

胶东型金矿成矿系列及找矿案例

宋明春^{1, 2, 3)}, 胡文萱¹⁾, 李杰¹⁾, 丁正江²⁾, 宋英昕⁴⁾, 彭永和⁵⁾

1)河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北地质大学地球科学学院, 河北石家庄 050031;

2)山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东威海 264209;

3)山东省物化探勘查院, 山东济南 250013; 4)山东省地质科学研究所, 山东济南 250013;

5)山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276800

摘要: 胶东型金矿是不同于国际已知类型的独特金矿类型, 深入研究其成矿系列有助于深化理解矿床成因和指导找矿。本文综合分析了胶东金(银)、有色金属矿床的类型、空间分布、形成时间和成因, 划分了成矿系列, 列举了应用成矿系列指导找矿的案例。将胶东地区早白垩世与壳幔混合岩浆活动有关的金矿床、金及多金属矿床和有色金属矿床划归为胶东型金矿成矿系列, 进一步划分了 Au(Ag)矿床成矿亚系列(125~115 Ma)和 Cu-Pb-Zn-Mo 矿床成矿亚系列(118~110 Ma), 认为两个成矿亚系列为连续发生、且有时间重叠的成矿事件。成矿系列理论有效指导了胶东地区的找矿工作, 根据石英脉型金矿和蚀变岩型金矿的成因联系在玲珑金矿田发现了台上一水旺庄巨型金矿床, 受胶莱盆地东北缘金矿床类型的启示发现了辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿, 在荣成有色金属成矿小区外围发现了大邓格金多金属矿床, 根据五莲七宝山金铜矿床探明了敞沟—杏山峪银铅锌矿床。

关键词: 成矿系列; 胶东型金矿床; 单金属矿床; 金及多金属矿床; 有色金属矿床; 找矿案例

中图分类号: P618.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.110201

Metallogenic Series of Jiaodong Type Gold Deposits and Its Prospecting Cases

SONG Ming-chun^{1, 2, 3)}, HU Wen-xuan¹⁾, LI Jie¹⁾, DING Zheng-jiang²⁾, SONG Ying-xin⁴⁾, PENG Yong-he⁵⁾

1) Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031;

2) No.6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai, Shandong 264209;

3) Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan, Shandong 250013;

4) Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan, Shandong 250013;

5) No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Rizhao, Shandong 276800

Abstract: Jiaodong type gold deposits are unique type of gold deposits different from the internationally known type. Further study of the metallogenic series is helpful to understand the genesis of the deposits and guide the prospecting. This paper comprehensively analyzes the types, spatial distribution, formation time and genesis of Jiaodong gold (silver) and nonferrous metal deposits, divides the metallogenic series, and enumerates the cases of applying the metallogenic series to guide prospecting. The gold-only deposits, gold-plus deposits and nonferrous metal deposits related to crust mantle mixed magmatism in the Early Cretaceous in Jiaodong area are classified as Jiaodong type gold metallogenic series, and further divided into Au (Ag) deposits metallogenic sub series (125–115 Ma) and Cu-Pb-Zn-Mo deposits metallogenic sub series (118–110 Ma). It is believed that the two metallogenic sub series are continuous and time overlapping metallogenic events. The metallogenic series theory has effectively guided the prospecting work in Jiaodong area. According to the genetic relationship between quartz vein type gold deposits and altered rock type gold deposits, Taishang-Shuiwangzhuang giant gold deposit was found in Linglong gold field. Liaoshang pyrite carbonate vein type gold deposit was found inspired by the

本文由国家自然科学基金 NSFC-山东省联合基金项目(编号: U2006201)、河北省自然科学基金面上项目(编号: D2020403061)和河北省高等学校科学技术研究重点项目(编号: ZD2021018)联合资助。

收稿日期: 2022-09-21; 改回日期: 2022-10-25; 网络首发日期: 2022-11-03。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 宋明春, 男, 1963 年生。博士, 教授。长期从事矿产勘查、区域地质调查和相关研究, 近年来重点研究胶东深部金矿找矿有关理论技术问题。通讯地址: 050031, 河北省石家庄市槐安东路 136 号。E-mail: mingchuns@163.com。

type of gold deposits in the northeast margin of Jiaolai basin. Dadengge gold polymetallic deposit was found outside Rongcheng nonferrous metal metallogenic district. And Changgou-Xingshanyu silver, lead, zinc deposit was proved according to Qibaoshan gold-copper deposit.

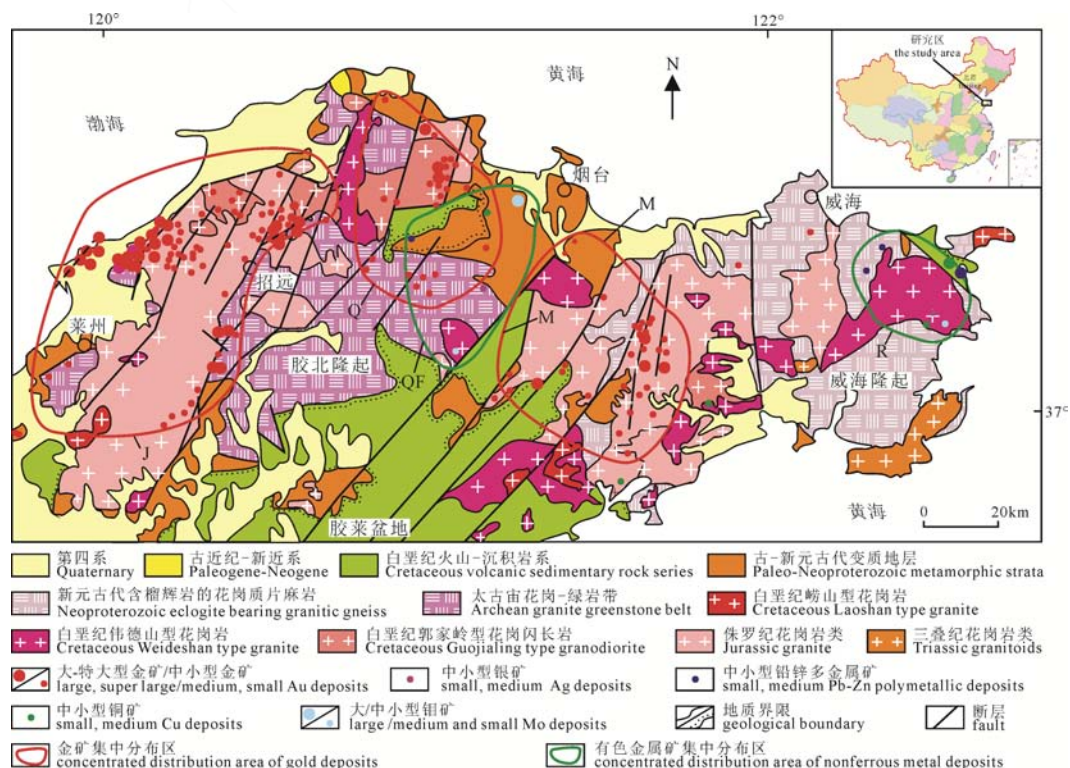
Key words: metallogenic series; Jiaodong type gold deposit; gold-only deposits; gold-plus deposits; nonferrous metal deposit; prospecting case

胶东型金矿是全球唯一产于早前寒武纪变质基底中的中生代金矿床,是不同于国际已知类型的独特金矿类型,因其独具特色的成矿特征和巨大的金储量得到广泛关注和大量研究(杨立强等, 2014; Zhu et al., 2015; Li et al., 2015; Song et al., 2015; 范宏瑞等, 2016; Deng et al., 2020a, 2021a, b; 宋明春等, 2020a, 2022)。除金(银)矿床外,胶东地区还有少量铜、铅锌、钼(钨)等有色金属矿床。有色金属矿主要分布于胶东中—东部的早白垩世花岗岩体周边和内部,而金矿主要分布于胶东中—西部侏罗纪花岗岩体周边和内部。初步研究表明,有色金属矿的成因与早白垩世岩浆活动密切相关(丁正江等, 2011, 2013; 李杰, 2012; 李杰等, 2015),形成时代与早白垩世花岗岩和金矿的同位素年龄相近(李杰等, 2013; Cheng et al., 2017; Song et al., 2017; Li et al., 2021),有色金属矿与金矿构成同一成矿系列(丁正江等, 2015; 宋明春等, 2015)。近年来在对成矿系列划分和研究的基础上,胶东地区

新发现和探明了多个金和有色金属矿床。实践证明,加强成矿系列研究不但有助于深化理解胶东型金矿的成因和成矿机制,而且能够指导发现新的矿床。本文在综述胶东金(银)、有色金属矿类型、组合、空间分布、形成时间和成因的基础上,提出了胶东型金矿成矿系列划分方案,通过典型矿床案例分析阐明了成矿系列研究对找矿的作用,期望为进一步推动胶东型金矿成矿研究和找矿实践提供有益借鉴。

1 区域地质背景

胶东位于华北陆块东南边缘和大别—苏鲁造山带东北段,前者由胶北隆起和胶莱盆地组成,后者在研究区内称为威海隆起。胶东地区是一个前寒武纪结晶基底形成后,经历长期稳定发展,于中生代重新活化的地质区。主要由前寒武纪变质岩系和中生代花岗岩类侵入岩组成,少量中—新生代火山—沉积岩系(图 1)。



J—胶西北金成矿小区; Q—栖霞—福山金成矿小区; M—牟乳金成矿小区; QF—栖霞—福山有色金属成矿小区;
R—荣成有色金属成矿小区。

J—Northwestern Jiaodong metallogenic district of gold deposits; Q—Qixia—Fushan metallogenic district of gold deposits;
M—Muping—Rushan mineralization district of gold deposits; QF—Qixia—Fushan metallogenic district of nonferrous metal deposits;
R—Rongcheng metallogenic district of nonferrous metal deposits.

图 1 胶东地区区域地质和金及有色金属分布略图(据宋明春等, 2015)

Fig. 1 Regional geology and distribution of gold and nonferrous deposits in Jiaodong area (from SONG et al., 2015)

胶北隆起前寒武纪变质岩系主要为太古宙花岗-绿岩带(包括中太古代唐家庄岩群、新太古代胶东岩群、新太古代 TTG 质花岗片麻岩套和中太古代—新太古代基性-超基性岩组合)和古—新元古代变质地层(包括古元古代以高铝片岩、大理岩、含石墨变粒岩为代表的荆山群、粉子山群和中元古代以变质碎屑岩为主的芝罘群及新元古代浅变质的蓬莱群)。威海隆起结晶基底岩系主要由经历了超高压变质作用的新元古代花岗质片麻岩组成,少量古元古代变质表壳岩(胶南表壳岩)和中元古代基性-超基性岩组合,含透镜状分布的超高压榴辉岩。

中生代花岗质侵入岩在胶北隆起和威海隆起广泛发育,可分为三叠纪宁津所型正长岩和槎山型正长花岗岩,侏罗纪玲珑型花岗岩、文登型花岗岩和垛崮山型花岗闪长岩,白垩纪郭家岭型花岗闪长岩、伟德山型花岗岩、崂山型花岗岩和柳林庄型闪长岩,另有较多白垩纪基性、中性和酸性脉岩。

中生代火山-沉积岩系是胶莱盆地的主要组成物质,在隆起区的小型盆地中也有分布,由河湖相碎屑岩系和基性-中性-酸性火山岩组成(莱阳群、青山群、王氏群)。

新生代地层除个别小型盆地中分布有古近纪沉积地层(五图群)、局部地区有零星的古近纪玄武岩(临朐群)外,大部分为沿沟谷、洼地、山坡、海边分布的第四纪松散沉积物,西北部蓬莱一带有少量第四纪玄武岩(史家沟组)。

胶东地区断裂构造发育,最发育的一组断裂是 NE—NNE 走向断裂,其次为近 EW—NEE 走向断裂。NE—NNE 向断裂发育的条数多、密度大,是胶东金矿的主要控矿构造。EW 向断裂连续性较差,在地表比较零星。华北陆块(胶北隆起)和大别—苏鲁造山带(威海隆起)的结合带被 NE 向断裂和中生代花岗岩叠加,大致位于牟平—即墨断裂带一线附近。

2. 矿床成矿系列

2.1 矿床类型

胶东地区以盛产金矿而闻名,是世界第三大金成矿区。该区也有少量铜、铅、锌、钼等有色金属矿床,金与有色金属具有密切的时、空分布关系(丁正江等, 2013, 2015; 李杰等, 2015; 宋明春等, 2015; Song et al., 2017)。按照矿床中有开采利用价值的金属元素的共生组合关系,将胶东金及有色金属矿床分为单金矿床、金及多金属矿床和有色金属矿床三种类型。

2.1.1 单金矿床

是主要开发利用 Au 元素的矿床,很多矿床中有可供开发利用的伴生 Ag,矿床中一般含有一定

量的 Cu、Pb、Zn 等有色金属的矿物,但不具开发利用价值。目前,胶东地区已探明金资源储量近 6 000 t,其中中型以上金矿床 100 余处,超大型金矿床(单矿床金资源量大于 100 t)的资源量之和占总量的 65%。2011 年国家找矿突破战略行动以来,胶东地区新增 1 000~2 000 m 深度的深部金资源量约 2 958 t,新探明莱州三山岛北部海域、莱州三山岛西岭—新立、莱州纱岭和招远水旺庄等 4 个金资源量均超过 200 t 的超大型金矿,形成了以三山岛、焦家和玲珑为代表的 3 个千吨级金矿田(宋明春等, 2022),并且在三山岛和焦家地区的多个以往认为独立分布的浅部金矿床向深部连为一体成为同一个矿床,二者资源储量均超过 1 000 t,成为我国仅有的 2 个千吨级超巨型金矿床(宋明春等, 2019),实现了我国金矿找矿的历史性突破。

金矿床集中分布于胶西北(莱州—招远)、栖霞福(栖霞—蓬莱—福山)和牟乳(牟平—乳山)3 个成矿小区(图 1),多沿 6 条 NE 至近 SN 走向的成矿带(三山岛、焦家、招平、栖霞—大柳行、桃村和牟乳等成矿带)产出,包括三山岛、焦家、玲珑、鞍山、灵北、大庄子、大尹格庄、旧店、大柳行、栖霞、邓格庄、莱山和蓬家夼等 13 处金矿田(宋明春等, 2014)。

莱州三山岛超巨型金矿床是单金矿床的代表性矿床之一。该矿床为由新立、三山岛、西岭和海域矿段组成的金资源量超过 1 200 t 的超巨型矿床(Song et al., 2021a),其海域部分的金资源量为 470 t。矿床赋存于三山岛断裂带中,断裂浅部的上盘主要为早前寒武纪胶东杂岩,下盘为侏罗纪玲珑型花岗岩和白垩纪郭家岭型花岗岩,断裂向深部切入玲珑型花岗岩中。基本矿石类型为玲珑型花岗岩破碎蚀变形成的黄铁绢英岩。矿石的主要金属矿物为黄铁矿,次要的有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂、磁黄铁矿、褐铁矿、磁铁矿等;主要非金属矿物为石英、绢云母、长石,次之为碳酸盐类矿物(方解石、白云石、菱铁矿等)。金矿物主要为银金矿,次要的为自然金、金银矿。黄铁矿为主要载金矿物,次为方铅矿和石英。矿石中主要有用元素为 Au,伴生有益元素为 Ag、S、Cu、Pb、Zn 等,Ag、S 和 Pb 达到综合利用要求,Cu 和 Zn 含量达不到综合利用要求。

2.1.2 金及多金属矿床

是 Au 与 Cu、Pb、Zn 等元素共、伴生的矿床,Au 与多种金属元素综合勘查、综合开发。这种类型的矿床在胶东地区比较少,已探明的具有工业价值的矿床主要有五莲七宝山铜金矿和威海大邓格金多金属矿床。

五莲七宝山铜金矿床,位于胶莱盆地南缘潜火山穹隆内的石英闪长玢岩-花岗闪长斑岩隐爆角砾岩筒中,为隐爆角砾岩型矿床,为中型铜金矿床,伴生有银和硫资源,矿床浅部(-500 m 标高以浅)以铜矿化为主,深部金矿化增强。矿石工业类型有铜矿石、铜金矿石和金矿石。矿石矿物主要为黄铜矿、自然金、银金矿和镜铁矿,次要为黝铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、方铅矿、白铅矿、磁黄铁矿、褐铁矿、软锰矿、菱锰矿等,脉石矿物有石英、重晶石、方解石、绢云母、绿泥石等。矿石中主要有益组分为Cu、Au, 另外 Ag 和 S 含量达到伴生组分综合利用的要求,Pb、Zn 含量较低,达不到综合利用要求(邱德同和孔令刚, 1986; 宋明春和徐军祥, 2018)。

大邓格金多金属矿床是目前胶东发现的唯一一个以金为主的银、铅锌多金属矿床,矿床特征见后述。

2.1.3 有色金属矿床

胶东的有色金属矿床主要有铜矿床、铅锌矿床和钼(钨)矿床,已探明小型及以上矿产地 10 余处。代表性矿床特征见表 1。矿床的赋矿围岩主要有两大类,即前寒武纪变质岩(变质地层、花岗质片麻岩)和白垩纪火成岩(以花岗岩类为主,也有中基性火山岩和潜火山岩)。赋矿构造位置主要有三种,即侵

入接触带、断裂构造带、层间滑动带。围岩蚀变主要有四类,即矽卡岩化、硅化、钾化、绢云母化(宋明春等, 2015)。矿床类型主要为热液脉型,福山王家庄铜矿被认为是似层状热液充填交代型矿床,栖霞香乔铅锌铜矿为矽卡岩型矿床,栖霞尚家庄钼矿被认为是斑岩型矿床(孔庆友等, 2006)。

2.2 矿床时空分布及成因关联

2.2.1 金与有色金属矿在空间分布上紧密伴生

如前所述,胶东的单金矿床中一般均伴生有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属矿物,并见有金与有色金属共、伴生矿床,指示了金矿物与有色金属矿物具有密切的共生组合关系。

区域上金矿床主要分布于胶东的西部和中部,集中于胶西北、栖霞福、牟乳三个成矿小区(图 1)。矿床数量和资源量自西向东明显减少:胶西北成矿小区已探明的金资源储量占胶东总量的 90%以上,胶东地区的特大型金矿均分布于该区(宋英昕等, 2017)。矿化类型以蚀变岩型(焦家式)和石英脉型(玲珑式)为主。栖霞福成矿小区中矿床数量较多,但规模一般不大,仅张家、台前、马家窑、杜家崖、黑岚沟等为数不多的几个矿床达到或接近中-大型矿床。矿化类型以石英脉型为主,少量层间滑动构造带型。牟乳成矿小区位于华北陆块(胶北隆起)与

表 1 胶东代表性有色金属矿床主要特征
Table 1 Main characteristics of representative nonferrous metal deposits in Jiaodong

矿床名称	矿体特征	赋矿构造、地质体	矿石类型	矿物组合和有益组分
福山王家庄铜矿	矿体呈层状、似层状、透镜状, 倾角一般 10°~30°, 局部受褶皱影响倾角较陡。矿体长、宽几十至几百米, 厚 1~5 m。Cu 平均品位 0.85%, 伴生 Zn 1.02%, 伴生 Ag 13.89 g/t	矿体受控于变质地层中的 NNW 走向顺层滑动构造。矿体围岩是古元古代粉子山群的大理岩、变粒岩、片岩、透闪岩	大理岩型、透闪岩型、闪长岩型、片岩型矿石	矿石矿物主要有黄铜矿、铁闪锌矿、黄铁矿, 其次为磁黄铁矿、白铁矿, 偶见方铅矿、毒砂, 稀少矿物有辉银矿、胶黄铁矿、碲铅矿; 脉石矿物主要有石英、绢云母、方解石、透闪石、斜长石、白云母、黑云母、石墨等。有益组分以铜为主, 局部锌品位较高
栖霞香乔铅锌铜矿	矿体形态复杂, 呈透镜状、脉状、囊状、似层状, 倾角 30°~60°。矿体长及延深多为几十米至百余米, 主矿体长达 1 054 m、延深 200~300 m、厚 10~44 m。主要有益组分品位: Pb 1.14%~1.88%、Zn 1.45%~2.52%、Cu 0.52%、S 12.17%。矿床自上而下存在垂直分带现象: 浅部为铅锌矿体、中部为铜硫矿、深部出现铜钼矿化	矿体赋存于白垩纪香乔岩体(伟德山型花岗岩)与新元古代蓬莱群香乔组灰岩接触带	矽卡岩型铅锌矿石, 矽卡岩型黄铁矿-黄铜矿矿石, 细脉浸染状矽卡岩矿石	铅锌矿石主要矿石矿物为方铅矿、闪锌矿, 其次为黄铁矿、黄铜矿, 脉石矿物主要为石榴子石、透辉石和绿泥石; 黄铜矿石主要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿, 其次为闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、辉钼矿, 脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、长石、石英、黑云母等。矿石有益组分为 Pb、Zn、Cu、S, 伴生 Mo、Sn、Sb、Co 等
栖霞尚家庄钼矿	矿体呈透镜状、似层状、饼状, 倾角 13°~35°。矿体长 110~1 010 m, 斜深 160~1 050 m, 厚 5~60 m。工业矿体平均品位: Mo 0.101%, 伴生 Cu 0.04%	矿体赋存于白垩纪牙山岩体(伟德山型花岗岩)内的 NNW 走向密集节理、裂隙带中, 以缓倾裂隙为主, 也有陡倾赋矿裂隙。围岩是斑状花岗闪长岩	细脉-网脉状花岗闪长岩型、细脉浸染状花岗闪长岩型和网脉浸染状花岗闪长质碎裂岩型矿石	主要矿石矿物有辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿, 其次有磁黄铁矿、闪锌矿, 少量黝铜矿、方铅矿、白铁矿等, 脉石矿物主要为长石、石英, 次为黑云母、角闪石、绢云母, 少量方解石、绿泥石等; 主要有益组分为 Mo, 伴生有益组分 Cu、Au、Re

大别—苏鲁造山带(威海隆起)的接合部位, 构造复杂, 金矿化类型较多, 以石英脉型为主, 也有破碎带蚀变岩型、蚀变砾岩型及断裂角砾岩型等。在胶东东部威海一带金矿的数量很少, 且规模小, 常与有色金属矿伴生或共生产出。

有色金属矿床主要分布于胶东的中部和东部, 包括栖霞—福山和荣成两个成矿小区(图 1)。栖霞—福山有色金属成矿小区西部与栖霞福山成矿小区的东部重叠, 区内的有色金属矿床规模相对较大, 主要有斑岩-矽卡岩型钼、钨、铅锌矿和似层状热液充填交代型铜矿。荣成成矿小区中的矿床规模较小、分布分散, 主要为脉状铅锌矿、多金属矿, 也有小规模斑岩型钼矿、脉状银矿。

2.2.2 金与有色金属矿在成矿时间上非常接近

关于胶东金矿的成矿时代, 前人进行过很多研究。虽然仍有多期成矿和长期成矿的认识, 但多数人认为矿床形成于(120±5) Ma(杨立强等, 2014; Zhu et al., 2015; 范宏瑞等, 2016; 宋明春等, 2018a, 2020a)。近 10 年来高精度测年技术的应用将主成矿期时间范围进一步缩短, 22 个样品的白云母(绢云母)⁴⁰Ar-³⁹Ar 法年龄范围为 130.0~104.8 Ma(Yang et al., 2014, 2017; Cai et al., 2018; 薛建玲等, 2019; Yuan et al., 2019; Sai et al., 2020; Zhang et al., 2020), 除去 1 个明显偏高的年龄和 3 个较低的年龄, 其余样品的年龄范围为 122.8~119.1 Ma; 9 个样品的热液独居石原位 U-Pb 年龄范围为 122.1~114.2 Ma(Ma et al., 2017; Yang et al., 2018; Deng et al., 2020b; Feng et al., 2020; 唐文龙等, 2021), 除去 1 个明显偏小的年龄, 其余的年龄范围为 122.1~119.1 Ma。据此, 胶东金矿主成矿时间被限定于(120±2) Ma。

有色金属矿比较可靠的同位素测试数据来自于辉钼矿的 Re-Os 同位素测年, 除福山邢家山钼钨矿床测得等时线年龄为 (157.6±3.9) Ma 和 (158.7±2.06) Ma(刘善宝等, 2011; 丁正江等, 2012) 外, 栖霞尚家庄钼矿年龄为 (117.1±1.4) Ma、(115.5±1.6) Ma、(116.1±1.6) Ma、(117.6±1.6) Ma(李杰等, 2013; Cheng et al., 2017), 牟平孔辛头钼矿年龄为 (117±1) Ma、(118.4±3.2) Ma(黄铜矿 Re-Os; 李超等, 2016), 招远南宿岩体中辉钼矿年龄为 (117.8±7.0) Ma(柳振江等, 2010), 牟平院格庄岩体辉钼矿年龄为 (117.8±5.7) Ma(朱保霖等, 2016), 伟德山岩体中崮庄闪长岩辉钼矿年龄为 (112.7±1.8) Ma(李杰等, 2020)。可见, Re-Os 同位素测年的年龄范围为 118.4~112.7 Ma。

上述同位素年龄测试结果显示, 胶东地区金与有色金属矿床的成矿时间较为接近, 金矿化蚀变的同位素年龄略早于钼矿化的时间, 二者为连续发

生、且有时间重叠的成矿事件。

2.2.3 金与有色金属矿在成因上密切关联

胶东地区在晚中生代发生了大规模岩浆活动。其中, 玲珑型花岗岩的年龄数据介于 163.2~149 Ma 之间(Yang, 2012; 林博磊和李碧乐, 2013; Li et al., 2015; Ma et al., 2017; Yang et al., 2018; Chai et al., 2019, 2020; 薛建玲等, 2019; 王斌等, 2021; 唐文龙等, 2021), 郭家岭花岗岩形成于 132~125 Ma(罗贤冬等, 2014; Deng et al., 2015; 耿科等, 2015; 王立功等, 2018; Cai et al., 2018; 宋英昕等, 2020; Feng et al., 2020), 伟德山型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄介于 125~110.5 Ma(Goss et al., 2010; Tang et al., 2014; Huang et al., 2016; Cheng et al., 2017; 李增达等, 2018; Song et al., 2020; 王斌等, 2021), 崂山型花岗岩的同位素年龄为 125~108.9 Ma(王世进等, 2010; Goss et al., 2010; Yan et al., 2019; 王斌等, 2021), 脉岩的同位素年龄范围为 130~107.6 Ma(耿科等, 2015; Ma et al., 2014, 2016; Li et al., 2016; Long et al., 2017; Liang et al., 2017; Ma et al., 2017; 宋英昕等, 2018; Cai et al., 2018; Yuan et al., 2019; Liu et al., 2020; Feng et al., 2020; 王斌等, 2021), 青山群火山岩的同位素年龄为 123.6~98 Ma(宋明春等, 2018b)。

胶东金与有色金属矿床成矿之时恰是大规模岩浆活动之期。金矿被认为与中生代岩浆活动密切相关(杨立强等, 2014; Li et al., 2015; Song et al., 2015), 矿床主要赋存于侏罗纪玲珑型花岗岩和白垩纪郭家岭型花岗岩中, 而白垩纪伟德山型花岗岩及大量中基性脉岩与金同时形成(Song et al., 2020)。有色金属矿则主要是与伟德山型花岗岩有关的斑岩型、矽卡岩型和热液脉型矿床(孔庆友等, 2006; 丁正江等, 2015; Song et al., 2017)。与金和有色金属矿床形成时间接近的郭家岭型花岗岩和伟德山型花岗岩均是壳幔混合源花岗岩类(Goss et al., 2010; Song et al., 2020), 同时代的基性脉岩和青山群玄武岩均是幔源岩浆岩, 并且胶东地区还发现有形成于 122.3~118.3 Ma 的幔源分异的柳林庄高镁闪长岩(宋明春等, 2020b)。这说明, 早白垩世时胶东地区发生了强烈的壳幔混合作用, 金及有色金属矿床是与壳幔混合岩浆活动有密切成因联系的矿床成矿系列。

2.3 成矿系列划分

根据矿化类型、矿床时空分布、矿床(物)共生组合特征及主要成矿因素, 将胶东主要形成于早白垩世与燕山期大规模岩浆活动有关的金及有色金属矿床组合划归为早白垩世胶东型金矿成矿系列或早白垩世与燕山晚期岩浆活动有关的 Au (Ag)、Cu、Pb、Zn、Mo 矿床成矿系列, 其下包括早白垩世中期

(125~115 Ma)Au(Ag)成矿亚系列和早白垩世中晚期(118~110 Ma)Cu、Pb、Zn、Mo 成矿亚系列(表 2)。

2.3.1 早白垩世中期(125 ~ 115 Ma)Au(Ag)成矿亚系列

为胶东型金矿成矿系列主成矿期的主要矿床组合,胶东的单金矿床均属于这一成矿系列。金矿床中一般伴生有可供综合利用的银矿,个别矿区有独立的银矿床,如招远十里堡银矿床。金矿床类型主要是破碎带蚀变岩型和石英脉型,二者累计资源储量占胶东金资源总量的 94%以上。此外,还有硫化物石英脉型、破碎带石英网脉带型、盆缘断裂角砾岩型、蚀变砾岩型、层间滑动构造带型和黄铁矿碳酸盐脉型等金矿化类型(宋明春等, 2014)。不同金矿类型受不同的构造位置和围岩条件控制,例如:焦家式金矿产于主控矿断裂主断面下盘的蚀变碎裂岩中,玲珑式金矿产于远离主断面的花岗岩中的张裂隙中,杜家崖式金矿产于前寒武纪变质地层内的层间滑脱拆离带中,邓格庄式硫化物石英脉型金矿产于陡倾断裂中,宋家沟(发云乔)式蚀变砾岩型金矿产于胶莱盆地边缘铲式断裂、裂隙中,蓬家乔式金矿产于中生代盆缘断裂中等(李士先等, 2007; 宋明春等, 2014)。侏罗纪玲珑型花岗岩是胶东金矿床的主要赋矿地质体(赋矿围岩),白垩纪郭家岭型花岗岩和新太古代—古元古代变质岩系次之,少量金矿床赋存于早白垩世莱阳群的底部。胶东金矿床主要受 NNE—近 SN 走向的断裂控制,主要控矿断裂有:三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、西林—陡

崖断裂和金牛山断裂(宋英昕等, 2017)。

2.3.2 早白垩世晚期(118 ~ 110 Ma)Cu-Pb-Zn-Mo 成矿亚系列

为胶东型金矿成矿系列后期的次要矿床组合,胶东早白垩世的金多金属矿床和有色金属矿床均属于这一成矿系列。矿床类型主要有热液充填脉型银铅锌矿、斑岩型铜钼(钨)矿、接触交代型铅锌铜矿、似层状热液充填交代型铜矿、破碎带蚀变岩型金及多金属矿、隐爆角砾岩型金铜矿等(丁正江等, 2011, 2015; 宋明春等, 2015)。矿床产出的特点是主要分布于 125 ~ 110 Ma 侵入岩的内部或周边,如尚家庄钼矿赋存于牙山岩体中的节理裂隙中,牙山岩体的同位素年龄是(117.7±2.9) Ma、(116±0.5) Ma、(116.9±0.7) Ma(张田和张岳桥, 2008)和 113 Ma (Goss et al., 2010); 分别产于伟德山岩体内部和边缘的同家庄银矿和介北铜矿,直接赋矿围岩伟德山型花岗岩的 LA-ICP-MS 岩浆锆石的加权平均年龄分别为(116.0±0.9) Ma 和(116.6±1.7) Ma(Song et al., 2017); 大邓格金多金属矿虽然赋存于前寒武纪变质岩中,但矿区邻近伟德山花岗岩体,花岗岩的 LA-ICP-MS 岩浆锆石年龄为(111.7±0.6) Ma(李杰等, 2018); 七宝山金铜矿和敞沟—杏山峪银铅锌矿产于七宝山潜火山杂岩体中,赋矿的花岗闪长斑岩和细密斑安山玢岩的锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 125 Ma 和 112 Ma(宋明春和徐军祥, 2018)。根据前述辉钼矿测年结果结合有色金属矿赋矿围岩的同位素年龄将这一成矿系列的时间范围限定为 118~110 Ma。

表 2 胶东型金矿成矿系列划分表
Table 2 Metallogenic series division of Jiaodong type gold deposits

矿床成矿系列	矿床成矿亚系列	矿床式/矿床类型	代表性矿床
早白垩世胶东型金矿成矿系列 (早白垩世与燕山晚期岩浆活动有关的 Au(Ag)、Cu、Pb、Zn、Mo 矿床成矿系列)	早白垩世(118~110 Ma)与壳幔混合岩浆活动有关的 Cu、Pb、Zn、Mo 矿床成矿亚系列	杏山峪式银铅锌矿/热液充填脉型	敞沟—杏山峪银铅锌矿
		香乔式铅锌矿/接触交代型	香乔铅锌铜矿
		王家庄式铜矿/似层状热液充填交代型	王家庄铜矿
		尚家庄式钼矿/斑岩型	尚家庄钼矿
		大邓格式金及多金属矿/破碎带蚀变岩型	大邓格金多金属矿
	早白垩世(125~115 Ma)与壳幔混合岩浆活动有关的 Au(Ag)矿床成矿亚系列	七宝山式金铜矿/隐爆角砾岩型	七宝山金铜矿
		十里堡式银矿/热液充填脉型	十里堡银矿
		辽上式金矿/黄铁矿碳酸盐脉型	辽上金矿、西涝口金矿
		杜家崖式金矿/层间滑动构造带型	杜家崖金矿
		宋家沟(发云乔)式金矿/蚀变砾岩型	宋家沟金矿
		蓬家乔式金矿/盆缘断裂角砾岩型	蓬家乔金矿、大庄子金矿
		河西式金矿/破碎带石英网脉带型	河西金矿
		邓格庄(金牛山)式金矿/硫化物石英脉型	邓格庄金矿、金青顶金矿、英格庄金矿
		玲珑式金矿/石英脉型	玲珑金矿、旧店金矿、黑岚沟金矿
		焦家式金矿/破碎带蚀变岩型	三山岛金矿、焦家金矿、大尹格庄金矿

3 成矿系列指导找矿的案例

3.1 台上一水旺庄巨型金矿床

招远台上一水旺庄巨型金矿床赋存于胶东三大主要断裂成矿带之一的招平断裂北段, 位于玲珑金矿田东侧。玲珑金矿田是玲珑式石英脉型金矿的典型产地(图 2a), 以往找矿重点部署在抗风化能力强及凸出正地形的石英脉上。在玲珑金矿田的东侧分布有招平断裂及其分支断裂—九曲蒋家断裂和破头青断裂, 由于断裂破碎风化, 形成沟谷地貌且被第四系严重覆盖, 对这一区域的找矿工作长期没有得到重视。通过对成矿规律和成矿系列的深入研究, 地质人员认识到石英脉型金矿与蚀变岩型金矿是同

一成矿期、同一成因、同一成矿物质来源、同一构造系统, 由于构造条件和成矿作用形式不同而产生的不同矿化型式(张丕建等, 2015; 宋明春等, 2020a, 2022; Deng et al., 2020a)。玲珑式金矿和焦家式金矿为紧密伴生的、互为找矿指示的同一成矿系列, 一般焦家式金矿产于主断裂构造带中, 玲珑式金矿产于主断裂下盘的次级断裂、裂隙中。在三山岛金矿田中, 已知的石英脉型金矿均产于规模不大的断裂裂隙中, 且均位于招平主断裂下盘。根据上述成矿系列特征分析, 主断裂是寻找蚀变岩型金矿的有利靶区。据此, 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队和山东省第三地质矿产勘查院等勘查队伍在沿沟谷负地形分布且被第四系严重覆盖的招平

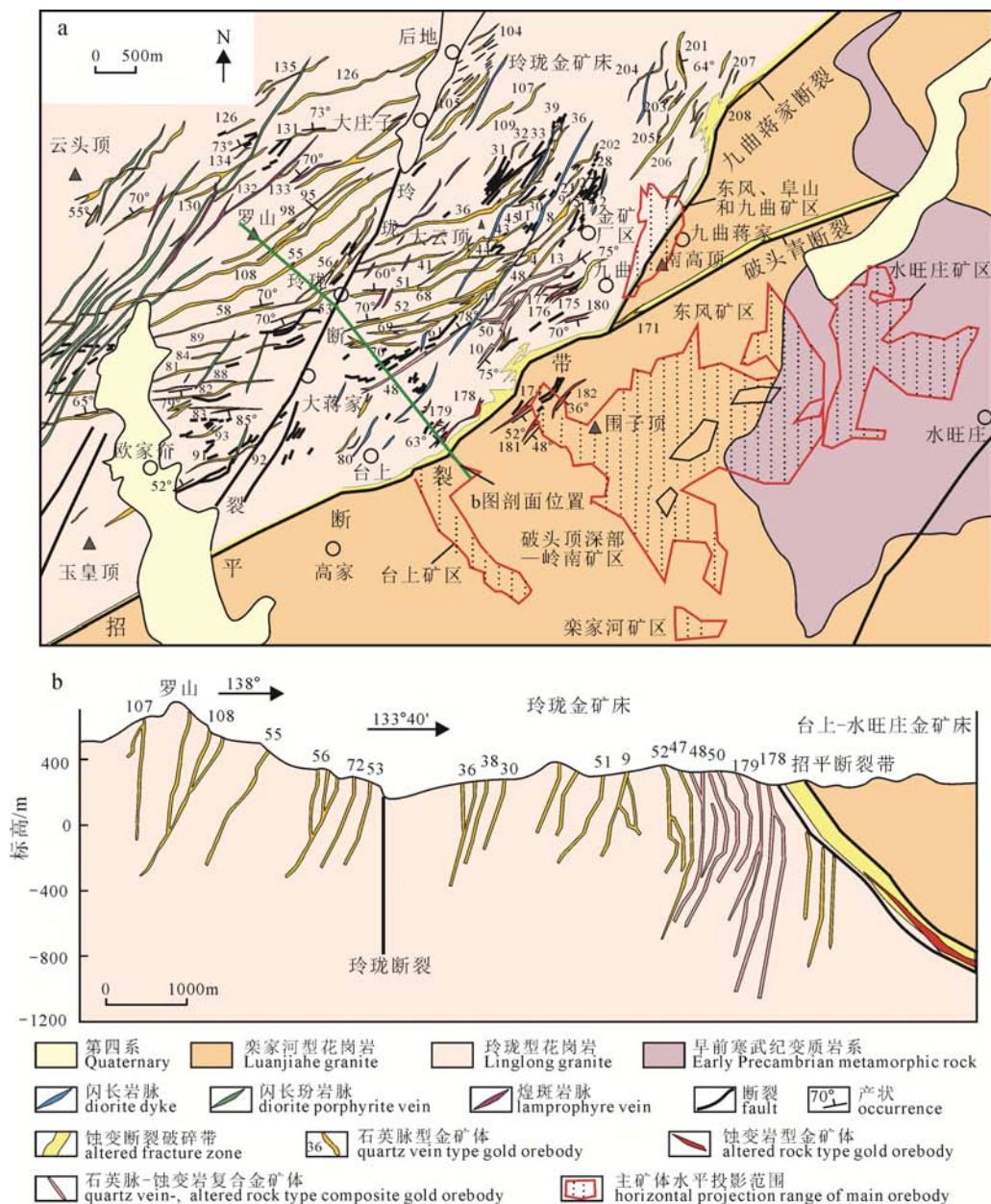


图 2 胶东玲珑金矿田及台上一水旺庄巨型金矿床地质和矿体分布图(a)和剖面图(b)

(据张丕建等, 2015; 宋英昕等, 2017)

Fig. 2 Geological map (a) and profile (b) of the Linglong gold field and the Taishang-Shuiwangzhuang gold deposit (from ZHANG et al., 2015; SONG et al., 2017)

断裂带北段及其深部延伸部位开展了找矿实践,在破头青断裂和九曲蒋家断裂带中陆续探明了水旺庄、栾家河、东风深部、台上深部、破头青深部、岭南等大型—特大型蚀变岩型金矿床(图 2a; 张丕建等, 2015; 刘国栋等, 2017), 累计提交金资源储量近 600 t(宋英昕等, 2017), 显著超过了以往探明的石英脉型金资源储量, 改变了该矿田的矿床类型格局。

近年来通过深部找矿发现, 在台上一水旺庄一带前人作为独立矿床勘查、研究的各矿区主要矿体向深部相互连接或上下叠合, 实际上为同一矿床(宋明春等, 2022; 王永庆等, 2022; 李世勇等, 2022)。矿床共圈定金矿体 536 个, 包括 I-1、I-2 和 I-3 号 3 个主要矿体。其中 I-2 号矿体是矿床最大的矿体, 由 269 个钻孔控制。分布于 +80 ~ -2 173 m 标高范围内, 埋深 44 ~ 2 333 m。控制最大走向长 4 750 m, 最大倾斜深 2 430 m。主要赋存于九曲蒋家断裂主裂面下的黄铁绢英岩化碎裂岩带及黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内。矿体呈似层状, 具分支复合、膨胀夹缩、尖灭再现等特点, 沿走向和倾向呈舒缓波状延伸。矿体产状与主裂面基本一致, 平均走向 20°, 倾向 SE, 倾角一般 15° ~ 35°。矿体平均厚度 11.50 m, 厚度变化系数 104.94%, 属厚度变化较稳定型矿体(李世勇等, 2022)。矿石平均品位 3.15 g/t, 品位变化系数为 102.14%, 属有用组分分布较均匀型矿体。蚀变岩型矿体和石英脉型矿体的空间分布证实了二者分别为受主断裂和断裂下盘次级断裂、裂隙控制(图 2b)的同一成矿系列规律。

矿床的矿石类型包括细粒浸染状黄铁绢英岩

化碎裂岩型, 浸染状、细脉状、网脉状黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型和细脉状黄铁绢英岩化花岗岩型, 以前两者为主。矿石中 S 平均含量为 2.26%, 工业类型属低硫型金矿石。矿石的金属矿物主要有自然金属和金属硫化物, 自然金属以银金矿为主, 次为自然金、自然银; 金属硫化物以黄铁矿为主, 黄铜矿、方铅矿、闪锌矿次之, 少量磁黄铁矿; 非金属矿物主要有石英、绢云母、长石等。矿石中有益组分以 Au 为主, 伴生有益组分为 Ag、S, Ag 平均品位 7.47 g/t。其他元素 Cu、Pb、Zn 含量较低, 伴生有害组分 As 含量低。由矿床浅部向深部, Ag、S 含量呈降低趋势, Au/Ag 比值呈增大趋势。

3.2 辽上特大型金矿床

辽上矿区位于胶莱盆地东北缘的基底隆起区边缘。胶莱盆地东北缘地质构造复杂、矿化类型多样, 除破碎带蚀变岩型和石英脉型金矿外, 先后发现了断裂角砾岩型和蚀变砾岩型金矿。详细的地质调查表明, 胶莱盆地东北缘集中分布了早前寒武纪变质岩、中生代岩浆岩、白垩纪火山-沉积岩、断裂构造等多种地质体、岩石和构造(图 3), 矿化类型的多样性与围岩类型的复杂性有关, 不同类型围岩中常常产有不同的矿化类型。在基底隆起区的边缘分布有含较多大理岩的古元古代荆山群, 根据胶东型金矿成矿系列的 Au(Ag)矿床成矿亚系列主要由多种不同矿化类型的矿床式组成分析, 在碳酸盐岩分布区域附近可能存在与之有关的矿化类型。山东省第三地质矿产勘查院发现的辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿(李国华等, 2017), 丰富了 Au(Ag)矿床成矿亚系列的矿床式。

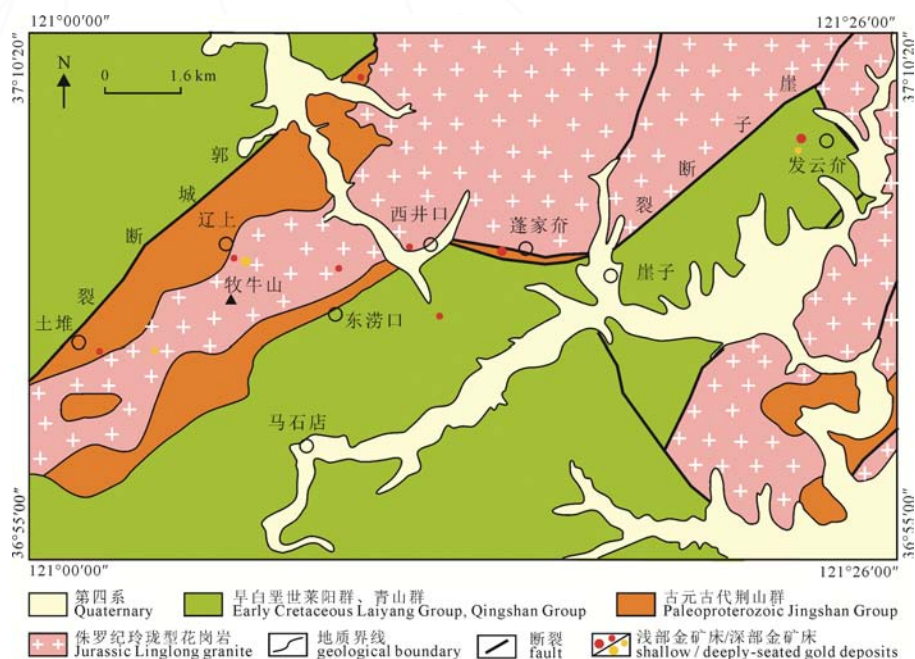


图 3 胶莱盆地东北缘区域地质简图(据纪攀等, 2016; 宋英昕等, 2017)

Fig. 3 Regional geological map of the northeast margin of Jiaolai basin (from JI et al., 2016; SONG et al., 2017)

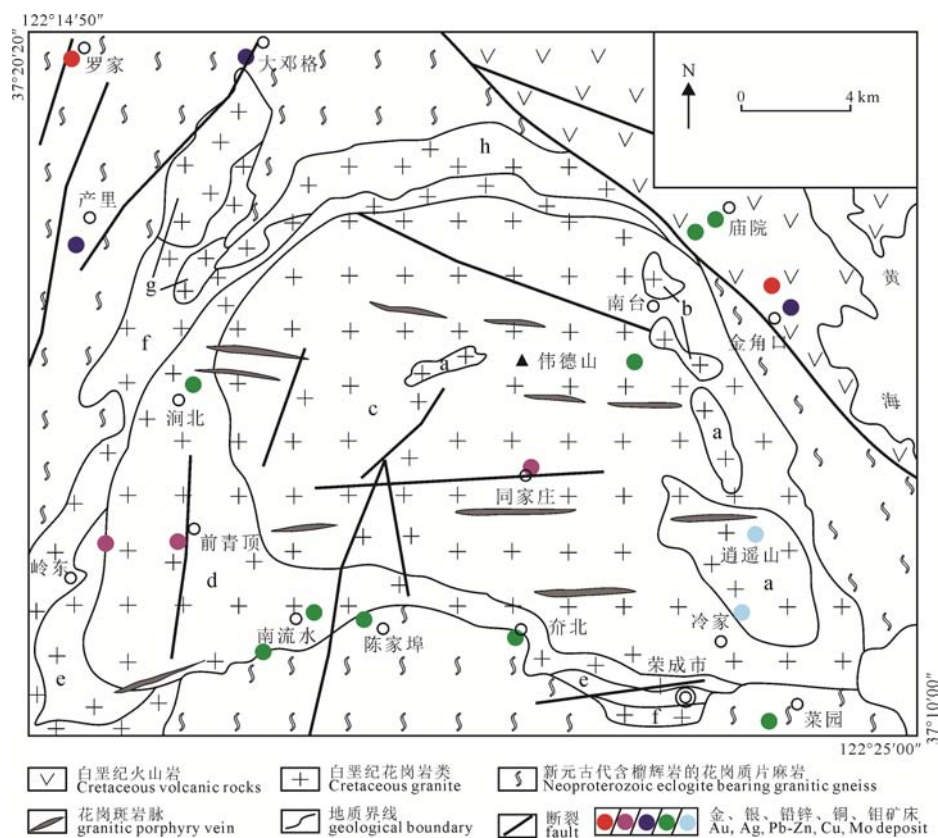
通过勘查,在辽上金矿床中共圈定金矿体 38 个,其中主矿体 4 个,探明金资源量 69 t。主矿体沿走向呈舒缓波状展布,沿倾向在-500 m 标高以下矿体产状变缓,并且明显膨大。矿体走向长度 80~380 m,斜深 16~791 m。平均金品位 2.00~6.00 g/t,最高达 22.68 g/t。矿体平均厚度为 3~10 m,最大为 42.93 m(纪攀等, 2016; 王志新等, 2017)。矿石类型主要有含黄铁矿碳酸盐脉二长花岗岩型、含黄铁矿碳酸盐脉变质岩型和黄铁矿碳酸盐脉型,以含黄铁矿碳酸盐(细)脉为特征。单条黄铁矿碳酸盐细脉的宽度多小于 1 cm,呈不规则状和脉状产出。矿石中金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿和磁黄铁矿,少量方铅矿和磁铁矿;脉石矿物主要有斜长石、钾长石、白云石、石英、方解石、绢云母和透辉石等。碳酸盐矿物主要为白云石,含少量方解石,与黄铁矿紧密镶嵌共生。黄铁矿多呈自形-半自形浸染状分布,局部为团块状,少量呈星点状。金矿物赋存于黄铁矿碳酸盐(细)脉之中。矿体围岩主要为弱片麻状细中粒含石榴二长花岗岩、透辉大理岩和黑云变粒岩等。

3.3 大邓格金多金属矿床

大邓格金多金属矿床位于荣成有色金属成矿

小区。该成矿小区中的有色金属矿均围绕早白垩世伟德山花岗岩体分布,由伟德山岩体内部向外大致形成了内部钼—中边部铜银—外部铅锌多金属的分布环带(图 4),属 Cu-Pb-Zn-Mo 矿床成矿亚系列。在这一成矿小区的西侧零星出现单金矿床(如罗家金矿),再往西逐步过渡到 Au(Ag)矿床成矿亚系列(牟乳金成矿小区)。在 Cu-Pb-Zn-Mo 矿床成矿亚系列与 Au(Ag)矿床成矿亚系列过渡区域,可能会赋存多矿种组合矿床。山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队通过对大邓格矿区的勘查,发现并探明了金及多金属矿床。

在大邓格矿区共圈定金、银、铜、铅、锌 5 种矿体 19 个, 为小型金-银-铅-锌多金属矿床。其中主矿体 6 个, 控制走向长度 50 ~ 370 m、斜深 160 ~ 453 m; 矿体走向 10° ~ 35°; 矿体倾角 18° ~ 60°, 平均 31° ~ 41°; 矿体厚度 0.44 ~ 5.88 m, 平均为 0.85 ~ 2.41 m, 厚度变化系数在 67% ~ 111% 之间。主矿体金品位为 1.94 ~ 5.65 g/t, 矿床金平均品位为 3.48 g/t, 银(含独立的和与金、铅共生的)平均品位为 198.41 g/t, 铅(含独立的和与金、锌共生的)平均品位为 2.04%, 锌(含独立的和与金、铅共生的)平均品位为 2.49%。主要矿体多集中分布于同一矿化较



伟德山花岗岩: a—虎头石单元; b—营盘单元; c—崖西单元; d—不落耩单元; e—大水泊单元; f—落西头单元; g—固庄单元; h—埠柳单元。

Weideshan granite: a-Hutoushi unit; b-Yingpan unit; c-Yaxi unit; d-Buluojiang unit; e-Dashuiuo unit; f-Luoxitou unit; g-Guzhuang unit; h-Buliu unit.

图4 伟德山岩体地质及有关矿产分布图(据丁正江等, 2013; 宋明春等, 2015)

Fig. 4 Sketch map of regional geology and metal mineral distribution of the Weideshan granite body
(from DING et al., 2013; SONG et al., 2015)

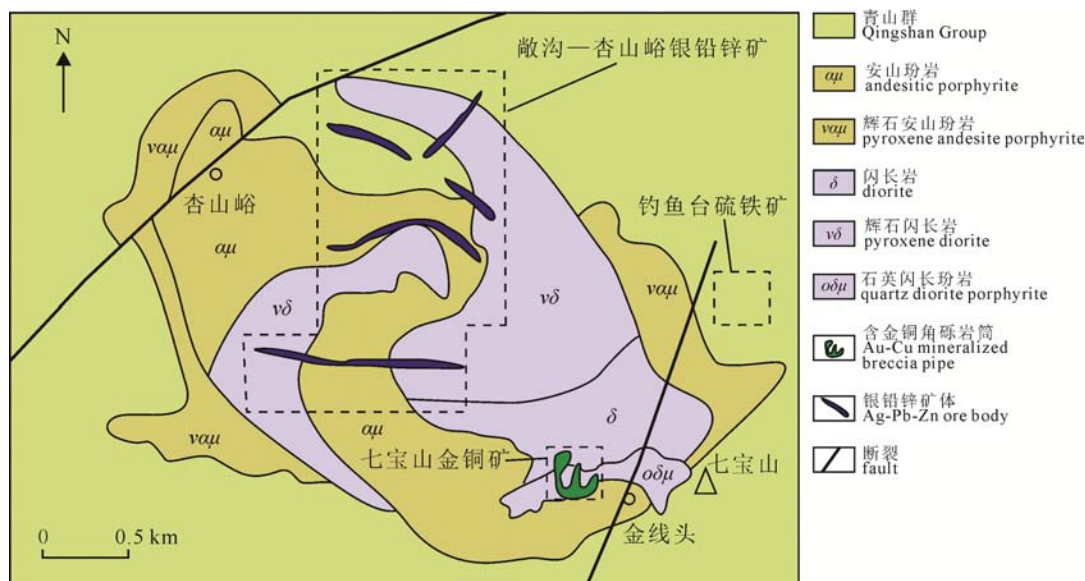


图5 五莲七宝山潜火山岩体及相关矿床地质略图(据宋明春和徐军祥, 2018)

Fig. 5 Geological sketch of Wulian Qibaoshan subvolcanic rock mass and related deposits (from SONG and XU, 2018)

好的地段,不同矿种往往集中分布构成多矿种同体共生、伴生矿体。矿床赋存于新元古代荣成片麻岩套花岗闪长质片麻岩中的断裂裂隙中,矿石类型为细脉-浸染状黄铁绢英岩化碎裂岩型和黄铁石英脉型,以前者为主。矿石中主要矿石矿物为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、银金矿,少量褐铁矿、黄铜矿等,脉石矿物主要有石英、斜长石、绢云母、方解石等,少量磁铁矿、绿帘石等(李杰等, 2016; 倪璋懿等, 2022)。

3.4 五莲七宝山敞沟—杏山峪银铅锌矿床

敞沟—杏山峪银铅锌矿床赋存于胶莱盆地南缘五莲七宝山潜火山岩体中。在该岩体的东南部以往探明了七宝山(金线头)隐爆角砾岩型金铜矿,在岩体的东北部有钓鱼台火山热液充填交代型硫铁矿(图5)。根据成矿系列组合规律分析,七宝山杂岩体中有较好的铅锌矿床找矿前景。山东省第七地质矿产勘查院经过多年勘查,在七宝山杂岩体西部发现和探明了敞沟—杏山峪银铅锌矿床(彭永和等, 2018)。

矿床中共圈定 35 个铅锌矿体, 8 个银矿体和 2 个铜矿体,探明的铅锌和银资源量均达中型规模(宋明春和徐军祥, 2018)。矿体主要赋存在断裂、裂隙构造中,近 EW 向断裂、二组“X”型共轭断裂以及岩体与火山岩盖层之间的层间滑动面是重要的赋矿构造位置。矿石类型包括碳酸盐、石英脉原生硫化物型铅锌银矿石(脉状矿石)和含矿蚀变岩原生硫化物型铅锌银矿石(蚀变岩型矿石)两种类型。碳酸盐、石英脉型矿石中的金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、辉银矿、自然银、含金自然银、银黝铜矿、黄铜矿、黄铁矿、蓝辉铜矿、赤铜矿、铜蓝等,脉

石矿物主要有铁白云石、白云石、石英、方解石、绢(白)云母、高岭石以及重晶石等;含矿蚀变岩型矿石中的金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、辉银矿、自然银、黄铜矿、黄铁矿等,脉石矿物主要有斜长石、绿帘石、角闪石、黑云母、方解石、钾长石、绢(白)云母、高岭石以及透闪石、绿泥石、石英等。

4 结论

(1)胶东型金矿成矿系列包括单金矿床、金及多金属矿床和有色金属矿床三种类型,金矿床主要分布于胶东的西部和中部,有色金属矿床主要分布于胶东的中部和东部。

(2)金成矿时间为 125 ~ 115 Ma, 有色金属成矿时间为 118 ~ 110 Ma, 二者为连续发生、且有时重叠的成矿事件。成矿之时恰是大规模壳幔岩浆活动之期,成矿与壳幔岩浆活动密切相关。

(3)早白垩世与壳幔混合岩浆活动有关的胶东型金矿成矿系列(或早白垩世与燕山晚期岩浆活动有关的 Au(Ag)、Cu、Pb、Zn、Mo 矿床成矿系列)包括 2 个成矿亚系列,即 125 ~ 115 Ma 的 Au(Ag)矿床成矿亚系列和 118 ~ 110 Ma 的 Cu-Pb-Zn-Mo 矿床成矿亚系列。

(4)成矿系列理论有效指导了胶东地区的找矿工作,根据玲珑金矿田石英脉型金矿的分布发现了主断裂带中台上一水旺庄巨型蚀变岩型金矿床,受胶莱盆地东北缘赋存多种金矿床类型(矿床式)的启示发现了辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿,在荣成有色金属成矿小区外围向牟乳金成矿小区过渡方向发现了大邓格金多金属矿床,根据五莲七宝山金铜矿床探明了敞沟—杏山峪银铅锌矿床。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产资源研究所陈毓川院士和肖克炎研究员邀请撰写本文, 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

Acknowledgements:

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund (No. U2006201), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. D2020403061), and Key Projects of Science and Technology Research in Universities of Hebei Province (No. ZD2021018).

参考文献:

- 丁正江, 孙丰月, 刘殿浩, 张丕建, 杨国福, 孔彦. 2011. 烟台福山北部地区金及多金属矿成矿系列[J]. 山东国土资源, 27(1): 1-6.
- 丁正江, 孙丰月, 刘建辉, 刘殿浩, 李碧乐, 张丕建, 钱烨, 李杰. 2012. 胶东邢家山钼铅矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9): 2721-2732.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 刘建辉, 刘殿浩, 张丕建, 杜圣贤, 李兵. 2013. 胶东伟德山地区铜钼多金属矿铅石 U-Pb 法测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(2): 607-618.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 刘建辉, 彭齐鸣, 纪攀, 李碧乐, 张丕建. 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. 岩石学报, 31(10): 3045-3080.
- 范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 胡芳芳, 杨奎锋. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用[J]. 岩石学报, 32(10): 3225-3238.
- 耿科, 王瑞江, 李洪奎, 单伟, 李大鹏. 2015. 胶西北地区北截金矿闪长玢岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 89(6): 1099-1107.
- 纪攀, 丁正江, 李国华, 宋明春, 钱烨. 2016. 胶东辽上特大型金矿床地质特征[J]. 山东国土资源, 32(6): 9-13.
- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 徐军祥, 潘元林, 李献水. 2006. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社: 351-389.
- 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 孙卫东. 2014. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究[J]. 地质学报, 88(10): 1874-1888.
- 李超, 裴浩翔, 王登红, 周利敏, 赵鸿, 李欣尉, 屈文俊, 杜安道. 2016. 山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. 地质学报, 90(2): 240-249.
- 李国华, 丁正江, 宋明春, 李俊建, 李秀章, 纪攀, 张丕建, 王志新. 2017. 胶东新类型金矿——辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿[J]. 地球学报, 38(3): 423-429.
- 李杰. 2012. 胶东地区钼-铜-铅锌多金属矿成矿作用及成矿模式——兼论与胶东金成矿作用的关系[D]. 成都: 成都理工大学: 1-127.
- 李杰, 宋明春, 王美云, 李世勇, 周明岭, 倪师军, 张成江, 丁正江, 岳跃破. 2013. 胶东尚家庄钼矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 40(5): 1612-1621.
- 李杰, 李世勇, 毕明光. 2015. 胶东地区早白垩世金-钼-铜-铅锌矿床成矿作用及成矿模式[M]. 北京: 地质出版社: 1-180.
- 李杰, 宋明春, 李世勇, 周晓剑, 宋英昕, 丁正江, 杨立新, 王珊珊, 姜帆, 李倩. 2016. 胶东大邓格金多金属矿床地质地球化学特征及意义[J]. 中国地质, 43(1): 221-237.
- 李杰, 李世勇, 宋英昕, 姜梦瑶, 毕明光, 王珊珊, 蒋雷, 孙亮亮. 2018. 胶东固庄闪长岩锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究[J]. 山东国土资源, 34(4): 35-42.
- 李杰, 张丽鹏, 李聪颖, 宋明春. 2020. 胶东固庄闪长岩辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 47(5): 1589-1590.
- 李士先, 刘长春, 安郁宏. 2007. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-423.
- 李世勇, 李杰, 宋明春, 丁正江, 周明岭, 范家盟, 解天赐, 刘向东, 王斌, 张亮亮, 杨真亮. 2022. 胶东玲珑金矿田成矿特征和成矿作用[J]. 地质学报, 96(9): 3234-3260.
- 李增达, 于晓飞, 王全明, 杜泽忠, 曹强, 师明元, 王然. 2018. 胶东三佛山花岗岩的成因: 成岩物理化学条件、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 34(2): 447-468.
- 林博磊, 李碧乐. 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(2): 147-160.
- 刘国栋, 温桂军, 刘彩杰, 鲍中义, 孙忠全, 范家盟, 李山, 闫春明, 郭志峰. 2017. 招平断裂北段水旺庄深部超大型金矿床的发现、特征和找矿方向[J]. 黄金科学技术, 25(3): 38-45.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 周会青, 屈文俊, 王成辉. 2011. 胶东半岛烟台地区邢家山钼铅矿床地质特征及其辉钼矿 Re-Os 同位素测年[J]. 地质通报, 30(8): 1294-1302.
- 柳振江, 王建平, 刘家军, 付超. 2010. 胶东南宿花岗岩中辉钼矿的同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(S1): 483-484.
- 倪璋懿, 李杰, 刘吉强. 2022. 胶东大邓格金-多金属矿床热液蚀变过程中的元素迁移[J]. 山东国土资源, 38(7): 1-11.
- 彭永和, 王申, 李小陪, 李双飞. 2018. 山东五莲七宝山多金属矿床勘查发现及启示[J]. 山东国土资源, 34(10): 57-61.
- 邱德同, 孔令刚. 1986. 山东省七宝山角砾岩筒型金铜矿床的地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, (5): 7-12.
- 宋明春, 李三忠, 伊丕厚, 崔书学, 徐军祥, 吕古贤, 宋英昕, 姜洪利, 周明岭, 张丕建, 黄太岭, 刘长春, 刘殿浩. 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, 宋英昕, 李杰, 李世勇. 2015. 胶东与白垩纪花岗岩有关的金及有色金属矿床成矿系列[J]. 大地构造与成矿学, 39(5): 823-843.
- 宋明春, 徐军祥. 2018. 大型-超大型矿床勘查方法与实践[M]. 北京: 地质出版社: 1-397.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 李世勇. 2018a. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 26(4): 406-422.
- 宋明春, 李杰, 李世勇, 丁正江, 谭现锋, 张照录, 王世进. 2018b. 鲁东晚中生代热隆伸展构造及其动力学背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 941-964.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 魏绪峰, 孙绍立, 宋国政, 张军进,

- 张丕建, 王永国. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 92-110.
- 宋明春, 林少一, 杨立强, 宋英昕, 丁正江, 李杰, 李世勇, 周明岭. 2020a. 胶东金矿成矿模式[J]. 矿床地质, 39(2): 215-236.
- 宋明春, 李杰, 周建波, 宋英昕, 李世勇, 王斌, 丁正江, 张照录. 2020b. 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.
- 宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 于学峰, 丁正江, 张永文, 邱昆峰, 李杰, 张良, 王斌, 李世勇. 2022. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展[J]. 地质通报, 41(6): 903-935.
- 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 魏绪峰, 徐韶辉, 李杰, 谭现峰, 李世勇, 张照录, 焦秀美, 胡弘, 曹佳. 2017. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征[J]. 黄金科学技术, 25(3): 4-18.
- 宋英昕, 宋明春, 孙伟清, 马晓东, 李大鹏. 2018. 胶东金矿成矿时代及区域地壳演化——基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 37(5): 908-919.
- 宋英昕, 于学峰, 李大鹏, 耿科, 尉鹏飞, 左晓敏, 王秀凤. 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.
- 唐文龙, 付超, 邹键, 何江涛, 席宏, 田杰鹏, 党智财. 2021. 胶东唐家沟金矿床独居石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. 地质学报, 95(3): 809-821.
- 王斌, 宋明春, 霍光, 周明岭, 徐忠华, 蒋雷, 宋英昕, 李杰. 2021. 胶东晚中生代花岗岩的源区性质与构造环境演化及其对金成矿的启示[J]. 岩石矿物学杂志, 40(2): 288-320.
- 王立功, 祝德成, 郭瑞朋, 于晓卫, 田京祥, 柯昌辉, 刘汉栋, 田瑞聪, 高华丽. 2018. 胶西北仓上、三山岛岩体二长花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究[J]. 地质学报, 92(10): 2081-2095.
- 王世进, 万渝生, 王伟, 宋志勇, 王金光, 董春艳, 颜颂强, 刘清德. 2010. 山东崂山花岗岩形成时代——锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 山东国土资源, 26(10): 1-5, 10.
- 王永庆, 李山, 杨真亮, 刘彩杰, 隋晓玲, 刘向东. 2022. 胶东玲珑—水旺庄巨型金矿床三维地质特征及断裂控矿规律[J]. 地质通报, 41(6): 977-985.
- 王志新, 焦秀美, 丁正江, 刘晓敏, 李国华, 纪旭波, 唐俊智. 2017. 胶莱盆地东北缘辽上式金矿构造控矿特征及找矿方向[J]. 黄金科学技术, 25(3): 61-69.
- 薛建玲, 庞振山, 李胜荣, 陈辉, 孙文燕, 陶文, 姚磊, 张运强. 2019. 胶东邓格庄金矿床成因: 地质年代学 and 同位素体系制约[J]. 岩石学报, 35(5): 1532-1550.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 30(9): 2447-2467.
- 张丕建, 宋明春, 刘殿浩, 丁正江, 胡培强, 杨国福, 王海波. 2015. 胶东玲珑金矿田 171 号脉深部金矿床特征及构造控矿作用[J]. 矿床地质, 34(5): 855-873.
- 张田, 张岳桥. 2008. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史[J]. 地质学报, 82(9): 1210-1228.
- 朱保霖, 柳振江, 成少博, 薛玉山, 王建平, 徐磊. 2016. 胶东院格庄岩体中辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质, 43(4): 1353-1366.

References:

- CAI Ya-chun, FAN Hong-rui, SANTOSH M, HU Fang-fang, YANG Kui-feng, LI Xian-hua. 2018. Decratonic gold mineralization: Evidence from the Shangzhuang gold deposit, eastern North China Craton[J]. Gondwana Research, 54: 1-22.
- CHAI Peng, HOU Zeng-qian, ZHANG Hong-rui, DONG Lei-lei. 2019. Geology, fluid inclusion, and H-O-S-Pb isotope constraints on the mineralization of the Xiejiagou gold deposit in the Jiaodong Peninsula[J]. Geofluids, 2019: 3726465.
- CHAI Peng, ZHANG Hong-rui, HOU Zeng-qian, ZHANG Zhi-yu. 2020. Geochronological framework of the Damoqujia gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for the timing and geologic setting of gold mineralization[J]. Geological Journal, 55(1): 596-613.
- CHENG Shao-bo, LIU Zhen-jiang, WANG Qing-fei, WANG Fu-jiang, XUE Yu-shan, XU Lei, WANG Jian-ping, ZHU Bao-lin. 2017. Mineralization age and geodynamic background for the Shangjiazhuang Mo deposit in the Jiaodong gold province, China[J]. Ore Geology Reviews, 80: 876-890.
- DENG Jun, QIU Kun-feng, WANG Qing-fei, GOLDFARB R, YANG Li-qiang, ZI Jian-wei, GENG Jian-zhen, MA Yao. 2020b. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Economic Geology, 115(3): 671-685.
- DENG Jun, WANG Chang-ming, BAGAS L, CARRANZA E J M, LU Yong-jun. 2015. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry[J]. Mineralium Deposita, 50: 987-1006.
- DENG Jun, YANG Li-qiang, GROVES D I, ZHANG Liang, QIU Kun-feng, WANG Qing-fei. 2020a. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China[J]. Earth Science Reviews, 208: 103274.
- DING Zheng-jiang, SUN Feng-yue, LIU Dian-hao, ZHANG Pi-jian, YANG Guo-fu, KONG Yan. 2011. Metallogenic series of gold and polymetallic deposits in north Fushan area of Yantai City[J]. Shandong Land and Resources, 27(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- DING Zheng-jiang, SUN Feng-yue, LIU Fu-lai, LIU Jian-hui, LIU Dian-hao, ZHANG Pi-jian, DU Sheng-xian, LI Bing. 2013. U-Pb dating of zircons from the Weideshan molybdenum

- copper polymetallic deposits in Jiaodong Peninsula, China, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 607-618(in Chinese with English abstract).
- DING Zheng-jiang, SUN Feng-yue, LIU Fu-lai, LIU Jian-hui, PENG Qi-ming, JI Pan, LI Bi-le, ZHANG Pi-jian. 2015. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3045-3080(in Chinese with English abstract).
- DING Zheng-jiang, SUN Feng-yue, LIU Jian-hui, LI Bi-le, ZHANG Pi-jian, QIAN Ye, LI Jie. 2012. Re-Os dating of molybdenites from the Xingjiashan molybdenum-tungsten deposit in Jiaodong Peninsula, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2721-2732(in Chinese with English abstract).
- FAN Hong-rui, FENG Kai, LI Xing-hui, HU Fang-fang, YANG Kui-feng. 2016. Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong and Korean peninsulas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3225-3238(in Chinese with English abstract).
- FENG Kai, FAN Hong-rui, GROVES D I, YANG Kui-feng, HU Fang-fang, LIU Xuan, CAI Ya-chun. 2020. Geochronological and sulfur isotopic evidence for the genesis of the post-magmatic, deeply sourced, and anomalously gold-rich Daliuhang orogenic deposit, Jiaodong, China[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 293-308.
- FENG Li-qiang, GU Xue-xiang, ZHANG Yong-mei, WANG Jia-lin, GE Zhan-lin, HE Yu, ZHANG Ying-shuai. 2020. Geology and geochronology of the Shijia gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103432.
- GENG Ke, WANG Rui-jiang, LI Hong-kui, SHAN Wei, LI Da-peng. 2015. Zircon SHRIMP age of diorite-porphyrite in Beijie Gold Deposit from the Northwest Jiaodong Area and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1099-1107(in Chinese with English abstract).
- GOSS S C, WILDE S A, WU Fu-yuan, YANG Jin-hui. 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.
- HUANG Xiao-long, HE Peng-li, WANG Xue, ZHONG Jun-wei, XU Yi-gang. 2016. Lateral variation in oxygen fugacity and halogen contents in early Cretaceous magmas in Jiaodong area, East China: Implication for triggers of the destruction of the North China Craton[J]. *Lithos*, 248-251: 478-492.
- JI Pan, DING Zheng-jiang, LI Guo-hua, SONG Ming-chun, QIAN Ye. 2016. Geological characteristics of Liaoshang oversize gold deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Shandong Land and Resources*, 32(6): 9-13(in Chinese with English abstract).
- KONG Qing-you, ZHANG Tian-zhen, YU Xue-feng, XU Jun-xiang, PAN Yuan-lin, LI Xian-shui. 2006. Mineral deposits in Shandong[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press: 351-389(in Chinese).
- LI Chao, PEI Hao-xiang, WANG Deng-hong, ZHOU Li-min, ZHAO Hong, LI Xin-wei, QU Wen-jun, DU An-dao. 2016. Age and source constraints for Kongxintou copper-molybdenum deposit Shandong from Re-Os isotope in molybdenite and chalcopyrite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 240-249(in Chinese with English abstract).
- LI Guo-hua, DING Zheng-jiang, SONG Ming-chun, LI Jun-jian, LI Xiu-zhang, JI Pan, ZHANG Pi-jian, WANG Zhi-xin. 2017. The Liaoshang pyrite-carbonate veined deposit: A new type of gold deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3): 423-429(in Chinese with English abstract).
- LI Jie, LI Cong-ying, LIANG Jin-long, SONG Ming-chun, ZHANG Li-peng, SONG Ying-xin. 2021. Mineralization of the Shangjiazhuang Mo deposit in the Jiaodong peninsula, China: Constraints from S-H-O isotopes and fluid inclusions[J]. *Solid Earth Sciences*, 6(4): 370-384.
- LI Jie, LI Shi-yong, BI Ming-guang. 2015. Metallization and metallogenic model of early cretaceous Au-Mo-Cu-Pb-Zn non-ferrous metal deposits in Jiaodong peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-180(in Chinese).
- LI Jie, LI Shi-yong, SONG Ying-xin, JIANG Meng-yao, BI Ming-guang, WANG Shan-shan, JIANG Lei, SUN Li-ang-liang. 2018. Study on zircon U-Pb chronology and rock geochemistry of Guzhuang diorite in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(4): 35-42(in Chinese with English abstract).
- LI Jie, SONG Ming-chun, LI Shi-yong, ZHOU Xiao-jian, SONG Ying-xin, DING Zheng-jiang, YANG Li-xin, WANG Shan-shan, JIANG Fan, LI Qian. 2016. Geological and geochemical features of the Dadengge gold polymetallic deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Geology in China*, 43(1): 221-237(in Chinese with English abstract).
- LI Jie, SONG Ming-chun, WANG Mei-yun, LI Shi-yong, ZHOU Ming-ling, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, DING Zheng-jiang, YUE Yue-po. 2013. The molybdenite Re-Os age and genetic analysis of the Shangjiazhuang Mo deposit in Jiaodong area[J]. *Geology in China*, 40(5): 1612-1621(in Chinese with English abstract).
- LI Jie, ZHANG Li-peng, LI Cong-ying, SONG Ming-chun. 2020. Re-Os dating of molybdenite from Guzhuang diorite in the Jiaodong peninsula and its geological significance[J]. *Geology in China*, 47(5): 1589-1590(in Chinese).
- LI Jie. 2012. The study on metallization and metallogenetic model of Mo-Cu-Pb-Zn complex deposits and comparison with gold metallization in Jiaodong area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-127(in Chinese with English abstract).
- LI Lin, LI Sheng-rong, SANTOSH M, LI Qing, GU Yue, LÜ Wen-jie, ZHANG Hua-feng, SHEN Jun-feng, ZHAO Guo-chun. 2016. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold deposits: Insights from the Jiaodong peninsula, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 2-22.
- LI Lin, SANTOSH M, LI Sheng-rong. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 589-611.

- LI Shi-xian, LIU Chang-chun, AN Yu-hong. 2007. Geology of gold deposits in Jiaodong[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-423(in Chinese).
- LI Shi-yong, LI Jie, SONG Ming-chun, DING Zheng-jiang, ZHOU Ming-ling, FAN Jia-meng, XIE Tian-ci, LIU Xiang-dong, WANG Bin, ZHANG Liang-liang, YANG Zhen-liang. 2022. Metakrogenic characteristics and mineralization of the Linglong gold field, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3234-3260(in Chinese with English abstract).
- LI Yu-jie, LI Sheng-rong, SANTOSH M, LIU Sheng-ao, ZHANG Long, LI Wen-tao, SONG Ying-xin, WANG Bi-xue. 2015. Zircon geochronology, geochemistry and stable isotopes of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(2): 695-710.
- LI Zeng-da, YU Xiao-fei, WANG Quan-ming, DU Ze-zhong, CAO Qiang, SHI Ming-yuan, WANG Ran. 2018. Petrogenesis of Sanfoshan granite, Jiaodong: Diagenetic physical and chemical conditions, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotope constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 447-468(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ya-yun, LIU Xue-fei, QIN Chen, LI Yan, CHEN Jing, JIANG Jie-yan. 2017. Petrogenesis of Early Cretaceous mafic dikes in southeastern Jiaolai basin, Jiaodong Peninsula, China[J]. *International Geology Review*, 59(2): 131-150.
- LIN Bo-lei, LI Bi-le. 2013. Geochemistry, U-Pb dating, Lu-Hf isotopic analysis and geological significance of Linglong granite in Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 40(2): 147-160(in Chinese with English abstract).
- LIU Guo-dong, WEN Gui-jun, LIU Cai-jie, BAO Zhong-yi, SUN Zhong-quan, FAN Jia-meng, LI Shan, YAN Chun-ming, GUO Zhi-feng. 2017. Discovery, characteristics and prospecting direction of Shuiwangzhuang deep super-large gold deposit in the northern section of Zhaoping Fault[J]. *Gold Science and Technology*, 25(3): 38-45(in Chinese with English abstract).
- LIU Shan-bao, WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, ZHOU Hui-qing, QU Wen-jun, WANG Cheng-hui. 2011. Geological characteristics and molybdenite Re-Os age of the Xingjiaoshan W-Mo deposit in Yantai area, Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1294-1302(in Chinese with English abstract).
- LIU Xue-fei, DENG Jun, LIANG Ya-yun, WANG Qing-fei, LI Gong-jian, MA Yao, XU Li-juan, LU Ying-huai. 2020. Geochemical, mineralogical and chronological studies of mafic-intermediate dykes in the Jiaodong Peninsula: implications for Late Mesozoic mantle source metasomatism and lithospheric thinning of the eastern North China Craton[J]. *International Geology Review*, 62(18): 2239-2260.
- LIU Zhen-jiang, WANG Jian-ping, LIU Jia-jun, FU Chao. 2010. Isotopic age and geological significance of molybdenite in Nansu granite, Jiaodong[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 483-484(in Chinese).
- LONG Qun, HU Rong, YANG Yi-zeng, YANG Chun-yue, ZHOU Shu, SIEBEL W, CHEN Fu-kun. 2017. Geochemistry of Early Cretaceous intermediate to mafic dikes in the Jiaodong Peninsula: Constraints on mantle source composition beneath eastern China[J]. *The Journal of Geology*, 125(6): 713-732.
- LUO Xian-dong, YANG Xiao-yong, DUAN Liu-an, SUN Wei-dong. 2014. Geochemical and geochronological study of the gold-related Guojialing Pluton and Shangzhuang Pluton in Jiaobei Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1874-1888(in Chinese with English abstract).
- MA Liang, JIANG Shao-yong, HOFMANN A W, XU Yi-gang, DAI Bao-zhang, HOU Ming-lan. 2016. Rapid lithospheric thinning of the North China Craton: New evidence from cretaceous mafic dikes in the Jiaodong Peninsula[J]. *Chemical Geology*, 432: 1-15.
- MA Liang, JIANG Shao-yong, HOU Ming-lan, DAI Bao-zhang, JIANG Yao-hui, YANG Tao, ZHAO Kui-dong, PU Wei, ZHU Zhi-yong, XU Bin. 2014. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 25(2): 859-872.
- MA Wei-dong, FAN Hong-rui, LIU Xuan, PIRAJNO F, HU Fang-fang, YANG Kui-feng, YANG Yue-heng, XU Wen-gang, JIANG Peng. 2017. Geochronological framework of the Xiadian gold deposit in the Jiaodong province, China: Implications for the timing of gold mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 196-211.
- NI Zhang-yi, LI Jie, LIU Ji-qiang. 2022. Element migration during the period of hydrothermal alteration of Dadengge gold-polymetallic deposit in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 38(7): 1-11(in Chinese with English abstract).
- PENG Yong-he, WANG Shen, LI Xiao-pei, LI Shuang-fei. 2018. Discovery and revelation of Qibaoshan polymetallic deposit exploration in Wulian County of Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 57-61(in Chinese with English abstract).
- QIU De-tong, KONG Ling-gang. 1986. Geological and geochemical characteristics of the breccia tube type Au-copper deposit in Shandong Province[J]. *Geology and Exploration*, (5): 7-12(in Chinese).
- SAI Sheng-xun, DENG Jun, QIU Kun-feng, MIGGINS D P, ZHANG Liang. 2020. Textures of auriferous quartz-sulfide veins and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Rushan gold deposit: Implications for processes of ore-fluid infiltration in the eastern Jiaodong gold province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103254.
- SONG Ming-chun, DING Zheng-jiang, ZHANG Jun-jin, SONG Ying-xin, BO Jun-wei, WANG Yu-qun, LIU Hong-bo, LI Shi-yong, LI Jie, LI Rui-xiang, WANG Bin, LIU Xiang-dong, ZHANG Liang-liang, DONG Lei-lei, LI Jian, HE Chun-yan. 2021a. Geology and mineralization of the Sanshandao super-giant gold deposit (1200 t) in the Jiaodong Peninsula, China:

- A review[J]. *China Geology*, 4: 686-719.
- SONG Ming-chun, LI Jie, LI Shi-yong, DING Zheng-jiang, TAN Xian-feng, ZHANG Zhao-lu, WANG Shi-jin. 2018b. Late Mesozoic thermal upwelling-extension structure and its dynamics background in eastern Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 48(4): 941-964(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, LI Jie, YU Xue-feng, SONG Ying-xin, DING Zheng-jiang, LI Shi-yong. 2021b. Metallogenic characteristics and tectonic setting of the Jiaodong gold deposit, China[J]. *Solid Earth Sciences*, 6(4): 385-405.
- SONG Ming-chun, LI Jie, ZHOU Jian-bo, SONG Ying-xin, LI Shi-yong, WANG Bin, DING Zheng-jiang, ZHANG Zhao-lu. 2020b. 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 Ming-chun, LI San-zhong, SANTOSH M, ZHAO Shu-juan, YU Shan, YI Pei-hou, CUI Shu-xue, LÜ Gu-xian, XU Jun-xiang, SONG Ying-xin, ZHOU Ming-ling. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 612-625.
- SONG Ming-chun, LI San-zhong, YI Pi-hou, CUI Shu-xue, XU Jun-xiang, LÜ Gu-xian, SONG Ying-xin, JIANG Hong-li, ZHOU Ming-ling, ZHANG Pi-jian, HUANG Tai-ling, LIU Chang-chun, LIU Dian-hao. 2014. Classification and metallogenic 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 Ming-chun, LIN Shao-yi, YANG Li-qiang, SONG Ying-xin, DING Zheng-jiang, LI Jie, LI Shi-yong, ZHOU Ming-ling. 2020a. Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 215-236(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, SONG Ying-xin, DING Zheng-jiang, LI Shi-yong. 2018a. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406-422(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, SONG Ying-xin, DING Zheng-jiang, WEI Xu-feng, SUN Shao-li, SONG Guo-zheng, ZHANG Jun-jin, ZHANG Pi-jian, WANG Yong-guo. 2019. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong Peninsula and discussion on the relevant issues[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 92-110(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, SONG Ying-xin, LI Jie, LI Shi-yong. 2015. Metallogenic series of gold and nonferrous metal deposits related to Cretaceous granites in eastern Shandong Peninsula, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 823-843(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, WANG Shan-shan, YANG Li-xin, LI Jie, LI Shi-yong, DING Zheng-jiang. 2017. Metallogenic epoch of nonferrous metallic and silver deposits in the Jiaodong Peninsula, China and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 91(4): 1305-1325.
- SONG Ming-chun, XU Jun-xiang. 2018. Prospecting methods and practice for large-super large deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-397(in Chinese).
- SONG Ming-chun, YANG Li-qiang, FAN Hong-rui, YU Xue-feng, DING Zheng-jiang, ZHANG Yong-wen, QIU Kun-feng, LI Jie, ZHANG Liang, WANG Bin, LI Shi-yong. 2022. Current progress of metallogenic research and deep prospecting of gold deposits in the Jiaodong Peninsula during 10 years for Exploration Breakthrough Strategic Action[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 903-935(in Chinese with English abstract).
- SONG Ming-chun, ZHOU Jian-bo, SONG Ying-xin, WANG Bin, LI Shi-yong, LI Jie, WANG Shan-shan. 2020. Mesozoic Weideshan granitoid suite and its relationship to large-scale gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Geological Journal*, 55: 5703-5724.
- SONG Ying-xin, SONG Ming-chun, DING Zheng-jiang, WEI Xu-feng, XU Shao-hui, LI Jie, TAN Xian-feng, LI Shi-yong, ZHANG Zhao-lu, JIAO Xiu-mei, HU Hong, CAO Jia. 2017. Major advances on deep prospecting in Jiaodong gold ore cluster and its metallogenic characteristics[J]. *Gold Science and Technology*, 25(3): 4-18(in Chinese with English abstract).
- SONG Ying-xin, SONG Ming-chun, SUN Wei-qing, MA Xiao-dong, LI Da-peng. 2018. Metallogenic epoch and regional crust evolution in the Jiaodong gold deposit, Shandong Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages of mafic dykes[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(5): 908-919(in Chinese with English abstract).
- SONG Ying-xin, YU Xue-feng, LI Da-peng, GENG Ke, YU Peng-fei, ZUO Xiao-min, WANG Xiu-feng. 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).
- TANG Hua-yun, ZHENG Jian-ping, YU Chun-mei, PING Xian-quan, REN Hong-wei. 2014. Multistage crust-mantle interactions during the destruction of the North China Craton: Age and composition of the Early Cretaceous intrusions in the Jiaodong Peninsula[J]. *Lithos*, 190-191: 52-70.
- TANG Wen-long, FU Chao, ZOU Jian, HE Jiang-tao, XI Hong, TIAN Jie-peng, DANG Zhi-cai. 2021. LA-ICP-MS U-Pb isotopic chronology of monazite from Tangjiagou gold deposit in Jiaodong and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 809-821(in Chinese with English abstract).
- WANG Bin, SONG Ming-chun, HUO Guang, ZHOU Ming-ling, XU Zhong-hua, JIANG Lei, SONG Ying-xin, LI Jie. 2021. Source characteristics and tectonic evolution of Late Mesozoic granites in Jiaodong and their implications for gold mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 1-12.

- 288-320(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-gong, ZHU De-cheng, GUO Rui-peng, YU Xiao-wei, TIAN Jing-xiang, KE Chang-hui, LIU Han-dong, TIAN Rui-cong, GAO Hua-li. 2018. Geochemistry, zircon U-Pb age and Lu-Hf isotopes of the Cangshang and Sanshandao monzogranites in the northwestern Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 2081-2095(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-jin, WAN Yu-sheng, WANG Wei, SONG Zhi-yong, WANG Jin-guang, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, LIU Qing-de. 2010. Forming ages of granites in Laoshan area of Shandong Province—zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Shandong Land and Resources*, 26(10): 1-5, 10(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong-qing, LI Shan, YANG Zhen-liang, LIU Cai-jie, SUI Xiao-ling, LIU Xiang-dong. 2022. Three-dimensional geological characteristics and fracture-controlling laws of Lingnan-Shuiwangzhuang giant gold deposit in Jiaodong[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 977-985(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-xin, JIAO Xiu-mei, DING Zheng-jiang, LIU Xiao-min, LI Guo-hua, JI Xu-bo, TANG Jun-zhi. 2017. Feature of ore-controlling structure and prospecting direction for the Liaoshang-type gold deposit in the northeast margin of Jiaolai Basin, Shandong Province[J]. *Gold Science and Technology*, 25(3): 61-69(in Chinese with English abstract).
- XUE Jian-ling, PANG Zhen-shan, LI Sheng-rong, CHEN Hui, SUN Wen-yan, TAO Wen, YAO Lei, ZHANG Yun-qiang. 2019. The genesis of Denggezhuang gold deposit in Jiaodong: Constraints from multigeological chronology and isotope system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1532-1550(in Chinese with English abstract).
- YAN Quan-shu, METCALFE I, SHI Xue-fa, ZHANG Ping-yang, LI Feng-chun. 2019. Early Cretaceous granitic rocks from the southern Jiaodong Peninsula, eastern China: implications for lithospheric extension[J]. *International Geology Review*, 61(7): 821-838.
- YANG Kui-feng, FAN Hong-rui, SANTOSH M, HU Fang-fang, WILDE S A, LAN Ting-guang, LU Li-na, LIU Yong-sheng. 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 Kui-feng, JIANG Peng, FAN Hong-rui, ZUO Ya-bin, YANG Yue-heng. 2018. Tectonic transition from a compressional to extensional metallogenic environment at similar to 120 Ma revealed in the Hushan gold deposit, Jiaodong, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 408-425.
- YANG Li-qiang, DENG Jun, GOLDFARB R J, ZHANG Jing, GAO Bang-fei, WANG Zhong-liang. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 25(4): 1469-1483.
- YANG Li-qiang, DENG Jun, WANG Zhong-liang, ZHANG Liang, GUO Lin-nan, SONG Ming-chun, ZHENG Xiao-li. 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).
- YANG Li-qiang, GUO Lin-nan, WANG Zhong-liang, ZHAO Rong-xin, SONG Ming-chun, ZHENG Xiao-li. 2017. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 491-510.
- YUAN Zhong-zheng, LI Zhan-ke, ZHAO Xin-fu, SUN Hua-shan, QIU Hua-ning, LI Jian-wei. 2019. New constraints on the genesis of the giant Dayingezhuang gold (silver) deposit in the Jiaodong district, North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 112: 103038.
- ZHANG Liang, WEINBERG R F, YANG Li-qiang, GROVES D I, SAI Sheng-xun, MATCHAN E, PHILLIPS D, KOHN B P, MIGGINS D P, LIU Yue, DENG Jun. 2020. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120 ± 2 Ma during cooling of pregold granite intrusions[J]. *Economic Geology*, 115(2): 415-441.
- ZHANG Pi-jian, SONG Ming-chun, LIU Dian-hao, DING Zheng-jiang, HU Pei-qiang, YANG Guo-fu, WANG Hai-bo. 2015. Features of deep-seated gold orebodies of No. 171 lode and structural ore-controlling action in Linglong gold orefield, Shandong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 34(5): 855-873(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Tian, ZHANG Yue-qiao. 2008. Late Mesozoic tectono-magmatic evolution history of the Jiaobei uplift, Shandong Peninsular[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1210-1228(in Chinese with English abstract).
- ZHU Bao-lin, LIU Zhen-jiang, CHENG Shao-bo, XUE Yu-shan, WANG Jian-ping, XU Lei. 2016. Re-Os isotopic dating of molybdenites from the Yuangezhuang pluton in Jiaodong and its geological significance[J]. *Geology in China*, 43(4): 1353-1366(in Chinese with English abstract).
- ZHU Ri-xiang, FAN Hong-rui, LI Jian-wei, MENG Qing-ren, LI Sheng-rong, ZENG Qing-dong. 2015. Decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.