

黔西南泥堡金矿围岩与矿石的对比及其成矿机制研究^{*}

韦东田^{1,2} 夏勇^{1**} 谭亲平³ 谢卓君^{1,2} 闫俊⁴ 郭海燕^{1,2} 刘建中⁵

WEI DongTian^{1,2}, XIA Yong^{1**}, TAN QinPing³, XIE ZhuoJun^{1,2}, YAN Jun⁴, GUO HaiYan^{1,2} and LIU JianZhong⁵

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550002

2. 中国科学院大学 北京 100049

3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所 廊坊 065000

4. 贵州理工学院 贵阳 550003

5. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队 贵阳 550018

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

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

3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

4. Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China

5. Geological Party 105, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, China

2016-05-09 收稿, 2016-08-16 改回.

Wei DT, Xia Y, Tan QP, Xie ZJ, Yan J, Guo HY and Liu JZ. 2016. Comparative study of the wallrock and ore and ore forming mechanisms at the Nibao gold deposit, Guizhou, China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3343–3359

Abstract The majority of the orebodies at the Nibao gold deposit are controlled by a reverse fault and an unconformity between the Middle Permian and Upper Permian stratigraphic units. In this paper, based on petrographic study, X-ray diffraction (XRD) analysis and microprobe analysis (EMPA) were integrated to identify and quantify the altered minerals and gold bearing arsenian pyrite, make a comparative study of the characteristics between the wallrock and the ore. Major and trace element analyses were used to determine the element fluxes during mineralization. The main objective of this paper is to understand the relationship between altered minerals and the ore forming, and the ore-forming mechanisms at the Nibao gold deposit. The results indicate that pyrite shows a negative correlation with quartz and a positive correlation with illite. Ore samples have undergone decarbonation, and pyrite in the ore samples generally shows core-rim texture. A part of wallrock samples also have undergone decarbonation, but pyrite in the wallrock samples does not show core-rim texture. Au was added to the ore, while CaO, MgO, S, Ba and Be were removed from the wallrock in the unconformity. In the reverse fault, Au, Sc, As and Fe₂O₃ were added to the ore while SiO₂, CaO, Sr, W and Be show the characteristics of being removed from the wallrock. The integrated results suggest that decarbonation and sulfidation are the main ore forming mechanisms at the Nibao gold deposit. Before mineralization, decarbonation provides favor environment for ore forming. During the ore forming process, mineralization through sulfidation to form gold bearing arsenian rims on pyrite.

Key words Carlin-type gold deposit; Altered minerals; Ore forming mechanism; Nibao; Guizhou

摘要 泥堡金矿的矿体主要赋存在构造蚀变体及逆冲断层破碎带中,受地层和断裂的双重控制。本文在岩相学研究的基础上应用 X 射线粉晶衍射分析(XRD)结合电子探针分析(EMPA)确定和量化了围岩和矿石的蚀变矿物及载金砷黄铁矿,对比了围岩和矿石的特点,并利用主微量元素分析矿化过程中围岩与矿石之间的元素带入带出通量,探讨了泥堡金矿蚀变矿物与成矿的关系及成矿机制问题。分析结果表明,黄铁矿(主要的载金矿物)与石英呈负相关,与伊利石呈正相关;矿石发生

* 本文受国家重点基础研究发展项目“973”计划(2014CB440905)和国家重点研发计划深地资源勘查开采卡林型金矿立体地球化学探测试验示范(2016YFC0600607)联合资助。

第一作者简介:韦东田,男,1988年生,博士生,矿床地球化学专业,E-mail: weidongtian2016@163.com

** 通讯作者:夏勇,男,1960年生,研究员,矿床地球化学专业,E-mail: xiayong@vip.gyig.ac.cn

了去碳酸盐化作用, 矿石中的黄铁矿大多具有环带结构, 部分围岩也发生了去碳酸盐化作用, 而围岩中的黄铁矿一般不具有环带结构; Au 明显加入到构造蚀变体的矿石中, 而 CaO、MgO、S、Ba、Be 等从其围岩中带出; Au、Sc、As 和 Fe₂O₃ 明显加入到逆冲断层破碎的矿石中, SiO₂、CaO、Sr、W、Be 等则显示从其围岩中带出。综合分析认为, 去碳酸盐化和硫化作用是泥堡金矿的主要成矿机制。在矿化前, 去碳酸盐化作用为成矿提供了有利的环境; 在成矿过程中, 矿化通过硫化作用形成了黄铁矿的载金含砷边缘。

关键词 卡林型金矿; 蚀变矿物; 成矿机制; 泥堡; 贵州
中图法分类号 P618.51

1 引言

美国内华达州和中国西南地区的卡林型金矿都以典型钙质沉积岩的去碳酸盐化、粘土化、硫化和硅化为特征 (Cline and Hofstra, 2000; Hu *et al.*, 2002; Yigit and Hofstra, 2003; Peters *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2008, 2009a, b; Cline *et al.*, 2013) 其构造背景、控矿地质因素、热液蚀变和矿物组合等同样具有相似性 (Zhang *et al.*, 2003)。卡林型金矿已经成为美国最重要的金矿类型 (Muntean *et al.*, 2011; Lubben *et al.*, 2012) 但是在中国的金矿产出中仅占一小部分比例 (Su *et al.*, 2012; Tan *et al.*, 2015)。

目前, 关于美国内华达卡林型金矿的研究已经涉及很多方面, 包括矿物共生、构造变形事件、地球化学研究、蚀变研究、金的沉淀过程、成矿时代等 (Arehart *et al.*, 1993; Simon *et al.*, 1999; Peters, 2004; Emsbo *et al.*, 2006; Muntean *et al.*, 2007; Barker *et al.*, 2009; Hickey *et al.*, 2014a, b)。不移动等值线图 (Grant, 1986) 被成功应用于研究蚀变和矿化过程中元素的带入带出, 揭示了 Hg、Sb、Se、Tl 和 Cs 明显的随着 Au 加入到矿化岩石中 (Cail and Cline, 2001)。元素通量研究表明了硫化和去碳酸盐化是内华达卡林型金矿的主要成矿机制 (Cail and Cline, 2001; Kesler *et al.*, 2003)。对蚀变矿物与成矿关系的量化表明了伊利石与 Au 呈正相关 (Cail and Cline, 2001), 黄铁矿与 Tl 也呈正相关 (De Almeida *et al.*, 2010)。

而中国西南贵州卡林型金矿, 也有很多学者进行了研究 (Ashley *et al.*, 1991; 胡瑞忠等, 1995; Zhu and Hu, 2000; Hu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Peters *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2008, 2009a, b; Zhang *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Hu and Zhou, 2012; Wang *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2015)。应用不移动等值线对水银洞金矿的研究表明了 Au、As、Sb、Hg、Tl 和 S 显著的加入到矿石中, Fe₂O₃ 和 SiO₂ 在生物碎屑灰岩主矿体中表现为不移动, CaO、Na₂O、Sr 和 Li 从围岩中被带出 (Tan *et al.*, 2015)。矿物共生研究表明水银洞金矿的黄铁矿有四种类型, 包括生物碎屑结构黄铁矿、浸染状黄铁矿、富砷黄铁矿增生边和贫砷黄铁矿核部 (Su *et al.*, 2012)。而在整个贵州卡林型金矿矿集区, 对蚀变矿物和成矿关系的研究较为薄弱。泥堡金矿目前处于勘查阶段, 控制的资源量已达到特大型。矿床的前期工

作主要涉及地质勘查, 在矿床地质、矿床地球化学特征、含矿岩石地球化学特征、控矿构造、控矿因素、找矿潜力等方面有一些研究报道 (陶平等, 2002; 刘平等, 2006; 祁连素等, 2014; 王疆丽等, 2014; 侯林等, 2015), 而对蚀变矿物与成矿的关系、矿化过程中元素带入带出及成矿机制等问题的研究较少。

本文拟通过 X 射线粉晶衍射结合岩相学研究、地球化学分析、电子探针分析, 来确定和量化蚀变矿物、载金黄铁矿及矿化过程中的元素带入带出通量, 探讨泥堡金矿蚀变矿物与成矿的关系及成矿机制问题。

2 矿床地质特征

黔西南卡林型金矿矿集区位于扬子克拉通与右江盆地的交接部位, 在大地构造上属于印度板块和太平洋板块的复合部位 (Tan *et al.*, 2015), 主要产出泥堡金矿、水银洞金矿、烂泥沟金矿、紫木凶金矿、太平洞金矿等。其中泥堡金矿位于泥堡背斜的边缘, 距离贵州西南的兴仁县以西约 20km (图 1)。矿区出露地层主要有中二叠统茅口组、上二叠统龙潭组、下三叠统永宁镇组、中三叠统关岭组及第四系 (图 1、图 2、图 3)。其中, 茅口组是一套中厚层生物碎屑灰岩、白云质灰岩及泥晶灰岩, 顶部受到强烈硅化 (图 4a)。其与上覆龙潭组底部的火山碎屑岩之间为构造蚀变体, 是一套由区域性构造作用形成的、并经热液蚀变的构造蚀变岩石 (夏勇, 2005; 刘建中等, 2009), 其岩性主要为石英岩、硅质岩、硅化灰岩 (图 4b), 产出一部分层状、似层状矿体。构造蚀变体之上的龙潭组地层可划分为三段。其中第一段与构造蚀变体接触, 分布着凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质角砾岩等, 黄铁矿化明显 (图 4c); 第二段为中厚层状岩屑粉砂岩、砂岩和粘土岩组成的不等厚韵律层 (图 4d, e); 第三段为砂屑泥晶灰岩、粉砂岩和粘土岩组成的不等厚韵律层 (图 4f) (侯林等, 2015)。小部分矿体在龙潭组地层中顺层分布。矿区构造主要发育有北东东向的泥堡背斜、北东东向的 F1 逆冲断层和受其推覆的次一级褶皱—二龙抢宝背斜。其中矿体呈透镜体赋存于 F1 中 (祁连素等, 2014) (图 3)。

泥堡金矿的矿石矿物以硫化物为主, 主要有各种结构类型的黄铁矿, 毒砂次之, 及少量的雄黄、雌黄和黄铜矿等 (图 5a-d)。金主要赋存在黄铁矿的含砷边缘 (图 5c, d)。毒砂沿着含砷黄铁矿的边缘增生, 说明了含砷黄铁矿的形成早于

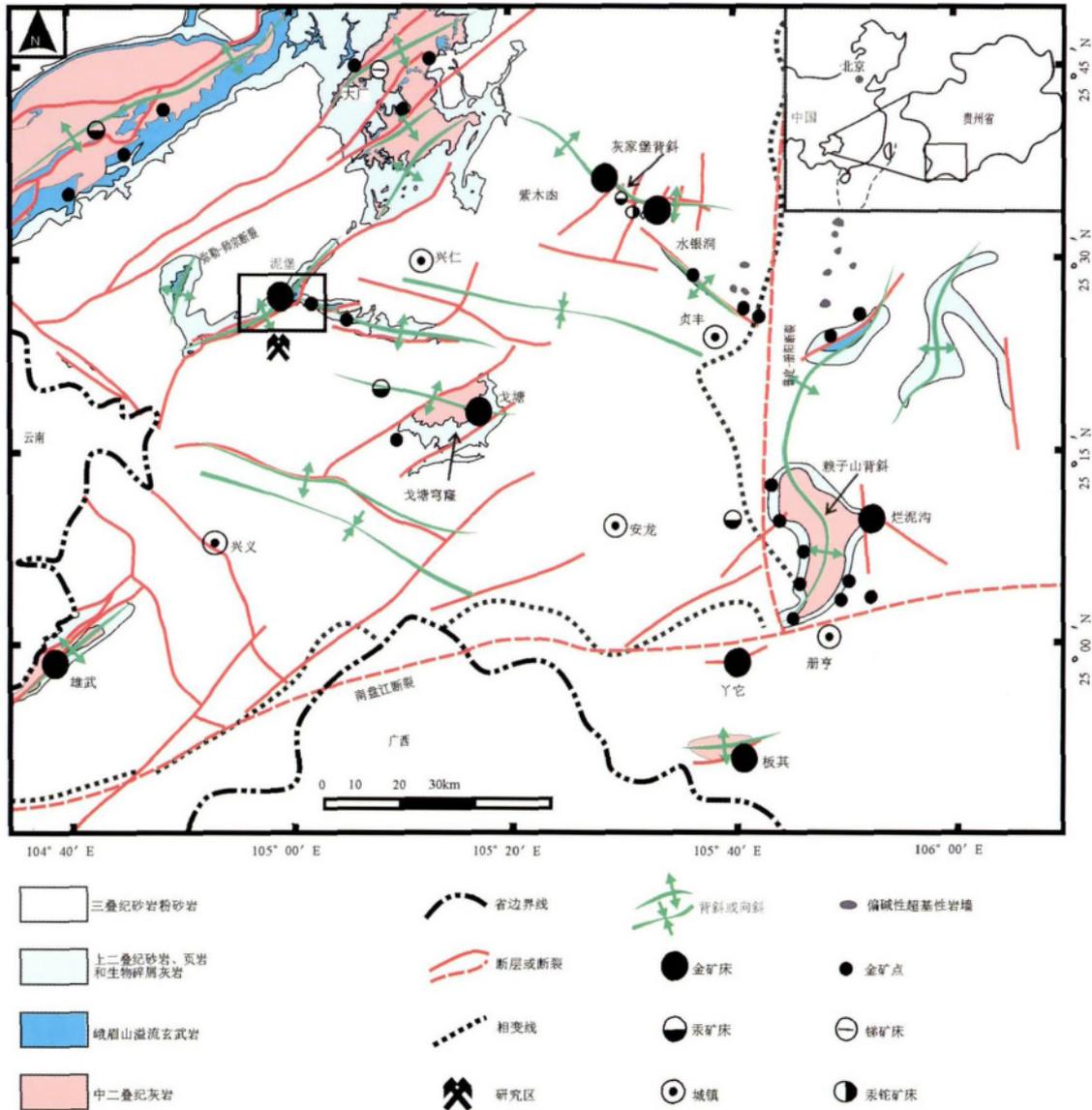


图1 贵州西南区域地质简图(据 Zhang *et al.* ,2003; Tan *et al.* ,2015)

Fig.1 Regional geological sketch map of southwestern Guizhou Province (modified after Zhang *et al.* ,2003; Tan *et al.* ,2015)

毒砂(图 5b)。含砷黄铁矿也以增生边的形式在粗粒低砷黄铁矿边缘形成 核部的粗粒低砷黄铁矿可能在成岩阶段就已经形成(图 5c)。雄黄、雌黄通常在石英脉中产出(图 5d)。脉石矿物主要有石英、(铁)白云石、方解石和伊利石,及少量的萤石、锐钛矿、钾长石等(图 5a, e, f)。自形的方解石颗粒出现在萤石脉中,说明了方解石的形成早于萤石(图 5e)。从围岩到矿石 泥堡金矿普遍发生了去碳酸盐化、硅化和伊利石化。石英和伊利石基质中的铁白云石(或白云石)残余说明了白云石在矿化过程中被部分溶解,是碳酸盐岩围岩中去碳酸盐化的明显证据(De Almeida *et al.* ,2010; Su *et al.* ,2012; Tan *et al.* ,2015)(图 5a)。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集

本次研究选择了泥堡矿区的两条典型剖面作为取样对象(图 3)。图中的小黑点即为采样位置 样品编号由钻孔号和孔深组成。取样的原则是根据岩性取样,每一个岩性段内按金品位从高到低进行取样。为了方便研究,本次研究把金品位大于 1g/t 的样品作为矿石进行研究,而不具有经济开采价值的、金品位小于 0.1g/t 的样品作为围岩进行研究。本次研究从 7 个钻孔选取了 21 件样品,并分析了这些样品的主量元素含量和 Au、As、Sb、Hg、Tl 及其它微量元素含量。对图 3 中有绿色样品编号的样品进行了岩相学对比分析和

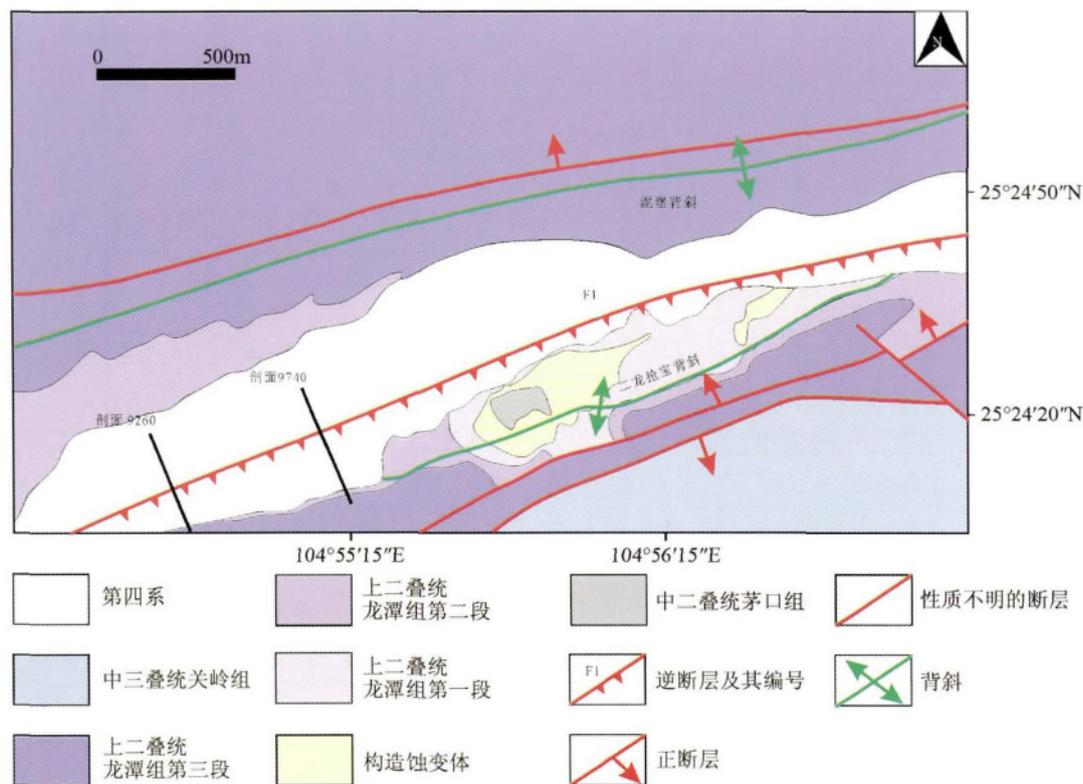


图2 泥堡金矿床地质简图(据祁连素等,2014)

Fig.2 Geological map of the Nibao gold deposit shows stratigraphic units and structures (modified after Qi *et al.* ,2014)

表1 黄铁矿电子探针结果(wt%)

Table 1 Electron microprobe analyses (wt%)

样品号	位置	Au	S	Fe	As	Ag	Se	Ni	Hg	Sb	Te	Zn	Total
545-141	边部	0.049	51.824	46.035	3.129	0.031	0.003	0.043	bdl	bdl	bdl	bdl	101.18
	边部	0.147	51.556	45.061	3.702	0.003	0.041	0.057	0.019	0.018	bdl	bdl	100.60
	边部	0.048	51.001	45.014	4.111	bdl	0.049	0.026	bdl	bdl	bdl	bdl	100.25
	核部	0.023	54.177	46.916	0.631	0.003	bdl	0.009	0.031	bdl	0.018	0.018	101.83
	核部	0.014	53.478	46.713	0.719	0.034	0.014	0.014	0.047	bdl	0.010	bdl	101.04
	核部	0.001	53.461	47.190	0.550	0.016	bdl	0.014	bdl	0.010	0.016	bdl	101.26
545-135		bdl	53.294	45.439	1.166	bdl	bdl	0.019	0.050	bdl	bdl	0.032	100.00
		bdl	52.579	44.791	0.585	0.009	0.017	0.018	bdl	0.003	bdl	0.029	98.03
9740-122		bdl	49.627	43.974	5.504	bdl	bdl	0.088	bdl	0.008	bdl	bdl	99.20
		bdl	50.007	44.735	5.433	0.010	bdl	bdl	0.042	0.008	bdl	bdl	100.24
9740-117	核部	bdl	50.342	44.163	3.978	bdl	bdl	0.015	bdl	bdl	bdl	0.033	98.53
	边部	0.101	51.069	45.786	4.907	0.024	0.036	0.008	bdl	0.010	bdl	0.004	101.95
	核部	0.001	53.268	44.586	0.949	0.040	0.034	0.014	bdl	0.010	bdl	0.006	98.91
	边部	0.141	50.455	44.842	3.901	bdl	bdl	0.005	bdl	bdl	bdl	bdl	99.34
	边部	0.043	50.899	44.852	3.759	bdl	bdl	0.014	bdl	0.004	0.010	bdl	99.58
边部	0.081	51.261	45.429	4.077	0.046	0.003	bdl	0.042	bdl	0.026	bdl	100.97	

注: bdl: 低于检测限. 检测限: Au: 0.004wt% ,Fe: 0.003wt% ,S: 0.005wt% ,As: 0.003wt% ,Ag: 0.003wt% ,Se: 0.003wt% ,Ni: 0.003wt% ,Hg: 0.003wt% ,Sb: 0.003wt% ,Te: 0.003wt% ,Zn: 0.003wt%

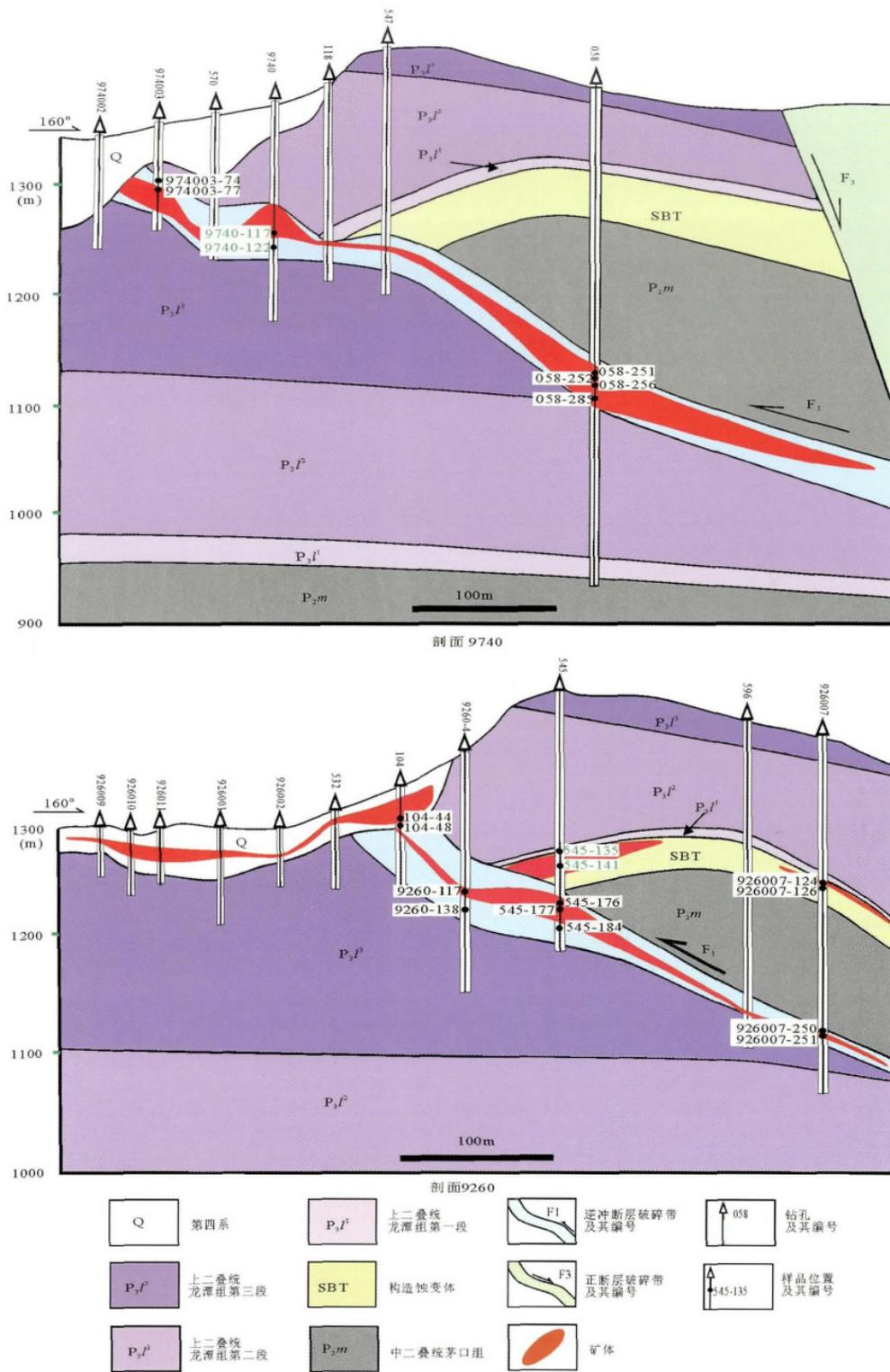


图3 泥堡金矿 9740、9260 勘探线剖面图

两条勘探线的位置见图 2 所示。图中小黑点为取样位置。样品编号由钻孔号和钻孔深度组成。有绿色编号的样品进行了岩相学对比研究、电子探针分析和矿化过程中元素带入带出通量分析

Fig. 3 Cross section 9740 and 9260 at the Nibao deposit

The positions of two cross sections were shown in Fig. 2. The sample number was composed of the drill number and its depth. Samples in green number were chosen for petrographic study, electron microprobe analyses and element fluxes analyses during ore forming process

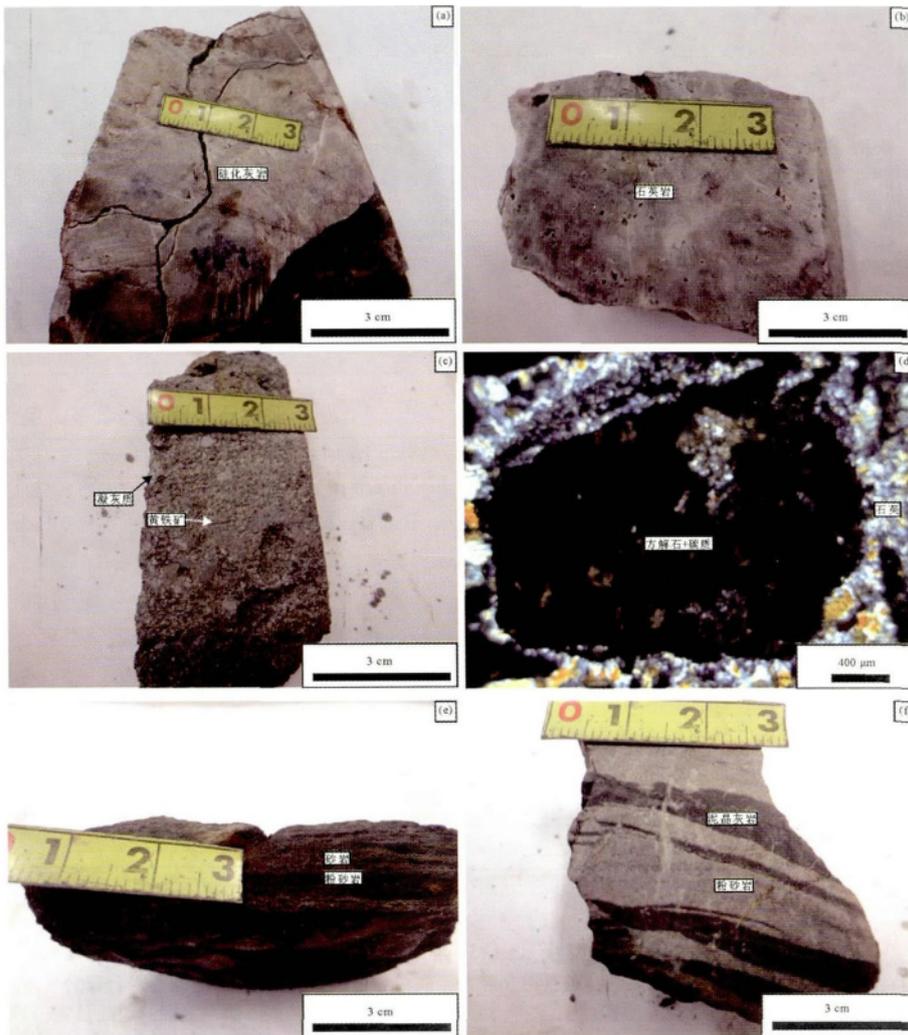


图4 茅口组顶部、构造蚀变体及龙潭组岩石样品

(a) 茅口组顶部的硅化灰岩,显示强烈硅化的特点;(b) 构造蚀变体中的石英岩;(c) 龙潭组第一段的凝灰质砂岩;(d) 龙潭组第二段的钙质碳质岩屑粉砂岩(透射偏光显微图片);(e) 龙潭组第二段砂岩粉砂岩互层;(f) 龙潭组第三段粉砂岩泥晶灰岩互层. 缩写: C-碳质; Cal-方解石; Py-黄铁矿; Qtz-石英

Fig. 4 Samples from the top of Maokou Formation, the unconformity, and Longtan Formation

(a) silicified limestone from the top of the Maokou Formation shows characteristic of strongly silicization; (b) quartzite from the unconformity between Maokou Formation and Longtan Formation; (c) tuffaceous sandstone from the first unit of Longtan Formation; (d) calcareous carbonaceous clastic siltstone from the second unit of Longtan Formation (photomicrograph under reflected light); (e) sandstone-siltstone interbed from the third unit of Longtan Formation; (f) siltstone-micrite interbed from the third unit of Longtan Formation. Abbreviations: C-carbon; Cal-calcite; Py-pyrite; Qtz-quartz

矿化过程中元素的带入带出分析。

3.2 背散射电子成像和电子探针分析

将岩石样品切割并制成约5cm长的抛光薄片,在光学显微镜下确定待测矿物后,然后在薄片上喷碳,最后送进电子探针显微分析的进样系统中,对待测矿物进行背散射电子成像和电子探针分析。矿物鉴定和背散射电子成像由电子探针上的EDAX能谱分析仪(EDS)确定。所有样品在中国科

学院地球化学研究所进行测试,仪器型号为EPMA-1600(岛津,日本)。点分析的测试条件为电压25kV,电流10~40mA,束斑直径10μm,分析元素和检出限见表1。

3.3 主微量元素分析

在澳实分析检测有限公司分析所有21件样品的主量元素、金、汞含量。其它微量元素在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行分析。分析结果见电

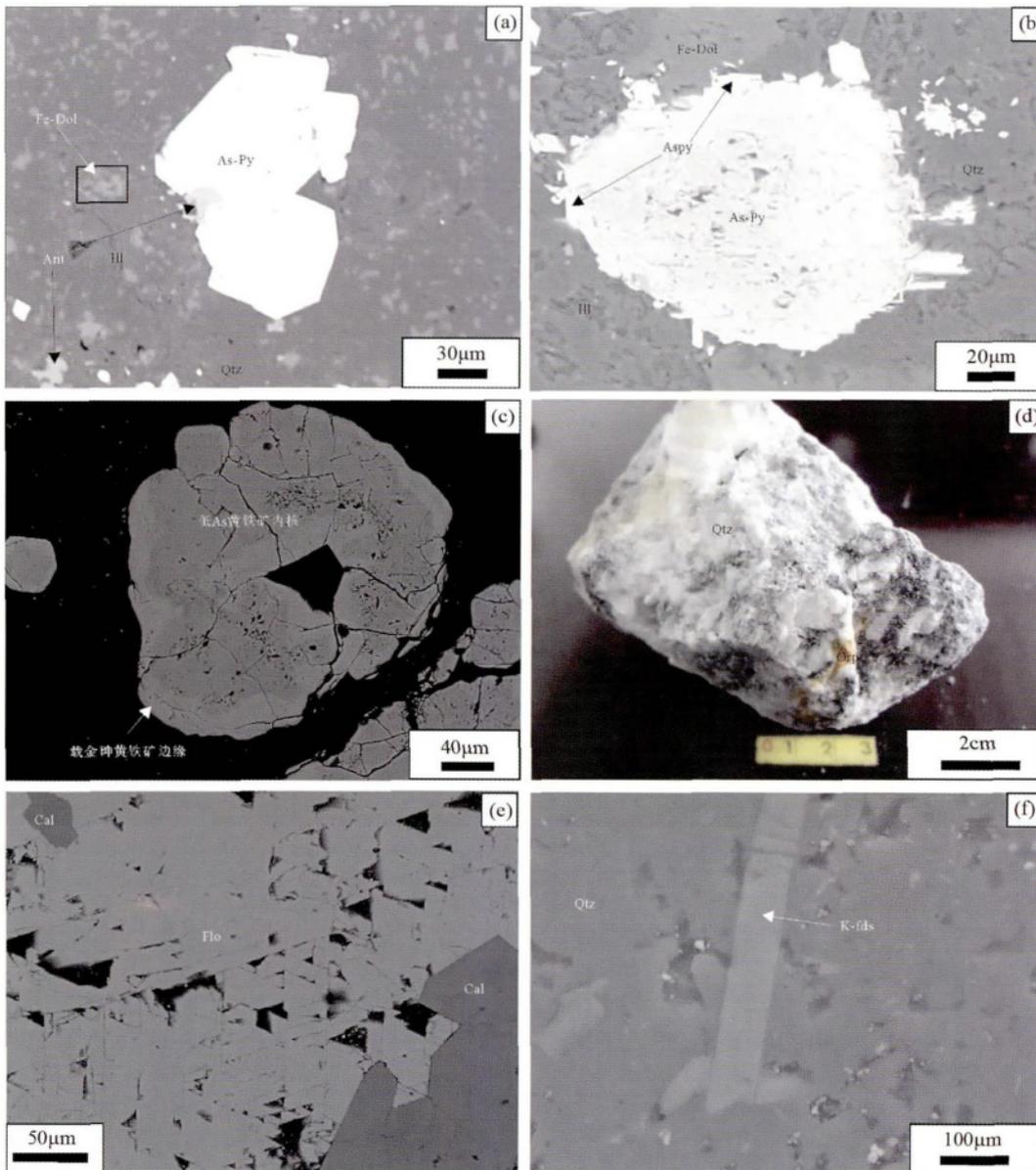


图5 泥堡金矿的矿物组合类型

(a) 他形铁白云石残留在由石英和伊利石组成的基质中,表明铁白云石受到了部分溶解(BSE图片);(b) 毒砂围绕砷黄铁矿,表明在矿物共生次序中砷黄铁矿形成早于毒砂(BSE图片);(c) 砷黄铁矿在粗粒低砷黄铁矿边缘形成环带(BSE图片);(d) 毒砂出现在石英脉中;(e) 自形的方解石赋存在萤石脉中,表明在矿物共生次序中方解石形成早于萤石(BSE图片);(f) 少量钾长石存在于样品中(BSE图片)。矿物缩写: Ant-锐钛矿; Aspy-毒砂; As-Py-砷黄铁矿; Cal-方解石; Fe-Dol-铁白云石; Flo-萤石; ill-伊利石; K-fds-钾长石; Orp-雌黄; Py-黄铁矿; Qtz-石英

Fig. 5 Paragenetic sequences of mineral assemblages from the Nibao deposit

(a) anhedral ferrodolomite relicts hosted in a matrix of quartz and illite, indicating ferrodolomite has been partially dissolved (BSE image); (b) arsenopyrite encompasses on arsenian pyrite, indicating arsenian pyrite occurs earlier in mineral paragenesis sequence (BSE image); (c) arsenian pyrite forms rim on coarse-grained low As pyrite core (BSE image); (d) orpiment presents in quartz vein; (e) euhedral calcite hosted in fluorite vein, indicating calcite forms earlier than fluorite in mineral paragenesis sequence (BSE image); (f) trace K-feldspar occurs in the sample (BSE image). Abbreviations: Ant-anatase; Aspy-arsenopyrite; As-Py-arsenian pyrite; Cal-calcite; Fe-Dol-ferrodolomite; Flo-fluorite; ill-illite; K-fds-K-feldspar; Orp-orpiment; Py-pyrite; Qtz-quartz

子版附表。分析方法简述如下。

主量元素分析在 X 射线荧光光谱(XRF)上进行,仪器型号: Axios-PW4400, PANalytical,工作电压及电流分别是 20kV、10mA。称出 0.7g 粉末样品混合 7g 硼酸,于设定温度

下在铂金坩锅中加热至样品熔化,冷却后得到一个均一的熔融体。最后,对冷却的熔融体进行 XRF 分析。这种方法最后得到了样品中 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 P_2O_5 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、F 和 S 的含量,以及样品的烧失量(LOI)。

表2 X射线粉晶衍射半定量计算结果(%)

Table 2 X-ray diffraction semi-quantitative calculated results (%)

样品号	金品位(g/t)	伊利石	高岭石	锐钛矿	石英	钾长石	黄铁矿	毒砂	方解石	白云石	萤石
545-135	0.005	11	8	bdl	60	3	3	bdl	1	14	1
545-141	5.210	9	11	bdl	63	5	6	1	3	bdl	2
545-176	1.475	21	bdl	3	49	3	1	bdl	4	19	bdl
545-177	0.919	28	bdl	4	39	2	1	bdl	2	24	bdl
545-184	0.313	27	mdl	3	27	3	10	2	3	24	1
926007-124	0.691	6	bdl	bdl	87	4	2	bdl	bdl	bdl	2
926007-126	1.810	53	5	5	14	bdl	16	1	1	bdl	5
926007-250	0.830	13	bdl	2	47	2	3	2	19	13	bdl
926007-251	0.013	3	bdl	bdl	56	4	1	bdl	36	1	bdl
9260-117	1.925	13	1	2	31	4	4	1	28	15	1
9260-138	0.227	11	2	1	51	7	3	1	10	13	1
104-44	0.953	29	bdl	bdl	32	2	4	2	2	29	1
104-48	0.581	36	bdl	2	22	2	5	2	4	25	1
058-251	0.439	24	bdl	3	27	bdl	11	2	3	29	1
058-252	0.021	20	bdl	2	36	4	12	2	3	20	2
058-256	1.875	29	bdl	3	21	1	10	3	3	28	2
058-285	0.005	bdl	bdl	1	48	3	1	1	45	2	bdl
9740-117	9.380	7	bdl	1	44	2	9	1	10	24	1
9740-122	0.024	bdl	bdl	bdl	54	3	bdl	bdl	43	bdl	bdl
974003-74	0.005	34	bdl	1	44	6	3	1	2	9	1
974003-77	2.280	4	8	1	67	2	1	bdl	4	11	1
围岩平均矿物组成		14	1	1	46	4	3	1	20	11	bdl
矿石平均矿物组成		21	2	2	44	2	5	1	6	15	1

注: bdl: 低于检测限. 所有矿物检测限为1%

微量元素分析是在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上进行,仪器型号: Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000。用氢氟酸和硝酸的混合溶液将50mg粉末样品在高压罐于190℃的温度下密闭消解48h。使用Rh做内标元素,分析的国际标准OU-6和GBPG-1与推荐值一致,所有元素的分析精度都优于5%。这种方法得到了样品中微量元素的含量,包括Sb、Tl、Bi、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Cs、Ba、Hf、Ta、W、Pb、Th、U及14种稀土元素的含量。样品金品位的检测采用火试法在原子吸收光谱(AAS)上进行测定,样品的汞含量采用电感耦合等离子发射光谱法测定。

3.4 X射线粉晶衍射分析

采用X射线粉晶衍射(XRD)的分析方法对粉末样品进行矿物定性及半定量,仪器产于日本理学公司,型号: D/Max-2200, CuK α 辐射,石墨单色器滤波。工作电压和电流分别是40kV、30mA。2 θ 在3~65°范围内收集谱线,以0.04°步长、每步5s的方式进行衍射扫描。样品中矿物相的确定是通过与各种矿物相的标准谱线的对比实现,在软件JADE6.5上进行。样品中矿物的半定量分析按照扣除背景、平滑、寻峰及

计算等步骤,同样在软件JADE上进行。样品中每一种矿物的含量由K值法计算,计算公式如下:

$$C_i = \frac{I_i/R_i}{\sum_i^n I_i/R_i} \times 100\%$$

式中 C_i 是矿物 i 的含量, I_i 是矿物 i 最强峰的衍射强度, n 是样品所含矿物种类数量, R_i 是矿物 i 的RIR值,由软件JADE6.5的PDF卡片提供(Meng *et al.*, 2014)。由XRD半定量计算得到样品中矿物含量的结果列于表2。

4 结果

4.1 岩相学研究

图6a和图6b中样品545-135和545-141分别代表构造蚀变体中硅质岩的围岩和矿石,2个样品的位置如图3所示,其全岩金含量分别是0.005g/t、5.210g/t。2个样品都属于硅质岩,石英含量达60%(表2),以灰白色和块状构造为特点。围岩样品主要由石英、伊利石和白云石组成,而矿石样品主要由石英和伊利石组成,无白云石(表2)。在BSE图像下,矿石样品中的硫化物主要为环带黄铁矿(约6%,表2)

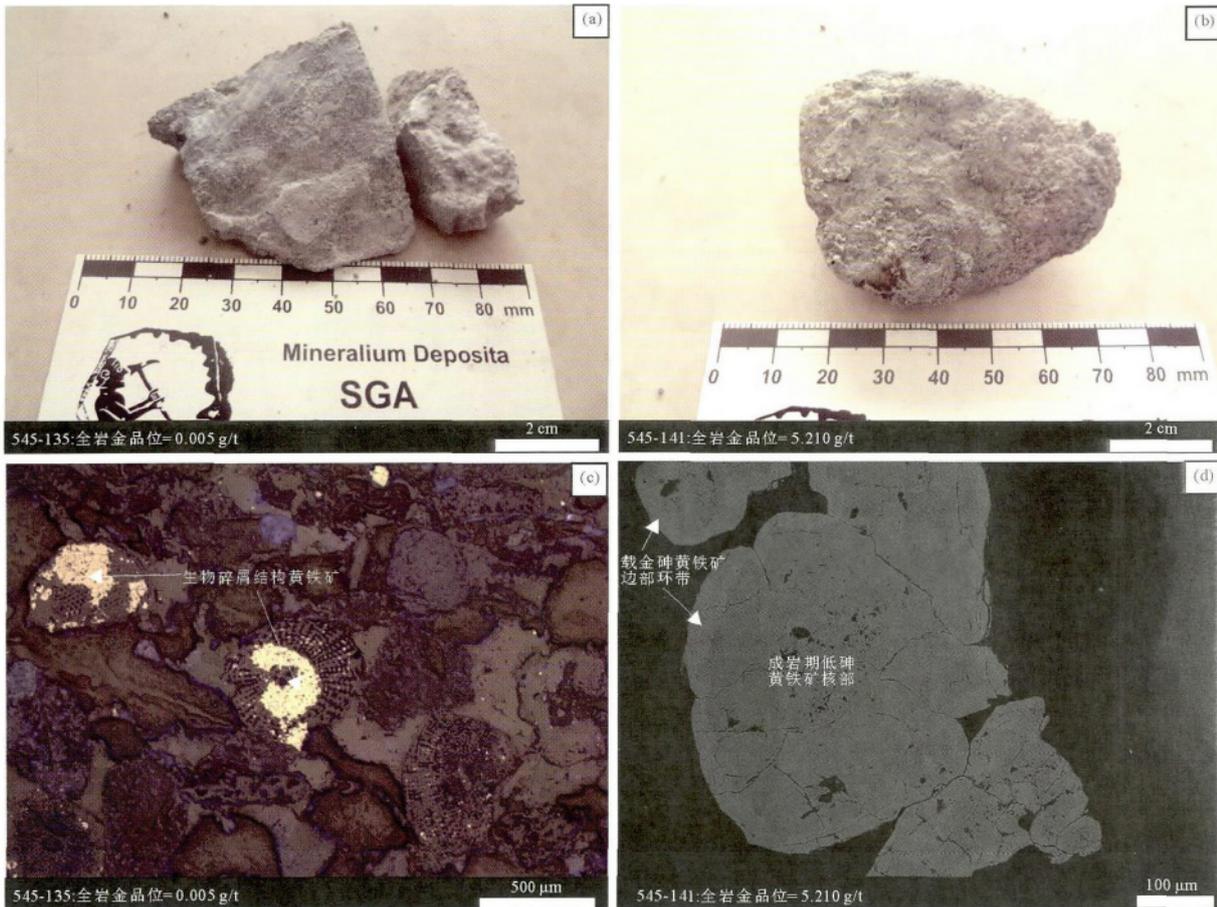


图6 硅质岩蚀变围岩和矿石岩相学对比

(a) 灰白色块状构造的硅质岩蚀变围岩样品; (b) 灰白色块状构造的硅质岩矿石样品; (c) 蚀变围岩样品中的生物碎屑结构黄铁矿(反射光图片); (d) 矿石样品中的环带结构黄铁矿(BSE 图片)

Fig. 6 Petrographic comparison of altered wallrock and ore from siliceous rock

(a) wallrock sample from the USMU shows grey white color and blocky structure; (b) ore sample from the USMU shows grey white color and blocky structure; (c) low As pyrite host in the biotrititus with dissolved characteristic (RPPL image); (d) ore pyrite riming pre-ore pyrite core (BSE image). USMU = unconformity surface of the Middle to Upper Permian

(图6d)。环带黄铁矿以成矿前的低砷黄铁矿为核部,其边缘增生环带状的成矿期含金砷黄铁矿。环带黄铁矿大小在100~500 μm 左右,环带宽约10~50 μm 。EMPA分析表明硅质岩矿石样品含金砷黄铁矿环带的金含量为 480×10^{-6} ~ 1470×10^{-6} ,平均 810×10^{-6} ,砷含量为3.129%~4.111%,平均3.647%;核部低砷黄铁矿的金和砷含量大大降低,金含量仅有 10×10^{-6} ~ 230×10^{-6} ,平均 130×10^{-6} ,砷含量仅有0.55%~0.719%,平均0.663%(表1)。围岩样品中的硫化物主要为生物碎屑结构黄铁矿(图6c)。生物碎屑结构黄铁矿可能是由早期成矿流体形成的,以细小的无环带砷黄铁矿结合体取代生物碎屑或化石为特点,但是还保留了原来生物碎屑或化石形态结构(图6c)。EMPA分析表明,生物碎屑结构黄铁矿的金含量低于检测限,砷含量为0.585%~1.116%(表1)。

图7a和图7b中样品9740-122和9740-117分别代表逆冲断层F1破碎带中硅化灰岩的围岩和矿石2个样品的位置

如图4所示,其全岩金含量分别为0.024g/t、9.380g/t。2个样品都以灰黑色和块状构造为特征,并且都被数条方解石细脉切割。方解石细脉脉宽1~5mm,脉中无黄铁矿等硫化物出现。矿石手标本样品颜色偏白,围岩样品更致密,可能是因为矿石样品受到粘土化、硅化比围岩样品更加强烈。围岩样品的主要矿物为石英和方解石,硫化物只有极细粒的黄铁矿($< 10\mu\text{m}$),在背散射电子成像下零星分布(图7c)。EMPA分析表明,围岩样品中极细粒黄铁矿为贫金砷黄铁矿,金含量低于检出限,砷含量为5.433%~5.504%(表1)。在矿石样品中,主要矿物有石英、方解石、白云石和伊利石,硫化物主要有黄铁矿,及少量毒砂。矿石样品中的黄铁矿具有核边结构,即具有一个内核和边部,内核大小约30 μm ,边部宽约50 μm ,内核和边部之间有明显的空隙(图7d)。据EMPA成像可将核边结构黄铁矿划分为两种类型,一种核边结构黄铁矿的核部和边部都是砷黄铁矿(图8a),另一种核边结构黄铁矿的核部是低砷黄铁矿,而边部是砷黄铁矿(图

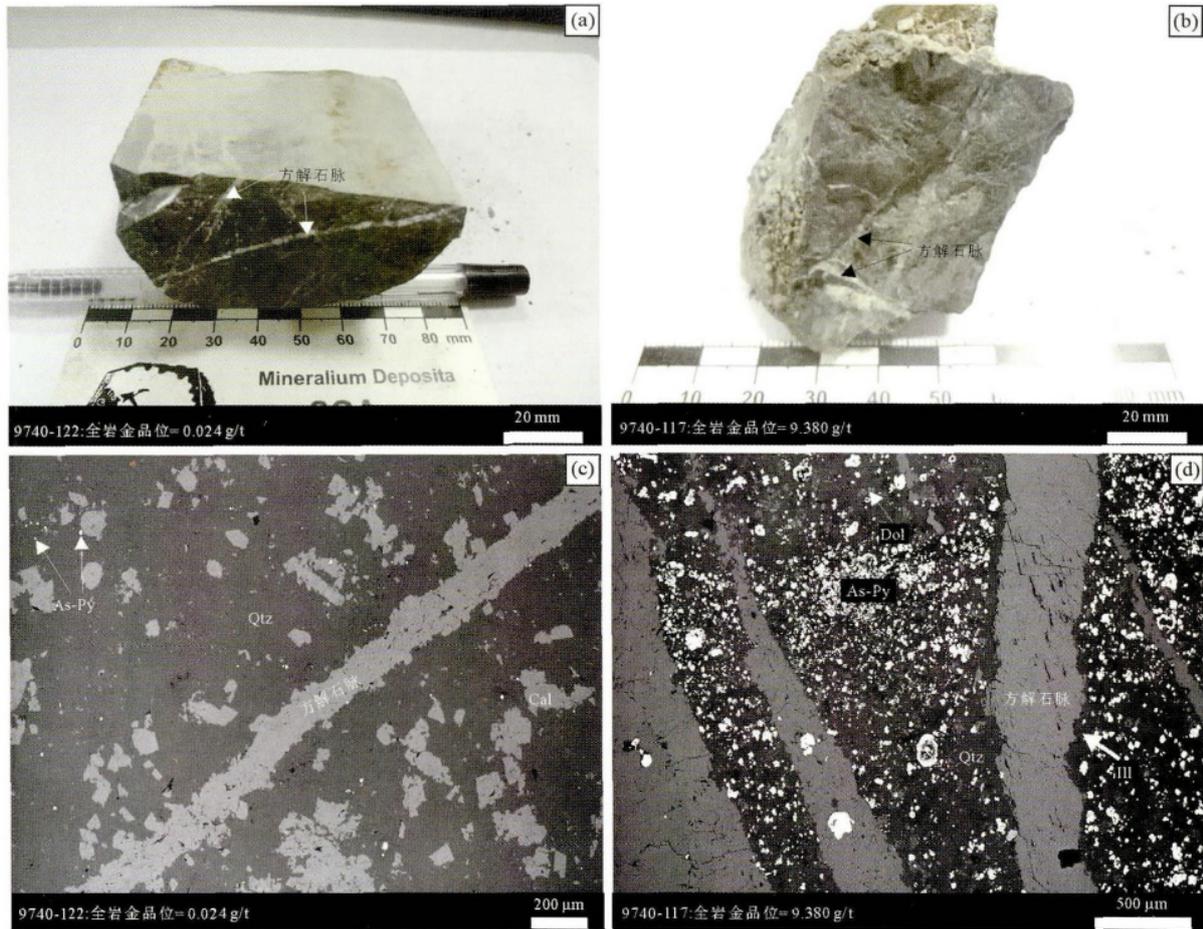


图7 硅化灰岩蚀变围岩和矿石岩相学对比

(a) 灰黑色块状构造的硅化灰岩围岩样品被方解石脉切割; (b) 灰黑色块状构造的硅化灰岩矿石样品被方解石脉切割; (c) BSE 图片显示只有极少量砷黄铁矿出现在硅化灰岩蚀变围岩样品中; (d) BSE 图片显示大量的环带结构黄铁矿出现在硅化灰岩矿石样品中

Fig. 7 Petrographic comparison of altered wallrock and ore from silicified limestone

(a) wallrock sample collected from the reverse fault F1 with grey black color and blocky structure, was cut by calcite veins; (b) ore sample collected from the reverse fault F1 with grey black color and blocky structure, was cut by calcite veins; (c) BSE image shows trace arsenian pyrite in low-grade sample; (d) BSE image shows abundant core-rim textured pyrite in ore sample

8b)。两种类型核边结构黄铁矿的边部含金, 金含量 $430 \times 10^{-6} \sim 1410 \times 10^{-6}$ 核部贫金, 金含量 $0 \sim 10 \times 10^{-6}$ (表 1)。

4.2 XRD 结果

X 射线衍射谱线显示, 石英在所有围岩和矿石中都有出现。其它矿物如伊利石、黄铁矿、毒砂、方解石、白云石等并不普遍出现。高岭石的峰在大多数样品中缺失。伊利石在各种岩性的围岩和矿石都有出现, 有的样品中的伊利石高达 53%。XRD 半定量计算表明, 矿石样品的伊利石平均含量明显高于围岩样品的伊利石平均含量, 围岩和矿石的石英、黄铁矿、毒砂含量相近, 矿石样品中碳酸盐矿物(方解石和白云石或铁白云石)的平均含量比围岩的低。

石英在所有围岩和矿石中都有出现, 说明了硅化在泥堡金矿所有的蚀变中范围最广泛。伊利石在大多样品中出现, 并且缺失其它粘土矿物的峰, 说明泥堡金矿的粘土化主要是

伊利石化。围岩与矿石中不同的伊利石含量说明部分伊利石可能与成矿热液有成因关系。

4.3 矿化过程中元素带入带出结果

矿化过程中矿床的矿石和围岩之间元素的带入带出通量, 可以利用最高品位样品和最低品位样品的主微量元素对数等值线图来确定 (Gresens, 1967; Grant, 1986)。元素的活性或不活性可以用所有样品的两个元素作 X-Y 散点图的方法来确定 (Finlow-Bates and Stumpfl, 1981)。由于蚀变过程造成岩石体积丢失, 如去碳酸盐化、脱水作用等, 会引起不活动元素的含量增加, 不活动元素在 X-Y 散点图中远离坐标原点。如果蚀变过程中有组分加入到岩石中, 如硅化、伊利石化等, 会造成不活动元素稀释, 含量降低, 不活动元素在 X-Y 散点图中靠近坐标原点。各种蚀变过程对不活动元素综合作用的结果是不活动元素在 X-Y 散点图中可以拟合出

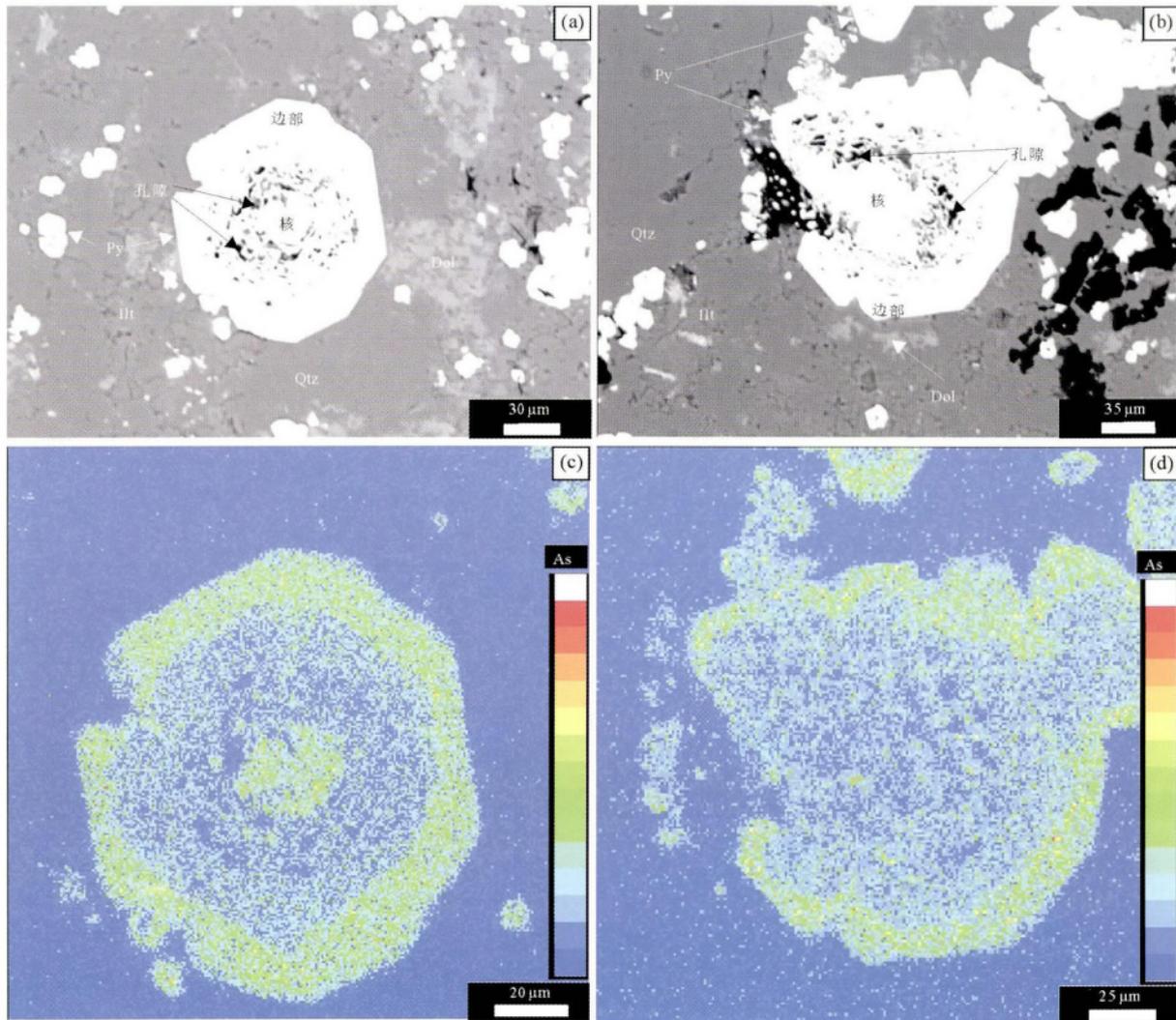


图8 两种不同类型的核-边结构黄铁矿

(a、c) 核-边结构黄铁矿的核部和边部都富砷 核部贫金 边部含金; (b、d) 核-边结构黄铁矿核部砷含量低且贫金 边部富砷且含金

Fig.8 BSE images showing two types of core-rim textured pyrite

(a , c) arsenic is rich in both the core and the rim of core-rim textural pyrite; (b , d) arsenic is poor in the core but rich in the rim of the core-rim textural pyrite

一条直线。本次研究所有样品的 $TiO_2-Al_2O_3$ 的高 R^2 (0.88) 值说明 Ti 和 Al 是不活动元素(图9)。具有类似特征的还有 Zr 和 Th $R^2 = 0.93$,说明这两个元素也是不活动元素。对数等值线图上的不移动等值线就是由不活动元素组成的回归线。不移动等值线的斜率决定了矿化过程中围岩和矿石的质量改变量。没有投在不移动等值线上的元素显示活动行为,是活动元素。位于不活动等值线之上的元素,在矿化过程中被带入矿石中,反之带出(Gresens, 1967; Grant, 1986)。

图10的对数等值线图显示了矿化过程中矿石和围岩之间元素的带入带出情况,图中样品的位置见图3。这些样品分别来自构造蚀变体中的硅质岩(545-135和545-141)和逆冲断层F1破碎带的硅化灰岩(9740-122和9740-117)。

主微量对数等值线图显示在构造蚀变体的硅质岩中(图

10a) ,Au 明显加入到矿石中, SiO_2 和 Fe_2O_3 保持不变,典型卡林型金矿成矿元素包括 As、Hg、Sb、Tl 等在图中也保持不变,主量元素 CaO、MgO 和 S 明显从围岩带出,以及微量元素 Ba、Be 等也从围岩带出。在逆冲断层 F1 破碎带中的硅化灰岩中(图10b) ,Au、Sc、As 和 Fe_2O_3 明显加入到矿石中, S 和 MgO 保持不变,除了 As 其它典型的卡林型成矿元素 Hg、Sb、Tl 等在图中也保持不变, SiO_2 和 CaO 显示被带出的特点,微量元素 Sr、W 和 Be 也被带出。

矿化过程质量改变量与不活动元素回归线的斜率有关,如果不活动元素回归线斜率大于质量一致线斜率(斜率 = 1),则说明矿化过程会造成质量丢失,如果不活动元素回归线斜率小于质量一致线斜率,则说明矿化过程会造成质量增加。质量改变量可以由如下公式计算: $\Delta_{mass} = ((1/m) - 1)$

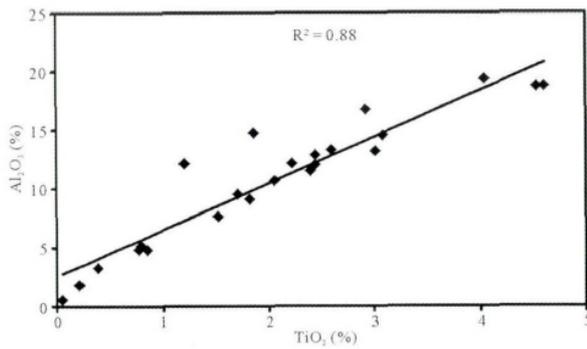


图9 TiO_2 - Al_2O_3 关系图

TiO_2 - Al_2O_3 高的 R^2 (0.88) 值说明 Ti 和 Al 是不活动元素

Fig. 9 Plot of TiO_2 vs. Al_2O_3

The high correlation of TiO_2 vs. Al_2O_3 ($R^2 = 0.88$) indicates that Ti and Al are immobile elements

• 100, 式中 m 表示不活动元素回归线的斜率 (Hofstra, 1994)。质量改变量计算表明构造蚀变体硅质岩矿石样品质量增加 17%, 逆冲断层破碎带 F1 硅化灰岩矿石样品质量丢失 89% (图 10a, b), 说明破碎带中的蚀变改造作用更强烈。

5 讨论

5.1 围岩和矿石对比

来自构造蚀变体硅质岩的特点表明其受到了硅化、伊利石化及硫化作用(黄铁矿化作用), 矿石中未发现白云石说明了其经受了更加强烈的去碳酸盐化。大量的具有含金环带结构黄铁矿在硅质岩矿石中富集(图 6d), 而具有生物碎屑结构黄铁矿则富集在其围岩中(图 6c), 说明这两种黄铁矿由不同热液形成或不同热液阶段形成, 环带结构的内核可能是成岩期的黄铁矿, 含金环带可能是主成矿期通过硫化作用形成的, 而生物碎屑结构黄铁矿可能与早期成矿热液有关。

逆冲断层 F1 破碎带中硅化灰岩围岩遭受更为强烈的硅化作用, 其中只有少量细粒黄铁矿沉淀。因此, 强烈的硅化作用可能会抑制岩石中含金黄铁矿的沉淀(图 7c)。硅化灰岩矿石中不同类型的核边黄铁矿说明成矿流体可能是多期活动的, 核部贫金低砷黄铁矿可能是成岩期黄铁矿, 核部贫金砷黄铁矿可能是由早期成矿流体交代成岩黄铁矿形成的, 而边部含金砷黄铁矿可能是有主成矿期流体形成的。

5.2 矿化过程中元素带入带出

矿化过程中元素的带入带出通量研究结果表明硅质岩中 SiO_2 保持不变(图 10a), 可能是由于其围岩和矿石样品中含有不同含量的伊利石及高岭石的原因。而通过 XRD 分析得出矿石样品的石英含量高于围岩样品的石英含量, 说明硅质岩矿石样品的硅化作用更为强烈。 Fe_2O_3 保持不变说明硅

质岩的围岩和矿石中黄铁矿的含量保持不变, 硅质岩围岩中的黄铁矿可能与早期成矿热液有关, 而硅质岩矿石中的黄铁矿可能与主成矿期热液有关, 与岩相学研究及电子探针分析结果一致。典型卡林型成矿元素 As、Hg、Sb、Tl 等在硅质岩围岩和矿石中保持不变, 可能与构造蚀变体遭受的强烈构造作用有关, 蚀变范围比矿化范围广。主量元素 CaO、MgO 从围岩中带出反映了去碳酸盐化的过程, 去碳酸盐化同时引起微量元素 Ba、Be 等一起带出。S 从围岩中带出说明矿石中的 S 可能来自地层。在逆冲断层 F1 破碎带的硅化灰岩中, Fe_2O_3 带入矿石说明硅化灰岩矿石发生黄铁矿化作用。Au、As 带入矿石中, 电子探针分析表明矿石中含金砷黄铁矿含有大量 Au 和 As, 所以认为它们是加入到矿石中的含金砷黄铁矿中。Sc 明显的带入到硅化灰岩矿石中, 可能是因为在碳酸盐和碳酸氢盐中 Sc 可能取代 Mg 和 Fe 离子而使得 Sc 发生明显的富集 (Eby, 1973; Bogoch *et al.*, 1984), 同时大量的 Sc 在酸性条件下可以被运移 (Wood and Samson, 2006)。 SiO_2 在硅化灰岩中显示带出的特点, 可能是由于硅化灰岩围岩中发生了更加强烈的硅化作用有关, 与硅化灰岩围岩中出现大量石英一致(图 7c)。

5.3 去碳酸盐化作用和硫化作用

岩相学研究表明他形的铁白云石存在于围岩和矿石样品中, 经溶蚀作用而具有多孔隙的特点(图 5a)。在矿体中, 大量的含金黄铁矿沉淀在由石英和伊利石组成的基质中(图 5a-e、图 7d), 而围岩中的黄铁矿主要赋存在由铁白云石组成的基质中(图 6c)。这些现象反映了矿化过程中的去碳酸盐化作用。XRD 半定量计算结果表明矿石的碳酸盐矿物平均含量比围岩的低, 同样反映了矿化过程中的去碳酸盐化作用。此外, 围岩和矿石样品中 MgO 和 CaO 的二元图解(图 11) 同样反应了去碳酸盐化的过程, 图中 I 表示矿石样品和部分围岩发生了去碳酸盐化, II 表示没有发生去碳酸盐化的围岩。围岩也有发生去碳酸盐化, 说明去碳酸盐化的范围比矿化范围广泛。岩石发生去碳酸盐化, 可能为载金黄铁矿的沉淀提供了有利环境。同时, 载金黄铁矿中的铁可能来自碳酸盐矿物中铁白云石溶解释放出来的铁。所以, 去碳酸盐化是泥堡金矿的主要成矿机制之一。

矿化过程中硫化作用或黄铁矿化作用的问题可以由围岩和矿石的铁硫散点图来确定 (Stenger *et al.*, 1998)。利用铁硫散点图说明了硫化作用是水银洞金矿的主要成矿机制之一 (Tan *et al.*, 2015)。图 12 中黄铁矿线是硫铁在黄铁矿中的相对含量: $S = 1.15 \times \text{Fe}$ (wt%)。采用不活动元素铝对图中的铁和硫进行标准化 (Hofstra and Cline, 2000)。图中大多数样品落在黄铁矿线下面, 而且基本是沿着黄铁矿线的方向漂移, 说明矿化过程中硫和铁同时加入到矿石中。铁硫关系图表明, 矿化过程中硫和铁同时加入到矿石中, 说明泥堡金矿除了硫化作用(加入硫)也有黄铁矿化作用(加入硫和铁)的发生, 黄铁矿化作用可能是硫化作用的表现形式之

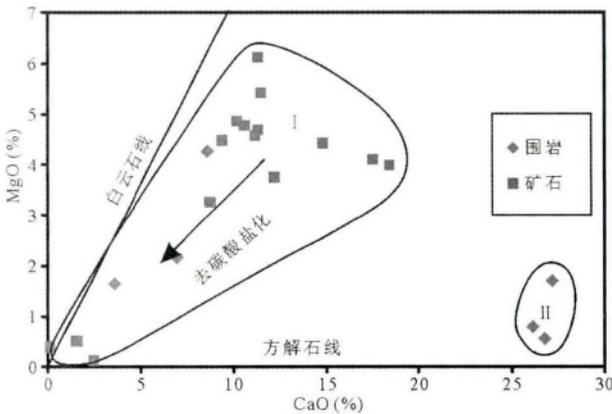


图 11 CaO-MgO 关系图

箭头方向表示去碳酸盐化过程. 图中 I 表示矿石样品和部分围岩发生了去碳酸盐化, II 表示没有发生去碳酸盐化的围岩样品

Fig. 11 Correlation diagrams shows relation between CaO and MgO

Arrow shows the process of decarbonation. In the figure, I represents ore samples and part of wallrock samples underwent decarbonation, and II represents wallrock samples which did not undergo decarbonation

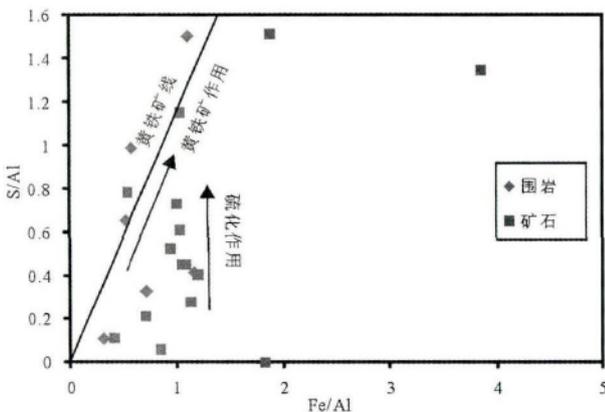


图 12 铁-硫关系图(据 Stenger *et al.*, 1998)

图中利用不活动元素 Al 对所有样品的铁和硫进行标准化. 箭头方向表示可能的矿化作用, 即黄铁矿化作用(加入铁和硫)和硫化作用(加入硫)

Fig. 12 Correlation diagrams shows relation between Fe and S (after Stenger *et al.*, 1998)

Fe and S were normalized to immobile Al in all samples. Arrows show the direction of possible mineralization, which associated with pyritization (addition of S and Fe) and sulfidation (addition of only S)

一. 结合 EMPA 分析, 金主要赋存在黄铁矿的含砷边缘, 所以认为硫化作用在矿化过程中形成了黄铁矿的含砷边缘, 同时金在黄铁矿的含砷边缘沉淀. 所以, 硫化作用也是泥堡金矿的主要成矿机制之一。

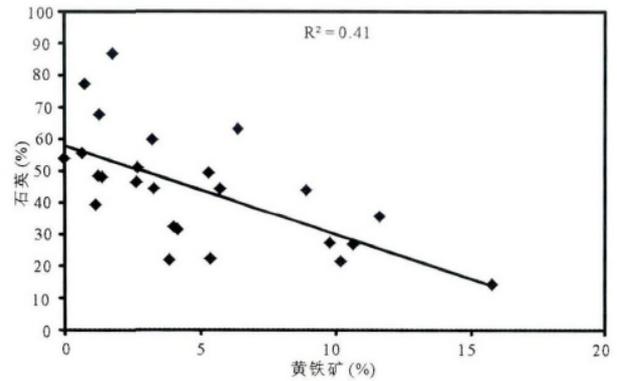


图 13 石英-黄铁矿关系图($R^2 = 0.41$)

Fig. 13 The calculated amount of quartz (%) vs. the calculated amount of pyrite (%) for all samples

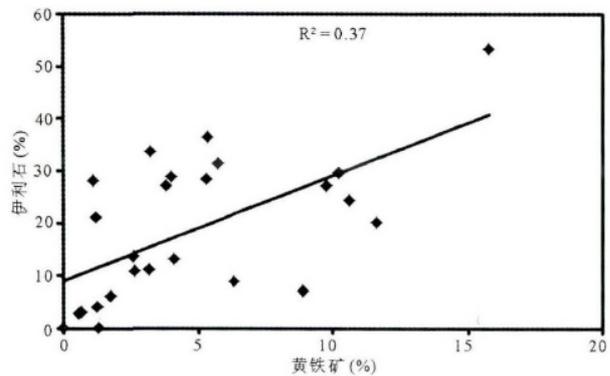


图 14 伊利石-黄铁矿关系图($R^2 = 0.37$)

Fig. 14 The calculated amount of illite vs. the calculated amount of pyrite for all samples

5.4 硫化作用和伊利石化作用

野外研究结合岩相学、XRD 分析表明了内华达州卡林型金矿的硫化范围比去碳酸盐化范围还要广泛(Cail and Cline, 2001)。本次研究的所有样品中都含有石英, 也表明了泥堡矿床中硫化作用范围最广。此外, 石英含量与黄铁矿含量呈负相关($R^2 = 0.41$) (图 13), 与岩石硫化强烈处无黄铁矿出现的现象一致, 如强烈硅化的硅质岩、石英脉中就很少见到黄铁矿, 反映了强烈的硫化作用可能会抑制黄铁矿的沉淀。

在内华达 Gethell 卡林型矿床中, 发现伊利石含量随着金品位升高而升高 ($R^2 = 0.80$) (Cail and Cline, 2001)。在本次研究中, 未发现金品位和伊利石的含量有直接联系。但是 XRD 半定量计算结果表明在所有样品中, 伊利石含量与黄铁矿呈一定的正相关 ($R^2 = 0.37$) (图 14), 说明矿化过程中可能伴随着伊利石化。此外, 矿石中的平均伊利石含量也明显高于围岩的平均伊利石含量(表 2)。围岩和矿石样品中的 K_2O 和 Al_2O_3 二元图解(图 15) 也表明了伊利石化的发生, 并且伊利石的范围比矿化范围广。

在背散射电子能谱分析下, 伊利石的确定首先由矿物中

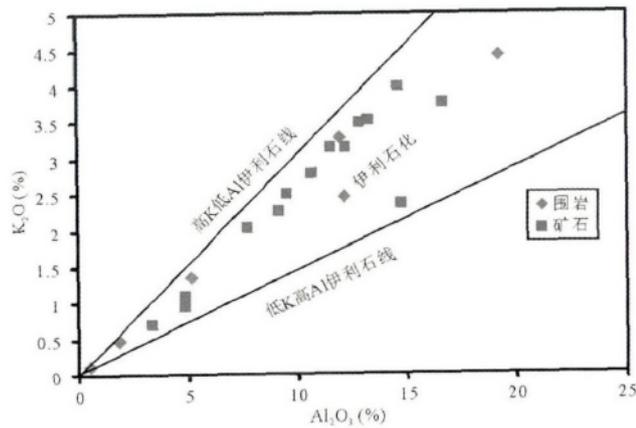


图 15 Al₂O₃-K₂O 关系图

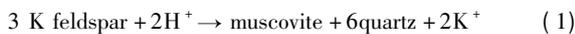
Al₂O₃-K₂O 关系图显示矿石和围岩都发生伊利石化。高 K 低 Al 伊利石线: 9% K, 30% Al; 低 K 高 Al 伊利石线: 6% K, 35% Al (李 晓敏和寇晓威 2000)

Fig. 15 Correlation diagrams shows relation between Al₂O₃ and K₂O

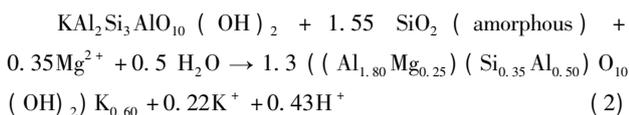
Relationship between Al₂O₃ and K₂O shows that ore samples and wallrock samples underwent illitization. High K low Al line: 9% K and 30% Al; Low K high Al line: 6% K and 35% Al (Li and Kou ,2000)

含有 Si 和 Al 而区别于其它矿物,其次矿物中含 K 而区别于高岭石等其它粘土矿物。伊利石呈鳞片状,单晶直径小于 100nm,在空间上常常围绕着黄铁矿发育。自形-半自形的黄铁矿常常被伊利石围绕,说明伊利石形成于黄铁矿之后,矿化过程中可能伴随着伊利石化。本次研究的样品中发现的钾长石(图 5f)以及 XRD 分析也发现大多数样品中含有少量钾长石(表 2),说明部分伊利石可能是由钾长石受到成矿热液蚀变释放 K 离子形成的。钾长石经过蚀变形成伊利石有多种方式(Cail and Cline, 2001)。

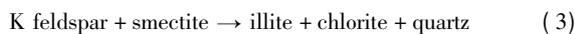
在酸性流体的条件下,钾长石可以蚀变形成白云母、石英,释放出钾离子(Meyer and Hemley, 1967):



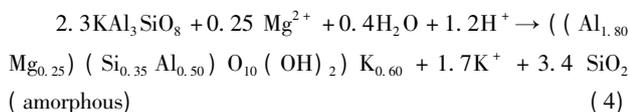
白云母通过如下反应转变为伊利石(Tardy and Garrels, 1974):



钾长石和蒙脱石在成岩条件下反应也能形成伊利石(Moore and Reynolds, 1997):



在酸性流体的条件下,伊利石也可以直接由钾长石形成(Faure, 1998):



反应(4)最可能是泥堡金矿中伊利石的形成方式,因为这个反应不需要白云母、蒙脱石参与反应。实际上,白云母和蒙脱石在所用的研究样品中都没有出现。反应(4)的发生过程消耗了 H 离子,使得流体趋于中性。岩石中铁白云石的溶解可能为该反应提供了 Mg 离子。

5.5 成矿机制

综合地质研究、地球化学、流体包裹体和同位素研究,许多学者认为硫化作用、去碳酸盐化作用、流体冷却和混溶是美国内华达州卡林型金矿的重要成矿机制(Hofstra et al., 1991; Stenger et al., 1998; Simon et al., 1999; Cail and Cline, 2001; Hofstra, 2003; Kesler et al., 2003; Yigit and Hofstra, 2003)。去碳酸盐化和硫化是卡林型金矿中最常见的蚀变类型(Cail and Cline, 2001; De Almeida et al., 2010)。本次研究综合围岩和矿石的岩相学对比、EMPA 分析、XRD 分析和相关的地球化学分析,认为去碳酸盐化和硫化作用是泥堡金矿的主要成矿机制。

流体包裹体研究表明泥堡金矿初始成矿流体具有中低温度(220~260℃)、低盐度(0~2% NaCleqv)、低密度(0.54~1.03g/cm³)并含有 CO₂ 及 CH₄、N₂ 等有机成分的特点(王疆丽等 2014)。具有这些特点的含金酸性初始流体首先与含 Fe 的不纯碳酸盐岩反应,即不纯的碳酸盐岩发生去碳酸盐化作用,溶解其中的碳酸盐矿物,为蚀变热液黄铁矿、石英及伊利石等沉淀提供物质基础和就位空间。此外,不纯碳酸盐中含有钾长石,钾长石在酸性流体的条件下发生伊利石化作用,生成伊利石。泥堡金矿成矿过程还发生硅化作用,硅化作用发生的范围非常广泛,与成矿的关系尚不明确,但是在硅化作用强烈的地方可能会抑制含金黄铁矿的沉淀。泥堡金矿金的沉淀则是通过硫化作用在成岩期黄铁矿或早期热液黄铁矿的边缘形成含金黄铁矿边部或环带。

6 结论

综合对泥堡金矿围岩和矿石的岩相学研究、EMPA、XRD 和主微量元素分析,本文得到如下结论:

(1) 去碳酸盐化、硫化、硅化和伊利石化是泥堡金矿重要的蚀变类型,且蚀变范围比矿化范围广。石英与黄铁矿呈负相关,硅化强烈可能抑制矿化作用;伊利石与黄铁矿呈正相关,矿化过程中可能伴随着伊利石化。

(2) Au 明显加入到构造蚀变体的矿石中,而 CaO、MgO、S、Ba、Be 等从其围岩中带出; Au、Sc、As 和 Fe₂O₃ 明显加入到逆冲断层破碎的矿石中, SiO₂、CaO、Sr、W、Be 等则显示从其围岩中带出。

(3) 泥堡金矿的主要成矿机制是去碳酸盐化和硫化作用。在成矿前去碳酸盐化作用为成矿提供了有利的环境,在成矿过程中通过硫化作用形成了黄铁矿的载金含砷边缘。

致谢 野外工作期间得到了贵州地质矿产开发局 105 地质队祁连素工程师、张应国工程师和贵州大学徐良易同学的大力支持和帮助; 内华达州大学拉斯维加斯分校 Jean Cline 教授对本文提出了许多建设性意见; 匿名审稿人为本文提供了非常宝贵的修改意见; 在此一并表示感谢。

References

- Arehart GB, Eldridge CS, Chryssoulis 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(7): 1505 – 1519
- Ashley RP, Cunningham CG, Bostick NH, Dean WE and Chou IM. 1991. Geology and geochemistry of three sedimentary-rock-hosted disseminated gold deposits in Guizhou Province, People's Republic of China. *Ore Geology Reviews*, 6(2–3): 133 – 151
- Barker SLL, Bennett VC, Cox SF, Norman MD and Gagan MK. 2009. Sm–Nd, Sr, C and O isotope systematics in hydrothermal calcite–fluorite veins: Implications for fluid–rock reaction and geochronology. *Chemical Geology*, 268(1–2): 58 – 66
- Bogoch R, Eldad H and Yaacov N. 1984. Scandium-bearing carbonates of the Tarr albitite complex, Southeast Sinai. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(4): 885 – 887
- Cail TL and Cline JS. 2001. Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada. *Economic Geology*, 96(6): 1343 – 1359
- Chen MH, Mao JW, Bierlein FP, Norman T and Uttley PJ. 2011. Structural features and metallogenesis of the Carlin-type Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 217 – 234
- Cline JS and Hofstra AA. 2000. Ore–fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA. *European Journal of Mineralogy*, 12(1): 195 – 212
- Cline JS, Muntean JL, Gu XX and Xia Y. 2013. A comparison of carlin-type gold deposits: Guizhou Province, golden triangle, Southwest China, and Northern Nevada, USA. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 1 – 18
- De Almeida CM, Olivo GR, Chouinard A, Weakly C and Poirier G. 2010. Mineral paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the carlin-type deposits in the southern part of the goldstrike property, northern Nevada: Implications for sources of ore-forming elements, ore genesis, and mineral exploration. *Economic Geology*, 105(5): 971 – 1004
- Eby GN. 1973. Scandium geochemistry of the Oka carbonate complex, Oka, Quebec. *American Mineralogist*, 58(9–10): 819 – 825
- Emsbo P, Groves DI, Hofstra AH and Bierlein FP. 2006. The giant Carlin gold province: A protracted interplay of orogenic, basal, and hydrothermal processes above a lithospheric boundary. *Mineralium Deposita*, 41(6): 517 – 525
- Faure G. 1998. *Principles and Applications of Geochemistry*. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1 – 600
- Finlow-Bates T and Stumpfl EF. 1981. The behaviour of so-called immobile elements in hydrothermally altered rocks associated with volcanogenic submarine-exhalative ore deposits. *Mineralium Deposita*, 16(2): 319 – 328
- Grant JA. 1986. The isocorn diagram: A simple solution to Gresens' equation for Metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81(8): 1976 – 1982
- Gresens RL. 1967. Composition–volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2: 47 – 65
- Hickey KA, Ahmed AD, Barker SLL and Leonardson R. 2014a. Fault-controlled lateral fluid flow underneath and into a carlin-type gold deposit: Isotopic and geochemical footprints. *Economic Geology*, 109(5): 1431 – 1460
- Hickey KA, Barker SLL, Dipple GM, Arehart GB and Donelick RA. 2014b. The brevity of hydrothermal fluid flow revealed by thermal halos around giant gold deposits: Implications for Carlin-type gold systems. *Economic Geology*, 109(5): 1461 – 1487
- Hofstra AH, Leventhal JS, Northrop HR, Landis GP, Rye RO, Birak DJ and Dahl AR. 1991. Genesis of sediment-hosted disseminated-gold deposits by fluid mixing and sulfidation: Chemical–reaction–path modeling of ore–depositional processes documented in the Jerritt Canyon district, Nevada. *Geology*, 19(1): 36 – 40
- Hofstra AH. 1994. Geology and genesis of the Carlin-type gold deposits in the Jerritt Canyon district, Nevada. Ph. D. Dissertation. Boulder: University of Colorado
- Hofstra AH and Cline JS. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163 – 220
- Hofstra AH. 2003. A special issue devoted to gold deposits in Northern Nevada: Part 2. Carlin-type deposits. *Economic Geology*, 98(6): 1063 – 1067
- Hou L, Peng HJ, Zhang JR, Zhu SB, Wu SY and Wang JJ. 2015. Ore–control factors and geophysical method tests in second round prospecting for gold deposits: A case study of Nibao gold deposit in Pu'an County, Guizhou Province. *Mineral Deposits*, 34(5): 895 – 912 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Su WC, Bi XW and Li ZQ. 1995. A possible evolution way of ore-forming hydrothermal fluid for the Carlin-type gold deposits in the Yunnan–Guizhou–Guangxi triangle area. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 144 – 149 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Su WC, Bi XW, Tu GZ and Hofstra AH. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Mineralium Deposita*, 37(3–4): 378 – 392
- Hu RZ and Zhou MF. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: An introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579 – 588
- Kesler SE, Fortuna J, Ye ZJ, Alt JC, Core DP, Zohar P, Borhauer J and Chryssoulis SL. 2003. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold, screamer section of the betze–post Carlin-type deposit, Nevada. *Economic Geology*, 98(6): 1137 – 1157
- Li XM and Kou XW. 2000. Illite: A new potential clay mineral material. *World Geology*, 19(4): 346 – 349 (in Chinese with English abstract)
- Liu JZ, Xia Y, Deng YM, Su WC, Zhang XC, Qiu L, Chen M, Chen FE and Fu ZK. 2009. Researches on the Stb of Shuiyindong gold deposit and significance for regional prospecting. *Gold Science & Technology*, 17(3): 1 – 5 (in Chinese with English abstract)
- Liu P, Lei ZY, Ye DS, Li KQ, Jin HY, Wei SY and Lv TQ. 2006. Geology and geochemistry of the Nibao gold deposit in Guizhou. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(4): 78 – 85 (in Chinese with English abstract)
- Lubben JD, Cline JS and Barker SLL. 2012. Ore fluid properties and sources from quartz-associated gold at the betze–post Carlin-type gold deposit, Nevada, United States. *Economic Geology*, 107(7): 1351 – 1385
- Meng Y, Gong GH, Wei DT, Xie YM and Yin ZJ. 2014. Comparative microstructure study of high strength alumina and bauxite insulator. *Ceramics International*, 40(7): 10677 – 10684
- Meyer C and Hemley JJ. 1967. Wall rock alteration. In: Barnes HL. (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 166 – 235
- Moore DM and Reynolds RC Jr. 1997. *X–ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. New York: Oxford University Press, 1 – 371
- Muntean JL, Coward MP and Tamocai CA. 2007. Reactivated Palaeozoic normal faults: Controls on the formation of Carlin-type gold deposits in north-central Nevada. In: Ries AC, Butler RWH and Graham RH (eds.). *Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. Geological Society, London, Special Publications, 272: 571 – 587
- Muntean JL, Cline JS, Simon AC and Longo AA. 2011. Magmatic–

- hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. *Nature Geoscience*, 4(2): 122–127
- Peters SG. 2004. Syn-deformational features of Carlin-type Au deposits. *Journal of Structural Geology*, 26(6–7): 1007–1023
- Peters SG, Huang JZ, Li ZP and Jing CG. 2007. Sedimentary rock-hosted Au deposits of the Dian-Qian-Gui area, Guizhou, and Yunnan provinces, and Guangxi District, China. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 170–204
- Qi LS, He YN, Qi J, Li JH, Pan ZD and Zhang YG. 2014. Ore-control structure type and its regulation of Nibao gold deposit in Guizhou. *Guizhou Geology*, 31(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Simon G, Kesler SE and Chryssoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada; Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits. *Economic Geology*, 94(3): 405–421
- Stenger DP, Kesler SE, Peltonen DR and Tapper CJ. 1998. Deposition of gold in Carlin-type deposits; The role of sulfidation and decarbonation at Twin Creeks, Nevada. *Economic Geology*, 93(2): 201–215
- Su WC, Xia B, Zhang HT, Zhang XC and Hu RZ. 2008. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4): 667–679
- Su WC, Heinrich CA, Pettke T, Zhang XC, Hu RZ and Xia B. 2009a. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids. *Economic Geology*, 104(1): 73–93
- Su WC, Hu RZ, Xia B, Xia Y and Liu YP. 2009b. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Chemical Geology*, 258(3–4): 269–274
- Su WC, Zhang HT, Hu RZ, Ge X, Xia B, Chen YY and Zhu C. 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for gold depositional processes. *Mineralium Deposita*, 47(6): 653–662
- Tan QP, Xia Y, Xie ZJ and Yan J. 2015. Migration paths and precipitation mechanisms of ore-forming fluids at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 69: 140–156
- Tao P, Li PG and Li KQ. 2002. The structure of the deposits of the Nibao Goldfield and its relationship with metallogenesis. *Guizhou Geology*, 19(4): 221–227 (in Chinese with English abstract)
- Tardy Y and Garrels KM. 1974. A method of estimating the Gibbs energies of formation of layer silicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(7): 1101–1116
- Wang GZ, Hu RZ, Su WC and Zhu LM. 2003. Fluid flow and mineralization of Youjiang Basin in the Yunnan-Guizhou-Guangxi area, China. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl. 1): 99–109
- Wang JL, Lin FC, Hou L, Zhang JR, Peng Z, Zhu SB and Wu SY. 2014. Characteristics and metallogenic significance of fluid inclusions in the Nibao gold deposit, Guizhou. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 688–699 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZP, Xia Y, Song XY, Liu JZ, Yang CF and Yan BW. 2013. Study on the evolution of ore-formation fluids for Au-Sb ore deposits and the mechanism of Au-Sb paragenesis and differentiation in the southwestern part of Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 32(1): 56–68
- Wood SA and Samson IM. 2006. The aqueous geochemistry of gallium, germanium, indium and scandium. *Ore Geology Reviews*, 28(1): 57–102
- Xia Y. 2005. Characteristics and model for Shuiyindong gold deposit in southwestern Guizhou, China. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Yigit O and Hofstra AH. 2003. Litho-geochemistry of Carlin-type gold mineralization in the Gold Bar district, Battle Mountain-Eureka trend, Nevada. *Ore Geology Reviews*, 22(3–4): 201–224
- Zhang XC, Spiro B, Halls C, Stanley CJ and Yang KY. 2003. Sediment-hosted disseminated gold deposits in Southwest Guizhou, PRC: Their geological setting and origin in relation to mineralogical, fluid inclusion, and stable-isotope characteristics. *International Geology Review*, 45(5): 407–470
- Zhang Y, Xia Y, Su WC, Tao Y, Zhang XC, Liu JZ and Deng YM. 2010. Metallogenic model and prognosis of the Shuiyindong super-large strata-bound Carlin-type gold deposit, southwestern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(2): 157–166
- Zhu LM and Hu RZ. 2000. Au-Sb association and fractionation in micro-disseminated gold deposits, southwestern Guizhou-geochemistry and thermodynamics. *Science in China (Series D)*, 43(2): 208–216

附中文参考文献

- 侯林, 彭惠娟, 张锦让, 朱思豹, 吴松洋, 王家俊. 2015. 金矿床二次找矿的控矿因素研究与物探找矿方法试验——以贵州普安泥堡金矿床为例. *矿床地质*, 34(5): 895–912
- 胡瑞忠, 苏文超, 毕献武, 李泽琴. 1995. 滇黔桂三角区微细浸染型金矿床成矿热液一种可能的演化途径: 年代学证据. *矿物学报*, 15(2): 144–149
- 李晓敏, 寇晓威. 2000. 伊利石: 一种前景广阔的新型粘土矿物材料. *世界地质*, 19(4): 346–349
- 刘建中, 夏勇, 邓一明, 苏文超, 张兴春, 邱林, 陈明, 陈发恩, 付芝康. 2009. 贵州水银洞 Sb 研究及区域找矿意义探讨. *黄金科学技术*, 17(3): 1–5
- 刘平, 雷志远, 叶德书, 李克庆, 金华英, 韦胜永, 吕天权. 2006. 贵州泥堡金矿地质地球化学特征. *沉积与特提斯地质*, 26(4): 78–85
- 祁连素, 何彦南, 祁杰, 李俊海, 潘政达, 张应国. 2014. 贵州省泥堡金矿床控矿构造类型及其控矿规律. *贵州地质*, 31(1): 1–9
- 陶平, 李沛刚, 李克庆. 2002. 贵州泥堡金矿区矿床构造及其与成矿的关系. *贵州地质*, 19(4): 221–227
- 王疆丽, 林方成, 侯林, 张锦让, 彭正, 朱思豹, 吴松洋. 2014. 贵州泥堡金矿床流体包裹体特征及其成矿意义. *矿物岩石地球化学通报*, 33(5): 688–699
- 夏勇. 2005. 贵州贞丰县水银洞金矿床成矿特征和金的超常富集机制研究. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所