

沈啟武, 王大钊, 冷成彪, 等. 云南普朗超大型斑岩铜金矿床中发现碲化物和硒化物[J]. 岩矿测试, 2023, 42(3): 643–646. doi: 10.15898/j.ykcs.202303180038.

SHEN Qiwu, WANG Dazhao, LENG Chengbiao, et al. Discovery of Telluride and Selenide in the Giant Pulang Porphyry Cu-Au Deposit, Yunnan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2023, 42(3): 643–646. doi: 10.15898/j.ykcs.202303180038.

云南普朗超大型斑岩铜金矿床中发现碲化物和硒化物

沈啟武¹, 王大钊^{2*}, 冷成彪², 余海军³, 张传昱³, 苏肖宇³, 毛金伟², 梁丰²

- (1. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 香格里拉 674400;
2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
3. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216)

碲和硒是稀散元素, 在高新科技领域具有重要应用, 已被中国和欧美国家列为战略性关键矿产资源^[1-2]。一直以来全球碲、硒矿产资源主要产自斑岩-矽卡岩铜金矿床, 如中国广东大宝山铜矿和江西城门山铜矿^[3-4], 研究斑岩矿床中碲、硒的产出情况对国家资源战略保障具有重要意义。云南普朗斑岩型铜金矿床位于三江特提斯成矿域义敦岛弧南部, 属于超大型斑岩矿床, 已探明铜资源储量 4.31Mt, 金资源量 113t^[5]。矿区内出露的地层为中三叠统尼汝组 and 上三叠统图姆沟组, 侵入岩为普朗复式岩体, 由石英闪长玢岩 (~ 216Ma)、石英二长斑岩 (~ 215Ma) 和花岗闪长斑岩 (~ 206Ma) 组成, 岩体出露总面积约为 11km²(图 1)。前人对普朗矿床的地质特征、成岩成矿时代、成矿物质来源、成矿流体性质等作了大量工作, 但对矿床中碲硒的含量和赋存状态等研究还较为薄弱。本文报道了普朗矿床中产出的碲化物和硒化物, 以期对斑岩矿床中碲硒的勘查和综合利用提供资料。

本次研究对象主要为普朗矿床中的铜精矿和钼精矿样品, 测试分析均在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。样品的矿相学观察利用 ZEISS Axio Scope A1 光学显微镜及 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电镜完成, 扫描电镜的加速电压为 20kV, 发射电流为 10μA^[6]。矿物成分利用 JXA-8530F Plus 型电子探针分析完成, 实验设定加速电压为 15kV, 电流为 20nA, 探针直径为 1μm, 使用 ZAF

方法对 X 射线强度进行校正。分析标样选择砷化镓(As), 黄铜矿(Cu), 黄铁矿(Fe、S), 自然银(Ag), 碲铋矿(Te、Bi), 辉钼矿(Mo), 自然铅(Pb), 自然锑(Sb), 硒化镉(Se), 自然金(Au), 自然铂(Pt), 自然钯(Pd)。测试主量元素的精确度和准确度均小于 2%。

普朗铜金矿床中的碲和硒含量高, 并形成大量碲化物、硒化物和富硒矿物。矿床精矿中的碲和硒含量分别达 74.3×10^{-6} 和 270×10^{-6} 。碲在钾化带中的含量为 $0.3 \times 10^{-6} \sim 0.43 \times 10^{-6}$, 较绢英岩化带中的高 ($0.02 \times 10^{-6} \sim 0.12 \times 10^{-6}$), 由矿体中心向外, 碲品位逐渐降低^[7]。硒在钾化带和绢英岩化带的含量无明显差别, 分别为 $1.49 \times 10^{-6} \sim 2.44 \times 10^{-6}$ 和 $1.04 \times 10^{-6} \sim 3.00 \times 10^{-6}$ 。矿石中的碲与金呈正相关关系, 硒与银呈正相关关系。普朗铜矿床中, 碲和硒主要以碲化物、硒化物和富硒矿物形式存在, 形成辉碲铋矿、碲钼矿、硒银矿和富硒方铅矿等(图 2)。辉碲铋矿是普朗含量最多的碲化物, 反射光下为白色略带淡蓝色, 矿物成分较均一, Bi 含量为 58.36% ~ 61.24%, Te 含量为 31.03% ~ 34.50%, S 含量为 3.76% ~ 4.54%(图 2e)。普朗辉碲铋矿中含有较高的 Se(0.77% ~ 3.63%)。辉碲铋矿的化学式为 $\text{Bi}_{2.02 \sim 2.08}(\text{Te}_{1.74 \sim 1.93} \text{S}_{0.85 \sim 1.01} \text{Se}_{0.08 \sim 0.33})_{2.90 \sim 2.98}$ 。碲钼矿属于独立铂族元素矿物, 在自然界很少见, 中国斑岩矿床中仅江西德兴有报道^[8], 在全球其他斑岩矿床中非常少见。普朗碲钼矿粒径为 1 ~ 5μm, 反射光下呈亮白色(图 2a)。

收稿日期: 2023-03-18; 修回日期: 2023-04-19; 接受日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(92062219); 云南迪庆有色金属有限责任公司勘查项目(DQYS-SCB-08-(2022)031)

第一作者: 沈啟武, 高级工程师, 主要从事金属矿床的开发与研究工作。E-mail: 1423229078@qq.com。

通信作者: 王大钊, 副研究员, 主要从事矿床学方面的研究与教学工作。E-mail: dazhaowang@foxmail.com。

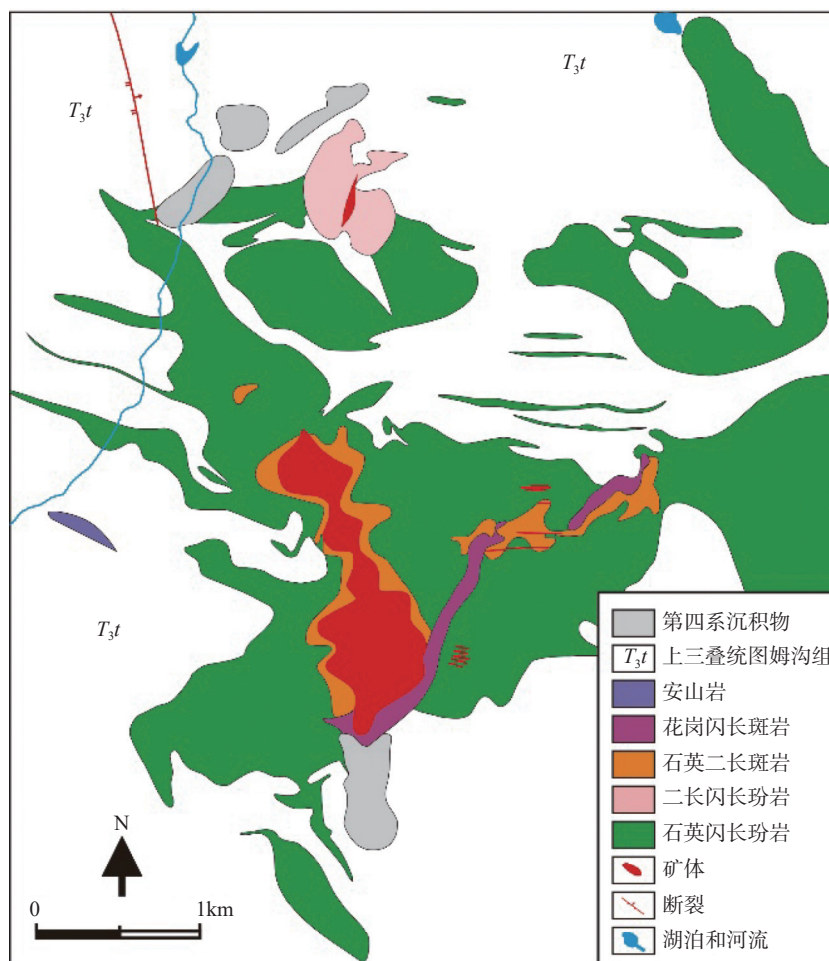


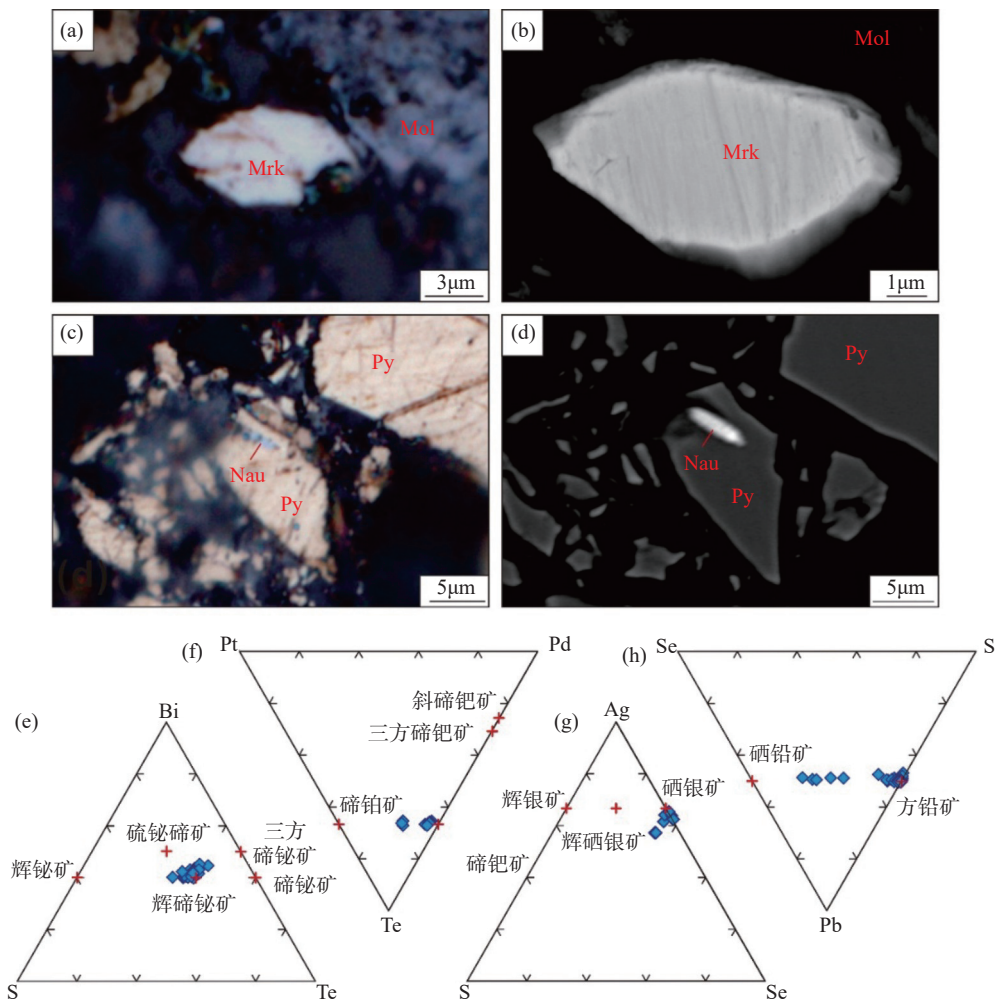
图1 普朗斑岩铜金矿床地质简图(据 Leng 等^[5] 修改)

Fig. 1 Geological map of the Pulang porphyry Cu-Au deposit (Modified from Leng, et al^[5]).

碲钼矿中 Pd 和 Pt 可以类质同象取代,因此含量变化较大, Pd 含量为 16.26% ~ 25.69%, Pt 含量为 4.82% ~ 17.66%, Te 含量为 61.25% ~ 66.76%(图 2f)。碲钼矿化学式为 $(\text{Pd}_{0.64 \sim 0.98}\text{Pt}_{0.09 \sim 0.37})_{0.98 \sim 1.03}\text{Te}_{1.97 \sim 1.02}$ 。硒银矿是普朗含量最多的硒化物,反射光下为白色带微蓝绿色(图 2c)。硒银矿中普遍含 S, 含量为 0.55% ~ 2.65%, Ag 含量普遍偏低,为 70.22% ~ 72.77%, Se 含量为 24.09% ~ 27.31%(图 2g)。硒银矿化学式为 $\text{Ag}_{1.89 \sim 1.98}(\text{Se}_{0.87 \sim 1.01}\text{S}_{0.05 \sim 0.24})_{1.02 \sim 1.11}$ 。富硒方铅矿属于 $\text{PbS}_{1-x}\text{Se}_x$ 矿物,其中 x 值可在 0 ~ 1 之间连续变化。普朗富硒方铅矿 S 和 Se 的含量变化大,分别为 4.01% ~ 12.52% 和 1.85% ~ 19.13%, Pb 含量为 73.91% ~ 82.52%, 大多数样品中含有 Ag, 最高含量达 1.61%。普朗富硒方铅矿形成了较完整的 PbS-PbSe 固溶体系列(图 2h), 化学式为 $\text{Pb}_{0.98 \sim 1.01}(\text{S}_{0.35 \sim 0.97}\text{Se}_{0.07 \sim 0.67})_{0.99 \sim 1.02}$ 。

矿床中的碲和硒可以指示物质来源和成矿过程。碲和硒具有亲硫特点,碲会部分进入硫化物晶格,但

更易形成碲的独立矿物;硒属于强亲硫元素,在较高温的条件下易于进入硫化物晶格,在中低温条件下,硫含量较低时,可形成硒的独立矿物。洋壳中的铁锰结壳、页岩及浮游沉积物等是自然界中碲和硒的重要储库^[9],因此在洋陆俯冲过程中,大陆岩石圈地幔和洋壳的部分熔融会形成富碲、硒的岩浆^[10-11]。碲和硒在硫化物熔体中的相容性很高($D_{\text{硫化物/硅酸盐}}^{\text{碲}} > 600$),碲倾向于存在液相硫化物(SL)中,而硒则更易进入单硫化物固熔体(MSS)($D_{\text{SL/硅酸盐}}^{\text{Te}}/D_{\text{MSS/硅酸盐}}^{\text{Se}}$ 为 5 ~ 9, $D_{\text{MSS/硅酸盐}}^{\text{Te}}/D_{\text{MSS/硅酸盐}}^{\text{Se}}$ 为 0.5 ~ 0.8)^[12]。当富碲、硒的岩浆到达下地壳,会结晶分异形成富 Co、Ni 的硅酸盐矿物,碲、硒存在硫化物熔体中继续向上运移;当岩浆到达中地壳,温度低于 900℃ 时,硫化物熔体与 Te-Se 熔体发生相分离;当岩浆到达上地壳,侵位形成斑岩体及 Cu 矿床, Ag-Pt-Pd 则高度集中在富 Te-Se 熔体中,并最终形成贵金属矿物^[13]。普朗铜金矿床中的碲和硒可能与区内晚三叠世的俯



a—碲钼矿反射光镜下照片；b—碲钼矿 BSE 照片；c—硒银矿反射光镜下照片；d—硒银矿 BSE 照片；e—Bi-Te-S 体系三元图；f—Te-Pd-Pt 体系三元图；g—Ag-Se-S 体系三元图；h—Pb-Se-S 体系三元图。Mol—辉钼矿；Mrk—碲钼矿；Nau—硒银矿；Py—黄铁矿。

图2 碲硒矿物显微照片及矿物元素含量三元图

Fig. 2 Photomicrographs of tellurium and selenium minerals and ternary plots of element contents. a—Reflected light photomicrograph of merenskyite; b—BSE image of merenskyite; c—Reflected light photomicrograph of naumannite; d—BSE image of naumannite; e—Ternary plot of Bi-Te-S system; f—Ternary plot of Te-Pd-Pt system; g—Ternary plot of Ag-Se-S system; h—Ternary plot of Pb-Se-S system. Mol=Molybdenite, Mrk=Merenskyite, Nau=Naumannite, Py=Pyrite.

冲造山密切相关, 富碲和硒的岩浆也促进了铂族元素的富集成矿。

普朗斑岩铜金矿床中碲化物和硒化物的发现, 对资源的综合利用及矿床成因研究具有重要意义。

矿床中碲和硒的资源量规模大, 大部分以独立矿物形式存在, 且常与 Au-Ag-PGE 共生, 具有较好的经济回收利用价值。碲化物和硒化物的产出也为成矿物质来源及岩浆演化过程提供了新的研究方向。

Discovery of Telluride and Selenide in the Giant Pulang Porphyry Cu-Au Deposit, Yunnan Province

SHEN Qiwu¹, WANG Dazhao^{2*}, LENG Chengbiao², YU Haijun³, ZHANG Chuanyu³,
SU Xiaoyu³, MAO Jinwei², LIANG Feng²

(1. Yunnan Diqing Nonferrous Metal Co. LTD., Shangrila 674400, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. Yunnan Geological Survey, Kunming 650216, China)

参考文献

- [1] 温汉捷,周正兵,朱传威,等. 稀散金属超常富集的主要科学问题[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3271–3291.
Wen H J, Zhou Z B, Zhu C W. Critical scientific issues of super-enrichment of dispersed metals[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(11): 3271–3291.
- [2] 何伟,吴亮,魏向成,等. 宁东煤田中侏罗统延安组稀有稀散稀土元素地球化学特征及其对沉积环境的指示意义[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(6): 962–977.
He W, Wu L, Wei X C, et al. Geochemical characteristics of rare, dispersed, and rare earth elements in the middle Jurassic Yan'an Formation of the Ningdong coalfield and their indication for a sedimentary environment[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(6): 962–977.
- [3] 国显正,周涛发,汪方跃,等. 长江中下游成矿带城门山斑岩-矽卡岩型铜金矿床碲元素赋存状态及沉淀机制初步研究[J]. *岩石学报*, 2021, 37(9): 2723–2742.
Guo X Z, Zhou T F, Wang F Y, et al. Study of occurrence states and precipitation mechanism of tellurium in Chengmenshan porphyry-skarn deposit from the middle-lower Yangtze River valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(9): 2723–2742.
- [4] 邓明华,方贵聪,赵如意,等. 广东大宝山铜多金属矿床伴生碲铋矿物特征及其指示意义[J]. *矿产与地质*, 2022, 36(5): 962–970.
Deng M H, Fang G C, Zhao R Y, et al. Characteristics of associated Te-Bi-minerals and its indicative significance of Dabaoshan copper polymetallic deposit in Guangdong Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2022, 36(5): 962–970.
- [5] Leng C B, Cooke D R, Hou Z Q, et al. Quantifying exhumation at the giant Pulang Porphyry Cu-Au deposit using U-Pb-He dating[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(5): 1077–1092.
- [6] 王冠,戴婕,王坤阳,等. 应用能谱-扫描电镜分析铜矿床伴生元素的赋存状态[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(5): 659–669.
- [7] 吴维虎,陈明勇,舒华伟,等. 云南普朗斑岩型铜矿伴生铂族铋元素调查及资源潜力分析[J]. *矿产与地质*, 2021, 35(4): 610–616.
Wu W H, Chen M Y, Shu H W, et al. Research and analysis of the potential resources of associated platinum group and rhenium elements in Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, 35(4): 610–616.
- [8] 胡淙声. 江西德兴斑岩铜矿中的碲钼矿[J]. *矿物学报*, 1982(4): 248–249.
Hu C S. Merenskyite in Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1982(4): 248–249.
- [9] Hein J R, Koschinsky A, Halliday A N. Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(6): 1117–1127.
- [10] Harris C R, Pettke T, Heinrich C A, et al. Tethyan mantle metasomatism creates subduction geochemical signatures in non-arc Cu-Au-Te mineralizing magmas, Apuseni Mountains (Romania)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 366(1): 122–136.
- [11] Jensen E P, Barton M D. Gold deposits related to alkaline magmatism[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13(1): 279–314.
- [12] Brenan J M. Se-Te fractionation by sulfide-silicate melt partitioning: Implications for the composition of mantle-derived magmas and their melting residues[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422(1): 45–57.
- [13] Holwell D A, Fiorentini M, McDonald I, et al. A metasomatized lithospheric mantle control on the metallogenic signature of post-subduction magmatism[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3511.