

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

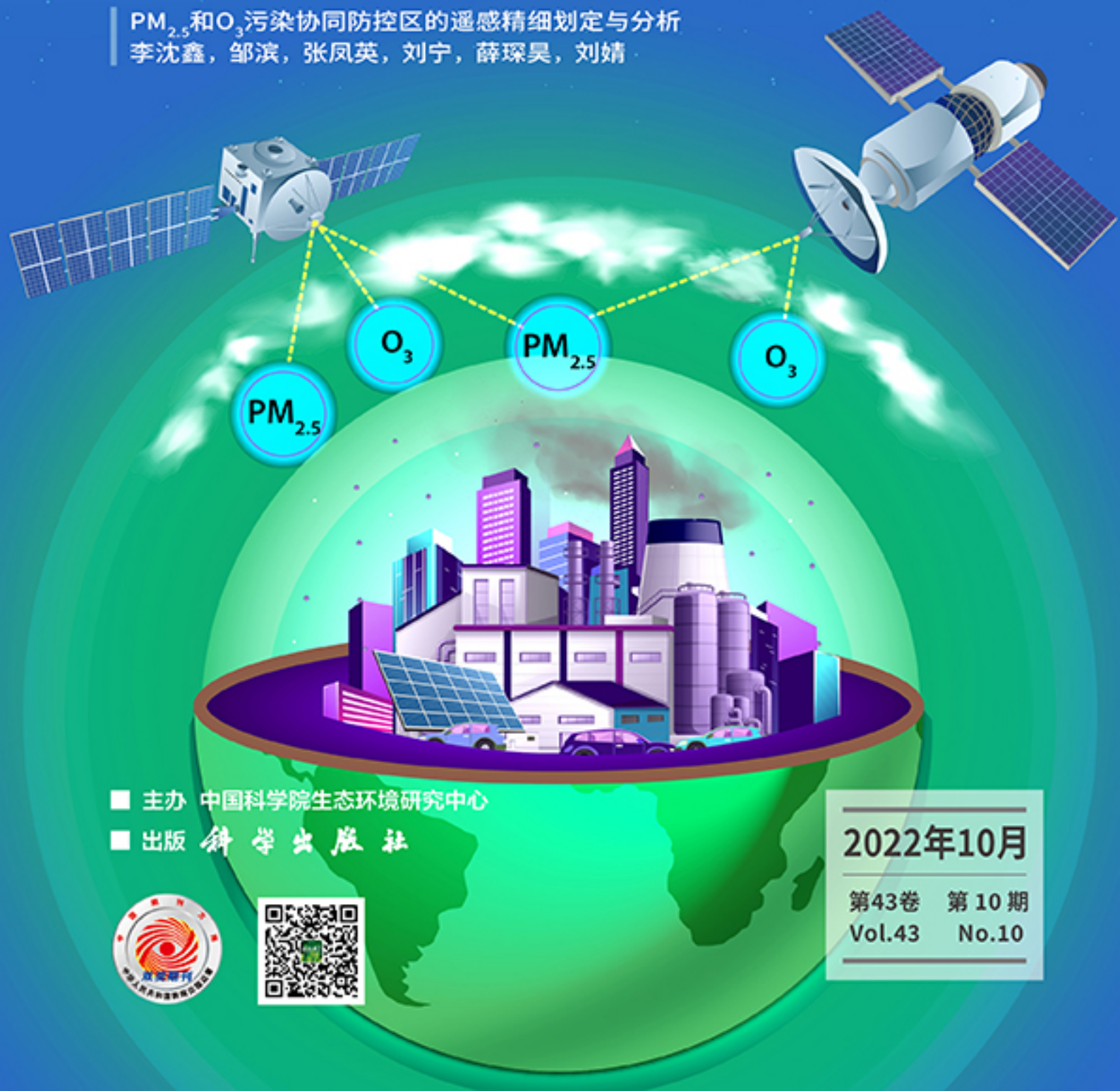
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险

车凯¹, 陈崇明¹, 郑庆宇², 范辉³, 魏明磊³, 罗蓬¹, 郁金星¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 中国兵器工业集团北方工程设计研究院有限公司, 石家庄 050011; 3. 国网河北省电力有限公司, 石家庄 050021)

摘要: 为揭示燃煤电厂烟气中重金属排放对周边土壤环境的影响, 以石家庄地区 6 座燃煤电厂为研究对象, 测定了燃煤电厂烟囱入口烟气中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg 和 Ni 这 7 种重金属元素, 同时对电厂周边土壤中重金属含量进行了测试分析, 并对其进行了源解析和健康风险评价。结果表明, 各燃煤电厂烟气经过一系列烟气污染物控制措施净化后, 烟气中不同重金属元素的排放量范围为 $0.11 \sim 6.32 \text{ mg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$, Cu、Cr 和 Ni 是主要排放污染物。各电厂向大气环境中排放的 7 种重金属元素总量在 $33.56 \sim 275.71 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。燃煤电厂周边表层土壤中 Cr、Cu、Pb、Hg 和 Ni 这 5 种重金属元素含量平均值均高于河北土壤背景值, 且超出背景值 1.16 ~ 2.32 倍。电厂周边土壤中重金属含量与烟气中重金属排放量具有一定相关性。不同风向土壤上重金属含量随距电厂距离的增大, 呈现出先增大后逐渐减小趋势。源解析表明煤炭燃烧排放对电厂周边土壤重金属的贡献率最大, 达到 41.4%, 其次为工业排放, 占比为 23.6%, 交通运输排放占比为 19.6%。总而言之, 人为活动对土壤重金属富集起主导作用, 约占 84.6%。健康风险评估显示电厂周边土壤中重金属元素的健康风险整体处于可接受范围内。

关键词: 燃煤电厂; 土壤; 重金属; 排放; 源解析; 健康风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4578-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202201032

Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils

CHE Kai¹, CHEN Chong-ming¹, ZHENG Qing-yu², FAN Hui³, WEI Ming-lei³, LUO Peng¹, YU Jin-xing¹

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. Norendar International LTD., Shijiazhuang 050011, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The aim of this study was to reveal the influence of heavy metal emissions from the flue gas of coal-fired power plants on the surrounding soil environment. Seven heavy metals, including As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, and Ni, were detected in the flue gas of six coal-fired power plants in Shijiazhuang, and the heavy metals in the soil surrounding the power plants were analyzed. The source analysis and health risk assessment of the heavy metals were carried out. The results showed that after a series of flue gas pollutant control measures, the emission concentrations of different heavy metals in the flue gas of the coal-fired power plants ranged from 0.11 to $6.32 \text{ mg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$, and Cu, Cr, and Ni were the main pollutants. The total amount of the seven heavy metal elements discharged into the atmosphere by each power plant was $33.56 \sim 275.71 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$. The average contents of Cr, Cu, Pb, Hg, and Ni in the surface soil surrounding the coal-fired power plant were higher than the background values of Hebei soil, and the contents were 1.16-2.32 times higher than the background values. The heavy metal content in the soil around the power plants was proportional to the heavy metal emissions in the flue gas. The heavy metal content in the soil under different wind directions first increased and then decreased gradually with the increase in distance from the power plants. Source analysis showed that coal combustion emissions contributed the most to heavy metals in soil around the power plants (41.4%), followed by industrial emissions (23.6%) and transportation emissions (19.6%). Altogether, human activities played a leading role in soil heavy metal enrichment, accounting for 84.6%. The health risk assessment showed that the overall health risk of metal elements in the soil surrounding the power plant was within acceptable limits.

Key words: coal-fired power plant; soil; heavy metals; emissions; source analysis; health risk assessment

土壤环境是人类生存和发展的重要物质基础之一^[1]。随着人类活动的干扰以及各种工业污染物的排放, 土壤环境遭受到了不同程度的破坏^[2]。对此, 生态环境部和自然资源部等相关部门对建设项目土壤专项评价、本底检测、定期监督评价和污染处罚等都提出了明确要求。工业生产排放的重金属是土壤重金属污染的重要源头。燃煤发电厂作为重要的电力来源, 亦是主要的工业污染源之一。伴随着大量煤炭资源的消耗, 燃烧释放的重金属元素对大气环境和土壤环境造成的危害已受到广泛关注^[3,4]。

目前, 对于电厂周边土壤中重金属污染的研究,

主要集中在对土壤中重金属含量、分布规律、赋存形态以及污染评价等方面^[5,6]。罗成科等^[7]对宁东基地多座燃煤电厂周边土壤中多种重金属元素含量和分布特性进行了对比分析研究。其他学者大多针对某一座电厂开展研究, 如樊倍希等^[8]对山西某火力发电厂周边农田土壤, 吕占禄等^[9]对安徽省 2 座电厂, 刘柱光等^[10]对燃煤电厂贮灰场, 高兰兰等^[11]对贵州某燃煤电厂等, 进行了土壤中重金属污染分

收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-03-03

基金项目: 国家电网公司科技项目(5204DY19000A)

作者简介: 车凯(1985~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为污染土壤环境风险评估和修复, E-mail: chekai311@163.com

析评价。然而,现有研究中只分析了土壤中重金属元素,结合燃煤电厂烟气中重金属排放浓度对周边土壤影响的相关研究尚未见到。

河北省会石家庄市是河北省政治、经济、文化和信息中心,是京津冀城市群全面发展的重要城市^[12]。逐渐形成以医药、纺织、化工、机械、电子、食品、轻工和建材工业为主的工业经济体系^[13]。近年来,随着城市化的快速发展,重污染天气的频繁出现,居民生活环境承受着巨大考验^[14]。为保证石家庄地区及周边用电及供热需求,石家庄地区共建有6座大型燃煤发电厂。巨量的煤炭燃烧不仅影响周边生态环境,同时也影响着周边居民的身体健
康^[15]。因此,开展燃煤电厂烟气中重金属排放及周边土壤中重金属环境调查评估,对石家庄地区环境保护及周边居民健康具有重要的意义。

基于上述分析,本文以石家庄地区6座燃煤电厂为研究对象,测定了燃煤电厂烟囱入口烟气中砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、汞(Hg)和镍(Ni)等国标GB 36600-2018^[16]要求的7种基本重金属元素含量,同时根据当地气象条件,采集了电厂周边土壤样品,分析了土壤中重金属含量及分布情况,并对其进行了健康风险评价,旨在为燃煤电厂气态污染物中重金属排放及其周边土壤重金属污染情况、预防和治理提供基础研究数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

石家庄地处河北省中南部,距首都北京283 km,位于北纬 $37^{\circ}27'$ ~ $38^{\circ}47'$,东经 $113^{\circ}30'$ ~ $115^{\circ}20'$ 之间,属于暖温带大陆性季风气候^[17,18]。总的气候特点为:年平均气温偏高,春温夏热秋凉冬冷,雨量分布不均,大部分地区接近常年,西部部分山区雨量偏多,日照偏少,春季多风。总降水量为401.1~752.0 mm,时空分布不均^[19,20]。年总日照时数为1916.4~2571.2 h,其中春夏日照充足,秋冬日照偏少。石家庄风向具有季节变化性,其主导风向为西北-北东北风和东南风-南风,冬夏风向有明显转换,每年9月至翌年2月盛行西北风,而3~8月则以东南风、南风为主导风向。西风 and 西南风出现频率最小,年静风频率高达30%^[21]。

1.2 燃煤电厂概况

石家庄区域内的6个燃煤电厂分布于石家庄主城区及周边市县内。电厂分布如图1所示。6个燃煤电厂总装机容量合计7047.5 MW。其中P3电厂为循环流化床(CFB)锅炉,其他电厂均为燃煤(PC)锅炉。各燃煤电厂装机容量及污染物控制措施如表1所示。

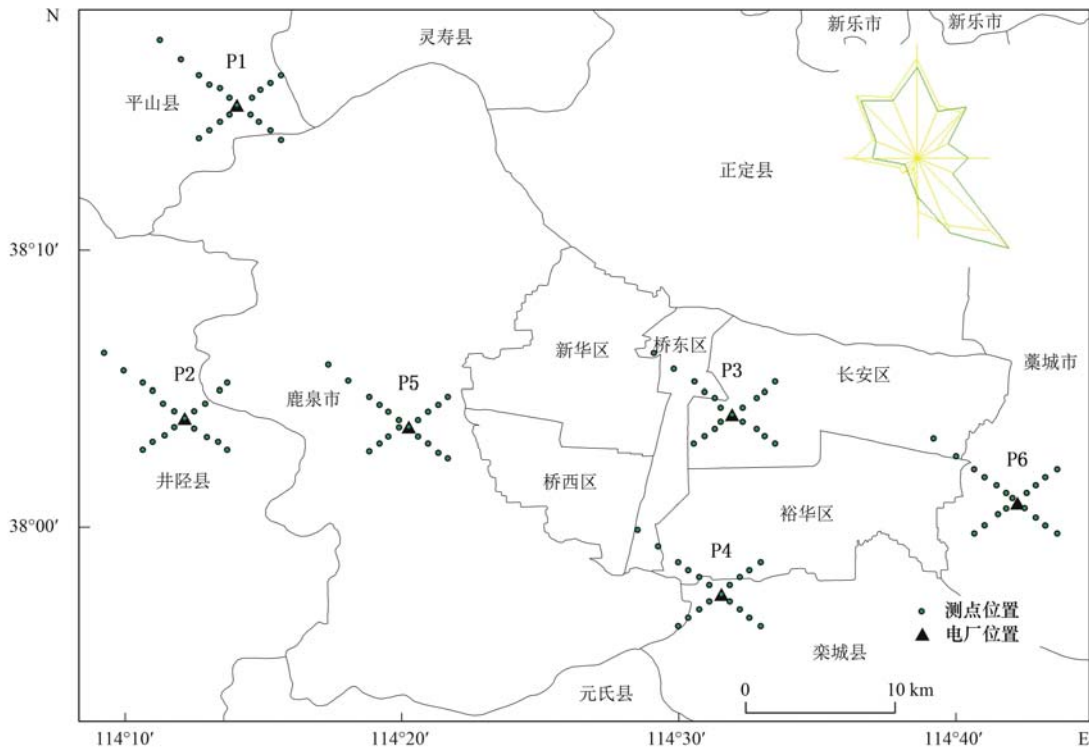


图1 电厂及土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of power plant and soil sampling sites

表 1 燃煤电厂参数

Table 1 Parameters of coal-fired power plant

项目	P1	P2	P3	P4	P5	P6
总装机容量/MW	2520	2560	47.5	600	660	660
测试机组容量/MW	300	330	22.5	300	330	330
锅炉炉型	PC	PC	CFB	PC	PC	PC
NO _x 控制	SCR	SCR	SNCR + SCR	SCR	SCR	SCR
SO ₂ 控制	WFGD	WFGD	炉内喷钙 + WFGD	WFGD	WFGD	WFGD
颗粒物控制	ESP/EP + WESP	ESP	EP + WESP	ESP + WESP	ESP + WESP	ESP + WESP

1.3 样品采集及点位布置

1.3.1 土壤样品采集

根据燃煤电厂烟囱高度和当地气象条件可知,大气污染物最大落地浓度约为距厂界 1 200 ~ 1 500 m,因此结合燃煤电厂所在地形特征以及当地主导风向,以各电厂为中心,采用辐射形布点法,以常年主导风向下风方向为轴线^[7]. 分别在燃煤电厂厂界处、电厂常年主导风向下风向及常年主导风向 90°、180°和 270°方向 500、1 000、1 500 和 2 000 m 半径处分别采集土壤样品(采样深度 0 ~ 20 cm),并在常年主导风向下风向 3 000 m 和 4 000 m 处增设采样点,共计 114 个表层土壤样品,采样点位分布见图 1. 土壤样品的采集严格执行四分法操作过程,将土壤样品缩分后取 1 kg 装入聚乙烯袋中带回实验室,并做好采样时间和 GPS 位置记录. 具体方法如《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)所示^[22].

1.3.2 烟气样品采集

烟气中重金属元素样品采用美国环保署(US Environmental Protection Agency, US EPA)推荐的 Method 29^[23]. 在机组满负荷工况下,使用烟气重金属采样装置(Clean Air, 美国)在烟囱排放口断面以连续等速采样方式采集 1.0 m³ 样气(标准状态),烟

气中颗粒态样品以等速采样方式被收集在滤膜上,气态样品采用被硝酸酸化过氧化氢和硫酸酸化高锰酸钾溶液收集. 采集样品吸收液装入玻璃瓶中密封,滤膜装入密封盒保存带回实验室分析. 样品采集期间,需同步收集电厂机组负荷、燃煤量、烟气量和氧气(O₂)浓度等参数. 采样过程中同时采集入炉煤样以备分析. 所有样品均在相同条件下重复采集 3 组.

1.4 样品检测

收集烟气中重金属的吸收液和滤膜采用 EPA Method 29 中所示预处理方法进行处理,其中石英滤膜经陶瓷剪刀剪碎后用 HCl-HNO₃ 消解. 采用电感耦合等离子体质谱仪(iCAP TQ 型,美国 Thermo Fisher)对煤样和土壤中 Cd、Cr、Ni 和 Pb 等重金属元素含量进行检测,具体操作参照标准 HJ 803-2016^[24]. 采用原子荧光光谱仪(9230 型,北京吉天)对土壤中 Hg 和 As 含量进行检测,具体操作参照标准 HJ 680-2013^[25]. 为了所测浓度值的统一度量,文中所有烟气中重金属元素浓度值均统一折算至 6% O₂ 下计算^[26]. 各电厂燃煤样品中重金属元素含量如表 2 所示. 为保证数据的准确性和可靠性,每组样品通过加入替代物和内标物,同时采用平行样和空白样品方法进行质量控制^[27].

表 2 各电厂燃煤样品中重金属元素含量/mg·kg⁻¹Table 2 Content of heavy metal elements in coal samples from various power plants/mg·kg⁻¹

电厂	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni
P1	4.13	0.12	14.50	28.54	15.31	0.08	10.20
P2	1.66	0.16	21.05	23.66	20.88	0.03	8.99
P3	1.09	0.20	19.33	29.25	16.34	0.09	13.27
P4	2.35	0.23	16.35	30.23	21.23	0.05	11.35
P5	2.11	0.26	18.78	25.36	29.80	0.04	9.21
P6	3.08	0.10	22.30	24.87	13.69	0.03	11.70

1.5 数据处理

1.5.1 源解析

重金属源解析方法很多,一般有 Pearson 相关分析法、主成分分析法、聚类分析法、特征组分比值法和正定矩阵因子分解法(PMF)^[28,29]. PMF 法是一种多元因素分析解析模型,在环境领域 PMF 源解析

模型被广泛应用^[30]. 本研究主要采用 Pearson 相关分析法和 PMF 法进行源解析分析. 重金属来源解析采用 USEPA PMF5.0 模型,模型参数的具体计算方法见文献[31,32].

1.5.2 健康风险评估

电厂周边土壤健康风险评估采用 HJ 25.3-

2019 推荐风险评价方法^[33],主要考虑表层土壤经口摄入、皮肤接触、土壤颗粒物吸入和土壤挥发气吸入等暴露途径,并按照毒理学性质将 7 种重金属分为致癌风险和非致癌风险这两类分别进行讨论,致癌风险计算方法如公式(1)~(5)所示,非致癌风险计算方法如公式(6)~(10)所示.各污染物 4 种暴露途径的致癌斜率因子和非致癌参考剂量(土壤颗粒物吸入和土壤挥发气吸入途径统一参照呼吸吸入参数)如表 3 所示,人体健康风险评价相关参数取值如表 4 所示.标准认为当致癌风险大于 $1\text{E}-06$,存在致癌风险;当非致癌风险商大于 1 时,认为存在非致癌风险.目前研究表明,对表层土壤风险评估过程中致癌风险虽超过 $1\text{E}-06$,存在一定风险,但在 $1\text{E}-06\sim1\text{E}-04$ 范围内也是可以接受^[34].

$$CR_{ois} = C_{sur} \times \frac{OSIR \times ED \times EF \times ABS_o}{BW \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \times SF_o$$

(1)

$$CR_{dcs} = C_{sur} \times \frac{SAE \times SSAR \times ED \times EF \times E_v \times ABS_d}{BW \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \times SF_d$$

(2)

$$CR_{pis} = C_{sur} \times PM_{10} \times DAIR \times ED \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO + f_{spi} \times EFI) \times 10^{-6} \times SF_i \times (BW \times AT_{ca})^{-1}$$

(3)

$$CR_{iovl} = C_{sur} \times VF_{suroa} \times \frac{DAIR \times EFO \times ED}{BW \times AT_{ca}} \times SF_i$$

(4)

$$CR_n = CR_{ois} + CR_{dcs} + CR_{pis} + CR_{iovl}$$

(5)

$$HQ_{ois} = CS_{sur} \times \frac{OSIR \times ED \times EF \times ABS_o}{RfD_o \times SAF \times BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6}$$

(6)

$$HQ_{dcs} = \frac{SAE \times SSAR \times ED \times EF \times E_v \times ABS_d}{RfD_d \times SAF \times BW \times AT_{nc}} \times CS_{sur} \times 10^{-6}$$

(7)

$$HQ_{pis} = CS_{sur} \times PM_{10} \times DAIR \times ED \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO + f_{spi} \times EFI) \times 10^{-6} \times (RfD_i \times SAF \times BW \times AT_{nc})^{-1}$$

(8)

$$HQ_{iovl} = CS_{sur} \times \frac{VF_{suroa} \times DAIR \times EFO \times ED}{RfD_i \times SAF \times BW \times AT_{nc}}$$

(9)

$$HI_n = HQ_{ois} + HQ_{dcs} + HQ_{pis} + HQ_{iovl}$$

(10)

式中,CR 为致癌风险;HQ 为非致癌危害商;ois、dcs、pis、iovl 和 n 分别为经口摄入、皮肤接触、土壤颗粒物吸入、土壤挥发气吸入和累积暴露途径;CS_{sur}为实测土壤中重金属含量,mg·kg⁻¹.

此外,本研究还采用 SPSS 21.0 软件对数据进行了包括最大值、最小值、平均值、中位数和变异系数等统计分析.采用 Origin 2017 和 Arcgis 10.3 软件进行制图.

表 3 重金属的致癌斜率因子和非致癌参考剂量¹⁾

项目	致癌斜率因子/mg·(kg·d) ⁻¹			非致癌参考剂量/mg·(kg·d) ⁻¹		
	经口摄入(SF _o)	呼吸吸入(SF _i)	皮肤接触(SF _d)	经口摄入(RfD _o)	呼吸吸入(RfD _i)	皮肤接触(RfD _d)
As	1.50E+00	1.83E+01	1.50E+00	3.00E-04	3.52E-06	3.00E-04
Cd	—	7.67E+00	—	1.00E-03	2.35E-06	2.50E-05
Cr	—	—	—	1.50E+00	—	1.95E-02
Cu	—	—	—	4.00E-02	—	4.00E-02
Pb	—	—	—	1.40E-04	3.28E-05	—
Hg	—	—	—	3.00E-04	7.04E-05	2.10E-05
Ni	—	1.11E+00	—	2.00E-02	2.11E-05	8.00E-04

1) “—”表示无数据

2 结果与讨论

2.1 烟气中重金属元素的排放

各燃煤电厂烟气经过一系列烟气污染物控制措施净化后,由烟囱排放至大气环境中,烟气中重金属元素随烟气向外扩散并逐步沉降于周边区域.各电厂烟囱入口处烟气中重金属排放浓度如表 5 所示.受测的 6 个燃煤电厂烟气中 7 种重金属含量平均值从大到小依次为:Cu[6.32 mg·(MW·h)⁻¹] > Cr[5.78 mg·(MW·h)⁻¹] > Ni[5.26 mg·(MW·h)⁻¹]

> Pb [3.48 mg·(MW·h)⁻¹] > Hg [1.70 mg·(MW·h)⁻¹] > As [1.67 mg·(MW·h)⁻¹] > Cd [0.11 mg·(MW·h)⁻¹].燃煤机组目前执行的污染物排放标准主要是《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)^[26].标准中仅规定了汞的排放限制(0.03 mg·m⁻³),对其他重金属排放限制并无规定.因此,本文参考美国 EPA 于 2011 年 12 月颁布的新火电厂的环保标准^[35].由于两国燃煤成分有所差异,仅将 EPA 标准作为参考,对比各电厂燃煤样品中重金属元素含量可以看出(表 2),烟气中

重金属含量与燃煤中重金属含量成一定正比例关系.排放至大气中重金属元素有不同程度超过 EPA 标准现象,其中 As[1.67 mg·(MW·h)⁻¹]和

Cr[5.78 mg·(MW·h)⁻¹]平均值更是超过了 EPA 标准 2011 年 5 月 3 日以后建造燃煤机组排放限值.

表 4 人体健康风险评价相关参数取值

Table 4 Values of relevant parameters in human health risk assessment			
参数	符号	数值	单位
成人每日摄入土壤量	OSIR	100	mg·d ⁻¹
成人暴露期	ED	25	a
成人暴露频率	EF	250	d·a ⁻¹
成人体重	BW	61.8	kg
经口摄入吸收效率因子	ABS _o	1	无量纲
成人暴露皮肤表面积	SAE	3 020.95	cm ²
致癌效应平均时间	AT _{ca}	27 740	d
非致癌效应平均时间	AT _{nc}	9 125	d
暴露于土壤的参考剂量分配系数	SAF	0.5	无量纲
成人皮肤表面土壤粘附系数	SSAR	0.2	mg·cm ⁻²
每日皮肤接触事件频率	E _v	1	次·d ⁻¹
空气中可吸入颗粒物含量	PM ₁₀	0.119	mg·m ⁻³
成人日空气呼吸量	DAIR	14.5	m ³ ·d ⁻¹
吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	PIAF	0.75	无量纲
室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例	fspi	0.8	无量纲
室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例	fspo	0.5	无量纲
成人室内暴露频率	EFI	187.5	d·a ⁻¹
成人室外暴露频率	EFO	62.5	d·a ⁻¹

表 5 燃煤电厂重金属排放量¹⁾/mg·(MW·h)⁻¹

Table 5 Heavy metal emissions from coal-fired power plants/mg·(MW·h) ⁻¹							
电厂	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni
P1	3.43	0.08	8.12	8.97	3.43	2.27	6.12
P2	0.92	—	9.72	5.65	4.88	1.17	3.59
P3	—	—	2.71	11.0	0.92	2.49	3.74
P4	2.00	0.15	5.24	4.24	2.66	1.12	6.39
P5	0.81	0.22	6.49	3.48	4.88	1.61	2.02
P6	2.86	0.22	2.38	4.51	4.11	1.54	9.72
平均值	1.67	0.11	5.78	6.32	3.48	1.70	5.26
标准差	9.72	0.25	32.44	25.75	14.45	6.02	16.47
EPA 现有燃煤机组排放限值	9.072	1.360 8	13.608	NA	3.63	NA	18.144
2011 年 5 月 3 日以后新建燃煤机组排放限值	1.360 8	0.181 44	3.175 2	NA	3.63	NA	18.144

1) “—”表示未检出,“NA”表示不适用 EPA 标准

各燃煤电厂每年向环境中排放的重金属总量如图 2 所示.经统计计算,各电厂向大气环境中排放的 7 种重金属元素总量在 33.56 ~ 275.71 kg·a⁻¹ (机组发电量按每台每年运行4 500 h,平均负荷率 75% 计算),其中 P1 和 P2 厂排放量最大,分别为 275.71 kg·a⁻¹和 223.98 kg·a⁻¹.这主要是由于这两个厂总装机容量较大,排放的污染物总量也较大.就各重金属元素而言,6 个燃煤电厂每年向周边环境排放的各种重金属总量从大到小依次为:Cr (187.76 kg·a⁻¹) > Cu(169.21 kg·a⁻¹) > Ni(128.18 kg·a⁻¹) > Pb (98.13 kg·a⁻¹) > As (49.28 kg·a⁻¹) > Hg (42.74 kg·a⁻¹) > Cd(1.95 kg·a⁻¹).由此可以看出虽然烟气中排放的各种重金属元素含量很低,但是由于整个城市燃煤电厂装机总量大,消耗的燃煤量大,因此排放的各种重金属元素也相当可观,这些元

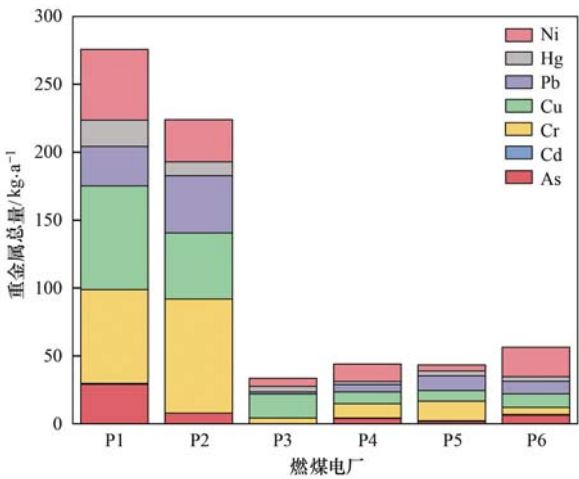


图 2 燃煤电厂每年排放重金属总量

Fig. 2 Coal-fired power plants emit the total amount of heavy metals annually

素通过扩散、沉降会对周边空气、水体、植被和土壤中其产生一定影响。

2.2 电厂周边土壤重金属元素含量及污染水平分析

2.2.1 重金属含量特征分析

石家庄各电厂周边土壤样品中重金属含量统计结果如表 6 所示。可以看出,石家庄电厂周边土壤样品中 7 种重金属元素均有检出。各元素含量平均值从大到小依次为:Cr (98.91 mg·kg⁻¹) > Ni (52.28 mg·kg⁻¹) > Cu (50.60 mg·kg⁻¹) > Pb (48.85 mg·kg⁻¹) > As(9.02 mg·kg⁻¹) > Cd(0.19 mg·kg⁻¹) > Hg(0.13 mg·kg⁻¹)。所测土壤中重金

属元素含量平均值均低于第一类建设用地土壤污染风险筛选值(GB 36600-2018)^[16]和农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018)^[36],土壤环境整体风险较低。燃煤电厂周边表层土壤中 Cr、Cu、Pb、Hg 和 Ni 等 5 种重金属元素含量平均值均高于河北土壤背景值,且超出背景值 1.16 ~ 2.32 倍。7 种土壤重金属质量分数的变异系数在 0.25 ~0.74 之间,其中,Cd 和 Hg 变异系数较高,表示该元素不同测试点位含量差异较大。说明这几种金属元素在不同位置土壤受到的污染影响不同,不同电厂区域差异明显。

表 6 土壤中重金属含量描述性统计¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 6 Descriptive statistics of soil HEs concentrations/mg·kg⁻¹

项目	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni
最大值	25.27	0.67	243.04	152.22	105.16	0.45	84.00
最小值	2.59	—	46.16	23.35	16.85	0.01	26.11
平均值	9.02	0.19	98.91	50.60	48.85	0.13	52.28
中值	8.33	0.14	90.94	46.08	49.36	0.11	51.35
标准差	3.83	0.14	40.52	19.36	16.88	0.08	12.87
变异系数	0.43	0.74	0.41	0.38	0.35	0.58	0.25
河北土壤背景值(中国环境监测总站)	13.6	0.16	65	21.8	21.5	0.094	30.8
平均值超标倍数	0.66	1.16	1.52	2.32	2.27	1.39	1.70
第一类建设用地土壤污染风险筛选值(GB 36600-2018)	20	20	NA	2000	400	8	150
农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018)	25	0.6	250	100	170	3.4	190

1) “—”表示未检出,“NA”表示不适用本标准

燃煤电厂周边土壤中不同重金属元素含量平均值如图 3 所示。可以看出受测的 6 座燃煤电厂相同重金属元素分布规律基本一致,而同一电厂中不同重金属元素含量差异较大。不同电厂 7 种重金属总量从大到小依次为: P2 (335.57 mg·kg⁻¹) > P1 (289.61 mg·kg⁻¹) > P4 (255.94 mg·kg⁻¹) > P6 (252.84 mg·kg⁻¹) > P5 (224.88 mg·kg⁻¹) > P3 (198.00 mg·kg⁻¹)。其中,P1 和 P2 电厂周边土壤中重金属总量相对偏高,P3 电厂周边土壤中重金属总量最少。对比上节电厂烟气中重金属排放量发现,除 As 元素外,电厂周边土壤中重金属含量与烟气中重金属排放量具有一定相关性,表明电厂周边土壤重金属污染主要受电厂烟尘排放影响较多。而电厂烟气中排放的 As 和 Hg 元素含量基本相同,土壤中两种元素含量却差异巨大,表明土壤中 As 元素并非主要由电厂排放所致。此外,P1 电厂位于石家庄周边郊县,四周以农田为主,工业污染源较少,P2 电厂位于山区,周边主要以矿石开采为主,受采矿和大型机动车影响较大,P3 电厂位于市中心,周边主要以居民区和市政道路为主,其它电厂主要分布在周边郊县,周边存在少量化工厂、制药厂和市政道路等。对比周边区域环境发现,P2 电厂周边土壤中 As、Cr、

Cu、Pb 和 Ni 的含量均偏高,有研究表明 As 元素除了受煤炭燃烧等工业排放影响外,还与周边地质环境和矿石开采等因素有关,由此表明 P2 电厂周边土壤中重金属来源可能与矿石开采有一定关系。

此外,对比相关研究发现^[12,37],本研究土壤中 Cr、Cu、Pb 和 Ni 等元素含量明显偏高,As、Cd 和 Hg 等元素含量相似,这也表明电厂周边土壤中重金

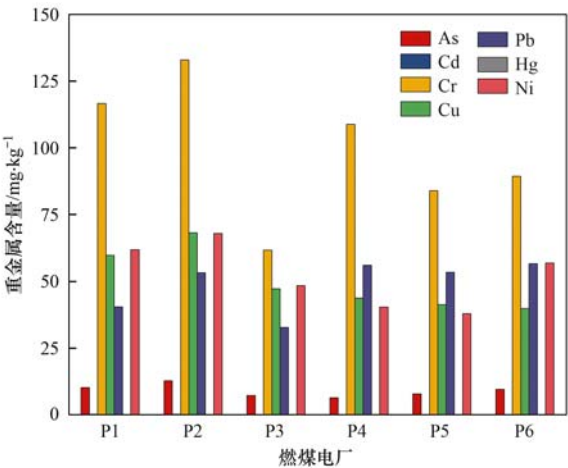


图 3 电厂周边土壤中重金属含量
Fig. 3 Statistics of heavy metal content in soil around power plants

属在一定程度上受燃煤电厂排放影响。

2.2.2 不同风向上土壤重金属含量分布

燃煤电厂周边各点位土壤样品中重金属元素含量如图4所示。Pb、Hg和Cd元素空间分布

呈现较强的一致性,在6个电厂周边均表现为在燃煤电厂常年主导风向下风向含量较高,而其它方位含量较低。Cr元素表现为在燃煤电厂常年主导风向下风向含量较高,在P1和P2电厂周边最

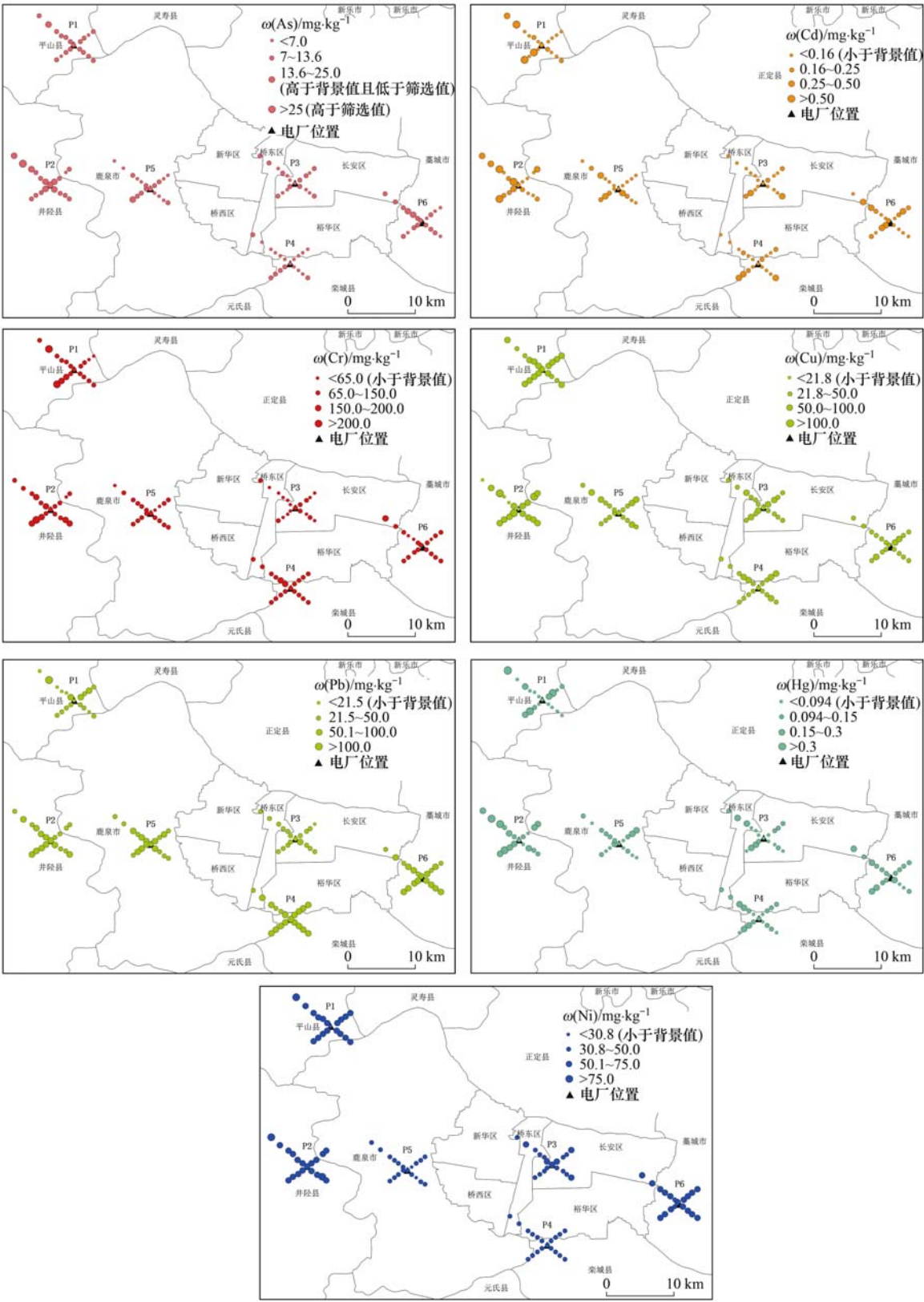


图4 燃煤电厂周边土壤中重金属含量

Fig. 4 Heavy metals in soils around coal-fired power plants

小风频下风向含量也较高. 可见 Cr 元素除了受电厂烟气排放影响,同时受其他因素影响较深. As 元素仅在 P1、P2 和 P6 电厂周边表现为常年主导风向下风向含量较高,而其电厂周边则分布相对较为一致. Cu 和 Ni 元素在电厂周边的 4 个方向上含量变化无明显差异. 对同一污染源来说,颗粒污染物沉降与当地气候条件相关,一般来讲主导风向上污染物沉降效果高于其他方向. 这与杨子鹏等^[28]和单平等^[38]对电厂周边土壤中重金属污染分析较一致.

将燃煤电厂周边各个方向测点中重金属元素含量相互对比,发现其含量随距电厂距离的增大,呈现出先增大后逐渐减小趋势. 尤其是在常年主导风向下风向,土壤中 Pb、Hg 和 Cd 元素含量在距电厂 1 000 ~ 2 000 m 距离时达到最高,而后逐渐降低. 这主要是由于为了有利于污染物的扩散,燃煤电厂烟囱一般设置较高(200 m 以上),而最大落地含量与烟囱距离和高斯大气扩散模型相关. 同

时,随着扩散距离增大,扩散面积随之增加,对气态污染物起到一定稀释作用,使其落到地面的含量逐渐降低.

2.3 重金属来源分析

2.3.1 相关性分析

Pearson 相关性分析可在一定程度上反映污染元素来源的相似性^[39]. 燃煤电厂周边表层土壤中重金属含量的 Pearson 相关性分析如表 7 所示. 结果表明,重金属 Pb-Cd、Pb-Cu 和 Pb-Hg 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,Cu-Cd 和 Cu-Cr 在 0.05 水平(双侧)上显著相关. 表明这些元素来源具有一定的相关性,可能受到同一污染源影响. Cu 和 Cd 同时与 Cr、Pb 和 Hg 均表现显著相关,说明 Cu 和 Cd 的来源并不单一,可能受到除燃煤电厂外其他污染源的影响. 而 Ni-As 在 0.05 水平(双侧)呈显著性相关,但与其他重金属之间相关性并不显著,表明这 2 种金属的来源具有相似性,且可能与其他金属有着不同的来源.

表 7 燃煤电厂周边表层土壤重金属 Pearson 相关性分析¹⁾

	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni
As	1						
Cd	0.036	1					
Cr	-0.255	0.605 **	1				
Cu	0.411	0.502 *	0.411 *	1			
Pb	-0.242	0.823 **	-0.204	0.722 **	1		
Hg	-0.182	0.235	-0.187	0.254	0.481 **	1	
Ni	-0.379 *	0.232	0.075	0.516 **	0.019	-0.003	1

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

2.3.2 基于 PMF 的污染源分析

土壤中重金属主要来源分为石油及其衍生产物(石油及其衍生产物泄漏和柴油、汽油燃烧)和化石燃料(煤炭、焦炭、生物质等)燃烧排放两大类^[40,41]. 为了精确确定重金属的污染来源,采用 PMF 模型对燃煤电厂周边土壤中 7 种重金属进行定量源解析,并评估了 7 种重金属元素的贡献比例,结果如图 5 所示. 本研究中,经过多次运行调试,最终确定 4 个因子,进行 20 次迭代运算,选取 Q 值最好结果,且所有残数值均在 -3 ~ 3 之间,计算结果趋于稳定. 实测含量值与模型预测值之间的拟合结果 R^2 在 0.44 ~ 0.99 之间,说明 PMF 模型整体解析效果较好,能满足源解析的需要.

因子 1 以 As (46.2%)、Cd (35.1%) 和 Cr (42.3%) 为主. 有研究表明环境中 As 的来源主要是与自然因素和农业活动有关,其次是与生活废物、工业废水污泥和排放物有关^[42]. 而土壤中 Cr 的来源较多,工业生产活动和人类活动等均会对土壤中

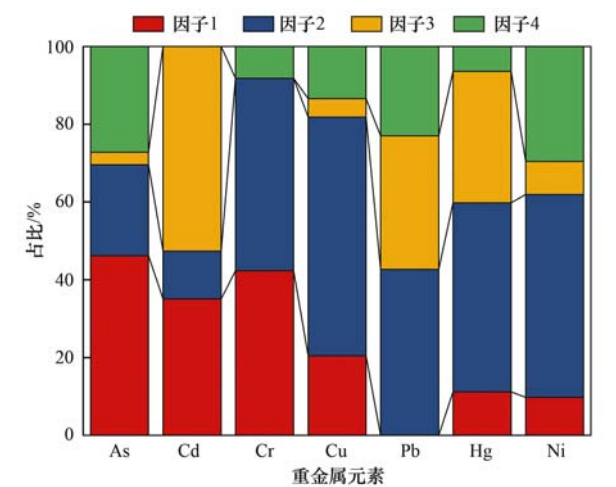


图 5 基于 PMF 模型重金属源解析

Fig. 5 Heavy metal source analysis based on PMF model

Cr 含量产生影响^[43]. 因此因子 1 表示工业排放源.

因子 2 主要载荷元素为 Cr (69.5%)、Cu (61.3%)、Pb (42.7%)、Hg (48.6%) 和 Ni (52.1%). 前人研究结果表明,中国土壤中 Hg、Cr

的高含量主要与工业活动中的煤燃烧有关^[44]. 此外对比上节中可以发现, 因子 2 中主要载荷元素与燃煤电厂烟气排放至大气中重金属元素呈正比关系. 由此可判断因子 2 表示燃煤源.

因子 3 主要载荷元素为 Cd (52.6%) 和 Pb (34.3%). 汽油添加剂、刹车片、燃料燃烧和发动机的使用导致 Pb 的排放^[45]. 研究表明交通干道两边土壤中 Cd 的污染含量最高^[46]. 而且燃煤电厂通过烟气排放的 Cd 元素只有 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 对周边环境影响较小. 同时, 研究区周边存在大量交通主干道, 汽车出入频次高、车流量大, 交通运输是土壤 Pb、Cd 积累的主要原因^[47]. 因此, 因子 3 代表交通源.

因子 4 所有元素载荷均较低, 主要以 As 和 Ni 为主, 通过 Pearson 相关性分析可知, 这两种元素来源具有相似性, 且可能与其他金属有着不同的来源. 此外, 由于 As 平均含量不超过背景值, 可以推测 As 元素主要为自然来源^[48]. 因此, 因子 4 表示自然源.

根据每种重金属元素因子指纹可得出污染来源贡献比例. 结果表明, 煤炭燃烧排放对土壤重金属的贡献率最大 (41.4%), 其次为工业排放 (23.6%), 交通运输排放 (19.6%). 总而言之, 人为活动对土壤重金属富集起主导作用, 约占 84.6%.

2.4 土壤中重金属健康风险评价

2.4.1 致癌风险评价

表8和表9为根据健康风险评价模型及相关风

表 8 燃煤电厂周边土壤中重金属致癌风险

Table 8 Carcinogenic risk of heavy metals in soil around coal-fired power plants

项目	重金属	P1	P2	P3	P4	P5	P6
经口摄入	As	7.82E-06	9.78E-06	5.58E-06	4.91E-06	6.00E-06	7.33E-06
皮肤接触	As	1.45E-05	1.81E-05	1.03E-05	9.12E-06	1.11E-05	1.36E-05
土壤颗粒物吸入	As	9.27E-07	1.16E-06	6.61E-07	5.82E-07	7.11E-07	8.69E-07
	Cd	8.02E-09	1.03E-08	4.79E-09	6.20E-09	5.86E-09	7.06E-09
	Ni	3.41E-07	3.73E-07	2.66E-07	2.22E-07	2.09E-07	3.13E-07
土壤挥发气吸入	As	8.11E-06	1.01E-05	5.78E-06	5.09E-06	6.22E-06	7.60E-06
	Cd	7.01E-08	9.01E-08	4.19E-08	5.42E-08	5.12E-08	6.18E-08
	Ni	2.98E-06	3.26E-06	2.33E-06	1.94E-06	1.83E-06	2.74E-06
合计	As	3.14E-05	3.92E-05	2.24E-05	1.97E-05	2.41E-05	2.94E-05
	Ni	3.32E-06	3.64E-06	2.60E-06	2.17E-06	2.03E-06	3.05E-06
	Cd	7.81E-08	1.00E-07	4.67E-08	6.04E-08	5.71E-08	6.89E-08

表 9 燃煤电厂周边土壤中重金属非致癌风险

Table 9 Non-carcinogenic risk of heavy metals in soil around coal-fired power plants

项目	重金属	P1	P2	P3	P4	P5	P6
经口摄入	As	2.16E-03	2.70E-03	1.54E-03	1.35E-03	1.65E-03	2.02E-03
	Cd	2.19E-03	2.82E-03	1.31E-03	1.70E-03	1.60E-03	1.93E-03
	Cr	3.64E-01	4.15E-01	1.93E-01	3.39E-01	2.62E-01	2.79E-01
	Cu	1.25E-04	1.42E-04	9.85E-05	9.12E-05	8.61E-05	8.30E-05
	Pb	3.16E-03	4.16E-03	2.56E-03	4.38E-03	4.17E-03	4.42E-03
	Hg	2.91E-03	4.01E-03	2.33E-03	2.75E-03	2.37E-03	3.11E-03
	Ni	5.44E-01	7.05E-01	5.04E-01	4.20E-01	3.95E-01	5.92E-01
皮肤接触	As	1.93E-02	2.41E-02	1.37E-02	1.21E-02	1.48E-02	1.80E-02
	Cd	3.98E-06	5.11E-06	2.38E-06	3.08E-06	2.91E-06	3.50E-06
土壤颗粒物吸入	As	6.07E-02	7.59E-02	4.32E-02	3.81E-02	4.65E-02	5.68E-02
	Pb	2.58E-02	3.40E-02	2.09E-02	3.58E-02	3.41E-02	3.61E-02
	Hg	3.88E-05	5.35E-05	3.11E-05	3.67E-05	3.16E-05	4.14E-05
	Ni	6.14E-02	6.72E-02	4.80E-02	4.01E-02	3.76E-02	5.64E-02
土壤挥发气吸入	As	4.61E-02	5.76E-02	3.28E-02	2.89E-02	3.53E-02	4.32E-02
	Cd	9.52E-04	1.22E-03	5.68E-04	7.36E-04	6.95E-04	8.38E-04
	Pb	1.83E-01	2.41E-01	1.48E-01	2.53E-01	2.41E-01	2.56E-01
	Hg	5.89E-04	8.12E-04	4.72E-04	5.57E-04	4.80E-04	6.29E-04
	Ni	2.79E-01	3.06E-01	2.19E-01	1.82E-01	1.71E-01	2.57E-01
	As	1.28E-01	1.60E-01	9.13E-02	8.05E-02	9.83E-02	1.20E-01
合计	Cd	3.15E-03	4.05E-03	1.88E-03	2.43E-03	2.30E-03	2.78E-03
	Pb	3.64E-01	4.15E-01	1.93E-01	3.39E-01	2.62E-01	2.79E-01
	Hg	1.25E-04	1.42E-04	9.85E-05	9.12E-05	8.61E-05	8.30E-05
	Ni	2.12E-01	2.79E-01	1.71E-01	2.93E-01	2.80E-01	2.96E-01
	As	1.28E-01	1.60E-01	9.13E-02	8.05E-02	9.83E-02	1.20E-01

险评价参数,燃煤电厂周边土壤重金属元素经口摄入、皮肤接触、表层土壤颗粒物吸入、土壤挥发气吸入这4种不同途径导致的致癌风险和非致癌风险的计算结果。由于测试位置基本在电厂周边农田、道边、绿化带、商业服务业设施用地和工业用地附近,因此不涉及导则中规定的敏感用地和住宅。评价时采用第二类用地推荐值并只针对成人进行风险评价。

从表8可以看出,皮肤接触暴露途径致癌风险最高,经口摄入暴露途径致癌风险次之,表层土壤颗粒物吸入和土壤挥发气吸入致癌风险相对较小。就不同燃煤电厂而言,致癌风险大小顺序依次为: $P2 > P1 > P6 > P5 > P3 > P4$ 。结合电厂烟气中重金属排放量以及周边土壤中重金属含量可以发现, $P1$ 和 $P2$ 电厂污染物排放总量较大,因此致癌风险较高,而 $P6$ 电厂周边制药厂和化工厂较为密集,会产生一定量重金属排放,导致致癌风险较高。6个燃煤电厂周边土壤中不同元素间的致癌风险差异显著, As 致癌风险为 $1.97E-05 \sim 3.92E-05$, Ni 致癌风险为 $2.03E-06 \sim 3.64E-06$,但整体在 $1E-06 \sim 1E-04$ 范围内,致癌风险也是可以接受。因此,本文认为电厂周边土壤中重金属健康致癌风险均处于可接受范围内。

2.4.2 非致癌风险评价

从表9可以看出,不同暴露途径上,经口摄入暴露途径非致癌风险最高,表层土壤颗粒物吸入和土壤挥发气吸入非致癌风险次之,皮肤接触暴露途径非致癌风险相对较小。不同重金属元素在4种暴露途径下导致的总非致癌风险最大的为 Ni 元素,非致癌风险为 $6.03E-01 \sim 9.98E-01$; Cu 元素非致癌风险最小,为 $8.30E-05 \sim 1.25E-04$ 。各电厂周边土壤中重金属元素的非致癌风险 HQ 并未超过1,这说明单个元素不足以存在对周边居民健康风险。总体来看,电厂周边土壤中重金属元素的健康风险整体处于可接受范围内。

3 结论

(1)各燃煤电厂烟气经过一系列烟气污染物控制措施净化后,烟气中不同重金属元素的排放量范围为 $0.11 \sim 6.32 \text{ mg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$, Cu、Cr 和 Ni 是主要排放污染物。各电厂向大气环境中排放的7种重金属元素总量在 $33.56 \sim 275.71 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,其中 $P1$ 和 $P2$ 厂排放量最大,分别为 $275.71 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $223.98 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于整个城市燃煤电厂装机总量大,消耗的燃煤量大,因此排放的各种重金属元素总量相当可观。

(2)燃煤电厂周边表层土壤中 Cr、Cu、Pb、Hg 和 Ni 等5种重金属元素含量平均值均高于河北土壤背景值,且超出背景值 $1.16 \sim 2.32$ 倍。 $P1$ 和 $P2$ 电厂周边土壤中重金属含量相对偏高, $P3$ 电厂周边土壤中重金属含量最少,这与电厂烟气中重金属排放量有一定相关性,表明电厂周边土壤重金属污染受电厂烟气排放影响较多。不同风向上土壤中 Hg、Pb 和 Cd 元素在常年主导风向下风向含量较高,而常年主导风向上风向含量较低,且含量随距电厂距离的增大,呈现出先增大后逐渐减小趋势。

(3)燃煤电厂周边表层土壤中 Pb、Cd、Cu、Hg 和 Cr 来源存在一定相关性, Ni 和 As 与其他重金属之间相关性并不显著。PMF 模型显示煤炭燃烧排放对土壤重金属的贡献率最大,达到41.4%,其次为工业排放占比为23.6%,交通运输排放占19.6%。总而言之,人为活动对土壤重金属富集起主导作用,约占84.6%。

(4)研究区内各电厂周边土壤中各重金属元素致癌风险在 $4.67E-08 \sim 3.92E-05$ 范围内,均处于可接受范围,皮肤接触是主要的致癌暴露途径。各电厂周边土壤中重金属元素均不存在非致癌风险,经口摄入是主要的非致癌风险暴露途径。总体来看,电厂周边土壤中重金属元素的健康风险整体处于可接受范围内。

参考文献:

- [1] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4180-4196.
Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, et al. Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: take a polluted industrial site of Beijing as an example[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4180-4196.
- [2] 张义, 周心劝, 曾晓敏, 等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2062-2070.
Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, et al. Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the regions in the Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental science, 2022, 43(4): 2062-2070.
- [3] 冯亦立, 王家源. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤重金属污染评价[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(4): 510-514.
Feng Y L, Wang J Y. Evaluation of heavy metal emission from coal-fired power plant and heavy metal pollution in surrounding soil[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(4): 510-514.
- [4] 杨子鹏. 燃煤电厂周边环境重金属时空分布特征及环境风险评估[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [5] Mutia T M, Fridriksson T, Magnússon S H, et al. Concentrations of sulphur and trace elements in subarctic soils and mosses in relation to geothermal power plants at Hengill, Iceland - ecological implications[J]. Geothermics, 2021, 95, doi: 10.1016/J.GEOTHERMICS.2021.102136.
- [6] 吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价[J]. 环境化学, 2020, 39(12):

- 3480-3494.
- Ly Z L, Zhang J L, Zhang H, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around the biomass power Plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39** (12): 3480-3494.
- [7] 罗成科, 张佳瑜, 肖国举, 等. 宁东基地不同燃煤电厂周边土壤5种重金属元素污染特征及生态风险[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(7): 1285-1291.
- Luo C K, Zhang J Y, Xiao G J, *et al.* Pollution characteristics and ecological assessment metals in soil around different coal-fired power plants of Ningdong base [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(7): 1285-1291.
- [8] 樊倍希, 张永清. 山西某火力发电厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, **36**(7): 953-960.
- Fan B X, Zhang Y Q. Evaluation of heavy metal pollution in farmland around a thermal power plant in Shanxi province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(7): 953-960.
- [9] 吕占禄, 张金良, 邹天森, 等. 燃煤电厂周边土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9**(6): 720-731.
- Ly Z L, Zhang J L, Zou T S, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil around coal-fired power plants [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(6): 720-731.
- [10] 刘柱光, 方樟, 丁小凡. 燃煤电厂贮灰场土壤重金属污染及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(9): 1916-1922.
- Liu Z G, Fang Z, Ding X F. Heavy metal pollution and health risk assessment of soil in ash yard of coal-fired power plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(9): 1916-1922.
- [11] 高兰兰, 傅成诚, 冯新斌, 等. 贵州东部某燃煤电厂汞排放对周边环境空气及土壤的影响[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(3): 51-58.
- Gao L L, Fu C C, Feng X B, *et al.* Mercury influence of a coal-fired power plant in East Guizhou on the ambient air and soil [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(3): 51-58.
- [12] 柴立立, 崔那涛. 河北省重点城市土壤重金属污染评价与防治对策—以石家庄市为例[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(3): 261-268.
- Chai L L, Cui X T. Pollution assessments and prevention countermeasures of heavy metals of soil in main cities of Hebei province: taking Shijiazhuang as an example [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(3): 261-268.
- [13] 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 等. 基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2917-2927.
- Tang Y X, Yao Q, Cai Z Y, *et al.* Exploring formation of ozone in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region using process analysis [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2917-2927.
- [14] 耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 等. 基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3508-3522.
- Yao T, Yin Z P, Zheng Z F, *et al.* Spatial-temporal distribution and evolution characteristics of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region based on long-term “Ground-satellite” data [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3508-3522.
- [15] 柴小康, 黄国和, 解玉磊, 等. 某燃煤超低排放机组非常规污染物脱除[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(12): 3480-3494.
- Chai X K, Huang G H, Xie Y L, *et al.* Unconventional pollutant removal from a coal-fired ultra-low emission unit [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(12): 3480-3494.
- [16] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [17] 关亚楠, 张博信, 倪爽英, 等. 石家庄大气能见度与颗粒物污染及相对湿度的关系[J]. *安全与环境学报*, 2020, **20**(5): 2001-2008.
- Guan Y N, Zhang B X, Ni S Y, *et al.* Relationship between atmospheric visibility and particulate matter pollution in addition to relative humidity in Shijiazhuang [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, **20**(5): 2001-2008.
- [18] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- Wang S, Nie S S, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O₃ and NO₂ in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- [19] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5131-5142.
- Nie S S, Wang S, Cui J S, *et al.* Spatio-temporal characteristics and potential source areas of seasonal atmospheric pollution in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5131-5142.
- [20] 张增凯, 路雨婷, 赵鹏宇, 等. 2019年京津冀重污染天气应急响应经济损失评估[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3399-3408.
- Zhang Z K, Lu Y T, Zhao P Y, *et al.* The assessment of economic cost induced by emergency responses for heavy pollution weather within Jing-Jin-Ji area in 2019 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3399-3408.
- [21] 张智答, 王晓琦, 张晗宇, 等. 京津冀地区典型城市秋冬季PM_{2.5}输送特征研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(3): 993-1004.
- Zhang Z D, Wang X Q, Zhang H Y, *et al.* PM_{2.5} Transport characteristics of typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(3): 993-1004.
- [22] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [23] 车凯, 郑庆宇, 韩忠阁, 等. 燃煤电厂痕量元素协同脱除及排放[J]. *中国电力*, 2019, **52**(4): 161-166.
- Che K, Zheng Q Y, Han Z G, *et al.* Research on Co-removal and emission of trace elements in the coal-fired power plant [J]. *China Electric Power*, 2019, **52**(4): 161-166.
- [24] HJ 803-2016, 土壤和沉积物12种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [25] HJ 680-2013, 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法[S].
- [26] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [27] 车凯, 郁金星, 刘松涛, 等. 河北南部变电站场地土壤中PAHs含量、来源及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
- Che K, Yu J X, Liu S T, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PAHs in soil of typical substation sites in south Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
- [28] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. *生态学报*,

- 2020, **40**(14): 4823-4835.
- Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, *et al.* Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- [29] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于 PMF 模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(9): 185-192.
- Bilal I, Abdugheni A, Shi Q D, *et al.* Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of Eastern Junggar Coalfield based on PMF model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(9): 185-192.
- [30] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 430-437.
- Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong river basin based on positive matrix factorization [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [31] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 2014.
- [32] 吴劲, 滕彦国, 李娇, 等. 基于 PMF 模型的土壤重金属源解析中变量敏感性研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2960-2969.
- Wu J, Teng Y G, Li J, *et al.* Sensitivity of input variables in source apportionment of soil heavy metal base on PMF model[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2960-2969.
- [33] HJ 25.3-2019, 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S].
- [34] 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 等. 青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4422-4431.
- Du H L, Wang Y, Wang J S, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in typical watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4422-4431.
- [35] Environmental Protection Agency. National emission standards for hazardous air pollutants from coal-and oil-fired electric utility steam generating units and standards of performance for fossil-fuel-fired electric utility, industrial-commercial-institutional, and small industrial-commercial-institutional steam generating units [EB/OL]. <https://www.federalregister.gov/documents/2011/05/03/2011-7237/national-emission-standards-for-hazardous-air-pollutants-from-coal--and-oil-fired-electric-utility>, 2011-05-03.
- [36] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [37] 姚娜, 彭昆国, 刘足根, 等. 石家庄北郊土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(2): 313-321.
- Yao N, Peng K G, Liu Z G, *et al.* Distribution and risk assessment of soil heavy metals in the north suburb of Shijiazhuang city [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(2): 313-321.
- [38] 单平, 伍震威, 黄界颖, 等. 安徽某燃煤电厂周边土壤汞分布特征及风险评价[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(5): 86-92.
- Shan P, Wu Z W, Huang J Y, *et al.* Distribution analysis and risk assessment of hg in soils around a coal-fired power plant in Anhui[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(5): 86-92.
- [39] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [40] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. 基于 PMF 模型及地统计法的乐安河中上游地区土壤重金属来源解析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(6): 984-992.
- Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal in the middle and upper reaches of Le'an River based on PMF model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 984-992.
- [41] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2104-2114.
- Wang H Y, Han L, Xie Da N, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in farmland soil around mining area and pollution assessment [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2104-2114.
- [42] 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.
- [43] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of Southern Ningxia based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.
- [44] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al.* Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: an integrated approach [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 650-661.
- [45] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 442-453.
- Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 442-453.
- [46] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [47] Cheng Z, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 621-629.
- [48] Sawut R, Kasim N, Abliz A, *et al.* Possibility of optimized indices for the assessment of heavy metal contents in soil around an open pit coal mine area[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **73**: 14-25.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)