

有色金属工业固体废物生态环境 效应分析方法研究进展

苏为洪, 全 佳, 王向宇, 张朝能*

(昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650500)

摘要: 随着经济社会的快速发展, 工业领域取得了许多进展, 但大量固体废物随工业的发展增加, 尤其是有色金属行业固体废物排放量较大, 占用了大量的土地, 导致生态环境污染, 危害人类健康。针对有色金属工业固体废物污染严重、综合利用率低及监测管理不足的现状, 综述了生态环境效应研究进展, 介绍生态环境效应分析评价指标体系的构建原则, 即目标性和针对性原则、系统综合性原则、科学性原则、代表性原则、可操作性原则。对6种生态环境污染指数评价方法进行系统比较, 分析其各自优缺点及适用范围, 给出了适合有色金属工业固体废物污染的评价方法, 为有色金属工业固体废物环境监测管理及有针对性地改善区域环境质量提供参考。

关键词: 有色金属; 固体废物; 生态环境效应; 环境污染评价

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8646(2024)02-0001-08

Research progress of methods for the analysis of eco-environmental effects of non-ferrous metal industrial solid waste

Su Weihong, Tong Jia, Wang Xiangyu, Zhang Chaoneng*

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: With the rapid development of economy and society, lots of advance has been made in industrial field. However, a large amount of solid wastes will also increase with the development of industry, especially in the non-ferrous metal industry. Therefore, not only will a large amount of land be occupied, but also the pollution of ecological environment will be caused and human health be hazard. In view of the current situation of serious pollution, low comprehensive utilization rate and lacking of monitoring and management of non-ferrous metal industry solid waste, the study summarized the research progress of ecological environmental effects, and introduced the construction principles of the evaluation index system of ecological environmental effects, i. e., the principle of target and pertinence, systematic comprehensiveness, scientificity, representativeness and operability. The study systematically compared 6 kinds of eco-environmental pollution index evaluation methods, analyzed their advantages and disadvantages and their applicable scope, and gave a suitable evaluation method for non-ferrous industrial solid waste pollution, so as to provide reference for the development of monitoring and management of non-ferrous metal industrial solid waste and the targeted improvement of regional environmental quality.

Key words: Ferrous metal; Solid waste; Ecological environmental effect; Environmental pollution assessment

0 引言

云南是“一带一路”西南地区有色金属产业聚集区, 有色金属产量在整个西南地区占比较大, 采选冶与

深加工过程将产生大量的固体废物, 如尾矿、冶炼渣、处置废气废水的二次渣尘泥、深加工渣等。云南有色金属以锡铅锌铜铝为主^[1], 典型固体废物包括锡尾矿、锡精冶炼渣(主要是砷铝渣和硫渣)、铜锌冶炼含砷汞尘泥、铝灰渣和废槽衬, 有色金属产业具有明显的高污染、高能耗特征。有色金属冶炼是环境中重金属污染物的主要来源^[2]。由于重金属污染具有毒性强、分布广泛性、长期性、累积性、隐蔽性、在环境中不易被降解、难治理、易迁移转化和不可逆性等特点, 可通过

收稿日期: 2023-10-09

国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(No. 2019YFC1904201)

作者简介: 苏为洪(2000-), 男, 硕士研究生。研究方向: 环境污染控制与生态修复研究。

食物链进入人体某些器官,并在人体中缓慢累积,一旦超过人体对其耐受程度,就会对人体造成严重危害。环境自身的净化作用和微生物也难以将其降解和消除,重金属污染环境的治理成本高且周期长,严重影响了区域大气、水体、土壤环境及人体安全健康,存在较大的生态环境安全隐患,因此开展环境污染质量评价对重金属污染防治和保障人体安全健康具有重要意义。

生态环境质量是生态环境因子在一定时空范围内对人类的生存繁衍及社会发展的适宜程度的反映,生态环境的优劣程度与人们的生存、生产、生活息息相关,为了系统、全面地了解生态环境质量现状及发展趋势,为国民生态安全提供根本保障,为制定生态环境污染防治方案及环境规划提供科学依据,使生态环境质量状况与人类的生存发展相适应,需对环境质量进行相关评价。

目前,国内外应用较多的生态环境质量评价方法主要有单因子污染指数法、潜在生态危害指数法、地质累积指数法、内梅罗综合污染指数法、富集因子法、内梅罗综合污染指数法及污染负荷指数法等^[3],每种方法各有其特点,适用范围、评价标准有一定的差异。本研究归纳总结了环境质量评价的国内外发展历程,介绍了6种指数评价方法并对其进行总结分析对比,选择出适合有色金属工业固体废物对生态环境影响的评价方法。

1 生态环境效应研究进展

生态环境是一个复合生态系统,包括水资源、生物资源、土地资源及气候等资源,这些资源数量与质量的有机组合形成了生态环境,影响人类的生存和经济社会的持续健康发展^[4]。

人类为了自身的生存和发展对自然进行利用与改造,其各种生产活动对生态环境会产生不同程度的影响,同时这些影响会反作用于人类的生产和生活。生态环境效应是指生态系统各组成部分在由于人类活动的影响所引发的生态过程变化及响应以及由此引起的区域生态格局的变化^[5],这种变化的影响可能是积极的(生态安全)或消极的(生态风险)。生态环境效应按性质可以分为正、负效应^[6-7]。正效应是人类生产活动对生态环境所产生的积极有利的效应影响,如土地利用类型的变化可能会促进生态环境质量改善和景观类型演变;反之,负效应是由于人类的行为活动对生态环境所产生的负面的消极的不利的影响,如生态破坏、环境污染等生态危害。

生态环境效应的研究目前主要是针对单一生态环

境水文、土壤、大气、生物多样性等的研究,对综合生态效应的研究较少,主要涉及景观生态格局、物质能量循环、生态服务功能等^[8]。

齐文强^[9]根据已有的理论和数据,以内蒙古自治区鄂托克旗、甘肃省肃南县、青海省乌兰县为分析研究对象,梳理了土壤质量及草地生态环境评价的理论研究,分析了草原生态环境的主要评价指标,揭示了研究区域土壤质量特点,评价了草原生态环境效应,搭建了项目数据库。李叶鑫^[10]等对煤矿区土壤裂缝的产生机制和演化规律进行系统的归纳总结,归纳了拉伸型、塌陷型、张拉型裂缝形态特征及影响因素、煤矿区土体裂缝的五种测定方法及其六类相关生态环境效应等方面的最新研究进展,并提出展望,以期为煤矿区土地复垦和生态修复提供科学依据。目前对生态环境效应的研究更多的集中在负生态环境效应方面,而对正生态环境效应的研究相对较少。武强^[11]等应用一系列学科如地质学、环境学和采矿学等相关理论,对闭坑矿山的正负生态环境效应进行了综合分析研究,提出了有针对性的开采与预防控制措施。研究表明,闭坑矿山存在着形成污染矿井(坑)水源、串层污染地下水与地表水、危害城乡供水、造成矿区地表二次塌陷与山体滑坡、矿区高层建筑地基失去稳定性或导致一系列基础设施危害及威胁矿井周围的生产安全等负效应,从储藏和资源效应及提供场地等方面分析综述了一系列正效应。

目前对生态环境效应评价的研究多是关于土地利用类型变化的生态环境效应评价研究^[12-14],而其他方面,尤其是固体废物的生态环境效应评价分析方面的研究较少,方法体系也不够完善。

2 生态环境效应分析评价指标体系的构建原则

2.1 目标性和针对性原则

评价方法多种多样,各评价方法的适用范围、评价标准和特点也有差异。应根据不同的评价目的并结合评价区域的实际情况选用合适的评价方法。

2.2 系统综合性原则

生态环境是一个较为复杂的系统,影响环境质量的因素有很多,很多仅反映生态环境质量的一个或几个方面的特征,缺乏全面、客观反映生态环境质量最本质特征的评价方法。在选择评价方法时,应立足于系统综合的观点,遵循系统相关性、层次性、整体性和综合性等原则,兼顾考虑多种因素的影响,从多个评价角度进行分析,虽各评价方法间具有独立性,但应有机结合起来。

2.3 科学性原则

在当代科学发展中,科学性是最基本的原则,在科学探究中需遵循科学规律,尊重客观事实,以客观事实为基础,要有科学依据,用科学的方法及手段反映生态环境中的基本特征。

2.4 代表性原则

有的评价方法缺乏导向性,难以突出问题,从而使评价结果不易得到应用。在选择评价方法时,应考虑其代表性、内涵独立性,选取的指标应客观反映研究区域内的生态环境质量特征,所选取的方法能代表引发生态环境效应的某种因素或效应。

2.5 可操作性原则

在选取评价方法时要考虑该指标的可量化性及可操作性,实用性强,评价结果与实际情况的差距小,能够与真实情况有较好的吻合。有些评价方法其他方面可能都比较合适,但在现有的技术条件下不方便获得或统计和计算复杂,这样的方法不推荐选取。

3 生态环境污染评价方法

工业固体废物流动扩散性和挥发性不强,但数量庞大,种类繁多,成分复杂,受工业生产过程等不同复杂因素的影响,导致处理难度大。除了直接造成的污染,还经常以水、大气和土壤为媒介污染环境,容易造成环境长期持续性的污染,是一个比较缓慢的过程。特别是有色金属行业,能耗高,固体废物排放量大,污染严重,排放的固体废物中经常含有酸性、碱性、毒性或重金属成分,通过淋溶、径流和大气飘尘等作用形式进入周围的大气、水体和土壤环境,受到其污染影响的范围将远远不止固体废物堆置区域和空间。为了更好地开展生态环境污染防治工作,营造健康安全生产生活环境,需要对其进行生态环境质量评价。

在生态环境质量评价工作中,评价方法的选择和确定是工作的核心。国内外生态环境质量评价方法多种多样,不同评价方法的对象及适用范围存在一定的差异。随着国内外学者对理论和评价方法的研究趋于多元化发展,在一般的指数法评价基础上,根据主客观相结合衍生出了一系列评价方法,主要有模糊数学评价法、物元分析法、主成分回归分析法(PCA)、层次分析法(AHP)、秩和比法(RSR)、人工神经网络法(ANN)、灰色系统评价法等^[15-16],被广泛应用于环境质量评价研究领域。这些方法特点各异,在评价相同或不同的区域环境时所呈现的优劣程度不同。而环境评价方法未来发展趋势是将多种评价方法结合起来使用并进行优化。目前,国内外常用的生态环境质量评价方法主要是基于指数评价的方法,包括单项污染指

数法^[17-20]、内梅罗综合污染指数法^[21-25]、地累积指数法^[26-29]、潜在生态危害指数法^[30-33]、富集因子法^[34-38]、污染负荷指数法^[39-44]。

3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法(Single factor pollution index method)是基于环境质量标准对环境中某单一污染物的污染程度进行评价,具体为参考评价基准逐个对各个单项污染指标进行分析和评定,是最简单、最基础、应用较广泛的评价方法^[45]。通过单因子污染指数评价可以判断出所评价区域主要污染物及其污染程度,计算公式为^[46]:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中, P_i 为单因子污染指数, C_i 为污染物 i 在评价区域环境中的实测浓度, S_i 为污染物 i 的评价标准或参考值。

表 1 单因子污染指数分级标准

Tab. 1 Single factor pollution index classification criteria

污染等级	单因子污染指数	污染程度
I	$P_i \leq 1.0$	清洁(无污染)
II	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻微污染
III	$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻度污染
IV	$3.0 < P_i \leq 5.0$	中度污染
V	$P_i > 5.0$	重度污染

若 $P_i \leq 1.0$,表示没有受到污染,若 $P_i > 1.0$,则表示受到污染,指数 P_i 的值越大表明污染程度越高,污染越严重。

单因子污染指数法只能反映出某一特定评价区域内单一污染因子的污染水平,可以判断环境中的主要污染因子及其污染程度,该方法直观、简便、易于理解、计算简单,还可以清晰表示出评价样本与评价标准之间的比值关系,为其他综合评价方法提供一定的依据^[47]。但在实际情况下的环境污染通常是由多个污染因子复合污染导致的,而单因子污染指数法不能做到对评价区域内整体污染情况进行综合评定,仅适用于对特定区域的单一污染因子污染进行评价。

3.2 内梅罗综合污染指数法

一般情况下,当环境中存在多种污染物复合污染时,如果仅用单因子评价法是不能对此区域内的环境污染真实状况进行评估的。为了对环境污染真实情况进行准确评价,需将各单一污染因子污染指数进行综合^[48],因此以单因子指数评价为基础发展了多种综合污染指数法。内梅罗综合污染指数法(Nemerow index method)就是其中一种,它能考虑单因子指数法中单一污染因子的均值与最大值,凸显出具有最高污染指数的污染物对环境质量的影响,对不同种类的污染物造

成的环境污染程度进行客观、全面、综合性评估,是一种计权型多因子环境质量指数。内梅罗指数法在早期时主要被应用于沉积物和土壤污染质量评价,随着发展也逐渐被用于地表水样品的重金属污染评价^[49],计算公式为^[50]:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i,ave}^2 + P_{i,max}^2}{2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right) + P_{i,max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 为内梅罗污染指数, $P_{i,ave}$ 为平均单项污染指数(各单项污染因子污染指数的算术平均值), $P_{i,max}$ 为最大单项污染指数(各单项污染因子中的最大污染指数)。

表2 内梅罗污染指数评价标准
Tab.2 Evaluation standard of Nemerow pollution index

等级	内梅罗污染指数	污染程度
I	$P_N \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
V	$P_N > 3.0$	重污染

内梅罗综合污染指数法考虑了污染物的均值和最大值,避免了加权系数中主观因素对加权过程的影响,可以更加客观地评价环境的污染状况,是目前国内外应用较多的综合评价方法。但不少研究者在实际应用中发现该方法过分强调了在评价区域环境质量中高浓度污染物的影响^[51],最终评价结果可能会因此在划分污染程度差异时在一定程度上存在灵敏性不够高、精确度不够好等缺点。

对多种污染因子共同污染的环境进行评价时可采用内梅罗综合污染指数法。与单因子污染指数法相比,内梅罗污染指数法能更好地反映出多类别污染物的总体污染情况,避免由于平均值的作用削弱污染因子的权值^[52]。但这种方法的主要问题是过于强调污染指数最大的污染因子的影响和作用,导致难以解释污染物在环境中发生的质变过程。

3.3 地累积指数法

地质累积指数法(Geo-accumulation index method)是德国科学家 Muller 在 1969 年首次提出的主要适用于河流沉积物的重金属污染状况的评价方法^[53],也被称为 Muller 指数,后来常被用于土壤重金属污染状况的评价。该方法考虑了自然地质过程中出现的背景值及人为活动对环境的影响,其将上述两个因素结合在一起,更加全面地评价了生态环境质量。该指数不仅可以反映出重金属在自然环境中的分布变化规律,

还能根据该指数对人为活动对环境造成的影响进行评价,从而区分人为活动的影响程度,计算公式为^[54]:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times B_i)] \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数, C_i 为样品中污染物 i 的实测浓度, B_i 为参比值,即污染物 i 的地球化学背景值(自然本底值), K 为修正系数,考虑到背景值会因为自然成岩作用、岩石种类及表面沉积特征等改变,取值一般为 1.5。

表3 地累积指数分级标准
Tab.3 Cumulative index classification standard

等级	地质累积指数	污染等级
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	无污染 ~ 中度污染
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	中度污染
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	中度污染 ~ 强污染
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	强污染
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	强污染 ~ 极强污染
6	$I_{geo} \geq 5$	极强污染

与其他方法相比,地质累积指数法除考虑背景值、人为污染因素的影响外,还考虑了岩石种类差异及表面沉积特征可能引起背景值变动的因素,因此弥补了其他方法的不足^[55]。但该方法仅能计算出评价区域内各采样点单一污染因子的污染指数,并不能对不同具有交互作用的污染物或不同评价区域内的环境质量进行比较分析,故该评价方法并不能全面、客观、系统地评价区域的环境状况。

3.4 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法(Potential ecological hazard index method)是瑞典地球化学家 Hakanson 从沉积学角度出发,根据重金属性质及环境行为特征提出的评价土壤或沉积物中重金属潜在风险程度的方法。该方法主要探究了重金属数量(种类数)、多种污染元素的协同作用、金属的毒性水平,评价区域环境中重金属浓度及环境对重金属污染的敏感性等因素,不仅反映某一特定环境下各重金属元素对环境的影响,还反映了多种金属元素协同污染环境的状况,因此经常被应用于评价土壤中重金属的生态风险^[56],其计算公式为^[57]:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (T_i \times P_i) \quad (4)$$

式中,RI 多因子综合潜在生态危害指数为各单一污染因子 i 的潜在生态危害系数之和。 E_i 为重金属元素 i 的潜在生态危害系数, $E_i = T_i \times P_i$ 。 T_i 为重金属元素 i 的毒性响应系数,该系数以重金属的毒性系数参考值代替,反映上述的金属毒性水平、多种污染元素的

近,达到 0.85 Tm。碳化硼不锈钢的烧结需要较高的温度,令不锈钢致密度达到较好的力学强度,防止碳化硼与不锈钢发生界面反应。从 SPS 烧结结果来看,碳化硼与不锈钢极易发生反应。

3 结论

高能球磨工艺对不锈钢粉末致密化烧结具有增益效果,球磨后不锈钢粉体比表面积达到 0.41 g/cm³,是球磨前不锈钢粉末表面积的 6 倍。高能球磨时间超过 2 h 后,对于不锈钢烧结体的致密度影响降低。掺杂 4 wt. % 碳化硼的不锈钢复合材料在 1100 °C、保温 6 min 后,致密度高于 99.5%,开口孔接近于 0。随着烧结温度的升高,在相同烧结时间条件下,碳化硼与不锈钢扩散速度加快。在相同烧结时间下,反应层的厚度加厚。

碳化硼不锈钢复合材料的密度随碳化硼掺量的增加而降低。碳化硼颗粒作为第二相对不锈钢颗粒界面迁移有钉扎阻碍作用,当碳化硼含量高于 6% 时,碳化硼不锈钢复合材料的孔隙率明显上升。碳化硼掺量小于 10% 时,金属相保持连续相,并没有出现传统高碳化硼不锈钢材料在晶界处的连续硼化物脆性相,硼含量是传统硼不锈钢的 3 倍。碳化硼不锈钢复合材料烧结时间不宜过长,以免影响材料力学性能。压力对碳化硼不锈钢的密度有较大影响,密度随压力的增加而快速升高。

参考文献:

- [1] 曹龙浩,霍明庆,罗肖,等. 乏燃料贮存用中子吸收材料研究进展[J]. 科技视界,2022(05):13-16.
- [52] 王玉军,吴同亮,周东美,等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报,2017,36(12):2365-2378.
- [53] 刘子赫,孟瑞红,代辉祥,等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报,2019,38(09):2157-2164.
- [54] 周长松,邹胜章,李录娟,等. 几种土壤重金属污染评价方法的对比[J]. 地球与环境,2015,43(06):709-713.
- [55] ZHANG J S, XU D C, LI L L, et al. Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26(15):15698-15709.
- [56] 庄玉婷,冯嘉仪,储双双,等. 粤西地区不同林分类型土壤重金属含量及生态风险评价[J]. 华南农业大学学报,2018,39(05):25-31.
- [57] 姚文文,陈文德,黄钟宣,等. 重庆市主城区土壤重金属形态特征及风险评价[J]. 西南农业学报,2021,34(01):159-164.
- [58] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008(02):112-115.
- [59] ATTA R, TANG F X. Distribution and potential ecological risk assessment of trace elements in the stream water and sediments from Lanmuchang area, southwest Guizhou, China[J]. Springer Berlin Heidelberg,2019,26(04):3706-3722.
- [60] 高健磊,王静. 两种河道底泥重金属污染生态危害评价方法比较研究[J]. 环境工程,2013,31(02):119-121.
- [61] ZOLLER W H, GLADNEY E S, DUCE R A. Atmospheric Concentrations and Sources of Trace Metals at the South Pole[J]. Science,1974,183(4121):198-200.
- [62] 孟源思,高琳琳,李子杰,等. 农田土壤重金属污染风险评价模型与方法研究[J]. 地球与环境,2020,48(04):489-495.
- [63] HUANG L, BAI Y H, MA R Y, et al. Winter chemical partitioning of metals bound to atmospheric fine particles in Dongguan, China, and its health risk assessment. [J]. Environmental science and pollution research international,2019,26(13):13664-13675.
- [64] 许桂苹,王晓飞,付洁. 土壤重金属污染评价方法研究综述[J]. 农村经济与科技,2014,25(01):71-74.
- [65] 郝春明,陈有鑑,李瑞敏,等. 基于地球化学标准化方法的平湖市农田土壤重金属污染评价[J]. 环境污染与防治,2009,31(02):96-99.
- [66] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980,33(1-4):566-575.
- [67] GALHARDI J A, DE M J W V, WILKINSON K J. Environmental and health risk assessment of agricultural areas adjacent to uranium ore fields in Brazil. [J]. Environmental geochemistry and health,2020,42(11):3965-3981.
- [68] ANDEM, ANDEM B, OKORAFOR, et al. Evaluation And Characterization Of Trace Metals Contamination In The Surface Sediment Using Pollution Load Index PLI And Geo-Accumulation Index Igeo Of Ona River Western Nigeria [J]. International Journal of Scientific & Technology Research,2014,4(01):29-34.
- [69] 何如海,薛中俊,刘娜,等. 两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(08):1858-1864.
- [70] 谢金亮,张建锋,刘永兵,等. 白云鄂博稀土伴生矿区土壤重金属污染及其环境评价[J]. 中国水土保持科学,2020,18(02):92-101.
- [71] 韩晋仙,李二玲,班凤梅. 常规农业村土壤重金属污染及潜在生态风险评价——山西寿阳县为例[J]. 中国土壤与肥料,2020(06):246-253.
- [72] GEORGIA N, KOUKOULAKIS P H, PAPADOPOULOS A H, et al. Interrelationships of pollution load index, transfer factor, and concentration factor under the effect of sludge[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2013,185(06):5231-5242.