

基于 pXRF 的荞麦山铜多金属矿床元素富集规律研究^{*}

张明明^{1,2,3,4}, 龙瑾潇¹, 周国玉⁵, 焦峻崧¹, 方红东⁶

(1 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2 合肥工业大学, 矿床成因与勘查技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 3 合肥工业大学 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 4 合肥工业大学 空间信息集成与综合分析平台, 安徽 合肥 230009; 5 安徽省地质测绘技术院, 安徽 合肥 230022; 6 宣城市华通矿业有限公司, 安徽 宣城 242000)

摘 要 大数据技术在地学领域的应用越来越广泛, 大数据思维为地学研究开辟了新的思路。从数据出发, 以数据驱动模式去分析地质问题, 在元素分布特征分析、矿床地化异常识别等方面较传统地学分析方法有着明显的优势。文章基于便携式 X 荧光分析仪(pXRF)测试的原位、无损、快捷、多元素分析等优点, 对宣城矿集区内的荞麦山铜多金属矿床岩芯进行高密度的全数据原位采集, 使用主成分分析(PCA)、多元逐步线性回归等方法进行量化分析。2 种方法均表明, 荞麦山铜多金属矿床中元素 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U 和成矿元素 Cu、Fe、S、W 存在正相关关系; 钻孔矿化和蚀变特征、铜硫矿石、钨矿石、石英砂岩均表现出不同的元素组合, 特别是主成分综合得分(PCA)和第一主成分(PC1)元素对钻孔成矿区具有较好的指示效果; 逐步多元线性回归分析进一步量化了元素富集规律, 对成矿元素的拟合能够较好地与钻孔信息形成对应。因此, pXRF 高密度的原位测量能够快速获取全面、准确的元素数据, 分析结果能够直观反映荞麦山铜多金属矿床各元素的深度空间分布情况及量化相关关系, 对深部地球化学特征的恢复和找矿提供帮助。

关键词 地质学; 便携式 X 荧光分析; 数据驱动; 主成分分析; 逐步回归; 荞麦山铜多金属矿床; 元素空间分布
中图分类号: P618.41 文献标志码: A

A pXRF study on element enrichment law of Qiaomaishan Cu polymetallic deposit, Anhui, China

ZHANG MingMing^{1,2,3,4}, LONG JinXiao¹, ZHOU GuoYu⁵, JIAO JunQin¹ and FANG HongDong⁶

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2 Ore Deposit and Exploration Centre (ODEC), School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3 Anhui Research Center for Mineral Resources and Mine Environment Engineering Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 4 Spatial Information Integration and Comprehensive Analysis Platform, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 5 Geological Surveying and Mapping Technical Institute of Anhui Province, Hefei 230022, Anhui, China; 6 Huatong Mining Company Limited of Xuancheng City, Xuancheng 242000, Anhui, China)

Abstract

Big data technology has been widely used in the geoscience and big data thinking has opened up a new way of thinking for geological research. Based on data, it is possible to obtain some results better than traditional geological analysis methods when analyzing geological problems with data-driven model. Based on the advantages of in-situ, nondestructive, fast and multi-element analysis of portable X-ray fluorescence analyzer (pXRF), this paper collects high-density in-situ geochemical data from the drill cores of the Qiaomaishan Cu polymetallic deposit in the Xuancheng ore district, Anhui Province, China, and makes quantitative analysis by using principal

^{*} 本文得到国家自然科学基金资助项目(编号:41872247,41820104007,42072321)的资助

第一作者简介 张明明,女,1981年生,博士,副教授,主要从事地学大数据及成矿预测研究。Email: mm81_0@126.com

收稿日期 2021-12-17; 改回日期 2022-03-01。秦思婷编辑。

component analysis (PCA) and multiple stepwise linear regression. Both methods can show that there is a positive correlation between elements Mg, Ca, Mn, Co, As, Se, Ag, Hg, U and ore-forming elements Cu, Fe, S, W in the Qiaomaishan Cu deposit. The characteristics of mineralization and alteration, copper sulfur ore, tungsten ore and quartz sandstone all show different element combinations, especially the comprehensive score of principal component (PCA) and the first principal component (PC1) elements have a good indication or vectoring to the ore zones. Stepwise multiple linear regression analysis further quantifies the law of element enrichment, and the fitting of metallogenic elements can better correspond to the borehole information. Therefore, the high-density in-situ measurement of pXRF can quickly obtain comprehensive and accurate element data, and the analysis results can directly reflect the depth and spatial distribution and quantitative correlation of various elements in the Qiaomaishan Cu deposit, which can provide help for the restoration of deep geochemical characteristics and ore prospecting.

Key words: geology, portable XRF(pXRF), data-driven, principal component analysis(PCA), stepwise regression, Qiaomaishan Cu polymetallic deposit, spatial distribution of elements

在当前大数据的时代背景下,从数据出发,以数据驱动模式去分析、挖掘地学研究积累的大量数据,可以从另一侧面观察、研究地质问题,为地质研究开拓了新的思路(Armstrong et al., 2014; Chen et al., 2014; 邵燕等, 2016; 张旗等, 2017; 翟明国等, 2018)。随着矿产勘查方法与仪器分析测试技术的不断进步,地学研究已经从传统的定性研究向量化研究快速发展(赵鹏大, 2011; 2014; 2015)。地质数据一般难以达到海量级数据的标准,但地学研究可以从数据出发,进行数据之间各类关系的分析,挖掘地质数据背后隐藏的信息,同样是属于大数据技术范畴(Li et al., 2009; Gantz et al., 2012; Carranza et al., 2015; Evans et al., 2016; Aryafar et al., 2017; Condie et al., 2017; Ernst et al., 2017; 张旗等, 2018a; 2018b; 2018c; Huang et al., 2021)。

通常,元素的迁移和富集规律研究、组合特征提取以及地化异常准确圈定对于找矿勘查有着重要的意义(Zhao et al., 2012; Li et al., 2015; Wang et al., 2016),如何快速分析岩石样品中的元素成分及其含量,以判断研究区的成矿潜力是一个非常关键的问题。实验室仪器分析方法由于测试的高精度使其在岩芯劈样元素分析、矿石地化异常分析等分析中占据着主导作用,但实验室分析方法一般需要经过“采集样品-运输样品-样品加工-化学分析”等过程之后才能得到测试结果,过程耗时长、费用昂贵且需要破坏样品,无法满足对研究区进行全数据采集(林延畅等, 2002; Zhao et al., 2018; Cui et al., 2021)。便携式X射线荧光分析仪(pXRF)可以在野外快速、准确地获取原位岩芯数据,为野外矿床全钻孔的元素采集

提供了技术支持(Kalnicky et al., 2001; Hall et al., 2014; McAlister, 2019)。

荞麦山铜多金属矿床位于长江中下游成矿带宣城矿集区内,是区内典型的矽卡岩型矿床(Mao et al., 2011; Pirajno et al., 2015; Nie et al., 2017; Liu et al., 2018)。前人对荞麦山铜多金属矿床的研究多从传统地质实验分析方面入手,采集矿床典型样品进行成岩成矿分析,成矿元素富集的特征及规律研究受到数据量及分析方法的限制。本次研究旨在从数据出发,运用pXRF对荞麦山铜矿床典型剖面进行全钻孔元素测试,以各元素之间的协同关系为基础,研究各元素在深度空间上的分布趋势和富集、亏损规律,深入分析元素之间相关性对矿物的指示,圈定地化异常,探索相关元素对成矿的指示作用。研究结果可以揭示荞麦山铜多金属矿床的元素分布特征,促进对成矿过程中元素迁移、富集规律的认识,明确矽卡岩型矿床的成矿模式和成矿条件,对进一步的找矿勘查工作具有积极的指导意义(Gazley et al., 2014; Young et al., 2016; Bruno, 2018; Perring et al., 2018; Gray et al., 2020)。

1 研究区地质背景

长江中下游成矿带是中国最重要的铜铁多金属成矿带之一,位于华北克拉通和扬子克拉通的汇聚地带,成矿带内有許多大规模、多类型的铜铁多金属矿床。荞麦山铜多金属矿床位于成矿带内宣城矿集区内(图1)。

长江中下游成矿带主要受特提斯构造域、深部

壳幔作用构造过程和古太平洋构造域的共同制约,经历了复杂的大陆动力学过程和多阶段的岩浆活动。诸多因素控制了本区的构造-岩浆-成矿作用,形成了许多大规模、多类型的铜铁多金属矿床(常印佛等, 1991; 翟裕生, 1992; 周涛发等, 2008)。成矿带自西向东主要包括鄂东南、九瑞、安庆-贵池、铜陵、庐枞、宁芜和宁镇7个传统的矿集区,以及近年来新增的宣城矿集区(图1)(Pirajno et al., 2015; Nie et al., 2017; Liu et al., 2018)。

长江中下游地区出露有晚太古代和古、中、新元古代变质基底,前震旦系沉积变质岩出露极少,震旦系一早三叠统稳定沉积盖层不整合覆盖于扬子克拉通不同基底之上,构成了该区“一盖多底”的地壳结构(常印佛等, 1996; 陈志洪等, 2017; 朱安冬等, 2017)。

双基底层位是长江中下游地区独特的结构,表现为南部是以新元古代复理石建造为主的江南式基底,北部是以太古宙—古元古代TTG岩系为特征的

崆岭-董岭式基底,长江中下游成矿带处于上述2种类型基底的边界带上(董树文等, 2011)。长江中下游成矿带从震旦系—白垩系都有各种类型的矿床产出,其中以铜、铁、金、钨等多金属矿床为主,铜、金矿床主要产出于3个层位,分别为上石炭统黄龙组、二叠系和中、下三叠统(包括东马鞍山组、大冶组),矿体一般处于碎屑岩和碳酸盐岩的接触部位(常印佛等, 1991)。

宣城矿集区位于长江中下游成矿带东南侧(图1)。近年来,随着区域找矿的进展,在该矿集区发现了许多矿床,如茶亭斑岩铜金矿床、荞麦山铜多金属矿床、刘家山硫铁矿床和麻姑山铜钼矿床等。这些矿床主要为斑岩-矽卡岩型矿床(Mao et al., 2006; Zhou et al., 2011; 李跃等, 2019; 徐晓春等, 2019),处于长兴-广德凹断褶束和宁芜凹断褶束2个Ⅳ级构造的结合部位,区内构造主要表现为褶皱构造、推覆体构造和断裂构造(钱仕龙等, 2017; 徐晓春等, 2019),区内中部叠置有北东向的九连山-狸桥、敬亭山、麻

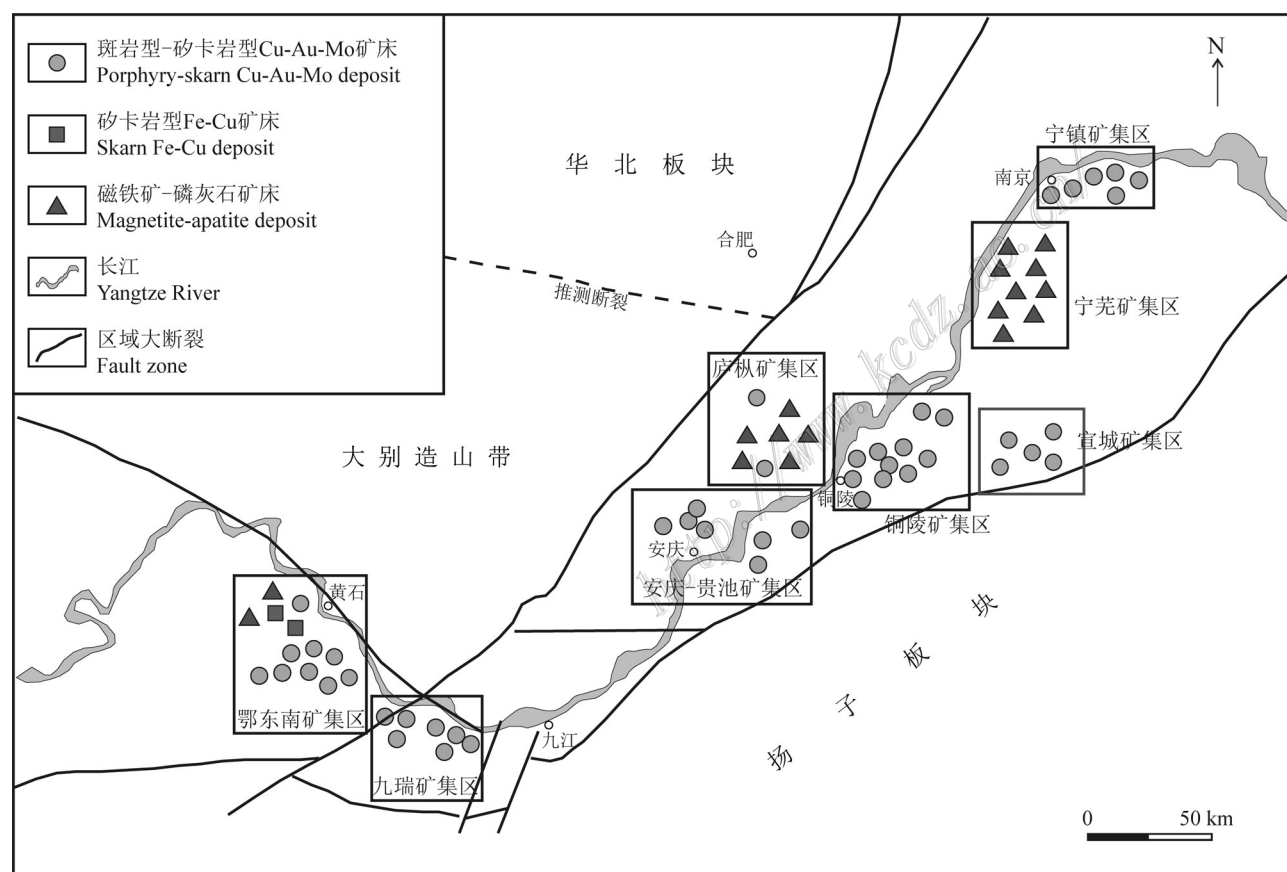


图1 长江中下游成矿带矿集区分布图(据周涛发等, 2017修改)

Fig. 1 Distribution map of ore concentration areas in the metallogenic belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River (modified after Zhou et al., 2017)

姑山推覆体构造,亦为复背斜构造。其中,九连山-狸桥推覆体往北东延伸至江苏境内为茅山推覆体(韩克从等, 1985; 朱志澄, 1991; 徐学思等, 2001; 黄润生等, 2010),断续绵延超过 100 km,目前已将宣城矿集区列为长江中下游成矿带的第八大矿集区(周涛发等, 2017)。

荞麦山铜多金属矿床是区内典型的矽卡岩型矿床,位于长山复背斜的次一级连续褶皱构造荞麦山茶山倒转背斜的南西倾伏端。矿床铜金属量约 5.9×10^4 t、硫铁矿矿石量约 5×10^6 t、钨金属量 8.3×10^3 t,为中型矽卡岩矿床(刘晓明等, 2015)。矿区内地层(图 2)由古至新分别为泥盆系上统五通组、石炭系中上统黄龙船山组、二叠系下统栖霞组、二叠系下统孤峰组、二叠系上统龙潭组及第四系全新统。矿体主要

赋存于石炭系黄龙船山组与侵入体接触带内。矿区侵入岩岩体平行于褶皱轴沿断裂带狭长状分布,呈岩枝、岩株或岩脉状产出,属于中-浅成相中酸性侵入岩,主要侵入荞麦山倒转背斜核部和北西翼部,与围岩接触面较陡,倾角 $50^\circ \sim 80^\circ$,有的呈脉状穿插在石英砂岩和石灰岩裂隙中,岩体为花岗闪长斑岩,多位于荞麦山南坡超覆于石英砂岩之上。矿区内脉岩主要为石英斑岩,大致沿孤峰组和栖霞组之间分布,具有明显的定向性,走向北东 70° ,厚约 20 m,分布于矿区南部的茨山的东部的顶门山等地。

2 数据采集

pXRF 是最常见的野外岩芯原位元素测试仪器,

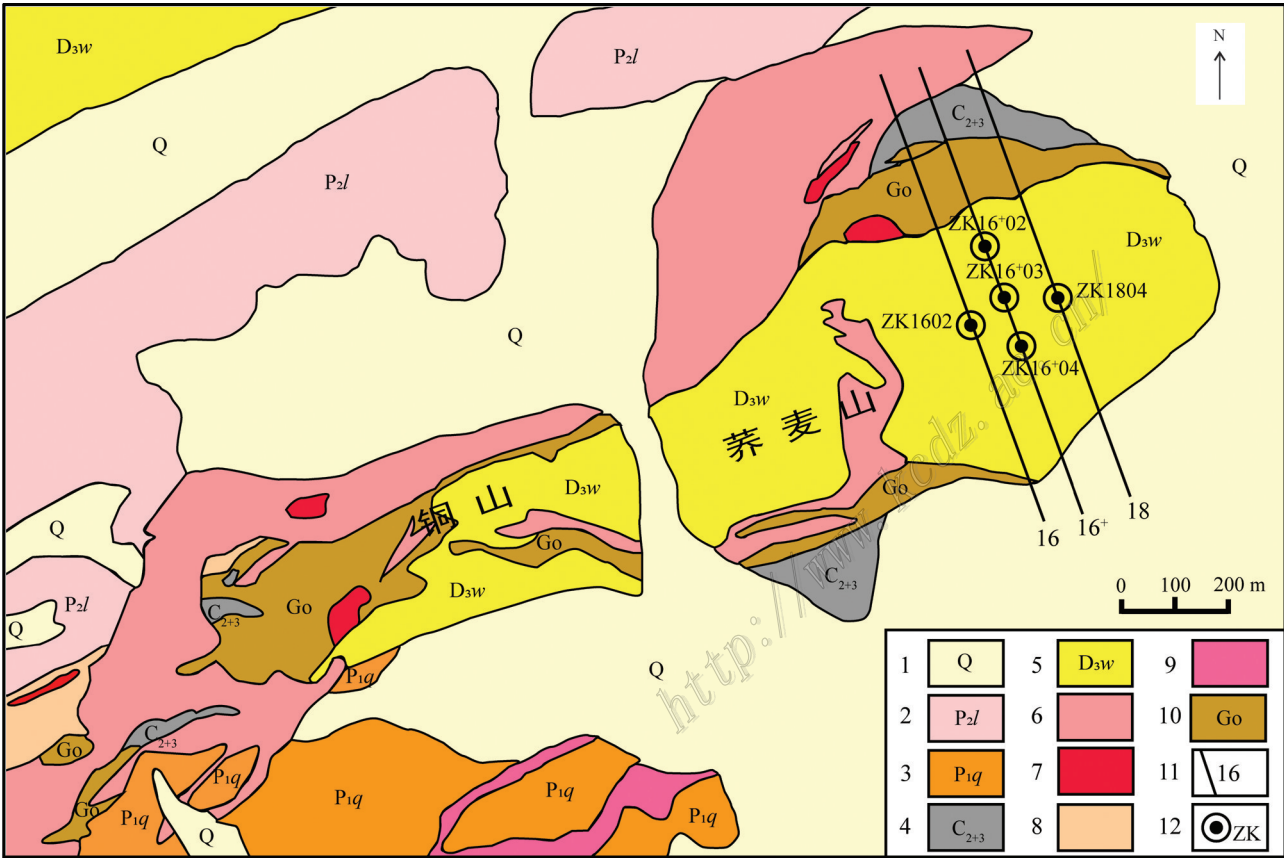


图2 荞麦山矿床地质图(据刘晓明等, 2014 修改)

1—第四系;2—二叠系上统龙潭组;3—二叠系下统栖霞组;4—石炭系中上统黄龙组、船山组;5—泥盆系上统五通组;6—花岗闪长斑岩;
7—矽卡岩;8—砂岩;9—花岗斑岩;10—铁帽;11—勘探线及编号;12—钻孔及编号

Fig. 2 Geological map of the Qiaomaishan deposit (modified after Liu et al., 2014)

1—Quaternary; 2—Longtan Formation of Upper Permian; 3—Qixia Formation of Lower Permian; 4—Huanglong Formation and Chuanshan Formation of Middle and Upper Carboniferous; 5—Wutong Formation of Upper Devonian; 6—Granodiorite porphyry; 7—Skarn; 8—Sandstone; 9—Granite porphyry; 10—Gossan; 11—Exploration line and number; 12—Drill hole and number

其优点在于其轻巧、便携、测试速度快、精度高,在野外可直接获取目标物的元素含量,当前在环境监测、岩芯测试、分析沉积物序列等方面有着广泛的应用(Peinado et al., 2010; Yuan et al., 2014; 刘琦, 2014; Mauriohoo et al., 2016; Al-Musawi et al., 2020)。在合理设置参数及模式的基础上, pXRF 技术被认为是一种满足全数据采集要求、便捷有效的测试方法(Radu et al., 2009; Piercey et al., 2014; Perring et al., 2018; Zhou et al., 2018; Zhou et al., 2020), 如夏庆霖等运用 pXRF 技术对安徽泥河铁矿进行了岩芯矿化蚀变研究, 获得了元素组合异常, 较好地指示了矿化(夏庆霖等, 2011); McNulty 等(2018)利用 pXRF 对加拿大温哥华岛上的迈拉瀑布火山岩矿床进行了岩性判别研究, 分析矿床 Ti/Zr 趋势确定火山岩的类型。

基于 pXRF 技术的岩芯测试可以最大限度保持样本的完整性及连续性, 可用于野外钻孔现场原位分析, 具有效率高、投入小的特点, 大大提高了找矿勘查的效率。本文运用 pXRF 技术在野外直接获取钻孔岩芯测试分析数据, 并基于数据驱动思维, 利用数据挖掘方法分析该矿床的元素空间分布规律。本研究所选择的仪器是日本奥林巴斯(OLYMPUS)科技公司生产的 VANTA 系列便携式 X 射线荧光分析仪, 采取地球化学模式进行测量, 在该模式下可测量元素包括 P、Cl、Mg、Al、Si、Cr、K、Ca、S、Ti、Cu、V、Mn、Fe、As、Co、Ni、W、Bi、Zn、Th、Hg、Sr、Y、Pb、Se、Mo、U、Rb、Cd、Zr、Nb、Ag、Sn、Sb。

本文选取了荞麦山铜多金属矿床的代表性剖面 16+ 线上的以铜硫矿石为主的 3 个典型钻孔, 分别为 ZK16+02、ZK16+03、ZK16+04(图 3)。在保持岩芯清洁、干燥的情况下, 经过等间距单点测试、校准方程建立等步骤, 获得了测量有效的 30 种元素 Mg、Al、Si、P、S、Cl、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Ag、W、Hg、Pb、Th、U 并进行数据分析, 测点间隔为 1 m 左右, 不同钻孔不同深度位置间隔略有变化, 每个点测试时间为 60 s, 累计测点 433 个(Bourke et al., 2016; 周国玉, 2021)。

3 荞麦山铜多金属矿床元素富集规律分析方法研究

3.1 主成分分析

主成分分析法(PCA)对元素数据进行降维可以

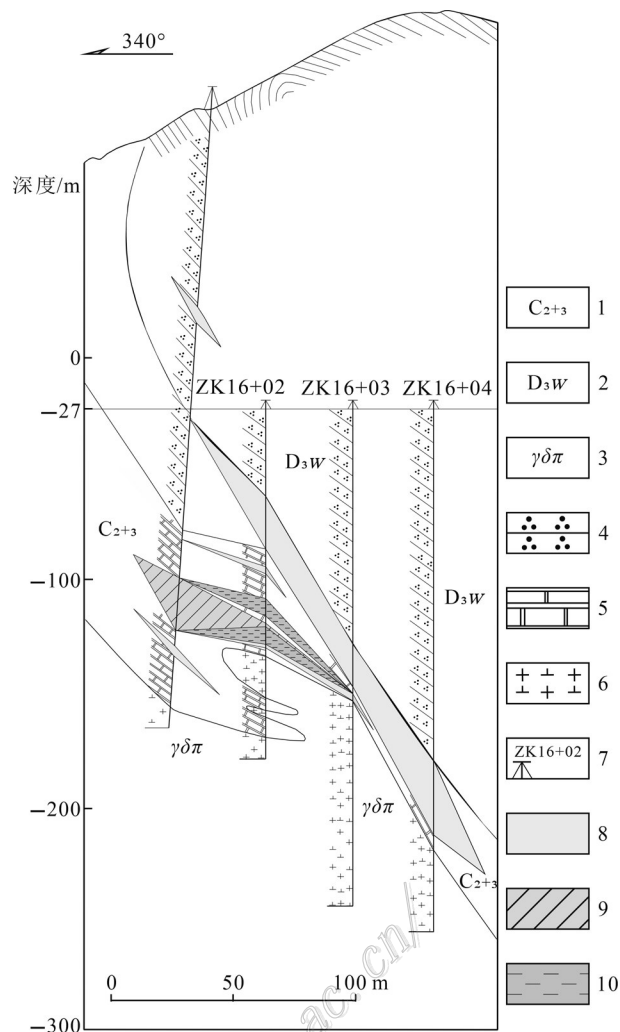


图3 16+线勘探剖面简图(据刘晓明等, 2014)

1—石炭系中上统黄龙组、船山组; 2—泥盆系上统五通组; 3—花岗闪长斑岩岩体; 4—石英砂岩; 5—大理岩; 6—花岗闪长斑岩; 7—钻孔及孔号; 8—铜硫矿石; 9—铜矿石; 10—钨矿石

Fig. 3 Simplified cross section of exploration line 16+ through the Qiaomaishan Cu deposit (after Liu et al., 2014)

1—Huanglong Formation and Chuanshan Formation of Middle and Upper Carboniferous; 2—Wutong Formation of Upper Devonian; 3—Granodiorite porphyry; 4—Quartz sandstone; 5—Marble; 6—Granodiorite porphyry; 7—Drill hole and number; 8—Copper-sulfur ore; 9—Copper ore; 10—Tungsten ore

除去一些重复变量因素的影响, 将信息进行压缩, 建立尽可能少的新变量, 使相关元素之间的关系更加明了(成秋明等, 2007; 韩小孩等, 2012)。本文利用 SPSS 统计软件对荞麦山铜多金属矿床 16+ 线所测的 30 种有效元素进行全钻孔主成分分析, 最终将 30 个元素压缩得到 8 个主成分信息, 累计方差贡献率达到 70.576%, 保留了钻孔中元素含量的主要信息, 其

中第一主成分累计方差贡献率达到 27.079%, 所得成分中包含了荞麦山铜多金属矿床成矿元素 Cu、Fe、S、W 在内的 14 个正载荷元素(Cl 元素由于得分过低, 暂不考虑)。主成分分析结果见表 1。

在此基础上利用全数据主成分分析得到的结果分别计算 ZK16+02、ZK16+03、ZK16+04 深部空间的

成分得分值, 成分得分结果的可视化显示能够直观反映各成分所包含的信息与钻孔岩芯成分之间的对应关系(图 4)。

荞麦山铜多金属矿床 16+ 线主成分分析反映了如下特征(表 1, 图 4):

(1) 综合主成分得分(PCA) 包含了全数据

表 1 荞麦山铜多金属矿床 16+ 线钻孔主成分方差及成分载荷表

Table 1 Principal component variance and component load of boreholes on exploration line 16+ through the Qiaomaishan Cu polymetallic deposit

对比项目	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
特征值	8.124	4.803	1.696	1.638	1.395	1.288	1.168	1.061
方差贡献率/%	27.079	16.010	5.655	5.460	4.649	4.294	3.893	3.536
累计方差贡献率/%	27.079	43.089	48.744	54.204	58.853	63.147	67.040	70.576
Mg	0.576	-0.048	0.515	-0.142	0.086	-0.181	0.158	-0.167
Al	-0.538	0.586	-0.009	-0.035	-0.346	-0.005	0.105	-0.071
Si	-0.644	-0.503	-0.188	0.009	0.097	-0.193	-0.110	-0.051
P	-0.190	0.409	-0.121	0.407	-0.049	-0.167	0.564	-0.147
S	0.642	0.231	0.252	0.418	-0.071	-0.193	-0.274	-0.014
Cl	0.084	0.024	-0.457	0.049	0.541	0.150	-0.008	0.372
Ca	0.724	0.137	-0.174	-0.278	-0.025	0.344	0.081	0.155
Ti	-0.471	0.713	0.278	-0.052	0.050	0.123	-0.092	0.138
V	-0.139	0.187	0.498	0.137	0.119	0.399	0.024	0.436
Cr	-0.356	0.727	0.105	-0.083	0.126	-0.072	0.025	-0.059
Mn	0.800	0.119	0.079	-0.363	0.062	0.099	0.180	-0.033
Fe	0.826	0.240	-0.076	0.075	-0.160	-0.184	-0.156	0.038
Co	0.792	0.275	-0.022	0.154	-0.152	-0.204	-0.145	0.014
Ni	-0.109	0.515	-0.179	0.350	0.176	-0.044	0.402	-0.155
Cu	0.735	0.254	-0.105	0.234	0.045	-0.076	-0.098	0.032
Zn	0.217	0.022	0.442	0.079	0.149	-0.089	0.145	-0.010
As	0.444	0.402	-0.243	0.217	0.197	0.281	0.052	0.128
Se	0.637	0.399	-0.105	0.095	-0.022	0.053	-0.172	0.006
Rb	-0.029	-0.257	0.615	0.264	0.226	-0.008	0.017	0.140
Sr	-0.168	-0.002	0.032	0.077	-0.725	0.202	0.272	0.323
Y	-0.429	0.714	0.020	-0.165	0.146	-0.109	-0.074	-0.029
Zr	-0.540	0.572	-0.011	-0.130	0.233	-0.143	-0.188	-0.089
Nb	-0.510	0.728	0.068	-0.181	-0.112	-0.047	-0.145	-0.001
Mo	-0.009	0.065	0.098	0.062	-0.018	0.516	-0.324	-0.480
Ag	0.836	0.258	-0.106	0.086	-0.191	-0.164	-0.185	0.084
W	0.495	0.086	0.008	-0.511	0.037	0.123	0.236	-0.196
Hg	0.761	0.075	0.121	-0.377	0.028	-0.004	0.147	-0.091
Pb	-0.016	0.117	-0.015	0.363	-0.090	0.515	-0.057	-0.362
Th	-0.312	0.553	-0.034	-0.261	-0.187	-0.047	-0.164	0.189
U	0.452	0.507	-0.021	0.040	0.177	0.007	0.156	-0.014

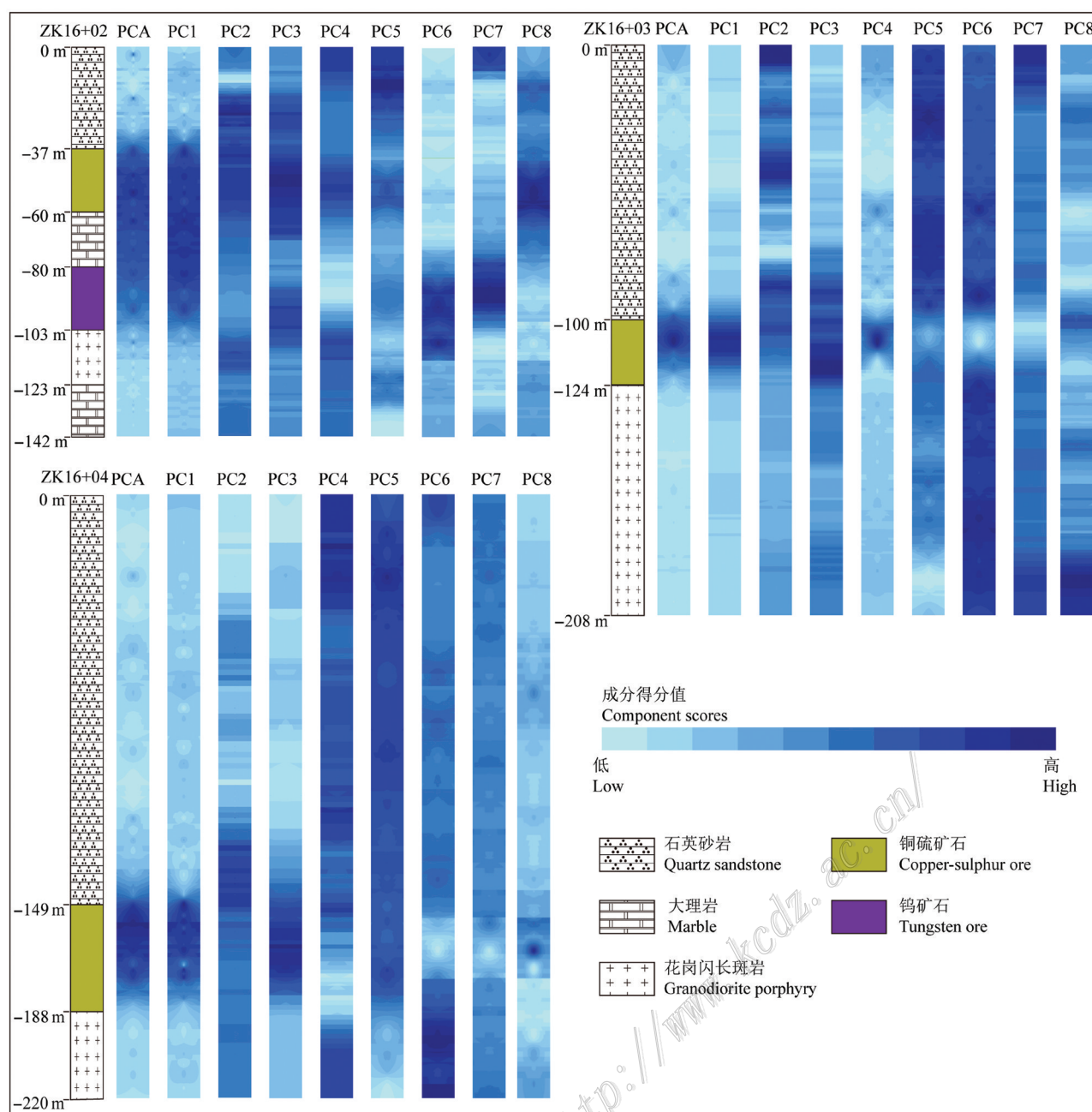


图4 荞麦山铜多金属矿床16+线主成分得分图

Fig. 4 Principal component score of exploration line 16+ through the Qiaomaishan Cu polymetallic deposit

70.576%的信息在内,高值区主要出现在包括铜硫矿石和钨矿石在内的矿化区,是对钻孔主要信息的集中反映,计算公式如下:

$$PCA = \sum_{i=1}^8 \omega_i \times PC_i$$

其中, $\omega_i = \lambda_i / \sum \lambda_i$, 代表了各成分所占权重, λ_i 为各成分所对应的特征值。

(2) 第一主成分(PC1)的高值富集区域与综合主成分高度相似,与钻孔的矿化区域明显对应,显然PC1

代表了富含元素Cu、Fe、S、W在内的矿化信息,且伴随有非成矿元素Mg、Ca、Mn、Co、Zn、As、Se、Ag、Hg、U。

(3) 第二主成分(PC2)具有除Mg、Si、Rb、Sr在内的较多的正载荷元素,结合主成分得分图可以看出第二主成分信息并不具备有类似于第一主成分具有明显矿化特征的元素组合,但高值区也多靠近矿石周围,在偏向石英砂岩的区域有着较强的反映,总体上具有更为复杂的表现。

(4) 第三主成分(PC3)具有正载荷元素Mg、S、Ti、V、Cr、Mn、Zn、Rb、Sr、Y、Nb、Mo、W、Hg,主成分得分高值区呈现出以铜硫矿石和钨矿石为中心向两侧逐渐降低辐散的趋势,结果表明,PC2在一定程度上能够反映铜硫矿石和钨矿石附近复杂多样的围岩蚀变现象。

(5) 第四主成分(PC4)所表现的不具备明显特征,但总体上表现出主成分得分值由矿石位置向非矿石位置由高到低(ZK16+02、ZK16+03)或由低到高(ZK16+04)的现象。

(6) 第五主成分(PC5)表现出得分值由石英砂岩段到铜硫矿石段、钨矿石段再到花岗闪长岩段逐渐降低变化的现象,反映出自浅向深得分值由高向低的变化。

(7) 第六主成分(PC6)在铜硫矿石所对应的位置表现出低值特征,而在钨矿石所对应的位置表现出高值特征。

(8) 第七主成分(PC7)和PC6特征一致。

(9) 第八主成分(PC8)所表现的特征与PC6、PC7的特征相反,在铜硫矿石所对应的位置表现为高值特征,在钨矿石所对应的位置表现出低值特征。

3.2 多元逐步线性回归分析

主成分分析能够保留诸多变量的主要信息,将30种有效元素压缩为8个变量,能够定性的反

映元素富集规律与钻孔岩芯之间的对应关系。而多元逐步线性回归分析方法能够反映多个变量对一个因素的影响,能够从大量可供选择的变量中选取最重要的变量,以保证最后保留在模型中的解释变量多重共线性降到最低,从而建立“最优”的多元线性回归方程,得到回归分析的预测模型(Closs et al., 1975; 付勇等, 2009; Nazarpour et al., 2016; Ali et al., 2017),从而定量的反映元素的富集关系,量化矿化信息。为探究荞麦山铜多金属矿床中成矿元素Cu、Fe、S、W与非成矿元素之间的富集伴随关系,笔者利用SPSS软件将荞麦山铜多金属矿床16+线钻孔的成矿元素与26种非成矿元素进行多元逐步线性回归分析,并建立预测模型,以达到进一步提取主要相关元素的目的。

为了避免不相关元素的干扰,在多元逐步回归之前对所测得的30种有效元素进行相关性分析,结果见表2,相关性分析结果可知,与荞麦山铜多金属矿床与成矿元素Cu、Fe、S、W具有正相关性元素主要有Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U。而由上述主成分分析表明,第一主成分集中反映了钻孔矿化信息,并且从主成分载荷表中可以看出元素非成矿元素Mg、Ca、Mn、Co、Zn、As、Se、Ag、Hg、U均具有较高的正载荷系数,与相关性分析相比仅多出元素Zn,且载荷系数最小,因此,相关性分析与主成分分

表2 荞麦山铜多金属矿床16+线钻孔成矿元素相关性分析表

Table 2 Correlation analysis of ore-forming elements in boreholes on exploration line 16+ through the Qiaomaishan Cu polymetallic deposit

组分	Mg	Al	Si	P	Cl	Ca	Ti	V	Cr
Cu	0.374**	-0.257**	-0.501**	-0.008	0.144**	0.457**	-0.191**	-0.083	-0.118*
S	0.446**	-0.259**	-0.58**	-0.004	-0.70	0.241**	-0.099*	0.006	-0.059
Fe	0.354**	-0.270**	-0.593**	-0.023	0.048	0.519**	-0.226**	-0.102*	-0.124**
W	0.356**	-0.191**	-0.36**	-0.114*	0.032	0.438**	-0.134**	-0.08	-0.075
组分	Mn	Co	Ni	Zn	As	Se	Rb	Sr	Y
Cu	0.483**	0.663**	0.092	0.16**	0.492**	0.612**	-0.112*	-0.128**	-0.165**
S	0.316**	0.647**	0.024	0.146**	0.352**	0.471**	0.164**	-0.110*	-0.135**
Fe	0.618**	0.797**	-0.026	0.097*	0.368**	0.564**	-0.157**	-0.105*	-0.179**
W	0.542**	0.288**	-0.051	0.05	0.130**	0.294**	-0.139**	-0.099*	-0.116*
组分	Zr	Nb	Mo	Ag	Hg	Pb	Th	U	
Cu	-0.236**	-0.207**	-0.013	0.661**	0.439**	0.049	-0.117*	0.463**	
S	-0.193**	-0.157**	0.022	0.662**	0.326**	0.107*	-0.119*	0.341**	
Fe	-0.294**	-0.235**	-0.019	0.936**	0.601**	-0.038	-0.132**	0.422**	
W	-0.174**	-0.138**	0.013	0.314**	0.557**	-0.04	-0.068	0.235**	

注:*表示显著性<0.05;**表示显著性<0.01。

析所得出的结论具有高度一致性。

结合主成分分析和相关性分析的结果,可以初步反映出与成矿元素 Cu、Fe、S、W 富集伴随的正相关元素。基于此,利用所测 433 个数据点对成矿元素进行多元逐步线性回归,无差别的将全部钻孔数据步入模型,以分析元素 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U 与成矿元素的量化关系,建立拟合模型,以探究诸多元素的富集成矿规律,分析结果见表 3。

虽然 Zn 元素在主成分分析中反映为低正载荷,但在初步的相关性分析中(表 2),该元素与成矿元素并非均反映为显著相关性,因此并未作为变量步入回归模型。尽管在相关性分析中,元素 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U 对成矿元素 Cu、Fe、S、W 均各自呈现出正相关关系,但在多元素共同作用的前提

下,元素自身之间也存在相互作用即多重共线性作用,因此逐步回归模型在回归过程中对变量进行边引入边剔除,直到既无新变量的引入也无旧变量的剔除,以建立“最优”的多元线性回归模型。从分析结果中可以看出,对于不同的成矿元素所保留的元素及系数也有所不同,模型 R^2 系数分别为 0.589、0.888、0.624、0.340,且各元素的系数均在满足显著性检验条件,因此,可以认为模型具有较好的拟合效果。此外,各模型 VIF 均小于 5,即拟合模型中不具有多重共线性影响,说明对于各成矿元素所保留下来的元素之间不存在明显相互作用,且其共同的富集对铜多金属矿床的形成产生着正向作用。逐步线性回归分析反映出 Cu 元素的富集伴随着元素 Mg、Co、As、Se、Ag、Hg、U; Fe 元素的富集伴随着元素 Ca、Mn、Ag、Se; S 元素的富集伴随着元素 Mg、

表 3 多元逐步线性回归分析系数表

Table 3 Multiple stepwise linear regression analysis coefficient table

成矿元素	变量	系数	标准化系数	T 检验(t)	显著性	VIF
Cu $R^2=0.589$	常量	-0.045		-5.400	<0.01	
	Co	35.736	0.156	2.370	0.012	4.463
	As	23.277	0.216	5.996	<0.01	1.346
	Se	61.993	0.209	4.686	<0.01	2.062
	Mg	0.012	0.203	5.075	<0.01	1.651
	Ag	681.665	0.269	4.097	<0.01	4.450
	U	22.317	0.085	2.263	0.024	1.470
	Hg	-7.788	-0.094	-2.054	0.041	2.164
Fe $R^2=0.888$	常量	-0.376		-2.361	0.019	
	Ag	93248.244	0.939	39.499	<0.01	2.154
	Se	-640.663	-0.055	-2.537	0.012	1.802
	Mn	6.828	0.150	5.991	<0.01	2.381
	Ca	-0.139	-0.101	-4.061	<0.01	2.355
S $R^2=0.624$	常量	0.611		2.371	0.018	
	Ag	59731.155	0.720	15.903	<0.01	2.320
	Mg	0.919	0.468	11.683	<0.01	1.818
	Mn	-9.945	-0.261	-4.344	<0.01	4.098
	As	609.918	0.173	4.945	<0.01	1.391
	Hg	-524.170	-0.193	-3.703	<0.01	3.086
	Se	1003.167	0.104	2.567	0.011	1.840
	Ca	-0.119	-0.104	-2.036	0.042	2.930
W $R^2=0.34$	常量	0.002		1.483	0.139	
	Hg	5.044	0.344	5.525	<0.01	2.528
	Mn	0.056	0.274	4.406	<0.01	2.528

Ca、Mn、As、Se、Ag、Hg; W 元素的富集伴随着元素 Mn、Hg。

此外,通过上述逐步线性回归分析系数表建立多元逐步线性回归拟合模型,对荞麦山铜多金属矿床 ZK16+02、ZK16+03、ZK16+04 钻孔中成矿元素进行拟合,以 Cu 为例,建立拟合模型如下:

$$\text{Cu}=35.736\times\text{Co}+23.277\times\text{As}+61.993\times\text{Se}+0.012\times$$

$$\text{Mg}+681.668\times\text{Ag}+22.317\times\text{U}-7.788\times\text{Hg}-0.0045$$

各成矿元素模型建立同理,利用拟合结果对比钻孔柱状图以及元素实测值,以此验证模型的准确性(图 5)。从对比结果中可以看出,成矿元素的预测高值区与铜硫矿石和钨矿石的位置均具有较好的对应关系,并且以非成矿元素 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U 所建立的预测模型与

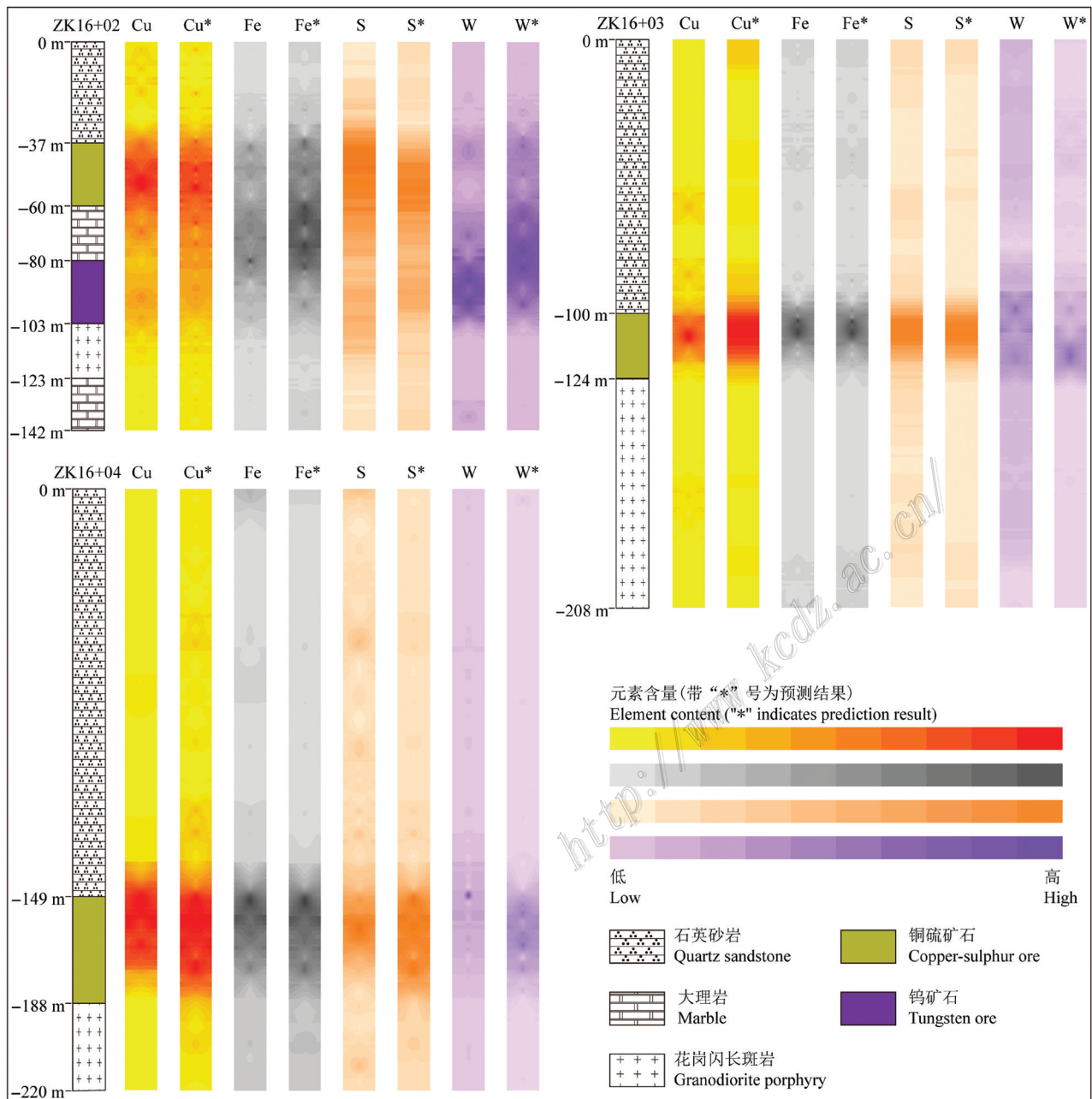


图5 荞麦铜多金属矿床16+线成矿元素拟合对比图

Fig. 5 Fitting comparison of metallogenic elements in boreholes on exploration line 16+ through the Qiaomaishan Cu polymetallic deposit

实测值也和铜硫矿石和钨矿石具有高度的吻合现象。由此可见,相关性分析及多元逐步线性回归分析将26种元素提取出了最为关键的相关元素以量化了元素富集信息,通过对成矿元素正相关元素进行多元逐步线性回归能够进一步提取对荞麦山铜多金属矿床具有正向影响的元素组合,并建立量化模型,定量反映了元素富集规律以及矿化信息。

4 讨论

4.1 区别于实验室方法的全数据分析

当前便携式X射线荧光分析技术的发展已经取得了很大的进步,测试检出限也提高了很多,但是pXRF数据精度与传统实验室分析精度之间仍然有一定的差距,pXRF分析总体来看属于半定量分析。本研究并非脱离于实验室方法完全基于pXRF的数据采集,为了提高pXRF数据的可信度,以更好地反映研究区的元素富集分布情况,本研究选择了以实验室数据为标准来校准pXRF数据。在数据采集的预处理阶段,选取了荞麦山铜多金属矿床采集样品中13块具有代表性的岩芯样品进行实验室全岩主微量元素测试,样品分别位于矿床的不同深度(深度从10~140 m),并且样品岩性从浅到深包含了荞麦山铜多金属矿床4种主要岩性在内的石英砂岩、矽卡岩型矿体、大理岩和花岗山长斑岩。研究发现pXRF分析结果与实验室分析结果之间具有较好的正相关关系,对于不同样品中元素含量的高值、低值反映结果是一致的(周国玉, 2021)。在岩芯数据采集,对荞麦山铜多金属矿床16+线主要以铜硫矿石为主的3个典型钻孔进行等间距连续单点测试,累计测点达到433个,各点采集有效元素30种,在获取丰富数据的前提下最大限度地保持了岩芯的完整性以及测试样本的连续性,这是实验室测样难以做到的。

虽然,pXRF化学分析是一种半定量、半定性的分析过程,但是其具有连续性测试、分析密度大、测验样品多的特性。并且,pXRF可以在无需样品制备的情况下很容易地在现场使用(Pinto, 2018),其提供快速、实时分析的能力有助于收集适合地统计分析的有针对性的高数据密度读数(Lemiere, 2018),尽管不具备实验室方法的高精度特征,与地球化学分析值存在本质区别,但能一定程度上能够反映出某

区域样品的连续性特征与相关性特征,可以获取更全面的岩性信息,突出相对变化,相比实验室测样能够更广泛便捷地分析岩芯岩性变化趋势特征,有助于全面反映矿化特征和蚀变现象,因此并不会降低用于勘探过程中元素分布、迁移、富集规律研究的数据价值。

4.2 元素富集规律与矿化、蚀变

作者通过利用pXRF对荞麦山铜多金属矿床16+线3个典型钻孔(ZK16+02、ZK16+03、ZK16+04)进行连续、高密度的主微量元素全数据采集,运用多元数据主成分分析法、多元逐步线性回归法对各主微量元素的分布规律、元素异常组合情况和成矿指示元素等进行了详细分析。

本文对上述3个钻孔元素进行主成分分析(图4),研究结果表明,在荞麦山铜多金属矿床16+线钻孔的主成分分析中,将30种元素信息压缩为8个主成分,每个主成分均代表了钻孔的不同信息:①以正载荷元素Cu、Fe、S、W、Mg、Ca、Mn、Co、Zn、As、Se、Ag、Hg、U为主的PC1元素组合代表着荞麦山铜多金属矿床的矿化信息,研究结果从元素分布的角度细化了前人的研究;②PC2、PC3反映了荞麦山铜多金属矿床中花岗闪长斑岩、石英砂岩、大理岩相互接触带之间复杂多样的蚀变信息及变化趋势(刘晓明等, 2015; 2016);③PC6、PC7、PC8主成分信息一定程度上蕴含了钨矿石、铜硫矿石的矿化信息。

因此,通过主成分分析16+线钻孔数据,将30种元素压缩为包括矿化信息、蚀变信息、铜硫矿石、钨矿石、岩石信息等在内的8个主成分信息,并且综合得分结果能够包含并解释70.576%的钻孔信息,通过主成分分析确定的,以Cu、Fe、S、W、Mg、Ca、Mn、Co、Zn、As、Se、Ag、Hg、U为正相关关系变化的元素组合,可辅助确定荞麦山铜多金属矿床的多样性矿化。分析表明,矿床复杂多样的矿化、蚀变是造成主成分分析中正载荷元素集中出现的主要原因,反过来多种元素不同主成分中出现的正载荷现象也能够一定程度上反映岩体多样的矿化、蚀变特征,两者之间相互佐证。

主成分分析侧重于将诸多变量进行压缩合并、整合归类,最大程度上保留原有信息,而多元逐步线性回归侧重于将诸多变量进行对比、剔除、保留,减少变量的同时,建立最优拟合方程,以提取相关信息。

在对荞麦山铜多金属矿床成矿元素 Cu、Fe、S、W 进行相关性分析发现,对成矿元素起正相关性影响的元素包括 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U,这一结果与主成分分析得出的结论大同小异,因此,可以进一步判断这些元素与成矿元素具有明显的富集特征,可作为矿化指示元素。基于相关性分析和主成分分析结果进行多元逐步线性回归分析并建立拟合模型,对比验证表明,尽管拟合 R^2 系数大小不一,但都对矿化位置具有较好的反映效果。ZK16+02 由于具有更为复杂的地质环境,无论是实测元素值还是拟合值,都综合反映了铜硫矿石和钨矿石的整体矿化特征;ZK16+03、ZK16+04 中 4 种成矿元素的拟合效果与实测值具有高度吻合的特征,并且对铜硫矿石的反映也十分显著,甚至 Cu 元素拟合值对铜硫矿石位置的指示效果比 Cu 元素的实测值更好,尽管 W 元素的 R^2 系数只有 0.34,但整体上对于钨矿床也具有大致的反映。可见,多元回归分析能够从诸多元素中提取与成矿元素具有最优相关性的成矿指示性元素,与主成分分析对比研究共同指示出与成矿元素 Cu、Fe、S、W 伴随富集的元素组合为 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U。

笔者主要选择了研究区代表性剖面的 3 个钻孔进行研究,虽然数据涵盖了矿床的主要岩层,但钻孔数量相对于整个矿床来说还是偏少,还有一些矿石类型如铜硫钨组合矿石、铜钨矿石、铜矿石未能全部覆盖。在分析方法上主要选择了主成分分析、相关性分析、多元逐步线性回归分析,如若加入一些数据分析、机器学习分析,将提升数据分析的科学性及有效性。

5 结 论

(1) 荞麦山铜多金属钻孔主成分分析结果显示,综合得分 PCA、PA1 集中反映了元素矿化信息;PC3 反映了矿石与接触带围岩的蚀变信息;PC5 一定程度上反映了岩芯中石英砂岩的成分;PC6、PC7 对钨矿石具有一定的指示作用;PC8 对铜硫矿石具有一定的指示作用。

(2) 多元逐步线性回归分析提取了具有成矿指示作用的相关富集元素,结果表明,荞麦山铜多金属矿床成矿元素 Cu 伴随着元素 Mg、Co、As、Se、Ag、Hg、U 的富集;成矿元素 Fe 伴随着元素 Ca、Mn、Ag、Se 的富集;成矿元素 S 伴随着元素 Mg、Ca、Mn、As、

Se、Ag、Hg 的富集;成矿元素 W 伴随着元素 Mn、Hg 的富集。

(3) 主成分分析和多元逐步线性回归分析共同反映荞麦山铜多金属矿床中元素 Mg、Ca、Mn、Co、As、Se、Ag、Hg、U 和成矿元素 Fe、S、Cu、W 存在正相关关系,并且伴随成矿元素呈现富集特征,对荞麦山铜多金属矿床铜硫矿石具有矿化指示作用。

References

- Ali I Z, Frika Y, Ghzel L L and Zairi M. 2017. Hydrogeochemical characteristics prediction using multiple linear regression: Case study on unconfined aquifer in northeastern Tunisia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(17): 1-14.
- Al-Musawi M and Kaczmarek S. 2020. A new carbonate-specific quantification procedure for determining elemental concentrations from portable energy-dispersive X-ray fluorescence(PXRF) data[J]. *Applied Geochemistry*, 113: 104491.
- Armstrong K. 2014. Big Data: A revolution that will transform how we live, work, and think[J]. *Mathematics & Computer Education*, 47 (10): 181-183.
- Aryafar A and Moeini H. 2017. Application of continuous restricted Boltzmann machine to detect multivariate anomalies from stream sediment geochemical data Korit, East of Iran[J]. *Journal of Mining and Environment*, 8(4): 673-682.
- Bourke A and Ross P S. 2016. Potable X-ray fluorescence measurements on exploration drill-cores: comparing performance on unprepared cores and powders for 'whole-rock' analysis[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 16(2): 147-157.
- Carranza E J M and Laborte A G. 2015. Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines)[J]. *Computers & Geosciences*, 74: 60-70.
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-89(in Chinese with English abstract).
- Chang Y F, Dong S W and Huang D Z. 1996. On tectonics of "Ploy-basement with one cover" in Middle-Lower Yangtze Craton China[J]. *Volcanology and Mineral resources*, 17(1-2): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Chen C L P and Zhang C Y. 2014. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data[J]. *Information Sciences*, 275: 314-347.
- Chen Z H and Zhao L. 2017. Zircon U-Pb dating of the Paleoproterozoic Dongling gneiss in the Middle and Cambrian Yangtze metallogenic belt and its geological significance[J]. *Bulletin of Mineralogy*,

- Petrology and Geochemistry, 36(6): 975-983(in Chinese with English abstract).
- Cheng Q M, Chen Z J and Khaled A. 2007. Application of fuzzy weights of evidence method in mineral resource assessment for gold in Zhenyuan district, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 175-184(in Chinese with English abstract).
- Closs L G and Nichol I. 1975. The role of factor and regression analysis in the interpretation of geochemical reconnaissance data[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12 (8): 1316-1330.
- Condie K C, Arndt N, Davaille A and Puetz S J. 2017. Zircon age peaks: Production or preservation of continental crust[J]? *Geosphere*, 13(2): 227-34.
- Cui K, Li L M, Yi J J, Li H B and Wu H R. 2021. Characteristics and evolution of ore-forming fluids in the Diyanqinamu Mo deposit, Inner Mongolia: Evidence from LA-ICP-MS analysis of individual fluid inclusion[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 1961(1): 012022.
- Dong S W, Ma L C, Liu G, Xue H M, Shi W and Li J H. 2011. On dynamics of the metallogenic belt of Middle-Lower Reaches of Yangtze River, eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 612-625(in Chinese with English abstract).
- Ernst R E and Youbi N. 2017. How large igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478: 30-52.
- Evans D A D, Li Z X and Murphy J B. 2016. Four-dimensional context of Earth's supercontinents[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 424(1): 1-14.
- Fu Y, Wang L J, Chai F M, Deng G, Chen Y and Chen J H. 2009. The application of multi-variate linear regression combined with stepwise regression analysis for Cu-Ni sulfide deposit of Baishiquan[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 373-380(in Chinese with English abstract).
- Gantz J and Reinsel D. 2012. The digital universe in 2020: Big Data, bigger digital shadows, and biggest growth in the Far East[J]. *IDC iView: IDC Analyze the Future, 2007(2012)*: 1-16.
- Gazley M F, Tutt C M, Fisher L A, Latham A R, Duclaux G, Taylor M D and Beer S J D. 2014. Objective geological logging using portable XRF geochemical multi-element data at Plutonic gold mine, Marymia Inlier, western Australia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 143:74-83.
- Gray C A and Van Rythoven A D. 2020. A comparative study of porphyry-type copper deposit mineralogies by portable X-ray fluorescence and optical petrography[J]. *Minerals*, 10(5): 431.
- Hall G E M, Bonham-Carter G F and Buchar A. 2014. Evaluation of portable X-ray fluorescence (pXRF) in exploration and mining: Phase 1, control reference materials[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14(2): 99-123.
- Han K C, Chen Y Z, Chen S S and Wu N. 1985. Nappe structure in the Maoshan area and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 9(1): 57-68(in Chinese with English abstract).
- Han X H, Zhang Y H, Sun F J and Wang S H. 2012. Determination method of index weight based on principal component analysis[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 3(10): 124-126(in Chinese with English abstract).
- Huang R S and Cao J Z. 2010. Analysis and study on Maoshan nappe tectonic zone in Jiangsu[J]. *Journal of Geology*, 34(1): 6-9(in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Shi Q, Zuo J, Pena M F, Chen J D and Yi W. 2021. Research status and challenges of data-driven construction project management in the big data context[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- Kalnicky D J and Singhvi R. 2001. Field portable XRF analysis of environmental samples[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 83(1-2): 93-122.
- Lemiere B. 2018. A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 188: 350-363.
- Li X H, Yuan F, Zhang M M, Jia C, Jowitt S M, Ord A, Zhang T K, Hu X Y and Li Y. 2015. Three-dimensional mineral prospectivity modeling for targeting of concealed mineralization within the Zhonggu iron orefield, Ningwu Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 633-654.
- Li Y, Yuan F, Deng Y F, Li X H, Liu G X, Li H, Lu S M and Zhou Z Y. 2019. Origin and metallogenic significance of the ore-forming intrusion and its mafic microgranular enclaves in the Qiaomaishan deposit, Xuancheng City, Anhui Province: Geochronology, geochemistry, Sr-Nd-Hf-O isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(12): 3838-3862(in Chinese with English abstract).
- Li Z X and Zhong S. 2009. Supercontinent-superplume coupling true polar wander and plume mobility: Plate dominance in whole-mantle tectonics[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 176 (3): 143-156.
- Lin Y C, Ge L Q and Lai W C. 2002. The application of portable multi-element XRF and analyzer to geological survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 26(4): 325-328(in Chinese with English abstract).
- Liu G, Feng Y, Deng Y, Liu G X, Yuan F, Deng Y F, Jowitt S M, Sun W A, White N C, Yang D, Li X S, Zhou T F and Huizenga J M. 2018. The genesis of the Hehuashan Pb-Zn deposit and implications for the Pb-Zn prospectivity of the Tongling district, Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt, Anhui Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 101:105-121.
- Liu Q. 2014. Portable X-ray fluorescence analyzer test spectrometer analysis of heavy metals in soil[D]. Instructor: Jia R Y. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology. 1-62(in Chinese with English abstract).

- Liu X M, Zhang P, Qiang X L and Zhang L Y. 2014. Geological report on deep exploration of Tongshan-Qiaomeishan copper and sulfur deposit in Xuancheng City, Anhui Province[R]. Anhui: Comprehensive Geological Brigade of East China Metallurgical Geological Exploration Bureau. 1-143(in Chinese with English abstract).
- Liu X M and Duan L A. 2015. Geological features and metallogenic regularity of the Tongshan-Qiaomaishan Cu-S-W-Fe polymetallic ore deposit in Xuancheng City[J]. *Geology of Anhui*, 25(3): 174-178(in Chinese with English abstract).
- Liu X M. 2016. Ore characteristics of the Tongshan-Qiaomaishan Cu-S deposit in Xuancheng City, Anhui Province[J]. *Modern Mining*, 564(4): 127-130(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zhang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 29(3-4): 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F and Chen Y C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294-314.
- Mauriohoo K, Barker S L L and Rae A. 2016. Mapping lithology and hydrothermal alteration in geothermal systems using portable X-ray fluorescence (pXRF): A case study from the Tauhara geothermal system, Taupo Volcanic Zone[J]. *Geothermics*, 64: 125-134.
- McAlister A. 2019. On provenance studies of New Zealand obsidians: A pXRF-based geochemical reference dataset and a review of analytical methods[J]. *Archaeology in Oceania*, 54(3): 131-148.
- McNulty B A, Fox N, Berry R F and Gemmell J B. 2018. Lithological discrimination of altered volcanic rocks based on systematic portable X-ray fluorescence analysis of drill core at the Myra Falls VHMS deposit, Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 193: 1-21.
- Nazarpour A, Paydar G R and Carranza E J M. 2016. Stepwise regression for recognition of geochemical anomalies: Case study in Takab area, NW Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 168: 150-162.
- Nie L Q, Zhou T F, Fan Y, Zhang L J, Cooke D and White N. 2017. Geology, geochemistry and genesis of the Makou magnetite-apatite deposit in the Luzong volcanic basin, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 264-277.
- Peinado F M, Ruano S M, Gonzalez M G B and Molina C E. 2010. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence(PXRF)[J]. *Geoderma*, 159: 76-82.
- Perring L and Andrey D. 2018. Multi-elemental ED-XRF determination in dehydrated bouillon and sauce base products[J]. *Food Analytical Methods*, 11(1): 148-160.
- Piecey S J and Devine M C. 2014. Analysis of powdered reference materials and known samples with a benchtop, field portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometer: Evaluation of performance and potential applications for exploration lithogeochemistry[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14(2): 139-148.
- Pinto A H. 2018. Portable X-Ray fluorescence spectrometry: Principles and applications for analysis of mineralogical and environmental materials[J]. *Aspects in Mining & Mineral Science*, 1(2): 42-47.
- Pirajno F and Zhou T F. 2015. Intracontinental porphyry and porphyry-skarn mineral systems in eastern China: Scrutiny of a special case "Made-in-China"[J]. *Econ. Geol.*, 110(3): 603-629.
- Qian S L, Yang G Q, Xie Z J and Liu J. 2017. Geological features and a discussion of ore-forming conditions of the Chating porphyry copper (gold) ore deposit in the Xuancheng district, Anhui Province[J]. *Geology of Anhui*, 27(2): 81-86(in Chinese with English abstract).
- Radu T and Diamond D. 2009. Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3): 1168-1171.
- Shao Y, Chen S S, Jia C P and Xu Q. 2016. Explore the data mining technology and application in the era of Big Data[J]. *China Computer & Communication*, (10): 118-119(in Chinese with English abstract).
- Song A D, Ni P, Wang G G, Yang Y L, Zhu R Z, Fan M S, Hu J S, Luo P and Lin W H. 2017. Discovery of Late Mesoproterozoic A-type granite in eastern Jiangnan orogen and its tectonic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(6): 938-947(in Chinese with English abstract).
- Wang C N, Han Z Z and Chen J P. 2016. Metallogenic prognosis of molybdenum ore based on GIS in Hulei area, Fujian Province[J]. *Geomatics World*, 23(1): 46-52.
- Webster R and Burgess T M. 1983. spatial variation in soil and the role of kriging[J]. *Agricultural Water Management*, 6(2): 111-122.
- Xia Q L, Cheng Q M, Lu J P, Xiao W, Sang H, Yuan Z X, Liu Y and Qiu J L. 2011. Application of Portable XRF Technology to identification of Mineralization and Alteration along Drill in the Nihe Iron Deposit, Anhui, East China[J]. *Earth Science*, 36(2): 336-340 (in Chinese with English abstract).
- Xu X C, Xu X Y, Xie Q Q, Fu Z Y, Qian S L and Xie Z J. 2019. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Chating copper-gold deposit in Xuancheng City, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(12): 3659-3676(in Chinese with English abstract).
- Xu X S and Hu L Y. 2001. Maoshan structure in Jiangsu-Sliding-reversed stacking orogeny[J]. *Geological Bulletin of China*, 20(3): 280-285(in Chinese with English abstract).
- Young K E, Evans C A, Hodges K V, Bleacher J E and Graff T G. 2016. A review of the handheld X-ray fluorescence spectrometer

- as a tool for field geologic investigations on earth and in planetary surface exploration[J]. *Applied Geochemistry*, 72: 77-87.
- Yuan Z X, Cheng Q M, Xia Q L, Yao L Q, Chen Z J, Zuo R G and Xu D Y. 2014. Spatial patterns of geochemical elements measured on rock surfaces by portable X-ray fluorescence: Application to hand specimens and rock outcrops[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14(3): 265-276.
- Zhai M G, Yang S F, Chen N H and Chen H L. 2018. Big Data epoch: Challenges and opportunities for geology[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(8): 825-831(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q and Zhou Y Z. 2017. Big Data will lead to a profound revolution in the field of geological science[J]. *Chinese Journal of Geology*, 52(3): 637-648(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Jiao S T and Lu X X. 2018a. Discussion on causality and correlation in geological research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 275-280(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang J R, Chen W F, Wan Y X, Jiao S T and Liu X Y. 2018b. Preliminary research progress of database data[J]. *Gansu Geology*, 27(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q and Zhou Y Z. 2018c. Big Data helps geology develop rapidly[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(11): 3167-3172(in Chinese with English abstract).
- Zhao L C, Wang J G, Li X, Zhang S and Zhang Z F. 2018. Application of inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry/mass spectrometry to phase analysis of gold in gold ores[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 46(2): 1801-1809.
- Zhao P D. 2011. Prospecting idea: From qualification to quantification[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 625-629(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D. 2014. The era of Big Data calls for data science in all scientific fields[J]. *China Awards for Science and Technology*, (9): 29-30 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D. 2015. Digital mineral exploration and quantitative evaluation in the Big Data age[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1255-1259(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z Y, Pan M, Guo Y J, Jin Y and Qu H G. 2012. Application study of GIS spatial analysis in three dimensional potential assessments of mineral resources[J]. *Journal of Geology*, 36(4): 336-373.
- Zhou G Y. 2021. Data-driven study on element migration, enrichment regularity and prospecting indication in the Qiaomaishan Cu-S-W polymetallic deposit[D]. Instructor: Zhang M M. Hefei: Hefei University of Technology. 1-97(in Chinese with English abstract).
- Zhou S and Cheng Q. 2020. Elemental assessment of dried and ground samples of Leeches via portable X-ray fluorescence[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(11): 2573-2581.
- Zhou S B, Ytan Z X, Cheng Q M, Zhang Z J and Yang J. 2018. Rapid in situ determination of heavy metal concentrations in polluted water via portable XRF-using Cu and Pb as example[J]. *Environmental Pollution*, 243: 1325-1333.
- Zhou T F, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665-1678(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Qiao B, Ma L, Yang X F and Cooke D R. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 54(2): 185-196.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F and Zhong G X. 2012. Progress of geological study in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3051-3066(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Wang S W and White N C. 2017. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353-3372(in Chinese with English abstract).
- Zhu Z C. 1991. Thrust nappe structure[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-98(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘相培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社. 1-89.
- 常印佛, 董树文, 黄德志. 1996. 论中-下扬子“一盖多底”格局与演化[J]. *火山地质与矿产*, 17(1-2): 1-14.
- 陈志洪, 赵玲. 2017. 长江中下游成矿带古元古代董岭片麻岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(6): 975-983.
- 成秋明, 陈志军, Khaled A. 2007. 模糊证据权法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 32(2): 175-184.
- 董树文, 马立成, 刘刚, 薛怀民, 施炜, 李建华. 2011. 论长江中下游成矿动力学[J]. *地质学报*, 85(5): 612-625.
- 付勇, 汪立今, 柴凤梅, 邓刚, 陈勇, 陈俊华. 2009. 多元线性回归和逐步回归分析在白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床研究中的应用[J]. *地学前缘*, 16(1): 373-380.
- 韩克从, 陈玉忠, 陈思松, 吴宁. 1985. 茅山地区的推覆构造及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 9(1): 57-68.
- 韩小孩, 张耀辉, 孙福军, 王少华. 2012. 基于主成分分析的指标权重确定方法[J]. *四川兵工学报*, 3(10): 124-126.
- 黄润生, 曹建忠. 2010. 江苏茅山推覆构造带的分析与研究[J]. *地质学刊*, 34(1): 6-9.
- 李跃, 袁峰, 邓宇峰, 李晓晖, 刘光贤, 李贺, 陆三明, 周宇章. 2019. 安徽宣城荞麦山矿床成矿岩体及其暗色包体成因与成矿意义: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf-O 同位素制约[J]. *岩石学报*, 35(12): 3838-3862.
- 林延畅, 葛良全, 赖万昌. 2002. 新一代手提式多元素 X 荧光仪在地

- 质普查中的应用[J]. 物探与化探, 26(4): 325-328.
- 刘琦. 2014. 便携式 X 射线荧光仪分析土壤中重金属的方法研究[D]. 导师: 贾锐鱼. 西安: 西安科技大学. 1-62.
- 刘晓明, 张平, 强小莉, 张梁宇. 2014. 安徽省宣城市铜山-荞麦山铜硫矿深部勘探地质报告[R]. 1-143.
- 刘晓明, 段留安. 2015. 宣城市铜山-荞麦山 Cu-S-W-Fe 多金属矿地质特征及成矿规律[J]. 安徽地质, 25(3): 174-178.
- 刘晓明. 2016. 安徽宣城铜山-荞麦山铜硫矿矿石特征[J]. 现代矿业, 56(4): 127-130.
- 钱仕龙, 杨前国, 谢祖军, 刘静. 2017. 安徽省宣州区茶亭斑岩型铜(金)矿床地质特征及成矿条件探讨[J]. 安徽地质, 27(2): 81-86.
- 邵燕, 陈守森, 贾春朴, 许强. 2016. 探究大数据时代的数据挖掘技术及应用[J]. 信息与电脑, (10): 118-119.
- 夏庆霖, 成秋明, 陆建培, 肖文, 桑浩, 袁兆宪, 刘艳, 邱俊玲. 2011. 便携式 X 射线荧光光谱技术在泥河铁矿岩心矿化蚀变信息识别中的应用[J]. 地球科学, 36(2): 336-340.
- 徐晓春, 许心悦, 谢巧勤, 傅仲阳, 钱仕龙, 谢祖军. 2019. 安徽宣城茶亭铜金矿床地质和地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 35(12): 3659-3676.
- 徐学思, 胡连英. 2001. 江苏茅山构造-滑覆反序叠置造山[J]. 中国区域地质, 20(3): 280-285.
- 翟明国, 杨树锋, 陈宁华, 陈汉林. 2018. 大数据时代: 地质学的挑战与机遇[J]. 中国科学院院刊, 33(8): 825-831.
- 张旗, 周永章. 2017. 大数据正在引发地球科学领域一场深刻的革命[J]. 地质科学, 52(3): 637-648.
- 张旗, 焦守涛, 卢欣祥. 2018a. 论地质研究中的因果关系和相关关系——大数据研究的启示[J]. 岩石学报, 34(2): 275-280.
- 张旗, 王金荣, 陈万峰, 王玉玺, 焦守涛, 刘欣雨. 2018b. 全球数据库数据研究的初步进展[J]. 甘肃地质, 27(1): 1-11.
- 张旗, 周永章. 2018c. 大数据助地质腾飞: 岩石学报 2018 第 11 期大数据专题“序”[J]. 岩石学报, 34(11): 3167-3172.
- 赵鹏大. 2011. 找矿理念: 从定性到定量[J]. 地质通报, 30(5): 625-629.
- 赵鹏大. 2014. 大数据时代呼唤各科学领域的科学数据[J]. 中国科技奖励, (9): 29-30.
- 赵鹏大. 2015. 大数据时代数字找矿与定量评价. 地质通报, 34(7): 1255-1259.
- 周国玉. 2021. 数据驱动的荞麦山铜硫钨多金属矿床元素迁移富集规律研究及找矿指示[D]. 导师: 张明明. 合肥: 合肥工业大学. 1-97.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 24(8): 1665-1678.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 钟国雄. 2012. 长江中下游成矿带地质与矿产研究进展[J]. 岩石学报, 28(10): 3051-3066.
- 周涛发, 范裕, 王伟伟, White N.C. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报, 33(11): 3353-3372.
- 朱安冬, 倪培, 王国光, 杨玉龙, 朱仁智, 范明森, 胡金山, 罗平, 林文海. 2017. 江南造山带东段中元古代晚期 A 型花岗岩的发现及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(6): 938-947.
- 朱志澄. 1991. 逆冲推覆构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-98.