

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023101301

CSTR:32061.14.hjhx.2023101301

段海静, 任翀, 申浩欣, 等. 基于多种评估方法的垃圾中转站周边土壤重金属污染及生态风险[J]. 环境化学, 2025, 44(3): 962-974.

DUAN Haijing, REN Chong, SHEN Haoxin, et al. Heavy metal pollution and ecological risk of soil around waste transfer station based on various assessment methods[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (3): 962-974.

基于多种评估方法的垃圾中转站周边土壤 重金属污染及生态风险*

段海静^{1,2,3} 任翀¹ 申浩欣¹ 彭超月¹ 王艳锋¹ 刘德新^{1,2,3}**
王玉龙^{1,2,3} 马清霞^{1,2,3} 马建华^{1,2,3}

(1. 河南大学地理与环境学院, 开封, 475004; 2. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封, 475004;
3. 河南大学土壤重金属污染控制与修复工程研究中心, 开封, 475004)

摘要 选取我国北方某市内 11 个垃圾中转站周围土壤为研究对象, 分析其 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 元素含量, 基于中国潮土背景值和土壤污染风险筛选值, 分别采用内梅罗综合污染指数 (NIPI) 和改进型内梅罗综合污染指数 (INI) 评价重金属污染程度, 潜在生态风险指数 (RI) 和改进型潜在生态风险指数 (NIRI) 评价重金属生态风险. 结果表明, 研究区 Ni、Cu、Pb、Cr、Zn、Cd 元素平均含量分别为 23.08、26.63、24.08、44.64、97.68、0.32 mg·kg⁻¹. NIPI 评价结果显示, 以中国潮土背景值为参比时, 各垃圾中转站总体上为重金属中度污染区; 以风险筛选值为参比时, 研究区 10 个垃圾中转站均处于安全无污染的水平, 总体上不存在污染风险. INI 评价结果显示, 以中国潮土背景值为参比时, 73% 占比的垃圾中转站污染程度为未污染至中度污染; 以风险筛选值为参比时, 不仅其评价污染等级远高于中国潮土背景值, 且各垃圾站受污风险程度排序与 NIPI 评估结果完全相反. RI 评价结果显示, 以中国潮土背景值为参比时, 7 个垃圾站为中度生态风险, 4 个为强生态风险; 以风险筛选值为参比时, 11 个垃圾站均为轻微生态风险. NIRI 评价结果显示与 RI 相似, 以中国潮土背景值为参比时, 研究区各垃圾中转站生态风险程度严重, 以风险筛选值为参比时, 所有样点的 NIRI 均低于 30, 研究区土壤重金属均为轻微生态风险. 综合上述评价结果表明, INI 不适合以风险筛选值为参比进行土壤重金属污染评估, RI 和 NIRI 评估结果排序基本一致, 五福路、刘寺、五顷四生活垃圾中转站生态风险最高, 晋安路、吹古台、铁南新村垃圾中转站生态风险最低, 表明中国潮土背景值和风险筛选值均适用于这两种评价方法. 研究结果可为土壤重金属污染评价方法的选择提供参考建议.

关键词 土壤重金属, 垃圾中转站, 改进型内梅罗综合污染指数, 改进型潜在生态风险评价.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Heavy metal pollution and ecological risk of soil around waste transfer station based on various assessment methods

DUAN Haijing^{1,2,3} REN Chong¹ SHEN Haoxin¹ PENG Chaoyue¹ WANG Yanfeng¹
LIU Dexin^{1,2,3}** WANG Yulong^{1,2,3} MA Qingxia^{1,2,3} MA Jianhua^{1,2,3}

2023 年 10 月 13 日收稿 (Received: October 13, 2023).

* 河南省科技攻关项目 (242102320255, 232102320107, 242102321077, 232102320073), 河南省自然科学基金 (232300420163) 和河南省地方标准修订项目 (20231210033) 资助.

Supported by Henan Science and Technology Research Project (242102320255, 232102320107, 242102321077, 232102320073), Henan Natural Science Foundation (232300420163) and Henan Province Local Standard Revision Project (20231210033).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: dxliu@vip.henu.edu.cn

(1. College of Geography and Environment Science, Henan University, Kaifeng, 475004, China; 2. Key Laboratory of Geography Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng, 475004, China; 3. Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution, Henan University, Kaifeng, 475004, China)

Abstract This research focuses on the soil surrounding 11 waste transfer stations in a northern city of China. The study analyzes the levels of Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, and Ni elements present in the soil. Based on the background values of Chinese coastal soil and soil screening values for pollution risks, the study uses the Nemerow Integrated Pollution Index (NIPI) and the improved Nemerow Integrated Pollution Index (INI) to assess the extent of heavy metal pollution. Additionally, the study evaluates the ecological risk of heavy metals using the Potential Ecological Risk Index (RI) and the improved Potential Ecological Risk Index (NIRI). The results indicate that the average concentrations of Ni, Cu, Pb, Cr, Zn, and Cd elements in the study area were 23.08, 26.63, 24.08, 44.64, 97.68, and 0.32 mg·kg⁻¹, respectively. The assessment using the NIPI showed that, when compared to the background values of Chinese coastal soil, the waste transfer stations in the study area were generally classified as moderately contaminated with heavy metals. However, when compared to the screening values for risk, all 10 waste transfer stations in the study area were found to be at a safe and pollution-free level, indicating an overall absence of contamination risk. The evaluation based on the INI reveals that, when compared to the background values of Chinese coastal soil, 73% of the waste transfer stations in the study area were classified as ranging from non-polluted to moderately polluted. However, when compared to the screening values for risk, not only were the pollution levels evaluated significantly higher than the background values of Chinese coastal soil, but also the rankings of contamination risk for each waste station were completely opposite to the results obtained from the NIPI assessment. Furthermore, the evaluation results based on the RI indicate that, when compared to the background values of Chinese coastal soil, 7 waste stations were identified as having a moderate ecological risk, while 4 stations were classified as having a high ecological risk. On the other hand, when compared to the screening values for risk, all 11 waste stations were considered to have a minor ecological risk. The evaluation results based on the NIRI were similar to those of the RI. When compared to the background values of Chinese coastal soil, the waste transfer stations in the study area were found to have a significant ecological risk. However, when compared to the screening values for risk, the NIRI values for all sampling points were below 30, indicating that the soil heavy metals in the study area pose only a minor ecological risk. The comprehensive assessment results indicate that the INI is not suitable for assessing soil heavy metal pollution when compared to the screening values for risk. The assessment results of RI and NIRI were consistent in their rankings. The waste transfer stations on Wufu Road, Liusi, and Wuqingsi had the highest ecological risk, while the waste transfer stations on Jinfan Road, Chuigutai, and Tienan New Village had the lowest ecological risk. This suggests that both the background values of Chinese coastal soil and the screening values for risk are applicable to these two evaluation methods. The research findings can provide valuable recommendations for selecting soil heavy metal pollution assessment methods.

Keywords heavy metals in soil, garbage transfer station, improved Nemerow comprehensive pollution index, improved potential ecological risk assessment.

随着城镇化快速发展,我国城市垃圾的总量急剧增加,其中生活垃圾产生量从1979年的0.25亿吨^[1-2]增长到2021年2.49亿吨^[3](以清运量计),年平均增长率为5.21%，“垃圾围城”已经成为制约城市发展,影响市民生活质量的重要因素之一^[4]。城市生活垃圾的生命周期为:居民区生活垃圾产生点(以垃圾桶为代表)经由垃圾车运输至垃圾收集点(垃圾中转站),待垃圾分拣中心对生活垃圾分类后,

最后集中运到垃圾处理终端(垃圾焚烧厂、垃圾综合处理园区)统一对垃圾进行无害化处理^[5]。当前大部分研究主要针对垃圾处理终端(垃圾填埋场^[6-8]、垃圾综合处理园区^[9-10]、垃圾焚烧厂^[11-14]等)周边土壤重金属的污染研究,城市中较为分散的垃圾中转站周围土壤重金属污染评估却鲜有研究。垃圾在中转站处理的过程中,含有的重金属经垃圾渗滤液释放到土壤,易在土壤中积累,给人类健康和生态安全带来潜在危害^[15]。垃圾中转站周边土壤中重金属含量除可能受到生活垃圾自身渗滤液的影响外,还可能受到各种人类活动(农业活动、工业生产和交通运输等)的影响。因此,开展垃圾中转站周围土壤重金属污染和生态风险评价,对开展区域性土壤污染防治具有重要意义。

合理、准确地评价土壤环境质量可为土地资源的有效利用和土壤污染风险管控提供重要依据。以往的研究中,学者们多采用地累积指数^[16]、内梅罗污染指数^[17]、污染负荷指数^[18]、潜在生态风险指数^[19]等方法评估土壤重金属的污染风险程度。然而在实际运用中,内梅罗指数注重指数最大值的重金属污染物的危害性,导致对土壤污染程度分级不精确,评价有所偏差^[20];潜在生态风险虽然考虑了毒性反应因素,但由于重金属种类和数量的增加,结果可能被夸大^[21],且该方法没有考虑重金属赋存形态的影响^[22]。基于此,有关学者对污染评价方法进行改进^[23-24],改进的内梅罗污染指数(INI)将污染因子(PI)替换为地累积指数(I_{geo}),可以评估所有重金属的总体生态风险。Men等^[25]将内梅罗污染指数(NIPI)与潜在生态风险(RI)相结合,提出了改进后的生态风险评价(NIRI)。已有学者^[26-29]采用改进后的内梅罗污染指数和改进后的潜在生态风险进行重金属污染研究,但有关于INI、NIRI与NIPI、RI进行对比分析的研究相对较少。

此外,在进行土壤重金属污染评价时,一些学者所采用的参比值往往相对单一,难以准确反映土壤污染状况和风险。姜冰等^[30]认为选择相关标准为潜在生态风险评价的参比值时,高于标准值则污染风险大,低于标准值则污染风险小,评价结果直接反映了重金属的污染程度;而选择背景值为参比值时,除在一定程度上反映污染风险外,还可客观反映重金属在区域背景下的富集程度。因此,本文选取中国潮土背景值^[31]和农业用地风险筛选值^[32]为参比值进行土壤重金属污染和风险的评估。

开封作为八朝古都,国务院首批公布的24座历史文化名城之一,面临着经济快速发展和环境保护的艰巨任务,土壤污染问题亟待解决。本研究选取开封市区内11个垃圾中转站为研究对象,测定其周围土壤中重金属Cd、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni的含量,以中国潮土背景值和风险筛选值为参比值,采用内梅罗污染指数(NIPI)和改进型内梅罗污染指数(INI)、潜在生态风险指数(RI)和改进型潜在生态风险(NIRI)分别评价重金属污染程度及生态风险,以期在城市土壤重金属生态风险防控和修复治理提供理论依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

开封位于河南省中东部的黄淮平原,经纬度为 $113^{\circ}52'15''$ — $115^{\circ}15'42''$ E, $34^{\circ}11'45''$ — $35^{\circ}01'20''$ N,气候属于暖温带大陆性季风气候,年均降水量636 mm,年均气温 14°C ;成土母质为黄河冲积物,土壤类型主要为黄潮土,质地偏砂,多为粉壤土和砂壤土^[33];土壤pH介于4.08—8.43之间,呈弱碱性^[34]。孙艳丽等^[35]对开封市城市土壤性质进行研究,开封城区土壤呈碱性,pH平均值为8.58,开封市土壤有机质由东向西呈环状递减。刘德新等^[36]研究表明,开封市城市土壤中As、Cd、Hg含量逐年升高,Cd、Hg元素富集明显。马建华等^[37]对开封市城市土壤状况调查发现,Cd是主要的污染因子。2022年开封市常住人口为478.30万人,人口密度为 $842\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$,截至2020年,开封市垃圾焚烧处理厂全年处置生活垃圾 $42.3\times 10^4\text{t}$,平均每人生活垃圾产量为每年 0.087t ^[38]。研究区11个垃圾中转站分布情况如图1所示。

1.2 样品采集与处理

样点布设主要依据城市土壤样品采集点布设规范《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004),在野外调查与室内分析的基础上,距离每个垃圾中转站0 m、15 m和50 m分别设置采样点(表1)。每个采样点按梅花形布点法,经四分法充分混匀后,获得土样1 kg,带回实验室待测,并记录采样点和周边

环境信息. 土壤样品在室内自然风干, 除去石块和植物, 用玛瑙研钵研磨后过 0.149 mm 筛. 土壤样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解体系, 使用电感耦合等离子体质谱仪(美国热电, X series2)测定土壤中重金属 Cr、Ni、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量, 样品在测试过程中, 每个样品设 3 个平行样, 质量控制采用国家土壤标准参比物质(GSS-24)进行, 误差保持在 5% 以内, 回收率为 81%—109%, 测量结果均在允许的误差范围内.

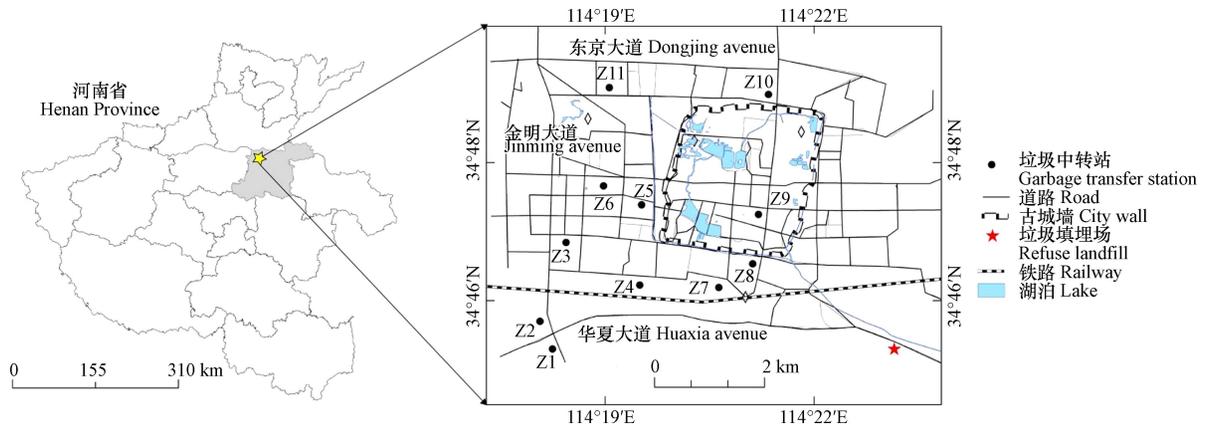


图 1 垃圾中转站采样点分布图

Fig.1 Sampling point distribution of garbage transfer station

表 1 垃圾中转站采样点信息

Table 1 Sampling point information of garbage transfer station

编号 No.	垃圾站名称 Garbage station name	采样点与垃圾站中心距离 Distance between sampling site and garbage station center	周边环境情况 The surrounding environment
Z1	刘寺垃圾中转站	15 m, 50 m	住宅、国道、工业、河流
Z2	铁南新村生活垃圾中转站	0 m, 15 m, 50 m	铁路、工业、农田、住宅
Z3	五顷四生活垃圾中转站	15 m, 50 m	住宅、商业设施
Z4	高屯生活垃圾中转站	15 m, 50 m	铁路、工业、住宅
Z5	晋安路生活垃圾中转站	15 m	住宅、商业设施
Z6	开大生活垃圾中转站	15 m, 50 m	商业、建筑工地、住宅
Z7	五福路生活垃圾中转站	0 m, 15 m, 50 m	住宅、商业设施、小学
Z8	文化宫垃圾中转站	0 m, 15 m, 50 m	工业、学校、住宅、商业
Z9	吹古台垃圾中转站	15 m	商业区、住宅
Z10	涧水河垃圾中转站	0 m, 15 m, 50 m	住宅、河流
Z11	东陈庄垃圾中转站	15 m, 50 m	商业设施、小吃街

1.3 重金属污染程度评价方法

内梅罗污染指数(Nemerow integrated pollution index, NIPI)是环境污染评价中使用较为广泛的一种评价方法, 该方法可以全面了解土壤环境质量的综合污染状况^[39], 公式如下:

$$\text{NIPI} = \sqrt{\frac{\text{PI}_{\text{ave}}^2 + \text{PI}_{\text{max}}^2}{2}} \quad (1)$$

$$\text{PI} = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中, C_i 为重金属 i 的浓度, S_i 为重金属 i 的参考水平, PI 是每种重金属的污染指数, PI_{ave} 和 PI_{max} 是所研究重金属 PI 的平均值和最大值. NIPI 分级标准见表 2.

改进型内梅罗指数法(Improved Nemerow index, INI)可以评估所有重金属造成的整体污染^[40]. 由于地累积指数只能评估单个重金属的污染水平, 而内梅罗污染指数可能会夸大或缩小一些污染物的影响, 导致对污染程度等级的不准确, 因此采用改进后的内梅罗污染指数. 计算公式为:

$$INI = \sqrt{\frac{I_{\text{geo(max)}}^2 + I_{\text{geo(avg)}}^2}{2}} \quad (3)$$

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n} \quad (4)$$

式中, $I_{\text{geo(max)}}$ 和 $I_{\text{geo(avg)}}$ 分别为重金属中 I_{geo} 的最大值和平均值; I_{geo} 为地累积指数; C_n 为土壤重金属 n 实测值; B_n 为土壤重金属 n 背景参比值; K 为成岩作用可能对背景值的影响, 修正值 K 取 1.5. INI 分级标准见表 2.

表 2 污染指标分类

Table 2 Classification of pollution indicators

评价方法 Evaluation method	分类 Classification	污染等级 Class of pollution	参考文献 Reference
内梅罗污染指数 Nemerow integrated pollution index	(a) $NIPi \leq 0.7$	无污染	[39]
	(b) $0.7 < NIPi \leq 1$	警告限值	
	(c) $1 < NIPi \leq 2$	轻度污染	
	(d) $2 < NIPi \leq 3$	中度污染	
	(e) $NIPi > 3$	重度污染	
改进型内梅罗污染指数 Improved Nemerow index	(A) $INI \leq 0.5$	未被污染	[40]
	(B) $0.5 < INI \leq 1$	未污染至中度污染	
	(C) $1 < INI \leq 2$	中度污染	
	(D) $2 < INI \leq 3$	中度至重度污染	
	(E) $3 < INI \leq 4$	重度污染	
	(F) $4 < INI \leq 5$	重度至极度污染	
	(G) $INI > 5$	极度污染	
潜在生态风险 Potential ecological risk index	(I) $RI \leq 60$	轻微生态风险	[41]
	(II) $60 < RI \leq 120$	中度生态风险	
	(III) $120 < RI \leq 240$	强生态风险	
	(IV) $240 < RI \leq 480$	很强生态风险	
	(V) $RI > 480$	极强生态风险	
改进型潜在生态风险 Nemerow integrated risk index	(1) $NIRI \leq 30$	轻微生态风险	[25]
	(2) $30 < NIRI \leq 60$	中度生态风险	
	(3) $60 < NIRI \leq 120$	强生态风险	
	(4) $120 < NIRI \leq 240$	很强生态风险	
	(5) $NIRI > 240$	极强生态风险	

1.4 重金属潜在生态风险评价方法

潜在生态风险指数法(Potential ecological risk index, RI)是瑞典科学家 Hakanson(1980)提出的方法,这种评价方法和生态学、环境学以及生物毒理学密切相关,是通过定量法对重金属的潜在性危险程度进行准确划分^[41].其公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m \left(T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \right) \quad (5)$$

式中, E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, Cd、Pb、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的毒性系数分别为 30、5、5、5、2、1; C_i 为土壤重金属实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为土壤重金属的背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 本文分别以中国潮土背景值和风险筛选值为例. 由式(5)可知 RI 的大小与污染物的种类和数量有关, 污染物的数目越多、毒性越强, 则 RI 值越大. 因此, 在实际应用中, 应根据具体研究的污染物种类和毒性对 Hakanson 的 E_r 和 RI 分级标准进行调整^[42], 调整后的 RI 分级标准见表 2.

改进型潜在生态风险(Nemerow integrated risk index, NIRI)可以更准确地评价多种重金属的综合效应^[25], 该指数综合了潜在生态风险指数和内梅罗综合污染指数的优点, 考虑了环境污染物对生物群的毒性及每种重金属的毒性反应因子. NIRI 的计算公式如下:

$$NIRI = \sqrt{\frac{(E_{r(\max)}^i)^2 + (E_{r(\text{ave})}^i)^2}{2}} \quad (6)$$

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \quad (7)$$

式中, $E_{r(\max)}^i$ 和 $E_{r(\text{ave})}^i$ 分别为 E_r^i 的最大值和平均值. NIPI、INI、RI 和 NIRI 的分级标准见表 2 所示.

2 结果与讨论(Results and Discussion)

2.1 土壤重金属含量特征

距垃圾中转站不同距离处采样点土壤重金属含量见表 3, 土壤重金属(Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd)含量平均值依次为 97.68、44.64、26.63、24.08、23.08、0.32 mg·kg⁻¹, 均低于农用地土壤污染风险筛选值(GB15618—2018), 与建设用地土壤风险筛选值^[43]相比, 除 Cr 和 Zn 元素外, 其他 4 种元素的含量平均值也均低于建设用地土壤风险筛选值, 表明垃圾中转站周围土壤环境质量整体较好; 与中国潮土背景值相比, 除 Ni 和 Cr 低于中国潮土背景值外, 其他重金属(Cu、Zn、Cd 和 Pb)平均值均高于中国潮土背景值, 分别是背景值的 1.10、1.37、3.20、1.10 倍. 总体来看, 距垃圾中转站 15 m 的土壤中重金属 Pb 的含量较高, 平均含量为 24.40 mg·kg⁻¹, 距垃圾中转站 50 m 的土壤中 Ni、Cu、Cr、Zn 和 Cd 的含量较高, 平均含量分别为 26.70、26.92、49.18、108.99、0.36 mg·kg⁻¹. 垃圾中转站周边土壤重金属污染来源除了受垃圾站生活垃圾物质组成的影响, 另一方面还受当地人类活动及大气沉降的影响.

表 3 垃圾中转站不同距离处土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Soil heavy metal content at different distances from garbage transfer station (mg·kg⁻¹)

不同距离处土壤 Soil at different distances	统计量 Statistic	Ni	Cu	Pb	Cr	Zn	Cd
15 m (n=11)	最小值	14.16	18.31	16.45	25.28	34.90	0.16
	最大值	30.19	38.58	50.37	59.49	177.36	0.43
	平均值	20.94	25.05	24.40	40.92	93.06	0.27
	CV/%	24.50	26.54	41.71	23.31	51.74	33.36
50 m (n=9)	最小值	17.72	20.32	17.65	32.71	31.78	0.17
	最大值	44.59	43.26	27.38	73.51	263.70	0.84
	平均值	26.70	26.92	21.96	49.18	108.99	0.36
	CV/%	33.31	29.96	16.19	30.39	67.06	67.56
全部 (n=24)	最小值	13.44	16.35	16.36	25.28	31.78	0.16
	最大值	44.59	43.73	50.37	73.51	263.70	0.84
	平均值	23.08	26.63	24.08	44.64	97.68	0.32
	CV/%	31.18	31.37	34.51	28.56	61.21	58.62
中国潮土背景值 Background value of fluvo-aquic soil in China		29.60	24.10	21.90	66.60	71.10	0.10
农用地土壤污染风险筛选值 Agricultural land soil pollution risk screening value		190	100	170	250	300	0.60
建设用地土壤污染风险筛选值(第二类用地) Construction land soil pollution risk screening value (the second type of land)		900	18000	800	5.7	—	65

注: “—”表示文献中没有相关数据. Note: “—” means there is no relevant data in the literature.

依据变异系数(CV)评价标准^[44], 所有采样点(n=24)各重金属的 CV 依次为: Zn>Cd>Pb>Cu>Ni>Cr, 其中 Zn 和 Cd 的 CV 大于 36%, 属于强变异, 表明其空间离散性大, 受人类活动影响大, Ni、Cu、

Pb 和 Cr 的 CV 在 16%—36% 之间, 属于中等变异, 可能同时受到人类活动和成土母质的影响. 以上结果表明, Zn 和 Cd 是研究区土壤的主要污染元素.

所有样点不同重金属含量分布箱线图见图 2, 在所有采样点中, Ni、Cu、Pb、Cr 和 Zn 元素的重金属含量均低于农用地土壤污染风险筛选值, 只有 Cd 元素有 12.5% 的样品超过土壤污染风险筛选值. 与中国潮土背景值相比, 所有重金属均有部分样点高于中国潮土背景值, 所有样点中除 Cd 元素的超标率为 100% 外, Ni、Cu、Pb、Cr 和 Zn 元素的超标率分别为 16.67%、41.67%、41.67%、4.17% 和 54.17%. 总的来说, 研究区绝大部分样点的土壤重金属含量未超过农用地土壤风险筛选值, 而只有少部分样点的重金属含量高于中国潮土背景值.

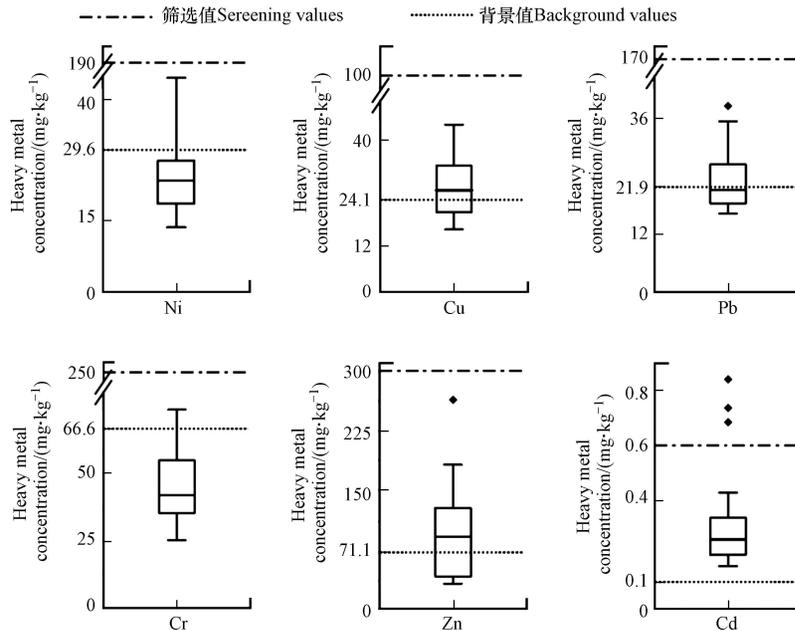


图 2 重金属含量分布箱线图

背景值: 中国潮土背景值; 筛选值: 农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)

Fig.2 Heavy metal content distribution box plot

Background value : Chinese fluvo-aquic soil background value ; screening value : Risk screening value of soil pollution in agricultural land (GB 15618—2018)

与开封市不同区域土壤重金属^[45-46,21] 污染对比发现(表 4), 研究区 6 种重金属含量均低于同城的城乡交错区、污灌区和生活垃圾填埋场附近土壤重金属含量. 与国内外其他城市垃圾焚烧厂和垃圾填埋场研究对比发现, 研究区除 Pb 和 Cr 略高于老挝万象垃圾填埋场^[47] 外, 所有重金属含量均低于国内^[48-49,10] 和伊朗法尔斯省卡泽润垃圾填埋场^[50]. 整体来看, 研究区周围土壤重金属含量偏低, 这可能是因为垃圾中转站主要用于临时存放来自各小区的生活垃圾, 其占地面积较小, 专人负责管理维护, 站内垃圾存放集中规范的原因. 相关研究表明, 垃圾处理设施周围重金属含量可能与该设施修建投入使用时间长短、功能及地理位置有关^[47], 因此, 不同城市及地域对土壤重金属含量具有不同的影响特点.

表 4 不同城市垃圾处理设施周边土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Heavy metal content in soil around different municipal waste treatment facilities (mg·kg⁻¹)

研究区 Study area	Ni	Cu	Pb	Cr	Zn	Cd	文献来源 Literature resource
开封市生活垃圾中转站	23.08	26.63	24.08	44.64	97.68	0.32	本研究
开封市城乡交错区农田	25.28	33.92	40.77	49.00	180.23	1.43	[45]
开封市污灌区	27.20	62.90	82.60	53.20	127.00	0.62	[46]
开封市生活垃圾填埋场附近	200.41	52.30	33.72	51.32	258.07	1.27	[14]
青岛市城阳区生活垃圾综合处理园区	30.56	23.49	23.23	69.97	60.13	0.07	[9]
成都市城乡结合部垃圾焚烧厂周边	41.21	38.12	30.24	82.84	129.00	0.37	[11]

续表 4

研究区 Study area	Ni	Cu	Pb	Cr	Zn	Cd	文献来源 Literature resource
拉萨市生活垃圾填埋场	20.90	—	30.92	60.44	67.00	0.11	[49]
伊朗法尔斯卡泽润垃圾填埋场	69.97	61.69	—	125.41	125.99	1.50	[50]
老挝万象垃圾填埋场	9.61	11.70	21.47	19.33	4.79	1.06	[47]

注: “—”表示文献中没有相关数据。Note: “—” means there is no relevant data in the literature.

2.2 基于不同参比值的土壤重金属污染评价

利用式(1)和式(2)计算内梅罗综合污染指数(NIPI), 结果见图 3(a), 以中国潮土背景值为参比值时, 各垃圾中转站受重金属污染程度依次为: Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z11>Z8>Z4>Z10>Z5>Z9>Z2, 其中 Z2、Z4、Z5、Z8、Z9、Z10、Z11 处于轻度污染, Z3、Z6 为中度污染水平, Z1 和 Z7 为重度污染。总体来看, 11 个垃圾中转站污染程度为轻度污染及以上等级, NIPI 平均值为 2.25, 说明该区总体上为重金属中度污染区, 重金属污染程度较为严重。以农用地土壤污染风险筛选值为参比值时, 各垃圾中转站污染程度依次为: Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z8>Z11>Z4>Z10>Z5>Z9>Z2, 所有垃圾中转站的 NIPI 介于 0.23—0.76, 只有 Z7 为警戒级, 其余 10 个垃圾中转站均处于安全无污染的水平, 总体上不存在污染风险。

利用式(3)和式(4)计算改进型内梅罗综合污染指数(INI), 结果见图 3(b), 以中国潮土背景值为参比值时, 各垃圾中转站受重金属污染程度依次为: Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z4>Z2>Z5>Z11>Z10>Z9>Z8, 研究区受到 Ni、Cu、Pb、Cr、Zn、Cd 不同程度的污染, 其中, 18.18% 的垃圾中转站达到了中度污染水平 (Z1、Z7), 81.82% 的垃圾中转站处于未污染至中等污染水平 (Z2、Z3、Z4、Z5、Z6、Z8、Z9、Z10、Z11), 总体来看, 11 个垃圾中转站 INI 平均值为 0.90, 说明垃圾中转站周围土壤重金属的整体生态风险为未污染至中度污染, 部分区域需要进行环境质量保护和污染修复。以农用地土壤污染风险筛选值为参比值时, 各垃圾中转站 INI 依次为: Z2>Z5>Z9>Z10>Z4>Z11>ZA>Z8>Z6>Z3>Z1>Z7, 11 个采样点的 INI 指数评价价值介于 1.89—2.89, 平均值为 2.37, 说明 11 个垃圾中转站总体上为中度污染及以上水平, 垃圾中转站周围土壤重金属的整体生态风险较为严重, 超过一半均为中度至重度污染。

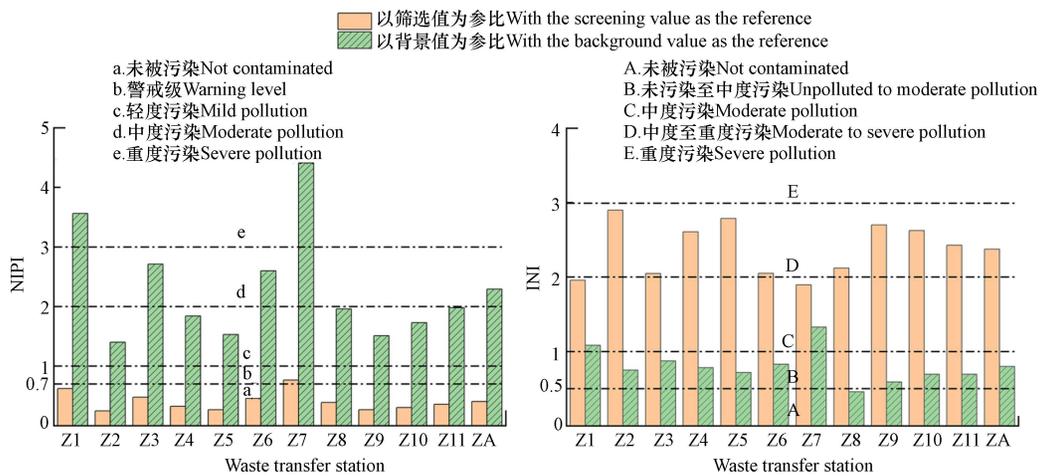


图 3 土壤重金属污染评价

Z1—Z11 为各垃圾中转站, 详细名称见表 1 所示, ZA 为平均值。NIPI: 内梅罗污染指数; INI: 改进型内梅罗污染指数

Fig.3 Evaluation of heavy metal pollution in soil

Z1—Z11 is the waste transfer station, the detailed name is shown in Table 1, ZA is the average.

NIPI: Nemerow pollution index; INI: Improved Nemerow pollution index

2.3 改进型内梅罗污染指数(INI)和内梅罗污染指数(NIPI)结果对比分析

从以上 4 种不同的土壤重金属污染评价结果可以看出, 以中国潮土背景值为参比值的 NIPI、RI 和以中国潮土背景值为参比值的 NIPI 对 Z7、Z1、Z3、Z6、ZA 的受污程度排序相一致, 均为 Z7>Z1>Z3>Z6>ZA, 而以风险筛选值为参比值的 INI 与前 3 种评价结果的受污程度排序完全相反, 说明在使用改进型内梅罗污染指数评价土壤重金属污染时, 不宜选择农用地土壤污染风险筛选值作为参比值。

4 种评价结果不同污染等级占比如图 4 所示, 以中国潮土背景值为参比值时, 各垃圾中转站

NIPI 的污染程度占比依次为:轻度污染(63.6%)>中度污染(18.2%)=重度污染(18.2%), INI 的污染程度占比依次为:未污染至中度污染(72.7%)>中度污染(18.2%)>未被污染(9.1%). 两种方法中重度污染和未被污染的占比差异较大,其原因可能是内梅罗综合污染指数法虽然可以全面展现各重金属对土壤的危害程度,但当有某重金属元素出现异常值会对结果造成较大影响.同时,因为没有扣除基准值的影响,不能有效区分外来因素的作用.

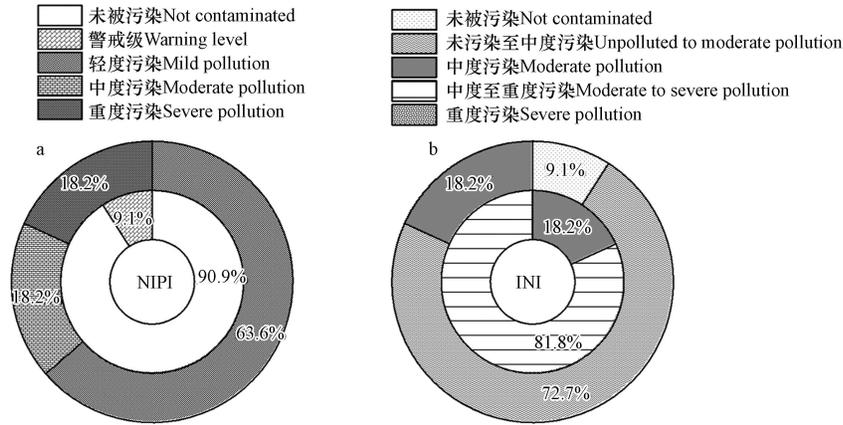


图 4 内梅罗综合污染与改进型内梅罗污染等级占比

外圆:以背景值为参比;内圆:以筛选值为参比;NIPI:内梅罗污染指数;INI:改进型内梅罗污染指数

Fig.4 The proportion of Nemerow comprehensive pollution and improved Nemerow pollution grade

Excircle:With the background value as reference ; Internal circle: With the screening value as the reference

NIPI: Nemerow pollution index ; INI: Improved nemerow pollution index

2.4 基于不同参比值的土壤重金属潜在生态风险评价

利用式(5)计算各生活垃圾中转站潜在生态风险指数(RI),结果如图5(a)所示.以中国潮土背景值为参比值时,各垃圾中转站生态风险程度依次为:Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z8>Z11>Z4>Z10>Z5>Z9>Z2,其中,Z7、Z1、Z3、Z6为强生态风险,其余7个垃圾中转站均为中度生态风险,整体来看,研究区综合潜在生态风险较高.以农用地土壤污染风险筛选值为参比值时,潜在生态风险评价表明,各垃圾中转站生态风险程度依次为:Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z8>Z11>Z4>Z10>Z9>Z5>Z2,RI平均值为18.48,远远小于警告限值,表明11个垃圾中转站均为轻微生态风险.

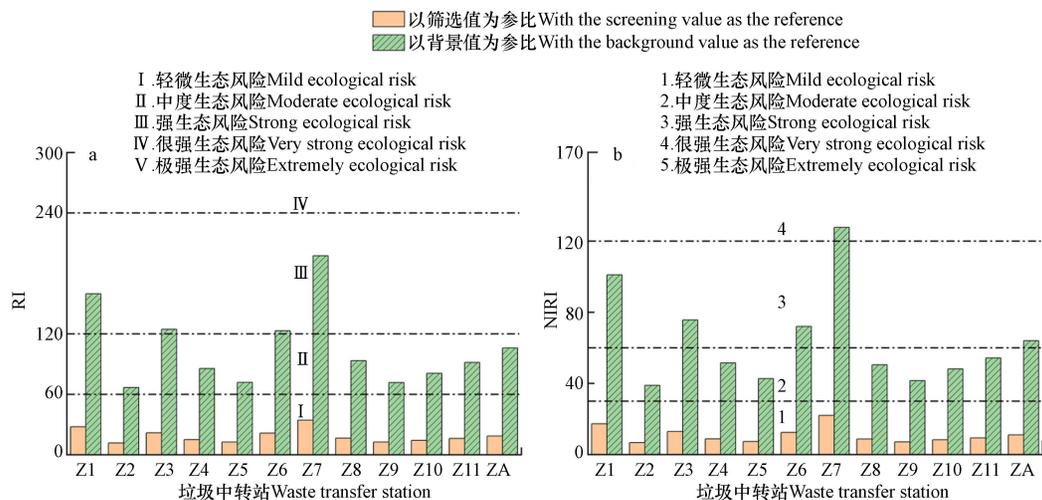


图 5 土壤重金属潜在生态风险评价

Z1—Z11 为各垃圾中转站,详细名称见表1所示,ZA 为平均值.RI:潜在生态风险;NIRI:改进型潜在生态风险

Fig.5 Potential ecological risk assessment of heavy metals in soil

Z1—Z11 is the waste transfer station, the detailed name is shown in table 1, ZA is the average.

RI : potential ecological risks ; NIRI : Improved Potential Ecological Risks

利用式(6)和式(7)计算垃圾中转站周围土壤改进型潜在生态风险(NIRI),统计结果如图5(b)所

示. 各垃圾中转站潜在生态风险依次为: Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z11>Z4>Z8>Z10>Z5>Z9>Z2, 以中国潮土背景值为参比值时, 所有样点的 NIRI 均大于 30, 表明研究区土壤重金属均存在不同程度的潜在生态风险, 11 个点位均为中度及以上生态风险, 其中有 4 个垃圾中转站的 NIRI 大于 60, 处于强生态风险, Z7 的 NIRI 高达 127.56, 为很强生态风险, 整体来看, 研究区各垃圾中转站生态风险程度严重. 以农用地土壤污染风险筛选值为评价标准时, 各垃圾中转站生态风险依次为: Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z11>Z4>Z8>Z10>Z5>Z9>Z2, NIRI 结果表明, 所有样点的 NIRI 均低于 30, 表明研究区土壤重金属均为轻微生态风险, 重金属污染程度较轻, 潜在生态风险程度较低.

2.5 改进型潜在生态风险指数(NIRI)和潜在生态风险指数(RI)结果对比分析

在 4 种不同土壤重金属污染评价结果中(图 6), 各垃圾中转站生态风险排序基本一致, Z7、Z1、Z3 生态风险最高, Z5、Z9、Z2 生态风险最低, 表明中国潮土背景值和风险筛选值均适用于 RI 和 NIRI.

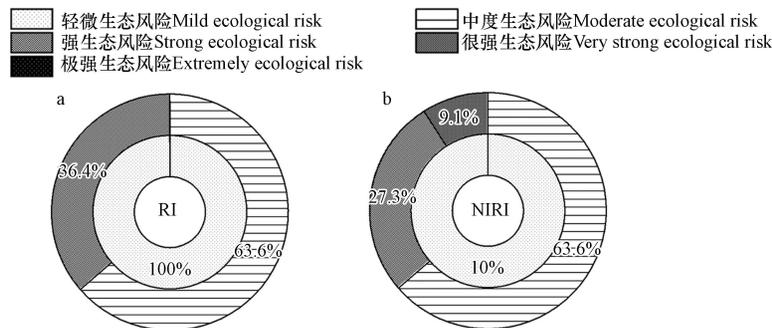


图 6 潜在生态风险与改进型潜在生态风险等级占比图

外圆: 以背景值为参比; 内圆: 以筛选值为参比值; RI: 潜在生态风险; NIRI: 改进型潜在生态风险

Fig.6 The proportion of potential ecological risk and improved potential ecological risk level

Excircle: With the background value as reference; Internal circle: With the screening value as the reference

RI: potential ecological risks ; NIRI: Improved Potential Ecological Risks

当使用 NIRI 评价土壤重金属风险时, 以中国潮土背景值和农用地土壤污染筛选值对垃圾中转站的生态风险评估均为 Z7>Z1>Z3>Z6>ZA>Z11>Z4>Z8>Z10>Z5>Z9>Z2, 不同的是, 风险筛选值的评价结果均为轻微污染(100%), 而中国潮土背景值的生态风险程度均为中度生态风险及以上等级. 造成这种结果可能是因为中国潮土背景值远低于风险筛选值, 土壤背景值反映区域背景下元素在土壤中的正常含量, 风险筛选值代表土壤污染的临界值, 以土壤背景值为参比值时, 展现的是重金属的局部小范围富集, 即便未达到污染级别, 但可能已存在潜在的生态危害; 以风险筛选值为参比值时, 更直观地展现土壤污染程度. 开封市土壤以潮土为主, 因此, 以中国潮土背景值为标准得出的结果反映的是开封市范围内土壤重金属污染状况.

对于同种参比值, 以风险筛选值为参比值时, RI 和 NIRI 的风险评价结果基本一致, 11 个垃圾中转站均为轻微生态风险, 因此选择农用地土壤污染风险筛选值为参比值时, 可以从两种方法中任选一个进行污染风险评估, 建议使用 RI, 计算过程更便捷. 以中国潮土背景值为参比值时, RI 的评价结果为中度生态风险占比 63.6%, 强生态风险占比为 36.4%. NIRI 评价结果为中度生态风险占比 63.6%、强生态风险占比 27.3%、很强生态风险占比 9.1%, 相比于 RI, NIRI 的污染分级突出了污染程度为重度污染的五福路生活垃圾中转站(Z7), 有利于相关风险管控部门有针对性合理分配资源进行治理和修复.

综上所述, 在实际应用中, 各种土壤重金属评估方法各有优缺点, 建立更实际、更科学的风险评估与管理体系, 能够降低过度环境管理的可能性, 同时也为从源头上更好控制土壤重金属污染提供建议, 这将有助于我国生态文明建设以及社会的可持续发展.

3 结论(Conclusions)

本文基于开封市 11 个生活垃圾中转站周围土壤中 6 种重金属元素的调查, 对重金属污染状况、分布情况、生态风险进行分析. 结果表明:

(1) 垃圾中转站附近所有采样点土壤重金属 Zn、Cr、Cu、Pb、Ni、Cd 的平均值依次为 97.68、44.64、

26.63、24.08、23.08、0.32 mg·kg⁻¹, Zn 的含量最高, Cd 的含量最低;除 Cd 外, Ni、Cu、Pb、Cr 和 Zn 的含量均低于农用地土壤污染风险筛选值,仅 Cd 有部分样点高于农用地土壤污染风险筛选值,其点位超标率为 12.5%。与中国潮土背景值相比,所有重金属均有部分样点高于中国潮土背景值,除 Ni 和 Cr 外,其余 4 种重金属的平均含量均高于中国潮土背景值。

(2)采用传统内梅罗综合污染指数和改进型内梅罗污染指数分别对垃圾中转站周围土壤进行污染评价得出的结果差异显著,整体来看,11 个垃圾中转站均受到不同程度的污染,计算结果表明,改进后的内梅罗污染指数不适合以农用地土壤污染风险筛选值为参比值进行土壤重金属污染水平的评估。

(3)采用潜在生态风险指数和改进型潜在生态风险评价垃圾中转站周围土壤重金属生态风险,结果表明,两种方法得出的各垃圾中转站生态风险排序基本一致,五福路生活垃圾中转站、刘寺垃圾中转站和五顷四生活垃圾中转站生态风险最高,晋安路生活垃圾中转站、吹古台垃圾中转站和铁南新村生活垃圾中转站生态风险最低,表明中国潮土背景值和风险筛选值均适用于潜在生态风险评价和改进型潜在生态风险评价这两种方法。

参考文献 (References)

- [1] 《中国城市生活垃圾管理状况评估报告》发布 [J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(5): 11-13.
Assessment Report on the Management of Municipal Solid Waste in China was released[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(5): 11-13 (in Chinese).
- [2] 魏潇潇, 王小铭, 李蕾, 等. 1979—2016 年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3833-3843.
WEI X X, WANG X M, LI L, et al. Temporal and spatial characteristics of municipal solid waste generation and treatment in China from 1979 to 2016[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3833-3843 (in Chinese).
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook. 2002 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002(in Chinese).
- [4] 孔令强, 田光进, 柳晓娟. 中国城市生活固体垃圾排放时空特征 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1408-1417.
KONG L Q, TIAN G J, LIU X J. The spatio-temporal dynamic pattern of urban solid waste emission in China[J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1408-1417 (in Chinese).
- [5] 罗伟. 生活垃圾中转站渗滤液全量化处理新工艺 [J]. 能源与环境, 2022(6): 86-88.
LUO W. New process for full quantitative treatment of leachate from domestic waste transfer station[J]. Energy and Environment, 2022(6): 86-88 (in Chinese).
- [6] 王庆鹤, 颜雄, 蔡深文, 等. 贵州某垃圾填埋场及其附近农田土壤中重金属形态分析和评价 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(6): 741-746.
WANG Q H, YAN X, CAI S W, et al. Speciation analysis and assessment of heavy metals in soils of a landfill and its surrounding agricultural land in Guizhou[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(6): 741-746 (in Chinese).
- [7] 邓凯文. 垃圾填埋场土壤重金属污染特征及生态风险分析 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(9): 125-128.
DENG K W. Pollution characteristics and ecological risk analysis of heavy metals in soil of landfill[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(9): 125-128 (in Chinese).
- [8] de SOUZA V B, HOLLAS C E, BORTOLI M, et al. Heavy metal contamination in soils of a decommissioned landfill southern Brazil: Ecological and health risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2023, 339: 139689.
- [9] 朱水, 申泽良, 王媛, 等. 垃圾处理园区周边土壤—地下水重金属分布特征 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4320-4332.
ZHU S, SHEN Z L, WANG Y, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the soil-groundwater system around an integrated waste management facility[J]. China Environmental Science, 2021, 41(9): 4320-4332 (in Chinese).
- [10] 刘洪华, 朱水, 董杰, 等. 某生活垃圾处理园区周边土壤重金属分布特征及风险评价 [J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2388-2398.
LIU H H, ZHU S, DONG J, et al. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil around an integrated waste management facility[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(8): 2388-2398 (in Chinese).
- [11] 吕占禄, 张金良, 陆少游, 等. 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 [J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2483-2492.
LÜ Z L, ZHANG J L, LU S Y, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around a municipal solid waste incineration power plant[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2483-2492 (in Chinese).
- [12] 张海龙, 李祥平, 林必桂, 等. 珠三角某垃圾焚烧厂周边环境空气重金属分布特征研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1833-1839.
ZHANG H L, LI X P, LIN B G, et al. Characterization of airborne particulate metals in the surroundings of a municipal solid waste incinerator (MSWI) in the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 1833-1839 (in Chinese).

- [13] 王宇珊, 刘成坚, 陈晓燕, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤的重金属污染风险评价 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2020, 52(5): 57-64.
WANG Y S, LIU C J, CHEN X Y, et al. Pollution risk assessments of heavy metals in soils around a municipal solid waste incinerator[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 57-64 (in Chinese).
- [14] WANG L, ZERAATPISHEH M, WEI Z D, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of farmland soil around abandoned domestic waste dump in Kaifeng City[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 946298.
- [15] 李亚静, 黄庭, 谢哲宇, 等. 非正规垃圾填埋场土壤和地下水重金属污染特征与评价 [J]. 地球与环境, 2019, 47(3): 361-369.
LI Y J, HUANG T, XIE Z Y, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil and groundwater of informal landfills[J]. Earth and Environment, 2019, 47(3): 361-369 (in Chinese).
- [16] MULLER G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geochemical Journal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [17] 黄楚珊, 张倩, 唐夫凯, 等. 江西陡水水库水环境重金属时空分布特征及生态风险评价 [J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2919-2930.
HUANG C S, ZHANG Q, TANG F K, et al. Profiles of heavy metals pollution and potential influence to aquatic environment of Doushui Reservoir from Jiangxi Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(9): 2919-2930 (in Chinese).
- [18] 于霞, 安艳玲, 吴起鑫. 赤水河流域表层沉积物重金属的污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1400-1407.
YU X, AN Y L, WU Q X. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Chishui River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1400-1407 (in Chinese).
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] 李小曼, 徐梦洁, 刘勤, 等. 基于内梅罗指数法及其改进方法的小尺度区域土壤重金属污染评价: 以苏南地区为例 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 241-245.
LI X M, XU M J, LIU Q, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution in small-scale area based on Nemerow index method and its improved method—a case study of southern Jiangsu Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 241-245 (in Chinese).
- [21] WANG J Y, DA L J, SONG K, et al. Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 387-393.
- [22] 吴宏满. 巢湖沉积物重金属和磷的赋存形态及相互关系初探 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
WU H M. Study on the fractions of heavy metals and phosphorus and their correlations in sediment from Chaohu Lake[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [23] LIU L L, LIU Q Y, MA J, et al. Heavy metal(loid)s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: Concentrations, potential sources, and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114083.
- [24] 刘衍君, 汤庆新, 张保华, 等. 基于 ArcGIS 的聊城市耕地土壤重金属污染现状与评价 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2009, 40(4): 567-571,580.
LIU Y J, TANG Q X, ZHANG B H, et al. Evaluation on soil heavy metal pollution in main grain producing area based on geography information system a case study of Liaocheng[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 40(4): 567-571,580 (in Chinese).
- [25] MEN C, LIU R M, XU L B, et al. Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121763.
- [26] LV Y T, KABANDA G, CHEN Y R, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in manganese (Mn) contaminated site[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 942544.
- [27] 李志. 广州市灰尘、土壤重金属污染特征及其健康风险评估 [D]. 广州: 广州大学, 2022.
LI Z. Pollution characteristics and health risk assessment of dust and soil heavy metals in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022 (in Chinese).
- [28] LI X C, BING J P, ZHANG J H, et al. Ecological risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments of a river-reservoir system[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 842: 156683.
- [29] ZHANG B C, JIA T Z, PENG S Z, et al. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in the cultivated soil of the Qinghai—Tibet Plateau region: Case study on Huzhu County[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 35: e02073.
- [30] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 基于不同参比值的土壤重金属潜在生态风险评价 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2964-2971.
JIANG B, WANG S T, SUN Z B, et al. Potential ecological risk assessment of soil heavy metals based on different reference ratios[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2964-2971 (in Chinese).
- [31] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
China Environmental Monitoring Station. Chinese soil heavy metal background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990(in Chinese).
- [32] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil

- environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).
- [33] 河南省土壤普查办公室. 河南土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
Henan Provincial Soil Survey Office. Henan soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004(in Chinese).
- [34] 李灿. 开封城市土壤性质、重金属污染及变化分析[D]. 开封: 河南大学, 2007.
LI C. The urban soil properties, heavy metal pollution and its changes in Kaifeng city[D]. Kaifeng: Henan University, 2007 (in Chinese).
- [35] 孙艳丽, 马建华, 李灿. 开封市不同功能区城市土壤有机碳含量与密度分析[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 124-128.
SUN Y L, MA J H, LI C. Contents and densities of soil organic carbon in urban soils in different function areas of Kaifeng[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(1): 124-128 (in Chinese).
- [36] 刘德新, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封市城市土壤磁化率空间分布及对重金属污染的指示意义[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1242-1250.
LIU D X, MA J H, SUN Y L, et al. Spatial distribution of urban soil magnetic susceptibility and its implication as indicator of heavy metal pollution in Kaifeng city, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1242-1250 (in Chinese).
- [37] 马建华, 李灿, 陈云增. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响: 以开封市为例[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 743-750.
MA J H, LI C, CHEN Y Z. Impacts of land use and economic growth on heavy metal pollution of urban soils: A case study of Kaifeng city[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 743-750 (in Chinese).
- [38] 开封市统计局. 开封市统计年鉴 2022[R]. 开封: 2022.
Kaifeng Municipal Bureau of Statistics. Kaifeng Statistical Yearbook 2022 [R]. Kaifeng: 2022.
- [39] 万梦雪, 焦文涛, 胡文友, 等. 城市工业区土壤重金属累积特征与来源解析: 以上海市闵行区典型工业区为例[J]. 环境化学, 2023, 42(6): 1886-1898.
WAN M X, JIAO W T, HU W Y, et al. Accumulation and source apportionment of heavy metals in urban-industrial soils—a case study in Minhang District of Shanghai[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(6): 1886-1898 (in Chinese).
- [40] WEI X F, CHEN H J, HYUN S H. Research on the Improvement of Environmental Pollution by Garden Landscape Design using different Vegetation Configurations[J]. Journal of the Institution of Engineers (India):Series A, 2022, 103(1): 81-88.
- [41] 程俊伟, 蔡深文, 黄明琴, 等. 贵州遵义锰矿区植物根际土壤中重金属形态迁移转化及风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2833-2841.
CHENG J W, CAI S W, HUANG M Q, et al. Heavy metal speciation migration transformation and risk assessment in plant rhizosphere soil of Zunyi manganese mineland, Guizhou[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(9): 2833-2841 (in Chinese).
- [42] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, 39(6): 1233-1241.
MA J H, HAN C X, JIANG Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. Geographical Research, 2020, 39(6): 1233-1241 (in Chinese).
- [43] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of development land: GB 36600—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).
- [44] 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 等. 白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4556-4565.
ZHENG F, GUO X, TANG M Y, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4556-4565 (in Chinese).
- [45] 王小莉, 陈志凡, 魏张东, 等. 开封市城乡交错区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 513-522.
WANG X L, CHEN Z F, WEI Z D, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in agricultural soils located in the peri-urban area of Kaifeng City[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 513-522 (in Chinese).
- [46] 杨伟红, 李振华, 王雪梅. 开封市污灌区土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 河南农业科学, 2016, 45(11): 53-57.
YANG W H, LI Z H, WANG X M. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in sewage irrigation area of Kaifeng city[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(11): 53-57 (in Chinese).
- [47] HAN I, WHITWORTH K W, CHRISTENSEN B, et al. Heavy metal pollution of soils and risk assessment in Houston, Texas following Hurricane Harvey[J]. Environmental Pollution, 2022, 296: 118717.
- [48] 李英华, 杨朝旭, 伯鑫, 等. 生活垃圾焚烧厂周边土壤中 PCDD/Fs 及重金属含量[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 726-735.
LI Y H, YANG Z X, BO X, et al. PCDD/Fs levels and heavy metal characteristics in soils surrounding typical municipal waste incineration plants in the Chengdu area[J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 726-735 (in Chinese).
- [49] 旦增, 周鹏, 汪晶, 等. 拉萨市生活垃圾卫生填埋场土壤重金属调查和分析评价[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 194-199, 154.
DAN Z, ZHOU P, WANG J, et al. Investigation and research about soil heavy metals in the vicinity of the domestic waste sanitary landfill site-lhasa[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 194-199, 154 (in Chinese).
- [50] ROUHANI A, BRADÁK B, MAKKI M, et al. Ecological risk assessment and human health risk exposure of heavy metal pollution in the soil around an open landfill site in a developing country (Khesht, Iran)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(18): 1-13.