部位(Crane and Kavalieris, 2012; 杨波和赵元艺, 2017)。

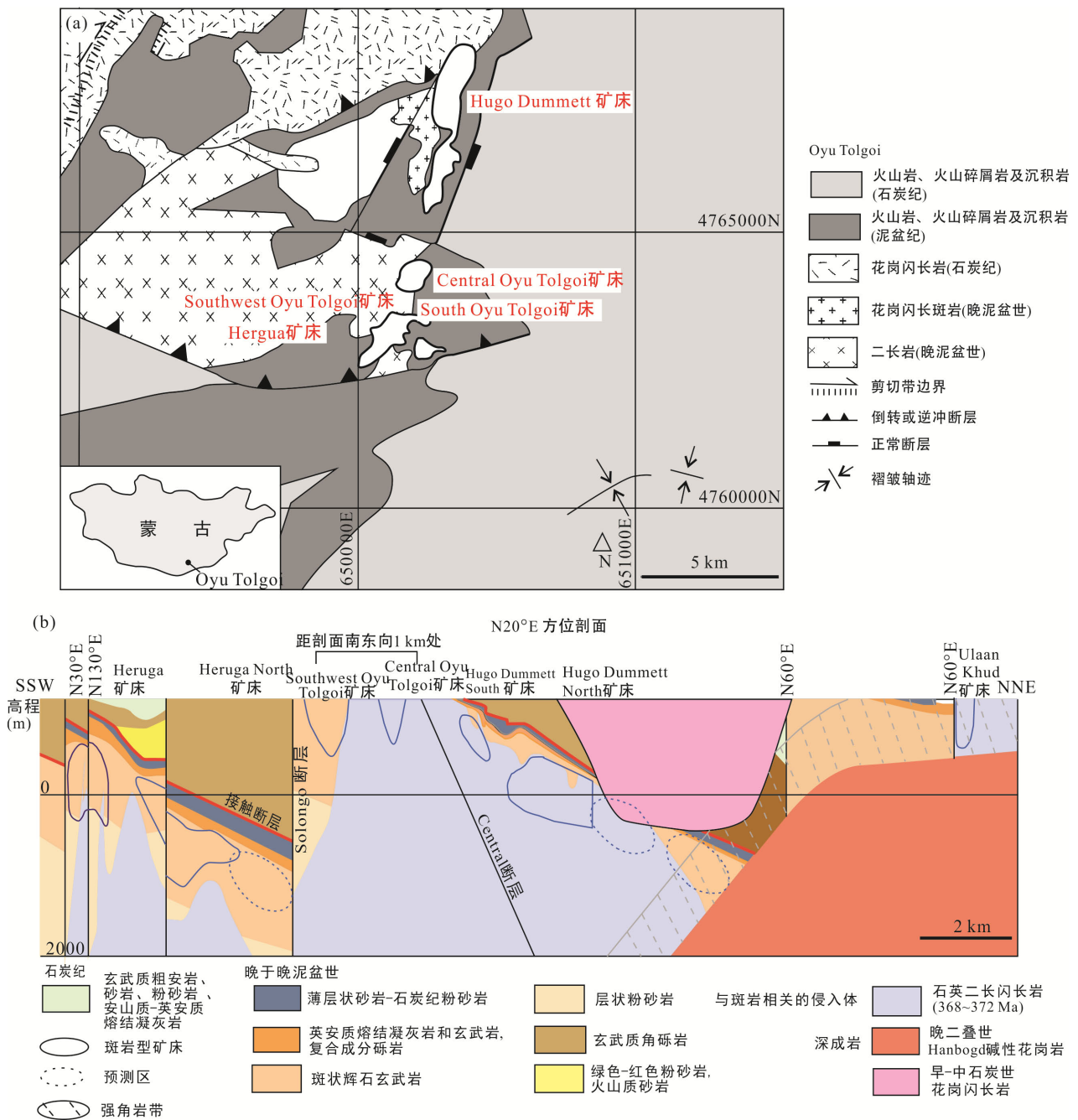


图 4 Oyu Tolgoi 矿床矿区地质简图(a)及剖面图(b) (引自 Crane and Kavalieris, 2012)  
 Fig.4 Geological map of the Oyu Tolgoi deposit (a) and N20°E oriented section (b)



整体上, Oyu Tolgoi 矿床的赋矿围岩为 Oyu Tolgoi 火山岩序列和石英二长闪长岩。Oyu Tolgoi 火山岩序列主要出露在 Southwest Oyu Tolgoi 矿床和 South Oyu Tolgoi 矿床, 沿北东向形成一长 12 km、宽 3 km、厚 1 km 的火山杂岩体, 其主要岩性为斑状辉石玄武岩, 辉石斑晶大小 5~10 mm, 约占 35%。晚泥盆世(372~368 Ma)聚晶斑状石英二长闪长岩作为赋矿围岩和致矿岩体出露在近 40 km<sup>2</sup> 北北东向椭圆形区域内, 岩石主要由拉长的(可长达 8 mm)斜长石斑晶(45%)、钾长石(15%~20%)和基质组成, 其中钾长石以自形或与石英共生的形式存在于基质中。Southwest Oyu Tolgoi 矿床深部未蚀变的石英二长闪长岩的基质中还出现角闪石、黑云母(可达 20%)和辉石, 并含磁铁矿(5%)和榍石(2%)。单向固结结构(UST)石英局部出现在高度矿化的石英二长闪长岩的顶部和地层与岩体的交界部位(Khashgerel et al., 2006; Crane and Kavalieris, 2012)。

Oyu Tolgoi 矿床具有典型斑岩型铜金矿床分布特征和蚀变特征, 各个矿床之间的间隔为 1.5~2.0 km, 最具有经济价值的矿体主要分布在 Hugo Dummett North 和 Heruga 矿床中, 垂直延深可达 1 km, 而出露在地表的 Southwest Oyu Tolgoi 矿床、South Oyu Tolgoi 矿床和 Central Oyu Tolgoi 矿床的矿体至少已被剥蚀 500 m 以上。①北部矿床(Hugo Dummett 矿床)剥蚀程度较低, 斑岩系统和叠加的高硫型成矿作用保存较完整, 高级泥化蚀变出现在矿床顶部, 为高品位铜矿化带, 并在深部叠加在早期石英-绢云母蚀变之上。矿体主要赋存于发育绢云母和高级泥化蚀变的石英二长闪长岩中, 矿石矿物为黄铜矿、斑铜矿和原生辉铜矿, 铜金矿化以低 Au(g/t)/Cu(%)比率(0.1~1)为特点, 高品位矿发育在 A 脉-石英脉和富斑铜矿区域。在 Hugo Dummett 矿床中心的深部, 强钾长石化蚀变与含金斑铜矿化密切相关, 外部高级泥化带和高硫化带中黄铜矿和斑铜矿同时出现, 最外部的高级泥化区域则发育硫砷铜矿-黄铁矿。②在南部矿床(Southwest Oyu Tolgoi 矿床、Heruga North 矿床和 Heruga 矿床), 青磐岩化蚀变分布在早期的钠-钙蚀变和钾化(黑云母-磁铁矿-钾长石)蚀变外围, 石英-绢云母蚀变位于矿床的顶部。矿体赋存于黑云母-磁铁矿蚀变的辉石玄武岩中, 矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿为主, 铜金矿化以高 Au(g/t)/Cu(%)比率(0.8~3)为特点。Southwest Oyu Tolgoi 矿床的成矿岩体石英二长闪长岩呈直径 250 m、高为

700 m 的筒状出露于该矿床的核部区域。在 Hugo Dummett 矿床深部硫化物主要为黄铜矿, 而在 South Oyu Tolgoi 矿床的深部则以斑铜矿为主。③中部矿床的赋矿位置、蚀变形态与南北部矿床不同, 锥形的高级泥化带和绢云母蚀变带叠加在石英二长闪长岩中的早期斑岩系统上, 矿石矿物为高硫型的铜蓝和黄铁矿组合, 在近地表处发育毯状的辉铜矿次生富集带。斑岩系统早期强烈发育的 A 脉在高硫化成矿带、上覆的席状辉铜矿次生富集带和地表的氧化带中均有出现(Crane and Kavalieris, 2012)。

Oyu Tolgoi 矿床的蚀变类型主要为钠-钙蚀变、钾化蚀变、石英-绢云母蚀变、泥化蚀变、青磐岩化蚀变和高级泥化蚀变(图 5)。①钠-钙(阳起石-磁铁矿-钠长石-磷灰石-榍石和绿色黑云母)蚀变在 South Oyu Tolgoi 矿床的辉石玄武岩中较常见, 该蚀变序列整体上早于黑云母蚀变。②钾化蚀变为黑云母-磁铁矿蚀变和钾长石化蚀变, 黑云母-磁铁矿-钾长石化蚀变与含金的铜矿体分布在南部矿区, 钾长石化蚀变整体上严格受石英二长闪长岩控制, 在局部玄武质围岩中也有出现。③石英-绢云母蚀变叠加在石英二长闪长岩上, 并在 Central Oyu Tolgoi 矿床和 Hugo Dummett 矿床南部普遍发育, 二长石英闪长岩的蚀变深度最深可达 1000 m。Hugo Dummett North 矿床深部存在壳状的强绢云母蚀变带, 覆盖在石英二长闪长岩上部遭强钾长石化蚀变的部位。④泥化蚀变包括中级泥化蚀变和高级泥化蚀变。中级泥化蚀变主要发育在辉石玄武岩围岩中, 岩石呈黄褐色至绿色, 蚀变组合为绿泥石-白云母-伊利石-菱铁矿-镜铁矿-赤铁矿, 伴随少量叶腊石-高岭石, 为辉石玄武岩中高级泥化蚀变和绿泥石-绢云母蚀变的过渡带。高级泥化蚀变从 Hugo Dummett North 矿床到 Central Oyu Tolgoi 矿床、Southwest Oyu Tolgoi 矿床与 South Oyu Tolgoi 矿床之间的断陷带中均有发育, 蚀变矿物组合为残余石英、叶腊石、少量刚玉、水铝石、钾明矾石、含铝磷酸盐矿物、氯黄晶、黄玉、地开石、高岭石、硬石膏、石膏和红柱石。在 Hugo Dummett North 矿床和 Hugo Dummett South 矿床, 高品位(>2.5% Cu)的以斑铜矿为主的成矿作用与明矾石关系密切。⑤青磐岩化蚀变仅在 Southwest Oyu Tolgoi 矿床西部和 Heruga 矿床可见发育, 以绿帘石、磁铁矿(+赤铁矿)、黄铁矿、钠长石化蚀变为特征(Crane and Kavalieris, 2012)。

### 2.2 致矿斑岩体地球化学信息

在详细的矿床地质信息基础上,数据收集和分析处理作为斑岩型矿床勘查标识体系中的基础部分,是尝试实现勘查标识可量化的重要环节;而且数据是否能真实客观地反映地质事实,使数据来源和筛选成为构建整个勘查标识体系的重要基础之一。引

起数据异常因素有采样、蚀变异常、样品处理等,因此准确合理地解释和筛选数据是矿床解剖和研究的重中之重。

#### 2.2.1 数据来源与筛选

用于斑岩型铜矿床勘查标识体系研究的数据收集,在初步阶段以岩石成因和成矿机制研究的地球

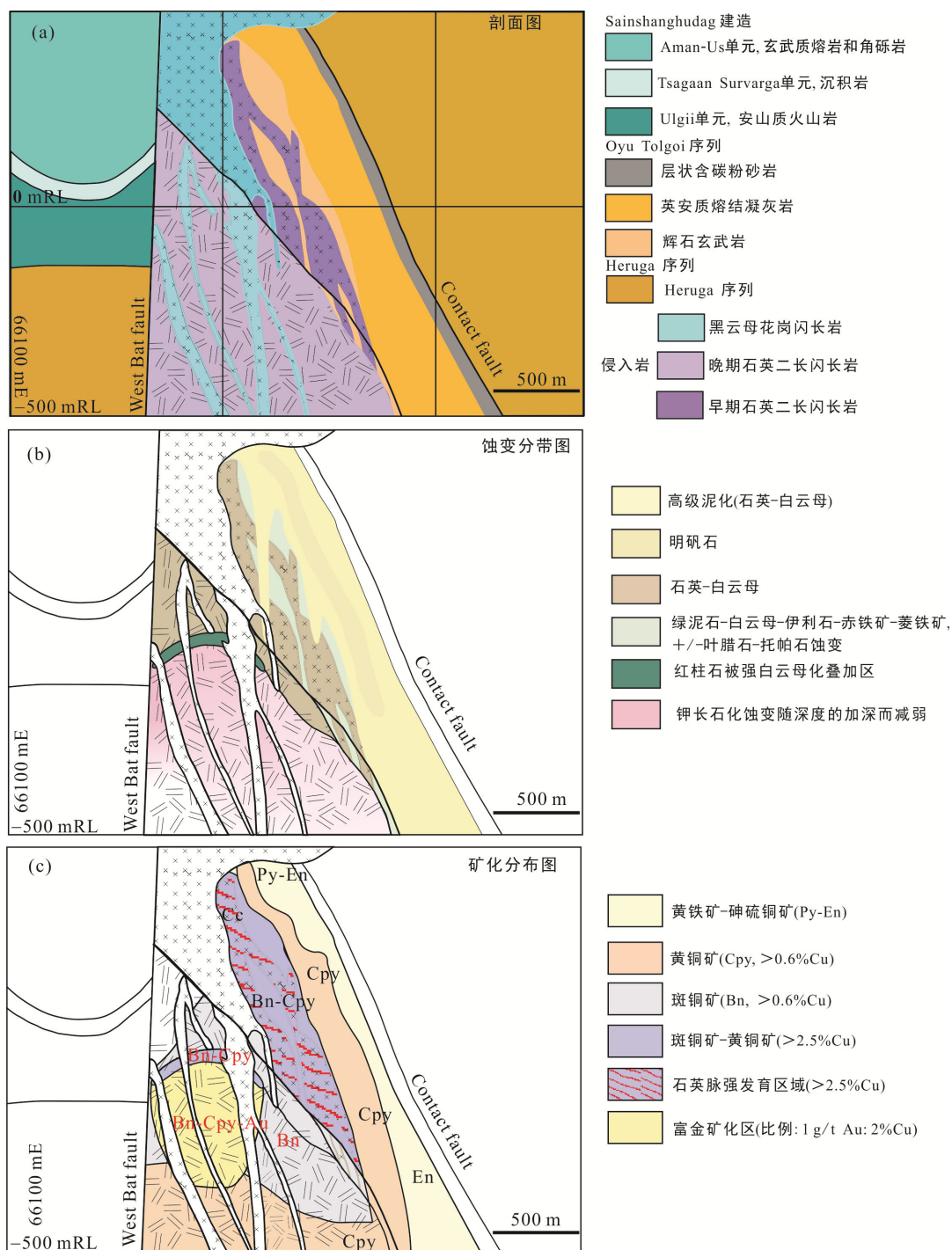


图 5 Hugo Dummett North 矿床矿体剖面图(a)、蚀变分带图(b)和矿化分布图(c)(据 Crane and Kavalieris, 2012)

Fig.5 Simplified cross sections along N4767395 showing geology (a), alteration zones (b) and sulfide assemblages (c) of the Hugo Dummett North deposit

化学原始数据为主,其来源主要为国内外核心期刊的文献(如: *Economic Geology*、*Geology*、*Mineralium Deposita*、*Lithos*、*Ore Geology Review*、*矿床地质*、*中国地质和岩石学报*等)。本文数据收集以致矿岩体的文献数据为主,对同一矿床在不同文献中出现明显不同的数据,将依据文献可信度和新旧对比等手段确定相对合理的数据进行使用;同时对异常数据进行成因分析并归类。针对斑岩矿床中普遍出现的岩体蚀变等现象,对所有收集到的原始数据进行蚀变程度鉴定(具体程序见下文 3.2),并利用鉴别后的新数据库进行重新投图等工作,提取可信度较高的指示标志。

数据筛选以蚀变盒子(alteration box)为判别标准,对致矿岩体岩石数据进行筛选,剔除受蚀变影响的数据。国际上认可的蚀变盒子是由 Large et al. (2001)提出的蚀变盒子判别图解,用以判别岩石地球化学数据的样品是否遭受蚀变和蚀变趋势走向(图 6)。

蚀变盒子判别图解中所应用的两个指数分别为: Ishikawa 蚀变指数(alteration index, 简称 AI)和绿泥石-碳酸盐-黄铁矿指数(chlorite-carbonate-pyrite index, 简称 CCPI)。判别图解主要有两个功能: ①以图解正中心的方框为界,不同类型的火山岩对应不同的格子,点落在对应格子内的样品为未蚀变样品数据,落在外部的为蚀变样品数据(图 6a); ②图中对角线将图解分为左右两部分,左下部分为成岩作用引起的热液蚀变范围,右上部分为热液蚀变的蚀变范围,剪头所指为岩石受热液蚀变影响的趋势(图 6b, Large et al., 2001)。

应用蚀变盒子对本次收集的原始数据进行筛选,结果显示: 大多数 El Teniente 矿床样品未蚀变,仅有四个点落在碳酸盐-绢云母蚀变的范围(图 7b),说明样品可能受到绢云母蚀变的影响; 驱龙矿床有一部分点落在蚀变盒子之外,这部分地层和岩体的 AI 值随着 CCPI 值的减小而升高,存在向钾长石方向靠近的趋势(图 7a),说明样品受钾长石蚀变的影响; Oyu Tolgoi 矿床有部分数据点落在绢云母-绿泥石-黄铁矿蚀变的范围内(图 7c),说明这部分样品已受蚀变的影响。

通过对三个矿床的岩石地球化学数据重新投图发现,主量元素散点图投图结果存在数据点分散、出现异常高的值(高  $K_2O$ 、高  $SiO_2$  等)或异常低的值(低  $K_2O$ 、低  $Na_2O+K_2O$  等)等现象(图 8a、b)。数据筛选前,位于  $K_2O-SiO_2$  图解底部高级泥化蚀变的样品,显示高级泥化蚀变导致岩石中 K、Na 含量明显低于正常值。经过筛选剔除后,数据点更为集中,主要落在石英二长岩、花岗闪长岩和花岗岩范围内,且大部分为高钾钙碱性岩石,显示出一定的规律性(图 8c、d)。微量元素蛛网图和稀土元素配分图显示出某些样品异于大部分样品分布趋势的元素异常(出现 Th、U、Eu、La 等元素)等较为混乱的现象(图 9、11)。驱龙矿床和 Oyu Tolgoi 矿床蚀变与未蚀变样品稀土元素配分图对比发现,驱龙矿床蚀变与未蚀变样品都具有右倾的稀土配分曲线,稀土元素总量并无明显的变化,但表现出明显 Eu 负异常和 Gd 正异常(图 9a); Oyu Tolgoi 矿床高级泥化样品与未蚀变样品稀土元素配分曲线较为平坦,且无明显元素富集或亏损,但稀土元素总量波动范围较大(图 9b)。

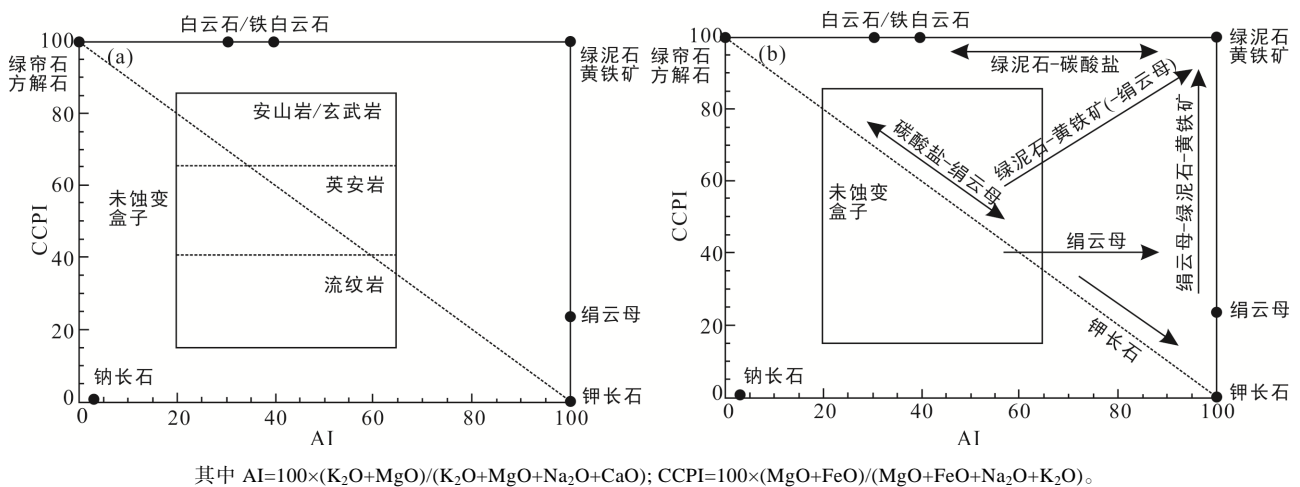
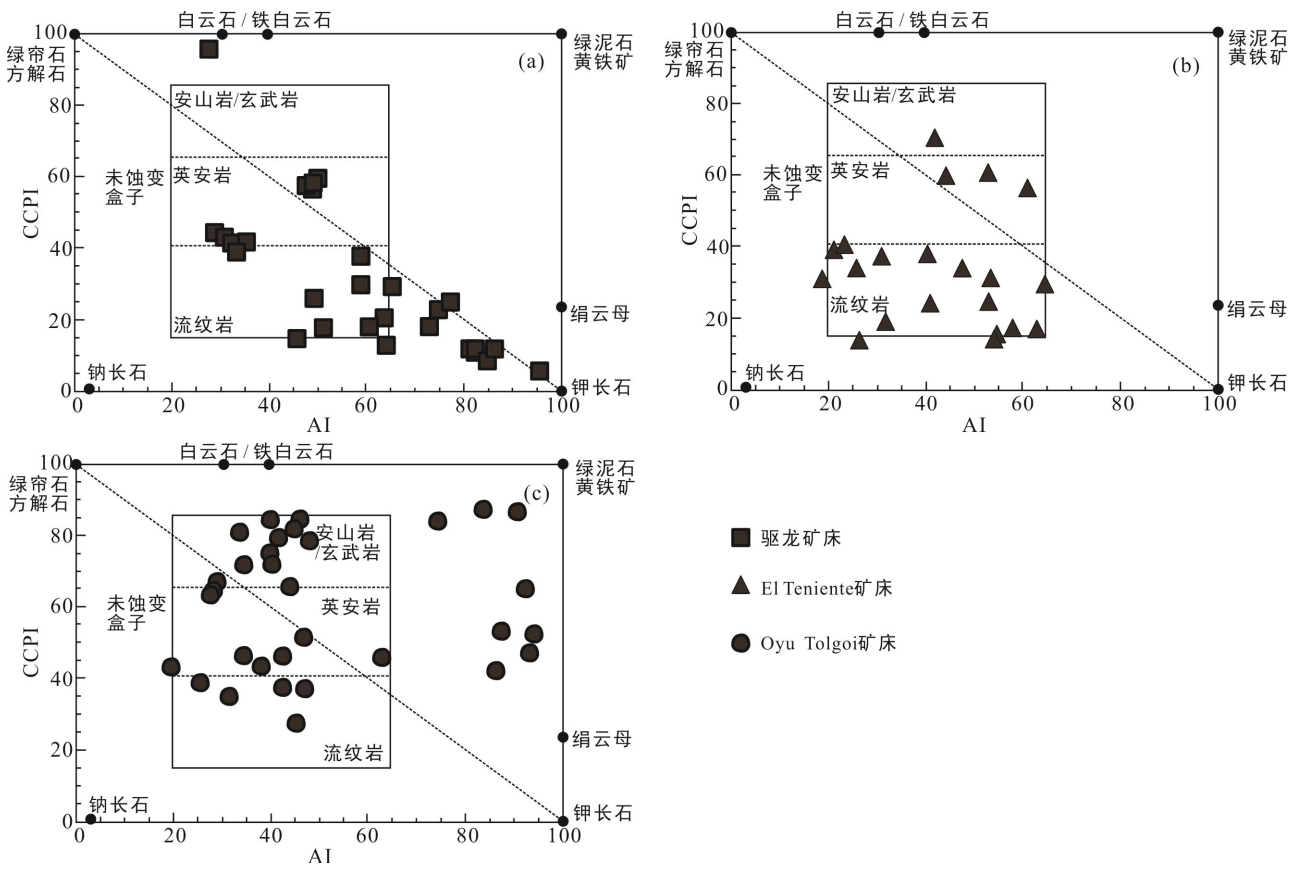


图 6 蚀变盒子判别图(a)和热液蚀变变化趋势图(b) (引自 Large et al., 2001)

Fig.6 Plots showing composition fields of the least altered felsic, intermediate, and mafic volcanic rocks (a) and hydrothermal alteration (upper right) in the alteration box plot (b)



注: 数据引自 Cannell et al. (2005); Khashgerel et al. (2008); 杨志明等(2008b); Yang et al. (2009); Vry et al. (2010); Crane and Kavalieris. (2012); Dolgoplova et al. (2013); 秦克章等(2014)。

图 7 驱龙矿床(a)、El Teniente 矿床(b)和 Oyu Tolgoi 矿床(c)蚀变盒子判别图  
Fig.7 Alteration boxes of the Qulong (a), El Teniente (b) and Oyu Tolgoi (c) deposits

以上数据分析表明, 收集数据资料时应首先对数据进行筛选判断, 在确定数据的合理性之后方能对数据进行客观分析和规律总结, 这对构建斑岩型铜矿床勘查标识体系的数据库非常重要。

2.2.2 典型矿床致矿岩体地球化学特征对比

(1) 主量元素地球化学特征

驱龙矿床、El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床形成环境依次为陆-陆后碰撞、洋-陆俯冲和洋-洋俯冲环境, 致矿岩体则分别为二长花岗斑岩、英安斑岩和石英二长闪长岩, 出露面积分别为 0.2 km<sup>2</sup>、2.6 km<sup>2</sup> 和 40 km<sup>2</sup>。经过筛选的数据重新归纳和投图, 结果显示三个矿床的致矿岩体普遍具有较高 K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O(4.60%~10.11%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(11.51%~18.46%)含量, 和较低 TiO<sub>2</sub>(0.2%~0.76%)、MgO(0.13%~2.41%), SiO<sub>2</sub>含量从 Oyu Tolgoi 矿床、El Teniente 矿床至驱龙矿床呈逐渐增高趋势。致矿岩体岩性主要属于二长岩或石英二长岩, 少数样品落入花岗闪长岩和花岗岩范围, 且均为高钾钙碱性系列, 具有强过铝质

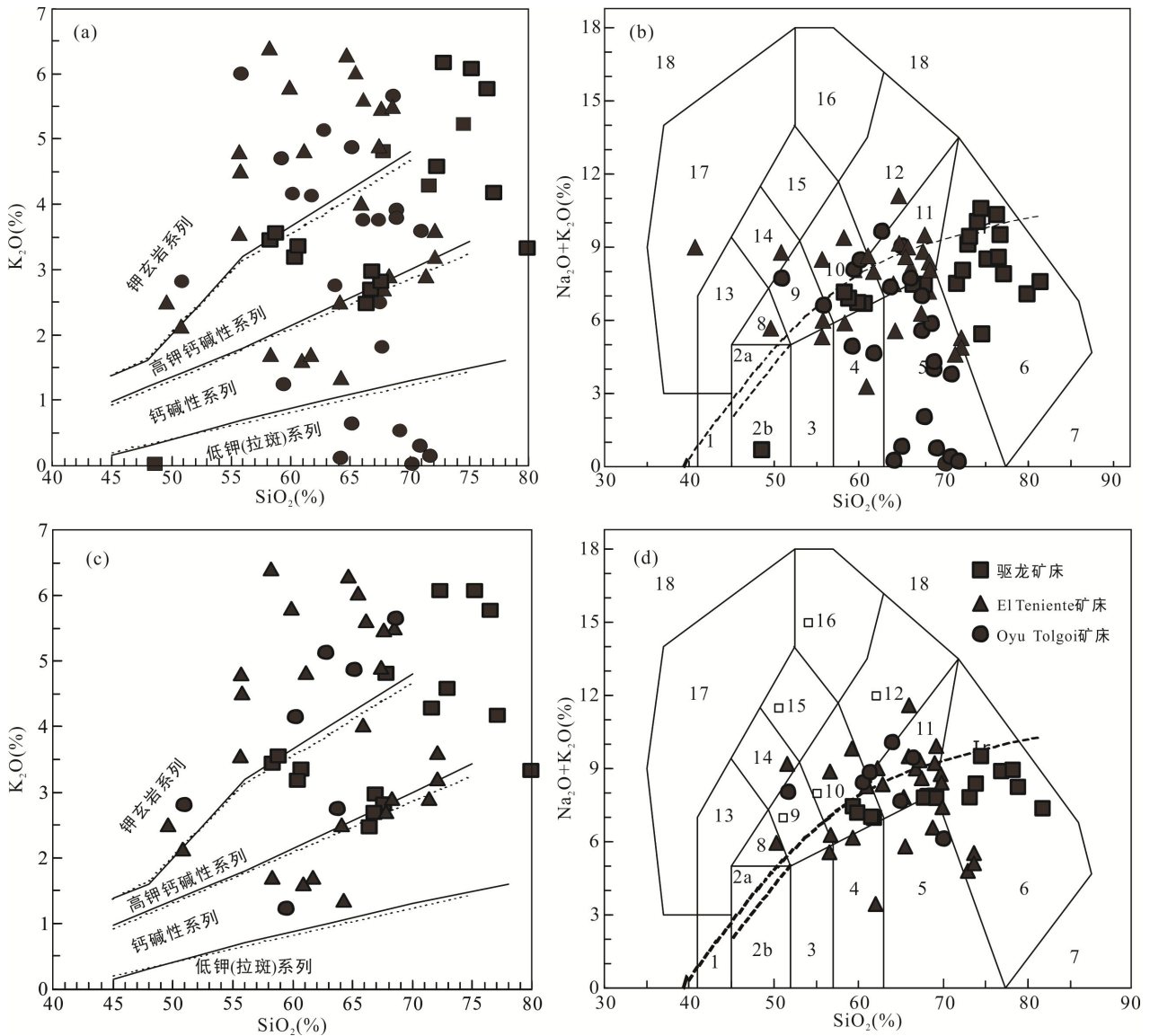
特征(图 10)。

主量元素含量按驱龙矿床→El Teniente 矿床→Oyu Tolgoi 矿床顺序依次出现升高或降低的变化, 升高有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(平均值: 14.64%、16.83%、17.31%)、MgO(平均值: 0.87%、0.94%、1.37%)、Na<sub>2</sub>O(平均值: 3.36%、4.88%、4.98%)和 CNK 值(平均值: 10.43、10.75、11.57), 降低有 SiO<sub>2</sub>含量(平均值: 69.01%、68.06%和 60.46%)和 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值(平均值: 1.62、0.87、0.67)。TiO<sub>2</sub>、MnO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>1</sup>的含量随着岩体形成年龄的增大而升高(El Teniente 矿床、驱龙矿床和 Oyu Tolgoi 矿床岩体成岩年龄依次增大): TiO<sub>2</sub>含量的平均值为 0.35%、0.39%、0.52%, MnO 含量的平均值为 0.01%、0.03%、0.12%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>1</sup>含量的平均值为 0.90%、2.32%、6.57%。

(2) 微量和稀土元素地球化学特征

三个矿床的致矿斑岩均以富集大离子亲石元素(Ba、Sr 和 U)和 LREE 元素, 亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Th)和 HREE 元素为特征, 并具高 LREE/HREE





深成岩: 1. 橄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 硅英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩。数据来源同图 7。

图 8 数据筛选前(a, b)和筛选后(c, d)的  $K_2O-SiO_2$  和  $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$  对比图解(a, c 据 Peccerillo and Taylor, 1976; b, d 据 Middlemost, 1994)

Fig.8  $SiO_2$  vs.  $K_2O$  (a, c) and TAS (b, d) diagrams of the the Qulong, El Tenicente, and Oyu Tolgoi deposits

(5.36~32.39)和 $(La/Yb)_N(4.67\sim66.78)$ 值。三个致矿岩体具有相似的右倾型稀土元素配分曲线, Eu 出现弱异常或无异常(图 11), 说明形成含矿斑岩的岩浆具有相似的演化过程, 并且结晶分异在演化过程中不占主导地位(孟祥金, 2004; 高顺宝和郑有业, 2006)。

致矿岩体的轻重稀土元素比值 $(La/Yb)$ 最大为 El Teniente 矿床, 最小为 Oyu Tolgoi 矿床, 说明致矿岩浆的结晶分异作用在 El Teniente 矿床中表现最强, 在 Oyu Tolgoi 矿床中表现最弱。大部分致矿岩体具

有高 Sr/Y 值(26.11~368.54), 其中 El Teniente 矿床的致矿岩体属于典型的埃达克岩, 具有较高的 Sr/Y 值(228.21~293.20), 驱龙矿床和 Oyu Tolgoi 矿床的点大部分落在埃达克岩和正常岛弧岩的混合区及周围(图 12a)。

(3) 同位素地球化学特征

驱龙矿床、El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  的比值范围分别为 0.701752~0.705053、0.70402~0.70406、0.7028~0.7041,  $\epsilon_{Nd}$  值范围为

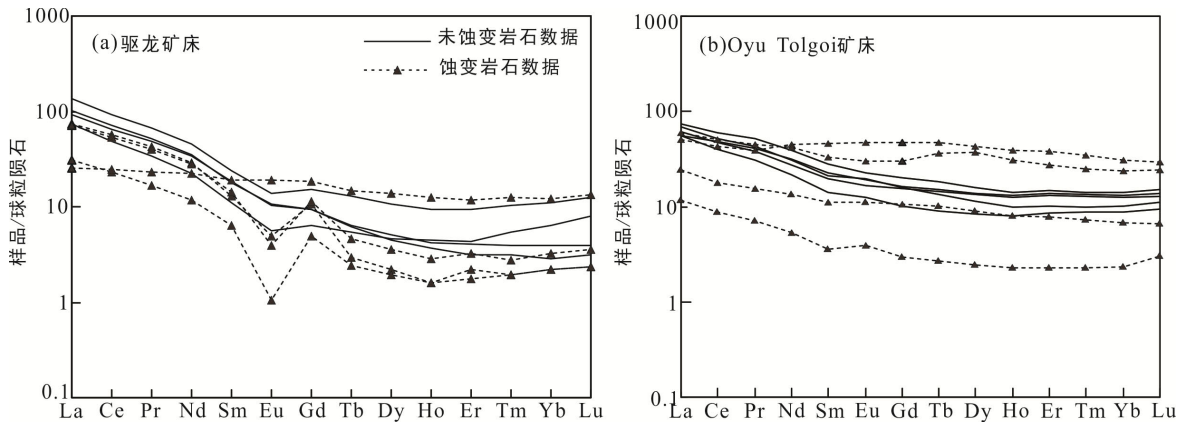
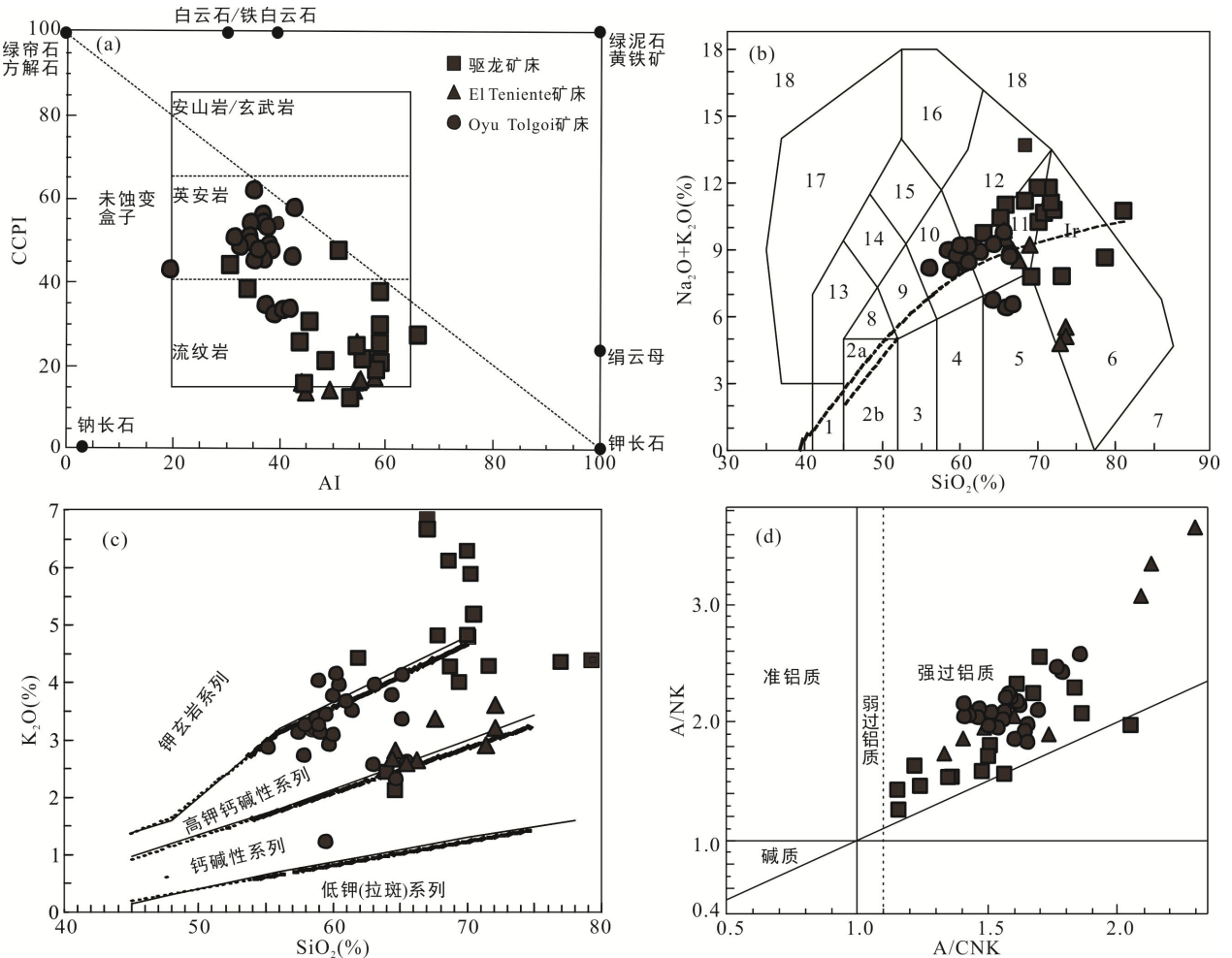


图 9 蚀变岩石与未蚀变岩石稀土元素配分曲线(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 数据来源同图 7)

Fig.9 Chondrite-normalized REE patterns for the least altered rocks and altered rocks from the Qulong (a) and Oyu Tolgoi (b) deposits



深成岩: 1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 硅英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩。数据来源同图 7。

图 10 三个矿床致矿岩体蚀变盒子判别图(a); 花岗岩岩石类型 TAS 图解(b, 据 Middlemost, 1994);  $K_2O-SiO_2$  图解(c, 据 Peccerillo and Taylor, 1976);  $A/NK-A/CNK$  图解(d, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.10 Plots of alteration box(a), TAS(b),  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  (c) and  $A/NK$  vs.  $A/CNK$  (d) for the Qulong, El Teniente, and Oyu Tolgoi deposits

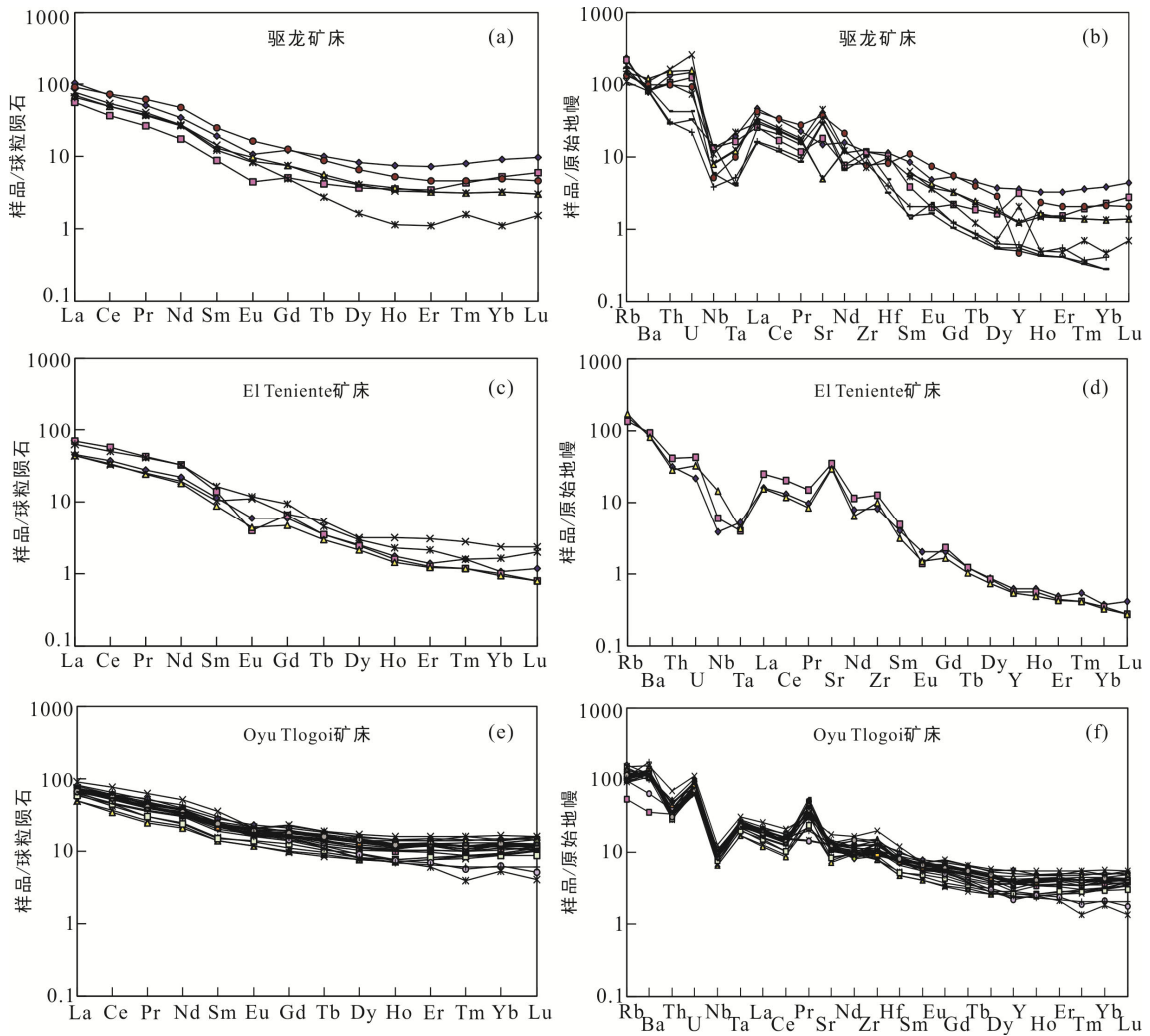


图 11 驱龙矿床(a, b)、El Teniente 矿床(c, d)和 Oyu Tlogoi 矿床(e, f)致矿岩体稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989, 数据来源同图 7)

Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Qulong (a, b), El Teniente (c, d) and Oyu Tolgoi (e, f) deposits

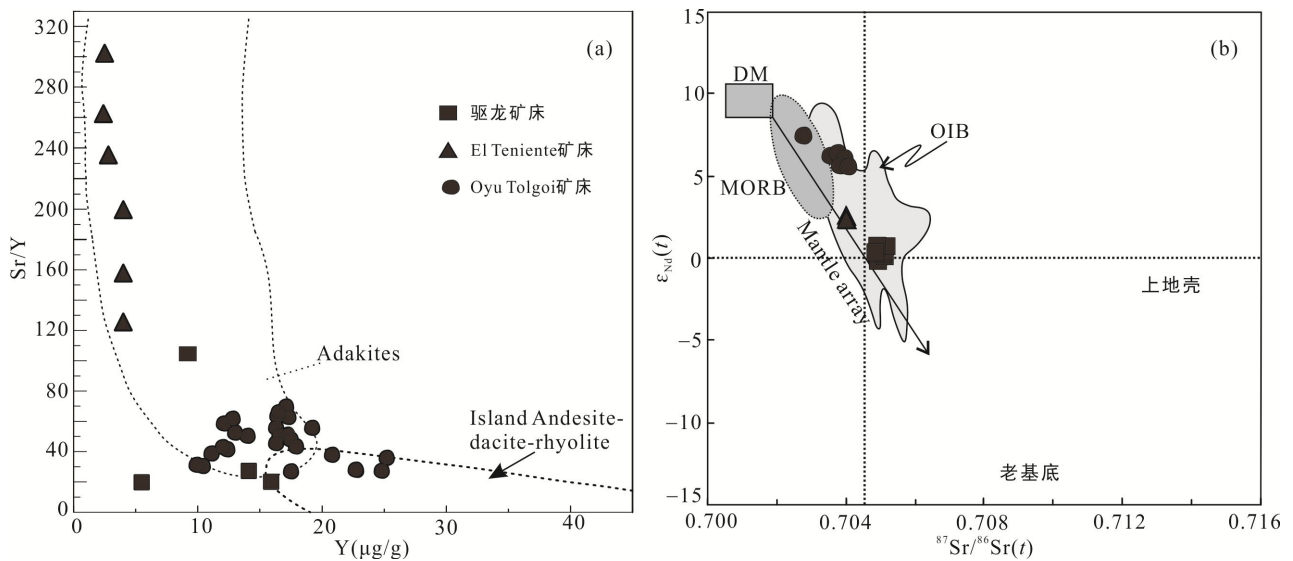


图 12 三个矿床致矿岩体 Sr/Y-Y 图(a)和 Sr-Nd 同位素图(b)(数据来源同图 7)

Fig.12 Sr/Y-Y (a) and Sr-Nd (b) diagrams for ore-related intrusions from the Qulong, El Teniente, and Oyu Tolgoi deposits

-0.1~1.2、2.5~3.2、5.5~7.4。三个矿床 Sr-Nd 同位素组成成矿环境从驱龙矿床(陆-陆后碰撞环境)到 El Teniente 矿床(洋-陆俯冲环境)再到 Oyu Tolgoi 矿床(洋-洋俯冲),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值依次减小,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值则依次增大。在 Sr-Nd 同位素图解中, 三个矿床呈现出较好的线性关系分布, 且具有明显分区。Oyu Tolgoi 矿床样品主要集中在洋中脊玄武岩范围附近, 并有向亏损地幔靠近的趋势(图 12b), 与形成于洋壳向洋壳俯冲的环境相对应; El Teniente 矿床明显区别于 Oyu Tolgoi 矿床, 显示出幔源物质与壳源物质混合的特征, 具有远离洋中脊玄武岩范围并向上地壳方向发展的趋势(图 12b), 表明可能有部分上地壳物质的加入, 与陆缘弧俯冲环境相一致; 驱龙矿床的点位于最靠近上地壳方向的位置(图 12b), 显示可能有更多地壳物质的加入, 显示出地壳来源的特征, 符合矿床形成于陆-陆后碰撞环境的特点。

### 3 矿床地质-岩石地球化学勘查标识提取与讨论

不同的斑岩型铜矿之间既具有共性也存在差异, 为建立斑岩型铜矿勘查标识体系的初步探讨提供了依据, 其共性有助于作为鉴定斑岩型铜矿床的普适性标志, 而差异标志则有利于判别在不同环境或条件下斑岩型铜矿所具有的特点。驱龙矿床、El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床分别形成于陆-陆后碰撞环境、洋-陆俯冲环境和洋-洋俯冲环境, 三个斑岩型铜矿的致矿岩体所表现出的差异性与其形成环境具有高度一致性, 蚀变带的不同亦可能与其形成环境有关。这些特征均为斑岩型铜矿床地质-岩石地化勘查标识的初步提取提供了科学依据。

#### 3.1 蚀变分带与矿化

在经典的斑岩型铜矿模型(Sillitoe, 2010)中, 蚀变分带从斑岩体中心向外依次发育钾化带、绢英岩化带和青磐岩化带, 外围发育泥化带和高级泥化带, 矿化主要赋存在钾化带和绢英岩化带中, 其次在高级泥化带上。但实际勘查发现, 每个斑岩型铜矿床发育的蚀变分带和矿化都各具特点, 不尽相同。驱龙矿床铜矿化主要赋存于钾化带和石英-绢云母带中, 而钼矿化则赋存于钾化带边部弱钾硅酸盐部位和石英-绢云母化带中。El Teniente 矿床铜钼矿化主要赋存于钠-钾蚀变带、钾化带、钾化-青磐岩化过渡带和绢英岩化带中。Oyu Tolgoi 矿床的黄铜矿赋

存于岩体深部钾长石化减弱部位和高级泥化带上, 斑铜矿主要赋存于钾长石化带内, 斑铜矿-黄铜矿赋存于钾长石化带外围的石英-白云母带和绿泥石-白云母-伊利石-赤铁矿-菱铁矿蚀变带中, 黄铁矿-砷硫铜矿主要发育在高级泥化带的中边部; 金则主要与斑铜矿-黄铜矿共生, 赋存在岩体顶部强钾长石化带部位; 钼矿化发育在岩体上部的石英-绢云母化带和含绿泥石-白云母/伊利石-赤铁矿组合的玄武质围岩中。

因此, 从整体上看, 超大型斑岩型铜矿床中无水蚀变(如钾长石化蚀变)强烈发育; 含水蚀变(如绢英岩化、绿泥石-绢云母化等)通常叠加在钾化蚀变上。矿化作用在钾化带、绢云母化带以黄铜矿、斑铜矿为主, 钼矿化更倾向于发育在含水蚀变如弱钾化蚀变、绢英岩化带和石英-绢云母化带中, 金矿化赋存于无水蚀变如强钾长石化蚀变部位。此外, 在 Oyu Tolgoi 矿床除发育斑岩系统外还叠加了高硫型成矿系统, 发育高级泥化蚀变, 富集黄铜矿-斑铜矿化; El Teniente 矿床也局部发育泥化蚀变, 含铜蓝、孔雀石等次生矿化; 驱龙矿床中却未见发育高级泥化或泥化蚀变, 可能与矿床形成于陆-陆后碰撞环境或泥化蚀变带已被剥蚀有关。

显然, 简单机械地利用经典斑岩矿床蚀变矿化模型进行矿床尺度勘查是不完善的。在了解和运用斑岩型铜矿普遍蚀变分带模式的同时, 必须清楚不同斑岩型铜矿之间的差异, 而利用这些“差异性”勘查标志也有利于我们在矿床尺度进行更有效的快速勘查部署。

#### 3.2 赋矿岩石和致矿岩体

##### 3.2.1 赋矿岩石

驱龙矿床、El Teniente 矿床和 Oyu Tolgoi 矿床的赋矿岩石分别为花岗闪长岩和二长花岗斑岩、英安斑岩和安山岩、石英二长闪长岩和玄武岩。赋矿岩石包括赋矿岩体和赋矿围岩(以火山岩为主), 但赋矿岩体与致矿岩体并非同源, 表明发生铜矿化作用并不取决于围岩岩性或成岩年龄, 更可能取决于致矿岩体的岩浆-流体系统(Chen et al., 2016), 赋矿围岩则较为多变。侯增谦等(2003)也提出斑岩型铜矿的赋矿围岩及盖层变化多样, 硫化物矿石的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围较小, 接近于 0, 说明 S 来自于岩浆, 赋矿围岩和盖层并不是斑岩型铜矿床内金属和硫的主要来源, 但正常的长英质岩浆也不是矿床中金属和硫的唯一来源。围岩的物理、化学性质对矿床的类型或



成矿作用有一定的控制作用, 渗透性较差的围岩将圈闭成矿流体或使得成矿流体在斑岩系统外围与碳酸盐岩反应形成矽卡岩型矿床。如驱龙矿床外围南部 2 km 和东南 4 km 处发育有 2 处矽卡岩型铜矿, 赋矿围岩为叶巴组凝灰岩-晶屑凝灰岩, 夹变石英砂岩和灰岩, 矽卡岩体和矽卡岩型矿化均沿凝灰岩地层分布, 受控于层间断层或岩性。总体而言, 斑岩型铜矿的围岩(此处指致矿岩体以外的)虽然以火成岩为主, 但并无明显特征可作为勘查标识。

### 3.2.2 致矿岩体

三个矿床的致矿岩体主要由斜长石斑晶(30%~50%)和基质(60%左右)组成, 基质主要为石英和钾长石。致矿岩体均为高钾钙碱性、过铝质、埃达克质岩石, 具有相似的右倾型稀土元素配分模式。不同的是, 驱龙矿床和 El Teniente 矿床的致矿岩体较 Oyu Tolgoi 矿床表现出更为右倾的富集 LREE、亏损 HREE 的配分模式, 亏损 HREE 和 Y 反映在岩浆熔融过程中石榴石残留(侯增谦等, 2003)。

火成岩特征标志有助于指示附近或隐伏矿床存在(Richards, 2016)。三个斑岩型矿床致矿岩体的主量元素特征、全岩 Sr-Nd 同位素与形成环境表现出一定的对应性: ①在主量元素方面, 形成于陆-陆后碰撞环境的驱龙矿床的致矿岩体(二长花岗斑岩)在形成过程中因有陆壳中物质加入, 使致矿岩体更偏酸性; 洋-陆俯冲环境中下的 El Teniente 矿床致矿岩体(英安斑岩)在形成过程中少量陆壳物质的加入, 而相对于驱龙矿床偏中性; Oyu Tolgoi 矿床致矿岩体为石英二长闪长岩, 说明在洋-洋俯冲环境下形成的致矿岩浆中极少有陆壳物质加入; ②虽然三个致矿岩体均具有埃达克质特征, 但三个矿区样品在 Sr/Y-Y 图解中落入不同的范围: El Teniente 矿床的致矿岩体具较高 Sr/Y 值而明显不同于其他两个矿床, 可能与其形成环境有关; ③Sr-Nd 同位素特征上也显示出斑岩型矿床形成与构造环境具有一定相关性: 驱龙矿床的致矿岩体靠近上地壳, Oyu Tolgoi 矿床则靠近洋中脊玄武岩和亏损地幔, El Teniente 矿床则位于另两个矿床的中间。

致矿岩体在地球化学性质上的共性与差异性可以作为斑岩型铜矿区域尺度上的勘查标志, 并有助于对其形成环境的判别和区域勘查部署。在多期斑岩体侵入的复杂成矿环境下, 利用区域典型矿床的致矿岩体地球化学特征也可以帮助迅速确定可能的致矿岩体和勘查目标。

## 4 主要认识与结论

三个超大型斑岩型铜矿在矿床地质和致矿岩体地球化学特征上对比研究发现, 致矿岩体的岩性和岩石地球化学特征变化与矿床形成环境有关, 而蚀变分带的不同和成矿机制方面的差异也与矿床的形成环境具有一定的联系。在此基础上, 对构建斑岩型铜矿床勘查标识体系提出以下几点初步认识:

(1) 构建斑岩型铜矿床勘查标识体系的原始数据经收集后需进行筛选, 鉴别和剔除异常数据, 确保数据分析的客观性和有效性。

(2) 矿床之间的共性可作为斑岩型铜矿床普遍鉴定标准。如斑岩系统中均发育钾化带、青磐岩化带和绢英岩化带, 铜矿化在钾化带、绢云母化带及石英-绢云母化带中均有发育, 钼矿化倾向于含水蚀变如绢云母化带、石英-绢云母蚀变, 金矿化赋存于无水蚀变的强钾长石化带。从矿化中心向外, 硫化物具有斑铜矿→黄铜矿(+斑铜矿)→黄铁矿的分布规律, 铜矿体和钼矿体有良好的套合。致矿岩体均为高钾钙碱性、过铝质、埃达克性质岩石, 具有相似的右倾型稀土元素配分模式。

(3) 矿床之间的差异性特征则可为勘查不同构造环境中产出的斑岩型铜矿床提供参考。如致矿岩体的硅碱成分、稀土元素配分模式、Sr-Nd 同位素表现出与产出环境一致的变化规律; El Teniente 矿床的致矿岩体较驱龙矿床和 Oyu Tolgoi 矿床表现出更典型的埃达克岩特征。驱龙矿床未发育 Oyu Tolgoi 矿床和 El Teniente 矿床共有的泥化蚀变, 可能与其形成环境有关, 也可能与剥蚀有关。

**致谢:** 在本文研究过程中得到长安大学赵联党、中国科学院广州地球化学研究所肖兵、中国地质科学院王云峰等博士的帮助, 中国地质大学(北京)郑有业教授以及匿名审稿人提出的大量中肯和建设性的修改意见, 对本文的改进和最终定稿起到了重要的作用, 在此一并表示衷心感谢。

### 参考文献(References):

- 高顺宝, 郑有业. 2006. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床成矿作用的地球化学控制. 地质科技情报, 25(2): 41-46.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. 矿床地质, 21(1): 1-12.
- 孟祥金. 2004. 西藏碰撞造山带内底斯中新世斑岩铜矿成

- 矿作用研究. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 38-44.
- 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-矽卡岩铜钼矿床. 北京: 科学出版社: 67-73.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿 成矿作用、勘查方向与资源潜力. 地球学报, 38(5): 571-613.
- 杨波, 赵元艺. 2017. 南蒙古欧玉陶勒盖斑岩型矿床研究进展. 地质通报, 36(1): 90-111.
- 杨志明, 侯增谦, 李振清, 宋玉财, 谢玉玲. 2008a. 西藏驱龙斑岩铜钼矿床中 UST 石英的发现: 初始岩浆流体的直接记录. 矿床地质, 27(2): 188-199.
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代祥, 潘凤雏. 2008b. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿. 矿床地质, 27(3): 279-318.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 张德会, 刘士毅, 王全明, 刘家军, 程志中, 李超岭, 肖克炎, 甄世民, 杜泽忠, 陈正乐. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法. 北京: 地质出版社: 1-12.
- 张金树, 多吉, 何政伟, 唐菊兴. 2009. 西藏驱龙斑岩型铜(钼)矿床矿化特征及远景预测. 世界地质, 28(4): 460-466.
- 郑有业, 薛迎喜, 程力军, 樊子琿, 高顺宝. 2004. 西藏驱龙超大型斑岩铜(钼)矿床: 发现、特征及意义. 地球科学, 29(1): 103-108.
- Camus F. 1975. Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Economic Geology*, 70(8): 1341-1372.
- Cannell J. 2008. El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. Central Chile: Ph.D. thesis of University of Tasmania: 3.
- Cannell J, Cooke D R, Walshe J L and Stein H. 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. *Economic Geology*, 100(5): 979-1003.
- Chen Y J, Wang P, Li N, Yang Y F and Pirajno F. 2016. The collision-type porphyry Mo deposits in Dabie Shan, China. *Ore Geology Review*, 81(2): 405-430.
- Codelco Ltd. 2017. Codelco annual report 2016. [https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/edic/base/port/inversiones.html](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/inversiones.html).
- Cooke D R and Hollings P. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801-818.
- Crane D and Kavalieris I. 2012. Geologic overview of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au-Mo deposits, Mongolia. *Economic Geology*, 16: 187-213.
- Dolgoplova A, Seltmann R, Armstrong R, Belousova E, Pankhurst R J and Kavalieris I. 2013. Sr-Nd-Pb-Hf isotope systematics of the Hugo Dummett Cu-Au porphyry deposit (Oyu Tolgoi, Mongolia). *Lithos*, 164-167: 47-64.
- Holliday J R and Cooke D R. 2007. Advances in geological models and exploration methods for copper±gold porphyry deposits. *Proceedings of Exploration: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 53: 791-809.
- Khashgerel B E, Kavalieris Imants and Hayashi Ken-ichiro. 2008. Mineralogy, textures, and whole-rock geochemistry of advanced argillic alteration: Hugo Dummett porphyry Cu-Au deposit, Oyu Tolgoi mineral district, Mongolia. *Mineral Deposita*, 43: 913-932.
- Khashgerel B E, Rye R O, Jeffrey H and Imants K. 2006. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi Porphyry Cu-Au system, South Gobi, Mongolia. *Economic Geology*, 101(3): 504-522.
- Large R R, Gemmell B J, Paulick H and Huston D L. 2001. The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96(5): 957-971.
- Maksaev V, Munizaga F, Williams M M, Fanning M, Mathur R, Ruiz J and Zentilli M. 2004. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Re-Os, and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 11: 15-54.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215-224.
- Mitchell A H G. 1973. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones. *Nature*, 245(143): 49-52.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Poter T M. 2016. The geology, structure and mineralisation of the Oyu Tolgoi porphyry copper-gold-molybdenum deposits, Mongolia: A review. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 375-407.
- Richards J. 2016. Clues to hidden copper deposits. *Nature Geoscience*, 9(3): 195-196.
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184-197.

- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Spencer E T, Wilkinson J J, Creaser R A and Seguel J. 2015. The distribution and timing of molybdenite mineralization at the El Teniente Cu-Mo porphyry deposit, Chile. *Economic Geology*, 110(2): 387–421.
- Stern C R, Skewes M A and Arévalo A. 2010. Magmatic evolution of the giant El Teniente Cu-Mo deposit, Central Chile. *Journal of Petrology*, 52(7–8): 1591–1617.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Sun W D, Wang J T, Zhang L P, Zhang C C, Li H, Ling M X, Ding X, Li C Y and Liang H Y. 2017. The formation of porphyry copper deposits. *Acta Geochimica*, 36(1): 9–15.
- Turquoise Hill Resources Ltd. 2017. Oyu Tolgoi 2016 Technical Report. <http://www.turquoisehill.com>.
- Vry V H, Wilkinson J J, Seguel J and Millan J. 2010. Multistage intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a nested porphyry system. *Economic Geology*, 105(1): 119–153.
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, Chang Z S, Li Z Q and Song Y C. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper–molybdenum deposit at Qulong, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 36: 133–159.

## Initial Approach to Establish the Identification Criteria System for Exploration of Porphyry Cu Deposits

LI Shasha<sup>1, 2, 3</sup>, CHEN Huayong<sup>1\*</sup> and WANG Liming<sup>4</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangdong Nonferrous Metal's Geological Exploration Institution, Guangzhou 510080, Guangdong, China; 4. Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

**Abstract:** Porphyry Cu deposits are significant reserves of copper, gold and molybdenum in the world, and have been of the highest interest in both research and exploration in the past decades. However, connections between these studies and exploration methods, especially those widely used methods such as exploration geochemistry and geophysics, have hardly been established, and therefore, restricted exploration efficiency. To address this issue, we tried to establish an identification criteria system for exploration of porphyry copper deposits (ICEPD). We choose three representative deposits from different metallogenic belts, the El Teniente porphyry deposit in the East Circum Pacific belt, the Qulong porphyry deposit in the Tethyan belt, and the Oyu Tolgoi porphyry deposit in the Central Asian belt, to make comprehensive comparisons of the characteristics of geology and ore-related intrusions geochemistry and summarize their common and different features. The common features and differences will be discussed as general and discriminated prospects in initial stage of building ICEPD. These three deposits all have potassic zone, prophylic zone and phyllic zone. Copper is preferentially concentrated in potassic zone and phyllic zone, while molybdenum in sericitic zone and quartz-sericitic zone, and gold in potassic zone. Sulfides show a clear spatial distribution, i.e., varying from bornite, to chalcopyrite (+bornite), and to pyrite dominated from ore central outwards, with overlapping copper and molybdenum mineralization. Base on geochemistry database, we present a method and procedure for data selecting and screening to guarantee the data validity. Causative intrusions commonly consist of plagioclase phenocrysts (30%–50%) and quartz - k-feldspar (60%) in the groundmass. These intrusions are all high-K calc-alkaline and peraluminous with adakitic features, characterized by moderately fractionated REE patterns and enriched LREE, moreover, their silica and alkali compositions, fractionated REE patterns, and Sr-Nd isotope compositions are consistent with tectonic settings. The ore-related intrusion of the El Teniente deposit is more adakitic than those of other two deposits. Overall, this initial attempt to build ICEPD laid the basis for further study.

**Keywords:** porphyry copper deposits; identification criteria system for exploration; alteration zones; geochemistry of ore-related intrusions