

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

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

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源: 以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化: 以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及健康风险评价

张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳*, 毛洪钧

(南开大学环境科学与工程学院, 城市交通污染防治研究中心, 天津 300071)

摘要: 为了分析和比较城市和公园道路扬尘 (RD&PRD) 中 $PM_{2.5}$ 载带的部分金属元素的污染特征及其健康风险, 本文利用再悬浮系统将道路扬尘中粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物悬浮至滤膜上, 分析了 $PM_{2.5}$ 中载带的 Na、Mg、Al、Fe、Cu、Mn、Ni、Sb、Zn、Cd 和 Pb 等元素。结果显示, 城市道路扬尘中 Cu 和 Sb 的平均含量为 $626\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $23\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 明显高于公园道路扬尘 ($274\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 表明 RD 中 Cu 和 Sb 的含量可能受到非尾气(刹车磨损)排放的影响; 地累积指数 (I_{geo}) 分析显示, RD 和 PRD 中 Cd 达到强到极强污染程度 ($4 < I_{\text{geo}} < 5$), Cu、Sb、Zn 和 Pb 为强或中到强污染程度 ($2 < I_{\text{geo}} < 4$), Ni 和 Mn 为未受污染到中度污染 ($I_{\text{geo}} < 1$)。RD 和 PRD 中的 Cu、Ni、Sb、Zn、Cd 和 Pb 尚不存在非致癌风险, Ni 和 Cd 的终生致癌风险小于 10^{-6} , 无致癌风险。

关键词: 道路扬尘; $PM_{2.5}$; 金属元素; 地累积指数; 健康风险评价

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4071-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702198

Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in $PM_{2.5}$ Fraction of Road Dust

ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, LI Feng-hua, WU Lin*, MAO Hong-jun

(Center for Urban Transport Emission Research (CUTER), College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In order to analyze and compare the pollution characteristics and risks to human health of metallic elements in the $PM_{2.5}$ fraction of urban road dust (RD) and park road dust (PRD), particles smaller than $2.5\ \mu\text{m}$ were suspended to filters by a re-suspension system and concentrations of Na, Mg, Al, Fe, Cu, Mn, Ni, Sb, Zn, Cd, and Pb were quantified. Results showed that the average concentrations of Cu and Sb in RD were $626\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $23\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, significantly higher than that in PRD ($274\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $11\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). This indicated that the elemental composition of RD was influenced by non-exhaust emissions. The geoaccumulation Index (I_{geo}) of each detected element showed that samples were strongly to extremely contaminated by Cd ($4 < I_{\text{geo}} < 5$), moderately to strongly contaminated by Cu, Sb, Zn, and Pb ($2 < I_{\text{geo}} < 4$), and uncontaminated to moderately contaminated by Ni and Mn ($I_{\text{geo}} < 1$). The hazard index (HI) values of Sb, Pb, Cu, Ni, Zn, and Cd were less than 1 and the incremental lifetime cancer risk (ILCR) values of Ni and Cd were less than 10^{-6} , indicating that these elements of RD and PRD are not associated with any cancer risks or non-cancer health risks.

Key words: road dust; $PM_{2.5}$; metallic elements; geoaccumulation index; health risk assessment

扬尘是大气颗粒物的主要来源之一, 颗粒物源解析结果显示, 在我国某些北方城市扬尘对 $PM_{2.5}$ 贡献率可达 30%^[1-3], 其中道路扬尘在扬尘中的占比最高可达 50%^[4]。道路扬尘又可作为受体, 其主要贡献源包括尾气颗粒物的沉降、轮胎及刹车片磨损、路面磨损和路边土壤流失等。正因如此, 道路扬尘颗粒物中载带多种对人体有害组分, 如重金属^[5,6]、多环芳烃等^[7]。研究表明, 机动车尾气管排放的颗粒物中会载带 Mn、Ni、Cd 等重金属元素^[8,9], 非尾气(轮胎及刹车片磨损)排放的颗粒物中载带 Cu、Sb、Zn、Cd、Pb 等元素较为丰富^[10]。

国内外已有大量研究对道路扬尘及降尘中金属元素的排放特征进行了分析并对重金属元素的健康风险进行了评估, 但研究对象大多为粗颗粒

物^[11-15], 会过高估计重金属对人体存在健康风险。由于细颗粒物($PM_{2.5}$, 粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物)直径小, 能够进入人体肺泡, 对人体健康危害更大, 且更易进入大气环境中进行长距离传输, 因此本文借助再悬浮系统, 将采集的城市道路扬尘和公园道路扬尘中的 $PM_{2.5}$ 悬浮至滤膜上, 分析了其载带的 4 种地壳元素 (Na、Mg、Al、Fe) 和 7 种微量元素 (Cu、Mn、Ni、Sb、Zn、Cd 和 Pb), 对其污染特征及重金属健康风险进行了分析。将细颗粒与粗颗粒

收稿日期: 2017-02-28; 修订日期: 2017-04-19

基金项目: 科技部科技基础性工作专项 (2013FY112700-02); 国家科技支撑计划项目 (2014BAC16B03)

作者简介: 张静 (1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为颗粒物组分及排放清单, E-mail: dr.zhangjing@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dr.wu@msn.com

分离,对细颗粒进行单独研究在一定程度上降低了健康风险评价的误差,以期为城市环境健康和管理提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015 年 5 月,在天津市市内选取四类不同等级的道路(次干道、主干道、快速路和环线)进行了城市道路扬尘(RD)的采集,采样点的选取参考文献[16],采样过程中分别对所选道路的机动车道和非机动车道进行了样品的采样,每个样品至少 3 个子样品.对于公园道路扬尘(PRD),在市内选取了 3 个人流量较大公园进行了样品的采集,分别是南翠屏公园、长虹生态公园和水上公园,每个公园采集了 3 个样品,每个样品包含 3 个子样品.

样品带回实验室之后,首先将样品过 200 目(75 μm)泰勒标准筛,以去除砂砾及枝叶等杂质,自然晾干的样品利用再悬浮系统^[17]将粒径小于 2.5 μm (PM_{2.5})的颗粒物采集到聚丙烯滤膜(φ 47)上,最终得到城市和公园道路扬尘的 PM_{2.5}样品分别为 41 和 9 个.

1.2 样品检测方法

利用碱熔法将 1/2 聚丙烯滤膜样品熔解,并使用电感耦合原子发射光谱(ICP-OES, Vista MPX)检测提取液中的 Mg、Al 和 Fe;另一半样品,利用酸熔法熔解,使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Aglient 7700)对提取液中的 Na、Mn、Ni、Cu、Zn、Sb、Cd 和 Pb 的含量进行了检测,同时做空白试验,以保证测试质量.

1.3 分析方法

1.3.1 地累积指数

地累积指数 (geoaccumulation index, I_{geo}) 自 1969 年 Müller^[18]提出之后,广泛应用于道路扬尘元素污染等级的评价^[19~22].地累积指数不仅可以反映各组分分布的自然变化特征,还可以判别人为活动对环境组分的影响,是判定人为活动影响的重要参数.本文利用地累积指数对道路扬尘中 PM_{2.5}载带重金属元素的污染程度进行评价,计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \tag{1}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_n 为样品中元素 n 含量或质量分数,%; B_n 为元素 n 的地球化学背景值,本研究中取天津市 A 层土壤元素背景中位值^[23],系数 1.5 用来校正因岩石差异引起的背景值变化.

在地累积指数的研究与应用中,一般采用的是 Müller 的分级标准,将污染程度从无污染到极强污染分为 7 个污染等级(如表 1).

表 1 地累积指数(I_{geo})与污染程度分级

Table 1 Geoaccumulation index (I_{geo}) and the corresponding contamination degree

I_{geo}	污染级别	污染程度
<0	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	未污染到中度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中到强污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强到极强污染
≥ 5	6	极强污染

1.3.2 健康风险评价模方法

本文基于 EPA 提供的健康风险评价模型对道路扬尘中 PM_{2.5}载带的重金属进行健康风险评估.人体主要通过 3 种途径暴露于道路扬尘中:摄食、皮肤接触和呼吸.经 3 种暴露途径的非致癌日均暴露量的计算公式分别如式(2)~(4):

$$ADD_{ing} = C \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{2}$$

$$ADD_{inh} = C \times \frac{IngR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \tag{3}$$

$$ADD_{dermal} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{4}$$

由于参数的局限,本研究中仅考虑呼吸暴露途径的致癌风险,其终身日平均暴露量(LADD)如公式(5)所示.

$$LADD = \frac{C \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \tag{5}$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{dermal} 分别是经摄食、呼吸和皮肤接触的日暴露量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; C 为尘中重金属的含量, $mg \cdot kg^{-1}$, 经常采用 95% 置信区间的上限值(95% UCL)来估计合理的最大暴露量,由 SPSS 软件计算获得,其他参数含义及单位如表 2 所示.

各重金属对非致癌风险的有害份额由 HQ (hazard quotient) 来表述,非致癌风险由 HI (hazard index) 来表述,HI 为所有重金属的累计风险,ILCR 为致癌总风险,公式如下:

$$HI = \sum HQ_i = \sum ADD/R_iD \tag{6}$$

$$ILCR = \sum LADD \times SF \tag{7}$$

式中, R_fD 为各重金属元素的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF 为致癌重金属元素的致癌斜率因子, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 所研究重金属对应的 R_fD 和 SF 值如表 3 所示. $HI \leq 1$ 表明无非致癌风险, $HI > 1$ 表明可能存在非致癌健康风险; $ILCR$ 介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时, 需要采取风险管理措施.

表 2 道路扬尘重金属暴露量参数

Table 2 Exposure factors for heavy metal doses					
参数	单位	含义	取值		
			儿童	成人	文献
C	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	重金属浓度	$C_{95\% \text{ UCL}}$	$C_{95\% \text{ UCL}}$	本研究
IngR	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	摄食全量	200	100	[24]
InhR	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	呼吸摄入全量	7.6	20	[25]
PEF	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	颗粒物排放因子	1.36×10^9	1.36×10^9	[24]
SA	cm^2	暴露皮肤面积	2 800	5 700	[24]
SL	$\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	皮肤附着因子	0.2	0.7	[24]
ABS	/	吸入因子	0.001	0.001	[26]
ED	a	暴露年限	6	24	[24]
EF	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	暴露频率	180	180	[27]
BW	kg	平均体重	15	70	[24]
$AT(\text{非致癌})$	d	平均作用时间	$ED \times 365$	$ED \times 365$	[26]
$AT(\text{致癌})$	d	平均作用时间	25 550	25 550	[24]

表 3 本文所研究重金属的 R_fD 和 SF 值

Table 3 R_fD and SF values of heavy metals in this study						
项目	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Pb
R_fD_{ing}	$2.00\text{E}-02$	$4.00\text{E}-02$	$3.00\text{E}-01$	$1.00\text{E}-03$	$4.00\text{E}-04$	$3.50\text{E}-03$
R_fD_{inh}	$2.06\text{E}-02$	$4.02\text{E}-02$	$3.00\text{E}-01$	$1.00\text{E}-03$	$5.00\text{E}-04$	$3.52\text{E}-03$
R_fD_{dermal}	$5.40\text{E}-03$	$1.20\text{E}-02$	$6.00\text{E}-02$	$1.00\text{E}-03$	$6.00\text{E}-06$	$5.25\text{E}-04$
SF	$8.40\text{E}-01$	/	/	$1.80\text{E}-03$	/	/

2 结果与讨论

2.1 金属元素含量

图 1 为 RD 和 PRD 中 PM_{2.5} 载带金属元素的含量, 从中可以看出各重金属元素含量变化幅度较大. 在 RD 中, 金属元素的含量为 $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Sb} > \text{Cd}$, 地壳元素的含量高于痕量元素, 痕量元素中, Zn 的平均含量最

高, 主要分布在 $701 \sim 982 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $811 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是 Mn 和 Cu , 主要分布在 $449 \sim 801 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $356 \sim 864 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量分别是 $630 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $626 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 最后是 Pb 、 Ni 、 Sb 和 Cd , 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的平均含量分别为 131、82、23 和 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

在 PRD 中, 金属元素含量从高到低为 $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Sb} > \text{Ni} > \text{Cd}$, 地壳

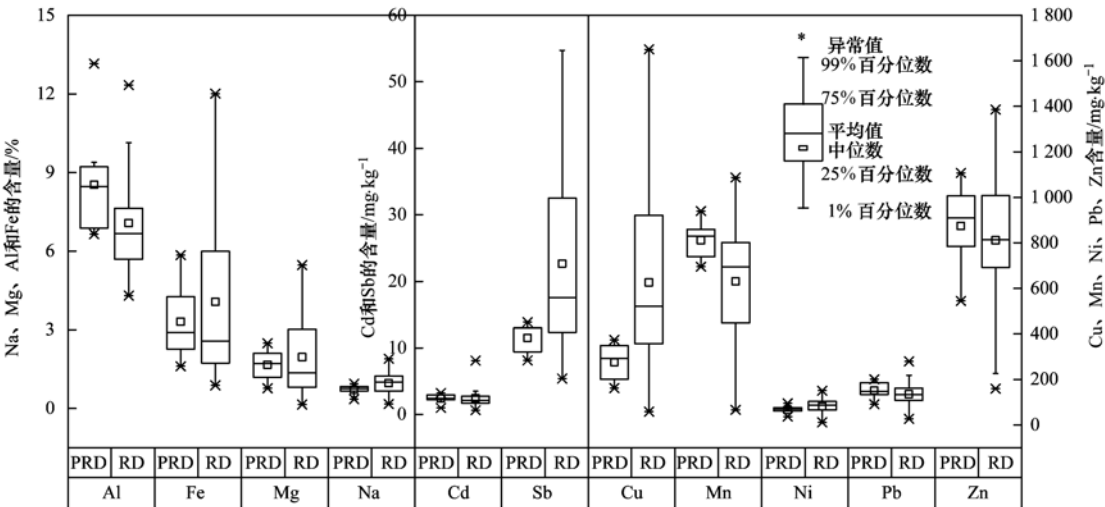


图 1 RD 和 PRD 中 PM_{2.5} 载带金属元素的含量

Fig. 1 Metal content of PM_{2.5} from RD and PRD

元素的含量高于痕量元素,痕量元素中,Zn 的平均含量最高,主要分布在 809 ~ 952 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 874 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Mn 和 Cu 含量主要分布在 696 ~ 832 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 209 ~ 295 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 706 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 274 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Pb、Ni、Sb 和 Cd 的平均含量分别是 151、66、11 和 2.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

两种尘中金属元素含量对比发现, RD 中 $\text{PM}_{2.5}$ 所载带的 Al、Fe 和 Mg 小于 PRD, Cu 和 Sb 的平均含量高于 PRD,分别是 PRD 的 2.28 和 2.09 倍,这说明这两种元素具有交通污染相关来源,且其在 RD 中的含量由交通污染源主导.铜纤维和三硫化二锑(Sb_2S_3)是刹车片生产过程中重要组分,因此 RD 中的 Cu 和 Sb 可能来自非尾气的排放^[28].而 Zn、Mn、Ni 和 Pb 在两种尘中的含量相近,说明这 4 种元素受由其他污染源影响较大.

2.2 金属元素污染程度分析

图 2 为城市道路扬尘和公园道路扬尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 载带金属元素的地累计指数.从中可以看出,在 RD 和 PRD 中,地壳元素(Al、Fe、Mg 和 Na)及 Mn 的 I_{geo} 均小于 0,说明这 4 种元素未受到人为污染源影响,Cd 的污染程度最高,在 RD 和 PRD 中均属于强到极强污染($4 < I_{\text{geo}} < 5$);Cu 和 Sb 在 RD 中属于强污染程度($3 < I_{\text{geo}} < 4$),且明显高于 PRD($2 < I_{\text{geo}} < 3$),说明交通污染源会直接排放这两种元素^[10, 29, 30];Zn 和 Pb 在 RD 和 PRD 中均属于中到强度污染,且 PRD 中的污染程度高于 RD,说明 Zn 和 Pb 在 PRD 中富集严重;Ni 的 I_{geo} 介于 0 ~ 1,可

能受到了轻微污染,主要由自然源贡献;Mn 的 $I_{\text{geo}} < 0$,未受到人为污染.综上分析, RD 中,7 种重金属元素的污染程度由高到低为: Cd、Cu、Sb、Zn、Pb、Ni 和 Mn, PRD 中为 Cd、Sb、Zn、Cu、Pb、Ni 和 Mn.同时说明 RD 和 PRD 中 $\text{PM}_{2.5}$ 载带的 Cd、Cu、Sb、Zn 和 Pb 具有明显的人为污染源.

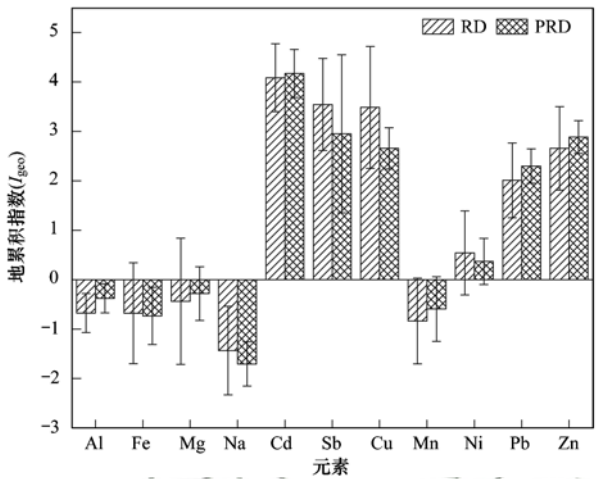


图 2 RD 和 PRD 中金属元素的 I_{geo} 值

Fig. 2 The I_{geo} value of detected metals in RD and PRD

2.3 健康风险评价

由 2.2 节的结果可知, Cd、Sb、Cu、Ni、Pb 和 Zn 受到了人为源的污染.为了评估金属元素对人体健康是否存在潜在的危害,本文对以上 6 种重金属元素进行了致癌和非致癌健康风险评价.

表 4 为不同暴露途径重金属元素的 95% UCL 值、HQ、HI 和 ILCR 值.对于非致癌风险, RD 中各

表 4 重金属非致癌风险与致癌风险

Table 4 Non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of heavy metals

类型	项目	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Pb
RD(儿童)	95% UCL	94	773	1 036	3	31	154
	HQ _{ing}	3.08E-02	1.27E-01	2.27E-02	1.90E-02	5.15E-01	2.89E-01
	HQ _{inh}	8.36E-07	3.53E-06	6.34E-07	5.30E-07	1.15E-05	8.04E-06
	HQ _{dermal}	3.19E-04	1.19E-03	3.18E-04	5.31E-05	9.62E-02	5.40E-03
	HI	3.11E-02	1.28E-01	2.30E-02	1.90E-02	6.12E-01	2.95E-01
RD(成人)	HQ _{ing}	3.30E-03	1.36E-02	2.43E-03	2.03E-03	5.52E-02	3.10E-02
	HQ _{inh}	4.71E-07	1.99E-06	3.58E-07	2.99E-07	6.50E-06	4.53E-06
	HQ _{dermal}	4.88E-04	1.81E-03	4.85E-04	8.11E-05	1.47E-01	8.25E-03
	HI	3.79E-03	1.54E-02	2.92E-03	2.11E-03	2.02E-01	3.92E-02
	ILCR	4.03E-09	/	/	2.66E-13	/	/
PRD(儿童)	95% UCL	80	328	1 004	3	15	176
	HQ _{ing}	2.63E-02	5.39E-02	2.20E-02	1.88E-02	2.47E-01	3.30E-01
	HQ _{inh}	7.13E-07	1.50E-06	6.15E-07	5.26E-07	5.53E-06	9.18E-06
	HQ _{dermal}	2.73E-04	5.03E-04	3.08E-04	5.27E-05	4.62E-02	6.17E-03
	HI	2.66E-02	5.44E-02	2.23E-02	1.89E-02	2.93E-01	3.37E-01
PRD(成人)	HQ _{ing}	2.82E-03	5.77E-03	2.36E-03	2.02E-03	2.65E-02	3.54E-02
	HQ _{inh}	4.02E-07	8.45E-07	3.47E-07	2.96E-07	3.12E-06	5.18E-06
	HQ _{dermal}	4.16E-04	7.68E-04	4.70E-04	8.04E-05	7.05E-02	9.42E-03
	HI	3.23E-03	6.54E-03	2.83E-03	2.10E-03	9.70E-02	4.48E-02
	ILCR	3.44E-09	/	/	2.64E-13	/	/

元素的 HI 值顺序为: Sb > Pb > Cu > Ni > Zn > Cd, PRD 各元素的 HI 值顺序为: Sb > Pb > Cu > Ni > Zn > Cd, 以上 6 种元素的 HI 值均小于 1, 说明对人体无非致癌风险. 从不同暴露途径的暴露量来看, 呈现摄食 > 皮肤接触 > 呼吸的特点.

对于致癌风险, 本文所研究重金属中 Ni 和 Cd 具有致癌效应, 2 种元素的 ILCR 值为 Ni > Cd. 在 RD 和 PRD 中, Ni 和 Cd 的 ILCR 均小于 10^{-6} 说明不存在致癌风险.

3 结论

(1) 本文利用 ICP-OES 和 ICP-MS 分别检测了城市道路扬尘和公园道路扬尘中 PM_{2.5} 载带的 Mg、Al、Fe 和 Na、Mn、Ni、Cu、Zn、Sb、Cd、Pb 等 11 种金属元素, 各元素含量变化幅度较大. RD 中 Cu 和 Sb 的平均含量高于 PRD, 分别是 PRD 的 2.28 和 2.09 倍, 这可能是非尾气的排放增加了这两种元素在城市道路扬尘中的含量; 而 Zn、Mn、Ni 和 Pb 在 RD 和 PRD 中的含量相当, 可能是由于这 4 种元素主要由其他污染源贡献.

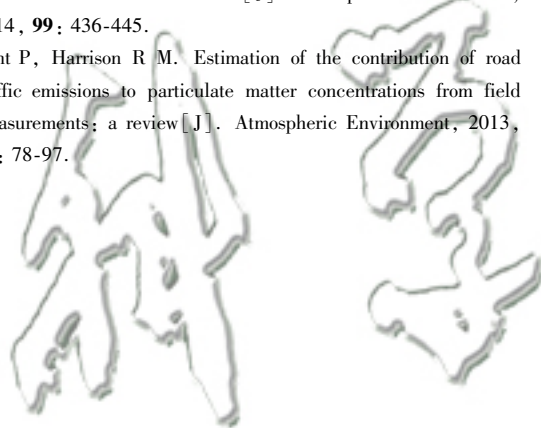
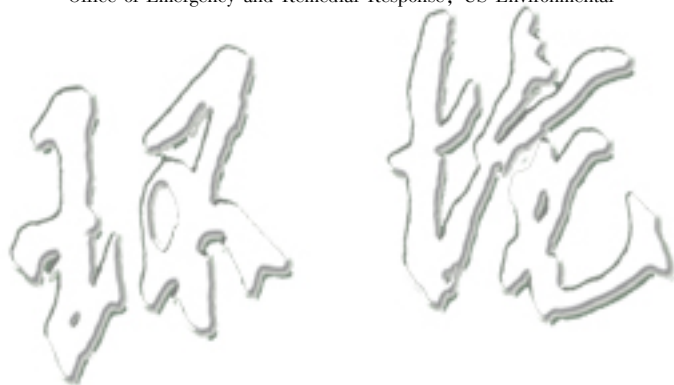
(2) 地累计指数结果显示, 在 RD 和 PRD 中, Al、Fe、Mg、Na 和 Mn 未受污染, Ni 受到轻微污染, 其他元素的污染程度存在一定的差异, 其中在 RD 中, 污染程度由高到低为: Cd(强到极强)、Cu(强)、Sb(强)、Zn(中到强)和 Pb(中到强), PRD 中为 Cd(强到极强)、Sb(中到强)、Zn(中到强)、Cu(中到强)和 Pb(中到强). 这 5 种元素具有明显的人为污染源.

(3) 非致癌健康风险评价结果表明 RD 和 PRD 中 Cd、Sb、Cu、Ni、Pb 和 Zn 均不存在非致癌风险. 对于 Ni 和 Cd 这 2 种致癌元素, 其终生致癌健康风险均小于 10^{-6} , 且在 RD 和 PRD 中这两种元素尚不存在致癌风险.

参考文献:

- [1] Xiao S, Wang Q Y, Cao J J, *et al.* Long-term trends in visibility and impacts of aerosol composition on visibility impairment in Baoji, China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, **149**: 88-95.
- [2] Geng N B, Wang J, Xu Y F, *et al.* PM_{2.5} in an industrial district of Zhengzhou, China: chemical composition and source apportionment[J]. *Particuology*, 2013, **11**(1): 99-109.
- [3] 天津市环境保护局. 天津召开新闻发布会 发布颗粒物源解析结果 扬尘成为首要污染物[EB/OL]. http://www.tjhb.gov.cn/news/news_headtitle/201410/t20141009_570.html, 2014-10-09.
- [4] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [5] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1799-1806. Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [6] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 宝鸡市街尘重金属元素含量、来源及形态特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2470-2476. Wang L J, Lu X W, Lei K, *et al.* Content, source and speciation of heavy metal elements of street dusts in Baoji city [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2470-2476.
- [7] 赵洪涛, 尹澄清, 陈梅雪. 长江三角洲河网地区典型城镇街尘中多环芳烃的污染特征[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(1): 123-130. Zhao H T, Yin C Q, Chen M X. The pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from a typical town in the Yangtze River Delta[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(1): 123-130.
- [8] Cheng Y, Lee S C, Ho K F, *et al.* Chemically-specified on-road PM_{2.5} motor vehicle emission factors in Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(7): 1621-1627.
- [9] Liu G, Li J H, Wu D, *et al.* Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China[J]. *Particuology*, 2015, **18**: 135-143.
- [10] Grigoratos T, Martini G. Brake wear particle emissions: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 2491-2504.
- [11] Li H Y, Shi A B, Zhang X R. Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **32**(6): 228-237.
- [12] 颜钰, 李盼盼, 陶军, 等. 北京高校校园道路灰尘重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 58-63, 81. Yan Y, Li P P, Tao J, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dusts of universities in Beijing[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(1): 58-63, 81.
- [13] Zhao N, Lu X W, Chao S G. Risk assessment of potentially toxic elements in smaller than 100- μ m street dust particles from a valley-city in northwestern China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, **38**(2): 483-496.
- [14] Keshavarzi B, Tazarvi Z, Rajabzadeh M A, *et al.* Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **119**: 1-10.
- [15] 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 等. 北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3060-3065. Duan H Y, Wu Y T, Wang J, *et al.* Concentrations and health risks of toxic metals in surface dust in kindergartens of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3060-3065.
- [16] HJ/T 393-2007, 防治城市扬尘污染技术规范[S]. HJ/T 393-2007, Technical specifications for urban fugitive dust pollution prevention and control[S].
- [17] Kong S F, Ji Y Q, Lu B, *et al.* Characterization of PM₁₀ source profiles for fugitive dust in Fushun-a city famous for coal[J].

- Atmospheric Environment, 2011, **45**(30): 5351-5365.
- [18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Journal of Geology, 1969, **2**(3): 108-118.
- [19] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, *et al.* Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses [J]. Science of the Total Environment, 2016, **553**: 636-642.
- [20] Lee P K, Youm S J, Jo H Y. Heavy metal concentrations and contamination levels from Asian dust and identification of sources: a case-study[J]. Chemosphere, 2013, **91**(7): 1018-1025.
- [21] Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* The spatial characteristics and pollution levels of metals in urban street dust of Beijing, China[J]. Applied Geochemistry, 2013, **35**: 88-98.
- [22] Faiz Y, Tufail M, Javed M T, *et al.* Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan[J]. Microchemical Journal, 2009, **92**(2): 186-192.
- [23] 中国环境监测总站. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] USEPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS). volume I: human health evaluation manual (Part D, standardized planning, reporting, and review of superfund reporting and review of superfund risk assessments) [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency, 2001.
- [25] Van Den Berg R. Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition) [R]. Netherland: Rijksinstituut Voor Volksgezondheid en Milieu Rivm, 1994.
- [26] 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.
- [27] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(4): 726-733.
- [28] Thorpe A, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review[J]. Science of the Total Environment, 2008, **400**(1-3): 270-282.
- [29] Hulskotte J H J, Roskam G D, Van Der Gon H A C D. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors[J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 436-445.
- [30] Pant P, Harrison R M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: a review[J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 78-97.



CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)