

Mesozoic Tectonic-Magmatic Events and Gold Mineralization in Eastern Shandong Province*

Hongkui Li^{1#}, Yifan Li², Ke Geng¹, Chuanyuan Zhuo¹, Taitao Liang¹, Zhili Yang³

¹Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Jinan

²College of Architecture and Civil Engineering, Weifang University, Weifang

³No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Zhaoyuan
Email: #lhk126@126.com

Received: Mar. 1st, 2013; revised: Mar. 17th, 2013; accepted: Apr. 5th, 2013

Copyright © 2013 Hongkui Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Eastern Shandong Province is situated at the intersection of three tectonic domains as Tetisi, Paleo-Asian Ocean and Pacific Ocean. Interaction process of these three global tectonic domains control and affect the metallogenic environment of eastern Shandong Province. This area has experienced Indosinian orogenic event and Yanshanian orogenic event during Mesozoic period. Yanshanian orogenic event represents three tectonic episodes. Each episode represents cyclicity of extrusion and extension. This cyclicity is the geological background of mineralization in Ludong gold deposit and other polymetallic deposits. Mineralization geological environment of three world-class gold fields with the reserve over one thousand tons, such as Sanshaodao gold field, Jiaojia gold field and Linglong gold field have the characteristics of uniqueness and induplication. Mesozoic tectonic evolution controls tectonic-magmatic event, sedimentary environment and gold mineralization. There is a strong coupling relationship between magma-sedimentary-tectonism-mineralization event and regional tectonic evolution. The formation and location of gold deposits and polymetallic deposits also have close connections with three tectonic episodes of Yanshanian orogenic event. Three mineralization events (160 - 140 Ma, 130 - 110 Ma and 105 - 80 Ma) have coupling relationship with three regional tectonic-magmatic hydrothermal events of Linglong rock mass, Guojialing rock mass and Weideshan rock mass respectively. On the basis of gold mineralization ages gained from 318 samples which have been reported in this area, three age concentration periods have been divided as 81 - 105 Ma, 110 - 130 Ma and 141 - 160 Ma. According to mineralization, deposit types and ore-forming sequences, it is regarded that mineralization in this area is synchronous with three tectonic episodes. That is the first Mo-W-Au tectonic episode, the second Au-Ag tectonic episode and the third Cu-Pb-Zn-Mo-Au tectonic episode mineralization. Typical deposits of Mo-W-Au metallogenic series are Xiangjiashan molybdenum and tungsten deposit, copper deposit and Liucun gold deposit. Au-Ag metallogenic series are major representative type of main mineralization stages in eastern Shandong Province. It can be further divided into Au-Ag metallogenic sub-series which has close relation with mantle-crust magma interaction in early Cretaceous period; Au-Ag-Cu metallogenic sub-series which has close relation with mantle-crust magma in early Cretaceous period; and Cu-Au-Fe-Ag metallogenic sub-series which has close relation with post-magmatic hydrothermal in early Cretaceous period. Typical deposits are Jiaojia gold deposit, Sanshaodao gold deposit and Linglong gold deposit. Cu-Pb-Zn-Mo-Au metallogenic series is the main stage of superimposition mineralization and polymetallic mineralization with a mineralization age at 81 - 105 Ma. This series is closely related to the diorite-granodiorite-granite and quartz diorite porphyry-granodiorite porphyry-monzonite porphyry of the late Weideshan orogenic stage, and acid-intermediate volcanic-sedimentary formation of Shiqianzhuang formation in Qingshan Group.

Keywords: Hydrothermal Event; Tectonic Episode; Mineralization; Metallogenic Series; Mesozoic; Eastern Shandong Province

*基金项目: 国家自然科学基金项目(41140025)和全国矿产资源法潜力评价项目之山东省成矿地质背景研究(1212010813014-01)的资助成果。

#通讯作者。

山东鲁东地区中生代构造 - 岩浆事件与金矿成矿作用*

李洪奎^{1#}, 李逸凡², 耿科¹, 嵇传源¹, 梁太涛¹, 杨之利³

¹山东省地质科学实验研究院, 国土资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 济南

²潍坊学院建筑与工程学院, 潍坊

³山东省第六地质矿产勘查院, 招远

Email: #lhk126@126.com

收稿日期: 2013年3月1日; 修回日期: 2013年3月17日; 录用日期: 2013年4月5日

摘要: 山东鲁东地区处于特提斯、古亚洲洋和太平洋三大构造域的结合部位, 它们的相互作用过程决定并影响着鲁东的成矿环境, 在中生代区内有印支和燕山二次造山事件。燕山造山事件在鲁东地区表现为三个造山幕, 每一幕表现为挤压与伸展的旋回性, 这种旋回性是鲁东金矿和多金属矿成矿的地质背景。中生代构造演化对山东的构造 - 岩浆事件、沉积环境和成矿作用起着制约与控制作用, 岩浆 - 沉积 - 构造 - 成矿事件与区域构造事件具有相互耦合性, 金矿、多金属矿的形成与定位同燕山期三个构造幕紧密相联, 3期成矿事件 160~140 Ma、130~110 Ma 和 105~80 Ma 则与玲珑、郭家岭和伟德山岩体的构造 - 岩浆热事件相耦合。文章在统计区内已报道的金矿成矿年龄样品 318 件的基础上, 划分了 81~105 Ma、110~130 Ma 和 141~160 Ma 三个年龄集中区间, 按照成矿作用、矿床类型和成矿时序, 认为区内成矿作用与三个构造幕同步, 为第一幕 Mo-W-Au、第二幕 Au-Ag 和第三幕 Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿作用。Mo-W-Au 成矿系列典型矿床是邢家山钼钨矿、铜矿和留村金矿; Au-Ag 成矿系列是鲁东地区主成矿期的表现形式, 可进一步分为与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag 矿床成矿亚系列、与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag、Cu、多金属矿床成矿亚系列和与早白垩世壳幔岩浆期后热液活动有关的 Cu、Au、Fe、Ag、硫铁矿床成矿亚系列, 其典型矿床为焦家金矿、三山岛金矿和玲珑金矿等。Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列与伟德山造山晚期闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合、浅成 - 超浅成石英闪长玢岩 - 花岗闪长斑岩 - 石英二长玢岩组合和青山群石前庄组中酸性火山喷发建造关系密切, 是区内金矿的叠加成矿期及多金属矿的主成矿期, 成矿年龄 81~105 Ma。

关键词: 热事件; 构造幕; 成矿作用; 成矿系列; 中生代; 鲁东地区

1. 引言

山东鲁东中生代强烈的构造 - 岩浆事件因与金矿相伴而备受注目, 这与中国中东部地区中、晚三叠世后经历了华北、扬子陆块碰撞 - 拼贴及太平洋板块运动有关, 导致了大规模叠加造山 - 裂谷系^[1,2]的形成。通常将三叠纪微陆块拼合碰撞和大陆形成的过程归结为印支运动, 其标志为近东西向的古特提斯海洋关闭^[3]。侏罗纪太平洋板块向西俯冲形成濒太平洋北北东方向大陆边缘体系, 李四光先生称之为新华夏构造体系^[4], 侏罗纪 - 白垩纪中国东部转变为挤压造山带, 翁文灏^[5]首次提出称为燕山运动, 并明确指出燕山运动以强烈的岩浆活动和挤压构造变形以及成矿作用为特征^[5]。崔盛芹等^[6,7]、赵越等^[8,9]、任纪舜等^[10]对燕山运动特征进行了描述与划分。对燕山运动的性

质目前大多数学者认为^[3,9-11]是从大陆碰撞构造体制转为以西太平洋陆缘俯冲构造体制为主导的陆内变形和陆内造山, 约 80% 的大中型金属矿床的形成与这个阶段有关^[12], 同时导致生物进化的激变期^[13]。故燕山运动是中生代构造演变的重大事件, 在山东具有特殊的地质意义, 也是中生代成矿大爆发时期^[14]。

长期以来, 国内外专家、学者对鲁东地区金矿成矿背景、成矿特征、成矿机制、成矿时代等进行了全面系统的研究^[15-33], 而针对多金属矿尤其是中生代金属矿产成矿系列的研究成果较少。对于该区中生代金矿成矿来说, 多数学者认为存在一个主成矿期, 即 140 Ma~110 Ma 之间^[34-36], 杨金中和李光明^[37]认为存在两个主成矿期, 而 Mao et al.^[38]更倾向于存在 3 次成矿事件。李洪奎^[39]按照成矿作用和矿床类型不同, 认为区

内成矿作用与三个构造幕同步, 总体是在挤压 - 伸展环境下形成的, 可分为第一幕(早期) Mo-W-Au 成矿作用、第二幕(主成矿期) Au-Ag 成矿作用和第三幕(晚期) Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿作用。

2. 成矿地质背景

鲁东地区地处华北板块与秦祁昆造山系二大构造单元结合带, 二者之间大致以五莲 - 即墨 - 牟平一线的断裂为界。鲁东地区以前寒武纪结晶基底为主, 盖层不发育。基底有中太古代唐家庄岩群、新太古代胶东岩群、古元古代荆山群、粉子山群和芝罘群, 震旦纪蓬莱群; 在断陷盆地内有白垩纪莱阳群、青山群、王氏群分布, 平原地区及河流沟谷有新近系、第四系分布。

鲁东地区基底构造线以近东西向展布为主, 断裂

构造是其醒目特点, NNE、NE 断裂尤为发育, NW、EW 向断裂次之。岩浆岩以侵入岩为主, 包括新太古代 TTG 岩系、震旦期片麻状二长花岗岩系列, 三叠纪后碰撞岩浆杂岩、侏罗纪玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗岩闪长岩 - 花岗岩、早白垩世伟德山长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩、早白垩世崂山碱性花岗岩等发育, 其它各时代的侵入岩为岩枝、岩株、岩脉状, 规模小(图 1)。

中生代是鲁东地质构造大变动时期。鲁东地区中生代有二次重要的碰撞造山事件 - 印支陆 - 陆碰撞造山和燕山俯冲造山作用。印支造山作用主要表现为扬子板块向华北板块俯冲, 形成苏鲁高压 - 超高压变质带及同造山花岗岩及后造山高碱正长岩; 燕山造山作用在鲁东可进一步分为三个造山幕, 每一幕表现为挤压与伸展的相互转化过程, 而这种转化是鲁东金矿

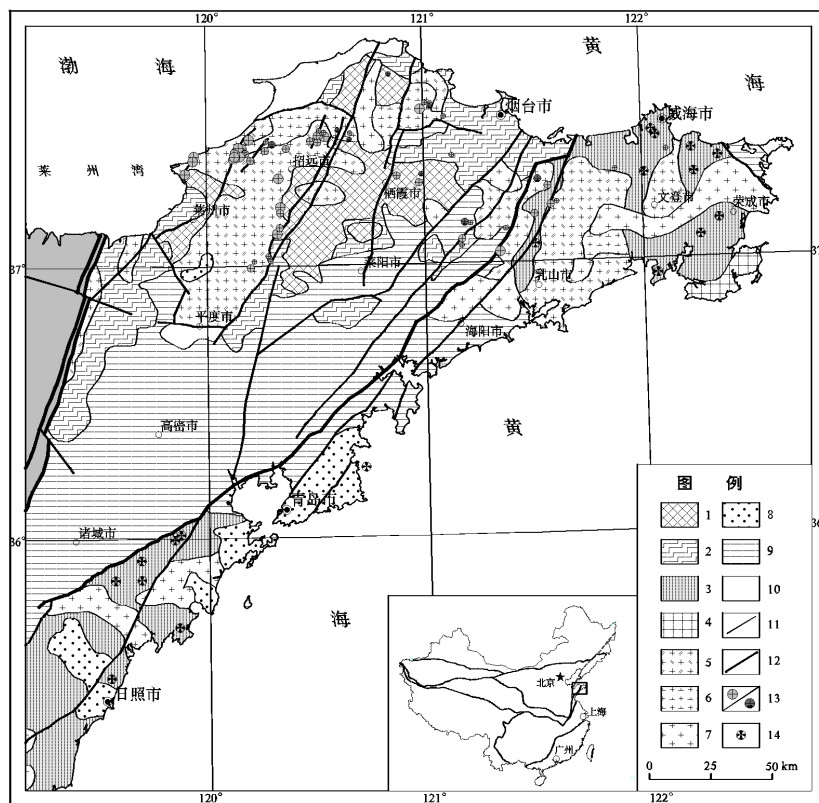


Figure 1. The tectonic location sketch map of Eastern Shandong Province. 1: Archean TTG and supracrustal rocks; 2: Proterozoic supracrustal rocks; 3: Proterozoic syn-collision igneous complex; 4: Triassic post-collision igneous complex; 5: Jurassic Linglong early orogenic intrusions; 6: Late Jurassic-Early Cretaceous Guojialing mid-orogenic intrusions; 7: Early Cretaceous Weideshan late orogenic intrusions; 8: Early Cretaceous Laoshan post orogenic alkalic intrusions; 9: Cretaceous sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 10: Cenozoic sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 11: main geological boundaries; 12: main faults; 13: gold mines/gold placer mines; 14: silver mines

图 1. 鲁东地区大地构造位置图。1: 太古宙 TTG + 表壳岩; 2: 元古宙变质表壳岩; 3: 高压-超高压变质带; 4: 三叠纪后碰撞岩浆杂岩; 5: 侏罗纪玲珑造山早期侵入岩; 6: 早白垩世郭家岭造山中后期侵入岩; 7: 早白垩世伟德山造山晚期侵入岩; 8: 早白垩世崂山后造山碱性侵入岩; 9: 白垩纪沉积-火山沉积岩系; 10: 新生代沉积-火山沉积岩系; 11: 主要地质界线; 12: 主要断裂; 13: 金矿/榴辉岩; 14: 银矿

和多金属矿成矿的前提。

2.1. 印支陆 - 陆碰撞造山事件

几近与山东海岸线平行、沿日照 - 胶南 - 荣成 - 威海等地呈 NE 向展布、出露宽 20~100 km、断续长约 450 km 的高压 - 超高压变质带, 是扬子板块和华北板块陆 - 陆碰撞造山后形成的一条 HP-UHP 变质带, 称为苏鲁高压 - 超高压变质带^[40-43]。苏鲁高压 - 超高压变质带是秦岭 - 大别碰撞带的东延部分, 属秦祁昆造山系的不同级别的低序次构造单元。对秦岭 - 大别碰撞带的研究表明: 秦岭 - 大别碰撞带在三叠纪晚期最后完成碰撞、拼合, 碰撞带内及其两侧的边缘残余海完全消失, 大量的同碰撞期变质和岩浆作用的年龄数据, 均为 240~205 Ma^[43-47], 显示了三叠纪晚期完成拼合。代表晚古生代 - 早三叠世残余洋壳的勉略 - 湖北随州花山一带蛇绿岩套, 在中三叠世末期受到挤压、碰撞, 这是秦岭 - 大别带最后完成碰撞、拼合的主要表现^[48]。上述认识与地质方面的证据相吻合, 已经被多数地球科学工作者所接受。

胶南 - 威海印支陆 - 陆碰撞造山形成的高压 - 超高压变质带, 其演化与发展史大致经历了强烈碰撞、俯冲和折返三个阶段, 其时限主要在 250~205 Ma, 约 45 Ma^[39,49,50], 属三叠纪构造事件。主要造山作用为: 250~230 Ma, 华北板块与扬子板块俯冲、碰撞, 扬子板块俯冲华北板块之下, 在俯冲带的前部和后部分别发生超高压变质和高压变质事件, 叠加到前造山的角闪岩相变质事件之上。230~210 Ma, 扬子板块向华北板块推挤、逆冲, 榴辉岩向地表回归, 造山带近邻扬子板块一侧变形强烈。同时形成柳林庄 - 宁津所同造山角闪石岩 - 闪长岩 - 石英二长岩组合, 在荣成邢家岩体变辉长岩的 SHRIMP U-Pb 年龄 (213 ± 5) Ma、 (211 ± 5) Ma^[51], 红门石岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (215 ± 5) Ma^[51]。210~200 Ma, 扬子板块向华北板块大规模斜向逆冲推覆, 深部榴辉岩同步向地表回归, 造山带结构分带进一步明显化。210~205 Ma, 进入后造山拉张阶段, 形成崂山后造山高碱正长岩组合, 在葛箕岩体含斑中细粒正长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (205.7 ± 1.4) Ma、 (211.9 ± 1.5) Ma^[51], 代表陆 - 陆碰撞造山阶段的结束, 同时证明三叠纪末期已经完成南北板块的拼合, 到侏罗纪 - 白垩纪时期应

力场与三叠纪已经完全不同, 进而转入燕山造山作用阶段。

印支造山作用主要表现为扬子板块向华北板块俯冲, 形成苏鲁高压 - 超高压变质带及同造山花岗岩及后造山高碱正长岩。

2.2. 燕山造山事件

鲁东地区燕山造山作用是华北板块与扬子板块陆 - 陆碰撞造山之后^[52], 由中亚 - 特提斯构造域向滨太平洋构造域转化和太平洋板块的俯冲联合作用的结果^[39]。在这一构造背景下, 鲁东地区燕山造山事件可进一步分为三个造山幕, 每一幕表现为由挤压到伸展的转化过程, 代表了应力由压性到张性的变化过程, 并形成了一套特定的构造——岩石组合, 表明侵入岩浆作用已经进入了另一个构造——岩浆旋回^[52-54]。

燕山造山事件是鲁东岩浆活动的鼎盛时期, 李洪奎^[39]对鲁东地区新近获得的 71 个 SHRIMP 年龄统计表明其年龄值集中在 160~110 Ma, 其中在 160~150 Ma、130~125 Ma 和 120~100 Ma 构造三次强烈构造 - 岩浆事件, 代表了燕山造山事件三个构造幕, 即第一幕(早期)、第二幕(中期)和第三幕(晚期)造山事件。

第一幕(早期)造山事件的实体为晚侏罗世玲珑 - 昆崙山片麻状二长花岗岩组合, 39 个锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值集中在 160 Ma~150 Ma^[39], 是区域构造挤压导致地壳增厚引起地壳重熔的产物, 代表了大陆弧花岗岩特征(邓晋福等, 2004), 其后的伸展引张形成了各种密集分布的脉岩群。第二幕(中期)造山事件的实体是早白垩世早期郭家岭花岗岩闪长岩 - 花岗岩组合和稍晚的莱阳陆内盆地形成的火山 - 沉积岩建造组合。郭家岭花岗岩 11 个岩浆锆石 SHRIMP U-Pb 年龄集中在 130~126 Ma, 其形成的构造背景是岩石圈发生巨量的减薄, 构造应力体制由挤压为主向伸展为主转换, 代表了造山期大陆弧花岗岩的特点; 随着由挤压向伸展的进一步转化, 形成了莱阳群陆相碎屑岩沉积及其后的青山群火山岩喷发建造。第三幕(晚期)造山事件的实体是伟德山闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合、青山群碱性火山岩及后造山 A 型崂山晶洞过碱性正长花岗岩组合。伟德山花岗岩 12 个岩浆锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 118~105 Ma, 表现为大陆弧花岗岩; A 型崂山后造山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长

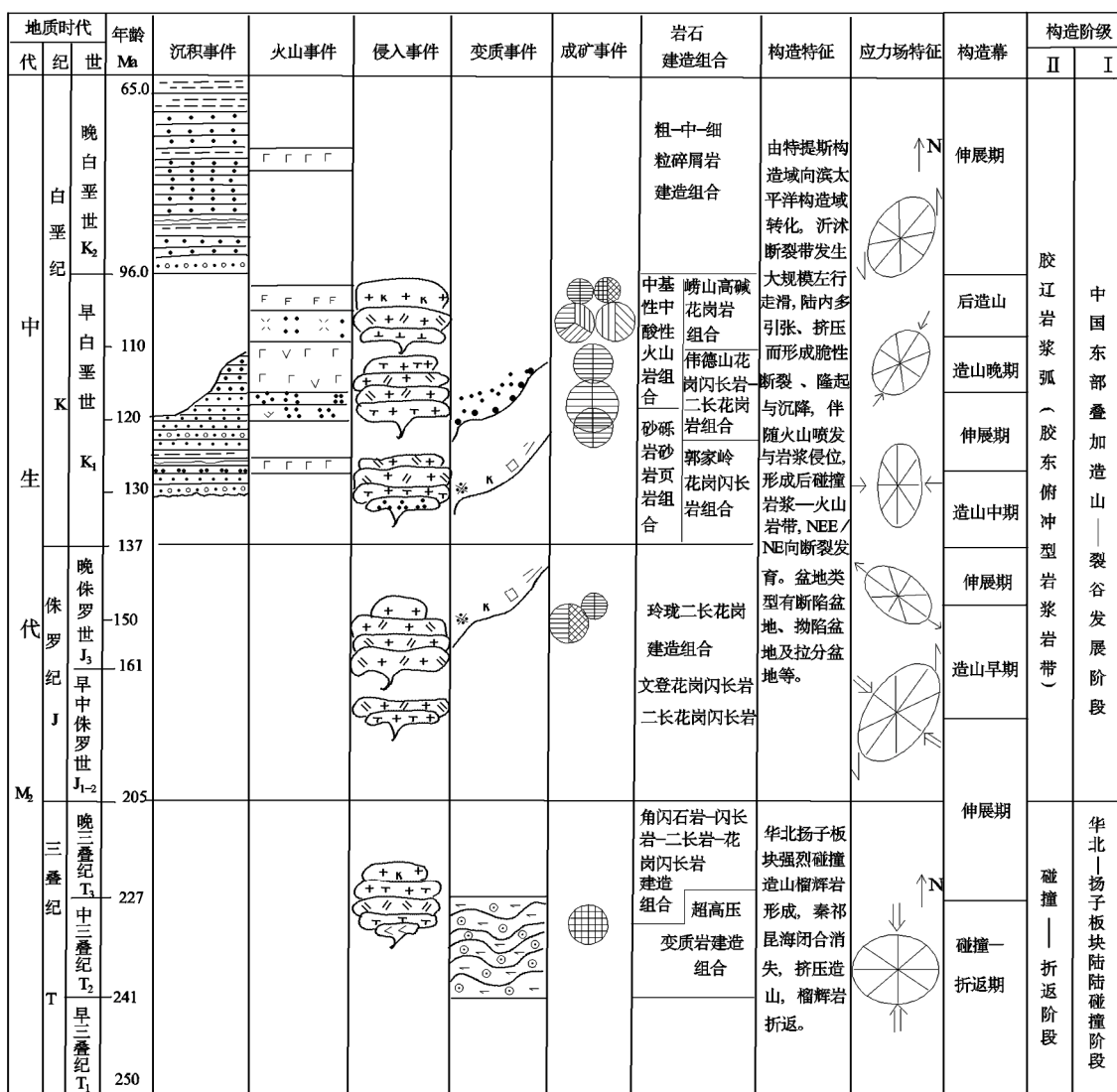
花岗岩组合, 标志着燕山造山过程的结束。

3. 构造 - 岩浆 - 沉积 - 成矿事件序列

各种矿床都是在大地构造演化过程中在特定大地构造环境下形成的特殊地质体, 成矿作用过程与大地构造演化密切相关^[1], 成矿作用过程中特定成矿类型反映了大地构造环境的时空专属性。图2为鲁东地区中生代造山带的构造 - 岩浆 - 沉积 - 成矿事件序列的初步框架, 它是在已有的山东大地构造相研究基础上初步确定的鲁东地区中生代造山带构造 - 岩浆

事件的完善与补充, 主要补充的是矿床和造山幕两栏, 以期把金属成矿事件与火山 - 岩浆事件和沉积事件对应起来, 以及把这些事件形成的时间序列纳入造山幕的划分框架中, 来初步讨论成矿事件在造山过程中的位置及其演化趋势, 并从地质事件序列这个视角初步讨论构造 - 岩浆 - 沉积作用与成矿作用的成生联系。

鲁东地区中生代岩浆 - 沉积 - 构造 - 成矿事件序列时空演化图(图2)是对区内地层划分、岩浆侵入时序关系、火山喷发建造、构造活动及成矿作用的概括



矿产图例: 多金属矿 铅锌矿 金红石 Cu, Mo矿 W, Mo矿 大型金矿 中型金矿 小型金矿

Figure 2. The evolutionary series of mesozoic magmatism-sedimentation-tectonism-mineralization in time and space in Eastern Shandong Province

图2. 鲁东地区中生代岩浆 - 沉积 - 构造 - 成矿事件序列时空演化图

和模式化,是在对区内已取得的 1:5 万、1:20 万和 1:25 万区调资料及各种资料系统研究的基础上,通过编制山东省 1:25 万建造构造图、1:50 万沉积岩区、变质岩区、侵入岩区、火山岩区和大型变形构造工作底图,进而上升为 1:50 万大地构造相图,而鲁东地区中生代时空演化图则是大地构造相图的组成部分,其时代划分的依据充分客观。从图 2 中可以划分为二个构造阶段,其一是三叠纪华北与扬子板块陆陆碰撞阶段,代表了印支造山过程;其二是中国东部叠加造山 - 裂谷发展阶段,是燕山造山事件的表现,可进一步分为三个构造幕。每一个造山幕,均符合于挤压造山到随后的伸展作用,亦即从地幔对陆壳的加热开始,随后是挤压造成的岩浆侵位以及造山后的伸展作用,并伴随着与岩浆事件紧密相关的不同的成矿作用。由图 2 可看出有几个重要的特征:

1) 每一个造山旋回都是从碰撞挤压开始,由造山期花岗岩(包括由基性→中酸性→酸性花岗岩建造组合)开始,并经过强度不等的伸展作用。这一过程包括两个方面,一是地壳的折沉作用使原来的太古宙克拉通的冷的和刚性强的陆壳的加热,表现为岩浆作用发生在构造变形之前使陆壳岩石熔融重结晶形成 S 型花岗岩,如玲珑弱片麻状二长花岗岩的侵位机制;二是幔源玄武质岩浆上涌形成壳幔混合岩浆经历结晶分异而成的,如郭家岭弱片麻状花岗闪长岩 - 花岗岩组合。

2) 前造山幕和后造山幕之间的伸展作用,表现为脉岩群、陆相碎屑岩沉积建造及火山岩堆积,它分别与比较平静的构造环境与强烈活动的挤压收缩构造环境有很好的对应和反馈关系,同时挤压后的伸展是区内金矿和多金属矿定位期。

3) 侏罗 - 白垩纪造山事件(燕山造山事件)表现为三个构造幕,即 3 次造山和 3 次伸展。区内 3 期成矿事件(160~140 Ma、130~110 Ma 和 105~80 Ma)则与玲珑、郭家岭和伟德山岩体的构造 - 岩浆热事件相耦合^[24]。3 幕造山(造山早期、造山中期和造山晚期)岩浆事件,在时间和空间上与 3 幕伸展构造变形事件伴生,每次事件间隔在 10 Ma 左右。

构造 - 岩浆 - 沉积 - 成矿事件与区域构造事件具有相互耦合性。造山早期玲珑片麻状花岗岩组合(J₃)侵位后的伸展表现为 NE 向玲珑岩群的侵入。造山中

期郭家岭花岗闪长岩 - 花岗岩组合(K₁)侵位后的伸展表现为胶莱盆地及胶北各断陷盆地(臧家庄断陷盆地、龙山店断陷盆地)的形成。造山晚期伟德山闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合与青山群双峰式火成岩为主的组合,早期大量花岗质岩浆与底侵玄武质岩浆在总体挤压条件下的主要通过岩浆混合作用形成以安山质为主的岩浆活动,随着整个陆壳已被加热升温,即使上地壳岩石发生大量局部熔融,形成以流纹质和花岗质为主的岩浆活动,岩浆侵入和喷发分别形成伟德山闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合和玄武安山岩、流纹岩等双峰式火成岩为主的组合。这种热演化趋势与变质作用的温度、压力演化趋势,以及与构造变形演化趋势有很好的对应和反馈关系。后造山 A 型崂山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长花岗岩组合与方戈庄组高碱粗玄武岩是典型造山后伸展的产物,代表燕山构造事件的结束。

4) 大尺度和强烈的金属成矿作用发育于同造山(早期、中期和晚期)幕,与此形成鲜明对照的是,造山中期由于强烈的伸展作用,除了形成大规模的金矿成矿作用外,还形成了火山岩型金属矿产和与火山作用有关的膨润土、沸石岩和珍珠岩矿床,而造山早期和造山晚期则形成多金属矿产,这一特征在图 2 中表现特别明显。它进一步表明,造山幕的识别和划分为金属成矿作用与大规模岩浆活动时空相伴生的成生联系提供了好的约束,而过热的大量岩浆作用发育期则在时空上与形成大型金、铜、钼、铅锌矿床相伴生。

4. 成矿系列

鲁东处于环太平洋成矿带的外带,处于华北板块与扬子板块碰撞带及太平洋伊佐奈岐板块向 NWW 俯冲陆缘岩浆弧部位,有其与众不同的特性。将成矿地质作用作为造山作用的一个过程,建立区域构造 - 岩浆活动 - 成矿作用总体模式,是创新思维^[54,55]。就鲁东地区成矿作用及其形成的矿床而言,表 1 收集了区内金矿成矿年龄数据(统计样品数 318 件),资料来源为参考文献中的[59-75]号。从图 3 中可以看出:区内金矿床的形成年龄集中在三个区间,一是 81 Ma~105 Ma,占统计样品数的 15.6%;二是 110 Ma~130 Ma,占统计样品数的 70.1%;三是 141 Ma~160 Ma,占统计样品数的 14.3%。研究表明:鲁东地区的三个金矿

Table 1. The gold mineralization ages of the main gold deposits from Eastern Shandong Province
表1. 鲁东地区主要金矿床成矿年龄测定表

采样地点/矿床	测试对象	测试方法	样品数	年龄(Ma)			资料来源 (与参考文献序号相对应)
				最高	最低	平均	
仓上	蚀变绢云母/绢云母	Ar-Ar	3	121.5	121.1	121.3	[59-61]
	流体包裹体/石英脉包裹体	Rb-Sr	2	114.1	112.9	113.5	[59,60]
大开头	矿石+黄铁矿	Rb-Sr 等时线	2	149	91	120	[62]
大尹格庄	含矿花岗岩	U-Pb	2	146	144	145	[60]
大庄子	石英/绢云母	Ar-Ar	3	118.03	114.6	116.32	[60,61,63]
	绢云母	K-Ar	4	128.2	105	116.6	[60,64]
邓格庄	黑云母/石英液包体	Ar-Ar	7	129.59	117.8	123.67	[60,64]
	蚀变绢云母/绢英岩	Rb-Sr	5	127	109	118	[59,60,63,64]
邓格庄	石英	Ar-Ar 坪年龄	3	141.8	139.4	140.6	[59]
东风	绢云母	Rb-Sr 等时线	2	81.46	62.26	71.86	[63]
东季	蚀变岩钾长石/脉石英	Ar-Ar	4	144.6	114.2	129.4	[60,61,63]
发云乔	黑云母	K-Ar	3	127.5	118.6	123.05	[60]
	矿石黄铁矿	Rb-Sr 等时线	5	135.4	121	128.2	[60,61,63]
范家埠	钾长石	K-Ar	3	44.65	42.55	43.6	[65]
	黑云母	Ar-Ar	2	124.9	123.6	124.25	[66]
胶东金矿	花岗闪长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	6	135	123	129	[66,67]
	绢云母	Ar-Ar	2	134	110	122	[68]
	绢云母, 白云母	Ar-Ar	2	121.1	119	120.05	[61]
	蚀变水白云母	K-Ar	2	108	104	106	[59]
焦家	蚀变水白云母/石英包裹体	Rb-Sr	5	142	88	115	[59,60]
	石英	Rb-Sr 等时线	4	142	87.1	114.55	[63,70,71]
	水云母	Rb-Sr	2	112	88	100	[69]
新城矿田	蚀变岩白云母	K-Ar	2	108	104	106	[60]
	蚀变岩白云母	Rb-Sr	6	112	98	105	[60]
界河	石英	Ar-Ar 坪年龄	2	144.5	116.1	130.3	[59]
	蚀变钾长石等	Rb-Sr	2	48.81	44.23	46.52	[59]
界河, 焦新	蚀变岩/粘土矿物	Rb-Sr	2	48.8	44.2	46.5	[60]
界河金矿	绢云母	Rb-Sr 等时线	2	48.81	44.23	46.52	[63]
金牛山	蚀变绢云母	Rb-Sr	2	86.6	74.6	80.6	[59]
	石英/成矿花岗岩	Ar-Ar 坪年龄	2	172.2	129	150.6	[59,60]
	岩体黑云母/全岩	K-Ar	3	217	110	163.5	[60]
金青顶	钾长石/绢云母/绢英岩/蚀变矿物	Rb-Sr	7	145.5	98.4	121.95	[60]
	钾长石/绢英岩	Rb-Sr 等时线	3	121.3	107.8	114.54	[64]
九曲	黄铁矿/矿石	Rb-Sr 等时线	4	129.7	100	114.85	[62]
	蚀变水白云母/蚀变钾长石	Rb-Sr	4	193.18	110	151.59	[59,60]
灵山沟金矿	绢云母/水白云母	Rb-Sr 等时线	2	193.18	110	151.59	[63]
	蚀变岩	Rb-Sr 等时线	2	120	110	115	[71]

续表

	蚀变岩	K-Ar	2	113	109	111	[60]
	黄铁矿/绢云母/绿泥石/石英包裹体	Rb-Sr	15	149	91	120	[60,61]
玲珑金矿	矿石+黄铁矿	Rb-Sr 等时线	2	125.3	118.3	121.8	[62]
	蚀变水白云母	K-Ar	2	113	109	111	[72]
	黄铁矿	Rb-Sr 等时线	5	133	110	121.5	[68,71]
	蚀变绢云母	Rb-Sr	4	127	100	113.5	[73]
玲珑大开头	矿石+黄铁矿	Rb-Sr	2	149	91	120	[59]
玲珑阜山	蚀变绢云母	Rb-Sr	2	81.49	62.29	71.89	[59]
九曲金矿	黄铁矿/绢云母	Rb-Sr 等时线	6	129.7	108.6	115.1	[59][63]
破头青金矿	蚀变绢云母	Rb-Sr	4	305.6	80.4	193	[59]
	绢云母	Rb-Sr 等时线	2	80.9	80.44	80.67	[63]
	蚀变水白云母	K-Ar	2	113	108	110.5	[59,63]
玲珑西山	蚀变水白云母/黄铁矿	Rb-Sr	5	132.2	96.52	114.36	[59]
	水白云母/绢云母	Rb-Sr 等时线	4	118.7	96.53	107.7	[63]
	蚀变水白云母	K-Ar	5	122	118	120	[59,60,63,71]
马家窑	蚀变绢云母/水白云母	Rb-Sr	13	144.7	101.2	122.96	[59,60]
	绢云母/水白云母	Rb-Sr 等时线	2	138.3	101.2	119.76	[63,71]
牟平金矿	蚀变岩	Rb-Sr	4	127.17	98.38	121.78	[59]
南张庄	石英斑岩	Rb-Sr	2	120	106	113	[60]
蓬家夼	石英/黑云母	Ar-Ar	91	176.14	65.21	120.68	[60,61,63,75]
	矿石绢云母	K-Ar	5	102.55	98.63	100.59	[59,75]
乳山金矿	绢云母/水白云母/绢英岩	Rb-Sr 等时线	4	127.17	98.48	112.825	[62,63]
	热液锆石	SHRIMP U-Pb	2	120	114	117	[61]
三山岛	绢云母	Ar-Ar	2	123	119	121	[74]
望儿山	绢云母/白云母	Ar-Ar	2	121.4	119.2	120.3	[61]
文登金矿	绢云母	K-Ar	2	104.36	99.48	101.97	[62]
下雨村	蚀变绢云母	K-Ar	2	127.12	122.1	124.6	[59]
	绢云母	K-Ar	2	127.12	122.1	124.6	[60]
新城	绢云母, 白云母	Ar-Ar	2	120.9	120.5	120.7	[60]
	黄铁矿绢云母	Rb-Sr	2	121.9	111.3	116.6	[59]

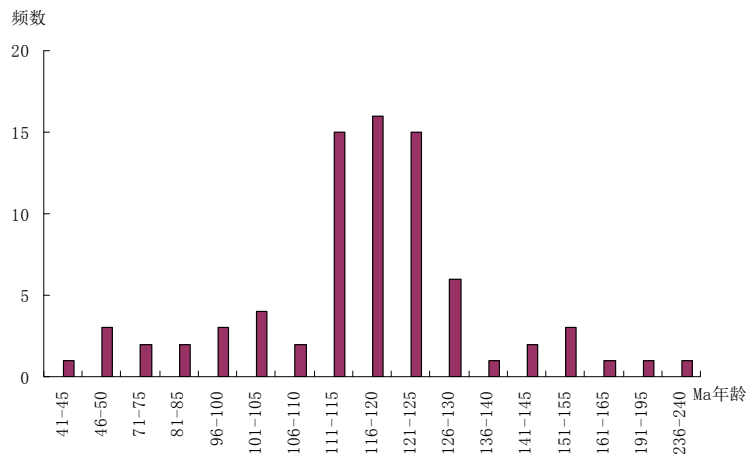


Figure 3. The gold mineralization ages histplot of the typical gold deposits from Eastern Shandong Province
图 3. 鲁东地区典型金矿床成矿年龄统计频数图

成矿峰期年龄值与区内三次构造 - 岩浆热事件相耦合, 相当于前述 3 幕同造山(造山早期、造山中期和造山晚期)岩浆事件, 在时间和空间上与三次金矿成矿作用密切相关, 即制约金矿成矿的构造系统与金矿时空相随并与成因相关的构造 - 岩浆热事件相一致。

4.1. Mo-W-Au 成矿系列

与燕山期第一幕构造环境有关的 Mo-W-Au 成矿系列, 是由中亚 - 特提斯构造域向滨太平洋构造域转化和太平洋板块的俯冲过程中形成的不同矿床类型组合。它们的动力源, 与古太平洋板块 - 太平洋板块和欧亚板块的强力俯冲、挤压及其后续作用有关。

三叠纪末期华北板块与扬子板块的碰撞造山作用完成南北板块的拼合, 至侏罗纪时, 鲁东地区一方面受到华北与扬子板块后碰撞挤压的后续效应, 另一方面受太平洋伊佐奈岐板块向 NW 方向运移的影响, 呈现隆起剥蚀状态。同时, 这种双重大地构造背景形成了具有碰撞后的抬升和大陆弧特点的高锆花岗岩。早侏罗世末, 郯庐断裂发生大规模左行平移运动, 玲珑岩体、昆崙山岩体强力侵位。玲珑花岗岩为过铝质花岗岩和钾质花岗岩, 以具较明显的负钨异常和铝含量较低区别于埃达克岩^[56], 是陆壳重熔型花岗岩^[57]。由于断裂的剪切深熔作用, 产生剪切深熔型花岗岩和相关脉岩, 太古宙 - 元古宙绿岩地体强烈活化改造, 其内金及相关多金属元素被激活, 并向流体相运移, 在玲珑岩体、昆崙山岩体内、外接触带尤其是玲珑岩体与结晶基底形成的接触带处为金质聚焦的有利场所。Mo-W-Au 成矿系列的典型矿床是钼矿、铜矿和金矿, 其形成年龄在 141 Ma~160 Ma 之间, 区域上与玲珑岩体、邢家山岩体相当。

该系列的金矿典型矿床为莱州留村金矿, 它产于玲珑岩体的外接触带, 是发育于古老变质岩中的小型石英脉型金矿。单颗粒黄铁矿 Rb-Sr 等时线测定留村金矿成矿时代为 $151.0 \pm 2.7 \text{ Ma}$ ^[58], 与玲珑岩体形成的构造 - 热事件相吻合。

而邢家山钼矿亦具有代表性。邢家山钼矿矿床是胶东地区一特大型矽卡岩 - 斑岩型钼钨矿床, 构造位置上处于华北板块东南缘与苏鲁造山带对接地带, 在成因上与幸福山似斑状含角闪二长花岗岩密切相关, 归属于该区与晚侏罗世花岗质岩浆作用有关的特大

型、大型和中型铜钼多金属矿床成矿系列。对该矿床透辉石榴矽卡岩中的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素测年, 结果显示, 辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄范围为 $156.91 \pm 1.78 \text{ Ma}$ 至 $160.70 \pm 1.66 \text{ Ma}$, 加权平均值为 $158.91 \pm 1.91 \text{ Ma}$, 对应的 Re-Os 等时线年龄为 $158.70 \pm 2.06 \text{ Ma}$ ^[76]; 这些年龄数据与区域上的晚侏罗世玲珑花岗岩锆石 U-Pb 年龄($158.53 \pm 0.79 \text{ Ma}$)相近, 指示区域上该期钼钨铜多金属矿化与区内花岗岩具有密切的时间和成因关系^[76,77]。中、晚侏罗世区内广泛的地壳增厚作用和地壳重熔导致的大规模地壳重熔型花岗质岩浆活动为该区钼钨多金属矿成矿提供了主要成矿物质和流体。结合已有的研究成果, 认为鲁东地区晚侏罗世以来岩浆活动(玲珑岩体)及相应的成矿作用的体现, 代表了鲁东地区燕山期第一幕构造环境下的 Mo-W-Au 成矿作用。

4.2. Au-Ag 成矿系列

燕山期第二幕构造环境下的 Au-Ag 成矿系列是鲁东地区主成矿期的表现形式, 可进一步分为与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag 矿床成矿亚系列、与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag、Cu、多金属、Mo、Fe、硫铁矿矿床成矿亚系列、与早白垩世壳幔岩浆期后热液活动有关的 Cu、Au、Fe、Ag、硫铁矿矿床亚系列。在早白垩世, 鲁东则发育了与岩石圈减薄有关的大规模岩浆作用、大范围盆地断陷、高强度金矿成矿爆发、高速度地壳隆升、多期次幔源岩浆活动和多式样脆性断裂切割等地质构造事件^[39]。研究表明: 白垩纪时期鲁东地区造山挤压和伸展事件频发, 主成矿事件与挤压向拉张作用转换有关。 130 Ma ~ 126 Ma 郭家岭岩体在挤压作用下强力定位, 并伴有快速隆升, 之后转入拉张, 金矿(伴生银矿)在这一时期沿构造有利部位定位。在挤压作用向拉张作用转换的过渡阶段, 鲁东地区花岗岩化作用强烈, NE 向构造岩浆带发育成熟, 此时, 真空泵吸作用促使成矿流体进入剪切裂隙系统, 使其成为矿化热液最佳吸收带, 造成含矿热液大量释放, 形成了鲁东金矿集中区^[78]。在 120 Ma 左右鲁东地区发生了大规模金矿成矿作用, 形成的金矿床具有区域集中、规模大、富集强度高和成矿期短的特点, 这与区内基础地质事件相吻合(图 3)。据吕古贤等^[79-83]的研究: 成矿期构造应力值明显

低于成矿前古应力值,与金矿有关的成矿期差应力为 $256.84 \times 10^5 \sim 451.78 \times 10^5$ Pa,成矿时代为 125.8~105.0 Ma。而据胡芳芳、范宏瑞等资料^[23,25,84],金青顶金矿成矿年龄 117~121 Ma,邓格庄金矿成矿年龄 120 Ma,与上述结论相一致。

鲁东地区在燕山期第二幕构造环境下形成的金矿床,其成因为壳幔岩浆期后热液型,成矿作用方式分为以大而连通的弥散空间交代蚀变的焦家式金矿床、以引张扩容空间充填形成的玲珑式金矿床以及介于二者之间的过渡类型。典型矿床以焦家金矿、三山岛金矿、大尹格庄金矿等破碎带蚀变岩型金矿和玲珑充填石英脉型金矿为代表,望儿山金矿、金岭金矿等属其过渡类型。

4.3. Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列

燕山期第三幕构造环境下的 Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列,是与鲁东最醒目的侵入 - 火山岩带有关的成矿系列及多金属矿床组合,包括伟德山造山晚期闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合、浅成 - 超浅成石英闪长岩 - 花岗闪长斑岩 - 石英二长玢岩组合和青山群石前庄组中酸性火山喷发物质,其成岩年龄大约 118~105 Ma,与铜、铅、钼矿有关,也是区内金矿的叠加成矿期及多金属矿的主成矿期,成矿年龄 81 Ma~105 Ma。

Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列与太平洋区板块运动状态发生改变有关,原来的 Izanagi 板块向 NNW 俯冲挤压变为太平洋板块的 NWW 向运动,鲁东地区的构造状态已从 NW-SE 向挤压转为 SE-NW 向拉张。118~110 Ma 时,伟德山造山晚期闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合定位,也是区内金矿的叠加成矿期及多金属矿的主成矿期。110~90 Ma 时,出现后造山 A 型崂山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长花岗岩组合侵入活动,代表了大规模的伸展作用^[85],标志着燕山造山过程的结束和成矿事件的结束。

5. 问题讨论

世界级鲁东金矿集中区的金成矿及其钼钨铜铅锌等多金属矿床,是在中生代陆陆碰撞、板块俯冲造山作用过程中重要地质事件的一种特殊事件,是地质作用过程的组合部分。早期中深成热液 Mo-W-Au 成

矿系列形成于燕山期第一幕构造环境的背景,燕山期第二幕构造环境下 Au-Ag 成矿系列是鲁东金矿的主成矿期,伴生有多金属矿产,包括三个成矿亚系列和若干个矿床类型,晚期 Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列形成于燕山期第三幕构造环境。以分析区域控矿网络构造系统→岩浆活动与金矿的时空和成因关系→金成矿作用在时空的演化→阐释金成矿地球动力学环境,是研究金矿成矿作用与过程的新取向^[86]。

区内三个成矿系列对应于三次构造 - 岩浆热事件,与对山东省大地构造相的研究中所划分出的造山早期、中期和晚期侵入岩亚相吻合。造山早期玲珑 - 崂山花岗岩组合,为挤压环境下陆壳重熔型花岗岩,与区内钼钨矿、金矿成矿作用有关。造山中后期郭家岭花岗岩组合 - 花岗岩组合,为壳幔混合岩浆经历结晶分异而成,是诱发胶东金矿主成矿期的构造 - 热事件。期间岩浆侵位与伸展交替进行,形成了莱阳盆地内陆内火山 - 沉积建造组合,匡永生等研究青山群基性火山岩喷发年龄 122~113 Ma,其物质来源为交代富集地幔部分熔融作用的产物^[87]。

造山晚期形成了鲁东最醒目的侵入 - 火山岩带,以伟德山、招虎山、崂山、大小珠山岩体和莱阳、即墨火山岩为代表,总体呈 NE 向。其形成机制为: 118~105 Ma 时,伟德山造山晚期闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合沿 NE 向构造侵位,伴随火山岩形成的浅成 - 超浅成石英闪长岩 - 花岗闪长斑岩 - 石英二长玢岩组合,同时伴有青山群石前庄组中酸性火山喷发物质,与铜、铅、钼矿有关,也是区内金矿的叠加成矿期及多金属矿的主成矿期。青山群中酸性火山岩喷发年龄 110~98 Ma,为古老下地壳和中生代底侵岩浆的熔融产物^[87],与伟德山岩体及其浅成 - 超浅成侵入岩同步。

后造山 A 型崂山后造山高碱性岩、方戈庄组高碱粗玄岩是典型造山后伸展构造的体现。110~90 Ma 时,后造山 A 型崂山后造山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长花岗岩组合侵入活动,标志着白垩纪俯冲型岩浆造山过程的结束。而整个侏罗 - 白垩纪俯冲岩浆造山事件正是由多其次岩浆侵入、火山喷发和拉分盆地内的沉积共同构成的。

上述特定的大地构造环境下发生的构造 - 岩浆热事件,造就了与之相伴的成矿作用。鲁东地区晚侏

罗世 - 早白垩世表现为三次造山和三次伸展, 而每一构造幕的伸展阶段是成矿的集中期。早期为钼、钨、金矿组合, 中期即主成矿期为金矿伴生银矿、铜矿等, 晚期为多金属成矿期。为成矿提供热源的岩浆事件是: 与钼钨金矿有关的造山早期玲珑片麻状花岗岩组合、与金矿有关的造山中后期郭家岭花岗闪长岩 - 花岗岩组合(主成矿期)、与多金属矿有关的造山晚期伟德山闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合和后造山 A 型崂山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长花岗岩组合, 其大陆动力学环境起源于中亚 - 特提斯构造域向滨太平洋构造域转化和太平洋板块的俯冲^[2,48]。

目前鲁东地区已探明三个超千吨的世界级金矿田, 它们是三山岛金矿田、焦家金矿田和玲珑金矿田。焦家金矿田已探明资源储量 1100 吨, 三山岛金矿田已探明资源储量 737 吨加上北部海域部分大于 300 吨, 累计超过 1000 吨, 玲珑金矿田已探明资源储量亦达到 1000 吨。这些金矿的成矿物质来源具有相似性, 为壳幔岩浆期后热液型金矿; 成矿作用方式分为以大而连通的弥散空间交代蚀变的焦家式金矿床、以引张扩容空间充填形成的玲珑式金矿床以及介于二者之间的过渡类型。鲁东金成矿的地质构造环境是处于特提斯、古亚洲洋和太平洋三大构造域的结合部位, 它们的相互作用过程决定并影响着鲁东的成矿环境, 而这一特征具有唯一性和不可复制性。鲁东地区构造 - 岩浆事件也受控于该动力学机制系统, 其形成和演化有着深部壳幔结构原因, 中生代板块俯冲挤压, 地幔上隆, 并导致莫霍面呈波状起伏, 其实质是深部地质构造特征的显示, 反映幔隆与幔凹的交替产出。莫霍面凹陷区与挤压构造体制紧密相关, 幔凹后的局部变形则与拉张环境相互关联, 而不同构造部位金成矿系统的聚矿功能不同, 表现为凹陷区的局部隆起部位金的成矿强度明显小于其它地段。胶东金矿集中区为相对于周边的地幔隆起区, 莫霍面高出 2~3.5 km。由于岩石圈厚度长期增加, 其下富含流体组分和成矿组分的软流圈得以形成, 并通过壳幔相互作用, 将含矿流体系统输运到更高的层位。金矿床(点)往往产于莫霍面的梯度变化处或变形部位, 它既与幔隆及幔凹的交替产出有关, 也与深断裂对莫霍面的影响有关。

鲁东地区 NE 向成矿带成矿前构造应力场为韧性

压剪状态, 成矿早期应力场向脆性剪张转换, 成矿主期应力场转换为脆性剪张状态, 成矿后构造应力场又重新转换为压剪状态, 成矿期构造应力值明显低于成矿前古应力值。空间上, 成矿早期构造应力场主压应力方位为 NW-SE 方向, 主压应力、剪应力、能量、运移势和破裂系数值从主断裂向两侧呈降低趋势, 而在次级断裂裂隙发育部位常出现高应力值; 成矿主期最大主压应力方位为 NE-SW 方向, 最小主应力方位为 NW-SE, 中间主应力轴近于直立, 主压应力、剪应力、能量及运移势值从主断面向两侧呈升高趋势。可见, 鲁东地区成矿主期构造应力场正处于由较强的挤压作用分布阶段向较弱的剪张作用分布阶段转换的时空界面, 在已形成矿化(脉)而相对脆弱的岩石物理界面地段, 是形成有富金硫化物和裂隙金叠加的富金矿石的有利构造条件, 即金属硫化物成矿作用发生于剪压变形构造岩相向剪张变形构造岩相转换的时空界面。

总之, 鲁东大规模成矿时代为中生代, 控矿围岩为基底岩系及衍生的 S 型、壳幔混合型花岗岩, 控矿热力学条件是白垩纪岩浆岩, 成矿的动力学过程受华北东部中生代构造体制制约^[88,89]。应该强调的是, 中国大陆处于特提斯、古亚洲洋和太平洋三大构造域的结合部位, 它们的相互作用及陆内过程, 都影响着中国东部大陆, 而胶东地区构造 - 岩浆事件也受控于该动力学机制^[90]。中生代是胶东金矿最重要的构造成矿期, 其金矿主成矿期为 110~125 Ma^[39], 金矿形成与基底岩系活化改造、同造山期花岗岩的形成关系密切。

6. 结论

1) 鲁东地区中生代造山过程与所处的大地构造位置密切相关, 这一特殊地区正处于特提斯、古亚洲洋和太平洋三大构造域的结合部位, 它们的相互作用过程决定并影响着鲁东的成矿环境, 而这一特征具有唯一性和不可复制性。鲁东地区构造 - 岩浆事件也受控于该动力学机制系统, 在中生代有二次重大的碰撞造山事件——印支和燕山造山作用。印支造山事件主要表现为华北板块和扬子板块碰撞, 燕山造山事件在鲁东地区可进一步分三个造山幕, 由挤压和伸展的旋回性表现出来, 而这些挤压与伸展作用是鲁东金矿和

多金属矿成矿的地质前提。

侏罗 - 白垩纪构造事件表现为挤压与伸展相互转化, 挤压造山之后随着构造应力松弛而产生伸展。造山早期形成了挤压环境下陆壳重熔型玲珑 - 昆嵛山片麻状二长花岗岩组合形成及其伸展型脉岩群; 造山中期形成了壳幔混合岩浆型花岗闪长岩 - 花岗岩组合和莱阳陆内火山 - 沉积建造; 造山晚期形成了闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合、石前庄组中酸性火山喷发建造、浅成 - 超浅成石英闪长玢岩 - 花岗闪长斑岩 - 石英二长玢岩组合和后造山 A 型崂山后造山晶洞过碱性碱长花岗岩 - 正长花岗岩组合, 标志着燕山构造旋回的结束。

2) 中生代构造演化对山东的构造 - 岩浆事件、沉积环境和成矿作用起着制约与控制作用, 构造 - 岩浆 - 沉积 - 成矿事件与区域构造事件具有相互耦合性, 金矿、多金属矿的形成与定位同造山早期、造山中期和造山晚期三个构造幕紧密相联, 3 期成矿事件 160~140 Ma、130~110 Ma 和 105 Ma~80 Ma 则与玲珑、郭家岭和伟德山岩体的构造 - 岩浆热事件相耦合, 成矿作用滞后与岩浆事件约 10 Ma。

3) 对鲁东地区已报道的有关金矿成矿年龄数据进行了系统收集研究, 统计了区内金矿成矿年龄样品 318 件, 划分了三个年龄集中区间, 即 81 Ma~105 Ma、110 Ma~130 Ma 和 141 Ma~160 Ma。按照成矿作用、矿床类型和成矿时序, 分为第一幕 Mo-W-Au、第二幕 Au-Ag 和第三幕 Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿作用。Mo-W-Au 成矿系列的典型矿床是邢家山钼钨矿、铜矿和留村金矿, 其形成年龄在 141 Ma~160 Ma 之间。第二幕 Au-Ag 成矿系列是鲁东地区主成矿期, 可进一步分为与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag 矿床成矿亚系列、与早白垩世壳幔岩浆作用有关的 Au、Ag、Cu、多金属矿床成矿亚系列和与早白垩世壳幔岩浆期后热液活动有关的 Cu、Au、Fe、Ag、硫铁矿矿床亚系列, 其典型矿床为焦家金矿、三山岛金矿和玲珑金矿等。Cu-Pb-Zn-Mo-Au 成矿系列与伟德山造山晚期闪长岩 - 花岗闪长岩 - 花岗岩组合、浅成 - 超浅成石英闪长玢岩 - 花岗闪长斑岩 - 石英二长玢岩组合和青山群石前庄组中酸性火山喷发建造关系密切, 是区内金矿的叠加成矿期及多金属矿的主成矿期, 成矿年龄 81 Ma~105 Ma。

4) 世界级鲁东金矿集中区的金成矿及其钼钨铜铅锌等多金属矿床, 是在中生代陆陆碰撞、板块俯冲造山作用过程中重要地质事件的一种特殊事件, 三山岛金矿田、焦家金矿田和玲珑金矿田等三个超千吨的世界级金矿田的成矿地质环境具独特性和不可复制性。

7. 致谢

本文完成过程中山东省地质矿产局宋明春研究员详细审阅了全文并提出了具体的修改意见, 审稿专家对本文进行了审查和提出了建设性建议, 他们认真负责的态度和渊博的地质知识使作者受益匪浅, 在此表示真挚的感谢!

参考文献 (References)

- [1] 叶天竺, 张智勇, 肖庆辉等. 成矿地质背景研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 303-365.
- [2] 李洪奎, 于学峰. 山东省大地构造相研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 9-19, 281-314.
- [3] 董树文, 张岳桥, 龙长兴等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [4] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 6-84.
- [5] W. H. Wong. Crustal movements and igneous activities in eastern China since Mesozoic time. Bulletin of Geological Society of China, 1927, 6: 9-37.
- [6] 崔盛芹. 论全球中 - 新生代陆内造山作用与造山带[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 283-283.
- [7] 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉等. 燕山地区中生代陆内造山[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-368.
- [8] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展中的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105-128.
- [9] 赵越, 徐刚, 张拴红. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 319-328.
- [10] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发等. 中国及邻区大地构造图(1:500 万)及简要说明书——从全球看中国大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 6-9.
- [11] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义[J]. 地质评论, 2000, 46(1): 8-13.
- [12] 陈毓川, 常印佛, 裴荣富, 任纪舜, 汤中立, 翟裕生. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-36.
- [13] 季强, 陈文, 王五力等. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-357.
- [14] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 王义天等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 117-176.
- [15] 孙丰月. 胶东地区区域构造演化及金矿成矿规律探讨, 博士学位论文[D]. 北京: 中国地质大学, 1992: 1-94.
- [16] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 陈殿照. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. 地质与勘探, 1992, 2: 15-18.
- [17] 陈毓川, 朱裕生, 王全明. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 250.
- [18] 陈毓川, 李兆鼎, 毋瑞身. 中国金矿床及其成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 465.

- [19] 孙丰月, 石准立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1995: 1-170.
- [20] 孙丰月, 于晓飞, 冯占山, 李延军. 山东招远灵山沟金矿床金矿化空间定位机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(6): 920-925.
- [21] 孙丰月, 丁正江, 刘殿浩, 张丕建, 于晓飞. 初论胶东福山北部地区斑岩成矿系统[J]. 黄金, 2011, 33(1): 14-19.
- [22] 丁正江, 孙丰月, 张渊, 李碧乐, 于晓飞. 胶东地区地幔捕虏体中黄铁矿含金性及其意义[J]. 黄金, 2005, 33(11): 1-5.
- [23] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 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, 2005, 21(5): 1317-1328.
- [24] 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, W. Siebel, 翟明国. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞 - 碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1281-1301.
- [25] 胡芳芳, 范宏瑞, 杨奎锋, 沈昆, 翟明国, 金成伟. 胶东牟平邓格庄金矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2155-2164.
- [26] 胡受奚, 赵懿英, 徐金方. 华北地台金成矿地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-220.
- [27] 李怀坤, 李惠民, 陆松年, 杨春亮. 山东招掖金矿带花岗岩类单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究及其意义[J]. 前寒武纪研究进展, 1998, 21: 11-18.
- [28] 李厚民, 毛景文, 沈远超, 刘铁兵, 张连昌. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 2003, 22: 72-77.
- [29] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 王为聪, 黄太岭, 杨承海. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-101.
- [30] 鲁安怀, 吕古贤, 王文正, 赖勇. 文登南部陆 - 陆碰撞与流体成矿[J]. 地球学报, 1998, 19: 187-194.
- [31] 刘连登, 陈国华, 刘青廷, 杨跃星, 吕永先, 宋存国. 烟台金矿床本质特征描述及其意义[J]. 矿床地质, 1998, 17(增): 295-298.
- [32] 闫峻, 陈江峰, 谢智, 高天山等. 鲁东晚白垩世玄武岩及其幔源包体的岩石学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005, 24(1): 101-104.
- [33] 杨立强, 邓军, 张静, 王庆飞, 高帮飞, 周应华, 郭春影, 江少卿. 山东招平断裂带大磨曲家金矿床流体包裹体初步研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(1): 153-160.
- [34] 涂光焯, 赵振华. 燕山期成矿作用的多样性[J]. 地质论评, 1983, 29(1): 57-65.
- [35] 陈衍景, F. Pirajno, 赖勇, 李超. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907-922.
- [36] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 85-98.
- [37] 杨金中, 李光明. 胶东中生代两期金矿化作用的对比研究及其意义[J]. 地质与勘探, 2001, 37(1): 33-37.
- [38] J. W. Mao, Y. T. Wang, Z. H. Zhang, et al. Geodynamic setting of Mesozoic large scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the high lypracise and accurate ages of metal deposits. Science in China Series D, 2003, 46: 838-851.
- [39] 李洪奎, 李逸凡, 耿科等. 山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 533-542.
- [40] 许志琴, 杨经绥, 李化启, 王瑞瑞, 蔡志慧等. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. 岩石学报, 2012, 28(6): 1697-1709.
- [41] 刘福来, 许志琴, 李彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 229-237.
- [42] 黄德志, 董树文, 叶朝暉. 大别与胶南造山带北缘地层对比意义[A]. 中国科协首届青年学术讨论会“兴皖之光”卫星会议论文集[C]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992: 52-58.
- [43] 李锦轶. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪 - 侏罗纪沉积环境的演变. 地质学报, 2001, 75(1): 25-34.
- [44] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 葛宁洁, 张宗清, 叶笑江. 大别山南麓含柯石英榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 科学通报, 1992, 7(4): 346-349.
- [45] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 王松山, 裘冀, 胡世玲, 桑海清. 中国中部蓝片岩的形成时代[J]. 地质科学, 1993, 28(1): 21-27.
- [46] 李曙光, 肖益林, 刘德良. 大别山石马地区石榴黑云片麻岩的 Sm-Nd, K-Ar 年龄及冷却速率[J]. 地质科学, 1995, 30(2): 174-181.
- [47] 王道轩, 刘因, 李双应, 金福全. 大别超高压变质岩折返至地表的时间下限: 大别山北麓晚侏罗世砾岩中发现榴辉岩砾岩. 科学通报, 2001, 46(14): 1216-1220.
- [48] 李洪奎, 杨永波, 杨锋杰. 山东沂沭断裂带构造演化与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 93-95.
- [49] 李洪奎, 耿科, 崔传源等. 山东省优势大地构造相划分初步方案[J]. 山东国土资源, 2010, 26(6): 1-6.
- [50] 宋明春, 赵庆龄. 山东日照官山闪长玢岩锆石 SHRIMP 年龄: 印支期岩浆热事件及其对超高压变质岩折返历史的限定[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1254-1258.
- [51] 张田, 张岳桥. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 323-336.
- [52] 李继亮. 碰撞造山带大地构造相[A]. 现代地质研究文集(上)[C]. 南京: 南京大学出版社, 1992: 9-21.
- [53] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 343-352.
- [54] 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光荣等. 中国东部中生代软流圈上涌造山作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 730-750.
- [55] 肖庆辉. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 19-22.
- [56] 张旗, 钱青, 王二七等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 2001, 36(2): 248-255.
- [57] 宋明春, 徐军祥, 王沛成. 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: 36-37.
- [58] 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋等. 胶西北留村金矿成矿流体特征与矿床成因[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 511-521.
- [59] 王义文, 朱奉三, 宫润潭等. 胶东金矿集中区金矿成矿年代学研究[J]. 黄金地质, 2002, 8(4): 48-55.
- [60] 陈衍景, 赖勇, 李超等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907-919.
- [61] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉等. 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, 2005, 21(5): 1317-1328.
- [62] 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 科学通报, 2000, 1.45(14): 1547-1553.
- [63] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳等. 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环境[J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 361-372.
- [64] 邹为雷, 沈远超, 张连昌等. 平度市大庄子金矿床控矿构造特征及金矿赋存规律初步探讨[J]. 地质与勘探, 2001, 37(1): 44-47.
- [65] 高太忠, 赵伦山, 杨敏芝. 山东牟汝金矿带成矿演化机理探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(2): 155-160.
- [66] 周遗军, 何国琦, 王金贤等. 胶东东部文登金矿床成矿地质特征[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 796-799.
- [67] 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碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 839-857.
- [68] 毛景文, 张作衡, 余金杰等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄推测得到启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4): 289-299.

- [69] 毛景文, 王忠良. 中国东部大部分成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 289-296.
- [70] 菅俊龙, 赵溥云, 郭虹等. 原生金矿成矿年龄测定研究[J]. 铀矿地质, 1997, 13(4): 232-239.
- [71] 林文蔚, 殷秀兰. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(13): 249-259.
- [72] 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(增刊): 11-20.
- [73] 杨金中, 沈远超, 刘铁兵. 大型 - 超大型金矿密集区的形成条件[J]. 地质与勘探, 2001, 37(1): 30-32.
- [74] 张连昌, 沈远超, 刘铁兵等. 山东胶莱盆地边缘金矿 Ar-Ar 法和 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(9): 727-734.
- [75] 孙丰月. 胶东地区区域构造演化及金矿成矿规律探讨, 博士学位论文[D]. 北京: 中国地质大学, 1992: 1-94.
- [76] 丁正江, 孙丰月, 刘建辉, 刘殿浩等. 胶东邢家山钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2721-2732.
- [77] 丁正江, 孙丰月, 刘殿浩, 张丕建, 杨国福, 孔彦. 烟台福山北部地区金及多金属矿成矿系列[J]. 山东国土资源, 2011, 27(1): 1-6.
- [78] 邓军, 翟裕生, 杨立强等. 构造演化与成矿系统动力学——以鲁东金矿集中区为例[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 315-320.
- [79] 吕古贤, 刘瑞珣, 王方正等. 关于成岩成矿深度构造校正测算的理论、方法和实例[J]. 地质科学, 2003, 38(4): 546-563.
- [80] 吕古贤, 刘瑞珣, 王方正等. 成岩成矿深度构造校正测算和实测[J]. 地质力学学报, 2000, 6(3): 50-62.
- [81] 吕古贤. 关于构造作用力影响静水压力问题[J]. 科学通报, 1995, 40(3): 286.
- [82] 吕古贤. 山东省玲珑金矿田成矿深度的研究与测算[J]. 科学通报, 1995, 40(15): 1398-1402.
- [83] 吕古贤. 山东玲珑金矿田和焦家金矿田成矿深度的测算与研究方法[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(4): 337-342.
- [84] H. R. Fan, M. G. Zhai, Y. H. Xie and J. H. Yang. Ore forming fluids associated with granite hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. Mineralium Deposit, 2009, 38: 739-750.
- [85] 洪大卫, 王涛, 童英. 中国花岗岩概述[J]. 地质论评, 2007, 53(增刊): 9-16.
- [86] 刘连登, 陈国华, 张辉煌, 张文钊, 颜秉蓬, 吴桂祥. 世界级胶东金矿集中区两类成矿地球动力学环境[J]. 矿床地质, 2002, 21(增): 36-39.
- [87] 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 洪路兵, 钟玉婷, 邱华宁, 徐义刚. 胶东青山群基性火山岩 Ar-Ar 年代学与地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1073-1091.
- [88] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲等. 中国东部岩石圈根/去根作用于大陆活化[J]. 现代地质, 1994, 8(3): 349-356.
- [89] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国等. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-381.
- [90] 邱连贵, 任风楼, 曹忠祥等. 鲁东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 117-123.