

江苏观山铜矿III、VII和VIII矿脉矿化金属元素特征和成因

谢晓华^{1,2}

¹江苏华东有色深部地质勘查有限责任公司, 江苏 南京

²江苏省有色金属华东地质勘查局八一三队, 江苏 南京

收稿日期: 2023年8月11日; 录用日期: 2023年10月31日; 发布日期: 2023年11月10日

摘要

江苏观山铜矿位于下扬子板块北缘沿江拗陷带内的溧水火山岩盆地大王山组地层中, III、VII和VIII矿脉产于观山铜矿西北角的粗安斑岩和角闪粗安斑岩中。为了查明三条矿脉矿化金属元素空间分布特征和共生关系, 对主要成矿元素Cu、Au、Ag、Pb和Zn做了数学统计分析。在矿化金属元素丰度分析中, Cu在探槽样(TC) (2050 ppm)分别低于拨土样(BT) (2458 ppm)和钻孔样(ZK) (10,300 ppm); Ag在拨土样(BT) (7.25 ppm)低于钻孔样(ZK) (22.6 ppm); Au在拨土样(BT) (0.269 ppm)和钻孔样(ZK) (0.252 ppm)中相当; 从拨土样(BT) (30.96 ppm)到钻孔样(ZK) (2332 ppm), Pb呈现逐渐富集; Zn在探槽样(TC) (327 ppm)和钻孔样(ZK) (346 ppm)类似。在矿化金属元素线性拟合中, Cu和Au在探槽样(TC)决定系数最高(0.754), 线性拟合优度最好, Cu和Ag在拨土样(BT)决定系数为0.547, 线性拟合优度次之, Cu和Pb、Zn决定系数分别低于0.5, 线性拟合优度最差, 无明显线性关系。通过对矿床地质年代学和同位素地球化学数据分析, 显示该矿床形成于白垩纪早期(K1), 成矿物质主要来自上地幔和下地壳, 岩浆热液经过后期大气水的混合, 在偏碱性、中低温条件下成矿。通过以上对观山铜矿床内部III、VII和VIII矿脉主要矿化金属元素分析, 阐明了主要矿化金属元素空间分布特征和共生关系, 并对矿床演化地质过程进行简要概述, 为后期在观山铜矿开展工作提供参考意见。

关键词

观山铜矿, III、VII和VIII矿脉, 铜, 矿化元素, 丰度, 线性拟合, 成因

Characteristics and Genesis of Mineralized Metal Elements in the III, VII, and VIII Ore Veins of Guanshan Copper Deposit, Jiangsu

Xiaohua Xie^{1,2}

¹Jiangsu East China Nonferrous Metals Deep Geological Exploration Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²No.813 Party of Jiangsu Nonferrous Metals East China Geological Exploration Bureau, Nanjing Jiangsu

文章引用: 谢晓华. 江苏观山铜矿 III、VII 和 VIII 矿脉矿化金属元素特征和成因[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(11): 1252-1267. DOI: 10.12677/ag.2023.1311119

Abstract

Jiangsu Guanshan copper deposit, located in the Dawangshan Formation strata of Lishui volcanic basin in the Yanjiang depression zone on the northern edge of the lower Yangtze plate. III, VII and VIII ore veins occur in coarse andesite porphyry and hornblende coarse andesite porphyry in the Northwest Angle of Guanshan Copper Mine. In order to identify the distribution characteristics and co-exist of mineralized metal elements in three ore veins, it is based on mathematical statistical analysis of major ore-forming metal elements Cu, Au, Ag, Pb and Zn in three ore vein regions. The abundance of Cu in the trench sample (TC) (2050 ppm) is lower than that in the soil sample (BT) (2458 ppm) and the abundance of Cu in the borehole sample (ZK) (10,300 ppm); the abundance of Ag in BT (7.25 ppm) is lower than that in ZK (22.6 ppm); the abundance of Au in BT (0.269 ppm) is equivalent in ZK (0.252 ppm); Pb gradually enriched from BT (30.96 ppm) to ZK (2332 ppm); Zn has similar characteristics in TC (327 ppm) and ZK (346 ppm). In the analysis of the linear fitting of mineralized metal elements, Cu and Au have the highest determination coefficients (0.754) in the TC. The coefficient of determination for Cu and Ag in BT is 0.547. The determination coefficients for Cu, Pb, and Zn are all below 0.5, indicating a poor linear fit and no significant linear relationship. Based on the results from research and analysis of geological chronology and isotope geochemistry data of the deposit, it is indicated that the formation of this deposit occurred during the Early Cretaceous (K1) period. The ore-forming materials mainly originated from the upper mantle and lower crust. The mineralization took place under alkaline, medium to low-temperature conditions when magmatic hydrothermal fluids mixed with later atmospheric water. By analyzing the major ore-forming metal elements in internal veins III, VII, and VIII of the Guanshan Copper deposit, this study elucidated the spatial distribution characteristics and coexistence relationships of these elements. Additionally, a brief summary of the geological evolution process of the deposit was provided, offering references for future work in the Guanshan Copper deposit.

Keywords

Guanshan Copper Mine, III, VII and VIII Ore Veins, Copper, Ore-Forming Elements, Abundance, Linear Fit, Genesis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

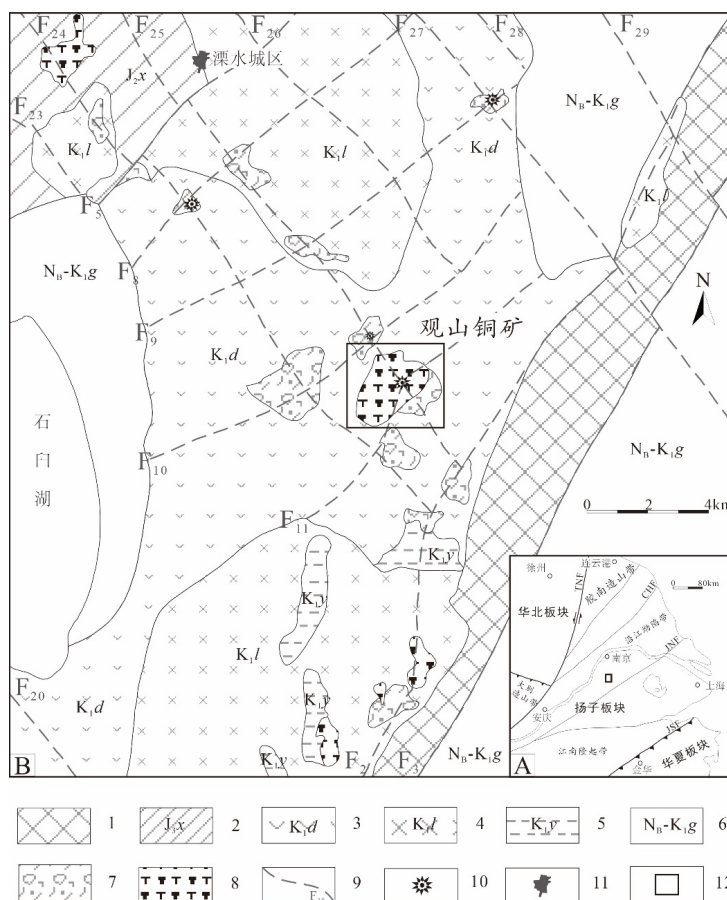
江苏观山铜矿始建于1958年, 1966年正式投产, 彼时日处理矿石量为250吨, 截止2010年查明矿区铜铅金属资源总储量为45,936吨[1]。包括江苏省有色金属华东地质勘查局等单位多年以来在该铜矿开展了大量地质勘查和研究工作, 总结前人对观山铜矿包括其所在溧水盆地内的研究资料, 概括分类起来, 主要包括: 成岩成矿年代学研究[2] [3] [4] [5]; 岩石地球化学特征[5]-[10]; 成矿流体包裹体及稳定同位素特征[11] [12]; 矿床矿化特征[13]; 地球物理探测分析[14] [15], 而对于矿床内部具体矿脉矿化金属元素研究甚少, 观山铜矿内部总计有12条矿脉, 已开展I、II、III、VI、VII和VIII矿脉勘查工作, 本文在总结前人的资料基础上, 通过对矿床内部III、VII和VIII矿脉主要矿化金属元素详细分析, 以期阐明主要

矿化金属元素空间分布特征和共生关系，并对矿床演化地质过程进行简要概述，为后期在观山铜矿开展工作提供参考意见。

2. 矿床概况

长江中下游地区是环太平洋构造-成矿域的一个重要组成部分，该区域探明的大中型铜矿约 30 多处，总金属量近千万吨，占全国储量的 30% [16]，产生的原因一般认为与中生代以来的地质构造运动有关，扬子板块与华北板块拼合时间大约在 226~3230 Ma [17]，以后在下扬子地区形成板内挤压，地壳减薄，地幔上隆，到燕山期间，受到太平洋构造域的影响，形成燕山期构造-岩浆事件，并形成了相应的成矿带[18] [19]。整个下扬子板块成矿构造以褶皱为基础，以 EW 和 NE-NNE 断裂系统为骨干，以推覆-挤压-伸展-拉张构造系统为特色，以隆起-坳陷构造为分区的构造格局[20] [21]。

观山铜矿(图 1(A))大地构造位于华北板块与扬子板块交界处下扬子板块一侧，郟庐断裂带(TNF)以东，江绍断裂(JSF)以北，位于沿江坳陷带内的溧水火山岩盆地中。中生代时下扬子板块有多次火山-岩浆事件发生，相应出露面积大于 0.2 km² 的岩体约 260 个，连同次火山岩区，总面积达 2 万多平方公里[23]，晚侏罗世至早白垩世下扬子板块出现一系列陆相火山岩盆地，包括宁芜盆地、溧水盆地等在内，它们呈北东-北北东向展布。



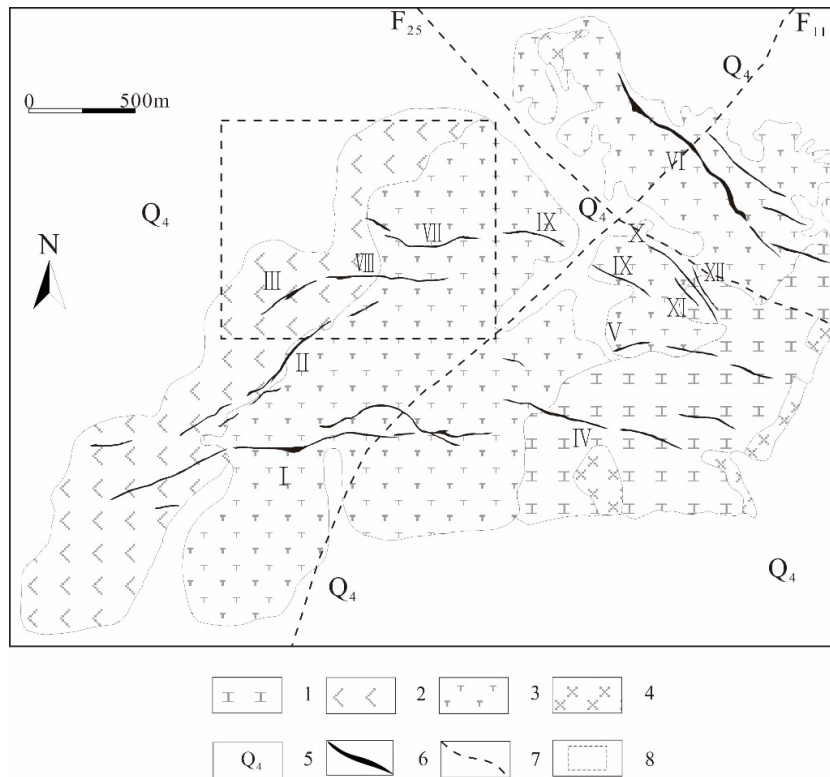
1——加里东-海西期构造层；2——西横山组；3——大王山组；4——龙王山组；5——云台山组；6——泥岩；7——近喷口相的集块角砾岩；8——岩体；9——构造断层；10——火山口；11——溧水城区；12——观山铜矿

Figure 1. Regional Geological map of Guanshan copper deposit ((A) Modified by [20]; (B) Modified by [22])
图 1. 观山铜矿区域地质图((A) 据[20]修改；(B) 据[22]修改)

矿区所在地溧水火山岩盆地出露地层(图 1(B))主要包括东部的加里东-海西期泥岩构造层,西北角的西横山组(J_{3x})泥灰岩,南部的云合山组砂岩(K_{1y}),中间穿插了了龙王山组(K_{1l})和大王山组(K_{1d})两组火山岩,前人又把这两组火山岩岩石组合分别称为龙王山旋回(K_{1l})和大王山旋回(K_{1d}) [24],矿区地层分布情况见表 1。

Table 1. Stratigraphic distribution in the Guanshan copper deposit (Modified by [22] [24])
表 1. 观山铜矿区域地层分布(据[22] [24]修改)

地层时代	地层代号和接触界线	岩性
中-新生代	N _B -K _{1g}	粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及砂岩等。
中生代	大王山组(K _{1d})	粗安岩、钾质石英粗面岩为主,夹少量粗安岩、石英粗安岩、石英粗面岩,总厚度大于 1600 米。
	云合山组(K _{1y})	砂岩夹泥灰岩、凝灰岩,总厚度大于 182 米。
	龙王山组(K _{1l})	角闪安山岩、安山玄武岩为主,次为辉石安山岩,安山质火山碎屑岩和角砾集块岩,总厚度大于 1200 米。
	西横山组(J _{3x})	泥岩和泥灰岩
古生代	加里东海西构造层	泥岩



1——粗面岩; 2——角闪粗安斑岩; 3——粗安斑岩; 4——凝灰角砾岩;
 5——第四系; 6——矿脉; 7——区域断裂; 8——工作区

Figure 2. Simplified geological map of Guanshan copper deposit (Modified by [22])
图 2. 观山铜矿地质简图(据[22]修改)

矿区区域构造主要形成于印支期,燕山期为主要发展期,到喜山期截止,以断裂为主,褶皱不发育。断裂构造主要以 NE 和 NW 两组主要断裂带为主,形成近似等距的格子状区域性基底断裂贯穿本区(图 1(B)),北东向断裂构造 7 条,北西向的 8 条,其中北东向 F11 和北西向 F25 大断裂在观山铜矿区火山口附近汇聚,为后期容矿提供条件。

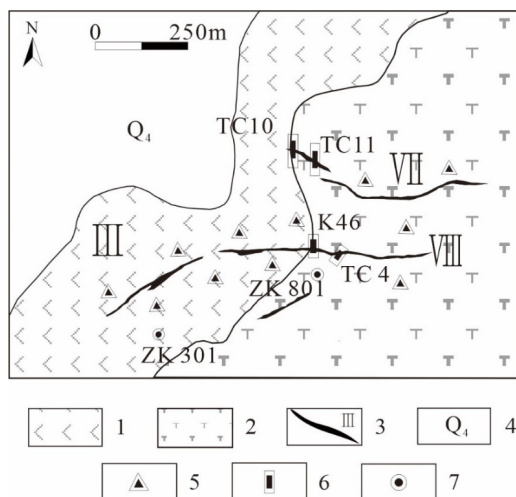
观山铜矿赋存的火山-次火山岩出露面积 7 平方公里左右(图 2),主要岩性为钾质粗面岩、角闪粗安斑岩、粗安斑岩以及相应成分的火山碎屑岩,碎屑岩主要为集块岩、角砾岩和凝灰角砾岩等。粗安斑岩的斑晶主要为斜长石以及不同比例的钾长石、黑云母、角闪石和石英,基质主要为霏细状长石、石英。

观山铜矿矿体主要沿晚期的火山喷口侵入的次火山岩体内部的复合裂隙中,即粗安斑岩和角闪粗安斑岩中,界定的矿床类型为热液脉型填充矿床,裂隙控矿[25]。目前发现大矿脉有 12 条(图 2),分别以罗马数字编号,矿脉走向大致分为三类:走向近 EW; NE 和 NW,区域断裂 F11 和 F25 在矿区东北处交汇,本文讨论的 III、VII 和 VIII 矿脉位于观山铜矿北侧。

3. 观山铜矿 III、VII 和 VIII 矿脉矿化金属元素特征

3.1. III、VII 和 VIII 矿脉概况

III、VII 和 VIII 矿脉中(图 3),III 矿脉 NEE 走向,长度约 280 米,宽度约 2 米;VIII 矿脉位于 III 矿脉上方,走向东西,长度约 590 米,宽约 2 米;VII 矿脉位于 VIII 矿脉上方,走向东西,长度约 400 米,宽约 2 米。



1——角闪粗安斑岩; 2——粗安斑岩; 3——矿脉; 4——第四系; 5——拨土样点; 6——探槽样点; 7——钻孔

Figure 3. Simplified geological map of ore veins III, VII, and VIII in Guanshan copper deposit (Modified by [22])

图 3. 观山铜矿 III、VII 和 VIII 矿脉地质简图(据[22]修改)

三个脉均为铜矿脉,铜的存在形式以斑点状、细脉状的黄铜矿浸染于菱铁矿脉中,围岩蚀变主要包括菱铁矿化、硅化、绢云母化、黄铁矿、重晶石化、方铅矿化、闪锌矿化和赤铁矿化。

表 2 可以看出, VIII 矿脉矿化类型丰富, III 矿脉和 VII 矿脉相对贫乏,脉石矿物基本相同。矿物一般世代关系为重晶石→菱铁矿→黄铜矿/斑铜矿→闪锌矿→方铅矿→赤铁矿→黄铁矿→石英。成矿的期的石英一般呈烟紫色,晚期的一般为白色梳状石英细脉。

Table 2. Main ore minerals and gangue minerals (Modified by [25])
表 2. 主要矿石矿物和脉石矿物(据[25]修改)

矿体编号	矿石矿物	脉石矿物
III 脉	黄铜矿和斑铜矿	菱铁矿、石英和赤铁矿
VIII 脉	黄铜矿、辉铜矿、蓝铜矿和孔雀石	菱铁矿、石英和赤铁矿
VII 脉	黄铜矿、孔雀石	菱铁矿、石英和赤铁矿

黄铁矿(Py) (图 4): 他形粒状或自形立方体, 粒度 0.01~0.13 mm 左右, 呈浸染状不均匀分布, 局部集中。黄铁矿形成较早, 常与菱铁矿共生, 被其他金属矿物所包围。

穆磁铁矿(M-mt) (图 4): 即磁赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), 赤铁矿以磁铁矿假象存在, 叶片状结构, 粒径 0.01~0.18 mm, 少数 >0.2 mm, 常垂直蚀变岩石生长, 分布不均匀。成因: 多次硫铁化合物 - 氧化 - 还原的过程, 显示岩浆存在多期次同化混染分离结晶(Assimilation and Fractional Crystallization, AFC), 从而导致铜、金等多金属矿物富集。

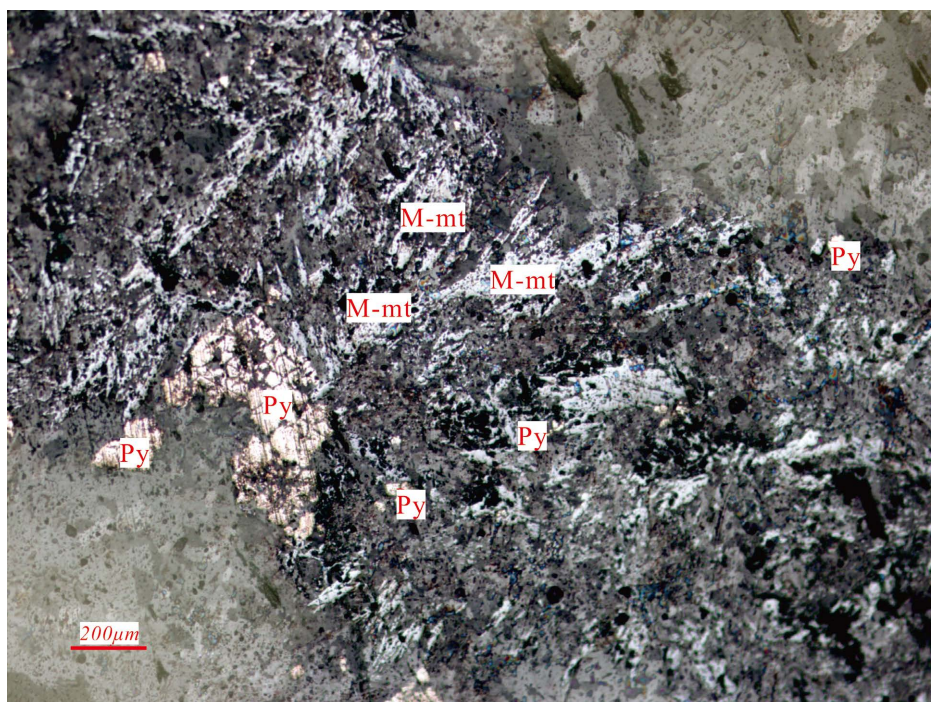


Figure 4. Microphotograph of ore minerals in Guanshan copper deposit (modified by [22]) Py: pyrite; M-mt: M-magnetite

图 4. 观山铜矿黄铁矿 - 穆磁铁矿显微镜照(据[22]修改)

3.2. 主要矿化金属元素特征

本文重点分析了 III、VII 和 VIII 矿脉工作区内(图 3)的剥土样(BT)、探槽样(TC)和钻孔样(ZK)中主要矿化金属元素 Cu、Ag、Au、Pb 和 Zn。剥土样(BT)取自矿脉附近表层土壤, 探槽样(TC)取自矿脉附近刻槽基岩, 钻孔样(ZK)取自深部钻孔岩芯。为了便于比较和作图, Cu 的丰度值分别以百分比(%)和浓度单位(ppm)表示, Au 丰度值较低, 同时以 ppm 和 ppb 两个数量单位展示。

3.2.1. 拨土样(BT)

拨土样(BT)数据见表 3, 分析主要矿化金属元素为 Cu、Ag、Au 和 Pb。可以看出, Cu (2458 ppm)高于中国东部上地壳(32 ppm)和全球上地壳(25 ppm), 因此能够为区域规模工业矿化提供足够的成矿金属量。Ag (7.25 ppm)低于中国东部上地壳(55 ppm)和全球上地壳(50 ppm)。Au (0.27 ppm)低于中国东部上地壳(1.24 ppm)和全球上地壳(1.8 ppm)。Pb (30.96 ppm)略高于中国东部上地壳(18 ppm)和全球上地壳(20 ppm)。拨土样(BT)中 BT-2, BT3-1, BT3-2 和 BT5-2 显示出 Cu 矿化较强。

Table 3. Main mineralized metal elements in soil sample (BT) [25]

表 3. 拨土样(BT)主要矿化金属元素[25]

样号	Cu		Ag	Au		Pb	
	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppb)	(ppm)	
BT1-1	BT1-01	0.0270	270.0	6.54	<0.05		
	BT1-02	0.4100	4100.0	13.2	0.057		
	BT1-03	0.4900	4900.0	10.5	0.093		
	BT1-04	0.0990	990.0	7.88	<0.05		
BT1-2	02BT1-1	0.0441	411.0	<5.0	0.0008	0.8	7.72
	02BT1-2	0.0963	963.0	<5.0			6.84
	02BT1-3	0.4690	4690.0	<5.0	0.21	210	34.4
	02BT1-4	0.0491	491.0	<5.0	0.0023	2.3	5.11
	02BT1-5	0.0123	123.0	<5.0	0.0008	0.8	5.28
BT2	BT2-01	0.1100	1100.0	3.4	<0.05		
	BT2-02	0.7600	7600.0	8.84	0.077	77	
	BT2-03	0.5400	5400.0	11.4	0.18	180	
BT3-1	BT3-01	0.2400	2400.0	8.5	0.055	55	
	BT3-02	0.4000	4000.0	7.4	<0.05		
	BT3-03	0.3800	3800.0	12.3	0.088	88	
	BT3-04	0.7100	7100.0	18.8	0.36	360	
	BT3-05	0.8100	8100.0	13.4	0.076	76	
	BT3-06	0.2700	2700.0	16.2	<0.05		
BT3-2	02BT3-1	0.1420	1420.0	<5.0	0.0038	3.8	13.8
	02BT3-2	0.3970	3970.0	<5.0	0.0166	16.6	31.6
	02BT3-3	0.9910	9910.0	<5.0	0.0615	61.5	21.7
	02BT3-4	0.6510	6510.0	<5.0	0.0574	57.4	17.2
	02BT3-5	0.0919	919.0	<5.0	0.003	3	36.1

Continued

	BT4-01	0.1100	1100.0	5.25	0.058	58	
BT4-1	BT4-02	0.0470	470.0	4.67	<0.05		
	BT4-03	0.2400	2400.0	3.76	0.098	98	
BT4-2	02BT4-1	0.0515	515.0	<3.0		17.9	65.5
	02BT4-2	0.1060	1060.0	<3.0		66.7	90.4
	02BT4-3	0.1830	1830.0	<3.0		136	18.6
	02BT4-4	0.1550	1550.0	<3.0		47	7.54
	02BT4-5	0.1620	1620.0	<3.0		35	8.4
BT5-1	BT5-01	0.0091	91.0	2.97	<0.05		
	BT5-02	0.0300	300.0	4.76	<0.05		
	BT5-03	0.0030	30.0	2.41	<0.05		
	BT5-04	0.0028	28.0	1.64	<0.05		
	BT5-05	0.0100	100.0	6.2	<0.05		
BT5-2	02BT5-1	0.2950	2950.0	<5.0	0.18	180	17.1
	02BT5-2	0.3210	3210.0	<5.0	0.0793	79.3	37.8
	02BT5-3	0.4850	4850.0	<5.0	4.03	4030	27.9
	02BT5-4	0.2070	2070.0	<5.0	0.25	250	24.4
	02BT5-5	0.0144	144.0	<5.0	0.0043	4.3	16.6
	02BT5-2Y	0.7090	7090.0	<3.0		346	16.4
	02BT5-3Y	0.1210	1210.0	<3.0		1160	54.6
	02BT5-4Y	0.0749	749.0	<3.0		359	147
BT6	BT6-2	0.1800	1800	4.47	<0.05		
	BT6-5	0.5600	5600	6.34	0.29		
	BT6-6	0.0110	110	4.84	<0.05		
	BT6-7	0.0022	22	2.54	0.052		
	BT6-1	0.0120	120	2.84	<0.05		
	BT6-8	0.0016	16	4.67	<0.05		
拨土样(BT)平均值			2458.0	7.2489	0.2686	268.647	30.956
中国东部上地壳[26]			32.0	55.0	1.24		18.0
全球上地壳[27]			25.0	50.0	1.80		20.0

拨土样(BT)主要矿化金属元素线性拟合结果见表 4 和图 5。Cu 和 Ag 决定系数最高(0.547)，线性关系较明显。Cu 和 Pb 拟合结果显示，当 Cu 增加到 2000 ppm 时，Pb 含量没有明显增长，一直保持在 40 ppm 以下，决定系数较小(0.023)，表明 Cu 和 Pb 没有线性关系。在 Cu-Au 线性拟合中，随着 Cu 的增长，Au 基本保持在 500 ppb 以下，决定系数较小(0.016)，没有线性关系。

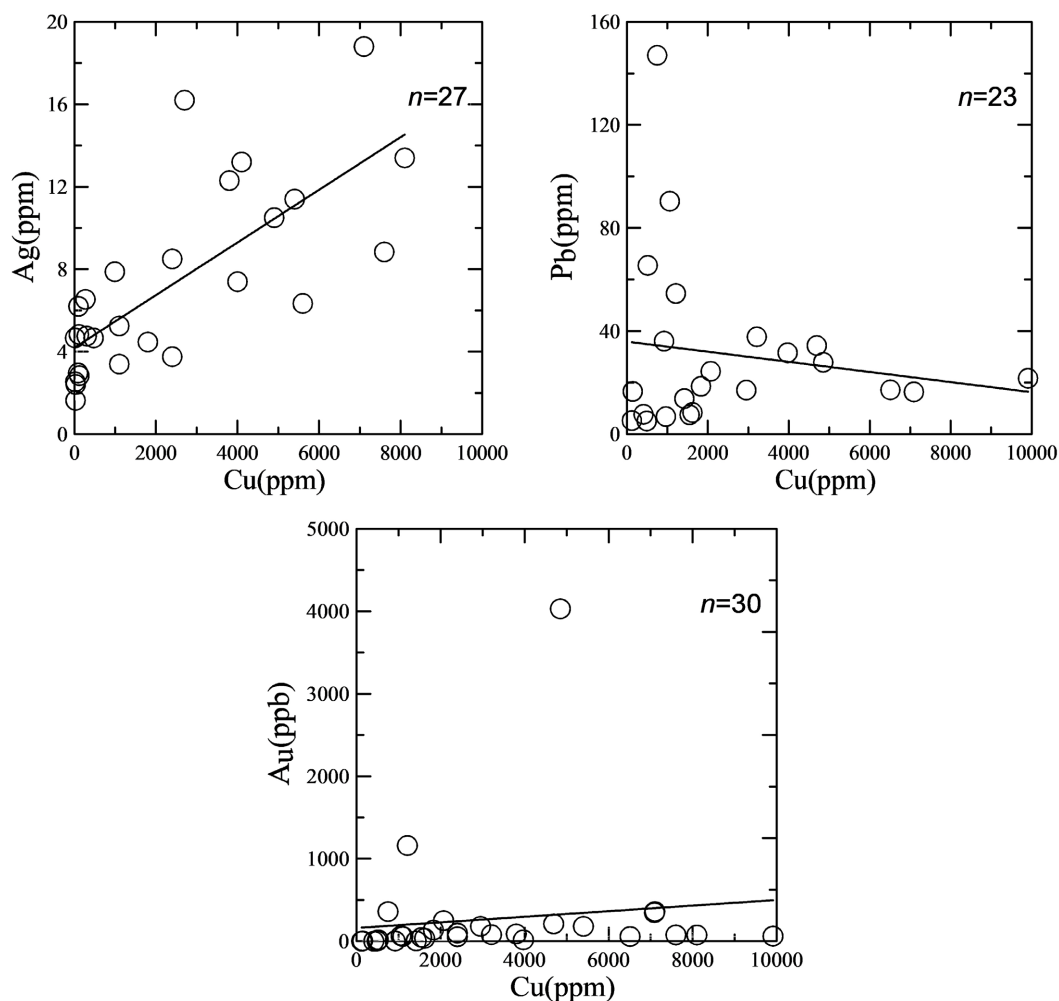


Figure 5. Linear fitting diagram of major mineralized metal elements in the soil sample (BT)

图 5. 拨土样(BT)主要矿化金属元素线性拟合图

Table 4. Linear fitting calculation of main mineralized metal elements in soil sample (BT)

表 4. 拨土样(BT)主要矿化金属元素线性拟合计算

线性拟合	Cu-Ag	Cu-Pb	Cu-Au
公式	$Y = 0.001276424285 * X + 4.192703676$	$Y = -0.001963279568 * X + 35.92873266$	$Y = 0.03384517931 * X + 161.2536564$
数据点	27	23	30
X 平均值	2394.33	2532.83	3173.07
Y 平均值	7.24889	30.9561	268.647

Continued

残余平方和	238.046	23173.1	1.58E+07
回归平方和	287.816	554.663	250386
决定系数	0.547322	0.0233762	0.0156035
残差均方	9.52185	1103.48	564158

3.2.2. 探槽样(TC)

探槽样(TC)分析主要矿化金属元素为 Cu、Ag、Au、Pb 和 Zn，数据见表 5。Cu (2050 ppm)高于中国东部上地壳(32 ppm)和全球上地壳(25 ppm)。Ag 低于检测限。Au (0.18 ppm)低于中国东部上地壳(1.24 ppm)和全球上地壳(1.8 ppm)。Pb (54 ppm)高于中国东部上地壳(18 ppm)和全球上地壳(20 ppm)。Zn (259 ppm)高于中国东部上地壳(70 ppm)和全球上地壳(71 ppm)。

Table 5. Main mineralized metal elements in trenching sample (TC) [22]

表 5. 槽探样(TC)主要矿化金属元素[22]

分析号	Cu		Ag	Au		Pb	Zn	
	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppb)	(ppm)	(ppm)	
TC-4	02TC4-1	0.0430	430	<5.0	0.0009	0.9	11	
	02TC4-2	0.1490	1490	<5.0	0.0422	42.2	16	
	02TC4-3	0.0715	715	<5.0	0.0072	7.2	21	
	02TC4-4	0.0719	719	<5.0	0.0095	9.5	30	
	03TC4-1	0.0027	27	<5.0	0.0079	7.9		
	03TC4-2	0.0025	25	<5.0	0.0087	8.7		
TC-10	O2TC10-1	0.22	2200	<3.0	0.2900	290	15	211
	O2TC10-2	0.28	2800	<3.0	0.4700	470	40	184
	O2TC10-3	0.27	2700	<3.0	0.0930	93	25	236
	O2TC10-4	0.40	4000	<3.0	0.1200	120	18	266
TC-11	02TC11-1	0.18	1800	<3.0	0.0180	18	172	317
	02TC11-2	0.14	1400	<3.0	0.0460	46	250	359
	02TC11-3	0.22	2200	<3.0	0.2800	280	69	322
	02TC11-4	0.70	7000	<3.0	1.1400	1140	49	175
K46	K46-1	0.19	1900				10	600
	K46-2	0.34	3400				30	600
探槽样(TC)平均值			2050.4		0.181	181.0	54.0	327.0
中国东部上地壳[26]			32.0	55.0	1.24		18.0	70.0
全球上地壳[27]			25.0	50.0	1.80		20.0	71.0

探槽样(TC)主要矿化金属元素线性拟合结果见表 6 和图 6。Cu 和 Au 决定系数最高(0.754)，线性关系较明显。Cu 和 Pb 决定系数较小(0.008)，无明显线性关系。Cu-Zn 拟合中，决定系数 0.107，线性拟合程度一般。

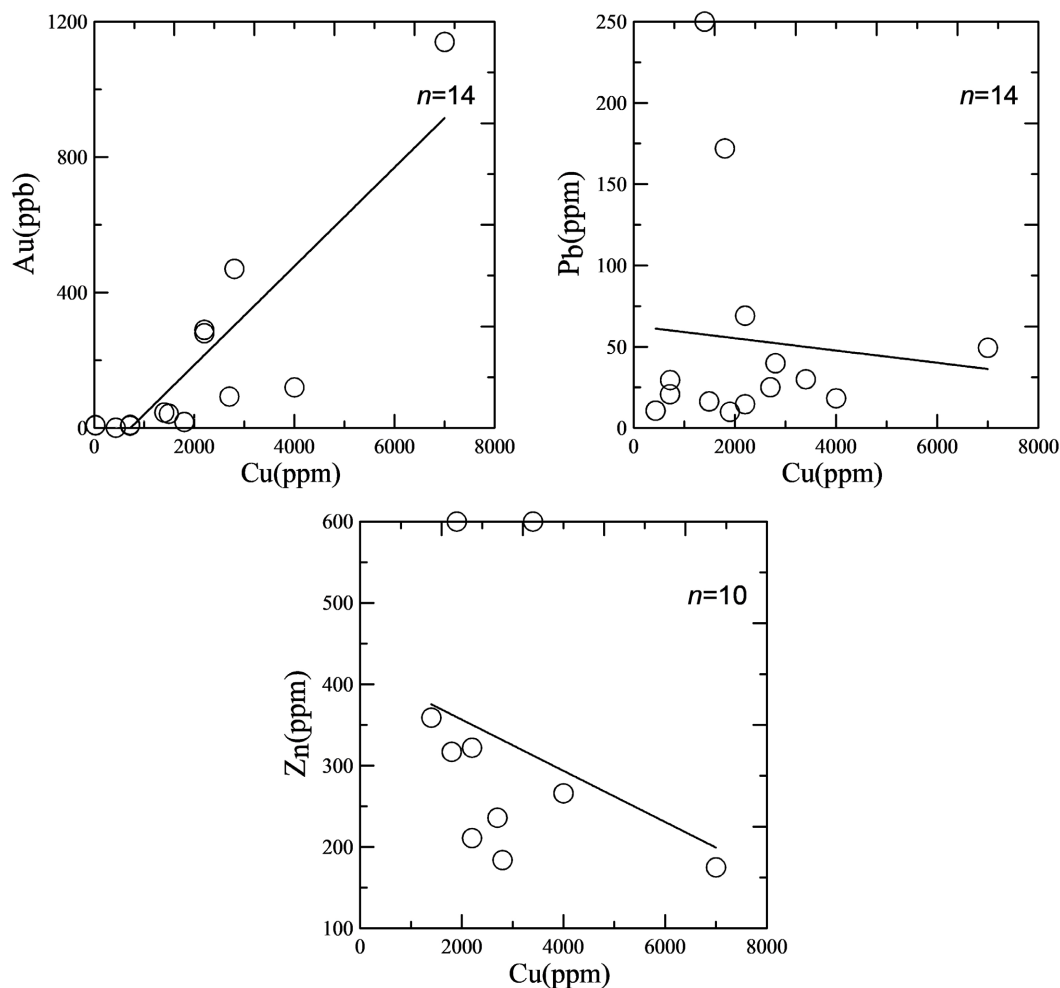


Figure 6. Linear fitting diagram of major mineralized metal elements in the trenching sample (TC)
图 6. 探槽样(TC)主要矿化金属元素线性拟合图

Table 6. Linear fitting calculation of main mineralized metal elements in trenching sample (TC)
表 6. 探槽样(TC)主要矿化金属元素线性拟合计算

线性拟合	Cu-Au	Cu-Pb	Cu-Zn
公式	$Y = 0.1458485275 * X - 105.5925009$	$Y = -0.003783172256 * X + 62.84385886$	$Y = -0.03144373315 * X + 419.4445755$
数据点	14	14	10
Cu 平均值	1964.71	2339.57	2940
Ag 平均值	180.957	53.9929	327
残余平方和	307,572	63,416	195,742

Continued

回归平方和	944,542	529.313	23475.9
决定系数	0.754358	0.00827759	0.107089
残差均方	25631	5284.67	24467.8

3.2.3. 钻孔样(ZK)

在钻孔 ZK301 (孔深 455 m)和 ZK801 (孔深 454 m)中分析的主要矿化金属元素为 Cu、Ag、Au、Pb 和 Zn, 分析数据见表 7。Cu (10,300 ppm)高于中国东部上地壳(32 ppm)和全球上地壳(25 ppm), Ag (22.6 ppm)低于中国东部上地壳(55 ppm)和全球上地壳(50 ppm)。Au (0.25 ppm)低于中国东部上地壳(1.24 ppm)和全球上地壳(1.8 ppm)。Pb (2332 ppm)高于中国东部上地壳(18 ppm)和全球上地壳(20 ppm)。Zn (346 ppm)高于中国东部上地壳(70 ppm)和全球上地壳(71 ppm)。

Table 7. Main mineralized metal elements in drilling sample (ZK) [22]

表 7. 钻孔样(ZK)主要矿化金属元素[22]

样号	Cu		Ag	Au		Pb	Zn	
	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppb)	(ppm)	(ppm)	
ZK301	02K301-1	0.52	5200	25.1	0.0036	3.6	2300	2200
	02K301-2	0.08	800	22.7	0.0096	9.6	21,100	314
	02K301-3	2.03	20,300	18.6			32	27.3
	02K301-4	0.10	1000	30.6	0.0073	7.3	40	38.4
	02K301-5	0.42	4200	19.9	0.0094	9.4	56	40.1
	02K301-6	0.32	3200	18.9	0.0061	6.1	100	47.4
	03K301-7	0.98	9800	22.4	1.4	1400	4800	299
	03K301-8	0.74	7400	22.8	0.66	660	1100	79.3
ZK801	02ZK801-1	1.22	12,200	<3.0	0.34	340	15.5	231
	02ZK801-2	0.43	4300	<3.0	0.15	150	20.9	29.6
	02ZK801-3	3.73	37,300	<3.0	0.36	360	47.6	112
	02ZK801-4	2.47	24,700	<3.0	0.07	70	10.6	92.5
	02ZK801-7	0.35	3500	<3.0	0.0053	5.3	688	987
钻孔样(ZK)平均值			10,300	22.6	0.25	252	2332	346
中国东部上地壳[26]			32.0	55.0	1.24		18.0	70.0
全球上地壳[27]			25.0	50.0	1.80		20.0	71.0

钻孔样(ZK)主要矿化金属元素线性拟合结果见表 8 和图 7。Cu 和 Ag 决定系数最高(0.238), 线性拟合程度相对较高。Cu-Au 决定系数 0.04, 拟合程度一般。Pb 和 Zn 基本相似, 和 Cu 的决定系数分别为 0.086 和 0.047, 无明显线性关系。

Table 8. Linear fitting calculation of main mineralized metal elements in drilling sample (ZK)
表 8. 钻孔样(ZK)主要矿化金属元素线性拟合计算

线性拟合	Cu-Ag	Cu-Au	Cu-Pb	Cu-Zn
公式	$Y = -0.0003008943452 * X + 24.57705206$	$Y = 0.007665137405 * X + 179.2116992$	$Y = -0.1563487588 * X + 3941.984524$	$Y = -0.01220204892 * X + 471.6503346$
数据点	8	12	13	13
X 平均值	6487.5	9466.67	10,300	10,300
Y 平均值	22.625	251.775	2331.59	345.969
残余平方和	81.7157	1.83E+06	3.70E + 08	4.32E + 06
回归平方和	25.5993	77139	3.47E + 07	211,608
决定系数	0.238544	0.0404329	0.0858742	0.0466732
残差均方	13.6193	183,069	3.36E + 07	392,930

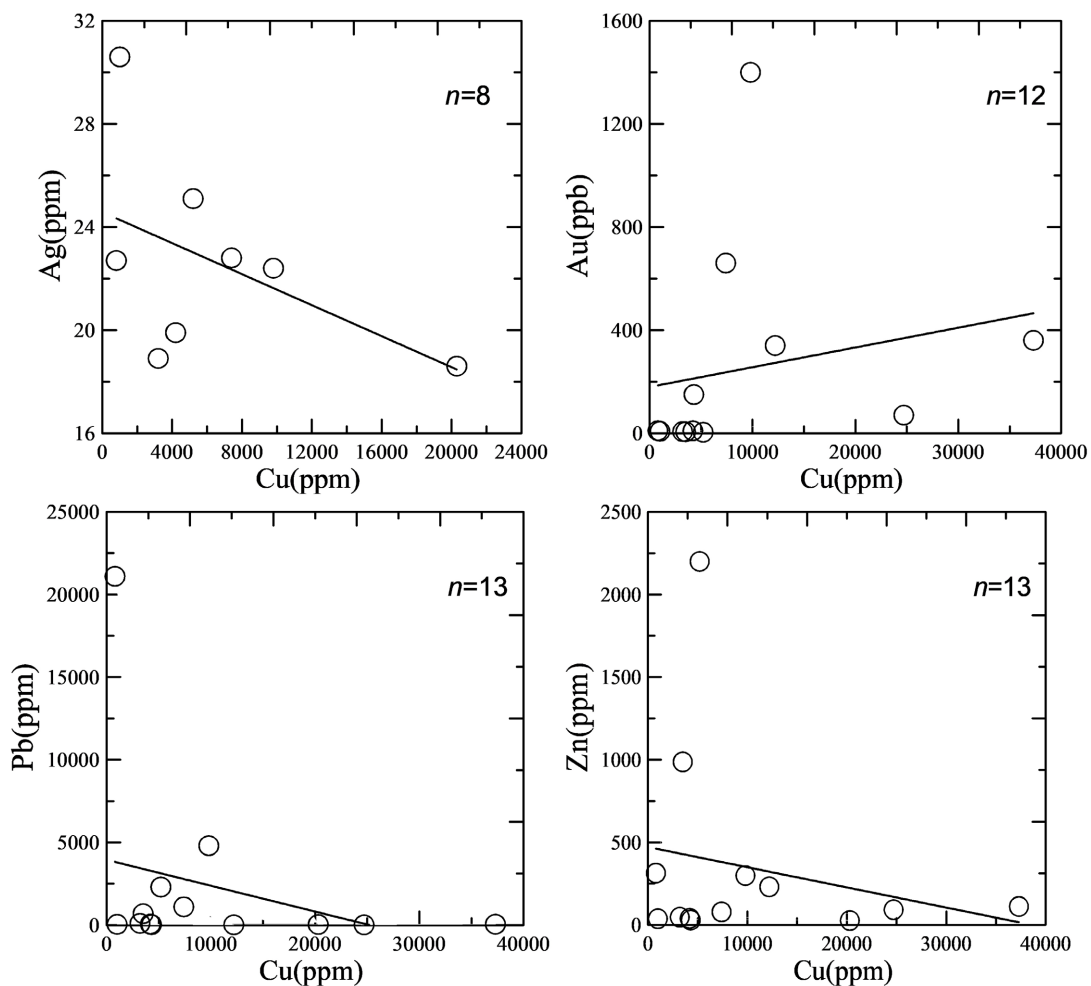


Figure 7. Linear fitting diagram of major mineralized metal elements in the drilling sample (ZK)
图 7. 钻孔样(ZK)主要矿化金属元素线性拟合图

3.3. 讨论

通过主要矿化金属元素丰度分析可以看出,深部钻孔样(ZK)中 Cu 的含量较高(10,300 ppm),而表层剥土样(BT) (2458 ppm)和探槽样(TC) (2050 ppm)较低,合理的解释是由于含铜矿物(黄铜矿等)在表生化学风化作用下造成含铜矿物风化壳(铁帽)流失,随着水系沉积物扩散到周边形成化探次生晕,导致其低于其下部的基岩,其特征可作为深部找矿提供依据之一。上低下高的丰度特征与观山深部钻孔原生晕特征吻合,即随着深度增加,铜矿化不仅品位增加,而且矿化类型更加丰富,呈现成矿金属元素的多期性和叠加性[6]。Ag 在剥土样(BT)中最低(7.25 ppm),探槽样(TC)值低于检测限,钻孔样(ZK)中最高(22.6 ppm),显示深部可能有局部矿化,但可能达不到工业边界品位(40 ppm)。Au 在剥土样(BT)为 0.26 ppm,在探槽样(TC)为 0.18 ppm,钻孔样(ZK)为 0.25 ppm,显示较为稳定的分布。Pb 在剥土样(BT)为 30.96 ppm,探槽样(TC)和钻孔样(ZK)分别为 54.0 ppm 和 2332 ppm,显示深部可能有局部矿化。Zn 在探槽样(TC) (327 ppm)与钻孔样(ZK) (346 ppm)类似,显示随着深度加深,矿化没有明显富集。北部的 VII 脉探槽样(TC-10 和 TC-11)中的 Cu (3013 ppm)矿化要高于中部的 VIII 脉探槽样(TC-4 和 K46)中的 Cu (1088 ppm),而中部 VIII 脉附近 ZK801 整体 Cu 矿化程度(16,400 ppm)要优于西部 III 脉附近 ZK301 (6488 ppm),显示沿着富集区可开展进一步工作。

通过主要矿化金属元素线性拟合特征可以看出, Cu 和 Au 在探槽样(TC)决定系数最高(0.754), Cu 和 Ag 在剥土样(BT)决定系数为 0.547,一般决定系数(R^2)愈逼近 1,表明其拟合程度愈高,线性关系越明显,从元素地球化学角度分析,其产生的原因可能是 Cu、Au 和 Ag 产生类质同象置换有关,这些金属元素共价半径(Cu-1.17; Ag-1.53; Au-1.34)存在差别,所以导致相同温压条件能产生不同的地球化学行为[28], Au 共价半径相较于 Ag 更接近 Cu,这就印证了邓龙林等(2018)对观山 5 个钻孔 588 件钻孔原生晕样品的元素统计分析,其结论显示铜和金成矿关系密切。Cu 和 Pb, Zn 各自线性拟合分析中,从剥土样(BT)、探槽样(TC)到钻孔样(ZK)分析中,决定系数较低,拟合程度较差,无明显线性关系,至少表明本研究范围内其共生能力不强。

4. 矿床成因探讨

禹尧等[2]测得龙王山组(K_1d)粗面岩年龄为 128 Ma (锆石 U-Pb); 王丽娟等[4]给出溧水火山岩盆地年龄为 136~127 Ma (锆石 U-Pb); 张少琴等[5]测得溧水盆地大王山组(K_1d)和龙王山组(K_1d)火山岩年龄为 135~124Ma (锆石 U-Pb); 梁业恒等[3]给出观山铜矿成矿年龄在 116~120 Ma 左右(粗安斑岩绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$),表明观山铜矿成岩成矿大约在白垩纪早期(K_1),即中国构造运动上的燕山晚期。燕山运动晚期的下扬子地区正受太平洋构造域影响[21],地幔上涌,地壳由伸展-减薄-拉张形成的沿江坳陷带内爆发多个火山岩盆地[20],并同步伴生长江中下游多金属成矿带[18] [19]。

夏嘉生[29]给出观山铜矿 $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ 位于-0.87~+1.95 和+5.55~+7.7 两个区间,梁业恒等[12]测得观山铜矿金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}\text{‰} = +5.8\text{‰} \sim +9.9\text{‰}$,均显示成矿物质之一的硫来源于下地壳和上地幔的混合,这一特征比对观山全岩稀土元素显示出来自大陆裂谷碱性玄武岩情况吻合[24]。周金城等[30]通过成岩模拟计算证明观山粗面岩来源于地幔部分熔融同化地壳分离结晶产物。李超文等[8]和高晓峰等[9]的研究论文认为溧水盆地火山岩主要受到地幔上涌,岩石圈伸展减薄,高钾、准铝质大王山组和龙王山组火山岩难以全部通过地壳部分熔融实现,而是在地幔玄武岩浆上涌过程中受到下陆壳部分同化混染(AFC)作用形成。

观山铜矿成矿流体包裹体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 分别位于+0.75‰~+10.80‰ [29]和+0.1‰~+2.3‰ [12], $\delta^{18}\text{D}_{\text{水}}$ 位于-81‰~-90‰ [12],显示整个矿体主要受到大气降水和岩浆水混合作用。夏嘉生[29]给出观山铜矿重晶石和石英包裹体成矿温度在 246℃~295℃之间,平均 277℃,成矿盐度(wt%NaCl)在 5.2%~21.8%之间,平均

9.03%。梁业恒等[11]测得观山铜矿方解石流体包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 在 0.48%~7.39% 之间, 成矿均一温度 13°C~304°C 之间。比照江西德兴斑岩铜矿盐度(25%~70%)和成矿温度(100°C~600°C) [31] [32] [33], 观山铜矿具有较低的成矿温度和成矿盐度。

Crerar *et al.* [34]和 Feiss [35]分别认为斑岩铜矿的 Cu 来源于母岩岩浆, 后期热液造成 Cu 富集, Cu 的含量与成矿流体中的盐度和成矿温度有关。观山铜矿成矿流体中的 pH 值位于 6.33~6.86, 平均为 6.54, Eh 值+49.16~+80.52, 平均+68.29 [29], 显示成矿流体为中偏碱性, 成矿环境为弱还原型。内生黄铜矿 (CuFeS_2)形成充要条件是, 成矿流体中不仅需要足够 Cu (地幔玄武岩), 还需要充足的 Fe (斑岩中黑云母类暗色矿物), 火山岩浆中的高硫化物不仅是成矿元素也是成矿环境的化学反应催化剂。



综上所述, 观山铜矿产于溧水中生代火山岩构造盆地地质背景下, 矿床空间定位于古火山机构的深部的粗面斑岩边缘部位, 成岩成矿大约形成于白垩纪早期(K_1), 成矿物质主要来源于下地壳和上地幔, 岩浆热液经过后期大气水的混合, 在偏碱性的、中低温度条件下成矿。以火山口为中心, 各种地质、地球物理、地球化学特征显示向四周环形分布, 向深部中心不仅 Cu 矿化递增且矿化种类丰富, 未来找矿探测方向以火山机构特征为参考, 向深部中心方向开展工作。

5. 结论

1) 矿化金属元素空间丰度方面: Cu 在深部钻孔样(ZK)中矿化最好(10,300 ppm), 地表探槽样(TC) (2050 ppm)和拨土样(BT) (2458 ppm)矿化相当, 暗示深部可能有较好矿化; 同样, Ag 在钻孔样(ZK)矿化(22.6 ppm)高于拨土样(BT)中的矿化(7.25 ppm); Au 变化幅度较小, 拨土样(BT) (0.269 ppm)、探槽样(TC) (0.181 ppm)和钻孔样(ZK) (0.252 ppm)矿化相当; Pb 在钻孔样(ZK)矿化(2332 ppm)高于拨土样(BT)矿化(30.96 ppm); Zn 变化幅度较小, 探槽样(TC)矿化(327 ppm)和钻孔样(ZK)矿化(346 ppm)相近。综上所述, Cu、Ag 和 Pb 深部可能有较好矿化, Au 和 Zn 变化幅度较小。

2) 矿化金属元素线性拟合分析中: Cu 和 Au 决定系数最高(0.754), 线性拟合优度最好, Cu 和 Ag 决定系数为 0.547, 线性拟合优度次之, Cu 和 Pb、Zn 决定系数低于 0.5, 线性拟合优度最差, 无明显线性关系。

3) 观山铜矿床形成于白垩纪早期(K_1), 矿床的成矿物质主要来自上地幔和下地壳, 岩浆热液经过后期大气水的混合, 在偏碱性、中低温度条件下成矿。

致 谢

匿名审稿人和《地球科学前沿》编辑老师对本文出版提出了不少建设性修改意见, 让我受益匪浅, 在此一并向他们表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 姜玲, 杨建勇, 等. 江苏省溧水县观山铜矿核查区资源储量调查报告[R]. 全国地质资料馆, 2010.
- [2] 禹尧, 徐夕生. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(1): 105-116.
- [3] 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏溧水观山高硫型铜铅金矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 143-148.
- [4] 王丽娟, 黄建平, 于津海, 等. 长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素[J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1305-1317.
- [5] 张少琴, 王丽娟, 杨颖鹤. 长江中下游溧水盆地火山岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报,

- 2015, 21(1): 15-30.
- [6] 邓龙林, 朱伟, 石富军, 等. 江苏观山铜矿钻孔原生晕特征及深部找矿预测[J]. 矿产勘查, 2018, 9(10): 1926-1931.
- [7] 刘俊, 彭芳. 江苏溧水火山岩盆地观山旋回岩石学特征[J]. 昆明工学院学报, 1991, 16(1): 12-20.
- [8] 李超文, 郭锋, 李晓勇. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因与深部动力学过程探讨[J]. 地球化学, 2004, 33(4): 361-371.
- [9] 高晓峰, 郭锋, 李超文, 等. 溧水盆地两类晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 1-12.
- [10] 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏溧水盆地次火山岩元素地球化学[J]. 矿物学报, 2009, 29(z1): 63-65.
- [11] 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏观山铜铅金矿床成矿流体地球化学和成因[J]. 矿床地质, 2008, 27(5): 605-612.
- [12] 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏观山高硫型铜铅金矿床稳定同位素地球化学和成因意义[J]. 地质与勘探, 2010, 46(4): 698-704.
- [13] 王堂喜, 唐端来. 江苏省溧水县观山铜多金属矿地质特征和成因探讨[C]//2006 年华东六省一市地学科技论坛论文集. 南昌: 江西科学技术出版社, 2006: 117-121.
- [14] 王振亮, 林天亮, 蔡永文. 综合物探方法在江苏观山铜多金属矿区寻找隐伏矿体的应用[J]. 矿产勘查, 2015, 6(1): 48-52.
- [15] 朱伟, 邓龙林, 等. 综合物探方法在江苏观山铜矿深部勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2018, 9(6): 1244-1248.
- [16] 楚之潮, 秦有余. 长江中下游铜矿地质特征[C]//长江中下游铁铜金银矿产地质论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-96.
- [17] Weislogel, A.L., Graham, S.A., Chang, E.Z., *et al.* (2006) Detrital Zircon Provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi Complex: Sedimentary Record of Collision of the North and South China Blocks. *Geology*, **34**, 97-100. <https://doi.org/10.1130/G21929.1>
- [18] 常印佛, 刘湘培, 等. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [19] 翟裕生, 姚书振, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [20] 朱光, 徐嘉炜, 刘国生, 等. 下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J]. 中国区域地质, 1999(1): 73-79.
- [21] 董树文, 马立成, 刘刚, 等. 论长江中下游成矿动力学[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 612-625.
- [22] 华东有色金属矿产勘查开发院. 江苏省溧水县观山及其外围次火山岩型铜多金属矿普查工作设计书[R]. 南京: 华东有色金属矿产勘查开发院, 2005.
- [23] 储国正. 长江中下游地区成矿地质背景分析[J]. 安徽地质, 2003, 13(1): 34-43, 53.
- [24] 刘俊, 彭芳. 江苏溧水火山岩盆地观山旋回岩石学特征[J]. 昆明工学院学报, 1991, 16(1): 12-20..
- [25] 江苏冶金地质勘探公司 813 队. 江苏溧水火山岩地区地质特征及成矿规律讨论[R]. 南京: 江苏冶金地质勘探公司 813 队, 1980.
- [26] Gao, S., Luo, T.C., *et al.* (1999) Structure and Composition of the Continental Crust in East China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **42**, 129-140. <https://doi.org/10.1007/BF02878511>
- [27] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- [28] 刘英俊, 曹励明, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [29] 夏嘉生. 江苏溧水火山岩盆地内生金属矿床定位模式及找矿思路[J]. 江苏地质, 1995, 19(1): 5-11
- [30] 周金城, 赵太平, 等. 溧水中生代橄榄安粗岩系的构造环境及演化关系[J]. 南京大学学报, 1994, 30(3): 504-509.
- [31] 芮宗瑶, 黄崇轲, 等. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [32] 钱鹏, 陆建军, 姚春亮. 德兴斑岩铜矿成矿流体演化与来源的流体包裹体研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(3): 319-326.
- [33] 吴德新, 赵元艺, 吕立娜, 等. 江西德兴朱砂红斑岩铜矿流体包裹体特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 677-690.
- [34] Crear, D.A. and Barnes, H.L. (1976) Ore Solution Chemistry: Solubilities of Chalcopyrite and Chalcocite Assemblages in Hydrothermal Solution at 200 Degrees to 350 Degrees. *Economic Geology*, **71**, 772-794. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.71.4.772>
- [35] Feiss, P.G. (1978) Magmatic Sources of Copper in Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, **73**, 397-404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.73.3.397>