

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价

吕占禄¹, 张金良^{1*}, 陆少游², 邹天森¹, 刘凯¹, 张晗¹, 谷亚亚¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 深圳市疾病预防控制中心, 深圳 518055)

摘要: 为了解与评价生活垃圾焚烧发电厂周边土壤重金属元素的污染状况, 按照点源扇形布点原则, 在生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内布点采样, 以远离电厂区域为对照点, 共采集 29 个土壤样品, 分析检测了 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ag、Cd、Hg 和 Pb 等 10 种重金属元素的含量。结果显示, 生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中各重金属元素的含量水平均满足国家《土壤环境质量》(GB 15618-2018) 和 (GB 36600-2018) 中土壤污染风险筛选值要求; 仅有 Mn、Cu 和 As 的平均含量高于安徽省土壤平均背景值, 其中 As 是背景值的 1.03 倍, Cu 是 1.07 倍; 与对照点对比, Cr、Ni、Cd、Cu 和 As 含量低于对照点, 差异有统计学意义 ($P \leq 0.05$)。电厂周边土壤中 Hg 在空间分布上的差异较明显, 其余重金属元素空间分布差异不明显、呈现较均匀, 在常年主导下风向和次主导下风向 500 m 土壤中最高, 之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降, 最后低于对照点的水平。电厂周边和厂区内土壤中各重金属元素的污染程度为轻度污染, 内梅罗综合污染指数 (PI) 为 1.1~1.2, 对照点也为轻度污染 (PI 为 1.5); 潜在生态风险为轻微, 多种重金属元素的综合潜在生态风险指数 (RI) 为 60.2~67.7, Hg 和 As 对 RI 的贡献率较大, 对照点为中等生态危害 (RI 为 116.8)。基于主成分分析的结果, 综合考虑土壤中各重金属元素的含量和空间分布特征以及相关性分析和聚类分析结果, 将 10 种重金属元素分为 3 类: ① Ni、Cr、As 和 Mn; ② Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb; ③ Hg。其中 Ni、Cr、As 和 Mn 来源主要受土壤母质影响; Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb 来源主要受土壤母质和多种人类活动共同影响; Hg 则很可能源于生活垃圾焚烧烟气的扩散沉降及其在土壤中的累积。在研究表明, 生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内表层土壤中 Hg 具有独特的环境污染特征, 在生活垃圾焚烧发电厂周边的土壤重金属污染调查中, Hg 污染应受到重点关注。

关键词: 生活垃圾焚烧发电厂; 表层土壤; 重金属元素; 污染特征; 潜在生态风险评价; 汞

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2483-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201810030

Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant

LÜ Zhan-lu¹, ZHANG Jin-liang^{1*}, LU Shao-you², ZOU Tian-sen¹, LIU Kai¹, ZHANG Han¹, GU Ya-ya¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Shenzhen Center for Disease Control and Prevention, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To investigate and evaluate the pollution levels of heavy metals in the soil around a large Municipal Solid Waste Incineration power plant (MSWIPP), a total of 29 soil samples were collected around the MSWIPP and away from the power plant area. The contents of 10 selected heavy metals (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Ag, Cd, Hg, and Pb) were analyzed. The results showed that the content of each heavy metal element did not exceed the values for Soil Environmental Quality of Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB15618-2018) and Development Land (GB 36600-2018). The mean contents of Mn, Cu, and As were higher than their respective background values of Anhui Province, where As was 1.03 times the background value, and Cu was 1.07 times. Compared with the control points, the contents of Cr, Ni, Cd, Cu, and As were lower than the control points, and the difference was statistically significant ($P \leq 0.05$). The spatial distribution of Hg was more obvious in the soil around the power plant, and other heavy metals were not obvious and uniform. The content of Hg was the highest in the 500 m soil of perennial dominant downwind and sub-dominant downwind. With increasing distance from the power plant, the content gradually decreased and it was lower than the level of the control point. The pollution degree of heavy metal elements in the soil around the power plant and in the plant area was mild. The Nemero comprehensive pollution index (PI) was 1.1-1.2, and the control point had also mild pollution (PI was 1.5). The potential ecological risk was slight, and the comprehensive potential ecological risk index (RI) of various heavy metal elements was 60.2-67.7. The contribution rate of Hg and As to RI were large, and the control point had medium ecological risk (RI was 116.8). Based on the results of principal component analysis, accompanied with the content, spatial distribution characteristics, Pearson's correlation, and hierarchical cluster analysis results, three groups of heavy metals with different spatial distribution were identified: ① Ni, Cr, As, and Mn originated from lithological sources; ② Cu, Zn, Ag, Cd, and Pb affected by both lithological and human sources (e.g. agricultural and traffic sources); ③ Hg likely originated from the diffusion sedimentation of MSWI flue gas and its accumulation in the soil. The above results indicated that the unique pollution characteristics of Hg deserve serious attention in

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2018-11-26

作者简介: 吕占禄(1985~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为环境污染与健康, E-mail: lvzhanlu1015@163.com

* 通信作者, E-mail: jinliangzhg@263.net

pollution monitoring in soils surrounding solid waste incinerator.

Key words: municipal solid waste incineration power plant; surface soil; heavy metal; pollution characteristics; potential ecological risk; mercury

随着我国城镇化和工业化进程的加快,城市生活垃圾(municipal solid waste, MSW)产生量日益增加. 据统计 2011 年我国城市生活垃圾清运量已达 1.64 亿 t, 2015 年达 1.91 亿 t, 预计到 2020 年达 2.82 亿 t, 年均增长率为 8%~10%^[1]. 目前,我国城市生活垃圾处理的主要方式包括填埋(65.5%)和焚烧(32.5%)^[2]. 垃圾焚烧可以将大部分垃圾转化为热能和电能,显著地减少城市固体废物总量(约 80%)和体积(约 90%),极大地缓解人口密集地区的土地资源限制. 发达国家的经验表明垃圾焚烧是垃圾集中处理的最有效的途径^[3~6]. 然而越来越多的居民关注到了垃圾焚烧过程中排放有毒有害物质的潜在健康影响,经常会出现群体性抗议事件^[7]. 我国生活垃圾收集方式以混合收集为主,组分复杂,一些可能含重金属元素的垃圾经焚烧后,重金属元素会转化成气态或颗粒态迁移至焚烧烟气,通过干-湿沉降等途径进入垃圾焚烧厂周边农田土壤^[8]. 这将导致土壤污染,威胁食品安全,也对生活在垃圾焚烧厂附近的居民健康构成威胁^[9, 10]. 目前,国内外已有大量的研究报道了垃圾焚烧厂周边土壤中重金属元素的含量水平,但垃圾焚烧厂对周围土壤重金属元素含量是否有显著影响仍然存在争议^[7, 9, 11, 12]. 第一种观点认为垃圾焚烧厂的 Hg、Cd 和 Pb 等重金属元素会对周边土壤造成明显的污染^[13~15];第二种观点认为垃圾焚烧厂周边土壤重金属元素含量水平与垃圾焚烧厂的重金属元素排放没有明显关联^[16, 17];第三种观点则认为垃圾焚烧厂会对周边土壤重金属元素产生影响,但其他因素掩盖了这种影响^[18, 19].

为了解与评价某生活垃圾焚烧电厂周边和厂区内土壤中重金属元素的污染状况,本研究以投产运行 1 年多的生活垃圾焚烧发电厂作为研究对象,按照点源扇形布点原则,在电厂周边、厂区及远离电厂区域采集土壤样品,测定土壤中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Ag、Cd、Hg 和 Pb 等 10 种重金属元素的含量,采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法、潜在生态危害指数法和来源探析等评价方法,对研究区域内土壤的环境质量、造成污染的程度以及表层土壤中重金属元素的可能来源进行综合分析和评价,旨在为类似点源污染对土壤造成的环境污染监管提供参考

依据.

1 材料与方法

1.1 电厂及周边环境

该电厂 2015 年投产发电,装机容量为 2 台 350 t·d⁻¹ 焚烧炉加 1 台 12MW 凝气式汽轮发电机组. 电厂所在地区为平原,地势平坦,地势由西北向东南倾斜,形成西北高、东南低的总地势. 属于暖温带半湿润季风性气候,年平均气温 14.9℃,全年主导风为东南偏东风,次主导风向为东风,年平均风速为 2.1 m·s⁻¹.

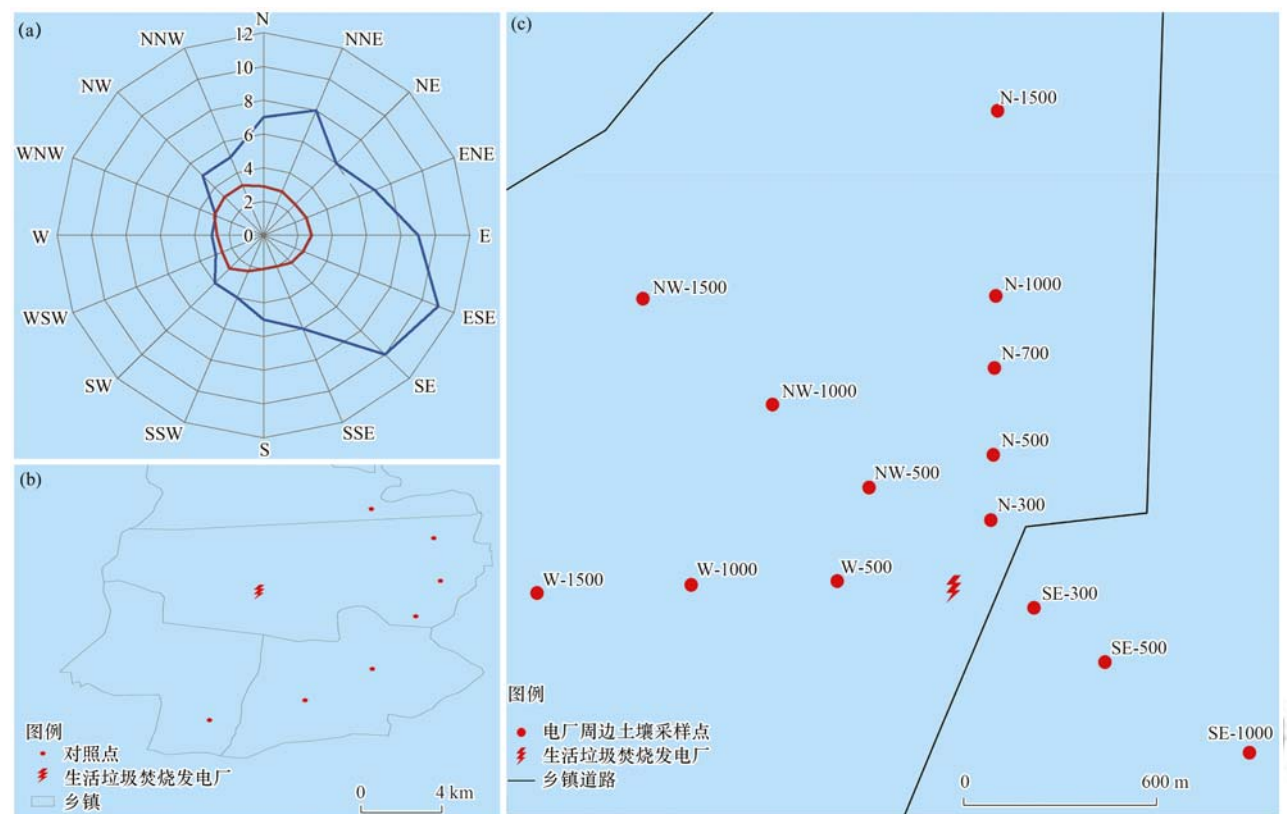
1.2 点位布点与样品采集

在电厂常年主导风上风向(东南偏东方向)、主导风下风向(西北偏西方向)、次主导风下风向(正西方向)和主导风下风向 45°夹角方向(正北方向)不同距离以及厂区内采集 22 个土壤样品;同时按照远离电厂 10 km 以上、周边无其他污染源、地质相似的原则,在远离电厂区域采集 7 个农田土壤作为对照样品. 对照点区域无潜在的污染源,土壤利用均为农业用地,土壤质地与电厂周边区域相同,为棕壤土,共采集 29 个土壤样品(图 1). 土壤样品的采集参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)进行,在每个采样点采集耕作层混合土样,一般按照 50 m×50 m 内梅花布点,采集 0~20 cm 的表层土壤,经四分法缩分后取 1 kg 样品装入聚乙烯袋中带回实验室,并做好采样记录.

1.3 样品实验分析及质量控制

土壤样品的前处理:首先将风干土壤样品用木锤敲打、压碎、拣出杂质、混匀,并用四分法取压碎样,过孔径 0.25 mm (20 目)尼龙筛. 然后称取 0.3 g 研磨后的土壤样品于内套聚四氟乙烯坩埚中,加入少许水润湿试样,再加入 HNO₃、HClO₄ 各 5 mL,摇匀后将坩埚放入不锈钢套筒中,拧紧. 放在 180℃ 的烘箱中分解 2h 取出,冷却至室温后,取出坩埚,用水冲洗坩埚盖的内壁,加入 3 mL HF 置于电热板上,在 100℃ 加热除硅,蒸至冒浓白烟后再缓缓蒸至近干,定容到 50 mL,过滤后进行 ICP-MS (Waters alliance e2695)测定.

土壤检测过程中采用加标回收和重复测量的方式进行质量控制,这一批次样品中各元素的加标回收率在 93.5%~105.6%,重复测量的偏差范围为 0.1%~9.5%.



(a)年平均风向玫瑰图；(b)对照点土壤采样；(c)电厂周边及厂区土壤采样

图1 生活垃圾焚烧发电厂周边土壤采样示意
Fig. 1 Sampling sites of soil around the MSWIPP

1.4 分析与评价

1.4.1 统计分析

采用 SPSS 18.0 软件进行相关性分析、聚类分析和主成分分析. 相关性分析采用 Pearson 相关系数分析土壤各类重金属元素含量之间的相关性；聚类分析采用分层聚类法的 R 型聚类进行分析；主成分分析采用因子分析，经 KMO 检验和 Bartlett 球度检验后分析重金属元素成分载荷.

1.4.2 单因子指数法

单因子指数法是针对土壤中的某一种物质的污染程度进行评价，可以全面反映出土壤中各种重金属元素的平均污染水平^[20]. 计算公式为：

$$P_i = C_i/S_i$$

式中， P_i 代表土壤中某物质 i 的污染指数； C_i 代表某物质 i 的实测值； S_i 代表某物质 i 的安徽省土壤背景值，其分级标准如表 1 所示.

表1 土壤重金属元素污染物评价及生态风险分级

Table 1 Soil environment quality classification

分级	单因子指数法(P_i)	内梅罗污染指数法(PI)	潜在生态危害指数法	
			单一潜在生态危害系数(E_r^i) ^[21]	综合潜在生态危害系数(RI)
1	无污染($P_i \leq 1$)	清洁/安全($PI \leq 0.7$)	轻微生态危害($E_r^i < 40$)	轻微生态危害($RI < 112$)
2	轻微污染($1 < P_i \leq 2$)	尚清洁/警戒线($0.7 < PI \leq 1.0$)	中等生态危害($40 \leq E_r^i < 80$)	中等生态危害($112 \leq RI < 224$)
3	轻度污染($2 < P_i \leq 3$)	轻度污染($1.0 < PI \leq 2.0$)	强生态危害($80 \leq E_r^i < 160$)	强生态危害($224 \leq RI < 448$)
4	中度污染($3 < P_i \leq 5$)	中度污染($2.0 < PI \leq 3.0$)	很强生态危害($160 \leq E_r^i < 320$)	很强生态危害($RI \geq 448$)
5	重度污染($P_i > 5$)	重度污染($PI > 3.0$)	极强生态危害($E_r^i \geq 320$)	—

1.4.3 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是兼顾最大值的一种多因子环境质量指数法，反映土壤中各种重金属元素对其的综合污染情况^[22]，公式：

$$PI = \sqrt{\frac{(P_{\max})^2 + (P_{\text{ave}})^2}{2}}$$

式中，PI 为土壤内梅罗污染指数； $P_{\max}$ 为土壤各元素单因子指数中的最大值， P_{ave} 为土壤中各元素单因子指数的平均值，其分级标准如表 1 所示.

1.4.4 潜在生态危害指数法

根据瑞典科学家 Hakanson^[23] 提出的潜在生态危害指数法，该方法能综合反映重金属元素对生态

环境影响潜力的指标. 其计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (1)$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i \quad (2)$$

式中, RI 为土壤或沉积物中多种重金属元素潜在生态危害指数; $C_f^i = C^i/C_n^i$ 为重金属元素的富集系数, C^i 为实测值, C_n^i 为物质 i 的安徽省土壤背景值; T_r^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数, 反映其毒性水平和环境对其污染敏感程度. 各重金属元素毒性系数: $Mn = 1 < Cr = 2 < Cu = Ni = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30 < Hg = 40$ ^[21, 23]; E_r^i 为第 i 种重金属元素的潜在生态危害系数; Zn 和 Ag 暂无毒性系数, 故不评价其潜在生态危害.

RI 的调整规则参照文献[24]的分级标准进行: 先根据 Hakanson 的第一级分级值 150 除以 8 种污染物 (Hakanson 研究沉积物中 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn) 的毒性系数总值 133, 得到单位毒性系数的 RI 分级值 1.13; 然后将单位毒性系数的 RI 分级值 1.13 乘以本研究 9 种重金属元素的毒性系数总值 99, 并取十位整数得到 RI 第一级界限值 112, 余下各级别界限值可由上一级界限值乘以 2 得到, RI 分级标准见表 1.

2 结果与讨论

2.1 重金属元素含量特征

土壤样品 pH 值为 6.82 (6.50 ~ 7.10). Mn、Cu 和 As 等 3 种重金属元素在电厂周边及其厂区内土壤中的平均含量高于安徽省土壤平均背景值, As 是背景值的 1.03 倍 (0.84 ~ 1.33), Cu 是背景值的 1.07 倍 (0.93 ~ 1.52). 较国家土壤环境质量《农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018) 中 (6.5 < pH ≤ 7.5) 风险筛选值和《建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 36600-2018) 的第二类用地筛选值相比, 所有重金属元素均满足要求. 与对照点对比, 电厂周边及其厂区内土壤中 Mn、Pb 和 Hg 的整体含量水平略高于对照点, 其余 7 种重金属元素的含量均低于对照点, 其中 Cr、Ni、Cd、Cu 和 As 含量低于对照点, 差异有统计学意义 ($P \leq 0.05$). 与国内外对其他垃圾焚烧厂周边土壤的研究报道对比, Zn 的含量水平除深圳市清水河垃圾焚烧厂周边土壤以外均低于已有研究报道, Cr、Ni、As 和 Cu 等重金属元素的含量水平高于西班牙 Tarragona、深圳市清水河、珠江三角洲、广州和北京等地垃圾焚烧厂周边土壤, 重金属元素 Pb 含量水平略高于广州和北京等地垃圾焚烧厂周边土壤, Cd 和 Hg 的含量水平平均

低于国内外其他垃圾焚烧厂周边土壤的研究报道, 详见表 2.

本研究的生活垃圾焚烧发电厂仅投产运行 1 年多, 电厂周边及其厂区内土壤中重金属元素的累积作用不明显, 仅 Mn、Pb 和 Hg 的含量水平略高于对照点. Mn 通常作为土壤自然源标识元素, 其受外界干扰影响较小, 主要受成土过程和土壤流失影响. 土壤中的 Pb 有自然源和人为源, 自然源为矿物和岩石中的本底值, 人为源主要为汽车尾气排放、采矿和金属加工业, 研究区域内土壤中 Pb 含量较高的点位主要分布于进出电厂道路两侧农田和厂区内主干道附近, 本区域内 Pb 的污染可能主要受人为活动影响为主. 在我国土壤中 Hg 的来源包括燃煤燃烧、城市生活垃圾焚烧、建筑材料生产、氯碱工业、非铁金属熔炼、温度计生产和荧光灯生产等^[25], 本研究区域周边 10 km 范围内历史上或现今不存在城市生活垃圾焚烧以外的其他前述污染源, 土壤利用类型为农田. 在电厂投产运行后, 可能对其周边土壤中 Hg 的含量造成一定的影响. 土壤中 Cr、Ni、Cd、Cu 和 As 等重金属元素的污染主要受土壤母质影响和农业、交通、金属或机械加工等人为活动的影响. 研究区内土壤中 Cr、Ni、Cd、Cu 和 As 的含量低于对照点, 其可能的原因: 一是部分对照点农田靠近该辖区内主要河流, 农业灌溉长期以地表水灌溉为主, 研究区域内农田远离河流, 以地下水灌溉为主; 其二是农业活动差异, 例如农药、化肥的使用量、种植作物的类型等.

2.2 重金属空间分布特征

生活垃圾焚烧发电厂周边土壤中 Hg 在空间分布上的差异较明显, 其余重金属空间分布差异不明显、呈现较均匀 (见图 2). Hg 在常年主导下风向和次主导下风向 500m 土壤中含量最高, 之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降, 最后低于对照点的水平, 符合点源污染物的分布特点. 再次提示 Hg 可能受到了电厂的影响.

2.3 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价

生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中重金属元素污染程度为轻度污染 (表 3). 从 P_i 看, 在发电厂周边不同方位和厂区内土壤中各重金属元素的 P_i 为 0.0 ~ 1.5, 属于轻微污染或无污染; 对照点的 P_i 为 0.4 ~ 1.8, 也属于轻微污染或无污染. 从 PI 看, 土壤中各重金属元素的 PI 为 1.1 ~ 1.2, 均属于轻度污染, 对照点的 PI 为 1.5, 属于轻度污染. 污染程度为对照点 > 主导风下风向 45° 夹角 > 厂区 = 主导风下风向 = 次主导风下风向 = 主导风上风向.

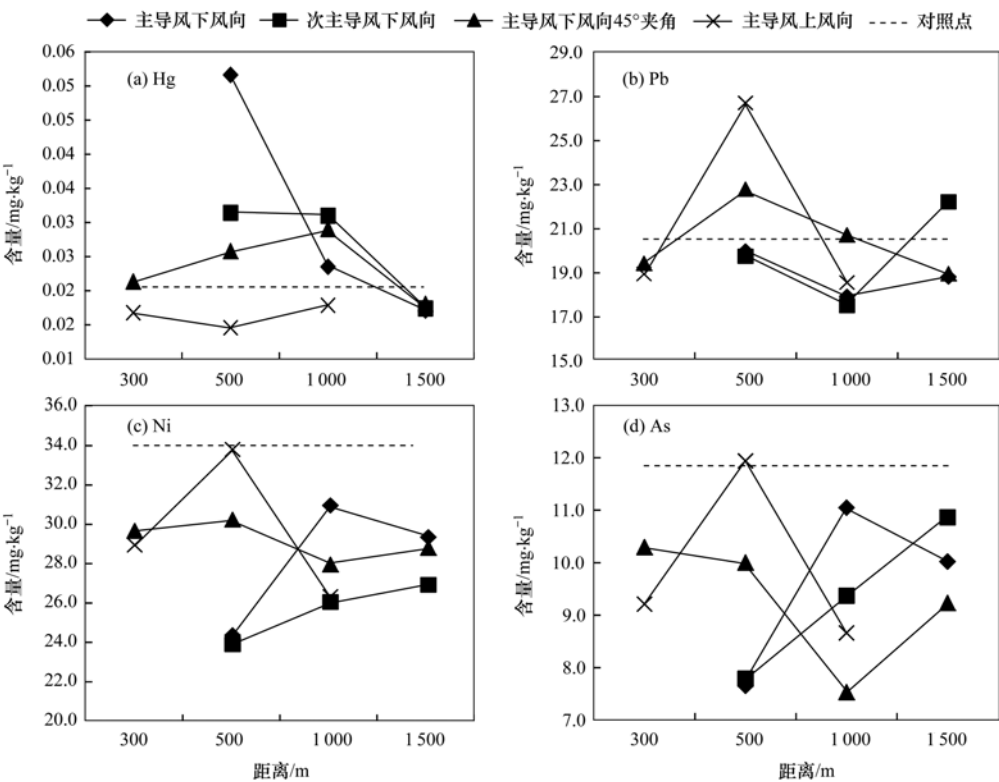


图2 生活垃圾焚烧厂周边不同距离土壤中重金属元素的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal elements in soils at different distances around the MSWIPP

表2 生活垃圾焚烧厂周边和厂区内土壤中重金属元素含量与其他文献案例对比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Concentration of heavy metals in soils and comparison with other MSWIs/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	类型	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Hg	Pb
生活垃圾焚烧厂 (n=22)	均值	59.6	628.6	28.5	21.8	46.3	9.34	0.088	0.028	0.025	20.5
	标准差	4.15	153.4	2.33	2.73	13.6	1.18	0.021	0.087	0.009	2.94
	几何均值	59.5	613.1	28.4	21.7	45.1	9.27	0.086	0.000	0.024	20.3
	中值	60.1	591.4	28.5	21.1	42.6	9.30	0.086	0.000	0.023	19.4
	极小值	51.2	451.8	23.9	18.9	36.3	7.53	0.059	0.000	0.014	17.5
	极大值	66.3	1042	33.8	31.0	98.0	11.9	0.155	0.386	0.052	28.7
对照点 (n=7)	炉渣中含量	106.4	506.0	32.9	201.0	1450	8.80	0.642	5.08	0.029	129.9
	均值	68.6	624.6	34.0	25.7	53.2	11.9	0.089	0.184	0.021	20.5
	标准差	9.53	152.2	4.51	4.67	8.46	2.04	0.018	0.061	0.006	4.27
	几何均值	68.1	610.7	33.8	25.4	52.7	11.7	0.087	0.177	0.020	20.1
	中值	68.9	549.5	33.9	25.9	52.1	11.1	0.085	0.154	0.020	18.7
	极小值	55.5	507.7	28.4	20.3	44.6	9.82	0.067	0.133	0.013	16.9
其他MSWI周边	极大值	85.9	901.0	42.7	34.1	71.3	15.9	0.120	0.303	0.030	28.8
	安徽省土壤背景值	66.5	530.0	29.8	20.4	62.0	9.00	0.196 0	0.097 0	0.033 0	26.6
	GB 15618-2018	120.0	—	100.0	100.0	250.0	30.0	—	0.3	2.4	120.0
	GB 36600-2018	—	—	900	18 000	—	60.0	—	65.0	38.0	800.0
	西班牙 Montcada ^[26]	17.7	—	17.4	—	97.8	9.71	—	0.400	0.110	54.2
	西班牙 Tarragona ^[18]	11.3	—	8.74	—	—	5.56	—	0.150	0.050	25.7
	广州 ^[27]	285.1	—	10.1	13.5	—	—	—	62.1	—	15.0
	上海市浦东 ^[28]	—	—	—	—	—	—	—	0.126	—	—
	上海 MSWI ^[29]	76.7	—	28.4	36.0	120.0	—	—	0.291	0.081	46.1
	深圳市清水河 ^[19]	51.7	—	6.00	11.6	6.00	9.39	—	0.120	0.058	27.6
	意大利 Pisa ^[12]	84.7	—	73.4	68.7	127.0	5.89	—	0.460	0.170	68.7
	嘉兴市 ^[13]	174.1	—	—	47.7	—	—	—	—	—	42.0
	重庆 ^[30]	218.0	—	—	31.8	71.0	—	—	ND	ND	35.7
	珠江三角洲 ^[15]	31.5	—	7.13	17.6	82.4	11.5	—	0.183	0.081	34.8
	广州 ^[31]	18.3	—	5.60	2.21	—	—	—	9.96	—	5.91
	北京 ^[32]	52.0	—	24.0	28.0	100.0	7.70	—	—	0.088	19.0
	中国北方 ^[33]	76.4	—	31.8	30.5	120.2	31.2	—	0.380	0.140	26.7

表3 生活垃圾焚烧发电厂不同方向土壤单因子和内梅罗综合指数分级结果¹⁾

Table 3 Classification results of single factor and Nemerow comprehensive index method in soil from different directions around the MSWIPP

项目	P_i					对照
	厂区	主导风下风向	次主导风下风向	主导风下风向45°夹角	主导风上风向	
Cr	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.1
Mn	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4
Ni	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.2
Cu	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1	1.3
Zn	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9
As	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4
Ag	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4
Cd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
Hg	0.8	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7
Pb	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
PI	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.5
污染水平	轻度	轻度	轻度	轻度	轻度	轻度

1) P_i 表示单因子指数, PI 表示内梅罗综合指数, 两者分级说明见表1

2.4 潜在生态风险评价

生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中重金属元素的潜在生态风险为轻微(表4)。从 E_r^i 看, 土壤中各重金属元素的 E_r^i 为0~37.6, 达到轻微生态危害, 对照点的 E_r^i 为0.9~53.1, 为轻微或中等生态

危害, 其中Cd的 E_r^i 为53.1, 达到中等生态危害。从RI看, 土壤中重金属元素的RI在60.2~67.7之间, 达到轻微生态危害, Hg和As对RI的贡献率较大, 在主导风下风向Hg和As对RI的贡献率达74.2%; 对照点为中等生态危害(RI为116.8)。

表4 生活垃圾焚烧发电厂周围厂区内土壤中重金属元素的潜在生态风险指数

Table 4 Potential risk index of heavy metals in soils around the MSWIPP

项目	E_r^i					对照
	厂区	主导风下风向	次主导风下风向	主导风下风向45°夹角	主导风上风向	
Cr	1.9	1.9	1.7	1.9	2.0	2.2
Mn	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4
Ni	5.2	5.0	4.6	5.1	5.3	6.0
Cu	5.7	5.3	5.2	6.0	5.6	6.6
Zn	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9
As	10.9	11.3	11.0	10.7	11.7	14.0
Cd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.1
Hg	33.2	39.8	37.2	35.8	30.4	28.9
Pb	4.0	3.6	3.8	4.0	4.1	3.9
RI	63.1	68.9	65.4	65.9	61.2	116.8
程度	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	中等

1) E_r^i 单项潜在风险评价指数, RI 综合潜在风险评价指数, 两者分级说明见表1; Ag 无毒性参数, 暂不计算其潜在生态风险指数

2.5 重金属元素来源探析

2.5.1 相关性分析

相关性分析广泛应用于土壤中重金属元素的来源辨识。本研究的 Pearson's 相关性分析结果见表5。10种重金属元素之间存在着6组显著的相关关系, 其中Ni与Cr、Ni和Mn、Zn与Cu、Cd与Zn和Ag等元素之间均有极显著正相关性($P<0.01$), Mn、Zn、Cu等8种重金属元素通常源于成土过程中地质风化, 受母质影响较大, 而受外界环境影响相对较小。Hg与Ni和As等元素之间呈显著负相关, 这与赵曦等^[15]对珠江三角洲某市垃圾焚烧厂周边土壤的研究结果相似, Hg与As、Cr、Cu和Zn等元素之间呈显著负相关, 说明Hg的来源与其他重金属元素存在差

异, 提示生活垃圾焚烧厂排放的Hg可能打破了周边土壤中重金属元素之间的平衡, 不过其内在机制仍需进一步研究探讨。

2.5.2 聚类分析

采用组间类平均法进行变量标准化, 距离测量采用平方欧氏距离, 对10种重金属元素进行聚类分析, 结果见图3。选择10为组间距离标准, 在生活垃圾焚烧发电厂周边及其厂区内土壤中Cr、Ni和As, Cu、Zn、Ag和Cd, Mn和Pb聚为一类, Hg自成一类; 对照点土壤中Cr、Ni和As, Ag、Pb、Cd、Mn, Cu、Zn和Hg聚为一类。赵曦等^[34]和Abanades等^[35]将城市生活垃圾焚烧过程中, 根据重金属元素在飞灰表面的分布和富集程度不同划分为4类, 详见表6。

表 5 生活垃圾焚烧厂周边土壤中重金属元素浓度 Pearson's 相关矩阵¹⁾

Table 5 Pearson's correlations matrix for the heavy metal concentrations around the MSWIPP

	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Hg	Pb
Cr	1.00									
Mn	0.22	1.00								
Ni	0.81 **	0.54 **	1.00							
Cu	0.36	0.10	0.28	1.00						
Zn	0.26	-0.08	0.12	0.84 **	1.00					
As	0.45 *	0.46 *	0.78 **	0.10	-0.02	1.00				
Ag	0.01	-0.28	-0.20	0.17	0.45 *	-0.43 *	1.00			
Cd	-0.02	-0.24	-0.23	0.26	0.60 **	-0.34	0.73 **	1.00		
Hg	-0.30	-0.06	-0.53 **	-0.17	-0.01	-0.50 *	-0.05	0.12	1.00	
Pb	0.12	0.44	0.15	0.30	0.34	0.12	0.31	0.41 *	0.14	1.00

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

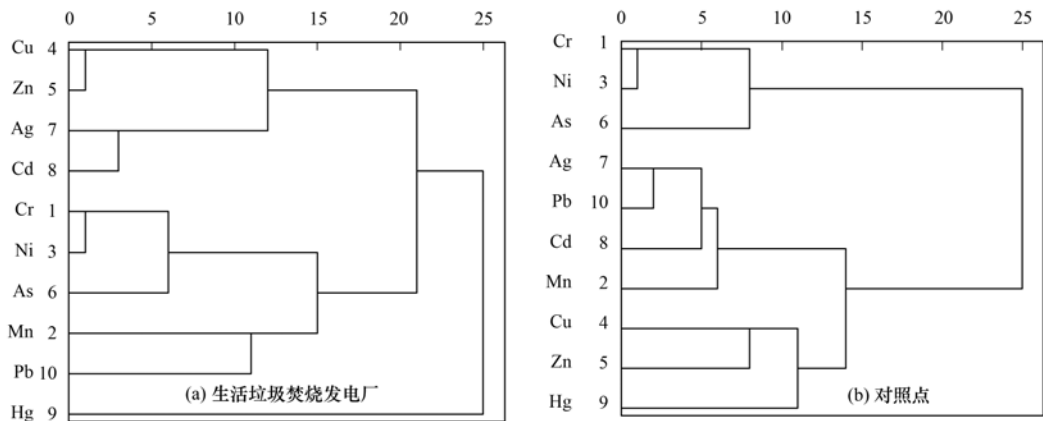


图 3 生活垃圾焚烧发电厂和对照点土壤重金属元素 R 型聚类

Fig. 3 R-type cluster analysis dendrogram in soil around the MSWIPP and control point

表 6 生活垃圾焚烧过程中重金属元素的迁移和分配特征

Table 6 Partitioning and distribution of heavy metals in the refuse incineration process

类型	重金属元素成分	重金属元素属性	重金属元素的迁移		
			底渣	飞灰	烟气
I	Co、Cr、Cu、Mn 和 Ni	难挥发	90% 以上	不到 10%	所占比例微乎其微
II	As、Pb、Zn、Sb 和 Sn	可挥发易凝结	约 50% ~ 60%	约 40% ~ 50%, 并在飞灰颗粒表面凝结	—
III	Cd	易挥发易凝结	约 10%	约 85%	约 5%
IV	Hg	易挥发难凝结	约 5%	约 25%	约 70%

本研究中聚类分析和炉渣中重金属元素含量(表 2)结果与文献[34,35]中重金属分类的结果基本一致. I 和 II 类中 Cr、Ni、Cu、Zn、Mn、As 和 Pb 等重金属元素主要聚集在熔渣或易捕获飞灰上,经烟尘处理工艺后随飞灰排放量相对较少,对周边土壤的影响也小,炉渣中重金属元素含量检测数据也支持这一观点;易挥发的 Cd 在炉渣中的含量和聚类分析并未与表 6 中分类相一致, Cd 在电厂周边土壤中均未检出,仅在厂区内土壤中检出,在炉渣中的含量远高于周边土壤,是厂区内土壤的约 145 倍,说明 Cd 可能是受建厂过程中电光源制造、机械设备加工等人为活动因素影响;IV 类的 Hg 随烟气扩散入大气,相对应电厂周边土壤中 Hg 的含量

与炉渣中含量几乎一致,与其他金属不相似性,再次表明垃圾焚烧厂周边土壤重金属元素 Hg 与垃圾焚烧过程密切相关.

2.5.3 主成分分析

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.特征值大于 1 的原则所提取的 3 个主成分方差累计贡献率达 74.72%(表 7),表明该结果在一定程度上能够真实地反映出生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中重金属元素来源情况.

主成分 1(PC1)的方差贡献率为 32.63%, Ni、Cr、As 和 Mn 都具有较大的正载荷. Mn 通常作为土壤自然源标识元素,其受外界干扰影响较小,主

要受成土过程和土壤流失影响. Ni 是我国城市土壤污染程度最低的重金属元素之一^[36]. 结合生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤重金属元素含量、空间特性以及相关性和聚类分析结果, 可判断 PC1 主要来源于土壤母质背景.

表 7 生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中
重金属元素主成分载荷

Table 7 Rotated component matrix for metals in soils
of the surrounding and factory area of MSWIPP

重金属元素	主成分		
	PC1	PC2	PC3
Cr	0.726	0.268	-0.205
Mn	0.613	-0.071	0.664
Ni	0.958	0.064	-0.074
Cu	0.344	0.707	-0.113
Zn	0.109	0.888	-0.121
As	0.861	-0.165	0.007
Ag	-0.343	0.721	-0.142
Cd	-0.335	0.808	0.019
Hg	-0.554	-0.008	0.561
Pb	0.184	0.560	0.690
特征值	3.263	2.881	1.328
方差贡献率/%	32.63	28.81	13.279
累计贡献率/%	32.63	61.44	74.719

1) 因子提取方法为主成分分析 (PCA); 旋转方法为正交转轴法 (varimax with kaiser normalization); 黑体字表示载荷 > 0.4

主成分 2 (PC2) 的方差贡献率为 28.81%, Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb 具有较大正载荷. 结合上述描述性统计与相关性分析结果可知, 生活垃圾焚烧发电厂周边土壤中 Zn、Ag 和 Cd 等 3 种重金属元素的平均含量低于本地区土壤背景和对照点的含量, 提示可能主要为自然来源. 而 Lv 等^[37]和 Cai 等^[38]的研究发现当 Cu、Cd 和 Zn 被分在同一主成分时, 在区域尺度上视为受到人为活动的影响. 除垃圾焚烧厂燃烧烟气排放影响外, 农业活动、电光源制造、机械设备加工和交通活动等也会向周边环境排放 Pb、Cd、Cu、Ag 和 Zn^[39-41]. 结合本研究区域内存在交通主干路、农业活动等多种人为污染源的情况, 可判断 PC2 可能受到自然和人为污染共同影响.

主成分 3 (PC3) 的方差贡献率为 13.28%, Mn、Hg 和 Pb 具有较大正载荷. PC3 很可能表征了垃圾焚烧厂排放物扩散、沉降行为对周边土壤环境的影响. 该区域地形平坦, 故可排除地形的影响. 从空间分布特征结果可以显示, Hg 的含量随相对位置变化与风向密切相关. 从垃圾焚烧过程中重金属元素迁移特征来看, Hg 主要迁移至飞灰和烟气中, 这一分类与周边土壤重金属元素相关性分析、聚类分析和主成分分析的特征均有相似性. 可判断本研究区域表层土壤中的 Hg 可能与垃圾焚烧厂的排放存

在较大的关联.

3 结论

(1) 生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中各重金属元素的含量水平均满足国家《土壤环境质量》(GB 15618-2018) 和 (GB 36600-2018) 中土壤污染风险筛选值要求; 仅有 Mn、Cu 和 As 的平均含量高于安徽省土壤平均背景值; 与对照点对比, Cr、Ni、Cd、Cu 和 As 含量低于对照点, 差异有统计学意义 ($P \leq 0.05$).

(2) 生活垃圾焚烧发电厂周边土壤中 Hg 在空间分布与当地主导风向密切相关. 在常年主导风下风向和次主导风下风向 500 m 土壤中最高, 之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降, 最后低于对照点的水平.

(3) 生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中各重金属元素的污染程度为轻度污染和潜在生态风险为轻微. Hg 和 As 对综合潜在生态危险指数 (RI) 的贡献率较大; 对照点为中等生态危害.

(4) 基于主成分分析的结果, 综合考虑生活垃圾焚烧发电厂周边和厂区内土壤中各重金属元素的含量和空间分布特征以及相关性分析和聚类分析结果, 将 10 种重金属元素分为 3 类: ① Ni、Cr、As 和 Mn; ② Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb; ③ Hg. 其中 Ni、Cr、As 和 Mn 来源主要受土壤母质影响; Cu、Zn、Ag、Cd 和 Pb 来源主要受土壤母质和多种人类活动共同影响; Hg 则很可能源于生活垃圾焚烧烟气的扩散沉降及其在土壤中的累积, 在垃圾焚烧厂周边的土壤重金属元素污染调查中 Hg 污染应受到重点关注.

参考文献:

- [1] Zhao X G, Jiang G W, Li A, *et al.* Technology, cost, a performance of waste-to-energy incineration industry in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **55**: 115-130.
- [2] Hong J L, Chen Y L, Wang M, *et al.* Intensification of municipal solid waste disposal in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **69**: 168-176.
- [3] Lombardi L, Carnevale E, Corti N A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste [J]. *Waste Management*, 2015, **37**: 26-44.
- [4] Marchi M, Pulselli F M, Mangiavacchi S, *et al.* The greenhouse gas inventory as a tool for planning integrated waste management systems: a case study in central Italy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 351-359.
- [5] Rajaeifar M A, Ghanavati H, Dashti B B, *et al.* Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **79**: 414-439.
- [6] Wang Y Q, Zhang X H, Liao W J, *et al.* Investigating impact of waste reuse on the sustainability of municipal solid waste (MSW)

- incineration industry using emergy approach: A case study from Sichuan province, China [J]. *Waste Management*, 2018, **77**: 252-267.
- [7] Li T, Wan Y, Ben Y J, *et al.* Relative importance of different exposure routes of heavy metals for humans living near a municipal solid waste incinerator [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **226**: 385-393.
- [8] Zhang H, He P J, Shao L M. Flow analysis of heavy metals in MSW incinerators for investigating contamination of hazardous components [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(16): 6211-6217.
- [9] Deng C Y, Xie H, Ye X J, *et al.* Mercury risk assessment combining internal and external exposure methods for a population living near a municipal solid waste incinerator [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 1060-1068.
- [10] Tepanosyan G, Maghakyan N, Sahakyan L, *et al.* Heavy metals pollution levels and children health risk assessment of Yerevan kindergartens soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **142**: 257-265.
- [11] Rovira J, Vilaverde L, Nadal M, *et al.* Temporal trends in the levels of metals, PCDD/Fs and PCBs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. Preliminary assessment of human health risks [J]. *Waste Management*, 2015, **43**: 168-175.
- [12] Bretzel F C, Calderisi M. Contribution of a municipal solid waste incinerator to the trace metals in the surrounding soil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **182**(1-4): 523-533.
- [13] 钟山, 高慧, 张漓杉, 等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价 [J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 164-169.
- Zhang S, Gao H, Zhang L S, *et al.* Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in soils surrounding a typical municipal solid waste incineration plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 164-169.
- [14] Morselli L, Bartoli M, Brusori B, *et al.* Application of an integrated environmental monitoring system to an incineration plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **289**(1-3): 177-188.
- [15] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(6): 1013-1021.
- Zhao X, Huang Y, Li J, *et al.* Environmental levels, spatial distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste incinerator [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 1013-1021.
- [16] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-Mulloli T, *et al.* Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: one source among many [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-2): 207-216.
- [17] Nadal M, Bocio A, Schuhmacher M, *et al.* Trends in the levels of metals in soils and vegetation samples collected near a hazardous waste incinerator [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, **49**(3): 290-298.
- [18] Llobet J M, Schuhmacher M, Domingo J L. Spatial distribution and temporal variation of metals in the vicinity of a municipal solid waste incinerator after a modernization of the flue gas cleaning systems of the facility [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **284**(1-3): 205-214.
- [19] 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.
- [20] Brady J P, Ayoko G A, Martens W N, *et al.* Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(5): 306.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [22] Ogunkunle C O, Fatoba P O. Pollution loads and the ecological risk assessment of soil heavy metals around a mega cement factory in southwest Nigeria [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, **22**(2): 487-493.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- [25] Zhang L, Wang S X, Wang L, *et al.* Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(5): 3185-3194.
- [26] Meneses M, Llobet J M, Granero S, *et al.* Monitoring metals in the vicinity of a municipal waste incinerator: temporal variation in soils and vegetation [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **226**(2-3): 157-164.
- [27] Li N, Kang Y, Pan W J, *et al.* Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **15**(7): 144-151.
- [28] 汤庆合, 丁振华, 江家骅, 等. 大型垃圾焚烧厂周边环境汞影响的初步调查 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 196-199.
- Tang Q H, Ding Z H, Jiang J H, *et al.* Environmental effects of mercury around a large scale MSW incineration plant [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(1): 196-199.
- [29] Li Y, Zhang H, Shao L M, *et al.* Impact of municipal solid waste incineration on heavy metals in the surrounding soils by multivariate analysis and lead isotope analysis [J]. *Journal of Environmental Science*, 2019, **20**(2): 1-10.
- [30] 冯经昆, 钟山, 孙立文, 等. 重庆某垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染分布特征及来源解析 [J]. *环境化学*, 2014, **33**(6): 969-975.
- Feng J K, Zhong G S, Sun L W, *et al.* Spatial distribution and source analysis of heavy metal contamination in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant in Chongqing [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(6): 969-975.
- [31] Li H, Nitivattananon V, Li P. Municipal solid waste management health risk assessment from air emissions for China by applying

- life cycle analysis[J]. *Waste Management & Research*, 2015, **33**(5): 401-409.
- [32] Han Y, Xie H T, Liu W B, *et al.* Assessment of pollution of potentially harmful elements in soils surrounding a municipal solid waste incinerator, China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(6): 129-139.
- [33] Ma W C, Tai L Y, Qiao Z, *et al.* Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: A case study in North China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 348-357.
- [34] 赵曦, 喻本德, 张军波. 城市生活垃圾焚烧重金属迁移、分布和形态转化研究[J]. *环境科学导刊*, 2015, **34**(3): 49-55.
- Zhao X, Yu B D, Zhang J B. The transfer, distribution, and morphological transformation of heavy metals from the incineration process of municipal solid waste [J]. *Environmental Science Survey*, 2015, **34**(3): 49-55.
- [35] Abanades S, Flamant G, Gagnepain B, *et al.* Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration [J]. *Waste Management & Research*, 2002, **20**(1): 55-68.
- [36] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **107**: 140-147.
- [37] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [38] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78**: 2-8.
- [39] 韩玉丽, 邱尔发, 王亚飞, 等. 北京市土壤和 TSP 中重金属分布特征及相关性研究[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(1): 146-155.
- Han Y L, Qiu E F, Wang Y F, *et al.* Study on heavy metals distribution and correlation in soil and TSP of Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(1): 146-155.
- [40] Markus J A, Mcbratney A B. Corrigendum-An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia[J]. *Soil Research*, 1996, **34**(3): 466.
- [41] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- Guo Y H, Sun X C, Zhang S B, *et al.* Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5262-5271.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)