

# 胶东玲珑金矿床成矿地质特征及矿床成因

张振<sup>1</sup>, 于超<sup>1</sup>, 吴志栋<sup>1</sup>, 王海屹<sup>2\*</sup>, 徐增田<sup>1</sup>, 梁亚运<sup>2</sup>

(1. 山东黄金矿业(玲珑)有限公司; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

**摘要:**玲珑金矿床位于华北克拉通东部胶东大型金矿集区西北部,是全球典型石英脉型金矿床之一,金资源总量超过1 000 t,但对于其矿床成因一直存在争议。通过系统总结玲珑金矿床地质特征、地质年代学、成矿流体特征及同位素数据,详细探讨了成矿地质特征和矿床成因。玲珑金矿床形成年龄集中在120~125 Ma,成矿流体整体属于中低温、低盐度、低密度热液流体,主要源自岩浆流体,并混有少量大气降水。C-H-O-S-Pb同位素指示,玲珑金矿床成矿流体主要来自地幔来源岩浆流体,并伴有壳源流体加入。早白垩世,华北克拉通东部岩石圈拆沉减薄引发软流圈上涌,进而不断底侵岩石圈地幔,发生部分熔融形成基性岩脉岩浆。基性岩脉岩浆上涌至地壳浅部时,温度、压力急速下降,脱气形成流体,沿着次级断裂沉淀形成金矿床,具有典型胶东型金矿床特征。

**关键词:**胶东型;玲珑金矿床;石英脉型金矿床;成矿流体;矿床成因;成矿年龄

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)07-0074-06

doi:10.11792/hj20240713

## 引言

胶东是中国重要的大型金矿集区,其黄金储量占全国的1/3,目前已探明金资源储量5 000余t<sup>[1-3]</sup>。区域内主要有招远—莱州、栖霞—蓬莱、牟平—乳山等3条金矿带<sup>[4-6]</sup>,以及2种矿化类型:①玲珑型,即石英脉型,主要产于玲珑花岗岩内较小规模的断裂中,部分产于郭家岭花岗闪长岩内;②焦家型,即蚀变岩型,主要呈浸染状和网脉状,产于一级区域断裂破碎区蚀变带内<sup>[7-8]</sup>。

玲珑金矿床位于胶东大型金矿集区西北部,是典型石英脉型金矿床,金资源总量超过1 000 t,但对于矿床成因一直存在争议。有学者提出玲珑金矿床是与玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩及伟德山花岗岩相关的岩浆热液型矿床<sup>[9-10]</sup>;也有学者认为,玲珑金矿床应归为造山型金矿床<sup>[11-12]</sup>和克拉通破坏型金矿床<sup>[13]</sup>;还有学者认为,中生代太平洋板块回撤引起幔隆作用,岩石圈减薄,形成富集的交代地幔,在壳幔边界处产生岩浆房,导致大规模岩浆和流体活动,进而形成玲珑金矿床<sup>[14]</sup>。本文通过系统总结前人在玲珑金矿床地质研究、流体包裹体及稳定同位素研究的基础上,对成矿的流体来源、物质来源及成矿机制展开了讨论,对深入认识胶东金矿的成矿规律、形成机制,以及指导深部找矿均具有重要意义。

## 1 矿床地质特征

玲珑金矿床位于山东省招远市东北部<sup>[15]</sup>,范围较广,由西山、东山、九曲、大开头、台上、罗山、阜山、东风等矿段组成,金资源总量超过1 000 t<sup>[16-17]</sup>。矿区内出露地层主要包括新太古界胶东群和新生界第四系(见图1-a))<sup>[16,18]</sup>。矿区内中生代岩浆岩主要为晚侏罗世玲珑花岗岩和早白垩世郭家岭花岗闪长岩,前者又可分为玲珑黑云母花岗岩和栾家河二长花岗岩。矿区出露着大量基性岩脉(群),其中成矿同期基性岩脉与矿体伴生、平行展布,共同受断裂控制,岩石类型以煌斑岩和辉绿岩为主,还有少量辉长岩<sup>[19]</sup>。

矿区内发育破头青断裂、玲珑断裂和九曲蒋家断裂等3条I级断裂,其走向相同,均为北北东向—北东向。其中,玲珑断裂和破头青断裂为主要控矿构造<sup>[20]</sup>,且在这几条大断裂中又发育着大量的次级断裂,长度一般为数百米至数千米,宽度一般为数米至数十米,是矿区内控制中基性岩脉和含金石英—硫化物矿脉产出的主要构造<sup>[21]</sup>。

矿区内矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿,其次为磁铁矿和磁黄铁矿;脉石矿物主要为石英、绢云母、长石、方解石。其中,黄铁矿、黄铜矿是主要载金矿物。矿石结构主要有晶粒状结构、压碎结

收稿日期:2024-01-31;修回日期:2024-04-18

基金项目:第八届中国科协青年人才托举工程项目(YESS20220661);国家自然科学基金面上项目(42273063)

作者简介:张振(1989—),男,工程师,从事矿山地质工作;E-mail:414235189@qq.com

\*通信作者:王海屹(2000—),男,硕士研究生,研究方向为岩石学与矿床学;E-mail:1434383299@qq.com

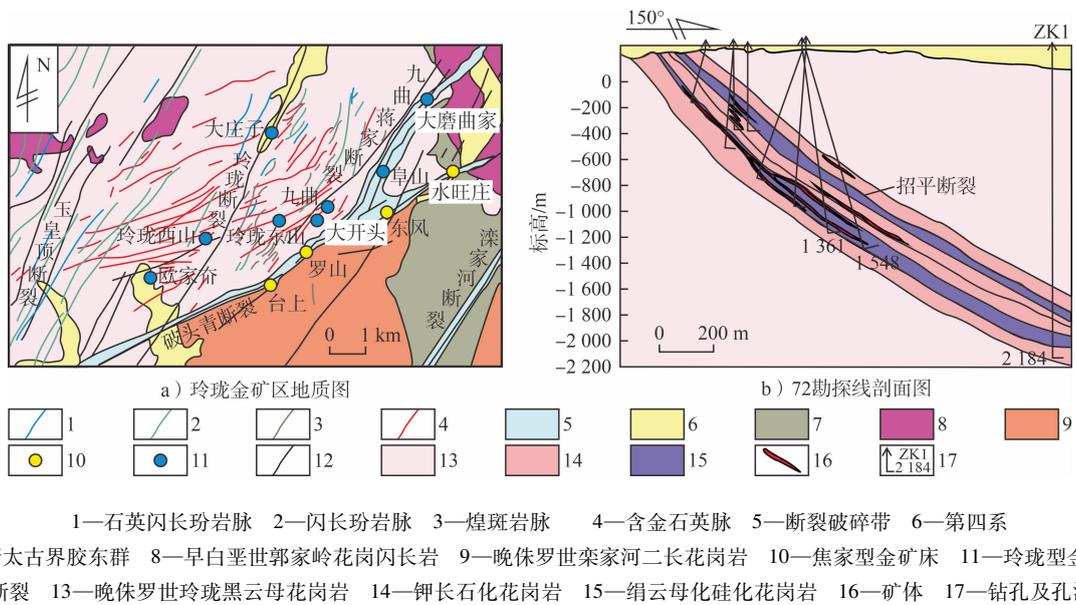


图1 玲珑金矿区地质图(a)及72勘探线剖面图(b)

Fig. 1 Geologic map of Linglong Gold District (a) and profile of Exploration Line 72 (b)

构、填隙结构、固溶体分离结构、包含结构、交代残余结构等；矿石构造有块状构造、网脉状构造、条带状构造、浸染状构造和晶洞构造等<sup>[22-23]</sup>。含金矿物主要为银金矿、自然金和金银矿。金银矿主要呈裂隙金、包裹金和晶隙金3种赋存状态。金矿物常呈细脉状或粒状，在反射光下为金黄色或亮黄色。在黄铁矿裂隙中发育称为裂隙金；在黄铁矿内部发育称为包裹金；在黄铁矿和其他金属矿物晶体间形成称为晶隙金<sup>[17]</sup>。

矿区围岩蚀变强烈，主要是黄铁绢英岩化、钾长石化、硅化、绢英岩化、碳酸盐化等。围岩蚀变的分布特征一般表现为从矿脉向两边对称展布，蚀变带依次为硅化带、绢英岩化带、钾化带、弱钾化带，最后是未蚀变的花岗岩<sup>[20]</sup>。

结合众多学者对矿体产状、矿石矿物组合特征、围岩蚀变特征，以及矿脉穿插关系等研究结果，将玲珑金矿床成矿过程划分为4个阶段：①黄铁矿-石英阶段；②石英-黄铁矿阶段；③石英-多金属硫化物阶段；④石英-碳酸盐阶段<sup>[24]</sup>。其中，金矿物主要赋存于石英-黄铁矿阶段和石英-多金属硫化物阶段，在黄铁矿-石英阶段及石英-碳酸盐阶段基本不含金矿物。

## 2 成矿年代学

目前，众多学者利用多种同位素手段测定玲珑金矿床成矿年龄，部分学者通过测定主成矿期载金矿物，获得黄铁矿 Rb-Sr 年龄为 119~126 Ma<sup>[25-28]</sup>；也有学者针对与黄铁矿、绢云母共生的独居石进行 U-Pb 定年，获得年龄为 120~121 Ma<sup>[29-30]</sup>；此外，

还有学者利用绢云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法测得成矿年龄为 120~121 Ma<sup>[2]</sup>。通过统计众多学者的测年数据，发现玲珑金矿床成矿年龄为 119.9~126.5 Ma，主要集中于 120~125 Ma(见图2)。

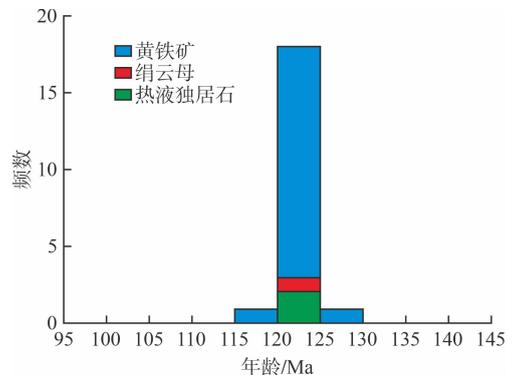


图2 玲珑金矿床成矿年龄分布直方图

Fig. 2 Histogram of metallogenic age distribution of Linglong Gold Deposit

## 3 成矿流体特征

利用流体包裹体可以了解成矿流体的温度、压力、密度等性质，还可以计算成矿压力及成矿深度，具有重要的研究意义<sup>[31]</sup>。大量学者针对玲珑金矿床的流体包裹体开展了岩相学、显微测温及拉曼成分分析等<sup>[17,19,21-22,31-41]</sup>。玲珑金矿床的流体包裹体类型比较多样，主要包括气液两相包裹体、含 CO<sub>2</sub> 三相包裹体、纯气相包裹体、富液相包裹体等类型，在成矿期主要发育气液两相包裹体及含 CO<sub>2</sub> 三相包裹体。在黄铁矿-石英阶段，流体包裹体的完全均一温度为 201℃~390℃，盐度为 2.7%~19.2%；在石英-黄铁矿阶段，流体包裹体的完全均一温度为 141℃~

378 ℃, 盐度为 2.9% ~ 13%; 在石英-多金属硫化物阶段, 流体包裹体的完全均一温度为 120 ℃ ~ 385 ℃, 盐度为 1.05% ~ 18.8%; 在石英-碳酸盐阶段, 流体包裹体的完全均一温度为 80 ℃ ~ 338 ℃, 盐度为 0.3% ~ 10.8%。此外, 前人计算出玲珑金矿床的成矿压力为 40 ~ 395 MPa, 成矿深度为 1.62 ~ 11.5 km。综上所述, 玲珑金矿床成矿流体为中低温、低盐度、低密度热液流体, 整体属于 H<sub>2</sub>O - NaCl - CO<sub>2</sub> 体系, 可能为幔源岩浆流体。

#### 4 成矿流体来源

通过整理前人研究玲珑金矿床成矿期载金黄铁矿 S 同位素数据, 结合围岩花岗岩和变质地层、中基性岩脉及胶东其他金矿床载金黄铁矿 S 同位素数据, 发现玲珑金矿床黄铁矿 S 同位素分布范围较广,  $\delta^{34}\text{S}$  值为 2.9‰ ~ 9.8‰, 主要分布于 6‰ ~ 8‰<sup>[21, 24, 27, 30, 38 - 39, 42 - 45]</sup>。郭家岭花岗闪长岩  $\delta^{34}\text{S}$  值为 2.7‰ ~ 10‰, 栾家河二长花岗岩  $\delta^{34}\text{S}$  值为 2.7‰ ~ 10‰, 玲珑黑云母花岗岩  $\delta^{34}\text{S}$  值为 7.9‰ ~ 10.7‰, 胶东中基性岩脉  $\delta^{34}\text{S}$  值为 5.3‰ ~ 10.8‰, 荆山群  $\delta^{34}\text{S}$  值为 8.2‰ ~ 15.4‰, 胶东群  $\delta^{34}\text{S}$  值为 5.6‰ ~ 9.8‰, 三山岛金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值为 10.01‰ ~ 12.61‰, 焦家金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值为 8.43‰ ~ 11.19‰, 邓各庄金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值为 8.21‰ ~ 10.81‰, 乳山金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值为 6.81‰ ~ 9.82‰<sup>[31, 39, 44]</sup>。玲珑金矿床黄铁矿与各岩石、其他金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  分布见图 3。由图 3 可知: 玲珑金矿床比胶东其他石英脉型金矿床, 如乳山金矿床、邓各庄金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  分布范围广; 比蚀变岩型金矿床, 如焦家金矿床、三山岛金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  分布范围整体偏小。此外, 玲珑金矿床与郭家岭花岗闪长岩、玲珑黑云母花岗岩、胶东中基性岩脉、胶东群及荆山群存在一定重合, 说明该矿区黄铁矿的 S 与赋矿围岩存在紧密联系。其中, 整体范围与郭家岭花岗闪长岩及胶东中基性岩脉高度相似, 因此成矿流体中的 S 具有幔源特征, 这与成矿同期的基性岩脉具有密切联系。

由于来源不同的流体具有不同的 H-O 同位素组成, 因此整理了玲珑金矿床石英脉型矿石中石英 H-O 同位素数据。结果显示, 玲珑金矿床成矿流体  $\delta\text{D}$  值为 -111‰ ~ -51‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -10.2‰ ~ 10‰<sup>[9, 19, 21, 38, 44, 46 - 48]</sup>。玲珑金矿床石英脉型矿石中石英  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解见图 4。由图 4 可知, 数据点基本落入原生岩浆水和地幔岩浆水, 以及与大气降水之间的区域, 因此推测成矿流体是混合流体, 主要为岩浆流体, 后期混入了少量大气降水。

玲珑金矿床发育碳酸盐化, 且脉石矿物如石英和方解石的流体包裹体中含有 CO<sub>2</sub><sup>[44]</sup>, 因此整理

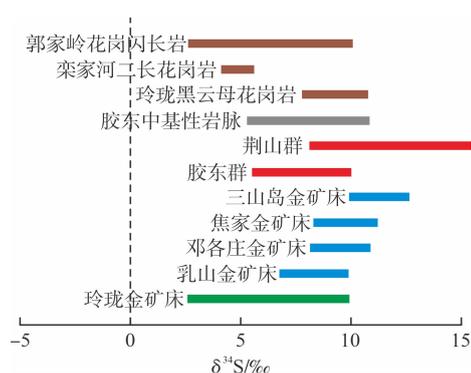


图 3 玲珑金矿床黄铁矿与各岩石、其他金矿床  $\delta^{34}\text{S}$  分布  
Fig. 3  $\delta^{34}\text{S}$  distribution of pyrite in Linglong Gold Deposit with rocks and other gold deposits

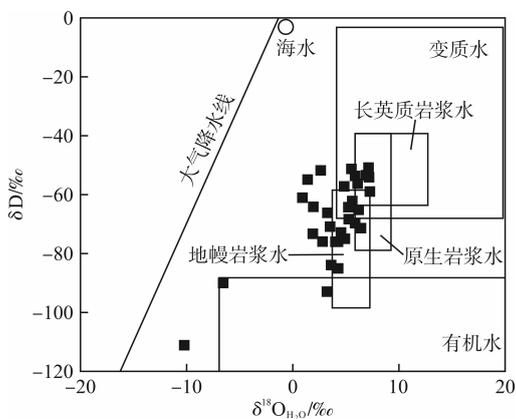


图 4 玲珑金矿床石英脉型矿石中石英  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解  
Fig. 4 Diagrams showing quartz  $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  in quartz vein-type ores of Linglong Gold Deposit

了玲珑金矿床方解石等碳酸盐矿物的 C-O 同位素组成, 以分析含矿热液来源及演化。玲珑金矿床  $\delta^{14}\text{C}$  值为 -7.56‰ ~ -3.4‰,  $\delta^{18}\text{O}$  值为 9.58‰ ~ 20.42‰<sup>[31, 41 - 42, 44, 49 - 50]</sup>。C 同位素数据表明, 其与地幔碳储库值接近<sup>[51 - 52]</sup>, 推测 C 可能来源于地幔。玲珑金矿床碳酸盐中方解石  $\delta^{14}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$  图解见图 5。由图 5 可知: 数据点主要落入花岗岩区域, 并偏向  $\delta^{18}\text{O}$  增高方向, 说明 C 来自花岗质岩浆。由于玲珑花岗岩是由胶东岩群、荆山群重熔形成的<sup>[41]</sup>, 不会再产生新的 C 源, 因此推测 C 来源于幔源岩浆流体。而少部分偏向溶解碳酸盐区的数据点可能与大陆地壳和水圈之间的相互作用相关<sup>[41, 44]</sup>。

Pb 作为一种示踪剂, 可以反映地质环境及成矿物质来源<sup>[53]</sup>。玲珑金矿床的黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等 Pb 同位素组成比较稳定,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 17.142 ~ 17.595,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.406 ~ 15.599,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 36.419 ~ 38.237<sup>[30, 41, 43, 44, 46, 54 - 55]</sup>; 胶东群  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 16.111 ~ 17.399,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.043 ~ 15.474,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 36.752 ~ 38.265; 玲珑黑云母花岗岩  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 16.635 ~ 17.494,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为

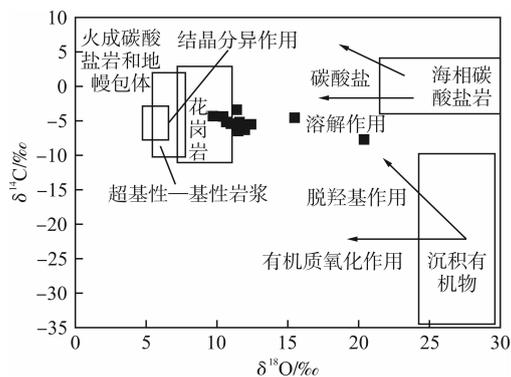


图5 玲珑金矿床碳酸盐中方解石  $\delta^{14}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$  图解

Fig. 5 Diagrams showing calcite  $\delta^{14}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$  characteristics in the carbonates of Linglong Gold Deposit

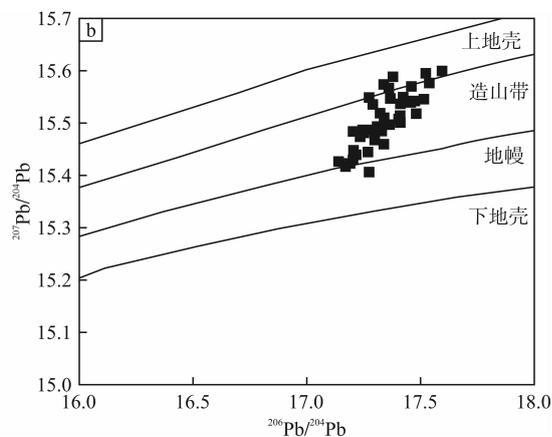
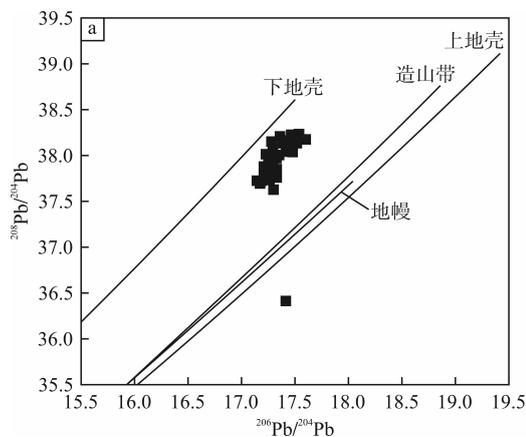


图6 玲珑金矿床 Pb 同位素构造模式图解

Fig. 6 Diagram showing Pb isotope tectonic pattern of Linglong Gold Deposit

矿床成因类型仍然存在争议,主要包括以下观点:

①造山型。成矿流体来源于造山晚期俯冲板片和洋壳沉积物俯冲停滞过程中的变质脱挥发分作用<sup>[11-12]</sup>。②岩浆-热液型。成矿流体来源于与地幔有关的岩浆作用,之后经历岩浆-热液过程,从而实现金进一步富集<sup>[56]</sup>。③胶东型。不同于全球其他已知金矿床类型,其具有独特的成矿模式,胶东大规模成矿作用是强烈壳幔相互作用的结果<sup>[57]</sup>。④克拉通破坏型。成矿流体主要来自地幔,成矿物质来源于滞留在地幔过渡带俯冲板片的脱水作用,在克拉通破坏时,含水矿物迅速分解,成矿流体集中释放,导致金爆发式成矿<sup>[13]</sup>。

玲珑金矿床形成于 120 ~ 123 Ma, 该时期华北克拉通东部正经历着大规模的岩石圈减薄<sup>[58-63]</sup>。岩石圈减薄会导致软流圈地幔上覆压力减小进而上涌,高温软流圈地幔不断底侵岩石圈地幔,岩石圈地幔发生部分熔融,形成基性岩脉岩浆。这些基性岩脉岩浆在不断上涌的过程中也会底侵下地壳,致使发生熔融,形成花岗质岩浆。因此,在成矿同期,有幔源基性岩脉形成(110 ~ 130 Ma)<sup>[58,64]</sup>,也有花岗岩形成(108 ~ 125 Ma)<sup>[65-66]</sup>。成矿流体研

究发现,成矿流体主要来自幔源岩浆流体,也有地壳来源特征。这说明,幔源基性脉岩岩浆在上涌到地壳浅部时,发生脱气形成成矿流体。邓军等<sup>[67]</sup>提出,基性岩脉岩浆出溶流体可能进一步萃取下地壳中的金生成成矿流体,这便与玲珑金矿床成矿流体具有壳源特征相一致。因此,玲珑金矿床是典型的胶东型金矿床。

## 5 矿床成因

胶东金矿床一直是众多学者的研究热点,针对金

矿床成因类型仍然存在争议,主要包括以下观点:

## 6 结论

1) 玲珑金矿床属于典型的石英脉型金矿床,主要载金矿物为黄铁矿与磁黄铁矿,形成年龄集中在 120 ~ 125 Ma。

2) 玲珑金矿床的成矿流体属于  $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl} - \text{CO}_2$  体系,具有中低温、低盐度、低密度热液流体特征。C-H-O-S-Pb 同位素显示,玲珑金矿床成矿流体主要来源于地幔,少部分来自于壳源。

3) 中生代晚期,在地壳减薄的构造背景下,软流圈地幔岩浆上涌导致岩石圈地幔发生部分熔融,基性岩脉岩浆出溶流体进一步萃取地壳中金产生玲珑金矿床成矿流体,属于胶东型金矿床。

[参考文献]

[1] DENG J, WANG Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic

- provinces, deposit types and tectonic framework [J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 219–274.
- [2] 宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 等. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展[J]. *地质通报*, 2022, 41(6): 903–935.
- [3] 阿卜杜萨拉木·喀迪尔, 陆继龙, 范玉超, 等. 胶东地区笏山金矿床黄铁矿微量元素特征及其成矿指示意义[J]. *黄金*, 2023, 44(4): 57–62.
- [4] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 85–98.
- [5] 王润生, 张保涛, 柳森, 等. 胶东牟平—乳山成矿带金青顶金矿广域电磁法探测效果分析[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(2): 381–390.
- [6] 孙之夫, 冯涛, 胡跃亮, 等. 胶东西岭金矿床地质特征与金的赋存状态[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(1): 24–36.
- [7] TIAN R C, LI D P, TIAN J P, et al. Genesis of the Jiudian gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Fluid inclusion and C–H–O–Pb isotope constraints[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 149: 105086.
- [8] WANG X, WANG Z C, CHENG H, et al. Gold endowment of the metasomatized lithospheric mantle for giant gold deposits: Insights from lamprophyre dykes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 316: 21–40.
- [9] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] SONG M C, DENG J, YI P H, et al. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(3): 801–824.
- [11] GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1/2): 1–75.
- [12] GROVES D I, SANTOSH M. The giant Jiaodong gold province: The key to a unified model for orogenic gold deposits? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(3): 409–417.
- [13] ZHU R X, FAN H R, LI J W, et al. Decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58: 1 523–1 537.
- [14] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式[J]. *矿床地质*, 2020, 39(2): 215–236.
- [15] 程力. 玲珑金矿九曲分矿通风系统优化研究[J]. *黄金*, 2023, 44(10): 9–12.
- [16] 赵泳越. 山东省玲珑金矿矿床成因研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [17] 冯岳川, 邓军, 于皓丞, 等. 胶东玲珑金矿田金的赋存状态及其对成矿过程的指示意义[J]. *岩石学报*, 2023, 39(2): 377–392.
- [18] 孙华山, 韩静波, 申玉科, 等. 胶西北玲珑、焦家金矿田锆石(U–Th)/He 年龄及其对成矿后剥露程度的指示[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 644–654.
- [19] WEN B J, FAN H R, SANTOSH M, et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constraints from geology, fluid inclusions and stable isotope [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 643–658.
- [20] 严千豪, 王翠芝, 吕古贤, 等. 胶东玲珑金矿黄铁矿的化学成分标型特征及其矿床学意义[J]. *地质找矿论丛*, 2020, 35(1): 52–63.
- [21] GUO L N, DENG J, YANG L Q, et al. Gold deposition and resource potential of the Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103434.
- [22] 王志强. 胶东玲珑金矿床流体包裹体特征及其成矿过程分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2015.
- [23] 李世勇, 李杰, 宋明春, 等. 胶东玲珑金矿田成矿特征和成矿作用[J]. *地质学报*, 2022, 96(9): 3 234–3 260.
- [24] LIANG Y Y, SHU L, MA P Y, et al. Gold source and ore-forming process of the Linglong gold deposit, Jiaodong gold province, China: Evidence from textures, mineral chemical compositions and sulfur isotopes of pyrite [J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 159: 105523.
- [25] 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb–Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. *科学通报*, 2000, 45(14): 1 547–1 553.
- [26] LI Q L, CHEN F, YANG J H, et al. Single grain pyrite Rb–Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 34(3): 263–270.
- [27] 王义文, 朱奉三, 宫润潭. 胶东金矿集中区金矿成矿年代学研究[J]. *黄金地质*, 2002, 8(4): 48–55.
- [28] YANG J H, ZHOU X H. Rb–Sr, Sm–Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits [J]. *Geology*, 2001, 29(8): 711–714.
- [29] DENG J, QIU K F, WANG Q F, et al. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China [J]. *Economic Geology*, 2020, 115(3): 671–685.
- [30] 林祖菁. 胶东玲珑金矿田石英脉型与蚀变岩型矿体黄铁矿矿物学和地球化学的对比及对成因的指示[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
- [31] 张栋霖. 胶东玲珑九曲金矿床成矿流体特征与来源[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [32] 卢焕章, GUHA J, 方根保. 山东玲珑金矿的成矿流体特征[J]. *地球化学*, 1999, 28(5): 421–437.
- [33] 张祖青, 赖勇, 陈衍景. 山东玲珑金矿流体包裹体地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2 207–2 216.
- [34] 王可勇, 张春燕, 樊岳铭, 等. 山东玲珑金矿床成矿流体地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(2): 194–201.
- [35] 李碧乐, 王力, 霍亮, 等. 胶东玲珑金矿<sup>52</sup>Rb 脉群成矿流体特征及成因[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(1): 51–60.
- [36] 秦丹鹤, 王可勇, 常亮, 等. 山东玲珑九曲金矿床地质特征及流体包裹体研究[J]. *世界地质*, 2013, 32(3): 505–514.
- [37] YANG Q Y, SHEN J F, LI S R, et al. Oxygen, boron, chromium and niobium enrichment in native Au and Ag grains: A case study from the Linglong gold deposit, Jiaodong, eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 537–546.
- [38] 丛智超, 孙丰月, 王力, 等. 山东招远九曲金矿床成矿流体地球化学特征[J]. *世界地质*, 2015, 34(2): 362–371.
- [39] 程韩宇. 胶东玲珑金矿和焦家金矿地球化学特征对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [40] ZHAO S R, LI Z K, LIN Z W, et al. Magmatic fluids responsible for lode gold mineralization in the giant Linglong deposit at Jiaodong, North China Craton: Constraints from LiO isotopes [J]. *Chemical Geology*, 2023, 638: 121696.
- [41] 王磊. 山东玲珑金矿流体包裹体及同位素特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [42] 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆科技出版社, 1989.
- [43] 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 胶东蓬莱金成矿区的 S–Pb 同位素地球化学和 Rb–Sr 同位素年代学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(10): 2 525–2 533.
- [44] 马广刚. 胶东玲珑金矿成因矿物学与深部远景研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [45] LI L, SANTOSH M, LI S R. The ‘Jiaodong type’ gold deposits: Characteristics, origin and prospecting [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 589–611.

- [46] 杨忠芳,徐景奎,赵伦山,等.胶东两大成因系列金矿石英包裹体氢氧同位素及成矿流体组分地球化学研究[J].矿物学报,1991,11(4):363-369.
- [47] 卢焕章,袁万春,张国平,等.玲珑—焦家地区主要金矿床稳定同位素及同位素年代学[J].桂林工学院学报,1999,19(1):3-10.
- [48] YANG L Q, DENG J, GUO L N, et al. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 585-602.
- [49] 姚凤良.胶东西北部脉状金矿[M].长春:吉林科学技术出版社,1990.
- [50] 毛景文,李厚民,王义天,等.地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J].地质学报,2005,79(6):839-857.
- [51] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [52] DENG J, LIU X F, WANG Q F, et al. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 674-686.
- [53] 赵伦山,张本仁.地球化学[M].北京:地质出版社,1988:166-188.
- [54] 李兆龙,杨敏之.胶东金矿床地质地球化学[M].天津:天津科学技术出版社,1993.
- [55] 周新华,杨进辉,张连昌.胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J].中国科学(D辑:地球科学),2002,32(增刊1):11-20.
- [56] WANG Z C, CHENG H, ZONG K Q, et al. Metasomatized lithospheric mantle for Mesozoic giant gold deposits in the North China craton[J]. Geology, 2020, 48(2): 169-173.
- [57] LI S R, SANTOSH M. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 376-414.
- [58] DENG J, LIU X F, WANG Q F, et al. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike—Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia[J]. Geological Society of America Bulletin, 2017, 129(11/12): 1 379-1 407.
- [59] DONG L L, YANG Z M, SONG M C, et al. Petrogenesis of Mesozoic magmatic suites in the Jiaodong Peninsula: Implications for crust-mantle interactions and decratonization[J]. Lithosphere, 2023(1): 6226908.
- [60] WU F Y, YANG J H, XU Y G, et al. Destruction of the North China craton in the Mesozoic[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47: 173-195.
- [61] 王立功,李秀章,于晓卫,等.胶东大泽山、天柱山花岗岩岩石成因和构造背景:地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素约束[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(3):879-898.
- [62] 仲米山,罗银花,刘冰,等.华北克拉通东部新房金矿床成矿规律与三维成矿预测[J].黄金,2023,44(7):48-54.
- [63] 王兴刚,孙涛,向胤合,等.胶西北大尹格庄金矿床与夏甸金矿床差异性研究[J].黄金,2023,44(2):67-72.
- [64] LIANG Y Y, LIU X F, QIN C, et al. Petrogenesis of early Cretaceous mafic dikes in southeastern Jiaolai basin, Jiaodong Peninsula, China[J]. International Geology Review, 2017, 59(2): 131-150.
- [65] GOSS S C, WILDE S A, WU F Y, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. Lithos, 2010, 120(3/4): 309-326.
- [66] YAN Q S, METCALFE I, SHI X F, et al. Early Cretaceous granitic rocks from the southern Jiaodong Peninsula, eastern China: Implications for lithospheric extension[J]. International Geology Review, 2019, 61(7): 821-838.
- [67] 邓军,王庆飞,张良,等.胶东型金矿成因模型[J].中国科学:地球科学,2023,53(10):2 323-2 347.

## Geological characteristics and genesis of Linglong Gold Deposit in Jiaodong

Zhang Zhen<sup>1</sup>, Yu Chao<sup>1</sup>, Wu Zhidong<sup>1</sup>, Wang Haiyi<sup>2</sup>, Xu Zengtian<sup>1</sup>, Liang Yayun<sup>2</sup>

(1. Shandong Gold Mining (Linglong) Co., Ltd.;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing)

**Abstract:** Linglong Gold Deposit, located in the northwestern part of the Jiaodong large-scale gold province in the eastern North China Craton, is one of the world's typical quartz vein-type gold deposits, with total gold resources exceeding 1 000 t. However, there has been ongoing debate regarding its genesis. By systematically summarizing the geological characteristics, geochronology, characteristics of ore-forming fluids, and isotope data of Linglong Gold Deposit, this study thoroughly discusses its geological characteristics and genesis. The formation age of Linglong Gold Deposit is concentrated 120-125 Ma. The ore-forming fluids are generally medium-to-low-temperature, low-salinity, and low-density hydrothermal fluids, primarily derived from magmatic fluids with a minor contribution from meteoric water. C-H-O-S-Pb isotopes indicate that the ore-forming fluids of Linglong Gold Deposit mainly originated from mantle-derived magmatic fluids, with some contribution from crustal fluids. During the Early Cretaceous, lithospheric delamination and thinning in the eastern North China Craton triggered asthenospheric upwelling, leading to continuous underplating of the lithospheric mantle, which partially melted to form mafic dyke magma. As the mafic dyke magma ascended to the shallow crust, rapid decreases in temperature and pressure caused degassing and fluid formation, which precipitated along secondary faults to form the gold deposit, exhibiting the typical characteristics of Jiaodong-type gold deposits.

**Keywords:** Jiaodong-type; Linglong Gold Deposit; quartz vein-type gold deposit; ore-forming fluids; deposit genesis; mineralization age