

四川康定偏岩子造山型金矿床成因： 石英微量元素和硫化物 S 同位素证据

宋明伟¹, 彭义伟¹, 陈友良¹, 刘畅², 田建吉², 赵鹤森¹,
王琦³, 王智¹, 周钰昌¹, 吴锋⁴

1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都 610059; 2. 核工业北京地质研究院地质矿产研究所, 北京 100029;
3. 内蒙古第七地质矿产勘查开发有限责任公司, 呼和浩特 010010;
4. 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 西安 101399

[摘要] 大渡河金矿带是中国重要的金矿化富集区, 发育一系列造山型金矿床。偏岩子金矿床位于大渡河南段的康定地区, 矿体赋存于震旦系灯影组白云岩中。金成矿过程分为金-黄铁矿-石英阶段、金-氟镁石阶段、金-硫化物-氟镁石-石英阶段和黄铁矿-白云石-白云母阶段 4 个成矿阶段。通过石英中微量元素和硫化物 S 同位素的原位分析, 旨在约束成矿流体性质、成矿物质来源和矿床成因。石英中 Li, B, Na, Al, P 和 K 相对富集, 主要以 $Al^{3+} + (Li^+, Na^+, K^+, H^+) \leftrightarrow Si^{4+}$ 和 $Al^{3+} + P^{5+} \leftrightarrow 2Si^{4+}$ 的替换机制进入石英晶格。石英中 Al 与 Li 呈明显正相关关系, 指示其形成温度较低。围岩中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值介于 $-22.3\% \sim -13.1\%$ 之间, 表明 S 来源于海相硫酸盐的细菌还原作用; 矿石中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值范围为 $5.4\% \sim 7.0\%$, 与交代岩石圈地幔的硫同位素值一致。综合矿床地质特征、石英微量元素和硫化物硫同位素组成, 研究认为偏岩子属于造山型金矿床。成矿流体在上升过程中与赋矿白云岩接触, 发生水-岩反应, 导致自然金、含金硫化物、氟镁石和萤石的沉淀结晶。

[关键词] 氟镁石; 石英微量元素; 原位 S 同位素; 造山型金矿床; 偏岩子

[分类号] P618.41; P597

[文献标志码] A

Genesis of the Pianyanzi orogenic gold deposit in Kangding, Sichuan: Evidence from quartz trace elements and sulfide S isotopes

SONG Mingwei¹, PENG Yiwei¹, CHEN Youliang¹, LIU Chang², TIAN Jianji²,
ZHAO Hesen¹, WANG Qi³, WANG Zhi¹, ZHOU Yuchang¹, WU Feng⁴

[收稿日期] 2023-12-04。

[基金项目] 中国核工业地质局地勘费项目(地 GT2201); 国家自然科学基金项目(41702081); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLC20210208)。

[第一作者] 宋明伟(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, E-mail: 2469749958@qq.com。

[通信作者] 彭义伟(1987—), 男, 副教授, 研究方向: 地球化学及矿床学, E-mail: yiwei_peng@163.com。

[引用格式] 宋明伟, 彭义伟, 陈友良, 等, 2024. 四川康定偏岩子造山型金矿床成因: 石英微量元素和硫化物 S 同位素证据[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 596-613.

Song M W, Peng Y W, Chen Y L, et al., 2024. Genesis of the Pianyanzi orogenic gold deposit in Kangding, Sichuan: Evidence from quartz trace elements and sulfide S isotopes[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 596-613.

1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Division of Geology and Mineral Resources, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;
3. Inner Mongolia No.7 Geological and Mineral Exploration and Development Co., Ltd., Hohhot 010010, China;
4. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 101399, China

Abstract: The Daduhe gold belt is a well-known gold ore cluster in southwestern China that is characterized by a series of orogenic gold deposits. The Pianyanzi gold deposit is situated in the Kangding area of the northern section of the Daduhe belt. The Au orebodies are mainly hosted by dolomite from the Sinian Dengying Formation, and the Au ore-forming process comprises four stages: the gold-pyrite-quartz stage (I), gold-sellaite stage (II), gold-sulfide-sellaite-quartz stage (III), and pyrite-dolomite-muscovite stage (IV). In this study, we examine trace elements of quartz from these different stages and analyze the sulfur isotopes of the sulfides *in situ* to investigate the sources of the metallogenic materials, ore-forming fluids, and ore genesis. Li, B, Na, Al, P and K were relatively rich in quartz, were probably mainly incorporated into the quartz crystal lattice, and were dominated by the coupled substitution of $Al^{3+} + (Li^+, Na^+, K^+, H^+) \leftrightarrow Si^{4+}$ and $Al^{3+} + P^{5+} \leftrightarrow 2Si^{4+}$ entering the quartz crystal lattice. The positive correlation between Al and Li in quartz suggested a low crystallization temperature. The $\delta^{34}S$ values of sulfides from the host rocks ranged from -22.3% to -13.1% , indicating that the sulfur was derived from bacterial reduction of marine sulfates. Sulfides from the ores had values of $\delta^{34}S$ ranging from 5.4% to 7% , suggesting a significant contribution from the metasomatic lithosphere mantle. The characteristics of the S isotopes and quartz trace elements suggest that the Pianyanzi deposit can be classified as an orogenic gold deposit. Auriferous fluids ascended along regional faults triggered by compressional tectonics, and reacted with dolomite to cause the precipitation and enrichment of gold, Au-bearing sulfides, fluorite and sellaite.

Key words: sellaite; quartz trace element; S isotope; orogenic gold deposit; Pianyanzi

大渡河金矿带位于扬子克拉通西缘,其北段为松潘—甘孜褶皱带的一部分,南段受攀西裂谷带的约束(图 1-A)。该金矿带作为中国重要的金成矿富集区,面积超过 $10\ 000\ km^2$,发育有许多规模相对较小、品位较高的金矿床(王小春,2000;王庆飞等,2020;Zhao et al.,2022)。大渡河流域南段康定地区发育偏岩子、一柱香、二里沟、三碛、黄金坪、韭菜坪等 60 余处金矿床(矿点),组成了有名的康定金矿田(曹志敏和李佑国,1992;闫升好等,2002;刘阳,2016;何阳阳等,2018;张燕等,2022)。这些金矿床虽在矿物组合上存在一定差异,但主要形成于喜马拉雅期的地壳伸展过程(20~25 Myr)(陈智梁等,1997;骆耀南等,1998;闫升好等,2002;Li et al.,2007;赵鹤森,2019)。大渡河流域的金矿床彼此之间矿化特征(如赋矿层位、矿体产状、矿物组合、矿石组构等)差异明显,其成矿物质来源(赋矿围岩、隐伏侵入岩还是富集地幔)、成矿流体的来源(大气降水、变质流体还是岩浆热液)、矿质沉淀机制仍是众说纷纭(李

保华和蔡建明,1995;李晓峰等,2004;Li et al.,2007;侯林等,2012;Zhao et al.,2019)。前人普遍认为流体不混溶作用是导致矿质沉淀的重要机制(蔡建明,1988;侯林等,2012;李保华等,2014),但流体混合作用(Li et al.,2007;侯林等,2012)和水-岩反应(李保华和蔡建明,1995;Pei et al.,2024)现象亦在部分矿床中被观察到。另外,岩浆活动是否为成矿提供成矿物质来源或热源也存在争议(周建军,2014;Wu et al.,2014;刘阳,2016)。虽然前人在康定地区的部分矿床开展过石英微量元素和硫化物的 S 同位素分析(张诣泽,2016;赵一琛,2016;许红英,2016),但缺乏单矿物尺度的原位分析。因此,有必要开展更系统、高精度的原位分析,以提高对 Au 矿化过程的认识。

偏岩子金矿床是康定地区的代表性矿床,其与区域典型造山型金矿床存在较大差异,矿石中以发育大量罕见的氟镁石为典型特征,具有独特的矿物组合(氟镁石-石英-硫化物-萤石)(罗鸿书

等,1987; 蔡建明,1988; Pei et al., 2024)。前人的研究主要集中在地质特征、控矿构造和流体包裹体上(毛玉元等,1986; 罗鸿书等,1987; 陆彦和毛玉元,1988; 李保华和蔡建明,1995; 郑大中,1995; 张燕等,2022)。Pei et al. (2024)最近开展了黄铁矿的原位微量元素和硫同位素分析,探讨了金在黄铁矿中的赋存状态、成矿物质来源以及金的沉淀机制。但对于该矿床为何会形成独特的氟镁石-石英-硫化物-萤石等矿物组合仍然不清晰,相关成矿物理化学条件和成矿过程仍有待详细厘定。本文对不同成矿阶段的热液石英开展了 LA-ICP-MS 原位微量组成测试,并对围岩中黄铁矿和矿石中热液硫化物开展了原位 S 同位素测试。旨在查明成矿物质来源、成矿流体性质及物理化学条件,探讨成矿过程。

1 区域地质背景

大渡河金矿带位于扬子克拉通西缘,发育大量造山型金矿床(图 1-A)。该区经历了新元古代海洋扩张和俯冲(Zhou et al., 2002; Zhao and Zhou, 2008)、晚古生代大陆裂谷与地幔柱(Xu et al., 2007; Deng et al., 2014; Li et al., 2016)、中生代古特提斯缝合(Yan et al., 2011)以及青藏高原东部新生代,与印度—亚洲板块碰撞有关的隆升(Kapp and DeCelles, 2019; Cao et al., 2023)等多期构造演化过程。区域地层由前震旦系结晶基底和震旦系—中生代沉积盖层组成。基底岩性主要为花岗质片麻岩、片麻岩、混杂岩,及少量片岩、角闪岩和麻粒岩(Xu et al., 1996; Zhou et al., 2008)。盖层主要为大理岩、石英岩、片岩和片麻岩等。区域断裂构造发育,印度—亚洲板块碰撞形成了一个规模和速率不等的韧性-脆性剪切带和断裂体系(Yan et al., 2018),这些构造体系通常控制着区域金矿床的形成(Groves and Santosh, 2021; Yang et al., 2022; Zhou et al., 2023)。沿着龙门山—锦屏山逆冲断层系发育中生代的穹窿带,并受新生代青藏高原碰撞造山运动的影响,发生了进一步隆升(Hou et al., 2006)。区内基性—超基性岩脉主要是辉绿岩,侵位年龄可分为~750 Ma(如姑咱—长河坝辉绿岩脉)、~430 Ma(如偏岩子辉绿岩脉)和~220 Ma(如二里沟、一柱香辉绿岩脉)三期(刘阳, 2016)。中酸性侵入体广泛分布在区域穹窿周围,包括晚

造山期具有 I 型和(或)埃达克质特征的花岗岩(230~200 Ma; Zhang et al., 2006; Xiao et al., 2007; Yuan et al., 2010)和造山后期至后造山期含镁铁质包体的 A 型及 S 型花岗岩(210~180 Ma; Zhang et al., 2007; Sigoyer et al., 2014; Jolivet et al., 2015)。

根据产出层位的不同,大渡河金矿带产出的大量金矿床可分为“基底中金矿”“界面中金矿”和“盖层中金矿”3 大类(王小春, 2000; Li et al., 2007; 张成江等, 2016; Zhao et al., 2019)。在前震旦系康定杂岩中,金矿床主要为蚀变岩-石英脉型(如黄金坪、白金台子、韭菜坪和黑金台子)和石英脉型(如一炷香和三碉);在界面中,金矿主要为石英脉型(如金台子、长岩窝、水滴窝和狮子岩等);在新元古代—古生代沉积盖层中,金矿床主要为多金属石英脉型(如偏岩子、灯盏窝和大发沟)和石英脉型(如二里沟、燕子沟和铜炉房)(周春波等, 2024)。

2 矿床地质特征

偏岩子金矿床位于大渡河金矿带南段的康定地区,具有独特的含氟镁石矿物组合(罗鸿书等, 1987; 蔡建明, 1988; Pei et al., 2024)。矿体主要赋存于震旦系灯影组灰白色中-厚层细晶白云岩和富藻白云岩之中,部分矿体产于泥盆系沙窝子组中厚层白云岩和上三叠—下侏罗统的寒风垭组绢云千枚岩与碳质砂板岩中(图 1-C)。受构造运动影响,矿区内发育一系列断裂构造。部分大断裂为矿床的导矿构造,甚至直接控制着矿床的形成;在大断裂周围的次级断层和顺层的破碎带,为含金矿脉的主要分布区(图 1-C)。

矿区共发现 4 条含金矿体(M1, M8, M10, M13),多为隐伏矿体,仅头部或尾部出露于地表,呈复杂的脉状,走向北北西,倾向南西西,倾角 $56^{\circ}\sim 86^{\circ}$ (图 1-D)。矿体长 45~72 m(最长 124 m);厚 1.5~8 m(最厚 41 m),延深 40~80 m(最大延深 131 m),以金、银矿化为主,平均品位为: Au=(6.8~18.3)g/t, Ag=(57.8~511.6)g/t(罗鸿书等, 1987; 高昆丽, 2017; 张燕等, 2022)。围岩蚀变作用微弱,主要集中在断裂带和破断裂之间。蚀变类型以黄铁矿化、硅化为主,其次为绢云母化、碳酸盐化、钠长石化、绿泥石化。

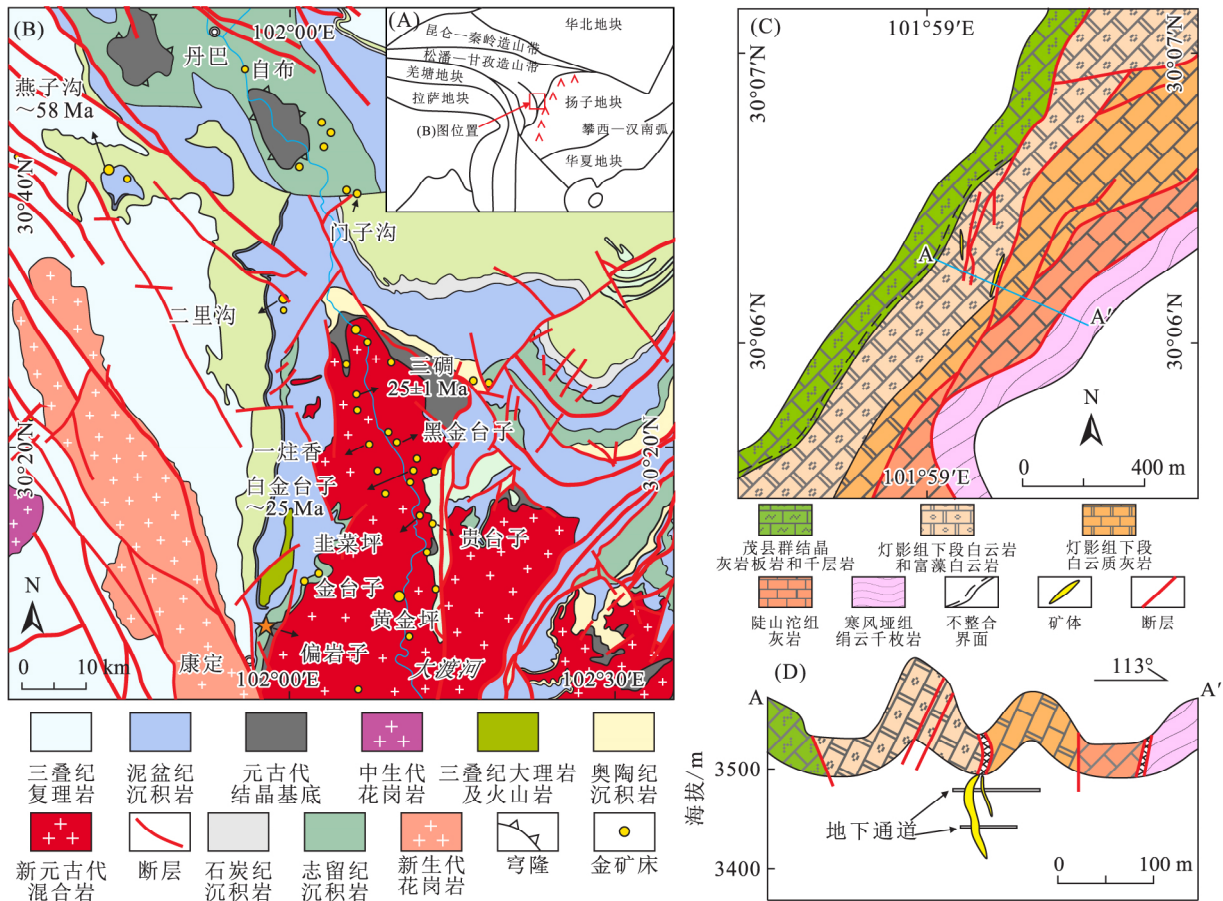


图 1 地质情况简图和矿体剖面图(据罗鸿书等,1987; Zhao et al., 2022; Pei et al., 2024 修改)

Fig. 1 Geological map and geological profile

(A)大地构造位置图;(B)大渡河金矿带区域地质简图;(C)偏岩子矿区地质图;(D)A-A'线矿体剖面图

偏岩子金矿床的矿石种类分为 5 种:(1)矿化围岩型(图 2-A~C),主要表现为黄铁矿呈浸染状和集合体零星分布于白云岩之中,金品位较低;(2)黄铁矿-石英型(图 2-D~F),主要由贫矿的中-粗粒乳白色石英和粗粒自形-半自形黄铁矿组成,金品位较低;(3)石英-氟镁石型(图 2-G~I),主要由氟镁石、石英和萤石组成,含少量多金属硫化物,金品位最高,为主成矿期的产物;(4)多金属硫化物-氟镁石-石英型(图 2-J~L),主要由铅、锌、铜、铁等的硫化物或硫酸盐矿物和石英组成,金、银品位均高;(5)褐铁矿型(图 2-F),是上述几类矿石受风化作用之后的次生氧化矿石,可见褐铁矿、铜蓝、孔雀石、铅钒、白铅钒等,金品位较低。矿石中金属矿物主要有自然金、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、达硫锑铅矿、黄铜矿、车轮矿、黝铜矿等;主要的氧化矿物为褐铁矿、铅钒、白铅钒、黄锑矿、蓝铜矿和孔雀石等;非金属矿物主要为石英、氟镁石、白云石、绢云母、萤石、方解石等(图 3)。矿石

典型结构有自形晶、半自形晶、他形晶、包含、充填、共边等,还常见溶蚀、残余、骸晶、假象等结构(图 3);矿石构造主要包括浸染状、纹层状、皱纹状、角砾状、脉状、晶簇状、梳状、多孔状、蜂窝状构造等(图 2)。

根据矿石组构及脉体间的穿插、胶结关系,偏岩子金矿床成矿过程可分为热液成矿期和表生期。其中热液成矿期又可分为金-黄铁矿-石英(I)、金-氟镁石(II)、金-硫化物-氟镁石(III)和黄铁矿-白云石-白云母(IV)4 个阶段(罗鸿书等, 1987; Pei et al., 2024)。金-黄铁矿-石英阶段(I)以围岩中广泛发育含金黄铁矿-石英脉为典型特征,伴随黄铁矿化和硅化(图 2-D~F)。该阶段矿石含金性差,但分布较广。黄铁矿中金质量分数低,矿石中自然金以显微金为主。金-氟镁石阶段(II)以发育氟镁石、石英和萤石为特征,存在少量金属硫化物(图 2-G~I)。该阶段矿石中金最为富集,为本矿床的主成矿阶段,自然金以明金

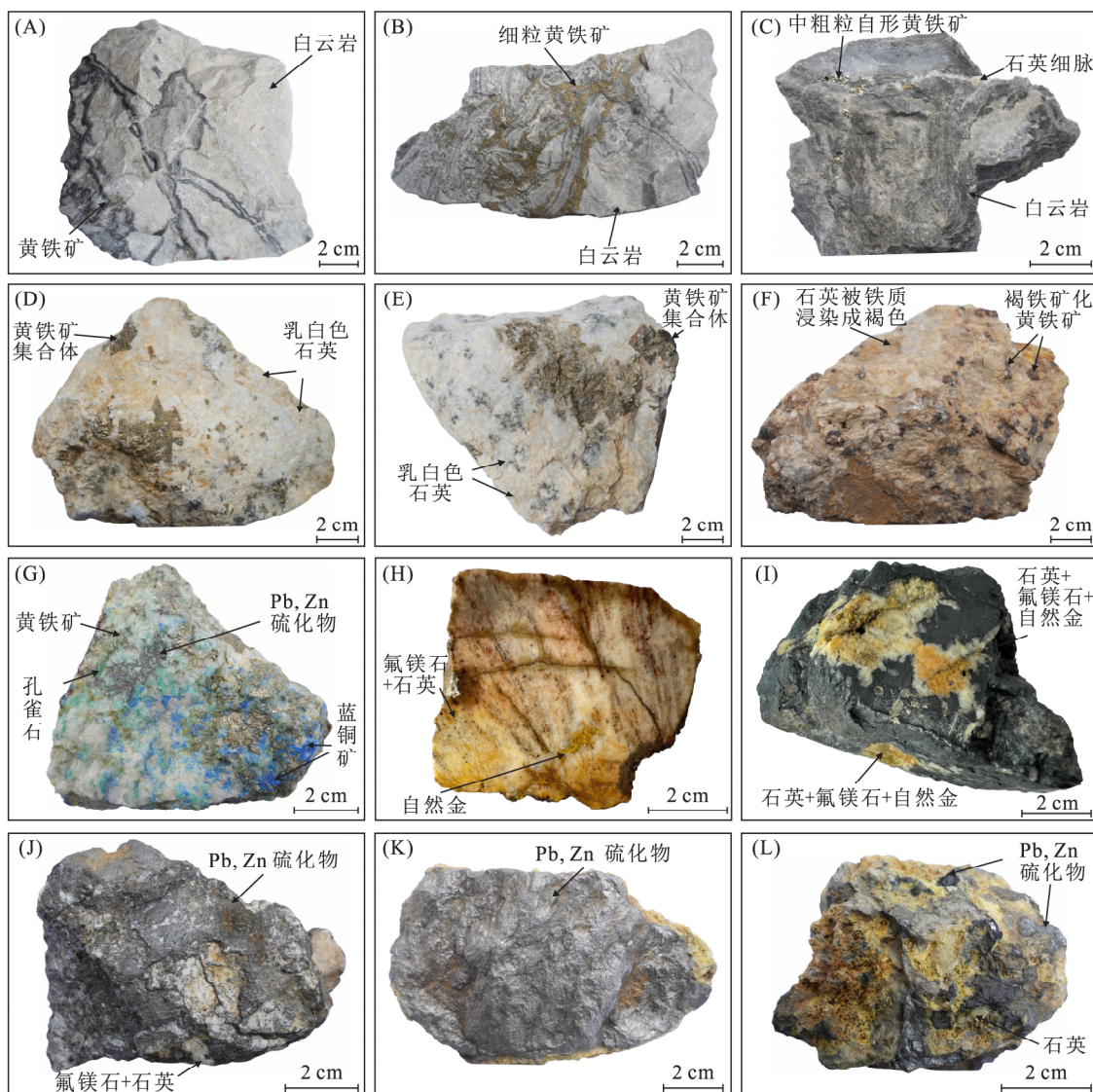


图 2 偏岩子金矿床不同类型矿石标本照片

Fig. 2 Photographs of hand specimens of ores in the Pianyanzi gold deposit

(A~C)蚀变围岩型矿石,白云岩中发育少量细粒黄铁矿;(D~E)黄铁矿-石英型矿石,主要由黄铁矿和石英组成;
 (F)黄铁矿-石英型矿石褐铁矿化;(G)黄铁矿-石英型矿石中可见较多蓝铜矿和孔雀石;
 (H~I)石英-氟镁石型矿石,可见自然金;(J~L)多金属硫化物-氟镁石-石英型矿石,主要由铅、锌、铜、铁等的硫化物或硫盐矿物、石英以及少量氟镁石组成

的形式广泛存在于氟镁石和萤石裂隙中,或被氟镁石、萤石所包裹。金-硫化物-氟镁石阶段(Ⅲ)以发育较多金属硫化物或硫盐矿物为特征(图 2-J~L)。该阶段金质量分数较高,金矿物以显微-次显微金为主,罕见银金矿、碲金矿。自然金主要呈星散状分布于硫化物、硫盐矿物和石英之间(图 3-H)。黄铁矿-白云石-白云母阶段(Ⅳ)以围岩中发育少量黄铁矿-白云石-白云母脉为特征。本阶段形成的矿脉含金性差。表生期表现为黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等被氧化形成蓝铜矿、褐铁矿、白铅矿等。

3 样品选择及分析方法

本次研究的主要采样对象为偏岩子金矿区的 52 号、53 号、56 号平硐,共采集了 20 件岩矿石样品,其中 18 件采自平硐中矿石,2 件采自矿区围岩。

石英微量元素微区分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析实验室完成。测试所用激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司 GeoLasPro 193 准分子固体进样系统,ICP-MS 为美国 Thermo Fisher

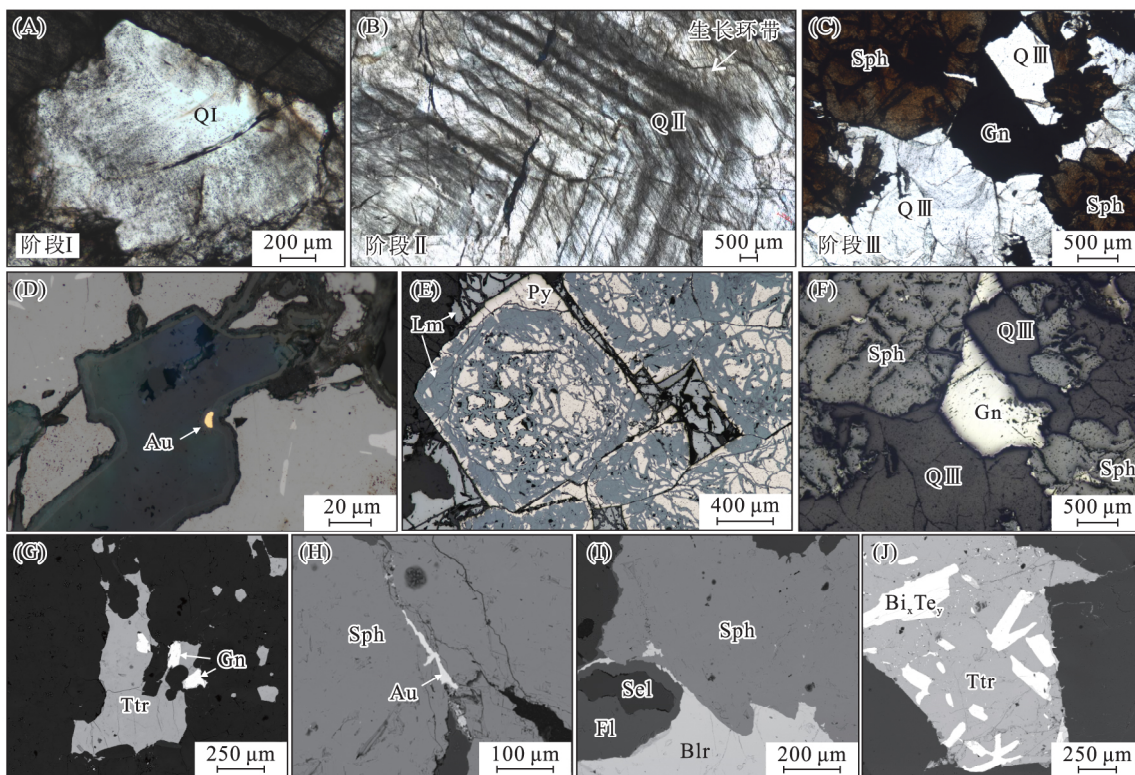


图 3 偏岩子金矿床矿石的物质组成和显微结构图像

Fig. 3 Mineral assemblages and textures of ores from the Pianyanzi gold deposit

(A)阶段 I 自形石英;(B)阶段 II 具生长环带的石英;(C)阶段 III 和硫化物共生的石英;(D)反射光下的自然金;(E)黄铁矿褐铁矿化形成交代结构;(F)石英与方铅矿、闪锌矿等硫化物共生;(G)方铅矿与黝铜矿共生;(H)闪锌矿颗粒裂隙中可见自然金;(I)氟镁石、萤石与闪锌矿、硫锑铅矿共生;(J)钼铜矿中可见针状碲铋矿。
Q-石英、Gn-方铅矿、Sph-闪锌矿、Au-自然金、Py-黄铁矿、Lm-褐铁矿、Ttr-黝铜矿、Fl-萤石、Sel-氟镁石、Blr-硫锑铋矿、Bi_xTe_y-碲铋矿物;(A)~(C)透射光;(D)~(F)反射光;(G)~(J)背散射

公司 X Series 2 型四极杆等离子体质谱仪。采用 He 作为载气,Ar 作为补偿气,通过单点剥蚀模式进行分析,激光束斑直径为 60 μm,频率 6 Hz,能量密度 12 J/cm²;背景信号采集时间为 20 s,样品信号采集时间为 50 s。采用标准玻璃 NIST610 作为外标,石英中 Si 元素理论值作为内标进行微量元素校正,一个天然石英标样 Q7 (Audéat, 2015)为监控样;采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008, 2010)对样品的测试数据进行后期处理。

LA-MC-ICP-MS 原位微区硫同位素分析在科荟测试(天津)科技有限公司完成。分析仪器为 Thermo Scientific 公司生产的 Neptune Plus 多接收等离子体质谱仪和与之连用的 RESOLUTION SE 193 nm 固体激光器。剥蚀采用点剥蚀,闪锌矿采用 30 μm 束斑,黄铁矿采用 20 μm 束斑,He 作为载气;能量密度 3 J/cm²,频率 5 Hz。³²S 和 ³⁴S 用法拉第杯静态同时接收,积分时间为 0.131 s,

采集 200 组数据,共需时约 27 s。分析过程中分别用与样品基质相似的硫化物为标样,并用标准-样品-标准交叉法进行质量歧视校正。

4 分析结果

4.1 石英微量元素组成

偏岩子金矿床主要发育 3 类石英,包括金-黄铁矿-石英阶段(I)中与黄铁矿共生的中粗粒自形-他形石英(Q I)(图 3-A);金-氟镁石阶段(II)与细粒氟镁石共生,可见明显生长晶纹的石英(QII)(图 3-B);金-硫化物-氟镁石-石英阶段(III)与金属硫化物(硫盐矿物)密切共生的石英(Q III)(图 3-C)。对上述 3 个阶段中的石英分别进行了原位 LA-ICP-MS 微量元素分析,共分析了 32 个点(Q I, Q II 和 Q III 分别为 5 个点、17 个点、10 个点),结果见表 1 和图 4,转换为每公式单位的原子数见表 2。所有石英富集 Li, Al 和 Ge 元素,用于解释的微量元素主要为 Li, Al, Ti, Ge, Rb 和 Sr。

表 1 偏岩子金矿床石英 LA-ICP-MS 微量元素 (10^{-6}) 分析结果统计表

Table 1 Results of LA-ICP-MS analysis of trace elements in quartz from the Pianyanzi gold deposit

样品	编号	数量/个	Li	Be	B	Fe	Cu	Ga	Ge	As	Se	Rb	Sr	Sn
Q I	PD53-002	5	3.62	0.05	1.90	3.13	0.33	0.00	5.18	0.40	2.32	0.12	0.08	0.08
Q II	PD56-002	17	2.03	0.11	2.77	0.93	0.20	0.02	4.33	0.32	0.54	0.07	0.06	0.05
Q III	PD52-012	10	15.35	0.19	2.51	3.67	0.70	0.10	13.76	1.53	2.97	0.18	0.05	0.32

样品	编号	数量/个	Sb	Cs	Ba	Na	Mg	Al	P	K	Ca	Ti	Mn
Q I	PD53-002	5	1.02	0.04	0.07	26.06	0.62	116.01	43.52	21.67	815.72	2.38	1.10
Q II	PD56-002	17	5.91	0.09	0.07	21.63	0.51	196.21	18.76	15.06	513.58	2.71	0.26
Q III	PD52-012	10	3.74	0.06	0.27	13.31	8.95	659.95	25.82	23.04	1150.08	3.35	0.19

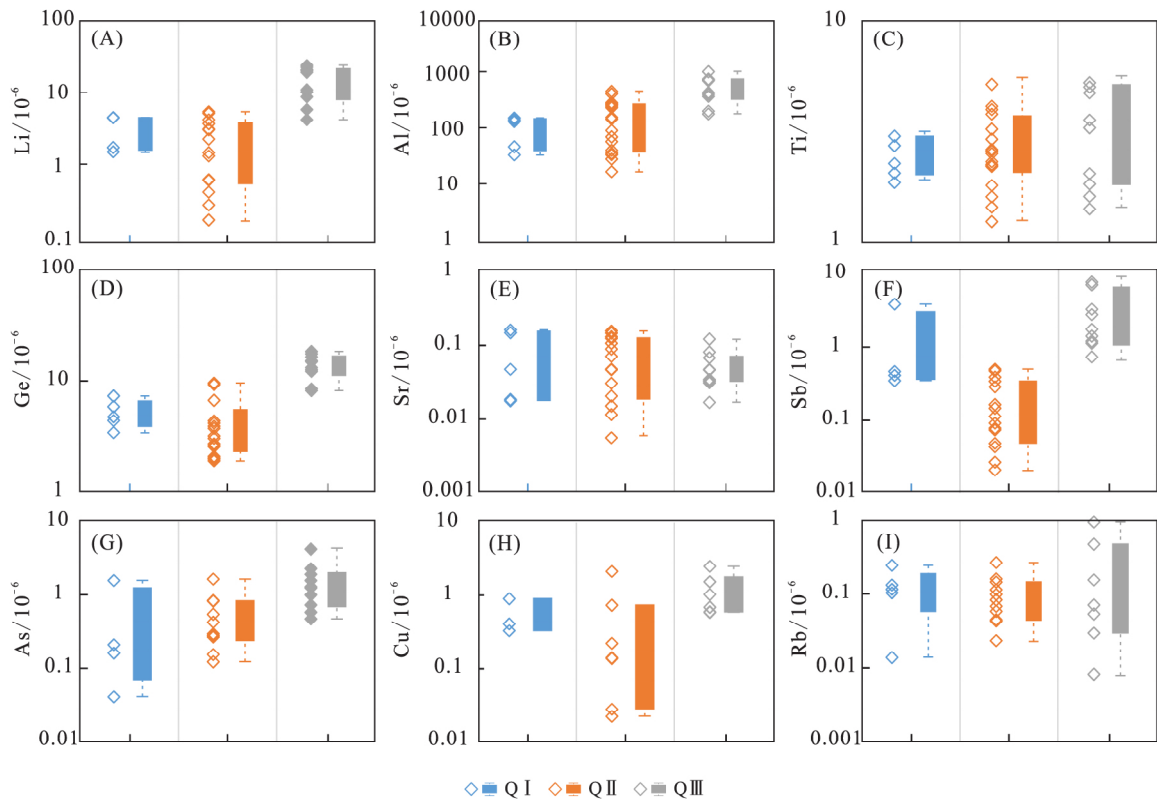


图 4 石英中 Li, Al, Ti, Ge, Sr, Sb, As, Cu 以及 Rb 的质量分数变化图解

Fig. 4 Plots of variations in the Li, Al, Ti, Ge, Sr, Sb, As, Cu, and Rb contents of quartz

表 2 将微量元素的质量分数转化为每个公式单位的原子数(原子单位数 $\times 10^6$)

Table 2 Conversion of trace element contents into atoms per formula units

样品	编号	数量/个	Li ⁺	B ³⁺	Na ⁺	Al ³⁺	P ⁵⁺	K ⁺	Sb ³⁺	M ⁺	M ³⁺	M ⁵⁺	M ⁺ 和 M ³⁺	M ⁺ 和 M ⁵⁺ 不含 Li
Q I	PD53-002	5	31.26	10.57	68.10	255.22	83.98	33.28	0.50	132.65	266.30	83.98	216.64	185.37
Q II	PD56-002	17	17.56	15.39	56.53	431.67	36.21	23.13	2.91	97.22	449.97	36.21	133.44	115.87
Q III	PD52-012	10	132.62	13.95	34.77	1451.90	49.84	35.39	1.84	202.78	1467.69	49.84	252.61	120.00

注: $M^+ = Li^+ + Na^+ + K^+$, $M^{3+} = B^{3+} + Al^{3+} + Sb^{3+}$, $M^{5+} = P^{5+}$ 。

Q I 和 Q II 的微量元素特征相似,但与 Q III 差异显著。例如,Q I 的 Li,Al 和 Ge 平均质量分数分别为 3.62×10^{-6} , 116.01×10^{-6} 和 5.18×10^{-6} ; Q II 的 Li,Al 和 Ge 平均质量分数为 2.03×10^{-6} , 196.21×10^{-6} 和 4.33×10^{-6} ; Q III 的 Li,Al 和 Ge 平均质量分数明显增高,分别为 15.35×10^{-6} , 659.95×10^{-6} 和 13.76×10^{-6} (图 4-A~B, D)。3 个阶段的石英 Ti, Sr, Rb 质量分数均较低,无明

显差异(图 4-C, E, D); Ti 的平均值分别为 2.38×10^{-6} , 2.71×10^{-6} , 3.35×10^{-6} ; Sr 平均值分别为 0.08×10^{-6} , 0.06×10^{-6} , 0.05×10^{-6} ; Rb 平均值分别为 0.12×10^{-6} , 0.07×10^{-6} , 0.18×10^{-6} 。Q I, Q II, Q III 的 As 质量分数具有升高趋势(图 4-G)。此外,石英中 Al 与 Cu, Ti 无明显相关性(图 5-A, C), 与 Ge, Li 呈明显的正相关关系(图 5-B, D)。

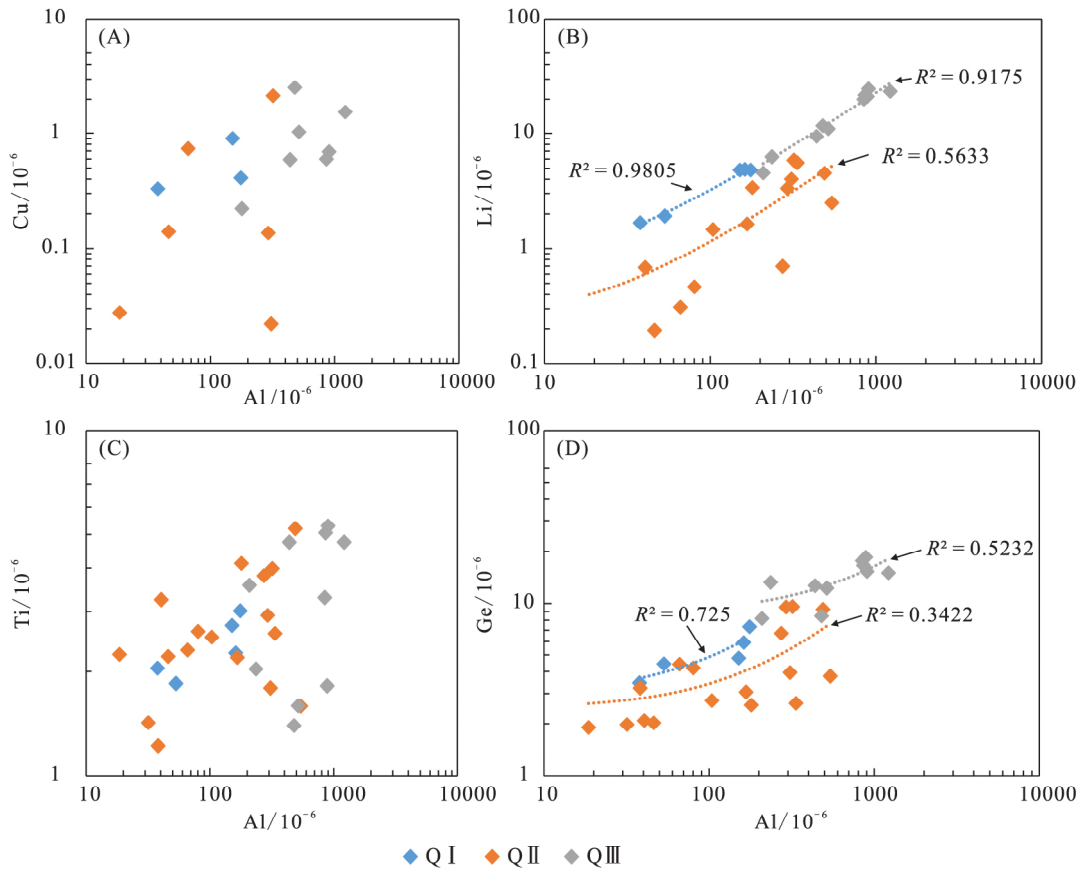


图 5 石英的 Al 元素与 Cu, Li, Ti, Ge 元素的相关性图解

Fig. 5 Binary diagram showing the correlations between Cu, Li, Ti, and Ge, and Al in quartz

选取矿石和围岩中的硫化物分别进行原位 S 同位素分析,结果见表 3 和图 6。矿石(包括块状黄铁矿矿石、块状方铅矿矿石、黄铁矿+方铅矿+孔雀石+蓝铜矿矿石)中 S 同位素值较为均一(介于 $5.4\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$ 之间,平均 6.1‰),具有单峰式分布特征。其中,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $6.0\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$ 之间(平均 6.3‰);闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 $5.4\text{‰} \sim 6.3\text{‰}$ (平均 5.9‰),总体小于黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。围岩(含网脉状石英+黄铁矿脉的皮壳状白云岩)中黄铁矿硫同位素值均为较大的负值($-22.3\text{‰} \sim -13.1\text{‰}$,平均 -17.1‰)。

5 讨论

5.1 石英微量元素化学特征及其替换机制

偏岩子金矿床 3 个阶段的石英 Al 质量分数较高,Al 质量分数变异系数分别为 0.56, 0.84 和 0.50。Q I, Q II, Q III 的 Al 质量分数具有明显增加的趋势(图 4-B)。研究表明低温热液形成的石英 Al 质量分数与一价阳离子通常具有正相关关系,而高温热液石英则很少显示出这些元素对之间的正相关关系(Cherniak, 2010; Rusk, 2012)。Q I, Q II, Q III 的 Al 与 Li 均呈现出明显正相关

表 3 偏岩子金矿床矿石样品硫化物原位 $\delta^{34}\text{S}$ 测试结果
Table 3 Results of *in-situ* analysis of $\delta^{34}\text{S}$ sulfide from the Pianyanzi gold deposit

样品编号	阶段	样品产状	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
LB-001-2-PY-1	围岩	围岩-白云岩中网脉状石英+黄铁矿	黄铁矿	-15.95
LB-001-2-PY-2	围岩	围岩-白云岩中网脉状石英+黄铁矿	黄铁矿	-22.33
LB-001-2-PY-3	围岩	围岩-白云岩中网脉状石英+黄铁矿	黄铁矿	-13.08
PD53-002-PY-1	阶段(I)	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	5.99
PD53-002-PY-2	阶段(I)	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	6.14
PD56-1-PY-1	阶段(II)	石英+黄铁矿+方铅矿+孔雀石+蓝铜矿矿石	黄铁矿	6.96
PD56-1-PY-2	阶段(II)	石英+黄铁矿+方铅矿+孔雀石+蓝铜矿矿石	黄铁矿	6.18
PD56-1-SP-5	阶段(II)	石英+黄铁矿+方铅矿+孔雀石+蓝铜矿矿石	闪锌矿	6.25
PD52-009-SP-1	阶段(III)	块状方铅矿矿石(含 Pb,Zn,Ag,As)	闪锌矿	5.79
PD52-009-SP-2	阶段(III)	块状方铅矿矿石(含 Pb,Zn,Ag,As)	闪锌矿	5.94
PD52-005-SP-3	阶段(III)	块状方铅矿矿石(多孔状)	闪锌矿	5.41

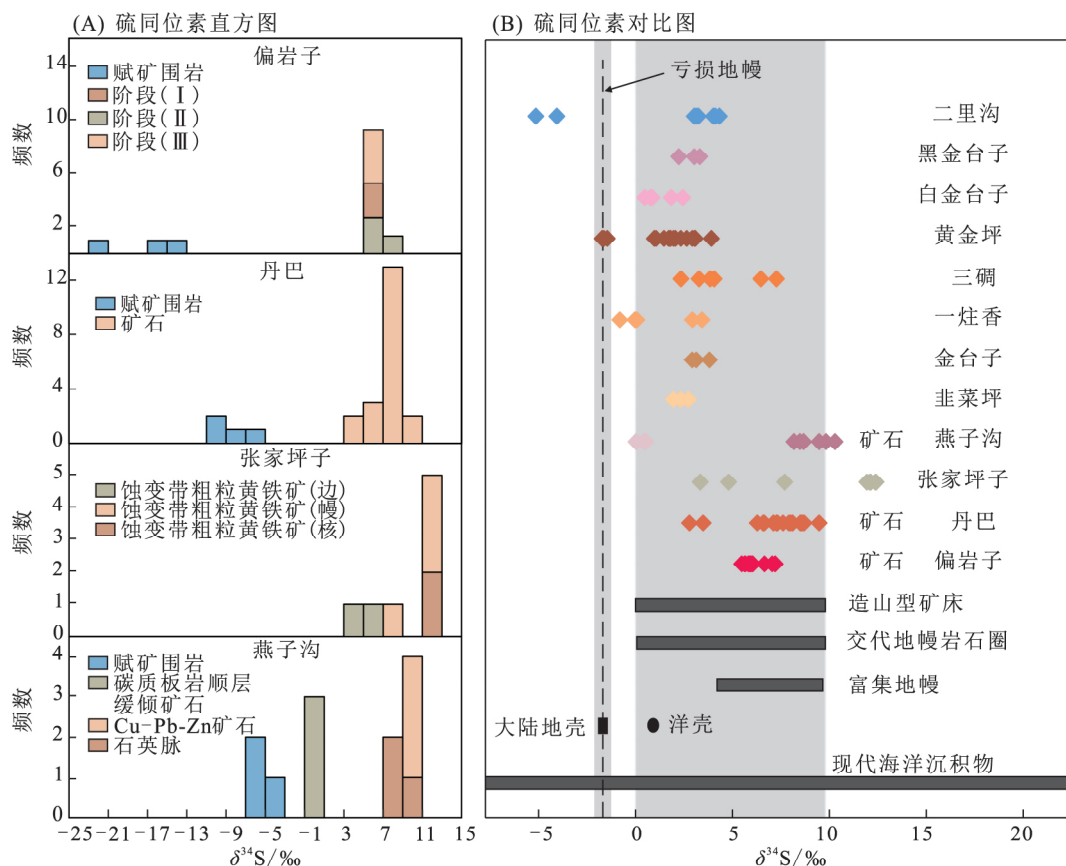


图 6 大渡河金矿带典型金矿床硫同位素频数直方图及与其他地质储库硫同位素对比图

Fig. 6 Frequency histogram of values of $\delta^{34}\text{S}$ of the Au deposit in the Daduhe region, and comparison between the composition of sulfur isotopes and natural geological settings

黑金台子、白金台子、三碛、一炷香、金台子、韭菜坪、燕子沟、张家坪子、丹巴硫同位素数据引自(陈智梁等,1997; 李晓峰等,2004; 周建军,2014; 王吉勇,2016; 许红英,2016; 赖晋杉,2018; 赵鹤森,2019; 毛艺,2020);造山型金矿一般值来自(Goldfarb and Groves,2015);交代地幔楔硫化物值来自(Alt and Shanks,2006; Alt et al.,1993,2012; Rielli et al.,2018);代表富集地幔的海底玄武质玻璃氧化硫值来自(Labidi et al.,2015);平均大陆地壳和洋壳以及海洋沉积物值来自(Rielli et al.,2018);灰色虚线代表亏损地幔平均硫同位素值(Labidi et al.,2015)

关系(R^2 分别为 0.980 5, 0.563 3, 0.917 5),说明其形成时温度较低(图 5-B)。早期石英(Q I 和 Q II)中 Ge, Li 等元素质量分数较低,在晚期(Q III)的石英中这些元素的质量分数明显较为富集,从早到晚 Ge, Li 等元素有逐渐增加的趋势(图 5-B, D)。这是由于 Ge, Li 等元素为不相容元素,更加倾向富集于流体中,当流体演化到晚阶段时,流体中 Ge, Li 等元素相对更加富集(Monnier et al., 2018; Götze et al., 2021)。

石英中微量元素的变化与其生长速率及所处环境的温度、压力、pH 值和流体/熔体成分等密切相关(Jourdan et al., 2009)。通过对控制微量元素进入石英晶格的因素进行约束,有助于研究石英生长所处的基本物理化学条件,并反演地质作用过程。由于 Al 在地壳中普遍存在,并且 Si^{4+} ($r=0.34 \text{ \AA}$) 和 Al^{3+} ($r=0.47 \text{ \AA}$) 的离子半径相似。因此, Al^{3+} 替代石英中 Si^{4+} 形成 $[AlO_4/M^+]^{\circ}$ 的结构中心是石英中与微量元素相关的最常见的结构中心(图 7), M^+ 充当着弱结合补偿电价的作用,通常是 H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Cu^+ 和 Ag^+ (Griffiths et al., 1954; Götze, 2009)。其中, Li^+ 更容易进去石英结构之中(图 7) (Walsby et al., 2003; Götze, 2009)。其他常见的微量元素如 Ga^{3+} , Fe^{3+} , Sb^{3+} , Ge^{4+} , Ti^{4+} 和 P^{5+} 在规则的 Si^{4+} 晶格位置的结构结合已被证明(Weil, 1984; Fu et al., 2020)。

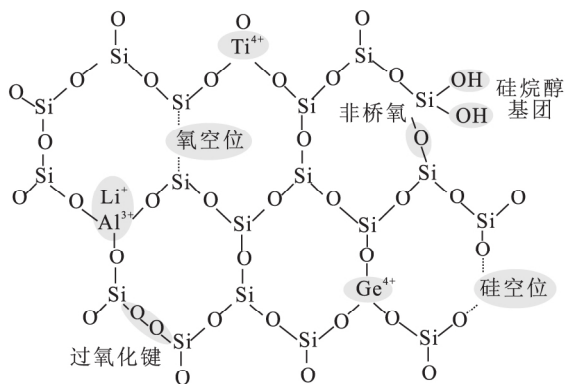


图 7 石英结构示意图显示了最常见的缺陷类型(据 Götze, 2009 修改)

Fig. 7 Schematic structure of quartz showing the most common types of defects in it

为了解释石英晶格中主要阳离子的掺入和耦合取代机制,本次研究将微量元素的质量分数转换为每公式单位的原子数(原子单位数 $\times 10^6$ 或

微原子单位数)(表 2、图 8-A~C)。三价阳离子以 Al^{3+} 为主,其次是 Sb^{3+} 和 B^{3+} 。一价阳离子以 Li^+ 为主,其次是 Na^+ 和 K^+ 。五价阳离子主要为 P^{5+} 。阳离子进入石英晶格主要有 $(Al^{3+}, Sb^{3+}, B^{3+}) + (Li^+, Na^+, K^+, H^+) \leftrightarrow Si^{4+}$ 和 $(Al^{3+}, Sb^{3+}, B^{3+}) + (P^{5+}) \leftrightarrow 2Si^{4+}$ 2 种耦合取代机制(Müller and Koch-Müller, 2009; Breiter et al., 2019; Fu et al., 2020)。在偏岩子金矿床中, Q I 和 Q III 的 Li^+/Al^{3+} 值约为 1/10; Q II 的 Li^+/Al^{3+} 值约为 1/30(图 8-C)。结合图 8-A, B 可知,偏岩子金矿床不同阶段石英中 Li^+/Al^{3+} 值的差异,主要是由于石英结构中 Li^+ 阳离子质量分数的不同所致。研究表明,石英中 Li^+/Al^{3+} 值 $> 1/1$ 时,微量元素进入石英的取代机制可能为 $Sb^{3+} + Li^+ \leftrightarrow Si^{4+}$; Li^+/Al^{3+} 值约等于 1/1, 耦合取代可能为 $Al^{3+} + Li^+ \leftrightarrow Si^{4+}$; 石英中 Li^+/Al^{3+} 值小于 1/1 时,表明存在 Na^+ , K^+ , H^+ 或 P^{5+} 与 Li^+ 竞争,并与 Al^{3+} 耦合,取代 Si^{4+} 进入石英晶格(Fu et al., 2020; Liu et al., 2022)。偏岩子金矿床 Q I, Q II, Q III 的 Li^+/Al^{3+} 值均小于 1/1, 表明其阳离子进入石英的取代机制可能为 $Al^{3+} + (Li^+, Na^+, K^+, H^+) \leftrightarrow Si^{4+}$ 和 $Al^{3+} + P^{5+} \leftrightarrow 2Si^{4+}$ 。

5.2 硫的来源

偏岩子白云岩围岩中黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为很大的负值 ($-22.3\text{‰} \sim -13.1\text{‰}$; 平均值为 -17.1‰), 与丹巴围岩-黑云母片岩和斜长角闪岩中的磁黄铁矿(赵鹤森, 2019)、燕子沟围岩-碳质板岩中的黄铁矿(赵鹤森, 2019)、二里沟黑色碳质板岩(吴二红, 2015)中的黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值较为相似(图 6)。硫化物的 $\delta^{34}S$ 值出现较大的负值通常认为其 S 源很可能来自于生物成因硫(Ohmoto, 1972)。鉴于偏岩子金矿床的赋矿围岩常为一套含藻的白云岩, 这些围岩中黄铁矿的硫很可能来源于硫酸盐的细菌还原作用。

研究表明,当硫化物 H_2S 达到平衡时,硫化物中富 ^{34}S 的顺序为辉钼矿 $>$ 黄铁矿 $>$ 闪锌矿(磁黄铁矿) $>$ H_2S $>$ 黄铜矿 $>$ $S(HS^-)$ $>$ 铜蓝 $>$ 方铅矿 $>$ 辰砂 $>$ 辉铜矿(辉锑矿) $>$ 辉银矿 $>$ S^{2-} 。偏岩子金矿床矿石中硫化物的 S 同位素值介于 $5.4\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$ 之间,平均值为 6.1‰ 。其中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 平均值 (6.3‰) $>$ 闪锌矿 $\delta^{34}S$ 平均值

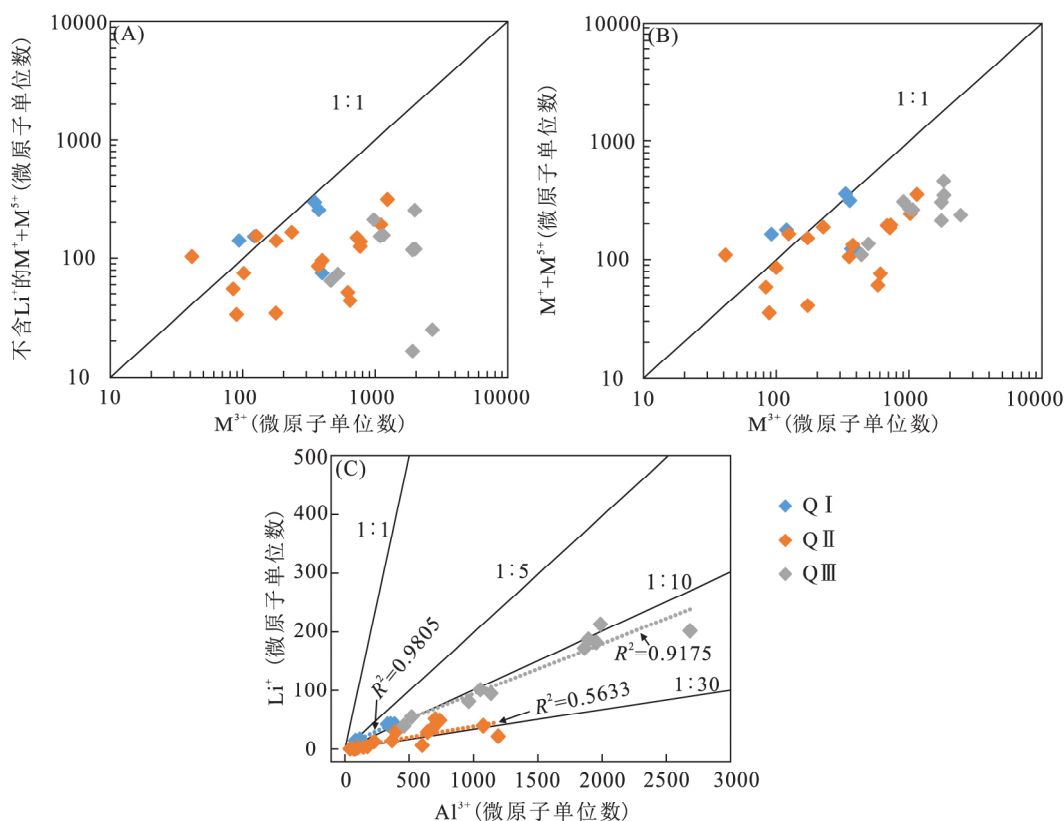


图 8 微量元素每个化学式单位的原子数的相关性图解

Fig. 8 Binary diagram showing the trace element atoms per formula units

(A) M^{3+} 与不含 Li^+ 的 $(M^+ + M^{5+})$ 相关性图解; (B) $M^{3+} - (M^+ + M^{5+})$ 相关性图解; (C) $Al^{3+} - Li^+$ 相关性图解

(5.9‰), 说明 S 同位素分馏达到平衡。另外, 偏岩子金矿床矿石中含硫矿物以黄铁矿、方铅矿、黝铜矿、车轮矿、辉碲铋矿等硫化物为主, 硫酸盐矿物(石膏、重晶石等)不发育, 表明成矿流体处于还原环境, 此时热液硫化物的 $\delta^{34}S$ 平均值可大致代表成矿热液的总硫同位素组成。

偏岩子金矿床矿石中硫化物的 S 同位素值与白云岩围岩中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值明显不同, 表明其成矿物质不太可能来自围岩。其与大渡河流域的丹巴金矿床(平均 7.8‰)、张家坪子金矿床(平均 10.0‰)、燕子沟金矿床(平均 6.5‰)和三雕金矿床(平均 4.8‰)的 $\delta^{34}S$ 值接近(图 6), 表明它们可能具有相同的成矿物质来源。另外, 二里沟(3.3‰)、黑金台子(3.0‰)、白金台子(1.3‰)、黄金坪(1.8‰)、一炷香(1.7‰)以及韭菜坪(2.6‰)等矿床中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值相对较低(陈智梁等, 1997; 李晓峰等, 2004; 宋笑天, 2015; 吴二红, 2015; 许红英, 2016; 王吉勇, 2016; 赖晋杉, 2018; 毛艺, 2020)。最新研究亦表明(Rielli et

al., 2018), 俯冲洋壳和上覆沉积物是引起交代岩石圈地幔产生正 $\delta^{34}S$ 值的重要原因(Alt and Shanks, 2006; Labidi et al., 2015)。丹巴、张家坪子和燕子沟金矿床矿石中硫化物均具有较大的 $\delta^{34}S$ 值, 暗示矿石中的硫很可能来自于交代岩石圈地幔(赵鹤森, 2019; Zhao et al., 2019; Zhao et al., 2022)。代表富集地幔组分的海底玄武质玻璃中氧化 S 也拥有正的 $\delta^{34}S$ 值 4.2‰~9.7‰(Labidi et al., 2015)。偏岩子金矿床硫化物的 $\delta^{34}S$ 值刚好与之重叠, 表明该矿床的硫同样可能来源于交代岩石圈地幔。

5.3 矿床成因

偏岩子金矿床位于扬子地块西南缘大渡河金矿带内, 该成矿带发育大量造山型金矿床。从晚三叠纪至新生代, 区域经历了晚三叠纪古特提斯洋闭合、早侏罗纪沿扬子克拉通西缘穹窿带的初始形成、新生代印度—欧亚板块碰撞等区域重大构造事件, 形成了众多变质地体或韧—脆性断裂构造(Huang et al., 2003a, 2003b; Roger et al.,

2004; Weller et al., 2013)。偏岩子金矿床矿体产于断裂构造和破碎带之中,成矿受构造控制明显。流体包裹体岩相学观察、测温过程中相态变化和激光拉曼成分分析均显示,偏岩子金成矿的成矿流体富含大量 CO₂ 成分(李保华,1997;高昆丽,2017),这与造山型金矿床的成矿流体成分较为相似(Groves et al., 1998; Kerrich, 1999; 王庆飞等,2019)。另一方面,偏岩子含矿石英的 δ¹⁸O_{H₂O} 值为 2.7‰~4.8‰,δD_{H₂O} 值为 -61.2‰~-59.6‰(罗鸿书等,1987),接近造

山型金矿床的 H-O 同位素值;矿石中硫化物的 δ³⁴S 值(5.4‰~7.0‰)也介于典型造山型金矿床范围内(0‰~10‰)(Goldfarb and Groves, 2015)。石英中 Al 和 Ti 质量分数的系统性变化可以区分浅成低温热液型、造山型和斑岩型矿床(Rusk,2012)。在 Ti-Al 关系图解中,偏岩子金矿床的 3 类热液石英均落入了造山型矿床的范围(图 9-A),明显区别于浅成低温热液矿床和斑岩型矿床。综上所述,本文初步认为偏岩子金矿床属于造山型矿床。

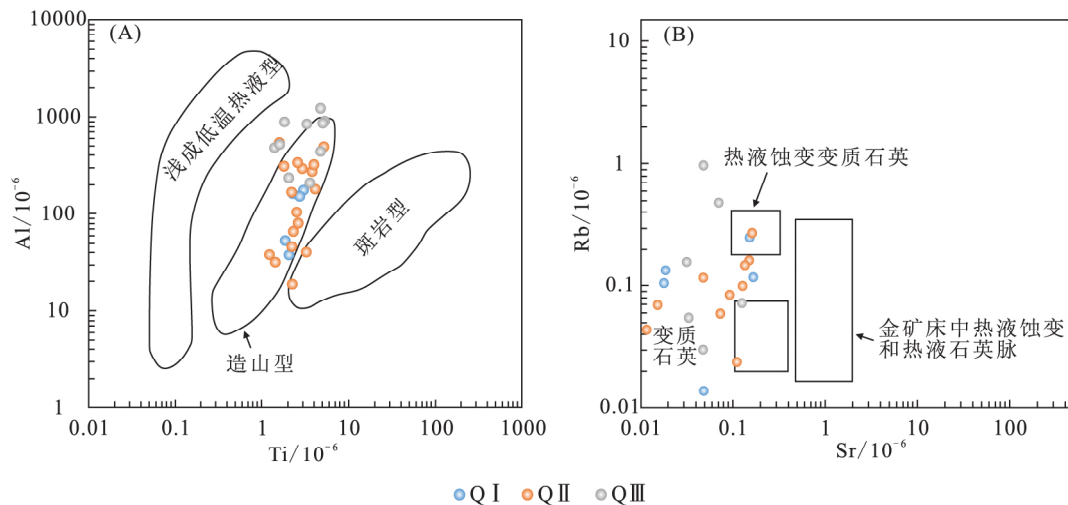


图 9 不同石英类型判别图解

Fig. 9 The discrimination diagram of different quartz types

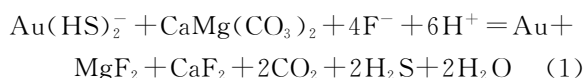
(A) 石英 Ti-Al 质量分数对数图解(Rusk,2012);(B) 石英 Sr-Rb 质量分数的对数关系图解(Monecke et al., 2002)

大多数学者认为,造山型金矿床的含金流体来源于赋矿地层或矿质初步富集的地壳岩石、从绿片岩相到角闪岩相的进变质过程中的变质脱水(Goldfarb et al., 2005; Tomkins and Grundy, 2009; Phillips and Powell, 2010; Tomkins, 2010)。近年来,也有部分学者认为造山型金矿床成矿流体可能有更深成的来源(Wyman et al., 2016),包括俯冲板块和上覆沉积物的脱挥发作用(Kerrich,1999; Groves et al., 2020a),或交代地幔岩石圈(Hronsky et al., 2012; Deng et al., 2020; Groves et al., 2020b; Wang et al., 2020)。偏岩子金矿床赋矿围岩的变质程度为次绿片岩相-绿片岩相,矿石中硫化物的 S 同位素值(4.3‰~7.5‰)与赋矿围岩中硫化物的 S 同位素值(-22.3‰~-13.1‰)差异较大、与富集地幔的硫同位素值具有一致性(4.2‰~9.7‰)(Labi-di et al., 2015),表明其成矿流体不太可能来自围

岩的变质脱水,更可能是来着富集地幔。另外,该矿床东北部的黄金坪、白金台子和黑金台子金矿床黄铁矿中流体包裹体的低 He-Ar 同位素比值(³He/⁴He = 0.16~0.86; ⁴⁰Ar/³⁶Ar = 298~3288),亦指示地幔流体参与了成矿作用(Li et al., 2007)。热液石英的 Rb 和 Sr 质量分数与成矿流体的组成有关。一般来说,岩浆流体的 Sr 和 Rb 质量分数要高于地幔流体和地壳;相比于地壳,地幔流体的 Rb 和 Sr 质量分数则更低。偏岩子金矿床 Q I, Q II, Q III 的 Sr[(0.05~0.08) × 10⁻⁶]和 Rb[0.07~0.18) × 10⁻⁶]质量分数均较低(图 9-B),类似于热液蚀变(叠加)变质石英和变质石英(Monecke et al., 2002),说明成矿流体并非来自于岩浆流体。虽然在偏岩子矿区辉绿岩脉广泛发育,且与矿体在空间上关系密切。但锆石 U-Pb 定年显示这些辉绿岩脉形成于(432.5 ± 5.1)Ma(刘阳,2016),远远大于偏岩子金矿床的

成矿年龄(石英 ESR 测年: (16.35 ± 1.50) Ma)(张诣泽, 2016)。因此, 偏岩子金矿床成矿流体并非来自赋矿围岩进变质过程中的变质脱水, 也与区域广泛分布的辉绿岩体无关, 而是来着于深部的地幔流体。

前人通过流体包裹体地球化学和热力学的研究, 认为偏岩子金矿床成矿流体中金的运移方式搬运形式主要为 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 、其次为 $\text{Au}(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ (李保华和蔡建明, 1995)。岩相学表明, 该矿床矿石中含有大量氟镁石和萤石, 金主要以自然金的形式存在于氟镁石、萤石等颗粒裂隙或其边部, 且氟镁石大量出现的部位金的品位越高, 表明金、氟镁石以及萤石同时形成。流体包裹体研究表明氟镁石以及萤石中含大量 CO_2 包裹体(李保华, 1997)。鉴于该矿床的赋矿围岩为白云岩, 本文初步认为金的沉淀与成矿热液和围岩反应的有关, 同时形成了大量氟镁石和萤石。其可能的反应式如下式:



在上述反应式中, 随着流体的演化, 反应向右进行, H_2S 活度降低, CO_2 逸出, pH 值上升, 自然金析出, 同时形成氟镁石、萤石等。

6 结论

a. 偏岩子金矿床主要发育 3 类石英, 石英中 $\text{Li}[(2.0 \sim 15.4) \times 10^{-6}]$, $\text{Al}[(116.0 \sim 660.0) \times 10^{-6}]$ 和 $\text{Ge}[(4.3 \sim 13.8) \times 10^{-6}]$ 质量分数高。且从早期到晚期有逐渐升高的趋势, 指示石英中元素替代作用逐渐增强; 阳离子进入石英晶格中的耦合取代机制可能为 $\text{Al}^{3+} + (\text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{H}^+) \leftrightarrow \text{Si}^{4+}$ 和 $\text{Al}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow 2\text{Si}^{4+}$ 。

b. 从早期到晚期石英中 Al 与 Li 均呈现出明显正相关关系, 指示其形成时温度较低。

c. 矿石中硫化物的原位 S 同位素介于 $5.4\% \sim 7.0\%$ 之间, 可能来源于交代岩石圈地幔; 围岩中黄铁矿原位 S 同位素介于 $-22.3\% \sim -13.1\%$ 之间, 其来源于硫酸盐的细菌还原作用。

d. 偏岩子金矿床属于造山型金矿床, 成矿流体来源于深部地幔。成矿流体上升过程中与围岩接触, 发生了水-岩反应, 导致 Au 发生沉淀, 同时形成了大量氟镁石。

[参 考 文 献]

- 蔡建明, 1988. 四川偏岩子金矿床流体包裹体特点及其成矿意义[J]. 成都地质学院学报, 15(3): 12-19.
- Cai J M, 1988. A fluid inclusion study of the pianyanzi gold deposit in Sichuan Province [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 15(3): 12-19. (in Chinese)
- 曹志敏, 李佑国, 1992. 康定黄金坪金矿床原生晕分带特征及找矿意义[J]. 矿物岩石, 12(2): 53-60.
- Cao Z M, Li Y G, 1992. Zoning features of the primary halo in Huangjinping gold deposit, Kangding [J]. Mineralogy and Petrology, 12(2): 53-60. (in Chinese)
- 陈智梁, 刘宇平, 魏少青, 等, 1997. 康定大渡河两岸主要金矿区矿田构造研究[M]. 北京: 地质出版社: 1-58.
- Chen Z L, Liu Y P, Wei S Q, et al., 1997. Study on Ore Field Structures of the Main Gold Districts along the Dadu River in Kangding [M]. Beijing: Geology Press: 1-58. (in Chinese)
- 高昆丽, 2017. 四川康定偏岩子金矿床成矿流体特征研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Gao K L, 2017. Metallogenic Fluid Characteristics in the Panyanzi Gold Ore Deposit, Kangding County, Sichuan [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 侯林, 邓军, 丁俊, 等, 2012. 四川丹巴燕子沟造山型金矿床成矿流体特征研究[J]. 地质学报, 86(12): 1957-1971.
- Hou L, Deng J, Ding J, et al., 2012. Ore-forming fluids features of the Yanzigou orogenic gold deposit, Danba County, Sichuan Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 86(12): 1957-1971. (in Chinese)
- 何阳阳, 周玉, 赵林, 等, 2018. 康定县三碛金矿床金的赋存状态[J]. 矿产综合利用, (3): 99-103.
- He Y Y, Zhou Y, Zhao L, et al., 2018. Gold occurrence of the Sandiao gold deposit in Kangding [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (3): 99-103. (in Chinese)
- 赖晋杉, 2018. 大渡河金成矿带稀有气体同位素特征[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Lai J S, 2018. Rare Gas Isotopic Characteristics of the Dadu River Gold Metallogenic Belt [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 李保华, 1997. 康定偏岩子金矿床流体包裹体研究[J]. 四川地质学报, 17(1): 36-42.
- Li B H, 1997. A research for fluid inclusions from Panyanzi gold deposit, Kangding [J]. Acta Geologica

- Sichuan, 17(1): 36—42. (in Chinese)
- 李保华, 蔡建明, 1995. 偏岩子金矿床成矿物理化学条件及金的迁移和沉淀[J]. 成都理工学院学报, 22(2): 89—95.
- Li B H, Cai J M, 1995. Physicochemical conditions of mineralization and the transportation and deposition of Au in Pianyanzi gold deposit[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 22(2): 89—95. (in Chinese)
- 李保华, 李雯霞, 顾雪祥, 等, 2014. 四川丹巴燕子沟金矿床成矿流体不混溶的流体包裹体证据[J]. 地学前缘, 21(5): 41—49.
- Li B H, Li W X, Gu X X, *et al.*, 2014. Fluid inclusion evidence for the immiscibility during the formation of the Yanzigou gold deposit in Daba, Sichuan Province [J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 41—49. (in Chinese)
- 李晓峰, 毛景文, 王登红, 等, 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氦氩硫氢氧同位素示踪[J]. 地质学报, 78(2): 203—210.
- Li X F, Mao J W, Wang D H, *et al.*, 2004. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusion of the gold deposits along the Daduhe River, Sichuan Province, southwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 203—210. (in Chinese)
- 刘阳, 2016. 大渡河金成矿带基性-超基性脉岩形成时代及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Liu Y, 2016. Discussion on the Age and Origin of the Formation of Mafic-ultramafic Dykes in Gold Metallogenic Belt of Dadu River[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 陆彦, 毛玉元, 1988. 康定偏岩子金矿床构造控矿特征[J]. 成都地质学院学报, 15(2): 11—19.
- Lu Y, Mao Y Y, 1988. Analysis of the characteristics of ore-controlling structures in Kangding Pianyanzi gold ore deposit[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 15(2): 11—19. (in Chinese)
- 罗鸿书, 毛玉元, 陆彦, 等, 1987. 康定氟镁石金矿[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- Luo H S, Mao Y Y, Lu Y, *et al.*, 1987. Kangding Sellaite Type Gold Deposit [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. (in Chinese)
- 骆耀南, 俞如龙, 侯立玮, 等, 1998. 龙门山—锦屏山陆内造山带[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- Luo Y N, Yu R L, Hou L W, *et al.*, 1998. Longmenshan-Jinpingshan Intracontinental Orogenic Belt [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House. (in Chinese)
- 毛艺, 2020. 川西康定—丹巴地区金矿床地质特征及成矿规律研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Mao Y, 2020. Study on Metallogenic Geological Characteristics and Regularity of Gold Deposits in Kangding-Danba Area, Western Sichuan[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 毛玉元, 陆彦, 蔡建明, 等, 1986. 一种新类型金矿——康定偏岩子氟镁石型金矿床[J]. 四川地质学报, (2): 6—9.
- Mao Y Y, Lu Y, Cai J M, *et al.*, 1986. A new type of gold deposit—Kangding Pianyanzi fluoromagnesite type gold deposit[J]. Acta Geologica Sichuan, (2): 6—9. (in Chinese)
- 宋笑天, 2015. 大渡河韭菜坪石英脉型与蚀变岩型金矿对比及其成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Song X T, 2015. The Comparison Research between Quartz-vein and Altered-rock Gold Deposit in Daduhe Jiucaiping and the Metallogenic Model[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 王吉勇, 2016. 大渡河地区三碛金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Wang J Y, 2016. Discussion on Geological Characteristics and Genesis of Sandiao Gold Deposit in Dadu River Area[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 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): 1—33.
- Wang Q F, Deng J, Zhao H S, *et al.*, 2019. Review on orogenic gold deposits[J]. Earth Science, 44(6): 1—33. (in Chinese)
- 王庆飞, 邓军, 翁伟俊, 等, 2020. 青藏高原新生代造山型金成矿系统[J]. 岩石学报, 36(5): 1315—1353.
- Wang Q F, Deng J, Weng W J, *et al.*, 2020. Cenozoic orogenic gold system in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(5): 1315—1353. (in Chinese)
- 王小春, 2000. 川西地区金矿的类型与分布规律[J]. 地质与勘探, 36(1): 19—22.
- Wang X C, 2000. Types and distribution regularity of gold deposits in the western Sichuan [J]. Geology and Prospecting, 36(1): 19—22. (in Chinese)
- 吴二红, 2015. 康定二里沟金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Wu E H, 2015. Discussion on Geological Characteristics and Metallogenic Genesis of Erligou Gold Deposit in

- Kangding [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 许红英, 2016. 一柱香金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Xu H Y, 2016. Discussion on Geological Characteristics and Metallogenic Genesis of Yizhuxiang Gold Deposit [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 闫升好, 杨建民, 王登红, 等, 2002. 大渡河金矿田喜马拉雅期成矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄依据及其意义[J]. 地质学报, 76(3): 384—388.
- Yan S H, Yang J M, Wang D H, *et al.*, 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Daduhe gold orefield in Kangding, Sichuan—New evidence of the Himalayan mineralization and its implications[J]. Acta Geologica Sinica, 76(3): 384—388. (in Chinese)
- 张成江, 宋昊, 修淑芝, 等, 2016. 大渡河流域金成矿带成矿模式及其找矿模型研究成果报告[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心.
- Zhang C J, Song H, Xiu S Z, *et al.*, 2016. Research Results Report on Metallogenic Model and Prospecting Model of Daduhe Gold Belt [R]. Chengdu: Chengdu Geological Survey Center of China Geological Survey Bureau. (in Chinese)
- 张燕, 李引, 尹鑫, 等, 2022. 四川大渡河流域偏岩子金矿床地质特征及金的赋存状态[J]. 矿产综合利用, (1): 42—47.
- Zhang Y, Li Y, Yin X, *et al.*, 2022. Geological characteristics and occurrence of Pianyanzi Au deposit in Daduhe Basin, Sichuan [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (1): 42—47. (in Chinese)
- 张诣泽, 2016. 偏岩子金矿床地质特征及垂直分带规律 [D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhang Y Z, 2016. The Geological Features and the Regularity of Vertical Zoning of Pianyanzi Gold Deposit [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 赵鹤森, 2019. 扬子克拉通西缘丹巴—冕宁造山型金矿带成因机制[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Zhao H S, 2019. Genetic Mechanism of Danba—Mianning Orogenic Gold Belt on Western Margin of Yangtze Craton [D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese).
- 赵一琛, 2016. 金台子金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhao Y C, 2016. Discussion on Geological Characteristics and Metallogenic Genesis of Jintaizi Gold Deposit [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese).
- 郑大中, 1995. 金的若干迁移形式的探讨——兼论康定偏岩子氟镁石金矿床的成矿机理[J]. 四川地质学报, 15(4): 304—311.
- Zheng D Z, 1995. Exploration of several migration forms of gold and discussion on the metallogenic mechanism of Kangding Pianyanzi fluoromagnesite gold deposit [J]. Acta Geologica Sichuan, 15(4): 304—311. (in Chinese)
- 周春波, 葛行飞, 屈尚伦, 等, 2024. 川西铜炉房造山型金矿床成因: 基于矿物学、流体包裹体和热力学模拟的制约[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版). [2024-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240305.1351.006.html>.
- Zhou C B, Ge H F, Qu S L, *et al.*, 2024. Ore genesis of the Tonglufang orogenic gold deposit in western Sichuan: Constraints from mineralogy, fluid inclusions, and thermodynamic simulations[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). [2024-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20240305.1351.006.html>.
- 周建军, 2014. 白金台子金矿床地质特征及垂直分带规律 [D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhou J J, 2014. The Geological Features and the Regularity of Vertical Zoning of Baijintaizi Gold Deposit in Kangding County [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese).
- Alt J C, Garrido C J, Shanks III W C, *et al.*, 2012. Recycling of water, carbon, and sulfur during subduction of serpentinites: A stable isotope study of Cerro del Almirante, Spain [J]. Earth and Planetary Science Letters, 327—328: 50—60.
- Alt J C, Shanks III W C, 2006. Stable isotope compositions of serpentinite seamounts in the Mariana forearc: Serpentinization processes, fluid sources and sulfur metasomatism [J]. Earth and Planetary Science Letters, 242(3—4): 272—285.
- Alt J C, Shanks III W C, Jackson M C, 1993. Cycling of sulfur in subduction zones: The geochemistry of sulfur in the Mariana Island Arc and back-arc trough [J]. Earth and Planetary Science Letters, 119(4): 477—494.
- Audétat A, Garbe-Schönberg D, Kronz A, *et al.*, 2015. Characterisation of a natural quartz crystal as a reference material for microanalytical determination of Ti, Al, Li, Fe, Mn, Ga and Ge [J]. Geostandards and Geo-

- analytical Research, 39(2):171–184.
- Breiter K, Badanina E, Durisova J, *et al.*, 2019. Chemistry of quartz—A new insight into the origin of the Orlovka Ta–Li deposit, Eastern Transbaikalia, Russia[J]. *Lithos*, 348–349:105206.
- Cao H W, Pei Q M, Yu X, *et al.*, 2023. The long-lived partial melting of the Greater Himalayas in southern Tibet, constraints from the geochronology and geochemistry of the Miocene Gyirong anatectic pegmatite [J]. *China Geology*, 6(2):303–321.
- Cherniak D J, 2010. Diffusion in quartz, melilite, silicate perovskite, and mullite [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 72(1):735–756.
- Deng J, Wang Q, Li G, *et al.*, 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26(2):419–437.
- Deng J, Wang Q F, Santosh M, *et al.*, 2020. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: A new model for the Jiadong gold province, eastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 55:257–274.
- Fu S L, Lan Q, Yan J, 2020. Trace element chemistry of hydrothermal quartz and its genetic significance: A case study from the Xikuangshan and Woxi giant Sb deposits in southern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 126:103732.
- Goldfarb R J, Baker T, Dube B, *et al.*, 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic belts[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*:407–450.
- Goldfarb R J, Groves D I, 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time [J]. *Lithos*, 233:2–26.
- Götze J, 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz—geological interpretation and technical application[J]. *Mineralogical Magazine*, 73(4):645–671.
- Götze J, Pan Y M, Müller A, 2021. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review[J]. *Mineralogical Magazine*, 85(5):639–664.
- Griffiths J H E, Owen J, Ward I M, 1954. Paramagnetic resonance in neutronirradiated diamond and smoky quartz[J]. *Nature*, 173:439–442.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, *et al.*, 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5):7–27.
- Groves D I, Santosh M, Deng J, *et al.*, 2020a. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2):275–292.
- Groves D I, Santosh M, Deng J, *et al.*, 2020b. Subduction, mantle metasomatism, and gold: A dynamic and genetic conjunction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 132(7–8):1419–1426.
- Groves D I, Santosh M, 2021. Craton and thick lithosphere margins: The sites of giant mineral deposits and mineral provinces [J]. *Gondwana Research*, 100:195–222.
- Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, *et al.*, 2006. Himalayan Cu–Mo–Au mineralization in the eastern Indo–Asian collision zone: Constraints from Re–Os dating of molybdenite[J]. *Mineralium Deposita*, 41:33–45.
- Hronsky J M A, Groves D I, Loucks R R, *et al.*, 2012. A unified model for gold mineralization in accretionary orogens and implications for regional-scale exploration targeting methods[J]. *Mineralium Deposita*, 47:339–358.
- Huang M, Buick I S, Hou L W, 2003a. Tectono-metamorphic evolution of the Eastern Tibet Plateau: Evidence from the Central Songpan–Garze Orogenic Belt, Western China[J]. *Journal of Petrology*, 44(2):255–278.
- Huang M, Maas R, Buick I S, *et al.*, 2003b. Crustal response to continental collisions between the Tibet, Indian, South China and North China blocks: Geochronological constraints from the Songpan–Garze orogenic belt, western China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21:223–240.
- Jolivet M, Roger F, Xu Z Q, *et al.*, 2015. Mesozoic–Cenozoic evolution of the Danba dome (Songpan Garze, East Tibet) as inferred from LA–ICPMS U–Pb and fission-track data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102:180–204.
- Jourdan A L, Vennemann T W, Mullis J, *et al.*, 2009. Oxygen isotope sector zoning in natural hydrothermal quartz[J]. *Mineralogical Magazine*, 73(4):615–632.
- Kapp P, DeCelles P G, 2019. Mesozoic–Cenozoic geological evolution of the Himalayan–Tibetan orogen and working tectonic hypotheses[J]. *American Journal of Science*, 319:159–254.
- Kerrick R, 1999. Nature’s gold factory[J]. *Science*, 284:2101–2102.
- Labidi J, Cartigny P, Jackson M G, 2015. Multiple sulfur

- isotope composition of oxidized Samoan melts and the implications of a sulfur isotope ‘mantle array’ in chemical geodynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 417: 28–39.
- Li H, Zhang Z, Santosh M, *et al.*, 2016. Late Permian basalts in the northwestern margin of the Emeishan Large Igneous Province; Implications for the origin of the Songpan-Ganzi terrane [J]. *Lithos*, 256–257: 75–87.
- Li X F, Mao J W, Wang C, *et al.*, 2007. The Daduhe gold field at the eastern margin of the Tibetan Plateau; He, Ar, S, O, and H isotopic data and their metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(3–4): 244–256.
- Liu X H, Li B, Xu J W, *et al.*, 2022. Monazite geochronology and geochemistry constraints on the formation of the giant Zhengchong Li-Rb-Cs deposit in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 150: 105147.
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, *et al.*, 2008. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9): 2349–2376.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.*, 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546.
- Monecke T, Kempe J, Götze J. 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: A reconnaissance study [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(3–4): 709–724.
- Monnier L, Lach P, Salvi S, *et al.*, 2018. Quartz trace-element composition by LA-ICP-MS as proxy for granite differentiation, hydrothermal episodes, and related mineralization: The Beauvoir Granite (Echassières district), France[J]. *Lithos*, 320–321: 355–377.
- Müller A, Koch-Müller M, 2009. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway[J]. *Mineralogical Magazine*, 73(4): 569–583.
- Ohmoto H, 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 67(5): 551–578.
- Pei Q M, Li C H, Ma S B, *et al.*, 2024. A rare sellate-bearing orogenic gold deposit at Pianyanzi, Yangtze Craton; Ore genesis as implied from in-situ studies of pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 165: 105866.
- Phillips G N, Powell R, 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6): 689–718.
- Rielli A, Tomkins A G, Nebel O, *et al.*, 2018. Sulfur isotope and PGE systematics of metasomatised mantle wedge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 497: 181–192.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, *et al.*, 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garze fold belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465–481.
- Rusk B G, 2012. Cathodoluminescence and trace elements in hydrothermal quartz [M]//Götze J, Möckel R. *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Berlin: Springer: 307–329.
- Sigoyer J D, Vanderhaeghe O, Duchene S, *et al.*, 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan-Ganze accretionary-orogenic wedge in a context of slab retreat accommodated by tear faulting, eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 192–216.
- Tomkins A G, 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(11): 3246–3259.
- Tomkins A G, Grundy C, 2009. Upper temperature limits of orogenic gold deposit formation: Constraints from the granulite-hosted Griffin’s Find Deposit, Yilgarn Craton[J]. *Economic Geology*, 104(5): 669–685.
- Walsby C J, Lees N S, Claridge R F C, *et al.*, 2003. The magnetic properties of oxygen-hole aluminium centres in crystalline SiO₂. VI: A stable AlO₄/Li centre[J]. *Canadian Journal of Physics*, 81(3): 583–598.
- Wang Q F, Zhao H S, Groves D I, *et al.*, 2020. The Jurassic Danba hypozonal orogenic gold deposit, western China; Indirect derivation from fertile mantle lithosphere metasomatized during Neoproterozoic subduction[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2): 309–324.
- Weil J A, 1984. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 10: 149–165.
- Weller O M, St-Onge M R, Waters D J, *et al.*, 2013. Quantifying Barrovian metamorphism in the Danba

- structural culmination of eastern Tibet[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(9): 909–935.
- Wu E H, Zhang C J, Song S W, *et al.*, 2014. Analysis of geological characteristics and metallogenic process of Erligou gold deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(2): 809–810.
- Wyman D A, Cassidy K F, Hollings P, 2016. Orogenic gold and the mineral systems approach: Resolving fact, fiction and fantasy[J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 322–335.
- Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, *et al.*, 2007. Late Triassic granitoids of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. *Lithos*, 96(3–4): 436–452.
- Xu S J, Wang R C, Sheng W Z, *et al.*, 1996. U-Pb, Rb-Sr isotopic chronology of Jinning granites in the Songpan-Ganze Orogenic Belt and its tectonic significances[J]. *Science China Earth Sciences*, 39(6): 576–686.
- Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, *et al.*, 2007. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: Insights into the source of a large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(8): 2104–2119.
- Yan D P, Zhou M F, Li S B, *et al.*, 2011. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 30(6): TC6005.
- Yan D P, Zhou Y, Qiu L, *et al.*, 2018. The Longmenshan Tectonic Complex and adjacent tectonic units in the eastern margin of the Tibetan Plateau: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 33–57.
- Yang L Q, Deng J, Groves D I, *et al.*, 2022. Metallogenic ‘factories’ and resultant highly anomalous mineral endowment on the craton margins of China[J]. *Geoscience Frontiers*, 13(2): 101339.
- Yuan C, Zhou M F, Sun M, *et al.*, 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan Garze fold belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3–4): 481–492.
- Zhang H F, Parrish P, Zhang L, *et al.*, 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Implication for lithospheric delamination[J]. *Lithos*, 97(3–4): 323–335.
- Zhang H F, Zhang L, Harris N, *et al.*, 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 75–88.
- 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]. *Mineralium Deposita*, 54: 133–152.
- Zhao H S, Wang Q F, Groves D I, *et al.*, 2022. Genesis of orogenic gold systems in the Daduhe belt: Evidence of long-lived fertile mantle lithosphere as a source of diverse metallogeny on the western margin of the Yangtze Craton, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 145: 104861.
- Zhao J H, Zhou M F, 2008. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution[J]. *Lithos*, 104(1–4): 231–248.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al.*, 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth And Planetary Science Letters*, 196(1–2): 51–67.
- Zhou M F, Yan D P, Vasconcelos P M, *et al.*, 2008. Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba domal terrane, eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5–6): 414–427.
- Zhou Z, Chen Z, Weyer S, *et al.*, 2023. Metal source and ore precipitation mechanism of the Ashawayi orogenic gold deposit, southwestern Tianshan Orogen, western China: Constraints from textures and trace elements in pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 157: 105452.

(责任编辑:黄维婷)