

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应

周亚龙^{1,2,3}, 王乔林^{1,2,3}, 王成文^{1,2,3*}, 刘飞^{1,2,3}, 宋云涛^{1,2,3}, 郭志娟^{1,2,3}, 杨志斌^{1*}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000; 3. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000)

摘要: 为评估雄安新区企业密集区工业生产经营活动对其周边农田土壤和农作物中重金属污染风险的影响程度, 系统分析企业周边农田区小麦籽实及其根系土壤重金属含量特征与超标情况, 利用地累积指数(I_{geo})和潜在生态风险指数(RI), 采用主成分分析和相关分析等统计方法开展重金属污染风险评估和源解析。结果表明, 根系土壤 96.67% 的样品存在 1 种以上重金属含量超出农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018), 小麦籽实 96.67% 的样品 Pb 含量和 16.67% 的样品 Cd 含量超出食品安全国家标准(GB 2762-2017)。根系土壤 Cd 和 Pb 污染相对严重, I_{geo} 呈中~重污染以上等级状态的样品数占比分别为 83.33% 和 53.33%, Cu、Hg 和 Zn 处于轻污染和中污染状态的样品数占比 90% 以上, As 和 Ni 呈现轻污染状态, Cr 处于无污染状态。根系土壤样品 RI 介于 212.69~1 022.69 之间, 73.33% 的样品 RI 为强生态风险等级, Cd 潜在生态危害最大, 其次为 Hg 和 Pb 元素。土壤重金属 Cd、Zn 和 Cu 的富集主要受周边企业生产活动的影响, As、Hg 和 Pb 除受企业生产活动因素影响外, 还可能受汽车尾气、燃煤等人为源影响, Cr 和 Ni 主要受自然地质背景因素影响。企业周边农田土壤-农作物系统重金属元素的累积与其距离企业距离(H)均呈负相关关系, 距离企业越近, 周边土壤-农作物系统重金属元素累积效应越显著。

关键词: 土壤-作物系统; 土壤重金属; 污染风险; 累积效应; 雄安新区

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5977-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202103255

Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District

ZHOU Ya-long^{1,2,3}, WANG Qiao-lin^{1,2,3}, WANG Cheng-wen^{1,2,3*}, LIU Fei^{1,2,3}, SONG Yun-tao^{1,2,3}, GUO Zhi-juan^{1,2,3}, YANG Zhi-bin^{1*}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 3. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to evaluate the influence of heavy metal pollution risk in a surrounding soil-crop system caused by industrial activities in enterprise-intensive areas and to analyze the characteristics of heavy metal content and excessive levels in wheat seed and root soil in farmland areas around the enterprise in Xiong'an new district, the geoaccumulation index (I_{geo}), potential ecological risk index (RI), principal component analysis, and correlation analysis were used to assess the pollution risk and source resolution. The results showed that 96.67% of the root soil samples had more than one kind of heavy metal present beyond the screening value of soil pollution risk to agricultural land (GB 15618-2018), whereas the content of Pb in 96.67% of wheat seed samples and Cd in 16.67% of wheat seeds exceeded the national food safety standards (GB 2762-2017). The pollution of Cd and Pb in root soil was relatively severe. The proportion of samples with medium to heavy pollution was 83.33% and 53.33%, respectively. The samples of Cu, Hg, and Zn in a light-and medium-polluted state accounted for more than 90%, whereas As and Ni showed a light-pollution state, and there was no Cr pollution present. The RI of root soil samples ranged from 212.69 to 1 022.69, and the RI in 73.33% samples was graded as a strong ecological risk. Cd had the greatest potential ecological harm, followed by Hg and Pb. The enrichment of Cd, Zn, and Cu in the soil was mainly affected by the production activities of surrounding enterprises, whereas As, Hg, and Pb were not only affected by the above factors but also might be affected by human sources, such as automobile exhaust and coal burning. Cr and Ni were mainly affected by natural geological background factors. The accumulation of heavy metal elements in the soil-crop system had a negative correlation with the distance from the enterprise (H), and the closer to the enterprise, the more significant the accumulation effect of the heavy metal elements in the surrounding soil-crop system.

Key words: soil-crop system; soil heavy metals; pollution risk; cumulative effect; Xiong'an New District

伴随人类剧烈的工业生产活动,各种重金属和有机污染物等通过不同途径不断进入土壤生态系统,导致严重的生态环境问题^[1,2]。土壤重金属属于一种潜在的有毒有害污染物质,其无法被生物降解而具有累积特征,对微生物活性及作物生长等具有重要影响,可能造成严重的生态安全问题,甚至可能威胁人类健康^[3,4]。2014 年我国土壤污染状况调查公报显示^[5],全国典型污染企业用地及周边土壤超标

点位占 36.3%,典型企业区及其周边土壤重金属污染以及农作物安全问题受到了各界的广泛关注^[6,7]。

雄安新区成立前,区内中小型企业众多,涉及废

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-05-31

基金项目: 中国地质调查局地调项目(DD20189123)

作者简介: 周亚龙(1984~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为勘查地球化学, E-mail: zyalong@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者, E-mail: wchengwen@mail.cgs.gov.cn; yzhibin@mail.cgs.gov.cn

旧有色金属回收、电解和机械制造等行业^[8]. 长期的有色金属冶炼等工业生产活动形成的工业固废污染物可能随大气干湿沉降、污水灌溉等方式影响周边农田,造成其土壤和农作物等产生重金属潜在生态风险. 已有相关资料显示,新区西南部土壤重金属存在一定程度的污染问题^[8~13],但鲜见针对新区典型企业生产密集区周边农田开展土壤生态风险综合评估及土壤-作物系统响应关系的报道.

基于此,本文选择新区典型企业密集区周边农田土壤-小麦籽实为研究对象,通过系统分析重金属污染空间分布特征及其成因解析,客观评估新区典型企业密集区工业生产活动对其周边农田-作物系统重金属污染风险的影响程度,以期为新区土壤污染修复防治及该类典型企业周边土壤重金属污染有效防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地理位置位于太行山东麓、华北平原中部小麦主要生产区,地理坐标介于 $38^{\circ}41' \sim 39^{\circ}10' \text{N}$, $115^{\circ}37' \sim 116^{\circ}19' \text{E}$ 之间. 新区地势平缓,地面高程 $5 \sim 20 \text{ m}$, 坡降 $0.2\% \sim 0.7\%$ ^[14]. 研究区第四纪覆盖,以砂土、黏土和砾石为主构成,其地层厚度达 $348 \sim 437 \text{ m}$ ^[15]. 新区土地利用类型主要为耕地,其占规划总面积的 53.33% ,主要土壤类型是潮土,其成土母质是第四纪河流冲积、冲洪积和冲湖积物. 新区北部的容城地区发育少量褐土,白洋淀周边地区零散分布少量沼泽土. 农作物种植模式以小麦-玉米轮作为主.

研究区内存在 2 家中小型有色金属熔炼生产企业(A 和 D 企业)、1 家以金属废料和碎屑加工处理为主的再生资源利用公司(C 企业)和 1 家蓄电池生产企业(B 企业),4 家企业在工业生产过程中的工业“三废”的大量排放,可能造成该企业周边农田土壤-作物重金属污染. 为评估该工业聚集区周边农田土壤-作物重金属污染情况,选取企业周边农田为采样区域,以研究区企业位置为中心,采用 $300 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 网格化采集小麦籽实及其对应的小麦根系土壤各 30 件(图 1).

1.2 样品采集与分析

小麦籽实于其收获盛期,采用棋盘法、梅花点法或对角线法采集 3~4 个子样点等量混匀组成 1 个混合小麦籽实样品,籽实样品室内晾干后脱粒,采用四分法混匀后缩分取 250 g 送实验室测试分析. 根系土壤样品与籽实样品同点配对采集,采集对象为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的作物根系土壤,使用四分法保留 1 kg 土



红色字母表示企业,如 A,紫色符号表示样品号,如 Y01,以此类推

图 1 小麦籽实及其根系土壤样品采样分布示意

Fig. 1 Distribution map of wheat seed and root soil samples

壤样品. 土壤样品风干、敲碎,过 10 目尼龙筛初加工后送实验室,再根据不同分析指标过不同粒级筛. 本次根系土壤和小麦籽实样品采集和加工严格按照文献^[16]的相关要求进行.

根系土壤和小麦籽实样品分析测试指标包括 As、Cd、Cr、Hg、Pb、Ni、Zn 和 Cu 等指标. 各指标分析测试配套方法及检出限见表 1,各元素指标检出限均满足文献^[17]的相关要求. 采用国家一级标准物质和重复样监控分析测试的准确度和精密度,其中根系土壤分析测试过程中插入 6 件一级标准物质(GSS3a、GSS39、GSS43 和 GSS44);农作物样品分析测试过程中插入 8 件一级标准物质(GSB3、GSB21、GSB24 和 GSS25),因国家一级标准物质有对应的标准值(表 2),因此分析测试质量准确度和精密度采用测量值与标准值的相对误差、对数偏差和重复样的相对误差来控制. 所有插入的密码监控样(标准物质和重复样)的相对误差检验合格率均为 100% ,其准确度和精密度均满足样品分析技术规范要求,分析质量可靠.

1.3 评价方法

1.3.1 地质累积指数

地质累积指数(geoaccumulation index, I_{geo})是在充分考虑自然地质背景(成岩作用)引起的元素背景值变动等自然因素的基础上,定量评估沉积物及其它物质中重金属污染程度的评价方法指标^[18],其数学计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属 i 的地质累积指数; C_i 为沉积物及其它物质中重金属元素 i 的实测值; B_i 为重金属

表1 元素分析配套方法、检出限和密码样合格率

Table 1 Analysis index matching method, detection limit, and analysis test pass rate					
分析指标	农作物样分析测试方法	农作物样检出限 /mg·kg ⁻¹	根系土壤样分析测试方法	根系土壤样检出限 /mg·kg ⁻¹	标准物质/重复样合格率 /%
As	氢化物-原子荧光光谱法 (HG-AFS)	0.3	氢化物-原子荧光光谱法	0.2	100
Cd	等离子体质谱法 (ICP-MS)	0.02	等离子体质谱法	0.03	100
Cr	等离子体质谱法 (ICP-MS)	0.2	X 射线荧光光谱法	5	100
Cu	等离子体质谱法 (ICP-MS)	1	等离子体质谱法	1	100
Hg	冷蒸气-原子荧光光谱法 (CV-AFS)	0.005	冷蒸气-原子荧光光谱法	0.002	100
Ni	等离子体质谱法 (ICP-MS)	0.1	等离子体质谱法	2	100
Pb	等离子体质谱法 (ICP-MS)	0.1	等离子体质谱法	2	100
Zn	等离子体质谱法 (ICP-MS)	1	等离子体光学发射光谱法	2	100

表2 标准样品含量及测定结果¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Content and determination results of standard samples/mg·kg ⁻¹										
样品类型	标准物质	ω(As)	ω(Cd)	ω(Cr)	ω(Cu)	ω(Hg)	ω(Ni)	ω(Pb)	ω(Zn)	
土壤	GSS3a	标准值	6.20	79.0	35.0	13.4	116	15.0	28.0	39.0
		测量值 1	5.89	71.8	32.2	13.5	115	14.9	28.6	38.1
		测量值 2	6.64	85.2	33.4	12.8	112	15.2	28.0	36.2
	GSS39	标准值	12.9	200	59.6	25.3	75.0	17.1	27.0	70.1
		测量值 1	12.7	187	61.9	26.0	76.8	16.9	26.5	73.9
		测量值 2	13.3	181	63.2	24.8	78.3	16.4	25.7	70.4
	GSS43	标准值	11.4	121	84.4	24.1	27.0	38.4	19.5	55.4
		测量值	11.1	137	80.6	24.4	25.9	39.5	20.2	58.0
	GSS44	标准值	13.5	57.0	38.0	23.7	18.0	16.2	18.8	34.6
		测量值	12.4	58.5	38.6	23.6	18.2	16.1	18.9	35.0
农作物	GSB3	标准值	0.028	4.10	0.110	0.66	1.60	0.097	0.070	2.90
		测量值 1	0.031	4.01	0.121	0.54	1.57	0.090	0.057	2.49
		测量值 2	0.022	5.21	0.092	0.82	1.52	0.120	0.072	3.69
	GSB21	标准值	0.114	12.0	0.140	1.70	4.80	0.16	0.075	13.0
		测量值 1	0.111	8.6	0.071	1.44	4.10	0.08	0.043	10.7
		测量值 2	0.108	9.6	0.082	1.78	3.80	0.10	0.042	11.6
	GSB24	标准值	0.025	18.0	0.190	2.40	—	0.11	0.067	12.4
		测量值 1	0.024	17.9	0.089	2.50	1.66	0.09	0.052	11.2
		测量值 2	0.025	17.5	0.099	2.54	1.42	0.09	0.053	11.5
	GSB25	标准值	0.110	34.0	1.040	4.10	3.20	0.67	0.430	11.2
		测量值 1	0.125	38.2	1.301	4.35	4.10	0.53	0.377	11.9
		测量值 2	0.100	35.6	0.946	4.46	4.07	0.74	0.370	12.6

1) “—”表示没有相关数据

元素*i*的背景值;*k*为修正系数,一般取1.5.考虑土壤成因类型、地质背景等自然地质环境因素,选择与研究区具有相同或相似成壤环境的海河平原北部土壤背景值^[19]作为本次研究的背景值*B_i*.地质累积指数*I_{geo}*分为7个级别,其分级标准见文献[10].

1.3.2 潜在生态风险指数

Hakanson 潜在生态风险指数法 (potential ecological risk index, RI)^[20]是目前最常用的土壤重金属潜在生态风险评价方法之一^[21],基于各重金属元素生态环境效应和毒理效应存在差异,定量评估重金属可能引起的生态环境风险.其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_i \times C_i^t) = \sum_{i=1}^n \left(T_i \times \frac{C_i}{C_b^i} \right) \quad (2)$$

式中,RI 为总潜在生态风险指数,*E_rⁱ*为重金属元素单项潜在生态风险指数;*C_i^t*为重金属元素*i*的实测值,*C_bⁱ*为重金属元素*i*的参比值;*C_i^t*为某重金属元素的污染指数;*T_i*为重金属元素*i*的毒理效应参数,各重金属毒理效应参数为:*T_{Zn}* = 1、*T_{Cr}* = 2、*T_{Cu}* = *T_{Ni}* = *T_{Pb}* = 5、*T_{As}* = 10、*T_{Cd}* = 30 和 *T_{Hg}* = 40.根据*E_rⁱ*和RI大小,将单项重金属潜在生态危害和总潜在生态危害进行分级,标准详见文献[10].

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征与超标情况

2.1.1 根系土壤重金属含量与超标情况

研究区30件企业周边小麦籽实根系土壤样品各

重金属元素含量特征统计显示(表3),土壤 pH 值介于 8.31~8.82 之间呈碱性特征,根系土壤中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cr 含量均值均显著高于河北省全省土壤背景值和相似自然地质背景条件的海河平原北部地区土壤背景值,其中 Cd 和 Pb 均

值分别是其河北省土壤背景值的 15.2 和 7.4 倍,是海河平原北部土壤背景值的 8.9 和 7.5 倍,反映其具有明显的富集特征.根系土壤中重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 和 Hg 变异系数大于 0.35,为高度变异元素;As、Cr 和 Ni 变异系数小于 0.15,为轻度变异元素.

表 3 研究区农作物根系土壤重金属含量特征统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Characteristic statistics of heavy metal content in crop root soil in the study area/mg·kg⁻¹

项目	ω(As)	ω(Cd)	ω(Cr)	ω(Cu)	ω(Hg)	ω(Ni)	ω(Pb)	ω(Zn)	pH
最小值	18.4	0.461	84.6	53.4	0.048	44.1	56.4	132.0	8.31
10%分位值	20.7	0.786	87.3	59.3	0.056	45.0	68.8	152.5	8.55
25%分位值	21.5	1.092	89.4	74.0	0.063	47.3	95.8	183.3	8.60
50%分位值	23.2	1.367	91.3	88.0	0.074	48.6	135.5	211.0	8.69
75%分位值	24.8	1.623	93.1	112.0	0.101	50.1	230.0	235.5	8.75
90%分位值	26.5	2.123	94.6	149.3	0.145	52.7	274.8	305.2	8.79
最大值	28.5	3.826	95.0	246.0	0.229	54.5	398.0	625.0	8.82
均值	23.3	1.423	91.1	99.2	0.089	48.7	158.7	224.8	8.67
标准差	2.3	0.629	2.6	40.0	0.040	2.5	87.1	86.7	0.12
变异系数	0.10	0.44	0.03	0.40	0.45	0.05	0.55	0.39	0.01
河北省背景值 ^[22]	13.6	0.094	68.3	21.8	0.036	30.8	21.5	78.4	7.90
海河平原背景值 ^[19]	10.8	0.16	66.3	22.7	0.028	28.9	21.2	73.8	8.22
GB 15618 筛选值	25	0.6	250	100	3.4	190	170	300	—
GB 15618 管控值	100	4	1 300	—	6	—	1 000	—	—
超标率(超标值)/%	23.33	96.67	0	33.33	0	0	33.33	10.00	—

1) N=30; “—”表示没有相关标准值; pH 值无量纲

参照 GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准,本次调查采集的 30 件农作物根系土壤样品中重金属含量均小于 GB 15618-2018 管控值.其中 Cr、Hg 和 Ni 含量均小于 GB 15618-2018 筛选值,属于安全无污染风险类型;部分根系土壤样品中 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量超过 GB 15618-2018 筛选值,超过筛选值的样点数分别为 7、29、10、10 和 3 个.

2.1.2 作物籽实重金属含量与超标情况

表 4 为研究区企业周边农田区 30 件小麦籽实重金属含量特征统计,研究区小麦籽实中重金属元

素 Pb 变异系数最大(0.826),说明小麦籽实中 Pb 元素的累积可能受到研究区企业生产活动的影响较大.与食品安全国家标准(GB 2762-2017)食物中重金属安全限值标准对比,研究区企业周边农田区小麦籽粒中 As、Cr、Cu、Hg 和 Ni 的含量均低于食品安全国家标准,29 件小麦籽实样品中 Pb 含量超过食品安全国家标准,超标率 96.67%,此外 5 件小麦籽实样品 Cd 含量超出 GB 2762-2017 标准,说明新区重点监管企业周边农田区小麦籽实中 Pb 等重金属元素存在超标现象,可能存在一定的人体健康风险.

表 4 研究区作物籽实重金属含量特征统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Characteristic statistics of heavy metal content in crop seeds in the study area/mg·kg⁻¹

项目	ω(As)	ω(Cd)	ω(Cr)	ω(Cu)	ω(Hg)	ω(Ni)	ω(Pb)	ω(Zn)
最小值	0.05	0.03	0.17	4.3	0.001 5	0.12	0.16	24.7
10%分位值	0.05	0.04	0.18	4.8	0.001 6	0.14	0.31	27.3
25%分位值	0.06	0.05	0.18	4.9	0.001 8	0.14	0.38	29.0
50%分位值	0.07	0.08	0.22	5.5	0.002 0	0.16	0.57	33.9
75%分位值	0.09	0.09	0.28	5.9	0.002 3	0.19	0.93	36.5
90%分位值	0.14	0.10	0.31	6.1	0.002 4	0.31	1.66	42.0
最大值	0.19	0.14	0.36	7.9	0.002 7	0.73	3.18	53.9
均值	0.08	0.08	0.23	5.5	0.002 0	0.19	0.77	34.0
标准差	0.03	0.03	0.05	0.7	0.000 3	0.17	0.63	6.4
变异系数	0.42	0.36	0.23	0.13	0.16	0.60	0.83	0.19
食品安全标准 GB 2762-2017	0.5	0.1	1	—	0.02	1	0.2	—
超标率/%	0	16.67	0	—	0	0	96.67	—

1) N=30; “—”表示没有相关标准值; 超标率表示超 GB 2762-2017 标准的比例

区内小麦籽实重金属生物富集系数 BCF 均值大小为: $\text{Zn}(16.29\%) > \text{Cu}(6.09\%) > \text{Cd}(5.73\%) > \text{Hg}(2.58\%) > \text{Pb}(0.53\%) > \text{Ni}(0.40\%) > \text{As}(0.36\%) > \text{Cr}(0.25\%)$. 其中重金属元素 Zn 的生物转移吸收率大于 10%, 其余 7 种重金属元素生物转移吸收率均小于 10%. 研究区 Pb 生物富集系数均值(0.53%) 高于保定东部地区(覆盖研究区) 80 件小麦籽实样本中重金属 Pb 生物富集系数均值(0.29%)^[23], 说明与保定东部地区相比, 研究区土壤中 Pb 的活性略高于保定东部地区.

研究区土壤重金属生物富集系数 $\text{Pb}(0.53\%) < \text{Cd}(5.73\%)$, 说明土壤重金属 Cd 生物活性高于 Pb, 与新区土壤重金属形态及生物有效性分析结果一致. 新区农田土壤 Cd 生物有效态含量最高, 其离子交换态和水溶态占比达 33.43%, Pb 生物有效态占比仅 0.63%^[13]. 新区西南部农田土壤重金属生物可利用(水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态)比例依次为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ ^[24]; 河北省农田土壤重金属生物有效态同样是 Cd 有效态含量最高, 其次为 Pb^[25~27]. 上述土壤重金属形态特征反映研究区土壤环境中重金属 Cd 生物活性更高, 与本研究区企业周边农田小麦籽实重金属 Pb 超标率更高和生态风险较强的情况有所不同, 说明研究区小麦籽实中的重金属除来源于土壤中根系的吸收和传输外, 可能还存在经大气干湿沉降或扬尘通过叶表(气孔)进入小麦体内等其它输入途径. 而大气干湿沉降中重金属来源包括周边企业排放的废气、燃煤

和汽车尾气等. 研究区中部交通道路上的机动车尾气可能会通过沉降等途径加剧周边农田小麦籽实中 Pb 含量超标.

研究区小麦籽实中 Pb 含量超标率高于 Cd 的原因还可能与其重金属元素自身性质有关. 重金属元素之间存在复杂的相互作用关系(协同、拮抗或既拮抗又协同的复杂作用), 从而影响植物体内生理指标的变化, 一定条件下, 植物体内 Zn-Cd 的联合毒性表现为拮抗作用^[28], 高浓度的 Zn 抑制 Cd 的吸收^[29], 其原因可能是 Zn 和 Cd 竞争细胞质中转运的结合点位所致^[30]. 此外, Pb/Cd 交互作用也会影响其生物有效性^[31].

2.2 重金属污染评估

2.2.1 根系土壤重金属污染情况

根系土壤重金属元素地质累积指数(I_{geo})评价结果显示, 研究区根系土壤 I_{geo} 均值从高至低依次为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Cr}$ (图 2). 其中 Cd 和 Pb 污染相对严重, 无重~极重以上污染等级样品, 但是均有 4 件样品 I_{geo} 达到重污染等级. Cd 地质累积指数 I_{geo} 以中~重污染等级为主, 占样本总数的 70.00%; Pb 地质累积指数 I_{geo} 以中污染和中~重污染等级为主, 分别占样本总数的 43.33% 和 40.00%. 根系土壤中 Cu、Hg 和 Zn 地质累积指数 I_{geo} 以轻污染和中污染等级为主, 分别占样本总数的 90.00%、93.33% 和 96.67%; As 和 Ni 地质累积指数 I_{geo} 属于轻污染, 无中、重污染以上等级样品; Cr 地质累积指数 I_{geo} 呈无污染状态.

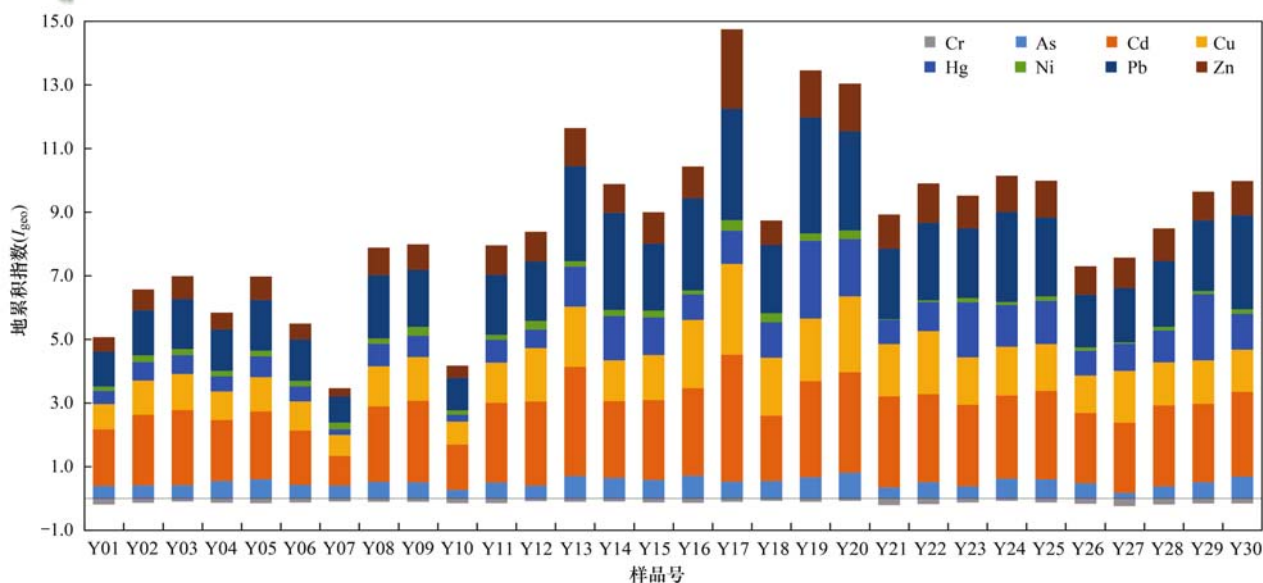


图 2 研究区各根系土壤重金属地累积指数 I_{geo}

Fig. 2 Heavy metal accumulation index (I_{geo}) in root soil in the study area

2.2.2 根系土壤重金属潜在生态风险

图 3 是研究区根系土壤样品各重金属元素潜在

生态风险评估结果. 研究区根系土壤中 Cd 潜在生态危害最大, 其次为 Hg 和 Pb 元素; Cr、Ni 和 Zn 潜

在生态危害相对较小. Cd 潜在生态风险指数范围介于 86.44 ~ 717.38 之间,均值为 266.87,反映其处于较强至极强生态风险等级状态,其中 70.00% 样品中重金属 Cd 属于很强生态风险等级,属于极强生态风险等级样本数为 16.67%. 重金属 Hg 潜在生态风险指数范围为 68.00 ~ 326.71,反映其处于中等至极强生态风险,其中 80.00% 样品中重金属 Hg 处

于较强生态风险等级. Pb 潜在生态风险以轻微等级为主,占总样本数的 66.67%,此外还存在 8 件中等等级和 2 件较强潜在生态风险等级的样品. Cu 潜在生态风险指数均值为 21.89,主要为轻微生态风险等级,仅 1 件根系土壤处于中等生态风险等级. As、Cr、Ni 和 Zn 潜在生态风险指数均小于 40,属于轻微生态风险.

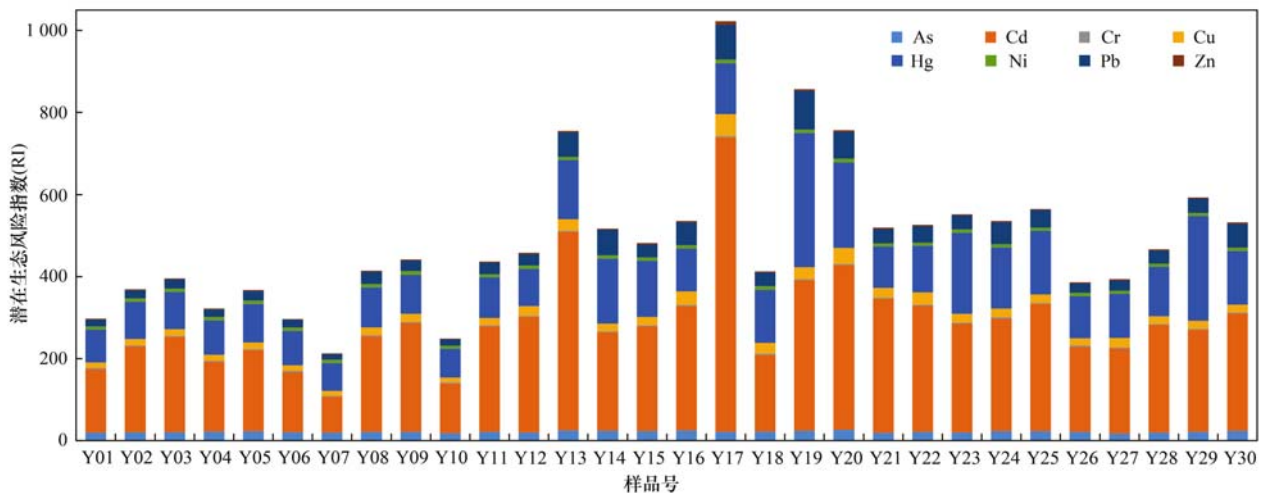


图3 研究区各根系土壤重金属潜在生态风险指数(RI)

Fig. 3 Potential ecological risk index (RI) of heavy metals in root soil in the study area

研究区根系土壤重金属 RI 范围介于 212.69 ~ 1 022.69 之间,处于中等至很强生态风险等级,其中 22 件样本处于强生态风险等级,占样本总数的比例为 73.33%. 此外,RI 属于很强和中等生态风险等级点样本各 4 件,其中很强潜在生态风险等级样点位置距离研究区内的生产企业和主干交通道路较近,中等潜在生态风险等级样点位置距离研究区内生产企业和主干交通道路则相对较远. 调查区发现的局部根系土壤处于很强潜在生态风险等级可能与区内企业生产经营活动(废旧有色金属的回收、电解等)产生的“三废”和主干交通道路上汽车行驶产生的尾气等因素有关. 这类人类活动可能导致 Cd、Pb 和 Hg 等重金属通过不同途径不断进入周边农田土壤生态系统.

2.2.3 土壤环境质量类别划分

参照《农用地土壤环境质量类别划分技术指南(试行)》(环办土壤(2017)97 号)中土壤与农作物协同开展土壤环境质量类别划分,基于研究区同一点位的土壤和小麦籽实的超标情况,其土壤环境质量类别划分结果如图 4 所示.

研究区土壤环境质量类别划分为优先保护类的样点数 1 件,占比仅为 3.33%;安全利用类的样点数 9 件,占比 30.00%;严格管控类的样点数 20 件,占比 66.67%. 从样点位置与研究区企业空间位置关系看,土壤环境质量类别为优先保护类的样点距

离企业最远,位于研究区西北角;严格管控类的样点均位于企业周边,距离相对较近.

2.3 重金属来源与影响因素

2.3.1 根系土壤中重金属源解析

由于土壤中 Sc 主要来源于地壳,人类活动对其含量不会产生太大的影响^[32],因此利用重金属与 Sc 元素之间的相关性,判断重金属元素是否受人类活动的影响具有合理性. 研究区根系土壤各重金属和 Sc 元素含量数据 KMO 和 Bartlett's 球体检验显示, KMO = 0.75 > 0.5, Bartlett's 球体检验 $P < 0.05$,反映各元素指标之间相关性强,满足主成分分析要求^[33]. 研究区采用 Kaiser 标准化的正交旋转法进行主成分提取,获取了 3 个特征值较大的成分来探讨根系土壤中重金属的来源(表 5),其累计方差贡献率 87.92%,即 3 个主成分能够解释研究区内绝大部分重金属成因来源. 第一主成分(PC1)由 Cd、Zn、Cu 和 Pb 这 4 种具有较高正载荷的重金属组成,方差贡献率为 38.34%;第二主成分(PC2)组成元素为 Cr、Ni 和 Sc,方差贡献率为 27.41%;As、Hg 和 Pb 为第三主成分(PC3)中具有较高载荷的重金属元素,方差贡献率为 22.17%.

研究区内存在 2 家中小型有色金属熔炼生产企业(A 和 D 企业)、1 家以金属废料和碎屑加工处理为主的再生资源利用公司(C 企业),经对白洋淀地区企业冶炼产生的矿渣样品调查分析^[34,35],其富含



N-As 表示小麦籽实中重金属 As,以此类推
图 4 研究区土壤环境质量类别划分
Fig. 4 Classification of soil environmental quality in the study area

表 5 研究区根系土壤重金属正交旋转因子载荷
Table 5 Orthogonal rotation factor load of heavy metals in root soil in the study area

指标	PC1	PC2	PC3
As	0.213	0.359	0.748
Cd	0.935	0.018	0.253
Cr	0.096	0.851	0.286
Cu	0.922	0.086	0.225
Hg	0.177	-0.041	0.863
Ni	0.354	0.898	-0.040
Pb	0.672	0.067	0.687
Zn	0.967	0.014	0.149
Sc	-0.358	0.890	0.026
特征值	3.45	2.47	2.00
方差贡献率/%	38.34	27.41	22.17
累积方差贡献率/%	38.34	65.75	87.92

较高的重金属 Cd、Zn、Cu 和 Pb,与第一主成分(PC1)吻合(表 6).此外,张秀芝等^[12]对白洋淀洼地环境地球化学物源判断结果证实,土壤重金属 Cd、Zn、Cu 和 Pb 高度富集区与区内的中-小型金属冶炼企业的空间位置具有对应关系.因此,推断第一主成分 PC1 组成的 4 种重金属 Cd、Zn、Cu 和 Pb 具有相同或相似的成因来源,其富集主要与周边冶炼企业生产经营活动相关.

表 6 企业冶炼矿渣中重金属元素含量特征¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 6 Content characteristics of heavy metal elements in the smelting slag of the enterprises/mg·kg⁻¹

项目	As	Cd	Cu	Pb	Zn
最小值	31.5	1.49	9 654	602	3 625
最大值	77.6	45.00	29 959	2 298	17 617
均值	52.4	16.43	17 836	1 195	9 055

1) N=4

第二主成分(PC2)中的重金属 Cr 和 Ni 与不易受人类活动影响的 Se 元素具有相似或相同的成因来源.重金属 Cr 和 Ni 为低变异元素,空间变异程度低,反映其受人为因素影响程度较小,推断第二主成分(PC2)组成的 3 种元素指标主要受自然地质背景因素影响.

第三主成分(PC3)中重金属 As 和 Pb 是企业冶炼矿渣中的主要污染物,其受区内企业生产活动的影响.重金属 Pb 既属于第一主成分因子,也属于第三主成分因子,反映研究区 Pb 除受区内企业生产活动影响外,还受到交通尾气、燃煤等人为源的影响.白洋淀沉积物中铅同位素²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 均值为 1.189,²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb 均值为 2.483,铅同位素比值结果说明其来源还叠加了人为活动(燃煤和气溶胶)的影响,大气沉降是其主要的迁移途径^[36].研究区周边 4 件大气干湿沉降样品中重金属 $\omega(\text{Pb})$ 范围为 452~1 767 mg·kg⁻¹,平均值为 860 mg·kg⁻¹,大气干湿沉降中 Pb 沉降通量均值 42.5 mg·(m²·a)⁻¹,显著高于我国大气干湿沉降中 Pb 沉降通量均值 21.81 mg·(m²·a)⁻¹^[37],也高于太行山山前平原保定大气干湿沉降 Pb 输入通量 29.25 mg·(m²·a)⁻¹^[38]和河北省南部平原区大气降尘 Pb 的年输入通量 30.48 mg·(m²·a)⁻¹^[39].新区土壤垂向剖面中重金属 Pb 等元素主要富集于表土层(0~30 cm),随着深度增加,由表土层至心土层过渡时,Pb 等重金属含量骤然降低,说明研究区土壤污染仅停留在表土层,其土壤环境质量及农作物重金属含量受周边大气干湿沉降等因素的影响.土壤中 As 和 Hg 的来源复杂多样,且容易受到自然环境的影响,除来自于地质母岩的风化成

土过程等自然源外,还受到工业排放、交通、农业灌溉和燃煤等人为源的影响^[40,41]. 金属冶炼必然产生大量含 Hg 废渣、废气和废水,对周边土壤产生污染,大气中的 Hg 通过干湿沉降污染土壤的贡献率在各种外源输入因子中排在首位^[42]. 因此推测第三主成分组成的 3 种重金属除受企业生产活动因素影响外,还可能受汽车尾气、燃煤等人为源影响.

2.3.2 土壤-作物系统重金属累积的影响因素

为了研究企业冶炼等工业活动对其周边农田土壤-作物系统重金属累积的影响范围,将农田土壤-作物重金属含量与样点离企业距离(H)进行数据分析(表 7),企业周边农田土壤-农作物系统重金

属元素的累积与其距企业距离(H)均呈负相关关系,距离企业越近,周边土壤-农作物系统重金属元素累积效应越显著. 研究区土壤-农作物系统 8 种重金属中仅 Pb 含量与其距周边企业距离(H)均为显著负相关,根系土壤和小麦籽实中 Pb 含量与样本距企业距离的相关系数分别为 -0.553 和 -0.492 . 此外,小麦籽实中 Pb 含量与根系土壤中 Pb 含量具有显著正相关,相关系数为 0.469 (图 5),说明研究区小麦籽实中重金属 Pb 含量明显受周边企业生产活动的影响,这可能是造成研究区小麦籽实样品重金属 Pb 含量超标率高达 96.67% 的原因之一.

表 7 土壤-农作物系统重金属含量与企业距离的相关性¹⁾

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
相关性	-0.540 **	-0.341	-0.779 **	-0.335	-0.468 **	-0.575 **	-0.553 **	-0.272
显著性(双侧)	0.002	0.065	0.000	0.070	0.009	0.001	0.002	0.146
	N-As	N-Cd	N-Cr	N-Cu	N-Hg	N-Ni	N-Pb	N-Zn
相关性	-0.026	-0.276	-0.167	-0.272	0.067	-0.044	-0.492 **	-0.001
显著性(双侧)	0.890	0.139	0.378	0.145	0.724	0.817	0.006	0.994

1) ** 表示在双侧 0.01 水平上显著相关, * 表示在双侧 0.05 水平上显著相关; N-As 表示小麦籽实中重金属 As 的含量,以此类推

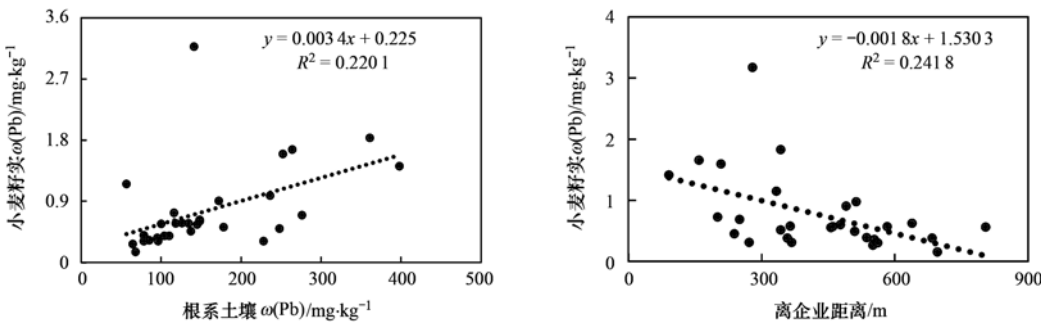


图 5 小麦籽实中 $\omega(\text{Pb})$ 与根系土壤中 $\omega(\text{Pb})$ 和企业距离的相关性

Fig. 5 Correlation of $\omega(\text{Pb})$ in wheat seed with $\omega(\text{Pb})$ in root soil and distance to enterprise

农田土壤-农作物重金属含量与样点离企业距离(H)相关性分析显示,根系土壤中 Cr 和 Ni 含量也与距企业距离远近呈显著负相关关系,似乎与根系土壤重金属元素主成分分析结果不一致. 为了进一步探究根系土壤中 Cr 和 Ni 含量的贫化富集是否受周边企业生产活动的影响,本研究采用标准化方法探讨其主要影响因素是人为源(企业生产活动)还是背景源(地质背景). 标准化方法的核心是选择非输入性的特征元素作为标准因子^[43],原则上选择

反映研究区内地质环境本底特征、受人为活动扰动程度低的元素指标^[44,45]. 土壤中 Sc 主要来源于地壳,其含量不易受人类活动影响,因此本次研究利用根系土壤中 Sc 元素作为标准因子,根系土壤重金属与 Sc 含量比值可消除根系土壤中重金属受自然地质因素影响部分. 研究区土壤中重金属元素含量标准化值(重金属/Sc)与样点离企业距离相关性分析结果显示(表 8),根系土壤 Cr 标准因子(Cr/Sc)和 Ni 标准因子(Ni/Sc)与距企业距离

表 8 土壤重金属元素含量标准化值与企业距离的相关性¹⁾

	As/Sc	Cd/Sc	Cr/Sc	Cu/Sc	Hg/Sc	Ni/Sc	Pb/Sc	Zn/Sc
相关性	-0.319	-0.274	-0.009	-0.257	-0.412 *	-0.180	-0.504 **	-0.197
显著性(双侧)	0.086	0.144	0.963	0.170	0.024	0.341	0.004	0.296

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

(H)无显著负相关关系,其相关系数分别为-0.009和-0.18,而根系土壤 Pb 标准化因子(Pb/Sc)与距企业距离(H)依然呈显著负相关关系,说明根系土壤中 Cr 和 Ni 含量的贫化富集主要是受地质背景影响,与根系土壤重金属元素主成分分析结果一致。

3 结论

(1)受研究区企业生产经营活动等人为因素的影响,部分根系土壤样品 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量超过农用地土壤污染风险筛选值标准(GB 15618-2018),其超标率分别为 23.33%、96.67%、33.33%、33.33%和 10.00%。Cd 和 Pb 地累积指数 I_{geo} 以中~重污染等级为主,污染相对严重;Cu、Hg 和 Zn 地累积指数 I_{geo} 以轻污染和中污染等级为主;As、Ni 和 Cr 地累积指数 I_{geo} 处于轻污染或无污染状态。根系土壤重金属总潜在生态风险以强生态风险等级为主,占总样本数的比例为 73.33%,其中潜在生态危害最大的重金属为 Cd,其次为 Hg 和 Pb,重金属 As、Cr、Ni 和 Zn 潜在生态危害较小。

(2)区内小麦籽实样品中重金属含量存在超标现象,其中 96.67%的小麦籽实样品中 Pb 含量超出食品安全国家标准(GB 2762-2017),16.67%的籽实样品中 Cd 含量超出 GB 2762-2017 标准,存在一定程度的人体健康风险。小麦籽实中各重金属迁移富集能力大小依次为:Zn > Cu > Cd > Hg > Pb > Ni > As > Cr;小麦籽实对重金属 Zn、Cu 和 Cd 转移吸收率达 5%以上,相对其他重金属活性更高。

(3)基于同一点位的土壤和小麦籽实重金属超标情况,研究区 3.33%的样点土壤环境质量类别划分为优先保护类,30%的样点土壤环境质量类别为安全利用类,66.67%的样点土壤环境质量类别为严格管控类。

(4)根系土壤重金属 Cd、Zn 和 Cu 的富集主要受周边企业生产活动的影响,As、Hg 和 Pb 除受企业生产活动因素影响外,还可能受汽车尾气和燃煤等人为源影响,Cr 和 Ni 主要受自然地质背景环境控制。企业周边农田土壤-农作物系统重金属元素的累积与其距企业距离(H)均呈负相关关系,距离企业越近,周边土壤-农作物系统重金属元素累积效应越显著。

参考文献:

[1] Duan Q N, Lee J, Liu Y S, *et al.* Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **97**(3):303-309.

[2] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, *et al.* Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of

yellow river irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1136-1147.

- [3] Jiang Y X, Zeng X C, Fan X T, *et al.* Levels of arsenic pollution in daily foodstuffs and soils and its associated human health risk in a town in Jiangsu Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 198-204.
- [4] Nkansah M A, Darko G, Dodd M, *et al.* Assessment of pollution levels, potential ecological risk and human health risk of heavy metals/metalloids in dust around fuel filling stations from the Kumasi Metropolis, Ghana [J]. *Cogent Environmental Science*, 2017, **3**(1), doi: 10.1080/23311843.2017.1412153.
- [5] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,等.河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J].*环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.
- Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [6] 肖冰,薛培英,韦亮,等.基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价[J].*环境科学*, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [7] 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.gov.cn/foot/site1/20140417/782bcb8840814ba158d01.pdf>, 2014-04-17.
- [8] 崔邢涛,秦振宇,栾文楼,等.河北省保定市平原区土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J].*现代地质*, 2014, **28**(3): 523-530.
- Cui X T, Qin Z Y, Luan W L, *et al.* Assessment of the heavy metal pollution and the potential ecological hazard in soil of plain area of Baoding city of Hebei province [J]. *Geoscience*, 2014, **28**(3): 523-530.
- [9] 郭志娟,周亚龙,杨峥,等.雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨[J].*环境科学*, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- Guo Z J, Zhou Y L, Yang Z, *et al.* Discussion on key issues of geochemical monitoring of soil heavy metal in Xiong'an New District [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- [10] 郭志娟,周亚龙,王乔林,等.雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J].*中国环境科学*, 2021, **41**(1): 431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 431-441.
- [11] 郭海全,郝俊杰,李天刚,等.河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J].*生态环境学报*, 2010, **19**(4): 786-791.
- Guo H Q, Hao J J, Li T G, *et al.* Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in topsoil in Hebei plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(4): 786-791.
- [12] 张秀芝,郭海全,李宏亮,等.河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断[J].*地学前缘*, 2008, **15**(5): 90-96.
- Zhang X Z, Guo H Q, Li H L, *et al.* Distinguishing origins of elements in environmental geochemistry of Baiyangdian billabong of Hebei province, North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 90-96.
- [13] 周亚龙,杨志斌,王乔林,等.雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J].*环境科学*,

- 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an New District[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [14] 马震, 夏雨波, 王小丹, 等. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建[J]. *中国地质*, 2019, **46**(S2): 123-129.
- Ma Z, Xia Y B, Wang X D, *et al.* Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 2019, **46**(S2): 123-129.
- [15] 何登发, 单帅强, 张煜颖, 等. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, **48**(9): 1207-1222.
- He D F, Shan S Q, Zhang Y Y, *et al.* 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: constraints from seismic reflection data [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(8): 1007-1022.
- [16] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [17] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求[S].
- [18] Müller G. Die Schwermetallbelastung der sedimenten des necker und seiner nebefluse [J]. *Chemiker Zeitung*, 1981, **6**: 164-175.
- [19] 曹峰, 李瑞敏, 王轶, 等. 海河平原北部地区土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. *地质通报*, 2010, **29**(8): 1215-1219.
- Gao F, Li R M, Wang Y, *et al.* Soil geochemical baseline and environmental background values in northern Haihe Plain, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, **29**(8): 1215-1219.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, *et al.* Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- [22] 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. 326-359.
- [23] 邢怡, 张素荣, 刘继红, 等. 农作物根系土对农产品安全的影响分析——以保定东部地区为例[J]. *地质调查与研究*, 2019, **42**(3): 219-224, 234.
- Xing Y, Zhang S R, Liu J H, *et al.* Effect of crop root soil on agricultural product safety: take the eastern part of Baoding Hebei province as an example [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, **42**(3): 219-224, 234.
- [24] 邢洪连, 郭华明, 王轶, 等. 河北保定市安新—清苑县土壤重金属形态分布及风险评估[J]. *水文地质工程地质*, 2016, **43**(2): 140-146.
- Xing H L, Guo H M, Wang Y, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of soil heavy metals in Anxin—Qingyuan County in Baoding of Hebei[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2016, **43**(2): 140-146.
- [25] 蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 等. 河北平原农田土壤重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的影响因素[J]. *中国地质*, 2016, **43**(4): 1420-1428.
- Cai K, Duan Y M, Luan W L, *et al.* Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain[J]. *Geology in China*, 2016, **43**(4): 1420-1428.
- [26] 蔡奎, 张倩, 吴云霞, 等. 河北平原农田土壤重金属形态分布特征及控制因素研究[J]. *生态毒理学报*, 2017, **12**(2): 155-168.
- Cai K, Zhang Q, Wu Y X, *et al.* Speciation distribution and its influencing factors of Cd, Cr, Pb, As, Hg in farmland soil from Heibei Plain, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(2): 155-168.
- [27] 崔邢涛, 王学求, 栾文楼. 河北中南部平原土壤重金属元素存在形态及生物有效性分析[J]. *中国地质*, 2015, **42**(2): 655-663.
- Cui X T, Wang X Q, Luan W L. An analysis of modes of occurrence and biological availability of the heavy metal elements in soil of the central and southern plain in Hebei[J]. *Geology in China*, 2015, **42**(2): 655-663.
- [28] 赵秀芳, 王艺璇, 张永帅, 等. 山东安丘地区土壤-小麦系统重金属等元素间的相互作用[J]. *现代地质*, 2020, **34**(5): 936-944.
- Zhao X F, Wang Y X, Zhang Y S, *et al.* Interaction of heavy metals and other elements in soil-wheat system in Anqiu area, Shandong province[J]. *Geoscience*, 2020, **34**(5): 936-944.
- [29] 朱波, 青长乐, 牟树森. 紫色土 Zn、Cd 复合污染生态效应研究[J]. *应用生态学报*, 1997, **8**(6): 639-644.
- Zhu B, Qing C L, Mu S S. Ecological effect of exotic Cd-Zn compound pollution on purple soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(6): 639-644.
- [30] 赵晓祥, 冯璐, 王宇晖. 锌、镉单一及复合胁迫下番茄幼苗生理响应及联合毒性的研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, **20**(3): 1176-1184.
- Zhao X X, Feng L, Wang Y H. Physiological responses and joint toxicity of tomato seedlings under single and combined stress of zinc and cadmium [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, **20**(3): 1176-1184.
- [31] 嵇赛. Pb/Cd 交互作用及其生物有效性对水稻生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. 47-53.
- [32] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2006, **25**(1): 65-72.
- Zhang X Z, Bao Z Y, Tang J H. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, **25**(1): 65-72.
- [33] 何晓群. 应用多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. 204-227.
- [34] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(4): 238-249.
- Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in soils of the southwestern part of the Xiongan New Area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(4): 238-249.
- [35] 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 等. 雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价[J/OL]. *中国地质*, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1753.015.html>, 2021-03-02.
- Wang C Y, Zhang S R, Liu J H, *et al.* Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an New Area[J/OL]. *Geology in China*, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1753.015.html>, 2021-03-02.
- [36] Gao L, Han L F, Peng W Q, *et al.* Identification of anthropogenic inputs of trace metals in lake sediments using geochemical baseline and Pb isotopic composition [J].

- Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **164**: 226-233.
- [37] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(11): 4085-4096.
- Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(11): 4085-4096.
- [38] 刘洪微. 太行山山前平原土壤环境中 Cd、Hg、Pb 地球化学背景及通量研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2010. 35-52.
- [39] 李随民, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 河北省南部平原区大气降尘来源及分布特征[J]. 中国地质, 2010, **37**(6): 1769-1774.
- Li S M, Luan W L, Song Z F, *et al.* The distribution and source of atmospheric dustfall in the southern plain of Hebei Province [J]. Geology in China, 2010, **37**(6): 1769-1774.
- [40] 王立辉, 邹正禹, 张翔宇, 等. 土壤中汞的来源及土壤汞污染修复技术概述[J]. 现代化工, 2015, **35**(5): 43-47.
- Wang L H, Zou Z Y, Zhang X Y, *et al.* Review of sources of mercury in soil and remediation techniques for mercury contaminated soil [J]. Modern Chemical Industry, 2015, **35**(5): 43-47.
- [41] 安礼航, 刘敏超, 张建强, 等. 土壤中砷的来源及迁移释放影响因素研究进展[J]. 土壤, 2020, **52**(2): 234-246.
- An L H, Liu M C, Zhang J Q, *et al.* Sources of arsenic in soil and affecting factors of migration and release: a review [J]. Soils, 2020, **52**(2): 234-246.
- [42] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 712-717.
- Liu F, Wang S X, Wu Q R, *et al.* Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a Large-scale zinc smelting plant [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 712-717.
- [43] 范俊楠, 贺小敏, 杜维, 等. 基于标准化方法和统计分析法的土壤重金属环境基线值分析比较[J]. 华中农业大学学报, 2021, **40**(1): 160-167.
- Fan J N, He X M, Du W, *et al.* Analyzing and comparing environmental baseline values of heavy metals in soil based on standardized method and statistical method [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, **40**(1): 160-167.
- [44] 卢新哲, 谷安庆, 张言午, 等. 基于环境地球化学基线的农用地重金属累积特征及其潜在生态危害风险研究[J]. 土壤学报, 2019, **56**(2): 408-419.
- Lu X Z, Gu A Q, Zhang Y W, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metal in agricultural soils based on the environmental geochemical baselines [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(2): 408-419.
- [45] 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 等. 伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2392-2400.
- Zhao X R, Nasier T, Cheng Y Y, *et al.* Environmental geochemical baseline of heavy metals in soils of the Ili River basin and pollution evaluation [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2392-2400.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)