

文章编号: 0258-7106 (2002) 02-0187-13

# 胶东金青顶和大尹格庄金矿床花岗质围岩的蚀变地球化学研究\*

凌洪飞<sup>1</sup> 胡受奚<sup>1</sup> 孙景贵<sup>1</sup> 倪培<sup>1</sup> 沈昆<sup>2</sup>

(1 南京大学地球科学系和成矿机制国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 2 山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013)

**摘要** 研究了大尹格庄金矿床和金青顶金矿床的花岗质围岩及其蚀变岩的主元素、微量元素和氧同位素等特征。结果表明郭家店花岗岩和金青顶花岗岩 Nb、Ta、P、Ti 相对亏损,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值为 -11.9 ~ -14.5, 为前寒武纪地壳岩石熔融的产物。大尹格庄围岩蚀变较强, 主要为沿断裂带发育的绢英岩化及深部的钾长石化, 金青顶蚀变较弱。在绢英岩化和绢云母化蚀变过程中, 两矿床  $Na_2O$  和 REE 降低, Au、Ag 升高, 金青顶变化幅度相对较小。热液带入的组分均为 Au、Ag、As、Co、Cu、 $K_2O$  等, 在大尹格庄带入组分还包括 Pb、Zn、Fe、 $SiO_2$ 。似伟晶状钾长石化均使两矿区  $K_2O$  显著升高, Au 和 Ag 略有升高, 其余组分降低, 尤其轻稀土降低显著。引起大尹格庄矿床围岩发生绢英岩化和似伟晶状钾长石化的初始流体  $\delta^{18}O$  值下限分别为 3.3‰ 和 4.4‰, 以岩浆热液为主导; 引起金青顶矿床围岩发生似伟晶状钾长石化和绢云母化的初始流体的  $\delta^{18}O$  值下限分别为 2.1‰ 和 1.2‰, 也以岩浆热液为主, 但不排除有大气降水参与。

**关键词** 主元素 微量元素 氧同位素 围岩蚀变 大尹格庄 金青顶金矿 胶东

**中图分类号**: P618.52; P595; P597+.2

**文献标识码**: A

大尹格庄金矿床为一特大型蚀变岩型金矿床, 但对其的研究程度远低于胶东其他主要金矿床, 目前仅对流体包裹体和叠加晕进行了研究(沈昆等, 2000; 李惠等, 1998)。金青顶金矿是我国目前最大的石英脉型金矿床(李振江等, 1999), 虽然对其矿床地质(李振江等, 1999)、叠加晕特征(李惠等, 2000)、蚀变岩元素和氢氧同位素等进行了研究(应汉龙, 1994; 张理刚等, 1995; 杨敏之, 1998), 但对其矿床成因、流体性质和来源仍然存在争论(张理刚等, 1995; 李振江等, 1999; 应汉龙, 1994, 1996; 卢焕章等, 1999)。本文对大尹格庄金矿床和金青顶金矿床的花岗质围岩及其蚀变岩的主元素、微量元素和氧同位素特征进行研究, 试图了解围岩与成矿流体作用过程中元素的迁移和富集规律, 并探讨成矿流体的性质和来源。

## 1 矿床地质概况

金青顶金矿床位于胶东隆起区东部的牟平—文登隆起南缘, 牟平—乳山金矿带的中部, 分布于昆崙山花岗岩体的西缘(图 1), 产于将军石—曲河庄北东向( $NE20^\circ$ ) 断裂的南段, 矿体赋存于断裂的弯曲处, 赋矿地段断裂呈张性, 而无矿地段

断裂呈压扭性(李振江等, 1999)。沿该断裂分布的含金石英脉陡倾( $\angle 75 \sim 85^\circ$ ), 脉长约 1.1 km, 宽 3 ~ 20 cm, 延深 750 m。矿体由含金黄铁矿-石英脉、含金银铜铅锌硫化物-石英脉和菱铁矿-石英脉组成, 以含金黄铁矿-石英脉为主。矿体围岩为昆崙山黑云母二长花岗岩。矿脉两侧之围岩发生蚀变, 蚀变带较窄(几十厘米至几米), 蚀变较弱。从矿脉向新鲜围岩, 蚀变分带依次是: 含金黄铁矿-石英脉 → (黄铁绢英岩) → 绢云母化花岗岩 → 钾长石化花岗岩 → 新鲜黑云母二长花岗岩。含金黄铁矿-石英脉矿石中, 黄铁矿是金的主要载体矿物(杨敏之等, 1996), 浅部矿石还有少量的黄铜矿、闪锌矿和方铅矿, 局部有菱铁矿。含金黄铁矿-石英脉与蚀变围岩边界一般较清楚, 其他蚀变带之间渐变过渡。黄铁绢英岩带很窄, 表现为长石大为减少甚至消失, 代之以石英、绢云母和黄铁矿。绢云母化带相对较宽, 绢云母化表现为斜长石被星点状-面型绢云母所交代, 黑云母也发生不同程度的绢云母化, 有时还伴有碳酸盐化。钾长石一般较为新鲜, 无明显泥化、浑浊化现象。钾长石化表现为钾长石交代斜长石等矿物, 在深部较为明显, 岩石颜色变红, 有时钾长石呈似伟晶状。

大尹格庄金矿是一大型焦家式蚀变岩型金矿床, 产于沿玲珑复式岩体与胶东群接触带西侧发育的、呈 NE 走向的招

\* 本文受国家自然科学基金项目(编号: 49133120)的资助

第一作者简介 凌洪飞, 男, 1960 年生, 教授(博导), 从事同位素地球化学研究与教学。

收稿日期 2001-07-09; 改回日期 2002-02-01。张绮玲编辑。

—平区域性韧-脆性断裂带的中段,即燕山期郭家店二长花岗岩体的东缘(图1),招—平断裂带在该段走向北东(NE20°),倾向南东,倾角21~54°,宽40~80m(李惠等,1998)。断裂带上盘为胶东群黑云母斜长变粒岩、斜长角闪岩和石榴黑云片岩等,断裂带下盘为花岗质糜棱岩、碎裂岩等。矿体主要产于断裂带下盘的花岗质破碎蚀变带中,矿化体长约80~2000m,宽0.5~50m,深200~300m。矿石以浸染状和细脉浸染状为主,矿石矿物以黄铁矿为主,其次有黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等。金矿物主要有自然金和银金矿,赋存在黄铁矿和石英中。含矿蚀变带主要为绢英岩化,包括黄铁绢英岩、绢英岩、绢英岩化糜棱岩、绢英岩化碎裂岩和绢英岩化二长花岗岩。随着远离断裂带和碎裂程度的减弱,蚀变程度也减弱。有时伴有碳酸盐化,深部有钾长石化,钾长石可呈似伟晶状。与金青顶石英脉型金矿床围岩蚀变相比,大尹格庄碎裂蚀变型金矿床的围岩蚀变范围和强度要大得多。前者蚀变围岩大多保持花岗岩的结构构造,而后者除蚀变带外缘的绢英岩化二长花岗岩保持花岗岩的结构构造外,其余绢英岩化蚀变岩均改变了原岩的结构构造。

## 2 样品采集与分析方法

未蚀变及微弱蚀变花岗岩围岩取自矿床外围、钻孔及坑道,花岗质蚀变围岩取自坑道及钻孔,大尹格庄矿床蚀变围岩

取自75503号钻孔及II号矿体坑道,金青顶矿床蚀变围岩取自II号矿体坑道。岩石的主要氧化物成分用湿化学法分析,由南京大学地球科学系化学分析实验室分析。微量元素用ICP-AES和ICP-MS分析,ICP-AES分析在南京大学成矿机制研究国家重点实验室进行,分析误差小于10%;ICP-MS分析在中科院贵阳地球化学研究所完成,分析误差小于5%。其中部分样品(大尹格庄3个,金青顶2个)同时作了ICP-AES和ICP-MS分析。Rb-Sr、Sm-Nd同位素分析在南京大学现代分析中心进行,采用传统的阳离子交换色谱法分离这些元素,用VG-354质谱仪测定其同位素比值,同位素含量(加稀释剂)和比值分别测定,同位素比值测定的相对误差小于 $5 \times 10^{-5}$ 。氧同位素分析在南京大学成矿机制研究国家重点实验室进行,采用BrF<sub>5</sub>法提取氧,经纯化后在铂催化下与碳反应转化为CO<sub>2</sub>,用MAT252测定其同位素比值,分析误差小于0.2%。

## 3 未蚀变花岗质围岩的地球化学特征

大尹格庄金矿床的围岩为玲珑复式岩基中的郭家店岩体,其岩性为中粗粒黑云母二长花岗岩,  $w(\text{SiO}_2)$  为67%~68%,  $[w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})]$  为7.2%~7.5%, A/CNK值 $\{n(\text{Al}_2\text{O}_3) / [n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]\}$  为1.06~1.16(表1),属过铝质,在SiO<sub>2</sub>-AR分类图上落入钙碱性岩系范围

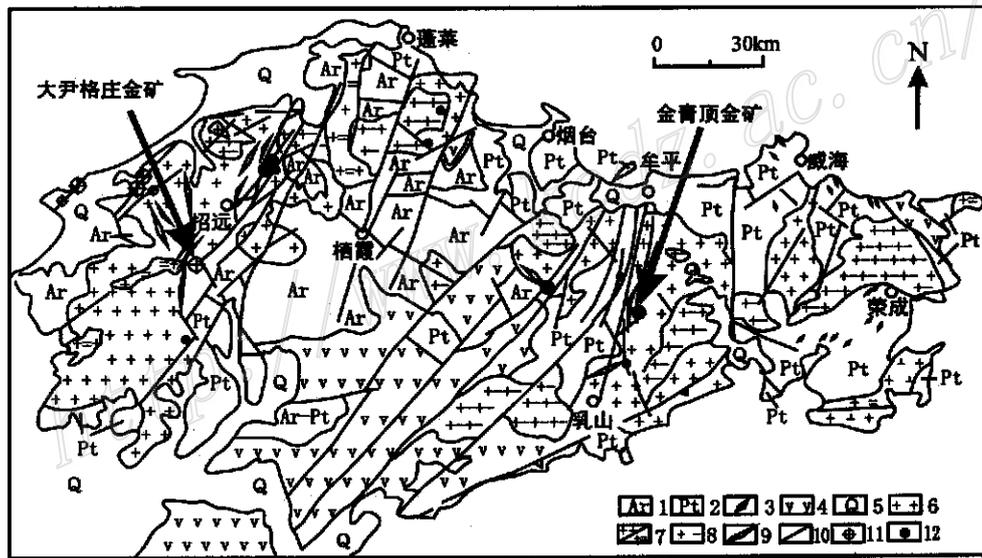


图1 胶东地区地质简图

1—太古代变质岩; 2—元古代变质岩; 3—榴辉岩和镁铁质岩; 4—中生代火山-沉积岩系; 5—第四系; 6—重熔型花岗岩; 7—角闪正长岩与碱性花岗岩; 8—壳幔混合型花岗岩; 9—脉岩; 10—断裂; 11—蚀变岩型金矿; 12—石英脉型金矿

Fig. 1 Sketch geological map of Jiaodong, Shandong Province

1—Archean metamorphic rocks; 2—Proterozoic metamorphic rocks; 3—Eclogite and mafic rocks; 4—Mesozoic volcanic-sedimentary rocks; 5—Quaternary; 6—Granitoids formed by crust melting; 7—Syenite/alkaline granitoids; 8—Granitoids of crust-mantle mixing type; 9—Veins; 10—Faults; 11—Gold deposits of alteration-rock type; 12—Gold deposits of quartz-vein type

表 1 胶东郭家店岩体和金青顶岩体花岗岩及其金矿蚀变围岩的岩石化学成分  
Table 1 Concentrations of major oxides of granites and altered wall-rocks of gold deposits in Guojiaidian and Jinqingding

序号	样品号	产状	wtg/%														A/CNK
			SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失	总量		
大尹格庄金矿区																	
1	D2-185-1	新鲜花岗岩	68.02	0.20	16.76	0.70	1.26	0.07	0.44	1.94	4.10	3.80	0.05	2.01	99.35	1.16	
2	75503-19-1	较新鲜花岗岩	67.06	0.16	15.88	0.28	1.60	0.15	0.38	2.52	3.52	4.18	0.02	3.76	99.51	1.06	
3	75503-1	绢英岩	66.77	0.15	15.57	1.31	1.96	0.29	0.32	2.70	0.19	5.41	—	4.81	99.48	1.40	
4	75503-7	碳酸盐化绢英岩	70.34	0.12	11.92	0.74	1.89	0.27	0.44	3.95	0.19	4.11	0.02	5.31	99.30	1.00	
5	75503-3	矿化绢英岩	68.98	0.18	15.04	2.86	1.33	0.07	0.34	0.94	0.19	5.41	0.05	3.92	99.31	1.90	
6	75503-9-1	矿化绢英岩	66.86	0.08	15.11	1.81	1.26	0.27	0.34	3.08	0.24	4.94	0.02	5.23	99.24	1.33	
7	75503-12	硅化绢英岩	76.12	0.04	0.78	0.34	1.35	0.2	0.32	2.97	0.16	3.91	—	3.71	99.90	1.09	
8	75503-21	硅化绢英岩	73.66	0.11	13.72	0.21	1.48	0.13	0.22	1.45	0.96	4.64	—	3.23	99.81	1.48	
9	D2-230-10	硅化绢英岩	70.14	0.12	16.36	0.92	1.40	0.11	0.50	1.22	0.19	5.73	0.02	3.42	100.1	1.87	
10	75503-22	伟晶状钾长石化	68.57	—	14.89	0.22	0.38	0.09	0.05	1.58	1.72	10.8	—	1.64	99.94	0.85	
11	D2-185-2	伟晶状钾长石化	73.54	0.04	13.40	0.12	0.69	0.04	—	0.94	3.08	7.10	—	0.62	99.57	0.93	
金青顶金矿区																	
1	J-1(s)	新鲜二长花岗岩	69.02	0.18	16.16	0.59	1.45	0.07	0.34	2.34	4.44	4.18	0.05	0.53	99.35	1.00	
2	J435-3-1	中粒二长花岗岩	74.29	0.08	12.93	0.55	0.96	0.07	0.06	1.25	3.46	4.64	—	1.16	99.45	0.99	
3	J435-3-13	粗粒二长花岗岩	70.39	0.16	15.46	0.36	1.17	0.05	0.28	1.94	4.72	4.32	0.04	0.68	99.57	0.97	
4	J435-5-10	微弱绢云母化花岗岩	70.56	0.16	15.46	0.13	1.39	0.05	0.32	1.63	4.44	4.55	—	1.00	99.69	1.02	
5	J435-5-7	弱绢云母化花岗岩	70.76	0.18	15.00	0.16	1.38	0.05	0.22	1.28	3.46	5.48	0.04	1.55	99.56	1.07	
6	J435-3-5	绢云母化花岗岩	68.52	0.21	14.14	4.16	1.02	0.06	0.32	0.54	1.86	5.57	0.02	3.49	99.91	1.40	
7	J435-3-7	绢云母化花岗岩	70.50	0.20	15.16	1.17	1.00	0.09	0.22	0.94	2.64	5.48	0.03	2.13	99.56	1.26	
8	J435-5-5	黄铁矿绢英岩	82.82	0.09	7.670	1.51	0.88	0.04	0.32	0.46	0.19	3.41	—	1.97	99.36	1.58	
9	J435-3-10	伟晶状钾长石化	75.49	0.03	12.89	0.04	0.93	0.04	0.06	0.94	3.08	6.06	—	0.72	100.3	0.97	

分析方法: 湿法化学分析, 由南京大学地球科学系化学分析实验室完成。“—”为低于检出限者。

内。稀土总含量较低(50~85) × 10<sup>-6</sup>(表2), LREE/HREE 为13左右, Eu无异常至弱正异常(图2a), 反映花岗岩浆源区被熔融的程度较高, 斜长石全被熔融, 但有石榴子石残余固相存在。花岗岩浆结晶分异不明显, 微弱的Eu正异常表明, 本区花岗岩属于岩浆较早阶段结晶的产物。

金青顶金矿床的花岗质围岩处于昆崙山花岗岩基的西部, 岩性为粗粒黑云母二长花岗岩(以下称金青顶岩体), 其SiO<sub>2</sub>和碱含量均略高于郭家店岩体, 分别为69%~71%和8.6%~9.0%, A/CNK值为0.97~1.02(表1)。稀土总含量较高, (149~198) × 10<sup>-6</sup>(表2), 重稀土含量与郭家店花岗岩相似, 但轻稀土含量高得多, LREE/HREE 21~63, Eu异常不明显(图2a), 说明熔融形成花岗岩浆之源区(可能与荆山群相似)REE含量较高, 或熔融程度较低, 但斜长石已基本全部被熔融, 残余固相有石榴子石。花岗岩浆结晶分异较弱。

尽管它们的微量元素含量有差别(表3), 但在微量元素蛛网图上, 郭家店岩体和金青顶岩体具有相似分布型式(图2b), Nb, Ta, P, Ti均为负异常。两岩体的Rb-Sr, Sm-Nd同位素分析结果见表4, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd值落于典型陆壳岩石的范围, 现代ε<sub>Nd</sub>(0)值为-15.3~-16.3。根据上述成岩年龄算得的初始ε<sub>Nd</sub>(t)值为-13.6~-14.5, 初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr为0.7098~0.7097, 都反映其成岩物质的壳源性质。两阶段模式年龄为20~21亿年, 反映其源区大致为早前寒武纪地壳。郭家店岩体δ<sup>18</sup>O值为8.1‰~8.7‰, 金青顶岩体δ<sup>18</sup>O值为

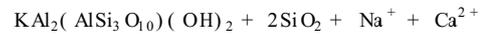
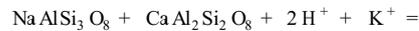
5.8‰~6.9‰(表5), 两者的源区成岩物质有较明显的差别。两岩体在微量元素含量上的差别, 除了与源区岩石的成熟度有关外, 可能还与形成花岗岩浆时的部分熔融程度有关。

## 4 蚀变花岗质围岩的地球化学特征

### 4.1 蚀变岩石化学组成的改变

#### (1) 绢英岩化

**主元素变化特征** 大尹格庄金矿区绢英岩化围岩最显著的特征是Na<sub>2</sub>O含量降低(表1, 图3a), 其降低程度与绢英岩化强度呈正相关。这是由于长石被绢云母和石英所交代。显微镜观察表明, 弱绢英岩化时, 斜长石较钾长石更易于被绢云母和石英所交代, 在弱酸性条件下其反应式如下:



可见, 钾随着酸性溶液对岩石的交代而加入到岩石中, 钠从长石中被置换出来并被溶液带走。随着绢英岩化作用的发展, Na<sub>2</sub>O含量随之降低, 从3.52%→0.96%→<0.25%(表1)。当溶液酸性程度进一步增强时, 钾长石也被绢云母和石英所交代:



溶出的K<sup>+</sup>作用于其它矿物, 使岩石的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和

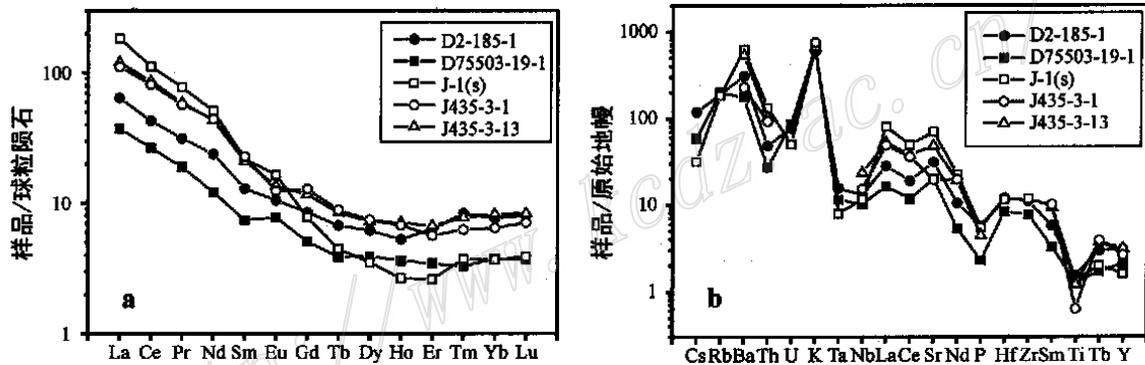


图2 郭家店岩体(实心符号)和金青顶岩体(空心符号)新鲜岩石稀土元素分布形式图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 2 Samples/Chondrite REE patterns (a) and Sample/Primitive Mantle multiple elements patterns (b) of unaltered rock for the Guojiadian Granite (solid symbols) and the Jinqingding Granite (open symbols)

表3 胶东郭家店岩体和金青顶岩体未蚀变花岗岩微量元素含量(μg/10<sup>-6</sup>)

Table 3 Concentrations(μg/10<sup>-6</sup>) of trace elements in unaltered granites in Guojiadian and Jinqingding

样品号	Cs	Rb	U	K	Ta	P	Hf	Zr	Ti	Y
郭家店岩体										
D2-185-1*	2.73	120	1.62	—	0.643	—	3.70	124	—	13.8
D75503-19-1*	1.36	126	1.82	158 850	0.470	210	2.57	86.1	1 590	9.46
金青顶岩体										
J-1(s)*	0.729	117	1.05	152 804	0.325	56	3.56	132	1 720	7.27
J435-3-1**	—	—	—	179 679	—	—	—	—	810	11.9

\* ICP-MS分析结果(中科院贵阳地球化学研究所分析); \*\* ICP-AES分析结果(南京大学成矿机制国家重点实验室分析)。“—”为未测者。

表 2 胶东郭家店岩体和金青顶岩体未蚀变花岗岩及其金矿蚀变围岩的稀土元素含量  
Table 2 Concentrations of trace elements and oxygen isotope composition in unaltered granites and altered wall-rock of Gaojiadian and Jinqingding

序号	样品号	$w_B/10^{-6}$														LREE /HREE		
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		Y	$\Sigma$ REE
<b>郭家店岩体</b>																		
1	D2-185-1*	20.0	34.8	3.84	14.3	2.53	0.774	2.20	0.319	1.99	0.378	1.33	0.27	1.60	0.268	13.8	84.6	12.8
2	75503-19-1*	11.6	21.6	2.32	7.29	1.45	0.574	1.31	0.184	1.26	0.26	0.725	0.106	0.783	0.124	9.46	49.6	13.4
3	75503-1	17.4	28.5	3.25	10.9	1.89	0.444	1.76	0.271	1.76	0.392	1.10	0.194	1.42	0.247	11.2	69.5	11.9
4	75503-7	25.1	39.6	4.32	15.6	2.70	0.602	2.07	0.283	1.72	0.368	0.982	0.173	1.25	0.215	10.3	95.0	18.0
5	75503-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	75503-9-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	75503-12	3.74	3.92	0.63	1.09	0.25	0.171	0.389	0.064	0.496	0.117	0.361	0.0716	0.552	0.0937	3.15	12.0	5.81
8	75503-21	8.79	16.5	2.07	6.71	1.15	0.364	0.882	0.12	0.664	0.146	0.408	0.0782	0.535	0.0974	3.86	38.5	17.8
9	D2-230-10*	10.9	19.2	2.12	7.65	1.36	0.302	1.02	0.143	0.909	0.175	0.604	0.117	0.882	0.168	7.16	45.5	14.2
10	75503-22*	0.56	0.99	0.13	0.56	0.358	0.28	0.486	0.117	0.805	0.165	0.623	0.124	0.897	0.182	7.00	6.27	1.15
11	D2-185-2*	1.02	1.66	0.18	0.80	0.359	0.28	0.536	0.148	1.36	0.33	1.33	0.208	1.58	0.305	12.3	10.1	0.92
<b>金青顶岩体</b>																		
1	J-1(s)*	56.9	90.8	9.43	30.8	4.28	1.21	2.02	0.212B	1.13	0.191	0.549	0.121	0.767	0.129	7.27	198	63.1
2	J435-3-1	34.5	65.8	6.97	26.6	4.47	0.914	3.33	0.421	2.39	0.485	1.19	0.203	1.35	0.235	11.9	149	22.8
3	J435-3-13	37.3	69.5	7.22	26.0	4.10	0.996	3.02	0.399	2.34	0.51	1.41	0.251	1.71	0.277	14.1	155	21.5
4	J435-5-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	J435-5-7	49.6	91.0	9.14	33.6	4.90	1.01	2.98	0.325	1.42	0.288	0.620	0.119	0.712	0.135	6.15	196	53.2
6	J435-3-5*	46.8	74.9	7.74	26.8	3.83	1.03	1.99	0.187	0.641	0.105	0.314	0.067	0.424	0.073	3.18	165	90.0
7	J435-3-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	J435-5-5*	30.3	52.0	5.02	16.6	2.18	0.765	1.67	0.189	0.602	0.111	0.297	0.033	0.146	0.044	2.92	110	76.4
9	J435-3-10	1.92	3.62	0.75	1.68	0.338	0.365	0.366	0.0525	0.384	0.0915	0.286	0.061	0.493	0.105	2.63	10.5	6.14

\* 为 ICP-MS 分析结果,由中国科学院贵阳地球化学研究所分析,其余为 ICP-AES 分析结果,由南京大学成矿机制国家重点实验室分析。“—”为未测者。

表 4 胶东郭家店岩体和金青顶岩体未蚀变花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotope compositions of the unaltered granites of Guojiadian and Jinqingding

样品号	产状	年龄/ Ma	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	ε <sub>Nd</sub> (t)	* t <sub>DM</sub> / Ma
D2-185-1	郭家店岩体	150	0.5431	0.711025 ± 20	0.1082	0.511854 ± 14	0.70983	-13.6	2045
J-1(s)	金青顶岩体	134	0.2246	0.710118 ± 18	0.0913	0.511803 ± 15	0.70969	-14.5	2104

由南京大学现代分析中心分析。

\* t<sub>DM</sub>为两阶段 Nd 模式年龄:  $t_{DM} = \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ 1 + \frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m - [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_c](e^{\lambda t} - 1)}{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_c - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}} \right\}$  (Liew et al., 1988; 陈江峰等, 1999) 式中 (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.2136, (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.513151, (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>c</sub> = 0.118 (Jahn et al., 1995), λ = 6.54 × 10<sup>-12</sup>a<sup>-1</sup>, 角标 m 代表样品测定值, t 代表岩石结晶年龄。

MgO 也有所降低(为未蚀变岩石的 98% ~ 20%); CaO 一般趋向降低, 但当叠加碳酸盐化时, 则有所增加。绢英岩化过程中含量升高的组分有 K<sub>2</sub>O、FeO、MnO 和烧失量(为未蚀变岩石的 1 ~ 4 倍), K<sub>2</sub>O 升高与绢云母增加有关, 而 FeO 和烧失量升高分别与黄铁矿化和碳酸盐化有关。

金青顶矿区绢云母化和绢英岩化过程中 Na<sub>2</sub>O 也不同程度的降低了(表 1, 图 4a)。绢英岩化样品的 Na<sub>2</sub>O 降低程度与大尹格庄绢英岩化相同。绢云母化样品的 Na<sub>2</sub>O 降低幅度较小(0.4 ~ 0.8 倍), 因为该区绢云母化仅发生于斜长石, 即斜长石被稀疏星点状至面型绢云母所交代。绢云母化还使岩石的烧失量升高(1.27 ~ 4.4 倍), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 有升有降。由于无明显碳酸盐叠加(碳酸盐脉体除外), CaO 有不同程度的降低(0.25 ~ 0.88 倍)。

**微量元素和稀土元素变化特征** 与未蚀变的岩石相比, 绢英岩化围岩微量元素变化幅度大于主元素变化幅度(表 5, 图 3a), 最显著的特征是 Au、Ag 含量大幅度升高(2.5 ~ 318 倍), Sr 含量较大幅度地降低(0.03 ~ 0.65 倍)。Sr 的降低主要是斜长石被绢云母和石英交代的结果, 花岗岩中 Sr 主要赋存在含 Ca 矿物斜长石中, 当斜长石被蚀变为不含 Ca 的绢云母和石英时, Sr 与 Ca 一起进入溶液。Au、Ag 的升高和 Sr 的降低幅度与绢英岩化的强度成正相关。过渡族元素 Co、Ni、Cu、Pb、Zn 与 Au、Ag 成正相关。

黄铁绢英岩化是金成矿的主要阶段。Fe、Cu、Pb、Zn 等以硫化物存在, 而 Au、Ag、As 赋存于这些硫化物中, 因此推测金以 Au(HS)<sub>2</sub> 络合物的形式在中温条件下迁移, 当溶液变得酸性(pH = 6.5)及氧逸度升高时, Au(HS)<sub>2</sub> 变得不稳定, 造成 Au 与黄铁矿一起沉淀。

与未蚀变的岩石相比, 除了较强的碳酸盐化叠加的绢英岩使轻稀土元素略有升高外(表 2, 图 3a), 绢英岩化使 REE 降低, 显然 REE 含量较高的黑云母等暗色矿物随长石一起被 REE 含量较低的绢云母和石英所替代。其中轻、重稀土降低的幅度相似, 降低的程度与绢英岩化的强度成正比。当绢英岩中石英含量较高时, REE 降低, 尤其轻稀土降低更为明显。

金青顶矿区绢云母化和绢英岩化过程中微量元素变化的总体特征与大尹格庄绢英岩化相似, 但变化幅度相对较小。Au、Ag 含量升高幅度较大(分别为 2.2 ~ 88 倍和 1.5 ~ 155

倍)(表 5, 图 4a), Cu 明显升高(1.26 ~ 12.6 倍), Sr 不同程度地降低(0.04 ~ 0.77 倍)。绢云母化还使 Ni、Pb、Zn、Th 降低, REE 也降低(表 5, 图 4a), 降低的幅度与大尹格庄绢英岩化相近, 但重稀土的降低幅度较大。

#### (2) 似伟晶状钾长石化

大尹格庄金矿区似伟晶状钾长石化, 主元素组分(表 1, 图 3b)中 K<sub>2</sub>O 显著升高(1.8 ~ 2.4 倍)。由于富含 K<sup>+</sup> 的偏碱性流体作用于围岩, 使围岩中斜长石、钠长石蚀变为钾微斜长石, 黑云母蚀变为白云母。SiO<sub>2</sub> 略有升高, MnO 有时升高, 其余组分均有不同程度的降低(0.11 ~ 0.89 倍)。钾长石对许多元素是清洁矿物(胡受奚等, 1997), 因此, 所分析的微量元素中(表 2, 表 5, 图 3b), 除 Au 和 Ag 小幅度升高(可能与硅化有关)外, 大部分微量元素(Sr、Ba、Th、Nb、Co、Cr、Zn 等)降低, 尤其是轻稀土和 REE 显著降低。

金青顶似伟晶状钾长石化除 K<sub>2</sub>O 升高(1.38 倍)和 SiO<sub>2</sub> 略有升高外, 其余主元素及烧失量不同程度地降低(表 1, 图 4b)。

微量元素 Au 有明显的升高(3.35 倍; 表 5, 图 4b), 但与绢云母化(Au 升高达 88 倍)相比, 升高幅度较小。Ni 略升高, 而 Sr、Ba、Nb、Th、Cu、Zn、Co、As 等降低。这些变化趋势与大尹格庄一致。

REE 尤其是轻稀土含量显著降低(0.04 ~ 0.49 倍)(表 5, 图 4b)。Eu 降低的幅度较相邻元素的小, 与大尹格庄的似伟晶状钾长石化相似。

## 4.2 组间相关特征

笔者计算了未蚀变岩石和蚀变岩各组分之间的相关系数(由于篇幅所限未列出), 相关研究结果如下。

大尹格庄矿区绢英岩化岩石和未蚀变岩石的 Na<sub>2</sub>O 与 Sr、Ba 成明显的正相关。因为, Na<sub>2</sub>O、Sr 赋存在斜长石中, Ba 主要赋存在黑云母中, 它们的变化取决于原岩斜长石和黑云母含量的多少以及岩石遭受绢英岩化的程度。由于蚀变岩石不均等地遭受碳酸盐化, 因而 CaO 与上述组分之间不存在相关性, 而与烧失量有微弱的正相关。这些关系还说明, 碳酸盐化的热液中几乎不含 Sr、Ba。K<sub>2</sub>O 与 Na<sub>2</sub>O(图 5a)、Sr、Ba 成弱的负相关, 反映了绢英岩化过程中绢云母等含钾矿物对斜长石等的交代蚀变。此外, δ<sup>18</sup>O 与 Na<sub>2</sub>O、Sr、Ba、Sc、REE 等原

表 5 胶东郭家店岩体和金青顶岩体未蚀变花岗岩及其金矿蚀变围岩的微量元素含量及氧同位素组成  
Table 5 Concentrations of trace elements and oxygen isotope composition in unaltered granites and altered wall-rock of Guojiaodian and Jinqingtong

序号	样品号	$w_B/10^{-6}$													$\delta^{18}O/\text{‰}$	
		Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Sr	Ba	Nb	Th	Au	Ag		As
郭家店岩体																
1	D2-185-1*	1.95	7.32	3.91	14.17	5.97	38.1	26.6	656	2155	9.29	4.08	11	0.03	3.3	8.1
2	75503-19-1*	2.63	8.63	2.41	4.24	4.71	13.3	12.7	421	1227	7.26	2.27	28	0.14	3.1	8.7
3	75503-1	1.95	5.16	3.30	4.23	11.0	29.1	34.0	93.7	447	12.5	11.1	170	0.72	3.0	9.1
4	75503-7	1.77	13.2	2.87	6.27	37.6	236	39.7	223	313	9.64	9.02	850	6.10	3.2	9.3
5	75503-3	—	7.54	9.03	6.25	240	683	1351	18.5	274	11.5	13.45	3500	14	7.5	10.7
6	75503-9-1	—	2.75	3.35	5.51	4.06	42.6	26.8	89.0	395	11.5	9.52	1030	7.30	2.5	9.8
7	75503-12	1.19	3.78	1.45	4.18	6.78	20.1	13.5	85.9	243	5.61	5.11	38	0.59	2.7	10.5
8	75503-21	1.14	6.21	1.69	3.34	4.67	15.9	36.6	129	633	9.41	5.86	52	1.24	3.0	10.4
9	D2-230-10*	0.82	6.06	1.92	0.69	70.3	4.1	15.5	110	294	9.09	3.54	120	0.58	4.7	10.4
10	75503-22*	—	4.45	0.858	—	7.69	85.7	5.69	205	290	2.55	0.56	16	0.28	2.8	9.1
11	D2-185-2*	1.71	5.57	0.53	2.48	2.89	36.2	6.34	149	248	4.13	0.444	20	0.05	2.5	8.2
金青顶岩体																
1	J-1(s)*	2.33	41.6	3.27	3.61	6.96	20.6	47.6	1469	4363	8.2	11.2	1.4	0.04	3.1	—
2	J435-3-1	1.56	13.5	4.52	11.0	7.39	59.7	41.0	411	1586	10.9	7.79	17	0.06	3.0	5.8
3	J435-3-13	2.08	12.0	6.42	12.0	5.49	64.8	57.7	1015	3744	16.6	8.69	5.8	0.04	2.8	6.9
4	J435-5-10	—	12.2	6.54	12.9	8.36	75.9	32.6	746	3248	14.3	9.72	18	0.04	3.0	5.5
5	J435-5-7	2.84	13.6	6.30	12.0	9.84	68.5	37.4	421	3083	14.4	8.91	140	0.12	2.7	7.9
6	J435-3-5*	1.30	6.92	15.3	0.79	36.4	19.1	51.2	228	2913	5.67	9.00	150	1.36	43	7.2
7	J435-3-7	—	13.4	8.92	11.8	9.06	72.1	75.4	273	2128	15.2	11.1	300	1.26	11	7.1
8	J435-5-5*	1.83	6.92	6.25	3.63	83.5	6.37	20.5	42.9	1505	3.47	5.15	710	4.90	18	9.0
9	J435-3-10	2.57	13.34	4.00	11.3	5.79	61.3	20.2	434	1716	8.83	5.50	27	0.03	2.7	7.7

\* 为 ICP-MS 分析结果(由中国科学院贵阳地球化学研究所分析);其余样品为 ICP-AES 分析结果,  $\delta^{18}O$  和 ICP-AES 分析由南京大学成矿机制国家重点实验室完成; Au, Ag, As 由中国有色金属工业总公司华东地质勘查局八一四队实验室分析。“—”为低于检出限者。空格为未测。

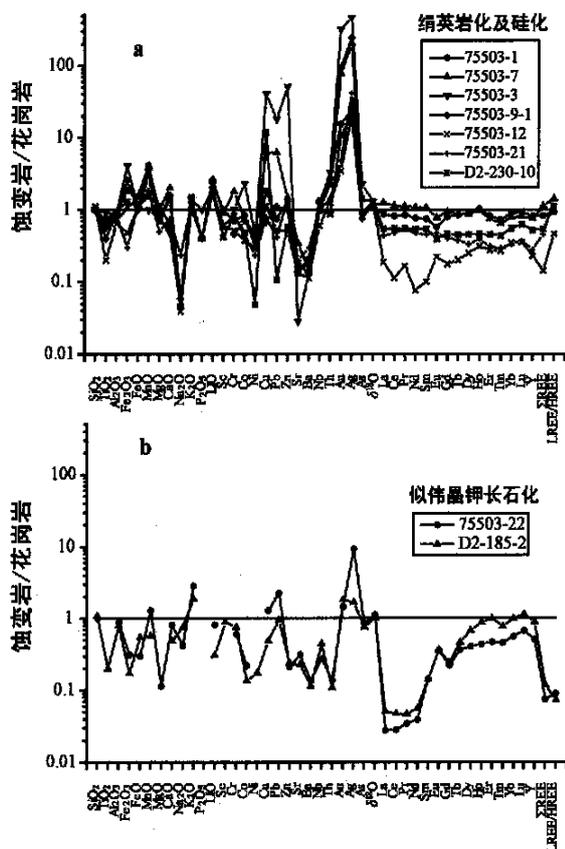


图3 大尹格庄金矿区蚀变岩/未蚀变岩成分比值图  
a—绢英岩化及硅化；b—似伟晶钾长石化

Fig. 3 Altered-rocks/unaltered rock patterns for the Dayingezhuang gold deposit

a—Sericitic-quartz alteration; b—Pegmatitic potash-feldspar alteration

岩组分成分负相关,而岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随绢英岩化的增强而升高。与Au成明显正相关的组分有Fe、Ag、As、Co、Th、Cu、Pb、Zn,这些组分之间也有良好的正相关关系。

似伟晶状钾长石化使 $\text{K}_2\text{O}$ 显著升高, $\text{Na}_2\text{O}$ 的降低幅度较小(图5a),而绢英岩化使 $\text{K}_2\text{O}$ 小幅升高, $\text{Na}_2\text{O}$ 显著降低,因为除了斜长石等被绢云母和石英替代外,还存在硅化。图5b表明,绢英岩化岩石和似伟晶状钾长石化岩石, $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\text{K}_2\text{O}$ 成正相关,但两者相关性的斜率明显不同,绢英岩化岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着 $\text{K}_2\text{O}$ 增加而大幅升高,部分样品 $\text{K}_2\text{O}$ 无明显增加而 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高,这是由于其中硅化较强。似伟晶状钾长石化岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着 $\text{K}_2\text{O}$ 大幅增加却只有小幅升高。由此推断,似伟晶状钾长石化是岩浆作用晚期岩浆热液中高温交代作用的产物。而绢英岩化是岩浆期后中温热液与花岗岩作用的产物。绢英岩化和似伟晶状钾长石化多使Au含量升高,但前者升高幅度较后者大(图5c)。图5d表明,绢英岩化使Au和 $\delta^{18}\text{O}$ 同时升高,叠加硅化时 $\delta^{18}\text{O}$ 较Au升高得多。

金青顶矿区与大尹格庄蚀变岩不同,金青顶矿区绢云母

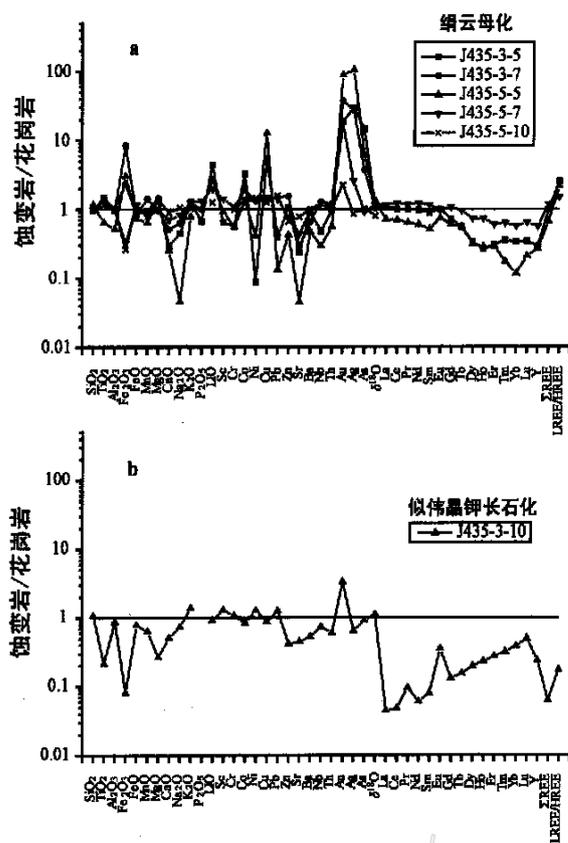


图4 金青顶金矿区蚀变岩/未蚀变岩成分比值图  
a—绢云母化；b—似伟晶钾长石化

Fig. 4 Altered-rocks/unaltered rock patterns for the Jinqingding gold deposit

a—Sericitization; b—Pegmatitic potash-feldspar alteration

化岩石未遭受碳酸盐蚀变, $\text{CaO}$ 与 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}$ 之间成正相关。同时 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 与烧失量、 $\text{K}_2\text{O}$ 成负相关,说明 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 与绢云母化程度互为消长。 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 还与Au、Ag、As、Cu、Co成负相关,反映了Au、Ag、As、Cu、Co等元素为热液携带组分。 $\text{K}_2\text{O}$ 与烧失量、Au、Ag、Co成正相关,这些组分与绢云母化程度成正比,也说明蚀变热液含有这些组分。

图6a显示了从新鲜花岗岩到绢云母化花岗岩, $\text{Na}_2\text{O}$ 与 $\text{K}_2\text{O}$ 成负相关,但负相关的斜率比大尹格庄绢英岩化的小。金青顶似伟晶状钾长石化在图6a上的投影点落在绢云母化负相关线附近,金青顶硅化黄铁绢英岩 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量与大尹格庄绢英岩化相似,在图6a上远离绢云母化的范围。

绢云母化花岗岩Au含量与 $\text{K}_2\text{O}$ 含量成正相关(图6c),且随着绢云母化增强而升高。似伟晶状钾长石化Au含量也有所升高,硅化黄铁绢英岩Au富集最明显。新鲜花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\text{K}_2\text{O}$ 和Au之间成弱负相关(图6b、d)。绢云母化及似伟晶状钾长石化的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\text{K}_2\text{O}$ 和Au之间成正相关。

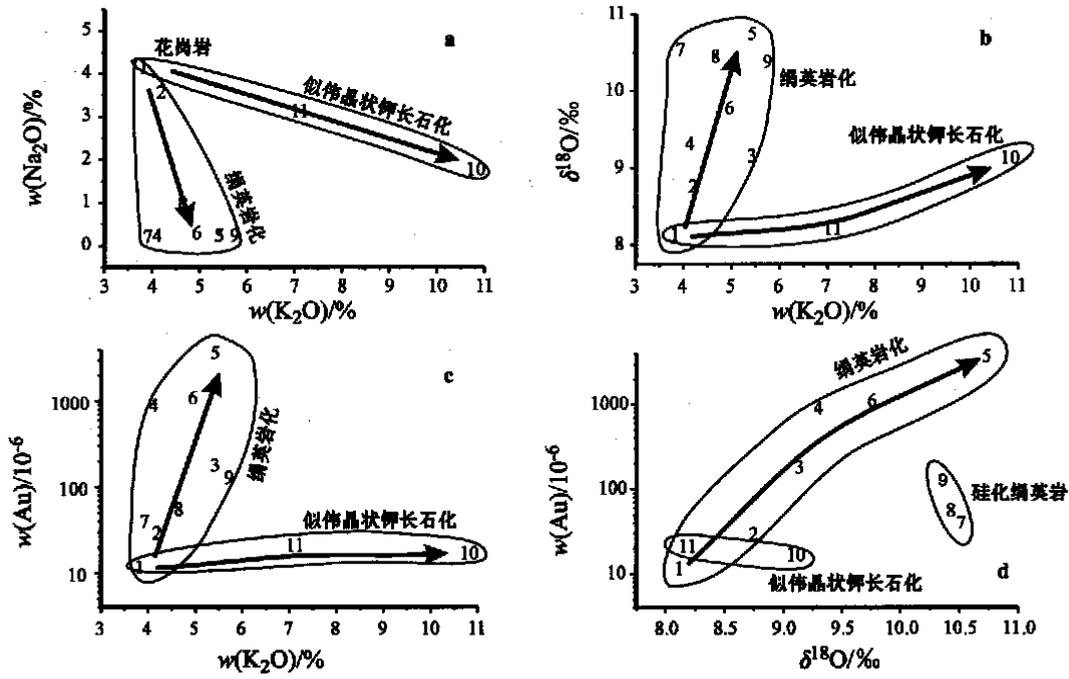


图 5 大尹格庄金矿区蚀变岩 Au, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, δ<sup>18</sup>O 之间的相关关系  
投影点数字为表 1 中样品序号

Fig. 5 Diagrams showing correlations between Au, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, δ<sup>18</sup>O of the altered rocks from the Dayingezhuang gold deposit

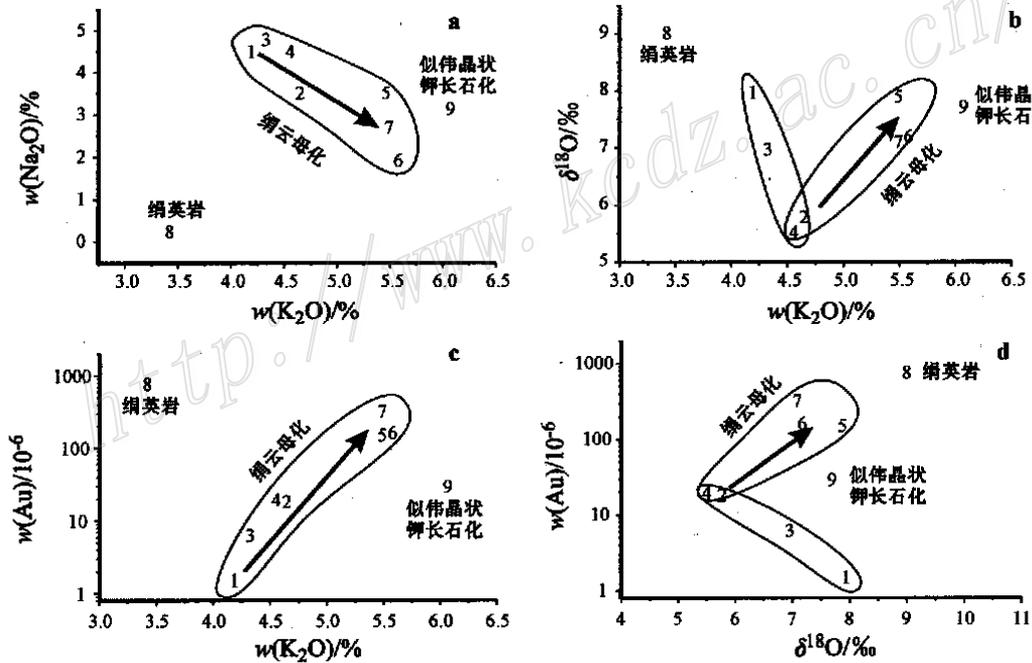


图 6 金青顶金矿区蚀变岩 Au, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, δ<sup>18</sup>O 之间的相关关系  
投影点数字为表 1 中样品序号

Fig. 6 Diagrams showing correlations between Au, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, δ<sup>18</sup>O of the altered rocks from the Jinqingding gold deposit

## 5 蚀变流体的性质

### 5.1 大尹格庄矿区

大尹格庄矿区未蚀变花岗岩的  $\delta^{18}\text{O}$  为  $8.1\text{‰} \sim 8.7\text{‰}$ , 成矿前似伟晶状钾长石化岩石的  $\delta^{18}\text{O}$  为  $8.2\text{‰} \sim 9.1\text{‰}$ , 成矿期绢英岩化岩石的  $\delta^{18}\text{O}$  为  $9.1\text{‰} \sim 10.7\text{‰}$  (表 5), 即从新鲜花岗岩  $\rightarrow$  成矿前似伟晶状钾长石化岩石  $\rightarrow$  成矿期绢英岩化岩石,  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐升高。根据气液包裹体研究 (沈昆等, 2000), 成矿前似伟晶状钾长石化-石英化的温度范围为  $280 \sim 360\text{°C}$ , 成矿期绢英岩化的温度在  $180 \sim 275\text{°C}$  之间, 且集中在  $230 \sim 250\text{°C}$ 。取未蚀变岩石  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $8\text{‰}$ , 以及蚀变岩石  $\delta^{18}\text{O}$  值和蚀变温度的平均值 (似伟晶状钾长石化  $8.5\text{‰}$ ,  $320\text{°C}$ , 绢英岩化  $10\text{‰}$ ,  $240\text{°C}$ ), 根据封闭体系水-岩反应模式 (Taylor, 1977):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}^i = (\delta^{18}\text{O}_{\text{岩}}^f - \delta^{18}\text{O}_{\text{岩}}^i) / (2W/R) + (\delta^{18}\text{O}_{\text{岩}}^f - \Delta)$$

和完全开放体系的水/岩比值  $(W/R)_{\text{开}}$  与封闭体系水/岩比值  $(W/R)_{\text{封}}$  的关系 (Taylor, 1977):

$$(W/R)_{\text{开}} = \ln[(W/R)_{\text{封}} + 1]$$

上式中上标  $i$  和  $f$  分别表示水-岩反应前后;  $W/R$  为参加反应的水/岩重量比值;  $\Delta$  代表花岗岩-水氧同位素分馏, 用斜长石的氧同位素分馏方程代替, 即  $\Delta = 2.68 \times 10^6 / T^2 - 3.53$  (Ó Neil et al., 1967)。结果表明对绢英岩化而言, 无论流体处于封闭体系还是开放体系, 在任何  $W/R$  比值条件下, 蚀变前初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} > 3.3\text{‰}$  (图 7a)。计算时所用包裹体测温结果未经压力校正, 因此计算结果应为实际值之下限, 可见该流体不可能以大气降水占主导。在  $W/R = 1/4 \sim 1.0$  时, 若为封闭体系, 则初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  为  $7.4\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ , 若为开放体系, 则初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  为  $6.9\text{‰} \sim 3.9\text{‰}$ , 与本区花岗岩岩浆分泌的热液相近。上述计算结果表明, 引起绢英岩化蚀变的流体应以岩浆热液占主导。对似伟晶状钾长石化而言, 在任何体系、任何  $W/R$  比值条件下, 反应前初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} > 4.4\text{‰}$  (图 7a), 以大气降水占主导的可能性很小。在

$W/R = 0.1 \sim 1.0$  时,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  为  $6.9\text{‰} \sim 4.7\text{‰}$  (封闭体系) 或  $6.8\text{‰} \sim 4.6\text{‰}$  (开放体系), 与本区花岗岩岩浆分泌的热液相近。

对玲珑花岗岩基的时代及其有关金矿床的成因, 已有许多研究。既有岩浆水热液成矿观点 (姚凤良等 1983; 林文蔚等, 1998), 也有大气降水热液成矿观点 (张理刚等, 1994)。需要指出, 由于成矿时的压力较难估计, 采用未经压力校正的包裹体温度 (可能比实际流体温度低许多) 来计算成矿时与脉石矿物平衡的流体的氧同位素组成, 其  $\delta^{18}\text{O}$  值极可能低于实际流体的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 从而影响对流体来源和性质的判断。因此  $\delta^{18}\text{O}$  值应是实际流体  $\delta^{18}\text{O}$  值的下限。另一方面, 支持大气降水热液成矿观点的证据之一是本区矿-岩时差较大。过去认为玲珑花岗岩基形成于元古代 (王鹤年, 1988; 裘有守等, 1988), 或是一个多时代的复式岩基 (徐金方, 1991; 李兆龙等, 1993)。近年来通过锆石 SHRIMP 定年, 除发现继承锆石外, 还测得了玲珑型花岗岩 [ $(153 \pm 4)\text{Ma} \sim (160 \pm 3)\text{Ma}$ ]、滦家河型花岗岩 [ $(152 \pm 10)\text{Ma} \sim (154 \pm 8)\text{Ma}$ ] 以及郭家岭型花岗岩 [ $(126 \pm 2)\text{Ma} \sim (130 \pm 3)\text{Ma}$ ] 的岩浆锆石结晶成岩年龄。但对属于滦家河型的郭家店粗粒二长花岗岩, 只测得继承锆石年龄 ( $200 \sim 300\text{Ma}$  和  $1800 \sim 2900\text{Ma}$ ), 而没有测得成岩锆石的年龄 (苗来成等, 1997; Wang et al., 1998)。由于郭家店粗粒二长花岗岩在岩性上与滦家河岩体 [ $(154 \pm 8)\text{Ma}$ ]、毕郭岩体 [ $(152 \pm 10)\text{Ma}$ ] (苗来成等, 1997) 很相似, 可以认为属同期岩浆产物。李怀坤等 (1998) 通过单颗粒锆石 U-Pb 定年, 测得玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩长岩的形成年龄均为  $(145 \pm 1)\text{Ma}$  左右, 并认为苗来成等 (1997) 对 SHRIMP 测定数据的处理不太合理。对此进行评论超出了本文的范围。对大尹格庄金矿赋矿围岩郭家店二长花岗岩体而言, 若其与滦家河岩体、毕郭岩体 [ $(154 \pm 8)\text{Ma}$ ,  $(152 \pm 10)\text{Ma}$ , 苗来成等, 1997] 同期, 则与李怀坤等 (1998) 认为的玲珑花岗岩年龄 [ $(145 \pm 1)\text{Ma}$ ] 在误差范围内一致。大尹格庄金矿成矿时代目前尚无定年数据, 但其成矿特征与焦家金矿类似, 后者的成矿年龄为  $(134 \pm 8)\text{Ma}$  (李华芹等, 1993), 因此, 矿-岩时差并不大。岩浆热液成矿是完全可能的。

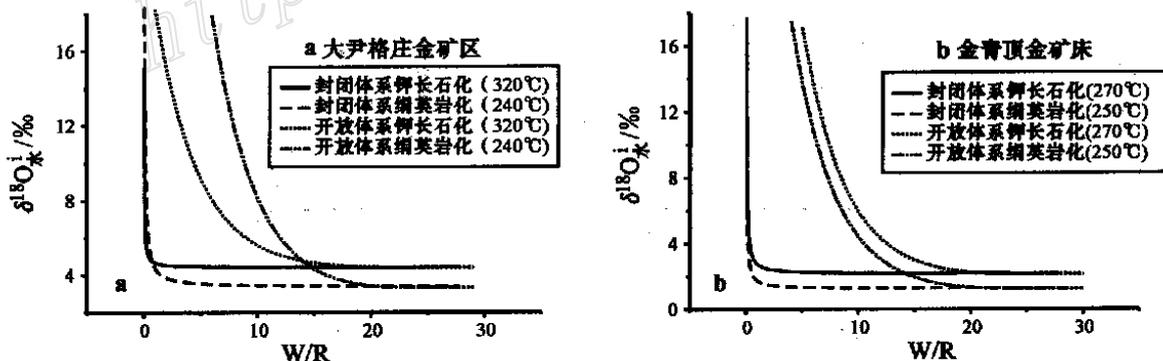


图 7 根据蚀变岩石  $\delta^{18}\text{O}$  值并按 Taylor 封闭体系水-岩反应模式计算的不同  $W/R$  比值条件下初始流体的  $\delta^{18}\text{O}$  值曲线

Fig. 7  $\delta^{18}\text{O}$  water/rock curves for initial fluid calculated by Taylor close-system model using altered-rock  $\delta^{18}\text{O}$  values

## 5.2 金青顶矿区

金青顶矿区未蚀变花岗岩的  $\delta^{18}\text{O}$  为 5.8‰ ~ 6.9‰ (平均 6.5‰), 似伟晶状钾长石化岩石的  $\delta^{18}\text{O}$  为 7.7‰, 绢云母化岩石的  $\delta^{18}\text{O}$  为 7.1‰ ~ 7.9‰, 黄铁绢英岩化的  $\delta^{18}\text{O}$  为 9.0‰ (表 5)。根据气液包裹体测温资料(杨敏之等, 1996; 沈昆等, 待发表资料), 绢云母化蚀变阶段热液温度为 190 ~ 300 °C, 平均 250 °C, 绢云母化花岗岩的平均  $\delta^{18}\text{O}$  为 7.5‰, 由上述封闭体系水-岩反应模式计算, 结果表明在任何体系任何 W/R 比值条件下, 蚀变前初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} > 1.2\text{‰}$  (图 7b)。可见蚀变流体不是以大气降水占主导, 但不排除有少量大气降水参与。由于金青顶矿床为脉型矿体, 岩石无明显破碎, 蚀变程度较弱, 范围较小, 因而热液蚀变的水/岩比值可能比大尹格庄矿区的小得多。

似伟晶状钾长石化的  $\delta^{18}\text{O}$  为 7.7‰ (表 5), 温度为 270 °C 左右(杨敏之等, 1996; 沈昆等, 待发表资料), 类似的计算表明, 任何体系任何 W/R 比值条件下, 蚀变前初始流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} > 2.1\text{‰}$  (图 7b)。可见蚀变流体也不是以大气降水占主导。在 W/R 为 0.2 ~ 0.3 时,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  为 5‰ ~ 4‰ (封闭体系) 或 4.9‰ ~ 3.9‰ (开放体系), 为岩浆热液。若有大气降水参与, 则所需 W/R 更大, 这与囊状似伟晶状长石化局限分布的事实不符, 因此, 引起似伟晶状钾长石化的流体极可能以岩浆热液为主。

金青顶花岗岩的 K-Ar 同位素年龄为 (134.4 ± 3.8) Ma (杨敏之, 1998),  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为 (130.7 ± 2.7) Ma (张德全等, 1995)。虽然对金青顶金矿化时代尚无结果, 但崑崙山岩体中另一大型石英脉型金矿——邓格庄金矿蚀变岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 (118 ± 9) Ma [张德全等, 1995; 本文作者用 ISO-PLLOT 程序计算其结果为 (118 ± 24) Ma, MS WD ≥ 86, 可信度低]。最近 Yang 等 (2001) 利用成矿期黄铁矿 Rb-Sr 等时线法测得玲珑石英脉型金矿成矿时代为 (123 ± 4) Ma。若金青顶金矿成矿时代与之相近, 则金青顶金矿床的矿-岩时差也不大, 初始成矿流体可能也来自岩浆热液, 但与大尹格庄蚀变岩型金矿相比, 其成矿温度较低, 蚀变作用较弱, 流体中大气降水参与相对较多。

综上所述, 大尹格庄金矿床和金青顶金矿床初始成矿流体都来自岩浆热液, 虽然矿区存在煌斑岩脉, 也有可能分泌岩浆热液, 但煌斑岩的规模小, 不大可能产生大量的岩浆热液, 因此初始成矿流体最可能来自花岗岩浆热液。由于郭家店花岗岩和金青顶花岗岩为新太古代-古元古代绿岩带地壳岩石熔融的产物, 因此 Au 最终可能来自这些古老的地壳岩石。在绿岩带地壳岩石熔融过程中, Au 与花岗岩浆一起被活化并初步富集。花岗岩浆结晶过程中, Au 形成富 Au 岩浆热液, 在合适的断裂系统和物理化学条件下, Au 沉淀成矿。

## 6 主要结论

(1) 大尹格庄金矿床的寄主围岩郭家店岩体与金青顶金

矿床的花岗质围岩金青顶岩体均属壳源型花岗岩。

(2) 大尹格庄蚀变岩型金矿床的围岩蚀变范围和强度较大, 主要为不同程度的绢英岩化(包括黄铁绢英岩化), 深部有钾长石化。金青顶石英脉型金矿床的围岩蚀变和强度较小, 蚀变分带明显: 含金黄铁矿-石英脉 → 绢云母化花岗岩 → 钾长石化花岗岩 → 新鲜黑云母二长花岗岩。

(3) 大尹格庄金矿床和金青顶矿床虽然矿体形式和围岩蚀变程度不同, 但围岩蚀变过程中主元素、微量元素的总体变化特征相似, 说明蚀变流体性质和成分相近。

(4) 大尹格庄矿区绢英岩化岩石中,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、Sr、Ba 为原岩组分, 热液带入组分有 Au、Ag、As、Co、Cu、Pb、Zn、Fe、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  等。金青顶矿区绢云母化岩石中, 原岩组分为 CaO、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、Sr 等, 热液带入组分有  $\text{K}_2\text{O}$  及 Au、Ag、As、Co、Cu 等。蚀变过程中, 两矿区带出组分都为  $\text{Na}_2\text{O}$  和 REE, 金青顶矿区元素变化幅度相对较小。似伟晶状钾长石化都使两矿区  $\text{K}_2\text{O}$  显著升高及 Au、Ag 小幅升高, 而其它组分不同程度的降低, 尤以轻稀土降低最为显著。

(5) 在大尹格庄和金青顶金矿床, 引起围岩蚀变的初始流体都是以花岗岩岩浆热液占主导, 金青顶矿床成矿晚期大气降水参与可能相对多于尹格庄矿床。推断金矿床 Au 最终来自晚太古代-早元古代绿岩带地壳岩石的熔融。

**致谢** 野外工作期间, 得到大尹格庄金矿于瑞业高级工程师和矿山领导以及金青顶金矿李振江矿长和地质科有关同志的热情帮助; 中科院贵阳地球化学研究所在 ICP-MS 分析上给予了支持; 审稿人的建议帮助了本文的改进。作者向他们表示诚挚的感谢。

## References

- Chen J F and Jahn B M. 1999. Evolution of continental crust in southeast China: constraints from Nd, Sr and Pb isotopes [A]. In: Zheng Y F, ed. *Geochemical dynamics* [C]. Beijing: Science Press. 262 ~ 287 (in Chinese).
- Hu S X, Zhao Y Y, Xu J F, et al. 1997. *Geology of gold mineralization in the North China Block* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Hu S X, Wang H N, Wang D Z, et al. 1998. *Geology and geochemistry of gold deposits in eastern part of China* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Li H Q, Liu J Q and Wei L. 1993. Study on geochronology of fluid inclusions in hydrothermal deposits and its geological application [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Li H K, Li H M, Lu S N, et al. 1998. Single grain zircon U-Pb ages for the granitoids from the Zhao-Ye gold mineralization belt (Shandong Province) and their geological implications [J]. *Progress in Precambrian Research*, 21 (1): 11 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Li H, Liu Z C, Wang J C, et al. 2000. Overprint halo feature research

- on Jinqingding Au deposit and ore prediction following ore exploration[ J ]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 15(2) : 151 ~ 158 ( in Chinese with English abstract ) .
- Li H, Zheng T, Tang L, et al. 1998. Super imposed halo model used for positional prediction of the concealed ore bodies in the Dayingezhuang gold deposit, Zhaoyuan, Shandong[ J ]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 7(3) : 178 ~ 185 ( in Chinese with English abstract ) .
- Li Z L and Yang M Z. 1993. Geology and geochemistry of gold deposits in eastern Shandong[ M ]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press ( in Chinese with English abstract ) .
- Li Z J, Liu B S and Sun Y T. 1999. The genesis and concentration regularity of Jinqingding gold deposit[ J ]. Gold, 20(5) : 8 ~ 12 ( in Chinese with English abstract ) .
- Liew T C and Hofmann A W. 1988. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian fold belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study[ J ]. Contrib. Mineral. Petrol., 98 : 129 ~ 138 .
- Lin W W and Yin X L. 1998. Isotope geological characteristics of mineralizing fluids of gold deposits in Jiaodong area and a discussion on the application condition of H. P. Taylor's equation [ J ]. Acta Petrologica Mineralogica, 17(3) : 249 ~ 259 ( in Chinese with English abstract ) .
- Lu H Z, Yuan W C, Zhang G P, et al. 1999. Stable isotopes studies and age dating of gold deposits and Linglong granites in Linglong-Jiaojia area, Shandong, China[ J ]. J. Guiling Institute Technology, 19(1) : 1 ~ 8 ( in Chinese with English abstract ) .
- Miao L C, Luo Z K, Huang J Z, et al. 1997. SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids from gold deposits at Zhaoyuan in Shandong[ J ]. Science in China ( D ), 27(3) : 207 ~ 213 ( in Chinese ) .
- O'Neil J R and Taylor H P Jr. 1967. The oxygen isotope and cation exchange chemistry of feldspars[ J ]. Am. Mineralogist, 52 : 1414 ~ 1437 .
- Qiu Y S, Wang K H, Yang G H, et al. 1998. Regional mineralization conditions for gold deposits in Zhaoyuan-Yexian, Shandong Province[ M ]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press ( in Chinese with English abstract ) .
- Shen K, Hu S X, Sun J G, et al. 2000. Characteristics of ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit in eastern Shandong, China[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 16(4) : 542 ~ 550 ( in Chinese with English abstract ) .
- Taylor H P Jr. 1977. Water/rock interactions and the origin of H<sub>2</sub>O in granitic batholiths[ J ]. J. Geol. Soc. London, 133 : 509 ~ 558 .
- Wang H N. 1988. Geological and geochemical characteristics of the middle Proterozoic Linglong granite in eastern Shandong and its works[ J ]. J. Nanjing University, (1) : 105 ~ 118 ( in Chinese with English abstract ) .
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, et al. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [ J ]. Ore Geol. Rev., 13 : 275 ~ 291 .
- Xu J F. 1991. Components and geologic ages of Linglong composite granitic batholith[ J ]. Acta Petrologica Sinica, (2) : 43 ~ 49 ( in Chinese with English abstract ) .
- Yang J H and Zhou X H. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits[ J ]. Geology, 29(8) : 711 ~ 714 .
- Yang M Z and Lu G X. 1996. The geology and geochemistry of gold deposits in greenstone belt of east Shandong province[ M ]. Beijing: Geol. Pub. House ( in Chinese with English abstract ) .
- Yang M Z. 1998. The geochemistry of wallrock alteration zone of gold deposits — as exemplified by Jiaodong gold deposits[ M ]. Beijing: Geol. Pub. House ( in Chinese with English abstract ) .
- Yao F L, Liu L D, Kong C Q, et al. 1983. Stable isotope geology and origin of the gold deposits in the Zhaoyuan-Yexian gold belt, Shandong Province[ J ]. J. Changchun College of Geology, (4) : 7 ~ 18 ( in Chinese with English abstract ) .
- Ying H L. 1994. Isotopic compositions and their geological significance of Jinqingding and Denggezhuang gold deposits, Jiaodong[ J ]. J. Precious Metallic Geology, 3(3) : 201 ~ 207 ( in Chinese with English abstract ) .
- Ying H L. 1996. Lamprophyre in the Denggezhuang and Jinqingding gold mining area of Jiaodong: Its characteristics and relationship to gold mineralization[ J ]. Acta Petrologica Mineralogica, 15(3) : 221 ~ 227 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang D Q, Xu H L and Sun G Y. 1995. Emplacement ages of the Denggezhuang gold deposit and the Kunyushan granite and their geological implications[ J ]. Geological Review, 41 : 415 ~ 425 ( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang L G, Chen Z S, Liu J X, et al. 1994. Water-rock exchange in the Jiaojia type gold deposit: A study of hydrogen and oxygen isotopic compositions of ore-formation fluids[ J ]. Mineral Deposits, 13(3) : 193 ~ 200 ( in Chinese with English abstract ) .

#### 附中文参考文献

- 陈江峰, 江博明. 1999. 铀-铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[ A ]. 见郑永飞主编. 化学地球动力学[ C ]. 北京: 科学出版社. 262 ~ 287 .
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方, 等. 1997. 华北地台金成矿地质[ M ]. 北京: 科学出版社 .
- 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 等. 1998. 中国东部金矿地质地球化学[ M ]. 北京: 科学出版社 .
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[ M ]. 北京: 地质出版社 .
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年, 等. 1998. 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, 21(1) : 11 ~ 18 .
- 李惠, 刘振昌, 王敬臣, 等. 2000. 对山东金青顶矿床原生叠加晕特征的跟踪研究及预测[ J ]. 地质找矿论丛, 15(2) : 151 ~ 158 .
- 李惠, 郑涛, 汤磊, 等. 1998. 山东招远大尹格庄金矿床隐伏矿定位预测的叠加晕模式[ J ]. 有色金属矿产与勘查, 7(3) : 178 ~ 185 .

- 李兆龙, 杨敏之. 1993. 胶东金矿床地质地球化学[ M]. 天津: 天津科学技术出版社.
- 李振江, 刘宝善, 孙玉堂. 1999. 金青顶金矿床成因及富集规律[ J]. 黄金, 20(5): 8 ~ 12.
- 林文蔚, 殷秀兰. 1998. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征[ J]. 岩石矿物学杂志, 17(3): 249 ~ 259.
- 卢焕章, 袁万春, 张国平, 等. 1999. 玲珑—焦家地区金矿床稳定同位素及同位素年代学[ J]. 桂林工学院学报, 19(1): 1 ~ 8.
- 苗来成, 罗镇宽, 黄佳展, 等. 1997. 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), 27(3): 207 ~ 213.
- 裘有守, 王孔海, 杨广华, 等. 1988. 山东招远-掖县地区金矿区域成矿条件[ M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- 沈 昆, 胡受奚, 孙景贵, 等. 2000. 山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征[ J]. 岩石学报, 16(4): 542 ~ 550.
- 王鹤年. 1988. 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), (1): 105 ~ 118.
- 徐金方. 1991. 玲珑复式花岗岩基的构成及其形成时代[ J]. 岩石学报, (2): 43 ~ 49.
- 杨敏之, 吕古贤. 1996. 胶东绿岩带金矿地质地球化学[ M]. 北京: 地质出版社.
- 杨敏之. 1998. 金矿床围岩蚀变带地球化学——以胶东金矿床为例[ M]. 北京: 地质出版社.
- 姚凤良, 刘连登, 孔存庆, 等. 1983. 招掖金矿带的稳定同位素地质及金矿成因[ J]. 长春地质学院学报, (4): 7 ~ 18.
- 应汉龙. 1994. 胶东金青顶和邓格庄金矿床的同位素组成及其地质意义[ J]. 贵金属地质, 3(3): 201 ~ 207.
- 应汉龙. 1996. 胶东邓格庄和金青顶金矿区煌斑岩特征及其与金成矿关系[ J]. 岩石矿物学杂志, 15(3): 221 ~ 227.
- 张德全, 徐洪林, 孙桂英. 1995. 山东邓格庄金矿与昆崙山花岗岩的定位时代及期地质意义[ J]. 地质论评, 41: 415 ~ 425.
- 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 等. 1994. 焦家式金矿水-岩交换作用: 成矿流体来源及成因[ J]. 矿床地质, 13(3): 193 ~ 200.

## Geochemical Study of Granitic wall-rock Alteration in Dayingezhuang Gold Deposit of Alteration Rock Type and Jinqingding Gold Deposit of Quartz-vein Type

Ling Hongfei, Hu Shouxi, Sun Jinggui, Ni Pei

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Shen Kun

(Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China)

### Abstract

In order to understand the change in elements in the wall-rocks of the Dayingezhuang and the Jinqingding gold deposits during hydrothermal alteration and the sources of the ore-forming fluids, the authors studied the composition of major and trace elements and oxygen isotopes in the unaltered and altered granitic wall-rocks. The Guojiadian and the Jinqingding granites which are related to the two deposits respectively are depleted in Nb, Ta, P, Ti, and have  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of  $-11.9 \sim -14.5$ , indicating their derivation from Precambrian crustal sources. The intensities of wall-rock alterations of the two deposits are somewhat different. In the Dayingezhuang gold deposit alterations are relatively strong, with sericite-quartz alteration along the fault zone and potash-feldspar alteration in the lower position. The Jinqingding gold deposit has limited and zoning wall-rock alterations, from the gold-bearing pyrite-quartz vein outwards to sericitization granite to K-feldspar alteration. The most prominent changes in chemical composition, however, are similar in sericite-quartz alteration in Dayingezhuang and sericitization in Jinqingding, i.e. decrease in Na and REE and increase in Au and Ag, though differences exist in amounts of the changes, with generally smaller changes in Jinqingding. In these alterations the components added to the wall-rocks from the fluids include Au, Ag, As, Co, Cu, K in both deposit areas and Pb, Zn, Fe, Si only in Dayingezhuang. When wall-rocks were subjected to potash-feldspar alteration in both deposits, K increased evidently and Au and Ag also increased to a less extent, while other components, especially LREE, decreased. Initial  $\delta^{18}\text{O}$  values of fluid causing the alterations were calculated according to Taylor's models of closed and open systems of water-rock interaction. In Dayingezhuang area, the fluid causing sericite-quartz alteration and permatitic K-feldspar alteration had initial  $\delta^{18}\text{O}$  value higher than 3.3‰ and 4.4‰, respectively, which suggests that the fluid was dominated by magmatic thermal solution. In Jinqingding area, initial  $\delta^{18}\text{O}$  values of the fluid causing permatitic K-feldspar alteration were higher than 2.1‰, and the fluid responsible for the sericitization had initial  $\delta^{18}\text{O}$  value not lower than 1.2‰, indicating a main source of magmatic thermal solution, but a small amount of meteoric water might also have played a certain role.

**Key words:** composition of elements and oxygen isotopes, hydrothermal alteration, Dayingezhuang and Jinqingding gold deposits, Eastern Shandong