

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
嗜碱降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例

姚静波,王明新*,齐今笛,孙向武,张文艺

(常州大学环境与安全工程学院,常州 213164)

摘要:在常州环城高架道路两侧 6 个住宅小区不同楼层采集 126 个灰尘样品,测定 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 含量,分析其化学形态和垂直分布特征,采用富集系数和风险评价指数评价其污染程度和生物有效性,并进行潜在生态风险评价和健康风险评价。结果表明,灰尘中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 含量均值分别为 181.95、709.99、211.24、2.76、101.59 和 257.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均远大于背景值。灰尘中 Cd 的富集系数为 33.05,富集程度为强烈,Cu、Pb 和 Zn 的富集程度为显著富集,它们可能受到自然源、交通源和区域废气传输的综合影响,Ni 和 Cr 富集系数较低,可能主要受自然源影响。随楼层高度的上升,Cd 含量呈增加趋势,Pb 和 Zn 含量呈先增加后降低趋势,Cu 含量无显著变化。Zn、Cd、Cu 和 Pb 主要以活性态存在,生物有效性较高,Ni 和 Cr 以残渣态为主,生物有效性较低。改进的潜在生态风险评价结果表明,Cd 的潜在生态风险极高,对多元素的潜在生态风险起主导作用,且对高层楼的潜在生态风险较大,其它重金属潜在生态风险为中低级。健康风险评价结果表明,Cr 对儿童的致癌风险超过安全阈值,其它重金属对成人与儿童致癌风险及非致癌风险均在安全域之内。

关键词:高架道路;灰尘重金属;垂直分布;化学形态;潜在生态风险;健康风险

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1807-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201611043

Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road: A Case Study in Changzhou

YAO Jing-bo, WANG Ming-xin*, QI Jin-di, SUN Xiang-wu, ZHANG Wen-yi

(College of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Totally 126 samples of windowsill dust were collected from different floors along elevated road in Changzhou. The concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Ni and Cr were determined, and the vertical distribution and chemical speciation were analyzed. The enrichment factor, bioaccessibility, potential ecological risk and health risk were evaluated. The results showed that the average contents of Cu, Zn, Pb, Cd, Ni and Cu were 181.95, 709.99, 211.24, 2.76, 101.59 and 257.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, which were all higher than the background value. The enrichment factor of Cd was 33.05, with enrichment degree of strongly enriched. The enrichment degrees of Cu, Pb and Zn were all significantly enriched. These four heavy metals may come not only from transportation source, but also from natural source and regional industrial polluted gas. The enrichment factors of Ni and Cr were low, which may result from natural source. With the elevation of house height, the concentration of Cd increased, the concentrations of Pb and Zn increased first and then decreased, while Cu showed no significant differences. Zn, Cd, Cu and Pb mainly existed in the active form, while Ni and Cr mainly existed in the residual form. The bioaccessibility of Zn and Cd was high, while that of other heavy metals was low. The modified potential ecology risk evaluation results showed that the risk of Cd was extremely high, and contributed mainly to the potential risk index of multi-element. The Cd from the windowsill of high height showed higher potential ecological risk. The carcinogenic risk of Cr to children was higher than the threshold value, while the carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of other metals to children and adults were all below the safety thresholds.

Key words: elevated road; heavy metals in dust; vertical distribution; chemical speciation; potential ecological risk; health risk

灰尘是由悬浮在空气中的微粒所组成的不均匀分散体系,其颗粒的直径通常小于 500 μm ,主要来自工业源、交通源和地表扬尘等。随着城市化和工业化的迅速发展,城市灰尘污染问题严重,成为霾天气的重要诱因之一,是重金属等多种污染物质的源和汇^[1],影响人们的正常生活和工作,诱发人类的呼吸道疾病。目前已有较多学者对街道^[2~4]、学校、工业园区等的地面^[5,6]或室内灰尘重金属污染的来源、分布特征、污染水平、环境风险^[7~9]和健

康风险^[10~12]等进行了深入研究。然而,这些研究主要关注不同功能区道路灰尘重金属污染灰尘,而很少关注不同高度灰尘重金属污染特征。但是随着城市化的迅猛发展和私家车保有量的大幅度增加,地

收稿日期: 2016-11-06; 修订日期: 2016-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641032); 江苏省政策引导类计划(产学研合作)——前瞻性联合研究项目(BY2015027-08); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 姚静波(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境模拟、评价与修复, E-mail: 2440185504@qq.com

* 通信作者, E-mail: wmxcau@163.com

面道路已经无法满足城市交通需求,许多城市纷纷建造高架道路,由于交通便捷,高架道路两侧开发了大量的住宅小区.与地面道路相比,高架道路的车流量更大,然而高架道路两侧建筑物灰尘重金属污染问题尚未见报道.此外,针对灰尘重金属污染风险的评价方法,如污染指数法^[13]、潜在生态风险评价法^[14]、地积累指数法^[15]等,仅考虑灰尘重金属含量、生理毒性的影响,而没有考虑重金属化学形态的影响.

常州市地处苏南中部经济发达区,经济发展模式具有典型的苏南经济特征.近年来常州市城市化发展迅速,城区不断向南和东南方向扩张.为了缓解市内交通拥堵问题,常州市于2008年建成了一条环绕市区的高架道路.本文以该高架道路为研究对象,在其两侧高层住宅小区采集不同楼层户外窗台灰尘样品,分析其重金属含量、富集系数、化学形态的垂直分布特征,并采用考虑了灰尘重金属含量、化学形态和生理毒性的改进潜在生态风险评价法进行环境风险评价,最后进行健康风险评价,旨在为高架道路及周边灰尘重金属污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

常州市环绕市区的高架道路总长度为29.25 km,东西南北4个路段分别为青洋路高架、龙江路高架、龙城大道高架和长虹路高架.本文采样时间为2014年4月,选择至少保持3 d晴朗、干燥、无风的天气进行采集.为减少随机因素干扰,本文选择在户外窗台上采集长时间未清扫的积尘.每个采样点采集2 g左右灰尘于自封袋中,排尽其中空气,将袋子密封,贴上对应标签,记录采样时间、地点和风向等信息后,整理带回实验室做进一步处理.本文以该高架道路两侧的高层住宅区为研究对象,每条高架道路两侧选择1~2个住宅小区作为代表,共选择了6个住宅小区(图1)所示.在每个采样点选择垂直于高架150 m范围内的连续3幢住宅的1、4、7、10、13、16和19层(分别称为F1、F4、F7、F10、F13、F16和F19)分别采样,全部样点共计采集灰尘样品126个.

1.2 分析方法

化学形态分析采用改进的BCR连续提取法^[16~19]逐步提取3种化学形态:酸可提取态(S1)、可还原态即铁锰氧化物(S2)、可氧化态即有机结合态(S3),最后剩余残渣为第4种化学形态:残渣态



图1 灰尘采样点断面分布示意

Fig. 1 Outdoor dust sampling sections

(R).

1.2.1 富集系数

富集系数(EF)是一种广泛应用于评价灰尘、土壤或沉积物中重金属污染程度的评价指标^[20],可反映环境介质中微量元素的富集或浓缩程度.一般选择迁移过程中性质较稳定的元素作为参比元素,例如Al、Fe、Ti、Si、Sr、K等^[21~24].富集系数的计算方法如下:

$$EF = [C_x/C_{ref}]_{\text{sample}} / [C_x/C_{ref}]_{\text{background}} \quad (1)$$

式中,分子的 C_x 为样品重金属含量;分子的 C_{ref} 为参比元素含量;分母的 C_x 为样品重金属的背景值;分母的 C_{ref} 为参比元素的背景值,本文选取Fe作为参比元素,以江苏省土壤背景值为参照标准^[25,26].EF可用来判断污染源是人为源还是自然源(EF值接近于1则认为是自然源,若EF值大于10则认为主要来自人为源)^[22,24],其数值越大说明人为污染越严重.此外,根据EF大小可将重金属的富集程度分为5种级别^[23]: $EF \leq 2$,轻微富集,污染级别为1; $2 < EF \leq 5$,中度富集,污染级别为2; $5 < EF \leq 20$,显著富集,污染级别为3; $20 < EF \leq 40$,强烈富集,污染级别为4; $EF > 40$,极强富集,污染级别为5.

1.2.2 环境风险评价指数

环境风险评价指数(RAC)是基于重金属化学形态的环境风险表征指标,通常采用酸可提取态重金属的质量分数来表示,可以反映重金属的活性、迁移能力和生物有效性^[27,28].低于1%,没有环境风险;1%~10%,存在较低环境风险;11%~30%,存在中等环境风险;31%~50%,存在较高环境风险;大于50%,存在很高的环境风险.

1.2.3 改进的潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法是由瑞典学者 Hakanson

在 1980 年建立的评价重金属污染及生态风险性的方法^[29],该方法从重金属的生物毒理角度出发,综合考虑环境介质中重金属含量、种类等因素,评价单个和多种重金属污染物的潜在生态危害程度,与单纯采用重金属元素污染程度相比,能更好地反映重金属的潜在危害。

然而,重金属的潜在生态风险不仅与重金属含量和毒性有关,也与重金属的化学形态有关,不同化学形态的重金属生物毒性存在一定的差异。因此,本文采用重金属的酸可提取态的质量分数和修正系数对传统潜在生态风险指数法进行改进,改进的潜在生态风险评价方法的计算公式如下^[30]。

$$\overline{RI} = \sum_{i=1}^n \overline{E_r^i} \tag{2}$$
$$\overline{E_r^i} = T_r^i \times \overline{C_f^i} \tag{3}$$
$$\overline{C_f^i} = \overline{C^i}/C_n^i \tag{4}$$
$$\overline{C^i} = C^i \times \gamma \tag{5}$$

$$\gamma = A\beta + (1 - A) \tag{6}$$

式中, $\overline{RI}$ 为改进的多元素潜在生态风险指数, $\overline{E_r^i}$ 为改进的单元素潜在生态风险系数, T_r^i 为重金属*i*的毒性响应系数, $\overline{C_f^i}$ 为重金属的超标倍数, $\overline{C^i}$ 为修正的重金属*i*的含量, C_n^i 为重金属*i*的背景值, C^i 为重金属*i*的含量, γ 为重金属含量修正系数, A 为重金属酸可提取态百分比, β 是酸可提取态毒性修正系数^[27](表 1)。其中重金属生态毒性响应系数为:5(Cu)、1(Zn)、5(Pb)、30(Cd)、5(Ni)和2(Cr)。改进潜在生态风险的分级方法见表 2。

表 1 风险指数对应的修正系数

Table 1 Correction factor of different risk index

风险指数	RAC/%	β
无	<1	1.0
低级	1~10	1.0
中级	11~30	1.2
高级	31~50	1.4
很高	>50	1.6

表 2 改进潜在生态风险评价指数分级标准

Table 2 Indices and grade of potential ecological risk evaluation

$\overline{E_r^i}$	单元素潜在生态风险等级	$\overline{RI}$	多元素潜在生态风险等级
$\overline{E_r^i} < 40$	低级	$\overline{RI} < 150$	轻微
$40 \leq \overline{E_r^i} < 80$	中级	$150 \leq \overline{RI} < 300$	中等
$80 \leq \overline{E_r^i} < 160$	高	$300 \leq \overline{RI} < 600$	高
$160 \leq \overline{E_r^i} < 320$	很高	$\overline{RI} \geq 600$	极高
$\overline{E_r^i} \geq 320$	极高		

1.3 质量控制

本文质量控制和质量评估包括对照空白、平行样分析和标准溶液分析。即每个样品重金属含量测定设置 3 个平行样,最后取值均为平均值。每批次制作测定样品的同时,均设置空白样,同时向实验样品中加入一定量用高纯的 Cu(NO₃)₂、Zn(NO₃)₂、Pb(NO₃)₂、Cd(NO₃)₂、Ni(NO₃)₂ 和 Cr(NO₃)₃ 配置的标准溶液,来计算火焰原子吸收法测定的 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 等 6 种重金属元素的加标回收率,评定测定结果的准确性。结果表明高架两侧各楼层灰尘中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 的回收率平均值分别为:86.64%、88.52%、105.92%、109.12%、91.03% 和 83.82%,可认为消解后的测量值和标准值之间有较好的拟合度^[31]。

1.4 健康风险评价模型

采用由美国环境保护署^[32]和荷兰国家公共卫生和环境保护研究所^[33]提供的健康风险评价模型和参数来评估灰尘重金属的健康风险,模型中暴露

量计算参数如表 3 所示。儿童和成人摄入灰尘有 3 个途径:食入、吸入和皮肤接触^[32,34~36]。灰尘 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 和 Cr 都具有慢性非致癌健康风险,同时 Cd、Ni 和 Cr 还具有致癌风险^[37]。

1.4.1 暴露剂量

通过计算各重金属每个途径的日暴露剂量反映其暴露特征。食入、吸入和接触这 3 种暴露途径日暴露剂量按照公式(7)~(9)计算^[32,34]:

$$D_{ing} = \frac{c \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \tag{7}$$

$$D_{inh} = \frac{c \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \tag{8}$$

$$D_{dermal} = \frac{c \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \tag{9}$$

1.4.2 风险评价

通过暴露剂量和表 4 中各金属的参考剂量 R_D和斜率因子 SF^[35,39]按照公式(10)、(11)分别计算非致癌风险商(HQ)和致癌风险商(CR)。

表 3 暴露量计算模型参数取值
Table 3 Particle exposure factors for dose calculation models

因素	定义	单位	参数		文献
			儿童	成人	
<i>c</i>	暴露点含量	mg·kg ⁻¹	几何平均数	几何平均数	本研究
IngR	摄入率	mg·d ⁻¹	200	100	[39]
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	180	180	[36]
ED	暴露时间	a	6	24	[39]
BW	平均体重	kg	15	70	[35]
AT(非致癌)	平均暴露时间	d	65 700	65 700	[35]
AT(致癌)	平均暴露时间	d	25 550	25 550	[36]
InhR	吸入率	m ³ ·d ⁻¹	7.6	20	[34]
PEF	颗粒排放因子	m ³ ·kg ⁻¹	1.36E+09	1.36E+09	[39]
SA	皮肤暴露面积	cm ²	2 800	5 700	[39]
SL	皮肤依赖因素	mg·(cm ² ·d) ⁻¹	0.2	0.7	[39]
ABS	皮肤吸收因素		0.001	0.001	[38]

表 4 参考的剂量和斜率因子
Table 4 Reference dose and slope factor of metals in this study

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr
食入参考剂量(R _f D _{ing})	4.00E-02	3.00E-01	3.50E-03	1.00E-03	2.00E-02	3.00E-03
吸入参考剂量(R _f D _{inh})	4.02E-02	3.00E-01	3.52E-03	5.00E-04	2.06E-02	2.86E-05
接触参考剂量(R _f D _{dermal})	1.20E-02	6.00E-02	5.25E-04	5.00E-06	5.40E-03	6.00E-05
斜率因子(SF)				3.80E-01	8.40E-01	4.20E+01

$$HQ = D/R_fD \tag{10}$$

$$CR = D \cdot SF \tag{11}$$

非致癌风险的危险指数(HI)等于3种暴露途径非致癌风险的总和^[36,39,40]。当HI<1时,表示重金属的健康风险可以忽略;当HI>1时,表示存在重金属健康风险,其值越大,健康风险就越大^[38]。致癌风险指数(CR)是指一个人一生中暴露于任何途径的致癌的概率,正常情况下其安全阈值为10⁻⁶~10⁻⁴^[35],即意味着一万或一百万个人当中有一个人是癌症患者^[38],如果低于这个值说明不存在致癌风险。

2 结果与讨论

2.1 重金属总量和富集系数分布特征

常州市高架道路两侧灰尘中重金属含量和富集系数均值及变异系数见表5。所有重金属含量均超过江苏省土壤重金属背景值,其中Pb平均含量达到《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中的二级标准限值,其余重金属均不同程度地超过二级标准限值。其中Cd含量超出背景值32.23倍,是二级标准限值的9.13倍;Zn和Cu分别是背景值的10.96倍和7.76倍,是二级标准值的3.55倍和3.64倍。

各不同重金属的富集系数均值从大到小依次为: Cd>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni(表5),富集程度均

在中度及以上,存在人为污染,富集程度最高的Cd的富集系数为33.05,达到了强烈级别,表明Cd主要受人为源影响,这与喻超等^[41]的研究结果相似;Cu、Zn和Pb富集程度范围在7.85~11.00,程度为显著,也存在一定的人为污染。而Ni和Cr的富集程度较低,人为源影响较小。

垂向分布上,各重金属含量随着楼层高度的增加的变化存在差异(图2),可能与重金属的来源不同有关^[42]。Zn含量随楼层升高先增大后减小,在楼层7达到峰值,其富集系数的垂直分布呈现相似的变化规律,1~7层呈增加趋势,可能是因为4层跟高架道路基本平行,7层以下可能受到地面道路和高架道路的双重影响,10层以后的影响开始降低,因此Zn污染集中于中低层。Cr含量随着楼层的升高有上升的趋势,但其富集系数较小,因此灰尘中的Cr可能主要来自于自然源,即地表扬尘的悬浮,它随着气流输送而逐渐沉降,使得高层Cr含量和富集系数相对较高。Pb的含量和富集系数随楼层升高而减小,由于目前机动车多采用无铅汽油,尾气铅污染较少,但地表残留量较大^[43],因此其主要来源可能是地表残留的Pb。灰尘Cd含量和富集系数随楼层升高而增大,富集系数在18.32~44.20之间,可见灰尘中的Cd主要来自人为源,可能受到地面道路、高架道路交通源和区域废气传输的多重影

响^[44]。灰尘 Cu 和 Ni 含量随高度变化很小,但 Cu 传输的影响。Ni 的富集系数很小,可能主要来自于自然源,楼层高度的影响较小。

表 5 灰尘重金属含量和富集系数的均值及变异系数

Table 5 Variability and mean of elements and enrichment factor of heavy metals in dust							
指标	项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr
重金属含量	平均值/mg·kg ⁻¹	181.95	709.99	211.24	2.74	101.60	257.55
	标准差	9.87	79.17	36.95	0.25	9.89	28.67
	变异系数/%	5.42	11.15	17.49	8.91	9.73	11.13
江苏省土壤重金属背景值/mg·kg ⁻¹		23.40	64.80	22.00	0.085	32.80	75.60
《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)		50	200	250	0.3	40	150
重金属富集系数	平均值	7.85	11.00	9.48	33.05	3.16	3.47
	富集等级	显著	显著	显著	强烈	中度	中度
	标准差	1.10	1.54	0.71	7.46	0.61	0.78
	变异系数/%	14.02	14.02	7.48	22.57	19.38	22.58

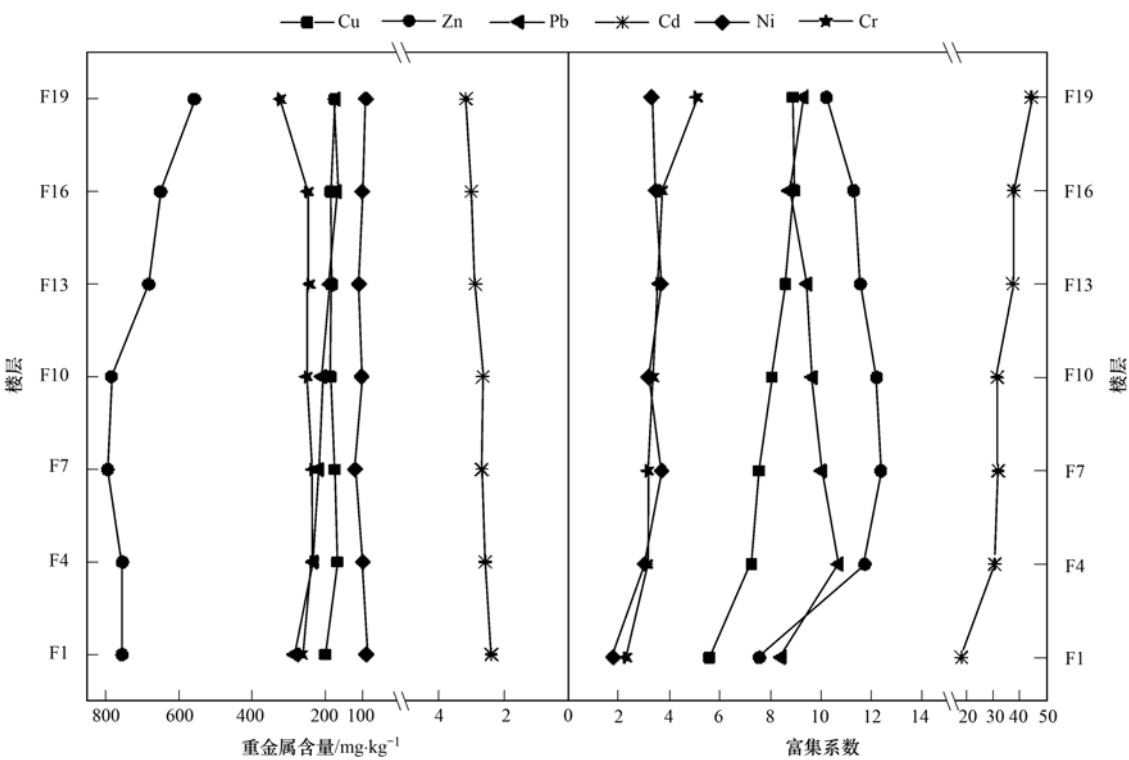


图 2 不同楼层灰尘重金属含量和富集系数

Fig. 2 Contents of heavy metals and enrichment factors in outdoor dust on different floors

2.2 重金属化学形态及垂直分布特征

通过改进 BCR 连续提取方法对灰尘中不同重金属进行化学形态进行分析(图 3),结果表明,Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 4 种重金属主要以活性态(即 S1 + S2 + S3)存在,说明这 4 种重金属的生物有效性较高;Ni 和 Cr 主要以残渣态存在,生物有效性较低.其中 Cd 和 Zn 主要以酸可提取态和可还原态为主,其范围分别是 44.78% ~ 56.12% 和 36.75% ~ 70.85%.垂向分布上,楼层 1 的活性态 Zn 比例显著高于其它楼层,活性态 Cd 比例则是先增后减.邓

高松等^[45]对道路灰尘重金属的化学形态分析结果与本文结果相异,这可能与灰尘重金属来源差异有关. Pb 以残渣态和可氧化态为主,两种形态总范围是 62.91% ~ 72.09%,随楼层变化先减小后增大; Cu 主要以可氧化态存在,范围分别是 44.34% ~ 72.10%,不同楼层高度的可氧化态 Cu 差异较小;Ni 和 Cr 主要以残渣态形式存在,其范围分别是 56.35% ~ 62.99% 和 68.57% ~ 79.94%,随楼层升高,先减小后增大呈 U 型分布. Pb、Cu、Ni 和 Cr 化学形态分布与 Banerjee^[46]和冯茜丹等^[47]的研究结

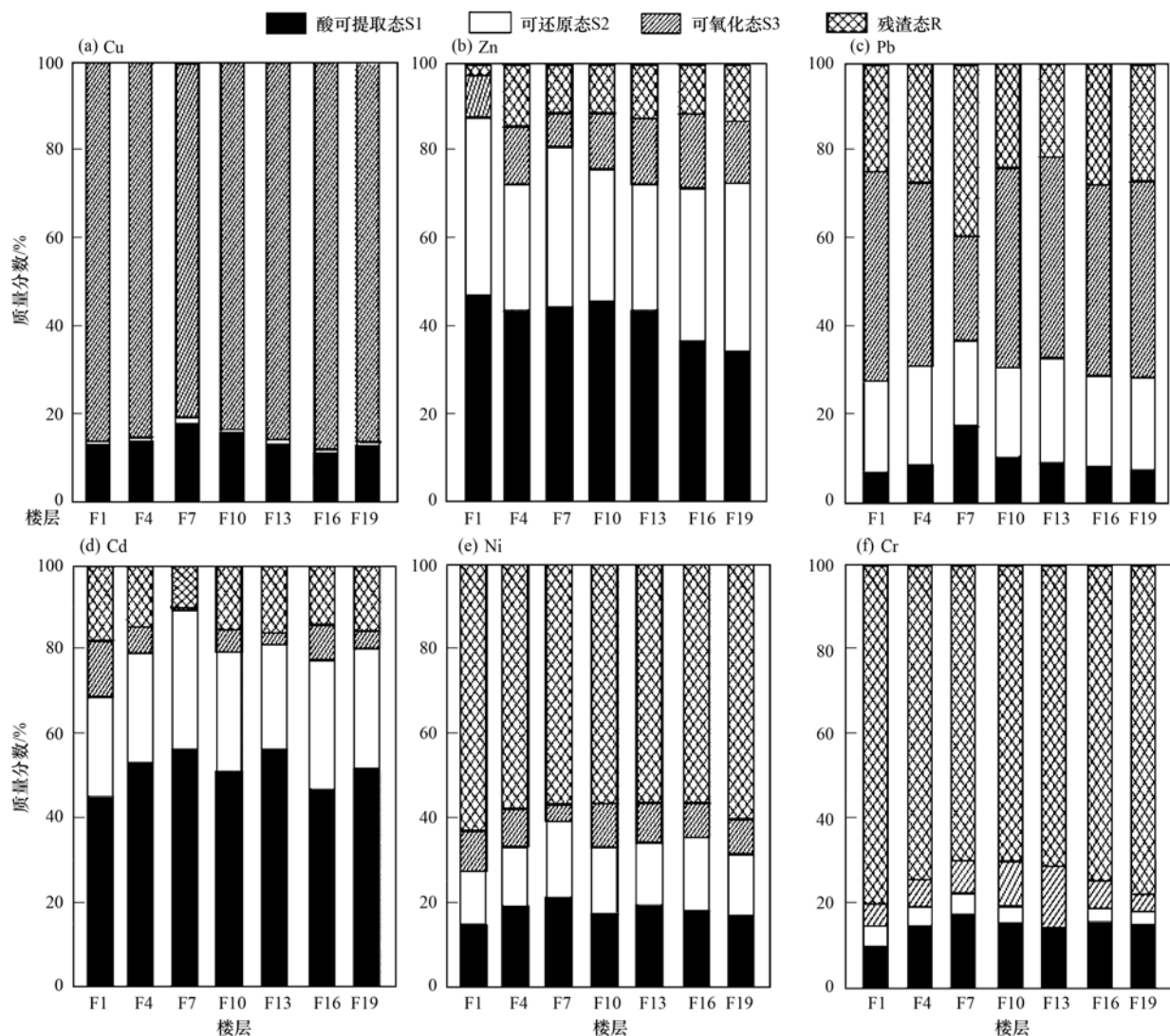


图3 不同楼层重金属化学形态分布

Fig. 3 Chemical speciation distribution of heavy metals in outdoor dust on different floors

果一致,这4种重金属化学形态可能受自身基体的影响较大。可见,灰尘中重金属化学形态分布受到其自身基体和来源的双重影响,但不同重金属化学形态分布的影响因素有所差异。

2.3 灰尘重金属环境风险评价指数和潜在生态风险指数

从环境风险评价指数(RAC)来看,整体而言顺序依次是: $Cd > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb$ 。其中Cd和Zn的风险指数分别是44.73%~52.94%和36.00%~44.61%,污染等级处于中等及以上,环境风险相对较大;Cu、Ni和Cr的风险指数范围分别是8.50%~14.20%、14.74%~21.25%和10.13%~17.47%,存在较低环境风险或中等环境风险;Pb的风险评价指数最低,这可能主要是因为Pb容易在环境介质中发生吸附和沉淀。从垂向分布看,Cd的环

境风险指数随楼层升高先增大后减小,在楼层4达到峰值,随即减低;Zn环境风险指数随楼层升高而减小,Zn和Cd均在楼层13层后急剧减小;Ni、Cr、Cu和Pb的环境风险指数变化相似,这与化学形态分布有一定相关性,随着楼层的升高呈现先增大后减小的趋势,与邵莉等^[48]的研究结果相似,表明这4种重金属粒子的垂向扩散特征可能较为相似。但是风险评价指数仅考虑了灰尘重金属中的酸可提取态比例,没有考虑重金属总量及毒性,因此评价结果实际上仅能反映灰尘中重金属的生物有效性,只是RAC仅考虑了活性最高的酸可提取态重金属比例,而没有考虑其它活性如可氧化态和可还原态重金属的比例。

用改进的潜在生态风险评价方法评价结果表明(图4),重金属单元素潜在生态风险系数依次为: Cd

> Pb > Cu > Ni > Zn > Cr. 这与环境风险评价指数的大小顺序有所不同,是因为潜生态风险评价法综合考虑了灰尘重金属的总量、形态和生理毒性. Cd 的潜在生态风险系数远高于其他重金属,系数达 994.45 ~ 1 330.59,存在极高潜在生态风险;Cu 和 Pb 的潜在风险系数相近,系数范围分别为 35.92 ~ 42.87 和 38.74 ~ 64.69,存在中级和低级潜在生态风险;Cr、Zn 和 Ni 潜在生态风险系数范围为 6.19 ~ 18.30,处于低潜在生态风险. Cd 的潜在生态风险指数随楼层升高而增大,对中高楼层住户存在较大的潜在生态风险;Pb 和 Cu 潜在生态风险系数随楼

层升高而减小;Ni、Zn 和 Cr 的垂向波动较小,且潜在生态风险程度低. 多元素潜在生态风险指数垂向分布范围为 1 136.36 ~ 1 142.45,均处于极高潜在生态风险,其中 Cd 的贡献率范围为:87.50% ~ 92.40%,对多元素潜在生态风险指数具有主导作用,因此是控制高架道路两侧建筑物灰尘重金属污染的关键. 多元素潜在生态风险指数总体上随楼层高度的增加呈上升后下降的趋势,Cd、Cu 和 Pb 等 3 种重金属对多元素潜在生态风险指数的贡献较大,因此对多元素潜在生态风险指数的变化趋势有着较显著的影响.

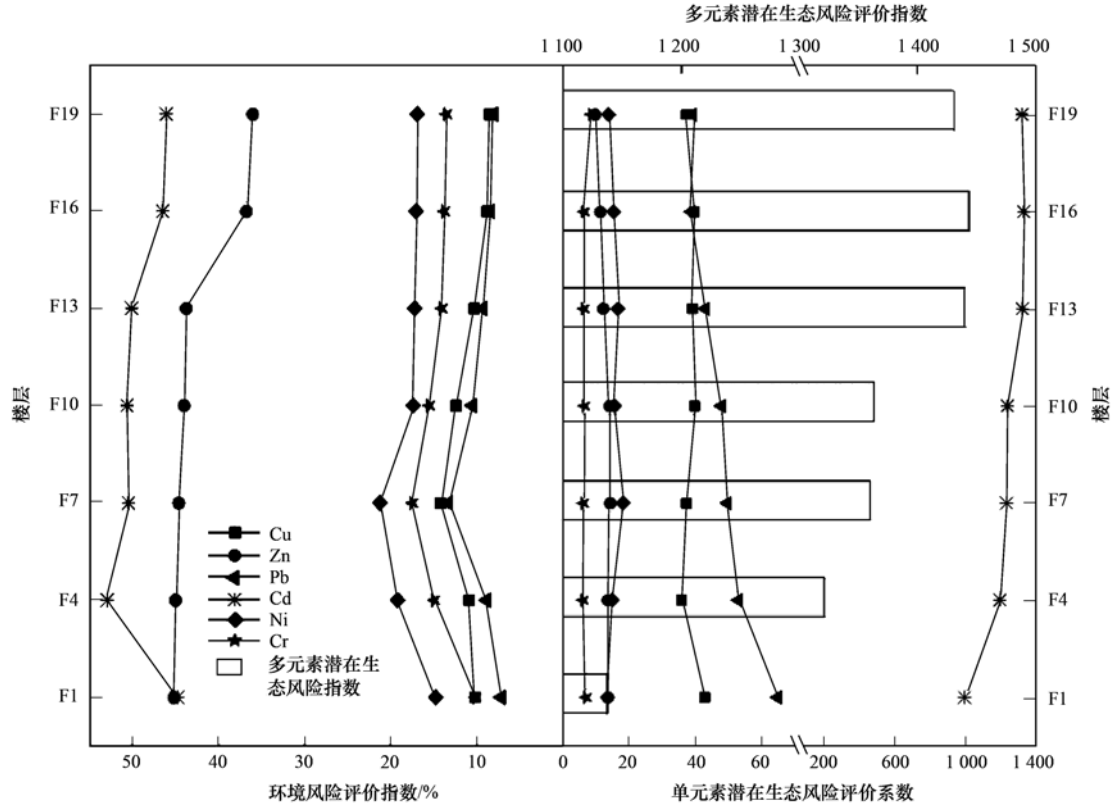


图4 不同楼层灰尘重金属风险评价指数和潜在生态风险评价

Fig. 4 Risk assessment code and potential ecological risk indices of heavy metals in outdoor dust on different floors

2.4 健康风险评价

灰尘重金属对儿童和成人的健康风险评价指数几何均值见图5. 重金属非致癌风险指数的顺序为: Zn > Cd > Cr > Pb > Cu > Ni,成人和儿童重金属的非致癌风险指数均小于1,处于安全阈值内,不存在非致癌风险. 但是重金属对儿童的非致癌风险指数和致癌风险指数均大于成人,这与儿童的体质和暴露剂量较大有关. 重金属致癌风险指数的顺序为:Cr > Cd > Ni,Cr 的致癌风险指数远超过另外两种重金属,与富集系数分布规律不呈现正相关,这与李如忠等^[49]和王晓云等^[50]的研究结果一致,主要

是因为不同重金属背景含量和毒性大小不同所致,其中 Cr 的斜率因子较大,致癌风险较高. 此外,Cr 对儿童的致癌风险指数超过了安全阈值($10^{-6} \sim 10^{-4}$),其均值为 $2.22E-03$,存在较大致癌风险,其余重金属致癌风险均在安全域之内. 综合来看,灰尘重金属对人体不具有非致癌风险,但 Cr 具有较高的致癌风险,对儿童的致癌风险超过安全阈值,并且重金属对儿童的致癌风险和非致癌风险均大于成人. 由于本研究中 Cr 可能来自于自然源,因此对于灰尘 Cr 污染的管控,主要应当为加强防护措施,降低儿童的灰尘摄入量. 本研究对灰尘重金属的生态

风险评价考虑了灰尘重金属含量、化学形态和生理毒性的影响,但健康风险评价中并未考虑重金属化学形态的影响,今后进一步的研究可以考虑对重金属摄入量,并根据其化学形态进行修正和完善。

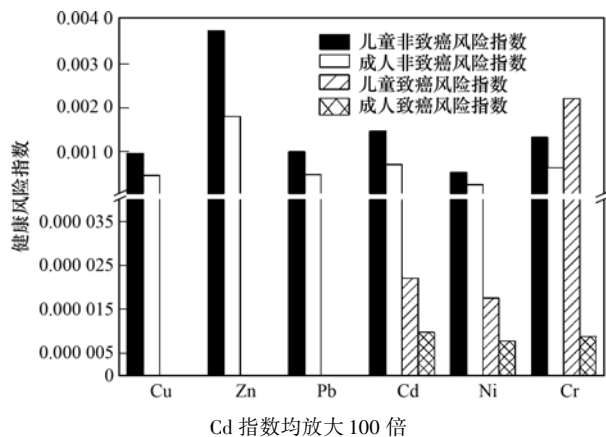


图5 灰尘重金属对成人与儿童的健康风险

Fig. 5 Health risk of heavy metals in dust for children and adults

3 结论

(1) 常州市高架道路两侧建筑物灰尘中重金属均超过背景值, Cd 为强烈富集, Pb、Zn 和 Cu 为显著富集. 它们受人为源影响较大. Cd 含量和富集系数随楼层升高而增大, Pb 和 Zn 含量及富集系数随楼层升高先增大后减小, Cu 含量随楼层高度变化较小, 但富集系数呈上升趋势。

(2) Cu、Zn、Pb 和 Cd 以活性态为主, Ni 和 Cr 以残渣态形式为主, 楼层高度对灰尘重金属化学形态有一定的影响. 风险评价结果表明, Zn 和 Cd 的环境风险最大, Cu、Ni 和 Cr 次之, Pb 最低。

(3) 改进的潜在生态风险评价结果表明, Cd 的潜在生态风险为极高, 是多元素潜在生态风险指数的主导元素, Cd 和多元素潜在生态风险指数均随楼层高度的上升而增加. 其它重金属潜在生态风险系数均处于中级和低级, 对低楼层的潜在生态风险大于中高楼层。

(4) Cr 对儿童的致癌风险和非致癌风险均大于成人, 且对儿童的致癌风险超过安全阈值, 存在较大的致癌风险. 其它重金属的非致癌风险指数和致癌风险指数均处于安全阈值内, 基本不存在健康风险。

(5) 本研究对于灰尘重金属的生态风险评价考虑了重金属含量、形态和毒性的影响, 更全面地反映了灰尘重金属生态风险的影响因素, 但健康风险评价中并未考虑重金属形态的影响, 有待今后对健康风险评价模型进行修正和完善。

参考文献:

- [1] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1153-1158.
Chang J, Liu M, Hou L J, et al. Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1153-1158.
- [2] Lu X W, Wang L J, Li L Y, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1-3): 744-749.
- [3] Świetlik R, Trojanowska M, Strzelecka M, et al. Fractionation and mobility of Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in the road dust retained on noise barriers along expressway-A potential tool for determining the effects of driving conditions on speciation of emitted particulate metals [J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 404-413.
- [4] 潘新星, 高琪, 王明新, 等. 常州市道路两侧户外灰尘重金属分布、形态及环境风险[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1374-1376.
Pan X X, Gao Q, Wang M X, et al. Distribution, specification and environmental risk of roadside outdoor dust in Changzhou [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(7): 1374-1376.
- [5] 李晓燕, 张舒婷. 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2274-2282.
Li X Y, Zhang S T. Seasonal provincial characteristics of vertical distribution of dust loadings and heavy metals near surface in city [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2274-2282.
- [6] 刘德鸿, 王发园, 周文丽, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 253-259.
Liu D H, Wang F Y, Zhou W L, et al. Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones of Luoyang city and its potential ecological risk [J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 253-259.
- [7] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2661-2668.
Li R Z, Zhou A J, Tong F, et al. Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2661-2668.
- [8] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4017-4023.
Yan H, Chen J, Xiao J. Heavy metal content in street dust and environmental risk assessment of agricultural city: a case study of Xuchang city [J]. Environmental Science, 2013, 34(10): 4017-4023.
- [9] Lu X W, Wu X, Wang Y W, et al. Risk assessment of toxic metals in street dust from a medium-sized industrial city of China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 154-163.
- [10] 李晓燕, 汪浪, 张舒婷. 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2889-2896.
Li X Y, Wang L, Zhang S T. Level and the courses of heavy metals and its risk assessment in indoor dust of city: take Guiyang as a case [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2889-2896.

- [11] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (27): 3239-3245.
- [12] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 186-192.
- [13] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- Guo W, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [14] 叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1333-1339.
- Ye H X, Zang S Y, Zhang L J, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Zhalong wetland [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1333-1339.
- [15] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. *广东微量元素科学*, 2007, **14**(8): 13-17.
- Peng J, Li Z Q, Hou J Y. Application of the index of Geo-accumulation index and ecological risk index to assess heavy metal pollution in soils [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, **14**(8): 13-17.
- [16] Sutherland R S, Tack F M G, Tolosa C A, *et al.* Operationally defined metal fractions in road deposited sediment, Honolulu, Hawaii [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(5): 1431-1439.
- [17] Tokaloğlu Ş, Kartal Ş. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the Organized Industrial District in Kayseri (Turkey) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2797-2805.
- [18] Delgado J, Barba-Brioso C, Nieto J M, *et al.* Speciation and ecological risk of toxic elements in estuarine sediments affected by multiple anthropogenic contributions (Guadiana saltmarshes, SW Iberian Peninsula): I. Surficial sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3666-3679.
- [19] 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.
- [20] Sutherland R S. A comparison of geochemical information obtained from two fluvial bed sediment fractions [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(3-4): 330-341.
- [21] Tasdemir Y, Kural C. Atmospheric dry deposition fluxes of trace elements measured in Bursa, Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **138**(3): 462-472.
- [22] Han Z X, Bi X Y, Li Z G, *et al.* Occurrence, speciation and bioaccessibility of lead in Chinese rural household dust and the associated health risk to children [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 65-70.
- [23] 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.
- [24] Turner A, Simmonds L. Elemental concentrations and metal bioaccessibility in UK household dust [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **371**(1-3): 74-81.
- [25] 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. 334-407.
- China Environmental Monitoring Station Editing. Background value of soil element in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 334-407.
- [26] Feng X D, Dang Z, Huang W L, *et al.* Chemical speciation of fine particle bound trace metals [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2009, **6**(3): 337-346.
- [27] Perin G, Craboledda L, Lucchese L, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [M]. In: Lekkas T D, ed. *Heavy Metals in the Environment*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1985, **2**: 454-456.
- [28] Yildirim G, Tokalioglu Ş. Heavy metal speciation in various grain sizes of industrially contaminated street dust using multivariate statistical analysis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **128**: 369-376.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**(6): 1470-1477.
- [31] 秦岩, 胡桂娟, 葛欣, 等. 原子吸收光谱法检测中的质量控制 [J]. *化学分析计量*, 2005, **14**(3): 45-46.
- Qin Y, Hu G J, Ge X, *et al.* Quality control of AAS measurement [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2005, **14**(3): 45-46.
- [32] US EPA. Soil screening guidance: technical background document [R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996.
- [33] Berg R V D. Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition) [R]. Bilthoven, Netherlands: National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), 1994. 5-12.
- [34] US EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual [R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1989. 15-28.
- [35] 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.
- [36] 潘新星, 高琪, 杨柳, 等. 常州市城乡道路两侧住宅灰尘重金属的健康风险 [J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2015, **27**(4): 79-84.
- Pan X X, Gao Q, Yang L, *et al.* Heavy metal pollution risk of household dust on both sides of the urban and rural road in Changzhou [J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2015, **27**(4): 79-84.

- [37] Jamali M K, Kazi T G, Afridi H I, *et al.* Speciation of heavy metals in untreated domestic wastewater sludge by time saving BCR sequential extraction method[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2007, **42**(5): 649-659.
- [38] Man Y B, Sun X L, Zhao Y G, *et al.* Health risk assessment of abandoned agricultural soils based on heavy metal contents in Hong Kong, the world's most populated city[J]. *Environment International*, 2010, **36**(6): 570-576.
- [39] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening level for superfund sites[R]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2002.
- [40] Lim H S, Lee J S, Chon H T, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, **96**(2-3): 223-230.
- [41] 喻超, 凌其聪, 彭振宇, 等. 城市工业区环境系统中的 Cd 污染循环及其健康风险——以杭州市半山工业区为例[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2474-2484.
- Yu C, Ling Q C, Peng Z Y, *et al.* Behaviors and potential health risks of Cd in urban environment of industrial area: a case study in Banshan industrial area of Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(11): 2474-2484.
- [42] 李晓燕, 刘艳青. 我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3648-3653.
- Li X Y, Liu Y Q. Heavy metals and their sources in outdoor settled dusts in different function areas of cities [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3648-3653.
- [43] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- Guo G H, Lei M, Chen T B, *et al.* Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- [44] 周开胜, 潘尤虎, 吕超田, 等. 城市街道灰尘重金属类环境激素镉污染及防治对策[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2009, **32**(3): 310-313.
- Zhou K S, Pan Y H, Lv C T, *et al.* Cadmium contamination in city street dust and its prevention and control methods [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2009, **32**(3): 310-313.
- [45] 邓高松, 陈思明, 李晓燕, 等. 城市室内外灰尘重金属形态差异分析——以贵阳市为例[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(4): 451-456.
- Deng G S, Chen S M, Li X Y, *et al.* A study on forms of heavy metals in indoor and street dusts: take Guiyang city for example [J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(4): 451-456.
- [46] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **123**(1): 95-105.
- [47] 冯茜丹, 党志, 吕玄文, 等. 大气 PM_{2.5} 中重金属的化学形态分布[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(6-7): 1048-1052.
- Feng Q D, Dang Z, Lv X W, *et al.* Chemical speciation distribution of PM_{2.5}-bound heavy metals in the air[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(6-7): 1048-1052.
- [48] 邵莉, 肖化云, 李南, 等. 高速公路沿线路面灰尘及土壤中重金属污染特征研究[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(6): 661-668.
- Shao L, Xiao H Y, Li N, *et al.* Pollution characterization of heavy metals in road dusts and soils near expressways[J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(6): 661-668.
- [49] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling city [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- [50] 王晓云, 马建华, 侯千, 等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 583-593.
- Wang X Y, Ma J H, Hou Q, *et al.* Accumulation and health risk assessment of heavy metals in kindergarten surface dust in the city of Kaifeng [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(3): 583-593.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)