

胶西北大尹格庄金矿岩石化学与成矿作用

刘庚寅^{1,2}, 杨斌^{1,2}, 彭省临^{1,2}, 刘海刚^{1,2}, 陈艳^{1,2}, 梁琴琴^{1,2}, 陈燕^{1,2},
刘贤红^{1,2}, 李守生³, 王慧³, 窦源东³, 杨玉泉³

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083,
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 山东招金集团, 招远 265400)

摘要: 大尹格庄金矿床位于招平断裂带中段, 金矿体主要赋存于招平断裂主裂面下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩中。岩、矿石主成分分析显示: 胶东群变质岩与煌斑岩成分均与玄武岩的相似, 大尹格庄矿区煌斑岩与焦家矿区和玲珑矿区煌斑岩在化学成分上差异明显。绢英岩化蚀变过程中, 显著带入 Si 和 K, 而 Na、Ca 和 Mg 等组分带出明显。稀土元素分析显示: 黄铁绢英岩化蚀变和金成矿过程中显著带出稀土元素, 胶东群变质岩的原岩与拉斑玄武岩有关, 而煌斑岩及其他样品的初始物源又与胶东群变质岩有关。微量元素分析显示: Au、Ag、Cu、Pb、As、Mo、Bi、Rb 和 Sr 等元素在金矿体及黄铁绢英岩化蚀变岩中呈聚集趋势, 但 Au 元素的聚集与 Cu、As、Pb、Zn、Hg 和 Ag 等元素的聚集不同步。大尹格庄金矿的形成与燕山期构造运动和岩浆活动关系密切, 并受到断裂构造系统、胶东群变质岩、玲珑花岗岩及伴生岩脉等条件的复合制约, 长期大规模热液对流循环及所伴随的动态开放条件下的水岩反应和物质运动是大尹格庄金矿成矿的关键。

关键词: 岩石化学; 水岩反应; 成矿作用; 大尹格庄金矿; 胶西北

中图分类号: P611; P618.51

文献标志码: A

Petrogeochemistry and metallization in Dayingezhuang gold deposit, northwest Jiaodong peninsula

LIU Geng-yin^{1,2}, YANG Bin^{1,2}, PENG Sheng-lin^{1,2}, LIU Hai-gang^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, LIANG Qin-qin^{1,2},
CHEN Yan^{1,2}, LIU Xian-hong^{1,2}, LI Shou-sheng³, WANG Hui³, DOU Yuan-dong³, YANG Yu-quan³

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Shandong Zhaojin Group Corporation, Zhaoyuan 265400, China)

Abstract: The Dayingezhuang gold deposit was located in the middle part of Zhaoping fault zone. The main orebodies occurred in cataclasite and granite with beresitization alteration in the fault's footwall. The principal component analysis of the rocks shows that the compositions of Jiaodong Group metamorphic rocks and lamprophyres are similar with those of basalts; the chemical compositions of lamprophyres in Dayingezhuang diggings are different from those in Jiaojia and Linglong diggings. In the process of sericitization, Si and K are carried in significantly; Na, Ca and Mg are brought out obviously. The analysis of rare earth elements shows that rare earth elements are brought out obviously in the process of beresitization and mineralization. The virgin rocks of Jiaodong group metamorphic rocks are connected with tholeiite. The original source of lamprophyres and other rock samples are related to Jiaodong group metamorphic rocks. The analysis of trace elements shows the collective trend of Au, Ag, Cu, Pb, As, Mo, Bi, Rb, Sr etc in ores and beresitization altered rocks, but the aggregation of Au is out of sync with that of Cu, As, Pb, Zn, Hg, Ag and so on. The formation of Dayingezhuang gold deposit has close relation with tectonic movement and magmatism in Yanshanian period and is

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAB01B07); 国家重点基础研究计划前期研究专项课题(2007CB416608)

收稿日期: 2011-12-01; **修订日期:** 2012-01-04

通信作者: 杨斌, 高级工程师, 博士; 电话: 0731-88836469; E-mail: 903755562@qq.com

restricted by the fracture structure system, Jiaodong group metamorphic rocks, Linglong granite and concomitant dikes. Long-term and large-scale convective circulation of hydrothermal solution and concomitant water-rock reactions and motion of matter in the dynamic-open condition are the keys of the mineralization in Dayingezhuang gold deposit.

Key words: petrochemistry; water-rock reaction; mineralization; Dayingezhuang gold deposit; northwest Jiaodong peninsula

关于胶西北地区金矿的成因有多种不同的观点,如幔源流体成岩成矿^[1]、岩浆水成矿^[2-3]、大气降水热液成矿^[4]、多层次流体循环和混合成矿^[5]等,而对于矿区主要地质体,如玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩、胶东群变质岩与金成矿的关系以及这些地质体间的成因演化关系也分歧较多^[6-8]。

本文作者通过对大尹格庄金矿主要围岩,包括玲珑花岗岩、胶东群变质岩、燕山期煌斑岩及主要蚀变岩常量元素、稀土元素和微量元素的分析,探索主要围岩的成因演化关系及蚀变矿化过程中元素的迁移、聚集规律和成矿作用机理。

1 矿区地质概况

大尹格庄金矿床位于招平断裂带的中段,是胶东地区著名的大型金矿床之一。

区内胶东群变质岩及玲珑花岗岩广泛出露,各类脉岩及断裂构造发育如图1所示。

区内断裂主要有招平断裂、大尹格庄断裂、南周家断裂和南沟断裂等。招平断裂在区内总体走向20°,倾向SE,倾角21°~58°,宽40~80 m,由糜棱岩、碎裂岩及断层泥等组成,断层泥是招平断裂主裂面的标志,糜棱岩主要分布在主裂面上盘,发育条带状和纹层状构造,碎裂岩多见于主裂面下盘花岗岩岩石中,发育碎裂结构和碎斑结构。

金矿体大部分赋存于主裂面下盘的黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩中,矿体形态、产状和分布严格受招平断裂带控制。主裂面上盘主要为胶东群变质岩,发育有碳酸盐化、绿泥石化与褐铁矿化蚀变。

区内共有2个矿体群,以大尹格庄断裂为界,北部为②号矿体群,南部为①号矿体群,它们呈隐伏状态分布于招平断裂带的下盘,矿体形态、产状和分布严格受招平断裂带的控制。

矿床中围岩蚀变分带清楚,自招平断裂带主裂面向下盘玲珑花岗岩方向依次出现:断层泥→绢英岩化糜棱岩→绢英岩或黄铁绢英岩化碎裂岩→绢英岩化花

岗质碎裂岩→钾长绢英岩化花岗岩→正常花岗岩。

金成矿可以划分为4个主要成矿阶段,即石英-粗粒黄铁矿阶段、石英-(浸染状或细脉状)黄铁矿阶段、石英-黄铁矿-多金硫化物阶段及石英-碳酸盐(方解石)-黄铁矿阶段。其中,石英-(浸染状或细脉状)黄铁矿阶段为金的主要成矿阶段。

2 岩石及矿石主成分特征

测试对象包括大尹格庄矿区煌斑岩、招平断裂带主裂面上盘胶东群变质岩、主裂面附近糜棱岩、主裂面下盘钾化花岗岩、黄铁绢英岩(金矿石)和绢英岩化碎裂岩等,硅酸盐全分析结果见表1。

大尹格庄矿区煌斑岩中SiO₂含量与焦家矿区煌斑岩的(SiO₂的质量分数为49.30%~50.43%^[9])接近,但显著低于玲珑矿区煌斑岩的(SiO₂的质量分数为52.33%~55.57%^[9])。在TAS分类图上,大尹格庄矿区煌斑岩样品投点落在玄武岩区,而焦家矿区煌斑岩样品投点则落在玄武岩区、粗面玄武岩区及碱玄岩区,玲珑矿区煌斑岩样品投点落在玄武质安山岩及安山岩区,显示大尹格庄矿区煌斑岩与焦家矿区和玲珑矿区煌斑岩在化学成分上差异明显。

在TAS分类图(见图2)上,大尹格庄矿区2件胶东群变质岩样品投点也落在玄武岩区,印证了有关胶东群正变质岩的原岩为岛弧及边缘洋底的拉斑玄武岩的推论^[10]。胶东群变质岩样品投点与煌斑岩样品投点较接近,显示两者在化学成分及成因方面有一定联系。

在所有测试对象中,招平断裂带绢英岩化碎裂岩中SiO₂和K₂O的含量最高,Na₂O、CaO、MgO、TiO₂、MnO、P₂O₅和CO₂的含量最低,显示绢英岩化蚀变过程中Si和K有显著带入,而Na、Ca和Mg等组分带出明显。

与钾化花岗岩相比,黄铁绢英岩(矿石)中Na₂O和CaO含量明显较低,FeO、Fe₂O₃、MgO、MnO和CO₂等成分则明显增高,也显示矿化蚀变过程中有Na和Ca带出,而Fe含量的增高与黄铁矿的聚集有关,MgO与CO₂含量的增高与矿体中普遍发育的白云石

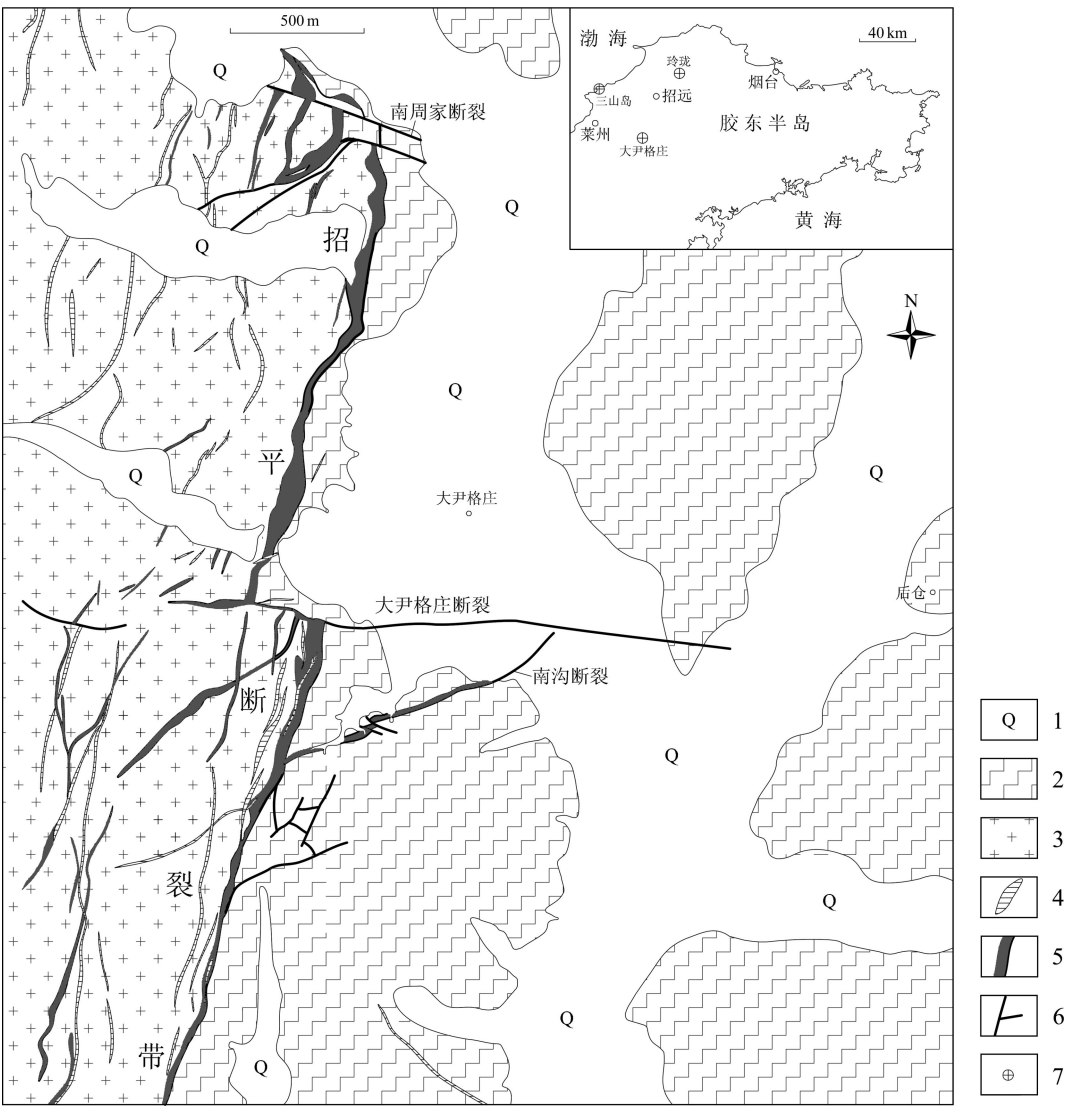


图 1 大尹格庄矿区地质简图: 1—第四系; 2—胶东群变质岩; 3—玲珑花岗岩; 4—闪长玢岩脉; 5—断裂破碎带; 6—断裂; 7—金矿床

Fig. 1 Geological sketch of Dayingezhuang gold deposit: 1—Quaternary system; 2—Metamorphic rock of Jiaodong group; 3—Linglong granite; 4—Diorite porphyrites; 5—Altered fracture zone; 6—Fault; 7—Gold deposit

细脉相吻合。

招平断裂带糜棱岩成分中, SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 TiO_2 、 P_2O_5 和 H_2O^+ 等组分的含量均处于钾化花岗岩和胶东群变质岩之间, 指示糜棱岩成分中既有原胶东群变质岩成分, 也有玲珑花岗岩成分。糜棱岩中 CO_2 含量在所有测试对象中为最高, 与碳酸盐矿物的聚集有关。

胶东群变质岩中, CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 和 H_2O^+ 等成分在所有测试对象中为最高, CaO 和 MgO 的高含量与招平断裂带主裂面上盘胶东群变质岩中碳酸盐化蚀变的发育相吻合, H_2O^+ 的高含量与绿泥石化蚀变中含水矿物的聚集有关。

3 岩石及矿石稀土元素地球化学特征分析

大尹格庄金矿岩石稀土元素测试结果见表 2。
招平断裂带黄铁绢英岩化碎裂岩、黄铁绢英岩(金矿岩)中 $\sum\text{REE}$ 在所有测试对象中为最低, 平均值分别为 43.6×10^{-6} 和 51.6×10^{-6} , 显示黄铁绢英岩化蚀变和金成矿过程中稀土元素有显著带出。钾化花岗岩和招平断裂带糜棱岩中 $\sum\text{REE}$ 平均值分别为 87.054×10^{-6} 和 88.597×10^{-6} , 也显著低于胶东群变质岩的 ($\sum\text{REE}$ 为 275.3×10^{-6})。黄铁绢英的岩化碎裂岩的

表 1 大尹格庄金矿岩石硅酸盐全分析结果

Table 1 Chemical compositions of rocks in Dayingezhuang gold deposit

Lithology	Sample number	w/%						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	FeO
Lamprophyre	2	48.52	15.02	0.32	2.92	9.26	6.55	7.73
Metamorphic rocks of Jiaodong Group	2	48.05	12.2	0.48	1.93	7.62	4.81	9.64
Potash feldspathization granite	2	65.70	14.8	3.61	3.00	4.16	0.54	1.76
Sericitic alteration cataclasite	2	74.14	14.5	4.46	0.21	0.50	0.49	0.86
Mylonite in Zhaoping fault zone	2	57.35	15.8	3.30	1.40	4.47	2.38	3.69
Berecrite (Gold ore)	2	60.91	11.3	3.29	0.86	1.89	0.59	5.04

Lithology	Sample number	w/%						
		Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	Total
Lamprophyre	2	3.81	1.36	0.24	0.19	2.05	1.78	99.72
Metamorphic rocks of Jiaodong Group	2	5.22	2.24	0.20	0.75	4.16	2.55	99.82
Potash feldspathization granite	2	0.76	0.21	0.14	0.06	1.53	3.38	99.65
Sericitic alteration cataclasite	2	1.16	0.12	0.07	0.02	2.40	0.34	99.27
Mylonite in Zhaoping fault zone	2	0.71	0.48	0.11	0.11	2.74	6.95	99.45
Berecrite (Gold ore)	2	1.83	0.16	1.34	0.04	1.74	4.17	93.13

Testing unit: Synataxic Rock-mineral Testing Center in Wuhan.

表 2 大尹格庄金矿岩石稀土元素测试结果

Table 2 REE contents of rocks in Dayingezhuang gold deposit

Lithology	Sample number	w/10 ⁻⁶							
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
Potash feldspathization granite	2	17.3	31.6	3.55	12.95	2.36	0.684	1.97	0.306
Berecrite (Gold ore)	2	9.2	17.1	1.88	7.09	1.32	0.384	1.25	0.204
Beresization cataclasite	2	7.6	14.5	1.50	5.75	1.05	0.350	0.99	0.151
Mylonite in Zhaoping fault zone	2	16.0	32.6	3.62	15.74	2.70	0.909	2.12	0.332
Metamorphic rocks of Jiaodong Group	2	40.0	83.0	10.97	47.70	10.83	3.350	8.32	1.603
Lamprophyre	2	14.6	29.4	3.62	15.95	4.01	1.436	3.38	0.663

Lithology	Sample number	w/10 ⁻⁶							
		Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
Potash feldspathization granite	2	1.82	0.353	1.09	0.167	1.340	0.196	11.4	87.1
Berecrite (Gold ore)	2	1.44	0.293	0.88	0.142	1.078	0.161	9.3	51.6
Beresization cataclasite	2	1.10	0.251	0.82	0.141	1.234	0.203	8.0	43.6
Mylonite in Zhaoping fault zone	2	1.80	0.340	1.04	0.149	1.191	0.185	9.8	88.6
Metamorphic rocks of Jiaodong Group	2	9.29	1.777	4.77	0.706	4.657	0.635	47.7	275.3
Lamprophyre	2	4.04	0.762	2.01	0.291	1.945	0.255	20.5	102.8

Testing unit: Synataxic Rock-mineral Testing Center in Wuhan.

ΣCe/ΣY 比值为 2.389, δ(Eu)值为 1.135, δ(Ce)值为 0.854; 黄铁绢英岩(金矿石) ΣCe/ΣY 比值为 2.509, δ(Eu)值为 0.988, δ(Ce)值为 0.819; 糜棱岩的ΣCe/ΣY 比值最大, 为 4.22, δ(Eu)为 1.224, δ(Ce)值为 0.865; 钾化花岗岩的ΣCe/ΣY 比值为 3.677, δ(Eu)值为 1.031,

δ(Ce)值 0.803; 胶东群变质岩的ΣCe/ΣY 比值为 2.465, δ(Eu)值为 1.133; 煌斑岩的ΣREE 为 102.817×10⁻⁶, ΣCe/ΣY 比值为 2.041, δ(Eu)值为 1.271。所有样品均显示弱的铈正异常和负铈异常特征。

在稀土元素配分模式图上(见图 3), 测试样品曲线

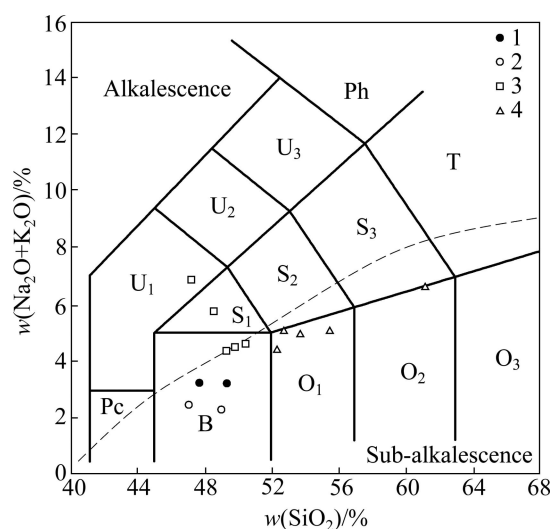


图 2 大尹格庄金矿基性岩脉和变质岩的 TAS 岩石分类图解(虚线为 Irvine 分界线, 上方为碱性岩石系列, 下方为亚碱性岩石系列): Pc—苦橄质玄武岩; B—玄武岩; O₁—玄武质安山岩; O₂—安山岩; O₃—英安岩; S₁—粗面玄武岩; S₂—玄武质粗面安山岩; S₃—粗面安山岩; T—粗面岩 ($w(Q) < 20\%$) 或粗面英安岩 ($w(Q) > 20\%$); U₁—碱玄岩 ($w(O_1) < 10\%$) 或碧玄岩 ($w(O_1) > 10\%$); U₂—响岩质碱玄岩; U₃—碱玄响岩; 1—大尹格庄金矿煌斑岩; 2—大尹格庄金矿变质岩; 3—焦家金矿煌斑岩; 4—玲珑金矿煌斑岩

Fig. 2 TAS classification map of lamprophyre and metamorphic rocks in Dayingezhuang gold deposit (Broken line in map is boundary between alkalescence and sub-alkalescence): Pc—Picrite basalt; B—Basalt; O₁—Basaltic andesite; O₂—Andesite; O₃—Dacite; S₁—Trachybasalt; S₂—Basaltic; S₃—Trachyandesite; T—Trachyte ($w(Q) < 20\%$) or toscanite ($w(Q) > 20\%$); U₁—Tephrite ($w(O_1) < 10\%$) or basanite ($w(O_1) > 10\%$); U₂—Phonolitic tephrite; U₃—Pollenite; Ph—Phonolite; 1—Lamprophyre samples of Dayingezhuang deposit; 2—Metamorphic rock samples of Dayingezhuang deposit; 3—Lamprophyre samples of Jiaojia deposit; 4—Lamprophyre samples of Linglong deposit

均为向右缓倾斜平滑曲线, 属轻稀土富集型, 其中, 胶东群变质岩、煌斑岩曲线形态和斜率基本一致, 钾化花岗岩、黄铁绢英岩化碎裂岩、糜棱岩及黄铁绢英岩(金矿石)曲线形态较相近, 在右侧尾端略微翘起。

在 La/Yb— Σ REE 含量图解上(见图 4), 所有样品投点均落在玄武岩区及其附近, 其中, 胶东群变质岩和煌斑岩样品落在大陆拉斑玄武岩区, 其他样品落在该区左侧, 说明胶东群变质岩的原岩与拉斑玄武岩有关, 而煌斑岩及其他岩矿石样品的初始物源与胶东群变质岩有关。

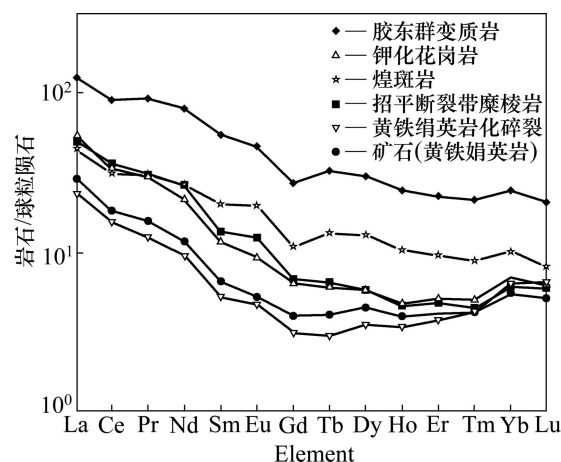


图 3 大尹格庄金矿岩石稀土元素球粒陨石标准化模式分配图

Fig. 3 REE distribution patterns for ores and host rocks in Dayingezhuang gold deposit

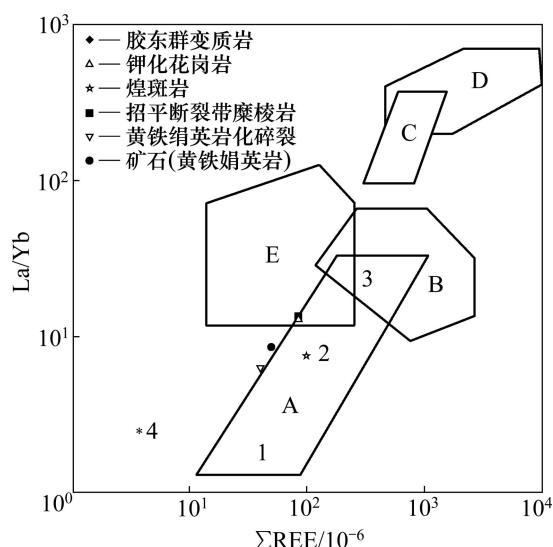


图 4 岩石 La/Yb— Σ REE 含量图解: A—玄武岩; B—花岗岩; C—金伯利岩; D—碳酸盐岩; E—钙质泥岩; 1—大洋拉斑玄武岩; 2—大陆拉斑玄武岩; 3—碱性玄武岩; 4—球粒陨石

Fig. 4 Diagram of La/Yb— Σ REE content in rocks: A—Basalt; B—Granite; C—Kimberlite; D—Carbonatite; E—Calcic pelite; 1—Oceanic tholeiite; 2—Continental tholeiite; 3—Alkali basalt; 4—Chondrite

4 微量元素地球化学特征

根据对部分钻孔岩芯和坑道岩石样品微量元素含量的统计, Au、Ag、Cu、Pb、As、Mo 和 Bi 等元素在胶东群变质岩、钾化花岗岩及黄铁绢英岩化蚀变岩中的含量变化范围均较大, 总体上呈在招平断裂带中

金矿体及黄铁绢英岩化蚀变岩中聚集的趋势。

部分钻孔岩芯和坑道岩石样品微量元素的聚类分析(图 5)显示, Cu、As、Pb、Zn、Hg 和 Ag 在 $R=0.41$ 的较高水平上聚类, 与黄铜矿、方铅矿物和闪锌矿等多金属硫化物的伴生有关; Au 在 $R=0.18$ 水平上与 Sr 聚类, 在 $R=0.06$ 的较低水平上与 K、Rb、Fe、Co、V 和 Ti 等元素聚类, 显示金矿化与反映黄铁绢英岩化的 K、Rb 和 Fe 等元素的聚集有关, 而 Au 与 Cu、As、Pb、Zn、Hg 和 Ag 等元素不明显的聚类关系反映出 Au 元素的活动具有一定的独立性, 在时间和空间上与 Cu、As、Pb、Zn、Hg 和 Ag 等元素呈不同步聚集关系, 证实石英-(浸染状或细脉状)黄铁矿阶段为金的主要成矿阶段。

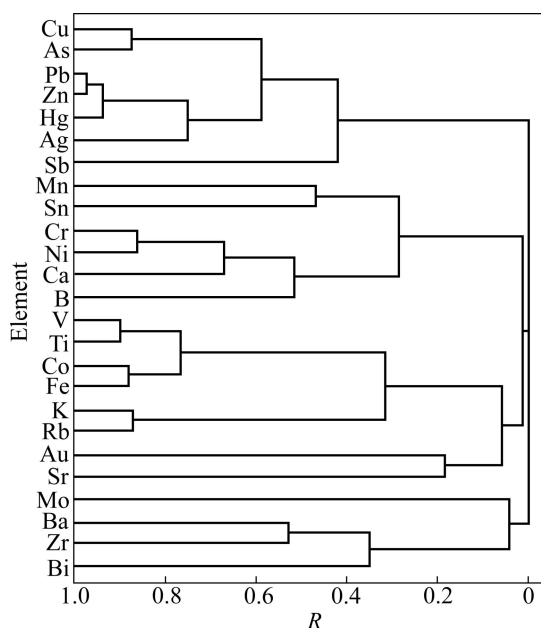


图 5 R 型聚类分析谱系图

Fig. 5 Hierarchical diagram of R-type cluster analysis

5 大尹格庄金矿成矿作用分析

关于胶东地区金矿的成因, 目前仍存在广泛争议, 主要的分歧涉及控矿构造性质与演化、玲珑花岗岩成因及其控矿作用、成矿物质来源及蚀变矿化机制等多方面。

招远—莱州地区花岗岩类锆石 SHRIMP 年代学研究显示, 玲珑型(含滦家河型)花岗岩的年龄为 160~150 Ma, 郭家岭型花岗闪长岩的年龄为 130~126 Ma^[11]。区内各种岩脉的 K-Ar 法年龄测定显示, 煌斑岩脉的年龄范围大多在 149~80 Ma 之间^[12]。胶东金矿床蚀变矿物的 Rb-Sr 等时线同位素年龄则大部分集中在 135~

80 Ma^[13]。

可以看出, 胶东地区与金矿形成有关的热事件主要发生 160~80 Ma 之间, 而早白垩世前后正是华北东部中生代动力体制转折的关键时段, 此时古太平洋板块向欧亚大陆斜向快速俯冲、华北东部岩石圈剧烈减薄、郯庐断裂发生强烈左行走滑、区域构造应力场转变为强烈引张、火山-岩浆活动也最为强烈^[14]。

胶东金矿区煌斑岩与围岩、金矿脉及胶东群残留体之间的渊源关系^[15]指明胶东地区金矿形成的长期性及成岩与成矿物质演化的继承性。其中, 燕山期岩浆演化可以用一种二阶段部分熔融模式解释^[16], 即中生代晚期, 受太平洋板块向亚洲大陆边缘俯冲的影响, 胶东群变质作用逐渐加深, 最终导致部分熔融(第一阶段), 形成大面积的花岗岩类岩石; 白垩纪以来, 热事件和构造运动促使胶东群一些偏基性的变质残核在较高温度下再次部分熔融(第二阶段), 其产生的一些偏基性的岩浆侵入到花岗岩或变质岩中, 形成胶东金矿区的煌斑岩等岩脉群。地质学实验证明, 成分为中基性的地质体部分熔融时, 在低温不变点产生酸性岩浆, 在高温不变点形成基性岩浆^[17]。

同样地, 大尹格庄金矿的形成与燕山期构造运动和岩浆活动关系密切, 并受到断裂构造系统、胶东群变质岩、玲珑花岗岩及伴生岩脉等条件的复合制约。其成矿体系可概括为地壳浅表环境下有大气水充分补给的热液对流成矿系统。

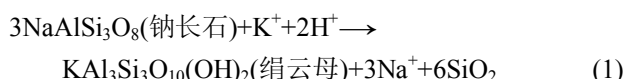
胶东金矿集中区绝大部分金矿床产于玲珑花岗岩与变质岩系接触破碎带中或玲珑花岗岩与郭家岭花岗岩接触断裂破碎带中, 显示玲珑花岗岩在金成矿中的重要性, 是金的主要来源之一, 也是热液成矿的主要驱动力之一。在大尹格庄金矿, 玲珑花岗岩接触带与招平断裂带的复合, 使之成为热能释放和热液活动的有利场所, 导致围岩中的成矿物质随热液一起发生循环。矿区闪长玢岩和煌斑岩等中基性脉岩发育, 空间上与矿体关系密切, 指示了深部岩浆活动的长期性和间歇性。

控矿断裂构造系统由招平断裂和与之交汇贯通的大尹格庄断裂等 NWW 向及 NW 向断裂共同构成的, 矿体的侧伏方向与侧伏角明显受大尹格庄断裂与招平断裂带的交汇线制约。招平断裂中的糜棱岩和碎裂岩分别是成矿前高温高剪切应变条件下塑性变形和成矿期脆性张裂的产物, 糜棱岩中发育碳酸盐化和黏土化蚀变, 矿化较弱, 碎裂岩中则往往发育不同程度的绢英岩化或黄铁绢英岩化蚀变。而与招平断裂带交汇贯通的 NWW 向及 NW 向断裂也显示有长期活动和多期活动的特征, 并构成了重要的导矿构造, 是保障热液

对流成矿系统中大气水长期补给、成矿流体循环畅通和成矿物质持续供给的关键。

招平断裂带上盘的胶东群变质岩中角闪石的含量较高,且这些角闪石中金的含量与世界其他地区角闪石中金的含量相比要高很多^[2],显示胶东群变质岩具有提供金来源的潜力。由浅部流体参与的大规模热液对流循环及所伴随的动态开放条件下的水岩反应和物质运动则是大尹格庄金矿成矿的关键。

黄铁绢英岩化蚀变反映的物理化学条件是偏酸性和还原性的,热液中 H^+ 的存在有利于绢英岩化蚀变的发生及硫化物和 SiO_2 的沉淀,其中绢英岩化蚀变可表示如下:



该反应导致黄铁绢英岩化蚀变岩中 K 元素含量的增高及 Na 和 Ca 元素含量的降低。

硫化物的形成则与 SO_4^{2-} 向 S^{2-} 发生临界转化有关,反应过程可表示为



偏酸性条件还有利于保持热液中 HCO_3^- 的活跃,并将 Na 和 Ca 元素从黄铁绢英岩化蚀变岩中带出。

另外,当水溶液中有 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- 时,一些金属元素溶度积明显增高,如 Cu 的溶度积比纯水的大 10 多倍,有利于 Cu 等金属元素呈络合离子搬运。同时, CO_2 大量释放又导致大量金属矿物的沉淀^[18]。在大尹格庄金矿矿体中,黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等多金属硫化物往往出现在石英-白云石-多金属硫化物脉或石英-方解石-多金属硫化物脉中,与这种机制不无关系。

招平断裂带主裂面上盘胶东群变质岩中绿泥石化、碳酸盐化及褐铁矿化蚀变反映了偏碱性和偏氧化的物理化学环境,绿泥石化过程中对 OH^- 的吸纳及碳酸盐化过程中方解石的大量生成是偏碱性条件的主要标志,而沿裂隙分布并与绿泥石化、碳酸盐化伴生的褐铁矿化蚀变则反映了偏氧化环境及 Fe 元素的活动,是绿泥石化蚀变过程中铁质释放的重要线索,有为黄铁绢英岩化蚀变提供 Fe 质来源的潜力。而大尹格庄金矿乃至整个胶东地区金矿硫同位素组成普遍显示富集重硫的特征,矿石中硫的主要来源之一可能与老地层中硫酸盐矿物的热还原作用有关。

在地壳浅部环境下, Au 和 Cu 等金属元素的活化、迁移和聚集与含硫和含碳组分的循环及不同相态含硫和含碳组分间的交替转化有关,并与物理化学条件的交替变化相对应。含硫组分和含碳组分对物理化学条

件的变化均十分敏感,并随着热液对流过程中温度、氧逸度、pH 值和 ϕ_h 值的变化而变化,其中, SO_4^{2-} 与 S^{2-} 之间的临界转化是制约成矿金属元素活化-迁移-聚集的关键。当流体在热液对流系统中向浅部运动时,随着氧逸度的增高,热液中的含硫组分逐渐以 SO_4^{2-} 占主导,导致围岩中金与多数亲铜元素和过渡元素的活化和迁移能力大大增强,在氧化性较强的区域,由于存在 MnO_2 、 O_2 、 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 等比 H^+ 更强的氧化剂,围岩中的 Au^0 会氧化成 Au^{3+} 而溶解^[19]。当对流热液向热源或深部方向迁移时,随着流体中氧逸度的逐渐降低, SO_4^{2-} 向 S^{2-} 发生临界转化,形成硫化物的聚集和金的沉淀。

REFERENCES

- [1] 孙丰月, 石淮立, 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: 67-88.
SUN Feng-yue, SHI Zhun-li, FENG Ben-zhi. Gold ore geology, lithogenesis and metallogenesis related to the differentiation of mantle-derived C-H-O fluids in Jiaodong Peninsula, eastern China [M]. Changchun: Jilin People's Press, 1995: 67-88.
- [2] 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989: 34-435.
CHEN Guang-yuan, SHAO Wei, SUN Dai-sheng. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong district with emphasis on gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1989: 34-435.
- [3] 林文蔚, 赵一鸣, 赵国红, 彭聪, 赵维刚. 胶东西北部金矿的控制因素[J]. 矿床地质, 1997, 16(2): 107-119.
LIN Wen-wei, ZHAO Yi-ming, ZHAO Guo-hong, PENG Cong, ZHAO Wei-gang. The ore-control mechanism of gold deposits in northwestern Jiaodong [J]. Mineral Deposits, 1997, 16(2): 107-119.
- [4] 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 于桂香, 王炳成, 徐金方, 郑文深. 焦家式金矿水-岩交换作用: 成流体来源及成因[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 193-200.
ZHANG Li-gang, CHEN Zheng-sheng, LIU Jing-xiu, YU Gui-xing, WANG Bing-cheng, XU Jin-fang, ZHENG Wen-shen. Water-rock exchange in the Jiaojia style gold deposit-hydrogen and oxygen isotopic study of altered rocks [J]. Mineral Deposits, 1994, 13(3): 193-200.
- [5] 孙忠实, 李德伦, 冯亚民. 含金流体层次性循环系统探讨—以吉林和山东地区金矿为例[J]. 世界地质, 1998, 17(4): 11-16.
SUN Zhong-shi, LI De-lun, FENG Ya-min. A preliminary study on Au bearing fluid circulation in different lithospheric levels [J]. World Geology, 1998, 17(4): 11-16.
- [6] 王鹤年. 胶东中元古代玲珑花岗岩及其后期叠加改造作用的地质、地球化学证据[J]. 南京大学学报: 地球科学版, 1988,

- 24(1): 105–118.
- WANG He-nian. Geological and geochemical characteristics of the middle Proterozoic Linglong granite in eastern Shandong and its reworks [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1988, 24(1): 105–118.
- [7] 徐金方. 玲珑复式花岗岩基的构成及其形成时代[J]. *岩石学报*, 1991, 7(2): 43–49.
- XU Jin-fang. The time gap of diagenesis and mineralization for gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991, 7(2): 43–49.
- [8] 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(1): 11–18.
- LI Huai-kun, LI Hui-min, LU Song-nian, YANG Chun-liang. Single grain zircon U-Pb ages for the granitoids from the Zhaoye gold mineralization (Shandong Province) and their geological implications [J]. *Progress in Precambrian Research*, 1998, 21(1): 11–18.
- [9] 徐红, 徐光平. 胶东煌斑岩的地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(1): 36–44.
- XU Hong, XU Guang-ping. Geochemical characteristics and genesis of the lamprophyres in the Jiaodong gold ore district, Shandong Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(1): 36–44.
- [10] 王鹤年, 汪耀, 陈延安. 胶东金矿含金建造的地球化学研究[J]. *地球化学*, 1988, 17(3): 195–208.
- WANG He-nian, WANG Yao, CHEN Yan-an. Geochemical studies of Au-bearing formation in Jiaodong peninsula, Shangdong Province [J]. *Geochimica*, 1988, 17(3): 195–208.
- [11] 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 关康, WANG L G, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义[J]. *中国科学: D 辑*, 1997, 27(3): 207–213.
- MIAO Lai-cheng, LUO Zheng-kuang, HUANG Jia-zhan, GUANG Kang, WANG L G, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. Zircon sensitive high resolution ion microprobe (SHRIMPS) study of granitoid intrusions in Zhaoye gold belt of Shangdong Province and its implication [J]. *Science in China: Serials D*, 1997, 27(3): 207–213.
- [12] 李兆龙, 杨敏之, 李治平. 胶东金矿床地质地球化学[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993: 1–300.
- LI Zhao-long, YANG Ming-zhi, LI Zhi-ping. The geology-geochemistry of gold deposits in Jiaodong region [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1993: 1–300.
- [13] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 徐卫东, 骆辉. 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.
- LI Jun-jian, LUO Zhen-kuan, LIU Xiao-yang, XU Wei-dong, LUO Hui. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 24(4): 361–372.
- [14] 刘建明, 叶杰, 徐九华, 姜能, 应汉龙. 初论华北东部中生代金成矿的地球动力学背景—以胶东金矿为例[J]. *地球物理学进展*, 1990, 1(1): 39–46.
- LIU Jian-ming, YE Jie, XU Jiu-hua, JIANG Neng, YING Han-long. Preliminary discussion on geodynamic background of Mesozoic gold metallogeny in eastern north China — With examples from eastern Shangdong Province [J]. *Progress in Geophysics*, 1990, 1(1): 39–46.
- [15] 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 宫润谭. 胶东西北部脉状金矿[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990: 1–300.
- YAO Feng-liang, LIU Liang-deng, KONG Qing-cun, GONG Run-tan. Lode gold deposits in the northwest parts of Jiaodong [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1990: 1–300.
- [16] TAYLOR T R, VOGEL T A, WILBAND J T. The composite dikes at mount desert island, Maine: An example of coexisting acidic and basic magmas [J]. *J Geol*, 1980, 88(4): 433–444.
- [17] YODER H S. Contemporaneous basaltic and rhyolitic magmas [J]. *Amer Mineral*, 1973, 58: 153–171.
- [18] 芮宗瑶, 赵一鸣, 王龙生, 王义天. 挥发份在矽卡岩型和斑岩型矿床形成中的作用[J]. *矿床地质*, 2003, 22(2): 143–147.
- RUI Zong-yao, ZHAO Yi-ming, WANG Long-sheng, WANG Yi-tian. Role of volatile components in formation of skarn and porphyry deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(2): 143–147.
- [19] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第1卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 103–269.
- TU Guang-chi. Geochemistry of the strata-bound ore deposits in China (Volume 1) [M]. Beijing: Science Press, 1984: 103–269.

(编辑 陈卫萍)