

西藏拿顿铜(金)矿床岩矿相学、流体包裹体和地球化学特征与成矿作用研究

王松^{1,2)}, 赵元艺²⁾, 汪傲^{1,2)}, 李玉彬³⁾, 李小赛²⁾, 郭硕⁴⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所/国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室, 北京, 100037;

3) 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海格尔木, 816000;

4) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 300170

内容提要:拿顿矿床位于多龙矿集区西南部, 地处西藏成矿潜力巨大的班公湖-怒江成矿带上, 目前该矿床的勘查研究程度非常低, 仅在地表圈定出一个铜金矿体, 具有很大的找矿前景。本文对拿顿矿床的岩矿相学、流体包裹体及地球化学特征进行了研究。矿床中主要蚀变矿物有高岭土、绢云母、绿帘石、方解石、白云石等, 并存在银金矿、辰砂、方铅矿、闪锌矿等特征金属矿物组合。斑晶与胶结物中的流体包裹体均一温度集中在 222~360℃ 之间, 主要成分以 H₂O 为主, 含有少量 CO₂, 斑晶中包裹体的盐度为一组高盐度值(18.35%~26.7% NaCleqv.) 和一组低盐度值(0.18%~12.85% NaCleqv.), 胶结物中包裹体盐度值较低, 主要分布在 1.6%~12.5% NaCleqv. 区间内, 是在中低温、低盐度、氧化环境中形成, 成矿流体受大气降水的影响较为明显。花岗闪长斑岩中 SiO₂ 含量为 55.9%~65.67%, 平均值为 60.52%, Na₂O+K₂O 含量为 3.54%~5.563%, 平均值为 4.83%, 属于高钾钙碱性系列至钾玄岩系列。A/CNK 值为 1.63~2.93, 平均值为 2.6, 反映原岩为过铝质岩石。花岗闪长斑岩中稀土总量 ΣREE 变化范围为 29.09×10⁻⁶~98.73×10⁻⁶, 整体上具轻微负异常(δEu=0.7~1.12), 不具铈异常(δCe=0.84~0.99); 岩石富集大离子亲石元素(LILE; Rb, K), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE), 具岛弧火山岩的典型特征。矿床脉状黄铁矿中 Co/Ni 比值为 0.05~8.523, 平均值为 4.219, 为热液成因, 脉状黄铁矿多与石英脉共生, 为后期热液作用阶段的产物。矿床中黄铁矿 δ³⁴S 值的分布范围为-4.5‰~0.7‰, 平均值为-1.95‰, 黄铜矿的 δ³⁴S 值为-7‰~-3.3‰, 平均值为-5.43‰, 硫同位素 δ³⁴S 值偏小, 且为负值, 指示矿床中的硫受到了还原硫的影响。矿床中赋矿岩体为花岗闪长斑岩, 发育银金矿、辰砂等特征矿物组合, 流体包裹体具有斑岩型铜(金)矿床的中高温流体特征, 据此判断矿床成因类型为低硫型浅成低温热液矿床叠加斑岩型铜(金)矿床。根据因子分析, 矿床最早期的成岩作用形成早期的中酸性岩体; 矿床的成矿作用主要为热液铜金矿化作用, 随后发生铅锌矿化、磁铁矿化和钾化等作用, 在成矿后期有含碳酸盐热液的侵入。

关键词:岩矿相学; 低硫型浅成低温热液矿床; 拿顿铜(金)矿床; 西藏

多龙超大型铜金矿集区位于西藏阿里地区改则县境内, 地处班公湖-怒江成矿带西段, 羌塘地块南缘, 大地构造位置处于羌塘-三江复合板片南缘超覆地层单元之色哇陆缘拗陷中(Chen Hongqi et al., 2015)。班公湖-怒江成矿带发育有西藏最具潜力的斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床的成矿系列, 在该成矿带上有一大批金、铜、铁、铬、铅等金属矿床(点)产出, 且具有成带成群分布的特点(Tang Juxing et

al., 2014b; Chen Hongqi et al., 2015)。多龙(多不杂-波龙)矿集区产出一系列斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床, 主要包括地堡那木岗、拿顿、波龙、多不杂、荣那、拿若、铁格隆、尕尔勤等矿床(图 1c)。目前, 矿集区内已勘查到的铜金属资源量超过 1300×10⁴ t, 金资源量超过 400t(Song Yang et al., 2014; Li Xingkui et al., 2015)。从目前的勘查结果看, 多龙矿集区及其外围铜(金)多金属矿找矿远

注: 本文为中国地质调查局二级项目“西藏多龙矿床技术经济与环境综合评价”(编号 DD20160330)和国家重点基础研究发展计划“973”项目“青藏高原南部增生造山成矿系统发育机制”(编号 2011CB403103)联合资助成果。

收稿日期: 2016-11-21; 改回日期: 2017-04-11; 责任编辑: 周健。

作者简介: 王松, 男, 1992 年生。在读硕士研究生, 地质工程专业。Email: wangsong656@163.com。通讯作者: 赵元艺, 男, 1966 年生。研究员, 从事矿床学与地球化学研究。Email: yuanyizhao2@sina.com。

景可达 $2000 \times 10^4 \text{ t}$ 以上,已成为中国最具潜力的铜矿战略资源储备开发基地(Chen Hongqi et al., 2015)。前人对于多龙矿集区的研究工作主要集中在多不杂、波龙等早期勘查的矿床,在矿床成因、勘查模型、地质特征、同位素地球化学、成矿年代学等方面取得重要成果(She Hongquan et al., 2009; Xin Hongbo et al., 2009; Li Yubin et al., 2012a, 2012b; Zhu Xiangping et al., 2012; Wu Dexin et al., 2012),但对于拿顿铜(金)矿床的研究程度相对较低。

研究认为在青藏高原也存在寻找浅成低温热液矿床的巨大潜力(Qin Kezhang et al., 2007; Tang Juxing et al., 2014b)。在世界范围内,浅成低温热液矿床产出了许多的超大型矿床,世界上最大的十个银矿床中有四个均为低硫型浅成低温热液型矿床,其中包括世界上最大的银矿 Cerro Rico-Potosi (银的储量为 115000t Ag)(Laznicka, 2010)。但目前在多龙矿集区仅确定铁格隆南(荣那)矿床为高硫型浅成低温热液矿床(Tang Juxing et al., 2014a),这也是在多龙矿区发现的第一例超大型浅成低温热液矿床,为下一步在多龙矿集区寻找该类型的矿床提供了范例。前人依据“缺位找矿理论”,预测多龙矿集区尕尔勤、地堡那木岗是浅成低温热液型铜金矿床的进一步勘查评价区,色那、拿顿角砾岩筒是寻找独立高硫化型浅成低温热液金矿床的重要靶区(Tang Juxing et al., 2014b)。本文通过野外工作,结合光学显微镜、扫描电镜观察、流体包裹体的研究、主微量元素测试分析以及硫同位素的测试分析,详细描述了拿顿铜(金)矿床的地质特征、岩矿相学特征,研究了矿床的成矿物质来源,探究矿床成因和成矿作用。本文的研究成果可为下一步的勘查工作提供理论参考。

1 矿床地质

拿顿矿床位于多龙矿集区西南部,位于波龙矿床和地堡那木岗矿床之间,距波龙矿床约 3km,距地堡那木岗矿床约 6km,大地构造位置处于班公湖-怒江成矿带西段(图 1a, c)。班公湖-怒江成矿带主要展布在班公湖-怒江缝合带北侧,该成矿带属于特提斯-喜马拉雅成矿域,演化历史独特,具有多岛弧碰撞造山的特征,是西藏地区继冈底斯成矿带之后最具潜力的斑岩型-浅成低温热液型铜金矿成矿带(Duan Zhiming et al., 2013; Tang Juxing et al., 2014b; Qu Xiaoming et al., 2015; Cui Ning et

al., 2016)。该成矿带横贯青藏高原,东西延伸长逾 2000km,羌塘地块位于该带的北侧,南侧为冈底斯地块(Pan Guitang et al., 2004)。

矿区出露的地层主要为下侏罗统曲色组一段($J_1 q^1$),下白垩统美日切组下段($K_1 m^1$)及第四系(Q)。下侏罗统曲色组一段($J_1 q^1$)为矿区主要地层,分布在矿区中部及北部的大部分地区,岩性主要为深灰色粉砂质板岩、长石石英砂岩,下白垩统美日切组下段($K_1 m^1$)分布在矿区西部及西北部,岩性为安山岩、安山玢岩、安山质玄武岩;第四系分布在矿区南部,为全新统冲洪积(Qh^{pal}),分布于山麓沟口,由松散砾石、砂土组成,砾石磨圆度中等,分选差,大小混杂^①。

在矿区北部分布有近东西向断层,中部有北东向的断层通过。北东向的断层南段走向约 45° ,北段走向约 25° ,为一北西向倾斜的逆冲断层;东西向展布的断层走向 $265^\circ \sim 275^\circ$,断层面北倾,倾角 65° ,构造破碎带宽约 70m,断裂带内岩石普遍角砾岩化,局部地段糜棱岩化,具压扭性断层特点,该断层为成矿晚期的一条断层,将北东向断层错断,对矿体起破坏作用。在两断层的交汇部位,含矿花岗闪长斑岩体呈面状产出,是矿床成矿的有利部位,并可见强烈的褐铁矿化(图 1b)。矿区中裂隙发育,主要含矿裂隙分布在含矿斑岩和脆性围岩中,交错状网脉状裂隙很发育,裂隙宽度一般 $2 \sim 5 \text{ mm}$,延伸长度小于 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 。裂隙呈密集平行分组交叉状出现,裂面平直。主要充填物为含矿石英脉,其次为碳酸盐脉、硫酸盐脉,再次为绿泥石脉、钾长石脉等;次要含矿裂隙为含矿斑岩的原生冷缩裂隙,其裂面粗糙,宽度小于 2 mm ,延伸不大,产状零乱;无矿裂隙为成矿后的裂隙,裂隙面平直,呈密集平行状出现,无细脉充填^②。

矿区出露有花岗闪长斑岩、闪长玢岩、热液角砾岩、长石石英砂岩、火山碎屑岩。与矿化相关的岩体为花岗闪长斑岩,其呈略规则的椭圆形近东西向展布,主要分布于矿区北部,与围岩呈侵入接触关系,为主要成矿岩体。矿床的控矿因素主要是断裂构造,矿(化)体位于断层交汇部位,而且矿床裂隙发育,有利于含矿热液流通和金属矿物沉淀。目前在地表初步圈定铜金矿体一个,矿体长约 300m,宽约 150m,面积约 0.045 km^2 ,在地表较为完整,向下则形成明显的分支,形成数条细脉状矿体向下呈尖灭趋势,使矿体形成一椭圆筒状体。矿体中平均铜品位为 0.75% ,伴生金平均品位 1.45 g/t ,估算(333+334)铜金属资源量 $2.16 \times 10^4 \text{ t}$; (333+334)金资源

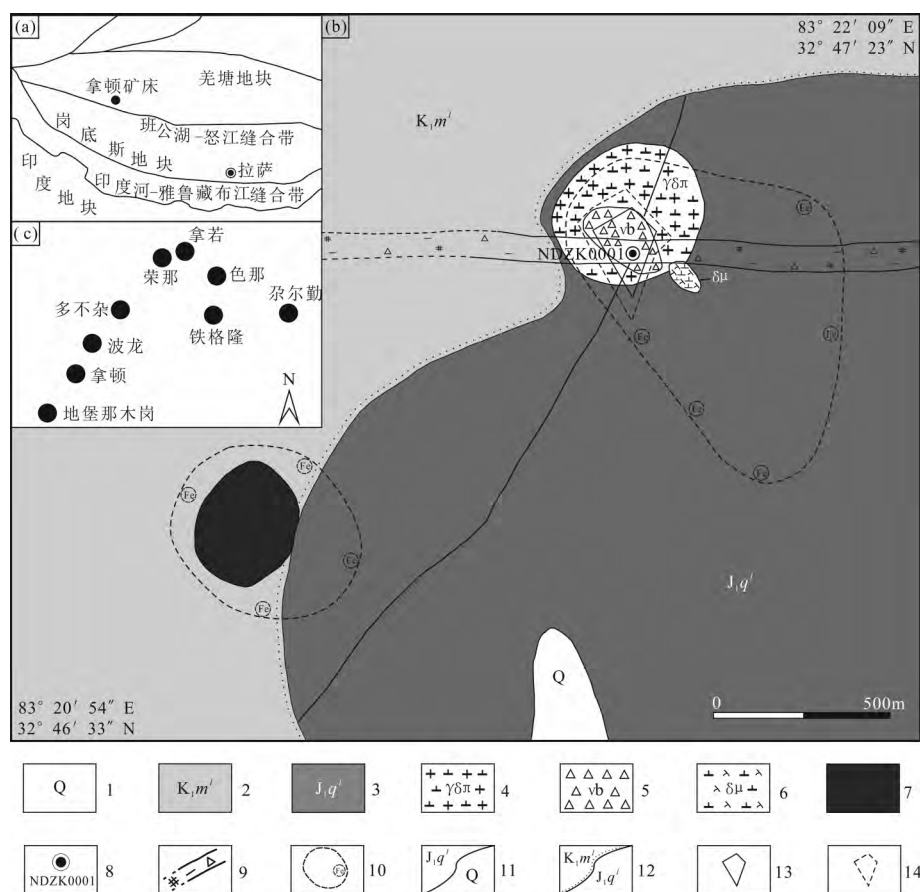


图 1 拿顿矿床地质略图(据西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队,2011 改绘^①)

Fig. 1 Geological scheme of Nadun deposit (modified from No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2010^①)

(a)—拿顿矿床大地构造位置示意图;(b)—拿顿矿床地质图;(c)—多龙矿集区矿床分布示意图;1—第四系(Q)残坡积物;2—下白垩统美日切组下段(K_1m^1)安山岩、安山玢岩、安山质玄武岩;3—下侏罗统曲色组一段(J_1q^1)深灰色粉砂质板岩、长石石英砂岩;4—花岗闪长斑岩;5—热液角砾岩;6—闪长玢岩;7—蚀变安山岩;8—钻孔位置及其编号;9—实测/推断断层或破碎带;10—地表强褐铁矿化范围;11—地质界线;12—实测不整合地质界线;13—333 矿体;14—334 矿体

(a)—The tectonic position sketch map of Nadun deposit; (b)—geological sketch map of Nadun deposit; (c)—ore deposits distribution sketch map of Duolong ore district; 1—talus and residual material of Quaternary(Q); 2—andesite, andesitic porphyry and andesite-basalt of lower Meiriquie Fm of the Lower Cretaceous(K_1m^1); 3—dark grey silty slate and feldspar quartz-sandstone of Quse Fm of the lower Jurassic(J_1q^1); 4—granodiorite porphyry; 5—hydrothermal breccias; 6—diorite porphyry; 7—alternating andesite; 8—position and number of boreholes; 9—measured / deduced faults or tectonic fracture zone; 10—range of limonitization at the surface; 11—geological boundary; 12—measured unconformity geological boundary; 13—ore bodies for “333”; 14—ore bodies for “334”

量 3.98t。目前矿区内的勘探程度还较低,具有很大的找矿前景^①。

2 样品与测试

2.1 样品采集

拿顿矿区正处于普查阶段,尚未开发,在野外对矿区的样品采集以岩芯库采样为主。在西藏地勘局第五地质队岩芯库重点选取拿顿矿床钻孔 NDZK0001 进行系统采样,采样间距控制在 3~10m 不等。拿顿矿床钻孔 NDZK0001 开孔处坐标

为 $32^{\circ}47'05''N, 83^{\circ}21'45''E$,从孔深 6m 至 207m 共计采样 39 件。在矿区地表采集出露的矿石共计 18 件(编号 ND-12-1~18),采样位置为 $32^{\circ}47'10''N, 83^{\circ}21'50''E$ 附近。对矿床的不同成矿期次的样品进行了系统采集,在详细的野外和镜下观察鉴定的基础上,开展了流体包裹体显微测温以及激光拉曼光谱分析。

2.2 测试方法

(1)光学显微镜、扫描电镜鉴定:将岩矿石样品送至廊坊科大矿物分选科技有限公司进行磨制,然

后在光学显微镜下进行薄片的观察、鉴定和照相。其中,重点进行金属矿物组合及蚀变矿物的观察。扫描电子显微镜与电镜能谱分析:首先将样品进行镀碳,然后通过电子显微镜对样品进行观察并进行图像拍照,最后对选取的样品进行能谱分析。测试单位为中国地质大学(武汉);仪器型号为 LEO-435VP 型扫描电子显微镜和 LINK-ISIS 型 X-射线能谱仪;测试条件为 20kV,100pA;执行标准为 SY/T5162-1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法。

(2)流体包裹体冰点、均一温度测定及拉曼光谱分析:流体包裹体的冰点、均一温度测试在中国地质科学院矿产资源研究所(国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室)完成,仪器型号:Linkam THMS G600 显微冷热台,测试温度范围 $-196 \sim +550^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)。激光拉曼光谱(LRM)测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所(国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室);仪器型号:System 2000 拉曼光谱仪,功率为 20mW,激光波长为 51453nm,束斑直径 $1\mu\text{m}$,扫描范围 $100 \sim 4500\text{cm}^{-1}$,分辨率 $1 \sim 2\text{cm}^{-1}$ 。

激光拉曼光谱分析是对流体包裹体及其气相成分进行测定最有效的分析方法之一,具有非破坏性(Xu Peicang et al., 1996; Burke, 2001; Yamamoto et al., 2002)。根据测试结果可以探讨成岩、成矿流体以及岩浆的来源和源区组成。本次测试对矿床的斑晶和胶结物中的流体包裹体分别进行了测试。

(3)主量、微量元素测试:将要进行测试分析的样品磨碎至 200 目,碎样时保证样品不受污染。依据 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法测定主、微量元素量,测试仪器型号为飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪;微量元素和稀土元素测试采用 ZT0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法

测试仪器为 HR-ICP-MS(ElementI)。碎样单位为廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司,主微量元素测试单位为核工业地质研究院分析测试中心。

(4)黄铁矿原位微量元素测试:将光片中的黄铁矿分为粒状黄铁矿和脉状黄铁矿,分别进行原位微量元素测试。测试方法为激光剥蚀等离子质谱法,使用仪器为 Thermo Element II 等离子质谱仪,激光剥蚀系统为 New Wave UP-213。测试单位为国家地质实验测试中心。

(5)硫同位素测试:选取黄铁矿、黄铜矿等硫化物矿物和硬石膏等硫酸盐矿物进行硫同位素的测试。测试仪器为 MAT251,采用 V-CDT 国际标准,分析精度好于 $\pm 0.2\%$ 。测试单位为核工业北京地质研究院分析测试中心。

2.3 测试结果

扫描电镜鉴定结果见表 1;矿床的流体包裹体显微测温结果见表 2,激光拉曼光谱分析结果见图 2;花岗闪长斑岩(7 件)主微量元素测试结果及稀土含量见表 3;黄铁矿微量元素原位测试结果见表 4;矿床中硫同位素测试结果见表 5。

3 岩矿相学特征

3.1 岩相学特征

拿顿矿区地表出露岩性以长石石英砂岩、火山熔岩及火山碎屑岩为主(图 3a~h),地表岩性以强烈氧化为特点,钻孔 NDZK0001 的岩性以花岗闪长斑岩、含角砾脉花岗闪长斑岩和石英砂岩为主,根据钻孔样品鉴定结果,由浅部到深部依次为强烈硅化的花岗闪长斑岩、含角砾花岗闪长斑岩、热液角砾岩、长石石英砂岩。

地表硅化火山碎屑岩原岩为火山熔岩,具气孔状构造,气孔孔径较大,约 $2 \sim 4\text{mm}$,同时岩石遭受

表 1 拿顿矿床钻孔样品扫描电镜分析结果(%)

Table 1 Analysis results of scanning electron microscope (SEM) of drill core samples from Nadun deposit (%)

样号	Cu	Fe	Mg	As	Bi	S	O	其他	分子式	矿物名
NDZK001-11	12.78				67.04	20.17		Mn:10.51	$\text{Cu}_{2.17}\text{Bi}_{3.57}\text{S}_7$	硫铋铜矿
		53	9.39				25.19		$\text{Mg}_{1.96}\text{Ca}_{0.24}\text{Mn}_{0.97}\text{Fe}_{0.09}\text{O}_8$	镁锰氧化物
	35.94	42.02				19.69	2.35		$\text{Cu}_{0.91}\text{Fe}_{1.21}\text{S}_2$	黄铜矿
	18.6				61.24	20.16			$\text{Cu}_{0.93}\text{Bi}_{0.93}\text{S}_2$	硫铋铜矿
	1.95				78.03	20.02			$(\text{Cu}_{0.07}, \text{Bi}_{0.77})_2\text{S}_3$	辉铋矿
NDZK001-15	2.56				80.35		17.09		$(\text{Cu}_{0.06}, \text{Bi}_{0.54})_2\text{O}_3$	铋华
	0.72	0.81					3.77	Au:78.92; Ag:15.78	$(\text{Au}, \text{Cu}_{0.03}, \text{Fe}_{0.04}, \text{Ag}_{0.37})_{1.00}$	银金矿
	63.02	5.86				23.25	7.87	Pb:18.37 Pb:70.63	$\text{Cu}_{2.02}\text{Fe}_{0.213}\text{S}_{1.47}\text{O}$	辉铜矿
	33.73	25.32				35.13	5.81		$\text{Cu}_{0.97}\text{Fe}_{0.83}\text{S}_2$	黄铜矿
	20.71	8.58			24.5	21.45	6.39		$\text{Cu}_{1.46}\text{Fe}_{0.69}\text{Bi}_{0.53}\text{Pb}_{0.40}\text{S}_{3.01}\text{O}_{1.79}$	铜铁硫化物
	6.61	1.87				14	6.89		$\text{Pb}_{0.78}\text{Cu}_{0.24}\text{Fe}_{0.08}\text{SO}_{0.99}$	方铅矿

表 2 拿顿矿床流体包裹体的均一温度、盐度、密度测试结果

Table 2 Measured results of homogenization temperatures, salinity, density of fluid inclusions from Nadun deposit						
	样品号	寄主矿物	均一温度(℃)	冰点(℃)	盐度(%NaCleqv.)	密度(g/cm ³)
斑晶	ND-6-1	石英	290~414	-8.4~-3.2	5.26~12.16	0.67~0.83
	ND-17	石英	250~550	-21.2~-0.8	1.4~23.18	0.62~1.00
	ND-18	石英	210~422	-17.5~-2.6	4.34~20.60	0.56~1.01
	ND-22	石英	258~403	-26.8~-0.8	1.40~26.68	0.67~1.02
	ND-26	石英	232~430	-9.0~-0.1	0.18~12.85	0.50~0.90
	ND-31	石英	160~402	-26.7~-0.2	0.35~26.62	0.69~1.01
胶结物	ND-10	石英	306~362	-7.0~-1.3	2.24~10.49	0.67~0.78
	ND-14	石英	264~395	-16.9~-1.2	2.07~20.15	0.61~0.91
	ND-15	石英	185~363	-5.9~-3.2	5.26~9.08	0.69~0.93
	ND-26	石英	318~550	-8.7~-4.9	7.73~12.51	0.28~0.80
	ND-27	石英	222~386	-10.6~-0.9	1.57~14.57	0.59~0.87

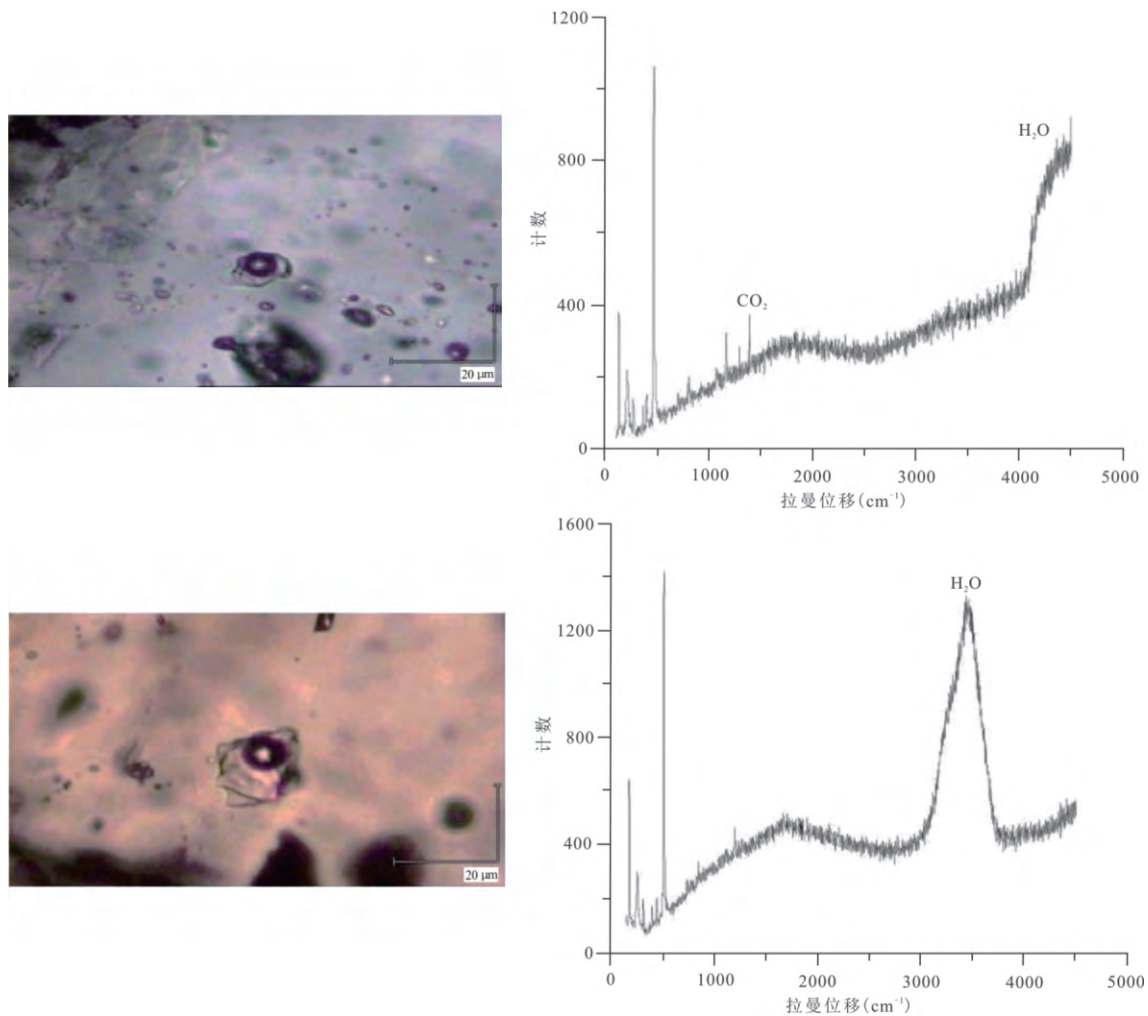


图 2 拿顿矿床流体包裹体激光拉曼光谱图

Fig. 2 The laser Raman spectrogram of fluid inclusions of Nadun deposit

后期热液淋滤,呈孔洞状硅化,孔径约 0.1mm(图 3c);地表氧化类岩石在矿区广泛分布,原岩为砂岩或部分出露的花岗闪长斑岩,岩石整体氧化呈褐红色,具孔雀石化,可见后期石英脉(图 3d、e)。

花岗闪长斑岩具碎斑结构和不等粒斑状结构(图 3f),斑晶主要为斜长石、石英、钾长石以及少量

角闪石,基质成分由钾长石、斜长石、石英、黑云母及副矿物磷灰石、锆石、金红石、磁铁矿等细小矿物组成。石英斑晶呈粒状、碎斑状,为碎斑结构,粒径 0.5~1.5mm,含量约 10%~15%(图 4a、b)。斜长石斑晶为粒状、碎屑状,粒径 0.5~1.5mm,含量约 20%,可见环带结构、穿插双晶等,白云母化、绢云母

表 3 拿顿花岗闪长斑岩主量元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)
和稀土元素的含量($\times 10^{-6}$)

Table 3 Analysis of major elements (%), trace
elements($\times 10^{-6}$) and rare earth elements
($\times 10^{-6}$) of Nadun granodiorite porphyry

样品号	NDZK0 001-05	NDZK0 001-06	NDZK0 001-07	NDZK0 001-29	NDZK0 001-31	NDZK0 001-33	NDZK0 001-34
SiO ₂	63.89	68.64	66.19	65.95	61.17	63.20	61.49
Al ₂ O ₃	19.68	15.87	18.91	13.3	18.21	14.47	17.84
Fe ₂ O ₃	7.93	8.79	7.37	11.05	10.2	14.19	7.34
MgO	0.293	0.404	0.715	1.83	1.81	1.21	0.812
CaO	0.104	0.093	0.108	2.0	0.45	0.49	0.327
Na ₂ O	0.193	0.119	0.097	0.11	0.10	0.21	0.103
K ₂ O	5.72	5.26	5.7	3.8	5.29	3.70	5.46
MnO	1.23	0.059	0.06	0.86	1.88	1.32	0.347
TiO ₂	0.63	0.486	0.584	0.394	0.55	0.734	0.513
P ₂ O ₅	0.184	0.156	0.175	0.121	0.21	0.192	0.148
FeO	0.11	0.40	0.42	4.50	5.89	5.58	1.27
La	19.7	15.9	15.6	18.8	15.8	3.83	12.4
Ce	39.1	31.8	29	37	29.6	7.94	25.2
Pr	4.33	3.91	3.26	4.31	3.49	1.4	3.21
Nd	17.2	15	12.3	16.1	13.8	6.07	13.1
Sm	3.85	3.03	2.17	3.12	2.9	1.42	2.85
Eu	1.17	0.842	0.484	0.812	1.03	0.49	0.692
Gd	3.32	2.61	2.02	2.67	2.63	1.32	2.59
Tb	0.562	0.431	0.332	0.414	0.49	0.305	0.507
Dy	3.26	2.49	1.88	2.1	2.93	2.02	3.24
Ho	0.725	0.574	0.432	0.442	0.64	0.47	0.73
Er	2.26	1.84	1.33	1.34	1.92	1.45	2.18
Tm	0.399	0.326	0.226	0.227	0.337	0.284	0.384
Yb	2.46	2.02	1.36	1.36	2	1.78	2.3
Lu	0.394	0.318	0.228	0.224	0.329	0.314	0.382
Li	44.7	39.9	16.4	35.6	16.4	15.2	3.22
Be	1.54	1.81	0.877	1.03	1.74	1.72	1.19
Sc	13.5	11.6	13.1	8.52	12.2	18	13.4
V	127	104	121	112	117	164	118
Cr	4.47	3.58	5.2	7.04	3.84	17.5	9.03
Co	25.5	5.68	3.88	24	26.2	36.8	24.6
Ni	4.39	3.48	1.46	8.71	8.9	17.7	6.44
Cu	3089	2201	1292	128	25.1	2813	442
Au	9.13	277	12.7	105	4.33	28.8	13.9
Zn	293	158	55.5	156	760	661	68.6
Ga	22.5	18.1	26.1	15.5	19.8	21.5	22.2
Rb	176	191	232	133	221	169	265
Sr	137	74	20.1	61.1	39.4	67.3	35.9
Y	14	10.4	11.2	11.2	15.4	11.5	17.9
Nb	6.34	5.07	5.61	4.42	5.8	4.91	4.4
Mo	0.588	0.779	1.5	3.27	1.14	0.857	0.858
Ta	0.674	0.511	0.575	0.351	0.584	0.426	0.339
W	5.14	67.8	18.5	12.6	6.21	2.22	9.6
Re	0.007	0.008	0.006	0.015	0.025	0.026	0.03
Tl	2.21	2.11	2.28	1.46	2.3	1.55	2.29
Pb	30	13.5	8.82	16.7	11.9	119	8.57
Bi	0.588	1.34	2.66	2.84	1.08	5.15	3.94
Th	5.9	5.19	5.19	3.16	5.48	2.98	2.47
U	1.34	1.45	1.33	0.793	3.26	0.908	1.12

续表 3

样品号	NDZK0 001-05	NDZK0 001-06	NDZK0 001-07	NDZK0 001-29	NDZK0 001-31	NDZK0 001-33	NDZK0 001-34
Zr	107	86.5	84.7	66.5	101	122	115
Hf	3.49	2.71	2.88	1.97	2.92	3.46	3.37
Sn	3.56	3.05	3.76	3.65	3.32	4.13	3.2
Cd	1.68	0.141	0.018	0.119	0.755	0.619	1.87
In	0.085	0.085	0.493	0.171	0.071	0.034	0.328
Sb	2.17	8.53	1.51	7.06	0.577	15.4	7.74
Cs	10.3	4.65	11.4	4.68	6.29	8.55	13.3
Ba	718	509	474	984	304	191	369
ΣREE	98.7	81.09	70.62	88.92	77.90	29.09	69.77
LREE	85.35	70.48	62.81	80.14	66.62	21.15	57.45
HREE	13.38	10.61	7.81	8.78	11.28	7.94	12.31
L _{REE} /H _{REE}	6.38	6.64	8.04	9.13	5.91	2.66	4.67
La _N /Yb _N	5.74	5.65	8.23	9.92	5.67	1.54	3.87
δEu	0.98	0.89	0.70	0.84	1.12	1.08	0.76
δCe	0.99	0.96	0.95	0.97	0.94	0.84	0.96

化和泥化发育(图 4f、h)。钾长石斑晶多为粒状,粒径 0.5~2mm,含量约 5%~10%,泥化和碳酸盐化强烈,部分绿帘石化。角闪石斑晶为粒状,粒径约 0.5~3mm,含量约 5%,可见六边形残余和角闪石式解理,碳酸岩化和磁铁矿化发育(图 4e)

含角砾脉花岗闪长斑岩中含大量热液角砾脉、石英脉及少量方解石脉(图 3g;图 4d),角砾成分为花岗闪长斑岩岩屑,钻孔样品中可见的脉体宽度约 3~20cm。金属矿化多伴随脉体发生,金属矿物以黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿为主,含一定量斑铜矿、硫铜铋矿、硫铋铜矿、磁铁矿、蓝辉铜矿、银金矿、自然金等,辰砂多伴随石英脉发育,金属矿物含量约 10%~20%,该段内的石英脉多为他形石英(图 4c)。

热液角砾岩:岩石主体为花岗闪长斑岩与闪长玢岩角砾,角砾大小约为 1~5mm、胶结物多为石英,且金属矿物多发育在石英胶结物中。金属矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿和磁铁矿等(图 3e;图 4d)。

长石石英砂岩具细粒结构,硅质胶结,含少量长石,长石多已黏土化,可见少量黄铜矿、方铅矿化(图 3h),金属矿物含量小于 2%。

3.2 矿相学特征

3.2.1 蚀变矿物特征

根据显微镜观察结果,样品中主要的蚀变矿物组合为高岭土、绢云母、绿泥石、绿帘石、方解石、白云石等。根据蚀变矿物组合特征,可将钻孔自浅向深分为硅化-泥化段和云母-碳酸盐化段。

硅化-泥化段的蚀变矿物组合主要为硅化、黏土矿物、绿泥石、绿帘石、绢云母等。其中,硅化表现为

表 4 拿顿矿床黄铁矿微量元素原位测试结果(×10⁻⁶)

Table 4 Measured results of in-situ test of trace elements (×10⁻⁶) in pyrites of Nadun deposit

序号	测点号	Fe	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Au	Ti	Pb	Bi	Sb	Co/Ni
1	NDZK0001-7-1	511126	477024	210. 1	44. 04	527. 3	7. 582	3979	56. 13	0. 999	0. 400	15. 774	84. 64	1. 401	33. 60	4. 771
2	NDZK0001-7-2	486036	505860	3. 858	0. 725	50. 52	672. 0	963. 4	49. 23	0. 395	0. 050	1403. 4	153. 7	1. 345	15. 13	5. 321
3	NDZK0001-7-3	461622	515153	387. 1	15. 04	20. 17	29. 66	290. 5	84. 33	1. 162	0. 063	781. 8	254. 0	42. 82	13. 45	25. 738
4*	NDZK0001-10-1	464756	531838	0. 256	DBL	248. 0	7. 776	1673	16. 24	DBL	0. 005	15. 768	1. 547	3. 354	DBL	\
5*	NDZK0001-10-2	469614	521062	8. 077	2. 021	48. 67	31. 11	3383	27. 44	0. 605	0. 141	27. 372	7. 966	11. 05	0. 688	3. 997
6*	NDZK0001-10-3	499286	485376	2192	1719	446. 2	176. 2	3772	60. 20	2. 542	1. 210	23. 976	2502	1. 446	148. 2	1. 275
7	NDZK0001-10-4	502450	475668	1213	95. 40	6337	19. 26	1986	20. 19	12. 30	0. 718	1551. 6	1123	124. 2	121. 5	12. 715
8	NDZK0001-10-5	561559	421058	230. 8	65. 94	3758	21. 15	771. 8	21. 25	5. 168	0. 369	2548. 2	1161	48. 19	92. 33	3. 500
9	NDZK0001-10-6	567539	416336	1206	133. 8	6882	46. 42	1585	23. 39	10. 42	0. 806	247. 98	1027	74. 79	104. 4	9. 013
10	NDZK0001-13-1	491804	476394	1430	7. 904	9794	3549	173. 2	76. 06	7. 157	0. 103	15. 972	7. 112	7. 394	0. 059	180. 921
11*	NDZK0001-13-2	469454	529310	251. 6	38. 07	69. 16	5. 891	71. 46	74. 79	DBL	0. 025	22. 092	0. 043	0. 002	DBL	6. 609
12*	NDZK0001-13-3	498265	494107	1096	128. 6	74. 51	20. 65	225. 7	58. 97	0. 433	0. 033	50. 454	9. 137	4. 596	0. 187	8. 523
13*	NDZK0001-13-4	501265	492687	8. 223	163. 8	4399	64. 27	8. 194	71. 53	4. 471	0. 020	19. 38	32. 53	1. 144	0. 298	0. 050
14	NDZK0001-13-5	509210	476394	110. 8	102. 3	342. 1	845. 7	110. 8	69. 63	0. 486	0. 007	35. 688	14. 56	2. 841	0. 104	1. 083
15	NDZK0001-13-6	473966	502443	169. 0	89. 29	20653	22. 16	17. 26	64. 49	6. 440	0. 079	35. 67	38. 51	2. 883	0. 162	1. 893
16	NDZK0001-18-1	533901	465441	255. 0	1. 412	4. 041	DBL	170. 4	12. 51	DBL	0. 021	16. 272	3. 059	1. 046	0. 073	180. 595
17	NDZK0001-18-2	519907	478622	422. 4	1. 569	8. 561	4. 184	215. 3	41. 27	DBL	0. 005	21. 168	3. 178	DBL	0. 052	269. 216
18	NDZK0001-18-3	500498	468086	1411	8. 361	39. 72	37. 01	370. 7	5. 454	3. 322	0. 275	782. 4	336. 4	3. 458	9. 195	168. 760
19*	NDZK0001-24-1	515511	471442	488. 3	147. 3	3359	46. 87	12. 47	16. 25	0. 596	0. 022	17. 622	9. 312	6. 667	0. 494	3. 315
20*	NDZK0001-24-2	477811	516570	107. 3	15. 14	23. 39	22. 80	45. 31	32. 57	0. 046	DBL	70. 68	14. 60	3. 096	0. 094	7. 087
21*	NDZK0001-24-3	530050	466917	399. 1	58. 26	86. 59	11. 07	3. 023	24. 17	0. 282	0. 036	14. 814	5. 637	8. 103	0. 024	6. 850
22	NDZK0001-24-4	488511	507952	234. 2	38. 57	14. 64	5. 372	21. 42	48. 14	DBL	0. 009	22. 872	5. 264	10. 71	DBL	6. 072
23	NDZK0001-24-5	504605	467221	457. 1	110. 9	5054	10. 40	87. 51	23. 08	7. 428	0. 053	69. 06	2. 514	8. 575	0. 321	4. 122
24	NDZK0001-24-6	489863	488753	393. 4	124. 6	1811	40. 87	10. 20	16. 73	5. 989	0. 035	266. 34	7. 476	27. 09	0. 118	3. 157
25*	NDZK0001-27-1	466880	532309	0. 227	DBL	2. 887	5. 498	DBL	47. 42	0. 214	DBL	19. 974	0. 028	0. 029	DBL	\
26*	NDZK0001-27-2	477667	520625	0. 354	2. 925	0. 650	5. 701	1. 294	38. 69	DBL	0. 018	23. 55	1. 007	2. 556	0. 055	0. 121
27*	NDZK0001-27-3	461613	537606	8. 487	1. 945	0. 646	55. 87	DBL	21. 35	DBL	DBL	43. 38	0. 019	0. 135	0. 047	4. 363
28	NDZK0001-27-4	493271	491974	268. 7	118. 6	9. 732	216. 8	365. 1	19. 95	2. 337	0. 723	19. 602	18. 45	65. 76	0. 456	2. 266
29	NDZK0001-27-5	473702	513231	310. 6	56. 60	8. 973	2. 325	79. 77	DBL	1. 250	0. 104	38. 982	25. 36	53. 02	0. 640	5. 488
30	NDZK0001-27-6	469023	521191	282. 4	85. 76	7. 605	11. 73	462. 1	12. 68	0. 234	0. 136	673. 8	12. 34	25. 50	0. 326	3. 293
31	NDZK0001-31-1	475189	523892	85. 48	12. 82	4. 676	94. 90	57. 13	41. 51	DBL	0. 020	19. 884	0. 286	0. 468	0. 014	6. 668
32	NDZK0001-31-2	449914	548218	367. 6	41. 36	29. 11	10. 05	26. 20	25. 50	0. 211	0. 037	31. 176	3. 724	5. 087	DBL	8. 888
33	NDZK0001-31-3	461066	534233	145. 3	52. 92	4. 738	11. 96	2. 753	0. 825	DBL	0. 033	43. 878	4. 291	6. 994	0. 088	2. 746
34	NDZK0001-34-1	499159	482580	278. 1	99. 14	695. 3	210. 8	60. 47	34. 96	2. 901	0. 173	77. 76	19. 95	37. 47	0. 084	2. 805
35	NDZK0001-34-2	459956	525453	578. 6	112. 1	868. 5	17. 57	112. 4	102. 4	2. 386	0. 099	1793. 4	25. 91	29. 74	0. 160	5. 161
36	NDZK0001-34-3	472628	523180	172. 6	84. 56	44. 66	102. 6	33. 26	49. 24	4. 114	0. 107	270. 66	14. 63	18. 31	0. 129	2. 041
37	NDZK0001-34-4	496116	476471	303. 4	99. 79	324. 0	69. 22	48. 03	10. 37	0. 727	0. 177	9522. 6	31. 16	58. 11	1. 729	3. 040
38	NDZK0001-34-5	433182	564113	169. 8	77. 22	114. 5	6. 754	15. 62	24. 60	1. 125	0. 174	27. 492	41. 68	39. 54	0. 462	2. 199
39	NDZK0001-34-6	542698	451669	199. 1	107. 1	11. 75	6. 257	21. 33	14. 36	0. 660	0. 079	1543. 2	12. 30	30. 68	0. 366	1. 859
40	NDZK0001-36-1	490652	508410	29. 48	318. 8	12. 34	4. 658	0. 608	37. 76	0. 189	0. 029	16. 5	44. 78	6. 640	0. 060	0. 092
41	NDZK0001-36-2	512726	484491	0. 987	9. 094	1905	6. 769	7. 265	148. 4	0. 102	0. 074	14. 874	0. 981	0. 810	0. 039	0. 109
42	NDZK0001-36-3	566848	432465	15. 59	170. 7	6. 797	3. 664	0. 161	19. 92	0. 096	DBL	18. 54	0. 253	0. 143	0. 577	0. 091
43	NDZK0001-36-4	408757	466903	127. 9	411. 3	23. 20	9. 706	15. 04	30. 35	1. 381	DBL	4905. 6	10. 03	7. 719	0. 400	0. 311
44	NDZK0001-36-5	473815	498869	149. 4	1493	1102	9. 265	6. 464	46. 00	2. 982	0. 071	169. 44	18. 78	7. 816	0. 289	0. 100
45	NDZK0001-36-6	509012	478138	453. 3	1066	121. 1	27. 10	10. 88	52. 18	3. 256	0. 212	3727. 8	11. 44	11. 40	0. 588	0. 425

注:DBL 为含量未达到仪器检测基准线,带*的测点为脉状黄铁矿,其余为粒状黄铁矿。

多孔状残余硅化,钻孔浅部样品直至地表样品均发育多孔状残余硅化。泥化则以高岭石、绿帘石为主(图 4g)。

云母-碳酸盐化段的蚀变矿物组合主要为绢云母、白云石、方解石、粘土矿物、石英。角闪石晶体及钾长石的碳酸盐化在这一区段大量发育,同时角闪

石晶体也伴随着磁铁矿化,而斜长石晶体则大量绢云母化。

3. 2. 2 金属矿物特征

根据显微镜观察和扫描电镜测试结果(表 1,图 6),矿床中主要金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、磁铁矿、硫铜铋矿、硫铋铜矿、铋华、方铅

表 5 拿顿矿床 NDZK0001 钻孔样品硫同位素测试结果

Table 5 Measured results of sulfur isotope of NDZK0001 borehole from Nadun deposit

序号	样号	矿物	$^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$	深度(m)
1	NDZK0001-08	黄铜矿	-6.1	27.7
2	NDZK0001-09		-5.2	30.5
3	NDZK0001-10		-6.6	31.3
4	NDZK0001-11		-7.0	34.4
5	NDZK0001-12		-5.2	36.6
6	NDZK0001-13		-6.3	38.7
7	NDZK0001-14		-6.0	39.5
8	NDZK0001-16		-3.9	42.2
9	NDZK0001-20		-3.3	52.8
10	NDZK0001-22		-5.5	56.4
11	NDZK0001-25		-4.6	75.8
12	NDZK0001-27		-4.6	77.0
13	NDZK0001-29		-6.2	80.5
14	NDZK0001-08	黄铁矿	-4.3	27.7
15	NDZK0001-09		-2.2	30.5
16	NDZK0001-10		-4.5	31.3
17	NDZK0001-11		-2.4	34.4
18	NDZK0001-12		-3.0	36.6
19	NDZK0001-14		-2.7	39.5
20	NDZK0001-15		-2.7	40.1
21	NDZK0001-16		0.4	42.2
22	NDZK0001-20		0.0	52.8
23	NDZK0001-22		-2.4	56.4
24	NDZK0001-23		0.2	63.8
25	NDZK0001-24		-3.7	72.5
26	NDZK0001-25		-1.6	75.8
27	NDZK0001-27		-1.6	77.0
28	NDZK0001-29		-1.4	80.5
29	NDZK0001-34		0.7	144
30	NDZK0001-13	辉铋矿	-7.1	38.7
31	NDZK0001-15	斑铜矿	-4.5	40.1

矿、银金矿、辰砂、菱铁矿等(图 5a~h)。部分主要金属矿物特征如下。

黄铁矿: 钻孔中的黄铁矿根据产出位置可分为浸染状和脉状。浸染状黄铁矿粒径小、含量少,其粒径多小于 $100\mu\text{m}$,含量约 5%,多与少量的黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等共生(图 5a、d、g)。脉状黄铁矿多与脉状黄铜矿共生,粒径多大于 $100\mu\text{m}$,与黄铜矿、斑铜矿、硫铋铜矿和硫铜铋矿等矿物共生(图 5b、e、f)。

黄铜矿: 铜黄色,多为脉状产出(图 5b),偶见不规则粒状黄铜矿。

硫铋铜矿(Cu_3BiS_3 ; Wittichenite): 米白色至灰白色,呈黄铜矿的包体形式产出,边缘被硫铜铋矿(CuBiS_2)交代,中间被蓝辉铜矿切割(图 5e)。

闪锌矿: 不规则粒状,灰褐色至深灰色,粒径 $10\sim 100\mu\text{m}$,多与黄铁矿及方铅矿共生(图 5d、g),整

个钻孔样品中闪锌矿含量远多于方铅矿。

银金矿(Electrum): 细脉状产于石英脉中(图 6a)。

辰砂(Cinnabar): 产于石英脉中,他形脉状,强透光(锥光)下呈鲜红色(图 5c)。

根据金属矿物组合,可将钻孔自浅向深分为黄铁矿-磁铁矿段和黄铁矿-硫化物段:黄铁矿-磁铁矿段范围约在钻孔 30m 及以上部分,金属矿物主要以磁铁矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿为主,该段磁铁矿主要为角闪石斑晶磁铁矿化而成,而黄铁矿、方铅矿和闪锌矿均粒径较小,且含量极少,总体上该段内金属矿物含量小于 5%,随着深度增加,金属矿物含量逐渐增加;黄铁矿-硫化物段的范围约在钻孔 30~155m 之间,金属矿物以硫化物矿物为主,主要金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硫铜铋矿、硫铋铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、辉铋矿、铋华、辰砂等,该段金属矿物含量显著增加,约 5%~20%,是矿床主要矿化部分。

4 流体包裹体

流体作为化学物质和传输的载体积极地参与了各种地球化学过程,对矿床的形成起着至关重要的作用,大部分金属热液矿床都是在地质流体中形成的(Lu Huanzhang et al., 2004)。流体包裹体是成岩成矿溶液在矿物结晶生长的过程中被捕获在矿物晶体缺陷里至今还在主矿物中完好封存并与主矿物有着相界限的那一部分物质,它的来源、运移和物质卸载反映了整个成矿过程。

4.1 流体包裹体种类

根据室温下流体包裹体的物理相态不同,按 Lu Huanzhang et al. (2004) 的分类方案将其分为原生包裹体和次生包裹体。拿顿矿床中原生包裹体主要呈孤立状分布,次生包裹体可见卡脖子现象,一般沿裂隙呈条带状分布。根据室温下流体包裹体特征和冷冻过程中相态变化特征可划分为三种主要类型:气液包裹体(I型)、含子晶包裹体(II型)和气相包裹体(III型)。其中,I型包裹体为水溶液包裹体,即在室温下含气相 $\text{H}_2\text{O}(\text{VH}_2\text{O})$ 和液相水溶液(L)的两相包裹体,这也是矿床中最主要的包裹体类型,原生和次生包裹体均有。II型包裹体室温下可见三相或多相,即气相(V)、液相(L)、一种或多种子晶(S),包裹体呈孤立状分布,属于原生包裹体。III型包裹体为富气相包裹体,此类包裹体数量较多,室温

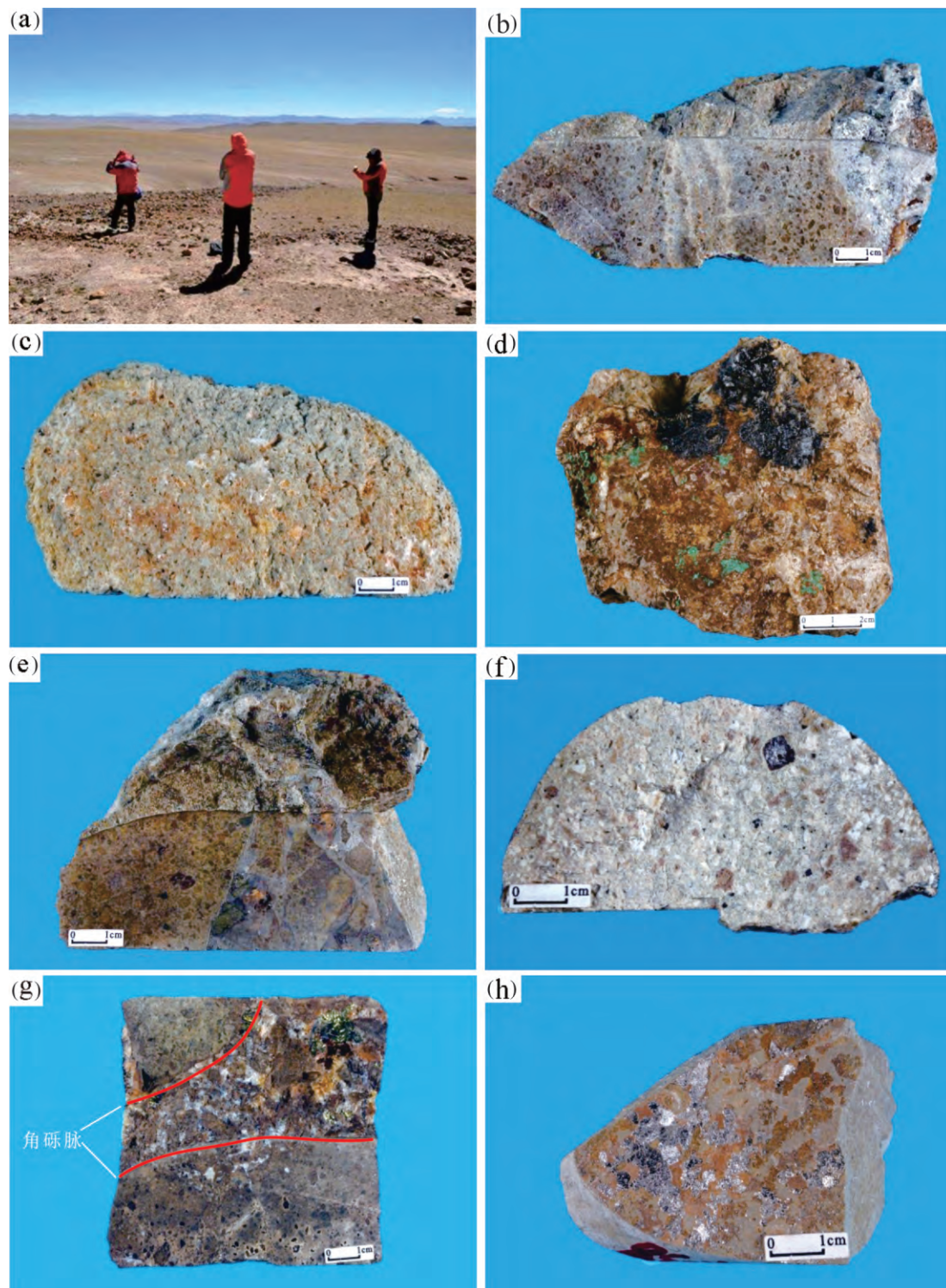


图 3 拿顿矿床样品标本照片

Fig 3 Pictures of specimens of Nadun deposit

- (a)—拿顿矿床地貌;(b)—闪长玢岩;(c)—地表多孔状硅化火山碎屑岩;(d)—地表氧化矿石(含孔雀石化和石英脉);
 (e)—热液角砾岩;(f)—碎斑结构花岗闪长玢岩;(g)—花岗闪长玢岩中的角砾脉;(h)—长石石英砂岩
 (a)—Landforms of Nadun deposit;(b)—diorite porphyry;(c)—porous silicified pyroclastic rock in the ground;
 (d)—oxide ores in the ground (include peacock petrochemical and quartz vein);(e)—hydrothermal breccia;
 (f)—porphyroclastic texture of granodiorite porphyry;(g)—brecciated vein in granodiorite porphyry;(h)—feldspar-quartz sandstone

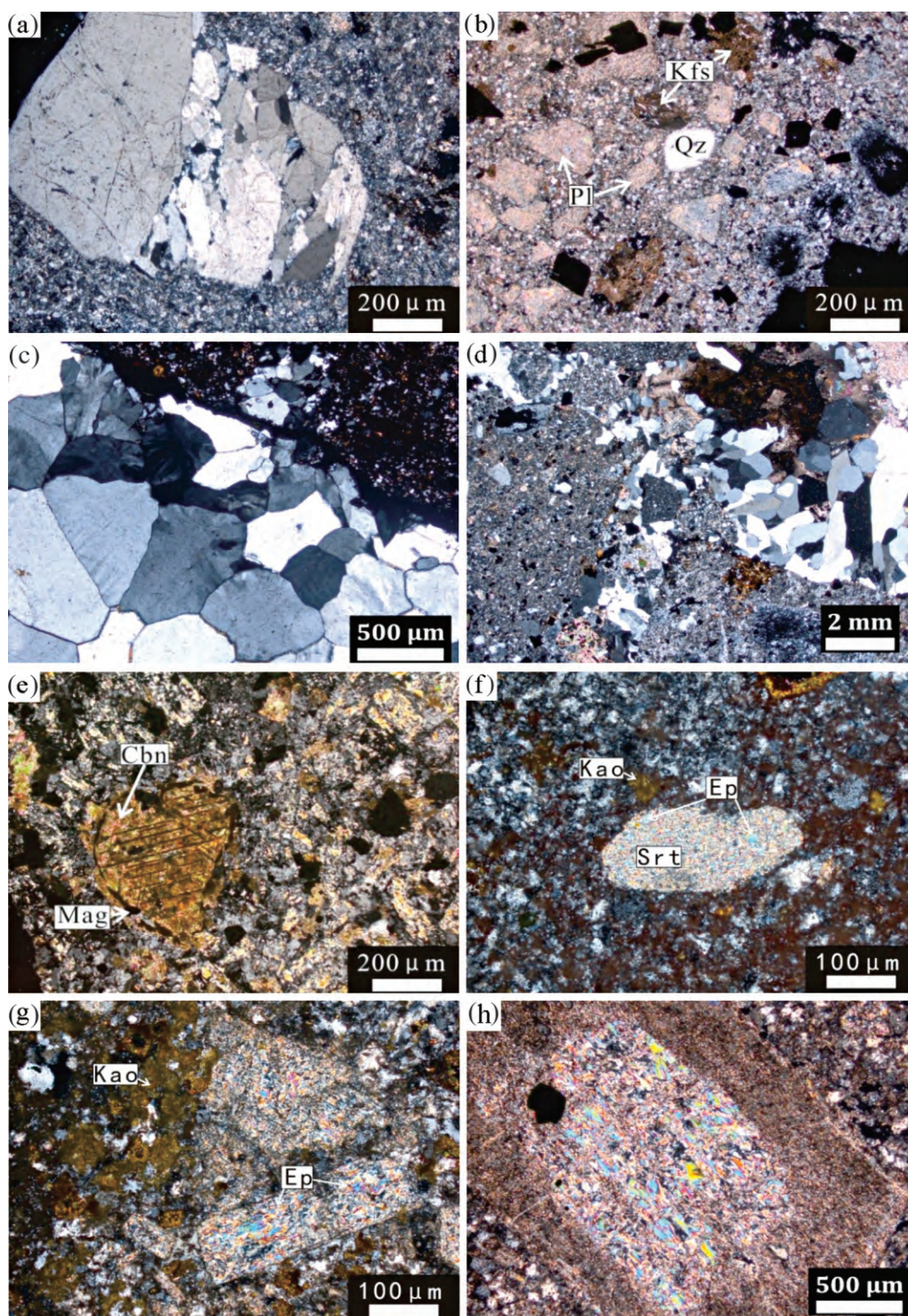


图4 拿顿矿床标本显微镜下照片

Fig. 4 Pictures under the microscope of samples of Nadun deposit

(a)—花岗闪长斑岩的石英碎斑晶;(b)—花岗闪长斑岩的不等粒斑状结构;(c)—他形石英;(d)—热液角砾岩;(e)—碳酸盐(Cbn)化和磁铁矿(Mag)化角闪斑晶;(f)—被溶蚀的长石斑晶绢云母(Srt)化;(g)—高岭石化(Kao)和长石斑晶绿帘石化(Ep);(h)—斜长石(Pl)的残余环带结构和绢云母(Srt)化

(a)—Quartz porphyroclast of granodiorite porphyry;(b)—inequigranular porphyritic texture of granodiorite porphyry;(c)—anhedral quartz;(d)—hydrothermal breccia;(e)—carbonation (Cbn) - magnetite (Mag) amphibole phenocrysts;(f)—sericitization (Srt) for corroded feldspar phenocryst;(g)—kaolinization (Kao) and epidotization (Ep) feldspar phenocryst;(h)—residual zonal structure and muscovitization of plagioclase (Pl)

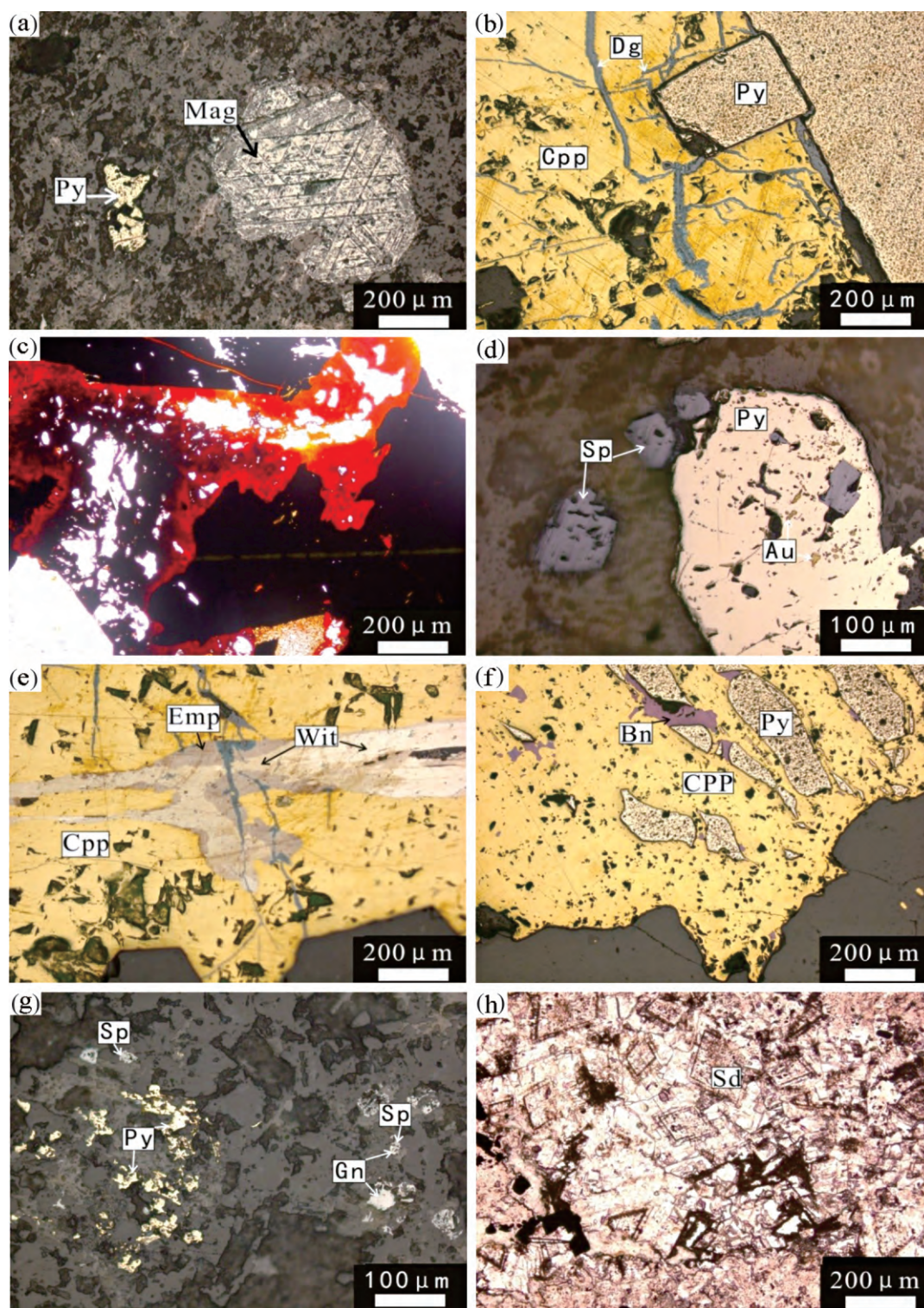


图 5 拿顿矿床标本显微镜下金属矿物照片

Fig. 5 Pictures under the microscope of metallic mineral samples of Nadun deposit

(a)—磁铁矿化(Mag);(b)—黄铜矿(Cpp)和黄铁矿(Py)脉,蓝辉铜矿(Dg)充填;(c)—强透光(锥光)下呈鲜红色的辰砂(Cin);(d)—黄铁矿(Py)中的包裹金(Au),闪锌矿(Sp);(e)—硫铜铋矿(Emp)和硫铋铜矿(Wit);(f)—黄铜矿(Cpp)中出溶黄铁矿(Py)及斑铜矿(Bn);(g)—黄铁矿(Py)、方铅矿(Gn)和闪锌矿(Sp);(h)—菱铁矿(Sd)

(a)—Magnetite (Mag);(b)—chalcopyrite (Cpp) and pyrite (Py) vein, digenite (Dg) filling in them;(c)—cinnabar (Cin) shows bright red in strong light transmission;(d)—gold(Au)in pyrite (Py), sphalerite (Sp);(e)—emplectite (Emp) and wittichenite (Wit);(f)—exsolution of pyrite (Py) and bornite (Bn) in chalcopyrite (Cpp);(g)—pyrite (Py), galena (Gn) and sphalerite (Sp);(h)—siderite (Sd)

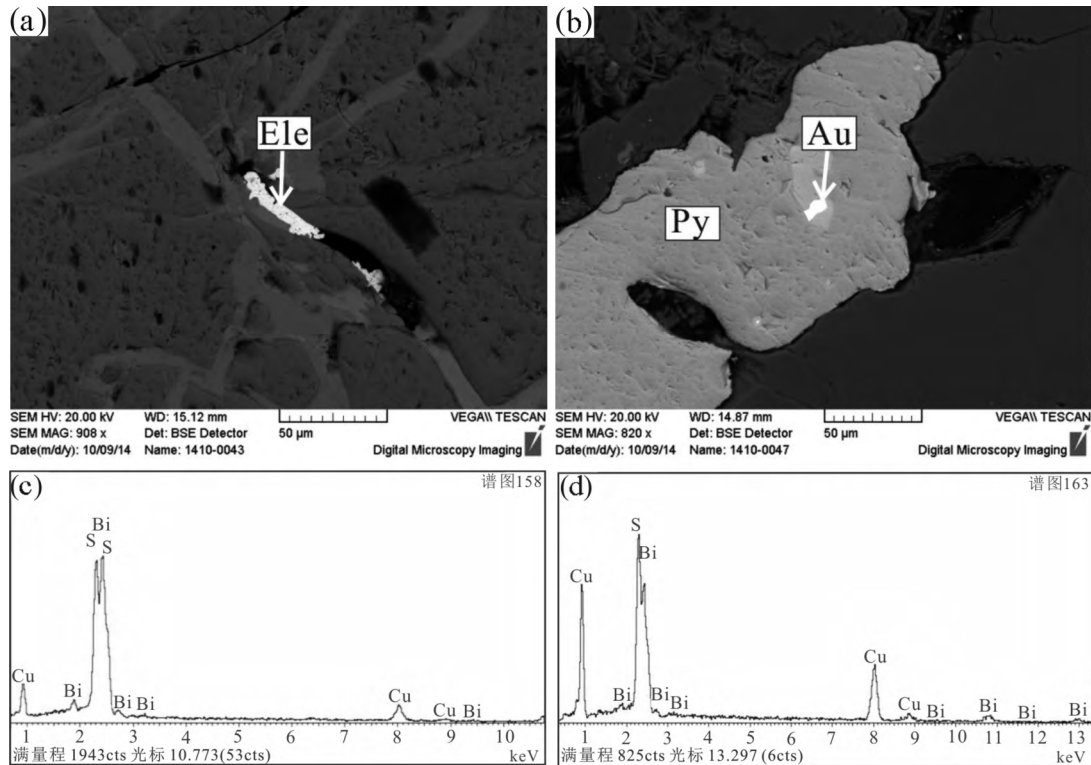


图6 拿顿矿床部分矿物扫描电镜照片及能谱图

Fig 6 Pictures under SEM and energy spectrum of some minerals of Nadun deposit

(a)—扫描电镜下银金矿(Ele)测点;(b)—黄铁矿(Py)中的包裹金(Au)

(c)—硫铜铋矿(Emp)扫描电镜能谱图;(d)—硫铋铜矿(Wit)扫描电镜能谱图

(a)—Survey point of electrum (Ele) in scanning electron microscope (SEM); (b)—gold (Au) in pyrite (Py);

(c)—energy spectrum of emplectite (Emp) under SEM; (d)—energy spectrum of wittichenite (Wit) under SEM

为气液两相或纯气相,气液比通常大于70%,呈孤立状分布。

将矿床中流体包裹体按斑晶和胶结物进行划分。石英斑晶中的流体包裹体发育较好,发育大量的I型包裹体及少量的II型包裹体。前者多数呈椭圆形,大小 $5\sim 26\mu\text{m}$ 之间,以 $15\sim 18\mu\text{m}$ 为主,气液比范围为15%~60%,主要分布在20%~30%之间,II型包裹体大小约 $10\mu\text{m}$,气液比约25%;胶结物中发育的流体包裹体较斑晶良好,大小 $4\sim 36\mu\text{m}$ 均有,以 $10\sim 20\mu\text{m}$ 为主,气液比分布在10%~50%之间,多数为20%~30%(图7)。

4.2 流体包裹体的特征

对矿床流体包裹体显微测温结果见表2,并据此做出流体包裹体均一温度直方图(图8)和盐度直方图(图9)。斑晶中的I型包裹体的均一温度范围为 160°C 至 550°C ,主要分布在 $160\sim 320^{\circ}\text{C}$ 和 $320\sim 440^{\circ}\text{C}$ 两个温度区间,极少数流体包裹体的均一温度达到 550°C 。冰点温度范围为 -26.8°C 至 -0.1°C ,据冰点温度计算得到成矿流体的盐度范围为0.2%

~26.7% NaCleqv., 主要分布在0.18%~12.85% NaCleqv. 和18.35%~26.7% NaCleqv. 两个盐度区间。据显微测温结果,由流体包裹体密度公式(Liu Bin et al., 1987)计算得出I型包裹体的密度为 $0.50\sim 1.02\text{ g/cm}^3$ 。

胶结物中的I型包裹体的均一温度范围为 185°C 至 550°C ,主要分布在 $185\sim 320^{\circ}\text{C}$ 和 $320\sim 398^{\circ}\text{C}$ 两个温度区间,极少数流体包裹体的均一温度也达到 550°C 。冰点温度范围为 -16.9°C 至 -0.9°C ,根据冰点温度计算得到成矿流体的盐度范围为1.6%~20.1% NaCleqv., 主要分布在1.6%~12.5% NaCleqv. 区间内,少数分布在17.25%~20.15% NaCleqv. 区间内。据显微测温结果,由流体包裹体密度公式(Liu Bin et al., 1987)计算得出I型包裹体的密度为 $0.28\sim 0.93\text{ g/cm}^3$ 。

从流体包裹体显微激光拉曼光谱图(图2)中可以看出矿床中流体包裹体的主要成分以 H_2O 为主,含有少量 CO_2 。据其他研究者对多龙矿集区流体包裹体的研究,多龙矿集区的其它矿床中(以多不杂和

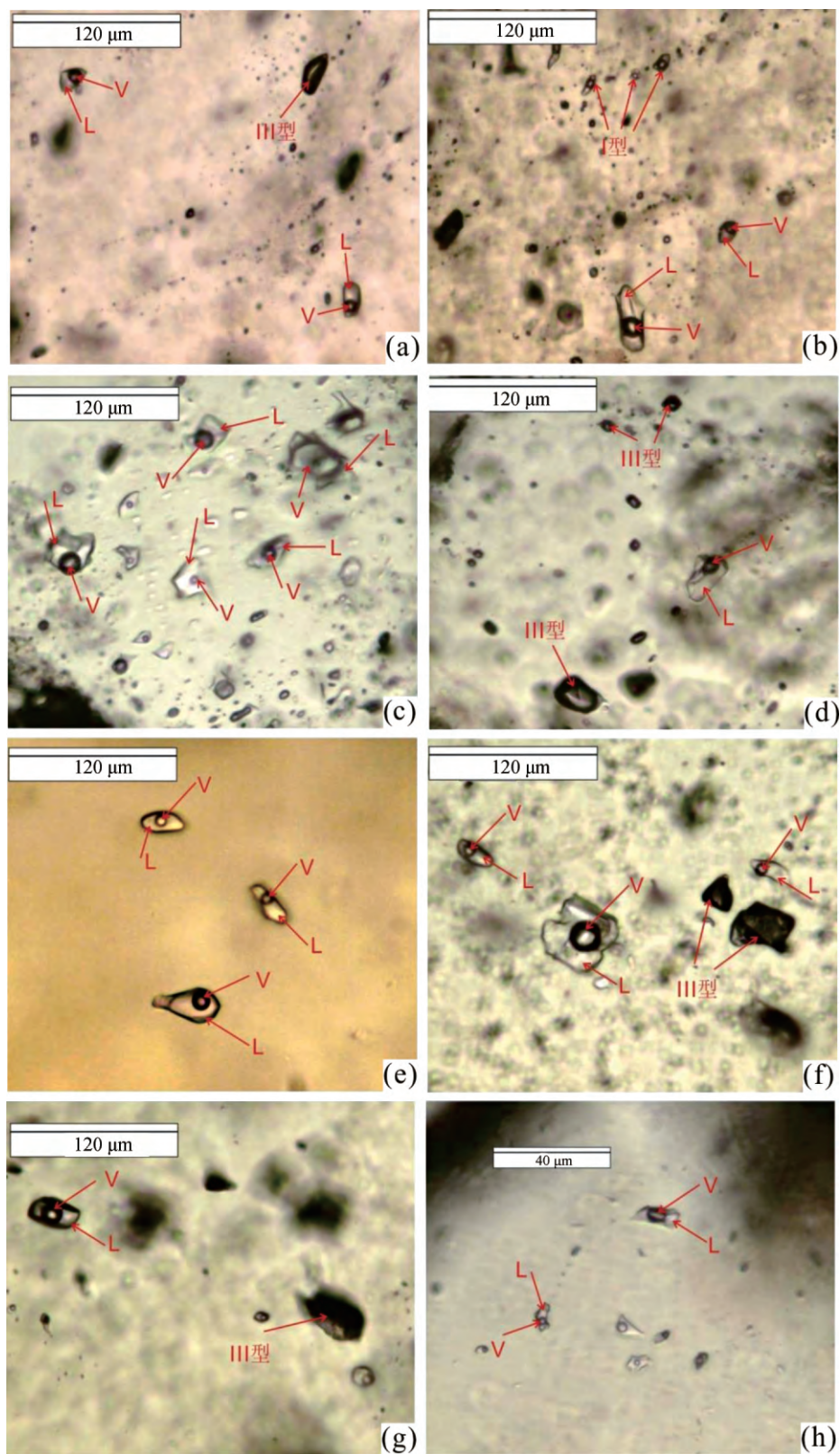


图 7 拿顿矿床流体包裹体照片

Fig. 7 Pictures of fluid inclusions of Nadun deposit

(a)—ND-26(石英斑晶);(b)—ND-26(石英斑晶);(c)—ND-31(石英斑晶);(d)—ND-31(石英斑晶);(e)—ND-15(胶结物);

(f)—ND-26(胶结物);(g)—ND-26(胶结物);(h)—ND-27(胶结物)

(a)—ND-26(quartz phanocryst);(b)—ND-26(quartz phanocryst);(c)—ND-31(quartz phanocryst);

(d)—ND-31(quartz phanocryst);(e)—ND-15(binder);(f)—ND-26(binder);(g)—ND-26(binder);(h)—ND-27(binder)

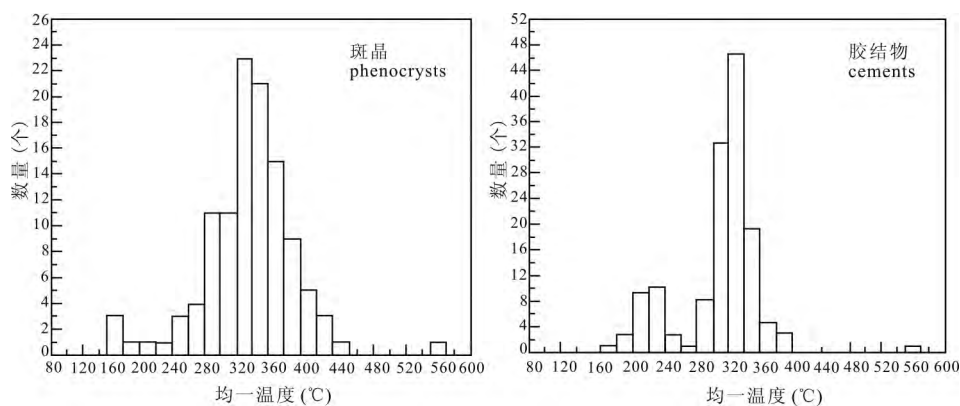


图8 拿顿矿床石英 V-L 流体包裹体均一温度直方图

Fig. 8 Histogram of homogenization temperature of V-L fluid inclusion of quartz from Nadun deposit

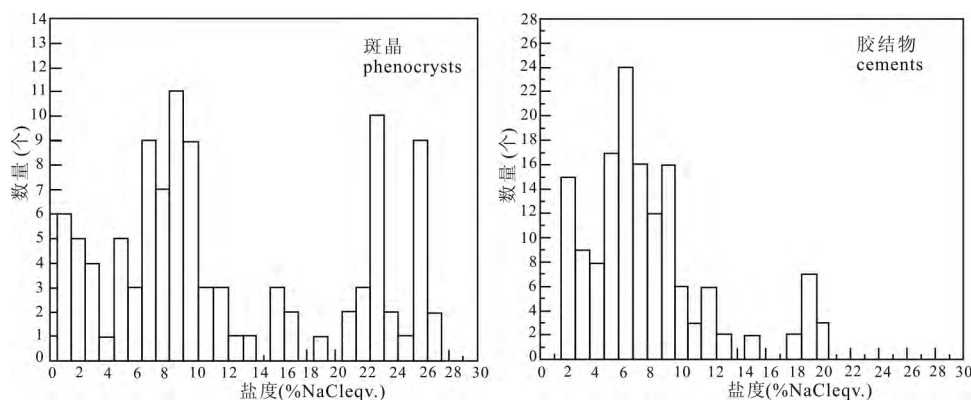


图9 拿顿矿床石英 V-L 流体包裹体盐度直方图

Fig. 9 Histogram of salinity of V-L fluid inclusion of quartz from Nadun deposit

波龙矿床为代表)的流体包裹体的气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主 (She Hongquan et al., 2006; Li Guangming et al., 2007; He Yangyang et al., 2013, 2014), 并含有 CH_4 、 C_4H_6 、 N_2 和 H_2S 等成分 (Lü Lina, 2012; Sun Zhenming et al., 2015)。拿顿矿床中流体包裹体成分相对单一, 与多龙矿集区其他矿床中的包裹体成分具有一定的差异。

4.3 流体包裹体形成环境

从测试结果来看, 矿床石英斑晶中的流体包裹体的均一温度主要分布在 $160 \sim 320^\circ\text{C}$ 和 $320 \sim 440^\circ\text{C}$ 两个温度区间, 胶结物中的流体包裹体的均一温度主要分布在 $185 \sim 320^\circ\text{C}$ 和 $320 \sim 398^\circ\text{C}$ 两个温度区间, 结合图 8 来看, 斑晶和胶结物中流体包裹体均一温度集中在 $222 \sim 360^\circ\text{C}$, 说明其主要形成于中低温的环境中; 由图 9 可以看出, 胶结物中 I 型包裹体盐度值较低, 主要分布在 $1.6\% \sim 12.5\%$ NaCleqv. 区间内, 而斑晶中 I 型包裹体的盐度为一组高盐度值 ($18.35\% \sim 26.7\%$ NaCleqv.) 和一组低盐度值 ($0.18\% \sim 12.85\%$ NaCleqv.), 这可能是由于高盐度的岩浆来源流体与低盐度的大气降水不均

匀混合而成 (Yang Chao et al., 2014)。

石英斑晶中的包裹体类型主要是水溶液包裹体 (I 型), 在室温下含气相 H_2O (VH_2O) 和液相水溶液, 并含有少量含子晶包裹体 (II 型), 包裹体的主要成分以 H_2O 和 CO_2 为主, CO_2 含量相对较少, 主成分与多龙矿集区中其他矿床的流体包裹体基本相同, 通过对比, 应形成于一种氧化环境 (Goldfarb et al., 2015), 这说明成矿流体具有氧化特点, 可能是由氧化状态较高的岛弧岩浆演化而成 (Qin et al., 1998)。

综上所述, 矿床中的流体包裹体是在中低温、低盐度、氧化环境中形成的, 成矿流体受到大气降水的影响。

5 矿床地球化学特征

在拿顿矿床钻孔 NDZK0001 选取典型岩石样品, 进行主、微量元素测量, 探究其地球化学特征。对钻孔样品中的黄铁矿进行原位微量元素的测定, 探究黄铁矿的成因。对钻孔中的黄铁矿、黄铜矿及硬石膏进行硫同位素测量, 探究其硫的来源。将钻孔主、微量化学分析结果进行旋转正交因子分析, 分

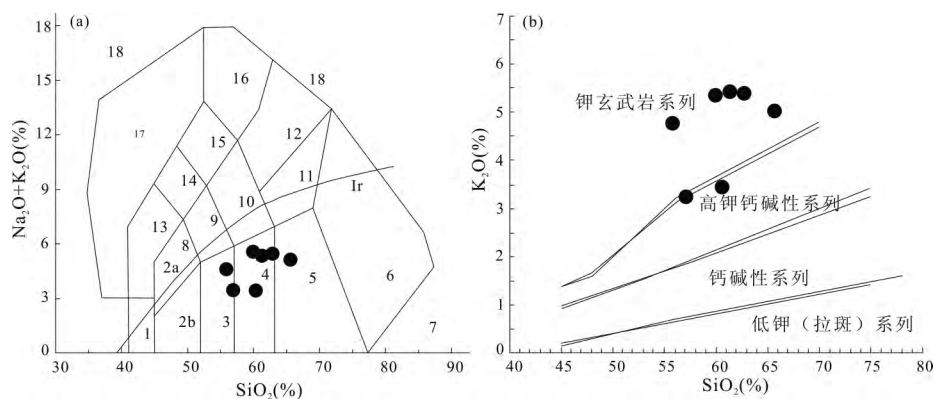
图 10 拿顿花岗闪长斑岩的 TAS 图(a)和 K_2O-SiO_2 图解(b)

Fig. 10 TAS (a) and K_2O-SiO_2 (b) diagrams for typical samples of granodiorite porphyry from Nadun deposit

1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

1—Olivine gabbro; 2a—alkaline gabbro; 2b—subalkaline gabbro; 3—gabbro diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartzolite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite; 12—syenite; 13—foidite gabbro; 14—foidite monzodiorite; 15—foidite monzosyenite; 16—foidite syenite; 17—foidite plutonic rock; 18—tawite/urtite/italite

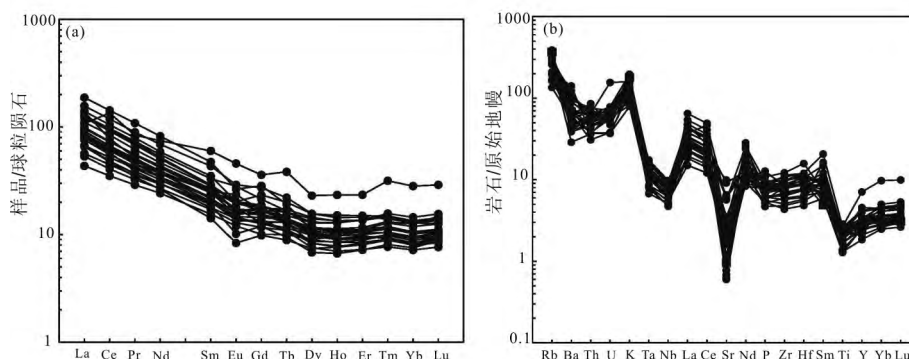


图 11 拿顿花岗闪长斑岩的稀土元素标准化分布型式图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 11 Chondrite-normalized REE patterns (a) and spider diagrams (b) of Nadun granodiorite porphyry

析矿床的成矿作用。

5.1 主量元素特征

选取不含角砾,且蚀变和矿化程度较小的花岗闪长斑岩共计 7 件样品进行了主量元素测量(NDZK0001-5~7; NDZK0001-29、31、33、34),测试结果见表 3。这七件样品的 SiO_2 含量为 55.9%~65.67%,平均值为 60.52%; $Na_2O + K_2O$ 含量为 3.54%~5.563%,平均值为 4.83%; TAS 图(图 10, a)显示岩石落在亚碱性区域;从图 10b 看,岩石落在高钾钙碱性系列至钾玄武岩系列之间;样品中 A/CNK 值为 1.63~2.93,平均值为 2.6,反映原岩为过铝质岩石。

5.2 微量和稀土元素特征

花岗闪长斑岩中微量元素测试结果和稀土元素含量见表 3。从图 11a 可以看出,花岗闪长斑岩中

的稀土元素分布整体上为平缓的右倾分布。稀土总量 ΣREE 变化范围为 $29.09 \times 10^{-6} \sim 98.73 \times 10^{-6}$,平均值为 73.73×10^{-6} 。轻重稀土比值 $LREE/HREE$ 变化范围为 2.66~9.13,平均值为 6.20,轻重稀土轻微分异,轻稀土轻微富集。花岗闪长斑岩的 δEu 变化范围为 0.7~1.12,平均值为 0.91,整体上具轻微负异常; δCe 变化范围为 0.84~0.99,平均值为 0.94,整体上不具有异常。

从图 11b 可以看出,拿顿花岗闪长斑岩整体上富集大离子亲石元素(LILE: Rb、K),亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSE),具有岛弧火山岩的典型特征。

5.3 黄铁矿微量元素特征

本文对拿顿钻孔 NDZK0001 的样品进行黄铁矿原位微量元素的测量。样品中的黄铁矿分为两

类,一类为浸染状的粒状黄铁矿,另一类为脉状矿化的黄铁矿。从测试结果看(表 4),粒状黄铁矿的 Co、Ni 含量均大于仪器测量下限。Co 的含量为 $0.987 \times 10^{-6} \sim 1430 \times 10^{-6}$,平均值为 365.82×10^{-6} ;Ni 的含量为 $0.725 \times 10^{-6} \sim 1066 \times 10^{-6}$,平均值为 159.294×10^{-6} ;Co/Ni 比值为 $0.091 \sim 269.216$,平均值为 28.013 。脉状黄铁矿的测试结果中,Co 的含量均大于仪器测量下限,而有两个测点的 Ni 含量低于仪器测量下限。从结果看,Co 的含量为 $0.257 \times 10^{-6} \sim 2192 \times 10^{-6}$,平均值为 379.993×10^{-6} ;Ni 的含量为 $1.945 \times 10^{-6} \sim 1719 \times 10^{-6}$,平均值为 227.706×10^{-6} ;Co/Ni 比值为 $0.05 \sim 8.523$,平均值为 4.219 。

粒状黄铁矿中 Au 有两个测点小于仪器测量下限,其余测点的 Au 含量为 $0.005 \times 10^{-6} \sim 0.806 \times 10^{-6}$,平均值为 0.17×10^{-6} ;脉状黄铁矿中有两个测点的 Au 含量小于仪器测量下限,其余测点的 Au 含量为 $1.294 \times 10^{-6} \sim 3772 \times 10^{-6}$,平均值为 919.55×10^{-6} 。总体上看,脉状黄铁矿具有更好的含金性。

5.4 硫同位素特征

矿床的硫同位素分析结果见表 5,由统计结果和硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布特征(图 12)可以看出,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值的分布范围为 $-4.5\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$,平均值为 -1.95‰ ,黄铜矿的值为 $-7\text{‰} \sim -3.3\text{‰}$,平均值为 -5.43‰ 。样品中 ^{34}S 富集程度为黄铁矿 > 黄铜矿 > 斑铜矿 > 辉铋矿,这说明矿物是在硫同位素达到分馏平衡的条件下结晶的(Shan Liang et al., 2009)。

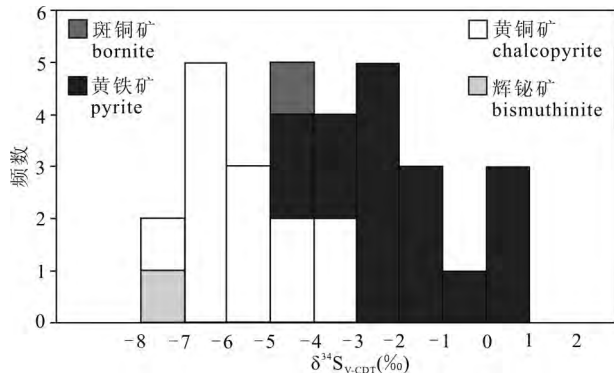


图 12 拿顿矿床硫同位素分布频率直方图

Fig 12 Frequency histogram of sulfur isotope of Nadun deposit

从硫同位素测试结果可看出(表 5), $\delta^{34}\text{S}$ 相对富集区段约为 20~100m 区段,在该区段内金属硫化物矿化强烈。因此在 20~50m 区段内,取 10m 为

区间间隔,将每个区间内的黄铜矿和黄铁矿分别进行算数平均,并统计频数(表 6)。

表 6 拿顿矿床硫同位素纵向变化统计表

Table 6 Longitudinal variation statistics of sulfur isotope of Nadun deposit

钻孔区间(m)	黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ (频数)	黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ (频数)
20~30	-6.1(1)	-4.3(1)
30~40	-6.05(6)	-2.96(5)
40~50	-3.9(1)	-1.15(2)
50~60	-4.4(2)	-1.2(2)
60~70		0.2(1)
70~80	-4.6(2)	-2.3(3)
80~90	-6.2(1)	-1.4(1)

从表 6 可以看出,钻孔中黄铜矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值从 20m 开始向下逐渐增加,至 40~50m 区间达到极大值,自 50m 向下逐渐减小,整体上具有中间大两端小的特点。黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值从 20m 开始向下逐渐增加,至 60~70m 区间达到极大值,随后向下减小,虽然在 80m 处有减小,但总体上仍然具有中间大两端小的特点。钻孔中金属硫化物的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值在纵向上呈现出“中间大两端小”的特点,这与多宝山斑岩型铜矿的“中间小两端大”的特点(Feng Jianxing et al., 2008)相反。

6 讨论

6.1 物质来源

根据流体包裹体的显微测温结果,拿顿矿床中存在均一温度高达 $400 \sim 550^\circ\text{C}$ 流体包裹体,其盐度也相对较高(表 2,图 8),是在成矿流体从岩浆中直接出溶时形成的(Heinrich et al., 1992)。在岩浆的驱动下,原始成矿流体继续上升,温度下降并分离出了气相包裹体,这一过程中在石英斑晶和胶结物中形成的流体包裹体的均一温度和盐度都较高(分别为 $320 \sim 440^\circ\text{C}$ 和 $18.35\% \sim 26.7\% \text{NaCl}_{\text{eqv.}}$)。高温、高盐度的成矿流体在此过程中形成了大量的磁铁矿以及部分金属硫化物的沉淀,为拿顿矿床的形成提供初始流体来源。

随着温度进一步降低和分离出的包裹体聚集,流体发生周期性的沸腾,释放出大量的硫与金属离子,导致了铜、金的沉淀(She Hongquan et al., 2006;Li Guangming et al., 2006, 2007)。随着矿床中富气相包裹体的不断聚集,压力逐渐增大,富气相包裹体发生了液化,最终形成热液角砾岩,随后又有大量大气降水加入,流体的温度下降,导致了成矿物质沉淀。在此过程,矿床中热液角砾岩的胶结物和石英斑晶中的流体包裹体的均一温度集中在 222

~360℃, 盐度集中在 0.18%~12.85% NaCleqv. (图 8, 图 9)。一般认为中低温、低盐度流体属天水来源或天水与岩浆水的混合产物, 而以天水成因为主, 以液相包裹体为代表 (She Hongquan et al., 2006), 所以在这一阶段大气降水对成矿流体有较大影响。随着大气降水的大量加入, 低温、低盐度流体的温度逐渐降低, 成矿元素也已基本沉淀完成。

对矿集区内其他矿床 (拿若、色那、尕尔勤、波龙、多不杂) 的硫同位素研究结果显示多龙矿集区金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的分布在 -2.2‰~6.2‰ 之间, 总体较为集中, 呈现双峰塔式分布, 主要为深源岩浆硫, 硫的来源与地幔更为密切 (Lü Lina et al., 2011; Lü Lina, 2012; Guo Shuo et al., 2013)。在这些斑岩型矿床中的斑岩中 S 与 Cu 的含量有明显的正向相关性, 暗示 S 和 Cu 可能为同一来源 (Ishihara et al., 2010)。从本文的测试结果看, 拿顿矿床中黄铁矿的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 -1.95‰, 黄铜矿的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 -5.43‰ (表 5), 对比矿集区其他矿床金属硫化物的结果可以看出, 拿顿矿床硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏小, 且为负值, 指示矿床中的硫受到了还原硫的影响 (Shan Liang et al., 2009), 其来源接近地幔硫。

6.2 矿床成因

拿顿矿床闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄为 $116.6 \pm 1.3\text{Ma}$ (Lv Lina, 2012), 多不杂斑岩铜矿床的成矿年龄为 118~120Ma (Zhu Xiangping et al., 2015b), 波龙斑岩铜矿床的成矿年龄为 118~119Ma (Zhu Xiangping et al., 2011), 地堡那木岗斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 $122 \pm 2.5\text{Ma}$ (Lin Bin et al., 2016), 总体上多龙矿集区内的成岩-成矿年龄集中在 118~122Ma 之间 (Guo Shuo et al., 2013; Guo et al., 2013), 反应了拿顿矿床与多龙矿集区的岩浆侵位-成矿在非常相近的时期形成。对多龙矿集区 (地堡那木岗、波龙、多不杂、拿若、铁格龙和尕尔勤 6 个矿床) 内与成矿有关的岩浆岩进行的主微量地球化学特征及 Pb-Sr-Nd 同位素研究表明, 矿集区内与成矿有关的岩浆岩整体上具高钾、铝过饱和的特点, 属于高钾钙碱性—钾玄岩系列, 而微量元素特征则显示矿集区内岩浆岩整体上富集大离子亲石元素 (LILE: Rb、K 等), 而亏损高场强元素 (HFSE: Nb、Ta、P、Ti), 结合 Pb-Sr-Nd 同位素的特征及前人对斑岩带演化的研究, 认为矿集区的成矿背景为增生杂岩上的岛弧环境 (Fu Jiajun et al., 2014; Zhu Xiangping et al., 2015a, 2015b; Wei

Shaogang et al., 2017a, 2017b; Huang Hanxiao et al., 2016)。

从地球化学特征来看 (表 3; 图 10a, b; 图 11b), 拿顿矿床的花岗闪长斑岩与多龙矿集区其他矿床中与成矿有关的岩浆岩具有较为一致的地球化学特征, 结合年代学证据, 可以看出, 拿顿矿床的花岗闪长斑岩与矿集区内其他矿床与成矿有关的岩浆岩为同一构造岩浆活动的产物, 均形成于增生杂岩上的岛弧环境。

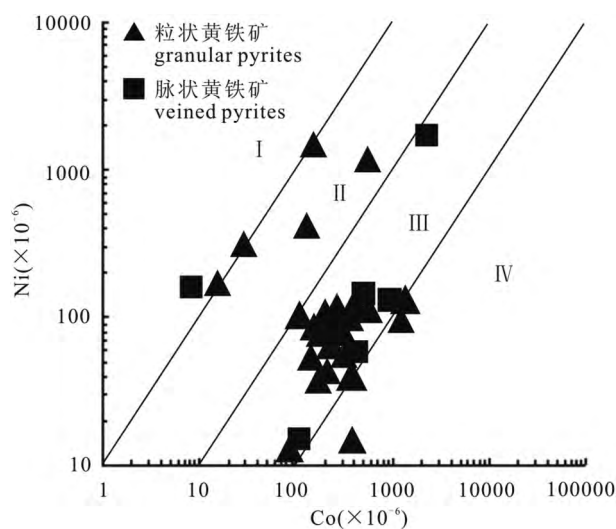


图 13 拿顿矿床黄铁矿 Co-Ni 成因图解

Fig. 13 Diagrams of Co-Ni genetic in Nadun pyrites

I、II—沉积和沉积改造区; III、IV—为岩浆和热液区
I, II—Deposition and deposition transformation zone;
III, IV—magma and hydrothermal area

黄铁矿中的 Co/Ni 比值是判断黄铁矿成因的重要指标, 沉积型黄铁矿 Co、Ni 含量较低, 为 $\text{Co/Ni} < 1$, 热液成因型黄铁矿 Co、Ni 含量及 Co/Ni 比值变化较大, 为 $1.17 < \text{Co/Ni} < 5$, 而火山喷气块状硫化物矿床则以 $5 < \text{Co/Ni} < 50$ 为特点 (Bajwah et al., 1987)。拿顿矿床中粒状黄铁矿 Co/Ni 比值为 0.091~269.216, 平均值为 28.013, 具有火山喷气成因的特点。脉状黄铁矿 Co/Ni 比值为 0.05~8.523, 平均值为 4.219, 表明其为热液成因, 脉状黄铁矿多与石英脉共生, 因此脉状黄铁矿为后期热液作用阶段的产物 (图 13)。

有研究认为拿顿矿床的成因类型为高硫型浅成低温热液矿床 (Li Jinxiang et al., 2012; Li Guangming et al., 2015; Li et al., 2016)。本文通过岩矿相学研究, 发现拿顿矿床中存在银金矿、辰砂、方铅矿、闪锌矿等低硫型浅成低温热液矿床的典型矿物组合 (图 5c、d、g; 图 6a); 对流体包裹体的研

究结果表明拿顿矿床的成矿温度较低(图 8),大气降水对成岩成矿过程有较明显的影响;黄铁矿微量元素测试结果显示矿床中黄铁矿具热液成因的特点;硫同位素测试结果显示矿床中 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏小,受到还原硫的影响,结合成矿背景并从其他方面与典型的低硫型浅成低温热液矿床进行对比(表 7),认为拿顿矿床属于低硫型浅成低温热液矿床。对流体包裹体测温结果显示,石英斑晶与胶结物中流体包裹体均一温度集中在 $222\sim 360^\circ\text{C}$ 之间,部分流体包裹体的均一温度较高(分别为 $320\sim 440^\circ\text{C}$ 和 $320\sim 398^\circ\text{C}$),这明显高于世界上一些典型的浅成低温热液矿床的形成温度($160\sim 270^\circ\text{C}$,最高不超过

300°C)(Hedenquist et al., 2000; Sillitoe et al., 2003; Gemmell et al., 2007),这些高温流体包裹体应是在矿床成岩阶段从深部高温岩浆中分离出来,然后被捕虏在石英斑晶中。这一原因可能是因为在矿床的深部存在斑岩型的成矿体(Sillitoe et al., 2010)。拿顿矿床赋矿岩体为花岗闪长斑岩,流体包裹体的特点与多龙矿集区中荣那高硫型浅成低温热液矿床中的高温流体包裹体特征相似(Yang Chao et al., 2014; Sun Zhenming et al., 2015),具有斑岩型矿床的中高温流体的特征,这表明拿顿矿床成因类型不是单一的低硫型浅成低温热液矿床,可能为低硫型浅成低温热液矿床叠加斑岩型铜(金)矿床。

表 7 拿顿矿床特征与典型低硫型浅成低温热液矿床对比表

Table 7 Comparison chart between Nadun deposit features and typical low-sulfur epithermal deposit

矿床	典型低硫型浅成低温热液矿床地质特征		拿顿矿床
深度	浅($<300\text{m}$)	深($300\sim 800\text{m}$)	
寄主岩石	次火山岩,火山碎屑岩、沉积岩	次火山岩,火山碎屑岩、沉积岩	花岗闪长斑岩
矿化形式	岩脉、脉群、网脉状、浸染状	岩脉、角砾岩、浸染状	浸染状、脉状、交代状
矿石结构	细条带状、壳状构造、角砾状	粗条带状	浸染状
蚀变矿物	明矾石、高岭石等黏土矿物	黏土矿物、绢云母、碳酸盐、钒云母、萤石	硅化、白云母化、绢云母化、碳酸岩化、泥化
脉石矿物	玉髓、冰长石	石英、碳酸盐、蔷薇辉石、绢云母、冰长石、重晶石、硬石膏、赤铁矿、绿泥石	石英、方解石、白云石、硬石膏、菱铁矿和隐晶质碳酸岩矿物等
金属矿物	辰砂、辉锑矿、黄铁矿/白铁矿、砷黄铁矿、金—银碲化物、磁黄铁矿、闪锌矿	黄铁矿、银金矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黝铜矿/砷黝铜矿	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿、硫铋铜矿、硫锑铜矿、银金矿、辰砂
矿化金属	Au-Ag-As-Sb-Se-Hg-Tl	Ag-Au-Pb-Zn-Ba-Mn-Se	Au-Cu
显著特征	硅华,玉髓平伏状	邻近高硫矿石的中等硫化脉体	具多孔状硅化
流体特征	$<0.1\%\text{NaCleqv.}$,富含气体	$3\%\sim 10\%\text{NaCleqv.}$	斑晶: $0.2\%\sim 26.7\%\text{NaCleqv.}$; 胶结物: $1.6\%\sim 20.1\%\text{NaCleqv.}$
形成温度	$<220^\circ\text{C}$	$220\sim 280^\circ\text{C}$	$185\sim 395^\circ\text{C}$

注:典型矿床据 Cook et al., 2000; Jiang Sihong et al., 2004; Simmons et al., 2005; Zhang Yuanhou et al., 2009; Du B et al., 2014; Kolova et al., 2015 整理。

6.3 成矿作用

选取钻孔 NDZK0001 的 38 件样品进行主微量元素的旋转正交处理和因子分析计算(表 8)。当取 7 个因子时,方差贡献累积百分比达 81.225% ,代表了成岩成矿过程中超过 81% 的信息,可以反映矿区发生的主要地质事件。各因子及其主成分如下。

F_1 因子主成分为 Tb-Eu-Sm-Gd-Dy-Ho-Y-Er-Nd-Nd-Ce-Tm-Yb-Pr-Lu-La-Co-Cd,为稀土元素(Pm 除外)和 Co,代表最早期的成岩作用,即岩浆作用形成早期的中酸性岩体,Co 有可能类质同象存在于早期的辉石或橄榄石中; F_2 因子主成分为 Cr-Ni-Nb-Ta-Zr-Th-Hf-TiO₂-U-Be-La-Re-MnO-Pr-Ga-Cu,为稀土元素 La,碱土元素 Nb、Ta,稀有元素 Hf,也应该代表早期的成岩作用; F_3 因子主成分为 Sc-V-Cs-SiO₂-Al₂O₃-Ga-Au-Bi-W-TiO₂-Lu-Be-Na₂O-Cu-Co-Mo-In,由于矿区成矿元素

表 8 拿顿矿床成矿作用因子分析的因子主成分特征

Table 8 The main factor characteristics of factor analysis for mineralization of Nadun deposit

因子	初始特征值		
	因子主成分	方差贡献百分比(%)	方差累积贡献百分比(%)
F_1	Tb-Eu-Sm-Gd-Dy-Ho-Y-Er-Nd-Ce-Tm-Yb-Pr-Lu-La-Co-Cd	35.045	35.045
F_2	Cr-Ni-Nb-Ta-Zr-Th-Hf-TiO ₂ -U-Be-La-Re-MnO-Pr-Ga-Cu	13.683	48.728
F_3	Sc-V-Cs-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Ga-Au-Bi-W-TiO ₂ -Lu-Be-Na ₂ O-Cu-Co-Mo-In	10.375	59.103
F_4	Fe ₂ O ₃ -Sr-P ₂ O ₅ -Ba-Li-In-Mo	6.872	65.975
F_5	Tl-Rb-K ₂ O-Li-Bi-U-Sn	6.355	72.33
F_6	Zn-MnO-Sb-Cd-Pb-FeO-Fe ₂ O ₃ -Cu	5.796	78.126
F_7	MgO-CaO-Sn-SiO ₂ -FeO-Na ₂ O	3.099	81.225

主要为 Cu、Au,这一组合代表热液成矿阶段,成矿作用与 SiO₂ 流体有关,与样品中观察到的矿化作用

主要与热液石英脉有关相印证;Cu、Au矿化与Bi的相关性较好,与镜下观察到大量与黄铜矿共生的硫铋铜矿和硫铜铋矿相印证,代表热液铜金矿化作用; F_4 因子主成分为 $|\text{Fe}_2\text{O}_3|-\text{Sr}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{Ba}-\text{Li}|\text{In}|-|\text{Mo}|$,代表了铅锌矿化和磁铁矿化阶段,发生磁铁矿化蚀变,并伴随一定的流体活动; F_5 因子主成分为 $|\text{Ti}|-|\text{Rb}|-|\text{K}_2\text{O}|-|\text{Li}-\text{Bi}|\text{U}|-|\text{Sn}|$,代表了钾化作用; F_6 因子主成分为 $\text{Zn}-\text{MnO}-\text{Sb}-\text{Cd}-\text{Pb}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Cu}$,为Fe、Cu等元素的进一步富集与叠加; F_7 因子主成分为 $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Sn}-|\text{SiO}_2|-\text{FeO}-|\text{Na}_2\text{O}|$,代表含碳酸盐热液的侵入,形成方解石及白云石脉,同时伴随一定的磁铁矿化。

根据以上研究,可以初步将拿顿矿床的成矿过程总结如下:

(1)岩浆侵位:来自岩浆房的花岗闪长质岩浆侵入于地壳浅部,在早期安山岩岩筒处,由于温度压力的急剧减小,侵入岩浆形成了花岗闪长斑岩,并伴随一定程度矿化,由于金属活性的差异,含铜金属在深部先沉淀,到达此处时金属矿物以黄铁矿、黄铜矿为主;

(2)热液成矿:含矿热液沿断裂构造侵入,并携带早期的花岗闪长斑岩形成角砾,大量黄铜矿和黄铁矿在此沉淀,形成拿顿矿床的主要矿化区段;随后含碳酸盐热液也沿断裂构造侵入,并形成了菱铁矿、辰砂等矿化。

7 结论

(1)矿床赋矿岩体为花岗闪长斑岩。由蚀变矿物组合特征,将钻孔自浅向深分为硅化-泥化段和云母-碳酸盐化段。由金属矿物组合,将钻孔自浅向深分为黄铁矿-磁铁矿段和黄铁矿-硫化物段,矿床中存在银金矿、辰砂、方铅矿、闪锌矿等低硫型浅成低温热液矿床的特征矿物组合。

(2)矿床中斑晶与胶结物中的流体包裹体均一温度集中在 $222\sim 360^\circ\text{C}$ 之间,主要成分以 H_2O 和 CO_2 为主,胶结物中包裹体的盐度较低,斑晶中包裹体的盐度相对较高,是在中低温、低盐度、氧化环境中形成,大气降水对成岩成矿过程有较明显的影响。矿床中岩石具有岛弧火山岩的典型特征。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值的分布范围为 $-4.5\text{‰}\sim 0.7\text{‰}$,平均值为 -1.95‰ ,黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-7\text{‰}\sim -3.3\text{‰}$,平均值为 -5.43‰ ,硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏小,且为负值,显示矿床中的硫受到还原硫的影响。

(3)矿床成因类型不是单一的低硫型浅成低温

热液矿床,为低硫型浅成低温热液矿床叠加斑岩型铜(金)矿床。矿床的成矿过程主要有岩浆侵位和热液成矿两个阶段。矿床最早期的成岩作用形成早期的中酸性岩体;在热液成矿阶段,成矿作用与 SiO_2 流体有关,随后发生铅锌矿化、磁铁矿化和钾化等作用,在成矿后期有含碳酸盐热液的侵入。

致谢:野外工作期间,得到西藏地质勘查局第五地质大队李玉昌高级工程师的支持和协助,并提供了相关的勘探资料;手标本照片和镜下薄片的鉴定得到了中国地质科学院矿产资源研究所沙俊生工程师、刘妍副研究员的指导和帮助;室内实验工作得到中国地质科学院矿产资源研究所陈伟十工程师、核工业北京地质研究院刘牧工程师以及中国石油勘探研究院朱德生高级工程师的帮助,在此一并致以衷心的感谢!

注 释

- ① 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队. 2011. 西藏自治区改则县多不杂西(拿顿)拿顿矿区金铜矿普查地质报告.
- ② 陈玉禄, 张宽忠, 徐天德. 2005. 中华人民共和国区域地质调查报告1:250000物玛幅. 四川省地质调查院.
- ③ 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队. 2010. 西藏自治区改则县多不杂铜矿2009年度普查报告.

References

- Burke E A J. 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusion. *Lithos*, 55:139~158.
- Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. 1987. Trace element distribution, Co;Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia. *Mineral Deposita*, 22:292~300.
- Cooke D R, Simmons S F. 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13 (12):221~244.
- Chen Hongqi, Qu Xiaoming, Fan Shufang. 2015. Geological characteristics and metallogenic-prospecting model of Duolong porphyry copper-gold ore concentration area in Gerze County, Tibet. *Mineral Deposits*, 32(2):321~332 (in Chinese with English abstract).
- Cui Ning, Xing Shuwen, Xiao Keyan, Ding Jianhua. 2016. Geological characteristics and resource potential analysis of the Bangong-Nujiang Cu-Au-Fe-Li metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(7):1623~1635 (in Chinese with English abstract).
- Du B, Edward A. 2014. Geochemical and modal data for igneous rocks associated with epithermal mineral deposits. *Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center*, (303):236~1562.
- Duan Zhiming, Li Guangming, Zhang Hui, Duan Yaoyao. 2013.

- The formation and its geologic significance of Late Triassic-Jurassic accretionary complexes and constraints on metallogenic and geological settings in Duolong porphyry copper gold ore concentration area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 32(5): 742 ~ 750 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jianxing. 2008. Distribution character of sulfur isotope in the Duo Baoshan copper deposit. *Geology and Prospecting*, 44(1): 46 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jiajun, Zhao Yuanyi, Guo Shuo. 2014. Geochemical characteristics and significance of granodiorite porphyry in the Duolong ore concentration area, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 1039 ~ 1051 (in Chinese with English abstract).
- Gemmell J B. 2007. Hydrothermal alteration associated with the gosowong epithermal au-ag deposit, halmahera, indonesia; mineralogy, geochemistry, and exploration implications. *Economic Geology*, 102(5): 893 ~ 922.
- Goldfarb R J, Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2 ~ 26.
- Guo S, Zhao Y Y, Li X S. 2013. Mineral deposit model of the Duolong gold-rich porphyry copper deposit cluster in Gaize County, Tibet: Evidence from zircon U-Pb dating. *Mineral Deposit Research for a High-tech World. 12th Biennial SGA Meeting, Sweden: The Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, 1455 ~ 1458.
- Guo Shuo. 2013. Mineral deposit model of the Duolong deposit cluster in Gaize County, Tibet and its application. A dissertation submitted to China University of Geosciences (Beijing) for Master Degree (in Chinese with English abstract).
- Hedenquist J W, Arribas A, Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits. *SEG Reviews*, 13: 245 ~ 277.
- Heinrich C A, Ryan C G, Mernagh T P, Eadington P J. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: a fluid inclusion study using pxe microanalysis. *Economic Geology*, 87(6): 1566 ~ 1583.
- He Yangyang, Wen Chunqi, Liu Xianfan, Wang Kangming, Huo Yan. 2013. Analysis on the gas and liquid ingredients of inclusions from Duobuza copper deposit. *Metal Mine*, 03: 108 ~ 110 + 115 (in Chinese with English abstract).
- He Yangyang, Wen Chunqi, Liu Xianfan, Guo Jianqiang, Zhou Yu. 2014. Geochemical characteristics and geological significance to the inclusions of the Duobuza copper deposit. *Journal of Guilin University of Technology*, 34(2): 218 ~ 226 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hnaxiao, Gong Fuzhi, Li Guangming, Liu Hong, Chen Huan, Zhu Xiangping, Xiao Wanfeng. 2016. Zircon U-Pb age and geochemical features of the Early Cretaceous purang pluton on the southern margin of Qiangtang, Xizang (Tibet), and their geological implications. *Geological Review*, 62(3): 569 ~ 584. (in Chinese with English abstract).
- Ishihara Shunso, Chappell B W. 2010. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern BC, Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 61(11/12): 383 ~ 415.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Zhang Yi, Hu Peng. 2004. The latest advances in the research of epithermal deposits. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 401 ~ 411 (in Chinese with English abstract).
- Kolova E E, Volkov A V, Prokof'ev V Y, Savva N E, Ali A A, Sidorov A A. 2015. Peculiarities of the ore-forming fluid of the Tikhoe Au-Ag epithermal deposit, Northeastern Russia. *Doklady Earth Sciences*, 463(2): 773 ~ 777.
- Laznicka P. 2010. *Giant Metallic Deposits*. Springer Berlin Heidelberg, 1 ~ 960.
- Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, Zhang Tianping, Xiao Bo. 2006. Preliminary study on alteration and mineralization features and high-oxidated ore-forming fluids at Duobuza super-large Au-rich porphyry Cu deposit, western Tibet. *Mineral Deposits*, S1: 411 ~ 414 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, Zhang Tianping, Xiao Bo. 2007. High temperature, salinity and strong oxidation ore-forming fluid at Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in the Banggonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from fluid inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 935 ~ 952 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Xianan, Qin Kezhang, Sun Xingguo, Zhao Junxing, Yin Xianbo, Li Jinxiang, Yuan Huashan. 2015. The telescoped porphyry-high sulfidation epithermal Cu (Au) mineralization of Rongna deposit in Duolong ore cluster at the southern margin of Qiangtang Terrane, Central Tibet: Integrated evidence from geology, hydrothermal alteration and sulfide assemblages. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2307 ~ 2324 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, Xiao Bo, Zhao Junxing, Cao Mingjian, Chen Lei. 2012. The Nadun high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit coexisted with Duolong porphyry Cu-Au deposit in the Banggonghu tectonic belt. *Mineral Deposits*, S1: 991 ~ 992 (in Chinese).
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, Evans N J, Zhao Junxing, Cao Mingjian, Huang Fang. 2016. The Nadun Cu-Au mineralization, central Tibet: Root of a high sulfidation epithermal deposit. *Ore Geology Reviews*, 78: 371 ~ 380 (in Chinese with English abstract).
- Li Xingkui, Li Cai. 2015. The study on the magma origins and tectonic setting of Duolong superlarge copper-gold deposit, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, S1: 410 ~ 411 (in Chinese).
- Li Yubin, Zhong Wanting, Zhang Tianping, Chen Hua'an, Li Yuchang, Chen Hongqi, Fan Anhui. 2012a. Geochemical characteristics and genesis of the Bolong porphyry copper-gold deposit in Gerze County, Tibet. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 579 ~ 587 (in Chinese with English abstract).

- Li Yubin, Duo Ji, Zhong Wanting, Li Yuchang, Qiangba Wangdui, Chen Hongqi, Liu Hong fei, Zhang Jinshu, Zhang Tianping, Xu ZHizhong, Fan Anhui, Suolang Wang Qin. 2012b. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize Country, northern Tibet. *Geology and Exploration*, 48 (2):274~287(in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, Feng Jun, Li Yanbo, Tang Xiaoqian, Lin Xin, Liu Zhibo, Wang Yiyun, Fang Xiang, Yang Chao, Yang Huanhuan, Fei Fan, Li Li, Gao Ke. 2016. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the ore-bearing porphyry in Dibao Cu (Au) deposit, Duolong ore concentration area, Xizang (Tibet), and its geological significance. *Geological Review*, 62(6):1565~1578. (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Duan Guangxian. 1987. The density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions (salinity $\leq 25\text{wt}\%$) and their applications. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4):345~352 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2004. Fluid inclusions. Beijing: Science Press, 132~137(in Chinese).
- Lü Lina. 2012. Metallogenic model of rich iron and copper (gold) deposits in western part of Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, Tibet. A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Master of Science (in Chinese with English abstract).
- Lü Lina, Zhao Yuanyi, Song Liang, Tian Yi, Xin Hongbo. 2011. Characteristics of C, Si, O, S and Pb isotopes of the Fe-rich and Cu (Au) deposits in the western Bangong-Nujiang metallogenic belt, Tibet, and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(8):1291~1304(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Liao Zhongli, Geng Quanru, Jiang Xin sheng. 2004. Bangong Lake - Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4):371~382(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Ishihara S. 1998. On the possibility of porphyry copper mineralization Japanese Islands. *International Geology Review*, 40(6):539~551.
- Qin Kezhang, Li Guangming, Zhang Qi, Li Jinxiang, Miao Yu, Xiao Bo, Zhang Tianping, Duo Ji, Li Jingao, Lu Yan. 2007. Metallogenic conditions and possible occurrences for epithermal goldmineralizations in gangdese and bangonghu belts, Tibet-in view of porphyry epithermal Cu-Au metallogenetic Systematics. *Proceedings of 8th State Mineral Deposit Conference*, Beijing: Geological Publishing House, 660~670(in Chinese).
- Qu Xiaoming, Fan Shufang, Ma Xudong, Song Yang. 2015. Post-collisional copper ore deposits along Bangong Co - Nujiang metallogenic belt, Tibetan Plateau. *Mineral Deposits*, 34(3):431~448(in Chinese with English abstract).
- Shan Liang, Zheng Youye, Xu Rongke, Cao Liang, Zhang Yulian, Lian Yonglao, Li Yanhua. 2009. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis. *Geology and Resources*, 18(3):197~203 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Feng Chengyou, Ma Dongfang, Pan Guitang, Li Guangming. 2006. The high-temperature and hypersaline fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper deposit, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9):1435~1447 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Ma Dongfang, Li Guangming, Zhang Dequan, Feng Chengyou, Qu Wenjun, Pan Guitang. 2009. Duobuza porphyry copper deposits dating on Re-Os of molybdenite and U-Pb SHRIMP of zircon and their geological significances. *Mineral Deposits*, 28(6):737~746 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. Porphyry Copper Systems. 2010. *Economic Geology*, 105(1):3~41.
- Sillitoe R, Hedenquist J. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits//Volcanic, geothermal and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth, 10:315~343.
- Simmons S F, White N C, John D A. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 485~522.
- Song Yang, Tang Juxing, Qu Xiaoming, Wang Denghong, Xin Hongbo, Yang Cha, Lin Bin, Fan Shufang. 2014. Progress in the study of mineralization in the Bangongco-Nujiang metallogenic belt and some new recognition. *Advances in Earth Science*, 29(7):795~809(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhenming, Ren Yunsheng, Li Cai, Li Xingkui, Wang Ming, Fan Jianjun. 2015. Fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Rongna Cu (Au) deposit in the western part of the Bangong Lake-Nujiang suture zone, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 89(3):608~617(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Sun Xingguo, Ding Shuai, Wang Qin, Wang Yiyun, Yang Chao, Chen Hongqi, Li Yanbo, Li Yubin, Wei Lujie, Zhang Zhi, Song Junlong, Yang Huanhuan, Duan Jilin, Gao Ke, Fang Xiang, Tan Jiangyun. 2014a. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1):6~10(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Qin, Yang Chao, Ding Shuai, Lang Xinghai, Liu Hongfei, Huang Yong, Zheng Wenbao, Wang Liqiang, Gao Yiming, Feng Jun, Duang Jilin, Song Yang, Wang Yiyun, Lin Bin, Fang Xiang, Zhang Zhi, Yang Huanhuan. 2014b. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: practice of "absence prospecting" deposit metallogenic series. *Mineral Deposits*, 33(6):1151~1170 (in Chinese with English abstract).
- Wei Shaogang, Tang Juxing, Song Yang, Liu Zhibo, Wang Qin, Lin Bin, He Wen, Feng Jun. 2017a. Petrogenesis, Zircon U-

- Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of the intermediate-felsic volcanic rocks from the Duolong deposit in the Bangonghu-Nujiang suture zone, Tibet, and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 91 (1): 132 ~ 150 (in Chinese with English abstract).
- Wei Shaogang, Tang Juxing, Song Yang, Liu Zhibo, Wang Qin, Lin Bin, Wang Yiyun, Fang Xiang, Yang Huanhuan, Feng Jun. 2017b. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb ages, petrochemical, petrological and its significance of the potassic monzonitic granite porphyry from the Duolong ore-concentrated district, Gaize County, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 63 (1): 132~150 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dexin, Zhao Yuanyi, Liu Chaoqiang, Xu Hong, Li Yuchang, Li Yubin, Lei Xiaoguang. 2012. Geochemical indicators of porphyry copper deposits in the Dobzha ore concentration area, Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 33 (2): 185 ~ 196 (in Chinese with English abstract).
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, Liu Hongfei, Zhao Yuayi, Huang Wei. 2009. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet. *Mineral Deposits*, 28 (6): 785~792 (in Chinese with English abstract).
- Xu Peicang, Li Rubi, Wang Yongqiang. 1996. Raman spectroscopy in earth science. Xi'an: Shaanxi science and Technology Press, 78 (in Chinese).
- Yamamoto J, Kagi H, Kaneoka I, Lai Y, Prihod'ko V S, Arai S. 2002. Fossil pressures of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals; implications for the geobarometry of mantle minerals using micro-Raman spectroscopy. *Earth and Planet Science Letters*, 198 (3~4): 511~519.
- Yang Chao, Tang Juxing, Wang Yiyun, Yang Huanhuan, Wang Qin, Sun Xingguo, Feng Jun, Yin Xianbo, Ding Shuai, Fang Xiang, Zhang Zhi, Li Yubin. 2014. Fluid and geological characteristics researches of Southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet. *Mineral Deposits*, 33 (6): 1287~1305 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanhou, Mao Jingwen, Li Zongyan, Qiao Cuijie, Zhang Xiaomin, Zhang Xiangwei. 2009. Ore deposit types and characteristics of magmatic-hydro-thermal systems and implication for exploration. *Acta Geologica Sinica*, 83 (3): 309 ~ 425 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Ma Dongfang, Huang Hanxiao, Li Guangming, Li Yubin, Li Yuchang. 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (7): 2159~2164 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Ma Dongfang, Huang Hanxiao, Li Guangming, Wei Lujie, Liu Chaoqiang. 2012. Geology and alteration of the Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet. *Geology and Exploration*, 48 (2): 199 ~ 206 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Liu Hongfei, Ma Dongfang, Li Guangming, Zhang Hong, Liu Chaoqiang, Wei Lujie. 2015a. Geochronology and geochemistry of porphyries from the Naruo porphyry copper deposit, Tibet and their metallogenic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89 (1): 109 ~ 128 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Liu Hongfei, Ma Dongfang, Li Guangming, Huang Hanxiao, Zhang Hong, Liu Chaoqiang, Wei Lujie. 2015b. Zircon U-Pb ages, geochemistry of the porphyries from the Duobuza porphyry Cu-Au deposit, Tibet and their metallogenic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89 (3): 534~548 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈红旗,曲晓明,范淑芳. 2015. 西藏改则县多龙矿集区斑岩型铜金矿床的地质特征与成矿-找矿模型. *矿床地质*, 32 (2): 321 ~ 332.
- 崔宁,邢树文,肖克炎,丁建华. 2016. 班公湖-怒江 Cu-Au-Fe-Li 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析. *地质学报*, 90 (7): 1623~1635.
- 段志明,李光明,张晖,段瑶瑶. 2013. 西藏班公湖-怒江缝合带北缘多龙矿集区晚三叠世-侏罗纪增生杂岩结构及其对成矿地质背景的约束. *地质通报*, 32 (5): 742~750.
- 符家骏,赵元艺,郭硕. 2014. 西藏多龙矿集区花岗闪长斑岩地球化学特征及其意义. *岩石矿物学杂志*, 33 (6): 1039~1051.
- 冯健行. 2008. 多宝山铜矿硫同位素空间分布特征. *地质与勘探*, 44 (1): 46~49.
- 郭硕. 2013. 西藏改则县多龙矿集区矿床模型与应用. 北京: 中国地质大学硕士学位论文.
- 黄瀚霄,龚福志,李光明,刘洪,陈华安,祝向平,肖万峰. 2016. 西藏羌塘南缘早白垩世普让岩体的锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义. *地质论评*, 62 (3): 569~584.
- 何阳阳,温春齐,刘显凡,王康明,霍艳. 2013. 多不杂铜矿床包裹体气液相成分分析. *金属矿山*, 03: 108~110+115.
- 何阳阳,温春齐,刘显凡,郭建强,周玉. 2014. 多不杂铜矿床包裹体地球化学特征及地质意义. *桂林理工大学学报*, 34 (2): 218 ~ 226.
- 江思宏,聂凤军,张义,胡朋. 2004. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展. *地学前缘*, 11 (2): 401~411.
- 林彬,陈毓川,唐菊兴,宋扬,王勤,冯军,李彦波,唐晓倩,林鑫,刘治博,王艺云,方向,杨超,杨欢欢,费凡,李力,高轲. 2016. 西藏多龙矿集区地堡 Cu (Au) 矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义. *地质论评*, 62 (6): 1565~1578.
- 刘斌,段光贤. 1987. NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用. *矿物学报*, 7 (4): 345~352.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,欧光习,沈昆,张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 132~137.
- 李光明,李金祥,秦克章,张天平,肖波. 2006. 西藏多不杂超大型富金斑岩铜矿的蚀变-矿化特征及高氧化成矿流体初步研究. *矿床地质*, 25: 411~414.
- 李光明,李金祥,秦克章,张天平,肖波. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体

- 证据. 岩石学报, 23(5): 935~952.
- 李光明, 张夏楠, 秦克章, 孙兴国, 赵俊兴, 印贤波, 李金祥, 袁华山. 2015. 羌塘南缘多龙矿集区荣那斑岩-高硫型浅成低温热液 Cu-(Au)套合成矿: 综合地质、热液蚀变及金属矿物组合证据. 岩石学报, 31(8): 2307~2324.
- 李金祥, 秦克章, 李光明, 肖波, 赵俊兴, 曹明坚, 陈雷. 2012. 西藏班公湖带与多龙斑岩 Cu-Au 矿床共生的拿顿高硫型浅成低温热液 Au-Cu 矿床. 矿床地质, 31: 991~992.
- 吕立娜. 2012. 西藏班公湖-怒江成矿带西段富铁与铜(金)矿床模型. 北京: 中国地质科学院硕士学位论文.
- 吕立娜, 赵元艺, 宋亮, 田毅, 辛洪波. 2011. 西藏班公湖-怒江成矿带西段富铁矿与铜(金)矿 C、Si、O、S 和 Pb 同位素特征及地质意义. 地质学报, 85(8): 1291~1304.
- 李兴奎, 李才. 2015. 西藏多龙超大型铜金矿岩浆起源和构造背景研究. 矿物学报, 31: 410~411.
- 李玉彬, 钟婉婷, 张天平, 陈华安, 李玉昌, 陈红旗, 范安辉. 2012a. 西藏改则县波龙斑岩型铜金矿床地球化学特征及成因浅析. 地球学报, 33(4): 579~587.
- 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 李玉昌, 强巴旺堆, 陈红旗, 刘鸿飞, 张金树, 张天平, 徐志忠, 范安辉, 索朗旺钦. 2012b. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型. 地质与勘探, 48(2): 274~287.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. 地学前缘, 11(4): 371~382.
- 曲晓明, 范淑芳, 马旭东, 宋扬. 2015. 西藏班公湖-怒江成矿带上的碰撞后铜矿床. 矿床地质, 34(3): 431~448.
- 秦克章, 李光明, 张旗, 李金祥, 缪宇, 肖波, 张天平, 多吉, 李金高, 陆彦. 2007. 西藏浅成低温金-银矿的成矿条件与可能产出区分析——从斑岩-浅成低温铜金成矿系统的角度. 见: 陈毓川, 毛景文, 薛春纪主编. 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 666~670.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿辉钼矿 Re-Os 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 矿床地质, 28(6): 737~746.
- 余宏全, 李进文, 丰成友, 马东方, 潘桂棠, 李光明. 2006. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义. 地质学报, 80(9): 1435~1447.
- 孙振明, 任云生, 李才, 李兴奎, 王明, 范建军. 2015. 西藏班-怒带西段荣那铜(金)矿床流体包裹体特征及矿床成因. 地质学报, 89(3): 608~617.
- 陕亮, 郑有业, 许荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永牢, 李闫华. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究. 地质与资源, 18(3): 197~203.
- 宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 王登红, 辛洪波, 杨超, 林彬, 范淑芳. 2014. 西藏班公湖-怒江成矿带研究进展及一些新认识. 地球科学进展, 29(7): 795~809.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 王勤, 王艺云, 杨超, 陈红旗, 李彦波, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 宋俊龙, 杨欢欢, 段吉琳, 高轲, 方向, 谭江云. 2014a. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床. 地球学报, 35(1): 6~10.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014b. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践. 矿床地质, 33(6): 1151~1170.
- 韦少港, 唐菊兴, 宋扬, 刘治博, 王勤, 林彬, 贺文, 冯军. 2017a. 西藏班公湖-怒江缝合带美日切错组中酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素、岩石成因及其构造意义. 地质学报, 91(1): 132~150.
- 韦少港, 唐菊兴, 宋扬, 刘治博, 王勤, 林彬, 王艺云, 方向, 杨欢欢, 冯军. 2017b. 西藏改则多龙矿集区地堡那木岗矿床钾玄质二长花岗斑岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 63(1): 189~206.
- 吴德新, 赵元艺, 刘朝强, 许虹, 李玉昌, 李玉彬, 雷晓光. 2012. 西藏多不杂矿集区斑岩铜矿地球化学指标研究. 地球学报, 33(2): 185~196.
- 徐培苍, 李如璧, 王永强. 1996. 地学中的拉曼光谱. 西安: 陕西科学技术出版社, 78.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 刘鸿飞, 赵元艺, 黄玮. 2009. 藏西班牙湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及 Pb、Sr、Nd 同位素特征. 矿床地质, 28(6): 785~792.
- 杨超, 唐菊兴, 王艺云, 杨欢欢, 王勤, 孙兴国, 冯军, 印贤波, 丁帅, 方向, 张志, 李玉彬. 2014. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究. 矿床地质, 33(6): 1287~1305.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 马东方, 李光明, 张红, 刘朝强, 卫鲁杰. 2015a. 西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义. 地质学报, 89(1): 109~128.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 马东方, 李光明, 黄瀚霄, 张红, 刘朝强, 卫鲁杰. 2015b. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义. 地质学报, 89(3): 534~548.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌. 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(7): 2159~2164.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 卫鲁杰, 刘朝强. 2012. 西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与蚀变. 地质与勘探, 48(2): 199~206.
- 张元厚, 毛景文, 李宗彦, 乔翠杰, 张孝民, 张向卫. 2009. 岩浆热液系统中矿床类型、特征及其在勘探中的应用. 地质学报, 83(3): 309~425.

The Study of Facieology–Mineragraphy, Fluid Inclusions, and Geochemical Characteristics and Mineralization in Nadun Cu (Au) Deposit, Tibet

WANG Song^{1,2)}, ZHAO Yuanyi²⁾, WANG Ao^{1,2)}, LI Yubin³⁾, LI Xiaosai²⁾, GUO Shuo⁴⁾

1) *China University of Geosciences, Beijing, 100083*; 2) *MLR Key Laboratory of Metalogeny and Mineral Assessment, Institute of mineral resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*;

3) *No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud, Qinghai, 816000*; 4) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170*

Abstract

Nadun deposit is located in the southwest of the Duolong ore-cluster district in the Bangong Co–Nujiang River metallogenic belt of Tibet, which has huge potential of mineralization. But its research and exploration degree is very low and only one Au-bearing body has been delineated. Therefore, this deposit is of great outlook for prospecting. This study carried out research on facieology and mineragraphy, fluid inclusions and geochemical characteristics of the Nadun deposit. Principal altered minerals in the Nadun deposit include kaoline, sericite, epidote, calcite and dolomite, etc., in company with typical metal mineral assemblage, such as electrum, cinnabar, galena and sphalerite. Homogenization temperatures of fluid inclusions in phenocrysts and cements distribute mainly between 222°C and 360°C. The fluid inclusions are dominated by H₂O, with minor CO₂. Salinities of fluid inclusions in phenocrysts can be divided into two groups: high values (18.35% ~ 26.7% NaCleqv.) and low values (0.18% ~ 12.85% NaCleqv.). While the salinity of fluid inclusions in cements is low and ranges from 1.6% to 12.5% NaCleqv. These results suggest that fluid inclusions formed in the environment of medium-low temperature, low salinity and oxidization and ore-forming fluids of the Nadun deposit were distinctly affected by atmospheric precipitation. The SiO₂ content of granodiorite porphyry is in the range of 55.9 ~ 65.67% (averaging 60.52%) and the Na₂O+K₂O values of samples are in the range of 3.54 ~ 5.563 percent (averaging 4.83%), indicating that rocks belong to peraluminous rocks of high-potassium calc-alkaline series to shoshonite series. A/CNK values are in the range of 1.63 ~ 2.93, and the average is 2.6, reflecting that protolith is peraluminous rocks. Granodiorite porphyry has a total REEs of $29.09 \times 10^{-6} \sim 98.73 \times 10^{-6}$, with slightly negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.7 \sim 1.12$) and without Ce anomaly ($\delta\text{Ce} = 0.84 \sim 0.99$). The rocks are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (Rb and K) and depletion of high field strength elements (Nb, Ta, P and Ti), suggesting typical features of island arc volcanics. Ratios of Co/Ni in veined pyrites range from 0.05 to 8.523 with an average of 4.219, and this indicates that the veined pyrites are of hydrothermal genesis. Paragenetic relationship between veined pyrites and quartz breccia vein suggests that they are the product of late hydrothermal mineralization. $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrites are in the range of $-0.45 \sim 0.07$ percent, and the average is -0.195 percent; $\delta^{34}\text{S}$ values of chalcopyrites are in the range of $-0.7 \sim -0.33$ percent, and the average is -0.543 percent; relatively low $\delta^{34}\text{S}$ values with part being negative show that sulfurs in the deposits were affected by reducing sulfur. Main ore-bearing rock of the Nadun deposit is granodiorite porphyry in which characteristic minerals (electrum and cinnabar) have been found in the deposit. Fluid inclusions are characterized by medium-high temperature fluids of porphyry copper (gold) deposits. Therefore, the genetic type of the deposit belongs to porphyry copper (gold) deposit superimposed by low-sulfur epithermal deposit. The factor analysis shows that the earliest diagenesis resulted in the formation of intermediate-felsic rock bodies. The main mineralization of the deposit should be hydrothermal copper-gold mineralization, followed by lead-zinc mineralization, magnetitization and potassic alteration, with involvement of carbonatic fluid in the late stage of mineralization.

Key words: facieology and mineragraphy; low-sulfur epithermal deposit; Nadun Cu (Au) deposit; Tibet