

# 粉煤灰及其资源化利用过程重金属生态风险研究

杨航<sup>1</sup>, 李懿轩<sup>1</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 艾锋<sup>1</sup>, 田亮<sup>1</sup>, 刘姿亨<sup>1</sup>, 潘伟杰<sup>1</sup>, 陶秋霞<sup>1</sup>

1. 榆林学院, 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000

2. 榆林市固废资源化利用工程技术研究中心, 陕西榆林 719000

**摘要:**粉煤灰作为燃煤发电厂的副产品,大量堆存和填埋会对环境造成严重威胁。采用BCR连续提取法探究陕北粉煤灰中Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Hg、Tl、As、Zn等9种重金属的形态分布特征,并综合运用单因子指数法、富集因子法、内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法及潜在生态风险指数法评估其生态风险水平,以判断资源化利用的可行性。测试结果显示,除Tl外,粉煤灰中其余重金属元素主要以残渣态存在,迁移性较低,且其全量均低于农用地土壤风险筛选值。通过单因子指数法计算得到,Tl为轻微污染,其余重金属元素无污染。地质累积指数法分析结果表明,Hg为偏中度污染,Cu、Tl、As为轻度污染水平。潜在生态风险指数评价结果表明,粉煤灰中的有效态重金属元素属于轻微生态风险。内梅罗综合污染指数显示,粉煤灰中9种重金属的风险等级为轻度污染;若去除Tl,综合污染指数降至清洁水平。综上所述,Tl是粉煤灰资源化利用中的重点关注对象;建议结合化学提取法与生物评价法构建粉煤灰重金属生态风险评价体系,以促进粉煤灰资源化利用。

**关键词:**煤基固体废物;粉煤灰;资源化利用;环境风险评价

**中图分类号:**X705

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-6002(2025)S1-0050-14

**DOI:**10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.07

## Research on the Ecological Risk of Heavy Metal in Fly Ash and Its Resource Utilization Process

YANG Hang<sup>1</sup>, LI Yixuan<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, AI Feng<sup>1</sup>, TIAN Liang<sup>1</sup>, LIU Ziheng<sup>1</sup>, PAN Weijie<sup>1</sup>, TAO Qiuxia<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanxi North Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China

2. Yulin Solid Waste Resource Utilization Engineering Technology Research Center, Yulin 719000, China

**Abstract:** Fly ash, a byproduct of coal-fired power plants, poses a significant environmental threat when stored or landfilled in large quantities. The BCR sequential extraction method was employed to investigate the speciation of nine heavy metals (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Hg, Tl, As, Zn) in fly ash from Northern Shaanxi. Ecological risk levels were assessed using a combination of the single-factor pollution index, enrichment factor, Nemerow Integrated pollution index, geo-accumulation index, and potential ecological risk index methods to evaluate the feasibility of resource utilization. Results indicate that, except for Tl, the other heavy metals primarily exist in the residual fraction with low mobility, and their total concentrations are below the risk screening values for agricultural soils. The single-factor pollution index revealed that Tl is slightly polluted, while the other metals show no pollution. The geo-accumulation index indicated Hg as moderately polluted, with Cu, Tl, and As classified as mildly polluted. The potential ecological risk index showed that bioavailable heavy metals pose slight ecological risks, and the Nemerow Integrated pollution index indicated mild pollution. Excluding Tl reduced the composite pollution index to a clean level. In conclusion, Tl is the primary concern in the resource utilization of fly ash. It is recommended to establish an ecological risk assessment system for heavy metals in fly ash by integrating chemical extraction and biological evaluation methods to promote its sustainable utilization.

**Keywords:** coal-based solid waste; fly ash; resource utilization; environmental risk assessment

煤炭作为我国经济发展不可或缺的化石能源支柱<sup>[1]</sup>,在电力与热力生产供应领域的需求持续攀升。2023年,中国能源消费总量跃升至57.2亿t标准煤的新高,同比增长5.7%<sup>[2]</sup>,彰显了能

源需求的强劲势头。然而,这一能源消费增长背后,煤炭燃烧衍生的粉煤灰问题日益凸显,成为亟待解决的环境挑战。粉煤灰<sup>[3]</sup>,这一源自燃煤电厂、工业锅炉等燃煤设施的副产品,主要由硅酸

收稿日期:2025-03-06;修订日期:2025-07-13

基金项目:煤基固废协同生态修复综合利用关键技术研究(2024CY2-GJHX-39);陕西省技术创新引导专项(基金)(2024ZC-YYDP-58);陕西省教育厅服务地方专项(SXJYT-30)

第一作者简介:杨航(1998-),男,陕西渭南人,硕士。

通讯作者:李强

盐、铝硅酸盐及碳酸盐等无机氧化物构成,是煤炭燃烧过程中释放的细微颗粒物。2023 年统计数据 displays,我国粉煤灰排放量已激增至 8.27 亿 t,较上年增长 9.4%,呈现出快速增长的趋势。粉煤灰的大规模堆存与填埋,不仅是对土地资源的巨大消耗,更对自然环境构成了多重威胁<sup>[4]</sup>。它们在大气中悬浮,会加剧空气污染;渗入水体,会污染水资源<sup>[5]</sup>;长期堆积,会改变土壤结构,影响土壤生态平衡。这一系列连锁反应,不仅威胁着人类健康,更对生态系统的稳定性与可持续性构成了严峻挑战。综上,实现粉煤灰的有效管理与资源化利用,是推动可持续发展战略的重要组成部分。

粉煤灰中重金属元素(如 Pb、Hg、Cd、Cr 等)的化学形态是评价其环境风险的关键依据<sup>[6]</sup>。通常,这些元素在粉煤灰中以水溶态、可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态与残渣态等多种形态存在<sup>[7]</sup>。不同化学形态的重金属因其迁移活性与毒性的显著差异,其潜在环境风险已引发广泛关注。这些形态的赋存特征不仅调控着重金属在环境介质中的迁移与转化行为,直接决定了其生态毒性效应与环境危害程度,凸显形态分析在环境风险评估中的关键作用。当前,粉煤灰的研究主要集中在资源化利用、综合应用与提质改造、环境影响评估与污染控制等方面<sup>[8]</sup>。其中,建筑、环保等领域的资源化利用研究尤为突出,展现了粉煤灰在循环经济中的巨大潜力。然而,尽管粉煤灰综合利用研究取得了显著进展,但针对其内部重金属赋存形态的研究仍相对不足。这一现状不仅制约了对粉煤灰环境风险的全面认知,也影响了粉煤灰资源化利用的安全性与可持续性。因此,加强对粉煤灰中重金属赋存形态的研究,对推动粉煤灰环保利用与保障生态环境安全具有重要意义。

粉煤灰中的重金属可通过大气沉降、水体迁移及土壤侵蚀等自然过程释放到环境中。其在环境中的迁移路径、转化机制及生物可利用性<sup>[9]</sup>,是评估生态风险的核心参数。因此,系统解析粉煤灰中重金属的含量及其化学赋存形态,对于科学识别环境风险、合理评估资源化利用的可行性

至关重要。此类研究不仅可为粉煤灰的安全处置与生态化利用提供数据基础与理论依据,亦有助于优化其资源化路径,在降低环境污染的同时,支撑循环经济发展与可持续发展目标的实现。BCR 连续提取法<sup>[10]</sup>是一种用于分析固体废物中重金属形态和迁移性的标准方法,由原欧洲共同体标准物质局开发。该方法通过一系列化学步骤<sup>[11]</sup>,将粉煤灰中的重金属分为不同形态(活性较高的可交换态,以及与碳酸盐、铁锰氧化物、有机物和硫化物相结合的多种稳定态),以确定其含量和迁移性。众多学者已利用 BCR 连续提取法开展了大量研究。例如,曾昭婵等<sup>[12]</sup>采用 BCR 法解析了粉煤灰中重金属的形态分布;朱加华等<sup>[13]</sup>基于该方法,通过顺序提取技术测定了粉煤灰中重金属的含量,还对重金属潜在环境风险进行了综合评价;邓庆德等<sup>[14]</sup>则借助该方法评价了粉煤灰对污泥中重金属的钝化去除效果。这些研究深化了对粉煤灰中重金属环境行为的认识,也为其资源化利用与污染控制提供了科学依据。

本研究基于 BCR 连续提取法,对粉煤灰中 Cd、Cr、Ni 等 9 种重金属的化学形态(酸溶态、可还原态、可氧化态、残渣态)进行了分析。在此基础上,结合单因子指数法、富集因子法、内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法及潜在生态风险指数法,系统评估了其生态风险,以期为其资源化利用潜力与后续安全利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用粉煤灰取自陕北地区某煤化工企业,鉴于堆放层较厚,采用分层取样方式,按 S 型采样法分别从表层(0~0.5 m)、中层(1.5~2 m)、底层(4.5~5 m)采集 5 组粉煤灰样品。样品经充分混合后置于干燥器中干燥,去除多余水分。粉煤灰样品测试结果显示:pH 为 9.05,有机质含量为 14.18 g/kg,全氮含量为 0.07 g/kg,全磷含量为 0.42 g/kg,全钾含量为 22.41 g/kg,电导率为 2 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,粒径组成如表 1 所示。

表 1 粉煤灰粒径组成  
Table 1 Fly ash particle size composition

粒径/mm	<0.002	0.002~<0.005	0.005~<0.01	0.01~<0.02	0.02~<0.05	0.05~<0.1	0.1~<0.2	0.2~<0.25
占比/%	19.93	4.61	10.23	19.12	25.69	12.52	6.59	0.89

取适量粉煤灰样品进行扫描电镜观测,结果如图1、图2所示。测试条件为:电镜放大倍数为3 000倍,成像模式为二次电子模式,工作距离为10.4 mm,标尺长度为40  $\mu\text{m}$ 。由图1可以看出,粉煤灰微粒多数呈球状,表面光滑,微孔较小。此外,部分颗粒因煤粉在1 300~1 500  $^{\circ}\text{C}$ 炉膛内悬浮燃烧时发生熔融粘连,形成表面粗糙的团聚体。图2为粉煤灰在碱性激发过程中的变化。观察发现,随反应时间的延长,粉煤灰微粒表面玻璃体开始溶解,并伴随着表面孔洞的逐渐增加。这要归因于粉煤灰中的硅酸盐、铝酸盐与碱性激发剂中的氢氧根离子发生水化反应,生成水化硅酸钙等产物,从而破坏原始结构并形成孔隙。

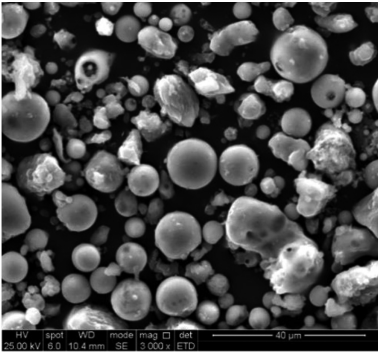


图1 实验室电镜扫描下的粉煤灰微粒

Fig. 1 Laboratory electron microscope scanning of fly ash particles

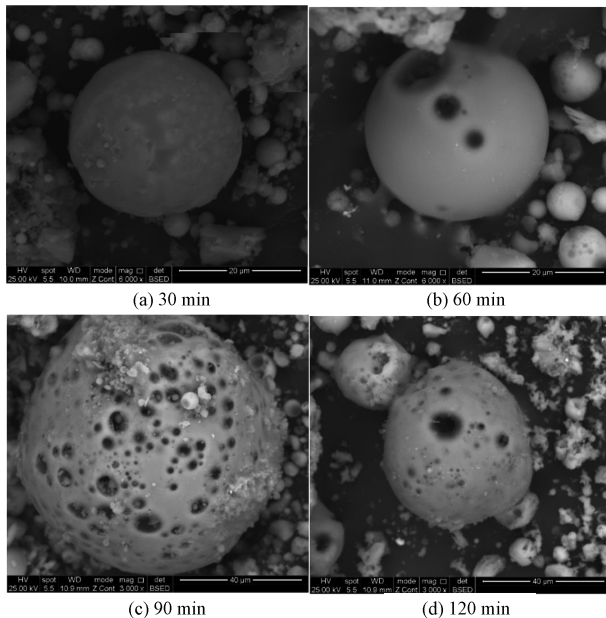


图2 不同反应时间的碱性激发效果

Fig. 2 Alkaline excitation effect with different reaction times

## 1.2 实验设备与参数

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS-QC)技术指标:射频功率为1 550 W,雾化室温度为2.5  $^{\circ}\text{C}$ ,采样深度为5 mm,冷却气流速为14.0 L/min,蠕动泵速率为40 r/min。

## 1.3 BCR连续提取法

1) 酸溶态(可交换态、弱酸溶解态):称取1 g烘干后的粉煤灰样品放入80 mL离心管中,加入40 mL 0.11 mol/L醋酸溶液。于(22 $\pm$ 5)  $^{\circ}\text{C}$ 下恒温振荡16 h。反应终止后,通过离心(3 000 r/min,20 min)实现固液分离。将所得液相(上清液)收集于聚乙烯瓶中,利用ICP-MS进行重金属元素浓度分析。离心残渣用纯净水洗涤后保留,供后续形态提取使用。

2) 还原态(可还原态、氧化结合态):在上一步骤剩余的残渣中加入40 mL 0.5 mol/L盐酸羟胺和硝酸混合液(pH=2),于(22 $\pm$ 5)  $^{\circ}\text{C}$ 恒温振荡16 h。随后,将混合液在3 000 r/min下离心20 min,收集上清液转移至聚乙烯瓶中,采用ICP-MS测定重金属元素浓度。残渣则用纯净水洗涤后保存,供后续形态分析使用。

3) 氧化态(可氧化态、有机结合态):在上一步骤剩余的残渣中加入10 mL 30%过氧化氢溶液,用硝酸调节pH至2~3,室温静置1 h,其间每15 min振荡一次。随后于(85 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ 加热消解至近干,重复此步骤以确保消解完全。冷却后加入适量去离子水或缓冲溶液,恒温振荡使重金属溶解。经离心后收集上清液,采用ICP-MS测定其中重金属含量。

4) 残渣态(残留态):是指经过酸溶态、还原态和氧化态提取后,仍然留在残渣中的重金属部分,即残渣态含量=重金属全量-酸溶态含量-还原态含量-氧化态含量。

5) 全量:称取1 g烘干后的粉煤灰,加入硝酸、氢氟酸、盐酸混合酸,置于200  $^{\circ}\text{C}$ 电热板上消解至完全。消解液冷却后移液至容量瓶中,冲洗消解罐内壁并合并洗涤液,定容、混匀。利用ICP-MS测溶液中各重金属的浓度。

## 1.4 生态风险评价法

### 1.4.1 单因子指数评价法

单因子指数评价法<sup>[15]</sup>是通过计算单一重金属的实测浓度与相应环境质量标准限值的比值,来确定该重金属的污染程度(表2)。本实验以土壤背景值为参考值,评价粉煤灰中各重金属污染

情况,为粉煤灰资源化利用潜在风险评价奠定基础。污染指数( $P_i$ )计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为粉煤灰中各重金属的污染指数; $C_i$ 为重金属的全量实测含量,mg/kg; $S_i$ 为土壤背景值,mg/kg。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)确定Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Hg、Tl、As、Zn<sup>[16]</sup>的土壤背景值,分别为0.6、250、190、100、170、3.4、0.58、25、300 mg/kg(Tl取陕北风沙地土壤背景值)。

表 2 污染指数分级  
Table 2 Classification of pollution index

等级	污染指数( $P_i$ )	污染评价结果
I	$P_i \leq 1$	无污染
II	$1 < P_i \leq 2$	轻微污染
III	$2 < P_i \leq 3$	轻度污染
IV	$3 < P_i \leq 5$	中度污染
V	$P_i > 5$	重度污染

#### 1.4.2 富集因子法

富集因子法是一种用于评估和解析大气颗粒物中元素富集程度的方法<sup>[17]</sup>。在粉煤灰重金属分析中应用该方法,主要是通过分析粉煤灰中重金属含量与土壤中重金属背景值的倍数,判断重金属在粉煤灰中的相对富集程度。若富集因子远

大于1,表明重金属在粉煤灰中相对于背景水平有显著富集,此时需要进行进一步的环境风险评估并采取响应的管控措施。富集因子计算公式如下:

$$EF = \frac{C_i}{C_0} \quad (2)$$

式中:EF为粉煤灰中各重金属的富集因子; $C_i$ 为重金属的全量实测含量,mg/kg; $C_0$ 为土壤背景值,mg/kg。

#### 1.4.3 地质累积指数法

地质累积指数法<sup>[18]</sup>通过对比重金属实测浓度与地球化学背景值,评估土壤和沉积物的污染等级,能够反映自然和人为因素对土壤重金属累积的影响。该方法将土壤或沉积物中某重金属的浓度与背景值相比较,通过计算一个指数值来评估该重金属的污染程度和富集程度。地质累积指数计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_i}{K \times B_i}\right) \quad (3)$$

式中: $I_{geo}$ 为地质累积指数; $C_i$ 为土壤中重金属的浓度,mg/kg; $B_i$ 为陕北风沙地土壤背景值,mg/kg; $K$ 为背景差异值修正系数,通常取1.5<sup>[19]</sup>。

地质累积指数法将污染程度分为7个等级,详见表3。

表 3 基于地质累积指数法的污染程度分级

Table 3 Classification of pollution degree based on the geological accumulation index method

等级	地质累积指数( $I_{geo}$ )	污染分级
I	$I_{geo} \leq 0$	清洁
II	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染
III	$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度污染
IV	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染
V	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重度污染
VI	$4 < I_{geo} \leq 5$	重度污染
VII	$I_{geo} \geq 5$	严重污染

#### 1.4.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法<sup>[20]</sup>旨在评估土壤、沉积物及其他环境介质中重金属污染所造成的生态风险。该方法通过计算单个元素的潜在生态风险系数和多个元素的潜在生态风险指数,评估重金属的潜在生态风险。潜在生态风险系数和潜在生态风险指数计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (4)$$

式中: $E_r^i$ 为重金属*i*的潜在生态风险系数; $T_r^i$ 为重金属*i*在土壤中的毒性响应系数<sup>[21]</sup>,Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Hg、Tl、As、Zn的毒性响应系数分别为30、2、5、5、5、80、10、10、1<sup>[22]</sup>; $C_s^i$ 为粉煤灰中重金属*i*的实测浓度; $C_n^i$ 为重金属*i*的背景参比值;RI为粉煤灰中重金属的潜在生态风险指数。

重金属潜在生态风险共分为5个等级,具体划分见表4。

表4 潜在生态风险分级

Table 4 Classification of potential ecological risks

等级	潜在生态风险系数( $E_r^i$ )	潜在生态风险指数(RI)	风险评价结果
I	$E_r^i < 40$	RI < 150	轻微风险
II	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq \text{RI} < 300$	中等风险
III	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq \text{RI} < 600$	较高风险
IV	$160 \leq E_r^i < 320$	$600 \leq \text{RI} < 1200$	高风险
V	$E_r^i \geq 320$	RI $\geq 1200$	超高风险

#### 1.4.5 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法<sup>[23-24]</sup> (Nemerow Integrated Pollution Index Method) 是一种常用的多因子综合污染指数评价方法,是由单因子污染指数法发展而来。该方法主要用于评估环境(如土壤、水体等)中重金属或其他污染物的综合污染程度,其基本思路是将多种污染物的浓度进行标准化处理,然后取最大值作为综合污染指数,以

此来反映环境质量的总体水平。计算公式如下:

$$P_n = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{i,\max}^2}{2}} \quad (6)$$

式中: $P_n$  为内梅罗综合污染指数; $\bar{P}_i$  为各重金属单因子污染指数的平均值; $P_{i,\max}$  为各重金属单因子污染指数的最大值。

内梅罗综合污染指数分级见表5。

表5 内梅罗综合污染指数分级

Table 5 Classification of Nemerow integrated pollution index

等级	内梅罗综合污染指数( $P_n$ )	污染分级
I	$P_n \leq 0.7$	清洁
II	$0.7 < P_n \leq 1$	较清洁
III	$1 < P_n \leq 2$	轻度污染
IV	$2 < P_n \leq 3$	中度污染
V	$P_n > 3$	重度污染

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属各组分形态含量

粉煤灰中重金属的各形态含量见表6。农用地土壤风险筛选值取自《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。除Tl未查到农用地土壤风险筛选值外,剩余重金属全量均可与陕北风沙地土壤背景值及农用地土壤风险筛选值进行比较。通过对比发现,除Cd、Cr、Zn外,Ni、Cu、Hg、As、Tl等的全量均超过陕北风沙地土壤背景值,背景值倍数排序为Hg(3.63) > Tl(1.94) > Cu(1.62) > As(1.51) > Pb(1.12) > Ni(1.09)。除Tl外,其余重金属全量均小于农用地土壤风险筛选值。

图3为粉煤灰中重金属的各形态含量占比,其中残渣态含量是从全量中扣除酸溶态、还原态和氧化态含量计算得出。由图3可以看出,除Tl外,其余重金属元素的残渣态含量占比均超过50%,说明Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Hg、As、Zn主要以残渣态形态存在。Tl的还原态占比为55%,这意味着粉煤灰中的Tl更易参与氧化还原反应。

### 2.2 粉煤灰资源化利用分析

根据榆林市地方标准《煤基固废调理剂修复沙化土地技术规范》(DB6108/T 53—2023)及《煤基固废调理剂修复盐碱地技术规范》(DB6108/T 52—2023),用于生态修复的粉煤灰可分为A、B两级。A级粉煤灰可直接用于制备煤基固废土壤调理剂,B级粉煤灰经微生物无害化处理后可用于制备煤基固废土壤调理剂。通过表7可知,粉煤灰中重金属的全量平均值均小于A级规范限值,符合A级粉煤灰标准,可以直接用于制备煤基固废土壤调理剂,以修复沙化土地及盐碱地。

### 2.3 生态风险评价

#### 2.3.1 粉煤灰重金属单因子指数评价

如表8所示,通过单因子指数评价法计算Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Hg、Tl、As、Zn的污染指数值,分别为0.107、0.134、0.123、0.229、0.059、0.032、1.940、0.445、0.071。各金属元素按污染指数大小的排序为Tl > As > Cu > Cr > Ni > Cd > Zn > Pb > Hg。除Tl属于轻微污染外,其余重金属全量均处于无污染状态。Tl在自然界中以多种形式存在,具有较高毒性<sup>[26]</sup>。其毒性作用始于抑制固氮与硝化细菌的活性,进而扰乱土壤中氮的固定与转化过

程,破坏氮循环平衡,最终阻碍植物对氮素的摄取。Tl 还能够与土壤中的酶结合,降低这些酶在有机物分解和养分转化等生物化学过程中的催化效率。

表 6 粉煤灰中重金属的各形态含量  
Table 6 Content of heavy metals in various forms in fly ash

重金属	赋存形态	含量平均值	陕北风沙地土壤背景值 <sup>[25]</sup>	农用地土壤风险筛选值(pH>7.5)	mg/kg
Cd	全量	0.064			
	酸溶态	0.005			
	还原态	0.010	0.07	0.6	
	氧化态	0.005			
	残渣态	0.044			
Cr	全量	33.497			
	酸溶态	1.969			
	还原态	5.118	47.80	250	
	氧化态	2.639			
	残渣态	23.771			
Ni	全量	23.356			
	酸溶态	5.866			
	还原态	2.631	21.50	190	
	氧化态	0.780			
	残渣态	14.079			
Cu	全量	22.940			
	酸溶态	0.006			
	还原态	1.843	14.20	100	
	氧化态	2.027			
	残渣态	19.064			
Pb	全量	10.076			
	酸溶态	0.004			
	还原态	0.382	9.00	170	
	氧化态	1.231			
	残渣态	8.459			
Hg	全量	0.109			
	酸溶态	0.006			
	还原态	0.002	0.03	3.4	
	氧化态	0.007			
	残渣态	0.094			
Tl	全量	1.125			
	酸溶态	0.096			
	还原态	0.616	0.58	—	
	氧化态	0.070			
	残渣态	0.343			
As	全量	11.120			
	酸溶态	0.533			
	还原态	1.960	7.35	25	
	氧化态	1.531			
	残渣态	7.096			
Zn	全量	21.326			
	酸溶态	0.063			
	还原态	3.192	40.80	300	
	氧化态	1.443			
	残渣态	16.628			

注:“—”表示未查到相关数据。

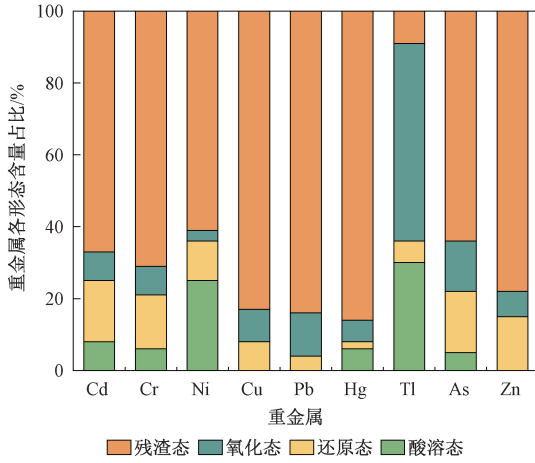


图3 粉煤灰中重金属各形态含量占比

Fig.3 Percentage of the contents of each form of heavy metals in fly ash

表7 粉煤灰资源化利用分级

Table 7 Classification of ecological utilization of fly ash

重金属	粉煤灰分级标准	
	A级	B级
Cd	<0.3	0.3~0.6
Cr	<150	150~250
Ni	<60	60~100
Cu	<50	50~150
Pb	<70	70~170
Hg	<0.5	0.5~150
Tl	—	—
As	<20	20~40
Zn	<200	200~250

注：“—”表示未查到相关数据。

2.3.2 粉煤灰重金属富集因子评价

如表9所示,分别选取中国土壤<sup>[27]</sup>、陕西土壤<sup>[28]</sup>、榆林土壤背景值(榆林市榆阳区各乡镇土壤平均值),计算富集因子。通过计算得出,在中

国土壤背景值下,As的富集因子大于1,为1.017;在陕西土壤背景值下,Cu、Hg、As的富集因子大于1,分别为1.072、3.633、1.002;在榆林土壤背景值下,Hg、As的富集因子大于1,分别为1.847、1.636。这表明Cu、Hg、As等重金属在粉煤灰中有明显富集,在资源化利用过程中需要重点关注。

表8 粉煤灰重金属单因子污染指数  
Table 8 Single factor pollution index of heavy metals in fly ash

重金属	土壤背景值/(mg/kg)	全量/(mg/kg)	污染指数
Cd	0.6	0.064	0.107
Cr	250	33.497	0.134
Ni	190	23.356	0.123
Cu	100	22.940	0.229
Pb	170	10.076	0.059
Hg	3.4	0.109	0.032
Tl	0.58	1.125	1.940
As	25	11.120	0.445
Zn	300	21.326	0.071

注:Tl土壤背景值以陕北风沙地土壤背景值替代。

2.3.3 粉煤灰重金属地质累积指数评价

由表10可以看出,Cu、Tl、As的地质累积指数值分别为0.107、0.371、0.012,属于轻度污染水平;Hg的地质累积指数值为1.276,属于偏中度污染水平;Cd、Cr、Ni、Pb、Zn属于清洁水平,不存在污染问题。综上所述,粉煤灰重金属污染程度属于偏中度污染水平及以下,其中绝大多数元素未构成环境风险,但Hg的累积效应较为突出。因此,在陕北风沙区开展生态修复工程时,应特别关注粉煤灰中Hg在土壤中的长期累积行为及其潜在生态风险。

表9 粉煤灰重金属富集因子

Table 9 Enrichment factors of heavy metals in fly ash

重金属	中国土壤		陕西土壤		榆林土壤	
	背景值/(mg/kg)	富集因子	背景值/(mg/kg)	富集因子	背景值/(mg/kg)	富集因子
Cd	0.391	0.164	0.094	0.681	0.203	0.315
Cr	60.960	0.550	62.500	0.536	39.891	0.840
Ni	25.060	0.932	28.800	0.811	25.600	0.912
Cu	29.590	0.775	21.400	1.072	30.960	0.741
Pb	34.200	0.295	21.400	0.471	14.494	0.695
Hg	0.495	0.220	0.030	3.633	0.059	1.847
As	10.930	1.017	11.100	1.002	6.797	1.636
Zn	85.470	0.250	69.400	0.307	50.140	0.425

表 10 粉煤灰重金属地质累积指数及污染程度  
Table 10 Geoaccumulation index and pollution level of heavy metals in fly ash

重金属	全量/(mg/kg)	陕北风沙地土壤背景值/(mg/kg)	地质累积指数	污染程度
Cd	0.064	0.07	-0.714	清洁
Cr	33.497	47.80	-1.096	清洁
Ni	23.356	21.50	-0.466	清洁
Cu	22.940	14.20	0.107	轻度污染
Pb	10.076	9.00	-0.422	清洁
Hg	0.109	0.03	1.276	偏中度污染
Tl	1.125	0.58	0.371	轻度污染
As	11.120	7.35	0.012	轻度污染
Zn	21.326	40.80	-1.521	清洁

### 2.3.4 粉煤灰重金属潜在生态风险指数评价

利用 Hakanson 指数法(背景参比值采用陕北风沙地土壤背景值),分别计算粉煤灰中 9 种重金属全量及有效态含量对应的潜在生态风险系数,以及所有重金属的潜在生态风险指数,并对全量及有效态含量的贡献率加以计算(表 11)。

由表 11 可以看出,在重金属全量潜在生态风险系数中,Hg 对应的值为 290.667,属于高生态风险;其他重金属均属于轻微生态风险。重金属

有效态潜在生态风险系数计算结果显示,所有重金属均属于轻微生态风险。Hg 的全量及有效态含量潜在生态风险系数贡献率均较大,分别为 77.790%及 45.732%;Cd、Tl 的有效态含量贡献率均超过 10%,分别为 13.782%、26.316%。粉煤灰中 9 种重金属元素全量的潜在生态风险指数值为 373.654,风险评价等级为较高生态风险;有效态含量的潜在生态风险指数值为 46.648,风险评价等级为轻微生态风险。

表 11 粉煤灰重金属 Hakanson 指数评价结果  
Table 11 Hakanson index evaluation results of heavy metals in fly ash

重金属	全量/(mg/kg)	有效态含量/(mg/kg)	潜在生态风险系数		贡献率/%	
			全量	有效态	全量	有效态
Cd	0.064	0.015	27.429	6.429	7.341	13.782
Cr	33.497	7.087	1.402	0.297	0.375	0.637
Ni	23.356	8.497	5.432	1.976	1.454	4.236
Cu	22.94	1.849	8.077	0.651	2.162	1.396
Pb	10.076	0.386	5.598	0.214	1.498	0.459
Hg	0.109	0.008	290.667	21.333	77.790	45.732
Tl	1.125	0.712	19.397	12.276	5.191	26.316
As	11.12	2.493	15.129	3.392	4.049	7.271
Zn	21.326	3.255	0.523	0.080	0.140	0.171

### 2.3.5 粉煤灰重金属内梅罗综合污染指数评价

由表 12 可得,粉煤灰中 9 种重金属的单因子污染指数平均值为 0.349。Tl 的单因子污染指数最大,为 1.940。经计算得出,内梅罗综合污染指数值为 1.394。依据表 5 进行风险评价,得出粉煤灰中 9 种重金属的风险等级为轻度污染水平。该方法的局限性在于,过度放大了污染指数最大因子的作用,从而在评价中高估了高浓度污染物的影响,并低估了低浓度污染物的影响。在本研究中,此评价方法过分放大了 Tl 的影响,倘若在去除 Tl 后利用此方法进行评价,得出内梅罗综合污染指数值为 0.337,对应的污染等级为清洁水平。

表 12 粉煤灰重金属内梅罗综合污染指数  
Table 12 Nemerow integrated pollution indexes of heavy metals in fly ash

重金属	全量/(mg/kg)	单因子污染指数	内梅罗综合污染指数
Cd	0.064	0.107	
Cr	33.497	0.134	
Ni	23.356	0.123	
Cu	22.940	0.229	
Pb	10.076	0.059	1.394
Hg	0.109	0.032	
Tl	1.125	1.940	
As	11.120	0.445	
Zn	21.326	0.071	

### 2.3.6 综合评价

本研究采用 5 种方法对粉煤灰重金属生态风险进行系统评估,各方法评价结果在污染物具体

排序与风险等级上存在一定差异。造成该情况的原因,主要在于各方法在评价因子、计算方式及指标敏感性方面的差异。为提升结论的科学价值与实践意义,本研究从污染水平与生态危害两个视角构建了综合评价体系进行判断:(1)在污染水平方面,地质累积指数与内梅罗综合污染指数主要反映重金属相对于背景值的超标情况。评价结果显示,Cu、Hg、As、Tl为需关注对象,Hg污染级别达到偏中度污染。(2)在生态危害方面,潜在生态风险指数法的特点在于引入了毒性响应系数,以反映不同重金属的毒性差异。评价结果表明,Hg、Cd、Tl生态风险较高;Cu尽管浓度略高,但因其毒性响应系数为1,潜在生态风险系数值远低于其他重金属,生态风险有限。此外,从重金属形态赋存角度看,除Tl外,其余元素以残渣态为主,迁移性较低,进一步支持了上述综合判断结果。

综上,应重点关注粉煤灰中Hg、Cd、Tl的生态风险贡献;Cu虽部分指标值略高,但生态效应不显著。整体上,粉煤灰资源化利用的环境风险处于可控范围内。建议后续研究可构建多因子权重体系或引入主成分分析、模糊聚类等集成评价方法,提升多源指标下的风险判别的一致性与科学性。

## 3 讨论与展望

### 3.1 讨论

本研究采用BCR连续提取法测定了粉煤灰中重金属的全量,并综合运用多种生态风险评价方法对其潜在环境风险进行了评估<sup>[29]</sup>。需要指出的是,所采用的评价方法(如地质累积指数、潜在生态风险指数等)主要源于土壤环境质量评价体系,目前尚缺乏针对粉煤灰等工业副产物的专属生态风险评价标准。2023年,我国大宗固体废弃物产生量高达42.34亿t,相较于2022年同比增长2.34%<sup>[30]</sup>;粉煤灰年产生量为7.49亿t,综合利用率为64.75%,远低于国家要求的80%的综合利用率标准。此外,根据中国自然资源部2023年土地质量监测数据,我国退化土地总面积约263.6万km<sup>2</sup>,占全国国土总面积的27.5%。粉煤灰富含磷、钾及多种微量元素,可作为作物生长提供部分必需营养元素<sup>[31]</sup>,在一定条件下具备作为土壤改良剂或辅助肥料的潜力。适量施用粉

煤灰于黏质土壤,有助于改善其通气性、透水性及热力学特性,优化水、气、热、肥的协调供应能力,进而促进土壤微生物群落活性<sup>[32]</sup>。综上,在有效管控重金属环境风险的前提下,合理施用粉煤灰可提升退化土壤的肥力水平<sup>[33-35]</sup>,促进作物增产<sup>[36]</sup>,并改善其理化性质<sup>[37]</sup>,从而服务于生态修复目标。因此,粉煤灰的资源化利用在退化土地生态修复中具有广阔的应用前景,但其潜在的重金属累积风险仍需作为核心关注点予以系统评估与长期监测。目前对单一重金属的生态风险评估,可采用的方法包括单因子污染指数法、地质累积指数法以及富集因子法等<sup>[38-39]</sup>。通过富集因子法发现,粉煤灰中存在Cu、Hg、As等重金属富集现象。相较于中国整体土壤背景水平,As呈现轻微富集,这主要归因于中国不同区域地质背景差异,以及矿产开发、农业生产等人为活动因素<sup>[40]</sup>。陕西作为能源大省,其重金属富集情况与煤矿开采、工业活动及交通运输等因素密切相关。研究显示,陕北煤矿区土壤中Hg、Cd、Pb、Cr的含量高于陕西省土壤背景值<sup>[28]</sup>;榆林地区土壤中重金属可能的来源涵盖燃煤、有色金属冶炼、化工生产等。综合分析可知,Cu、Hg、As等重金属在粉煤灰中相对于环境背景水平呈显著富集,这表明粉煤灰是这些重金属的重要来源之一。粉煤灰是煤炭燃烧产生的固体废弃物,富含大量重金属元素。若处理不当,其可能通过径流、扬尘等途径进入土壤环境,引发土壤污染。而粉煤灰经微生物、生物炭等的固化及钝化处理,可有效阻止其中的重金属在土壤中富集,并降低其被植物根系吸收的风险<sup>[41-42]</sup>。Hg在常温下的蒸发速率随温度的升高而增大。尽管在常温下蒸发缓慢,但温度的微小升高都可能显著提高Hg的蒸发速率<sup>[43]</sup>。因此,Hg富集因子虽达3.633,但不需要考虑其生态风险。

重金属生态综合风险评估主要采用内梅罗综合污染指数法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法,同时可结合模糊数学法和灰色聚类法开展。重金属在分布与演变特征,使其污染特性呈现出均匀连续性及突变性并存的特点。这意味着在不同空间区域与时间尺度下,即便重金属含量相同,其生态风险水平也可能存在显著差异。本研究聚焦于粉煤灰在自然环境中与重金属迁移转化相关的环境行为。粉煤灰中重金属的释放与迁移是一个受多种环境因素协同调控的复杂过程,包括微

生物介导的分解转化作用、降雨淋溶作用,以及植物根系分泌物的螯合作用等。这些因素会驱动重金属的赋存形态发生不同程度的迁移转化,进而改变其环境活性与生物有效性,最终导致其生态风险水平升高或降低。综上,在评估粉煤灰中重金属的生态风险时,需系统考量上述自然环境因素对重金属迁移转化的调控作用。Hg、Cd、Pb、Cr、As 等的生物毒性<sup>[44]</sup>显著,累积后会对土壤中的微生物群落及作物根系产生不可逆影响,因此在资源化利用过程中,应考虑在评估重金属生态风险时引入毒性系数<sup>[45]</sup>,使评估结果更具有参考价值与实际意义。但现阶段多数研究仍停留在以浓度为主导的定量评价层面。为增强评估结果的生态意义,本研究应用 Hakanson 潜在生态风险指数法,整合了毒性响应系数,以量化比较各重金属的相对生态风险贡献。研究表明,尽管部分重金属含量较高,但由于其毒性响应系数值低(如 Cu 为 1),最终的潜在风险贡献有限;而毒性响应系数值较高的 Hg、Tl、Cd,即使浓度较低,其潜在生态风险系数和潜在生态风险指数贡献占比明显更高。该方法可为未来的生态风险精准化评估提供理论支持。在粉煤灰的资源化利用过程中,需要关注 Tl 对农作物的影响。CORZO-REMIGIO 等<sup>[46]</sup>学者研究发现,甘蓝类蔬菜通过根系从土壤中吸收 Tl,并将其向地上部位转运,累积于可食用部分,对人类健康构成潜在威胁;不同种类的甘蓝类蔬菜对 Tl 的吸收能力差异很大,有些品种的地上部分的 Tl 含量超过 500  $\mu\text{g/g}$ 。在意大利北部一个受污染地区进行的田间试验表明,羽衣甘蓝和红菊苣对 Tl 的吸收行为有显著差异,在羽衣甘蓝叶片中可观察到 Tl 的过度积累<sup>[47]</sup>。为减轻 Tl 的危害,可以通过添加土壤改良剂或生物炭,实现对可耕作土壤中潜在毒性元素 Tl 的固化,降低其生物有效性<sup>[48-49]</sup>。

### 3.2 展望

当前在粉煤灰的资源化利用过程中,尚缺乏一个全面的重金属生态风险综合评价体系。建议将化学提取法与生物评价法相结合,评估煤基固体废弃物中重金属的生态风险。另外,随着智能化的发展与应用,应引入基于 AI 的大数据模型,对煤基工业固体废弃物资源化利用<sup>[50-51]</sup>进行科学化、体系化跟踪监测,综合分析潜在生态风险,完善煤基工业固体废弃物资源化利用风险评价标准,建立煤基固体废弃物评价体系。

## 4 结论

1)除 Cd、Cr、Zn 外,Ni、Cu、Hg、As 等重金属含量超过陕北风沙地土壤背景值。各元素的风沙地背景值倍数排序为  $\text{Hg}(3.63) > \text{Tl}(1.94) > \text{Cu}(1.62) > \text{As}(1.51) > \text{Pb}(1.12) > \text{Ni}(1.09)$ 。

2)粉煤灰中的 9 种重金属中,仅 Tl 的还原态占比为 55%;剩余 8 种重金属元素主要以残渣态存在于粉煤灰中,占比均超过 50%。

3)单因子指数法评价得到粉煤灰中 Tl 的污染程度为轻微污染,而其他重金属元素均处于无污染状态。采用地质累积指数法评估发现,Hg 的污染级别为偏中度污染,Cu、Tl、As 处于轻度污染水平。

4)通过潜在生态风险指数法得出,粉煤灰中 9 种重金属元素全量的生态风险等级为较高生态风险,有效态含量的生态风险等级为轻微生态风险。内梅罗综合污染指数法评价结果显示,9 种重金属的综合污染等级为轻度污染。当剔除关键污染物 Tl 后,内梅罗综合污染指数降至 0.337,整体污染等级已达到清洁水平。

### 参考文献(References):

- [1] 葛世荣,刘淑琴,刘金昌,等.能源强国目标下煤炭安全保供及高效降碳效力研究[J].中国工程科学,2024,26(4):40-51.  
GE Shirong, LIU Shuqin, LIU Jinchang, et al. Effectiveness of Secure Supply and Carbon Reduction in the Coal Sector for Strengthening the Energy Power of China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 40-51.
- [2] 肖英,何杰兰,汪权方,等.中国能源消费差异化碳减排潜能分析[J].湖北大学学报(自然科学版),2024,46(5):701-708.  
XIAO Ying, HE Jielan, WANG Quanfang, et al. Analysis of Differentiated Carbon Emission Reduction Potential of Energy Consumption in China [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2024, 46(5): 701-708.
- [3] 王晓兵,李浩,曲文涛,等.粉煤灰淋滤过程中砷和铅的迁移特性与钝化[J].洁净煤技术,2024,30(增刊2):197-205.  
WANG Xiaobing, LI Hao, QU Wentao, et al. Migration Characteristics and Immobilization of Arsenic and Lead During the Leaching Process of Fly Ash [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S2): 197-205.

- [ 4 ] 李琴,徐舒,顾闫悦,等.我国粉煤灰生态环境标准体系现状及建议[J].环境工程技术学报,2023,13(1):438-446.  
LI Qin,XU Shu,GU Yanyue,et al. Present Status and Suggestions on the Standard System of Ecology and Environment of Fly Ash in China [ J ]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13 ( 1 ):438-446.
- [ 5 ] 孙红娟,曾丽,彭同江.粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J].材料导报,2021,35(3):3 010-3 015.  
SUN Hongjuan,ZENG Li,PENG Tongjiang. Research Status and Progress of High-Value Utilization of Coal Fly Ash [ J ]. Materials Reports, 2021, 35 ( 3 ): 3 010-3 015.
- [ 6 ] 赵满满,徐秀月,王宁宁,等.秸秆与粉煤灰联合施加对煤矸石污染土壤中黑麦草富集重金属的影响[J].环境工程,2023,41(12):221-226,287.  
ZHAO Manman,XU Xiuyue,WANG Ningning,et al. Effect of Dosing Straw and Fly Ash on Enrichment of Heavy Metals in Ryegrass in Coal Gangue Contaminated Soil [ J ]. Environmental Engineering, 2023,41(12):221-226,287.
- [ 7 ] 孔祥芝,李行星,张恒,等.粉煤灰化学成分对其抑制碱骨料反应效果影响试验研究[J].混凝土,2024(8):112-114,119.  
KONG Xiangzhi,LI Xingxing,ZHANG Heng,et al. Experimental Study on the Effect of Chemical Composition of Fly Ash on Its Inhibition of Alkali Aggregate Reaction [ J ]. Concrete, 2024 ( 8 ): 112-114,119.
- [ 8 ] 朱佩誉.粉煤灰大规模高附加值应用技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(增刊2):352-358.  
ZHU Peiyu. Progress of High Value-Added Application Technology of Coal Fly Ash [ J ]. Clean Coal Technology, 2021, 27 ( S2 ): 352-358.
- [ 9 ] 李快,栗照帅,董庭轩,等.湿法磁选对粉煤灰中铁和重金属元素的分布影响研究[J].无机盐工业,2024,56(4):98-104,150.  
LI Kuai,LI Zhaoshuai,DONG Tingxuan,et al. Study on Effect of Wet Magnetic Separation on Distribution of Fe and Heavy Metal in Fly Ash [ J ]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56 ( 4 ): 98-104,150.
- [ 10 ] 李振凯,马少兰,高雪,等.低分子有机酸浸提和添加锌肥、锰肥对甘草土壤4种金属元素释放及赋存形态的影响[J].西南农业学报,2022,35(7):1 640-1 648.  
LI Zhenkai,MA Shaolan,GAO Xue,et al. Effects of Low Molecular Weight Organic Acid Extraction and Addition of Zinc and Manganese Fertilizer on the Release and Occurrence Forms of Four Metal Elements in *Glycyrrhiza uralensis* Soil [ J ]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35 ( 7 ): 1 640-1 648.
- [ 11 ] 陈璐,文方,程艳,等.铅锌尾矿库周边土壤重金属污染特征及环境风险[J].中国环境监测,2017,33(1):82-87.  
CHEN Lu,WEN Fang,CHENG Yan,et al. Study on Contamination Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in the Soils Around Pb-Zn Tailings Reservoir [ J ]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33 ( 1 ): 82-87.
- [ 12 ] 曾昭婵,曾昭朝,胡佳佳.贵州煤矿区表层水-沉积物重金属分布特征及来源分析——以新寨河为例[J].中国环境监测,2023,39(4):147-157.  
ZENG Zhaochan,ZENG Zhaozhao,HU Jiajia. Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Water-Sediment Within Guizhou Coal Mining Area: The Case Study of Xinzhai River [ J ]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39 ( 4 ): 147-157.
- [ 13 ] 朱加华,张绪敏,刘丹,等.毕节市粉煤灰重金属形态分析及风险评价[J].山东化工,2021,50(14):230-233.  
ZHU Jiahua,ZHANG Xumin,LIU Dan,et al. Speciation Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Fly Ash of Bijie City [ J ]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50 ( 14 ): 230-233.
- [ 14 ] 邓庆德,张艳,姬海宏,等.粉煤灰钝化污泥炭中重金属有效性评估[J].中国科技论文,2018,13(9):1 068-1 071.  
DENG Qingde,ZHANG Yan,JI Haihong,et al. Effectiveness Evaluation on the Heavy Metals in Sludge Charcoal Passivated by Fly Ash [ J ]. China Sciencepaper, 2018, 13 ( 9 ): 1 068-1 071.
- [ 15 ] 辛惠娟,苏思霖,周添红,等.基于不同评价方法的玛曲县饮用水水源地水质研究[J].给水排水,2023,59(增刊1):212-217,223.  
XIN Huijuan,SU Silin,ZHOU Tianhong,et al. Study on Water Quality of Drinking Water Sources in Maqu County Based on Different Evaluation Methods [ J ]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59 ( S1 ): 212-217,223.
- [ 16 ] 陈景辉,马云,郭毅,等.陕西省城市土壤重金属空间分布特征与来源解析[J].环境生态学,2023,5(10):1-12.

- CHEN Jinghui, MA Yun, GUO Yi, et al. Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban Soils of Shaanxi Province[J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(10):1-12.
- [17] 尹寒梅,徐雪梅,冯小琼,等.成都市城区 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征及来源[J]. *中国环境监测*, 2025, 41(2):114-122.
- YIN Hanmei, XU Xuemei, FENG Xiaoqiong, et al. Pollution Characterization and Source Identification of Metal Elements in PM<sub>2.5</sub> in Chengdu City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(2):114-122.
- [18] 王昌宇,张素荣,刘继红,等.雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价[J]. *中国地质*, 2021, 48(6):1 697-1 709.
- WANG Changyu, ZHANG Surong, LIU Jihong, et al. Pollution Level and Risk Assessment of Heavy Metals in a Metal Smelting Area of Xiong'an New District [J]. *Geology in China*, 2021, 48(6):1 697-1 709.
- [19] 陈涛,赵子亮,严春丽,等.云南某铅锌冶炼厂土壤重金属污染特征与成因分析[J]. *中国环境监测*, 2025, 41(2):133-145.
- CHEN Tao, ZHAO Ziliang, YAN Chunli, et al. Soil Contamination Characteristics and Causes Analysis of Heavy Metals in a Lead and Zinc Smelting Plant in Yunnan [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(2):133-145.
- [20] 刘坤,李雨桐,余海,等.重庆某工业园土壤重金属污染特征、风险及源解析[J]. *中国环境监测*, 2024, 40(2):74-83.
- LIU Kun, LI Yutong, YU Hai, et al. Pollution Characteristics, Risk Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in an Industrial Park of Chongqing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2024, 40(2):74-83.
- [21] 徐庆利,肖晨威,李跃,等.典型金属冶炼城市降尘中重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(6):133-143.
- XU Qingli, XIAO Chenwei, LI Yue, et al. Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition from a Typical Metal Smelting City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(6):133-143.
- [22] 王茜,刘永侠,庄文,等.南四湖表层沉积物中铍、镉、铊的地球化学特征与环境风险[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5):1 968-1 982.
- WANG Qian, LIU Yongxia, ZHUANG Wen, et al. Research on Geochemical Characteristics and Environmental Risk of Be, Sb and Tl in Surface Sediments of the Nansihu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5):1 968-1 982.
- [23] 王海洋,韩玲,谢丹妮,等.矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(4):2 104-2 114.
- WANG Haiyang, HAN Ling, XIE Danni, et al. Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4):2 104-2 114.
- [24] 王小凤,兰文波,肖启蓬,等.应用三种方法评价湖南省郴州市东河流域耕地土壤环境质量[J]. *环境与职业医学*, 2022, 39(6):684-689.
- WANG Xiaofeng, LAN Wenbo, XIAO Qipeng, et al. Evaluation of Soil Environmental Quality of Cultivated Land in the Donghe River Basin of Chenzhou City, Hunan Province by Three Methods [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2022, 39(6):684-689.
- [25] 边江东,郭爱琴,张艳,等.气化渣提碳灰渣重金属赋存形态特征及生态风险评价[J]. *中国煤炭*, 2023, 49(9):96-103.
- BIAN Jiangdong, GUO Aiqin, ZHANG Yan, et al. Occurrence form Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Carbon Extraction Ash from Gasification Slag [J]. *China Coal*, 2023, 49(9):96-103.
- [26] 陈景辉,郭毅,杨博,等.中国 33 个城市土壤重金属污染空间分布特征与潜在风险[J]. *中国环境监测*, 2024, 40(6):152-165.
- CHEN Jinghui, GUO Yi, YANG Bo, et al. Spatial Distribution Characteristics and Potential Risks of Heavy Metal Pollution in Soils of 33 Cities of China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2024, 40(6):152-165.
- [27] 周勤利,李志涛,王学东,等.矿山周边农田土壤磁化率与重金属含量的关系研究[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(5):47-56.
- ZHOU Qinli, LI Zhitao, WANG Xuedong, et al. Correlations Between Magnetic Susceptibility and the Concentration of Heavy Metals in Agricultural Soil Around Mine Area [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, 35(5):47-56.
- [28] 朱玉高.陕北煤矿区农田土壤重金属污染现状及修复研究[J]. *洁净煤技术*, 2014, 20(5):105-108.
- ZHU Yugao. Contamination and Control of Heavy Metals in Farmland Around Coal Mining Area in

- Northern Shaanxi[J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20(5):105-108.
- [29] 蔡维卿. 粉煤灰添加对复垦土壤重金属的赋存特征影响及风险评价[D]. 淮南:安徽理工大学, 2023.
- [30] 李欢, 杨春明. 大宗工业固体废弃物煤矸石的综合利用研究进展[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2024, 47(1):1-9.
- LI Huan, YANG Chunming. Research Progress in Comprehensive Utilization of Bulk Industrial Solid Waste Coal Gangue[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2024, 47(1):1-9.
- [31] 邢静璐, 齐德娥, 秦身钧, 等. 粉煤灰中有价元素的高值化利用研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(7):39-43, 49.
- XING Jingkai, QI De'e, QIN Shenjun, et al. Research Progress on High-Value Utilization of Valuable Elements in Fly Ash[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(7):39-43, 49.
- [32] 王凯. 氯氧镁水泥稳定黏质土路用性能及微观机理研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2023.
- [33] 刘哲, 王欢元, 孙婴婴, 等. 施用不同改良材料对黄土区空心村复垦土壤结构和有机质含量的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5):16-24.
- LIU Zhe, WANG Huanyuan, SUN Yingying, et al. Effects of Different Amendment Materials on Reclaimed Soil Structure and Organic Matter Content of Hollow Village in Loess Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):16-24.
- [34] 季慧慧, 黄明丽, 何键, 等. 粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展[J]. *土壤*, 2017, 49(4):665-669.
- JI Huihui, HUANG Mingli, HE Jian, et al. Effects of Fly Ash on Promoting Soil Properties and Fertility: A Review[J]. *Soils*, 2017, 49(4):665-669.
- [35] 姜雪, 郭丽琢, 牛济军, 等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J]. *江西农业大学学报*, 2024, 46(4):1 086-1 098.
- JIANG Xue, GUO Lizhuo, NIU Jijun, et al. Improvement Effect of Different Amendments on Soil Fertility Status of Saline Alkali Soil in Hexi Irrigation Area [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(4):1 086-1 098.
- [36] 庞喆, 张卫华, 孙增慧, 等. 施用粉煤灰和有机肥对土壤温度和玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(24):91-94.
- PANG Zhe, ZHANG Weihua, SUN Zenghui, et al. Impacts of Fly Ash and Organic Fertilizer on Soil Temperature, Growth and Water Use Efficiency of Maize [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(24):91-94.
- [37] 李恩伟. 粉煤灰配施对挖深垫浅复垦土壤理化性质影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.
- [38] 余梓鹏, 王宝娥, 王柳玲, 等. 生态修复后某矿区下游农田土壤金属污染特征与风险评价[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(5):134-144.
- SHE Zipeng, WANG Bao'e, WANG Liuling, et al. Characteristics and Risk Assessment of Soil Metal Pollution in Farmland Downstream of Mining Area After Ecological Restoration [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(5):134-144.
- [39] MAMAT A, ZHANG Z Y, MAMAT Z, et al. Pollution Assessment and Health Risk Evaluation of Eight (Metalloid) Heavy Metals in Farmland Soil of 146 Cities in China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(11):3 949-3 963.
- [40] ZHONG T Y, CHEN D M, ZHANG X Y. Identification of Potential Sources of Mercury (Hg) in Farmland Soil Using a Decision Tree Method in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(11):1111.
- [41] UKWATTAGE N N L, LI Y, LAKMALIE U U V, et al. Agro-Waste Biochar to Reduce the Leaching of Heavy Metals from Coal Fly Ash Amended Soil[J]. *Asian Soil Research Journal*, 2023, 7(3):43-49.
- [42] DIATTA J, FOJCIK E, DROBEK L, et al. Assessment of Heavy Metals Inactivation in Contaminated Soil by Coal Fly and Bottom Ashes[J]. *Mineralogia*, 2017, 48(1/2/3/4):127-143.
- [43] O'CONNOR D, HOU D Y, OK Y S, et al. Mercury Speciation, Transformation, and Transportation in Soils, Atmospheric Flux, and Implications for Risk Management: A Critical Review [J]. *Environment International*, 2019, 126:747-761.
- [44] 张鸿龄, 马国峰, 刘畅, 等. 清淤底泥处置中添加粉煤灰/炉渣对重金属生物有效性及毒性的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1):254-260.
- ZHANG Hongling, MA Guofeng, LIU Chang, et al. The Effect of Fly Ash and Alkaline Slag on the Heavy Metals Bioavailability and Toxicity of Dredged Sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1):254-260.
- [45] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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, 31(2):112-115.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al.

- Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [46] CORZO-REMIGIO A, HARRIS H H, KIDMAN C J, et al. Mechanisms of Uptake and Translocation of Thallium in *Brassica* Vegetables: An X-Ray Fluorescence Microspectroscopic Investigation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(5): 2 373-2 383.
- [47] WEI X D, NICOLETTO C, SAMBO P, et al. Thallium Uptake and Risk in Vegetables Grown in Pyrite Past-Mining Contaminated Soil Amended with Organic Fertilizer (Compost): A Potential Method for Tl Contamination Remediation[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908:168002.
- [48] LWIN C S, KIM Y N, LEE M N, et al. In Situ Immobilization of Potentially Toxic Elements in Arable Soil by Adding Soil Amendments and the Best Ways to Maximize Their Use Efficiency [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 115-134.
- [49] LUO Z X, KAYIRANGA A, UWIRINGIYIMANA E, et al. Thallium Contamination in Agricultural Soils and Associated Potential Remediation *via* Biochar Utilization[J]. *Biochar*, 2020, 2(1): 33-46.
- [50] 单兴宇. 园林废弃物生态处理与资源化利用探讨[J]. *产业与科技论坛*, 2021, 20(4): 220-221.
- SHAN Xingyu. Discussion on Ecological Treatment and Resource Utilization of Garden Waste [J]. *Industrial & Science Tribune*, 2021, 20(4): 220-221.
- [51] 许欣, 武小燕, 陈敏洁, 等. 粉煤灰在矿坑生态化利用过程中的环境行为研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2023, 75(1): 73-81.
- XU Xin, WU Xiaoyan, CHEN Minjie, et al. Environmental Behavior of Fly Ash During the Process of Ecological Utilization of Mine Pits [J]. *Nonferrous Metals (Mine Section)*, 2023, 75(1): 73-81.