

俞炳,王永彬,曾庆栋等. 2024. 辽东地区王家崴子金矿古元古代金预富集矿化事件. 岩石学报,40(04): 1249 – 1263, doi: 10.18654/1000 – 0569/2024.04.12

辽东地区王家崴子金矿古元古代金预富集矿化事件^{*}

俞炳^{1,2,3} 王永彬⁴ 曾庆栋^{5,6**} 陈伟军⁷ 杨进辉^{3,6} 周伶俐⁸ 孙国涛⁹ 陈沛文⁹
YU Bing^{1,2,3}, WANG YongBin⁴, ZENG QingDong^{5,6**}, CHEN WeiJun⁷, YANG JinHui^{3,6}, ZHOU LingLi⁸, SUN GuoTao⁹ and CHEN PeiWen⁹

1. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

2. 自然资源部矿产勘查技术指导中心,北京 100037

3. 中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

4. 云南大学云南省地球系统科学重点实验室,昆明 650500

5. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室,北京 100029

6. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049

7. 中国冶金地质总局矿产资源研究院,北京 101300

8. 阿姆斯特丹自由大学地球科学系,阿姆斯特丹 1081HV

9. 贵州大学资源与环境工程学院,贵阳 550025
1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

2. Mineral Exploration Technical Guidance Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China

3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

5. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

6. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

7. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China

8. Department of Earth Sciences, VU Amsterdam, Amsterdam 1081HV, Netherlands

9. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2023-07-05 收稿, 2023-11-30 改回.

Yu B, Wang YB, Zeng QD, Chen WJ, Yang JH, Zhou LL, Sun GT and Chen PW. 2024. A Paleoproterozoic gold pre-enrichment mineralization event in the Wangjiawaizi gold deposit, Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1249 – 1263, doi: 10.18654/1000-0569/2024.04.12

Abstract The Wangjiawaizi gold deposit is a middle tonnage and quartz-vein type deposit in the Maoling gold district of Liaodong Peninsula, China. The orebody is hosted in the Gaixian Formation of Paleoproterozoic Liaohe Group, and is mainly controlled by a series of nearly parallel NW ductile shear zones in the mine area. In this study, we studied pyrite that is genetically closely related to gold mineralization, as well as sphalerite and galena for S-Pb isotopes and trace elements characteristics by using in-situ microanalytic techniques. LA-MC-ICP-MS in-situ S isotope analyses show that sulfides from the Wangjiawaizi gold deposit yielded $\delta^{34}\text{S}$ values of 8.2‰ ~ 11.5‰, which is significantly higher than that of magmatic sulfur, but overlaps with the range of $\delta^{34}\text{S}$ value of the Gaixian Formation, thus inferring that the sulfur in the ore-forming fluids is derived from the Gaixian Formation. The in-situ Pb isotope analyses by LA-MC-ICP-MS show that sulfides yielded $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 39.000 ~ 39.084, 15.691 ~ 15.707, and 18.623 ~ 18.664, respectively. They cluster near the upper crust evolution line and plot in the field of the Gaixian Formation,

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(42302079)、国家重点研发计划项目(2021YFC2901805、2016YFC0600108-03-1)、中国地质调查局项目(DD20230355、20230356)和国家留学基金委(201904910709)联合资助。
第一作者简介: 俞炳,男,1993年生,博士,工程师,主要从事找矿预测研究工作,E-mail: yubing15@mails.ucas.ac.cn
^{**} 通讯作者: 曾庆栋,男,1964年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事内生金属成矿作用及预测研究工作,E-mail: zengqingdong@mail.iggcas.ac.cn

indicating that the Pb was primarily derived from the upper crustal rock of the Gaixian Formation. LA-ICP-MS trace element analyses show that pyrite yielded low Co/Ni and Te/Au ratios, and is obviously enriched in Au, As, Ag, Cu, Pb and Zn, indicating a metamorphic-hydrothermal origin. In combination with previous research, we propose that there is an early stage of Paleoproterozoic gold pre-enrichment in this Maoling gold district, and that the subsequent Early Jurassic magmatic-hydrothermal activity extracted the pre-enriched ore-forming materials from the Gaixian Formation to account for most of the gold mineralization in the Wangjiawaizi deposit. The Gaixian Formation is a significant source bed for gold mineralization in the Liaodong Peninsula, which should be given full attention in future mineral exploration work.

Key words Wangjiawaizi gold deposit; Liaodong Peninsula; LA-(MC)ICP-MS; S-Pb isotopes; Trace elements

摘要 王家崴子金矿床位于辽东半岛猫岭金矿集区内,为一中型石英脉型金矿床。矿体产于古元古代辽河群盖县组地层中,主要受控于区内一系列近平行的NW向韧性剪切带。本文选择与金密切共生的黄铁矿、闪锌矿和方铅矿为研究对象,采用LA-(MC)ICP-MS原位微区分析技术,开展原位S-Pb同位素和微量元素特征研究。S同位素测试结果显示王家崴子金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为8.2‰~11.5‰,明显高于典型岩浆硫值范围,与盖县组地层硫范围重叠,推断可能主要来源于地层硫。王家崴子金矿床硫化物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为39.000~39.084、15.691~15.707和18.623~18.664,落在上地壳演化线附近且在盖县组地层范围内,表明上地壳地层围岩盖县组是王家崴子金矿床重要的Pb源。LA-ICP-MS微量元素分析显示黄铁矿具有低的Co/Ni和Te/Au比值,明显富集Au、As、Ag、Cu、Pb和Zn等元素,指示了其为沉积热液成因黄铁矿。综合前人有关盖县组地层及矿区岩浆岩研究结果,本文认为该地区可能存在着一期古元古代金预富集作用,而晚期的早侏罗世岩浆热液活动大量萃取了盖县组地层中早期预富集的成矿物质形成了王家崴子金矿。盖县组地层是辽东地区金成矿重要的矿源层,需在今后的找矿勘查工作中给予重视。

关键词 王家崴子金矿床;辽东半岛;LA-(MC)ICP-MS;S-Pb同位素;微量元素

中图法分类号 P597.2;P611;P618.51

辽东半岛位于华北克拉通东北部,东西分别以鸭绿江断裂带和郯庐断裂带为界,是我国重要的金矿产地。金矿床主要分布在青城子、五龙、猫岭等矿集区内(Yu *et al.*, 2018; 曾庆栋等, 2019; Zhang *et al.*, 2022a),累计已探明金资源量>500t。相比于具有相似地质特征和演化历史的胶东地区,辽东半岛的勘查深度和探明资源量均较小,深部资源成为我国地球科学研究的热点(朱日祥等, 2015; 曾庆栋等, 2019; 姚晓峰等, 2021; 俞炳, 2023)。众多地质工作者对辽东半岛金矿床进行了大量的研究,尤其是对主要分布于青城子和五龙矿集区内的众多金矿床开展了大量的控矿构造机制(肖世椰等, 2018; Liu *et al.*, 2020a; 于嫒等, 2021)、成岩成矿时代(刘军等, 2018a; Yu *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2022)、成矿流体和成矿物质来源(Yu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019)、金迁移沉淀和富集机制(Sun *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2023)、矿床成因(Yu *et al.*, 2018, 2020; Zhang *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020)、成矿潜力和找矿方向(俞炳等, 2020, 2021; 刘建民等, 2021; 张拴宏等, 2022; Zheng *et al.*, 2022)等方面研究工作,取得了一系列较为一致的成果。然而,对于猫岭金矿集区内的众多金矿床关注较少,往往聚焦于区内大型猫岭金矿床,研究程度也较弱,且主要存在着2种不同的观点。认识分歧在成矿物质来源方面主要有来源于辽河群盖县组(孙宝亮等, 2000, 2001; 喻钢等, 2005; 刘军等, 2018b)还是来源于深部成矿热液(Zhang *et al.*, 2017, 2022b);在成矿时代方面主要集中在古元古代(喻钢等, 2005; 刘军等, 2018b)还是早侏罗世(Zhang *et al.*, 2017, 2022b);在矿床成因方面主要为变质热液成因(王宏和国家辉, 1992; 孙宝亮等, 2000; 张朋等, 2013)还

是岩浆热液成因(余昌涛等, 1992; Zhang *et al.*, 2017, 2022b; 刘军等, 2018b)。由于这些关键地质问题长期以来均未得到有效约束,相比于青城子和五龙金矿集区内的金矿床最新研究进展,猫岭金矿集区内的金矿床研究认识明显滞后,这极大地限制了辽东半岛金矿床的当前理论研究水平及下一步找矿勘查工作部署。尤其是古元古代辽河群盖县组地层产出大量金矿(曾庆栋等, 2019; Feng *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2022; 俞炳, 2023),但盖县组对该地区金成矿起多大的作用仍有待深入研究。

王家崴子金矿床地处辽宁省盖州市卧龙泉镇金厂沟村,位于猫岭金矿集区内,是一处已探明的赋存于辽河群盖县组中的中型(>5t)石英脉型金矿床,矿体金平均品位达9.19g/t(冯啸宇等, 2009)。前人仅对王家崴子金矿床的矿床地质特征(冯啸宇等, 2009; 吴文彬等, 2022)、构造演化(于莉, 2018)、金赋存状态(冯啸宇等, 2009)、矿床成因及成矿模式(郝瑞霞, 1991; 郝瑞霞和彭省临, 1998, 1999; 孙宝亮等, 2001)和找矿方向(徐山等, 2012; 吴文彬等, 2022)等开展过初步研究。但对于王家崴子金矿床的金赋存状态、成矿物质来源和矿床成因等关键科学问题仍不清楚。

随着原位微区分析技术的快速发展,使得LA-ICP-MS单点和扫面微量元素分析以及LA-MC-ICP-MS原位S-Pb同位素分析技术(Large *et al.*, 2009; Koglin *et al.*, 2010; 范宏瑞等, 2018; 周伶俐等, 2019),在示踪成矿物质来源,厘定成矿流体性质,刻画精细成矿过程,以及约束矿床成因等方面显示出巨大优势。因此,本文以王家崴子金矿床为研究对象,立足详实的野外观察的基础上,对与金密切相关的硫化物开展LA-ICP-MS单点和扫面微量元素分析和LA-MC-ICP-

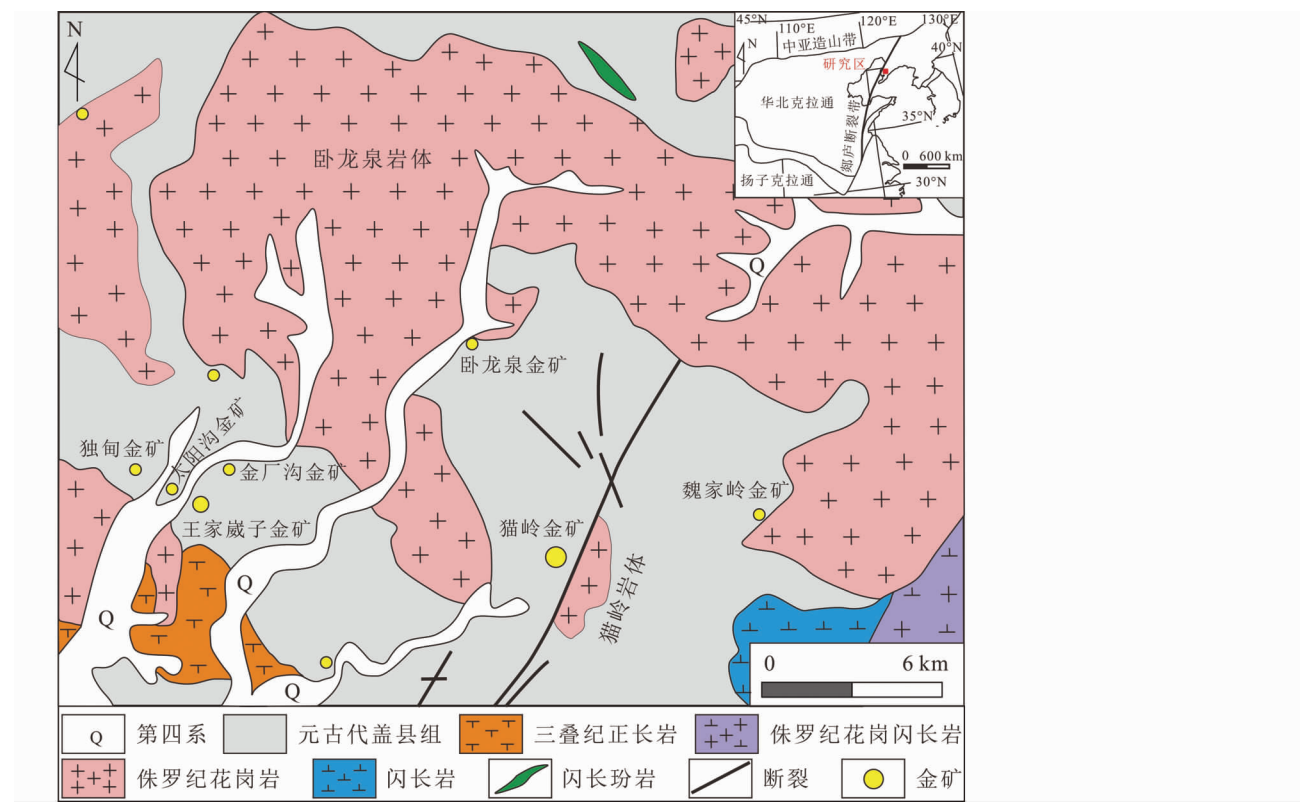


图 1 辽东半岛猫岭金矿集区地质简图(据 Zhang *et al.* , 2017 修改)
 Fig. 1 Geological sketch map of the Maoling gold district in the Liaodong Peninsula (modified after Zhang *et al.* , 2017)

MS 原位 S-Pb 同位素分析工作,查明金的赋存状态,探讨成矿物质的来源,剖析盖县组地层与金成矿的关系,进而尝试约束该矿床的成因类型,为猫岭金矿集区乃至辽东半岛下一步开展金矿成矿预测和找矿勘查提供理论基础。

1 区域地质背景

猫岭金矿集区位于辽东半岛的西南部(图 1),在大地构造位置上处于华北克拉通东北部。猫岭金矿集区内分布有大型猫岭金矿床、中型王家崴子金矿床以及众多小型金矿床或金矿点(图 1),共同构成了当前辽东半岛最为重要的 3 个金矿集区之一。

矿集区内出露地层主要为古元古代辽河群盖县组和第四系(图 1)。其中,盖县组是一套海相陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造,岩性具体可分为上下两段,一段为含十字石片岩类夹变质砂岩,二段为含绢云母片岩类夹变质砂岩。盖县组是猫岭金矿集区乃至辽东半岛最重要的赋矿地层(曾庆栋等, 2019; Sun *et al.* , 2020; 吴文彬等, 2022; Yu *et al.* , 2022)。

矿集区内岩浆活动十分发育,以中生代侵入岩为主。卧龙泉岩体在矿集区内广泛分布,呈岩基状侵入到盖县组地层中,面积约 90km²,岩性为黑云母二长花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为 ~194Ma(张朋等, 2015)。猫岭岩体仅在矿集区南部出

露,面积约 0.4km²,岩性为黑云母花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为 ~196Ma(Zhang *et al.* , 2017)。卧龙泉和猫岭岩体具有较为相似的主微量和稀土元素地球化学特征,一致的冷却结晶年龄,表明它们是在同一期岩浆事件中形成的(Zhang *et al.* , 2017)。此外,矿集区西南和东南区域还分别发育少量三叠纪正长岩、闪长岩和花岗闪长岩。各类脉岩仅在矿集区内零星出露,主要有花岗斑岩、闪长岩、闪长玢岩和煌斑岩脉等,这些脉岩主要呈 NNE 和 NW 向产出。

矿集区内断裂构造发育,主要由 NNE-NE 向、NWW-NW 向和近 NS 向断裂构成了完整的区域断裂构造格架。其中, NNE-NE 向断裂构造最为发育,倾向 NW 或 SE,倾角 60° ~ 85°,为区域主要的控矿和赋矿构造(吴文彬等, 2022)。

2 矿床地质

矿区内出露地层为古元古代辽河群盖县组和第四系(图 2)。盖县组地层在矿区内以一岩段为主,岩性主要为云母石英片岩,含少量黑云石英片岩、含十字石云母石英片岩、十字石二云母片岩、夕线二云片岩、黑云片岩夹大理岩等。该地层大体走向北西,倾向北东,产状为 25° ~ 35° ∠ 45° ~ 70°(吴文彬等, 2022)。第四系主要为腐殖土、黏土、砂土、砂砾土和砾石。其中,矿体主要赋存在盖县组一岩段的云母石英片岩中(孙宝亮等, 2000; 吴文彬等, 2022)。

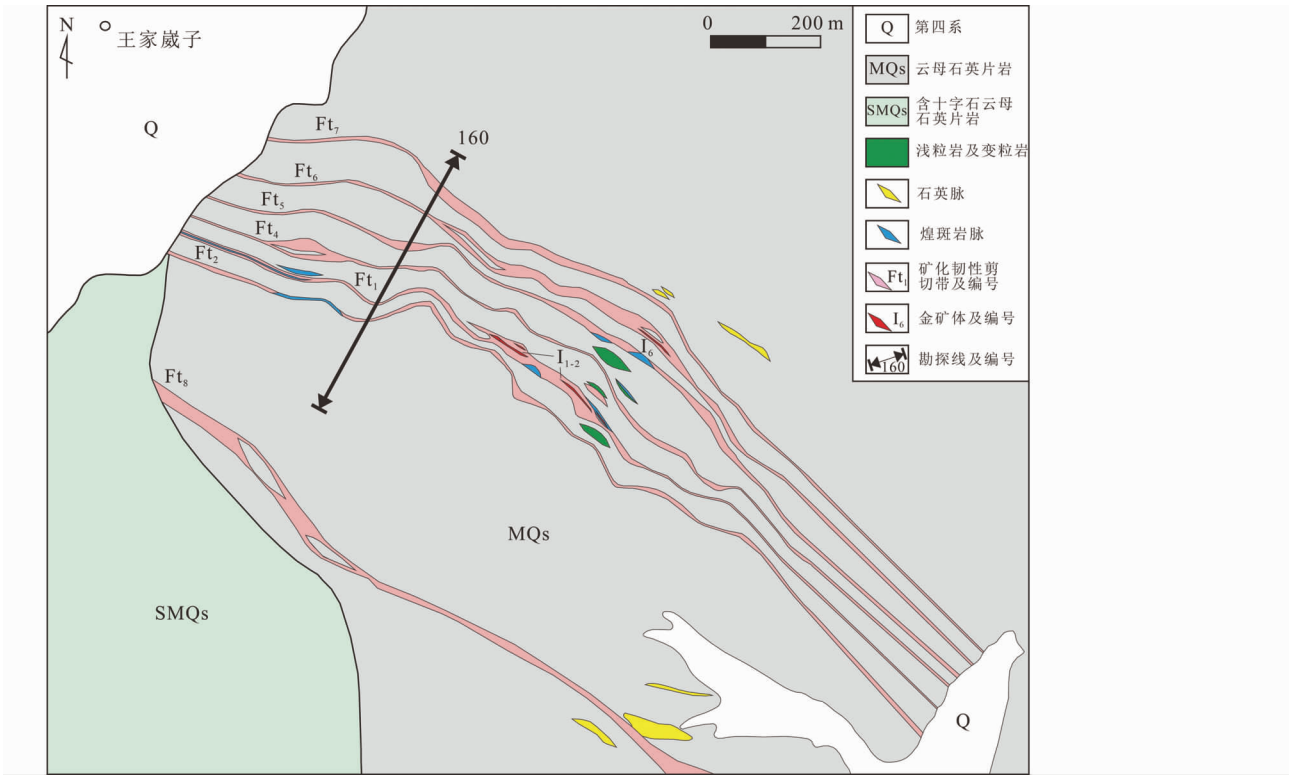


图2 王家崴子金矿床地质简图(据吴文彬等, 2022 修改)
Fig.2 Geological sketch map of the Wangjiawaizi gold deposit (modified after Wu *et al.* , 2022)

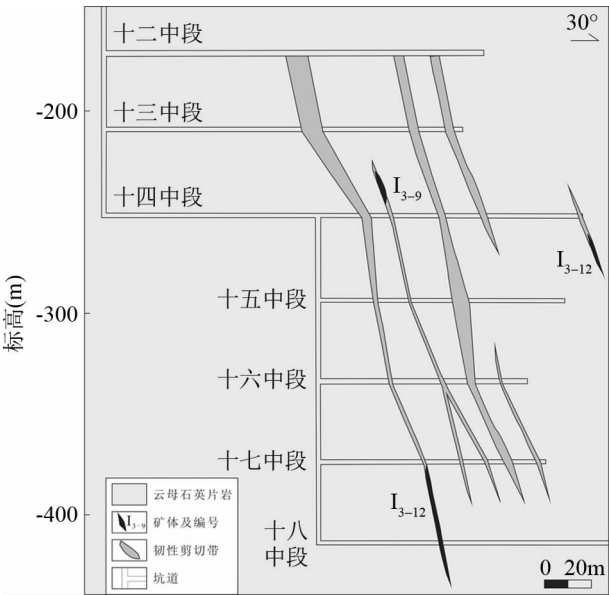


图3 王家崴子金矿 160 勘探线深部采矿巷道工程地质剖面图(据吴文彬等, 2022 修改)
Fig.3 Geological section of the exploration line 160 in the deep mining tunnel from the Wangjiawaizi gold deposit (modified after Wu *et al.* , 2022)

矿区内断裂主要为一系列近平行的 NW 向韧性剪切带(图 2),这些韧性剪切带长约 1500m,宽多在 800 ~ 5000m,贯

穿整个矿区,倾向 NE,倾角为 45° ~ 70°。含金石英矿脉主要赋存在该组 NW 向韧性剪切带中。

矿区内仅见少量煌斑岩(图 2)、闪长玢岩、细晶岩和石英斑岩脉等,在位于该矿床东北部 2.5km 处发育有早侏罗世卧龙泉岩体(图 1),该岩体可能与王家崴子金成矿密切相关(郝瑞霞和彭省临, 1998, 1999)。

金矿床主要由 I、II、III 号 3 条金矿带组成,各矿带在空间上以 300 ~ 350m 的距离近等距平行产出,各金矿带均有多条含金石英脉组成。金矿脉多呈脉状、薄脉状和扁豆状(图 2、图 3)。其中, I 号为主金矿带由 6 条赋存在该 NW 向韧性剪切带中的 I₁、I₂、I₃、I₄、I₅、I₆ 含金石英脉组成。I 号金矿带长约 1500m,宽为 200 ~ 400m,其中 I₃₋₁₀ 为当前主要矿体长 461m,倾向延深 287m,赋存标高为 -511 ~ -223m,倾向 NNE,倾角为 65° ~ 85°,矿体平均厚度为 0.89m,金平均品位 11.66g/t(吴文彬等, 2022)。

矿石类型以含金石英脉型为主(图 4a-c),含少量蚀变岩型(图 4d)。金属矿物以黄铁矿为主(图 4),次为方铅矿、闪锌矿、毒砂和黄铜矿,并含少量的磁黄铁矿、褐铁矿、辉铜矿、黝铜矿、银金矿和金银矿。脉石矿物以石英为主,次为绢云母、绿泥石、方解石和白云母,局部见少量的黑云母和电气石。金以可见金的形式存在(图 4g, h),以裂隙金为主,包体金和晶隙金少量。金矿物以银金矿为主,次为金银矿,金成色为 297 ~ 750(郝瑞霞等, 1998)。金矿物形态以各种粒状为主,占 47.2%,其次为树枝状(16.0%)、长粒状(15.1%)、

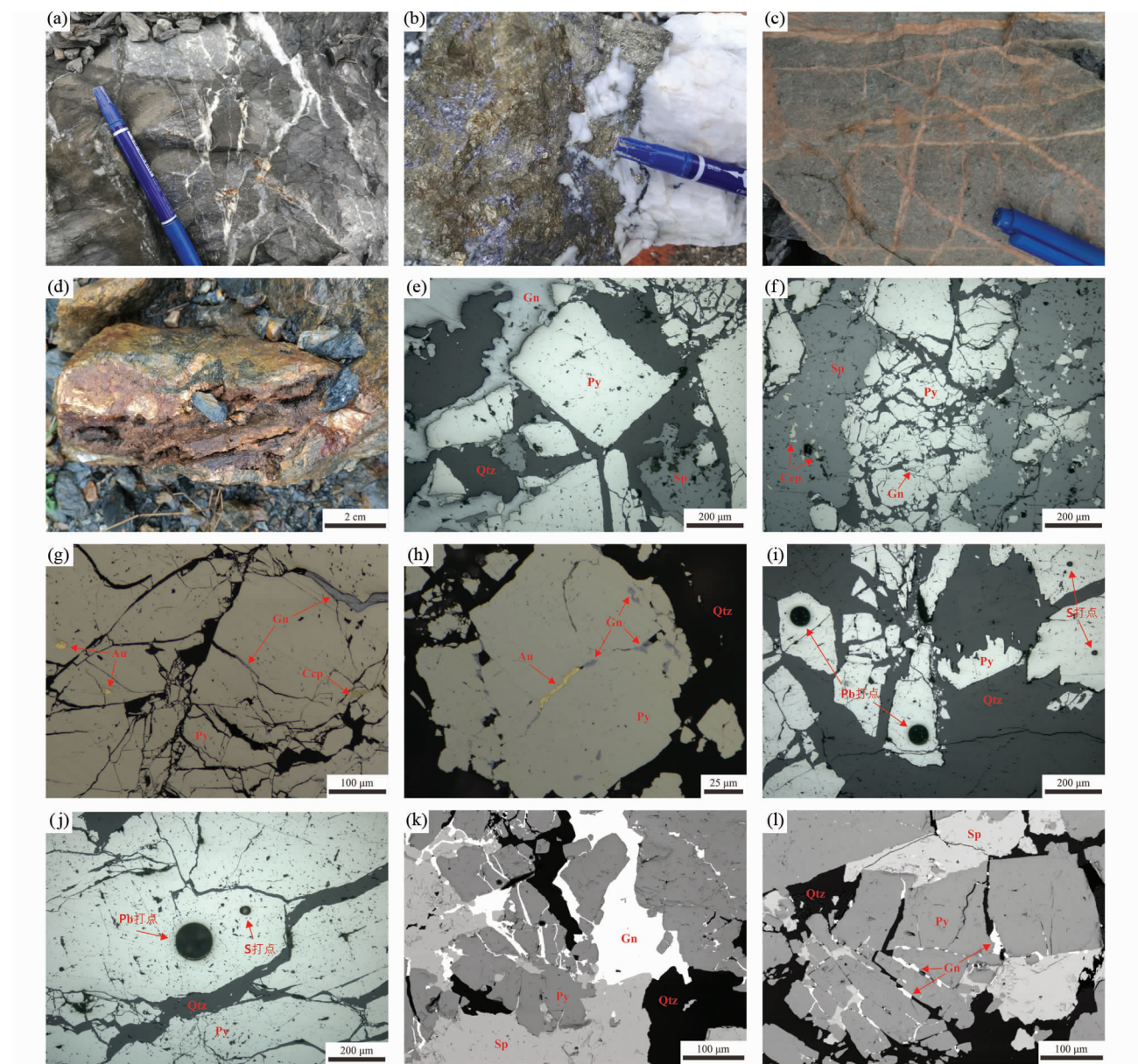


图4 王家崴子金矿床矿石和矿相学特征

(a) 石英±黄铁矿脉矿石；(b) 石英-多金属硫化物脉矿石；(c) 石英±黄铁矿-碳酸盐脉矿石；(d) 蚀变岩型矿石；(e) 粗粒自形-半自形黄铁矿；(f) 半自形-他形晶黄铁矿集合体；(g) 金以包体金的形式赋存在黄铁矿中；(h) 金以裂隙金的形式沿着黄铁矿的裂隙生长；(i, j) 黄铁矿原位 S-Pb 打点位置；(k, l) 黄铁矿、方铅矿和闪锌矿共生。Au-金；Ccp-黄铜矿；Gn-方铅矿；Qtz-石英；Py-黄铁矿；Sp-闪锌矿

Fig. 4 Photographs (a-d) of ore, and photomicrographs (e-j) and BSE images (k, l) of mineral assemblages in the Wangjiawaizi gold deposit

针状(15.1%)和片状(6.6%)。金的粒度以中-细粒为主,微粒次之,粗粒极少(冯啸宇等, 2009)。

围岩蚀变类型主要有绢英岩化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化,其中硅化和黄铁矿化与金矿化关系密切(郝瑞霞和彭省临, 1999)。围岩蚀变具有分带性,从矿体中心向外依次存在着强硅化→黄铁矿化→绢英岩化→绢云母化→绿泥石化→碳酸盐化的分带过渡(冯啸宇等, 2009)。

根据矿物共生组合特征及相互穿切关系,可将王家崴子金矿床划分为早期石英±黄铁矿、中期石英-多金属硫化物和晚期石英±黄铁矿-碳酸盐阶段。早期阶段以大量石英为主(图4a),含少量黄铁矿。黄铁矿为浅黄色,不规则或粗粒立方体自形晶。中期阶段广泛发育各类金属硫化物(图4b),包括黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂、黄铜矿和金矿物等。黄铁矿为灰黄色,半自形-他形晶和集合体。晚期阶段以大量石英和方解石为主(图4c),含少量黄铁矿。黄铁矿为深

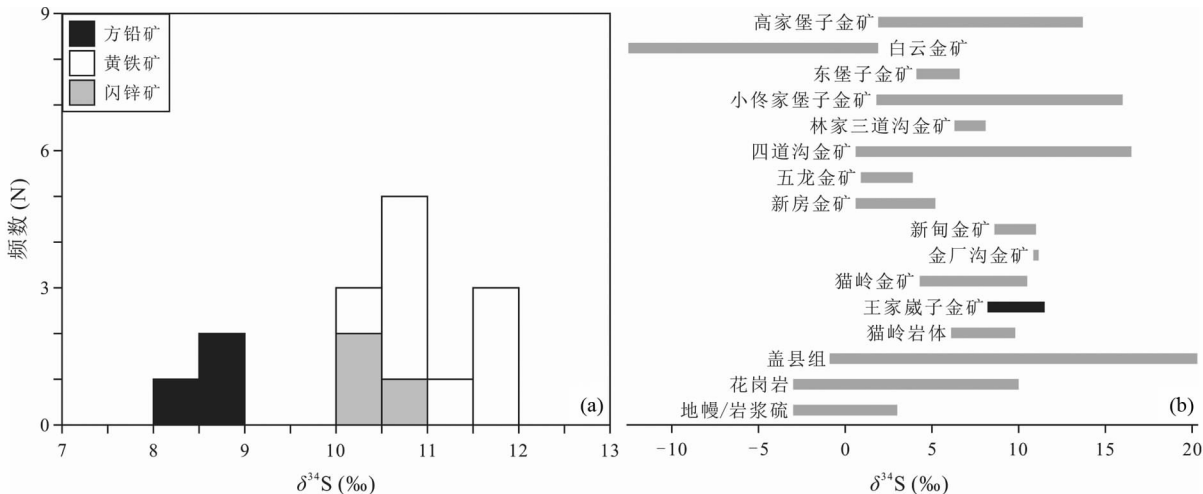


图5 王家崴子金矿床硫化物硫同位素组成(a)与辽东地区金矿床矿石和围岩的硫同位素(b)对比
数据来源:刘先利等, 2000; 肖鹏, 2017; 刘军等, 2018b; Yu *et al.*, 2018, 2021, 2022; Feng *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020b; Sun *et al.*, 2020, 2022, 2023; Chen *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022b, 2023; Li *et al.*, 2023

Fig. 5 Histogram of sulfur isotopic composition of sulfides from the Wangjiawaizi gold deposit (a) and comparison of $\delta^{34}\text{S}$ values from the Wangjiawaizi gold deposit with sulfides and wall rocks of the Liaodong gold deposits (b)

黄色,细粒半自形-他形晶(郝瑞霞等, 1998)。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集

在野外地质观察的基础上,对王家崴子金矿床3个不同成矿阶段的矿石样品进行了系统采样。对采集到的矿石样品首先进行150mm厚度的激光片磨制,接着对这些激光片开展单偏光显微镜反射光和扫描电镜背散射图像观察。由于早期的石英±黄铁矿阶段和晚期的石英±黄铁矿-碳酸盐阶段中的矿石样品的激光片中所含金属硫化物极少,不具备对这2个阶段开展相应的原位微区分析工作,相反,大量金属硫化物出现在中期的石英-多金属硫化物阶段中。因此,本次研究仅对来自于中期的石英-多金属硫化物阶段的激光片开展原位S-Pb和微量元素分析工作。

3.2 LA-MC-ICP-MS 硫同位素分析

硫化物原位S同位素测试在西北大学进行,使用仪器为配备RESOLUTION M-50 193nm ArF激光剥蚀系统的Nu Plasma 1700型多接收等离子体质谱仪。测试过程中使用条件为:能量密度3.8J/cm²,剥蚀频率3Hz,黄铁矿和闪锌矿激光束斑直径30μm,方铅矿37μm。测试数据校正使用“标样-样品-标样”交叉测试方法。黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的标样分别使用Py-4、NBS123和CBI-3(Chen *et al.*, 2017)。整个测试过程包括30s的背景收集、50s的数据收集和75s的清洗时间。

3.3 LA-MC-ICP-MS 铅同位素分析

硫化物原位Pb同位素测试在西北大学进行,使用仪器

为配备RESOLUTION M-50 193nm ArF激光剥蚀系统的Nu Plasma II型多接收等离子体质谱仪。测试过程中黄铁矿使用条件为:激光束斑直径120μm,能量密度7J/cm²,剥蚀频率7Hz;方铅矿使用条件为:激光束斑直径9μm,能量密度7J/cm²,剥蚀频率3Hz。数据采集使用静态时序分析模式,积分时间为0.2s。整个测试过程包括30s的背景收集、50s的数据收集和40s的清洗时间。

3.4 LA-ICP-MS 微量元素分析

黄铁矿微量元素测试在爱尔兰都柏林圣三一学院进行,使用仪器为配备193nm ATLEX 300LR ArF激光剥蚀系统的Thermo Fisher Scientific iCAP-Qc型四极杆等离子体质谱仪。在单点测试过程中使用条件为:激光束斑直径35μm,能量密度1.0J/cm²,剥蚀频率6Hz。整个测试过程包括30s的背景收集、35s的数据收集和30s的清洗时间。在扫描测试过程中使用条件为:方形激光束斑直径20μm×20μm,能量密度1.0J/cm²,扫描速率20μm/s,剥蚀频率40Hz。外标使用USGSMass-1、BCR和UQAC校正,内标使用电子探针测定的Fe含量校正。黄铁矿微量元素单点和扫描数据由Iolite软件处理完成(Paton *et al.*, 2011)。

4 测试结果

4.1 LA-MC-ICP-MS 硫同位素分析结果

王家崴子金矿床共计测试了中期成矿阶段的15个硫化物原位S同位素值,测试结果见表1和图5a。9个黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为10.3‰~11.5‰,3个闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为10.1‰、10.4‰和10.8‰,3个方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为

8. 2‰、8. 4‰和 8. 7‰。

4. 2 LA-MC-ICP-MS 铅同位素分析结果

王家崴子金矿床共计测试了中期成矿阶段的 13 个硫化物原位 Pb 同位素值,测试结果见表 2 和图 6。11 个方铅矿的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 39. 000 ~ 39. 017、15. 691 ~ 15. 700 和 18. 623 ~ 18. 664,2 个黄铁矿的分别为 39. 045 ~ 39. 084、15. 705 ~ 15. 707 和 18. 634 ~ 18. 635。

4. 3 LA-ICP-MS 微量元素分析结果

王家崴子金矿床中期成矿阶段黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素单点分析测试结果见表 3 和图 7。中期成矿阶段黄铁矿

明显亏损 Co($\leq 4. 15 \times 10^{-6}$)、Ni($\leq 11. 30 \times 10^{-6}$)、Se($\leq 0. 53 \times 10^{-6}$)、Mo($\leq 0. 04 \times 10^{-6}$)、Te($\leq 0. 10 \times 10^{-6}$)、W($\leq 0. 17 \times 10^{-6}$)和 Bi($\leq 0. 01 \times 10^{-6}$),较为富集 Cu($0. 36 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$)、Zn(bdl ~ 3790×10^{-6})、As($16. 90 \times 10^{-6} \sim 15500 \times 10^{-6}$)、Sn(bdl ~ 1050×10^{-6})、Au($0. 02 \times 10^{-6} \sim 16. 80 \times 10^{-6}$)和 Pb($0. 27 \times 10^{-6} \sim 4060 \times 10^{-6}$)元素。微量元素扫描结果显示(图 8)中期成矿阶段自形-半自形黄铁矿颗粒 Fe 含量较为均一,As 和 Au 主要富集在黄铁矿核部,具有明显的核边分带特征;Te 和 Bi 含量基本都低于检出限;Ag、Cu、Pb 和 Sb 等元素在黄铁矿中往往以显微包裹体的形式存在;此外,As、Au、Ag、Co、Ni、Cu、Pb 和 Sb 元素沿着黄铁矿裂隙及其边部较为富集。

表 1 王家崴子金矿床硫化物 LA-MC-ICP-MS S 同位素测试结果

Table 1 The S isotopic composition of sulfides from the Wangjiawaizi gold deposit

样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	2SE	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	2SE
WJWZ-4A-1-Py	黄铁矿	11. 3	0. 1	WJWZ-4B-9-Py	黄铁矿	11. 5	0. 1
WJWZ-4A-2-Py	黄铁矿	10. 3	0. 1	WJWZ-4B-10-Py	黄铁矿	10. 5	0. 2
WJWZ-4A-3-Sp	闪锌矿	10. 4	0. 1	WJWZ-4B-11-Py	黄铁矿	11. 5	0. 1
WJWZ-4A-4-Sp	闪锌矿	10. 8	0. 2	WJWZ-3-12-Py	黄铁矿	10. 9	0. 2
WJWZ-4A-5-Sp	闪锌矿	10. 1	0. 1	WJWZ-3-13-Py	黄铁矿	10. 9	0. 1
WJWZ-4A-6-Gn	方铅矿	8. 7	0. 1	WJWZ-3-14-Py	黄铁矿	11. 5	0. 2
WJWZ-4A-7-Gn	方铅矿	8. 4	0. 1	WJWZ-3-15-Py	黄铁矿	10. 6	0. 1
WJWZ-4A-8-Gn	方铅矿	8. 2	0. 2				

表 2 王家崴子金矿床硫化物 LA-MC-ICP-MS Pb 同位素测试结果

Table 2 The Pb isotopic composition of sulfides from the Wangjiawaizi gold deposit

样品号	矿物	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1SE	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1SE	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1SE
WJWZ-4A-4-Py	黄铁矿	39. 045	0. 006	15. 705	0. 002	18. 634	0. 002
WJWZ-4A-6-Py	黄铁矿	39. 084	0. 004	15. 707	0. 002	18. 635	0. 002
WJWZ-3-1-Gn	方铅矿	39. 011	0. 002	15. 700	0. 001	18. 662	0. 001
WJWZ-3-2-Gn	方铅矿	39. 000	0. 003	15. 695	0. 001	18. 658	0. 001
WJWZ-3-3-Gn	方铅矿	39. 012	0. 002	15. 700	0. 001	18. 664	0. 001
WJWZ-3-4-Gn	方铅矿	39. 006	0. 002	15. 698	0. 001	18. 661	0. 001
WJWZ-3-5-Gn	方铅矿	39. 007	0. 002	15. 698	0. 001	18. 662	0. 001
WJWZ-4A-1-Gn	方铅矿	39. 017	0. 002	15. 692	0. 001	18. 632	0. 001
WJWZ-4A-2-Gn	方铅矿	39. 011	0. 001	15. 691	0. 001	18. 628	0. 001
WJWZ-4A-3-Gn	方铅矿	39. 013	0. 002	15. 693	0. 001	18. 627	0. 001
WJWZ-4B-4-Gn	方铅矿	39. 010	0. 002	15. 692	0. 001	18. 624	0. 001
WJWZ-4B-5-Gn	方铅矿	39. 008	0. 002	15. 692	0. 001	18. 624	0. 001
WJWZ-4B-6-Gn	方铅矿	39. 009	0. 002	15. 694	0. 001	18. 623	0. 001

表 3 王家崴子金矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素分析测试结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 The trace element contents ($\times 10^{-6}$) of pyrite from the Wangjiawaizi gold deposit

样品号	^{53}Cr	^{59}Co	^{60}Ni	^{63}Cu	^{66}Zn	^{75}As	^{77}Se	^{95}Mo	^{107}Ag	^{121}Sb	^{124}Sn	^{125}Te	^{182}W	^{197}Au	^{208}Pb	^{209}Bi
WJWZ-1_1	8. 30	0. 28	1. 20	7. 10	1. 12	770. 0	0. 12	0. 01	2. 82	15. 10	0. 65	bdl	bdl	0. 56	4060	0. 01
WJWZ-1_2	0. 23	0. 16	0. 15	15. 50	0. 20	5580	bdl	0. 01	1. 81	2. 18	0. 45	0. 06	0. 03	3. 27	36. 80	0. 01
WJWZ-1_3	0. 08	0. 04	0. 34	3. 62	bdl	6610	0. 15	bdl	0. 52	0. 23	0. 19	0. 02	0. 03	5. 53	9. 70	bdl
WJWZ-1_4	0. 28	0. 12	0. 87	6. 20	bdl	5780	0. 33	0. 01	0. 87	0. 84	0. 25	0. 02	0. 04	3. 25	27. 00	bdl
WJWZ-1_5	0. 16	4. 15	11. 30	14. 00	0. 85	6620	0. 49	0. 02	0. 57	4. 41	0. 27	0. 01	0. 02	2. 00	17. 70	0. 01

续表 3

Continued Table 3

样品号	⁵³ Cr	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶³ Cu	⁶⁶ Zn	⁷⁵ As	⁷⁷ Se	⁹⁵ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹²¹ Sb	¹²⁴ Sn	¹²⁵ Te	¹⁸² W	¹⁹⁷ Au	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi
WJWZ-1_6	0.01	0.29	1.22	1.80	0.17	3960	0.17	bdl	0.63	0.40	0.20	0.03	0.02	0.72	4.70	0.01
WJWZ-1_7	1.80	0.01	0.26	72.00	31.00	5050	0.19	bdl	0.93	2.10	47.00	0.01	bdl	5.56	16.00	bdl
WJWZ-1_8	bdl	0.22	0.93	4.60	0.66	8910	0.07	bdl	0.27	1.24	0.08	0.10	bdl	2.48	27.00	bdl
WJWZ-2_9	bdl	0.17	0.53	9.50	0.34	12700	0.04	bdl	1.29	2.51	0.16	bdl	0.02	11.30	28.20	0.01
WJWZ-2_10	8.60	0.20	bdl	0.38	bdl	6360	0.30	0.01	0.08	1.70	0.03	0.04	0.02	1.94	25.30	bdl
WJWZ-2_11	bdl	0.08	0.15	51.00	187.0	4550	0.36	0.01	1.05	1.08	35.90	0.04	0.01	1.19	15.40	bdl
WJWZ-2_12	1.70	bdl	bdl	8.10	0.09	553.0	0.05	0.01	1.27	4.20	bdl	bdl	0.02	0.28	15.90	bdl
WJWZ-2_13	0.08	0.59	1.84	0.36	bdl	3440	bdl	bdl	0.03	0.06	bdl	0.02	0.01	0.89	0.27	bdl
WJWZ-2_14	0.01	bdl	bdl	4.90	0.08	1270	bdl	0.01	0.22	0.20	0.04	0.01	0.01	0.06	43.00	bdl
WJWZ-2_15	2.30	0.07	0.84	8.90	bdl	6400	0.06	0.01	1.39	10.90	0.05	0.01	0.02	5.90	220.0	0.01
WJWZ-2_16	0.01	0.06	0.18	8.20	0.54	15500	0.14	0.04	0.85	2.60	0.06	0.04	0.01	7.53	25.00	bdl
WJWZ-3_17	0.03	0.35	0.30	7.90	bdl	12700	bdl	0.01	0.79	2.66	0.01	0.03	0.02	16.80	15.20	bdl
WJWZ-3_18	bdl	bdl	0.12	0.50	bdl	1230	0.28	bdl	0.01	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	0.36	bdl
WJWZ-3_19	1.26	bdl	0.16	3.95	4.10	3090	0.29	bdl	1.02	12.50	0.02	0.04	0.01	0.16	26.90	bdl
WJWZ-3_20	0.25	0.01	0.23	900.0	1350	38.20	bdl	bdl	12.40	10.30	1050	bdl	bdl	0.28	37.50	bdl
WJWZ-3_21	bdl	1.85	0.67	3.40	bdl	3770	0.30	bdl	1.18	13.30	0.01	0.01	0.01	1.48	21.60	bdl
WJWZ-3_22	bdl	0.02	0.28	6.70	0.37	1740	0.40	0.01	0.88	2.88	bdl	0.08	0.02	0.48	18.10	bdl
WJWZ-3_23	0.20	1.31	0.37	0.80	bdl	1890	0.42	0.01	0.12	1.60	0.05	0.02	0.02	0.34	1.30	bdl
WJWZ-3_24	0.12	0.01	0.24	46.00	20.00	18.50	0.53	0.02	0.93	3.80	87.00	bdl	0.01	0.06	6.10	bdl
WJWZ-4A_25	1.08	0.01	0.38	37.00	0.40	360.0	0.34	0.01	1.67	2.41	0.65	0.02	0.01	0.47	52.00	bdl
WJWZ-4A_26	0.10	0.03	0.59	840.0	214.0	52.30	0.07	0.01	4.30	2.27	910.0	0.03	0.02	0.16	12.30	bdl
WJWZ-4A_27	0.02	0.07	0.27	55.00	0.58	2990	0.26	0.02	0.41	4.90	0.21	0.03	0.01	0.67	9.10	bdl
WJWZ-4A_28	0.29	0.02	0.12	290.00	2540	26.60	0.37	0.02	5.58	3.72	195.0	0.01	0.02	0.35	32.50	bdl
WJWZ-4B_29	0.49	0.42	0.57	499.0	3790	16.90	0.42	bdl	15.10	3.60	407.0	0.07	0.03	0.31	14.30	bdl
WJWZ-4B_30	0.25	1.10	0.07	350.0	2210	310.0	bdl	0.01	8.90	16.50	242.0	0.03	0.05	0.52	160.0	0.01
WJWZ-4B_31	bdl	0.18	bdl	2.67	0.15	3320	0.26	bdl	0.36	5.99	bdl	0.02	bdl	2.15	8.83	0.01
WJWZ-4B_32	0.38	0.03	0.15	372.0	2490	124.0	0.32	0.02	12.20	44.00	308.0	0.06	0.17	0.57	94.00	0.02

注: bdl 表示低于检测限

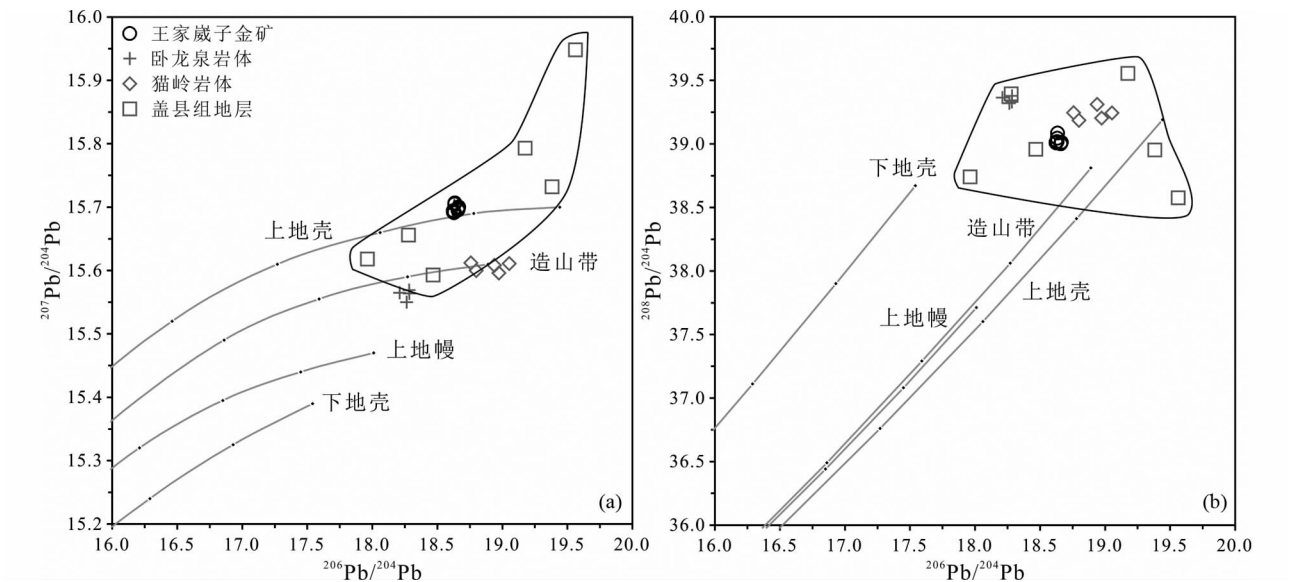


图 6 王家崴子金矿床硫化物及其围岩铅同位素组成图解 (铅演化曲线据 Zartman and Doe, 1981)

数据来源: Yu *et al.*, 2009; Duan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017, 2022b

Fig. 6 Diagrams of the lead isotopic composition of sulfides and related wall rocks in the Wangjiawaizi gold deposit (the lead evolution curves from Zartman and Doe, 1981)

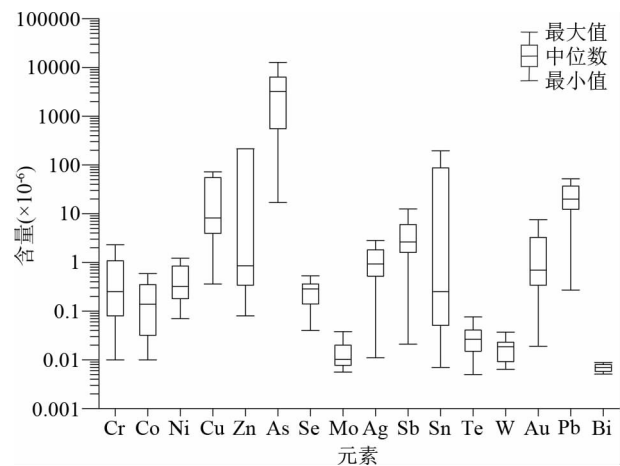


图7 王家崴子金矿床黄铁矿微量元素含量箱形图

Fig. 7 Box plot of trace element contents in pyrite from the Wangjiawaizi gold deposit

5 讨论

5.1 金的赋存状态

金往往以可见金和不可见金的形式主要赋存在黄铁矿颗粒中 (Cook and Chrysosoulis, 1990; Reich *et al.*, 2005; Ciobanu *et al.*, 2012)。在王家崴子金矿床中, 可见大量的可见金颗粒, 并主要以裂隙金的形式沿着黄铁矿、黄铜矿和石英裂隙生长, 或以包体金和晶隙金的形式赋存在黄铁矿和石英中。LA-ICP-MS 微量元素单点分析显示中期成矿阶段黄铁矿明显富集 Au ($0.02 \times 10^{-6} \sim 16.8 \times 10^{-6}$) 和 As ($16.9 \times 10^{-6} \sim 15500 \times 10^{-6}$)。金在黄铁矿中的分配系数与 As 含量的多少密切相关, 即 Au-As 耦合置换是 Au 沉淀的关键 (Cabri *et al.*, 1989; Cook and Chrysosoulis, 1990; Morishita *et al.*, 2018; Kusebauch *et al.*, 2019)。一方面, Au 会在富 As (高 As 含量) 流体中优先沉淀出来 (Voute *et al.*, 2019); 另一方面, As 通常可以以 As^{-} 替代黄铁矿中的 S^{-} (Reich *et al.*, 2005; Deditius *et al.*, 2014), 致使黄铁矿晶格破坏, Au 更易进入黄铁矿晶格中。微量元素扫描结果显示 (图 8) 黄铁矿中 As 和 Au 具有很好的对应关系, 表明 As 对王家崴子金矿床中不可见 Au 具有重要的控制作用。其中, 黄铁矿的核部明显富集 Au 和 As, 指示了 Au 和 As 会优先从成矿流体中进入到黄铁矿晶格内, 致使其核部明显富集这些成矿元素。随着成矿作用的持续进行, 这些元素在成矿流体中逐渐亏损。而其他微量元素, 如 Cu、Pb、Zn、Ag 和 Sb 等则开始沉淀, 致使其边部亏损 Au 但富集 Cu、Pb、Zn、Ag 和 Sb。黄铁矿 As-Au 投图显示 (图 9a), 其 Au/As 比值均落在了金溶解度曲线之下 (Reich *et al.*, 2005), 这表明王家崴子金矿床中数量可观的不可见金是以 Au^{+} 的形式赋存于富 As 黄铁矿的晶格之中。因此, 黄铁矿的深入研究对揭示金的成因具有重要意义。

5.2 成矿物质来源

王家崴子金矿床中期成矿阶段的硫化物 $\delta^{34}S$ 值范围较窄, 集中在 $8.2\text{‰} \sim 11.5\text{‰}$, 明显高于典型岩浆硫范围 ($0 \pm 3\text{‰}$, Ohmoto, 1972), 从而排除了王家崴子金矿床为单一的岩浆硫来源, 可能有其他的高 $\delta^{34}S$ 硫源的贡献。王家崴子金矿床硫同位素值相对集中, 与辽东重要赋矿围岩盖县组地层、毗邻的猫岭岩体和众多金矿床的硫同位素值范围高度重叠 (图 5b), 如高家堡子金矿 (刘先利等, 2000)、东堡子金矿 (Chen *et al.*, 2022)、小佟家堡子金矿 (Liu *et al.*, 2020b; Sun *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023)、林家三道沟金矿 (Sun *et al.*, 2023)、四道沟金矿 (Feng *et al.*, 2019) 和猫岭金矿 (刘军等, 2018b; Zhang *et al.*, 2022b), 而这些金矿床的硫源普遍被认为有盖县组地层的重要贡献 (曾庆栋等, 2019; Yu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022a)。值得注意的是, 王家崴子金矿床 $\delta^{34}S$ 值与新甸金矿床 $\delta^{34}S$ 值高度一致, 而最新的研究表明古元古代辽河群盖县组地层为新甸金成矿提供了充足的硫源 (Yu *et al.*, 2022)。因此, 王家崴子金矿床的高 $\delta^{34}S$ 值硫源可能主要来源于盖县组地层。

王家崴子金矿床中期成矿阶段的硫化物具有相似的 Pb 同位素组成, 分布范围集中, 相对均一, 表明王家崴子金矿床具有相同的 Pb 来源。在 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{207}Pb/^{204}Pb$ 图解中 (图 6a), 王家崴子金矿床所有数据点都落在上地壳演化线附近。在 $^{206}Pb/^{204}Pb$ - $^{208}Pb/^{204}Pb$ 图解中 (图 6b), 所有数据点都更为趋近造山带或上地壳演化线。其中, 造山带 Pb 来源往往被认为是壳源 Pb 和幔源 Pb 混合作用的结果, 在 Pb 同位素示踪构造模式时, 数据点落在造山带增长线上方的样品, 其 Pb 来源往往包含上地壳成分 (Zartman and Doe, 1981)。Pb 同位素图解表明王家崴子金矿床 Pb 主要来源于浅部上地壳, 幔源 Pb 贡献则有限, 这可能是由于王家崴子金矿床在成矿过程中大量萃取了上地壳地层围岩中的 Pb。值得注意的是, 王家崴子金矿床 Pb 同位素与毗邻的卧龙泉岩体和猫岭岩体 Pb 同位素落在不同的区间 (图 6), 排除了王家崴子金矿床 Pb 主要来源于这些早侏罗世岩浆热液活动的可能; 但他们均落在古元古代辽河群盖县组地层 Pb 同位素组分范围内 (图 6), 表明盖县组地层是区域岩浆活动和王家崴子金矿床重要的 Pb 源。

前人研究表明黄铁矿中的 Co 和 Ni 的含量及其 Co/Ni 比值通常可以用来判断黄铁矿的成因及流体的性质。一般而言, 岩浆热液成因的黄铁矿 Co/Ni 比值通常 >1 , 而沉积成岩作用形成的黄铁矿往往具有较低 (<1) 的 Co/Ni 比值 (Campbell and Ethier, 1984; Bralio *et al.*, 1979; Reich *et al.*, 2016)。王家崴子金矿床中期成矿阶段黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素单点分析显示其 Co/Ni 比值为 $0.03 \sim 15.71$, 有且仅只有 5 个点 >1 (图 9b), 这表明可能黄铁矿主要为沉积变质热液成因, 但是有部分岩浆热液活动参与了王家崴子金成矿作用。这也与黄铁矿中低的 Te/Au 比值指示其主要为沉积

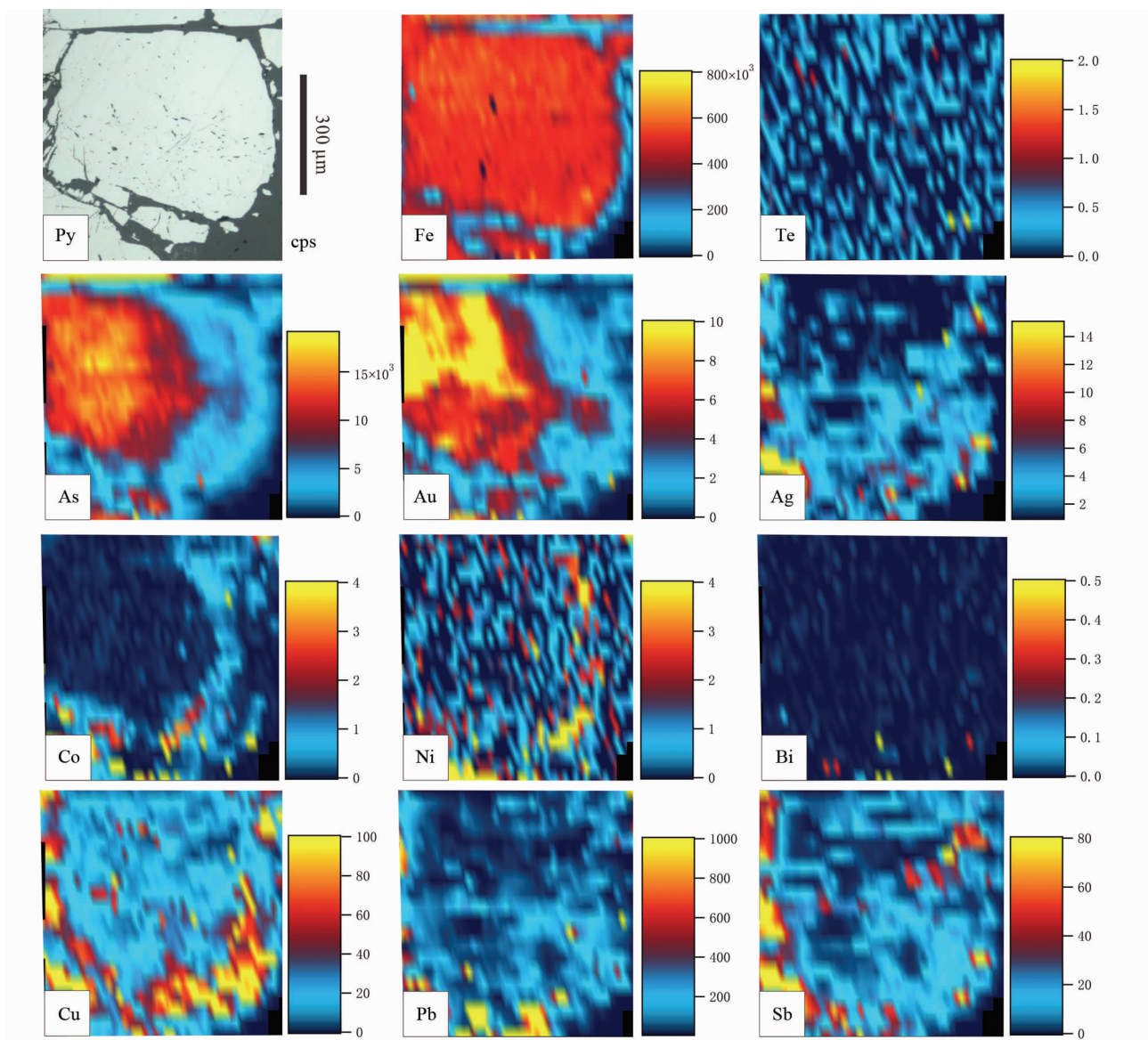


图8 王家崴子金矿床黄铁矿颗粒微量元素扫描图

Fig. 8 LA-ICP-MS elemental maps (cps) for pyrite grain from the Wangjiawaizi gold deposit

变质热液成因黄铁矿(<1 , Belousov *et al.*, 2016)相一致。

综合考虑硫化物原位 S-Pb 同位素及黄铁矿 Co/Ni 和 Te/Au 比值,结合盖县组地层是猫岭金矿集区乃至辽东地区最为重要的赋矿围岩(曾庆栋等, 2019; Sun *et al.*, 2020; 吴文彬等, 2022; Yu *et al.*, 2022),我们认为盖县组地层为辽东金矿(包括王家崴子)提供了重要的成矿物质。

5.3 矿床成因

相对于辽东地区青城子和五龙矿集区,前人对猫岭矿集区的研究有限,尤其是缺乏精确的成矿年龄(包括王家崴子)。已有的研究仅对于毗邻的猫岭金矿床开展过硫化物 Re-Os(喻钢等, 2005)和 Rb-Sr(刘军等, 2018b; Zhang *et*

al., 2022b)以及黑云母 Ar-Ar(Zhang *et al.*, 2017)年代学研究,但获得了截然不同的测试结果,分别为古元古代(2316 ~ 2287Ma)和早侏罗世(~189Ma)。前者分析方法封闭温度相对较高,与赋矿的盖县组地层成岩年龄相近;而后者分析方法封闭温度相对较低,与矿集区内岩浆岩年龄相近,这是否暗示猫岭矿集区内存在着多期矿化事件,尤其是否存在古元古代金预富集,值得进一步深入研究。

本次研究的王家崴子金矿床主要产于盖县组地层中,为一套浅-中变质碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造,明显受 NW 向韧性剪切带控制,并形成于已知的卧龙泉岩体附近。我们的研究表明,王家崴子金矿床金成矿与盖县组地层密切相关, S-Pb 同位素显示大量成矿物质和成矿元素主要来自于盖县

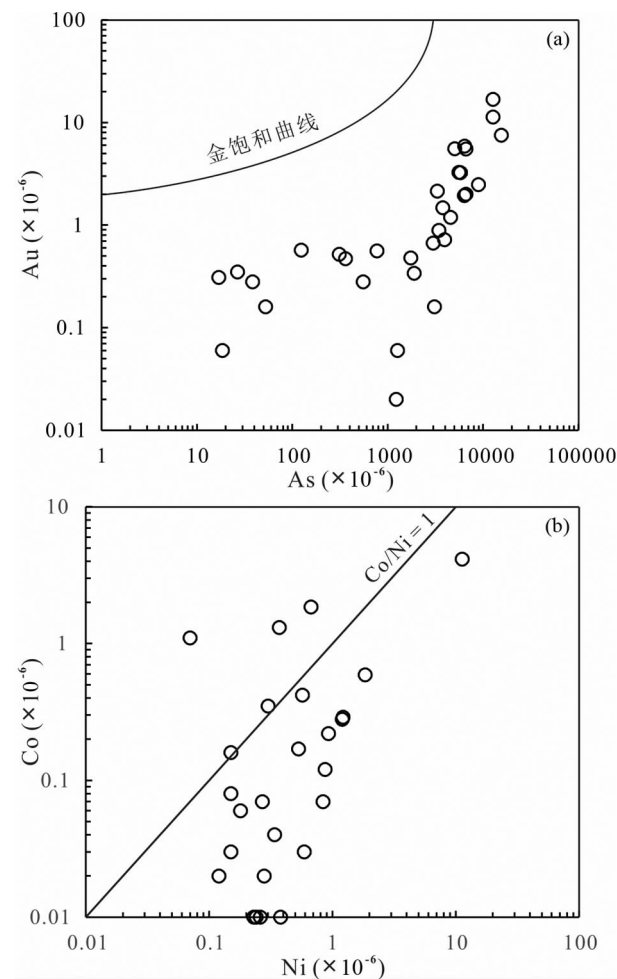


图9 王家崴子金矿床黄铁矿 Au-As(a)和 Co-Ni(b)关系图解

Fig.9 Scatter plots of Au vs. As (a) and Co vs. Ni (b) in pyrites from the Wangjiawaizi gold deposit

组地层,而黄铁矿中低 Co/Ni 和 Te/Au 比值推断成矿流体以沉积变质热液为主。另外富 As 黄铁矿中赋存有数量可观的不可见金,而且相对较低的金成色(297~750)指示了其形成于温度相对较低的成矿环境(Morrison *et al.*, 1991; Liu and Beaudoin, 2021)。这些地质特征与已有的类卡林型金矿(Asadi *et al.*, 2000; 张复新等, 2001; Muntean, 2018)的成矿模式高度吻合。结合邻区猫岭金成矿年代学数据,我们认为王家崴子金矿床存在着早期(古元古代)预富集作用,这也与盖县组地层具有高的 Au 元素异常背景值($\sim 107 \times 10^{-9}$, 彭省临和杨德江, 1996)相吻合,盖县组地层作为重要矿源层参与金成矿。

值得一提的是,该地区在中生代发生了大规模的岩浆活动,尤以呈岩基状侵入到盖县组地层中的卧龙泉岩体为代表。在这一过程中,早侏罗世岩浆热液活动为该地区金成矿提供了大量的成矿物质和成矿元素(Zhang *et al.*, 2017,

2022b)。考虑到王家崴子金矿床距离这些相关的早侏罗世岩体较近,且部分黄铁矿中 Co/Ni 比值大于 1,因此在王家崴子金成矿过程中,早侏罗世岩浆热液活动可能提供了部分成矿流体和成矿物质,更为重要的是提供了一个热源,致使在成矿过程中与地层围岩不断发生强烈的水岩相互作用,大量萃取了盖县组地层中早期(古元古代)预富集的成矿物质和成矿元素,致使王家崴子金矿床的成矿流体和成矿物质呈现出与盖县组地层围岩较为一致的特征,该富 Au 成矿流体最终在构造薄弱部位(韧性剪切带)富集形成大量可见 Au,形成王家崴子金矿床。这也与我们本次研究得到的硫化物原位 S-Pb 同位素和黄铁矿微量元素特征相吻合。

6 结论

(1)在王家崴子金矿床中,金主要以大量可见金为主,以 Au^+ 的形式赋存在富砷黄铁矿晶格之中的不可见金也是王家崴子金矿床的重要来源。

(2)王家崴子金矿床硫化物 S-Pb 同位素特征,与盖县组地层范围重叠,结合黄铁矿低 Co/Ni 和 Te/Au 值,推断成矿物质主要来源于盖县组地层,可能还有部分岩浆热液活动参与了王家崴子金成矿作用。

(3)王家崴子金矿床存在着早期古元古代金预富集作用和一期早侏罗世岩浆热液金成矿作用,晚期的早侏罗世岩浆热液活动大量萃取了盖县组地层中早期预富集的成矿物质和成矿元素,王家崴子金矿床属于类卡林型金矿床。

(4)盖县组地层具有高的 Au 元素异常背景值,是辽东地区最为重要的赋矿围岩,其作为重要的矿源层参与辽东地区金矿床的金成矿作用,需要在今后的找矿勘查工作中加以重视。

致谢 感谢德国维尔茨堡大学的 Hartwig E. Frimmel 教授, Stefan Höhn 博士和 Peter Späthe 工程师在激光片磨制中给予的帮助和论文撰写过程中进行的有益交流。感谢西北大学陈开运和包志安老师在硫化物 S-Pb 同位素分析测试过程中给予的指导和帮助。感谢爱尔兰都柏林圣三一学院的 Sean H. Mcclenaghan 和 Foteini Drakou 博士在黄铁矿微量元素分析测试过程中给予的指导和帮助。感谢辽宁省地质矿产研究院的吴文彬高级工程师在本文成文过程中进行的有益交流。感谢两位匿名审稿人花费宝贵的时间认真审阅本文,使本文有了明显的提升。

References

- Asadi HH, Voncken JHL, Kühnel RA and Hale M. 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, Northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35(7): 656-671
- Belousov I, Large RR, Meffre S, Danyushevsky LV, Steadman J and Beardmore T. 2016. Pyrite compositions from VHMS and orogenic

- Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia; Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, 79: 474-499
- Bralia A, Sabatini G and Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems; Evidences from southern Tuscany pyritic deposits. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353-374
- Cabri LJ, Chrysosoulis SL, de Villiers JPR, Laflamme JHG and Buseck PR. 1989. The nature of "invisible" gold in arsenopyrite. *The Canadian Mineralogist*, 27(3): 353-362
- Campbell FA and Ethier VG. 1984. Nickel and cobalt in pyrrhotite and pyrite from the Faro and Sullivan orebodies. *The Canadian Mineralogist*, 22(3): 503-506
- Chen C, Wu TT, Sha DM, Li DT, Yang ZZ, Zhang J and Shang QQ. 2022. Genesis of the Dongpuzi gold deposit in the Liaodong Peninsula, NE China; Constraints from geology, fluid inclusion, and C-H-O-S-Pb isotopes. *Minerals*, 12(8): 1008
- Chen L, Chen KY, Bao ZA, Liang P, Sun TT and Yuan HL. 2017. Preparation of standards for in situ sulfur isotope measurement in sulfides using femtosecond laser ablation MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32(1): 107-116
- Ciobanu CL, Cook NJ, Utsunomiya S, Kogagwa M, Green L, Gilbert S and Wade B. 2012. Gold-telluride nanoparticles revealed in arsenic-free pyrite. *American Mineralogist*, 97(8-9): 1515-1518
- Cook NJ and Chrysosoulis SL. 1990. Concentrations of invisible gold in the common sulfides. *The Canadian Mineralogist*, 28(1): 1-16
- Cui WL, Guo JH, Huang GY, Wang ZC, Liu YH and Yang JH. 2022. Gold mobilization during prograde metamorphism of clastic sedimentary rocks; An example from the Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 140: 104624
- Deditius AP, Reich M, Kesler SE, Utsunomiya S, Chrysosoulis SL, Walshe J and Ewing RC. 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 140: 644-670
- Duan XX, Zeng QD, Wang YB, Zhou LL and Chen B. 2017. Genesis of the Pb-Zn deposits of the Qingchengzi ore field, eastern Liaoning, China; Constraints from carbonate LA-ICPMS trace element analysis and C-O-S-Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 89: 752-771
- Fan HR, Li XH, Zuo YB, Chen L, Liu S, Hu FF and Feng K. 2018. In-situ LA-(MC)-ICPMS and (Nano) SIMS trace elements and sulfur isotope analyses on sulfides and application to confine metallogenic process of ore deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3479-3496 (in Chinese with English abstract)
- Feng HX, Shen P, Zhu RX, Li CH, Ma G and Pan HD. 2019. Geology and He-Ar-S-Pb isotope constraints on the genesis of the Sidaogou gold deposit in Liaodong Peninsula, northeastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 113: 103080
- Feng HX, Shen P, Zhu RX, Zi JW, Groves DI, Li CH, Wu Y, Ma G and Li TY. 2022. Precise ages of gold mineralization and pre-gold hydrothermal activity in the Baiyun gold deposit, northeastern China; In situ U-Pb dating of hydrothermal xenotime and rutile. *Mineralium Deposita*, 57(6): 1001-1022
- Feng HX, Shen P, Zhu RX, Tomkins AG, Brugger J, Ma G, Li CH and Wu Y. 2023. Bi/Te control on gold mineralizing processes in the North China Craton; Insights from the Wulong gold deposit. *Mineralium Deposita*, 58(2): 263-286
- Feng XY, Jiang FL and Bian GQ. 2009. Characteristics of ore and occurrence of gold of the Wangjiawaizi gold deposit in Liaoning Province, China. *Geology and Resources*, 18(2): 96-99 (in Chinese with English abstract)
- Hao RX. 1991. Genesis and metallogenic model of the Wangjiawaizi gold deposit, Gaixian County, Liaoning Province. Master Degree Thesis. Shenyang; Northeastern University of Technology (in Chinese)
- Hao RX and Peng SL. 1998. The ore-control factors and metallogenic mechanism of Wangjiawaizi gold ore deposit. *Gold*, 19(12): 8-12 (in Chinese with English abstract)
- Hao RX, Jin CZ and Guan GY. 1998. Typomorphic features of minerals from Wangjiawaizi gold ore deposit. *Geology and Prospecting*, 34(3): 23-27 (in Chinese with English abstract)
- Hao RX and Peng SL. 1999. Geochemical study of Wangjiawaizi gold deposit in Liaoning. *Gold Geology*, 5(2): 47-51 (in Chinese with English abstract)
- Koglin N, Frimmel HE, Lawrie Minter WE and Brätz H. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic Palaeoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, 45(3): 259-280
- Kusebauch C, Gleeson SA and Oelze M. 2019. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits. *Science Advances*, 5(5): eaav5891
- Large RR, Danyushevsky L, Holli C, Maslennikov V, Meffre S, Gilbert S, Bull S, Scott R, Emsbo P, Thomas H, Singh B and Foster J. 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique; Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 104(5): 635-668
- Li J, Yang ZM, Wang CW, Chu ZB, Liu X, Cui QY, Wang YK, Li ZS, Song YX and Lai CK. 2023. Metallogeny of the Xiaotongjiapuzi gold deposit, Liaodong Peninsula (eastern China); Perspective from sulfide trace element geochemistry and sulfur isotopes. *Ore Geology Reviews*, 157: 105455
- Liu HM and Beaudoin G. 2021. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geology Reviews*, 132: 104066
- Liu J, Wang SL, Li TG, Yang Y, Liu FX, Li SH and Duan C. 2018a. Geochronology and isotopic geochemical characteristics of Wulong gold deposit in Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 37(4): 712-728 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Li TG and Duan C. 2018b. Geochronology and isotopic geochemistry characteristics of the Maoling large gold deposit, Liaoning Province, China. *Geological Bulletin of China*, 37(7): 1325-1337 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Liu FX, Li SH and Lai CK. 2019. Formation of the Baiyun gold deposit, Liaodong gold province, NE China; Constraints from zircon U-Pb age, fluid inclusion, and C-H-O-Pb-He isotopes. *Ore Geology Reviews*, 104: 686-706
- Liu J, Liu FX, Li SH and Lai CK. 2020b. Genesis of the Xiaotongjiapuzi gold deposit of the Liaodong gold province, Northeast China; Fluid inclusion thermometry and S-Pb-H-O-He isotope constraints. *Geological Journal*, 55(1): 1023-1040
- Liu JM, Zhao GC, Xu G, Sha DM, Xiao CH, Fang X, Liu FX, Guo Q and Yu H. 2020a. Structural control and genesis of gold deposits in the Liaodong Peninsula, northeastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 125: 103672
- Liu JM, Zhao GC, Xu G, Qiu HC, Li JF, Xiao CH, Sha DM, Liu FX, Bi GY, Fang X, Zhang JQ, Guo Q and Yu H. 2021. Metallogenesis of gold deposits and deep exploration in Liaodong Peninsula. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(6): 1613-1635 (in Chinese with English abstract)
- Liu XL, Jiang Y and Liu ZY. 2000. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Gaojiapuzi large-scale Au-Ag deposits in Qingchengzi orefield. *Liaoning Geology*, 17(2): 121-127 (in Chinese with English abstract)
- Morishita Y, Shimada N and Shimada K. 2018. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan; Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite. *Ore geology Reviews*, 95: 79-93
- Morrison GW, Rose WJ and Jaireth S. 1991. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*, 6(4): 333-364
- Muntean JL. 2018. Diversity of Carlin-Style Gold Deposits. Littleton; Society of Economic Geologists
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551-578
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J and Hergt J. 2011. Iolite; Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508-

2518

- Peng SL and Yang DJ. 1996. The characteristics and genesis of the Weizi gold deposit. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 5(3): 146–153 (in Chinese with English abstract)
- Reich M, Kesler SE, Utsunomiya S, Palenik CS, Chrysosoulis SL and Ewing RC. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796
- Reich M, Simon AC, Deditius A, Barra F, Chrysosoulis S, Lagas G, Tardani D, Knipping J, Bilenker L, Sánchez-Alfaro P, Roberts MP and Munizaga R. 2016. Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposit, Chile: A missing link between Andean IOA and iron oxide copper-gold systems? *Economic Geology*, 111(3): 743–761
- Sun BL, Liang JH, Yao YZ and Jin CZ. 2000. Geochemical characteristics of lead isotope in Maoling-Wangjiawaizi gold metallogenic belt. *Liaoning Geology*, 17(4): 259–262 (in Chinese with English abstract)
- Sun BL, Jin CZ and Cui WL. 2001. The study of the metallogenetic model of Maoling-Wangjiawaizi gold mineralization belt. *Gold Journal*, 3(1): 19–23 (in Chinese with English abstract)
- Sun GT, Zeng QD, Zhou LL, Wang YB and Chen PW. 2020. Trace element contents and in situ sulfur isotope analyses of pyrite in the Baiyun gold deposit, NE China: Implication for the genesis of intrusion-related gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 118: 103330
- Sun GT, Zeng QD, Zhou LL, Hollis SP, Zhou JX and Chen KY. 2022. Mechanisms for invisible gold enrichment in the Liaodong Peninsula, NE China: In situ evidence from the Xiaotongjiapuzi deposit. *Gondwana Research*, 103: 276–296
- Sun GT, Zeng QD and Zhou JX. 2023. Jurassic Au-Ag mineralization of the Linjiasandaogou deposit in the Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from apatite U-Pb dating and the in situ geochemistry of sulfides. *Journal of Geochemical Exploration*, 251: 107242
- Voute F, Hagemann SG, Evans NJ and Villanes C. 2019. Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Patay-Parcoy district, Peru: Implication for paragenesis, fluid source, and gold deposition mechanisms. *Mineralium Deposita*, 54(7): 1077–1100
- Wang H and Guo JH. 1992. On geological characteristics and genesis of the Maoling gold deposit. *Journal of Precious Metallic Geology*, (1): 48–57 (in Chinese with English abstract)
- Wei B, Wang CY, Wang ZC, Cheng H, Xia XP and Tan W. 2021. Mantle-derived gold scavenged by bismuth-(tellurium)-rich melts: Evidence from the Mesozoic Wulong gold deposit in the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 131: 104047
- Wu WB, Min ZY, Wang YP, Chang SW, Li HY and Liu Y. 2022. Geological characteristics and prospecting direction of Wulongquan gold deposit in eastern Liaoning. *Gold*, 43(1): 28–33 (in Chinese with English abstract)
- Xiao P. 2017. The characteristics and genesis of Jinchanggou-Maoling gold metallogenic belt in Wulongquan area, Liaoning Province. *Geology of Chemical Minerals*, 39(2): 72–77, 108 (in Chinese with English abstract)
- Xiao SY, Zhu G, Zhang S, Liu C, Su N, Yin H, Wu XD and Li YJ. 2018. Structural processes and dike emplacement mechanism in the Wulong gold field, eastern Liaoning. *Chinese Science Bulletin*, 63(28–29): 3022–3036 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Li SY and Wang ZW. 2012. Metallogenic prospective of gold deposits in Wulongquan area, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Suppl. 3): 93–100 (in Chinese with English abstract)
- Yao XF, Yan TJ, Lin CG, Li SH, Mi KF, Li JP, Li Y and Du WG. 2021. New sight for gold forming system in Wulong deposit: Indicated by the distal Pb-Zn mineralization in hydrothermal breccia. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1883–1900 (in Chinese with English abstract)
- Yu B, Zeng QD, Frimmel HE, Wang YB, Guo WK, Sun GT, Zhou TC and Li JP. 2018. Genesis of the Wulong gold deposit, northeastern North China Craton: Constraints from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, and pyrite trace element concentrations. *Ore Geology Reviews*, 102: 313–337
- Yu B, Zeng QD, Frimmel HE, Qiu HC, Li QL, Yang JH, Wang YB, Zhou LL, Chen PW and Li JP. 2020. The 127Ma gold mineralization in the Wulong deposit, Liaodong Peninsula, China: Constraints from molybdenite Re-Os, monazite U-Th-Pb, and zircon U-Pb geochronology. *Ore Geology Reviews*, 121: 103542
- Yu B, Zeng QD, Xia F, Qiu HC, Li JP, Xie LQ, Chen XY and Yu BS. 2020. Structural superimposed halo of the Wulong gold deposit in Liaoning province. *Geology and Exploration*, 56(5): 898–914 (in Chinese with English abstract)
- Yu B, Zeng QD, Frimmel HE, Zhou LL, McClenaghan SH, Drakou F, Wang YB, Chen PW and Yu C. 2021. A magmatic-hydrothermal origin of the Xinfang gold deposit, Liaodong Peninsula, China, revealed by in-situ S-Pb isotopes and trace element analyses of pyrite. *Resource Geology*, 71(2): 144–160
- Yu B, Qiu HC, Yu CM, Zeng QD, Du Q, Ye J, Li JP and Chen HT. 2021. Application of EH4 magnetotelluric method in ore-controlling structure and metallogenic prediction of the Wulong gold deposit in Liaodong Peninsula. *Gold Science and Technology*, 29(5): 637–646 (in Chinese with English abstract)
- Yu B, Zeng QD, Frimmel HE, Yang JH, Zhou LL, Drakou F, McClenaghan SH, Wang YB and Wang RL. 2022. The genesis of Xindian gold deposit, Liaodong Peninsula, NE China: Constraints from zircon U-Pb ages, S-Pb isotopes, and pyrite trace element chemistry. *Resource Geology*, 72(1): e12303
- Yu B. 2023. A comparative study on the gold mineralization in the Jiaodong and Liaodong gold districts. Post-Doctor Research Report. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–120 (in Chinese with English abstract)
- Yu CT, Jia B and Liu B. 1992. Geological characteristic and genesis of Maoling gold deposit in Liaoning province. *Journal of Precious Metallic Geology*, 1(1): 38–47 (in Chinese with English abstract)
- Yu G, Yang G, Chen JF, Qu WJ, Du AD and He W. 2005. Re-Os dating of gold-bearing arsenopyrite of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, Northeast China and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(14): 1509–1514
- Yu G, Chen JF, Xue CJ, Chen YC, Chen FK and Du XY. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 35(3–4): 367–382
- Yu H, Zhao GC, Liu JM, Zhang JQ, Bi GY, Guo Q, Fang X, Xu G, Liu FX, Huo YD and Bian HH. 2021. Analysis of structural characteristics of mineralization period in Qingchengzi Baiyun gold deposit in Eastern Liaoning. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(6): 1720–1739 (in Chinese with English abstract)
- Yu L. 2018. Discussion on the tectonic evolution process of Wangjiawaizi mining area. *Scientific and Technological Innovation*, (26): 59–60 (in Chinese)
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics: The model. *Tectonophysics*, 75(1–2): 135–162
- Zeng QD, Chen RY, Yang JH, Sun GT, Yu B, Wang YB and Chen PW. 2019. The metallogenic characteristics and exploring ore potential of the gold deposits in eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1939–1963 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FX, Ji JL, Long LL and Fan CH. 2001. Comparative features of Carlin-Para-Carlin type gold deposits in the South Qinling and gold deposits in other areas. *Geological Review*, 47(5): 492–499 (in Chinese with English abstract)
- Zhang P, Zhang Q, Liu CC, Zhao Y, Shi JM and Yang HZ. 2013. Study on the geological characteristics and prospecting indicator of Maoling gold deposit in northern margin of North China Craton. *Gold*, 34(11): 11–15 (in Chinese with English abstract)
- Zhang P, Chen D, Kou LL, Zhao Y, Yang HZ, Sha DM and Wang XJ.

2015. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Wolongquan intrusion in Liaodong and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1762–1772 (in Chinese with English abstract)
- Zhang P, Zhao Y, Chai P, Yang HZ and Na FC. 2017. Geochemistry, zircon U-Pb analysis, and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Maoling gold deposit, Liaodong rift, NE China. *Resource Geology*, 67(4): 426–441
- Zhang P, Kou LL, Zhao Y, Bi ZW, Sha DM, Li ZM and Han RP. 2019. Fluid inclusions, H-O, S, Pb, and noble gas isotope studies of the Baiyun gold deposit in the Qingchengzi orefield, NE China. *Journal of Geochemical Exploration*, 200: 37–53
- Zhang P, Kou LL and Zhao Y. 2022a. Three periods of gold mineralization in the Liaodong Peninsula, North China Craton. *International Geology Review*, 64(20): 2922–2940
- Zhang P, Kou LL, Zhao Y and Sha DM. 2022b. Genesis of the Maoling gold deposit in the Liaodong Peninsula: Constraints from a combined fluid inclusion, C-H-O-S-Pb-He-Ar isotopic and geochronological studies. *Geoscience Frontiers*, 13(4): 101379
- Zhang P, Zhao Y, Kou LL and Yang HZ. 2023. Genesis of the Xinfang gold deposit, Liaodong Peninsula: Constraints from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, pyrite trace element concentrations, and chronology. *Gondwana Research*, 113: 210–231
- Zhang SH, Zhang QQ, Hu GH, Li JF, Xiao CH, Liu XC and Wang S. 2022. Comparison of mineralization and preservation conditions in the Wulong and Qingchengzi ore concentration areas, eastern Liaoning Province: Implications for deep metallogenic prediction. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 232–248 (in Chinese with English abstract)
- Zheng F, Xu T, Ai YS, Yang YJ, Zeng QD, Yu B, Zhang W and Xie TT. 2022. Metallogenic potential of the Wulong goldfield, Liaodong Peninsula, China revealed by high-resolution ambient noise tomography. *Ore Geology Reviews*, 142: 104704
- Zhou LL, Zeng QD, Sun GT, Duan XX, Bonnetti C, Riegler T, Long D and Kamber B. 2019. Laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) elemental mapping and its applications in ore geology. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1964–1978 (in Chinese with English abstract)
- Zhu RX, Fan HR, Li JW, Meng QR, Li SR and Zeng QD. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China (Earth Sciences)*, 58(9): 1523–1537
- 附中文参考文献**
- 范宏瑞, 李兴辉, 左亚彬, 陈蕾, 刘尚, 胡芳芳, 冯凯. 2018. LA-(MC)-ICPMS 和 (Nano)SIMS 硫化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程. *岩石学报*, 34(12): 3479–3496
- 冯啸宇, 姜福伦, 边广清. 2009. 辽宁王家崴子金矿床矿石特征与金的赋存状态. *地质与资源*, 18(2): 96–99
- 郝瑞霞. 1991. 辽宁盖县王家崴子金矿床成因及成矿模式. 硕士学位论文. 沈阳: 东北工学院
- 郝瑞霞, 彭省临. 1998. 王家崴子金矿床的控制因素及成矿机制. *黄金*, 19(12): 8–12
- 郝瑞霞, 金成洙, 关广岳. 1998. 王家崴子金矿床中矿物标型特征研究. *地质与勘探*, 34(3): 23–27
- 郝瑞霞, 彭省临. 1999. 辽宁王家崴子金矿床地球化学研究. *黄金地质*, 5(2): 47–51
- 刘军, 王树岭, 李铁刚, 杨艳, 刘福兴, 李生辉, 段超. 2018a. 辽宁省五龙金矿床成岩成矿年代学及同位素地球化学特征. *矿床地质*, 37(4): 712–728
- 刘军, 李铁刚, 段超. 2018b. 辽宁猫岭大型金矿床成岩成矿年龄及同位素地球化学特征. *地质通报*, 37(7): 1325–1337
- 刘建民, 赵国春, 徐刚, 邱海成, 李建锋, 肖昌浩, 沙德铭, 刘福兴, 毕广源, 房兴, 张家奇, 郭祺, 于娜. 2021. 辽东半岛金矿成矿作用与深部资源勘查. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(6): 1613–1635
- 刘先利, 姜瑛, 刘志远. 2000. 青城子矿田高家堡子大型金银矿床地质特征及成矿机制. *辽宁地质*, 17(2): 121–127
- 彭省临, 杨德江. 1996. 辽南限子金矿成矿地质特征及成因讨论. *有色金属矿产与勘查*, 5(3): 146–153
- 孙宝亮, 梁俊红, 姚玉增, 金成洙. 2000. 猫岭-王家崴子金成矿带铅同位素地球化学特征. *辽宁地质*, 17(4): 259–262
- 孙宝亮, 金成洙, 崔卫利. 2001. 猫岭-王家崴子金成矿带成矿模式研究. *黄金学报*, 3(1): 19–23
- 王宏, 国家辉. 1992. 辽宁猫岭金矿床地质特征及成因探讨. *贵金属地质*, (1): 48–57
- 吴文彬, 闵振友, 王玉平, 常世伟, 李海洋, 刘宇. 2022. 辽东卧龙泉金矿床地质特征及找矿方向. *黄金*, 43(1): 28–33
- 肖鹏. 2017. 辽宁卧龙泉地区金厂沟-猫岭金成矿带特征及成因. *化工矿产地质*, 39(2): 72–77, 108
- 肖世椰, 朱光, 张帅, 刘程, 苏楠, 尹浩, 吴晓冬, 李云剑. 2018. 辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制. *科学通报*, 63(28–29): 3022–3036
- 徐山, 李守义, 王忠文. 2012. 辽宁省卧龙泉地区金矿成矿远景区预测. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(增3): 93–100
- 姚晓峰, 颜廷杰, 林成贵, 李生辉, 巫奎峰, 李建平, 李阳, 杜宛鸽. 2021. 辽东半岛五龙金成矿系统新认识: 来自外围热液角砾岩型铅锌矿化的指示. *岩石学报*, 37(6): 1883–1900
- 俞炳, 曾庆栋, 夏凡, 邱海成, 李建平, 解丽强, 陈显玉, 于宝申. 2020. 辽宁五龙金矿构造叠加晕研究. *地质与勘探*, 56(5): 898–914
- 俞炳, 邱海成, 于昌明, 曾庆栋, 杜琴, 叶杰, 李建平, 陈海涛. 2021. EH4 音频大地电磁方法在辽东五龙金矿控矿构造及成矿预测研究中的应用. *黄金科学技术*, 29(5): 637–646.
- 俞炳. 2023. 胶东和辽东金成矿对比研究. 博士后工作报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1–120
- 余昌涛, 贾斌, 刘斌. 1992. 辽宁省盖县猫岭金矿床地质特征及成因探讨. *贵金属地质*, 1(1): 38–47
- 喻钢, 杨刚, 陈江峰, 屈文俊, 杜安道, 何畏. 2005. 辽东猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义. *科学通报*, 50(12): 1248–1252
- 于娜, 赵国春, 刘建民, 张家齐, 毕广源, 郭祺, 房兴, 徐刚, 刘福兴, 霍延达, 边惠惠. 2021. 辽东青城子白云金矿床成矿期构造特征分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(6): 1720–1739
- 于莉. 2018. 浅谈王家崴子矿区构造演化过程. *科学技术创新*, (26): 59–60
- 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 孙国涛, 俞炳, 王永彬, 陈沛文. 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. *岩石学报*, 35(7): 1939–1963
- 张复新, 季军良, 龙灵利, 范春花. 2001. 南秦岭卡林型-似卡林型金矿床综合地质地球化学特征. *地质论评*, 47(5): 492–499
- 张朋, 张倩, 刘长纯, 赵岩, 时建民, 杨宏智. 2013. 华北克拉通北

缘猫岭金矿床地质特征及找矿标志. 黄金, 34(11): 11 – 15

张朋, 陈冬, 寇林林, 赵岩, 杨宏智, 沙德铭, 王希今. 2015. 辽东卧龙泉岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其构造意义. 地质学报, 89(10): 1762 – 1772

张拴宏, 张琪琪, 胡国辉, 李建锋, 肖昌浩, 刘向冲, 王森. 2022. 辽东五龙与青城子矿集区成矿和保存条件对比及其深部找矿意义. 地质学报, 96(1): 232 – 248

周伶俐, 曾庆栋, 孙国涛, 段晓侠, Bonnetti C, Riegler T, Long D, Kamber B. 2019. LA-ICPMS 原位微区面扫描分析技术及其矿床学应用实例. 岩石学报, 35(7): 1964 – 1978

朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学(地球科学), 45(8): 1153 – 1168