

# 中国城市道路灰尘重金属污染的多维异质性解析：基于地域、城市规模与职能的Meta分析

宋利<sup>1</sup>, 张勇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年3月27日; 发布日期: 2026年4月8日

## 摘要

城市快速发展使中国道路灰尘重金属污染愈加凸显, 已严重影响城市居民健康。尽管道路灰尘污染研究受到广泛关注, 但现有研究多局限于单一城市或相邻城市, 缺乏全国尺度、跨区域、跨城市类型的系统整合和评估。该研究基于中国知网(CNKI)和Web of Science数据库2000~2024年间发表的61篇文献, 采用Meta分析方法, 系统评估了中国城市道路灰尘中Cr、Cd、Cu、Pb、Zn、Ni六种重金属的污染特征, 并从地域、城市规模和城市职能三个维度进行异质性解析。结果表明, 六种重金属的合并效应值均显著高于土壤背景值(95%置信区间均不包含0), 其中Cd的增幅最为突出, 达1386.46%。亚组分析显示, 东北地区Cd污染最重, 西部地区Pb和Zn污染突出, 东部地区呈现多种重金属复合污染特征; 中小型城市污染水平普遍高于大城市和特大城市, 而资源能源型和制造业城市重金属污染程度明显高于服务业城市。发表偏倚检验显示结果具有较好的稳健性。该研究为识别我国城市道路灰尘重金属污染的空间分异特征及制定差异化治理策略提供了科学依据。

## 关键词

道路灰尘, 重金属污染, Meta分析

# Multidimensional Heterogeneity Analysis of Heavy Metal Pollution in Road Dust across Chinese Cities: A Meta-Analysis Based on Region, Scale, and Function

Li Song<sup>1</sup>, Yong Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Resources Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

\*通讯作者。

文章引用: 宋利, 张勇. 中国城市道路灰尘重金属污染的多维异质性解析: 基于地域、城市规模与职能的 Meta 分析[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 501-512. DOI: 10.12677/aep.2026.164050

## Abstract

The rapid urbanization in China has exacerbated heavy metal pollution in road dust, posing a growing threat to the health of urban residents. Although road dust pollution has received extensive research attention, existing studies are largely confined to single cities or adjacent urban areas, leaving a gap in systematic integration and assessment at the national scale across regions and city types. Based on 61 peer-reviewed articles published between 2000 and 2024 in the CNKI and Web of Science databases, this study employed a meta-analytic approach to systematically evaluate the pollution characteristics of six heavy metals (Cr, Cd, Cu, Pb, Zn, and Ni) in road dust across Chinese cities. Heterogeneity was further analyzed from three dimensions: geographical region, urban scale, and urban function. The results showed that the pooled effect sizes of all six heavy metals were significantly higher than the corresponding soil background values (95% confidence intervals did not include zero), with Cd exhibiting the most pronounced increase of 1386.46%. Subgroup analysis revealed that Cd pollution was most severe in Northeast China, Pb and Zn pollution were prominent in Western China, and Eastern China displayed a multi-metal contamination pattern. In terms of urban scale, small and medium-sized cities generally exhibited higher pollution levels than large cities and megacities. Functionally, resource-based and manufacturing cities showed significantly higher heavy metal accumulation compared to service-oriented cities. Publication bias tests indicated that the results were robust. This study provides a scientific basis for identifying spatial heterogeneity in heavy metal pollution in urban road dust and for formulating differentiated pollution control strategies in Chinese cities.

## Keywords

Road Dust, Heavy Metal Pollution, Meta-Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市作为人类活动高度集约化的空间载体,其环境质量不仅关乎居民健康与安全生态,更是区域可持续发展的重要表征[1]。道路灰尘作为城市多介质污染的交叉界面,兼具污染源和汇的双重属性,是衡量城市生态环境质量的重要指标[2]。道路灰尘一方面作为污染源可通过再悬浮进入大气造成大气污染[3];另一方面作为污染汇携带的污染物具有危害性,尤其是重金属,可以渗透土壤或水体,引发复合型生态风险[4]。其中,重金属可经呼吸吸入、皮肤接触及手-口途径进入人体,对人体健康构成直接威胁[5]。由于重金属难以降解、易在生物体内蓄积,长期暴露可导致神经系统损伤、肝肾功能障碍、心血管疾病等危害,并具有致癌、致畸及内分泌干扰等多重毒性效应[6]-[8]。

近年来,随着中国城市化的快速推进,大多数城市道路灰尘重金属富集现象明显[6][9][10],然而现有研究通常多局限于单一城市和相邻城市[11]-[13],缺乏全国性系统评估。基于已有数据进行分析是一种有效的解决办法。Meta分析它提供了一个统计框架,可以对具有相同研究目的的相互独立的多个研究结

果进行系统合并, 根据文献中的数据赋予相应的权重值, 通过加权合并效应值, 可有效降低研究间异质性对结论的干扰从而得出一个更可靠, 大尺度分析的结果[14][15]。主要步骤为确定主题, 数据收集和整理, 效应值计算, 亚组分析, 发表性偏倚检验, 总结分析[16][17]。

目前对城市地表灰尘中研究较多的重金属为 Cu、Cr、Pb、Cd、Ni、Zn, 这些元素的富集具有重要的环境指示意义和较大的环境污染危害[18][19]。基于此, 该文基于中国知网, Web of Science 检索了有关我国城市道路灰尘重金属研究的文献, 采用 Meta 分析, 从地域、城市规模和城市职能分析我国城市道路灰尘重金属的空间分布特征, 通过地累积指数法和潜在生态风险指数法来评估城市道路重金属污染等级和生态风险, 运用健康风险评估模型对重金属所产生的非致癌和致癌健康风险进行评估, 为我国治理城市道路灰尘重金属污染提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 文献检索和筛选

该文以 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb、Ni 为研究对象, 在中国知网、Web of Science 数据库中进行文献检索。在知网中, 以主题 = (道路灰尘 OR 街道灰尘 OR 城市灰尘) AND (铜 OR 铬 OR 镉 OR 铅 OR 锌 OR 镍 OR Cu OR Cr OR Cd OR Pb OR Zn OR Ni) AND (浓度 OR 污染 OR 含量 OR 风险评价 OR 空间分布)。在 WOS 中以 TS = (“road dust” OR “street dust” OR “pavement dust” OR “urban dust”) AND (copper OR Cu OR chromium OR Cr OR cadmium OR Cd OR lead OR Pb OR zinc OR Zn OR nickel OR Ni) AND (concentrat\* OR pollut\* OR contaminat\* OR “risk assessment” OR monitor\*), 检索时间为 2000~2024 年, 最终纳入 61 篇文献。

文献筛选原则: ① 研究区域为中国城市; ② 提供城市的名称、采样区域和年份; ③ 至少包含 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb、Ni 其中一种元素的浓度数据; ④ 文献提供了样本数量、平均值和标准差或者可推导统计量。⑤ 重金属测量方法为石墨炉原子吸收分光光度法、火焰原子吸收分光光度法、冷原子吸收分光光度法和原子荧光法等行业标准方法; 最终选定的城市见图 1。

### 2.2. 效应值计算

在生态和环境领域中, 以对数响应比做效应值比较常见, 因为它能更好地量化不同实验引起的比例变化[20][21]。该文以文献中的数据为实验组, 中国环境监测站总站中各省份的背景值[22]作为对照组进行 Meta 分析。其中效应值和方差的计算方法如下:

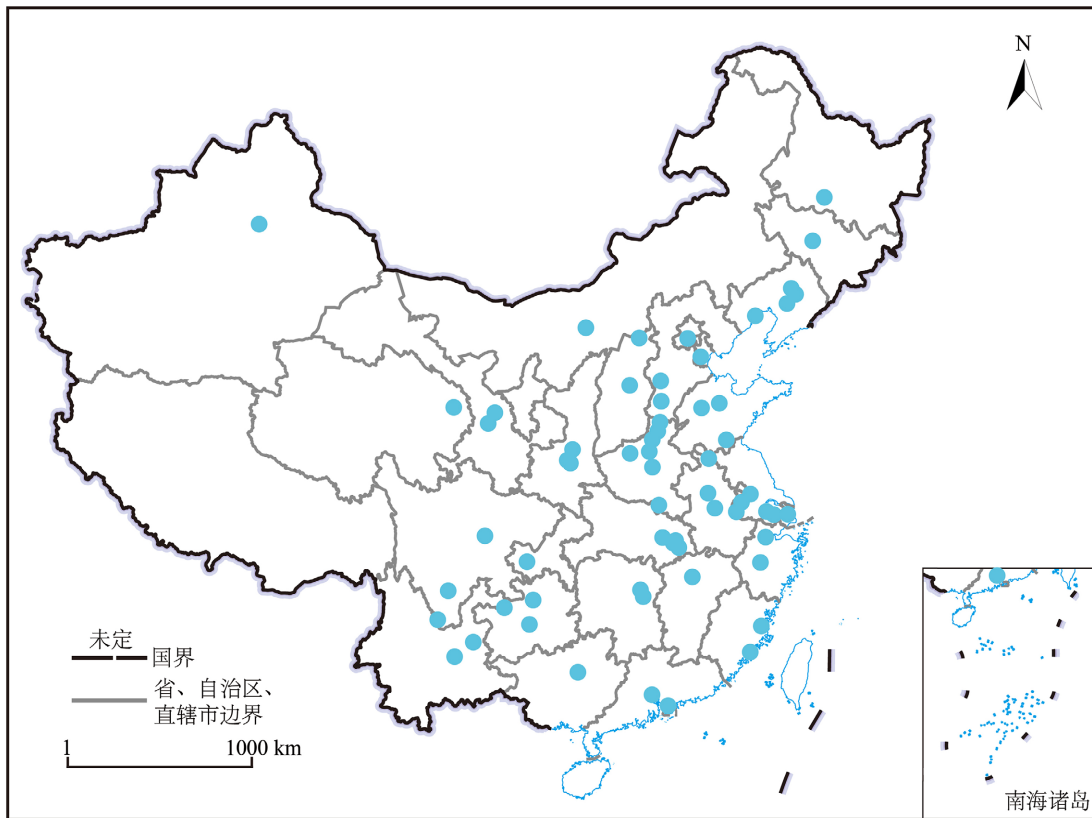
$$ES_i = \ln R = \ln X_e - \ln X_c \quad (1)$$

$$v_i = \frac{S_e^2}{N_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} \quad (2)$$

式中:  $ES_i$  表示灰尘重金属含量的效应值,  $X_e$ 、 $S_e$ 、 $N_e$  分别表示文献中重金属含量的平均值、标准差、样品数量,  $X_c$ 、 $S_c$ 、 $N_c$  分别表示各省土壤重金属背景值含量的平均值、标准差、样品数量。 $v_i$  为对应  $ES_i$  的方差(若文献未提供标准差或变异系数, 则以平均值的十分之一作为标准差[23])。

### 2.3. 合并效应值计算

Meta 分析通过模型给每个效应值分配权重来合并效应值, 通常为固定模型和随机模型。考虑到各城市地域、规模、重金属背景值等差异, 该文采用随机模型来计算合并效应值。因为它不仅考虑组内方差, 还考虑了组间方差[24], 能更好地反映本文的效应值。通过 REML 估计不同研究之间的方差  $\tau^2$ , 采用倒方差法来计算各个效应值的权重, 最后根据加权平均法合并效应值  $ES_{\pm}$ 。其计算公式为如下:



注: 底图源自自然资源部(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)下载的《中国地图 1:740 万(界线版 无邻国 无河流 线划(一))》, 审图号: GS (2023) 2767 号。下同。

Figure 1. Distribution of collected city locations

图 1. 已收集的城市位置分布图

$$\omega_i^* = \frac{1}{\tau^2 + v_i} \quad (3)$$

$$ES_+ = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i^* (ES_i)}{\sum_{i=1}^k \omega_i^*} \quad (4)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i^*}} \quad (5)$$

$$CI = ES_+ \pm Z_{\alpha/2} \times SE \quad (6)$$

式中:  $\omega_i^*$  表示第  $i$  个研究的权重大小;  $SE$  表示标准误差;  $CI$  表示  $ES_+$  的 95% 置信区间;  $Z_{\alpha/2}$  表示  $p = (1 - \alpha/2)$  时标准正态分布的函数值, 取  $\alpha = 0.05$ 。

若合并效应值的 95% 置信区间包含 0, 表明城市道路灰尘中重金属含量与背景值无显著差异; 若合并效应值的 95% 置信区间都大于 0, 表明城市道路灰尘中重金属含量有显著提升;

重金属的增加率可以通过以下公式转化:

$$PI = (e^{ES_+} - 1) \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $PI$  表示灰尘重金属含量超过土壤背景值的百分比, %。

## 2.4. 异质性检验

模型的异质性可以通过  $Q$  检验和  $I^2$  检验来判断, 一般  $Q$  检验  $p$  值  $< 0.05$  则表示异质性存在,  $I^2 > 50\%$  则表示异质性很高。若异质性存在且很高采用随机模型, 否则采用固定模型[14]。

$Q$  检验是  $Q$  服从于自由度为  $k-1$  的  $\chi^2$  分布,  $Q$  值越大, 其对应的  $p$  值越小。计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^k \omega_i^* (ES_i - ES_+)^2 \quad (8)$$

$I^2$  检验是衡量异质性程度的统计量, 反映异质性部分在效应值总的变异中所占的比重, 计算公式如下:

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $\omega_i^*$  为第  $i$  个研究的权重值;  $ES_i$  为第  $i$  个纳入研究的效应值;  $ES_+$  为所有纳入研究的平均效应量;  $df$  为自由度。

## 2.5. 亚组分析

亚组分析是根据研究数据之间的共有特征或者某种联系将其分成几个小组, 进而在各小组内进行 Meta 分析。

## 2.6. 发表性偏倚检验

发表性偏倚是指在学术出版过程中, 具有统计学显著性的研究成果比非显著性结果更容易被期刊采纳的现象, 这种选择性发表可能会导致 Meta 分析高估效应量[25] [26]。我们采用漏斗图、失安全系数检验发表性偏倚。漏斗图的对称性可通过 Egger 回归  $p$  值判断, 若  $p > 0.05$ , 表明漏斗图对称性良好, 发表性偏倚风险较低[27]。失安全系数是指为逆转已有显著结果、评估发表偏倚影响所需的统计学上不显著的研究数量。若失安全系数  $>$  临界值( $5n + 10$ ,  $n$  为纳入研究的个数), 则表明现有结论对发表性偏倚具有较强抗性[28]。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 模型结果

六种重金属的  $I^2$  值均大于 50% 且  $p$  值远小于 0.05, 表明异质性很高且存在, 采用随机模型是正确的。六种重金属的合并效应值均大于 0, 且 95% CI 均不包含 0, 表明我国城市道路中重金属含量高于其背景值, 其合并效应值从大到小表现为 Cd (2.70)、Zn (1.57)、Pb (1.37)、Cu (1.35)、Cr (0.74)、Ni (0.41), 与土壤背景值相比, 重金属含量分别增加了 1386.46%、381.76%、293.28%、283.99%、109.84%、50.12%。Cd 是 6 种重金属中的首要污染物, 其增幅达到了 1386.46%, Ni 的污染最低, 增幅为 50.12% (表 1)。

Table 1. Meta-analysis results

表 1. Meta 分析结果

重金属	合并效应值	95% CI	p 值	$I^2$
Cd	2.70	[2.26, 3.14]	0.00	99.65
Cr	0.74	[0.56, 0.92]	0.00	99.32
Cu	1.35	[1.15, 1.54]	0.00	99.03
Ni	0.41	[0.21, 0.60]	0.00	99.26
Pb	1.37	[1.12, 1.62]	0.00	99.67
Zn	1.57	[1.35, 1.79]	0.00	99.48

### 3.2. 亚组分析

由于六种重金属的  $I^2$  值大于 50%, 异质性显著, 需要进行亚组分析。根据城市所在的区域、规模、职能进行亚组分析。

#### 3.2.1. 不同区域城市道路灰尘重金属分布特征

依据我国经济带划分, 将数据分为东北、东部、西部和中部地区。结果表明 Cd、Zn、Cu、Pb 和 Cr 在各区域的合并效应值均大于 0, 且 95% CI 未包含 0, 说明这些重金属在道路灰尘中的含量普遍高于当地背景值, 存在明显的污染现象。Cd 在东北地区效应值最高, 其次为东部地区, 中部地区和西部地区差异不大。Cr、Cu、Ni 在东部和西部地区效应值显著高于中部和东北地区, 其中 Ni 在中部地区 95% CI 包含 0, 表明其含量与当地背景值无显著差异。Zn 和 Pb 在西部地区效应值最高, 东部地区的效应值也比较高(图 2)。

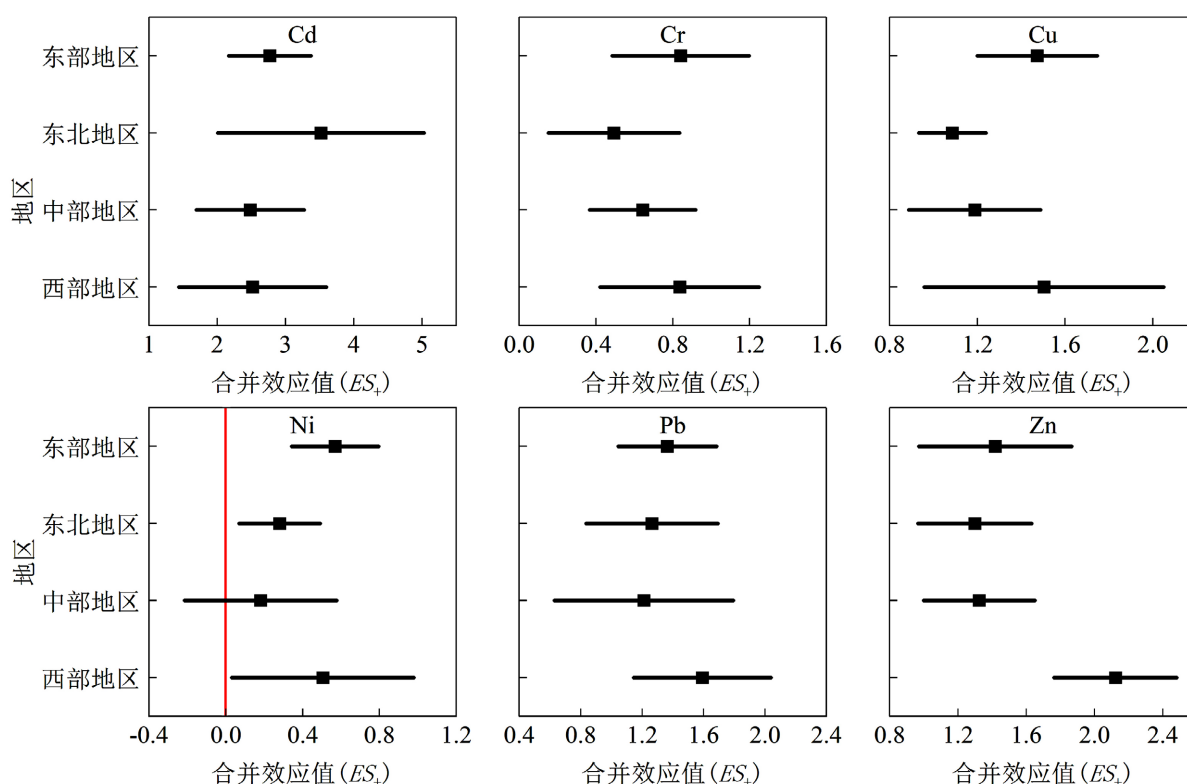


Figure 2. Meta-analysis results of each region  
图 2. 各地区 Meta 分析结果

#### 3.2.2. 不同规模城市道路灰尘重金属分布特征

根据市区常住人口数量对城市进行规模划分, 将数据划分为超大、特大、大、中小型城市。分析结果表明, Cd、Cu、Pb、Zn 在四类城市的合并效应值均大于 0, 且 95% CI 未包含 0, 说明这些重金属在道路灰尘中的含量普遍高于当地背景值, 存在明显的污染现象。Cd 和 Cr 在中小型城市效应值最为突出, 效应值最高, 其次为大城市和特大城市, 在超大城市中效应值最低。Cu、Ni、Pb 和 Zn 在中小型城市和超大城市表现出最高的效应值, 而大城市和特大城市的效应值相对较低, 且 Cr、Ni 在特大城市中与当地背景值无显著差异(95% CI 包含 0)(图 3)。

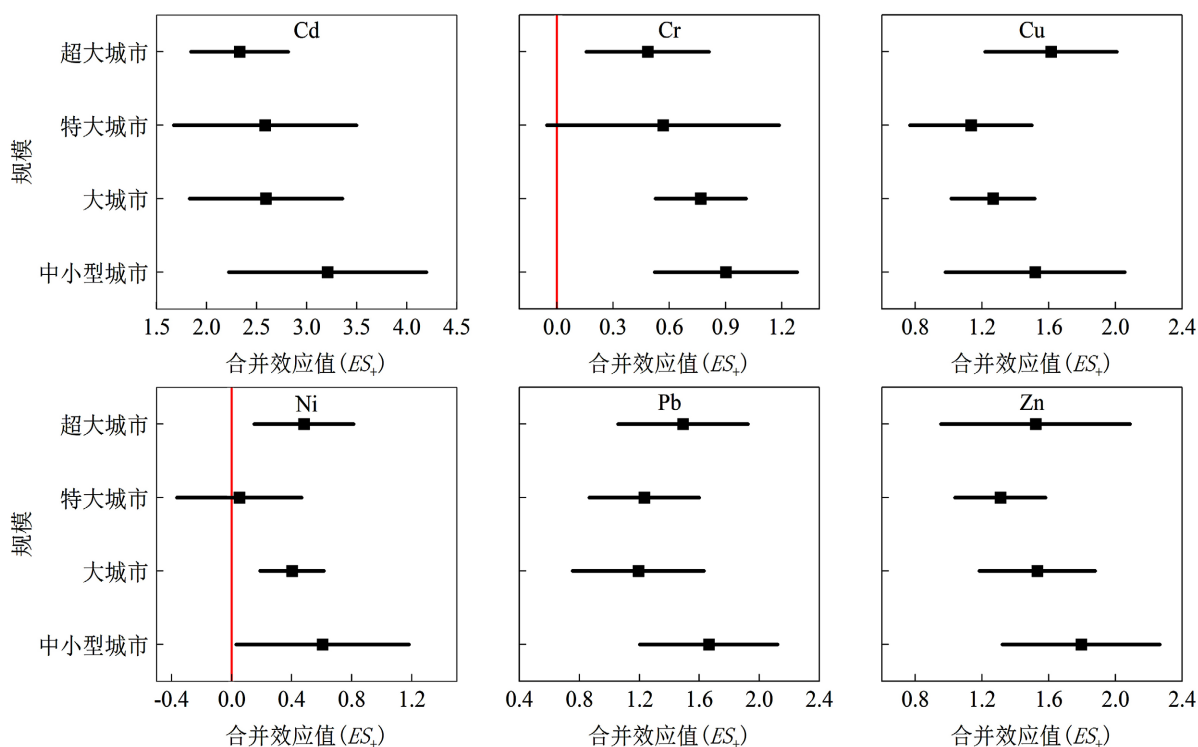


Figure 3. Meta-analysis results of cities of different scales

图 3. 不同规模城市 Meta 分析结果

### 3.2.3. 不同职能城市道路灰尘重金属分布特征

依据曹等[29]对我国城市职能的分类标准, 将城市划分为资源能源业、制造业、建筑业、服务业、无主导职能五类。分析结果表明, Cd、Zn、Cu、Pb 和 Cr 在五类城市中的合并效应值大于 0, 且 95% CI 未包含 0, 说明这些重金属在道路灰尘中的含量普遍高于当地背景值, 存在明显的污染现象。Ni 的富集不显著, 仅制造业城市 95% 置信区间不包含 0。Cd 和 Cr 在资源能源型与制造业型城市的合并效应值最高, 显著高于其他职能城市, 表明这两类城市对 Cd 和 Cr 的富集贡献较大。Cu 和 Zn 在制造业城市的效应值最高, 建筑业城市也呈现出较高的效应值。Pb 在无主导职能城市效应值最高, 其次为制造业和资源能源业。服务业城市中各重金属的合并效应值普遍低于其他类型城市, 但多数元素仍显著高于背景值(图 4)。

### 3.3. 发表性偏倚检测

Egger 回归检验发现 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 受发表偏倚的影响比较小( $p > 0.05$ ), Ni 可能存在发表偏倚( $p < 0.05$ ), 但 Ni 的失安全系数远高于临界值, 可以认为结果可信(表 2)。

Table 2. Published bias test results

表 2. 发表偏倚检验结果

重金属元素	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
N	47	58	61	62	58	50
p 值	0.17	0.61	0.32	0.41	0.72	0.01
临界值	236	291	306	311	291	251
失安全系数	602,042	114,007	307,477	608,848	645,045	11,631

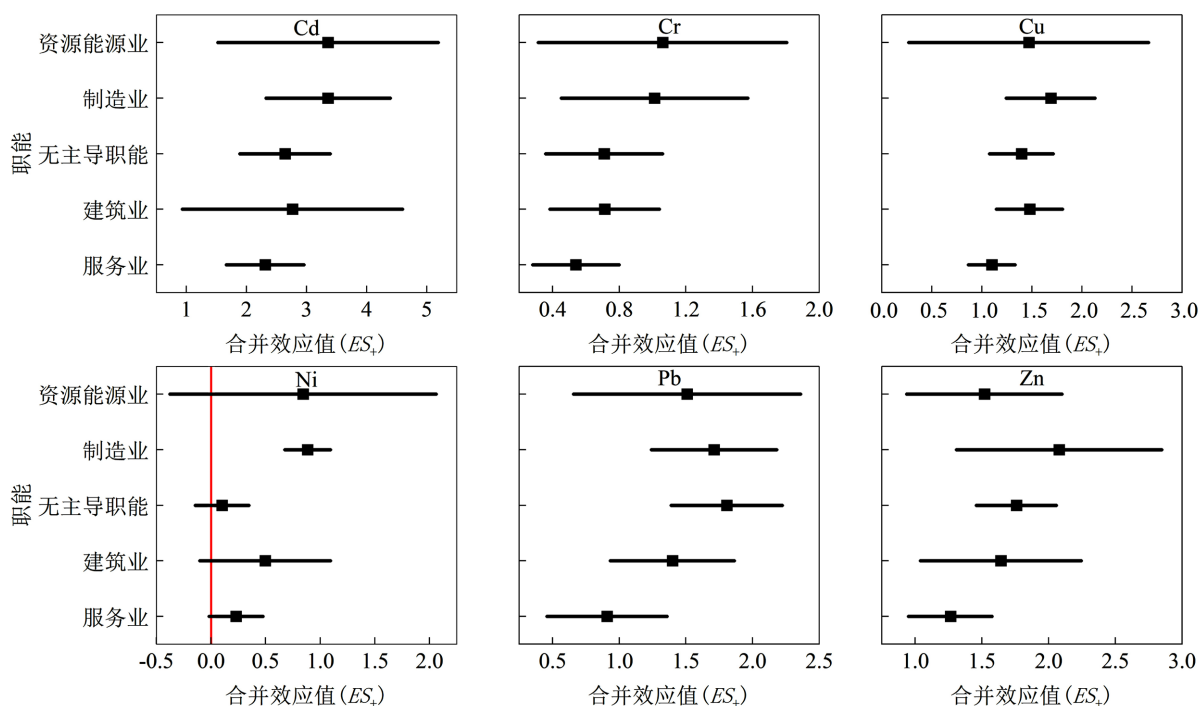


Figure 4. Meta-analysis results of each functional city  
图 4. 各职能城市 Meta 分析结果

## 4. 讨论

### 4.1. 不同区域城市道路灰尘重金属污染差异

总体来看,我国道路灰尘重金属污染呈现出鲜明的空间分异格局,东北地区面临着严重的 Cd 污染,西部地区在 Zn 和 Pb 污染方面尤为突出,东部地区呈现多种重金属的复合污染特征,中部地区污染相对较低,造成这种地域分布差异的主要原因为:① Cd 是工业冶炼和废气排放中发现的典型元素[30]。东北地区是我国传统重工业基地,深厚的重工业基础提供了持续的排放源[31][32]。此外,东北地区冬季供暖期较长,低温天气也不利于污染物的扩散。供暖主要依赖煤炭,以沈阳市为例,其能源结构以煤气、原煤和焦炭为主。其中,生产用炉煤炭消耗量为 560 万吨,占全市煤炭消费总量的 54.2%;生活用煤约为 678.6 万吨,以居民冬季采暖锅炉用煤为主,占生活用煤总量的 95%。煤炭燃烧过程亦可能导致重金属元素镉(Cd)在环境中的累积[33][34]。因此相比于其他地区,东北地区的 Cd 污染更为严重。对于东北老工业城市,应该重点关注有色金属冶炼企业和燃煤设施的 Cd 排放。② 东部地区因政策优势与地理区位条件率先发展,是我国国家经济核心地带[35],珠三角,长三角金属加工、电子制造、化工产业密集,这些工业活动会释放 Cu、Cd、Ni、Pb 等多种重金属[36][37]。另一方面,东部地区道路密度高,地势平坦,交通活动强,汽车刹车片、车辆轮胎、润滑油和路面交通标志线含有 Zn、Cd、Pb 等重金属,这些重金属释放到环境中,最终沉积吸附到道路灰尘中[38][39]。针对东部地区多种重金属复合污染,应该重点关注工业-交通的协同污染,如对于不同工业的污染排放,制定相应的排放标准,减少源头重金属上的排放。③ 西部地区矿产资源丰富,部分城市的发展依赖采矿、金属冶炼和选矿等工矿业活动[5][40]。西部地区的土壤背景值比较高,如云贵川 Pb、Zn、Ni 的背景值[22]显著高于其他区域,这也是导致该地区道路灰尘重金属含量偏高的重要自然因素。因此对于西部地区的城市,应该重点监管矿业城市 Pb 和 Zn 的排放源。

## 4.2. 不同规模城市道路灰尘重金属污染差异

总体而言, 中小型城市普遍存在更高的重金属污染, 大城市和特大城市的效应值相对较低, 但超大城市的 Cu、Pb 和 Zn 的污染水平较高。以 Cu、Pb、Zn 为代表的典型城市重金属, 其污染水平随城市规模扩大呈现“先上升、后下降、再回升”的趋势, 这与以往认为污染随城市扩张单调变化的观点不同[41][42]。造成这种规模分布差异的主要原因为: ① 中小型城市处于城市化进程初期, 快速工业化与大规模基础设施建设同步进行, 人口、产业的集聚会带来大量能源消耗与污染物的排放, 导致资源消耗与污染物排放超出环境承载能力, 一定程度上牺牲了生态环境[43]-[45]。雷等[46]对中国 39 个城市的研究也发现, 中小城市 Cd、Cu、Zn 的浓度高于特大城市。因此, 对于中小型城市, 在城市化的进程中, 应该加强环境基础设施的建设, 避免只关注效益而忽略环境。② 随着城市规模的扩大, 能源利用率高, 更多的资源和资金投入环境治理中, 城市对污染的承载能力开始增强, 环境质量因而得到系统改善[47], 大城市及特大城市部分重金属污染水平因此呈现下降趋势。③ 但当城市规模达到一定规模以后, 城市的交通和工业强度再度增加, 城市对污染的承载能力开始下降[48], 与交通排放和工业活动密切相关的 Pb、Cu、Zn 等重金属的污染也随之回升。

## 4.3. 不同职能城市道路灰尘重金属污染差异

总体而言, 资源能源业和制造业城市道路灰尘中多种重金属污染程度偏高, 无主导职能和建筑业污染中等偏高, 服务业城市相对较低, 这表明城市主导产业是驱动重金属累积差异的关键因素, 造成这种职能分布差异的主要原因为: ① 不同产业活动在重金属排放量上存在差异, 金属加工冶炼工业和制造业的发展是城市金属浓度高的主要来源[49][50]。例如, 有色金属冶炼、金属加工及制造过程中产生的废气会释放 Cd、Cu、Pb [51]; 钢铁行业和汽车工业的运行可导致灰尘中 Pb 和 Zn 的富集[52]; 电子与冶金工业会贡献 Cu 和 Cr [53]。这些产业活动中的重金属常以粉尘、烟尘或废水形式进入环境, 并通过大气沉降、地表径流等途径最终汇入道路灰尘[45][54][55]。对于资源能源业和制造业城市, 需重点关注工矿业活动所带来的重金属污染, 建立重点行业重金属排放总量控制制度, 实施“等量替代”或“减量替代”。② 建筑业城市较高效应值的 Cu 和 Zn, 可能与建筑活动中使用的金属材料有关[56]。镀锌是保护钢材免受腐蚀的常用工艺, 此类材料在建筑活动中广泛应用可能导致环境中 Zn 含量升高[57]。对于建筑业城市, 应该减少此类建筑材料的使用, 推广绿色建筑材料的使用。③ 服务业属于低污染产业, 主要以金融、文娱和旅游产业为主[29][58], 相较于重工业污染排放较低, 服务业城市通过其产业结构, 从源头减少了本地重工业的直接重金属排放。

## 5. 结论

1) 基于中国知网和 Web of Science 数据库中 2000~2024 年间的 61 篇文献, 对我国城市道路灰尘中 Cd、Cr、Zn、Pb、Cu、Ni 含量进行了 Meta 分析。分析结果表明, 我国城市道路灰尘中 Cd、Zn、Pb、Cu、Cr 和 Ni 的平均含量均显著高于其相应区域的土壤背景值。合并效应值从高至低为 Cd (2.70)、Zn (1.57)、Pb (1.37)、Cu (1.35)、Cr (0.74)、Ni (0.41)。与背景值相比, 道路灰尘中上述元素的含量增幅分别为 1386.46%、381.76%、293.28%、283.99%、109.84%、50.12%。Cd 的增幅显著高于其余 5 种重金属, 是我国道路灰尘重金属的首要污染物, 应该密切关注。

2) 从地区来看, 东北地区的 Cd 污染突出, 西部地区的 Zn 和 Pb 污染较为严重, 东部地区多种重金属累积明显。从城市规模看, 中小型城市道路灰尘重金属污染水平高于大城市和特大城市, 超大城市的 Cu、Pb 和 Zn 污染也比较高。从城市职能看, 资源能源业和制造业城市重金属污染较为严重, 服务业城市污染相对较低。

## 基金项目

湖南省教育厅科学研究项目(23A0356)。

## 参考文献

- [1] 孙晓, 刘旭升, 李锋, 等. 中国不同规模城市可持续发展综合评价[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5590- 5600.
- [2] Ma, Y.Y., Zhang, Y. and Song, L. (2025) Ecological and Health Risk Assessment and Anthropogenic Sources Analysis of Heavy Metals in Different Types of Urban Road Dust. *Process Safety and Environmental Protection*, **195**, Article 106813. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106813>
- [3] 何安恩, 解姣姣, 苑春刚. 大气颗粒物重金属形态分析[J]. 化学进展, 2021, 33(9): 1627-1647.
- [4] 张春玲, 许新兵, 任小娜, 等. 城市地表灰尘的概念及其研究现状分析[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(2): 21-24.
- [5] Zhang, J., Gu, H., Chen, S., Ai, W., Dang, Y., Ai, S., *et al.* (2023) Assessment of Heavy Metal Pollution and Preschool Children Health Risk in Urban Street Dusts from Different Functional Areas in a Typical Industrial and Mining City, NW China. *Environmental Geochemistry and Health*, **45**, 7199-7214. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01623-7>
- [6] Chen, W., Zhang, X., Zhang, J., Duan, N., Gong, X., Liu, S., *et al.* (2022) Characteristics, Sources and Health Risk of Heavy Metals in Road Dust in the Typical County Town, Central China. *Applied Sciences*, **12**, Article 12958. <https://doi.org/10.3390/app122412958>
- [7] Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L. and Shen, Z. (2018) The Impact of Seasonal Varied Human Activity on Characteristics and Sources of Heavy Metals in Metropolitan Road Dusts. *Science of the Total Environment*, **637**, 844-854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.059>
- [8] Han, Q., Wang, M., Xu, X., Li, M., Liu, Y., Zhang, C., *et al.* (2023) Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from the Fourth-Tier Industrial City in Central China Based on Monte Carlo Simulation and Bioaccessibility. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **252**, Article 114627. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114627>
- [9] Wang, Q., Lu, X. and Pan, H. (2016) Analysis of Heavy Metals in the Re-Suspended Road Dusts from Different Functional Areas in Xi'an, China. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 19838-19846. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7200-5>
- [10] Zhong, P., Zhang, J., Xu, D., Tian, Q., Hu, T., Gong, X., *et al.* (2020) Contamination Characteristics of Heavy Metals in Particle Size Fractions from Street Dust from an Industrial City, Central China. *Air Quality, Atmosphere & Health*, **13**, 871-883. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00846-2>
- [11] 沈墨海, 孙丽芳, 张亚洁, 等. 河南省若干城市道路灰尘的重金属污染特征[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S2): 117-123.
- [12] Fan, P., Lu, X.W., Yu, B., *et al.* (2022) Spatial Distribution, Risk Estimation and Source Apportionment of Potentially Toxic Metal(loid)s in Resuspended Megacity Street Dust. *Environment International*, **160**, Article 107073. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107073>
- [13] Yuan, X., An, T., Hu, B. and Zhou, J. (2023) Analysis of Spatial Distribution Characteristics and Main Influencing Factors of Heavy Metals in Road Dust of Tianjin Based on Land Use Regression Models. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 837-848. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22151-4>
- [14] 晏利晶, 姜淼, 赵庆良, 等. 基于 Meta 分析的中国工矿业场地土壤重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2023, 36(1): 9-18.
- [15] 董鑫, 胡浩然, 张晓晴, 等. 基于 Meta 分析的矿区周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 93-102.
- [16] Hansen, C., Steinmetz, H. and Block, J. (2022) How to Conduct a Meta-Analysis in Eight Steps: A Practical Guide. *Management Review Quarterly*, **72**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11301-021-00247-4>
- [17] Zhang, X.J., Cheng, B. and Zhang, Y. (2022) A Hands-On Tutorial for Systematic Review and Meta-Analysis with Example Data Set and Codes. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **65**, 3217-3238. [https://doi.org/10.1044/2022\\_jslhr-21-00607](https://doi.org/10.1044/2022_jslhr-21-00607)
- [18] 方凤满, 林跃胜, 王海东, 等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7301-7310.
- [19] Chen, R.H., Wang, B.Q., Wang, Z.B., *et al.* (2015) The Pollution Character Analysis and Risk Assessment for Metals in Dust and PM10 around Road from China. *Biomedical and Environmental Sciences*, **28**, 44-56.
- [20] Pustejovsky, J.E. (2018) Using Response Ratios for Meta-Analyzing Single-Case Designs with Behavioral Outcomes. *Journal of School Psychology*, **68**, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2018.02.003>

- [21] Nakagawa, S., Yang, Y., Macartney, E.L., Spake, R. and Lagisz, M. (2023) Quantitative Evidence Synthesis: A Practical Guide on Meta-Analysis, Meta-Regression, and Publication Bias Tests for Environmental Sciences. *Environmental Evidence*, **12**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00301-6>
- [22] 国家环境保护局, 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.
- [23] Rose, M.T., Patti, A.F., Little, K.R., Brown, A.L., Jackson, W.R. and Cavagnaro, T.R. (2014) A Meta-Analysis and Review of Plant-Growth Response to Humic Substances: Practical Implications for Agriculture. In: *Advances in Agronomy*, Elsevier, 37-89. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800138-7.00002-4>
- [24] Halme, A.L.E., McAlpine, K. and Martini, A. (2023) Fixed-Effect versus Random-Effects Models for Meta-Analyses: Random-Effects Models. *European Urology Focus*, **9**, 693-694. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2023.10.023>
- [25] Nakagawa, S., Lagisz, M., Jennions, M.D., Koricheva, J., Noble, D.W.A., Parker, T.H., et al. (2022) Methods for Testing Publication Bias in Ecological and Evolutionary Meta-Analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, **13**, 4-21. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13724>
- [26] Lin, L. and Chu, H. (2017) Quantifying Publication Bias in Meta-Analysis. *Biometrics*, **74**, 785-794. <https://doi.org/10.1111/biom.12817>
- [27] Lin, L., Chu, H., Murad, M.H., Hong, C., Qu, Z., Cole, S.R., et al. (2018) Empirical Comparison of Publication Bias Tests in Meta-Analysis. *Journal of General Internal Medicine*, **33**, 1260-1267. <https://doi.org/10.1007/s11606-018-4425-7>
- [28] Rosenberg, M.S. (2005) The File-Drawer Problem Revisited: A General Weighted Method for Calculating Fail-Safe Numbers in Meta-Analysis. *Evolution*, **59**, 464-468. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2005.tb01004.x>
- [29] 曹广忠, 彭荣熙, 刘涛. 2000~2020年中国城市职能特征及其演变[J]. 城市规划, 2025, 49(5): 28-39.
- [30] Wang, Y., Zhang, Y., Schauer, J.J., de Foy, B., Guo, B. and Zhang, Y. (2016) Relative Impact of Emissions Controls and Meteorology on Air Pollution Mitigation Associated with the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) Conference in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, **571**, 1467-1476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.215>
- [31] Xiao, Q., Zong, Y., Malik, Z. and Lu, S. (2020) Source Identification and Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust of Steel Industrial City (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **26**, 1359-1378. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1578946>
- [32] Li, X., Yu, Y., Zheng, N., Wang, S., Sun, S., An, Q., et al. (2021) Exposure of Street Sweepers to Cadmium, Lead, and Arsenic in Dust Based on Variable Exposure Duration in Zinc Smelting District, Northeast China. *Chemosphere*, **272**, Article 129850. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129850>
- [33] 李崇. 沈阳城市灰尘中金属的空间分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2008.
- [34] Li, N., Han, W., Tang, J., Bian, J., Sun, S. and Song, T. (2018) Pollution Characteristics and Human Health Risks of Elements in Road Dust in Changchun, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, Article 1843. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091843>
- [35] 覃成林, 张震, 贾善铭. 东部地区率先发展战略: 变迁、成效与新构想[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2020, 20(4): 58-71.
- [36] Wang, S., Wang, L., Huan, Y., Wang, R. and Liang, T. (2022) Concentrations, Spatial Distribution, Sources and Environmental Health Risks of Potentially Toxic Elements in Urban Road Dust across China. *Science of the Total Environment*, **805**, Article 150266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150266>
- [37] 李彩丹, 马骁, 毛宇翔, 等. 焦作市道路灰尘中重金属的污染评价与源解析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S2): 150-157.
- [38] Men, C., Liu, R., Xu, F., Wang, Q., Guo, L. and Shen, Z. (2018) Pollution Characteristics, Risk Assessment, and Source Apportionment of Heavy Metals in Road Dust in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, **612**, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.123>
- [39] Wang, X.Y., Liu, E.F., Lin, Q., et al. (2020) Occurrence, Sources and Health Risks of Toxic Metal(loid)s in Road Dust from a Mega City (Nanjing) in China. *Environmental Pollution*, **263**, Article 114518. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114518>
- [40] Yang, J., Teng, Y.G., Song, L.T., et al. (2016) Tracing Sources and Contamination Assessments of Heavy Metals in Road and Foliar Dusts in a Typical Mining City, China. *PLOS ONE*, **11**, e0168528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168528>
- [41] Acosta, J.A., Gabarrón, M., Faz, A., Martínez-Martínez, S., Zornoza, R. and Arocena, J.M. (2015) Influence of Population Density on the Concentration and Speciation of Metals in the Soil and Street Dust from Urban Areas. *Chemosphere*, **134**, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.038>

- [42] Trujillo-González, J.M., Torres-Mora, M.A., Keesstra, S., Brevik, E.C. and Jiménez-Ballesta, R. (2016) Heavy Metal Accumulation Related to Population Density in Road Dust Samples Taken from Urban Sites under Different Land Uses. *Science of the Total Environment*, **553**, 636-642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101>
- [43] 周芳丽. 城市规模与环境污染: 规模效应还是拥挤效应——基于地级城市面板数据的实证分析[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2020, 41(2): 34-41.
- [44] 李佳佳, 罗能生. 城市规模对生态效率的影响及区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 129-136.
- [45] Zhu, Z., Li, Z., Bi, X., Han, Z. and Yu, G. (2013) Response of Magnetic Properties to Heavy Metal Pollution in Dust from Three Industrial Cities in China. *Journal of Hazardous Materials*, **246**, 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.024>
- [46] 雷蕾, 陈玉成, 李章平, 等. 我国城市街道灰尘中重金属的成分分析[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(2): 124-129.
- [47] 张志彬, 龚玉琨. 城市规模扩张对环境相对污染强度的影响研究——基于 285 个城市面板数据的经验分析[J]. 河南牧业经济学院学报, 2022, 35(5): 13-21.
- [48] 杨柳青青, 刘章生, 张麒. 中国城市人口集聚对城市生态效率的门槛效应研究[J]. 西南民族大学学报(人文社科版), 2019, 40(11): 153-157.
- [49] He, Y., Peng, C., Zhang, Y., Guo, Z., Xiao, X. and Kong, L. (2023) Comparison of Heavy Metals in Urban Soil and Dust in Cities of China: Characteristics and Health Risks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **20**, 2247-2258. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04051-9>
- [50] 王硕, 蔡立梅, 王秋爽, 等. 中国城市地表灰尘中重金属的富集状况及空间分布特征[J]. 地理研究, 2018, 37(8): 1624-1640.
- [51] Jiang, Y.F., Shi, L.P., Guang, A.L., et al. (2018) Contamination Levels and Human Health Risk Assessment of Toxic Heavy Metals in Street Dust in an Industrial City in Northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*, **40**, 2007-2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0028-1>
- [52] Han, X. and Lu, X. (2017) Spatial Distribution, Environmental Risk and Source of Heavy Metals in Street Dust from an Industrial City in Semi-Arid Area of China. *Archives of Environmental Protection*, **43**, 10-19. <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0013>
- [53] Wang, H.Z., Cai, L.M., Wang, Q.S., et al. (2021) A Comprehensive Exploration of Risk Assessment and Source Quantification of Potentially Toxic Elements in Road Dust: A Case Study from a Large Cu Smelter in Central China. *Catena*, **196**, Article 104930. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104930>
- [54] Galjak, J., Đokić, J., Dervišević, I., Milentijević, G., Mojsić, M. and Živković, B. (2022) Assessment of Pollution and Distribution of Heavy Metals in the Soil near the Flotation Tailings Gornje Polje. *Polish Journal of Environmental Studies*, **31**, 4097-4106. <https://doi.org/10.15244/pjoes/147828>
- [55] Mahmud, M. and Hasan, M.M. (2025) Assessment of Heavy Metal Contamination on Road Dust: A Case Study of Khulna City. *Advances in Environmental and Engineering Research*, **6**, 1-13. <https://doi.org/10.21926/aecer.2501008>
- [56] Yang, S., Liu, J., Bi, X., Ning, Y., Qiao, S., Yu, Q., et al. (2020) Risks Related to Heavy Metal Pollution in Urban Construction Dust Fall of Fast-Developing Chinese Cities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **197**, Article 110628. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110628>
- [57] Liang, N.B., Zhang, C.B., Zhang, Y.Y., et al. (2025) Pollution Levels, Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals (HMs) in Road Dust in Major Cities of China. *Journal of Hazardous Materials*, **494**, Article 138733. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138733>
- [58] 宁静, 范文娜, 王锋. 金融集聚、城市功能分工与碳减排[J]. 生态经济, 2024, 40(11): 13-22.