E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

中国期刊方阵
双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2020
Vol.41 No.12
第41卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 …… 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)
2015~2018年我国$PM_{2.5}$健康损害价值的动态评估 …… 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)
2011~2017年中国$PM_{2.5}$多尺度时空分异特征分析 …… 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)
关中地区$PM_{2.5}$时空演化及人口暴露风险 …… 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 …… 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)
西北工业城市冬季$PM_{2.5}$污染特征及理化性质 …… 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)
基于PMF模型的$PM_{2.5}$中金属元素污染及来源的区域特征分析 …… 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向锌鹏(5276)
重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 …… 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 …… 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞锋, 许彩琴(5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 …… 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 …… 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 …… 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 …… 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 …… 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 …… 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 …… 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 …… 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 …… 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 …… 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 溜映雪, 李睿, 陈建耀(5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 …… 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 …… 王世亮, 曹雪稚(5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 …… 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 …… 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 …… 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 … 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)
生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 …… 王鹏飞, 郅蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)
Bi_2MoO_6/Bi_2S_3异质结光催化降解四环素-铜复合物 …… 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe_3O_4@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 …… 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 …… 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 …… 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)
限NH_4^+和限NO_2^-厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 …… 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 …… 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 …… 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)
中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 …… 赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 …… 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)
硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 …… 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 …… 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 …… 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(Ⅴ)污染土壤的钝化修复性能 …… 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 …… 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 …… 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 …… 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)
生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 …… 崔丙健, 崔二苹, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 …… 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章(5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 …… 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N_2O排放的影响 …… 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录 …… (5677)
《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第12期 2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价

张夏, 刘斌*, 肖柏林, 王佳, 万达
(重庆大学环境与生态学院, 重庆 400044)

摘要: 为了解重庆主城大气降尘中重金属的污染特征及风险,于2017年12月至2018年11月,逐月监测了郊区、文教区和居住区等6个功能区的大气降尘,用AAS分析了其中Cd、Cr、Ni和Pb的含量,并结合潜在生态风险指数法和地累积指数法对降尘中的重金属污染进行了评价. 结果表明,大气降尘中Cd、Cr、Ni和Pb含量($mg \cdot kg^{-1}$)和沉降通量[$mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$]分别为1.59和0.39、72.68和8.04、20.99和2.41、101.17和10.41,各功能区大气降尘秋季重金属含量显著高于其他3个季节,而各功能区的大气这4种重金属降尘通量总体表现为冬季显著低于其他3个季节. 潜在生态危害指数和地累积指数显示,Cd有极高的生态危害和较高的污染,Cr、Ni和Pb造成的生态危害低,且污染也较低,工业居住混合区和交通枢纽具有高生态危害及较高的污染,郊区的生态危害和污染都相对较低.

关键词: 大气降尘; 重金属; 生态风险; 地累积指数; 重庆主城
中图分类号: X513; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-5288-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202001142

Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing

ZHANG Xia, LIU Bin*, XIAO Bo-lin, WANG Jia, WAN Da
(College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Pollution characteristics and risk of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas of Chongqing were investigated for one year from December 2017 to November 2018. Six functional zones: suburb, education area, residential area, commercial area, transportation hub, and industrial-residential area in Chongqing were selected for monthly atmospheric deposition collection. Concentrations of Cd, Cr, Ni, and Pb were analyzed using AAS. The potential ecological risk index and geoaccumulation index were used to evaluate the heavy metals pollution. Results show that the concentrations of Cd, Cr, Ni, and Pb in the atmospheric deposition were 1.59, 72.68, 20.99, and 101.17 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively, and their annual deposition fluxes were 0.39, 8.04, 2.41, and 10.41 $mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$, respectively. Concentrations of heavy metals in autumn were significantly higher than those in the other three seasons, especially for Cd, and their deposition fluxes in winter were lowest. The potential ecological risk index of Cd was biggest, achieving a very high ecological hazard level, while the ecological risk of Cd and Pb in industrial-residential area was highest, and that of Cr and Ni, respectively, were highest in transportation hub and residential area. The geoaccumulation index indicated that the pollution of Cd was the highest, and that of Cr, Ni, and Pb was very low. The pollution in industrial-residential area and transportation hub was high, while that in the suburb was relatively low.

Key words: atmospheric deposition; heavy metals; ecological risk; geoaccumulation index; core urban areas of Chongqing

大气降尘被认为是去除大气污染物的主要过程,是生态系统营养物质和污染物的重要来源[1,2]. 大气降尘也是重金属在环境中传输的重要环节,具有重要的环境指示作用,经化石燃料燃烧、金属矿物冶炼、汽车尾气等进入大气的重金属,会被吸附在气溶胶上,通过大气降尘进入土壤或水体,对生态系统安全造成风险,并最终通过食物链威胁人体健康[3,4].

城市人口众多且密集,对其大气环境的变化尤其敏感. 近年来,城市大气降尘重金属污染特征和对生态系统的风险引起了国内外广泛关注. 张忠地等[5]的研究表明开封市大气降尘中Al、Cd、Cu、V和Pb含量均高于背景值,商业区降尘Cd、Cr、Pb、Cu和Zn含量显著高于其他研究功能区,全年中各重金属含量总体呈现出冬季、秋季含量比春季和夏季高的特征; 伊丹等[6]的研究发现青岛市冬季降尘Cd、Cr、Cu、Pb和Zn的平均含量均超出了青岛土壤背景值,Cu的含量尤其高; Weerasundara等[7]监测了斯里兰卡的大气降尘,发现除Al、Fe、Cr和Pb的含量都很高. 目前关于大气降尘重金属污染的环境标准缺乏,其生态风险的评价主要借鉴沉积物重金属污染评价的方法,如潜在生态危害指数法、地累积指数法和富集因子法等. 陈泓霖等[8]对衡阳市的大气降尘的研究表明,其重金属的地累积指数法评价污染程度和潜在生态危害程度均表现为Cd > Pb > As; Sobhanardakani[9]运用潜在生态危险指数法评价了伊朗的科曼莎市大气降尘中重金属,发现都处于低生态风险水平.

收稿日期: 2020-01-15; **修订日期**: 2020-06-17
基金项目: 重庆市科技计划项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0017)
作者简介: 张夏(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染修复,E-mail:1210819513@qq.com
* 通信作者,E-mail:liubinworld@126.com

重庆是我国重要的现代制造业基地，是西南地区最大的工商业城市之一，每年都会有大量的重金属随废气排放到大气中，再伴随大气降尘降落到地表. 一个地区的自然地理环境、气候条件、经济发展情况、工业及城市化程度、产业结构等的不同，会导致该地的大气中重金属情况存在明显的时空分布差异[10]. 目前，研究重庆大气重金属含量和沉降量以及不同功能区的大气降尘的研究较少[11~13]，对大气降尘重金属产生的生态风险的关注也较低. 因此，本文通过监测 2017 年 12 月至 2018 年 11 月的重庆主城不同功能区的大气降尘，研究其中的重金属含量和沉降通量的时空分布特征，并评价大气降尘重金属对土壤的污染风险，以期为重庆主城的大气环境质量评价及其重金属污染防治提供一定的参考.

1　材料与方法

1.1　样品采集

在重庆主城沙坪坝区选择 6 类城市功能区：郊区(SU)、文教区(EA)、居住区(RA)、商业区(CA)、交通枢纽(TH)和工业居住混合区(IR)，分别位于虎溪、重庆大学 B 区、逸雅苑、三峡广场、同行枢纽站和双碑会山康城(图 1). 于 2017 年 12 月至 2018 年 11 月间逐月进行监测，每个功能区各设置 1 个采样点，每个采样点设 2 个降尘桶进行平行监测. 在降尘桶不易被破坏且容易更换的地方设置采样点，四周无高大遮挡物及局部污染源，降尘桶放置在距离地面 5 ~ 12 m 的屋顶平台上. 参照《环境空气降尘的测定-重量法》(GB/T 15265-1994)，采用重力降尘桶逐月采集大气降尘. 降尘桶为聚乙烯塑料桶，内壁光滑，接收口内径约 15 cm，高约 30 cm. 使用前需经 10% HCl 溶液浸泡 24 h，用超纯水冲洗晾干加入 50 mL 乙二醇，放置在距平台 1.5 m 处，收集大气降尘.

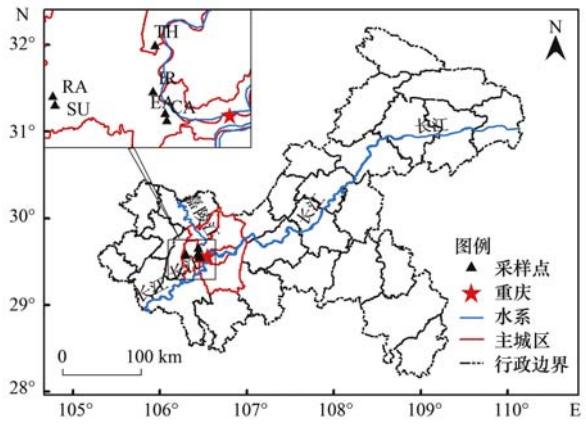

图 1　采样点位置示意

Fig. 1　Location of the sampling sites

1.2　样品处理和测定

每月末将降尘桶取回实验室，取出落入桶内的树叶和昆虫等异物，将所有溶液和沉淀物移入 500 mL 的烧杯中，在电热板上蒸发浓缩至 10 ~ 20 mL，冷却后全部转移至已恒重的 100 mL 锥形瓶中，放在电热板上小心蒸干，然后放入烘箱于 105℃下烘干、称重. 样品采用硝酸-王水法在电热板上消解后，过滤至 25 mL 容量瓶，定容后待测. Pb、Cd、Cr 和 Ni 元素采用原子吸收分光光度计(岛津 AA-6880，日本)测定. 样品分析全程作空白实验和平行测定，并用国家标准土样 GBW07428-(GSS-14)同步进行消化测定，以进行质量控制.

1.3　数据处理

根据降尘桶口面积、采样天数和大气降尘中 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的含量计算各元素年大气沉降通量，采用以下公式进行计算：

$$Q_x = 365M/(S \cdot N)$$

式中，Q_x 为各元素年大气沉降通量[$mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$]，$M$ 为大气降尘中重金属元素的质量(mg)，S 为降尘桶口面积(m^2)，N 为采样天数(d).

2　结果与讨论

2.1　重庆主城不同功能区大气降尘重金属含量特征及四季变化

分析整理，计算得出 2017 年 12 月至 2018 年 11 月重庆主城不同功能区大气降尘中 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的含量及其平均值、标准差和变异系数见表 1. 重庆主城大气降尘中 4 种重金属在各功能区的含量有较大差异，Cd 和 Pb 在工业居住混合区中的含量最高，Cr 在交通枢纽中的含量最高，Ni 在居住区的含量最高. 大气降尘中 4 种重金属元素的平均含量的大小顺序为 Pb (101.17 $mg \cdot kg^{-1}$) > Cr (72.68 $mg \cdot kg^{-1}$) > Ni (20.99 $mg \cdot kg^{-1}$) > Cd (1.59 $mg \cdot kg^{-1}$)，与姜伟[11]对重庆主城降尘的研究结果类

表 1　大气降尘中重金属含量的描述性统计/$mg \cdot kg^{-1}$

Table 1　Statistical values of heavy metal concentrations in atmospheric deposition/$mg \cdot kg^{-1}$

功能区	Cd	Cr	Ni	Pb
郊区	1.31	41.68	16.68	82.88
文教区	1.57	80.43	21.40	110.81
居住区	1.56	55.36	23.51	91.54
商业区	1.56	70.93	18.63	100.94
交通枢纽	1.69	94.31	23.42	105.87
工业居住混合区	1.83	93.39	22.28	114.98
平均值	1.59	72.68	20.99	101.17
标准差	0.172	21.08	2.77	12.11
变异系数/%	10.85	29.00	13.18	11.97

似. 通过变异系数可以看出,各重金属含量的变化范围都较小,表明 4 种重金属在各功能区的含量差别不大,可能是因为各个功能区之间的直线距离不远,大气环境相似.

目前,我国还没有关于大气重金属含量的限值规定,故与国内其他相关研究进行比较(表 2). 除 Ni 外,本研究的 Cd、Cr 和 Pb 含量均高于各重金属的重庆土壤背景值,分别比其高 10.4、0.5 和 3.3 倍,表明重庆主城的大气降尘到地表会影响土壤中 Cd、Cr 和 Pb 的含量,尤其是 Cd 和 Pb. 除南京的 Cd、Cr 以及准噶尔盆地外,本研究的 Cd、Cr、Ni 和 Pb 含量几乎均低于表中所列城市,且与其他城市的大气状况类似,Pb 和 Cr 的含量都较高,Cd 和 Ni 的含量都相对较低. 与对重庆主城降尘的研究比较[11],发现本研究的 4 种重金属的含量都更低,说明近十年重庆主城的大气质量有所改善. 与同处西南的攀枝花相比,重庆主城大气降尘的 4 种重金属的含量都较低,可能是由两个城市的经济发展情况、工业及城市化程度和产业结构不同所导致的.

重庆主城不同功能区大气降尘重金属含量的四季变化情况如图 2 所示. 各个功能区的大气降尘重金属含量存在明显的季节差异:对于重金属 Cd,郊区(SU)和文教区(EA)均为秋 > 冬 > 春 > 夏,居住区(RA)、交通枢纽(TH)和工业居住混合区(IR)为秋 > 夏 > 春 > 冬,商业区(CA)为秋 > 冬 > 夏 > 春; 对于重金属 Cr,郊区、文教区和商业区均为秋 > 冬 > 春 > 夏,居住区和工业居住混合区均为秋 > 夏 > 冬 > 春,交通枢纽为秋 > 春 > 冬 > 夏; 对于重金属 Ni,郊区为春 > 秋 > 冬 > 夏,文教区和商业区均为秋 > 冬 > 春 > 夏,居住区为秋 > 春 > 夏 > 冬,交通枢纽为秋 > 春 > 冬 > 夏,工业居住混合区为秋 > 夏 > 春 > 冬; 对于重金属 Pb,郊区、文教区、居住区和商业区均为秋 > 冬 > 春 > 夏,交通枢纽为秋 > 春 > 冬 > 夏,工业居住混合区为秋 > 夏 > 冬 > 春. 总体表现为各功能区大气降尘秋季重金属含量显著高于其他 3 个季节,尤其是 Cd 含量.

表 2 重庆主城大气降尘重金属含量与其他相关研究比较/mg·kg^{-1}

Table 2 Heavy metal content of atmospheric deposition in core urban areas of Chongqing in comparison with other studies/mg·kg^{-1}

地区-类型	Cd	Cr	Ni	Pb	地域
本研究	1.59	72.68	20.99	101.17	西南
重庆土壤背景值[14]	0.14	49.08	37.38	23.52	—
重庆主城-降尘[11]	13.70	188.83	39.12	916.60	西南
攀枝花-降尘[15]	4.65	431.02	73.69	284.86	西南
南京-降尘[16]	1.56	59.97	44.05	123.39	华东
珠三角-干沉降[17]	13	252	238	418	华南
北京-沉降[18]	3.19	85.97	47.64	152.27	华北
西安-降尘[19]	4.18	195.52	71.52	310.29	西北
准噶尔盆地-降尘[20]	0.5	40.0	29.3	14.2	西北

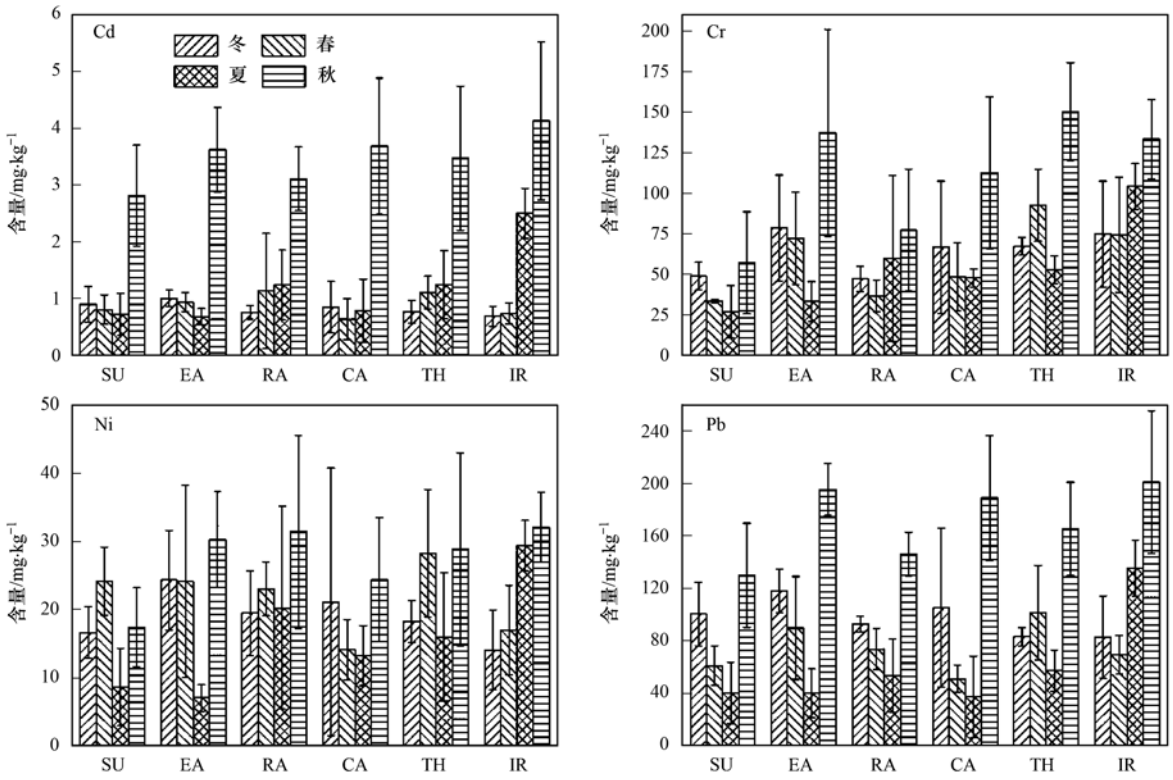

图 2 不同功能区大气降尘中各重金属含量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in heavy metal concentrations in atmospheric deposition in different functional areas

2.2　重庆主城不同功能区大气降尘重金属沉降通量及季节变化

2017 年 12 月至 2018 年 11 月的大气降尘重金属 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的沉降通量及季节变化如表 3 所示. 重庆主城的降尘不同重金属沉降通量的大小顺序总体为 Pb > Cr > Ni > Cd. 降尘中 4 种重金属的沉降通量均在工业居住混合区最大,在郊区的几乎都是最小,主要是因为工业居住混合区的大气除受一般人为活动的影响外,还受工业活动的影响,而郊区远离工业,一般人为活动也相对较少.

从表 3 中还可看出,Cd、Cr、Ni 和 Pb 沉降通量在同一功能区的不同季节也存在差异. 对于重金属 Cd,郊区(SU)和文教区(EA)均为秋 > 夏 > 春 > 冬,居住区(RA)、交通枢纽(TH)和工业居住混合区均为夏 > 秋 > 春 > 冬,商业区(CA)为春 > 夏 > 秋 > 冬,且春、夏和秋三季的沉降量远远大于冬季. 对于 Cr 元素,郊区为夏 > 春 > 秋 > 冬,文教区为秋 > 夏 > 春 > 冬,居住区、商业区和工业居住混合区均为春 > 夏 > 冬 > 秋,交通枢纽为春 > 夏 > 秋 > 冬. 对于重金属 Ni,郊区和交通枢纽均为春 > 夏 > 秋 > 冬,文教区为春 > 冬 > 夏 > 秋,居住区、商业区和工业居住混合区均为春 > 夏 > 冬 > 秋. 对于元素 Pb,郊区为夏 > 秋 > 春 > 冬,文教区为秋 > 夏 > 冬 > 春,居住区为春 > 秋 > 夏 > 冬,商业区为春 > 秋 > 冬 > 夏,交通枢纽为春 > 夏 > 秋 > 冬,工业居住混合区为夏 > 春 > 秋 > 冬. 总体表现为各功能区 4 种重金属冬季的沉降通量低于其他 3 个季节.

表 3　不同功能区大气降尘重金属沉降通量[1)]/mg·(m²·a)⁻¹

Table 3　Atmospheric heavy metal deposition flux in different functional areas/mg·(m²·a)⁻¹

元素	功能区	冬	春	夏	秋	平均值
Cd	SU	0.049 ±0.016	0.207 ±0.193	0.403 ±0.193	0.519 ±0.028	0.295 ±0.208
	EA	0.086 ±0.040	0.217 ±0.247	0.446 ±0.136	0.554 ±0.022	0.326 ±0.213
	RA	0.059 ±0.018	0.514 ±0.732	0.599 ±0.827	0.550 ±0.154	0.430 ±0.250
	CA	0.072 ±0.019	0.771 ±1.24	0.354 ±0.316	0.489 ±0.120	0.422 ±0.291
	TH	0.058 ±0.009	0.377 ±0.504	0.582 ±0.166	0.496 ±0.103	0.378 ±0.230
	IR	0.077 ±0.011	0.467 ±0.572	1.01 ±0.253	0.505 ±0.094	0.529 ±0.382
Cr	SU	2.66 ±0.416	4.96 ±1.38	5.91 ±2.54	4.17 ±2.12	4.42 ±1.38
	EA	6.09 ±2.53	7.91 ±2.80	8.59 ±3.65	8.68 ±6.35	7.82 ±1.20
	RA	3.53 ±0.215	6.81 ±2.78	10.86 ±9.75	4.78 ±1.72	6.50 ±3.21
	CA	5.99 ±2.86	12.92 ±10.54	8.67 ±1.17	5.97 ±3.28	8.39 ±3.28
	TH	5.36 ±1.89	13.60 ±10.15	9.55 ±0.723	8.26 ±1.57	9.19 ±3.42
	IR	8.21 ±2.68	18.32 ±3.91	15.06 ±4.63	6.10 ±0.142	11.92 ±5.73
Ni	SU	0.905 ±0.217	3.71 ±1.62	2.13 ±1.33	1.19 ±0.072	1.98 ±1.27
	EA	1.88 ±0.439	2.25 ±0.246	1.80 ±0.620	1.70 ±0.113	1.91 ±0.24
	RA	1.43 ±0.218	4.17 ±5.23	3.61 ±2.75	1.99 ±0.709	2.80 ±1.30
	CA	1.60 ±0.616	4.72 ±5.23	2.39 ±0.839	1.22 ±0.350	2.48 ±1.57
	TH	1.47 ±0.615	3.74 ±1.91	2.73 ±1.04	1.52 ±0.433	2.36 ±1.09
	IR	1.52 ±0.256	4.29 ±0.297	4.22 ±1.18	1.47 ±0.001	2.87 ±1.60
Pb	SU	5.47 ±1.36	8.95 ±3.23	9.31 ±4.71	9.10 ±1.71	8.21 ±1.83
	EA	9.63 ±3.01	9.43 ±2.56	10.39 ±5.80	11.64 ±4.24	10.27 ±1.00
	RA	7.08 ±1.55	13.51 ±4.71	9.59 ±4.90	9.64 ±2.50	9.96 ±2.65
	CA	8.89 ±2.45	13.90 ±11.83	6.80 ±5.74	9.47 ±1.31	9.76 ±2.99
	TH	6.54 ±2.09	13.13 ±5.86	10.15 ±0.450	9.02 ±1.32	9.71 ±2.73
	IR	8.99 ±1.13	18.48 ±3.13	19.95 ±8.06	9.14 ±1.03	14.14 ±5.89

1)表中数据为平均值 ± 标准差

本研究的重庆主城大气降尘 Cd 和 Pb 沉降通量比彭玉龙等[13]的研究中对应重金属的沉降通量小,Cr 和 Ni 的沉降通量则更大(表 4). 从表 4 中可知,重庆主城的降尘 Cd、Cr、Ni 和 Pb 沉降通量和国内外其他地区的一样,Cd 的沉降通量,均在 0 ~ 1.00 mg·(m²·a)⁻¹之间,且都远小于另外 3 种重金属的沉降通量. 与国内其他地区相比,除黑龙江大庆的 Cd 外,重庆主城降尘 Cd、Cr、Ni 和 Pb 沉降通量都低与其他地区; 与其他国家的城市比较,除日本东京湾和新加坡的 Cd 和 Ni 外,重庆主城降尘这 4 种重金属沉降通量都较其他国家的城市高.

2.3　大气降尘中重金属污染评价

2.3.1　潜在生态风险指数法

为了解重庆主城大气降尘中 Pb、Cd、Cr 和 Ni 元素的污染情况,采用 Hakanson[29]提出的潜在生态危害指数法评估这 4 种重金属对生态系统的潜在风

表 4 不同地区大气重金属沉降通量比较[1)]/mg·(m²·a)⁻¹

Table 4 Comparison of atmospheric heavy metal deposition flux in different regions/mg·(m²·a)⁻¹

地区	Cd	Cr	Ni	Pb
本研究	0.39	8.04	2.41	10.41
重庆主城(降水)[13]	0.44	2.90	2.22	30.25
浙东沿海 a[21]	0.75	14.13	6.34	35.43
湖北云梦 a[22]	0.67	19.35	5.79	16.57
广东广州 a[23]	1.00	9.86	—	17.00
黑龙江大庆 a[10]	0.17	17.58	9.69	15.71
日本东京湾 a[24]	0.39	6.2	6.8	9.9
法国西北部 a[25]	0.009	—	0.36	0.14
韩国大田 b[26]	0.023	1.03	0.52	1.77
美国洛杉矶 b[27]	—	1.93	2.15	5.84
新加坡 c[28]	0.78	4.16	10.14	8.84

1)由于各文献中数据有所不同,部分数据经过单位换算;a、b 和 c 分别表示干湿沉降、干沉降和湿沉降;"—"表示未测定

险,其计算公式如下:

$$E_i = \frac{T_i \cdot C_i}{B_i} \quad (1)$$

$$\mathrm{RI} = \sum E_i \quad (2)$$

式中,E_i 为单个重金属元素的潜在生态风险指数,RI 为多个重金属的综合潜在生态风险指数,T_i 为重金属 i 的生物毒性系数,Pb、Cd、Cr 和 Ni 取值分别为 5、30、2 和 5[30],C_i 为重金属 i 的实测含量(mg·kg⁻¹);B_i 为重金属的参比值(重庆土壤背景值,mg·kg⁻¹)[14].

潜在生态风险评价等级见表 5.

表 5 潜在生态风险评价指标的等级划分

Table 5 Relationships for E_i, RI, and potential pollution risk ranking

单个重金属潜在生态危害指数 E_i 范围	多个重金属综合潜在生态危害指数 RI 范围	金属潜在生态风险程度
<40	<50	Ⅰ生态危害低
40~80	50~100	Ⅱ 生态危害中等
80~160	100~200	Ⅲ 生态危害较高
160~320	200~400	Ⅳ 生态危害高
≥320	≥400	Ⅴ生态危害极高

各功能区的 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的 E_i 和 RI 见表 6. Cd 和 Pb 的潜在生态危害指数 E_i 在工业居住混合区中最大,Cr 的在交通枢纽最大,Ni 的在居住区的最大. 总体 E_i 由各元素在 6 个功能区的平均含量求得,Cd 的总体 E_i 最大,有极高的生态危害,Cr、Ni 和 Pb 的总体 E_i 都 <40,造成低生态危害,与田春晖等[16]对南京大气降尘的研究结果类似. 各个功能区 Cd 的 E_i 在 RI 中占比在 91.89%~93.08%之间,说明 Cd 是重庆主城 6 个功能区大气降尘潜在生态危害的关键元素. 综合潜在生态危害指数 RI 由大到小的顺序为工业居住混合区 > 交通枢纽 > 文教区 > 商业区 > 居住区 > 郊区,且各功能区的 RI 都大于 200,造成的生态危害高甚至达到极高.

表 6 重庆主城不同功能区大气降尘中重金属潜在生态风险指数

Table 6 The E_i and RI of heavy metals in atmospheric subsidence in core urban areas of Chongqing

功能区	单个金属潜在生态危害指数 E_i				RI
	Cd	Cr	Ni	Pb	
郊区	280.71	1.70	2.23	17.62	302.26
文教区	336.43	3.28	2.86	23.56	366.13
居住区	334.29	2.26	3.14	19.46	359.15
商业区	334.29	2.89	2.49	21.46	361.13
交通枢纽	362.14	3.84	3.13	22.51	391.63
工业居住混合区	392.14	3.81	2.98	24.44	423.37
总体	340.00	2.96	2.81	21.51	367.28

2.3.2 地累积指数法

地累积指数法是评价沉积物[31]、土壤[32]和大气降尘[33]中重金属元素的常用方法,它综合考虑了自然成岩作用引起的土壤背景值变化和人为活动造成的影响. 其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (3)$$

式中,C_n 为元素 n 在大气降尘中的含量(mg·kg⁻¹),B_n 为该元素的土壤背景值[14]. Muller 地累积指数分为 7 个等级:$I_{geo} \leq 0$,无污染;$0 < I_{geo} \leq 1$,无污染至中度污染;$1 < I_{geo} \leq 2$,中度污染;$2 < I_{geo} \leq 3$,中度污染至重度污染;$3 < I_{geo} \leq 4$,重度污染;$4 < I_{geo} \leq 5$,重度污染至严重污染;$I_{geo} > 5$,严重污染.

重庆主城区大气降尘重金属地累积指数见表 7,Cd、Cr、Ni 和 Pb 的地累积指数的大小顺序表明,Cd 的污染程度最重,其次是 Pb,Cr 和 Ni 几乎都是无污染,且总体为交通枢纽和工业居住混合区的较高,郊区的相对较低. 所有功能区 Cd 的地累积指数最大,交通枢纽和工业居住混合区的在 $3 < I_{geo} \leq 4$ 范围,为重度污染,其他 4 个功能区的在 $2 < I_{geo} \leq 3$ 范围,为中度污染至重度污染. 文教区、交通枢纽和工业居住混合区 Cr 的 I_{geo} 在 0~1 间,为无污染至中度污染,其他功能区的均小于 0,为无污染. 所有功能区的 Ni 的 I_{geo} 都小于 0,为无污染,所有功能区 Pb 的污染程度均为中度污染.

表 7 重庆主城不同功能区大气降尘重金属地累积指数

Table 7 Geoaccumulation index of heavy metals from atmospheric deposition in core urban areas of Chongqing

功能区	Cd	Cr	Ni	Pb
郊区	2.64	−0.821	−1.75	1.23
文教区	2.90	0.128	−1.39	1.65
居住区	2.89	−0.411	−1.25	1.38
商业区	2.89	−0.054	−1.59	1.52
交通枢纽	3.01	0.357	−1.26	1.59
工业居住混合区	3.12	0.343	−1.33	1.70

3 结论

(1)重庆主城大气降尘中,Pb 平均含量最大,其

次为 Cr,Cd 的最小,且 Cd 和 Pb 在工业居住混合区中的含量最高,Cr 和 Ni 分别在交通枢纽和居住区中含量最高. 不同功能区的大气降尘重金属含量存在明显的季节差异,总体表现为各功能区大气降尘秋季重金属含量显著高于其他 3 个季节.

(2)重庆主城大气降尘不同重金属沉降通量 Pb 最大,其次为 Cr,Cd 的最小,降尘中 4 种重金属沉降通量均在工业居住混合区最大,在郊区的几乎都是最小. 各功能区降尘中 4 种重金属沉降通量总体表现为冬季显著低于其他 3 个季节.

(3)潜在生态危害指数和地累积指数显示,Cd 有极高的生态危害和较高的污染,Cr、Ni 和 Pb 造成的生态危害低,且污染也较低. 工业居住混合区和交通枢纽具有高生态危害及较高的污染,郊区的生态危害和污染都相对较低.

参考文献:

[1] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.

[2] Nie X L, Wang Y, Li Y X, *et al*. Characteristics and impacts of trace elements in atmospheric deposition at a high-elevation site, southern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(29): 22839-22851.

[3] Wang Z X, Yao L, Liu G H, *et al*. Heavy metals in water, sediments and submerged macrophytes in ponds around the Dianchi Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 200-206.

[4] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4051-4059.
Xiong Q J, Zhao W J, Li D J, *et al*. Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4051-4059.

[5] 张忠地, 邵天杰, 卫佩茹. 开封市大气降尘中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(11): 156-162.
Zhang Z D, Shao T J, Wei P R. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological hazards in atmospheric dust in Kaifeng city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(11): 156-162.

[6] 伊丹, 王艳, 刘汝海, 等. 青岛市冬季降尘中重金属的形态分析及其环境风险评估[J]. 环境化学, 2019, **38**(9): 1990-1997.
Yi D, Wang Y, Liu R H, *et al*. Speciation analysis and environmental risk assessment of heavy metals in dustfall of Qingdao in winter[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(9): 1990-1997.

[7] Weerasundara L, Amarasekara R W K, Magana-Arachchi D N, *et al*. Microorganisms and heavy metals associated with atmospheric deposition in a congested urban environment of a developing country: Sri Lanka [J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 803-812.

[8] 陈泓霖, 邱国良. 衡阳市大气降尘中重金属污染特征及风险评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, **29**(5): 12-15, 24.
Chen H L, Qiu G L. Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of atmospheric dust in Hengyang City [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2019, **29**(5): 12-15, 24.

[9] Sobhanardakani S. Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran [J]. Biological Trace Element Research, 2019, **187**(2): 602-610.

[10] 汤洁, 李娜, 李海毅, 等. 大庆市大气干湿沉降重金属元素通量及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(2): 507-513.
Tang J, Li N, Li H Y, *et al*. Flux and source appointment of heavy metals from atmospheric dry and wet deposition in Daqing City, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, **42**(2): 507-513.

[11] 姜伟. 重庆主城降尘中六种金属及其化学形态研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
Jiang W. The investigation of the six metal elements and their chemical species in dust in Chongqing main city [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.

[12] Sun S Q, Wang D Y, He M, *et al*. Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Chongqing, China-based on moss bag technique [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **148**(1-4): 1-9.

[13] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2490-2496.
Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, *et al*. Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in Core Urban Areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2490-2496.

[14] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, **28**(2): 227-230, 251.
Li Z P, Chen Y C, Yang X C, *et al*. Assessment of potential ecological hazard of heavy metals in urban soils in Chongqing City [J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2006, **28**(2): 227-230, 251.

[15] 汪凝眉. 攀枝花市大气降尘源解析及风险评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Wang N M. Sources and eclogical risk assessment of heavy metal in atmospheric dust in the Panzhihua City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[16] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3118-3125.
Tian C H, Yang R Z, Gulizhaer Y, *et al*. Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3118-3125.

[17] 黄强, 宋建中, 彭平安. 珠江三角洲大气干沉降金属元素浓度和来源分析[J]. 地球与环境, 2013, **41**(5): 498-505.
Huang Q, Song J Z, Peng P A. Concentrations and sources of metal elements of dry deposition in the Pearl River Delta, South China[J]. Earth and Environment, 2013, **41**(5): 498-505.

[18] Guo L L, Lyu Y L, Yang Y Y. Concentrations and chemical forms of heavy metals in the bulk atmospheric deposition of Beijing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(35): 27356-27365.

[19] 陈莹, 赵剑强, 汤丹娜, 等. 西安市大气降尘重金属污染特征与生态风险[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(6): 154-159.

Chen Y, Zhao J Q, Tang D N, *et al*. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk of dust fall in Xi'an City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, **31**(6): 154-159.

[20] 杨静, 何静, 塔勒哈尔·库尔曼别克, 等. 准噶尔盆地南缘大气降尘中重金属的季节性规律和来源分析[J]. 新疆环境保护, 2019, **41**(3): 22-27, 38.
Yang J, He J, Kurmanbek T, *et al*. Seasonal regularity and sources of heavy metals in atmospheric dust fall in the Southern Margin of Jung-gar Basin [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2019, **41**(3): 22-27, 38.

[21] 黄春雷, 宋金秋, 潘卫丰. 浙东沿海某地区大气干湿沉降对土壤重金属元素含量的影响[J]. 地质通报, 2011, **30**(9): 1434-1441.
Huang C L, Song J Q, Pan W F. Impact of dry and wet atmospheric deposition on content of heavy metals in soils along coastal areas of eastern Zhejiang Province [J]. Geological Bulletin of China, 2011, **30**(9): 1434-1441.

[22] 徐宏林, 李定远, 杨军, 等. 湖北省云梦县重金属元素大气干湿沉降通量初探[J]. 资源环境与工程, 2015, **29**(6): 816-821.
Xu H L, Li D Y, Yang J, *et al*. Preliminary study on flux of atmospheric dry and wet deposition of heavy metal elements in Yunmeng County, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2015, **29**(6): 816-821.

[23] Ye L, Huang M J, Zhong B Q, *et al*. Wet and dry deposition fluxes of heavy metals in Pearl River Delta Region (China): characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **70**: 106-123.

[24] Sakata M, Tani Y, Takagi T. Wet and dry deposition fluxes of trace elements in Tokyo Bay [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(23): 5913-5922.

[25] Connan O, Maro D, Hébert D, *et al*. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France [J]. Atmospheric Environment, 2013, **67**: 394-403.

[26] Lee P K, Choi B Y, Kang M J. Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk [J]. Chemosphere, 2015, **119**: 1411-1421.

[27] Sabin L D, Lim J H, Stolzenbach K D, *et al*. Atmospheric dry deposition of trace metals in the coastal region of Los Angeles, California, USA[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, **25**(9): 2334-2341.

[28] Hu G P, Balasubramanian R. Wet deposition of trace metals in Singapore[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **144**(1-4): 285-300.

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

[30] Kouidri M, Youcef N D, Benabdellah I, *et al*. Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments from coast of Ain Temouchent (Algeria)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, **9**(5),doi: 10.1007/s12517-016-2377-y.

[31] Dai L J, Wang L Q, Li L F, *et al*. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 1433-1444.

[32] Wu W, Wu P, Yang F, *et al*. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility [J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 53-61.

[33] Cai K, Li C, Na S. Spatial Distribution, pollution source, and health risk assessment of heavy metals in atmospheric depositions: A case study from the sustainable city of Shijiazhuang, China[J]. Atmosphere, 2019, **10**(4), doi: 10.3390/atmos10040222.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 12

Dec. 15, 2020

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China ····· YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, *et al.* (5215)

Dynamic Assessment of $PM_{2.5}$ Health Damage Value in China from 2015 to 2018 ····· LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)

Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of $PM_{2.5}$ in China from 2011 to 2017 ····· YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, *et al.* (5236)

Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to $PM_{2.5}$ in the Guanzhong Area ····· HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, *et al.* (5245)

Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City ····· JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, *et al.* (5256)

Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of $PM_{2.5}$ in a Northwest Industrial City ····· YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, *et al.* (5267)

Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric $PM_{2.5}$ and Its Sources Based on the PMF Model ····· DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, *et al.* (5276)

Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing ····· ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, *et al.* (5288)

Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019 ····· KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, *et al.* (5295)

Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China ····· JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, *et al.* (5306)

Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (5316)

Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O_3 in Shijiazhuang ····· WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, *et al.* (5325)

Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen ····· WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, *et al.* (5336)

Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives ····· LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, *et al.* (5345)

Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China ····· MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, *et al.* (5352)

Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower ····· HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, *et al.* (5362)

Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions ····· ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, *et al.* (5371)

Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area ····· QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, *et al.* (5381)

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments ····· ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, *et al.* (5389)

Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City ····· CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, *et al.* (5400)

Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin ····· JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, *et al.* (5410)

Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin ····· ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, *et al.* (5419)

Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province ····· WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)

Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake ····· LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, *et al.* (5438)

Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater ····· YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, *et al.* (5448)

Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers ····· SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, *et al.* (5458)

Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake ····· SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, *et al.* (5470)

Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar ····· WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, *et al.* (5480)

Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi_2MoO_6/Bi_2S_3 Heterojunction ····· HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, *et al.* (5488)

Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe_3O_4@UiO-66 ····· YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, *et al.* (5500)

Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons ····· LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, *et al.* (5509)

Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW ····· GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, *et al.* (5518)

Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems ····· SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, *et al.* (5527)

Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria ····· YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, *et al.* (5535)

Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(Ⅱ)-Activated Calcium Peroxide ····· BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, *et al.* (5544)

Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China ····· ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, *et al.* (5552)

Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China ····· DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, *et al.* (5562)

Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils ····· WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, *et al.* (5571)

Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong ····· YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, *et al.* (5579)

DA-6 and GLDA Enhanced *Pancium virgatum* L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils ····· WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, *et al.* (5589)

Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α-Fe_2O_3/Fe_3O_4/C Using a Bamboo Template on As(Ⅴ) Contaminated Soils ····· ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, *et al.* (5600)

Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in *Zophobas morio*: Effects of Gut Microbiota ····· YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, *et al.* (5609)

Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium ····· HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)

Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in *Bothriochloa ischaemum* in Copper Tailings ····· JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)

Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water ····· CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, *et al.* (5636)

Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake ····· HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, *et al.* (5648)

Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model ····· XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, *et al.* (5656)

Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N_2O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils ····· XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, *et al.* (5668)