



引文格式: 高建伟, 陆丽娜, 申俊峰, 等. 山东三山岛北部海域金矿黄铁矿成分标型特征及地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 310–321. DOI: 10.12401/j.nwg.2025182

Citation: GAO Jianwei, LU Lina, SHEN Junfeng, et al. Characteristics of Geochemical Compositions and Implications of Pyrite in the Undersea Gold Deposit off Northern Sanshandao, Shandong Province, China[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 310–321. DOI: 10.12401/j.nwg.2025182

山东三山岛北部海域金矿黄铁矿成分 标型特征及地质意义

高建伟¹, 陆丽娜^{2,*}, 申俊峰³, 李宝君⁴

(1. 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 应急管理大学, 河北 三河 065201;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100038; 4. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 胶东三山岛北部海域金矿是近年来新发现的超大型金矿, 位于三山岛-仓上断裂带北端。前人对该矿床浅部开展了大量研究工作, 但对深部成矿规律和资源潜力的研究相对薄弱。笔者旨在通过对矿床深部(–1 253~–1 455 m 标高)载金矿物黄铁矿开展系统的矿物学研究, 揭示其标型特征, 探讨矿床成因, 评价深部找矿潜力, 为区域深部找矿预测提供科学依据。基于成因矿物学理论, 在对矿区典型钻孔岩心进行详细编录的基础上, 系统采集不同成矿阶段的黄铁矿样品。利用显微镜观察黄铁矿的形态、粒度、自形程度等特征, 并运用电子探针技术对各阶段黄铁矿进行原位微量元素成分分析, 重点测定 Fe、S、As、Co、Ni、Au 等元素的含量, 并计算 Co/Ni 值、Fe/(S+As) 值等标型参数。研究表明, 该矿床黄铁矿可划分为 3 个成矿阶段: 黄铁绢英岩化阶段(Py1)、石英-黄铁矿-毒砂阶段(Py2)和石英-多金属硫化物阶段(Py3), 其中 Py2、Py3 阶段黄铁矿粒度小、自形程度差, 含金性较好。黄铁矿 Co/Ni 值为 1~4, 平均值为 3, 且富 As 和 Co, 指示该矿床为岩浆热液成因。Fe/(S+As) 值和微量元素垂向分带特征表明, 该矿床深部仍具有较好的找矿潜力。

关键词: 黄铁矿; 电子探针; 金矿; 三山岛; 胶东

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0310-12

Characteristics of Geochemical Compositions and Implications of Pyrite in the Undersea Gold Deposit off Northern Sanshandao, Shandong Province, China

GAO Jianwei¹, LU Lina^{2,*}, SHEN Junfeng³, LI Baojun⁴

(1. Cores and Samples Center of Natural Resource, China Geological Survey, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. University of Emergency Management, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110031, Liaoning, China)

收稿日期: 2026-01-20; 修回日期: 2026-03-05; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目(DD2026101021、DD20251101505)联合资助。

作者简介: 高建伟(1986–), 男, 高级工程师, 主要从事构造地质学、矿床学等研究。E-mail: cugbgjw@163.com。

* 通讯作者: 陆丽娜(1983–), 女, 博士, 副教授, 主要从事矿床地球化学研究。E-mail: guzhuyiya83@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: The undersea gold deposit off northern Sanshandao is a newly discovered super-large gold deposit in the northern Jiaodong Peninsula, located at the northern end of the Sanshandao- Cangshang Fault Zone. A large amount of research work has been carried out on the shallow part of this deposit, but the research on the deep mineralization laws and resource potential is relatively weak. The systematic mineralogical study on pyrite of the deep part of this deposit (at an elevation of -1 253 to -1 455 m) is conducted in this paper, to reveal its characteristics of geochemical compositions, explore the genesis of the deposit, evaluate the potential for deep mineral exploration, and provide a scientific basis for regional deep mineral exploration prediction. Based on the theories of genetic mineralogy, this paper conducts an in-depth study on the morphology and compositional characteristics of pyrites from three metallogenic stages from drill cores in this deposit. We observed the morphological, particle size, and self-shaping degree characteristics of pyrite and analyzed in-situ trace element composition of pyrites at each stage, using electron probe technology, with a focus on determining the contents of elements such as As, Fe, S, Co, Ni, and Au, and calculating standard parameters such as Co/Ni value and Fe/(S+As) value. The results indicate that the pyrites in this deposit can be divided into three mineralization stages: pyrite sericilization stage (Py1), quartz-pyrite-arsenopyrite stage (Py2), and quartz-polymetallic sulfide stage (Py3). Among them, the pyrites of stage Py2 and Py3 have smaller particle size and poorer hedral degree which have better gold content. The Co/Ni ratio of pyrites in this deposit ranges from 1 to 4, with an average of 3. The pyrites are rich in As and Co, which further indicate that this deposit is of magmatic hydrothermal origin. Collectively, Fe/(S+As) ratios of pyrites, alongside the vertical zonation characteristics of trace element, indicate high prospectivity at depth in the undersea gold deposit off northern Sanshandao.

Keywords: pyrite; EPMA; gold deposit; Sanshandao; Jiaodong

胶东是中国金矿产出最集中的地区(范宏瑞等, 2021; 冯李强等, 2023), 三山岛-仓上断裂带发育了胶东矿集区招远-莱州成矿带的典型“蚀变岩型”金矿床, 如三山岛、仓上和新立等金矿(胡训宇等, 2025)。前人对此开展了矿床年代学、成矿流体特征、成矿物质来源以及成矿动力背景等详细研究(Fan et al., 2003; 王庆飞等, 2007; Deng et al., 2008; Li et al., 2013; Hu et al., 2013; Wang et al., 2014; Yang et al., 2014; Deng et al., 2015; Wen et al., 2015)。其中, 三山岛北部海域金矿位于三山岛-仓上断裂带上的三山岛金矿北侧, 是近年来区域内发现的最大规模金矿之一。该矿床与位于其南侧的三山岛金矿深部主矿体相连, 实际上为同一矿体, 该矿体是中国规模最大的单一金矿体(宋明春等, 2015)。该矿床自发现以来, 前人对其成矿地质背景(宋明春等, 2015)、成矿流体及其演化规律(Wen et al., 2015, 2016; 吕婧祎等, 2023)、矿床成因(林祖苇等, 2019)、成矿构造(杨奎锋等, 2017; 韦星等, 2025)、蚀变过程(高建伟等, 2023)等进行了深入研究, 取得了丰硕成果。然而, 这些研究大都聚焦于矿床浅部, 对其深部成矿规律和成矿潜力的研究仍旧比较薄弱。近些年来, 随着分析技术和仪器精度的提高, 精细的

矿物学研究已被广泛证实能够很好地约束矿床成矿规律和指导找矿勘查(钟世华等, 2025a, 2025b)。因此, 笔者选取三山岛金矿-1 253~-1 455 m 标高矿体中的不同成矿阶段黄铁矿, 开展详细的岩相学研究和原位地球化学分析, 查明了三山岛金矿深部矿体中载金矿物黄铁矿标型特征, 揭示深部成矿规律, 为矿区深部找矿预测提供依据。

1 区域地质背景

胶西北是中国重要的金矿集区, 其大地构造位置为华北板块东缘, 胶辽隆起区的胶北隆起(陈衍景等, 2004; 吕古贤等, 2006; 石启慧等, 2023)。胶西北基底岩石为太古宙 TTG 岩系及上元古界和下元古界变质碎屑岩系(Zhai et al., 2011; Deng et al., 2016)。上元古界蓬莱群碎屑岩和碳酸盐岩不整合于下元古界荆山群和粉子山群之上, 二者之间缺失中元古界(王中亮等, 2011)。新生界第四系临沂组松散沉积层分布于研究区北侧海边和河流边。中生代花岗岩覆盖了区内 2/3 以上的基岩露头, 主要为 160~150 Ma 的壳源中生代玲珑序列中的黑云母二长花岗岩(王中亮等,

2011; Yang et al., 2012)和 132~126 Ma 的壳幔混合成因的中生代郭家岭序列的似斑状花岗闪长岩(Yang et al., 2012), 产出了区内绝大部分金矿床(图 1)。

研究区内构造非常发育, 自西向东依次主要为三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂(邓军等, 1999; 毛先成等, 2023; 吴明刚等, 2025)。其中, 三山岛断裂是三山岛金矿及其北部海域金矿的主控断裂(图 1), 由北到南控制了三山岛、新立、仓上 3 个特大型金矿。该断裂在陆地上出露长为 12 km、宽为 20~400 m, 总体走向为 40°~50°, 倾向 SE, 倾角为 30°~40°, 局部达 80°, 平面上呈“S”型。三山岛北部海域金矿位于该断裂北端向海域延伸位置(宋明春等, 2015)。

2 矿床地质特征

三山岛北部海域金矿区内出露地层较为简单, 主要为第四系, 钻孔揭露第四系之下主要为胶东群, 岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩和黑云母片岩等, 分布于矿区东南侧(图 2)。部分学者认为胶东群为金矿床的矿源层(郭彬等, 2010)。

矿区内岩浆活动强烈, 主要以玲珑花岗岩及郭家

岭花岗闪长岩等侵入岩为主, 两个岩体是区内金矿最主要的含矿岩体。此外, 矿区内还发育一些中基性岩脉, 包括闪长玢岩、正长斑岩和煌斑岩等。

矿区构造主要为 NE 向与 NW 向断裂。NE 向断裂控制矿体产出, 倾向 SE、倾角为 35°~40°, 断裂上盘为郭家岭似斑状花岗闪长岩, 下盘为玲珑黑云母二长花岗岩, 断裂具有继承-活化多期次活动特征。NW 向断裂多为破矿构造或成矿后构造。

矿区内共圈出 21 个金矿体, 其中具有利用价值的工业矿体 18 个(宋明春等, 2015)。矿体分为南、北两个矿段。南矿段主要由 7 个矿体组成, 深部和浅部矿体之间存在无矿间隔, 南矿段的 1、2、6、7 号矿体为浅部矿体群, 3、4、5 号矿体为深部矿体群(宋明春等, 2015)。北矿段主要由 8、9、10、11、12 号矿体组成。其中, 4 号金矿体为主矿体, 其次是 1、2、3 号和 11 号矿体。其他矿体的规模小, 均为单工程见矿。此外, 在距主断裂面一定距离的上盘或下盘的黄铁绢英岩化花岗碎裂岩带(图 3)中可见一些小的矿体。

矿石构造主要为浸染状构造(图 4a), 次为细脉状(图 4b)、网脉状(图 4c)和团块状(图 4)构造。矿床中的矿石结构较为复杂, 主要有自形和半自形晶粒结构

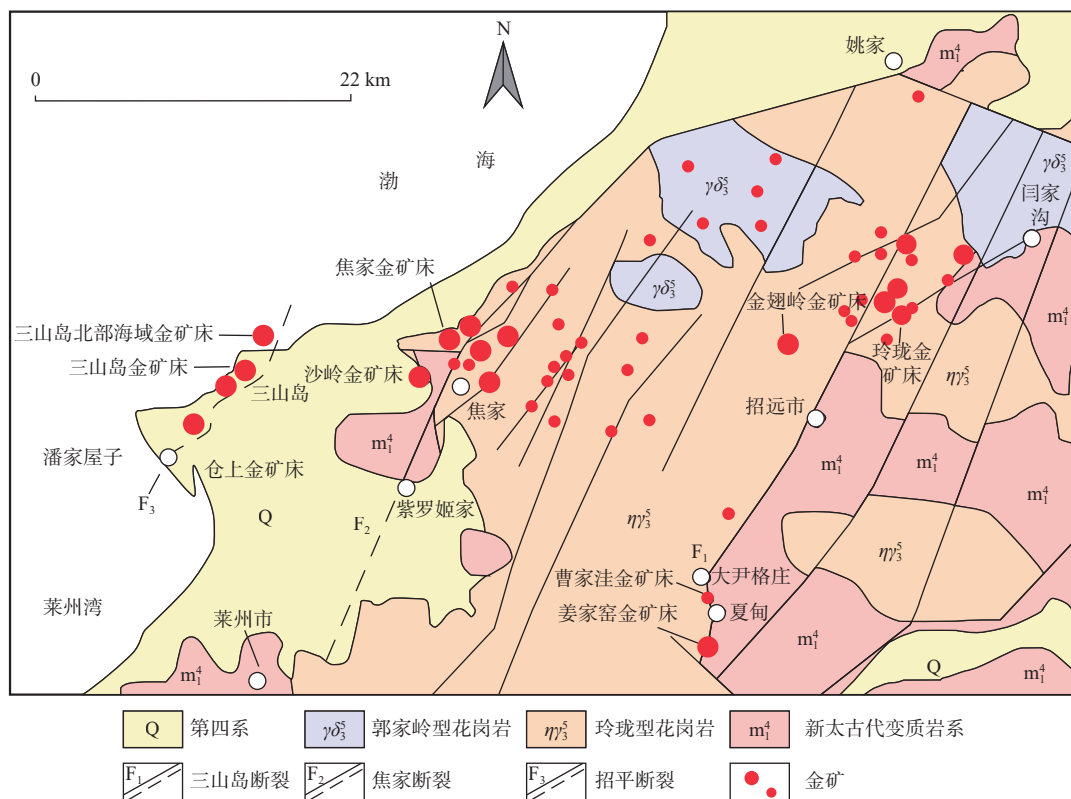


图1 胶西北区域地质略图(据宋明春等, 2015 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the undersea gold deposit off northern Sanshandao

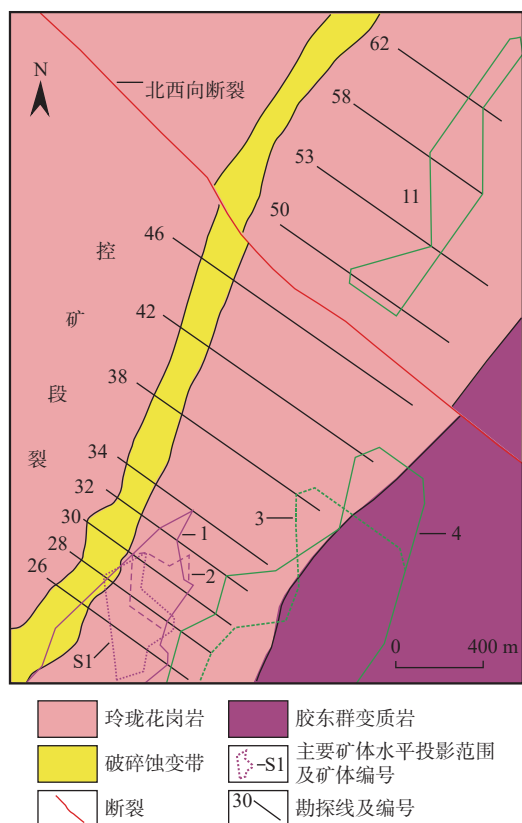


图2 三山岛北部海域金矿地质图

Fig. 2 The geological map of the undersea gold deposit off northern Sanshandao

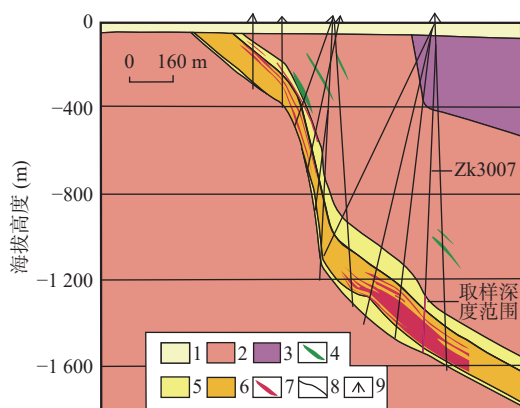
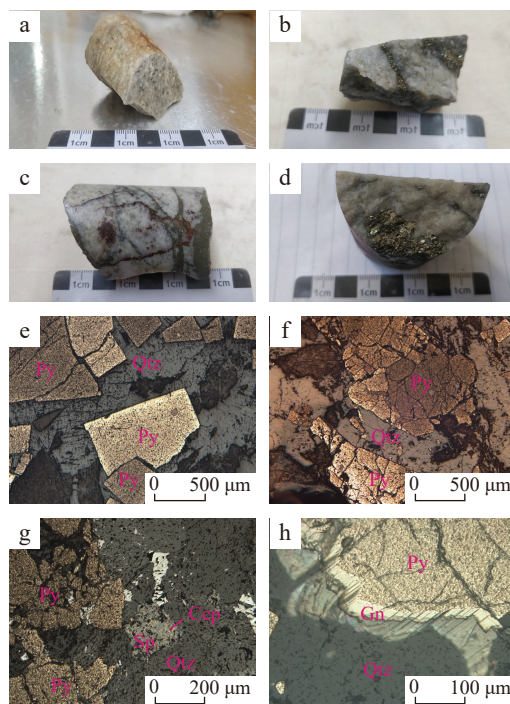


图3 三山岛北部海域金矿第30号勘探线地质剖面图

Fig. 3 Geological section along the No. 30 exploratory line of the undersea gold deposit off northern Sanshandao

(图4e)、压碎结构或碎裂结构(图4f)、乳滴状结构(图4g)、交代残余结构(图4h)等。

岩芯观察编录表明, 矿区内蚀变发育且具明显分带, 由外向内依次为二长花岗岩、绢英岩、黄铁绢英



Py. 黄铁矿; Ccp. 黄铜矿; Gn. 方铅矿; Sp. 闪锌矿; Qtz. 石英

图4 三山岛北部海域金矿典型矿石手标本和显微镜下(反射光)照片

Fig. 4 Hand specimen and microscopic photographs of typical ore from the undersea gold deposit off northern Sanshandao

岩。主断裂面之下0~320 m一般为黄铁绢英岩化带, 蚀变与金矿化最强, 是主矿体的赋存部位, 以浸染状或细脉浸染状矿化为主。

3 样品采集及分析方法

本次研究采集了该矿30号勘探线ZK3007孔-1253~-1455 m标高矿体中的不同矿化阶段黄铁矿样品, 磨制探针片, 观察其岩相学和矿相学特征, 并针对各成矿阶段黄铁矿进行单矿物电子探针微量元素分析, 其中样品中心一个测点, 边部一个测点。样品测试在核工业电子探针微区分析实验室完成, 实验仪器为日本JXA-8100型探针仪。电子探针分析的实验参数包括电子加速电压为20 kV, 传感器电流为 1×10^{-8} A, 束斑直径为10 μ m, 检出限为0.001%, ZAF法校正。

4 黄铁矿标型特征

4.1 黄铁矿产出特征

黄铁矿是矿区内最主要的载金矿物。在光学显

显微镜下对光片进行观察,结果显示,黄铁矿产出于 3 个成矿阶段。

第Ⅰ阶段为黄铁绢英岩化阶段,此阶段的黄铁矿称为 Py1。此为热液成矿的早阶段,黄铁矿多呈不规则粒状或自形粗粒状立方体产出,呈浸染状或星点状分布于绢英岩中,共生矿物主要为石英、绢云母(图 5a、图 5b)。

第Ⅱ阶段为石英-黄铁矿-毒砂阶段,此阶段的黄铁矿称为 Py2。此为热液成矿期的中阶段,金属矿物主要为黄铁矿和毒砂。黄铁矿在岩石中多呈中细粒自形-半自形结构且数量明显增加。石英和黄铁矿常结合为小团粒状或呈浸染状、细脉状、网脉状等。该阶段有金银矿物产出,多为银金矿和自然金,常见包裹于黄铁矿或充填于黄铁矿、毒砂和石英等晶隙或裂隙中。该阶段矿物组合主要为黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、石英、绢云母等(图 5c、图 5d)。

第Ⅲ阶段为石英-多金属硫化物阶段,此阶段的黄铁矿称为 Py3。此为热液成矿期的主要阶段,主要表现为多金属硫化物(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等)呈他形-半自形细粒状、细脉状和浸染状分布在其他矿物之间,或赋存在岩石微裂隙内,并广泛发育交代充填作用,也常见分布于石英等脉石矿物之间。矿物组合以黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等共生产出为主要特点(图 5e、图 5f)。

此外,在第Ⅲ阶段(石英-多金属硫化物阶段),局部亦可见粗-中粒黄铁矿晶体散布在碳酸盐脉中,很少或无金矿化。

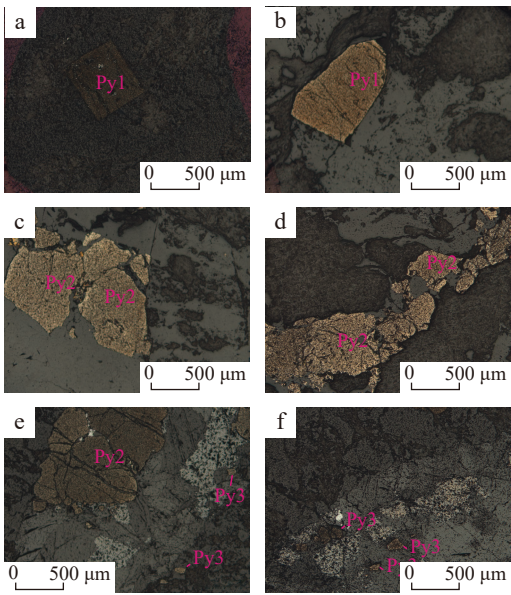


图5 三山岛北部海域金矿不同阶段黄铁矿(Py)显微照片(透射光)

Fig. 5 Photomicrographs of pyrite from different stages of the undersea gold deposit off northern Sanshandao

4.2 黄铁矿成分标型特征

电子探针分析结果(表 1)显示,在-1 253~-1 455 m 标高范围内,Py1 阶段的 Fe 含量为 45.52%~46.06%,平均值为 49.95%;S 含量为 52.69%~53.24%,平均值为 52.91%。Py2 阶段的 Fe 含量为 45.84%~46.53%,平均值为 46.03%;S 含量为 52.69%~53.58%,平均值为 52.88%。Py3 阶段的 Fe 含量为 45.50%~46.36%,平均值为 45.96%;S 含量为 52.69%~53.58%,平均值

表 1 ZK3007 孔不同标高黄铁矿电子探针(EPMA)分析结果(%)

Tab. 1 EPMA results of pyrite in different elevations of ZK3007(%)

样号	深度(m)	类型	As	Fe	S	Au	Mo	Zn	Pb	Cu	Ag	Co	Bi	W	Te	Cr	Sb	Ni	Sn	Total
H1253	-1 253	Py2	0.83	45.84	52.45	/	/	/	/	/	/	0.12	0.20	/	/	/	0.08	0.03	0.06	99.61
			0.33	46.09	52.74	0.06	/	/	/	0.05	0.07	0.07	0.25	0.08	/	/	/	0.02	/	99.76
		Py3	0.71	46.11	52.87	0.06	/	/	/	/	/	0.07	0.14	/	/	/	/	/	/	99.96
			0.32	45.70	52.48	0.08	/	0.06	/	/	0.04	0.08	0.30	/	/	/	/	/	0.06	99.12
H1257	-1 257	Py3	/	45.93	52.78	0.06	/	/	/	/	/	0.04	0.27	/	/	/	0.05	0.03	0.04	99.20
			0.17	46.21	52.80	0.10	/	/	/	/	/	0.08	0.26	0.10	/	0.02	/	/	/	99.74
		Py2	0.37	46.25	53.23	/	/	0.05	/	/	/	0.03	0.22	/	0.09	0.02	/	0.03	/	100.29
			0.21	46.28	52.84	0.07	/	/	/	/	/	0.07	/	0.08	/	0.02	/	/	0.04	99.61
H1284	-1 284	Py2	1.02	45.70	52.36	/	/	/	/	/	/	0.08	/	/	/	0.02	0.04	/	0.07	99.29
			0.72	45.49	52.84	/	/	/	/	/	/	0.07	0.30	0.08	/	0.02	/	/	/	99.52
H1305	-1 305	Py1	/	46.38	53.09	/	/	0.06	/	/	0.04	0.07	0.17	/	/	/	/	0.04	/	99.85
			/	46.06	52.75	/	/	0.04	/	0.03	/	0.07	0.07	/	/	0.03	/	/	/	99.05

续表 1

样号	深度(m)	类型	As	Fe	S	Au	Mo	Zn	Pb	Cu	Ag	Co	Bi	W	Te	Cr	Sb	Ni	Sn	Total
H1355	-1 355	Py1	/	45.76	52.84	/	/	/	/	/	0.04	0.04	0.21	/	0.04	/	/	/	0.08	99.01
			/	45.95	52.69	/	/	/	/	/	/	0.08	/	/	/	/	/	/	/	98.72
H1362	-1 362	Py2	/	45.86	52.88	/	/	0.06	/	/	/	0.07	0.14	/	/	/	/	/	/	99.01
			/	46.01	52.72	/	/	/	/	/	0.04	0.03	/	/	0.09	/	/	/	0.06	98.95
		Py3	0.78	46.09	52.96	/	/	/	/	/	/	0.09	0.17	/	0.06	/	0.12	/	0.03	100.30
			0.21	45.99	52.90	/	/	/	/	/	/	0.08	0.12	/	/	/	/	/	/	99.30
H1369	-1 369	Py3	/	46.28	52.98	0.13	/	0.04	/	/	/	0.06	0.20	/	/	/	/	0.03	/	99.72
			0.85	45.50	52.35	0.10	/	0.57	/	0.03	/	0.08	0.27	/	0.06	0.02	0.07	/	/	99.90
H1378	-1 378	Py2	/	46.33	52.80	/	/	/	/	/	/	0.07	0.12	/	/	0.02	/	/	/	99.34
			0.75	45.72	52.30	/	/	/	/	/	0.05	0.08	0.17	/	/	0.02	/	/	0.08	99.17
H1393	-1 393	Py3	0.07	46.12	52.76	0.06	/	/	/	/	/	0.07	0.28	/	0.05	0.03	0.08	/	/	99.52
			/	46.18	52.78	/	/	/	/	/	/	0.07	0.17	/	0.04	0.02	/	0.03	0.04	99.33
		Py3	0.15	45.57	52.76	/	/	/	/	/	/	0.07	0.16	/	/	/	/	0.03	0.03	98.77
			0.20	45.76	52.59	/	/	0.04	/	/	0.03	0.03	0.15	0.12	/	/	/	0.03	/	98.95
H1403	-1 403	Py3	0.04	46.12	53.25	/	/	/	/	/	0.04	0.03	0.35	0.06	/	/	0.05	/	0.05	99.99
			0.04	45.72	52.88	/	/	/	/	/	/	0.12	0.10	/	/	/	/	/	0.06	98.92
H1408	-1 408	Py2	0.05	46.53	53.40	/	/	/	/	0.09	/	0.05	0.09	/	/	0.02	/	/	/	100.23
			0.04	46.30	53.58	/	/	/	/	/	/	0.08	0.12	/	/	/	/	/	/	100.12
		Py2	/	46.19	52.81	/	/	/	/	/	/	0.07	0.10	/	/	/	/	/	/	99.17
			0.09	45.80	52.81	/	/	0.03	/	/	0.08	0.10	0.10	/	/	/	/	0.04	/	99.05
H1421	-1 421	Py3	0.05	46.34	52.90	/	/	/	/	/	/	0.07	0.20	/	/	0.02	/	/	/	99.58
			1.55	45.81	52.11	/	/	0.05	/	/	0.03	0.07	0.10	/	/	/	/	/	0.11	99.83
H1429	-1 429	Py2	0.07	46.36	53.06	/	/	/	/	/	/	0.07	/	/	0.14	/	/	/	0.04	99.74
			0.08	46.14	52.92	/	/	0.06	/	/	/	0.07	0.20	/	/	/	0.04	/	/	99.51
		Py2	/	45.89	52.88	/	/	/	/	/	/	0.06	0.15	/	/	0.03	/	/	/	99.01
			/	45.98	53.05	/	/	0.05	/	0.04	0.04	0.08	0.22	/	/	/	/	/	0.05	99.51
H1441	-1 441	Py1	/	45.96	52.98	/	/	/	/	/	/	0.08	0.16	/	0.11	/	/	/	0.05	99.34
			0.05	45.88	52.92	/	/	/	/	/	/	0.10	0.08	/	/	/	/	/	0.05	99.08
		Py1	/	45.83	52.97	/	/	/	/	/	/	0.09	0.16	/	0.07	/	/	/	/	99.12
			0.11	46.07	53.24	/	/	/	/	/	/	0.06	0.14	/	/	/	/	/	0.03	99.65
H1442	-1 442	Py2	/	45.91	52.75	/	/	0.04	/	0.04	0.04	0.07	0.21	/	0.07	/	/	0.02	/	99.15
			0.08	46.07	53.09	/	/	/	/	/	/	0.05	0.10	/	0.13	/	/	/	/	99.52
		Py3	/	45.52	52.14	/	/	/	/	/	/	0.05	0.11	/	/	0.02	/	/	0.04	97.88
			0.05	45.77	53.21	/	/	/	/	/	/	0.07	0.21	/	/	/	0.05	0.02	/	99.38
		Py3	/	46.24	52.88	/	/	/	/	/	/	0.06	0.13	/	0.06	/	/	/	0.08	99.45
			/	45.97	52.89	/	/	/	/	/	/	0.04	0.19	/	/	/	0.05	/	/	99.14
H1442	-1 442	Py3	/	46.17	53.16	0.07	/	0.03	/	/	/	0.06	0.30	/	0.04	/	/	/	0.07	99.90
			0.07	45.95	53.19	/	/	0.08	/	/	/	0.05	0.23	/	/	/	0.06	0.03	0.03	99.69

续表 1

样号	深度(m)	类型	As	Fe	S	Au	Mo	Zn	Pb	Cu	Ag	Co	Bi	W	Te	Cr	Sb	Ni	Sn	Total
H1446	-1 446 m	Py3	0.04	45.70	52.66	0.18	/	/	/	/	0.04	0.02	0.14	/	0.04	0.03	0.04	/	/	98.89
			/	46.04	52.59	/	/	0.05	/	0.03	/	0.05	0.12	/	/	0.02	/	/	/	98.90
		Py3	0.07	46.19	53.27	/	/	/	/	/	/	0.06	0.16	/	/	0.02	/	/	0.04	99.81
			/	45.95	52.75	/	/	0.03	/	/	/	0.07	0.22	/	/	0.02	/	/	/	99.04
H1455	-1 455 m	Py1	/	45.52	52.74	/	/	/	/	/	0.06	0.08	0.23	/	/	0.02	/	0.62	/	99.27
			/	45.70	53.06	/	/	/	/	/	/	0.06	0.29	/	/	/	/	/	0.09	99.20
		Py1	/	46.02	52.84	/	/	/	/	/	0.03	0.09	/	0.12	/	/	/	0.03	0.03	99.16
			/	46.34	52.80	/	/	/	/	/	0.07	0.06	0.15	/	/	/	/	/	/	99.42

为 52.87%。各阶段的 Py1、Py2 和 Py3 中 Fe 含量为 45.84%~46.53%，平均为 45.99%；S 含量为 52.45%~53.58%，平均为 52.85%。3 个阶段的黄铁矿与理想黄铁矿相比，皆具亏硫、亏铁的特征，说明在成矿过程中有大量的微量元素进入黄铁矿内。控制胶东金矿金沉淀的两个重要机制——硫化和流体不混溶作用，均消耗成矿流体中的硫(Wang et al., 2014)，这就解释了三山岛北部海域金矿深部为何亏损硫。

在-1 253~-1 455 m 标高范围内，Py1 阶段的 As 检出率仅为 16.66%。Py2 阶段的 As 含量为 0.04%~1.02%，平均值为 0.356%，检出率为 65%。Py3 阶段的 As 含量为 0.04%~1.55%，平均值为 0.316%，检出率为 65.385%。这些结果表明，Py1 阶段 As 少量替代 S 进入黄铁矿的晶格内，Py2、Py3 阶段 As 开始大量替代 S 进入黄铁矿的晶格内。

在-1 253~-1 455 m 标高范围内，各阶段黄铁矿的 Co 均检出。Py1 阶段的 Co 含量为 0.04%~0.1%，平均值为 0.073%；Py2 阶段的 Co 含量为 0.04%~0.1%，平均值为 0.069%；Py3 阶段的 Co 含量为 0.02%~0.12%，平均值为 0.063%。这些结果表明，Py1 阶段 Co 代替 Fe 大量进入黄铁矿的晶格内，Py2、Py3 阶段 Co 等少量替代 Fe 进入黄铁矿的晶格内。

在-1 253~-1 455 m 标高范围内，Py1 阶段的 Au 均未检出。Py2 阶段 Au 的检出率为 10%。Py3 阶段 Au 的检出率为 34.6%，说明金主要在 Py2、Py3 阶段富集。

由于 Co、Ni 与 Fe 均为过渡族(VIII 族)元素，故它们能够局部代替 Fe 进入黄铁矿的晶格中。在-1 253~-1 455 m 标高范围内，Py1、Py2、Py3 阶段中既测定出 Co，又测出 Ni 成分的黄铁矿中 Co 的含量为 0.03%~0.12%，平均为 0.067%，Ni 的含量为 0.02%~0.04%，平均值为 0.029，且 Co 含量明显大于 Ni 含量。同时，但

对不同成因的黄铁矿来说，黄铁矿中 Co 与 Ni 的含量比值又各有不同。Co 和 Ni 的值及 Co/Ni 的值具有一定标型意义(Brill, 1989; Large et al., 2009)，特别是 Co/Ni 具有指示成因作用。根据计算，不同阶段黄铁矿 Co/Ni 值为 1~4，平均值为 3。

Se 和 Te 也可以代替黄铁矿中的 S 而进入黄铁矿的晶格中。Te 的代替会导致黄铁矿晶格严重畸形，同时引起其他阳离子替换 Fe 或以杂质方式进入黄铁矿晶格。该矿在-1 253~-1 455 m 标高范围内黄铁矿 Te 的检出率为 25.86%，含量为 0.04%~0.14%，平均值为 0.073%。这说明该矿床在-1 253~-1 455 m 标高内，Te 对金矿的形成同样起到了重要作用。

5 讨论

5.1 黄铁矿的形态标型与金矿化的关系

在自然界，黄铁矿的形态较为复杂，常见的晶型主要为立方体、五角十二面体、八面体和它们之间的聚型晶。在金矿床中，最常见的晶型为立方体和五角十二面体，两者占总数的 90% 以上(申俊峰等, 2013)。

笔者在显微镜下对光薄片中的黄铁矿的晶型、粒度等进行观察统计。结果(表 2)表明，该矿在-1 253~-1 455 m 标高范围内黄铁矿形态主要为立方体、五角十二面体，自形程度主要为自形、半自形-自形、他形-半自形、他形。呈自形立方体与五角十二面体聚晶和立方体形的黄铁矿粒度较大(2~3 mm)，呈半自形-自形立方体形态的黄铁矿粒度较小，为 0.5~1.6 mm，呈他形黄铁矿的粒度最小(0.2~1 mm)。电子探针测试结果显示，自形程度好的 Py1 阶段，Au 均未检出；半自形-自形的 Py2 阶段，Au 的检出率为 10%；他形-半自形的 Py3 阶段，Au 检出率为 34.6%。

表 2 黄铁矿形态及粒度统计表
Tab. 2 Statistics table of pyrite shape and particle size

样品号	黄铁矿类型	形态及自形程度	粒度 (mm)	深度 (m)
H1253	Py2、Py3	他形-半自形立方体	0.2~0.3	-1 253
H1257	Py2、Py3	他形-半自形立方体	0.3~0.5	-1 257
H1284	Py2	半自形-自形立方体	1~1.6	-1 284
H1305	Py1	自形立方体与五角十二面聚形	2~3	-1 305
H1355	Py1	自形立方体	2	-1 355
H1362	Py2、Py3	他形-半自形立方体	0.4~0.6	-1 362
H1369	Py3	他形	0.3	-1 369
H1378	Py2	半自形-自形立方体	0.5	-1 378
H1393	Py3	他形	0.2~0.6	-1 393
H1403	Py3	他形-半自形立方体	0.5	-1 403
H1408	Py2	半自形立方体与五角十二面聚形	1~2	-1 408
H1421	Py3	他形	1	-1 421
H1429	Py2	半自形-自形立方体	0.5~0.8	-1 429
H1441	Py1、Py2	自形-半自形立方体	0.8~1.2	-1 441
H1442	Py3	他形	0.2~0.4	-1 442
H1446	Py3	他形	0.3~0.4	-1 446
H1455	Py1	半自形-自形立方体	1~1.5	-1 455

由此可见,在该矿床中,黄铁矿粒度越小,自形程度越差,含矿性越好。

5.2 黄铁矿的成分特征及成矿指示意义

黄铁矿 Co/Ni 值可以用于指示其形成环境。一般来说,沉积型黄铁矿 $\text{Co/Ni} < 1$,岩浆热液型黄铁矿 $\text{Co/Ni} > 1$,与火山作用有关或者与中基性岩浆热液有关的层控黄铁矿 Co/Ni 变化较大(李胜荣等, 2020)。不同阶段黄铁矿 Co/Ni 值为 1~4(表 1),平均值为 3。该矿床大部分黄铁矿落在热液成因范围内(图 6),表明具有岩浆热液成因。

Co-Ni-As 在不同成因金矿床中含量变化与其各自的地质作用密切相关(严育通等, 2012)。在-1 253~-1 455 m 标高范围内,Py1、Py2、Py3 阶段能够同时测定出 Co、Ni 和 As 的黄铁矿中,As 的含量为 0.05%~0.83%,均值为 0.26%;Co 的含量为 0.03%~0.12%,均值为 0.07%;Ni 的含量为 0.05%~0.83%,平均值为 0.26%。黄铁矿 As-Co-Ni 三角关系图(图 7)显示,该矿床黄铁矿具有富 As、Co 特征,指示出黄铁矿具有岩浆热液特征。

Au/Ag 值对成因同样具有指示意义,一般中低温岩浆热液矿床黄铁矿 Au/Ag 值大于 0.5,火山岩型、沉

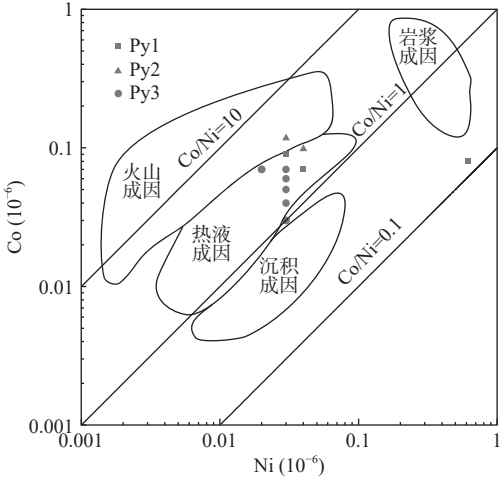


图6 黄铁矿 Co/Ni 值特征与成因判别图

Fig. 6 Co/Ni discrimination diagram for pyrite

积变质热液型等金矿床中黄铁矿 Au/Ag 值小于 0.5 (周学武等, 2005)。在-1 253~-1 455 m 标高范围内,Py1、Py2、Py3 阶段的同时测定出 Au 和 Ag 的黄铁矿中,其 Au/Ag 值分别为 0.857、2、4.5, Au/Ag 值皆大于 0.5,同样指示该矿为中低温岩浆热液型金矿。

5.3 三山岛北部海域金矿深部成矿潜力

Py1 阶段 Fe 含量平均值为 49.95%, Co 含量平均

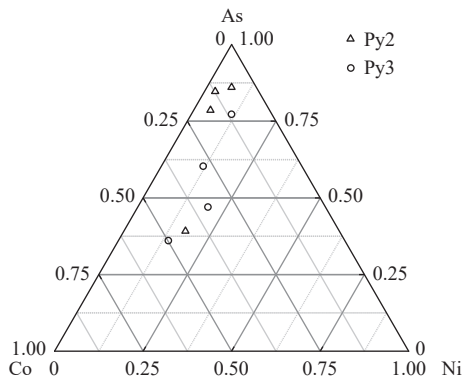


图7 黄铁矿 As-Co-Ni 图解

Fig. 7 As-Co-Ni discrimination plot for pyrite

值为 0.073%; Py2 阶段 Fe 含量平均值为 46.03%, Co 含量平均值为 0.069%; Py3 阶段 Fe 含量平均值为 45.96%, Co 含量平均值为 0.063%。Py1 与 Py2、Py3 相比,更加亏 Fe、富 Co,说明在成矿第一阶段成矿温度较高,大量 Co 等高温元素进入黄铁矿的晶格内,此时含矿性较差。Py1 阶段 S 含量平均值为 52.91%, As 检出率仅为 16.66%; Py2 阶段 S 含量平均值为 52.88%, As 平均值为 0.356%, 检出率为 65%; Py3 阶段 S 含量平均值为 52.87%, 平均值为 0.316%, 检出率为 65.385%。Py2、Py3 与 Py1 相比,更加亏 S、富 As,这说明伴随着成矿作用的进行,大量 As 等低温元素进入黄铁矿的晶格内,同时金开始大规模沉淀富集。

Fe/(S+As)值可用于计算成矿深度(周学武等, 2005; 曹煦等, 2015), 矿体深部黄铁矿 Fe/(S+As)值为 0.85, 中部黄铁矿 Fe/(S+As)值为 0.86, 浅部黄铁矿 Fe/(S+As)值为 0.93(周学武等, 2005)。-1 253~-1 455 m 标高范围内, Py1、Py2、Py3 黄铁矿 Fe/(S+As)值变化较小(0.875~0.853), 平均值为 0.864。因此,推测目前该矿床-1 253~-1 455 m 标高的矿体为其中部,深部仍有找矿空间。

近年来,众多学者对金矿床中黄铁矿微量元素进行研究(Boyle, 1979; 李惠等, 1999; 佟景贵等, 2004; 周学武等, 2005; 于洪军等, 2011)。结果表明,受温度影响,岩浆热液型金矿床的黄铁矿微量元素在空间上有明显的分布规律。一般来说, Hg、As、Sb、Ba、Se、Te 等高活动性的低温亲铜元素多富集在矿体上部或顶部的黄铁矿中; Cu、Pb、Zn 等中温亲铜元素多富集在矿体中部的黄铁矿中; 而 Co、Ni、Ti、Cr 等高温亲铁、亲石元素多富集在矿体下部或根部的黄铁矿中。当黄铁矿中的中低温微量元素相对富集并且含量变

化较大时,往往指示可能存在金的矿化。结合前人研究成果(高建伟等, 2023), 笔者以 $w(\text{As+Sb+Se+Te})$ 、 $w(\text{Cu+Pb+Zn})$ 、 $w(\text{Co+Ni+Ti+Cr})$ 为 3 个端元, 进行黄铁矿化学成分三角图解分析(图 8)。结果(图 8 可)显示,一部分数据点位靠近低温元素组合区,另一部分点位靠近高温元素组合区,低温元素组合区主要为 Py3、Py2, 说明该矿-1 253~-1 455 m 标高矿体的黄铁矿经历了高温到低温的成矿变化过程, Py3、Py2 的低温元素组合证明该矿体深部还有较好的找矿潜力。黄铁矿化学成分标型表明该矿床深部仍有很大的找矿潜力。

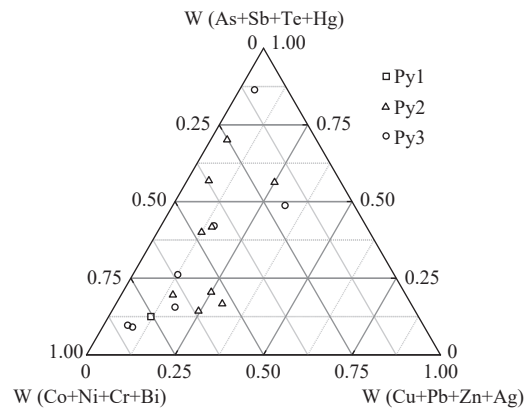


图8 黄铁矿微量元素成分特征图解

Fig. 8 Trace element discrimination diagrams for pyrite

6 结论

(1)三山岛北部海域金矿的黄铁矿主要经历 3 个成矿阶段: 第 I 阶段为黄铁绢英岩阶段, 形成黄铁矿(Py1)以粒度大、自形程度好为特点; 第 II 阶段为石英-黄铁矿-毒砂阶段, 形成黄铁矿(Py2)以自形-半自形为主, 粒度较小, 含矿性较好; 第 III 阶段为多金属硫化物阶段, 形成黄铁矿(Py3), 以他形为主, 粒度最细, 含矿性最好。

(2)该矿床深部黄铁矿的 Co/Ni 值为 1~4, 富 As 和 Co, 黄铁矿 Fe/(S+As)值较低, 这些特征证明该矿床属于岩浆热液成因矿床, 并且矿床深部仍具有较好的找矿潜力。

(3)本研究证明黄铁矿标型特征可以作为示踪矿床深部成矿潜力的重要指标, 对胶东地区其他金矿床深部找矿勘查和矿床成因研究具有借鉴意义。

致谢: 感谢中国地质科学院刘海明副研究员和浙江大学杨明副教授在成文过程中的帮助, 感谢审

稿专家对本文提出的宝贵意见。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 曹煦, 李权衡, 叶荣, 等. 新疆 210 金矿床黄铁矿标型特征及地质意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(1): 56–60.
- CAO Xu, LI Quanheng, YE Rong, et al. Typomorphic Characteristics of Pyrites in the 210 Gold Deposit, Xinjiang Province and its Geological Significance[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1): 56–60.
- 陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 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): 907–922.
- CHEN Yanjing, PIRAJNO F, LAI Yong, et al. Metallogenic Time and Tectonic Setting of the Jiaodong Gold Province, Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 907–922.
- 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 构造演化与成矿系统动力学——以胶东金矿集中区为例[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 122–130.
- DENG Jun, ZHAI Yusheng, YANG Liqiang, et al. Ectonic Evolution and Dynamics of Metallogenic System—An Example from the Gold Ore Deposits Concentrated Area in Jiaodong, Shandong, China[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(2): 122–130.
- 范宏瑞, 蓝廷广, 李兴辉, 等. 胶东金成矿系统的末端效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(9): 1504–1523.
- FAN Hongrui, LAN Tingguang, LI Xinghui, et al. Conditions and Processes Leading to Large-Scale Gold Deposition in the Jiaodong Province, Eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(9): 1504–1523.
- 高建伟, 刘文卿, 邓会娟, 等. 胶东三山岛北部海域金矿蚀变特征与微量元素迁移规律[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 245–253.
- GAO Jianwei, LIU Wenqing, DENG Huijuan, et al. Hydrothermal Alteration Characteristics and Migration Rules of Trace Elements in the North Sanshandao Sea Gold Deposit, Shandong, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 245–253.
- 郭彬, 刘帅, 陈自辉. 山东莱州三仓成矿带地质特征与构造岩相研究[J]. 矿产与地质, 2010, 24(5): 395–398.
- GUO Bin, LIU Shuai, CHEN Zihui, et al. Research on geological characteristics and structural lithofacies of Sancang metallogenic belt in Laizhou, Shandong[J]. Mineral Resources and Geology, 2010, 24(5): 395–398.
- 冯李强, 顾雪祥, 章永梅, 等. 山东蓬莱石家金矿床含金黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体的约束[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 262–277.
- FENG Liqiang, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Trace Element Geochemical Characteristics of Gold-Bearing Pyrite from the Shijia Gold Deposit in Penglai, Shandong Province and Its Constraints on Ore-Forming Fluids[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 262–277.
- 李惠, 张文华. 胶东大型金矿床的地球化学分带特征[J]. 贵金属地质, 1999, 8(4): 217–222.
- LI Hui, ZHANG Wenhua. Characteristics of Geochemical Zoning in Large and Rich Gold Deposits in Shandong Province[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1999, 8(4): 217–222.
- 胡训宇, Jowitt Simon, 王坤, 等. 胶西北蚀变岩型金矿床成矿过程三维数值模拟研究与找矿勘查启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(5): 1005–1019.
- HU Xunyu, JOWITT Simon, WANG Kun, et al. Three-dimensional numerical simulations of the ore-forming processes of the orogenic gold deposits within the northwest Jiaodong District, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(5): 1005–1019.
- 李胜荣, 申俊峰, 董国臣, 等. 成因矿物学: 原理·方法·应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- 林祖苇, 赵新福, 熊乐, 等. 胶东三山岛金矿床黄铁矿原位微区微量元素特征及对矿床成因的指示[J]. 地球科学进展, 2019, 34(4): 399–413.
- LIN Zuwei, ZHAO Xinfu, XIONG Le, et al. In-situ Trace Element Analysis Characteristics of Pyrite in Sanshandao Gold Deposit in Jiaodong Peninsula: Implications for Ore Genesis[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(4): 399–413.
- 吕古贤, 郭涛, 舒斌, 等. 胶东金矿集中区构造控岩控矿地质特征研究[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 471–478.
- LV Guxian, GUO Tao, SHU Bin, et al. Geological Characteristics of Rock-controlling and Ore-controlling Structures in the Jiaodong Gold Ore Concentration Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5): 471–478.
- 吕婧祎, 王金辉, 毛美桥, 等. 胶东三山岛北部海洋金矿床成因: 地质特征与流体包裹体的制约[J]. 矿物学报, 2023, 43(4): 521–532.
- LV Jingyi, WANG Jinhui, MAO Meiqiao, et al. The genesis of the Haiyu gold deposit in the northern part of Shanshandao gold metallogenic belt in the eastern Shandong: Constraints from geological characteristics and fluid inclusion study[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023, 43(4): 521–532.
- 毛先成, 王春燧, 刘占坤, 等. 顾及构造改造的胶西北大尹格庄金矿床三维成矿预测[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 72–84.
- MAO Xiancheng, WANG Chuntan, LIU Zhankun, et al. Three-Dimensional Metallogenic Prediction with Integration of Structural Reconstruction at the Dayingezhuang Gold Deposit, Northwestern Jiaodong Peninsula[J]. Northwestern Geology, 2023,

- 56(5): 72–84.
- 申俊峰, 李胜荣, 马广刚, 等. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 55–75.
- SHEN Junfeng, LI Shengrong, MA Guanggang, et al. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linglong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 55–75.
- 石启慧, 章永梅, 顾雪祥, 等. 山东蓬莱石家金矿床早白垩世镁铁质-长英质脉岩地球化学特征及其成因[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 99–116.
- SHI Qihui, ZHANG Yongmei, GU Xuexiang, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Early Cretaceous Mafic-Felsic Dykes in the Shijia Gold Deposit, Penglai, Shandong Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 99–116.
- 宋明春, 张军进, 张丕建, 等. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景[J]. 地质学报, 2015, 89(2): 365–383.
- SONG Mingchun, ZHANG Junjin, ZHANG Pijian, et al. Discovery and Tectonic-Magmatic Background of Superlarge Gold Deposit in Offshore of Northern Sanshandao, Shandong Peninsula, China[J]. Acta Geology Sinica, 2015, 89(2): 365–383.
- 佟景贵, 李胜荣, 肖启云, 等. 贵州遵义中南村黑色岩系黄铁矿的成分标型与成因探讨[J]. 现代地质, 2004, 18(1): 41–47.
- TONG Jinggui, LI Shengrong, XIAO Qiyun, et al. The Chemical Typomorphism Genesis of the Pyrites from the Zhongnancun Black-Rock-Series Deposit of Zunyi, Guizhou[J]. Geoscience, 2004, 18(1): 41–47.
- 王庆飞, 万丽, 刘学飞. 典型构造蚀变岩型金矿远景资源量数学模型与预测[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 341–345.
- WANG Qingfei, WAN Li, LIU Xuefei. Mathematical modeling and estimation of reserves of typical structural altered rock type gold deposit[J]. Mineral Deposit, 2007, 26(3): 341–345.
- 王中亮, 龚庆杰, 杨立强, 等. 胶东望儿山金矿床构造-热事件时序: 野外地质证据[J]. 地质与勘探, 2011, 47(6): 1067–1076.
- WANG Zhongliang, GONG Qingyang, YANG Liqiang, et al. Timing of Structural - Thermal Events in the Wang' ershan Gold Deposit, Eastern Shandong: Evidences from Field Investigations [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(6): 1067–1076.
- 韦星, 计文化, 王建田, 等. 胶东地区招平断裂带中-南段断裂与金矿成矿关系研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 225–239.
- WEI Xing, JI Wenhua, WANG Jiantian, et al. Research on the Relationship between Fault and Gold Mineralization in the Middle-south Section of Zhaoping Fault Zone in Jiaodong Peninsula[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 225–239.
- 吴明刚, 邱敦方, 宋子崇, 等. 山东平度旧店金矿床成矿物质来源和成矿模式[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 60–74.
- WU Minggang, QIU Dunfang, SONG Zichong, et al. Sources of Ore-forming Materials and Ore-forming Model of the Jiudian Gold Deposit in Pingdu, Shandong Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 60–74.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 214–226.
- YAN Yutong, LI Shengrong, JIA Baojian, et al. Composition Typomorphic Characteristics and Statistic Analysis of Pyrite in Gold Deposits of Different Genetic Types[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 214–226.
- 杨奎锋, 朱继托, 程胜红, 等. 胶东三山岛金矿构造控矿规律研究[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(2): 272–282.
- YANG Kuifeng, ZHU Jituo, CHENG Shenghong, et al. Structural Controls of the Sanshandao Gold Deposit in the Northwestern Jiaodong District, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(2): 272–282.
- 于洪军, 申俊峰, 王磊, 等. 玲珑金矿黄铁矿热电性与微量元素标型及深部金矿化评价[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 615–623.
- YU Hongjun, SHENG Junfeng, WANG Lei, et al. Thermoelectricity and trace element typomorphism of pyrite and evaluation of deep gold mineralization in the Linglong gold deposit[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 615–623.
- 钟世华, 黄宇, 刘永乐, 等. 东昆仑志留纪——泥盆纪关键金属成矿大爆发[J]. 地质通报, 2025a, 44(4): 574–586.
- ZHONG Shihua, HUANG Yu, LIU Yongle, et al. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Bulletin of China, 2025a, 44(4): 574–586.
- 钟世华, 李三忠, 丰成友, 等. 原特提斯和古特提斯碰撞岩浆与斑岩成矿: 以东昆仑祁漫塔格地区为例[J]. 地质通报, 2025b, 44(4): 511–533.
- ZHONG Shihua, LI Sanzhong, FENG Chengyou, et al. Proto-Tethys and Paleo-Tethys collisional magmas and porphyry mineralization: A case study of the Qimantagh area, East Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2025b, 44(4): 511–533.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 等. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005(4): 317–326.
- ZHOU Xuewu, LI Shengrong, LU Li, et al. Research on the Composition Typomorphism of Pyrite from Longkeng Gold-Silver Mineralization District in Wuyi, Zhejiang Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005(4): 317–326.
- Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element)[J]. (No Title), 1979.

- Brill B A. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia, and implications for ore genesis[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1989, 27(2): 263–274.
- Deng J, Wang Q F, Yang L Q, et al. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 769–780.
- 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.
- Deng J, Wang C M, Bagas L, et al. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry[J]. *Miner Deposita*, 2015(8): 987–1006.
- Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 219–274.
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H a, et al. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(6): 739–750.
- Hu F F, Fan H R, Jiang X H, et al. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Geofluids*, 2013, 13(4): 528–541.
- Li X C, Fan H R, Santosh M, et al. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 403–421.
- Large R R, Danyushevsky L, Hollit C, et al. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(5): 635–668.
- Wang C M, Deng J, Santosh M, et al. Timing, tectonic implications and genesis of gold mineralization in the Xincheng gold deposit, China: C-H-O isotopes, pyrite Rb-Sr and zircon fission track thermochronometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 65: 659–673.
- Wen B J, Fan H R, Santosh M, et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constraints from geology, fluid inclusions and stable isotope[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 643–658.
- Wen B J, Fan H R, Hu F F, et al. Fluid evolution and ore genesis of the giant Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China: Constraints from geology, fluid inclusions and H-O-S-He-Ar isotopic compositions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 171: 96–112.
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. Reactivation of the Archean lower crust: implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 146: 112–127.
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1469–1483.
- Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6–25.