

四川丹巴独狼沟金矿中金与碲铋矿物的赋存状态及金的富集机制

马天祺¹, 张燕¹, 陈翠华¹, 李引¹, 陈曦², 杨玉龙¹, 刘舒月¹,
辜鹰¹, 赖翔¹

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 独狼沟金矿是位于丹巴成矿带中穹窿边缘的典型的石英脉型金矿, 矿床中发育大量明金与碲铋矿物。本文以独狼沟金矿中碲铋矿物及自然金为主要研究对象, 通过显微岩相学观察、扫描电镜、能谱以及电子探针分析, 对矿床中碲铋矿物和自然金的赋存状态进行了较为详细的研究, 并对金的富集机制进行了探讨。结果表明, 碲铋矿物与自然金主要在成矿Ⅱ、Ⅲ阶段产出, 矿石中自然金主要为含银自然金, 成色整体偏高, 平均为881。碲铋矿物主要有楚碲铋矿、叶碲铋矿、赫碲铋矿、硫碲铋矿B、未命名碲铋矿物(Bi_2Te 、 Bi_8Te_3 、 Bi_3Te)以及自然铋, 碲铋矿物与自然金具密切的时空关系。结合前人流体包裹体的研究结果, 认为成矿Ⅱ阶段到Ⅲ阶段过渡的过程中温度以及体系中碲逸度的降低是矿床中多种碲铋矿物相形成的关键, 独狼沟金矿成矿的物理化学条件以及碲铋矿物与自然金的矿物特征均指示成矿过程中金-铋-碲熔体对热液中金金的抽取是导致自然金富集的关键。

关键词: 独狼沟金矿; 碲铋矿物; 富集机制; 矿物特征; 四川丹巴

中图分类号: P618.51; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)04-0541-14

The occurrence state of gold and tellurium-bismuth minerals and enrichment mechanism of gold in Dulanggou gold deposit of Danba, Sichuan Province

MA Tian-qi¹, ZHANG Yan¹, CHEN Cui-hua¹, LI Yin¹, CHEN Xi², YANG Yu-long¹, LIU Shu-yue¹,
GU Ying¹ and LAI Xiang¹

(1. College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Earth Sciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The Dulanggou gold deposit is a typical quartz vein type gold deposit, which is located at the edge of the dome in the Danba metallogenic belt. A large number of visible gold and tellurium-bismuth minerals are developed in the deposit. Taking tellurium-bismuth minerals and native gold in Dulanggou gold deposit as the main research object, the occurrence states of tellurium-bismuth minerals and native gold in the deposit were studied in detail through microscopic petrography observation, scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and electron probe analysis. Simultaneously, the enrichment mechanism of gold was also discussed. The results show that native gold and tellurium-bismuth minerals were mainly produced in the Ⅱ and Ⅲ mineralization stages of the Dulanggou gold deposit. The native gold in the Ⅱ and Ⅲ mineralization stages is mainly silver-bearing native gold,

收稿日期: 2022-12-13; 接受日期: 2023-05-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 四川省科技厅面上项目(2018JY0477); 四川省科技厅自然科学基金项目(2023NSFSC0274)

作者简介: 马天祺(1999-), 男, 硕士研究生, 地质学专业, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, E-mail: 3503913016@qq.com; 通讯作者: 陈翠华(1972-), 女, 教授, 研究方向: 矿床学、矿相学、地球化学, E-mail: chencuihua@cdut.edu.cn。

and the gold fineness is high with an average of 881, the main tellurium-bismuth minerals are tsumoite, pilsenite, hedleyite, joseite B, unnamed tellurium-bismuth minerals (Bi_2Te 、 Bi_8Te_3 、 Bi_3Te) and native bismuth. These tellurium-bismuth minerals have a close relationship with native gold in time and space. Combined with previous studies on fluid inclusions, it is suggested that the decrease of temperature and tellurium fugacity in the system from mineralization stage II to stage III are the important reasons for the formation of various tellurium-bismuth minerals. The physical and chemical conditions of the mineralization of the Dulanggou gold deposit, as well as the mineral characteristics of tellurium-bismuth minerals and native gold, indicate that the extraction of gold from the hydrothermal solution by the gold-bismuth-tellurium melt during the mineralization process is the key to the enrichment of native gold in the mineralization process.

Key words: Dulanggou gold deposit; tellurium-bismuth minerals; enrichment mechanism; mineral characteristics; Danba, Sichuan Province

Fund support: Sichuan Provincial Science and Technology Department Surface Program (2018JY0477); Natural Science Foundation Program of Sichuan Science and Technology Department (2023NSFSC0274)

四川丹巴独狼沟金矿为石英脉型金矿(凡韬, 2017),矿床中发现了大量的碲铋矿物,金多以大颗粒自然金产出。目前大多数学者对热液金矿床中金沉淀机制的研究表明,金主要以硫氢络合物的形式在成矿热液中运移,成矿流体沿区域断裂向上迁移过程中由于流体不混溶作用或流体-岩石相互作用导致金的硫氢络合物失稳、解体而发生金矿化(Phillips and Powell, 2010; Pitcairn *et al.*, 2010, 2015; Tomkins, 2010; Zhong *et al.*, 2015),然而流体中金络合物赋金能力较为有限,通常难以形成独狼沟金矿中这样的大颗粒自然金。值得注意的是,独狼沟金矿中大颗粒自然金与碲铋矿物密切伴生,而在国内外金矿床中,常常出现碲铋矿物,如澳大利亚的Golden Mile金矿床(Mueller and Muhling, 2020)、巴西东北部的Pedra Branca金矿床(Felipe *et al.*, 2019)、华北克拉通东北缘的五龙金矿(Wei *et al.*, 2021)、胶东玲珑金矿(冯岳川等, 2022)。近年来许多研究表明碲-铋熔体在金的运移和沉淀机制中起着关键作用,可作为热液中金的关键吸附剂(Ciobanu *et al.*, 2005; Tooth *et al.*, 2008, 2011; Cook *et al.*, 2009; 冯岳川等, 2022)。前人对独狼沟金矿床的成矿年代、成矿物质来源、流体包裹体做了详细的研究(Zhao *et al.*, 2019; 王庆飞等, 2019),但是对于独狼沟金矿的矿物学、金的富集机制方面的研究较为薄弱。

因此,本次工作结合独狼沟地区的成矿地质特征,通过显微岩相学观察、扫描电镜、能谱以及电子探针分析,对独狼沟金矿中碲铋矿物及自然金的赋存特征及化学成分进行研究。在此基础上,确定了

碲铋矿物的种类,并对多种碲铋矿物形成的原因及自然金的富集机制等问题进行了探讨。

1 地质背景

独狼沟金矿位于松潘-甘孜造山带东南缘的金汤弧形构造中(图1a、1b),由于研究区特殊的地理位置,板块活动带来复杂多变的构造应力变化使得区域造山运动频繁,丹巴地区多层次顺层剪切及穹状构造体发育,为成矿流体运移、沉淀、储藏提供了良好的空间条件。松潘-甘孜造山带东南缘金汤弧形构造的形成主要经历了:①前震旦纪基底形成;②震旦纪到中三叠世被动大陆边缘;③晚三叠世古特提斯洋的闭合带来南北向的挤压应力,形成大量褶皱以及推覆断层(Deng *et al.*, 2014; 陈敏等, 2023);④早侏罗世扬子克拉通西缘穹窿带的形成(Chen and Wilson, 1996; Wallis *et al.*, 2003);⑤新生代较为刚性的印度板块楔入较为塑性的欧亚板块(Roger *et al.*, 2004; 杨成业等, 2022)。丹巴成矿带内发育有多个跟构造穹窿相关的造山型金矿床和众多金矿化点(侯林等, 2012; 凡韬, 2017; 王昕, 2019; Zhao *et al.*, 2019)以及铂镍金属矿床(戴捷等, 2015; 王坤阳等, 2022)。

研究区大面积出露早古生代地层,但缺少寒武系,除第四系以外的地层均受到不同程度的变质作用影响(图1c)。区内地层主要见穹窿核部震旦系花岗质片麻岩,志留系茂县组二云母片岩,泥盆系羌关群角闪-黑云母片岩、石英岩。研究区内部岩浆岩出露较少,主要见南缘格宗穹窿核部澄江期斜长花

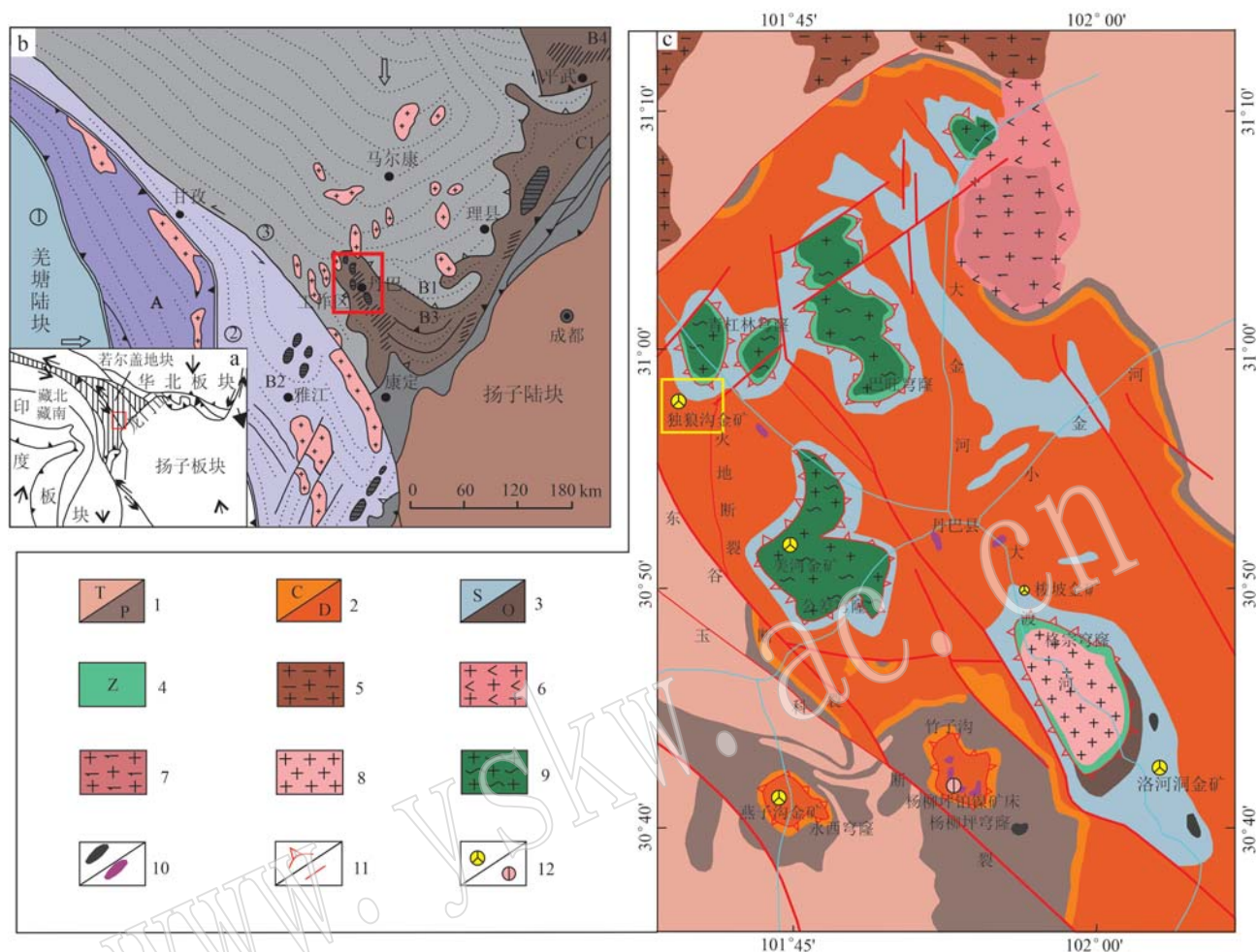


图1 丹巴独狼沟金矿大地构造位置简图(a)、大地构造图(b)、区域地质图(c) [据许志琴等(1992)、王昕(2019)修改]

Fig. 1 Simplified tectonic location map(a), tectonic map(b) and regional geological map(c) of Dulonggou gold deposit in Danba(modified after Xu Zhiqin,1992; Wang Xin, 2019)

b中:A—西部结合带;B—造山带主体(B₁—摩天岭逆冲-滑脱叠置岩片;B₂—巴彦喀拉-马尔康逆冲-滑脱叠置岩片;B₃—丹巴逆冲-滑脱叠置岩片;B₄—雅江逆冲-滑脱叠置岩片);C₁—龙门山前陆逆冲带;c中:1—三叠系/二叠系;2—石炭系/泥盆系;3—志留系/奥陶系;4—震旦系;5—燕山期黑云母花岗岩;6—燕山期角闪花岗岩;7—燕山期辉石正长岩;8—澄江期斜长花岗岩;9—混合片麻岩;10—海西期基性岩/超基性岩;11—穹窿/断层;12—金矿/铂镍矿

b:A—western conjunctive zone;B—main body of orogenic belt(B₁—Motianling thrust-detachment stack rocks;B₂—Bayankashi-Maerkang thrust-detachment stack rocks;B₃—Danba thrust-detachment stack rocks;B₄—Yajiang thrust-detachment stack rocks;C₁—Longmen Mountain foreland thrust zone;c:1—Triassic/Permian;2—Carboniferous/Devonian;3—Silurian/Ordovician;4—Sinian;5—Yanshanian biotite granite;6—Yanshanian hornblende granite;7—Yanshanian pyroxene syenite;8—Chengjiang plagiogranite;9—migmatitic gneiss;10—Hercynian basic/ultrabasic rocks;11—vault/fault;12—gold deposit/Pt-Ni deposit

岗岩以及北缘燕山期角闪花岗岩和黑云母花岗岩,另外可见少量海西期基性、超基性岩脉出露,主要分布在杨柳坪穹窿一带(凡韬,2017;王昕,2019;Zhao *et al.*, 2019)。

2 矿床地质

2.1 矿体特征

丹巴独狼沟金矿床矿区出露于泥盆系危关群第

3岩组角闪岩相沉积变质岩中。第3岩组地层倾向220°~270°,倾角46°~74°,上部为白云质大理岩,中部主要是二云石英片岩与石英岩互层,下部为石榴矽线二云母片岩,矿体主要赋存于中部的二云石英片岩及石英岩层间薄弱面上。矿区共圈定23个工业矿体,均为石英脉型矿体(图3a,3f)。主要矿体有4条,矿体严格受到构造控制,控矿断裂为火地断裂派生出的3条次级断裂,分别为F₁、F₂、F₃(图2)。F₁断层走向325°~360°,总体倾向为向西至北西,倾角

$65^{\circ}\sim 82^{\circ}$; F_2 走向 $336^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 总体倾向 $221^{\circ}\sim 275^{\circ}$, 倾角约 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$; F_3 走向与 F_2 大致平行, 倾向 $232^{\circ}\sim 264^{\circ}$, 倾角 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 其中 F_2 为主控矿断裂。矿体赋存海拔在 3 667~4 245 m 之间, 矿体多呈脉状、透镜状、雁列状产出, 整体朝西倾, 倾向多在 $230^{\circ}\sim$

310° 之间, 倾角较陡, 多在 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。勘探资料表明, 主矿体真厚度为 0.8~27.3 m, 平均 8.0 m, 扣除特高品位后的金品位在 2.6~26.3 g/t, 平均为 7.0 g/t, 包括主矿体及其他小矿体总资源量约为 50 t (凡韬, 2017; Zhao *et al.*, 2019)。

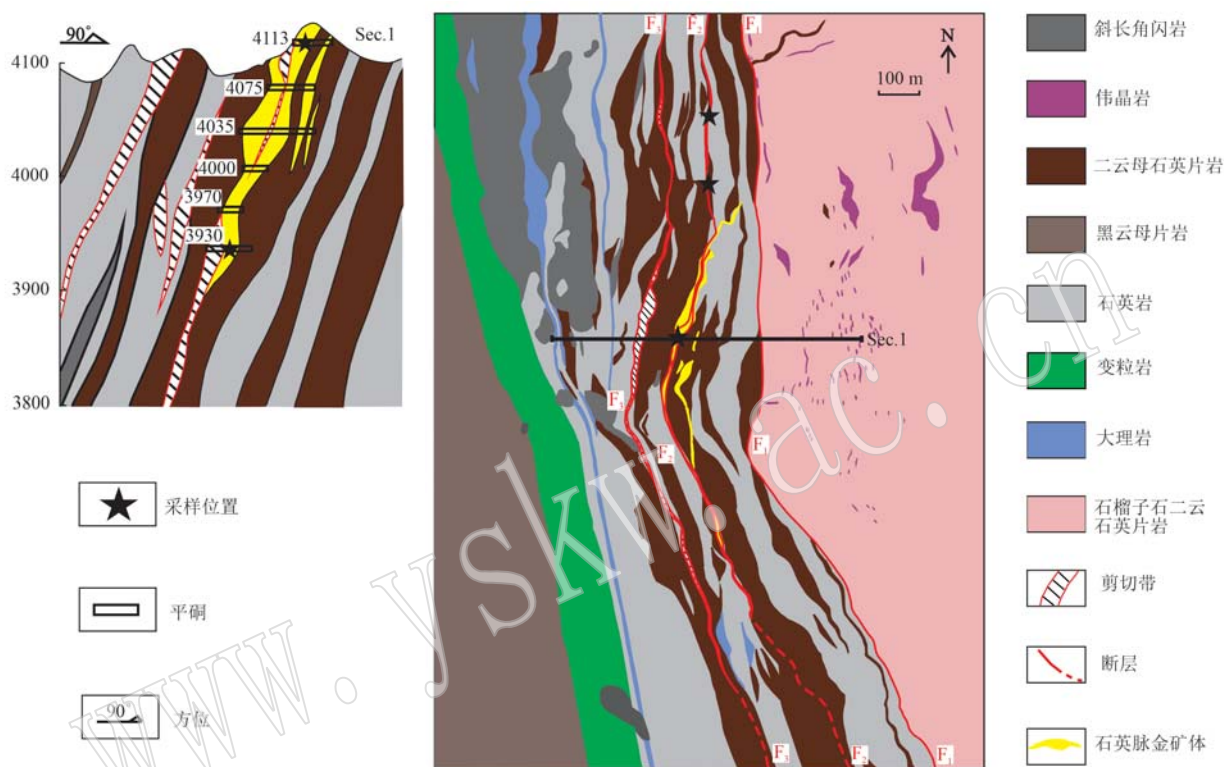


图 2 丹巴独狼沟金矿床地质图及代表性勘探线剖面图 [据 Zhao 等 (2019) 修改]

Fig. 2 Geological map and representative exploration line profile of Dulanggou gold deposit in Danba (modified after Zhao *et al.*, 2019)

2.2 矿石特征与围岩蚀变

矿石中金属矿物以磁黄铁矿为主, 其次为黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、一系列碲铋矿物、自然金。非金属矿物主要以石英为主, 有少量蚀变黑云母、绿泥石、方解石、绢云母 (图 3e、3g)。矿石可见浸染状-稀疏浸染状构造、角砾状构造、团块状构造以及脉状-网脉状构造, 其中以脉状构造为主 (图 3c、3d)。矿石结构可见他形晶结构、自形-半自形晶粒状结构、文象结构、乳滴状结构、充填结构等。

独狼沟金矿区内围岩蚀变强烈, 但蚀变分带不明显, 围岩主要发育硅化 (图 3b、3f)、黑云母化、角闪石化, 其上叠加有绢云母化蚀变, 晚期有少量碳酸盐化、绿泥石化。

2.3 热液成矿阶段划分

根据石英矿脉的野外产出特征、手标本的结构构造特征以及室内镜下详细的矿物学研究, 可将丹巴独狼沟金矿的成矿过程分为 4 个成矿阶段, 分别为石英-磁黄铁矿 (I)、碲铋矿物-粗粒自然金阶段 (II)、碲铋矿物颗粒-自然金阶段 (III)、方解石-石英阶段 (IV)。成矿 I 阶段矿石中主要见脉状或团块状磁黄铁矿集合体, 见少量黄铁矿、黄铜矿, 未见碲铋矿物, 矿石中磁黄铁矿多呈不规则团块状大面积分布, 团块粒径可 0.5~1.5 cm, 最粗可达 2~3 cm, 中心裂缝发育, 黄铁矿常呈半自形到他形或呈胶状充填于磁黄铁矿团块裂隙中 (图 4a), 黄铜矿则常在磁黄铁矿边缘少量产出。II 阶段主要以粗粒碲铋矿物和粗粒自然金为主, 碲铋矿物主要为碲铋矿、叶

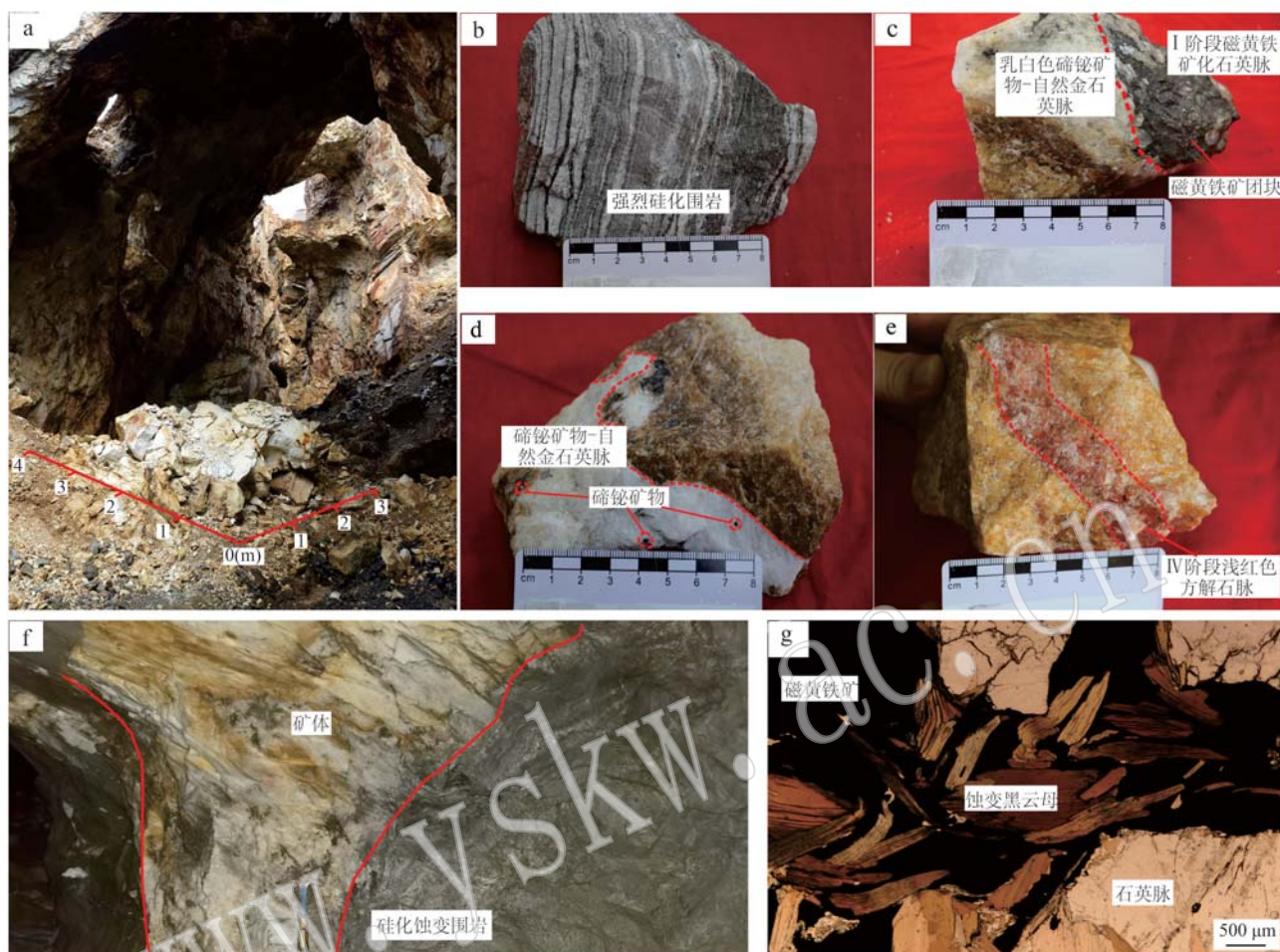


图3 独狼沟金矿野外露头、手标本及镜下蚀变特征

Fig. 3 Pictures of outcrop, hand samples and microscopic of rocks and ores in Dulangou gold deposit

a—采空矿体; b—硅化蚀变围岩; c—碲铋矿物石英脉与磁黄铁矿石英脉交界; d—碲铋矿物石英脉; e—IV阶段方解石脉; f—矿体与围岩交界; g—矿体中蚀变黑云母发育(透射单偏光)

A—mined-out ore body; b—silicified altered surrounding rock; c—the boundary of tellurium-bismuth minerals quartz vein and pyrrhotite quartz vein; d—tellurium-bismuth minerals quartz vein; e—stage IV calcite quartz vein; f—the ore body meets the surrounding rock; g—alteration biotite development in ore body (perspective single polarized light)

碲铋矿、未定名矿物(Bi_2Te)、少量赫碲铋矿和硫碲铋矿B,碲铋矿物粒径均较大,多大于 $100\text{ }\mu\text{m}$,呈不规则状产出于磁黄铁矿等金属硫化物边缘(图5e、5f、5g、5h),部分与磁黄铁矿、黄铜矿构成交代文象结构(图5a、5c),或呈不规则块状集合体单独赋存于石英中(图5b、5e、5f、5k),另外可见大块碲铋矿物中有少量方铅矿出溶(图4c)。Ⅲ阶段以生成近圆形或近椭圆形的碲铋矿物颗粒和小颗粒自然金为主(图4b、4e、4f、4g,图5i、5j、5k、5l),这种碲铋矿物颗粒通常呈群状、条带状分布于石英中,粒径通常为 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,镜下观察到这种碲铋矿物颗粒多为两相甚至三相,各相之间具有平滑的共结边,该阶段生成的主要碲铋矿物为自然铋、 Bi_3Te 、 Bi_8Te_3 。IV阶段主要

为石英方解石脉沿早阶段石英脉错碎裂隙填充,未见金矿化。

3 碲铋矿物与自然金特征

3.1 样品采集与分析

本次研究在丹巴独狼沟金矿床主要矿体的不同标高处均有采样,采集样品主要集中在1号勘探线的 $3\,930\text{ m}$ 和 $4\,113\text{ m}$ 处,在1号勘探线北部的其他两处矿点也另外采集了部分样品(图2),磨制矿物学探针片共计58片,在成都理工大学矿相实验室进行了镜下鉴定。通过矿相显微镜详细观察发现,石英-磁黄铁矿阶段(I阶段)发育少量自然金,粗粒

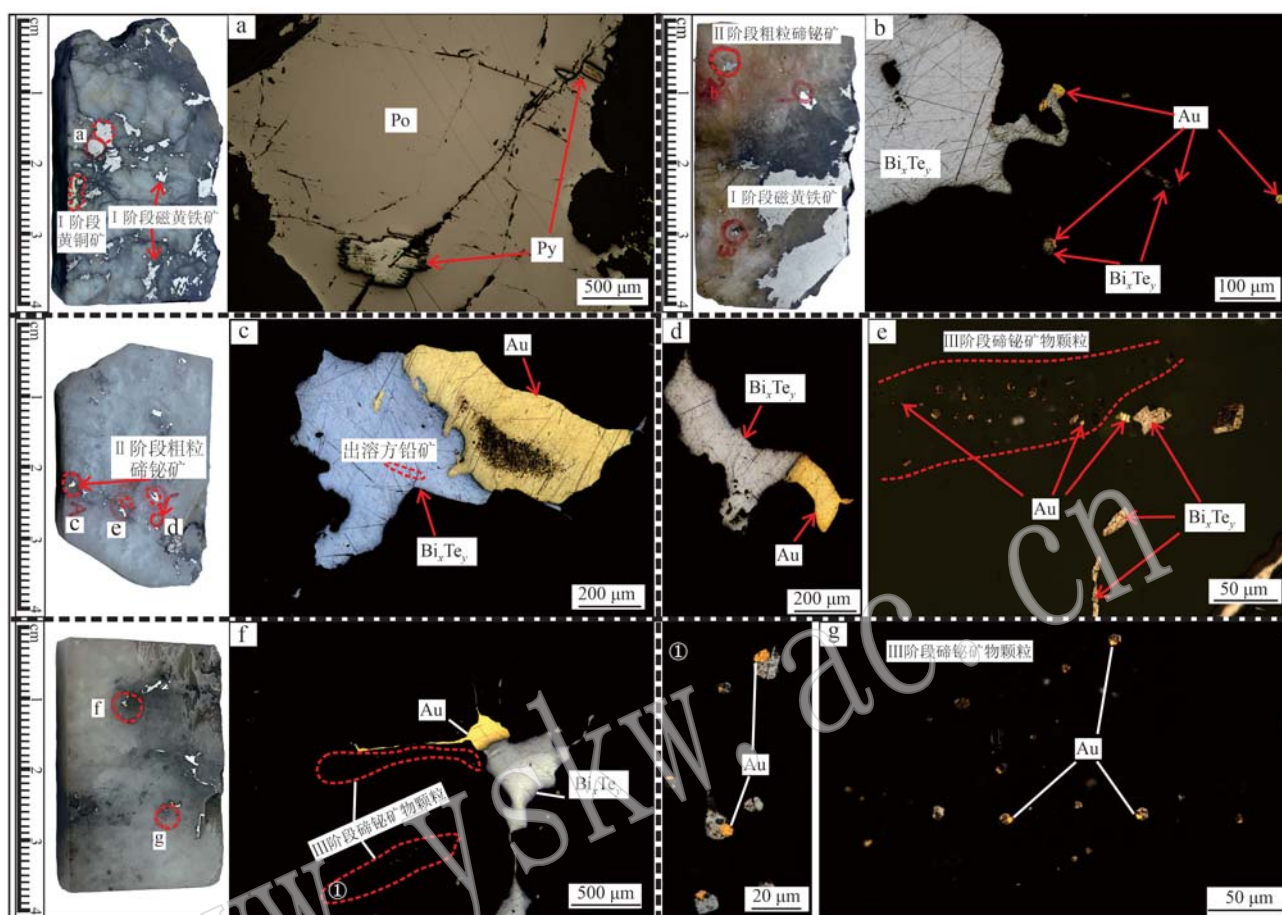


图4 不同阶段石英脉中矿物产出特征(反射单偏光)

Fig. 4 Mineral production characteristics in quartz veins at different stages (reflect single polarized light)

a—Ⅰ阶段多金属硫化物产出特征; b、c、d—Ⅱ阶段自然金与碲铋矿物连生或呈固溶体结构产于碲铋矿物中; e、f、g—Ⅲ阶段碲铋矿物颗粒产出特征; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Au—自然金; Bi₂Te₃—碲铋矿物

a—production characteristics of polymetallic sulfide in stage I; b, c, d—the gold and bismuth-tellurium minerals are naturally connected or formed as solid solution in stage II; e, f, g—production characteristics of bismuth-tellurium particles in stage III; Po—pyrrhotite; Py—pyrite; Au—gold;

Bi₂Te₃—bismuth-tellurium minerals

碲铋矿物-自然金阶段(Ⅱ阶段)和碲铋矿物颗粒-自然金阶段(Ⅲ阶段)含大量金矿化并且多种碲铋矿物相发育,碳酸盐-石英阶段(Ⅳ阶段)未见金矿化。为对比、验证鉴定结果的可靠性并且针对性地开展自然金、碲铋矿物后续详细的矿物学研究,选出12片现象较好的探针片并对目标矿物进行圈定,测试前先对样品进行预处理,将光薄片尽量均匀地镀上厚度约20 nm的碳膜。在西南石油大学电子探针实验室对目标矿物进行了扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)以及电子探针(EPMA)等测试工作,针对部分样品拍摄了背散射图像(BSE)。电子探针型号JEOL-JXA-8230,加速电压20 kV,加速电流20 nA,所有的测试数据均进行了ZAF校正处理。针对不同元

素使用不同的标样,其中Se的标样为Bi₂Se₃, Bi、Au、Ag、Mo、Co、Ni为单质标样, Zn的标样为ZnS, S、Fe的标样为FeS₂, Cu的标样为CuFeS₂, Pb的标样为PbS, As的标样为FeAsS, Te、Sb的标样为Sb₂Te₃。

3.2 分析结果

矿相显微镜观察、能谱及电子探针结果显示,独狼沟金矿床中Ⅰ阶段石英脉中产出的磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿均具有一定的含金性(表1),金主要以自然金形式在Ⅱ阶段、Ⅲ阶段产出,与碲铋矿物具有极强的相关性。矿床中碲铋矿物主要为碲铋矿、叶碲铋矿、未定名矿物Bi₂Te、赫碲铋矿、硫碲铋矿B、未定名矿物Bi₈Te₃、未定名矿物Bi₃Te、自然铋。

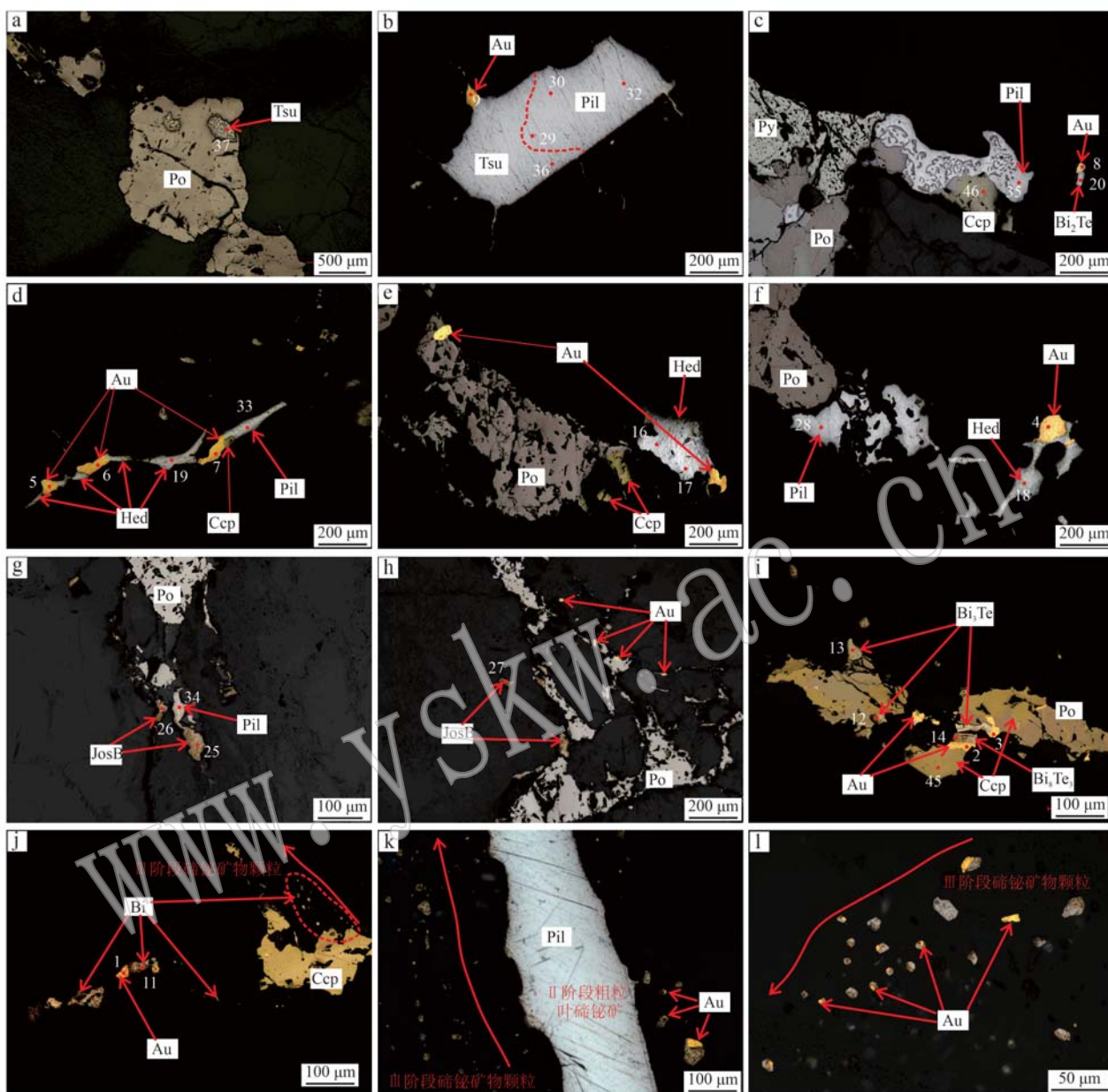


图5 独狼沟金矿自然金与碲铋矿物产出特征(反射单偏光)

Fig. 5 Gold and tellurium-bismuth mineral production characteristics in Dulangou gold deposit (reflect single polarized light)
 a—碲铋矿交代磁黄铁矿构成交代文象结构; b, f—自然金与碲铋矿、赫碲铋矿构成固溶体分离结构; c—叶碲铋矿交代磁黄铁矿构成交代文象结构; d, e, i, j—各种碲铋矿物与自然金连生; g, h—碲铋矿产出特征; k, l—Ⅲ阶段碲铋矿物颗粒产出特征; Po—磁黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Au—自然金; Bi—自然铋; JosB—碲铋矿; Hed—赫碲铋矿; Pil—叶碲铋矿; Tsu—碲铋矿; Bi_2Te , Bi_8Te_3 , Bi_3Te —未定名矿物

a—the metasomatic texture of pyrrhotite replaced by tsumoite; b, f—the natural gold forms the solid melt separation structure with tsumoite and hedleyite; c—the metasomatic texture of pyrrhotite replaced by pilsenite; d, e, i, j—various tellurium-bismuth minerals are associated with native gold; g, h—production characteristics of josit B; k, l—production characteristics of tellurium-bismuth particles in stage III; Po—pyrrhotite; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite; Au—gold; Bi—bismuth; JosB—josit B; Hed—hedleyite; Pil—pilsenite; Tsu—tsumoite; Bi_2Te , Bi_8Te_3 , Bi_3Te —unnamed tellurium-bismuth minerals

3.2.1 自然金

自然金呈金黄色, I 阶段自然金少量产出, 电子

探针结果显示成矿 I 阶段磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿中金的含量为 0.01%~0.07%, 表明成矿 I 阶段金多

表 1 独狼沟金矿中不同矿物的电子探针数据

$w_B/\%$

Table 1 Electron probe data of different minerals in Dulanggou gold deposit

点号	Se	S	Pb	Bi	Te	Fe	Cu	Zn	As	Co	Ni	Sb	Ag	Mo	Au	Total	矿物定名
1	-	0.03	-	0.48	-	0.15	0.03	0.01	-	-	0.01	-	1.72	0.37	92.04	94.83	自然金
2	0.04	0.03	0.03	0.55	0.02	0.87	0.26	0.03	0.01	-	-	0.02	10.42	0.27	83.42	95.98	
3	-	0.01	-	0.42	0.09	0.85	0.04	-	0.01	-	0.02	-	10.75	0.36	86.83	99.37	
4	0.02	0.06	0.09	0.59	0.09	0.02	0.05	0.02	-	-	0.01	0.03	11.13	0.31	86.68	99.09	
5	-	0.03	-	0.45	0.03	0.02	-	0.01	0.02	-	-	-	15.93	0.64	79.78	96.90	
6	-	0.03	0.01	0.67	0.05	-	0.04	-	0.02	-	0.01	0.02	8.91	0.48	88.31	98.52	
7	0.03	0.01	-	0.43	0.13	-	-	-	-	-	-	0.07	14.30	0.32	86.69	101.98	
8	-	0.09	-	0.35	-	0.10	0.17	-	-	-	0.01	0.01	15.20	0.36	81.31	97.58	
9	0.05	0.03	0.11	0.44	0.06	-	0.02	-	-	-	-	0.02	15.73	0.20	82.86	99.52	
10	0.01	-	0.04	98.88	-	0.03	-	0.02	0.01	-	-	-	0.05	-	0.06	99.10	自然铋
11	-	-	0.01	101.03	0.05	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	101.10	
12	0.07	-	0.03	80.93	17.03	0.01	0.02	0.02	-	-	-	0.06	0.03	-	-	98.18	未定名矿物(Bi_3Te)
13	0.17	-	0.11	81.61	16.98	0.13	-	-	-	-	-	0.03	-	-	0.02	99.04	
14	0.23	-	0.13	81.27	19.08	0.11	0.02	-	-	-	0.01	0.07	0.08	-	-	100.99	未定名矿物(Bi_8Te_3)
15	-	-	0.08	78.75	19.88	0.01	-	-	-	-	-	0.12	0.02	-	-	98.86	赫碲铋矿
16	0.05	0.02	0.37	77.98	21.94	0.02	0.01	-	-	0.01	-	0.13	-	-	0.03	100.55	
17	0.16	0.02	0.39	77.46	22.05	0.01	-	-	-	-	-	0.09	0.03	-	0.04	100.24	
18	0.10	0.02	0.50	77.03	21.96	-	-	-	-	-	0.02	0.06	0.04	-	-	99.73	
19	0.25	0.01	0.26	76.66	21.89	0.07	0.07	-	-	-	-	0.09	-	-	-	99.29	
20	0.12	-	0.44	75.69	22.98	0.01	-	-	-	0.02	0.03	0.03	-	-	-	99.32	未定名矿物(Bi_2Te)
21	0.15	-	0.31	75.24	23.15	0.03	-	-	-	-	-	0.01	0.02	-	0.07	98.97	
22	0.13	-	0.35	75.62	23.40	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	-	99.65	
23	0.14	-	0.36	72.50	24.89	-	-	-	-	-	-	0.10	0.03	-	-	98.03	
24	0.21	2.49	0.14	74.47	20.05	0.03	0.02	-	-	0.03	0.02	0.01	-	-	-	97.48	硫碲铋矿 B
25	0.10	2.65	0.81	73.17	21.70	0.02	-	-	-	-	-	0.07	0.03	-	-	98.55	
26	0.06	2.63	0.51	74.25	21.00	0.16	0.03	0.02	-	-	-	0.07	0.05	-	-	98.77	
27	0.10	2.44	0.21	72.77	20.65	-	0.01	-	-	0.02	-	0.08	0.02	-	-	96.29	
28	0.12	0.02	0.29	68.36	30.39	0.05	-	0.02	-	-	-	0.19	-	-	-	99.44	叶碲铋矿
29	0.02	0.01	0.85	68.01	30.78	0.05	0.02	-	-	-	0.01	0.17	0.02	-	-	99.94	
30	-	0.01	0.80	67.65	30.13	-	0.03	-	-	-	-	0.16	0.03	-	-	98.81	
31	0.05	-	0.81	67.46	30.59	0.04	-	-	-	0.01	-	0.13	0.05	-	-	99.12	
32	0.02	0.01	0.67	67.05	30.45	0.01	-	-	-	-	-	0.17	-	-	0.07	98.45	
33	0.10	-	0.74	67.49	30.67	0.01	0.02	-	-	-	-	0.18	0.01	-	-	99.22	
34	-	0.01	0.77	66.83	30.56	0.02	0.03	-	-	0.01	-	0.21	0.04	-	-	98.46	
35	0.01	-	0.96	65.54	31.87	0.03	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-	98.59	
36	0.24	-	1.70	62.41	33.94	0.04	0.11	0.04	-	-	0.01	0.19	0.07	-	-	98.75	楚碲铋矿
37	0.03	0.01	1.07	63.74	34.81	0.07	-	-	-	-	-	0.15	-	-	-	99.88	
38	-	52.58	-	-	-	46.87	-	0.01	0.03	0.10	0.02	-	-	-	0.03	99.64	黄铁矿
39	0.02	52.57	-	0.04	-	46.94	-	-	-	0.07	0.01	0.04	-	-	0.07	99.77	
40	-	52.55	-	0.03	-	46.52	-	-	-	0.07	-	-	-	-	0.01	99.19	
41	-	37.73	0.01	-	0.01	58.95	-	0.03	0.01	0.09	0.01	0.03	0.01	-	0.04	96.92	磁黄铁矿
42	0.01	38.77	-	0.04	0.02	58.22	-	-	-	0.10	0.01	0.01	0.01	-	0.07	97.26	
43	0.04	38.75	-	0.03	-	58.49	0.18	-	-	0.14	0.11	-	-	-	0.04	97.80	
44	0.01	37.96	-	-	-	58.54	-	0.01	-	0.09	0.02	-	-	-	0.04	96.66	
45	-	35.58	-	-	-	30.64	34.31	0.09	-	0.04	-	0.04	0.02	-	0.03	100.75	黄铜矿
46	-	35.96	-	0.05	-	30.77	34.15	0.08	-	0.01	0.02	-	0.03	-	0.04	101.13	
47	0.03	35.45	0.07	-	-	30.42	33.81	0.05	-	0.03	-	-	-	-	-	99.86	方铅矿
48	0.27	12.53	86.13	0.39	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.43	
49	0.24	12.62	87.11	0.47	0.15	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	100.60	

-表示未达检测限。

呈晶格金赋存于磁黄铁矿以及黄铜矿中,另外可见少量自然金以粒间金、包体金的形式赋存于磁黄铁矿、黄铜矿的内部及边缘(图 5e、5h、5i、5j)。Ⅱ阶段中粗粒自然金大量产出,多呈不规则状与碲铋矿物共边产出,通常与碲铋矿物具有平滑的边界(图 4d、4f,图 5b、5c、5d、5e),或呈固溶体分离结构产于碲铋矿物内部(图 4c,图 5b、5f),粒径在 5~200 μm 均有产出,最大可达 500 μm 以上。电子探针结果显示Ⅱ、Ⅲ阶段中自然金中 Au 的含量为 79.78%~92.04%,Ag 的含量为 1.72%~15.93%(表 1),根据 $\text{Au}/(\text{Au}+\text{Ag})\times 1\,000$ 的公式计算金的成色,得出独狼沟金矿Ⅱ、Ⅲ阶段中金的成色为 834~982,平均成色为 881,根据金银系列矿物的分类,独狼沟金矿中自然金属于含银自然金。

3.2.2 碲铋矿物

独狼沟金矿床中碲铋矿物分多种,主要以 Bi 与 Te 的原子数的比值来界定(钱汉东等, 2000),数据显示楚碲铋矿(BiTe)、叶碲铋矿(Bi_4Te_3)、未定名矿物(Bi_2Te)、硫碲铋矿 B($\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$)、赫碲铋矿(Bi_7Te_3)、未定名矿物(Bi_8Te_3)、未定名矿物(Bi_3Te)均有产出,电子探针结果显示独狼沟金矿中碲铋矿物中 Te 含量为 16.98%~34.81%,Bi 含量为 62.41%~100%。按碲含量由高到低排序,分别为楚碲铋矿(Te 含量 33.94%~34.81%,Bi 含量 62.41%~63.74%)、叶碲铋矿(Te 含量 30.13%~31.87%,Bi 含量 65.54%~68.36%)、 Bi_2Te (Te 含量 22.98%~24.89%,Bi 含量 72.50%~75.69%)、赫碲铋矿(Te 含量 19.88%~21.89%,Bi 含量 76.66%~78.75%)、硫碲铋矿(Te 含量 20.65%~21.70%,Bi 含量 72.77%~74.25%,S 含量 2.44%~2.65%)、 Bi_8Te_3 (Te 含量 19.08%,Bi 含量 81.27%)、 Bi_3Te (Te 含量 16.98%~17.03%,Bi 含量 80.93%~81.61%)、自然 Bi(Te 含量 0%,Bi 含量 100%)。

(1) 楚碲铋矿:化学式为 BiTe ,该矿物镜下较为少见,反射色为银白色,反射率较高。主要形态有两种:一种与磁黄铁矿组成交代合晶(李引等, 2021),文象矿物磁黄铁矿呈蠕虫或长条状(图 5a);另一种与叶碲铋矿“不均匀混合”产出,难以根据镜下特征判断两者边界,本文根据电子探针分析结果大致标明了两者界线(图 5b)。

(2) 叶碲铋矿:化学式为 Bi_4Te_3 (钱汉东等, 2000),该矿物镜下较为多见,反射色呈银白色偏淡蓝色,高反射率,多呈他形粒状集合体状产出,集合

体粒径在 20~200 μm 均有产出,最大可达 1~2 mm,偶见方铅矿呈蠕虫状、似文象状包体形式产于叶碲铋矿内部(图 4c),主要形态有 3 种:①与磁黄铁矿组成交代合晶,文象矿物磁黄铁矿呈蠕虫状(图 5c);②与楚碲铋矿、硫碲铋矿 B 构成连晶(图 5b、图 5g);③呈脉状、岛状或不规则状产于石英脉中,与自然金具密切的时空联系(图 5d、图 5f)。

(3) 未定名矿物(Bi_2Te):反射色为银白色,高反射率,多见与自然金连生(图 5c)。

(4) 赫碲铋矿:化学式为 Bi_7Te_3 ,反射色为亮白色略带淡蓝色,高反射率,常呈他形粒状集合体,镜下粒径多为 30~120 μm ,与金伴生极为密切,主要形态有两种:①呈岛状、脉状产于石英脉中,自然金常伴随共边产出(图 5f);②与自然铋呈固溶体分离结构产出于磁黄铁矿边缘(图 6)。

(5) 硫碲铋矿:硫碲铋矿化学式为 $\text{Bi}_4\text{Te}_{2-x}\text{S}_{1+x}$, $x>0.5$ 和 $x<0.5$ 对应两个亚种:硫碲铋矿 A 和硫碲铋矿 B(卢静文等, 2010)。本文电子探针结果显示该矿物化学式为 $\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$,对应硫碲铋矿 B。硫碲铋矿多产出于磁黄铁矿附近的石英脉间隙中(图 5h)或与叶碲铋矿构成连晶(图 5g),反射色多呈褐黄色,矿物多呈不规则小颗粒状产出,粒径多为 20~40 μm ,与自然金密切伴生。

(6) 未定名矿物 Bi_8Te_3 :反射色呈乳白色,高反射率,矿物表面部分被氧化呈褐黄色,镜下见短柱状或液滴状,与自然金连生(图 5i)。

(7) 未定名矿物 Bi_3Te :反射色呈乳白色,高反射率,见短柱状、液滴状等形态,镜下矿物表面部分氧化呈褐黄色,与金属硫化物共边产出,或呈包体形式产于其内部(图 5i),与自然金、自然铋具极其密切的时空关系。

(8) 自然铋:反射色呈乳白色略带淡黄色,高反射率,镜下多氧化呈褐黄色,表面显脏,见树枝状以及小液滴状产出于石英脉中(图 5j),或与赫碲铋矿呈固溶体分离结构(图 6),与自然金密切伴生。

4 讨论

4.1 多种碲铋矿物相生成的原因

综合前文研究,独狼沟金矿床中成矿Ⅰ阶段基本未见碲铋矿物,形成矿物以磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿为主。成矿Ⅱ、Ⅲ阶段产出多种碲铋矿物,Ⅱ阶段碲铋矿物为楚碲铋矿、叶碲铋矿、未定名矿物

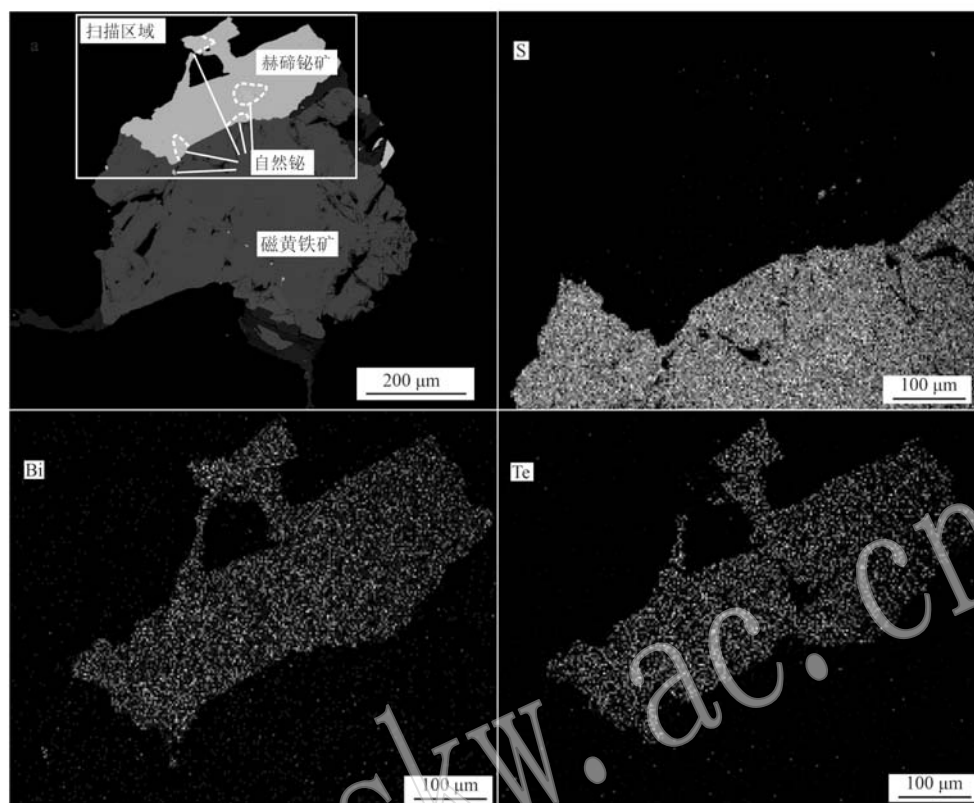


图 6 碲铋矿物元素扫面图

Fig. 6 X-ray mapping of tellurium-bismuth minerals

(Bi_2Te)、少量赫碲铋矿和硫碲铋矿 B。Ⅲ阶段主要生成液滴状的碲铋矿物颗粒,这种碲铋矿物颗粒多为两相甚至三相,各相之间具有平滑的共结边,指示由熔体直接沉淀生成。由于成矿Ⅲ阶段中碲铋矿物颗粒粒径较小,电子探针仅于图 5i、5k 视域中检测到了自然铋、未定名矿物 Bi_3Te 和 Bi_8Te_3 ,认为Ⅲ阶段碲铋矿物颗粒应主要为富 Bi 的液滴状金属熔体沉淀生成。

Bi、Hg、Pb、Se、Te、Tl、Sn、As、Sb 等具有亲铜性、低熔点的元素被统称为 LMCE,这些元素具有极低的熔点,可从流体中分离形成熔体 (Okamoto and Masalski, 1983; Frost *et al.*, 2002; Ciobanu *et al.*, 2006; Tooth *et al.*, 2008)。热液体系中 Bi 主要以 +3 价存在 (Tooth *et al.*, 2011),而当矿床中温度超过金属铋的熔点时,流体中的 Bi^{3+} 会被磁黄铁矿等还原剂还原成 Bi 熔体,生成的 Bi 熔体大部分可能会附着在磁黄铁矿边缘 (图 6),少部分则呈金属液滴形式随着成矿流体移移。

根据 Bi-Te 二元相图 (图 7a),富 Bi 侧自然铋与赫碲铋矿共晶时温度达到最低的 266°C ,接近自然铋

的熔点 271°C ,随着 Te 含量的增加,Bi-Te 体系熔点逐渐升高。前人对独狼沟金矿流体包裹体的研究表明,矿床主成矿阶段的温度范围为 $230\sim 436^\circ\text{C}$ (Zhao *et al.*, 2019),该温度条件下,矿床中的碲铋矿物大部分可以保持熔体形式。独狼沟金矿Ⅱ阶段中的碲铋矿物相较于Ⅲ阶段的碲铋矿物相对富 Te,说明成矿流体从Ⅱ阶段过渡到Ⅲ阶段时,碲逸度和成矿温度的逐渐降低是导致多种碲铋矿物形成的主要原因。

4.2 金的富集机制

前人实验发现,铋熔体在 241°C 的条件下就可以从流体中析出 (图 7b),而在 $300\sim 450^\circ\text{C}$ 的条件下,铋熔体中 Au 的浓度比热液中的 Au 高出几个数量级 (Douglas *et al.*, 2000; Tooth *et al.*, 2011),热液中的金会被铋熔体强烈收集形成 Bi-Au 熔体,只要这种熔体能够保持液态,就会不断从热液中抽取 Au,即便是 Au 在矿物晶格中也能被有效带出,且 Bi-Te-Au 熔体对热液中的 Au 同样具有较强的清除能力 (Meinert *et al.*, 2000; Ciobanu *et al.*, 2005, 2006, 2010)。LMCE 熔体形成的矿物常以乳滴、液珠、气

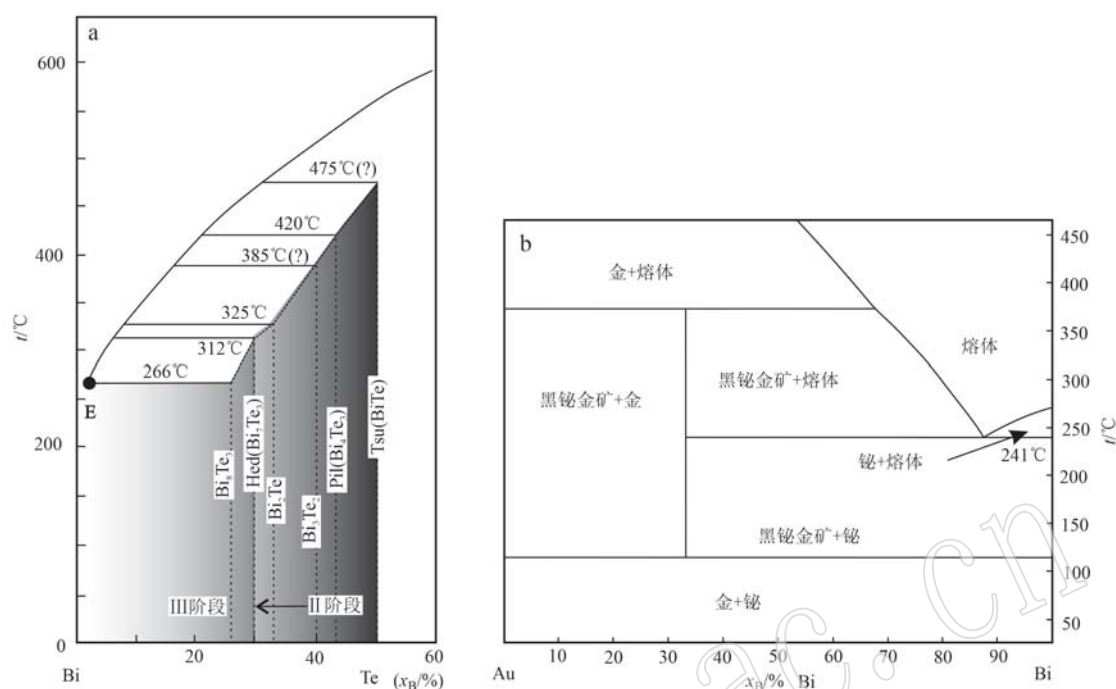


图7 碲铋矿物相图(a)和 Au-Bi 二元相图(b) (据 Okamoto *et al.*, 1983; Ciobanu *et al.*, 2005; Tooth *et al.*, 2008)
Fig. 7 Phase diagram of tellurium-bismuth mineral(a) and Au-Bi binary phase diagram(b) (after Okamoto *et al.*, 1983; Ciobanu *et al.*, 2005; Tooth *et al.*, 2008)

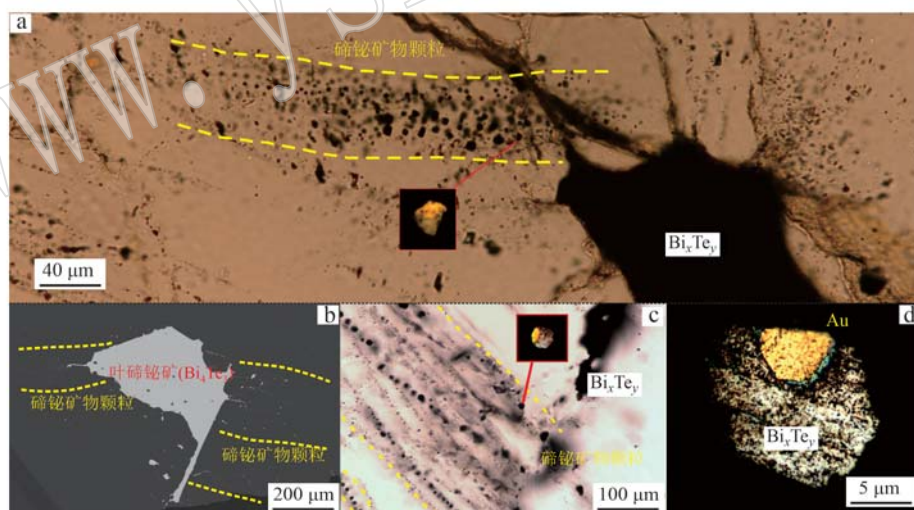


图8 条带状分布的碲铋矿物颗粒镜下照片

Fig. 8 Microscopic image of banded bismuth-tellurium mineral particles

a、b、c—碲铋矿物颗粒呈条带状分布；d—与自然金紧密共生的碲铋矿物颗粒；a、c—透射光下拍摄；b—BSE 图像；d—反射单偏光下拍摄
a, b, c—the bismuth-tellurium mineral particles are banded；d—bismuth-tellurium particles in close association with natural gold；
a and c—perspective light image；b—BSE image；d—reflect single polarized light image

泡的微粒包体形式产在硫化物、硒化物、碲化物、氧化物和硅酸盐矿物内或沿矿物断裂线形排布,形态多呈浑圆状、近浑圆状(刘家军等, 2021),这样的浑圆状、近浑圆状的碲铋矿物颗粒在独狼沟金矿中被

大量观测到(图 4e、4f、4g,图 5j、5k、5l,图 8a、8b、8c、8d),成矿 II 阶段这些颗粒以熔体的形式存在,并不断萃取成矿流体中的金,在成矿 III 阶段由于温度降低,由熔体直接沉淀形成这种条带状分布的矿物颗

粒,大部分碲铋矿物颗粒中清晰可见自然金与碲铋矿物具平滑的共结边。

Feng 等(2022)通过精细的矿物学研究指出,金、铋的全岩浓度异常高以及富金样品中金和铋的矿物存在紧密的结构和时间组合是富铋熔体作为金的清除剂机制引起金的超常富集的重要证据。前人对独狼沟矿床中的 6 件石英脉矿石样品进行了矿石全分析,结果显示金-铋-碲高度的相关性(凡韬等,2013)。独狼沟金矿的成矿物理化学条件均满足低熔点多金属熔体的要求,结合镜下矿相学的研究,各种证据均指示金-铋-碲熔体是独狼沟金矿床中金富集的关键。

5 结论

(1) 独狼沟金矿的流体成矿过程从早到晚可分为 4 个阶段,分别为磁黄铁矿-石英脉阶段(Ⅰ)、碲铋矿物-粗粒金阶段(Ⅱ)、碲铋矿物颗粒-自然金阶段(Ⅲ)、石英-碳酸盐阶段(Ⅳ)。Ⅰ阶段见少量金产出,Ⅱ、Ⅲ阶段为金主成矿期,Ⅳ阶段未见金矿化。

(2) 独狼沟金矿成矿Ⅱ、Ⅲ阶段矿石中自然金主要为含银自然金,成色整体偏高,平均为 881,矿床中见多种碲铋矿物相产出,按 Bi 含量逐步升高的顺序分别为碲铋矿(BiTe)、叶碲铋矿(Bi_4Te_3)、未定名矿物(Bi_2Te)、赫碲铋矿(Bi_7Te_3)、硫碲铋矿 B($\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$)、未定名矿物(Bi_8Te_3)、未定名矿物(Bi_3Te)、自然铋(Bi)。矿物生成顺序可初步厘定为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、少量自然金→碲铋矿、叶碲铋矿、 Bi_2Te 、赫碲铋矿、硫碲铋矿、大量中粗粒自然金→ Bi_8Te_3 、 Bi_3Te 、自然铋、大量细粒自然金。

(3) 独狼沟金矿成矿Ⅱ阶段到Ⅲ阶段,体系中碲逸度与温度逐渐降低是导致独狼沟金矿中多种碲铋矿物生成的主要原因。

(4) 独狼沟金矿中金与碲铋矿物具有极强的相关性,各种证据均表明金-铋-碲熔体在成矿过程中不断对热液中金的抽取是导致独狼沟金矿中金富集的关键。

References

Chen Min, Wang Yanhe, Gu Qiang, *et al.* 2023. Discovery of Late Triassic basic rocks in the Xiacangjie area of Songpan-Ganzi terrane and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*,

42(1): 1~12(in Chinese with English abstract).

Chen S F and Wilson C J L. 1996. Emplacement of the Longmenshan thrust-nappe belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Structural Geology*, 18: 413~430.

Ciobanu C L, Birch W D, Cook N J, *et al.* 2010. Petrogenetic significance of Au-Bi-Te-S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia[J]. *Lithos*, 116: 1~17.

Ciobanu C L, Cook N J and Pring A. 2005. Bismuth tellurides as gold scavengers[C]//Mao J W and Bierlein F P. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Berlin: Springer, 1 383 ~ 1 386.

Ciobanu C L, Cook N J and Spry P G. 2006. Preface: Special issue: Telluride and selenide minerals in gold deposits: How and why? [J]. *Mineralogy and Petrology*, 87(3): 163~169.

Cook N J, Ciobanu C L, Spry P G, *et al.* 2009. Understanding gold-(silver)-telluride-(selenide) mineral deposits[J]. *Episodes*, 32(4): 249~263.

Dai Jie, Xu Jinsha, Du Gu, *et al.* 2015. Analysis of the occurrence of platinum-palladium and precipitation mechanism by SEM and EPMA in the Ni-Cu sulphide deposits from Yangliupin, Sichuan Province, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 3(34): 161~168(in Chinese with English abstract).

Deng J, Wang Q F, Li G J, *et al.* 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China [J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268~299.

Douglas N, Mavrogenes J, Hack A, *et al.* 2000. The liquid bismuth collector model: An alternative gold deposition mechanism[C]//Geological Society of Australia, Abstracts No. 59. Sydney, 135.

Fan Tao. 2017. Study on Structural Superposition Halo and Prediction of Deep Blind Ore in Danba Danlanggou Gold deposit, Sichuan Province[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).

Fan Tao, Yin Yuyan and Wang Yi. 2013. Exploration Report of Dulanggou Gold Deposit, Danba County, Sichuan Province[R]. Sichuan Geology and Mineral Bureau(in Chinese).

Felipe G D C, Luiz Klein E, Harris C, *et al.* 2019. Fluid inclusion and stable isotope (O, H, C) constraints on the genesis of the Pedra Branca gold deposit, Troia Massif, Borborema Province, NE Brazil: An example of hypozonal orogenic gold mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 476~500.

Feng H X, Shen P, Zhu R X, *et al.* 2022. Bi/Te control on gold mineralizing processes in the North China Craton: Insights from the Wulong gold deposit[J]. *Miner Deposita*, 58: 263~286.

- Feng Yuechuan, Qiu Kunfeng, Wang Dazhao, *et al.* 2022. Formation conditions of telluride and its constraints on gold enrichment in Linglong gold deposit, Jiaodong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 63~77(in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Mavrogenes J A and Tomkins A G. 2002. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism[J]. *The Canadian Mineralogist*, 40(1): 1~18.
- Hou Lin, Ding Jun, Wang Xiongwu, *et al.* 2012. Geochemical and metallogenic significance of the Devonian black rock series from the Tonglufang gold deposit in Danba area, western Sichuan Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42: 205~215(in Chinese with English abstract).
- Li Yin, Wang Jiaxin, Chen Cuihua, *et al.* 2021. Process mineralogy of the Dashuigou tellurium deposit in Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 5: 139~145(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Wang Dazhao, Zhai Degao, *et al.* 2022. Supper-enrichment mechanisms of precious metals by low-melting point copper-philic element(LMCE) melts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2 629~2 656(in Chinese with English abstract).
- Lu Jingwen and Peng Xiaolei. 2010. *Manual for Microscopic Identification of Metallic Minerals*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 2000. Gold in skarns related to epizonal intrusions[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 347~375.
- Mueller A G and Muhling J R. 2020. Early pyrite and late telluride mineralization in vanadium-rich gold ore from the Oroya Shoot, Paríngas South Mine, Golden Mile, Kalgoorlie: 3. Ore mineralogy, Pb-Te (Au-Ag) melt inclusions, and stable isotope constraints on fluid sources[J]. *Miner Deposita*, 55: 733~766.
- Okamoto H and Massalski T B. 1983. The Au-Bi(gold-bismuth) system[J]. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 4(4): 401~407.
- Phillips G N and Powell R. 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28: 689~718.
- Pitcairn I K, Olivo G R, Teagle D A H, *et al.* 2010. Sulfide evolution during prograde metamorphism of the Otago and Alpine schists, New Zealand[J]. *Canadian Mineralogist*, 48: 1 267~1 295.
- Pitcairn I K, Skelton A D L and Wohlgenuth-Ueberwasser C C. 2015. Mobility of gold during metamorphism of the Dalradian in Scotland[J]. *Lithos (Oslo)*, 233: 69~88.
- Qian Handong, Chen Wu, Xie Jiadong, *et al.* 2000. A review of tellurium minerals[J]. *Journal of Geology of Universities*, 6(2): 178~187(in Chinese with English abstract).
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, *et al.* 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465~481.
- Tomkins A G. 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 3 246~3 259.
- Tooth B, Brugger J, Ciobanu C L, *et al.* 2008. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids[J]. *Geology*, 36(10): 815~818.
- Tooth B, Ciobanu C L, Green L, *et al.* 2011. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(19): 5 423~5 443.
- Wallis S, Tsujimori T, Aoya M, *et al.* 2003. Cenozoic and Mesozoic metamorphism in the Longmenshan orogen: Implications for geodynamic models of eastern Tibet[J]. *Geology*, 31(9): 745~748.
- Wang Kunyang and Xu Jinsha. 2022. Occurrence state of PGE in Yangliuping Cu-Ni sulfide deposit, Danba, Sichuan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(1): 17~24(in Chinese with English abstract).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Zhao Hesen, *et al.* 2019. Review on orogenic gold deposits[J]. *Earth Science*, 44(6): 2 155~2 186(in Chinese with English abstract).
- Wang Xin. 2019. Geological Characteristics and Genesis of Luohedong Gold Deposit in Danba area, Sichuan Province[D]. Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Wei B, Wang C Y, Wang Z C, *et al.* 2021. Mantle-derived gold scavenged by bismuth-(tellurium)-rich melts: Evidence from the mesozoic wulong gold deposit in the north china craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 104047.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, *et al.* 1992. Orogenic Processes in the Songpan-Ganzi Orogenic Belt, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~160(in Chinese).
- Yang Chengye, Feng Jiajia, Li Yubin, *et al.* 2022. Eocene Tuolong I-type granite in Linzhou area, Tibet: Constraints on the timing of the collision between India and Eurasian plates[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 080~1 096(in Chinese with English abstract).
- Zhao H S, Wang Q F, Groves D I, *et al.* 2019. A rare phanerozoic amphibolite hosted gold deposit at Danba, Yangtze Craton, China: Significance to fluid and metal sources for orogenic gold systems[J]. *Miner Deposita*, 54: 133~152.
- Zhong R, Brugger J, Tomkins A G, *et al.* 2015. Fate of gold and base

metals during metamorphic devolatilization of a pelite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 171: 338~352.

附中文参考文献

- 陈敏, 王雁鹤, 谷强, 等. 2023. 松潘-甘孜地下仓界地区晚三叠世基性岩的发现及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 42(1): 1~12.
- 戴婕, 徐金沙, 杜谷, 等. 2015. 利用扫描电镜-电子探针研究四川杨柳坪镍铜硫化物矿床铂钯的赋存状态及沉淀机制[J]. *岩矿测试*, 3(34): 161~168.
- 凡韬. 2017. 四川丹巴独狼沟金矿床构造叠加晕研究及深部盲矿预测[D]. 成都理工大学.
- 凡韬, 殷育彦, 王毅, 等. 2013. 四川省丹巴县独狼沟金矿勘探报告[R]. 四川省地矿局.
- 冯岳川, 邱昆峰, 王大钊, 等. 2022. 胶东玲珑金矿区碲化物形成条件及其对金富集过程的约束[J]. *岩石学报*, 38(1): 63~77.
- 侯林, 丁俊, 汪雄武, 等. 2012. 川西丹巴铜炉房金矿区泥盆系危观群黑色岩系地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42: 205~215.
- 李引, 王嘉欣, 陈翠华, 等. 2021. 四川大水沟碲矿工艺矿物学特性研究[J]. *矿产综合利用*, 5: 139~145.
- 刘家军, 王大钊, 翟德高, 等. 2021. 低熔点亲铜元素(LMCE)熔体超常富集贵金属的机制及其识别标志[J]. *岩石学报*, 37(9): 2629~2656.
- 卢静文, 彭晓蕾. 2010. 金属矿物显微镜鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 钱汉东, 陈武, 谢家东, 等. 2000. 碲矿物综述[J]. *高校地质学报*, 6(2): 178~187.
- 王坤阳, 徐金沙. 2022. 四川丹巴杨柳坪铜镍硫化物矿床铂族元素赋存状态研究[J]. *矿物学报*, 42(1): 17~24.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 2019. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用[J]. *地球科学*, 44(6): 2155~2186.
- 王昕. 2019. 四川丹巴地区洛河洞金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都理工大学.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1~160.
- 杨成业, 冯佳佳, 李玉彬, 等. 2022. 西藏林周地区始新世托龙I型花岗岩对印度-欧亚板块碰撞时限的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(6): 1080~1096.