

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018090505

刘贤荣, 郑权, 胡恭任, 等. 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1609-1618.

LIU Xianrong, ZHENG Quan, HU Gongren, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ fraction of road dust in Nanchang City[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(7): 1609-1618.

南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属分布特征及健康风险评价*

刘贤荣 郑 权 胡恭任 于瑞莲**

(华侨大学化工学院, 厦门, 361021)

摘 要 为了解南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的分布特征和健康风险, 利用颗粒物再悬浮采样器采集了道路尘中的 $PM_{2.5}$ 样品, 用电感耦合等离子体质谱仪和原子荧光光谱仪测定了样品中 11 种重金属元素的含量. 结果表明, 道路尘 $PM_{2.5}$ 中 Mn、Zn、Cr、Cu、Pb、V、As、Ni、Co、Cd 和 Hg 的平均含量分别为 1014、208.17、106.47、102.40、62.12、39.59、28.93、24.07、7.86、0.58、0.53 $mg \cdot kg^{-1}$, 除 V 和 Co 外均大于南昌市土壤元素背景值, 整体上主干道和支路的金属含量会高于主干道重金属的含量, 比国内外其他城市相对要低. 地累积指数结果显示, Cd、Hg、Cu、Mn 和 Zn 处于偏中度污染, As 和 Pb 属于轻度污染, 其余元素处于无污染水平. 日均暴露剂量表明, Mn 在儿童的非致癌日均暴露剂量最高 (摄食: $2.83 \times 10^{-3} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 呼吸吸入: $2.50 \times 10^{-7} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 皮肤接触: $6.87 \times 10^{-6} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$), 经口摄食是人体暴露的主要途径, Cr 的终身暴露剂量最高 (儿童: $8.63 \times 10^{-9} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 成年男性: $9.12 \times 10^{-9} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, 成年女性: $8.12 \times 10^{-9} mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$). 11 种重金属对儿童、成年女性和成年男性的非致癌风险值之和分别为 0.58、0.19 和 0.17, 小于可接受风险值 1.0, As、Cr、Mn 是主要贡献元素; 5 种致癌元素 (Cr、As、Co、Ni 和 Cd) 经呼吸途径对人体的总致癌风险值均小于可接受水平 10^{-6} , 成年男性 (4.29×10^{-7}) 略高于儿童 (4.06×10^{-7}) 和成年女性 (3.82×10^{-7}), Cr 和 As 是主要贡献元素.

关键词 南昌市, 道路尘, $PM_{2.5}$, 重金属, 健康风险评价.

Characteristics and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ fraction of road dust in Nanchang City

LIU Xianrong ZHENG Quan HU Gongren YU Ruilian**

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China)

Abstract: In order to understand the characteristics and health risk of heavy metals in $PM_{2.5}$ fraction of road dust in Nanchang city, $PM_{2.5}$ samples were collected by a resuspension sampler, then concentrations of 11 heavy metals were detected by an inductively coupled plasma mass spectrometer and an atomic fluorescence spectrometer. The results showed that the average concentrations of Mn, Zn, Cr, Cu, Pb, V, As, Ni, Co, Cd and Hg in $PM_{2.5}$ fraction of road dust were 1014, 208.17, 106.47, 102.40, 62.12, 39.59, 28.93, 24.07, 7.86, 0.58 and 0.53 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively, which were higher than the background values of Nanchang soil except V and Co. The concentrations of heavy metals in secondary roads and branch roads were higher than those of the main road, and were lower than those of other cities. The results of geoaccumulation index revealed that Cd, Hg, Cu,

2018 年 9 月 5 日收稿 (Received: September 5, 2018).

* 国家自然科学基金 (21477042, 21377042) 和福建省自然科学基金 (2016J01065) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21477042, 21377042) and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2016J01065).

** 通讯联系人, Tel: 15905093062, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 15905093062, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

Mn, and Zn were at moderate pollution level, As and Pb showed mild pollution, while the other elements presented no pollution. The average daily exposure dosage showed that Mn in children was the highest (ingestion: $2.83 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, inhalation: $2.50 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, dermal contact: $6.87 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$). Ingestion was the major exposure pathway for human health risk. The lifetime exposure dose of Cr was the highest (children: $8.63 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, adults males: $9.12 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, adult females: $8.12 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$). The studied heavy metals showed the highest non-carcinogenic risk to children with the non-carcinogenic risk value of 0.58, followed by adult females (0.19) and adult males (0.17), which were all less than the threshold value 1.0, and the major contribution elements were Mn, As and Cr. The five carcinogenic metals Cr, As, Co, Ni and Cd had no carcinogenic risk to human health via inhalable pathway with the risk values of less than the threshold value 10^{-6} . The total carcinogenic risk of heavy metals to adult males (4.29×10^{-7}) was slight higher than that to children (4.06×10^{-7}) and adult females (3.82×10^{-7}), and the major contribution elements were Cr and As.

Keywords: Nanchang City, road dust, $\text{PM}_{2.5}$, heavy metal, health risk assessment.

随着我国工业化和城市化的快速发展,城市环境污染加剧,大气颗粒物成为城市空气污染的重要因素之一^[1-3].大气颗粒物,特别是细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$),因易富集有害化学组分而对人体健康造成不良影响^[4-5].道路扬尘是城市大气颗粒物的重要组成部分,也是各种污染物迁移转化的重要载体之一^[6].重金属由于其存在形态的多变性、累积性和不可降解性^[7],易附着在 $\text{PM}_{2.5}$ 中并通过不同暴露途径对人体健康造成危害.

南昌市作为江西省的省会城市,是中国重要的综合交通枢纽和现代制造业基地,近年来大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题日益严重.已有学者开展了针对南昌市 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布^[8]、化学组分特征及来源解析^[9-14] 的研究.有报道指出,南昌市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源中各类扬尘(包括道路尘、建筑施工尘和土壤风沙尘等)占 27.3%,是造成城市大气颗粒物污染的重要因素之一^[15].目前针对南昌市道路扬尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究尚未见报道.

本研究以南昌市道路尘的 $\text{PM}_{2.5}$ 为研究对象,分析其中重金属元素的分布特征,利用 EPA 相关健康风险评价模型评估道路尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属对人体健康的风险,以期为该城市大气污染综合防治和环境管理提供参考依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

2015 年 9 月,分别选取南昌市具有代表性的城市主干道(八一大道 BY、丰和大道 FH、昌南大道 CN)、次干道(三店西路 SDW、会展路 HZ、京东大道 JD)、支路(彭桥路 PQ、苏圃路 SP、芙蓉路 FR),每条道路选 3 个采样点,各采样点之间距离:主干道不小于 1000 m、次干道不小于 500 m、支路不小于 100 m.用毛刷或真空吸尘器收集机动车道边沿的道路积尘.每个样点采集 5 个子样品混合,每个样点采集不少于 500 g,共计 27 个样品.采样选择在晴天进行,出现下雨天气时,等路面干燥(2—7 d)后在进行道路尘采集工作,采样点位置见图 1.

以上采集的样品自然晾干后过 200 目的尼龙筛,然后用 NK-ZXF 颗粒物再悬浮采样器将各道路尘的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品分别采集到聚丙烯滤膜上,用于无机元素的分析.

1.2 样品分析

将载有 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的聚丙烯滤膜剪碎,放入锥形瓶中,加去离子水润湿,加入 15 mL HNO_3 和 5 mL HClO_4 ,在电热板上加热,温度控制在 100 °C 以下,反应约 1 h 后,有白烟冒出,此时 HClO_4 开始分解,再提高温度至 160 °C,当酸剩余约 3 mL 时,将锥形瓶取下,冷却后,加入少许去离子水,过滤残渣,定容到 25 mL 容量瓶.V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试分析,As

和 Hg 采用原子荧光光谱仪(AFS)分析.全程做空白滤膜的平行实验,道路尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中各元素含量均为扣除空白膜中的值.

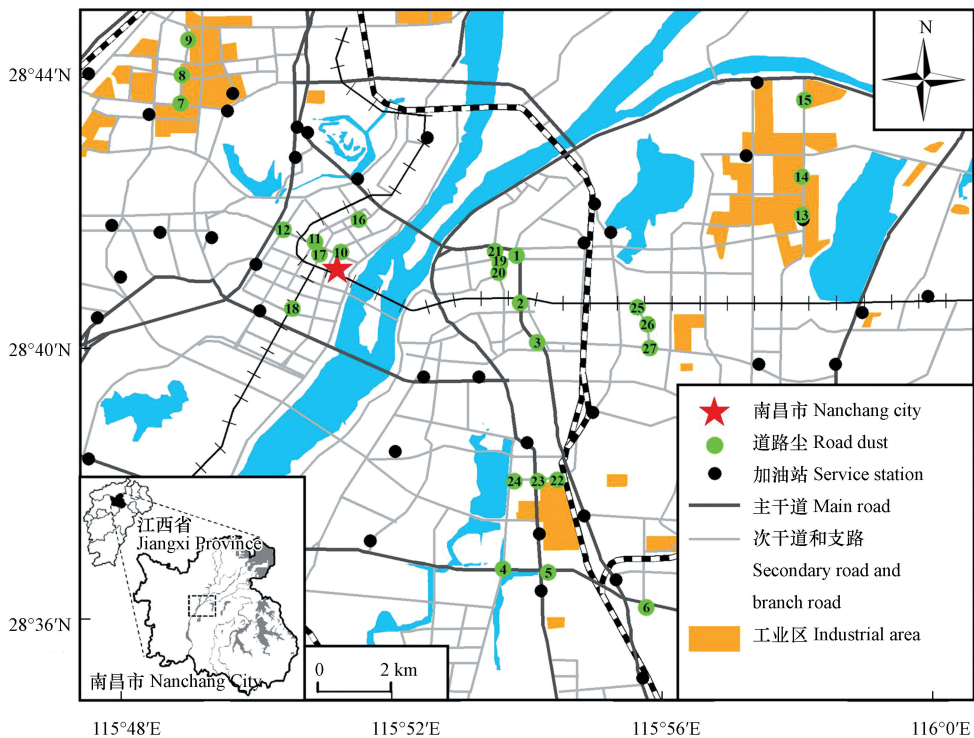


图 1 南昌市道路尘采样位置图

(序号 1—3: 八一大道; 4—6: 昌南大道; 7—9: 芙蓉路; 10—12: 会展路; 13—15: 京东大道; 16—18: 丰和大道; 19—21: 苏圃路; 22—24: 三店西路; 25—27: 彭桥路)

Fig.1 Sampling sites of road dust in Nanchang City

(Number 1—3: BY; 4—6: CN; 7—9: FR; 10—12: HZ; 13—15: JD; 16—18: FH; 19—21: SP; 22—24: SDW; 25—27: PQ)

1.3 污染评价方法

地累积指数(I_{geo})最早是由 Muller 提出的用于研究沉积物中重金属的污染程度^[16],目前也可用于其他环境介质中重金属的污染评价.其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_i} \right)$$

式中, C_i 为道路尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素 i 的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为元素 i 的地球化学背景值,本文中 B_i 采用的是南昌市土壤元素背景值 (V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As 和 Hg 分别为 92.13、60.74、269.32、12.17、20.96、20.10、64.37、0.11、29.64、11.12、0.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17].采用的评价标准为: $I_{\text{geo}} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 轻度污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 偏中度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$, 中度污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$, 偏重污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$, 重度污染; $I_{\text{geo}} > 5$, 严重污染.

1.4 健康风险评价方法

1.4.1 暴露剂量

经口摄食、呼吸吸入及皮肤接触是污染物对人体产生健康危害的 3 个主要途径^[18].所研究的 11 种重金属元素都具有慢性非致癌健康风险,其暴露剂量的计算公式^[19]为:

$$\begin{aligned} \text{ADD}_{\text{ing}} &= \frac{C \times \text{IR}_{\text{ing}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \\ \text{ADD}_{\text{inh}} &= \frac{C \times \text{IR}_{\text{inh}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \\ \text{ADD}_{\text{derm}} &= \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{SL} \times \text{SA} \times \text{ABS}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \end{aligned}$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 、 ADD_{derm} 分别为摄食、呼吸吸入和皮肤接触的日均暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; C 为污染物浓度 ($mg \cdot kg^{-1}$), IR_{ing} 为摄食速率 ($mg \cdot d^{-1}$); IR_{inh} 为呼吸速率 ($m^3 \cdot d^{-1}$), EF 为暴露频率 ($d \cdot a^{-1}$), ED 为暴露持续时间 (a), BW 为体重 (kg), AT 为平均暴露时间, PEF 为颗粒物排放因子 ($m^3 \cdot kg^{-1}$); SL 为皮肤黏着度 [$mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}$], SA 为暴露皮肤面积 (cm^2), ABS 为皮肤吸收因子.

由于仅有呼吸吸入途径的致癌风险参数, 因此仅计算通过呼吸途径的致癌风险暴露量. Cd 、 Co 、 Cr 、 Ni 、 As 具有致癌风险, 其暴露量的计算公式^[20]为:

$$LADD_{inh} = \frac{C \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{IR_{inhch} \times ED_{inhch}}{BW_{inhch}} + \frac{IR_{inhchad} \times ED_{inhchad}}{BW_{inhchad}} \right)$$

$LADD_{inh}$ 为人体通过呼吸吸入途径暴露于致癌物的日均暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; IR_{inhch} 、 $IR_{inhchad}$ 分别为儿童和成人的呼吸速率 ($m^3 \cdot d^{-1}$); ED_{inhch} 、 $ED_{inhchad}$ 分别为儿童和成人的暴露持续时间 (a); BW_{inhch} 、 $BW_{inhchad}$ 分别为儿童和成人的体重 (kg).

为了使健康风险评价更符合中国人群的特性, 本文中的暴露参数选用了中国人群暴露参数手册^[21-22]的相关参数. 各参数取值见表 1.

表 1 道路扬尘中重金属的人体暴露量计算参数
Table 1 Exposure parameters of heavy metals in road dust

暴露参数 Exposure parameters	儿童(0—18 岁) Children(0—18 years)	成人男性(18 岁以上) Adult males(>18 years)	成人女性(18 岁以上) Adult females(>18 years)
$IR_{ing}/(mg \cdot d^{-1})$	90	50	50
$IR_{inh}/(m^3 \cdot d^{-1})$	10.8	17.7	14.5
$EF/(d \cdot a^{-1})$	365	365	365
ED/a	6	24	24
BW/kg	32.2	66.1	57.8
AT (carcinogenic)/d	74.8×365	72.4×365	77.4×365
AT (non-carcinogenic)/d	$ED \times 365$	$ED \times 365$	$ED \times 365$
$PEF/(m^3 \cdot kg^{-1})$	1.36×10^9	1.36×10^9	1.36×10^9
$SL/[mg \cdot (cm^2 \cdot d)^{-1}]$	0.2	0.07	0.07
$SA/(cm^2)$	1091	1700	1500
ABS	0.001	0.001	0.001

1.4.2 健康风险值

重金属元素的非致癌风险值 HQ_T 和致癌元素的终生致癌风险值 $ILCR_T$ 计算公式^[18]分别为:

$$HQ_T = \sum_i^m \sum_j^n HQ_{ij} = \sum_i^m \sum_j^n ADD_{ij} / RfD_{ij}$$
$$ILCR_T = \sum_i^m ILCR_i = \sum_i^m LADD_i \times SF_i$$

式中, HQ_{ij} 为重金属 i 元素在 j 途径暴露的非致癌风险值, $ILCR_i$ 为重金属 i 元素的致癌风险值; RfD_{ij} 为重金属 i 元素在 j 途径暴露的参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], SF_i 为重金属 i 元素的致癌强度系数 [$(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$]. 当 $HQ_T \leq 1$ 时, 非致癌健康风险较小或可以忽略; $HQ_T > 1$ 时, 存在非致癌风险. $ILCR_T$ 表示人群癌症发生的概率, 若 $ILCR_T < 10^{-6}$, 致癌风险可忽略; 若 $ILCR_T$ 在 10^{-6} — 10^{-4} 之间, 可认为有一定的致癌风险; 当 $ILCR_T > 10^{-4}$ 时, 存在较高的致癌风险. 各重金属元素的参考剂量 (RfD) 和致癌强度系数 (SF) 见表 2.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属分布特征

图 2 为南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的含量分布. Mn 、 Zn 、 Cr 、 Cu 、 Pb 、 V 、 As 、 Ni 、 Co 、 Cd 和 Hg 的平均含量分别为 1014、208.17、106.47、102.40、62.12、39.59、28.93、24.07、7.86、0.58、0.53 $mg \cdot kg^{-1}$, 分别是

南昌市土壤背景值^[17]的 3.76、3.23、1.75、5.09、2.10、0.43、2.60、1.15、0.65、5.26 和 5.28 倍,说明南昌市道路尘中多数重金属元素已受到人为活动一定程度的影响.各道路尘 PM_{2.5} 中 11 种重金属元素含量 (mg·kg⁻¹) 之和的排序:彭桥路(1973)>三店西路(1750)>京东大道(1741)>苏圃路(1715)>八一大道(1556)>芙蓉路(1531)>会展路(1422)>昌南大道(1367)>丰和大道(1335).整体上次干道和支路的金属含量会高于主干道,这可能与主干道的保洁频率更高有关.同时,由于彭桥路和京东大道位于工业区附近、三店西路周围加油站和车辆较多也是金属元素含量较高的重要原因.

表 2 道路扬尘重金属进入人体的剂量-反应参数^[23-24]

Table 2 Dose-response parameters of heavy metals in road dust^[23-24]

元素 Element	RfD _{ing} /[mg·(kg·d) ⁻¹]	RfD _{inh} /[mg·(kg·d) ⁻¹]	RfD _{derm} /[mg·(kg·d) ⁻¹]	SF/[(kg·d)·mg ⁻¹]
Cd	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁵	6.30
Co	2.00×10 ⁻²	5.71×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻²	9.80
Cr	3.00×10 ⁻³	2.86×10 ⁻⁵	6.00×10 ⁻⁵	42.0
Ni	2.00×10 ⁻²	2.06×10 ⁻²	5.40×10 ⁻³	0.84
As	3.00×10 ⁻⁴	3.01×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	15.1
Hg	3.00×10 ⁻⁴	8.57×10 ⁻⁵	2.10×10 ⁻⁵	—
Mn	4.60×10 ⁻²	1.43×10 ⁻⁵	1.84×10 ⁻³	—
Zn	0.30	0.30	0.06	—
Pb	3.50×10 ⁻³	3.52×10 ⁻³	5.25×10 ⁻⁴	—
Cu	4.00×10 ⁻²	4.02×10 ⁻²	1.20×10 ⁻²	—
V	7.0×10 ⁻³	7.0×10 ⁻³	7.0×10 ⁻⁵	—

Cr、Cu 和 Co 等 3 个元素在不同道路尘 PM_{2.5} 中的含量存在明显的波动现象,变异系数分别为 0.60、0.62 和 0.57,属于中等程度变异^[25].上述元素在三店西路、彭桥路和京东大道尘 PM_{2.5} 中的含量远高于其他道路,因这 3 种元素与交通活动、燃油和工业生产贡献^[26-27]有关.

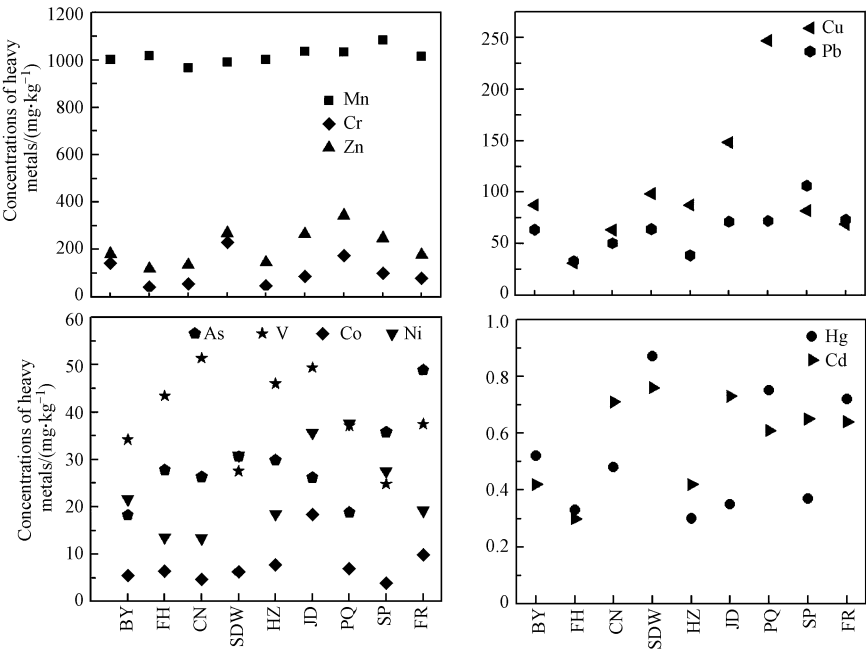


图 2 南昌市道路尘 PM_{2.5} 中重金属含量分布

Fig.2 Concentrations of heavy metals in PM_{2.5} fraction of road dust in Nanchang City

表 3 为国内外不同城市道路尘中重金属的含量比较.从中可知,南昌市的道路尘 Mn 含量高于其他城市;As 含量高于北京、上海和 Novi Sad,低于中国香港;Hg 含量高于北京和上海;V 含量低于西安;Cr

含量高于北京和 Novi Sad,低于西安、宝鸡、中国香港和 Thessaloniki;Co 含量高于 Novi Sad,低于西安和宝鸡;Ni 含量高于 Novi Sad,低于其他城市(上海无数据);Cu 含量高于北京、西安和 Novi Sad,低于其他城市;Zn 含量高于北京和西安,低于其他城市(Novi Sad 无数据);Pb 含量高于北京,低于其他城市;Cd 含量高于北京、上海和 Novi Sad,低于其他城市(西安无数据);因此,南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属的含量整体比其他城市相对要低.

表 3 国内外不同城市道路尘重金属含量比较(mg·kg⁻¹)

Table 3 Comparison of heavy metals concentrations in road dusts between different cities(mg·kg⁻¹)

元素 Element	南昌 Nanchang	北京 ^[28] Beijing	天津 ^[29] Tianjin	上海 ^[30] Shanghai	西安 ^[31] Xi'an	宝鸡 ^[32] Baoji	中国香港 ^[33-34] HongKong, China	Novi Sad ^[35]	Thessaloniki ^[36]
Mn	1014	520.88	630	—	337.6	804.2	594	—	295.89
As	28.93	4.52	—	9.4	—	—	66.8	4.92	—
Hg	0.53	0.11	—	0.29	—	—	—	—	—
V	39.59	—	—	—	57.1	—	—	—	—
Cr	106.47	88	—	—	177.5	126.7	124	36.1	149.7
Co	7.86	—	—	—	9.8	15.9	—	6.01	—
Ni	24.07	27.14	82	—	29.3	48.8	28.6	21	133.45
Cu	102.40	57.92	626	132.1	46.6	123.2	110	50.1	482.92
Zn	208.17	206.08	811	473.5	169.2	715.1	3840	—	818.92
Pb	62.12	50.28	131	105.6	97.4	408.4	120	66.5	182.92
Cd	0.58	0.47	2.4	0.46	—	5.5	3.77	0.47	1.24

2.2 南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属污染评价

图 3 是南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属元素地累积指数 I_{geo} 结果.11 种元素的平均 I_{geo} 从大到小依次是 Cd(1.76)> Hg(1.70)> Cu(1.54)> Mn(1.33)> Zn(1.03)> As(0.75)> Pb(0.44)> Cr(-0.01)> Ni(-0.47)> Co(-1.39)> V(-1.86).其中 Cd、Hg、Cu、Mn 和 Zn 处于偏中度污染,As 和 Pb 属于轻度污染,Cr、Ni、Co 和 V 属于无污染.Hg 在彭桥路(2.33)、三店西路(2.53)和芙蓉路(2.27)、Cu 在彭桥路(3.03)和京东大道(2.30)以及 Cd 在三店西路(2.20)、京东大道(2.14)和昌南大道(2.11)的 I_{geo} 超过 2,处于偏重度污染水平.与张静等^[29]对天津市道路扬尘 PM_{2.5}中金属元素污染特征的研究结果相比,本文所研究的 Cd、Cu、Zn、Ni 的地累积指数 I_{geo} 整体上低于天津市(Cd:4—5,Cu:3—4,Zn、Pb:2—3,Ni:0—1),这可能与京津冀地区交通更发达等因素有关.因此,南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属的污染程度整体较轻,各元素(除 Mn 外)存在明显的空间差异.

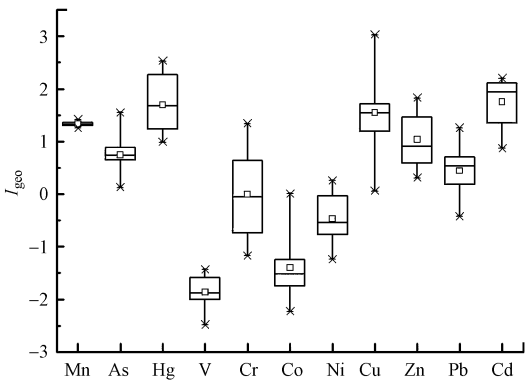


图 3 南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属元素地累积指数 I_{geo}

Fig.3 Geoaccumulation index (I_{geo}) of heavy metals in PM_{2.5} fraction of road dust in Nanchang City

2.3 南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属健康风险评价

2.3.1 南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属暴露量

南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属不同暴露途径下的日均暴露量见表 4.对于非致癌暴露,3 种不同暴露途径都是儿童的日均暴露量最高,其中 Mn 的日均暴露量最高,ADD_{ing}、ADD_{inh}和 ADD_{derm}分别为 $2.83\times 10^{-3}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $2.50\times 10^{-7}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $6.87\times 10^{-6}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$.所有人群中,各元素的日均暴露量均表现为:经口摄食>皮肤接触>呼吸吸入,经口摄食的暴露量占 3 种途径之和的 99.7%以上.由于身体情况不同,成年男性由呼吸吸入途径的日均暴露量比成年女性的略高,而经口摄食和皮肤接触的日均暴露量比成年女性的略低.

对于 5 种致癌元素 As、Cr、Co、Ni 和 Cd,经呼吸途径的终生日均暴露剂量最高的为 Cr,分别为 $8.63\times 10^{-9}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ (儿童)、 $9.12\times 10^{-9}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ (成年男性)和 $8.12\times 10^{-9}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ (成年女性);各元素对成年男性的日均暴露量均略高于儿童和成年女性.

2.3.2 南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属健康风险评价

图 4 为南昌市道路尘 PM_{2.5}中重金属非致癌健康风险值 HQ 和致癌风险 ILCR 的结果.11 种元素对儿童、成年女性和成年男性的非致癌风险值之和分别为 0.58、0.19 和 0.17,均小于 1.0,说明南昌市道路扬尘 PM_{2.5}中上述重金属元素对人体的非致癌健康风险可忽略.11 种元素中,As、Cr、Mn 是非致癌风险的主要贡献者(三者之和的贡献率占 80%以上);其中 As 的贡献率分别为 46.9%(儿童)、44.1%(成年男性)和 45.0%(成年女性),Cr 的贡献率分别为 19.4%、18.5%和 18.6%,Mn 的贡献率分别为 14.3%、19.0%和 17.8%.3 种暴露途径中,11 种元素对儿童的非致癌风险值之和表现为:经口摄食>皮肤接触>呼吸吸入,而对成人则为:经口摄食>呼吸吸入>皮肤接触,表明经口摄食是造成非致癌风险的主要途径,特别是对于儿童.经口摄食途径中,As 的 HQ_{ing}最高,儿童、成年男性和成年女性分别是 2.70×10^{-1} 、 7.29×10^{-2} 和 8.34×10^{-2} ,其次是 Cr、Mn、Pb、Cu、V、Hg、Ni、Zn、Cd、Co,说明 As 是经口摄食产生非致癌风险的主要元素(贡献率占 50.2%).呼吸吸入途径中,HQ_{inh}最高的元素是 Mn(儿童: 1.75×10^{-2} ,成年男性: 1.40×10^{-2} ,成年女性: 1.31×10^{-2}),占 11 种元素 HQ_{inh}之和的 93.1%.皮肤接触途径中,Cr、V 和 Mn 的 HQ_{derm}值之和占 11 种元素 HQ_{derm}之和的 86.4%.

5 种致癌元素中风险值最高的是 Cr,其次是 As.5 种元素经呼吸途径对成年男性、儿童和成年女性的致癌风险值之和分别为 4.29×10^{-7} 、 4.06×10^{-7} 和 3.82×10^{-7} ,均小于 10^{-6} ,说明南昌市道路尘 PM_{2.5}中上述元素基本无致癌风险.

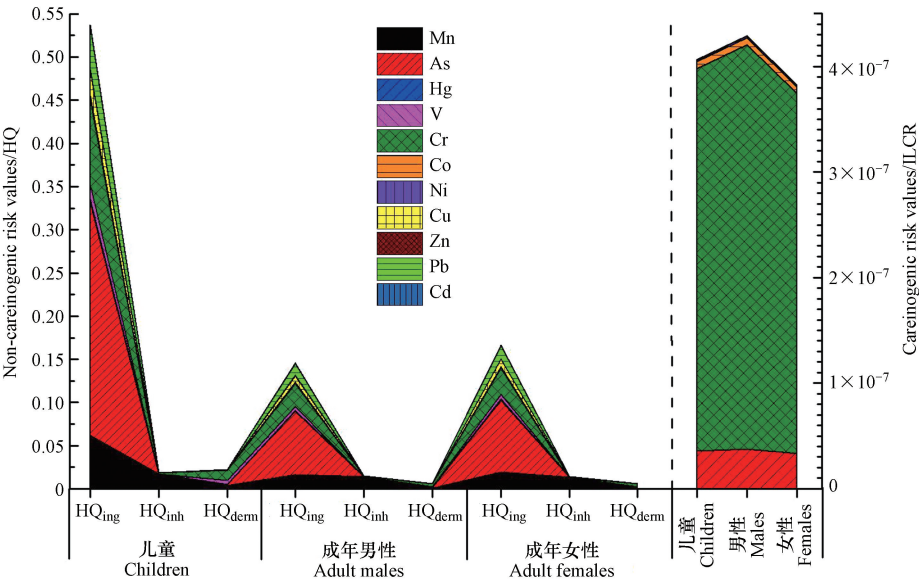


图 4 南昌市道路扬尘 PM_{2.5}中重金属健康风险值

Fig.4 Health risk of heavy metals in PM_{2.5} fraction of road dust in Nanchang City

表 4 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属日均暴露剂量 ($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)
Table 4 Average daily exposure dosage of heavy metals in $PM_{2.5}$ fraction of road dust in Nanchang City ($mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$)

人群 Populations	参数 Parameters	Mn	As	Hg	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
儿童 Children	ADD_{ing}	2.83×10^{-3}	8.09×10^{-5}	1.48×10^{-6}	1.11×10^{-4}	2.98×10^{-4}	2.20×10^{-5}	6.73×10^{-5}	2.86×10^{-4}	5.82×10^{-4}	1.74×10^{-4}	1.62×10^{-6}
	ADD_{inh}	2.50×10^{-7}	7.13×10^{-9}	1.30×10^{-10}	9.76×10^{-9}	2.63×10^{-8}	1.94×10^{-9}	5.94×10^{-9}	2.53×10^{-8}	5.13×10^{-8}	1.53×10^{-8}	1.43×10^{-10}
成年男性 Adult males	ADD_{derm}	6.87×10^{-6}	1.96×10^{-7}	3.58×10^{-9}	2.68×10^{-7}	7.21×10^{-7}	5.33×10^{-8}	1.63×10^{-7}	6.94×10^{-7}	1.41×10^{-6}	4.21×10^{-7}	3.92×10^{-9}
	$LADD_{inh}$		2.35×10^{-9}			8.63×10^{-9}	6.38×10^{-10}	1.95×10^{-9}				4.69×10^{-11}
成年女性 Adult females	ADD_{ing}	7.67×10^{-4}	2.19×10^{-5}	3.99×10^{-7}	2.99×10^{-5}	8.05×10^{-5}	5.95×10^{-6}	1.82×10^{-5}	7.75×10^{-5}	1.57×10^{-4}	4.70×10^{-5}	4.38×10^{-7}
	ADD_{inh}	2.00×10^{-7}	5.70×10^{-9}	1.04×10^{-10}	7.80×10^{-9}	2.10×10^{-8}	1.55×10^{-9}	4.74×10^{-9}	2.02×10^{-8}	4.10×10^{-8}	1.22×10^{-8}	1.14×10^{-10}
	ADD_{derm}	1.82×10^{-6}	5.21×10^{-8}	9.50×10^{-10}	7.13×10^{-8}	1.92×10^{-7}	1.42×10^{-8}	4.33×10^{-8}	1.84×10^{-7}	3.75×10^{-7}	1.12×10^{-7}	1.04×10^{-9}
	$LADD_{inh}$		2.48×10^{-9}			9.12×10^{-9}	6.74×10^{-10}	2.06×10^{-9}				4.96×10^{-11}
	ADD_{ing}	8.77×10^{-4}	2.50×10^{-5}	4.57×10^{-7}	3.42×10^{-5}	9.21×10^{-5}	6.80×10^{-6}	2.08×10^{-5}	8.86×10^{-5}	1.80×10^{-4}	5.37×10^{-5}	5.00×10^{-7}
	ADD_{inh}	1.87×10^{-7}	5.34×10^{-9}	9.74×10^{-11}	7.30×10^{-9}	1.96×10^{-8}	1.45×10^{-9}	4.44×10^{-9}	1.89×10^{-8}	3.84×10^{-8}	1.15×10^{-8}	1.07×10^{-10}
	ADD_{derm}	1.84×10^{-6}	5.26×10^{-8}	9.59×10^{-10}	7.19×10^{-8}	1.93×10^{-7}	1.43×10^{-8}	4.37×10^{-8}	1.86×10^{-7}	3.78×10^{-7}	1.13×10^{-7}	1.05×10^{-9}
	$LADD_{inh}$		2.21×10^{-9}			8.12×10^{-9}	6.00×10^{-10}	1.84×10^{-9}				4.42×10^{-11}

3 结论 (Conclusion)

(1) 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中重金属元素 V 和 Co 的平均含量低于南昌市土壤背景值, 其他元素的平均含量是南昌市土壤元素背景值的 1.15—5.28 倍。Cr、Cu 和 Co 的含量在不同道路的波动范围较大。整体上重金属含量比国内外其他城市要低。

(2) 地累积指数结果表明, 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中 Cd、Hg、Cu、Mn 和 Zn 处于偏中度污染, As 和 Pb 属于轻度污染, Cr、Ni、Co 和 V 属于无污染。重金属污染程度整体较轻, 多数元素存在明显的空间差异。

(3) 南昌市道路尘 $PM_{2.5}$ 中 11 种重金属元素的非致癌风险值和 5 种元素的致癌风险值均未超过可接受水平, 但 Cr 和 As 是健康风险的主要贡献元素, 应予以重视。

参考文献 (References)

- [1] 孙颖, 潘月鹏, 李杏茹, 等. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2732-2740.
SUN Y, PAN Y P, LI X R, et al. Chemical composition and mass closure of particulate matter in Beijing, Tianjin and Hebei megacities, northern China[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2732-2740 (in Chinese).
- [2] 汪浪, 杨海龙, 李晓燕. 中国部分省会城市 $PM_{2.5}$ 中重金属水平及影响因素分析[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 72-83.
WANG L, YANG H L, LI X Y. Analysis of heavy metals contents in $PM_{2.5}$ in some provincial capital cities in China and their affecting factors[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 72-83 (in Chinese).
- [3] HAN L, ZHOU W, LI W. City as a major source area of fine particulate ($PM_{2.5}$) in China[J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 183-187.
- [4] BELL M L, EBISU K, PENG R D. Community-level spatial heterogeneity of chemical constituent levels of fine particulates and implications for epidemiological research[J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2011, 21(4): 372-384.
- [5] KIM K H, KABIR E, KABIR S. A review on the human health impact of airborne particulate matter[J]. Environment International, 2015, 74: 136-143.
- [6] GUNAWARDANA C, EGODAWATTA P, GOONETILLEKE A. Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces[J]. Environmental Pollution, 2014, 184(1): 44-53.
- [7] 刘爱明, 杨柳, 吴亚玲, 等. 城市区域大气颗粒物的健康效应研究[J]. 中国环境监测, 2012, 28(5): 19-23.
LIU A M, YANG L, WU Y L, et al. Research on the health effects of atmospheric particulates in city region[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(5): 19-23 (in Chinese).
- [8] 赵阳, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 2013 年南昌市区 $PM_{2.5}$ 的浓度水平及时空分布特征与来源[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 855-863.
ZHAO Y, HU G R, YU R L, et al. Concentrations and spatial-temporal characteristics and source analysis of $PM_{2.5}$ in Nanchang city in 2013[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(6): 855-863 (in Chinese).
- [9] 刘忠马, 徐义邦, 樊孝俊, 等. 南昌市秋季大气 $PM_{2.5}$ 浓度及化学组分特征分析[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(9): 55-59.
LIU Z M, XU Y B, FAN X J, et al. Content and chemical composition characteristics of $PM_{2.5}$ in autumn in Nanchang[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(9): 55-59 (in Chinese).
- [10] 赵阳, 林晓辉, 胡恭任, 等. 南昌市秋季 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征、风险评价及来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(3): 500-507.
ZHAO Y, LIN X H, HU G R, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ collected in autumn in Nanchang City[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(3): 500-507 (in Chinese).
- [11] 林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 等. 南昌市秋季大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素富集特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 35-40.
LIN X H, ZHAO Y, FAN X J, et al. Enrichment characteristics and source analysis of metal elements in $PM_{2.5}$ in autumn in Nanchang city[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 35-40 (in Chinese).
- [12] ZHAO Y, YU R, HU G, et al. Chemical characteristics and Pb isotopic compositions of $PM_{2.5}$ in Nanchang, China[J]. Particology, 2017, 32(3): 95-102.
- [13] 郭琳, 何宗健, 尹丽. 南昌市夏季 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃来源解析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 58-62.
GUO L, HE Z J, YIN L. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in summer of Nanchang[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(11): 58-62 (in Chinese).
- [14] ZHAO Y, YU R L, HU G R, et al. Characteristics and environmental significance of rare earth elements in $PM_{2.5}$ of Nanchang, China[J]. Journal of Rare Earths, 2017, 35(1): 98-106.
- [15] 魏秀芝, 左嘉, 魏宝梅. 南昌市扬尘污染现状及防治情况报告[J]. 黑龙江科技信息, 2016(10): 13.
WEI X Z, ZUO J, WEI B M. Report on status and prevention of dust pollution in Nanchang City[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016 (10): 13 (in Chinese).

- [16] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(108):108-118.
- [17] 何纪力,徐光炎,朱慧民,等. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.
HE J L, XU G Y, ZHU H M, et al. Research on Jiangxi province soil environmental background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006(in Chinese).
- [18] USEPA.EPA/600/P-95/002Fa. Exposure factors handbook [M]. Washington DC:USEPA, 2011.
- [19] USEPA. Risk assessment guidance for Superfund, Vol. I: human health evaluation manual[R]. Washington D. C.: Office of Emergency and Response, 1989.
- [20] USEPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington, D. C.: Office of Emergency and Response, 2002.
- [21] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京:中国环境出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factor handbook of Chinese population(adults)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013(in Chinese).
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷)[M]. 北京:中国环境出版社, 2016.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factor handbook of Chinese population(children)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016(in Chinese).
- [23] SLEZAKOVA K, MORAIS S, PEREIRA M C. Trace metals in size-fractionated particulate matter in a Portuguese hospital: exposure risks assessment and comparisons with other countries[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(5), 3604-3620.
- [24] FERREIRA-BAPTISTA L, MIGUEL E D. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25):4501-4512.
- [25] 杨忠平,王雷,翟航,等. 长春市城区近地表灰尘重金属健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015,35(4):1247-1255.
YANG Z P, WANG L, ZHAI H. et al. Study on health risk of potentially toxic metals in near-surface urban dust in Changchun City[J]. *China Environmental Science*, 2015,35(4):1247-1255(in Chinese).
- [26] LIACOS J W, KAM W, DELFINO R J, et al. Characterization of organic, metal and trace element PM_{2.5} species and derivation of freeway-based emission rates in Los Angeles, CA[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 435-436(2):159-166.
- [27] TAIWO A M, HARRISON R M, SHI Z. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97:109-120.
- [28] MEN C, LIU R M, XU F, et al. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:138-147.
- [29] 张静,张衍杰,方小珍,等. 道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017,38(10):4071-4076.
ZHANG J, ZHANG Y J, FANG X Z, et al. Characteristics and health risk assessment of metallic elements in PM_{2.5} fraction of road dust [J]. *Environmental Science*, 2017,38(10):4071-4076(in Chinese).
- [30] BI C J, ZHOU Y, CHEN Z L, et al. Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620:1349-1357.
- [31] 石栋奇,卢新卫. 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析[J]. *环境科学*, 2018,39(7):3126-3133.
SHI D Q, LU X W. Contamination level and source analysis of heavy metals in the finer particles of urban road dust from Xi'an, China[J]. *Environmental Science*, 2018,39(7):3126-3133(in Chinese).
- [32] 王利军,卢新卫,雷凯,等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011,32(8):2471-2476.
WANG L J, LU X W, LEI K, et al. Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji City[J]. *Environmental Science*, 2011,32(8):2471-2476(in Chinese).
- [33] LI X D, POON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11-12):1361-1368.
- [34] YEUNG Z L L, KWOK R C W, YU K N. Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF)[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, 58(3):339-346.
- [35] ŠKRBIĆ B D, BULJOVIĆ M, JOVANOVIĆ G, et al. Seasonal, spatial variations and risk assessment of heavy elements in street dust from Novi Sad, Serbia[J]. *Chemosphere*, 2018, 205:452-462.
- [36] BOURLIVA A, KANTIRANIS N, PAPADOPOULOU L, et al. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: A one-year monitoring period[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639:417-427.