



鸭绿江成矿带多级断裂控矿与蚀变岩型金矿找矿前景

朱日祥^{1,2*}, 曾庆栋^{1,2}, 杨进辉^{1,2}, 刘福兴³, 田树海³, 汪凤伟⁴, 杨明⁴, 俞炳⁵, 张帅⁶, 段晓侠⁶, 陈沛文⁷, 孙国涛⁷

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3. 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司, 丹东 118000

4. 辽宁五龙黄金矿业有限责任公司, 丹东 118000

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

6. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

7. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025

* 通讯作者, E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

2025-12-03收稿, 2026-03-23修回, 2026-03-30接受, 2026-04-20网络版发表

地球深部探测与矿产资源勘查国家重大专项项目(2024ZD1001301)资助

摘要 辽吉东部的鸭绿江成矿带是华北东部重要金多金属成矿带之一, 鸭绿江断裂带控制了中生代岩浆岩、火山沉积盆地及金多金属矿床的分布, 以广泛发育中生代金矿为主要成矿特色, 金矿主要与华北克拉通破坏的深部过程相关。这些金矿床受鸭绿江断裂带多级构造系统控制, 一级构造控制成矿带的展布, 二级构造与一级构造复合位置控制矿田的产出, 三级构造及更低级构造控制矿床与矿脉(体)的产出。随着对该断裂带构造演化与成矿关系的深入研究及勘探工作的不断投入, 断裂带蚀变岩型金矿找矿取得了重大突破, 如近期发现的具大型/超大型找矿潜力的秋果碧金矿床和岗草甸子蚀变岩型金矿床, 这些规模巨大的硅化和黄铁矿化含金蚀变带的发现, 揭示出鸭绿江断裂带金矿找矿潜力巨大, 其中秋果碧、古马岭、大古岭、五龙-杨家、岗草甸子等矿区, 是今后辽吉东部金矿找矿突破的优选靶区。

关键词 蚀变岩型金矿, 鸭绿江断裂带, 断裂控矿, 辽东金矿省

1 引言

辽吉东部的鸭绿江断裂带整体呈北东-北北东向展布, 是华北东部重要的构造岩浆活动和控矿构造带。鸭绿江主干断裂(丹东-集安)总体沿鸭绿江干流展布(张国仁等, 2006), 向南西延伸进入黄海, 向北东经吉林省、黑龙江省(向北东延伸接吉林省、黑龙江省的两江-天桥断裂), 最终进入俄罗斯境内, 全长超过1000 km, 为郯庐断裂系的一个重要分支断裂(董南庭等, 1989; Zhang等, 2025)。该断裂带控制发育了一系列中生代金矿、斑岩钼矿、矽卡岩型铜多金属矿等多种类型的矿床(董南庭

等, 1989; 朱日祥等, 2024), 构成了辽吉东部, 乃至华北克拉通东部重要的金多金属成矿带。

鸭绿江断裂带是华北克拉通东北部最重要的断裂带之一, 属于一级控矿构造, 关于该断裂带成矿前景或找矿潜力, 朱日祥等(2024)在研究华北及辽东地区金矿成矿特征、控矿因素及成矿机制的基础上, 明确提出鸭绿江断裂带具有巨大的找矿潜力, 是辽东地区寻找蚀变岩型金矿的重要突破方向。近年来, 鸭绿江断裂带蚀变岩型金矿找矿取得了重要进展, 例如, 宽甸满族自治县秋果碧蚀变岩型金矿正处于勘查阶段, 目前已取得初步的重大找矿突破, 控制金资源量10吨以上; 在丹东五龙金

中文引用格式: 朱日祥, 曾庆栋, 杨进辉, 刘福兴, 田树海, 汪凤伟, 杨明, 俞炳, 张帅, 段晓侠, 陈沛文, 孙国涛. 2026. 鸭绿江成矿带多级断裂控矿与蚀变岩型金矿找矿前景. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1849–1862, doi: 10.1360/SSTe-2025-0422

英文引用格式: Zhu R, Zeng Q, Yang J H, Liu F, Tian S, Wang F, Yang M, Yu B, Zhang S, Duan X, Chen P, Sun G. 2026. Multiscale fault control of mineralization and exploration prospects of altered-rock-type gold deposits in the Yalu River metallogenic belt. Science China Earth Sciences, 69(5): 1807–1821, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1920-0>

矿区北东向鸡心沟主干断裂带深部发现了厚大工业矿体-细脉蚀变岩型金矿体,虽勘查工作正在进行,但发现矿体厚达50 m,分段取样分析结果显示,其中22 m平均品位2.21 g/t(曾庆栋等, 2025), 12 m平均品位1.35 g/t;在丹东市大古岭矿区也勘探发现厚约20 m蚀变岩型工业矿体;在本溪满族自治县岗草甸子金矿区勘探发现了近地表厚度49.5 m、平均品位0.6 g/t的低品位厚大工业矿体。鉴于此,本文在总结鸭绿江成矿带已有金矿特征及找矿进展的基础上,旨在进一步研究鸭绿江断裂带成矿机理,助力鸭绿江成矿带金矿找矿勘查突破。

2 鸭绿江成矿带特征

2.1 鸭绿江成矿带地质环境

北东-北北东走向的鸭绿江断裂带是中国东部大型的断裂构造之一,其南段发育在华北克拉通东北部的辽东地区(图1),北段进入中亚造山带东部的吉黑地区。在我国境内,鸭绿江断裂带南段地层主要为古元古代辽河群和老岭群,在朝鲜境内主要为狼林群及摩天岭群。辽河群为一套遭受角闪岩相-绿片岩相变质的火山-沉积岩系(张国仁等, 2006),新元古代-古生代地层呈角度不整合覆盖在古元古代及太古代基底岩系之上,局部出露,岩性主要为海相陆源碎屑岩和碳酸盐岩建造,中生代陆相火山-碎屑岩分布在鸭绿江断裂带上的众多盆地内。

辽东地区侵入岩主要形成于古元古代和中生代,其中古元古代侵入岩(辽吉花岗岩)包含2.2–2.0 Ga的造山期前花岗质岩石和1.9–1.8 Ga的后造山或非造山期的花岗质岩石(张帅等, 2017)。中生代侵入岩主要分为三期:晚三叠世、中晚侏罗世及早白垩世(图1和2)。晚三叠世侵入岩包括碱性系列的霞石正长岩-辉石正长岩-石英正长岩和钙碱性系列的辉长岩-闪长岩-花岗岩,其中以花岗岩为主;中晚侏罗世侵入岩主要为钙碱性系列的闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩(吴福元等, 2005);早白垩世侵入岩以高钾钙碱性系列花岗岩为主,伴生小规模碱性岩和基性岩岩株,并发育大量中基性岩脉,如区内五龙背岩体、三股流岩体(杨进辉等, 2021)、石柱岩体(Wu等, 2025)等。早白垩世花岗岩类岩石形成于两个阶段,早阶段为二长花岗岩、花岗闪长岩及闪长岩,形成时代为130–126 Ma,晚阶段为花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩等,形成时代为120–115 Ma。早期花岗岩与区内金多金属成矿具有密切关系(Zhu等, 2017; Wu等, 2025)。其中,早白垩世岩浆活动与华北克拉通破坏峰期一致(朱日祥等, 2011, 2015; 朱日祥和徐义刚, 2019; Wu等, 2019; 杨进辉等, 2021),据此,朱日祥等(2015)提出中

国东部早白垩世强烈岩浆活动与金成矿作用主要受控于华北克拉通破坏的深部动力学过程。

2.2 鸭绿江断裂带特征

鸭绿江断裂带在中生代经历了多期、复杂的演化历史,其走向大致平行于古太平洋海沟,通常被认为主体受控于古太平洋板块俯冲作用(Zhu等, 2010; Zhang等, 2018; Zhu等, 2021)。鸭绿江断裂系统由一系列北东-北北东走向、断裂性质和活动时间相似的主干断裂(一级构造)以及旁侧的次级断裂(二级构造)所构成,主干断裂与次级断裂在平面上呈现平行或斜交式分布(图2)。近年来的系统研究揭示了鸭绿江断裂带在白垩纪早期显示左行平移运动,受控于伊泽奈崎板块斜向低角度俯冲作用,与燕山运动B幕挤压事件同期发生(Zhang等, 2018)。这些断裂自南西向北东依次出露有不同层次变形构造,表现为沿走向上依次展布的韧性、脆-韧性及脆性走滑构造(Zhang等, 2018)。

在华北克拉通破坏峰期的背景下,鸭绿江断裂带发生了强烈的伸展作用,呈现正断层性质,控制了区内一系列早白垩世伸展盆地的发育及岩体侵位。自南西向北东依次分布着丹东盆地、古楼子盆地、蜚场沟盆地、绿江村盆地、凉水盆地、麻线沟盆地以及集安盆地(图1; 董南庭等, 1989; Zhang等, 2019)。同期,在辽东地区广泛发育高角度正断层、低角度韧性拆离剪切带、变质核杂岩等伸展构造,是岩石圈深度范围内北西-南东向伸展的结果(Yang等, 2007; 刘俊来等, 2011)。该断裂带在晚白垩世早期(100–97 Ma)的南-北向挤压作用下再次发生左行平移运动,并终止了早白垩世盆地的发育。在晚白垩世中晚期(97–70 Ma),该断裂带局部表现为右行张扭性活动,控制了晚白垩世盆地的发育,形成于南-北向弱伸展背景下。在白垩纪末,受东西挤压作用的影响,该断裂带又转变为逆右行平移活动,导致晚白垩世盆地反转与消亡(Zhang等, 2019)。

鸭绿江断裂带西侧的丹东地区(包括五龙和四道沟金矿区),发育了一系列近平行的北北东走向二级断裂构造,自东向西依次为金场断裂、郑家堡子断裂、黑沟断裂、鸡心沟断裂、杨家断裂、红石断裂、砬子沟断裂、韩家堡子断裂以及玉龙断裂。近期研究表明,这些北西向陡倾的断裂皆形成于左行平移活动,并在旁侧普遍派生有共轭里德尔剪切,一组为北北东或近南北走向的左行平移断裂或劈理带,另一组为北西西走向的右行平移断裂,属于南-北向挤压应力下的共轭破裂产物(肖世柳等, 2018; Zhang等, 2020)。这一系列断裂组合在早白垩世广泛发生活化,古应力场反演显示该期断裂活动形

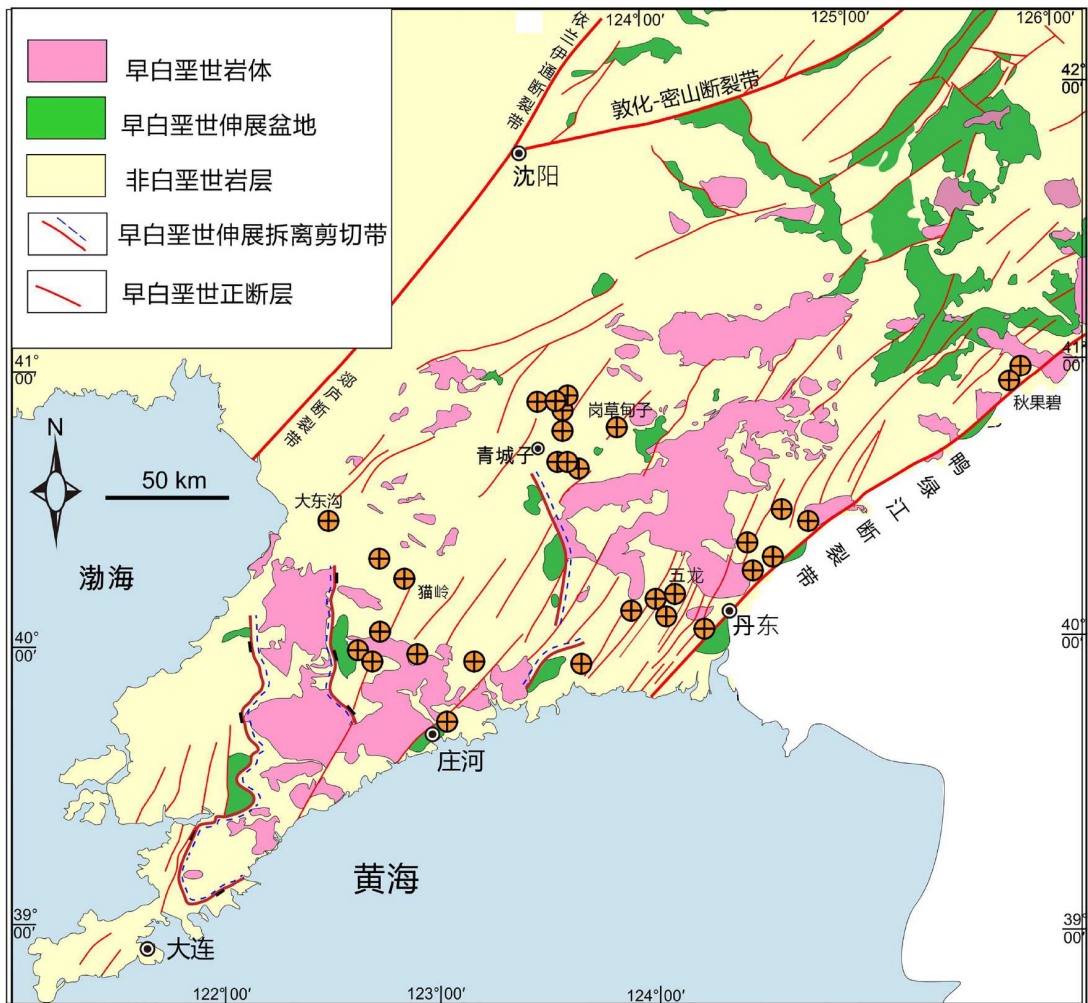


图1 辽东金矿省早白垩世伸展构造、岩浆岩及金矿分布图(修改自朱日祥等, 2024)

成于北西-南东向拉张背景(Zhang等, 2020), 与鸭绿江断裂带的正断活动一致, 也与辽东半岛同时期的伸展活动相吻合。与之相比, 在鸭绿江断裂带以东的朝鲜新义州地区, 北西走向的断裂体系更为发育, 结合断裂带两侧岩石地层单元、地形地貌所具有的显著差异性和不连续性(图2), 表明鸭绿江断裂带发生了大规模的平移运动。以华北克拉通与辽源增生带的界线(赤峰-开原断裂)为位错标志, 估算鸭绿江断裂带累积左行位移量可达30 km(Liu等, 2018)。鸭绿江断裂带与旁侧次级断裂在侏罗-白垩纪的活动方式与应力状态, 是古太平洋板块俯冲运动学变化的产物。

3 典型金矿床特征

鸭绿江断裂带发育了大量金矿床, 我国境内金矿床类型主要有两种: 石英脉型和蚀变岩型(图2)。石英脉型金矿以五龙、杨家、下河口、古楼子等为代表, 金矿脉

产出受一系列(北北东、北西、北北西向)三级或更低序次断裂构造控制(俞炳等, 2025); 蚀变岩型金矿则以大东沟、四道沟、秋果碧、古马岭、大古岭等矿床为代表, 金矿床主要产于辽河群盖县组地层中, 受三级或更低序次层间断裂构造控制, 或深大断裂的次级(二级)断裂带中, 近期在五龙金矿区北东向鸡心沟断裂(二级断裂)中新发现细脉蚀变岩型厚大工业矿体(曾庆栋等, 2025)。

3.1 五龙石英脉型金矿床

五龙金矿分布在晚侏罗世五龙二云母花岗岩岩体和早白垩世三股流岩体花岗闪长岩岩体中, 由近百条不同方向展布的含金石英脉组成(Yu等, 2018)。矿区构造包括区域二级断裂——鸡心沟断裂和一系列北北东、北东、近南北及北西向三级断裂构造, 其中, 北东向鸡心沟断裂带是五龙金矿的导矿与控矿构造, 由断裂破碎蚀变带、闪长岩、含金石英脉、细脉蚀变岩带等构成, 宽度在

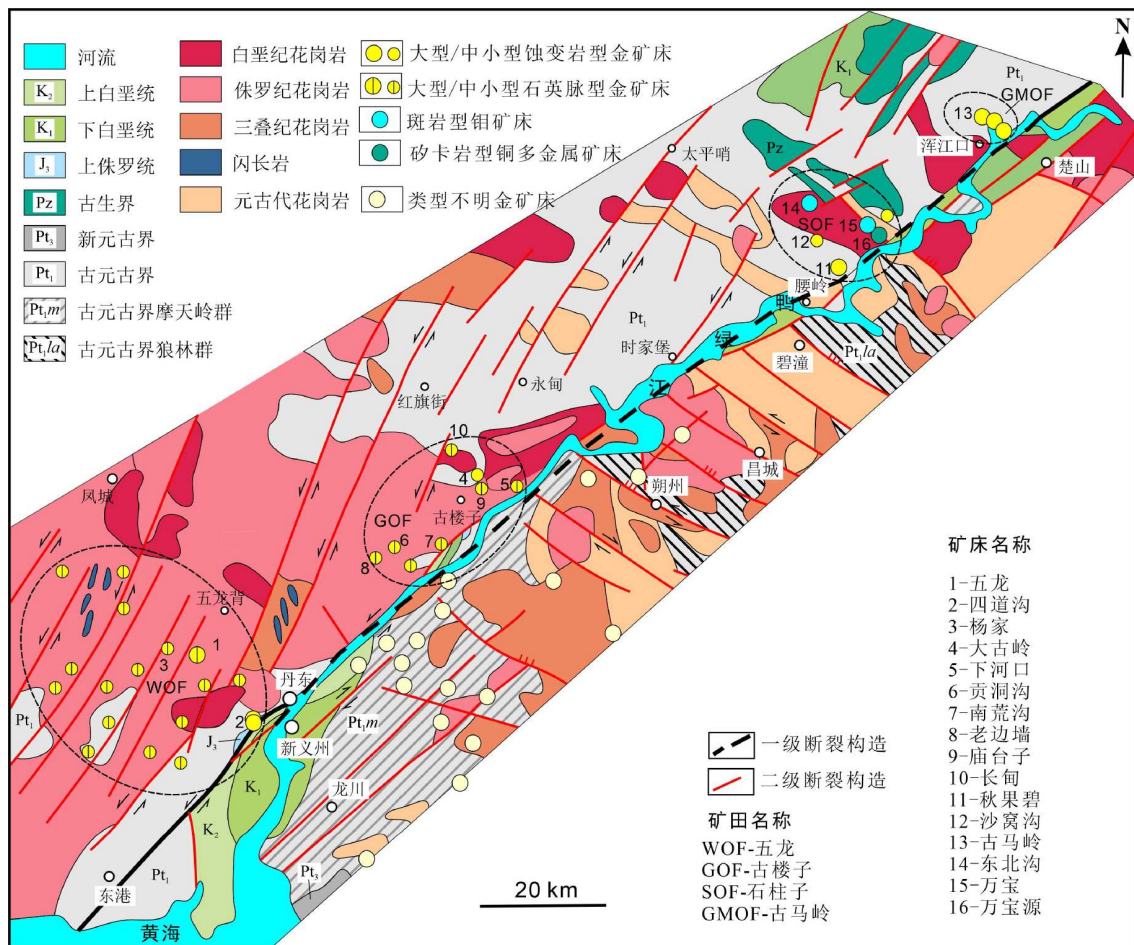


图2 鸭绿江断裂带地质简图及金矿分布图。修改自张国仁等(2006)和宋建潮等(2009)

200–300 m。三级断裂以北北东和北西向断裂为主，二者为共轭断裂，北北东向断裂为压剪性断裂，一般倾向西，倾角 75° – 85° ，局部反转；北西向断裂为张剪性断裂，一般倾向南西，倾角 50° – 80° 。不同方向断裂均具有脉动活动特点：成矿前为张性活动，伴随着闪长岩等岩脉贯入；成矿期多阶段剪切活动，石英大脉形成、石英大脉剪切形成条带状构造及石英硫化物脉、拉张形成断层角砾岩；成矿后脉岩侵入切穿矿脉(曾庆栋等, 2023)。这级断裂是矿区内最主要的容矿断裂构造，伴有大量不同类型脉岩(图3)，包括成矿前细粒闪长岩及花岗斑岩，成矿后煌斑岩和辉绿岩(Yu等, 2018)。含金石英脉、细粒闪长岩及花岗斑岩常相伴产出于同一构造之中，含金石英脉常分布在脉岩的一侧或切穿脉岩。

目前,五龙金矿区具工业价值的含金石英脉有20余条,规模较大的含金石英脉包括163号、80号、4-1号、4-5号、2-3号、32-1号、33号、42号、11号、65号、76号、100号脉等,矿体一般延长为几十米至近600 m,延深为几十米至大于750 m,矿脉厚度在0.1~20 m之间,水

平厚度一般为0.84–5.52 m。近南北向含金石英脉近于直立，倾向东；NW向含金石英脉，除163号脉之外一般规模较小，倾向南西，倾角60°–80°。含金石英脉以金品位高为特点，如80号脉金品位最高达70.40 g/t，平均10.54 g/t；163号脉金品位最高达101.00 g/t，平均10.81 g/t；4-1号脉金品位为13.20–53.22 g/t，平均32.53 g/t；4-5号脉金品位1.11–74.05 g/t，平均23.87 g/t。矿石中金属矿物以黄铁矿、磁黄铁矿为主，次要矿物为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、自然金、白钨矿、辉钼矿以及各类铋矿物，脉石矿物以石英为主，次要矿物为绢云母、绿泥石、方解石、萤石等(曾庆栋等, 2023)。矿石构造以块状、条带状、脉状、网状构造为主，其次为浸染状、角砾状、晶洞构造等(图4A–4C)。近期在四分矿15中段(619 m深)鸡心沟主断裂带中探获厚度50 m石英细脉充填的蚀变岩型金矿体(图4D)，分段连续取样，其中22 m平均金品位2.21 g/t，12 m平均品位1.35 g/t，其他取样分析正在进行之中。蚀变岩型矿体矿石矿物以黄铁矿、碲铋矿、自然铋、碲银矿等发育为特征(图4E、4F)，具有与石英脉型



图3 五龙金矿地质简图(修改自Yu等, 2018)

金矿脉相似的金属矿物组合与蚀变类型(曾庆栋等, 2023), 反映了深部流体成矿特征, 也展示了巨大的找矿潜力(曾庆栋等, 2025)。矿区围岩蚀变发育, 不同围岩类型蚀变有所差别, 细粒闪长岩围岩蚀变为硅化、绿泥石化、碳酸盐化, 二云母花岗岩围岩蚀变为硅化、绢云母化、绿泥石化, 花岗斑岩围岩蚀变为硅化、绢云母化。蚀变带宽度变化较大, 为几米至百余米, 与含矿断裂规

模有关。热液成矿作用可分为石英-黄铁矿、石英-自然金-多金属硫化物、石英-碳酸盐三个成矿阶段(Yu等, 2018)。蚀变岩型金矿产于区内二级主干断裂带内, 石英脉型金矿产于二级断裂旁侧的三级或更次级断裂构造内, 两者为同一成矿流体系统不同构造部位的产物, 形成时代一致, 均形成于早白垩世克拉通破坏过程(120–127 Ma, Yu等, 2020, 本文未发数据)。

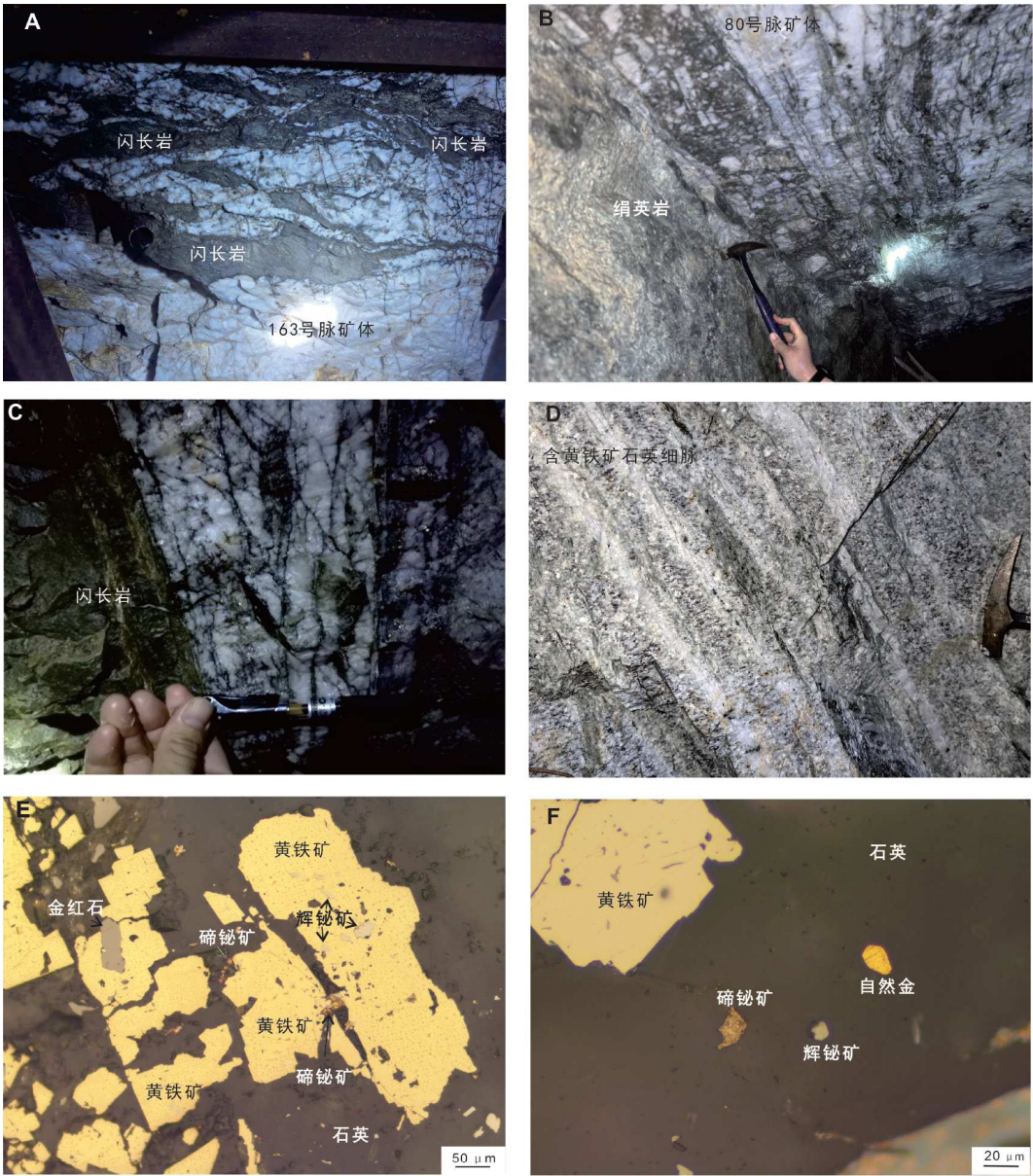


图4 五龙金石英脉型主矿体及细脉蚀变岩型矿特征。(A) 163号脉矿体示剪切作用形成(闪长岩脉呈扁豆状定向产于石英脉中)(四分矿24中段); (B) 80号脉矿体, 脉侧示剪切条带, 左侧示叠加晚阶段张性破碎呈角砾状构造(四分矿15中段); (C) 2-1号脉矿穿入于闪长岩中(三分矿6中段); (D) 细脉蚀变岩型矿体(四分矿15中段); (E) 细脉蚀变岩型矿石中黄铁矿呈半自形结构(光片); (F) 细脉蚀变岩型矿石中自然金呈浑圆状产出石英中

3.2 秋果碧蚀变岩型金矿床

秋果碧金矿床位于鸭绿江成矿带的北东段、鸭绿江断裂西侧(图1), 隶属宽甸满族自治县振江镇管辖, 矿区面积6.85 km²。矿区地层为古元古代辽河群变质岩系, 包括里尔峪组斜长角闪岩、大理岩和盖县组黑云母片岩、黑云变粒岩等。矿区中西部出露燕山期石英二长闪长岩岩体, 岩性主要为闪长岩, 伴生大量中基性-中酸性岩脉, 岩性为闪长岩、闪长玢岩、煌斑岩、花岗斑岩等(图5), 其中煌斑岩最为发育。岩脉呈近南北向或北东向展

布, 宽5–60 m, 延长200–500 m不等。辽宁有色地质103队有限责任公司于2023年勘探发现金矿化带, 随后在鸭绿江断裂带对区域金矿导矿与控矿新认识的指导下(朱日祥等, 2024), 103地质队发现煌斑岩蚀变与金矿化关系密切, 蚀变煌斑岩金品位可达0.78 g/t。北东走向花岗斑岩脉宽5–30 m, 延长200–800 m不等。矿区2和9号金矿体产于花岗斑岩脉中, ZK20-1孔中金平均品位4.05 g/t。矿区内发育含硫化物石英细脉或网脉、蚀变煌斑岩、硅化角砾岩、断层泥、构造透镜体等, 有分支复合、膨缩等

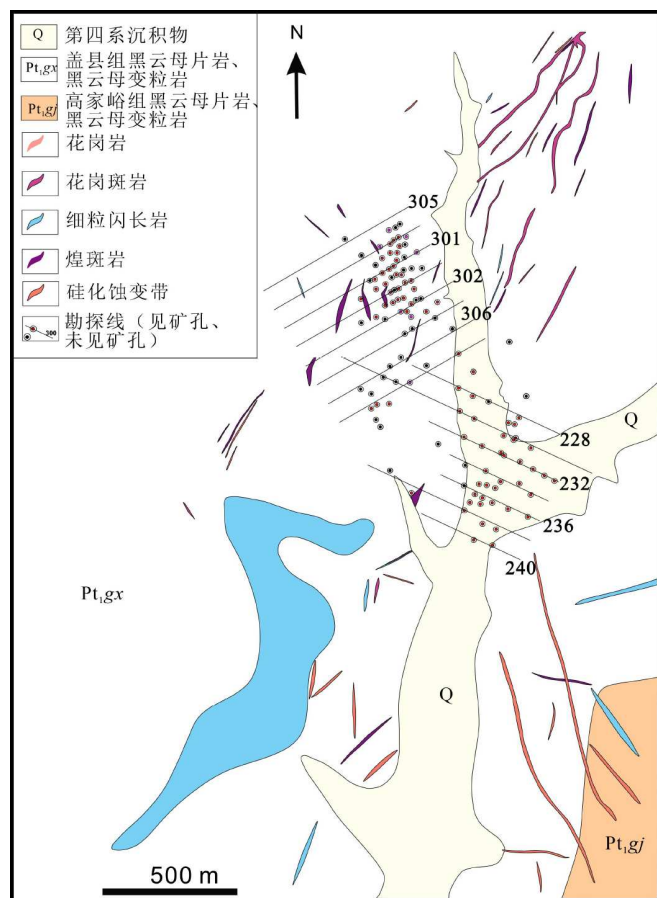


图5 秋果碧金矿床地质简图

特征,反映了北东向断裂早期挤压、晚期拉张的活动特点,该组断裂为区内主要的含矿构造。厚大金矿体往往出现在断裂与平缓构造相交部位或构造转折部位。近南北向二级断裂,向东倾斜,倾角 50° – 70° ,延长300–1000 m,延深200–300 m。断裂内挤压片理化、构造透镜体发育,并发育强硅化蚀变岩、蚀变煌斑岩等,硅化、石墨化较强。此外发育北东向成矿后断裂,对矿体存在破坏作用。金矿体主要赋存于北东向和北西向三级断裂中。矿体的分布、形态、规模和产状受热液蚀变带控制,目前矿区内已勘查确定1、2、3、4、6、7、9、10、11、15、16、17共12条破碎蚀变岩型金矿体及1条金矿化体。其中3、6号矿体为主矿体,15、16、17号金矿体为新发现的盲矿体。

3和6号矿体赋存于北西向硅化破碎蚀变岩带中,具有上部较陡、下部较缓及尖灭再现特点,围岩为云母片岩、黑云变粒岩(图6)。其中,3号金矿体分布于304和305线之间,矿体产状为倾向 60° ,倾角 45° – 70° ,控制延长320 m,延深225 m,矿体厚度0.33–2.28 m,平均0.87 m,矿石金品位一般为0.97–8.01 g/t(平均品位3.51 g/t),

银平均品位18.58 g/t。6号金矿体分布于300–305线之间,属隐伏矿体,矿体产状为 60° – 47° – 68° ,控制矿体延长240 m,延深210 m;一般厚度0.60–2.60 m,平均厚度1.11 m,金品位一般为0.82–5.00 g/t(平均品位2.40 g/t),银平均品位3.03 g/t。15号、17号金矿体,产于硅化破碎蚀变带中,其中15号矿体分布于234–228线之间,产状为 115° – 30° ,控制延长120 m,控制延深180 m,厚度1.27–2.70 m,平均厚度1.99 m,金品位1.55–4.73 g/t(平均金品位3.26 g/t);17号金矿体分布于234–230线之间,产状为 115° – 30° 。控制延长200 m,控制延深140 m,厚度0.83–2.60 m,平均厚度1.51 m,一般金品位2.03–4.40 g/t(平均金品位3.80 g/t)。矿区内许多矿体如10号、11号、15号、16号、17号等矿体的延长、延深仍未完全控制,具有巨大找矿前景。

矿石类型单一,主要为蚀变岩型矿石(原岩变粒岩、片岩、闪长玢岩、花岗斑岩等),矿石构造主要为网脉状、浸染状、角砾状构造等(图7A–7E),呈他形晶微粒、半自形-他形晶微粒状结构。地表少量氧化矿,氧化带厚度一般在5–10 m。矿石金属矿物主要为黄铁矿、毒砂,少量黄铜矿、方铅矿、辉铜矿、辉银矿、自然金、碲化物等(图7F–7H);脉石矿物以石英、长石、黑云母、绿泥石和方解石。矿床围岩蚀变发育,主要包括硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化。按矿物组合及其脉体穿切关系,初步划分为三个成矿阶段:(1)石英-黄铁矿阶段,乳白色或灰色石英脉或细脉(图7B),含少量黄铁矿,且黄铁矿多以半自形粒状产出,为金的早期成矿阶段;(2)石英-黄铁矿-毒砂阶段,灰色石英网脉状产出或胶结早阶段脉角砾产出(图7B),黄铁矿、毒砂等硫化物有较多产出,是金最主要成矿阶段;(3)石英-碳酸盐阶段,呈白色石英-方解石细脉或铁白云石细脉产出,切穿早期两个阶段矿物。

秋果碧金矿产于盖县组,金矿体受缓倾斜三级断裂破碎带控制,表现为破碎蚀变岩型金矿化,与区域上受陡倾三级断裂或更低级别断裂控石英脉型金矿体在形成时代上一致,也为早白垩世。空间上产于一级断裂与二级断裂控制的不同区域(图2)。

3.3 四道沟蚀变岩型金矿床

四道沟金矿位于丹东市南部,鸭绿江断裂带上盘(图1和2),产于辽河群盖县组地层中,金矿化类型为蚀变岩型,金矿体主要赋存围岩为变质砂岩及强破碎的石墨化片岩。矿区内震旦系石英岩覆盖于辽河群之上,侏罗系为小东沟组,主要由粉砂岩、砂岩、凝灰质-粉砂质页岩及砾岩、泥灰岩组成,为河湖相砂页岩建造(范国清,

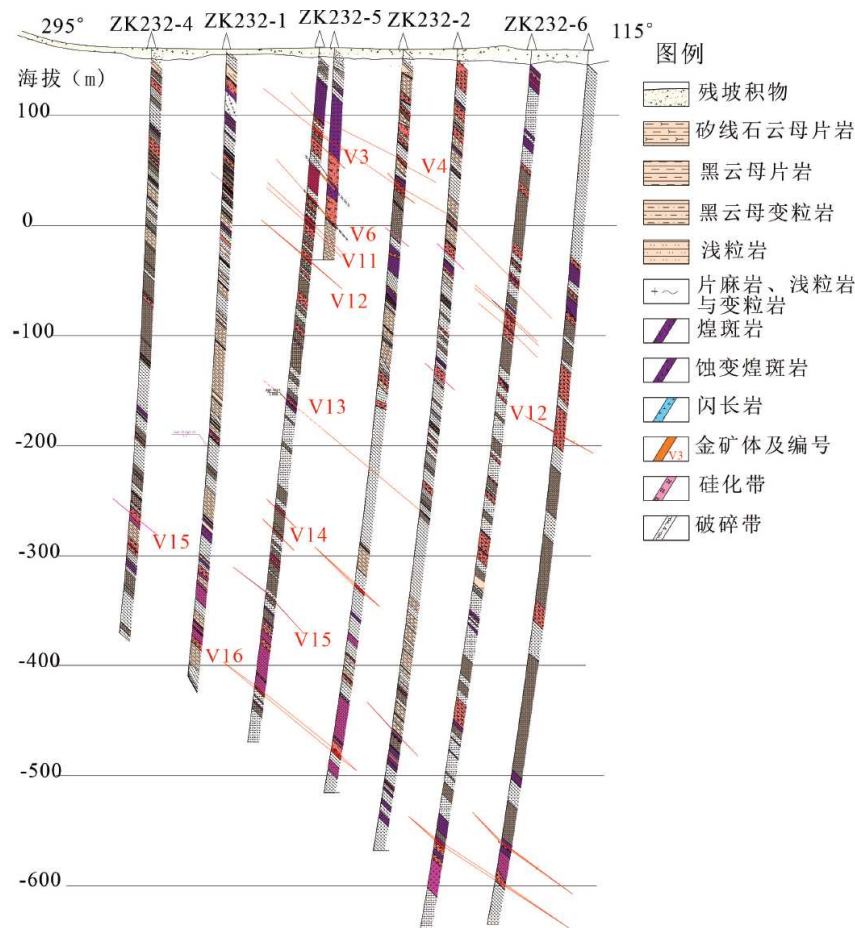


图6 宽甸县秋果碧金矿床232勘探线地质剖面简图

1996)。矿区断裂构造主要由四条北东向三级断裂及其次级层间破碎带构造组成，次级层间破碎带是主要容矿构造。矿区脉岩发育，主要为闪长岩和煌斑岩，闪长岩总体NE向分布，规模较大，而煌斑岩脉常与金矿体相伴平行产出，在煌斑岩脉上、下盘均有金矿脉产出(肖国洪和秦延华，2002)。矿区内已圈定工业矿体26个，单个矿体规模变化较大，长度由几米到100多米，一般30–50 m，矿体延深50–250 m不等(张晓东等，2008)，金矿体品位变化于3.0–15.0 g/t。矿石金属矿物以黄铁矿为主，次要金属矿物为磁黄铁矿、白钨矿、黄铜矿、方铅矿、毒砂、自然金等；金主要呈裂隙金和包体金产出，以裂隙金为主(肖国洪和秦延华，2002)。脉石矿物包括石英、绢云母、绿泥石、方解石、白云石等。矿石构造为块状、细脉状、浸染状、角砾状、晶洞构造等(图8)。近矿围岩蚀变类型有硅化、绢云母化、绿泥石化及碳酸盐化等。矿床热液成矿作用可划分为三个阶段：石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物阶段、石英-碳酸盐阶段(Yu等，2025)。

4 鸭绿江断裂带多级控矿作用

鸭绿江断裂带控制了区域金属矿产的空间分布，表现为多级控矿作用。一级构造表现为对矿带的控制，区内金多金属矿床在空间上沿一级断裂带分布。一级构造控矿具体有两种形式，一种是通过二级断裂控制矿床产出，另一种是通过控制早白垩世侵入岩体产出而控制相关金属矿床分布，如石柱山矿田内斑岩钼矿、矽卡岩铜多金属矿及热液脉状金矿受控于石柱山复式岩体(Wu等，2025)。断裂带内复式岩体则产于鸭绿江断裂带与北西向断裂的交汇部位(图9A)，同时该断裂带也控制了区域内金等地球化学异常(董南庭等，1989；于成广，2016)。北东/北西向二级断裂构造主要控制矿田分布，北东向断裂多平行展布(图9B)，如五龙金矿田受五条区域北东向断裂构造控制。北西向断裂与北东向断裂交汇则控制了侵入岩体及相关矿床的产出，如石柱山矿田，这些断裂及其交汇部位也控制了金多金属地球化学异常区，如五龙金矿田、古楼子金矿田、石柱山金多金属矿田、古马岭金矿田等。区域北侧荒沟山“S”形断裂发育于鸭绿

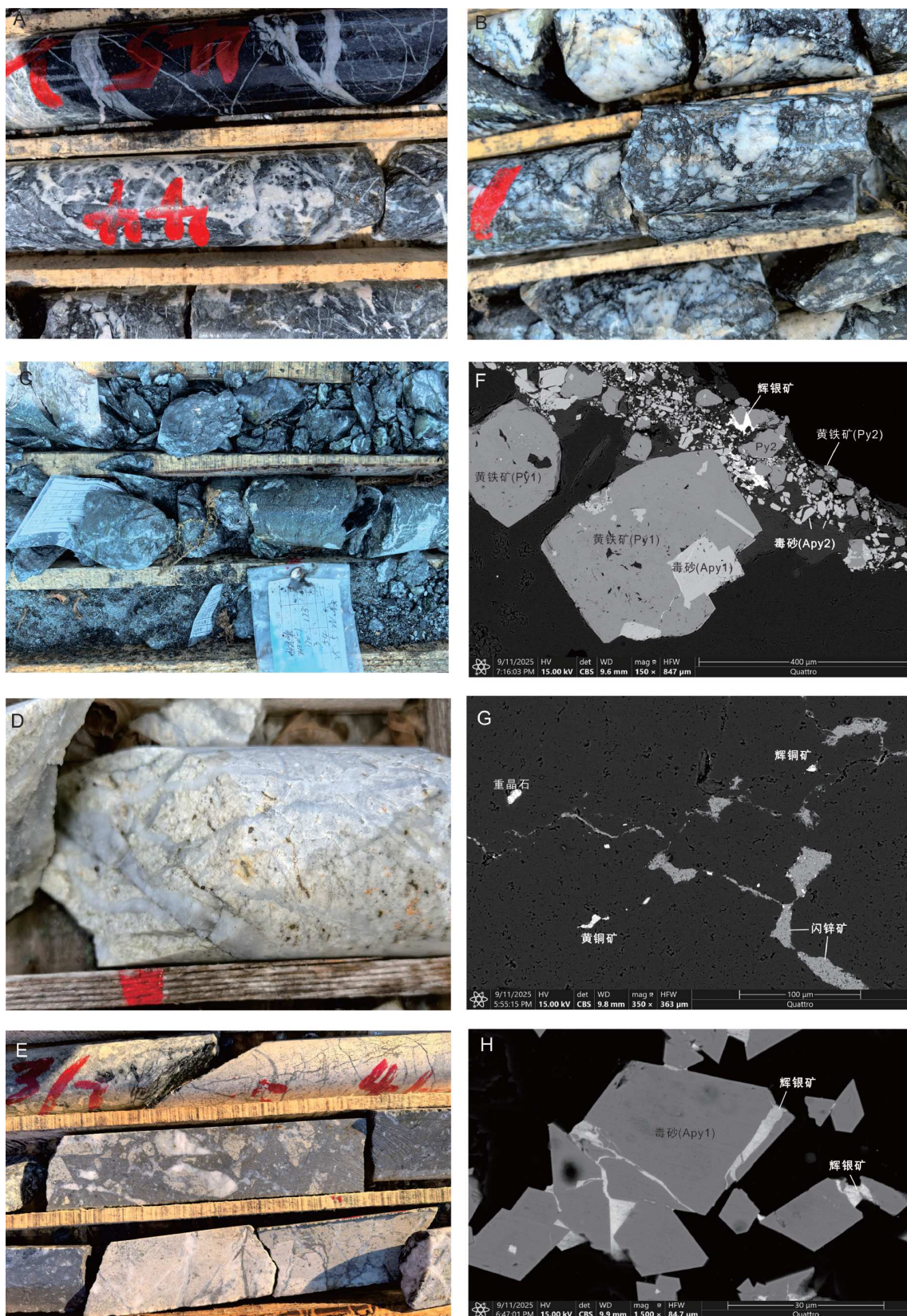


图7 宽甸满族自治县秋果碧金矿床矿石及矿物特征。(A) 网脉状蚀变岩型矿(原岩片岩, ZK318-2); (B) 角砾状构造矿(ZK306-11); (C) 蚀变岩型矿(原岩含石墨片岩, ZK310-1); (D) 网脉状蚀变岩型矿(原岩花岗岩, ZK302-2); (E) 角砾状及网脉状构造矿(原岩细晶岩, ZK230-6); (F) 自形-半自形两世代黄铁矿、毒砂(扫描电镜); (G) 沿裂隙充填硫化物(扫描电镜); (H) 自形毒砂被晚阶段辉银矿充填(扫描电镜)

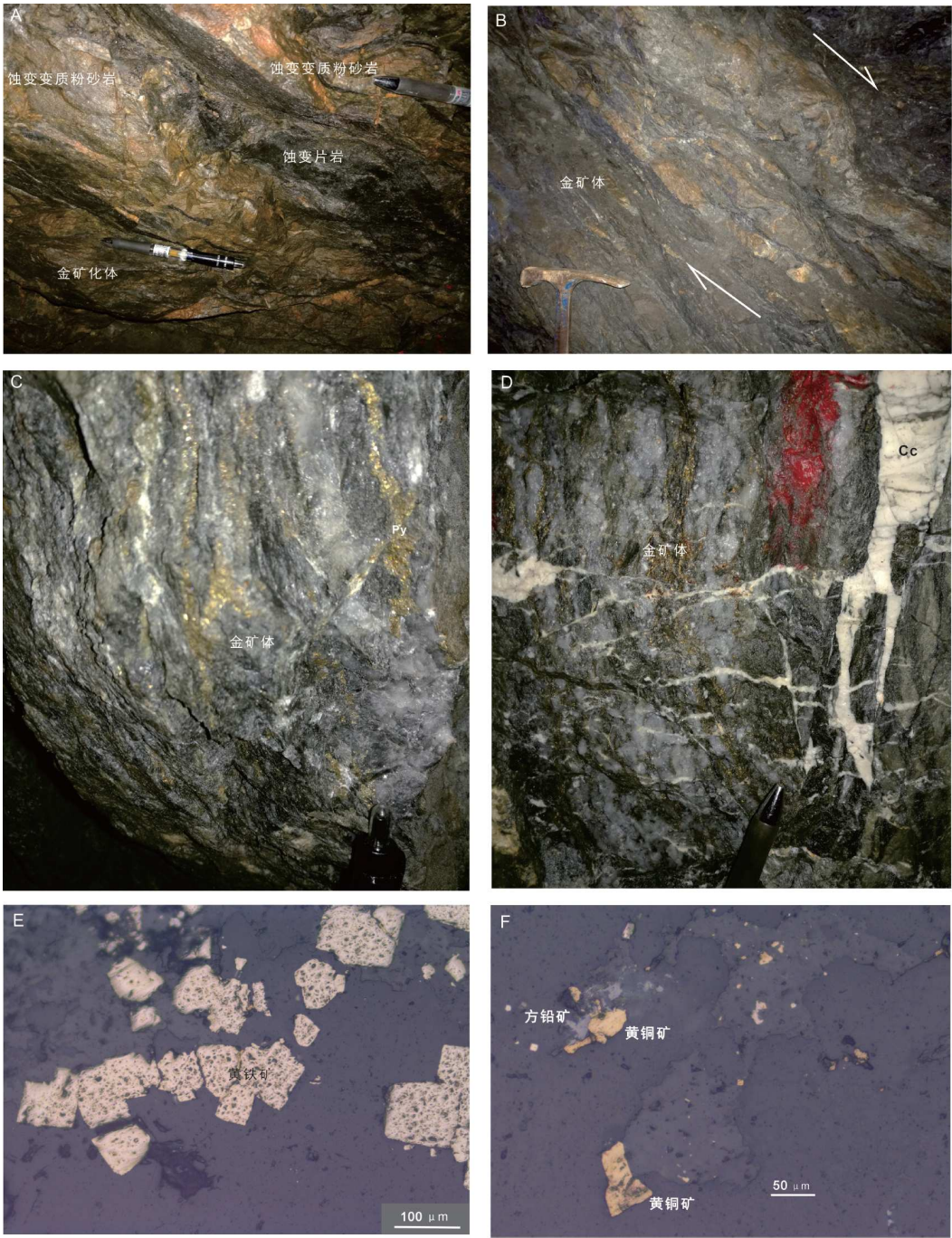


图8 丹东市四道沟金矿矿体特征。(A) 变质粉砂岩与片岩互层；(B) 蚀变岩型矿，正断活动；(C) 细脉-浸染状蚀变岩型矿体(黄铁绢英岩，黄铁矿呈细脉产出)；(D) 晚阶段方解石脉切入于强硅化蚀变岩型矿体中；(E) 自形-半自形黄铁矿呈细脉状产出；(F) 石英多金属硫化物阶段黄铜矿与方铅矿；Py-黄铁矿；Cc-方解石

江断裂西北侧，控制了荒沟山硫铁-铅锌矿、荒沟山金矿、大清沟金矿、八里沟金矿、南大坡金矿等的产出，构成荒沟山矿带或矿田。目前在五龙金矿区北东向二级断裂构造中发现了具有工业价值的大规模细脉带蚀变岩型金矿体(曾庆栋等, 2025)，进一步证明这些二级断裂构造具有重要的导矿-控矿作用。

三级断裂构造表现为控制矿床及矿体的展布，矿田范围内还发育更低级的断裂构造(图9B)，如低序次的张性及张剪性断裂、压剪性断裂等，主要为北北东、北西向展布，具有早期张性、中期张剪性及晚期拉张等多阶段活动特点，控制了矿床、矿体的分布。如五龙金矿目前金矿体主要受北西、北北东向两组共轭断裂控制，秋

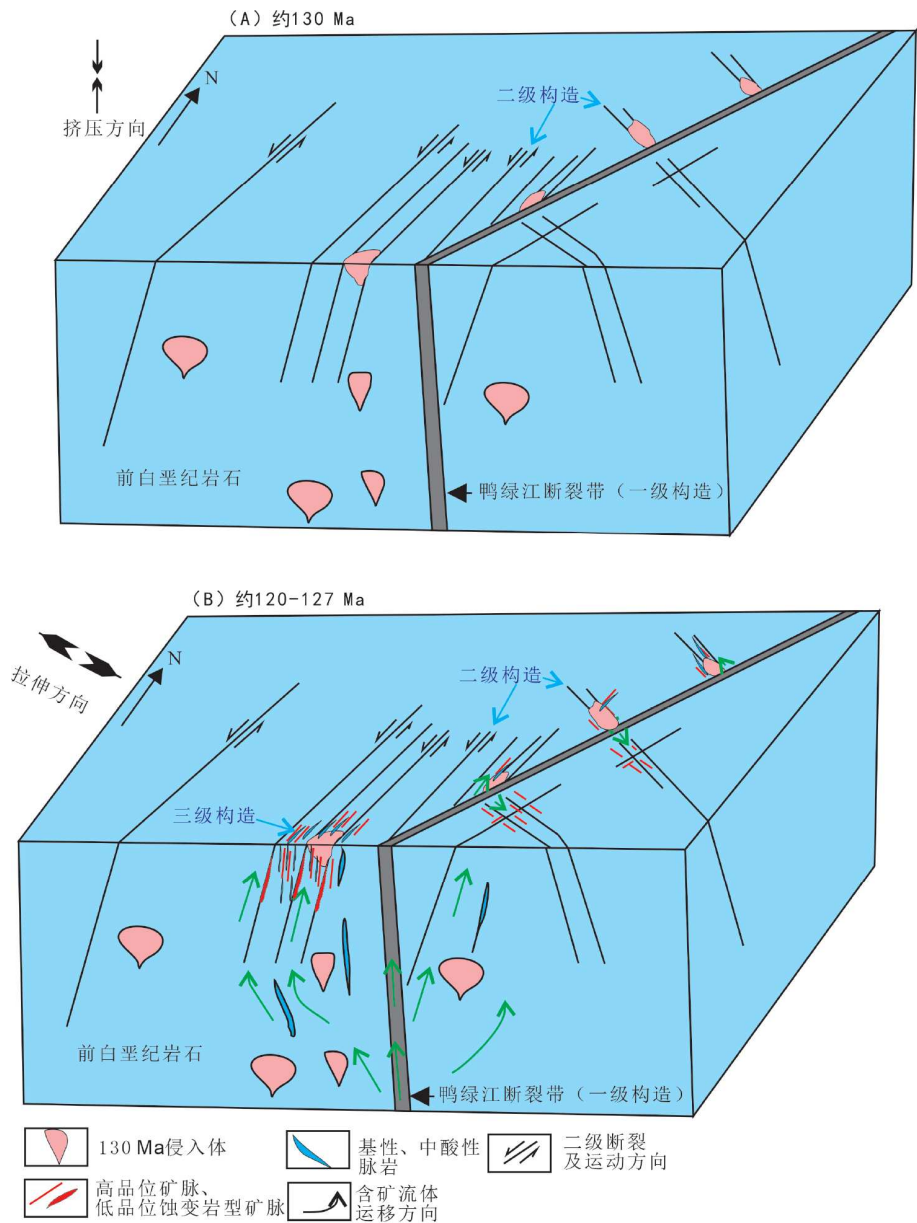


图9 鸭绿江断裂带多级构造控矿模式。(A) 130 Ma, 鸭绿江断裂带(一级构造)左行活动, 边部次级断裂(二级构造)形成, 在有利部位, 花岗质岩体侵入, 形成控制矿田构造; (B) 127-120 Ma, 鸭绿江断裂带左行剪切活动, 深部含矿流体沿断裂带上涌, 至地壳浅部, 流体运移至二级断裂构造薄弱部位及三级断裂中沉淀成矿

果碧金矿矿体也主要受这两组断裂控制。外围地区同样发育大量这种类型构造, 并具有明显的矿化异常。

5 鸭绿江断裂带蚀变岩型金矿找矿前景

5.1 控矿因素与找矿标志

鸭绿江断裂带内金矿成矿时代主要为早白垩世, 金的成矿作用与华北克拉通破坏、中生代岩浆-流体活动及辽河群地层密切相关(曾庆栋等, 2019, 2023; 朱日祥等, 2015, 2024; 俞炳等, 2025)。

(1)构造因素与标志。目前辽东金矿省内金矿床多为热液金矿床, 受不同类型的构造控制, 石英脉金矿主要受高角度陡倾断裂构造体系控制, 高品位破碎蚀变岩型金矿则主要受低角度层间断裂构造控制(曾庆栋等, 2019, 2023), 一些产于辽河群的大型/超大型低品位破碎蚀变岩型金矿, 如大东沟金矿床可能受背斜构造(李浩等, 2024)或巨型剪切构造控制(李勇等, 2025), 而产于花岗岩体中的低品位细脉蚀变岩型金矿则受二级断裂构造扩容部位控制(曾庆栋等, 2025)。区内石英脉型金矿主要受二级断裂构造的次级构造控制, 总体上呈NNE向、

NW向产出, 断裂具有多期剪切活动特点(曾庆栋等, 2023)。

辽东破碎蚀变岩型金矿产出构造部位主要为辽河群不同岩性界面-构造薄弱面。辽河群地层主要岩性为变质碎屑岩和大理岩, 在下部层位发育变质火山岩(辽宁省地质矿产局, 1989)。大理岩与片岩、片岩与变质砂岩等接触带都是构造薄弱面, 在辽河群地层褶皱变形过程中, 沿这些构造薄弱面易发生层间滑动, 形成层间断裂带。在后期构造活动及成矿热液活动时, 含矿热液向这些层间断裂带运移并沉淀, 从而形成金矿床。辽河群地层中破碎蚀变岩型金矿床主要受大石桥组和盖县组不同岩性建造界面附近的滑脱面控制, 含矿构造带产状平缓、延伸稳定, 由一系列近于平行的、断续出现的构造蚀变带组成。矿化沿着辽河群上部大石桥组和盖县组的岩性接触界面附近及层间破碎带中发育, 总体表现出一定的层位及构造控制。

因此, 区域内花岗岩岩体内叠加的二级断裂是寻找细脉蚀变岩或破碎蚀变岩型金矿的重要构造标志, 而三级或更低序次陡倾断裂则是寻找高品位石英脉型金矿的重要构造标志; 辽河群地层内发育的三级或更低序次缓倾层间断裂是高品位破碎蚀变岩型金矿找矿构造标志; 多组断裂交汇处、盖县组地层大型剪切构造或褶皱构造叠加区段是寻找低品位大型、超大型破碎蚀变岩型金矿的重要构造标志。

(2)地层因素与标志。辽河群在辽东地区广泛分布, 主要为一套碳酸盐岩和碎屑岩组合, 包括浪子山组、里尔峪组变质火山-沉积岩组合, 高家峪组变质碳酸盐岩与变质火山-沉积岩组合, 大石桥组变质碳酸盐岩与变质碎屑岩组合, 盖县组变质碎屑岩与变质碳酸盐岩组合(辽宁省地质矿产局, 1989)。区域内金属矿产的分布与其具有密切的空间关系, 具有下部产出硼矿、铜钴矿、中部铅锌矿、上部金矿的空间控矿规律。金矿主要产于绿片岩相-低角闪岩相变质的盖县组, 部分产于中生代花岗岩和大石桥组顶部地层中。其中, 产于盖县组及大石桥组地层的金矿多为蚀变岩型金矿, 如营口市大东沟金矿、猫岭金矿、丹东市青城子矿田内小佟家堡子金矿、林家三道沟金矿、白云金矿、丹东市四道沟金矿、宽甸县秋果碧金矿等。

辽东地区盖县组地层具有高的Au元素异常背景值(~107 ppb; 彭省临和杨德江, 1996), 远超地壳丰度克拉克值。从S-Pb同位素研究结果来看, 赋存在盖县组地层中的金矿床S值变化范围较大, 与盖县组地层S同位素组成相同, 表明盖县组地层可能为这些金矿床贡献了S源, 明显区别于产出于中生代花岗岩中具有岩浆硫同位素特

征的金矿床。辽东金矿床的Pb同位素组成与辽河群盖县组地层Pb同位素组成相似。此外, 众多辽东金矿床的黄铁矿微量元素分析也显示, 部分黄铁矿Co/Ni比值明显<1。因此, 盖县组地层对于辽东金成矿具有重要的作用(曾庆栋等, 2019; Sun等, 2022; 吴文彬等, 2022; Yu等, 2022; 朱日祥等, 2024)。三叠纪、早侏罗世和早白垩世岩浆热液活动通过水-岩相互作用大量萃取了盖县组地层古元古预富集的成矿物质和成矿元素(俞炳等, 2024), 致使赋矿围岩为盖县组地层的辽东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, 这些富Au成矿流体最终在构造薄弱部位(层间破碎带/韧性剪切带)富集成矿。盖县组地层硅化蚀变强烈、硫化物发育地段是金矿找矿的最有利层位, 表现为盖县组叠加了褶皱作用或经历了剪切作用造成层间滑动、产生密集裂隙带, 形成有利赋矿空间, 需要在今后的找矿勘查工作中加以重视。

(3)岩浆岩控矿因素与标志。主要表现为早白垩世岩浆活动对金矿的贡献, 区内无论产于中生代花岗岩的金矿, 还是产于辽河群地层的金矿, 均与早白垩世岩浆活动密切相关(曾庆栋等, 2019, 2023; 朱日祥等, 2024), 岩浆作用不仅提供部分成矿物质和成矿流体, 更为重要的是提供了热源, 促使成矿流体萃取围岩中预富集的成矿元素。如王家崴子金矿床产于盖县组地层, 矿床矿石光片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(0.02–16.8 ppm)和As(16.9–15500 ppm)。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。辽河群盖县组地层高的金的背景值构成了一个有利金成矿地球化学场, 不同岩性的发育构成了成矿有利的构造薄弱面—层间滑动断裂的广泛发育, 而广泛发育的早白垩世岩浆活动则是辽东大规模金矿成矿的催化剂, 也正是这三个因素导致辽东地区金矿, 特别是大型/超大型金矿多产于盖县组地层。中基性及中酸性岩脉发育是金矿找矿的岩浆岩标志。因此, 早白垩世岩浆活动既携带了大量深部成矿物质至浅部(朱日祥等, 2015), 也是盖县组地层中成矿物质活化的热引擎, 起到了双重作用。

(4)物化探标志。区域内已有地球物理探测表明, 区内含金构造带具有明显的低电阻率异常, 同时由于各金矿床矿脉中发育磁黄铁矿, 大规模金矿化发育区具有较为明显的正磁异常。因此, 盖县组地层内若发育显著正磁异常, 则具有低品位大型蚀变岩型金矿找矿潜力, 也就是说低电阻率和正磁异常是区域金矿找矿的地球物理

标志。已有区域及矿区水系沉积物及土壤地球化学测量结果表明, 矿化集中区或矿区范围具有明显的综合地球化学异常, 异常具有面积大、元素分带明显并有浓集中心的特点。Au、Ag、As、Pb、Zn等元素组合异常强度高、浓集中心明显的异常分布区是区域找矿的重要靶区。

(5) 围岩蚀变标志。区内金矿床均具有明显且强烈的围岩蚀变特点, 围岩蚀变类型主要为硅化、绢英岩化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。金矿产出的围岩不同, 蚀变类型略有差异。围岩蚀变的规模与强度反映了成矿热液流体与围岩的水岩反应强度, 只有巨量的成矿流体才能形成大型/超大型金矿床。围岩蚀变的规模和强度与矿床规模的大小成正比, 围岩蚀变强度大、范围广则金矿化强度大, 也就是说区域上强烈围岩蚀变发育的地段是重要的找矿靶区。

5.2 蚀变岩型金矿找矿前景

鸭绿江断裂带发育了一系列金矿床、矿化点, 这些矿床、矿化点除五龙、四道沟及大东沟金矿有相对较多的浅部钻探或坑道工程控制外, 其他金矿床、矿化点缺少系统的研究与勘探工作, 对于矿带平面延长及延深均缺少工程。鸭绿江成矿带强烈的围岩蚀变(硅化、绢云母化、绿泥石化)表明了成矿带发育强烈的流体活动, 具有良好的容矿空间, 而成矿带金等成矿元素地球化学异常的存在(董南庭等, 1989; 刘国昊, 2017; 王飞, 2017)也表明了金成矿潜力巨大。

五龙金矿区厚大细脉蚀变岩型金矿体的新发现, 展示了区内二级断裂构造成矿的巨大潜力。北段秋果碧蚀变岩型金矿床的新发现及外围矿化蚀变带的广泛发育, 表明秋果碧金矿床及邻区具有良好的找矿突破前景。最北段古马岭金矿区地球化学异常及初步勘探结果表明(王飞, 2017), 古马岭金矿区找矿潜力不容忽视。所有这些重大进展及标志都表明, 鸭绿带成矿带蚀变岩型金矿找矿潜力巨大, 是我国重要的黄金战略接替基地。

6 结论

(1) 鸭绿江成矿带具有多级断裂控矿特征: 一级鸭绿江断裂控制区域金矿及区域地球化学异常展布; 二级北东向断裂发育区控制金矿田产出, 或北西向断裂与鸭绿江断裂交汇部位控制矿田产出; 三级北北东(北东)向及北西向断裂则控制了金矿床及金矿体的产出和分布。

(2) 鸭绿江成矿带内金矿包括蚀变岩型和石英脉型两种类型。石英脉型金矿矿脉受陡倾三级断裂构造控制, 具脉窄、高品位特点; 蚀变岩型金矿有三种产出形式: 一为受二级断裂带控制的陡倾细脉蚀变岩型低品位金矿,

具矿体宽大、中低品位特点; 二为受中等至缓倾层间断裂(破碎带)控制的破碎蚀变岩型金矿, 具脉窄、中高品位特点; 三为受平缓剪切构造控制的网状蚀变岩型金矿, 具厚度大、品位低的特点。

(3) 鸭绿江成矿带成矿地质条件优越, 控矿地层、构造、岩浆岩标志及地球物理和地球化学异常发育, 表明成矿带具有巨大的找矿潜力, 特别是蚀变岩型金矿是最重要的找矿目标。

致谢 感谢赵国春院士及另一匿名审稿人对本文提出的宝贵修改建议, 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司、辽宁五龙黄金矿业有限责任公司和丹东青城子矿业公司相关工作人员以及中国地质调查局发展研究中心颜廷杰正高级工程师等对野外科学考察工作的大力支持。辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司石闯工程师, 中国科学院地质与地球物理研究所李逢春博士, 贵州大学硕士生孙南天、吴松松、王淑、王均益, 合肥工业大学硕士生王景怡、王纪元、汪俊杰参加了野外考察。

参考文献

- 董南庭, 武贵禄, 王光奇, 等. 1989. 鸭绿江断裂带基本地质特征及成矿规律. 吉林地质, 4: 1-25
- 范国清. 1996. 关于辽东-吉南中侏罗-早白垩世地层问题. 辽宁地质, 2: 98-108
- 李浩, 韩吉龙, 王功文, 等. 2024. 辽东矿集区大东沟金矿床成矿时代和成因: 地质、年代学、地球化学和同位素制约. 岩石学报, 40: 3191-3210
- 李勇, 王东波, 樊金虎, 等. 2025. 辽宁大东沟超大型低品位金矿的发现及地质意义. 中国矿业, 34: 233-238
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社. 1-856
- 刘国昊. 2017. 鸭绿江断裂带宽甸段金元素地球化学特征. 西部探矿工程, (1): 111-113
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学: 地球科学, 41: 618-637
- 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: 146-153
- 宋建潮, 胡铁军, 王恩德, 等. 2009. 鸭绿江断裂带两侧成矿条件对比及对辽东地区未来寻找金属矿产资源的启示. 矿床地质, 28: 449-461
- 王飞. 2017. 吉林省集安市古马岭金矿床地质特征及外围找矿成果. 吉林地质, 36: 22-25
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11: 305-317
- 吴文彬, 闵振友, 王玉平, 等. 2022. 辽东卧龙泉金矿床地质特征及找矿方向. 黄金, 43: 28-33
- 肖国洪, 秦延华. 2002. 四道沟金矿床地质特征及找矿方向. 黄金, 23: 5-7
- 肖世柳, 朱光, 张帅, 等. 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: 3022-3036
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 等. 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程. 中国科学: 地球科学, 51: 1401-1419
- 于成广. 2016. 辽宁鸭绿江成矿带水系沉积物地球化学特征及远景预测. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-190
- 俞炳, 曾庆栋, 王永彬, 等. 2025. 辽东鸭绿江金成矿带下河口金矿床成因: 地质、S-Pb-He-Ar同位素和硫化物微量元素证据. 岩石学报, 41:

- 2897–2911
- 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: 1249–1263
- 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 等. 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力. *岩石学报*, 35: 1939–1963
- 曾庆栋, 陈仁义, 俞炳, 等. 2023. 辽东金矿床. 北京: 地质出版社. 1–260
- 曾庆栋, 汪凤伟, 刘福兴, 等. 2025. 辽东金矿省五龙蚀变岩型金矿新发现. *岩石学报*, 41: 2889–2896
- 张国仁, 江淑娥, 韩晓平, 等. 2006. 鸭绿江断裂带的主要特征及其研究意义. *地质与资源*, 15: 11–19
- 张帅, 朱光, 顾承串, 等. 2017. 辽-吉造山带东南边界位置探讨. *科学通报*, 62: 2814–2828
- 张晓东, 杜祖权, 侯传罡. 2008. 辽东四道沟金矿床地质特征及找矿方向. *黄金*, 29: 18–21
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 2015. 克拉通破坏型金矿床. *中国科学: 地球科学*, 45: 1153–1168
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 49: 1346–1356
- 朱日祥, 杨进辉, 王功文, 等. 2024. 辽东地区金矿床成因与资源潜力. *中国科学: 地球科学*, 54: 677–692
- Liu C, Zhu G, Zhang S, et al. 2018. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua-Mishan Fault Zone in NE China: A response to oceanic plate subduction. *Tectonophysics*, 723: 201–222
- Sun G, Zeng Q, Zhou L, et al. 2022. Mechanisms for invisible gold enrichment in the Liaodong Peninsula, NE China: *In situ* evidence from the Xiaotongjiapuzi deposit. *Gondwana Res*, 103: 276–296
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, et al. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 47: 173–195
- Wu J, Yang J, Yang J, et al. 2025. Contrasts in two-stage superimposed magmatism of the Shizhuzi magmatic complex-Mo-Cu-Au system, Liaodong Peninsula, North China Craton. *Minerals*, 15: 631
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. *Geol Soc Am Bull*, 119: 1405–1414
- Yu B, Zeng Q, Frimmel H E, et al. 2020. The 127 Ma gold mineralization in the Wulong deposit, Liaodong Peninsula, China: Constraints from molybdenite Re-Os, monazite U-Th-Pb, and zircon U-Pb geochronology. *Ore Geol Rev*, 121: 103542
- Yu B, Zeng Q, Frimmel H E, et al. 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 Geol Rev*, 102: 313–337
- Yu B, Zeng Q, Frimmel H E, et al. 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. *Resour Geol*, 72: e12303
- Yu B, Zeng Q, Yang J, et al. 2025. *In situ* SIMS U-Th-Pb dating of hydrothermal monazite from the Large Sidaogou Deposit, Liaodong Peninsula, NE China: Insights into Early Jurassic gold mineralization. *Acta Geol Sin (Eng)*, 99: 1725–1737
- Zhang P, Zhao Y, Kou L, et al. 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 Res*, 113: 210–231
- Zhang S, Dai L, Zhu G. 2025. Multiple Stages of strike-slip movement and the propagation of the Tan-Lu fault zone, East Asia. *Acta Geol Sin (Eng)*, 99: 352–369
- Zhang S, Zhu G, Liu C, et al. 2018. Strike-slip motion within the Yalu River Fault Zone, NE Asia: The development of a shear continental margin. *Tectonics*, 37: 1771–1796
- Zhang S, Zhu G, Liu C, et al. 2019. Episodicity of stress state in an overriding plate: Evidence from the Yalu River Fault Zone, East China. *Gondwana Res*, 71: 150–178
- Zhang S, Zhu G, Xiao S, et al. 2020. Temporal variations in the dynamic evolution of an overriding plate: Evidence from the Wulong area in the eastern North China Craton, China. *GSA Bull*, 132: 2023–2042
- Zhu G, Niu M, Xie C, et al. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. *J Geol*, 118: 277–293
- Zhu R, Zhang H, Zhu G, et al. 2017. Craton destruction and related resources. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 106: 2233–2257
- Zhu R, Zhao G, Xiao W, et al. 2021. Origin, accretion, and reworking of continents. *Rev Geophys*, 59: e2019RG000689

(责任编辑: 陈华勇)