

新疆阿吾拉勒地区查岗诺尔铁矿床铜矿化的成因探讨*

牛贺才^{1**}, 罗 勇², 李宁波^{1,3}, 姜玉航^{1,3}, 杨武斌^{1,3}, 单 强¹, 于学元¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640; 2. 南阳师范学院环境科学与旅游学院, 南阳, 473061; 3. 中国科学院研究生院, 北京, 100049)

摘 要: 与西天山阿吾拉勒石炭纪火山活动有关的铁矿床普遍发育含铜的方解石脉, 在局部地段构成伴生或独立铜矿体. 钻孔揭露显示, 查岗诺尔铁矿体内含铜方解石脉穿插在磁铁矿、石榴石、阳起石和绿帘石中, 其形成明显晚于铁矿化. 流体包裹体研究显示, 查岗诺尔铁矿床后期铜矿化的成矿流体应为 $\text{CO}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ 体系的超临界流体. 这种富含 CO_2 的超临界流体不但具有较强的渗透性, 而且对铜等成矿元素具有较高的溶解度, 可以携带巨量成矿元素进行长距离迁移. 由于体系的温度及 CO_2 和 H_2S 等挥发分含量降低, 铜等成矿元素在流体中的溶解度明显下降并沉淀成矿. 碳、氧位素分析结果显示, 查岗诺尔铁矿床晚期铜矿化与区内早二叠世的钾质—超钾质岩浆活动有关.

关键词: 查岗诺尔铁矿床, 铜矿化, 流体包裹体, 碳、氧同位素, 超临界流体

Study on the Cu-mineralization of the Chagangnuoer Fe-deposit in the Awulale area, Xinjiang

Niu He-Cai¹, Luo Yong², Li Ning-Bo^{1,3}, Jiang Yu-Hang^{1,3}, Yang Wu-Bin^{1,3},
Shan Qiang¹, Yu Xue-Yuan¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou, 510640, China;
2. School of Environmental Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang, 473061, China;
3. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China)

Abstract: The Cu-bearing calcite veins, usually in association with the accessory or independent Cu mineralization, were widespread in Fe-deposits associated with Carbonaceous volcanics in the Awulale Mountains, western Tianshan. The drillings show that the calcite veins occurred significantly later than the Fe-mineralization, with cutting across the magnetite, garnet, actinolite and epidote. This study investigated the fluid inclusions forming after the Fe-mineralization in the Chagangnuoer deposit. The results suggest that the Cu-mineralization fluid was a supercritical fluid of $\text{CO}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$. Such CO_2 -rich fluid was of high permeability and solubility in Cu, and of high ability to transfer abundant ore-forming elements over a long distance. As the temperature down to

* 基金项目: 国家自然科学基金(41040029, 41173040)

收稿日期: 2011-10-08

** 通讯联系人, E-mail: niuhc@gig.ac.cn

280 °C~240 °C, the fluid would change into sault solution. The solubility would drop and the ore-forming elements would precipitate, since the decrease of temperature and volatiles of CO₂ and H₂S. C—O isotopes indicate that the Cu-mineralization related fluids of the Chagangnuoer Fe deposit were derived from the Permian potassic and shoshonitic magmatism.

Key words: Chagangnuoer Fe-deposit, Cu-mineralization, fluid inclusion, C—O isotopes, supercritical fluid, Xinjiang

自2005年以来,阿吾拉勒地区东段铁矿床的勘探取得了突破性进展,继确定查岗诺尔矿床和备战矿床为大型铁矿床之后,相继发现了备战、智博、敦德、雾岭、松湖、松湖南和坎苏等与火山活动有关的大中型铁矿床,新增铁矿石储量9亿多吨,远景资源量超过20亿吨,使该地区成为我国一处重要的大型铁资源开发基地。根据矿床成因,可以将上述矿床分成两类,一类是与铁矿浆作用有关的铁矿床,以查岗诺尔铁矿床为代表^[1],包括备战、智博和敦德等铁矿床,它们明显受火山机构的控制,成矿母岩与基性火山岩有关;另一类则为与火山活动有关的沉积型铁矿床,以松湖铁矿床为代表^[2],包括松湖南和坎苏等铁矿床。无论是在查岗诺尔铁矿床、还是在松湖铁矿床中均分布着铜矿化,在局部地段构成伴生或独立铜矿体,其金属矿物以黄铁矿和黄铜矿为主,而脉石矿物则以方解石为主,石英含量极少,呈含黄铜矿及黄铁矿的方解石脉穿插在铁矿体中,在时序上晚于铁矿化。铜矿化的成因机制及与铁矿化的关系对于揭示区域成矿作用规律,指导区域找矿均具有重要的启示意义。本文拟通过含铜矿化方解石脉的流体包裹体及方解石C、O同位素组成的研究,确定查岗诺尔铁矿床中铜富集的物理化学条件,探讨其成矿物质来源,进而揭示铜富集与铁矿化的关系。

1 地质背景及样品特征

查岗诺尔铁矿位于阿吾拉勒山东端的和静县巩乃斯乡班禅沟内,海拔为3205~3397 m。查岗诺尔铁矿床和相邻的智博铁矿床均受同一

个破火山口的控制,智博铁矿床位于破火山口的中心,而查岗诺尔矿床则位于破火山口的西北缘。查岗诺尔矿区内断裂构造十分发育,表现为环状和辐射状,它主要受火山机构的控制。查岗诺尔铁矿床产在大哈拉军山组第二亚组中,该亚组主要由层状富铁玄武岩和玄武安山岩、英安质和流纹质火山熔岩及沉积岩组成,也含有少量的薄层碳酸盐。富铁玄武岩—流纹岩组合产在该亚组的中部,而查岗诺尔大型铁矿床则产在该亚组的上部(图1)。目前,已探明的工业储量达到2.5亿吨,其远景储量将在4亿吨以上。查岗诺尔矿床矿化蚀变作用十分发育,主要是石榴石化、阳起石化、绿帘石化、黄铁矿化和硅化。在地表的围岩蚀变带被断裂带所限制,呈北东—南西向展布,其长延伸1800余米,而宽为500至600 m。根据蚀变矿物的组成,自东而西分出石榴石岩带和阳起石岩带(图1),而阳起石岩带又可细分成阳起石—绿帘石岩和阳起石—磁铁矿亚带。此外,矿区内还分布着少量的蚀变大理岩。冯金星等通过对矿石组构、成因、矿物共生组合和产出特征研究,将查岗诺尔铁矿床划分为矿浆和热液两个成矿期^[1],在矿浆成矿期矿物组合相对简单,以磁铁矿和石榴石为主,含有少量的阳起石和绿帘石;而在热液成矿期矿物组合较为复杂,不但含有磁铁矿、石榴石,还含有阳起石、绿帘石、黄铁矿、石英等矿物。

钻孔揭露显示,在查岗诺尔铁矿体内分布着方解石脉,该类方解石穿插在磁铁矿、石榴石、阳起石和绿帘石中(图2),该类方解石脉普遍含有黄铜矿和黄铁矿等硫化物。矿床地质研

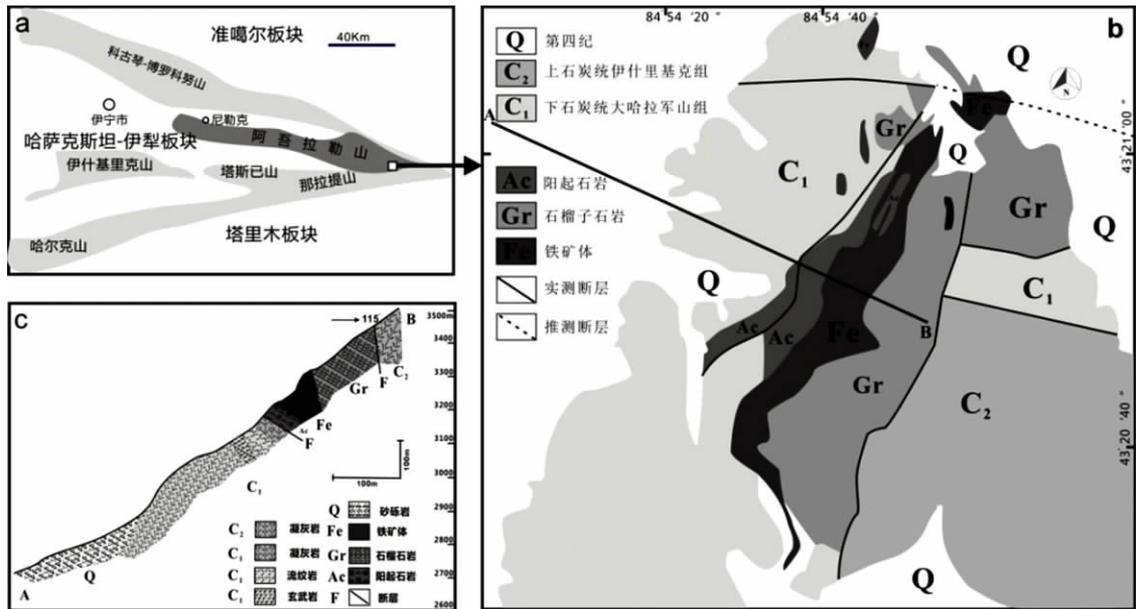


图 1 查岗诺尔铁矿床地质图

Fig. 1 The geologic map of the Chaganuoer Fe-deposit in the Awulale area

a: 查岗诺尔铁矿床的构造背景图; b: 查岗诺尔铁矿床的矿区地质图; c: 查岗诺尔铁矿床的矿区剖面图

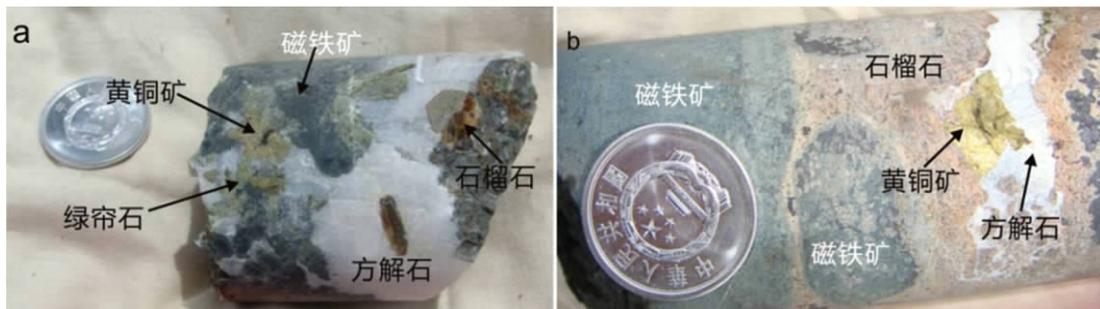


图 2 查岗诺尔铁矿床中含铜矿化的方解石脉

Fig. 2 The Cu-bearing calcite veins in the Chaganuoer Fe deposit

a: 含黄铜矿的方解石脉穿插在由石榴石、磁铁矿和绿帘石组成的铁矿石中; b: 含黄铜矿的方解石脉穿插在石榴石脉体中, 在石榴石脉体中含有角砾状的磁铁矿

究显示,在查岗诺尔铁矿床中铜矿化与区内其它铜矿床(点)一样,具有贫硅(石英含量极少)富碳酸盐(脉石矿物几乎全是方解石)特征,且铜矿化明显晚于铁矿化. 本文拟对这种含铜矿化的方解石脉进行流体包裹体显微测温和 C、O 同位素研究,探讨含铜矿化方解石脉形成的物理化学条件及成矿物质来源,进而论述其成因.

2 包裹体特征及显微测温结果

2.1 包裹体岩相学特征 在查岗诺尔含铜矿化方解石脉的方解石中包裹体均为气液两相的流体包裹体,根据室温条件下的气相所占的比例将流体包裹体分为富气相流体包裹体、富液相流体包裹体和纯液相流体包裹体三种类型.

富气相流体包裹体(VL):该类包裹体气相所占比例大,约占整个包裹体体积的 50% 以上

(图 3A), 该类流体包裹体的大小介于在 $10\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 数量相对较少, 形状以方

形和不规则状为主, 在主矿物中呈孤立状分布, 为原生包裹体。

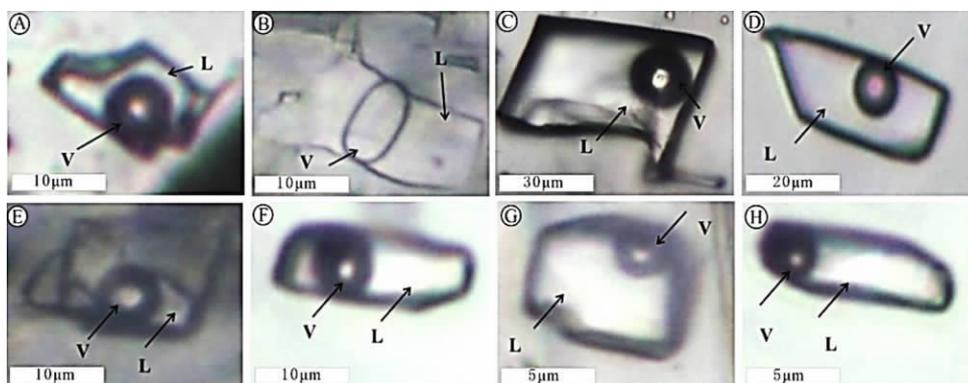


图 3 查岗诺尔铁矿床方解石中流体包裹体的显微照片

Fig. 3 Micrographs of fluid inclusion in the calcite vein from the Chagangnuoer Fe-deposit

富液相流体包裹体(LV): 该类包裹体气相所占比例较小, 其体积一般小于整个包裹体体积的 25%, 根据相态比又可以细分为 LVa 和 LVb 两个亚类:

LVa: 该类流体包裹体在主矿物方解石中分布较多且体积变化较大, 其最大直径可以从 $10\ \mu\text{m}$ 变化到 $100\ \mu\text{m}$, 气体约占包裹体体积的 10%~20% (B, C, D, E, F); 该类包裹体以长条状、椭圆状和不规则状为主; 包裹体呈孤立状或群状分布在主矿物中, 为原生包裹体。

LVb: 该类包裹体数量较多, 其气体约占整个包裹体体积的 5%~8%, 包裹体最大直径一般小于 $15\ \mu\text{m}$ (图 3G, H); 该类包裹体以长条状和不规则状为, 在主矿物中呈孤立或群状分布, 为原生流体包裹体。

纯液相包裹体(L): 该类包裹体为单相包裹体, 在常温条件下不分离出气体。该类包裹体相对较小, 其最大直径一般不超过 $10\ \mu\text{m}$, 主要集中在 $5\ \mu\text{m}$ 以下, 包裹体呈线状排列, 主要受方解石中的裂隙控制, 为次生流体包裹体。

2.2 包裹体的显微测温结果 显微测温研究在中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室用 Linkam MDS 600 型冷热台完成。仪器测定温度范围为 $-196\ ^\circ\text{C}\sim 600\ ^\circ\text{C}$, 测

量精度在 $-100\ ^\circ\text{C}\sim 25\ ^\circ\text{C}$ 范围内为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$, $25\ ^\circ\text{C}\sim 400\ ^\circ\text{C}$ 范围内为 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$, $400\ ^\circ\text{C}$ 以上为 $\pm 2\ ^\circ\text{C}$ 。测试升温速率一般为 $0.2\ ^\circ\text{C}/\text{min}\sim 5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

流体包裹体显微测温结果显示, 方解石富气相流体包裹体和富液相流体包裹体的水石盐的初始熔化温度介于 $-38.2\ ^\circ\text{C}\sim -29.7\ ^\circ\text{C}$ 之间, 它高于 $\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系的共结温度, 但低于 $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系的共结温度^[3], 暗示其流体应为 $\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ 复杂体系。富气相流体包裹体的冰点温度从 $-0.7\ ^\circ\text{C}$ 变化到 $-9.9\ ^\circ\text{C}$, 相应的盐度从 2.57 wt% NaCl eqv. 变化到 13.8 wt% NaCl eqv.; LVa 型流体包裹体的冰点温度从 $-4.8\ ^\circ\text{C}$ 变化到 $-15.1\ ^\circ\text{C}$, 其盐度则从 7.9 wt% NaCl eqv. 变化到 25.6 wt% NaCl eqv.; LVb 型流体包裹体的冰点温度从 $-0.7\ ^\circ\text{C}$ 变化到 $-14.7\ ^\circ\text{C}$, 其盐度则从 1.22 wt% NaCl eqv. 变化到 18.4 wt% NaCl eqv.。

显微测温结果还显示, 不同类型流体包裹体的均一温度有明显差异(图 4)。富气相流体包裹体的均一气相的温度从 $280\ ^\circ\text{C}$ 变化到 $360\ ^\circ\text{C}$, 主要集中在 $320\ ^\circ\text{C}$ 至 $360\ ^\circ\text{C}$ 区间; LVa 型流体包裹体的均一温度从 $120\ ^\circ\text{C}$ 变化到

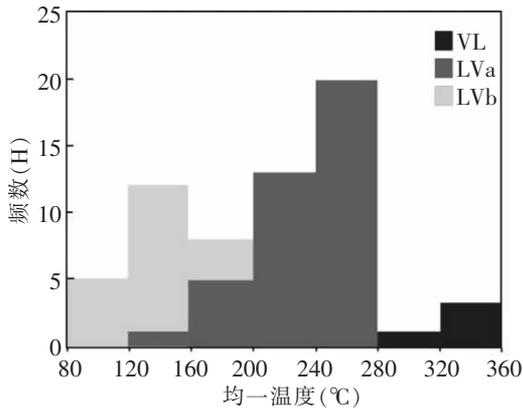


图 4 方解石中流体包裹体均一温度频数直方图
Fig. 4 Histogram of homogenization temperatures for the fluid inclusions from the calcite vein in the Chaganguoer Fe deposit

280 °C,主要集中在 240 °C 至 280 °C 区间;而 LVb 型流体包裹体的均一温度从 80 °C 变化到 200 °C,主要集中在 120 °C 至 160 °C 区间。

3 方解石的 C 和 O 同位素组成

方解石的碳、氧稳定同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成. 将挑纯的方解石的单矿物用玛瑙研钵研成 200 目,在烘箱中烘干,然后在真空中于 25 °C 条件下,使方解石与 100% 的正磷酸反应释放 CO₂. 获得的 CO₂ 气体在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室 GV IsoPrime II 型稳定同位素质谱仪上测定 C、O 的组成,δ¹³C 的分析精度好于 0.05‰,δ¹⁸O 的分析精度好于 0.08‰. 用中国的国家一级碳酸盐碳、氧同位素参考物质 GBW04416 和 GBW04417 作为工作标准,GBW04416 的 δ¹³C_{PDB} 和 δ¹⁸O_{PDB} 值分别为 1.61‰ 和 -11.59‰,GBW04417 的 δ¹³C_{PDB} 和 δ¹⁸O_{PDB} 值分别为 -6.06‰ 和 -24.12‰. 方解石样品的 δ¹⁸O_{PDB} 值和 δ¹³C_{PDB} 直接从 CO₂ 测得. 在转变 δ¹⁸O_{PDB} 与 δ¹⁸O_{SMOW} 时,使用 δ¹⁸O_{SMOW}=1.03091 δ¹⁸O_{PDB}+30.91 [4].

对 9 个方解石进行了 C 和 O 同位素组成的分析,结果见表 1. 查岗诺尔含铜矿化方解石

脉中方解石的碳同位素组成相对较稳定,其 δ¹³C_{PDB} 从 -2.43‰ 变化到 0.10‰,相对于地幔碳同位素值 (δ¹³C_{V-PDB} = -5 ± 2‰) 较高,与沉积碳酸盐碳同位素组成十分接近;与碳同位素相比,方解石的氧同位素组成更加稳定,其 δ¹⁸O_{SMOW} 从 9.09‰ 变化到 10.99‰,它与火山岩氧同位素值 5‰~15‰ 也基本一致 [5].

表 1 查岗诺尔铁矿床与铜矿化有关方解石的碳和氧同位素组成

Table 1 C-O isotopes compositions for the calcite related with the Cu-mineralization in the Chaganguoer Fe deposit

样品	δ ¹³ C _{PDB} ‰	δ ¹⁸ O _{PDB} ‰	δ ¹⁸ O _{SMOW} ‰
PD16	-0.75	-21.06	9.20
PD16-1	0.22	-20.71	9.56
PD16-2-4	-0.80	-21.6	8.64
PD16-2-8	0.10	-21.16	9.09
11CG15-6	-2.43	-21.49	8.76
11CG10-5B	-1.17	-19.32	10.99
11CG15D	-0.35	-20.21	10.07
11CG15A	-0.72	-20.63	9.64
11CG15C	-0.55	-20.63	9.64

4 讨论

4.1 查岗诺尔与铜矿化有关成矿流体的性质及成矿条件 查岗诺尔铁矿床内与铜矿化有关的方解石原生流体包裹体的均一温度范围较大,从 80 °C 变化到 360 °C,并表现出三个峰值,它们分别对应着 VL、LVa 和 LVb 三种类型的流体包裹体,而相对稳定的碳、氧同位素组成则排除了这种富碳的含铜成矿流体具有不同来源可能. 也就是说尽管温度具有较大的变化,但不同类型包裹体所捕获的流体为同源流体.

测温结果显示,方解石中 VL 型包裹体的均一温度上限可达 360 °C,考虑到压力效应,其捕获温度应更高,这暗示查岗诺尔与铜矿化有关的最初原始成矿流体可能是一种高温的超临界流体. 显微测温研究同时还显示,这种富含气

相的流体包裹体也具有相对较高的盐度,其最高可达 13.8 wt% NaCl eqv. (图 5),其流体密度介于 $0.61 \text{ g/cm}^3 \sim 0.80 \text{ g/cm}^3$ 之间. 尽管本研究中尚未发现极富 CO_2 的流体包裹体,但考虑到铜矿床的脉石矿物以方解石为主(几乎不含石英),且包裹体的主矿物为方解石作者认为,查岗诺尔矿床与铜矿有关的超临界流体应为 $\text{CO}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ 体系. 种低密度的超临界流体具有很高的渗透性,它可以长距离迁移,远离其源区. 随着温度和压力的下降,这种初始富含 CO_2 及水蒸汽的超临界流体将演化为高盐度和中低盐度的富液相流体(LVa 和 LVb 型流体包裹体包捕获的流体).

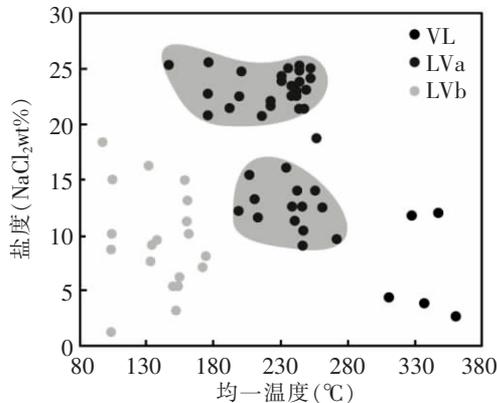


图 5 方解石中流体包裹体均一温度—盐度协变图

Fig. 5 Variation diagram of salinity with homogenization temperatures for fluid inclusions from the Chagnuor Fe deposit

长期以来人们普遍认为在热液系统中金属元素以络合物形式在水溶液中迁移^[6,7],然而上个世纪晚期这种传统观点遇到了挑战. Henley and McNabb (1978)在研究斑岩型矿床成矿模式时首次提出了水蒸汽柱迁移成矿元素的概念^[8],随后 Heinrich *et al.* (1992)在对澳大利亚 Mole 花岗岩进行研究时,发现气相流体包裹体所捕获流体的成矿元素(Cu)含量明显高于共生的高盐度流体^[9]. 上世纪末至本世纪初更多的学者通过流体包裹体的研究进一步证实成矿元素(Cu)在蒸汽相中具有较高的含量^[10~13]. Zajacz and Halter(2009)在智利 Vil-

larrica 地区岛弧玄武—安山岩的斜长石斑晶的硅酸盐熔体和气体包裹体中发现了富硫和铜但贫氯的气相,认为从基性岩浆分离出的气相可以在不同次火山储库间传输硫和铜,并对斑岩矿床形成产生重要影响^[14]; Kim *et al.* (2011)研究结果显示,富含硫的火山喷发气体对铜具有较强的搬运能力^[15]. 近年来,一些学者发现以 CO_2 或 CH_4 为主要成分的非水气相可以有效地传输成矿元素^[7,16~20]. Lai and Chi (2007)在安徽铜陵凤凰山矽卡岩型 Cu—Fe—Au 矿床中发现了富 CO_2 流体包裹体含有黄铜矿子晶,并论证了贫水富 CO_2 的气体可以有效地传输成矿元素铜^[7].

显然,这种富含 CO_2 及水蒸汽的超临界流体不但具有较高渗透性,而且对铜等成矿元素具有较强的搬运能力,它可以携带着铜等成矿元素进行长距离迁移.

与铜矿化有关方解石中, LVa 型流体包裹体的均一温度(最低捕获温度)主要集中在 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 区间,而盐度却有较大的变化范围,呈现出 $20 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.} \sim 25 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$ 和 $10 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.} \sim 15 \text{ wt}\% \text{ NaCl eqv.}$ 两个不连续区间,在均一温度—盐度协变图中其投影点构成两个集中区(图 5). 这是由于分析数据有限所致,还是暗示成矿流体曾经发生过相分离有待今后进一步探讨. VL 型包裹体和 LVa 型流体包裹体的显微测温结果表明,查岗诺尔矿床与铜矿化有关的原始超临界在 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 区间转变成高密度盐水溶液. 根据 Heinrich *et al.* ^[9],同时考虑到在盐水溶液(与水蒸汽相比)中 CO_2 , H_2S 等挥发分的溶解度明显下降,笔者有理由推测在这种转变过程中成矿元素铜在流体中的溶解度发生明显的下降,并沉淀形成铜矿化. 因此,查岗诺尔矿床铜矿化的最低形成温度应为 $240 \text{ }^\circ\text{C} \sim 280 \text{ }^\circ\text{C}$,与阿吾拉勒地区西段的琼布拉克铜矿床的形成温度相近^[21].

4.2 查岗诺尔与铜矿化有关成矿流体的来源

查岗诺尔与铜矿化有关方解石的碳、氧同位素组成与幔源碳酸岩的碳、氧同位素组成有

明显差异,在 $\delta^{18}O_{SMOW} - \delta^{18}O_{PDB}$ 图解中它们的投影点均落在沉积碳酸盐区域附近(图 6).

在查岗诺尔东北部的布谷拉克地区,作者发现了早二叠世侵位的岩脉状钾质-超钾质岩浆岩,它与铜矿化十分关系密切^[22]. 在布谷拉克钾质-超钾质岩浆岩内普遍存在着球状或椭圆状的分凝体,即“眼斑”^[23,24]. “眼斑”的直径一般在数毫米左右,其内主要为方解石,但其边缘被绿泥石交代(图 7a). 根据 Cathelineau 的经验方程^[25],绿泥石的形成温度应介于 310 °C ~ 330 °C 之间,表明方解石的形成温度应明显高于 310 °C. 作者在布谷拉克钾质-超钾质岩浆岩“眼斑”的方解石内发现了数量众多的流体-熔体包裹体(图 7b, c, d). 初步岩相学研究显示,包裹体的固体矿物主要是方解石,可能含有铁氧化(红色矿物,图 7d)和少量的长石等硅酸盐矿物. 大量流体-熔体包裹体的存在表明布谷拉克钾质-超钾质岩浆岩“眼斑”中方解石为熔体

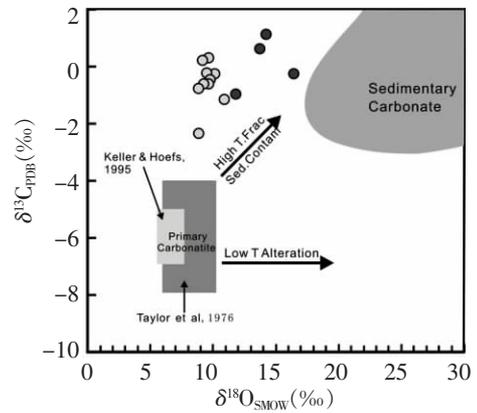


图 6 方解石的碳、氧同位素组成图解(原图据[28])
Fig. 6 C-O isotopic discrimination diagram for the calcite from the Chaganuoer Fe deposit (after [28])
灰色充填的圆圈为查岗诺尔与铜矿化有关的方解石;深灰色充填的圆圈为钾质-超钾质岩石中“眼斑”状方解石

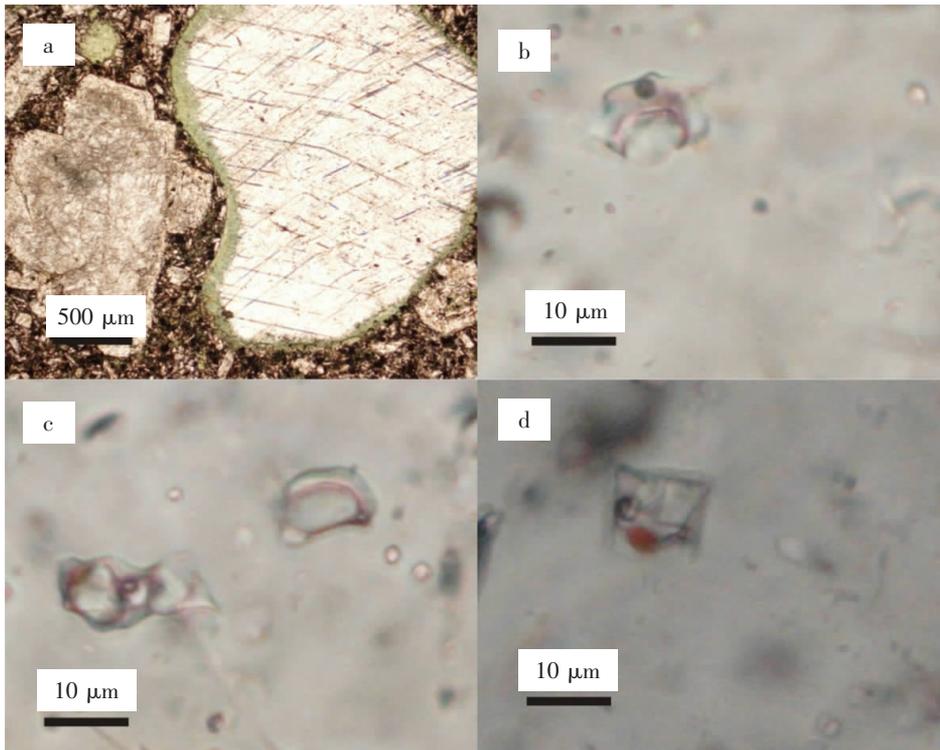


图 7 布谷拉克钾质-超钾质岩石的“眼斑”方解石(a)及其中的流体-熔体包裹体(b, c, d)
Fig. 7 Melt-fluid inclusion and the hosted calcite from the Bugula potassic and shoshonitic rock

或富含挥发分熔融固结的产物。“眼斑”或“球状”等结构特征表明布谷拉钾质—超钾质岩浆岩中碳酸盐熔体是岩浆不混溶作用的产物^[26~28]。

同位分析结果显示,这类方解石的具有相对较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成,在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 图解中它们的投影点落在查岗诺尔与铜矿化有关方解石的区域内(图6),与沉积碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成十分相近。

已有的研究显示,岛弧地区火山岩较大洋中脊火山岩含有更丰富的 CO_2 ^[30,31],同时也证实 CO_2 对于岛弧岩浆形成具有重要的控制作用^[32]。碳同位素组成估算显示,在岛弧火山活动中喷发的 CO_2 有 80% 来自随大洋板块一起俯冲至地幔的海相沉积碳酸盐和有机物^[31]。为数不多的金伯利岩中碳酸盐熔融包裹体及地幔橄榄岩包体中脉状和球状方解石碳、氧及锶同位素分析结果证实,地壳上的沉积碳酸盐及有机物确实可以随俯冲板块一起进入并交代上地幔^[32,33]。实际上,在大多数的俯冲带内俯冲板片都能将沉积碳酸盐带到上地幔^[34]。而俯冲进入上地幔的含碳酸盐的泥质岩和沉积碳酸盐对于钾质及钾质—超钾质岩浆岩的形成具有明显的控制作用,其中碳酸盐加入导致的体系的 X_{CO_2} 升高,从而影响原始岩浆碱和硅的含量^[35,36]。

岩石中广泛分布的“眼斑”状方解石充分显示区内钾质—超钾质岩浆岩富含 CO_2 。已有的研究显示, CO_2 在硅酸盐熔体内的溶解度与硅酸盐熔体的碱含量呈正相关, CO_2 在超钾质岩(石榴石响岩)的溶解度远远大于碧玄岩、玄武岩和流纹岩^[37~38]。大量熔融包裹体和流体—熔融包裹体的存在表明钾质—超钾质岩浆岩“眼斑”状方解石为熔体固结产物,而非后期低温蚀变产物,“眼斑”结构则揭示钾质—超钾质岩中的碳酸盐熔体是岩浆不混溶作用的产物^[26~28]。较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成证实“眼斑”状碳酸盐来自俯冲至地幔的沉积碳酸盐。

在西天山阿吾拉勒地区,钾质—超钾质岩浆岩十分发育,而查岗诺尔铁矿中与铜矿化有

关的方解石的碳、氧同位素组成与具有铜矿化的钾质—超钾质岩浆岩中“眼斑”状方解石的碳、氧同位素组成十分相似,使作者有理由推测查岗诺尔矿床与铜矿化有关的成矿流体来自其深部的钾质或超钾质岩浆岩,它与松湖铁矿床晚期铜矿化的成矿作用相似^[2]。

5 结 论

(1) 流体包裹体研究显示,查岗诺尔矿床中铜矿化的成矿的初始流体应为 $\text{CO}_2 - \text{CaCl}_2 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ 体系的超临界流体,这种富含 CO_2 的超临界流体不但具有较强的渗透性,而且对铜等成矿元素具有较高的溶解度,可以携带巨量成矿元素进行长距离迁移。显微测温研究显示,在 240°C 至 280°C 区间这种超临界流体转变成盐水溶液,由于体系的温度及 CO_2 和 H_2S 等挥发分含量降低使铜等成矿元素在流体中的溶解度明显下降并沉淀成矿;

(2) 查岗诺尔铁矿床中与铜矿化有关方解石具有相对较高的碳、氧同位素组成,它与阿吾拉勒地区广泛分布的钾质—超钾质岩石中具有岩浆成因物征的“眼斑”状方解石的碳、氧同位素组成十分相似。这种同位素组成特征的耦合关系暗示查岗诺尔矿床晚期铜矿化与区内早二叠世的钾质—超钾质岩浆活动有关,而区域内铁的成矿作用则主要与石炭纪的岩浆活动有关。

References

- [1] Feng J X, Shi F P, Wang B Y, *et al.* The syngenetic volcanogenic iron ore deposits in Awulale Metallogenetic Belt, Western Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 2010, 56~92. (冯金星,石福品,汪帮辉等. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿. 北京:地质出版社, 2010, 56~92).
- [2] Shan Q, Zhang B, Luo Y, *et al.* Characteristics and trace element geochemistry of pyrite from the Songhu iron deposit, Nilek County, Xingjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25:1456~1464 (单强,张兵,罗

- 勇等. 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. 岩石学报, 2009, 25: 1456~1464).
- [3] Lu H Z, Fan H R, Ni P, *et al.* Fluid Inclusions. Beijing: Science Press, 2004, 172~228. (卢焕章, 范宏瑞, 倪培等. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 2004, 172~228).
- [4] Coplen T B, Kendall C, Hoppo J. Comparison of stable isotope reference samples. *Nature*, 1983, 302: 236~238.
- [5] Zheng Y F, Chen J F. Stable isotope geochemistry. Beijing: Science Press. 2000, 155~208 (郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 2000, 155~208).
- [6] Williams-Jones A E, Heinrich C A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 2005, 100: 1287~1312.
- [7] Lai J Q, Chi G X. CO₂-rich fluid inclusions with chalcopyrite daughter mineral from the Fenghuangshan Cu—Fe—Au deposit, China; implications for metal transport in vapor. *Mineralium Deposita*, 2007, 42: 293~299.
- [8] Henley R W, McNabb A. Magmatic vapor plumes and groundwater interaction in porphyry copper emplacement. *Economic Geology*, 1978, 73: 1~20.
- [9] Heinrich C A, Ryan C G, Mernagh T P, *et al.* Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor — a fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, 1992, 87: 1566~1583.
- [10] Damman A H, Kars S M, Touret J L R, *et al.* PIXE and SEM analyses of fluid inclusions in quartz crystals from the K-alteration zone of the Rosia Poieni porphyry-Cu deposit, Apuseni mountains, Rumania. *European Journal of Mineralogy*, 1996, 8: 1081~1096.
- [11] Heinrich C A, Günther D, Audétat A, *et al.* Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 1999, 27: 755~758.
- [12] Ulrich T, Günther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature*, 1999, 399: 676~679.
- [13] Baker T, Van Achterberg E, Ryan C G, *et al.* Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit. *Geology*, 2004, 32: 117~120.
- [14] Zajacz Z, Halter W. Copper transport by high temperature, sulfur-rich magmatic vapor: Evidence from silicate melt and vapor inclusions in a basaltic andesite from the Villarrica volcano (Chile). *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282: 115~121.
- [15] Kim J, Lee K Y, Kim J H. Metal-bearing molten sulfur collected from a submarine volcano: Implications for vapor transport of metals in seafloor hydrothermal systems. *Geology*, 2011, 39: 351~354.
- [16] Yang K H, Scott S D. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, 1996, 383: 420~423.
- [17] Schmidt M A, Oberthür T, Vetter U, *et al.* High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralizations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids? *Mineralium Deposita* 1997, 32: 107~118.
- [18] Hanley J J, Mungall J E, Pettke T, *et al.* Ore metal redistribution by hydrocarbon-brine and hydrocarbonhalide melt phases, North Range footwall of the Sudbury igneous complex, Ontario, Canada. *Mineralium Deposita*, 2005, 40: 237~256.
- [19] Chi G, Williams-Jones A E, Dube B, *et al.* Carbonic vapor-dominated fluid systems in orogenic-type Au deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: A738.
- [20] Chi G, Dube B, Williamson K, *et al.* Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H₂O-poor, CO₂-dominated fluids. *Mineralium Deposita*, 2006, 40: 726~741.
- [21] Luo Y, Liao S P, Yang W B, *et al.* Fluid inclusion and carbon oxygen isotope studies in the Qiongbulake copper deposit from the Awulale Mountains, Xinjiang, China. *Mineral deposits*, 2011, 30: 547~556. (罗勇, 廖思平, 杨武斌)

- 等. 阿吾拉勒山琼布拉克铜矿床流体包裹体及碳氧同位素研究. *矿床地质*, 2011, 30: 547~556).
- [22] Yang W B, Niu H C, Luo Y, *et al.* 40Ar/39Ar age and geochemistry of the ultrapotassic magmatic rocks from Bugula in Nileke, Xinjiang and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26: 3065~3073 (杨武斌, 牛贺才, 罗勇等. 新疆尼勒克县布谷拉超钾质岩浆岩的40Ar/39Ar年龄和地球化学特征. *岩石学报*, 2010, 26: 3065~3073).
- [23] Mauger R L. Ocelli: transient disequilibrium features in a Lower Carboniferous minette near Concord North Carolina. *The Canadian Mineralogist*, 1998, 26: 117~132.
- [24] Deme'ny A, Ahijado A, Casillas R, *et al.* Crustal contamination and fluid/rock interaction processes in the carbonatites of Fuerteventura, (Canary Islands, Spain): A C, O, H isotope study. *Lithos*, 1998, 4: 101~115.
- [25] Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay minerals*, 1988, 23: 471~485.
- [26] Pyle J M, Haggerty S E. Silicate-carbonate liquid immiscibility in upper-mantle eclogites: Implications for natrosilicic and carbonatitic conjugate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 2997~3011.
- [27] Kogarko L N, Henderson C M B, Pacheco H. Primary carbonate system at 25 kbars and implications for carbonatite origin. Ca-rich carbonatite magma and carbonate-silicate-sulfide liquid immiscibility in the upper-mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 121: 267~274.
- [28] Seifert W, Thomas R. Silicate-carbonate immiscibility; a melt inclusion study of melilitite and wehrlite xenoliths in tephrite from the Elbe Zone, Germany. *Chemie der Erde*, 1995, 55: 263~279.
- [29] Hoernle K, Tilton G, Le Bas M J, *et al.* Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2002, 142: 520~542.
- [30] Sano Y, Williams S N. Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 2749~2752.
- [31] Marty B, Tolstikhin I N. CO₂ fluxes from mid-ocean ridges, arcs and plumes. *Chemical Geology*, 1998, 145: 233~248.
- [32] Ducea M N, Saleeby J, Morrison J, *et al.* Subducted carbonates, metasomatism of wedges, and possible connections to diamond formation: An example from California. *American Mineralogist*, 2005, 90: 864~870.
- [33] Van Achtebergh E, Griffin W L, Ryan C G, *et al.* Subduction signature for quenched carbonatites from the deep lithosphere. *Geology*, 2002, 30: 743~746.
- [34] Marin-Ceron M I, Moriguti T, Makishima A, *et al.* Slab decarbonation and CO₂ recycling in the Southwestern Colombian volcanic arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74: 1104~1121.
- [35] Peccerillo A. Relationships between ultrapotassic and carbonate-rich volcanic rocks in central Italy: petrogenetic and geodynamic implications. *Lithos*, 1998, 43: 267~279.
- [36] Avanzinelli R, Lustrino M, Mattei M, *et al.* Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins. *Lithos*, 2009, 113: 213~227.
- [37] Lowenstern J B. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 490~502.
- [38] Yu W, Ni P, Wang G G, *et al.* Evolution of ore-forming fluids of the Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Jinzhai, Anhui province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2012, 48(3): 240~255. (于文, 倪培, 王国光等. 安徽金寨县沙坪沟斑岩钼矿床成矿流体演化特征. *南京大学学报(自然科学)*, 2012, 48(3): 240~255).