

# 上海城区大气降尘重金属污染特征及风险评价

蔡成霖<sup>1\*</sup>, 鲍梦蓉<sup>1</sup>, 黄建时<sup>1</sup>, 成水平<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海

<sup>2</sup>同济大学环境生态研究所, 上海

收稿日期: 2023年1月2日; 录用日期: 2023年1月31日; 发布日期: 2023年2月9日

## 摘要

为探究上海市城区大气降尘重金属的污染状况和时空分布特征, 于2021年监测了商业区、公园区、居住区、文教区和交通区的大气降尘重金属Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Sr、Zn等, 并进行了潜在生态风险和健康风险评价。大气降尘中重金属浓度顺序为Zn > Sr > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > Cd, 且均高于土壤背景值。Cu、Pb、Sr、Zn重金属在居住区的降尘浓度最高, Cd、Co、Cr、Ni在交通区的降尘浓度最高, 秋季大气降尘重金属浓度高于其他3个季节。各种重金属沉降通量均值在交通区和居住区较高, 在春季或秋季时较高。潜在生态风险评价结果表明, Cd的潜在生态危害程度最大, 是关键控制元素, 各功能区生态风险指数为交通区 > 居住区 > 文教区 > 商业区 > 公园区。健康风险评价结果表明各种重金属元素对人体不具有非致癌风险和致癌风险。

## 关键词

大气降尘, 重金属, 生态风险评价, 健康风险评价, 上海城区

# The Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Atmospheric Deposition in Shanghai Urban Areas

Chenglin Cai<sup>1\*</sup>, Mengrong Bao<sup>1</sup>, Jianshi Huang<sup>1</sup>, Shuiping Cheng<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Institute of Eco-Environmental Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023; published: Feb. 9<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 蔡成霖, 鲍梦蓉, 黄建时, 成水平. 上海城区大气降尘重金属污染特征及风险评价[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(1): 37-46. DOI: 10.12677/aep.2023.131005

## Abstract

In order to explore the pollution status and spatiotemporal distribution characteristics of heavy metals in the atmospheric deposition in Shanghai urban areas, we monitored the concentrations of heavy metals Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn in the atmospheric deposition in commercial, park, residential, educational and traffic areas respectively in 2021 and assessed the potential ecological and health risk. The results showed that the order of heavy metal concentration in atmospheric deposition was  $Zn > Sr > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > Cd$ , and they were all higher than the soil background value. Cu, Pb, Sr and Zn had the highest deposition concentrations in the residential area. Cd, Co, Cr, and Ni had the highest deposition concentrations in the traffic area. The heavy metal concentration of atmospheric deposition in autumn was significantly higher than those in the other three seasons. The average values of the deposition flux of each heavy metal in the traffic area and the residential area were higher than those of the other areas, and they in the spring or autumn were higher than those in the other seasons. The results of the potential ecological risk assessment showed that Cd was the highest degree of potential ecological hazard and was the key element to control. The order of ecological risk index of different functional areas was traffic area > residential area > educational area > commercial area > park area. According to the results of health risk assessment, none of the studied heavy metals had non-carcinogenic risk and/or carcinogenic risk for human being.

## Keywords

Atmospheric Deposition, Heavy Metal, Ecological Risk Assessment, Health Risk Assessment, Urban Areas of Shanghai

Copyright © 2023 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

大气降尘是受重力作用下降到地表的颗粒物，也是多种大气污染物的载体，沉降过程被视作去除大气污染物的重要过程[1]。通过大气沉降进入地表土壤或水体的污染物经食物链的富集放大作用会进一步危害人体健康[2]。重金属是降尘中的典型污染物，可通过呼吸摄入、手-口摄入和皮肤接触摄入3种方式进入人体并造成潜在危害[3]。

研究表明我国南方城镇大气降尘中Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、和Hg平均浓度较北方高出68.0%、34.2%、60.9%、7.3%、137.5%、44.2%和25.0%，As和Mn则低于北方[4]。在大气降尘重金属污染评价方面，生态风险评价的研究主要参考沉积物重金属污染评价，常见方法有富集因子法[5]、地积累指数法[6]和潜在生态危害指数法[7]。有学者采用美国环保局主张的土壤健康风险模型对大气降尘重金属污染状况进行人体健康风险评价[8]。

上海市是我国超大型城市代表之一，各类产业链完备，服务业发达。近年来对于上海市城区大气降尘重金属污染特征的研究鲜有报道。本研究分别在上海市城区的商业区、公园区、居住区、文教区和交通区设置采样点，探究大气降尘重金属的污染状况和时空分布特征，并进行潜在生态风险和健康风险评价，为上海市大气重金属污染防治提供参考。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区域与采样设置

本研究选取位于上海市中环线以内的杨浦区和虹口区交界周边 5 个典型功能区(商业区、公园区、居住区、文教区、交通区)设置采样点, 功能区位置见图 1。参照《环境空气降尘的测定 - 重量法》(GB/T 15265-1994), 采用降尘桶采集大气降尘, 每个采样点分设 3 个降尘桶, 且均放置距离地面 5~15 m 的屋顶或平台上。降尘桶为聚乙烯塑料桶, 内壁光滑, 采集口直径 20.0 cm、高度 25.0 cm。使用前经 10% HCl 溶液浸泡 24 h, 用超纯水冲洗晾干, 放置于高 0.8 m 的不锈钢固定架内。采样时间为 2021 年 4 个季节内的连续 4 周: 冬季(1 月 5 号~2 月 2 号)、春季(4 月 1 号~4 月 29 号)、夏季(7 月 6 号~8 月 2 号)和秋季(10 月 5 号~11 月 2 号), 以每周为单位采集样品, 期间共收集到有效样品 244 个, 其中空白样品 4 个。

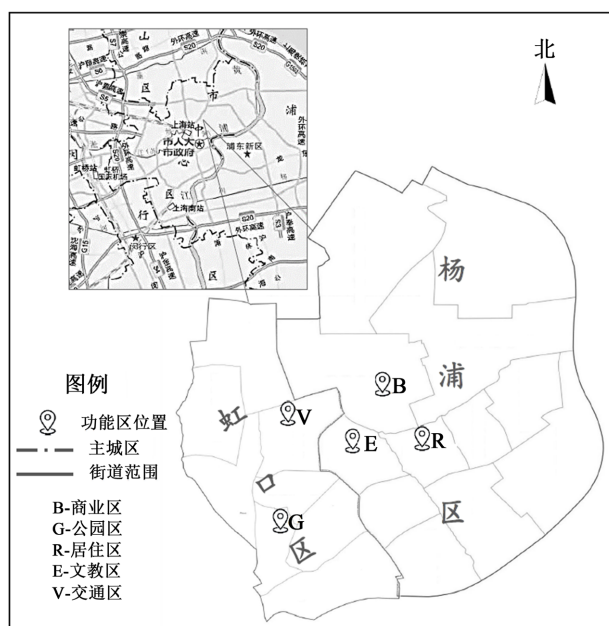


Figure 1. Schematic diagram of study area and sampling sites  
图 1. 研究区域与采样点示意图

### 2.2. 样品采集、处理和测定

以周为单位取回降尘样品, 用桶盖密封运输回实验室妥善保存, 用镊子取出落入桶内的树叶等异物, 将样品全部转移至烧杯并在电热板上蒸发浓缩至 10~20 mL, 加适量去离子水和 4~5 滴浓硝酸将样品全部转移至 100 mL 聚氯乙烯离心管中, 在冰箱 0°C~4°C 内保存。将连续采集 4 周的样品全部转移至同一 250 mL 聚四氟乙烯坩埚中, 采用 EPA3050b 消解法[9] [10]进行消解, 消解完成后定容待测。使用 ICP-MS (Agilent7700, 美国)测试样品中 8 种重金属元素 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Sr、Zn 浓度, 样品分析全程作平行测定和空白实验, 采用国家标准土样 GBW07429 (GSS-15)作为质控样品, 上述 8 种重金属元素回收率范围为 93.3%~104.3%。

### 2.3. 评价方法

#### 2.3.1. 潜在生态风险指数法

采用潜在生态危害指数法对重金属 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 生态风险进行评估(Sr 潜在生态毒

性很低, 不作考虑) [7], 其计算公式(1)为:

$$RI = \sum E_i = \sum \left( T_i \times \frac{c_i}{b_i} \right) \quad (1)$$

式中,  $c_i$  为某种重金属元素的浓度,  $b_i$  为其参比值(上海市土壤背景值) [11],  $T_i$  为其毒性系数, 适用本方法评价重金属 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的毒性系数分别为 30、5、2、5、5、5、1 [12],  $E_i$  为单种重金属潜在生态危害系数。 $RI$  为多种重金属的综合潜在生态风险指数。

### 2.3.2. 重金属健康风险评价

选取美国环境保护署的人体暴露健康风险评价模型进行评价[8], 经计算得各重金属通过呼吸、手-口、皮肤 3 种摄入途径的日均暴露量  $ADD_{inh}$ 、 $ADD_{ing}$ 、 $ADD_{derm}$  和致癌重金属在呼吸途径下的终生日均暴露量  $LADD$ , 以此计算得非致癌性风险商  $HQ$ 、非致癌性风险指数  $HI$  和致癌性风险指数  $CR$ , 并与其参考值范围对比从而判断健康风险程度[13]。

## 2.4. 数据处理

降尘重金属浓度公式(2)、沉降通量计算公式(3)为:

$$c_i = \frac{Q_{i0}}{m} \times 1000 \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{Q_{i0} \times 365}{S \times 28 \times 1000} \quad (3)$$

式中,  $c_i$  为降尘中某种重金属的浓度(mg/kg);  $Q_{i0}$  为某种重金属在某季节内连续 4 周的沉降通量( $\mu\text{g}$ );  $m$  在某季节内连续 4 周为降尘质量(mg);  $Q_i$  为某种重金属的单位面积年沉降通量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $S$  为降尘桶口面积, 经计算取  $0.0314 \text{ m}^2$ 。

使用 Origin 8.5 (OriginLab, 美国)进行绘图; 使用 SPSS 23.0 (IBM, 美国)中的单因素方差分析法分析不同季节及不同功能区的沉降浓度与通量的差异性,  $P < 0.05$  表明具有显著性差异。

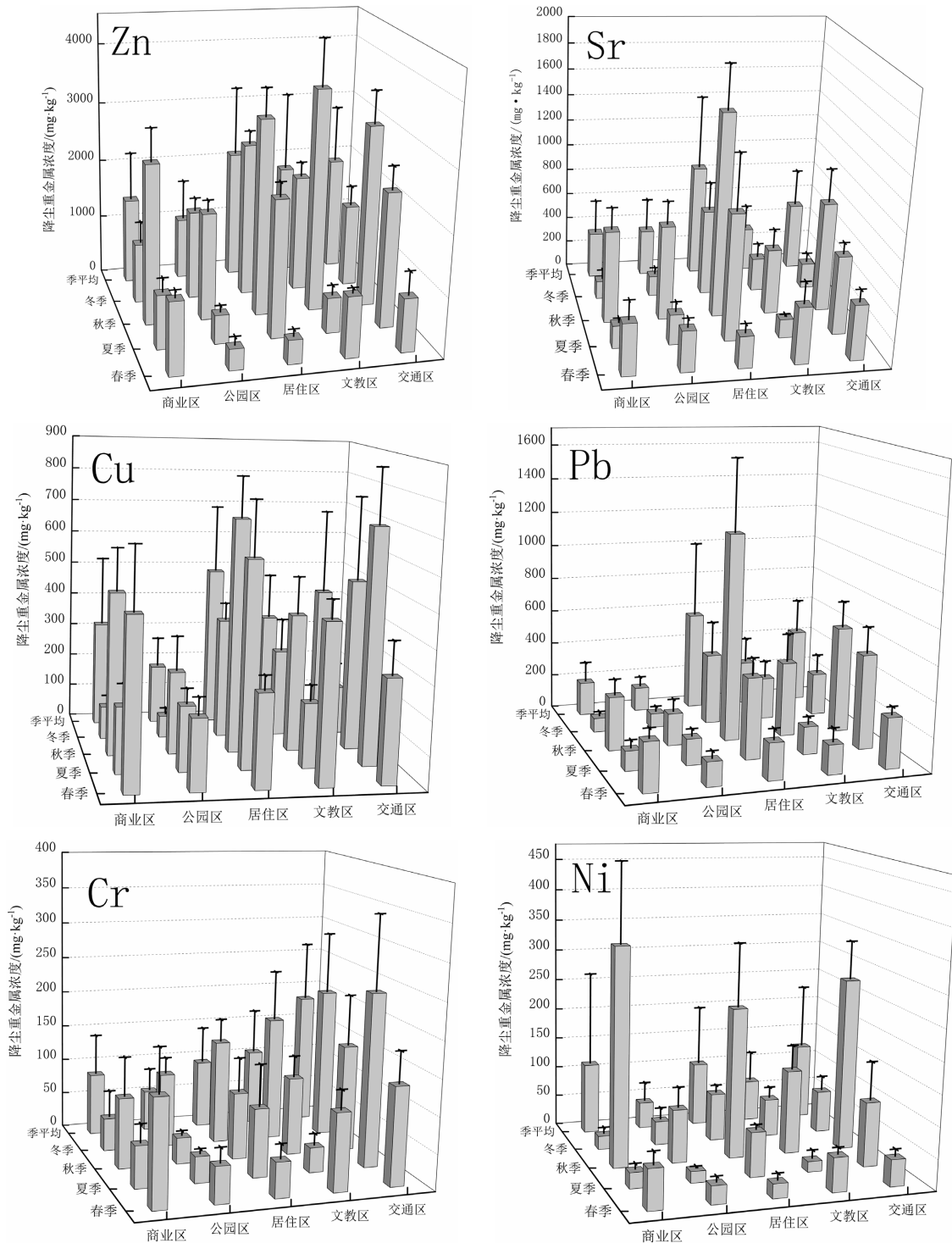
## 3. 结果与讨论

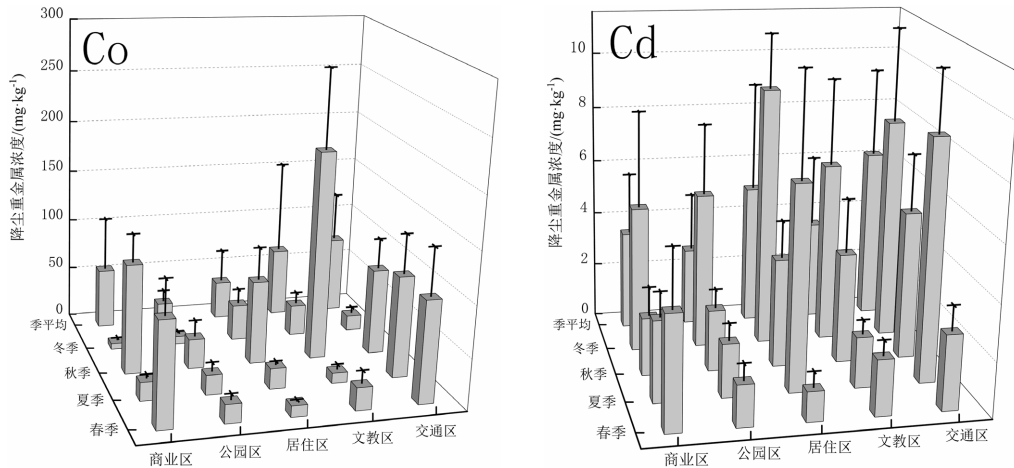
### 3.1. 大气降尘重金属浓度污染特征及季节变化特征

经分析整理, 大气降尘重金属浓度顺序为  $\text{Zn} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cd}$ 。不同功能区大气降尘各重金属浓度见图 2, 其中重金属 Cu、Pb、Sr、Zn 居住区比交通区的浓度均值高, 这可能一方面与交通区采样点的车道受新冠疫情影响车流量明显降低, 市民居家时长增加有关。另一方面上海市机动车污染物排放标准和燃油标准实施较早, 上海市新能源汽车保有量显著提高, 有研究表明近年来上海市机动车排放的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 等污染物呈递减趋势[14]。不同季节中, 秋季大气降尘的重金属浓度高于其他 3 个季节, 与张夏等[15]对重庆市主城研究结果相近, 结合气象因素认为可能是由于秋季上海市受蒙古高压逐渐增强影响, 由东北风转为北风主导且风速较高, 虽然降尘量较低[16], 但外源输送型污染增强, 外源降尘来源由较洁净的海洋源转为北部城郊工业区的大陆源[17], 导致秋季降尘中重金属浓度相对较为突出。

本研究中重金属 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Sr、Zn 分别是土壤背景值[11]的 32.54 倍、3.86 倍、1.41 倍、12.15 倍、19.31 倍、12.44 倍、3.98 倍、19.31 倍, 其中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 的平均值都是背景值的十倍以上, 这 4 种元素也常被称为“城市元素”, 这与上海市的大规模人口和城区面积相对应[18]。与帅开敏等[19]研究比较可知, 近年来上海地区降尘 Cr 污染增加, 而其他重金属元素浓度显著低于 2011 年水平,

说明随着近十年来上海市大气环境质量的提高[20] [21], 城区大气重金属污染也有所改善。与我国大气降尘重金属浓度 1995~2015 的统计数据[4]的平均值相比, 本研究中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 的浓度分别是其 1.04、1.94、3.23、2.25、1.29、1.15 倍, 其中 Ni、Cu、Zn 污染较为严重。与近年来全国其他城市或地区(南京[10]、重庆[15]、杭州[22]、珠三角[23])相比, 本研究表明上海城区大气降尘重金属浓度处于全国中高位水平, 其中重金属 Ni、Cu、Zn、Cd 污染相较更为突出。



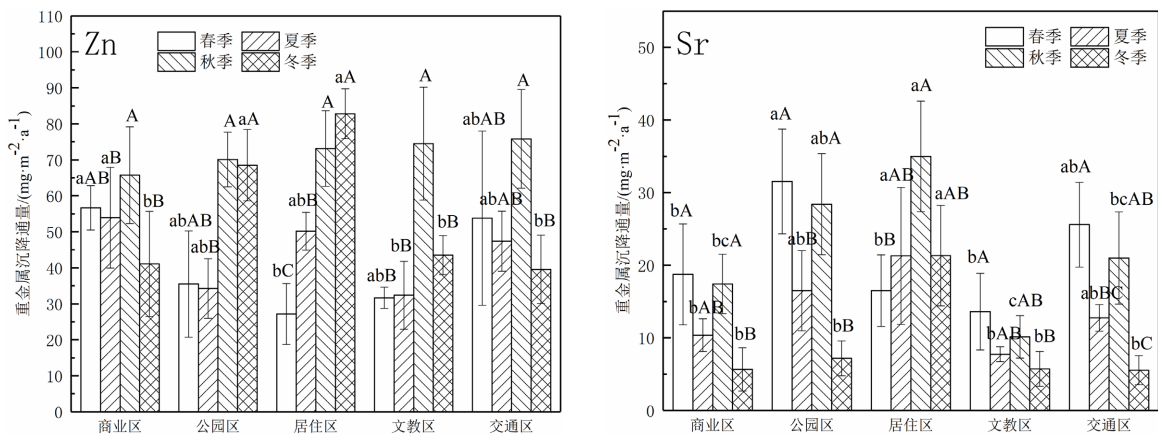


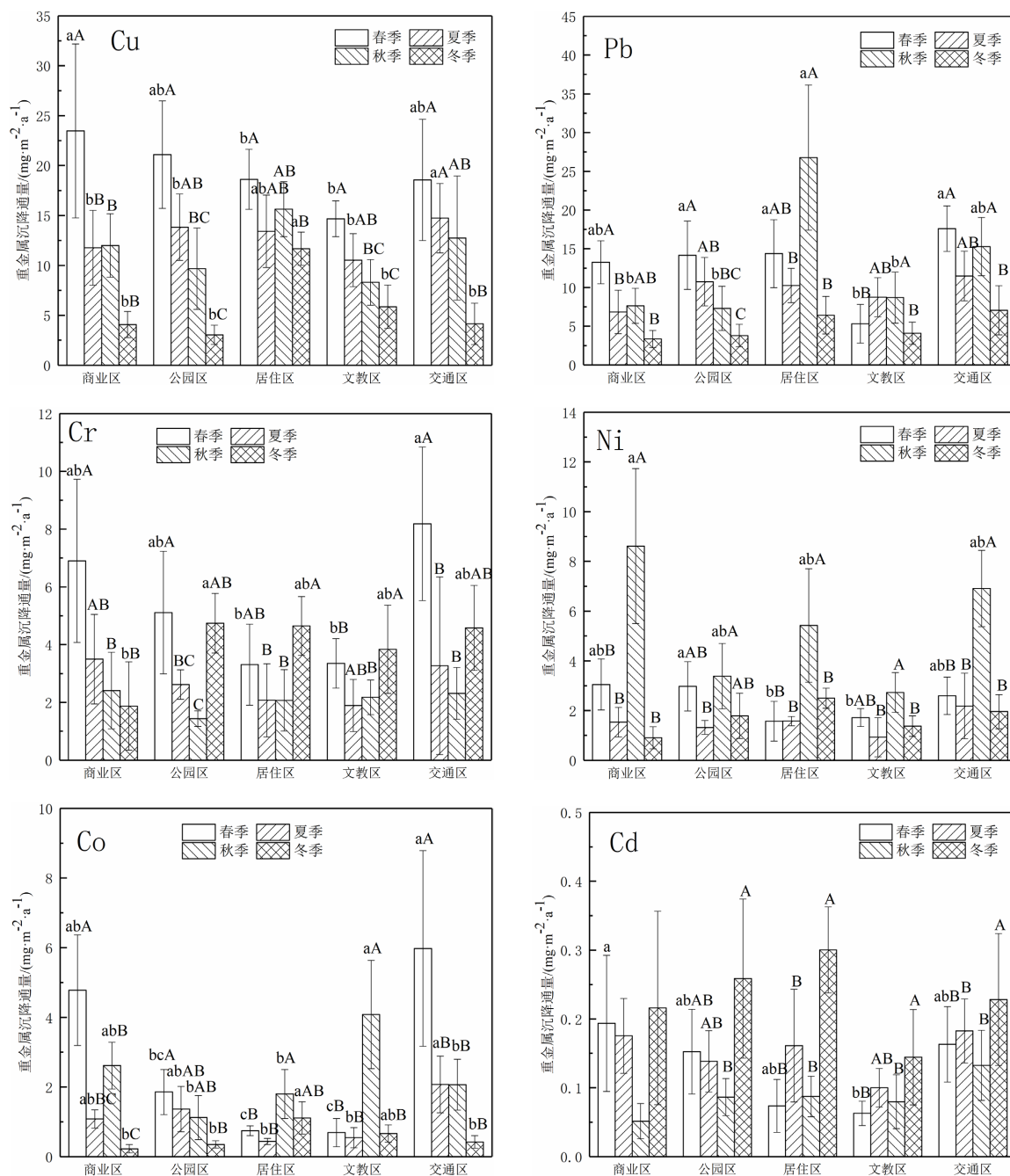
**Figure 2.** The concentrations of different heavy metals in atmospheric deposition in different seasons and different functional areas/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

**图 2.** 各重金属元素在不同季节、不同功能区大气降尘中的浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

### 3.2. 大气降尘重金属沉降通量及季节变化特征

各重金属沉降通量年均值的顺序为  $\text{Zn}$  ( $52.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Sr}$  ( $16.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Cu}$  ( $12.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Pb}$  ( $10.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Cr}$  ( $3.52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Ni}$  ( $2.75 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Co}$  ( $1.70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) >  $\text{Cd}$  ( $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。不同功能区重金属沉降通量的四季变化见图 3。重金属  $\text{Cd}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Cr}$  在交通区的沉降通量均值最大，重金属  $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Zn}$  在居住区的沉降通量均值最大，在交通区次之。有研究表明城市降尘中重金属  $\text{Cu}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Pb}$  主要来自于交通源的汽车排放尾气和轮胎磨损[24]。餐厨烹饪行为对空气中的重金属  $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$  有一定影响[25]，同时生活垃圾的倾倒、堆积和转运[26]以及家用电器、日用包装等物品的磨损也会增大居住区内的大气重金属污染[27]。另外无铅汽油的推广应用已降低了汽车尾气释放的  $\text{Pb}$ ，而涂料和油漆等材料在建筑外表面、室内装修使用时释放的  $\text{Pb}$  更加值得关注[28]。 $\text{Ni}$  在商业区沉降通量均值最大。文教区是各重金属沉降通量均值最小的功能区。对于不同季节，重金属在夏季沉降通量最低，在春季或秋季时重金属沉降通量较高。就时空影响整体而言，季节差异的显著性比功能区差异的显著性更大。分析认为这是由于不同季节的气象条件差异能更大程度影响外源输入型污染源。有研究表明上海市季节差异导致的气象因素变化会使外源输入型污染源改变[17]，而上海市的大气污染可分为外源输入型、内源静稳型和双源叠加型，其中外源输入型是上海市大气污染的主要类型，占上海市中度污染及以上的 45.8% [29]，内源静稳型最少，仅占上海市中度污染及以上的 23.7%。





注：图中不同大写字母表示同一功能区沉降通量在不同季节的显著性差异( $P < 0.05$ )，不同小写字母表示在同一季节不同功能区的显著性差异( $P < 0.05$ )。

Figure 3. Seasonal flux variation of heavy metals in atmospheric deposition in different functional areas

图 3. 不同功能区大气沉降中各重金属四季通量变化

与全国平均水平[4]相比，除重金属 Cu、Zn 外，上海市城区重金属 Cd、Cr、Ni、Pb 沉降通量整体处于较低水平，这是由于尽管降尘重金属浓度较高，但近年来上海市降尘污染治理效果显著[20] [30]，使得总体降尘通量小，本研究中月降尘通量范围为 1.2~8.8 g/(m<sup>2</sup>·30d)，均值为 3.5 g/(m<sup>2</sup>·30d)，远低于 2018 年生态环境部颁布的标准 9 g/(m<sup>2</sup>·30d)。

### 3.3. 风险评价

#### 3.3.1. 生态风险评价

各功能区 7 种重金属 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的  $E_i$  和  $RI$  见表 1。潜在生态风险评价等级依据[31] [32], 7 种重金属的生态危害程度的大小顺序是 Cd (强) > Pb (中等) > Cu (中等) > Zn (轻微) > Co (轻微) > Ni (轻微) > Cr (轻微)。各功能区综合潜在生态风险指数  $RI$  大小顺序为交通区 > 居住区 > 文教区 > 商业区 > 公园区, Cd 的潜在生态危害系数在综合潜在生态风险指数中占比很高, 达到 87.5%~91.7%, 说明 Cd 是大气降尘重金属潜在生态危害的关键控制元素。

**Table 1.** Evaluation of potential ecological risk index of heavy metals in atmospheric deposition in different functional areas  
**表 1.** 不同功能区的大气降尘重金属潜在生态风险指数评价

功能区	单种重金属潜在生态危害系数 $E_i$							综合潜在生态风险指数 $RI$
	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
商业区	823.85	21.88	2.3	55.57	18	38.3	16.65	938.25
公园区	648.46	7.03	1.51	31.23	6.77	27.37	11.91	706.91
居住区	1167.69	13.94	2.53	85.1	16.27	112.21	24.76	1310.29
文教区	826.15	25.3	2.82	58.56	10.57	49.47	21.11	944.51
交通区	1430.77	28.35	4.9	73.18	19.44	83.73	22.12	1578.76
总体	979.38	19.3	2.81	60.73	14.21	62.22	19.31	1095.74

#### 3.3.2. 健康风险评价

经计算上海市城区大气降尘重金属健康风险指数见表 2。各重金属在手 - 口摄入、皮肤接触和呼吸摄入暴露途径下非致癌风险指数  $HI$  均未超过美国环保局规定的限值 1, 说明非致癌风险较小或不存在, 且成人低于儿童, 手 - 口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入。对于成人和儿童, 各重金属非致癌风险指数  $HI$  顺序分别为 Pb > Cr > Cu > Zn > Cd > Ni > Sr > Co 和 Pb > Cr > Cu > Zn > Ni > Cd > Sr > Co。

**Table 2.** Health risk index of heavy metals in urban atmospheric deposition  
**表 2.** 上海市城区大气降尘重金属健康风险指数

重金属元素	非致癌性风险商 HQ						非致癌性风险指数 HI		致癌性风险指数 CR (呼吸途径)
	呼吸摄入		手 - 口摄入		皮肤接触		成人	儿童	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童			
Cd	4.38E-07	7.77E-07	2.98E-03	2.78E-02	4.46E-04	3.20E-03	3.43E-03	3.10E-02	1.37E-09
Co	3.27E-07	5.81E-07	1.15E-05	1.07E-04	2.67E-06	1.91E-05	1.45E-05	1.27E-04	2.54E-08
Cr	3.82E-04	6.78E-04	2.48E-02	2.31E-01	1.86E-03	1.33E-02	2.70E-02	2.45E-01	2.27E-07
Cu	8.95E-07	1.59E-06	6.12E-03	5.71E-02	3.05E-05	2.19E-04	6.15E-03	5.73E-02	-
Ni	4.56E-07	8.09E-07	3.19E-03	2.98E-02	1.77E-04	1.27E-03	3.37E-03	3.11E-02	3.90E-09
Pb	9.33E-06	1.65E-05	6.38E-02	5.95E-01	6.43E-04	4.61E-03	6.44E-02	6.00E-01	-
Sr	8.36E-08	1.48E-07	5.68E-04	5.30E-03	4.26E-06	3.05E-05	5.73E-04	5.34E-03	-
Zn	5.74E-07	1.02E-06	3.90E-03	3.64E-02	2.92E-05	2.10E-04	3.93E-03	3.67E-02	-



重金属 Cd、Co、Cr、Ni 通过呼吸途径的致癌风险指数  $CR$  顺序为  $Cr > Co > Ni > Cd$ 。4 种重金属  $CR$  值均小于美国环保局规定的限值  $10^{-6}$ ，此结果赵晓亮等[33]研究相同，4 种重金属均不具有致癌风险或风险较小。

#### 4. 结论

1) 上海城区大气降尘重金属浓度顺序为  $Zn > Sr > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > Cd$ ，且均高于土壤背景值。Cu、Pb、Sr、Zn 在居住区的降尘浓度最高，Cd、Co、Cr、Ni 在交通区的降尘浓度最高。大气降尘重金属浓度的季节性差异性显著，秋季最高。

2) 重金属 Cd、Co、Cr 在交通区的沉降通量均值最大，Cu、Pb、Sr、Zn 居住区最大，Ni 在商业区沉降通量均值最大，文教区的各重金属沉降通量均值最小。在春季或秋季时各重金属沉降通量较高。

3) 潜在生态危害程度最大的重金属元素是 Cd，达到极强潜在生态危害程度，是关键控制元素。各功能区综合潜在生态风险指数顺序为交通区 > 居住区 > 文教区 > 商业区 > 公园区。

4) 各种重金属暴露量大小顺序为手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入，且均无非致癌风险。通过呼吸途径摄入 Cd、Co、Cr、Ni 的量不具有致癌风险。

#### 参考文献

- [1] Nie, X., Wang, Y., Li, Y., *et al.* (2017) Characteristics and Impacts of Trace Elements in Atmospheric Deposition at a High-Elevation Site, Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 22839-22851. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8791-1>
- [2] Okubo, A., Takeda, S. and Obata, H. (2013) Atmospheric Deposition of Trace Metals to the Western North Pacific Ocean Observed at Coastal Station in Japan. *Atmospheric Research*, **129-130**, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.03.014>
- [3] Gope, M., Masto, R.E., George, J., *et al.* (2017) Bioavailability and Health Risk of Some Potentially Toxic Elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in Street Dust of Asansol, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **138**, 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.008>
- [4] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4085-4096.
- [5] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4051-4059.
- [6] Lei, P., Zhang, H., Shan, B., Lv, S. and Tang, W. (2016) Heavy Metals in Estuarine Surface Sediments of the Hai River Basin, Variation Characteristics, Chemical Speciation and Ecological Risk. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 7869-7879. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6059-9>
- [7] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control a Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [8] USEPA (1997) Environmental Protection Agency. Exposure Factors Handbook. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development, Washington DC, 290 p.
- [9] USEPA (1996) Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. USEPA, Washington DC.
- [10] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3118-3125.
- [11] 王云. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 37.
- [12] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 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.
- [13] Cai, K., Li, C. and Na, S. (2019) Spatial Distribution, Pollution Source, and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Depositions: A Case Study from the Sustainable City of Shijiazhuang, China. *Atmosphere*, **10**, Article No. 222. <https://doi.org/10.3390/atmos10040222>
- [14] 阿迪拉·阿力木江, 蒋平, 董虹佳, 胡彪. 推广新能源汽车碳减排和大气污染控制的协同效益研究——以上海市为例[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1873-1883.

- [15] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5288-5294.
- [16] 陈镭, 马井会, 瞿元昊, 常炉予. 2019-2020 年上海地区空气质量变化特征及气象影响因素分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 59-65.
- [17] 陈镭, 周广强, 毛卓成, 瞿元昊. 上海地区 2017 年三次短时重度污染过程变化特征及其气象影响因素[J]. 气象, 2020, 46(5): 675-686.
- [18] Miguel, E.D., Llamas, J.F., Chacon, E., *et al.* (1997) Origin and Patterns of Distribution of Trace Elements in Street Dust: Unleaded Petrol and Urbanlead. *Atmospheric Environment*, **31**, 2733-2740.  
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00101-5)
- [19] 帅开敏, 余莉萍, 王少平, 等. 工业和交通对城市降尘中砷和 5 种重金属的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 50-53.
- [20] 上海市生态环境局. 2010 年上海市环境状况公报[R]. <https://link.sthj.sh.gov.cn/file/2011bulletin/index.html>, 2011-06-02.
- [21] 上海市生态环境局. 2021 年上海市生态环境状况公报[R].  
<https://sthj.sh.gov.cn/hbzhzywpt1143/hbzhzywpt1144/20220603/878ab2328926470fa8af4c19770bd081.html>, 2022-06-03.
- [22] 焦荔, 沈建东, 姚琳, 杨乐. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(1): 73-76.
- [23] 黄强, 宋建中, 彭平安. 珠江三角洲大气干沉降金属元素含量和来源分析[J]. 地球与环境, 2013, 41(5): 498-505.
- [24] Bourliva, A., Christophoridis, C., Papadopoulou, L., *et al.* (2017) Characterization, Heavy Metal Content and Health Risk Assessment of Urban Road Dusts from the Historic Center of the City of Thessaloniki, Greece. *Environmental Geochemistry and Health*, **39**, 611-634. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9836-y>
- [25] 李林璇, 程渊, 杜鑫, 等. 六类餐饮源排放  $PM_{2.5}$  化学成分谱[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 71-78.
- [26] 吴一鸣, 周怡静, 田贺忠, 等. 我国城市生活垃圾处理处置全过程大气排放研究进展[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 991-999.
- [27] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 392-400.
- [28] 梁静, 毛建素. 铅元素人为循环环境释放物形态分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1191-1197.
- [29] 余钟奇, 马井会, 曹钰, 等. 影响上海  $PM_{2.5}$  污染不同源地和路径的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 21-31.
- [30] 上海市生态环境局. 2017 年上海市生态环境状况公报[R].  
<https://sthj.sh.gov.cn/hbzhzywpt1143/hbzhzywpt1144/20190602/0024-141847.html>, 2018-06-02.
- [31] 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.
- [32] 侯千, 马建华, 王晓云, 段海静. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1764-1771.
- [33] 赵晓亮, 孙杰, 李俊华, 等. 阜新城区降尘重金属污染及其健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2017, 30(9): 1346-1354.