



辽东半岛内生金矿床基本特征、成矿作用与资源潜力

张 朋¹, 吕骏超¹, 赵 岩¹, 寇林林¹, 杨宏智¹, 毕中伟¹,
沙德铭¹, 杨中柱¹, 李东涛¹, 刘长纯²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

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

摘 要: 辽东半岛是华北克拉通重要组成部分, 中生代发生强烈的构造、岩浆活动和金矿成矿作用, 其内部产有不同规模的金矿床, 并具有明显的地域特色。通过系统总结辽东半岛金矿床的空间分布、赋矿围岩、控矿构造类型、矿化蚀变等基本特征和成矿作用, 分析金矿的资源潜力。根据金矿床的空间分布, 划分 4 个金矿集区, 即: 猫岭、白云-青城子、五龙-三道沟和新房金矿集区。猫岭和白云-青城子矿集区赋矿围岩为古元古代沉积变质岩系, 矿化类型分为蚀变岩型和石英脉型, 矿体主要受低角度层间断裂控制; 五龙-三道沟矿集区赋矿围岩分别为中侏罗世片麻状黑云母花岗岩和古元古代沉积变质岩系, 矿化类型以石英脉型为主, 蚀变岩型次之, 矿体受高角度断裂和低角度层间断裂控制; 新房矿集区赋矿围岩为太古宙片麻岩和新元古界青白口系变质砂岩、变粒岩和大理岩, 矿化类型为石英脉型和蚀变岩型, 矿体多呈脉状受变质核杂岩剥离断层下盘发育的韧-脆性次级断裂和上部新元古界青白口系盖层构造裂隙控制。年代学研究表明, 金矿成矿时代可分为晚三叠世(约 220 Ma)、早侏罗世(约 190 Ma)和早白垩世(约 120 Ma)。流体包裹体研究显示, 流体不混溶是金矿成矿的主要机制; 氢-氧同位素显示, 成矿流体主要来自岩浆水, 后期有大气降水加入; 氮-氩同位素数据揭示, 成矿流体主要来自壳源, 少量来自幔源; 硫-铅-锶同位素显示, 成矿物质主要来自中生代岩浆。同时, 赋矿地层起到不可或缺的作用。矿床地质特征及同位素数据显示, 辽东半岛金矿为与岩浆热液有关的金矿床。结合区域构造大地构造演化, 认为, 辽东半岛晚三叠世金矿形成与扬子板块向华北板块深俯冲背景有关, 早侏罗世金矿形成与古太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压构造背景有关, 早白垩世金矿形成于古太平洋板块向欧亚板块俯冲折返伸展环境。结合典型矿床地质特征、区域地球化学和地球物理特征, 圈定找矿靶区 23 处, 预测 3 000 m 以浅金资源量 2 414.56 t。

关键词: 金矿床; 矿集区; 成矿作用; 矿床成因; 变质核杂岩; 资源潜力; 辽东半岛

CHARACTERISTICS, MINERALIZATION AND RESOURCE POTENTIAL OF ENDOGENOUS GOLD DEPOSITS IN LIAODONG PENINSULA

ZHANG Peng¹, LYU Jun-chao¹, ZHAO Yan¹, KOU Lin-lin¹, YANG Hong-zhi¹, BI Zhong-wei¹,
SHA De-ming¹, YANG Zhong-zhu¹, LI Dong-tao¹, LIU Chang-chun²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-07-28. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“变质核杂岩构造系统中金矿成矿精细过程, 以辽东半岛新房金矿为例”(42072104); 中国地质调查局项目“东北地区辽东-吉南等成矿区带重点调查区铜硼等战略性矿产调查评价”(DD20230329), 国家重点研发计划课题“辽东金矿集区综合研究与找矿预测”(2016YFC0600108-09)“辽东典型金多金属矿田地质(建造、构造、矿化蚀变)-物化探多参数填(编)图技术示范”(2018YFC0603804-3).

作者简介: 张朋(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和综合研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//geozhangpeng2010@163.com

通信作者: 吕骏超(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和成矿规律研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//30207544@qq.com

Abstract: Liaodong Peninsula is an important part of North China Craton, where intense tectonic movement, magmatic activities and gold mineralization occurred in Mesozoic, and gold deposits of different scales are distributed with typical regional characteristics. Through the systematic summary of basic characteristics such as spatial distribution, ore-bearing wall rock, ore-controlling structures and mineralized alteration, as well as the metallogenesis of gold deposits, the paper analyzes the resources potential of gold deposits in Liaodong Peninsula. According to the spatial distribution of gold deposits, four gold deposit concentration areas are divided, including Maoling, Baiyun-Qingchengzi, Wulong-Sidaogou and Xinfang gold deposit concentration areas. The ore-bearing wall rocks of Maoling and Baiyun-Qingchengzi concentration areas are Paleoproterozoic sedimentary metamorphic rock series, with the mineralization of altered rock type and quartz vein type, and the orebodies mainly controlled by low-angle interlayer faults. The wall rocks of Wulong-Sidaogou concentration area are Middle Jurassic gneissic biotite granite and Paleoproterozoic sedimentary metamorphic rock series respectively, with the main mineralization of quartz vein type, followed by altered rock type, and the orebodies controlled by high-angle fault and low-angle interlayer fault. The wall rocks of Xinfang concentration area are Archean gneisses and Neoproterozoic Qingbaikouan metamorphic sandstone, granulite and marble, with the mineralization of quartz vein type and altered rock type. The orebodies are mostly in veins and controlled by the ductile-brittle secondary faults developed in the foot wall of metamorphic core complex detachment fault and by the structural fractures in the Neoproterozoic Qingbaikouan cap rock. The geochronological study shows that the gold mineralization epoch can be divided into Late Triassic (~ 220 Ma), Early Jurassic (~ 190 Ma) and Early Cretaceous (~ 120 Ma). The study on fluid inclusions indicates that fluid immiscibility is the main mechanism of gold mineralization. The H-O isotopes reveal the ore-forming fluid mainly comes from magmatic water, with atmospheric precipitation added in later period. The He-Ar isotopes show that the ore-forming fluid is mainly derived from crustal source and a little from mantle source. The S-Pb-Sr isotopes indicate that the metallogenic materials mainly come from the Mesozoic magma. Besides, the ore-bearing strata play an indispensable role. The geological characteristics and isotopic data show that the gold deposits in Liaodong Peninsula are of magmatic hydrothermal origin. Combined with regional tectonic evolution, it is believed that the Late Triassic gold deposits in the area are related to the deep subduction of Yangtze plate to North China plate, the Early Jurassic gold deposits related to the subduction and compression of Paleo-Pacific plate to Eurasian plate, and the Early Cretaceous gold deposits were formed in the subduction and exhumation extensional setting of Paleo-Pacific plate to Eurasian plate. According to the geological, regional geochemical and geophysical characteristics of typical deposits, 23 prospecting targets are delineated and 2 414.56 t of gold resources at 3 000 m below surface are predicted.

Key words: gold deposit; ore concentration area; mineralization; genesis of deposit; metamorphic core complex; resources potential; Liaodong Peninsula

0 引言

辽东半岛位于华北克拉通北缘东段,是华北克拉通 7 个重要金矿集区之一,与世界级胶东金矿集区隔海相望,二者成矿地质条件相似,产有一定数量的金矿,且具有一定的成矿特色。胶东地区目前已探明金资源储量 5 000 余吨^[1],而与胶东成矿地质条件相似的辽东已探明的金资源量不足 500 t。主要原因,一方面可能是辽东地区主要为森林覆盖区,找矿勘查工作难度大,且工作程度较低。另一方面可能是与胶东相比,该地区地质科研程度较低,研究程度相对薄弱,在矿床控矿构造、成因类型、成矿规律总结与找矿预测等

方面研究不够深入,且认识不统一。如:矿床成因方面,主要有印支期/燕山期岩浆热液型金矿^[2-4]、同沉积-变质-岩浆热液叠加改造成矿^[5]、古元古代变质热液金矿^[6]、“克拉通破坏”型金矿^[7]和“造山型”金矿^[8-9]等观点。这严重制约了辽东地区金矿找矿突破和成矿理论的发展。

为此,笔者及其研究团队在辽东地区开展了系列的矿床地质特征、成矿流体、矿物元素-同位素地球化学、年代学和成矿预测与资源潜力评价工作,在该地区取得了一系列成果,并发表了大量的学术论文。本论文是作者及其团队多年来研究成果的总结,并结合国

内外在该地区最新的研究进展与成果,以诠释辽东半岛金矿床的地质特征、控矿构造、矿床成因、成矿作用与深部资源潜力。一方面促进辽东半岛金矿成矿作用的理论认识,另一方面为辽东地区金矿找矿评价和实现新一轮找矿突破战略行动奠定基础。

1 区域地质背景

辽东半岛位于辽宁省东南部,大地构造位置隶属于华北克拉通北缘东段(图 1a、b)^[10-12],划分为 3 个主要大地构造单位,即北部的鞍山-抚顺太古宙杂岩(辽北地块-太古宙基底),南部的金州太古宙杂岩(辽南地块-太古宙基底)和中部的辽河群与辽吉花岗岩(辽吉造山带-古元古代基底)(图 1c)^[4,13-14]。中部的古元古代基底上部覆盖着中元古代—白垩世的未变质、变形的火山-沉积岩^[13]。辽东半岛最古老的锆石分布在辽北地体鞍山地区,成岩时代在 3.85~3.2 Ga 之间^[15]。在 2.24~2.02 Ga,辽河群不整合覆盖在太古宙基底之上,之后大约在 1.89 Ga 发生变质、变形作用^[16-17]。随后,大量的 A 型花岗岩、未变形的碱性正长岩和环斑花岗岩在 2.17~2.09 Ga 和 1.88~1.85 Ga 期间形成^[18-19]。最后,沉积大量的新元古代—中生代沉积岩^[20]。辽东半岛断裂构造、变质核杂岩构造和拉分盆地构造发育,大型的断裂构造以北东向为主,主要由西北部的郊庐断裂、东南部鸭绿江断裂和中部庄桓断裂组成。区内变质核杂岩构造发育,主要分为金州、万福、新房、栗子房变质核杂岩等(图 1c)。

区内中生代岩浆活动发育,主要分为 3 期,分别为晚三叠世(238~212 Ma)^[21]、侏罗世(180~153 Ma)^[22]和早白垩世(131~120 Ma)^[23-24]。晚三叠世岩体主要岩性组合为碱性杂岩、辉绿岩、煌斑岩和花岗岩;侏罗世岩体主要岩性为二长花岗岩和花岗闪长岩;白垩世岩体岩性组合主要为镁铁质、超镁铁质、闪长质岩石和铝质 A 型花岗岩、过碱性 A 型花岗岩及 I 型花岗岩^[25]。

2 金矿集区及典型矿床地质特征

辽东地区中生代发育强烈的构造、岩浆活动,区内金矿床聚集成区分布,不同矿集区具有不同的成矿环境和成矿特点。按其空间分布特点,划分为 4 个矿集区,即:白云-青城子金矿集区、五龙-四道沟金矿集区、猫岭金矿集区和新房金矿集区(图 1c)。

2.1 白云-青城子金矿集区

2.1.1 白云-青城子金矿集区地质特征

青城子金矿集区位于辽东半岛中部(图 1c),矿集区内共发现 5 处大型金矿床、10 多处小型金矿床(矿点),累计探明金资源量 300 t 以上^[26]。矿集区主要分布的金矿床有白云金矿、小佟家堡子金矿、林家三道沟金矿等^[27](图 2a)。

矿集区分布的地层主要有辽河群高家峪岩组、大石桥岩组和盖县岩组(图 2a)。高家峪岩组岩性为含石墨大理岩、角闪片岩、夕线石云母片岩,为一套火山岩、黏土岩夹碳酸盐岩建造。大石桥岩组主要岩性为白云质大理岩、云母条带大理岩、透闪石大理岩夹薄层变粒岩及石榴石云母片岩、夕线石云母片岩组成,为一套碳酸盐建造。盖县岩组岩性组合为云母片岩、夕线石云母片岩、石榴石云母片岩、透闪石片岩夹薄层大理岩,为一套碎屑岩-火山碎屑岩建造。

矿集区褶皱和断裂构造发育。由北而南分布着新岭背斜、四棵杨树向斜、榛子沟背斜及南山向斜。区内断层发育,以脆性断裂为主,断裂构造在该区铅锌银金的成矿中起着重要作用,它们既为火成岩脉的侵位提供了构造薄弱带,又为含矿热液的运移提供了通道。按走向分为北东、南北、北西 3 组。其中北东向的二道沟断裂和北西向的尖山子断裂控区内的矿床分布,几乎所有的金、银、铅锌矿床均分布在两条断裂内部。

白云-青城子矿集区发育中酸性岩体和各种脉岩,主要为大顶子、双顶沟、新岭和姚家沟岩体以及煌斑岩脉、闪长岩脉等(图 2a)。大顶子岩体为二长花岗岩,其成岩时代为 $1\ 869\pm16\ \text{Ma}$ ^[31];双顶沟岩体和新岭岩体岩性分别为二长花岗岩和花岗斑岩,成岩时代分别为 $224.2\pm1.2\ \text{Ma}$ 和 $225.3\pm1.8\ \text{Ma}$ ^[32];姚家沟岩体岩性为花岗岩,成岩时代为 $167.8\pm0.9\ \text{Ma}$ ^[33]。NNW 向的脉岩主要为煌斑岩和闪长岩,成岩时代主体在晚三叠世^[34]。

2.1.2 白云-青城子矿集区典型金矿床

白云-青城子矿集区大型金矿床有白云金矿、小佟家堡子金矿、林家三道沟金矿等。矿集区典型金矿床地质特征见表 1。本文以白云大型金矿床为典型矿床作简要介绍。

1) 矿区地质特征

白云金矿床位于辽宁省凤城市通远堡镇西约 40 km 的白云村,是 20 世纪末发现的一座大型热液金

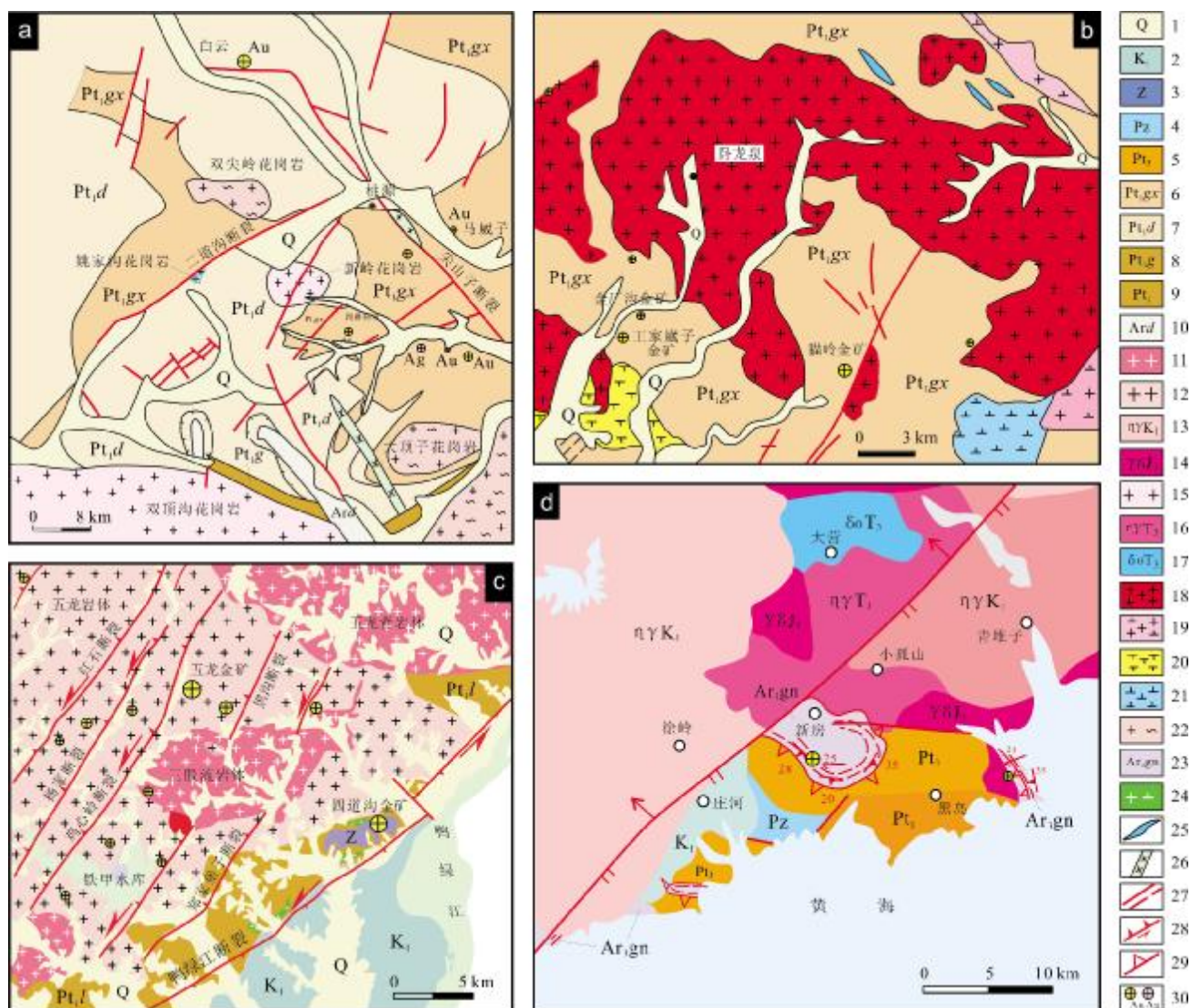


图2 辽东半岛金矿集区地质图

Fig. 2 Geological map of gold concentration areas in Liaodong Peninsula

a—白云—青城子金矿集区(据文献[27]修改)(Baiyun-Qingchengzi gold concentration area, modified from reference [27]); b—猫岭金矿集区(据文献[28]修改)(Maoling gold concentration area, modified from reference [28]); c—五龙—四道沟金矿集区(据文献[29]修改)(Wulong-Sidaogou gold concentration area, modified from reference [29]); d—新房金矿集区(据文献[30]修改)(Xinfang gold concentration area, modified from reference [30]); 1—第四系(Quaternary); 2—早白垩世火山岩(Early Cretaceous volcanic rock); 3—震旦系(Sinian); 4—古生代地层(Paleozoic strata); 5—新元古界地层(Neoproterozoic strata); 6—古元古代盖县岩组(Paleoproterozoic Gaixian fm.); 7—古元古代大石桥岩组(Paleoproterozoic Dashiqiao fm.); 8—古元古代高家峪岩组(Paleoproterozoic Gaojiayu fm.); 9—古元古界(Paleoproterozoic); 10—混合岩(migmatite); 11—早白垩世侵入岩(Early Cretaceous intrusive rock); 12—中侏罗世侵入岩(Middle Jurassic intrusive rock); 13—早白垩世二长花岗岩(Early Cretaceous monzogranite); 14—晚侏罗世二长花岗岩(Late Jurassic monzogranite); 15—晚三叠世花岗岩(Late Triassic granite); 16—晚三叠世花岗闪长岩(Late Triassic granodiorite); 17—晚三叠世闪长岩(Late Triassic diorite); 18—花岗闪长岩(granodiorite); 19—花岗斑岩(granite porphyry); 20—正长岩(syenite); 21—闪长岩(diorite); 22—吕梁期花岗岩(granite of Lyuliang stage); 23—太古宙片麻岩(Archean gneiss); 24—早白垩世脉岩(Early Cretaceous dike rock); 25—闪长斑岩(diorite porphyry); 26—闪长玢岩脉(diorite porphyrite vein); 27—断层/推测断层(fault/inferred fault); 28—走滑断层(strike-slip fault); 29—拆离断层(detachment fault); 30—金/银矿床(Au/Ag deposit)

表 1 辽东半岛主要金矿床地质特征

Table 1 Geological features of significant gold deposits in Liaodong Peninsula

矿集区	地区	矿床	矿化	赋矿围岩	控矿构造	与成矿有关的侵入岩	蚀变类型	矿石矿物	脉石矿物	规模	参考文献
白云、青城子金矿集区	凤城	林家三道沟金矿	蚀变岩型	盖县岩组片岩、大理岩、晚三叠世煌斑岩和花岗斑岩	E-W 向断裂构造	煌斑岩和花岗斑岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂	石英、方解石、绢云母等	大型	[4,35]
	凤城	杨树金矿	蚀变岩型	盖县岩组片岩和大理岩	NNW 向断裂构造	煌斑岩和花岗岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂	石英、白云石、绢云母和方解石等	中型	[4,36]
	凤城	白云金矿	蚀变岩、石英脉型	盖县岩组片岩和大理岩	NE、EW 向断裂构造	闪长玢岩和花岗斑岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化绿泥石化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿和自然金	石英、方解石、钾长石等	大型	[27,37,38]
	凤城	小佟家堡子金矿	蚀变岩型	盖县岩组片岩和大石桥岩组大理岩	E-W 向断裂构造	煌斑岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂	石英、方解石等	大型	[35,39]
	凤城	桃源金矿	蚀变岩、角砾岩型	盖县岩组片岩和大理岩	NE、E-W 向断裂构造	煌斑岩和花岗斑岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂	石英、白云石、绢云母等	中型	[40]
五龙、四道沟金矿集区	丹东	五龙金矿	石英脉型	片麻状花岗岩	NW、NE、N-S 向断裂构造	花岗闪长岩、煌斑岩和闪长岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化	黄铜矿、辉钼矿、自然金、黄铁矿、磁黄铁矿	石英、方解石、绢云母等	大型	[13,41-42]
	丹东	四道沟金矿	蚀变岩型	盖县岩组片岩和大理岩	NE 向断裂构造	煌斑岩和闪长玢岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、钠长石化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、白钨矿	石英、方解石、绢云母等	大型	[29,43]
猫岭金矿集区	大石桥	猫岭金矿	蚀变岩、石英脉型	盖县岩组千枚岩	NE 向断裂构造	二长花岗岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铜矿化、黄铁矿化	磁黄铁矿、自然金、毒砂、黄铁矿、方铅矿、白钨矿、闪锌矿、方铅矿	石英、白云石、绢云母、方解石、黑云母等	超大型	[6,28,44]
	大石桥	金厂沟金矿	石英脉型	盖县岩组片岩	NW 向断裂构造	黑云母二长花岗岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铜矿化、黄铁矿化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿	石英、方解石、绢云母等	小型	[45]
	大石桥	王家崴子金矿	石英脉型	盖县岩组片岩	NW 向断裂构造	二长花岗岩和闪长玢岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铜矿化、黄铁矿化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂辉铜矿	石英、白云石、绢云母、方解石、黑云母、绿帘石、绿泥石等	中型	[45,46]
新房金矿集区	庄河	新房金矿	蚀变岩、石英脉型	新太古代黑云二长片麻岩和新元古代石英砂岩	NE 向拆离断层带	花岗斑岩	硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铜矿化、钠长石化	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、自然金	石英、钾长石、方解石、绿帘石、绿泥石等	中型	[47-49]

矿床，目前经过老矿山项目勘查已累计探明金储量达 50 t 以上。

白云金矿矿区出露地层有辽河群盖县岩组片岩和大石桥岩组大理岩(图 3)。

矿区构造较为复杂，其中对金成矿影响最大的

为呈东西向展布的滑脱构造带，该构造带地表延长 8 500 m，倾斜深度大于 1 000 m，宽 1~40 m，其主要构造面位于盖县岩组和大石桥岩组接触部位。滑脱构造带内小褶皱、微褶皱劈理、节理、片理化带发育。脆-韧性剪切带是含矿构造，对矿化带内矿体的形态、产状、规

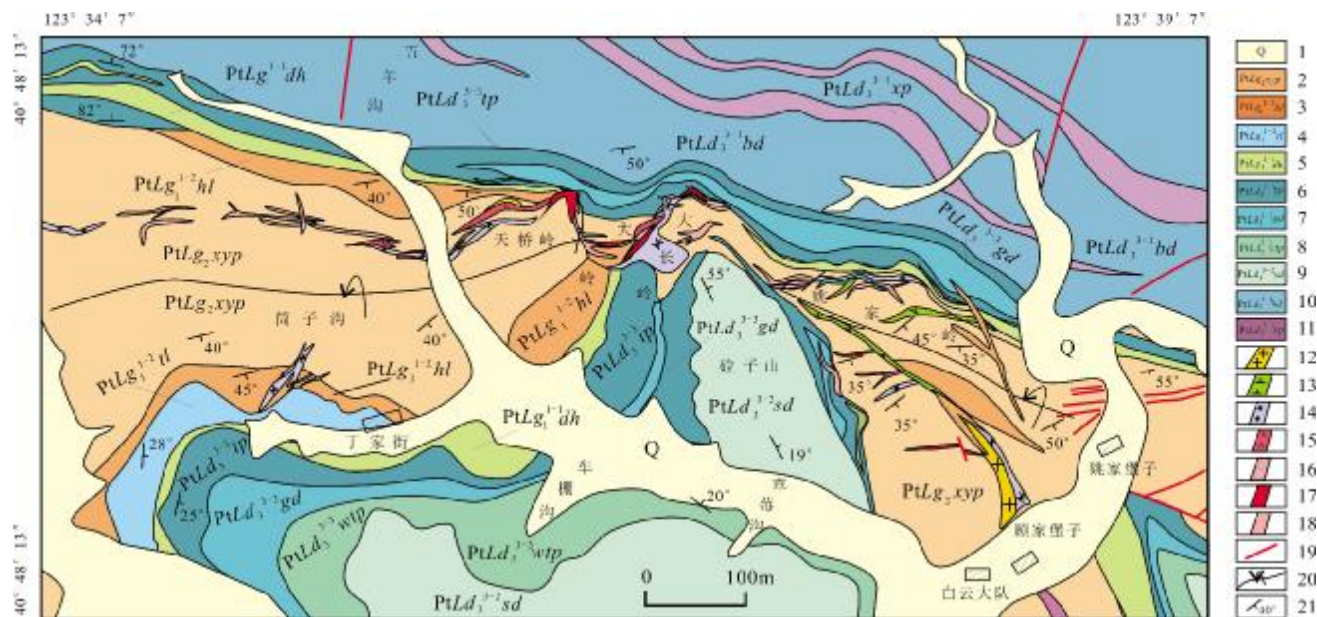


图3 白云金矿地质简图

(据文献[3])

Fig. 3 Geological sketch map of Baiyun gold deposit

(From Reference [3])

1—第四系(Quaternary); 2—盖县岩组夕线黑云片岩(sillimanite biotite schist of Gaixian fm.); 3—盖县岩组黑云变粒岩(biotite granulite of Gaixian fm.); 4—盖县岩组透闪变粒岩(tremolite granulite of Gaixian fm.); 5—盖县岩组大理岩和变粒岩互层(marble interbedded with granulite, Gaixian fm.); 6—大石桥岩组透辉透闪片岩(diopside tremolite schist of Dashiqiao fm.); 7—大石桥岩组薄层硅质条带大理岩(siliceous banded marble of Dashiqiao fm.); 8—大石桥岩组条带状透辉透闪片岩(banded diopside tremolite of Dashiqiao fm.); 9—大石桥岩组薄层含石墨大理岩(thin graphite-bearing marble of Dashiqiao fm.); 10—大石桥岩组白云石大理岩(dolomite marble of Dashiqiao fm.); 11—大石桥岩组斜长角闪片岩(plagioclase amphibole schist of Dashiqiao fm.); 12—花岗斑岩(granite porphyry); 13—闪长玢岩(diorite porphyry); 14—石英斑岩(quartz porphyry); 15—含金硅钾蚀变岩(gold-bearing silicon potassium altered rock); 16—含金石英脉(gold-bearing quartz vein); 17—金矿体(gold orebody); 18—银矿体(silver orebody); 19—断层(fault); 20—倒转向斜轴(axis of overturned syncline); 21—片理产状(schistosity occurrence)

模及分布起决定性的控制作用,控制着白云金矿床及其外围金矿体(脉)的空间产出范围(图3)。本区褶皱构造均呈东西向展布,由北至南依次为白云山背斜、阳沟里向斜、阳沟—石湖沟背斜、姚家堡子—天桥岭—李家堡子倒转向斜、苏家堡子翻卷背斜、荒岔沟翻卷向斜。

矿区见有闪长玢岩脉和石英斑岩脉(图4)。闪长玢岩主要呈北西向,石英斑岩则呈近东西向断续出露在滑脱构造带中。石英斑岩与金成矿密切相关,与金矿脉呈平行产出。同时井下见有隐伏的花岗斑岩,推测可能为金成矿提供热源(图4)。

2) 矿床地质特征

白云金矿由多条矿脉组成,分别为1、2、3、4、10、11、37、42、60、70、80号脉,共有200多条矿体组成。白云金矿矿体呈脉状、扁豆状分布在蚀变带中(图4),具有分支复合、尖灭再现特点。矿体总体走向

100~290°,倾向南西(30~70°)。矿体延长50~100m,延伸70~670m,厚度0.70~5.41m,最厚可达16.0m,品位 1.03×10^{-6} 。

矿石类型主要有硅钾蚀变岩型和石英硫化物脉型,矿石金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁铁矿等。黄铁矿是主要载金矿物,自然金呈不规则粒状、脉状分布于黄铁矿内及其边部。非金属矿物有石英、正长石、白云母、石墨、绿泥石等。矿石结构主要有自形粒状、自形—半自形粒状、细脉浸染状结构,构造有团块状、浸染状、细脉状和角砾状构造。

白云金矿围岩蚀变明显,主要蚀变有硅化、钾长石化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化。

根据野外脉体穿插关系和矿物镜下特征划分出3个主要成矿阶段。

(I) 石英—黄铁矿阶段:该阶段是在钾长石、硅化

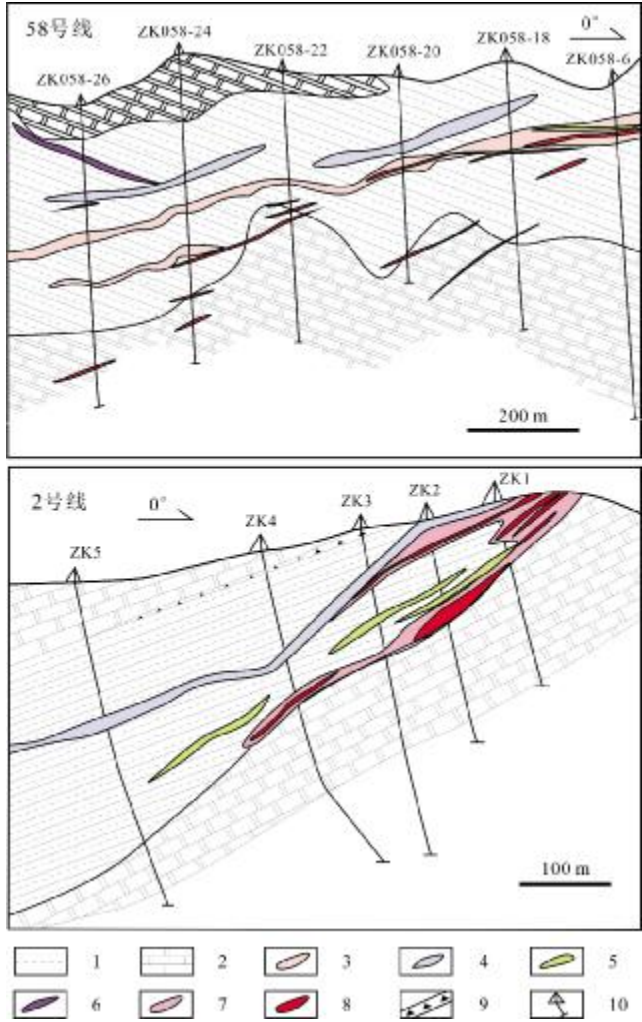


图4 白云金矿58号和2号勘探线剖面图

Fig. 4 Profiles of Baiyun gold deposit along exploratory lines Nos. 58 and 2

1—盖县岩组夕线黑云片岩 (sillimanite biotite schist of Gaixian fm.); 2—大石桥岩组大理岩 (marble of Dashiqiao fm.); 3—花岗岩岩 (granite porphyry); 4—石英斑岩 (quartz porphyry); 5—闪长玢岩 (diorite porphyrite); 6—煌斑岩 (lamprophyre); 7—硅钾蚀变岩 (silica potassium altered rock); 8—金矿体 (gold orebody); 9—推覆构造 (nappe structure); 10—钻孔 (drill hole)

以及绿泥石化、绿帘石化的基础上产生的,主要形成石英、少量黄铁矿。

(Ⅱ)石英-金-多金属硫化物阶段:该阶段主要形成团块状硫化物集合体、纯硫化物脉,主要矿石矿物是黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉铜矿、毒砂、自然金、自然银,金在该阶段大量生成。

(Ⅲ)石英-黄铁矿-方解石脉阶段:乳白色方解石脉和石英脉大量出现,偶见黄铁矿,多呈细脉状,局部

呈脉状。

2.2 猫岭金矿集区

2.2.1 猫岭金矿集区地质特征

猫岭金矿集区位于辽东半岛中部(图1c),矿集区主要分布的金矿床有猫岭金矿、王家崴子金矿和金厂沟金矿等。

矿集区分布的地层主要有辽河群盖县岩组(图2a),盖县岩组分为两个岩性段,下部为石英岩和变粒岩,上部为绢云母片岩、变长石石英砂岩夹板岩^[50],盖县岩组二段地层为矿集区主要赋矿地层。

矿区断裂构造发育,按走向分为北东和北西向断裂,其中北东向断裂与成矿关系密切。

猫岭金矿集区发育中酸性岩体,主要为卧龙泉岩体、矿洞沟岩体和猫岭岩体(图2b),卧龙泉岩体为复式岩体,主要由二长花岗岩和花岗岩组成,前者成岩时代为 $194.0\pm1.0\text{ Ma}$ ^[51],后者成岩时代为 $1\ 888.4\pm5.3\text{ Ma}$ ^[52],矿洞沟岩体为粗粒正长岩、细粒正长岩和闪长岩组成,成岩时代分别为 $1\ 879.0\pm17.0\text{ Ma}$ 、 $1\ 874.0\pm18.0\text{ Ma}$ 和 $1\ 870.0\pm18.0\text{ Ma}$ ^[53],猫岭岩体为似斑状二长花岗岩,成岩时代为 $196.0\pm1.0\text{ Ma}$ ^[28]。

2.2.2 猫岭金矿集区典型金矿床

猫岭金矿集区分布有猫岭金矿床、王家崴子金矿床、金厂沟金矿床等一系列大中型矿床,矿集区典型金矿床地质特征见表1。本文以猫岭大型金矿床为典型矿床作简要介绍。

猫岭金矿是辽东半岛重要的超大型金矿之一,矿床位于盖州市矿洞沟镇猫岭村李家堡子西部,探明储量达183 t,平均品位为 0.87×10^{-6} ^[54],具有规模大、品位低的特点。

1) 矿区地质特征

矿区出露的地层主要为古元古界辽河群盖县岩组和中元古界青白口系榆树砬子组,盖县岩组主要分布在矿区南部和西部,可分为2个岩性段,一段岩性组合为十字石、夕线石、石榴石、电气石、二云母片岩为主,夹石英岩、黑云母变粒岩等,二段岩性组合为绢云千枚岩类,为低绿片岩相,夹薄层灰色变质石英砂岩和长石石英砂岩,是猫岭金矿的主要赋矿围岩,榆树砬子组分布在矿区北部,不整合于盖县组二段之上,主要岩性为巨厚层石英岩、含磁铁矿石英岩,夹薄层变质石英砂岩和绢云千枚岩(图5)。

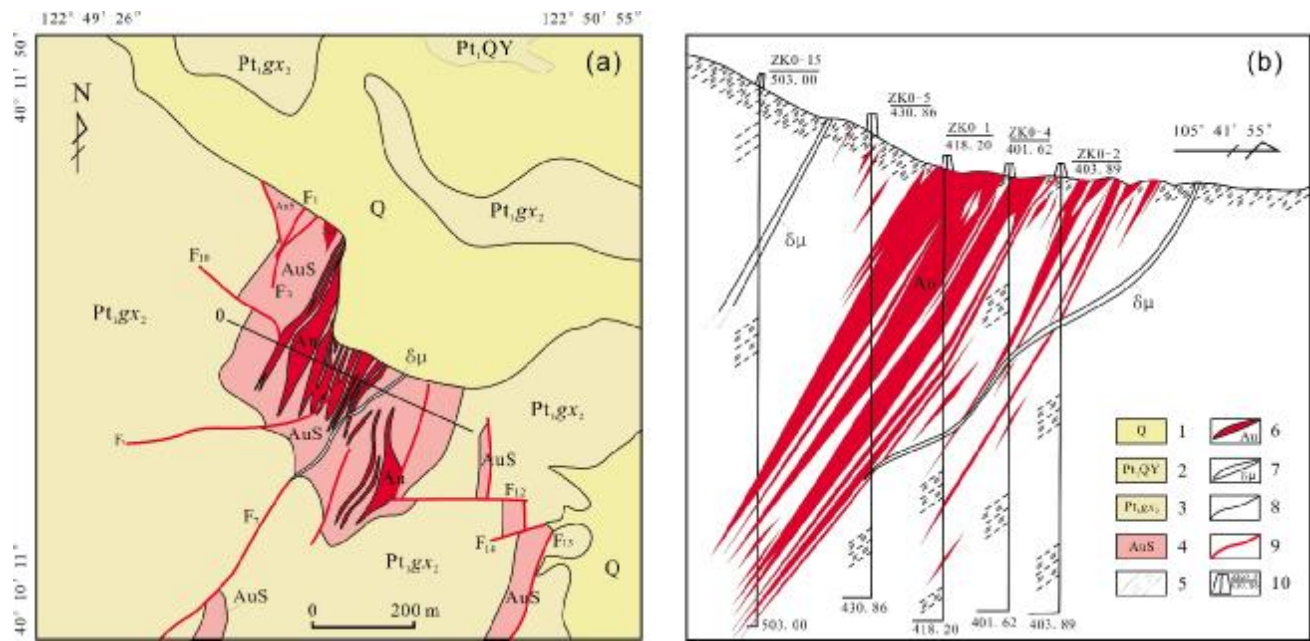


图 5 猫岭金矿地质简图
(据文献[28])

Fig. 5 Geological sketch map of Maoling gold deposit
(From Reference [28])

a—矿区地质图(geological map of orefield); b—0 线剖面图(profile along exploratory lines No. 0); 1—第四系(Quaternary); 2—榆树砬子群(Yushulazi gr.); 3—盖县岩组二段(2nd mem. of Gaixian fm.); 4—金矿化体(gold mineralized body); 5—绢云母片岩(sericite schist); 6—金矿体(gold orebody); 7—闪长(玢)岩脉(diorite dike); 8—地质界线(geological boundary); 9—断层(fault); 10—钻孔及编号(drill hole and number)

矿区主要发育北西向、近东西向、近南北向以及北北东向断裂,其中北东向断裂是主要的控矿构造,但矿体内部含金石英-硫化物脉还受到赋矿围岩的揉皱片理、千枚理控制,形成弯曲和平直的石英细脉-硫化物脉。

侵入岩主要为矿区南部出露的猫岭岩体,呈岩株状产出,岩性为似斑状黑云母二长花岗岩和细粒花岗岩,岩体侵入于盖县岩组二段地层中,石英硫化物沿节理呈脉状出现,脉宽 0.5 mm,同时岩体的边部与围岩接触部位有 10 cm 宽的细粒花岗闪长岩,与似斑状二长花岗岩呈渐变过渡关系,岩体本身具有矿化现象,测得蚀变二长花岗岩金含量 0.2×10^{-6} ,说明岩体本身已明显金矿化^[55]。矿区出露的脉岩主要有闪斜煌斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩、二长斑岩,呈北东、北西和近南北向产出,脉岩穿插矿体,没有明显矿化现象。

2) 矿床地质特征

根据矿(化)体自然产出状态,划分 2 个矿带,即 I 号和 IV 号矿化带。I 号矿带位于矿区东南部,IV 号矿

化带位于矿区西北部。I 号矿化带是猫岭金矿的主矿化带,规模大且工业矿体数众多、分布集中、北宽南窄,长近 1 500 m,宽 430 m,矿带走向 15° ,倾向西,倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。IV 号矿带距离 I 号矿化带北西方向 2 km,矿带长度超过 700 m,宽度约 200 m,走向北北西。

猫岭金矿体与围岩界限不明显,以大于 1×10^{-6} 圈定矿体 21 条,其中规模较大为 8 号和 9 号矿体。矿体长度 300~500 m,延伸 250~400 m,厚度 4.47~19.96 m,矿体呈层状、似层状、透镜状产出,倾向 $286^\circ \sim 300^\circ$,倾角 $56^\circ \sim 62^\circ$,由南向北呈右形雁列状排列。

矿石矿物组合较为简单,金属矿物主要有自然金、金银矿、银金矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿,非金属矿物有石英、黑云母、绿泥石、长石、方解石等。矿石构造主要为揉曲状、细脉浸染状、浸染状、块状构造,团块状和角砾状构造次之。矿石的结构有压碎结构、包含结构、乳滴状结构、交代结构、半自形-他形粒状结构。

矿床围岩蚀变分带明显,中心带以强硅化为主,

是工业矿体集中分布区;边缘带蚀变为绢云母化、绿泥石化,该蚀变带工业矿体少,且分布不集中。

根据野外矿体形态及室内显微镜鉴定,将猫岭金矿成矿过程划分为4个成矿阶段。

(I)硅化石英-毒砂-绢云母阶段:主要为硅化和绢云母化,偶见毒砂。

(II)弯曲石英-多金属硫化物成矿阶段:矿物组合为石英+毒砂+磁黄铁矿+黄铁矿+方铅矿+闪锌矿,该阶段是金的主要成矿阶段。石英呈灰黑色,脉状和网脉状产出,石英脉经薄片鉴定未发生拉长和波状消光现象,由此推测可能为后期热液活动成矿流体沿构造裂隙上升充填形成。

(III)平直石英-磁黄铁矿成矿阶段:主要矿物组合为石英+毒砂+磁黄铁矿+黄铜矿+黄铁矿,该阶段同样是金形成的主要阶段。石英脉呈灰白-灰黑色脉状分布。

(IV)方解石-石英阶段:主要形成方解石和石英,无明显矿化现象,基本不含金。可见方解石脉切割弯曲和平直的石英硫化物脉。

2.3 五龙-四道沟金矿集区

2.3.1 五龙-四道沟金矿集区地质特征

五龙金矿集区位于辽东半岛东南部(图1c),是辽东地区重要金矿集区之一。矿集区发现有五龙、四道沟大型金矿床和杨家、红石等小型金矿床(矿点)。

矿集区内分布的地层主要有辽河群浪子山岩组、早白垩世小岭组和青白口系鲇鱼台组(图2c)。

区内断裂构造发育,走向北东,近等间距自西向东展布,依次为红石断裂、杨家断裂、鸡心岭断裂和黑沟断裂。其中鸡心岭断裂主要发育在五龙金矿矿区,与金成矿关系最为密切。

五龙矿集区发育中酸性岩体,大面积分布片麻状花岗岩,是矿床的主要赋矿围岩,成矿时代在157~163 Ma^[56]。在矿集区东北部分布五龙背岩体,主要岩性为斑状花岗岩,成岩时代为146.8±0.8 Ma^[57]。矿集区南侧分布三股流复式岩体,由花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩和中粗粒黑云母二长花岗岩组成,后两者成岩年龄分别为137.2±1.2 Ma和123.2±1.3 Ma^[57]。

2.3.2 五龙-四道沟金矿集区典型金矿床

五龙金矿集区主要分布五龙和四道沟大型金矿床及一些小型金矿,矿集区典型金矿床地质特征见表1。

本文以五龙大型金矿床为典型矿床作简要介绍。

五龙金矿床位于辽宁省丹东市西约30 km,已有近70年的开采历史,根据矿区资料,矿产资源储量已超80 t,为大型金矿床。

1) 矿区地质特征

金矿体主要产在侏罗纪五龙岩体内。岩体分布于矿区西部、中部,呈大面积岩基产出,面积约450 km²。矿区东南侧为三股流复式杂岩。矿区内还发育一系列北东、北西向脉岩,主要为闪长岩、煌斑岩、花岗斑岩和辉绿岩等(图6)。

五龙金矿区断裂构造发育,与成矿作用密切相关的是北北东向鸡心岭脆性断裂、100°断裂(图6)。

2) 矿床地质特征

五龙金矿由东向西可分为I号、II号、III号矿化带,每条金矿脉带由10余条金矿体组成。矿体以近南北走向为主,北北东、北西走向次之。近南北向组包括2、3、4、5、32、33、40、42、9、10、107号脉,矿脉倾角较陡,近于直立,向南南西侧伏,侧伏角40~70°;北西向组包括1、6、11、75、76、80、163号脉,矿脉一般规模较小,倾向南西,倾角60~80°。两组矿脉延长几十米至600 m,宽0.1~30 m。矿体规模变化较大,一般延长、延深为200~300 m,最大延长达600 m,延深大于800 m;矿体厚薄不等,一般0.2~3.0 m,最大厚度达10 m。

矿石矿物组合较为简单。金属矿物主要有自然金、金银矿、银金矿,磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿和斜方辉铅铋矿^[41];非金属矿物有石英、金红石、独居石、黑云母、绿泥石、长石、方解石等。矿石构造主要为浸染状、细脉状和块状构造;具有自形-半自形结构、交代结构。矿床围岩蚀变带明显,主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化和碳酸盐化。根据野外矿体形态及室内显微镜鉴定,将五龙金矿成矿过程划分为4个成矿阶段。

(I)乳白色石英阶段:主要为乳白色石英脉,未见其他矿物被第二成矿阶段(石英黄铁矿脉)和第四成矿阶段(石英-方解石脉)切割。

(II)暗灰色石英-黄铁矿阶段:矿物组合为石英+浸染状黄铁矿,该阶段矿脉被石英多金属硫化物脉(第三成矿阶段)切割。

(III)石英-多金属硫化物成矿阶段:主要矿物组合为石英+方铅矿+磁黄铁矿+黄铜矿+黄铁矿+辉铋

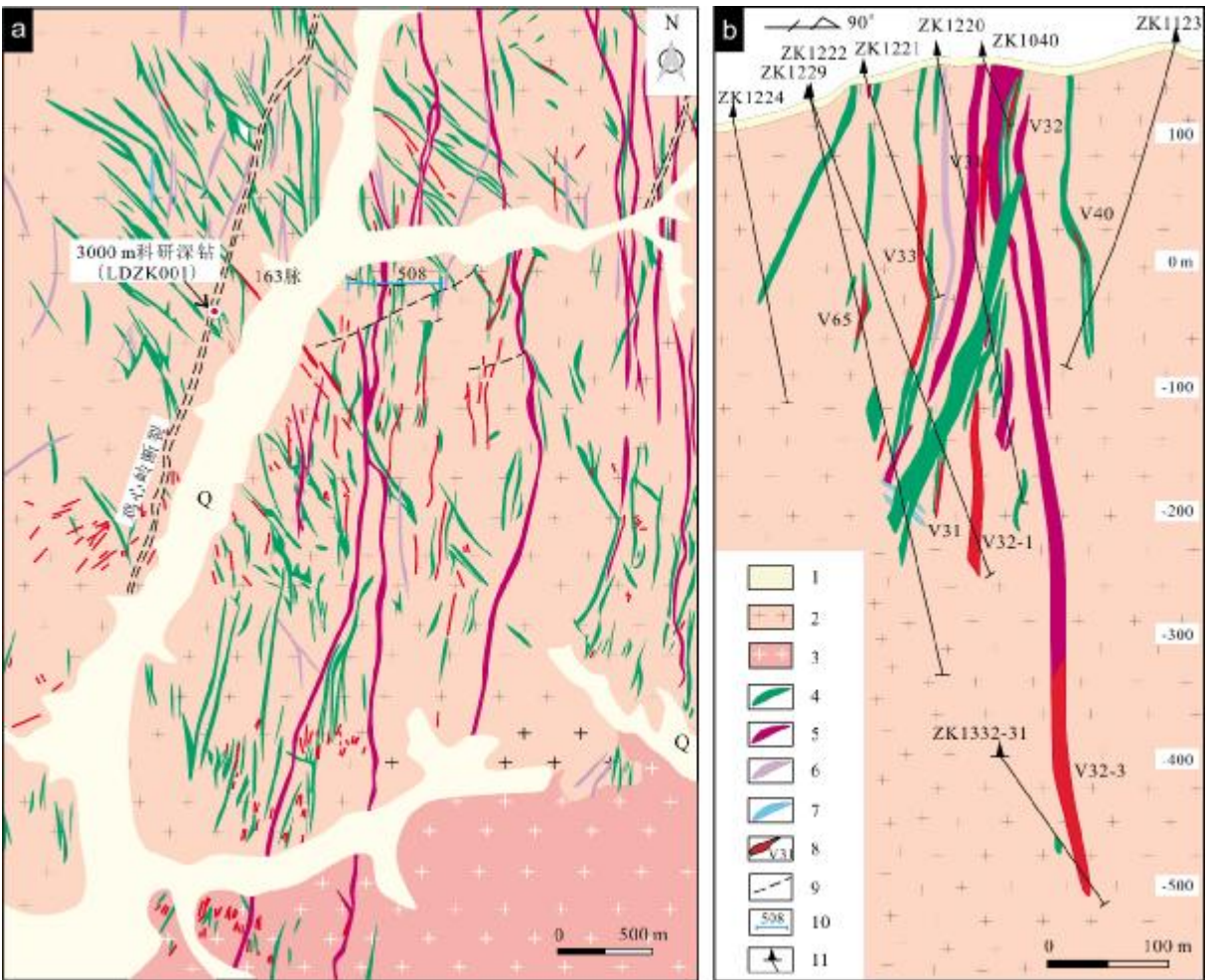


图 6 五龙金矿地质简图
(据文献[36])

Fig. 6 Geological sketch map of Wulong gold deposit
(From Reference [36])

a—矿区地质图(geological map of orefield); b— 508 线剖面图(profile along the along exploratory line No. 508); 1—第四系(Quaternary); 2—片麻状花岗岩(gneissic granite); 3—花岗闪长岩(granodiorite); 4—闪长岩(diorite); 5—花岗斑岩(granite porphyry); 6—煌斑岩(lamprophyre); 7—辉绿岩(diabase); 8—矿体(orebody); 9—断裂(fault); 10—勘探线及编号(exploratory line and number); 11—钻孔(drill hole)

矿+自然金,该阶段同样是金形成的主要阶段.

(IV)方解石-石英阶段:主要形成方解石和石英.

2.4 新房金矿集区

2.4.1 新房金矿集区地质特征

新房金矿集区位于辽东半岛西南部. 区域出露的地层主要为太古宇鞍山群,古元古界辽河群,新元古界青白口系鲇鱼台组、南芬组、桥头组,寒武系以及白垩系小岭组(图 2d).

矿集区断裂构造和变质核杂岩构造发育,其中北东向的庄桓断裂在区内分布,新房变质核杂岩构造为区内新近发现的主要构造. 新房变质核杂岩具有典型

的三层结构(上盘弱变形沉积岩层、下盘深成变质岩和中部的拆离断层带),由 4 个部分(上盘新元古代—古生代弱变形沉积岩层,中部的拆离断层带,下盘的太古宙糜棱岩、片麻杂岩和同构造中生代花岗质侵入岩体)构成(图 2d).

区内中生代岩浆活动频繁,分布大量中生代岩体. 矿集区西北部 and 东北部分布的早白垩世二长花岗岩,形成时代分别为 137.9 Ma 和 124.0±2.0 Ma^[30];东南部分布黑岛斑状花岗岩,形成时代为 128±0.7 Ma^[30].

2.4.2 新房金矿集区典型金矿床

新房金矿集区主要分布新房中型金矿床及黑岛小

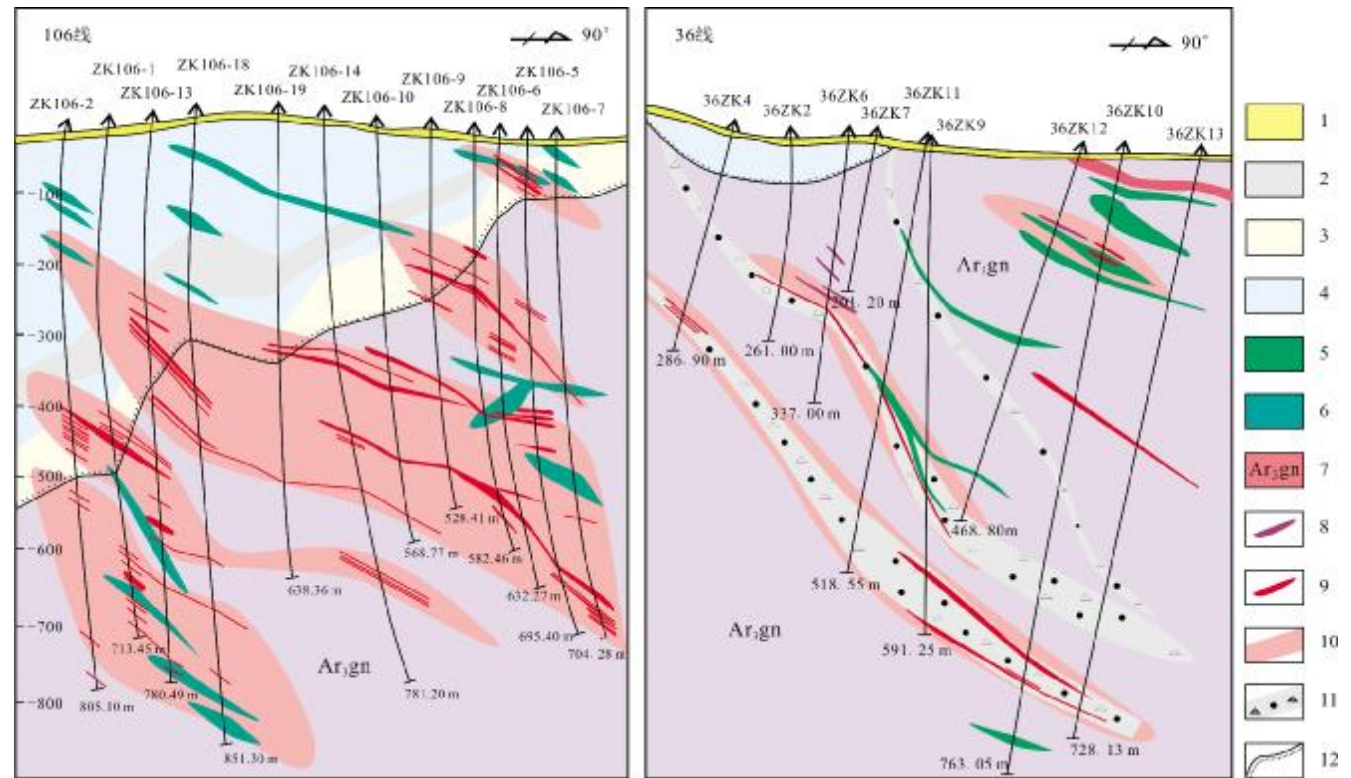


图 8 新房金矿 106 线和 36 线勘探线剖面图
(据文献[49])

Fig. 8 Profiles of Xinfang gold deposit along exploratory lines Nos. 106 and 36
(From Reference [49])

1—第四系(Quaternary); 2—大理岩(marble); 3—变质砂岩(metasandstone); 4—变粒岩(granulite); 5—辉绿岩(diabase); 6—闪长岩(diorite); 7—太古宙片麻岩(Archean gneiss); 8—石英脉(quartz vein); 9—矿体(orebody); 10—蚀变带(alteration zone); 11—构造破碎带(structural fracture zone); 12—拆离断层(detachment fault)

磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $2\,287\pm95\text{ Ma}$ 和 $188.7\pm4.5\text{ Ma}$, 黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $188.9\pm1.2\text{ Ma}$, 与成矿密切的花岗岩成岩时代为 $196.1\pm1.1\text{ Ma}$, 赋矿围岩的成岩时代不早于 $2\,065\text{ Ma}$. 因此笔者认为猫岭金矿为早侏罗世成矿. 金厂沟金矿载金石英 Rb-Sr 等时线年龄为 $159\pm29\text{ Ma}$, 同时猫岭金矿区分布的与成矿密切的卧龙泉复式岩体成岩时代分别为 $194\pm1\text{ Ma}$ 和 $1\,888.4\pm5.3\text{ Ma}$. 因此, 本文认为猫岭金矿集区早侏罗世成岩、成矿事件比较明显.

白云-青城子矿集区白云金矿黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 $225\pm7\text{ Ma}$, 石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 快中子活化和阶段性加热法分别为 $207\sim209\text{ Ma}$ 和 $196\sim197\text{ Ma}$ 成矿年龄, 热液金红石 SIMS U-Pb 加权平均年龄为 $229\pm4\text{ Ma}$, 磷钼矿 SIMS U-Pb 加权平均年龄分别为 $224\pm2\text{ Ma}$ 、 $231\pm1\text{ Ma}$ 、 $1\,816\pm6\text{ Ma}$. 作者近期获得载金黄铁矿

Rb-Sr 等时线年龄为 $218.5\pm2.6\text{ Ma}$, 锆石 U-Pb 定年结果显示, 矿区岩浆活动主要分为早白垩世(约 130 Ma) 和晚三叠世(约 220 Ma). 林家三道沟金矿热液磷灰石谐和年龄为 $184.78\pm9.35\text{ Ma}$, 作者获得其含金黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 $213.0\pm3.1\text{ Ma}$, 矿区内岩浆活动主要在晚三叠世(矿化花岗斑岩 $220.7\pm2.1\text{ Ma}$, 花岗斑岩 $224\pm1.5\text{ Ma}$, 蚀变闪长玢岩 $226.4\pm2.8\text{ Ma}$). 小佟家堡子含金硅质岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $233\pm3\text{ Ma}$; 煌斑岩和闪长岩成岩时代分别为 $226\pm1\text{ Ma}$ 和 $214\pm2\text{ Ma}$. 高家堡子银矿石英 Ar-Ar 和 Rb-Sr 等时线时代分别为 $234\pm1\text{ Ma}$ 和 $237\pm1\text{ Ma}$. 通过数据分析整理, 白云-青城子矿集区金矿成岩、成矿时代主要集中在晚三叠世.

五龙-四道沟金矿集区五龙金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 $119.0\pm1.0\text{ Ma}$, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

表 2 辽东半岛金矿成岩、成矿年代学表

Table 2 Diagenetic and metallogenic chronology of gold deposits in Liaodong Peninsula

矿床	测试对象	方法	年龄/Ma	参考文献
高家堡子银矿	石英	Ar - Ar	234±1	[2]
	石英	Rb - Sr	237±1	[2]
小佟家堡子金矿	含金硅质岩	Rb - Sr	233±3	[2]
	煌斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	226±1	[34]
	闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	214±2	[22]
白云金矿	黄铁矿	Re - Os	225±7	[3]
	金红石	SIMS U - Pb	229±4	[8]
	磷钇矿	SIMS U - Pb	224±2、231±1、1816±6	[8]
	石英	Ar - Ar	207~209	[59]
	石英	Ar - Ar	196~197	[59]
	花岗斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	219	[60]
	石英斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	219±3	[60]
	二长斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	164	[60]
	石英斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	127.8±0.8	[61]
	闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	125.6±1.3	[61]
林家三道沟金矿	黄铁矿	Rb - Sr	218.5±2.6	作者待发表
	热液磷灰石	LA - ICP - MS U - Pb	184.78±9.35	[62]
	矿化花岗斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	220.7±2.1	[62]
	花岗斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	224±1.5	[62]
	蚀变闪长玢岩	LA - ICP - MS U - Pb	226.4±2.8	[62]
	黄铁矿	Rb - Sr	213.0±3.1	作者待发表
猫岭金矿	毒砂	Re - Os	2316±140	[6]
	黑云母	Ar - Ar	189±1	[28]
	卧龙泉花岗岩	LA - ICP - MS U - Pb	194±1	[28]
	猫岭花岗岩	LA - ICP - MS U - Pb	196±1	[28]
	毒砂、磁黄铁矿	Rb - Sr	2287±95	[44]
	卧龙泉花岗岩	LA - ICP - MS U - Pb	1888.4±5.3	[51]
	毒砂、磁黄铁矿	Rb - Sr	188.7±4.5	[63]
金厂沟金矿	石英	Rb - Sr	159±29	[64]
五龙金矿	成矿浅闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	123±1	[13]
	煌斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	115±2	[13]
	花岗闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	124±1	[13]
	花岗斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	126±1	[13]
	与成矿密切花岗岩	LA - ICP - MS U - Pb	120±1	[13]
	辉长岩	LA - ICP - MS U - Pb	119±2	[13]
	黄铁矿	Rb - Sr	119±1	[13]
	辉钼矿	Re - Os	127.6±2.3	[42]
	热液独居石	SIMS U - Th - Pb	126.7±3.2	[42]
	三股流花岗岩	Single zircon U - Pb	129±3	[65]
	石英	Rb - Sr	120±3	[65]
	花岗斑岩	SHRIMP U - Pb	125±4	[56]
	片理化闪长岩	SHRIMP U - Pb	125±2	[56]
	未变形闪长岩	SHRIMP U - Pb	121±4	[56]
	斑状花岗岩	SHRIMP U - Pb	125±3	[56]
	斑状花岗岩	LA - ICP - MS U - Pb	120±2	[56]
	花岗岩	TIMS U - Pb	129±3	[56]
	绢云母	Ar - Ar	122.8±0.8	[66]
	热液金红石	SIME U - Pb	122.3±1.1	[67]
	成矿后闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	114.5±1.9	作者待发表
四道沟金矿	成矿前闪长岩	LA - ICP - MS U - Pb	124.8±2.5	作者待发表
	矿化的煌斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	132.2±3.3	作者待发表
新房金矿	石英	Rb - Sr	143.0±5.8	[47]
	黄铁矿、方铅矿	Rb - Sr	122.6±2.1	[48]
	黄铁矿	Re - Os	121.1±1.2	[49]
	花岗斑岩	LA - ICP - MS U - Pb	123.0±1.4	作者待发表

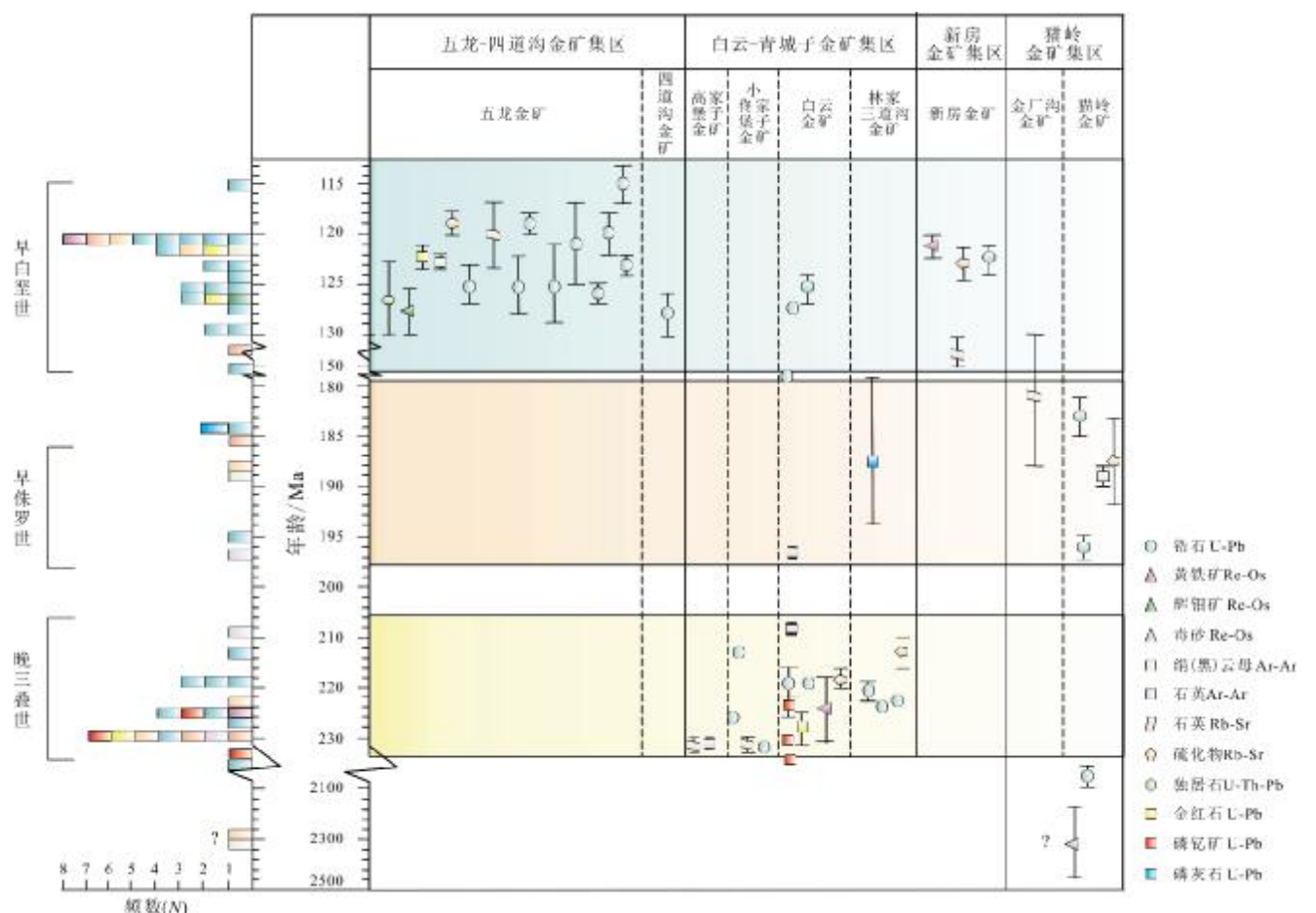


图 9 辽东半岛金矿成岩成矿年龄分布图

Fig. 9 Distribution of diagenesis and mineralization ages in Liaodong Peninsula

为 127.6 ± 2.3 Ma, 热液金红石 U-Pb 年龄为 122.3 ± 1.1 Ma, 热液独居石 SIMS U-Th-Pb 年龄为 126.7 ± 3.2 Ma, 绢云母 Ar-Ar 等时线年龄为 122.8 ± 0.8 Ma. 矿区岩浆活动主要集中在早白垩世 (129~115 Ma), 四道沟矿化煌斑岩锆石 U-Pb 年龄为 132.2 ± 3.3 Ma.

新房金矿集区新房金矿石英和多金属硫化物(方铅矿、黄铁矿) Rb-Sr 等实线时代均为 122.6 ± 2.1 Ma, 黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 121.1 ± 1.2 Ma, 矿区花岗斑岩成岩时代为 123.0 ± 1.4 Ma. 鉴于新房金矿受新房变质核杂岩控制, 结合获得的最新成矿时代认为其成矿时代在白垩世.

3.2 同位素特征与成矿物质来源

3.2.1 硫同位素特征

辽东半岛 3 期不同时代的金矿床具有不同的硫同位素组成(图 10), 并与赋矿围岩和环境不同有关. 晚三叠世金矿床矿石矿物除白云金矿外均具有较宽的正

的硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S} = 1.87\text{‰} \sim 16.0\text{‰}$) (图 10). 晚三叠世金矿床硫同位素组成与古元古代地层(盖县岩组变质岩)、中生代侵入岩以及古元古代侵入岩中的硫同位素组成具有一定的重叠性(图 10a、d、e), 反映金矿的形成与地层和岩浆活动关系密切. 白云金矿硫同位素组成从 $-10.3\text{‰} \sim +18.7\text{‰}$, 且具有较多的负值硫同位素组成, 可能与成矿过程中的氧化作用有关, 而部分具有较高的正值硫可能与地层的高度混染有关, 但还需要进一步更细致的工作. 早侏罗世猫岭金矿硫同位素组成为 $4.3\text{‰} \sim 10.2\text{‰}$ (图 10b), 与猫岭岩体和古元古代地层具有相似的硫同位素组成, 认为猫岭岩体与古元古代地层可能为猫岭金矿的形成提供了成矿物质(图 10d、e). 早白垩世五龙金矿和新房金矿硫同位素组成变化范围较小, 集中在 0 值附近 ($\delta^{34}\text{S} = 0.2\text{‰} \sim 5.23\text{‰}$) (图 10c、e), 具有典型的岩浆流的特点. 赋存在辽河群盖县岩组中的四道沟金矿硫同位素组成具有较

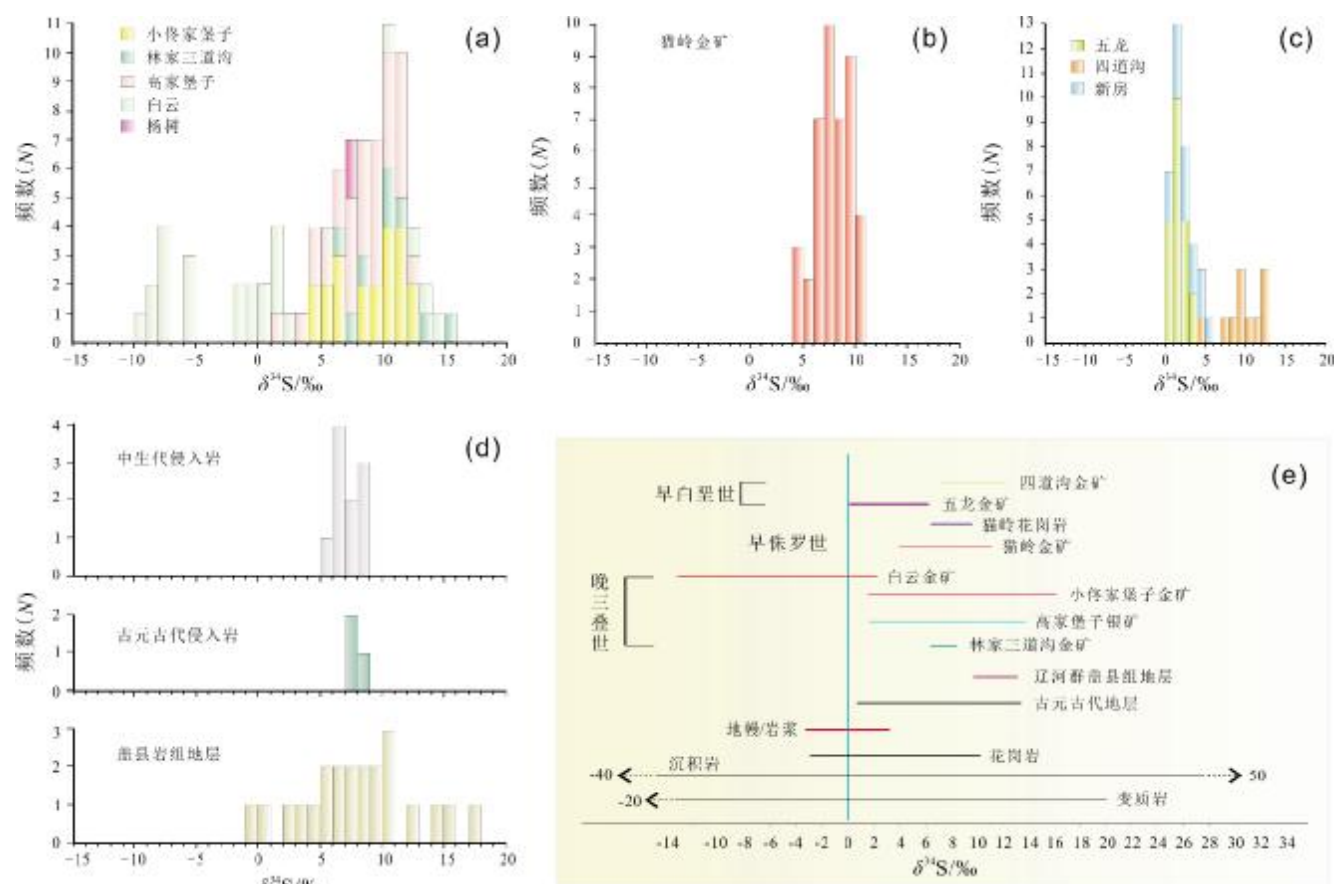


图 10 辽东半岛金矿床及与成矿有关岩石硫同位素柱状图和地球化学储库对比图

Fig. 10 Histograms of sulfur isotopes of gold deposits and ore-forming rocks and geochemical reservoirs in Liaodong Peninsula

a—晚三叠世金矿床(Late Triassic gold deposit); b—早侏罗世金矿床(Early Jurassic gold deposit); c—早白垩世金矿床(Early Cretaceous gold deposit); d—古元古代及中生代岩石地层(据文献[14])(Paleoproterozoic and Mesozoic rocks and strata, from Reference [14]); e—辽东半岛金矿床和相关岩石硫同位素对比图(据文献[13,27,37,43-44,47,64,68-75])(comparison of sulfur isotope gold deposits and related rocks in Liaodong Peninsula, data from References [13, 27, 37, 43-44, 47, 64, 68-75])

大的正值($\delta^{34}\text{S}=4.9\text{‰}\sim 12.8\text{‰}$)(图 10c),反映地层和岩浆双重的成矿作用。

总之,辽东半岛 3 期不同金矿床的硫同位素组成具有明显的两种特征:产在花岗岩中的金矿床(五龙、新房)具有 0 值附近的硫同位素组成,具有明显的岩浆(深源)成矿物质来源;而产在变质地质体(辽河群地层)中的金矿具有明显地层和岩浆混合源的成矿物质来源。

3.2.2 铅同位素特征

辽东半岛 3 期不同金矿床与太古宙变质岩、古元古代变质岩和中生代侵入岩具有不同的铅同位素组成(图 11)。太古宙变质岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.66\sim 16.95$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.25\sim 15.46$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.69\sim 38.46$ 。古元古代地层铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.74\sim 20.64$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.59\sim 16.00$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.91\sim 39.63$ [4]。

晚三叠世侵入岩铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.41\sim 17.61$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.52\sim 15.63$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.77\sim 39.91$ [27]。早中侏罗世侵入岩铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.19\sim 18.37$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.50\sim 15.62$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.22\sim 38.86$ [4]。早白垩世侵入岩铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.88\sim 17.72$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.34\sim 15.64$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.03\sim 38.91$ [4]。

晚三叠世金矿床铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.41\sim 18.36$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.51\sim 15.74$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.94\sim 40.03$ 。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 判别图(图 11)中,样品均落入上地壳和造山带中,在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 判别图(图 11)中,样品均落入下地壳和造山带中,暗示为混合来源铅。早侏罗世金矿床铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.86\sim 18.76$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.28\sim 15.87$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.91\sim 39.63$ [4]。

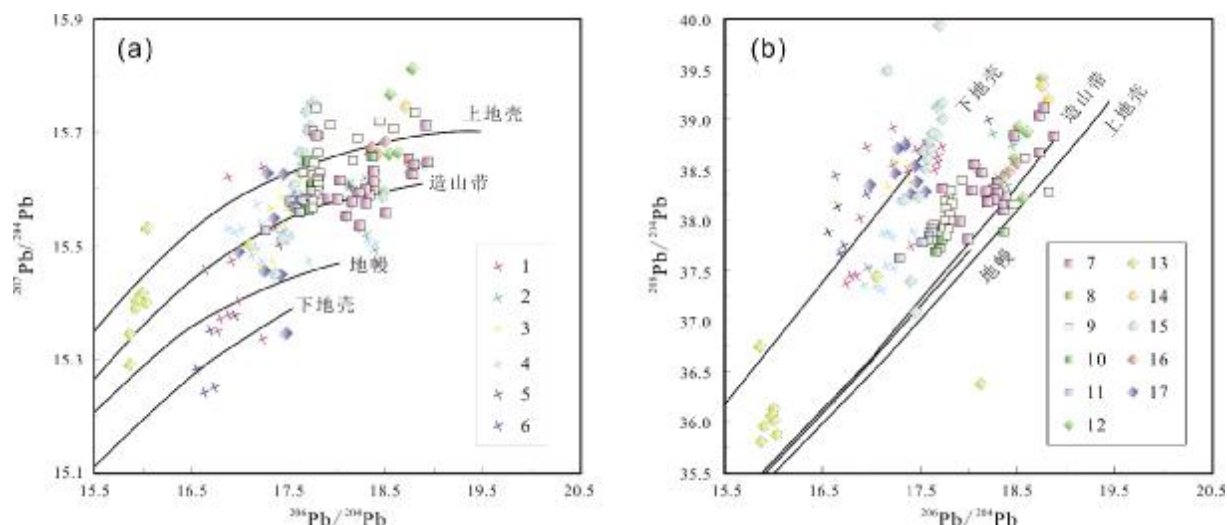


图 11 辽东半岛主要金矿床金属硫化物、侵入岩及其围岩的铅同位素图解

Fig. 11 Pb isotope diagrams of metal sulfides, intrusions and wall rocks of significant gold deposits in Liaodong Peninsula

1—早白垩世侵入岩(Early Cretaceous intrusive rock);2—早侏罗世侵入岩(Early Jurassic intrusive rock);3—中侏罗世侵入岩(Middle Jurassic intrusive rock);4—晚三叠世侵入岩(Late Triassic intrusive rock);5—古元古代变质岩(Paleoproterozoic metamorphic rock);6—太古宙岩石(Archean rock);金矿(gold deposit):7—白云(Baiyun),8—杨树(Yangshu),9—高家堡子(Gaojiapuzi),10—小佟家堡子(Xiaotongjiapuzi),11—林家三道沟(Linjasandaogou),12—王家崴子(Wangjiawaizi),13—猫岭(Maoling),14—金厂沟(Jinchanggou),15—五龙(Wulong),16—四道沟(Sidaogou),17—新房(Xinfang);数据来源:文献[13,27,35,38,43,45,47,64,73,76-79](Data from References [13, 27, 35, 38, 43, 45, 47, 64, 73, 76-79])

35.37~39.43. 早侏罗世金矿床铅同位素组成与早侏罗世花岗岩相似,在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 判别图(图 11a)中,样品点均落在上地壳和造山带中,在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 判别图(图 11b)中,样品均落入下地壳和造山带中,暗示金矿床与花岗岩具有相同来源的铅。猫岭金矿与花岗岩铅同位素组成具有一定差异性,可能暗示其具有多种来源的铅,如赋矿地层与早侏罗世花岗岩。早白垩世金矿床硫化物铅同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.99 \sim 18.90$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.34 \sim 15.75$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.03 \sim 40.03$ 。赋存在花岗岩中的金矿床与花岗岩具有相似的铅同位素组成,在铅同位素判别图解中,二者均落入下/上地壳和造山带中,指示二者具有成因联系。而赋存于变质岩中的早白垩世金矿与侵入岩具有不同的铅同位素组成,指示多种铅的来源。

总之,铅同位素显示,赋存在变质地体(辽河群)中的晚三叠—早侏罗世金矿床成矿物质具有多种来源,可能是地层与岩浆的双重作用。赋存在花岗岩/太古宙片麻岩中的早白垩世金矿成矿物质来源主要与早白垩世岩浆活动关系密切。

3.2.3 铈同位素特征

研究表明,初始铈同位素比值能够有效地示踪成

矿物质来源。辽东半岛晚三叠世林家三道沟金矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.710976 \sim 0.714962$,白云金矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.710986 \sim 0.715644$ 、早侏罗世猫岭金矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.710271 \sim 0.712863$,早白垩世新房金矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.709556 \sim 0.710731$ 、五龙金矿 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.708714 \sim 0.712504$ 。辽东半岛金矿床初始铈同位素比值均小于大陆地壳初始铈(0.719),大于地幔的初始铈(0.707)。因此,辽东半岛金矿床初始铈同位素比值暗示成矿物质主要来源于大陆地壳,少量来源于地幔物质。辽东半岛金矿床初始铈比值具有 EM II 演化趋势(图 12),同样指示壳幔混合源的性质。

3.3 矿物流体包裹体特征

大量研究揭示,辽东半岛晚三叠世金矿流体包裹体类型主要为气液两相(富液相)包裹体、气液两相(富气相)包裹体和含 CO_2 三相包裹体,极少量纯气相包裹体。主成矿阶段均一温度在 $177 \sim 287^\circ\text{C}$,盐度在 $1.02\% \sim 13.29\%$ (NaCl 当量,质量分数),成矿流体总体属于含 CO_2 、 H_2S 、 CH_4 的 H_2O -NaCl 中温热液体系。辽东半岛早侏罗世金矿流体包裹体类型主要为气液两相(富液相)包裹体、气液两相(富气相)包裹体和少量含子晶的包裹体,主成矿阶段均一温度范围为 $180 \sim 300^\circ\text{C}$,

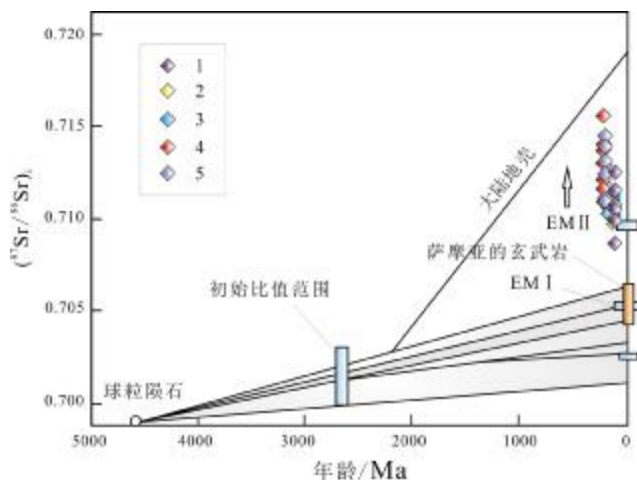


图 12 辽东半岛主要金矿床年龄锶同位素组成
(底图据文献[80])

Fig. 12 The diagram for ages vs. initial ratios of Sr isotopes from significant gold deposits in Liaodong Peninsula

(After Reference [80])

1—五龙金矿 (Wulong gold deposit); 2—新房金矿 (Xinfang gold deposit); 3—猫岭金矿 (Maoling gold deposit); 4—白云金矿 (Baiyun gold deposit); 5—林家三道沟金矿 (Linjiasandaogou gold deposit); 数据来源: 文献[44, 48, 63] 及作者待发表资料 (Data from References [44, 48, 63] and unpublished data by the author)

盐度范围为 4.49%~22.38%, 成矿流体总体属于含 CO_2 、 N_2 、 CH_4 的 H_2O -NaCl 中温热液体系。早白垩世金矿流体包裹体类型与晚三叠世金矿床相似, 主成矿阶段均一温度在 246~314 °C, 盐度范围为 0.18%~7.64%, 成矿流体总体属于中温、低盐度的 H_2O - CO_2 -NaCl± CH_4 ± N_2 热液体系。

氢-氧同位素组成 (图 13) 显示, 晚三叠世金矿 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ 变化范围为 -108.9‰~-48‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -8.36‰~-8.6‰。早侏罗世金矿 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ 变化范围为 -133.48‰~-75.90‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5‰~+9.8‰。早白垩世金矿 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ 变化范围为 -98.0‰~-48‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -2.71‰~+5.09‰。辽东半岛金矿床的 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ 值与岩浆水 (-80‰~-40‰) 相似, 低于变质水 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ 值 (-65‰~-20‰), 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值接近初始岩浆水的值 (5‰~10‰)。在 $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 判别图解 (图 13) 中, 大部分样品均落入岩浆水和地幔初生水上, 从成矿早阶段向晚阶段有向大气降水演化的趋势, 指示成矿晚期有大气降水的加入。

氮-氩同位素资料显示 (图 14a), 晚三叠世白云和

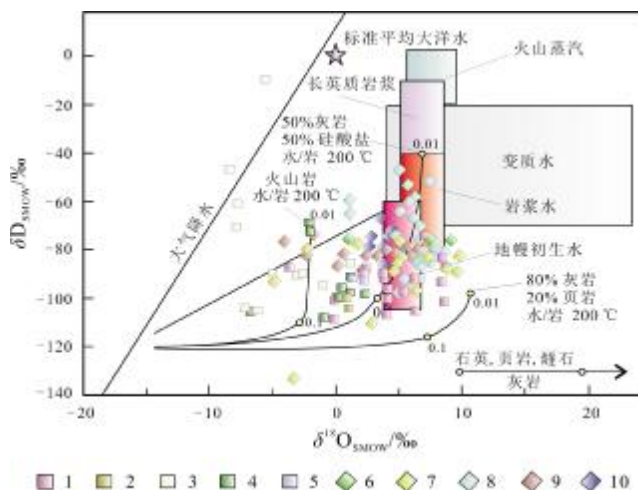


图 13 辽东半岛主要金矿床氢-氧同位素组成

Fig. 13 H-O isotope compositions of significant gold deposits in Liaodong Peninsula

金矿 (gold deposit): 1—白云 (Baiyun), 2—杨树 (Yangshu), 3—高家堡子 (Gaojiapuzi), 4—小佟家堡子 (Xiaotongjiapuzi), 5—林家三道沟 (Linjiasandaogou), 6—王家崴子 (Wangjiawazi), 7—猫岭 (Maoling), 8—五龙 (Wulong), 9—四道沟 (Sidaogou), 10—新房 (Xinfang); 数据来源: 文献 [13, 27, 37, 38, 41, 44, 46~47, 55, 66, 71~75, 80~82] (Data from References [13, 27, 37, 38, 41, 44, 46~47, 55, 66, 71~75, 81~82])

小佟家堡子金矿 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (R_a) 为 0.27~0.53, 其值明显高于地壳值 (0.01~0.05)^[83], 但又明显地低于地幔值 (6~9)^[83], 显示了壳幔混合来源的特征。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值在 362~5 504.8 之间 (图 14b), 高于大气饱和水值 (295.5)^[84]。 He-Ar 同位素数据 (图 14c) 表明, 所有投点均落在壳幔混合过渡带, 并以靠近壳源流体为主, 表明晚三叠世金矿成矿流体为壳幔混合来源, 并以壳源流体为主, 但具有明显的幔源组分加入的特征, 计算得到晚三叠世金矿成矿流体幔源 He 的比值为 2.39%~5.78%。 早侏罗世猫岭金矿 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.002~0.054, 其值接近地壳值 (0.01~0.05), 明显的低于地幔值 (6~9), 显示了壳源的特征。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值在 1 225~3 930 之间, 高于大气饱和水值 (295.5)。 He-Ar 同位素数据图 (图 14c) 表明, 所有投点落在壳源流体附近, 表明早侏罗世猫岭金矿成矿流体来源为壳源, 极少量幔源组分可能参与成矿。 计算得到猫岭金矿成矿流体幔源 He 的比值为 0.011%~0.489%。 早白垩世五龙、四道沟、新房金矿 ^4He 和 ^{40}Ar 值变化均较大, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.146~0.62, 其值明显的高于地壳值 (0.01~0.05), 但又明显的低于地幔值 (6~9), 显示了壳幔混

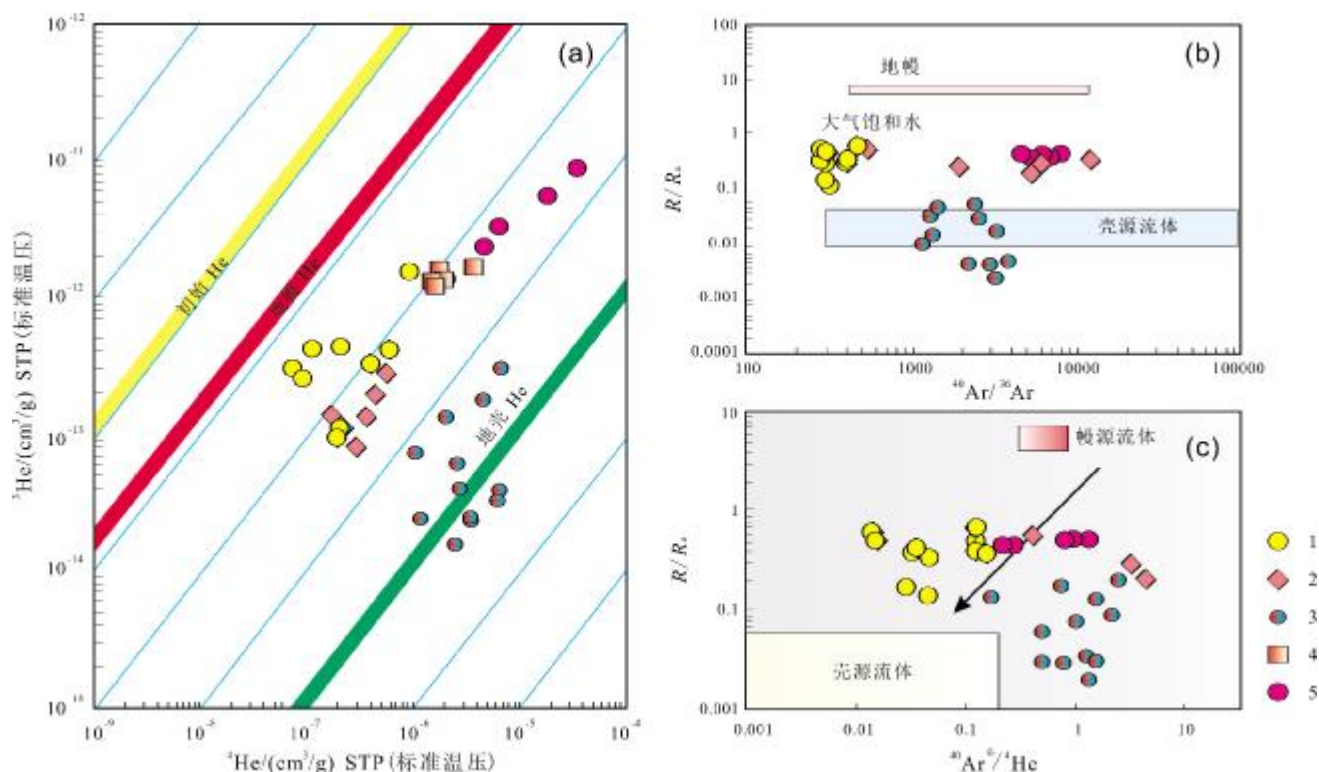


图 14 辽东半岛主要金矿氦-氩同位素组成

(底图据文献[83])

Fig. 14 He-Ar isotope compositions of significant gold deposits in Liaodong Peninsula

(After Reference [83])

1—五龙金矿(Wulong gold deposit); 2—四道沟金矿(Sidaogou gold deposit); 3—猫岭金矿(Maoling gold deposit); 4—小佟家堡子金矿(Xiaotongjiapuzi gold deposit); 5—白云金矿(Baiyun gold deposit); 数据来源:文献[13, 27, 29, 38, 66] (data from References [13, 27, 29, 38, 66])

合来源的特征。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值在 297.0~11 994.0 之间, 高于大气饱和水值(295.5)。He-Ar 同位素数据图(图 14c)表明, 所有投点均落在壳幔混合过渡带, 并以靠近壳源流体为主; 显示壳幔混合源的特点。计算得到五龙金矿成矿流体幔源 He 的比值为 1.44%~6.79%。

3.4 矿床成因

有关辽东半岛金矿床成因类型主要有印支期/燕山期岩浆热液型金矿^[2-4, 36]、同沉积-变质-岩浆热液叠加改造成矿^[5]、古元古代变质热液金矿^[6]、“克拉通破坏型”金矿^[7]和“造山型”金矿^[8-9]等观点。

矿床地质特征表明, 辽东半岛金矿床主要赋存在花岗岩、花岗片麻岩和辽河群变质岩中, 受高角度断裂系统、变质核杂岩拆离断层带和低角度变质岩层间破碎带等构造系统控制。矿床围岩蚀变分带明显, 如赋存在变质核杂岩拆离断层带的新房金矿内部为黄铁绢英岩化带, 向外依次为硅化、钾化带, 最外侧为碳酸盐化带; 受高角度断裂控制赋存在花岗岩中的五龙金矿靠

近矿体为绢英岩化带, 向外依次为硅化、绢云母化和绿泥石化带; 受低角度断裂/层间破碎带控制, 赋存在辽河群变质岩中的白云金矿的绢英岩化、绢云母化和绿泥石化带, 反映明显的热液交代充填成矿作用。矿集区产有大量的与成矿密切的中酸性岩体, 与成矿密切伴生, 二者成岩、成矿时代相一致, 表明成岩与成矿作用有着密切的关系。辽东金矿床含有一些特殊的矿物, 如白云金矿中的碲银矿, 反映一定的岩浆来源。流体包裹体研究显示部分矿床具有含子晶矿物的流体包裹体, 如猫岭金矿。氢氧同位素同样显示成矿流体具有岩浆热液特征, 氦氩同位素显示成矿流体具有壳幔混合源的特征。硫铅同位素显示成矿物质来源于岩浆和地层的混合源。以上矿床地质特征、同位素地球化学特征显示辽东半岛金矿床均属于与侵入岩有关的岩浆热液型金矿床。

3.5 成岩、成矿地球动力学模型

成岩、成矿年代学研究显示, 辽东半岛金矿床成岩、

成矿时代主要分为 3 期,分别为晚三叠世(约 220 Ma),早侏罗世(约 190 Ma)和早白垩世(约 120 Ma)。

在晚三叠世,扬子板块向华北板块深俯冲碰撞后折返、板块断离伸展的构造背景下,软流圈物质沿构造裂隙上涌,促使上部的地幔部分熔融并与扬子板块物质混熔形成玄武质岩浆。玄武质岩浆底侵,诱发下地壳物质部分熔融形成富含成矿物质的基性-中酸性岩浆。基性-中酸性富含成矿物质的岩浆在构造裂隙和构造薄弱地带温压降低处结晶成岩。岩浆期后热液继续上涌,在上涌过程中萃取辽河群地层的金等成矿元素,在地表断裂带和碰撞形成的韧性剪切带等部位与大气降水混合,并与围岩反应促使金沉淀形成白云金矿、小佟家堡子金矿等(图 15a)。

侏罗纪期间,古太平洋板块向欧亚板块俯冲,导致研究区地壳加厚,促使岩石圈发生拆沉作用,从而使研究区在侏罗纪发生大规模成岩成矿作用。古太平洋板块俯冲过程中,俯冲板块脱水交代上覆地幔楔,形成玄武质岩浆。玄武质岩浆上涌加热地壳形成大规模的混合岩浆房,混合岩浆沿构造裂隙上升,在成岩、成矿有利部位形成花岗质杂岩和相关的岩浆热液型金矿床,如猫岭金矿、金厂沟金矿等(图 15b)。

早白垩世古太平洋板块向欧亚大陆俯冲、折返、伸展,俯冲大洋板片携带大量水,通过流体交代上覆岩石圈地幔,经部分熔融产生玄武质岩浆。玄武质岩浆底侵下地壳形成富含成矿元素的壳幔混合源岩浆和含矿流体,混合源岩浆经过分异结晶作用形成中酸岩体。含矿流体在上升过程中与大气降水混合或通过流体沸腾作用,在温压变化情况下使成矿元素沉淀成矿,形成相应金矿床,如五龙金矿、四道沟金矿和新房金矿等(图 15c)。

4 金矿资源潜力预测

辽东半岛位于华北克拉通东北部,在中生代经历了强烈的构造、岩浆活动和成矿作用。辽东与胶东隔海相望,金矿化类型及特点相似,形成时代相近。胶东地区找矿已取得了重大的突破,目前控制金资源量已超过 5 000 t^[4]。

辽东地区目前勘探和开采深度有限,大多数探采深度不足 500 m。近些年,随着勘查技术的提高,辽东地区深部显示出巨大的金矿资源潜力。辽宁有色地

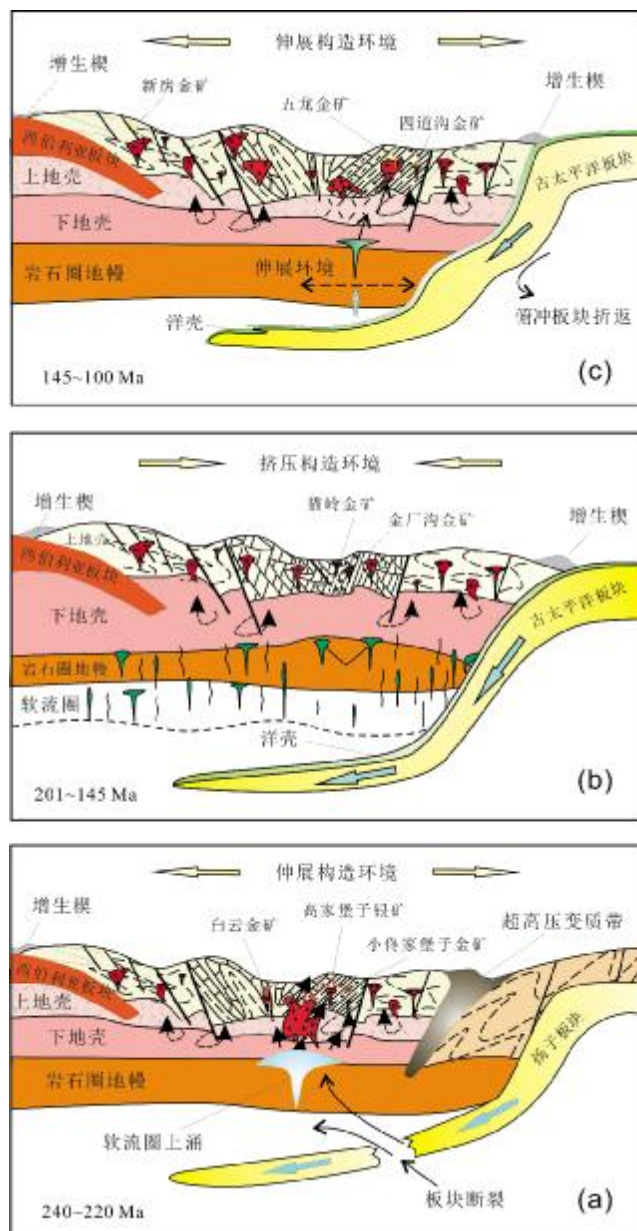


图 15 辽东半岛金矿床区域成矿地球动力学模型。

Fig. 15 Metallogenic geodynamic models of gold deposits in

Liaodong Peninsula

a—晚三叠世(Late Triassic); b—早侏罗世(Early Jurassic); c—早白垩世(Early Cretaceous)

质 103 队有限责任公司在辽东青城子矿集区实施 2 000 m 勘查深钻,在 1 692 m 发现穿厚 1.2 m 金矿体(品位 1.18×10^{-6});国家重点研发计划在五龙矿集区开展 3 000 m 科研深钻,在 2 827 m 处发现含矿构造带;近年来在白云、林家三道沟、新房等矿区新增金资源量 166 t。这些发现无疑显示出辽东半岛巨大的金资源潜力。

根据典型金矿床地质特征、空间分布规律,本研究将辽东半岛金矿分为 4 个主要的金矿远景预测区域,分别为凤城青城子金成矿远景预测区、盖县猫岭-岫岩金成矿远景预测区、丹东五龙-古楼子金成矿远景预测区和庄河新房-栗子房金成矿远景预测区。通过总结不同预测区的金矿床预测要素,根据预测要素对预测信息进行提取、综合,结合笔者的野外工作,对辽东地区金矿进行了靶区预测,共圈定 23 处找矿靶区

(图 16),运用证据权法进行优选分级,按成矿有利度从高到低分为 A、B、C 三类。其中,A 类靶区 8 处,B 类靶区 9 处,C 类靶区 6 处。应用地质体积参数法对靶区的预测资源量进行估算,共估算 3 000 m 以浅金矿资源总量为 2 414.56 t。

5 结论

1) 辽东半岛金矿床主要分为石英脉型和蚀变岩

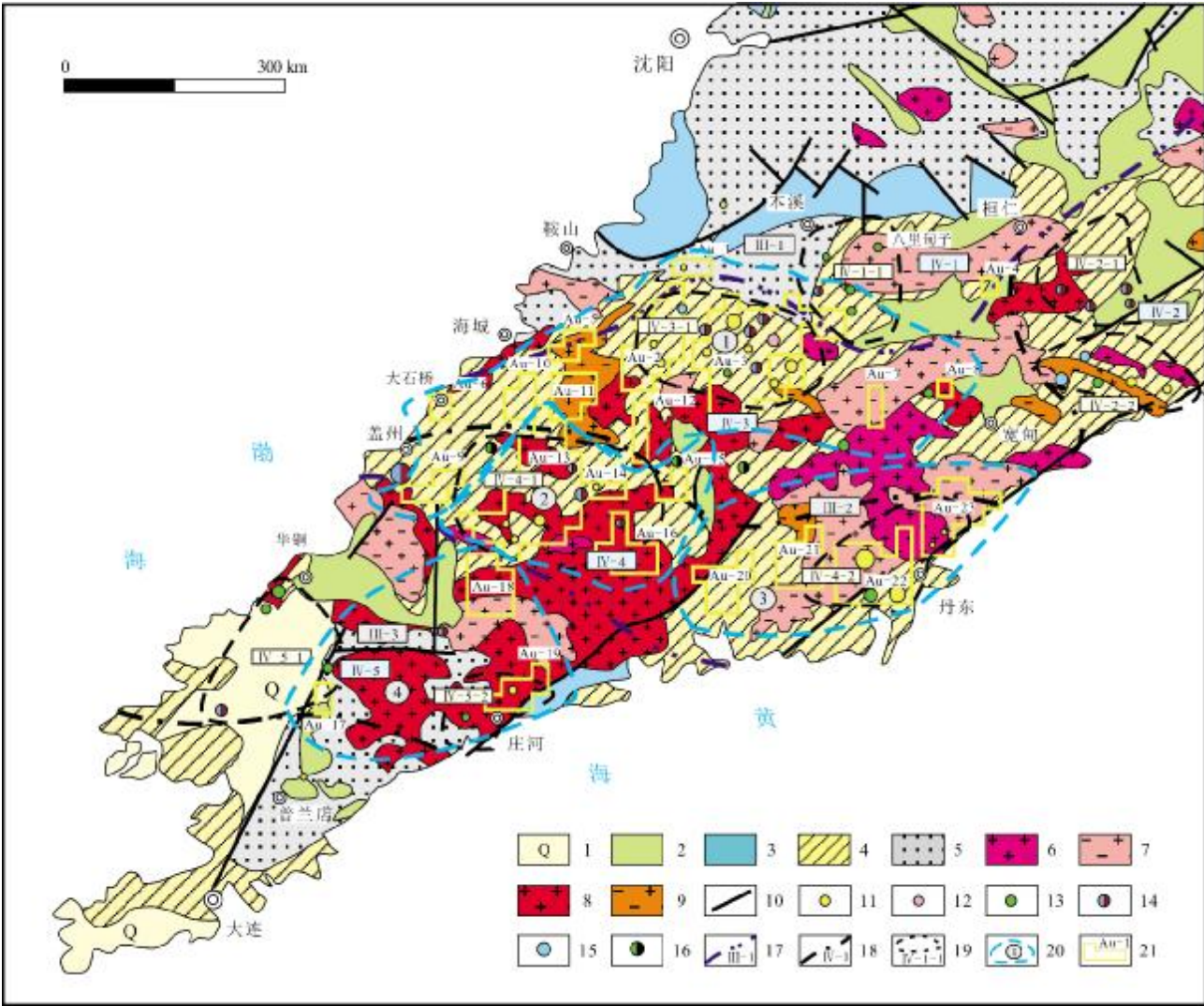


图 16 辽东半岛金矿床找矿靶区预测图

Fig. 16 Distribution of gold deposit prospecting targets in Liaodong Peninsula

1—第四系 (Quaternary); 2—中生界 (Mesozoic); 3—古生界 (Paleozoic); 4—古元古界 (Paleoproterozoic); 5—太古宇 (Archean); 6—白垩纪花岗岩 (Cretaceous granite); 7—侏罗纪花岗岩 (Jurassic granite); 8—三叠纪花岗岩 (Triassic granite); 9—古元古代花岗岩 (Paleoproterozoic granite); 10—深大断裂 (deep fault); 11—金矿床 (Au deposit); 12—银矿床 (Ag deposit); 13—铜矿床 (Cu deposit); 14—铅锌矿床 (Pb-Zn deposit); 15—钼矿床 (Mo deposit); 16—铜钴矿床 (Cu-Co deposit); 17—三级成矿单元及编号 (third-order metallogenic unit and number); 18—四级成矿单元及编号 (fourth-order metallogenic unit and number); 19—五级成矿单元及编号 (fifth-order metallogenic unit and number); 20—金矿远景预测区及编号 (gold prospecting area and number); 21—金矿找矿靶区 (gold prospecting target)

型, 石英脉型金矿主要控矿构造为高角度断裂构造系统, 蚀变岩型金矿主要受低角度层间破碎带构造系统控制。

2) 成岩、成矿年代学资料显示, 辽东半岛金矿床成矿主要分为 3 期, 分别为晚三叠世(约 220 Ma)、早侏罗世(约 190 Ma)和早白垩世(约 120 Ma)。分别形成于晚三叠世扬子板块向华北板块深俯冲、早侏罗世古太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压和早白垩世古太平洋板块向欧亚板块俯冲折返伸展环境。

3) 流体包裹体和 H-O-S-Pb-He-Ar-Sr 同位素研究结果表明, 辽东地区金矿成矿作用与区内中生代岩浆活动密切相关, 矿床成因类型为与岩浆热液有关的中温热液金矿床。

4) 结合典型矿床地质特征、区域地球化学和地球物理特征, 圈定找矿靶区 23 处, 预测 3 000 m 以浅金总资源量为 2 414.561 t。

(扫描首页 OSID 二维码可见更多原始数据和图片)

致谢: 本文是在国家自然科学基金委项目、国家重点研发计划专题项目和中国地质调查局项目资助支持获得的成果; 在项目执行过程中得到辽宁有色地质局 103 队有限责任公司、丹东青城子矿业有限公司、辽宁五龙黄金矿业有限责任公司、辽宁国测黄金股份有限公司、大连金莱矿业有限公司等单位领导和同事的帮助, 在此向提供支持和帮助的各位领导、专家和同事表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 406-422.
Song M C, Song Y X, Ding Z J, et al. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(4): 406-422.
- [2] 薛春纪, 陈毓川, 路远发, 等. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(2): 177-184.
Xue C J, Chen Y C, Lu Y F, et al. Metallogenic epochs of Au and Ag deposits in Qingchengzi ore-clustered area, eastern Liaoning Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(2): 177-184.
- [3] 张朋, 李斌, 李杰, 等. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(4): 731-738.
Zhang P, Li B, Li J, et al. Re-Os isotopic dating and its geological implication of gold bearing pyrite from the Baiyun gold deposit in Liaodong Rift[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(4): 731-738.
- [4] 曾庆栋, 陈仁义, 杨进辉, 等. 辽东地区金矿床类型、成矿特征及找矿潜力[J]. 岩石学报, 2019, 35(7): 1939-1963.
Zeng Q D, Chen R Y, Yang J H, et al. The metallogenic characteristics and exploring ore potential of the gold deposits in eastern Liaoning Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(7): 1939-1963.
- [5] 孙立民, 孙文涛, 赵广繁. 青城子矿田小佟家堡子金银矿床地质特征及成矿物质来源探讨[J]. 黄金, 1997, 18(12): 13-18.
Sun L M, Sun W T, Zhao G F. Geological characteristics of Xiaotongjiabaozi gold-silver deposit of Qingchengzi ore field and its source of mineralized matter[J]. Gold, 1997, 18(12): 13-18.
- [6] Yu G, Yang G, Chen J F, et al. Re-Os dating of gold-bearing arsenopyrite of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, Northeast China and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(14): 1509-1514.
- [7] 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1153-1168.
Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. Decratonic gold deposits[J]. Science China Earth Science, 2015, 58(9): 1523-1537.
- [8] Feng H X, Shen P, Zhu R X, et al. 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[J]. Mineralium Deposita, 2022, 57(6): 1001-1022.
- [9] Liu S J, Chen B, Zheng J H, et al. Genesis of the Xinfang gold deposit, Liaodong Peninsula: Insights from fluid inclusions and S-Sr isotopic constraints[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(1): 68-80.
- [10] Sengör A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis[C]//Yin A, Harrison T M. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-640.
- [11] Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. Gondwana Research, 2016, 36: 219-274.
- [12] Li Y J, Li S R, Santosh M, et al. Isotope geochemistry and geochronology of the Niujuan silver deposit, northern North China Craton: Implications for magmatism and metallogeny in an extensional tectonic setting[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 90: 36-51.
- [13] Zhang P, Kou L L, Zhao Y, et al. Genesis of the Wulong gold deposit, Liaoning Province, NE China: Constrains from noble gases, radiogenic and stable isotope studies[J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(2): 547-563.
- [14] Zhang P, Kou L L, Zhao Y. Three periods of gold mineralization in the Liaodong Peninsula, North China Craton[J]. International Geology Review, 2022, 64(20): 2922-2940.
- [15] Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic

- constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2008, 167(3/4): 339–362.
- [16] 孟恩, 刘福来, 刘平华, 等. 辽东半岛东北部宽甸地区南辽河群沉积时限的确定及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2465–2480.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, et al. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2465–2480.
- [17] Xu W, Liu F L. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 162–198.
- [18] Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2016, 146(3/4): 138–164.
- [19] Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2018, 163(3/4): 279–306.
- [20] Wang H Z, Mo X X. An outline of the tectonic evolution of China[J]. *Episodes*, 1995, 18(1/2): 6–16.
- [21] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton[J]. *Chemical Geology*, 2007, 242(1/2): 155–175.
- [22] Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 2005, 221(1/2): 127–156.
- [23] Yang J H, Sun J F, Zhang J H, et al. 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[J]. *Lithos*, 2012, 153: 108–128.
- [24] Zhang P, Zhao Y, Kou L L, et al. Geochronology and geochemistry of the Late Triassic intrusive rocks in the Liaodong Peninsula, NE China: Petrogenesis and implications for Early Mesozoic tectonic evolution[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(2): 219–235.
- [25] 裴福萍. 辽南-吉南中生代侵入岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学: 对华北克拉通破坏时空范围的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 1–186.
- Pei F P. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in southern Liaoning and Jilin provinces: Constraints on the spatial-temporal extent of the North China Craton destruction [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 1–186.
- [26] 王玉往, 解洪晶, 李德东, 等. 矿集区找矿预测研究——以辽东青城子铅锌-金-银矿集区为例[J]. *矿床地质*, 2017, 36(1): 1–24.
- Wang Y W, Xie H J, Li D D, et al. Prospecting prediction of ore concentration area exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag ore concentration area, eastern Liaoning Province[J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(1): 1–24.
- [27] Zhang P, Kou L L, Zhao Y, et al. Fluid inclusions, H-O, S, Pb, and noble gas isotope studies of the Baiyun gold deposit in the Qingchengzi orefield, NE China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200: 37–53.
- [28] Zhang P, Zhao Y, Chai P, et al. Geochemistry, zircon U-Pb analysis, and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Maoling gold deposit, Liaodong rift, NE China[J]. *Resource Geology*, 2017, 67(4): 426–441.
- [29] Feng H X, Shen P, Zhu R X, et al. Geology and He-Ar-S-Pb isotope constraints on the genesis of the Sidaogou gold deposit in Liaodong Peninsula, northeastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103080.
- [30] 仲米山, 张国仁, 杨中柱, 等. 辽东半岛南部早白垩世变质核杂岩时空分布及动力学特征[J]. *地质与资源*, 2020, 29(5): 411–418.
- Zhong M S, Zhang G R, Yang Z Z, et al. Spatiotemporal distribution and dynamic characteristics of the Early Cretaceous metamorphic core complexes in southern Liaodong Peninsula[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(5): 411–418.
- [31] 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 等. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(10): 2620–2636.
- Song Y H, Yang F C, Yan G L, et al. SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic compositions of paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(10): 2620–2636.
- [32] Yu G, Chen J F, Xue C J, et al. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35(3/4): 367–382.
- [33] 张朋, 杨宏智, 李斌, 等. 辽东青城子矿集区姚家沟钼矿床成矿物质来源、成矿年代及成矿动力学背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(6): 1684–1696.
- Zhang P, Yang H Z, Li B, et al. Ore source, ore-forming age and geodynamic setting of Yaojiagou molybdenum deposit in Qingchengzi ore-clustered area, eastern Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(6): 1684–1696.
- [34] 张朋, 赵岩, 寇林林, 等. 辽东青城子矿田煌斑岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(7): 1056–1060.
- Zhang P, Zhao Y, Kou L L, et al. Zircon U-Pb dating and its geological significance of lamprophyres from Qingchengzi Orefield,

- Liaodong[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(7): 1056–1060.
- [35]张森, 张迪, 沙德喜, 等. 辽东林家三道沟-小佟家堡子地区金(银)矿成矿特征及成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 725–732.
- Zhang S, Zhang D, Sha D X, et al. Metallogenetic characteristics and genesis of the gold (silver) mineralization in Linjiasandaogou-Xiaotongjiapuzi area, eastern Liaoning Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 725–732.
- [36]孙文涛, 孙吉国, 孙红云, 等. 青城子矿田杨树区超大型金银铅锌矿床地质特征及成矿机理[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 24–30.
- Sun W T, Sun J G, Sun H Y, et al. Geology and mineralization of superlarge Yangshuqu Au-Ag-Pb-Zn deposit in the Qinchengzi mine field[J]. Geology and Exploration, 2008, 44(4): 24–30.
- [37]Liu J, Liu F X, Li S H, et al. 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[J]. Ore Geology Review, 2019, 104: 686–706.
- [38]Sun G T, Zeng Q D, Zhou L L, et al. 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[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 118: 103330.
- [39]Liu J, Liu F X, Li S H, et al. Genesis of the Xiaotongjiapuzi gold deposit of the Liaodong gold province, Northeast China: Fluid inclusion thermometry and S-Pb-H-O-He isotope constraints[J]. Geological Journal, 2020, 55(1): 1023–1040.
- [40]孙国强, 孙启明, 郑廷. 辽宁青城子矿田桃源金矿床地质特征及成矿机制探讨[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(6): 49–51.
- Sun G Q, Song Q M, Zheng T. Geological characteristics and causes of Taoyuan gold deposit in Liaoning Qingchengzi[J]. Gansu Metallurgy, 2008, 30(6): 49–51.
- [41]Yu B, Zeng Q D, Frimmel H E, et al. Genesis of the Wulong gold deposit, northeastern North China Craton: Constraints from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, and pyrite trace element concentrations[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 102: 313–337.
- [42]Yu B, Zeng Q D, Frimmel H E, et al. 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[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 121: 103542.
- [43]Chen C, Li D T, Wu T T, et al. Genesis of gold deposits in the Wulong orefield, Liaodong Peninsula, North China Craton: Constraints from ore deposit geology, REE, and C-H-O-S-Pb isotopes[J]. Geological Journal, 2020, 55(8): 5914–5933.
- [44]刘军, 李铁刚, 段超. 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[J]. 地质通报, 2018, 37(7): 1325–1337.
- Liu J, Li T G, Duan C. Geochronology and isotopic geochemistry characteristics of the Maoling large gold deposit, Liaoning Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(7): 1325–1337.
- [45]孙宝亮, 梁俊红, 姚玉增, 等. 猫岭-王家崴子金成矿带铅同位素地球化学特征[J]. 辽宁地质, 2000, 17(4): 259–262.
- Sun B L, Liang J H, Yao Y Z, et al. Geochemical characteristics of lead isotope in Maoling-Wangjiawaizi gold metallogenic belt[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(4): 259–262.
- [46]郝瑞霞, 彭省临. 辽宁王家崴子金矿床地球化学研究[J]. 黄金地质, 1999, 5(2): 47–51.
- Hao R X, Peng S L. Geochemical study of Wangjiawaizi gold deposit in Liaoning[J]. Gold Geology, 1999, 5(2): 47–51.
- [47]郭大招, 魏俊浩, 张可清, 等. 辽东庄河金矿同位素地球化学特征及成矿时代[J]. 地质学报, 2005, 79(5): 671–678.
- Guo D Z, Wei J H, Zhang K X, et al. The isotope geochemical characteristics and ore-forming time of Zhuanghe gold deposit, eastern Liaoning[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(5): 671–678.
- [48]Zhang P, Zhao Y, Kou L L, et al. Genesis of the Xinfang gold deposit, Liaodong Peninsula: Constraints from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, pyrite trace element concentrations, and chronology[J]. Gondwana Research, 2023, 113: 210–231.
- [49]Zhang P, Zhao Y, Kou L L, et al. 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[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 148: 105025.
- [50]冯啸宇. 辽南盖县组地层中金矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质与资源, 2011, 20(1): 36–69.
- Feng X Y. Geologic characteristics and prospecting direction of gold deposits in Gaixian formation in southern Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2011, 20(1): 36–69.
- [51]张朋, 陈冬, 寇林林, 等. 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[J]. 地质学报, 2015, 89(10): 1762–1772.
- Zhang P, Chen D, Kou L L, et al. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Wolongquan intrusion in Liaodong and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(10): 1762–1772.
- [52]刘文彬, 彭游博, 赵辰, 等. 辽南盖州卧龙泉岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. 地质与资源, 2018, 27(6): 531–539.
- Liu W B, Peng Y B, Zhao C, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of Wolongquan intrusion in Gaizhou, Southern Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2018, 27(6): 531–539.
- [53]杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 263–276.
- Yang J H, Wu F Y, Xie L W, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula,

- east North China Craton: Constraints from in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 263–276.
- [54]徐山. 辽东地区金矿矿产资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1–158.
- Xu S. The mineral resources assessment of gold deposits in eastern Liaoning[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1–158.
- [55]余昌涛, 贾斌, 刘斌. 辽宁省盖县猫岭金矿床地质特征及成因探讨[J]. *贵金属地质*, 1992, 1(1): 37–47.
- Yu C T, Jia B, Liu B. Geological characteristic and genesis of Maoling gold deposit in Liaoning Province[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 1992, 1(1): 37–47.
- [56]吴福元, 杨进辉, 柳小明. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 305–317.
- Wu F Y, Yang J H, Liu X M. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 305–317.
- [57]张朋, 赵岩, 寇林林, 等. 辽东半岛丹东地区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(10): 3297–3313.
- Zhang P, Zhao Y, Kou L L, et al. Zircon U-Pb ages, Hf isotope sand geological significance of Mesozoic granites in Dandong area, Liaodong Peninsula[J]. *Earth Science*, 2019, 44(10): 3297–3313.
- [58]仲米山, 张国仁, 高福亮, 等. 辽南新房变质核杂岩的发现及地质意义[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 272–287.
- Zhong M S, Zhang G R, Gao F L, et al. Discovery and geological implication of Xinfang metamorphic core complex in southern Liaoning[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 272–287.
- [59]刘国平, 艾永富. 辽宁白云金矿床成矿时代探讨[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 627–632.
- Liu G P, Ai Y F. Studies on the mineralization age of Baiyung old deposit in Liaoning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(4): 627–632.
- [60]周国超, 王玉往, 李德东, 等. 辽东白云金矿区脉岩锆石的 U-Pb 年代学研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(4): 620–627.
- Zhou G C, Wang Y W, Li D D, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of dykes from the Baiyun gold deposit in eastern Liaoning[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(4): 620–627.
- [61]Sun G T, Zeng Q D, Li T Y, et al. Ore genesis of the Baiyun gold deposit in Liaoning Province, NE China: Constraints from fluid inclusions and zircon U-Pb ages[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(9): 299.
- [62]Sun G T, Zeng Q D, Zhou J X. 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[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, 251: 107242.
- [63]Zhang P, Kou L L, Zhao Y, et al. 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[J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, 13(4): 101379.
- [64]张朋. 辽宁省东南部典型有色、贵金属矿床成矿特征、成因与成矿成矿地球动力学过程[D]. 长春: 吉林大学, 2018: 62–67.
- Zhang P. Metallogenic characteristics, ore genesis, diagenesis and metallogenic geodynamic process of precious and nonferrous metals ore deposits in southeast Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2018: 62–67.
- [65]魏俊浩, 刘丛强, 李志德, 等. 论金矿床成矿年代的确定——以丹东地区成岩成矿 Rb-Sr、U-Pb 同位素年代为例[J]. *地质学报*, 2003, 77(1): 113–119.
- Wei J H, Liu C Q, Li Z D, et al. U-Pb, Rb-Sr isotopic dating of the diagenesis and mineralization of gold deposits in the Dandong area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 113–119.
- [66]Liu J, Zhang L J, Wang S L, et al. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 109: 130–143.
- [67]Feng H X, Shen P, Zhu R X, et al. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103838.
- [68]马玉波, 邢树文, 张增杰, 等. 辽吉裂谷区铅锌金矿床 S、Pb 同位素组成特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1399–1410.
- Ma Y B, Xing S W, Zhang Z J, et al. Characteristics of the sulfur and lead isotope compositions of the polymetallic deposit in the Liaoji rift and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(9): 1399–1410.
- [69]赵鸿志, 杨沈生, 李辉. 白云金矿床地质特征及成因探讨[J]. *有色矿冶*, 2009, 25(3): 4–7.
- Zhao H Z, Yang S S, Li H. Geologic features of Baiyun gold ore deposit and discussion of the genesis [J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2009, 25(3): 4–7.
- [70]关广岳, 金成洙. 白云金矿床的成因[J]. *地质与勘探*, 1983(10): 12–20.
- Guan G Y, Jin C Z. Genesis of Baiyun gold deposit[J]. *Geology and Exploration*, 1983(10): 12–20. (in Chinese)
- [71]郝立波, 赵昕, 赵玉岩. 辽宁白云金矿床稳定同位素地球化学特征及矿床成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2): 442–451.
- Hao L B, Zhao X, Zhao Y Y. Stable isotope characteristics and ore genesis of the Baiyun gold deposit, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(2): 442–451.
- [72]刘先利, 姜瑛, 刘志远. 青城子矿田高家堡子大型金银矿床地质特征及成矿机制[J]. *辽宁地质*, 2000, 17(2): 121–127.

- Liu X L, Jiang Y, Liu Z Y. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Gaojiapuzi large-scale Au-Ag deposits in Qingchengzi orefield[J]. *Liaoning Geology*, 2000, 17(2): 121-127.
- [73] 杨凤超, 宋运红, 张朋, 等. 辽宁青城子矿集区金银矿成矿流体特征和成矿物质来源示踪[J]. *地质学报*, 2016, 90(10): 2775-2785.
- Yang F C, Song Y H, Zhang P, et al. Forming fluid characteristics and tracing of ore-forming source materials of gold-silver deposit in the Qingchengzi ore concentration area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(10): 2775-2785.
- [74] 刘辉, 金成洙, 关广岳. 辽南猫岭金矿床的成矿物质来源及金的活化、迁移及富集机理[J]. *地质找矿论丛*, 1990, 5(4): 57-68.
- Liu H, Jin C Z, Guan G Y. A mechanism study on the source of minerogenic material and the activation transportation and concentration of gold in Maoling gold deposit[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1990, 5(4): 57-68.
- [75] 成曦晖. 辽东中生代岩浆活动及金铀成矿作用[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 1-207.
- Cheng X H. Integrated research on Mesozoic magmatism and gold-uranium metallogenesis in the Liaodong Peninsula, Liaoning Province[D]. Beijing: University of Science and Technology, 2017: 1-207.
- [76] 吴兴华. 辽南马蹄形带金矿床层控-多成因成矿模式[D]. 沈阳: 东北工学院, 1990: 1-99.
- Wu X H. Stratabound-polygenetic metallogenic model of the C-shaped gold deposit belt in southern Liaoning[D]. Shenyang: Northeastern Institute of Technology, 1990: 1-99. (in Chinese)
- [77] Chen J F, Yu G, Xue C J, et al. Pb isotope geochemistry of lead, zinc, gold and silver deposit clustered region, Liaodong rift zone, northeastern China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(4): 467-476.
- [78] Yao X F, Yan T J, Lü Z C, et al. Ore-forming age and tectonic setting of the Linjiasandaogou gold deposit in the Liaodong Peninsula, Northeast China: Constraints from geochronology and geochemistry[J]. *Acta Geochimica*, 2022, 41(2): 244-266.
- [79] 李兆龙, 许文斗, 秦敏琪, 等. 辽宁五龙金矿地质特征及矿床成因[J]. *地质找矿论丛*, 1987, 2(3): 31-39.
- Li Z L, Xu W D, Qin M Q, et al. Geological characteristics and ore genesis of Wulong gold deposits, Liaoning Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1987, 2(3): 31-39.
- [80] 刘国平, 艾永富. 辽宁白云金矿床某些基本问题探讨[J]. *矿床地质*, 1999, 18(3): 219-225.
- Liu G P, Ai Y F. A discussion on some major problems of the Baiyun gold deposit, eastern Liaoning[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(3): 219-225.
- [81] Faure G. Principles of isotope geology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1986: 1-589.
- [82] 赵岩, 张朋, 吕骏超, 等. 辽宁青城子矿田高家堡子银矿成矿流体特征及地质意义[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(3): 441-450.
- Zhao Y, Zhang P, Lü J C, et al. Characteristics of ore-forming fluids in the Gaojiapuzi Ag deposit of the Qingchengzi orefield, Liaoning Province and geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(3): 441-450.
- [83] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(22): 4663-4673.
- [84] Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10): 1595-1604.

(上接第 416 页/Continued from Page 416)

- [23] Li Z, Chen B, Yan X L. The Liaohe Group: An insight into the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 326: 174-195.
- [24] Li Z, Wei C J, Chen B, et al. Late Neoproterozoic reworking of the Mesoproterozoic crustal remnant in northern Liaoning, North China Craton: A U-Pb-Hf-O-Nd perspective[J]. *Gondwana Research*, 2020, 80: 350-369.
- [25] Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, et al. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 2015, 264: 119-139.
- [26] Zhu K, Liu Z H, Xu Z Y, et al. Petrogenesis and tectonic implications of two types of Liaoji granitoid in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 331: 105369.
- [27] 王恩德, 夏建明, 付建飞, 等. 鞍山地区 BIF 磁铁矿床类型与形成机制[J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 137-138.
- Wang E D, Xia J M, Fu J F, et al. Types and formation mechanism of BIF magnetite-rich deposits in Anshan-Benxi area[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(S1): 137-138. (in Chinese)
- [28] 朱日祥, 杨进辉, 王功文, 等. 辽东地区金矿床成因与资源潜力[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(3): 677-692.
- Zhu R X, Yang J H, Wang G W, et al. The genesis and resource potential of gold deposits in the Liaodong Peninsula[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(3): 657-672.