

1981年创刊 物理类、化学类核心期刊

ISSN 1000-0593
CODEN GUOXDH

2022 7
月刊



光谱學與光谱分析

GUANGPUXUE YU GUANGPU FENXI

嚴濟慈題

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS



主 管：中国科学技术协会
主 办：中国光学学会
承 办：激光杂志社
中国科学出版社编辑部
北京大學
清華大學





2022年 42卷 07期
刊出日期: 2022-07-01

论文

◀ 上一期 下一期 ▶

◀ 带摘要目录

✓ 合并选中摘要

论文

- ☐ 1993 **红肉质量的高光谱无损检测研究进展分析**
 白雪冰, 马殿坤, 张梦杰, 马瑞芹
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-1993-06
2022 Vol. 42 (07): 1993-1998 [摘要] (115) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (1434 KB) (118)
- ☐ 1999 **食品中三聚氰胺的光谱检测与分析技术研究进展**
 吕铷麟, 何洪源, 贾 镇, 王书越, 蔡能斌, 王晓宾
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-1999-08
2022 Vol. 42 (07): 1999-2006 [摘要] (85) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (1706 KB) (91)
- ☐ 2007 **双模式放电中DBD放电参数对甲烷滑动弧火焰光谱及活性粒子的影响分析**
 裴 欢, 陈 雷, 王思远, 杨 昆, 宋 鹏
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2007-06
2022 Vol. 42 (07): 2007-2012 [摘要] (68) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (2785 KB) (55)
- ☐ 2013 **光谱成像仪快速光谱定标方法研究**
 王建威, 李伟艳, 孙建颖, 李 兵, 陈鑫雯, 谭 政, 赵 娜, 刘场阳, 吕群波
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2013-05
2022 Vol. 42 (07): 2013-2017 [摘要] (69) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (5690 KB) (105)
- ☐ 2018 **基于LIF的海面溢油状态识别研究**
 袁 丽, 谢贝贝, 崔永强, 张晓丹, 焦慧慧
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2018-07
2022 Vol. 42 (07): 2018-2024 [摘要] (63) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (4190 KB) (47)
- ☐ 2025 **基于NIR和SOM-RBF网络的兰州百合关键营养物质定量分析方法**
 廉小亲, 陈 群, 汤堯森, 吴静珠, 吴叶兰, 高 超
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2025-08
2022 Vol. 42 (07): 2025-2032 [摘要] (74) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (4232 KB) (45)
- ☐ 2033 **显微共聚焦拉曼光谱技术结合化学计量法鉴别静电复印纸**
 陈维娜, 国中正, 李开开, 杨玉柱, 杨 旭
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2033-06
2022 Vol. 42 (07): 2033-2038 [摘要] (74) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (3148 KB) (45)
- ☐ 2039 **多轴差分吸收光谱技术对冬季大气HONO垂直分布特征研究**
 田 鑫, 任 博, 谢品华, 牟福生, 徐 晋, 李 昂, 李素文, 郑江一, 李晓梅, 任红梅, 黄晓辉, 潘屹峰, 田 伟
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2039-08
2022 Vol. 42 (07): 2039-2046 [摘要] (73) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (6220 KB) (34)
- ☐ 2047 **利巴韦林、磷酸氯喹、盐酸阿比多尔等抗病毒药物的红外光谱表征**
 陈靖奕, 朱 南, 咎佳男, 肖子康, 郑 晶, 刘 畅, 沈 睿, 王 芳, 刘云飞, 蒋 玲
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2047-09
2022 Vol. 42 (07): 2047-2055 [摘要] (111) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (5274 KB) (41)
- ☐ 2056 **Bi靶激光等离子体极紫外光源以及碎屑辐射特性研究**
 谢 卓, 王海建, 袁银萍, 宋晓伟, 林景全
DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2056-07
2022 Vol. 42 (07): 2056-2062 [摘要] (56) [RICH HTML](#) ^{NEW} [PDF](#) (3588 KB) (35)

☐	2063	Eu³⁺/Dy³⁺共掺Sr₃Y₂(BO₃)₄荧光粉的发光性质研究
		胡欣妍, 曹龙菲, 李金华, 李 霜 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2063-06 2022 Vol. 42 (07): 2063-2068 [摘要] (63) RICH HTML ^{NEW} PDF (3795 KB) (34)
☐	2069	闪电连续电流的光谱分析及通道温度特性研究
		王雪娟, 许伟群, 化乐彦, 王海通, 吕伟涛, 杨 静, 袁 萍, 张其林, 张袁瞰 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2069-07 2022 Vol. 42 (07): 2069-2075 [摘要] (62) RICH HTML ^{NEW} PDF (5054 KB) (21)
☐	2076	溶液pH对羟基苯硫酚同分异构体脱羟基反应影响的SERS研究
		葛登云, 徐敏敏, 袁亚仙, 姚建林 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2076-06 2022 Vol. 42 (07): 2076-2081 [摘要] (64) RICH HTML ^{NEW} PDF (3050 KB) (29)
☐	2082	后司忒匣钵工艺特征及其对青瓷釉面呈色的影响
		吴军明, 桑月侠, 郑乃章, 郑建明, 吴 琳, 山日钦 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2082-10 2022 Vol. 42 (07): 2082-2091 [摘要] (68) RICH HTML ^{NEW} PDF (7153 KB) (42)
☐	2092	基于非线性光谱字典学习的单幅RGB图像光谱重建方法研究
		左 楚, 谢德红, 万晓霞 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2092-09 2022 Vol. 42 (07): 2092-2100 [摘要] (83) RICH HTML ^{NEW} PDF (5697 KB) (37)
☐	2101	原子吸收光谱法测定岩石中铜、铅和锌的不确定度评定及方法改进
		侯亚茹, 陆继龙, 范玉超, 阿卜杜萨拉木·喀迪尔, 汤肖丹, 魏俏巧, 郭金珂, 赵 威 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2101-06 2022 Vol. 42 (07): 2101-2106 [摘要] (85) RICH HTML ^{NEW} PDF (1335 KB) (40)
☐	2107	血管紧张素转化酶抑制肽Leu-Lys-Pro (LKP) 抑制机理的研究
		徐晓晴, 周 倩, 孙建华, 孙丽霞, 冯学珍, 徐永芳, 童张法, 廖丹葵 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2107-06 2022 Vol. 42 (07): 2107-2112 [摘要] (63) RICH HTML ^{NEW} PDF (3383 KB) (24)
☐	2113	分散式农村污水基于三维荧光光谱和紫外-可见全波段吸收光谱的“聚类-回归”COD预测模型
		周铭睿, 曲江北, 李 彭, 何义亮 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2113-07 2022 Vol. 42 (07): 2113-2119 [摘要] (57) RICH HTML ^{NEW} PDF (4485 KB) (35)
☐	2120	不同辅料与生物沥浸深度脱水污泥混合堆肥中溶解性有机质的光谱特征研究
		卢 泽, 席北斗, 台德志, 陆良全, 孙晓杰, 张 军, 张 华 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2120-10 2022 Vol. 42 (07): 2120-2129 [摘要] (91) RICH HTML ^{NEW} PDF (7413 KB) (28)
☐	2130	天然钻尖晶石的谱学特征及颜色成因
		陶隆凤, 史 淼, 徐丽娟, 韩秀丽, 刘倬君 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2130-05 2022 Vol. 42 (07): 2130-2134 [摘要] (84) RICH HTML ^{NEW} PDF (1994 KB) (48)
☐	2135	基于可见光-近红外光谱的煤岩识别方法实验研究
		徐良骥, 孟雪莹, 韦 任, 张 坤 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2135-08 2022 Vol. 42 (07): 2135-2142 [摘要] (68) RICH HTML ^{NEW} PDF (2573 KB) (49)
☐	2143	液体物质红外光谱的简便测试方法研究
		杨 珊, 蔡秀琴, 刘雨晗, 王 伟 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2143-05 2022 Vol. 42 (07): 2143-2147 [摘要] (75) RICH HTML ^{NEW} PDF (2804 KB) (51)
☐	2148	随机森林结合CatBoost的近红外光谱药品鉴别
		蒋 萍, 路皓翔, 刘振丙 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2148-08 2022 Vol. 42 (07): 2148-2155 [摘要] (101) RICH HTML ^{NEW} PDF (3302 KB) (44)

☐	2156	基于便携式拉曼光谱成像技术的散装奶粉中硫脲可视化现场快速检测方法研究	 杨巧玲, 陈沁, 钮冰, 邓晓军, 马金鸽, 古淑青, 于永爱, 郭德华, 张峰 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2156-07 2022 Vol. 42 (07): 2156-2162 [摘要] (54) RICH HTML ^{NEW} PDF (3151 KB) (42)
☐	2163	激光诱导击穿光谱分析土壤样品中的锆、铪和铌元素含量实验研究	 张鹏鹏, 徐进力, 胡梦颖, 张灵火, 白金峰, 张勤 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2163-06 2022 Vol. 42 (07): 2163-2168 [摘要] (69) RICH HTML ^{NEW} PDF (3525 KB) (49)
☐	2169	沉淀分离-电感耦合等离子体质谱法测定高纯钨中铌铪含量	 张璇, 王长华, 胡芳菲, 墨淑敏, 李继东 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2169-06 2022 Vol. 42 (07): 2169-2174 [摘要] (56) RICH HTML ^{NEW} PDF (1544 KB) (34)
☐	2175	Paraloid文物保护材料光老化的红外光谱研究	 龚欣, 韩向娜, 陈坤龙 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2175-06 2022 Vol. 42 (07): 2175-2180 [摘要] (88) RICH HTML ^{NEW} PDF (3229 KB) (25)
☐	2181	透射光谱的水体亚硝酸盐含量模拟估算	 王彩玲, 王波, 纪童, 徐君, 剧锋, 王洪伟 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2181-06 2022 Vol. 42 (07): 2181-2186 [摘要] (66) RICH HTML ^{NEW} PDF (2457 KB) (29)
☐	2187	基于数字摄像的测量观测系统设计	 雷鸣, 孙玟玲, 聂凯, 刘旭林 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2187-07 2022 Vol. 42 (07): 2187-2193 [摘要] (62) RICH HTML ^{NEW} PDF (5227 KB) (22)
☐	2194	马达加斯加黄色方柱石的谱学特征研究	 丁薇, 陈全莉, 艾苏洁, 尹作为 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2194-06 2022 Vol. 42 (07): 2194-2199 [摘要] (60) RICH HTML ^{NEW} PDF (3764 KB) (43)
☐	2200	微区X射线荧光成像技术在岩心分析中的应用	 张启燕, 刘晓, 杨玠, 史维鑫, 高卿楠, 张弘, 邓晃 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2200-07 2022 Vol. 42 (07): 2200-2206 [摘要] (72) RICH HTML ^{NEW} PDF (7540 KB) (49)
☐	2207	叶绿素荧光分析技术在野生植物响应多环芳烃(菲)胁迫的应用研究	 丁俊男, 王慧, 于少鹏 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2207-06 2022 Vol. 42 (07): 2207-2212 [摘要] (72) RICH HTML ^{NEW} PDF (3009 KB) (28)
☐	2213	近五年拉曼光谱技术在宫颈癌中的研究进展	 申卓未, 李睿, 王杨, 许晓光, 肖祯 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2213-05 2022 Vol. 42 (07): 2213-2217 [摘要] (85) RICH HTML ^{NEW} PDF (1000 KB) (44)
☐	2218	高光谱成像的甜瓜嫁接愈合状态早期分类检测	 杨杰楷, 郭志强, 黄远, 高宏盛, 金科, 吴香帅, 杨杰 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2218-07 2022 Vol. 42 (07): 2218-2224 [摘要] (88) RICH HTML ^{NEW} PDF (3489 KB) (46)
☐	2225	Sentinel-2宽波段光谱指数预测拔节后受冻冬小麦减产率	 赵爱萍, 马浚诚, 武永峰, 胡新, 任德超, 李崇瑞 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2225-08 2022 Vol. 42 (07): 2225-2232 [摘要] (59) RICH HTML ^{NEW} PDF (3327 KB) (28)

☐	2233	农作物冠层光谱信息的施肥管理分区研究	陈浩, 王熙, 张伟, 王新忠, 狄小冬, 王畅 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2233-08 2022 Vol. 42 (07): 2233-2240 [摘要] (159) RICH HTML ^{NEW} PDF (5734 KB) (51)
☐	2241	采用光纤光栅级联结构实现光纤延迟线	王翀, 杜欢, 王静, 王青, 王景华 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2241-06 2022 Vol. 42 (07): 2241-2246 [摘要] (67) RICH HTML ^{NEW} PDF (4144 KB) (20)
☐	2247	采用特征融合的紫檀属内相似树种识别方法研究	王承琨, 赵鹏, 李祥华 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2247-08 2022 Vol. 42 (07): 2247-2254 [摘要] (55) RICH HTML ^{NEW} PDF (5324 KB) (39)
☐	2255	高光谱成像的三七粉质量等级无损鉴别	张付杰, 史磊, 李丽霞, 赵浩然, 朱银龙 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2255-07 2022 Vol. 42 (07): 2255-2261 [摘要] (75) RICH HTML ^{NEW} PDF (3671 KB) (51)
☐	2262	基于蚁群-遗传算法的光谱选择方法与应用	黄清, 薛河儒, 刘江平, 刘美辰, 胡鹏伟, 孙德刚 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2262-07 2022 Vol. 42 (07): 2262-2268 [摘要] (73) RICH HTML ^{NEW} PDF (2837 KB) (50)
☐	2269	基于端元可变的喀斯特地形复杂区石漠化信息提取	阮欧, 刘绥华, 罗杰, 胡海涛 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2269-09 2022 Vol. 42 (07): 2269-2277 [摘要] (51) RICH HTML ^{NEW} PDF (3945 KB) (22)
☐	2278	GF-6 WFV光谱植被指数模型的叶面积指数反演	王泉轩, 卢小平, 孟庆岩, 李国清, 王俊, 张琳琳, 杨泽楠 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2278-06 2022 Vol. 42 (07): 2278-2283 [摘要] (97) RICH HTML ^{NEW} PDF (4007 KB) (34)
☐	2284	结合DEM的红边-近红外植被指数提取城市植被信息	王泉轩, 卢小平, 李国清, 王俊, 杨泽楠, 周雨石, 冯志立 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2284-06 2022 Vol. 42 (07): 2284-2289 [摘要] (66) RICH HTML ^{NEW} PDF (3791 KB) (34)
☐	2290	均值+方差二维表征高光谱信息的苹果腐败预警方法	王志豪, 殷勇, 于慧春, 袁云霞, 薛书凝 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2290-07 2022 Vol. 42 (07): 2290-2296 [摘要] (60) RICH HTML ^{NEW} PDF (3484 KB) (29)
☐	2297	儿茶素与卵黄免疫球蛋白互作的多重光谱分析及抑菌性变化	张孟军, 刘丽莉, 杨协力, 郭净芳, 王浩阳 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2297-07 2022 Vol. 42 (07): 2297-2303 [摘要] (76) RICH HTML ^{NEW} PDF (2277 KB) (24)
☐	2304	典型作物残茬磷分子形态表征	辛鸿娟, 杨冬玲, 韩超群, 顾雪琪, 杨建军, 刘瑾, 陈源泉, 隋鹏 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2304-05 2022 Vol. 42 (07): 2304-2308 [摘要] (62) RICH HTML ^{NEW} PDF (1323 KB) (19)
☐	2309	基于基体效应校正和对应分析的便携式X荧光光谱法对土壤重金属的研究	郭金珂, 陆继龙, 司峻石, 赵威, 刘洋, 王天欣, 来雅文 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2309-06 2022 Vol. 42 (07): 2309-2314 [摘要] (77) RICH HTML ^{NEW} PDF (1945 KB) (46)
☐	2315	联合InSAR与PCA的北京平原地面沉降时空分析	何旭, 何毅, 张立峰, 陈毅, 蒲虹宇, 陈宝山 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2315-10 2022 Vol. 42 (07): 2315-2324 [摘要] (67) RICH HTML ^{NEW} PDF (13513 KB) (55)

微区X射线荧光成像技术在岩心分析中的应用

张启燕¹ 刘晓¹ 杨玠^{2,3}✉ 史维鑫¹ 高卿楠¹ 张弘¹ 邓晃¹

1. 自然资源实物地质资料中心 2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室 3. 中国地质大学(北京)科学研究院

摘要：微区X射线荧光(Micro-XRF)分析技术是通过微小的X射线光束照射样品，对样品进行原位成分观测的无损分析手段之一，具有灵敏度高、速度快和准确性高的特点。采用微区X射线荧光光谱仪(M6 JETSTREAM)对安徽铜陵冬瓜山铜矿床四段岩心样品进行面扫描，分析不同矿层共17种元素区域分布特征、空间分布规律及组合关系等，结果表明：(1)Cu和Fe两种成矿元素高值空间分布区域基本不重叠，S与Fe分布范围高度重叠，关系密切，微量元素Ni, Bi, Pb, Zn, Si, Na与Cu密切相关，而Ti, Al, K与Fe具有弱相关性；(2)垂向上，Fe元素含量随深度增加逐步增大，而Cu元素含量呈降低趋势，其他元素也随深度呈下降趋势；(3)元素分布受石炭纪中期海底喷流沉积成矿作用和岩浆热液成矿作用叠加改造作用明显；(4)该钴孔矿石矿物以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主，垂向上组合规律明显，脉石矿物以石英、石榴子石和透辉石为主。该技术通过分析元素空间分布规律、相关性以及矿物组合和分配关系等可对元素富集和运移以及对矿床的成矿机制、成因模式等地质环境和地质过程提供新认识和新证据。结合矿床地球化学特征的分布模式...
[更多](#)

关键词：微区X射线荧光；岩心分析；元素分布；冬瓜山铜矿；

基金资助：地质调查项目(DD20201113)资助；

专辑：基础科学

专题：地质学

分类号：P575.5

微区 X 射线荧光成像技术在岩心分析中的应用

张启燕¹, 刘 晓¹, 杨 玠^{2,3*}, 史维鑫¹, 高卿楠¹, 张 弘¹, 邓 晃¹

1. 自然资源实物地质资料中心, 北京 100083

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

摘 要 微区 X 射线荧光(Micro-XRF)分析技术是通过微小的 X 射线光束照射样品, 对样品进行原位成分观测的无损分析手段之一, 具有灵敏度高、速度快和准确性高的特点。采用微区 X 射线荧光光谱仪(M6 JETSTREAM)对安徽铜陵冬瓜山铜矿床四段岩心样品进行面扫描, 分析不同矿层共 17 种元素区域分布特征、空间分布规律及组合关系等, 结果表明: (1)Cu 和 Fe 两种成矿元素高值空间分布区域基本不重叠, S 与 Fe 分布范围高度重叠, 关系密切, 微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn, Si, Na 与 Cu 密切相关, 而 Ti, Al, K 与 Fe 具有弱相关性; (2)垂向上, Fe 元素含量随深度增加逐步增大, 而 Cu 元素含量呈降低趋势, 其他元素也随深度呈下降趋势; (3)元素分布受石炭纪中期海底喷流沉积成矿作用和岩浆热液成矿作用叠加改造作用明显; (4)该钻孔矿石矿物以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主, 垂向上组合规律明显, 脉石矿物以石英、石榴子石和透辉石为主。该技术通过分析元素空间分布规律、相关性以及矿物组合和分配关系等可对元素富集和运移以及对矿床的成矿机制、成因模式等地质环境和地质过程提供新认识和新证据。结合矿床地球化学特征的分析模式, 微量元素可作为寻找主矿种的指示元素, 为深部找矿提供依据。此外, 该技术能作为预分析技术快速筛选出感兴趣的信息和位置, 为后期各种更高精度的微区分析提供不同尺度、不同层次元素分布信息。

关键词 微区 X 射线荧光; 岩心分析; 元素分布; 冬瓜山铜矿

中图分类号: P575.5 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2200-07

引 言

微区 X 射线荧光(Micro X-ray fluorescence, Micro-XRF, μ XRF)分析主要通过激发源发射微小 X 射线束斑到样品, 通过荧光光谱分析元素分布一种无损分析技术。根据不同测试目的, 可将微区分析分为以成分分析为主的电子探针、离子探针、激光探针(包括激光光谱仪)等, 和以微观结构构造分析为主的扫描电子显微镜、分析电子显微镜、光电子谱仪等^[1]。电子探针、同步辐射 X 探针以及质子探针等的分析精度达到了微米-亚微米-纳米水平, 而以 X 微束的分析技术在毫米-亚毫米水平, 属于微-毫区分析技术^[2]。此外, 相较于其他微区分析方法, 由于 X 射线在空气中有着良好的穿透性, Micro-XRF 并不依赖高真空的样品仓, 因此可以用于大

尺寸(几十厘米)、含水样品的测试分析。微区 X 射线荧光装置在测量时将样品放置在样品台上, 激发 X 光束照射在样品上, 样品中的元素会激发出二次 X 射线荧光, 由于不同元素的 X 射线荧光能谱不同, 探测系统通过测量不同能谱与强度, 将收集到的信息转化为样品中各种元素的种类及含量。Micro-XRF 可为物质成分分析研究等方面, 提供不同尺度、不同层次需求的技术支撑^[2]。

近年随着各类测试仪器及显微技术的发展, 微区 X 射线荧光分析技术广泛应用于地质领域, 通过扫描样品获取其元素时序信息^[3], 分析岩心组分和特征变化^[4], 通过对沉积物样品扫描分析研究古气候、古地理、环境演化过程^[5], 通过对矿石样品扫描, 分析成矿元素的含量及分布特征, 揭示物质来源, 研究成矿过程和成因^[6]。此外, 该技术在矿石鉴定^[7-8]和硫化物蚀变特征研究^[9]等方面具有重要作用。元素

收稿日期: 2021-04-29, 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 地质调查项目(DD20201113)资助

作者简介: 张启燕, 1988 年生, 自然资源实物地质资料中心工程师 e-mail: zqy25105@163.com

刘 晓, 1984 年生, 自然资源实物地质资料中心工程师 e-mail: sea_251@163.com

张启燕, 刘 晓: 并列第一作者 * 通讯作者 e-mail: sinixyang@gmail.com

是地质研究的基本单位。各种元素在不同矿物相中的分布特征、分配系数不仅可为岩石学、矿物学、地球化学、岩石矿物成因与演化研究提供大量信息，而且对于元素在岩石矿物中的赋存状态、矿物加工与选冶研究也有重要意义^[10]。微区 X 射线荧光不仅可以获取样品表面信息，还可获取样品内部元素的分布特征^[11]。此外该技术不仅可以清晰刻画矿物形貌，也可以很好地显示常规测试中无法识别的矿物成因机制，并且结合同位素地球化学等方法，在地质年代划分和物源示踪、判别地质环境等方面也起到了重要作用^[12]。

1 实验部分

1.1 样品

长江中下游地区是我国主要斑岩型以及矽卡岩型铜矿的产地之一，铜陵矿集区在成矿复杂性、成矿规模以及成矿作用等方面均具有代表性，其中冬瓜山铜金矿床是目前该矿集

区内典型的“斑岩型-层控矽卡岩型-矽卡岩型”铜矿床(安徽省地质矿产局 321 地质队，安徽铜陵狮子山矿区冬瓜山铜矿床南段勘探地质报告，1995. 1-24)，其成矿地质背景、控矿因素、地质特征以及矿化特征等方面，在长江中下游地区具有典型性和代表性^[13]。冬瓜山矿床主要的成矿地层分布在二叠系和石炭系等。

本次样品取自冬瓜山铜矿床 ZK3801 钻孔，孔深 1 201.10 m，其中 490.20~1 160.15 m 内可观察到共有 10 层矿体，主要金属矿物为黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿。孔内可见石英闪长岩、角岩、矽卡岩、大理岩、硅质岩、细砂岩、石英砂岩等(安徽省地质矿产局 321 地质队。安徽省铜陵市冬瓜山铜矿接替资源勘查项目总体设计，2013. 1-73)。本次岩心样品分别从四个矿层部位获取，涉及地层为三叠系、二叠系和石炭系，岩心通过切割、研磨、抛光等手段，经过多次反复，制成薄片样品，尺寸约为 200 mm×50 mm×2 mm (表 1)。

表 1 岩心样品地质信息简表
Table 1 Geological information of core samples

样品名	起始深度/m	终止深度/m	样品尺寸/cm	地层	主要矿石矿物	主要脉石矿物
含铜角岩夹矽卡岩	492.23	492.40	17×5.0	三叠系下统小凉亭组	黄铜矿、黄铁矿	石英、石榴子石、透辉石、绿泥石、方解石
含铜硅质岩	852.68	852.90	22×4.5	二叠系下统栖霞组	黄铜矿	石英、石榴子石、透辉石
含铜矽卡岩	1 124.94	1 125.10	16×4.6	石炭系中、上统黄龙、船山组	黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿	石榴子石、透辉石、石英、绿泥石
含铜磁黄铁矿石	1 156.70	1 156.90	20×4.7	石炭系中、上统黄龙、船山组	磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿	绿泥石、透闪石

1.2 方法

实验在中国地质大学(北京)完成，采用德国布鲁克(Bruker)公司研发的微区 X 射线荧光光谱仪(M6 JET-STREAM)进行扫描。该设备可对大尺寸样品进行微区分析，是一种跨越宏观-微观尺度的分析设备。该仪器有效面积为 50 mm²、具有能量分辨率小于 145 eV(@MnK α)的硅漂移探

测器，装备有微束斑的直径低至 50 μ m 毛细管，可对 800 mm×600 mm 样品进行 Na 到 U 元素的面扫描。实验装置采用铈(Rh)靶 X 射线光管，电压为 50 kV，电流 600 μ A，光斑大小 50 μ m，每点时长约 10 ms 左右。本次数据使用 Golden Software Surfer 13 软件进行处理。具体参数如表 2 所示。

表 2 微区扫描参数一览表
Table 2 Scan parameters of Micro-XRF

样品名	宽/ pixel	高/ pixel	总像素/pixel	单像素大小/ μ m	停留时间/ (ms·pixel ⁻¹)	移动速度/ (mm·s ⁻¹)
含铜角岩夹矽卡岩	3 480	998	3 473 040	50	10	5
含铜硅质岩	4 545	901	4 095 045	50	8	6.3
含铜矽卡岩	3 398	932	3 166 936	50	8	6.3
含铜磁黄铁矿石	4 245	937	3 977 565	50	10	5

2 结果与讨论

本实验依次对四块岩心样品进行面扫描，共扫描分析了 Cu, Fe, S, Mn, Ni, Pb, Bi, Na, Os, P, Ti, V, Zn, Al,

Ca, K, Si 共 17 种元素，具体扫描结果如图 2—图 5 所示。

2.1 元素空间分布规律

从扫描结果可以看出，平面上，主要元素(Fe, Cu 和 S)呈条带状、团块状分布，而微量元素(Ni, Bi, Pb, Zn 等)呈零星状、脉状(图 1)分布，非金属元素(Al, Na 等)较均匀分

布。垂向上, Fe 含量随深度增加而增大, 而 Cu 和其他微量元素也随深度呈下降趋势。

Fe 和 Cu 呈高强度、大面积分布于岩心中, 两者高值区域分布范围基本不重叠, 分布特征具有差异性。S 同样呈大面积、高强度分布, 与 Fe 分布特征高度相似, 相关系数达 0.94, 而与 Cu 具有弱相关性, 说明该岩心金属矿物以含铁硫化物为主。在含铜硅质岩中 S, Fe, Cu 分布范围和分布特征基本一致, 三者密切相关, 该岩心样品金属矿物可能以黄铜矿为主。微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn 与 Cu 关系密切, 而非金属元素 Si 和 Na 与 Cu 呈正相关, 相关系数均在 0.9 以上, Al, Ca 与 Cu 具有弱相关性, K 与 Cu 基本没有相关性, 而 Ti, Al, K 与 Fe 具有弱相关性, Si, Na, Ca 与 Fe 元素呈负相关。元素空间分布特征及相关性分析可以反映成矿环境和成矿作用, 比如 K 与 Fe 相关可能是由于酸性花岗岩岩浆热液的交代作用造成的, 而 Na 与 Cu 相关可能与中性岩浆热液活动或与早期的沉积成矿活动有关, 这种不同的相关性组合反映了该矿床多阶段的叠加成矿过程, 此外高值区域 Ca, Fe, Ti, Mn 等元素富集, 可能表明矽卡岩(石榴子石或透辉石)存在。

微区 X 射线荧光光谱仪对岩心样品进行面扫描, 可直接显示各元素分布特征, 反映元素之间的空间相关性, 通过分析元素空间分布规律及相关性, 可为元素组合和配比关系提供依据, 并在元素富集和运移以及成矿规律等方面均有指示性意义。此外, 微量元素结合同位素元素分析, 在地质年代划分和物源示踪、判别地质环境等方面具有重要作用。

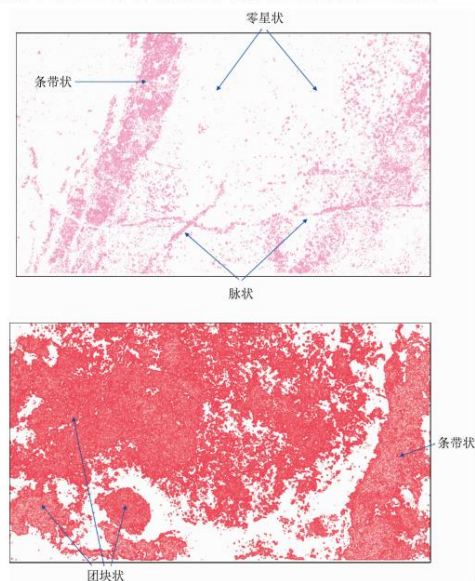


图 1 元素分布示意图

Fig. 1 The maps of element distribution

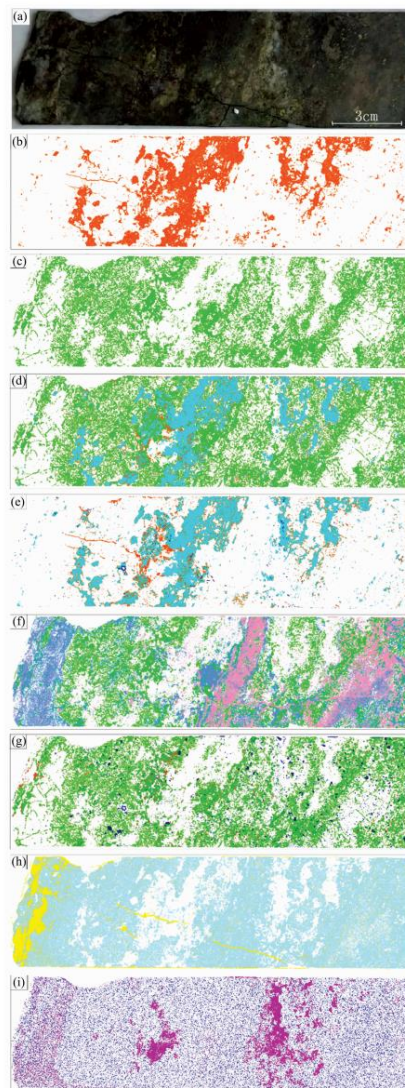


图 2 含铜角岩夹矽卡岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)、Ni 元素(蓝色)和 S 元素(青色); (f): Cu 元素(绿色)、Mn 元素(蓝色)和 Ti 元素(粉色); (g): Cu 元素(绿色)、Ni 元素(蓝色)、V 元素(黑色)和 Zn 元素(红色); (h): Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (i): Al 元素(蓝色)和 Si 元素(紫红色)

Fig. 2 Element distribution map of copper-bearing hornstones with skarn breccia

(a): Photo of sample; (b)–(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

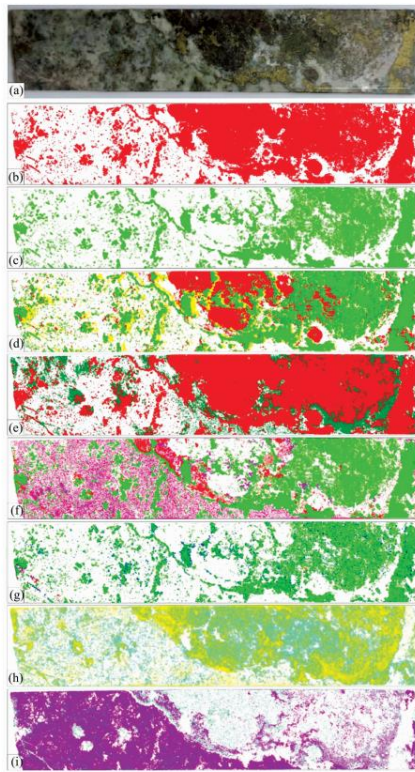


图3 含铜硅质岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)和 Mn 元素(绿色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(粉红色)和 Bi 元素(紫色); (g): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(蓝色)和 Pb 元素(红色); (h): Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (i): Na 元素(绿色)和 Si 元素(紫红色);

Fig. 3 Element distribution map of copper-bearing siliceous rock

(a): Photo of sample; (b)–(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

2.2 矿物组合关系分析

通过研究各元素空间分布规律以及元素之间的组合和配比关系,可以看出铜陵冬瓜山矿床以金属硫化物为主。结合矿物含量分析、比例组成及镜下矿物鉴定,本次岩心样品的主要矿石矿物从上到下依次为黄铁矿+黄铜矿,黄铜矿,磁黄铁矿+黄铁矿+黄铜矿,磁黄铁矿+黄铁矿+磁铁矿,矿石矿物以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主,其次为磁铁矿,少量方铅矿、闪锌矿等其他矿物,常见黄铜矿交代磁黄铁矿和黄铁矿等硫化物形成环斑结构。脉石矿物以石英、石榴子石和透辉石为主,少量绿泥石、方解石及透闪石等。

根据前人研究冬瓜山成矿作用经历了两个阶段:第一成矿阶段,在石炭纪中期海底喷流作用形成了块状硫化物矿床,

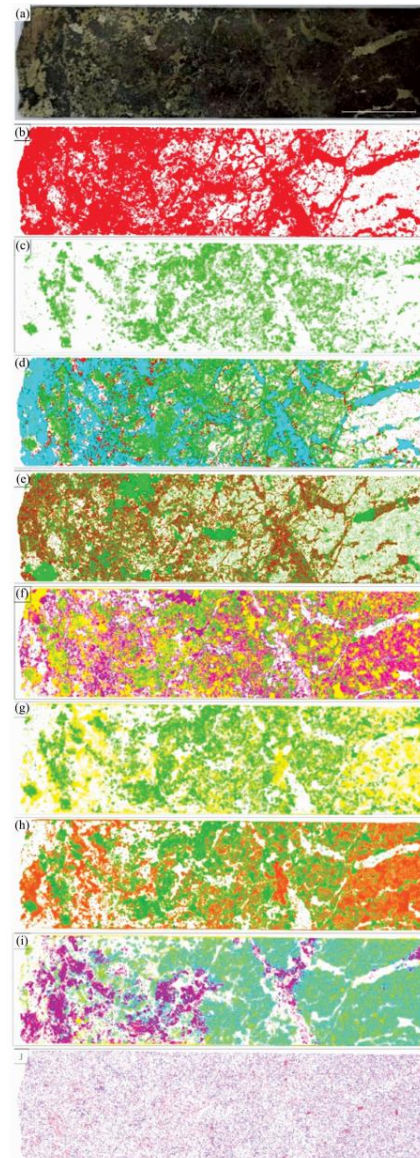


图4 含铜矽卡岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)和 Ti 元素(绿色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(黄色)和 Mn 元素(粉色); (g): Cu 元素(绿色)与 Bi 元素(黄色); (h): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(紫色)和 Pb 元素(橙色); (i): Si 元素(紫红色)、Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (j): Al 元素(蓝色)和 Na 元素(红色)

Fig. 4 Element distribution map of copper-bearing skarn

(a): Photo of sample; (b)–(j): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

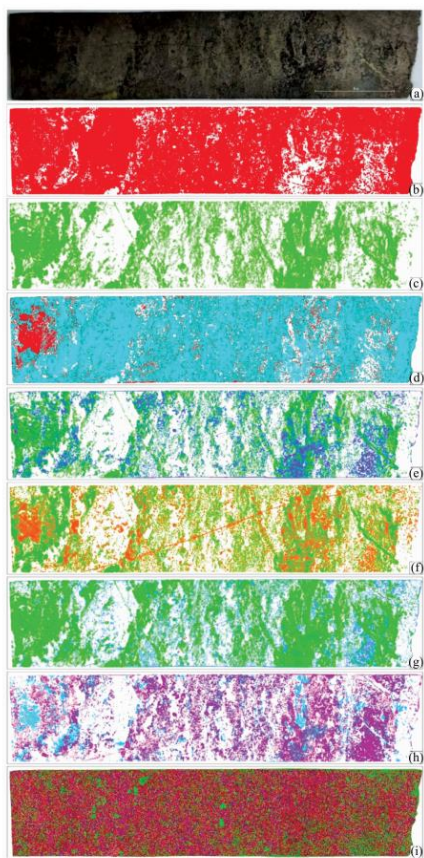


图 5 含铜磁黄铁矿石元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(红色)和 Pb 元素(蓝色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(蓝色)和 Mn 元素(橙色); (g): Cu 元素(绿色)与 Ti 元素(红色)和 Bi 元素(蓝色); (h): Si 元素(紫红色)和 Ca 元素(青色); (i): Al 元素(蓝色)、K 元素(绿色)和 Na 元素(红色)

Fig. 5 Element distribution map of copper-bearing pyrrhotite ore

(a): Photo of sample; (b)—(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

主要是含铁硫化物;第二成矿阶段,随着燕山期岩浆侵入上升,一方面热液与围岩互相作用发生围岩蚀变,形成矽卡岩型和斑岩型矿体,另一方面岩浆热液对块状硫化物矿体进行改造,致使块状硫化物矿物富集铜等成矿物质^[13-14]。黄铜矿矿化与围岩蚀变密切相关,在岩体接触带附近的矿石中黄铜矿较多,而远离接触带矿石中黄铜矿逐渐减少^[14]。通过元素相关性以及矿物组合关系分析显示,含铜矽卡岩和含铜磁黄

铁矿石可能经历成矿第一阶段,而含铜角闪岩夹矽卡岩和含铜硅质岩可能经历成矿第二阶段。

微区 X 射线荧光光谱仪可以进行线扫描和面扫描,线扫描主要显示不同元素之间的线性关系,为组分特征判别提供依据,而面扫描可以显示各元素之间的组合和配比关系,为成矿机制等地质过程提供新证据^[1]。通过本次微区分析结果,可为冬瓜山成矿模式和成矿阶段等方面提供更多依据。

2.3 微量元素识别意义

微量元素在古环境研究、岩浆分异演化、变质岩原岩恢复、判断物质来源以及矿床成因和地质过程研究等方面具有重要意义。本次微区 X 射线荧光光谱仪除了识别主要元素(Cu, Fe 和 S)之外,还识别了部分微量元素(Mn, Ni, Ti, Zn, Pb, Bi, Os, P 和 V 等元素)。经分析发现,微量元素含量随深度的增加而呈下降趋势,微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn, Si, Na 与 Cu 密切相关,Al, Ca 与 Cu 具有弱相关性,而 Ti, Al, K 与 Fe 具有相关性。在铜陵冬瓜山矿床,从早期的石英-硫化物阶段,阳离子以 K^+ , Na^+ 为主,到了成矿晚期,石英-碳酸盐阶段,阳离子以 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ 为主。由于 Ca^{2+} 的加入,并且不断消耗流体中的 CO_2 ,从而形成大量方解石脉,并且由于富碱(K^+ , Na^+)和 Cl^- , SO_4^{2-} 热液的作用下,致使围岩中的铜元素活化转移,并在合适的位置和环境下,铜等成矿物质分解并沉积富集成矿^[15]。因此 Ca 和 Na 富集可以作为成矿晚期与黄铜矿富集密切相关的标志之一。此外在该矿床中与 Cu 密切相关的微量元素 Ni, Bi, Pb 和 Zn,可作为深部找矿的依据之一。

通过分析微量元素与主要元素之间相关性和分布规律,可作为寻找主要矿种的指示元素。在冶炼过程中作为伴生元素进行综合利用,提高矿床经济价值。

3 结 论

微区 X 射线荧光光谱仪在不破坏样品的前提下,可以对大尺寸样品进行元素扫描成像,对样品进行快速分析。通过分析元素空间分布规律、相关性、矿物组合和分配关系等对矿床的成矿机制、成因模式提供新认识、新证据。分析微量元素特征及相关性,结合其他分析技术在元素示踪、地质环境研究等,分析不同成矿阶段各个元素之间的相关性以及矿物成分、结构和构造的微观变化,对元素富集和运移以及沉积、演化和形成的物理化学环境和地质过程提供新依据。与电子探针、扫描电镜等更小面积更高精度仪器相比,该技术可快速筛选出所需的信息和位置,操作简单,人员要求不高,可以作为前期筛选各种精细参数的手段之一。

该技术在停留时间与测量精度和效率之间存在矛盾,扫描过程中每点停留时间越短,扫描总时长越短,效率越高,且可以减少扫描时间过长带来的环境干扰。而驻留时间越长,越有利于低强度的能谱峰被检测到,有助于信号强度的提升,从而减小误差,但效率越低。

References

- [1] ZHANG Wei, ZHOU Xia-qing, SUN Cong-cong, et al(张伟, 周夏青, 孙聪聪, 等). Shandong Land and Resources(山东国土资源), 2019, (10): 38.
- [2] WAG Yi-yan, GAO Xin-hua, WANG Yi-min, et al(王伟亚, 高新华, 王毅民, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2020, (10): 86.
- [3] Tsuji K, Tsutsumimoto K, Nakano K. Advances in X-Ray Analysis, 2006, 49: 296.
- [4] Sorrel P, Oberhansli H, Boroffka N, et al. Quaternary Research, 2007, 67(3): 371.
- [5] Boning P, Bard E, Rose J. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2007, 8(5): Q05004.
- [6] YANG Li-hui, ZHENG Xiang-min, YE Wei(杨立辉, 郑祥民, 叶玮). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(6): 1955.
- [7] LIANG Shu-ting, LIU Yu-chun, LIU Tian, et al(梁述廷, 刘玉纯, 刘瑱, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2013, 33(11): 27.
- [8] LIU Chun, ZHEN Hong-tao, LIANG Shu-ting, et al(刘春, 郑洪涛, 梁述廷, 等). Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry(矿物岩石地球化学通报), 2019, 38(1): 169.
- [9] Dominique Genna, Damien Gaboury. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 108: 131.
- [10] ZHU Jie-qing, WANG Yi-min(朱节清, 王毅民). Rock Min. Anal. (岩矿测试), 1991, 20(4): 262.
- [11] XU Tao, LUO Li-qiang(许涛, 罗立强). Rock Min. Anal. (岩矿测试), 2011, (3): 375.
- [12] LIU Dun-yi(刘敦一). Geological Bulletin of China(地质通报), 2003, 22(3): 145.
- [13] WANG Yue, ZHU Xiang-kun, MAO Jing-wen, et al(王跃, 朱祥坤, 毛景文, 等). Acta Geologica Sinica(地质学报), 2014, 88(12): 2413.
- [14] LU Jian-jun, GUO Wei-min, XU Zhao-wen(陆建军, 郭维民, 徐兆文). Acta Mineralogy Sinica(矿物学报), 2007, 27(z1): 30.
- [15] HUANG Shun-sheng, XU Zhao-wen, NI Pei(黄顺生, 徐兆文, 倪培). Contributions to Geology and Mineral Resources Research(地质找矿论丛), 2003, (1): 34.

Application of Micro X-Ray Fluorescence Imaging Technology in Core Analysis

ZHANG Qi-yan¹, LIU Xiao¹, YANG Jie^{2,3*}, SHI Wei-xin¹, GAO Qing-nan¹, ZHANG Hong¹, DENG Huang¹

1. Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
3. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract Micro-XRF analysis technology is one of the non-destructive analysis methods that use tiny X-Ray beams to irradiate samples and then analyze fluorescence spectra and observe the components of the samples. It has the characteristics of high sensitivity, high efficiency and high accuracy. In this experiment, The Micro-XRF spectrometer (M6 JETSTREAM) was used to scan the core samples of the ZK3801 drilling in Dongguashan copper mine, Anhui province. It can analyze the distribution characteristics and combination relationships of 17 elements in different parts. The results show that (1)The high-value spatial distribution regions of Cu and Fe do not overlap basically, and the distribution ranges of S and Fe are highly overlapped, Ni, Bi, Pb, Zn, Si and Na are closely related to Cu, while Ti, Al and K have a weak correlation with Fe; (2)In the vertical direction, as increasing depth, the content of Fe increases gradually, while the content of Cu and other elements shows a decreasing trend; (3) The element distribution is modified by the middle Carboniferous submarine jet sedimentation and mineralization and magmatic-hydrothermal mineralization; (4) The ore minerals of the drill hole are mainly pyrrhotite, chalcopyrite and pyrite, with a certain combination law in the vertical direction. The gangue minerals are mainly quartz, garnet and diopside; Analyzing the spatial distribution of elements, correlations, and mineral combinations and distribution relationships can provide new understanding and new evidence for the enrichment and migration of elements, mineralization mechanisms, genetic models, and environmental, geological processes. Moreover, combined with the distribution pattern of the geochemical halo of the deposit, trace elements can be used as indicator elements to find the main mineral species and provide a basis for deep prospecting. Additionally, it can filter out the information and location that we are interested in quickly. It can provide powerful technical

support for different scales and different levels of requirements for screening various fine parameters in the later stage.

Keywords Micro X-ray fluorescence; Core analysis; Element distribution; Dongguashan Copper Mine

(Received Apr. 29, 2021; accepted Aug. 25, 2021)

ZHANG Qi-yan and LIU Xiao: joint first authors

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社