

新疆恰尔噶巴斯希铁-铜-金矿矿床地质研究^{*}

王 瑞, 朱永峰^{**}

(北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要 新疆恰尔噶巴斯希铁-铜-金矿床中磁铁矿化和铜矿化与中基性侵入岩体密切相关。磁铁矿化在辉长岩体与中基性火山岩的内外接触带发育, 由内带的磁铁矿 + 透辉石组合变化到外带的磁铁矿 + 石英 + 钙铁榴石 + 方解石组合。辉长岩和闪长岩的轻、重稀土元素分异明显 $[(La/Yb)_N \text{ 为 } 3.19 \sim 7.81]$, 富集大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta, 具岛弧岩浆岩特征。辉长岩氧逸度较高, 明显富钾。铜矿化主要集中于闪长岩体的外接触带, 大部分铜矿化充填在热液角砾岩中。可划分出 4 个铜矿化阶段: ① 钠长石-石英阶段; ② 黄铜矿-黄铁矿-自然金-绢云母-石英阶段; ③ 黄铜矿-黄铁矿-绿帘石-葡萄石阶段; ④ 闪锌矿-方铅矿-石英-方解石阶段。自然金主要出现在糜棱岩化之后的黄铁矿-石英脉中。

关键词 地质学 铁-铜-金矿床 热液角砾 矽卡岩化 萨吾尔 新疆

中图分类号 P618.31; P618.41; P618.51

文献标志码 A

Geology and geochemistry of Qia'erdunbasixi Fe-Cu-Au deposit in Sawur, northern Xinjiang

WANG Rui and ZHU YongFeng

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract

The Qia'erdunbasixi Fe-Cu-Au deposit is located in Sawur on the northern margin of west Junggar in northern Xinjiang. Magnetite and copper are developed mostly along the contact zone between gabbro and diorite. Magnetite mineralization occurs along the inner and outer contact zones of gabbro, assuming typical zoning from magnetite + diopside to magnetite + quartz + andradite + calcite. Wall rock with high Fe seems to be one of the sources for magnetite mineralization. The differentiation between light REE and heavy REE of gabbro and diorite is very obvious $[(La/Yb)_N = 3.19 \sim 7.81]$. Both of gabbro and diorite are enriched with LILE and depleted in Nb and Ta, showing characteristics of island arc magma. Copper mineralization is concentrated along the outer contact zone of diorite. Four stages of copper mineralization could be identified, i. e., ① albite-quartz; ② chalcopyrite-pyrite-gold-seriate-quartz; ③ chalcopyrite-pyrite-epidote-prehnite; ④ sphalerite-galena-quartz-calcite. Gold mineralization occurs in pyrite-quartz veins closely related to altered granodiorite-porphyry, which, however, have been locally mylonitized.

Key words: geology, Fe-Cu-Au deposit, hydrothermal breccia, contact metasomatism, Sawur, Xinjiang

位于新疆北部的西准噶尔地区是中亚成矿域的重要组成部分(徐新等, 2006; 何国琦等, 2007; 朱永峰等, 2007a; 安芳等, 2007; Shen et al., 2007; An et al., 2009)。该区在晚古生代形成了大量矿床, 如哈图金矿、包古图铜金矿、宝贝金

^{*} 本文得到国家自然科学基金创新群体项目(40821002)和‘十一五’国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)的联合资助

第一作者简介 王 瑞, 男, 1986 年生, 研究生, 矿床地球化学专业。

^{**} 通讯作者 朱永峰, 教授, 博士生导师。Email: yfzhu@pku.edu.cn

收稿日期 2009-06-22; 改回日期 2009-09-29。李德先编辑。

矿、满岭山金矿、铭门沟金矿和扎武特金矿等。位于西准噶尔北缘的萨吾尔地区的晚古生代岩浆活动强烈,并形成了阔尔真阔腊金矿床和布尔克斯岱中型金矿床。在该地区的找矿勘探工作进展很快,最近在萨吾尔地区东南部发现了恰尔墩巴斯希铁-铜-金矿床,该矿床目前仍处于勘查阶段。本文主要报道该矿床的地质特征,并初步探讨其成因。

1 地质概况

新疆西准噶尔萨吾尔山地区火山岩出露在额尔齐斯构造带以南的西准噶尔北缘,属于准噶尔板块的晚古生代岛弧带(图 1a),区内出露的最老地层为中泥盆统萨吾尔山组,是一套岛弧型火山岩-火山碎屑岩建造,其上的中泥盆统布尔津组,主要由细碎屑岩夹少量火山岩组成,中泥盆统蕴都喀拉组为一套海相中基性火山岩和正常沉积碎屑岩建造,上泥盆统塔尔巴哈台组为一套岛弧浊流相火山复理石建造(新疆维吾尔自治区区域地质志,1993)。下石炭统黑山头组为一套浅海相类复理石陆源碎屑岩建造夹火山岩建造,布尔克斯岱金矿产于该地层中。贺伯初等(1994)获得金矿区内安山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 342 Ma,辉绿玢岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 325 Ma。

区内断裂构造十分发育,方向以近东西向、北西向和北东东向为主,规模宏大,是区带主要导岩导矿构造。主要断裂有那林卡拉断裂、萨吾尔山弧形断裂和喀拉托普断裂。阔尔真阔腊金矿和布尔克斯岱金矿就产在萨吾尔山弧形断裂的分支断裂中。

萨吾尔山地区侵入岩分布广泛,从基性、中性到酸性岩均有出露,以花岗岩最为发育(图 1a),其中塔斯岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄为 337 Ma(范裕等,2007),森塔斯岩体 SHRIMP 年龄为 328 Ma,沃肯萨拉岩体锆石 SHRIMP 年龄为 324 Ma(袁峰等,2006)。阔依塔斯碱性花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄为 298 Ma,恰其海的碱性花岗岩年龄 291 Ma(Zhou et al., 2006)。布尔克斯岱金矿区内石英钠长斑岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 294 Ma(李华芹等,2000)。

2 矿区地质

晚古生代辉长岩、闪长岩和花岗闪长斑岩侵入到中泥盆统布尔津组的火山-沉积岩中,矿区内发育北东东向的恰尔墩巴斯希大断裂以及多条北西西向的分支断裂(图 1b),矿化发育在侵入岩和火山岩的接触带内。磁铁矿化主要发育在辉长岩体的内外接触带,铜矿化主要发育在闪长岩的外接触带,金矿化则和花岗闪长斑岩密切相关。布尔津组由细粒碎屑岩夹少量火山岩组成(新疆维吾尔自治区区域地质志,1993)。矿区内出露的火山岩为玄武岩、安山岩和凝灰岩。玄武岩中斑晶多为单斜辉石和角闪石,基性斜长石较少。安山岩根据结构可分为 3 类:基质为交织结构,斑晶为角闪石,杏仁状安

山岩,气孔内充填有石英和方解石,斜长石斑晶很发育,基质为玻基交织结构。凝灰岩中见石英斑晶和安山质角砾。

辉长岩结构为辉长结构,主要组成矿物为单斜辉石、长石,含少量的磷灰石(5%左右)和磁铁矿(5%左右)。单斜辉石具有复杂的环带特征,正环带、反环带和震荡环带均有发育。部分单斜辉石核部发育钠长石和次透辉石捕虏晶。长石现存为钾长石和钠长石,原生斜长石被钠长石和绢云母交代,残留假象,外围依次发育钠长石和钾长石环边。钾长石普遍为发育卡斯巴双晶的正长石,个别正长石粒径达 1 mm,包裹了单斜辉石和假象斜长石。闪长岩由于侵位深度的不同,导致结构略有差异。出露在地表的闪长岩为斑状结构(闪长玢岩),来自钻孔深部样品(>90 m)显示为半自形粒状结构。闪长岩的组成矿物有角闪石、斜长石($w(\text{An})$:45%,表 1),含少量的磷灰石(5%左右)和零星分布的磁铁矿。角闪石和斜长石均发育明显的环带特征。闪长岩蚀变程度不一,部分角闪石被绿泥石交代,斜长石普遍被绢云母和方解石所交代。花岗闪长斑岩为细粒斑状结构,显示出浅成相的特征。组成矿物为角闪石、斜长石、钾长石和石英(15%左右)。花岗闪长斑岩遭受了强烈的蚀变作用,并局部发生了糜棱岩化。角闪石被绿泥石和绢云母交代,斜长石被钠长石、绢云母和少量方解石所交代。石英显示明显的波状消光。

辉长岩和闪长岩均强烈富钾(辉长岩, $w(\text{K}_2\text{O})$:5.53%~7.48%;闪长岩, $w(\text{K}_2\text{O})$:2.37%~6.15%),高铝($w(\text{Al}_2\text{O}_3)$:>15%,表 2)。玄武岩富钾($w(\text{K}_2\text{O})$:3.94%~7.16%)且低钠($w(\text{Na}_2\text{O})$:0.96%~1.30%)。安山岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 较低(53.82%~54.81%)、富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 2.22~2.32)、高钛($w(\text{TiO}_2)$ 为 0.95%~1.32%)。样品的稀土元素和微量元素分析结果列于表 2,玄武岩的稀土元素总量较低($10.7 \times 10^{-6} \sim 32.1 \times 10^{-6}$),轻稀土元素略微富集,安山岩的稀土元素总量较高($77.4 \times 10^{-6} \sim 203.9 \times 10^{-6}$),轻稀土元素明显富集[(La/Yb)_N 为 3.15~16.45](图 2a)。在微量元素的原生地幔标准化图解(图 2b)中,所有样品均具亏损 Nb 和 Ta,富集 Rb、Ba、U 和 Sr。安山岩微量元素含量较高。辉长岩和闪长岩的稀土元素总量均较低(分别为 $26.1 \times 10^{-6} \sim 40.4 \times 10^{-6}$ 和 $20.7 \times 10^{-6} \sim 26.4 \times 10^{-6}$)。稀土元素球粒陨石标准化图解均为右倾型,轻稀土元素较富集,辉长岩和闪长岩的(La/Yb)_N 值分别为 5.92~7.95 和 3.08~4.95,辉长岩 Ce 呈负异常(δCe 为 0.87~0.91)。除一个样品(07TS193, $\delta\text{Eu}=0.94$)外,其余样品的 δEu 为 1.23~1.34,重稀土元素曲线较平坦(图 2c)。

早石炭世中期辉长岩、闪长岩和花岗闪长斑岩侵入到中泥盆统布尔津组火山-沉积岩中。辉长岩和闪长岩有着相近的稀土元素含量并具有相似的微量元素配分模式(图 2d),表明它们可能为同源的岩浆产物。安山岩表现为略微的轻稀土元素富集,玄武岩的轻重稀土元素有弱的分异(图 2a),均亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf(图 2b)。侵入岩表现为轻稀土元素明显富集的特征(图 2c)。在微量元素的原始地幔标准化图解中

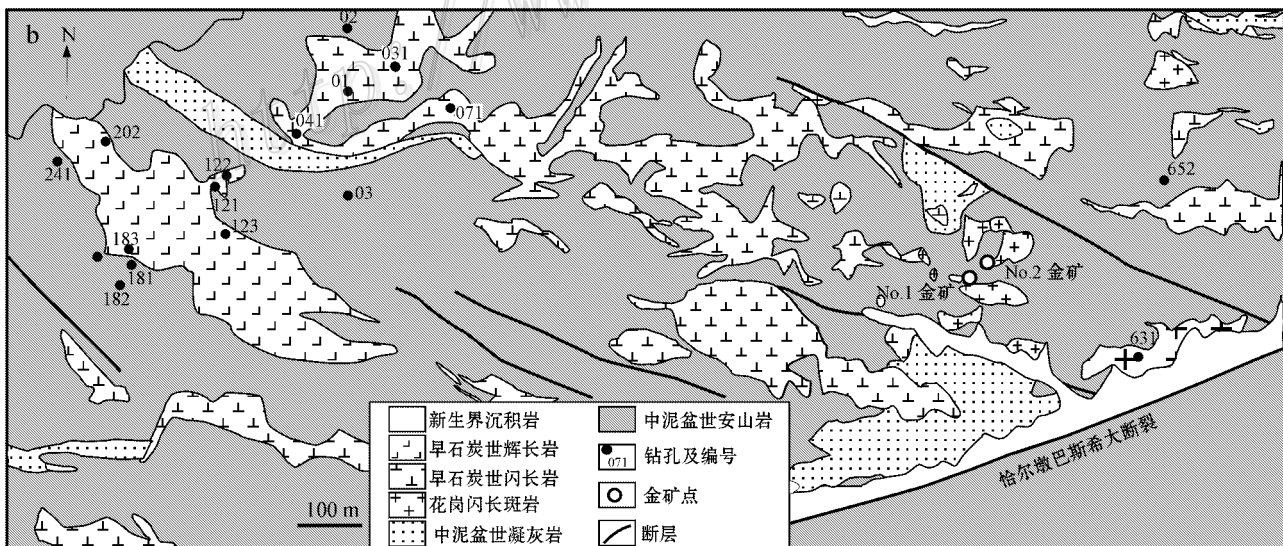
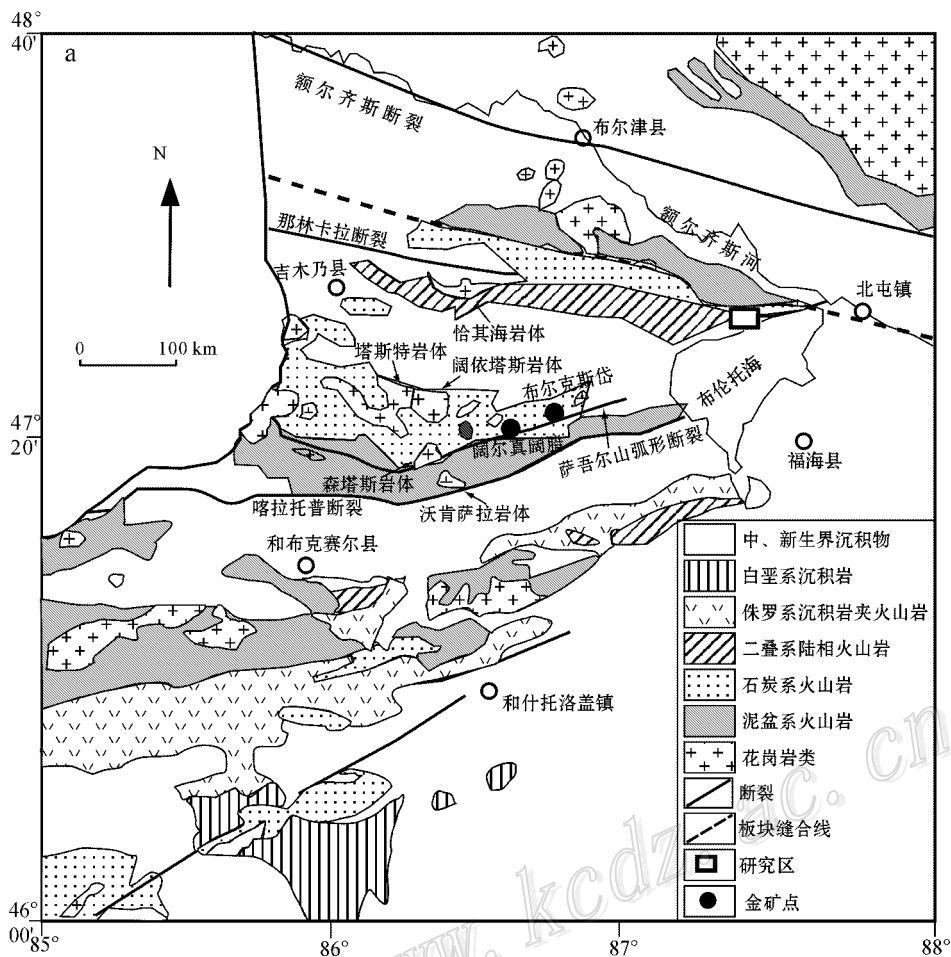


图 1 新疆北部萨吾尔及其周边地区地质图(a, 据何国琦等, 2005)和恰尔墩巴斯希矿区地质图(b)^①

Fig. 1 Regional geological map of Sawur and adjacent areas (a, modified after He et al., 2005) & Geological map of the Qia'erdunbasixi ore district (b)

① 新疆杰奥勘查技术责任有限公司. 2007. 新疆福海县恰尔墩巴斯希矿区地质图.

表 1 哈尔墩巴斯希矿床矿石中矿物的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of minerals in the Qia'erdunbasixi ore deposit

矿物类型	w _B /%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	总和
中长石	56.02	27.52	0.25	9.78	0.00	0.63	6.05	0.01	0.06	100.36
钠长石	68.58	19.63	0.15	0.29	0.04	0.35	11.14	0.02	0.00	100.23
钠长石	68.05	19.28	0.18	0.28	0.52	0.08	11.37	0.00	0.00	99.76
钾长石	65.01	18.7	0.49	0.00	0.00	16.97	0.24	0.03	0.00	101.46
钾长石	65.05	18.21	0.04	0.00	0.00	16.84	0.19	0.00	0.04	100.37
钙铁榴石	35.77	0.01	27.15	33.17	0.05	0.00	0.01	0.16	0.02	96.43
绿帘石	37.44	21.99	13.57	22.43	0.02	0.01	0.00	0.12	0.08	95.74
绿帘石	37.71	24.42	9.96	21.85	0.00	0.03	0.06	0.45	0.00	94.50
绿帘石	37.07	17.55	18.55	22.63	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	95.86
绿帘石	38.32	24.34	10.43	23.45	0.05	0.03	0.03	0.12	0.10	96.92
绿纤石	36.96	22.21	6.35	22.76	3.02	0.00	0.00	0.08	0.10	91.60
葡萄石	43.39	19.28	5.47	26.39	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	94.60
葡萄石	44.40	23.77	0.69	26.22	0.00	0.00	0.01	0.12	0.00	95.25
葡萄石	43.00	19.29	6.10	26.28	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	94.75
葡萄石	44.69	23.19	1.18	25.52	0.05	0.00	0.04	0.33	0.01	95.05

矿物类型	阳离子数												
	O	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Mn	Ca	K	Na	总和
中长石	8.00	2.52	0.48	0.98	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.47	0.04	0.53	5.03
钠长石	8.00	2.99	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.94	4.98
钠长石	8.00	2.98	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.97	5.00
钾长石	8.00	2.98	0.02	0.99	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.02	5.01
钾长石	8.00	3.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.02	5.00
钙铁榴石	12.00	3.03	0.00	0.00	0.00	1.93	0.00	0.01	0.01	3.02	0.00	0.00	8.00
绿帘石	12.50	3.02	0.00	2.09	0.00	0.91	0.00	0.00	0.01	1.94	0.00	0.00	7.98
绿帘石	12.50	3.04	0.00	2.32	0.00	0.67	0.00	0.00	0.02	1.89	0.00	0.01	7.97
绿帘石	12.50	3.03	0.00	1.69	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	1.98	0.00	0.00	7.99
绿帘石	12.50	3.03	0.00	2.27	0.01	0.69	0.00	0.01	0.01	1.98	0.00	0.00	7.99
绿纤石	24.50	6.13	4.00	0.35	0.01	0.65	0.23	0.75	0.01	4.05	0.00	0.00	16.18
葡萄石	11.00	3.06	0.00	1.6	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	6.98
葡萄石	11.00	3.05	0.00	1.93	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	1.93	0.00	0.00	6.96
葡萄石	11.00	3.03	0.00	1.61	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	6.99
葡萄石	11.00	3.08	0.00	1.89	0.00	0.07	0.00	0.01	0.02	1.88	0.00	0.01	6.95

(图 2d), 闪长岩和辉长岩均亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf, 富集 Rb、Ba、U 和 Sr。所有这些岩浆岩均具有岛弧岩浆的地球化学特征, 岛弧环境流体的复杂性可能是导致该矿区矿化类型多样的原因。

3 矿化特征

3.1 磁铁矿矿化

磁铁矿矿化发育在辉长岩与火山岩(以安山岩为主的中基性火山岩)的接触带中。矿石类型分为块状磁铁矿矿石和浸染状磁铁矿矿石。矿石中主要金属矿物为磁铁矿, 其次是黄铜矿和黄铁矿。脉石矿物包括石英、透辉石、方解石、绢云母和钙铁榴石。围岩蚀变主要为矽卡岩化、硅化、绿泥石化、碳

酸盐化和绢云母化。矿化蚀变分带明显, 由内带的磁铁矿 + 透辉石组合到外带的磁铁矿 + 石英 + 钙铁榴石 + 方解石组合, 矿石具脉状和浸染状构造。

在辉长岩与安山岩的内外接触带, 磁铁矿具有不同的产出形式。在内接触带, 大量细粒透辉石呈密集浸染状或细脉(图 3a, b), 磁铁矿呈稀疏浸染或是呈细脉(图 3b, c)。辉长岩中原生斜长石发育钠黝帘石化, 次透辉石被绿帘石和绿泥石所交代, 析出的磁铁矿呈稀疏浸染状(图 3d)。在外接触带, 宽约 2~10 cm 的磁铁矿-石英脉广泛分布, 脉体中存在的少量钙铁榴石与方解石共生(图 3e)。磁铁矿-石英脉中的磁铁矿较自形(图 3f), 石英和磁铁矿共生(图 3g), 磁铁矿在石英脉内约占 50%。脉内还见少量稀疏浸染状黄铜矿(图 3h)。矽卡岩化后期发生了钾长石化、硅化和方解石化等蚀变作用。钾长石粒径粗大, 包裹了早期形成的透辉石(图 3i), 晚期的方

表 2 哈尔墩巴斯希矿区岩浆岩样品的化学分析结果

Table 2 Representative compositions for the magmatic rocks in the Qia'ertunbasixi deposit

分析项目	辉长岩				闪长岩				安山岩				玄武岩	
	07TS187	07TS190	07TS193	FH14	07TS199	FH21	FH19	ZK07-33	ZK03-7	ZK07-4	FH01	07TS189	ZK03-12	
						$w_B/\%$								
SiO ₂	53.61	54.35	53.33	52.95	56.08	58.67	59.58	57.82	51.56	49.16	51.27	52.4		
Al ₂ O ₃	15.74	18.48	16.7	18.15	16.65	15.67	15.45	16.04	17.22	16.42	15.09	15.67		
Fe ₂ O ₃	6.98	5.07	5.97	5.71	6.60	5.53	5.10	6.45	7.17	10.32	8.25	6.88		
CaO	6.28	6.05	6.54	5.71	6.58	4.40	4.46	4.21	6.23	5.45	7.49	7.68		
MgO	4.77	2.95	4.37	3.35	4.67	3.96	4.04	3.48	5.17	7.07	7.03	5.19		
K ₂ O	5.53	7.48	7.41	6.30	2.37	4.65	6.15	3.39	1.60	1.53	3.94	7.16		
Na ₂ O	2.29	2.54	1.64	2.51	2.46	2.54	1.94	2.50	3.71	3.41	0.96	1.30		
MnO ₂	0.13	0.10	0.11	0.12	0.12	0.10	0.09	0.13	0.12	0.14	0.17	0.12		
TiO ₂	0.48	0.39	0.46	0.42	0.41	0.35	0.34	0.35	0.95	1.32	0.58	0.48		
P ₂ O ₅	0.33	0.33	0.49	0.42	0.22	0.22	0.21	0.28	0.35	0.19	0.23	0.49		
烧失量	3.69	2.17	2.89	4.17	3.64	3.83	2.39	5.13	5.83	4.71	4.74	2.56		
总量	99.83	99.92	99.93	99.83	99.79	99.93	99.75	99.78	99.90	99.73	99.75	99.91		
					$w_B/10^{-6}$									
Li	10.09	11.48	15.87	16.57	8.06	5.84	5.82	6.93	9.03	10.55	11.47	17.85		11.90
Be	0.60	1.15	0.88	1.11	0.82	0.42	0.36	0.36	0.95	0.43	0.32	0.82		0.34
Sc	23.35	10.83	16.55	15.00	32.42	30.34	28.18	29.96	18.23	32.72	45.11	25.38		38.74
V	190.0	160.1	190.3	200.9	218.9	192.5	174.0	188.3	175.7	295.9	265.6	182.5		221.3
Cr	197.0	168.0	168.2	202.1	313.6	352.5	268.8	145.8	69.00	146.9	340.5	265.7		673.1
Co	22.66	13.14	18.82	17.80	16.62	15.90	15.21	14.49	20.44	45.07	30.78	22.56		35.39
Ni	43.76	30.90	41.32	31.30	29.25	27.75	31.61	18.50	21.27	66.12	65.19	53.97		186.7
Cu	160.6	117.3	103.1	148.5	256.5	9.14	9.18	27.57	68.20	902.6	72.59	123.6		44.07
Ga	11.92	13.46	13.11	17.24	15.52	11.31	10.15	9.96	15.26	16.87	12.16	11.77		8.28
Rb	85.48	65.86	89.97	74.68	21.95	57.10	77.59	48.13	18.53	27.21	49.39	101.7		21.18
Sr	565.0	1171	1470	1488	260.9	570.8	417.6	399.1	1153	403.5	487.6	1238		233.0
Y	8.36	8.14	8.33	9.19	9.91	8.78	8.84	8.68	19.08	23.89	12.32	8.92		8.93
Zr	21.64	32.50	22.88	32.69	23.37	19.29	20.71	13.55	119.3	104.6	14.85	22.84		8.32
Nb	2.65	4.13	3.12	4.06	4.16	3.62	3.93	3.02	5.77	3.27	2.34	3.21		1.67

续表 2
Cont. Table 2

分析项目	辉长岩				闪长岩				安山岩				玄武岩	
	07TS187	07TS190	07TS193	FH14	07TS199	FH21	FH19	ZK07-33	ZK03-7	ZK07-4	FH01	07TS189	ZK03-12	
	wB/%													
Cs	2.25	0.89	0.84	0.74	0.52	1.28	1.12	0.92	0.26	1.05	0.94	2.66	0.49	
Ba	768.5	996.9	1095	922.2	520.1	1190	1051	770.4	362.9	140.1	987.3	1179	424.7	
La	5.01	7.05	6.94	8.39	4.97	5.93	4.18	4.55	40.87	9.83	3.16	6.29	1.48	
Ce	9.29	12.46	12.93	15.67	8.96	9.62	7.04	6.76	86.52	24.48	5.55	11.65	2.12	
Pr	1.27	1.60	1.73	1.97	1.20	1.16	0.95	0.86	10.65	3.71	0.88	1.58	0.38	
Eu	0.46	0.48	0.39	0.56	0.38	0.23	0.23	0.30	1.83	1.48	0.49	0.36	0.23	
Nd	5.11	6.07	6.90	7.65	4.81	4.37	3.84	3.15	42.06	17.12	4.01	6.22	1.87	
Sm	1.12	1.22	1.40	1.45	1.02	0.86	0.84	0.72	7.50	4.87	1.13	1.38	0.60	
Gd	0.94	0.90	1.06	1.30	0.93	0.81	0.80	0.72	5.25	4.43	1.37	1.09	0.70	
Tb	0.16	0.15	0.17	0.20	0.17	0.14	0.15	0.14	0.70	0.74	0.24	0.18	0.15	
Dy	1.06	1.01	1.08	1.17	1.23	0.99	1.01	1.06	3.60	4.50	1.65	1.17	1.11	
Ho	0.23	0.23	0.23	0.25	0.29	0.23	0.23	0.25	0.68	0.91	0.37	0.26	0.26	
Er	0.65	0.67	0.63	0.75	0.92	0.72	0.71	0.81	1.93	2.44	1.10	0.76	0.77	
Tm	0.10	0.12	0.10	0.12	0.16	0.12	0.12	0.14	0.28	0.35	0.17	0.13	0.12	
Yb	0.61	0.79	0.63	0.77	1.16	0.86	0.82	1.02	1.78	2.23	1.12	0.88	0.78	
Lu	0.09	0.13	0.09	0.12	0.19	0.14	0.14	0.16	0.27	0.33	0.17	0.14	0.12	
Hf	0.75	1.06	0.82	1.14	0.80	0.66	0.69	0.51	3.55	3.20	0.58	0.82	0.29	
Ta	0.16	0.23	0.17	0.23	0.29	0.23	0.43	0.19	0.33	0.21	0.14	0.17	0.10	
Th	0.53	1.00	0.63	0.87	0.69	0.56	0.56	0.59	8.00	1.17	0.29	0.63	0.18	
U	0.20	0.57	0.37	0.68	0.37	0.35	0.36	0.28	2.01	0.44	0.22	0.40	0.10	
(La/Sm) _N *	2.90	3.73	3.20	3.74	3.15	4.45	3.20	4.09	3.52	1.30	1.80	2.95	1.59	
(La/Yb) _N *	5.92	6.40	7.95	7.81	3.08	4.95	3.64	3.19	16.45	3.15	2.02	5.14	1.37	
Eu*	1.33	1.34	0.94	1.23	1.17	0.84	0.84	1.27	0.84	0.96	1.21	0.88	1.07	
Ce*	0.88	0.87	0.89	0.91	0.87	0.84	0.83	0.78	0.99	0.99	0.80	0.88	0.67	

主量元素采用 XRF(Rigaku RIX2100)玻璃熔烘法分析;微量元素用 Finnigen Mat ICP-MS 分析;测试方法见 Zhu 等,2006。* 单位为 1。

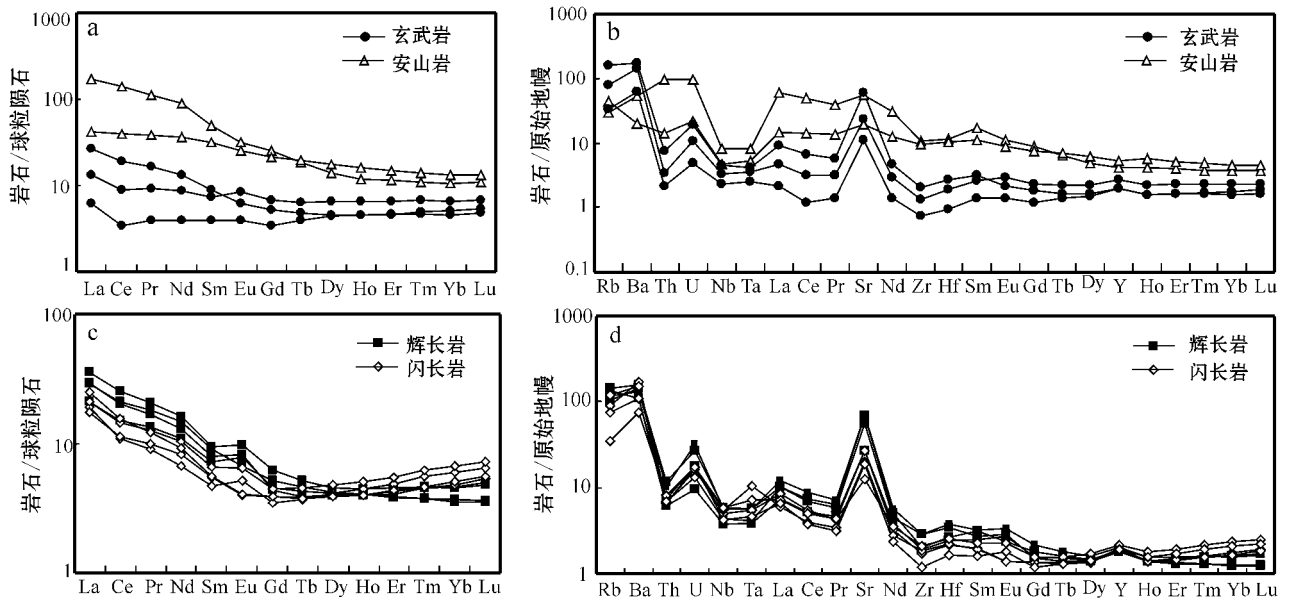


图2 恰尔噶斯希矿区内火山岩和辉长岩、闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化图解(a, c)和微量元素原始地幔标准化图解(b, d),标准值据 Sun 等(1989)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive mantle normalized multi-element plots (b, d) for volcanic rocks, gabbro and diorite in the Qiaer'dunbasixi ore deposit (normalized values after Sun et al., 1989)

解石脉切穿早期形成的磁铁矿(图3j)。在磁铁矿-石英脉还有孔雀石发育(图3k),显示了后期较高的氧逸度。

3.2 铜矿化

铜矿化发育在闪长岩与中酸性火山岩(安山岩和凝灰岩为主)的接触带中(如071钻孔见图4a)。矿石矿物主要包括黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿。脉石矿物主要有石英、方解石、绿帘石、绢云母、葡萄石、绿泥石、钾长石、钠长石和绿纤石。矿石构造主要为细脉浸染状和角砾状构造。闪长岩矿石具细脉浸染状构造(图4b, c),安山岩和凝灰岩矿石则以黄铜矿细脉和气孔充填为主。主要围岩蚀变类型包括绢云母化、绿帘石化、钾长石化、绿泥石化、硅化和碳酸盐化。绿帘石化和绢英岩化与黄铜矿化关系密切。凝灰岩和安山岩广泛遭受绿帘石化和黄铁矿化,晚期的硅化与方铅矿和闪锌矿密切相关(图4d)。

在闪长岩和安山岩的接触带发育角砾(如071钻孔在~40 m深度见安山岩和闪长岩的接触带,图4a),有闪长岩角砾和安山岩角砾。角砾的粒径为0.5~5 cm,呈棱角状,具可拼合特征。角砾边缘有蚀变边,部分已经完全被绿帘石或绿泥石所交代。角砾被热液蚀变矿物所胶结,为热液角砾。铜矿化和黄铁矿化主要发育在热液角砾的胶结物中。图4e-f为闪长岩内接触带的热液角砾(均为闪长岩角砾),角砾被方解石-石英-绿泥石-绿帘石胶结,胶结物内见少量褐铁矿。图4g为闪长岩外接触带的热液角砾,见安山岩角砾(图4h)和闪长岩角砾,胶结物为黄铜矿-黄铁矿-绢云母-绿泥石-绿帘石。

根据岩石学观察,将铜矿化过程分为热液期和表生期(图

5)。热液期可以划分为4个阶段:阶段Ⅰ主要由石英、钠长石、黄铜矿、黄铁矿组成,黄铁矿和黄铜矿呈浸染状分布。安山岩中广泛发育钠长石+石英+绿泥石蚀变,石英为细粒状,黄铜矿呈浸染状(图4i),在安山岩的气孔中充填有钠长石,且内部发育浸染状黄铜矿(图6a)。阶段Ⅱ由绢云母、黄铜矿、黄铁矿、钾长石、方解石、绿帘石、绿泥石、钠长石、石英和自然金组成,是铜矿化的主要阶段,呈网脉状分布在闪长岩和火山岩的接触带,或呈胶结物充填在热液角砾岩中。该阶段绢云母脉穿切早期蚀变矿物(图4j)。图4k显示了该阶段在闪长岩和安山岩接触带的发育,黄铁矿-黄铜矿-方解石-绢云母脉在接触带附近广泛发育。自然金($w(\text{Au})$ 94.43%, $w(\text{Ag})$ 4.23%,表3)呈浑圆状,被黄铁矿包裹(图6b, c)。黄铜矿在脉内呈浸染状(图6d, e)。阶段Ⅱ的黄铁矿除含Au外还含As, As含量最高可达1.22%,此外还含有0.16%~0.30%的Cu(表3)。阶段Ⅲ主要由绿帘石、黄铁矿、黄铜矿、葡萄石、绿泥石、绿纤石、方解石、绢云母和石英组成。黄铜矿主要在闪长岩的外接触带中呈细脉状或浸染状分布(图6h),并明显交代早期的黄铁矿(图6i),或呈胶结物充填在热液角砾岩中,该阶段的黄铜矿普遍和绿帘石共生(图6f~h)。阶段Ⅲ的黄铁矿主要以脉体形式存在,在凝灰岩和安山岩中均常见黄铁矿-绿帘石脉体(0.1~0.5 cm),安山岩中还普遍发育绿帘石杏仁体,杏仁内部见黄铜矿或黄铁矿,部分绿帘石杏仁体外围生长着钠长石(图6f, g)。葡萄石交代部分角闪石或斜长石(局部保留角闪石和斜长石假相),也见葡萄石脉。由外到内,从绿帘石到绿纤石、绿泥石、自形葡萄石,再到方解石的变化过

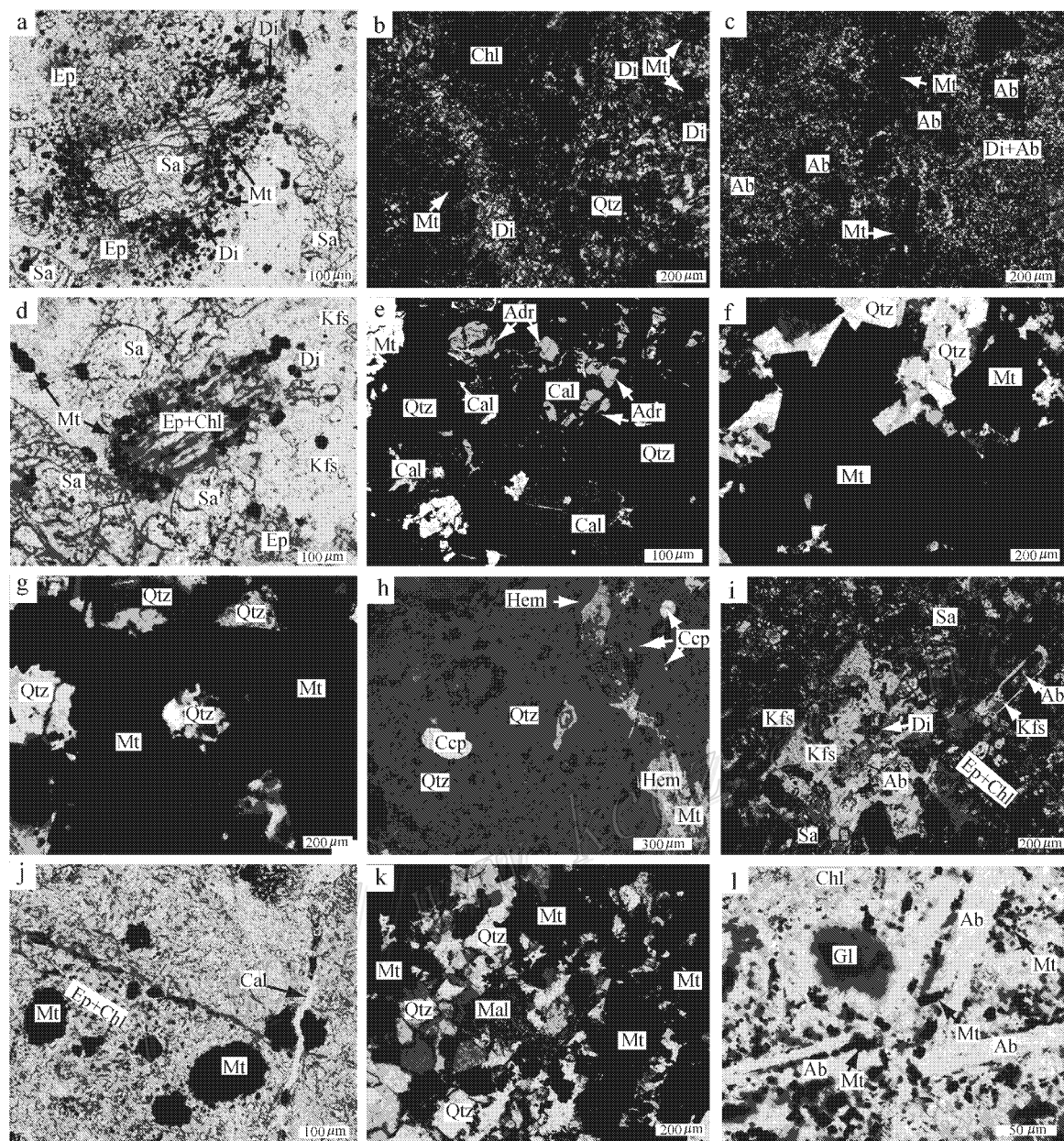


图 3 磁铁矿矿化蚀变特征

a. 辉长岩中的次透辉石蚀变为透辉石和磁铁矿, 单偏光; b. 辉长岩与安山岩内接触带内的透辉石细脉, 正交偏光; c. 内接触带内的磁铁矿细脉, 正交偏光; d. 次透辉石被绿帘石和绿泥石交代, 磁铁矿呈稀疏浸染, 单偏光; e. 钙铁榴石和方解石、磁铁矿共生, 背散射图像 (BSE); f. 磁铁矿-石英脉, 磁铁矿自形, 正交偏光; g. 磁铁矿-石英脉, 正交偏光; h. 黄铜矿呈浸染状, 磁铁矿被赤铁矿交代, 反射光; i. 钾长石交代早期的透辉石和蚀变斜长石, 正交偏光; j. 方解石脉穿切磁铁矿, 单偏光; k. 磁铁矿-石英脉中的孔雀石, 正交偏光; l. 安山岩基质中磁铁矿细粒密集浸染, 单偏光。Ab—钠长石; Adr—钙铁榴石; Cal—方解石; Ccp—黄铜矿; Chl—绿泥石; Di—透辉石; Ep—绿帘石; Gl—玻璃; Hem—赤铁矿; Mal—孔雀石; Mt—磁铁矿; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Sa—次透辉石

Fig. 3 Characteristics of magnetite alterations

a. Salite replaced by diopside and magnetite in gabbro, plainlight; b. Diopside veins in the inner contact zone between gabbro and andesite, crossed nicols; c. Magnetite veins in the inner contact zone, crossed nicols; d. Salite replaced by epidote, chlorites and magnetites, with magnetites disseminated in epidote, plainlight; e. Mt + Adr + Cal disseminated in quartz vein, BSE; f. Euhedral magnetite in quartz vein, crossed nicols; g. Quartz and magnetite, crossed nicols; h. Chalcopyrite disseminated in Qtz-Mt vein, magnetite replaced by hematite, reflected light; i. Diopside and plagioclase replaced by K-feldspar, crossed nicols; j. Calcite vein penetrating magnetite, plainlight; k. Malachite developed in Mt-Qtz vein, crossed nicols; l. Magnetite intensively disseminated in the background of andesite, plainlight. Ab—Albite; Adr—Andradite; Cal—Calcite; Ccp—Chalcopyrite; Chl—Chlorite; Di—Diopside; Ep—Epidote; Gl—Glass; Hem—Hematite; Mal—Malachite; Mt—Magnetite; Kfs—K-feldspar; Qtz—Quartz; Sa—Salite

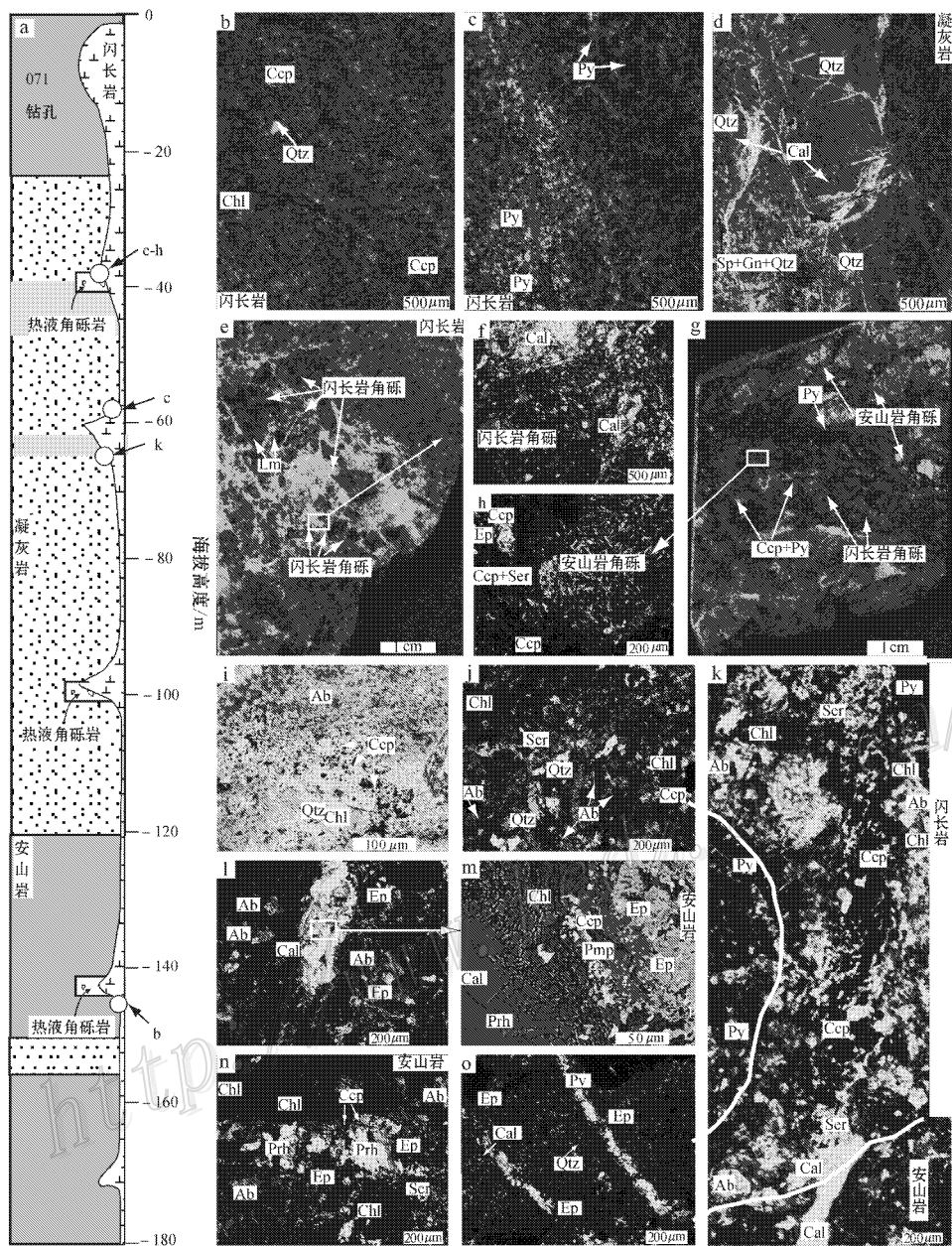


图 4 恰尔墩巴斯希矿床的铜矿化特征

a. 071 钻孔柱状图；b. 闪长岩矿石中黄铜矿呈不规则细脉，采样位置见 a；c. 黄铁矿在闪长岩中呈细脉浸染状，采样位置见 a；d. 凝灰岩中的石英脉中的闪锌矿和方铅矿；e. 发育在闪长岩内接触带的热液角砾，采样位置见 a；f. e. 的局部放大，正交偏光；g. 发育在闪长岩外接触带的热液角砾，采样位置见 a；h. g. 的局部放大，正交偏光；i. 黄铜矿在石英-钠长石中呈浸染状，单偏光；j. 绢云母脉穿切早期石英-钠长石蚀变，正交偏光；k. 闪长岩和安山岩接触带的黄铜矿-方解石-绢云母脉，采样位置见 a，正交偏光；l. 黄铜矿-绿帘石-方解石脉，正交偏光；m. l. 的局部放大，脉由外到内：绿帘石、绿帘石、绿泥石、葡萄石和方解石，背散射图像(BSE)；n. 黄铜矿-葡萄石-绿帘石脉，正交偏光；o. 石英-方解石脉穿切绿帘石蚀变，正交偏光。Ab—钠长石；Cal—方解石；Ccp—黄铜矿；Chl—绿帘石；Ep—绿帘石；Gn—方铅矿；Lm—褐铁矿；Pmp—绿帘石；Prh—葡萄石；Py—黄铁矿；Qtz—石英；Ser—绢云母；Sp—闪锌矿

Fig. 4 Copper mineralization and alteration in the Qiaer 'dunbasixi ore deposit
a. Column of Drill zk071；b. Chalcopyrite assuming irregular veins in diorite ores (sampling position see a)；c. Pyrite disseminated in diorite (sampling position see a)；d. Sphalerite and galena developed in quartz veins within tuff；e. Hydrothermal breccia of the inner contact zone of diorite (sampling position see a)；f. Enlarged diorite-breccia of e, crossed nicols；g. Hydrothermal breccia of the outer contact zone of diorite (sampling position see a)；h. Enlarged andesite-breccia of g, crossed nicols；i. Chalcopyrite disseminated in altered quartz-albite, plainlight；j. Sericite veins cutting early altered quartz-albite, crossed nicols；k. Chalcopyrite-calcite-sericite veins developed along the contact zone of diorite and andesite (sampling location see a), crossed nicols；l. Chalcopyrite-epidote-calcite vein, crossed nicols；m. Enlarged vein of i, from the outer part to the inner part of the vein, there are epidote, pumpellyite, chlorite, prehnite and calcite in succession, BSE；n. Chalcopyrite-prehnite-epidote, crossed nicols；o. Quartz-calcite veins cutting altered epidote, crossed nicols. Ab—Albite；Cal—Calcite；Ccp—Chalcopyrite；Chl—Chlorite；Ep—Epidote；Lm—Limonite；Pmp—Pumpellyite；Prh—Prehnite；Py—Pyrite；Qtz—Quartz；Ser—Sericite；Sp—Sphalerite

矿物名称	阶段I	阶段II	阶段III	阶段IV	表生期
钠长石					
石英					
方解石					
钾长石					
绢云母					
绿帘石					
绿泥石					
绿纤石					
葡萄石					
黄铁矿					
黄铜矿					
自然金					
方铅矿					
闪锌矿					
硫镉矿					
辉铜矿					
赤铁矿					
铜蓝					
孔雀石					

图 5 恰尔噶巴斯希矿床的矿物共生组合

Fig. 5 Paragenetic associations of four stages of mineralization related to copper mineralization and exogenic mineralization stage in the Qiaer'dunbasixi ore deposit

程(图 4 m),绿帘石 TFeO 含量为 9.96%~18.55%,绿纤石为 6.34%,葡萄石为 0.69%~5.47%,而方解石几乎不含铁,脉体由外到内的矿物产出显示了热液演化中铁含量逐渐降低的过程,也预示了成矿作用的结束。黄铜矿呈浸染状分布在绿帘石和绿纤石中(图 4l~n,图 6g、h),在流体演化晚期形成葡萄石-石英-方解石脉,无黄铜矿生成。阶段 IV 主要由方解石、石英、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、葡萄石、绿帘石和绿泥石组成,呈脉状(宽 0.01~10 cm)穿切早期的蚀变矿物集合体。黄铁矿较自形,花环状黄铁矿内部发育方解石(图 6j),该阶段的黄铁矿含 0.05%~1.09% 的 Co(见表 3)。阶段 IV 的方解石主要和石英以粗细不等的脉体形式存在,遍及整个矿区。石英-方解石脉明显穿切早期的绿帘石(图 4o)。闪锌矿(含 Cd 约 4%,表 3)与方铅矿共生,交代早期的黄铜矿,并包裹黄铁矿(图 6k、l)。

铜矿化的近地表部分,发生了次生富集。原生硫化物带内有黄铜矿、黄铁矿、硫镉矿、闪锌矿和方铅矿。次生硫化物富集带中常见辉铜矿和铜蓝。辉铜矿交代黄铜矿,形成环边。氧化带中形成的矿物为赤铁矿和孔雀石,是重要的找矿标志。

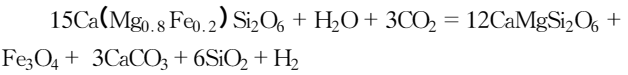
3.3 金矿化

金矿化在空间上与花岗闪长岩密切相关,这些花岗闪长岩遭受了强烈蚀变,并在局部糜棱岩化。常见石英的波状消光、核幔构造、动态重结晶及条带构造。重结晶的细小石英颗粒环绕在残留母晶体的周围(图 7a)。残斑石英表现为石英

鱼形态(图 7b),具有显著波状消光。黄铁矿碎裂(图 7c),黄铜矿充填在裂隙中(图 7d)。矿化蚀变普遍发育在糜棱岩化作用后。自然金主要出现在黄铁矿-石英脉中,其中的石英具明显的生长韵律(图 7e~g),石英中的自然金呈不规则状(图 7h~j)。自然金在赤铁矿化的黄铁矿中呈浑圆状(图 7k),其中含 Au 88.35%~89.82%,含 Bi 0.35%~0.67%(表 1)。晚期的黄铁矿-石英-绢云母脉穿切含金黄铁矿-石英脉(图 7l),或者填隙在自形石英晶体边界(图 7g)。

4 讨论与结论

恰尔噶巴斯希的磁铁矿矿化具有特征的矽卡岩型蚀变矿物组合及分带特征。在早期矽卡岩阶段,辉长岩内次透辉石被蚀变成透辉石和磁铁矿(图 3a),其交代反应如下:



晚期矽卡岩阶段,辉长岩中的斜长石普遍拗帘石化或形成钠长石亮边,次透辉石被绿帘石和绿泥石交代,并析出磁铁矿,为细粒状(图 3d)。在辉长岩体的外接触带,钙铁榴石与方解石、磁铁矿和石英共生。这个阶段由于温度逐渐降低,溶液中的铁除部分参与形成硅酸盐矿物以外,大量以磁铁矿形式出现(故又称为磁铁矿阶段),表现为磁铁矿-石英脉,该阶段的磁铁矿为自形,呈板条状,含量约占脉体的50%。钾长

表 3 恰尔噶巴斯希矿床部分矿石矿物电子探针分析结果
Table 3 Electron microprobe analyses of ore minerals in the Qia'erdunbasixi ore deposit

成矿阶段 与矿物名称	w _B /%										总量
	S	As	Fe	Pb	Co	Bi	Cu	Zn	Ag	Au	
第Ⅱ阶段											
黄铁矿	53.00	0.83	46.06	0.00	0.12	N.A	0.30	0.00	0.02	—	100.33
黄铁矿	53.92	0.00	45.88	0.03	0.13	N.A	0.16	0.00	0.00	—	100.12
黄铁矿	50.61	1.22	46.68	0.00	0.10	0.00	0.18	0.00	0.00	—	98.79
黄铜矿	34.11	0.04	30.18	0.00	0.00	0.00	34.52	0.00	0.02	—	98.87
黄铜矿	33.19	0.03	31.56	0.00	0.04	0.00	34.07	0.00	0.02	—	98.91
黄铜矿	33.71	0.01	31.09	0.00	0.04	0.00	34.33	0.00	0.00	—	99.18
黄铜矿	34.06	0.00	31.33	0.00	0.07	0.03	33.94	0.00	0.00	—	99.43
黄铜矿	33.70	0.00	30.99	0.04	0.06	0.00	33.78	0.02	0.04	—	98.63
自然金	0.13	0.00	0.16	0.00	0.00	0.81	0.08	0.00	4.23	94.43	99.84
第Ⅲ阶段											
黄铁矿	54.17	0.00	46.40	0.00	0.08	N.A.	0.17	0.01	0.00	—	100.83
黄铁矿	52.75	0.02	47.34	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	—	100.18
黄铁矿	52.18	0.01	47.34	0.00	0.08	0.01	0.04	0.00	0.02	—	99.68
黄铁矿	52.02	0.01	46.63	0.00	0.13	0.00	0.03	0.01	0.00	—	98.83
黄铜矿	34.12	0.03	24.06	0.09	0.07	0.00	39.69	0.01	0.01	—	98.08
黄铜矿	33.51	0.00	30.15	0.03	0.01	0.06	34.25	0.00	0.08	—	98.09
黄铜矿	33.97	0.00	30.43	0.06	0.01	0.02	34.29	0.00	0.00	—	98.78
黄铜矿	33.71	0.01	30.64	0.07	0.06	0.00	34.84	0.02	0.05	—	99.40
黄铜矿	34.50	0.00	30.20	0.00	0.04	0.00	34.18	0.00	0.01	—	98.93
黄铜矿	34.72	0.01	30.09	0.00	0.07	0.00	34.09	0.00	0.00	—	98.98
第Ⅳ阶段											
黄铁矿	53.48	0.00	46.39	0.10	0.05	N.A	0.00	0.00	0.00	—	100.02
黄铁矿	53.74	0.00	45.37	0.00	1.09	N.A	0.00	0.06	0.00	—	100.26
黄铁矿	53.91	0.00	45.55	0.00	1.04	N.A	0.02	0.00	0.00	—	100.52
方铅矿	13.61	0.00	0.03	85.76	0.01	N.A	0.05	0.02	0.01	—	99.49
方铅矿	13.69	0.00	0.12	86.07	0.00	N.A	0.14	0.00	0.00	—	100.02
闪锌矿	33.57	0.00	0.41	0.00	0.02	N.A	0.32	61.52	0.01	—	95.85
闪锌矿	32.95	0.09	0.36	0.00	0.00	N.A	0.18	62.23	0.00	—	95.81
表生期											
辉铜矿	22.92	0.01	0.10	0.29	0.01	N.A	77.46	0.00	0.09	—	100.88
辉铜矿	22.95	0.00	0.07	0.11	0.01	N.A	77.04	0.00	0.07	—	100.25
辉铜矿	23.39	0.00	0.67	0.08	0.00	N.A	75.34	0.00	0.07	—	99.55
金矿化阶段											
自然金	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.56	0.01	0.00	10.96	89.06	100.64
自然金	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.49	0.02	0.03	10.03	87.62	98.79
自然金	0.04	0.00	0.23	0.00	0.01	0.65	0.00	0.07	10.66	88.92	100.58
自然金	0.07	0.01	0.82	0.00	0.02	0.57	0.03	0.07	10.04	87.89	99.52

“—”为未测试

石化在辉长岩中广泛发育,充填在透辉石的间隙,或是交代早期的透辉石和钠长石(图 3i)。蚀变辉长岩的 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 变化不大,印证了早期岩浆钠长石化为流体自交代的特点。 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化与碳酸盐化、钾长石化和绢云母化相关,大量的 K 和 Ca 进入流体,导致热液晚期的钾长石交代和网脉状碳酸盐脉。在安山岩基质中,磁铁矿呈密集浸染状(图 3l),暗示火山岩岩浆晚期强烈富铁。安山岩的 $w(\text{TFeO})$ (7.62%~10.86%,表 2)明显高于辉长岩(5.07%~6.98%,表 2)。安山岩可能为磁铁矿成矿的主要来源。

铜矿化主要发育在闪长岩体的内外接触带,尤其是外接触带。矿体周边围岩蚀变强烈,以绿帘石化、绢云母化、绿泥

石化、方解石化和硅化等中低温热液蚀变为主。矿石具细脉状、网脉状、浸染状和角砾状构造,这些为典型的热液充填交代特征。接触带的热液角砾岩为主要的成矿场所,闪长岩侵入到火山岩地层中,热液流体的聚集导致围岩爆破,成矿物质以胶结物的形式存在。新鲜闪长岩的 $w(\text{Cu})$ 较低,仅为 $9.14 \times 10^{-6} \sim 27.58 \times 10^{-6}$, 强蚀变样品含 $w(\text{Cu})$ 为 256.5×10^{-6} 。辉长岩均具有较高的 $w(\text{Cu})$, 为 $103.1 \times 10^{-6} \sim 160.6 \times 10^{-6}$ (表 2)。金和铜在岩浆结晶分异过程中为相容元素,要使其在残余岩浆中富集,要求岩浆体系中硫不饱和(Bornhorst,1986)。钾质岩浆熔体的高碱含量使 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值增大,形成高氧逸度(Wybon,1994),而高氧逸度可抑制体系

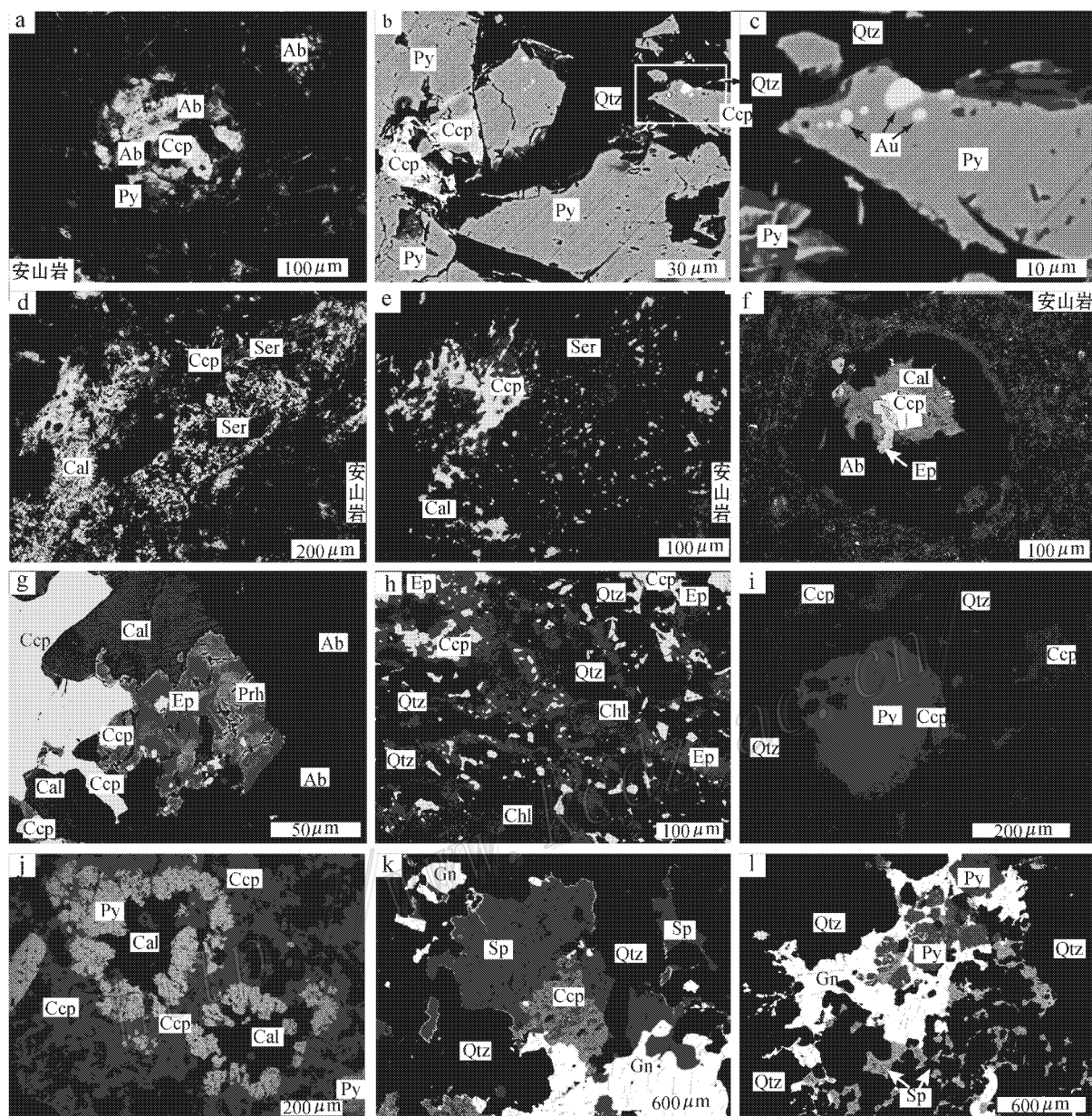


图 6 铜矿化中部分金属硫化物的产出形式

a. 钠长石杏仁体中的黄铜矿,正交偏光;b. 黄铁矿包裹自然金,背散射图像(BSE);c. b的局部放大,BSE;d. 黄铜矿在方解石-绢云母脉中呈密集浸染,正交偏光;e. 同d,反射光;f. 杏仁体中黄铜矿和绿帘石共生,BSE;g. 杏仁体中的绿帘石内有黄铜矿浸染,BSE;h. 黄铜矿被绿帘石包裹,呈浸染状,BSE;i. 黄铜矿交代黄铁矿,反射光;j. 黄铜矿、黄铁矿和方解石,反射光;k. 闪锌矿交代黄铜矿,BSE;l. 方铅矿中有黄铁矿的包裹体,BSE。Ab—钠长石;Au—自然金;Cal—方解石;Ccp—黄铜矿;Ep—绿帘石;Gn—方铅矿;Prh—葡萄石;Py—黄铁矿;Qtz—石英;Ser—绢云母;Sp—闪锌矿

Fig. 6 Modes of occurrence of sulfides related to copper mineralization

a. Chalcopyrite in albite inclusion, crossed nicols; b. Native gold in pyrite, BSE; c. Enlarged b, BSE; d. Chalcopyrite disseminated intensely in calcite-sericite vein, crossed nicols; e. The same as d, reflected light; f. Chalcopyrite intergrown with epidote in albite inclusion, BSE; g. Chalcopyrite disseminated in epidote of albite inclusion, BSE; h. Chalcopyrite wrapped by epidote in the form of disseminates in quartz vein, BSE; i. Chalcopyrite replacing pyrite, reflected light; j. Chalcopyrite, pyrite and calcite, reflected light; k. Sphalerite replacing chalcopyrite, BSE; l. Galena embracing pyrite, BSE. Ab—Albite; Au—Native gold; Cal—Calcite; Ccp—Chalcopyrite; Ep—Epidote; Gn—Galena; Prh—Prehnite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Sp—Sphalerite

的硫达到饱和。辉长岩接触带中磁铁矿很发育,显示其较高的氧逸度。辉长岩相对闪长岩明显富钾(辉长岩中 $w(K_2O)$ 为5.53%~7.48%,闪长岩中 $w(K_2O)$ 为2.37%~6.15%,

表2),高钾辉长岩抑制了硫的饱和,有利于富集铜、金等成矿元素在残余岩浆中富集。闪长岩的形成过程中,由于钾含量较低,体系中硫对铜、金的承载量降低,导致铜金矿化。

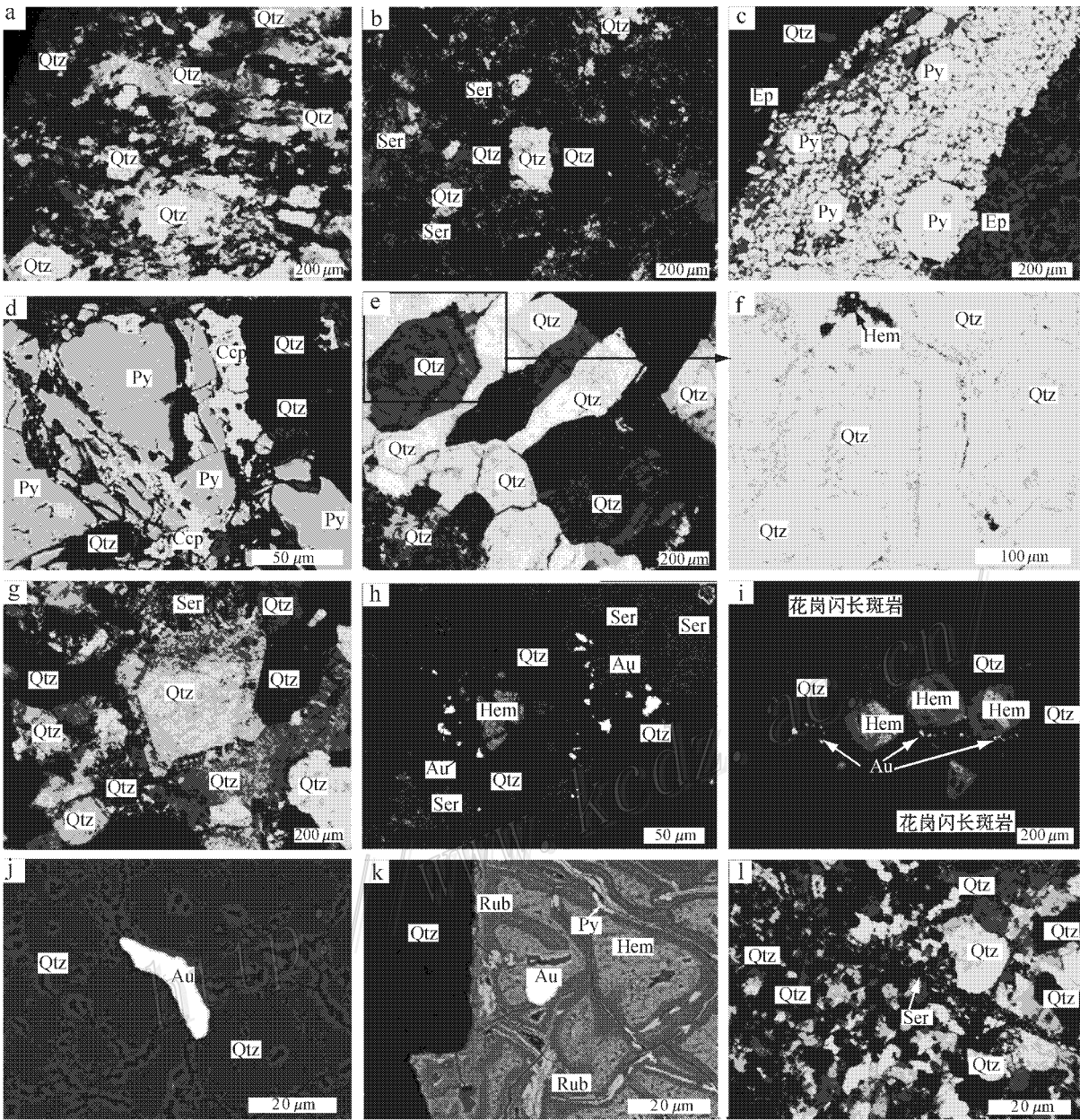


图 7 糜棱岩化及金矿化过程中的矿物产出形式

a, b. 糜棱岩化石英脉, 正交偏光; c. 呈碎状结构的黄铁矿脉, 背散射图像(BSE); d. 在碎裂状黄铁矿中产出的黄铜矿, BSE; e. 自形石英颗粒及生长环带, 正交偏光; f. e 的放大, 单偏光; g. 自形石英间隙发育石英亚颗粒和绢云母, 正交偏光; h. 石英-绢云母脉中的自然金, BSE; i. 石英脉中的自然金, 反射光; j. 石英中的自然金, BSE; k. 褐铁矿中的自然金, BSE; l. 绢云母脉穿切含金石英脉, 正交偏光。Au—自然金; Ccp—黄铜矿; Ep—绿帘石; Hem—赤铁矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Rub—针铁矿; Ser—绢云母

Fig. 7 Modes of occurrence of minerals in the process of mylonitization and gold mineralization

a, b. Mylonitized quartz vein, crossed nicols; c. Crushed pyrite vein, BSE; d. Chalcopyrite developed in cracks of pyrite, BSE; e. Euhedral quartz grains with growing zoning, crossed nicols; f. Enlarged part of image e; g. Quartz subgrain and sericite around euhedral quartz grains, crossed nicols; h. Native gold in sericite-quartz vein, BSE; i. Native gold in quartz vein of granodiorite, reflected light; j. Native gold in quartz, BSE; k. Native gold in limonite, BSE; l. Sericite vein cutting quartz vein with native gold, crossed nicols. Au—Native gold; Ccp—Chalcopyrite; Ep—Epidote; Hem—Hematite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Rub—Rubinglimmer; Ser—Sericite

糜棱岩化石英脉未见金矿化, 矿化主要发育在糜棱岩化之后。糜棱岩化作用可以导致花岗质岩石中金被活化带出, 进入成矿流体(Zhu et al., 2007b)。糜棱岩化作用后, 脆性断裂大量形成, 开放的空间生长很自形的石英, 脆性断裂发育加

快了成矿流体的循环, 并提供了成矿空间。石英自形晶发育明显的生长环带, 说明晶体的生长发生过间断, 是热液脉动的标志。

该矿区磁铁矿化、铜矿化和金矿化分别与辉长岩、闪长岩

和花岗闪长岩有密切的关系。这些侵入岩对应着的成矿流体有所差异,这可能是导致矿化多样性的主要原因,但具体的铁、铜和金在成矿过程中的相互关系还有待进一步的研究。

志 谢 野外工作中得到新疆杰奥勘查技术责任有限公司的大力协助。舒桂明老师和王长秋老师协助完成了电子探针分析,陈博和薛云兴参与部分实验室工作。特此感谢。

References

An F and Zhu Y F. 2007. Studies on geology and geochemistry of alteration-type ore in the Hatu Gold deposit (western Junggar, Xinjiang), NW China [J]. *Mineral Deposits*, 26 (6): 621-633 (in Chinese with English Abstract).

An F and Zhu Y F. 2009. Significance of native arsenic in the Baogutu gold deposit, western Junggar, Xinjiang, NW China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 54 (10): 1744-1749.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).

Bornhorst T J. 1986. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks from Guatemala [J]. *J. Geol.*, 94: 412-418.

Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Tan L G, David C, Sebastien M, Yang W P and He L X. 2007. LA-ICP MS zircon age of Tasite pluton in Sawuer region of west Juggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (8): 1901-1908 (in Chinese with English abstract).

He B C, Tan K R and Wu Q H. 1994. Ages and Sr, Nd isotopic evidences of mantle source magmatite in the bu's gold deposit, Jimunai County, northern Xinjiang [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 18: 219-228 (in Chinese with English abstract).

He G Q, Cheng S D, Xu X, Li J Y and Hao J. 2005. An introduction to the explanatory text of the map of the tectonics of Xinjiang and its neighboring area (1:250000) [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).

He G Q, Liu J B, Zhang Y Q and Xu X. 2007. Keramay Ophiolitic mélange formed during Early Paleozoic in western Juggar basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1573-1576 (in Chinese with English abstract).

Li H Q, Cheng F W and Cai H. 2000. Study on chronology of the Buerkesidai gold deposit in northwestern margin of the Junggar basin [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4: 15-18 (in Chinese with English abstract).

Shen P, Shen Y C, Liu T B, Li G M and Zeng Q D. 2007. Genesis of volcanic-hosted gold deposits in the Sawur gold belt, northern Xinjiang, China: Evidence from REE, stable isotopes, and noble gas isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 207-226.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic study of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 42: 313-345.

Wybon D. 1994. Sulphur-undersaturated magmatism: A key factor for generating magma-related copper-gold deposits [J]. *AGSO Research Newsletter*, 21: 7-8.

Xu X, He G Q, Li H Q, Ding T F, Liu X Y and Mei S W. 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating [J]. *Geology in China*, 33 (3): 470-475 (in Chinese with English abstract).

Yuan F, Zhou T F, Tan L G, Fan Y, Yang W P, He L X and Yue S C. 2006. Isotopic ages of the I type granites in west Junggar Sawuer region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1238-1248 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Tan L G and Yue S C. 2006. Geodynamic significance of the A-type granites in the Sawuer region in west Junggar, Xinjiang: Rock geochemistry and SHRIMP zircon age evidence [J]. *Science in China (Series D)*, 49 (2): 113-123.

Zhu Y F, He G Q and An F. 2007a. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian: A review [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (9): 1167-1177 (in Chinese with English abstract).

Zhu Y F, Zhou J and Zeng Y S. 2007b. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: Petrographic and geochemical characteristics [J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 337-365.

附中文参考文献

安 芳, 朱永峰. 2007. 新疆哈图金矿蚀变岩型矿体地质和地球化学研究 [J]. *矿床地质*, 26(6): 621-633.

范 裕, 周涛发, 袁 峰, 谭绿贵, David C, Sebastien M, 杨文平, 何立新. 2007. 新疆西准噶尔地区塔斯提岩体锆石 LA-ICPMS 年龄及其意义 [J]. *岩石学报*, 23(8): 1901-1908.

贺伯初, 谭克仁, 吴堃虹. 1994. 北疆吉木乃布氏金矿幔源岩浆时代及 Sr、Nd 同位素证据 [J]. *大地构造与成矿学*, 18(3): 220-228.

何国琦, 成守德, 徐 新, 李锦轶, 郝 杰. 2005. 中国新疆及邻区大地构造图 1:1500000 [M]. 北京: 地质出版社.

何国琦, 刘建波, 张跃迁, 徐 新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定 [J]. *岩石学报*, 23(7): 1645-1654.

李华芹, 成富文, 蔡 红. 2000. 准噶尔盆地西北缘布尔克斯岱金矿床成矿作用年代学研究 [J]. *华南地质与矿产*, 4: 15-18.

徐 新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息 [J]. *中国地质*, 33(3): 470-486.

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.

袁 峰, 周涛发, 谭绿贵, 范 裕, 杨文平, 何立新, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义 [J]. *岩石学报*, 22(5): 1238-1248.

朱永峰, 何国琦, 安 芳. 2007a. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律 [J]. 26(9): 1167-1177.