基于同步辐射 μXRF 的烧结烟尘微量元素测定与相关性分析

王 翠，吕 斐，唐鸿鹄，曹学锋，韩海生，孙 伟
（中南大学 a. 资源加工与生物工程学院；b. 金属资源开发利用碳减排教育部工程研究中心，湖南 长沙 410083）

摘要： 本文采用同步辐射 X 射线荧光光谱微区分析法（μXRF）对铁矿烧结烟尘进行多元素分析，得到 16 个元素（Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Hg、Na、K、Rb、Cs、Ca、F、S、Cl）的特征峰强度，分别构建出各元素相对强度的微区二维空间分布图；并采用主成分分析（PCA）对所选元素进行降维分类，进而降低利用相关性分离原理进行各元素分布特征解析时的难度。研究发现，部分元素间存在很强的相关性，第一主成分中 Fe 和 Mn 相关性系数达到 0.807，第二主成分中 Cu、Zn 和 As 之间相关性系数在 0.651～0.664 之间。根据元素之间的线性相关关系可建立起宏量元素与微量元素之间的关系，有望预测烧结烟尘中主要有价元素、毒害元素分布特点，为铁矿烧结烟尘中微量元素的分析提供借鉴与参考。

关键词： X 射线荧光光谱微区分析；铁矿；烧结；烟尘；微量元素；主成分；相关性
中图分类号： O657.34；P575.4；X757 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）03－0034－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.037

Determincition and comelation analysis of trace elements in sintering dust based on synchrotron radiation μXRF

WANG Cui，LÜ Fei，TANG Honghu，CAO Xuefeng，HAN Haisheng，SUN Wei
（a. School of Minerals Processing and Bioengineering；b. Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources，Central South University，Changsha 410083，Hunan，China）

Abstract： The synchrotron radiation X-ray fluorescence spectroscopy micro-analysis（μXRF） is used to perform multi-element analysis of iron ore sintering dust，and the characteristic peak intensities of 16 elements，including Fe，Mn，Cu，Pb，Zn，Ag，As，Hg，Na，K，Rb，Cs，Ca，F，S，Cl，are obtained，and two-dimensional spatial distribution map of the relative intensity of each element is constructed separately. Principal component analysis（PCA） is used to classify the selected elements in dimensionality reduction；therefore，the difficulty of analyzing the distribution characteristics of each element by using the principle of correlation separation is reduced. It is found out that a strong correlation exists between some elements，the correlation coefficient between Fe and Mn in the first principal component reaches 0.807，and the correlation coefficient between Cu，Zn and As in the second principal component is between 0.651～0.664. According to the linear correlation between elements，the relationship between macro elements and trace elements can be established，and it is expected to predict the distribution characteristics of the main valuable elements and toxic elements in sintering dust，which can provide references for the analysis of trace elements in iron ore sintering dust.

收稿日期： 2022－05－16；**修回日期：** 2022－07－24
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（52004335）；湖南省自然科学基金资助项目（2023JJ20071）
作者简介： 王 翠（1998—），女，硕士研究生，从事固体废弃物综合利用方面的研究。
通信作者： 唐鸿鹄（1988—），男，副教授，硕士生导师，从事固体废弃物综合利用及浮选理论与工艺方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Key words: micro-analysis of X-ray fluorescence spectroscopy; iron ore; sintering dust; trace element; principal component; relevance

目前，全球约 70% 产量的钢铁通过高炉和碱性氧气炉生产[1]。铁矿烧结是制备高炉用铁矿石粉最经济和最广泛使用的附聚工艺，是钢铁冶炼的重要环节。但烧结过程中排放的烟气会对环境造成严重的污染，是含有微量元素污染气体和颗粒物的主要排放源[2]，包括烟尘、有毒气体、挥发性有机物等[3]，通常采用静电除尘器或布袋除尘等方法进行尾气处理[4]。除尘所得产品即为烧结烟尘，其粒度微细、组成复杂、有害组分多，同时也含有大量的铅、汞、砷等重金属元素[5]。随着各项环境治理政策的出台，烧结过程中微量元素和细颗粒物的排放和监管也愈发严格，如何对烧结烟尘中微量元素进行测定和评估、回收利用已成为今后工作研究的重点。

在过去几年中，原子吸收法、滴定法、等离子体发射光谱法等被广泛用于测定和评估钢铁烧结烟尘中微量元素的含量，然而这些化学方法需要特定的溶剂溶解样品、不仅破坏了样品结构，也造成了严重的环境污染。相比于化学方法，利用同步辐射装置进行 X 射线荧光光谱微区分析具有操作简单、分析迅速、检测限低、灵敏度高以及高空间分辨率的优势，可以在不改变样品形态的情况下生成大量不同化学元素的空间分布图，为微量元素分析、矿石物相分析以及材料成分分析等提供了技术条件。梁述廷等[6]利用 μXRF 分析了铅锌矿石标本，生成了矿石元素分布图，解决了矿物在光学显微镜下鉴定困难的问题。KHAOKAEW 等[7]应用 μXRF 对从锌矿区的水稻土壤样品分析，结果显示 Cd 与 Ca 元素的分布显著相关，推测 Cd 与 Ca 可能存在于一个矿相。吴应荣等[8]应用 μXRF 分析了头发和病变组织中的微量元素，研究了细胞内元素在条件下的变化。μXRF 具有较高的测试精度和灵敏度，可以在微米水平得到痕量组分的定量数据，是各个领域关注的热点，该技术早已成为元素成分的重要分析测试方法，广泛应用于地球化学、环境科学、医学、组织化学以及工业等领域。

烧结粉尘是一种复杂的混合物，来源于化学成分复杂的烧结原料，例如铁矿石、燃料、助燃剂和炼钢残渣等，涉及元素种类繁多[9-10]。由于元素种类的多样性以及元素与元素之间相互作用的复杂性，应用传统方法的多变量统计分析方法对烧结烟尘进行分析变得更加困难。主成分分析(PCA)是一种传统的多变量降维分析方法，可以对元素之间的相互依赖性进行探索性评价，表明微量成分之间的关联，常用于处理和解释地球化学和其他类型的空间数据[11-12]。

本研究旨在采用同步辐射 μXRF 对烧结烟尘进行多元素分析，得到钢铁烧结烟尘中有价元素的特征峰强度，重建烧结烟尘中元素映射图像；采用主成分分析(PCA)对烧结烟尘中微量元素进行降维分类，构建相关性分析模型，降低分析复杂度；最后利用相关性矩阵对元素之间的相关性进行检验，建立起微量元素与宏量元素之间的关系，难测元素与易测元素之间的关系。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用铁矿烧结烟尘样品来自于湖南某钢铁企业非脱硫电场的一周混合样中取出的代表性样品，成分分析结果如表 1 所示。由表 1 可知，该烟尘主要组成元素有 Fe、K、Na、Cl 等，主要成分有氧化铁、氯化钾、氯化钠等。

表 1　铁矿烧结烟尘样品主要元素分析(质量分数)

Table 1　Analysis of main elements of sintering dust used in the experiment　%

Cl	K	Fe	O	Na	Ca	Pb	F	Cu	Rb	Zn	Mn
28.60	20.97	17.01	15.54	7.59	4.11	1.58	0.73	0.34	0.19	0.17	0.07

1.2　试验仪器与数据处理

同步辐射 μXRF 在同步辐射装置 4W1B 光束线上进行。该装置运行 2.5 GeV 电子，电流为 150～250 mA；利用 W/B4C 双多层单色器(DMM)在 15 keV 下对入射的 X 射线能量进行单色，并利用多毛细管透镜聚焦到直径为 50 μm 的范围内；

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用步进方式实现二维映射：在精密电机驱动平台上进行100 μm步进扫描；使用Si(Li)固体探测器检测X射线荧光发射线，时间控制在小于30%；使用PyMca软件包[13]进行数据还原和处理。

为便于测试，自制中心具有圆孔的方形载样玻璃薄片，玻璃片边长为20 mm，厚度为0.3 mm，中央圆孔孔径为5 mm。测试时，将样品粉末至于玻璃薄片的圆孔内，两侧依次用Scotch测试胶带固定。μXRF测试光斑直径为50～100 μm，测试时固定光斑移动步长为0.1 mm，探测光斑沿X轴和Y轴呈之字形进行逐点测试。

首先使用4W1B荧光采集系统进行元素信息采集，然后利用μXRF对所选微量元素进行测定，借助PyMca对数据进行能量标定、非线性数据拟合、批处理操作计算X射线荧光光谱中每个元素的积分强度，采用电离室计数归一法得到目标元素的元素特征峰强度。应用统计方法对所选微量元素进行元素分类和相关性分析。

1.3 检测结果分析原理

1.3.1 μXRF测定原理

本文利用同步加速器的μXRF分析进行宏量与微区样品多元素分析，已成功用于研究元素之间的关联性。当高能X射线照射到样品表面时产生荧光效应，样品中不同元素被激发后放出具有不同特定能量的特征X射线，通过测定特征X射线的能量，便可以确定相应元素的存在，而特征X射线的强弱则代表该元素的含量。对于尚未准确标定的特征X射线，不能直接根据X射线强度来比较不同元素含量的高低，但仍可根据两个元素特征峰强度的相对变化趋势进行元素之间的相关性分析。

1.3.2 主成分分析原理

主成分分析是一种多元统计分析技术，是将多个相关关系复杂的单一指标变量压缩为几个与原始变量相关且尽可能保留原始变量相关信息的综合指标变量，也就是主成分，实现对原始数据的高效率压缩[14-15]。每个主成分都是各个原始变量的线性组合，并且各个主成分相互独立[16]。本文采用SPSS软件对烧结烟尘进行R型主成分分析，降低样品维度，将样品分为几个特殊的类别，可实现简化分析步骤的目的。

1.3.3 相关性分析原理

皮尔逊相关性是度量两个变量间线性相关程度的手段之一，其数值为两变量间的协方差和标准差的商。相关系数大小介于-1到1之间，绝对值越大，则相关性越强，当其绝对值等于1时，为完全线性相关。

根据主成分分析得出的几个类别，借助绘图软件重建烧结烟尘中元素映射图像，应用皮尔逊相关系数来研究烧结烟尘元素之间的线性相关关系，拟建立起微量元素与宏量元素之间的关系、难测元素与易测元素之间的关系。

2 结果与讨论

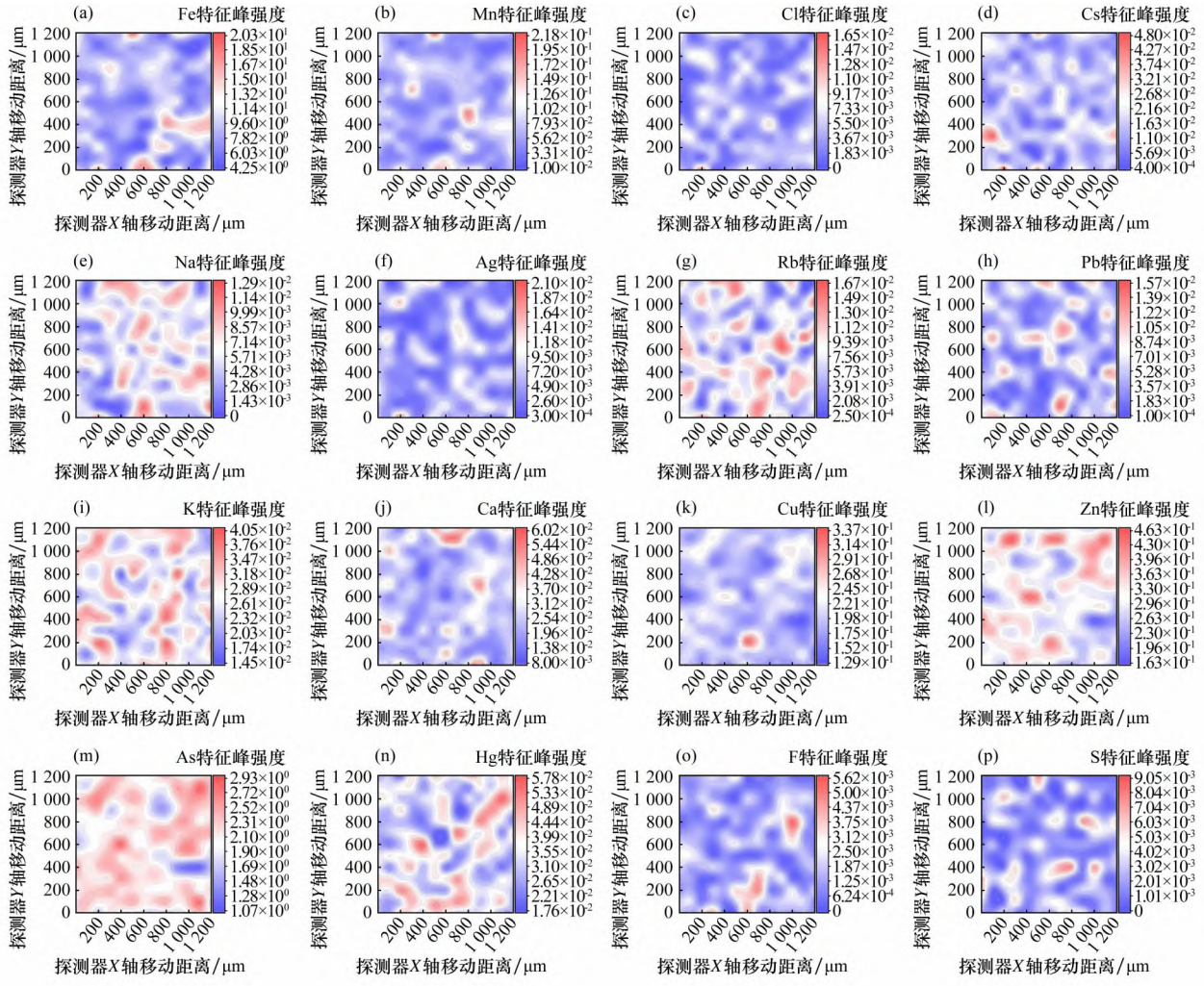
2.1 μXRF元素分布图

试验采用同步辐射μXRF进行铁矿烧结烟尘样品中Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Ag、As、Hg、Na、K、Rb、Cs、Ca、F、S和Cl共16种元素的二维探测扫描，所得结果经分析处理后，绘制出样品中各元素的空间分布图，结果如图1所示。其中，每个分布图右边的刻度显示了归一化峰强度，元素峰强度以颜色凸显，从蓝色到红色表示元素特征峰强度逐渐增强。由于元素含量和对荧光X射线的吸收强度不同，导致不同元素的特征峰强度区间差异较大。

2.2 主成分分析

以铁矿烧结烟尘中每种元素的特征峰强度作为分析的变量，对整个数据集采取主成分分析法降维分类，结果如表2所示。特征值被用作表征主成分对原始变量(烧结烟尘中各种元素)的代表力度，特征值越大，对原始变量的代表力度越大，通常将特征值大于1作为主成分的选择标准[16]。由表2可知，第一主成分的特征值为3.890，贡献率为24.314%，即第一主成分可以代表全部元素24.314%的信息。第二个主成分特征值为3.129，贡献率为19.558%。第三主成分特征值为1.382，贡献率为8.638%。第四主成分特征值为1.200，贡献率为7.503%。提取前4个主成分，其累计方差贡献率为60.013%，表明其可代表烧结烟尘中60.013%的信息，因为烟尘组成的复杂，部分元素

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) Fe; (b) Mn; (c) Cl; (d) Cs; (e) Na; (f) Ag; (g) Rb; (h) Pb; (i) K; (j) Ca; (k) Cu; (l) Zn; (m) As; (n) Hg; (o) F; (p) S

图 1　烧结烟尘中元素的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution images of elements in sintering dust

表 2　主成分分析特征值和总体方差分析

Table 2　Principal component analysis characteristics and population variance analysis

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3. 890	24. 314	24. 314	9	0. 614	3. 835	84. 090
2	3. 129	19. 558	43. 871	10	0. 601	3. 759	87. 848
3	1. 382	8. 638	52. 509	11	0. 545	3. 403	91. 252
4	1. 200	7. 503	60. 012	12	0. 468	2. 922	94. 174
5	0. 955	5. 967	65. 979	13	0. 425	2. 659	96. 832
6	0. 795	4. 971	70. 950	14	0. 237	1. 483	98. 316
7	0. 763	4. 769	75. 719	15	0. 155	0. 966	99. 282
8	0. 726	4. 535	80. 255	16	0. 115	0. 718	100. 000

之间联系较弱，累计方差贡献率不高，但对样本信息的解释程度尚可，因此选择了前 4 个主成分。

表 3 为主成分的系数矩阵，其代表各元素在各主成分上的载荷，即元素和主成分之间的相关系数，对于一个变量而言，荷载绝对值越大，其与主成分的关系越密切。由于主成分分析是一种

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

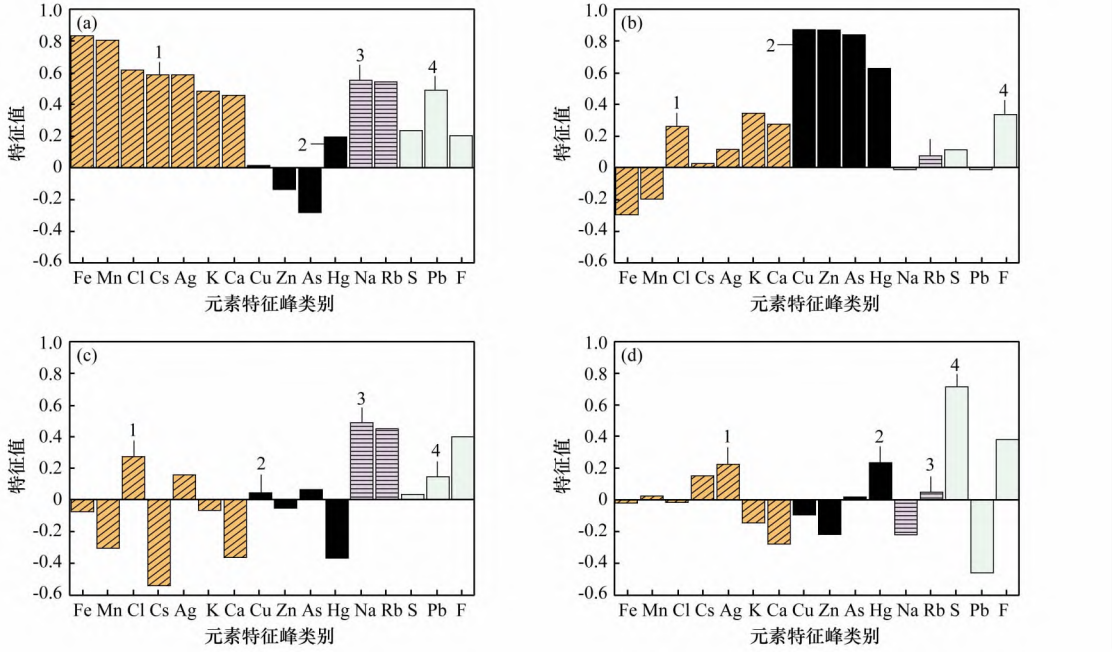
表 3 元素与主成分之间相关性的成分矩阵

Table 3 Component matrix of correlations between elements and principal components

元素	主成分			
	1	2	3	4
F	0.197	0.333	0.392	0.379
Na	0.550	−0.010	0.484	−0.222
S	0.230	0.108	0.030	0.713
Cl	0.613	0.257	0.270	−0.011
K	0.482	0.342	−0.069	−0.141
Ca	0.453	0.271	−0.367	−0.282
Mn	0.801	−0.197	−0.308	0.022
Fe	0.833	−0.299	−0.076	−0.022
Cu	0.006	0.871	0.041	−0.096
Zn	−0.137	0.867	−0.059	−0.218
As	−0.285	0.838	0.064	0.012
Rb	0.539	0.073	0.442	0.045
Ag	0.584	0.106	0.152	0.222
Cs	0.586	0.024	−0.545	0.147
Hg	0.194	0.626	−0.368	0.233
Pb	0.484	−0.014	0.140	−0.464

矩阵变换过程，并不要求所有主成分都具有实际意义。由表 3 可知，Fe、Mn、Cl、Ag、Cs 在第一主成分中的绝对值较大，与第一主成分的相关性较高，故作为第一主成分的主要指标。Cu、Zn、As 和 Hg 在第二主成分中的绝对值较大，为第二主成分的主要指标。Na、Cs 和 Rb 在第三主成分中的绝对值较大，S、Pb 和 F 在第四主成分中的绝对值较大，分别为第三主成分和第四主成分的主要指标。

可见，通过主成分分析把 16 个元素压缩为代表不同元素信息的四维因子，即每个元素在 4 个主成分上的载荷值可以看作一个四维向量。图 2 给出了向量的方向和向量的模，柱形图的方向代表向量的方向，柱形图高度为向量的模。结合以上分析，由图 2 可知，每个主成分代表元素的矢量方向可能相同，若元素之间的矢量方向相同则可能存在某种程度的相关关系，例如 Mn 和 Fe，Cu、Zn 和 As 它们在 4 个主成分上的方向和比例大致相同；若属于不同主成分的特征元素，它们在矢量的各个分方向上比例则不一致，故两者所指的矢量方向不同或相反，两者之间存在的联系较弱，例如 Fe 和 Cu、Fe 和 As 分别属于两个不同主成分的代表元素，它们在四个主成分上的方向和占比不相同。



(a) 第一主成分特征值；(b) 第二主成分特征值；(c) 第三主成分特征值；(d) 第四主成分特征值

1—第一主成分代表元素；2—第二主成分代表元素；3—第三主成分代表元素；4—第四主成分代表元素。

图 2 代表性元素在各主成分上的分配情况

Fig. 2 Allocation of elements in principal components

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3　皮尔逊相关性分析

本文基于主成分分析的结果，进行了各主成分中代表性元素的皮尔逊相关性分析。

2.3.1　第一主成分代表性元素相关性

对比第一主成分的代表元素(Fe、Mn、Cl、Cs、Ag)的空间分布图存在明显的相似性，如图 1 中 Fe 和 Mn 的空间分布图所示，在图中分布着几个 Fe 的特征峰强度较高的区域，虽然 Mn 的质量浓度远低于 Fe，但 Mn 的空间分布与 Fe 相似，在对应位置也存在 Mn 的高质量浓度区域。通过比较每个元素的特征峰强度值可以确定不同元素之间的皮尔逊相关系数，图 3 显示了 Fe 元素和 Mn 元素的特征峰线性拟合结果，发现两者的线性程度也比较好，Fe 和 Mn 皮尔逊相关系数为 0.807，表明 Fe 和 Mn 的元素之间的相关性很强且呈正相关。

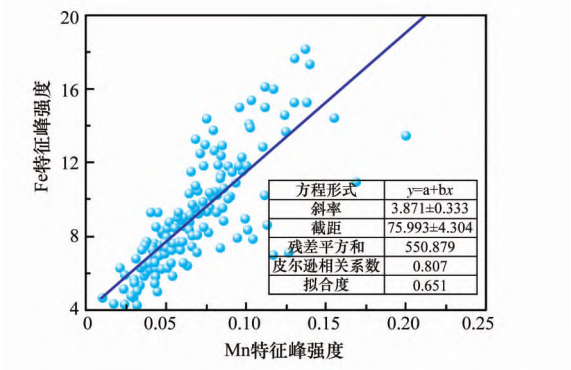


图 3　烧结烟尘中 Fe 和 Mn 元素微区荧光信号的线性关系

Fig. 3　Linear relationship of microregion fluorescence signal of Fe and Mn in sintering dust

Fe 和 Mn 作为典型的黑色金属，从地球化学的角度来看，在铁矿烧结过程中，Fe 元素和 Mn 元素的强皮尔逊相关性很可能源于它们在矿石中的丰度、矿物组成、烧结反应以及烧结条件等因素的相互作用。Fe 和 Mn 在地壳中丰度较高，它们是地壳中常见的元素[17]。铁矿石通常富含 Fe 元素，而 Mn 元素也以氧化物、硅酸盐等形式存在于铁矿石中[18-20]。这些矿物中同时存在 Fe 和 Mn 元素，因此在高温烧结过程中，矿石发生了复杂的化学反应，Fe 和 Mn 元素可能会被氧化或还原，形成不同的化合物或气体。这些反应可能导致 Fe 和 Mn 元素的共同释放或迁移，从而增强它们之间的相关性。此外，烧结过程中的温度、气氛和燃烧条件等因素对 Fe 和 Mn 元素的释放和迁移有影响[21]。相似的烧结条件可能导致 Fe 和 Mn 元素在烟尘中的质量浓度变化趋势相似，从而产生较强的皮尔逊相关性。这些因素共同促使 Fe 和 Mn 元素在烧结烟尘中呈现出较强的正相关性。

2.3.2　第二主成分代表性元素相关性

对比第二主成分中代表元素 Cu、Zn、As 和 Hg 的空间分布图(图 1)，富含 Cu 的区域也与样品中的 Zn 和 As 富集区相对应，这些元素之间存在的空间关系表明它们是互相关联的。Cu、Zn、As 三者皮尔逊相关系数在 0.65 以上，存在一定的相关关系。对三者绘制气泡图，如图 4 所示，以横坐标代表 Cu 元素的特征峰强度变化，纵坐标代表 Zn 的特征峰强度变化，气泡颜色由浅到深说明了 As 元素特征峰强度增加，值得注意的是，随着 Cu 元素特征峰强度的增加，Zn 和 As 元素也呈增加趋势。根据元素特征峰强度的相关性分析可知，As 和 Cu 的分布呈较强的正相关，而硫的亲和元素 Cu、Zn 和 As，并没有与 S 表现出明显的相关性。

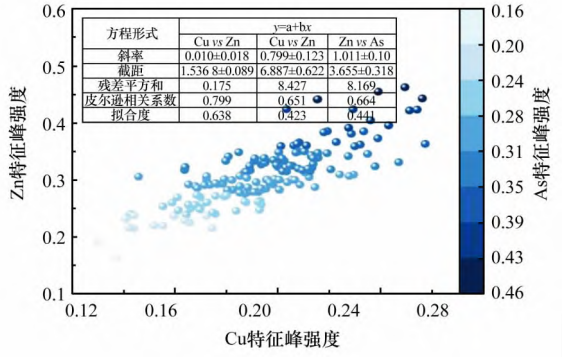


图 4　烧结烟尘中 Cu、Zn、As 微区荧光信号的线性关系

Fig. 4　Linear relationship of microregion fluorescence signal of Cu, Zn and As in sintering dust

As 和 Zn 是典型的亲铜元素，它们几乎完全与黄铁矿及其氧化产物相关[22-23]。在铁矿石中，As 主要以毒砂(FeAsS)、硫砷铜矿(Cu_3AsS_4)、氧化砷(As_2O_3、As_2O_5)等形式存在，Zn 主要以伴生闪锌矿形式存在。从物种形成转化行为来看，Cu、Zn 和 As 的形态分布和转化特征相似。在烧结过程中，Cu-Zn 生成黄铜合金，但是 Cu、Zn 相对配比不同会发生一些 Zn 原子占据 Cu 原子晶格或者 Cu 原子取代 Zn 原子的现象[24]。

2.3.3　第三、四主成分代表性元素相关性

比较第三主成分和第四主成分中代表元素

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Na、Cs、Rb、S、Pb 和 F 的空间分布图(图 1),它们的分布相似性较差,Na、Cs 和 Rb,F、S 和 Pb 与自身及其它元素的相关系数的绝对值仅为 0.002 ~ 0.548 和 0.000 ~ 0.351。这是因为第一主成分的方差最大,代表的元素信息最全面。如果第一主成分对元素的信息解释不够充分时,再考虑第二个主成分,以此类推,这些主成分互不相关,且呈方差递减。

2.3.4 整体相关性

对烧结烟尘包含的 16 种元素的同步辐射 μXRF 数据进行分析,并构建皮尔逊相关性矩阵,如图 5 所示。图中每一个网格内包含的数据为横坐标轴和纵坐标轴对应元素特征峰强度的皮尔逊相关系数,红色代表正相关,蓝色代表负相关,颜色越深表明元素之间的相关性越强。第一主成分代表元素的相关性较第二主成分和第三、四主成分的相关性强,如第一主成分的 Fe 和 Mn 的相关性在全部元素相关性中最强,其次是第二主成分的 Cu 和 Zn 以及 Zn 和 As。与主成分分析结果相符,第一主成分代表元素的相关性最强,第二主成分次之,第三主成分和第四主成分的相关性较差。

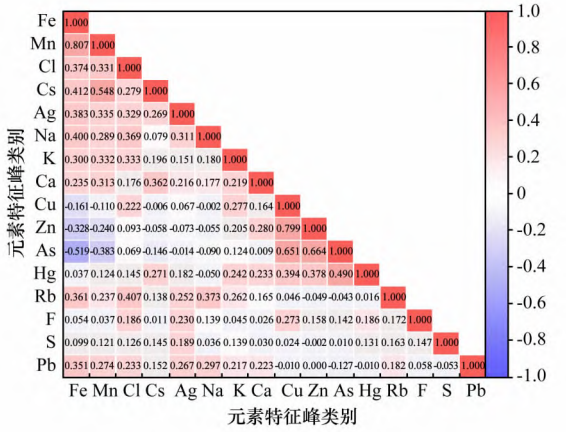


图 5 烧结烟尘中各元素整体相关性矩阵

Fig. 5 Correlation matrix of the selected elements in sintering dust

3 结 论

(1) 本研究采用同步辐射 μXRF 对铁矿烧结烟尘中 16 种元素进行了测定,并建立了目的元素特征峰强度的主成分分析模型,通过提取每个主成分的代表元素,可有效减少分析相关性关系元素的复杂度,进而减少分析次数、提高分析可视度。

(2) 本研究烧结烟尘样品中的 Fe 和 Mn 具有较强的正相关关系,皮尔逊相关系数为 0.807;Cu、Zn、As 也存在较强的正相关关系,皮尔逊相关系数在 0.65 以上。

(3) 建立 Zn、Mn、As 等重金属元素及毒害元素与 Fe 和 Cu 的相关关系,可以实现通过测定常见宏量元素 Fe、Cu 的元素质量分数和分布预测难测目标元素的信息。

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置 X 射线荧光微分析实验站(4W1B)提供测试,同时感谢实验站工作人员在数据测量和数据处理方面提供的指导和支持。

参考文献:

[1] 刘臣,叶恒棣,魏进超,等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团,2021,46(6):1 - 7;26.
LIU Chen,YE Hengdi,WEI Jinchao,et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):1 - 7;26.

[2] 段毅,包向军,徐俊超,等. 不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析[J]. 烧结球团,2022,47(2):96 - 100;109.
DUAN Yi,BAO Xiangjun,XU Junchao,et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):96 - 100;109.

[3] 于恒,王海风,张春霞. 铁矿烧结污染物排放特征探讨[J]. 环境工程,2014,32(2):87 - 90.
YU Heng,WANG Haifeng,ZHANG Chunxia. Study on the emission characteristic of pollutants during iron ore sintering[J]. Environmental Engineering,2014,32(2):87 - 90.

[4] 唐鸿鹄,赵立华,韩海生,等. 铁矿烧结烟尘特性及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):88 - 98.
TANG Honghu,ZHAO Lihua,HAN Haisheng,et al. Review on the characteristics and comprehensive utilization of iron sintering dust[J]. Consevation and utilization of mineral resources,2019,39(3):88 - 98.

[5] 邵武. 烧结机头电除尘器的运行维护分析[J]. 冶金管理,2021(11):36 - 37.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

SHAO Wu. Operation and maintenance analysis of electric dust collector for sintering machine head [J]. Metallurgical management,2021(11):36 - 37.

[6] 梁述廷,刘玉纯,刘璜,等. X 射线荧光光谱微区分析在铅锌矿石鉴定上的应用 [J]. 岩矿测试,2013,32(6):897 - 902.
LIANG Shuting,LIU Yuchun LIU Zhen,et al. Application of in-situ micro-X-ray fluorescence spectrometry in the identification of Lead-Zinc ore [J]. Rock and Mineral Analysis,2013,32(6):897 - 902.

[7] KHAOKAEW S,CHANEY R L,LANDROT G,et al. Speciation and release kinetics of cadmium in an alkaline paddy soil under various flooding periods and draining conditions [J]. Environmental Science & Technology,2011,45(10):4249 - 4255.

[8] 吴应荣,潘巨祥. 同步辐射微束 X 射线荧光分析及其在生物医学中的应用 [J]. 广东微量元素科学,1998,10(5):1 - 5.
WU Yingrong,PAN Juxiang. SR micro-probe XRF and it´s application on bio-medicine [J]. Guangdong Trace Elements Science,1998,10(5):1 - 5.

[9] 郭正启,詹若宁,朱德庆,等. 铁矿粉球团烧结试验研究 [J]. 烧结球团,2022,47(1):87 - 94;103.
GUO Zhengqi,ZHAN Ruoning,ZHU Deqing,et al. Experimental study on iron ore powder pelletizing sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):87 - 94;103.

[10] 李谦,周浩宇,刘前,等. 焦炉煤气喷吹对铁矿烧结过程影响的试验研究 [J]. 烧结球团,2021,46(4):14 - 19;63.
LI Qian,ZHOU Haoqian,LIU Qian,et al. Experimental research on influence of coke oven gas injection on iron ore sintering process [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(4):14 - 19;63.

[11] OCAMPO-MARULANDA C,FERNÁNDEZ-ÁLVAREZ C,CERÓN W L,et al. A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern colombia using combined principal component analysis [J]. Ain Shams Engineering Journal,2022,13(5):101739.

[12] GRUNSKY Eric C. The interpretation of geochemical survey data [J]. Geochemistry:Exploration,Environment,Analysis,2010,10(1):27 - 74.

[13] SOLÉ V,PAPILLON E,COTTE M,et al. A multiplatform code for the analysis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectra [J]. Spectrochimica Acta Part B:Atomic Spectroscopy,2007,62(1):63 - 68.

[14] WENNING R J,ERICKSON G A. Interpretation and analysis of complex environmental data using chemometric methods [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry,1994,13(10):446 - 457.

[15] SADEGHI M,MORRIS G A,CARRANZA E J M,et al. Rare earth element distribution and mineralization in Sweden:An application of principal component analysis to FOREGS soil geochemistry [J]. Journal of Geochemical Exploration,2013,133:160 - 175.

[16] 张文彤,董伟. SPSS 统计分析高级教程(第 3 版) [M]. 北京:高等教育出版社,2017.
ZHANG Wentong,DONG Wei. SPSS statistical analysis advanced course(3rd Edition) [M]. Beijing:Higher Education Press,2017.

[17] BOYKO V,AVETISYAN K,FINDLAY A,et al. Biogeochemical cycling of sulfur,manganese and iron in ferruginous limnic analog of Archean ocean [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2021,296:56 - 74.

[18] LAU L L,STREZOV V,GONçALVES M V B,et al. Trace elements emission in iron ore sintering:A review [J]. Environmental Advances,2021,6:100123.

[19] HEIN J,KOSCHINSKY A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules [J]//Geochemistry of Mineral Deposits:Treatise of Geochemistry,2014,13:273 - 291.

[20] YU X L,LU S U. Micrometer-scale internal structure and element distribution of Fe-Mn nodules in quaternary red earth of eastern China [J]. Journal of Soils and Sediments,2016,16(2):621 - 633.

[21] PALUMBO B,BELLANCA A,NERI R,et al. Trace metal partitioning in Fe - Mn nodules from sicilian soils,Italy [J]. Chemical Geology,2001,173(4):257 - 269.

[22] HUGGINS F E,SRIKANTAPURA S,PAREKH B K,et al. XANES spectroscopic characterization of selected elements in deep-cleaned fractions of kentucky No. 9 coal [J]. Energy & Fuels,1997,11(3):691 - 701.

[23] GERMANI M S,SMALL M,ZOLLER W H,et al. Fractionation of elements during copper smelting [J]. Environmental Science & Technology,1981,15(3):299 - 305.

[24] LI L,SONG K K,WANG Y Z,et al. The thermodynamic properties of disorder Cu-Zn solid solution and nonstoichiometric Cu-Zn alloy:pseudo-atomic lattice inversion potential method [J]. Journal of Solid State Chemistry,2020,289:121488.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net