

玉龙斑岩 Cu-Mo 矿床精矿中 Au、Pd、Pt 富集特征

刘申态¹, 黄明亮²

1. 西藏玉龙铜业股份有限公司, 西藏 昌都 854000;

2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

摘要: 查明斑岩型铜矿床伴生的关键金属资源赋存特征, 对综合利用伴生关键金属具有重要意义。本文以西藏玉龙超大型斑岩型 Cu-Mo 矿床为例, 对选矿过程中获得的铜精矿和钼精矿样品的铂族元素(PGE)和金(Au)进行了分析测试, 并对其富集特征和综合利用前景进行了探讨。结果显示, 尽管 PGE 和 Au 在矿石中品位极低, 但在精矿中显著富集(97~464 倍)。在铜精矿(Cu 平均品位为 22.4%)中 Au、Pd 和 Pt 品位分别高达 0.816 g/t、65.0 ng/g 和 10.69 ng/g, 钼精矿(Mo 平均品位大于 10%)中 Au、Pd 和 Pt 品位分别高达 0.558 g/t、23.3 ng/g 和 55.5 ng/g。研究表明, PGE 和 Au 在铜精矿、钼精矿中具选择性富集特征, 即 Au 和 Pd 多富集在铜精矿中, Pt 多富集在钼精矿中。根据 PGE 和 Au 在精矿中的品位并结合玉龙矿的 Cu、Mo 储量, 估算出其伴生的 Pd、Pt 和 Au 的金属储量分别为 0.97、0.15 和 17.0 t, 表明这些元素均具有较好的综合利用潜力。

关键词: 铂族元素; 玉龙超大型斑岩 Cu-Mo 矿床; 综合利用

中图分类号: P595 P618.41 文章编号: 1007-2802(2022)03-0540-07 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.012

Enrichment Characteristics of Au, Pd and Pt in Floatation Concentrates of the Yulong Porphyry Cu-Mo Mine: A Reconnaissance Study

LIU Shen-tai¹, HUANG Ming-liang²

1. Tibet Yulong Copper Co., Ltd., Qamdo, Tibet 854000, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: It is of great significance for comprehensive utilization of the associated critical metals to identify the occurrence characteristics of the associated critical metals in porphyry copper deposits. Taking the Yulong super-large porphyry Cu-Mo deposit in Tibet as an example, the PGE and Au of copper concentrate and molybdenum concentrate samples obtained in the beneficiation processes have been studied, and their comprehensive utilization prospect was discussed in this paper. The analytical results show that though PGE and Au grades of ores are very low, those of floatation concentrates are significantly upgraded (97-464 times). Specifically, the maximum Au, Pd and Pt grades of the Cu concentrates (with average Cu grade of 22.4%) are 0.816, 65.0 and 10.69 ng/g, respectively, whereas those of the Mo concentrates are 0.558%, 23.3 ng/g, and 55.5 ng/g, respectively. This research indicates that the PGE and Au are selectively enriched in the floatation concentrates, as Au and Pd are relatively enriched in the Cu concentrate, whereas Pt is relatively concentrated in the Mo concentrate. According to the grades of PGE and Au in floatation concentrates and the Cu and Mo reserves of the Yulong mine, the estimated resources of the associated Pd, Pt, and Au metals are 0.97, 0.15 and 17.0 t, respectively. It is believed that Pd, Pt, and Au in the floatation concentrates of the mine should have good comprehensive recycling and utilization potential.

Key words: platinum group elements; Yulong porphyry Cu-Mo deposit; comprehensive utilization

收稿编号: 2021-159 2021-11-15 收到 2022-2-8 改回

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(91955209); 中国科学院“一带一路”团队项目; 中国博士后科学基金资助项目(2020M673301)

第一作者简介: 刘申态(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事成矿预测及矿山管理工作。E-mail: lstwxx@qq.com.

0 引言

斑岩型 Cu(Mo-Au) 矿床提供了全球超过 60% 的 Cu、50% 的 Mo 和 20% 的 Au, 是全球最重要的矿床类型之一(Sillitoe, 2010)。该类矿床的矿化主要发生在与成矿相关的、发生强烈热液蚀变的中酸性斑岩体中, 其 Cu-Mo-Au 等金属元素品位通常较低(如 Cu 品位一般低于 1%) , 但矿石量规模巨大。近年来, 该类矿床中伴生的关键金属种类、含量、伴生利用价值、赋存状态等特征逐渐受到重视(李晓峰等, 2003; John and Taylor, 2016; 杨志明等, 2020)。研究表明, 尽管伴生的关键金属元素含量较低, 但由于矿石量巨大, 且在矿石选冶过程中, 这些元素会随 Cu 等主要成矿元素一起在铜(钼)精矿中发生显著富集, 从而也可能具有重要的综合利用价值。有统计显示, 作为副产品, 全球超过 80% 的 Re 和几乎所有的 Se 和 Te 都来自斑岩型铜矿床的综合利用(John and Taylor, 2016)。

相比之下, 斑岩型铜矿床却被认为难以成为全球主要的铂族元素(PGE)来源(John and Taylor, 2016), 一方面是由于 PGE 在基性-超基性岩相关的岩浆矿床中的品位相对较高、更易综合利用, 另一方面也受限于对斑岩型矿床中 PGE 含量和选冶过程中 PGE 的富集程度认识的匮乏。尽管如此, 也有研究显示, PGE 在部分斑岩铜矿床中的品位较高(Tarkian and Stribny, 1999), 希腊 Skouries 斑岩 Cu-Au 矿中, 矿石的 Pd 品位可达 480 ng/g(Eliopoulos and Economou-Eliopoulos, 1991; Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2000); 菲律宾 Santo Tomas II 斑岩铜矿床矿石中的 Pd 和 Pt 品位分别可达 160 ng/g 和 38 ng/g, 主要的 PGE 矿物为碲钨矿(Tarkian and Koopmann, 1995); 保加利亚 Elatsite 斑岩铜矿床矿石中的 Pd 和 Pt 品位分别为 7 ng/g 和 2 ng/g, 精矿中 Pd 和 Pt 的品位可高达 740 ng/g 和 155 ng/g(Tarkian et al., 2003)。我国有明确数据报道的矿床中, 德兴铜矿床矿石 PGE(Pd+Pt) 品位最高可达 240 ng/g(梁有彬和李艺, 1997), 土屋斑岩 Cu-Au 矿床成矿闪长岩中的 PGE(Pd+Pt) 品位大部分为 0.7~2.4 ng/g, 最高可达 21.7 ng/g(Gao et al., 2015), 普朗斑岩 Cu-Au 矿床弱矿化成矿斑岩中的 PGE 总品位为 1.5~5.6 ng/g(Leng et al., 2018)。上述研究表明, 斑岩型铜矿床中也伴生有品位可观的 PGE, 其潜在储量及综合利用价值亟需进一步研究。

西藏玉龙斑岩型 Cu-Mo 矿床是我国第三大铜

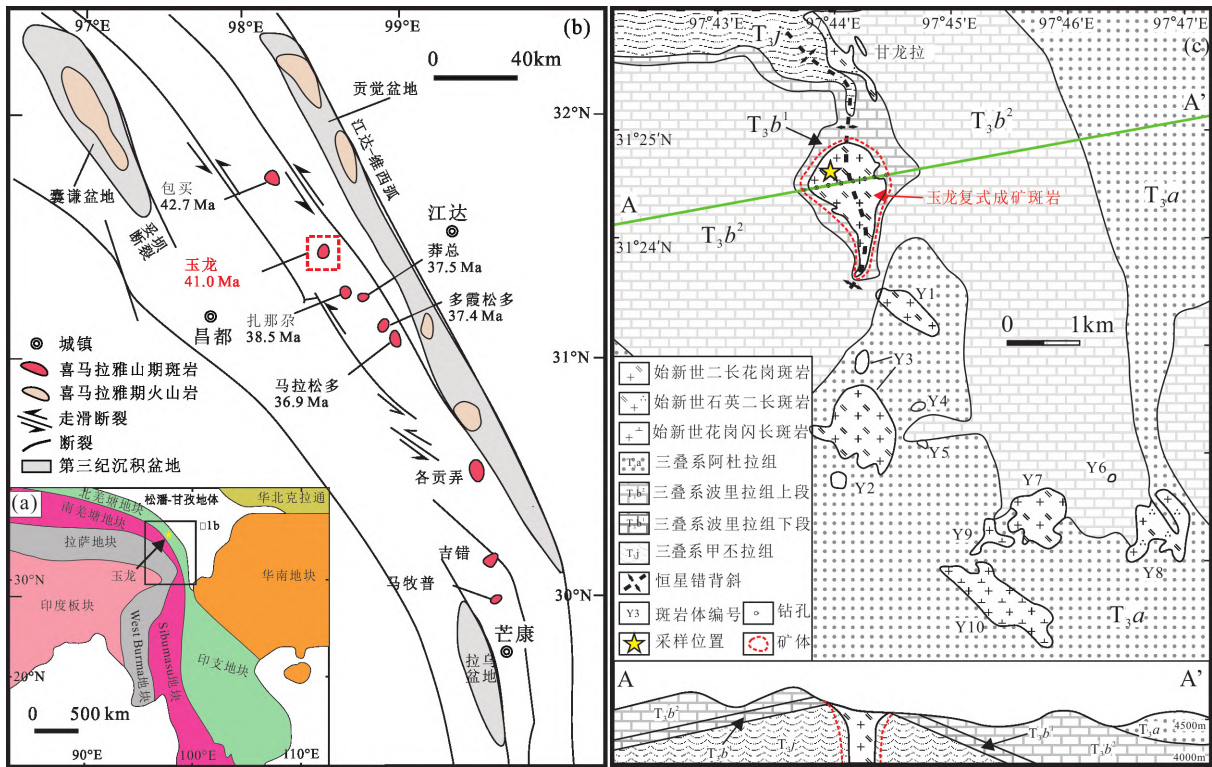
矿床, 其 Cu 储量达 624 万 t, Mo 储量达 41 万 t, 均达超大型规模(西藏玉龙铜业股份有限公司, 2009)。本文选取矿山生产过程中通过浮选获取的铜精矿、钼精矿和矿山尾矿样品, 对其开展了 PGE 和 Au 元素含量分析。并在此基础上, 估算了 PGE 和 Au 的潜在资源量, 探讨了该矿床中 PGE 和 Au 的综合利用前景, 以期深入了解斑岩铜矿床中关键金属资源提供数据支撑。

1 区域地质背景与矿床地质特征

玉龙斑岩型 Cu-Mo 矿床位于西藏自治区江达县, 大地构造位置上位于北羌塘-昌都地块东部(图 1a)。该地块北东侧以金沙江缝合带为界与义敦地体、松潘-甘孜地体相接, 南西侧以龙木措-双湖缝合带为界与南羌塘地块相接(图 1a)。玉龙 Cu-Mo 矿床所处的北羌塘地块东部, 基底由元古界和下古生界结晶基底组成, 前者主要为高绿片岩相-低角闪岩相变质岩, 后者主要为奥陶系变质砂板岩和碳酸盐岩(Hou et al., 2003)。区域盖层从上古生界至新生界地层均有, 包括石炭系-二叠系近连续的浅海相碳酸盐岩夹砂页岩, 三叠系火山碎屑岩和砂泥岩夹碳酸盐岩, 侏罗系-白垩系杂色碎屑岩、红色碎屑岩和碳酸盐岩, 以及古近系-新近系紫红、灰褐色砾岩、砂岩、粉砂岩与火山岩(唐仁鲤和罗怀松, 1995; Hou et al., 2003)。

区内岩浆活动发育, 主要与石炭纪-早三叠世古特提斯洋的俯冲闭合, 始新世印-亚大陆的碰撞的陆内挤压走滑相关(唐仁鲤和罗怀松, 1995; Hou et al., 2003)。前者以大规模出露的火山岩及侵入岩为主, 主要分布在北羌塘东部江达地区, 构成江达-维西弧岩浆岩带的北段(图 1b)。后者多以小规模的岩株形式产出在北西-南东向展布的恒星错-玉龙-贡觉-芒康一带, 露头规模较小, 但广泛发育斑岩型 Cu-Mo 矿化, 构成了著名的玉龙斑岩铜矿带(唐仁鲤和罗怀松, 1995; 张世铭等, 2012)。目前带内已发现超大型斑岩铜矿床 1 处、大型 5 处, 小型矿床及矿化点十余处(图 1b)(Huang et al., 2019)。

玉龙铜矿带与我国滇西地区喜马拉雅期富碱斑岩及相关的斑岩型 Cu-Mo-Au 矿床具有相近的成岩成矿时代(Lu et al., 2013; 马瑞等, 2020), 共同构成了三江地区金沙江-哀牢山喜马拉雅期陆内斑岩铜矿带(Xu et al., 2012)。玉龙铜矿是斑岩铜矿带内规模最大的斑岩型 Cu-Mo 矿床, 其 Cu 平均品位 0.64%, 储量达 624 万 t, Mo 平均品位 0.041%, 储量达 41 万 t, 均达到超大型规模(西藏玉龙铜业股



(a) 据 Metcalfe (2013); (b) 斑岩铜矿床分布及年龄数据引自 Liang 等 (2006); (c) 据 Huang 等 (2019)

图 1 青藏高原东南缘大地构造简图 (a) 及玉龙铜矿带 (b) 和玉龙矿区 (c) 地质简图

Fig. 1 The tectonic sketch map of the southeastern Tibetan Plateau (a), and simplified geological map of the Yulong copper metallogenic belt (b) and the Yulong ore deposit (c)

份有限公司 2009)。Cu-Mo 矿化主要发育在玉龙复式斑岩体内部及其与三叠系碳酸盐岩接触带附近的矽卡岩型矿体中(图 1c),其中斑岩型矿体(即矿山 I 号矿体)Cu 储量达 523 万 t,Mo 储量达 40.7 万 t(西藏玉龙铜业股份有限公司 2009)。斑岩型矿石类型以细脉浸染状为主,黄铜矿、辉钼矿等矿石矿物产于石英-硫化物脉中(图 2)。研究表明,玉龙复式斑岩体由二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩、石英钠

长斑岩等多个岩相组成,成矿作用主要与二长花岗斑岩相关(Hou et al., 2003; Liang et al., 2006; Chang et al., 2017)。锆石 U-Pb 及辉钼矿 Re-Os 同位素年代学研究表明,包括二长花岗斑岩在内的多个岩相均形成于 41 Ma 左右,矿化作用与岩浆侵入基本同期或稍晚,发生在 40.1 ~ 41.6 Ma(Liang et al., 2006; Hou et al., 2006)。

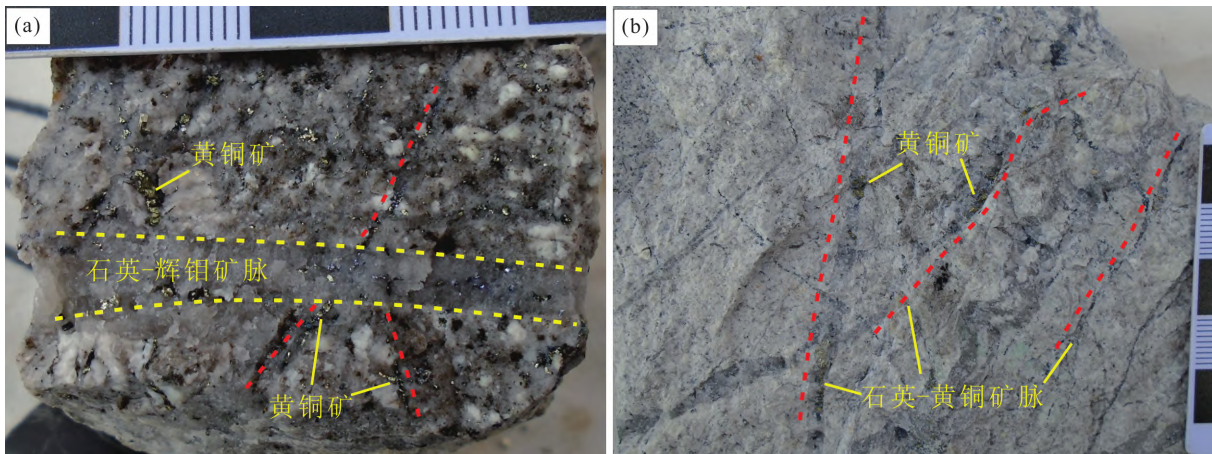


图 2 玉龙铜矿代表性斑岩矿石手标本照片

Fig. 2 Photos of representative porphyry ores in the Yulong copper deposit

2 样品与分析方法

本文进行 PGE 和 Au 含量测试分析的样品共 7 件,为玉龙 Cu-Mo 矿床矿山生产过程中获得的铜精矿 3 件(Cu 平均品位 22.4%)、钼精矿 3 件(Mo 平均品位大于 10%)及尾矿样品 1 件,用于进行 Au 品位测试的斑岩型矿石有 11 件。

铜精矿、钼精矿及尾矿样品的 Cu-Mo 含量分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。Cu 采用四酸消解容量法测定,方法代码 Cu-VOL61。试样用盐酸、硝酸分解后,用乙酸铵溶液调节溶液的 pH 值为 3.0~4.0,用氯化氢铵掩蔽铁,加入碘化钾与二价铜作用,析出的碘以淀粉为指示剂,用硫代硫酸钠标准溶液滴定铜含量。检测范围为 0.01%~100%。Mo 采用四酸消解法电感耦合等离子体发射光谱测定,方法代码 Mo-OG62。称取试样于 Teflon 试管中,加入硝酸、高氯酸、氢氟酸和盐酸消解,蒸发至近干;加入盐酸和去离子水,于电热炉上加热,进行进一步消解。消解完并待溶液冷却后,用容量瓶定容,然后用电感耦合等离子体发射光谱仪检测。检测范围为 0.001%~10%。

精矿及斑岩型矿石的 Au 含量测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成。采用火试金原子吸收光谱法测定,方法代码为 Au-ICP21。首先,向样品中加入由氧化铅、碳酸钠、硼砂、石英砂及其他试剂混合组成的熔剂,再加入不含金的银,然后高温熔融和灰吹至生成金银合珠。往金银合珠加入稀释的硝酸,置于微波炉中进行消解去银后,然后加入浓盐酸进一步消解溶金。消解完并待溶液冷却后,用去离子水稀释定容,再用原子吸收光谱仪分析。仪器测试曲线由匹配母体标准溶液构成。Au 含量检测范围为 0.005~10.0 g/t。

铜精矿、钼精矿及尾矿样品的 PGE 含量测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。首先,在特氟龙罐子中准确称量约 8 g 样品粉末,加入适量纯水并适当摇晃,使粉末呈泥浆状、不结块,然后缓慢加入足量 HF 去硅。蒸干后加入适量的含¹⁹³Ir、¹⁰¹Ru、¹⁹⁴Pt 和¹⁰⁵Pd 的稀释剂,再加入 5 mL HF 和 15 mL HNO₃,随后将罐子放入不锈钢套中密闭,放入烘箱,在 185 °C 下消解 36 h。待凉后将特氟龙罐子取出,加入 2 mL HCl 并蒸干,再加入 5 mL HCl 并再蒸干,随后用 40 mL 2 mol/L HCl 将样品溶解,转移至试管中并定容至 50 mL,在 2800 转/分钟条件下离心 6 min。将上清液倒回特

氟龙罐子中,加入约 1 mL Te 溶液和过量 SnCl₂ 溶液进行 Te 共沉淀,随后加入纯水至罐子 1/2 处,加盖加热 40 min,完成后再加入 1 mL Te 溶液。随后用滤膜抽滤得到黑色沉淀并放入特氟龙罐子中,用 HCl 和 HNO₃ 将沉淀溶解,取出滤膜,将溶液蒸干,并趁热加入适量 HNO₃ 和 HCl,转移至 15 mL 试管中,定容至 10 mL,离心 2 min 后将上清液上柱(Dowex 50W-X8 阳离子交换树脂),用特氟龙罐子收集溶液,蒸干至 1 滴时转移到 15 mL 试管,定容至 3 mL 待测。分析仪器为 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e ICP-MS。国际标样 UMT-1、TDB-1、空白样与样品一同消解、测试,以检验测试结果。Pd、Pt、Ir 和 Rh 的检测限分别为:0.012、0.014、0.004 和 0.006 ng/g。具体测试流程见 Qi 等(2011)。

3 分析结果

11 件矿化斑岩样品的 Cu-Au-PGE 品位数据见表 1。可见样品的 Au 含量为 0.001~0.008 g/t,平均(0.005±0.003) g/t,这一数值接近检测限,表明样品的 Au 品位较低,该数据仅作为参考。Cu 品位与 PGE 含量之间相关性见图 3。

表 1 玉龙铜矿斑岩型矿石 PGE 和 Cu-Mo-Au 品位
Table 1 Grades of PGE and Cu-Mo-Au of porphyry-type ores at Yulong

样品号	Au	Cu	Mo	PGE/(ng/g)		
	/(g/t)	/%	/(g/t)	Pt	Pd	Σ(Pd+Pt)
YL1522	0.002	0.0672	6.14	0.10	0.32	0.42
YL1523	0.004	0.0269	8.95	0.04	0.20	0.24
YL1524	0.007	0.1450	3.26	0.17	0.33	0.50
YL1525	0.001	0.0666	6.08	0.11	0.26	0.37
YL1525-4	0.007	0.2580	2.58	0.13	0.41	0.54
YL1525-7	0.002	0.0557	1.62	0.12	0.21	0.33
YL1528-2-1	0.006	0.0609	2.36	0.06	0.19	0.25
YL1528-2-2	0.004	0.1180	2.18	0.11	0.34	0.45
YL1530	0.004	0.5190	5.62	0.13	0.40	0.53
YL1552-26	0.008	0.2060	166.50	0.09	0.22	0.31
YL1552-3	0.008	0.1210	26.90	0.09	0.60	0.69

注: Au 品位数据为本次数据,其他元素品位数据引自 Huang 等(2019, 2020)。

7 个精矿及尾矿样品的 Cu、Mo、Au、PGE 含量分析结果列于表 2。对于 PGE 含量,由于 Ir、Ru、Rh 三个元素的含量较低,靠近检测限,因此本文重点关注 Pd、Pt 两个元素。

3 件铜精矿样品的 Cu 品位为 21.6%~23.6%,平均(22.4±1.1)%; Mo 品位为 0.134%~0.376%,平均(0.291±0.136)%; Au 品位为 0.789~0.816 g/t,平均(0.799±0.015) g/t; Pd 品位为 33.5~65.0

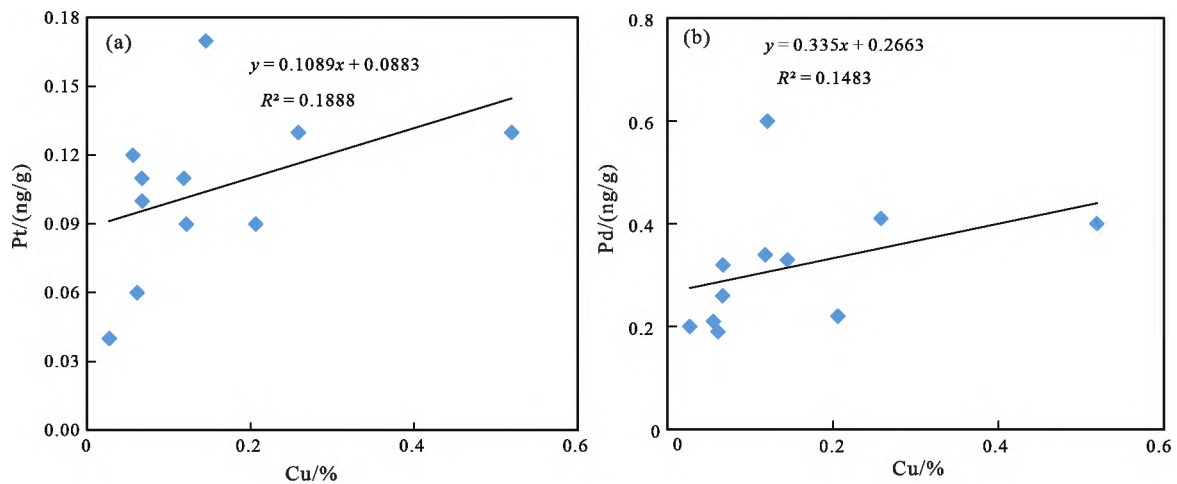


图3 玉龙弱矿化斑岩中 PGE 和 Cu 品位相关图

Fig. 3 Plots of PGE and Cu grades in weakly mineralized porphyry rocks at Yulong

表2 玉龙铜矿精矿中 PGE、Au 和 Cu-Mo 品位

Table 2 Grades of PGE, Au and Cu-Mo of floatation concentrates at Yulong

样品号	样品类型	Pd/(ng/g)	Ir/(ng/g)	Pt/(ng/g)	Rh/(ng/g)	Au/(g/t)	Cu/%	Mo/%
YL-1	铜精矿	64.99	0.03	10.69	0.09	0.789	21.56	0.376
YL-2		39.54	0.03	4.51	0.10	0.816	21.92	0.364
YL-3		33.48	0.02	2.74	0.05	0.792	23.57	0.134
YL-4	钼精矿	17.61	0.12	43.81	0.06	0.558	1.20	>10.0
YL-5		23.26	0.09	55.45	0.07	0.408	5.61	>10.0
YL-6		14.59	0.08	46.96	0.01			
YL-7	尾矿	0.65	0.00	0.16	0.01	0.069	0.07	0.01
BLK		0.05	0.01	0.02	0.03			
BLK126	流程空白	0.01	0.01	0.01	0.01			
BLK0		0.01	0.01	0.00	0.00			
TDB-1	标样	22.06	0.04	4.67	0.66			

ng/g, 平均值为(46.0±16.7) ng/g; Pt 品位为 2.74~10.69 ng/g, 平均值为(5.98±4.18) ng/g。

3 件钼精矿中 Au 品位为 0.408~0.558 g/t, 平均值为(0.483±0.106) g/t; Pd 品位为 14.6~23.3 ng/g, 平均值为(18.5±4.4) ng/g; Pt 品位为 43.8~55.5 ng/g, 平均值为(48.7±6.0) ng/g; 其中 2 件用于分析 Mo 和 Cu 品位, Mo 品位超出检测限; Cu 品位分别为 1.20% 和 5.61%。

1 件尾矿样品中 Au、Pd、Pt 品位分别为 0.069 g/t、0.653 ng/g 和 0.158 ng/g; Cu、Mo 品位分别为 0.07%、0.01%。

4 讨论

4.1 矿石选冶过程中 PGE、Au 富集特征

在 Cu-Mo 矿石选冶过程中, 矿石内伴生的关键金属元素会随 Cu-Mo 等主成矿元素一起在 Cu-Mo 精矿中发生显著富集, 从而具有重要的综合利用价值。本次对玉龙铜矿床铜精矿、钼精矿和尾矿样品

的分析结果进一步证实, 尽管 PGE (<1 ng/g) 和 Au (<0.01 g/t) 在斑岩型 Cu-Mo 矿石中品位非常低 (表 1), 其在选矿所获得的精矿中发生了明显富集 (表 2, 图 4), 相对于矿石 0.005 g/t 的 Au 平均品位, 铜精矿中 Au 平均品位为 0.799 g/t, 富集了约 160 倍; 钼精矿中 Au 平均品位为 0.483 g/t, 富集了约 97 倍。相对于已发表的矿石中 0.105 ng/g 的 Pt 平均品位和 0.316 ng/g 的 Pd 平均品位 (Huang et al., 2020), 铜精矿中的 Pd 平均品位为 46.0 ng/g, 富集了约 145 倍。钼精矿中 Pt 的平均品位为 48.7 ng/g, 富集了约 464 倍。

同时, 本次研究还表明, Au、Pt、Pd 在铜精矿和钼精矿中发生富集的程度存在显著差异, 即发生了选择性富集 (图 4)。尽管铜精矿和钼精矿中的 PGE 和 Au 均发生明显富集, 但铜精矿的 Au-Pd 品位和富集倍数明显高于钼精矿, 而 Pt 品位和富集倍数则显著低于钼精矿。对已发表数据的分析显示, 其他斑岩铜矿床的铜、钼精矿也有这种特征: 我国长江

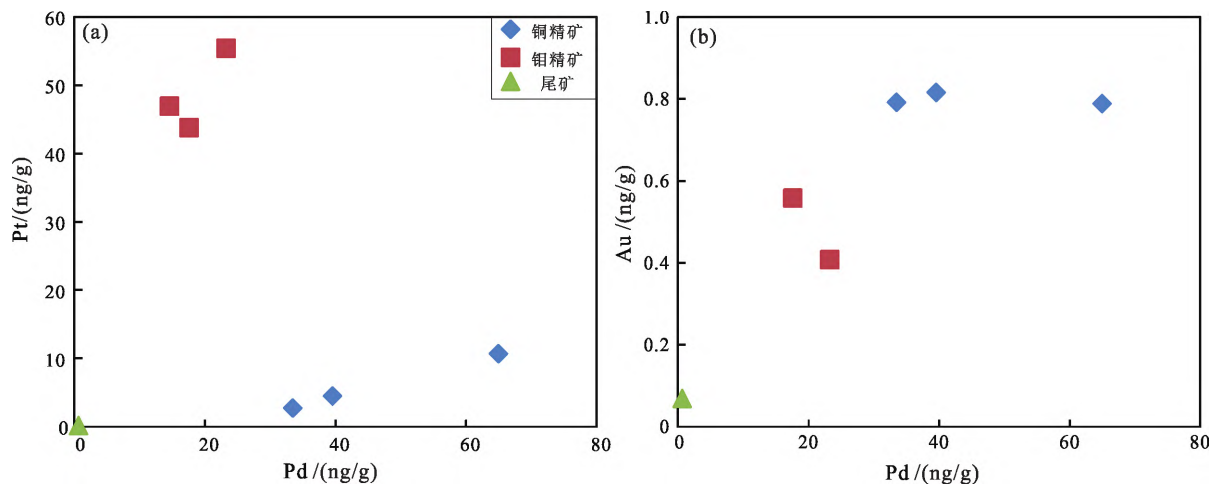


图4 玉龙铜矿精矿中 Pd-Pt (a) 和 Pd-Au (b) 品位相关图

Fig. 4 Plots of grades between Pd-Pt (a) and Pd-Au (b) in floatation concentrates of the Yulong deposit

中下游地区的丰山 Cu-Mo 矿床中, 钼精矿中的 Pt 品位(81.2 ng/g) 高于 Pd(32 ng/g), 而铜精矿的 Pt 品位(5.1~9.0 ng/g) 则低于 Pd(20~27 ng/g) (Wang et al., 2014)。这表明, 在选矿所获得的铜、钼精矿中, PGE 和 Au 发生了选择性富集: Au、Pd 趋向于富集在铜精矿中, 而 Pt 则趋向于富集在钼精矿中。导致这种选择性富集的原因可能有两种: ①与 Cu、Mo 矿石的选矿工艺流程有关; ②与 Pt 和 Pd(Au) 的性质有关。苟体忠等(2010)对云南中甸地区烂泥塘矿床的研究显示, 黄铜矿中 Pd 的含量(1.37~3.19 ng/g) 高于 Pt(0.12~0.64 ng/g); Sotnikov 等(2001)对俄罗斯和蒙古国 Zhireken 等 3 个斑岩矿床的研究表明, 大多数辉钼矿中 Pt 的含量要高于 Pd(Pt/Pd=0.31~12.35, 平均 2.74)。Sotnikov 等(2001)的工作还显示, 矿石中 Cu 与 Pd-Au 之间、Mo 与 Pt 之间有明显的正相关性。这些现象似乎更加支持后一种可能, 即 Au、Pt、Pd 在铜精矿和钼精矿中的选择性富集与元素本身性质有关。

4.2 玉龙铜矿斑岩矿体中伴生 PGE、Au 资源量估算及综合利用前景

玉龙铜矿矿石中的 PGE 和 Au 品位极低, 且与主成矿元素 Cu 之间的品位相关性较差(图 3), 故本文根据其再在精矿中的平均品位估算其资源量。根据西藏玉龙铜业股份有限公司(2009)对玉龙斑岩矿体(即 I 号矿体)已探明的 5.23 Mt 的 Cu 储量和 0.41 Mt 的 Mo 储量, 以及精矿中 Cu、Mo 的回收率(分别为 90%和 85%)和品位(铜精矿的 Cu 品位采用分次分析结果 22.4%; Mo 品位因超出检测限, 故采用矿山勘探报告中的数据 49.2%)(表 2), 并依据 Cu 和 Mo 的质量平衡, 分别估算得出铜、钼精矿

总量。计算方法为: 假设选矿所获得的铜精矿和钼精矿质量分别为 a 和 b (单位: t), 依据矿石与精矿中 Cu 和 Mo 的质量平衡, 则有如下等式:

$$[a \times 22.4\% (\text{铜精矿中铜的品位}) + b \times 3.4\% (\text{钼精矿中铜的品位})] / 0.9 (\text{铜回收率}) = 5230000 \quad (1)$$

$$[a \times 0.29\% (\text{铜精矿中钼的品位}) + b \times 49.2\% (\text{钼精矿中钼的品位})] / 0.85 (\text{钼回收率}) = 410000 \quad (2)$$

对上述方程求解, 可获得铜、钼精矿总量分别为 2093 万 t 和 58 万 t。再根据铜、钼精矿中 PGE 和 Au 的品位, 估算出 Pd、Pt、Au 资源量分别为 0.97、0.15、17.0 t(表 3)。

表 3 玉龙铜矿斑岩型矿石中关键金属元素资源量估算结果
Table 3 The estimated resources of critical metals in porphyry-type ores at Yulong

	Au/t	Pt/t	Pd/t	(Pd+Pt) /t
估算方法	精矿平均品位			
估算结果	17.0	0.15	0.97	1.12

前述分析表明, 经选冶获得的精矿中, PGE 和 Au 的品位会发生显著富集, 这对玉龙铜矿关键金属元素综合利用具有重要意义。根据上述讨论, Au、Pd 较易富集在铜精矿中, 因而铜精矿具有较高的 Au、Pd 综合利用潜力; 钼精矿中 Pt 较富集, 因而钼精矿具有较高的 Pt 综合利用潜力。这一现象对其他斑岩型矿床中 PGE 和 Au 的综合利用可能也有指导意义。受分析方法所限, 本次研究未能测得精矿中的 Re、Se、Te 品位, 因而未能揭示其在所选精矿中的富集程度。考虑到 Re 主要赋存于辉钼矿中, 推测钼精矿中的 Re 品位可能会显著高于矿石, 因此钼精矿中的 Re 可能可以综合利用。

本次研究还表明, 玉龙铜矿尾矿中的 PGE(Pd+

Pt) 和 Au 品位依然较高, 分别达 0.81 ng/g 和 0.069 g/t, 均高于矿石中 PGE 和 Au 品位(表 1), 表明矿山目前采用的选矿工艺仍有改进空间。在铜、钼精矿交易过程中, Au 品位达到 1 g/t 即可同时参与计价。本次研究显示, 目前玉龙铜精矿中的 Au 品位已达到 0.789~0.816 g/t, 若合理改进铜矿石的选矿工艺, 使铜精矿中的 Au 品位达到计价标准, 则可在成本基本不变的情况下, 有效避免铜精矿中 Au 资源的浪费, 增加矿山经济效益。

5 结论

(1) 对西藏玉龙超大型斑岩 Cu-Mo 矿床选矿所获精矿中的 PGE 和 Au 品位分析显示, 相对于斑岩型矿石, 精矿中的 PGE 和 Au 有显著的选择性富集(97~464 倍)特征。铜精矿较富 Au、Pd(品位分别高达 0.816 g/t 和 65.0 ng/g), Pt 品位则较低(最高为 10.69 ng/g); 钼精矿较富 Pt(品位高达 55.5 ng/g), 而 Au 和 Pd 品位则较低(最高分别为 0.558 g/t 和 23.3 ng/g)。

(2) 根据 PGE 和 Au 在精矿中的品位并结合玉龙矿床的 Cu、Mo 储量, 估算出该矿床的 Pd、Pt、Au 金属量分别为 0.97、0.15、17.0 t, 具有较好的综合利用潜力。

致谢: 玉龙铜业有限公司廖勋、周菲、马国军等在野外考察和样品采集过程中给予了大力支持, 矿床地球化学国家重点实验室王大鹏工程师在铂族元素分析测试工作中给予了很多帮助, 在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

Chang J, Li J W, Selby D, Liu J C, Deng X D. 2017. Geological and chronological constraints on the long-lived Eocene Yulong porphyry Cu-Mo deposit, eastern Tibet: implications for the lifespan of giant porphyry Cu deposits. *Economic Geology*, 112: 1719-1746

Economou-Eliopoulos M, Eliopoulos D G. 2000. Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance. *Ore Geology Reviews*, 16(1-2): 59-70

Eliopoulos D G, Economou-Eliopoulos M. 1991. Platinum-group element and gold contents in the Skouries porphyry copper deposit, Chalkidiki peninsula, Northern Greece. *Economic Geology*, 86(4): 740-749

Gao J F, Zhou M F, Qi L, Chen W T, Huang X W. 2015. Chalcophile elemental compositions and origin of the Tuwu porphyry Cu deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 66: 403-421

Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T, Tang R L. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Prod-

uct of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125-145

Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du A D, Fu D M. 2006. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite. *Mineralium Deposita*, 41(1): 33-45

Huang M L, Bi X W, Hu R Z, Gao J F, Xu L L, Zhu J J, Shang L B. 2019. Geochemistry, in-situ Sr-Nd-Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on origin and magmatic-hydrothermal evolution of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit, Eastern Tibet. *Gondwana Research*, 76: 98-114

Huang M L, Gao J F, Bi X W, Xu L L, Zhu J J, Wang D P. 2020. The role of early sulfide saturation in the formation of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit: Evidence from mineralogy of sulfide melt inclusions and platinum-group element geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 124: 103644

John D A, Taylor R D. 2016. By-products of porphyry copper and molybdenum deposits: Chapter 7. *Rev., Econ., Geol.*, 18: 137-164

Leng C B, Gao J F, Chen W T, Zhang X C, Tian Z D, Guo J H. 2018. Platinum-group elements, zircon Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on magmatic evolution of the Pulang porphyry Cu-Au system, SW China. *Gondwana Research*, 62: 163-177

Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 41(2): 152-159

Lu Y J, Kerrich R, Kemp A I S, McCuaig T C, Hou Z Q, Hart C J R, Li Z X, Cawood P A, Bagas L, Yang Z M, Cliff J, Belousova E A, Jourdan F, Evans N J. 2013. Intracontinental Eocene-Oligocene porphyry Cu mineral systems of Yunnan, western Yangtze Craton, China: Compositional characteristics, sources, and implications for continental collision metallogeny. *Economic Geology*, 108(7): 1541-1576. doi: 10.2113/econgeo.108.7.1541

Metcalf I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33

Qi L, Gao J F, Huang X W, Hu J, Zhou M F, Zhong H. 2011. An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(9): 1900-1904

Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41

Sotnikov V I, Berzina A N, Economou-Eliopoulos M, Eliopoulos D G. 2001. Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu±Mo deposits of Russia and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 18(1-2): 95-111

Tarkian M, Koopmann G. 1995. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines. *Mineralium Deposita*, 30(1): 39-47

Tarkian M, Stribny B. 1999. Platinum-group elements in porphyry copper deposits: A reconnaissance study. *Mineralogy and Petrology*, 65(3): 161-183

(下转第 571 页)

-662

- 史富强, 朱祥坤, 闫斌, 刘燕群, 张飞飞, 赵妮娜, 褚明恺. 2016. 湖南湘潭锰矿的地球化学特征及成矿机制. 岩石矿物学杂志, 35(3): 443-456
- 王丹. 2015. 黔东地区新元古代“大塘坡式”锰矿沉积地球化学条件研究. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 1-59
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社, 1-146
- 王剑, 段太忠, 谢渊, 汪正江, 郝明, 刘伟. 2012. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义. 地质通报, 31(11): 1739-1749
- 杨瑞东, 欧阳自远, 朱立军, 王世杰, 姜立君, 张位华, 高慧. 2002. 早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识. 矿物学报, 22(4): 329-334
- 杨瑞东, 高军波, 程玛莉, 魏怀瑞, 许利群, 文雪峰, 魏晓. 2010. 贵州从江高增新元古代大塘坡组锰矿沉积地球化学特征. 地质学报, 84(12): 1781-1790
- 余文超, 杜远生, 周琦, 彭头平, 王萍, 袁良军, 徐源, 潘文, 谢小峰, 齐靓. 2016. 黔东松桃南华系大塘坡组锰矿层物源: 来自 Sr 同位素的证据. 地球科学, 41(7): 1110-1120
- 张飞飞, 闫斌, 郭跃玲, 朱祥坤, 周琦, 杨德智. 2013. 湖北古城锰矿的沉淀形式及其古环境意义. 地质学报, 87(2): 245-258
- 张飞飞. 2014. 华南山华系含锰建造的形成机制与南华纪间冰期海洋的氧化还原状态. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1

-121

- 赵广涛, 何雨阳, 陈淳, 李德平, 徐翠玲, 陆建国, 吴晓. 2011. 太平洋铁锰结核与富 Co 结壳的矿物地球化学比较研究. 中国海洋大学学报, 41(5): 85-93
- 赵志强, 凌云, 李核良, 蒋凯, 李杰, 蔡柯柯, 廖洪. 2019. 重庆秀山小茶园大塘坡组合锰岩系地球化学特征及地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 38(2): 330-341
- 郑杰. 2019. 黔东北地区大塘坡式锰矿床沉积相分析. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 1-91
- 周克林, 付勇, 叶远谋, 龙克树, 周文喜. 2019. 贵州寒武纪早期含磷岩系稀土富集特征. 矿物学报, 39(4): 420-431
- 周琦, 杜远生, 覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例. 矿床地质, 32(3): 457-466
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 张遂, 余文超, 杨胜堂, 刘雨. 2016. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用. 地球科学, 41(2): 177-188
- 朱祥坤, 彭乾云, 张仁彪, 安正泽, 张飞飞, 闫斌, 李津, 高兆富, 覃英, 潘文. 2013. 贵州省松桃县道坨超大型锰矿床地质地球化学特征. 地质学报, 87(9): 1335-1348

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

(上接第 546 页)

- Tarkian M, Hünken U, Tokmakchieva M, Bogdanov K. 2003. Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria. Mineralium Deposita, 38(3): 261-281
- Wang M F, Gutzmer J, Michalak P P, Guo X N, Xiao F, Wang W, Liu K. 2014. PGE geochemistry of the Fengshan porphyry-skarn Cu-Mo deposit, Hubei Province, Eastern China. Ore Geology Reviews, 56: 1-12
- Xu L L, Bi X W, Hu R Z, Zhang X C, Su W C, Qu W J, Hu Z C, Tang Y Y. 2012. Relationships between porphyry Cu-Mo mineralization in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt and tectonic activity: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. Ore Geology Reviews, 48: 460-473
- 苟体忠, 钟宏, 冷成彪, 吴孔文. 2010. 云南中甸地区烂泥塘低热液型 Cu-Au 矿床铂族元素(PGE) 地球化学特征. 矿物学报, 30(3): 319-323
- 李晓峰, 毛景文, 张作衡. 2003. 斑岩铜矿中铂族元素的研究现状及展望. 矿床地质, 22(1): 95-98

- 梁有彬, 李艺. 1997. 中国铂族元素矿床类型和地质特征. 矿产与地质, 11(3): 145-151
- 马瑞, 黄明亮, 胥磊落, 毕献武, 刘龚. 2020. 扬子克拉通西缘新生代幔源钾质-超钾质岩岩浆氧逸度及其对陆内斑岩成矿作用的启示. 矿物岩石地球化学通报, 39(4): 794-809
- 唐仁鲤, 罗怀松. 1995. 西藏玉龙斑岩铜(钼) 矿带地质. 北京: 地质出版社, 1-320
- 西藏玉龙铜业股份有限公司. 2009. 西藏自治区江达县玉龙矿区铜矿勘探报告(内部资料)
- 杨志明, 侯增谦, 周利敏, 周怿惟. 2020. 中国斑岩铜矿床中的主要关键矿产. 科学通报, 65(33): 3653-3664
- 张世铭, 肖渊甫, 龚婷婷, 何佳乐, 王强, 张林, 孙建东. 2012. 西藏玉龙成矿带各贡弄、恒星错、马牧普地球化学异常优选评价. 矿物岩石地球化学通报, 31(4): 354-360

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)