中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 3 期: 677 ~ 692
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

辽东地区金矿床成因与资源潜力

朱日祥[1*], 杨进辉[1], 王功文[2], 曾庆栋[1], 薛国强[1], 徐涛[1], 李兴辉[1], 张朋[3], 雷达[1], 朱光[4]

1. 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;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 沈阳 110034;
4. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009
* 通讯作者, E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2023-10-24; 收修改稿日期: 2023-12-13; 接受日期: 2024-01-17; 网络版发表日期: 2024-02-26
国家自然科学基金项目(批准号: 42288201)和国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600109)资助

摘要 华北东部广泛分布着与晚中生代克拉通破坏相关的金矿床, 但不同地区金矿床在研究程度、成矿特征、探明储量等方面存在显著差异. 华北东部的辽东具有与胶东相似的区域地质特征, 并共同经历了晚中生代克拉通破坏作用, 但其金成矿的理论研究和探明的黄金资源量却存在巨大差异. 本文在分析研究辽东区域地质、中生代岩浆-构造演化和矿床地质基础上, 通过深部-浅部综合地球物理探测和大数据AI资源量预测, 提出了辽东晚中生代金元素富集主体来自于克拉通破坏诱发的幔源熔流体, 金矿床主要受北东-北北东向断裂控制, 金矿类型以破碎带蚀变岩型和含硫化物石英脉型为主. 明确了鸭绿江主断裂带及相关的次级断裂、已知矿集区外围与深部是未来金矿资源勘查的重要区域, 预测鸭绿江成矿带黄金资源潜力巨大, 具备新增数千吨级黄金资源的潜力.

关键词 辽东, 金矿, 综合地球物理勘查, 找矿潜力, 找矿突破方向

1 引言

全球超大型金矿床多分布在克拉通上, 并与克拉通化过程中的造山-变质作用相关, 是由中地壳深度绿片岩相-角闪岩相进变质脱水、脱硫、脱碳形成的含金(H_2O-CO_2)流体迁移到地壳浅部沉淀形成(Gebre-Mariam等, 1995; Phillips和Powell, 2010; Tomkins, 2010; Yu等, 2024), 通常被称之为造山型金矿(Goldfarb等, 2001). 华北克拉通广泛分布着大型-超大型金矿床, 其探明储量占全国的50%以上, 金矿床围岩为前寒武纪变质岩及后期侵入的中生代岩浆岩, Groves等(1998)认为胶东金矿床也属于造山型金矿. 但近年的研究表明, 胶东地区在晚古生代经历了古特提斯洋俯冲, 在早中生代经历了大陆碰撞, 在晚中生代经历了克拉通破坏等多重构造作用(张秋生等, 1988; 郑永飞等, 2018; Zheng等, 2019). 胶东及华北克拉通东部其他地区金矿床主要形成于早白垩世, 与区内煌斑岩墙和辉绿岩墙成岩时代接近, 形成于白垩纪岩石圈减薄、软流圈上涌的伸展环境(孙丰月和石准立, 1995; Yang等, 2003; 毛景文等, 2005; Mao等, 2008), 与克拉通破坏所引起的构造、岩浆、流体活动有关, 是古太平洋板块俯冲作用下克拉通破坏的产物(朱日祥等, 2015;

中文引用格式: 朱日祥, 杨进辉, 王功文, 曾庆栋, 薛国强, 徐涛, 李兴辉, 张朋, 雷达, 朱光. 2024. 辽东地区金矿床成因与资源潜力. 中国科学: 地球科学, 54(3): 677–692, doi: 10.1360/SSTe-2023-0261
英文引用格式: Zhu R, Yang J, Wang G, Zeng Q, Xue G, Xu T, Li X, Zhang P, Lei D, Zhu G. 2024. The genesis and resource potential of gold deposits in the Liaodong Peninsula. Science China Earth Sciences, 67(3): 657–672, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1258-4

© 2024 《中国科学》杂志社

Wu等, 2019; 朱日祥等, 2020; Mao等, 2021; 杨进辉等, 2021及其参考文献), 且在成矿流体、成矿物质来源、矿床地质特征和成矿背景等方面明显区别于造山型金矿. 因此, 一些学者认为华北金矿床不是造山型金矿, 而是“胶东型金矿”(Deng等, 2015, 邓军等, 2023)或“克拉通破坏型金矿”(朱日祥等, 2015). 最近, Mao等(2021)通过研究欧亚大陆东部边缘多金属成矿特点与构造背景, 提出胶东和辽东白垩纪金矿属于晚太平洋板块后俯冲伸展环境下大规模成矿的组成部分, 即成矿元素来自岩石圈深部动力过程.

华北克拉通东部不同地区金矿床在研究程度、成矿类型、矿床地质特征、探明储量等方面存在显著差异. 胶东地区已探明黄金储量>5400t(Deng等, 2020a; 于晓卫等, 2023), 占全国的1/3以上. 而同处于郯庐断裂东部的辽东地区, 虽具有与胶东类似的前寒武纪基底岩石和广泛分布的中生代岩浆岩, 且经历了与胶东相同的克拉通破坏作用, 但辽东地区发现的黄金资源量与胶东地区存在巨大差距. 为深入研究辽东地区金矿成因、寻找黄金资源战略接替基地, 近年来国家设置专项对辽东地区金矿床进行了地质学、地球化学、地球物理学等多学科综合研究(毛景文等, 2005; 杨进辉等, 2021; 底青云等, 2021; 王功文等, 2021). 这些研究进一步表明, 辽东地区黄金资源量潜力巨大, 目前黄金已探明储量接近千吨. 本文在对比分析胶辽地区岩石圈深部结构、中生代构造演化、中生代岩浆作用与深部过程, 以及巨量成矿作用的基础上, 提出了辽东地区未来研究重点和黄金找矿勘查的新方向.

2 辽东地区晚中生代地质特征

辽东地区地处华北克拉通东北部, 介于郯庐断裂带与鸭绿江断裂带之间, 北邻中亚造山带(也称为兴蒙造山带)(图1). 该区南部的渤海以南, 为华北克拉通东南缘的胶北隆起, 发育了大规模的早白垩世克拉通破坏型/胶东型金矿(朱日祥等, 2015; Deng等, 2015, 邓军等, 2023). 在基底演化阶段, 辽东主体属于古元古代胶-辽-吉造山带, 其西北侧(海城-本溪南-通化一线西北侧)为龙岗地块, 东侧(鸭绿江断裂带以东)为狼林地块(张帅等, 2017). 辽东出露的岩石包括太古代-古元古代变质基底、中元古代-古生代海相沉积盖层、局部的侏罗纪-白垩纪陆相火山-沉积岩及一系列中生代岩体.

在华北克拉通破坏峰期(朱日祥等, 2011, 2012; Wu等, 2019; 杨进辉等, 2021; Zhu G等, 2021), 辽东地区发生了广泛而强烈的岩浆作用和地壳伸展活动, 并发育了一系列伸展构造(朱光等, 2021及其参考文献). 近年来, 大量高精度同位素年代学资料显示, 辽东地区中生代岩浆岩可划分为三期: 三叠纪(231~200Ma)、侏罗纪(183~152Ma)和早白垩世(131~120Ma), 其中早白垩世花岗岩和火山岩分布最为广泛(Wu等, 2005a; 杨进辉和吴福元, 2009; Sun等, 2021). 三叠纪岩浆岩主要包括碱性岩和钙碱性辉长岩-闪长岩-花岗岩(Yang等, 2012; Zhu Y S等, 2017); 侏罗纪岩浆岩则以中酸性闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩为主, 很少见基性岩(Wu等, 2005b; Sun等, 2021); 而早白垩世岩浆岩岩石类型复杂, 包括碱性岩、A型花岗岩和I型花岗岩, 且广泛伴生中基性岩石(杨进辉等, 2021). 辽东地区中生代岩浆岩在成岩时代、岩石类型等方面与胶东地区基本相似, 早白垩世华北克拉通破坏峰期岩浆作用最为强烈(图1b), 形成于强烈的伸展构造背景之下.

辽东地区广泛分布着早白垩世伸展构造, 包括一系列变质核杂岩、拆离断层、高角度正断层、顺层伸展滑动破碎带与伸展盆地(图1b). 辽东地区南部发育着变质核杂岩, 自南向北称为辽南与万福变质核杂岩(Lin等, 2008; Liu等, 2013). 变质核杂岩核部出露先前位于中地壳层次的太古代变质岩与中生代岩体, 核杂岩拆离断层带的上盘出露中元古代-古生代海相盖层, 并控制发育了早白垩世上叠盆地. 在120~100Ma期间, 辽南与万福变质核杂岩发生相对抬升与剥露(Yang等, 2007; Lin等, 2011). 万福变质核杂岩西侧, 发育大营子和孤山低角度拆离断层带, 两者的上盘均发育了伸展盆地(刘俊来等, 2011). 早白垩世北东-南西走向的高角度正断层在辽东地区中、北部广泛出现, 断层属性可划分为两类: 一类是新生的, 一般规模相对较小; 另一类是早期左行平移断裂的复活, 包括巨型的郯庐断裂带与鸭绿江断裂带(Zhu等, 2012; Zhang等, 2018, 2019; 朱光等, 2018). 早白垩世顺层伸展滑动破碎带, 主要发育在古元古代辽河群大石桥组大理岩与上覆盖县组片岩接触带上, 多为低角度产出, 以出现角砾岩带为特征, 并常伴生岩脉侵入与矿化. 这一类伸展构造在辽东中部的青城子矿集区最为发育, 主要呈近北东走

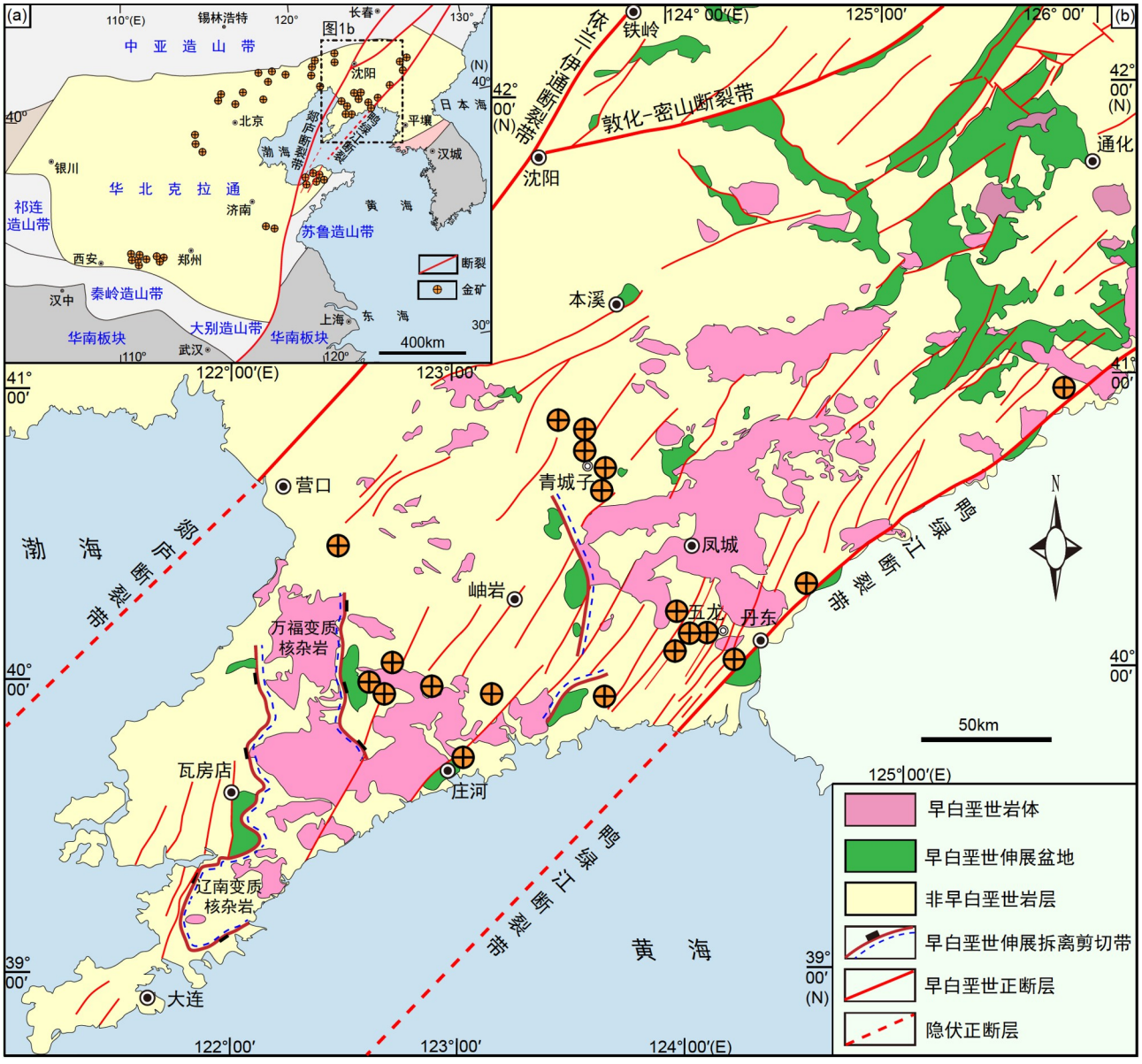


图 1　辽东地区早白垩世伸展构造、岩浆岩及金矿分布图

向(曾庆栋等, 2019).

辽东地区早白垩世发育的一系列伸展盆地均为小型的火山-沉积盆地(刘俊来等, 2011; 颜丹平等, 2021), 可划分为三种类型: 一类是辽南与万福变质核杂岩拆离断层带上盘发育的上叠盆地(东侧为桂云花盆地, 西侧为普兰店-瓦房店盆地); 另一类是大营子和孤山低角度拆离断层带上盘发育的伸展盆地(黄花甸-大营子盆地与孤山盆地); 还有一类为高角度正断层控制的断陷盆地(如丹东盆地和通远堡盆地; Zhang等, 2019). 辽东地区一系列伸展韧性拆离剪切带的$^{40}Ar/^{39}Ar$定年结果, 以及伸展盆地内火山岩的锆石U-Pb定年结果表明, 早白垩世伸展活动时限为135~106Ma(Yang等, 2007; Lin等, 2008, 2011; 刘俊来等, 2011; Liu等, 2013; Zhang等, 2019, 2020; 颜丹平等, 2021). 鸭绿江断裂带早白垩世期间转变为大型正断层带, 东盘主体下降, 控制发育了一系列断陷盆地(Zhang等, 2019); 西盘为上升盘, 剥露上地壳, 伴生了一系列北东-南西走向的高角度正断层(Zhang等, 2020).

3 地球物理探测与岩石圈深-浅结构

3.1 辽东地区岩石圈深部结构

在辽东地区区域地质考察和金矿床研究的基础上，沿着南东方向、穿过五龙和青城子两个矿集区布设了流动地震台阵探测和两个矿集区浅部地球物理综合探测，以查明辽东地区岩石圈深部结构和矿集区浅部地质构造与隐伏岩体(图2a). 综合华北克拉通东北缘及邻区宽频带流动台阵(NCISP6和NCISP10)和固定台站数据(Meng等, 2021; Ma等, 2022), Zhang等(2014)和Meng等(2021)利用远震S波接收函数偏移成像方法，获得了辽东地区岩石圈深度变化特征(图2b). 从图2b可见，穿越五龙和青城子两个金矿集区的AA′剖面，岩石圈厚度从东部约65km向西北逐渐加深到大兴安岭南部的100km左右. 这表明辽东地区岩石圈已被破坏和减薄，并且在空间上呈现出不均匀性，特别是沿郯庐断裂带与鸭绿江断裂带之间岩石圈厚度明显变薄(图2b)，而且岩石圈之下也存在明显的热异常，显示深大断裂在克拉通破坏与减薄过程起着重要的作用，并且为深部熔流体上侵提供了通道. 岩石圈厚度的显著减薄和强烈的熔流体交代作用，可能是辽东晚中生代金成矿的重要因素之一. 图2c揭示了龙岗地块下方5km左右太古代基底顶面，该界面向东可能延伸进入胶-辽-吉造山带，并逐渐变深，并被龙岗块体和胶-辽-

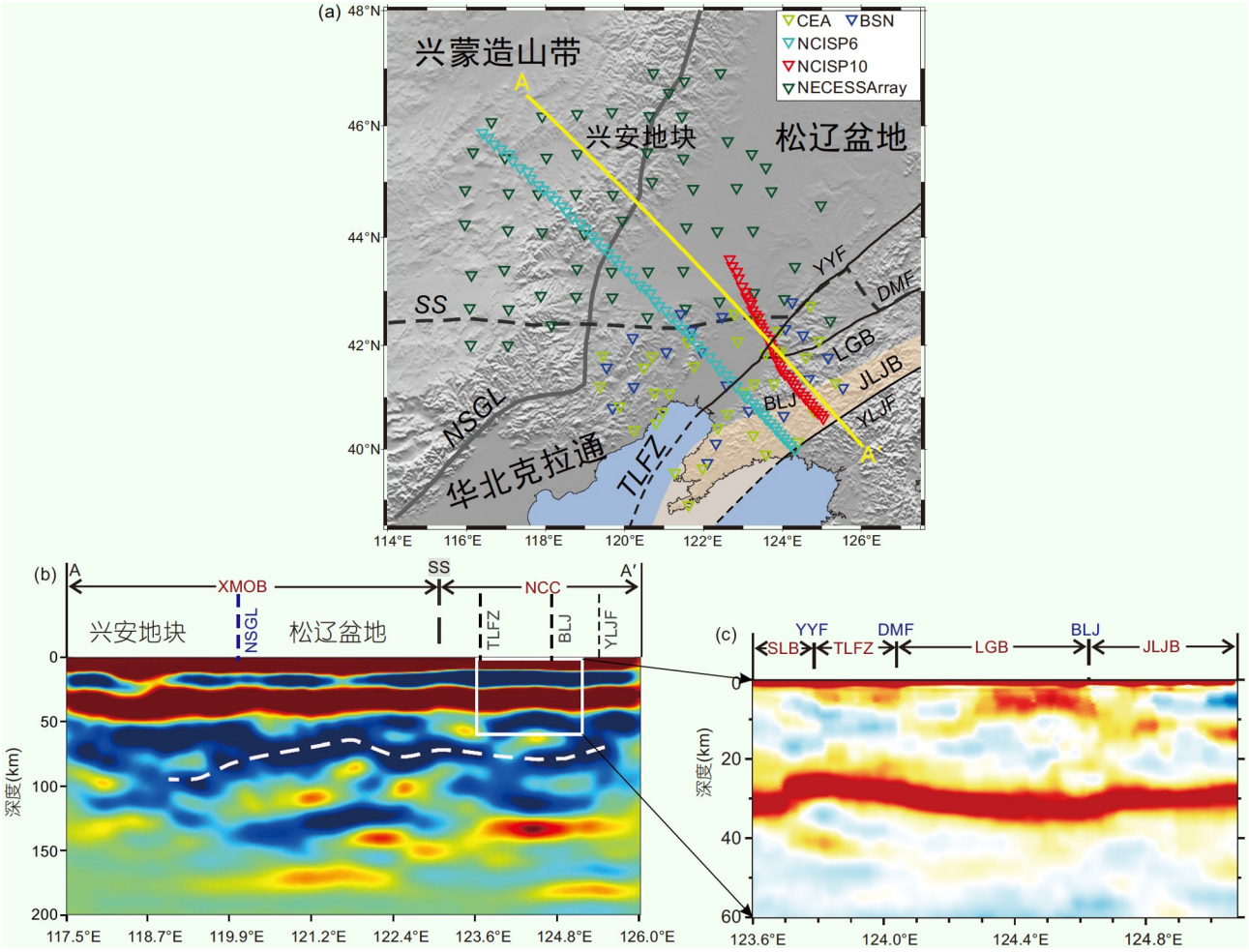


图 2　辽东地区岩石圈结构

(a) AA′剖面位置; (b) 白色虚线为AA′剖面岩石圈厚度(修改自Zhang等, 2014; Meng等, 2021); (c) 显示图2b白色方框圈定区域的地壳结构(修改自Dong等, 2022). XMOB, 兴蒙造山带; NCC, 华北克拉通; XB, 兴安地块; SLB, 松辽盆地; TLFZ, 郯庐断裂带; YLJF, 鸭绿江断裂带; NSGL, 南北重力梯度带; SS, 索伦缝合带; YYF, 依兰-伊通断裂; DMF, 敦化-密山断裂; LGB, 龙岗地块; JLJB, 胶-辽-吉造山带; BLJ, 龙岗和胶辽吉边界

吉造山带边界(BLJ)断裂错断. 前人研究结果表明, 胶东地区岩石圈厚度也明显减薄(Chen, 2010; 朱日祥等, 2011). 由此可见, 辽东与胶东两地区均具有岩石圈破坏与减薄的基本结构和动力学背景.

3.2 矿集区浅部地球物理探测与地质构造

为揭示辽东地区五龙和青城子两个典型金矿集区浅部地壳结构和控矿构造, 实施了地面大地电磁、航空瞬变电磁、航空磁测、短周期地震台阵等浅部地球物理探测工作. 浅部地球物理探测揭示了五龙矿集区、青城子矿集区的航磁异常、电性异常(Di等, 2020)和速度异常(Xie等, 2021; Zheng等, 2022). 以往地面磁测资料表明, 辽河群的磁铁石英岩呈强磁性, 而其中的大理岩、片岩、变粒岩等呈弱磁性. 区内中生代花岗岩呈弱磁性, 基性辉长岩为中磁性, 不含矿石英脉表现为弱磁性或无磁性, 含矿石英脉因含有磁黄铁矿而磁性略强(Di等, 2020). 具体的矿集区磁异常解译如下.

(1) 五龙矿集区. 对五龙矿集区航磁异常进行化极处理后, 发现测区内磁场整体呈北东走向, 具有北西高南东低的特征(图3a). 以测区中部鸡心岭断裂北东段为界, 其西北为大面积的高磁异常区, 东南则表现为负异常区. 北东向磁异常条带基本与红石断裂、杨家断裂、鸡心岭断裂等位置相吻合, 均以稳定、连续磁异常为特征.

航磁异常资料限定了岩体边界和岩性. 图3a中B区为无磁或弱磁性的辽河群地层, 岩性可能为大理岩、片岩、变粒岩; 而A区则为辽河群含有磁铁矿颗粒的高磁性异常区(图3a). 测区东南部半圆型低磁异常带与测区内三股流岩体出露位置对应(图3a, C区). 五龙岩体本应表现为弱磁性, 但在测区西北部出现高磁异常, 推测与其深部的辽河群变质岩以及后期侵入的基性岩体有关, 测区中部出现中磁异常, 推测与出露五龙岩体片麻状黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩有关.

为了解地下不同深度电性分布特征, 根据航空瞬变电磁资料, 绘制了地表、地下100m、300m不同深度视电阻率切面图(图3b). 在地下300m深度范围内, 测区内电性分布形态基本一致, 电阻率具有明显的北高南低的特征, 低阻带由北东向南西呈等间隔相间分布. 航电异常资料反映的岩体边界和岩性与航磁探测结果(图3a)基本一致吻合, A区和B区均为辽河群地层, 整体上表现为低电阻率特征, C区为高电阻率特征, 与三股流岩体出露位置对应, 其他区域为五龙岩体, 主要表现为高电阻特性. 由于构造作用结果, 五龙岩体电性分布不均匀, 在部分地段出现中阻特性.

(2) 青城子矿集区. 青城子矿集区地表出露四个岩体(B、D、C、E)(图4a), 其中的中、晚三叠世二长花岗岩岩体呈高磁性(D), 而元古代二长花岗岩岩体(B、C、E)呈中低磁性. 在姚家钼矿附近发现高磁区(A区), 推测为中侏罗世含矿花岗岩体.

航磁资料验证了测区内发育北东向(F101和F102)和北西向(F201和F202)两组断裂(图4a), 揭露了这两组断裂深部在走向上的延伸. 位于矿集区中南部的F101断裂, 在测区内控制长度14km, 其北侧磁场较强, 南侧磁场较弱, 而钼矿床分布在其与F201断裂的交汇处. F102断裂在区内控制长度约28km, 断裂南侧为弱正磁场, 北侧为弱负磁场, 表明两侧的岩性存在着差异.

三维大地电磁测深法获得的地下5km里电性资料(图4b)表明, 在L1A、L2A、L3A线剖面位置处(图4a和4b), 近地表高阻区域推测为出露或者隐伏花岗岩, 低电阻特性区域推测为古元古界辽河群盖县组地层. 区内几个著名的多金属矿床与断裂密切相关, 并多位于弱正、弱负磁场梯度带上(图4b). 小佟家堡子(图4b, L3线)附近处于高阻与低阻过渡部位, 且向深部具有较大的延深. 短周期地震台阵噪声成像, 揭示小佟家堡子下方深至5km可能存在隐伏岩体(Xie等, 2021), 推测为金矿带产出位置(Di等, 2020).

4 金矿床成因

4.1 辽东金矿成矿时代

辽东地区金矿床主要包括石英脉型和蚀变岩型两种类型, 近年来, 金矿床成矿年代学研究取得了重要进展. 在五龙金矿床, 不同方法所获得的成矿时代基本一致, 含金石英脉中辉钼矿Re-Os等时线年龄为(125±2) Ma, 热液独居石SIMS U-Pb年龄为(127±3)Ma(Yu等, 2020), 热液金红石SIMS U-Pb年龄为(122±1)Ma(Feng等, 2020), 绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄为(123±1)Ma(Liu等, 2019), 这些年龄与矿区内与金矿脉密切伴生的中基性脉的年龄一致, 均表明了为早白垩世成矿. 在青城子矿集区, 成矿时代存在一定争议, 但据岩脉与矿脉穿切关

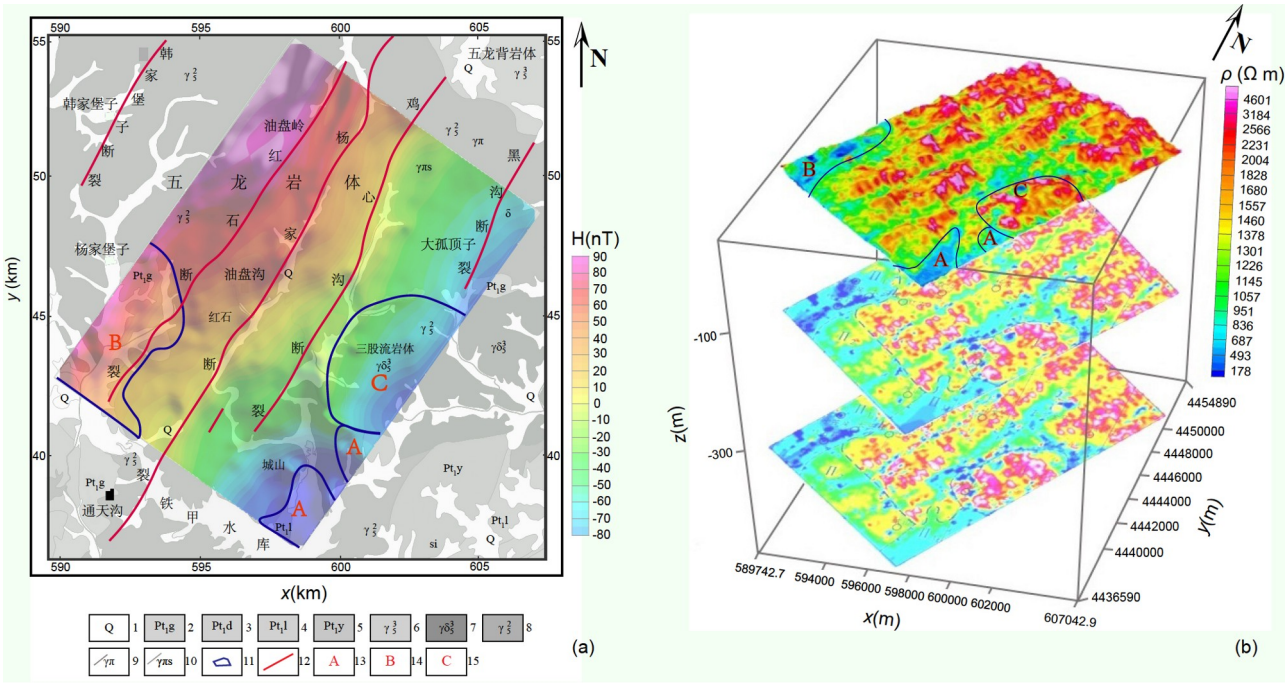


图 3　五龙矿集区航磁航电解释图

(a) 航磁异常平面解释图. 1, 第四纪; 2, 古元古界辽河群盖县组; 3, 古元古界辽河群大石桥组三段; 4, 古元古界辽河群浪子山组; 5, 古元古界辽河群余家堡子组; 6, 中生代三叠纪花岗岩脉; 7, 中生代三叠纪花岗闪长岩脉; 8, 中生代侏罗纪花岗岩脉; 9, 花岗斑岩脉; 10, 变花岗斑岩; 11, 岩体边界; 12, 断层; 13, 辽河群地层(盖县组、大石桥组); 14, 辽河群地层(浪子山组、余家堡子组); 15, 三股流岩体. (b) 航空瞬变电磁不同深度视电阻率切片图

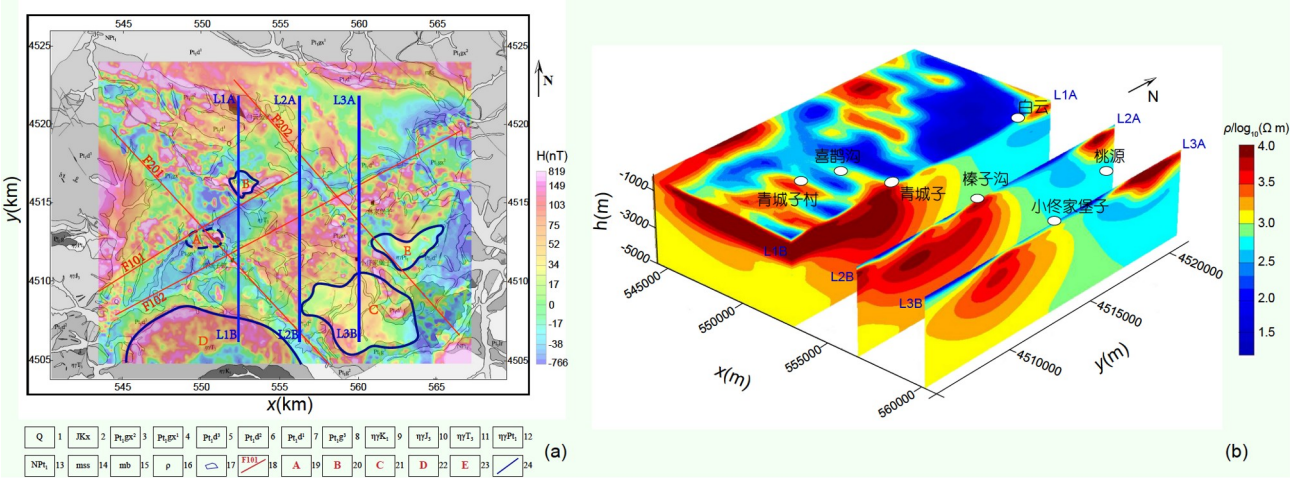


图 4　青城子矿集区航磁异常解释平面图和大地电磁电阻率图

(a) 航磁异常解释平面图. 1, 第四纪; 2, 侏罗-白垩纪小岭组; 3, 古元古代辽河群盖县组二段; 4, 古元古代辽河群盖县组一段; 5, 古元古代辽河群大石桥组三段; 6, 古元古代辽河群大石桥组二段; 7, 古元古代辽河群大石桥组一段; 8, 古元古代辽河群高家峪组; 9, 早白垩世二长花岗岩; 10, 晚侏罗世二长花岗岩; 11, 晚三叠世二长花岗岩; 12, 元古代二长花岗岩; 13, 新元古代地层; 14, 变质砂岩; 15, 大理岩; 16, 伟晶岩脉; 17, 岩体边界; 18, 断层; 19, 姚家沟岩体; 20, 新岭岩体; 21, 大顶子岩体; 22, 双顶沟岩体; 23, 南山岩体; 24, 测线号. (b) 大地电磁3D反演电阻率切片图

系及锆石U-Pb年龄, 区内金矿主要形成于早白垩世(~126Ma)(Sun等, 2019, 2020, 2022). 对辽东西部猫岭矿集区成矿时代早期争论更大, 部分研究者认为猫岭矿集区成矿时代从古元古代((2316±140)Ma, Yu等,

2005; (2287±95)Ma, 刘军等, 2018)至侏罗纪约(189±5) Ma(Zhang等, 2017), 但近期获得猫岭矿区花岗岩锆石U-Pb年龄129Ma(刘军等, 2018); 矿田内北部大东沟金矿近年来找矿取得重大突破, 区内相关岩体及成矿年龄也均为早白垩世. 鸭绿江断裂带南部新房金矿, 成矿阶段黄铁矿Re-Os等时线年龄为(121±1)Ma(Zhang等, 2022), 硫化物Rb-Sr年龄为(123±2)Ma(Zhang等, 2023); 新甸金矿的成矿前脉岩时代为127Ma, 与成矿后脉岩时代121Ma同样限定其成矿时代为早白垩世(Yu等, 2018, 2020, 2022); 中部古楼子金矿含金石英脉中热液独居石U-Pb年龄为(121±7)Ma(本文作者未发表的数据), 北部沙窝沟金矿形成于126~129Ma(本文作者未发表数据). 这些最新研究结果表明, 辽东地区金矿成矿时代主要为早白垩世, 与胶东地区金矿床形成时代一致.

4.2　辽东金矿控矿构造

辽东地区金矿控矿构造主要为北东-南西走向高角度正断层与近东西向低角度顺层伸展滑动破碎带(肖世椰等, 2018; 曾庆栋等, 2019). 石英脉型金矿主要受高角度正断层控制, 而蚀变岩型金矿分别受高角度正断层与低角度顺层伸展滑动破碎带控制. 目前勘查程度较高的五龙金矿为石英脉型金矿, 其控矿构造主要是北东-南西走向高角度正断层及其伴生构造(肖世椰等, 2018), 具体包括早白垩世伸展期新生的正断层以及前期左行平移断层及其派生断层的复活(Zhang等, 2020), 赋矿围岩是晚侏罗世五龙二长花岗岩体. 鸭绿江断裂带南部的四道沟金矿与辽东中部的猫岭金矿, 均为蚀变岩型金矿, 发育在古元古代辽河群内, 四道沟金矿的容矿构造为辽河群层间破碎带, 矿体走向呈北东与北西向, 而猫岭金矿的容矿构造为高角度正断层的破碎带. 青城子矿集区的白云、小佟家堡子、桃源、林家三道沟等蚀变岩型金矿, 均受低角度顺层伸展滑动破碎带控制(曾庆栋等, 2019), 主要发育在辽河群大石桥组大理岩与盖县组片岩内, 呈近东西向, 常具有多期活动特点, 早期为逆冲-推覆型层间滑动带(张拴宏等, 2020), 晚期转变为伸展型层间滑动带(曾庆栋等, 2019). 无论哪种金成矿方式, 均发育强烈的围岩蚀变, 并具有较为明显的热液蚀变分带规律, 即自矿脉中心向围岩依次可划分为(黄铁)绢英岩化(硅化)-绢云母化(绿泥石化)-未蚀变岩石.

辽东地区金矿床具有集中成区和成带分布的规律, 根据其丛聚性分布的特点, 分为青城子金多金属矿集区、猫岭金矿集区和鸭绿江金成矿带(图1). 鸭绿江成矿带以北东向展布于辽东半岛东侧, 与朝鲜接壤, 发育以五龙金矿为代表的石英脉金矿和以四道沟与大东沟等为代表的蚀变岩型金矿. 石英脉型金矿受NE向陡倾断裂控制, 蚀变岩型金矿受辽河群层间断裂控制(图5). 由此可见, 辽东金矿化主要受北东-北北东向断裂控制的特征, 与胶东金矿构造控矿规律非常相似(图1). 辽东与胶东金成矿作用是在相同构造背景下短时间内完成的, 金矿类型均以破碎带蚀变岩型和含硫化物石英脉型为主.

4.3　辽东与胶东金矿成矿对比

胶东矿集区是我国最重要的金矿产地, 在仅占中国陆地面积0.17%的区域内已经探明5400余吨金资源量, 成为世界第三大金矿集区. 辽东和胶东地区在岩石圈深部结构、中生代构造演化、基底岩石和岩浆岩等方面基本相似, 尤其是均以发育与金矿床密切相关的早白垩世花岗岩为特征, 金矿床成矿时代和矿化特征等也具有明显的相似性(苗来成等, 1997; Yang等, 2005; Jiang等, 2010; 朱日祥等, 2015; Goldfarb和Groves, 2015; 范宏瑞等, 2021; Deng等, 2022). 前人采用硫化物Rb-Sr同位素测年方法(Yang和Zhou, 2001)、石英-硫化物矿脉中热液锆石和独居石SHRIMP/LA-ICPMS U-Pb定年, 将胶东矿集区三个主要成矿带矿化年龄精确限定在(120±5)Ma范围内(Hu等, 2013; Ma等, 2017; Deng等, 2020b), 与辽东地区金成矿时代相同.

辽东早白垩世金矿床与胶东金矿床具有相似的流体包裹体特征, 主要类型为H_2O-NaCl气液两相和含CO_2两类包裹体, 成矿温度主要集中在200~350℃, 流体盐度主要在2~15wt.% NaCl equiv., 成矿流体同属于H_2O-NaCl-CO_2热液体系(图6a)(范宏瑞等, 2016; Deng等, 2022). 辽东金矿床中发现部分高盐度流体包裹体(图6a), 反映了岩浆热液流体的特征. 高盐度的岩浆热液成矿流体和低盐度的大气水发生流体不混溶作用或者流体混合作用, 是金矿沉淀的主要机制. 辽东和胶东金矿床的氢氧同位素范围大体相似, 主体与初始岩浆水重叠(图6b), 也进一步表明其成矿流体主要为岩浆水, 有部分大气降水的参与. 胶东金矿床硫同位素$\delta^{34}S$值较为集中, 大多为+6‰~+10‰(Mao等, 2008; Li等,

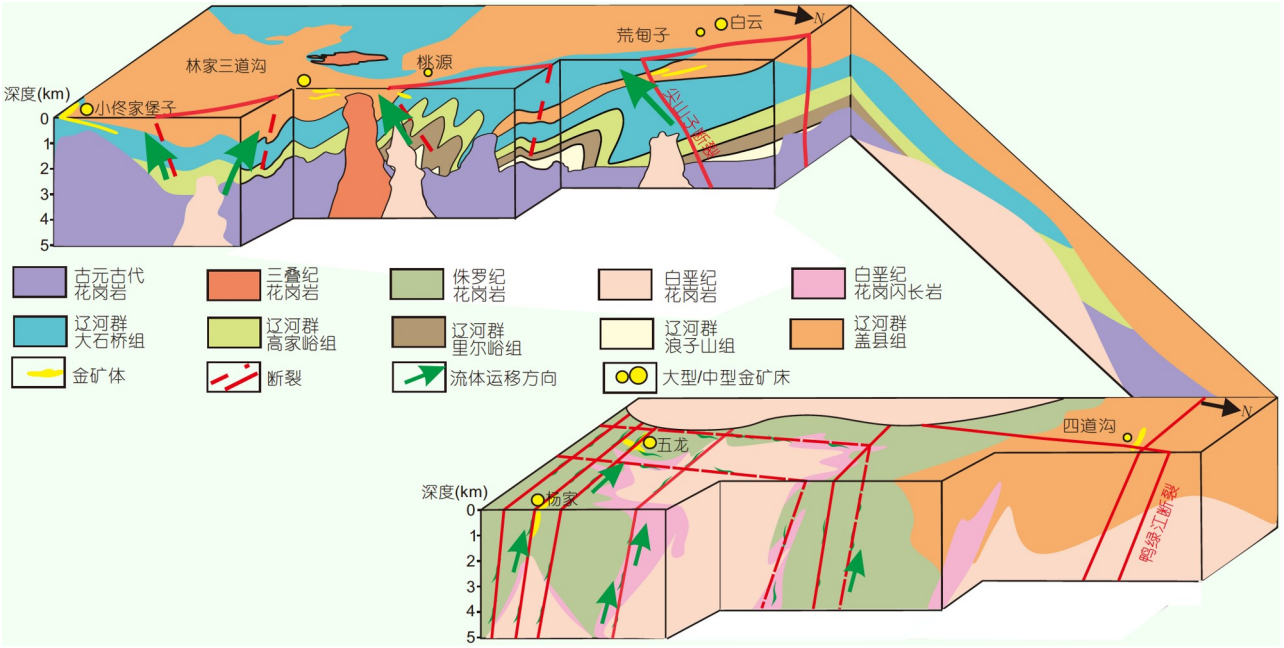


图 5　辽东地区青城子、五龙早白垩世构造-岩浆-成矿5km以浅剖面图

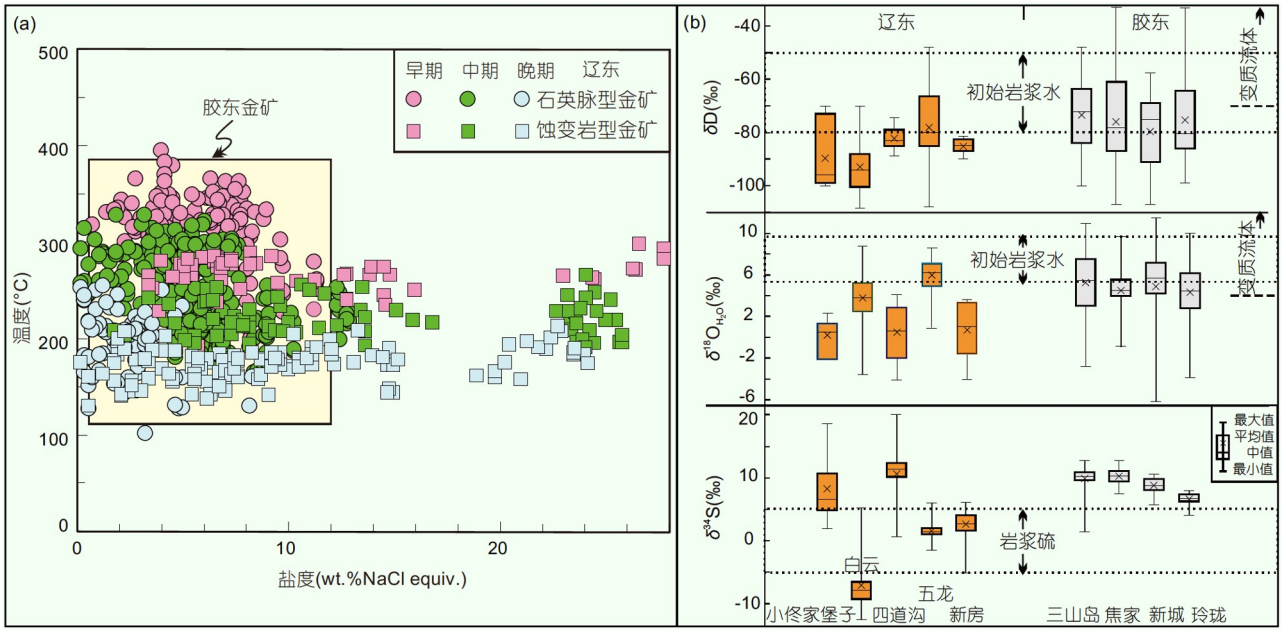


图 6　辽东早白垩世金矿床流体包裹体均一温度-盐度散点图(a)、辽东与胶东早白垩世金矿床成矿流体H-O和黄铁矿S同位素组成对比(b)

据范宏瑞等(2016)和Deng等(2022)

2018; Feng等, 2018; Deng等, 2020b); 而辽东金矿床硫同位素由于受成矿流体与围岩(辽河群变质岩)发生强烈水-岩反应的影响，δ^{34}S值较分散，变化于−9.0‰~+17‰之间，但依然涵盖了胶东金矿δ^{34}S值范围. 总之，辽东和胶东金矿的成矿流体均以岩浆流体为主，混入部分大气降水，并显示与地壳围岩发生不同程度交换

的特征. 这些特征进一步表明, 辽东和胶东地区在早白垩世相似的构造与岩浆活动背景下发生金成矿作用, 且具有瞬时爆发成矿的特点, 两地区金矿床矿化特征和成矿流体温度-压力-组分等也具有极大相似性.

4.4　辽东金矿成矿模式

辽东地区金成矿作用主要发生在早白垩世, 受断裂构造控制, 以强烈硅化和绢云母化为特征. 流体包裹体C-H-O同位素和硫化物微区S同位素等研究表明, 辽东地区无论是石英脉型还是蚀变岩型金矿床的成矿流体主要来源于同期岩浆水, 并混合了萃取围岩成矿物质的大气降水(Xu等, 2020; 王焰等, 2021). 黄铁矿的Sr-Nd-Pb同位素及其微区S-Fe同位素研究, 揭示出金等成矿元素主要来源于早白垩世岩浆. 区内金矿床是岩浆水与萃取围岩成矿元素的大气降水混合, 在有利的构造位置经过强烈的水-岩相互作用后卸载形成(Xu等, 2020). 因此, 克拉通破坏导致的强烈早白垩世岩浆活动和伸展构造是造成辽东地区乃至华北东部金矿床成矿的一级控制因素. 多学科综合研究表明, 华北克拉通破坏及其伴生的强烈构造-岩浆-成矿作用是古太平洋板块俯冲作用的结果(Zhu R X等, 2017; Wu等, 2019). 华北克拉通东部岩浆时空分布和构造特征, 揭示了晚中生代古太平洋板块向东亚大陆的俯冲过程(朱日祥和徐义刚, 2019), 即侏罗纪低角度俯冲及随后的早白垩世俯冲板块回撤和俯冲带后撤. 正是早白垩世俯冲板块的后撤, 导致华北克拉通破坏及伴生的伸展构造-岩浆-金成矿深部动力学过程.

结合区域地质资料, 我们建立了辽东地区乃至华北东部金矿床成矿模式: 自晚侏罗世-早白垩世以来, 古太平洋板块俯冲和俯冲带持续后撤, 造成华北东部发生强烈伸展作用, 形成伸展盆地和广泛分布的变质核杂岩. 古太平洋板块后撤引起的不稳定地幔流动体系, 导致上地幔中熔流体含量增加和岩石圈黏度显著降低, 促使华北克拉通东部古老岩石圈地幔经历了强烈的熔流体交代作用, 同时导致华北克拉通东部巨量幔源岩浆和流体形成. 地壳物质受到上涌软流圈以及上升到地壳内的幔源岩浆加热发生部分熔融, 形成长英质岩浆. 这些携带部分成矿物质的岩浆和深部流体沿深大断裂上升至地壳不同深度, 形成岩性复杂的火山岩和侵入岩. 岩浆在地壳浅部通过结晶分异作用形成的成矿流体, 并与广泛淋滤围岩中成矿物质的大气降水混合, 形成富金成矿流体. 当成矿流体继续上升进入浅部断裂构造体系时, 随着温度、压力等条件的改变, 成矿流体迅速发生沸腾/混合, 造成金等成矿元素的沉淀而成矿(图7). 由此可见, 辽东早白垩世金矿床不可能是造山型, 应该是与克拉通破坏密切相关的“克拉通破坏型金矿”或“胶东型金矿”.

5　找矿潜力预测与突破方向

5.1　辽东地区典型金矿集区资源潜力预测

根据辽东金成矿动力学背景和矿床成因模式, 利用地质矿产大数据(地质、地球物理、地球化学、遥感及典型矿山深部补充勘探资料)、人工智能方法(包括随机森林(RF)、PU-Learning等机器学习)和2D/3D/4D GIS技术, 构建了辽东金矿集区成矿地质体三维模型. 在此基础上, 利用自主研发Geo-系列软件(Geosift, Geostatck, GeoPro, GeoSIM和GeoCube3.0), 对五龙、青城子金矿集区开展了地质大数据挖掘、三维勘探变量(包括构造与岩体找矿信息以及密度、磁化率和电阻率矿致异常信息)提取以及融合集成研究, 提出了找矿有利靶区和资源潜力估算新方法.

(1) 五龙金矿集区. 根据五龙金矿集区1:1万地质矿产图、1:1000中段图和钻孔数据库, 利用SKU-GOCAD18.0软件, 建立了五龙金矿集区核心地段的断裂、岩体、岩脉、矿体等模型, 并运用自主研发的Geosift软件获得了1:5万重磁成矿地质体三维模型. 在此基础上, 利用澳大利亚Encom公司开发的ModelVision软件, 对重磁进行位场的二度半解释, 将深部地质结构划分为多个连续性地质单元; 再利用UBC-GIF软件获得正演建模约束下的大地电磁剖面(垂深5.0km)数据集Loop3D的三维成矿地质体建模与不确定性分析及三维勘探变量提取. 基于上述三维模型和勘探变量提取, 应用SKUA-GOCAD18.0软件对密度、磁化率、电阻率及其组合变量, 对控矿断裂和侵入岩体/岩脉三维反演数据进行DSI插值, 构建了三维密度反演模型、三维磁化率反演模型以及三维电阻率反演模型. 最后利用自主研发的定量化资源预测评价软件GeoCube3.0(王功文等, 2021)的增强证据权法模块, 圈定出五龙矿集区找矿有利靶区(图8). 在此基础上, 采用金富集-体积(C-V)多重分形将五龙矿集区划分为三个等级(图8a~8c). 其中, 一级靶区(图8d)进一步划分为

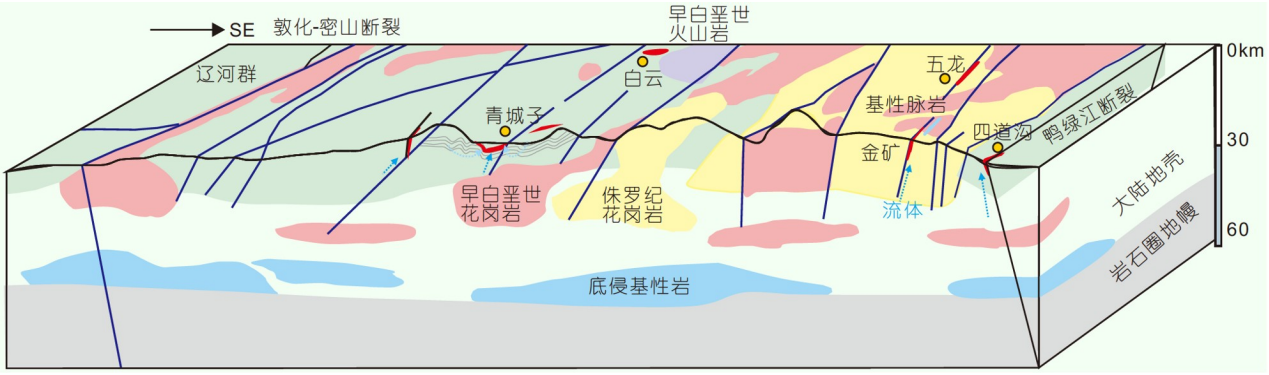


图 7　辽东地区早白垩世金矿成矿模式

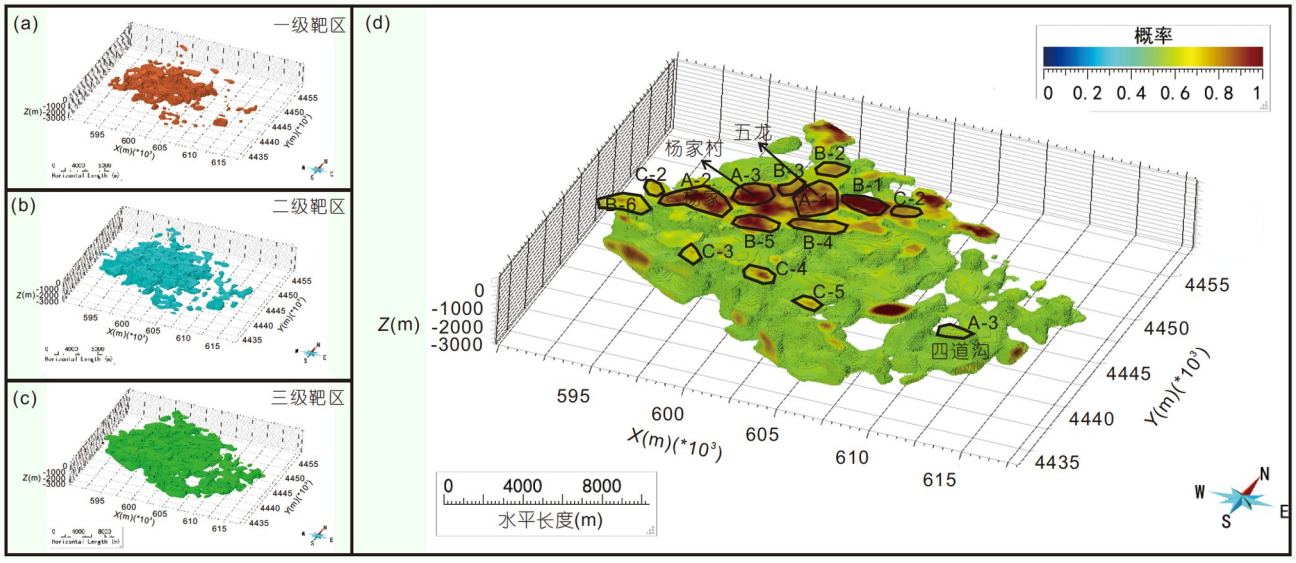


图 8　五龙金矿集区三级(C-V分形)找矿靶区优选

A级靶区(A-1、A-2和A-3), B级靶区(B-1、B-21、B-3、B-4、B-5和B-6)和C级靶区. 依据工业储量估算块体单元的含金量(王功文等, 2021), 估算2500m以浅金资源量超1000t, 五龙金矿集区累计资源储量超500t.

(2) 青城子矿集区. 根据青城子矿集区地质矿产大数据, 利用SKU-GOCAD18.0软件初步建立了青城子金矿集区核心区域的断裂、岩体、矿体模型, 开展了地层、岩体、断裂缓冲区、脉岩、密度、磁化率、电阻率等多参数三维空间信息融合研究, 并根据金矿成因模式和找矿模型构建了三维成矿地质体模型. 运用上述Geo-系列地学软件, 开展了矿集区的勘探变量融合集成研究, 利用3D RF与3D PU -Learing两种方法及其软件模块确定了五个找矿靶区, 分别是白云NW地段、荒甸子NE地段与SW地段、小佟家堡子深部地段和林家三道沟-桃源矿区深部地段(图9). 根据青城子金矿床的显式建模(辅助矿山巷道工程数据集)获取了覆盖工业矿体及其三维块体单元数量, 依据工业储量估算出块体单元的含金量(王功文等, 2021); 统计了已知金矿体外围三维块体单元数量(一级靶区地段), 一级靶区与已知矿体具有相似的勘探变量及其组合和较高数值的贝叶斯后验概率; 根据块体单元数量和含金量数值乘积得出了靶区资源量. 利用GeoCube3.0软件和SKUA-GOCAD软件分析, 估算出青城子矿集区500~2500m深金资源量达1619t.

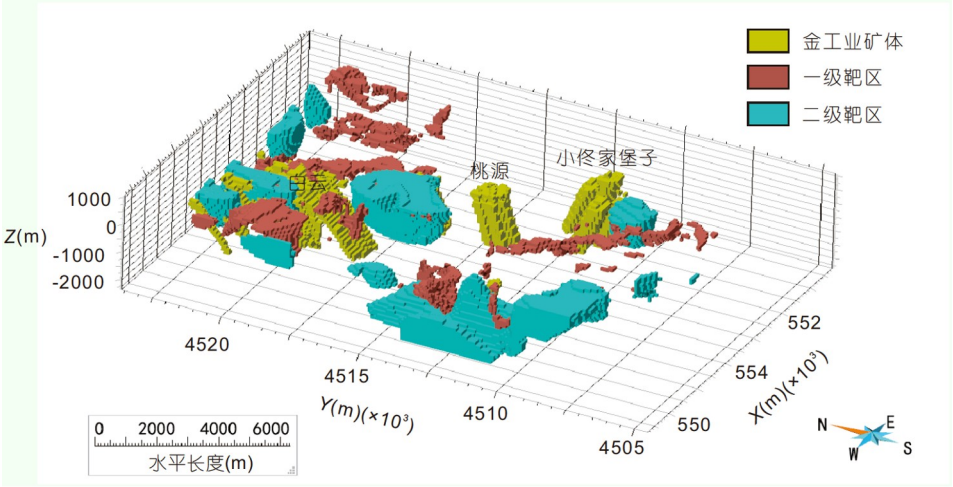


图 9　**青城子金矿集区的靶区优选三维模型**

5.2　找矿标志

辽东地区已发现金矿床的地质特征与成因，指示了较为明显的找矿标志. 找矿标志之一是早白垩世中期(120~125Ma)幔源基性侵入岩，具体为闪长岩、辉绿岩与煌斑岩, 多以岩脉形式侵位, 局部呈岩株状. 这些基性侵入岩的发育程度常与金矿化程度呈正比，是寻找蚀变岩型或石英脉型金矿的最有利部位. 找矿标志之二是早白垩世早期(125~130Ma)壳-幔混源的中-酸性侵入体, 以花岗闪长岩为主. 这些中酸性侵入体内部与周边也是有利的金矿富集区. 找矿标志之三是区域上发育晚侏罗世壳源花岗岩，它们常与金成矿带相伴，是重要的成矿岩石学背景. 找矿标志之四是早白垩世成矿期的伸展构造，包括正断层、伸展拆离带、层间滑动带或顺侵入体边界发育的断层, 其中脆-韧性伸展构造是金成矿的最有利部位.

值得指出的是，上述三期侵入岩与早白垩世伸展构造在空间上重叠部位是辽东地区最有利的金成矿区. 这三期岩浆与伸展活动强度与金矿化程度成正比. 辽东地区早白垩中期幔源岩浆与伸展活动是金成矿的必要条件，而早白垩世早期与晚侏罗世岩浆活动是金成矿的充分条件. 早白垩中期幔源岩浆和伸展活动与区内金矿紧密相伴，而早白垩世早期和晚侏罗世岩浆活动常发育在金矿周边或深部.

辽河群由浪子山组、列尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组组成，由下至上依次发育白云岩、火山岩、碳酸盐岩和泥质岩(Luo等, 2004; Li等, 2005). 辽河群盖县组巨厚的泥砂质沉积岩变质程度最低，金含量最高(Cui等, 2022); 同时盖县组也是蚀变最发育的岩层，因此盖县组是在辽东寻找蚀变岩型金矿最有利的层位.

5.3　找矿突破方向

尽管目前我们还不能确定在辽东是否存在类似胶东不同深度多台阶富集成矿的特点，但辽东地区与胶东地区无论在区域地质演化史与金矿床地质特征，还是在成矿过程和成矿背景等方面，都非常相似，近期的多学科综合勘查资料也表明辽东地区金矿资源潜力巨大，应是我国黄金最重要的战略资源接替基地之一，近期重点研究工作和找矿突破方向建议如下:

(1) 已知金矿床深/边部. 除五龙金矿外, 辽东地区金矿床目前探采深度大多小于500m. 然而，辽东地区各金矿集区广泛分布与金矿密切相关的早白垩世中酸性岩脉和同期活动的控矿断裂; 矿床浅部发育强烈的围岩蚀变(如硅化、绢英岩化、绢云母化、绿泥石化等), 具有蚀变强度大且变化不明显的特点; 地球物理探测也指示已知矿脉向深部和边部仍具有较大的延伸范围. 在青城子矿集区实施的深部科学钻探发现, 最深矿体(130脉)埋深达1692m，是辽东已知见矿最深的矿体; 五龙金矿钻探发现1500m深的含金石英脉, 厚度达3.7m, 品位达5.74g/t. 区域地质研究也表明，已知金矿集区的矿脉向边部及外围均有明显的延伸，呈现沿构造连续发育, 并有围岩蚀变和金矿化显示. 例如，五龙

金矿集区发育与已知矿区内控矿构造、围岩蚀变、矿化相似的数百条含金石英脉, 但目前对这些含金石英脉的勘探程度较低. 青城子矿集区白云金矿已知矿化蚀变带向西经过李家堡, 一直延伸到冯家堡子. 在冯家堡子民采坑处, 揭示含金石英脉的品位达到8.97g/t, 蚀变带宽达50~60m. 经可控源大地电磁探测发现, 低阻异常带走向延长超过4000m, 倾向延伸至400~1500m, 并与地表观测到的蚀变带相吻合. 由此可见, 区域地质和钻探都表明辽东地区已知金矿集区深部/边部均具有巨大的找矿潜力.

(2) 大型断裂中蚀变岩型金矿. 辽东地区具有与胶东地区相似的区域构造格架, 发育了一系列北北东走向的大型断裂及旁侧近南北向次级断裂. 胶东地区在北北东向主干断裂上, 如三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂, 发育了多个大型、超大型蚀变岩型金矿床. 然而, 目前辽东地区同类北北东向大型断裂还未发现超大型金矿床. 在断裂构造特征方面, 辽东地区北北东向断裂与胶东地区同类控矿断裂十分相似, 多呈现出早期韧性至晚期脆性的递进活动, 发育破碎带及与金矿化密切的硅化、绢云母化等围岩蚀变(局部已见明显的金矿化), 并具有明显的低电阻率异常和正磁异常特点. 例如, 近期在五龙金矿集区北东向鸡心沟断裂带中, 新发现了破碎蚀变岩型金矿体, 有待钻探验证和进一步的深入勘探研究. 在青城子金矿集区内, 尖山子断裂控制了主要金矿的分布. 已有的钻孔资料表明, 该断裂内发育了厚达100多m、倾向延伸达1100~1600m的金矿化带, 局部金品位可达2.72g/t, 平均金品位0.19g/t.

中朝边界上北北东走向的鸭绿江断裂带, 长达700km, 是辽东地区十分重要的控矿构造, 控制发育了多种类型的金矿. 目前在该大型断裂带上发现的蚀变岩型金矿床有沙窝沟金矿、秋果碧金矿、四道沟金矿、新房外围金矿以及盖州大东沟形成于辽河群盖县组绢云千枚岩层的蚀变岩型金矿(李浩等, 2019). 这些金矿床的赋矿围岩皆是盖县组, 其中四道沟金矿已经成为大型金矿床, 大东沟成为超大型金矿床. 此外, 在鸭绿江断裂带上还发现了蚀变岩型与石英脉型叠合金矿床, 代表性的有下河口金矿、大古岭金矿和新房金矿, 其中新房金矿已经成为大型金矿床. 下河口金矿赋矿围岩为辽河群高家峪组, 大古岭金矿赋矿围岩为辽河群高家峪组和大石桥组, 新房金矿赋矿围岩为太古代鞍山群. 在鸭绿江断裂带内及其旁侧次级断裂上, 还发现了一系列石英脉型金矿或金矿化点, 如庙台子金矿、南岭外金矿、汞洞沟金矿和老边墙金矿. 这些石英脉型金矿的赋矿围岩均是晚中生代花岗岩, 也具有重要的找矿潜力. 这些初步研究表明, 辽东地区鸭绿江断裂带内的破碎蚀变带和石英脉型金矿床, 是未来找矿的重要突破口, 具备新增千吨级黄金可采储量的潜力.

6 结语

辽东地区金矿床主要形成于早白垩世, 受断裂构造控制, 以强烈硅化和绢云母化为特征, 金成矿作用与华北东部岩石圈减薄、克拉通破坏导致的早白垩世岩浆活动密切相关. 辽东地区金矿床与著名的胶东地区金矿床在区域地质演化、成矿时代、成矿过程等方面非常相似, 是与克拉通破坏密切相关的“克拉通破坏型金矿”或“胶东型金矿”.

中生代岩浆-构造演化与矿床成因研究、深-浅部综合地球物理探测与大数据AI资源量预测表明, 辽东地区金资源潜力巨大, 是我国另一个重要的“数千吨级”黄金资源战略基地. 根据近期研究和勘查结果, 本文明确提出鸭绿江断裂带及其周边是未来金矿资源勘查的重点区域, 已知矿区外围与深部也是未来寻找金矿的重要靶区.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所底青云院士、中国地质调查局沈阳地质调查中心沙德铭教授和辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司刘福兴教授与作者的多次讨论与建设性建议, 感谢南京大学董树文教授对本文的认真修改, 感谢三位匿名审稿人非常有价值的建议和认真修改.

参考文献

邓军, 王庆飞, 张良, 薛胜超, 刘学飞, 杨林, 杨立强, 邱昆峰, 梁亚运. 2023. 胶东型金矿成因模型. 中国科学: 地球科学, 53: 2323–2347

底青云, 薛国强, 雷达, 曾庆栋, 付长民, 安志国. 2021. 华北克拉通金矿综合地球物理探测研究进展——以辽东地区为例. 中国科学: 地球科学, 51: 1524–1535

范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 胡芳芳, 杨奎锋. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用. 岩石学报, 32: 3225–3238

范宏瑞, 蓝廷广, 李兴辉, Santosh M, 杨奎锋, 胡芳芳, 冯凯, 胡换龙,

彭红卫, 张永文. 2021. 胶东金成矿系统的末端效应. 中国科学: 地球科学, 51: 1504–1523
李浩, 李勇, 马, 双, 王鹏, 魏巍, 樊金虎, 郑军, 刘怀金. 2019. 辽东大东沟金矿岩浆岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及岩石地球化学特征. 地质通报, 38: 1543–1555
刘军, 李铁刚, 段超. 2018. 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: 1325–1337
刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis G A. 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
毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21: 169–188
苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 关康, Wang L G, McNaughton N J, Groves D I. 1997. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石SHRIMP研究及其意义. 中国科学D辑: 地球科学, 27: 207–213
孙丰月, 石准立. 1995. 煌斑岩与某些热液矿床关系新探——兼论幔源C-H-O流体的分异演化. 地质找矿论丛, 2: 72–81
王功文, 张智强, 李瑞喜, 李俊健, 沙德铭, 曾庆栋, 庞振山, 李大鹏, 黄蕾蕾. 2021. 华北重点矿集区大数据三维/思维建模与深层次集成的资源预测评价. 中国科学: 地球科学, 51: 1594–1610
王焰, 魏博, 谭伟, 汪在聪, 曾庆栋. 2021. 脉状金矿床的时空分布、地质特征和成矿流体来源. 中国科学: 地球科学, 51: 1457–1476
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: 3022–3036
颜丹平, 孔若颜, 董小宇, 邱亮, 刘会龙. 2021. 辽东半岛晚侏罗-早白垩世挤压-伸展构造转折及金成矿意义. 中国科学: 地球科学, 51: 1536–1557
杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 曾庆栋, 赵亚楠, 王浩, 朱昱升. 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
杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 910–921
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: 1939–1963
张秋生, 杨振升, 刘连登. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社. 218–450
张帅, 朱光, 顾承串, 刘程, 李云剑, 赵田, 王薇. 2017. 辽-吉造山带东南边界位置探讨. 科学通报, 62: 2814–2828
张拴宏, 胡国辉, 李建锋, 肖昌浩, 刘向冲, 张琪琪, 姚晓峰, 刘福兴, 王伟, 陈正乐, 张青. 2020. 辽东白云-小佟家堡子矿集区控矿构造及成矿有利区预测. 地球科学——中国地质大学学报, 45: 3885–3899
郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414
朱光, 刘程, 顾承串, 张帅, 李云剑, 苏楠, 肖世椰. 2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学: 地球科学, 48: 415–435
朱光, 陆元超, 苏楠, 吴晓冬, 尹浩, 张帅, 谢成龙, 牛漫兰. 2021. 华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学. 中国科学: 地球科学, 51: 1–25
朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 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, 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: 1153–1168
朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159
朱日祥, 朱光, 李建威. 2020. 华北克拉通破坏. 北京: 科学出版社. 417
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
Chen L. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. Lithos, 120: 96–115
Cui W L, Guo J H, Huang G Y, Wang Z C, Liu Y H, Yang J H. 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 Geol Rev, 140: 104624
Deng J, Liu X F, Wang Q F, Pan R G. 2015. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C–D–O–S–Sr isotope compositions. Ore Geol Rev, 65: 674–686
Deng J, Qiu K F, Wang Q F, Goldfarb R J, Yang L Q, Zi J W, Geng J Z, Ma Y. 2020b. *In-situ* dating of hydrothermal monazite and implications on the geodynamic controls of ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China. Econ Geol, 115: 671–685
Deng J, Wang Q F, Liu X F, Zhang L, Yang L Q, Yang L, Qiu K F, Guo L N, Liang Y Y, Ma Y. 2022. The formation of the Jiaodong gold province. Acta Geol Sin-Engl Ed, 96: 1801–1820
Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F, Wang Q F. 2020a. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. Earth-Sci Rev, 208: 103274
Di Q Y, Xue G Q, Zeng Q D, Wang Z X, An Z G, Lei D. 2020. Magnetotelluric exploration of deep-seated gold deposits in the Qingchengzi orefield, Eastern Liaoning (China), using a SEP system. Ore Geol Rev, 122: 103501
Dong W Y, Xu T, Ai Y S, Fan E B, Li L, Hou J. 2022. The boundary between the North China Craton and the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Seismic evidence from receiver function imaging. J Asian Earth Sci, 237: 105360

Feng H X, Shen P, Zhu R X, Ma G, Li C H, Li J P. 2020. SIMS U-Pb dating of vein-hosted hydrothermal rutile and carbon isotope of fluids in the Wulong lode gold deposit, NE China: Linking gold mineralization with craton destruction. Ore Geol Rev, 127: 103838

Feng K, Fan H R, Hu F F, Yang K F, Liu X, Shangguan Y N, Cai Y C, Jiang P. 2018. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: Evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition. J Asian Earth Sci, 160: 304–321

Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Groves D I. 1995. A classification scheme for epigenetic Archaean lode-gold deposits. Mineral Depos, 30: 408–410

Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geol Rev, 18: 1–75

Goldfarb R J, Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos, 233: 2–26

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geol Rev, 13: 7–27

Hu F F, Fan H R, Jiang X H, Li X C, Yang K F, Mernagh T. 2013. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. Geofluids, 13: 528–541

Jiang N, Guo J H, Zhai M G, Zhang S Q. 2010. ~2.7 Ga crust growth in the North China craton. Precambrian Res, 179: 37–49

Li S Z, Zhao G C, Sun M, Han Z, Luo Y, Hao D, Xia X. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the eastern block of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 24: 659–674

Li X H, Fan H R, Yang K F, Hollings P, Liu X, Hu F F, Cai Y C. 2018. Pyrite textures and compositions from the Zhuangzi Au deposit, southeastern North China craton: Implication for ore-forming processes. Contrib Mineral Petrol, 173: 73

Lin W, Faure M, Monie P, Scharer U, Panis D. 2008. Mesozoic extensional tectonics in eastern Asia: The South Liaodong Peninsula Metamorphic Core Complex (NE China). J Geol, 116: 134–154

Lin W, Monié P, Faure M, Schärer U, Shi Y H, Breton N L, Wang Q C. 2011. Cooling paths of the NE China crust during the Mesozoic extensional tectonics: Example from the south-Liaodong peninsula metamorphic core complex. J Asian Earth Sci, 42: 1048–1065

Liu J L, Shen L, Ji M, Guan H, Zhang Z, Zhao Z. 2013. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. Tectonics, 32: 1121–1141

Liu J L, Zhang L J, Wang S L, Li T G, Yang Y, Liu F X, Li S H, Duan C. 2019. Formation of the Wulong gold deposit, Liaodong gold Province, NE China: Constraints from zircon U-Pb age, sericite Ar-Ar age, and H–O–S–He isotopes. Ore Geol Rev, 109: 130–143

Luo Y, Sun M, Zhao G C, Li S Z, Xu P, Ye K, Xia X. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. Precambrian Res, 134: 349–371

Ma L X, Xu T, Ai Y S, Yang J H, Yang Y J, Fan E B, Li L, Hou J, Dong W Y. 2022. Hot Lithosphere beneath the northeastern North China Craton detected by ambient noise tomography. Tectonophysics, 839: 229551

Ma W D, Fan H R, Liu X, Pirajno F, Hu F F, Yang K F, Yang Y H, Xu W G, Jiang P. 2017. Geochronological framework of the Xiadian gold deposit in the Jiaodong province, China: Implications for the timing of gold mineralization. Ore Geol Rev, 86: 196–211

Mao J W, Liu P, Goldfarb R J, Goryachev N A, Pirajno F, Zheng W, Zhou M F, Zhao C, Xie G Q, Yuan S D, Liu M. 2021. Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia. Ore Geol Rev, 136: 104270

Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q, Wang R T. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D–O–C–S isotope systematics. Ore Geol Rev, 33: 361–381

Meng F, Ai Y S, Xu T, Chen L, Wang X, Li L. 2021. Lithospheric structure beneath the boundary region of North China Craton and Xing Meng Orogenic Belt from S-receiver function analysis. Tectonophysics, 818: 229067

Phillips G N, Powell R. 2010. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model. J Metamorph Geol, 28: 689–718

Sun G T, Zeng Q D, Li T Y, Li A, Wang E Y, Xiang C S, Wang Y B, Chen P W, Yu B. 2019. Ore genesis of the Baiyun gold deposit in Liaoning province, NE China: Constraints from fluid inclusions and zircon U-Pb ages. Arab J Geosci, 12: 299

Sun G T, Zeng Q D, Zhou L L, Philip Hollis S, Zhou J X, Chen K. 2022. Mechanisms for invisible gold enrichment in the Liaodong Peninsula, NE China: *In situ* evidence from the Xiaotongjiapuzi deposit. Gondwana Res, 103: 276–296

Sun G T, Zeng Q D, Zhou L L, Wang Y B, Chen P W. 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 Geol Rev, 118: 103330

Sun J F, Zhang J H, Yang J H, Zhu Y S, Chen J Y, Ling-Hu M M. 2021. Multi-stage Jurassic magmatism in the Liaodong Peninsula: Constraints on crustal evolution beneath the eastern North China Craton. Lithos, 402-403: 105897

Tomkins A G. 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the

crust: Implications for gold deposit genesis. Geochim Cosmochim Acta, 74: 3246–3259

Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119

Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Zhang X O. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chem Geol, 221: 127–156

Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. Annu Rev Earth Planet Sci, 47: 173–195

Xie T T, Xu T, Ai Y S, Zeng Q D, Zhang W, Zheng F. 2021. Imaging the shallow crustal velocity structure of the Qingchengzi ore field on the Liaodong Peninsula, China, with a short-period dense array using ambient noise tomography. Tectonophysics, 813: 228913

Xu L, Yang J H, Zeng Q D, Xie L W, Zhu Y S, Li R, Li B. 2020. Pyrite Rb-Sr, Sm-Nd and Fe isotopic constraints on the age and genesis of the Qingchengzi Pb-Zn deposits, northeastern China. Ore Geol Rev, 117: 103324

Yang J H, Sun J F, Zhang J H, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence. Lithos, 153: 108–128

Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Lo C H, Wilde S A, Davis G A. 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. GSA Bull, 119: 1405–1414

Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F, Lo C H, Song B. 2005. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning. Chem Geol, 222: 200–231

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. Ore Geol Rev, 23: 125–152

Yang J H, Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits. Geology, 29: 711–714

Yu B, Zeng Q D, Frimmel H E, Qiu H C, Li Q L, Yang J H, Wang Y B, Zhou L L, Chen P W, Li J P. 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 D, Frimmel H E, Yang J H, Zhou L L, Drakou F, Mcclenaghan S H, Wang Y B, Wang R L. 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 D, Frimmel H E, Wang Y, Guo W, Sun G, Zhou T, Li J. 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 C, Zhong R C, Tomkins A G, Cui H, Chen Y J. 2024. Expanding the metamorphic devolatilization model: Komatiites as a source for orogenic gold deposits in high-grade metamorphic rocks. Geology, 52: 67–71

Yu G, Yang G, Chen J F, Qu W J, He W. 2005. Re-Os dating of gold-bearing arsenopyrite of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, Northeast China and its geological significance. Chin Sci Bull, 50: 1509–1514

Zhang P, Zhao Y, Chai P, Yang H Z, Na F C. 2017. Geochemistry, zircon U-Pb analysis, and biotite $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Maoling Gold Deposit, Liaodong Rift, NE China. Resour Geol, 67: 426–441

Zhang P, Zhao Y, Kou L L, Yang H Z, Sha D M, Yang Z Z, Zhang J, Yu C. 2022. Genesis of the Xinfang magmatic-hydrothermal gold deposit, Liaodong Peninsula, China: Constraints from pyrite Re-Os isotopes, C, O, S, Pb, Si, He and Ar isotopes. Ore Geol Rev, 148: 105025

Zhang P, Zhao Y, Kou L L, Yang H Z. 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 R Q, Wu Q J, Sun L, He J, Gao Z Y. 2014. Crustal and lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions. Earth Planet Sci Lett, 401: 196–205

Zhang S, Zhu G, Liu C, Li Y, Su N, Xiao S, Gu C. 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, Li Y, Su N, Xiao S. 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 Y, Su N, Liu C, Wu X D, Yin H, Li Y J, Lu Y C. 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

Zheng F, Xu T, Ai Y S, Yang Y J, Zeng Q D, Yu B, Zhang W, Xie T T. 2022. Metallogenic potential of the Wulong goldfield, Liaodong Peninsula, China revealed by high-resolution ambient noise tomography. Ore Geol Rev, 142: 104704

Zheng Y F, Zhao Z F, Chen R X. 2019. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Compositional inheritance and metamorphic modification. Geol Soc Lond Spec Publ, 474: 89–132

Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. Gondwana Res, 22: 86–103

Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, Meng Q R, Fan H R, Yang J H, Wu F Y, Zhang Z Y, Zheng T Y. 2017. Craton destruction and related resources. Int J Earth Sci-Geol Rund, 106: 2233–2257

Zhu R X, Zhao G C, Xiao W J, Chen L, Tang Y J. 2021. Origin, accretion, and reworking of continents. Rev Geophys, 59: e2019RG000689

Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, Wang H. 2017. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks. Geology, 45: 407–410

(责任编委: 陈华勇)