

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                |                                                      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 近20年来中国典型区域PM <sub>2.5</sub> 时空演变过程            | 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)                          |
| 西安市PM <sub>2.5</sub> 健康损害价值评估                  | 魏国茹,史兴民 (3014)                                       |
| 河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析                      | 江琪,王飞,孙业乐 (3022)                                     |
| 南京北郊秋季PM <sub>2.5</sub> 碳质组分污染特征及来源分析          | 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)      |
| 临安夏季霾和清洁天气PM <sub>2.5</sub> 化学组成特征比较           | 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)                 |
| 盘锦市秋冬季节PM <sub>2.5</sub> 中碳组分特征及来源解析           | 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)                      |
| 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应                          | 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)                                     |
| 夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量                   | 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)                            |
| 太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源                            | 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)                        |
| 杭州地区大气CO <sub>2</sub> 体积分数变化特征及影响因素            | 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)                            |
| 典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征                           | 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090) |
| 地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例            | 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)                                    |
| 青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价                         | 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)                           |
| 轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究                           | 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)                                     |
| 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价                            | 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)                  |
| 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析                        | 石栋奇,卢新卫 (3126)                                       |
| 三峡库区主要河流秋季pCO <sub>2</sub> 及其影响因素              | 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)                                    |
| 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素                         | 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)                                  |
| 生物滞留对城市地表径流磷的去除途径                              | 李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)                                |
| 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系                       | 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)                          |
| 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系                        | 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)               |
| 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响                           | 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)                             |
| 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响                       | 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)                        |
| Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能                    | 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)                           |
| Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制                        | 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)                            |
| 铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制                    | 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)                             |
| 铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验                               | 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)                            |
| 制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法              | 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)                                 |
| 电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响                | 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)                            |
| 不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求                           | 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)                           |
| 基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响                       | 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)                         |
| 采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除                | 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)                        |
| 间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性                            | 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)                         |
| 基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析                       | 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)                              |
| 纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响            | 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)                                   |
| 气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响                      | 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)                                |
| 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较                               | 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)                                    |
| 耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性                      | 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)                                 |
| PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性                | 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)                            |
| 采油井场土壤微生物群落结构分布                                | 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)                              |
| 铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征                        | 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)                                |
| 广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险                             | 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)                         |
| 邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析                    | 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)                            |
| 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素                         | 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)                  |
| 塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性          | 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)                             |
| 塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系       | 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)                              |
| 高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制                          | 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)                                |
| 施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响                               | 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)                              |
| 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析                  | 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)                    |
| 南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估                      | 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)                                  |
| 三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析                     | 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)                          |
| 人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性                           | 时红蕾,王文昌,李倩 (3434)                                    |
| COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 对青霉素菌渣厌氧消化影响 | 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)                                    |
| 果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征                       | 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)                         |
| 曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH <sub>3</sub> 挥发的影响            | 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)                            |
| 《环境科学》征订启事(3141)                               |                                                      |
| 《环境科学》征稿简则(3202)                               |                                                      |
| 信息(3229, 3433, 3451)                           |                                                      |

# 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价

田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 钱新, 王金花, 李慧明\*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 为探究城市不同功能区大气降尘重金属的污染水平及其风险, 在南京市典型工业区、交通区、居住区和高教区这 4 个区域设置 20 个采样点, 采集大气降尘, 并分析其中 As、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr、Ti、V、Zn 的含量, 采用潜在生态危害指数和美国 EPA 健康风险评价模型对重金属的风险进行评价, 采用富集因子、相关性分析和主成分分析对金属元素进行源解析。结果显示, As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Zn 在工业区含量最高, 而 Ba、Ni、Ti、V 在交通区含量最高。工业区的综合潜在生态风险指数最高, 高教区最低, 元素 Cr 的生态风险最高, 达中等生态危害。健康风险评价中各金属元素均不具有非致癌风险及致癌风险。源解析结果表明, 研究区域大气降尘重金属主要来自交通、工业活动、燃煤、自然源及生活源等。

**关键词:** 大气降尘; 重金属; 生态风险; 健康风险; 南京市

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3118-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201709120

## Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing

TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, QIAN Xin, WANG Jin-hua, LI Hui-ming\*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to evaluate the pollution levels of and risk from heavy metals in the atmospheric deposition of different functional urban districts, dust samples were collected from 20 sampling sites in typical industrial, traffic, residential, and educational districts of Nanjing. The concentrations of As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, V, and Zn were analyzed. The potential ecological risk and health risk were evaluated using the potential ecological risk index and U.S. EPA's health risk assessment models. Enrichment factors, correlation analysis, and principal component analysis were used to analyze the sources of heavy metals. Results showed that the concentrations of As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, and Zn were the highest in the industrial district and the concentrations of Ba, Ni, Ti, and V were the highest in the traffic district. The value of the potential ecological risk index was the highest in the industrial district and lowest in the educational district. Meanwhile, the ecological risk of Cr was the highest, achieving a moderate ecological hazard level. None of the studied heavy metals had noncarcinogenic risk or carcinogenic risk, according to the results of health risk assessment. Source analysis indicated that heavy metals in the atmospheric deposition from the study areas were mainly from traffic and industrial activities, coal combustion, natural process and life sources.

**Key words:** atmospheric deposition; heavy metal; ecological risk; health risk; Nanjing City

大气降尘是空气环境中靠重力降落并沉积于地表的颗粒物, 是多种污染物的运载体和反应床, 尤其是重金属类污染物<sup>[1]</sup>。重金属多以松散束缚的形式附着在降尘颗粒表面, 通过干湿沉降回到地表, 污染土壤、水体, 并进入动植物体内造成生态安全风险, 也可通过食物链的富集放大效应危害人体健康<sup>[2]</sup>。降尘中的重金属可通过呼吸、手-口摄入及皮肤接触进入人体, 对人体健康造成潜在危害<sup>[3]</sup>。

城市大气降尘中的重金属对生态系统和人体健康的风险引发了广泛关注。近年来, 有关大气降尘中重金属污染特征及风险评价的研究日益增多, 与国外相比, 中国部分地区大气降尘中重金属元素如: Cu、Pb、Zn、Cd 等的含量普遍较高<sup>[4]</sup>。目前大气降尘中的重金属污染缺少相应的环境标准, 其生态风

险的评价方法主要借鉴沉积物重金属污染评价的方法, 如地积累指数法、污染负荷指数法和潜在生态危害指数法等<sup>[5]</sup>; 健康风险的评价方法主要基于美国环保局提出的土壤健康风险评价框架<sup>[6]</sup>。如生态风险领域, 张棕巍等<sup>[7]</sup>发现泉州市不同功能区中, 大气降尘重金属生态危害的大小顺序为工业区 > 交通区 > 商业区 > 居住区, 其中 Cd 和 Hg 的潜在生态危害程度极高; Kamani 等<sup>[8]</sup>对伊朗城市德黑兰的街道降尘重金属的研究表明, Cd 具有最高的生态

收稿日期: 2017-09-14; 修订日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501549); 江苏省自然科学基金项目(BK20171339)

作者简介: 田春晖(1995~), 女, 主要研究方向为大气颗粒物污染, E-mail: chunhuitian@foxmail.com

\* 通信作者, E-mail: valen222@126.com

风险且达到强生态危害水平. 健康风险方面, Men 等<sup>[9]</sup>对北京市大气降尘重金属的健康风险评价显示,各重金属元素对人体均无致癌与非致癌风险; Agarwal 等<sup>[10]</sup>在印度城市阿萨索尔评估大气颗粒物中的重金属对人体的健康风险时发现, Cr 和 Mn 具有极高的致癌和非致癌风险,且人体不同途径风险暴露的大小顺序为:手口摄入>皮肤摄入>呼吸摄入. 大气降尘中重金属的来源主要包括土壤颗粒源、燃煤源、交通源、金属和石油冶炼等工业排放源、秸秆焚烧等农业源以及火山喷发等其他源<sup>[11]</sup>. 金属元素源解析的主要方法有因子分析、聚类分析、主成分分析、Pearson 相关性分析、富集因子、同位素示踪法等方法<sup>[12]</sup>.

本文以南京市 4 个功能区、20 个采样点为研究区域,分析大气降尘中重金属的富集情况、污染水平、生态风险、健康风险及来源,以期有效防控城市重金属污染提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样品采集

南京(118°46'E, 32°03'N), 江苏省省会,是长三角地区第二大城市,我国重要的综合工业基地和交通枢纽. 本研究在南京选取典型高教区、工业区、交通区及居住区,每个功能区中各取 5 个共 20 个点进行大气降尘采样. 各采样点分布如图 1 所示. 20 个采样点均设置在南京市高校内. 根据高校地理位置将功能区粗略区分如下:采样点 1、2、3、6、13 所在区域为工业区,周围有较多中小型工厂;采样点 4、10、15、16、18 所属区域为高教区,位于仙林、江宁大学城等高校聚集的区域;采样点 7、8、9、14、17 所在区域为交通区,临近中央门汽车站、南京火车站等主要交通枢纽;采样点 5、11、12、19、20 所在区域为居住区.

样品于 2015 年 12 月采集,采集前一周内无雨,保证有足够的降尘沉积量,1 d 内完成采样,每点 4 个平行样品. 选择建筑物平面和窗台等距离地面 1.5~2 m 高处的降尘(人的一般呼吸高度),用洁净的软毛刷将降尘扫进塑料采样袋中,去除大颗粒杂物,贴好标签备用.

### 1.2 样品处理及重金属检测与分析

将样品自然风干,用直径 63  $\mu\text{m}$  的尼龙筛筛分后待用<sup>[13]</sup>. 采用改良版的 EPA3050b<sup>[14]</sup>消解法. 称取 0.2 g 混合均匀的样品于消解管内,加入 10 mL



图 1 研究区域及大气降尘采样点分布示意

Fig. 1 Study area and distribution of atmospheric deposition sampling sites

1:1  $\text{HNO}_3$ , 在 105℃ 下回流加热蒸发至 5 mL,冷却后加入 0.5 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 放置至无大量气泡产生,再次在 105℃ 下消解 30 min; 此后将消解管移出并重复此步骤一次. 待消解管内样品近干,用 0.1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{HNO}_3$  将样品转移至离心管, 4 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 15 min. 测试上清液中 14 种元素: As、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sr、Ti、V、Zn 的含量,其中 As 用 ICP-MS(Perkin Elmer SCIEX, Elan 9000)测试,其余元素用 ICP-OES(Perkin Elmer SCIEX, Optima 5300)测试. 每批次实验中空白样品和质控样品同步进行测量.

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 富集因子

富集因子(enrichment factor, EF)是用以评价环境中金属元素污染富集程度及来源的重要指标. 它选择某一参比元素作为参考标准,表达式如(1)所示<sup>[15]</sup>:

$$EF = \frac{c_n/c_{\text{ref}}}{b_n/b_{\text{ref}}} \quad (1)$$

式中,元素  $n$  和参比元素在样品中的浓度用  $c_n$  和  $c_{\text{ref}}$  表示,在背景值中的浓度用  $b_n$  和  $b_{\text{ref}}$  表示. Al 是

地壳中含量最丰富的金属元素,目前在大气降尘中重金属富集因子的计算中被广泛用作参比元素<sup>[16]</sup>,本研究选择 Al 作为参比元素计算 EF. 元素的富集程度划分等级如表 1<sup>[17]</sup>.

表 1 富集因子分级标准

Table 1 Classification standards of the enrichment factors

| 富集因子           | 元素富集程度 |
|----------------|--------|
| EF≤1           | 极轻     |
| 1 < EF≤10      | 轻度     |
| 10 < EF≤100    | 中度     |
| 100 < EF≤1 000 | 重度     |
| EF > 1 000     | 极重     |

1.3.2 潜在生态危害指数法

采用瑞典地球化学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法(potential ecological risk index, RI)评估 7 种重金属对生态系统的潜在风险. 计算公式为:<sup>[8]</sup>

表 2 潜在生态危害系数  $E_r^i$  和综合潜在生态危害指数 RI 与风险等级的关系

Table 2 Correlation between  $E_r^i$  and RI and the risk levels of each

| $E_r^i$ 与危害等级          |        | RI 与危害等级                   |        |
|------------------------|--------|----------------------------|--------|
| $E_r^i < 40$           | 轻微生态危害 | RI < 150                   | 轻微生态危害 |
| $40 \leq E_r^i < 80$   | 中等生态危害 | $150 \leq \text{RI} < 300$ | 中等生态危害 |
| $80 \leq E_r^i < 160$  | 强生态危害  | $300 \leq \text{RI} < 600$ | 强生态危害  |
| $160 \leq E_r^i < 320$ | 很强生态危害 | RI ≥ 600                   | 很强生态危害 |
| $E_r^i \geq 320$       | 极强生态危害 |                            |        |

1.3.3 健康风险评价

健康风险评价参考 U. S. EPA 提出的土壤健康风险评价框架<sup>[6]</sup>. 该模型假设降尘中的重金属主要通过呼吸摄入、手-口摄入及皮肤接触进入人体,暴露人群分为儿童和成人. 暴露量计算公式如下:

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{c \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{c \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \quad (6)$$

$$\text{ADD}_{\text{derm}} = \frac{c \times \text{EF} \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$\text{LADD} = \frac{c \times \text{EF}}{\text{PEF} \times \text{AT}} \times$$

$$\left( \frac{\text{InhRchild} \times \text{EDchild}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhRadult} \times \text{EDadult}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (8)$$

式中,  $\text{ADD}_{\text{ing}}$  为手-口摄入途径的降尘颗粒日均暴露量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ],  $\text{ADD}_{\text{inh}}$  为呼吸途径的日均暴露量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ],  $\text{ADD}_{\text{derm}}$  为皮肤接触途径的日均暴露量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]; LADD 为致癌重金属的终

$$C_f^i = c_s^i / c_n^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (3)$$

$$\text{RI} = \sum E_r^i \quad (4)$$

式中,  $c_s^i$  为样品中重金属的浓度,  $c_n^i$  为该元素的评价标准,  $C_f^i$  为单个元素的污染系数.  $T_r^i$  为各重金属的毒性响应系数,反映重金属的毒性强度及生态环境对该元素的敏感程度,  $E_r^i$  为某一重金属的潜在生态危害系数<sup>[18]</sup>. RI 为多种重金属的综合潜在生态危害指数,由各元素的危害系数相加得到. 本研究中的评价标准  $c_n^i$  采用各元素在江苏省地表土中的背景值表示<sup>[19]</sup>, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的评价标准分别为 10、0.126、77.8、22.3、26.7、26.2、62.6. 重金属的毒性响应系数  $T_r^i$  取值为  $\text{Zn} = 1 < \text{Cr} = 2 < \text{Cu} = \text{Ni} = \text{Pb} = 5 < \text{As} = 10 < \text{Cd} = 30$ <sup>[20]</sup>. 风险等级划分如表 2.

生日均暴露量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]. 其他参数的含义和取值见表 3.

该模型将健康风险分为非致癌风险和致癌风险. 本研究所涉及的重金属中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、V、Zn 均具有非致癌风险,其中 As、Cd、Cr、Co、Ni 同时具有致癌风险<sup>[23]</sup>. 目前 U. S. EPA 只给出了 As 在 3 种途径中的致癌暴露量参考值,其余元素只有呼吸途径下的暴露量参考值,因此 Cd、Cr、Co、Ni 只考虑呼吸途径下的致癌风险. 非致癌风险与致癌风险的具体表达式如下:

$$\text{HQ}_{ij} = \text{ADD} / \text{RfD} \quad (9)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{HQ}_{ij} \quad (10)$$

$$\text{Risk} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (11)$$

式中,  $\text{HQ}_{ij}$  为非致癌风险商,表征单种污染物通过单一途径的非致癌风险; ADD 为某一污染物在单一途径下的暴露量;  $\text{RfD}$  为参考剂量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ],表示单位时间、单位体重摄取的不会损伤人体的污染物最大量. 总 HI 为所有途径

表 3 暴露量计算公式中各参数含义及取值

Table 3 Parameter values for average daily dose calculation models of heavy metals

|        | 项目                | 含义      | 单位                               | 取值                   |          | 文献   |
|--------|-------------------|---------|----------------------------------|----------------------|----------|------|
| 基础参数   | <i>c</i>          | 重金属含量   | mg·kg <sup>-1</sup>              |                      |          | 本研究  |
| 暴露行为参数 | ED                | 暴露年限    | a                                | 6(儿童)                | 24(成人)   | [21] |
|        | EF                | 暴露频率    | d·a <sup>-1</sup>                | 180                  |          | [22] |
|        | BW                | 平均体重    | kg                               | 16.2(儿童)             | 61.8(成人) | [22] |
|        | AT <sub>非致癌</sub> | 平均暴露时间  | d                                | ED×365               |          | [22] |
|        | AT <sub>致癌</sub>  | 平均暴露时间  | d                                | LT×365               |          | [22] |
|        | LT                | 平均寿命    | a                                | 72                   |          | [21] |
| 手-口摄入  | IngR              | 摄入速率    | mg·d <sup>-1</sup>               | 200(儿童)              | 100(成人)  | [22] |
| 呼吸摄入   | InhR              | 呼吸速率    | m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>  | 7.6(儿童)              | 20(成人)   | [22] |
| 皮肤接触   | PEF               | 颗粒物排放因子 | m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> | 1.36×10 <sup>9</sup> |          | [22] |
|        | AF                | 皮肤黏着度   | mg·cm <sup>-2</sup>              | 0.2(儿童)              | 0.07(成人) | [22] |
|        | SA                | 暴露皮肤面积  | cm·d <sup>-1</sup>               | 2800(儿童)             | 5700(成人) | [22] |
|        | ABS               | 皮肤吸收因子  | 无量纲                              | 0.001                |          | [22] |

所有污染物总非致癌风险的加和。当 HQ 或 HI < 1 时非致癌风险可忽略; HQ 或 HI > 1 时,存在非致癌风险。式(11)中, Risk 为致癌风险, LADD 为致癌暴露量; SF 为致癌斜率系数,表示人体暴露于一定剂量某种污染物下产生致癌效应的最大概率[ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ]。若  $\text{Risk} < 10^{-6}$ ,不具有致癌风险;若 Risk 在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间,致癌风险

在可接受范围内;若  $\text{Risk} > 10^{-4}$ ,对人体有高致癌风险。

表 4 列出了 11 种重金属金属在不同暴露途径下的  $R_fD$  值及致癌金属的 SF 值,其中元素 As、Cd、Cu、Ni、Pb、Sr、V、Zn 无法获得 EPA 的  $R_fD_{inh}$  数据,故采用其手-口暴露途径的值  $R_fD_{ing}$  代替,此方法所带来的误差需进一步探究。

表 4 各重金属元素非致癌风险参考剂量  $R_fD$  及致癌斜率系数 SF

Table 4 Value of  $R_fD$  and SF of heavy metals

| 项目                 | As       | Cd       | Co       | Cr       | Cu       | Mn       | Ni       | Pb       | Sr       | V        | Zn       |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $R_fD_{ing}$       | 3.00E-04 | 1.00E-03 | 3.10E+00 | 3.00E-03 | 4.00E-02 | 4.60E-02 | 2.00E-02 | 3.50E-03 | 6.00E-01 | 7.00E-03 | 3.00E-01 |
| $R_fD_{inh}$       | 3.00E-04 | 1.00E-03 | 1.60E-02 | 2.86E-05 | 4.02E-02 | 1.43E-05 | 2.06E-02 | 3.52E-03 | 6.00E-01 | 7.00E-03 | 3.00E-01 |
| $R_fD_{derm}$      | 1.23E-04 | 1.00E-05 | 2.00E-02 | 6.00E-05 | 1.20E-02 | 1.84E-03 | 5.40E-04 | 5.20E-04 | 1.20E-01 | 7.00E-05 | 6.00E-02 |
| SF <sub>ing</sub>  | 1.5      | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        |
| SF <sub>inh</sub>  | 15.1     | 6.3      | 9.8      | 42       | —        | —        | 0.84     | —        | —        | —        | —        |
| SF <sub>derm</sub> | 3.66     | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        |

2 结果与讨论

2.1 大气降尘中的重金属含量

各功能区降尘中重金属的含量如表 5 所示。As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Zn 等元素在工业区的含量最高; Ba、Ni、Ti、V 等元素在交通区的含量最高。而 Sr 在居住区含量最高。Cd、Cu、Ni、Pb、Sr、Zn 等元素在不同功能区的含量均超过江苏省表层土壤背景值。

2.2 重金属富集因子

各重金属富集因子平均值的大小为 Cd(61.79) > Zn(54.41) > Cu(41.28) > Pb(23.29) > Sr(8.415) > Ni(8.236) > Mn(5.551) > Ba(4.066) > Fe(3.902) > Co(3.868) > Cr(3.837) > V(2.508) > As(2.471) > Ti(0.4929)。其中 Cr、Zn、Cu、Pb

的富集因子在 10 ~ 100 之间,污染水平较高; Sr、Ni、Mn、Ba、Fe、Co、Cr、V、As 的富集因子在 1 ~ 10 之间,表明其主要来源为自然源,污染水平低; Ti 的富集因子小于 1,表明其主要来自自然来源,富集程度极轻,造成的污染可不计。各重金属元素在不同功能区的富集因子大小如图 2 所示。除 Sr、V、Ti 外,其余重金属的富集因子均在工业区达到最高,交通区仅次于工业区。

2.3 重金属生态风险评价

不同功能区中降尘重金属生态风险指数如表 6 所示。As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的潜在生态危害系数  $E_r^i$  均在工业区最大, Ni 则在交通区最大,可能由于 Ni 与汽车燃油排放有关<sup>[24]</sup>。总体  $E_r^i$  由各元素在 4 个功能区的平均浓度求得。综合潜在生态危害指数 RI 由大到小的顺序为工业区 > 高教区 > 居住区

表 5 各功能区大气降尘中重金属元素的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 5 Heavy metal concentrations in the different functional urban districts/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 元素 | 数据            | 高教区                 | 交通区                | 居住区                 | 工业区                 | 背景值 <sup>[19]</sup> |
|----|---------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| As | 范围            | 2.071 ~ 3.309       | 3.668 ~ 7.322      | 3.722 ~ 5.724       | 6.520 ~ 8.532       | 10                  |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 2.634 $\pm$ 0.497 1 | 4.805 $\pm$ 1.489  | 4.631 $\pm$ 0.890 4 | 7.510 $\pm$ 0.770 2 |                     |
| Ba | 范围            | 17.63 ~ 513.6       | 196.5 ~ 644.9      | 309.6 ~ 518.8       | 351.3 ~ 525.6       | 425                 |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 175.4 $\pm$ 205.1   | 435.4 $\pm$ 173.5  | 395.0 $\pm$ 76.25   | 408.9 $\pm$ 68.52   |                     |
| Cd | 范围            | 1.125 ~ 2.625       | 1.125 ~ 2.000      | 1.125 ~ 1.750       | 1.400 ~ 2.275       | 0.126               |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 1.575 $\pm$ 0.622 5 | 1.450 $\pm$ 0.338  | 1.475 $\pm$ 0.323 6 | 1.725 $\pm$ 0.401 2 |                     |
| Co | 浓度范围          | 8.250 ~ 12.00       | 4.500 ~ 11.88      | 8.625 ~ 11.13       | 7.875 ~ 12.63       | 12.6                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 9.600 $\pm$ 1.429   | 9.550 $\pm$ 2.965  | 10.05 $\pm$ 1.074   | 10.25 $\pm$ 1.965   |                     |
| Cr | 范围            | 42.63 ~ 65.50       | 35.50 ~ 82.25      | 50.75 ~ 72.00       | 35.13 ~ 113.4       | 77.8                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 55.23 $\pm$ 9.291   | 57.88 $\pm$ 19.36  | 59.03 $\pm$ 7.886   | 67.75 $\pm$ 28.82   |                     |
| Cu | 范围            | 67.13 ~ 276.5       | 96.00 ~ 263.0      | 122.0 ~ 247.5       | 124.6 ~ 381.4       | 22.3                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 159.3 $\pm$ 77.95   | 172.5 $\pm$ 66.86  | 188.4 $\pm$ 48.11   | 214.7 $\pm$ 103.5   |                     |
| Fe | 范围            | 18 406 ~ 25 127     | 11 971 ~ 26 287    | 20 855 ~ 28 100     | 15 676 ~ 50 383     | 30 200              |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 21 204 $\pm$ 3 037  | 20 939 $\pm$ 5 991 | 25 112 $\pm$ 2 865  | 27 557 $\pm$ 13 461 |                     |
| Mn | 范围            | 503.4 ~ 606.1       | 383.9 ~ 731.5      | 577.8 ~ 689.3       | 498.0 ~ 1 533       | 585                 |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 566.5 $\pm$ 40.54   | 614.2 $\pm$ 135.2  | 617.7 $\pm$ 44.46   | 784.8 $\pm$ 425.1   |                     |
| Ni | 范围            | 27.50 ~ 43.63       | 29.00 ~ 58.75      | 30.75 ~ 54.88       | 31.00 ~ 62.38       | 26.7                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 38.18 $\pm$ 6.245   | 47.45 $\pm$ 12.73  | 43.43 $\pm$ 11.14   | 47.15 $\pm$ 12.09   |                     |
| Pb | 范围            | 35.88 ~ 203.8       | 84.00 ~ 175.8      | 98.63 ~ 165.5       | 108.1 ~ 207.8       | 26.2                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 86.05 $\pm$ 68.97   | 138.9 $\pm$ 37.18  | 126.8 $\pm$ 26.25   | 141.8 $\pm$ 39.68   |                     |
| Sr | 范围            | 203.8 ~ 237.5       | 205.0 ~ 249.9      | 186.9 ~ 310.0       | 90.50 ~ 245.1       | 132                 |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 226.3 $\pm$ 13.93   | 219.9 $\pm$ 18.87  | 244.3 $\pm$ 57.26   | 187.5 $\pm$ 61.18   |                     |
| Ti | 范围            | 198.5 ~ 443.9       | 330.5 ~ 658.5      | 384.6 ~ 596.9       | 244.3 ~ 395.1       | 4 100               |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 311.0 $\pm$ 90.09   | 539.1 $\pm$ 128.6  | 476.6 $\pm$ 92.05   | 321.2 $\pm$ 54.55   |                     |
| V  | 范围            | 34.13 ~ 51.25       | 30.25 ~ 59.25      | 39.75 ~ 49.13       | 27.63 ~ 42.75       | 83.4                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 40.43 $\pm$ 7.006   | 46.08 $\pm$ 10.67  | 44.20 $\pm$ 3.959   | 38.23 $\pm$ 6.107   |                     |
| Zn | 范围            | 425.3 ~ 821.1       | 479.0 ~ 1 064      | 553.6 ~ 883.5       | 580.4 ~ 1 061       | 62.6                |
|    | 平均值 $\pm$ 标准差 | 630.6 $\pm$ 162.3   | 702.6 $\pm$ 255.5  | 672.0 $\pm$ 155.0   | 727.2 $\pm$ 195.7   |                     |

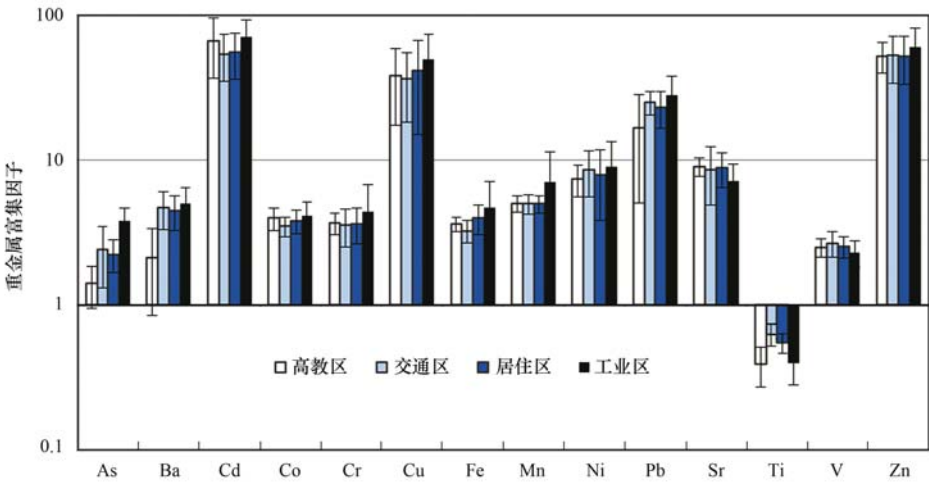


图 2 重金属元素在不同功能区的富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals in the different functional urban districts

> 交通区. 除 Cd 和 Cu 外, 其余重金属在各功能区及总体的  $E_r^i$  均小于 40, 只造成轻微生态危害; Cu

在高教区和交通区造成轻微生态危害, 在居住区和工业区达到则中等危害. Cd 的  $E_r^i > 320$ , 达到极强

表 6 不同功能区大气降尘重金属生态风险指数

| 功能区 | 潜在生态危害系数 $E_r^i$ |       |       |       |       |       |       | 潜在生态风险指数 (RI) |
|-----|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
|     | As               | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | Pb    | Zn    |               |
| 高教  | 2.634            | 375.0 | 1.420 | 35.72 | 7.149 | 16.42 | 10.07 | 448.4         |
| 交通  | 4.805            | 345.2 | 1.488 | 38.68 | 8.886 | 26.50 | 11.22 | 436.8         |
| 居住  | 4.631            | 351.2 | 1.517 | 42.23 | 8.132 | 24.19 | 10.74 | 442.6         |
| 工业  | 7.510            | 410.7 | 1.742 | 48.13 | 8.830 | 27.06 | 11.62 | 515.6         |
| 总体  | 4.895            | 370.5 | 1.542 | 41.19 | 8.249 | 23.54 | 10.91 | 460.9         |

的生态危害. 各功能区及南京市总体的 RI 均 300 ~ 600 之间,属强生态危害.

2.4 健康风险评价

各重金属非致癌暴露量的大小顺序为: Zn > Mn > Sr > Cu > Pb > Cr > Ni > V > Co > As > Cd. 对于不同的暴露途径,各重金属的暴露量均为: 手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入,且呈现儿童的暴露量高于成人的特征. 对于儿童和成人,手口摄入的暴露量分别占暴露总量的 99.72% 和 98.59%. 致癌重金属 As、Cd、Cr、Co、Ni 的致癌暴露量的大小顺序

为 Cr > Ni > Co > As > Cd. 对于同一种元素,其致癌暴露量均小于非致癌暴露量.

由暴露量计算所得的非致癌风险指数和致癌风险指数结果如表 7 所示. 3 种途径下的非致癌风险指数大小顺序为手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入,同样呈现出儿童高于成人的特征. As、Cr、Mn、Pb 的非致癌风险略高于其他重金属元素. 各重金属元素的 HQ 和 HI 均小于 1,不存在非致癌风险. 致癌重金属的风险指数大小顺序为 Cr > As > Co > Ni > Cd,致癌风险值均小于  $10^{-6}$ ,不存在致癌风险.

表 7 南京市大气降尘中重金属非致癌及致癌风险指数

| 元素 | HQ <sub>ing</sub> |          | HQ <sub>inh</sub> |          | HQ <sub>herm</sub> |          | HI       |          | Risk <sup>1)</sup> |
|----|-------------------|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|--------------------|
|    | 儿童                | 成人       | 儿童                | 成人       | 儿童                 | 成人       | 儿童       | 成人       |                    |
|    |                   |          |                   |          |                    |          |          |          |                    |
| As | 9.72E-02          | 1.27E-02 | 2.71E-06          | 1.87E-06 | 6.64E-04           | 1.24E-04 | 9.78E-02 | 1.29E-02 | 6.12E-09           |
| Cd | 9.48E-03          | 1.24E-03 | 2.65E-07          | 1.83E-07 | 2.65E-03           | 4.96E-04 | 1.21E-02 | 1.74E-03 | 6.19E-10           |
| Co | 1.93E-05          | 2.54E-06 | 1.05E-07          | 7.22E-08 | 8.40E-06           | 1.57E-06 | 2.78E-05 | 4.18E-06 | 6.09E-09           |
| Cr | 1.21E-01          | 1.59E-02 | 3.55E-04          | 2.45E-04 | 1.70E-02           | 3.17E-03 | 1.39E-01 | 1.93E-02 | 1.58E-07           |
| Cu | 2.56E-02          | 3.36E-03 | 7.72E-07          | 5.33E-07 | 2.59E-04           | 4.84E-05 | 2.59E-02 | 3.41E-03 |                    |
| Mn | 8.50E-02          | 1.11E-02 | 7.64E-03          | 5.27E-03 | 5.95E-03           | 1.11E-03 | 9.86E-02 | 1.75E-02 |                    |
| Ni | 1.33E-02          | 1.75E-03 | 3.61E-07          | 2.49E-07 | 1.38E-03           | 2.58E-04 | 1.47E-02 | 2.00E-03 | 2.32E-09           |
| Pb | 2.12E-01          | 2.77E-02 | 5.88E-06          | 4.05E-06 | 3.99E-03           | 7.44E-04 | 2.16E-01 | 2.85E-02 |                    |
| Sr | 2.23E-03          | 2.92E-04 | 6.23E-08          | 4.30E-08 | 3.12E-05           | 5.83E-06 | 2.26E-03 | 2.98E-04 |                    |
| V  | 3.67E-02          | 4.80E-03 | 1.02E-06          | 7.07E-07 | 1.03E-02           | 1.92E-03 | 4.69E-02 | 6.72E-03 |                    |
| Zn | 1.38E-02          | 1.81E-03 | 3.86E-07          | 2.66E-07 | 1.93E-04           | 3.61E-05 | 1.40E-02 | 1.85E-03 |                    |

1) 只有元素 As、Cd、Cr、Co、Ni 有致癌风险 (Risk)

2.5 重金属来源解析

各重金属元素间的 Pearson 相关系数在一定程度上反映了重金属元素是否为同一来源. Ba、Ti 相互之间具有正相关性,推测这两种元素具有同一来源. Fe、Mn、Pb、Cr、Cd、Co、Zn、Ni、V 之间呈显著的正相关,表明这组元素具有同源性. Sr-Cr、Sr-Fe、Sr-Mn 具有负相关系数,表明 Sr 与元素 Cr、Fe、Mn 的来源完全不同.

对重金属进行主成分分析的结果如表 8 所示. 共提取出 4 组成分,累积成因率达 78.133%. 主成分 1 主要包括重金属元素如: Co、Cr、Cd、Ba、Fe、Mn、Ni、Pb、V、Zn, 贡献率达 42.086%, Cr、Fe、

Zn 主要来源于交通零部件磨损, Ni、Cd、Mn、P 来源于汽车燃油<sup>[24, 25]</sup>, 因此成分 1 为交通源. 成分 2 中 Sr 和 Ti 载荷最高, Sr 的富集因子在 1 ~ 10 之间,可能受到人为源和自然源的共同影响,但 Sr 与 Cr、Fe、Mn 等受人为源影响的元素来源完全不同,故可能主要受自然源影响, Ti 的富集因子小于 1,可认为其来源于自然源,因此成分 2 为自然源. 成分 3 中 As 和 Cu 的载荷较高, Cu 来自于工业生产等活动<sup>[4]</sup>, As 是燃煤排放的特征元素<sup>[26]</sup>, 且 Cu 与 As 在工业区中的富集程度最高,因此成分 3 代表工业活动和燃煤的混合源. 成分 4 中 As 与 Ba 的载荷数值最大且为负数,表明此成分是与第一、三主成分

完全不同的其他源,由于本研究的样品采自南京市各高校校区,推测成分4是高校的生活源、科教活动、基础设施建设等可能产生重金属的来源.

表8 主成分分析<sup>1)</sup>

Table 8 Principal component analysis

| 元素      | 成分           |              |              |               |
|---------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|         | 1            | 2            | 3            | 4             |
| As      | 0.392        | -0.201       | <b>0.562</b> | <b>-0.520</b> |
| Ba      | <b>0.659</b> | 0.290        | -0.094       | <b>-0.639</b> |
| Cd      | <b>0.630</b> | -0.428       | 0.135        | 0.057         |
| Co      | <b>0.855</b> | 0.095        | -0.192       | 0.054         |
| Cr      | <b>0.822</b> | -0.281       | -0.046       | 0.280         |
| Cu      | 0.153        | 0.119        | <b>0.898</b> | 0.164         |
| Fe      | <b>0.840</b> | -0.418       | -0.232       | 0.085         |
| Mn      | <b>0.782</b> | -0.487       | -0.224       | 0.047         |
| Ni      | <b>0.668</b> | 0.195        | 0.463        | 0.338         |
| Pb      | <b>0.802</b> | 0.117        | 0.058        | -0.329        |
| Sr      | -0.333       | <b>0.810</b> | -0.003       | 0.118         |
| Ti      | 0.536        | <b>0.665</b> | -0.194       | -0.109        |
| V       | <b>0.687</b> | 0.546        | -0.130       | 0.286         |
| Zn      | <b>0.714</b> | -0.148       | 0.069        | 0.143         |
| 合计      | 6.313        | 2.686        | 1.569        | 1.153         |
| 方差贡献率/% | 42.086       | 17.905       | 10.459       | 7.684         |
| 累积贡献率/% | 42.086       | 59.991       | 70.449       | 78.133        |

1) 黑体字为每个主成分中载荷较高的数值

3 结论

(1)大气降尘中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Zn 等重金属在工业区含量最高,Ba、Ni、Ti、V 等在交通区含量最高. 其中 Cd、Cu、Ni、Pb、Sr、Zn 等重金属含量均超过江苏省表层土壤背景值.

(2)富集因子评价结果表明,研究区域降尘中重金属 Cr、Zn、Cu、Pb 污染水平较高. 不同功能区中,除了 Sr、V、Ti 大部分重金属的富集因子均在工业区达到最高.

(3)降尘中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的潜在生态危害系数  $E_r^i$  在工业区最大,元素 Ni 的  $E_r^i$  在交通区最大. 综合潜在生态危害指数 RI 在工业区最大,交通区最小. 总体而言,Cu 在居住区和工业区达到中等生态危害,Cd 达到极强生态危害,其余重金属元素均为轻微生态危害.

(4)重金属的非致癌与致癌暴露途径的暴露量大小顺序均为手-口摄入>皮肤接触>呼吸摄入,儿童的暴露量高于成人. As、Cr、Mn、Pb 的非致癌风险略高于其他重金属,各重金属元素均不存在非致癌风险. As、Cd、Cr、Co、Ni 也不存在致癌风险.

(5)降尘中重金属来源可分为四类:Co、Cr、Cd、Ba、Fe、Mn、Ni、Pb、V、Zn 主要来自于交通源;Sr 和 Ti 来自于自然源;As 和 Cu 主要来自于工

业活动和燃煤的混合源;此外,As 与 Ba 还可能来自于高校生活、科教或设施建设等其他源.

参考文献:

[1] 王明仕,李晗,王明娅,等. 中国降尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(12): 164-169.  
Wang M S, Li H, Wang M Y, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment on dust heavy metals in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, **29**(12): 164-169.

[2] Tang Z W, Chai M, Chen J L, *et al.* Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **138**: 83-91.

[3] Gope M, Masto R E, George J, *et al.* Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **138**: 231-241.

[4] 温先华,胡恭任,于瑞莲,等. 厦门市大气降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 1-7.  
Wen X H, Hu G R, Yu R L, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dustfall of Xiamen city, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 1-7.

[5] 方文稳,张丽,叶生霞,等. 安庆市降尘重金属的污染评价与健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3795-3803.  
Fang W W, Zhang L, Ye S X, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Anqing[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3795-3803.

[6] USEPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS): part A[R]. Washington, DC: USEPA, 1989. 256-263.

[7] 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,等. 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2881-2888.  
Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics and source apportionment of metals in the dustfall of Quanzhou city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2881-2888.

[8] Kamani H, Mahvi A H, Seyedsalehi M, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of heavy metals in street dust of Tehran, Iran[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, **14**(12): 2675-2682.

[9] 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.

[10] Agarwal A, Mangal A, Satsangi A, *et al.* Characterization, sources and health risk analysis of PM<sub>2.5</sub> bound metals during foggy and non-foggy days in sub-urban atmosphere of Agra[J]. Atmospheric Research, 2017, **197**: 121-131.

[11] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution[J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1361-1369.

[12] 陈家栋,程浚峰,赵静怡,等. 城市大气降尘中重金属的研究方法综述[J]. 能源环境保护, 2017, **31**(4): 1-4, 14.

- Chen J D, Cheng J F, Zhao J Y, *et al.* The research of heavy metal in atmospheric dust fall [J]. *Energy Environmental Protection*, 2017, **31**(4): 1-4, 14.
- [13] Li K X, Liang T, Wang L Q, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in road dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, **25**(12): 1439-1451.
- [14] USEPA. Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils[R]. Washington, DC: USEPA, 1996.
- [15] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [16] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖流域大气降尘重金属的污染和健康风险[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1645-1653.
- Zhang Z Y, Jilili · Abuduwallil, Jiang F Q. Pollution and potential health risk of heavy metals in deposited atmospheric dusts in Ebinur Basin, Northwest China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1645-1653.
- [17] 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 等. 鄂东典型工业城市大气 PM<sub>10</sub> 中元素浓度特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4463-4468.
- Zhan C L, Zhang J Q, Zheng J R, *et al.* Characteristics and sources of elements of a PM<sub>10</sub> measurements from a typical industrial city in eastern Hubei province [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4463-4468.
- [18] Lei P, Zhang H, Shan B Q, *et al.* Heavy metals in estuarine surface sediments of the Hai River Basin, variation characteristics, chemical speciation and ecological risk [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(8): 7869-7879.
- [19] 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.
- [20] Tang Y, Han G L. Characteristics of major elements and heavy metals in atmospheric dust in Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **176**: 114-119.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 2008 中国卫生统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2008.
- [22] WHO. The world health report 2006-working together for health [R]. Geneva: World Health Organization, 2006.
- [23] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- [24] 秦鑫, 张泽锋, 李艳伟, 等. 南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- Qin X, Zhang Z F, Li Y W, *et al.* Sources analysis of heavy metal aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- [25] Bourliva A, Christophoridis C, Papadopoulou L, *et al.* Characterization, heavy metal content and health risk assessment of urban road dusts from the historic center of the city of Thessaloniki, Greece [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(3): 611-634.
- [26] 王明仕, 曹景丽, 李晗, 等. 焦作市采暖期降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(5): 824-830.
- Wang M S, Cao J L, Li H, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dust-fall in Jiaozuo City, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(5): 824-830.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                        |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Spatial-Temporal Change Evolution of PM <sub>2.5</sub> in Typical Regions of China in Recent 20 Years .....                                                                            | LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)                |
| Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM <sub>2.5</sub> Particulate in Xi'an City .....                                                                                     | WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)                                       |
| Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province .....                                                                         | JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)                                  |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM <sub>2.5</sub> During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing .....                                              | XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)                   |
| Comparison of Chemical Components Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an .....                                                | LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)     |
| Characteristics and Sources of Carbon Components in PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Panjin City .....                                                                    | ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)                 |
| Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing .....                                                                                   | HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)                             |
| Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer .....                                                       | LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)               |
| Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China .....                                                                             | YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)           |
| Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in Hangzhou .....                                                                                   | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)         |
| Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources .....                                                                      | JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)        |
| Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City .....                               | ..... HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)                          |
| Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production .....                                                                        | GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)               |
| Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles .....                                                                                                      | HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)                               |
| Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing .....                                                                                      | TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118) |
| Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China .....                                                             | SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)                                        |
| pCO <sub>2</sub> in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors .....                                                                                    | LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)                              |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River .....                                                                        | KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)                 |
| Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems .....                                                                                                                 | LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)           |
| Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai .....                                      | ..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)       |
| Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake .....                                                                      | LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)           |
| Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface .....                                                                                              | WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)         |
| Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland .....                                                       | XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)           |
| Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone .....                                                                       | ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)        |
| Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate .....                                                                        | LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)             |
| Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets .....                                                                                  | KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)                   |
| Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter .....                                                                  | CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)          |
| Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing .....                                                         | ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)            |
| Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell .....                                               | LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)           |
| COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations .....                                                                       | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)            |
| Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor .....                                                                  | ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)              |
| Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor .....                                          | ..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)    |
| Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration .....                                                                                 | GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)                |
| Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing .....                                                                                      | HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)                  |
| Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion .....                                  | ..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)                   |
| Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....                          | ..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)      |
| Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge .....                                                                                     | SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)                           |
| Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97 .....                                         | CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)                    |
| Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil .....                        | ..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)       |
| Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site .....                                                                                                           | CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)                 |
| Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam .....                                                 | WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)           |
| Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi .....                                                                    | GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)             |
| Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City .....                                                                                                 | YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)           |
| Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain .....                                                                                   | LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)            |
| Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin ..... | ..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)      |
| Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin .....                              | ..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)         |
| Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil .....                                                                                   | TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)     |
| Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings .....                                                                                                        | ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)                 |
| Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland .....                                 | ..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)   |
| Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China .....                                                                                | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)                 |
| Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors .....                                                | CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)                 |
| Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces .....                                                                                                          | SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)                         |
| Effect of COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues .....                                                                        | QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)                             |
| Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application .....                                                                                              | HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)           |
| Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure .....                       | ..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)     |