

# Geochemical Characteristics of Primary Halos in Tongjiangling Cu-W Deposit, Jiangxi Province in China

Zhijian Lai\*, Langming Hu, Liming Tian, Xinhua Yan#

Geophysical and Geochemical Exploration Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Nanchang Jiangxi  
Email: 2759285911@qq.com, #120637623@qq.com

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The orebodies in the Tongjiangling copper-tungsten mining area generally strike northeast and dip southeast, and occur as layers and lenses near the contact zone between the granodiorite porphyry and carbonate of the Maokou Formation. The ore minerals are mainly composed of chalcopyrite and scheelite. The metallogenic magmatic rocks in this area are granodiorite porphyry. Mineralization zoning in the Tongjiangling mining area is characterized by "copper in the upper part and copper and tungsten in the lower part". The contact zone between Carboniferous and Ordovician carbonate rocks and granodiorite porphyry or the Wutong plane and the silica-calcium interface formed during Ordovician-Silurian in the mining area have a great potential for tungsten exploration.

## Keywords

Geochemical Characteristics of Primary Halos, Zoning Sequence, Copper-Tungsten Deposit, Tongjiangling, Jiurui

---

# 江西九瑞通江岭铜多金属矿原生晕地球化学特征

赖志坚\*, 胡朗明, 田立明, 鄢新华#

江西省地质矿产勘查开发局物化探大队, 江西 南昌  
Email: 2759285911@qq.com, #120637623@qq.com

---

\*第一作者。  
#通讯作者。

## 摘要

通江岭铜多金属矿区内矿体总体走向北东、倾向南东，呈似层状、透镜状产出于花岗闪长斑岩与茅口组碳酸盐接触带附近，矿石矿物以黄铜矿、白钨矿为主。区内成矿岩浆岩为花岗闪长斑岩。通江岭矿区存在“上铜下钨”的矿化分带特征，元素分带具有低温(前缘晕) - 中温(近矿晕) - 高温(尾晕)的特征，底部出现As、Sb、Hg等前缘晕元素，指示剖面下方还可能存在着铜钨矿体，结合矿区石炭系、奥陶系碳酸盐岩与花岗闪长斑岩接触带或五通面、奥陶—志留系所形成的硅钙界面，认为找钨潜能大。

## 关键词

原生晕地球化学，分带序列，铜钨矿，通江岭，九瑞

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

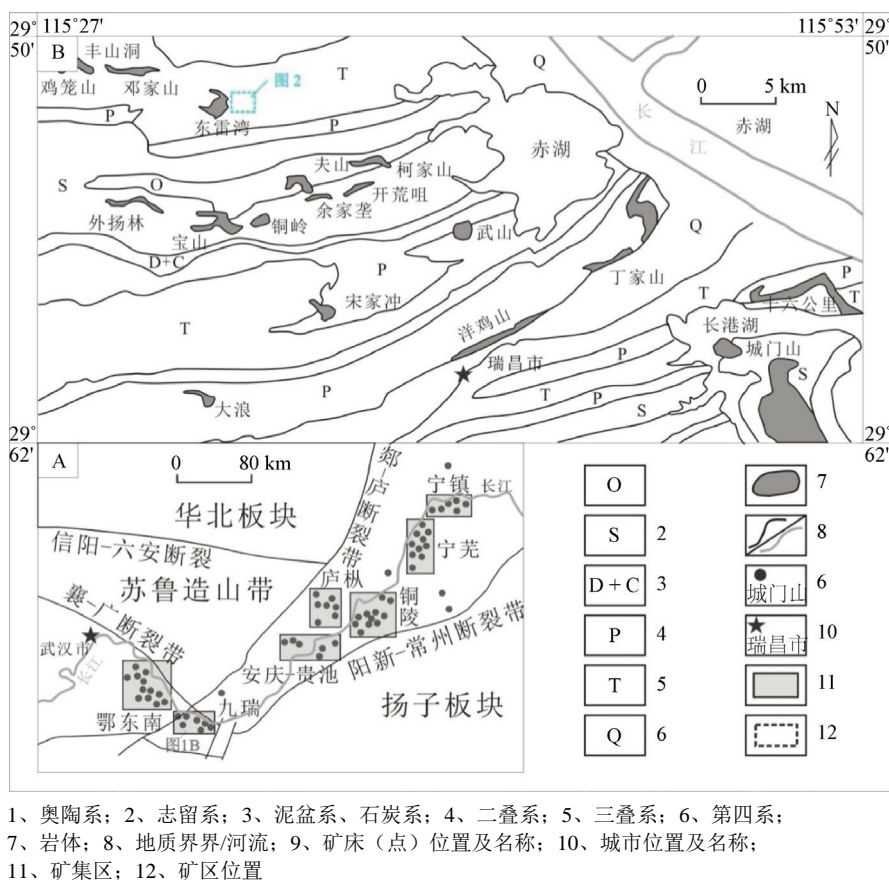
## 1. 引言

原生晕是矿体围岩中的元素异常，往往由成矿作用所致，反映了最直接的原生地球化学特征[1]。众多热液矿床找矿实例证明，对周围发育的成矿相关元素分带性进行研究，是判断异常分布、地球化学特征、剥蚀程度，推测隐伏矿体、评价深部潜力、进行找矿预测的一个有效方法[2] [3] [4]。铜作为国家工业发展的重要矿种，其化探原生晕的研究早在 20 世纪 60 年代便已经开始，多年以来通过结合各类型铜矿床成因对地球化学异常的形成机制进行科学解释，构成地球化学勘查模型，建立了不同类型铜矿地质 - 地球化学勘查模式模型系统。基于原生晕的岩石地球化学找矿方法已被认为是一种寻找深部隐伏矿体的有效方法[1] [2] [3] [5]。

九(江) - 瑞(昌)矿集区位于长江中下游 Cu-Au-Mo (Fe)成矿带中段(图 1)，是中国的大型铜资源基地之一。历经 60 余年的勘查，九瑞地区总结出“上铁下铜(钼)”的矿化分带规[6] [7] [8]，并发现了武山、城门、洋鸡山等一批大型铜金矿床[9] [10] [11] [12] [13]。通江岭铜多金属矿床位于九瑞矿集区北侧，是该地区近年来深部新发现厚大铜钨矿体的矿床[14]，极大丰富了九瑞矿集区找矿空间、找矿思路和找矿方向。前人研究了通江岭铜多金属矿床的矿床地质特征和成岩成矿年代学[15] [16]，总结了矿床成因及其成矿规律。本文在前人工作基础上，开展典型勘探线剖面原生晕地球化学的分析，初步建立了原生晕叠加模型，讨论矿床元素分带规律，为通江岭铜多金属矿床深部勘查，乃至九瑞矿集区的找矿提供参考。

当前的勘查发现，通江岭铜多金属矿主矿体呈似层状、透镜状产出于花岗闪长斑岩与茅口组碳酸盐接触带附近。通江岭铜矿自浅部至深部具有明显的矿化分带，浅部以热液充填铅锌铜矿化为主，深部岩脉与围岩接触带部位发育接触交代型铜矿化，岩脉内部则发育细脉浸染状铜矿化。多条斜列分布的矿体倾向延深超过 1 km，均位于 F1 逆断层上盘。矿体深部和 F1 断层下盘，是否存在找矿潜力是后续勘查急需解决的问题。前人通过格里戈良分带性值系数法和 Min-Max 标准化方法，初步建立了通江岭铜矿床垂直分带序列[17]。与典型的斑岩 - 矽卡岩型矿床原生晕分带结构相比，认为矿区深部具有斑岩 - 矽卡岩型的找矿前景，深部五通组与黄龙组形成的“硅钙”界面可能存在块状硫化物型铜矿体[18]。本文在前人工

作基础上,开展典型勘探线剖面原生晕地球化学的分析,初步建立了原生晕叠加模型,讨论矿床元素分带规律,为通江岭铜多金属矿床深部勘查,乃至九瑞矿集区的找矿勘查提供启示。



**Figure 1.** Geological map of Jiujiang-Ruichang ore concentration area in middle to lower Yangtze mineralizing belt

**图 1.** 长江中下游九瑞矿集区地质简图

## 2. 区域地质特征

九瑞矿集区位于华北板块苏鲁造山带以南,地处下扬子地块的西北缘,受郟庐断裂带、襄阳-广济断裂带和阳新-常州断裂带的控制(图 1) [7]。区域内基底为新元古代双桥山群,盖层连续沉积了从震旦系至第四系的地层。矿集区主要赋矿地层为奥陶系与石炭系碳酸盐岩。褶皱与断裂构造发育。褶皱构造主要为一系列近北东向展布的褶皱带。断裂构造主要为北西-北北西和北东-北北东向两组,两组断裂构造的交汇部位是主要控岩控矿构造。岩浆活动频繁,岩性以花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩为主,呈岩株、岩墙和岩脉状产出。与成矿有关的岩浆岩为高钾钙碱性侵入岩,属于 I 型花岗岩。成岩成矿时代集中于 145 Ma 左右,与赣北朱溪、大湖塘、阳储岭等钨矿床的成岩成矿时代基本一致[19] [20] [21]。

## 3. 矿床地质特征

### 3.1. 基本地质特征

通江岭铜多金属矿发育有近东西泉古寺-牛头山背斜,背斜从核部到两翼依次展布中二叠茅口组( $P_{2m}$ )、上二叠统龙潭组( $P_{3l}$ )、上二叠统长兴组( $P_{3c}$ )、下三叠统殷坑组( $T_{1y}$ )、下三叠统青龙组( $T_{1q}$ )、下三

叠统周冲村组(T<sub>1z</sub>) (图 2)。其中, 中二叠统茅口组含炭灰岩、燧石结核灰岩是矿床主要赋矿地层。

矿区断裂自北而南, 主要由 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub> 等 4 条断层, 其余为规模较小的北西西向断层, 为成矿后断层。F<sub>1</sub> 断层, 分布于通江岭背斜北翼。断层呈弯曲波状, 走向为近东西 - 北东东向, 向南陡倾, 使茅口组逆冲于下三叠统之上, 长兴组、龙潭组和部分殷坑组遭到错动断失和叠覆, 为走向逆冲断层。F<sub>2</sub> 断层, 位于通江岭背斜轴部。断层走向近东西 - 北东东, 在地表浅部形成一个宽约 10~20 米的角砾破碎带, 发育有为硅化、绿泥石化、泥化等蚀变。沿断层贯入有多条花岗闪长斑岩岩脉, 最长岩脉延长 2 千米以上, 宽度 10~40 米, 是主要的控岩控矿逆冲断层。F<sub>3</sub> 断层, 位于通江岭背斜南翼, F<sub>2</sub> 断层和主矿体的上部。断层走向近东西 - 北东东, 使青龙组直接断覆于茅口组之上, 其中见有铜矿化, 是次要控矿的正断层。F<sub>4</sub> 断层, 位于通江岭背斜南翼。断层走向为东西 - 北东东, 倾向正北 - 北北西。钻孔显示断层下盘的南部地层下三叠统周冲村组蚀变大理岩和矿体上升, 形成断距约 200 米。该断层破碎带中构造角砾明显, 残留早期形成的黄铜矿角砾, 表现为成矿后的正断层性质。

矿区岩浆岩主要为燕山晚期花岗闪长斑岩脉, 沿 F<sub>2</sub> 断层近东西向至北东东向发育, 被北西向 - 北西西向成矿后断裂切割。锆石 LA-ICPMSU-Pb 年龄为 143.31 ± 2.70 Ma [14], 与该区域周边的朱溪、武山、南港等铜钨矿床的花岗斑岩、花岗闪长斑岩和石英斑岩的 145 Ma 左右的年龄接近[19] [21]。

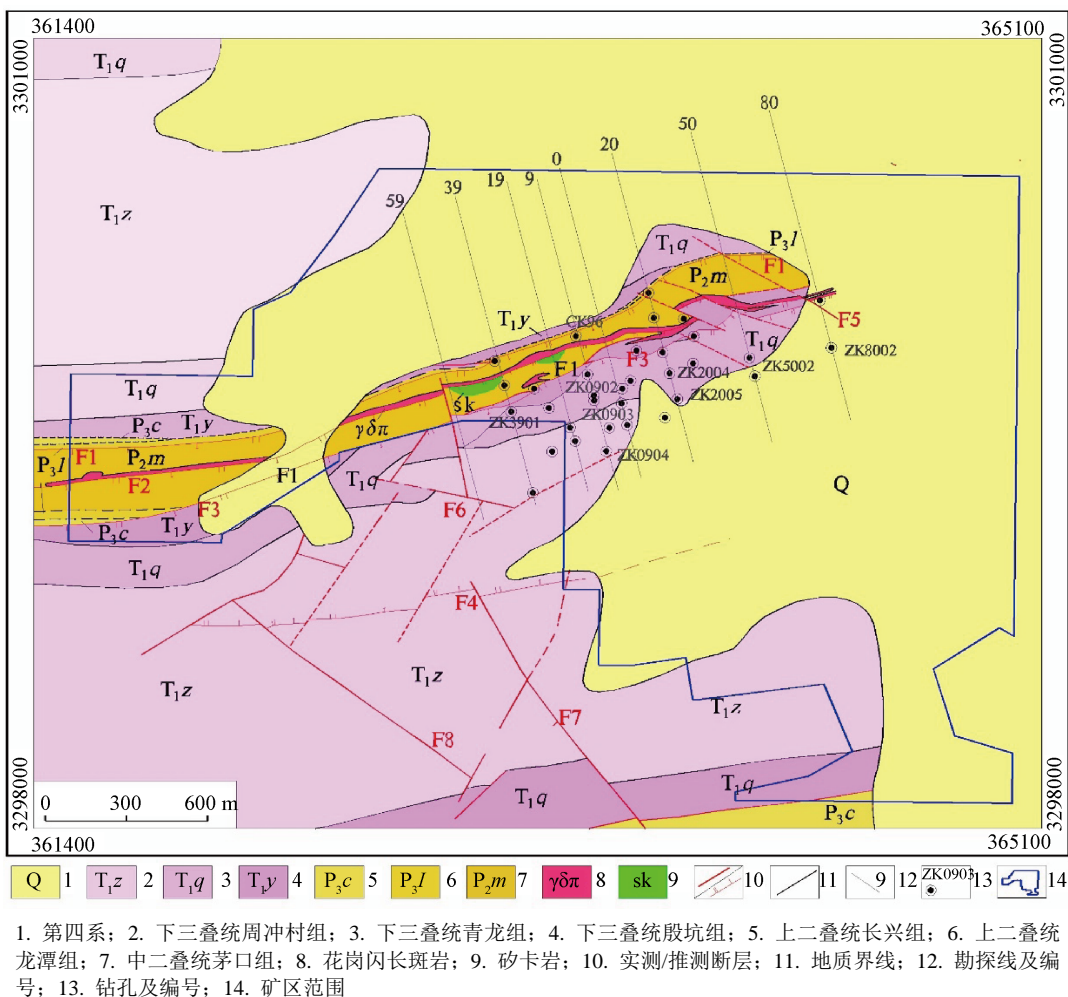


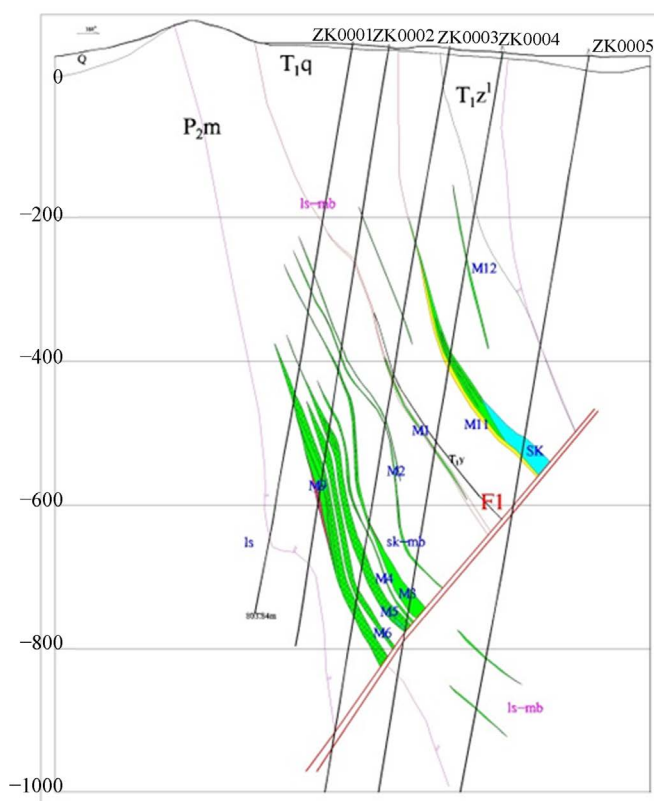
Figure 2. Geological map of Tongjiangling Cu-polymetal deposit  
图 2. 通江岭铜多金属矿矿区地质图

### 3.2. 矿体地质特征

矿区目前共圈定 14 条矿体(M1~M14)，总体走向北东东，倾向南南东，产状陡倾，倾角  $50^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。矿体主要呈似层状、透镜状产于花岗闪长斑岩与中二叠茅口组( $P_2m$ )碳酸盐岩地层的内外接触带，以斑岩型、矽卡岩型矿化为主。矿体具有上铜下钨的分带趋势，上部主要为铜矿体，下部为铜(钨)矿体(如图 3)。M9 号矿体为规模最大的代表性矿体，走向延伸超 1200 米，倾向延深超 1000 米，真厚度 10.43~27.66 m，Cu 品位 0.45%~0.68%，最高可达 9.73%； $WO_3$  品位 0.05~0.17%，局部 Mo、Zn、Ag 达到伴品位要求。

矿石中金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿，其次是少量的白钨矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿。非金属矿物主要为石英、方解石、长石、高岭土，以及石榴子石、辉石、绿帘石等矽卡岩型蚀变矿物。黄铜矿主要以浸染状、细脉状、网脉状赋存于矽卡岩和蚀变花岗闪长斑岩中。白钨矿主要分布在矿体中下部，呈浸染状、细脉状产出于石榴子石透辉石矽卡岩中和石英硫化物脉中。矿石构造主要为浸染状、脉状、网脉状、角砾状和块状；矿石结构以结晶结构、交代结构和固溶体分离结构为主。

花岗闪长斑岩主要发育石英、黄铁矿、绢云母、绿泥石、高岭土、方解石等代表的斑岩型蚀变矿物组合，岩体内矽卡岩化蚀变和矿化作用较弱。岩体外接触带的茅口组碳酸盐岩地层中主要发育石榴子石、透辉石、透闪石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石等矿物组合。岩体与围岩之间具有硅化-黄铁绢英岩化-高岭土化花岗闪长斑岩 → 石榴子石-透辉石-透闪石矽卡岩 → 矽卡岩化大理岩 → 大理岩的蚀变分带。



$T_{1z}^1$  下三叠统周冲村组一段； $T_{1q}$  下三叠统青龙组；  
 $P_2m$  中二叠统茅口组；绿色：铜矿体；蓝色：矽卡岩

**Figure 3.** The line 9 and line 20 cross section in Tongjiangling Cu-polymetal deposit

**图 3.** 通江岭铜多金属矿 0 线勘探线剖面图



## 4. 样品采集及测试

本次研究样品采自通江岭铜多金属矿 0 号勘探线上的 4 个钻孔, 262 件样品。岩石类型包括围岩地层、矽卡岩化矿石、斑岩型矿化岩石以及构造裂隙充填物, 样品基本反映了矿区热液活动的信息。共分析了 Cu、Pb、Zn、Ag、W、Sn、Mo、Bi、Au、As、Sb、Hg、Co、Ni、Cd、Cr、Ba、Mn、Se、Sr、Ti、V 等 22 个元素。其中, Au、Ag 采用 AAS 火焰原子吸收法测定, As、Sb、Hg 采用 AFS 原子荧光仪测定, 矿石中 Pb、Zn 采用 ICP-OES 测定, 其余采用 ICP-MS 测定。

## 5. 元素组合特征

### 5.1. 相关系数和聚类分析

为消除元素含量级差和特高值对相关系数影响, 本文采用原始数据对数转换处理来计算相关系数(如表 1)。元素间的相关系数  $r$  大于临界 0.33 (置信度为 0.01), 一般认为是具有显著的相关性。通江岭矿区主成矿元素 Cu, 与原生晕元素 Ag、Co、Au、Mo、W、Sn、Zn、Cd、As 等的相关系数  $r > 0.33$ , 属于显著的相关性, 能够作为指示元素。Cu 元素与 Mn、Bi、Sb、Hg、Cr、Ni、Ba、Ti、V、Se 等元素相关系数  $r < 0.33$ , Cu 元素与 Pb、Sr 等相关系数  $r$  分别为 -0.29 和 -0.11, 为较弱的负相关关系。

次要成矿元素 W, 与原生晕元素 Cu、Ag、Co、Au、Mo、Sn、Mn 等的相关系数  $r > 0.33$ , 属于显著的正相关性。W 元素与 Pb 元素具有较强的负相关关系, 相关系数  $r = -0.45$ 。W 元素与 Zn、Cd、As、Cr、Ni、Ba、Ti、V、Se 等元素有较弱的正相关系数, 与 Bi、Sb、Hg、Sr 等元素具有较弱的负相关关系, 相关系数  $r$  介于 -0.33 和 0.33 之间。

**Table 1.** Correlation coefficients of the log-transformed data from primary halo elements and main oreforming elements  
**表 1.** 原生晕元素与主成矿元素的相关系数( $r$ )

	Cu	Ag	Co	Au	Mo	W	Sn	Mn	Zn	Cd	Bi
Cu	1.00	0.86*	0.76*	0.69*	0.69*	0.63*	0.49*	0.32	0.48*	0.39*	0.11
W	0.63*	0.43*	0.61*	0.49*	0.71*	1.00	0.52*	0.60*	0.12	0.05	-0.16
	Pb	As	Sb	Hg	Sr	Cr	Ni	Ba	Ti	V	Se
Cu	-0.29	0.43*	0.26	0.10	-0.11	0.20	0.32	0.05	0.18	0.25	0.20
W	-0.45	0.20	-0.08	-0.10	-0.19	0.17	0.30	0.13	0.24	0.29	0.05

注: \*表示呈显著正相关关系。n = 262, 置信度为 0.01 的显著相关临界值为 0.33。

皮尔逊相关系数法(The Pearson correlation coefficient)能够有效的统计元素内之间的相关关系[22][23]。原生晕 22 种元素利用皮尔逊相关系数法进行了 R 型聚类分析(如图 4), 在相关系数  $r > 0.2$  相似性水平上, 所有元素可以分为 3 类: (1) 代表与 Cu 成矿密切相关的伴生元素组合 Ag、Co、Au、Mo、W、Sn、Mn。其中, Cu、Ag 元素的相关系数  $r$  最高为 0.86, 在矿区可能以黄铜矿、银黝铜矿的共生关系赋存。Mo、W、Sn 都属于典型的高温元素, 相关系数较高  $r > 0.5$ , 在整个成矿作用中的富集相对于其他中低温元素来说具有较高独立性。Cu、Ag、Co、Au、Mo、W、Sn 等元素在相关系数  $r > 0.3$  相似性水平上属于同一组, 说明这些元素关系密切, 属于同一套热液流体来源, 但是具有不同的富集程度。相对而言, Mn 元素为单独的一类, 与其他元素相关性相对较弱。(2) 代表与矿床次要金属矿物(闪锌矿、方铅矿、辉铋矿等)矿化相关的 Zn、Cd、As、Sb、Hg 等元素, 可以作为指示元素。其中, Zn 与 Cd 具有较强的相关性( $r > 0.9$ )。As、Sb、Hg 属于典型的中低温元素组合, 相关性  $r > 0.2$ 。(3) 代表与铜成矿热液流体活动关系不密切的元素, 有 Sr、Cr、Ni、Ba、Ti、V、Se 等元素, 此类元素在热液活动中没有显著发生元素的

迁移和富集。

根据矿石矿物组合, 相关系数和聚类分析结果, 通江岭铜多金属矿原生晕找矿主要指示元素为 Cu、Ag、Co、Au、Mo、W、Sn 等元素; 次要指示元素为 Zn、Cd、As、Sb、Hg 等元素。

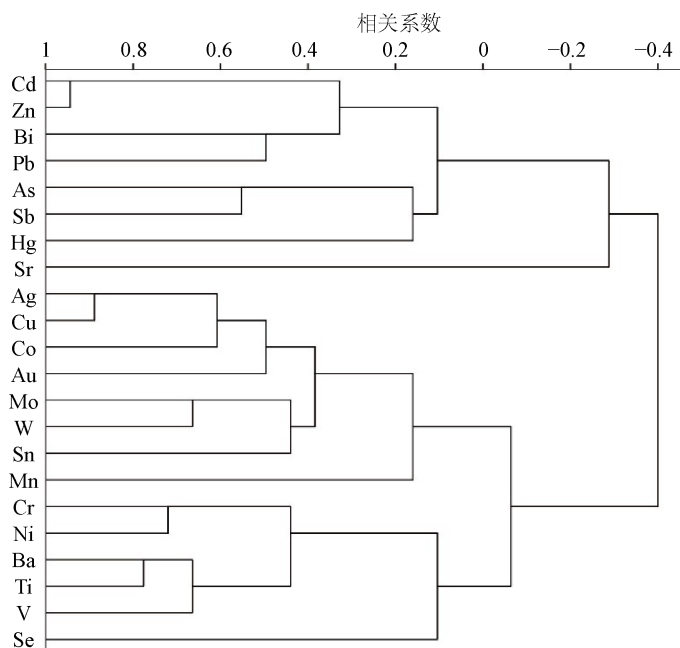


Figure 4. Trace elements R type cluster analysis dendrogram  
图 4. 岩石样品微量元素 R 型聚类图

## 5.2. 元素分布型式

每一期次的热液活动会引起岩石微量元素的富集或者迁移, 形成新的一期元素含量的分布状态。因此, 微量元素分布型式可以反映出岩浆-热液活动期次及其元素富集规律。原生晕指示元素对数转换后, 得到的分布型式图(如图 5), 主成矿元素 Cu、W 以及伴生元素 Ag、Au 等呈显著的单峰式分布, 低值区域大致代表了区域内岩石的背景分布特征, 高值区域代表成矿作用造成矿区蚀变和矿化岩石元素的富集特征。指示元素 Co、Zn、Cd、Hg 等呈现单峰式分布特征, 具有明显的峰值区域, 表明热液成矿过程中这些元素有局部富集的过程。As、Sb、Mo、Sn 等指示元素略有高含量峰值区或者右倾型偏态分布特征, 表明成矿过程中这些元素富集趋势不强烈。

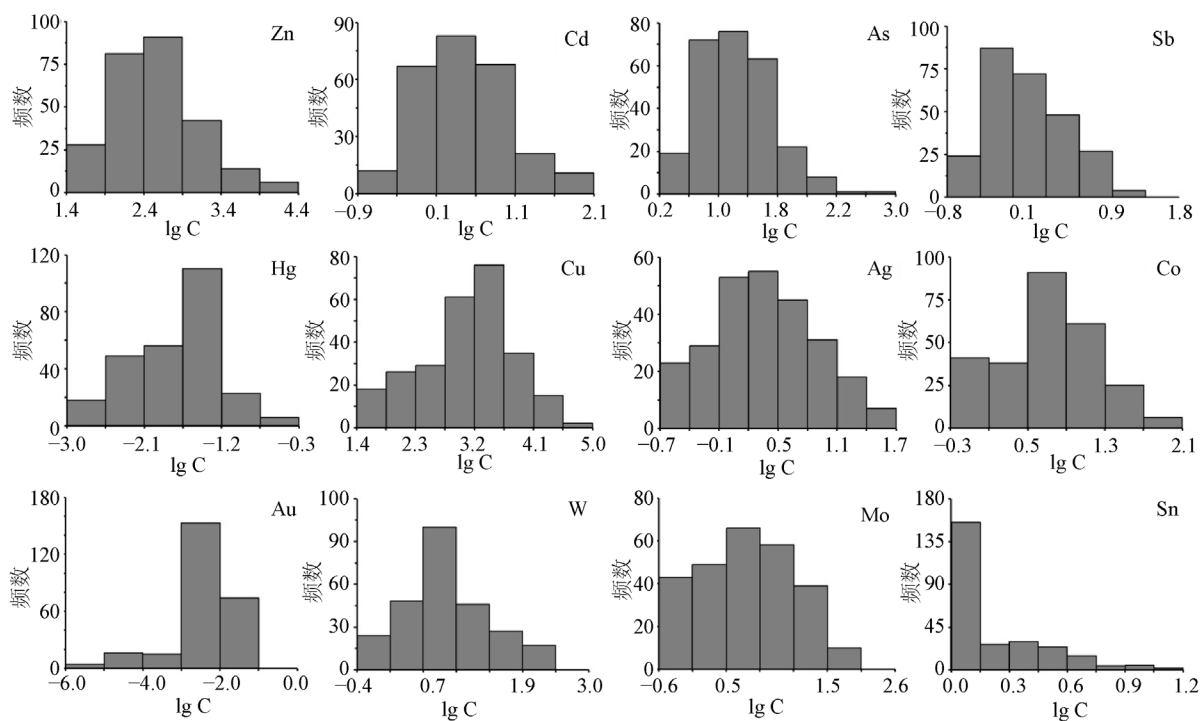
## 6. 原生晕剖面特征

### 6.1. 元素分级

根据元素分布形态特征, 矿区原生晕元素基本属于对数正态分布特征。因此, 各元素背景值和异常下限可采用传统迭代法进行计算。计算方法为首先对各元素按照平均值加减 2 倍标准离差剔除异常值, 再以剔除后的数据平均值作为背景值。背景值加上 2 倍标准离差, 作为矿区原生晕的异常下限。一般分别将 1 倍、2 倍、4 倍的异常下限作为划分外带异常、中带异常和内带异常的界限[2]。采用以上方法, 对矿区 0 号勘探线剖面的钻孔样品进行了原生晕异常分级(如表 2)。

背景值, 反应矿区范围内未发生矿化岩石的元素含量水平。异常下限, 即外带异常, 反应了岩石经历了热液流体活动, 元素有一定程度的富集。内带异常, 是指异常中含量比较高的地段, 其含量未达到

边界品位, 但矿体一般出现在内带异常内, 它能较好反映矿体位置[1] [5]。根据计算结果, 矿区成矿元素 Cu, 其背景值为 127 ppm, 异常下限为 280 ppm、内带异常为 1119 ppm。伴生成矿元素 W 的背景值为 3.26 ppm, 异常下限为 7.11 ppm、内带为 28.5 ppm。矿区高含量的指示元素 Mn, 背景值为 287 ppm, 异常下限为 501 ppm、内带异常为 2006 ppm。



C 为元素质量分数, 单位为  $10^{-6}$ 。

Figure 5. Statistic diagrams of the Tongjiangling Cu-polymetal deposit

图 5. 通江岭铜多金属矿床原生晕指示元素分布型式

Table 2. Abnormal classification of indicator elements in profile of exploration line 0

表 2. 0 号勘探线剖面指示元素异常分级表

元素	背景值	外带异常	中带异常	内带异常
Cu	127	280	559	1119
Ag	0.85	1.85	3.71	7.41
Co	3.38	7.21	14.42	28.84
Au	0.00	0.00	0.01	0.02
Mo	1.05	2.00	4.00	8.00
W	3.26	7.11	14.2	28.5
Sn	1.00	1.02	2.04	4.08
Zn	121	221	441	883
Cd	0.86	1.64	3.28	6.56
As	9.88	21.0	41.9	83.9
Sb	0.69	1.32	2.65	5.30
Hg	0.02	0.04	0.08	0.16



## 6.2. 轴向分带序列

采用改良的格里戈良分带指数法[24],将0号勘探线4个钻孔按照100 m一个中段,统计轴向分带序列。其方法是计算其线金属量、正规化、分带指数以及变化梯度,根据轴向分带指数的高低,得到钻孔从浅到深的分带序列。根据轴向分带序列,单个钻孔的原生晕轴向分带序列总体上具有低温(前缘晕)-中温(近矿晕)-高温(尾晕)的特征,但部分指示元素也具有较为特殊的轴向序列。

zk0004 轴向序列: Cd-Zn-Sn-Au-Co-Mo-Cu-Sb-W-Ag-As-Hg; 前缘晕元素 Cd、Zn 在序列前端。近矿晕元素 Au、Co、Cu、Ag 位于序列中尾段。尾晕元素 Mo、W 位于序列中底部。部分元素,如尾晕元素 Sn 出现在序列中前端, Sb、As、Hg 等前缘晕低温元素出现在了序列中底部。

Zk0003 轴向序列: Cd-Zn-As-Co-Mo-Ag-Hg-W-Cu-Sn-Au-Sb; 前缘晕元素 Cd、Zn、As 在序列前端。Cu、Ag、Co 等近矿晕元素以及 Mo、W、Sn 等尾晕元素位于序列中底部。部分元素,如中温元素 Au, 低温元素 Hg、Sb 却分布在轴向序列中底部。

Zk0002 轴向序列: Bi-Au-As-Co-Zn-Cd-Ag-Cu-W-Mo-Sn-Sb-Hg; 前缘晕元素 As、Zn、Cd 和近矿晕 Au、Co、Ag、Cu 等元素位于序列中前端,尾晕元素 W、Mo、Sn 位于序列中底部。部分指示元素,如前缘晕元素 Sb、Hg 分布在序列底部。

Zk0001 轴向序列: Zn-Co-Sn-Cu-Ag-Mo-W-As-Cd-Sb-Au-Hg; 前缘晕元素 Zn、Cd 和近矿晕元素 Co、Cu、Ag 元素分布在序列中前端。Au 等近矿晕元素和 Mo、W 等尾晕元素分布在序列的中底部。部分元素,如 As、Cd、Sb、Hg 等前缘晕元素,却分布在序列中底部。

综合0号勘探线4个钻孔的原生晕轴向分带序列,剖面中上部是以 Zn、Cd、As、Sb、Hg 等为代表的前缘晕元素,中部为 Cu、Ag、Au、Co 近矿晕,下部为 W、Mo、Sn 等尾晕元素。矿体前缘晕、近矿晕和尾晕元素分布特征,符合原生晕地球化学分布规律。矿体经历了多期次热液活动改造,造成原生晕序列的叠加,主矿体集中分布在剖面的中下部。轴向分带底部出现 As、Sb、Hg 等前缘晕元素,指示剖面下方还可能存在铜钨矿体,与0号勘探线剖面 F1 断层错断矿体的地质现象相吻合。

## 6.3. 剖面异常分带

根据原生晕异常分级,以通江岭铜多金属矿0号勘探线上钻孔数据为基础绘制原生晕指示元素分带图(如图6)。整体来说,元素的异常主要集中在-200米以下,根据元素性质的不同,异常分布特征有所不同。

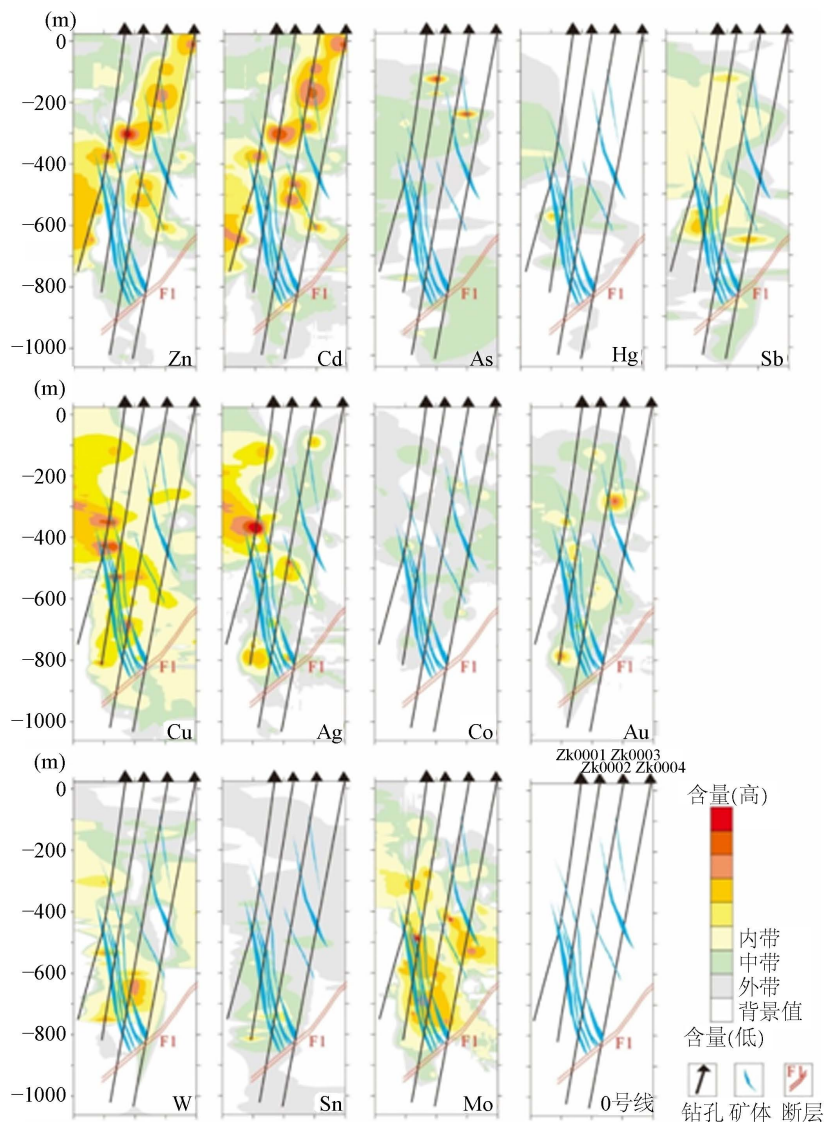
Cu 元素异常范围分布较广,从地表开始出现内带异常,沿矿体南南东的倾斜方向一直延续到-1000米深处;勘探线剖面-1000米以下区域仍有内带和中带异常。Cu 元素高值异常区域从-100米一直延续到-800米,并且多个高含量浓集中心,分布在-350米、-450米、-700米、-800米等标高的区域。

Ag 元素外带异常分布范围与铜矿体套合较好,分布范围从-100米延续到-900米,与 Cu 元素分布特征相似。高值异常有两个区域,分布在-400米, -700米和-800米。

Au 元素从-100米出现外带异常并延续到-1000米;内带异常出现在-300米到-900米的区域;剖面有多个高值异常区域,主要分布在-300, -500米, -600米, -800到-900米区域。

Co 元素外带异常范围从-100米分布到-900米;其内带异常分布较为局限,主要在-300米到-600米的区域;高值异常区不显著。Co 元素异常区与 Au 元素异常区套合较好,二者密切相关性。

W 元素外带异常从-100米开始出现外带异常一直延续到-1000米,异常形态沿矿体倾斜方向延伸。内带异常从-200米开始出现,向深部逐渐出现高含量异常区域。W 元素异常中心区域出现在-700米到-800米的范围。剖面深部沿矿体延伸方向-900米到-1000米区域仍然存在内带异常和高含量元素异常,可以作为尾晕元素。



**Figure 6.** Abnormal zoning map of primary halo of exploration line 0  
**图 6.** 原生晕 0 号勘探线异常分带图

Mo 元素外带异常范围从-100 米分布到-900 米;内带异常主要分布在-300 米到-800 米的区间范围内;高值异常区域较为显著,与矿体分布范围套合较好,但浓集中心在矿体中下部,集中在-400 米-900 米范围内,可以作为尾晕元素。

Sn 元素总体为外带异常,分布范围较广,从地表延续到剖面-1000 米。中带异常和内带异常区域局限在-500 米到-900 米的范围,位于矿体的中下部区域,是典型的尾晕元素特征。

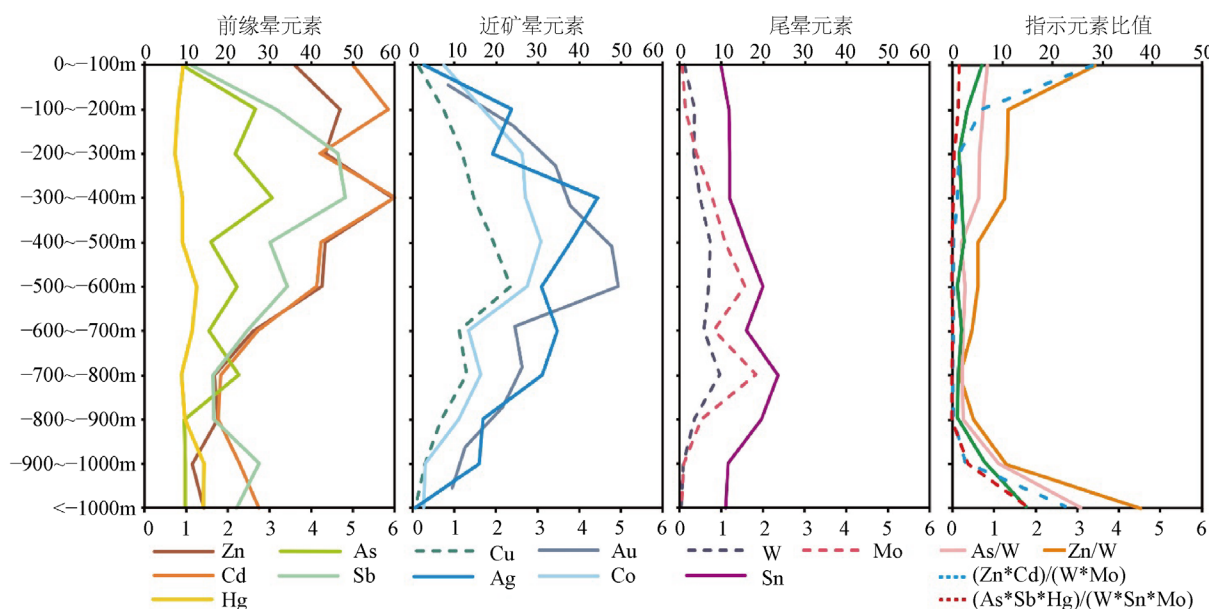
Zn 元素和 Cd 元素具有显著的相关性,具有相同的异常分布特征,外带异常从地表延伸到剖面深部-1000 米。二者的高值异常区较为显著,分布在地表到-500 米,对应于矿体头部位置,可以作为前缘晕指示元素。Pb 元素异常以中带异常和高值异常为主,分布范围从地表一直到剖面底部-1000 米。

As、Sb、Hg 等元素是典型的低温元素和前缘晕元素,在剖面上分布范围较广,以外带异常和中带异常为主。高值异常区域主要分布在-400 米到-600 米的区域。值得主要的是,剖面深部-1000 米区域仍然存在中带异常和局部内外异常。

总体而言, 0 号勘探线剖面指示元素的总体展布方向, 与矿体延伸方向较为一致。主成矿元素 Cu 和元素 Ag、Au、Co 等元素与矿体套和较好, 沿矿体倾斜方向展布, 推断为近矿晕元素。Zn、Cd、As、Sb、Hg 等元素分布范围相对靠上, 与矿体头部套合较好, 推断为前缘晕元素。W、Mo、Sn 等元素与矿体有一定程度的套合, 但更多的表现为整体相对向深部富集趋势, 推断为尾晕元素。

#### 6.4. 地球化学参数特征

元素的衬度值可以消除各元素含量之间数量级差异, 来分析指示元素的富集程度和轴向变化趋势[22][23][25]。其方法是首先按照 100 米间距计算剖面各中段钻孔元素的几何平均值, 再除以背景值得到衬度值。指示元素衬度值剖面图(如图 7)所示: (1) 前缘晕元素 Zn、Cd、As、Sb 从地表到深部, 具有相似的上升 → 下降 → 上升 → 下降的转折特征, 这与串珠状分布的原生晕异常, 以及多条斜列式间隔排布的矿体特征吻合, 与多阶段的热液成矿作用有关。衬度值高值区总体上处于-200 米到-500 米之间。Hg 元素衬度在垂向剖面上总体变化程度不大; (2) 主成矿元素 Cu 的变化趋势为从地表开始逐渐升高, 至-500 米到-600 米区间达到峰值, 之后向深部-1000 逐渐降低。Ag、Au、Co 等近矿晕元素具有与 Cu 元素相似的上升→下降的趋势, 衬度高值区域位于-300 米到-700 米之间, 与主矿体的位置基本吻合; (3) 尾晕元素 W、Sn、Mo 元素衬度的变化趋势较为一致, 从地表向下逐渐升高, 直到高值区-500 米到-800 米, 再向深部衬度值则逐渐降低。



实线对应下 X 轴坐标, 虚线对应上 X 轴坐标

**Figure 7.** Section line chart of contrast value and geochemical parameters of indicating elements

**图 7.** 指示元素衬度值和地球化学参数剖面折线图

以各元素衬度值为基础, 建立地球化学参数指标  $P = (\text{前缘晕元素衬度累乘值}) / (\text{尾晕元素衬度累乘值})$ , 可以强化衬度系数的变化趋势[24][25]。0 号勘探线剖面原生晕地球化学指示元素折线图(图 7)显示,  $As/W$ 、 $Zn/W$ 、 $Pb/Bi$ 、 $(Zn * Cd) / (W * Mo)$ 、 $(As * Sb * Hg) / (W * Sn * Mo)$  等参数指标变化趋势基本一致。从地表到深部-200 米范围, 各参数指标均为较大幅度的降低; -300 米到-900 米区域缓缓降低, 对应斜列式间隔排布的矿体; -900 米到-1000 米以下参数指标逐渐陡升, 表明深部区域前缘晕元素有明显的富集趋势。考虑到 0 号勘探线剖面揭示出 F1 走滑逆冲断层的产状特征, 我们认为断层下盘及走滑侧伏方向存在找矿潜力。

## 7. 原生晕理想叠加模型

综合地质剖面、原生晕元素的相关性、元素分带序列、轴向分带序列、地球化学参数指标数等分析结果，初步建立通江岭铜多金属矿 0 号勘探线原生晕理想模型(如图 8)。

前缘晕、近矿晕和尾晕分带良好，其中前缘晕延伸较深，表明不同标高存在多组矿体，使得前缘晕元素存在连续变化，符合地质事实和原生晕地球化学分布规律；前缘晕及尾晕元素在序列中下部叠加，结合地化参数的变化趋势，前缘晕元素向深部存在一定富集，推定深部可能存在一个矿体头部。未出现尾晕元素，故深部应有一定的延伸，同时代表热液多阶段成矿作用。

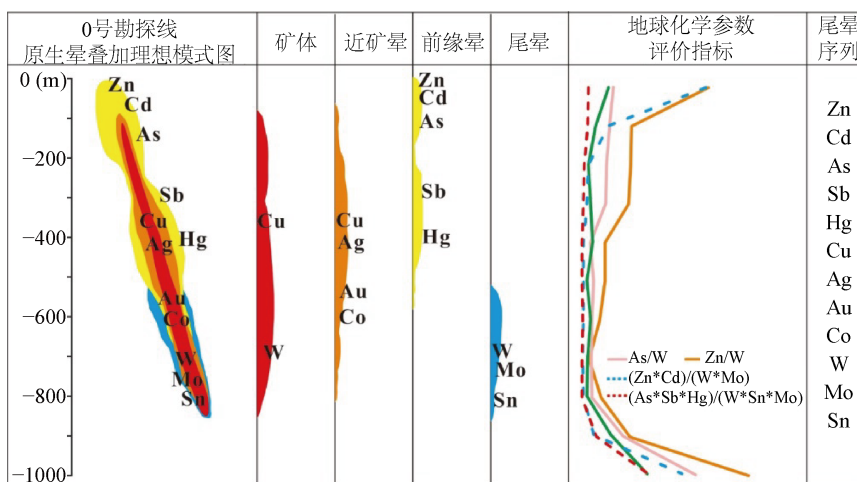


Figure 8. Ideal pattern of primary halo superimposed of exploration line 0  
图 8. 0 号勘探线叠加原生晕理想模式图

## 8. 结论

对矿区 22 种元素进行数据处理，通过相关性分析所得结果显示：成矿元素 Cu、W，与原生晕元素 Ag、Co、Au、Mo、Sn、Zn、Cd、As、Sb、Hg 等具有较高的相关性，能够作为指示元素。

结合指示元素浓度异常分带，可以认为通江岭铜多金属矿原生晕分带为：前缘晕为 Zn、Cd、Pb、As、Sb、Hg，元素的赋存矿物主要为闪锌矿、方铅矿、毒砂等；近矿晕元素为 Cu、Ag、Au、Co，代表性矿物为黄铜矿、黄铁矿等；尾晕元素为 W、Mo、Bi、Mn，赋存矿物为白钨矿、辉钼矿、铁锰碳酸盐等。

通过改良的格里戈良分带指数法对 0 号勘探线 4 各钻孔分别得出分带序列，单个钻孔的原生晕轴向分带序列总体上具有低温(前缘晕) - 中温(近矿晕) - 高温(尾晕)的特征，底部出现 As、Sb、Hg 等前缘晕元素，指示剖面下方还可能存在铜钨矿体，与 0 号勘探线剖面 F1 断层错断矿体的地质现象相吻合，同时代表热液多阶段成矿作用。

以各元素衬度值为基础，建立的地球化学参数指标变化规律明显，与矿体套合良好，此外，地球化学参数指标在深部陡升，指示前缘晕元素富集，这一趋势对于通江岭铜多金属矿外围深部找矿有良好的指示作用。

## 基金项目

国家重点研发计划“穿透性地球化学勘查技术”(编号 2016YFC600600)资助。



## 参考文献

- [1] 邵跃, 傅学信. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-122.
- [2] 李惠, 张文华, 刘宝林, 等. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则[J]. 地质与勘探, 1999, 35(1): 32-35.
- [3] 李惠, 张国义, 禹斌, 等. 构造叠加晕法是危机金矿山寻找接替资源的有效新方法[J]. 矿产与地质, 2005, 19(6): 683-687.
- [4] 代西武, 杨建民, 张成玉, 等. 利用矿床原生晕进行深部隐伏矿体预测[J]. 矿床地质, 2000, 19(3): 245-256.
- [5] 吴承烈, 徐外生, 刘崇民. 中国主要类型铜矿勘查地球化学模型[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-225.
- [6] 季绍新, 王文斌, 邢文臣. 江西九瑞地区两个成矿系列的铜矿床[J]. 矿床地质, 1989, 8(2): 14-24.
- [7] 蒋少涌, 孙岩, 孙明志. 长江中下游成矿带九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2751-2761.
- [8] 胡朗明, 刘启智, 陈后扬, 等. EH-4 在瑞昌南阳矿区应用及该区找矿潜力分析[J]. 江西地质, 2017, 3(69): 231-238.
- [9] 杨明桂, 王发宁, 曾勇. 江西北部金属成矿地质[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004: 151-177.
- [10] 杨明桂, 等. 江西铜矿的找矿方向与资源潜力预测: 江西地学新进展[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2011, 28-39.
- [11] 杨明桂, 吴富江, 刘亚光, 等. 中国区域地质志江西志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 6.
- [12] 王先广, 周贤旭, 马振兴, 等. 九瑞地区武山铜矿外围深部找矿进展与方向[J]. 东华理工大学学报, 2014, 37(4): 378-385.
- [13] 李旭辉, 高任, 等. 赣北城门山铜矿床 I 号矿体矿化富集规律及找矿方向研究[J]. 东华理工大学学报, 2014, 37(4): 373-378.
- [14] 王先广, 胡正华, 黄秋芸, 等. 九瑞矿集区通江岭铜多金属矿成矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 832-840.
- [15] 胡正华, 王先广, 李永明, 等. 长江中下游九瑞矿集区宝山铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 585-596.
- [16] 胡正华, 王先广, 李永明, 等. 长江中下游九瑞矿集区宝山铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 585-596.
- [17] 赖志坚, 胡朗明, 田立明, 等. 江西省通江岭铜矿原生晕结构特征及深部找矿前景[C]. 中国地球科学联合学术年会中国地球科学联合学术年会, 2018: 1925-1927.
- [18] 周涛发, 王世伟, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带陆内斑岩型矿床的成岩成矿作用[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 271-288.
- [19] 毛景文, Holly STEIN, 杜安道, 等. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 2004, 78 (1): 121-148.
- [20] 王先广, 刘战庆, 刘善宝, 等. 江西朱溪铜钨矿细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学研究[J]. 岩矿测试, 2015, 34(5): 592-599.
- [21] 胡正华, 王先广, 陈国华, 等. 江西通江岭铜钨矿床特征及其找矿意义[J]. 中国钨业, 2018, 33(5): 15-21.
- [22] Templ, M., Filzmoser, P., Reimann, C., *et al.* (2008) Cluster Analysis Applied to Regional Geochemical Data: Problems and Possibilities. *Applied Geochemistry*, **23**, 2198-2213. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.03.004>
- [23] Zuo, R., Xia, Q. and Wang, H. (2013) Compositional Data Analysis in the Study of Integrated Geochemical Anomalies Associated with Mineralization. *Applied Geochemistry*, **28**, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.031>
- [24] 王建新, 臧兴运, 郭秀峰, 等. 格里戈良分带指数法的改良[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 884-888.
- [25] Hosseini-Dinani, H. and Aftabi, A. (2016) Vertical Lithogeochemical Halos and Zoning Vectors at Goushfil Zn-Pb Deposit, Irankuh District, Southwestern Isfahan, Iran: Implications for Concealed Ore Exploration and Genetic Models. *Ore Geology Reviews*, **72**, 1004-1021. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.023>