

新疆尼勒克县松湖铁矿床黄铁矿的特征和微量元素地球化学*

单强¹ 张兵³ 罗勇^{1,2} 周昌平³ 于学元¹ 曾乔松¹ 杨武斌^{1,2} 牛贺才¹

SHAN Qiang¹, ZHANG Bing³, LUO Yong^{1,2}, ZHOU ChangPing³, YU XueYuan¹, ZENG QiaoSong, YANG WuBin^{1,2} and NIU HeCai¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队, 乌苏 833000

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. No. 7 Geological Survey Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Wusu 833000, China

2008-12-12 收稿, 2009-05-10 改回.

Shan Q, Zhang B, Luo Y, Zhou CP, Yu XY, Zeng QS, Yang WB and Niu HC. 2009. Characteristics and trace element geochemistry of pyrite from the Songhu iron deposit, Nilek County, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1456 – 1464

Abstract The Songhu iron deposit is located in the eastern part of Awurale region, and its bed-like orebodies occurred in the volcanic-pyroclastic rocks of the Lower Carboniferous Awurale Formation. The volcanic rocks, as the wall/host rocks of the deposit, were formed in an island arc tectonic setting according to their trace element geochemistry. Three genetic types of pyrite have been distinguished in the deposit: the framboidal, the anhedral-subhedral (with a large amount of pyritized bio-remains), and the cobalt pyrite. The pre-iron ore framboidal pyrite of sedimentary origin recrystallized due to the reworking of ore-forming hydrothermal solution, accompanied by the apparent increasing of its Co content and Co/Ni ratio. The iron ore-stage anhedral-subhedral pyrite and associated pyritized bio-remains possess relatively higher Co contents and Co/Ni ratios, indicating the close relationship between the ore-forming fluid and the magmatic (volcanic) activities. The Songhu iron deposit was superimposed by late stage Cu-Co mineralization, in which a large amount of chalcopyrite and cobalt pyrite were formed. The Co content of cobalt pyrite can be over 1% and its Co/Ni ratio over 26. It is suggested that the process of Cu-Co enrichment in the deposit is closely related to the latter stage of volcanic activity. This deposit could be recognized as a volcanic exhalative sedimentary iron deposit, and its ore-forming temperature ranges from 270°C to 325°C.

Key words Songhu iron deposit; Pyrite; Co content; Co/Ni ratio; Volcanic activity

摘要 松湖铁矿床位于阿吾拉勒地区东部, 矿体呈层状产在石炭系阿吾拉勒组火山岩-火山碎屑岩建造中。微量元素地球化学特征显示, 松湖铁矿床赋矿围岩形成于岛弧构造环境。松湖铁矿床含有草莓黄铁矿、他形-半自形黄铁矿(含有大量黄铁矿化生物遗骸)和钴黄铁矿三种不同成因的黄铁矿。铁成矿前沉积成因草莓黄铁矿受成矿热液影响发生重结晶, 其钴含量及 Co/Ni 比值明显增大。铁成矿期的他形-半自形黄铁矿和伴生的黄铁矿化生物遗骸具有相对较高的钴含量和 Co/Ni 比值, 显示其成矿流体与火山活动有密切的成因联系, 松湖铁矿床后期叠加了铜-钴矿化作用, 形成了大量的黄铜矿和钴黄铁矿。钴黄铁矿的钴含量 > 1%, Co/Ni 比值 > 26, 显示该矿床铜、钴的富集过程与后期火山作用有关, 该矿床是一个与火山岩有关的沉积型铁矿床, 其形成温度为 270 ~ 325°C。

关键词 松湖铁矿床; 黄铁矿; 钴含量; Co/Ni 比值; 火山活动

中图法分类号 P618.31

* 本项目由中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107)和“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB07B02-03)联合资助。

第一作者简介: 单强, 男, 1967 年生, 副研究员, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: qshan@gig.ac.cn

1 引言

黄铁矿广泛存在于各类矿床中,不同条件下形成的黄铁矿其结晶学、杂质元素含量及热电性等性质有一定的差异(李晶等,2004a, b;杨进辉等,2000;胡楚雁,2001;杨竹森等,2000;Arehart *et al.*, 1993),黄铁矿的这些标型特征可以用于探讨矿床的成因。研究发现,随着温度的增高黄铁矿中钴含量增高,在温度为400℃时,黄铁矿中钴含量最高可以达到9%,当温度大于500℃时, FeS_2 - CoS_2 以完全的固溶体形式出现(Moh, 1980;Vaughan and Craig, 1978)。黄铁矿的钴含量及Co/Ni比值等参数是区分岩浆、热液和沉积三种成因金属矿床的有效地球化学指标(Fleischer, 1955; Hawley and Nichol, 1961; Loftus-Hills and Solomon, 1967; Bralía *et al.*, 1979; Bajwah *et al.*, 1987; Brill, 1989; Xu, 1998; Clark *et al.*, 2004; Monteiro *et al.*, 2008)。魏明秀(1986)对我国不同成因金属矿床中黄铁矿钴含量以及Co/Ni比值进行了较系统研究,发现大冶铁矿的黄铁矿中钴的含量从早期向晚期明显降低。由于形成的温度、压力以及其他的环境因素不同,黄铁矿初始结晶形态也不尽相同(Clark, 2004)。草莓黄铁矿不仅见于低温水体或沉积环境,而且还出现在以沉积岩或火山岩为赋矿围岩的块状硫化物矿床以及卡林型金矿床(Steinike, 1963; Chen, 1978; Kanehira and Bachinski, 1967; 付绍洪,2000;程斌等,2006),其形成温度介于150~210℃之间(Wilkin and Barnes,1997)。

新疆松湖铁矿床含有多种类型的黄铁矿,包括草莓黄铁矿、他形-半自形黄铁矿和钴黄铁矿,本文拟通过对不同类型黄铁矿微量元素的系统研究,揭示松湖铁矿床的形成机制。

2 松湖铁矿床的地质特征

松湖铁矿床位于阿吾拉勒山东段,式可布台铁矿床的东部,二者直线距离约为30km。

矿区裸露的地层有中-上泥盆统坎苏组、石炭系的阿吾拉勒组和吐尔拱河组、中-下侏罗统喀什河组和第四系,各组地层岩性特征如下(图1):

坎苏组($D_{2-3}k$):它出露在松湖铁矿床的南部,与石炭系的吐尔拱河组呈断层接触。坎苏组按岩性分上、中、下三个部分。下部以火山灰凝灰岩、凝灰粉砂岩、凝灰质钙质粉砂岩等细碎屑岩为主,夹少量灰岩薄层或透镜体;中部以钠长斑岩、霏细斑岩及火山碎屑岩为主,夹少量英安斑岩;上部则以英安斑岩为主。

阿吾拉勒组(C_1a):为一套火山岩(火山碎屑岩-碳酸岩建造,根据岩性阿吾拉勒组分为四个亚组,在松湖矿区未见第一亚组(C_{1a}^1)。第二亚组(C_{1a}^2)由酸性火山岩、火山碎屑岩组成,主要岩性为紫红色岩屑凝灰岩、浅红褐色流纹斑岩、

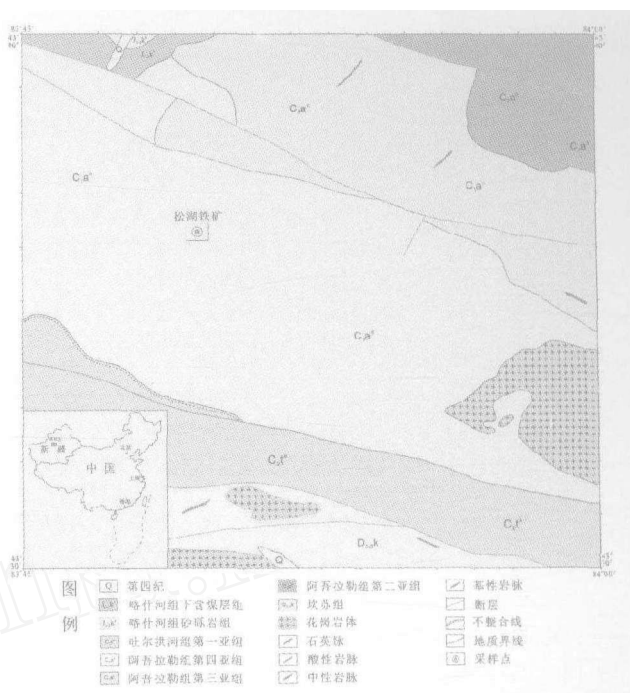


图1 松湖铁矿床地质简图(据新疆地质七大队资料改绘①)

Fig.1 Geological sketch map of Songhu iron deposit

霏细斑岩夹凝灰角砾岩。第三亚组(C_{1a}^3)其下部由正常沉积的灰岩及粉砂质泥岩组成;上部为钠长斑岩、霏细岩、石英钠长斑岩及其碎屑岩组成,与下伏的第二亚组(C_{1a}^2)呈断层接触。第四亚组(C_{1a}^4)下部为一套正常沉积岩;上部为中性凝灰岩及碎屑岩,主要岩性为紫红-灰绿色晶屑凝灰岩、含有少量的杏仁状安山玢岩、安山岩、灰白色生物碎屑灰岩,与下伏的第三亚组(C_{1a}^3)呈整合接触。铁矿体定位在第四亚组(C_{1a}^4)的火山凝灰岩中。

吐尔拱河组(C_2t):松湖铁矿地区仅出露了吐尔拱河组的第一亚组(C_{2t}^1),底部为紫红色凝灰砾岩,中上部为中-酸性晶屑凝灰岩及酸性凝灰岩。它分布于松湖铁矿床的南部,与阿吾拉勒组呈不整合或断层接触。

喀什河组($J_{2-3}k$):分布在松湖铁矿床的西北部,为含煤地层,主要由砾岩、砂砾岩、细砂岩、泥质粉砂岩及煤层组成,呈角度不整合覆于阿吾拉勒组之上。

第四系(Q):出露于矿区的北部,主要由巨砾、砾石、砂、淤积砂、砂质粘土、黄土及亚砂土组成。

本文对松湖铁矿床赋矿围岩阿吾拉勒组火山岩分别进行了主量元素和微量元素的分析并对矿石中的黄铁矿和岩石中钠长石和绿泥石作了电子探针分析。首先,选取新鲜样品,去除风化表面,手工碎至1~5mm,用5% HNO_3 和5% HCl 在超声波清洗仪中清洗,以去除碳酸盐化的影响,烘干后用

① 新疆地质矿产勘查开发局第七地质大队. 2007. 新疆尼勒克县松湖铁矿预查报告

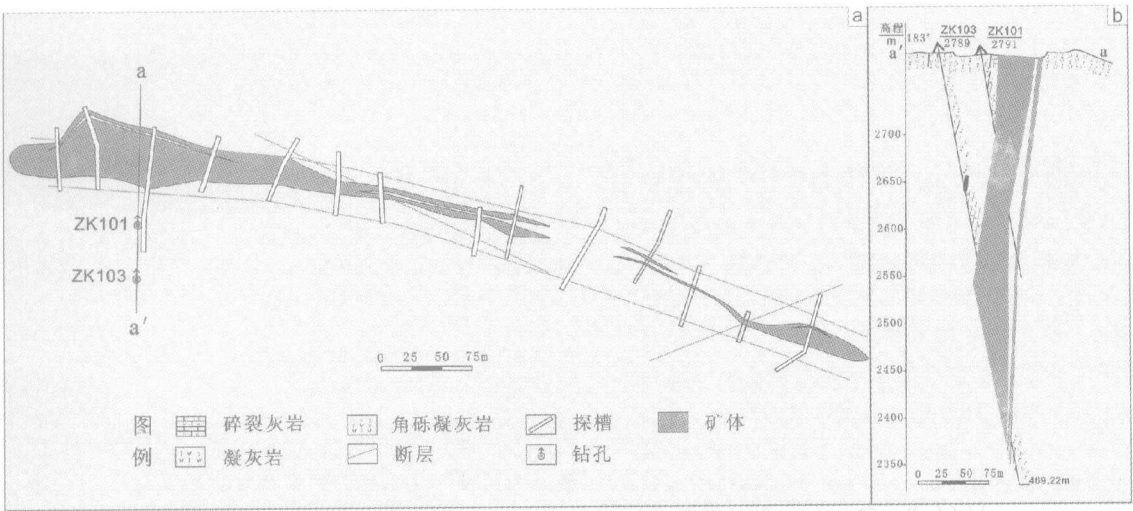


图2 松湖铁矿床1号矿体的平面(a)和剖面图(b)(据新疆地质七大队资料改绘)
Fig. 2 Geological plane (a) and profile (b) of No. 1 orebody in Songhu iron deposit

表1 松湖铁矿床阿吾拉勒组火山岩的主量元素(wt%)分析结果

Table 1 Representative compositions of major element (wt%) of volcanic rocks in Awulale Formation from Songhu iron deposit

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
SH2-1B	67.71	0.54	14.64	4.90	0.03	1.01	0.22	2.15	7.29	0.1	1.31	99.90
SH3-1B	67.63	0.54	14.56	4.70	0.04	0.76	0.67	2.26	7.23	0.1	1.40	99.89
SH7-1A	55.42	0.85	17.41	10.22	0.13	4.04	1.49	5.45	2.2	0.11	2.55	99.87
SH7-1B	56.19	0.88	17.65	9.85	0.12	3.25	1.73	5.93	1.99	0.12	2.17	99.88
SH7-1C	54.93	0.89	17.14	10.61	0.13	3.93	1.67	5.57	2.34	0.12	2.56	99.90
SH9-1A	60.44	0.74	16.48	7.54	0.1	2.38	1.02	1.95	7.08	0.09	2.04	99.86
SH9-1B	55.83	0.88	16.70	9.92	0.26	4.64	2.21	5.35	0.96	0.12	2.99	99.85
601-6	64.59	0.82	15.51	7.57	0.1	2.22	1.05	2.31	2.82	0.04	2.79	99.83
SHAn-1	61.73	0.85	16.45	7.49	0.14	2.85	2.94	4.37	1.45	0.09	1.54	99.90
101-14	66.79	0.53	14.34	4.44	0.04	0.56	1.1	2.91	6.57	0.11	2.47	99.87

不锈钢钵粉碎至200目。在中国科学院广州地球化学研究所用XRF和ICP-MS分别分析了岩石的主量元素和微量元素。黄铁矿、绿泥石和钠长石的电子探针分析是在中国科学院广州地球化学研究所进行的,仪器型号:日本电子(JEOL)JXA-8100,工作条件:加速电压:15kV,测试电流:20nA,束斑直径:1μm,计数时间:10~20s。定量分析最小检测极限F为500×10⁻⁶,其他元素为200×10⁻⁶。标样:Co:金属钴,Ni:金属镍,As:(Co,Ni)As₃,Ti:金红石,Si,Al,Fe,Mg,Ca:石榴石,Mn:氧化锰,Na:钠长石),K:钾长石。

松湖铁矿床赋矿围岩阿吾拉勒组火山岩的岩石化学分析结果显示,它们是一套钙碱性粗面安山岩-粗面英安岩组合(表1),其SiO₂的含量为55%~68%,Na₂O+K₂O含量较高(5.13%~9.44%),其中一部分火山岩为典型的高钾火山岩(K₂O>7%)。微量元素地球化学特征显示,松湖铁矿床的赋矿岩石为岛弧火山岩。

目前,松湖铁矿已发现了5个矿体,其中1、2号矿体出露于地表,其余三个矿体均为隐伏矿体。2007年新疆地质矿产勘查开发局第七地质大队对1号矿体进行了地质详查,求

得332级铁矿石储量1170万吨和333级铁矿石储量500万吨。本文研究样品均采自松湖铁矿床1号矿体。

地表揭露及钻探工程显示(新疆地矿局第七地质大队),松湖铁矿1号矿体呈层状产出,与围岩接触界线十分清晰且产状一致,二者为整合接触(图2a,b)。底板为灰绿色晶屑凝灰质岩,局部可见含砂微晶粉晶生物碎屑灰岩。岩石裂隙发育。晶屑凝灰岩中火山碎屑总含量约40%~50%,粒度为0.02×1mm~0.25×1mm;底板蚀变以硅化、绿泥石化和碳酸岩化为主;顶板为灰紫色晶屑凝灰岩。火山碎屑含量25%~30%,粒度为0.005×0.05mm~0.02×0.02mm。矿体产状较稳定,倾向为74°~89°,延伸约120m(钻孔控制);走向177°~210°,走向长约720m;厚度介于0.86~57.68m之间,平均厚度为20.70m。矿石主要为稠密浸染状、致密块状构造,他形-半自形粒状结构,新鲜铁矿石呈灰黑色,局部夹黄褐色条带。矿石的矿物主要为磁铁矿、其次为赤铁矿、针铁矿、黄铁矿和黄铜矿,偶见镜铁矿。矿石中全铁含量为22.23%~54.18%,平均为46.09%。

虽然都定位在石炭系地层中,但松湖铁矿床与邻近的莫

表2 松湖铁矿床钠长石和绿泥石的电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Electron data of albite and chlorite from Songhu iron deposit(wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	T(℃)
钠长石											
yu-1	68.10	/	19.28	/	/	/	0.08	11.49	0.05	99.00	
yu-2	66.93	/	20.7	/	/	/	1.16	10.89	/	99.68	
yu-3	66.88	0.01	20.59	/	/	/	1.17	11.17	0.09	99.91	
yu-4	66.24	/	20.46	/	/	/	1.23	10.58	0.04	98.55	
yu-5	65.41	/	21.56	/	/	/	0.70	11.14	0.1	98.91	
绿泥石											
yu-1	26.92	/	17.97	22.03	/	14.91	0.20	0.04	0.08	82.15	270
yu-2	25.95	0.04	20.48	26.41	0.533	12.72	0.03	0.07	0.08	86.31	325
yu-3	26.00	0.04	19.02	26.55	0.431	13.00	0.06	0.05	0.08	85.23	309
yu-4	26.39	0.01	18.97	27.91	0.406	13.93	/	0.07	0.05	87.74	317
yu-5	26.92	/	17.97	22.03	0.593	14.91	0.20	0.04	0.08	82.74	271

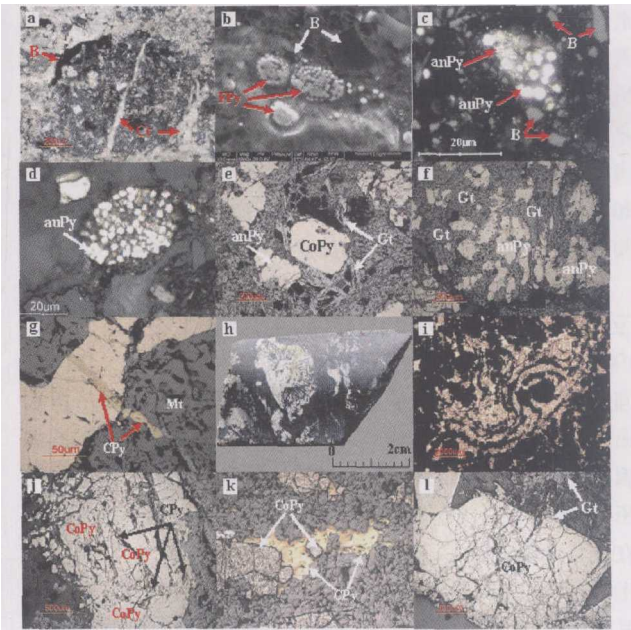


图3 松湖铁矿床的铁矿石手标本及显微照片
a-铁矿石中方解石(Cc)脉穿切沥青(B)和草莓黄铁矿;b-铁矿石中草莓黄铁矿(FPy)和沥青(B);c-草莓黄铁矿球内自形黄铁矿(aupy)和他形黄铁矿(anpy);d-草莓黄铁矿球中重结晶自形黄铁矿(aupy);e-与磁铁矿共生的他形黄铁矿(anPy)以及晚期自形黄铁矿(CoPy)和针铁矿(Gt);f-与磁铁矿(Mt)共生的他形黄铁矿(anPy);g-黄铜矿细脉穿切他形黄铁矿(anPy)和磁铁矿(Mt);h-铁矿石中黄铁矿化珊瑚化石;i-铁矿石中黄铁矿化生物遗骸;j-钴黄铁矿(CoPy)中黄铜矿(CPy)呈细脉状沿碎裂纹分布;k-黄铜矿(CPy)中自形钴黄铁矿(CoPy);l-自形钴黄铁矿(CoPy)
Fig. 3 Photo and microphotographs of iron ore in Songhu iron deposit
a-Bitumen and framboidal pyrite in iron ore cut through by calcite veins; b-Bitumen and framboidal pyrite in iron ore; c-automorphic and anhedral pyrites in framboidal pyrite sphere; d-recrystallized automorphic pyrites in framboidal pyrite sphere; e-Anhedral pyrites and late anhedral pyrites and goethites associated with magnetites; f-Anhedral pyrites associated with magnetites; g-Anhedral pyrites and magnetites cut through by chalcopyrite thin veins; h-Pyritized coral fossil in iron ore; i-Pyritized biological remains in iron ore; j-thin vein chalcopyrite distributions along fine fracture in cobalt pyrite; k-automorphic cobalt pyrites in chalcopyrite; l-automorphic cobalt pyrite

托沙拉和式可布台铁矿床在矿物组成上有明显差别:松湖铁矿床以磁铁矿为主,含有丰富的硫化物(以黄铁矿为主),而莫托沙拉和式可布台铁矿床则以赤铁矿为主,硫化物含量很低(袁涛,2003)。

在松湖铁矿床1号矿体内不但含有相当数量的方解石、黄铁矿、石英等脉石矿物,还存在着一定数量的钠长石和绿泥石,本文对其中的钠长石和绿泥石成分进行了分析(表2)。

显微结构研究显示,在松湖铁矿床某些矿段可以见到黄铜矿呈细网脉状穿切或分割黄铁矿和磁铁矿(图3g)。本文选取了zk101,zk103和zk401三个钻孔的不同深度的黄铁矿化磁铁矿矿石样品16个进行了铜的定量分析,所有样品铜含量均大于0.01%,其中有5个样品铜含量超过0.1%,最高含量达到0.85%。由此可见,在松湖铁矿床存在着铜矿化,矿化作用明显晚于铁矿化。本文对上述16个样品也进行了其它相关元素的定量分析,结果显示松湖铁矿床中钴含量介于0.01%~0.27%之间,有9个样品达到了钴的工业品位0.02%。元素定量分析还显示铜、钴含量具有较好的相关性,显示二者富集受制于同一地质过程。

3 松湖铁矿床的黄铁矿分类及其特征

根据黄铁矿与主要矿石矿物磁铁矿形成的时序关系,将松湖铁矿床黄铁矿分为成矿前(草莓黄铁矿)、成矿期(他形-半自形黄铁矿)和成矿后(钴黄铁矿)三类。草莓黄铁矿和共生的有机质作为残留体分布在碳酸盐化磁铁矿矿石中(图3a),其形成时间早于磁铁矿,为成矿前黄铁矿(图3b-d);他形-半自形黄铁矿与磁铁矿紧密共生(图3e-g),为成矿期黄铁矿。在该阶段发现了一定数量的黄铁矿化珊瑚化石,化石显示出清晰的放射状的隔壁,从中轴向外伸展,其个体大小约1.5~2cm×2~3cm(图3h,i)。钴黄铁矿的形成明显晚于铁矿石,为成矿后黄铁矿。在矿床中钴黄铁矿分布极不均匀,其中大部分较破碎,被黄铜矿细小脉体穿插(图3j,5a,

b),有一部分钴黄铁矿呈自形与黄铜矿共生(图3k),还有一部分则分布在大而自形的黄铁矿晶体边缘(图5c, d)。

3.1 草莓黄铁矿

该类黄铁矿仅见于401钻孔中212~215m处,矿石样品为碳酸盐化铁矿物(岩石薄片编号为zk401-1b)。草莓状黄铁矿是许多微晶黄铁矿堆积成的球体,其直径大小为1~10 μm ,最大不超过50 μm (Butler and Rickard, 2000)。松湖铁矿床矿石中产出的草莓黄铁矿呈圆球状、椭球或不规则状,大小为几个 μm 至十几个 μm ,最大的为40 μm 。草莓黄铁矿中微晶黄铁矿粒径变化较大,最小粒径小于0.1 μm (图3b),最大粒径可达3~4 μm 。细小微晶黄铁矿均为他形,而大的微晶黄铁矿则呈四边形(立方体)、五边形(五角十二面体)及六边形等自形存在(图3c, d)。显微结构研究显示,在同一个草莓黄铁矿球内细小微晶黄铁矿和大的自形微晶黄铁矿共生在一起,这说明草莓黄铁矿中的微晶黄铁矿后期发生了重结晶(图3c)。在松湖铁矿床中草莓黄铁矿与有机质(沥青)共生(图3a),有机质沿方解石颗粒边缘呈不规则的条带分布。在该矿床中有机质(沥青)为具有清晰的棱角碎屑状颗粒,多数为几 μm 至十几 μm 。松湖铁矿床20个沥青颗粒的镜质体反射率测定结果为3.52~4.38,平均为4.00,显示其具有较高的成熟度,说明松湖铁矿床中有机质及共生的草莓黄铁矿遭受了后期地质作用的改造。根据经验公式(刘德汉等, 2007),松湖铁矿床有机质的改造温度约为220 $^{\circ}\text{C}$,也就是说草莓黄铁矿的重结晶作用发生在220 $^{\circ}\text{C}$ 左右。显微结构研究还发现了另一个重要的地质现象:铁矿石中的细小方解石脉体穿切了有机质和草莓黄铁矿带。显然,在松湖铁矿床中碳酸盐化应晚于草莓黄铁矿和有机质形成。

3.2 他形-半自形黄铁矿

该类黄铁矿在矿石中含量为5%~15%,粒径为80~200 μm ,嵌布于磁铁矿之中。此外,在铁矿石中还分布着一定数量的以珊瑚为主的黄铁矿化生物遗骸化石(图3h, i)。黄铁矿化的动物化石形成于缺氧环境(Bölücek and İlhan, 2006),显示松湖铁矿床铁沉淀的环境相对还原。这可能是导致该矿床与周围其它同层位铁矿床(式可布台铁矿床)相比明显富硫化物和磁铁矿的原因。

3.3 钴黄铁矿

这类黄铁矿是含铜-钴热液活动的产物。钴黄铁矿在松湖铁矿床中有两种产状:一种是自形程度较低但晶体粗大,具有明显的碎裂纹并充填了黄铜矿细脉(图3j, 5a, b);另一种是自形程度高的黄铁矿,呈五角十二面体,八面体或立方体,经常与针铁矿、黄铜矿共生(图3k, l, 5c, d)。有些靠近针铁矿、黄铜矿及黄铜矿细脉的黄铁矿其钴含量更高。

4 黄铁矿微量元素地球化学特征

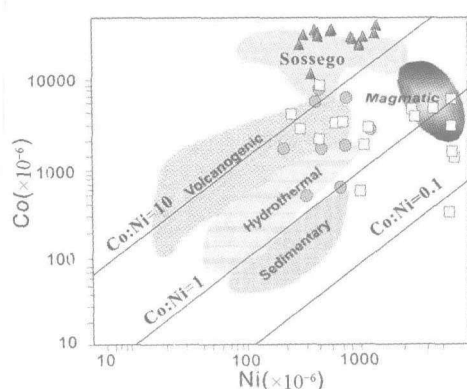
黄铁矿的理想化学式为 FeS_2 ,实际上天然黄铁矿除了基本组分Fe和S之外,都含有少量的微量元素(如钴、镍和砷)。在黄铁矿中,钴和镍含量一般不超过2%,砷的含量一般不超过10%,而金、银、硒、铜及锌等元素含量则小于1%(Abraitis *et al.*, 2004)。已有的研究显示,天然黄铁矿中钴($26 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-2}$)、镍($106 \times 10^{-6} \sim 0.2 \times 10^{-2}$)和砷($6 \times 10^{-6} \sim 9.6 \times 10^{-2}$)的含量变化较大(Arehart *et al.*, 1993; Abraitis *et al.*, 2004; Brill, 1989; Chenery *et al.*, 1995; Huston *et al.*, 1995; Oberthur *et al.*, 1997; Wells and Mullens, 1973)。制约黄铁矿中微量元素含量的因素很多,诸如共生的硫化物相和寄主岩石中微量元素含量、成矿流体的微量元素含量、体系氧逸度和PH物理化学条件等(Moh, 1980)。当黄铁矿形成温度大于300 $^{\circ}\text{C}$ 时,氧逸度和硫逸度较低,Fe、Co、Ni、Mn、Cr和Ti等过渡族金属离子活度大,黄铁矿中阴离子之和与阳离子之和比值小于2,黄铁矿为N型黄铁矿;相反,当黄铁矿的形成温度较低时,氧逸度和硫逸度较高,S、As、Se和Te等阴离子活度加大,黄铁矿中阴离子之和与阳离子之和比值大于2,黄铁矿为P型黄铁矿(李晶等2004a, b)。

电子探针分析显示,松湖铁矿床中草莓黄铁矿钴含量介于 $570 \times 10^{-6} \sim 4790 \times 10^{-6}$ 之间,其中大多数钴的含量大于 1000×10^{-6} (表3),镍含量介于 $240 \times 10^{-6} \sim 860 \times 10^{-6}$ 之间,但有相当数量分析样品的镍含量低于电子探针的分析检出限(表3)。众所周知,黄铁矿的Co/Ni比值与黄铁矿的成因有密切关系(Brill, 1989; 李晶等, 2004a, 2004b),因此利用Ni-Co图解可以判别黄铁矿的成因。尽管在低温矿床中也存在着草莓状黄铁矿,鉴于松湖铁矿草莓黄铁矿与有机质共生,本文认为该类黄铁矿应为沉积成因,但在Ni-Co图解中其投影点落在了热液和火山成因的黄铁矿区域内(图4)。该图还显示,草莓黄铁矿镍含量相对稳定,而钴含量变化则十分明显。松湖铁矿床中草莓黄铁矿的砷含量介于 $850 \times 10^{-6} \sim 10240 \times 10^{-6}$,为富砷黄铁矿,反映它是快速沉淀的产物,处于亚稳定状态(Cook and Chrysosoulis, 1990; Huston *et al.*, 1995)。

他形-半自形黄铁矿钴含量介于 $280 \times 10^{-6} \sim 6870 \times 10^{-6}$ 之间,而镍含量则在 $250 \times 10^{-6} \sim 3820 \times 10^{-6}$ 之间变化(表3)。与草莓黄铁矿相比,该类黄铁矿钴和镍含量有明显增加,而且其变化范围明显增大,Co/Ni比值也变化较大(0.08~17.18)(表3)。在Ni-Co图解中其投影点虽然分布较散,但主要集中在火山热液成因和岩浆热液成因区域内(图4),显示其形成受岩浆活动的制约。成矿期黄铁矿的钴、镍地球化学特征还显示,松湖铁矿床的成矿物质来源与岩浆活动有内在的成因联系。与成矿早期草莓黄铁矿相比,成矿期他形-半自形黄铁矿砷含量明显偏低,其变化范围为 $240 \times 10^{-6} \sim 820 \times 10^{-6}$,有相当数量样品的砷含量低于电子

表3 松湖铁矿床各类黄铁矿中钴、镍和砷的电子探针分析结果($\times 10^{-6}$)Table 3 Representative compositions of cobalt, nickel and arsenic in pyrites from Songhu iron deposit($\times 10^{-6}$)

草莓黄铁矿					他形-半自形黄铁矿					钴黄铁矿				
点号	As	Ni	Co	Co/Ni	点号	As	Ni	Co	Co/Ni	点号	As	Ni	Co	Co/Ni
3	3260	600	1480	2.47	45	760	400	6870	17.18	1	—	470	28140	59.87
4	2070	—	4330	—	55	460	3570	5140	1.44	2	—	—	29710	—
10	4080	440	—	—	56	—	3820	1140	0.3	3	—	360	28490	79.13
12	3120	—	1690	—	58	—	1860	4460	2.4	4	—	—	25310	—
13	3650	—	—	—	66	310	900	2390	2.66	5	490	—	26590	—
14	6770	—	680	—	69	—	400	1710	4.28	7	—	1010	33360	33.02
15	3220	240	1350	5.63	74	—	800	460	0.58	8	—	380	26390	69.44
18	2540	—	1710	—	75	—	—	690	—	9	240	—	31110	—
19	850	400	—	—	96	820	520	2630	5.06	10	360	—	23405	—
20	3500	420	1370	3.26	29	290	290	2210	7.62	11	—	—	15530	—
21	820	—	—	—	30	—	1950	3220	1.65	12	230	660	24240	36.72
28	1220	—	1370	—	31	360	250	3220	12.88	15	—	—	26380	—
29	1020	640	—	—	32	—	850	1510	1.78	16	—	340	9120	26.82
30	1140	—	4790	—	33	—	590	2710	4.59	17	—	280	19370	69.17
31	4000	340	460	1.35	34	—	3560	2560	0.72	18	410	—	9570	—
32	5690	600	4450	7.42	35	240	3670	1320	0.36	21	—	—	24820	—
36	2570	—	1480	—	36	—	3560	280	0.08	22	—	—	20850	—
39	5620	—	4210	—	—	—	—	—	—	23	—	300	29480	98.26
41	10240	560	570	1.02	—	—	—	—	—	24	—	—	29830	—
98	4350	—	—	—	—	—	—	—	—	28	240	—	28370	—
99	5060	860	2170	2.52	—	—	—	—	—	41	—	—	23700	—

图4 松湖铁矿床各类黄铁矿的 Co-Ni 图解(据 Monteiro *et al.*, 2008)

圆圈:草莓黄铁矿;方块:他形-半自形黄铁矿;三角:钴黄铁矿

Fig. 4 Co-Ni diagram of different pyrites from Songhu iron deposit(after Monteiro *et al.*, 2008)

Circle: framboidal pyrite; Diamond: anhedral-hypautomorphic pyrite; Triangle: Co-pyrite

探针的分析检出限(表3)。草莓黄铁矿与铁成矿期黄铁矿中砷含量的差异可能与其形成温度不同有关。

与前两类黄铁矿相比,钴黄铁矿(成矿后)的钴含量明显增大,其值介于 $9570 \times 10^{-6} \sim 33360 \times 10^{-6}$ 之间,其中大部分样品的含量超过了 20000×10^{-6} ,其平均值高达 24470×10^{-6}

(表3)。该类黄铁矿镍含量与成矿前草莓黄铁矿相近,有相当数量样品的镍含量低于电子探针的分析检出限(表3)。钴黄铁矿具有非常高的 Co/Ni 比值,其变化范围为 25.71 ~ 98.26。在 Co-Ni 图解中其投影点均落在火山成因黄铁矿的区域内,且与巴西 Sossego 铁氧化物铜金矿床一致(Monteiro *et al.*, 2008)。Huston *et al.* (1995) 研究显示,与火山活动有关的块状硫化物矿床中钴黄铁矿是高温热源(high-temperature feeder zones)的标志,是高温矿床的特征矿物之一。松湖铁矿床钴黄铁矿的存在和分布特征表明:(1)在铁矿形成之后该矿床受到富铜-钴流体的交代,形成了晚期的铜-钴矿化;(2)富铜-钴成矿流体的温度较高,它受火山(岩浆)活动的制约。此外,钴黄铁矿砷含量非常低,均小于 490×10^{-6} ,多数分析样品砷含量低于电子探针的分析检出限。钴黄铁矿低砷特征也在一定程度上反映形成温度与其砷含量有明显的相关性。

电子探针元素面分析结果显示,在松湖铁矿床黄铁矿中钴的分布很不均匀,钴黄铁矿或者呈条带状分布在自形的黄铁矿边缘(图5a),或者呈碎裂状分布在黄铜矿细脉附近(图5b)。显微结构研究显示,在松湖铁矿床中钴黄铁矿总是和黄铜矿相伴,该类黄铁矿本身呈碎裂状或被黄铜矿细脉所充填,远离黄铜矿的黄铁矿钴含量骤减,这一现象表明钴黄铁矿的形成与晚期黄铜矿细脉的贯入有密切的成因联系。另外,那些粗大自形的黄铁矿边缘钴含量骤增也与晚期黄铜矿

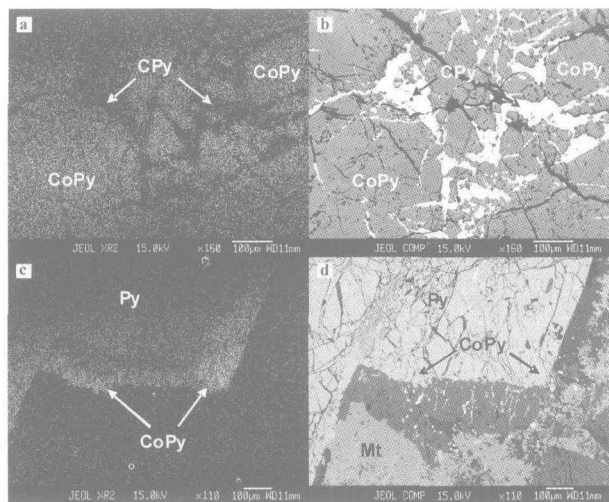


图5 松湖铁矿床矿石的钴元素面扫描及BSE图像

a-钴黄铁矿 (CoPy) 中的黄铜矿 (CPy) 呈细脉状沿碎裂纹分布 (钴元素面扫描图); b-钴黄铁矿 (CoPy) 中的黄铜矿 (CPy) 呈细脉状沿碎裂纹分布 (BSE 图); c-钴黄铁矿呈条带状分布在自形的黄铁矿边缘 (钴元素面扫描图); d-钴黄铁矿呈条带状分布在自形的黄铁矿边缘 (BSE 图)

Fig. 5 Cobalt surface scan and BSE images of ore in Songhu iron deposit

a-Thin vein chalcopyrite distributions along fine fracture in cobalt pyrite (Cobalt surface scan and image); b-Thin vein chalcopyrite distributions along fine fracture in cobalt pyrite (BSE image); c-Banding cobalt pyrite distributions along automorphic pyrite edge (Cobalt surface scan and image); d-Banding cobalt pyrite distributions along automorphic pyrite edge (BSE image)

细脉的贯入有成因联系。由此推测,钴黄铁矿是富铜-钴流体交代成矿期黄铁矿的产物。

5 讨论

松湖铁矿床中三种黄铁矿分别代表不同成因类型,草莓黄铁矿是铁矿成矿前形成的沉积成因黄铁矿,应该具有较低的钴含量和 Co/Ni 值。但松湖铁矿床草莓黄铁矿的钴含量和 Co/Ni 比值高于其它沉积成因黄铁矿,在 Ni-Co 图解上其投影点落到了热液成因黄铁矿的区域内(图4)。显微结构研究显示,松湖铁矿床草莓黄铁矿后期发生了重结晶作用。显然,草莓黄铁矿钴含量及 Co/Ni 比值的增加与后期地质改造作用有直接联系。这种改造是缘于成岩作用,还是缘于铁的成矿作用?成岩温度的上限为 50℃(陈衍景等,2007),而有机质镜质体反射率显示草莓黄铁矿改造的温度在 220℃左右,这暗示草莓黄铁矿的改造作用与成岩作用无关。在 Ni-Co 图解上草莓黄铁矿的投影点形成的区域与成矿期他形-半自形黄铁矿,特别是与其中镍含量比较低的投影点形成的区域完全重合(图4)。在 Co-Co/Ni 图解上,这种现象表现得

为明显(图6)。这说明草莓黄铁矿受到铁矿成矿流体的改造,不但使其重结晶,而且也使其钴含量和 Co/Ni 比值增大,改变了原来沉积成因的面貌。已有的研究显示,当黄铁矿中砷含量大于 0.1% 时,矿物处于亚稳定状态,重结晶作用将导致其含量降低(Cook and Chrysosoulis, 1990; Huston *et al.*, 1995)。由此推断,草莓黄铁矿原始砷含量应高于本文的测定值。

铁成矿期他形-半自形黄铁矿中钴的含量及 Co/Ni 比值特征显示,松湖铁矿床铁成矿流体与火山热液有关,为与海底火山活动有关的层状矿床(陈衍景等,2008)。黄铁矿钴含量及 Co/Ni 比值特征还显示,该矿床铁矿化的温度应明显高于草莓黄铁矿的改造温度,即应明显高于 220℃。在松湖铁矿床中存在着钠长石和绿泥石等脉石矿物。Walshe (1981, 1986) 将绿泥石作为由六个热力学端员组成的固溶体,通过热力学推导,并结合现代地热体系和成矿热液系统中绿泥石成分与形成温度的关系,得出了一套用绿泥石成分分析结果计算其端员组分和形成温度的方程组。而 Cathelineau (1988) 则总结出了绿泥石中四配位铝 (Al^{IV}) 含量与其形成温度的经验关系式: $T(^{\circ}C) = -61.92 + 321.98 (Al^{IV})$ 。本文应用上述经验公式计算得出松湖铁矿床绿泥石的形成(铁矿化)温度介于 270℃ ~ 325℃ 之间,它代表了铁矿的形成温度,明显高于草莓黄铁矿的改造温度。在 Ni-Co 图解中,有一部分铁矿化期形成黄铁矿的投影点没有落在热液成因黄铁矿区域,却落在了沉积成因黄铁矿区域(图4)。实际上,该类黄铁矿镍含量高,导致其 Co/Ni 比值小(表3)。成矿期部分黄铁矿高镍可能与成矿过程中成矿流体性质(温度和化学组成)发生了明显变化有关,也可能与镍、钴在黄铁矿中富集机理不同有关(李晶等,2004a,b)。

钴黄铁矿不但钴含量高,而且 Co/Ni 比值也大。钴黄铁矿高钴含量和高 Co/Ni 比值说明松湖铁矿床后期铜-钴矿化的成矿流体来源与岩浆-火山活动有关。另外,在 Co-Ni 图解中,松湖铁矿床钴黄铁矿的投影点与巴西的 Sossego 铁氧化物型铜-金矿床的投影点都落在同一区域,Monteiro (2008) 认为 Sossego 矿床钴和镍的富集与镁铁质岩浆活动有着密切联系。在 Co-Co/Ni 图解中,钴黄铁矿的投影区域与草莓黄铁矿和铁成矿期黄铁矿的投影区域有明显差别(图6),显示其形成受不同地质作用的制约。显微结构研究显示,钴黄铁矿与黄铜共生,为铁成矿后流体作用的产物。勘探过程采集的组合大样分析结果显示,1号矿体深部 Cu 和 Co 含量分别为 0.14% 和 0.019%,明显高于地表的 0.036% 和 0.004% (新疆地质矿产勘查开发局第七地质大队,2007)。这也在一定程度上暗示松湖铁矿床铁矿化与铜-钴矿化受不同的地质作用控制。松湖铁矿形成后与地层一起发生倾斜,形成近直立的铁矿体,而后期受岩浆作用控制的铜-钴成矿流体从深部作用于铁矿体,由于流体作用的强度不同,导致该矿床深部与地表铜、钴含量明显不同。

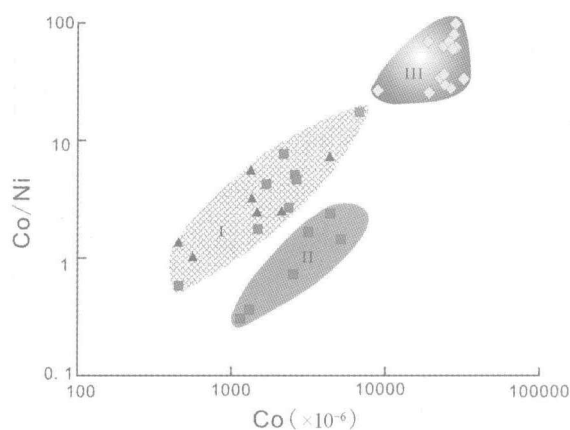


图6 松湖铁矿床黄铁矿的 Co-Co/Ni 图解

I-三角-铁成矿前的草莓黄铁矿;方块-铁成矿期的黄铁矿;
II-方块-铁成矿期的高镍黄铁矿;III-菱形-铁成矿后 Cu-Co
矿化期钴黄铁矿

Fig. 6 Co-Co/Ni diagram of pyrites from Songhu iron deposit

I-Triangle- Framboidal pyrite; formed before iron ore-forming;
Diamond-Pyrite formed at iron ore-forming stage; II-Diamond- High
Ni-pyrite formed at iron ore-forming stage; III-Rhombush; Co-pyrite
formed at Cu-co mineralization period after iron ore-forming stage

6 结论

(1)松湖铁矿床呈层状产于石炭系阿吾拉勒组第四亚组火山岩中,与地层整合接触。铁成矿阶段黄铁矿钴含量及 Co/Ni 比值特征显示,松湖铁矿床的铁成矿作用受火山活动制约,是一个与火山岩有关的沉积型铁矿床,其形成温度为 270℃ ~ 325℃。

(2)矿相学及显微结构研究显示,松湖铁矿床后期叠加了铜-钴矿化作用,形成了相当数量的黄铜矿和钴黄铁矿,构成了伴生铜和钴矿化。钴黄铁矿钴含量及 Co/Ni 比值特征显示,松湖铁矿床后期铜-钴矿化作用与岩浆活动有关。

致谢 本文的野外考察和资料收集得到新疆维吾尔自治区 305 项目办公室和新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队的大力支持,在样品分析及成文过程中得到中国科学院广州地球化学研究所陈林丽女士和白正华研究员的热情帮助,在成文过程中得到陈衍景教授的指导,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Abraitis PK, Patrick RAD and Vaughan DJ. 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: A review. *International Journal of Mineral Processing*, 74:41-59
- Arehart GB, Chrysosoulis SL and Kesler SE. 1993. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: Implications for depositional processes. *Economic Geology*, 88(1): 171-185
- Arehart GB, Eldridge CS, Chrysosoulis SL and Kesler SE. 1993. Ion microprobe determination of sulfur isotope variations in iron sulfides from the Post/Betze sediment-hosted disseminated gold deposit, Nevada, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57:1505-1519
- Bajwah ZU, Secombe PK and Offler R. 1987. Trace element distribution, Co/Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia. *Mineralium Deposita*, 22:292-300
- Bralia A, Sabatini C and Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. *Mineralium Deposita*, 14:353-374
- Brill BA. 1989. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn Deposit, Australia. *Canadian Mineralogist*, 27:263-274
- Butler IB and Rickard D. 2000. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15):2665-2672
- Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*, 23:471-485
- Chen TT. 1978. Colloform and framboidal pyrite from the Caribou deposit New Brunswick. *Canadian Mineralogist*, 16:9-15
- Chenery S, Cook JM, Styles M and Cameron EM. 1995. Determination of the three-dimensional distributions of precious metals in sulphide minerals by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAMP-ICP-MS). *Chemical Geology*, 124:55-65
- Cheng B, Zhang FX and He GF. 2006. Genesis and types of the Yangshan superlarge micro-disseminated gold deposit, Wenxian, Gansu, China. *Geological Bulletin of China*, 25(11):1354-1360 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Xiao WJ and Zang JJ. 2008. Ore-system as geodynamic probe. *Geology in China*, 35(6):1059-1073 (in Chinese with English abstract)
- Clark C, Crguric B and Mumm AS. 2004. Genetic implications of pyrite chemistry from the Palaeoproterozoic Olary Domain and overlying Neoproterozoic Adelaidean sequences, northeastern South Australia. *Ore Geology Reviews*, 25:237-257
- Cook NJ and Chrysosoulis SL. 1990. Concentrations of invisible gold in the common sulfides. *Canadian Mineralogist*, 28:1-16
- Fleischer M. 1955. Minor elements in some sulfide minerals. *Economic Geology*, 2:970-1024
- Fu SH, Gu XX, Wang Q *et al.* 2004. The typomorphic characteristics of gold-bearing pyrites from Shuiyindong gold deposit, SW Guizhou. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(1):75-80 (in Chinese with English abstract)
- Hawley JE and Nichol I. 1961. Trace elements in pyrite, pyrrhotite, and chalcopryrite of different ores. *Economic Geology*, 56(3):467-487
- Hu CY. 2001. Characteristics of trace elements, thermoelectricity and crystal form of pyrite. *Geoscience*, 15(2):238-241 (in Chinese with English abstract)
- Huston DL, Sie SH, Suter GF, Cooke DR and Both RA. 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopryrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta ³⁴S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90:1167-1196
- Kanehira K and Bachinski D. 1967. Framboidal pyrite concentric textures in ores of the Tilt Cove mine, northeastern New-foundland. *The Canadian Mineralogist*, 9:124-128
- Li J, Chen YJ, Li QZ and Tang GQ. 2004. Hydrothermal metallogeny of

- the Shangong gold deposit, East Qinling: Evidence from mineralogical study. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 28 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Li J, Chen YJ and Liu YX. 2004. Typomorphic characteristic of pyrite from the lode gold deposits in north China craton: Implications for fluid mineralization. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 93 – 102 (in Chinese with English abstract)
- Liu DH, Lu HZ and Xiao XM. 2007. Oil-bearing fluid inclusion and its application in petroleum exploration and development. Guangdong: Guangdong Science and Technology Press (in Chinese with English abstract)
- Loftus-Hills G and Solomon M. 1967. Cobalt, nickel and selenium in sulphides as indicators of ore genesis. *Mineralium Deposita*, 2: 228 – 242
- Moh GH. 1980. Ore syntheses, phase equilibria studies and applications. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, 139: 114 – 154
- Monteiro LVS, Xavier RP, Hitzman MW *et al.* 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34: 317 – 336
- Oberthur T, Cabri LJ, Weiser TW, McMahon G and Muller P. 1997. Pt, Pd, and other trace elements in sulfides of the main sulfide zone, Great Dyke, Zimbabwe: A reconnaissance study. *Canadian Mineralogist*, 35: 597 – 609
- Steinike K. 1963. A further remark on biogenic sulfides: Inorganic pyrite spheres. *Economic Geology*, 58: 998 – 1000
- Vaughan DJ and Craig JR. 1978. Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Walshe JL and Solomon M. 1981. An investigation into the environment of formation of the volcanic-hosted Mt. Lyell copper deposits, using geology, mineralogy, stable isotopes and a six-component chlorite solid solution model. *Economic Geology*, 76: 246 – 284
- Walshe JL. 1986. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems. *Economic Geology*, 81: 681 – 703
- Wei MX. 1986. Cell parameter equation of pyrite and its genetic implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 6(3): 245 – 251 (in Chinese with English abstract)
- Wells JD and Mullens TE. 1973. Gold-bearing arsenian pyrite determined by microprobe analysis, Cortez and Carlin gold mines, Nevada. *Economic Geology*, 68: 187 – 201
- Wilkin RT and Barnes HL. 1997. Formation processes of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2): 323 – 339
- Xu G. 1998. Geochemistry of sulphide minerals at Dugald River, NW Queensland, with reference to ore genesis. *Mineralogy and Petrology*, 63: 119 – 139
- Yang JH, Ma HM, Zhou XH and Feng BZ. 2000. Genesis and significance of component zones in pyrites from Penglai gold deposit, Shandong Province. *Chinese Journal of Geology*, 35(2): 168 – 174 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZS, Li HY, Gao ZM and Wang ZM. 2000. A study on thermoelectricity of pyrite from superhigh-grade gold deposits, northern Jiaodong. *Mineral deposits*, 19(4): 307 – 314 (in Chinese with English abstract)
- Yuan T. 2003. Contrast of geological characteristics between Motuoshala iron (manganese) deposit and Shikebutai iron deposit in West Tianshan mountain of Xinjiang Autonomous Region. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18: 88 – 92 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 程斌, 张复新, 贺国芬. 2006. 甘肃文县地区阳山超大微细浸染型金矿床的成因与类型. *地质通报*, 25(11): 1354 – 1360
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, F Pirajno, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085 – 2108
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35(6): 1059 – 1073
- 付绍洪, 顾薛祥, 王乾等. 2004. 黔西南水银洞金矿床载金黄铁矿标型特征. *矿物学报*, 24(1): 76 – 80
- 胡楚雁. 2001. 黄铁矿的微量元素及热电性和晶体形态分析. *现代地质*, 15(2): 238 – 241
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 唐国军. 2004. 东秦岭上官金矿流体成矿作用. *矿物学研究*. *矿物岩石*, 24(3): 28 – 35
- 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 2004. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程. *矿物岩石*, 24(3): 93 – 102
- 刘德汉, 卢焕章, 肖贤明. 2007. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用. 广东科技出版社
- 魏明秀. 1986. 黄铁矿晶胞参数计算及某些杂质含量分布特征. *矿物学报*, 6(3): 245 – 251
- 杨进辉, 马红梅, 周新华, 冯本智. 2000. 山东蓬莱金矿黄铁矿成分环带的成因及成矿意义. *地质科学*, 35(2): 168 – 174
- 杨竹森, 李红阳, 高振敏, 王志敬. 2000. 胶东北部超高位金矿黄铁矿热电性研究. *矿床地质*, 19(4): 307 – 314
- 袁涛. 2003. 新疆西天山莫托沙拉铁(锰)矿床与式可布台铁矿床地质特征对比. *地质找矿论丛*, 18: 88 – 92