

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.145>



三江造山带普朗斑岩型铜金钼矿床硒 碲富集规律及其资源前景评估

王雷¹, 韦金花¹, 欧阳荷根^{1,2*}, 吴练荣³, 赵晓瑜¹, 杨帆⁴, 沃拥军⁴, 谢桂青²

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南香格里拉 674400

4. 中铜矿产资源有限公司, 云南昆明 650051

摘要: 近年来, 普朗超大型斑岩铜多金属矿床(Cu-An-Mo)的硒(Se)和碲(Te)的富集现象备受关注, 但资源前景与综合利用价值尚不明确。本研究采用 LA-ICP-MS 和 ME-MS61r 等方法, 系统探究了该矿床 Se 和 Te 的主要载体矿物与空间分布规律, 并对其资源前景进行了评估。研究发现, Se 主要富集于黄铜矿和辉钼矿, Te 主要寄主矿物为辉钼矿。空间分布上, 主矿段硫化物的 Se 和 Te 含量显著高于东部矿段; 但在单一勘探线剖面上, 两者含量随深度变化无明显规律。从综合利用价值来看, 铜精矿 Se 含量为 $170 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 、钼精矿为 250×10^{-6} , 均达到伴生 Se 矿综合回收指标; 铜精矿 Te 含量为 $3.6 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-6}$, 钼精矿为 16.4×10^{-6} (略超伴生 Te 矿回收标准), 因矿床以铜为主的开采特点, Te 综合回收价值相对有限。资源前景方面, 基于已探明的 5.11 Mt 铜资源量估算, 普朗矿床 Se 潜在资源量约 4 440 t, 达到超大型规模。

关键词: 伴生硒碲矿产; 稀土元素; 资源评估; 三江造山带; 硒碲富集规律; 斑岩-矽卡岩; 矿床。

中图分类号: P617

文章编号: 1000-2383(2025)11-4323-14

收稿日期: 2025-05-22

Enrichment Regularities of Se and Te and Their Potential Resources in Pulang Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Sanjiang Orogenic Belt

Wang Lei¹, Wei Jinhua¹, Ouyang Hegen^{1,2*}, Wu Lianrong³, Zhao Xiaoyu¹,
Yang Fan⁴, Wo Yongjun⁴, Xie Guiqing²

1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Yunnan Diging Nonferrous Metals Co., Ltd., Shangrila 674400, China

4. China Copper Mineral Resources Co., Ltd., Kunming 650051, China

Abstract: Recent years have witnessed increasing attention on the enrichment of selenium (Se) and tellurium (Te) within the

基金项目: 深地国家科技重大专项(No.2024ZD1001400); 云南省新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(2024); 国家自然科学青年基金项目(No.42103062); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(No.92462306); 云南省产教融合研究生联合培养基地项目(2023); 云南省博士研究生导师团队(2024)。

作者简介: 王雷(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学与找矿预测研究。ORCID:0009-0005-0363-5698. E-mail: kust_wanglei@kust.edu.cn

* 通讯作者: 欧阳荷根, E-mail: oyhg1984@163.com

引用格式: 王雷, 韦金花, 欧阳荷根, 吴练荣, 赵晓瑜, 杨帆, 沃拥军, 谢桂青, 2025. 三江造山带普朗斑岩型铜金钼矿床硒富集规律及其资源前景评估. 地球科学, 50(11):4323—4336.

Citation: Wang Lei, Wei Jinhua, Ouyang Hegen, Wu Lianrong, Zhao Xiaoyu, Yang Fan, Wo Yongjun, Xie Guiqing, 2025. Enrichment Regularities of Se and Te and Their Potential Resources in Pulang Porphyry Cu-Au-Mo Deposit, Sanjiang Orogenic Belt. *Earth Science*, 50(11): 4323—4336.

Pulang super-large porphyry Cu-Au-Mo deposit; however, their resource potential and comprehensive utilization value remain unclear. In this paper it presents a systematical investigation of the principal host minerals and spatial distribution patterns of Se and Te within the deposit, employing methods such as LA-ICP-MS and ME-MS61r, and evaluation of their resource prospects. The findings reveal that Se is primarily enriched in chalcopyrite and molybdenite, while the main host mineral for Te is molybdenite. At the spatial distribution level, the contents of Se and Te in sulfides of the main mining area are obviously higher than those in the eastern mining area on the plane, which may be related to differences in mineralization types and ore-forming temperatures. However, in a single exploration line section, the contents of Se and Te show no obvious regular changes with depth. Regarding utilization value, the analysis of Cu and Mo concentrates shows that the Se content in Cu concentrates is 170×10^{-6} — 200×10^{-6} , and that in Mo concentrates reaches 250×10^{-6} , both meeting the recovery indexes for associated Se minerals. The Te content in Cu concentrates is 3.6×10^{-6} — 5.5×10^{-6} , and that in Mo concentrates is 16.4×10^{-6} . Only Mo concentrates slightly exceed the recovery standard for associated Te minerals, and due to the Cu-dominated mining characteristics of the deposit, the comprehensive recovery value of Te is relatively limited. In terms of resource estimation, based on the proven Cu resource of 5.11 Mt, the potential Se resource of the Pulang deposit is calculated to be approximately 4 440 t, reaching the super-large scale.

Key words: Se and Te mineralization; rare earth elements; resource assessment; Sanjiang Orogenic Belt; selenium-tellurium enrichment mechanism; porphyry-skarn; deposits.

0 引言

硒(Se)和碲(Te)在化学元素周期表中处于第四周期第六主族,与氧和硫同属一族,二者皆为非金属元素。它们在地壳中的丰度极低(硒为 0.05×10^{-6} 、碲为 0.001×10^{-6}),常难以富集成矿,且在所有非金属元素里,硒和碲的金属性表现最为突出,具备一定的导电性与导热性,属于半导体材料。正因如此,它们也常被称作“稀有元素”、“分散元素”或“稀散金属”(涂光炽,2000;刘家军等,2011)。尽管硒和碲在自然界中含量稀缺,但它们作为半导体稀有元素,却是极具开发利用价值的工业原材料,在冶金、化工、电子、国防、医药、航空航天、新能源等诸多领域,都有着广泛且独特的用途。

依据美国地质调查局(www.usgs.gov)发布的数据,2025年全球硒和碲资源保有储量分别为9.2万吨和3.5万吨。从全球国家分布状况来看,俄罗斯以2.6万吨的硒储量位居首位,其后依次是秘鲁(1.6万吨)、美国(1.0万吨)、加拿大(6 500吨)以及中国(5 000吨)。在碲资源方面,俄罗斯(5 800吨)、美国(3 900吨)和中国(3 100吨)是全球碲储量名列前茅的国家。近10年来,我国对硒的需求呈现出显著增长趋势,然而硒产量却难以跟上需求的步伐,供需矛盾突出。以上海有色网(www.smm.cn)2023年公布的数据为例,我国当年硒的表观消费量约为2 900吨,而产量仅为1 400吨。目前我国碲产量整体能够满足消费需求,2023年我国碲产量约为675吨,需求量约为225吨。但值得注意的是,

随着太阳能电池、红外探测等战略性新兴产业的迅猛发展,未来碲资源需求量预计将大幅增加。据韩中奎等(2025)研究预测,到2035年,我国碲资源供应缺口将达到82吨,供大于求的现状将逐渐改变。

硒、碲作为重要的稀散元素,几乎不形成独立矿床,其主要来源是作为铜矿电解精炼过程中从阳极泥中提取出来的,斑岩型矿床几乎提供了全球所有的硒和碲资源(Li et al., 2024)。硒、碲的赋存状态以类质同象、独立矿物和矿物包裹体为主,学者们对于类质同象和独立矿物的关注较多。在热液矿床中,硫含量、温度和氧化还原环境对于硒、碲矿物赋存形式起着关键作用,在高温环境下硒倾向于进入硫化物中,低温环境易形成硒独立矿物,而碲多数与金属元素结合形成碲独立矿物(刘家军等,2020;谢桂青等,2024)。在地球化学上,硒、碲表现出强烈亲硫性,硒离子半径和电荷与硫元素相似,因此在热液成矿过程中倾向于富集在硫化物矿物(如黄铜矿和黄铁矿)中。相比之下碲的离子半径大于硫,以类质同象进入黄铜矿等硫化物晶格内方式的相对局限,其更易与金属元素Cu、Au、Bi等形成独立矿物。斑岩成矿系统能够为硒、碲富集提供理想条件,其岩浆-热液体系能提供巨量的硫和金属元素(如Cu、Au、Mo),成矿演化过程和物理化学条件阶段性变化驱动元素发生分异,导致硒主要进入硫化物,碲则倾向于形成独立矿物。根据硒和碲的工业利用要求和经济价值,含硒或碲的矿床可分为独立和伴生两大类。其中,独立的硒或碲矿床规模普遍偏小,而伴生的硒或碲矿床类型丰富,包括岩浆型、

斑岩型、矽卡岩型、火山岩型、岩浆-热液型、中-低温热液脉型、化学沉积型和叠加-改造型等。虽然火山岩型、矽卡岩型矿床也含硫化物,但规模通常远小于斑岩矿床,且成矿流体来源更复杂,物理化学条件多变,岩浆来源的硫和金属供应量也常不及斑岩系统,限制了硒、碲的大规模富集与成矿。浅成低温热液金银矿床虽以碲化物、硒化物为特征,但其主矿化为金银,硫化物总量微乎其微,缺乏斑岩系统特有的巨量黄铜矿、黄铁矿作为硒、碲类质同象寄主的载体。岩浆型矿床中,硒、碲虽可以类质同象进入磁黄铁矿中,但含量普遍较低,经济价值远低于主金属,矿床数量和经济重要性相对斑岩铜矿小。至于沉积型矿床,部分可能含一定量的硒,但 Te 含量通常很低,两者均难以经济回收。这些矿床因规模受限、载体形态差异或经济性不足,难以像斑岩矿床那样成为硒、碲稳定且具有经济意义的主要来源。因此,深入开展我国不同地区、不同构造背景下斑岩型矿床中伴生硒和碲的赋存状态与富集规律研究,全面评价其综合利用潜力,并积极探寻新的资源基地,对于切实保障我国硒和碲资源的安全供应,有着至关重要的科学意义和现实价值。

三江中段的普朗矿床是在俯冲背景下形成的我国具代表性的超大型斑岩型铜金钼矿床。该矿床已探明铜资源量达 511 万吨,同时伴生金 145 吨、钼 19 万吨(Li *et al.*, 2022)。近年来的勘探实践表明,普朗矿床的矿体持续向深部延伸,其深边部展现出良好的找矿前景,铜、金和钼的资源储量预计还会进一步增加。针对普朗矿床,前人已从多个方面开展了大量研究工作。例如,在矿化蚀变空间分带特点与机制、岩石组合类型及成因、成岩成矿时代、成矿物质来源等方面均取得了一系列成果(曹殿华等,2009;任江波等,2011;刘学龙等,2012;刘江涛等,2013;Cao *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019; Yang and Zhang, 2021)。随着研究的逐步深入,近年来普朗矿床中硒和碲的富集现象逐渐被报道(如:沈啟武等,2023;王大钊等,2025)。不过,目前这些研究主要聚焦于硒和碲的赋存状态及富集机制,而在普朗矿床硒和碲的资源前景评估以及是否具备综合利用价值等方面,研究尚存在空白。基于此,本文在详细分析普朗矿床中硒和碲的主要载体矿物以及空间分布规律的基础上,重点对其资源前景和综合利用价值展开深入剖析,期望能为准确评估该矿床硒和碲的综合利用潜力提供更为详实的资料。

1 区域地质及矿床地质特征

普朗超大型斑岩铜金钼矿床构造位置上位于义敦岛弧带南端的中甸弧内(图 1a)。该区先后经历了晚三叠世洋壳俯冲和造山作用、侏罗纪陆内碰撞造山作用、白垩纪造山作用和新生代陆内汇聚与走滑伸展作用(侯增谦等,2001, 2004; 李文昌等, 2011; 邓军等, 2014, 2016)。区内褶皱和断裂构造发育,主要由一系列 NNW 向线性褶皱和断裂及近 EW 向断裂组成(图 1a)。规模最大的 NNW 向断裂为格咱断裂,次为黑水塘断裂,该组断裂控制着区内岩浆岩的侵位。

区域上出露的地层主要有三叠系尼汝组(T_2n)、曲嘎寺组(T_3q)、图姆沟组(T_3t)和喇嘛垭组(T_3lm),以图姆沟组分布最为广泛(李文昌和刘学龙,2015; Yang *et al.*, 2021)。其中,尼汝组主要由细粒灰岩、板岩和凝灰岩组成;曲嘎寺组由灰岩、变质砂岩和板岩组成;图姆沟组由绢云板岩、变质砂岩、火山碎屑岩和安山岩组成;喇嘛垭组为长石-石英砂岩、绢云母板岩-石英砂岩和细粒长石-石英复合砂岩。受晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲及随后的陆内后碰撞伸展过程影响,义敦岛弧带上形成了诸多斑岩型和矽卡岩型铜多金属矿床,典型矿床有普朗超大型斑岩铜金钼矿床、雪鸡坪中型斑岩铜矿床、浪都中型矽卡岩型铜多金属矿床等(曾普胜等,2006)。

普朗是中甸弧内最大的斑岩型铜金钼矿床,由首采区、北部、东部及南部四个矿段组成(图 1)。矿区内地层分布广泛,以印支期中-酸性侵入岩为主,主要的岩石类型有石英闪长玢岩、石英二长斑岩和花岗闪长斑岩,其次为中性火山岩(安山岩)。矿区内地层主要为图姆沟组和第四系。图姆沟组由板岩、粉砂质绢云板岩、变质砂岩、安山岩和流纹岩组成。普朗矿床的矿体在空间上的展布主要受普朗复式岩体的形态控制。该复式岩体由老到新由石英闪长玢岩、石英二长斑岩和花岗闪长斑岩组成。其中,花岗闪长斑岩多以岩墙形式产出,其侵位中心与石英二长斑岩基本相同。矿区内地层主要分布于首采区的北部、东部及南部(图 1b),石英二长斑岩主要分布于首采区及北矿段的局部,花岗闪长斑岩则主要分布于首采区的南部及北矿段。

前人研究结果表明,矿区内地层形成年龄为(227±2) Ma、石英二长斑岩为(218±1) Ma、花岗闪长斑岩为(209±1) Ma(Cao *et al.*, 2019; Yang

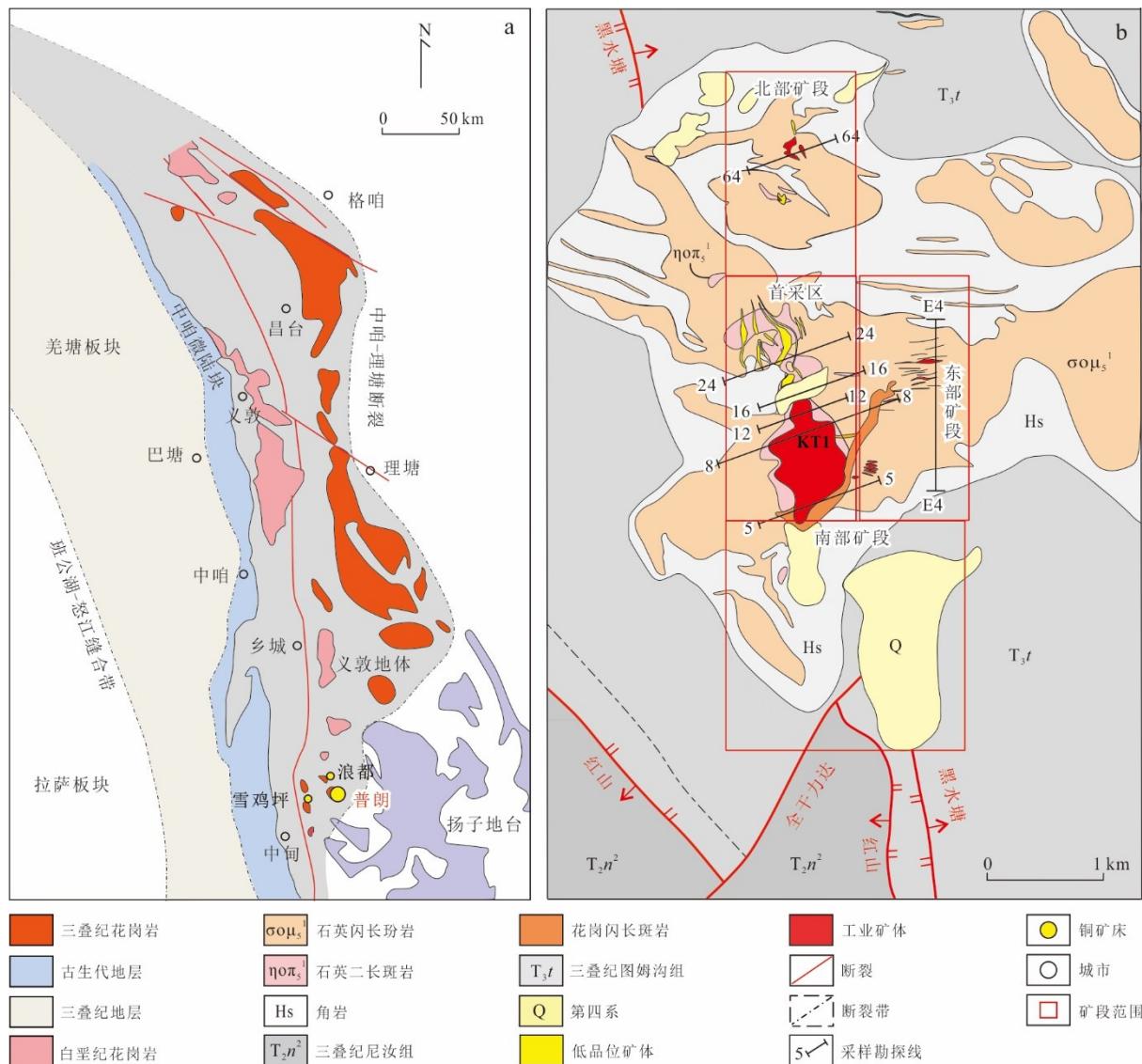


图1 义敦岛弧构造格架(a)和普朗斑岩型铜金钼矿床地质简图(b. 据 Cao et al., 2019; Zhao et al., 2025 修改)

Fig.1 Tectonic framework of the Yidun island arc (a) and geological map of the Pulang porphyry Cu-Au-Mo deposit (b. modified from Cao et al. (2019) and Zhao et al.(2025))

et al., 2019). 其中的石英二长斑岩形成年龄与成矿年龄(213~216 Ma; Li et al., 2022)在误差范围内基本一致, 表明其与成矿关系密切。普朗作为典型的斑岩型铜金钼矿床, 其热液蚀变分带特征既与典型斑岩型矿床存在相似之处, 又具备自身独特性。其热液蚀变自内向外呈现出同心圆带特征, 依次为钾硅化带、绢英岩化带、青磐岩化带, 在外部局部区域可见泥化蚀变和碳酸盐化现象。然而, 随着研究不断深入, 学者们发现, 青磐岩化和绢云母化几乎叠加于钾化带上, 且蚀变叠加的部位矿化效果较好。此外, 高品位的Cu、Mo主要集中在青磐岩化叠加钾化蚀变的部位以及破碎带发育的区域(Cao et al., 2019; Yang and Cooke, 2019; 朱振东等, 2023)。

2 样品采集与测试

为精准把握普朗矿床硒和碲的富集状况并评估它们的资源前景与综合利用潜力, 本研究围绕该矿床的北部矿段、首采区和东部矿段, 依次对64号(北部矿段)、24号(首采区)、16号(首采区)、12号(首采区)、8号(首采区)、5号(首采区)和E4号(东部矿段)勘探线剖面(图1b), 开展了系统的样品采集工作(图2), 同时对2024年生产的铜精矿和钼精矿进行了样品的抽检。鉴于普朗矿床的硫化物以黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿和磁黄铁矿为主, 本次工作分别对这四种硫化物开展了LA-ICP-MS微量元素含量的原位分析测试工作。

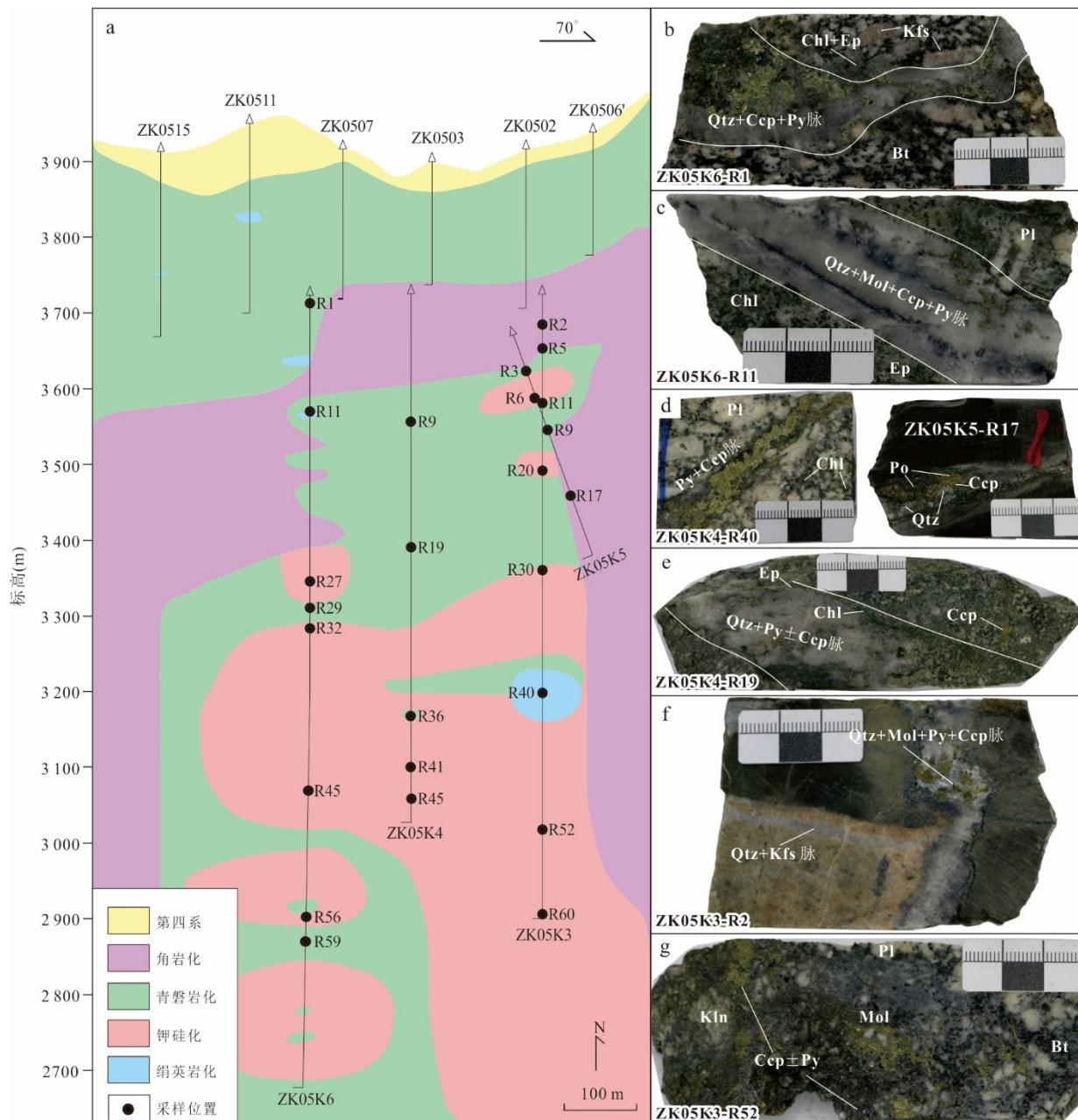


图2 普朗矿床5号勘探线采样位置(a)及典型样品手标本特征(b~g)

Fig. 2 Sampling locations (a) and hand specimen characteristics (b~g) of representative samples along the No. 5 exploration line, Pulang deposit

Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿; Mol. 辉钼矿; Po. 磁黄铁矿; Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Ep. 绿帘石; Chl. 绿泥石; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石; Kln. 高岭石

(图3),同时对普朗矿床的主要矿精粉:铜精矿和钼精矿,开展了矿相学分析及微量元素含量测试。

硫化物的LA-ICP-MS原位分析测试工作在中国地质科学院地质研究所自然资源部同位素地质重点实验室完成。采用RESolution LR/S155(激光剥蚀器)与Agilent 7900(四极杆电感耦合等离子体质谱仪)联用的方式对样品进行分析,激光束斑为 $44 \mu\text{m}$,频率为4 Hz,激光能量密度

为 4.0 J/cm^2 ,分析过程中使用氦气作为载气将剥蚀的气溶胶吹至四极杆质谱仪。采用标样MASS-1,并选择Fe或者S作为内标元素校正数据,数据处理软件为Iolite2.5(Paton *et al.*, 2011)。

铜精矿、钼精矿分析在广州澳实分析检测有限公司完成。样品前处理采用四酸消解法,称取适量铜精矿试样于Teflon消解管中,依次加入硝酸(HNO_3)、高氯酸(HClO_4)、氢氟酸(HF)和盐酸

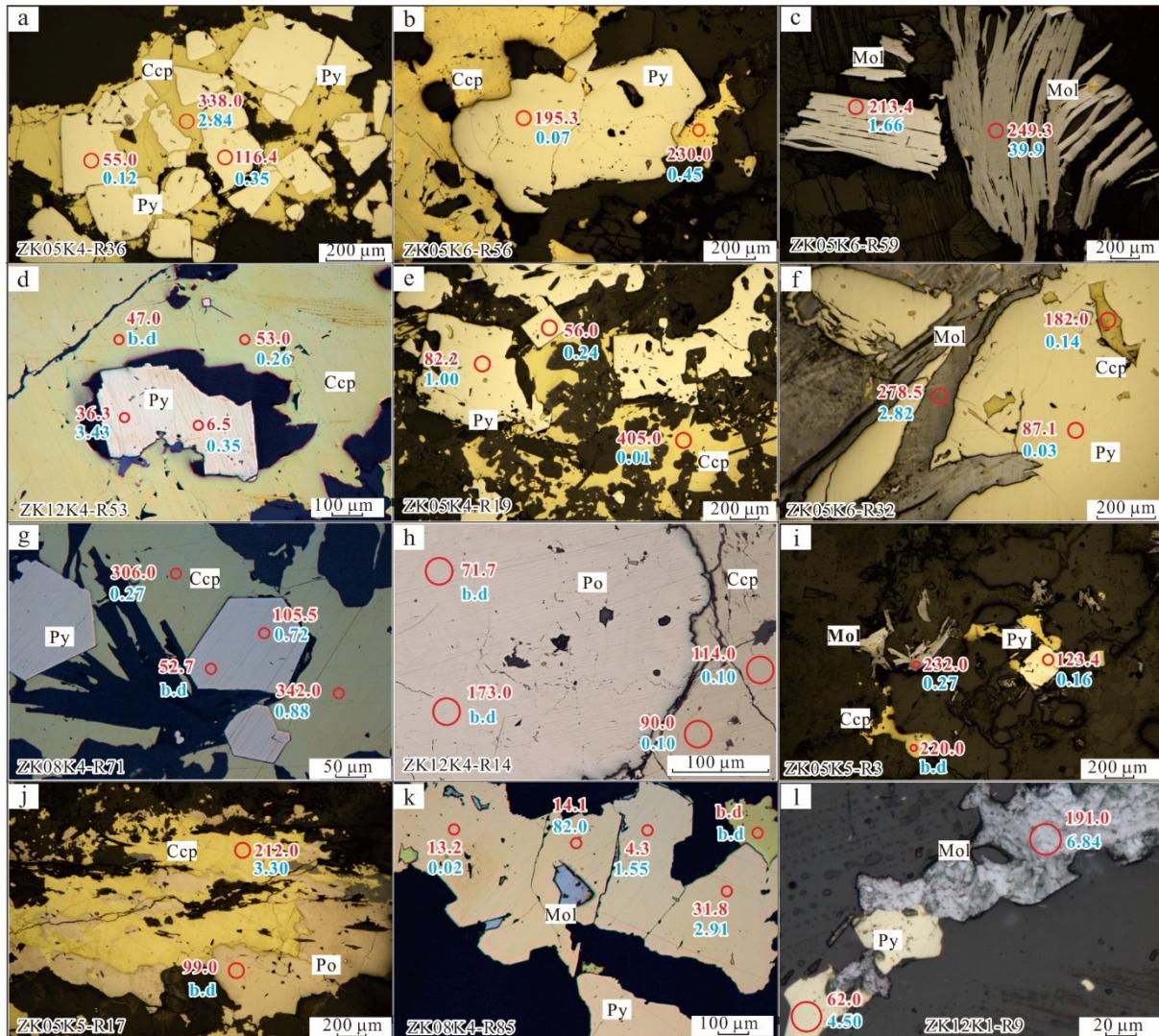


图3 普朗矿床代表性样品的黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)、辉钼矿(Mol)和磁黄铁矿(Po)LA-ICP-MS分析点位及其硒(红色数值)和碲(蓝色数值)含量(10^{-6})

Fig.3 LA-ICP-MS analysis spots and selenium (red values) and tellurium (blue values) contents (10^{-6}) in pyrite (Py), chalcopyrite (Ccp), molybdenite (Mol), and pyrrhotite (Po) from representative samples of the Pulang deposit

(HCl),经高温消解至近干后,加入稀盐酸和去离子水复溶,定容后待测。使用Cu-OG62方法,基于电感耦合等离子体发射光谱仪(Agilent 5110)对样品进行检测。当铜含量 $>15\% \sim 20\%$ 时,需结合滴定法或重注法以提高准确度,同时通过光谱干扰矫正好确保结果可靠性,精密度(RD) $<5\%$,准确度(RE) $<3.5\%$ 。随后,采用ME-MS61r方法,联用电感耦合等离子体发射光谱(Agilent 5110)与质谱仪(Agilent 7900),对样品超痕量元素及稀土元素进行检测。若检测到Bi、Hg、Mo、Ag、W等元素浓度较高,需稀释后转用质谱分析,避免光谱干扰。检测覆盖 $\mu\text{g/g}$ 至百分比级元素(如As、Pb、稀土等),精密度(RD) $<10\%$,准确度(RE) $<10\%$ 。每批次插入

空白样、重复样及标准物质,仪器经可溯源校准,定期参与国际实验室比对(每年两次)及盲样检测,数据通过控制图与复测验证,确保分析结果准确可靠。

铜精矿和钼精矿样品矿物组成分析在昆明冶金研究院有限公司物质成分室完成。根据分析需求,将矿石进行混匀、缩分后,用树脂进行二次镶嵌,采用MLA自动检测系统对样品进行分析,分析条件为电压25 kV、电流40 μA 、束斑6.0。MLA自动检测系统由一台带有两个先进能谱(EDS)的扫描电镜(SEM)及一个软件包组成。首先利用背散射电子区分不同的物相,同时结合能谱分析快速准确地鉴定矿物并采集相关信息,然后再通过现代图像分析技术进行数据的计算与

处理,从而获得所需要的工艺矿物学参数。

3 结果与讨论

3.1 普朗矿床硒和碲的富集规律及空间分布特点

普朗矿床不同勘探线剖面黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和磁黄铁矿的硒(Se)、碲(Te)含量测试结果详见附表1与图4。数据显示:在硒元素方面(图4a),除E4号勘探线样品外,其余勘探线样品中黄铜矿与辉钼矿的Se平均含量均超过 160×10^{-6} ,而黄铁矿和磁黄铁矿的Se平均含量大多低于 100×10^{-6} ;在碲元素方面(图4b),所有勘探线样品中黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿的Te平均含量均不足 10×10^{-6} ,辉钼矿则呈现显著差异——除8号勘探线样品外,其Te平均含量均高于 10×10^{-6} ,其中12号勘探线样品辉钼矿的Te平均含量更是突破

180×10^{-6} 。由此可见,尽管Se和Te在不同硫化物中的含量波动显著,但整体规律清晰:Se在黄铜矿和辉钼矿中的富集程度显著高于黄铁矿和磁黄铁矿,而Te主要富集于辉钼矿。这一结论与王大钊等(2025)的研究成果基本吻合,进一步证实普朗矿床中Se的主要寄主矿物为黄铜矿和辉钼矿,Te的主要寄主矿物为辉钼矿。

在普朗矿床不同勘探线同种硫化物的Se含量分布上,12号勘探线表现尤为突出,其黄铁矿的Se平均含量高达 300×10^{-6} ,远超其他勘探线;该勘探线的黄铜矿和辉钼矿Se平均含量同样显著,均大于 160×10^{-6} 。与之形成鲜明对比的是E4号勘探线,其黄铁矿Se平均含量低于 50×10^{-6} ,黄铜矿和磁黄铁矿的Se平均含量更低,均不足 10×10^{-6} 。不过,这种不同硫化物Se含量的协同变化规律并非普遍存在。例如,5号和8号勘探线的黄铁矿Se平均含量处于中等水平(小于 100×10^{-6}),但其黄铜矿和辉钼矿的

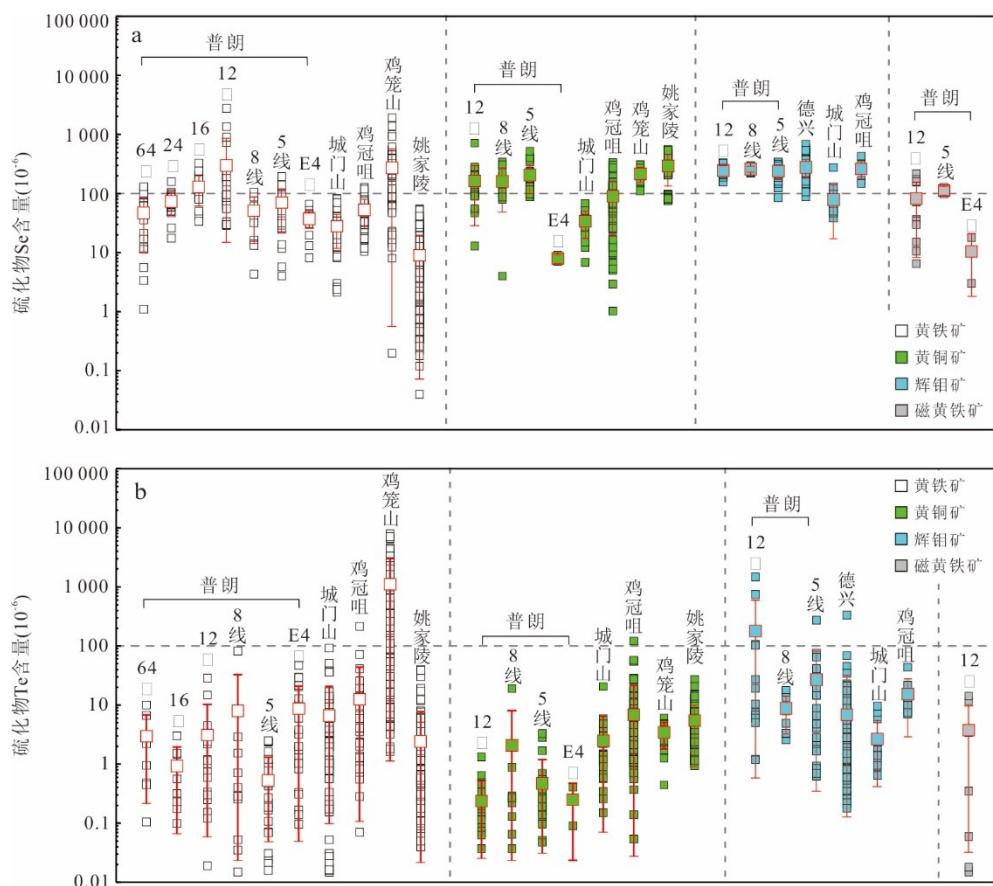


图4 普朗矿床北部矿段、首采区和东部矿段代表性勘探线硫化物的硒(a)和碲(b)含量

Fig.4 Selenium (a) and tellurium (b) contents in sulfides from representative exploration lines of the northern mining block, initial mining area, and eastern mining block, Pulang deposit

德兴、城门山、鸡冠咀、鸡笼山和姚家陵硫化物的硒和碲含量数据源自 Xiong et al. (2022); Zhang et al. (2022); Guo et al. (2023); 冷成彪等 (2023); Li et al. (2024); Jiang et al. (2025)

Se 平均含量却与 12 号勘探线相当(大于 200×10^{-6})。Te 含量的空间分布特征同样复杂。尽管 12 号勘探线辉钼矿的 Te 平均含量在所有勘探线中最高(大于 100×10^{-6}),但其黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿的 Te 含量并未呈现同步升高的趋势。可见,Te 在不同勘探线同种硫化物中的含量变化,也未表现出明显的协同规律。综合分析可知,12 号勘探线的黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿 Se 含量均为各勘探线中最高,且辉钼矿的 Te 含量也最为突出;E4 号勘探线硫化物的 Se 含量整体最低,但 Te 含量并非最低。5 号和 8 号勘探线虽然黄铜矿和辉钼矿的 Se 含量较高,但其余硫化物的 Se、Te 含量并不突出。值得注意的是,12 号、8 号和 5 号勘探线位于普朗矿床首采区(主矿段),以细脉浸染型铜金钼矿化为主,成矿温度集中在 260~400 °C,且从早期到晚期蚀变阶段氧逸度呈下降趋势(Hu *et al.*, 2024);而 E4 号勘探线位于矿床东部矿段,以脉型铜铅锌矿化为主,成矿温度集中在 170~300 °C(Xia *et al.*, 2021)。这些勘探线间硫化物 Se、Te 含量的差异,是否与金属矿化类型或成矿温度、温度相关?硫化物的 Se、Te 含量能否作为指标,用于预测斑岩成矿系统中不同金属矿化类型或成矿中心的空间分布?这些问题亟待深入研究,其主要原因在于岩浆-热液矿床中硫化物 Se 和 Te 富集受多种因素复杂交互作用以及研究对象的多样性控制。Keith *et al.*(2018)认为低温环境形成的硫化物更富集 Se, 黄铁矿中碲与温度、氧逸度负相关;然而,另有研究表明硫化物中 Se 含量会随成矿流体温度升高而增加(Auclair *et al.*, 1987; Revan *et al.*, 2014; Maslennikov, 2017)。而近年来的研究表明,低温、氧化环境是碲富集的关键,促进 Te^{4+} 迁移与独立矿物沉淀;高温、还原环境则利于硒以类质同象形式进入硫化物晶格,除了温度和氧逸度的影响,二者富集机制还受两种元素自身的地球化学行为差异、矿物组合及流体化学演化共同控制(谢桂青等, 2024, 2025; Jiang *et al.*, 2025; 朱乔乔等, 2025)。这种复杂的控制因素,导致同一硫化物中硒、碲的含量往往存在显著差异(图 3a, 3d, 3g, 3h)。其中,硒、碲在黄铜矿和黄铁矿等矿物中的富集机制仍需进一步研究。这种现象及复杂的控制因素使得普朗矿床勘探线间硫化物 Se、Te 含量差异的成因解释,以及其作为成矿预测指标的可行性研究面临挑战,亟需进一步的理论探讨与实证分析。

为进一步揭示普朗矿床硫化物中 Se 和 Te 含量

的空间分布规律,作者选取 5 号勘探线剖面作为典型案例展开了进一步研究(图 5)。该剖面涵盖不同钻孔(ZK05K6、ZK05K5、ZK05K4、ZK05K3)、深度范围从标高 3 700 m 至 2 850 m,且包含青磐岩化、钾化、绢英岩化等不同矿化蚀变带。对剖面中黄铁矿(图 5a)、黄铜矿(图 5b)和辉钼矿(图 5c)样品的 Se 和 Te 含量分析结果显示,其平均含量未呈现出与钻孔位置、深度变化或矿化蚀变类型相关的规律性波动。尽管不同样品所处地质条件存在差异,但仍存在显著共性:在所有样品中,黄铜矿和辉钼矿的 Se 平均含量始终远高于黄铁矿;辉钼矿中的 Te 平均含量也显著高于黄铁矿和黄铜矿。这一现象表明,在普朗矿床勘探线剖面上,硫化物中 Se 和 Te 含量可能难以作为有效指标,用于精准示踪成矿热液中心位置或热液流体运移方向,后续研究可能需要结合其他地球化学指标或地质证据开展深入探索。

3.2 普朗与其他斑岩(-矽卡岩)型矿床在硒和碲富集规律方面的对比

斑岩(-矽卡岩)型矿床作为世界上最重要的矿床类型之一,不仅是 Cu、Au 和 Mo 的主要来源,也是 Se 和 Te 的重要伴生产出载体。据 John and Taylor(2016)研究显示,全球约 90% 的 Se 和 80% 的 Te 产自斑岩(-矽卡岩)型铜矿。然而,受限于 Se 和 Te 在这类矿床中含量较低、缺乏独立矿物以及测试技术等因素,目前针对其富集规律的研究仍相对不足。为深入探究普朗矿床中 Se 和 Te 的富集特征,并与全球其他斑岩(-矽卡岩)型矿床进行对比,本文选取了长江中下游(城门山、鸡冠咀、鸡笼山和姚家陵)和钦杭成矿带北段(德兴)典型的斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床作为对比对象(图 4)。这两个区域的矿床在 Se 和 Te 伴生研究方面积累了相对丰富的成果,有助于通过对比分析,揭示普朗矿床中 Se 和 Te 的富集规律,为该类元素在斑岩(-矽卡岩)型矿床中的研究提供新的视角和依据。

从图 4a 可知,在硫化物的 Se 含量方面,鸡冠咀、姚家陵和德兴矿床 Se 的主要寄主矿物为黄铜矿(平均含量大于 100×10^{-6})和辉钼矿(平均含量大于 200×10^{-6})。这与普朗矿床 Se 的主要寄主矿物类型及其平均含量基本相似。但在城门山矿床,Se 的主要寄主矿物为辉钼矿(平均含量约为 100×10^{-6} , 小于普朗矿床的辉钼矿 Se 平均含量),而在鸡笼山矿床,Se 的主要寄主矿物为黄铁矿(平均含量大于 300×10^{-6} , 显著高于普朗矿床)和黄铜矿(平均含量

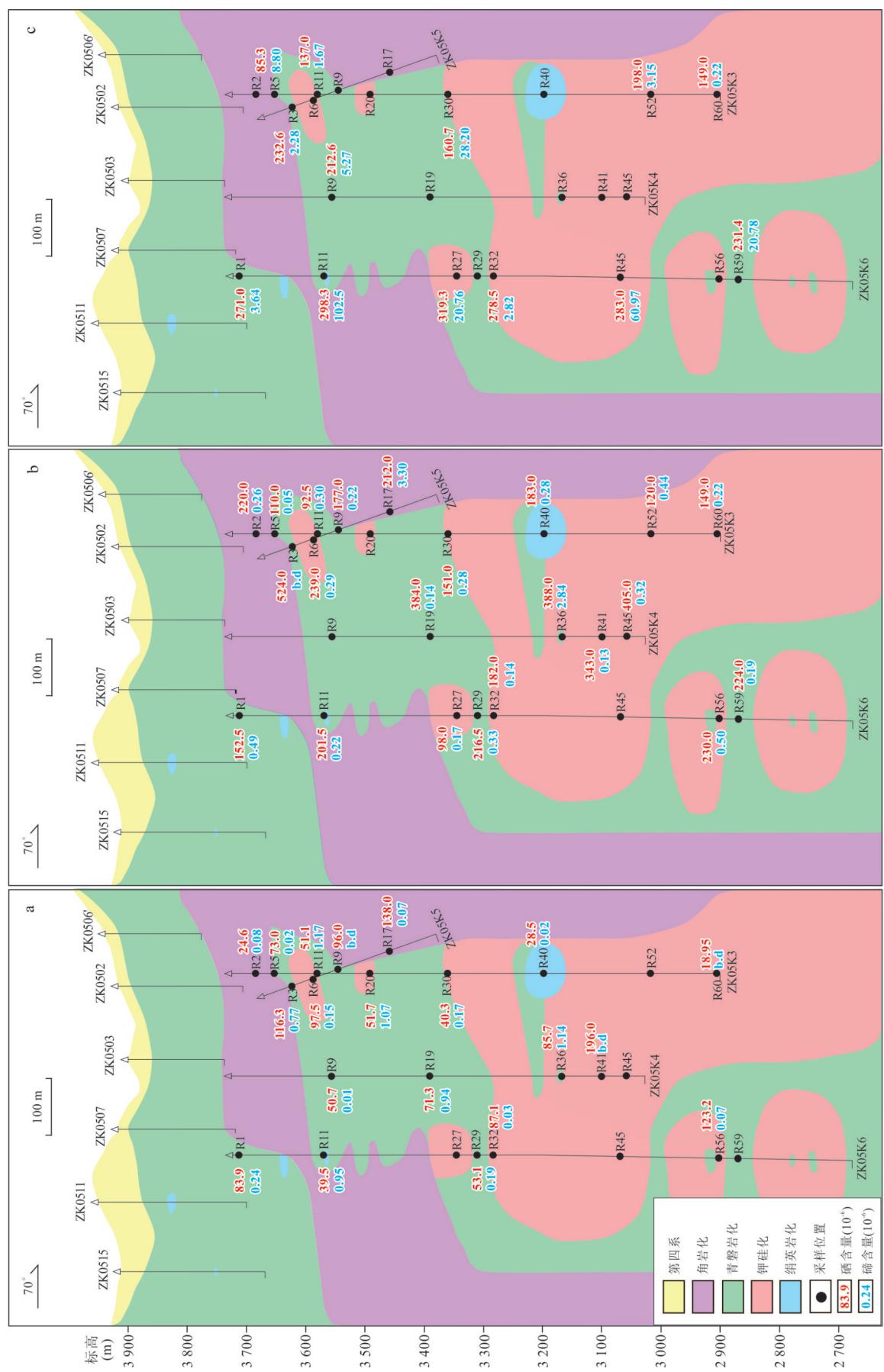


图5 普明矿床5号勘探线各采样位置黄铁矿(a)、黄铜矿(b)和辉钼矿(c)的硒和碲平均含量(10^{-6})

Fig.5 Average selenium
PuLang deposit

约为 100×10^{-6} , 小于普朗矿床的黄铜矿 Se 平均含量).

在硫化物的 Te 含量方面(图 4b), 城门山、鸡冠咀、姚家陵和德兴矿床的黄铁矿和黄铜矿的 Te 平均含量均小于 10×10^{-6} , 与普朗矿床情况相符. 但在辉钼矿的 Te 平均含量方面, 普朗矿床表现突出, 尤其是 12 号勘探线样品中辉钼矿的 Te 平均含量高达 180.5×10^{-6} , 较城门山、鸡冠咀、姚家陵和德兴矿床同类矿物的 Te 含量高出 10~20 倍. 值得关注的是, 鸡笼山矿床 Te 的寄主矿物为黄铁矿, 其 Te 平均含量超过 1000×10^{-6} , 远超普朗及其他对比矿床黄铁矿的 Te 含量水平.

综上可知, 普朗矿床硫化物中 Se 和 Te 富集规律, 与长江中下游和钦杭成矿带北段的代表性斑岩(-矽卡岩)型铜多金属矿床呈现出“同中有异”的特征. 相似之处在于, 普朗矿床与多数斑岩(-矽卡岩)型铜多金属矿床一致, Se 的主要寄主矿物均为黄铜矿和辉钼矿. 然而, 普朗矿床展现出明显的独特性, 其辉钼矿对 Te 的富集程度显著高于其他对比矿床, 但这种富集差异的成因机制目前尚不明确, 亟待深入研究. 此外, 尽管同属斑岩(-矽卡岩)型铜多金属矿床, 不同矿床间 Se、Te 的主要寄主矿物差异显著. 例如, 普朗、鸡冠咀、姚家陵和德兴矿床中, Se 的主要寄主矿物为黄铜矿和辉钼矿, 而鸡笼山矿床却以黄铁矿为 Se 的主要寄主矿物; Te 的主要寄主矿物在鸡笼山矿床为黄铁矿, 在普朗矿床则为辉钼矿. 这些现象背后的控制因素, 如成矿流体性质、物理化学条件差异等, 是极具价值的科学问题, 需要通过系统的对比研究加以揭示. 但目前, 关于斑岩(-矽卡岩)型矿床中 Se、Te 的主要寄主矿物分异机制的研究仍较为薄弱, 相关理论体系尚未完善. 破解这些科学问题, 对于深入理解斑岩(-矽卡岩)型成矿系统中硫化物 Se、Te 含量的时空变化规律, 构建基于硫化物 Se 和 Te 含量的勘查指标体系, 指导找矿勘探实践, 具有重要的理论价值和现实意义.

3.3 普朗矿床硒和碲潜在资源量评估

基于前文对普朗矿床硫化物中 Se 和 Te 富集规律的研究成果, 为进一步挖掘 Se 和 Te 的潜在资源量, 科学评价其综合利用价值, 本文开展了进一步探究. 研究以普朗矿床首采区产出的矿精粉(铜精矿和钼精矿)为研究对象, 通过系统的矿物组成分析与 Se、Te 含量测试, 全面剖析目标元素在精矿产品中的富集规律与富集特征. 具体研究结果详见表 1, 这些数据将为后续资源量估算

及开发利用方案制定提供关键依据.

通过对普朗矿床首采区矿精粉的分析测试(表 1)可知, 铜精矿中 Se 含量相对稳定, 变化范围在 170×10^{-6} ~ 200×10^{-6} , 钼精矿的 Se 含量稍高, 达 250×10^{-6} . 依据伴生 Se 矿可综合回收利用的经济指标(大于 100×10^{-6}), 该矿床铜精矿和钼精矿中的伴生 Se 均具备综合回收经济价值. 在 Te 含量方面, 15 件铜精矿样品的 Te 含量为 3.6×10^{-6} ~ 5.5×10^{-6} , 钼精矿的 Te 含量为 16.4×10^{-6} , 虽高于铜精矿, 但参照伴生 Te 矿可综合回收利用经济指标(大于 10×10^{-6}), 同时考虑到普朗矿床以铜为主的开采特点, 其伴生 Te 的综合回收经济价值相对有限.

为进一步明确普朗矿床潜在的 Se 资源量, 研究以该矿床探明的铜资源量(5.11 Mt, Li et al., 2022)为基础, 结合铜精矿中 Cu 占比 21%(表 1)、Se 平均含量 182.5×10^{-6} 等参数, 进行资源量估算. 具体过程如下: 首先, 根据铜金属储量与铜在铜精矿中的占比, 计算出铜精矿总量为: $\frac{5.11 \text{ Mt}}{21\%} = 24.33 \text{ Mt}$; 进而得出 Se 资源量为: $24.33 \text{ Mt} \times 182.5 \times 10^{-6} \approx 4440 \text{ t}$. 尽管估算结果受不同矿段和标高影响存在一定偏差, 但仍是目前较为可靠的数据. 参照《矿产资源储量规模划分标准》(2000 年 4 月 24 日国土资源部国土资发[2011]133 号), 普朗矿床 Se 的潜在资源量已达超大型规模, 相当于 9 个大型硒矿床(大型硒矿划分标准为 500 t).

当前, 我国硒资源供需矛盾突出, 摸清资源家底、合理开发利用, 对保障战略安全和推动产业发展至关重要. 陈炳翰等(2020)研究表明, 我国硒矿资源储量主要集中在甘肃(5 831 t)、新疆(2 443 t)、江西(2 124 t)、湖北(1 822 t)和黑龙江(1 640 t)等 5 个省份, 占总量的 76%; 王冠智等(2024)则将我国潜在硒矿资源划分为南阿尔泰-北准噶尔、东天山、阿拉善、北祁连、西秦岭南亚带、东秦岭、湘鄂西-黔中南以及长江中下游等 8 个矿集区. 普朗矿床 4 440 t 潜在 Se 资源的发现, 使三江造山带成为我国又一硒资源成矿条件优越的区域, 显著改变了我国硒资源的分布格局. 这一发现具有双重重要意义. 在矿区层面, 将硒资源纳入整体资源规划, 有助于在开采铜、金、钼等主要金属时, 同步实现硒资源的综合回收, 提升普朗矿床的经济价值; 在国家层面, 普朗矿床潜在 Se 资源的综合利用, 能够有效缓解我国硒资源供应压力, 对保障硒资源安全供应、优化资源战略布局具有关键作用.

表1 普朗矿床铜精矿和钼精矿的伴生元素含量

Table 1 Associated element contents in copper and molybdenum concentrates from the Pulang deposit

样品号	Cu (%)	Fe (%)	Mo (10^{-6})	Se (10^{-6})	Te (10^{-6})	Ag (10^{-6})	As (10^{-6})	Pb (10^{-6})	Co (10^{-6})	Ni (10^{-6})	主要金属矿物
Cu1	19.80	31.9	8 400	170	3.8	42.2	550	750	200	99	Ccp, Py
Cu3	21.1	32.1	8 200	180	5.3	44.9	620	490	178.5	91	Ccp, Py
Cu5	19.90	33.0	8 190	170	5.1	42.7	660	510	230	103.5	Ccp, Py
Cu7	19.25	31.4	6 590	170	4.4	43.5	660	600	200	115	Ccp, Py
Cu9	20.1	33.4	7 390	180	4.5	43.4	650	590	216	107	Ccp, Py
Cu11	21.4	33.4	8 170	200	4.6	48.5	630	690	199	99	Ccp, Py
Cu13	21.4	32.2	6 730	180	5.0	44.7	560	580	182.5	89	Ccp, Py
Cu15	22.1	31.9	7 810	190	4.4	45.3	464	580	168	87	Ccp, Py
Cu17	20.5	31.9	7 060	170	4.8	44.5	560	530	196	98	Ccp, Py
Cu19	22.4	31.6	6 430	180	4.7	44.6	750	550	165.5	80	Ccp, Py
Cu21	21.1	32.1	6 780	180	5.5	45.1	760	630	170.5	83	Ccp, Py
Cu23	23.1	32.4	1 790	190	3.6	46.8	580	620	153	81	Ccp, Py
Cu25	22.8	32.6	1 930	190	4.9	46.8	530	620	160.5	82	Ccp, Py
Cu27	22.4	32.9	1 610	200	4.7	46.8	620	590	181	86	Ccp, Py
Cu29	21.2	31.0	6 920	190	4.6	44.2	780	520	152	74	Ccp, Py
Mo1	2.14	4.4	>10 000	250	16.4	45.4	67	350	34	22	Mol, Ccp

4 结论

(1) 普朗矿床中 Se 的主要寄主矿物为黄铜矿和辉钼矿,这一特征与多数斑岩(-矽卡岩)型铜多金属矿床一致;在 Te 的赋存方面,尽管其主要寄主矿物同为辉钼矿,但该矿床中辉钼矿对 Te 的富集程度显著高于多数同类矿床。

(2) 普朗矿床首采区(主矿段)勘探线的硫化物 Se 和 Te 含量显著高于东部矿段勘探线,但在单一勘探线剖面上,硫化物中 Se 和 Te 的含量随深度增加未呈现明显变化趋势。

(3) 普朗矿床铜、钼精矿中的伴生 Se 均达到综合回收经济指标($>100 \times 10^{-6}$),具备回收价值,但伴生 Te 综合回收经济价值相对有限。

(4) 依据普朗矿床探明的 5.11 Mt 铜资源量、铜精矿中 21% 的 Cu 占比及其 182.5×10^{-6} 的 Se 平均含量估算,该矿床 Se 潜在资源量约为 4 440 t,达超大型规模。该发现对保障硒资源安全供应、优化资源战略布局具有关键作用,能够有效缓解我国硒资源供应压力。

附表见 <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.145>。

References

- Auclair, G., Fouquet, Y., Bohn, M., 1987. Distribution of Selenium in High-Temperature Hydrothermal Sulfide Deposits at 13 Degrees North, East Pacific Rise. *The Canadian Mineralogist*, 25(4): 577—587.
- Cao, D. H., Wang, A. J., Li, W. C., et al., 2009. Magmatic Mixing of Pulang Porphyry Copper Deposit: Petrological and Element Geochemical Evidence. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 166—175 (in Chinese with English abstract).
- Cao, K., Yang, Z.M., Mavrogenes, J., et al., 2019. Geology and Genesis of the Giant Pulang Porphyry Cu-Au District, Yunnan, Southwest China. *Economic Geology*, 114(2): 275—301. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2019.4631>
- Chen, B. H., Ding, J. H., Ye, H. S., et al., 2020. Metallogenetic Regularity of Selenium Ore in China. *Mineral Deposits*, 39(6): 1063—1077 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2020.06.007>
- Deng, J., Wang, C. M., Li, W. C., et al., 2014. The Situation and Enlightenment of the Research of the Tectonic Evolution and Metallogenesis in the Sanjiang Tethys. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 52—64 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., Wang, Q. F., Li, G. J., 2016. Superimposed Orogeny and Composite Metallogenetic System: Case Study from the Sanjiang Tethyan Belt, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2225—2247 (in Chinese with English abstract).

- Guo, X. Z., Zhou, T. F., Wang, F. Y., et al., 2023. Distribution of Co, Se, Cd, In, Re and Other Critical Metals in Sulfide Ores from a Porphyry-Skarn System: A Case Study of Chengmenshan Cu Deposit, Jiangxi, China. *Ore Geology Reviews*, 158: 105520. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105520>
- Han, Z. K., Chen, Z. Z., Pan, Z. S., et al., 2025. Analysis of the Supply and Demand Dynamics of Tellurium Resources in China by 2035. *China Mining Magazine*, 34(2): 297—305 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Zhou, J. R., et al., 2001. Collision Orogenic Processes of the Yidun Arc in the Sanjiang Region: Record of Granites. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 484—497 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Y. Q., Qu, X. M., et al., 2004. Tectonic Evolution and Mineralization Systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109—120 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. P., Guan, S. J., Su, Y., et al., 2024. Characteristics of Ore-Forming Fluids and Genesis of the First Mining Area and Eastern Ore Section of the Pulang Porphyry Copper Deposit, Southeastern China: A Comparative Study. *Minerals*, 14(1): 98. <https://doi.org/10.3390/min14010098>
- Jiang, J. C., Xu, J., Xie, G. Q., et al., 2025. Occurrence and Distribution of Se and Te in the Jilongshan Au-Cu Skarn Deposit from the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, China. *Ore Geology Reviews*, 176: 106439. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106439>
- John, D. A., Taylor, R. D., 2016. By-Products of Porphyry Copper and Molybdenum Deposits. *Acta Geochimica*, 36(1):1—7. <https://doi.org/10.5382/rev.18.07>
- Keith, M., Smith, D. J., Jenkin, G. R. T., et al., 2018. A Review of Te and Se Systematics in Hydrothermal Pyrite from Precious Metal Deposits: Insights into Ore-Forming Processes. *Ore Geology Reviews*, 96: 269—282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>
- Leng, C. B., Chen, T. L., Ren, Z., et al., 2023. Distribution Characteristics and Differential Enrichment Mechanism of Rhenium in Molybdenite in the Dexing Copper Ore Field. *Acta Petrologica Sinica*, 39(10): 3107—3120 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. C., Liu, X. L., 2015. The Metallogenic Regularity Related to the Tectonic and Petrographic Features of Pulang Porphyry Copper Orefield, Yunnan, and Its Ore-Controlling Characteristics. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 53—66 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.04.007>
- Li, W. C., Yin, G. H., Yu, H. J., et al., 2011. The Porphyry Metallogenesis of Geza Volcanic Magmatic Arc in NW Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2541—2552 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. C., Zhang, X. F., Yu, H. J., et al., 2022. Geology and Mineralization of the Pulang Supergiant Porphyry Copper Deposit (5.11 Mt) in Shangri-La, Yunnan Province, China: A Review. *China Geology*, 5(4): 662—695. <https://doi.org/10.31035/cg2022060>
- Li, W. K., Yang, Z. M., Cao, K., et al., 2019. Redox-Controlled Generation of the Giant Porphyry Cu-Au Deposit at Pulang, Southwest China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(2): 12. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1546-x>
- Li, X. H., Xie, G. Q., Jian, W., et al., 2024. Distribution of Tellurium, Selenium, Cobalt and Gold in Sulfide Minerals: A Case Study of the Jiguanzui Porphyry-Skarn Au-Cu Deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 175: 106318. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106318>
- Liu, J. J., Zhai, D. G., Liu, X. H., et al., 2011. Research Status of Extraordinary Enrichment of Selenium and Tellurium in Gold Deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 267—269 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2011.s1.102>
- Liu, J. J., Zhai, D. G., Wang, D. Z., et al., 2020. Classification and Mineralization of the Au-(Ag)-Te-Se Deposits. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 79—98 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.2020.3.13>
- Liu, J. T., Yang, L. Q., Lyu, L., 2013. Pulang Reduced Porphyry Copper Deposit in the Zhongdian Area, Southwest China: Constraints by the Mineral Assemblages and the Ore-Forming Fluid Compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3914—3924 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. L., Li, W. C., Yin, G. H., 2012. Lead Isotope Characteristics and Tracing Significance of Ore Metallogenic Material in Geza Arc Metallogenic Belt, Yunnan. *Geoscience*, 26(3): 445—452 (in Chinese with English abstract).
- Maslennikov, V. V., Ayupova, N. R., Maslennikova, S. P., et al., 2017. Criteria for the Detection of Hydrothermal Ecosystem Faunas in Ores of Massive Sulfide Deposits in the Urals. *Lithology and Mineral Resources*, 52(3): 173—191. <https://doi.org/10.1134/S002449021703004X>

- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., et al., 2011. Iolite: Free-ware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>
- Ren, J. B., Xu, J. F., Chen, J. L., 2011. Zircon Geochronology and Geological Implications of Ore-Bearing Porphyries from Zhongdian Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2591–2599 (in Chinese with English abstract).
- Revan, M. K., Genç, Y., Maslennikov, V. V., et al., 2014. Mineralogy and Trace-Element Geochemistry of Sulfide Minerals in Hydrothermal Chimneys from the Upper-Cretaceous VMS Deposits of the Eastern Pontide Orogenic Belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63: 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>
- Shen, Q. W., Wang, D. Z., Leng, C. B., et al., 2023. Discovery of Telluride and Selenide in the Giant Pulang Porphyry Cu - Au Deposit, Yunnan Province. *Rock and Mineral Analysis*, 42(3): 643–646 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202303180038>
- Tu, G. C., 2000. Preliminary Discussion on Tellurium Mineralization. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 211–214 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Liang, F., Wang, Y. J., et al., 2025. Occurrence States and Enrichment Mechanisms of Low-Melting Point Copper-Philic Element and Noble Metals in Porphyry System: A Case Study of the Pulang Porphyry Cu-Au Deposit, Southeast Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 41(2): 621–641 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Z., Liu, J. J., Liu, Z. J., et al., 2024. Types, Distribution and Resource Potential of Selenium Deposits in China. *China Mining Magazine*, 33(4): 39–50 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. L., Li, T. F., Kang, L., et al., 2021. Study on the PTX Parameters and Fractal Characteristics of Ore-Forming Fluids in the East Ore Section of the Pulang Copper Deposit, Southwest China. *Journal of Earth Science*, 32(2): 390–407. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1448-5>
- Xie, G. Q., Ji, Y. H., Wu, X. L., et al., 2025. Study on Skarn Deposit Model. *Geological Bulletin of China*, 44(S1): 201–219 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Wu, X. L., Li, X. H., et al., 2024. A Primary Study on the Current Status and Mineralization Regularities of Associated Te and Se Resources in Porphyry - Skarn Cu Polymetallic Deposits in the Middle - Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(1): 35–48, 5 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Y. Y., Zhou, T. F., Fan, Y., et al., 2022. Enrichment Mechanisms and Occurrence Regularity of Critical Minerals Resources in the Yaojialing Zn Skarn Polymetallic Deposit, Tongling District, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 144: 104822. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104822>
- Yang, Q., Ren, Y. S., Chen, S. B., et al., 2019. Geological, Geochronological, and Geochemical Insights into the Formation of the Giant Pulang Porphyry Cu (-Mo -Au) Deposit in Northwestern Yunnan Province, SW China. *Minerals*, 9(3): 191. <https://doi.org/10.3390/min9030191>
- Yang, Z., Zhang, X. F., 2021. Multiphase Intrusion at the Giant Pulang Porphyry Cu - Au Deposit in Western Yunnan (Southwestern China): Comparison between Ore-Causative and Barren Intrusions. *Mineralogy and Petrology*, 115(2): 223–240. <https://doi.org/10.1007/s00710-020-00734-8>
- Yang, Z., Zhang, X. F., Yuan, Y. S., et al., 2021. Hydrothermal Evolution and Mineralization of the Pulang Porphyry Cu - Au Deposit in the Sanjiang Tethys, Southwest China: Constraints from Fluid Inclusions and D-O-S Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 139: 104430. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104430>
- Yang, Z. M., Cooke, D. R., 2019. Porphyry Copper Deposits in China. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 133–187. <https://doi.org/10.5382/SP.22.05>
- Zeng, P. S., Li, W. C., Wang, H. P., et al., 2006. Indosiman Super-Large Porphyry Copper Deposit in Pulang, Yunnan Province: Petrological and Chronological Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 989–1000 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Chen, H. Y., Cheng, J. M., et al., 2022. Pyrite Geochemistry and Its Implications on Au - Cu Skarn Metallogenesis: An Example from the Jiguanzui Deposit, Eastern China. *American Mineralogist*, 107(10): 1910–1925. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8118>
- Zhao, X. Y., Tang, Z. C., Deng, M. G., et al., 2025. Genesis of the Pulang Polymetallic Mineralization System in Yunnan Province, China: Insights from In Situ Trace Element and S Isotope Analyses of Pyrite. *Journal of Geochemical Exploration*, 278: 107848. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107848>
- Zhu, Q. Q., Xie, G. Q., Gao, R., et al., 2025. Diversified

- Enrichment Regularity of Dispersed Elements of Chengmenshan Cu Polymetallic Deposit from Jiangxi Province. *Earth Science*, 50(7): 2667–2688 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. D., Li, Z. Z., Li, Z. P., et al., 2023. Geochemical Characteristics of Tectonic(Altered Rock) in the Initial Mining Area and Prospecting Prediction of Yunnan Pulang Porphyry Copper Deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(5): 1002–1017 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddg-zyckx.2023.05.005>
- ### 中文参考文献
- 曹殿华, 王安建, 李文昌, 等, 2009. 普朗斑岩铜矿岩浆混合作用: 岩石学及元素地球化学证据. *地质学报*, 83(2): 166–175.
- 陈炳翰, 丁建华, 叶会寿, 等, 2020. 中国硒矿成矿规律概要. *矿床地质*, 39(6): 1063–1077.
- 邓军, 王长明, 李文昌, 等, 2014. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究态势及启示. *地学前缘*, 21(1): 52–64.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健, 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析. *岩石学报*, 32(8): 2225–2247.
- 韩中奎, 陈子瞻, 潘昭帅, 等, 2025. 2035 年我国碲资源供需形势分析. *中国矿业*, 34(2): 297–305.
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等, 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录. *地质学报*, 75(4): 484–497.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109–120.
- 冷成彪, 陈涛亮, 任志, 等, 2023. 德兴斑岩矿田辉钼矿中铼的分布特征及富集机制. *岩石学报*, 39(10): 3107–3120.
- 李文昌, 刘学龙, 2015. 云南普朗斑岩型铜矿田构造岩相成矿规律与控矿特征. *地学前缘*, 22(4): 53–66.
- 李文昌, 尹光侯, 余海军, 等, 2011. 滇西北格咱火山-岩浆弧斑岩成矿作用. *岩石学报*, 27(9): 2541–2552.
- 刘家军, 翟德高, 刘新会, 等, 2011. 金矿床中硒、碲超常富集研究现状. *矿物学报*, 31(S1): 267–269.
- 刘家军, 翟德高, 王大钊, 等, 2020. Au-(Ag)-Te-Se 成矿系统与成矿作用. *地学前缘*, 27(2): 79–98.
- 刘江涛, 杨立强, 吕亮, 2013. 中甸普朗还原性斑岩型铜矿床: 矿物组合与流体组成约束. *岩石学报*, 29(11): 3914–3924.
- 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 2012. 云南格咱岛弧岩浆成矿带铅同位素特征及成矿物质来源示踪. *现代地质*, 26(3): 445–452.
- 任江波, 许继峰, 陈建林, 2011. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义. *岩石学报*, 27(9): 2591–2599.
- 沈啟武, 王大钊, 冷成彪, 等, 2023. 云南普朗超大型斑岩铜金矿床中发现碲化物和硒化物. *岩矿测试*, 42(3): 643–646.
- 涂光炽, 2000. 初论碲的成矿问题. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 211–214.
- 王大钊, 梁丰, 王艳军, 等, 2025. 斑岩系统中低熔点亲铜元素与稀贵金属赋存状态和富集机制研究: 以藏东南普朗超大型斑岩 Cu-Au 矿床为例. *岩石学报*, 41(2): 621–641.
- 王冠智, 刘家军, 柳振江, 等, 2024. 中国硒矿的矿床类型、分布与资源潜力. *中国矿业*, 33(4): 39–50.
- 谢桂青, 纪云昊, 吴晓林, 等, 2025. 砂卡岩矿床模型研究. *地质通报*, 44(S1): 201–219.
- 谢桂青, 吴晓林, 李新昊, 等, 2024. 长江中下游斑岩-砂卡岩铜多金属矿床共伴生碲、硒资源现状和成矿规律浅析. *矿物岩石地球化学通报*, 43(1): 35–48, 5.
- 曾普胜, 李文昌, 王海平, 等, 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征. *岩石学报*, 22(4): 989–1000.
- 朱乔乔, 谢桂青, 高任, 等, 2025. 江西城门山铜多金属矿床中稀散元素的差异化富集规律. *地球科学*, 50(7): 2667–2688.
- 朱振东, 李正章, 李志鹏, 等, 2023. 云南普朗铜矿首采区构造(蚀变岩)地球化学特征及找矿预测. *大地构造与成矿学*, 47(5): 1002–1017.