

胶东金矿成矿模式*

宋明春¹, 林少一¹, 杨立强², 宋英昕³, 丁正江⁴, 李杰⁵, 李世勇⁶, 周明岭¹

(1 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209; 2 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013; 4 山东省地质矿产勘查开发局, 山东 济南 250013; 5 河北地质大学资源学院, 河北 石家庄 050031; 6 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013)

摘要 胶东是全球三大金矿集区之一, 深入研究其成矿模式对于正确认识胶东金矿类型并指导进一步找矿具有重要的理论意义和实践价值。文章通过系统总结胶东金矿控矿构造特征与型式、构造与矿体的耦合关系、岩浆活动与金矿化的关系及其他成矿地质因素, 在分析不同类型和不同层次金矿赋矿规律、成矿机制的基础上, 分别建立了破碎带蚀变岩型金矿、石英脉型金矿、胶西北金矿和深部金矿成矿模式。综合分析后, 提出了胶东金矿热隆-伸展成矿模式, 其要义是: 早白垩世, 由于板块俯冲、回撤, 诱发壳幔相互作用, 产生大规模岩浆活动, 引起广泛的流体活动; 同时, 地壳拉张和岩浆隆升, 形成花岗岩穹窿-伸展构造, 出现大量铲式断层、拆离断层等。与岩浆活动有关的高强度含矿流体活动和交代蚀变作用是胶东金矿大规模集中产出的基础条件, 地壳快速隆升引起强烈减压、降温是大量金质从流体中析出、沉淀的重要原因, 伸展构造则为大规模金成矿提供了充足的空间。

关键词 地质学; 胶东金矿; 成矿模式; 断裂构造; 热隆-伸展; 破碎带蚀变岩型和石英脉型金矿; 阶梯式成矿

中图分类号 P618.51

文献标志码 A

Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits

SONG MingChun¹, LIN ShaoYi¹, YANG LiQiang², SONG YingXin³, DING ZhengJiang⁴, LI Jie⁵,
LI ShiYong⁶ and ZHOU MingLing¹

(1 Shandong Provincial No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Institute of Geological Sciences of Shandong Province, Jinan 250013, Shandong, China; 4 Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250013, Shandong, China; 5 College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 6 Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, Shandong, China)

Abstract

Jiaodong Peninsula (eastern Shandong) is one of the three most important gold ore concentration areas in the world, and its metallogenic model of gold deposits is significant in understanding the type of the Jiaodong gold deposits and targeting exploration. This paper systematically summarizes the characteristics of ore-controlling structure, coupling relationships between structure and orebody, internal connection between magmatic activity and gold mineralization, and other ore-controlling factors. By analysis of the characteristics of ore-bearing and ore-forming mechanism, the authors established the metallogenic models for alteration rock style gold deposits in fracture zone, quartz vein style gold deposits, gold deposits in northwestern Jiaodong Peninsula and deep-seated gold deposits and, on such a basis, the metallogenic model of thermal upwelling-extension structure for Jiaodong

* 本文得到山东省重点研发计划(编号:2017CXGC1604)和山东省泰山学者建设工程专项经费(编号:ts201511076)联合资助

第一作者简介 宋明春,男,1963年生,博士,工程技术应用研究员,主要从事矿产勘查、区域地质调查和相关研究。Email:mingchuns@163.com

收稿日期 2019-07-13;改回日期 2020-03-04。张绮玲编辑。

ore deposits was presented. In the early Cretaceous, due to the subduction and roll back of the paleo-Pacific Plate, large-scale magma activities and extensive fluid activities occurred in the Jiaodong Peninsula. Meanwhile, under the granite dome-extension structure, a large number of shovel faults and detachment faults were induced by the crustal extension and subsequent magma upwelling. The extensive ore-bearing fluid activities and alteration related to magmatic activities constituted the prerequisite for large-scale metallogenesis of gold deposits. The rapid uplift of the crust caused intense decompression and cooling, which seems to have been an important reason for the precipitation of large amounts of gold from the fluids. Extensional structures provided sufficient space for gold mineralization.

Key words: geology, Jiaodong Peninsula gold deposits, metallogenic model, fault, thermal upwelling-extension structure, alteration rock style and quartz vein style gold deposits, a stepped distribution pattern

胶东是中国最重要的黄金资源基地和全球三大金矿集区之一,累计探明金资源储量占全国总量的1/3左右(宋明春等,2018a)。20世纪60年代,在胶东地区的区域性大断裂中发现了破碎带蚀变岩型金矿类型,突破了“大断裂只导矿不储矿”的传统找矿理论认识(李士先等,2007),推动了中国金矿资源储量的大幅增长。本世纪以来,在胶东主要成矿构造带700~2000 m深度范围内发现了受阶梯式缓倾角断裂控制的深部金矿床(体),率先突破国内深部找矿技术瓶颈,使中国金矿资源储量跃居全球第二。胶东地区是中国金矿勘查和研究程度非常高的地区之一,前人对金矿床的特征、成矿规律、矿床成因等进行了大量研究(范宏瑞等,2005;邓军等,2006; Deng et al., 2011; 2019; Song et al., 2012; 2015; 宋明春等, 2014; 杨立强等, 2014; Li et al., 2015; Cai et al., 2018),近年来,国家重点研发计划中的“深地资源勘查开采”重点专项将胶东金矿深部探测列为重要的研究目标,这些研究工作有力地推动了胶东地区的金矿勘查。大量的勘查和研究成果表明,胶东金矿具有鲜明的特色,其主要特征包括:受区域大断裂控制、赋矿围岩主要是中生代花岗岩和早前寒武纪高级变质岩、形成于伸展构造背景、矿石类型以破碎带蚀变岩为主、矿化连续易形成超大型矿床、矿体沿倾向的延伸一般大于走向的长度、矿化蚀变具有分带性、元素组合中富集Ag-Cu-Pb-Zn-Mo、Au/Ag值一般小于1(0.13~2.06)等(宋明春等,2019)。这些特征不同于国际上已知的其他金矿类型,也不同于经典的造山型金矿。虽然有研究者提出胶东金矿总体属造山型范畴(Zhou et al., 2000; Goldfarb et al., 2001; Qiu et al., 2002; Chen et al., 2005),但近年来也有研究者指出,胶东金矿具有独特的矿床特征和成矿机制,是不同于国际已知类型的独特金矿类型(杨

立强等,2014; Li et al., 2015; Zhu et al., 2015; 宋明春等, 2019)。

以往的地质工作,在胶东地区建立了一系列金矿成矿模式,其中,反映金矿赋存位置和相互关系的有断裂控矿模式(李士先等,2007)和焦家—玲珑式金矿成矿模式(吕古贤等,1993);揭示矿床成因的有深熔再生岩浆期后热液金矿与多源长期成矿模式(李士先等,2007)、造山型金矿成矿模式(Goldfarb et al., 2014)、热隆—伸展成矿模式(宋明春等,2014)和胶东型金矿成矿模式(Deng et al., 2015; Li et al., 2015)等;阐明浅部与深部矿床(体)关系的有地壳连续成矿模式(杨立强等,2014)和阶梯式成矿模式(Song et al., 2012)等。这些模式中从不同侧面反映了胶东地区区域或局部的金矿赋存规律和成因机制。各种模式在胶东金矿受断裂构造控制、成矿与深部流体活动和交代蚀变有关、浅部与深部连续成矿、矿化发生于晚中生代强烈的构造岩浆活动背景等方面具有大致相似的看法,但在矿床成因或成矿构造背景、成矿物质来源和成矿地质体、成矿时代等方面存在较大分歧(宋明春等,2018a),对赋矿位置及其地质特征缺乏精细刻画。因此,建立客观有效的成矿模式对于全面、正确认识胶东金矿成矿规律和成因机制具有重要意义。另外,近年来的深部找矿揭示了一些新的成矿规律,如:阶梯式成矿,深部矿体倾角缓、厚度大、品位低、金矿物粒度小,平行主断裂的相对缓倾角似层状主矿体之下常出现陡倾脉状矿体等(宋明春等,2011; Song et al., 2012),为合理构建成矿模式提供了更丰富的资料。本文在综合前人研究成果的基础上,结合近年深部找矿的重要进展(宋英昕等,2017),集成建立了胶东金矿系列成矿模式,包括反映不同矿化类型的单一成矿模式(破碎带蚀变岩型金矿断裂渗流交代成矿模式和石英脉

型金矿泵吸充填成矿模式)和侧重于不同矿化类型空间关系与配置的区域成矿模式(胶西北金矿区域成矿模式和深部金矿阶梯式成矿模式),最终形成了阐述成矿机制与矿床形成过程的胶东金矿热隆-伸展成矿模式。本文对胶东金矿成矿模式的研究,一方面揭示了热隆-伸展构造背景下,与大规模成矿有关的岩浆作用引起的高强度含矿流体活动、地壳快速隆升造成的强烈减压降温过程、伸展构造产生的特定构造位置等关键成矿因素,深化发展了胶东大规模成矿的理论认识;另一方面阐明了构造控矿规律,明晰了赋矿位置和找矿方向,对于指导胶东地区深部找矿具有重要的应用价值。

1 地质背景和金矿床分布

1.1 区域地质背景

胶东位于山东省东部半岛区域,包括隶属华北克拉通的胶北地体、隶属秦岭-大别-苏鲁造山带的威海地体和叠加于二者之上的胶莱盆地等构造单元。主要由前寒武纪和中生代地质体组成,另有少量古近纪-新近纪火山岩和碎屑沉积物及第四纪松散沉积物(图1)。胶北地体是一个前寒武纪结晶基底隆起区,主要由太古宙花岗-绿岩带和古-新元古代变质地层组成(Li et al., 2012),少量古元古代基性-超基

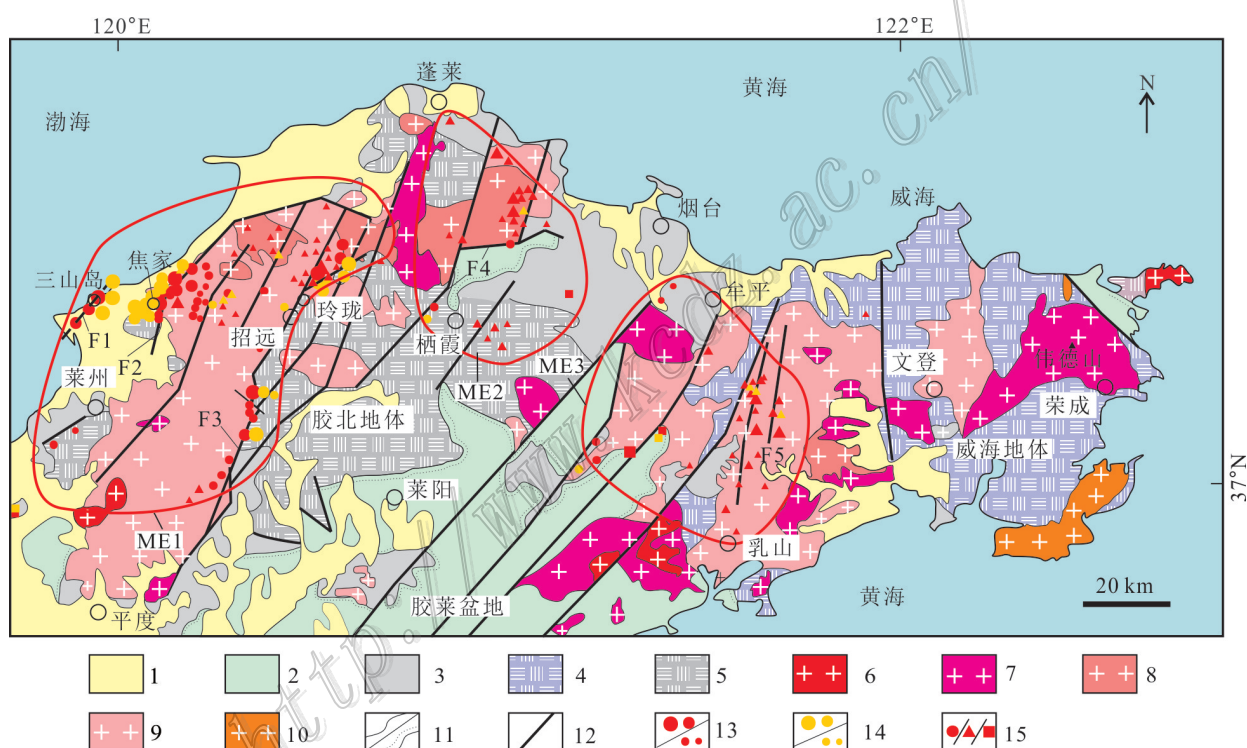


图1 胶东地区区域地质及金矿床分布图(宋明春等, 2018a)

1—第四系;2—白垩系;3—古元古界和新元古界;4—含榴辉岩的新元古代花岗质片麻岩;5—太古宙花岗-绿岩带;6—白垩纪崂山型花岗岩;7—白垩纪伟德山型花岗岩;8—白垩纪郭家岭型花岗岩;9—侏罗纪花岗岩类;10—三叠纪花岗岩类;11—整合/不整合地质界限;12—断层;13—以往探明的浅部金矿床位置(图中金矿符号大小依次代表资源储量 ≥ 100 t的超大型金矿床、 $20 \text{ t} \leq \text{资源储量} < 100$ t的大型金矿床、 $5 \text{ t} \leq \text{资源储量} < 20$ t的中型金矿床和资源储量 < 5 t的小型金矿床);14—新探明的深部金矿床位置(图中金矿符号大小含义同图例13);15—蚀变岩型和网脉型金矿,石英脉型和硫化物石英脉型金矿,以及蚀变角砾岩型、蚀变砾岩型和层间滑脱拆离带型金矿;ME1—胶西北成矿小区;ME2—栖霞-蓬-福成矿小区;ME3—牟-乳成矿小区;F1—三山岛断裂;F2—焦家断裂;F3—招平断裂;F4—西林-陡崖断裂;F5—金牛山断裂

Fig. 1 Regional geological sketch map and distribution of gold deposits in the Jiaodong Peninsula (after Song et al., 2018a)

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Paleoproterozoic and Neoproterozoic; 4—Neoproterozoic granitic gneiss with eclogite; 5—Archean granite-greenstone belt; 6—Cretaceous Laoshan granite; 7—Cretaceous Weideshan granite; 8—Cretaceous Guojialing granite; 9—Jurassic granite; 10—Triassic granite; 11—Conformity/unconformity; 12—Fault; 13—Shallow gold deposits (superlarge, large, midsize and small); 14—Deep gold deposits (superlarge, large, midsize and small); 15—Gold deposit of altered rock style/quartz vein style/altered breccia style; ME1—Northwestern Jiaodong Peninsula gold mineralization concentrated area; ME2—Qipengfu gold mineralization concentrated area; ME3—Muru gold mineralization concentrated area; F1—Sanshandao fault; F2—Jiaojia fault; F3—Zhaoping fault; F4—Xilin-Douya fault; F5—Jinniushan fault

性岩及花岗岩类,发育较多中生代花岗岩类侵入体及脉岩带,局部有小的中生代断陷沉积盆地。威海地体是三叠纪华北与扬子板块之间的碰撞造山带,主要由含超高压榴辉岩的新元古代花岗质片麻岩组成,可见少量古元古代变质表壳岩和中元古代基性-超基性岩组合,有较多中生代花岗岩类侵入体。胶莱盆地由白垩纪陆相火山-沉积岩系组成。胶东地区的中生代花岗岩类侵入岩主要包括侏罗纪花岗岩类(玲珑型花岗岩和文登型花岗岩)、白垩纪花岗岩类(郭家岭型花岗闪长岩、伟德山型花岗岩和崂山型花岗岩),少量三叠纪花岗岩类(宁津所型正长岩、槎山型正长花岗岩)。胶东地区断裂构造发育,其中NE—NNE走向的断裂数量多、规模大,也有部分NW走向和近EW走向的断裂。在前寒武纪结晶基底和侏罗纪花岗岩中广泛分布韧性剪切带。

1.2 金矿类型及分布

胶东地区已探明金资源储量5000余吨,是中国最大的金矿集区,也是仅次于南非兰德和乌兹别克斯坦穆龙套成矿区的世界第三大金矿集中区。金矿床主要分布于莱州、招远、蓬莱、栖霞、福山、牟平、平度、莱西、乳山和文登等行政市(区),共有中型及以上金矿床100余处,其中近年来探明的赋存深度在700~2000 m的深部金矿床近40处。资源储量大于100 t的超大型金矿床资源量占胶东总资源量的65%,大型金矿床占24%,中型金矿床占11%。金矿床集中成区、带分布,构成3个成矿小区(分别是胶西北、栖霞-福和牟-乳成矿小区)(图1),6条NE向至近SN走向的成矿带(三山岛、焦家、招平、栖霞—大柳行、桃村和牟乳成矿带),13处金矿田(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)(宋明春等,2014)。

胶东地区的金矿化类型主要是焦家式破碎带蚀变岩型和玲珑式石英脉型,二者累计资源储量占胶东金资源总量的90%以上。此外,还有邓格庄式硫化物石英脉型、河西式破碎带石英网脉带型、蓬家夼式盆缘断裂角砾岩型、发云夼式蚀变砾岩型、杜家崖式层间滑动构造带型和辽上式黄铁矿碳酸盐脉型等8种金矿化类型(宋明春等,2014;2018a;李国华等,2016)。不同金矿类型受不同的构造位置和围岩条件控制,例如:焦家式金矿产于区域性较大规模主控矿断裂主断面下盘的蚀变碎岩中,玲珑式金矿产于远离主断面的次级张裂隙中,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,邓格庄式金矿产于陡倾断裂中,发云夼式金矿产于白垩纪莱阳群底部的铲式断裂、裂隙中,蓬家夼式金矿产于中生代盆缘断裂中(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界—古元古界变质岩系次之,少量金矿床赋存于下白垩统莱阳群的底部。胶东金矿床主要受NNE—近SN走向的断裂控制(宋英昕等,2017),主要控矿断裂自西向东有: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(图1)。

2 破碎带蚀变岩型金矿断裂渗流交代成矿模式

2.1 赋矿断裂和赋矿结构面

20世纪60年代,山东省地质六队在胶东西北部莱州市境内发现了受区域大断裂控制的破碎带蚀变岩型金矿,命名为焦家式金矿,结束了中国以石英脉型金矿为重点的找矿历史,开拓了金矿找矿新方向。这种破碎带蚀变岩型金矿受胶西北的3条区域性较大规模断裂控制,其中的三山岛断裂陆地部分长度约12 km(其南北两端均延伸到海域,总长度尚未控制),焦家断裂长约60 km,招平断裂长约120 km。产于三山岛断裂的三山岛金矿和产于焦家断裂的焦家金矿是破碎带蚀变岩型金矿的典型代表。继焦家式金矿发现之后,胶东地区陆续发现和命名了产于焦家断裂下盘的河西式网脉状金矿、产于胶莱盆地东北缘盆缘断裂两盘的发云夼式蚀变砾岩型金矿和蓬家夼式蚀变角砾岩型金矿,以及产于前寒武纪变质岩系层间滑脱拆离带中的杜家崖式金矿等,这些金矿类型是由不同性质的围岩(碎裂岩、碎裂花岗岩、砾岩、构造角砾岩、糜棱岩等)发生类似的矿化蚀变(黄铁绢英岩化)而形成的,属于广义的破碎带蚀变岩型金矿。

蚀变岩型金矿是胶东最重要的金矿类型,其资源总量占胶东金矿的87%,中型及以上矿床数量占总数量的64%(宋明春等,2018a)。在胶西北地区,三山岛、焦家和招平3条主干控矿断裂总体呈NNE走向,平面上,断裂呈舒缓波状展布,其走向在NE向至NNE向之间波动变化,断裂下盘的次级断裂较发育,部分区段主断裂与下盘次级断裂形成菱形结环状、帚状等构造组合型式(李士先等,2007);剖面上,

断裂的浅部倾角较陡,向深部变缓,而且呈现陡、缓交替特征,构成铲式阶梯状断裂(宋明春等,2010)。断裂的多期活动特征比较明显,一般认为成矿前断裂经受了压扭性活动,形成断层泥;成矿期断裂活动属张扭性质,为成矿流体运移、沉淀提供了有利空间;成矿后断裂以压性为主兼扭性。总体看,破碎带蚀变岩型金矿的控矿断裂兼具张性和剪切构造性质(苗来成等,1997;李厚民等,2003;汪劲草等,2003;李俊建等,2005)。

金矿体主要赋存于以断层泥为标志的断裂主断面下盘的破碎蚀变带中(图2),矿体延深一般大于延长。重要的赋矿结构面包括:

(1) 断裂拐弯部位(图2),如三山岛金矿、新立金矿和仓上金矿均赋存于三山岛断裂走向拐弯附近(Zhang et al., 2019);

(2) 主断裂下盘次级断裂发育部位,断裂交汇处、断裂交叉处、断裂分枝处及局部张性裂隙均是有利赋矿部位(图2;苗来成等,1997;李士先等,2007),如焦家金矿田和玲珑金矿田分别产于焦家断裂和招平断裂下盘的次级断裂发育区段,主断裂和次级断裂分别构成的菱形结环状和帚状构造组合型式是这2个金矿田的特征成矿构造型式(李士先等,2007);

(3) 断裂倾角变化部位,在剖面上,断裂构造倾角变缓部位常形成厚大矿体,如在三山岛北部海域金矿床,控矿的三山岛断裂在-600 m至-1000 m标高段,倾角在75°~85°之间,在-1000 m至-1764 m标高段,断裂倾角变缓为35°~40°,矿床的厚大矿体赋

存于倾角较缓段(宋明春等,2015)。

2.2 蚀变岩型金矿的构造-蚀变-矿化分带

破碎带蚀变岩型金矿受断裂构造控制,大型矿床主要赋存于区域较大规模断裂构造带中。沿控矿断裂常发育断层泥,断层泥两侧分布有破碎蚀变岩,这种蚀变岩是在断裂构造岩的基础上,经后期热液作用蚀变改造而成的,具有分带现象。以断层泥为中心,上下盘的破碎蚀变岩呈带状分布,断裂两盘依次出现绢英岩(绢英岩质碎裂岩)带、绢英岩化××(原岩)质碎裂岩带和钾化、绢英岩化××岩(原岩)带,由内向外岩石的破碎和蚀变程度逐渐递减(李士先等,2007)。在焦家矿区,主裂面以灰黑色断层泥(厚2~40 cm)为标志,由主裂面向外的3个破碎蚀变岩带分别是:靠近主裂面的(黄铁)绢英岩带,厚0.00~80 m,平均21.70 m;中间的(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩带,厚4.20~188.50 m,平均53.47 m;外部的(黄铁)绢英岩化碎裂花岗岩带(-400 m标高以上的断裂上盘为绢英岩化斜长角闪岩带),平均厚度约200 m。金矿体主要赋存于焦家主断裂下盘的破碎蚀变带中,划分为3个矿体群,在黄铁绢英岩带内赋存的矿体为Ⅰ号矿体群,其中的Ⅰ-1号矿体是主矿体,其资源量占总资源量的87.27%;在黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内赋存的矿体为Ⅱ号矿体群;在黄铁绢英岩化花岗岩带内赋存的矿体为Ⅲ号矿体群,其中在浅部矿区开采过程中控制了大量陡倾角矿体(图3)。断裂上、下盘破碎蚀变岩呈非镜像的近似对称分带,主要表现为:断裂下盘的岩石破碎程度强于上盘,下

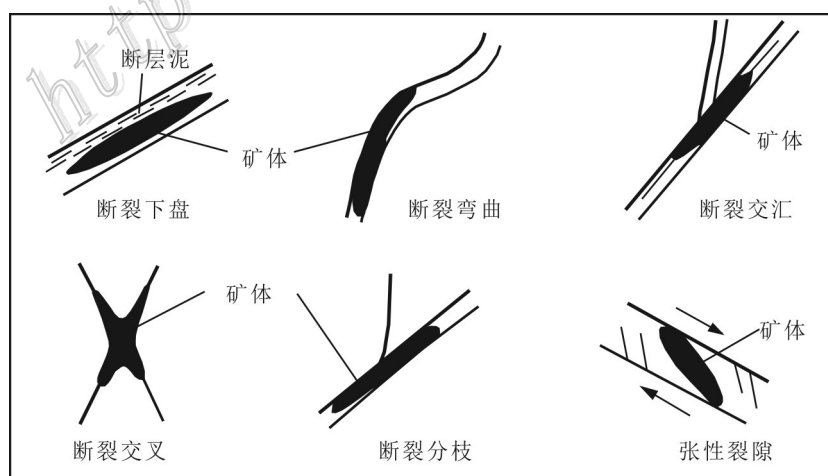


图2 胶西北地区有利断裂成矿部位示意图(据苗来成等,1997修改)

Fig. 2 Sketch map showing favorable locations of gold deposition in the faults in northwestern Jiaodong Peninsula (modified after Miao et al., 1997)

盘发育原岩不易识别的碎裂岩(碎粒岩和碎粉岩),上盘主要是能够识别原岩结构和成分的碎裂岩化岩石,下盘破碎带的厚度一般大于上盘;断裂上盘常有较多早前寒武纪变质岩系(斜长角闪岩、英云闪长岩等),断裂下盘主要为花岗岩;断裂下盘的蚀变程度强于上盘,上盘一般不发育强烈蚀变的绢英岩或绢英岩质碎裂岩,常常缺失,主要是能够识别原岩结构和成分的绢英岩化岩石,下盘发育稳定的绢英岩和绢英岩质碎裂岩带;断裂下盘的矿化程度强于上盘,下盘普遍发育黄铁矿化,是金矿体的主要赋矿位置,上盘常没有明显的黄铁矿化,偶尔有金矿体分布。

沿赋矿断裂的构造-蚀变-矿化分带具有一致性特点,由断裂主裂面至远离主裂面,构造变形强度由强变弱,在花岗质岩石区,构造分带表现为断层泥带、碎裂岩带、花岗质碎裂岩带、碎裂花岗岩带和花岗岩带;相应的,蚀变强度由强变弱,蚀变分带则表现为黄铁绢英岩带、黄铁绢英岩化花岗岩带、钾化-绢英岩化花岗岩带;矿化强度也由强变弱,矿化类型从稠密浸染状、浸染状-网脉状、网脉状-脉状、脉状发生变化(表1)。矿床中矿体集中成群产出,在主断面之下的3层矿化蚀变带中分别产出3个矿体群,黄铁绢英岩(黄铁

绢英岩化碎裂岩)带内赋存Ⅰ号矿体群,而且金矿床主矿体多赋存于这一蚀变带中;黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带内赋存Ⅱ号矿体群,一般为矿床的次要矿体,也有主矿体赋存于或延伸到这一蚀变带中者;黄铁绢英岩化花岗岩带内赋存Ⅲ号矿体群,均为次要矿体;在正常花岗岩中可见稀疏的石英脉型金矿体(图4)。在断裂主断面附近,矿体产状与主断面平行,随着远离主断面,逐渐出现斜交主断面和反向倾斜的矿体。

2.3 断裂渗流交代成矿机制

胶东地区区域大断裂的发育为蚀变岩型金矿成矿提供了有利条件。由于控矿断裂通达地表,且断裂系统上盘与地表连通性好,岩石冷,为氧化环境下的水溶液循环系统;而由断层泥构成的致密遮挡层为顶盖的断裂构造下盘,岩石热,属于还原环境的水溶液循环系统。从而在断裂构造上、下盘的接触部位,即两个水溶液循环系统的汇合处,形成了一个含矿热液沉淀聚集的有利场所。深部含矿热液由高压区域向低压区域上升遇到断裂构造中致密的断层泥遮挡层后,在主构造面附近聚集,由于断裂下盘以碎裂岩为主的构造岩发育良好,成矿流体以渗流方式运移(郭涛等,2008),通过与构造岩发生交代作用形

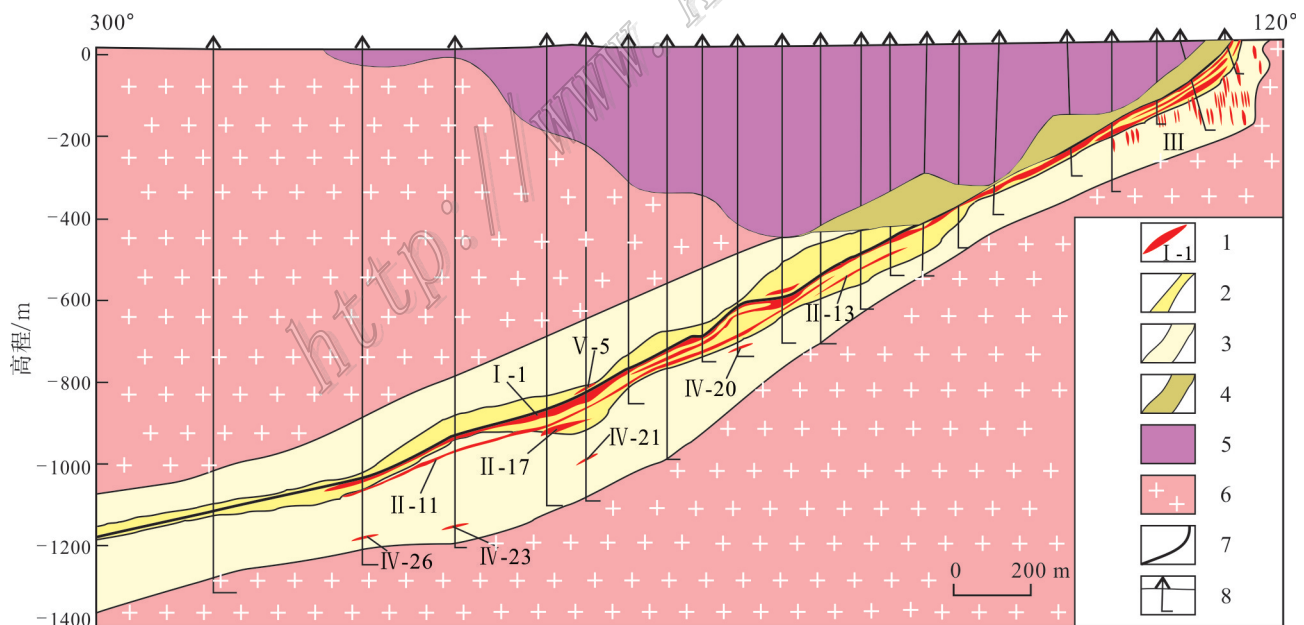


图3 焦家矿区112勘探线剖面图(据宋明春等,2010修改)

1—金矿体及编号;2—黄铁绢英岩带和黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带;3—钾化、黄铁绢英岩化花岗岩带;4—黄铁绢英岩化斜长角闪岩带;
5—前寒武纪变质岩系;6—玲珑型花岗岩;7—焦家断裂;8—钻孔位置

Fig. 3 Geological section along No. 112 exploration line in the Jiaojia gold deposit (modified after Song et al., 2010)

1—Gold orebody and its serial number; 2—Beresitization and beresitization granitic cataclasite zone; 3—Potassic and beresitization granite zone;
4—Beresitization amphibolite zone; 5—Early Precambrian metamorphic rocks; 6—Linglong granite; 7—Jiaojia fault; 8—Borehole position

表 1 蚀变岩型金矿构造-蚀变-矿化分带(据张丕建等,2015)

Table 1 Structure, alteration and mineralization zonation of the alteration rock style gold deposit (after Zhang et al., 2015)

类型	分带标志	分带特征及变化			
	距主断面距离	主断裂面附近			远离主断面
构造分带	构造岩带	断层泥 碎裂岩	花岗质碎裂岩	碎裂花岗岩	花岗岩
	构造强度	极强 强	较强	较弱	弱
	容矿裂隙	连续弥散空间			连续自由空间
	微构造	劈理 平行裂隙		交叉裂隙	张裂隙
蚀变分带	岩石类型	(黄铁)绢英岩	(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩	(黄铁)绢英岩化碎裂花岗岩	钾化花岗岩
	蚀变类型	绢英岩化、黄铁矿化、碳酸盐化	绢英岩化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化	绢英岩化、硅化、黄铁矿化、钾化、碳酸盐化	硅化、钾化、红化
	蚀变强度	强	较强	较弱	弱
矿化分带	成矿方式	交代			充填
	矿化类型	稠密浸染状	浸染状、网脉状	网脉状、脉状	脉状
	矿石类型	蚀变岩型	蚀变岩型、复合型	复合型、石英脉型	石英脉型
	矿石组构	碎裂、糜棱、交代结构、浸染状、斑杂状构造	碎裂、花岗变晶结构、浸染状、细脉网脉状构造	碎裂、花岗结构、细脉网脉状构造	晶粒状结构、块状、浸染状构造
	矿化强度	强	较强	较弱	弱

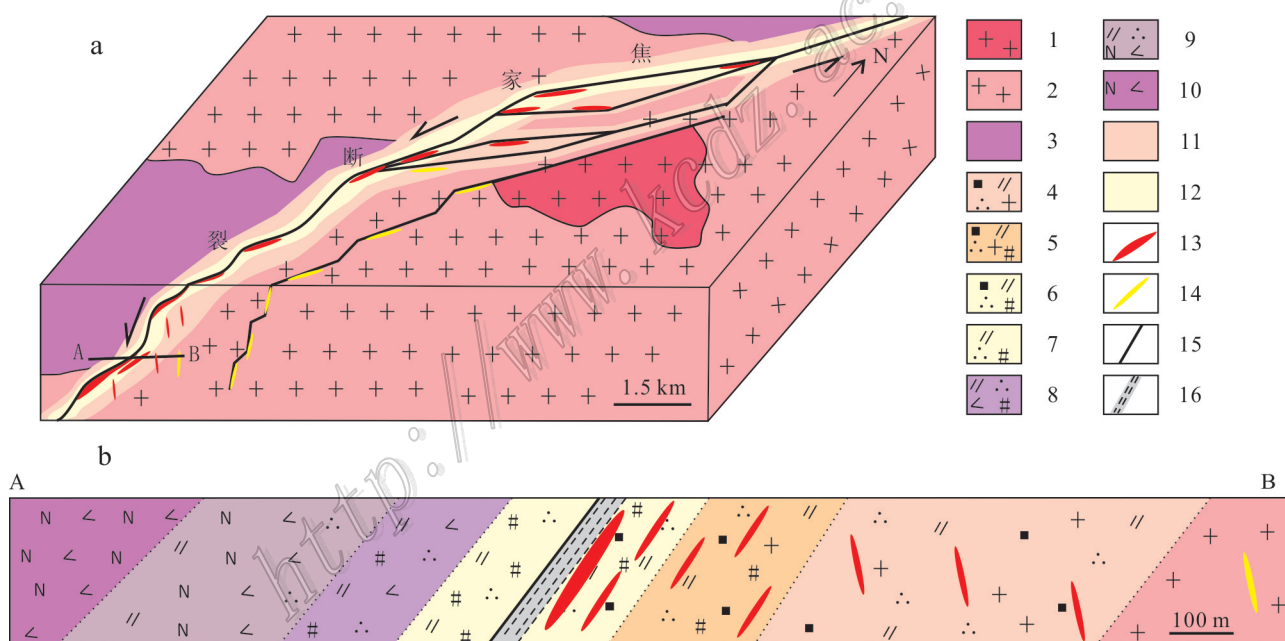


图 4 胶东破碎带蚀变岩型金矿断裂赋矿位置立体图(a,据山东省地质调查院,2014修改)和剖面示意图(b)

- 1—郭家岭型花岗岩;2—玲珑型花岗岩;3—早前寒武纪变质岩系;4—钾化黄铁绢英岩化花岗岩带(次要金矿体赋矿带);5—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带(金主矿体和次要矿体赋矿带);6—黄铁绢英岩带(金主矿体赋矿带);7—绢英岩带;8—绢英岩化斜长角闪质碎裂岩带;9—钾化绢英岩化斜长角闪岩带;10—斜长角闪岩;11—钾化绢英岩化带;12—绢英岩带和绢英岩化花岗质碎裂岩带;13—破碎带蚀变岩型金矿体;14—石英脉型金矿体;15—断裂;16—断层泥

Fig. 4 Stereogram map (a, modified after Institute of Geological Survey, Shandong Province, 2014) and section (b) of the alteration rock style gold deposit in fracture zone in Jiaodong Peninsula

- 1—Guojialing granite; 2—Linglong granite; 3—Early Precambrian metamorphic rocks; 4—Potassic and beresitization granite zone (minor orebodies zone); 5—Beresitization granitic cataclastic rock zone (major and minor orebodies zone); 6—Beresite zone (major orebodies zone); 7—Sericite quartz rock zone; 8—Beresitization amphibolite cataclastic rock zone; 9—Potassic and beresitization amphibolite zone; 10—Amphibolite; 11—Potassic and beresitization zone; 12—Sericite quartz rock and phyllic granitic cataclastic rock zone; 13—Alteration rock style gold orebody; 14—Quartz vein style gold orebody; 15—Fault; 16—Fault gouge

成以浸染状破碎带蚀变岩为主的矿体;随着热液的消耗,深部成矿物质的浓度越来越大,高浓度的成矿物质挤入到稍远离主裂面的花岗质碎裂岩带和碎裂花岗岩带的网状裂隙中(李金祥等,1999),形成脉状和网脉状多金属硫化物矿体(图5)。在赋矿断裂主裂面附近的主矿化绢英岩带,流体温度为150~250℃(±50℃),为酸性还原环境,典型矿物组合为石英+黄铁矿±黄铜矿±方铅矿±闪锌矿±碳酸盐;在主矿化带外侧的绢英岩化带,流体温度为250~350℃,为弱碱性—中性环境,典型矿物组合为绢云母+石英±黄铁矿;在赋矿断裂带外侧的钾化绢英岩化带,其流体温度为350~450℃,为碱性氧化环境,典型矿物组合为微斜长石+赤铁矿±钠长石(Fan et al., 2003; 范宏瑞等,2005; Xu et al., 2016; Yang et al., 2017)。

3 石英脉型金矿泵吸充填成矿模式

3.1 赋矿构造型式

典型的石英脉型金矿主要产于招远玲珑金矿田中,通常称为玲珑式含金石英脉型金矿,其成矿方式以充填为主,是胶东地区重要的金矿类型之一。在牟乳成矿带中产出的富含黄铁矿的邓格庄式硫化物石英脉型金矿,也是石英脉型金矿的一种类型。该类型金矿一般矿体规模相对较小,矿化连续性不好,组分

变化较大。其矿化蚀变主要为硅化、黄铁矿化等。

在玲珑金矿田,石英脉型金矿体产于主干断裂下盘伴生或派生的小规模次级构造中。破头青断裂(招平断裂)及其下盘伴生、派生的NE向次级断裂是矿田的主要含矿断裂。这些伴生、派生的次级断裂被石英脉充填,在平面上自北东向南西撒开,颇似帚状构造型式(图6)。石英脉密集分布,玲珑矿田由700余条大致平行的含金石英脉及含金蚀变岩脉组成(二者均简称为矿脉)。仅在大开头矿段,长度大于50 m的含金石英脉就有254条之多,脉体走向40°~80°,倾向NW,倾角50°~90°,个别向SE陡倾,沿走向及延深方向均呈舒缓波状变化(张丕建等,2015)。而招平断裂主断裂由破碎蚀变岩组成,其中赋存破碎带蚀变岩型金矿。

在牟乳成矿带,硫化物石英脉型金矿体产于一组近平行分布的NNE向断裂带中。断裂自东向西每隔4~5 km出现一条,单条断裂宽度从几米到数十米,整体倾向SE,局部倾向NW,倾角65°~85°;断裂带断续出露长度达60 km,最大宽度约15 km。金牛山断裂带为牟乳成矿带的一条重要控矿断裂,断裂宽度变化于数米至数十米间,由数条平行或分枝复合的断裂构成。断裂面呈舒缓波状,断裂带内见规模不等的石英脉呈雁行排列或尖灭再现分布,并被挤压破碎。整个断裂带在平面上不连续分布,呈右

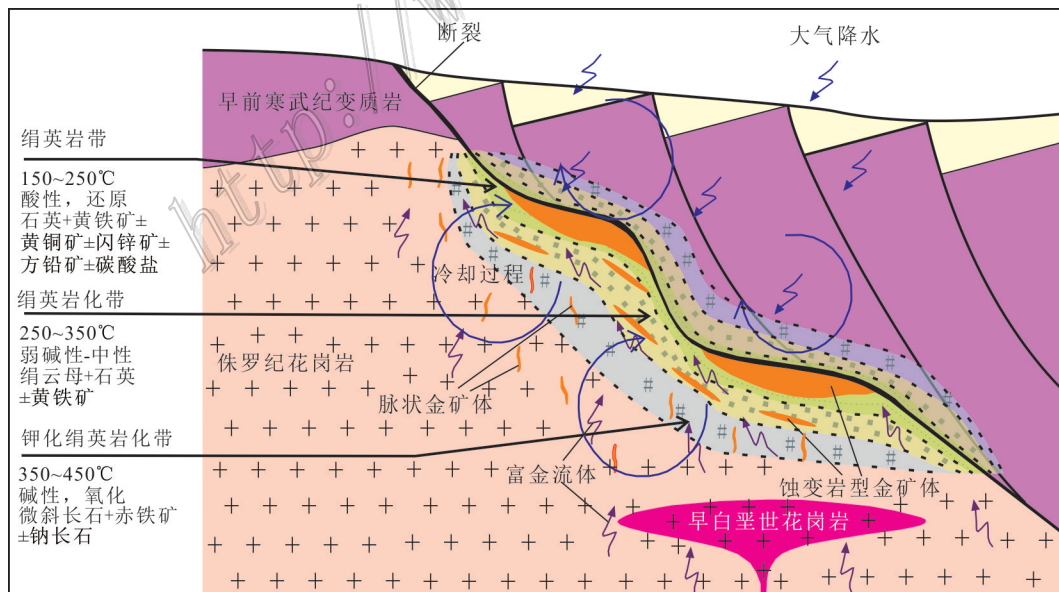


图5 蚀变岩型金矿断裂渗流交代成矿机制(据 Fan et al., 2003; 范宏瑞等,2005;杨立强等,2014;Xu et al., 2016)

Fig. 5 Mineralization mechanism of seepage metasomatism for the alteration rock style gold deposit (after Fan et al., 2003; 2005; Yang et al., 2014; Xu et al., 2016)

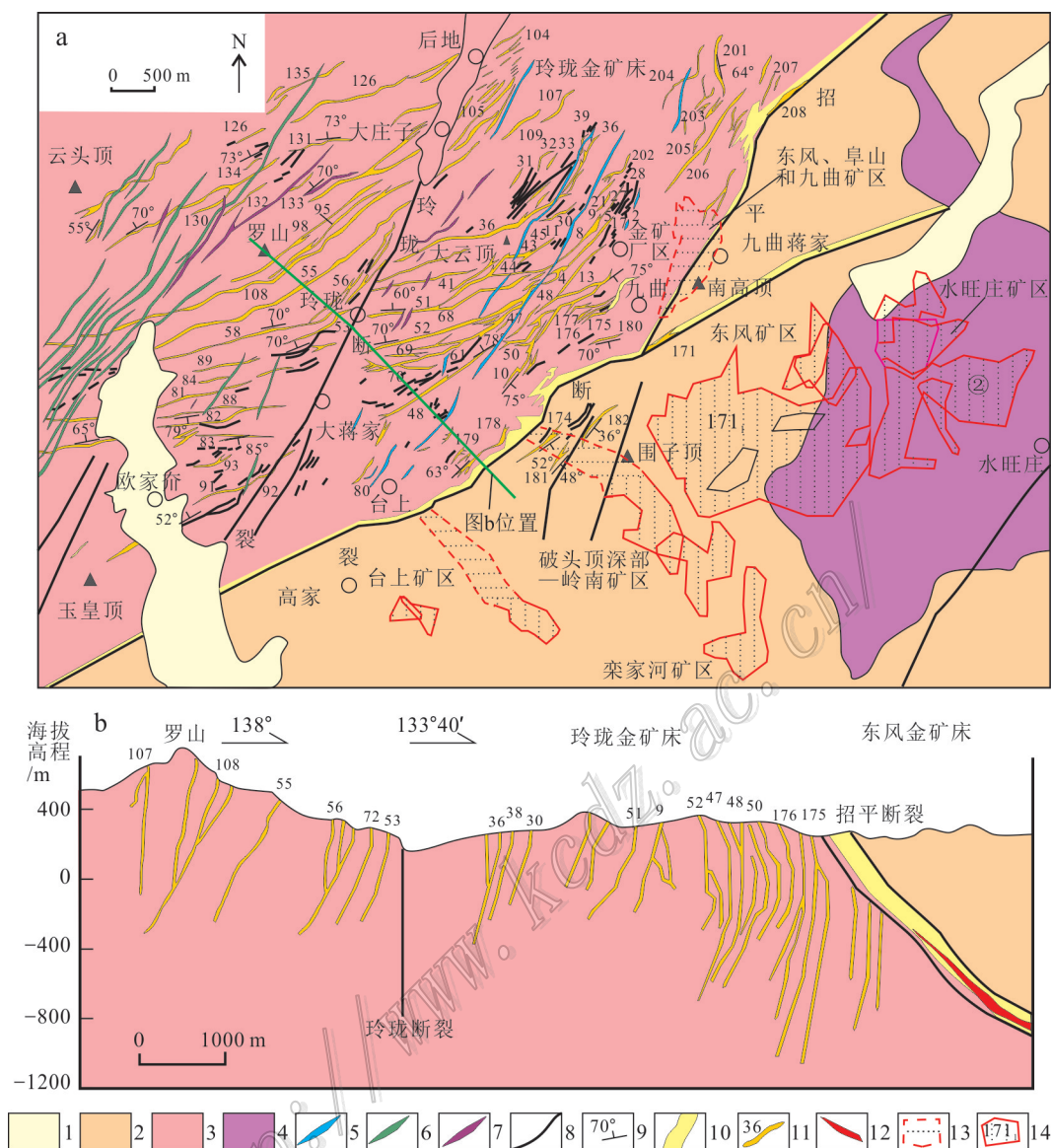


图6 玲珑金矿田矿脉分布(a)及赋矿构造型式(b)(宋英昕等, 2017)

1—第四系; 2—莱家河型花岗岩; 3—玲珑型花岗岩; 4—早前寒武纪变质岩系; 5—闪长岩脉; 6—闪长玢岩脉; 7—煌斑岩脉; 8—断裂; 9—岩脉、矿脉及断裂产状; 10—蚀变断裂破碎带; 11—石英脉型金矿脉及编号; 12—蚀变岩型金矿体; 13—蚀变岩型浅部金矿体水平投影范围; 14—蚀变岩型深部金矿体水平投影范围及编号

Fig.6 Geological map showing the distribution of gold-bearing veins (a) and pattern of ore-controlling structures (b) in the Linglong gold field (after Song et al., 2017)

1—Quaternary; 2—Luanjiahe granite; 3—Linglong granite; 4—Early Precambrian metamorphic rocks; 5—Diorite vein; 6—Diorite-porphyrite vein; 7—Lamprophyres vein; 8—Fault; 9—Attitude of vein and fault; 10—Altered fault fracture zone; 11—Quartz vein style gold orebody and its serial number; 12—Altered rock style gold orebody; 13—Horizontal projection range of shallow gold orebody of altered rock style and its serial number; 14—Horizontal projection range of deep-seated gold orebody of altered rock style and its serial number

阶式排列。断裂平面上表现为膨大收缩、波状弯曲的特点,矿体主要产于断裂带膨大部位。在金牛山主断裂西侧 100~500 m 的范围内发育一组 NNE 向次级断裂,为邓格庄金矿床的主要控矿构造,与金牛

山主干断裂之间成锐角相交或近平行展布,断裂走向为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,倾向 NW,倾角 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$;在金牛山断裂带的东侧也有一系列的 NNE 向的雁行式断裂,断裂一般倾向 NWW,倾角在 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 间变化。金牛山

断裂带与其次级断裂在平面上表现为右阶式雁行排列,硫化物石英脉矿体赋存于一组平行排列、交错分布的裂隙中,构成雁列脉(图7a)。邓格庄金矿矿体厚度小,沿倾向的斜深大于沿走向的长度。在剖面上,矿化带及控矿断裂由浅部向深部延深呈陡、缓交替变化,矿体主要赋存于断裂倾角的较陡段(图7b)。

分析表明,石英脉型金矿体主要赋存于断裂构造的扩容带。断裂构造在走向上的转折段,在倾向上的倾角陡、缓变化处是构造扩容带,为拉张构造应力场区域,有利于石英脉型金矿充填成矿。例如:乳山金矿在-600~-200 m标高为构造扩容带,金矿富矿脉均赋存于这一空间中。具体表现为:断裂倾角在-200m标高左右发生变化,-600~-200 m间断裂产状近直立(多在88°左右),其上、下段断裂倾角均变小,断层面趋于平缓;Ⅱ号主矿体及所有平行矿体主要赋存于-600~-200 m标高,矿体倾角82°~90°,平行矿体均为隐伏矿体;扩容带内金储量占矿山探明储量的78%左右,高品位及特高品位矿石主要见于此扩容带中;在平面上,该段处于断裂走向的拐弯位置,扩容带为应力拉张区,扩容带两侧以剪切

应力为主(曾庆栋等,1999)。

3.2 矿体分布和构造控矿特征

石英脉型矿体呈脉状、透镜状、扁豆状、囊状、串珠状、不规则状等,矿体产状与控矿断裂一致,在空间上具有分枝复合、侧现、尖灭再现现象。按规模和形态,将含金石英脉分为4类(李士先等,2007):① 稳定厚脉型石英脉,长80~800 m,厚2~6 m,石英脉稳定而连续,含矿率高,是主要工业矿脉;② 稳定薄脉型石英脉,长一般大于80 m,厚度小于1 m,一般较稳定,但含矿率低,矿体中部有时出现贫矿;③ 透镜状石英脉,长一般在40 m以内,最大不超过80 m,厚一般3~4 m,个别达6 m以上。小透镜体宽仅0.5 m左右,长宽比为20:1~5:1,以10:1居多数,沿走向尖灭迅速。倾向相对稳定,含矿率高,往往是金矿化富集地段;④ 似透镜状石英脉,透镜体由若干平行的小石英脉组成,其中一条为主脉,两侧有若干副脉,主脉与副脉在两端汇合。整个透镜体长20~40 m,最大60 m,宽4~6 m,沿走向尖灭迅速,沿倾向往往与厚脉型或薄脉型汇合,含矿率较高。石英脉型金矿的主要赋矿特征有(李士先等,2007):

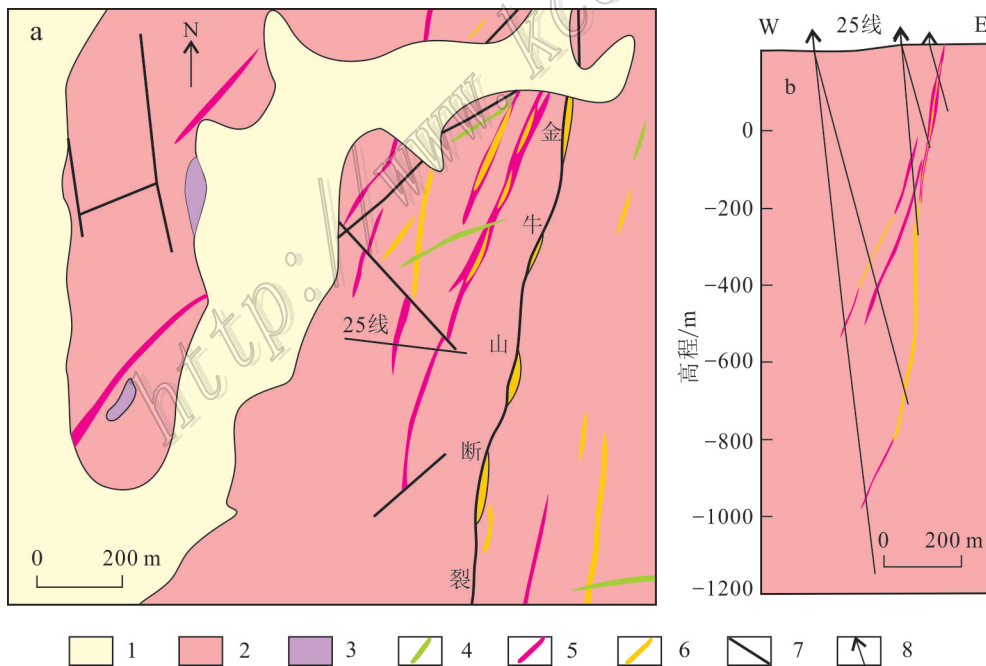


图7 邓格庄金矿床矿体分布(a)和25勘探线剖面图(b)

1—第四系;2—侏罗纪花岗岩;3—早前寒武纪变质岩系;4—中基性脉岩;5—矿化蚀变带;6—黄铁矿化石英脉及金矿体;7—断裂构造;8—钻孔

Fig. 7 Geological map showing the distribution of orebodies (a) and geological section along No. 25 exploration line (b) in the

Denggezhuang gold deposit

1—Quaternary; 2—Jurassic granite; 3—Early Precambrian metamorphic rocks; 4—Intermediate-basic dike; 5—Mineralized alteration zone;

6—Quartz vein style gold orebody; 7—Fault; 8—Drill hole

(1) 控矿断裂倾角较陡,一般大于 65° ,矿脉一般位于主裂面的下盘;

(2) 矿脉沿走向呈雁行状(多为右行)排列,沿倾向呈下行排列;

(3) 断裂沿走向扭转或沿倾向倾角变化处,往往出现富矿体;

(4) 矿脉复合处或突然膨大处,矿体品位较富,特别是矿体膨胀中心,品位最富;

(5) 主脉上的支脉矿体往往比主脉富;

(6) 控矿构造组合,在胶西北地区一般为低级别或低序次的“X”、“Y”和“入”字型,如金翅岭金矿、玲珑金矿等;而在牟乳地区则主要为高级别的“入”字型(如邓格庄金矿)、“一”字贯通型(如金青顶金矿)和雁列型(如小青金矿)。

石英脉型金矿体表现为石英单脉或多期充填的复脉。如:乳山金矿床即由多期充填的复脉组成,矿脉主要由黄铁石英脉、铜铅锌多金属硫化物石英脉和菱铁矿(碳酸盐)石英脉复合叠加而成,其中主矿体为黄铁石英脉,其在复脉体中呈较规则的脉产出,与围岩边界清晰。围岩蚀变具有分带特征,一般以石英脉为中心向两侧依次对称出现黄铁绢英岩带、钾化花岗岩带和未蚀变的花岗岩。根据野外脉体穿插关系、矿物共生组合和结构构造特点,乳山金矿成矿作用从早到晚可分为4个阶段:(I)黄铁石英阶段,主要矿物为乳白色石英,其中散布有少量浸染状粗粒黄铁矿;(II)石英-黄铁矿阶段,主要矿物组合为黄铁矿、银金矿和自然金,黄铁矿以团块状和浸染状为主;(III)多金属硫化物阶段,石英、黄铁矿仍是该阶段主要矿物成分,但黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和磁黄铁矿是其特征组合,有自然金和银金矿;(IV)石英-碳酸盐阶段,以方解石、菱铁矿为主,含有极少量黄铁矿和细脉状石英。其中第II和III阶段是金矿化的主阶段(胡芳芳等,2005)。

3.3 泵吸充填成矿模式

石英脉型金矿的主要特点是矿体方向稳定,边界明显,与围岩呈突变关系,找矿标志明确,品位较富,发育明金。这些特征指示,石英脉型金矿的矿脉贯入方式是主动贯入,其流体运移方式是大规模流体涌流模式。在初期构造作用的基础上,流体依靠液压和热力开辟道路,强行贯入,迫使围岩张开,充填宽大的石英脉。这种流体强行贯入,并使岩石发生裂隙的过程,被称为液压致裂(邵世才等,1993)。

胶东石英脉型金矿集中产出于侏罗纪的玲珑岩

体和昆嵛山岩体中,这2个岩体被认为具有变质核杂岩性质,在岩体的外围和顶部存在稳定分布的由糜棱岩或断层泥、碎裂岩等组成的拆离带,其上盘为早前寒武纪变质岩系或中生代陆相碎屑沉积岩系(杨金中等,2000; Charles et al., 2011; 林少泽等, 2013)。玲珑岩体和昆嵛山岩体于侏罗纪就位后,发生了强烈隆升,在岩体周边与围岩接触部位产生拆离断层,在岩体中形成密集的断裂构造。拆离断层作为较大范围分布的低渗透性封闭构造层,在一定程度上阻隔了成矿流体运移,使得流体在拆离断层下盘的断裂、裂隙中聚集(图8)。构造带的弯曲、凹凸不平和围岩的不均匀性能够造成断裂带中流体的局部聚集(Ojala et al., 1993),成为金沉淀的最佳场所。

根据断裂与脉状充填物的关系,胶东石英脉型金矿的容矿断裂有2类,一是断裂先形成,后被热液脉充填,断裂的形成与脉的充填之间有显著的时差;二是断裂与含矿热液同时形成,它们之间时差极小,这种断裂的发生与流体压力有关,为液压致裂作用,脉的生成机制则为“裂隙-愈合作用”(邵世才等, 1993)。流体演化和成矿动力耦合是形成石英脉金矿的重要机制。牟乳带含矿断裂的构造活动可划分为2个阶段,即脆性破裂阶段和韧脆性扩张阶段。脆性破裂阶段是构造活跃期,由于应力瞬间高强度释放,使原来完整岩石或压扭性断裂产生脆性破裂,形成断层角砾。由于浅部张剪裂隙的减压扩容,形成瞬时负压,“泵吸”导致深部流体迅速上侵和充填断裂空间。该阶段形成细粒乳白色块状石英脉,也可见断层角砾被胶结现象。韧脆性扩张阶段是构造亚稳期,随着区域构造应力持续释放,断裂转入韧脆性缓慢扩张阶段。此阶段成矿热液体系在接近局域平衡状态下演化,成矿物质在张裂隙中缓慢结晶,形成晶形较好的矿石,如梳状石英、条带状多金属矿石(高太忠等,1999)。整体而言,石英脉型金矿的形成是成矿流体多次脉动式上侵和沸腾作用的结果,成矿热液依次沉淀形成乳白色石英脉、含金黄铁矿脉、含金多金属硫化物脉和碳酸盐脉等。

石英脉型金矿成矿过程中,驱动流体运移与沉淀富集的主要因素是构造。在构造应力场作用下,构造的形变与转换与成矿流体的运移有密切关系(张欣等,2011)。“断层阀-地震泵吸”模式很好的解释了构造与成矿流体之间的关系(Sibson et al., 1988; Boullier et al., 1992; Cox, 1995; Robert et al., 1995)。在胶东的玲珑岩体和昆嵛山岩体中,由于受

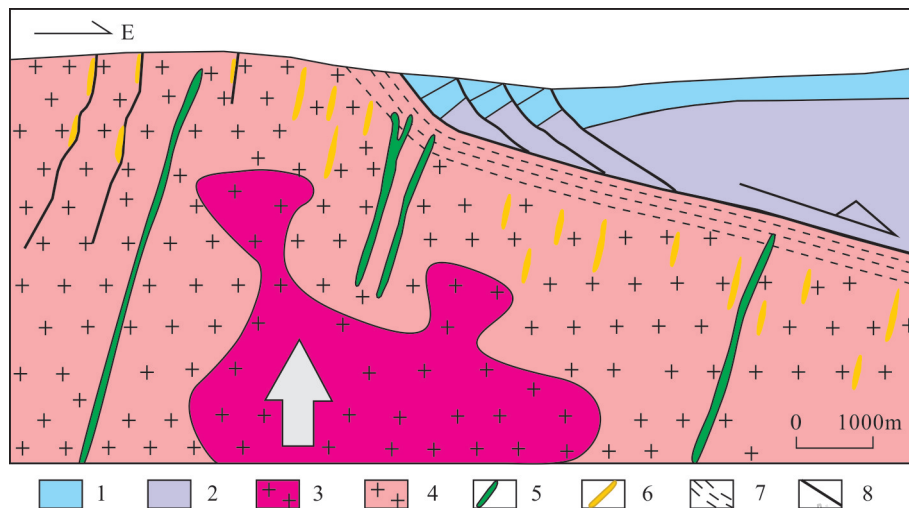


图8 胶东石英脉型金矿成矿模式

1—沉积地层;2—前寒武纪变质岩系;3—白垩纪花岗岩类;4—侏罗纪花岗岩类;5—基性脉岩;6—石英脉型金矿体;7—拆离断层带;8—断裂

Fig. 8 The diagram showing metallogenic model for the quartz vein style gold deposit in Jiaodong Peninsula

1—Sedimentary strata; 2—Early Precambrian metamorphic rocks; 3—Cretaceous granite; 4—Jurassic granite; 5—Mafic dike;
6—Quartz vein style gold orebody; 7—Detachment fault belt; 8—Fault

拆离断层的阻隔,成矿流体不断在拆离系统下盘聚集,流体压力累积至超静岩压力后,使已有的断裂构造或块状花岗岩产生液压致裂,出现扩容空间,成矿流体在泵吸作用下聚集到裂隙中充填沉淀,裂隙逐渐封闭;随着裂隙封闭,流体压力再次聚集,原有裂隙再度扩容或者产生新的裂隙,流体再次充填。这样,成矿流体向上运移沉淀过程中经历了断裂“破裂前—液

压致裂—地震泵吸—流体充填—自愈合”过程(图9),然后再循环的周期性活动,最终形成石英脉型金矿。

4 胶西北和深部金矿成矿模式

4.1 胶西北金矿区域成矿模式

胶西北地区金矿分布于三山岛、焦家和招平3

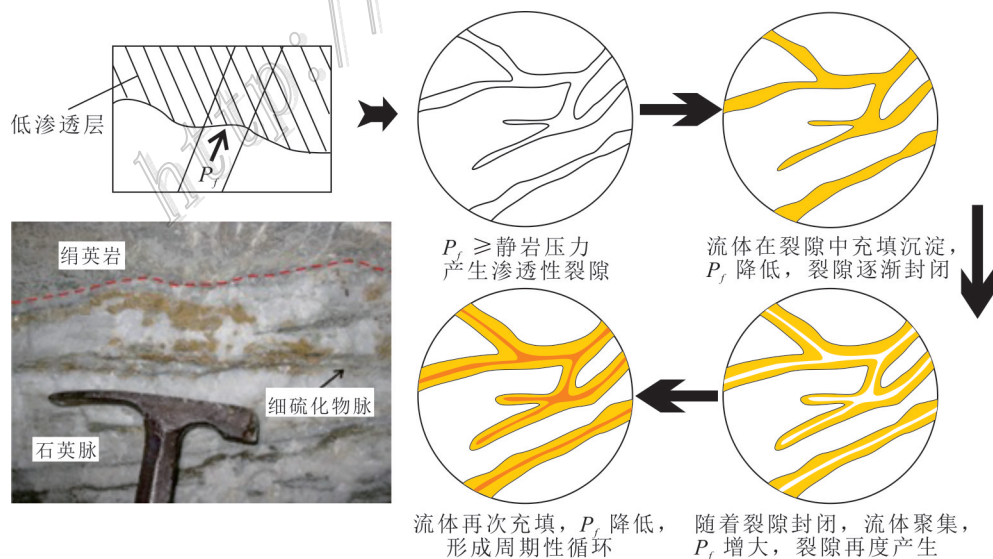


图9 石英脉型金矿成矿流体动力学及石英脉的形成过程(据张欣等,2011修改)

Fig.9 The schematic diagram showing metallogenic dynamics and forming process of quartz vein style gold mineralization
(modified after Zhang et al., 2011)

条主断裂带中和其附近区域,矿化类型主要有焦家式破碎带蚀变岩型、玲珑式石英脉型和河西式黄铁石英网脉带型。控矿断裂为浅部倾角陡、深部倾角缓的铲式断裂,具有拆离断层性质。不同矿化类型形成于同一时期,赋存于主控矿断裂的不同构造位置,成矿作用与岩浆活动密切相关(宋明春等, 2014)。综合分析矿床的产出规律,建立胶西北金矿成矿模式是:由于白垩纪花岗岩体的强烈隆升及区域伸展构造作用,在侏罗纪形成的玲珑花岗岩与早前寒武纪变质岩系界面附近产生拆离断层,在拆离断层主断面之下的主断裂带区域,岩石受到强烈的破坏,构造岩为变形均匀的碎粒岩和糜棱岩,流体沿连续弥散空间渗流交代,水岩相互作用形成浸染状破碎带蚀变岩型矿石(焦家式);远离主断面,由于岩体快速隆升造成的引张作用产生近直立的裂隙带,以及与主断裂配套的次级张性裂隙的发育,流体充填到连续自由空间中,形成脉状矿石(玲珑式)(图10);二者之间,网状裂隙发育,流体渗流交代或充填形成网脉状矿石(河西式)。

金矿的形成过程是:深部含矿热液上升遇到拆离断层的致密遮挡层后,首先在主构造面附近与下盘岩石进行交代,形成浸染状蚀变岩型矿体;随着热液的消耗,深部成矿物质的浓度越来越大,高浓度的成矿物质挤入到网状裂隙带中,形成网脉状多金属硫化物矿体;而在玲珑花岗岩体顶部由于地壳快速隆升产生的张裂隙带中,具有强大的压力负区,使矿液被泵吸进来形成石英脉型矿体。

晚中生代中国东部软流圈上涌,在胶东地区产

生了幔源(基性脉岩、高镁闪长岩)和壳幔混合源(白垩纪花岗岩)岩浆活动,为流体活动提供了有利条件;深反射地震探测发现,胶东地区的莫霍面存在不连续现象(Yu et al., 2018),指示了幔源物质参与成矿和岩浆活动的可能;由岩浆隆升和地壳伸展在浅部产生的断裂构造,为金矿定位提供了适宜的空间。

4.2 深部金矿阶梯式成矿模式

4.2.1 深部金矿阶梯式赋矿规律

通过焦家金矿带的深部勘探揭示:金矿床受断裂构造控制,沿同一条断裂若干个金矿床集中成带分布;控矿断裂为浅部倾角陡向深部变缓的铲式断裂,而且由浅至深显示陡、缓交替变化的台阶式或坡坪式特点,矿体厚大部位赋存于台阶的平缓部分,在2000 m垂向深度以浅,出现浅部和深部2个赋矿台阶(或称矿化富集带),二者之间为无矿间隔或弱矿化带;断裂主断面附近矿体平行主断面产出,断裂下盘,逐渐出现斜交主断面和反向倾斜矿体;矿床中矿体成群产出,形成3个矿体群,分别受3层破碎蚀变带控制。矿床和矿体的这种分布规律可以概括为:一条构造带、二个倾斜台阶、二段矿化富集带(第一矿化富集带和第二矿化富集带)、二种产状类型(陡倾和缓倾)、三层矿化蚀变带(黄铁绢英岩化碎裂岩带、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带和黄铁绢英岩化花岗岩带)(图11)。通过对赋矿构造、深浅部主矿体对比、矿体产出特点、围岩条件等的深入分析发现,胶西北破碎带蚀变岩型金矿控矿断裂沿倾向出现若干个倾角由陡变缓的变化台阶,金矿体主要沿台阶的平缓部位和陡、缓转折部位富集,构成“阶梯式”分

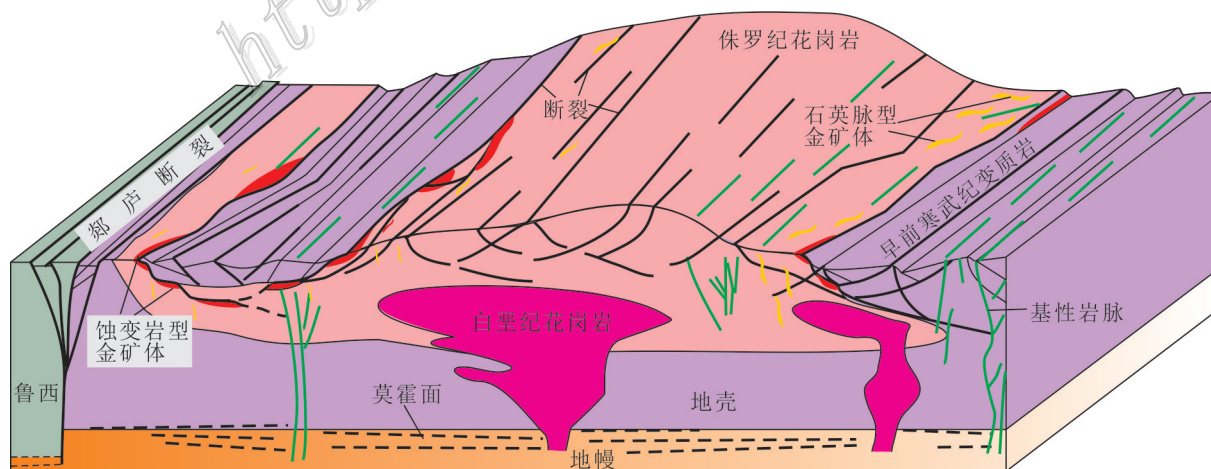


图10 胶西北金矿区域成矿模式示意图

Fig.10 The schematic diagram of regional metallogenic model of gold deposits in northwestern Jiaodong Peninsula

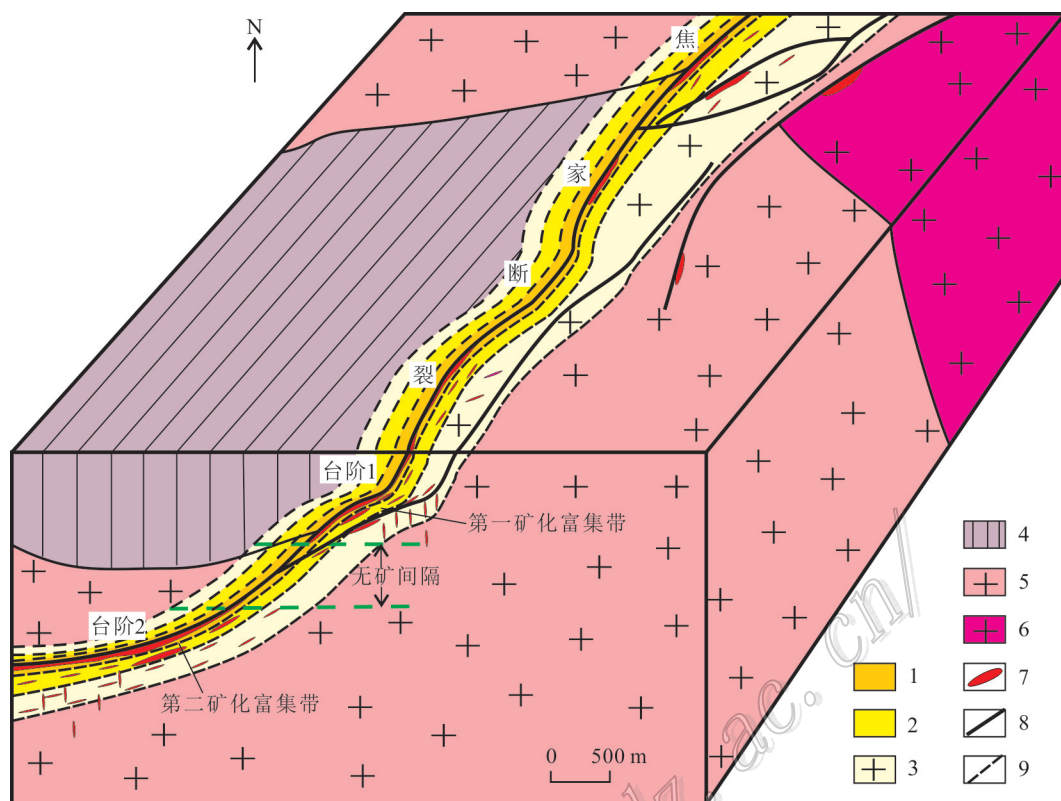


图 11 焦家金矿带深部矿体分布模式示意图(据 Song et al.,2012)

1—黄铁绢英岩化碎裂岩带;2—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带;3—黄铁绢英岩化花岗岩带;4—早前寒武纪变质岩系;5—侏罗纪玲珑花岗岩类;6—白垩纪郭家岭花岗岩;7—金矿体;8—断裂构造;9—矿化蚀变带边界

Fig. 11 Distribution pattern of gold deposits in the Jiaojia belt (after Song et al.,2012)

1—Cataclasite zone of pyrite-serisite-quartz alteration; 2—Granitic cataclasite zone with pyrite-serisite-quartz alteration; 3—Granite zone with pyrite-serisite-quartz alteration; 4—Early Precambrian metamorphic rocks; 5—Jurassic granite; 6—Cretaceous granite;

7—Gold orebody; 8—Fault; 9—Boundary of mineralized alteration zone

布型式(图 12),笔者等将这一赋矿规律称为深部金矿阶梯式成矿模式(宋明春等,2010; Song et al., 2012)。

石英脉型金矿主要受倾角较陡的断裂控制,陡倾断裂的倾角相对陡的部分为断裂扩容带(曾庆栋等,1999),是石英脉充填的有利区段,厚大金矿体主

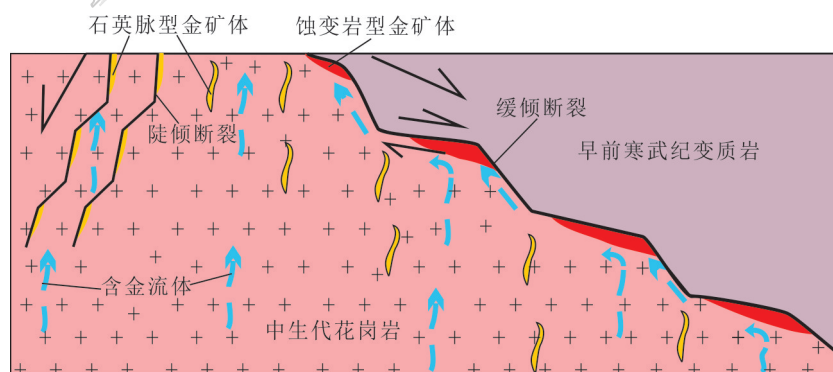


图 12 蚀变岩型金矿和石英脉型金矿的阶梯式赋矿模式示意图(据宋明春等,2014修改)

Fig.12 A stepped distribution pattern of alteration rock style and quartz vein style gold deposit (modified after Song et al., 2014)

要赋存于断裂倾角的较陡部分,即在倾角阶梯式变化的断裂的陡倾角部位赋矿(图12),其赋矿构造部位与蚀变岩型金矿恰恰相反。

4.2.2 阶梯式矿体的成矿机制

物理化学条件的改变是矿液中的成矿物质沉淀结晶的必要条件,而影响物理化学条件的最重要因素是深度,只有在一定深度下的地球化学和物理化学条件界面附近,矿质方能沉淀成矿(陈柏林等,1999),每一种矿床都有其特定的形成深度。低角度断层一方面因倾角小或者呈平缓的波状起伏,与受深度影响的成矿物理化学界面夹角很小,或连续出现或穿插于这种界面附近,有利于矿质的沉淀;另一方面,断层上、下盘的地质体在岩性、结构、构造等方面有差异,其物理化学条件也有差异,因此低角度断层与物理化学界面在一定的范围内重叠,甚至低角度断层控制了这种界面,成为成矿最有利的部位。这是低角度断层或断裂缓倾段赋矿的重要原因。

构造型式和流体迁移-沉淀方式是断裂阶梯式赋矿的决定机制,由于地质体岩性、结构等的不均匀性,断裂沿走向和倾向往往呈舒缓波状展布,倾角的陡、缓交替形成台阶型式。成矿流体沿断裂运移时,在断裂陡倾段,流体由较深部的高压区向较浅部的低压区快速运移,不易沉淀成矿;在断裂缓倾段,流体在近等压条件下横向缓慢运移,易沉淀成矿。因此,矿体主要赋存于断裂缓倾段,断裂的台阶型式造成了金矿的阶梯式分段富集(Song et al., 2012)。在靠近断裂主构造面附近,流体受主构造控制,沿构造带扩散、沉淀,形成平行主构造的缓倾矿体;远离主构造带,流体沿花岗岩体的边缘张裂隙运移、沉淀,形成与主构造斜交的陡倾矿体。陡倾矿体和缓倾矿体构成了垂向上的二元结构,类似于块状硫化物矿床的补给带和层状矿(Song et al., 2012)。

石英脉型金矿赋矿位置与蚀变岩型金矿阶梯式赋矿位置相反的主要原因是二者的控矿构造型式和流体成矿方式不同。蚀变岩型金矿的成矿方式是压力差渗流交代,成矿流体沿着较疏松的岩层缓慢流动,通过水岩交代逐渐沉淀成矿,流体耗散大于补给。大型断裂的缓倾斜段一般具有剪切构造性质,岩石破碎较均匀,微裂隙发育,形成连续弥散空间,压力差较小,有利于成矿流体的缓慢渗流交代;而断裂陡倾段具有引张(正断层)或挤压(逆断层)性质,在引张空间压力差大,不利于流体的缓慢聚集,在挤

压空间流体则难以渗入。石英脉型金矿的成矿方式是大规模流体涌流充填,由于超静岩压力梯度的存在使得流体在扩容带快速充填成矿,流体补给大于耗散。高角度张性断裂的陡倾段和拆离断层下盘的断裂裂隙系统为应力拉张区,形成连续自由空间,是强大的负压区,有利于大量流体的快速充填。石英脉型金矿和蚀变岩型金矿分别代表了不同的流体与构造配合方式。

5 胶东金矿热隆-伸展成矿模式

根据成矿地质条件、物质来源、同位素年龄等综合分析认为,胶东金矿是地质构造长期演化、含矿流体异常活跃、区域地壳快速隆升、成矿物质集中爆发成矿的结果,陆壳重熔、流体活动、热隆-伸展构造是大规模成矿的关键控制因素。

5.1 中生代陆壳重熔为金成矿提供了重要物质来源

关于胶东金矿床成矿物质来源目前尚未有形成一致的认识。早期的研究者认为,新太古代胶东岩群变质火山-沉积岩系为金成矿提供了物质来源,胶东金矿属绿岩带型(杨敏之等,1996)。近年来,多数研究者强调了成矿物质来源的多元性和复杂性,至于何者为主,则分歧较大(如, Qiu et al., 2002; Chen et al., 2005)。山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队的地质工作者(李士先等,2007)提出了多源、长期成矿观点,认为胶东金矿的形成从太古宙到中生代,有继承或“承袭”的关系,太古宙—古元古代为金矿产生的雏形期,变质基底岩系是金矿的原始矿源岩;新元古代为金矿的预富集期,新元古代花岗岩类(即侏罗纪玲珑花岗岩)是金矿的衍生矿源岩;中生代燕山早期是金矿的主成矿期,郭家岭花岗岩为金矿的直接矿源岩。

据统计,胶东西北部金矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 均为正值,变化范围为0.20‰~12.60‰,与围岩花岗岩和前寒武纪变质岩系的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近(Song et al., 2014),推测硫源主要为容矿花岗岩类和前寒武纪变质岩。36件样品统计的胶东主要金矿床矿石中方铅矿的铅同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.582\sim18.960$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.235\sim18.840$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.991\sim40.770$ (李士先等,2007),铅同位素组成整体略显分散、主体相对均一,矿石铅与围岩地质体铅具有较大范围的重叠,均显示下地壳铅特征(杨立强等,2014; Song et al., 2014)。矿石、蚀变矿物、黄铁矿的 I_{sr} 主体大于0.710,部分介于

0.708~0.710之间,显示成矿物质以壳源为主,幔源组分有少量贡献。 I_{Sr} 均落入玲珑型花岗岩范围内,主体同位素比值与郭家岭型花岗岩一致,同位素比值低值区亦与基性脉岩重合(杨立强等,2014)。这说明,成矿物质可能直接来源于赋矿围岩——玲珑及郭家岭花岗岩类,成矿期基性脉岩或其岩浆源区可能提供了部分成矿物质。

上述同位素地球化学数据指示,胶东金矿的成矿物质与其围岩有明确的渊源关系。因此笔者认为:太古宙,胶东地区原始地壳薄,地热梯度大,岩浆活动强烈,由来自地幔的基性-超基性火成岩组成的唐家庄岩群、胶东岩群、官地洼组合、马连庄组合和来自地壳深部的TTG岩系组成的栖霞片麻岩套,构成了胶东地区花岗-绿岩建造,该建造中金的原始丰度较高,成为胶东金矿初始矿源岩。侏罗纪,构造岩浆活动强烈,胶东地区陆壳发生大规模重熔,初始矿源岩中的金元素在浅部岩浆房中富集,岩浆冷凝结晶后形成富金花岗岩——玲珑花岗岩,成为胶东金矿再生矿源岩。即胶东金矿具有双重来源,太古宙变质基底是金矿的初始矿源岩,壳源重熔型玲珑花岗岩是形成金矿的再生矿源岩(或直接矿源岩)。

5.2 太平洋板块俯冲背景下的大规模岩浆和流体活动是金成矿的重要动因

胶东地区晚中生代岩浆活动强烈,侵入岩出露总面积占胶东陆域面积的近1/4。主要侵入岩包括:(164±2)Ma~(144±3)Ma的玲珑型花岗岩、(130±3)Ma~(125.4±2.2)Ma的郭家岭型花岗岩、(126±3)Ma~(108±2)Ma的伟德山型花岗岩、(120±2)Ma~(107.04±2.14)Ma的崂山型花岗岩,以及(121.6±1.7)Ma~(114±2)Ma的脉岩(宋明春等,2018b)。由侏罗纪的玲珑型花岗岩到白垩纪的崂山型花岗岩和中基性脉岩,地球化学特征呈现出由高Ba-Sr向低Ba-Sr、由高Sr/Y值向低Sr/Y值、由EM2型向EM1型富集地幔的演化(宋明春等,2015; Song et al., 2019),指示胶东地区经历了由华北-扬子板块碰撞构造体系向太平洋板块俯冲构造体系和由挤压向伸展的构造动力学机制转换。富集地幔和伸展构造为大规模金成矿提供了有利条件。

胶东金矿床的石英及碳酸盐矿物中流体包裹体类型主要有H₂O-CO₂包裹体、H₂O-CO₂±CH₄包裹体和H₂O溶液包裹体,也有纯CO₂包裹体,偶尔可见含固相(石盐或方解石)的水溶液包裹体(范宏瑞等, 2005, 杨立强等, 2014; Song et al., 2014),表明成矿

流体为低盐度H₂O-CO₂-NaCl±CH₄流体,主成矿期温度为170~335℃,成矿压力为70~250 MPa(范宏瑞等, 2005, 杨立强等, 2014; Song et al., 2014)。在氢-氧同位素组成图上,大量金矿床的氢-氧同位素成分投点于原始岩浆水或变质水与大气降水之间,少量数据落在岩浆水、变质水或建造水区域内(杨立强等, 2014),指示成矿流体源于初始岩浆水,后期有大量大气降水参与(Fan et al., 2003; 范宏瑞等, 2005; 姜晓辉等, 2011; 杨立强等, 2014; Song et al., 2014)。范宏瑞等(2005)认为,成矿流体可能来源于与金矿床伴生的基性幔源岩浆脱水形成的岩浆水,但在地壳浅部遭受到大气降水的混合。毛景文等(2005)基于胶东金矿成矿系统中富含CO₂,提出成矿作用在一定程度上与地幔活动有关。杨立强等(2014)根据成矿流体的碳、氢、氧、硫和惰性气体同位素特征认为,胶东金矿成矿流体为壳-幔混合来源,以壳源变质流体为主,并根据氢的含量计算成矿流体中地幔端元流体的比例多在30%以下。

综合前人大量研究成果,笔者认为多源、大规模的流体活动是胶东金元素活化、迁移、富集成矿的重要因素。只有强度大、氧化性较强的热流体大范围活动才能使成矿流体富金,矿化流体增多。白垩纪,中国东部太平洋板块俯冲、回撤引起幔隆作用、岩石圈减薄,形成富集的交代地幔,在壳幔边界处产生岩浆房,导致大规模岩浆和流体活动。相应的,处于华北克拉通与苏鲁造山带复合部位的胶东地区发生了强烈的构造岩浆作用,伴随多种类型的大范围流体活动(图13)。其中,基性脉岩等幔源岩浆伴随幔源流体上侵到地壳中,白垩纪花岗岩类(如伟德山型花岗岩)岩浆活动产生岩浆流体,高温的岩浆使围岩中的先存流体活化产生活化流体,白垩纪陆相盆地(胶莱盆地)汇集大量大气降水沿断裂构造和裂隙逐渐渗流到地下。在这一地质时期,各种流体异常活跃,深部幔源流体与岩浆流体及地壳中的先存流体等多种流体混合,萃取矿源岩中的金元素,形成成矿流体。成矿流体由深部向地表迁移至较浅部位时,与大气降水混合,形成了一个新的流体-成矿系统,金质与挥发分、碱质(K、Na等元素)等形成易溶络合物进入流体相,在温度、压力等物理化学条件下,含金热液由高能部位向低能部位迁移,在中温阶段金络合物的稳定性降低,金分解、析出,在适当深度范围内的断裂构造有利部位富集成矿(图13)。胶东金矿是构造-岩浆-流体耦合作用的结果,高强度的含矿流

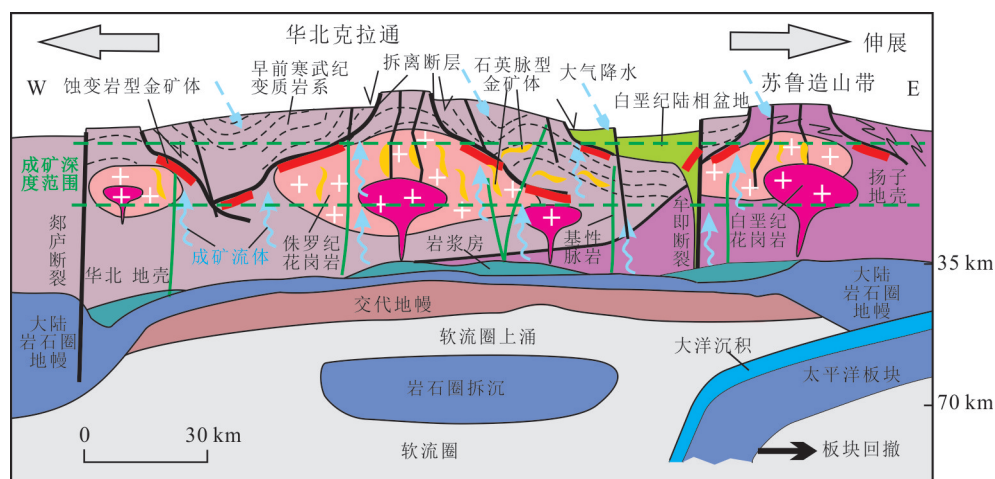


图13 胶东金矿成矿背景示意图

Fig.13 The schematic map of gold metallogenic background in Jiaodong Peninsula

体活动和交代蚀变是胶东金矿大规模集中产出的基础条件。

5.3 岩浆热隆-伸展构造为金成矿提供了有利空间

晚中生代是华北克拉通东部岩石圈减薄和伸展构造期,主要表现为拉分盆地、双峰式火山活动、广泛的正断层活动(张岳桥等,2004)、变质核杂岩(Ratschbacher et al., 2000; 刘俊来等,2006)和“A”型花岗岩(王德滋等,1995)等。在胶东地区则形成胶莱盆地、郯庐裂谷及有关的正断层、青山群中的双峰式火山岩、崂山A型花岗岩等。135~110 Ma的早白垩世中国东部岩石圈减薄达到最高峰(吴福元等,2008),是岩浆、成矿作用最为强烈的时期。岩石圈减薄和伸展作用造成软流圈上涌,地温升高,在胶东地区产生广泛的岩浆活动。

研究表明,胶东侏罗纪的玲珑型花岗岩为高锆花岗岩,具有加厚地壳特征,反映地壳厚度大于40 km(张华锋等,2004);而早白垩世的壳幔混合花岗岩(郭家岭型花岗岩和伟德山型花岗岩)和幔源中基性脉岩则指示了地壳减薄特点。采用岩浆岩绿帘石压力计,计算玲珑花岗岩的侵位深度为10~15 km(张华锋等,2006);采用角闪石全铝压力计,计算早白垩世郭家岭岩体侵位深度为 (13.0 ± 1.6) km(豆敬兆等,2015),而早白垩世的艾山、海阳、牙山、三佛山、伟德山等岩体(伟德山型花岗岩)侵位深度则普遍小于3.5 km(张华锋等,2006)。这表明,早白垩世伟德山型花岗岩侵位时,侏罗纪玲珑型花岗岩和早白垩世郭家岭型花岗闪长岩发生了强烈抬升剥蚀。玲珑型

花岗岩从140~110 Ma的30 Ma间,隆升剥蚀大于7 km;郭家岭岩体约10 Ma内,隆升剥蚀量达10 km左右。而110 Ma前至今,地壳隆升剥蚀量不超过4 km(豆敬兆等,2015)。可见,晚中生代,胶东地区在大规模岩浆活动的同时,发生了强烈的地壳隆升事件,而且早白垩世的隆升速率明显大于侏罗纪。对前人测试的25个胶东金矿同位素年龄结果统计表明,其年龄范围为123.0~110.6 Ma(宋明春等,2018a),与早白垩世地壳快速隆升时间一致。另外,笔者最近测试的胶东早白垩世角闪二长岩的锆石和磷灰石U-Pb同位素年龄分别为123 Ma和118 Ma,计算其降温速率达 $48.1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$,而同样方法估算的侏罗纪玲珑花岗岩的降温速率为 $14.4^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (详细资料另文发表),快速降温的时间与金矿成矿时间也是一致的。

综上,在晚中生代地壳伸展背景下,胶东地区发生强烈的岩浆作用并快速隆升,同时产生拆离断层、正断层、裂谷、伸展断陷盆等构造组合。宋明春等(2018b)将这种构造、岩浆强烈活化的地质景象称为热隆-伸展构造。地壳快速隆升引起强烈减压、降温是大量金质从流体中析出、沉淀的重要原因,伸展构造则为大规模金成矿提供了充足的空间,金矿化与热隆-伸展构造是一个有机联系的整体。

由此,建立胶东金矿“热隆-伸展”成矿模式是:侏罗纪,中国东部处于华北板块与扬子板块碰撞向太平洋板块俯冲于欧亚板块之下重大构造体制转折背景,胶东地区因挤压/伸展转换导致由早前寒武纪结晶基底岩系组成的中下地壳减压熔融,形成陆壳

重熔型花岗岩(玲珑型花岗岩),金在岩浆中初步富集。早白垩世,在板块俯冲、回撤过程中,地幔隆起,软流圈上涌,莫霍面撕裂,诱发壳幔相互作用(图13),产生壳幔混合花岗岩(伟德山型花岗岩)及幔源基性脉岩,同时产生的幔源流体、岩浆流体及活化流体萃取壳源花岗岩及早前寒武纪变质岩系中的成矿物质(图14)。早白垩世岩浆活动对金矿的形成起到“引擎”作用,它既为流体活化提供热源,又是形成伸展拆离构造的动力源之一。幔隆作用造成地壳拉张和花岗岩的快速抬升、去根,形成花岗岩穹窿-伸展构造。在花岗岩穹窿的上部,由拆离断层、张裂隙、早前寒武纪变质岩系中的层间滑动构造、白垩纪陆相沉积盆地盆缘断裂、高角度正断层等构成了一组伸展断层系统(图14),伸展断层既为成矿流体运移提供了良好的通道,又为成矿流体富集、矿体定位提供了有利的空间。早白垩世地壳快速隆升,使得温度和压力骤降,成矿流体发生沸腾和相分离作用而成矿,胶东金矿床中普遍存在的流体不混溶现象是流体发生沸腾的重要证据(沈昆等,2000)。流体进入拆离断层中,若断裂系统中以碎裂岩为主的构造岩发育良好,成矿流体以渗流方式运移,通过与构造岩发生交代作用形成以浸染状蚀变岩为主的矿体,即焦家式破碎带蚀变岩型金矿、河西式网脉型金矿,主拆离断层及其上、下盘断裂中金矿体均呈阶梯式

分布;如果成矿流体沿前寒武纪层间滑动构造渗流交代成矿,则形成杜家崖式层间滑脱带蚀变岩型金矿;如果成矿流体在压力驱动下以循环对流、缓慢渗流方式,运移至处于氧化-还原界面环境的构造角砾岩带或砾岩层内,通过充填交代作用成矿,则形成蓬家夼、发云夼式蚀变角砾岩和蚀变砾岩型金矿;在主断裂张剪段或次级张性、张剪性断裂中易形成减压空间,成矿流体在泵吸作用下在其中充填成矿(张连昌等,2002),形成玲珑式含金石英脉型金矿和邓格庄式石英硫化物脉型金矿(图14)。

6 结 论

综上,胶东金矿系列成矿模式包括:

(1) 破碎带蚀变岩型金矿断裂渗流交代成矿模式:破碎带蚀变岩型金矿受区域较大规模断裂控制,金矿体主要赋存于主断裂下盘。由以断层泥为标志的断裂主裂面至远离主裂面,依次分布黄铁绢英岩带、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带和钾化黄铁绢英岩化花岗岩带,带内分别赋存Ⅰ号、Ⅱ号和Ⅲ号矿体群。深部含矿热液上升遇到断裂构造中致密的断层泥遮挡层后,成矿流体以渗流方式运移,通过与构造岩发生交代作用形成浸染状破碎带蚀变岩矿体。

(2) 石英脉型金矿泵吸充填成矿模式:石英脉

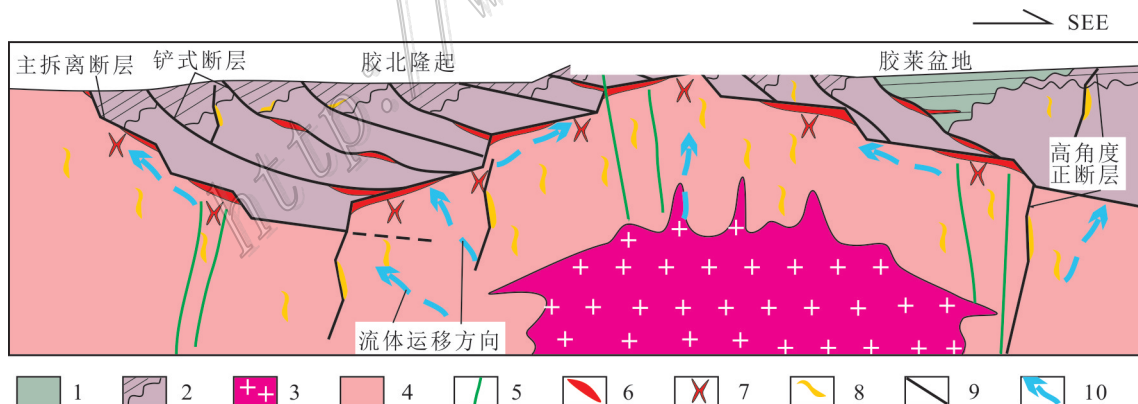


图14 胶东金矿“热隆-伸展”成矿模式示意图(据宋明春等,2014修改)

1—白垩纪陆相沉积盆地;2—早前寒武纪变质岩系;3—白垩纪壳幔混合花岗岩类;4—侏罗纪壳源花岗岩类;5—基性脉岩;6—蚀变岩型金矿体;7—网脉型金矿体;8—石英脉型金矿体;9—断裂构造;10—流体运移方向

Fig. 14 Schematic model showing “thermal upwelling-extension” of gold deposits in Jiaodong Peninsula (modified after Song et al., 2014)

1—Cretaceous terrestrial basin; 2—Early Precambrian metamorphic rocks; 3—Cretaceous granite derived from mixing source of the mantle and the crust; 4—Jurassic granite derived from crust source remelting; 5—Mafic dike; 6—Gold orebody in alteration rocks; 7—Stockwork type gold orebody; 8—Quartz vein type gold orebody; 9—Fault; 10—Fluid migration direction

型金矿受拆离断层下盘的陡倾角张性断裂控制,矿体主要赋存于断裂构造的扩容带。拆离断层作为较大范围分布的低渗透性封闭构造层,阻隔了成矿流体的运移,大规模流体以涌流模式贯入到已有裂隙中并迫使围岩张开,成矿流体多次脉动式上侵,形成宽大的石英脉。

(3) 胶西北金矿区域成矿模式:胶西北金矿受侏罗纪的玲珑花岗岩与早前寒武纪变质岩系界面附近的伸展拆离构造控制,在拆离断层主断面之下的主断裂带区域,流体沿连续弥散空间渗流交代形成浸染状破碎带蚀变岩型矿石;远离主断面,流体充填到拆离断层下盘张裂隙带的连续自由空间中,形成脉状矿石;二者之间,网状裂隙发育,形成网脉状矿石。

(4) 深部金矿阶梯式成矿模式:金矿控矿断裂沿倾向出现若干个倾角由陡变缓的变化台阶,金矿体沿断裂倾角较缓部位分段富集构成“阶梯式”分布型式。

(5) 胶东金矿热隆-伸展成矿模式:陆壳重熔、流体活动、热隆-伸展是胶东金矿大规模成矿的关键控制因素。早白垩世,由于板块俯冲、回撤,诱发壳幔相互作用,产生大规模岩浆活动,引起广泛的流体活动;同时,地壳拉张和岩浆隆升,形成花岗岩穹窿-伸展构造。伸展构造既为成矿流体运移提供了良好的通道,又为成矿流体沉淀、矿体定位提供了有利的空间。随着地壳快速隆升,温度和压力骤降,成矿流体发生沸腾和相分离作用而成矿。

致谢 本文是在山东省地质矿产勘查开发局所属的六队、三队等单位多年来胶东找矿及研究成果的基础上撰写的,感谢地勘单位地质科技人员对建立胶东金矿成矿模式所做的重要贡献;中国地质大学(北京)博士后张良、博士生赛盛勋帮助修改了文稿,审稿专家审阅本文并提出了重要的修改建议,在此一并致谢!

References

- Boullier A M and Robert F. 1992. Paleoseismic events recorded in arche-an gold quartz vein networks[J]. *Journal of Structural Geology*, 14: 161-179.
- Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F and Li X H. 2018. De-cratonic gold mineralization: Evidence from the Shangzhuang gold deposit, eastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 54: 1-22.
- Charles N, Gumiaux C, Augier R, Chen Y, Zhu R X and Lin W. 2011. Metamorphic core complexes vs. synkinematic plutons in conti-nental extension setting: Insights from key structures (Shandong Province, eastern China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 261-278.
- Chen B L and Fu G L. 1999. Advances in studies of ore-forming and ore-controlling structures on lode gold deposits[J]. *Gold Geology*, 5(4): 63-69(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F and Qi J P. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore forming fluids, Jiaodong Province, eastern China[J]. *International Geology Review*, 47(5): 530-549.
- Cox S F. 1995. Faulting processes at high fluid pressures: An example of fault valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 100(B7): 12841-12860.
- Deng J, Yang L Q, Ge L S, Wang Q F, Zhang J, Gao B F, Zhou Y H and Jiang S Q. 2006. Research advances in the Mesozoic tectonic re-gimes during the formation of Jiaodong ore cluster area[J]. *Pro-gress in Natural Science*, 16(5): 513-518(in Chinese).
- Deng J, Wang Q F, Wan L, Liu H, Yang L Q and Zhang J. 2011. A mul-tifractal analysis of mineralization characteristics of the Daying-e-zhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 54-64.
- Deng J, Liu X F, Wang Q F and Pan R G. 2015. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 674-686.
- Deng J, Yang L Q, Li R H, Groves D I, Santosh M, Wang Z L, Sai S X and Wang S R. 2019. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the giant Jiaodong Gold Province, China[J]. *Geological Journal*, 54: 378-391.
- Dou J Z, Fu S and Zhang H F. 2015. Consolidation and cooling paths of the Guojialing granodiorites in Jiaodong Peninsula: Implication for crustal uplift and exhumation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (8): 2325-2335(in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H and Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshan-dao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Depo-sita*, 38: 739-750.
- Fan H R, Hu F F, Yang J H, Shen K and Zhai M G. 2005. Fluid evolu-tion and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1317-1328(in Chinese with English abstract).
- Gao T Z, Yang M Z, Jin C Z and Wu X Y. 1999. Study on fluid and tec-tonodynamics of quartz vein-type gold deposits in the Mouping-Rushan gold belt, Shandong Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2): 130-136(in Chinese with English abstract).
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geolo-gic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 18(1): 1-75.
- Goldfarb R J and Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique[J]? *Geoscience Frontiers*, 5(2): 139-153.
- Guo T, Deng J, Lü G X and Sun Z F. 2008. The channel way, style and driving mechanism of ore fluid migration in the Jiaojia gold de-posit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(1): 81-88(in Chinese with English abstract).
- Hu F F, Fan H R, Shen K, Zhai M G, Jin C W and Chen X S. 2005. Na-

- ture and evolution of ore-forming fluids in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1329-1338(in Chinese with English abstract).
- Institute of Geological Survey, Shandong Province. 2014. Report of special mapping and technology application for gold deposits-clustered district of Zhaoyuan-Laizhou area in Shandong Province[R]. Internal Report. Jinan: 5-26(in Chinese).
- Jiang X H, Fan H R, Hu F F, Yang K F, Lan T G, Zheng X L and Jin N X. 2011. Comparative studies on fluid inclusion in different depths and ore genesis of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1327-1340(in Chinese with English abstract).
- Li G H, Ding Z J, Ji Pan, Li Y, Tang J Z and Liu L S. 2016. Features and prospecting direction of the gold deposits in the northeastern margin of the Jiaolai Basin[J]. *Geology and Exploration*, 52(6): 1029-1036(in Chinese with English abstract).
- Li H M, Mao J W, Shen Y C, Liu T B and Zhang L C. 2003. Ar-Ar ages of K-feldspar and quartz from Dongji gold deposit, northwest Jiaodong, and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 72-77(in Chinese with English abstract).
- Li J X, Guo T and Lü G X. 1999. Discussion on gold mineralization type and its relation with tectonic in northwestern Jiaodong[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 8(2): 87-91(in Chinese with English abstract).
- Li J J, Luo Z K, Liu X Y, Xu W D and Luo H. 2005. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area[J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 361-372(in Chinese with English abstract).
- Li L, Santosh M and Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 589-611.
- Li S Z, Zhao G C, Santosh M, Liu X, Dai L M, Suo Y H, Tam P Y, Song M C and Wang P C. 2012. Structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 200-203: 59-73.
- Li S X, Liu C C, An Y H, Wang W C, Huang T L and Yang C H. 2007. *Geology of gold deposits in Shandong Peninsula*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Lin S Z, Zhu G, Yan L J, Jiang Q Q and Zhao T. 2013. Discussion on uplifting mechanism of the Linglong batholith in eastern Shandong[J]. *Geological Review*, 59(5): 832-844(in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Guan H M, Ji M and Hu L. 2006. Late Mesozoic metamorphic core complexes: New constraints on lithosphere thinning in north China[J]. *Progress in Natural Science*, 16(1): 21-26(in Chinese).
- Lü G X and Kong Q C. 1993. *Geology on the Linglong-Jiaojia-type gold deposits in the Jiaodong area, China*[M]. Beijing: Science Press. 1-253(in Chinese).
- Mao J W, Li H M, Wang Y T, Zhang C Q and Wang R T. 2005. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839-857(in Chinese with English abstract).
- Miao L C, Luo Z K, Guan K and Huang J Z. 1997. The evolution of the ore-controlling faults in the Zhaoye gold belt, eastern Shandong Province[J]. *Discussion of Geological Prospecting*, 12(1): 26-35(in Chinese with English abstract).
- Ojala V J, Ridley J R, Grove D I and Hall G C. 1993. The Granny smith gold deposit: the role of heterogeneous stress distribution at an irregular granitoid contact in a greenstone facies terrane[J]. *Mineralium Deposita*, 28: 409-419.
- Qiu Y M, Groves I D, McNaughton G N, Wang L G and Zhou T H. 2002. Nature, age and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern north China Craton, China[J]. *Mineralium Deposita*, 37: 283-305.
- Ratschbacher L, Hacker B R and Webb L E. 2000. Exhumation of the ultra-high pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tanlu fault[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105: 13303-13338.
- Robert F, Boullier A M and Firdaous K. 1995. Gold quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7): 12861-12870.
- Shao S C, He S X and Xi X S. 1993. Research on mechanism of formation of the ore-hosted fractures and gold-bearing quartz veins at Xiaolinling area[J]. *Discussion of Geological Prospecting*, 8(2): 26-33(in Chinese with English abstract).
- Shen K, Hu S X, Sun J G, Ling H F, Zhao Y Y and Sun M Z. 2000. Characteristics of ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit in eastern Shandong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 542-550(in Chinese with English abstract).
- Sibson R H, Robert F and Poulsen K H. 1988. High angle reverse faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold quartz deposits[J]. *Journal of Structural Geology*, (16): 551-555.
- Song M C, Cui S X, Zhou M L, Jiang H L, Yuan W H, Wei X F and Lü G X. 2010. The deep oversize gold deposit in the Jiaojia field, Shandong Province and its enlightenment for the Jiaojia gold type[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1349-1358(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Song Y X, Cui S X, Jiang H L, Yuan W H and Wang H J. 2011. Characteristic comparison between shallow and deep-seated gold ore bodies in Jiaojia superlarge gold deposit, northwestern Shandong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 923-932(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Yi P H, Xu J X, Cui S X, Shen K, Jiang H L, Yuan W H and Wang H J. 2012. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwestern Shandong Peninsula, China[J]. *Science China Earth Science*, 55(6): 940-948.
- Song M C, Deng J, Yi P H, Yang L Q, Cun S X and Xu J X. 2014. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 88(3): 801-824.
- Song M C, Li S Z, Yi P H, Cui S X, Lv G X, Xu J X, Song Y C, Jiang H L, Zhou M L, Huang T L, Liu C C and Gao S J. 2014. The types of Jiaojia style gold deposit and metallogenetic theory in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 87-104(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Zhang J J, Zhang P J, Yang L Q, Liu D H, Ding Z J and

- Song Y X. 2015. Discovered and tectonic magmatic background of superlarge gold deposit in offshore of northern Sanshandao, Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 365-383(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Li S Z, Santosh M, Zhao S J, Yu S, Yi P H, Cui S X, Lü G X, Xu J X, Song Y X and Zhou M L. 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, Song Y X, Ding Z J and Li S Y. 2018a. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406-422(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Li J, Li S Y, Ding Z J, Tan X F, Zhang Z L and Wang S J. 2018b. Late Mesozoic thermal upwelling-extension structure and its dynamics back ground in eastern Shandong Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(4): 941-964(in Chinese with English abstract).
- Song M C, Song Y X, Ding Z J, Wei X F, Sun S L, Song G Z, Zhang J J, Zhang P J and Wang Y G. 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 M C, Zhou J B, Song Y X, Wang B, Li S Y, Li J and Wang S S. 2019. Mesozoic Weideshan granitoid suite and its relationship to large-scale gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Geological Journal*, 1-22. doi.org/10.1002/gj.3607.
- Song Y X, Song M C, Ding Z J, Wei X F, Xu S H, Li J, Tan X F, Li S Y, Zhang Z L, Jiao X M, Hu H and Cao J. 2017. Major advances on deep prospecting in Jiaodong gold ore cluster and its metallogenetic characteristics[J]. *Gold Science and Technology*, 25(3): 4-18 (in Chinese with English abstract).
- Wang D Z, Zhao G T and Qiu J S. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in eastern China[J]. *Geological Journal of Universities*, 1(2): 13-20(in Chinese with English abstract).
- Wang J C, Xia B and Tang J R. 2003. Recognition on some key geological problems of Linglong-Jiaojia ore-concentrated district in Shandong Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 147-151(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S and Zheng J P. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174(in Chinese with English abstract).
- Xu W G, Fan H R, Yang K F, Hu F F, Cai Y C and Wen B J. 2016. Exhaustive gold mineralizing processes of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Displayed by hydrothermal alteration modeling[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129 (1): 152-169.
- Yang J Z, Shen Y C and Liu T B. 2000. Gold mineralization associated with Queshan metamorphic core complex[J]. *Geology Geochemistry*, 28(1): 15-19(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, Zhang L, Guo L N, Song M C and Zheng X L. 2014. Mesozoic gold metallogenetic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447-2467(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Guo L N, Wang Z L, Zhao R X, Song M C and Zheng X L. 2017. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 88, 491-510.
- Yang M Z and Lü G X. 1996. The geochemical characteristic of gold deposits in Jiaodong greenstone belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Yu X F, Shan W, Xiong Y X, Geng K, Sun Y Q, Chi N J, Guo B K, Li D P, Li H K, Song Y X and Yang D P. 2018. Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the northwestern Jiaodong Peninsula, China: A new understanding based on high-resolution reflective seismic survey[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(5): 1823-1840.
- Zeng Q D, Shen Y C, Yang J Z, Zhang Q R and Li Z Z. 1999. Positional prediction of concealed orebodies of the Rushan gold mine, Shandong[J]. *Geology and Prospecting*, 35(2): 3-5(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Zai M G, He Z F, Peng P and Xu B L. 2004. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 369-380(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Li S R, Zhai M G and Guo J H. 2006. Crust uplift and its implications in the Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 285-295(in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Shen Y C, Liu T B, Zeng Q D, Li G M and Li H M. 2002. Gold deposit types and metallogenic systems of Jiaodong region[J]. *Mineral Deposits*, 21(Supp.): 779-782(in Chinese).
- Zhang L, Groves D I, Yang L Q, Wang G W, Liu X D, Li D P, Song Y X, Shan W, Sun S C and Wang Z K. 2019. Relative roles of formation and preservation on gold endowment along the Sanshandao gold belt in the Jiaodong gold province, China: Importance for province- to district-scale gold exploration[J]. *Minerium Deposita*, https://doi.org/10.1007/s00126-019-00908-1.
- Zhang P J, Song M C, Liu D H, Ding Z J, Hu P Q, Yang G F and Wang H B. 2015. Features of deep seated gold deposit of No. 171 lode and controlled ore by structures in Linglong gold field, Shandong Peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 34(5): 855-873(in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Wang X W, Zhao Y and Hou L. 2011. Analysis on ore-controlling structure and metallogenetic mechanism of Yanzigou gold deposit in Danba[J]. *Nonferrous Metals(Part of Mine)*, 63(3): 19-24(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Zhao Y, Dong S W and Yang N. 2004. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in eastern China and adjacent areas and their geodynamic background[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 123-133(in Chinese with English abstract).
- Zhou T H and Lü G X. 2000. Tectonics, granitoids and Mesozoic gold deposits in East Shandong, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 16(1/2): 71-90.
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, Meng Q R, Li S R and Zeng Q D. 2015. De-cratonic gold deposits[J]. *Science China: Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.

附中文参考文献

- 陈柏林,付国立. 1999. 脉状金矿成矿控矿构造的研究进展[J]. 黄金地质, 5(4): 63-69.
- 邓军,杨立强,葛良胜,王庆飞,张静,高帮飞,周应华,江少卿. 2006. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展[J]. 自然科学进展, 16(5): 513-518.
- 豆敬兆,付顺,张华锋. 2015. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀[J]. 岩石学报, 31(8): 2325-2335.
- 范宏瑞,胡芳芳,杨进辉,沈昆,翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 21(5): 1317-1328.
- 高太忠,杨敏之,金成洙,吴学益. 1999. 山东牟乳石英脉型金矿流体成矿构造动力学研究[J]. 大地构造与成矿学, 23(2): 130-136.
- 郭涛,邓军,吕古贤,孙之夫. 2008. 焦家金矿床成矿流体运移的通道、方式及驱动机制[J]. 地球学报, 29(1): 81-88.
- 胡芳芳,范宏瑞,沈昆,翟明国,金成伟,陈绪松. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化[J]. 岩石学报, 21(5): 1329-1338.
- 姜晓辉,范宏瑞,胡芳芳,杨奎峰,蓝廷广,郑小礼,金念宪. 2011. 胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因[J]. 岩石学报, 27(5): 1327-1340.
- 李国华,丁正江,纪攀,李勇,唐俊智,刘莉莎. 2016. 胶莱盆地东北缘地区金矿特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 52(6): 1029-1036.
- 李厚民,毛景文,沈远超,刘铁兵,张连昌. 2003. 胶西北东季金矿钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(1): 72-77.
- 李金祥,郭涛,吕古贤. 1999. 试论胶东西北部金矿化类型及其与构造关系[J]. 贵金属地质, 8(2): 87-91.
- 李俊建,罗镇宽,刘晓阳,徐卫东,骆辉. 2005. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金矿床形成的地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(4): 361-372.
- 李士先,刘长春,安郁宏,王为聪,黄太岭,杨承海. 2007. 胶东金矿地质[M]. 北京:地质出版社.
- 林少泽,朱光,严乐佳,姜芹芹,赵田. 2013. 胶东地区玲珑岩基隆升机制探讨[J]. 地质论评, 59(5): 832-844.
- 刘俊来,关会梅,纪沫,胡玲. 2006. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束[J]. 自然科学进展, 16(1): 21-26.
- 吕古贤,孔庆存. 1993. 胶东玲珑-焦家式金矿地质[M]. 北京:科学出版社. 1-253.
- 毛景文,李厚民,王义天,张长青,王瑞廷. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 79(6): 839-857.
- 苗来成,罗镇宽,关康,黄佳展. 1997. 胶东招掖金矿带控矿断裂演化规律[J]. 地质找矿论丛, 12(1): 26-35.
- 邵世才,何绍勋,奚小双. 1993. 小秦岭脉型金矿床容矿断裂及石英脉形成机制的探讨[J]. 地质找矿论丛, 8(2): 26-33.
- 山东省地质调查院. 2014. 山东省莱州一招远金矿整装勘查区专项填图与技术应用示范报告[R]. 内部资料. 济南: 5-26.
- 沈昆,胡受奚,孙景贵,凌洪飞,赵懿英,孙明志. 2000. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征[J]. 岩石学报, 16(4): 542-550.
- 宋明春,崔书学,周明岭,姜洪利,袁文花,魏绪峰,吕古贤. 2010. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示[J]. 地质学报, 84(9): 1349-1358.
- 宋明春,宋英昕,崔书学,姜洪利,袁文花,王化江. 2011. 胶东焦家特大型金矿床深、浅部矿体特征对比[J]. 矿床地质, 30(5): 923-932.
- 宋明春,李三忠,伊丕厚,崔书学,吕古贤,徐军祥,宋英昕,姜洪利,周明岭,黄太岭,刘长春,高书剑. 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,张军进,张丕建,杨立强,刘殿浩,丁正江,宋英昕. 2015. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J]. 地质学报, 89(2): 365-383.
- 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,谭现峰,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,王卫国. 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.
- 王德滋,赵广涛,邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. 高校地质学报, 1(2): 13-20.
- 汪劲草,夏斌,汤静如. 2003. 对玲珑—焦家矿集区几个关键地质问题的认识[J]. 大地构造与成矿学, 27(2): 147-151.
- 吴福元,徐义刚,高山,郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 杨金中,沈远超,刘铁兵. 2000. 胶东东部青山变质核杂岩与金矿成矿[J]. 地质地球化学, 28(1): 15-19.
- 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.
- 杨敏之,吕古贤. 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学[M]. 北京:地质出版社.
- 曾庆栋,沈远超,杨金中,张启锐,李慎之. 1999. 山东省乳山金矿隐伏矿体定位预测[J]. 地质与勘探, 35(2): 3-5.
- 张华锋,翟明国,何中甫,彭澎,许保良. 2004. 胶东昆崙山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义[J]. 岩石学报, 20(3): 369-380.
- 张华锋,李胜荣,翟明国,郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义[J]. 岩石学报, 22(2): 285-295.
- 张连昌,沈远超,刘铁兵,曾庆栋,李光明,李厚民. 2002. 浅议胶东金矿集中区矿床类型与成矿系统[J]. 矿床地质, 21(增刊): 779-728.
- 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.
- 张欣,汪雄武,赵岩,侯林. 2011. 丹巴燕子沟金矿构造控矿特征分析及成矿机制初探[J]. 有色金属(矿山部分), 63(3): 19-24.
- 张岳桥,赵越,董树文,杨农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 11(3): 123-133.