

文章编号: 1000-4734(2022)03-0329-14

紫金山高硫型铜金矿床表生氧化带金矿体 矿物学特征及演化

陈明勇^{1,2}, 武丽艳^{1*}

(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, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 福建省紫金山 Cu-Au 矿床是我国典型的高硫型浅成低温热液矿床, 具有“上金下铜”的矿化分带特点, 金矿主要产于潜水面以上的氧化带中, 铜矿则主要分布于潜水面以下的原生带中, 本文通过手标本、光学显微镜、XRD、FE-SEM 以及 EPMA 等对金矿体中矿物和蚀变情况进行研究。结果表明, 金矿体中地开石在多个蚀变过程都有产出, 3 种不同结构地开石的主要成分 (Al_2O_3 和 SiO_2) 差异可能与矿物产出环境、结晶程度、粒径大小和晚期热液影响等有关。通过 EPMA 分析发现该金矿体内的绿泥石以铁斜绿泥石为主, 平均结晶温度为 166°C , 并由镁铁质矿物在还原环境蚀变而成。绢云母和明矾石中 $w(\text{K}_2\text{O})$ 含量略低于理论值, 这可能与晚期大气降水淋滤有关。载金矿物褐铁矿由以针铁矿、赤铁矿、石英和磁铁矿组成, 以胶状结构为主, 褐铁矿主要成分 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 变化则可能是内部的含水矿物发生脱水导致。早期热液阶段形成大量低品位含 Au 的金属硫化物, 而晚期则通过氧化淋滤对金进行二次富集, 最终在表生氧化带中形成大储量的金矿床。

关键词: 紫金山; 金矿床; 矿物特征; 蚀变演化

中图分类号: P575

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.015

第一作者: 陈明勇, 男, 1993 年生, 硕士, 地质工程. E-mail: 1126687827@qq.com

A study on the mineralogical characteristic and alteration evolution of gold orebodies in the supergene oxidized zone of the Zijinshan high-sulfur (HS) epithermal Cu-Au deposit

CHEN Ming-yong^{1,2}, WU Li-yan^{1*}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

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

Abstract: The Zijinshan Cu-Au deposit in Fujian Province is one of the typical high sulfidation epithermal deposits in China. It is characterized with the zoning of gold mineralization in the upper (shallower) level and copper mineralization in the lower level, as gold orebodies mainly occurred in the oxidation zone above the ancient underground water table, while copper orebodies mainly occurred in the primary zone below the ancient underground water table. In this paper, the mineralogical and alteration evolution characteristics of gold orebodies have been studied based on observation and analysis by using optical microscope, X-Ray Diffraction, Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM), and Electron Probe Microanalysis Analysis (EPMA). The results show that dickites occurred in multiple-stage alteration processes in the supergene oxidized gold orebodies. The difference of the main compositions (Al_2O_3 and SiO_2) of three different structured dickites could be caused by the mineral-forming environment, crystalline degree, mineral particle size, and influence of the late-stage hydrothermal fluid. EPMA analyses found that the chlorite in gold orebodies belongs

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41773048); “西部青年学者”项目类 A 类; 国家重点研发计划 (编号: 2016YFC0600207); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (编号: XDB18030200)

* 通讯作者, E-mail: wuliyan@mail.gyig.ac.cn

mainly to prochlorite, with the average crystallization temperature of 166°C. It was formed by the alteration of mafic minerals in the reduced environment. The relative slightly low $w(\text{K}_2\text{O})$ contents of sericite and alunite samples comparing to their respective theoretical values could be caused by the late-stage atmospheric water leaching. The gold-bearing limonite consists of goethite, hematite, magnetite, and quartz, with predominant colloidal structure. The variation of $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ contents in limonite samples may be caused by the dehydration of various water-bearing minerals enclosed in limonites. It is believed that the large reserve gold orebodies were formed in the supergene oxidation zone through the gold secondary enrichment resulted from the late-stage oxidation and meteoric water leaching of a large amount of low-grade Au-containing sulfides which were formed in the early hydrothermal stage.

Keywords: Zijinshan; gold deposit; mineralogical characteristics; alteration evolution

紫金山矿集区位于我国福建省上杭县境内,是我国著名的大型-超大型热液矿田,围绕早白垩纪火山-次火山岩发育一套完整的斑岩-浅成低温热液成矿系统^[1-2]。其中主要有紫金山高硫型浅成低温热液 Cu-Au 矿床、罗卜岭斑岩型 Cu-Mo 矿床、悦洋低硫型浅成低温 Ag-Au-Cu 多金属矿床以及五子骑龙 Cu-Au 矿床、龙江亭 Cu 床等过渡型矿床。经过近二十多年的勘查与研究,对于矿区内地质背景和主要矿床等都有丰富的研究成果^[3-10]。而紫金山 Cu-Au 矿床作为矿田内最重要的矿床,吸引了大量学者关注,但这些研究大多集中于下伏铜矿体之中,对于表层氧化带金矿体的研究相对较少,而专门针对其矿物特征和蚀变情况的研究就更少。本文通过野外考察、手标本、光学显微镜、场发射扫描电镜和电子探针等对金矿体的矿物组合、成分特征以及蚀变演化情况等进行研究,并在此基础上结合前人的成果对该金矿体成因和蚀变演化进行探讨。

1 地质背景

福建省紫金山矿田位于闽西北武夷隆起区的边缘,华夏板块北东向政和-大浦断裂的西侧,早白垩世上杭火山沉积盆地东北缘,北东向宣和复背斜与北西向上杭-云霄深断裂的交汇部位(图 1A)^[11]。

矿田内出露的地层简单(图 1B),主要有早震旦系楼子坝群浅变质砂岩,晚泥盆系天瓦崇组和桃子坑组河口相-滨海相碎屑沉积岩,石炭系林地组海相、陆相、海陆交互相碎屑沉积岩,白垩系石帽山群陆相火山-沉积岩,以及零星第四系坡积碎屑堆积物^[12]。

矿田内发育有 NE 向宣和复式背斜,主要由震旦系和古生界地层组成^[13]。而构造则以 NE 和 NW 向断裂带为主(图 1B),其中 NE 向断裂带发育于白垩纪前,控制了晚侏罗世花岗岩的分布^[11,225],而 NW 向断裂主要发育早白垩世时期,控制着矿田内早白垩世火山-侵入岩浆作用和成矿活动,两个方向断裂交汇点常常是火山-次火山岩侵入的部位,并成为重要的导矿和储矿构造^[14-15]。

矿田内中生代岩浆活动主要分为 2 期(图 1B):第一期为晚侏罗世(149~154 Ma)挤压环境下的岩浆活动,表现为壳源 S 型花岗岩,先后有紫金山复式岩体和才溪岩体的侵位;第二期则是早白垩世(93~125 Ma)挤压过渡到拉伸构造环境下的岩浆活动,表现为 I 型花岗岩,并由多个岩体组成,主要包括石帽山群酸性火山岩、四坊花岗闪长岩、罗卜岭花岗闪长斑岩以及紫金山地区的隐爆角砾岩、凝灰岩和英安玢岩等^[16-18]。

紫金山 Cu-Au 矿床位于矿田中部(图 1B),区域上位于 NE 向金山脚下-中寮断裂和 NW 向的铜石下-紫金山断裂交汇部位^[19-20],矿区面积 4.37 km²。矿床中心由一系列火山-次火山岩组成,主要岩性包括粗安岩、英安岩、花岗质隐爆角砾岩及英安玢岩等,而矿床外围则是早期的紫金山复式岩体,岩性为中细粒花岗岩,并作为矿区主要的赋矿围岩。热液蚀变以火山机构为中心,向外依次为强硅化带、地开石+褐铁矿化带、地开石+明矾石化带和绢云母+地开石化带^[21-22]。

金矿体主要分布在+650 m 标高以上氧化带中,以发育巨厚的蚀变硅化帽、多孔状石英以及强烈的褐铁矿化等标志性特征。矿体内氧化带极为发育,其整体呈中间深,两边浅的“浅锅”状分布,而内部断裂带的不均匀分布,使得矿体内原生带、混合带、氧化带常相间重复出现。金矿石矿物成分简单,

其中脉石矿物含量一般大于 90%, 以石英为主, 其次是地开石、绢云母、明矾石、绿泥石等。而金属矿物含量一般为 3%~5%, 主要为褐铁矿, 少量的黄铁矿、铜蓝、硫砷铜矿、蓝辉铜矿和黄钾铁矾等^[23-24]。

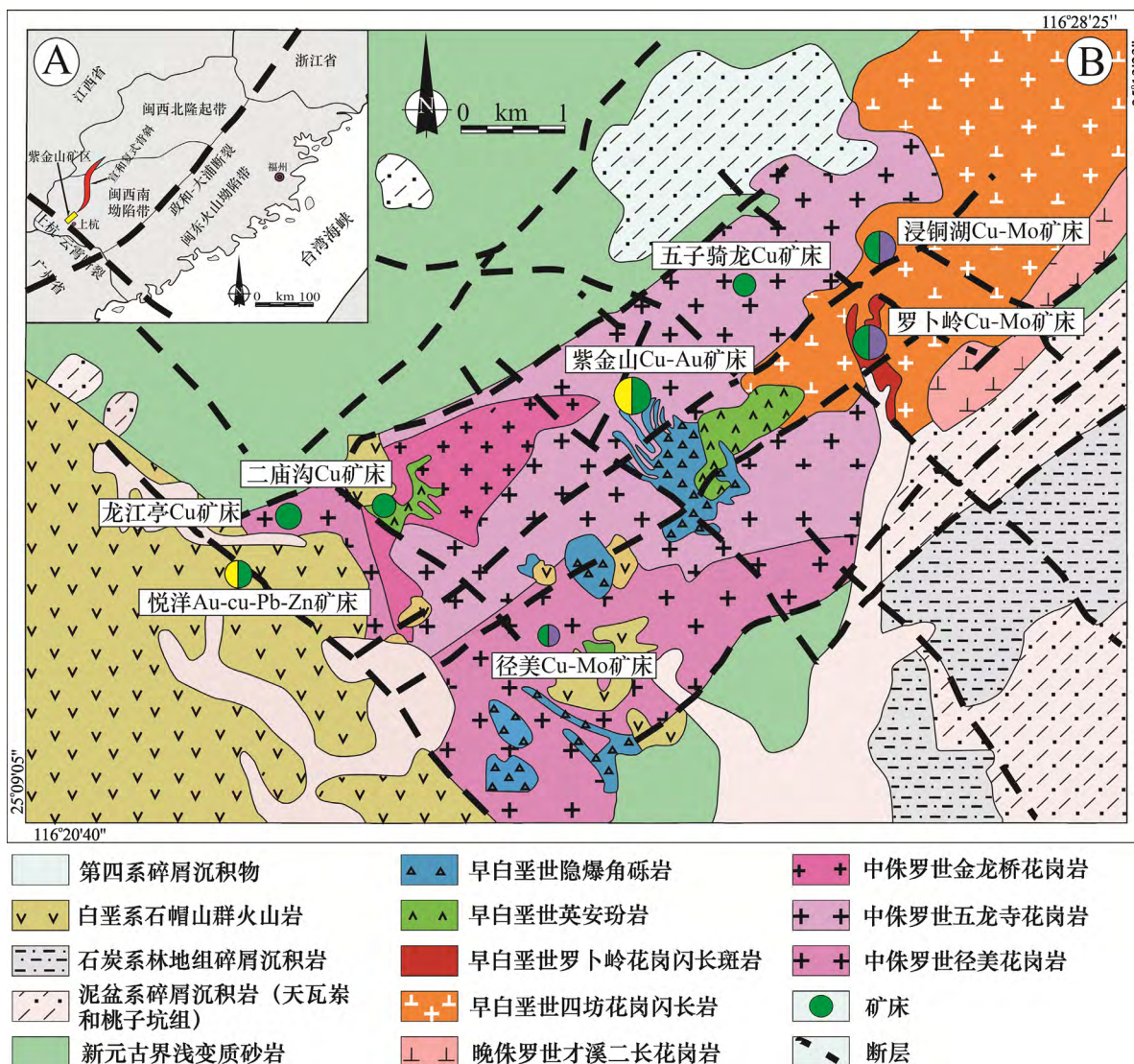


图1 紫金山地质构造、火山活动带简图与矿区地质图(图A据文献[25]和[26];图B据文献[27])

Fig. 1. Sketch map showing regional structures and volcanic activity belts of the Zijinshan area in Fujian Province (A) and geological map for the Zijinshan ore field (B).

2 样品采集与实验方法

研究样品主要采自紫金山露天采场 600 m 标高以上的氧化带内, 自上而下依次取样, 贯穿整个表生氧化带金矿体。然后选取合适样品磨制成光薄片, 进行如下实验:

首先将磨制好的光薄片在光学显微镜下进行观察, 圈出后续实验所需的具体位置, 然后进行镀膜处理, 最后再分别完成 SEM 图像、二次电子图、能谱、XRD 和 EPMA 主微量原位测试。实验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中的岩矿鉴定实验室、场发射扫描电镜实验室、电子探针实验和粉晶 X 射线衍射实验室完成, 其中显微镜使用的是德国徕卡公司生产的 DM-2700P 型光学显微镜。场发射扫描电镜(FE-SEM)实验使用的设备是日本电子株式会社 2011 年推出的 JSM-7800F 型热场发射扫描电子显微镜。实验条件: 电压 20 kV, 电流 10 nA。电子探针微区原位分析(EPMA)实验使用为日本岛津公司生产的 EPMA-1600 型电子探针。实验条件: 电压 20 kV, 电流 10 nA, 束斑

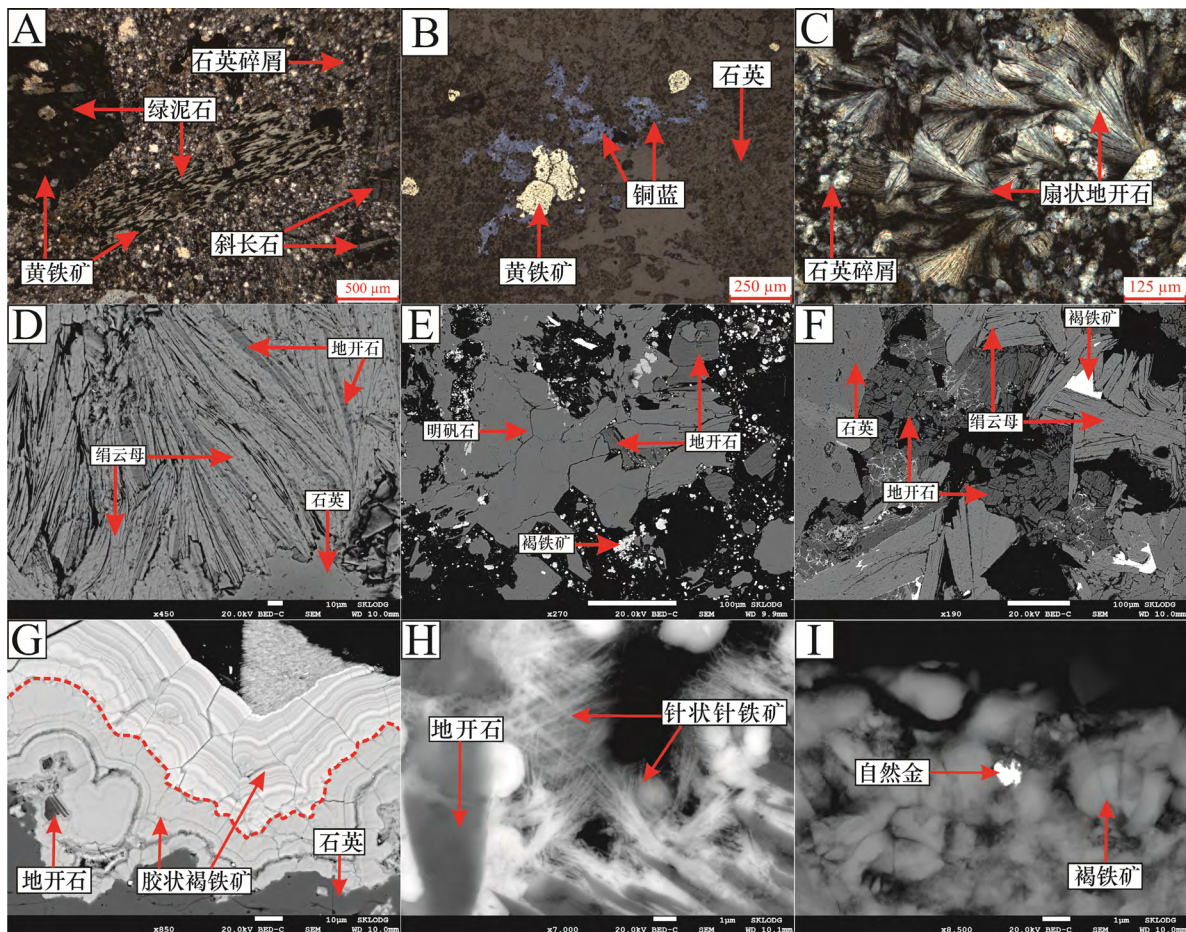
直径 1~10 nm。粉晶 X 射线衍射 (XRD) 实验使用的是荷兰帕纳科生产的锐影 (Empyrean) 型粉晶 X 射线衍射仪。实验条件: 电压 40 kV, 电流 40 mA。

3 实验结果和讨论

3.1 镜下观察和 FE-SEM 实验

通过光学显微镜和 FE-SEM 对表生氧化带金矿体中的样品进行了大量研究观察, 发现矿体中的石英主要为碎屑状和粒状结构, 粒径变化较大 (图 2A)。绢云母则主要为薄片状和鳞片状 (图 2F), 同时部分绢云母还与地开石相间产出 (图 2D)。明矾石主要呈叶片状或者溶蚀残余结构, 周围常有褐铁矿发育 (图 2E)。地开石的结构主要为碎屑状和薄片状 (图 2F), 以及少量产于裂隙和空隙中的扇状结构 (图 2C)。绿泥石主要沿黑云母的节理和裂隙分布, 常与未蚀变的黑云母逐渐过渡, 甚至有的绿泥石还保留黑云母的晶型 (图 2A)。

金属硫化物含量较少, 其中以黄铁矿为主, 少量的铜蓝和硫砷铜矿, 且大部分矿物多呈溶残余结构 (图 2B), 仅黄铁矿出现少量立方体结构。褐铁矿主要以胶状结构产出, 少量呈胶状环带、条纹状、粒状或团粒状结构等 (图 2G)。以及少量针状结构的针铁矿, 长度 3~10 μm (图 2H)。而自然金则多呈亚微米级赋存于褐铁矿空隙、裂隙和碎屑中, 形状多以粒状、薄片状和树枝状为主 (图 2I)。



A. 绿泥石; B. 残余结构的黄铁矿与铜蓝; C. 扇状结构地开石; D. 地开石和绢云母相间产出; E. 明矾石和地开石; F. 薄片状地开石和绢云母; G. 胶状结构褐铁矿; H. 针状结构针铁矿; I. 褐铁矿碎屑中的自然金

图 2 紫金山表生氧化带金矿体中主要矿物光学显微和背散射图

Fig. 2. The microphotographs and SEM back scattered images for main minerals in ores from the Zijinshan supergene oxidized zone of gold ore body.

3.2 EPMA 分析

通过 EPMA 对金矿体中的主要蚀变矿物进行主微量测试, 具体结果表 1。

绢云母主要成分 $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化范围为 8.80%~10.31%, 平均为 9.86%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 37.30%~39.78%, 平均为 38.30%; $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围为 45.47%~48.40%, 平均为 46.85%。各组分质量分数合计为 94.27%~98.52%, 平均为 96.64%。

表 1 紫金山表生氧化带金矿体主要蚀变矿物化学成分 ($w_B/\%$)

Table 1. Chemical compositions of main altered minerals in ores of the Zijinshan supergene oxidized zone of gold ore body

绢云母													
样品编号	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	As ₂ O ₅	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CuO	Au ₂ O	Total
ZJS-60-1	0.54	37.65	45.95	0.03	bdl	0.31	bdl	0.52	10.08	0.02	bdl	bdl	95.08
ZJS-60-2	0.47	39.06	46.77	0.04	0.04	0.24	bdl	0.54	10.21	bdl	0.04	0.01	97.41
ZJS-60-3	0.43	39.79	46.86	0.03	bdl	0.25	bdl	0.53	10.03	bdl	bdl	0.04	97.96
ZJS-60-4	0.66	37.61	46.24	0.06	bdl	0.26	bdl	0.69	9.75	0.06	0.01	0.04	95.37
ZJS-60-5	0.50	38.47	47.17	0.23	bdl	0.47	bdl	0.74	10.31	bdl	bdl	bdl	97.89
ZJS-60-6	2.00	36.16	48.40	0.12	bdl	0.89	bdl	0.46	10.21	0.01	bdl	0.03	98.27
ZJS-60-7	0.51	38.36	47.49	0.13	0.07	0.41	bdl	0.66	9.99	0.06	0.03	0.05	97.75
ZJS-60-8	0.46	38.82	47.47	0.00	bdl	0.26	bdl	0.55	10.10	0.03	bdl	bdl	97.69
ZJS-60-9	0.48	38.44	46.75	0.03	bdl	0.34	bdl	0.62	10.13	0.05	bdl	bdl	96.84
ZJS-60-10	0.48	37.88	46.56	0.03	bdl	0.35	bdl	0.69	9.98	bdl	0.02	bdl	95.98
ZJS-60-11	0.50	38.67	46.40	0.26	0.05	0.30	bdl	0.50	10.09	0.02	bdl	0.01	96.79
ZJS-60-12	0.48	37.87	46.09	0.06	0.06	0.26	bdl	0.60	8.80	0.02	0.03	0.01	94.27
ZJS-60-13	0.52	37.82	46.64	0.06	bdl	0.27	bdl	0.92	10.18	0.05	bdl	0.07	96.53
ZJS-60-14	0.46	38.05	46.14	0.01	0.07	0.26	bdl	0.75	10.14	0.04	bdl	bdl	95.94
ZJS-60-15	0.51	38.41	45.93	0.07	0.03	0.35	bdl	1.13	9.85	0.03	0.01	0.01	96.31
ZJS-60-16	0.47	38.72	46.90	0.06	bdl	0.26	bdl	0.79	10.05	0.04	bdl	bdl	97.29
ZJS-60-17	0.38	37.56	46.04	0.04	0.07	0.23	bdl	0.96	9.02	0.04	bdl	0.02	94.37
ZJS-60-18	0.46	38.58	47.52	0.01	bdl	0.28	bdl	0.49	9.58	0.05	0.03	bdl	96.99
ZJS-60-19	0.53	38.10	46.47	0.10	0.04	0.23	bdl	0.73	10.11	0.06	bdl	0.02	96.38
ZJS-60-20	0.58	37.30	45.47	0.14	0.03	0.31	bdl	0.96	10.00	0.06	0.01	0.02	94.88
ZJS-60-21	0.52	37.83	46.67	0.09	bdl	0.39	bdl	0.46	9.88	0.04	bdl	0.04	95.92
ZJS-60-22	0.49	38.78	47.86	0.00	bdl	0.25	bdl	0.53	9.61	0.04	0.03	bdl	97.59
ZJS-60-23	0.52	38.45	47.84	0.15	bdl	0.37	bdl	0.57	9.62	0.01	0.01	bdl	97.54
ZJS-60-24	0.56	37.86	46.92	0.05	bdl	0.20	bdl	0.69	9.40	0.02	0.01	bdl	95.71
ZJS-60-25	0.41	39.07	46.91	0.03	bdl	0.25	bdl	0.49	9.21	bdl	0.01	0.06	96.42
ZJS-60-26	0.47	38.50	46.85	0.03	bdl	0.30	bdl	0.59	9.64	0.02	bdl	0.05	96.45
ZJS-60-27	0.41	38.50	46.81	0.02	bdl	0.19	bdl	0.54	9.26	0.04	bdl	0.02	95.77
ZJS-60-28	0.48	38.35	46.65	0.04	0.01	0.30	bdl	0.64	10.31	0.01	bdl	bdl	96.79
ZJS-60-29	0.68	38.89	47.85	0.06	bdl	0.26	bdl	0.56	10.13	0.01	0.02	bdl	98.48
ZJS-60-30	0.54	39.30	47.74	0.05	bdl	0.24	bdl	0.56	10.08	bdl	0.01	bdl	98.52
平均值	0.55	38.30	46.85	0.07	0.02	0.31	bdl	0.65	9.86	0.03	0.01	0.02	96.64

绿泥石															
样品编号	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	TiO ₂	As ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CuO	Au ₂ O	Ag ₂ O	Total
ZJS-18-1	18.98	17.24	35.81	12.97	0.92	0.14	0.10	0.01	0.07	2.29	0.03	bdl	0.06	bdl	88.62
ZJS-18-2	22.23	16.51	29.72	16.80	0.12	0.20	0.49	0.03	bdl	0.17	0.03	bdl	0.02	bdl	86.32
ZJS-18-3	20.21	17.72	33.40	14.86	0.17	0.27	0.19	bdl	0.01	1.37	0.03	0.01	0.02	bdl	88.27
ZJS-18-4	14.57	17.95	39.55	10.30	0.50	0.20	0.21	0.05	0.07	3.78	0.03	bdl	bdl	bdl	87.21
ZJS-18-5	21.98	16.70	29.70	17.83	0.09	0.23	0.14	bdl	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	86.80
ZJS-18-6	22.02	15.07	32.05	17.98	0.27	0.20	0.26	bdl	0.02	0.41	0.02	0.04	0.06	bdl	88.41
ZJS-18-7	19.44	16.90	34.35	14.18	0.44	0.22	0.23	0.01	0.02	1.74	0.02	bdl	bdl	0.02	87.56
ZJS-18-8	21.12	16.70	31.76	15.59	0.23	0.29	0.16	0.01	bdl	0.84	0.06	0.04	0.02	bdl	86.81
ZJS-18-9	21.63	15.01	31.05	19.15	0.04	0.20	0.47	bdl	0.06	0.02	0.04	0.01	0.01	bdl	87.68
ZJS-18-10	21.64	15.37	31.31	17.98	0.09	0.23	0.22	bdl	0.03	0.31	0.04	bdl	bdl	0.02	87.25
ZJS-18-11	22.46	15.09	30.22	18.67	0.14	0.25	0.32	bdl	0.02	0.05	bdl	0.02	0.06	bdl	87.32

续表 1

样品编号	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	TiO ₂	As ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CuO	Au ₂ O	Ag ₂ O	Total
ZJS-18-12	22.48	14.71	31.25	16.47	0.23	0.23	0.43	0.02	0.03	0.30	0.02	bdl	0.02	0.01	86.19
ZJS-18-13	21.26	15.94	31.09	17.08	1.50	0.20	0.03	bdl	bdl	0.71	0.01	0.02	bdl	bdl	87.85
ZJS-18-14	21.36	14.85	29.11	16.78	5.00	0.26	0.03	bdl	0.02	0.25	0.03	0.02	0.02	0.01	87.76
ZJS-18-15	21.34	15.86	30.70	20.28	0.04	0.23	0.13	bdl	0.02	0.02	0.05	0.01	bdl	bdl	88.68
ZJS-18-16	22.79	14.89	30.67	17.38	0.20	0.20	0.53	bdl	bdl	0.15	0.05	0.01	bdl	0.01	86.85
ZJS-18-17	22.02	14.49	30.62	18.46	0.06	0.35	0.40	0.01	0.02	0.10	0.02	bdl	0.02	bdl	86.59
ZJS-18-18	23.46	16.31	29.69	16.67	0.07	0.32	0.21	bdl	0.01	0.05	0.02	bdl	bdl	bdl	86.81
ZJS-18-19	24.13	16.30	29.24	16.38	0.14	0.28	0.22	bdl	0.05	0.14	0.02	0.02	bdl	bdl	86.93
ZJS-18-20	22.69	16.13	30.30	17.20	0.08	0.31	0.28	bdl	0.04	0.18	0.02	bdl	0.01	0.01	87.25
ZJS-18-21	22.65	16.36	30.49	16.77	0.16	0.18	0.25	bdl	0.01	0.45	0.03	bdl	0.06	bdl	87.41
ZJS-18-22	22.63	14.94	29.58	18.56	0.04	0.30	0.34	bdl	0.03	0.01	0.05	bdl	0.01	bdl	86.49
ZJS-18-23	23.97	15.92	29.85	16.37	0.06	0.17	0.25	0.04	0.02	0.14	0.01	bdl	0.01	bdl	86.82
ZJS-18-24	20.29	16.55	31.63	17.11	0.01	0.24	0.01	bdl	0.01	0.68	bdl	0.01	bdl	0.01	86.55
ZJS-18-25	18.56	16.62	33.15	17.53	0.04	0.30	0.03	bdl	0.04	1.02	0.01	0.02	0.08	bdl	87.41
ZJS-18-26	20.29	15.99	30.56	19.18	0.02	0.29	0.03	bdl	bdl	0.20	bdl	0.01	bdl	bdl	86.56
ZJS-18-27	16.55	18.75	38.10	11.81	bdl	0.24	0.06	0.01	0.01	2.71	bdl	0.02	0.07	bdl	88.32
ZJS-18-28	19.98	16.10	31.67	17.57	0.02	0.28	0.06	bdl	0.02	0.65	0.01	bdl	0.02	bdl	86.38
ZJS-18-29	18.51	17.16	33.57	15.29	0.01	0.23	0.11	0.02	0.02	1.45	0.02	bdl	0.02	bdl	86.39
ZJS-18-30	19.50	17.53	33.89	15.21	bdl	0.22	bdl	bdl	0.01	1.26	0.02	bdl	bdl	bdl	87.65
平均值	21.02	16.19	31.80	16.61	0.36	0.24	0.21	0.01	0.02	0.72	0.02	0.01	0.02	bdl	87.24

明矾石

样品编号	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	SiO ₂	TiO ₂	As ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	CuO	Au ₂ O	Ag ₂ O	Total
ZJS-167-1	37.08	38.83	9.54	0.6	0.02	0.01	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.05	bdl	86.18
ZJS-167-2	37.28	39.73	9.94	0.65	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.67
ZJS-167-3	36.69	39.13	9.8	0.69	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	86.36
ZJS-167-4	37.99	38.78	9.89	0.61	0.03	0.1	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	87.42
ZJS-167-5	37.58	39.24	10.38	0.45	0.01	0.05	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.01	bdl	0.01	87.77
ZJS-167-6	36.89	38.87	10.04	0.62	bdl	0.05	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	86.56
ZJS-167-7	36.96	38.42	10.06	0.52	0.1	0.04	0.03	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	0.02	86.27
ZJS-167-8	41.34	36.94	6.65	0.35	0.06	0.35	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	85.73
ZJS-167-9	36.58	38.7	9.79	0.7	0.09	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.04	bdl	85.98
ZJS-167-10	36.81	39.56	9.87	0.52	0.32	0.08	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.01	87.2
ZJS-167-11	37.61	38.61	9.97	0.59	0.1	0.09	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.02
ZJS-167-12	37.02	38.15	9.64	0.72	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.01	85.64
ZJS-167-13	37.88	37.62	10.06	0.54	0.11	0.57	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	86.85
ZJS-167-14	37.61	38.95	9.82	0.84	0.05	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.01	bdl	87.36
ZJS-167-15	39.17	39.1	7.84	0.53	0.25	0.13	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.05
ZJS-167-16	38.19	39.33	9.04	0.53	0.23	0.11	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	87.45
ZJS-167-17	36.98	38.98	9.97	0.65	0.29	0.01	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	86.89
ZJS-167-18	36.91	38.1	9.94	0.59	0.01	0.51	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	86.1
ZJS-167-19	37.15	38.85	9.73	0.62	0.01	0.13	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	86.5
ZJS-167-20	37.27	39.59	9.67	0.6	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	87.16
ZJS-167-21	38.28	38.58	9.65	0.9	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.45
ZJS-167-22	36.78	39.22	9.8	0.74	bdl	0.07	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	86.7
ZJS-167-23	37.04	38.61	9.98	0.49	0.03	0.01	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	86.17
ZJS-167-24	37.65	39.26	9.38	0.66	0.18	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.22
ZJS-167-25	37.68	39.44	9.69	0.86	0.2	0.02	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	87.95
ZJS-167-26	37.22	38.83	9.91	0.54	0.08	0.33	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	86.91
ZJS-167-27	37.27	38.99	9.93	0.59	0.17	0.23	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	87.19
ZJS-167-28	36.95	38.59	9.51	0.77	0.18	0.9	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	86.94
ZJS-167-29	37.66	38.45	9.68	0.57	0.09	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	0.09	bdl	86.58
ZJS-167-30	36.43	38.28	10.04	0.54	0.12	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	85.51
平均值	37.46	38.79	9.64	0.62	0.1	0.14	0.01	0.01	bdl	bdl	bdl	0.01	0.01	bdl	86.79

续表 1

地开石															
样品编号	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	BaO	CuO	Total	
ZJS-5-1	0.01	40.38	47.99	0.02	0.03	bdl	0.03	0.07	0.07	bdl	bdl	bdl	0.02	88.61	
ZJS-5-2	0.02	39.77	47.54	bdl	0.06	bdl	0.01	0.08	0.02	bdl	0.01	0.02	0.01	87.54	
ZJS-5-3	bdl	39.87	47.15	bdl	0.01	bdl	0.02	0.02	0.03	bdl	bdl	bdl	0.01	87.11	
ZJS-5-4	0.01	39.99	47.43	bdl	0.04	bdl	0.02	0.05	0.05	bdl	0.01	0.01	0.05	87.66	
ZJS-5-5	0.02	40.04	47.56	bdl	0.05	bdl	0.02	0.03	0.04	bdl	0.01	bdl	0.01	87.77	
薄片状结构	ZJS-5-6	0.02	40.28	49.14	0.01	0.07	bdl	0.01	0.07	0.07	bdl	bdl	bdl	89.68	
ZJS-5-7	0.02	39.12	47.75	bdl	0.06	bdl	0.02	0.13	0.08	bdl	0.02	0.03	bdl	87.23	
ZJS-5-8	0.01	39.37	48.08	0.02	0.05	0.01	0.04	0.05	0.04	bdl	0.02	0.04	0.03	87.77	
ZJS-5-9	0.01	39.90	47.37	bdl	0.01	bdl	0.03	0.07	0.06	bdl	bdl	0.01	0.03	87.49	
ZJS-5-10	bdl	39.69	48.52	0.02	0.01	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.04	88.32	
平均值	0.01	39.84	47.85	0.01	0.04	bdl	0.02	0.06	0.05	bdl	0.01	0.01	0.02	87.92	
ZJS-74-1	0.04	39.62	48.09	bdl	0.03	0.01	0.01	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	87.87	
ZJS-74-2	0.02	39.34	47.12	0.02	0.02	bdl	0.01	0.08	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	86.69	
ZJS-74-3	0.03	38.87	46.66	bdl	0.01	bdl	bdl	0.08	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	85.70	
ZJS-74-4	0.01	40.14	48.42	bdl	0.01	0.01	0.02	0.06	0.01	bdl	bdl	0.05	bdl	88.73	
ZJS-74-5	0.07	40.11	47.13	bdl	0.01	bdl	0.03	0.08	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	87.46	
碎屑状结构	ZJS-74-6	0.08	40.42	46.88	bdl	0.10	bdl	0.03	0.02	0.03	bdl	bdl	0.01	0.03	87.58
ZJS-74-7	0.04	39.83	46.51	bdl	0.02	bdl	0.03	0.07	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	86.53	
ZJS-74-8	0.02	41.20	48.12	bdl	0.04	bdl	0.03	0.03	0.07	bdl	0.01	bdl	0.02	89.52	
ZJS-74-9	0.02	39.29	47.41	bdl	0.15	0.01	0.05	0.78	0.59	bdl	bdl	0.01	bdl	88.30	
ZJS-74-10	0.04	37.99	46.32	bdl	0.13	0.01	0.10	0.19	0.17	bdl	bdl	0.03	bdl	84.99	
平均值	0.03	39.68	47.27	bdl	0.05	bdl	0.03	0.14	0.11	bdl	bdl	0.01	bdl	87.34	
ZJS-74-11	0.03	39.56	47.70	0.01	0.06	bdl	0.02	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	0.01	87.44	
ZJS-74-12	0.03	39.34	47.81	bdl	0.06	0.01	0.02	0.01	0.01	bdl	bdl	0.05	bdl	87.34	
ZJS-74-13	0.04	39.80	48.13	0.02	0.08	bdl	0.03	0.02	0.03	bdl	0.01	bdl	bdl	88.15	
ZJS-74-14	0.05	39.65	47.31	bdl	0.12	0.01	0.04	0.08	0.03	bdl	0.01	0.01	0.02	87.34	
ZJS-74-15	0.12	39.77	47.92	bdl	0.13	bdl	0.05	0.06	0.06	bdl	0.01	bdl	bdl	88.12	
扇状结构	ZJS-74-16	0.03	39.52	47.77	bdl	0.05	0.03	0.06	0.03	bdl	0.01	bdl	0.01	87.54	
ZJS-74-17	0.01	39.62	47.87	bdl	0.05	bdl	0.03	0.06	0.03	bdl	bdl	0.02	0.01	87.71	
ZJS-74-18	0.01	39.77	48.10	bdl	0.05	bdl	0.03	0.03	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	88.03	
ZJS-74-19	0.06	39.44	48.20	0.03	0.05	0.02	0.02	0.06	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	87.91	
ZJS-74-20	0.03	39.88	48.05	bdl	0.05	bdl	0.01	0.03	0.02	bdl	bdl	bdl	0.01	88.08	
平均值	0.04	39.63	47.89	0.01	0.07	0.01	0.03	0.05	0.03	bdl	bdl	0.01	0.01	87.77	
褐铁矿															
样品编号	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	As ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	Au ₂ O	Ag ₂ O	Total
ZJS-6-1	91.28	0.60	0.70	1.17	bdl	0.13	0.22	bdl	bdl	0.06	0.05	0.05	0.07	0.02	94.34
ZJS-6-2	91.54	0.55	0.80	1.19	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	0.11	0.05	0.04	0.02	bdl	94.42
ZJS-6-3	89.62	0.61	0.77	1.30	bdl	0.08	0.14	0.03	bdl	0.68	0.08	0.06	0.02	0.01	93.39
ZJS-6-4	91.10	0.80	0.82	1.01	bdl	0.07	0.13	0.03	bdl	0.06	0.14	0.05	0.01	bdl	94.22
ZJS-6-5	90.01	0.55	0.74	1.34	bdl	0.10	0.07	0.03	bdl	0.35	0.14	0.13	0.01	bdl	93.46
ZJS-6-6	89.12	0.71	0.74	0.98	bdl	0.12	0.35	0.02	bdl	0.12	0.03	0.12	0.03	bdl	92.34
ZJS-6-7	88.75	0.73	0.68	1.32	0.01	0.16	0.21	0.04	bdl	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	92.07
ZJS-6-8	89.27	0.75	0.84	0.88	bdl	0.02	0.32	0.02	bdl	0.18	0.09	0.06	bdl	0.01	92.44
ZJS-6-9	90.85	0.62	0.80	1.42	0.02	0.04	0.24	bdl	bdl	0.04	0.05	0.09	0.02	0.01	94.21
ZJS-6-10	91.45	0.65	0.73	1.40	bdl	0.08	0.03	0.05	bdl	0.06	0.02	0.05	0.08	bdl	94.60
ZJS-6-11	91.45	0.77	0.76	1.30	bdl	0.22	0.24	bdl	bdl	0.12	0.06	0.05	bdl	bdl	94.97
ZJS-6-12	91.32	0.55	0.74	1.24	bdl	0.05	0.30	0.05	bdl	bdl	0.03	0.05	0.08	bdl	94.39
ZJS-6-13	92.11	0.63	0.71	1.39	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	0.06	0.03	0.11	0.10	0.01	95.20
ZJS-6-14	91.24	0.64	0.89	1.49	bdl	bdl	0.08	0.03	bdl	0.10	0.03	0.01	0.03	bdl	94.54
ZJS-6-15	89.14	0.91	1.16	1.38	bdl	bdl	0.14	0.03	bdl	0.03	0.05	0.07	bdl	bdl	92.90
ZJS-6-16	92.19	0.63	0.73	1.43	bdl	0.08	0.12	bdl	bdl	bdl	0.04	0.06	0.06	0.01	95.35
ZJS-6-17	91.20	0.78	0.90	1.41	bdl	bdl	0.25	0.05	bdl	0.09	0.04	0.07	0.09	0.01	94.89

续表 1

样品编号	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	As ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	Au ₂ O	Ag ₂ O	Total
ZJS-6-18	90.87	0.78	0.82	1.56	bdl	bdl	0.20	bdl	bdl	0.05	0.11	0.11	0.02	bdl	94.51
ZJS-169-1	70.50	2.93	0.84	0.62	bdl	3.01	0.26	bdl	bdl	bdl	bdl	3.63	0.06	0.01	81.84
ZJS-169-2	71.01	2.78	0.83	0.63	bdl	3.67	0.22	bdl	bdl	bdl	bdl	3.41	bdl	0.03	82.58
ZJS-169-3	70.42	2.64	1.34	0.73	bdl	3.29	0.22	bdl	bdl	0.02	bdl	3.91	bdl	bdl	82.57
ZJS-169-4	87.44	1.79	0.66	0.39	bdl	2.84	0.13	bdl	bdl	0.02	bdl	0.56	bdl	bdl	93.84
ZJS-169-5	82.58	0.23	0.36	0.59	bdl	0.61	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	0.41	bdl	bdl	84.89
ZJS-169-6	82.80	0.29	0.92	0.45	bdl	0.40	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	0.40	0.04	bdl	85.44
ZJS-167-1	75.72	2.79	0.92	1.44	bdl	0.14	0.59	bdl	bdl	0.16	0.02	1.21	0.10	bdl	83.11
ZJS-167-2	76.61	2.29	1.07	1.37	bdl	0.10	0.55	bdl	bdl	0.13	0.03	1.30	0.07	bdl	83.53
ZJS-167-3	76.13	2.00	1.17	1.44	bdl	0.01	0.63	bdl	bdl	0.27	0.10	1.34	bdl	bdl	83.09
ZJS-167-4	76.35	2.20	1.21	1.35	bdl	0.04	0.70	bdl	bdl	0.12	0.03	1.25	0.03	bdl	83.27
ZJS-167-5	76.35	2.25	1.16	1.64	bdl	bdl	0.37	bdl	bdl	0.08	0.03	1.23	0.04	bdl	83.16
ZJS-167-6	77.15	1.79	1.02	1.52	bdl	bdl	0.21	0.01	bdl	0.21	0.03	1.31	0.06	bdl	83.31
平均值	85.18	1.21	0.86	1.18	bdl	0.51	0.24	0.01	bdl	0.10	0.04	0.71	0.04	0.01	90.10

注: bdl 表示低于检测线。

绿泥石主要成分 $w(\text{FeO})$ 变化范围为 14.57%~24.13%，平均为 21.02%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 14.48%~18.75%，平均为 16.19%、 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围为 29.11%~38.10%，平均为 31.80%、 $w(\text{MgO})$ 变化范围为 10.30%~20.28%，平均为 16.61%、各组分质量分数合计为 86.32%~88.68%，平均为 87.24%。

明矾石主要成分 $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化范围为 6.65%~10.38%，平均为 9.64%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 36.43%~41.34%，平均为 37.46%、 $w(\text{SO}_3)$ 变化范围为 36.94%~39.73%，平均为 38.79%、各组分质量分数合计为 85.51%~87.95%，平均为 86.79%。

薄片状结构地开石主要成分 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 39.12%~40.31%，平均为 39.48%、 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围为 47.15%~49.14%，平均为 47.85%、各组分质量分数合计为 87.11%~89.68%，平均为 87.92%。碎屑状结构地开石主要成分 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 37.99%~41.20%，平均为 39.68%、 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围为 46.32%~48.42%，平均为 47.27%、各组分质量分数合计为 84.99%~89.52%，平均为 87.34%。扇状结构地开石主要成分 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 39.34%~39.88%，平均为 39.63%、 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围为 47.31%~48.20%，平均为 47.89%、各组分质量分数合计为 87.34%~88.15%，平均为 87.77%。

褐铁矿主要成分 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 70.42%~92.19%，平均为 85.18%、而其他微量成分变化范围为 2.32%~12.15%，平均为 4.91%、各组分质量分数合计为 81.84%~95.35%，平均为 90.10%。

3.3 讨论

3.3.1 矿物特征

通过光学显微镜和背散射图观察分析，并加以能谱实验验证，金矿体中矿物可分为热液阶段的矿物，主要有石英、绢云母、明矾石、地开石、绿泥石、黄铁矿、铜蓝和硫砷铜矿；晚期次生改造阶段的矿物，主要有地开石、褐铁矿、赤铁矿、黄钾铁矾和自然金等。

石英是金矿体中最主要脉石矿物，以多孔状和块状构造为主，其中块状构造的石英与热液硅化有关，且在矿体中大量分布，而多孔状构造的石英则与酸性淋滤作用有关，主要产于英安玢岩脉中^[28]。绿泥石主要为黑云母蚀变产物，而且周围还有大量的黑云母、斜长石以及港湾状石英等矿物出现（图 2A）。绢云母和明矾石并不常见，仅在厚层状矿体的部分样品中出现，且矿物多呈溶蚀残余结构产出（图 2E），这与构造裂隙发育不均有关，使得这些矿物在晚期的氧化淋滤中得以幸存。地开石的产出则具有多期次、多类型的特征，如早期热液阶段的地开石与绢云母呈相间分布（图 2D），之后与明矾石相伴，并被后期大气降水淋滤呈溶蚀残余结构（图 2E），最后在晚期形成的裂隙和空隙中还有少量扇状结构的地开石产出（图 2C）。褐铁矿是金矿体中最主要载金矿物^[29-30]，其构造主要以块状和浸染状等，而

结构则以胶状结构为主 (图 2G), 少量的葡萄状、鲕状、针状、粒状或团粒状结构等 (图 2H)。自然金多为褐铁矿胶体吸附沉淀结果, 主要赋存于矿物碎屑、内部裂隙和空隙之中 (图 2I)。

3.3.2 矿物成分特征讨论

绢云母结构式 $KAl[AlSi_3O_{10}](OH)_4$, 是由 2 个硅氧四面体夹 1 个硅氧八面体的 TOT 型的层状硅酸盐矿物。由于在硅氧四面体中的 Si^{4+} 有 1/4 为 Al^{3+} 所代替, 结构中出现剩余负电荷, 为了达到电价平衡, 必须要有阳离子补充 (通常是 K^+ 或 Na^+) [31]。EPMA 分析显示, 该绢云母为钾云母, 部分 K 被 Na 取代, 而 $w(K_2O+Na_2O)$ 平均为 10.51%, 略低于理论值 (11.80%), 这可能与后期大气降水淋滤有关, 但 $w(Al_2O_3)$ 、 $w(SiO_2)$ 和 $w(H_2O)$ 则与理论值 (38.4%、45.3% 和 4.5%) 较为接近 (图 3A)。

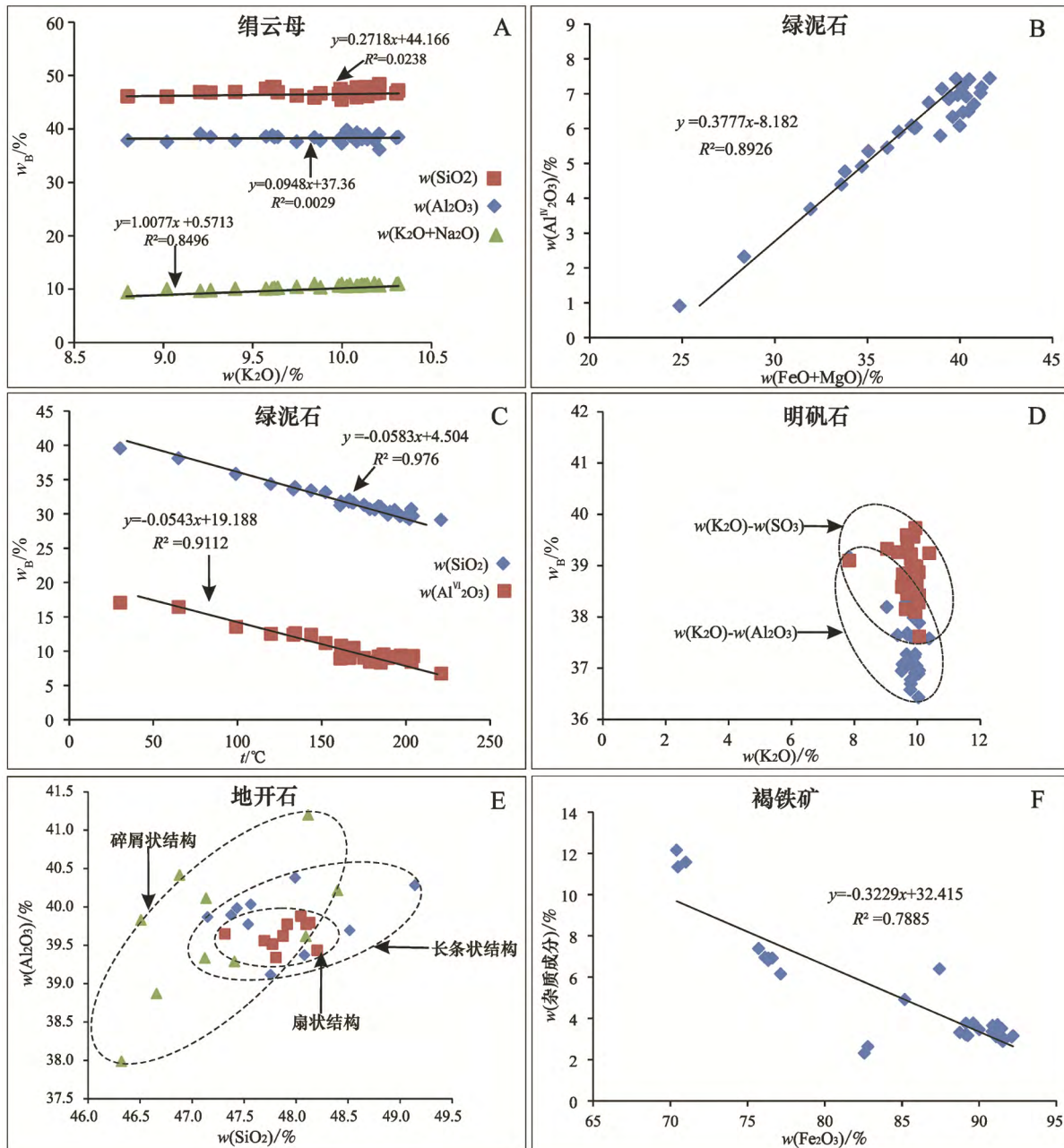
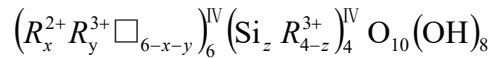


图 3 紫金山表生氧化带金矿体中主要蚀变矿物的化学成分对比

Fig. 3. Comparison of chemical compositions of main altered minerals in ores from the Zijinshan supergene oxidized zone of gold orebody.

绿泥石族是化学成分相当复杂的铁、镁、铝的层状硅酸盐矿物，其基本结构由 2:1 层和层间氢氧化物层组成，一般晶体化学式可表示为：



其中 R^{2+} 代表 2 价阳离子， R^{3+} 代表 3 价阳离子， \square 代表八面体空位。由于绿泥石 2:1 层和层间氢氧化物层之间定位和定向(或叠层顺序)的多样性^[33]，使得绿泥石呈现多种类型。Deer^[34]绿泥石族分类图解投图，表明该绿泥石以铁斜绿泥石为主，少量密绿泥石(图 4)。绿泥石的 Al^{IV} 、 Fe^{2+} 、 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比值与结晶温度之间存在一定的函数关系，可用作地质温压计。Cathelineau^[35]在 1988 年首先发现绿泥石的 Al^{IV} 含量与结晶温度之间存在很好的线性关系，并给出经验公式，之后的研究中 Kranidiotiis 等^[36]、Zane 和 Fyfe^[37]发现绿泥石 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值对温度计算的存在一定的影响(图 3B)，并对 Al^{IV} 进行了校正，获得如下公式：

$$t/^\circ\text{C} = 212.4 \left(n(\text{Al}^{\text{IV}}) - 0.4 \left(\frac{n(\text{Fe})}{n(\text{Fe}+\text{Mg})} - 0.34 \right) \right) + 17.5 \quad (1)$$

通过公式(1)得到紫金山地区的绿泥石结晶温度介于 30~220 °C 之间，平均 166 °C(具体见表 2)，指示其形成于中低温相。此外，通过图 3C 发现 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}^{\text{VI}}_2\text{O}_3)$ 与结晶温度 t 之间也有很好的线性关系，这表明绿泥石结晶温度对这些元素的含量也存在一定影响。同时近年来不断有研究者指出绿泥石成分还与其成因和氧化-还原环境之间一定关系。Inoue^[38]认为在相对还原的环境中有利于富铁绿泥石的形成，并具有高的 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值。紫金山地区绿泥石的 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值介于 0.37~0.45，平均值为 0.42，这与方维萱等^[39]测试新疆萨热克铜矿床中绿泥石的 $n(\text{Fe})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值(0.46)非常相近，因此，我们推测该绿泥石可能形成于相对还原环境。通常镁铁质矿物蚀变形成的绿泥石中 $n(\text{Al})/n(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Al})$ 比值一般小于 0.35^[39]，紫金山地区绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Al})$ 值为 0.27~0.43，平均值为 0.31(具体见表 2)，其整体上小于 0.35，这表明该地区绿泥石是由镁铁质矿物蚀变或转化形成，并且这与显微镜下观察到的现象也是一致的。

明矾石化学式 $\text{KAl}_3[\text{SO}_4](\text{OH})_6$ ，理论上 $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 11.4%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 37.0%、 $w(\text{SO}_3)$ 为 38.6%、 $w(\text{H}_2\text{O})$ 为 13.0%^[40]，通过 EPMA 分析显示，该金矿体中明矾石属于钾明矾石，但 $w(\text{K}_2\text{O})$ 略低于理论值(图 3D)，这可能与后期淋滤作用有关，而 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{SO}_3)$ 与理论值都较为接近。同时矿物内部还含有微量的 FeO 、 Na_2O 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 As_2O_5 、 MgO 、 CuO 、 Au_2O 、 Ag_2O ，一般在 0.5%~2% 之间。对比王翠芝^[41]测试的 4 种不同类型(粒状、叶片状或板状、短柱状和致密块状)明矾石，发现本次测试的叶片状结构明矾石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{SO}_3)$ 更接近理论值。其中 $w(\text{Na}_2\text{O})$ (0.619%) 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ (9.639%) 与王翠芝^[41]测试的板状结构明矾石 $w(\text{Na}_2\text{O})$ (0.455%) 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ (9.948%) 较为相近。因此，推测这 2 种类型矿物具有相似成因，即在岩浆蒸汽较高温度环境下，受大气降水影响较快速形成的。

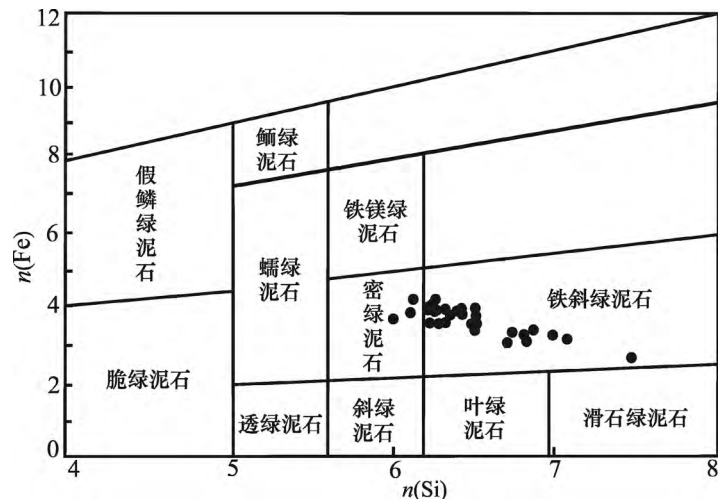


图 4 绿泥石分类图解(底图据文献[33])

Fig. 4. Classification diagram for the chlorite.

表2 紫金山表生氧化带金矿体中绿泥石结构式和结晶温度

Table 2. Estimated structure formulae and formation temperatures for chlorites from the Zijinshan Supergene oxidized zone of gold ore body

样品编号	n_B													Fe/Fe+Mg	Al/Al+Fe+Mg	$t/^\circ\text{C}$
	Fe	Al	Si	Mg	Ti	As	Cr	Na	K	S	Al-IV	Al-VI	Fe+Mg			
ZJS-18-1	1.58	2.02	3.57	1.92	0.07	0.01	0.01	0.01	0.29	0	0.43	1.59	3.51	0.45	0.37	99.2
ZJS-18-2	1.95	2.04	3.12	2.63	0.01	0.01	0.04	0	0.02	0	0.88	1.16	4.58	0.43	0.31	197
ZJS-18-3	1.7	2.1	3.36	2.23	0.01	0.01	0.02	0	0.18	0	0.64	1.47	3.93	0.43	0.35	144
ZJS-18-4	1.2	2.08	3.89	1.51	0.04	0.01	0.02	0.01	0.48	0	0.11	1.98	2.71	0.44	0.43	30.4
ZJS-18-5	1.91	2.05	3.09	2.76	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.91	1.14	4.68	0.41	0.3	204
ZJS-18-6	1.88	1.81	3.27	2.73	0.02	0.01	0.02	0	0.05	0	0.73	1.08	4.61	0.41	0.28	167
ZJS-18-7	1.65	2.02	3.48	2.14	0.03	0.01	0.02	0	0.22	0	0.52	1.49	3.78	0.43	0.35	120
ZJS-18-8	1.82	2.03	3.28	2.4	0.02	0.02	0.01	0	0.11	0	0.72	1.31	4.23	0.43	0.32	162
ZJS-18-9	1.86	1.82	3.19	2.93	0	0.01	0.04	0.01	0	0	0.81	1.01	4.79	0.39	0.27	185
ZJS-18-10	1.87	1.87	3.23	2.76	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0	0.77	1.1	4.63	0.4	0.29	175
ZJS-18-11	1.95	1.85	3.14	2.89	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0	0.86	0.99	4.84	0.4	0.28	194
ZJS-18-12	1.98	1.82	3.28	2.58	0.02	0.01	0.04	0.01	0.04	0	0.72	1.1	4.55	0.43	0.29	161
ZJS-18-13	1.82	1.93	3.19	2.61	0.12	0.01	0	0	0.09	0	0.81	1.11	4.43	0.41	0.3	184
ZJS-18-14	1.85	1.81	3.01	2.58	0.39	0.01	0	0	0.03	0	0.99	0.82	4.43	0.42	0.29	221
ZJS-18-15	1.81	1.89	3.11	3.06	0	0.01	0.01	0	0	0	0.89	1.01	4.87	0.37	0.28	203
ZJS-18-16	1.99	1.83	3.2	2.71	0.02	0.01	0.04	0	0.02	0	0.8	1.04	4.7	0.42	0.28	179
ZJS-18-17	1.92	1.78	3.2	2.88	0	0.02	0.03	0	0.01	0	0.8	0.98	4.8	0.4	0.27	182
ZJS-18-18	2.06	2.01	3.11	2.6	0.01	0.02	0.02	0	0.01	0	0.89	1.13	4.66	0.44	0.3	196
ZJS-18-19	2.13	2.02	3.08	2.57	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0.92	1.1	4.7	0.45	0.3	202
ZJS-18-20	1.97	1.97	3.15	2.66	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0.85	1.12	4.63	0.43	0.3	191
ZJS-18-21	1.97	2	3.16	2.59	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0	0.84	1.16	4.56	0.43	0.3	187
ZJS-18-22	1.99	1.85	3.11	2.91	0	0.02	0.03	0.01	0	0	0.89	0.96	4.9	0.41	0.27	200
ZJS-18-23	2.11	1.97	3.14	2.57	0	0.01	0.02	0	0.02	0	0.86	1.12	4.68	0.45	0.3	190
ZJS-18-24	1.75	2.01	3.26	2.63	0	0.01	0	0	0.09	0	0.74	1.27	4.38	0.4	0.31	169
ZJS-18-25	1.57	1.98	3.35	2.64	0	0.02	0	0.01	0.13	0	0.65	1.33	4.21	0.37	0.32	152
ZJS-18-26	1.75	1.95	3.16	2.95	0	0.02	0	0	0.03	0	0.84	1.1	4.71	0.37	0.29	193
ZJS-18-27	1.36	2.17	3.73	1.72	0	0.01	0	0	0.34	0	0.27	1.9	3.08	0.44	0.41	65
ZJS-18-28	1.72	1.96	3.27	2.7	0	0.02	0	0	0.09	0	0.73	1.23	4.43	0.39	0.31	168
ZJS-18-29	1.58	2.06	3.43	2.33	0	0.01	0.01	0	0.19	0	0.57	1.49	3.91	0.4	0.35	133
ZJS-18-30	1.64	2.08	3.42	2.29	0	0.01	0	0	0.16	0	0.58	1.5	3.93	0.42	0.35	134
平均值	1.81	1.96	3.27	2.55	0.03	0.01	0.02	0	0.09	0	0.73	1.23	4.36	0.42	0.31	166

注: 绿泥石的阳离子数计算以 14 个氧原子为标准; 绿泥石形成温度据 Zane and Fyfe(1995)^[37]方法估算。

地开石为二八面体型层状结构硅酸盐矿物, 化学式为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, 理论 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 39.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 为 46.5%, $w(\text{H}_2\text{O})$ 为 14%, 其中水为吸附水和结构水^[42]。通过 EPMA 显示地开石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{SiO}_2)$ 与理论值都较为接近, 仅 $w(\text{SiO}_2)$ 稍高, 这可能与不同 pH 下 SiO_2 和 Al_2O_3 发生差异溶蚀有关^[43], 而矿物内部其他微量元素 (FeO 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 CuO 和 Cr_2O_3) 介于 0.2%~0.3% 之间。此外, 对比 3 种不同结构类型的地开石其主要成分 (Al_2O_3 和 SiO_2) 含量间存在较大的差别 (图 3E)。其中以扇状结构地开石主要成分含量变化最小, 碎屑状结构地开石变化最大。这可能与矿物的产出环境、结晶程度、粒径大小以及晚期热液影响等有关。如早期形成的地开石在后期风化淋滤过程中形成碎屑状结构, 成分变化较大。而薄片状的地开石多产于厚层状矿体中, 因此, 在后期的氧化淋滤过程中受到影响较小。扇状结构的地开石形成时间最晚, 而且矿物结晶形态最为完整, 成分变化也最小。

褐铁矿化学式 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 通常 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 在 42%~57% 之间, 实际上它并非一种单独的矿物, 而是以针铁矿、纤铁矿和含水针铁矿等含水氧化物为主, 同时矿物内部还包含有少量的二氧化硅和泥质等的混合物, 而其中水主要以吸附水、胶体水以及结晶水形式存在, 因此成分变化会很大^[44]。通过褐铁矿单矿物 XRD 分析结果表明该褐铁矿成分有针铁矿、赤铁矿、石英和磁铁矿 (图 5)。紫金山

氧化带金矿体中褐铁矿 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 主要在 70%~90% 之间 (图 3E), 这与通常的褐铁矿存在很大区别, 可能与内部的含水矿物氧化脱水形成赤铁矿有关。矿物间差异性脱水又使得不同期次褐铁矿的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 出现巨大差异 (图 3F)。矿物内杂质成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 As_2O_5 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 、 CuO 、 Au_2O 和 Ag_2O 在 2%~12%

之间, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 和这些杂质成分的含量具有很好的负相关关系, $R^2=0.7885$ (图 3F)。这表明铁的含水氧化物在不断脱水过程变得更加“干净”, 可能是由于大分子水的加入, 使得矿物之间出现较大空隙, 这让杂质成分得以大量保存, 而后期脱水过程中这些空隙大量减少, 相应的杂质成分也会变得更少。

4 金矿形成和演化讨论

4.1 早期热液阶段

中生代早期, 矿田由于受古太平洋板块俯冲影响而处于陆内挤压环境, 使得地壳加厚升温, 元古代基底发生重熔形成岩浆房。同时矿区在挤压应力作用下形成大量 NE 向断裂和宣和复式背斜, 岩浆则沿着背斜轴部的拉张位置多次上侵形成紫金山复式岩体^[45-46], 并作为后期矿床的主要围岩。随着陆缘造山的进行, 矿田内应力逐渐由挤压向拉张过渡, 而此时岩石圈伸展减薄和底侵作用不断增强, 使得大量的幔源物质加入到后期的岩浆活动中^[47-48]。在早白垩纪时期深源含矿岩浆沿着 NW 向深大断裂多次上侵, 形成不同定位深度的中酸性火山-侵入岩系列同时, 还伴随着大规模的热流体对流循环 (岩浆气液与大气降水混合), 从而在侵入岩体及其周围产生广泛的热液蚀变和铜金银矿化^{[2]77}。

紫金山地区的热液蚀变则主要受火山机构和断裂构造控制, 且具有多期次、多类型、高中低温蚀变叠加套生的特征^{[22]170}。由于上侵岩浆中不断有气液流体与之分离, 并沿着早期的断裂带快速上升。当这些气液流体向上迁移, 周围裂隙中的大气降水会大量加入, 使得气液流体 (主要挥发份中的 S) 中含硫化物发生氧化形成亚硫酸或硫酸, 而当这些酸性流体再与围岩中的硅酸盐矿物接触时, 从而会引发大规模的热液蚀变, 其中主要有硅化、绢云母化、明矾石化以及地开石化等^[49-50]。而同时期携带的大量金属络合物, 也会随气液流体迁移至近地表环境中, 并在后期沸腾作用和大气降水影响下发生沉淀, 其中的金则主要赋存于金属硫化物当中^{[28]650}。

4.2 次生改造阶段

晚期矿体在岩浆和构造的双重作用下不断抬升至近地表, 使得大气降水得以源源不断补给, 从而对早期热液阶段形成的蚀变矿物进行二次“加工”。其中主要发生褐铁矿化、黄钾铁矾化以及自然金富集等。在该阶段中以风化剥蚀以及氧化淋滤作用为主, 通常沿断裂和裂隙带进行, 但由于矿体内部裂隙发育不均一, 因此, 还能发现少量厚层状未改造的原生矿石。

在次生改造过程中, 不同元素间地球化学行为存在巨大差异, 其中大部分易迁移的离子会因氧化淋滤而流失, 仅有少量惰性元素在近地表环境中得以保留下来。由于在氧化带中的大气降水不断补给,

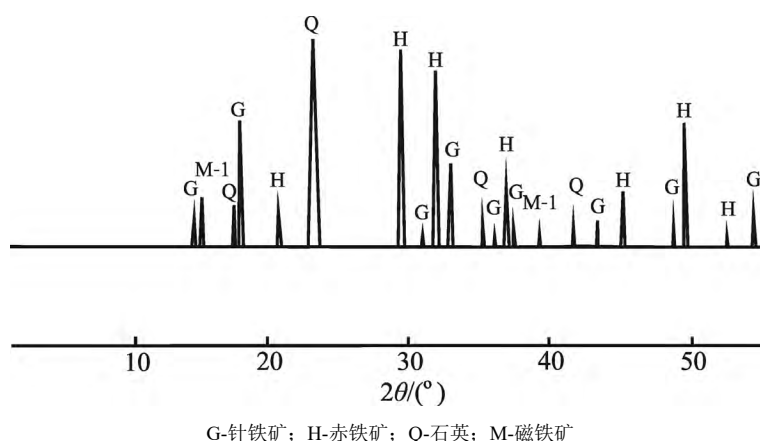


图 5 紫金山表氧化带金矿体褐铁矿 XRD 分析图谱

Fig. 5. XRD patterns for limonite from the Zijinshan supergene oxidized gold ore body.

使得大量的含铁硫化物(主要为黄铁矿)发生氧化分解形成硫酸铁矿和硫酸盐。而同时的硅酸盐矿物不断解离,形成了大量钾、钠、钙等离子,当其与含铁硫酸盐混合,会生成矾类矿物。而紫金山地区常年潮湿多雨,这些矾类矿物又极易发生水解,最终形成针铁矿、纤铁矿和水针铁矿等^[51]。而在后期近中性环境中这些含铁硫酸盐在还可以形成大量 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体,当随流体向下迁移至更深处时,由于环境中的 Eh、pH 以及大量原生性矿物(相对而言)的缓冲作用,流体中的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体会发生沉淀,形成大量含水铁氧化物,同时这些含水铁氧化物还会在后期氧化过程中进一步脱水形成赤铁矿^{[23]283}。

热液阶段形成金主要赋存在黄铁矿、硫砷铜矿、蓝辉铜矿以及铜蓝为主金属硫化物中^[28,52],但金的品位极低,提炼难度极大,无法达到工业利用的要求。在晚期大气降水淋滤过程中使得金属硫化物氧化分解,从而将其中包含微粒金矿物释放出来。而同时期形成的大量 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体对金有极强的吸附作用,并且在之后随之一同沉淀,这对金富集起到关键性的作用^[53-54],最终金以自然金的形式在氧化带中富集形成大储量的金矿床。这也是为什么自然金总是与褐铁矿共同产出的重要原因,而活性更强的元素将会继续迁移。

5 结论

1) 紫金山表生氧化带金矿体内的地开石在不同阶段都有产出,主要载金矿物褐铁矿以胶状结构为主,而未被淋滤的明矾石、绢云母和绿泥石出现是矿体经历早期热液蚀变最直接的证据。

2) 通过 EPMA 分析发现金矿体中的绿泥石以铁斜绿泥石为主,少量密绿泥石,平均结晶温度为 166 °C,且由镁铁质矿物在还原环境蚀变而成。绢云母与明矾石的主要成分 $w(\text{K}_2\text{O})$ 含量略低于理论值,这可能与后期大气降水淋滤有关。而褐铁矿主要由针铁矿、赤铁矿、石英和磁铁矿组成。其中 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 含量的变化可能是内部的含水矿物发生脱水导致,并且与杂质成分含量成负相关。3种不同类型的地开石主要成分(Al_2O_3 和 SiO_2) 差异则可能与矿物产出环境、结晶程度、粒径大小和晚期热液影响等有关。

3) 金矿体内的蚀变过程可以分为2个阶段,即在早期热液阶段形成大量低品位的含 Au 金属硫化物,而在晚期次生改造阶段则通过风化剥蚀和氧化淋滤对这些蚀变矿物进行二次“加工”,使得 Au 以自然金的形式大量赋存在褐铁矿中,最终在表生氧化带富集形成大储量的金矿床。

参考文献:

- [1] 张德全, 余宏全, 李大新, 等. 紫金山地区的斑岩—浅成热液成矿系统[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 253-261.
- [2] 黄仁生. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液—斑岩铜金银成矿系统[J]. 地质力学学报, 2008, 14(1): 74-86.
- [3] SO C S, ZHANG DQ, YUN ST, et al. Alteration-mineralization zoning and fluid inclusions of the high sulfidation epithermal Cu-Au mineralization at Zijinshan, Fujian Province, China[J]. Economic Geology, 1998, 93: 961-980.
- [4] DUAN G, CHEN HY, HOLLINGS P, et al. The Mesozoic magmatic sources and tectonic setting of the Zijinshan mineral field, south China: Constraints from geochronology and geochemistry of igneous rocks in the southeastern ore segment[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 800-827.
- [5] 钟军, 陈衍景, 陈静, 等. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜铅矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(5): 1410-1424.
- [6] ZHONG J, CHEN YJ, Qi JP, et al. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yucyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86: 254-270.
- [7] 薛凯. 福建紫金山矿田五子骑龙铜矿床矿化与蚀变分带研究[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(3): 463-470.
- [8] 陈静, 陈衍景, 钟军, 等. 福建省紫金山矿田龙江亭矿床地质和成矿流体特征及成因意义[J]. 矿床地质, 2015, 34(1): 98-118.
- [9] 张锦章. 紫金山矿集区地质特征、矿床模型与勘查实践[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 757-766.
- [10] 陶奎元, 薛怀民, 毛建仁, 等. 中国东南沿海大(中)型浅成中低温热液矿床—斑岩型矿床评价的地质准则、成矿模式及其找矿意义[J]. 火山地质与矿产, 1996, (Z1): 26-40.
- [11] 周肃, 邱瑞照, 陈好寿. 福建紫金山铜金矿床氢氧同位素组成特征及与成矿关系的研究[J]. 福建地质, 1998, (2): 94-100.
- [12] 赵希林. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、地球化学特征及其地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院(硕士学位论文), 2007: 11-13.
- [13] 王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 等. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 145-157.

- [14] 陶建华, 许春林. 福建上杭紫金山铜金矿床控岩控矿构造分析[J]. 福建地质, 1992, 11(3): 186-203.
- [15] 薛凯, 阮诗昆. 福建紫金山矿田罗卜岭铜(钼)矿床地质特征及成因探讨[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(5): 491-496.
- [16] 于波, 裴荣富, 邱小平, 等. 福建紫金山矿田中生代岩浆岩演化序列研究[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 437-446.
- [17] 张德全, 李大新, 丰成友, 等. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义[J]. 地球学报, 2001, 22(5): 403-408.
- [18] JIANG SH, LIANG QL, BAGAS L, et al. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry-epithermal Cu-Au-Mo-Ag ore system, SW Fujian Province, China: constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 287-305.
- [19] 阮诗昆, 张定才, 龚建生. 紫金山金矿露天铜矿矿石赋存形态及成因初探[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(2): 100-103.
- [20] 陈可, 邱小平, 邓俊斌. 福建上杭紫金山高硫化型铜矿床矿化分带特征[J]. 福建地质, 2013, 32(4): 255-263.
- [21] 赵禹, 赵玉岩, 郝立波, 等. 福建紫金山矿床初始成矿流体来源及性质—来自稀土和微量元素的证据[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1562-1570.
- [22] 崔晓琳, 刘文元, 刘羽, 等. 紫金山高硫型金铜矿的矿床地质研究进展[J]. 矿物学报, 2015, 35(2): 167-177.
- [23] 周友清. 紫金山矿床露天铜矿矿石赋存原因初探[J]. 福建地质, 2017, 36(4): 277-285.
- [24] 梁清玲, 江思宏, 白大明, 等. 福建紫金山矿田浅成低温热液型矿床成矿物质来源探讨—H、O、S、Pb 同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 2015, 34(3): 533-546.
- [25] 高天钧. 福建紫金山铜金矿床类型与环太平洋浅成低温矿床的比较[J]. 福建地质, 1999, (4): 167-177.
- [26] 陈素余, 王少怀. 紫金山铜金矿床深部XI号铜矿带矿石学特征系统研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(2): 45-53.
- [27] XU C, CHEN HY, QI JP, et al. Mesozoic multiphase magmatism at the Xinan Cu-Mo ore deposit (Zijinshan Orefield): Geodynamic setting and metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 0169-1368.
- [28] CHEN J, DAVID R, COOKE J P, et al. Hydrothermal Alteration, Mineralization, and Structural Geology of the Zijinshan High-Sulfidation Au-Cu Deposit, Fujian Province, Southeast China[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(4): 639-666.
- [29] 张江. 紫金山铜金矿床地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2001, (2): 17-22.
- [30] 黎富金, 姚香. 紫金山金铜矿的金矿体矿岩变化规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2007, 59(5): 18-22.
- [31] 李胜荣. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 240-241.
- [32] 周栋, 赵太平, 赵鹏彬, 等. 豫西康山金银铅锌矿床绿泥石电子探针成分特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 2018, 9(5): 803-824.
- [33] 刘焱平, 张少颖, 张华锋. 绿泥石的成因矿物学研究综述[J]. 地球科学前沿, 2016, 6(3): 264-282. 2016.
- [34] Deer W A. *Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates*[M]. London: Longman, 1962: 270.
- [35] CATHELIN M. Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as Function of Temperature[J]. *Clay Minerals*, 23, 471-485.
- [36] KRANIDIOS P, AND MACLEAN WH. Systematics of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec[J]. *Economic Geology*, 1987, 82, 1898-1911.
- [37] ZANG W AND FYFE W S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil[J]. *Mineralium Deposita*, 1995, 30(1): 30-38.
- [38] INOUE A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments[A]. Velde B. *Origin and Mineralogy of Clays*[M]. Berlin Heidelberg: Springer 1995:268-330.
- [39] 方维萱, 王磊, 鲁佳, 于志远. 新疆萨热克铜矿床绿泥石蚀变相与构造-岩浆-古地热事件的热通量恢复[J]. 矿物学报, 2017, 37(5): 661-675.
- [40] 潘兆麟. 结晶学与矿物学(下)[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 242-243.
- [41] 王翠芝, 阙洪华. 紫金山金铜矿明矾石的矿物学特征[J]. 矿物学报, 2013, 33(3): 329-336.
- [42] 徐廷婧, 王河锦. 景德镇地区高岭石红外光谱分析[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(1): 59-66.
- [43] 梁修睦, 毛顺利, 朱连根. “硅化带(帽)”成因、分类及找矿意义[J]. 浙江地质, 1998, (1): 18-22.
- [44] 吴树仁, 王曙. 地质大辞典—矿物、岩石、地球化学分册[M]. 北京: 地质出版社 2005: 60-61.
- [45] 李斌, 赵葵东, 张倩, 等. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因[J]. 岩石学报, 2015, 31(3): 811-828.
- [46] 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 等. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2008, (4): 590-597.
- [47] 毛建仁, 许乃政, 胡青, 等. 福建省上杭一大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化[J]. 岩石学报, 2004, (2): 285-296.
- [48] WU LY, HU RZ, LI XF, et al. Mantle volatiles and heat contributions in high sulfidation epithermal deposit from the Zijinshan Cu-Au-Mo-Ag orefield, Fujian Province, China: Evidence from He and Ar isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2018, 480: 58-65.
- [49] 江思宏, 聂凤军, 张义, 等. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展[J]. 地学前缘, 2004, (2): 401-411.
- [50] 李碧乐, 张晗. 浅成低温热液型金矿床研究的某些进展[J]. 矿物学报, 2010, 30 (1): 90-97.
- [51] 涂光帆, 李锡林. 干旱和极端干旱气候条件下硫化物矿床氧化带发育特征(以西北五个矿床为例说明)[J]. 地质学报, 1963, (4): 361-377.
- [52] 刘文元. 福建紫金山斑岩—浅成热液成矿系统的精细矿物学研究[D]. 北京: 中国地质科学院(博士学位论文), 2015: 42-43.
- [53] 王吉珺, 张旭东. 金矿床的氧化淋失、次生富集和指示性评价指标的确定[J]. 地质与勘探, 1991, 27(1): 13-18.
- [54] 姚敬劬. 我国金矿床氧化带的地质地球化学特征[J]. 黄金, 1994, 15(5): 1-9.