

王存柱,徐明芳,刘长纯,等. 吉林桦甸地区二道甸子金矿床成因与成矿背景. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 139-154. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230201.

Wang Cunzhu, Xu Mingfang, Liu Changchun, et al. Genesis and Metallogenic Background of Erdaodianzi Gold Deposit in Huadian, Jilin Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 139-154. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230201.

吉林桦甸地区二道甸子金矿床成因与成矿背景

王存柱¹, 徐明芳², 刘长纯¹, 张苍江¹, 郑大贺¹, 李国郡¹,
金忠宝¹, 许帅农¹, 王刚¹

1. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157021

2. 吉林省有色金属地质勘查局六〇五队, 吉林 延吉 133000

摘要: 吉林省桦甸地区二道甸子金矿床是一座大型金矿床, 位于桦甸市二道甸子镇西北约 2 km 处。为了揭示该矿床成因和成矿地质背景, 在矿床地质研究基础上, 开展了矿物流体包裹体、H-O-S-Pb 同位素及成矿时代等方面研究。结果表明: 该矿床流体包裹体类型主要是气液两相包裹体和液相包裹体; 获得均一温度为 218.7~347.8 °C, 流体盐度为 3.33%~14.57%, 密度为 0.69~0.89 g/cm³, 成矿深度 < 1.4 km; 流体包裹体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 5.23‰~9.50‰, δD 为 -83.8‰~-111.1‰, $\delta^{34}\text{S}$ 为 -8.25‰~-2.00‰, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 16.721 0~18.489 8、15.340 0~15.623 0、36.488 0~38.373 0。上述特征揭示其为中温热液矿床, 成矿流体来自岩浆水, 演化过程发生与围岩的水岩交换, 晚阶段有大气水混入, 成矿物质主要来自岩浆, 伴有地壳物质的混染。结合获得黑云母花岗岩闪长岩的 LA-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 年龄((192.7±1.6) Ma) 和区域金矿成矿时代的研究成果, 分析认为该矿床为与深成岩浆作用有关的岩浆热液金矿床, 成矿适宜古太平洋板块俯冲作用下的活动大陆边缘造山伸展环境。

关键词: 矿床地质; 流体包裹体; H-O-S-Pb 同位素; 锆石 U-Pb 定年; 成矿地质环境; 二道甸子金矿床; 岩浆热液型金矿床

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230201

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Genesis and Metallogenic Background of Erdaodianzi Gold Deposit in Huadian, Jilin Province

Wang Cunzhu¹, Xu Mingfang², Liu Changchun¹, Zhang Cangjiang¹, Zheng Dahe¹,
Li Guojun¹, Jin Zhongbao¹, Xu Shuainong¹, Wang Gang¹

收稿日期: 2023-08-17

作者简介: 王存柱(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事固体矿产勘查及基础地质调查方面的研究, E-mail: 463016191@qq.com

通信作者: 徐明芳(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事固体矿产勘查方面的研究, E-mail: 842896668@qq.com

基金项目: 中国地质调查局矿产地质调查项目(DD20230382, DD20208010); 吉林省有色金属地质勘查局项目(JL-JN2021008)

Supported by the Mineral Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20230382, DD20208010) and the Project of Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau (JL-JN2021008)

1. *Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157021, Heilongjiang, China*
2. *605 Party of Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau Yanji, 133000, Jilin, China*

Abstract: Erdaodianzi gold deposit located approximately 2 kilometers northwest of Erdaodianzi Town, Huadian City, Jilin Province, is a large gold deposit situated at the contact zone of Paleozoic schist, gneiss, and Mesozoic Early Jurassic granodiorite. It is controlled by a tectonic magmatic fluid mineralization system and NW-trending compressive and torsional faults. Our new research on mineral fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, and mineralization ages has provided insights into its genesis and geological background. The main types of fluid inclusions are mainly gas-liquid two-phase and liquid phase inclusions, with uniform temperatures between 218.7 and 347.8 °C, fluid salinities of 3.33% to 14.57%, densities of 0.69 to 0.89 g/cm³, and a mineralization depth of less than 1.4 km. The fluid inclusion $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values range from 5.23‰ to 9.50‰, δD values range from -83.8‰ to -111.1‰, and $\delta^{34}\text{S}$ values range from -8.25‰ to -2.00‰, with ratios of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ varying from 16.721 0 to 18.489 8, 15.340 0 to 15.623 0 and 36.488 0 to 38.373 0, respectively. These characteristics reveal a medium temperature hydrothermal deposit with ore-forming fluids sourced from magma, involving water-rock interactions with surrounding rocks and the addition of atmospheric water. The mainly ore-forming material is derived from magma mixed with stratigraphic materials. Additionally, single grain zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of (192.7 ± 1.6) Ma from biotite granodiorite align with the regional gold mineralization era. Comprehensive analysis suggests that the deposit is a magmatic hydrothermal gold deposit related to plutonic magmatism, suitable for an active continental margin orogenic extension environment influenced by the subduction of the Pele-Pacific plate.

Key words: deposit geology; fluid inclusion; H-O-S-Pb isotope; zircon U-Pb dating; metallogenic geological environment; Erdaodianzi gold deposit; magmatic hydrothermal gold deposit

0 引言

吉林省中部地区构造及岩浆活动强烈频繁,成矿地质条件非常优越,金、铜、钼、镍、铁、铅、锌等矿产资源丰富,是近年来地质找矿与成矿理论研究的热点地区。二道甸子金矿床是吉林省中部大型金矿床之一,位于桦甸市二道甸子镇西北约 2 km 处,自 1947 年发现以来,倍受国内地质工作者广泛关注和研究^[1-6]。但受限于当时实践认识、实验条件和理论局限,有关该矿床成因、形成物理化学条件和成矿地质背景存在较大争议。早期曾提出该矿床为复成矿床,成矿物质来源于地层含金建造^[1],近期有学者提出其属中温热液型金矿床,成矿物质来源于地层和来自海西晚期黑云母花岗岩^[7]。

本文在上述研究和系统矿床地质调查研究基础上,首先开展了包裹体显微特征、显微测温及激光拉曼分析以及不同成矿阶段 H-O 和硫化物的 S-Pb

同位素测试;然后对与成矿密切相关的岩浆热事件进行了 U-Pb 同位素定年;最后结合相关研究成果讨论了矿床成因、成矿流体性质、成矿物质来源和成矿地质背景。通过此次研究,以期在提高吉林省中部地区区域成矿理论的同时,为下一步区域资源潜力评价和地质找矿提供理论与技术支撑。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置处于兴蒙造山带东段,索伦—西拉木伦—长春增生杂岩带与华北地块北缘岩浆弧的交会部位^[8](图 1a),敦化—密山断裂从研究区南东部通过,经历了古亚洲洋演化、兴蒙造山和叠加古太平洋板块俯冲大陆边缘复合构造、岩浆成矿,区内矿产资源分布较为丰富。

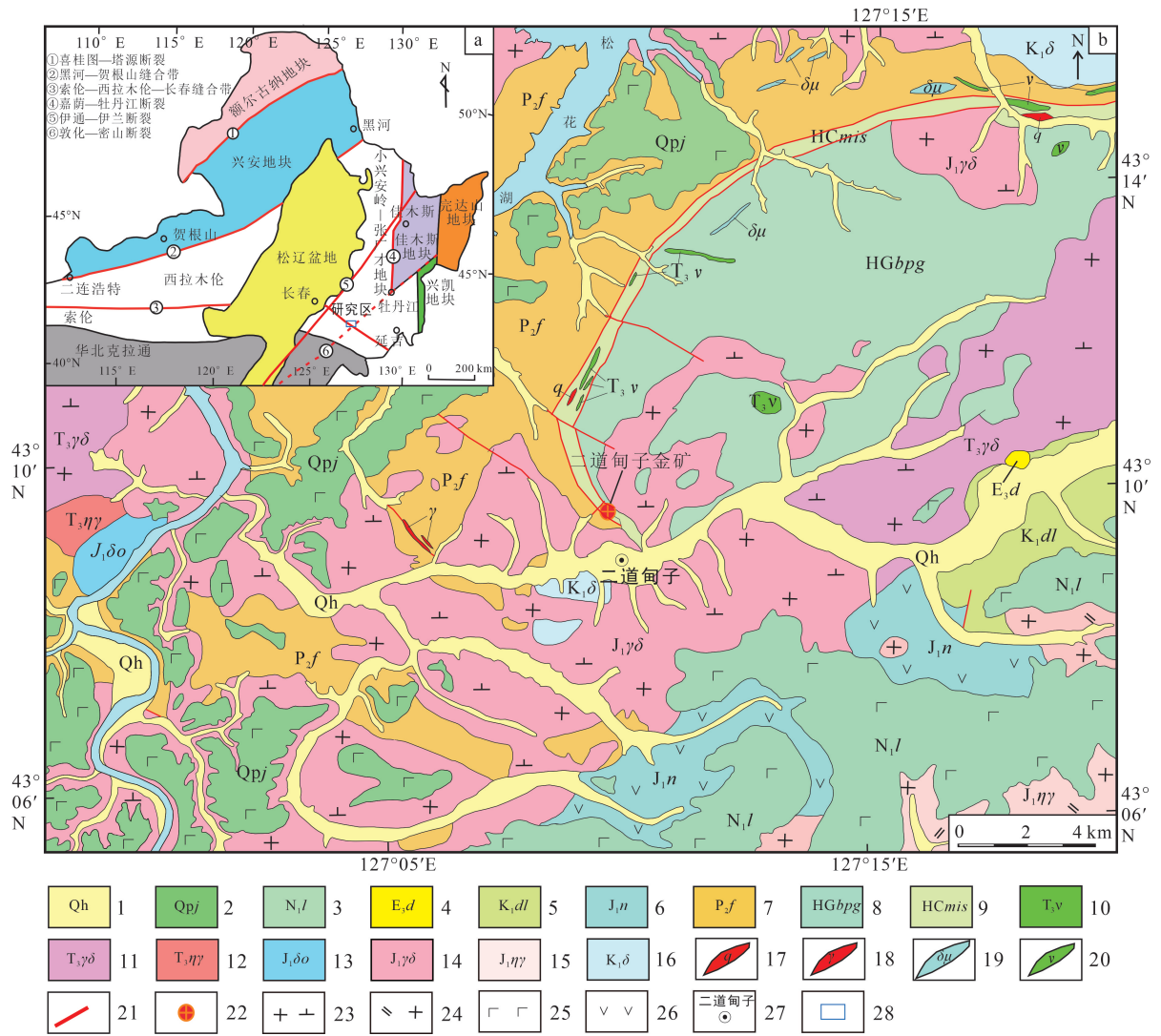
区域发育的地层有中二叠统范家屯组、下侏罗统南楼山组、下白垩统大砬子组、渐新统大川组、中新统老爷岭组及第四系;同时在二道甸子—漂河川

地区以构造堆叠方式发育着二云石英片岩(寒葱沟)及黑云斜长片麻岩(荒沟岭)。区内岩浆活动比较强烈;海西期岩浆活动早期表现为基性岩浆侵入活动,局部有镍铜矿富集,晚期则以强烈的酸性岩浆活动遍布全区;燕山期岩浆活动早期为小规模中性岩浆侵入,晚期则为断陷带中的中性-中酸性岩浆喷发和酸性岩浆侵入。构造复杂多样,以褶皱、断裂发育为特征,其中,二道甸子—漂河川弧形构造带构成区内主要构造格架,是主要控矿构造(图 1b)。

2 成矿地质特征

2.1 矿区地质

矿区地质研究揭示,矿区内地层主要为荒沟岭黑云斜长片麻岩及寒葱沟二云石英片岩,二者整体呈北东向展布,并被早侏罗世花岗闪长岩侵入。其中:前者主要分布在荒沟庙—蛇岭沟上屯—漂河川一带近北东向展布的弧形带上,获得锆石 U-Pb 同位素年龄 950~220 Ma;后者沿二道甸子—寒葱沟—



1. 全新统;2. 更新统军舰山组;3. 中新统老爷岭组;4. 渐新统大川组;5. 下白垩统大拉子组;6. 下侏罗统南楼山组;7. 中二叠统范家屯组;8. 荒沟岭黑云斜长片麻岩;9. 寒葱沟二云石英片岩;10. 晚三叠世辉长岩;11. 晚三叠世花岗闪长岩;12. 晚三叠世二长花岗岩;13. 早侏罗世石英闪长岩;14. 早侏罗世花岗闪长岩;15. 早侏罗世二长花岗岩;16. 早白垩世闪长岩;17. 石英脉;18. 花岗细晶岩脉;19. 闪长玢岩脉;20. 辉长岩脉;21. 断裂构造;22. 金矿床;23. 花岗闪长岩;24. 二长花岗岩;25. 玄武岩;26. 安山岩;27. 地名;28. 研究区。a 图据文献[8]修编。

图 1 区域构造单元图(a)和二道甸子地区地质简图(b)

Fig.1 Regional tectonic unit map (a) and geological sketch map of Erdaodianzi area (b)

漂河川弧形展布,出露面积小,锆石 U - Pb 同位素年龄为 2 319~221 Ma。岩浆岩有晚三叠世及早侏罗世两期,其中:晚三叠世为呈脉状产出的(角闪)辉长岩,发育镍铜矿化,锆石 U - Pb 同位素年龄为 222~210 Ma;早侏罗世为呈大面积侵入岩产出的花岗闪长岩,锆石 U - Pb 测年结果为 194~188 Ma。在两者与早侏罗世花岗闪长岩接触带附近,多发生热接触变质作用形成的长石角闪石角岩、含炭云母石英角岩等岩石类型。

区内构造以韧、脆性变形发育为特征。范家屯组碎屑岩、寒葱沟二云石英片岩及荒沟岭黑云斜长片麻岩中发育一系列糜棱面理、片理、片麻理构造,局部可见因剪切而形成变质分异条带或鞘褶皱等,形成于中浅构造层次的环境中^[9]。脆性断裂构造主要有三个方向:最早为东西向断裂,具长期活动特点;其次为东北-北东东向及北西向压扭性断裂;晚期为压扭性断裂,是该区主要的控岩控矿构造^[4]。

2.2 矿体特征

二道甸子金矿床主矿带石英脉带全长约 3 000 m、

宽 20~50 m,延深约 1 000 m,主要由 12 条矿脉组成(图 2a)。主矿带严格受北东陡倾斜的张扭性断裂和南东陡倾的压扭性断裂共同控制,主要表现为含矿石英脉在走向上呈等间距(700 m 左右)尖灭再现右行侧列展布状态,总体矿化呈现北西—南东展布,矿体向南东侧伏,侧伏角为 40°左右,倾角较陡(图 2b)。上部近矿间接围岩为含炭质的薄层云英角岩和厚层的长石角闪石角岩互层带,深部(南山 250 m 标高,北山 200 m 标高)含矿石英脉进入片岩、片麻岩岩层。井下观测发现含矿石英脉的下盘常形成压扭性的石墨黏土带,且局部为含矿角砾。其中:新 1 号矿脉规模最大,分布于 7—29 号勘探线之间,赋矿标高在 48~500 m 之间,走向为 315°~325°,400 m 标高以上倾向南西,400 m 标高以下倾向北东,倾角 70°~80°,控制延长约 300 m,倾斜最大延深约 390 m。矿体真厚度为 0.80~2.10 m,金品位为 $1.91 \times 10^{-6} \sim 11.12 \times 10^{-6}$,平均品位为 3.19×10^{-6} 。

该矿床矿体工业类型为含金石英脉型,矿石自

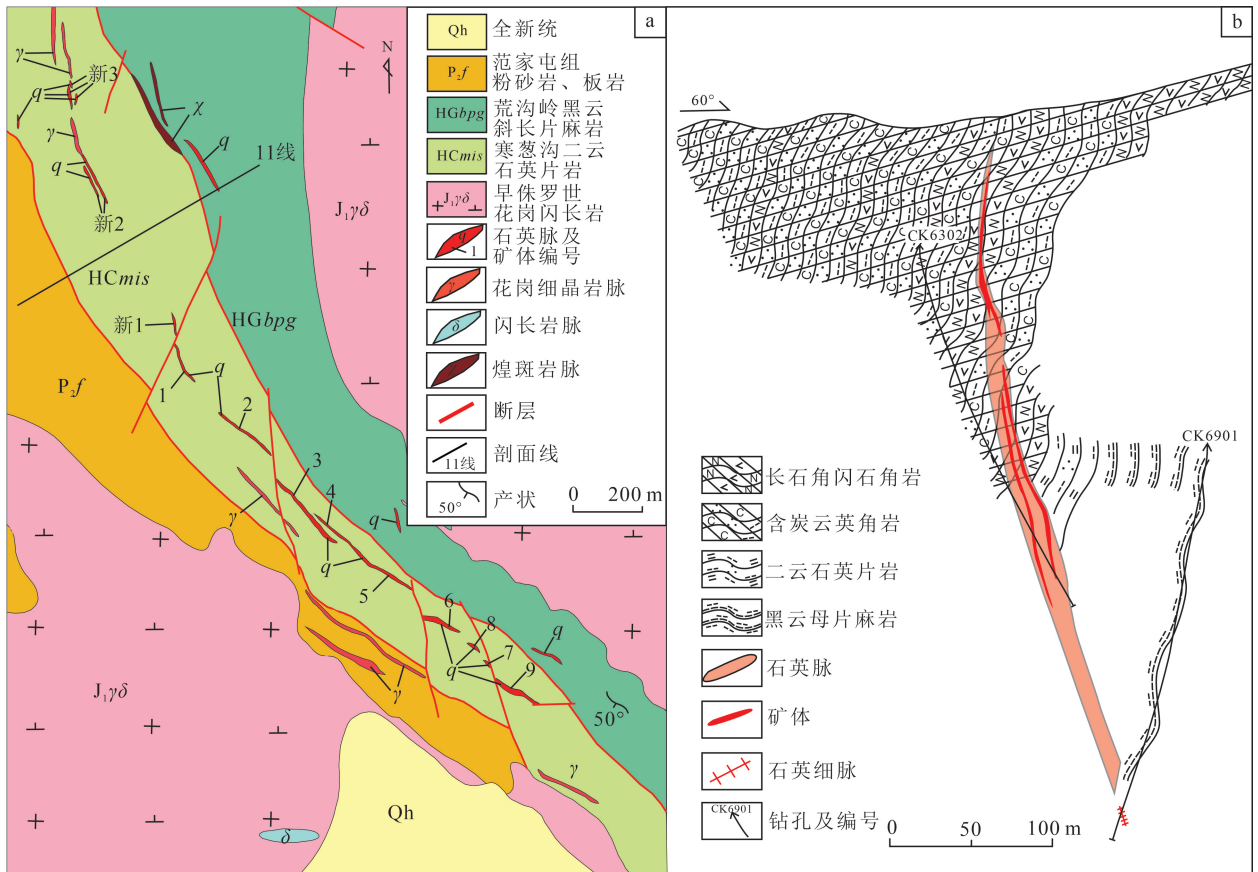


图 2 二道甸子金矿床地质简图(a)及 11 线剖面图(b)

Fig.2 Geological sketch map (a) and sectional drawing of Line 11 (b) in Erdaodianzi gold deposit

然类型为金属硫化物型;矿石矿物或矿化矿物体积分数<5%,由毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和载金矿物等组成;脉石矿物及蚀变矿物有石英、绢云母、绿泥石、方解石等。将矿化与蚀变矿物生成顺序相结合,成矿阶段可划分为:早期的无石英-黑云母阶段、主成矿期的黄铁矿-石英阶段和石英-多金属硫化物阶段、晚期的石英-方解石阶段(图 3)。

3 流体包裹体特征

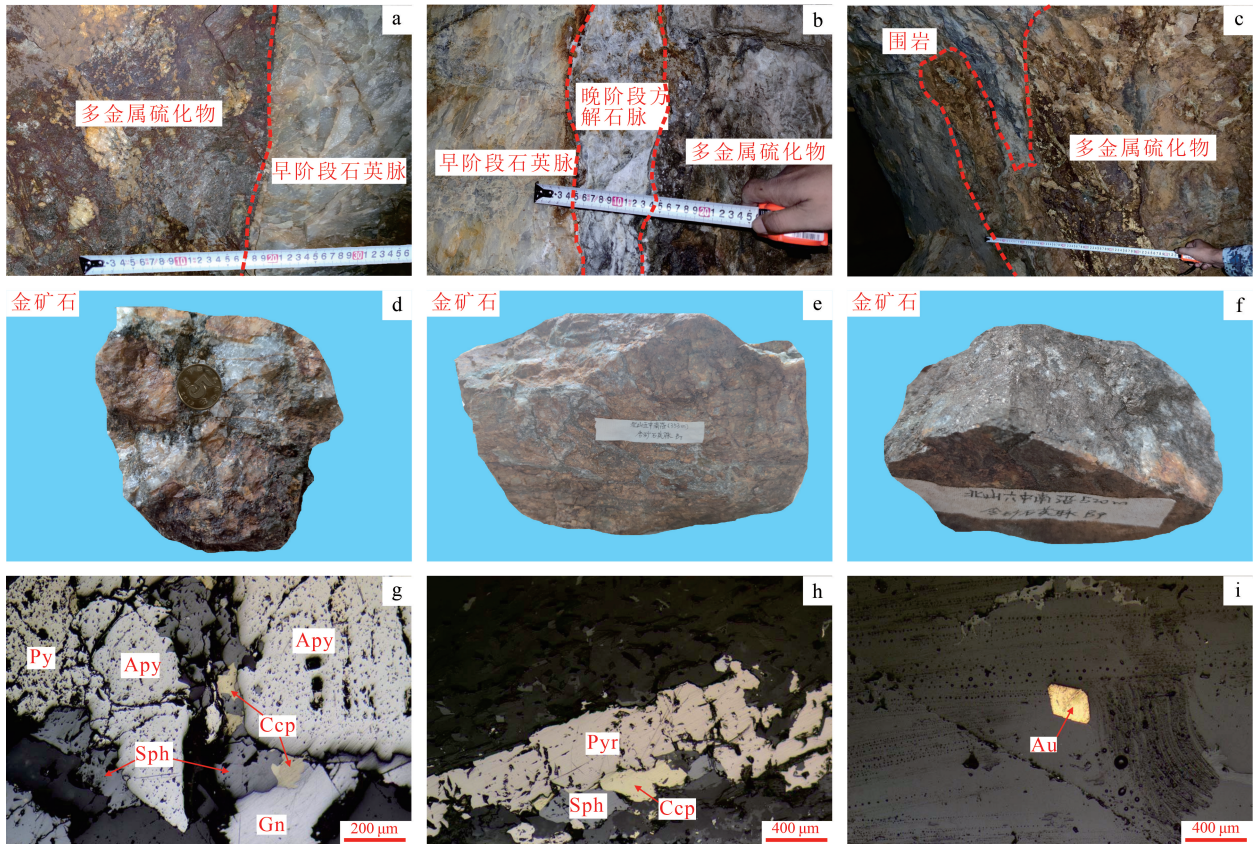
在矿床地质研究基础上,对采集的二道甸子金矿床成矿早阶段、主成矿阶段石英脉样品及成矿晚阶段的石英-方解石脉样品开展了矿物流体包裹体实验,样品制备及均一温度测试在北京铂年领航科技有限公司完成。

3.1 流体包裹体类型及岩相学特征

系统的显微观察(图 4)显示,成矿早阶段石英(图 4a)、主成矿阶段石英(图 4d)和成矿晚阶段方解石(图 4g)中均含有丰富的包裹体,透明度较高。根据流体包裹体在室温物理状态特征,可将样品中的包裹体分为两类、三种,即:由水组成的纯液体流体包裹体(I类)、液相和气相均由水组成的气液两相流体包裹体(II a类)和液相为水与气相为 CO₂ 或 CH₄ 组成的气液两相流体包裹体(II b类)。具体特征如下。

纯液体流体包裹体(I类):分布数量最多,室温下由水溶液组成,灰白色,多呈不规则状成群分布,大小为 3~15 μm,部分与气液两相流体包裹体(II a类)共生(图 4b、e、h)。

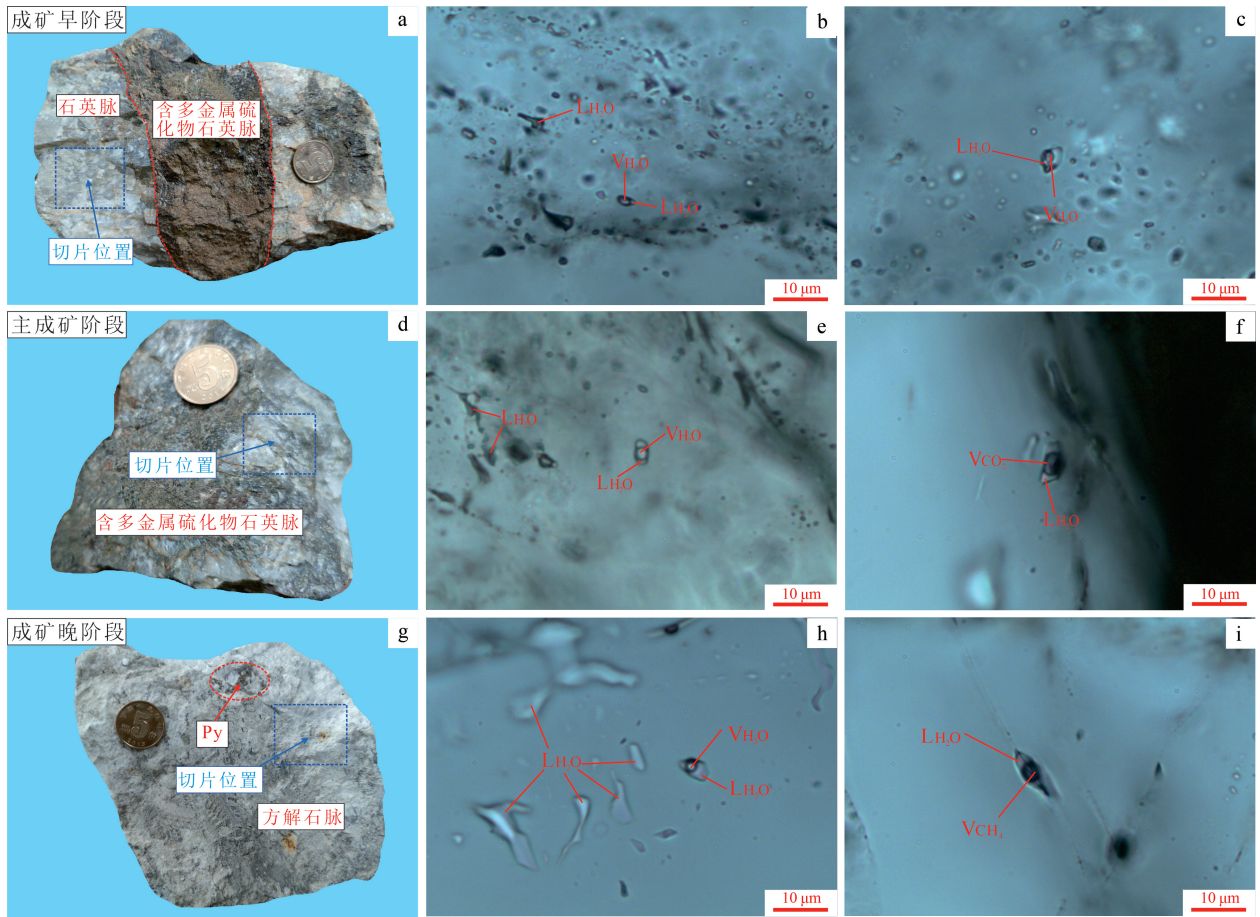
气液两相流体包裹体(II a类):分布数量较多,



a. 早阶段石英脉周围发育多金属硫化物;b. 早阶段石英脉、多金属硫化物被晚期方解石脉穿插;c. 多金属硫化物金矿石局部呈条带状分布;d. 主成矿阶段团块状金矿石;e. 北山五中段南沿 353 m 处块状金矿石;f. 北山六中段南沿 520 m 处块状金矿石;g. 金属矿物由毒砂、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿和方铅矿组成,多呈自形或半自形结构;h. 金属矿物由磁黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿组成,呈半自形或其他形结构;i. 自然金呈自形粒状分布于石英脉中。Py. 黄铁矿;Sph. 闪锌矿;Ccp. 黄铜矿;Gn. 方铅矿;Apy. 毒砂;Pyr. 磁黄铁矿;Au. 金。

图 3 二道甸子金矿床矿石矿物特征照片

Fig.3 Photographs of characteristics of ore minerals in Erdaodianzi gold deposit



L_{H2O}. 液相水; V_{H2O}. 气相水; V_{CH₄}. 气相甲烷; V_{CO₂}. 气相二氧化碳。

图 4 二道甸子金矿床不同阶段手标本及流体包裹体显微照片

Fig.4 Hand specimen photographs and photomicrographs of fluid inclusions at different stages in Erdaodianzi gold deposit

室温下由水溶液、气泡组成,灰白色-灰色,透明一半透明,呈椭圆形离散分布,大小为 $3\sim 10\ \mu\text{m}$,大多数充填度大于 85% ;少量包裹体呈半透明不规则状离散分布,大小为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$,充填度在 $60\%\sim 85\%$ 之间,为 $\text{H}_2\text{O}(\text{L},\text{V})$ 两相流体(图4b、c、e、h)。

气液两相流体包裹体(II b类):分布数量较少,仅零星分布,室温下由水溶液和气相的 CO_2 或 CH_4 组成,为 $\text{H}_2\text{O}(\text{L})-\text{CO}_2(\text{V})$ 两相流体,灰黑-灰紫色,半透明呈椭圆形离散分布,大小为 $5\sim 15\ \mu\text{m}$,充填度为 $40\%\sim 50\%$,部分与气液两相流体包裹体(II a类)共生(图4f、i)。

3.2 流体包裹体激光拉曼分析

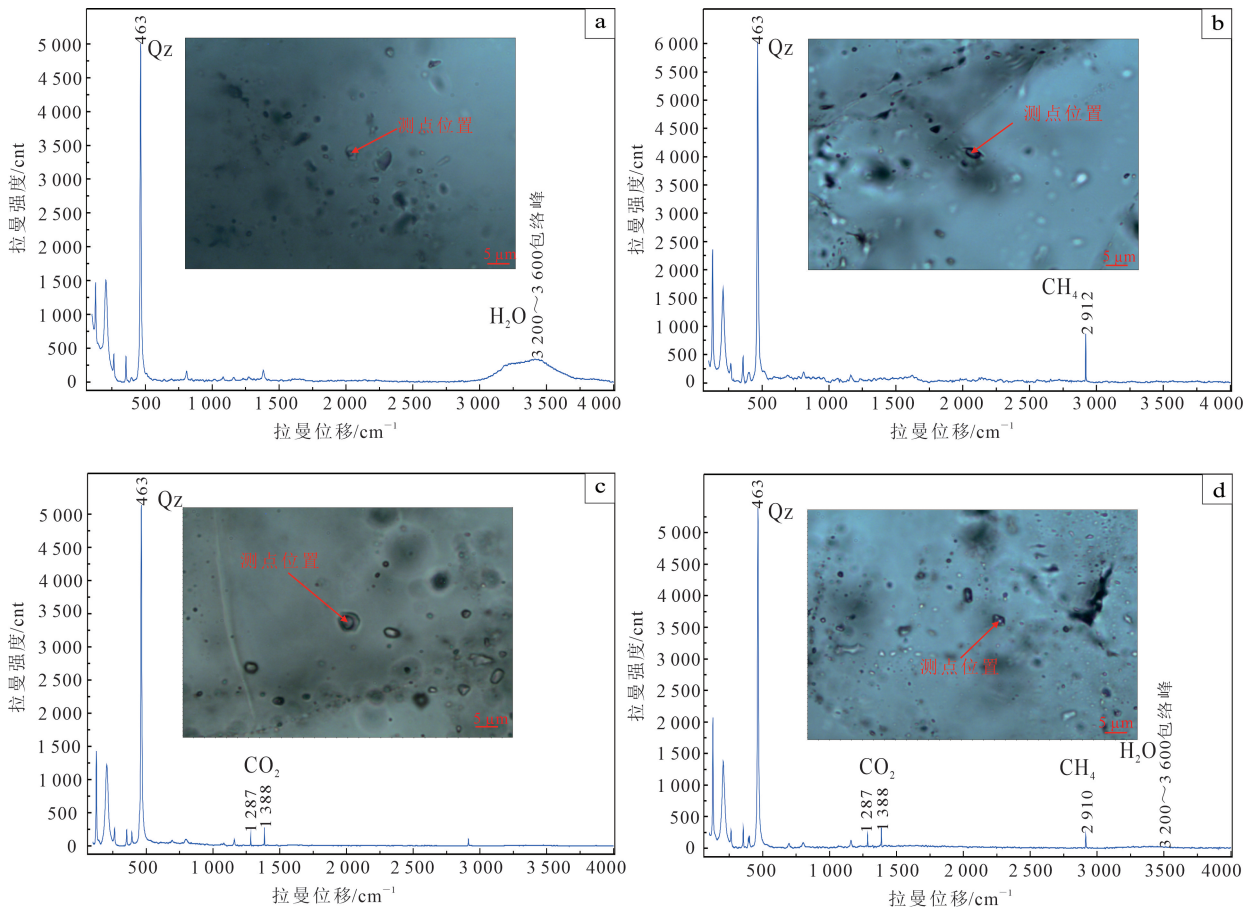
选取9件含金石英脉中的气液两相包裹体(II a、II b类)开展激光拉曼光谱分析,实验仪器型号为LabRAM HR Evolution共聚焦显微激光拉曼光谱仪,激光波长为 $532\ \text{nm}$,输出功率为 $50\ \text{mW}$,扫描范围为 $100\sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$,激光束斑大小约为

$1\ \mu\text{m}$,光谱分辨率为 $0.65\ \text{cm}^{-1}$ 。

测试结果显示,上述两种包裹体的气相成分除 H_2O 外,还有 CO_2 以及少量的 CH_4 ,在激光拉曼分析谱图(图5)中, H_2O 表现为 $3\ 200\sim 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 包络峰, CO_2 特征峰为 $1\ 287$ 和 $1\ 388\ \text{cm}^{-1}$, CH_4 特征峰为 $2\ 910$ 和 $2\ 912\ \text{cm}^{-1}$ 。

3.3 流体包裹体显微测温

在上述矿物流体包裹体显微观察基础上,选用成矿早阶段的石英脉样品3件、主成矿阶段石英脉样品7件、成矿晚阶段方解石-石英脉样品1件样品开展显微测温实验,仪器为Linkam THMSG 600型冷热台,冰点温度测试精度为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$,均一温度测试精度为 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ 。实验共获得冰点温度和均一温度107组数据,并利用 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系低盐度公式计算流体盐度($\omega(\text{NaCl})$)^[10],利用盐水溶液 $\omega(\text{NaCl})\leq 25\%$ 的包裹体密度计算式算出流体密度^[11],结果归纳于表1。



cnt. 光子计量数;Qz. 石英。

图 5 二道甸子金矿床流体包裹体激光拉曼谱图

Fig.5 Laser Raman spectra of fluid inclusions of Erdaodianzi gold deposit

表 1 二道甸子金矿床流体包裹体特征及参数

Table 1 Characteristics and parameters of fluid inclusions in Erdaodianzi gold deposit

样品号	成矿阶段	数量	直径/ μm	气液比/%	冰点温度/ $^{\circ}\text{C}$	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	$w(\text{NaCl})/\%$
21ED-1	成矿早阶段	6	5~8	5~10	-5.6~-4.6	289.3~296.8	7.31~8.68
21ED-2		6	5~6	5~10	-7.8~-4.8	275.9~299.3	7.59~11.46
21ED-3		8	5~6	5~10	-10.6~-3.6	310.9~347.8	5.86~14.57
21ED-4		8	7~8	5~40	-4.4~-3.5	247.3~268.6	5.71~7.02
21ED-5		10	5~12	5~60	-4.9~8.3	257.5~310.4	3.33~7.73
21ED-6	主成矿阶段	10	6~18	15~60	-5.2~7.3	256.6~295.7	5.15~8.14
21ED-8		7	4~6	5~10	-4.7~-3.9	248.9~277.6	6.30~7.45
21ED-9		10	8~20	10~20	-4.7~-3.8	238.5~270.1	6.16~7.45
EDDZ1		16	4~8	5~15	-7.8~7.6	262.4~288.7	4.62~11.46
EDDZ2		16	4~8	≤ 5	-8.8~-5.9	264.2~297.8	9.08~12.62
21ED-7	成矿晚阶段	10	6~12	20~30	-4.5~-2.2	218.7~233.4	3.71~7.17

从表 1 结合图 6 可知:成矿早阶段石英脉中,包裹体均一温度为 275.9~347.8 $^{\circ}\text{C}$,平均为 304.6 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 5.86%~14.57%,平均为 9.33%;主成矿阶段包裹体均一温度为 238.5~310.4 $^{\circ}\text{C}$,平均为

270.2 °C, 主要集中于 250~290 °C 之间, 盐度范围为 3.33%~12.62%, 平均为 7.91%, 主要集中于 6%~10% 之间; 成矿晚阶段包裹体均一温度为 218.7~233.4 °C, 平均为 224.2 °C, 盐度为 3.71%~7.17%, 平均为 5.33%。结合流体包裹体气相分析得出该矿床成矿流体为中温、中盐度 H₂O-NaCl-CO₂ 三组分为主的中温热液流体体系。

计算的流体密度在 0.69~0.89 g/cm³ 之间, 平均为 0.83 g/cm³, 主要集中于 0.79~0.88 g/cm³ 之间; 成矿压力在 8.68~14.19 MPa 之间, 平均为 10.60 MPa, 主要集中于 9.50~11.60 MPa 之间。利用脉状热液矿床深度与压力分段拟合的方程^[12], 估算二道甸子金矿床成矿深度为 0.08~1.40 km。

4 同位素

在上述研究基础上, 针对各成矿阶段石英流体包裹体及硫化物分别开展了 H-O 同位素和 S-Pb 同位素实验, 单矿物挑选及分析测试在北京铅年领航科技有限公司完成。

4.1 氢-氧同位素

实验样品为不同成矿阶段的单矿物石英, 分析仪器为 253plus 气体同位素质谱仪。 δD 测试采用高温爆裂法, 测试精度优于 $\pm 1\%$; $\delta^{18}O$ 分析则采用 BrF₅ 置换法, 标准样品的外分析精度优于 $\pm 0.2\%$, 相对标准为 V-SMOW, 测试数据见表 2。

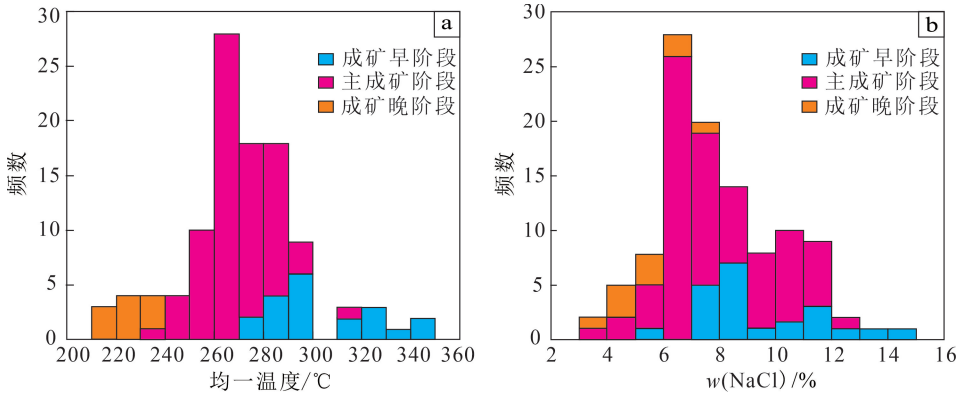


图 6 二道甸子金矿床流体包裹体均一温度直方图(a)和盐度直方图(b)

Fig.6 Fluid homogenization temperature histogram (a) and salinity histogram (b) of Erdaodianzi gold deposit

表 2 二道甸子金矿床石英中流体包裹体氢-氧同位素组成

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic composition of fluid inclusions in quartz in Erdaodianzi gold deposit

样品号	成矿阶段	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\%$	$\delta D_{V-SMOW}/\%$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\%$	温度/°C
21ED-1		16.0	-96.4	8.93	294
21ED-2	成矿早阶段	16.1	-90.2	8.70	285
21ED-3		15.5	-100.8	9.50	327
21ED-4		15.5	-85.8	7.01	259
21ED-5		15.1	-89.3	7.12	272
21ED-6		14.9	-99.3	6.87	272
21ED-8	主成矿阶段	14.7	-91.1	6.12	262
21ED-9		15.9	-85.1	5.59	257
21EDDZ-2		13.2	-94.0	5.64	282
21EDDZ-1		13.1	-95.5	5.23	274
21ED-7	成矿晚阶段	14.9	-94.8	6.52	224

从表 2 可知,石英矿物中 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 变化范围在 13.1‰~16.1‰ 之间, δD_{V-SMOW} 变化范围在 -110.8‰~-85.1‰ 之间。根据石英-水之间的氧同位素分馏方程^[13],结合流体包裹体均一温度,计算获得的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 在 5.23‰~9.50‰ 之间。

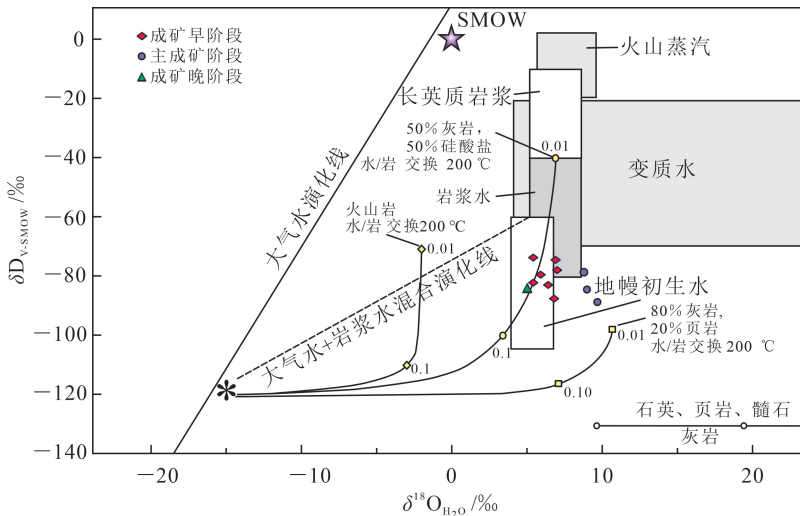
在氢-氧同位素图解(图 7)中,成矿各阶段 δD_{V-SMOW} 、 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 整体落入大气降水与岩浆水的混合区域;但是,主成矿阶段的流体偏向 80% 灰岩+20% 页岩在 200 °C 的演化线,表明该阶段流体发生了岩浆流体与围岩流体的相互作用。

4.2 硫-铅同位素

测试样品为黄铁矿,S 同位素采用仪器设备为 253plus、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口;采用 IAEA-S3、GBW04414 和 GBW04415

三种标准物质,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$,测试结果见表 3。Pb 同位素测试仪器为 Neptune plus 型 MC-ICP-MS,Pb 同位素仪器分馏校正采用指数方程,以 $^{203}Tl/^{205}Tl=2.3889$ 进行校正,测试结果见表 4。

S 同位素特征 从表 3 可知,金石英脉中黄铁矿的硫同位素均表现为负值,组成 $\delta^{34}S$ 值变化不大,范围在 -8.25‰~-2.00‰ 之间。 $\delta^{34}S$ 值没有明显的塔式效应,硫来源与典型幔源硫的变化范围窄不同,但与地层硫为负值、还原硫特征相似(图 8), $\delta^{34}S$ 值变化情况显示出硫主要来源于地层和岩浆岩,热水溶液主要来源于岩浆但具有大气降水和地下水混合的特征,暗示成矿过程经历了低温效应或地层有机质的作用发生还原作用^[22]。



据文献[14]修编。

图 7 二道甸子金矿床氢-氧同位素图解

Fig.7 δD_{V-SMOW} vs $\delta^{18}O_{H_2O}$ plot of ore-forming fluid in Erdaodianzi gold deposit

表 3 二道甸子金矿床中黄铁矿硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotopic composition of pyrite in Erdaodianzi gold deposit

样品号	采样位置	$\delta^{34}S/\text{‰}$	样品号	采样位置	$\delta^{34}S/\text{‰}$
21ED-4	南山四中段	-6.73	21EDDZ-1	南山五中段	-2.69
21ED-5	南山四中段	-5.51	ZSC-2	外围铈金矿	-8.03
21ED-6	南山四中段	-2.00	ZSC-1	外围铈金矿	-8.25
21ED-7	南山五中段	-3.31	DTDZ-2	外围铈金矿	-5.41
21ED-8	南山五中段	-7.89	DTDZ-1	外围铈金矿	-5.34
21ED-9	北山四中段	-4.23	21DTDZ-1	外围铈金矿	-3.86
21ED-10	南山四中段	-6.07	21DTDZ-2	外围铈金矿	-4.21

表 4 二道甸子金矿床中硫化物铅同位素组成

Table 4 Lead isotope composition of sulfide in Erdaodianzi gold deposit

序号	测试矿物	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω	Th/U	数据来源
1	黄铁矿	18.364 9	15.582 7	38.250 5	9.43	35.84	3.68	本文
2	黄铁矿	18.379 5	15.580 9	38.263 6	9.43	35.80	3.67	
3	黄铁矿	18.489 8	15.608 1	38.373 0	9.47	35.91	3.67	
4	方铅矿	18.357	15.542	38.141	9.36	35.07	3.63	文献[1]
5	方铅矿	18.414	15.623	38.371	9.51	36.44	3.71	
6	方铅矿	18.200	15.450	38.350	9.19	35.90	3.78	
7	方铅矿	18.134	15.581	37.875	9.46	35.51	3.63	
8	辉锑矿	16.884	15.456	36.660	9.42	36.2	3.72	
9	辉锑矿	17.608	15.593	38.366	9.56	40.98	4.15	
10	辉锑矿	17.142	15.574	37.733	9.61	40.99	4.13	
11	磁黄铁矿	16.721	15.572	37.532	9.72	43.16	4.30	
12	磁黄铁矿	17.040	15.340	36.488	9.13	33.30	3.53	

注： $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ； $\omega = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 。

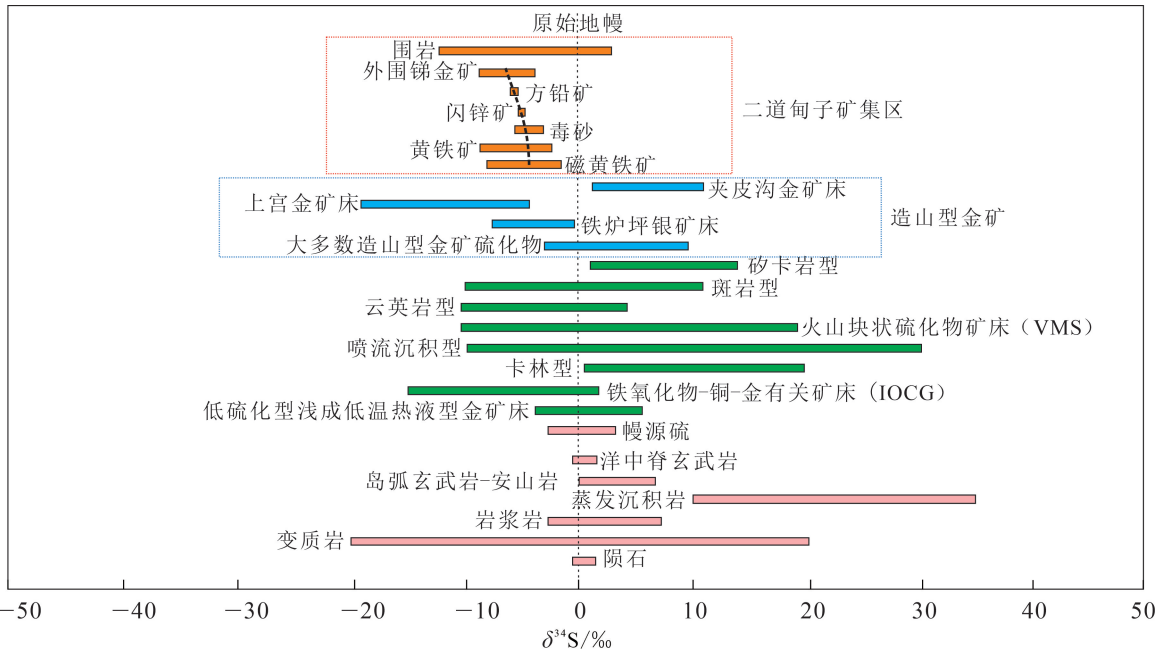


图 8 二道甸子金矿床与重要地质体(矿床类型)S 同位素对比

Fig.8 Sulfur isotope comparison between Erdaodianzi gold deposit and important geological bodies (deposit types)

Pb 同位素特征 从本次试验结果和前人^[1]对二道甸子金矿床含金石英脉中的方铅矿、辉锑矿及磁黄铁矿等研究可知:黄铁矿²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.364 9~18.489 8, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.580 9~15.608 1, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.250 5~38.373 0; 方铅矿²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.134~18.414, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.450~15.623, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 37.875~38.371; 矿体外围花岗岩闪长岩中辉锑矿²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 16.884~17.608, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.456~15.593, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 36.660~38.366; 2 件蚀变岩中的层纹磁黄铁矿

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 16.721 和 17.040, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.340 和 15.572, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 36.488 和 37.532; 它们在铅同位素图解(图 9a)上的成分点分散在造山演化线和造山演化线与下地壳之间(图 9b)。

5 锆石 U-Pb 同位素定年

实验样品取自矿区中与成矿密切的燕山期黑云母花岗闪长岩, 样品分离、处理及实验测试在中国冶金地质总局山东局测试中心实验室完成。实验主检设备为 iCAPQ 电感耦合等离子体质谱仪、GeoLasPro 193 nm ArF 激光剥蚀系统, 利用标准锆石 91500(同位素稀释-热电离质谱法定年结果 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}=1063.35\text{ Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=1062.45\text{ Ma}$) 进行同位素比值校正, 数据处理采用 ICPMSDATA CAL 程序, 图件制作采用 Isoplot3.0 程序完成^[23]。实验结果表明: 被测锆石 CL 图像呈现自形一半自形柱状结构, 长宽比 2 : 1~4 : 1, 振荡环带发育(图 10a), Th/U 值范围多数在 0.41~0.61 之间(表 5), 平均值为 0.49, 为岩浆成因属性^[24]。24 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 198.4~185.2 Ma(表 5), 加权平均年龄为 $(192.7 \pm 1.6)\text{ Ma}$ ($n=24, \text{MSWD}=1.8$)(图 10a, b)。

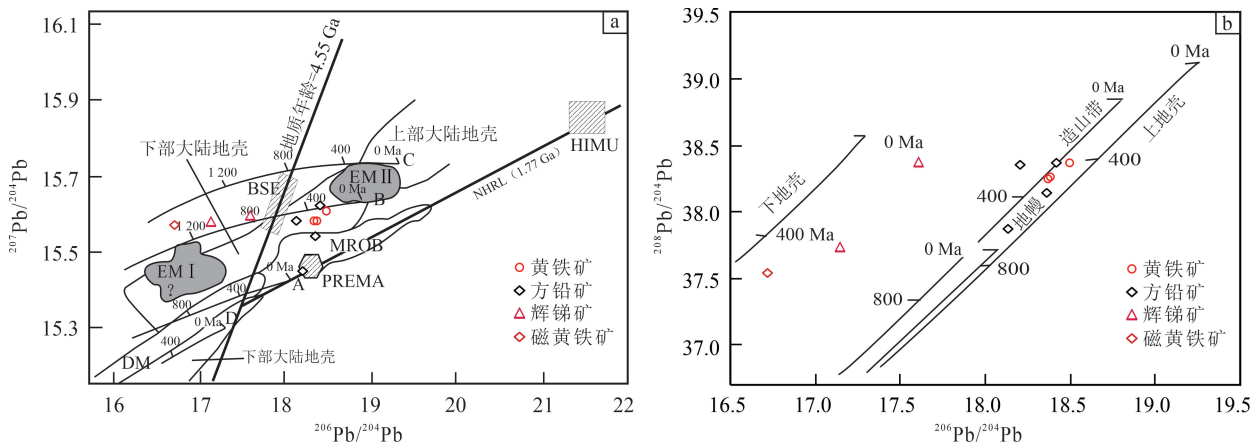
6 讨论

6.1 成矿流体起源与演化

如前文所述, 长期以来有关该矿床成因存在较

大争议^[1-7]。本次研究表明: 该矿床矿化类型为毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和自然金等, 围岩蚀变主要是石英、绢云母、绿泥石、方解石等, 成矿过程至少经历早阶段的无矿石英-黑云母阶段、主成矿阶段的黄铁矿-石英阶段和石英-多金属硫化物阶段、晚阶段的石英-方解石阶段; 成矿流体为中温、中低盐度 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 三组分为主的流体体系, 成矿深度接近 1.4 km; 氢-氧同位素揭示成矿流体整体为以岩浆水为主, 少量大气降水残余混合, 同时主成矿阶段具有偏向 80% 灰岩+20% 页岩在 200 °C 的演化线, 表明主阶段的成矿流体与围岩流体发生了水岩交换相互作用(图 7)。因此, 该矿床应为中温岩浆热液金矿床^[25], 不大可能是浅成热液金矿床^[26]。其成矿流体来自深部中深成地位的岩浆, 流体演化受到大气水/地下水混入, 并在主成矿阶段和围岩发生强烈的水岩交换。

在硫同位素方面, 因矿石矿物中目前尚未见到重晶石等硫酸盐矿物, 故本次和前人^[27]测得的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 可近似代表成矿流体中总硫同位素值, 其数值能够有效示踪其成矿物质来源。从本次获得黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}(-8.25\text{‰} \sim -2.00\text{‰})$ 和前人获得的磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}(-7.8\text{‰} \sim -1.2\text{‰})$ 、毒砂 $\delta^{34}\text{S}(-5.2\text{‰} \sim -2.8\text{‰})$ 、闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}(-4.7\text{‰})$ 、方铅矿 $\delta^{34}\text{S}(-5.3\text{‰})$ 以及矿区围岩 $\delta^{34}\text{S}(-12.0\text{‰} \sim 3.2\text{‰})$ 来看, 矿石矿物均为相对大的负值, 变化在 $-8.25\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$ (表 3 和图 8), 指示成矿流体演化为相对氧



EM I. I 型富集地幔; EM II. II 型富集地幔; DM. 地幔; BSE. 全硅酸盐地球; MORB. 洋中脊玄武岩; PREMA. 流行地幔; HIMU. 高 U/Pb 地幔; NHRL. 北半球参考线; A. 地幔演化线; B. 造山带演化线; C. 上地壳演化线; D. 下地壳演化线。底图据文献^[22]。

图 9 二道甸子金矿床铅同位素图解

Fig.9 Lead isotope histogram of Erdaodianzi gold deposit

表 5 二道甸子金矿区黑云母花岗岩长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据表
Table 5 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons of biotite granodiorite in Erdaodianzi gold mining district

样品号	$\tau_{\text{eB}}/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma			谐一度/%				
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ		
EDDZ-1	26.04	314.3	716.0	0.44	0.048 9	0.001 4	0.207 7	0.006 1	0.030 7	0.000 4	142.7	68.5	191.6	5.2	194.8	2.7	98
EDDZ-2	18.83	316.2	498.1	0.63	0.049 8	0.001 6	0.210 0	0.006 3	0.030 0	0.000 4	187.1	74.1	193.6	5.3	190.3	2.6	98
EDDZ-3	27.49	367.0	755.8	0.49	0.050 2	0.001 3	0.211 8	0.005 6	0.030 5	0.000 3	205.6	61.1	195.1	4.7	193.7	2.1	99
EDDZ-5	5.37	51.5	149.4	0.34	0.055 5	0.003 0	0.234 4	0.011 3	0.031 2	0.000 8	435.2	120.4	213.8	9.3	198.2	5.2	92
EDDZ-6	8.50	83.5	236.2	0.35	0.047 3	0.002 4	0.201 3	0.009 2	0.031 2	0.000 5	64.9	124.1	186.2	7.8	198.4	2.8	93
EDDZ-7	17.77	250.1	481.8	0.52	0.050 9	0.001 5	0.216 6	0.006 7	0.030 7	0.000 4	239.0	68.5	199.1	5.6	194.9	2.5	97
EDDZ-8	20.59	264.4	566.3	0.47	0.050 0	0.001 7	0.209 7	0.006 4	0.030 6	0.000 4	194.5	105.5	193.3	5.4	194.5	2.6	99
EDDZ-9	20.89	270.2	585.9	0.46	0.050 5	0.001 6	0.213 0	0.006 2	0.029 7	0.000 4	220.4	70.4	196.1	5.2	189.0	2.5	96
EDDZ-10	17.09	213.9	484.4	0.44	0.049 2	0.001 8	0.214 0	0.006 9	0.030 1	0.000 4	166.8	85.2	196.9	5.8	191.3	2.6	97
EDDZ-11	10.94	60.4	336.0	0.18	0.051 8	0.002 1	0.210 2	0.009 4	0.029 1	0.000 5	276.0	90.7	193.7	7.9	185.2	3.1	95
EDDZ-12	16.56	235.5	461.2	0.51	0.052 0	0.001 6	0.215 3	0.006 6	0.030 0	0.000 4	283.4	70.4	198.0	5.5	190.6	2.5	96
EDDZ-13	8.30	105.6	234.9	0.45	0.051 0	0.002 5	0.205 5	0.009 2	0.029 8	0.000 5	242.7	114.8	189.8	7.7	189.2	3.3	99
EDDZ-14	9.74	97.1	276.9	0.35	0.051 1	0.002 1	0.213 9	0.009 1	0.030 4	0.000 5	255.6	96.3	196.9	7.6	192.9	2.9	97
EDDZ-15	19.24	275.1	527.1	0.52	0.046 8	0.001 6	0.194 2	0.006 1	0.030 1	0.000 5	42.7	77.8	180.2	5.2	191.4	2.9	93
EDDZ-16	24.03	591.7	583.9	1.01	0.051 2	0.001 8	0.204 7	0.007 2	0.029 2	0.000 5	250.1	83.3	189.1	6.1	185.4	3.1	97
EDDZ-17	9.46	94.7	264.5	0.36	0.053 8	0.002 9	0.230 0	0.012 2	0.031 2	0.000 7	361.2	122.2	210.2	10.1	198.3	4.2	94
EDDZ-18	9.92	167.0	265.1	0.63	0.053 6	0.002 9	0.223 9	0.011 7	0.030 5	0.000 6	353.8	119.4	205.1	9.7	193.4	3.6	94
EDDZ-19	15.92	191.1	441.7	0.43	0.050 6	0.002 0	0.209 4	0.008 1	0.030 1	0.000 5	220.4	99.1	193.0	6.8	191.3	3.0	99
EDDZ-20	12.01	196.8	322.6	0.61	0.048 0	0.001 8	0.197 9	0.007 3	0.029 9	0.000 4	98.2	90.7	183.3	6.2	189.8	2.8	96
EDDZ-21	18.79	249.7	529.6	0.47	0.050 8	0.001 8	0.208 2	0.007 1	0.029 7	0.000 4	231.6	81.5	192.0	6.0	188.9	2.7	98
EDDZ-22	13.74	174.8	374.2	0.47	0.050 0	0.001 9	0.214 8	0.008 3	0.031 1	0.000 5	194.5	87.0	197.6	7.0	197.5	2.9	99
EDDZ-23	12.66	143.6	352.5	0.41	0.050 8	0.002 2	0.213 8	0.009 0	0.030 8	0.000 5	231.6	100.0	196.8	7.5	195.4	3.1	99
EDDZ-24	12.38	197.0	321.0	0.61	0.050 8	0.001 7	0.219 4	0.007 6	0.031 3	0.000 4	235.3	77.8	201.4	6.3	198.4	2.8	98
EDDZ-25	21.95	306.9	588.5	0.52	0.048 0	0.001 4	0.206 1	0.006 0	0.031 2	0.000 5	98.2	65.7	190.3	5.1	198.2	2.9	95

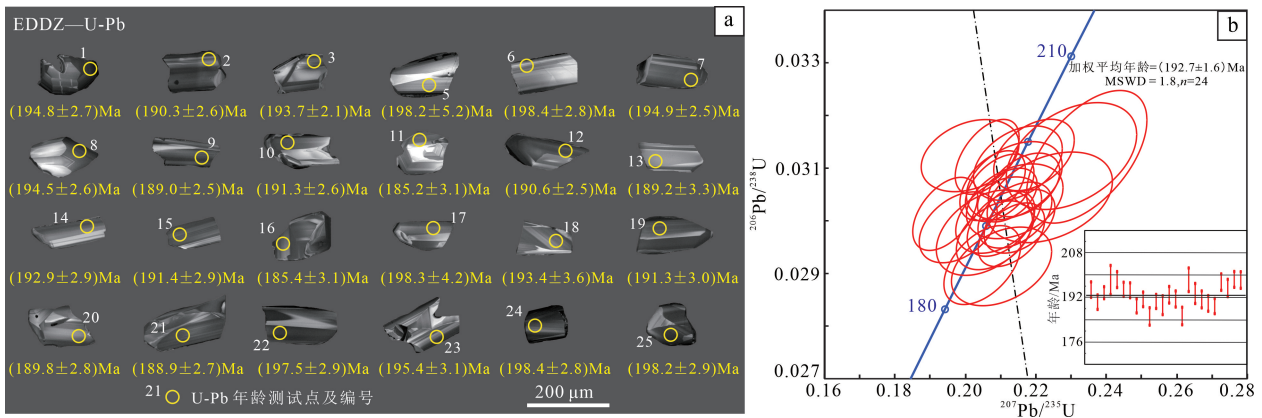


图 10 矿区中黑云母花岗闪长岩锆石阴极发光图像 (a) 与锆石 U - Pb 年龄谐和图 (b)

Fig.10 Zircon cathodoluminescence image (a) and zircon U - Pb age harmony diagram (b) of granodiorite in the mining district

化路径^[28];结合矿石矿物的生成顺序,即从高温到低温由磁黄铁矿→黄铁矿→毒砂→闪锌矿→方铅矿结晶顺序,平衡条件下形成的含硫矿物遵循从大到小为硫酸盐、辉钼矿、黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、辉铜矿、辉铋矿、辉铊矿的规律^[29]。从图 8 可知,该矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的整体趋势从大到小为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,主成矿带黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值高于外围碲金矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,说明成矿早阶段成矿流体与围岩发生水岩交换非平衡过程,主成矿阶段处于相对平衡状态;其高值接近球粒陨石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,并与整体相应的中高温岩浆热液矿床具有相似硫同位素特征,进一步说明初始成矿流体来自深部中深成就位的岩浆,随温压降低,其演化过程经历交替的非平衡与准平衡水岩交换过程,并有不同程度围岩介质影响。

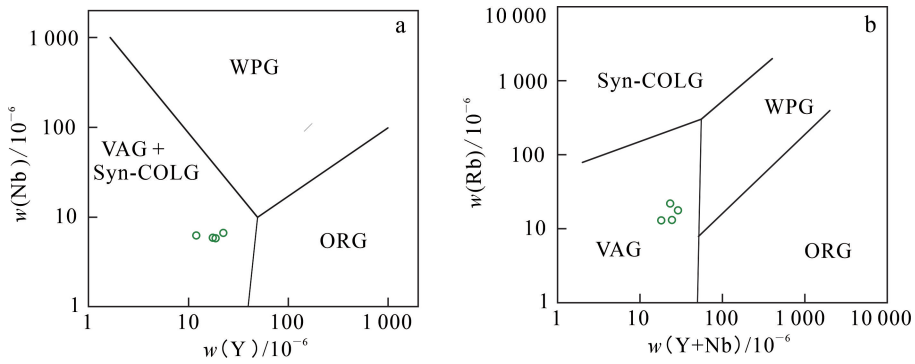
铅同位素特征揭示,大多数样品铅同位素 $\mu < 9.58$,说明铅来源于下地壳或上地幔;少数样品铅同位素 $\mu > 9.58$,则反映铅来源于上地壳(图 9)。在铅同位素源区环境判别图解(图 9)中,黄铁矿铅同位素投点均落在造山带演化曲线附近,方铅矿铅同位素投在造山带与地幔演化曲线延伸处;近矿蚀变岩(前人多以“围岩”表述)中的磁黄铁矿及外围碲金矿中辉铋矿的铅同位素投点分散在造山带演化线与下地壳之间;表明后者的成矿流体明显受到围岩物质混染,成矿体系的铅同位素为造山带环境或壳幔混生源的属性,即成矿物质主要来自大陆下地壳(图 9a)。

6.2 成矿地质背景

矿床地质研究表明,二道甸子金矿床成矿作用

晚于赋矿围岩黑云斜长片麻岩及二云石英片岩,同时矿区被大面积早侏罗世花岗闪长岩所包围;前人^[30]获得矿区外围二云石英片岩中黑云母、白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄分别为(223.6±0.8)和(229.2±4.6)Ma,本次研究获得二道甸子金矿床围岩黑云母花岗闪长岩锆石 U - Pb 年龄为(192.7±1.6)Ma,两者限定其成矿时代小于 190 Ma。鉴于本次研究确立该矿床为中温岩浆热液金矿床,且近期获得毗邻夹皮沟金矿带的下戏台金矿床中黄铁矿+黄铜矿+方铅矿 Rb - Sr 等时线年龄为(175.8±4.6)Ma^[18],八家子金矿床中碱长花岗细晶岩的锆石 U - Pb 年龄为(186±2)Ma^[31],新安屯铜金矿床中辉钼矿 Re - Os 同位素年龄为(180.5±3.9)Ma^[32],冰湖沟金矿床主阶段黄铁矿 Rb - Sr 等时线年龄为(176.4±2.2)Ma^[33],间接暗示中侏罗世早阶段为区域岩浆热液型金矿的主要成矿阶段,二道甸子金矿床成矿亦应在此阶段;而成矿正值古太平洋板块向欧亚大陆俯冲陆缘碰撞造山环境。

根据矿区黑云母花岗闪长岩地球化学数据进行形成环境分析,在 $w(\text{Nb}) - w(\text{Y})$ 、 $w(\text{Rb}) - w(\text{Y} + \text{Nb})$ 图解(图 11a、b)中,成分点(4 件样品)均落入了火山弧/火山弧+同碰撞区域。鉴于二道甸子金矿床矿体为石英脉型,容矿构造为张扭性断裂,其形成应是古太平洋板块向欧亚大陆俯冲陆缘碰撞造山与伸展转换过程^[34],即:成矿作用发生在中侏罗世早阶段,为古太平洋板块向欧亚大陆俯冲控制下的挤压-转换岩浆流体成矿过程^[35-36],成矿与深成岩浆作用有关。



Syn-COLG.同碰撞花岗岩;WPG.板内花岗岩;VAG.火山弧花岗岩;ORG.洋中脊花岗岩。

图 11 矿区黑云母花岗闪长岩微量元素 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ (a) 和 $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$ (b) 构造环境判别图

Fig.11 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ diagram (a) and $w(\text{Rb})-w(\text{Y}+\text{Nb})$ diagram (b) and of granodiorite in the mining district

7 结论

1) 二道甸子金矿床为中温岩浆热液金矿床,成矿过程经历早阶段的无矿石英-黑云母阶段、主成矿阶段的黄铁矿-石英阶段和石英-多金属硫化物阶段、晚阶段的石英-方解石阶段,成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 三相体系。

2) 流体包裹体氢-氧同位素、硫-铅同位素特征揭示,成矿物质主要来自大陆下地壳,成矿流体为来自深成岩浆的相对氧化性流体,在早阶段和晚阶段流体表现岩浆水为主,少量大气水/地下水,主成矿阶段成矿流体与围岩发生一定的水岩交换,整个成矿过程呈现明显的非平衡与准平衡交替作用。

3) 将矿区成矿密切的黑云母花岗闪长岩成岩年龄(192.7 ± 1.6 Ma)与赋矿围岩、区域相关成矿年龄相联系,认为二道甸子金矿床应形成在中侏罗世早阶段,形成于古太平洋板块俯冲作用下的挤压-转换的构造环境。

参考文献 (References):

[1] 吴尚全.吉林省二道甸子金矿床同位素地质学及成矿物质来源研究[J].黄金,1991,16(8):5-9.
Wu Shangquan. Study on Osotopic Geology and Source of Ore-Forming Materials of Erdaodianzi Gold Deposit, Jilin Province, China[J]. Gold, 1991,16(8): 5-9.

[2] 杨言辰,刘鹏鸷,吕建生.吉林二道甸子金矿成矿控制条件分析及靶区评价[J].长春地质学院学报,1995,25(1):40-46.
Yang Yanchen, Liu Peng'e, Lü Jiansheng. Analysis of Metallogenesis Controlling Factor and Evaluation of

Erdaodianzi Gold Deposit, Jilin Province, China [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1995, 25(1):40-46.

[3] 张文启,吴尚全.吉林省二道甸子金矿床同位素地质学及矿床成因探讨[J].吉林地质,1996,15(2):31-35.
Zhang Wenqi, Wu Shangquan. Isotopic Geology of Erdaodianzi Gold Deposit in Jilin Province and Its Ore Genesis[J]. Jilin Geology, 1996,15(2):31-35.

[4] 王义强,吕建生,杨言辰,等.吉林省二道甸子金矿控矿构造演化特征及控矿作用[J].地质力学学报,1995,1(3):82-88.
Wang Yiqiang, Lü Jiansheng, Yang Yanchen, et al. Evolution of the Ore Controlling Structures Erdaodianzi Gold Deposit in Jilin Province[J]. Journal of Geomechanics, 1995,1(3):82-88.

[5] 吕建生,王义强.吉林省二道甸子帚状构造的确定及其对金矿的控制作用[J].矿床地质,1995,13(增刊1):35-37.
Lü Jiansheng, Wang Yiqiang. Determination of Broom Structure and Its Control on Erdaodianzi Gold Deposit in Jilin Province[J]. Deposit Geology, 1995,13(Sup. 1):35-37.

[6] 鲍继文,孟继伟,蔡远江,等.关于二道甸子金矿找矿的探讨[J].吉林地质,2007,26(3):6-9.
Bao Jiwen, Meng Jiwei, Qi Yuanjiang, et al. Discussion on the Erdaodianzi Prospecting Gold Deposit[J]. Jilin Geology, 2007,26(3):6-9.

[7] 孙英华,辛永辉,荆振刚,等.吉林省二道甸子金矿区主矿带地质特征、成因探讨及研究意义[J].价值工程,2016,35(6):101-104.
Sun Yinghua, Xin Yonghui, Jing Zhengang, et al. The Geological Characteristics, Causes Exploration and Research Significance of the Major Ore Belt in Jilin

- Erdaodianzi Gold Deposit[J]. Value Engineering, 2016, 35(6):101-104.
- [8] 韩作振,钟文建,高丽华,等.吉林桦甸地区东南盆组下段变质砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J].中国科技论文, 2016,11(9):995-1004,1026.
- Han Zuozhen, Zhong Wenjian, Gao Lihua, et al. U-Pb Dating of Detrital Zircons of Metamorphic Sandstone from Dongnancha Formation in the Huadian Area of Jilin Province[J]. China Science Paper, 2016, 11(9):995-1004,1026.
- [9] 徐仲元.浅变质岩石中的叠加韧性剪切带:以吉林桦甸二道甸子地区为例[J].长春地质学院学报, 1993,23(4):380-385,399.
- Xu Zhongyuan. Characteristics of Superposed Ductile Shear Zones in Low-Grade Metamorphic Rocks: A Case Study on the Erdaodianzi Region Huadian, Jilin [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1993,23(4):380-385,399.
- [10] 卢焕章,范洪瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学出版社, 2004:219-240.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press,2004:219-240.
- [11] 刘斌.中高盐度 NaCl-H₂O 包裹体的密度式和等容式及其应用[J].地质论评, 2001,47(6):617-622.
- Liu Bin. Density and Isochoric Formulae for NaCl-H₂O Inclusion with Medium and High Salinity and Their Applications[J]. Geological Review, 2001, 47(6): 617-622.
- [12] 孙丰月,金巍,李碧乐.关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J].长春科技大学学报, 2000,30(增刊1): 27-30.
- Sun Fengyue, Jin Wei, Li Bile. Thinking of the Mineralization Depth in Hydrothermal Vein Gold Deposits[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000,30(Sup.1): 27-30.
- [13] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen Isotope Exchange Between Quartz and Water [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.
- [14] 张理刚.稳定同位素在地质科学中的应用[M].西安:陕西科学技术出版社, 1985:1-200.
- Zhang Ligang. Applications of Stable Isotope at the Earth and Science[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technic Publishing House, 1985:1-200.
- [15] 陈衍景,隋颖慧, Franco Pirajno. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例:东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学[J].岩石学报, 2003,19(3):551-568.
- Chen Yanjing, Sui Yinghui, Franco Pirajno. Exclusive Evidences for CMF Model and a Case of Orogenic Silver Deposits: Isotope Geochemistry of the Tieluping Silver Deposit, East Qinling Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003,19(3):551-568.
- [16] 陈衍景,李晶, Franco Pirajno,等.东秦岭上宫金矿流体成矿作用:矿床地质和包裹体研究[J].矿物岩石, 2004, 24(3):1-12.
- Chen Yanjing, Li Jing, Franco Pirajno, et al. Hydrothermal Metallogeny of the Shangong Gold Deposit, East Qingling: Studies on Ore Geology and Fluid Inclusion Geochemistry [J]. Mineralogy and Petrology, 2004,24(3):1-12.
- [17] 汪在聪,刘建明,刘红涛,等.稳定同位素热液来源示踪的复杂性和多解性评述:以造山型金矿为例[J].岩石矿物学杂志, 2010,29(5):577-580.
- Wang Zaicong, Liu Jianming, Liu Hongtao, et al. Complexity and Uncertainty of Tracing Fluids Sources by Means of H-O, C, S, N Isotope Systems: A Case Study of Orogenic Lode Gold Deposits[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010,29(5):577-580.
- [18] 张笑天.中国东北部陆缘夹皮沟矿田金矿床地质、地球化学特征与成矿作用研究[D].长春:吉林大学, 2018.
- Zhang Xiaotian. Research on Geology, Geochemistry and Metallogenesis of the Gold Deposits of the Jiapigou Ore Field in the Continental Margin of Northeast China [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [19] 贾三石,冷文芳,王恩德,等.合仁坪金矿 H-O-S-Pb 同位素地球化学特征及其成因机制[J].东北大学学报(自然科学版), 2019,40(2):256-260,272.
- Jia Sanshi, Leng Wenfang, Wang Ende, et al. H-O-S-Pb Isotopic Geochemical Characteristics and Formation Mechanism of the Herenping Gold Deposit [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(2):256-260,272.
- [20] 李振焕,李文昌,刘学龙,等.滇西保山地块金厂河铁铜铅锌多金属矿床成矿机制:基于流体包裹体和硫、铅同位素证据[J].矿床地质, 2020,39(6):995-1014.
- Li Zhenhuan, Li Wenchang, Liu Xuelong, et al. Metallogenic Mechanism of Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit in Baoshan Block, Western Yunnan: Evidence from Fluid Inclusions and S-Pb Isotope[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(6): 995-1014.

- [21] 赵忠海,陈俊,乔锴,等.小兴安岭西北部永新金矿床成矿流体来源与矿床成因:流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素证据[J]. 矿床地质, 2021, 40(2): 221-240.
Zhao Zhonghai, Chen Jun, Qiao Kai, et al. Ore-Fluid Sources and Genesis of Yongxin Gold Deposit in Northwestern Xiao Hinggan Mountains: Constraint from Fluid Inclusions and H-O-S-Pb Isotopes[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(2): 221-240.
- [22] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: The Model [J]. Tectonophysics, 1981, 75(1/2): 135-162.
- [23] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [24] 翟伟,李兆麟,孙晓明,等.粤西河台金矿锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J].地质论评, 2006, 52(5): 690-698.
Zhai Wei, Li Zhaolin, Sun Xiaoming, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Hetai Gold Deposit in Western Guangdong, China and Geological Implications[J]. Geological Review, 2006, 52(5): 690-698.
- [25] Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits[J]. Geological Magazine, 1998, 135(6): 819-842.
- [26] 孙景贵,刘阳,徐智恺,等.试论中国东北部陆缘晚中生代浅成热液大规模成矿与深部地质过程对成矿制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(3): 651-692.
Sun Jinggui, Liu Yang, Xu Zhikai, et al. Large-Scale Epithermal Mineralization of Late Mesozoic and the Constraints of Deep Geological Processes on Mineralization in the Continental Margin of NE China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(3): 651-692.
- [27] Ohmoto H. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5): 551-578.
- [28] Rye R O. The Evolution of Mamatic Fluids in the Epithermal Environment: The Stable Isotope Perspective[J]. Economic Geology, 1993, 88: 733-753.
- [29] 申谓洲.同位素地球化学[M].北京:原子能出版社, 1997: 1-257.
Shen Weizhou. Tuto Rial of Iso Topic Geology[M]. Beijing : Atomic Energy Publishing House, 1997: 1-257.
- [30] 郗爱华,任洪茂,张宝福,等.吉林中部呼兰群同位素年代学及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(1): 15-18.
Xi Aihua, Ren Hongmao, Zhang Baofu, et al. Isotopic Chronology of the Hulan Group and Its Geological Significance in the Central Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(1): 15-18.
- [31] 冯洋洋.吉林省夹皮沟八家子矿床成因研究 [D].长春:吉林大学, 2017.
Feng Yangyang. A Study on the Genesis of Bajiazhi Gold Ore in Jiapiyou, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [32] 王存柱,高全,任龙,等.吉林省蛟河市新安屯钨钼矿流体包裹体、氢氧同位素及成矿时代研究[J].地质与勘探, 2019, 55(3): 673-684.
Wang Cunzhu, Gao Quan, Ren Long, et al. Fluid Inclusion, H-O Isotope and Metallogenic Epoch of the Xin' antun W-Mo Deposit in Jiaohe, Jilin Province[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(3): 673-684.
- [33] 韩吉龙.吉林省桦甸市溜河地区典型金矿床成因与成矿动力学背景 [D].长春:吉林大学, 2019.
Han Jilong. Metallogenesis and Geodynamic Setting of the Typical Gold Deposits in the Liuhe Area of the Huadian City, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [34] 许文良,王枫,裴福萍,等.中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火成岩组合时空变化的制约[J].岩石学报, 2013, 29(2): 339-353.
Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, et al. Mesozoic Tectonic Rectonic Regimes and Regional Ore-Forming Background in NE China: Constraints from Spatial and Temporal Variations of Mesozoic Volcanic Rock Associations [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 339-353.
- [35] 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.
- [36] 汪志刚.吉林东部中生代内生金属矿床成矿作用研究[D].长春:吉林大学, 2012.
Wang Zhigang. Study on Metallogenesis of Mesozoic Endogenetic Metal Deposits in the Eastern Part of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2012.