



引文格式: 李承鸿, 裴秋明, 徐勇, 等. 川西康定偏岩子富氟镁石造山型金矿床成矿机制: 基于金成色值、流体包裹体和热力学模拟的限定[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 156–171. DOI: 10.12401/j.nwg.2025101

Citation: LI Chenghong, PEI Qiuming, XU Yong, et al. Ore-Forming Mechanism of the Sellaite-Bearing Orogenic Gold Deposits in Pianyanzi, Kangding, West Sichuan: Constraints from Gold Fineness, Fluid Inclusions and Thermodynamic Modeling[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 156–171. DOI: 10.12401/j.nwg.2025101

川西康定偏岩子富氟镁石造山型金矿床成矿机制: 基于金成色值、流体包裹体和热力学模拟的限定

李承鸿^{1,2}, 裴秋明^{2,*}, 徐勇¹, 周春波¹, 梁翼², 孙清飞²,
龙有根¹, 陈科勇¹, 黄皓南², 李萌¹

(1. 四川省地球物理调查研究所, 四川 成都 610072; 2. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 康定偏岩子金矿床位于扬子克拉通西缘, 是川西大渡河金矿带中罕见的富氟镁石造山型金矿床。然而, 关于成矿流体性质以及金的富集沉淀过程等有关成矿机制的研究比较薄弱。笔者在野外调研的基础上, 通过流体包裹体显微测温、单矿物 EPMA 和单个包裹体成分 LA-ICP-MS 原位微区分析等手段, 并根据以上实验结果开展热力学模拟计算, 综合探讨金的富集条件与沉淀机制。根据脉体穿切关系和矿物共生组合特征, 成矿过程可划分为黄铁矿–石英阶段 (I)、黄铁矿–氟镁石–金–石英–白云石阶段 (II)、石英–多金属硫化物阶段 (III) 和赤铁矿–褐铁矿–金阶段 (IV) 4 个成矿阶段。根据 EPMA 测试结果, II 阶段与 IV 阶段的金成色值分别为 976.4~986.9 与 960.9~992.9, 表现出稳定的高金含量特征。流体包裹体类型以含 CO₂ 包裹体和 H₂O 包裹体为主, 均一温度范围为 135~357.1 °C, 峰值集中于 220~300 °C, 盐度范围为 0.4% NaCl_{eqv}~14.4% NaCl_{eqv}, 峰值集中于 6% NaCl_{eqv}~12% NaCl_{eqv}。LA-ICP-MS 原位成分显示, 从成矿早阶段到晚阶段, 流体包裹体中元素总含量、Na、K 等微量元素呈降低趋势, 流体包裹体中 Rb/Na、Cs/Na、Sr/Na 和 K/Na 值符合造山型矿床的流体特征。热力学模拟和综合研究表明, 金主要以 AuHS⁰ 形式运移, II 阶段的温度降低和 IV 阶段的氧逸度升高可能是金沉淀和金成色值发生变化的主要原因。

关键词: 造山型金矿; 成矿流体; 金成色值; 热力学模拟; 大渡河金矿带

中图分类号: P611

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0156-16

Ore-Forming Mechanism of the Sellaite-Bearing Orogenic Gold Deposits in Pianyanzi, Kangding, West Sichuan: Constraints from Gold Fineness, Fluid Inclusions and Thermodynamic Modeling

LI Chenghong^{1,2}, PEI Qiuming^{2,*}, XU Yong¹, ZHOU Chunbo¹, LIANG Yi², SUN Qingfei², LONG Yougen¹,
CHEN Keyong¹, HUANG Haonan², LI Meng¹

收稿日期: 2025-06-25; 修回日期: 2025-07-13; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42302104), 中央高校基本科研业务费项目 (2682024CX116), 四川省政府性投资地质勘查项目 (DZ202406) 联合资助。

作者简介: 李承鸿 (1999–), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事矿产地质调查工作。E-mail: lch2253255575@163.com。

* 通讯作者: 裴秋明 (1989–), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿产勘查与遥感地质研究。E-mail: pqm@swjtu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

(1. Sichuan Geophysical Survey and Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan, China; 2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The Pianyanzi gold deposit, situated on the western margin of the Yangtze Craton within the Daduhe gold belt in western Sichuan Province, represents a rare sellate-bearing orogenic gold deposit. However, key aspects of its ore-forming processes, particularly regarding the nature of ore-forming fluids and the mechanisms governing gold enrichment and precipitation, remain poorly constrained. This study integrates field observations with microthermometric analysis of fluid inclusions, electron probe microanalysis (EPMA) of individual minerals, and laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) in-situ microanalysis of individual fluid inclusions. Based on these experimental results, thermodynamic simulations were conducted to comprehensively investigate the conditions conducive to gold enrichment and its precipitation mechanisms. Based on the ore vein cross-cutting relationships and mineral assemblages, the mineralization process can be divided into four distinct stages: the pyrite-quartz stage (I), the pyrite-sellaite-gold-quartz-dolomite stage (II), the quartz-polymetallic sulfide stage (III), and the hematite-limonite-gold stage (IV). EPMA analyses reveal that the gold fineness values in Stage II and Stage IV range from 976.4 to 986.9 and from 960.9 to 992.9, respectively, indicating a consistently high gold content. Fluid inclusions are predominantly CO₂-bearing and H₂O-bearing, with homogenization temperatures ranging from 135 to 357.1 °C, peaking between 220 and 300 °C, and salinities varying from 0.4% NaCl_{eqv} to 14.4% NaCl_{eqv}, with a peak concentration between 6% NaCl_{eqv} and 12% NaCl_{eqv}. LA-ICP-MS analyses of individual fluid inclusions reveal that during the evolution from the early to late stages of mineralization, both the total elemental content and the concentrations of trace elements such as Na and K exhibit a progressively decreasing trend. Moreover, the Rb/Na, Cs/Na, Sr/Na, and K/Na ratios observed in these fluid inclusions are consistent with the geochemical signatures of fluids associated with orogenic gold deposit. Thermodynamic simulations and integrated studies indicate that gold is primarily transported in the form of AuHS⁰ complexes. The decrease in temperature during stages II, along with an increase in oxygen fugacity specifically in stage IV, may serve as the primary factors contributing to gold precipitation and variations in gold fineness.

Keywords: orogenic gold deposit; ore-forming fluids; gold fineness; thermodynamic simulation; Daduhe gold belt

造山型金矿与造山作用过程存在密切的时-空-因关联性,其主要形成于汇聚板块边缘,表现为受构造控制的后生脉型-浸染型金矿床系列(Groves et al., 1998; Robert et al., 2007; 凡韬等, 2025)。造山型金矿提供了世界超过 40% 的金储量(Goldfarb et al., 2019),具有成矿时代广、赋矿深度宽、品位高且规模大等突出特征(Goldfarb et al., 2001; 王庆飞等, 2019),是具有全球意义的金矿勘查类型(Wang et al., 2022a; 王京彬等, 2024),亦是现代矿床学领域关注的热点(Kerrick et al., 2000; 陈衍景等, 2006; 卢焕章等, 2018; Qiu et al., 2023; Zhao et al., 2024; Hakim et al., 2025)。虽然造山型金矿的诸多特征已达成共识(Goldfarb et al., 2015; Wang et al., 2022b),但由于其成矿过程受围岩类型、控矿构造、赋矿深度和水岩反应等多因素综合影响,

有关造山型金矿的矿物组合、流体来源和成因模式等仍存在很大分歧(Tomkins et al., 2009; Large et al., 2011; 王焰等, 2021; 杨林等, 2023; Wang et al., 2024),亟待开展更多的矿床实例解剖和深化研究。

川西康定偏岩子金矿床(> 5 t Au @ ~2.5 g/t)是大渡河金矿带内的代表性矿床,属于罕见的富氟镁石造山型金矿床(Pei et al., 2024)。前人研究主要围绕偏岩子金矿床的地质特征、矿物组合、控矿构造、流体包裹体和矿床成因等内容(李保华等, 1995; 郑大中, 1995; 葛良胜等, 1998; 许红英等, 2015; 高昆丽, 2017; 张燕等, 2022)。近年来,研究学者基于石英和硫化物的微区成分和 S 同位素测试分析(宋明伟等, 2024; Pei et al., 2024),探讨了偏岩子金矿中金的赋存状态、氟镁石与金的共存机制等问题,但有关该矿床的流体化

学特征与金的富集沉淀机制等研究相对薄弱。基于此,笔者以成矿流体综合表征为重点,在成矿阶段详细划分的基础上,开展流体包裹体岩相学、显微测温和单个流体包裹体 LA-ICP-MS 原位成分分析。此外,由于金成色值可以指示成矿流体特征,如温度、压力和 pH 值等关键信息(刘星, 1991; 刘星成等, 2021; 梁翼等, 2023), 笔者对该矿床中不同成矿阶段自然金进行 EMPA 测试分析, 进而获取金成色值信息。热力学模拟计算作为一种重要的研究手段, 在热液矿床成因研究中得到了广泛应用(Zhong et al., 2015; 梁翼等, 2021; Zhao et al., 2024; 周春波等, 2025)。以流体包裹体和金成色值等实验数据作为约束条件进行金溶解度的热力学模拟, 可以量化分析流体条件对金溶解度和金成色值的影响程度, 从而为限定成矿流体特征提供了有效手段(Liang et al., 2023)。因此, 笔者以川西康定偏岩子富氟镁石造山型金矿为解剖对象, 通过 EMPA/LA-ICP-MS 微区原位分析与热力学模拟计算相结合, 综合探讨该矿床的成矿流体特征和金的富集沉淀机制, 为矿床成因研究和后期找矿勘查提供依据, 本工作对于其他地区造山型金矿的成矿机制研究亦具有参考价值。

1 区域地质背景

研究区地处扬子克拉通西缘, 紧靠松潘-甘孜造山带(图 1a)。区域构造格局受多阶段构造演化过程控制(Li et al., 2025), 主要包括: 新元古代古大洋俯冲(Zhou et al., 2002)、晚古生代大陆裂谷活动(Li et al., 2016)、中生代古特提斯洋闭合(Zhang et al., 2023)和新生代印度-亚洲板块碰撞(Kapp et al., 2019)。区域地层由结晶基底和盖层两部分组成, 二者呈角度不整合接触。基底由康定群组成, 盖层主要分布于基底的周边, 主要包括震旦系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系、新近系和第四系(Zhou et al., 2008)。区内金矿的形成与康定群密切相关, 金矿多分布于大渡河流域, 形成国内著名的大渡河金矿带(图 1b)。沿扬子克拉通西北部大规模穹隆带, 出露的基底由新元古代弧形构造-变质组合构成(Zhou et al., 2006; Zhao et al., 2022b)。基底包括花岗质片麻岩、片麻岩、混杂岩, 以及少量片岩、角闪岩和麻粒岩等, 被新元古代至新生代的地层所覆盖(Yan et al., 2018), 其中以古生代地层和三叠纪类复理石地层为主(图 1b)。

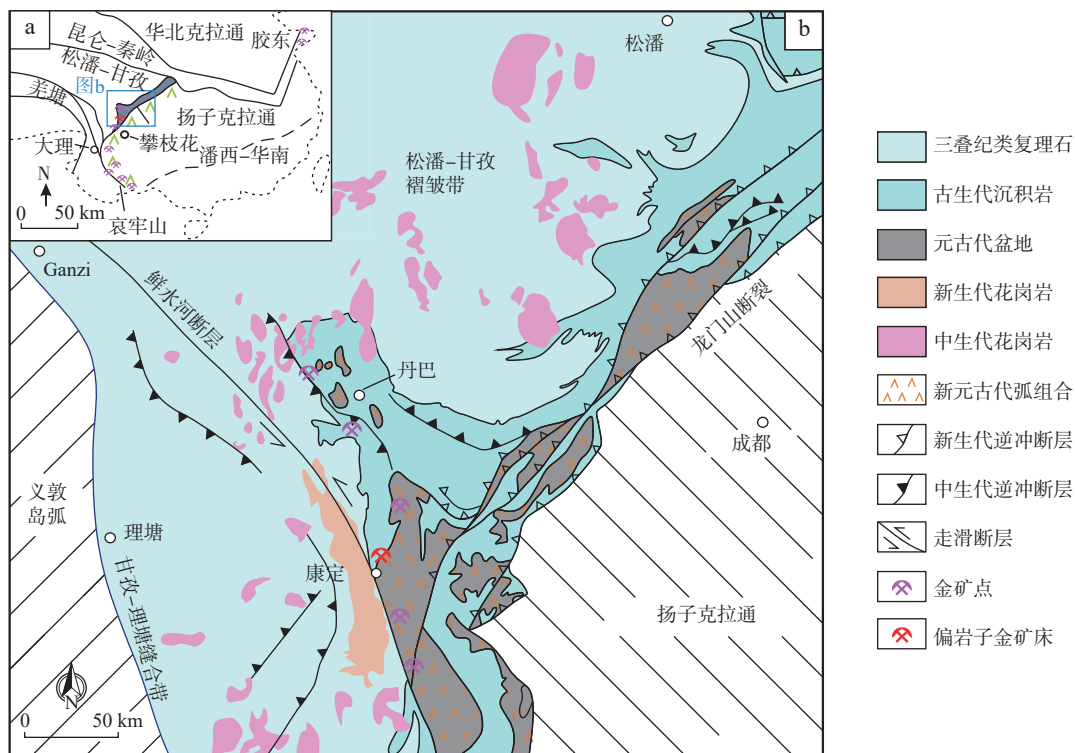


图1 扬子克拉通西缘简化构造图(a; 据 Wang et al., 2020 修改)、区域地质图(b; 据 Zhao et al., 2022b 修改)

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map showing the location of the western margin of the Yangtze Craton, (b) regional geological map showing the stratigraphy, magmatic rocks, structures, and gold deposits

盖层岩性为大理岩、石英岩、片岩和片麻岩等(宋明伟等, 2024)。

研究区岩浆活动以印支期、华力西期、晋宁期最为剧烈(赵一琛, 2016)。区内广泛发育火成岩, 如峨眉山大型火成岩带、二叠系火山角砾岩以及中生代和新生代花岗岩等(Roger et al., 2010; 张文林等, 2023), 为区内成矿提供了必要的物质、动力和热源。区域整体表现为3个构造带毗邻的“Y”型构造格局(凡韬等, 2023), 构造演化复杂, 成矿物质来源、运移和储存条件良好, 在大渡河金矿带区内大量发育金矿床, 多属于造山型金矿床(赵一琛, 2016; 宋明伟等, 2024; 周春波等, 2025)。“Y”型构造格局下, 区域构造演化复杂, 发育着大量的韧性剪切带, 这些基底内部的韧性剪切带对金矿有着明显的控制作用。前人对地质构造与金成矿作用的相关研究表明, 深部的金可在韧性剪切作用中被活化进入向上运移的热液, 并在浅部的次一级韧性剪切构造带中富集成矿(葛良胜等, 1998), 松潘-甘孜成矿带以及攀西成矿带的形成与上述地质过程密切相关。

2 矿床地质特征

大渡河金矿带是中国西南地区著名的金成矿带, 已发现金矿床多达30余个(图2a)(Zhao et al., 2022a; 宋明伟等, 2024; 凡韬等, 2025)。偏岩子金矿床位于大渡河金矿带西南位置(图2a), 在多期造山运动的作用下, 区内褶皱和断裂构造发育, 规模较大且与成矿关系较密切的断层包括郭达山断层、淘沙坪断层、偏岩子断层和灯盏窝断层等, 其走向多呈NNE向。其中, 偏岩子断层与金成矿密切相关(图2b)。研究区出露地层包括震旦系、志留系、泥盆系、三叠系及第四系, 其中矿体主要赋存于震旦系上统灯影组的富藻白云岩中(图2b)。目前, 矿区正在开采的两条矿体, 均为坑道工程控制的隐伏矿体。1号矿体呈透镜状, 产状为 $280^{\circ}\sim 295^{\circ}$, 倾角为 $\angle 65^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该矿体的矿体厚度为0.73~2.45 m, 平均厚度为1.33 m, 单工程控制矿体Au品位为3.25~4.33 g/t, 平均品位为3.91 g/t。2号矿体倾向为 $250^{\circ}\sim 265^{\circ}$, 倾角为 $\angle 65^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该矿

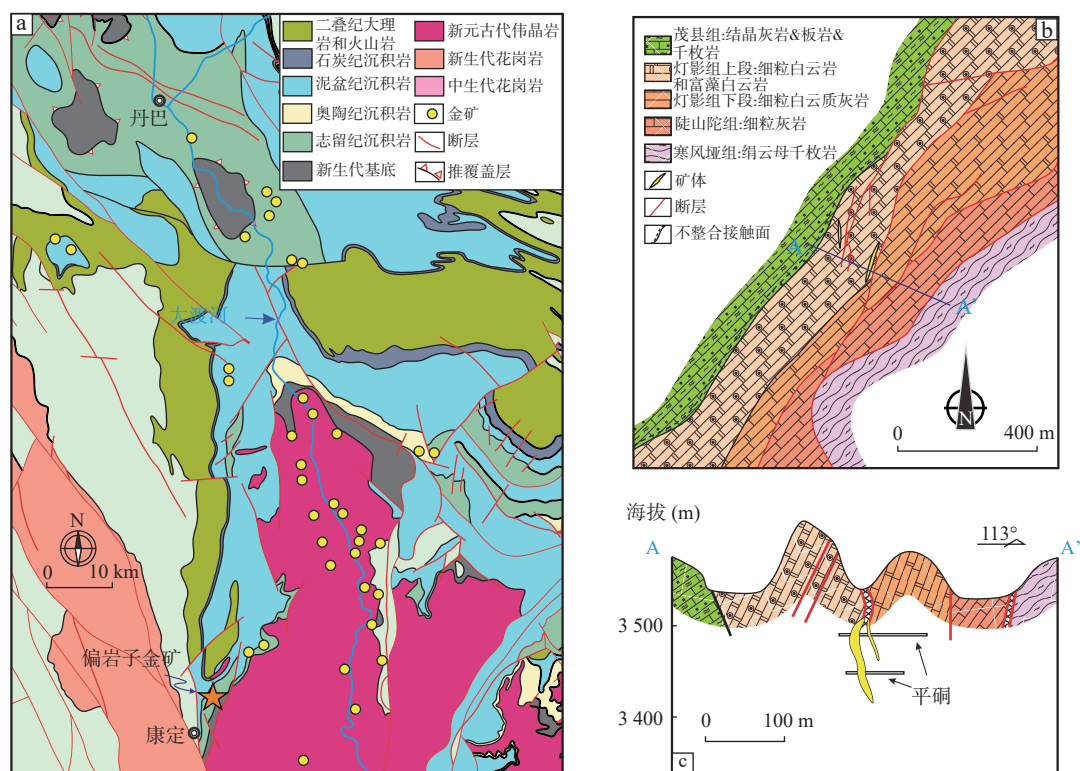


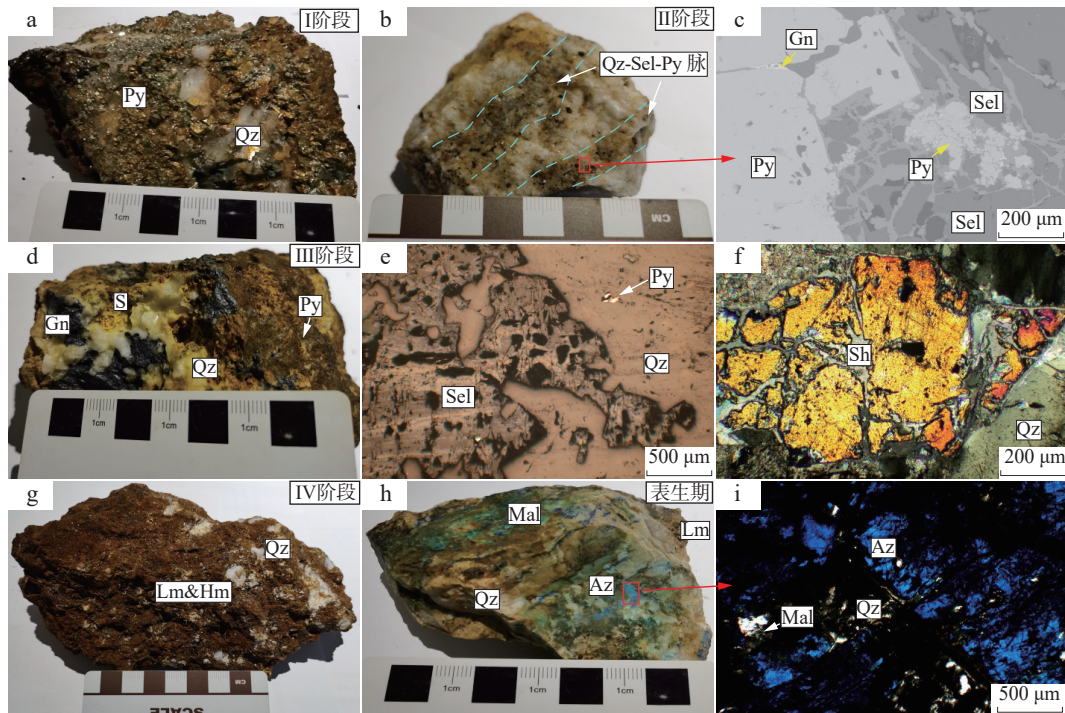
图2 大渡河流域金矿地质图(a; 据 Zhao et al., 2022a 修改)、偏岩子金矿床地质图(b; 据罗鸿书等, 1987 修改)和偏岩子金矿床剖面图(c; 据罗鸿书等, 1987 修改)

Fig. 2 (a) Geological map of the Duduhe gold belt, (b) geological sketch map of the Pianyanzi gold deposit, and (c) simplified geological profile of the Pianyanzi gold deposit

体的平均厚度为 1.30 m, 单工程控制矿体 Au 品位为 3.66~5.48 g/t, 平均品位为 4.65 g/t(图 2c)。

偏岩子金矿床矿石矿物成分复杂, 已发现的矿物多达 50 余种(毛玉元等, 1987)。金属矿物以黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿、黄铜矿(图 3a~图 3d、图 3g)和自然金(图 4)为主, 其次为孔雀石、蓝铜矿(图 3h)等。此外, 还发现了白钨矿(图 3f)。脉石矿物主要为石英、氟镁石、萤石和白云石等(图 3a、图 3b、图 3d、图 3g),

少量方解石、绢云母、白云母(毛玉元等, 1987; 张燕等, 2022)等。其中, 氟镁石是偏岩子金矿床中重要载金矿物之一, 与萤石共生, 在手标本上多呈白色-浅黄色, 一轴正晶, 半自形-他形结构, 突起等级明显高于石英(图 3e)。偏岩子金矿床围岩蚀变分布于矿体周围, 蚀变程度弱、类型简单, 主要为线性蚀变。围岩蚀变类型主要包括黄铁矿化和硅化, 其次为绢云母化、绿泥石化和钠长石化, 多为中低温热液蚀变。



a. I 阶段半自形-自形黄铁矿和石英; b. II 阶段黄铁矿、石英及氟镁石组合; c. 氟镁石、黄铁矿和方铅矿背散射图像特征; d. III 阶段黄铁矿、方铅矿、硫单质和石英矿物组合; e. 氟镁石与石英、黄铁矿矿物组合; f. 透射光镜下石英与白钨矿特征; g. IV 阶段产出大量赤铁矿和褐铁矿; h. 表生期产出孔雀石和蓝铜矿矿物组合; i. 透射光镜下蓝铜矿与少量孔雀石特征; Az. 蓝铜矿; Gn. 方铅矿; Hm. 赤铁矿; Lm. 褐铁矿; Mal. 孔雀石; Py. 黄铁矿; Qz. 石英; S. 硫单质; Sel. 氟镁石; Sh. 白钨矿

图3 偏岩子金矿床手标本照片

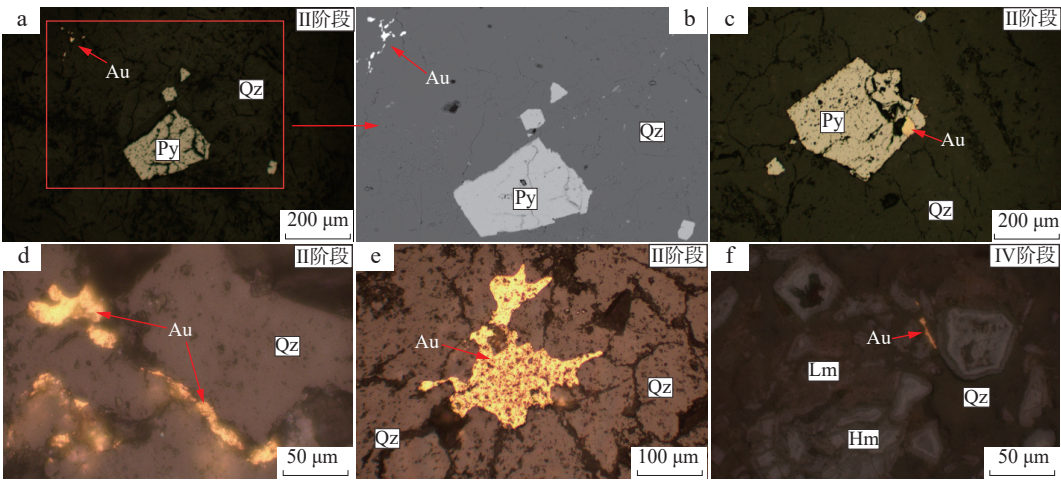
Fig. 3 Photographs of hand specimens from the Pianyanzi gold deposit

基于脉体穿插关系和矿物共生组合关系, 将偏岩子金矿成矿作用划分为热液期与表生期, 热液期又分为 4 个成矿阶段(图 5)。黄铁矿-石英阶段(I): 主要为黄铁矿与石英, 此阶段黄铁矿粒径较大(图 3a); 黄铁矿-氟镁石-金-石英-白云石阶段(II): 此阶段为自然金主要产出阶段(图 4a~图 4e), 以大量产出氟镁石为特征(图 3c、图 3e), 常见石英-氟镁石-黄铁矿脉, 黄铁矿颗粒较小(图 3b、图 4a~图 4c); 石英-多金属硫化物阶段(III): 多金属硫化物的产出, 可发现部分单质硫磺(图 3d); 赤铁矿-褐铁矿-金阶段(IV): 大量

出现赤铁矿与褐铁矿(图 3g), 且产出自然金, 但颗粒相较于 II 阶段变小, 产出数量也明显减少(图 4f)。

3 分析测试方法

笔者挑选所采 29 件矿石样品并圈定合适位置, 由广州拓岩检测技术有限公司制备探针片和包裹体片。流体包裹体显微测温在西南交通大学地质资源与地质工程实验中心进行。通过 Linkam THMSG600 冷热台及其配套系统控制温度信息, 结合显微镜对包



a. II 阶段自然金分布于黄铁矿附近; b. 自然金背散射图像特征; c. II 阶段自然金分布于黄铁矿内部; d. II 阶段自然金呈脉状分布于裂隙; e. II 阶段自然金呈颗粒状分布; f. IV 阶段自然金反射光镜下特征; Au. 自然金; Hm. 赤铁矿; Lm. 褐铁矿; Py. 黄铁矿; Qz. 石英

图4 偏岩子金矿床自然金镜下分布图

Fig. 4 Photomicrographs illustrating gold occurrence of the Pianyanzi gold deposit

矿物	热液期				表生期
	I阶段	II阶段	III阶段	IV阶段	
金属矿物					
黄铁矿	████████	████████	████████	————	
自然金		-----		-----	
方铅矿		————	████████		
闪锌矿		-----	————		
黄铜矿		-----	-----		
赤铁矿		-----	————	████████	————
褐铁矿			-----	████████	————
辉铜矿			-----		
硫砷铜矿		-----			
白钨矿		-----			
非金属矿物					
石英	████████	████████	████████	————	████████
氟镁石		████████	-----		
萤石		————			
白云石	————	————			
绢云母		-----	-----	————	
方解石		-----	-----		-----
孔雀石					████████
蓝铜矿					████████
硫单质		-----	————		
████████ 主要 ██████ 常见 ————— 较少 ----- 微量					

图5 偏岩子金矿床矿物生成顺序图(据 Pei et al., 2024 修)

Fig. 5 Mineral paragenesis and assemblage diagram of the Pianyanzi gold deposit

裹体片进行观测。冷热台测温范围-190~600 ℃, 精度为 0.1 ℃。在 7 mm 的石英坩埚和银盖恒温室中进行测试, 升温速率控制在 25 ℃/min 以内, 在相转变点附近升温速率控制在 0.1~2 ℃/min。

单个流体包裹体 LA-ICP-MS 测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行。测试仪器为 Agilent 7900 型质谱仪, 配备 GeoLasPro 型 193nmArF 准分子激光器。分析测试激光脉冲为 10

Hz, 激光能量保持在 12 J/cm³。激光束斑依据不同包裹体尺寸调整为 10~44 μm。使用 NIST SRM610 作为外标, 流体包裹体显微测温获得的等效盐度作为内标(Heinrich et al., 2003), 对其主微量元素进行校准。原始 LA-ICP-MS 信号使用 SILLIS 软件(Guillong et al., 2008)处理, 采用电价平衡方法以校正其他离子对盐度的贡献(Allan et al., 2005), 详细分析流程参考蓝廷广等(2017)。

自然金颗粒的 EMPA 测试(金成色值)在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室进行,使用 JEOL JXA-8 230 仪器测试。测试条件如下:室温为 22 ℃,束斑值为 1 μm,实验电流为 20 nA,加速电压为 20 kV。每个元素的计数时间为 10 s。所有数据均使用标准 ZAF 程序进行校正,精度优于 1%。

4 实验测试结果

4.1 自然金成色值

通过 EPMA 测试不同阶段自然金颗粒 55 个点位的成色值(金银浓度比)。Ⅱ阶段与Ⅳ阶段的金成色值分别为 976.4~986.9 与 960.9~992.9(表 1),平均值分别为 981.4(N=27)和 980.3(N=28),显示偏岩子金矿

中自然金成色具有稳定的高金含量特征。

4.2 流体包裹体岩相学和显微测温

偏岩子金矿床中流体包裹体的主要寄主矿物为石英,其次为氟镁石和方解石。大量原生流体包裹体呈孤立或成群出现,少量次生包裹体沿裂隙分布。偏岩子金矿床中的流体包裹体主要以含 CO₂ 流体包裹体为主,通常由 L_{H₂O}、L_{CO₂} 和 V_{CO₂} 三相组成,常呈不规则状(图 6a)和椭球状(图 6c),偶见含子矿物(子晶)的 CO₂-H₂O 包裹体(图 6b),并发育纯 CO₂ 包裹体,由 L_{CO₂} 和 V_{CO₂} 两相(图 6a)、L_{H₂O} 和 V_{CO₂} 两相(图 6e)相及 V_{CO₂} 单相组成(图 6d)。富液相两相包裹体较少,室温下通常由 L_{H₂O} 和 V_{H₂O} 两相组成(图 6f)。

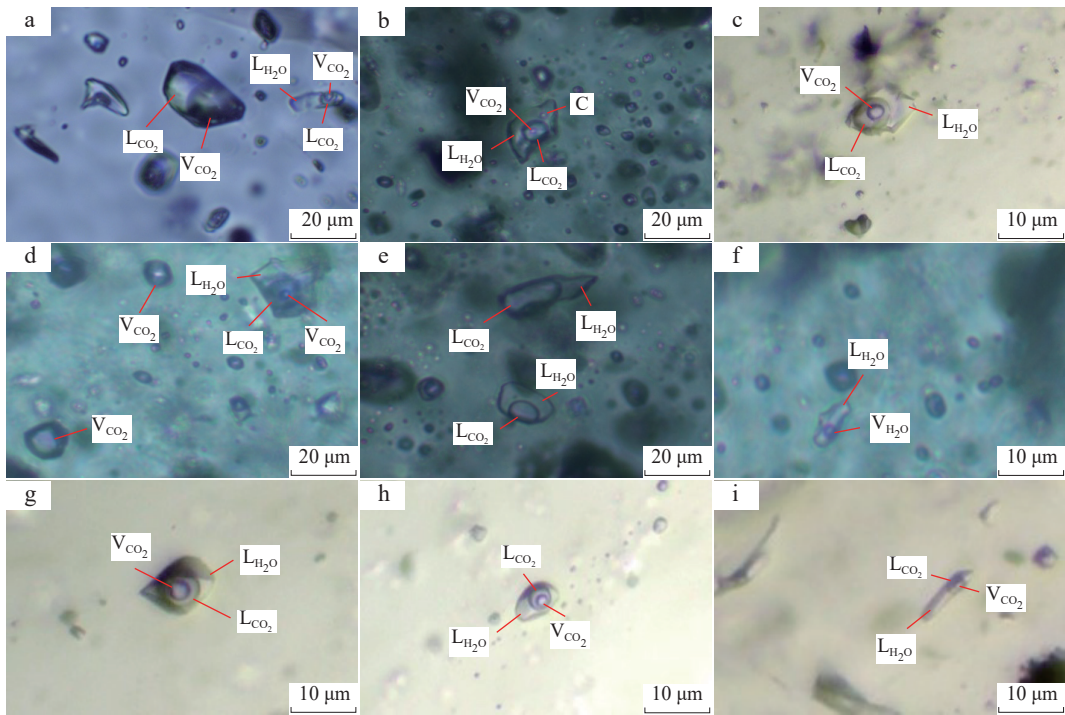
包裹体岩相学观察发现,Ⅰ和Ⅱ阶段流体包裹体的直径为 5~25 μm,多数>15 μm,气相百分比>60%

表 1 偏岩子金矿床不同阶段自然金成色值结果统计表

Tab. 1 The gold fineness texted by EMPA from the Pianyanzi gold deposit

阶段	测试点数	Au成色值	Ag范围	Total值	金成色值	金成色值平均值
Ⅱ	27	83.96~98.27	1.30~2.03	85.99~99.78	976.4~986.9	981.4
Ⅳ	28	82.97~99.70	0.71~3.37	86.34~100.41	960.9~992.9	980.3

注: 金成色值= Au(wt%)/ [Au(wt%)+ Ag(wt%)] × 1 000。



a. CO₂ 流体包裹体及三相 CO₂-H₂O 流体包裹体; b. 含子晶 CO₂ 流体包裹体; c、g、h、i. 三相 CO₂-H₂O 流体包裹体; d. 纯气相 CO₂ 流体包裹体及三相 CO₂-H₂O 流体包裹体; e. 两相 CO₂-H₂O 流体包裹体; f. H₂O 流体包裹体

图6 偏岩子金矿床流体包裹体岩相学特征图

Fig. 6 Petrographic Characteristics of Fluid Inclusions in Pianyanzi gold Deposit

(图 6a~图 6e)。Ⅲ阶段的流体包裹体直径为 3~15 μm , 气相百分比集中于 30%~60%(图 6f~图 6i)。Ⅳ阶段的流体包裹体直径较小(普遍 < 10 μm), 难以满足单个包裹体 LA-ICP-MS 成分测试要求。

通过显微测温实验获取流体包裹体的完全均一温度(T_h)、笼合物熔化温度(T_c)等数据, 并计算盐度、

密度、压力及 pH 值(Roedder, 1984; 刘斌, 2018; 马少兵等, 2024)。结果显示, 均一温度为 220~300 $^{\circ}\text{C}$, 峰值在 280 $^{\circ}\text{C}$ 附近, 具正态分布特征(图 7a); 盐度为 0.9% NaCl_{eqv} ~14.4% NaCl_{eqv} ; 密度为 0.71~1.04 g/cm^3 , 平均值为 0.93 g/cm^3 ; 压力为 308~2 317 bar, 平均值为 118.9 MPa; pH 值为 5.4~5.9, 平均值为 5.6(表 2)。

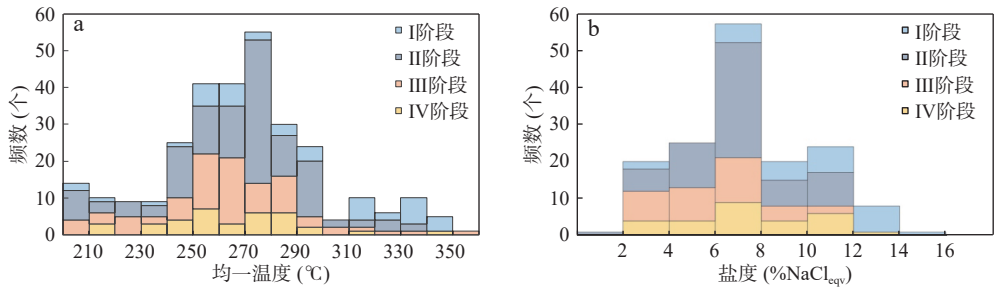


图7 偏岩子金矿床不同阶段流体包裹体均一温度统计图(a)、盐度统计图(b)

Fig. 7 (a) Homogeneous temperature and salinity statistics (b) Statistical chart of fluid inclusions in different stages of Pianyanzi gold deposit

表 2 偏岩子金矿床流体包裹体显微测温结果

Tab. 2 Microthermometric results of fluid inclusions in the Pianyanzi gold deposit

包裹体阶段	包裹体大小(μm)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	盐度(% NaCl_{eqv})	密度(g/cm^3)	压力(bar)	pH
I	15~28	172.5~350	2~8	3.9~14.4			
II	13~22	160~340	1~9.8	0.9~12.0	0.71~1.04	308~2 317	5.4~5.9
III	7~16	135~357.1	3.3~8.7	2.6~11.6	均值=0.93	均值=1 189	均值=5.6
IV	3~11	217~346	2~8.5	3~13.3			

4.3 单个流体包裹体 LA-ICP-MS 成分分析

笔者分别对 I 阶段(图 8a)、II 阶段(图 8b)和 III 阶段(图 8c)的单个流体包裹体进行了 LA-ICP-MS 成分分析(表 3)。

I 阶段: Na 含量为 $19\,865\times 10^{-6}$ ~ $31\,005\times 10^{-6}$, 平

均为 $2\,517\times 10^{-6}$; K 含量为 $6\,243\times 10^{-6}$ ~ $23\,639\times 10^{-6}$, 平均为 $12\,653\times 10^{-6}$; As 含量为 312×10^{-6} ~ $3\,538\times 10^{-6}$, 平均为 $1\,925\times 10^{-6}$; B 含量为 $1\,617\times 10^{-6}$ ~ $1\,850\times 10^{-6}$; Sr 含量为 9.8×10^{-6} ~ 41.5×10^{-6} ; Cs 含量为 36.5×10^{-6} ~ 109×10^{-6} 。II 阶段: Na 含量为 $11\,592\times 10^{-6}$ ~ $19\,258\times 10^{-6}$, 平

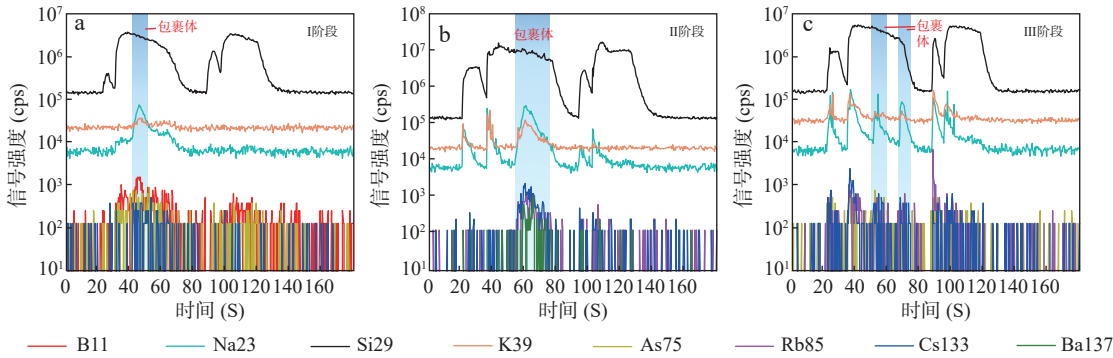


图8 偏岩子金矿床流体包裹体 LA-ICP-MS 部分脉冲信号图

Fig. 8 Partial pulse signal diagram of LA-ICP-MS fluid inclusions in Pianyanzi gold deposit

表 3 偏岩子金矿床流体包裹体 LA-ICP-MS 数据结果(10⁻⁶)
Tab. 3 LA-ICP-MS data results of fluid inclusions in Pianyanzi gold deposit (10⁻⁶)

编号	阶段	B	Na	Mg	K	As	Sr	Cs	Ba	Rb
560101	I 阶段	1 849.6	27 227.5	bdl	bdl	bdl	41.5	108.4	61.8	bdl
560102		bdl	31 004.9	bdl	bdl	3 537.9	bdl	bdl	bdl	bdl
560103		1 616.5	25 028.9	bdl	6 242.8	312.0	11.2	50.2	bdl	27.0
560104		1 832.5	22 701.1	521.7	8 076.4	bdl	9.8	36.5	bdl	bdl
560105		bdl	19 865.2	bdl	23 639.0	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
560401	II 阶段	122.5	11 591.9	323.5	5 707.1	40.6	29.9	58.2	21.6	50.9
560402		444.8	15 681.6	2 048.5	10 844.8	87.1	50.5	68.8	61.4	91.4
560403		903.0	14 977.4	bdl	11 337.0	40.4	4.7	29.3	28.0	65.3
560404		1 439.1	19 258.3	86.9	4 697.5	bdl	15.0	61.3	bdl	40.3
560405		675.1	14 841.0	304.1	5 349.1	43.8	32.4	33.7	72.4	37.4
560501	III 阶段	163.3	1 587.2	88.5	3 664.7	bdl	1.8	4.0	16.7	26.4
560502		803.8	16 494.6	bdl	4 324.9	bdl	bdl	31.3	bdl	29.7
560503		428.2	1 620.1	bdl	826.0	bdl	bdl	bdl	15.6	8.4

均为 15 270×10⁻⁶; K 含量为 4 698×10⁻⁶~11 337×10⁻⁶, 平均为 7 587×10⁻⁶; B 含量为 123×10⁻⁶~1 439×10⁻⁶, 平均为 717×10⁻⁶; Mg 含量为 86.9×10⁻⁶~2 049×10⁻⁶, As 含量为 40.4×10⁻⁶~87.1×10⁻⁶, Sr 含量为 4.7×10⁻⁶~50.5×10⁻⁶, Cs 含量为 29.3×10⁻⁶~699×10⁻⁶, Ba 含量为 21.6×10⁻⁶~72.4×10⁻⁶, Rb 含量为 37.4×10⁻⁶~91.4×10⁻⁶。Ⅲ阶段: Na 含量为 1 587×10⁻⁶~16 495×10⁻⁶, 平均为 6 567×10⁻⁶; K 含量为 826×10⁻⁶~4 325×10⁻⁶, 平均为 2 939×10⁻⁶; B 含量为 163×10⁻⁶~804×10⁻⁶; Cs 范围为 4×10⁻⁶~31.3×10⁻⁶; Ba 含量为 15.6×10⁻⁶~16.7×10⁻⁶; Rb 含量为 8.4×10⁻⁶~29.7×10⁻⁶。

由信号强度可以看出,除了 K 元素,其余元素的含量都低于 Na 元素(约 2~3 个数量级)(图 8)。流体包裹体都具备富集 Na、K 元素的特征,不同阶段富集元素特征具有一定差异。I 阶段较为富集 B、As 元素,平均值分别为 1 766×10⁻⁶、1 925×10⁻⁶;而 II 阶段较为富集 Mg、Rb 元素,平均值为 691×10⁻⁶、57×10⁻⁶。Ⅲ阶段富集元素特征与 II 阶段相似,但整体含量更低。

5 矿床成因分析

5.1 成矿流体特征

I 阶段:成矿流体的均一温度为 172.5~350 ℃,盐度为 3.9% NaCl_{eqv}~14.4%NaCl_{eqv}。II 阶段:成矿流体的均一温度为 160~340 ℃,盐度为 0.9% NaCl_{eqv}~12.0% NaCl_{eqv}。Ⅲ阶段:成矿流体的均一温度为 135~357.1 ℃,盐度为 2.6% NaCl_{eqv}~11.6% NaCl_{eqv}。IV 阶段:

成矿流体的均一温度为 217~346 ℃,盐度为 3% NaCl_{eqv}~13.3%NaCl_{eqv}(图 7)。从 I 阶段到Ⅲ阶段,偏岩子金矿床成矿流体温度及盐度呈现出逐步降低的趋势,与前人研究趋于一致(李保华, 1997; 蔡建明, 1988; 高昆丽, 2017)。密度和压力的平均值分别为 0.93 g/cm³ 和 118.9 MPa,其 pH 估算值为 5.4~5.9。结合前文包裹体岩相学特征,与造山型金矿成矿流体的中温、低盐度、高 CO₂ 等特征相似(卢焕章等, 2018)。不同阶段的温度、盐度变化相似, I 阶段~Ⅲ阶段不断降低, IV 阶段略微上升。II 阶段成矿流体温度、盐度变化较大,暗示在 II 阶段成矿流体性质和成分可能发生了转变。IV 阶段流体温度、盐度较Ⅲ阶段发生略微上升。结合 IV 阶段的产金现象,暗示在 IV 阶段成矿流体性质和成分可能再次发生了转变。

LA-ICP-MS 原位分析结果表明(表 3),随着阶段演化,偏岩子金矿床流体包裹体微量元素含量相对降低,与之(NaCl、KCl)对应的盐度等也相对降低,这与流体包裹体测温结果相符。流体包裹体 I 阶段较为富集 B、As 元素,而 II 阶段较为富集 Mg、Rb 元素,富集元素特征有所不同,表明成矿流体性质和成分或已发生了转变。根据包裹体中 Rb/Na、Cs/Na、Sr/Na 与 K/Na 之间的比值关系,对偏岩子金矿床成矿流体来源进行分析(图 9)。结果显示,偏岩子金矿床成矿流体具岩浆-热液型或中级变质流体特征,与 MVT 型流体和低级变质流体差异较大。结合流体包裹体岩相学特征,认为偏岩子金矿床成矿流体符合典型造山型金

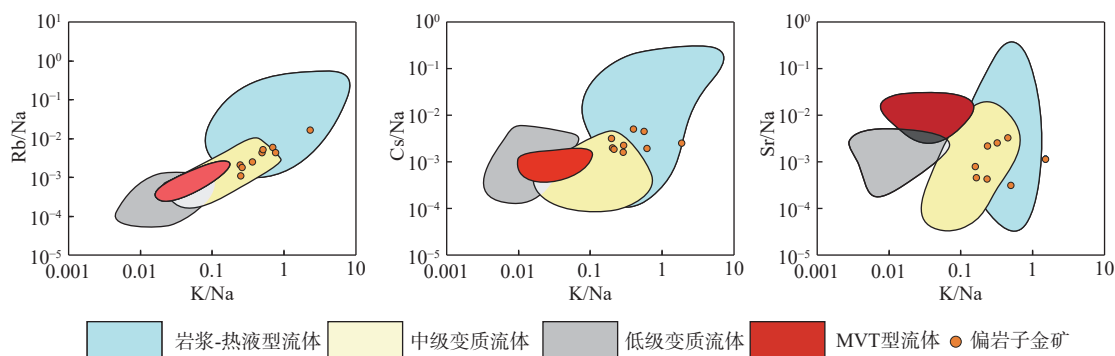


图9 偏岩子金矿床流体包裹体 LA-ICP-MS 不同元素比值图(底图据 Wang et al., 2022b)

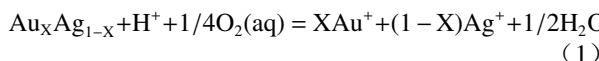
Fig. 9 LA-ICP-MS maps of different element ratios in fluid inclusions of Pianyanzi gold deposit

矿床特征(卢焕章等, 2018; Wang et al., 2022b)。

5.2 热力学模拟

5.2.1 理论方法与模拟条件

文中热力学模拟的理论方法主要根据 Liang et al. (2015)报道的金银固溶体理想混合模式, 该模式提出了成矿溶液中金银固溶体的化学平衡反应式。



式中: x 为金银固溶体中 Au 的摩尔系数(可换算为金成色值), Au^+ 和 Ag^+ 分别代表成矿溶液中所有的金和银络合物。本次模拟所涉及反应式如表 4 所示。

热力学模拟通过 SUPCRT92 软件(Johnson et al., 1992)获得表 4 中各化学反应在不同温度和压力条件下达到平衡时的 $\log K$ 值, 并在 $\log f_{\text{O}_2}$ -pH 图中计算并绘制出不同硫离子(HSO_4^- , SO_4^{2-} , HS^- , H_2S)的主导区域及各种金属矿物(Py、Po、Hm、Mt)的稳定区域界线。随后, 依次设定金成色值、温度、压力、硫离子浓度和盐度等流体条件, 再根据公式(1)可计算不同 pH 值和 $\log f_{\text{O}_2}$ 值的成矿流体形成金银固溶体时的金离子浓度(即为金溶解度数值), 并在 $\log f_{\text{O}_2}$ -pH 图中制作金溶解度的等值线图。

热力学模拟的流体条件主要根据本次工作的实验结果(表 2), 对成矿流体中金溶解度的变化规律进行了热力学模拟(图 10)。其中, 流体包裹体的显微测温结果显示偏岩子金矿床的成矿温度可能集中于 220~300 °C(图 7), 阶段 II 和阶段 IV 的盐度数值均集中在 6% NaCl_{eqv} ~8% NaCl_{eqv} (~1.4 mol/kg), 估算的平均压力约为 120 MPa, 估算的 pH 值为 5.4~5.9。另外, 电子探针测试结果显示金成色值为 960~993。因此, 本次工作对不同温度(220 和 300 °C)和金成色值(960 和 993)条件下, 并根据不同阶段的矿物组合来讨

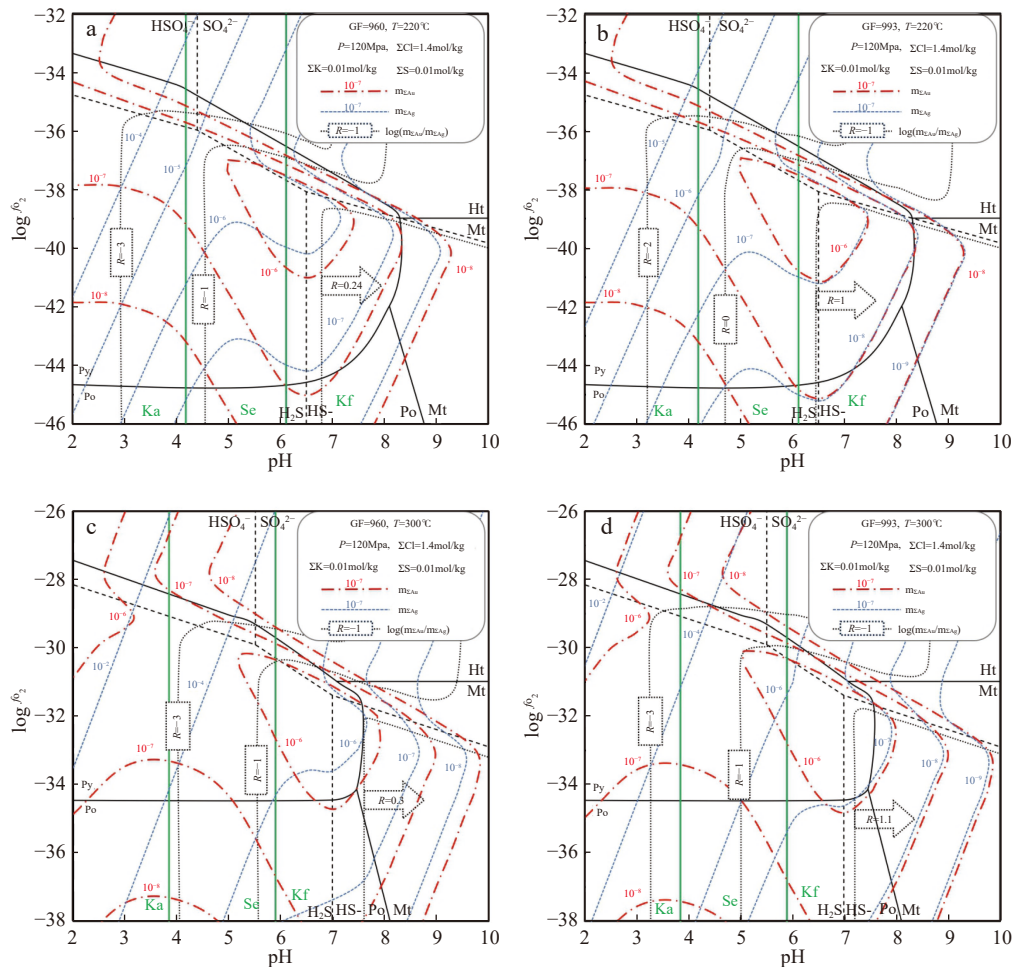
表 4 热力学模拟涉及离子和矿物种类及反应式

(据 Liang et al., 2015)

Tab. 4 Thermodynamic simulation involves ion and mineral species and reaction equations

离子与矿物	反应式
HS^-	$\text{HS}^- + 2\text{O}_2(\text{g}) = \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
H_2S	$\text{H}_2\text{S}(\text{aq}) + 2\text{O}_2(\text{g}) = 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
HSO_4^-	$\text{HSO}_4^- = \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
O_2	$\text{O}_2(\text{aq}) = \text{O}_2(\text{g})$
黄铁矿(Py)	$\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2(\text{g})$
磁黄铁矿(Po)	$\text{FeS} + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S} + 1/2\text{O}_2(\text{g})$
赤铁矿(Hm)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{H}^+ = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2(\text{g})$
磁铁矿(Mt)	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{H}^+ = 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2(\text{g})$
Au^+	$\text{Au}(\text{s}) + \text{H}^+ + 1/4\text{O}_2(\text{aq}) = \text{Au}^+ + 1/2\text{H}_2\text{O}$
$\text{AuOH}(\text{aq})$	$\text{AuOH}(\text{aq}) + \text{H}^+ = \text{Au}^+ + \text{H}_2\text{O}$
$\text{AuCl}(\text{aq})$	$\text{AuCl}(\text{aq}) = \text{Au}^+ + \text{Cl}^-$
AuCl_2^-	$\text{AuCl}_2^- = \text{Au}^+ + 2\text{Cl}^-$
AuCl_3^-	$\text{AuCl}_3^- = \text{Au}^+ + 3\text{Cl}^-$
$\text{AuHS}(\text{aq})$	$\text{AuHS}(\text{aq}) = \text{Au}^+ + \text{HS}^-$
$\text{Au}(\text{HS})_2^-$	$\text{Au}(\text{HS})_2^- = \text{Au}^+ + 2\text{HS}^-$
Ag^+	$\text{Ag}(\text{s}) + \text{H}^+ + 1/4\text{O}_2(\text{aq}) = \text{Ag}^+ + 1/2\text{H}_2\text{O}$
$\text{AgOH}(\text{aq})$	$\text{AgOH}(\text{aq}) + \text{H}^+ = \text{Ag}^+ + \text{H}_2\text{O}$
$\text{AgCl}(\text{aq})$	$\text{AgCl}(\text{aq}) = \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$
AgCl_2^-	$\text{AgCl}_2^- = \text{Ag}^+ + 2\text{Cl}^-$
AgCl_3^-	$\text{AgCl}_3^- = \text{Ag}^+ + 3\text{Cl}^-$
AgCl_4^-	$\text{AgCl}_4^- = \text{Ag}^+ + 4\text{Cl}^-$
$\text{AgHS}(\text{aq})$	$\text{AgHS}(\text{aq}) = \text{Ag}^+ + \text{HS}^-$
$\text{Ag}(\text{HS})_2^-$	$\text{Ag}(\text{HS})_2^- = \text{Ag}^+ + 2\text{HS}^-$

论相关区域的金溶解度大小和变化规律, 如赤铁矿, 黄铁矿, 绢云母等矿物组合进一步限定区域。



不同温度(T)和金成色值(GF)的模拟条件为: a. $T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $GF=960$; b. $T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $GF=993$; c. $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $GF=960$; d. $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $GF=993$ 。其他条件均为: $P=120\text{ MPa}$, $m_{\Sigma\text{Cl}}=1.4\text{ mol/kg}$, $m_{\Sigma\text{S}}=0.01\text{ mol/kg}$ 。红色点划线为 m_{Au} 等值线, 蓝色虚线为 m_{Ag} 等值线, 黑色实线为 $R(=\log m_{\text{Au}}/m_{\text{Ag}})$ 等值线。矿物简写: Hm. 赤铁矿; Ka. 高岭石; Kf. 钾长石; Mt. 磁铁矿; Po. 磁黄铁矿; Py. 黄铁矿; Se. 绢云母

图10 pH- $\log f_{\text{O}_2}$ 图中不同温度和金成色值条件下金溶解度的热力学模拟结果

Fig. 10 Thermodynamic simulation results of gold solubility under different temperature and gold fineness conditions in pH- $\log f_{\text{O}_2}$ diagrams

5.2.2 热力学模拟结果与分析

II 和 IV 阶段的成矿流体在不同矿物组合的稳定区域内 Au 的运移形式存在差别(图 10)。基于 II 阶段的自然金与黄铁矿-黄铜矿-绢云母的共生组合关系, 流体中 Au 主要以 AuHS^0 络合物形式运移。根据 IV 阶段的自然金与赤铁矿-黄铁矿-绢云母的共生组合关系, 流体中 Au 可能以 AuHS^0 和 AuCl_2^- 的络合物形式运移。IV 阶段流体包裹体的盐度较低, 表明 AuCl_2^- 不占主导地位。上述结果与卢焕章等(2018)总结提出的造山型金矿的成矿流体中 Au 的运移形式相同, 认为造山型金矿床的成矿流体主要以还原性和偏中性 pH 为特征, Au 主要以 Au-HS 络合物的形式运移。

在黄铁矿-绢云母的稳定区域内金溶解度较高, 有利于含矿流体携带较高浓度的 Au, 而在赤铁矿-绢云母的稳定区域内金溶解度较低, 有利于 Au 的沉淀。因此, 文中的热力学模拟查明 II 阶段和 IV 阶段的成矿流体主要由于不同的氧逸度特征, 导致金溶解度的差异。II 阶段成矿流体的氧逸度较低, 符合典型造山型金矿床的还原性流体, 有利于流体运移过程中 Au 的富集。IV 阶段成矿流体的氧逸度较高, 属于非典型造山型金矿床的氧化性流体, 但更有利于 Au 在流体中沉淀。

在 $T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同金成色值的成矿流体中金溶解度没有明显区别(图 10a、图 10b)。例如, 在黄铁矿-

绢云母稳定区域内, 当 $\text{pH}=5.6\sim 5.9$ 时, 流体金溶解度相差约为 4.1×10^{-8} mol/kg。相似的结果也出现在图 10c 和图 10d 中, 表明模拟的金成色值范围对金溶解度的影响程度较小, 暗示偏岩子的自然金可能形成于相似金溶解度的成矿流体。

Liang et al. (2023) 获得了金溶解度与金成色值的相关线性公式: $m_{\Sigma\text{Au}} = 0.495 \times \ln(\text{GF}) - 3.5 - a$ 。其中, a 表示 $\text{GF}=999$ 时的金溶解度。

经计算可得, 金成色值为 960~993 引起的金溶解度变化值约为 4×10^{-8} mol/kg, 与本次模拟结果相符。温度差异对金溶解度的影响较为明显(图 10a、图 10c), 在黄铁矿-绢云母稳定区域内, 图 10a 的金溶解度等值线主要为 $10^{-6}\sim 10^{-9}$ mol/kg, 而图 10c 的金溶解度等值线主要为 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ mol/kg, 二者差异较大。上述对比结果显示, 温度较高的流体中金溶解度更高, 表明温度与金溶解度成正相关。II 阶段和 IV 阶段的均一温度变化范围较大(均 $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)(图 7), 温度的下降均可造成金溶解度的明显降低。此外, 当氧逸度从黄铁矿变化至赤铁矿稳定区域, 金溶解度可从 10^{-6} mol/kg 明显下降至 10^{-9} mol/kg(图 10), 表明氧逸度的升高也可能导致金溶解度的下降。因此, IV 阶段的黄铁矿-赤铁矿共生组合关系证明成矿流体的氧逸度出现过明显变化的过程, 可能导致金溶解度的明显降低。由于已知 pH 值的变化范围($5.4\sim 5.9$)较小, 因此本次工作未进行分析和讨论。综上所述, 热力学模拟表明偏岩子金矿床 II 阶段和 IV 阶段的成矿流体在沉淀自然金时的金溶解度可能相似, 而运移过程中两个阶段温度的下降和 IV 阶段的氧逸度升高是导致金溶解度明显降低的原因。

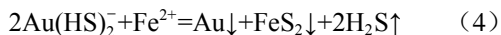
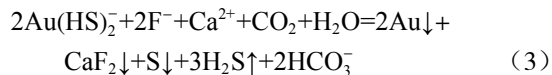
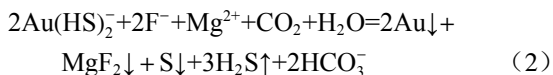
笔者对金成色值的形成条件和影响因素进行了模拟和讨论, 结果显示金成色值主要取决于成矿流体的 R 值($= \log m_{\Sigma\text{Au}}/m_{\Sigma\text{Ag}}$), 而流体的物理化学条件对 R 值的影响程度存在差异。对比图 10a 和图 10c 可知, 模拟的温度范围对金成色值影响程度较小, 较小的差别表明模拟的温度差异对金成色值的影响较小。与之相反, 氧逸度的差别对金成色值的影响程度较大。当 $\text{pH}=5.4\sim 5.9$ 时, 还原性流体的 R 值为 $-0.08\sim 0.13$, 氧化性流体的 R 值为 $-4.54\sim -4.07$ (图 10a)。上述结果说明形成黄铁矿的成矿流体中金和银浓度相似, 而形成赤铁矿的成矿流体中金银浓度比值更小。因此, 氧逸度从黄铁矿升高到赤铁矿区域时, R 值降低会导致形成的金成色值略微升高, 升高的范围与测试结果

的变化范围相符。由此可知, II 阶段的温度降低可促发金的沉淀, 但对金成色值的变化影响较小, 而 IV 阶段的氧逸度升高则可能促发金的沉淀以及金成色值的小幅升高。

5.3 金的沉淀机制

热力学模拟结果虽然表明成矿流体特征的变化可导致金的沉淀和金成色值的差异, 但其诱发机制还未论及。断层阀机制被广泛应用于解释石英脉型金矿中金的沉淀(Sibson et al., 1988; Voisey et al., 2020): 岩石在地震活动中破裂导致压力骤降, 引起流体氧化、相分离等作用, 金和石英过饱和而沉淀, 形成含金石英脉。偏岩子金矿床经历的多期构造作用可能引起断层阀机制析出自然金, 这点也可与热力学模拟中氧逸度上升产金的结果相印证。但值得注意的是, 热力学模拟中氧逸度变化只与 IV 阶段产金相关。因此, 笔者认为断层阀机制对于偏岩子金矿床更偏向于辅助生金机制。围岩的硫化作用是溶液中的还原硫沉淀成黄铁矿和毒砂的有效方式, 可能形成的两个反应公式为: $\text{FeO}(\text{在硅酸盐中}) + 2\text{H}_2\text{S} = \text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$; $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{H}_2\text{S} = 3\text{FeS}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2$ (Neil et al., 1983; Neall et al., 1987)。考虑到偏岩子金矿床未见毒砂, 暂不考虑围岩的硫化作用。李华健(2020)对造山型金矿水岩反应进行模拟, 支持水岩反应控制着金的沉淀, 提出对于石英脉型金矿, 单独用水岩反应并不能解释金的沉淀, 是因为模拟中当水岩比超过 0.35 才会发生金的沉淀。此外, 模拟结果表明水岩比可控制磁黄铁矿和黄铁矿的形成, 低水岩比形成磁黄铁矿, 高水岩比形成黄铁矿。相较于丹巴金矿床大量发育的磁黄铁矿(Zhao et al., 2019), 偏岩子金矿床主要产出黄铁矿, 指示偏岩子矿床具较高的水岩比, 有利于自然金通过水岩反应产出, 硫化和黄铁矿化可能在金沉淀中有着重要作用(Kusebauch et al., 2019)。

综上所述, 含金流体在构造应力作用下沿区域断层/或韧性剪切带上升, 金主要以 AuHS^0 形式被热液输送(郑大中, 1995), 当到达有利地点(如偏岩子断层)后部分物质迁入与迁出, 在地质作用(如造山运动)影响下, 成矿环境不断改变(如温压变化、氧逸度升高、流体沸腾等), 发生一系列流体反应过程(包括水岩相互作用), 造成了金的沉淀富集及相关的含氟镁石的矿物组合, 如公式(2)~公式(4)所示。



6 结论

(1) 川西康定偏岩子金矿可划出 4 个成矿阶段。其中, 金主要以自然金的形式在黄铁矿-氟镁石-金-石英-白云石阶段(Ⅱ阶段)和赤铁矿-褐铁矿-金阶段(Ⅳ阶段)中产出。EMPA 测试结果表明, Ⅱ阶段与Ⅳ阶段的金成色值分别为 976.4~986.9 与 960.9~992.9, 平均值分别为 981.4(N=27)和 980.3(N=28), 自然金成色值变化不大, 表现出稳定的高金含量特征。

(2) 包裹体显微测温及 LA-ICP-MS 成分分析显示, 偏岩子金矿床流体包裹体均一温度主要集中于 220~300 °C, 盐度主要集中于 6% NaCl_{eqv}~12% NaCl_{eqv}, 密度的平均值为 0.93 g/cm³, 压力为 308~2317 bar, pH 值为 5.4~5.9。随着阶段演化, 流体包裹体微量元素含量逐渐降低, 与之(NaCl、KCl)对应的盐度等也逐渐降低。Ⅰ、Ⅱ阶段富集元素特征存在差异, 表明成矿流体性质和成分可能发生了转变。Rb/Na 等不同元素比值特征指示成矿流体具岩浆-热液型或中级变质流体特征, 符合造山型矿床的流体特征。

(3) 热力学模拟分析表明氧逸度从黄铁矿区域升高到赤铁矿区域, 成色值可能会有所升高, 温度降低和氧逸度升高可能促发金的沉淀。含金流体在构造应力作用下沿区域断层/或韧性剪切带上升, 金主要以 AuHS⁰ 形式运移, 当到达有利赋矿空间(如偏岩子断层), 在造山过程影响下, 成矿环境不断改变, 发生一系列流体反应过程(如水岩相互作用), 从而造成了金的沉淀富集及含氟镁石的矿物组合。

致谢: 电子探针实验测试得到了西南石油大学陈曦老师的支持和帮助; 野外考察中得到了西南交通大学张云辉副教授的帮助, 在此一并表示感谢。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 蔡建明. 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, 1988, 15(3): 9-16.
- CAI Jianming. A fluid inclusion study of the Pianyanzi gold deposit in Sichuan province[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1988, 15(3): 9-16.
- 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1181-1196.
- CHEN Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1181-1196.
- 凡韬, 王春林, 杨波, 等. 四川丹巴县独狼沟金矿床成因: 来自同位素证据[J]. 地质与勘探, 2023, 59(3): 481-0496.
- FAN Tao, WANG Chunlin, YANG Bo, et al. Genesis of the Dulanggou gold deposit in Danba County of Sichuan Province: Based on isotopic evidence[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(3): 481-496.
- 凡韬, 赖翔, 程文斌, 等. 四川丹巴独狼沟金矿成因矿物学及指针矿物学特征[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 209-224.
- FAN Tao, LAI Xiang, CHENG Wenbin, et al. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy of the Dulanggou Gold Deposit in Danba, Sichuan Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 209-224.
- 高昆丽. 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, 2017.
- GAO Kunli. Metallogenic fluid characteristics in the Panyanzi gold-dore deposit, Kangding County, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 葛良胜, 李玉静, 郭晓东, 等. 川西南康定—会理地区构造演化与金矿成矿[J]. 黄金地质, 1998, 4(3): 7-14.
- GE Liangsheng, LI Yujing, GUO Xiaodong, et al. The tectonic evolution and gold mineralization from Kangding to Huili, southwest of Sichuan[J]. Gold Geology, 1998, 4(3): 7-14.
- 蓝廷广, 胡瑞忠, 范宏瑞, 等. 流体包裹体及石英 LA-ICP-MS 分析方法的建立及其在矿床学中的应用[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3239-3262.
- LAN Tingguang, HU Ruizhong, FAN Hongrui, et al. In-situ analysis of major and trace elements in fluid inclusion and quartz: LA-ICP-MS method and applications to ore deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(10): 3239-3262.
- 李保华. 康定偏岩子金矿床流体包裹体研究[J]. 四川地质学报, 1997, 17(1): 36-42.
- LI Baohua. A research for fluid inclusions from Pianyanzi gold deposit, Kangding[J]. Acta Geologica Sichuan, 1997, 17(1): 36-42.
- 李保华, 蔡建明. 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, 1995, 22(2): 89-95.

- LI Baohua, CAI Jianming. Physicochemical conditions of mineralization and the transportation and deposition of Au in Pianyanzi gold deposit[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1995, 22(2): 89–95.
- 李华健. 哀牢山剪切带北段造山型金矿床流体来源和成矿过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- LI Huajian. The Fluid Source and Ore-forming Processes of the Orogenic Gold Mineralization on the North Part of the Ailaoshan Shear Zone [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 梁翼, 钟建胜, JOUKOU Suguru, 等. 湖南康家湾矿床的成矿流体特征: 基于矿物学、流体包裹体及热力学计算的制约[J]. 矿床地质, 2021, 40(3): 475–490.
- LIANG Yi, ZHONG JianSheng, JOUKOU Suguru, et al. Characteristics of ore-forming fluids of Kangjiawan deposit in Hunan Province: Constraints from mineralogy, fluid inclusions thermodynamic calculation[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(3): 475–490.
- 梁翼, 葛行飞, 王国刚, 等. 湖南沃溪金锑钨矿床的金矿化作用研究: 基于元素地球化学特征和自然金的热力学模拟分析[J]. 地质学报, 2023, 97(10): 3380–3395.
- LIANG Yi, GE Hangfei, WANG Guogang, et al. Gold mineralization of the Woxi Au-Sb-W deposit in Hunan Province based on element-geochemical features and thermodynamic modelling analysis of native gold[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(10): 3380–3395.
- 刘斌. 流体包裹体测定计算和分析(上)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- 刘星. 金成色成因探讨[J]. 地质与勘探, 1991, 27(2): 34–39.
- LIU Xing. On Genesis and Fineness of Native Gold[J]. Geology and Prospecting, 1991, 27(2): 34–39.
- 刘星成, 许婷, 熊小林, 等. 岩浆熔/流体中金的溶解度: 高温高压实验研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(9): 1477–1488.
- LIU Xingcheng, XU Ting, XIONG Xiaolin, et al. Gold solubility in silicate melts and fluids: Advances from high-pressure and high-temperature experiments[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(9): 1477–1488.
- 卢焕章, 池国祥, 朱笑青, 等. 造山型金矿的地质特征和成矿流体[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 244–265.
- LU Huanzhang, CHI Guoxiang, ZHU Xiaoqing, et al. Geological Characteristics and Ore Forming Fluids of Orogenic Gold Deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 244–265.
- 罗鸿书, 毛玉元, 陆彦, 等. 康定氟镁石金矿[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1987.
- 毛玉元, 陆彦, 罗鸿书. 我国新类型金矿—四川偏岩子金矿中金的赋存状态[J]. 黄金, 1987, (2): 19–25.
- MAO Yuyuan, LU Yan, LUO Hongshu. The occurrence state of gold in a new type of gold deposit in China, the Pianyanzi gold deposit in Sichuan Province[J]. Gold, 1987, (2): 19–25.
- 马少兵, 裴秋明, 王亮, 等. 内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿床成因: 来自稀土元素、流体包裹体和 H-O 同位素的制约[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 50–65.
- MA Shaobing, PEI Qiuming, WANG Liang, et al. Genesis of the Daxigou Fluorite Deposit, Harqin Banner, Inner Mongolia, China: Constraints from Rare Earth Elements, Fluid Inclusions and H-O Isotopes[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 50–65.
- 宋明伟, 彭义伟, 陈友良, 等. 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), 2024, 51(4): 596–613.
- SONG Mingwei, PENG Yiwei, CHEN Youliang, et al. 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, 2024, 51(4): 596–613.
- 王京彬, 王玉往, 李庆哲, 等. 造山型金矿容矿建造分类, 成矿模式及找矿勘查[J]. 地质学报, 2024, 98(3): 898–919.
- WANG Jingbin, WANG Yuwang, LI Qingzhe, et al. Classification of host rock formation, metallogenic model, and exploration of orogenic gold deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(3): 898–919.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 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, 2019, 44(6): 2155–2186.
- WANG Qingfei, DENG Jun, ZHAO Hesen, et al. Review on Orogenic Gold Deposits[J]. Earth Science, 2019, 44(6): 2155–2186.
- 王焰, 魏博, 谭伟, 等. 脉状金矿床的时空分布、地质特征和成矿流体来源[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(9): 1457–1476.
- WANG Yan, WEI Bo, TAN Wei, et al. The distribution, characteristics and fluid sources of lode gold deposits: An overview[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(9): 1457–1476.
- 许红英, 张成江, 李俊国, 等. 四川康定偏岩子氟镁石金矿床的成矿机理[J]. 矿物学报, 2015, (S1): 637.
- XU Hongying, ZHANG Chengjiang, LI Junguo, et al. The ore-forming mechanism of Pianyanzi fluorite magnesite gold deposit in Kangding, Sichuan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, (S1): 637.
- 杨林, 王庆飞, 赵世宇, 等. 造山型金矿构造控矿作用[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 277–292.
- YANG Lin, WANG Qingfei, ZHAO ShiYu, et al. Structural controls on orogenic gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(2): 277–292.
- 张文林, 文怀忠, 林鑫, 等. 四川木里梭罗沟金矿床载金黄铁矿原位微量元素特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(1): 77–86.

- ZHANG Wenlin, WEN Huaizhong, LIN Xin, et al. The in-situ trace elements of gold-bearing pyrites from Suoluogou gold deposit, Muli, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2023, 43(1): 77–86.
- 张燕, 李引, 尹鑫, 等. 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*, 2022(1): 42–47.
- ZHANG Yan, LI Yin, YIN Xin, et al. Geological Characteristics and Occurrence of Pianyanzi Au Deposit in Daduhe Basin, Sichuan [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1): 42–47.
- 赵一琛. 金台子金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- ZHAO Yichen. Discussion on geological characteristics and metallogenic genesis of Jin Taizi gold deposit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- 郑大中. 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*, 1995, 15(4): 304–311.
- ZHENG Dazhong. A discussion into several migration forms of gold—On genetic mechanism of Pianyanzi sellaite-type gold deposit, Kangding[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1995, 15(4): 304–311.
- 周春波, 葛行飞, 屈尚伦, 等. 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证据[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(2): 253–269.
- ZHOU Chunbo, GE Hangfei, QU Shanglun, et al. Ore genesis of the Tonglufang orogenic gold deposit in western Sichuan: Constraints from mineralogy, fluid inclusions, and thermodynamic simulations[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2025, 52(2): 253–269.
- Allan M M, Yardley B W D, Forbes L J, et al. Validation of LA-ICP-MS fluid inclusion analysis with synthetic fluid inclusions[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(11-12): 1767–1775.
- Goldfarb R J, Groves D I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time[J]. *Lithos*, 2015, 233: 2–26.
- Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1-2): 1–75.
- Goldfarb R J, Qiu K F, Deng J, et al. Chapter 8 Orogenic Gold Deposits of China[M]. *Mineral Deposits of China*. Society of Economic Geologists, 2019.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1-5): 7–27.
- Guillong M, Meier D L, Allan M M, et al. Appendix A6: SILLS: A MATLAB-based program for the reduction of laser ablation ICP-MS data of homogeneous materials and inclusions[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 2008, 40: 328–333.
- Hakim A Y A, Dijkstra A H, Melcher F, et al. Tracing metal sources in orogenic gold deposits of the Timburu Goldfield, Meratus, Indonesia: A geochemical and statistical approach[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2025, 285: 106561.
- Heinrich C A, Pettke T, Halter W E, et al. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 3473–3497.
- Johnson J W, Oelkers E H, Helgeson H C. SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reaction from 1 to 5 000 bar and 0 to 1 000 °C[J]. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(7): 899–947.
- Kapp P, DeCelles P G. Mesozoic–Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses[J]. *American Journal of Science*, 2019, 319(3): 159–254.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, et al. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(S1): 1–68.
- Kusebauch C, Gleeson S A, Oelze M. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaav5891.
- Large R, Bull S, Maslennikov V. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits[J]. *Economic Geology*, 2011, 106(3): 331–358.
- Li H, Dong G, Xie Z, et al. Geology and genesis of gold deposits in the daduhe belt: A Case study of the Lianhua gold deposit on the Western margin of the Yangtze Craton, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2025, 178: 106500.
- Li H, Zhang Z, Santosh M, et al. Late Permian basalts in the north-western margin of the Emeishan Large Igneous Province: Implications for the origin of the Songpan-Ganzi terrane[J]. *Lithos*, 2016, 256: 75–87.
- Liang Y, Ge H, Pei Q, et al. 3D Plotting of Gold Solubility and Gold Fineness: Quantitative Analysis of Ore-Forming Conditions in Hydrothermal Gold Deposits[J]. *Lithosphere*, 2023, 2023(1): lithosphere_2023_208.
- Liang Y, Hoshino K. Thermodynamic calculations of Au_xAg_{1-x} – Fluid equilibria and their applications for ore-forming conditions [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 52: 109–117.
- Neall F B, Phillips G N. Fluid-wall rock interaction in an archaean hydrothermal gold deposit: A thermodynamic model for the hunt mine, kambalda[J]. *Economic Geology*, 1987, 82(7): 1679–1694.
- Neil P G, Groves D I. The nature of archaean gold-bearing fluids as

- deduced from gold deposits of Western Australia[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1983, 30(1-2): 25–39.
- Pei Q M, Li C H, Ma S B, et al. A rare sellaite-bearing orogenic gold deposit at Pianyanzi, Yangtze Craton: Ore genesis as implied from in-situ studies of pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2024, 165: 105866.
- Qiu K F, Deng J, Laflamme C, et al. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 343: 133–141.
- Robert F, Brommecker R, Boume B T, et al. Models and exploration methods for major gold deposit types[J]. *Ore Deposits and Exploration Technology*, 2007, 7: 691–711.
- Roedder E. Fluid Inclusions[M]. *Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, 1984, 12: 1-644.
- Roger F, Jolivet M, Malavieille J. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 254–269.
- Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits[J]. *Geology*, 1988, 16(6): 551–555.
- Tomkins A G, Grundy C. Upper temperature limits of orogenic gold deposit formation: Constraints from the granulite-hosted Griffin's find deposit, Yilgarn Craton[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(5): 669–685.
- Voisey C R, Willis D, Tomkins A G, et al. Aseismic refinement of orogenic gold systems[J]. *Economic Geology*, 2020, 115(1): 33–50.
- Wang H, Lan T G, Fan H R, et al. Fluid origin and critical ore-forming processes for the giant gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from in situ elemental and oxygen isotopic compositions of quartz and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. *Chemical Geology*, 2022b, 608: 121027.
- Wang Q F, Liu X F, Yin R S, et al. Metasomatized mantle sources for orogenic gold deposits hosted in high-grade metamorphic rocks: Evidence from Hg isotopes[J]. *Geology*, 2024, 52(2): 115–119.
- Wang Q F, Yang L, Zhao H S, et al. Towards a universal model for orogenic gold systems: A perspective based on Chinese examples with geodynamic, temporal, and deposit-scale structural and geochemical diversity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022a, 224: 103861.
- Wang Q F, Zhao H S, Groves D I, et al. The Jurassic Danba hypozonal orogenic gold deposit, western China: indirect derivation from fertile mantle lithosphere metasomatized during Neoproterozoic subduction[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55(2): 309–324.
- Yan D P, Zhou Y, Qiu L, et al. The Longmenshan tectonic complex and adjacent tectonic units in the eastern margin of the Tibetan Plateau: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 164: 33–57.
- Zhang Y, Yan D P, Qiu L, et al. Stepwise growth of the southeastern Tibetan Plateau: Structural and thermochronological evidence from the Panxi tectonic belt[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 621: 111542.
- Zhao H S, Wang Q F, Groves David I, et al. 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*, 2019, 54(1): 133–152.
- Zhao H S, Wang Q F, Groves D I, et al. 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*, 2022a, 145: 104861.
- Zhao H S, Wang Q F, Kendrick M A, et al. Metasomatized mantle lithosphere and altered ocean crust as a fluid source for orogenic gold deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022b, 334: 316–337.
- Zhao H S, Wang Q F, Li C, et al. Two Episodes of Postpeak Metamorphic High-to Moderate-Temperature Orogenic Gold Mineralization at Danba, Southwest China: Timing and Fluid Source Constraints from Thermodynamic Modeling and U-Pb, Re-Os, and S Isotopes[J]. *Economic Geology*, 2024, 119(8): 1791–1807.
- Zhong R C, Brugger J, Chen Y J, et al. Contrasting regimes of Cu, Zn and Pb transport in ore-forming hydrothermal fluids[J]. *Chemical Geology*, 2015, 395: 154–164.
- Zhou M F, Ma Y, Yan D P, et al. The Yanbian Terrane(Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2006, 144(1-2): 19–38.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. 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*, 2002, 196(1-2): 51–67.
- Zhou M F, Yan D P, Vascincelos P M, et al. 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*, 2008, 33(5–6): 414–427.