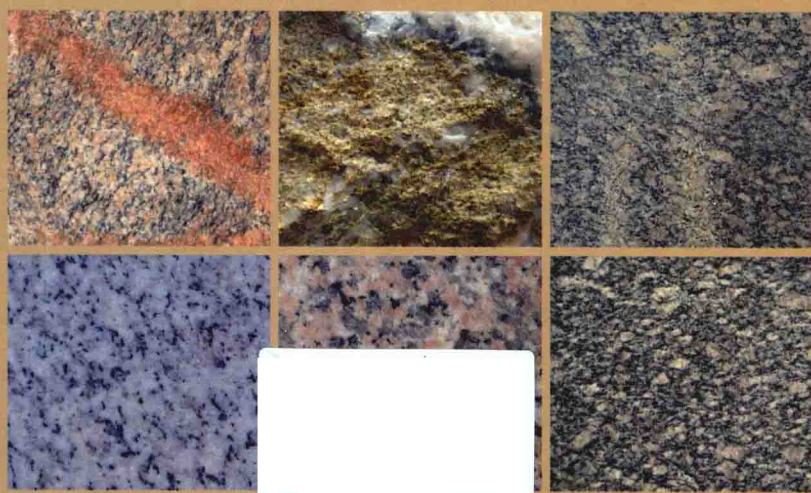


# 胶东玲珑 金矿田地质

吕古贤 武际春 崔书学 等 著



科学出版社

# 胶东玲珑金矿田地质

吕古贤 武际春 崔书学等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

胶东是全球最大的与中生代花岗岩有关的大型金矿床集中区。集 20 多年的实际研究,本书以玲珑金矿田为典型实例,对于区域成矿演化条件、矿田地质构造、矿床地质、蚀变带构造地球化学和构造物理化学成矿信息、深部外围隐伏矿找矿预测方法等方面进行了系统的阐述,系统发展了焦家式金矿——提出“陆内构造岩浆热隆起—拆离带交代蚀变成矿”的新认识,建立岩浆期后热液剪切带黄铁矿石英脉-黄铁绢英质蚀变岩金矿床的成矿模式,分析了胶东金矿源岩演化系列,厘定了多级构造岩相体系成矿控矿的特点,建立了成矿深度构造校正测算并结合构造岩相填图的找矿方法,预测了胶东大型金矿深部发育第二富集带,已经得到探矿工程验证。这一研究不仅促进了胶东金矿找矿重大突破,对其他类似矿产的矿带、矿田、矿区和矿床的深部外围勘探找矿工作亦有重要的参考价值。

本书可供从事金属矿山勘测地质和勘探地质及其相关的区域地质调查、矿床地质科学研究的科研、生产人员和有关院校在校研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

胶东玲珑金矿田地质/吕古贤等著. —北京:科学出版社, 2013. 11  
ISBN 978-7-03-034515-8

I. ①胶… II. ①吕… III. ①金矿床-采矿地质学-山东省  
IV. ①P618.510.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 111701 号

责任编辑:谢洪源 韩 鹏/责任校对:韩 杨  
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 11 月第一次印刷 印张:43 1/2 插页:14

字数:1 031 000

定价:259.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《胶东玲珑金矿田地质》作者名单

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 吕古贤 | 武际春 | 崔书学 | 胡宝群 | 刘维民 |
| 周明岭 | 郭 涛 | 申玉科 | 李世勇 | 杨桂彬 |
| 周国发 | 吕承训 | 王超凡 | 韩云松 | 温桂军 |
| 吴海庆 | 任 宏 | 朱随洲 | 刘其臣 | 李德江 |
| 袁月蕾 | 王宗永 | 张迎春 | 张迅与 | 许亚青 |
| 范 潇 | 霍庆龙 | 杨人毅 | 许谱林 | 罗毅甜 |

# 序 言

胶东是全球最大的与中生代花岗岩有关的金矿集中区，约为全国陆地面积的0.27%，却占全国探明黄金储量的24%。2004年，产黄金158万两，约49.37t，占全国黄金产量的23%。胶东有超过千年的采金历史，尽管已经挖掘出如此大量的黄金，矿山的深部和外围资源潜力仍然巨大。

胶东地区老矿山金储量的不断增长与新矿床的发现，是山东地质勘查专业队伍、矿山勘查和开采队伍的艰苦努力的结果，也是科研、教学与野外勘查单位和矿山密切结合有效协作的结果。山东地质六队提出“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿床类型，改变了长期主要开采石英脉型金矿的局面，近年区内新的矿床类型不断被发现，在古老变质岩层中勘探出剪切带蚀变岩型金矿，有平度大庄子金矿和栖霞台前金矿；有层间滑脱和拆离带构造控制的金矿，例如福山杜家崖金矿；产于莱阳群和变质岩之间的蚀变岩型金矿，乳山市发云乔金矿为代表；还有盆缘剪切带型的蓬家乔式金矿等。然而，胶东金矿90%以上的工业储量仍然赋存在与中生代花岗岩直接有关的“玲珑-焦家式”金矿之中。

本书的研究工作注重紧跟矿产勘查地质的前沿发展问题，他们多年研究低品位矿化蚀变岩的地质特征，重点钻研深部成矿的科学问题，获得以下一些新的认识和成果。

## 1. 发展“焦家式金矿”为“陆内岩浆期后热液剪切带黄铁石英脉-黄铁绢英质蚀变岩金矿床”成矿模式

研究总结了“玲珑-焦家式金矿—岩浆期后剪切带黄铁石英脉-细脉浸染状黄铁绢英质蚀变岩型金矿”和“大庄子式金矿——变质岩区剪切带石英脉-蚀变岩金矿”等主要类型矿床地质特征，进一步把它们都归为“焦家式金矿”。

研究工作以我国复合大陆的地质实际为基础，探讨胶东金矿成矿模式问题。他们认为胶东金矿属于典型的“绿岩带型”或“碰撞造山带型”金矿床，提出胶东属中生代陆内剪切带，相应发育北东向壳幔隆起凹陷的左行斜列组合构造，并引发壳源交代重熔花岗岩作用，且形成岩浆期后热液交代蚀变岩型金矿床的见解。

## 2. 探讨构造岩相体系多级序控矿规律

在前人构造“形变”和“形质”研究思路（李四光，1953）和构造岩相研究工作（涂光炽，1959）基础上，提出构造变形岩相形迹概念，依此，区分并厘定了胶东半岛基底与中生代构造岩相形式基本格架，预测新的找矿区带。研究了构造控制矿床分布和形成的规律，强调区域挤压剪切断裂带发育黄铁绢英质蚀变岩型金矿，其次级序的引张剪切断裂有脉状及网脉状石英脉型金矿，两者的分布规律受“入”字形断裂形式控制。

### 3. 开展胶东金矿构造物理化学成矿预测研究

笔者经过对胶东金矿近三十年来的研究,认为构造作用通过岩石变形、位移、摩擦等途径改变了压力、温度、氧化还原参量以及元素活度、逸度等物理化学条件,用构造物理化学的方式影响成矿地球化学过程——构造控制了矿源岩的形成和演化、矿质的热液淬取、热液的驱动过程及物理化学条件突变而沉淀成矿的全过程。这一研究建立了金属矿床一个构造成矿系列、构造地球化学和构造物理化学成矿的典型实例,深入研究构造成矿机制,取得了成矿理论新进展。

### 4. 获得胶东金矿构造校正的成矿深度,预测深部发育第二富集带

基于“构造附加压力”理论研究,提出先从总压力中消除掉构造附加压力之后,再测算成矿深度的途径和方法。测算胶东主要矿脉的成矿深度,结合其他地物化探资料预测大型金矿深部发育“第二富集带”。胶东金矿存在深部第二富集带的预测已经得到探矿工程验证,这也为中国东部深部找矿勘查提供了一个依据。

### 5. 提出胶东金矿矿源岩演化序列概念,具有成矿预测意义

根据我国复合大陆构造演化和叠加成矿特点,笔者提出矿源岩系(序)列的概念,将胶东前寒武纪变质岩系作为金矿的中间矿源岩,将变质岩原岩新太古代—元古宙的海底基性火山岩及沉积岩系看作该类金矿的初始矿源岩,而主要在中生代形成的壳源交代重熔花岗岩是直接矿源岩。矿源岩演化序列的概念对于不同层次找矿具有参考意义。

### 6. 开展构造蚀变岩相测量和深部外围靶区预测,获得显著找矿效果

在胶东金矿预测研究中,作者不仅将黄铁绢英岩化硅化断裂破碎带,并且把绢英岩化、钾化及至弱钾化花岗岩整体作为找矿预测的目标,从而将预测标志体从几米宽扩大为几百米甚至上千米宽,提高了预测效果。构造岩相填图方法为隐伏热液矿床预测,为寻找断裂切错矿带,为极其困难的采空区深部预测,且为开展低品位金矿勘查提出了新的思路和勘查方法。这一方法应用于焦家金矿、平度金矿、玲珑断裂带和九曲等矿区的深部预测,已经获得良好的找矿效果。

### 7. 预测玲珑金矿田黄金资源总量将超过 1000t

根据胶东金矿研究和矿山开发低品位矿石的多年实践,结合山东地质矿产局和山东黄金集团有限公司等的统计资料,研究预期玲珑金矿田—1500m 以上的黄金资源总量将超过 1000t。

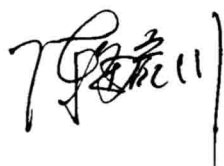
### 8. 提出胶东金矿“构造岩浆热隆起—拆离带交代蚀变成矿模式”

胶东金矿的成因众说纷纭。笔者认为,该区处于亚洲东部大陆—海洋板块交互过渡带具反钟向剪切挤压构造应力场,陆内壳幔结构形成北东向左行斜列的隆起和凹陷,因挤压/伸展构造体制转换,侏罗纪地壳减压熔融,形成了大面积地壳重熔型花岗杂岩,白垩纪幔隆作用进而发育岩浆穹窿—伸展构造,不仅促使成矿热液的形成,而且驱动流体大规模聚集在拆离带交代蚀变形成金矿床。“构造岩浆热隆起—拆离带交代蚀变成矿模式”不仅揭示了胶东金矿大规模成矿的机理,而且丰富了东部陆内成矿理论。

吕古贤科研团队长期从事胶东地区金矿科学研究,并紧密配合地质勘查工作,坚持深入生产第一线,悉心观测与艰苦实践、探索,有所创新,取得了丰硕的研究成果和显

著的找矿效果。其研究成果对提高胶东金矿的地质研究程度和深部找矿的理论、方法都做出了重要贡献；对促进本区今后的找矿工作具有重要的参考意义，对其他类似金矿等热液成矿区带的找矿工作亦具有参考价值。

该书是他们在以玲珑为基地长期辛勤研究的又一结晶，在此成果出版之际，特致以衷心祝贺。希望他们继续发扬团结、务实、探索、创新和服务的科研风格，在今后的工作中更上一层楼。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '陈先' (Chen Xian), with a vertical line extending downwards from the right side.

2012年7月6日

# 目 录

## 序言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 绪论                          | 1   |
| 第一节 胶东金矿开采历史和研究背景           | 1   |
| 第二节 地质矿产开发与地质找矿研究           | 4   |
| 第三节 地质找矿研究的进展               | 6   |
| 第四节 资料来源与致谢                 | 10  |
| 第一章 玲珑金矿田地质和矿山开发概况          | 13  |
| 第一节 研究开发历史                  | 14  |
| 第二节 玲珑金矿田概况                 | 17  |
| 第三节 玲珑金矿田成矿地质背景和剪切带蚀变岩型矿床   | 24  |
| 第四节 玲珑金矿田资源特点和开发前景          | 33  |
| 第二章 胶东金矿区域地质及其成矿演化特征        | 44  |
| 第一节 胶东金矿集中区区域地质背景           | 46  |
| 第二节 胶东地区地层                  | 65  |
| 第三节 胶东地区变质岩及其富金地质特征         | 68  |
| 第四节 焦家式金矿矿源岩系演化和成矿作用        | 82  |
| 第五节 胶东金矿集中区构造演化和控矿特征        | 88  |
| 第六节 胶东地区构造岩相分布和金矿成矿         | 101 |
| 第七节 焦家式金矿成矿模式               | 106 |
| 第八节 胶东金矿成矿规律和找矿方向           | 110 |
| 第三章 胶东壳源交代熔融花岗岩岩石地球化学特征及其成矿 | 114 |
| 第一节 前人研究概况                  | 114 |
| 第二节 胶东花岗岩系列及其壳源交代熔融类型       | 116 |
| 第三节 花岗岩的形成时代和顺序             | 122 |
| 第四节 花岗岩的侵位构造岩相特征            | 125 |
| 第五节 胶东中生代花岗岩的岩石学            | 128 |
| 第六节 花岗岩构造岩相的矿物学             | 136 |
| 第七节 花岗岩构造岩相的岩石地球化学          | 140 |
| 第八节 花岗岩岩浆期后热液流体蚀变成矿         | 162 |
| 第四章 玲珑金矿田地质特征               | 164 |
| 第一节 玲珑矿田构造背景及招平断裂带的地质特征     | 164 |
| 第二节 玲珑金矿田成矿构造与地质特征          | 195 |

|          |                                        |     |
|----------|----------------------------------------|-----|
| 第三节      | 玲珑矿田断裂构造蚀变岩带成矿特征·····                  | 226 |
| 第四节      | 玲珑金矿田构造成矿系列及构造物理化学成矿·····              | 250 |
| 第五章      | 玲珑金矿田的矿床地质特征·····                      | 257 |
| 第一节      | 玲珑矿田金矿床的分布特征·····                      | 258 |
| 第二节      | 胶东焦家式金矿矿床地质特征·····                     | 260 |
| 第三节      | 玲珑式亚类——硫化物石英脉金矿矿床地质特征·····             | 265 |
| 第四节      | 灵山式(河西式)亚类——细脉网脉石英-绢英质蚀变岩金矿矿床地质特征····· | 287 |
| 第五节      | 焦家式亚类——细脉浸染状绢英质蚀变岩金矿矿床地质特征·····        | 315 |
| 第六节      | 胶东焦家式金矿的构造成矿系列特征·····                  | 332 |
| 第七节      | 矿床蚀变带构造地球化学·····                       | 341 |
| 第八节      | 矿床同位素地球化学·····                         | 375 |
| 第九节      | 成矿时代、成矿期次和成矿阶段·····                    | 394 |
| 第十节      | 成矿深度构造校正测算方法·····                      | 407 |
| 第十一节     | 玲珑金矿田深部第二富集带预测·····                    | 413 |
| 第十二节     | 胶西北金矿深部第二富集带的赋存规律·····                 | 415 |
| 第六章      | 玲珑矿田构造岩相地质测量和深部找矿·····                 | 419 |
| 第一节      | 构造岩相形迹地质填图和成矿研究方法·····                 | 419 |
| 第二节      | 玲珑金矿田构造蚀变成矿图·····                      | 427 |
| 第三节      | 玲珑金矿田蚀变岩及其成矿意义·····                    | 436 |
| 第四节      | 玲珑矿田蚀变分带的岩石、矿物和地球化学特征·····             | 443 |
| 第五节      | 玲珑矿田构造蚀变岩测量和预测·····                    | 448 |
| 第七章      | 胶东金矿流体构造物理化学成矿理论与实验·····               | 494 |
| 第一节      | 构造物理化学成矿理论研究·····                      | 495 |
| 第二节      | 胶东金矿断裂蚀变岩带构造地球化学特征·····                | 522 |
| 第三节      | 胶东金矿构造流体地球化学特征·····                    | 525 |
| 第四节      | 胶东金矿区域构造-流体成矿研究·····                   | 540 |
| 第五节      | 断裂带的流体临界成矿理论和实验·····                   | 564 |
| 第六节      | 胶东焦家式金矿热液交代蚀变成矿实验·····                 | 584 |
| 第七节      | 玲珑矿田构造物理化学场实测与成矿分析·····                | 609 |
| 第八章      | 胶东焦家式金矿在全球的重要地位·····                   | 633 |
| 主要参考文献   | ·····                                  | 648 |
| Abstract | ·····                                  | 678 |
| 图版       |                                        |     |

# 绪 论

## 第一节 胶东金矿开采历史和研究背景

胶东地区是我国开采最早、最著名并且最重要的黄金产区。胶东是指胶东半岛胶县以东地区，是中国最主要的黄金资源和生产基地（图 1-1）。胶东采金历史悠久，黄金开采从唐朝早就开始，连续了一千多年，黄金的开采总量已经超过 1000t 以上。早在公元 907~960 年间（五代十国），招远地区就有“金城天府”之誉称，至公元 1007 年（宋景德四年）业“岁益数千两”黄金。而胶东登州、莱州产金，自宋太宗（公元 976~997 年）时已有记载，殆至元丰元年（公元 1078 年）收金总计 10710 两（见宋会要稿），可见当时开采的盛况。民间“矿师”积年累月沿榫采金，时兴时衰；直到 20 世纪抗日战争与国内战争期间，牟平地区还采金以增财力，取黄铁矿以制弹药（冯景兰，1936；郭文魁等，1951；郭文魁和段承敬，1951；郭文魁，1950；李士先等，2007）。

最早来玲珑进行地质工作的是 1881 年李宗岱聘请的美国矿师瓦遵等，他们曾两次踏勘考查玲珑山红石崖金矿线（即今 51 号脉），并取矿样送国外化验。冯景兰、王植等（1936）较早对本区金矿做过地质工作。1921 年开始，日本多次派员对玲珑进行地质调查。1936 年，对将军杨等脉（即今 61 号脉）施行电法探矿。1939~1945 年 8 月，日军侵占玲珑时期，进行了详确的地质调查，并对多个矿脉进行坑探和开采。

胶东是中国最大金矿生产地，也是中国最大的金矿集中发育区，它以仅占全国陆地 0.27% 的面积，却在相当长期内其黄金产量和储量均占全国的 1/4 以上（李士先等，2007；杨敏之和吕古贤，1996）。2004 年年底，胶东已探明的黄金储量 557t，约占全国查明储量的 24%（李士先和王建收，2006；李宏骥，1989，2002，1996；宋明春等，2008），年产黄金 158 万两，约 49.37t，占全国黄金产量的 23%。尽管已经挖掘出如此大量的黄金，矿山的深部和外围资源潜力仍然巨大。在金矿床学和金矿勘探居于重要意义的是，山东第六地质队建立的“山东焦家式破碎带热液蚀变岩型金矿”新类型（山东省地质局第六地质队，1977）。近年来，胶东新的矿床类型不断被发现，在老地层中勘探了剪切带蚀变岩型金矿，平度大庄子金矿和栖霞台前金矿（吕古贤等，1997）；有层间滑脱和拆离带构造控制的金矿，例如福山杜家崖金矿；产于莱阳群和变质岩之间的蚀变砾岩型金矿，乳山市发云乔金矿为代表；还有盆缘剪切带型的蓬家乔式金矿等（涂光炽等，2002；山东招金集团公司，2002；沈远超等，1998，2001，2002）。然而，胶东金矿 90% 的工业储量仍然赋存在与中生代花岗岩直接有关的“玲珑-焦家式”金矿之中（张韞璞等，1988，1989；吕古贤，1989，1991b；李士先和王建收，2006）。要特别指出的是，近年区内“焦家式”金矿深部探矿不断获得新的发现，大型金矿深部存在金矿

第二富集带已经被钻探工程所证实(吕古贤, 1997; 李德亨等, 2002), 目前, 全区内已经多处在 1000m 以下发现工业矿体, 三山岛矿区钻孔在地下 2060m 仍然见矿, 区内黄金矿业有很好的发展前景。区内的黄金储量持续增长, 产量稳步上升, 胶东在相当长的一个时期内能够继续作为国家的黄金龙头产区(李士先等, 2007)。

胶东地区老矿山金储量的不断增长与新矿床的发现, 是山东地质勘查专业队伍、矿山勘查和开采队伍的艰苦卓绝努力之结果, 也是科研、教学和野外勘查单位与矿山密切有效协作的功勋。1949 年 8 月, 首先来玲珑考察的是上海科技界山东三矿考察团, 并编有考察报告。1949 年 11 月, 华东工业部矿产勘测处组织胶东矿产调查队, 对玲珑进行地质调查, 由郭文魁等编著“山东玲珑金铜矿的地质调查报告”, 并编绘了第一张玲珑金矿田近 20km<sup>2</sup> 的 1:1 万地形地质图。郭文魁与段承敏对招远玲珑脉状金矿进行的调查(郭文魁等, 1951), 他们的《山东招远县玲珑金铜矿》等论著对于后来沿袭而成的“玲珑式”金矿床类型具有开创性意义(郭文魁和段承敏, 1951)。除根据矿物共生组合论证深部仍有金矿外, 郭文魁并从胶东群杂岩中分出后来侵入的玲珑花岗岩, 以示与双顶片麻岩之区别。在 20 世纪 50 和 60 年代, 山东地质局、长春地质学院和冶金地质单位的许多地质工作者在胶东做了基础地质、金矿矿床地质工作。山东省地质局八〇七地质队, 即后来改编的山东省地质六队从 1958 年开始, 即对玲珑金矿田开展了系统的找矿勘探工作。1965~1972 年, 该队提交玲珑矿田九曲矿段、玲珑-大开头矿段、108 号脉矿段等三份地质勘探报告, 以及欧家乔、东风、破头青及双顶四矿段的地质详查报告, 共提交黄金储量 70 余吨(山东省地质局第六地质队, 1977)。近 30 多年, 众多的国内外科研、院校专业人员前来开展地质工作, 对于区内的地层、岩石、构造、矿床、地球化学、流体化学和矿山地质等方面进行了广泛深入的研究, 近代测试和测年分析方法获得了大量数据, 这更推进了胶东金矿地质科学研究。胶东岩金成矿理论的突出发展是科学研究密切结合生产, 从不同领域或不同侧面进行深入钻研的产物。与胶东金矿有关的沉积、变质、岩浆作用、热液蚀变、地球化学、成因矿物、构造地质、矿田构造、同位素年代、粒间溶液理论和地幔流体成矿等多方面的著作, 如雨后春笋, 相继出版。

该区金矿总体分布于绿岩带金矿范围(任纪舜和肖藜薇, 2001; 任纪舜等, 1993, 1997; 母瑞身, 1981, 1987; 韦永福和孙培基, 1995), 但笔者将其作为绿岩带中生代活化花岗岩岩浆期后热液蚀变岩矿床类型(杨敏之和吕古贤, 1996)。胶东金矿床与世界典型绿岩带型矿床对比可知, 矿床最初的物质来源于太古宙—元古宙镁铁或超镁铁岩石为主, 并夹中酸性火山岩类及沉积岩类地层, 这一点是相近的; 而其他主要工业矿体的形成作用及其成岩成矿演化特征, 胶东金矿与世界范围绿岩带金矿床类型有着本质上的区别(王秀璋和程景平, 1986, 1989; 王鹤年等, 1988)。国外太古宇变质岩中金矿床产在地盾上, 形成时代为太古宙, 成矿构造环境特点是长期稳定, 缺乏前寒武纪之后的沉积和构造岩浆活动, 构造变动微弱(涂光炽, 1988, 1989, 1992, 1994; 涂光炽等, 2000; Zhou and Lu, 2000)。世界累计金产量将近 60% 是从年龄超过 2.5Ga 的岩石中开采的。太古宙的金矿床占世界累计金产量的 18%。南非维特瓦特兰德古砂矿占其中 40%, 但它们也可能是由绿岩型金矿床剥

蚀后形成的 (Roberts, 1988)。而我国产于太古宙绿岩中的金矿床成矿时间却主要是燕山、海西及部分加里东期。胶东金矿主要工业矿化的峰期年龄  $100\sim 115\text{Ma}$ , 形成于中生代, 花岗岩年龄集中于  $130\sim 155\text{Ma}$ , 这已逐渐成为地质界的共识 (曹国权等, 1996; 李士先等, 2007; 李宏骥, 1996; 姚凤良等, 1983, 1990; 杨敏之和吕古贤, 1996; 吕古贤, 1989; 邓军等, 2004, 2006)。

地质院校、科研单位及国内外许多著名专家学者来本区进行了多年金矿地质研究, 他们的著述见地深邃、影响广泛。山东省第六地质队冲破石英脉金矿的已有矿化类型与找矿理论, 相继发现三山岛、焦家等一系列破碎带蚀变岩型金矿床, “山东焦家式破碎带蚀变岩型金矿床” 成为一个新的重要的矿床类型 (张韞璞, 1989; 李宏骥, 1989)。对于胶东金矿矿床, 多数学者倾向认为, 玲珑式和焦家式金矿属同一矿床成因类型 (李士先和刘连生, 1981; 母瑞身, 1981; 张韞璞等, 1988, 1989; 王孔海等, 1984; 裴有守等, 1988; 姚凤良等, 1990), 但是对于石英脉和蚀变岩两种矿床的构造关系有不同见解, 有人认为是上下“五层楼”分带关系 (范永香等, 2002; 姚凤良等, 1990)。吕古贤 (1987, 1989, 1991b) 等根据胶东尚未发现典型的单矿脉垂直分带的勘探事实, 明确指出两者是构造条件差别产生的不同矿化形式, 在区域压性剪切带发育蚀变岩金矿, 而次级张剪裂隙交代充填石英脉金矿, 两种矿化的水平分带更为明显, 建立了“玲珑-焦家式金矿”<sup>①</sup> 的概念。胶东“玲珑-焦家式”金矿产在中国东部活化地台或称地洼活动地区 (陈国达, 1960), 长期的发育过程中受过多期次的构造活化作用, 伴随中生代大规模构造岩浆作用而成矿, 是“焦家式”金矿的一种主要矿床组合类型。这种分布在前寒武纪变质岩区内, 却赋存在中生代花岗岩中的大型热液金矿床, 无论在国内还是国外文献中均属少见 (裴荣富和吴良士, 1990, 1993, 1994; 翟裕生等, 2002; 翟明国等, 1992, 2000, 2001)。胶东金矿明显特征是成矿作用受控于脆-韧性构造剪切带, 含矿热液流体主要来源于花岗岩, 部分成矿流体和金可能直接来自于地幔深部 (孙丰月等, 1995), 岩浆期后热液在运移和上升过程中受到构造岩性界面的阻挡, 交代蚀变充填于剪切带裂隙中, 由于控矿断裂应力不同, 形成了蚀变岩和石英脉不同矿化特点的金矿脉。胶东金矿构造岩浆和矿化事件集中发育在印支-燕山时期, 燕山运动早期成岩, 燕山运动晚期成矿 (吕古贤, 1991a, b; 杨敏之和吕古贤, 1996)。与金矿床具有密切空间和物源关系的交代-重熔花岗岩类主要形成于燕山运动早期, 其同位素年龄介于  $126\sim 160\text{Ma}$  ( $J_2^2-J_3^2$ ), 集中成岩期在  $155\sim 130\text{Ma}$  左右, 蚀变矿化岩石成矿年龄集中在  $90\sim 125\text{Ma}$  ( $K_1^2-K_2^2$ ), 集中成矿年龄在  $100\sim 115\text{Ma}$  左右。玲珑-焦家式金矿床赋存有胶东 90% 以上的黄金储量。可以发现, 胶东是世界上与花岗岩相关的最大的金矿省, 发育在新太古代-元古宙绿岩却与中生代花岗岩有关的大型热液脉状金矿床 (姚凤良等, 1990), 焦家式金矿在世界矿床学领域有重要的学术地位 (涂光炽等, 2000; 吕古贤, 1991; 吕古贤和孔庆存, 1993; Zhou and Lu, 2000)。

① 吕古贤, 孔庆存, 1987. 胶东玲珑-焦家式金矿田构造地质特征. 地质科技情报.

## 第二节 地质矿产开发与地质找矿研究

全球现代金属矿床学、成矿学、矿山地质和矿业的发展,具有以下明显的方向和趋势。

### 1. 矿床学与构造地质学的密切结合是成矿学的重要发展方向

矿床地质研究(涂光炽, 1988, 1992, 1994; 涂光炽等, 2000; 翟裕生等, 1981, 1999a, b)证明, 构造与成矿密切相关。凡重大的矿床发现, 无不与地质构造演化的新发现、新认识和新理论密切相关(戴自希, 2001, 2004, 2005)。东亚地区地盾地台等古老地体在中新生代发生构造岩浆活化成为该区大陆构造的基本特征(陈国达, 1956, 1960)。在板块构造及其成矿理论在大陆地区深入发展的时代(任纪舜, 1994), 矿床学与构造地质学、构造体系(李四光, 1973a)和成矿系列(陈毓川等, 1983, 1993)的紧密结合已经成为成矿理论和预测方法的发展趋势。

### 2. 低品位难选冶矿石加工利用是全球矿业开发利用的趋势

经济快速发展提高了对于矿产品的需求, 地表高品位矿石的缺乏与矿产品的价格变动推动低品位矿石的调查和开发利用。根据经济发展和采选冶全面科学技术进步的条件, 金矿低品位难选冶矿石的勘探、开采和加工利用已经成为矿业发展的重要议题。胶东金矿对于低品位矿石的开采、选矿和冶炼均处于国内外领先水平。考虑低品位矿的规模, 胶东将会成为世界规律的大型矿床。(曹新元等, 2007; 吕古贤等, 2004; 王京彬, 2004)。

### 3. 矿田范围的接替资源成为最经济的勘查目标

20 世纪 70 年代以来发现的 100 个贵重有色金属大型或超大型矿床(戴自希, 2001, 2004, 2005; 施俊法等, 2008), 至少有 58% 是在已知矿床周围发现的。北美 39 个巨型斑岩铜矿床中的 90% 是在已知矿区附近发现的。智利的楚基卡马塔铜矿, 在其矿区的南、北两侧均发现了巨型铜矿床, 使铜储量达到 5838 万 t, 成为世界最大的铜矿床。印度尼西亚在埃茨贝格铜矿山以北 3km 处发现了格拉斯贝格巨型铜金矿, 增加铜 953 万 t、金 1217t、银 2062t。可以发现, 从规模上看, 矿田范围(几十平方公里到上百平方公里)的接替资源成为最经济最有效的勘查目标。此外, 从深度上看, 国外许多大型矿山勘探开采深度已超过 1000m, 南非的维特瓦特兰德金矿开采深度已达 4000m, 巴伯顿金矿也达 3800m, 澳大利亚的芒特艾萨铜多金属矿开采深度达 2600m, 在 3000m 深度又发现了储量大于 300 万 t 的富铜矿床。而我国绝大多数矿山的开采深度一般不足 500m, 胶东金矿平均勘查深度超过 500m, 但是开采深度没有超过 1000m, 勘探深度也很少达到 1500m(王京彬等, 2006; 施俊法等, 2008)。胶东金矿田和矿山深部外围的隐伏矿床成为首选的最佳勘查目标。就矿田和矿山深部的隐伏矿床研究、找矿勘查效果和开采深度等方面, 胶东金矿都能够成为国内外金矿勘探找矿的成功范例(山东招金集团公司, 2002; 李士先等, 2007)。

对于我国独具特色的、有重大经济意义和学术影响的成矿区和矿产地,应该给予一定的重视,抓住不断涌现的新现象、新资料开展系统的资料总结、实地调查和理论研究,这不仅可以推进国内地质找矿工作,而且有益于开发利用境外矿产资源的战略。目前,胶东地区尚缺乏对于大型金矿田进行系统地质研究的著作,缺乏系统介绍其矿床地质、矿山地质、成矿规律和研究工作的成果,缺乏全面展示独特的胶东金矿的成矿模式和控矿规律研究。陈毓川在2010年山东省地质矿产局金矿勘查项目评审会上尖锐地指出,仅焦家矿带就达到957t的黄金储量是有重大影响的勘探成果,但是为什么胶东能形成如此大规模的矿床,需要重点回答一些科学问题,急需深入总结。这样的工作不仅对于胶东,而且对于东亚其他地区的金属矿床地质研究,对于取得深部外围找矿重大突破也有借鉴意义。

笔者等在胶东金矿持续开展近三十年的地质调查和找矿实践。本书以玲珑金矿田为典型实例,全面介绍世界上中生代花岗岩中最大的金矿省——胶东金矿区,介绍发育在新太古代一元古宙绿岩中但是成矿与中生代花岗岩密切相关的焦家式金矿床,展示“焦家式金矿”有别于世界范围主要金矿类型的地质特征。中国及其所在东亚大陆是由一些准地台、众多微陆块和造山带组合而成的复合大陆(任纪舜等,1999)。我国复合大陆基本特点是历经复杂与长期的构造演化环境,有经济价值的工业矿体大部分都是经过多期次地质作用的复合、叠加与改造而形成,与国际上主要的金矿成矿过程和形成时代具有明显的差别。国内外的研究者曾指出,金对于地质作用形式、岩石类型似乎没有明显的专属性,而对构造及其演化的专属性却是非常明显的。根据复合大陆成矿系统和金矿成矿的特点,笔者对构造影响成矿作用和成矿规律问题提出一些新的认识和思考。

1) 成矿作用的基本条件是化学成分、压力和温度等参数,但是目前研究还没有把构造压力放在应有的重要地位(Baker, 1979; Anderson, 1989; Ashley et al., 1986)。通过矿山地质观测、成矿理论分析和实验研究,认识到构造力在地下产生一定的围压。构造作用下变形岩石的偏应力场中具有各向等正应力部分(刘瑞珣, 1988, 2007a, b),笔者称之为“构造附加静水压力”或“构造附加压力”,进一步指出其不仅是引起岩石体变的物理量,而且也是引起岩石化学变化的物理化学参变量(吕古贤, 1982, 1987, 1989)。因而,构造附加压力是热液金矿重要的成矿要素。

研究特别强调,地壳中一点的压力主要是由重力和构造力两个应力场叠加而成,并不像通常认为的仅由重力产生;即使在同一地壳层次因为处于不同性质构造变形带其应力状态也是不同的,其中岩石所承受的构造静水压力值不一样,这个量值的变化是有规律的;胶东脉状金矿的矿化特点和形式主要受控于构造强弱,因而成矿压力大小并不完全由形成深度所决定的(吕古贤, 1989)。

2) 多数构造地球化学研究者强调构造强弱影响化学元素的分异,但是大量的地球化学反应需要流体环境,而构造变形的差应力能否影响液体的化学过程尚未得到证实(涂光炽, 1956)。吕古贤等(1982, 1986, 1987)指出,构造力作用于岩石可以产生两部分结果,其一引起差应力和岩石形变,其二引起各向等量的静压力和岩石体变;构造力引起静压力及其他物理化学条件的改变是影响化学元素行径、化学平衡的重要途径和方式;提出构造物理化学,即是以岩石构造应力场分析为基础,开展构造力改变局部压

力、温度和氧化还原等物理化学参量的测算,研究岩石物理变化和化学变化之间物理化学相互关系的新领域(吕古贤,1991a)。

3) 构造结合成分,改造结合建造一直缺乏适用的野外地质研究方法。在构造成矿(陈国达,1978)、构造地球化学(吴学益,1998;吴学益等,1988,2006;孙岩等,1982,1998;吕古贤等,2011a)和构造动力成矿(杨开庆,1979,1982,1984,1986;杨开庆,1986)研究的基础之上,以构造体系(李四光,1965,1966)结合成矿系列(程裕淇等,1979;程裕淇和陈毓川,1983;陈毓川等,1993,2001)作为理论指导,开展构造变形岩相形迹测量,深入于矿田地质学研究,对于实现地质找矿突破具有重要意义(吕古贤等,1998,1999;吕古贤,2011)。

4) 胶东地表矿带和深部矿带之间有无矿带或弱矿化带发育,深部成矿规律与浅部成矿规律可能不同,必须认真和具体研究深部构造与矿化特征。随着地表和高品位资源的逐步枯竭,胶东在地质勘查、开发和开采构造带蚀变岩的低品位金矿矿石方面取得了丰富经验。这两方面可能引导今后国际金属矿业的一个重要发展。

### 第三节 地质找矿研究的进展

胶东是中国最大的金矿产地,也是中国最大的金矿床集中发育地区。区内金矿种类繁多,新的矿床类型不断被发现。金矿的多种命名反映了客观特点,但是也带来一些困惑。为此,笔者发现,有的命名强调矿产地地区,主要具有区域地理意义,例如,胶东金矿(李士先等,2007;宋明春等,2008),招-掖金矿(裘有守等,1988);另一类矿床命名,强调的是矿床地质成因特征,诸如“焦家式破碎带蚀变岩型金矿床”(山东地质六队,1977;张韞璞,1989;李宏骥,1989)、“盘马式”金矿、胶东脉状金矿(姚凤良等,1990)、胶东活化绿岩带金矿(杨敏之和吕古贤,1996)、“玲珑-焦家式”金矿(吕古贤,1989,1991a,1991b;李士先和王建收,2006)、平度大庄子式金矿(吕古贤,1997)、杜家崖拆离带型金矿、发云弁蚀变砾岩型金矿和蓬家弁式剪切带金矿等(涂光炽,刘秉光等2002;沈远超等,1998,2001,2002)。

研究认为,胶东地区金矿总体命名为“焦家式”金矿床比较合适。其他矿床可以作为“焦家式”金矿床的地区亚类或类型,以围岩性质进行次级分类或命名,例如,中生代花岗岩有关的“玲珑-焦家式”金矿、老地层大庄子剪切带蚀变岩型金矿、发云弁式蚀变砾岩金矿和盆缘变质岩剪切带式金矿等等。

以构造体系(李四光,1973a)与成矿系列(程裕淇等,1979;陈毓川等,1989,2001)相结合的理论为指导,经过几十年实地研究和系统测试分析,本书展示以下主要研究进展和找矿成果。

#### 1. “焦家式金矿”属于陆内剪切带中生代岩浆期后热液黄铁绢英质蚀变岩金矿床

胶东地区金矿可以统称为“焦家式金矿床”,其主要工业类型是“玲珑-焦家式”——花岗岩岩浆期后剪切带石英脉-细脉浸染状黄铁绢英质蚀变岩金矿,其他还有产于变质岩区、产于莱阳群底砾岩或盆缘剪切带等多种类型矿床。它们的成矿时代相

近,多为鲁东地盾绿岩带中生代构造活化岩浆期后相关热液交代蚀变的产物,处于同样的地质构造环境,可以统称为“焦家式金矿”。

笔者认为,胶东中生代逆时针向压性剪切体制是胶东金矿的区域构造背景(吕古贤等,1998a;翟裕生和吕古贤,2002)。这显然与碰撞造山带型金矿(陈衍景等,2004)的认识不同,也不认同胶东金矿与苏鲁超高压碰撞带直接相关,或由海陆地壳间的俯冲作用成矿的观点。

胶东金矿是中国大陆拼合之后的产物,属于陆内剪切造山型金矿床。华夏系统改造基底纬向构造,且发生逆时针压扭体制向顺时针伸展体制的转换,这一构造过程形成了北东向左行斜列的富集岩石圈地幔隆起-凹陷构造,原地-侵位壳源重融至深融花岗岩控制了胶东热液交代蚀变与金矿成矿作用(杨敏之和吕古贤,1996;万天丰,1992,1993;吕古贤等,2011b;卢焕章,2011)。

## 2. 胶东金矿矿源岩演化序列的概念和划分

胶东金矿的矿质来源历来有“胶东群”和“花岗岩”之争(张秋生,1978;张秋生和刘连登,1982;杨士望,1986,1993;杨士望等,1993),有的工作还强调“地幔来源”(孙丰月等,1995;孙贵忠和胡受奚,2000a,b;孙贵忠等,2001)。根据我国复合大陆复杂长期的演化环境和成矿特点,本研究提出胶东金矿矿源岩系(序)列的概念:矿源岩系是成矿物质随着其载体岩石形成、相变和形变而断续分散、运移、富集和重新分配,直至形成矿床这一演变过程和体现这一过程的岩石组合(吕古贤,1998,2002)。据其形成时间和空间上与成矿作用的亲疏远程度,将它们划为初始矿源岩、中间矿源岩和直接矿源岩系列。笔者将胶东前寒武纪变质岩系作为金矿的中间矿源岩,把变质岩的原岩新太古代-元古宙的海底基性火山-沉积岩系看作金矿的初始矿源岩,而主要在中生代形成的交代重熔花岗岩是直接矿源岩(李士先等,2007;宋明春等,2008)。对于“焦家式”金矿床,其直接矿源岩系——中生代花岗岩进行构造岩相属性的划分:玲珑型似片麻状黑云母花岗岩属压扭、剪切构造岩浆岩相,栾家河型等粒二长花岗岩为引张、扭张构造岩浆岩相和郭家岭型斑状花岗闪长岩为挤压、扭压构造岩浆岩相(吕古贤等,1999;李士先等,2007)。根据对形成热液的贡献程度,又将它们依次划分为“预积黑云母花岗岩”、“热积二长花岗岩”和“浓积花岗闪长岩”(吕古贤和孔庆存,1993;李士先等,2007)。

## 3. 压扭构造岩带和雁列形式的三维分类

观测与分析矿区发育的构造岩,提出珠状砾石超碎糜-碎糜岩带、杆状砾石碎糜-糜棱岩带和片状细脉状砾石糜棱岩带三个主要压扭性构造岩带的空间分类意见;建立张扭性斜列(雁列)构造矿脉组合的四种空间形式。依此,系统指出胶东区域压剪断裂控制矿带延伸,断裂带的倾向控制矿床的侧伏方向,而断裂构造多期复合运动控制了矿脉和富矿体的斜列及雁列形式等新认识。这些深化了胶东金矿脉状组合规律的研究,有效推动了地质找矿勘查(吕古贤,1989,1991b)。

#### 4. 新华夏构造岩相体系多级序断裂控岩控矿和成岩成矿规律

构造结合建造的野外地质工作缺乏地质研究和找矿方法。根据构造结合矿床、改造结合建造的方向,在前人构造“形变”和“形质”“构造-岩相”的研究思路基础上(李四光,1953;涂光炽,1959),提出构造变形岩相形迹,即反映成岩成矿地质特征的构造岩石单元的概念,进一步认为应该研究构造变形岩相形式——有一定形态及展布且具成生联系的构造变形岩相带和构造变形岩相地域组合(涂光炽,1959;吕古贤,1991c;吕古贤等,2011b)。

运用构造变形岩相的思路方法编制了1:50万地质构造图,厘定了胶东半岛中生代的新华夏构造岩相形式,提出中生代前胶东基底为EW向延展的反“S”状弧形断褶变质岩相形式,而中生代发育“N”字形构造变形岩相形式(吕古贤,1991b)。根据两者的复合特征,可以合理地解释金矿的区域分布规律,并预测新的找矿区段。

“焦家式金矿”脉状矿床(郭文魁,1963;宋叔和,1995),发育在岩相接触面及其构造剪切带,由于赋矿及成矿构造不同表现为黄铁石英脉(玲珑式)和黄铁绢英质蚀变岩(焦家式)两种典型亚类,区域挤压剪切断裂蚀变岩带中发育“焦家式”黄铁绢英质蚀变岩型金矿,其次级序的引张剪切断裂裂隙充填交代有脉状及网脉状“玲珑式”石英脉型金矿,两者的分布规律呈“入”字形断裂形式控制(吕古贤和孔庆存,1993)。

#### 5. 构造应力场转化与界面成矿特征

胶东金矿与国外碰撞造山带型金矿不同,是东亚大陆与西太平洋结合区带剪压造山带型金矿。胶东中生代发生北东构造成逆时针压扭体制向顺时针伸展的应力场转换。这一构造作用下发育了富集岩石圈地幔的波状隆起,产生大规模原地-侵位壳源重融铝钙碱性花岗岩系列,岩浆期后热液作用形成了胶东金矿(周世泰,1989)。

根据胶东金矿成矿带的分布规律,矿带呈挤压剪状,而矿脉矿石在引张空间就位的现象,发现成矿前、成矿中和成矿后的构造主压应力方向发生过近于垂直的转化,提出构造应力场转化成矿的观点,研究了构造岩相界面和构造物理化学界面成矿的特征(范永香和周群辉,1987;卢作祥等,1988,1989;方金云等,1996;吕古贤等,1998;翟裕生和吕古贤,2002)。

#### 6. 胶东金矿是构造物理化学成矿的典型实例

提出“构造作用力通过改变压力、温度等物理化学参量的途径控制地球化学过程”的思路,开拓构造物理化学这一新的学科研究领域(吕古贤,1982,1991a;吕古贤和孔庆存,1993;吕古贤等,1999)。系统测试和研究了构造作用通过岩石体积变化、位移、摩擦等途径改变压力、温度、氧化还原及元素活度、逸度等物理化学条件,用这样的方式影响地球化学成矿过程——构造控制了矿源岩的演化、矿质的热液淬取、热液的驱动过程及物理化学条件突变而沉淀成矿的全过程,初步建立了构造物理化学成矿理论(郭文魁,1997;吕古贤等,1999;吕古贤,2003)。

构造作用不仅影响成岩成矿地质和化学背景,而且控制其形成发展的物理化学条件,因而产出构造沉积岩相、构造岩浆岩相、构造变质岩相和构造热液交代岩相等建造