

引用格式: 于学峰, 李大鹏, 单伟, 等, 2022. 鲁西归来庄金矿田燕山期金成矿系统及成矿模式 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 821–841.
DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222815](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222815)

Citation: YU X F, LI D P, SHAN W, et al., 2022. Yanshanian gold metallogenic system and metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field, western Shandong [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 821–841. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222815](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222815)

鲁西归来庄金矿田燕山期金成矿系统及成矿模式

于学峰^{1,2,3}, 李大鹏^{1,2,3}, 单伟^{1,2,3}, 李增胜^{1,2,3}, 耿科^{1,2,3}, 舒磊^{1,2,3}, 孙雨沁^{1,2,3}, 宋英昕^{1,2,3}

YU Xuefeng^{1,2,3}, LI Dapeng^{1,2,3}, SHAN Wei^{1,2,3}, LI Zengsheng^{1,2,3}, GENG Ke^{1,2,3}, SHU Lei^{1,2,3}, SUN Yuqin^{1,2,3}, SONG Yingxin^{1,2,3}

1. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;
2. 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;
3. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013

1. *Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization, MNR, Jinan 250013, Shandong, China;*
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resource Utilization, Jinan 250013, Shandong, China;*
3. *Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China*

Yanshanian gold metallogenic system and metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field, western Shandong

Abstract: The Guilaizhuang gold ore field is one of the essential tellurium-rich goldfields in eastern China and the only super-large goldfield in western Shandong so far. These gold deposits controlled by the Tongshi subvolcanic dome occur in different depths, geological structures, and geological bodies. Though their mineralization types are diverse, their host wall rocks, formation environment, geological background, and metallogenic characteristics are generally consistent: (1) The Guilaizhuang gold ore field, mainly composed of Precambrian basement rocks and early Paleozoic carbonate cap rocks, is an endogenous medium–low hydrothermal gold concentration area of relatively developed Mesozoic tectonic magmatism. (2) Yangan fault, a derivative structure of the Tanlu Fault Zone, controls the distribution of strata, magmatic rocks, secondary structures, and gold deposits (points) in this area. The sub-faults of the Yangan fault and the radial and circular structures of subvolcanic domes are good places for ore fluid migration and sedimentation. (3) The mineralization types are mainly cryptoexplosive breccia, magnesian carbonate micro-disseminated, porphyry, skarn superposition, and altered fracture zone. The ores generally develop into disseminated, veinlet disseminated, stockwork, crumb, and block structures, reflecting that they were formed in the post-magmatic hydrothermal environment. (4) It shows a distinguished character of coexistence of tellurium and gold super concentration. In addition to common native gold and electrum, there are also tellurium-containing minerals such as bessmertnovite, petzite, hessite, calaverite, etc. (5) The early Jurassic intermediate alkaline magma initially started the gold mineralization process in this area and provided parent rock and material source for the early Cretaceous alkaline magmatic activities. The main mineralization period of the Guilaizhuang gold ore field in western Shandong may be in the early Cretaceous. (6) The ore-forming fluid has the characteristics of low temperature and low salinity. The isotopic characteristics are multi-sourced. They are dominated by magmatic water and atmospheric precipitation, with a small amount of metamorphic water. (7) Au likely combines with Te and S to form transportable

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272104, 42172094, 41372086, 41672084, 41772076, 41503038)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 42272104, 42172094, 41372086, 41672084, 41772076, 41503038)

第一作者简介: 于学峰 (1962—), 男, 博士, 二级研究员, 主要从事地质矿产研究。E-mail: xfengy@sohu.com

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-07-20; 责任编辑: 范二平

complexes for migration in the ore-forming hydrothermal fluid. There is a high tellurium fugacity in the ore-forming hydrothermal fluid. Under medium- and low- temperature conditions, tellurium can easily replace sulfur and enter the sulfide lattice. Under high tellurium fugacity conditions, tellurium is prone to form telluride with elements such as gold, silver and lead to mineralization. The consistency of the regional metallogenic characteristics indicates that the Mesozoic large-scale gold mineralization in the Guilaizhuang area of western Shandong is controlled by a unified geological event and can be classified into a unified subvolcanic medium-low hydrothermal gold metallogenic system.

Keywords: cryptoexplosive breccia; tellurium-rich gold deposit; metallogenic system; Guilaizhuang; western Shandong

摘 要: 鲁西归来庄金矿田是中国东部最重要的富碲型金矿田之一,也是鲁西地区迄今唯一的特大型金矿田。矿田中各金矿床受铜石潜火山穹隆控制,产出于不同深度、不同地质构造部位、不同的地质体中,矿化类型多样,但它们的形成环境、成矿地质背景、成矿作用特征总体一致:①归来庄金矿田是一个主要由前寒武纪基底岩石和早古生代碳酸盐岩盖层组成、中生代构造-岩浆作用较为发育的内生中低温热液金矿集区;②燕甘断裂是郯庐断裂带派生构造,控制着区内地层、岩浆岩、次级构造及金矿床/点的展布;燕甘断裂的次级断裂、潜火山穹隆的放射状、环状构造是矿液运移和沉淀聚集的良好场所;③金矿化以隐爆角砾岩型、镁质碳酸盐岩微细浸染型、斑岩型、矽卡岩叠加型及破碎带蚀变岩型为主,矿石普遍发育浸染状、细脉浸染状、网脉状、团块状和块状构造,反映其形成于岩浆期后热液环境;④具有碲与金超常富集共存的显著特征,金属矿物除常见的自然金、银金矿外,另有含碲矿物碲铜金矿、碲金银矿、碲银矿、碲金矿等;⑤早侏罗世中偏碱性岩浆侵位初步启动了该区的金成矿过程,为早白垩世的中碱性岩浆活动提供了母岩和成矿物质来源,早白垩世可能是鲁西归来庄金矿田的主要成矿时期;⑥成矿流体具有低温、低盐度特征,同位素特征具有多来源性,以岩浆水和大气降水为主,并有少量变质水的参与;⑦在成矿热液中可能是Au与Te、S结合生成可搬运的配合物进行运移;成矿热液中有较高的碲逸度,在中低温条件下碲易置换硫而进入硫化物晶格,在高碲逸度的条件下碲则易与Au、Ag、Pb等元素形成碲化物而参与成矿。这种区域上成矿特征表现出的一致性,表明鲁西归来庄地区中生代大规模金成矿作用受控于统一的地质事件,可划归为一个统一的潜火山中-低温热液金成矿系统。

关键词: 隐爆角砾岩; 富碲金矿; 成矿系统; 归来庄; 鲁西地区

中图分类号: P588.122;P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6616 (2022) 05-0821-21

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222815

0 引言

作为中国东部最重要的富碲型金矿田之一,鲁西归来庄金矿田自20世纪90年代初被发现至今,一直备受国际地学界广泛关注(Yu, 1996; Xu et al., 2014, 2015)。该区是明确揭示巨型郯庐断裂带对中国东部中生代成矿大爆发约束机制的典型地域(Xie et al., 2000);同时,该构造岩浆带是系统研究中国东部中生代华北-扬子板块碰撞与古太平洋板块俯冲构造体制转变的优选对象(Xu et al., 2015);并且,该矿田也是研究富碲成矿热液演化与金成矿作用的良好案例(Xu et al., 2012; Zhai and Liu, 2014)。针对于该矿田的Te-Au成矿过程,国内外地学专家开展了系统深入的研究,普遍认为该矿田是形成于早侏罗世(188~175 Ma)的、与高钾碱性潜火山杂岩体密切相关的浅成中低温热液型金矿(Afifi et al., 1988; Bowell, 1992; 邱检生等, 1994; 金隆裕和沈昆,

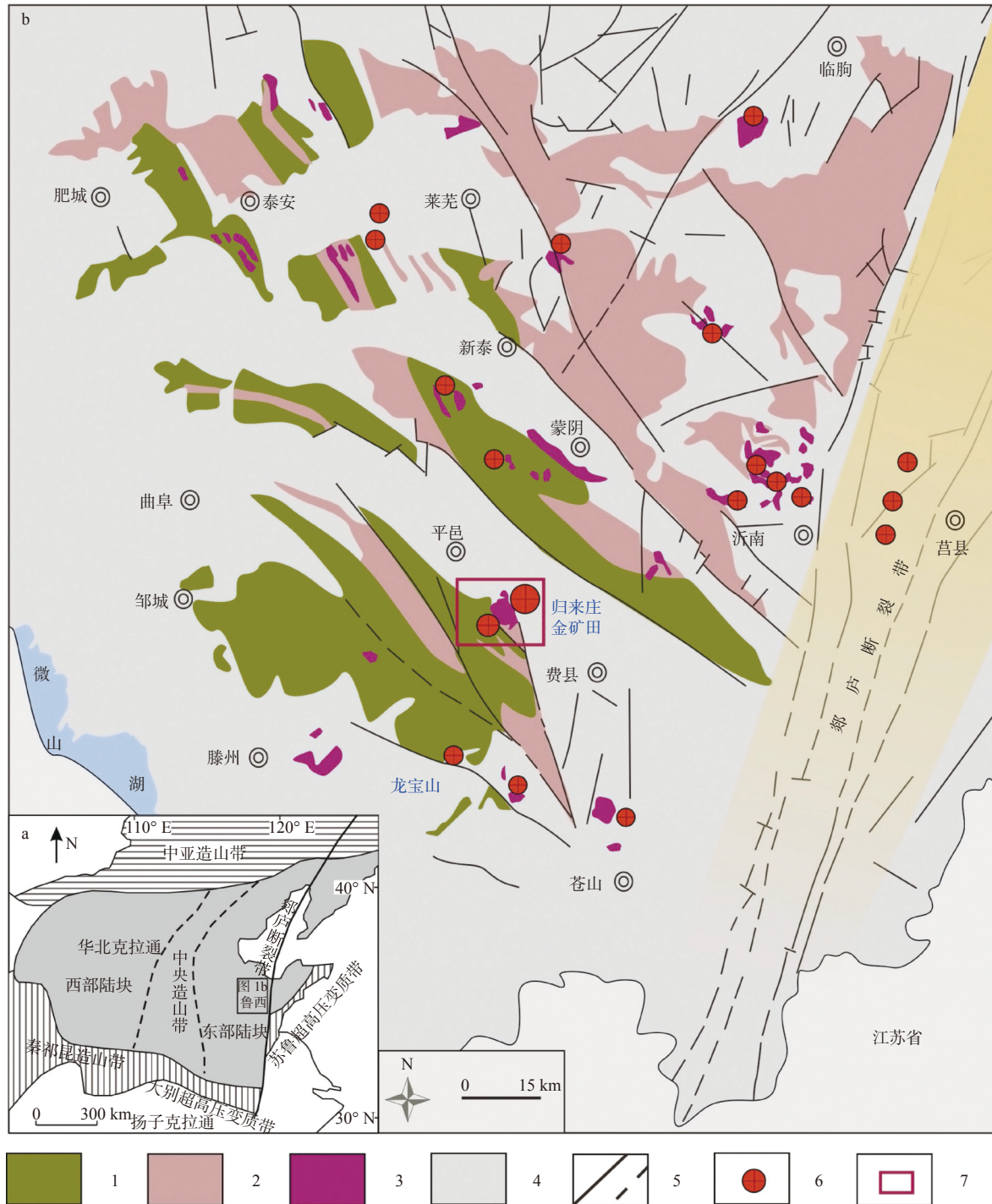
1995; Chen and Zhao, 1998; 祝德平和张广安, 1998; 沈远超等, 2000; Xie et al., 2000; 谢家东等, 2000; 胡华斌, 2005; 于学峰等, 2009, 2019; 朱金, 2014; Xu et al., 2015; Liu et al., 2017; 索晓晶等, 2020),其成矿特征与胶东早白垩世巨量金爆发成矿有着明显不同(Xu et al., 2014)。

但随着该矿田勘查程度和研究深度的逐步加强,作者团队近期在归来庄矿田深部和外围地区新发现了与金成矿关系密切的早白垩世细粒二长斑岩脉和二长斑岩岩床,这暗示了归来庄金矿田主成矿期极可能是在早白垩世,而非普遍认为的早侏罗世。因此,为了深化对鲁西归来庄金矿田成矿背景、产出环境及成矿作用的系统理解,文章在大量相关研究基础上,系统剖析金矿成矿特征,厘定金矿成矿背景与构造环境,探讨其金成矿作用过程与成矿机制,进一步厘定矿床类型、揭示成矿规律,以期在鲁西和类似地区发现新的金矿产地提供理论依据。

1 地质背景

鲁西地区大地构造位置处于滨西太平洋成矿域

中部、华北板块东南缘、郯庐断裂带西侧，具备有利的金矿成矿地质条件，已发现多处金矿床(点)(图 1)。金矿床大多分布于沂沭断裂带(郯庐断裂带山东段)西侧，矿床(点)的形成大多与潜火山热



1—太古宙侵入岩类；2—元古宙侵入岩类；3—中生代侵入岩类；4—地层；5—已知和推断断层；6—金矿床(矿点)；7—归来庄金矿田

图 1 鲁西地区金矿地质简图 (于学峰等, 2016)

Fig. 1 Sketch geological map of the gold deposits in western Shandong(Yu et al., 2016)

1—Archean intrusions; 2—Proterozoic intrusions; 3—Mesozoic intrusions; 4—Stratum; 5—Faults and inferred faults; 6—Gold deposits (occurrence); 7—Guilaizhuang gold ore field

液活动有关,如平邑归来庄金矿田、沂南铜井金矿床、邹平王家庄铜金矿床、兰陵龙宝山金矿床等。其中,平邑归来庄金矿田是鲁西地区规模最大、最重要的金矿田,其成矿作用与燕山早期铜石(杂岩)岩浆活动后期的潜火山热液活动密切相关,受区域性主干断裂——燕甘断裂和铜石潜火山穹隆及伴生的环带状、放射状构造控制。

归来庄金矿田地处鲁西隆起区南部,尼山凸起与平邑凹陷的接壤地带。区内地层主要为新太古代泰山岩群山草峪组变质岩系、古生代寒武系—奥陶系碳酸盐岩及碎屑岩地层、中生代侏罗系—白垩系碎屑岩及火山岩等。区域基底褶皱构造发育,盖层总体为一倾向北东的单斜构造。区内断裂构造发育,主要有北北西向、近东西向及北西向3组(图2)。北北西向的主干断裂及次级北西向断裂控制了地层及岩浆岩的展布;近东西向及北西向的次级断裂是该区的主要控矿构造。区内岩浆岩较发育,新太古代花岗闪长岩、二长花岗岩构成了该区的结晶基底。中生代燕山期构造—岩浆活动强烈,形成了主要由二长—闪长质岩石、二长—正长质岩石构成的铜石中偏碱性潜火山杂岩体。矿田内形成了与中生代燕山期潜火山岩浆热液有关的隐爆角砾岩型(归来庄、卓家庄)、镁质碳酸盐岩微细浸染型(磨坊沟)等多种类型金矿(Yu, 1996; 于学峰, 1996, 2001, 2010; 于学峰和韩作振, 2008; 翟德高, 2014; 徐安泰等, 2018)。

2 成矿特征

自20世纪90年代初归来庄大型新类型金矿床发现之后,矿田内又相继发现了卓家庄、磨坊沟、梨方沟、贺山庄等多处中、小型金矿床及宝古山、银洞沟、郝家山头等一大批金矿点和金矿化点。根据各类矿床(点)的控矿地质条件、成矿方式及矿化特点,可划分为5种矿床类型:隐爆角砾岩型、镁质碳酸盐岩微细浸染型、斑岩型、矽卡岩叠加型及破碎带蚀变岩型。各类型金矿化相伴产出,受潜火山穹隆的控制,它们生成于不同深度不同地质部位,赋存于不同的地质体中,为铜石潜火山中低温热液成矿系统中不同的金矿类型组合,主要特征如表1所示。

2.1 归来庄金矿床

归来庄金矿床产于郯庐断裂带次级北北西向断

裂——燕甘断裂东侧、铜石潜火山杂岩体东部边缘。矿体呈脉状赋存于沿断裂带侵入的构造隐爆角砾岩带内及其两侧的下古生界碳酸盐岩中。

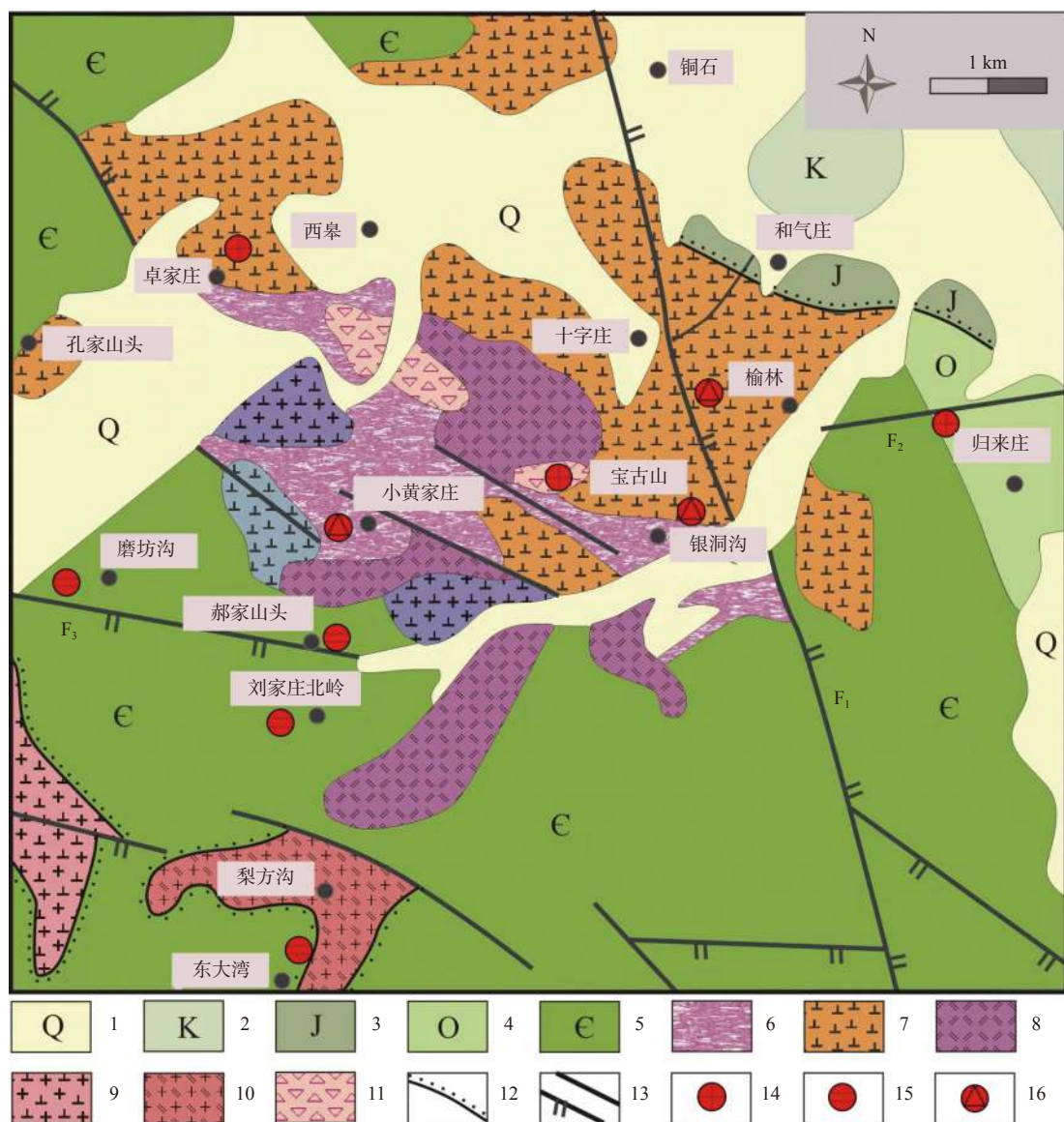
I号矿体为主矿体,其资源储量占矿区已查明总资源储量的99%以上,-300 m标高以上矿体长度为550 m,延深>650 m,呈脉状产出,矿化连续;矿体厚度一般在2~15 m,最厚达36.5 m,平均厚度为6.12 m。矿体总体走向为近东西向,倾向南,倾角随倾向向深部逐渐变缓,在-540~-600 m标高,倾角一般为29°~42°,在-600~-665 m标高,倾角一般为8°~11°,局部呈近水平为5°。近年来经深部勘查验证,在-300~-1000 m标高成功控制了向深部连续延深的主矿体(图3),累计新增金资源量20 t以上,矿床金总资源储量已近60 t(于学峰等, 2009, 2019; 张国权, 2017; 张英梅等, 2018)。

矿石类型主要有隐爆角砾岩型(占70%)、石灰岩白云岩型(占27%)及斑(玢)岩型(占3%)。金矿物主要有自然金、碲铜金矿、银金矿;银矿物主要有自然银、辉银矿;碲矿物主要为碲镍矿、碲铅矿、碲汞矿、碲银矿、碲金矿、碲金银矿等。载金矿物以石英、方解石、白云石等为主(占90%以上),少量为黄铁矿、褐铁矿等。与成矿有关的蚀变主要有硅化、萤石化、绢云母化、水白云母化、冰长石化及碳酸盐化。

矿石中Au品位一般为 $3.50 \times 10^{-6} \sim 12.00 \times 10^{-6}$,平均为 8.10×10^{-6} ;伴生有益组分主要为Ag,与金含量相当或高于金含量,平均品位为 14.21×10^{-6} ;Cu、Pb、Zn、Te、S含量均较低,S含量仅为0.06%。矿石的金矿物中,自然金占55%、碲铜金矿占29%、银金矿占16%。金矿物形态主要有角粒状(约占65%)、浑圆状(约占11%)、长角粒状(约占9%)、麦粒状(约占12%)等。粒度以细粒—微细粒金为主,粒径<0.009 mm者占85%以上。金矿物的赋存形式主要有粒间金(占69.85%),次为包体金(占25.18%),少量裂隙金(占4.89%),粒间金主要为脉石矿物粒间金,金矿物呈星散粒状或集合体分布于脉石矿物粒间;包体金以脉石矿物包体金为主,金矿物呈孤立粒状或集合体状包裹于石英、方解石等内部,少量褐铁矿及黄铁矿包体金。裂隙金主要表现为金矿物沿矿石裂隙或碳酸盐矿物节理充填分布。

2.2 卓家庄金矿床

卓家庄金矿是中国罕见的富碲型金矿,位于矿



1—第四系; 2—白垩系; 3—侏罗系; 4—奥陶系; 5—寒武系; 6—新太古代泰山岩群山草峪组; 7—燕山早期二长闪长玢岩; 8—燕山早期二长斑岩; 9—新太古代花岗闪长岩; 10—新太古代二长花岗岩; 11—隐爆角砾岩; 12—角度不整合地质界线; 13—断裂及编号; 14—隐爆角砾岩型(归来庄式)金矿床; 15—镁质碳酸盐岩微细浸染型(磨坊沟式)金矿床; 16—其他热液型金矿床(点); F_1 —燕甘断裂; F_2 —归来庄断裂; F_3 —营子洼断裂

图2 归来庄金矿田地质简图(于学峰等, 2019)

Fig. 2 Sketch geological map of the Guilaizhuang gold ore field(Yu et al., 2019)

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Ordovician; 5—Cambrian; 6—Shancaoyu formation of the Taishan group in the Neoproterozoic; 7—Early Yanshanian monzodiorite porphyrite; 8—Early Yanshanian monzonite porphyry; 9—Neoproterozoic granodiorite; 10—Neoproterozoic monzonitic granite; 11—Cryptoexplosive breccia; 12—Angular unconformity geological boundary; 13—Fault and its serial number; 14—Cryptoexplosive breccia type (Guilaizhuang type) gold deposit; 15—Micro-disseminated magnesium carbonate (Mofanggou type) gold deposit; 16—Other hydrothermal gold deposits (ore spots); F_1 —Yan-Gan fault; F_2 —Guilaizhuang fault; F_3 —Yingziwa fault

田西北部(图2), 主要赋存于受北西向断裂控制的隐爆角砾岩筒内, 角砾岩筒主要发育在北西向与近东西向断裂构造交会部位上。角砾岩筒内充填有细粒二长斑岩脉及隐爆角砾岩, 围岩主要为二长斑

岩及二长闪长玢岩。角砾岩体就是矿体, 为全筒式金矿化, 平面上呈透镜状, 长轴长10~15 m, 走向300°, 倾向南西, 倾角为75°~80°; 短轴长5~10 m; 延深>170 m。在90 m中段, 矿体长轴达50 m左右。

表 1 归来庄金矿田成矿系列划分表

Table 1 Division of the minerogenetic series of the Guilaizhuang gold ore field

成矿系列	成矿亚系列	矿床式	成因类型	成因亚类型	代表矿床(点)	主要矿种	产出环境及矿化特征
鲁西中生代侵入岩 Au、Cu、Fe成矿系列	归来庄燕山早期中偏 碱性潜火山杂岩Au、 Cu、Fe成矿亚系列	归来庄式	隐爆角砾岩型	脉状型	归来庄	Au、Ag、Te	大型金矿,产于杂岩体东边缘脉状隐爆角砾岩带中,围岩为碳酸盐岩;矿体呈脉状,长550 m、斜深650 m以上,平均厚度为6.21 m;金品位平均为 8.10×10^{-6}
				筒状型	卓家庄		中型金矿,产于杂岩体边部筒状隐爆角砾岩中;金平均品位 156.77×10^{-6} ,最高达 2000×10^{-6} 以上
		磨坊沟式	镁质碳酸盐岩微 细浸染型		磨坊沟	Au、Ag	中型金矿,产于杂岩体西南边缘,寒武系底部碳酸盐岩中;矿体呈似层状,长300 m以上,厚2.05~2.82 m,金品位一般为 $4.5\times 10^{-6}\sim 11.6\times 10^{-6}$
				斑岩型	银洞沟	Au、Ag	小型金矿,产于杂岩体中部的二长斑岩岩墙中;矿化体呈脉状,长350 m以上,厚1.5~3 m,金品位一般为 $2\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$,蚀变为硅化、黄铁矿化
				似层状型	黄家庄		产于杂岩体中部的二长斑岩岩床中,金矿化不均匀、规模较小
			含铁砂卡岩上叠 加型		十字庄	Fe、Cu、Au	小型铁矿,伴生铜、金;在二长闪长玢岩与石灰岩的接触带生成的含铁夕卡岩带上,有后期金矿化叠加,金矿化不均匀
			破碎带蚀变岩型		董李	Au	金矿点,位于杂岩体南边部,在断裂破碎带内的蚀变角砾岩、碎裂岩中形成金矿化体,金矿化不均匀、规模较小

Au 平均品位为 156.77×10^{-6} , 最高达 2000×10^{-6} 以上; 伴生组分 Ag 平均品位为 695.33×10^{-6} ; Te 含量的平均品位为 1.18%; 具有碲与金超常富集共存的显著特征, 碲、金元素浓集系数分别高达 118000、22998(于学峰, 2010)。金矿物主要有自然金、银金矿、碲金矿、碲金银矿等(杨德平和刘鹏瑞, 2001; 胡勇平等, 2016; 于学峰等, 2019)。与成矿有关的蚀变主要有硅化、萤石化、黄铁矿化、碲化物矿化, 其次为绢云母化、滑石化、碳酸盐化(图 4)。

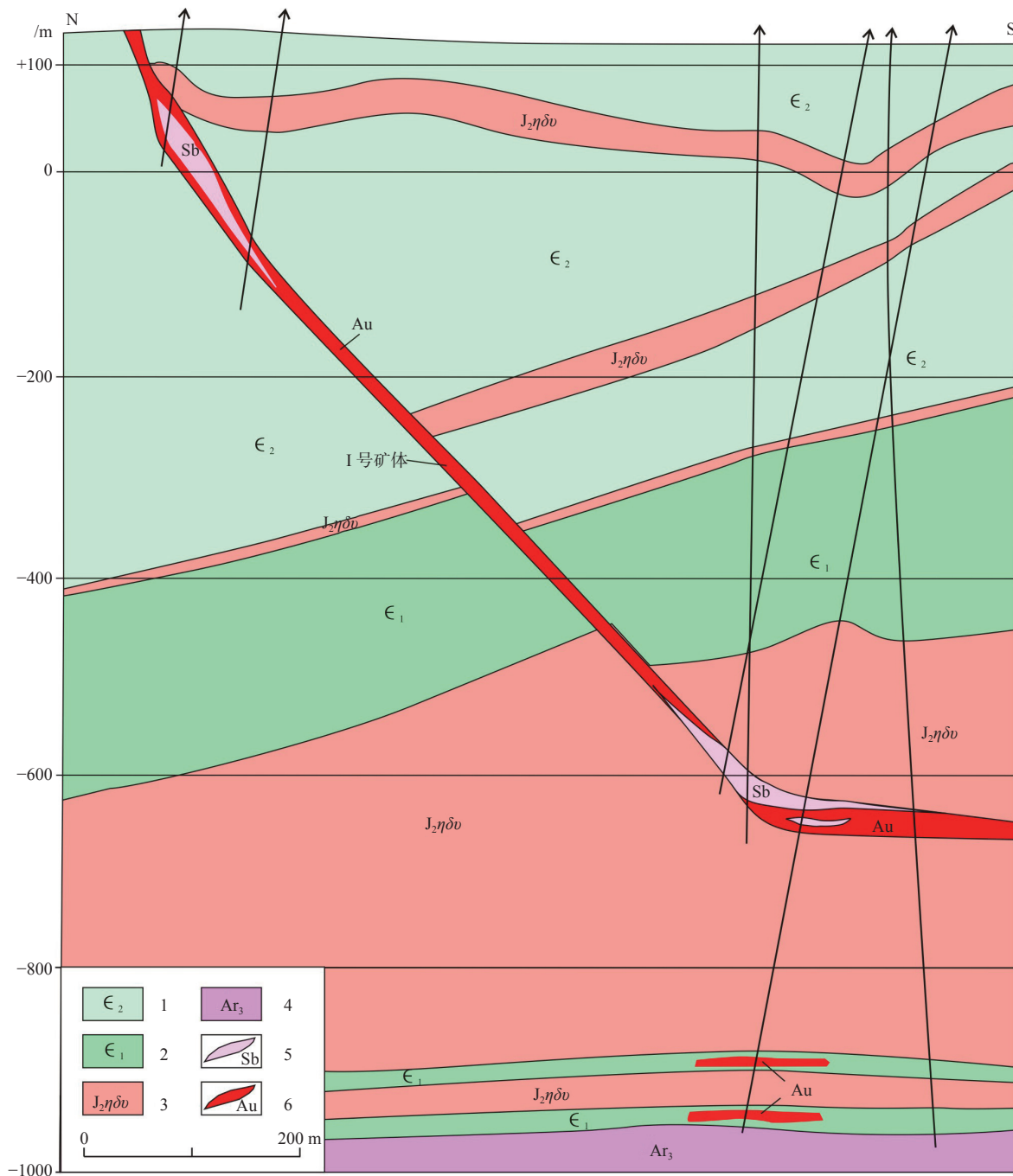
矿石类型主要为隐爆角砾岩型, 根据隐爆角砾岩中胶结物成分及含量, 大致分为 4 种主要矿石类型: 矿浆胶结隐爆角砾岩型、热液胶结隐爆角砾岩型、熔浆胶结隐爆角砾岩型和凝灰质胶结隐爆角砾岩型, 其金品位依次由高到低, 以第 1 种矿石金品位最高, 多在 1000×10^{-6} 以上。

富含碲元素是卓家庄金矿的独特之处, 碲化物往往局部富集, 含量可达 3%~5%, 与石英、萤石、黄铁矿等其他热液蚀变矿物一起分布于角砾之间(图 4h)。碲矿物有自然碲、碲银矿、碲金银矿、碲金矿、碲铅矿、碲铋矿、碲铁矿等, 碲化物电子探针波谱定量分析结果见表 2。

2.3 磨坊沟金矿床

磨坊沟金矿床位于铜石中偏碱性潜火山杂岩体的西南部边缘(图 2)。矿体赋存在寒武系与新太古代基底不整合面上部、朱砂洞组上灰岩段下部的一套镁质碳酸盐岩中(图 5), 其岩性主要为中厚层—厚层灰质白云岩、含燧石结核白云质灰岩、泥质白云岩、白云质灰岩。这类岩石具有的脆性大、化学活动性强、角砾状构造和岩溶孔隙发育等特点, 有利于含矿热液的运移和渗滤扩散, 易与矿液发生交代作用而形成矿体。上部的泥云岩、含燧石结核灰质白云岩等岩石, 结构致密, 化学活动性差, 对含矿热液起着隔挡或屏蔽作用。

矿体呈似层状产于寒武纪朱砂洞组上灰岩段下部层位中, 共圈定 2 个金矿体, 其中 I 号矿体长 340 m, 厚度为 0.60~4.80 m, 平均厚度为 2.82 m; 矿体呈似层状, 产状与岩层产状基本一致, 倾向为 $325^{\circ}\sim 350^{\circ}$, 倾角为 $8^{\circ}\sim 20^{\circ}$; Au 品位一般为 $1.09\times 10^{-6}\sim 25.21\times 10^{-6}$, 平均为 11.57×10^{-6} 。II 号矿体长 200 m, 厚度在 1.20~3.20 m, 平均厚度为 2.05 m; 矿体呈似层状, 产状与岩层产状一致, 倾向为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 倾角为 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$; Au 品位一般在 $1.64\times 10^{-6}\sim 12.88\times 10^{-6}$, 平均为 4.54×10^{-6} 。



1—寒武—奥陶纪三山子组+炒米店组+崮山组；2—寒武纪张夏组+馒头组+朱砂洞组；3—侏罗纪二长闪长玢岩；4—前寒武纪变质基底；5—蚀变角砾岩；6—金矿体

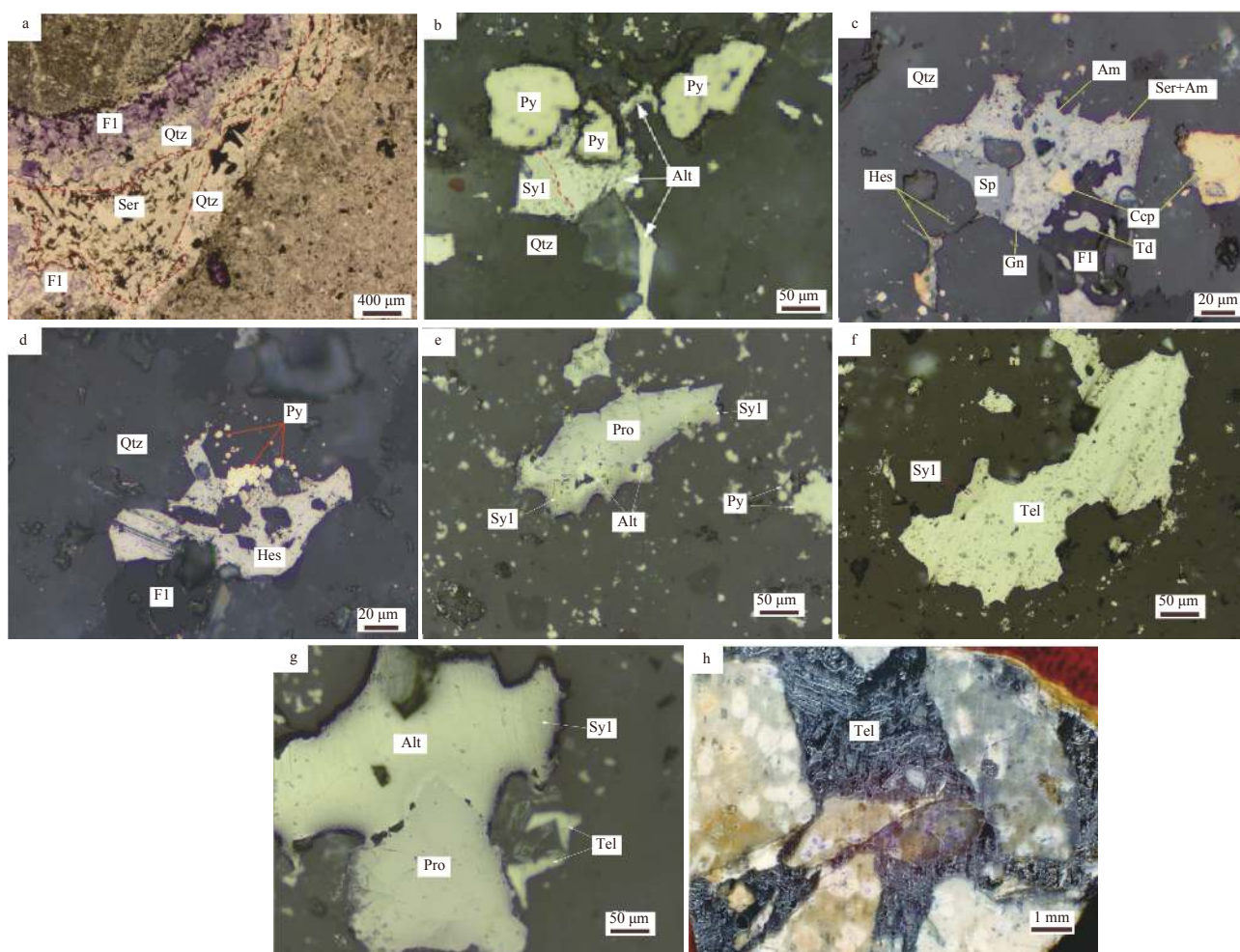
图 3 归来庄金矿深部 32 勘探线剖面图（于学峰等，2016）

Fig. 3 Section map of the No.32 prospecting line in the Guilaizhuang gold deposit(Yu et al., 2016)

1—Cambrian–Ordovician Sanshanzi group, Chaomidian group and Gushan group; 2—Cambrian Zhangxia group, Mantou group and Zhushadong group; 3—Jurassic monzonitic diorite porphyrite; 4—Precambrian metamorphic basement; 5—Broken alteration breccia; 6—Gold ore bodies

矿石中的金矿物主要有自然金、碲金银矿、银金矿，伴生金属矿物较少，主要为黄铁矿、方铅矿、褐铁矿等。主要蚀变矿物为方解石、白云石、石英、萤石、绢云母等。金矿物粒度以微粒金为主，

小于 10 μm 的金矿物占全部金矿物的 98%，其中粒径为 1 μm 左右的金矿物占 51%。围岩蚀变主要有硅化、萤石化、黄铁矿化、绢云母化及碳酸盐化，其中硅化、萤石化与金矿化关系最为密切。



Alt—碲铅矿；Syl—针碲金银矿；Py—黄铁矿；Qtz—石英；Fl—萤石；Ser—绢云母；Hes—碲银矿；Am—辉银矿；Gn—方铅矿；Sp—闪锌矿；Ccp—黄铜矿；Pro—碲铁矿；Tel—自然碲

a—石英-萤石-多金属硫化物-金-碲化物脉体沿早期石英-黄铁矿化的岩石裂隙充填，又被成矿后期的绢云母脉体充填穿插（单偏光）；b—碲铅矿和针碲金银矿连生分布于黄铁矿周围，晚于黄铁矿形成（反射光）；c—碲银矿与辉银矿呈不规则状交生体状，并见许多乳滴状碲银矿分布于石英粒间（反射光）；d—碲银矿和黄铁矿分布于石英萤石粒间（反射光）；e—碲铅矿和针碲金银矿分布于碲铁矿边部（反射光）；f—自然碲及针碲金银矿连生分布于石英、萤石等非金属矿物中（反射光）；g—碲铁矿和自然碲及针碲金银矿连生分布于非金属矿物石英、萤石中（反射光）；h—自然碲分布于胶结物中（反射光）

图4 卓家庄金矿富碲型金矿石矿相学特征（于学峰等，2019）

Fig. 4 Mineralogical characteristics of the Te-rich gold ores in the Zhuojiazhuang gold deposit (Yu et al., 2019)

(a) Zhuojiazhuang gold ores: Quartz, fluorspar-polymetallic sulfide-gold telluride vein bodies are filled along the early quartz-pyritization rock fractures, and then interspersed with the later sericite vein bodies; (b) Zhuojiazhuang gold ores: Altaite and sylvanite are distributed around pyrite and formed later than pyrite; (c) Guilaizhuang gold ores: Hessite and argentite are irregularly distributed together with galena, sphalerite and chalcopyrite. Tellurite deposits are metasomatized along the chalcopyrite edges. Many tellurite crystals are distributed between quartz grains; (d) Guilaizhuang gold ores: Hessite and pyrite are distributed among quartz fluorite minerals. The residual bulk pyrite is distributed between tellurite and quartz fluorite grains; (e) Zhuojiazhuang gold ores: Altaite and sylvanite are distributed at the edge of cuzticite. The micrograined pyrite is distributed in quartz, fluorite and so on; (f) Zhuojiazhuang gold ores: Native tellurium and sylvanite coexist in minerals such as quartz and fluorite; (g) Zhuojiazhuang gold ores: Cuzticite, native tellurium and sylvanite are symbiotically distributed in quartz and fluorite; (h) Zhuojiazhuang gold ores: Native tellurium is distributed in the cements

Alt—Altaite; Syl—Sylvanite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Fl—Fluorite; Ser—Sericite; Hes—Hessite; Am—Argentite; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Pro—Cuzticite; Tel—Native tellurium

表 2 归来庄金矿田主要碲化物和自然金电子探针波谱定量分析结果

Table 2 Results of the EMPA spectroscopic quantitative analysis of main telluride and native gold in the Guilaizhuang gold ore field

矿物种类	含量/%												总计/%
	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Hg	Bi	Te	Au	Ag	Sb	Se	
自然碲	0.06	—	0.02	0.02	0.02	—	0.11	98.77	—	—	0.68	0.07	99.75
自然碲	—	—	0.02	—	0.01	0.13	0.07	99.14	0.05	—	0.65	—	100.08
自然碲	—	—	—	—	—	—	0.11	98.84	—	—	0.65	0.03	99.65
自然碲	—	—	0.03	—	0.02	—	0.05	99.01	0.01	—	0.67	0.07	99.87
斜方碲金矿	0.01	—	—	0.16	—	—	0.29	59.01	30.32	8.20	0.40	0.08	98.45
斜方碲金矿	0.01	—	—	0.16	—	—	0.34	59.11	30.31	8.40	0.39	0.04	98.76
斜方碲金矿	—	—	—	0.19	0.01	—	0.29	59.16	30.60	8.18	0.40	0.03	98.88
斜方碲金矿	0.01	—	—	0.18	—	—	0.38	58.48	30.06	8.62	0.41	—	98.15
斜方碲金矿	0.01	0.04	—	0.08	1.65	—	0.31	59.31	29.18	9.25	0.36	—	100.23
针碲金银矿	—	0.02	0.08	0.01	0.02	—	0.22	61.92	25.81	12.13	—	—	100.22
针碲金银矿	—	—	—	0.01	—	—	0.24	61.63	27.00	11.30	—	—	100.20
碲银矿	—	—	—	—	0.02	—	0.02	39.04	0.04	60.02	—	—	99.15
碲银矿	0.59	0.04	0.04	0.05	0.02	0.56	—	39.15	0.03	59.78	—	—	100.26
碲银矿	0.94	0.04	0.06	0.05	—	1.25	—	41.11	—	57.14	—	—	100.60
碲银矿	0.04	0.01	—	0.02	0.01	0.50	—	38.40	—	60.31	—	—	99.37
碲银矿	—	—	—	—	0.02	0.51	0.04	38.30	—	60.66	—	—	99.55
碲金银矿	0.03	—	0.03	—	0.04	—	0.25	33.16	25.78	41.79	—	—	101.07
碲金银矿	—	—	0.01	—	0.05	—	0.22	33.34	26.18	41.64	—	—	101.45
碲金银矿	0.03	—	0.01	0.01	0.03	0.09	0.18	33.02	25.09	41.84	—	—	100.31
自然金	—	0.11	—	0.05	0.05	0.36	0.68	0.07	89.80	10.52	—	—	101.67
自然金	0.03	0.02	—	0.03	0.08	0.11	0.85	0.07	90.09	10.55	—	—	101.83
自然金	0.02	0.02	0.05	0.04	—	—	0.76	0.01	86.69	13.15	—	—	100.74
自然金	—	0.02	0.04	—	0.04	—	0.85	0.03	87.44	12.60	—	—	101.02

3 控矿地质条件

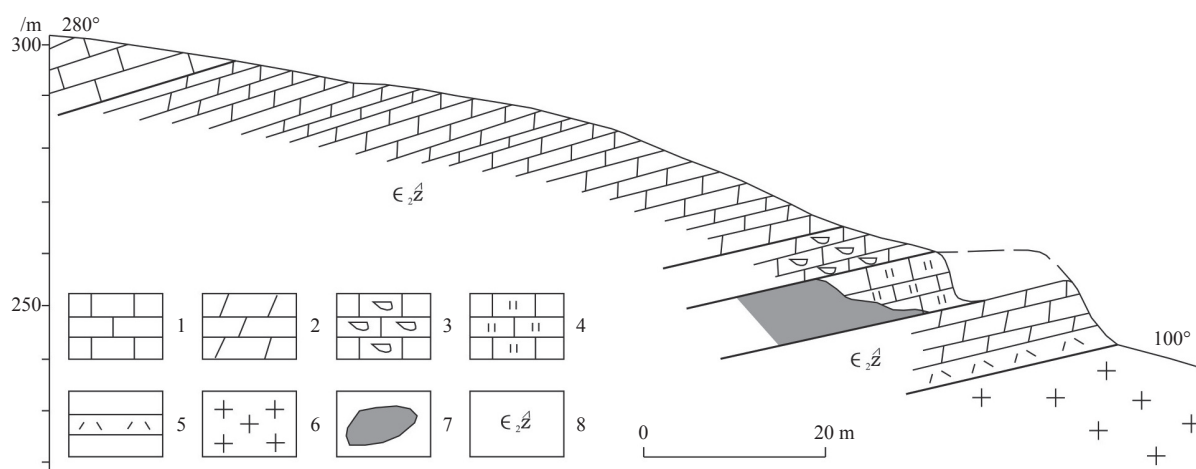
3.1 构造控矿特征

3.1.1 断裂构造

燕山运动早期,随着太平洋板块沿北北西向欧亚板块俯冲,郯庐断裂发生左行扭动,派生出一系列北西向、北北西向主干断裂及次级断裂(图 6)。受区域应力与潜火山穹隆的共同作用,研究区内断裂构造发育,其中北北西向的燕甘断裂为区内主干断裂,近东西向及北西向断裂为燕甘断裂的次级断裂也是该区的主要控矿构造,控制着区内金矿床(点)的生成与分布。

北北西向燕甘断裂是归来庄金矿田的主要断裂,断裂北起蒙山断裂,途经平邑铜石燕庄,南至兰陵甘霖,向南东与鲁南小型帚状构造系列断裂收敛相交于郯庐断裂带西侧,是其派生构造——鲁南“帚状”构造的重要组成部分,控制着该区地层、岩浆岩、次级构造及归来庄金矿田的展布。区内断裂总体走向 345°~350°,倾向北东,倾角为 64°~80°。断裂宽度为 5~25 m,带内发育碎裂岩和角砾岩及灰白色断层泥,断裂带内多发育硅化、绿泥石化、萤石化、绢云母化等,局部可见金矿化。

燕甘断裂历经多次构造活动,派生有近东西向断裂、北西向断裂,是矿田内的主要导矿和容矿构

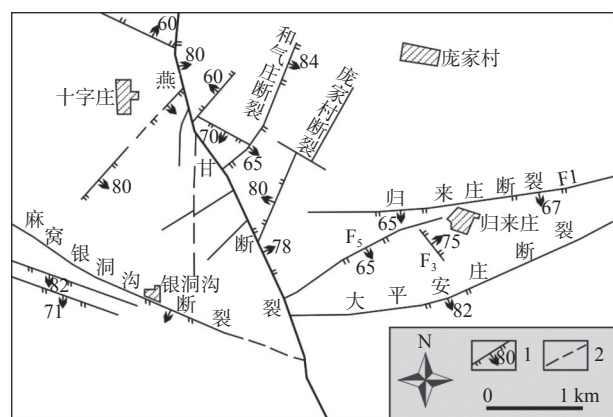


1—石灰岩; 2—白云质灰岩; 3—含燧石结核灰岩; 4—萤石化白云质灰岩; 5—中生代燕山期二长斑岩; 6—新太古代二长花岗岩; 7—金矿体; 8—早寒武世朱砂洞组

图5 平邑磨坊沟金矿地质剖面图 (于学峰等, 2009)

Fig. 5 Geological profile of the Mofanggou gold deposit in Pingyi county (Yu et al., 2009)

1—Limestone; 2—Dolomitic limestone; 3—Flint-bearing nodule limestone; 4—Fluoritized dolomitic limestone; 5—Mesozoic Yanshanian monzonitic porphyry; 6—Neoproterozoic admellite; 7—Gold ore body; 8—Early Cambrian Zhushadong formation



1—实测断层及倾角(°); 2—推断断层

图6 燕甘断裂及其派生断裂构造展布图 (据林景什等, 1997)

Fig. 6 Structural distribution map of the Yan-gan fault and its sub-faults (Lin et al., 1997)

1—Faults and dip angle(°); 2—Inferred faults

造, 区内矿床(点)多分布于此2组断裂内或其旁侧附近。近东西向断裂包括归来庄 F_1 、 F_2 断裂、大平安庄断裂、车草峪断裂、营子洼断裂, 整体走向为 $260^\circ \sim 290^\circ$, 向南倾, 倾角为 $65^\circ \sim 82^\circ$ 。 F_1 断裂是归来庄矿床的控矿断裂, 其转折、复合、交会部位是矿体产出的有利部位。北西向断裂大多位于燕甘断裂西部, 小官路断裂、毛家岭断裂、贺山庄断裂、卓家庄断裂、麻窝—银洞沟断裂等由北向南依次分布。总体走向 $290^\circ \sim 310^\circ$, 倾向南西, 倾角为 $60^\circ \sim$

80° , 该组断裂控制着卓家庄、磨坊沟等金矿床的分布。

3.1.2 潜火山穹隆构造

受区域构造应力转换及断裂发育影响, 该区中生代岩浆活动频繁, 大量的幔源岩浆底侵上升, 经地壳同化混染作用形成一套杂岩体, 侵入到老基底与寒武系的不整合面附近形成一个穹隆体, 呈轴向北西的椭圆状, 基本由中心、内、外环带组成, 外环带由二长闪长质岩石构成; 内环带主要有二长—正长质岩石构成; 中心主要由隐爆角砾岩及脉岩组成。岩浆的侵位及之后的隆升, 在穹隆的顶部及外环和围岩中, 形成一系列的环状、放射状及轴向线状断裂。这些环状、放射状及轴向线状构造与区域性构造的叠加、复合和交会部位, 是矿液聚集成矿的良好场所, 既是导矿构造又是容矿构造。已知归来庄、卓家庄金矿床即受此类构造控制。

3.2 地层控矿特征

在成矿物质方面, 泰山岩群可能为成矿提供了部分成矿元素。区内新太古代绿岩带主要为泰山岩群的山草峪组, 据作者以往研究资料(于学峰, 2010), 山草峪组中的黑云斜长片麻岩金元素含量为 5.9×10^{-9} ($n=45$)、长英质片岩金元素含量为 7.04×10^{-9} ($n=17$)、斜长角闪岩金元素含量为 8.2×10^{-9} ($n=5$)。据赵鹏大和陈永清(1998)研究成果, 泰山岩群金元素含量为 10.14×10^{-9} ($n=68$)。可见, 鲁西新

太古代泰山岩群金元素含量是地壳丰度值的3~5倍(地壳丰度值为 2.19×10^{-9} ;黎彤, 1992)。这暗示成矿组分可能主要来源于具有丰富金元素储备的泰山岩群。

在成矿空间方面,一方面地层不整合为成矿提供了空间,寒武纪朱砂洞组不整合于前寒武纪花岗质变质基底之上,其下部的灰质白云岩,脆性大,化学活动性强,角砾状构造和岩溶孔隙发育,有利于含矿热液的运移和渗滤扩散,易与矿液发生交代作用而形成矿体;另一方面,顶板围岩主要为泥云岩等,其结构致密,化学活动性差,对金元素的聚集成矿起着隔挡或屏蔽作用,该层位是形成磨坊沟式金矿的主要层位。此外,寒武系上部及奥陶系下部的白云质灰岩、白云岩等,是归来庄式金矿的有利围岩。

3.3 岩浆岩控矿特征

中生代燕山早期郯庐断裂带左行走滑使鲁西地区北西向断裂发生拉张,为幔源岩浆上侵提供了通道。携带金属矿质的岩浆在上侵过程中不断活化、迁移泰山岩群中的金属矿质,于浅部寒武系地层及燕甘断裂的次级断裂处就位,多次的岩浆活动形成了铜石潜火山杂岩体。该岩体为一多阶段分异演化而形成的高钾碱性潜火山穹隆,岩浆活动可分为3个主要阶段:①二长闪长质岩石阶段,主要分布于杂岩体的外环;②二长-正长质岩石阶段,分布于铜石杂岩体的中部;③粗面斑岩及隐爆角砾岩阶段,隐爆角砾岩主要呈筒状或脉状分布于杂岩体的中心部位或边缘构造带中,金矿化主要发生在该阶段。已有研究表明,矿田内广泛分布的二长闪长玢岩和二长斑岩年龄主要集中于189~180 Ma(林景仟等, 1997; Lan et al., 2012; Xu et al., 2015),二者同属燕山早期产物。近期,作者团队对矿田内与成矿关系密切的细粒二长(正长)斑岩脉和二长斑岩岩床开展系统深化研究,获得岩体锆石U-Pb年龄均集中于127~124 Ma,这暗示铜石杂岩体晚阶段的二长(正长)斑岩脉(岩床)可能形成于早白垩世,而非早侏罗世。

矿田内中生代的潜火山岩浆活动对金矿形成具有明显的控制作用。从空间展布上看,已知金矿床、矿点及矿化点均位于铜石杂岩体范围内,且多分布于杂岩体的边缘接触带附近;从金矿化与岩浆

演化的关系看,矿化主要发生在分异强烈的二长-正长质岩浆活动阶段末期。岩浆岩对金矿化的控制作用主要表现在,一方面,多期次的潜火山岩浆活动为成矿提供了充足的热源和成矿热液。多期多阶段的高钾碱性潜火山岩浆活动,分异出大量富含 H_2O 、 CO_2 、S挥发分及部分矿质的成矿热液,热液在上升运移过程中,进一步活化泰山岩群中的金元素,使成矿物质进一步富集迁移,在适当的物理化学条件下沉淀聚集,形成矿体。另一方面,岩浆活动末期形成的隐爆角砾岩(筒)、二长斑岩岩床和岩脉及潜火山杂岩体接触带及伴生的放射状、环状断裂,为矿液的迁移和金元素的沉淀聚集提供了有利空间。

4 成矿作用

4.1 成矿物质来源

关于金矿床成矿物质的来源,绝大多数学者强调了其多元性和复杂性,至于何者为主,分歧较大,故文中结合归来庄金矿田矿石及各地质体同位素地球化学数据对成矿物质来源与演化进行了综合约束。

(1) 硫同位素方面

众所周知,热液系统的硫同位素组成由温度、pH值、氧逸度和离子活性等物理化学条件决定,而在温度低于350℃、流体中以 H_2S 为主的还原热液条件下,硫化物矿物的平均 $\delta^{34}S$ 接近热液的 $\delta^{34}S$ 值(Sakai, 1968; Ohmoto and Rye, 1979; Hoefs, 1997; 郑永飞和陈江峰, 2000)。归来庄金矿田形成于中低温还原环境,共生含硫矿物主要是黄铁矿,其他只有少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿和辉钼矿,未发现硫酸盐矿物。因此,硫化物矿物的平均 $\delta^{34}S$ 值可以直接表征硫源。已有研究表明,该区隐爆角砾岩型金矿床黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为0.71‰~5.50‰(Hu et al., 2006; Li and Santosh, 2017),镁质碳酸盐岩微细浸染型黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为16.5‰~0.4‰。由此可见,隐爆角砾岩型矿石硫同位素的特征代表着成矿物质初始硫同位素特征,而镁质碳酸盐岩微细浸染型黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值变大是受地层中大量的海相沉积硫($\delta^{34}S$ 值接近20‰)混合造成的。

(2) 铅同位素方面

归来庄矿田隐爆角砾岩型矿石的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 质量比分别为16.94~17.42和15.36~15.42

(Chen and Zhao, 1998)。Li et al.(2018)报道了镁质碳酸盐岩微细浸染型黄铁矿的铅同位素质量比为 $18.207 \sim 18.908$ ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)、 $15.575 \sim 15.757$ ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)、 $38.313 \sim 39.252$ ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)，铅的 μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) 和 ω ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) 分别为 $9.37 \sim 9.79$ 和 $36.83 \sim 39.17$ ，高于正常铅的 μ ($8.686 \sim 9.238$) 和 ω (35.55 ± 0.59)。以上资料表明，隐爆角砾岩型金矿形成的铅主要来自地幔，可能与下地壳混合，而镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿形成的铅有一部分来自碳酸盐岩围岩。

(3) 氢氧同位素方面

有学者研究了隐爆角砾岩型金矿石英和方解石晶体中包裹体水的氢、氧同位素特征，发现归来庄矿床石英、方解石含水 δD 值为 $-73\text{‰} \sim -48\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-1.1\text{‰} \sim 8.7\text{‰}$ (林景仟等, 1997; Chen and Zhao, 1998; 胡华斌, 2005; 于学峰, 2010)，与原生岩浆水及变质水相当，更接近于中国东部北方中生代大气降水的 δD 值 ($-70\text{‰} \sim -110\text{‰}$)。由此可说明，成矿热液具有多来源性，以岩浆水和大气降水为主，并有少量变质水的参与。

(4) 碳氧同位素方面

相关学者开展了大量的研究工作，研究认为隐爆角砾岩型矿石更接近于地幔或者岩浆岩体系，而镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿石的碳源主要来自碳酸盐岩围岩 (Li et al., 2018)。

(5) 铷锶同位素方面

有学者研究发现隐爆角砾岩型金矿的初始 Sr 同位素比值 $i(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 为 $0.7024 \sim 0.7061$ (Chen and Zhao, 1998)，镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿石的初始 Sr 同位素比值 $i(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 为 0.712429 ± 0.000076 (Li et al., 2018)。由此可见，前者与幔源胶结物的铅数据接近 (<0.7037)，后者的数据高于玄武岩 (<0.704)、低于陆源硅酸盐 (>0.720 ; Faure, 1986)，表明成矿物质特别是 Rb 和 Sr 来自深部，在成矿流体渗入灰岩围岩中时与上地壳物质混合。

综上所述，鲁西归来庄金矿田成矿流体来自统一的流体库——壳幔相互作用过程中的流体系统。

4.2 流体性质

对主成矿阶段形成的石英、萤石流体包裹体的测试资料表明，归来庄金矿床石英中包裹体主要为富液相包裹体，多数为原生包裹体，少量次生包裹体。形态多样，有梯形、椭圆形、三角形、长方形、不规则形态，大小以 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 为主；方解石中包裹体

大部分也为富液相，少量均一液相，呈星点状、长条状分布，形状有不规则状、椭圆状、菱形等，大小多为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ；成矿主阶段的萤石，颜色为不均匀紫色调，晶形较好，所含大量包裹体成群分布，呈长条状、椭圆状、不规则状，多为原生包裹体，个头较大，为 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ ，主要为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。成矿晚期的萤石中包裹体很少。

包裹体显微测温发现，石英中流体包裹体的均一温度为 $179 \sim 341\text{℃}$ ，主要集中于 $230 \sim 260\text{℃}$ ，平均值为 244℃ ，冰点范围为 $-8.2 \sim -3.2\text{℃}$ ；方解石中流体包裹体的均一温度为 $114 \sim 259\text{℃}$ ，主要集中于 $140 \sim 170\text{℃}$ ，均值为 158℃ ，冰点在 $-7.9 \sim -2.5\text{℃}$ ；萤石中流体包裹体的均一温度为 $121 \sim 268\text{℃}$ ，集中于 $160 \sim 190\text{℃}$ ，均值为 179℃ ，冰点在 $-10.5 \sim -2.4\text{℃}$ 。以上数据显示出均一温度按石英、萤石、方解石顺序逐步降低，这一结果与石英、萤石主要采自主成矿期的矿石，方解石来自成矿晚期的矿石相一致。全部包裹体的均一温度范围为 $114 \sim 341\text{℃}$ ，成矿温度集中在 $130 \sim 250\text{℃}$ ，早期至晚期温度逐渐降低，平均值为 187℃ ，表明归来庄矿床成矿温度较低，为中—低温热液矿床。石英中流体包裹体的盐度为 $5.26\% \sim 12.39\%$ ，均值为 8.39% ；方解石中流体包裹体的盐度范围为 $4.18\% \sim 11.58\%$ ，均值为 7.14% ；萤石中流体包裹体的盐度为 $4.03\% \sim 14.46\%$ ，均值为 7.1% ；全部包裹体盐度均值为 7.54% ，表明成矿流体为低盐度流体。

包裹体激光拉曼分析表明，石英脉中的流体包裹体主要成分是 H_2O ，其中含数量不等的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等阳离子及 CO_2 、 F_2 、 Cl_2 、 CH_4 、 H_2S 等组分，偶尔含少量 Fe^{2+} 和 N_2 。而萤石中的流体包裹体富含 CO_2 、 H_2S 、 SO_2 及少量的 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ，可能说明成矿流体处在酸性或弱酸性环境， CO_2 含量的升高可能更有利于金元素的成矿。 H_2S 的大量出现及少量的 SO_2 和 SO_4^{2-} 存在，可能暗示了部分金可能以硫络合物的形式迁移 (沈昆等, 2001; 于学峰等, 2009)。

4.3 碲金成矿过程和机理

碲化物型金矿床是国际矿床学界公认的一种重要金矿类型，其显著特点是矿石中含有大量的碲化物，往往与俯冲背景下有地幔流体加入的碱性、钙碱性岩浆活动有关，矿化多分布在同期或者早期的

火山岩中 (Fornadel et al., 2014; Kelley and Spry, 2016)。在世界上许多的碲化物型金矿床中,碲化物常与自然金密切共生,且金越富集的地方碲化物的含量越高,呈正相关关系 (Kelley et al., 1998; Tombros et al., 2007),因此多项研究认为碲(硒/铋元素)络合物可能是此类金矿金元素出熔、迁移、富集成矿的过程中的主要载体 (Ciobanu et al., 2006; Voudouris et al., 2011)。但也有学者发现金矿物中具有比较低的 Te/Au 和 Te/Ag 比值,认为碲不足以有效运载金或银,即碲络合物并非主要的金属运载组成 (Kesler et al., 2007)。还有观点认为在岩浆热液过程中碲以气相运移冷凝沉淀,而非液相,无法参与运移金元素 (Henley and Berger, 2011; Pokrovski et al., 2013; Zhai and Liu, 2014; Liu et al., 2017)。张招崇和李兆鼎 (1997) 认为碲化物型金矿床中往往自然金成色高的原因是成矿溶液中有较高的碲逸度,碲逸度对金银矿物的共生组合会产生重大影响。钱汉东等 (2000) 认为金银碲化物产出的种类和数量取决于成矿体系溶液中 Au、Ag、Te 元素的浓度及其含量比值。Mao et al. (2003) 通过稀有气体同位素研究认为东坪金矿床部分富碲成矿流体来源于地幔,流体运移可能主要沿着克拉通的边缘上升。Voudouris et al. (2011) 研究发现在成矿流体的演化过程中,硫、硒逸度的降低和碲逸度的升高是碲化物形成的重要因素。

归来庄金矿田的硫化物含量相对较少,含 As 黄铁矿中能承载的 Au 是有限的,因此硫化物导致的金矿化规模较小,基于归来庄金矿田大量碲化物的特点,碲化物的金矿化可能是该金矿田最重要的成矿过程。矿石中碲化物除大量发育的自然碲外,还有斜方碲金矿、碲银矿、碲金银矿、碲铋矿、碲铁矿、碲铅矿及碲汞矿等碲化物,往往局部富集,含量可高达 3%~5%,明确指示了其成矿热液中有较高的碲逸度 (李增胜等, 2015; 于学峰等, 2019)。文中通过碲化物矿物学、元素地球化学特征及 Te-Au-Ag 共生关系等进行了深入研究,以进一步揭示碲金超常富集机理。为了更直接清晰地观察碲矿物的元素分布规律,对碲铅矿-斜方碲金矿-自然碲的共生体进行了面扫描分析 (图 7),发现与碲矿物关系密切的元素有 Bi、Co、Zn、Ni、As、Cu、Sb、Se、Cl 等, Sb 更倾向于富集在自然碲中,而 Se 更倾向于

富集在碲铅矿中。碲化物共生体边界清晰, Au、Ag 在斜方碲金矿中分布不均匀,可能是非平衡状态下快速沉淀而成。将金银碲化物的矿物学数据投点到 Au-Ag-Te 三角图解中 (图 8)。可以看出,大部分矿物都不是标准的端元组分,这也说明这些金银碲化物是在非稳定、非平衡状态下快速沉淀形成,这也解释了大量碲铅矿-斜方碲金矿-自然碲共生体的形成原因。

Au 除与 S 结合生成可搬运的配合物外,还可能与 Te、Se、Bi 结合形成可搬运的配合物 (Boyle, 1979)。尽管归来庄金矿成矿过程中存在一期石英-硫化物阶段,但这个阶段明显晚于区内的大规模金成矿作用。碲化物中的阴离子多伴有 S、Br、F 等元素,阳离子主要有 Ag、Au、Pb 等元素,这可能与富碲碱性岩浆分异过程中的沸腾作用和混合作用造成硫化物和碲化物反应所引起的 Te 逸度升高有关。除了具有 Te 逸度高的特征外,成矿岩浆/流体还表现出高 Cl、F、Br 等卤族元素的特征。在中、低温条件下,Te 易置换 S 而以类质同象的形式分散于硫化物晶格中;但在高碲逸度的条件下,Te 易与 Au、Ag、Pb 等元素结合形成大量碲化物,这是碲元素参与成矿的主要地球化学行为。初步认为,在成矿热液中 Au 可能与 Te、S 等结合生成可搬运的配合物进行运移。

4.4 成矿时代

归来庄式金矿形成与中生代燕山早期潜火山杂岩有关,但热液型金矿成矿时代一般晚于成岩时代。已有学者对铜石杂岩体主体岩石做了大量年代学工作。例如,谭东娟等 (1993)、林景仟等 (1996) 采用角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测得石英二长闪长玢岩和二长斑岩年龄分别为 $189.8\pm 0.2\text{ Ma}$ 和 $188.4\pm 1.6\text{ Ma}$; 胡华斌等 (2004) 测得细粒闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值为 $175.7\pm 3.8\text{ Ma}$; Lan et al. (2012) 利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法测得细粒石英二长岩的年龄为 $184.7\pm 1.0\text{ Ma}$ 、斑状石英二长岩年龄为 $181.5\pm 0.9\text{ Ma}$ 、中粒斑状正长岩年龄为 $180.1\pm 0.7\text{ Ma}$ 、细粒斑状正长岩年龄为 $180.5\pm 0.9\text{ Ma}$; Xu et al. (2015) 测得正长岩中锆石 U-Pb 年龄为 $179.7\pm 1.4\text{ Ma}$; 李世勇等 (2021) 测得归来庄金矿床矿化闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄为 $181.5\pm 1.8\text{ Ma}\sim 178.6\pm 2.0\text{ Ma}$ 。可见,归来庄金矿田存在早侏罗世岩浆活动是毋庸置疑。

置疑的。早期对于归来庄矿田成矿年龄的研究,大都是根据成岩时代及地质关系推定,或依据少量蚀变矿物萤石、方解石、黄铁矿同位素年龄数据集中于 188~175 Ma(燕山早期),认为归来庄金矿田的成矿作用属于中国东部早侏罗世岩浆-成矿事件(Chen and Zhao, 1998; Xie et al., 2000; 胡华斌, 2005; 于学峰等, 2009; 朱金, 2014; Xu et al., 2015; 索晓晶等, 2020)。

近年来,作者团队对归来庄矿田与成矿关系密切的细粒二长(正长)斑岩脉和二长斑岩岩床开展系统深化研究,尤为重要的是发现这类岩体锆石 U-

Pb 年龄均集中于 127~124 Ma, 金矿体往往错断(归来庄金矿)或穿插侵入(卓家庄金矿)该期次二长斑岩脉或稳定赋存于该期次二长斑岩岩床顶板附近(磨坊沟金矿);这一新数据暗示归来庄金矿田主成矿期极可能是在 ± 125 Ma 的早白垩世,而非早侏罗世。但该区广泛发育的早侏罗世高钾碱性潜火山杂岩在成矿空间(主要矿体赋存于该类岩体边缘中)和同位素特征(矿石铅同位素与之具有相似特征)等方面与成矿关系非常密切。由此,经初步研究认为,早侏罗世中偏碱性岩浆岩对区域成矿作用的贡献不仅是这类岩体的侵位初步启动了该区的

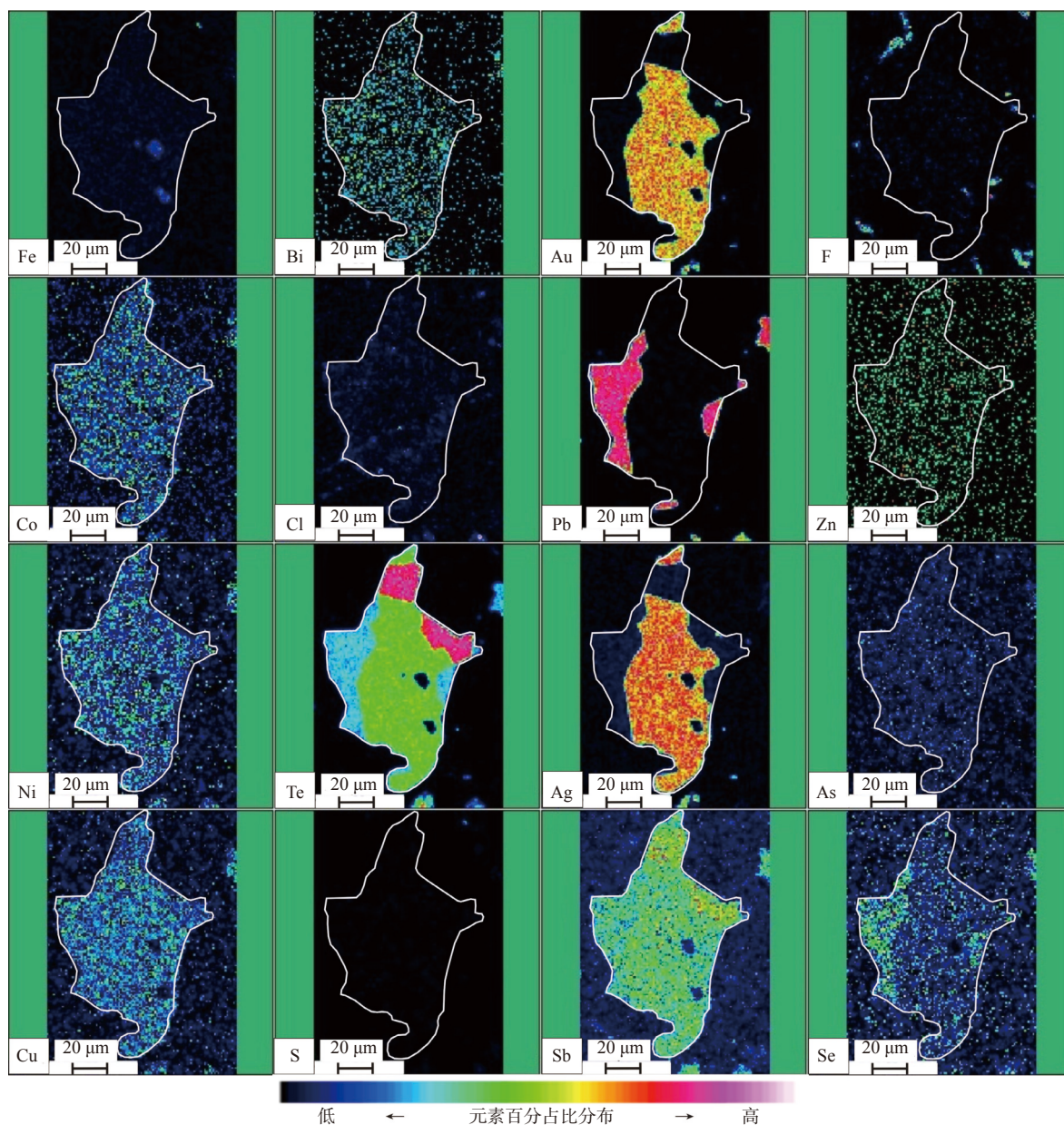
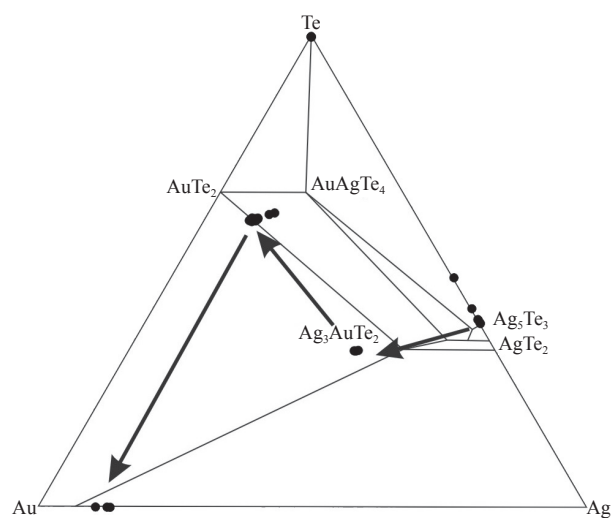


图 7 碲铅矿-斜方碲金矿-自然碲共生体元素分布图

Fig. 7 Element distribution of altaite-krennerite-tellurium symbiont



投点采用矿物元素的质量百分数

图8 Au-Ag-Te三角图解(底图据 Cabri, 1965; Afifi et al., 1988)

Fig. 8 Triangular diagram of Au-Ag-Te (Base diagram after Cabri, 1965; Afifi et al., 1988)

Mass percentage of mineral elements is used in the diagram

金成矿过程,更在于其为早白垩世的碱性岩浆活动提供了母岩或物源,而早白垩世可能是鲁西归来庄金矿田的主要成矿时期。当然,这项工作还需要系统深入地研究不同成矿阶段蚀变矿物特征,优选主成矿阶段代表性蚀变矿物进行年代学研究,方可进一步明确约束成矿过程及成矿时代。

5 鲁西与胶东金成矿差异的构造-岩浆背景

对胶东地区成矿期岩浆活动的研究表明,与金成矿时间接近的郭家岭型花岗岩和伟德山型花岗岩均为壳幔混源花岗岩类,岩浆来源于再循环的大陆地壳物质与富集岩石圈地幔的部分熔融(Goss et al., 2010; Yang et al., 2012; 牛树银等, 2020; 宋英昕等, 2020; 宋明春等, 2020; 胡宝群等, 2021),基性岩浆早于酸性岩浆侵位,花岗岩中来自幔源的微粒闪长质包体含量不超过15%。胶东地区金矿床中发育的中基性脉岩研究表明,类似于岛弧地球化学特征和洋岛玄武岩地球化学特征的两种基性脉岩(Deng et al., 2020),分别为交代地幔源区和富集地幔源区的产物。对胶东金矿的研究表明,成矿流体为壳幔混合来源,以壳源变质流体为主(杨立强等, 2014);也有

学者认为,幔源岩浆是克拉通破坏型金矿床的主要物质/流体来源(朱日祥等, 2015)。对金成矿之前的玲珑型花岗岩的研究表明,其为陆壳重熔型花岗岩,物质来源于华北增厚下地壳的部分熔融(Yang et al., 2012)。可见,胶东金矿成矿流体与同时代的花岗岩类均显示有幔源的印记,金成矿与以壳源为主有幔源参与的花岗岩类侵入岩有关。壳幔岩浆混合产生的热量及流体为金成矿提供了优良的热动力条件和流体来源,岩浆隆升产生的穹窿伸展构造为金成矿提供了有利的运移通道和赋存空间,地壳快速抬升降温为金质沉淀提供了适宜的物理化学条件(Song et al., 2015),金在热隆-伸展构造作用下成矿(宋明春等, 2014)。

鲁西归来庄金矿田广泛分布的铜石杂岩体恰好是壳幔混合的侵入岩,而且岩浆经历了快速的隆升降温,岩体周边发育岩浆穹窿伸展构造,具备与胶东金矿相似的热隆-伸展成矿条件。鲁西地区也发育有白垩纪侵入岩,大部分为幔源的中基性侵入岩类,如济南辉长岩、埠村闪长岩等,这些中基性岩体周边均没有金矿分布;但以壳源为主并有少量幔源参与的侵入岩周边常常有金矿化且和成矿关系密切,甚至部分金矿脉将这类岩脉切断,如卓家庄金矿床。这暗示了这类岩脉与区域金成矿作用密切,说明早白垩世这类壳幔混合、以壳源为主的侵入岩是有利于成矿的。鲁西和胶东的金矿分布共同指示了纯壳源和纯幔源侵入岩是不利于成矿的,且地幔物质的参与对山东省与岩浆岩有关的金矿形成起到重要促进作用。

Sr-Nd 同位素是判别岩浆源区的重要标志,因此文中收集了以上讨论的、与金成矿相关的鲁西铜石杂岩体、早白垩世岩脉、胶东的郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩和中基性脉岩的 Sr-Nd 同位素数据(Chen and Zhao, 1998; 邓晋福等, 2003; Li et al., 2018; 宋英昕等, 2020)。数据显示鲁西和胶东地区的地幔性质不同,鲁西地区主要为 EM1 型富集地幔,胶东地区则主要为 EM2 型富集地幔。综上所述,鲁西与胶东金成矿的显著差异与二者的侵入岩类型不同有关。鲁西地区发育少量侏罗纪的壳幔混合源侵入岩,幔源为 EM1 型富集地幔;胶东地区发育大量早白垩世壳幔混合花岗岩类,幔源为 EM2 型富集地幔。

鲁西地区的 EM1 型地幔是华北克拉通古老的富集岩石圈地幔减压熔融的产物 (Guo et al., 2003; 汤艳杰等, 2011), 而胶东地区的 EM2 型地幔为受俯冲的扬子地壳影响的改造型地幔 (Zhou et al., 2003)。在侏罗纪—白垩纪时期, 太平洋板块向欧亚板块俯冲, 中国东部构造体制由挤压向伸展转换, 引起岩石圈下部拆沉和软流圈上涌, 伴随着岩石圈减薄事件, 并在早白垩纪达到高峰期 (Gao et al., 1998; Deng et al., 2003; Yang et al., 2003; Hou et al., 2007; 张田和张岳桥, 2007; Zhang et al., 2013)。胶东和鲁西地区岩浆活动和金成矿程度的差异是由太平洋板块俯冲过程中两地块构造背景不同引起的 (Guo et al., 2013)。与胶东地区相比, 鲁西地区位于板内相对稳定的环境 (An et al., 2009)。在鲁西地区, 侏罗纪时期处于岩石圈减薄的初期阶段, 产生少量侏罗纪壳幔混合侵入岩, 随后发生金矿化, 早白垩世岩石圈强烈减薄, 产生较多幔源岩浆岩; 在胶东地区, 侏罗纪时岩石圈的厚度较大, 形成了加厚下地壳部分熔融的大规模玲珑型花岗岩 (Zhang et al., 2010; Jiang et al., 2012), 而早白垩纪岩石圈发生大范围减薄, 产生大规模壳幔混合花岗岩, 为金成矿提供了有利条件。综上所述, 侏罗纪—白垩纪古太平洋板块的俯冲引起岩石圈减薄对先存地幔改造程度不同, 是鲁西和胶东地区成岩成矿存在差异的关键因素。

6 成矿模式

鲁西地区金矿与碱性岩有关, 形成于伸展环境 (毛景文等, 2005)。中生代燕山运动早期, 受古太平洋伊泽奈奇 (Izanagi) 板块北西向俯冲挤压作用的影响, 郯庐断裂发生左行扭动并派生出该区北西向、北北西向的主干断裂及次级断裂, 为岩浆活动及热液的运移提供了通道。燕山运动时期, 来自上地幔的含矿热液沿着断裂裂隙上升, 二长—正长质岩浆分异晚期的残余岩浆, 同化了上地壳中的酸性岩石 (泰山岩群), 并活化、吸取了其中的 Au 元素, 使 Au 的丰度值明显提高。强烈的同化作用使残余岩浆极富以水为主的挥发分。因前锋岩浆的凝固, 内部岩浆被屏蔽于冷凝壳内, 形成局部高压封闭环境, 内部压力、温度逐渐升高, 当内压超过外压时, 便发生剧烈的潜火山隐爆作用; 强大的内能使部分

隐爆产物沿构造带运移, 贯入断裂构造形成隐爆侵入角砾岩。隐爆作用产生的热能加热了下渗的大气降水, 大气降水与部分岩浆热液混合, 并与围岩发生水岩交换作用, 使矿源层中的 Au、Ag 等元素活化、迁移, 形成富含矿质及挥发分的潜火山岩浆期后热液。当矿液充填渗滤到构造隐爆侵入角砾岩带而聚集成矿时, 则形成潜火山热液隐爆角砾岩型 (归来庄式) 金矿床; 当矿液充填渗滤到岩体上下盘的下寒武系白云质灰岩和白云岩中沉淀聚集成矿, 即形成镁质碳酸盐岩微细浸染型 (磨坊沟式) 金矿; 当矿液运移到先期形成的含铁矽卡岩接触带上沉淀聚集成矿, 则形成含铁矽卡岩上叠加型金矿。

归来庄金矿田范围内金矿类型多样, 具工业价值的主要有隐爆侵入角砾岩型金矿床 (归来庄式)、镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿床 (磨坊沟式); 另外, 有隐爆崩塌角砾岩型金矿化 (宝古山式)、斑岩型金矿化 (银洞沟式) 及矽卡岩叠加型金矿化 (十字庄式)。多种类型金矿化相伴产出, 受潜火山穹隆的控制, 它们生成于不同深度、不同地质构造部位, 赋存于不同的地质体中, 是在铜石潜火山中低温热液成矿系统中生成的金矿类型组合 (图 9)。

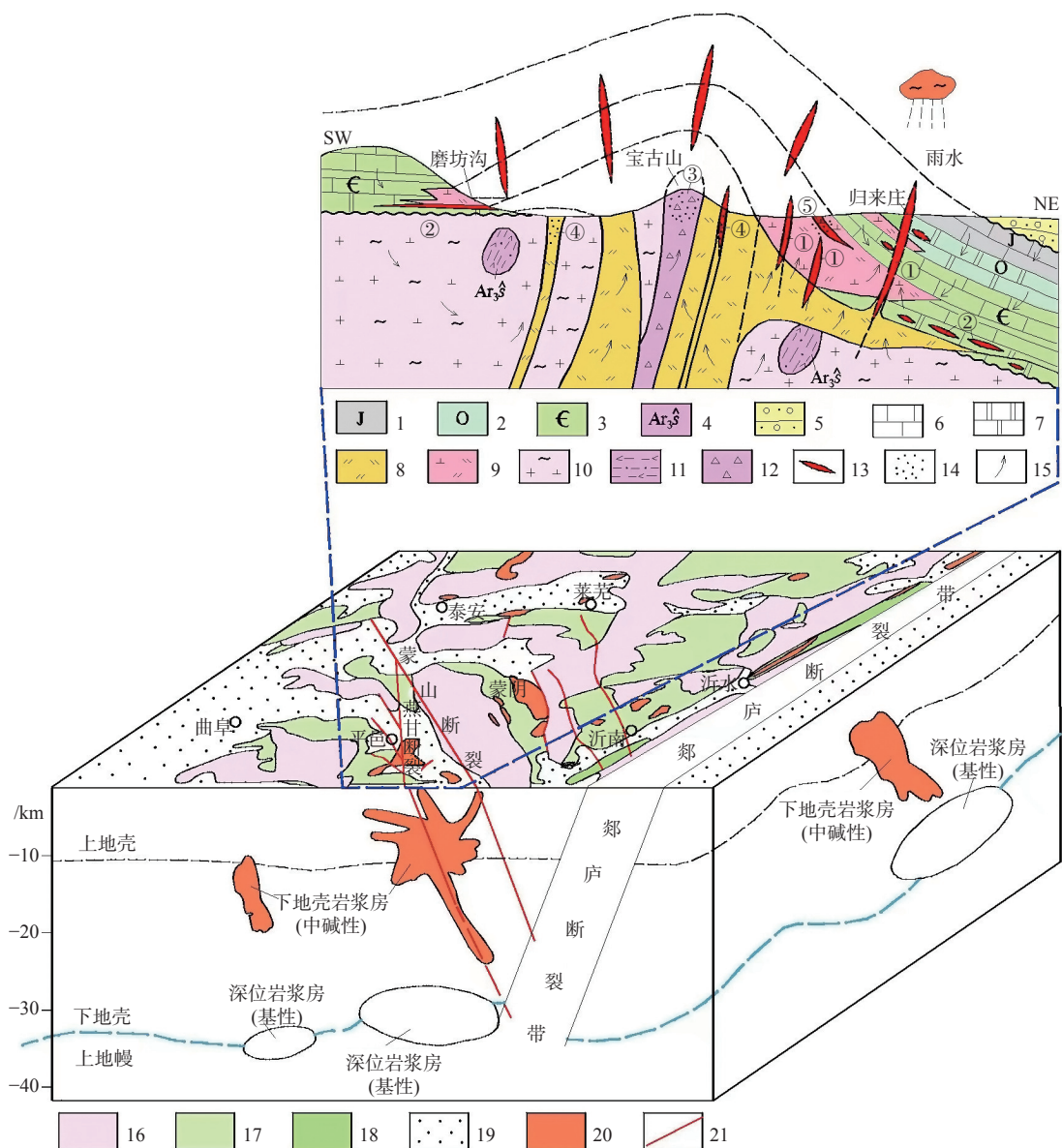
7 结论

(1) 鲁西地区中生代发生了大规模的金成矿事件, 在归来庄金矿田形成了隐爆角砾岩型、镁质碳酸盐岩微细浸染型、斑岩型、矽卡岩型等类型的金矿床, 各类型赋存于铜石杂岩体潜火山穹隆不同深度、不同地质构造部位、不同的地质体中, 构成了潜火山中—低温热液金成矿系统。

(2) 成矿物质来源于壳幔相互作用过程中的岩浆—流体系统; 成矿流体具有低温、低盐度特征, 同位素特征具有多来源性, 以岩浆水和大气降水为主, 并有少量变质水的参与。

(3) 该区金矿具有碲与金超常富集共存的显著特征, 在成矿热液中可能是 Au 与 Te、S 结合生成可搬运的配合物进行运移; 成矿热液具有高 Te 逸度、高卤素元素特征, Te 以类质同象的形式置换 S 是 Te 元素参与 Au 成矿的主要地球化学行为。

(4) 早侏罗世中偏碱性岩浆侵位初步启动了该区的金成矿过程, 为早白垩世的碱性岩浆活动提供了母岩和成矿物质来源, 早白垩世可能是鲁西归来庄金矿田的主要成矿时期。



①—隐爆侵入角砾岩型金矿床 (归来庄式); ②—镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿床 (磨坊沟式); ③—隐爆崩角砾岩型金矿化 (宝古山式); ④—斑岩型金矿化 (银洞沟式); ⑤—矽卡岩叠加型金矿化 (十字庄式)

1—侏罗系; 2—奥陶系; 3—寒武系; 4—新太古代泰山岩群山草峪组; 5—古近纪砂砾岩; 6—石灰岩; 7—白云岩; 8—二长斑岩; 9—二长闪长岩; 10—片麻状花岗闪长岩; 11—黑云角闪变粒岩; 12—隐爆角砾岩; 13—金矿体; 14—金矿化体; 15—热液运移方向; 16—前寒武纪基底; 17—古生代地层; 18—中生代地层; 19—新生代地层; 20—中生代岩浆岩; 21—断层

图 9 归来庄金矿田成矿模式图

Fig. 9 Metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field

1—Jurassic; 2—Ordovician; 3—Cambrian; 4—Shancaoyu formation in the Neoproterozoic Taishan group; 5—Paleogene conglomerate; 6—Limestone; 7—Dolomite; 8—Monzonitic porphyry; 9—Monzonitic dioritic porphyry; 10—Gneissoid granodiorite; 11—Biotite hornblende granulites; 12—Cryptoexplosive breccia; 13—Gold ore body; 14—Gold ore mineralization; 15—Hydrothermal migration direction; 16—Precambrian basement; 17—Palaeozoic strata; 18—Mesozoic strata; 19—Cenozoic strata; 20—Mesozoic magmatic rocks; 21—faults; ①—Cryptoexplosive intrusive breccia type gold deposit (Guilaizhuang type); ②—Magnesium carbonate micro-disseminated gold deposit (Mofanggou type); ③—Cryptoexplosive breccia type gold mineralization (Baogushan type); ④—Porphyry type gold mineralization (Yindonggou type); ⑤—Skarn-stacking type gold mineralization (Shizizhuang type)

(5)鲁西与胶东两个中生代金成矿系统相比,其形成均与壳幔混合侵入岩有关,但岩浆源区有所不同,鲁西地区主要为EM1型富集地幔,胶东地区则主要为EM2型富集地幔。侏罗纪—白垩纪太平洋板块的俯冲引起岩石圈减薄对先存地幔改造程度不同可能是鲁西和胶东地区成岩成矿存在差异的关键因素。

致谢:李四光先生努力拼搏、孜孜以求的爱国情操,为国家建设兢兢业业竭尽全力的奉献精神,处处为我们树立了光辉的榜样,谨以此文献给地质学前辈李四光先生。衷心感谢本刊特邀主编胡建民研究员和审稿专家对本文提出的宝贵意见。

References

- AFIFI A M, KELLY W C, ESSENE E J, 1988. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria[J]. *Economic Geology*, 83(2): 377-394.
- AN M J, FENG M, ZHAO Y, 2009. Destruction of lithosphere within the North China Craton inferred from surface wave tomography[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(8): Q08016.
- BOWELL R J, 1992. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: implications for the supergene behaviour of gold[J]. *Mineralogical Magazine*, 56(385): 545-560.
- BOYLE R W, 1979. The geochemistry of gold and its deposits[R]. Ottawa: Geological Survey of Canada: 1-580.
- CABRI L J, 1965. Phase relations in the Au-Ag-Te systems and their mineralogical significance[J]. *Economic Geology*, 60(8): 1569-1606.
- CHEN Y Q, ZHAO P D, 1998. Zonation in primary halos and geochemical prospecting pattern for the Guilaizhuang gold deposit, Eastern China[J]. *Nonrenewable Resources*, 7(1): 37-44.
- CIOBANU C L, COOK N J, SPRY P G, 2006. Preface – special issue: telluride and selenide minerals in gold deposits – how and why?[J]. *Mineralogy and Petrology*, 87(3): 163-169.
- DENG J, WANG Q F, SANTOSH M, et al., 2020. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: a new model for the Jiaodong gold province, Eastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2): 257-274.
- DENG J F, SU S G, ZHAO H L, et al., 2003. Deep processes of Mesozoic Yanshanian lithosphere thinning in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41-50. (in Chinese with English abstract)
- FAURE G, 1986. Principles of isotope geology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons: 1-589.
- FORNADEL A P, SPRY P G, JACKSON S E, et al., 2014. Methods for the determination of stable Te isotopes of minerals in the system Au-Ag-Te by MC-ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(4): 623-637.
- GAO S, LUO T C, ZHANG B R, et al., 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975.
- GOSS S C, WILDE S A, WU F Y, et al., 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. *Lithos*, 120(3-4): 309-326.
- GUO F, FAN W M, WANG Y J, et al., 2003. Geochemistry of late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, Eastern China: characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China block[J]. *Geochemical Journal*, 37(1): 63-77.
- GUO P, SANTOSH M, LI S R, 2013. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: an integrated geological, geophysical and geochemical perspective[J]. *Gondwana Research*, 24(3-4): 1172-1202.
- HENLEY R W, BERGER B R, 2011. Magmatic-vapor expansion and the formation of high-sulfidation gold deposits: chemical controls on alteration and mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 63-74.
- HOEFS J, 1997. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer: 1-281.
- HOU M L, JIANG Y H, JIANG S Y, et al., 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, East China: implications for crustal thickening to delamination[J]. *Geological Magazine*, 144(4): 619-631.
- HU B Q, GAO H D, WANG Y, et al., 2021. A preliminary study on the Mesozoic massive gold metallogenic mechanism of the deep-large fault coupling with critical water in the Jiaodong area, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 585-595.
- HU H B, MAO J W, LIU D Y, et al., 2004. The SHRIMP age of zircon from Tongshi magmatic complex in western Shandong and its geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 453-460. (in Chinese with English abstract)
- HU H B, 2005. The ore-forming fluid and mineralization of epithermal gold deposits in Pingyi, western Shandong[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- HU H B, MAO J W, NIU S Y, et al., 2006. Geology and geochemistry of telluride-bearing Au deposits in the Pingyi area, western Shandong, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4): 209-240.
- HU Y P, YU X F, LI D P, et al., 2016. Modes of occurrence of telluride in Zhuojiazhuang tellurium-bearing gold deposit within Guilaizhuang gold orefield, Shandong Province[J]. *Mineral Deposits*, 35(3): 475-490. (in Chinese with English abstract)
- JIANG N, CHEN J Z, GUO J H, et al., 2012. In situ zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China Craton: evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ^{18}O depletion[J]. *Lithos*, 142-143: 84-94.
- JIN L Y, SHEN K, 1995. Ore composition and genesis of the Guilaizhuang gold deposit in Pingyi Shandong Province[J]. *Geology of Shandong*, 11(1): 30-40. (in Chinese with English abstract)
- KELLEY K D, ROMBERGER S B, BEATY D W, et al., 1998. Geochemical and geochronological constraints on the genesis of Au-Te deposits at Cripple Creek, Colorado[J]. *Economic Geology*, 93(7): 981-1012.
- KELLEY K D, SPRY P G, 2016. Critical elements in alkaline igneous rock-related epithermal gold deposits[M]//VERPLANCK P L, HITZMAN M W. Reviews in Economic Geology: Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Littleton: Society of Economic Geologists: 195-216.
- KESLER S E, DEDITIUS A P, CHRYSOULIS S, 2007. Geochemistry of Se and Te in Arsenian pyrite: new evidence for the role of Se and Te hydrothermal complexes in Carlin and epithermal-type deposits[J]. *Geological Survey of Finland, Guide*, 53: 57-59.
- LAN T G, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2012. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: implication for crust-mantle interaction and

- post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 140-141: 183-199.
- LI L, LI S R, SANTOSH M, et al., 2018. Early Jurassic decratonic gold metallogenesis in the eastern North China Craton: constraints from S-Pb-C-D-O isotopic systematics and pyrite Rb-Sr geochronology of the Guilaizhuang Te-Au deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 558-568.
- LI S R, SANTOSH M, 2017. Geodynamics of heterogeneous gold mineralization in the North China Craton and its relationship to lithospheric destruction[J]. *Gondwana Research*, 50: 267-292.
- LI S Y, LI J, JIANG L, et al., 2021. Zircon U-Pb dating of diorite porphyrite in the Guilaizhuang gold deposit, western Shandong[J]. *Geology in China*, 48(1): 334-336. (in Chinese with English abstract)
- LI T, 1992. The statistical characteristics of the abundance of chemical elements in the earth's crust[J]. *Geology and Prospecting*, 28(10): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- LI Z S, WU M, HOU M L, et al., 2015. Discovery and genesis of Au_{2-x}Te in Guilaizhuang gold deposit, Shandong[J]. *Geological Review*, 61(S1): 339-340. (in Chinese)
- LIN J Q, TAN D J, JIN Y, 1996. ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of Mesozoic igneous activities in western Shandong[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 22-29. (in Chinese with English abstract)
- LIN J Q, TAN D J, YU X F, et al., 1997. Genesis of Guilaizhuang gold deposit, western Shandong[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press. (in Chinese)
- LIU J J, ZHAI D G, DAI H Z, et al., 2017. Nanoscale characterization of Au₂Te grains from the Sandaowanzi gold deposit, Northeast China[J]. *The Canadian Mineralogist*, 55(2): 181-194.
- MAO J W, WANG Y T, ZHANG Z H, et al., 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(8): 838-851.
- MAO J W, XIE G Q, ZHANG Z H, et al., 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188. (in Chinese with English abstract)
- NIU S Y, SUN A Q, CHEN C, et al., 2020. Multistage evolution of mantle plume and the ore-forming and ore-controlling role of mantle branch structure: A study on mineralization of the Guojiadian mantle branch structure in northwestern Jiaodong[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 656-672. (in Chinese with English abstract)
- OHMOTO H, RYE R O, 1979. Isotopes of sulfur and carbon[M]/BARNES H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons: 509-567.
- POKROVSKI G S, BORISOVA A Y, BYCHKOV A Y, 2013. Speciation and transport of metals and metalloids in geological vapors[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 76(1): 165-218.
- QIAN H D, CHEN W, HUANG J, et al., 2000. Mineralogical paragenetic relationships of Au-Ag tellurides in some gold deposits of China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(2): 220-224. (in Chinese with English abstract)
- QIU J S, WANG D Z, REN Q J, 1994. The first example of tellurium-gold type epithermal deposit in China-the Guilaizhuang gold deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 30(1): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- SAKAI H, 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes[J]. *Geochemical Journal*, 2(1): 29-49.
- SHEN K, NI P, LIN J Q, 2001. Characteristics and evolution of ore fluids in Guilaizhuang gold deposit, southwest Shandong[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- SHEN Y C, ZENG Q D, LIU T B, et al., 2000. Geological features and metallogenetic prognostication of Zhuojiazhuang gold deposit, Pingyi County, Shandong Province[J]. *Geology and Prospecting*, 36(4): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, LI S Z, YI P H, et al., 2014. Classification and metallogenetic theory of the Jiaojia-style gold deposit in Jiaodong peninsula, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 87-104. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, LI S Z, SANTOSH M, et al., 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong peninsula, eastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 612-625.
- SONG M C, LI J, ZHOU J B, et al., 2020. The discovery and tectonic setting of the Early Cretaceous high-Mg diorites in the Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1): 279-296. (in Chinese with English abstract)
- SONG Y X, YU X F, LI D P, et al., 2020. Petrogenesis of the Beijie pluton from the northwestern Jiaodong peninsula: constraints from zircon U-Pb age, petrogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1477-1500. (in Chinese with English abstract)
- SUO X J, LIU S H, LI S R, et al., 2020. Geologic feature and metallogenetic model of Guilaizhuang gold deposit, Shandong[J]. *Global Geology*, 39(3): 544-556. (in Chinese with English abstract)
- TAN D J, LIN J Q, XU W L, et al., 1993. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of Tongshi sub-volcanic complex and the mineralization period of Guilaizhuang gold deposit[J]. *Geology of Shandong*, 9(2): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- TANG Y J, ZHANG H F, YING J F, 2011. Sr-Nd-Li isotopic constraints on the origin of EM1 end-member[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(1): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- TOMBROS S, ST. SEYMOUR K, WILLIAMS-JONES A E, et al., 2007. The genesis of epithermal Au-Ag-Te mineralization, Panormos Bay, Tinos Island, Cyclades, Greece[J]. *Economic Geology*, 102(7): 1269-1294.
- VOUDOURIS P C, MELFOS V, SPRY P G, et al., 2011. Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrotro graben, NE Greece[J]. *Mineralogy and Petrology*, 103(1-4): 79-100.
- XIE J D, QIAN H D, LI Y H, 2000. Geochemical characteristics of tellurium and minerogenic mechanism of the Guilaizhuang tellurium-type gold deposit, Shandong Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15(2): 133-141. (in Chinese with English abstract)
- XU A T, WANG H Y, MA X L, et al., 2018. Discussion on the occurrence law of stratoid carbonate type gold deposit in Guilaizhuang gold deposit[J]. *China Metal Bulletin*(3): 248-249. (in Chinese)
- XU H, YU Y X, WU X K, et al., 2012. Intergrowth texture in Au-Ag-Te minerals from Sandaowanzi gold deposit, Heilongjiang Province: implications for ore-forming environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(21): 2778-2786.
- XU W G, FAN H R, HU F F, et al., 2014. Gold mineralization in the Guilaizhuang deposit, southwestern Shandong Province, China: insights from phase relations among sulfides, tellurides, selenides and oxides[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 276-291.
- XU W G, FAN H R, HU F F, et al., 2015. Geochronology of the Guilaizhuang gold deposit, Luxi Block, eastern North China Craton: constraints from zircon U-Pb and fluorite-calcite Sm-Nd dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 390-399.
- YANG D P, LIU P R, 2001. Characteristics of tellur-seleno minerals in

- Zhuojiazhuang gold deposit of Pingyi and their ore-prospecting significance[J]. *Geology of Shandong*, 17(3-4): 102-106. (in Chinese with English abstract)
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 23(3-4): 125-152.
- YANG K F, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2012. Reactivation of the Archean lower crust: implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of Late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong terrane, the North China Craton[J]. *Lithos*, 146-147: 112-127.
- YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al., 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, Eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447-2467. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, 1996. A new type gold deposit in Shandong: Guilaizhuang[M]/Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources. Collected Works on Geology and Mineral Resources in Shandong Province. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press: 129-140. (in Chinese)
- YU X F, 1996. Geological characteristics and genesis of the Guilaizhuang gold deposit[C]/30th International Geological Congress Proceedings, Volume 2 of 3.
- YU X F, 2001. Ore-forming series and model of Tongshi gold field in Pingyi, Shandong Province[J]. *Geology of Shandong*, 17(3-4): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, HAN Z Z, 2008. Geology of micro-disseminated magnesium carbonate rock type gold deposit in the Tongshi area, western Shandong[J]. *Geology and Prospecting*, 44(4): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, FANG B M, HAN Z Z, 2009. Study on ore-forming series and mineralization of the Guilaizhuang gold field in western Shandong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 55-64. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, 2010. Study on gold mineralization ore-forming rules and prospecting direction of Guilaizhuang gold mine in Pingyi County in Shandong Province[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, SONG M C, LI D P, et al., 2016. Prospecting breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2847-2862. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, LI D P, LI Z S, et al., 2019. Research on geochemical process of Te-Au elements in Guilaizhuang gold deposit of western Shandong[J]. *Mineral Deposits*, 38(2): 277-290. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI D G, 2014. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Sadaowanzi gold-telluride deposit in Heilongjiang Province, NE China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- ZHAI D G, LIU J J, 2014. Gold-telluride-sulfide association in the Sadaowanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions[J]. *Mineralogy and Petrology*, 108(6): 853-871.
- ZHANG G Q, 2017. Study on characteristics and metallogenic mechanism of deep deposits in Guilaizhuang gold deposit in Pingyi County of Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 33(9): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H F, NAKAMURA E, KOBAYASHI K, et al., 2010. Recycled crustal melt injection into lithospheric mantle: implication from cumulative composite and pyroxenite xenoliths[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 99(6): 1167-1186.
- ZHANG H F, ZHU R X, SANTOSH M, et al., 2013. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: implications for craton destruction[J]. *Gondwana Research*, 23(1): 95-107.
- ZHANG T, ZHANG Y Q, 2007. Geochronological sequence of Mesozoic intrusive magmatism in Jiaodong Peninsula and its tectonic constraints[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 323-336. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y M, ZHANG G Q, CHEN K M, et al., 2018. Prospecting potential in the depth and periphery of Guilaizhuang gold deposit in western Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 33-42. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z C, LI Z N, 1997. Physicochemical conditions for the formation of tellurides rich gold deposits as exemplified by the Shuiquanguo gold orefield[J]. *Mineral Deposits*, 16(1): 41-52. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHEN Y Q, 1998. The main way of geo-anomaly location of ore body[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 111-114. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG Y F, CHEN J F, 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: China Science Publishing House: 1-316. (in Chinese)
- ZHOU X H, YANG J H, ZHANG L C, 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(S1): 14-25.
- ZHU D P, ZHANG G A, 1998. The geological and stress field characteristics of the ore-controlling tectonics of Gui-Lai-Zhuang gold deposit, Pingyi County, Shandong Province[J]. *Gold*, 19(5): 13-15. (in Chinese with English abstract)
- ZHU J, 2014. Geochronology, metallogenic model and ore prospecting of the Guilaizhuang gold deposit, west of Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- ZHU R X, FAN H R, LI J W, et al., 2015. Decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.

附中文参考文献

- 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等. 2003 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[J]. *地学前缘*, 2003(03): 41-50.
- 胡宝群, 高海东, 王运, 等. 2021. 胶东中生代巨量金矿堆积的深大断裂-临界水耦合成矿机制新探[J]. *地质力学学报*, 27(4): 585-585.
- 胡华斌, 毛景文, 刘敦一, 等. 2004. 鲁西铜石岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地学前缘*, 11(2): 453-460.
- 胡华斌. 2005. 鲁西平邑地区浅成低温热液金矿床成矿流体及成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 胡勇平, 于学峰, 李大鹏, 等. 2016. 山东省归来庄金矿田卓家庄含碲金矿床的碲化物赋存状态研究[J]. *矿床地质*, 35(3): 475-490.
- 金隆裕, 沈昆. 1995. 山东省平邑县归来庄金矿物质组分及矿床成因分析[J]. *山东地质*, 11(1): 30-40.
- 李世勇, 李杰, 蒋雷, 等. 2021. 鲁西归来庄金矿床矿化闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄[J]. *中国地质*, 48(1): 334-336.
- 黎彤. 1992. 地壳元素丰度的若干统计特征[J]. *地质与勘探*, 28(10): 1-7.
- 李增胜, 吴敏, 侯明兰, 等. 2015. 山东归来庄金矿床 $Au_{2-3}Te$ 的发现及其成因探讨[J]. *地质论评*, 61(S1): 339-340.

- 林景仟,谭东娟,金桦,1996.鲁西地区中生代火成活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J].岩石矿物学杂志,15(3):22-29.
- 林景仟,谭东娟,于学峰,等,1997.鲁西归来庄金矿成因[M].济南:山东科学技术出版社.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等,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[J].岩石学报,21(1):169-188.
- 牛树银,孙爱群,陈超,等,2020.地幔热柱多级演化及其幔枝构造成矿控矿:以胶西北郭家店幔枝构造为例[J].地质力学学报,26(5):656-672.
- 钱汉东,陈武,黄瑾,等,2000.我国某些金矿床中金银硫化物矿物的共生关系[J].高校地质学报,6(2):220-224.
- 邱检生,王德滋,任启江,等,1994.我国首例碲金型浅成低温热液金矿床:山东平邑归来庄金矿床[J].地质与勘探,30(1):7-12.
- 沈昆,倪培,林景仟,2001.鲁西南归来庄金矿成矿流体特征和演化[J].地质科学,36(1):1-13.
- 沈远超,曾庆栋,刘铁兵,等,2000.山东平邑卓家庄金矿地质特征及成矿预测[J].地质与勘探,36(4):20-23.
- 宋明春,李三忠,伊丕厚,等,2014.中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论[J].吉林大学学报(地球科学版),44(1):87-104.
- 宋明春,李杰,周建波,等,2020.胶东早白垩世高镁闪长岩类的发现及其构造背景[J].岩石学报,36(1):279-296.
- 宋英听,于学峰,李大鹏,等,2020.胶东西北部北截岩体岩石成因:锆石U-Pb年龄、岩石地球化学与Sr-Nd-Pb同位素制约[J].岩石学报,36(5):1477-1500.
- 索晓晶,刘顺好,李胜荣,等,2020.山东归来庄金矿床地质特征及成矿模型[J].世界地质,39(3):544-556.
- 谭东娟,林景仟,许文良,等,1993.铜石杂岩体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,兼论归来庄金矿成矿时代[J].山东地质,9(2):68-72.
- 汤艳杰,张宏福,英基丰,2011.地幔中EMI端元成因的锂同位素制约[J].矿物岩石地球化学通报,30(1):11-17.
- 谢家东,钱汉东,李永徽,2000.山东省平邑归来庄碲型金矿床碲元素地球化学特征及成矿机制探讨[J].地质找矿论丛,2000(02):133-141.
- 徐安泰,王洪洋,马小丽,等,2018.归来庄金矿床似层状碳酸盐岩型金矿体赋存规律探讨[J].中国金属通报,(3):248-249.
- 杨德平,刘鹏瑞,2001.山东平邑卓家庄金矿中的碲硒矿物特征[J].山东地质,17(3-4):102-106.
- 杨立强,邓军,王中亮,等,2014.胶东中生代金成矿系统[J].岩石学报,30(9):2447-2467.
- 于学峰,1996.山东金矿新类型:归来庄金矿床[M]/山东地质矿产局.山东地质矿产研究文集.济南:山东科学技术出版社:129-140.
- 于学峰,2001.山东平邑铜石金矿田成矿系列及成矿模式[J].山东地质,17(3-4):59-64.
- 于学峰,韩作振,2008.鲁西铜石地区镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿成矿地质特征[J].地质与勘探,44(4):39-44.
- 于学峰,方宝明,韩作振,2009.鲁西归来庄金矿田成矿系列及成矿作用研究[J].地质学报,83(1):55-64.
- 于学峰,2010.山东平邑归来庄金矿成矿作用成矿规律与找矿方向研究[D].青岛:山东科技大学.
- 于学峰,宋明春,李大鹏,等,2016.山东金矿找矿突破进展与前景[J].地质学报,90(10):2847-2862.
- 于学峰,李大鹏,李增胜,等,2019.鲁西归来庄金矿田碲金元素地球化学过程研究[J].矿床地质,38(2):277-290.
- 翟德高,2014.黑龙江省三道湾子碲化物型金矿床地质地球化学特征与成矿机制[D].北京:中国地质大学(北京).
- 张国权,2017.山东省平邑归来庄金矿深部矿床特征及成矿规律研究[J].山东国土资源,33(9):7-13.
- 张田,张岳桥,2007.胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J].高校地质学报,13(2):323-336.
- 张英梅,张国权,陈昆明,等,2018.鲁西归来庄金矿床深部外围找矿前景[J].山东国土资源,34(10):33-42.
- 张招崇,李兆鼎,1997.富碲化物型金矿形成的物理化学条件:以水泉沟金矿田为例[J].矿床地质,16(1):41-52.
- 赵鹏大,陈永清,1998.地质异常矿体定位的基本途径[J].地球科学——中国地质大学学报,23(2):111-114.
- 郑永飞,陈江峰,2000.稳定同位素地球化学[M].北京:科学出版社:1-316.
- 祝德平,张广安,1998.平邑归来庄金矿床控矿构造地质及其应力场特征[J].黄金,19(5):13-15.
- 朱金,2014.山东省平邑县归来庄隐爆角砾岩型金矿成矿年代、成因模式与找矿研究[D].北京:中国地质大学(北京).
- 朱日祥,范宏瑞,李建威,等,2015.克拉通破坏型金矿床[J].中国科学:地球科学,45(8):1153-1168.

获奖者简历:

于学峰,山东省地质科学研究院二级研究员、山东科技大学产业教授。2021年获得第17次李四光地质科学奖野外奖。现任山东省地质科学研究院党委书记、理事长,兼任中国地质学会理事、山东地质学会理事长、山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室主任、自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室主任。长期从事矿产资源勘查研究和管理工作的。参加工作近40年来,先后主持60余项国家和省部级重大项目,累计发表论文近100篇(其中第一/通讯作者论文36篇、SCI和EI 20篇),出版专著12部(第一作者专著4部),获省部级科技一等奖9项(6R1、1R2、2R3)、二等奖10项(6R1、1R2、3R5),全国十大地质找矿成果2项(1R1、1R2)、全国十大地质科技进展2项(2R1),为我国金矿深部探测和山东金、铁、煤等矿产找矿突破做出重要贡献。先后获国务院政府特殊津贴、山东省有突出贡献的中青年专家、全国优秀科技工作者、国土资源部首批科技领军人才、山东省泰山学者特聘专家、山东省智库高端人才首席专家、山东五一劳动奖章、李四光地质科学奖、全国五一劳动奖章等荣誉。

