

Geochemical Characteristics and Metallogenic Significance of Carbonic Acid Dyke Houkuang Gold Deposit of Eastern Shandong Province

Hongkui Li^{1,2,3}, Binhengyang Ha⁴, Benhai Ha⁴, Yubo Zhang^{1,2,3}, Jimei Liu^{1,2,3}, Guodong Chen^{1,2,3}, Taitao Liang^{1,2,3}

¹Shandong Geological Sciences Institute, Jinan Shandong

²Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Natural Resources, Jinan Shandong

³Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan Shandong

⁴Shandong Jinshan Geological Exploration Limited Liability Company, Yantai Shandong

Email: lhklhk126@126.com

Received: Feb. 28th, 2020; accepted: Mar. 12th, 2020; published: Mar. 19th, 2020

Abstract

The gold deposits in Qixia gold deposit area are all located in the archaic crystalline basement rock series, quartz vein type gold deposit is the main type in the fracture zone, followed by altered rock type gold deposit, and rich in copper, lead and zinc, which are different from the typical jiaojia fracture zone altered rock type and linglong quartz vein type gold deposit. Qixia Houkuang gold deposit is a quartz vein type deposit of siderite bearing in the basement metamorphic rocks of Precambrian. Basis after this article through to ling in the area of stone the pulse chemical composition, trace elements and siderite ore mineral properties research showed that: vein basis after the chemical composition of SiO₂ content is between 24.85% - 85.41%, has the characteristics of high Fe, Mg, Fe₂O₃ + FeO 25.03% on average, MgO style an average of 4.74%, in comparison of chemical composition content percentage chart reflects the different mixing characteristics of vein rocks. Electron energy spectrum analysis showed that Mg in the chemical composition had a high atomic percentage and a weight percentage, with an average of 7.67 and 16.00, respectively. The mineral was considered to be magnesium siderite, with Mg²⁺ and Fe²⁺ solid solute-like co-substitution, which was the front-end combination of siderite—magnesium siderite—magnesite solid solution series. Basis after has the characteristics of the multi-stage mineralization, ling hardness of the pulse is the main ore type of the mine area, siderite and quartz vein of arteries and veins is a symbiotic relationship, form a sequence for vein quartz vein and the magnet to the vein of siderite, gold bearing sulfide quartz vein and quartz calcite vein, dike in quartz veins have a symbiotic relationship and carbonate precipitation for the enrichment of gold, Mg, Ca siderite can be used as a unique metallogenic stages. On the comprehensive analysis of the regional geology and ground data, dike carbonate and quartz vein should be derived from different material source area, carbonate vein from Jingshan, Fenzishan of calcium carbonate, magnesium silicate rock, under tec-

tono-magmatic thermal metamorphism or event is easy to form rich carbonate fluid, formed in the tectonic fracture space filling dike, carbonate and quartz vein is magmatic hydrothermal end product, after the formation of vein rocks are the result of area extending action.

Keywords

Vein Rock, Carbonate Rock Vein, Magnesium Siderite, Geochemistry, Tectonic Environment, Houkuang Gold Deposit, Qixia, Jiaodong Region

胶东后乔金矿碳酸岩脉地球化学特征及其成矿意义

李洪奎^{1,2,3}, 哈斌恒洋⁴, 哈本海⁴, 张玉波^{1,2,3}, 刘继梅^{1,2,3}, 陈国栋^{1,2,3}, 梁太涛^{1,2,3}

¹山东省地质科学研究所, 山东 济南

²自然资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

³山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

⁴山东金山地质勘探股份有限公司, 山东 烟台

Email: lhklhk126@126.com

收稿日期: 2020年2月28日; 录用日期: 2020年3月12日; 发布日期: 2020年3月19日

摘要

栖霞金矿集中区内的金矿床皆产于太古宙结晶基底岩系中, 以石英脉型金矿为主破碎带蚀变岩型金矿次之, 并富含铜、铅、锌等区别于典型的焦家式破碎带蚀变岩型和玲珑式石英脉型金矿。栖霞后乔金矿是产于前寒武纪基底变质岩系中的含菱铁矿石英脉型金矿床, 前人对碳酸岩脉与金矿形成的关系探讨研究的较少, 本文通过对后乔金矿区内菱铁石英脉矿石化学成分、微量元素及菱铁矿矿物属性的研究表明: 后乔金矿脉脉化学成分中SiO₂含量介于24.85%~85.41%之间, 具有高Fe、高Mg的特征, Fe₂O₃ + FeO平均25.03%, MgO平均4.74%, 在化学成分含量对比的百分图上反映出不同脉岩的混合特点。电子能谱分析表明化学成分中Mg具有较高的原子百分比和重量百分比, 平均值分别为7.67和16.00, 认为该矿物应为菱镁铁矿, 具有Mg²⁺与Fe²⁺固溶体类质同象相互取代, 属菱铁矿-菱镁铁矿-菱铁矿固溶体系列中的前端组合。后乔金矿具有多阶段成矿的特点, 菱铁石英脉是该矿区的主要矿石类型, 菱铁矿脉与石英脉呈共生关系, 形成顺序为石英脉→磁铁矿脉→菱铁矿脉→含金硫化物石英脉→石英方解石脉, 碳酸岩脉于石英脉具有共生关系并为金矿的富集提供了沉淀场所, Mg、Ca的菱铁矿可作为一个独特的成矿阶段。根据区域地质和脉岩资料综合分析, 碳酸岩脉与石英脉应来源于不同的物质源区, 碳酸岩脉来源于荆山群、粉子山群组成碳酸盐岩-钙镁硅酸岩有关, 在变质或构造-岩浆热事件作用下易形成富碳酸盐岩的流体, 在构造裂隙空间充填形成碳酸岩脉, 而石英脉则为岩浆期后热液的最终产物, 脉岩的形成是区域伸展作用的结果。

关键词

脉岩, 碳酸岩脉, 菱镁铁矿, 地球化学, 构造环境, 后乔金矿, 栖霞, 胶东地区

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胶东地区是我国著名的金矿集中区，以盛产焦家式和玲珑式金矿而蜚声国内外。按金矿分布的密集和集中度划分为招远-莱州、蓬莱-栖霞和牟平-乳山三个金矿矿集区，金矿成因与中生代花岗岩关系密切[1]-[5]。但对于蓬莱-栖霞金矿矿集区尤其是栖霞地区的金矿床，因产于太古宙结晶基底岩系中，前人存有认识的不同。山东经典性的金矿论著中多将其划为变质热液金矿的范畴[6] [7]，各大学和科研单位的研究者则多将其归入岩浆热液序列[8]-[12]，并认为是早白垩纪成矿。李洪奎认为是在同一的大地构造背景环境下、由同一成矿作用形成的具有成因相同、时代相近、在不同构造部位、不同围岩条件形成的一系列金矿自然类型组合，涵盖了破碎带蚀变岩型、石英脉型、富硫化物石英脉型、层间滑脱拆离带型和构造角砾岩型等胶东地区所有金矿成因类型[13] [14] [15]。栖霞地区金矿床均发育于古老变质岩中，以石英脉型金矿为主破碎带蚀变岩型金矿次之，并富含铜、铅、锌等区别于典型的焦家式破碎带蚀变岩型和玲珑式石英脉型金矿[16]-[20]。近年来，地质学者从更宏观和微观的层面来探讨胶东金矿的成矿地质环境和物质来源，一是将中国东部中生代大陆岩石圈构造格架转换、强烈的岩石圈减薄作用和华北克拉通破坏与再造相联系[21]-[26]，二是对成矿矿物进行微区精细化研究，进一步探讨胶东金矿的形成过程[27] [28] [29]。一些学者注意到金矿石中碳酸盐矿物铍-钼同位素地球化学资料与太古宙基底同位素组成的联系及深源岩体(脉体)与金矿的形成存在的幔源信息，试图合理的解释区内金矿的形成过程和金质来源[30]-[36]。正是基于这些原因，本文以山东栖霞市后乔金矿碳酸岩脉为研究对象，进一步研究脉岩的岩相学、岩石化学、微量元素等地球化学特征，追溯后乔金矿碳酸岩脉的原岩性质、形成环境及其所经历的地质作用过程，最终对碳酸岩脉与金矿形成的关系进行探讨，研究其对金矿成矿的指示意义。

2. 区域与矿床地质

2.1. 区域地质背景

胶东地跨华北板块和苏鲁造山带二个 I 级大地构造单元，进一步分为胶北隆起、威海隆起和胶莱盆地，胶北隆起是胶东金矿产出的主要构造单元[1] [37] [38] [39] [40]。胶北隆起内前寒武纪基底主要包括中-新太古代壳岩(唐家庄岩群和胶东岩群)、基性-超基性岩浆岩、TTG 质片麻岩和古元古代荆山群、粉子山群、芝罘群及新元古代蓬莱群，构成了以太古宙为核以元古宙为环带的核幔构造格架，在断陷盆地内分布有白垩纪莱阳群、青山群和王氏群及新生界。中生代花岗岩广泛发育，包括晚三叠世正长岩系列、中侏罗世花岗岩系列、晚侏罗世玲珑二长花岗岩系列、早白垩世郭家岭花岗闪长岩、伟德山花岗闪长岩-二长花岗岩和崂山晶洞碱性正长岩系列等，煌斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩和伟晶岩等中生代脉岩十分发育。北东、北北东向断裂是该区的醒目特征，北西向断裂亦较发育。

2.2. 矿区地质特征

矿区位于栖霞市东北 4 km 的后乔村一带，区内广泛分布新太古代回龙乔条带状细粒含角闪黑云英云闪长质片麻岩、新庄中细粒含角闪黑云英云闪长质片麻岩，在英云闪长质片麻岩中有胶东岩群细粒斜角闪岩、黑云变粒岩包体，矿区北部出露有古元古代粉子山群碳酸盐岩变质岩系，在沟谷中有第四系冲洪积层分布，构造以北北东向断裂为主，脉岩有闪长岩脉、闪长玢岩脉、闪斜煌斑岩脉、辉绿岩脉、花岗细晶岩脉和石英脉等，在石英脉中普遍具有金矿化显示(图 1，图 2)。

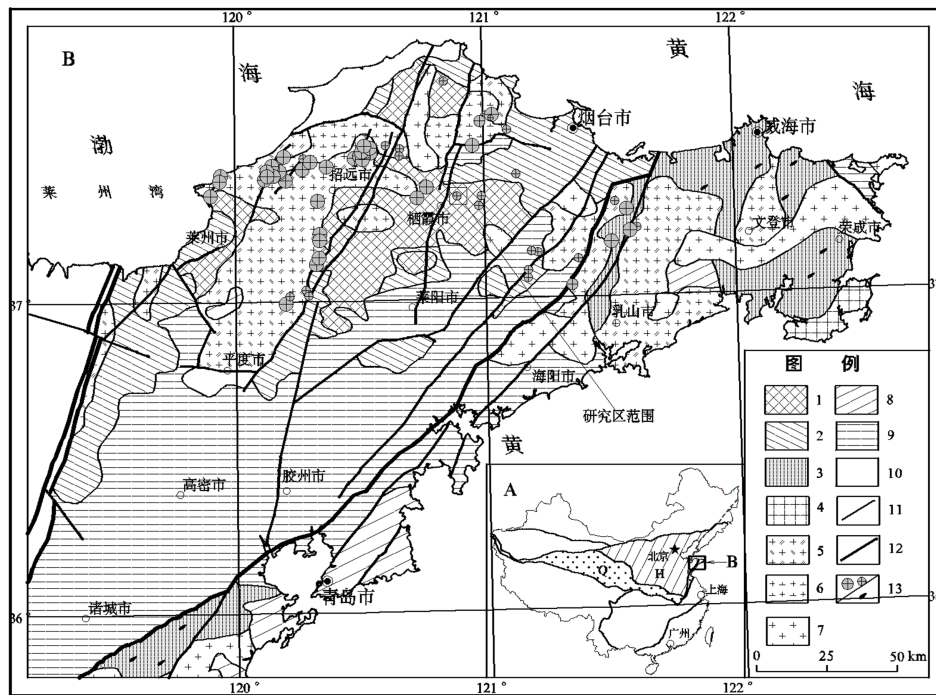


Figure 1. Regional Geological and mineral map of Houkuang gold deposit area in Qixia. (A) H—North China plate; Q—Qinqikun Orogenic system; (B) 1—Archean TTG and supracrustal rocks; 2—Proterozoic supracrustal rocks; 3—Proterozoic syn-collision igneous complex; 4—Triassic igneous complex; 5—Jurassic Linglong orogenic intrusions; 6—Early Cretaceous Guojialing orogenic intrusions; 7—Early Cretaceous Weideshan orogenic intrusions; 8—Early Cretaceous Laoshan orogenic intrusions; 9—Cretaceous sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 10—Cenozoic sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 11—main geological boundaries; 12—main faults; 13—Medium and large gold deposit/eclogite
图 1. 胶东后乔金矿区区域地质矿产略图。(A) H—华北板块; Q—秦祁昆造山系; (B) 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—三叠纪岩浆杂岩; 5—侏罗纪玲珑侵入岩; 6—早白垩世郭家岭侵入岩; 7—早白垩世伟德山侵入岩; 8—早白垩世崂山侵入岩; 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—大中型金矿/榴辉岩

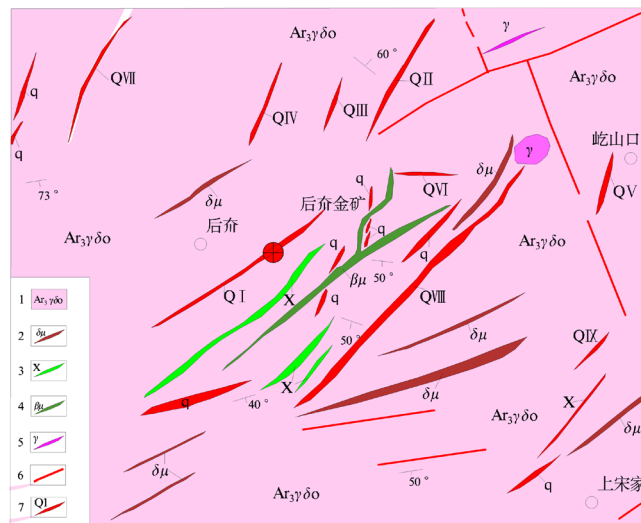


Figure 2. Geological outline of Houkuang gold deposit. 1—Neocaeen bryodiorite; 2—diorite porphyrite vein; 3—lamprophyre vein; 4—diabase vein; 5—granitic vein; 6—fracture; 7—gold-bearing quartz vein and serial number
图 2. 后乔金矿区地质略图。1—新太古代英云闪长岩; 2—闪长玢岩脉; 3—煌斑岩脉; 4—辉绿岩脉; 5—花岗细晶岩脉; 6—断裂; 7—含金石英脉及编号

矿区内发现大大小小的石英脉十几条,普遍具有金矿化显示,具有一定规模的编号石英脉有8条(图2),共圈定有9个矿体,编号为I-1、I-2、I-3、I-4、II-1、V-1、VIII-1、VIII-2及VIII-3号矿体,其中I-4、VIII-2、VIII-3号矿体为主矿体,赋存于黄铁矿菱铁石英脉中,各矿体主要特征见表1。

Table 1. Geological features of the ore bodies of Houkuang gold deposit

表 1. 后乔金矿床矿体地质特征一览表

矿体编号	分布空间		矿体形态	产状		规模		平均金品位($\times 10^{-6}$)	平均厚度(m)
	勘查线	标高(m)		倾向($^{\circ}$)	倾角($^{\circ}$)	长度(m)	斜深(m)		
I-1	3~4	52~188	透镜状	南东	38	300	250	15.97	0.45
I-2	3~4	116~182	透镜状	南东	35	210	45	34.68	0.40
I-3	3~5	75~82	脉状	南东	35	22	21	6.30	0.76
I-4	3~4	22~295	脉状	南东	20~60	260	584	5.40	0.74
II-1	7~10	5~150	脉状	南东	45~55	440	280	5.61	0.85
V-1	16~31	120~236	脉状	南东	45~58	300	450	2.51	1.03
VIII-1	85~86	83~125	脉状	南东	35	300	180	20.64	0.92
VIII-2	85~86	18~444	脉状	南东	22~45	500	526	4.61	0.98
VIII-3	95~109	254~190	脉状	南东	35~47	485	500	2.51	1.32

矿体为含金石英脉,与围岩界线清楚,石英脉的构造特征主要表现为纵向裂隙发育,但在大部分地区裂隙都不穿过围岩,并且在裂隙中硫化物分布较少,硫化物主要沿石英脉走向分布。

综合矿区石英脉的特征以及部分石英脉的穿切关系,可以大致将石英脉形成期次分为成矿前、成矿期和成矿期后。并划分为石英-菱铁矿阶段、黄铁矿-铁矿物阶段和多金属硫化物阶段¹。

在矿床地质特征上,该矿最大的特点是碳酸岩矿物与石英脉共生或相伴产出,并具有呈矿显示,这是与栖霞地区其它金矿在矿石类型上的最大区别,前人将这些碳酸岩矿物鉴定为菱铁矿、白云石矿物,但未对其进行化学成分分析。

3. 碳酸盐脉特征

3.1. 碳酸盐脉地质特征

后乔金矿区矿石主要自然类型有二类,一是含硫化物石英脉,二是含硫化物菱铁石英脉,尤其是菱铁石英脉是该矿区的主要矿石类型,菱铁矿脉与石英脉呈共生关系。

如表1, I号脉是区内最大的一条菱铁石英脉,走向长大于700 m,倾斜延深大于620 m,宽约0.2~1.3 m,平均0.43 m,总体产状走向50°,南东倾,倾角40°左右。该脉内圈定4个矿体(表1)。在I号脉-25 m中段西巷,矿脉被闪长玢岩脉切穿,矿脉中含菱铁矿和硫化物,并可见镜铁矿,矿脉顶底板为硅化的片麻岩,矿脉产状 $134^{\circ} \angle 34^{\circ}$ 。在-25 m中段东巷,脉体中暗色岩含量较多,约占30%~40%,菱铁矿呈淡黄色,含量约占15%,石英脉中含少量的硫化物,产状 $156^{\circ} \angle 41^{\circ}$ 。

VIII号脉是区内另一条菱铁石英脉,走向长大于600 m,倾斜延深大于550 m,宽约0.15~1.90 m,平均0.62 m,总体产状走向45°,南东倾,倾角35°左右,该脉内圈定3个矿体(表1)。VIII号脉-50 m中段西巷中的矿脉中含大量的菱铁矿,菱铁矿为棕褐色,呈条带状沿石英脉走向分布,菱铁矿约占30%,

¹ 中国人民武装警察部队黄金第十支队。山东省栖霞县后乔金矿勘探地质报告, 1990年。

另可见少量暗色岩分布在石英脉中, 脉体产状 $155^{\circ} \angle 28^{\circ}$ 。顶板为蚀变硅化的闪长玢岩, 底板为斜长角闪岩。VIII 号脉-50 m 中段西巷斜井主要含有石英、菱铁矿、暗色岩和硫化物的脉体, 矿脉产状 $143^{\circ} \angle 44^{\circ}$, 菱铁矿呈条带状分布于石英脉中, 并可见暗色岩穿切菱铁矿, 硫化物呈零星状分布于石英脉中。顶板为硅化岩, 底板为硅化的角闪石岩。在 VIII 号脉 143 m 中段北东巷石英矿脉宽 0.8 m, 矿脉主要由石英、菱铁矿、方铅矿和硫化物组成, 硫化物呈条带状分布在石英脉中, 菱铁矿、方铅矿与硫化物相伴产出, 菱铁矿约占 13%, 方铅矿占 10%, 石英脉产状 $125^{\circ} \angle 20^{\circ}$ 。

3.2. 碳酸岩脉地球化学特征

本文所研究的样品采集于后乔金矿 I 号和 V 号矿脉, VIII 号矿脉采集-25 m 中段的黄铁矿菱铁石英脉中, VIII 号矿脉采集-50 m 中段的菱铁石英脉中, 矿体围岩为英云闪长岩质片麻岩, 与矿体界线清楚。

矿物化学成份分析在中国冶金地质总局山东局测试中心进行, 控制编号: HF2018-553, 分析依据为 DZ/T0279-2016 区域地球化学化学样品分析方法之标准。主元素采用全谱直读等离子体发射光谱仪, 仪器型号为 IRISIntrepid II 进行分析。矿脉的岩石化学成分分析结果见表 2。

Table 2. Chemical composition of vein and vein rock of Houkuang gold deposit

表 2. 后乔金矿矿脉与脉岩岩石化学成分表

样品编号	H-1	KQ5	KQ1	KQ2	KQ3	KQ4	YQ1	YQ2	YQ3	YQ4	
采集地	I-1	I-1	VIII-1	VIII-1	VIII-1	VIII-1	地表	地表	地表	地表	
岩性	含黄铁矿 黄铜矿石 英脉	含黄铁矿 黄铜矿石 英脉	含黄铁矿 黄铜矿石 英脉	含黄铁矿 菱铁石英 英脉	含黄铁矿 菱铁石英 英脉	含菱铁矿 石英脉	含菱铁矿 石英脉	闪长玢 岩脉	闪长玢 岩脉	煌斑岩 脉	煌斑岩 脉
成分											
SiO ₂	85.41	61.97	66.32	30.12	63.62	24.85	66.92	68.64	53.2	59.44	
Al ₂ O ₃	4.71	2.16	1.04	0.29	0.3	1.85	13.44	13.23	12.98	13.29	
TiO ₂	0.13	0.15	0.01	0.01	0	0.18	0.4	0.26	0.8	0.65	
P ₂ O ₅	0.13	0.05	0.03	0.03	0.03	0.05	0.13	0.08	0.14	0.16	
Fe ₂ O ₃	3.44	17.84	18.63	5.37	3.92	1.77	0.58	0.72	3.87	1.37	
FeO	1.5	7.19	2.69	32.69	17.24	37.9	3.05	2.34	9.34	5.03	
CaO	0.06	0	0.17	1.13	0.06	0.23	3.22	3.79	8.71	5.66	
MgO	0	0.22	0.04	5.47	2.47	6.28	2.11	1.53	6.41	7.49	
K ₂ O	1.41	0.38	0.24	0.03	0.01	0.14	2.88	2.99	0.66	2.41	
Na ₂ O	0.18	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	4.05	4.2	2.25	3.47	
H ₂ O ⁺		1.49	0.4	0.02	0.03	0.13	1.44	1.3	1.39	1.11	
MnO	0.16	0.35	0.02	0.8	1.3	2.5	0.05	0.03	0.2	0.09	
Au	19.08	65.12	75.42	1.35	16.58	1.09	0.08	0.11			
烧失量%		8.95	8.84	22.53	12.1	23.79					

注: Au 为 $n \times 10^{-6}$, 其它化学成分单位为%。

从表 2 中可以看出: 所研究的岩石样品的 SiO₂ 含量介于 24.85%~85.41% 之间, 闪长玢岩脉与煌斑岩脉具有同类型岩石的化学成分, 但矿脉的化学成分变化较多, 受脉体与矿物成分所决定。含黄铁矿黄铜矿石英脉除 H-1 是石英脉外, 其它样品中均含有较高的 Fe 的成分, Fe₂O₃ + FeO 的变化范围为 4.94%~39.47%, 平均 25.03%, 说明是非纯性的石英脉。同时 KQ2、KQ3 和 KQ4 中含有较高的 Mg 的成

分, MgO 的变化范围为 2.47%~6.28%, 平均 4.74%, 在化学成分含量对比的百分图上(图 3), 也反映出成分的变化与不同脉岩的混合有关。

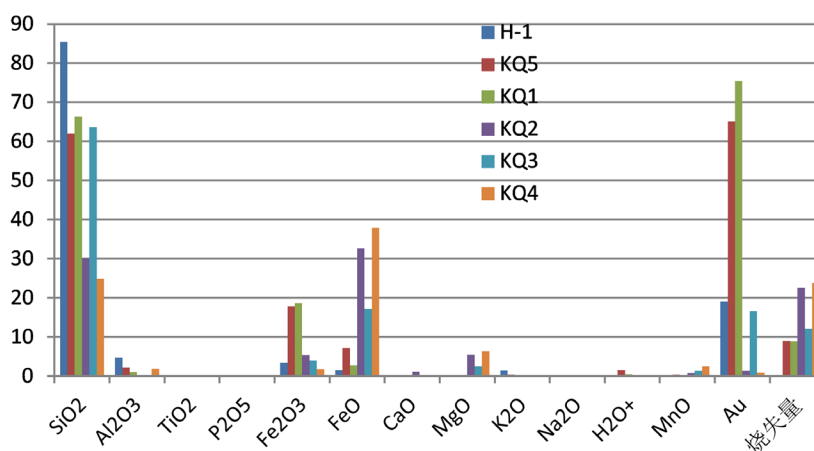


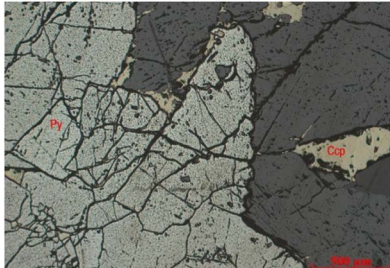
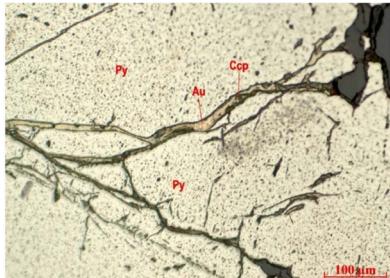
Figure 3. Changes of chemical composition in the veins of Houkuang gold deposit (Note: the serial number is the same as in Table 2)

图 3. 后乔金矿脉化学成分含量变化图(注: 序号与表 2 同)

区内碳酸岩脉化学成分 SiO_2 含量介于 24.85%~30.12%, Fe_2O_3 含量 1.77%~5.37%, FeO 含量 32.69%~37.90%, CO_2 含量 22.53%~23.79%, MgO 为 5.47%~6.28%, 说明为富镁的碳酸岩脉, 这与地质事实相吻合。

Table 3. Results of ore photoplate identification of Houkuang gold deposit

表 3. 后乔金矿床矿石光片鉴定结果表

样号	主要特征	显微反射光照片
送样编号: ZJC001 检测编号: 19058-1 名称: 黄铁矿化菱铁脉 石英	光片中金属矿物主要为黄铁矿, 其次为黄铜矿, 少量闪锌矿、方铅矿、蓝辉铜矿等, 可见金矿物。具他形 - 半自形粒状结构、碎裂结构, 充填结构, 团块状构造。黄铁矿含量约 40%±, 反射色为浅黄白色, 呈他形 - 半自形粒状, 多组成团块状集合体, 颗粒大小不等, 小者粒度一般 0.03~0.1 mm, 大者粒度一般为 0.1~0.5 mm, 有的大于 0.5 mm, 局部有碎裂现象, 沿裂隙及晶隙有黄铜矿充填。黄铜矿约 3%±, 反射色为铜黄色, 多呈他形充填状, 有的分布于黄铁矿晶隙及裂隙中, 有的分布于非金属矿物菱铁矿粒间。闪锌矿: 较少见, 反射色为灰色, 他形微粒状, 多与黄铜矿连生分布。方铅矿: 较少见, 反射色为白色, 他形微粒状, 多与黄铜矿连生分布, 局部见其分布于非金属矿物粒间。蓝辉铜矿: 局部可见, 反射色为浅蓝色, 呈充填状分布于黄铁矿裂隙中。金矿物: 光片中仅见几粒, 反射色呈亮黄白色, 呈角粒状、长角粒状或片状, 分布于黄铁矿晶隙中, 或与黄铜矿连生分布于黄铁矿裂隙中, 颗粒长轴大小为 16~72 μm 。	 

矿脉中含黄铁矿黄铜矿石英脉普遍具有较高的含矿性, 三个样品中 Au 品位介于 19.08×10^{-6} ~ 75.42×10^{-6} , 平均 53.21×10^{-6} ; 而三个含菱铁石英脉样品中 Au 品位介于 1.09×10^{-6} ~ 16.58×10^{-6} , 平均 6.34×10^{-6} 。

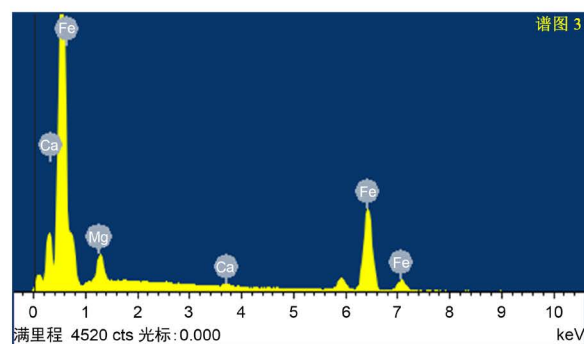
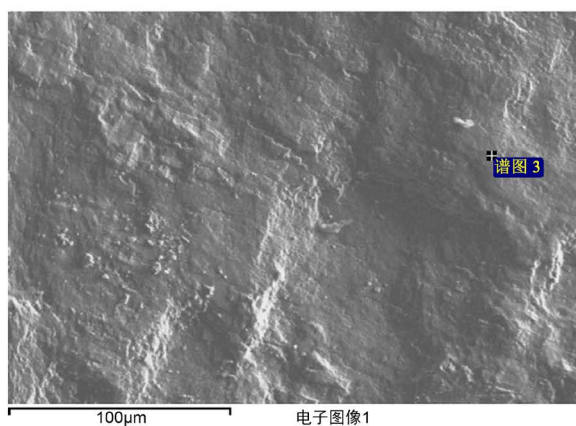
10^{-6} ，说明无论是石英脉还是菱铁矿脉均是金的寄驻场所而非金质的源区，这从光片鉴定中也得到了进一步证实(见表 3)，自然金多呈角粒状、长角粒状或片状，分布于黄铁矿晶隙中或与黄铜矿连生分布于黄铁矿裂隙中，说明金是黄铁矿后的产物而与黄铜矿共生，即金与黄铜矿具有成生关系，黄铁矿是其寄驻场所。

通过对矿脉中的菱铁矿进行 X 射线光电子能谱分析，以进一步确定其成分后进行矿物定名。能谱分析在自然资源部济南矿产资源监督检测中心进行，采用电感耦合等离子体质谱仪，仪器型号为 XSERIES2 分析。菱铁矿电子探针分析能谱见表 4，其图谱见图 4 所示。

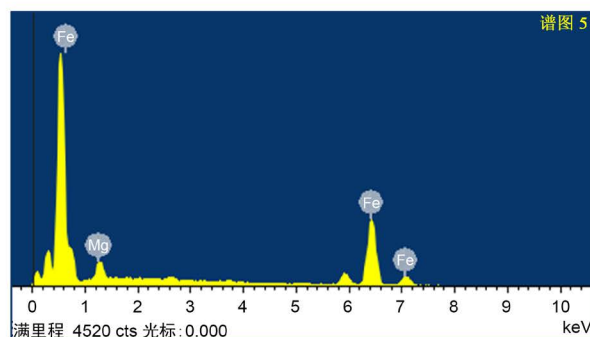
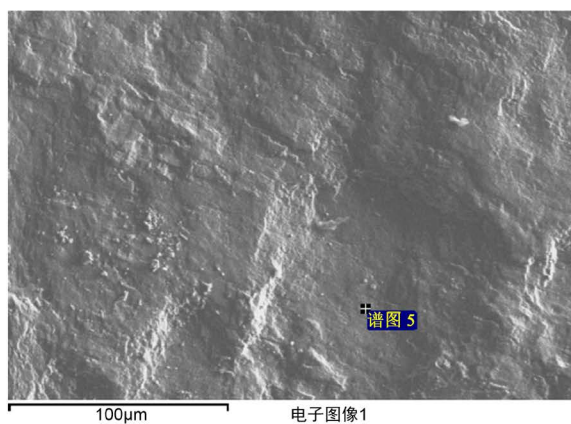
Table 4. Energy spectrum analysis of siderite in the vein of Houkuang gold deposit

表 4. 后夼金矿矿脉中菱铁矿能谱分析成分表

样号	HK01		HK02		HK03	
	重量百分比	原子百分比	重量百分比	原子百分比	重量百分比	原子百分比
Mg	8.21	17.00	7.22	15.17	7.57	15.83
Ca	0.81	1.02	0	0	0	0
Fe	90.97	81.98	92.78	84.83	92.43	84.17
总量	100	100	100	100	100	100



HK01



HK02

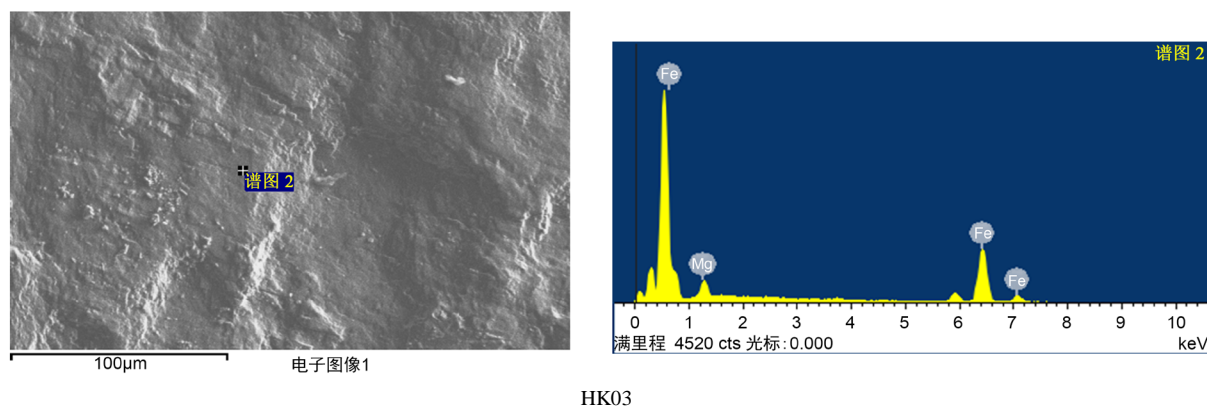


Figure 4. Spectral analysis of siderite in the vein of Houkuang gold deposit
图 4. 后乔金矿矿脉中菱铁矿能谱分析谱系图

菱铁矿是一种分布比较广泛的矿物，它的成分是碳酸亚铁，属于方解石族的矿物，族中的矿物彼此异质同型，具许多相似的物理性质，如属于六方晶系、晶型多为菱面体、具有双折射现象、有三组发育优良的菱面体解理等[41] [42]。矿物组成中的阳离子之间，彼此可以完全地相互取代，形成一系列的固溶液，因此矿物之间的分辨可能变得较为困难[43]。菱铁矿化学成份为 FeCO_3 ，理论值中 FeO 占 62.01%， CO_2 占 37.99%，常含 Mg 和 Mn ，属三方晶系，常见菱面体，晶面常弯曲，其集合体成粗粒状至细粒状。本次研究中样品菱铁矿呈淡黄色，具菱面体晶形，属菱铁矿类。从化学成分中 Mg 具有较高的原子百分比和重量百分比，平均值分别为 7.67 和 16.00 来分析(表 4)，该矿物应为镁菱铁矿，具有 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 固溶体类质同象相互取代，属菱铁矿 - 镁菱铁矿 - 菱镁矿固溶体系列中的前端组合。

4. 问题讨论

4.1. 脉岩的构造环境

栖霞地区是胶东基底岩系集中分布区，广泛出露胶东岩群、新太古代 TTG 系列灰色片麻岩及古元古代荆山群、粉子山群等，变质变形强烈，具麻粒岩相到低角闪岩相变质。基底岩系中的脉岩有二大类，一是古老的变质脉岩，二是中生代沿裂隙侵入的煌斑岩、辉绿玢岩、闪长玢岩、花岗斑岩、石英脉和碳酸盐岩脉等，石英脉多含有金，代表古老基底内的一种石英脉型金矿，但碳酸盐岩脉含金是个特例，只是在栖霞地区特有的一种金矿化形式。通常认为脉岩是岩浆作用过程中一定阶段的产物，一般形成于大规模岩石圈伸展构造背景下[44] [45]。脉岩既可以代表源区物质，又可以反映源区构造应力场，同时也是有效的找矿标志[33]。对栖霞地区结晶基底岩系中分布的超基性 - 基性到中酸性以及碱性脉岩的分析研究证实，古老的脉岩均已发生区域变质作用，具有与基底岩系相协调的变质面理构造。而中生代脉岩具有明显受构造裂隙控制、斜穿区域片麻理、岩性特征与基底岩系差异明显等特点，脉岩的形成先后是受不同构造期的制约，野外不同的穿插时序是判断脉岩先后的主要依据。不同性质和不同岩性的脉岩具有不同的源区，但脉岩的最终定位代表了区域地壳伸展机制的作用[33] [46] [47]。

4.2. 碳酸岩脉与金矿关系

胶东地区脉岩对金矿形成的作用已引起众多地质学者的重视[48]-[53]，对栖霞地区金矿床中脉岩特征亦有论述[54]-[60]，但碳酸岩脉与金矿关系的研究涉猎较少，包括碳酸岩脉的物质来源与成因。对于碳酸岩脉的来源，从区域上分析，笔者认为可能与荆山群、粉子山群这套由大理岩、片麻岩、片岩及斜长角闪岩组成碳酸盐岩 - 钙镁硅酸岩有关，该套岩系在后乔金矿区周围广泛发育，在变质或构造 - 岩浆热事

件作用下易形成富碳酸盐岩的流体,在构造裂隙空间充填形成碳酸岩脉,而石英脉则为岩浆期后热液的最最终产物。就后金矿区而言,石英脉与菱铁矿脉相伴而生,具有空位互补关系或缺位互补关系,说明二者在形成时间上具有相近性。耿瑞根据矿脉相互切割关系和手标本观测,将后金矿成矿阶段划分为石英脉和少量黄铁矿贯入、磁铁矿脉和少量黄铁矿贯入、菱铁矿脉和含少量金及多金属硫化物贯入、镜铁矿贯入、含金黄铁矿脉、含金黄铜矿等硫化物脉和石英碳酸盐七个阶段,四、五阶段为碳酸岩脉形成阶段,形成石英脉→磁铁矿脉→菱铁矿脉→基性岩脉→含金硫化物脉,说明碳酸岩脉为金矿的富集提供了沉淀场所[61]。但有一个不容忽视的地质事实是:采集较纯的菱铁矿矿石样品,肉眼没见有任何硫化物,但经化学成分测定后却出现一定量 Au 及多金属硫化物矿化。Au 含量最高达 2.83×10^{-6} , 平均值为 0.66×10^{-6} ; Ag 含量最高达 48.53×10^{-6} , 平均值为 7.46×10^{-6} ; Cu 含量最高达 1.37%, 平均值为 0.13%; Zn 含量最高达 0.018%, 平均值为 0.011%。这说明含 Mg、Ca 菱铁矿的流体形成时,含 Au 及多金属硫化物一起贯入成矿。确切地说含 Mg、Ca 的菱铁矿可视为一个成矿阶段,这与光片特征提示的地质事实具有相似性,金总是充填在黄铁矿裂纹中,与黄铜矿具有共生关系。

栖霞地区脉岩是产于基底结晶岩系中的一套脉岩组合,由超基性-基性-中性-酸性-碳酸盐岩构成。脉岩的形成是在构造-岩浆热事件之后的一次强烈的伸展作用的体现,而金矿形成大都是在伸展构造环境中产生的[1]-[5] [44] [45] [46] [47],这也解释了脉岩与金矿形成之间具有一定的内在成因联系。但金矿的形成毕竟是在长期地质作用过程中的最终产物,它是地质作用的一个特殊组成部分,脉岩对金矿形成的贡献度也需要进一步详细研究。

5. 结论

(1) 栖霞后金矿是产于前寒武纪基底变质岩系中的含菱铁矿石英脉型金矿床,菱铁矿石英脉是该矿区的主要矿石类型,菱铁矿脉与石英脉呈共生关系,菱铁矿石英脉中 Au 平均 6.34×10^{-6} 。

(2) 后金矿脉岩化学成分中 SiO_2 含量介于 24.85%~85.41%之间,具有高 Fe、高 Mg 的特征, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 平均 25.03%, MgO 平均 4.74%,在化学成分含量对比的百分图上反映出不同脉岩的混合特点。电子能谱分析表明化学成分中 Mg 具有较高的原子百分比和重量百分比,平均值分别为 7.67 和 16.00,认为该矿物应为菱铁矿,具有 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 固溶体类质同象相互取代,属菱铁矿-菱镁矿固溶体系列中的前端组合。

(3) 后金矿具有多阶段成矿的特点,形成顺序为石英脉→磁铁矿脉→菱铁矿脉→含金硫化物石英脉→石英方解石脉,碳酸岩脉于石英脉具有共生关系并为金矿的富集提供了沉淀场所, Mg、Ca 的菱铁矿可作为一个独特的成矿阶段。

(4) 根据区域地质和脉岩资料综合分析,碳酸岩脉与石英脉应来源于不同的物质源区,碳酸岩脉来源于荆山群、粉子山群组成碳酸盐岩-钙镁硅酸岩有关,在变质或构造-岩浆热事件作用下易形成富碳酸盐岩的流体,在构造裂隙空间充填形成碳酸岩脉,而石英脉则为岩浆期后热液的最最终产物,脉岩的形成是区域伸展作用的结果。

致 谢

野外工作期间,得到了栖霞市金兴矿业有限公司山城金矿林晓辉科长在资料和取样方面的帮助,地球科学前沿编辑部和审稿人提出了建设性修改建议,在此一并致以特别感谢!

基金项目

本文为国家自然科学基金项目山东招远-平度断裂带夏甸金矿深部成矿特征研究(41572068)、国家公益性专项胶东招平断裂带深部特征与金矿成矿过程研究(201511029)、国家重点研发计划项目胶西北地区深部

构造格架研究 - 依托于深部反射地震(2016YFC0600107-5)、招平断裂带中段深部金矿成矿理论找矿方法与成矿预测(2017CXGC1605)和山东省泰山学者建设工程专项联合资助。

参考文献

- [1] 李洪奎, 耿科, 嵇传源, 梁太涛. 胶东金矿构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1-5, s338-383.
- [2] 宋明春, 崔书学, 伊丕厚, 等. 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: 36-56.
- [3] 李逸凡, 李洪奎, 陈国栋, 等. 论山东胶东金矿形成的挤压 - 伸展构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(6): 1117-1132.
- [4] 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: 102-186.
- [5] 李洪奎, 嵇传源, 耿科, 等. 胶东金矿成矿构造背景探讨[J]. 山东国土资源, 2012, 28(1): 5-13.
- [6] 刘玉强, 李洪喜, 黄太岭, 等. 山东省金铁煤矿床成矿系列及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 52-97.
- [7] 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 等. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2006: 225-261.
- [8] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 391-425.
- [9] 陈光远, 孙岱生, 邵伟. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆科技出版社, 1989: 59-126.
- [10] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 447-467.
- [11] 邓军, 杨立强, 王庆飞, 等. 胶东矿集区金成矿系统组成与演化概论[J]. 矿床地质, 2006(S1): 67-70.
- [12] 吕古贤, 郭涛. 胶东矿集区构造控岩控矿地质特征研究[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 471-478.
- [13] 李洪奎, 于学峰, 嵇传源, 等. 山东胶东金矿成矿理论体系[J]. 山东国土资源, 2017, 33(7): 1-6.
- [14] 李洪奎, 嵇传源, 梁太涛, 等. 山东胶东金矿理论体系研究进展[J]. 矿床地质, 2016, 35 增刊(1): 73-74.
- [15] 李洪奎, 时文革, 李逸凡, 等. 山东胶东地区金矿成矿时代研究[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(3): 1-9.
- [16] 张蕴璞. 胶东焦家式金矿地质特征及找矿模式. 国际金矿地质与勘探学术会议文集[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989: 358-362.
- [17] 张蕴璞, 吕以发, 赵惠傅, 等. 山东掖县北部覆盖地区焦家式金矿成矿地质条件及成矿方向. 中国金矿主要类型区域成矿条件文集[M]. 北京: 地质出版社, 1988(5): 46-84.
- [18] 李宏骥. 浅谈焦家式金矿及其找矿方法. 国际金矿地质与勘探学术会议论文集[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989: 591-597.
- [19] 李宏骥. 胶东地区内生金矿的矿床类型及其构造控制与分布规律. 山东地质矿产研究文集[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 63-71.
- [20] 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.
- [21] 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 505-513.
- [22] 翟明国, 樊祺诚. 华北克拉通中生代下地壳置: 非造山过程的壳幔交换[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 1-8.
- [23] Goldfarb, R.J. and Santosh, M. (2013) The Dilemma of the Jiaodong Gold Deposits: Are They Unique. *Geoscience Frontiers*, 5, 139-153. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.11.001>
- [24] 杜杨松, 曹毅, 袁万明, 等. 安徽沿江地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动和壳幔相互作用——来自火山 - 侵入杂岩和岩石包体的证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1294-1302.
- [25] 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 692-700.
- [26] 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭 - 燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 56-63.
- [27] 张瑞忠, 王中亮, 王偲瑞, 等. 胶西北大尹格金矿床成矿机理: 载金黄铁矿标型及硫同位素地球化学约束[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2451-2464.
- [28] 张龙, 李胜荣, 朱随洲, 等. 胶东望儿山金矿床石英热释光和晶胞参数特征及其找矿意义[J]. 现代地质, 2016, 30(4): 792-801.

- [29] 张凯. 胶东上庄金矿地质特征与黄铁矿微区成分结构研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015: 39-60.
- [30] Zhou, T., Goldfarb, R.J. and Neil Phillips, G. (2002) Tectonics and Distribution of Gold Deposits in China—An Overview. *Mineralium Deposita*, **37**, 249-282. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0237-4>
- [31] Richards, J.P. (1990) Petrology and Geochemistry of Alkalic Intrusives at the Porgera Gold Deposit, Papua New Guinea. *Journal of Geochemical Exploration*, **35**, 141-200. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90038-C](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90038-C)
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 蒋少涌, 戴宝章, 姜耀辉, 等. 胶东和小秦岭: 两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2727-2738.
- [35] 侯明兰, 蒋少涌, 沈昆, 等. 胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2241-2256.
- [36] 李洪奎, 李逸凡, 耿科, 等. 山东胶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.
- [37] 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: 281-314.
- [38] 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 等. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 163-179.
- [39] 李洪奎, 耿科, 赧传源, 等. 山东胶东金矿四位一体成矿地质背景初探[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(2): 266-275.
- [40] 李洪奎, 耿科, 赧传源, 等. 山东胶东碰撞造山型金矿形成的动力学背景[J]. 地球科学与环境, 2010, 32(增刊): 13-14.
- [41] 王昆, 截惠新. 菱铁矿选矿现状[J]. 矿产综合利用, 2012(1): 1-3.
- [42] 罗立群. 菱铁矿的选矿开发研究与应用前景[J]. 金属矿山, 2006, 355(1): 68-72.
- [43] 李艳军, 杨光, 赵瑞超, 等. 含菱铁矿难选铁矿石的特点及选矿技术研究趋势[J]. 矿产综合利用, 2015(2): 12-18.
- [44] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾 - 钾质脉岩地球化学与俯冲 - 壳幔作用研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 401-412.
- [45] Halls, H.C. (1982) The Importance and Potential of Mafic Dyke Swarms in Studies of Geodynamic Processes. *Geoscience Canada*, **9**, 145-154.
- [46] 邓军, 杨立强, 方云, 等. 胶东地区壳 - 幔作用与金成矿效应[J]. 地质科学, 2000, 35(1): 60-70.
- [47] 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳 - 氧和锶 - 钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(10): 921-930.
- [48] 谭俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示[J]. 地球科学, 2008, 38(8): 913-929.
- [49] 赫英. 地幔深部过程与金富集成矿研究取得重要进展[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 136.
- [50] 赫英, 董振信, 岳可芬, 等. 中国东部地幔岩包体中的金含量及其成矿学意义[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 418-425.
- [51] 胡文宣, 孙睿, 张文兰, 等. 金矿成矿流体特点深 - 浅部流体相互作用成矿机制[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 281-288.
- [52] 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 玲珑金矿中基性岩脉与矿化的关系探讨[J]. 地球科学, 1984, 27(4): 37-46.
- [53] 翟建平, 胡凯, 陆建军. 乳山金矿煌斑岩及流体和氢、氧、锶同位素研究[J]. 矿床地质, 1996, 15(4): 358-364.
- [54] 张国刚. 山东栖霞区域地质特征及找矿标志和方向[J]. 黄金科学技术, 2008, 16(4): 54-57.
- [55] 余普贤, 徐怀峰, 曹铁生, 等. 山东栖霞金矿的空间分布及其矿化特征[J]. 山东国土资源, 2008, 24(3): 31-34.
- [56] 王佳良. 山东栖霞马家窑金矿床地质特征及矿化富集规律研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013: 29-62.
- [57] 付晨晨. 胶西北栖霞孙疃地区金成矿特征及成矿预测[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2014: 17-26.
- [58] 王新红. 山东省栖霞市小灵山金矿床地球化学特征与控矿因素研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学,

2014: 25-37.

- [59] 廖明伟, 陈玉菡, 谢军民. 山东省栖霞市笏山 - 西陡崖金矿地质特征及深部找矿远景[J]. 山东国土资源, 2014, 30(4): 21-26.
- [60] 刘冬生, 李彬, 许凯磊, 等. 栖霞市马耳弁石英脉型金矿地质特征及找矿方向[J]. 山东国土资源, 2016, 32(6): 14-18.
- [61] 耿瑞. 山东省栖霞市山城金矿床地质特征及成因研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012: 22-56.