

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价

王呈, 钱新*, 李慧明*, 孙一轩, 王金花

(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: 分析了南京 10 个公园大气降尘中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量, 利用地积累指数法、潜在生态风险指数法和美国 EPA 健康风险评价方法进行重金属污染水平、生态风险和健康风险的评价。结果表明, 重金属污染水平较高的有燕子矶公园、大桥公园和莫愁湖公园。与其他部分城市如长春、武汉和北京相比, 南京市公园降尘中的重金属含量偏高。地积累指数评价结果表明, Pb 处于中度污染水平, Zn 和 Cu 均处于中度至严重污染水平, 而 Cd 处于严重至极度污染水平。Cd 的生态风险水平为很强生态风险。健康风险评价结果显示, 各重金属均不存在非致癌风险。Cd、Cr 和 Ni 均不存在致癌风险 (风险值 $< 10^{-6}$), As 的致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 存在一定的致癌风险, 但是在可接受范围之内。

关键词: 公园降尘; 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(2016)05-1662-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.009

Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing

WANG Cheng, QIAN Xin*, LI Hui-ming*, SUN Yi-xuan, WANG Jin-hua

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

Abstract: Contents of heavy metals involving As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn from atmospheric deposition in 10 parks of Nanjing were analyzed. The pollution level, ecological risk and health risk were evaluated using Geoaccumulation Index, Potential Ecological Risk Index and the US EPA Health Risk Assessment Model, respectively. The results showed that the pollution levels of heavy metals in Swallow Rock Park, Swallow Rock Park and Mochou Lake Park were higher than the others. Compared to other cities such as Changchun, Wuhan and Beijing, the contents of heavy metals in atmospheric deposition of parks in Nanjing were higher. The evaluation results of Geoaccumulation Index showed that Pb was at moderate pollution level, Zn and Cu were between moderate and serious levels, while Cd was between serious and extreme levels. The ecological risk level of Cd was high. The assessment results of Health Risk Assessment Model indicated that there was no non-carcinogenic risk for all the seven heavy metals. For carcinogenic risk, the risks of Cd, Cr and Ni were all negligible ($\text{Risk} < 1 \times 10^{-6}$), whereas As had carcinogenic risk possibility but was considered to be acceptable ($10^{-6} < \text{Risk} < 10^{-4}$).

Key words: park dusts; heavy metal; ecological risk; health risk; Nanjing City

大气降尘是悬浮于大气中的颗粒物在重力、降水、湍流等因素的作用下降落于地表的大气颗粒物的总称, 其粒径多在 $10 \mu\text{m}$ 以上。大气降尘是众多污染物的载体和反应床^[1], 特别是重金属。大气降尘吸附的重金属不仅可通过水体、土壤等介质进入植物, 影响生态安全, 还可通过手-口、呼吸和皮肤渗入途径进入人体, 对人体健康产生损害。

近年来, 国内众多学者对大气降尘中重金属污染做了大量研究。于瑞莲等^[2]发现泉州市不同功能区大气降尘重金属生态危害程度为: 工业区 > 商业区 > 交通繁忙区 > 居民区 > 农业区。张春荣等^[3]的研究结果表明, 青岛市区大气降尘重金属对人体健康的风险整体差异不大, 危害较小。Li 等^[4]发现, 南京道路降尘中 Cd、Zn、Cu、Pb 和 Ni 等金属的富集程度较高, 主要来自汽车交通污染、工业污染和城

市建设等。城市公园是人们休闲娱乐的重要场所, 其气象动力条件和道路环境有所不同, 而目前关于城市公园降尘中重金属污染的研究还很少。梅凡民等^[5]发现西安公园降尘中 Cu 和 Pb 含量均超过该市道路灰尘平均含量的 7 倍和 3 倍以上, 并且对人体健康具有潜在的威胁。郭金停等^[6]的研究结果显示, 天津市公园降尘中 Cu、Pb、Cr、Cd 和 Ni 的含量均高于天津市土壤重金属元素背景值。本研究选取南京市主城区的 10 个公园, 分析公园大气降尘中重金属污染水平并进行生态风险及健康风险评价, 以期城市大气重金属风险防控提供参考。

收稿日期: 2015-10-22; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271511)

作者简介: 王呈(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染, E-mail: heywangch@outlook.com

* 通讯联系人, E-mail: xqian@nju.edu.cn; valen222@126.com

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

南京是江苏省省会,全省政治、经济、科教和文化中心,也是全国重要的综合性工业生产基地及我国重要的综合性交通枢纽和通信枢纽城市. 本研究以南京 6 个市辖区:栖霞区、鼓楼区、玄武区、建邺区、白下区和雨花台区内的 10 个公园(图 1),即燕子矶公园、大桥公园、宝船遗址公园、古林公园、鼓楼公园、玄武湖公园、绿博园、莫愁湖公园、月牙湖公园和雨花台烈士陵园为研究区域.

在 2013 年 12 月,用扫集法在晴朗无风的天气下收集大气降尘. 在每个公园设置 3 个不同采样点. 在以采样点为中心的附近 10 m 范围内,选择电线杆、树木、空调外机、建筑物窗台等距离地面 1.5 ~2 m 部位的降尘,用清洁的毛刷采集降尘样品装于塑料自封袋中. 筛除其中大颗粒杂物,自然风干.

1.2 重金属提取和分析

称取样品 0.5g,用 HCl-HNO₃-HF 混合酸在电热板上进行 85℃ 消解,使用 ICP-OES (ICP-OES,

Perkin Elmer SCIEX, Optima 5300) 和 ICP-MS (ICP-MS, Perkin Elmer SCIEX, Elan 9000)测试重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的浓度. 其中,As 和 Cd 用 ICP-MS 测定,检出限分别为 0.000 6 μg·L⁻¹、0.000 09 μg·L⁻¹,Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 用 ICP-OES 测定,检出限分别为 0.4、0.4、0.5、1、1 μg·L⁻¹. 所有元素的回收率介于 95% ~ 105% 之间. 每批次实验过程中空白样品和质控样品进行同步测定.

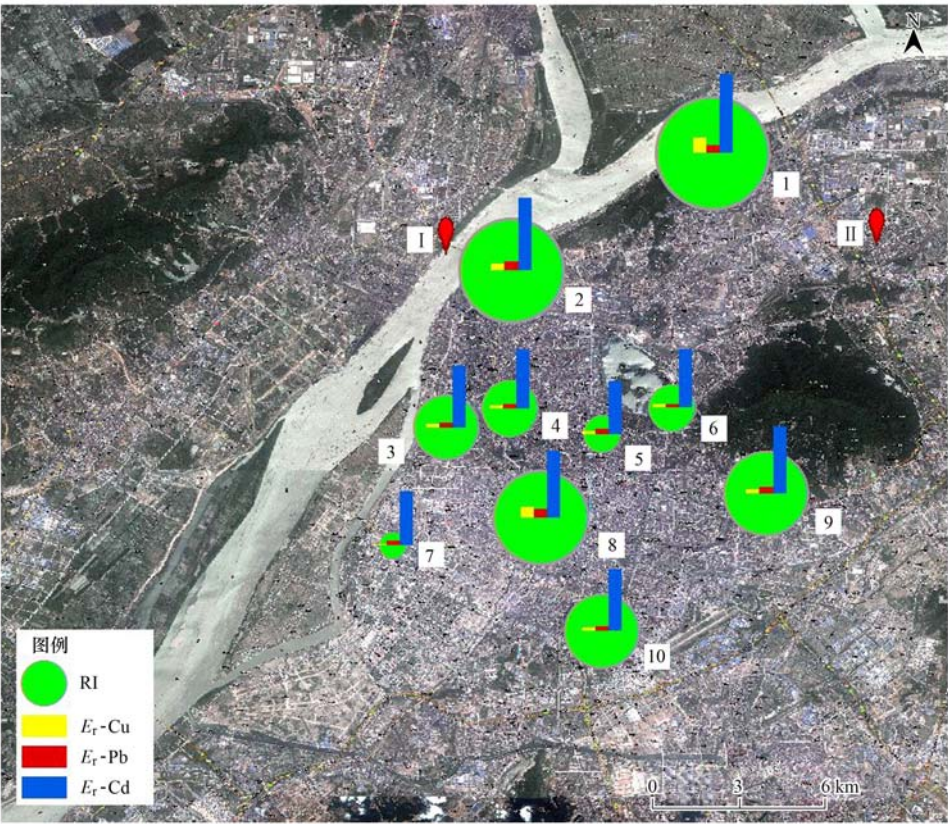
1.3 评价方法

1.3.1 地积累指数法

地积累指数 (geoaccumulation index, I_{geo}) 最早由德国海德堡大学沉积物研究所 Muller^[7] 提出,现被广泛应用于研究现代沉积物、土壤、降尘中重金属的污染评价,计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \tag{1}$$

式中, C_i 为重金属的实测含量; B_i 为元素的地质背景值,文中 B_i 采用江苏省土壤重金属含量背景值^[8]; k 为考虑到造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数, $k = 1.5$ ^[1]. 通常采用 Muller 的分级标



1. 燕子矶公园; 2. 大桥公园; 3. 宝船遗址公园; 4. 古林公园; 5. 鼓楼公园; 6. 玄武湖公园; 7. 绿博园; 8. 莫愁湖公园; 9. 月牙湖公园; 10. 雨花台烈士陵园; I. 南京长江大桥; II. 金陵石化烷基苯厂

图 1 南京公园降尘采样点及重金属潜在生态风险分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites and ecological risks of heavy metals in park atmospheric depositions in Nanjing

准^[7]: $I_{\text{geo}} < 0$ 表示无实际污染; $0 < I_{\text{geo}} < 1$ 表示轻度污染; $1 < I_{\text{geo}} < 2$ 表示中度污染; $2 < I_{\text{geo}} < 3$ 表示中度污染至严重污染; $3 < I_{\text{geo}} < 4$ 表示严重污染; $4 < I_{\text{geo}} < 5$ 表示严重污染至极度污染; $I_{\text{geo}} > 5$ 表示极度污染.

1.3.2 潜在生态危害指数法

瑞典地球化学家 Hakanson 提出的潜在生态指数法是目前最为常用的评价重金属污染程度的方法之一^[9]. 其计算公式如下:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

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

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n \frac{T_r^i \times C_s^i}{C_n^i} \quad (4)$$

式中, RI 为多种重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 为单一重金属的潜在生态风险系数; C_f^i 为重金属 i 相对参比值的污染系数; C_s^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度^[10]. 本研究中 7 种重金属毒性响应系数取值分别为 $\text{Cd} = 30 > \text{As} = 10 > \text{Cu} = \text{Ni} = \text{Pb} = 5 > \text{Cr} = 2 > \text{Zn} = 1$ ^[9]. 评价参比值 C_n^i 采用 Hakanson 提出的工业化前沉积物中重金属的最高背景值^[11]. 其中, As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的评价参比值分别为: 15、1.0、90、50、70 和 175. 由于 Hakanson 未提供 Ni 的评价参比值, 本研究以江苏省地表土中 Ni 的自然背景值 26.7 替代. 当 $E_r^i < 40$, $RI < 150$ 时, 为轻微生态风险; 当 $40 \leq E_r^i < 80$, $150 \leq RI < 300$ 时, 为中等生态风险; 当 $80 \leq E_r^i <$

160, $300 \leq RI < 600$ 时, 为强生态风险; 当 $160 \leq E_r^i < 320$, $RI \geq 600$ 时, 为很强生态风险, 当 $E_r^i \geq 320$ 时, 为极强生态风险^[11].

1.3.3 健康风险评价

利用美国 EPA 提出的土壤风险评价方法对公园降尘重金属的健康风险进行评价. 该模型把土壤、沉积物或降尘进入人体的途径主要分为经手-口摄入、呼吸摄入和皮肤接触, 暴露对象分为儿童和成人^[12]. 不同暴露途径的计算公式如式(5)~(7)所示. 式(8)为致癌重金属呼吸途径终生日平均暴露量 $LADD_{\text{inh}}$ 的计算公式.

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \quad (6)$$

$$ADD_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (7)$$

$$LADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{PEF} \times \text{AT}} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \quad (8)$$

式中, ADD_{ing} 为手-口摄入途径降尘颗粒日平均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; ADD_{inh} 为呼吸途径降尘颗粒日平均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; ADD_{derm} 为皮肤接触途径降尘颗粒日平均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; $LADD_{\text{inh}}$ 为致癌重金属呼吸途径终生日平均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. 其他参数的含义和取值见表 1.

表 1 重金属日平均暴露剂量计算参数含义及取值

Table 1 Parameter values for average daily dose calculation models of heavy metals

项目	参数	含义	单位	取值	数据来源
基础参数	C	重金属含量	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		本研究
暴露行为参数	ED	暴露年限	a	6(儿童), 30(成人)	[13]
	EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	180	[14]
	CF	单位转换	$\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$	1×10^{-6}	[12]
	BW	平均体重	kg	16.2(儿童), 61.8(成人)	[15]
	$AT_{\text{非致癌}}$	平均暴露时间	d	$\text{ED} \times 365$	[13]
	$AT_{\text{致癌}}$	平均暴露时间	d	$\text{LT} \times 365$	[13]
	LT	平均寿命	a	72	[16]
手-口摄入	IngR	摄入速率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	200(儿童), 100(成人)	[13]
呼吸摄入	InhR	呼吸速率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	7.6(儿童), 20(成人)	[17]
	PEF	颗粒物排放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36×10^{-9}	[13]
皮肤接触	AF	皮肤黏着度	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2(儿童), 0.07(成人)	[13]
	SA	暴露皮肤面积	$\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	2800(儿童), 5700(成人)	[13]
	ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.01 (0.03 for As)	[18]

该模型将风险表征方式分为非致癌风险和致癌风险,计算公式如式(9)~(12)所示。文中涉及的7种重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 均具有非致癌风险,而 As、Cd、Cr 和 Ni 同时又具有致癌风险。由于模型只给出了重金属 As 在3种暴露途径的致癌暴露量参考值,而认为其他重金属只有通过呼吸途径进入人体才有致癌风险,因此本研究中 Cd、Cr、Ni 只考虑呼吸途径所导致的致癌风险。

$$HQ = ADD/RfD \quad (9)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (10)$$

$$Risk = LADD \times SF \quad (11)$$

$$Risk_T = \sum Risk_i \quad (12)$$

式中, HQ 为非致癌风险商,表征单种污染物通过某一途径的非致癌风险; RfD 为参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$],表示在单位时间、单位体重摄取的不会引起人体不良反应的污染物最大量; HI 为某种污染物多种暴露途径下总的非致癌风险,总 HI 为所有途径所有污染物总非致癌风险的加和; 一般认为,当 HQ 或 $HI < 1$ 时,没有非致癌风险; HQ 或 $HI > 1$ 时,存在非致癌风险。Risk 为单种致癌重金属的致癌风险, $Risk_T$ 为多种重金属总致癌风险; SF 为单种重金属致癌斜率因子,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 $Risk < 10^{-6}$,则认为该物质不存在致癌风险; 若 $10^{-6} < Risk < 10^{-4}$,则认为该物质的致癌风险在可以接受的范围内; 若 $Risk > 10^{-4}$,则认为该物质对人体存在高致癌风险。表7列出了7种重金属不同暴露途径的 RfD 值以及致癌重金属的 SF 值^[12]。其中只有 As、Ni、Cd 和 Cr 可以获取 EPA 的 RfD_{inh} 数据, Zn、Pb 和 Cu 的 RfD_{inh} 认为可以等同于其相应手-口摄入途径的 RfD_{inh}^[14]。

2 结果与讨论

2.1 大气降尘中重金属含量

如表2所示,10个公园大气降尘中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别为 10.77、5.184、81.29、168.28、45.32、147.35、526.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于江苏省土壤背景值。其中 Cd 比土壤背景值高了40倍, Zn、Cu 和 Pb 分别高7.5、6.5和4.6倍。与其他研究相比(表3),南京市公园降尘的重金属含量明显高于长春和武汉,而北京除了 Pb 含量高于南京之外,其他重金属含量也都低于南京。西安、上海、广州、兰州道路降尘的重金属含

量普遍高于南京公园降尘重金属含量,这与各城市的污染状况及道路降尘与公园降尘的污染来源不同等因素有关。

ANOVA 方差分析($P < 0.05$)显示, Cr 和 Cu 在燕子矶公园、大桥公园和莫愁湖公园的含量显著高于其它7个公园, Pb 和 Zn 的含量也显著高于其他大部分公园。一般认为,大气中 Cu 主要来自工业冶炼和汽车尾气、汽车轮胎磨损等^[19]; Pb 主要来源于燃煤、蓄电池、冶炼、机械、涂料和电镀工业生产过程以及汽车尾气^[20]; Zn 主要来自汽车尾气、燃煤、垃圾焚烧、钢铁冶炼、轮胎磨损和润滑油的使用等^[21]。燕子矶公园位于南京市栖霞区幕府山东北角,北面紧靠长江,东南面有金陵石化和中国石化部分化工厂,因此江面船舶的尾气排放、化工厂的污染排放可能会导致公园内降尘中 Cu、Pb、Zn 等的富集。莫愁湖公园和大桥公园分别靠近交通拥堵的虎踞路和南京第一长江大桥,而且大桥公园毗邻长江,因此汽车尾气、轮胎的磨损以及江面船舶的尾气排放都可能是造成 Cu、Pb、Zn 的含量与其他公园存在显著性差异的原因。重金属 Ni 含量在各公园之间均不存在显著性差异; 燕子矶公园的 As 和 Cd 含量与其他部分公园(鼓楼公园、玄武湖公园等)之间存在显著性差异,这可能与处于化工厂附近有关,因为一般来说,大气中的 As 主要来自于煤炭燃烧和工业冶炼^[22], Cd 主要来自于冶炼、燃煤、石油燃烧、垃圾焚烧等^[23]。

2.2 重金属污染水平评价

地积累指数 I_{geo} 的计算结果见表4。As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均地积累指数分别为 -0.495、4.757、-0.723、2.020、0.122、1.836、2.414。各元素污染程度从高到低为 $Cd > Zn > Cu > Pb > Ni > As > Cr$ 。As 和 Cr 处于无实际污染水平, Ni 处于轻度污染水平, Pb 处于中度污染水平, Zn 和 Cu 均处于中度至严重污染水平,而 Cd 处于严重至极度污染水平。对比各元素在10个公园的不同含量,发现 Cu 在不同公园的含量存在显著差异。Cu 在燕子矶和莫愁湖的污染水平都达到了严重污染,而在绿博园则为轻度污染,在其他公园多为中度污染。

2.3 重金属生态风险评价

重金属的潜在生态风险指数计算结果如表5所示。利用 ArcGIS 作出潜在生态风险的空间分布(图1)。在各采样点用圆圈的相对大小表示各个公园降尘重金属的潜在生态风险大小,用柱状图表示3个

生态风险系数较高的重金属 Cu、Pb 和 Cd 的风险系数大小分布. 10 个公园重金属的潜在生态风险均处于中等生态风险水平. 燕子矶公园的潜在生态风险指数最大,为 276.6,绿博园最小,为 163.7. Cd 的生态风险最大,在燕子矶公园、大桥公园、莫愁湖公园和月牙湖公园的潜在生态风险系数均超过了

160,达到了很强生态风险水平,在其它公园也都处于强生态风险水平. 其他重金属的潜在生态风险系数均明显低于 Cd. Cu 在大部分公园处于轻微生态风险水平,只有在燕子矶公园存在中等生态风险. As、Cr、Ni、Pb 和 Zn 在各公园均处于轻微生态风险水平.

表 2 南京公园大气降尘中重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Heavy metal concentrations in park atmospheric depositions in Nanjing/mg·kg ⁻¹							
采样点	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
燕子矶公园	12.54	6.480	133.38	449.16	49.64	184.87	601.83
大桥公园	10.03	5.910	137.57	209.23	45.91	209.64	716.76
宝船遗址公园	10.46	5.013	48.51	103.83	45.74	115.24	528.78
古林公园	11.36	4.922	59.76	95.03	40.07	118.10	440.28
鼓楼公园	9.713	4.350	85.59	108.68	40.37	135.63	401.13
玄武湖公园	8.957	4.759	44.20	103.16	56.87	94.59	398.31
绿博园	11.72	4.425	35.21	53.87	34.15	121.10	330.44
莫愁湖公园	12.04	5.474	153.88	326.55	51.05	210.60	678.78
月牙湖公园	10.79	5.445	64.00	131.05	47.87	158.73	743.95
雨花台烈士陵园	10.11	5.063	50.81	102.28	41.53	125.02	426.37
江苏省土壤背景值 ^[8]	10.00	0.126	77.80	22.30	26.70	26.20	62.60
最小值	8.957	4.425	35.21	53.87	34.15	94.59	330.44
最大值	12.54	6.480	153.88	326.55	56.87	210.60	743.95
平均值	10.77	5.184	81.29	168.28	45.32	147.35	526.66
标准偏差	1.129	0.660	44.01	125.50	6.524	41.38	149.22

表 3 南京公园大气降尘重金属含量与部分城市比较/mg·kg⁻¹

Table 3 Comparison of heavy metal concentrations of park atmospheric depositions in Nanjing with other cities/mg·kg ⁻¹								
研究城市	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	文献
长春	—	0.33	59.28	37.82	23.08	69.12	169.26	[24]
武汉	—	—	64.10	58.40	25.80	85.50	313.35	[25]
北京	—	0.64	69.33	72.13	25.97	201.82	219.20	[26]
西安	10.62	—	167.28	94.98	—	230.52	421.46	[27]
上海	—	1.23	159.30	196.80	83.98	294.90	733.80	[28]
广州	—	2.41	159.30	176.00	78.80	240.00	586.00	[29]
兰州	—	4.34	88.73	82.22	40.64	130.31	369.23	[30]
南京	10.77	5.18	81.29	168.28	45.32	147.35	526.66	本研究

表 4 南京公园大气降尘重金属的地积累指数

Table 4 Geoaccumulation indexes of heavy metals in park atmospheric depositions in Nanjing							
采样点	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
燕子矶公园	-0.262	5.099	0.181	3.735	0.296	2.211	2.655
大桥公园	-0.589	4.958	0.205	2.610	0.183	2.398	2.905
宝船遗址公园	-0.530	4.728	-1.284	1.628	0.191	1.530	2.489
古林公园	-0.416	4.687	-0.981	1.481	-0.025	1.564	2.209
鼓楼公园	-0.665	4.517	-0.472	1.681	0.007	1.782	2.084
玄武湖公园	-0.747	4.648	-1.408	1.603	0.209	1.250	2.058
绿博园	-0.358	4.523	-1.744	0.658	-0.235	1.610	1.768
莫愁湖公园	-0.317	4.850	0.381	3.261	0.345	2.391	2.843
月牙湖公园	-0.484	4.831	-0.892	1.963	0.257	1.992	2.966
雨花台烈士陵园	-0.579	4.732	-1.215	1.580	-0.005	1.632	2.160
最小值	-0.747	4.517	-1.744	0.658	-0.235	1.250	1.768
最大值	-0.262	5.099	0.381	3.735	0.345	2.398	2.966
平均值	-0.495	4.757	-0.723	2.020	0.122	1.836	2.414

表 5 南京公园降尘重金属的潜在生态风险指数

采样点	潜在生态风险系数 E_i^p							潜在生态 风险指数 RI
	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	
燕子矶公园	8.359	2.964	44.92	9.296	13.20	3.439	194.4	276.6
大桥公园	6.688	3.057	20.92	8.597	14.97	4.096	177.3	235.6
宝船遗址公园	6.975	1.078	10.38	8.565	8.231	3.021	150.4	188.7
古林公园	7.571	1.328	9.503	7.504	8.435	2.516	147.7	184.5
鼓楼公园	6.475	1.902	10.86	7.559	9.688	2.292	130.5	169.3
玄武湖公园	5.971	0.982	10.32	10.65	6.757	2.276	142.8	179.7
绿博园	7.816	0.782	5.387	6.395	8.650	1.888	132.8	163.7
莫愁湖公园	8.029	3.419	32.65	9.559	15.04	3.879	164.2	236.8
月牙湖公园	7.191	1.422	13.11	8.964	11.33	4.251	163.4	209.6
雨花台烈士陵园	6.743	1.129	10.22	7.777	8.930	2.436	151.9	189.1

2.4 暴露量计算及健康风险评价

单位体重日平均暴露量的计算结果如表 6 所示. 各重金属非致癌风险暴露量从高到低分别为 $Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > As > Cd$, 与各公园降尘中重金属含量一致. 儿童在 3 种途径的暴露量均高于成人, 其中, 在手-口摄入途径儿童的暴露量显著高于成人, 为成人的 16.1 倍. 从不同暴露途径的暴露量来看, 手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入, 对于儿童和成人而言, 手-口摄入途径的暴露量分别占总暴露量的 99.6% 和 98.9%. 致癌重金属 As、Cd、Cr、Ni 吸入途径终生日平均暴露量的排序为 $Cr > Ni > As > Cd$, 它们的致癌风险暴露量相对于非致癌风险暴

露量来说均相对较小.

根据式(8)~(11)计算出公园降尘重金属的非致癌风险指数和致癌风险指数, 结果如表 7 所示. 整体来说, 儿童的非致癌风险高于成人; 各暴露途径的非致癌风险排序为手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入. 其中, 儿童手-口摄入途径的非致癌风险显著高于成人. 单种重金属各暴露途径总的非致癌风险排序为 $Pb > As > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn$, 其中儿童 As 的非致癌风险略高于 Pb. Pb、As 和 Cr 的非致癌风险明显高于其余 4 种重金属元素. 但对于儿童和成人而言, 其非致癌风险系数 HQ 均小于 1, 且总非致癌风险指数 HI 也均小于 1, 因此南京公园降尘中

表 6 南京公园降尘中重金属不同途径暴露量

Table 6 Average daily doses for each metal and exposure pathway of heavy metals in park atmospheric depositions in Nanjing								
项目		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
平均含量/ $mg \cdot kg^{-1}$		10.77	5.18	81.29	168.28	45.32	147.35	526.66
$ADD_{ing}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	儿童	6.56×10^{-5}	3.16×10^{-5}	4.95×10^{-4}	1.02×10^{-3}	2.76×10^{-4}	8.97×10^{-4}	3.21×10^{-3}
	成人	2.06×10^{-6}	2.52×10^{-6}	6.55×10^{-6}	5.09×10^{-5}	9.22×10^{-6}	7.44×10^{-5}	2.26×10^{-4}
$ADD_{inh}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	儿童	1.83×10^{-9}	8.82×10^{-10}	1.38×10^{-8}	2.86×10^{-8}	7.71×10^{-9}	2.51×10^{-8}	8.96×10^{-8}
	成人	1.26×10^{-9}	6.08×10^{-10}	9.54×10^{-9}	1.97×10^{-8}	5.32×10^{-9}	1.73×10^{-8}	6.18×10^{-8}
$ADD_{derm}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	儿童	5.51×10^{-6}	8.84×10^{-8}	1.39×10^{-6}	2.87×10^{-6}	7.73×10^{-7}	2.51×10^{-6}	8.98×10^{-6}
	成人	1.03×10^{-6}	1.65×10^{-8}	2.59×10^{-7}	5.36×10^{-7}	1.44×10^{-7}	4.69×10^{-7}	1.68×10^{-6}
$LADD_{inh}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$		6.79×10^{-10}	3.27×10^{-10}	5.13×10^{-9}	—	2.86×10^{-9}	—	—

重金属对人体不存在非致癌风险.

致癌重金属 As、Cd、Cr、Ni 的致癌风险(Risk)分别为 1.68×10^{-5} 、 2.06×10^{-8} 、 2.15×10^{-7} 、 2.40×10^{-9} . 其中, Cd、Cr 和 Ni 的 Risk 均小于 10^{-6} , 表明均不存在致癌风险, 而 As 的 Risk 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 表明 As 存在一定的致癌风险, 但是在可接受范围之内.

3 结论

(1) 南京市公园大气降尘中重金属 As、Cd、

Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量均高于江苏省的土壤背景值. 由于各公园降尘中重金属来源不同, 所以部分重金属含量在不同公园之间存在显著差异. 与长春、武汉和北京相比, 南京市公园降尘中重金属含量明显偏高.

(2) 根据地积累指数法的计算结果, 南京市 10 个公园的大气降尘中 Cd 处于严重至极度污染水平; Zn 和 Cu 均处于中度至严重污染水平; Pb 处于中度污染水平; 其他重金属处于无实际污染或轻度污染水平. 其中, Cu 的污染水平在不同公园之间有

表 7 南京公园降尘重金属的非致癌风险指数及致癌风险¹⁾

Table 7 Non-carcinogenic risk indexes and carcinogenic risks of heavy metals in park atmospheric depositions in Nanjing

项目		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
RfD _{ing}		3.00×10^{-4}	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}	4.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	3.50×10^{-3}	3.00×10^{-1}
RfD _{inh}		3.00×10^{-4}	1.00×10^{-3}	2.86×10^{-5}	4.00×10^{-2}	2.06×10^{-2}	3.50×10^{-3}	3.00×10^{-1}
RfD _{derm}		1.23×10^{-4}	1.00×10^{-5}	6.00×10^{-5}	1.20×10^{-2}	5.40×10^{-4}	5.25×10^{-4}	6.00×10^{-2}
SF _{ing}		1.50	—	—	—	—	—	—
SF _{inh}		15.1	6.30	42.0	—	0.84	—	—
SF _{derm}		3.66	—	—	—	—	—	—
HQ _{ing}	儿童	2.19×10^{-1}	3.16×10^{-2}	1.65×10^{-1}	2.56×10^{-2}	1.38×10^{-2}	2.56×10^{-1}	1.07×10^{-2}
	成人	6.88×10^{-3}	2.52×10^{-3}	2.18×10^{-3}	1.27×10^{-3}	4.61×10^{-4}	2.13×10^{-2}	7.52×10^{-4}
HQ _{inh}	儿童	6.11×10^{-6}	8.82×10^{-7}	4.84×10^{-4}	7.16×10^{-7}	3.74×10^{-7}	7.16×10^{-6}	2.99×10^{-7}
	成人	4.21×10^{-6}	6.08×10^{-7}	3.34×10^{-4}	4.94×10^{-7}	2.58×10^{-7}	4.94×10^{-6}	2.06×10^{-7}
HQ _{derm}	儿童	4.48×10^{-2}	8.84×10^{-3}	2.31×10^{-2}	2.39×10^{-4}	1.43×10^{-4}	4.78×10^{-3}	1.50×10^{-4}
	成人	8.36×10^{-3}	1.65×10^{-3}	4.31×10^{-3}	4.46×10^{-5}	2.67×10^{-5}	8.94×10^{-4}	2.79×10^{-5}
HI	儿童	2.63×10^{-1}	4.04×10^{-2}	1.89×10^{-1}	2.59×10^{-2}	1.39×10^{-2}	2.61×10^{-1}	1.08×10^{-2}
	成人	1.52×10^{-2}	4.17×10^{-3}	6.83×10^{-3}	1.32×10^{-3}	4.88×10^{-4}	2.22×10^{-2}	7.80×10^{-4}
Risk		1.68×10^{-5}	2.06×10^{-8}	2.15×10^{-7}	—	2.40×10^{-9}	—	—

1) 其中 As 的 Risk 为 3 种暴露途径的总致癌风险

明显差异.

(3)潜在生态风险指数法的计算结果表明,南京市 10 个公园降尘中的重金属潜在生态风险均处于中等生态风险状态,其中燕子矶公园的潜在生态风险系数最大. Cd 的生态风险最大,这与地积累指数法的结果一致.

(4)对于儿童和成人来说,各重金属不同摄入途径的非致癌风险顺序为手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入. 儿童的非致癌风险大于成人. 重金属各暴露途径总的非致癌风险指数排序为 Pb > As > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn,但风险指数均低于安全值,因此对人体的非致癌风险可以忽略. 致癌重金属 Cd、Cr 和 Ni 均无致癌风险,As 的致癌风险在可接受的范围之内.

参考文献:

[1] 胡恭任, 戚红璐, 于瑞莲, 等. 大气降尘中重金属形态分析及生态风险评价[J]. 有色金属, 2011, **63**(2): 286-291.

[2] 于瑞莲, 胡恭任, 戚红璐, 等. 泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 1086-1090.

[3] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2736-2741.

[4] Li H M, Qian X, Hu W, *et al.* Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **456-457**: 212-221.

[5] 梅凡民, 徐朝友, 周亮. 西安市公园大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的化学形态特征及其生物有效性[J]. 环境化学, 2011, **30**(7): 1284-1290.

[6] 郭金停, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市公园灰尘重金属污染

健康风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(2): 415-420.

[7] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. GeoJournal, 1969, **2**(3): 108-118.

[8] 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.

[9] 王健康, 高博, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1693-1699.

[10] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 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.

[11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[12] USEPA. Risk assessment guidance for Superfund (RAGS): part A[R]. Washington, DC: USEPA, 1989.

[13] USDOE. The risk assessment information system (RAIS) [EB/OL]. <http://rais.ornl.gov>, 2013.

[14] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.

[15] 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.

[16] WHO. World Health Organization (2006) working together for health: World health report [R]. Geneva: World Health Organization, 2006.

[17] Van den Berg R. Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values [R]. RIVM Report No. 725201011. Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environmental Protection (RIVM), 1994.

[18] USEPA. Screening Levels (RSL) for chemical contaminants at

- superfund sites [M]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [19] Xia L L, Gao Y. Characterization of trace elements in $PM_{2.5}$ aerosols in the vicinity of highways in northeast New Jersey in the U. S. east coast [J]. Atmospheric Pollution Research, 2011, **2** (1): 34-44.
- [20] Tian H Z, Cheng K, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **50**: 157-163.
- [21] Hjortenkrans D S T, Bergbäck B G, Häggerud A V. Metal Emissions from Brake Linings and Tires; case Studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005 [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41** (15): 5224-5230.
- [22] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10** (23): 11905-11919.
- [23] 谭吉华, 段青春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, **30** (2): 145-155.
- [24] Liu Q, Wang Y, Liu J S, *et al.* Grain-size distribution and heavy metal contamination of road dusts in urban parks and squares in Changchun, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2015, **37** (1): 71-82.
- [25] Yang T, Zeng Q L, Liu Z F, *et al.* Magnetic properties of the road dusts from two parks in Wuhan city, China; implications for mapping urban environment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **177** (1-4): 637-648.
- [26] Du Y R, Gao B, Zhou H D, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in road dusts in urban parks of Beijing, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, **18**: 299-309.
- [27] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, central China [J]. Science of the Total Environment, 2006, **355** (1-3): 176-186.
- [28] Shi G T, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **156** (2): 251-260.
- [29] Duzgoren-Aydin N S, Wong C S C, Aydin A, *et al.* Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28** (4): 375-391.
- [30] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2014, **35** (3): 1021-1028.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015: Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行