

DOI: 10.12401/j.nwg.2022025

胶东三山岛北部海域金矿蚀变特征与 微量元素迁移规律

高建伟¹, 刘文卿¹, 邓会娟^{1,*}, 申俊峰², 赵国春²

(1. 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 胶东地区是中国最重要的金矿矿集区, 区内众多大型-超大型金矿集中产出, 已探明金矿资源量占全国 30% 以上。构造蚀变岩型金矿是胶东区内重要的类型之一, 三山岛北部海域金矿是该类型的典型代表。胶东三山岛北部海域金矿是近年来新发现的超大型金矿, 对该矿床的蚀变岩石进行研究具有重要意义。通过详实地岩心编录与室内研究, 查明了该矿床的主要蚀变类型及矿物组合特征, 系统采集了典型蚀变岩石样品并进行了微量元素地球化学分析, 运用质量平衡技术方法总结了热液蚀变过程中的元素迁移规律, 同时探讨了黄铁绢英岩中微量元素特征。结果表明, 在标高-1 200~-1 400 m 范围内蚀变强烈。蚀变类型有钾化、绢英岩化和黄铁绢英岩化等, 其中与成矿关系最为密切的是绢英岩化和黄铁绢英岩化; 从原岩到黄铁绢英岩的整个蚀变过程中, 流体向围岩提供了大量(迁移量>2)的 As、Sb、Te 等低温元素, 中量(迁移量为 1~2)的 Pb、Zn、Cu 等中温元素, 少量(迁移量<1)的 Co、Ni、Cr 等高温元素, 表明在标高-1 200~-1 400 m 处, 流体以中低温元素组合为主, 预测-1 200~-1 400 m 处矿体仍处于中上部, 深部还有很好的找矿潜力。

关键词: 热液蚀变; 质量平衡; 金矿; 胶东

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0245-09

Hydrothermal Alteration Characteristics and Migration Rules of Trace Elements in the North Sanshandao Sea Gold Deposit, Shandong, China

GAO Jianwei¹, LIU Wenqing¹, DENG Huijuan^{1,*}, SHEN Junfeng², ZHAO Guochun²

(1. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Jiaodong area, the most important gold province in China, is an area with concentration occurrence of large and super large gold deposits, the proved reserves in Jiaodong Peninsula account for more than 30% of the country. The fracture zone altered type gold deposit is one of the important types in the area; The Sanshandao North Sea gold deposit is a typical representative of this type. This gold deposit is a super-large gold deposit newly discovered in recent years, it is important to study the eroded rock of this deposit. Based on the detailed

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2022-01-25; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“全国实物地质资料数据更新与服务”(DD20221786)资助。

作者简介: 高建伟(1986-), 高级工程师, 主要从事矿床学、实物地质资料产品开发等工作。E-mail: cugbgjw@163.com。

* 通讯作者: 邓会娟(1967-), 正高级工程师, 主要从事矿产勘查及实物地质资料管理工作。E-mail: 1215356662@qq.com。

rock core compilation and interior study, the main corrosion type and mineral combination characteristics were identified. Samples of typical eroded rock were collected and underwent trace element geochemical analysis, the element migration rules in the hydrothermal erosion are summarized by mass balance technique, and the characteristics of trace elements in beresite are also discussed. The results show that, in the elevation range-1 200 to-1 400 m, corrosion types are kalification, sericitization and beresitization. Among them, the most closely related to mineralization are sericitization and beresitization. From the original rock to the beresite, the fluid provides a large number of low temperature elements (migration value > 2) such as As, Sb, Te, moderate medium temperature elements (migration values are 1~2) such as Pb, Zn, Cu, and a small number of high temperature elements (migration value < 1) such as Co, Ni, and Cr. It is shown that at-20 -1 200 to -1 400 m, it is predicted that the ore body at -1 200 to -1 400 meters is still in the upper middle part, and there is still good prospecting potential in the depth.

Keywords: hydrothermal alteration; mass balance; gold deposit; Jiaodong

胶东三山岛北部海域金矿(简称“海域金矿”)位于三山岛金矿北侧,是近年来发现的海域最大规模金矿。宋明春等(2015)研究发现,海域金矿与位于其南侧的三山岛金矿的深部主矿体相连,实际上为同一矿床。矿体全长超过3 km,金的资源总量超过500 t,是中国规模最大的单一金矿体。海域金矿自发现以来,前人对其成矿地质背景(宋明春等,2015)、成矿流体来源及演化(姜晓辉等,2011)、矿床成因(林祖苇等,2019)、成矿构造(杨奎锋等,2017;刘日富等,2019)和黄铁矿的晶胞参数及热电性(高建伟等,2020)等进行了深入研究,积累了丰富的成果。王建等(2020)对该矿床的热液蚀变作用进行了研究,探讨了蚀变过程中的元素迁移,但主要集中在常量元素,微量元素在热液蚀变过程的迁移规律和对成矿的影响讨论较少。笔者从微量元素入手,探讨其在绢英岩化和黄铁绢英岩化蚀变阶段的迁移规律,进而预测矿床深部的找矿潜力。

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(吕古贤,2001;陈衍景等,2004;吕古贤等,2006)。区内基底岩石为太古宙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地层(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60%以上的基岩露头,

主要为中生代玲珑序列中的黑云母二长花岗岩(160~150 Ma,壳源成因)(王中亮等,2011; Yang et al., 2012)和中生代郭家岭序列的似斑状花岗闪长岩(132~126 Ma,壳幔混合成因)(Yang et al., 2012),该区绝大部分金矿床均产于这些花岗岩中(图1)。

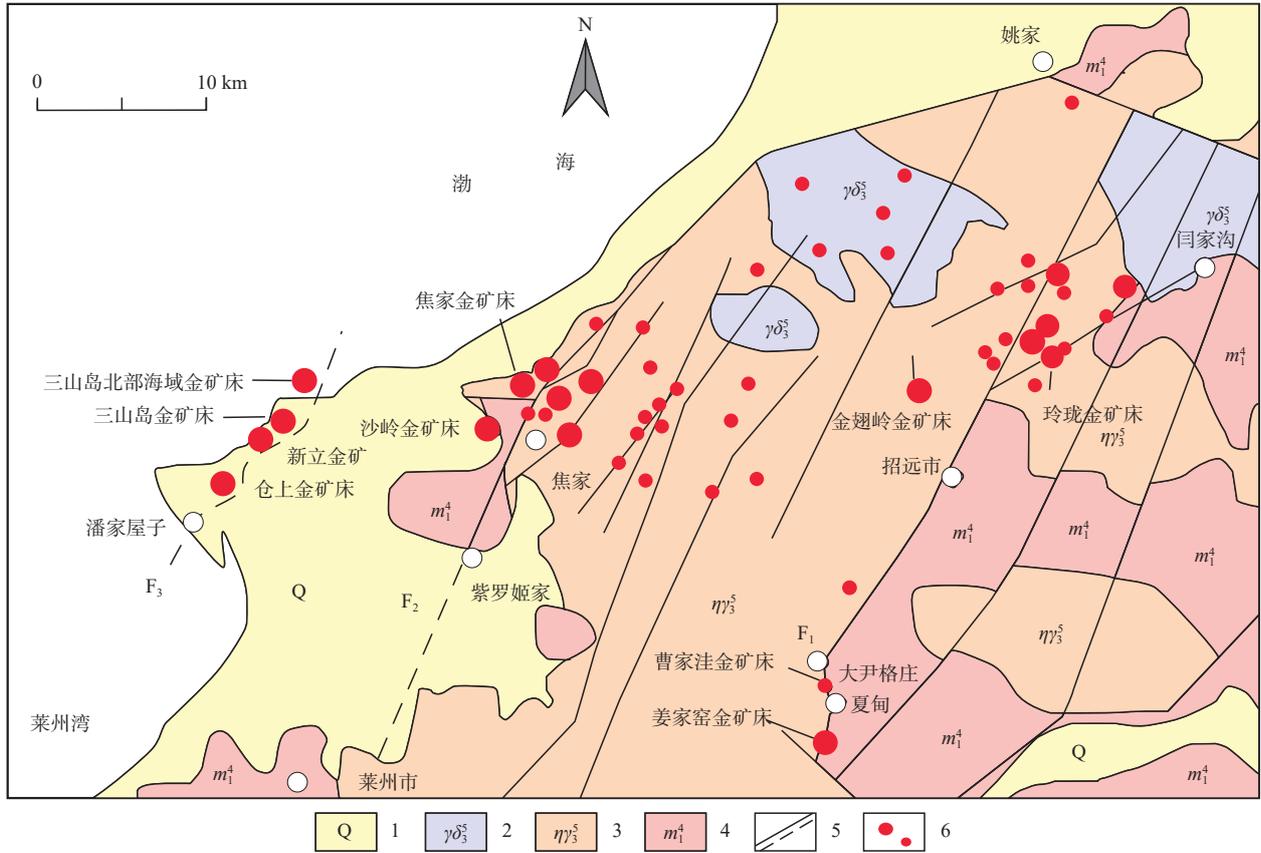
研究区内构造非常发育,自西向东依次主要为三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂(邓军等,1996;吴晋超等,2021)。其中,三山岛断裂是三山岛金矿及其北部海域金矿的主控断裂(图1),由北到南依次控制了三山岛、新立、仓上3个特大型金矿。该断裂在陆地上出露长12 km、宽20~400 m,总体走向40°~50°,倾向南东,倾角30°~40°,局部达80°,平面上呈“S”型。三山岛北部海域金矿位于该断裂北端向海域延伸位置(宋明春等,2015)。

2 矿床地质特征

海域金矿区内出露地层简单,主要为第四系。钻孔揭露第四系主要为胶东群,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)。前人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床最主要的含矿岩体。此外,矿区内还发育一些岩脉,主要是一些中基性岩脉,包括闪长玢岩、正长斑岩和煌斑岩等。

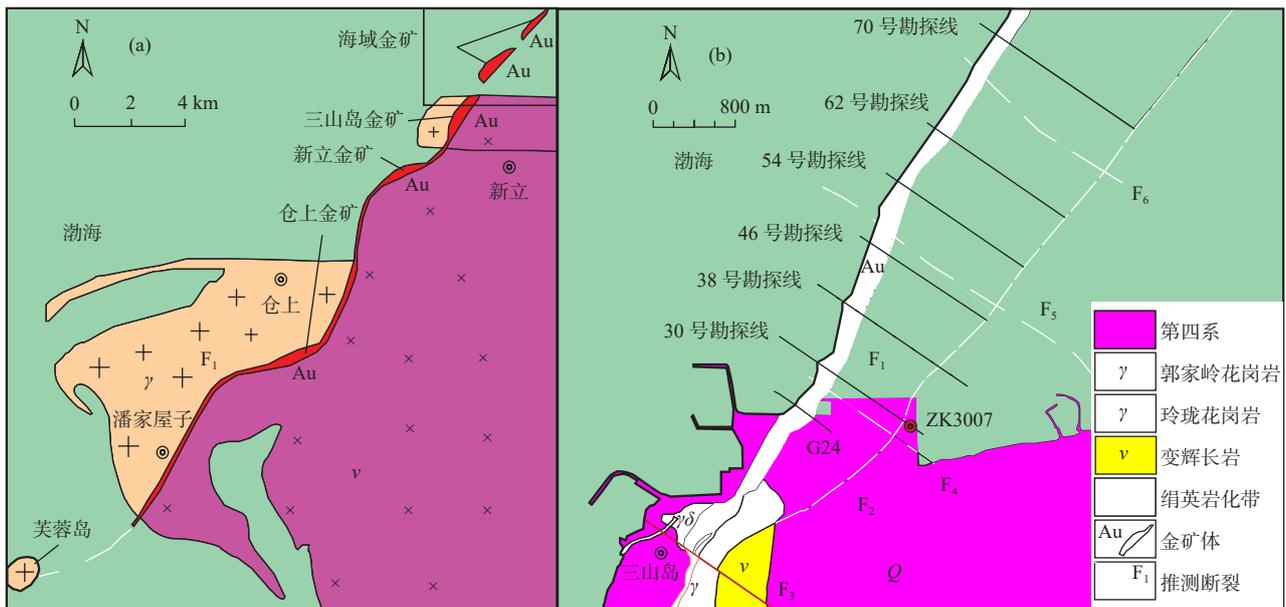
矿区构造主要为北东向与北西向断裂。北东向断裂控制矿体产出,倾向南东、倾角35°~40°,断裂上



1.第四系; 2.郭家岭型花岗岩; 3.玲珑型花岗岩; 4.新太古代变质岩系; 5.断裂; 6.金矿位置;
F₃.三山岛断裂; F₂.焦家断裂; F₁.招平断裂

图 1 胶西北区域地质略图(据宋明春, 2015 修改)

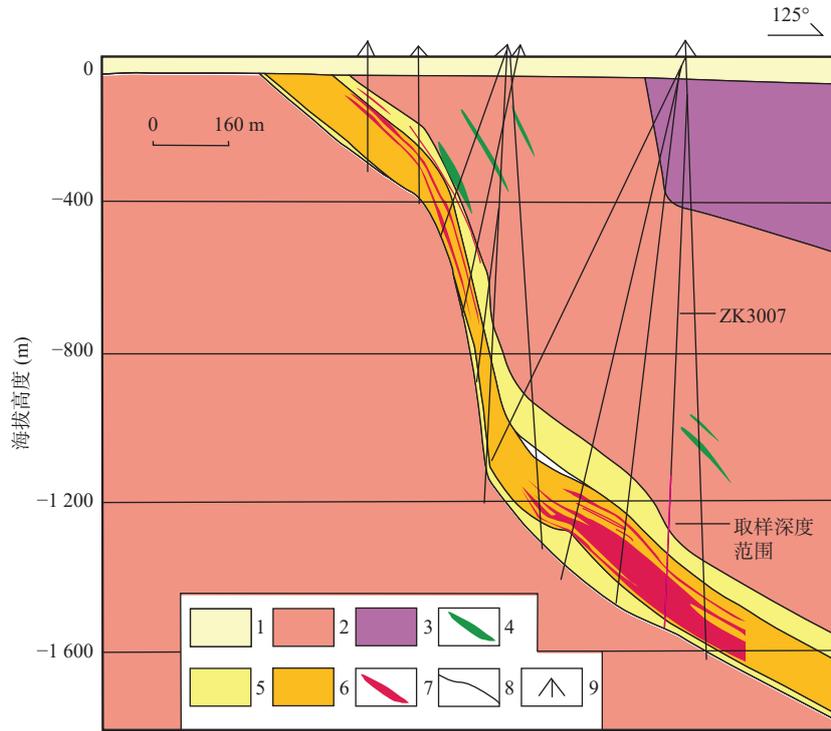
Fig. 1 Simplified geological map of the northwestern Jiaodong area



a.矿床地质简图; b.矿区勘地质简图与探线分布简图

图 2 三山岛北部海域金矿地质图(据王建等, 2020 修改)

Fig. 2 The geological map of the super lager Sanshandao North Sea gold deposit, Shandong Peninsula



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

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 super large Sanshandao North Sea gold deposit

盘为玲珑黑云母花岗岩，下盘为玲珑黑云母二长花岗岩和郭家岭花岗闪长岩，断裂具有继承-活化多期次活动特征。北西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(图3)，资源量超过400t(宋明春等, 2015)，为超大型金矿。金矿体呈脉状或透镜状赋存于绢英岩化带内。其中，I-4号矿体为该金矿床的主要矿体，占矿床总储量的74.9%，沿走向长约为1446m，平均厚度为30.91m，沿倾向最大延伸达1072m，深部仍未封闭，走向35°，倾向南东向，倾角21°~52°，平均为39°，平均品位为5.23g/t；I-11号矿体占该金矿总储量的9.6%，沿走向长约1477m，平均厚度为8.05m，沿着倾向延伸590m，矿体呈透镜状，走向35°，倾向南东向，倾角32°~45°，平均品位2.62g/t；其余多为小矿体，具有形态简单，厚度小的特征。

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4a)、压碎结构或碎裂结构(图4b)、乳滴状结构(图4c)、交代残余结构(图4d)等。矿石构造主要为浸染状构造(图4e)，次为细脉状(图4f)、网

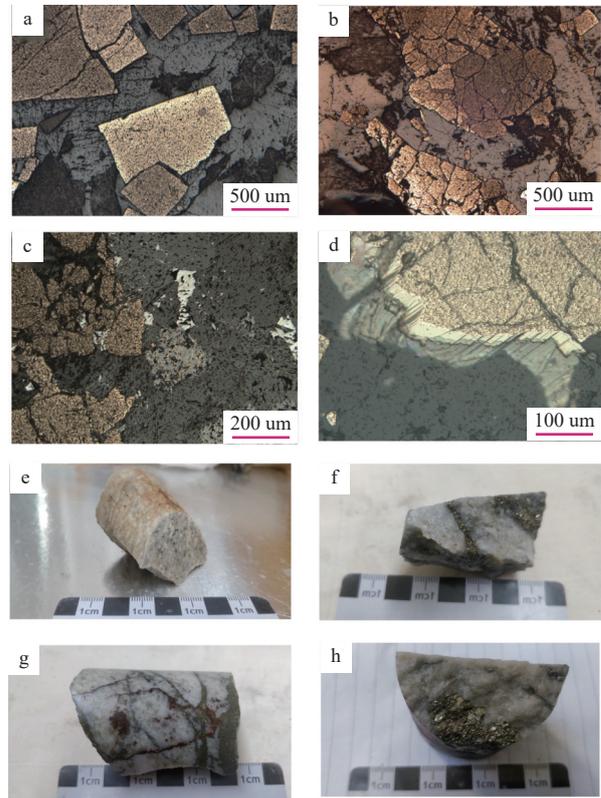


图4 矿石的结构及构造特征

Fig. 4 the textural and structural characteristics of gold ores

脉状(图4g)、团块状(图4h)构造。

3 蚀变类型及特征

3.1 蚀变特征

据岩心观察表明, 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、钾长石化二长花岗岩、绢英岩、黄铁绢英岩。蚀变带较宽, 可达 320 m, 其中绢英岩、黄铁绢英岩化带与金矿化关系最为密切, 其中黄铁绢英岩是主矿体的赋存部位, 以浸染状或细脉浸染状矿化为主。

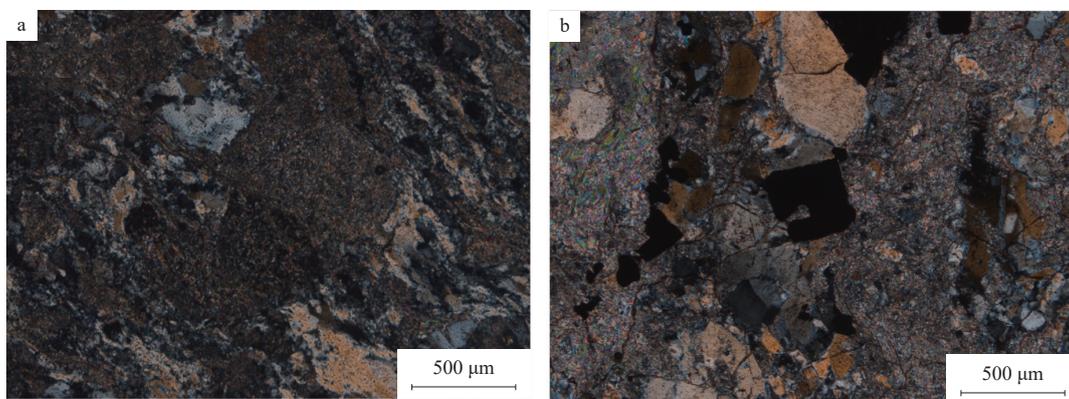


图5 矿蚀变特征

Fig. 5 the Map of altered characteristics

黄铁绢英岩: 灰-灰绿色, 主要矿物成分有绢云母(约占 40%~50%)、石英(约占 30%~40%)和黄铁矿(约占 5%~10%); 其他如方解石等, 约占 5%。鳞片粒状变晶结构, 块状构造。石英: 他形粒状, 波状消光, 常发育受动力变质作用而形成的变形纹。绢云母: 鳞片状, 多呈聚集体分布, 或者在一个聚集体里分布着细粒石英, 形成石英、绢云母集合体。黄铁矿: 半自形晶粒状, 压碎结构, 金矿物分布于裂隙中。

4 元素地球化学

4.1 样品采集及分析测试

在对海域金矿 ZK3007 钻孔岩心详细编录的基础上, 采集了新鲜样品进行光薄片磨制, 室内镜下观察及微量元素地球化学分析。样品共 10 件, 样品标号中的数字代表取样深度, 其中二长花岗岩 2 件、绢英岩 4 件、黄铁绢英岩 4 件。

测试在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。用于测试的岩石样品均粉碎至 200 目, 进行微

3.2 蚀变带内主要岩石特征

蚀变带内与金矿关系最为密切的就是绢英岩化阶段(图5a)和黄铁绢英岩化阶段(图5b)。

绢英岩: 绿-灰绿色, 主要矿物成分有绢云母(约占 50%~60%)和石英(约占 30%~40%); 其他如长石、黄铁矿等, 约占 5%。鳞片粒状变晶结构, 块状构造。石英呈他形粒状分布, 波状消光; 绢云母呈鳞片状分布; 钾长石呈他形粒状, 交代斜长石; 斜长石呈板状, 聚片双晶发育; 黄铁矿呈他形粒状, 或沿裂隙呈小细脉充填。

量元素含量分析, 以了解不同蚀变类型岩石的元素迁移特征。分析仪器为 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS, 测试方法遵循 DZ/T 0223-2001 电感耦合等离子体质谱方法通则, 测试精度优于 5%, 检出限为 10^{-9} 。测试结果见表 1。

4.2 蚀变过程中的元素迁移

成矿流体与围岩相互作用导致围岩蚀变, 其在微观上表现为元素带入带出, 质量平衡分析可以定量研究蚀变作用过程中元素迁移 (Gresens, 1967; Grant, 1986; 张可清, 2002; 刘洋等, 2017; 高建伟等, 2019)。Gresens(1967)提出 Gresens 方程, 成为研究开放系统中元素质量迁移的经典方法; Grant(1986)对方程进行了简化, 采用等浓度图解来确定蚀变系统中的不活动元素, 进而以不活动元素为参考来计算蚀变前后岩石中元素的质量迁移, 但如何选择不活动元素是进行质量平衡计算中的关键问题(Gong, 2011)。

利用质量平衡方程进行元素质量迁移计算的关键是确定蚀变过程中的不活动元素。所谓不活动元素是指岩石在发生交代蚀变的化学变化中, 既不从外

表1 三山岛北部海域金矿岩石微量元素含量表(10^{-6})Tab. 1 Compositions of trace elements of rocks in the super lager Sanshandao North Sea gold deposit (10^{-6})

岩性	二长花岗岩			绢英岩				黄铁绢英岩					
	样号	H1169	H1172	均值	H1200	H1358	H1366	H1425	均值	H1186	H1388	H1392	H1417
Ag	0.071	0.035	0.053	0.510	0.820	1.660	0.870	0.965	10.300	20.900	8.310	12.300	12.953
As	3.400	0.470	1.935	34.900	33.700	98.600	25.800	48.250	2 241.000	935.000	203.000	122.000	875.250
Pb	34.000	35.000	34.500	52.400	113.000	174.000	58.600	99.500	226.000	107.000	268.000	596.000	299.250
Zn	82.800	36.000	59.400	16.400	380.000	112.000	31.500	134.975	97.200	39.400	23.600	8.550	42.188
Cu	25.300	3.000	14.150	20.900	42.400	38.600	60.600	40.625	107.000	483.000	23.100	61.700	168.700
W	1.430	0.170	0.800	0.810	2.440	3.590	3.900	2.685	1.390	1.890	5.140	3.150	2.893
Mo	0.420	0.950	0.685	0.540	0.520	0.290	1.030	0.595	0.590	0.950	0.460	0.760	0.690
Co	2.940	0.960	1.950	4.850	2.330	1.990	5.040	3.553	3.370	3.950	6.100	5.120	4.635
Ni	27.600	1.840	14.720	22.900	23.300	18.400	42.100	26.675	29.500	35.000	12.600	30.900	27.000
Cr	200.000	120.000	160.000	197.000	245.000	185.000	469.000	274.000	310.000	308.000	89.100	220.000	231.775
Sb	0.051	0.280	0.166	0.330	0.740	1.120	0.290	0.620	8.600	1.760	0.930	0.260	2.888
Bi	0.020	0.580	0.300	0.380	0.780	1.270	2.010	1.110	3.470	7.370	18.900	24.100	13.460
Hg	0.007	0.008	0.0075	0.008	0.0140	0.008	0.005	0.009	0.011	0.014	0.007	0.004	0.009
Ti	738.000	624.000	681.000	751.000	590.000	1 045.000	521.000	726.750	749.000	336.000	908.000	496.000	622.250
Sn	1.850	2.000	1.925	2.300	2.910	2.430	5.180	3.205	2.270	2.010	1.720	3.400	2.350
Te	0.003	0.008	0.006	0.071	0.004	0.003	0.082	0.040	0.011	0.062	0.051	0.053	0.044

界加入到岩石中,也不从岩石中迁出的元素。实际上,元素的活动性只是一个相对概念,相对于其他元素,活动性极小(或溶解度极小)的元素可被认为是不活动元素(张可清, 2002)。

在热液蚀变过程中, Al_2O_3 和 TiO_2 通常被认为是不活动的,常被选为不活动元素来进行质量平衡计算(Grant, 1986)。本文选择 Ti 为相对不活动组分进行计算。

质量平衡计算是基于这样一个基本的物质转化方程:

$$M_{ip} + Q_i = M_{id} \quad (1)$$

式中: M_{ip} 为元素 i 在原岩中的总质量; Q_i 为元素 i 在岩石发生变化中的总质量; M_{id} 为元素 i 在子岩(或蚀变岩)中的总质量。

$$\text{同时, } M_i = W_i \cdot M \quad (2)$$

式中: M_i 为样品中元素 i 的质量; W_i 为样品中元素 i 的质量分数; M 为样品的总质量。

将公式(2)代入公式(1)可得:

$$W_{ip} \cdot M_p + Q_i = W_{id} \cdot M_d \quad (3)$$

式中: W_{ip} , W_{id} 分别为原岩和子岩中元素 i 的质量

分数; M_p , M_d 分别为原岩和子岩的总质量。

将公式(3)两边均除以 $(W_{ip} \cdot M_p)$ 并移项得:

$$\begin{aligned} T_i / (W_{ip} \cdot M_p) &= (W_{id} \cdot M_d) / (W_{ip} \cdot M_p) - 1 \\ &= (W_{id} / W_{ip}) \cdot (M_d / M_p) - 1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,左侧为地球化学过程中活动元素的相对质量迁移量,可记为 X_{gp} (Gong, 2011),即

$$X_{gp} = (W_{id} / W_{ip}) \cdot (M_d / M_p) - 1 \quad (5)$$

当 X_{gp} 取正值时代表该过程中元素带入体系,取负值则表明元素迁出体系。

当选择 Ti 作为不活动元素时,其 $X_{gp}=0$,可利用原岩与子岩中 Ti 含量计算出子岩相对于原岩的质量变化率 M_d/M_p

$$M_d / M_p = W_{T_{ip}} / W_{T_{id}} \quad (6)$$

公式(6)中的质量变化率可利用公式(5)计算其他活动元素的相对质量迁移量。计算过程中,原岩和蚀变岩的质量取多个样品的平均值计算(表2)。

从表2、图6中可以看出,在绢英岩化阶段,与未蚀变的二长花岗岩相比,除了 Mo 外,所测微量元素含

表 2 三山岛北部海域金矿构造蚀变带微量元素化学成分迁移表

Tab. 2 Trace elements migration of alteration zone in the Sanshandao North Sea gold deposit

成分	X_{gp} (原岩-绢英岩化)	X_{gp} (绢英岩化-黄铁绢英岩化)
Ag	16.91	14.66
As	23.51	20.17
Pb	1.84	2.51
Zn	1.23	-0.65
Cu	1.82	3.85
W	2.30	0.26
Mo	-0.15	0.35
Co	0.79	0.52
Ni	0.78	0.18
Cr	0.68	-0.01
Sb	2.67	4.44
Bi	2.64	13.15
Hg	0.18	0.17
Sn	0.64	-0.14
Te	5.55	0.28

量均增加, 其中 Ag、As、W、Sb、Bi、Te 等元素大量带入($X_{gp}>2$), Cu、Pb、Zn 等元素中量带入(X_{gp} 为 1~2), Co、Ni、Cr 等元素少量带入($X_{gp}<1$); 在黄铁绢英岩阶段, 与绢英岩相比, 除 Zn、Cr、Sn 外, 所有微量元素含量均增加, 其中 Ag、As、Cu、Pb、Sb、Bi 等元素大量带入($X_{gp}>2$), W、Mo、Co、Cr、Ni、Hg、Te 等元素少量带入($X_{gp}<1$)。

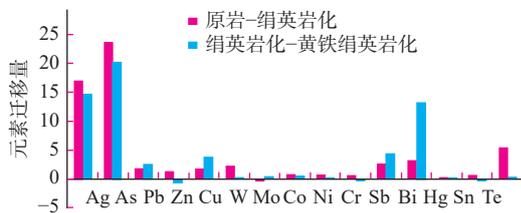


图 6 三山岛北部海域金矿蚀变过程微量元素得失图

Fig. 6 Gain-loss diagram for trace elements in the different alteration zones in the Sanshandao North Sea gold deposit

5 讨论

海域金矿内发育的蚀变主要为钾长石化、绢英岩化和黄铁绢英岩化。其中在钾化阶段, 钾长石常以团

块状或角砾存在, 在矿物学中表现为钾长石对斜长石的交代和钾长石自身的次生加大, 属于成矿前的蚀变, 微量元素迁移量不多(王建等, 2020), 说明在碱性条件下, 微量元素的活跃度较低。从绢英岩化阶段开始, 很多微量元素进入蚀变岩参与成矿作用的进行, 微量元素在成矿过程中扮演着重要角色(表 2、图 6)。在绢英岩化阶段, Ag 等成矿元素开始大量富集, 指示成矿作用在此阶段开始进行; 同时, 此阶段 Ag、As、Sb 等低温元素大量带入, Cu、Pb、Zn 等中温元素中量带入, 说明成矿开始后, 流体向围岩提供了大量的中低温元素。在黄铁绢英岩化阶段, 与矿化有关的 Ag、Cu、Pb 等元素明显迁入, 指示该蚀变为成矿的第一个阶段; 同时, 同样是 Ag、As、Cu、Pb、Sb 等中低温元素持续带入, Co、Ni、Cr 等高温元素少量带入, 结合绢英岩化阶段和黄铁绢英岩化阶段的蚀变, 说明-1 200 m~-1 400 m 标高处的流体应以中低温元素组合为主。较绢英岩阶段, 黄铁绢英岩阶段表现为大量的黄铁矿形成, Au 伴随成矿, 同时很多微量元素参与成矿; 和原岩相比, 黄铁绢英岩中迁入大量微量元素, 将黄铁绢英岩样品的高温、中温、低温元素进行投图(图 7), 同样发现所有点皆靠近中低温元素组合区域, 也说明此标高的流体应为一套中低温元素组合。

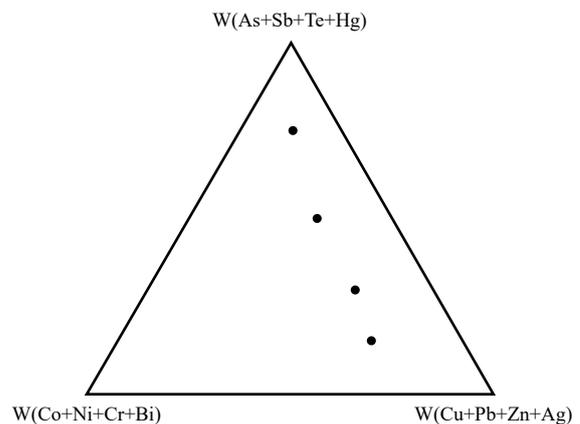


图 7 黄铁绢英岩化阶段主要微量元素成分特征图解 (据于洪军等, 2011 修编)

Fig. 7 Triangle diagram of sericitic quartzite pyrite alteration composition of the Sanshandao North Sea gold deposit

同时, 根据现有的勘查资料, 表明海域金矿同样具有阶梯式成矿的特点(宋明春等, 2015), -1 200 m~-1 400 m 标高内的矿体为第二成矿空间的矿体, -1 200 m~-1 400 m 标高内的蚀变岩石又指示该标高范围内的流体为中低温元素组合, 故推断-1 200 m~

-1 400 m 标高范围内的矿体为第二成矿空间矿体的上部,深部仍具有非常好的找矿潜力。

6 结论

(1)海域金矿蚀变强烈,主要类型有钾长石化、绢英岩化和黄铁绢英岩化。其中,钾长石化为成矿前蚀变,绢英岩化和黄铁绢英岩化阶段和矿化关系最为密切。

(2)在绢英岩化阶段,Ag、As、W、Sb、Bi、Te等元素大量带入,Cu、Pb、Zn等元素中量带入,Co、Ni、Cr等元素少量带入;在黄铁绢英岩化阶段,Ag、As、Cu、Pb、Sb、Bi等元素大量带入,W、Mo、Co、Cr、Ni、Hg、Te等元素少量带入。

(3)在蚀变过程中,中低温元素大量带入,预示着在-1 200 m~-1 400 m 标高范围的流体为中低温元素组合;结合现有的勘查资料,认为-1 200 m~-1 400 m 标高范围内的矿体为第二成矿空间矿体的上部,深部仍具有非常好的找矿前景。

参考文献(References):

- 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. Timing and tectonic setting of large-scale mineralization in the Jiaodong Ore Set[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 20(4): 907-922.
- 邓军, 徐守礼, 方云, 等. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-98.
- DENG Jun, XU Shouli, FANG Yun, et al. Tectonic system and gold mineralization dynamics in northwestern Jiaodong [M]. Beijing: Geological Press, 1996: 1-98.
- 高建伟, 滕超, 赵国春, 等. 山东金翅岭金矿蚀变特征与元素迁移规律[J]. *现代地质*, 2019, 33(5): 1036-1045.
- GAO Jianwei, TENG Chao, ZHAO Guochun, et al. The Alteration Characteristics and Element Migration Law of the Jinchiling Gold Deposit, Shandong Province[J]. *Geoscience*, 2019, 33(5): 1036-1045.
- 高建伟, 申俊峰, 李国武, 等. 胶东三山岛北部海域金矿黄铁矿晶胞参数与热电性特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(6): 1205-1214.
- GAO Jianwei, SHEN Junfeng, LI Guowu, et al. Characteristics of Cell Parameters and Thermoelectricity of the Pyrite in the Sanshandao North Offshore Gold Deposit, Shandong Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(6): 1205-1214.
- 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. Research on geological characteristics and structural lithofacies of Sancang metallogenic belt in Laizhou, Shandong[J]. *Minerals and Geology*, 2010, 24(5): 395-398.
- 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1327-1340.
- JIANG Xiaohui, FAN Hongrui, HU Fangfang, et al. Comparative studies on fluid inclusion in different depths and ore genesis of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(5): 1327-1340.
- 林祖菁, 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.
- 刘日富, 周鑫, 吕雨璐, 等. 胶东三山岛-仓上断裂带控矿规律与找矿勘查实践[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(2): 528-541.
- LIU Rifu, ZHOU Xin, LV Yulu, et al. Ore-controlling Regularity and Prospecting Practice in the Sanshandao-Cangshang Fault Zone, Jiaodong Area[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(2): 528-541.
- 刘洋, 张海东, 王金雅. 胶东地区夏甸金矿床构造蚀变带元素质量迁移与 Au 沉淀关系研究[J]. *西北地质*, 2017, 50(04): 176-185.
- LIU Yang, ZHANG Haidong, WANG Jinya. Elements Migration in Tectonic-alteration Zones of the Xiadian Gold Deposit, Eastern Shandong Province and Its Relationship with Au Precipitation[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(04): 176-185.
- 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]. *Journal of Earth Sciences*, 2006, 27(5): 471-478.
- 吕古贤. 胶东玲珑—焦家式金矿床矿源岩系[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(3): 140-143.
- LV Guxian. Research on ore source series of the linglong-jiaojia-type gold deposits[J]. *Geological Geochemistry*, 2001, 29(3): 140-143.
- 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[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 Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 365–383.
- 王建, 朱立新, 马生明, 等. 胶东三山岛北部海域金矿床热液蚀变作用研究[J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1807–1826.
- WANG Jian, ZHU Lixin, MA Shengming, et al. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic Linglong-type granite-hosting gold mineralization at the Haiyu gold deposit, Jiaodong gold province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1807–1826.
- 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 Qingjie, YANG Liqiang, et al. Timing of Structural-thermal Events in the Wang'ershan Gold Deposit, Eastern Shandong: Evidence from Field Investigations[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(6): 1067–1076.
- 吴晋超, 申俊峰, 申玉科, 等. 胶东黑岚沟金矿田黄铁矿热电性研究及深部成矿预测[J]. *西北地质*, 2021, 54(02): 111–125.
- WU Jinchao, SHEN Junfeng, SHEN Yuke, et al. The Thermoelectricity Property and Deep Metallogenic Forecast of Pyrite in Heilangou Gold Field of Jiaodong, Shandong Province[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(02): 111–125.
- 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, SHEN Junfeng, WANG Lei, et al. Thermoelectricity and Trace Elements Typomorphism of Pyrite and Evaluation of Deep Gold Mineralization in the Linglong Gold Deposit[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(4): 615–623.
- 张可清, 杨勇. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(3): 104–107.
- ZHANG Keqing, YANG Yong. Introduction of the method for mass balance calculation in altered rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2002, 21(3): 104–107.
- Deng Jun, Wang Qingfei. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 219–274.
- Gong Qingjie, Deng Jun, Yang Liqiang, et al. Behavior of major and trace elements during weathering of sericite-quartz schist[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 1–13.
- Grant J A. The isocon diagram—a simple solution to Gresens equation for metasomatic alteration[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(8): 1976–1982.
- Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism [J]. *Chemical Geology*, 1967, (2): 47–65.
- Yang Kuifeng, Fan Hongrui, 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, 146–147: 112–127.
- Zhai Mingguo, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6–25.