
# 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

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

# 目 次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估 …… 尹晓梅，李梓铭，熊亚军，乔林，邱雨露，孙兆彬，寇星霞(1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响 …… 李颖若，汪君霞，韩婷婷，王垚，何迪，权维俊，马志强(1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气$PM_{2.5}$来源解析 …… 王彤，华阳，许庆成，王书肖(1035)
四川省典型工业行业$PM_{2.5}$成分谱分析 …… 冯小琼，陈军辉，熊文朋，梅林德，徐雪梅，尹寒梅，范武波，姜涛，钱骏，叶宏(1043)
典型物流城市2016年冬季2次污染过程$PM_{2.5}$污染特征及来源解析 …… 赵雪艳，杨文，王静，刘盈盈，白雯宇，徐艳萍，王歆华，白志鹏(1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气$PM_{2.5}$污染特征及来源分析 …… 张显，田莎莎，刘盈盈，赵雪艳，余浩，张辉，陈莉，王歆华(1062)
新乡冬季$PM_{2.5}$中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析 …… 闫广轩，雷豪杰，张靖雯，唐明双，张佳羽，曹治国，李云蓓，王跃思，樊静，李虎(1071)
烟台市环境受体$PM_{2.5}$四季污染特征与来源解析 …… 刘童，王晓军，陈倩，温杰，黄渤，朱红霞，田瑛泽，冯银厂(1082)
常州市冬季$PM_{2.5}$中类腐殖质昼夜特征分析 …… 顾远，李清，黄雯倩，赵竹子，马帅帅，叶招莲(1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险 …… 曹红梅，赵留元，穆熙，李尧捷，毛潇萱，黄韬，马建民，高宏(1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析 …… 邱昀，李令军，姜磊，王新辉，赵文慧，张立坤，鹿海峰(1111)
中国城市$O_3$浓度时空变化特征及驱动因素 …… 黄小刚，赵景波，曹军骥，宋永永(1120)
基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征 …… 张倩倩，张兴赢(1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析 …… 王俏丽，董敏丽，李素静，吴成志，王刚，陈必新，李伟，高翔，叶荣民(1143)
中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立 …… 高美平，邵霞，聂磊，王海林，安小栓(1152)
异戊二烯和甲苯二次有机示踪物的臭氧非均相氧化 …… 黄亚娟，曹罡，朱荣淑，欧阳峰(1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征 …… 栗世学，郭文凯，何昕，朱玉凡，陈强(1172)
成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析 …… 胡月，刘国东，孟玉川，张文江，夏成城(1179)
基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面$CO_2$扩散通量估算 …… 张逸飞，杨平，赵光辉，李玲，谭立山，仝川(1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化 …… 刘兆冰，梁文健，秦礼萍，唐建辉(1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学 …… 劳心宇，原杰，刘瑜，Khan M. G. Mostofa(1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征 …… 刘启明，梁海涛，锡桂莉，胡欣，葛健(1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析 …… 王奇岗，肖琼，赵海娟，王建力，郭永丽，张清华(1222)
鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素 …… 何锦，张幼宽，赵雨晴，韩双宝，刘元晴，张涛(1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征 …… 吴迪，印红玲，李世平，王增武，邓旭，罗怡，罗林(1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUSt功能预测分析 …… 张菲，田伟，孙峰，陈彦，丁传雨，庞发虎，姚伦广，李玉英，陈兆进(1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响 …… 刘志迎，许海，詹旭，朱广伟，秦伯强，张运林(1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价 …… 苏瑶，许育新，安文浩，王云龙，何振超，楼颖雯，沈阿林(1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响 …… 黄磊，梁银坤，梁岩，罗星，陈玉成(1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性 …… 何湖滨，陈诚，林育青，严晗璐，董建玮，陈求稳(1287)
BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 …… 张文海，吉庆华，兰华春，李静(1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除 …… 吴乃瑾，宋云，魏文侠，王海见，孙仲平(1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除 …… 邓曼君，王学江，成雪君，景焕平，赵建夫(1310)
Ca/Mg负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性 …… 易蔓，李婷婷，李海红，黄巧，杨金娥，陈玉成，杨志敏(1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素 …… 程扬，沈启斌，刘子丹，杨小莹，张太平，廖志钟(1328)
静止和水动力扰动状态下锆改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响 …… 俞阳，林建伟，詹艳慧，何思琪，吴小龙，王艳，赵钰颖，林莹，刘鹏茜(1337)
4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制 …… 王大鹏，张娴，颜昌宙(1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析 …… 徐婷，李勇，朱怡嘉，薛梦婷，汤同欢(1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响 …… 李冬，曹美忠，郭跃洲，梅宁，李帅，张杰(1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复 …… 李海玲，李冬，张杰，刘博(1367)
CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能 …… 马娟，杨蕊春，俞小军，周猛，陈永志(1375)
不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能 …… 袁梦飞，于德爽，巩秀珍，王晓霞，陈光辉，杜世明，甄建园(1382)
ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水 …… 李田，曹家炜，谢凤莲，沈耀良，吴鹏，宋吟玲(1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性 …… 谢璐琳，王建芳，钱飞跃，张泽宇，沈耀良，齐泽坤(1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征 …… 任君怡，陈林艺，李慧春，秦玉洁，曹雁，王桐屿，周少奇(1405)
降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征 …… 付昆明，廖敏辉，周厚田，付巢，姜姗，仇付国，曹秀芹(1412)
IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析 …… 刘子奇，张岩，马翔山，张博康，曹孟京，陈昌明(1419)
温度对硝化杆菌(*Nitrobacter*)活性动力学影响 …… 于雪，孙洪伟，李维维，祁国平，马娟，陈永志，吕心涛(1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化 …… 牛雨彤，刘吉宝，马爽，李亚明，解立平，魏源送，孟晓山(1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响 …… 彭晶，王科，谷月，王爱杰(1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 …… 张彦军，郭胜利(1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应 …… 李一凡，王玉杰，王彬，王云琦(1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响 …… 王甜，黄志霖，曾立雄，肖文发，宋文梅(1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征 …… 宁赵，程爱武，唐海明，葛体达，邓扬悟，苏以荣，陈香碧(1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征 …… 童瑶瑶，王季斐，祝贞科，邓扬悟，陈珊，葛体达，袁红朝，吴金水(1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征 …… 徐广平，李艳琼，沈育伊，张德楠，孙英杰，张中峰，周龙武，段春燕(1491)
缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征 …… 王富华，吕盛，黄容，高明，王子芳，徐畅(1504)
大气污染对居民健康影响研究进展 …… 秦耀辰，谢志祥，李阳(1512)
《环境科学》征订启事(1042)　《环境科学》征稿简则(1162)　信息(1208，1235，1286)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

# 西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险

曹红梅[1],赵留元[1],穆熙[1],李尧捷[1],毛潇萱[1],黄韬[1],马建民[2],高宏[1*]
(1. 兰州大学资源环境学院,甘肃省环境污染预警与控制重点实验室,兰州 730000;2. 北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

**摘要**:本研究利用 ICP-OES 对西北干旱区某规模化电子垃圾拆解厂拆解车间内外空气不同粒径 的颗粒物($PM_{1.0}$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$)及上风向对照点 $PM_{2.5}$中的6种重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的浓度进行了分析测定,基于该数据对拆解车间内外颗粒物中重金属污染浓度水平、粒径分布特征、职业暴露风险以及呼吸系统沉积特征进行了研究. 结果表明,拆解车间内外颗粒物中重金属 Zn(室内4 890 ng·m$^{-3}$,室外1 245 ng·m$^{-3}$)、Pb(室内1 201 ng·m$^{-3}$,室外 240 ng·m$^{-3}$)、Cu(室内1 200 ng·m$^{-3}$,室外 110 ng·m$^{-3}$)均表现出较高的污染水平,且室内浓度远高于室外数倍,表明拆解活动是造成室内空气较高浓度重金属的主要原因,室内外空气环境 污染特征与电子垃圾拆解种类密切相关. 粒径分布特征为:车间内空气环境中重金属主要吸附于 $PM_{2.5}$中,车间外主要是赋存于 $PM_{10}$中. 职业暴露风险评估显示:Cr 的非致癌与致癌风险最高;拆解厂车间室内外6种重金属总非致癌危害指数为 $1.62\times10^{-3}$和 $3.60\times10^{-4}$,远低于 U. S. EPA 规定的限定值(1.0);车间室内外致癌总风险值为 $2.69\times10^{-7}$和 $2.59\times10^{-9}$,小于可接受范围($1\times10^{-6}$),表明由重金属所导致的职业健康风险相对较小;评估结果表明按国家环保要求规模化建厂的电子垃圾拆解厂空气环境颗粒物中重金属对公共健康造成的风险处于相对安全的水平. 颗粒态重金属在人体呼吸系统的不同器官的沉积特征表现为粒径越小,在呼吸系统的深处的沉积百分占比越大,建议企业应针对细颗粒物给职业工人造成的呼吸健康风险采取相应的减排对策.

**关键词**:规模化电子垃圾拆解;空气颗粒物;重金属;污染特征;职业暴露风险;沉积通量
**中图分类号**:X513;X820.4 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2019)03-1101-10 **DOI**:10.13227/j.hjkx.201807176

# Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China

CAO Hong-mei[1], ZHAO Liu-yuan[1], MU Xi[1], LI Yao-jie[1], MAO Xiao-xuan[1], HUANG Tao[1], MA Jian-min[2], GAO Hong[1*]
(1. Key Laboratory for Environmental Pollution Prediction and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract**: Atmospheric particle samples ($PM_{1.0}$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$) were collected from three sampling sites (indoor and outdoor workplaces of a formal e-waste dismantling plant, and upwind area) in an arid area of Northwest China. The contents of six heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) were analyzed using ICP-OES. Based on this data, the concentration levels, size distribution characteristics, and occupational exposure risks of heavy metals at the indoor and outdoor dismantling workplaces were studied. Particle analysis showed that Zn (4 890 ng·m$^{-3}$ indoors, 1 245 ng·m$^{-3}$outdoors)、Pb (indoors 1 201 ng·m$^{-3}$, outdoors 240 ng·m$^{-3}$), and Cu (indoors 1 200 ng·m$^{-3}$, outdoors 110 ng·m$^{-3}$) showed higher pollution levels indoors and outdoors at the dismantling workplace. Moreover, the indoor concentration was much higher than that outdoors, indicating that the dismantling activity was the main cause of the high levels of heavy metal contamination. The indoor and outdoor air pollution characteristics were closely related to the types of electronic waste dismantled. Occupational exposure risk assessments showed that the total non-carcinogenic hazard quotient (HQ) of the indoor and outdoor dismantling workshops was $1.62\times10^{-3}$, and $3.60\times10^{-4}$, respectively, and the carcinogenic risk values were $2.69\times10^{-7}$ and $2.59\times10^{-9}$. Cd caused the greatest carcinogenic and non-carcinogenic risks at both indoor and outdoor dismantling workplaces, but it was still far below the limits (1.0) and acceptable ranges ($1\times10^{-6}$) stipulated by U. S. EPA, indicating that the health risks caused by heavy metals were minor or negligible. Heavy metals in the ambient particulate matter released from an adequately equipped and formally managed e-waste dismantling plant would not lead to any public health risk. The sedimentation characteristics of particulate heavy metals in different organs of the human respiratory system exhibited that the smaller the particle size was, the greater the proportion of deposition in the depths of the respiratory system was. Enterprises should make scientific and

**收稿日期**:2018-07-20;**修订日期**:2018-09-07
**基金项目**:国家自然科学基金青年科学基金项目(41701582);国家自然科学基金项目(41671460)
**作者简介**:曹红梅(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染物的区域过程及风险,E-mail:caohm16@lzu.edu.cn
* 通信作者,E-mail:honggao@lzu.edu.cn

effective decisions on the respiratory health risks caused by such fine particles to the health of professional workers.

**Key words**: scaled e-waste dismantling; air particulates; heavy metals; pollution characteristics; occupational exposure risk; deposition flux

电子产品的不断更新换代，导致电子垃圾成为世界上增长最快的固体废弃物[1]. 中国一方面面临外来“洋”垃圾给本土环境带来的破坏：根据联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)的数据，约有 50% ~80% (2005 年)产生于发达国家的电子垃圾被出口到发展中国家，如中国、印度、巴基斯坦、越南、菲律宾和非洲大陆其他许多国家[2]；另一方面我国本土与日俱增的废旧电子产品数量也给回收与拆解地的周边环境及职业工人和居民带来严重污染及健康威胁. 全球电子垃圾每年增加4 000万 t，到 2020 年，中国旧计算机形成的电子垃圾数量较 2007 年将增加 2 ~4 倍，旧电视机产生的电子垃圾将增加 1.5 ~2 倍[3]. 废电器和电子设备是由各种材料制备的元件组合而成，因而被视为金属、超细粉、铝黄金和塑料等废物再利用的宝贵资源[4]. 由于作坊式电子垃圾拆解活动对局地环境和人群会造成严重污染及健康风险，同时为了最大程度地废物资源化回收利用，中国规模化电子垃圾处理产业近年来得以较快发展.

废旧电子产品的各种元件中包含诸多重金属，诸如铅(Pb)主要用作阴极射线管(电视机的显示器)玻璃中的焊料和氧化铅的主要成分，电池中也含有镍(Ni)、镉(Cd)等重金属[5]. 镉主要被用于某些开关和电子器件的焊点，及旧式阴极射线管中的“荧光粉”涂层[6]. 锌(Zn)则以氧化锌的形式作为压敏电阻的主要原材料而应用于黑白或彩色电视机[7]. 废弃电器电子产品在具有资源性的同时也具有潜在的健康危害，如通过拆解活动而排放到周围环境中的重金属对人体肾脏、骨骼、呼吸及免疫等系统会产生严重危害[8]. 关于国内大气重金属污染问题主要以城市为研究区域，对颗粒物、降尘中的重金属的污染水平、季节变化、来源解析、形态分布、健康以及生态风险等内容展开研究[9~12]. 而关于电子垃圾中的重金属污染状况，主要集中在对土壤[13~15]、沉积物[16]等环境介质的关注. 对于电子垃圾大气颗粒物中重金属的相关研究鲜见报道. Xue 等[17]对江苏某一电子工业园区的废旧线路板的拆解车间中 TSP 及 $PM_{10}$ 中重金属(Cr、Cu、Cd、Pb)，分别从不同暴露途径进行了健康风险评估. Fang 等[18]分别对上海某一典型废旧电视机显示器手工拆解车间和机械拆解车间的 $PM_{10}$ 及 $PM_{2.5}$ 中重金属(Cr、Ni、Cu、Cd、Pb)展开污染水平及致癌与非致癌健康风险评估的研究. Deng 等[19]对以家庭作坊为主要的拆解方式的广东贵屿镇的 TSP 和 $PM_{2.5}$ 的重金属污染水平及毒性试验进行了研究，并分析得出由于焚烧等原始拆解方式在贵屿个体小作坊的普遍应用，增大毒性金属向大气环境释放的可能.

国内关于电子垃圾排放的重金属污染相关研究，主要在中国加工电子废物回收较为集中的东南部地区，如：贵屿、台州、清远[8]. 这些地区主要是通过个体手工作坊采用露天焚烧、强酸浸泡等原始落后方式提取贵金属，落后而原始的拆解方式造成了较为严重的生态恶果，如污染地下水及土壤. 随着国家产业西移战略的推进和实施，以及避免传统的手工作坊式拆解活动所造成的环境污染及健康风险，规模化的电子垃圾回收与拆解相关产业亦开始在西北地区投资建设. 与地下水较为丰富的南方地区比较，西北干旱地区地下水资源相对匮乏，地下水系欠发达，且人口稀疏. 但西北干旱区生态环境脆弱，其规模化的电子垃圾拆解厂是否会给当地带来生态与健康的问题还有待于研究证实. 刘保健等[20]虽提出建立西北地区电子垃圾的回收渠道，走规模化的发展道路. 但就目前来看，通过监测数据定量评估分析西北干旱区规模化建厂的电子垃圾拆解生产活动所产生的排放以及所带来的周边环境污染及职业暴露风险还未见公开报道. 由此，本文对西北干旱区某个按国家环保要求建设的规模化电子垃圾拆解厂拆解活动所排放的重金属进行了污染水平、污染特征及其带来的职业呼吸暴露风险等研究，通过了解电子垃圾产业西移给周边空气环境以及职业人群健康所带来的影响和风险，以期为企业管理者及政府环境管理提供理论支撑和科学决策.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及采样点布设

研究区概况：本研究选取的某规模化电子垃圾拆解厂位于西北干旱半干旱区的甘肃省兰州市皋兰县 (36°20′N, 103°57′E)，如图 1 所示，属温带大陆性气候，昼夜温差大. 该拆解厂是按照国家环保要求建厂，并根据环保部所发布相关规章制度要求来管控电子垃圾拆解和回收活动. 拆解废物主要包括电视机、电脑的废旧显示器，液晶电视、电脑、笔记本外壳、电路板、液晶屏等元件及零件.

采样点布设：本研究选取该电子垃圾规模化拆解厂中的一个拆解车间作为车间内采样点，以调查拆解活动排放对室内作业环境带来的重金属污染；此外，为了了解拆解活动的重金属排放通过空气的扩散迁移对周边空气环境的影响，选取该拆解厂内的一个五层行政办公楼楼顶作为车间外空气环境的采样点；本研究的对照点位于该规模化电子垃圾拆解厂上风向 5 km 处.

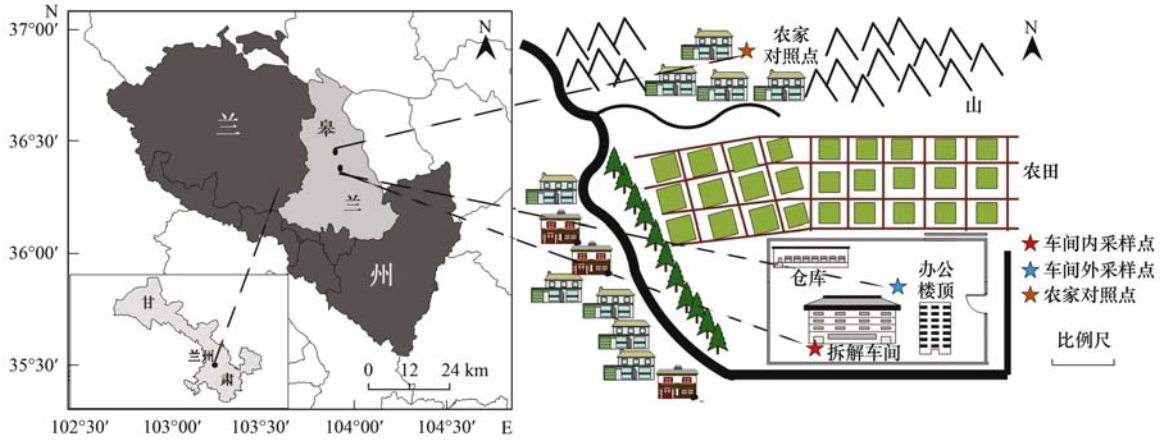


**图 1　西北地区某规模化电子垃圾拆解厂地理位置及采样点布设示意**

Fig. 1　Geographical location and sampling sites layout of a large-scale electronic waste dismantling plant in Northwest China

### 1.2　样品采集、前处理与分析

拆解车间内、外：采集空气颗粒相（$PM_{1.0}$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$）样品；对照点：由于采样器数量的限制，只对 $PM_{2.5}$ 进行了样品采集. $PM_{10}$ 采用大流量空气采样器（中国武汉天虹智能仪器厂）采集，$PM_{2.5}$ 及 $PM_{1.0}$ 亦由大流量空气采样器（Grase by Anderson）采集. 本研究于 2016 年 11 月 17 ~ 26 日期间，连续采集 10 d 空气颗粒相样品，采样期间平均最高气温为 7.6℃，平均最低气温为 −9.4℃. 使用石英滤膜（QFF，20.3 cm × 25.4 cm，Whatman，英国）进行颗粒相样品采集，共采集样品 70 个，车间内、外及对照点的采样流量依次分别为 200、300 和 250 $L \cdot min^{-1}$. 每天采样时间为 23 h，采样前后分别称重并予以记录，同时记录大气压、温度等参数，以计算标准状况下颗粒相重金属的质量浓度.

样品前处理：用剪刀将八分之一滤膜剪碎于微波消解罐中并加入 9 mL 浓盐酸和 3 mL 浓硝酸，消解采用安东帕（Multi wave 3000）消解法，消解时间为 79 min. 消解结束及过滤后，用超纯水定容到刻度线，于 4℃冷藏保存直至分析.

样品分析：利用电感耦合等离子体光学发射光谱仪（ICP-OES，PerkineElmer SCIEX，Optima 5300）定量分析所有重金属（Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn）含量. 每一批样品均设置两个平行样、一个空白样，并且对所有待测重金属进行了空白加标回收测试以控制分析的准确度. 每种重金属元素的空白加标回收率范围在 95% ~ 110% 之间. 平行样品的待测重金属浓度相对标准差≤10%.

### 1.3　健康风险评估模型

本研究基于观测到的空气颗粒相重金属浓度，利用以下健康风险评估模型对该规模化电子垃圾拆解厂车间内作业环境中职业工人呼吸暴露风险进行了评估. 根据美国环保署综合危险度信息数据库（Integrated Risk Information System，IRIS）和国际癌症研究机构（International Agency for Research on Cancer，IARC）对致癌物与非致癌物的划分，则重金属健康风险划分为致癌性健康风险与非致癌性健康风险. 本研究所关注的 6 种重金属中均具有慢性非致癌健康风险，其中 Cd、Cr 和 Ni 作为致癌物还具有致癌风险. 对于非致癌性风险，呼吸暴露途径的日平均暴露剂量［$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$］计算公式如式（2）[21]，暴露参数详见表 1.

$$ADD_{inh} = C \times \frac{IR_{inh} \times EF_{inh} \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (2)$$

对于致癌性健康风险，基于美国 EPA 仅给出了关于呼吸暴露的致癌风险暴露剂量公式，如式（3）[21]，由此本研究只涉及由职业环境呼吸暴露所带来的致癌风险.

$$LADD_{inh} = \frac{C \times IR_{inh} \times EF_{inh} \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (3)$$

关于呼吸速率以及平均暴露时间等参数，本研究基于对拆解车间职业工人年龄、体重、工时等问题进行调查问卷的结果，结合中国卫生年鉴人口寿命数据，综合考虑后得出表 1 的参数值.

对于非致癌风险，本研究采用暴露量与重金属参考剂量的比值，即危害熵（hazard quotient，HQ）来度量，其表达式为 HQ = ADD/RfD. 其中 RfD 表示

表 1 健康风险评估暴露参数

Table 1 Parameters of the health risk assessment model

| 暴露参数 | 描述 | 参数值 | 文献 |
|---|---|---|---|
| C | 颗粒相重金属含量/mg·kg$^{-1}$ | — | — |
| $IR_{inh}$ | 呼吸速率/m$^3$·d$^{-1}$ | 14.45 | [22] |
| EF | 年暴露频率/d·a$^{-1}$ | 250 | [23] |
| ED | 暴露年限/a | 10 | [23] |
| BW | 平均体重/kg | 65 | [24,25] |
| AT | 平均暴露时间/d | 非致癌金属:ED×365 d; 致癌金属:71.4×365 d | [21] |
| PEF | 颗粒物排放因子/m$^3$·kg$^{-1}$ | $1.36\times10^9$ | [17,18] |
| SF | 斜率因子 | Cd: 6.30; Cr: 42; Ni: 0.84 | [21] |

重金属污染物的参考剂量. 采用危害熵的值来评估健康风险的高低, 若 HQ < 1 时, 认为风险较小或可忽略不计; 若 HQ > 1 时, 则认为存在非致癌风险; 对于致癌风险, 用暴露剂量乘以相应的致癌斜率因子 SF, 即得到相应的致癌总风险 Risk[21]:

$$\text{Risk} = \text{LADD} \times \text{SF} \tag{4}$$

### 1.4 人体呼吸系统沉积通量计算模型

为了评估不同粒径颗粒态的重金属对人体健康危害的差异, 本研究采用国际防辐射委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)提供的简化的 ICRP 模型计算颗粒态重金属在人体呼吸系统不同器官如鼻腔咽喉部(head airways, HA)、气管支气管部位(traheobronchial region, TB)和肺泡部位(alveolar region, AR)的沉积通量[26], 颗粒态污染物在人体呼吸系统不同器官的沉积通量(deposition flux, $D$)用公式(5)计算[26]:

$$D_{j,i} = \sum (\text{DF}_{j,i} \times C_i) \times V \tag{5}$$

$$\text{DF}_{\text{HA},i} = \text{IF} \times \left( \frac{1}{1 + \exp(6.84 + 1.183 \ln D_p)} + \frac{1}{1 + \exp(0.924 - 1.885 \ln D_p)} \right) \tag{6}$$

$$\text{IF} = 1 - 0.5\left(1 - \frac{1}{1 + 0.000\,16 D_p^{2.8}}\right) \tag{7}$$

式中, $D_{j,i}$为第 $i$ 个粒径范围的颗粒物在第 $j$ 个部位的沉积通量, ng·h$^{-1}$. $\text{DF}_{j,i}$为第 $i$ 个粒径段颗粒物在第 $j$ 个部位的沉积系数, 由于计算过程过于复杂,本研究仅给出 $\text{DF}_{\text{HA},i}$的计算公式, 其他 2 个沉积部位的计算公式具体参见文献[26]. $C_i$ 是不同粒径颗粒物上污染物的浓度,ng·m$^{-3}$. $V$ 是正常成人的呼吸速率, 取 0.45 m$^3$·h$^{-1}$[27]. IF 为颗粒物的可吸入部分(inhalable fraction), $D_p$ 为颗粒物的粒径(μm).

## 2 结果与讨论

### 2.1 空气颗粒物中重金属浓度水平及污染特征

#### 2.1.1 拆解车间内颗粒物重金属浓度水平

拆解车间内颗粒物($PM_{1.0}$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$)的重金属浓度从大到小依次为, $PM_{1.0}$: Zn (1 977 ng·m$^{-3}$) > Pb (568 ng·m$^{-3}$) > Cu (201 ng·m$^{-3}$) > Ni (108 ng·m$^{-3}$) > Cr (53 ng·m$^{-3}$) > Cd (14 ng·m$^{-3}$); $PM_{2.5}$: Zn (4 890 ng·m$^{-3}$) > Pb (1 201 ng·m$^{-3}$) > Cu(1 200 ng·m$^{-3}$) > Ni(320 ng·m$^{-3}$) > Cr (170 ng·m$^{-3}$) > Cd (30 ng·m$^{-3}$); $PM_{10}$: Zn (3 690 ng·m$^{-3}$) > Pb (1 280 ng·m$^{-3}$) > Cu (1 087 ng·m$^{-3}$) > Ni (350 ng·m$^{-3}$) > Cr (170 ng·m$^{-3}$) > Cd (20 ng·m$^{-3}$). 从图 2 中也可以看出, 拆解车间内重金属在 $PM_{2.5}$中分布的浓度水平最高, 表明车间内重金属易于吸附在 $PM_{2.5}$上.

由于电子垃圾拆解产业没有制定如其他行业车间空(废)气中重金属的行业排放标准, 由此, 本研究依据《工作场所空气中有毒物质容许浓度》Cd、Ni、Pb 和 Cu 这 4 种重金属元素的浓度限定值(0.02、1.5、0.15 和 2.5 mg·m$^{-3}$), 对本研究的拆解车间内的相对应的重金属元素浓度水平进行比较及评定, 结果表明本研究的相对应重金属的最高浓度水平值均远低于上述工作场所空气中有毒物质容许浓度限定值的 3 ~ 4 个数量级. 说明规模化电子垃圾拆解活动造成车间内重金属排放污染与其他职业场所造成的重金属污染相比, 相对水平较低.

#### 2.1.2 拆解车间外颗粒物重金属浓度水平

拆解车间外颗粒物($PM_{1.0}$、$PM_{2.5}$、$PM_{10}$)的重金属浓度从大到小依次为, $PM_{1.0}$:Zn (890 ng·m$^{-3}$) > Pb (157 ng·m$^{-3}$) > Cu (89 ng·m$^{-3}$) > Cr (31 ng·m$^{-3}$) > Ni (28 ng·m$^{-3}$) > Cd (8 ng·m$^{-3}$); $PM_{2.5}$: Zn (1 174 ng·m$^{-3}$) > Pb (196 ng·m$^{-3}$) > Cu (103 ng·m$^{-3}$) > Cr(38 ng·m$^{-3}$) > Ni(29 ng·m$^{-3}$)

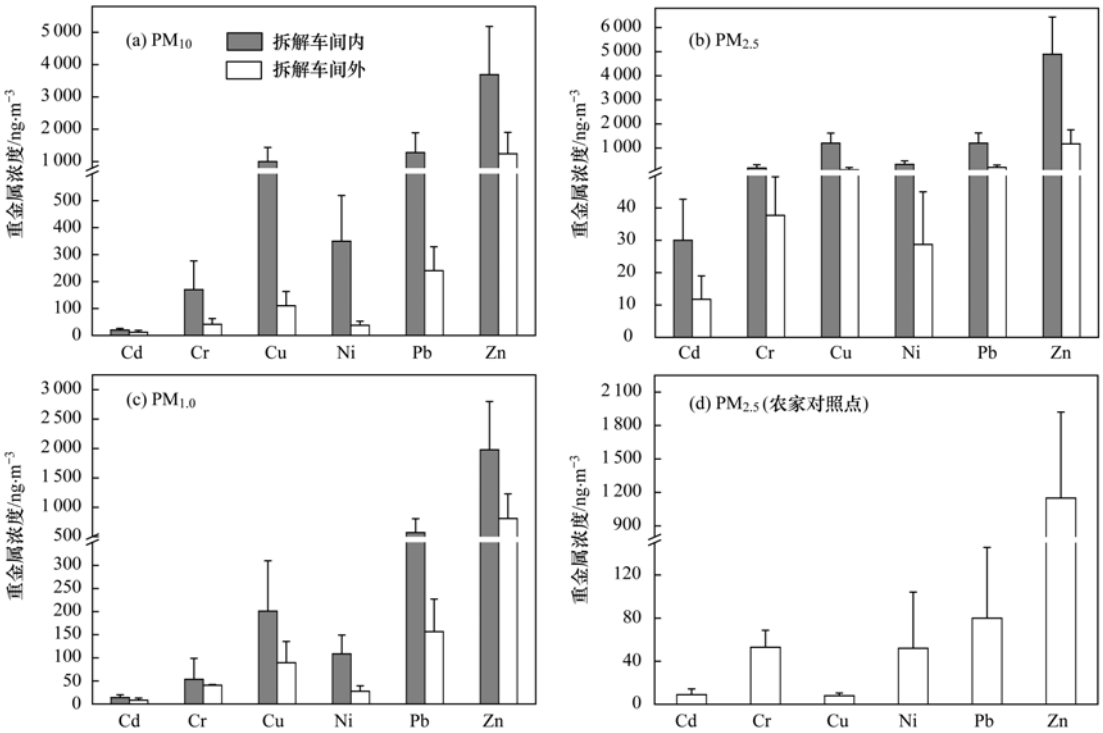


**图 2　拆解车间内外 $PM_{10}$、$PM_{2.5}$、$PM_{1.0}$ 及对照点 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度水平**

Fig. 2　Concentrations of heavy metals in the particulate matter at the indoor and outdoor dismantling workplaces and control site

>Cd(12 ng·m$^{-3}$)；$PM_{10}$：Zn（1 245 ng·m$^{-3}$）>Pb（240 ng·m$^{-3}$）>Cu（110 ng·m$^{-3}$）>Cr（41 ng·m$^{-3}$）>Ni（38 ng·m$^{-3}$）>Cd（12 ng·m$^{-3}$），拆解车间外重金属在 $PM_{10}$ 中含量最高(图 2)，表明在车间外环境空气中重金属更易于吸附于较粗的颗粒物 $PM_{10}$ 上，与车间内重金属的粒径分布特征有所不同. 可能由于车间内外不同的环境条件如温度、相对湿度、风速等，以及内外环境扩散机制等不同在一定程度上影响不同粒径的颗粒物对重金属的吸附含量大小，而且车间外上风向干旱区大面积土壤裸露，自然扬尘等外来源也会造成 $PM_{10}$ 中重金属浓度高于细颗粒物. 车间内外 3 种重金属(Zn、Pb、Cu)在不同粒径中的含量均较高，分析与所拆解的电子垃圾种类有关，印制线路板，电视机显示器的阴极射线管以及电视机中压敏电阻的原材料中 Cu、Pb、Zn 含量高，而 Ni、Cd、Cr 等痕量元素含量相对较低[28].

本研究针对车间外空气环境中颗粒物的重金属浓度水平与国内外环境空气质量标准中 $PM_{10}$ 的重金属浓度限值进行了对比分析[29]，结果表明车间外 $PM_{10}$ 中 Cr 的浓度值是我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)(《标准》)标准限值(0.19 ng·m$^{-3}$)的 215 倍，是 WHO《欧洲空气质量指南》(《指南》)标准限值(1.92 ng·m$^{-3}$)的 21.6 倍；车间外 $PM_{10}$ 中 Pb 的浓度值(240 ng·m$^{-3}$)略低于《标准》限定值(272.5 ng·m$^{-3}$)；车间外 $PM_{10}$ 中 Cd 的浓度值是《标准》、《指南》等限定值(3.5 ng·m$^{-3}$)的 4 倍. 车间外 $PM_{10}$ 中 Ni 的平均浓度值是欧盟《空气质量标准》限定值(13.8 ng·m$^{-3}$)的近 3 倍，是 WHO《指南》的限定值(17.3 ng·m$^{-3}$)2 倍之多. 说明车间外空气环境中重金属主要来自车间内拆解活动的重金属排放，由此可见拆解车间外环境空气质量已经受到了一定程度的拆解排放的影响和产生污染，尤其是 Cr 污染水平超标较为严重. 因此企业管理者及政府相关职能部门机构应加强拆解活动中 Cr 排放控制，以最大程度地降低对车间内职业环境、及车间外空气环境的污染.

### 2.1.3　对照点颗粒物重金属浓度水平

对照点 6 种重金属在 $PM_{2.5}$ 中的浓度从大至小依次为：Zn(1149 ng·m$^{-3}$)>Pb(80 ng·m$^{-3}$)>Cr(53 ng·m$^{-3}$)>Ni(47 ng·m$^{-3}$)>Cd(10 ng·m$^{-3}$)>Cu(8 ng·m$^{-3}$). 图 2(d)中的对照点 $PM_{2.5}$ 中 Zn 的浓度与图 2(b)中拆解车间室外的 $PM_{2.5}$ 的 Zn 的浓度水平相当，Ni 与 Cr 的含量甚至略高于拆解车间外，造成这种现象的可能原因是由于采样期间正值冬季采暖期，而 Kemp 等[30]在其研究中表明居民取暖是重金属主要来源之一，以及生物质燃烧等都会对颗粒物中重金属排放产生贡献[31]，推测是导致 Cd、Cr、Ni 的浓度在对照点高于拆解车间外环境浓度的重要原因. 加之大气稳定度越高颗粒物的垂直运动就越受限制，从一定程度上影响车间内重金属浓度扩散到办公楼楼顶，造成楼顶本身污染物浓度值相对较低；其次，5 层办公楼

楼顶与上风向农家院落相比风速较快，颗粒态重金属的扩散速率相对较高，进一步降低楼顶的颗粒物中重金属浓度.

## 2.2 重金属职业健康风险评估

为了便于对拆解车间内、外及农家对照点的健康风险进行比较，考虑到重金属在 $PM_{2.5}$ 中的浓度水平分布为 3 个粒径中较高，且 $PM_{2.5}$ 对人体的健康危害大于粗颗粒物($PM_{10}$)，因此采用 $PM_{2.5}$ 中的重金属浓度进行职业空气环境或区域空气环境暴露健康风险评估.

### 2.2.1 非致癌风险

图 3 为拆解车间内、外，对照点的非致癌暴露剂量值(ADD)与非致癌健康风险危害熵(HQ). 总体而言，HQ(车间内) > HQ(车间外) > HQ(对照点). 拆解车间内各重金属对非致癌风险贡献率从高到低的依次为 Cr > Pb > Cu > Cd > Zn > Ni. 车间外 Cu 的非致癌风险比 Cd 高出 1 个数量级. 拆解车间内外及农家对照点总非致癌危害指数为 $1.62 \times 10^{-3}$ 和 $3.60 \times 10^{-4}$，$3.18 \times 10^{-4}$ 与美国环境保护署(U. S. EPA)规定的限定值(1.0)相比低 3 ~ 4 个数量级，表明拆解车间内、外及农家对照点的重金属所导致的非致癌风险较小，即处于相对安全水平. 其中非致癌危害指数最高的是 Cr，与其他重金属相比，Cr 可以在较小的呼吸暴露剂量值下达到较大的非致癌健康风险危害.

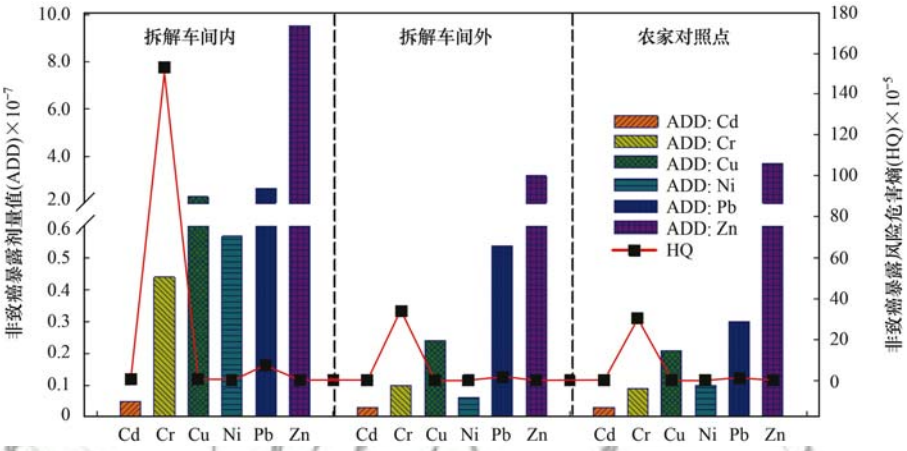


**图 3 拆解车间内外及对照点的非致癌露剂量及非致癌风险危害熵**

Fig. 3 Non-carcinogenic average daily exposure dose (ADD) and hazard quotient (HQ) of heavy metals at the indoor and outdoor of dismantling workplaces and control site

### 2.2.2 致癌风险

图 4 为拆解车间内、外、对照点的致癌暴露剂量值(LADD)与致癌风险(risk). 在拆解车间内外及农家对照点，3 种致癌重金属所造成的总致癌风险值分别为 $2.69 \times 10^{-7}$、$2.59 \times 10^{-9}$ 和 $5.50 \times 10^{-8}$. 本研究车间内致癌风险与上海某一特定的工业区电视机显示器(CRT)拆解线所造成的致癌风险水平相当($3.34 \times 10^{-7}$)[18]，但低于 US. EPA 对重金属所造成的致癌风险所规定的可接受范围($1.0 \times 10^{-6}$). 由此推断，拆解车间内、外以及对照点 Cr、Cd、Ni 的致癌风险均相对较小，处于较安全水平. 单个重金属的致癌风险最大的为 Cr，前文表明 Cr 也是非致癌风险中贡献值最大. 尽管致癌风险较低，处于相对安全及可接受水平，但是车间内外重金属主要吸附于细颗粒物中，危害性大，所以企业仍需加强对 Cr 排放的管理，减少职业工人的健康风险.

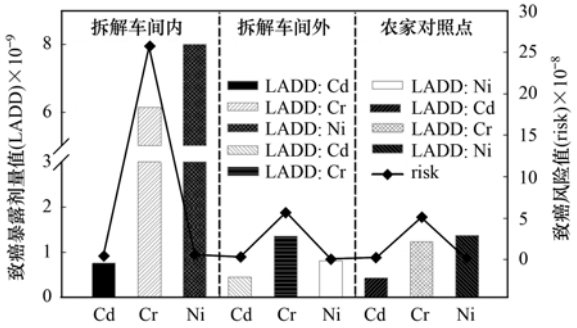


**图 4 拆解车间室内外及对照点的致癌暴露剂量与致癌风险**

Fig. 4 Lifetime average daily dose and cancer risk level of heavy metal at the indoor and outdoor dismantling workplaces and control site

### 2.2.3 不确定性分析

不确定性是健康风险评价的一个基本特征，是客观存在的[32]. 一方面由于拆解车间每日拆解量不固定、以及实验过程的各种干扰造成测得颗粒物重金属浓度存在不确定性；另一方面人体的生理学差异(性别、体重、遗传因素等)，使健康风险评价存在不确定性[21]. 为降低健康风险评估中无法避免的不确定性，使用水晶球软件(Crystal Ball，版本号 11.1.63.0)中的蒙特卡罗模型对本研究拆解车间 $PM_{2.5}$ 中的典型存在致癌风险的重金属元素 Cd、

Cr、Ni 的致癌风险进行不确定性分析，描述其中对个体风险的分布. 从其中质量浓度、人体质量及呼吸速率 3 个不确定因素分布中独立抽取样本，其中重金属元素质量浓度数据用正态分布来表征，人体质量数据采用对数正态分布来表征[33,34]，呼吸速率采用三角分布表征，重复计算 5000 次，以表征不同拆解工人长期暴露于电子垃圾拆解车间空气环境的可能致癌风险. 结果如图 5 ~ 7 所示.

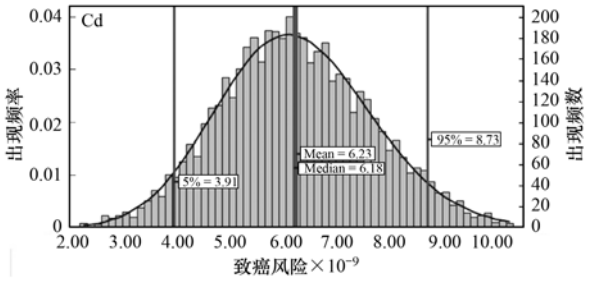


**图 5　拆解车间内 $PM_{2.5}$ 中 Cd 的致癌风险频率分布**

Fig. 5　Frequency distribution of carcinogenic risk of Cd in $PM_{2.5}$ at the dismantling workshop

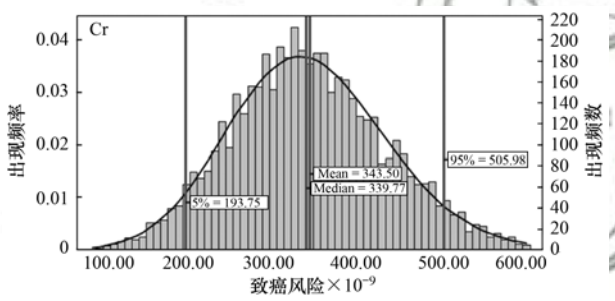


**图 6　拆解车间内 $PM_{2.5}$ 中 Cr 的致癌风险频率分布**

Fig. 6　Frequency distribution of carcinogenic risk of Cr in $PM_{2.5}$ at the dismantling workshop

图 5 ~ 7 中 Cd、Cr 和 Ni 的平均数、中位数、95% 和 5% 的值代表了拆解车间的职业工人中所对应的平均值、中位值和上、下限值的致癌风险. 从中可以看出，Cd、Cr 和 Ni 的致癌风险基本不存在偏斜. 即使上限致癌风险值仍未超过 US. EPA 对重金属所造成的致癌风险的所规定的的可接受范围 ($1.0 \times 10^{-6}$)，表明拆解车间内 Cd、Cr 和 Ni 所造成的致癌风险相对较小.

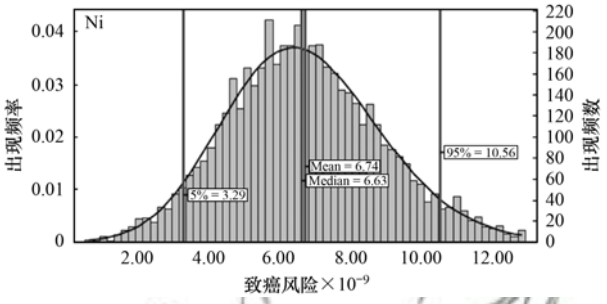


**图 7　拆解车间内 $PM_{2.5}$ 中 Ni 的致癌风险频率分布**

Fig. 7　Frequency distribution of carcinogenic risk of Ni in $PM_{2.5}$ at the dismantling workshops

## 2.3　不同粒径重金属在人体呼吸系统的沉积通量及特征

颗粒物的呼吸暴露风险不仅与其颗粒物上赋存的有毒有害污染物(hazardous air pollutants，HAPs)浓度有关，如重金属及持久性有机污染物(persistent organic pollutants，POPs)，更受粒径分布的影响[26]. 为了进一步评估不同粒径颗粒态重金属对暴露人群健康危害的程度及差异，本研究采用国际防辐射委员会推荐的 ICRP 简易模型(前文已给出)计算不同粒径颗粒态重金属在人体呼吸系统

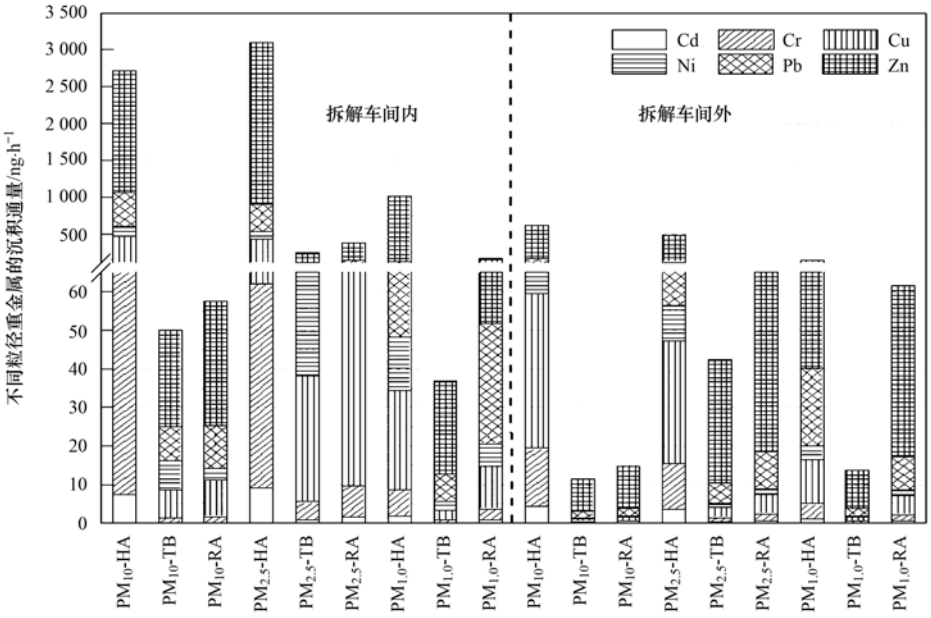


**图 8　不同粒径的重金属在呼吸系统各器官(HA、TB、RA)的累积沉积通量**

Fig. 8　Deposition fluxes of particle-bound heavy metals in different respiratory organs (HA, TB, AR)

不同器官(HA、TB、RA)的沉积通量[26],结果如图8所示,下文中沉积通量用 $D$ 来表示. 总体上颗粒物中重金属大部分沉积于鼻腔咽喉部,较少一部分沉积于肺泡部位. 拆解车间内,$PM_{10}$、$PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 中6种重金属在呼吸系统各器官的总沉积浓度占颗粒物总浓度的百分占比为38%~47%、39%~53%和20%;车间外为38%、39%和20%. 车间内的沉积百分占比整体大于车间外,表明车间内的呼吸暴露健康风险大于车间外. 由于沉积通量受到污染物浓度和粒径分布双重因素的影响,以拆解车间内 $PM_{2.5}$ 中的各个重金属在不同器官的累积沉积通量均最大,为3260 $ng \cdot h^{-1}$. 拆解车间内外Zn、Pb、Cu的沉积通量在各个器官不同粒径上均较高,其中以拆解车间内 $PM_{2.5}$ 粒径范围沉积在鼻腔咽喉部(HA)的通量最大,分别为2200.5、371.3和371.2 $ng \cdot h^{-1}$. 致癌重金属Cd、Cr和Ni在不同器官的沉积通量相对较小,造成的致癌风险也就相对较小.

拆解车间内外不同粒径的重金属在呼吸系统各器官的沉积通量的相对贡献如图9所示. 拆解车间内外的不同粒径中的重金属的沉积特征表现在:粒径越小,沉积到鼻腔咽喉部的金属含量所占百分占比就越小,而沉积到肺泡部位的百分占比就越大;其中 $PM_{1.0}$ 的6种重金属中沉积到肺泡部位的含量占呼吸系统各器官总沉积通量的百分占比最高可达28%,$PM_{2.5}$ 最高可达到11%,由此可见细颗粒物对人体的呼吸系统的健康危害也就越大. 虽然每日进入到肺泡部位的重金属沉积通量相对较小,但由于拆解车间的职业工人长期从事电子垃圾的拆解工作,沉积于肺泡部位的颗粒态重金属累积量逐渐增大,对职业工人的肺部健康所造成的威胁越大. 所以对于职业工人的呼吸健康问题不容忽视,例如可以从职业工人的防尘口罩角度,防尘粒径更细化,减少细颗粒物的吸入对工人所造成的影响;优化防尘装置,从源头减少车间内细颗粒物的排放量;定期对职业工人进行呼吸体统等进行全面体检.

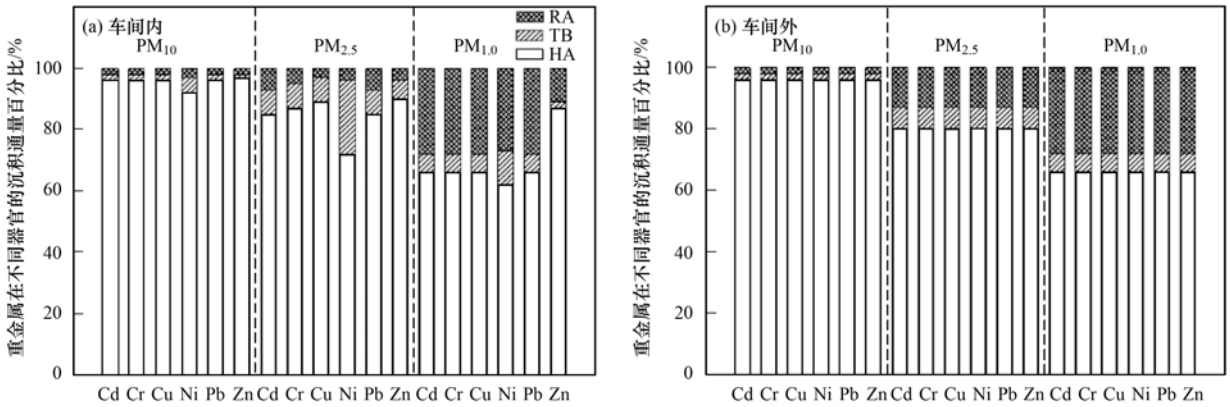


**图9 拆解车间内外不同粒径的重金属在呼吸系统各器官(HA、TB、RA)的沉积通量百分比**

Fig. 9 Percentage of deposition fluxes of particle-bound heavy metals in different respiratory organs (HA, TB, AR) at the indoor and outdoor of dismantling workplaces

## 3 结论

(1)拆解车间内重金属在 $PM_{2.5}$ 中分布的浓度水平最高,车间外重金属则主要吸附于 $PM_{10}$. 在车间内重金属的浓度与《工作场所空气中有毒物质容许浓度》的限定值相比处于较低水平,规模化电子垃圾拆解活动造成车间内重金属排放污染与其他职业场所造成的重金属污染相比,相对水平较低. 车间外的Pb、Cd、Cr与国内外相关空气质量标准相比,浓度水平较高,表明拆解车间外重金属含量明显受到车间内拆解活动的影响从而造成相对严重的空气重金属空气污染.

(2)拆解车间室内外总非致癌危害指数为 $1.62 \times 10^{-3}$ 和 $3.6 \times 10^{-4}$,与美国环境保护署(U. S. EPA)规定的限定值1相比相差3~4个数量级,表明拆解车间室内、室外重金属所导致的非致癌风险相对较小. 拆解车间室内外致癌风险值为 $2.69 \times 10^{-7}$ 和 $2.59 \times 10^{-9}$,均远小于美国EPA所规定的的 $10^{-6}$ 范围内,所以认为Cr、Cd、Ni在拆解车间内,外重金属所引起的致癌风险较低.

(3)$PM_{10}$ 主要沉积于鼻腔咽喉部,贡献率达到46.67%~49.68%;$PM_{2.5}$ 在气管支气管部的沉积百分占比最大,61.12%~72.17%;$PM_{1.0}$ 在肺泡部位的沉积百分占比最大,为25.7%~43%. 拆解车间内 $PM_{2.5}$ 粒径范围Zn、Pb、Cu在鼻腔咽喉部(HA)的沉积通量最大,分别为2200.5、371.3、371.2 $ng \cdot h^{-1}$.

(4)通过研究不同粒径的颗粒物重金属在呼吸

系统不同器官的沉积通量来看，颗粒态重金属在人体呼吸系统的不同器官的沉积特征即粒径越小，在呼吸系统的深处的沉积百分占比越大，从而对职业工人的健康危害也就越大. 所以企业仍需加强对职业工人呼吸健康的重视，做出科学有效的决策.

**参考文献：**


[1] 郑良楷. 电子垃圾回收拆解区儿童血铅镉水平调查及 ALAD 基因多态性研究[D]. 广州：汕头大学，2007.

[2] Singh M, Thind P S, John S. Health risk assessment of the workers exposed to the heavy metals in e-waste recycling sites of Chandigarh and Ludhiana, Punjab, India[J]. Chemosphere, 2018, **203**: 426-433.

[3] 杜晓燕. 我国电子垃圾产业化问题研究[D]. 武汉：中国地质大学，2007.

[4] Cui J R, Forssberg E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **99**(3): 243-263.

[5] Zheng L K, Wu K S, Li Y, *et al*. Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China[J]. Environmental Research, 2008, **108**(1): 15-20.

[6] Akesson A, Lundh T, Vahter M, *et al*. Tubular and glomerular kidney effects in Swedish women with low environmental cadmium exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2005, **113**(11): 1627-1631.

[7] Méar F, Yot P, Cambon M, *et al*. The characterization of waste cathode-ray tube glass[J]. Waste Management, 2006, **26**(12): 1468-1476.

[8] Song Q B, Li J H. A review on human health consequences of metals exposure to e-waste in China[J]. Environmental Pollution, 2015, **196**: 450-461.

[9] 姚琳，廖欣峰，张海洋，等. 中国大气重金属污染研究进展与趋势[J]. 环境科学与管理，2012，**37**(9)：41-44.
Yao L, Liao X F, Zhang H Y, *et al*. Progress and trend of atmospheric heavy metal pollution in China[J]. Environmental Science and Management, 2012, **37**(9): 41-44.

[10] 赵珍丽，赵委托，黄庭，等. 电镀厂周边大气 $PM_{10}$ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学，2018，**39**(1)：18-26.
Zhao Z L, Zhao W T, H T, *et al*. Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in $PM_{10}$ around electroplating plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 18-26.

[11] 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.

[12] 陈衍婷，杜文娇，陈进生，等. 海西城市群 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学，2017，**38**(2)：429-437.
Chen Y T, Du W J, Chen J S, *et al*. Pollution characteristics of heavy metals in $PM_{2.5}$ and their human health risks among the coastal city group along western Taiwan straits region, China[J]. Environment Science, 2017, **38**(2): 429-437.

[13] 尹伊梦，赵委托，黄庭，等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学，2018，**39**(2)：916-926.
Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al*. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a Soil-rice system in an E-waste dismantling area[J]. Environment Science, 2018, **39**(2): 916-926.

[14] 赵科理，傅伟军，叶正钱，等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. 环境科学，2016，**37**(8)：3151-3159.
Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al*. Spatial variation of soil heavy metals in an E-waste dismantling area and their distribution characteristics[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3151-3159.

[15] 张金莲，丁疆峰，卢桂宁，等. 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价[J]. 环境科学，2015，**36**(7)：2633-2640.
Zhang J L, Ding J F, Lu G N, *et al*. Heavy metal contamination in farmland soils at an E-waste disassembling site in qingyuan, Guangdong, South China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2633-2640.

[16] 林娜娜，单振华，朱崇岭，等. 清远某电子垃圾拆解区河流底泥中重金属和多氯联苯的复合污染[J]. 环境化学，2015，**34**(9)：1685-1693.
Lin N N, Shan Z H, Zhu C L, *et al*. Heavy metal and PCB contamination in river sediments of an E-waste recycling site in Qingyuan City[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(9): 1685-1693.

[17] Xue M Q, Yang Y C, Ruan J J, *et al*. Assessment of noise and heavy metals (Cr, Cu, Cd, Pb) in the ambience of the production line for recycling waste printed circuit boards[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(1): 494-499.

[18] Fang W X, Yang Y C, Xu Z M. $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(21): 12469-12476.

[19] Deng W J, Louie P K K, Liu W K, *et al*. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and $PM_{2.5}$ at an electronic waste recycling site in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(36): 6945-6955.

[20] 刘保健，张敏，李文清，等. 建立我国西北地区电子垃圾回收渠道[J]. 资源再生，2007，(4)：27-30.
Liu B J, Zhang M, Li W Q, *et al*. Establishing our country nw area electronic refuse recycling channel[J]. Resource Recycling, 2007, (4): 27-30.

[21] 董婷，李天昕，赵秀阁，等. 某焦化厂周边大气 $PM_{10}$ 重金属来源及健康风险评价[J]. 环境科学，2014，**35**(4)：1238-1244.
Dong T, Li T X, Zhao X G, *et al*. Source and health risk assessment of heavy metals in ambient air $PM_{10}$ from one coking plant[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1238-1244.

[22] 王宗爽，武婷，段小丽，等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究，2009，**22**(10)：1171-1175.
Wang Z S, Wu T, Duan X L, *et al*. Research on inhalation rate exposure factors of Chinese residents in environmental health risk assessment[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(10): 1171-1175.

[23] Li J, Xu Z M. Environmental friendly automatic line for recovering metal from waste printed circuit boards[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(4): 1418-1423.

[24] 卫生部. 2007 中国卫生统计年鉴[M]. 北京：中国协和医科

大学出版社, 2007.

[25] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 基于盲数理论的城市表土与灰尘重金属污染健康风险评价模型[J]. 环境科学报, 2013, **33**(1): 276-285.
Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al*. Uncertainty model for the health risk of heavy metals in urban topsoil and dust based on blind number theory[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 276-285.

[26] 罗沛. 大气颗粒态典型半挥发性有机污染物的粒径分布及人体呼吸暴露风险评估[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.

[27] Zhang K, Zhang B Z, Li S M, *et al*. Calculated respiratory exposure to indoor size-fractioned polycyclic aromatic hydrocarbons in an urban environment[J]. Science of the Total Environment, 2012, **431**: 245-251.

[28] Yang Y C, Fang W X, Xue M Q, *et al*. TSP, $PM_{10}$ and health risk assessment for heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) in the ambience of the production line for waste cathode ray tube recycling [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, **18**(2): 296-302.

[29] 邹天森, 康文婷, 张金良, 等. 我国主要城市大气重金属的污染水平及分布特征[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(7): 1053-1061.
Zou T S, Kang W T, Zhang J L, *et al*. Concentrations and distribution characteristics of atmospheric heavy metals in urban areas of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(7): 1053-1061.

[30] Kemp K. Trends and sources for heavy metals in urban atmosphere[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, **189**(1-4): 227-232.

[31] 王小刚, 李海滨, 向银花, 等. 废弃物燃烧产生的可吸入颗粒物中金属元素的排放特性研究[J]. 燃料化学学报, 2006, **34**(1): 81-84.
Wang X G, Li H B, Xiang Y H, *et al*. Emission character of metal elements in inhalable particulate emitted from several waste burning[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, **34**(1): 81-84.

[32] 高爽. 恶臭污染源挥发性有机物排放特征和健康风险评估[D]. 天津: 南开大学, 2012.

[33] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(12): 1359-1363.
Wang X Y, Gao S, Zhou J Q, *et al*. Risk assessment of VOCs from cooking fumes[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(12): 1359-1363.

[34] 王钊, 韩斌, 倪天茹, 等. 天津市某社区老年人 $PM_{2.5}$ 暴露痕量元素健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 913-918.
Wang Z, Han B, Ni T R, *et al*. Health risk assessment of trace elements of $PM_{2.5}$ exposure for the elderly subpopulation in Tianjin, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(8): 913-918.

**HUANJING KEXUE** Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

# CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 ····· YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, *et al.* (1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 ····· LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, *et al.* (1024)
Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter ····· WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, *et al.* (1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, *et al.* (1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City ····· ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, *et al.* (1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Heating and Non-heating Periods in Shenyang ····· ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, *et al.* (1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment ····· YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, *et al.* (1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient $PM_{2.5}$ During Four Seasons in Yantai City ····· LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, *et al.* (1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in $PM_{2.5}$ During Winter in Changzhou ····· GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, *et al.* (1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China ····· CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, *et al.* (1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations ····· QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, *et al.* (1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, *et al.* (1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation ····· ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying (1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan ····· WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, *et al.* (1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China ····· GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, *et al.* (1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone ····· HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, *et al.* (1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City ····· LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, *et al.* (1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu ····· HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, *et al.* (1179)
Diffusive $CO_2$ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model ····· ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, *et al.* (1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea ····· LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, *et al.* (1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir ····· LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, *et al.* (1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China ····· LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, *et al.* (1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring ····· WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, *et al.* (1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River ····· HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, *et al.* (1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City ····· WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, *et al.* (1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir ····· ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, *et al.* (1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China ····· LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) ····· SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, *et al.* (1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of *Acorus calamus* in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland ····· HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, *et al.* (1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials ····· HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, *et al.* (1287)
Preparation of BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants ····· ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, *et al.* (1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source ··· WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, *et al.* (1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite ····· DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, *et al.* (1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar ····· YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, *et al.* (1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution ····· CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, *et al.* (1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions ····· YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant ····· WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou (1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes ····· XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, *et al.* (1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System ····· LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, *et al.* (1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification ····· LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance ····· MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, *et al.* (1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times ····· YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, *et al.* (1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater ····· LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, *et al.* (1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ····· XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics ····· REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, *et al.* (1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process ····· FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, *et al.* (1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System ····· LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, *et al.* (1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of *Nitrobacter* ····· YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, *et al.* (1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron ····· NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, *et al.* (1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems ····· PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, *et al.* (1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity ····· ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area ····· LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, *et al.* (1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area ····· WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, *et al.* (1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management ····· NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, *et al.* (1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil ····· TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin ····· XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, *et al.* (1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain ····· WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, *et al.* (1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents ····· QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang (1512)