

·矿产资源·

胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展

宋明春

SONG Mingchun

山东省地质矿产勘查开发局/山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013

Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Prospecting, Ji'nan 250013, Shandong, China

摘要:系统总结了胶东金矿深部找矿的主要成果,回顾了胶东金矿的主要找矿理论认识和找矿方法技术发展历程。目前,胶东地区深、浅部累计探明金矿资源储量超过4500t,其中,500~2000m深度的深部金资源储量逾2700t,单矿床规模大于等于100t的超大型金矿床累计资源储量超过2900t,以破碎带蚀变岩型为主的金矿床资源储量逾3900t。探明了千吨级焦家巨型金矿床和三山岛巨型金矿床。对成矿模式的认识,经历了从受小构造控制的石英脉型金矿到受区域性大断裂控制的蚀变岩型金矿,再到深部阶梯式成矿的逐步扩展的发展过程。对成矿机制的认识,由绿岩带型金矿、多源长期成矿、岩浆热液金矿、幔源成矿、造山型金矿等发展为热隆伸展成矿。对矿床类型的认识,综合焦家式破碎带蚀变岩型金矿、玲珑式石英脉型金矿及其他多种类型金矿认识,提出了胶东型金矿的概念。找矿方法技术由早期的常规方法技术,发展为现今的高精度、大探测深度找矿方法技术。

关键词:深部找矿;巨型金矿床;胶东型金矿;成矿模式;热隆-伸展成矿;高精度找矿方法

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)09-1758-14

Song M C. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(9):1758-1771

Abstract: Based on lots of geological exploration results, this paper summarized the main achievements of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, and reviewed in brief the development process of main gold metallogenic theory and prospecting methods. Up till now, more than 4500 tons of gold reserves have been found in shallow and deep places in the Jiaodong area, with more than 2700 tons found in the depth of 500~2000m below the surface. Among these resources, more than 2900 tons were found from superlarge gold deposits with the reserves of each single deposit ≥ 100 tons, and more than 3900 tons were detected from structural altered rock. Furthermore, Jiaojia and Sanshandaogiant gold deposits of kiloton class have been proved. The progress of the ore-forming theory and prospecting methods has made important contribution to prospecting breakthrough. In the aspect of metallogenic model, the understanding has proceeded from quartz vein type gold deposit under a small structure control through structural altered rock type gold deposit under regional large fault control and then to a step metallogenic model in vertical direction. In the aspect of mineralization genesis, previous understanding included greenstone type, multi-sources and long-term mineralization, magmatic hydrothermal ore formation, mantle-derived mineralization and orogenic gold deposit. Now upwelling-extension theory on mineralization has been established. In the aspect of understanding of mineralization type, by integrating Jiaojia type structural altered rock gold deposit, Linglong type quartz vein gold deposit and other various types of gold deposits, researchers put forward the concept of Jiaodong-type gold deposit, which is a unique gold mineralization type that is different from other known types of gold deposit in the world. In the aspect of prospecting method, conventional methods include such means as geological mapping, IP and IP combined profile, and prospecting by primary and secondary halos, whereas present-day prospecting methods adopt high-precision

收稿日期:2015-06-23;修订日期:2015-08-20

资助项目:山东省地质矿产勘查开发局科研和勘查项目及山东省“泰山学者”工程

作者简介:宋明春(1963-),男,博士,研究员,从事矿产勘查、区域地质调查和相关研究。E-mail:mingchuns@163.com

and large detection depth means, such as 3-D metallogenic prognosis along the structural belt, high resolution geophysical exploration, tectonogeochemical exploration, constructing exploration model on the basis of a step metallogenic model.

Key words: deep-seated prospecting; giant gold deposit; Jiadong-type gold deposit; metallogenic model; upwelling-extension theory on mineralization; prospecting methods of large detection depth

胶东金矿集中区面积约16522km²,仅占中国陆地的0.17%,累计探明金资源储量和黄金产量均占中国的1/4左右,是中国最重要的黄金基地。该地区的金矿勘探和研究是国内外高度关注的热点,金矿找矿不断取得新进展。2005年以前,在500m深度以浅探明金资源储量逾1700t;2005年以来,在500~2000m深度探明金资源储量逾2700t。目前,胶东地区最深的金矿勘探钻孔深度达4006.17m。对胶东金矿成矿规律和找矿理论的研究也不断取得新认识,如早期发现的产于破碎带蚀变岩中的焦家式金矿类型,打破了大断裂只导矿不成矿的传统认识^[1];近期深部找矿提出的阶梯式成矿模式^[2],解决了深部赋矿位置、找矿方向问题;以往认为胶东金矿为绿岩带型金矿或造山型金矿^[3-4],现在提出热隆-伸展成矿理论^[5];前人认为金矿形成于元古宙或多期成矿^[1],现在普遍认为金矿形成于白垩纪^[6]。

虽然前人对胶东金矿进行了大量勘查和研究,但多为单一矿床特征、矿床地球化学、区域成矿规律、成因机制、成矿地质条件等方面的研究,缺乏对胶东整体找矿成果的系统总结,导致对一些重要的找矿问题尚不清楚,如胶东地区有哪些主要金矿床?已探明的金资源储量究竟有多少?深部找矿效果如何?直接指导找矿的主要理论认识有哪些?深部找矿采用了哪些实用的技术方法?近年来,笔者参与了胶东地区的深部找矿探索和研究,对胶东金矿找矿工作予以高度关注。本文在前人大量工作的基础上,较全面地总结了胶东深部找矿的主要成果和理论、技术进展,期望通过回答上述问题,进一步推进胶东金矿勘查研究,并且为推动中国东部地区“攻深找盲”找矿战略提供典型范例和有益指导。

1 区域地质背景

胶东位于中国东部,其西部属于华北陆块,由胶北隆起、胶莱盆地组成,其东部属大别-苏鲁造山带的威海隆起^[7],大别-苏鲁造山带为华北板块与扬子板块之间的碰撞造山带。胶北隆起主要由新太

古代花岗-绿岩带(胶东岩群、栖霞片麻岩套)、古元古代中-高级变质的滨浅海相沉积地层(荆山群、粉子山群、芝罘群)、新元古代浅变质的滨浅海相沉积地层(蓬莱群)和中生代花岗岩组成^[8],胶莱盆地主要由白垩纪陆相火山-沉积地层(莱阳群、青山群、王氏群)组成。威海隆起为高压-超高压变质带,主要由新元古代含榴辉岩的花岗质片麻岩(荣成片麻岩套)和中生代花岗岩组成,以及少量古元古代变质地层。古近系、新近系和第四系零星分布于胶东地区的新生代山间盆地、现代河流和滨海地区。胶东中生代侵入岩主要有三叠纪柳林庄型闪长岩、宁津所型正长岩、槎山型正长花岗岩,侏罗纪垛山型花岗闪长岩、文登型花岗岩、玲珑型二长花岗岩,白垩纪郭家岭型花岗闪长岩、伟德山型花岗岩和崂山型花岗岩(图1)。金矿主要产于胶北隆起及其周边地区,赋矿围岩主要为前寒武纪变质岩(太古宙花岗-绿岩带、古元古代和新元古代变质地层)和中生代原生块状岩石(早白垩世火山-沉积岩系和侏罗纪一早白垩世花岗岩类侵入岩)。胶东地区大量发育的NE—NNE走向断裂构造是金矿成矿的有利部位,主要控矿断裂有三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、西林断裂、陡崖断裂和金牛山断裂^[11,6]。

2 胶东金矿主要找矿成果和进展

2.1 金矿床类型

胶东地区金矿开发历史悠久,早在唐朝即有开采金矿的记载。新中国成立以来,陆续开展了金矿勘查工作,初期根据历史经验寻找石英脉型金矿。石英脉型金矿床由单条石英脉或多条石英脉群组成,含金石英脉形态较简单,局部有分支现象。单个矿体长10~250m,厚0.5~3m。石英脉岩性特征与围岩差异大,抗风化能力强,常形成正地形,易于识别,这种类型金矿是以往当地居民采金矿的主要对象。

由于石英脉型金矿一般规模较小,找矿效果不理想,1958—1965年胶东仅探明逾20t黄金储量。为了满足国家经济建设快速发展的需要,地质工作者开始寻找新的金矿类型。20世纪60年代末,在区

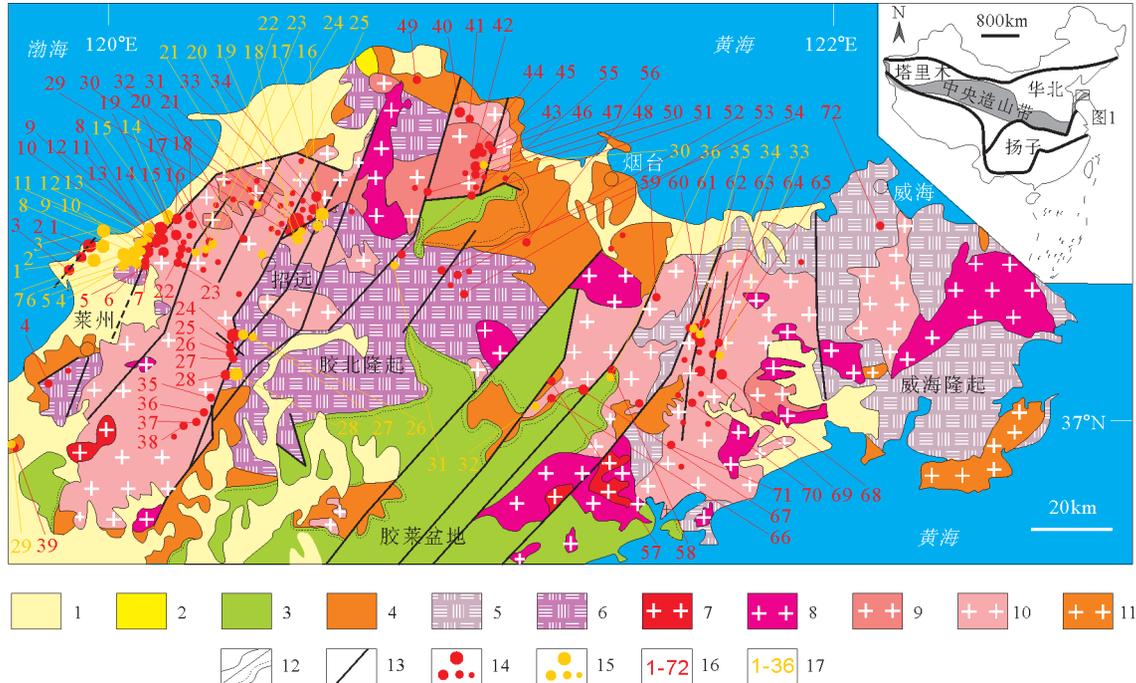


图1 胶东地区区域地质及金矿床分布

Fig. 1 Regional geological map of the Jiaodong Peninsula, showing distribution of gold deposits

- 1—第四系;2—新近系+古近系;3—白垩系;4—古元古界和新元古界;5—新元古代含榴辉岩的花岗质片麻岩;
- 6—太古宙花岗-绿岩带;7—白垩纪崂山型花岗岩;8—白垩纪伟德山型花岗岩;9—白垩纪郭家岭型花岗岩
- 闪长岩;10—侏罗纪花岗岩类(玲珑型花岗岩、垛山型花岗岩、文登型花岗岩);11—三叠纪花岗岩类;
- 12—整合/不整合地质界线;13—断层;14—以往探明的浅部金矿床位置(直径由大到小分别表示资源储量≥100t的超大型金矿床、资源储量20~<100t的大型金矿床、资源储量5~<20t的中型金矿床和资源储量<5t的小型金矿床);15—新探明的深部金矿床位置(直径大小的意义同图例14);16—以往探明的浅部金矿床编号(不同序号的矿床名称同表1);17—新探明的深部金矿床编号(不同序号的矿床名称同表2)

域性较大断裂中发现了破碎带蚀变岩型金矿,这一发现打破了传统的“大断裂只导矿不成矿”的观点。其后地质工作者将找矿目标转向赋存于大断裂中的破碎带蚀变岩型金矿,找矿取得了重大突破,陆续发现了焦家、三山岛、新城、台上、大尹格庄等超大型金矿床。破碎带蚀变岩型金矿又称为焦家式金矿,是赋存于断裂主断面附近均匀破碎的碎粒岩、碎斑岩中的细粒浸染状矿化类型,主要矿石有浸染状黄铁绢英岩、细脉浸染状黄铁绢英岩化花岗岩质碎裂岩和细脉浸染状黄铁绢英岩化花岗岩,矿体呈似层状、大脉状产出,主矿体产状平行于控矿断裂主断面^[1]。

之后,相继发现了网脉型金矿和硫化物石英脉型金矿。网脉型金矿是发现于焦家主断裂破碎带

蚀变岩型金矿之下离主断面稍远处及其分支断裂中的细脉、网脉型金矿,单脉宽度由不足1cm至数厘米,细脉、网脉主要由黄铁矿化硅化绢英岩脉、石英细脉组成,受一组“X”形网状裂隙控制,其中部分裂隙为与主断裂产状平行的缓倾角裂隙,其他裂隙为与主断裂产状垂直甚至反倾的陡倾角裂隙。河西金矿、红布金矿和焦家金矿主矿体下部均出现网脉型金矿类型。

硫化物石英脉型金矿以沿断裂发育脉体宽大的含金硫化物石英脉为特征,矿床富含黄铁矿(含S一般大于8%),有时伴生其他金属硫化物(黄铜矿、方铅矿等),Au品位中等或偏低。矿床以含金硫化物石英脉单脉为主,部分矿区有脉群出现。矿体多为陡倾斜脉状,倾角60°~85°。矿体形态简单,多呈

脉状、薄板状、透镜状。分布于烟台市牟平区—威海市乳山市一带,以牟平邓格庄金矿为代表。

20世纪80—90年代,人们把找矿方向转向基底隆起中的古元古代变质地层和基底隆起与中生代盆地的结合部位,发现了层间滑脱拆离带型金矿、构造角砾岩型金矿和砾岩型金矿。

层间滑脱拆离带型金矿矿体呈似层状、透镜状沿粉子山群不同岩性层的层间构造带分布。矿石自然类型主要有碎裂状褐铁矿(黄铁矿)绢英岩化变粒岩、碎裂状褐铁矿(黄铁矿)绢英岩、褐铁矿化大理岩、褐铁矿(黄铁矿)绢英岩质碎裂岩、碎裂状褐铁矿石方解石蚀变岩、黄铁绢英岩化糜棱岩,以福山杜家崖金矿为代表。

构造角砾岩型金矿赋存于胶莱盆地与变质基底结合部位的盆缘断裂构造带中,矿石类型为含金黄铁矿硅化构造角砾岩,以乳山市蓬家乔金矿床和平度大庄子金矿床为代表。

砾岩型金矿主要分布于胶莱盆地东北边缘,赋存于白垩纪莱阳群林寺山组灰紫色—灰黄色巨砾岩、粗砾岩中,受小规模断裂、裂隙密集带控制,矿石自然类型主要为黄铁矿化绢云母化碎裂状砾岩,以乳山市发云乔金矿床为代表。

2.2 矿床数量和规模

胶东地区已探明资源储量的金矿床(区)共有200余处,主要分布于烟台市的莱州、招远、蓬莱、栖霞、福山、牟平等市(县、区),青岛市的平度、莱西市和威海市的乳山、文登市构成胶东金矿集中区,划分为胶西北(莱州—招远)、栖霞福(栖霞—蓬莱—福山)、牟乳(牟平—乳山)3个成矿小区^[5]。胶东金矿床分布频度、大型矿床数量均居中国首位,金矿床具有区域集中、规模大、富集强度高、成矿期短的特点,被地质学家称为中生代成矿大爆发或金属异常巨量堆积^[9]。

本文对已探明的中型及以上规模金矿床进行了初步统计,矿床数量共计108个(图1),其中以往探明的浅部金矿床72个(表1),新探明的深部金矿床36个(表2)。按照矿床规模统计,资源储量 $\geq 100\text{t}$ 的超大型金矿床16个(浅部6个、深部10个),20t到小于100t的大型金矿床25个(浅部17个、深部8个),5t到小于20t的中型金矿床67个(浅部49个、深部18个)。按矿床类型统计,以破碎带蚀变岩型为主的金矿床69个(浅部39个、深部30个),其中超大

型15个、大型18、中型36个;以石英脉型为主的金矿床21个(浅部20个、深部1个),其中超大型1个、大型3个、中型17个;以硫化物石英脉型为主的金矿床12个(浅部9个、深部3个),其中大型3个、中型9个;蚀变角砾岩型金矿床3个(浅部2个、深部1个),其中大型1个、中型2个;蚀变砾岩型金矿床2个(浅部1个、深部1个),均为中型矿;层间滑脱拆离带型金矿床1个(浅部),为中型矿。按照围岩类型统计,产于侏罗纪玲珑型花岗岩中的金矿床83个,其中超大型矿16个、大型矿22个、中型矿45个;产于白垩纪郭家岭型花岗岩中的金矿床11个,其中大型矿3个、中型8个;产于前寒武纪变质岩中的金矿床12个,均为中型矿;产于白垩纪莱阳群中的金矿床2个,均为中型矿。

胶东金矿集中区累计探明金资源储量总量逾4500t(其中截至2012年,累计评审备案资源储量2585.376t),其中,浅部探明逾1700t,深部探明逾2700t。按照矿床规模统计,超大型金矿床资源储量逾2900t(浅部逾700t、深部逾2200t),大型金矿床资源储量逾900t(浅部逾560t、深部逾350t),中型金矿床资源储量逾650t(浅部逾450t、深部逾200t)。按矿床类型统计,以破碎带蚀变岩型为主的金矿床资源储量逾3900t(浅部逾1200t、深部2700t),以石英脉型为主的金矿床资源储量逾340t(浅部340t、深部5t),以硫化物石英脉型为主的金矿床资源储量逾140t(浅部120t、深部近30t),蚀变角砾岩型金矿床资源储量逾30t(浅部近30t、深部6t),蚀变砾岩型金矿床资源储量18t(浅部12t、深部6t),层间滑脱拆离带型金矿床资源储量5t(均为浅部)。

胶东大型以上金矿床虽然数量不多,但资源储量多,超大型、大型、中型金矿床资源储量占总量的比例分别约为65%、20%、15%,说明近年来深部找矿成果明显改善了我国金矿床的资源特点。以往统计,我国金矿床的主要特征之一是,大型、特大型金矿床少,中小型金矿床多^[10]。胶东深部金矿床与浅部金矿床比较,显示了矿床数量少,资源储量多的特点,深部金矿床数量占矿床总数的33%,但资源/储量却占总量的61%,说明深部金矿床分布集中、规模大。破碎带蚀变岩型金矿无论是数量还是资源储量均在胶东地区占绝对优势,其次是石英脉型金矿和硫化物石英脉型金矿,三者矿床数量所占比例依次是64%、19%、11%,资源储量所占比例则是

表1 胶东地区2005年及以前探明的中型及以上规模浅部金矿床

Table 1 Content of shallow gold deposits of medium-sized or larger deposits in Jiaodong area

序号	矿床名称	勘查阶段	矿床类型	赋矿地质体	矿床规模	矿石品位/ 10^{-6}
1	莱州市三山岛	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	8.72
2	莱州市新立	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型*	3.5
3	莱州市仓上	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	4.78
4	莱州市留村	详查	蚀变岩型	荆山群	中型	7.92
5	莱州市寺庄	普查	蚀变岩型+网脉型	玲珑花岗岩	中型	3.89
6	莱州市马塘	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.32
7	莱州市焦家	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	3.82
8	莱州市东季	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	7.89
9	莱州市龙埠	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	4.17
10	莱州市红布	详查	蚀变岩+网脉型	玲珑花岗岩	中型	6.85
11	莱州市望儿山	勘探	蚀变岩+石英脉型	玲珑花岗岩	大型*	8.21
12	莱州市新城	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	6.81
13	招远市侯家	详查	蚀变岩型+网脉型	玲珑花岗岩	中型	7.21
14	招远市河西	勘探	蚀变岩型+网脉型	玲珑花岗岩	大型*	6.23
15	招远市河东	勘探	蚀变岩型+网脉型	玲珑花岗岩	大型	6.66
16	招远市上庄	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	6.99
17	招远市陈家	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	7.24
18	招远市洼孙家	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	11.70
19	招远市前孙家	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	10.90
20	招远市埠上	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	6.22
21	招远市原疃	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	15.00
22	招远市灵山沟	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	9.40
23	招远市黄埠岭	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	13.06
24	招远市大尹格庄	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	2.75
25	招远市小尹格庄	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.00
26	招远市曹家洼	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	10.40
27	招远市姜家窑	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	4.89
28	招远市夏甸	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	7.76
29	招远市九曲	勘探	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	12.38
30	招远市阜山	普查	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	9.81
31	招远市玲珑	勘探	石英脉+蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	12.2
32	招远市台上	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	6.03
33	招远市东风	勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	6.20
34	龙口市大磨曲家	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	6.67
35	莱西山后	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	2.94
36	平度市上庄	普查-勘探	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.37
37	平度市老窑窝子29号脉	勘探	蚀变岩	玲珑花岗岩	中型	6.70
38	平度市旧店	勘探	蚀变岩+石英脉型	玲珑花岗岩	中型	9.53
39	平度市大庄子	勘探	蚀变角砾岩型	荆山群	中型	4.53
40	蓬莱市庄官	详查	石英脉型	郭家岭花岗岩	大型	1.53~25.81
41	蓬莱市后大雪	普查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	12.74
42	蓬莱市黑岚沟	勘探	石英脉型	郭家岭花岗岩	大型	13.50
43	蓬莱市初格庄	详查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	15.00

续表 1

序号	矿床名称	勘查阶段	矿床类型	赋矿地质体	矿床规模	矿石品位/10 ⁻⁶
44	蓬莱市初格庄北	普查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	13.28
45	蓬莱市门楼	详查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	5.68、6.34
46	蓬莱市吨口	详查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	9.32
47	蓬莱市齐家沟	勘探	石英脉型	郭家岭花岗岩	大型	1.00~317.31
48	蓬莱市强家沟	普查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	4.00
49	蓬莱市西南王	详查	石英脉型	粉子山群	中型	10.00~40.00
50	栖霞市前山顶Ⅲ、Ⅳ号脉	详查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	14.03
51	栖霞市西林	详查	蚀变岩型	荆山群	中型	1.51
52	栖霞市百里店	勘探	石英脉型	栖霞片麻岩套	中型	10.51
53	栖霞市后夼	勘探	石英脉型	栖霞片麻岩套	中型	20.12
54	栖霞市马家窑	勘探	石英脉型	栖霞片麻岩套	中型	17.03
55	栖霞市西陡崖	详查	蚀变岩型	栖霞片麻岩套	中型	3.09
56	福山杜家崖	详查	层间滑脱拆离带型	荆山群	中型	3.58、2.70
57	牟平辽上	详查	蚀变岩型	荆山群	中型	10.48
58	牟平发云夼	详查	蚀变砾岩型	莱阳群	大型	6.76
59	牟平下雨村	勘探	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	7.40
60	牟平哈狗山	勘探	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	7.74
61	牟平区邓格庄	勘探	含金硫化物石英脉型+蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	10.50
62	牟平金牛山	勘探	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	大型	5.79~9.55
63	牟平福祿地	普查	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	9.60
64	牟平腊子沟	详查	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	5.99
65	牟平莒格庄	详查	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	19.37
66	乳山西涝口	普查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	2.65
67	乳山市蓬家夼	详查	蚀变角砾岩型	玲珑花岗岩	大型	3.24
68	乳山市皂地	勘探	含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	大型	20.06
69	乳山市金青顶	勘探	含金硫化物石英脉型+蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	13.56
70	乳山市英格庄	详查	石英脉型-含金硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	4.38
71	乳山市三甲	勘探	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	12.06
72	威海市范家埠	详查	石英脉型	荣成片麻岩套	中型	9.90

注:5t≤中型<20t,20t≤大型<50t,50t≤大型* <100t,超大型≥100t;表中矿床序号与图1中以往探明的浅部金矿床编号一致

88%、8%、3%;蚀变角砾岩型、蚀变砾岩型和层间滑脱拆离带型金矿床数量和资源储量均较少,三者合计数量和资源储量所占比例分别为6%和1%;超大型金矿床中除1个为石英脉型金矿外,其余均为破碎带蚀变岩型金矿;大型金矿床中破碎带蚀变岩型金矿数量占72%,石英脉型金矿占12%,硫化物石英脉型占12%,蚀变角砾岩型金矿占4%。

2.3 深部找矿突破及巨型金矿床的发现

20世纪,地质工作者主要在胶东地区地表至地下500m深度范围内的浅部区域勘探金矿,随着勘探程度不断增高,浅部区域金矿资源越来越少。找

矿方向转向地下较深部区域和近海区域,主要矿区勘探深度达到1000~2000m。深部找矿取得重大突破,新发现深部中型及以上金矿36个(表2),其中,超大型金矿床10个、大型8个,探获金资源储量逾2700t。有3个深部金矿床资源量均超过300t,其规模远超过浅部金矿床,是国内最大的金矿床。

深部金矿床主要赋存于规模较大的控矿断裂带中,位于矿床集中分布的金矿田中,其浅部有中-超大型金矿床分布。在焦家断裂的中南段连续发现了莱州寺庄深部、焦家深部^[11-13]、朱郭李家、南吕-欣木、纱岭、前陈等大型-超大型金矿床,研究表明

表2 胶东地区2005年以来探明的中型及以上规模深部金矿床

Table 2 Content of deep-seated gold deposits of medium-sized or larger deposits in Jiaodong area

序号	矿床名称	勘查阶段	矿床类型	赋矿地质体	矿床规模	矿石品位/ 10^{-6}
1	莱州市新立深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	2.95
2	莱州市西岭	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型*	4.22
3	莱州市三山岛北部海域	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型*	4.44
4	莱州市前陈	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型*	4.85
5	莱州市寺庄深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	4.35
6	莱州市南吕-欣木	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	2.41
7	莱州市纱岭	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型*	2.94
8	莱州市朱郭李家	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	3.37
9	莱州市焦家深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	3.60
10	莱州市焦家金矿床延伸	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.32
11	莱州市红布深部及外围	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.13, 2.98
12	莱州市曲家	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型*	3.33
13	莱州市新城深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	3.62
14	莱州市上庄深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	4.48, 4.00
15	招远市上庄接替资源	普查	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	4.48
16	招远市水旺庄	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型*	3.58
17	招远市东风深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	2.75
18	招远台上深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型	3.42
19	招远破头顶深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.51
20	招远市岭南	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型*	3.16
21	招远市李家庄	普查	石英脉型	玲珑花岗岩	中型	3.16
22	招远市蚕庄深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	4.00±
23	招远市埠南深部及外围	详查	蚀变岩+石英脉型	玲珑花岗岩	中型	10.47
24	招远市埠上深部及外围	详查	蚀变岩+石英脉型	玲珑花岗岩	中型	4.79
25	招远市金翅岭接替资源	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	5.44
26	招远市尹格庄深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	大型*	3.10
27	招远市后仓	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	4.00±
28	招远市夏甸深部	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	超大型	3.36
29	平度市大庄子I号脉深部	详查	蚀变角砾岩型	荆山群	中型	4.61
30	蓬莱市燕山⑧—1号矿体深部	普查	石英脉型	郭家岭花岗岩	中型	8.68
31	栖霞市笏山村	详查	蚀变岩型	栖霞片麻岩套	中型	2.67
32	海阳市土堆—沙旺	详查	蚀变岩型	玲珑花岗岩	中型	3.55
33	牟平福禄地深部	详查	硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	11.76
34	牟平腊子沟深部	普查	硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	5.93
35	牟平邓格庄深部	详查	硫化物石英脉型	玲珑花岗岩	中型	4.73
36	牟平宋家沟深部及外围	详查	蚀变砾岩型	莱阳群	中型	1.69

注: $5t \leq$ 中型 $< 20t$, $20t \leq$ 大型 $< 50t$, $50t \leq$ 大型* $< 100t$, $100t \leq$ 超大型 $< 200t$, 超大型* $\geq 200t$;

表中矿床序号与图1中新探明的深部金矿床编号一致

这几个金矿床之间及其与浅部的寺庄、马塘、焦家金矿床主矿体连续分布或在平面上相互叠合,实际上构成一个吨位聚集指数(矿床的经济金属吨位

与地壳中金属平均含量之比)大于 10^{11} 的巨型矿床,这一矿床已累计探明金资源/储量 1200t 左右^[14]。受勘查历史、探矿权等因素影响,该矿床被分段勘查,

人为划分为若干个金矿床。笔者建议将这一巨型矿床称为千吨级焦家巨型金矿床,以往所称的各个矿床改称为矿段。

在三山岛断裂的北段发现了西岭和三山岛北部海域2个资源储量超过400t的深部超大型金矿床,其中三山岛北部海域金矿床是位于浅海中的隐伏矿床,海水深度8.5~20m。这2个矿区与浅部的三山岛金矿区主要金矿体连续分布,实际也是一个巨型金矿床,累计探明金资源储量超过1000t。这一巨型金矿床可称为千吨级三山岛巨型金矿床。千吨级焦家巨型金矿床和三山岛巨型金矿床都是世界级罕见的巨型金矿床。三山岛断裂中部的新立金矿深部也发现超大型金矿床,浅部和深部累计探获金资源储量逾250t。

在招平断裂北段的玲珑金矿田和中段的大尹格庄金矿田深部找矿均有重大突破,玲珑金矿田的招远市水旺庄、东风深部、台上深部、破头顶深部、岭南等矿床共计探明深部金资源储量逾300t,以往探明的九曲、阜山、玲珑、台上、东风等浅部矿床累计探明金资源储量逾340t,浅部和深部合计探明金资源储量逾600t。大尹格庄金矿田的招远市尹格庄深部、后仓和夏甸深部3个金矿床共计探明金资源储量逾170t,招远市大尹格庄、小尹格庄、曹家洼、姜家窑和夏甸5个浅部矿床累计探明金资源储量逾190t,浅部和深部合计探明金资源储量逾370t。

目前,胶西北(莱州—招远)成矿小区浅部金矿床累计探明金资源储量逾1400t,深部金矿床累计探明金资源储量近2700t,二者合计逾4100t,成为继南非兰德和乌兹别克斯坦穆龙套之后的世界第三大岩金成矿区。

栖霞笏山村金矿是陡崖断裂深部找矿的重要成果,深部矿区和浅部矿区累计探明金资源储量已超过20t,成为栖霞金矿田第一个大型金矿,改变了该矿田“只见星星不见月亮”的找矿局面。

牟平辽上深部金矿和海阳土堆—沙旺金矿是胶莱盆地东北缘找矿的重要成果,前者新增金资源量接近70t,是胶东东部发现的唯一超过50t的大型金矿;后者深部和浅部矿区累计探明金资源储量超过20t,该矿区于2000年开始开采,当时是金资源储量不足1t的小型矿床,经过多年的边采边探,现已发展为大型金矿床。目前,胶莱盆地东北缘周边地区累计探明金资源储量超过150t。

3 阶梯式成矿模式及找矿理论认识进展

在金矿找矿的同时,地质人员不断深入研究胶东金矿矿床特征、成矿及控矿规律,建立了有效指导深部找矿的阶梯式成矿模式,找矿理论认识不断获得新进展,促进了深部找矿突破。

3.1 成矿模式——从大断裂成矿到阶梯式成矿

20世纪60年代以前,胶东地区勘查开发的金矿类型均为石英脉型金矿,因大部分金矿产于招远市玲珑镇,因此被命名为玲珑式金矿。这种金矿规模一般较小,分布零散。1965—1970年,山东省地质局807队打破寻找石英脉型金矿的传统束缚,相继在三山岛断裂、焦家断裂等区域性规模较大断裂中发现了破碎带蚀变岩型大型金矿床,突破了大断裂只导矿不成矿的认识误区,证实在破碎岩石宽达百米、长度数十千米的区域性断裂带内是能够储矿的,并且矿床规模较大。经过深入研究,提出了一系列金矿成矿规律,如岩体和构造控矿规律、矿床分布和变化规律、赋矿规律、矿体产出规律等^[1,15-16],建立了蚀变型金矿的大断裂成矿模式,形成了对焦家式金矿成矿的较系统认识,解决了浅部金矿找矿的理论认识问题。

随着浅部金矿资源的逐渐减少,20世纪90年代后期,地质工作者开始了深部找矿探索,开展了部分500~800m深度的较深钻孔。结果发现,以往探明的浅部金矿似乎延伸到地下500m以浅就尖灭了,致使部分地质专家认为胶东深部没有找矿潜力。因此,胶东地区在这一时期的近10年间没有大的找矿发现。2006年,深部找矿取得历史性突破,在莱州寺庄矿区深部发现了大型金矿。经过深入研究发现,控制金矿的断裂构造不是呈直线式向深部延展,而是呈现倾角陡、缓相间阶梯式特征,金矿主要沿倾角较缓的台阶分布,由此建立了深部金矿阶梯式成矿模式^[2]。阶梯式成矿模式揭示了断裂缓倾段赋矿、陡倾段无矿的规律,而以往深部探索没有找到矿的原因是,钻孔恰好打在了断裂陡倾角的位置(图2)。

深部找矿成果对部分传统认识提出了挑战,如以往按照玲珑在上焦家在下的认识,重点在玲珑式金矿分布区的玲珑型花岗岩内部找矿,多年来没有明显找矿进展。深部找矿成果显示,深部金矿绝大部分赋存于焦家式金矿的深部,在玲珑式金矿深部仅发现了少量中型及以下规模的矿床,这可能暗示

玲珑式金矿位于金矿垂向分带的深部带,其下部不会再有大规模的矿。以玲珑金矿为代表的石英脉型金矿赋存于招平断裂下盘的玲珑花岗岩体内部,而台上、东风、大尹格庄等蚀变岩型金矿则赋存于招平断裂主构造带附近的玲珑花岗岩体边缘。这种地质现象指示,蚀变岩型金矿位于断裂主断面附近,在上部;石英脉型金矿赋存于断裂下盘,在下部。稳定同位素地球化学研究^[17-19]和流体包裹体研究^[20-24]同样说明,石英脉型金矿形成的深度相对深,蚀变岩型金矿形成的深度相对浅^[25]。

3.2 成矿机制——从变质热液成矿到热隆伸展成矿

对于胶东金矿的成矿机制,前人做过大量研究,早期的地质工作者多将胶东金矿作为绿岩带型金矿^[3],认为其属于变质热液成矿。之后,地质工作者普遍认可多源长期成矿说,认为胶东金矿的成岩成矿从太古宙—中生代有继承性或承袭的成因关系,金成矿具有长期性、多来源的特点,但中生代燕山早期的构造岩浆活动是成矿的主导因素,金矿是壳幔混合以地壳物质组分为主要物质来源的岩浆期后热液矿床。太古宙—古元古代形成金矿原始矿源岩,为金矿形成的雏形期;新元古代震旦纪形成金矿衍生矿源岩,为金矿形成的预富集期;中生代燕山早期形成金矿直接矿源岩,为金矿的主成矿期^[1]。也有人提出胶东金矿是地幔热柱演化的结果^[26-27]。

近年来,研究者普遍认为,中生代壳幔相互作用产生的大量岩浆活动在金矿成矿中起重要作用,但对哪种岩浆活动与金矿成矿有关尚有不同认识。有人认为胶东金矿是与玲珑型花岗岩有关的混合岩化岩浆热液矿床^[28],也有人指出地幔来源的煌斑岩与金矿化有成因联系^[29-31]或为金矿成矿提供了部分成矿物质^[32],更多人则支持郭家岭型花岗岩岩浆期后热液作用引起了金矿成矿^[1,33-34]。笔者提出,伟德山型花岗岩是分凝富金流体和驱动大规模流体循环的主要原因^[35]。

同位素年代学研究发现,胶东不同类型、不同成矿区的金矿成矿时代是一致的,统计的年龄范围为110.6~128.17Ma,集中在115~122.5Ma^[5]。与金矿有关的侵入岩则是多时代、多期次、多成因岩浆活动的结果,玲珑型花岗岩形成于150~160Ma^[36],为壳源重熔型花岗岩;郭家岭型花岗岩形成于126~130Ma^[37],为壳幔混合源花岗岩;伟德山型花岗岩同

位素年龄值是105~127Ma,为壳幔混合源花岗岩^[7];崂山型花岗岩同位素年龄值是90~115.4Ma,为A型花岗岩^[7]。金矿的同位素年龄略晚于郭家岭型花岗岩年龄,略早于崂山型花岗岩年龄,位于伟德山型花岗岩年龄值范围内,因此认为,胶东金矿与伟德山花岗岩大致同时形成。赋存金矿的直接围岩有前寒武纪变质岩、玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩、莱阳群底部砾岩,金矿产于切割这些围岩的断裂构造和石英脉中,说明在这些地质体形成之后才发生金成矿作用。焦家深部金矿床蚀变岩的岩石地球化学特征表明,蚀变岩是由玲珑花岗岩经过破碎、流体活动改造而成的,指示蚀变作用和金矿化是在玲珑花岗岩形成之后发生的^[25]。伟德山型花岗岩分布面积大、范围广,是胶东地区中生代强烈壳幔相互作用的产物,分布于金成矿区的深部和外围。与金矿相伴分布的以煌斑岩为代表的成矿期中—基性脉岩,是与伟德山型花岗岩同源、同时代的二分和未分脉岩。伟德山型花岗岩、煌斑岩、金矿构成了有机的联系,其形成时代一致,成岩、成矿物质均有地幔来源成分^[38],成矿作用发生之时伟德山型花岗岩岩基位于深部,煌斑岩和金矿形成于其浅部。花岗岩岩浆活动产生的热量造成围岩中的流体活化并与岩浆分离出熔的流体混合形成含金流体,伴随煌斑岩等中—基性脉岩向地壳浅部迁移,在远离花岗岩基的适当部位沉淀成矿。伟德山型花岗岩在金矿成矿作用中起到了“热机”和提供部分流体来源的作用。

结合大量成矿构造背景、矿床成因及成矿规律的研究成果认为,岩浆作用、流体活化、伸展构造是胶东金矿成矿的三大因素,提出了胶东金矿热隆—伸展成矿理论^[5,35];华北—扬子陆陆碰撞和古太平洋板块俯冲构造体制叠加/转换过程中,白垩纪中国东部地幔隆起,岩石圈减薄,克拉通破坏,壳幔相互作用,在胶东产生大量壳幔混合岩浆,分凝富金流体和驱动大规模流体循环,为金成矿提供了丰富的物质来源;同时,幔隆作用造成地壳拉张和花岗岩抬升、去根,形成大规模花岗岩穹窿—伸展构造,为流体运移富集、矿体定位提供了有利空间(图3)。在伸展构造主断裂带中,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蚀变岩为主的矿体,主拆离断层及其上、下盘断裂中的金矿体均呈阶梯式分布,

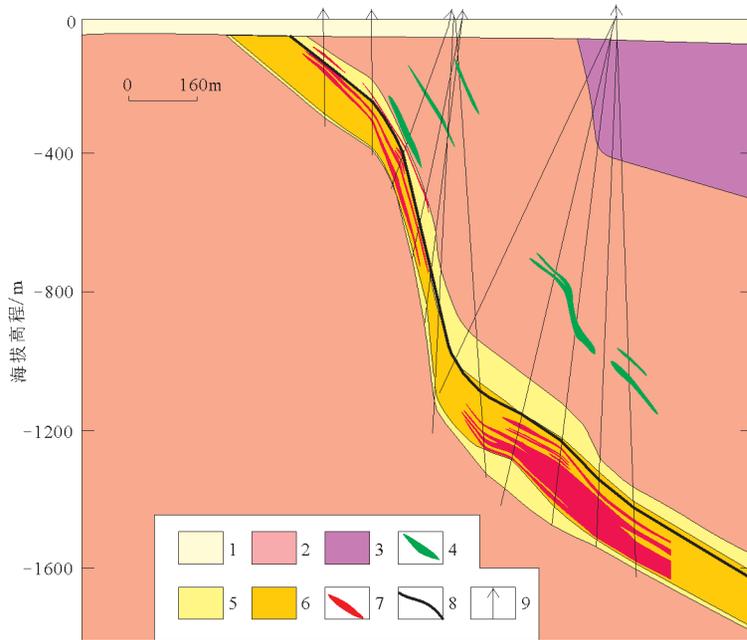


图 2 三山岛北部海域矿区第 30 勘探线地质剖面

Fig. 2 Geological section along No. 30 exploration line

- 1—第四系; 2—玲珑型花岗岩; 3—新太古代变质岩系; 4—煌斑岩和闪长玢岩脉;
- 5—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩带; 6—黄铁绢英岩化碎裂岩带; 7—金矿体; 8—三山岛断裂; 9—钻孔位置

构成多层成矿阶梯;在伸展构造下盘的花岗岩穹窿边缘,由于岩体上拱造成的引张作用产生大量张裂隙,形成减压空间,成矿流体在泵吸作用下充填成矿,即所谓的石英脉型金矿。这一认识揭示了构造、岩浆、流体、成矿耦合规律,指示胶东主控矿断裂规模大、产状缓,金矿在三维空间成群、成带产出,深部找矿潜力巨大。据此,将胶东找大矿的方向定位于主拆离断层向深部延展位置,开展 500~

2000m 深度深部找矿,实现了深部找矿重大突破。

3.3 矿床类型——从焦家式金矿到胶东型金矿

焦家式破碎带蚀变岩型金矿是中国金矿找矿的重大发现。该类型金矿的特点是,矿床规模一般较大、矿体形态简单、矿石类型单一、矿化连续集中、品位相对均匀、矿石易选。发育于早前寒武纪变质岩系与中生代花岗岩接触带上的区域较大断裂控矿和黄铁绢英岩化蚀变岩是这一类型金矿的主要成矿因素和找矿标志。虽然中国地质学家围绕焦家式金矿做了大量工作,形成了许多理论性认识,但这一矿床类型没有发展成为国际认可的理论模型。早期的研究者将胶东金矿划为绿岩带型金矿^[3],后来许多人认为应属造山型金矿^[39-40],也有人提出异议,认为属非造山型金矿^[41]。最近,造山型金矿的提出者 Goldfarb^[42]指出,胶东金矿与古老的前寒武纪陆块边缘陆内伸展构造有关,而非典型的显生宙造山型金矿。

胶东金矿床的矿化类型主要有破碎带蚀变岩型(焦家式)和含金石英脉型(玲珑式)。此外,按照矿石主要特征和控矿构造性质还划分了破碎带石英网脉带型、硫化物石英脉型、层间滑动构造带型、蚀变砾岩型、盆缘断裂角砾岩型等类型。研究表明,这些不同金矿类型是同一构造背景、同一成因、同一时代形成的产于不同构造部位、不同围岩条件的自然类型,是同一成矿作用的产物^[5]。传统的焦

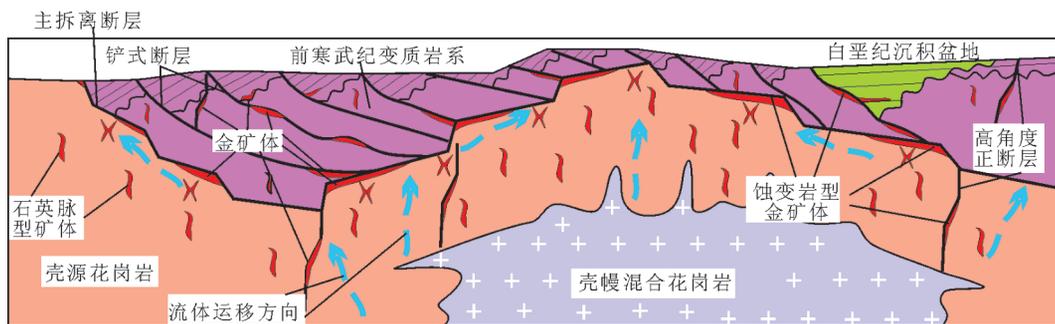


图 3 胶东金矿热隆-伸展成矿理论模型剖面示意图

Fig. 3 Sketch showing schematic model for upwelling-extension theory on mineralization

家式金矿认识显然不能涵盖上述矿化类型,国外已有的成矿理论模型也不适用于对胶东金矿的解释,胶东金矿是不同于国外已知金矿的独具特色的金矿类型。热隆-伸展成矿理论较好地解释了胶东金矿的成矿机制,这一理论不同于世界上其他金矿成矿理论,笔者曾将其称之为焦家型金矿^[14],为了避免与传统意义的焦家式金矿混淆,本文将这一成矿理论模型简称为胶东型金矿。

虽然胶东金矿床在矿体产状、蚀变作用、受断裂构造控制等特征方面具造山型金矿特点,然而二者也有明显的差异。大部分造山型金矿产于形成时间早于其数十至数百百万年的岩石中,即显生宙造山型金矿床通常赋存于显生宙岩石中,而胶东金矿形成于高级变质岩及其原岩形成后的大约20亿年之后。在典型科迪勒拉造山带中的造山型金矿主要赋存于绿片岩相变质岩系中^[43-44],通常表现为造山带区域抬升期间的退变质轨迹^[45],流体和金属来源于科迪勒拉地体深部的递增变质带^[46];而胶东金矿叠加于燕山运动期间抬升到接近于地壳表层的角闪岩相和麻粒岩相岩石之上,已经变质和去挥发分至少20亿年的古老陆壳岩石不能为流体和金属提供直接的来源^[42]。增生造山带中的造山型金矿为低-中等盐度的 $H_2O-CO_2-NaCl\pm CH_4\pm N_2\pm HS$ 流体^[42],胶东金矿则为低盐度富 $H_2O-CO_2-NaCl\pm CH_4$ 组分^[14,25]。胶东地区晚侏罗世-早白垩世岩浆岩锆石的U-Pb和Hf同位素显示了强烈的地壳、岩石圈地幔和软流圈组分混合特征^[47],没有变质锆石特征,说明这一时期的构造热事件与板内岩浆作用有关。上述研究比较清楚地表明,胶东金矿不是造山型金矿,而是具有独特特征和成矿机制的、与国际上已知其他成因类型金矿不同的金矿类型。

胶东型金矿的主要特征包括^[14,48-50]:①矿床受断裂构造控制,赋存于区域较大规模断裂的产状变化、分支复合、断裂交会及大断裂旁侧的次级断裂中;②赋矿围岩大部分是侏罗纪壳源花岗岩,也有白垩纪壳幔混合花岗岩、砂砾岩、火山岩、中-基性脉岩和早前寒武纪变质地层、TTG质花岗岩;③矿石类型主要为黄铁绢英岩质蚀变岩和石英脉,围岩蚀变主要有黄铁绢英岩化、钾化和硅化;④矿床共、伴生有益组分主要有Au、Ag、S、Cu、Pb、Zn;⑤成矿流体为中-低温、低盐度、还原性流体,流体组成为 $NaCl-H_2O-CO_2\pm CH_4$,接近于岩浆水;⑥成矿流体

和物质是多源的,既有幔源特征,又有壳源的贡献;⑦矿床形成于伸展构造环境,其构造动力学机制是古太平洋板块俯冲和岩石圈减薄。

4 深部找矿关键技术

4.1 多尺度逐步逼近找矿预测方法

胶东金矿找矿的早期阶段主要是采用地表地质调查、群众报矿、沿主要成矿带走向追索、钻探验证等方法,后来发展了地球物理和地球化学找矿方法。地球物理找矿方面,航空磁测、航空重力成果主要用于选择找矿靶区,激电联剖和激电测深则为普查找矿和钻探施工提供了依据。经过大量实践,建立了以常规电法、磁法为主的地球物理找矿模型,如蚀变岩型金矿的地球物理找矿标志是低磁、低阻、高极化率异常,而石英脉型金矿的地球物理找矿标志是低磁、高阻、高极化率异常^[1,48]。地球物理方法在浅部找矿中发挥了很大作用,以莱州市仓上为代表的部分被第四系浅覆盖的金矿床就是在地球物理方法发现异常的基础上,经过进一步工作探明的。地球化学勘查方面,主要采用了次生晕和原生晕地球化学勘查方法。胶东地区的次生晕地球化学调查,已系统开展了1:20万、1:5万水系沉积物测量,部分矿区开展了1:1万土壤测量,次生晕地球化学在大面积找矿靶区选择、成矿预测中发挥了重要作用。原生晕地球化学测量,已开展了部分地区的1:5万基岩化探测量和部分矿区的1:1万、1:5000基岩化探测量及化探剖面测量,为普查工作勘查工程布置提供了依据。通过上述工作建立了金矿找矿的次生晕和原生晕地质-地球化学找矿模型,将Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi作为金矿找矿的主要指示元素,确定了它们的水平和轴向分带规律^[1,51]。

在前人大量实践的基础上,胶东深部找矿采用了多尺度逐步逼近找矿预测方法。①完成了整个胶东地区的大面积多元信息综合区域成矿预测,在大量地质、物探、化探、遥感综合勘查基础上,以地质变量类比和构造岩相界面成矿为主要标志,在胶东圈出预测远景区130余处,预测金资源总量约5000t;②对主要成矿带进行了大比例尺(1:2.5万~1:1万)矿带(田)成矿预测,在开展系统的1:5000~1:50000拉网式大比例尺高精度电法、磁法、重力和构造地球化学测量基础上,圈定了主要成矿带的找矿靶区,其中在焦家金矿田圈定了20处深部找矿靶区,预测深部金资源总量972.761t;③

开展了深部金矿三维定位预测,在对大量地质、钻探、物化探资料进行计算机数据处理和建立数据库的基础上,采用三维立体建模技术,推断了主要矿区(床)预测矿体位置、形态和产状。

4.2 深部金矿找矿模型

成矿地质理论认识与高精度、大探测深度找矿方法技术有机结合是实现胶东深部找矿突破的关键。在找矿实践中建立的深部金矿找矿模型为:成矿构造带三维成矿预测+高分辨率地球物理+构造地球化学探测+阶梯式成矿模式,即在主要成矿构造带上开展大比例尺(1:2.5万)成矿预测和三维定位预测圈定勘查靶区,根据高精度精细地球物理探测确定赋矿断裂带延深和深部产状变化,依据构造地球化学测量预测深部成矿的可能性,按照阶梯式成矿模式选择断裂产状由陡变缓区段布置钻探验证。

通过对焦家断裂带深部金矿找矿的 CSAMT、SIP 测量和研究,总结地球物理参数及典型金矿床试验地球物理场特征,建立了焦家断裂带深部金矿地球物理找矿模型^[52]:在 CSAMT 法视电阻率断面等值线图上,断裂蚀变带位于视电阻率等值线由低到高的过渡梯级带上,梯级带呈舒缓波状特征,梯度变化最大的部位为断裂带主裂面下界面,金主矿体主要分布于主裂面下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩带内,视电阻率等值线同步向下弯曲、间距变大及由陡变缓部位为成矿有利部位;在 SIP 法复电阻率参数断面等值线图上,赋矿断裂带表现为定向延深的条带串珠状低阻带,复电阻率值越低反映断裂带矿化蚀变程度愈强烈,等值线弯曲、低阻带局部膨大部位为成矿有利部位;在充电率参数断面等值线

图上,赋矿断裂带表现为定向延深的条带串珠状高值异常带,在矿体头部高值异常呈“八”字型特征,在一定范围内充电率值越高反映矿化蚀变程度越强;在时间常数参数断面等值线图上,赋矿断裂带反映为条带串珠状高值异常带;频率相关系数参数断面等值线,断裂带反映为低值条带状异常特征;频散率参数断面等值线,赋矿断裂带反映为高值条带状异常特征;金属因数参数断面等值线,高值带状异常沿矿化蚀变带分布,低阻高极化体异常反映最明显。通过对焦家控矿断裂带和三山岛控矿断裂带开展可控源大地音频电磁测深+频谱激电+大地电磁测深+高精度重力+高精度磁法综合探测,发现焦家断裂与三山岛断裂由地表至断裂交会处出现若干个倾角明显变化的台阶,台阶的平缓部位显示有较强的金矿化地球物理标志;按照阶梯式成矿模式,在以往发现的第一矿化富集带之下识别出第二、第三矿化富集带,确定有 6 个主要赋矿台阶(图 4),目前第二矿化富集带及相应的赋矿台阶已经得到钻探证实。

构造地球化学测量方法,主要是在矿床普查、评价中沿赋矿构造在地表、坑道或钻孔内采集基岩样品,为深部找矿、预测盲矿体、矿床评价提供依据。李惠等^[53-54]根据金矿成矿成晕具有多期多阶段脉动叠加的特点,开展三山岛断裂带构造叠加晕地球化学研究,建立了构造蚀变带深部盲矿预测的构造叠加晕模型,在三山岛、新立、仓上 3 个矿床深部预测盲矿靶位 22 个、有利成矿地段 3 个、有利成矿远景区 2 个,经钻探验证取得了较好找矿效果。乳山金矿区地球化学原生叠加晕深部成矿预测也取得了较好的效果^[55]。

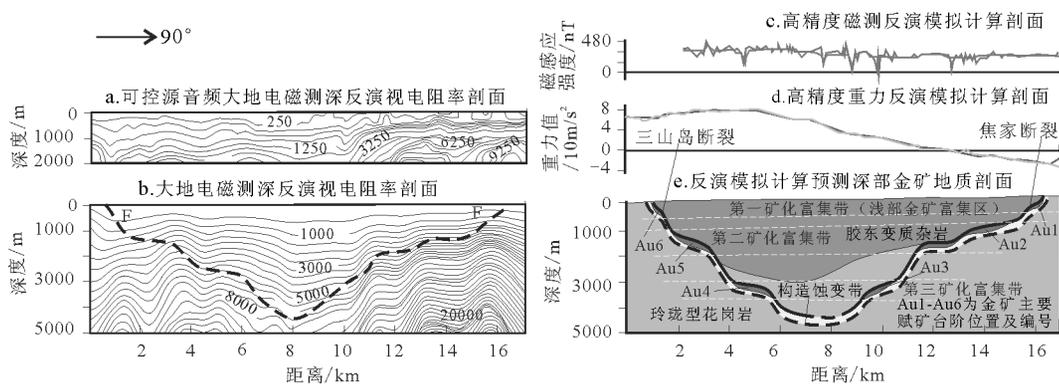


图 4 地球物理反演模拟深部金矿地质剖面

Fig. 4 Integrated inversion geological section based on gravimetric, magnetic and electric data

4.3 深孔钻探技术

20世纪主要采用传统的钻探设备和工艺进行金矿勘探,最大钻探孔深不超过1000m。钻探设备和工艺技术的进步是胶东深部找矿取得成功的重要因素之一。根据深部找矿的技术要求,山东省地质探矿机械厂研制了XD系列全液动力头式岩心钻机,其中XDL-3000全液动力头岩心钻机钻进能力达3000m深度。在胶东深部找矿钻探施工中,技术人员创新绳索取心、泡沫钻进、受控定向钻探等技术,解决了深孔钻进钻杆断裂、塌孔、埋钻、烧钻、取心等工程技术难题,提高了深部钻进能力和效率。采用金刚石WL钻探技术、液动冲击WL钻探方法、PHP系列无固相冲洗液、LBM泥浆、立轴钻机、动力头钻机等深孔钻探组合技术,解决了胶东地区硬、脆、碎、漏、酥复杂岩层钻进难题,确保了深孔钻探成功率。其中,在寺庄、焦家、朱郭李家3个勘查区成功施工158个深孔,钻探总进尺 13.9×10^4 m以上,最大孔深2188.28m;在三山岛金矿深部(西岭矿区)施工了深度分别为2755.70m、2738.83m和4006.17m的3个深孔,后者被誉为中国岩金勘查第一深钻。

5 结论

(1)胶东深部找矿在500~2000m深度范围内新发现中型及以上金矿36个(其中,超大型金矿床10个、大型8个),探获金资源储量逾2700t。目前胶东深部和浅部累计探明金资源储量总量逾4500t,其中,深部和浅部金资源储量占比分别为61%和39%;超大型、大型、中型金矿床资源储量所占比例分别为65%、20%、15%;破碎带蚀变岩型和石英脉型金矿资源储量所占比例各为88%和8%。

(2)焦家金矿田和三山岛金矿田中以往探明的浅部金矿床的主要矿体向深部延伸相互连接或叠合,实际上构成了2个巨型矿床,金资源储量均超过1000t,分别称之为千吨级焦家巨型金矿床和千吨级三山岛巨型金矿床。

(3)阶梯式成矿模式是在以往受小构造控制的石英脉型金矿和受区域性大断裂控制的蚀变岩型金矿基础上发展的对金矿空间分布规律的新认识,其要点是:控制金矿的断裂构造由浅部向深部延展,呈现铲式阶梯状特征,金矿主要沿断裂倾角较缓的台阶分布,呈现出断裂缓倾段赋矿、陡倾段无矿规律。

(4)不同学者分别用绿岩带型金矿、岩浆热液

型金矿、造山型金矿等理论认识解释胶东金矿成矿,近年来在深部找矿过程中发展的胶东型金矿热隆-伸展成矿理论是:受白垩纪热隆作用影响,胶东地区产生大量壳幔混合花岗岩和穹窿-伸展构造,岩浆作用诱发流体活动,为金成矿提供了丰富的物质来源,伸展构造为流体运移富集、矿体定位提供了有利空间。胶东型金矿独具特色,不同于造山型等国外金矿成矿理论。

(5)浅部金矿找矿采用地质填图+激电测深和激电联剖+次生晕和原生晕地球化学等常规方法技术;深部金矿找矿采用了多尺度逐步逼近找矿预测方法,深部找矿模型为:成矿构造带三维成矿预测+高分辨率地球物理+构造地球化学探测+阶梯式成矿模式,CSAMT、SIP法和深孔钻探技术在深部找矿中发挥了重要作用。

致谢:感谢山东省第六地质矿产勘查院、第三地质矿产勘查院、山东省物化探勘查院等单位勘查工作参与者对深部找矿和本文的贡献。

参考文献

- [1]李士先,刘长春,安郁宏,等. 胶东金矿地质[M].北京:地质出版社,2007:1-7,102-186.
- [2]宋明春,伊丕厚,徐军祥,等. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学(D辑),2012,42(7):992-1000.
- [3]杨敏之,吕古贤. 胶东绿岩带金矿地质地球化学特征[M].北京:地质出版社,1996:1-228.
- [4]毛景文,张作衡,余立金,等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景:从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D辑),2003,33:289-299.
- [5]宋明春,李三忠,伊丕厚,等. 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),2014,44(1):87-104.
- [6]宋明春,崔书学,伊丕厚,等. 山东省胶西北金矿集中区深部大型-超大型金矿找矿与成矿模式[M].北京:地质出版社,2010:57-214.
- [7]宋明春,徐军祥,王沛成,等. 山东省大地构造格局和地质构造演化[M].北京:地质出版社,2009:1-237.
- [8]Li S Z,Zhao G C,Santosh M,et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. Precambrian Research,2012,200/203: 59-73.
- [9]翟明国,杨进辉,刘文军. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D辑),2001,31(7):545-552.
- [10]孙兆学. 中国金矿资源现状及可持续发展对策[J]. 黄金,2009,30(1):12-13.
- [11]宋明春,孟庆宝,杨承海,等. 胶东寺庄矿区深部特大型金矿的发现及其找矿意义[J]. 中国地质,2007,34(Z):220-224.
- [12]宋明春,崔书学,杨之利,等. 山东焦家金矿带深部找矿的重大突破及其意义[J]. 地质与勘探,2008,44(1): 1-8.
- [13]宋明春,崔书学,周明岭,等. 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,2010,84(9):1349-1358.

- [14] Song M C, Deng J, Yi P H, et al. The kiloton class Jiaojia gold deposit in eastern Shandong Province and its genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(3): 801–824.
- [15] 杨承海, 石玉臣, 刘长春, 等. 山东省焦家金矿带大比例尺成矿预测中地质模型的研究与应用[J]. *山东省国土资源*, 2006, 22(5): 34–37.
- [16] 李宏骥. 胶北地区内生金矿成矿规律[J]. *山东地质*, 2002, 18(3/4): 72–77.
- [17] 毛景文, 李厚民, 王义天, 等. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧硫同位素证据[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 839–857.
- [18] 王义文, 朱峰三, 宫润潭. 构造同位素地球化学——胶东金矿集中区硫同位素再研究[J]. *黄金*, 2002, 23(4): 1–15.
- [19] 黄德业. 胶东金矿成矿系列硫同位素研究[J]. *矿床地质*, 1994, 13(1): 75–87.
- [20] 赵宏光, 孙景贵, 凌洪飞, 等. 胶东金矿成矿流体性质及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(5): 27–33.
- [21] 张海泉. 山东胶东地区焦家式金矿床中含石英英大脉流体包裹体的特征[J]. *地质通报*, 2005, 24(5): 456–461.
- [22] 申萍, 沈远超, 李光明, 等. 胶东金牛山金矿床构造—流体—成矿体系研究[J]. *地质科学*, 2004, 39(2): 272–283.
- [23] Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 739–750.
- [24] 沈昆, 胡受奚, 孙景贵, 等. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 542–550.
- [25] 宋明春, 宋英昕, 沈昆, 等. 胶东焦家深部金矿床地球化学特征及有关问题讨论[J]. *地球化学*, 2013, 42(3): 274–289.
- [26] 牛树银, 孙爱群, 张建珍, 等. 胶西北金矿集中区亚热柱幔枝构造成矿研究[J]. *山东国土资源*, 2012, 28(12): 7–14.
- [27] 孙景贵, 胡受奚, 姚凤良, 等. 初论胶东地区金矿成矿模式[J]. *矿床地质*, 2000, 19(1): 26–36.
- [28] 朱奉三. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究——以招掖地区的金矿床为例[J]. *地质与勘探*, 1980, 7: 1–10.
- [29] 申玉科, 邓军, 徐叶兵. 煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(3): 45–49.
- [30] 罗振宽, 关康, 苗来成. 胶东玲珑金矿田煌斑岩脉与金矿关系的讨论[J]. *黄金地质*, 2001, 7(4): 15–21.
- [31] 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 玲珑金矿中中性岩脉与矿化的关系讨论[J]. *地球科学*, 1984, 9(4): 37–46.
- [32] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. *地质与勘探*, 1992, 28(2): 15–18.
- [33] 孙华山, 孙林, 赵显辉, 等. 招掖地区郭家岭花岗岩控矿的几点证据及找矿指示意义[J]. *黄金*, 2007, 28(4): 3–8.
- [34] 关康, 罗镇宽, 苗来成, 等. 郭家岭型花岗岩地球化学特征与金矿化的关系[J]. *地质找矿论丛*, 1997, 12(4): 1–8.
- [35] 宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 等. 胶东金矿“热隆伸展”成矿理论及其找矿意义[J]. *山东省国土资源*, 2013, 29(7): 1–12.
- [36] 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱U–Pb年龄及其岩石学意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 198–206.
- [37] Wang L G, Qiu Y M, Mc Naughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northeastern Jiaodong peninsula, China, from SHRIMP U–Pb zircon studies of granitoids[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 275–291.
- [38] 宋明春, 宋英昕, 李杰, 等. 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*, 2015, 39(5): 828–843.
- [39] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18: 1–75.
- [40] Zhou T H, Lu G. Tectonics, granitoids and Mesozoic gold deposits in East Shandong, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2000, 16: 71–90.
- [41] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. *地质前缘(中国地质大学·北京)*, 2004, 11(1): 85–98.
- [42] Goldfarb R J, Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5: 139–153.
- [43] Goldfarb R J, Baker T, Dube B, et al. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes[J]. 100th Anniversary Volume of Economic Geology, 2005: 407–450.
- [44] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 7–27.
- [45] Stüwe K. Tectonic constraints on the timing relationships of metamorphism, fluid production and gold-bearing quartz vein emplacement[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 219–228.
- [46] Pitcairn I K, Teagle D A H, Craw D, et al. Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago and Alpine schists, New Zealand[J]. *Economic Geology*, 2006, 101: 1525–1546.
- [47] Yang Q Y, Santosh M, Shen J F, et al. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula[J]. *Gondwana Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013>.
- [48] Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: constraints from fluid inclusion and C–D–O–S–Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 674–686.
- [49] Song M C, Li S Z, Santosh M, et al. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 612–625.
- [50] Li L, Santosh M, Li S R, et al. The ‘Jiaodong type’ gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 589–611.
- [51] 顾留成, 万国普, 段林祥. 胶东破碎带蚀变岩型金矿床的地质—地球物理—地球化学模型及评价指标研究[C]//山东省地质矿产局主编. *山东地质矿产研究文集*. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 178–193.
- [52] Song M C, Wan G P, Cao C G, et al. Geophysical–geological interpretation and deep-seated gold deposit prospecting in Sanshandong–Jiaojia area, Eastern Shandong Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(3): 640–652.
- [53] 李惠, 禹斌, 李德亮, 等. 山东三(山岛)–仓(上)断裂带金矿床深部盲矿预测的构造叠加晕模型[J]. *矿床地质*, 2010, 29(S1): 713–714.
- [54] 李惠, 张国义, 禹斌. 金矿区深部盲矿预测的构造叠加晕模型及找矿效果[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 48–91.
- [55] 周军, 刘建朝, 杨正华, 等. 胶东乳山金矿区原生晕地球化学特征及深部成矿预测[J]. *西安工程学院学报*, 2001, 23(4): 16–27.