

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析

靳琪¹, 高红^{1*}, 岳波², 黄启飞², 王瑜堂², 吴小卉², 於俊颖², 杨惠媛¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 对全国12个省份72个典型村镇的生活垃圾进行采样调查, 系统分析我国村镇生活垃圾中重金属污染特征及其可能来源。结果表明, 我国北方典型村镇生活垃圾中重金属As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn和Ni的含量分别为(7.51 ± 8.89)、(0.64 ± 0.42)、(21.91 ± 12.29)、(4.82 ± 8.37)、(86.36 ± 59.99)、(36.43 ± 15.98)、(62.19 ± 36.61)和(46.07 ± 25.22) mg·kg⁻¹, 南方典型村镇生活垃圾中重金属As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn和Ni的含量分别为(7.43 ± 8.82)、(0.83 ± 0.74)、(21.62 ± 13.76)、(1.84 ± 4.55)、(131.06 ± 74.96)、(37.20 ± 16.80)、(98.04 ± 63.71)和(46.75 ± 25.75) mg·kg⁻¹。与《城镇垃圾农用控制标准》(GB 8172-87)和《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准相比, 重金属Cd和Hg超标较严重。通过聚类分析、Pearson相关分析和主成分分析解析垃圾中重金属污染物的来源, 结果表明我国典型村镇生活垃圾中Pb和Cd主要来源于厨余、灰土、橡塑类和纸质等印刷品, Hg主要来源于厨余和灰土, Zn和Cr主要来源于灰土, Cu主要来源于电子、电池类废弃物和尘土、橡塑、纸质等印刷品, Ni主要来源于废弃的电子、电池类产品, As主要来源于杀虫剂等农药和肥料。

关键词: 村镇; 生活垃圾; 重金属污染; 含量; 来源分析

中图分类号: X501; X708 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4385-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712049

Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis

JIN Qi¹, GAO Hong^{1*}, YUE Bo², HUANG Qi-fei², WANG Yu-tang², WU Xiao-hui², YU Jun-ying², YANG Hui-yuan¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Living solid waste of 72 typical villages and towns in 12 provinces was investigated, and related heavy metal pollution characteristics, source, and distribution were analyzed. Results showed that heavy metal content of As, Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, and Ni in living solid waste of typical northern villages of China was (7.51 ± 8.89), (0.64 ± 0.42), (21.91 ± 12.29), (4.82 ± 8.37), (86.36 ± 59.99), (36.43 ± 15.98), (62.19 ± 36.61), and (46.07 ± 25.22) mg·kg⁻¹, respectively. Content of As, Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, and Ni in living solid waste of typical southern towns was (7.43 ± 8.82), (0.83 ± 0.74), (21.62 ± 13.76), (1.84 ± 4.55), (131.06 ± 74.96), (37.20 ± 16.80), (98.04 ± 63.71), and (46.75 ± 25.75) mg·kg⁻¹, respectively. Cd and Hg exceeded the standards for urban garbage agricultural control and soil environmental quality. Sources of heavy metals in domestic waste were explored by Pearson correlation analysis, cluster analysis, and principal component analysis. Results showed that Pb and Cd were mainly derived from kitchen waste, dust, paper, rubber, and plastic. Hg was mainly from kitchen waste and dust. Zn and Cr were mainly from dust. Cu was mainly from dust, paper, rubber, plastic, battery, and electronic waste. Ni was mainly from battery and electronic wastes. As was mainly derived from pesticides and fertilizers.

Key words: rural living; domestic waste; heavy metal pollution; content; source and distribution

随着我国村镇经济的快速发展和城镇化率的日益增加, 农民生活水平逐步提高, 村镇生活垃圾产量与日俱增。生活垃圾中常含有包括重金属在内的大量有害物质, 若不将其妥善处理, 将会对农村环境造成直接威胁。我国村镇生活垃圾主要以填埋、焚烧和堆肥这3种方式进行处理处置。生活垃圾填埋处置时产生的渗滤液中包含大量重金属离子, 容易对土壤和地下水造成污染^[1~3]; 焚烧处理时, 会产生含高浓度重金属的飞灰和烟气, 极易对周边土壤和大气造成二次污染^[4~6]; 若堆肥处理, 堆肥产

品中重金属含量高, 不仅影响产品肥效, 还会污染土壤并且造成农作物中重金属的富集^[7~9]。因此, 明确农村生活垃圾中重金属的种类、含量以及来源对其污染控制至关重要, 有利于进一步从垃圾源头规避风险, 实现生活垃圾处理处置的减量化、资源化和无害化。

收稿日期: 2017-12-07; 修订日期: 2018-03-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAL02B01)

作者简介: 靳琪(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置, E-mail: jinqi_ljc@sina.com

* 通信作者, E-mail: gaohong208@163.com

近年来,许多专家学者针对城市生活垃圾重金属问题进行了研究,任福民等^[10]对北京市城区生活垃圾中的重金属进行测定发现,各类垃圾中 Hg、Cd 元素含量均超过了北京市郊土壤背景值和污染起始值的最高允许含量;贾悦等^[11]的研究发现上海市生活垃圾中橡塑类、厨余类、纸类为关键来源,橡塑类 Pb、Cd 含量最高,厨余类 Cr、As 含量最高;刘晓红等^[12]的研究表明延安市区生活垃圾可堆腐物中重金属元素 Pb、Cr、Cd、Hg、As 轻微污染.

目前国内已有的相关研究多局限于城市生活垃圾,对我国农村生活垃圾重金属种类、含量及来源大范围、系统的研究报道较少.因此,本文以全国 12 个省份、72 个典型村镇为对象研究生活垃圾中重金属种类、含量特征,并结合相关分析方法探讨我国农村地区生活垃圾中重金属的可能来源,以期

为我国农村地区生活垃圾的处理处置提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点

在全国 12 个省市进行村镇生活垃圾采样调查,包括南方 6 个省市(广东、湖南、安徽、湖北、上海、重庆),北方 6 个省市(北京、河南、山东、甘肃、黑龙江、吉林),其中每个省市选择 1 个采样地区,每个地区根据经济水平和产业类型等因素选取 3 个典型乡镇,每个乡镇设集镇中心和周边农村 2 个采样点,共计 72 个采样点,样品采集时间为 2015 年的 4 个季度,采集样品数 288 个(南方采集样品 144 个,北方采集样品 144 个),我国典型村镇新鲜生活垃圾采样点如表 1 所示.

表 1 全国典型村镇新鲜生活垃圾采样点分布

Table 1 Distribution of living garbage sampling in typical villages and towns of China

地区	省、市/县	典型镇	典型村
北方	黑龙江省哈尔滨市双城区	周家镇、东官镇、幸福乡	东升村、庆新村、久前村
	吉林省延边朝鲜族自治州延吉市	依兰镇、朝阳川镇、东盛涌镇	利民村、合成村、渊背村
	甘肃省庆阳西峰区	董志镇、什社乡、彭原镇	岳家洼、庙张家、花儿岭
	北京市房山区	周口店镇、阎村镇、长阳镇	娄子水村、阎村、稻田村
	山东省单县	莱河镇、郭村镇、黄冈镇	庞楼村、郭庄、韩庄
	河南省淅川县	关镇、马蹬镇、大石桥乡	刘营、王家庄、大石桥村
南方	安徽省岳西县	天堂镇、白帽镇、温泉镇	回龙村、孟家村、张吴塘村
	上海市崇明县	竖新镇、新河镇、东平旅游景区	竖新村、新河农村、东平农村
	重庆市巴南区	跳石镇、界石镇、东泉镇	大沟村、金鹅村、玉滩村
	湖北省麻城市	龟峰山风景区、铁门岗乡、白果镇	龟山茶园冲、铁门岗茅瓦屋村、白果龚埠村
	湖南省醴陵县	王坊镇、王仙镇、大林乡	王坊村、大王冲村、高桥村
	广东省南澳县	深澳镇、云澳镇、后宅镇	海滨村、坎头顶村、山顶村

1.2 样品采集与分析

垃圾采样方法参照《生活垃圾采样和物理分析方法》(CJ/T 313-2009)执行.具体为,将生活垃圾搅拌均匀并堆成圆形,进行十字四等分后随机舍弃对角中的两份,余下部分重复上述步骤,直至垃圾容量达到 4 只 100 L 的大桶,然后将 4 只大桶的垃圾倾倒在一大堆,将垃圾按照厨余、纸类、玻璃、塑料等物理组分进行分类,分类完成后对每一组分进行称量并记下数目,然后对每一类垃圾进行取样带回实验室分析.

样品前处理时,首先将样品中大粒径垃圾破碎至 1~2 cm,如木竹、塑料、布料、玻璃、砖瓦等主要用剪刀和铁锤进行破碎,目的为方便垃圾组分的干燥和称量.在处理过程中避免使用含有待测重金属的材料和工具.按照现场采样时记录各组分的数

kg 的垃圾样品放置于电热鼓风恒温干燥箱中进行干燥,在(105±5)℃的条件下烘 4~8 h,待冷却 0.5 h 后称重,重复烘 1~2 h,冷却 0.5 h 后再称重,直至前后两次称量数据之差小于样品前一次称量数据的 1.0%.干燥后的垃圾样品用研钵研磨至 0.5 mm 以下,其中不易研磨的塑料、橡胶等组分主要通过剪刀和铁锤进行处理,从中取 1 g 采用浓 HNO₃-H₂O₂-电热板法^[13]消解,每个样品做 3 个平行样.

将浓 HNO₃-H₂O₂-电热板法^[13]消解后的样品用稀硝酸稀释及清洗消解容器并转移至 100 mL 容量瓶中定容,定容后的样品经离心或抽滤后转移至 50 mL 的离心管中 4℃ 冷藏保存待测.测试方法选取电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、Ni 重金属含量.

1.3 数据处理与分析

为了对生活垃圾重金属来源进行科学、客观地

解析, 分别对样品中重金属元素含量进行聚类分析、Pearson 相关性分析和主成分分析. 聚类分析是根据数据性质将其进行分类组合形成多个类的分析过程, 同一类别中对象具有较高的相似性, 不同类别之间对象差异较大. Pearson 相关性分析有助于揭示重金属元素之间的内在联系, 辨识重金属来源^[14~16]. 主成分分析是将数据进行降维处理, 消除数据所反映的信息相关性带来的影响, 用几个综合变量代替多个单变量, 简化数据类别、增强有用信息^[17, 18]. 其中, 聚类分析和主成分分析作用大致相似, 文中同时采用这两种方法目的是为了进行相

互印证, 以便对生活垃圾中重金属来源进行更加充分、客观地解析. 本研究运用 Excel 2010 软件进行数据统计分析, 运用 SPSS 22.0 进行聚类分析、Pearson 相关分析和主成分分析, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 典型村镇生活垃圾中重金属含量及分布特征
对我国南、北方典型村镇生活垃圾中重金属元素砷、汞、铅、镉、铬、铜、锌、镍的含量分别进行统计分析, 见表 2.

表 2 我国南、北方典型村镇垃圾重金属含量
Table 2 Heavy metal content in domestic waste in southern and northern villages of China

地区	元素	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\bar{x} \pm s$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	城镇垃圾 农用控制标准	超标率 /%	土壤环境质量 二级标准	超标率 /%
北方	As	0.05 ~ 43.74	7.51 ± 8.89	118.38	≤ 30	4.63	25	6.48
	Hg	0.12 ~ 4.55	0.64 ± 0.42	65.63	≤ 5	1.40	0.50	27.10
	Pb	0.09 ~ 146.67	21.91 ± 12.29	56.09	≤ 100	4.20	300	0
	Cd	0.02 ~ 119.18	4.82 ± 8.37	173.65	≤ 3	13.20	0.30	52.80
	Cr	6.75 ~ 302.46	86.36 ± 59.99	69.47	≤ 300	1.40	300	1.40
	Cu	3.66 ~ 133.80	36.43 ± 15.98	43.86			100	2.80
	Zn	3.86 ~ 274.45	62.19 ± 36.61	58.87			250	0.70
	Ni	1.21 ~ 153.32	46.07 ± 25.22	54.74			50	31.80
南方	As	0.03 ~ 42.22	7.43 ± 8.82	118.71	≤ 30	7.48	25	7.48
	Hg	0.02 ~ 5.89	0.83 ± 0.74	89.16	≤ 5	2.10	0.50	39.16
	Pb	1.86 ~ 169.15	21.62 ± 13.76	63.64	≤ 100	2.80	300	0
	Cd	0.03 ~ 42.05	1.84 ± 4.55	247.28	≤ 3	15.38	0.30	55.94
	Cr	4.57 ~ 468.55	131.06 ± 74.96	57.20	≤ 300	2.11	300	2.11
	Cu	6.05 ~ 145.89	37.20 ± 16.80	45.16			100	1.40
	Zn	2.85 ~ 617.24	98.04 ± 63.71	64.98			250	6.29
	Ni	1.04 ~ 219.35	46.75 ± 25.75	55.08			50	22.47

如表 2 所示, 我国南、北方典型村镇生活垃圾中各重金属的含量存在差异. 就北方典型村镇而言, 生活垃圾中重金属平均含量由高到低为: $\text{Cr} [(86.36 \pm 59.99) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Zn} [(62.19 \pm 36.61) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Ni} [(46.07 \pm 25.22) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Cu} [(36.43 \pm 15.98) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Pb} [(21.91 \pm 12.29) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{As} [(7.51 \pm 8.89) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Cd} [(4.82 \pm 8.37) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Hg} [(0.64 \pm 0.42) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$; 就南方典型村镇而言, 生活垃圾中重金属平均含量由高到低为: $\text{Cr} [(131.06 \pm 74.96) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Zn} [(98.04 \pm 63.71) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Ni} [(46.75 \pm 25.75) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Cu} [(37.20 \pm 16.80) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Pb} [(21.62 \pm 13.76) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{As} [(7.43 \pm 8.82) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Cd} [(1.84 \pm 4.55) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}] > \text{Hg} [(0.83 \pm 0.74) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$. 除 Cd、Cr 和 Zn 外, 其他 5 种重金属平均含量在南、北方差别不大, 这可能是受土壤污染的影响, 据 2014 年

全国土壤污染状况调查公报^[19]统计, 南方土壤受重金属污染程度重于北方, 导致南方生活垃圾中重金属含量高于北方. 变异系数反映了总体样本中各采样点平均变异程度^[20], 我国南、北方典型村镇生活垃圾中各重金属的变异系数均很大, 说明生活垃圾中重金属来源较为复杂, 空间分布差异较大.

为了更好地表征我国南、北方典型村镇生活垃圾重金属污染程度, 对我国农村生活垃圾土地还原及堆肥重金属含量做出准确客观的评价, 以《城镇垃圾农用控制标准》(GB 8172-87) 和《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 中二级标准为参照依据进行对比. 结果发现, 与《城镇垃圾农用控制标准》相比, 北方典型村镇生活垃圾重金属只有 Cd 平均含量超标, 超标倍数为 0.61 倍, 样品中单个重金属超标率除 Cd(13.20%) 外, As、Hg、Pb、Cr 超标率均在 5% 以下. 南方典型村镇生活垃圾重金属平均含量均未超标, 样品中 As、Hg、Pb、Cd、Cr 单个重

金属超标率分别为 7.48%、2.10%、2.80%、15.38%、2.11%。与《土壤环境质量标准》二级标准相比,北方典型村镇生活垃圾中重金属 Hg 和 Cd 的平均含量超过标准,超标倍数为 0.66 倍和 15.07 倍,样品中单个重金属超标率除 Cd(52.80%)外均在 50% 以下,其中 Hg 超标率最大(31.80%),其次是 Ni(27.10%),其余重金属超标率低于 10%。南方典型村镇生活垃圾中重金属 Hg 和 Cd 的平均含量超标,超标倍数为 0.28 倍和 5.13 倍,样品中单个重金属超标率除 Cd(55.94%)外均在 50% 以下,其中 Hg 超标率最大(39.16%),其次是 Ni(22.47%),其余重金属超标率低于 10%。王瑜堂等^[21]的研究指出,农村生活垃圾中 Cd 和 Hg 两种重金属污染严重且存在较强的潜在生态风险。因此,就重金属而言我国农村生活垃圾具有较好的堆肥潜力,但鉴于重金属具有易富集、危害大等特点,且 Cd、Hg 超标率高,毒性大,需要特别关注,如将垃圾进行土地还原还需引起重视。

综上所述,我国南、北方典型村镇生活垃圾中含有的重金属种类多,在含量水平上存在一定差异,但算术平均值均接近分布范围下限。如 Cd 在南方典型村镇生活垃圾重金属中的变异系数最大,约 90% 的样点 Cd 含量都低于平均含量 $1.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中近 50% 的样点 Cd 含量低于土壤环境质量二级标准 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同样,北方典型村镇生活垃圾重金属 Hg 变异系数也较大,约 79% 的采样点 Hg 含量低于平均值 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 73% 的采样点 Hg 含量都低于土壤环境质量二级标准 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见,少量采样点重金属含量偏高,可能是采样点采样时,某种组分含量高,从而导致了这种重金属含量升高,总体来说我国南、北方典型村镇生活垃圾重金属来源较为复杂。

2.2 典型村镇生活垃圾重金属的聚类分析

根据我国典型村镇生活垃圾中几种重金属含量

进行聚类分析,结果如图 1 所示。8 种重金属可以聚为 3 类,第一类包括 Pb、Cd、Zn、Cu、Ni; 第二类包括 Hg 和 Cr; 第三类包括 As。Pb 与 Cd、Zn、Cu 之间存在显著相关性,Cu 和 Ni 之间具有显著的相关性,Pb、Cd、Zn 与 Cu 和 Ni 最终聚为一个大类,表明它们之间可能具有较高的相似性。Cr 和 Hg 聚为一类,表明 Cr 和 Hg 来源可能相似。As 自成一类,表明 As 与其他几种重金属元素可能存在较大差异。

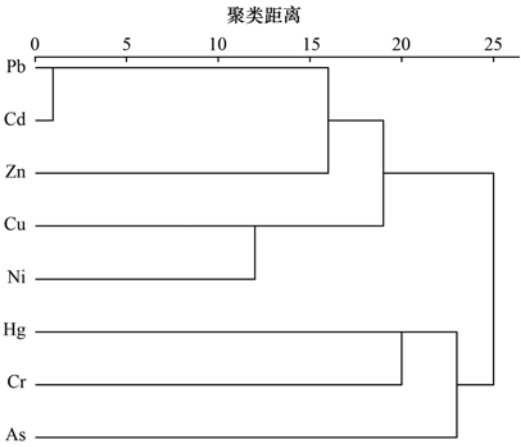


图 1 我国典型村镇生活垃圾重金属的聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis of total metal concentrations in typical rural domestic waste

2.3 典型村镇生活垃圾重金属的相关分析

生活垃圾中各种重金属含量不尽相同,重金属元素之间存在相关关系,说明其来源可能相同,不存在相关关系则说明它们的来源差异较大。对我国典型村镇生活垃圾中几种主要重金属含量进行 Pearson 相关性分析,结果如表 3 所示。由重金属元素含量相关系数可以看出,Pb-Cd、Pb-Zn 和 Pb-Cu 存在显著的正相关,说明 Pb 与 Cd、Zn、Cu 这 3 种金属具有同源性;As 与其他几种重金属元素都不相关,意味着 As 与它们的来源差异性较大;Cu 和 Ni、Cd 存在显著的正相关,但它们分别与 Cr 和 Hg

表 3 我国典型村镇生活垃圾中重金属含量 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation matrix for heavy metals in typical rural domestic waste

	As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni
As	1	0.094	-0.084	-0.052	-0.011	-0.045	-0.059	-0.070
Hg		1	-0.073	-0.016	0.137	-0.091	0.169 *	-0.017
Pb			1	0.684 **	-0.001	0.305 **	0.413 **	0.008
Cd				1	-0.021	0.414 **	0.051	0.034
Cr					1	-0.055	0.175 *	-0.096
Cu						1	0.115	0.360 **
Zn							1	0.016
Ni								1

1) * 表示在 0.05 显著水平上相关; ** 表示在 0.01 显著水平上相关

的相关性不显著,说明有部分 Cu 的来源可能与 Ni 相似,但与 Cr 和 Hg 的来源差异较大;Cr 和 Hg 与除 Zn 之外的其他几种重金属元素相关性较差且不显著,表明 Cr 和 Hg 与其他几种重金属元素的来源可能不同.

2.4 典型村镇生活垃圾重金属的主成分分析

利用主成分分析探究典型村镇生活垃圾中重金属的主要来源,分析前对重金属数据进行标准化处理,分析采用正交旋转突出影响重金属来源的主要因子.检测数据经 KMO 检验和 Bartlett 球度检验($P < 0.001$),主成分分析结果具有统计学意义.由表

4 可知,根据特征向量选取原则(特征值 > 1.0)提取 4 个主成分,方差累计贡献率达到 70.66%,说明该结果在一定程度上能够真实地反映我国典型村镇生活垃圾重金属的来源情况.图 2、3 为对应各主成分因子荷载散点图.图 2 显示,第一主成分(PC1)由 Pb 和 Cd 构成,可以解释总变量方差的 26.48%.第二主成分(PC2)由 Cr、Hg 和 Zn 构成,可以解释总变量方差的 17.42%.图 3 显示,第三主成分(PC3)由 Cu 和 Ni 构成,可以解释总变量方差的 13.88%.第四主成分(PC4)由 As 构成,可以解释总变量方差的 12.87%.

表 4 我国典型村镇生活垃圾重金属含量主成分分析结果

项目	旋转主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
As	0.000	-0.094	-0.078	0.908
Hg	-0.143	0.611	0.083	0.449
Pb	0.902	0.164	0.005	-0.098
Cd	0.875	-0.072	0.088	0.044
Cr	-0.065	0.647	-0.151	-0.089
Cu	0.473	-0.064	0.671	-0.004
Zn	0.313	0.708	0.065	-0.113
Ni	-0.093	-0.021	0.906	-0.060
特征值	1.933	1.338	1.319	1.063
贡献率/%	24.165	16.730	16.483	13.283
累计贡献率/%	24.165	40.894	57.377	70.660

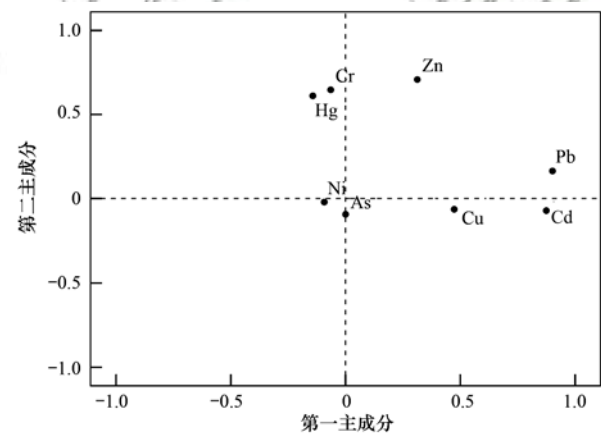


图 2 我国典型村镇生活垃圾重金属含量的第一、二主成分得分
Fig. 2 Illustration of total metal concentrations in typical rural domestic waste in the coordinate system of first and second principal components

2.5 典型村镇生活垃圾重金属的来源解析

结合聚类分析、相关分析和主成分分析结果推断,Pb 和 Cd 的主要来源相似,Cr、Hg 和 Zn 的主要来源相似,Cu 和 Ni 的主要来源相似,As 的主要来源异于其他几种重金属.

第一组元素 Pb 和 Cd 存在显著的相关性,在聚

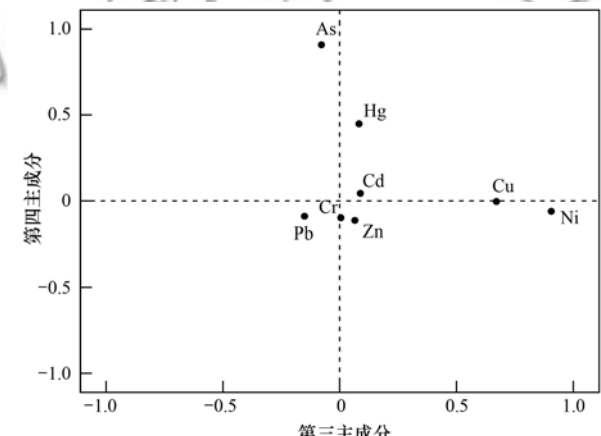


图 3 我国典型村镇生活垃圾重金属含量的第三、四主成分得分
Fig. 3 Illustration of total metal concentrations in typical rural domestic waste in the coordinate system of third and fourth principal components

类分析中归属为一个大类且同属于一个主成分,说明典型村镇生活垃圾中 Pb 和 Cd 的来源相似.有研究表明包装纸所含重金属浓度较高^[22],在各类垃圾组分中,如塑料中的 Pb 和 Cd,包装纸(报纸、印刷制品)中的 Cd、Cu 都高于生活垃圾其他组分中相应元素的浓度,说明塑料、纸质印刷制品是 Pb、

Cd 的主要来源之一。此外,我国农村生活垃圾组成上主要以灰土和厨余为主,含量约占垃圾总量的一半以上^[23, 24],可见灰土和厨余对 Pb 和 Cd 浓度的贡献也不容忽视。银燕春等^[25]的研究表明生活垃圾各组分重金属含量中, Pb 和 Cd 在餐厨和尘土组分中的浓度都高于混合垃圾,其中尘土中 Pb 浓度高达 $116.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为混合垃圾的 2.4 倍。刘育辰等^[26]的研究也指出,生活垃圾各组分中重金属 Cd 含量为灰土 > 厨余 > 其余组分 > 卫生纸,灰土和厨余组分对 Cd 总量的贡献率达到 68%。由此分析 Pb 和 Cd 元素主要来源于塑料类、纸质印刷制品和厨余、灰土类垃圾。

第二组元素 Cr 和 Hg 在聚类分析中归属为一个大类,分别与 Zn 之间都存在显著的相关性且这 3 种元素同属于一个主成分,说明 Cr、Hg 和 Zn 的来源可能相似。此外, Zn 与 Pb 显著相关而与 Cd 不相关,说明除上述来源之外还有一部分 Pb 与 Zn 的来源相似。农村地区居民冬天多以燃煤为主, Hg 污染在我国北方地区表现得尤为突出^[27]。通常燃煤会导致生活垃圾中灰土成分增加,燃煤过程中产生的大气 Hg 沉降造成灰土中 Hg 含量较高,因此煤炭等能源的利用可能是 Hg 含量高的原因之一^[28]。蔡葵等^[29]发现重金属元素 Hg 可在花生植株的不同器官中富集,导致农产品重金属含量升高。另外含 Hg 农药等的使用以及农作物从土壤中的吸收富集也增加了厨余类垃圾对 Hg 的贡献率。农村生活垃圾中灰土组分对 Zn 的贡献率最大,银燕春等^[25]通过对成都市城郊和农村地区生活垃圾各组分中的重金属含量进行分析表明,农村垃圾中 Zn 主要来源于灰土。灰土中主要包含土壤、煤渣等组分,其重金属含量在一定程度上可能受到土壤、燃煤粉尘、煤渣等重金属含量的影响。从表 2 可以看出南方典型村镇生活垃圾重金属 Cr 和 Zn 含量明显高于北方,可能是受到土壤重金属污染影响,据统计我国土壤受多种重金属污染^[19],其中南方土壤污染重于北方。这可能是由于农村传统肥料、土壤改良剂等使用导致土壤中 Cr、Zn、Cu 等重金属富集造成污染。事实上,除肥料使用的影响外,燃煤过程也会产生含 Zn、Pb 等重金属的粉尘和煤渣,从而造成其含量在灰土中的积累^[30, 31]。

第三组元素 Cu 和 Ni 存在显著的相关性,同属于一个主成分且在聚类分析中与 Pb、Cd、Zn 共同归属为一个大类,说明 Cu 和 Ni 同源。此外, Cu 与 Pb 和 Cd 之间也存在显著的相关性,表明 Cu 的来

源较为广泛,与 Pb、Cd 的来源也有一定的相似性。有研究表明^[22]:干电池中的 Cu、Zn 和 Pb,蓄电池中的 Ni 和 Cd 的含量明显高于各种垃圾组分中其他垃圾组分相应元素的含量。张昱等^[32]对浙江某典型电子废弃物拆解区周边土壤检测表明,该地土壤中重金属 Cu 和 Ni 分别为重度和轻度污染。沈东升等^[33]发现 Cu、Ni 和 Zn 等重金属污染物的源头为电子废物堆场及拆解后产生的固体废物。由此推断 Cu 和 Ni 可能主要来源于电子、电池类废弃物。根据第一组元素的来源分析还可以发现,各种橡胶塑料类垃圾以及包装纸和打印纸等印刷品对 Cu 的来源也有一定的贡献。

第四组元素 As 与其他几种重金属均不存在相关性,在聚类分析及主成分分析中均自成一类,说明 As 与其他重金属来源不同,其主要来源可能是杀虫剂等含 As 的农药。土壤是灰土组分的来源之一,当土壤受到重金属 As 污染时会直接影响灰土中重金属 As 的含量。郭伟等人^[34]曾在土壤重金属相关研究中提出, As 在城市公园中的单因子污染指数高于商业区、工业区等其他功能区,可能是由于含 As 农药的使用。砷化物的广泛利用,如杀虫剂和除草剂等含砷农药和肥料的大量使用都会造成土壤中 As 含量的升高,从而导致灰土中 As 的富集。农村居民在使用后常将农药瓶等与生活垃圾混合收集,这可能也是影响生活垃圾中 As 含量的主要因素之一。燃煤过程中 As、Hg 都属于易挥发元素^[35],炉渣以及沉降后的烟尘、粉尘也会引起灰土中 As 含量升高。

综上所述,我国典型村镇生活垃圾中 Pb 和 Cd 主要来源于厨余、灰土、橡塑类和纸质等印刷品, Hg 主要来源于厨余和灰土, Zn 和 Cr 主要来源于灰土, Cu 主要来源于电子、电池类废弃物和尘土、橡塑、纸质等印刷品, Ni 主要来源于废弃的电子、电池类产品, As 主要来源于杀虫剂等农药和肥料。

3 结论

(1)我国北方典型村镇生活垃圾中重金属 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的含量分别为 (7.51 ± 8.89) 、 (0.64 ± 0.42) 、 (21.91 ± 12.29) 、 (4.82 ± 8.37) 、 (86.36 ± 59.99) 、 (36.43 ± 15.98) 、 (62.19 ± 36.61) 和 $(46.07 \pm 25.22) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,南方典型村镇生活垃圾中重金属 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的含量分别为 (7.43 ± 8.82) 、 (0.83 ± 0.74) 、 (21.62 ± 13.76) 、 (1.84 ± 4.55) 、

(131.06 ± 74.96)、(37.20 ± 16.80)、(98.04 ± 63.71)和(46.75 ± 25.75) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与《城镇垃圾农用控制标准》相比北方典型村镇垃圾中 Cd 超标, 与《土壤环境质量标准》二级标准相比南、北方典型村镇垃圾中 Cd 和 Hg 超标. 若要将垃圾进行土地还原, 重金属 Cd 和 Hg 的超标率高、毒性大, 需重点关注.

(2) 经聚类分析、相关分析和主成分分析 3 种多元统计分析得出, Pb 和 Cd 主要来源于厨余、灰土、橡塑类和纸质等印刷品, Hg 主要来源于厨余和灰土, Zn 和 Cr 主要来源于灰土, Cu 主要来源于电子、电池类废弃物和尘土、橡塑、纸质等印刷品, Ni 主要来源于废弃的电子、电池类产品, As 主要来源于杀虫剂等农药和肥料.

参考文献:

- [1] Rabl A, Spadaro J V, Zoughaib A. Environmental impacts and costs of solid waste: a comparison of landfill and incineration [J]. *Waste Management & Research*, 2008, **26**(2): 147-162.
- [2] Xing W, Lu W J, Zhao Y, *et al.* Environmental impact assessment of leachate recirculation in landfill of municipal solid waste by comparing with evaporation and discharge (EASEWASTE) [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(2): 382-389.
- [3] Abu-Daibes M, Qdais H A, Alsyouri H. Assessment of heavy metals and organics in municipal solid waste leachates from landfills with different ages in Jordan [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2013, **4**(4): 344-352.
- [4] Tian H Z, Gao J J, Lu L, *et al.* Temporal trends and spatial variation characteristics of hazardous air pollutant emission inventory from municipal solid waste incineration in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 10364-10371.
- [5] Wei Y M, Shimaoka T, Saffarzadeh A, *et al.* Mineralogical characterization of municipal solid waste incineration bottom ash with an emphasis on heavy metal-bearing phases [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 534-543.
- [6] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 298-304.
- Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, *et al.* Concentration levels and spatial distribution of heavy metals in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant (Shenzhen) [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 298-304.
- [7] 马军伟, 孙万春, 俞巧钢, 等. 山区农村生活垃圾成分特征及农用风险 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, **38**(2): 220-228.
- Ma J W, Sun W C, Yu Q G, *et al.* Component characteristic and agricultural utilization risk of household waste in mountainous rural area [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2012, **38**(2): 220-228.
- [8] Fekri M, Kaveh S. Heavy metal accumulation in soil after application of organic wastes [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, **6**(2): 463-467.
- [9] Rawat M, Ramanathan A L, Kuriakose T. Characterisation of municipal solid waste compost (MSWC) from selected Indian cities—a case study for its sustainable utilisation [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2013, **4**(2): 163-171.
- [10] 任福民, 汝宜红, 许兆义, 等. 北京市生活垃圾重金属元素调查及污染特性分析 [J]. *北方交通大学学报*, 2001, **25**(4): 66-68.
- Ren F M, Ru Y H, Xu Z Y, *et al.* Investigation of heavy metal elements in municipal solid waste in Beijing [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2001, **25**(4): 66-68.
- [11] 贾悦, 王震, 夏苏湘, 等. 上海市生活垃圾重金属来源分析及污染风险评价 [J]. *环境卫生工程*, 2015, **23**(4): 31-34.
- Jia Y, Wang Z, Xia S X, *et al.* Source analysis and pollution risk assessment of heavy metals from Shanghai domestic waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2015, **23**(4): 31-34.
- [12] 刘晓红, 刘延萍, 高歌, 等. 延安市区生活垃圾可堆腐物中的重金属污染分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, **33**(7): 143-146.
- Liu X H, Liu Y P, Gao G, *et al.* Analysis on heavy metal pollution in Yan'an compostable refuse [J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2005, **33**(7): 143-146.
- [13] US Environmental Protection Agency. EPA Method 3050B, Acid digestion of sediments, sludges, and soils [S]. 1996.
- [14] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价 [J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 971-984.
- Ly J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [15] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [16] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4486-4493.
- Qi P, Yu S Q, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4486-4493.
- [17] 虞敏达, 张慧, 何小松, 等. 典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(3): 1500-1507.
- Yu M D, Zhang H, He X S, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(3): 1500-1507.
- [18] Ma X L, Zuo H, Tian M J, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 264-272.
- [19] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报

- [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [20] 国家环境保护局, 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. 87-90, 330-496.
- [21] 王瑜堂, 张军, 岳波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(8): 1634-1639.
- Wang Y T, Zhang J, Yue B, *et al.* Heavy metal content of the rural solid waste and its land utilization environmental risk analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(8): 1634-1639.
- [22] 杨淑英, 刘晓红, 张增强, 等. 杨凌城市生活垃圾中重金属元素的污染特性分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(1): 148-153.
- Yang S Y, Liu X H, Zhang Z Q, *et al.* A pollution characteristics of heavy metals in municipal solid waste of Yangling city[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(1): 148-153.
- [23] 岳波, 张志彬, 孙英杰, 等. 我国农村生活垃圾的产生特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(6): 129-134.
- Yue B, Zhang Z B, Sun Y J, *et al.* Characteristics of rural household solid wastes in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(6): 129-134.
- [24] 晏卓逸, 岳波, 高红, 等. 我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 3078-3084.
- Yan Z Y, Yue B, Gao H, *et al.* Basic features of combustible rural garbage component and its spatial-temporal difference in China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 3078-3084.
- [25] 银燕春, 玉莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 392-400.
- Yin Y C, Wang L L, Xiao H, *et al.* Characteristics and sources of heavy metal pollution in urban, suburban and rural domestic waste of Chengdu, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 392-400.
- [26] 刘育辰, 王莉淋, 伍钧, 等. 四川城市生活垃圾重金属污染状况及来源分析[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 6010-6018.
- Liu Y C, Wang L L, Wu J, *et al.* Pollution and source analysis of heavy metals in municipal solid waste in Sichuan[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(12): 6010-6018.
- [27] 王雄军, 赖健清, 鲁艳红, 等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 671-676.
- Wang X J, Lai J Q, Lu Y H, *et al.* Main source of soil heavy metal pollution based on factor analysis in Taiyuan[J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(2): 671-676.
- [28] 章明奎. 浙江省城市汽车站点地表灰尘中重金属含量及其来源研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2294-2304.
- Zhang M K. Concentrations and sources of heavy metals in surface dust from urban coach stations in Zhejiang province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2294-2304.
- [29] 蔡葵, 于秋华, 赵征宇, 等. 花生不同品种植株重金属 As 和 Hg 的富集与转运规律[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(24): 167-172.
- Cai K, Yu Q H, Zhao Z Y, *et al.* As and Hg accumulation and transformation rules in different varieties of peanut plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(24): 167-172.
- [30] 李洋, 陈卫锋, 魏然, 等. 闽江福州段沉积物中重金属的分布特征及其毒性和生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1792-1799.
- Li Y, Chen W F, Wei R, *et al.* Distribution characteristics, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments of Minjiang river in Fuzhou city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(5): 1792-1799.
- [31] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 土壤, 2010, **42**(6): 928-934.
- Wang J, Zhang H, Zeng X B, *et al.* Distribution and pollution assessment on heavy metals in urban soils of Guiyang[J]. *Soils*, 2010, **42**(6): 928-934.
- [32] 张昱, 胡君利, 白建峰, 等. 电子废弃物拆解区周边农田土壤重金属污染评价及成因解析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(7): 1228-1234.
- Zhang Y, Hu J L, Bai J F, *et al.* Contamination assessment and genesis analysis of heavy metals in farmland soils around a waste electrical and electronic equipments disassembling area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(7): 1228-1234.
- [33] 沈东升, 朱荫渭. 进口废电器拆解残余固体废物中污染物的溶出试验研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(3): 382-384.
- Shen D S, Zhu Y M. Study on the leaching of solid pollutants from disassembled import waste electrical equipment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(3): 382-384.
- [34] 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.
- [35] Koukouzas N, Ketikidis C, Itskos G. Heavy metal characterization of CFB-derived coal fly ash[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(3): 441-446.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	 XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	 LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	 WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin	 XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	 HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	 LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	 NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	 CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	 WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	 HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	 HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	 ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	 YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	 WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	 HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	 WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	 YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	 ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	 CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	 SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	 AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	 LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	 SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	 LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	 LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	 ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	 HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	 JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)