

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫫, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
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	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

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

周亚龙^{1,2,3}, 杨志斌^{1*}, 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*}

(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. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000; 3. 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)

摘要: 为评估雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险, 分析测试新区小麦籽实和根系土壤中重金属含量及其赋存形态, 利用综合污染指数(IPI_N)、潜在生态风险指数(RI)、生物富集系数(BFC)和风险评价指数(RAC), 采用主成分分析和相关分析等统计方法开展重金属潜在生态风险评估及来源解析。结果表明, 新区根系土壤中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均值显著高于河北省表层土壤背景值。 IPI_N 介于 0.2 ~ 5.18 之间, 94.83% 的根系土样为安全无污染等级; 土壤中 Cd 单指标潜在生态危害最大, 其次为 Hg 元素, Cr、Ni 和 Zn 潜在生态危害较小; 总潜在生态风险以轻微和中等等级为主, 占比分别为 64.66% 和 30.17%。根系土壤中 Cd 生物活性形态组分(离子交换态和水溶态)占比达 33.43%, 生物有效性相对较高, 其他各重金属元素赋存形态均以残渣态为主(残渣态占比 > 60%)。RAC 指数由大到小为 Cd > Ni > Hg > As > Cu > Cr > Zn > Pb, 重金属 Cd 的 RAC 均值为 22.75%, 以中等风险为主, 其他各元素 RAC 均为低风险或无风险。根系土壤重金属主要潜在来源是在地质背景的基础上叠加了人为活动。农作物籽实中重金属迁移、富集能力依次为 Zn > Cu > Cd > Hg > As > Ni > Pb > Cr, 其中 As、Cd、Pb 和 Zn 的生物有效组分对小麦籽实吸收重金属起促进作用, 农作物籽实中重金属含量与土壤 pH 值呈负相关, 土壤理化指标(OM 和 CEC 等)双向影响土壤中重金属生物有效态组分比例。

关键词: 土壤-农作物系统; 重金属形态; 潜在生态风险; 污染来源; 雄安新区

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2003-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007253

Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District

ZHOU Ya-long^{1,2,3}, YANG Zhi-bin^{1*}, 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*}

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

Abstract: In order to evaluate the potential ecological risk of heavy metals in the soil-crop system in the Xiong'an New District, the heavy metal contents and forms in wheat seed and root soil samples are analyzed, and the comprehensive pollution index (IPI_N), potential ecological risk index (RI), bio-enrichment coefficient (BFC), risk assessment code (RAC), principal component analysis, and correlation analysis are used to assess the potential ecological risk of heavy metals and analyze their sources. The results indicate that the average content of Cd, Cu, Pb, and Zn in the root soil is significantly higher than the soil background value in Hebei province. The IPI_N ranges from 0.2 to 5.18, 94.83% of the soil samples are in the safe and pollution-free grade, and the potential ecological risks of heavy metal are slight and moderate, accounting for 64.66% and 30.17%, respectively. Cd has the greatest potential ecological harm, followed by Hg, Cr, Ni, and Zn. All the heavy metal elements besides Cd in the root soil are dominated by the residual form, which accounts for 60%, and the bioactive form (ion-exchange and water-soluble state) of Cd accounts for 33.43%, indicating relatively high bio-availability. The risk assessment code can be ranked as Cd > Ni > Hg > As > Cu > Cr > Zn > Pb, and the risk of Cd is moderate, while other elements are of low or no risk. The leading potential source of heavy metals is human activity combined with the geological background. The migration and enrichment capability of the wheat seeds is in order from strong to weak of Zn > Cu > Cd > Hg > As > Ni > Pb > Cr, and the biological effective components of As, Cd, Pb, and Zn plays a substantial role in promoting the absorption of heavy metals. The content of heavy metals in the wheat seeds has a negative correlation with the soil pH, and the physical and chemical indices, such as OM and CEC, has bi-directional influence on the biological effective state of the heavy metals.

Key words: soil-crop system; heavy metal forms; potential ecological risk; pollution source; Xiong'an New District

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-29

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: yzhibin@mail.cgs.gov.cn; gzhijuan@mail.cgs.gov.cn

随着工业化和城镇化的推进,土壤环境污染对区域生态系统和人类健康等问题的影响愈发严峻^[1~3]. 重金属是重要的潜在风险污染物^[4],土壤既能为植物提供必需元素(如 Fe、Cu 和 Zn)和有益元素(如 Se),也能提供有毒有害元素(如 As、Cd 和 Pb). 植物从土壤中吸收富集的有毒有害重金属元素,易造成严重的生态环境问题^[5,6]. 持久性重金属污染物不易被生物降解导致其在农田土壤中长期留存累积,被植物吸收进入农作物籽实内,进而流入食物链,可能直接危及食品安全和人类健康^[7,8].

雄安新区安新县是华北地区最大废旧有色金属集散地,已形成了集废旧有色金属回收、电解和线缆加工制造于一体的产业链;容城县存在大量的机械制造、汽车零部件和毛绒玩具制造等产业^[9]. 雄安新区人类生产活动(废旧有色金属的回收、电解和机械制造等)形成的重金属污染源可能通过扬尘与污水灌溉等途径进入农田土壤中,导致土壤重金属累积,进而对农作物产生潜在风险^[10]. 前人的研究证实,河北省保定地区存在一定程度的土壤重金属污染问题^[11~14],但鲜见针对雄安新区土壤生态风险综合评估及土壤-小麦之间响应关系的研究. 基于此,利用雄安新区农田土壤和小麦籽实地球化学调查数据,系统分析新区农田土壤和小麦重金属污染特征,开展新区农田土壤和小麦籽实重金属潜在风险评估及其污染源成因分析具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雄安新区地理坐标介于 $38^{\circ}41' \sim 39^{\circ}10'N$, $115^{\circ}37' \sim 116^{\circ}19'E$ 之间,规划范围覆盖容城、安新和雄县 3 个县(含白洋淀水域),任丘市七间房乡、郑州镇、苟各庄镇和高阳县龙化乡. 新区属于暖温带季风型半湿润半干旱气候区^[15]. 区内地势平坦,地面高程 5~20 m,坡降 0.2‰~0.7‰^[16]. 地貌成因类型主要为洼地和低海拔平原^[17],沉积环境以冲积、冲洪积和冲湖积为主. 区内第四系地层主要由砂、黏土以及砾石组成,层厚 348~437 m^[18]. 新区土地利用类型主要以耕地为主,占新区面积的 53.33%. 土壤类型主要为潮土,容城北部零散分布少量褐土,白洋淀周边地区发育少量沼泽土. 农作物种植模式主要为小麦-玉米轮作.

1.2 样品采集与分析测试

研究区采集根系土壤和小麦籽实样品各 116 件(图 1),样品采集时间为小麦收获盛期. 土壤和小麦籽实样品采集、加工严格按文献^[19]相关要求进行. 以 0.1~0.2 hm² 为采样单元,视采样单元地块

形状,采用棋盘法、梅花点法或对角线法多点取样,每个子样点选取 10~20 株采集麦穗,采集 3~4 个子样点等量混匀组成 1 件小麦籽实样品. 小麦籽粒样品风干,脱粒后用四分法缩分取 250 g 送实验室测试. 根系土壤样品采集位置与小麦籽实样点对应,以小麦根系土壤为对象,采集地表 0~20 cm 的根系土,采用四分法弃除多余土壤,保留 1 kg 样品. 土壤样品风干后过 10 目尼龙筛后送实验室测试.

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,测试工作由河南省岩石矿物测试中心完成. 采用 BAF-2000 原子荧光光度计分析测试 As 和 Hg; 采用 ZSXPrimus II 射线荧光光谱仪分析测试 Cr,采用 XSERIES2 电感耦合等离子体质谱仪测试 Cd、Ni、Cu、Pb 和 Zn. 7 种重金属形态分析方法依据 GB/T 25282-2010 标准,称取定量样品,依次提取水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态、强有机结合态和残渣态. 7 种形态提取剂依次添加顺序为蒸馏水、 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化镁溶液、 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的醋酸钠溶液、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的焦磷酸钠溶液、 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸羟胺-盐酸混合溶液、 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸与过氧化氢溶液和盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸混合酸溶液.



图 1 雄安新区小麦籽实及根系土壤样品采样分布示意

Fig. 1 Distribution map of wheat seed and root soil samples in the Xiongan New District

土壤和农作物中重金属含量分析测试过程中均插入了国家一级标准物质和重复样进行质量控制. 各重金属元素形态分析回收率均介于 80%~105% 之间,其中 As 回收率 80%~102.02%,均值为 87.20%; Cr 回收率 80%~99.97%,均值为 91.18%; Cd 回收率 80.2%~100.25%,均值为 95.48%; Cu 回收率 80.18%~99.95%,均值为 95.06%; Hg 回收率 80%~97.94%,均值为 89.57%.

Ni 回收率 86%~100.00%, 均值为 98.40%; Pb 回收率 80%~99.98%, 均值为 92.05%; Zn 回收率 80%~99.98%, 均值为 89.88%。样品分析测试质量通过中国地质调查局地球化学样品分析质量监控中心的验收, 各指标检出限和分析质量均满足文献[20]要求。

1.3 评价方法

本研究采用重金属综合污染指数和潜在生态风险指数法评价农田土壤-农作物系统重金属污染潜在生态风险等级; 结合土壤重金属赋存形态, 采用重金属生物富集系数和风险评价指数法定量评估重金属对生态环境的危害; 采用主成分分析和相关分析等统计方法开展重金属污染来源解析。

1.3.1 综合污染指数(IPI_N)

重金属单元素的污染指数 PI_i 和综合污染指数 IPI_N 可定量评估土壤中重金属污染等级^[21,22], 其计算公式如下:

$$PI_i = C_i/T_i \quad (1)$$

$$IPI_N = [(IPI_{avg}^2 + IPI_{max}^2)/2]^{1/2} \quad (2)$$

式中, C_i 为土壤中元素 i 的实测含量; T_i 是土壤元素 i 的管理目标值, 本次评价使用土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 GB 15618-2018 中的筛选值; IPI_{avg} 是所有参与统计重金属元素 PI_i 的平均值, IPI_{max} 为最大值。依据 IPI_N 大小划分为 5 个等级, 定量评估土壤污染程度, 其分级标准参见文献[21]。

1.3.2 潜在生态风险指数(RI)

潜在生态指数法(potential ecological risk index, RI)综合考虑重金属生态环境和毒理学效应, 评价土壤重金属污染程度和生态风险^[23], 其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^i) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_i}{C_b^i} \right) \quad (3)$$

式中, C_i^i 为某重金属的污染指数; C_i 为某重金属的实测值; C_b^i 为某重金属参比值, 文中采用河北省平原区土壤重金属背景值作为参比值; E_r^i 为重金属单指标潜在生态风险指数; T_r^i 为某重金属的毒性响应参数, 各参数分别为: Zn=1、Cr=2、Cu=Ni=Pb=5、As=10、Cd=30 和 Hg=40。依据 E_r^i 和 RI 大小划分潜在生态危害等级, 其分级标准参见文献[24]。

1.3.3 生物富集系数(BCF)

生物富集系数(biological enrichment factor, BCF)表示生物富集、累积和吸收能力与程度的数量关系, 是生物体内某种元素含量与其所生存环境中

该元素含量的比值, 可定量评估农作物中重金属累积的风险和危害程度^[25], 其计算公式: $BCF = C_{i\text{plant}}/C_{i\text{soil}}$, 式中, $C_{i\text{plant}}$ 为农作物食用部分重金属 i 的含量, $C_{i\text{soil}}$ 为土壤中重金属 i 的含量。

1.3.4 风险评价指数(RAC)

风险评价指数(risk assessment code, RAC)是利用重金属元素活性形态含量占重金属总含量的比例定量评价重金属生物有效性及其生态风险。风险评价指数 RAC 越高, 重金属生态危害风险越大^[26, 27]。自然背景条件下, 重金属水溶态和离子交换态的活性最大, 转化和迁移能力强, 易被生物吸收和利用, 可能产生潜在生态安全风险^[27]。依据 RAC 大小划分为 5 个等级, 表征土壤生态风险程度, 对应关系为: $RAC < 1\%$, 无风险; $1\% \leq RAC < 10\%$, 低风险; $10\% \leq RAC < 30\%$, 中等风险; $30\% \leq RAC < 50\%$, 高风险; $RAC \geq 50\%$, 极高风险。

2 结果与分析

2.1 重金属含量特征

2.1.1 根系土壤重金属含量特征

采用最小值、10%、25%、50%、75% 和 90% 分位值, 最大值, 平均值, 标准差和变异系数等特征值对区内 116 件根系土壤样品各重金属含量特征进行统计(表 1)。研究区根系土壤重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均值显著高于河北省土壤背景值^[28]。研究区根系土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 变异系数大于 0.35, 其中 Cd、Cu 和 Pb 变异系数均大于 1, 属于高度变异^[29]; As 元素变异系数介于 0.15~0.35 之间, 属于中度变异; Cr 和 Ni 变异系数低于 0.15, 属于轻度变异。

2.1.2 小麦籽实重金属含量特征

表 2 为研究区农作物小麦籽实重金属含量特征统计表, 小麦籽实中重金属元素 Pb、Cd 和 As 变异系数大于 0.6, 表明小麦籽实中 Pb、Cd 和 As 含量可能受到人类活动的影响较大。与食物中重金属安全限值标准(GB 2762-2017)相比, 小麦籽粒中 As、Cr、Cu、Hg、Ni 和 Pb 的含量均低于国家食品安全限量标准, 仅 3 件小麦籽实样品 Cd 含量超出 GB 2762-2017 标准, 1 件小麦籽实样品 Zn 含量超出 GB 13106-91 标准, 意味着研究区小麦籽实总体安全, 仅极少样品存在一定的人体健康风险。

2.1.3 小麦籽实对土壤重金富集特征

研究区小麦籽实重金属富集系数 BCF 均值大小排序为 $Zn > Cu > Cd > Hg > As > Ni > Pb > Cr$ (表 3)。小麦籽粒中富集系数 BCF 最大是 Zn (0.348 5), 其次为 Cu (0.174 0), 第三为 Cd

(0.149 9),说明研究区土壤中 Zn、Cu 和 Cd 易于迁移进入小麦籽粒,作物籽实对重金属元素转移吸收率达到了 10% 以上,其余重金属元素转移吸收率均小于5%,显示出 Zn、Cu 和 Cd 比其他重金属活性更高,小麦植株转移吸收重金属 Zn、Cu 和 Cd 的能力更强,其重金属生态风险更高.

表 1 研究区农作物根系土壤重金属含量特征统计¹⁾

Table 1 Characteristic statistics of heavy metal contents in the crop root soil in the study area									
特征值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH 值
最小值	5.71	0.094	55.40	15.71	0.019	21.17	17.81	55.89	7.57
10%分位值	7.33	0.140	61.17	19.78	0.025	23.49	19.92	64.61	8.18
25%分位值	8.99	0.162	64.73	22.35	0.030	26.12	21.41	70.19	8.29
50%分位值	10.38	0.187	70.90	25.67	0.038	29.86	23.45	77.67	8.43
75%分位值	12.38	0.241	78.30	33.23	0.048	34.02	27.16	84.26	8.57
90%分位值	16.80	0.373	86.39	45.26	0.067	40.24	32.40	103.78	8.67
最大值	24.28	3.671	102.40	691.80	0.149	47.04	464.80	737.00	8.85
均值	11.27	0.290	72.21	35.32	0.043	30.74	31.00	88.72	8.42
标准差	3.88	0.473	9.80	62.81	0.021	5.98	43.19	66.98	0.21
变异系数	0.32	1.63	0.14	1.78	0.49	0.19	1.39	0.76	0.02
河北省背景值 ^[28]	13.6	0.094	68.3	21.8	0.036	30.8	21.5	78.4	7.9
GB 15618 筛选值	25	0.6	250	100	3.4	190	170	300	/
GB 15618 管控值	100	4	1300	/	6	/	1 000	/	/

1) pH 值无量纲,其他元素单位为mg·kg⁻¹

表 2 研究区农作物小麦籽实重金属含量特征统计/mg·kg⁻¹

Table 2 Characteristic statistics of the heavy metal content in the grain in the study area/mg·kg ⁻¹								
特征值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
最小值	0.005	0.008	0.037	2.85	0.000 7	0.030	0.001	16.60
10%分位值	0.012	0.015	0.046	3.63	0.001 1	0.045	0.010	20.10
25%分位值	0.018	0.021	0.048	4.16	0.001 2	0.052	0.013	23.10
50%分位值	0.030	0.028	0.052	4.67	0.001 3	0.064	0.017	26.34
75%分位值	0.044	0.038	0.057	5.20	0.001 4	0.084	0.024	32.58
90%分位值	0.060	0.057	0.062	5.66	0.001 5	0.113	0.035	35.28
最大值	0.102	0.143	0.072	6.75	0.001 8	0.185	0.122	54.30
均值	0.033	0.034	0.053	4.67	0.001 3	0.073	0.022	27.95
标准差	0.020	0.022	0.007	0.78	0.000 2	0.031	0.018	6.66
变异系数	0.60	0.66	0.13	0.17	0.14	0.42	0.81	0.24
食品安全标准 ¹⁾	0.5	0.1	1	10 *	0.02	1.0	0.2	50 **

1) 食品安全标准中 * 表示来自 GB 15199-94, ** 表示来自 GB 13106-91,其余来自 GB 2762-2017

表 3 研究区小麦籽实重金属生物富集系数(BCF)特征统计

Table 3 Characteristic statistics of the bio-enrichment coefficient of the heavy metals in the wheat in the study area								
特征值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
最小值	0.000 4	0.028 5	0.000 5	0.009 0	0.009 4	0.000 9	0.000 1	0.067 9
最大值	0.009 2	0.430 9	0.001 1	0.336 7	0.071 1	0.005 8	0.002 4	0.627 3
均值	0.003 1	0.149 9	0.000 7	0.174 0	0.034 9	0.002 4	0.000 8	0.348 5
中位数	0.002 7	0.135 7	0.000 7	0.179 4	0.033 5	0.002 2	0.000 7	0.336 6
标准差	0.001 8	0.072 7	0.000 1	0.057 4	0.013 0	0.000 9	0.000 4	0.098 3

2.2 根系土壤重金属赋存形态特征

土壤中重金属的赋存形态特征是研究重金属来源和生物有效性的重要信息^[30],其迁移能力与其赋存形态息息相关,重金属的赋存形态影响其在自然界的循环及生态毒性^[31].研究区小麦籽实根系土壤中重金属 As、Cr、Ni、Hg 和 Zn 元素赋存形态均以残渣态为主(图 2),残渣态占全量的比例分别为 61.47%、84.12%、71.18%、75.86% 和 60.58%,其

次为铁锰结合态和腐殖酸结合态,水溶态和离子交换态合计占比分别为 4.02%、2.91%、3.39%、1.37% 和 5.03%; Cu 赋存形态含量特征为残渣态 > 铁锰结合态 > 腐殖酸结合态 > 强有机结合态,各形态占比分别为 33.05%、32.25%、19.38% 和 9.08%,水溶态和离子交换态合计占比 2.06%; Pb 赋存形态以残渣态、铁锰结合态、强有机结合态为主,分别占 34.54%、32.60% 和 15.09%,水溶态和

离子交换态合计仅占比 0.63%；Cd 赋存形态含量大小为离子交换态 > 碳酸盐结合态 > 铁锰结合态 > 腐殖酸结合态 > 残渣态 > 强有机结合态 > 水溶态，比例分别为 33.09%、23.30%、23.05%、10.63%、5.84% 和 0.34%。研究区根系土壤为碱性，碳酸盐态不易转化为可交换态被植物吸收，因此研究区重金属元素的生物有效性主要考虑植物易吸收的离子交换态和水溶态。Cd 生物活性形态组分（离子交换态和水溶态）达到了 33.43%，显著高于其他重金属，也高于河北省中南部平原区土壤 Cd 生物有效性均值 19.01%^[32]，表现出高生物活性特征。研究区根系土壤重金属的生物活性系数顺序为：Cd > Zn > As > Ni > Cr > Cu > Hg > Pb，总体而言，除 Cd 元素外，研究区土壤重金属多以残渣态形式存在，重金属元素生物活性组分占比相对较低。

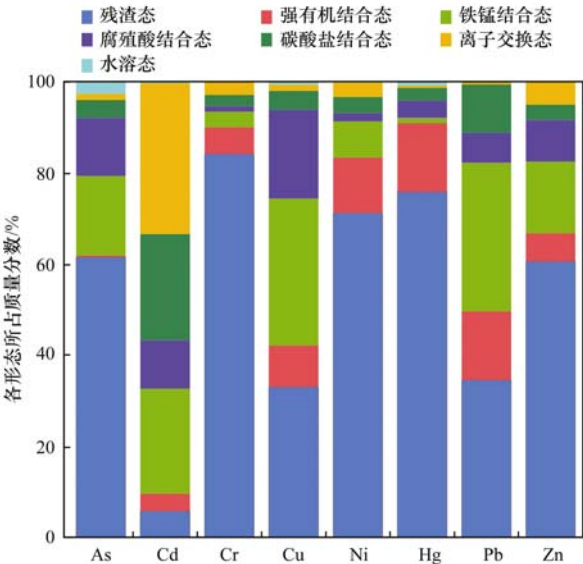


图2 研究区根系土壤重金属元素赋存形态分布特征
Fig. 2 Distribution characteristics of the combined forms of the heavy metal elements in the root soil in the study area

2.3 根系土壤污染程度分析

2.3.1 综合污染评价

依据 GB 15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准，研究区 116 件农作物根系土壤样品中 As、Cr、Hg 和 Ni 含量均小于 GB 15618-2018 筛选值，为安全无污染风险等级；部分土壤样品中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量超过 GB 15618-2018 筛选值，但均小于 GB 15618-2018 管控制，其含量超 GB 15618-2018 筛选值样点分别为 6、1、1 和 1 个，主要位于雄安新区西南部地区。

研究区 116 件根系土壤重金属综合污染指数 IPI_N 介于 0.2 ~ 5.18 之间，均值为 0.46，反映区内根系土壤重金属综合污染指数相对较低，环境相对安全。综合污染指数 IPI_N 评价结果显示，94.83% 的根系土壤样品（110 件） IPI_N 处于安全无污染等级；0.86% 的样品（1 件） IPI_N 处于预警状态；4.31% 的样品处于污染状态，其中 3 件样品 IPI_N 处于轻度污染状态，2 件样品 IPI_N 达到重度污染状态。上述 5 件处于污染状态的样品中有 4 件样品 Cd 占据土壤重金属元素综合污染指数的 IPI_{max} ，剩余 1 件污染状态的样品 Cu 为土壤重金属元素综合污染指数的 IPI_{max} ，表明主要污染元素为 Cd 和 Cu。

2.3.2 潜在生态风险评价

研究区 116 件根系土壤样品中 As、Cr、Ni 和 Zn 潜在生态风险指数均小于 40，为轻微生态风险等级（表 4）。Cu 和 Pb 潜在生态风险指数均值分别为 8.10 和 7.21，以轻微生态风险等级为主，仅 1 件根系土壤为强生态风险等级。Cd 潜在生态风险指数范围为 30.00 ~ 1 171.6，存在轻微至很强生态风险等级，以中等风险等级为主，占总样本数的 75.86%，其次强生态风险样本占总样本数的 13.79%；此外存在 4 件很强和 3 件极强潜在生态风险等级的样品。

表 4 雄安新区土壤重金属元素潜在生态风险指数分级统计

Table 4 Class statistics of the potential ecological risk index of the soil heavy elements of the Xiong'an New District

危害指数	指数分布范围	指数均值	各级样本数					
			$E_i < 40$	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥ 320	
			RI < 150	150 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1 200	$\geq 1 200$	
			轻微	中	强	很强	极强	
E_i	As	4.20 ~ 17.85	8.29	116	0	0	0	0
	Cd	30.00 ~ 1 171.60	92.40	5	88	16	4	3
	Cr	1.62 ~ 3.00	2.11	116	0	0	0	0
	Cu	3.60 ~ 158.67	8.10	115	0	1	0	0
	Hg	20.57 ~ 165.56	47.85	54	55	6	1	0
	Ni	3.44 ~ 7.64	4.99	116	0	0	0	0
	Pb	4.14 ~ 108.09	7.21	115	0	1	0	0
	Zn	0.71 ~ 9.40	1.13	116	0	0	0	0
RI	76.42 ~ 1 542.29	172.08	75	35	4	0	2	

Hg 潜在生态风险指数范围为 20.57 ~ 165.56, 存在轻微至很强的生态风险, 以轻微和中等风险为主, 分别占总样本数的 46.55% 和 47.41%。从研究区各根系

土壤重金属潜在生态风险指数 RI 的叠加柱状图可见 (图 3), 各重金属元素中 Cd 潜在生态危害最大, 其次为 Hg 元素; Cr、Ni 和 Zn 潜在生态危害较小。

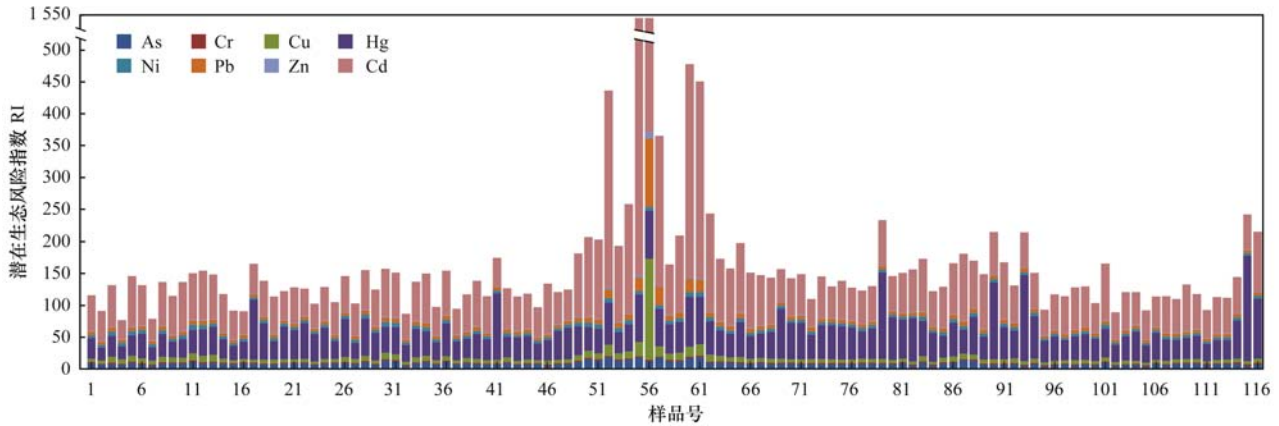


图 3 研究区各根系土壤采样点重金属潜在生态风险指数 RI 的叠加柱状

Fig. 3 Superposition histogram of the potential ecological risk index (RI) of the heavy metals in the root soil samples in the study area

研究区根系土壤重金属总潜在生态指数 RI 分布范围为 76.42 ~ 1542.29, 存在轻微至极强的生态风险, 以轻微和中等为主, 所占比例分别为 64.66% 和 30.17%。此外还存在 4 件强潜在生态风险等级的样点和 2 件极强潜在生态风险等级的样点, 其主要分布于新区安新县老河头镇地区。调查发现安新县老河头镇局部强潜在生态风险区存在废旧有色金属的回收、电解的生产活动, 可能导致周边土壤 Cd 和 Hg 等重金属生态风险较高。

3 讨论

3.1 土壤 RAC 风险评价

研究区根系土壤为碱性, 碳酸盐态含量不易转化为可交换态被植物吸收, 因此根系土壤 RAC 风险评价时, 采用水溶态和离子交换态之和占各形态和的百分比作为风险值, 研究区土壤重金属 RAC 风险等级如图 4 所示。

研究区根系土壤重金属 RAC 风险系数由强到弱分别为 $Cd > Ni > Hg > As > Cu > Cr > Zn > Pb$, 重金属 As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 元素 RAC 风险等级均为低风险或无风险, 仅 Cd 元素 RAC 风险等级以中等风险为主, 其中 11 件样品呈 RAC 高风险特征, RAC 高风险样品主要分布于研究区安新县西南部的老河头镇、芦庄乡和容城县周边 (图 5)。

3.2 重金属来源解析

3.2.1 根系土壤中重金属源解析

研究区根系土壤重金属含量数据经 KMO 检验和 Bartlett's 球体检验, KMO 检验系数 $0.662 > 0.5$, Bartlett's 球体检验 P 值 < 0.05 , 表明各重金属元素相关性强, 适合进行主成分分析。根系土壤 8 种重金

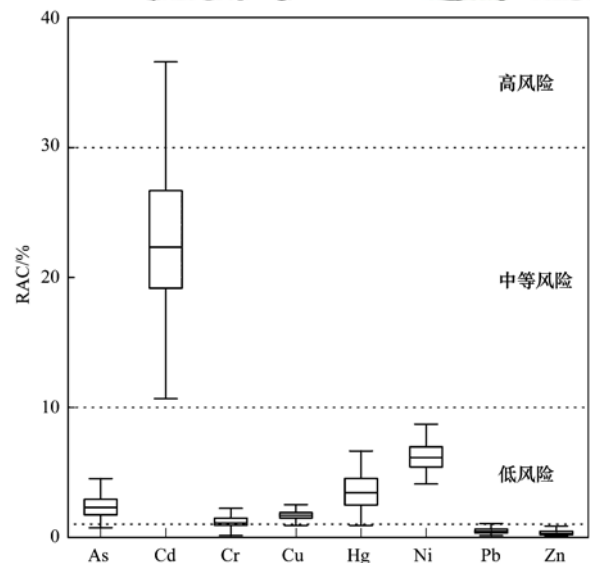


图 4 研究区根系土壤 RAC 风险评价等级

Fig. 4 Risk assessment code (RAC) grade map of the root soil in the study area

属污染物主成分分析显示, 2 个主成分 (特征值 $4.321 + 1.948 = 6.269$ 个变量) 反映 78.37% 的全部信 [图 6(a)], 即 2 个主成分可解释区内大部分重金属成因信息。

第一主成分 (F1) 的方差贡献率为 54.02%, 特点表现为因子变量 Zn、Pb、Cu 和 Cd 具有较高的正载荷, 分别为 0.947、0.906、0.881 和 0.868 [图 6(b)]. 研究区内存在大量的有色金属熔炼厂, 经过废渣样品调查, Cd、As、Hg 和 Zn 均为废渣中含量较高的重金属元素^[33]; 同时, 白洋淀洼地环境地球化学物源判断显示^[11], 在 Cu、Pb、Zn 和 Cd 高度富集区域内建有数家小-中型的电镀厂 (以镀锌和铜为主) 及炼铜 (锌) 厂, Cu、Pb、Zn 和 Cd 的强异常区与

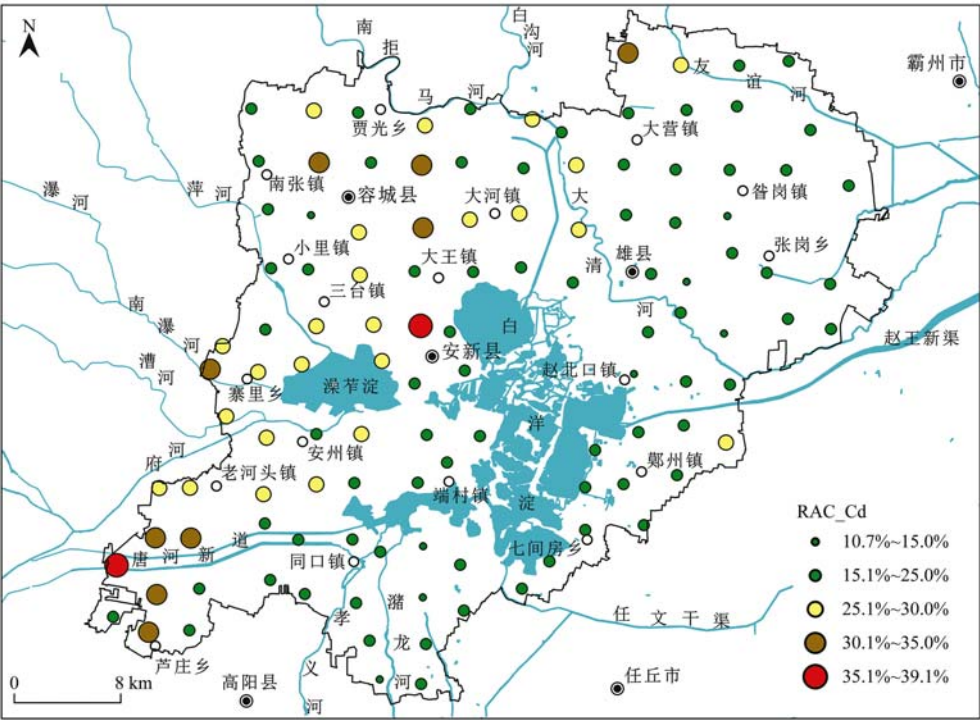
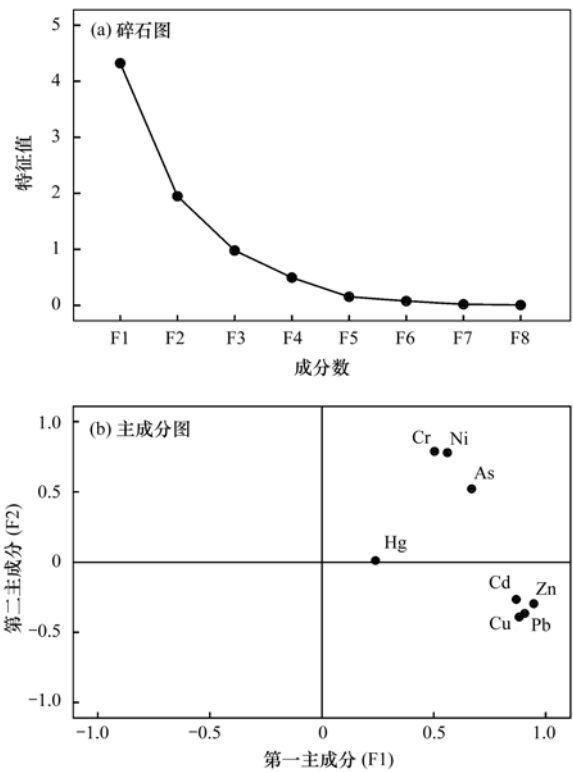


图 5 研究区根系土壤重金属 Cd 元素 RAC 风险评价等级

Fig. 5 Risk assessment code (RAC) grade map of Cd in the root soil in the study area



(a) 碎石图; (b) 主成分图

图 6 研究区根系土壤主成分分析

Fig. 6 Gravel and variation of the principal component analysis of the root soil in the study area

这些重金属污染排放企业空间位置具有对应关系。据河北省农田土壤 Cd 输入通量的研究^[34],其输入源中大气沉降、灌溉水和其他来源所占比例分别为

80.51%、8.70% 和 10.79%。另据 Gao 等^[35]对白洋淀内 39 件沉积物中重金属地球化学基线和实际浓度的计算,Cd 是受人为输入影响最大的元素,人为贡献比例高达 78.07%; 铅同位素²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 均值为 1.189,²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb 均值为 2.483,铅同位素比值结果证实白洋淀沉积物中铅等重金属主要潜在来源是在地质背景的基础上叠加了人为活动(燃煤和气溶胶),大气沉降是主要的迁移途径。因此推测第一主成分 4 种重金属具有相同或相似的来源,主要受人类生产活动的影响。

第二主成分(F2)的方差贡献率为 24.35%,载荷较高的因子变量为 Cr、Ni 和 As,分别为 0.789、0.780 和 0.522。第二主成分重金属变异系数均较低,受人为因素影响程度较小,推断这 3 种重金属具有相同或相似的来源。主要源于地壳的 Sc 元素含量不易受人类活动的影响^[36],采用土壤中重金属含量与 Sc 含量之间的相关性来判断元素是否受人类活动的影响。研究区根系土壤中重金属 As、Cr、Ni 与 Sc 含量具有显著正相关关系(图 7),说明第二主成分 3 种重金属与 Sc 具有相似来源,主要受自然地质背景因素影响。

3.2.2 农作物籽实中重金属源解析

农作物对土壤重金属的吸收和富集受土壤重金属含量及其赋存形态、土壤理化性质[pH 值、有机质(OM)、阳离子交换量(CEC)和氧化还原电位(Eh)]等因素的影响^[6,37~40]。研究区根系土壤重金

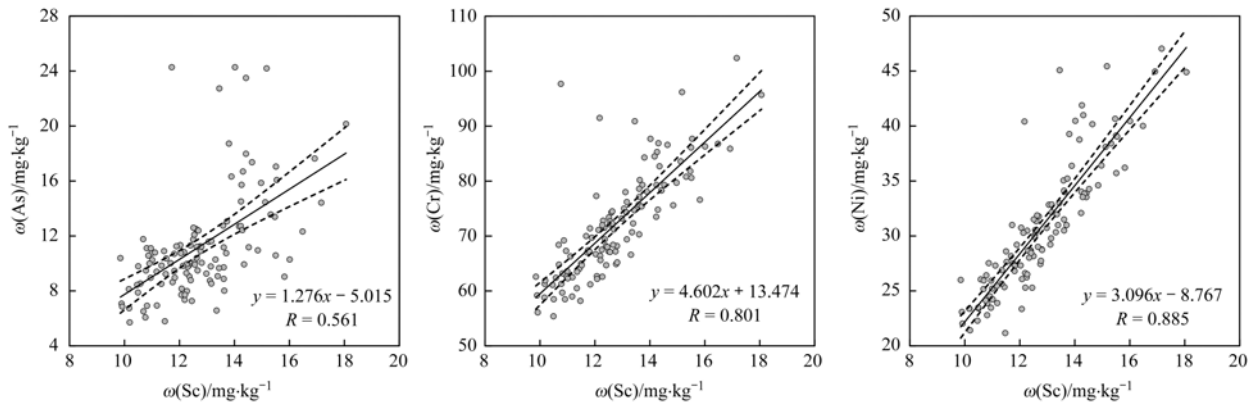


图7 研究区根系土壤重金属 As、Cr、Ni 和 Sc 元素含量关系

Fig. 7 Scatter plots of heavy metals As, Cr, Ni, and Sc of the root soil in the study area

属生物有效态组分(水溶态和离子交换态)与小麦籽实中重金属含量相关性分析显示(图8),小麦籽实中重金属含量与土壤中重金属 As、Cd、Pb 和 Zn 的生物有效组分含量呈显著正相关性,相关系数 R 分别为 0.60、0.65、0.50 和 0.24,说明重金属的生物有效组分会对小麦籽实吸收重金属 As、Cd、Pb

和 Zn 起到明显的促进作用,其他 4 种重金属 Cr、Cu、Hg 和 Ni 的生物有效组分含量与籽实中重金属元素含量相关性低,无显著相关性,考虑可能其他因素对小麦籽实中这 4 种重金属的影响较大。

农作物籽实中重金属的迁移富集能力与土壤理化性质密切相关. 研究区根系土壤 pH 值、CEC 和

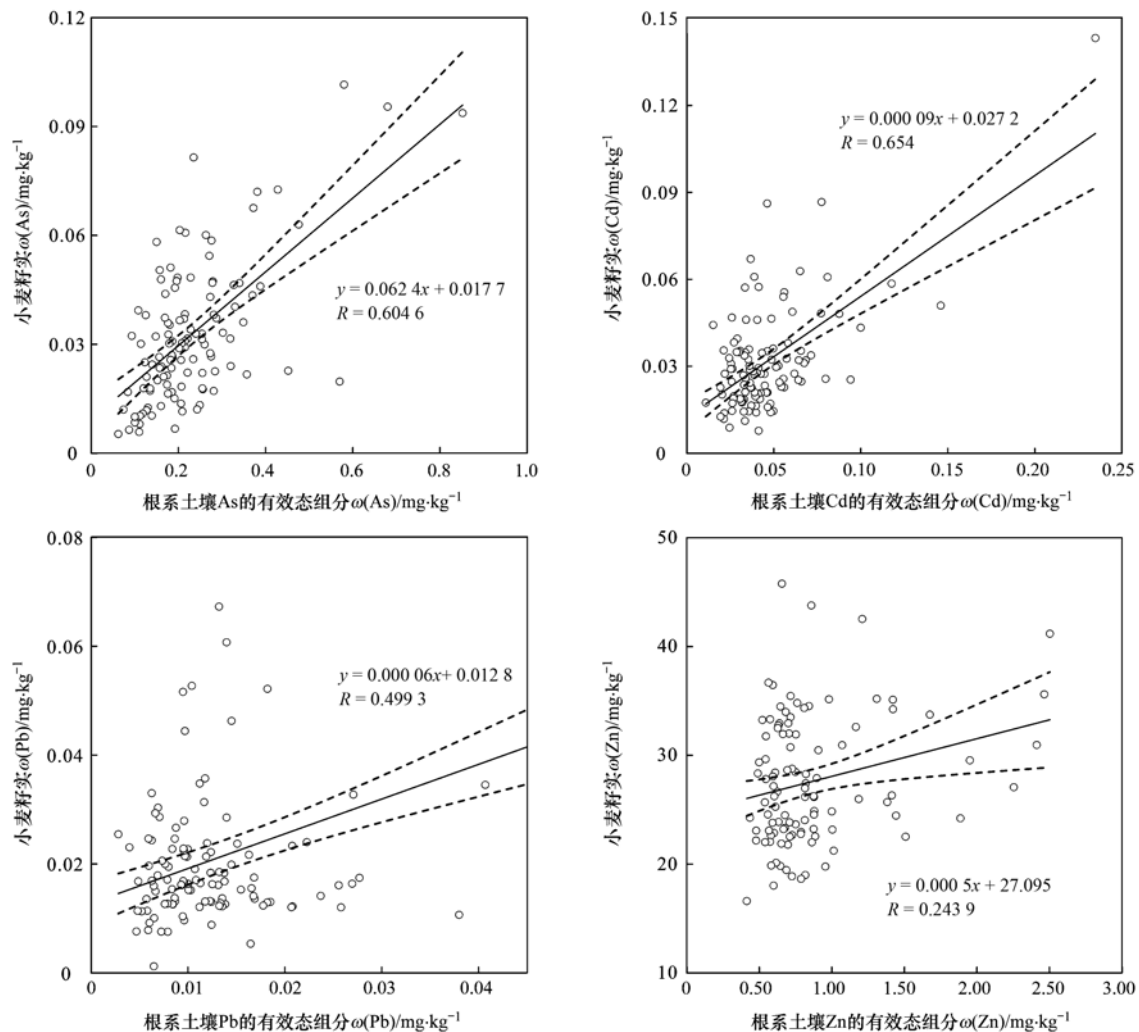


图8 研究区根系土壤中有有效态组分与小麦籽实中重金属 As、Cd、Pb 和 Zn 元素含量关系

Fig. 8 Relationship between the available components in the root soil and the content of heavy metals As, Cd, Pb, and Zn in the wheat seeds

OM 与重金属生物有效组分的相关性统计显示(表 5),除 Hg 元素外,小麦籽实中其余 7 种重金属含量与根系土壤 pH 值均呈负相关性,其中籽实中 Cd 含量与根系土壤 pH 值呈显著的负相关性($P < 0.01$),随着 pH 值的增大,籽实中重金属 Cd 含量显著降低.

表 5 研究区土壤 OM、CEC 和 pH 值与小麦籽实中重金属含量的相关性¹⁾

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
OM	0.186 *	0.116	-0.244 **	-0.101	-0.055	0.092	0.114	-0.129
CEC	0.026	0.274 **	-0.057	0.105	-0.079	0.262 **	0.234 *	0.004
pH	-0.216	-0.374 **	-0.132	-0.204 *	0.065	-0.164	-0.148	-0.139

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

普遍认为土壤酸化(pH 降低)会导致土壤中潜在农作物可利用态的重金属解析释放,重金属生物活性增加^[37~40]. 本研究结果显示小麦籽实中 As 与土壤 pH 值呈负相关关系,与前人的研究结果^[41~44]存在差异,前人的研究认为,As 与其他重金属阳离子相反,土壤中 As 的释放和 pH 值呈正相关,pH 值越高,土壤对 As 的吸附性越差,As 的生物有效性越高. 研究区土壤 pH 值均大于 7,在碱性条件下,土壤中 As 多以 HAsO_4^- 存在. 区内根系土壤 7 种形态 As 含量与 pH 值相关性统计显示(表 6),水溶态 As 与土壤 pH 值呈正相关,由于土壤 pH 值升高,土壤胶体上正电荷减少,对 As 的吸附能力降低,因此水溶态 As 的含量增加. 铁锰氧化物结合态 As 与土壤 pH 值呈显著正相关,由于土壤 pH 值升高,土壤中铁锰氧化物(土壤矿质胶体中吸附阴离子的重要部分)增加,导致其吸附能力增强^[45,46],因此铁锰氧化物结合态 As 的含量增高. 在土壤理化条件变化与微生物作用下导致 As 结合矿物相态或粒径改变时,水溶态、交换态和铁锰铝氧化物结合态 As 均有可能释放而成为有效 As^[47]. 从研究区土壤 pH 值与 As 水溶态、离子交换态和铁锰氧化物结合态等相关分析结果看,研究区土壤 pH 值与 As 生物有效性呈正相关,与前人的研究结果一致. 此外,土壤 pH 值与 As 生物富集系数 BCF 也呈现正相关(图 9),说明随着土壤 pH 值升高,研究区根系土壤中 As 的生物有效

性增加,与前人指出 pH 对土壤-作物系统中 As 影响的研究结论是一致的. 研究区小麦籽实中重金属 As 含量与土壤 pH 值相关系数为负值的原因可能与研究区根系土壤 pH 值区间较集中(pH 均值为 8.42),pH 值区间变化较窄等因素有关^[48]. 此外,As 具有独特的物理和化学性质,其在环境中的迁移过程受微生物、理化性质(pH、Eh、CEC 和 OM)和矿物(铁、铝、锰、硫、磷、硅酸盐和碳酸盐)等诸多因素的共同作用,各因素间的相互作用机制复杂^[49].

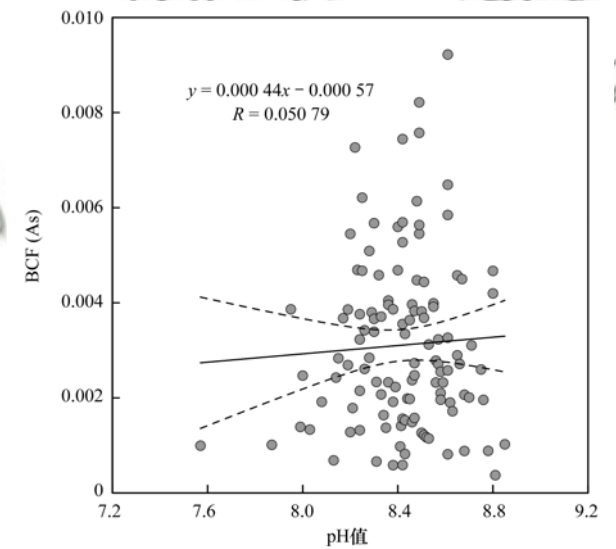


图 9 研究区根系土壤 pH 值与 As 生物富集系数相关性

Fig. 9 Correlation between the pH value and bioenrichment coefficient of As of the root soil in the study area

表 6 研究区根系土壤 pH 值与 As 各形态相关性¹⁾

	Table 6 Correlation between the pH value and morphology of As of the root soil in the study area						
相关系数	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	腐殖酸结合态	铁锰结合态	强有机结合态	残渣态
pH-As 形态 相关系数	0.059	0.031	-0.159	0.108	0.265 **	-0.150	-0.090

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

土壤中 Cr(Ⅲ)易被土壤胶体吸附或形成沉淀,以残渣态赋存为主,生物活性较差,植物难以吸收;土壤中 Cr(Ⅵ)通常以 CrO_4^{2-} 和 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 形式存在,土壤胶体对其吸附较弱,具有较高的生物活

性^[50,51]. 研究区根系土壤中 Cr 主要以残渣态赋存为主,残渣态占比高达 84.12%;其次为强有机结合态占比 5.89%;水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态占比分别为 0.09%、2.82% 和 2.54%. 土壤中重

金属 Cr 赋存形态受 pH 值变化的影响,造成其生物有效性的变化^[52~54].在表生强烈氧化条件下(碱性介质), Cr^{3+} 易被氧化成 Cr^{6+} 形式的铬酸盐阴离子 $[(\text{CrO}_4)^{2-}]$ 或者重铬酸络阴离子 $[(\text{Cr}_2\text{O}_7)^{2-}]$.研究区土壤 pH 值处于碱性环境,土壤中 Cr^{3+} 易被氧化成 Cr^{6+} 形式存在.土壤 pH 值与小麦籽实中 Cr 含量呈负相关,但相关性不显著,一方面可能是研究区土壤 pH 的变化范围较窄造成的,pH 值为 8 时,土壤基本上不吸附 Cr^{6+} ,另一方面在土壤 pH、有机质、土壤矿物和植物种类等因素综合作用下 Cr 在土壤-植物系统中的迁移转化等行为是一种复杂的生物化学过程^[55].土壤碱性环境有利于 Cr(Ⅲ)向 Cr(Ⅵ)的转化,随着土壤 pH 增加,Cr 的迁移转化能力和生物有效性增强^[56].农作物中 Cr 含量可能与 pH 呈负相关,反映在多种因素的共同作用下,其他土壤性质(如有机质和铁锰氧化物含量等因素)对 Cr 的吸收富集亦有重要影响.如姜身永^[57]的研究认为土壤 pH 值与水溶态和交换态 Cr 含量为负相关,土壤酸性增强时,水溶态和交换态 Cr 含量增大,导致土壤中 Cr 的生物有效性增强,使植物生态风险加大.孙宗全^[58]对我国 14 种类型土壤中小麦籽实生物富集系数 BCF 与 pH 值相关性研究认为 BCF 与 pH 呈显著负相关($P < 0.05$),pH 是影响小麦籽实吸收 Cr 的重要因素($r^2 = 0.507$).Zeng^[59]的研究认为土壤-水稻系统中的 Cr 含量与土壤 pH 值呈负相关.

土壤有机质既能钝化固定重金属,又能活化重金属^[60].研究区根系土壤有机质 OM 与小麦籽实中 Cr、Cu、Hg 和 Zn 呈负相关性,其中与 Cr 呈显著负相关性($P < 0.01$);与 As、Cd、Ni 和 Pb 呈正相关,其中与 As 呈显著正相关($P < 0.05$).土壤 OM 既能通过吸附金属络合物而降低重金属的生物活性^[61],也可以在土壤溶液中与重金属形成螯合物而增强其生物活性^[62, 63].土壤 OM 双向影响重金属的生物有效性,与土壤 OM 类似,阳离子交换量 CEC 对农作物中重金属的吸收富集影响也具有双向性.研究区根系土壤 CEC 与小麦籽实中 As、Cd、Ni 和 Pb 呈正相关,其中与 Cd 和 Ni 呈显著正相关($P < 0.01$).土壤 CEC 是交换性盐基(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 H^+ 和 Al^{3+} 等)的总量,阳离子作为农作物吸收重金属元素的强竞争性离子,其浓度越高,重金属吸收量就越低,对重金属元素起到拮抗效应^[64];而在酸性条件下,土壤表面带有负电荷的胶体与重金属水溶态和交换性盐基形成表面络合物时产生竞争机制导致土壤中 CEC 减少^[65].研究区土壤理化性质(pH 值、OM 和 CEC)对小麦籽实吸收富集不同

重金属是个复杂的过程,受众多因素影响.

4 结论

(1)受外部因素的影响,研究区存在个别样品根系土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量超过农用地污染风险筛选值;94.83%的根系土壤样品重金属综合污染指数(IPI_N)处于安全无污染等级;重金属潜在生态风险以轻微和中等为主,所占比例分别为 64.66%和 30.17%,其中 Cd 潜在生态危害最大,其次为 Hg 元素,Cr、Ni 和 Zn 等重金属潜在生态危害较小.

(2)研究区根系土壤重金属除 Cd 生物活性形态组分(离子交换态和水溶态)占比达 33.43%,生物有效性相对较高,其余 7 种重金属赋存形态均以残渣态为主,生物活性组分占比相对较低;土壤重金属 RAC 由强到弱分别为 $\text{Cd} > \text{Ni} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb}$,其中仅 Cd 元素 RAC 以中等风险等级为主,11 件样品 Cd 元素 RAC 为高风险等级,其余 7 种重金属 RAC 风险等级均为低风险或无风险.

(3)小麦籽实样品中重金属含量总体安全,仅 3 样品中 Cd 含量超出国家安全限值,具有一定的潜在健康风险,小麦籽实中重金属迁移富集能力依次为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr}$;小麦籽实对重金属 Zn、Cu 和 Cd 转移吸收率达 10% 以上,相对其他重金属活性更高.

(4)土壤重金属主成分分析和铅同位素数据显示,研究区根系土壤重金属主要来源是在地质背景的基础上叠加了人为来源(燃煤、气溶胶和重金属冶炼).小麦籽实对重金属的吸收富集是个复杂的过程,重金属 As、Cd、Pb 和 Zn 的生物有效态组分对小麦籽实吸收重金属起促进作用,小麦籽实中重金属含量与根系土壤 pH 值呈负相关性,土壤理化指标 OM 和 CEC 等双向影响土壤中重金属的生物有效性.

参考文献:

- [1] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [2] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [3] 李春芳,曹见飞,吕建树,等.不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [4] Li C F, Cao J F, Lü J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.

- [4] Wahsha M, Bini C, Argese E, *et al.* Heavy metals accumulation in willows growing on spolic technosols from the abandoned imperina valley mine in Italy [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **123**: 19-24.
- [5] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. *Plant Science*, 2011, **180**(2): 169-181.
- [6] 柳检, 罗立强. As、Cd 和 Pb 植物根系吸收途径和影响因素研究现状与进展[J]. *岩矿测试*, 2015, **34**(3): 269-277.
Liu J, Luo L Q. Research progress on the root uptake pathway of As, Cd and Pb and its influence factors[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, **34**(3): 269-277.
- [7] Joseph T, Dubey B, McBean E A. Human health risk assessment from arsenic exposures in Bangladesh[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 552-560.
- [8] Xu L, Lu A X, Wang J H, *et al.* Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 214-220.
- [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] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 916-926.
Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 916-926.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 胡国成, 许木启, 许振成, 等. 府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(1): 146-153.
Hu G C, Xu M Q, Xu Z C, *et al.* Pollution characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediment from Fuhe river and Baiyangdian lake, North China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(1): 146-153.
- [15] 朱江, 马柱国, 严中伟, 等. 气候变化背景下雄安新区发展中面临的问题[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(11): 1231-1236.
- [16] Zhu J, Ma Z G, Yan Z W, *et al.* Problems faced by construction of Xiongan New Area under climate change [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(11): 1231-1236.
- [17] 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.
- [18] 刘芳圆, 崔俊辉, 陈立江, 等. 华北平原地貌区划新见[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, **25**(4): 100-103.
Liu F Y, Cui J H, Chen L J, *et al.* A view on geomorphologic zonalization of North China Plain [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, **25**(4): 100-103.
- [19] 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.
- [20] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [21] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [22] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
- [23] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(17): 310-315.
Fan S X, Gan Z T, Li M J, *et al.* Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(17): 310-315.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 周亚龙, 郭志娟, 王成文, 等. 云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. *物探与化探*, 2019, **43**(6): 1358-1366.
Zhou Y L, Guo Z J, Wang C W, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiang county, Yunnan province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, **43**(6): 1358-1366.
- [26] Cui Y J, Zhu Y G, Zhai R H, *et al.* Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China [J]. *Environment International*, 2005, **31**(6): 784-790.
- [27] Liu J, Zhang X H, Tran H, *et al.* Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1623-1632.
- [28] 张江华, 徐友宁, 吴耀国. 小秦岭金矿区小麦和玉米重金属的健康风险评价[J]. *地质学报*, 2019, **93**(2): 501-508.
Zhang J H, Xu Y N, Wu Y G. Health risk assessment of heavy metals in wheat and maize in the Xiaolinling gold mining area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, **93**(2): 501-508.
- [29] 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.
- [30] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys [A]. In Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: Pudoc, 1984. 166-193.
- [31] Adamo P, Iavazzo P, Albanese S, *et al.* Bioavailability and soil-

- to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500-501**: 11-22.
- [31] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
Han C M, Wang L S, Gong Z Q, *et al.* Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- [32] 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.
- [33] 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*, 2020, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.7.1.
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 Xiong'an New Area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.7.1.
- [34] 熊孜. 河北农田土壤重金属污染特征及风险评估研究——以镉、镍为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017. 21-27.
Xiong Z. Studies on pollution characteristics and risk assessment of heavy metal in HeBei's farmland soil-A case of cadmium and nickel [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. 21-27.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 关共凑, 徐颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. *生态环境*, 2006, **15**(2): 315-318.
Guan G C, Xu S, Huang J G. The regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 315-318.
- [38] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. *环境化学*, 2002, **21**(2): 110-116.
Mo Z, Wang C X, Chen Q, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2002, **21**(2): 110-116.
- [39] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. *生态环境*, 2005, **14**(2): 282-286.
Zhao Z Q, Zhu Y G, Cai Y L. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(2): 282-286.
- [40] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 67-73.
Yu T, Yang Z F, Zhong J, *et al.* Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 67-73.
- [41] 余跃, 王济, 张浩, 等. 土壤-植物系统中砷的研究进展[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **28**(3): 113-117.
Yu Y, Wang J, Zhang H, *et al.* Advances of research on arsenic in soil-plant system [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2010, **28**(3): 113-117.
- [42] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4178-4185.
- [43] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, *et al.* Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of arsenic in paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- [44] 陈静, 王学军, 朱立军. pH 对砷在贵州红壤中的吸附的影响[J]. *土壤*, 2004, **36**(2): 211-214.
Chen J, Wang X J, Zhu L J. Effect of pH on adsorption and transformation of arsenic in red soil in Guizhou [J]. *Soils*, 2004, **36**(2): 211-214.
- [45] 黄春雷, 郑萍, 陈岳龙, 等. 山西临汾-运城盆地土壤中 As 含量的变化规律[J]. *地质通报*, 2008, **27**(2): 246-251.
Huang C L, Zheng P, Chen Y L, *et al.* Change of the arsenic content in soils of the Linfen-Yuncheng basin, Shanxi, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(2): 246-251.
- [46] 李月芬, 王冬艳, 汤洁, 等. 吉林西部土壤砷的形态分布及其与土壤性质的关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(3): 516-522.
Li Y F, Wang D Y, Tang J, *et al.* Speciation of soil arsenic and its correlation with soil properties in western Jilin province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(3): 516-522.
- [47] Semple K T, Doick K J, Jones K C, *et al.* Peer reviewed: defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(12): 228A-231A.
- [48] Tokunaga S, Hakuta T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(1): 31-38.
- [49] 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.
- [50] Gill M. Heavy metal stress in plants: a review [J]. *International Journal of Advanced Research*, 2014, **2**(6): 1043-1055.
- [51] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tavera H, *et al.* Chromium toxicity in plants [J]. *Environment International*, 2005, **31**(5): 739-753.
- [52] 刘云惠, 魏显有, 王秀敏, 等. 土壤中铬的吸附与形态提取研究[J]. *河北农业大学学报*, 2000, **23**(1): 16-20.
Liu Y H, Wei X Y, Wang X M, *et al.* A study on the adsorption of chromium in soil and the form extraction [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, **23**(1): 16-20.
- [53] 李晶晶, 彭恩泽. 综述铬在土壤和植物中的赋存形式及迁移规律[J]. *工业安全与环保*, 2005, **31**(3): 31-33.
Li J J, Peng E Z. Summarization on the existing form and transferring rules of chromium in soil [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2005, **31**(3): 31-33.
- [54] 易秀. 黄土性土壤对铬砷的吸附量及其吸附形态[J]. *生态环境*, 2006, **15**(3): 547-550.

- Yi X. Adsorption amount and forms of Cr and As in loessial soil [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(3): 547-550.
- [55] Köleli N. Speciation of chromium in 12 agricultural soils from Turkey[J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1473-1478.
- [56] 戴宇, 杨重法, 郑袁明. 土壤-植物系统中铬的环境行为及其毒性评价[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3432-3440.
- Dai Y, Yang Z F, Zheng Y M. A review on the environmental behaviors and toxicity assessment of chromium in soil-plant systems[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3432-3440.
- [57] 姜身永, 侯明. 土壤几种化学性质对土壤 Cr 形态的影响[J]. *桂林工学院学报*, 2008, **28**(4): 558-561.
- Jiang S Y, Hou M. Effect of several soil chemical properties on soil chromium speciations[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, **28**(4): 558-561.
- [58] 孙宗全, 李合莲, 于修乐, 等. 不同作物对土壤中铬的富集能力的差异[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2019, **33**(3): 255-260, 265.
- Sun Z Q, Li H L, Yu X L, *et al.* Bioconcentration ability of chromium in soil by different crops[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2019, **33**(3): 255-260, 265.
- [59] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.
- [60] 潘胜强, 王铎, 吴山, 等. 土壤理化性质对重金属污染土壤改良的影响分析[J]. *环境工程*, 2014, **32**(S1): 600-603, 633.
- Pan S Q, Wang D, Wu S, *et al.* Impact of soil properties on improvement of heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2014, **32**(S1): 600-603, 633.
- [61] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [62] 李其林, 魏朝富, 王定勇, 等. 重金属在土壤载体中的行为和环境响应[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(2): 441-447.
- Li Q L, Wei C F, Wang D Y, *et al.* Environmental response and behavior of heavy metal in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(2): 441-447.
- [63] Frohne T, Rinklebe J. Biogeochemical fractions of mercury in soil profiles of two different floodplain ecosystems in Germany [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, **224**(6): 1591.
- [64] 王惠明, 林小兵, 黄欠如, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J]. *生态科学*, 2019, **38**(3): 152-158.
- Wang H M, Lin X B, Huang Q R, *et al.* Effects of different irrigation modes on heavy metal accumulation in paddy soil and brown rice[J]. *Ecological Science*, 2019, **38**(3): 152-158.
- [65] 胡清菁, 张超兰, 靳振江, 等. 铅锌矿尾砂重金属污染物对不同土地利用类型土壤性质影响的典范对应分析[J]. *岩矿测试*, 2014, **33**(5): 714-722.
- Hu Q J, Zhang C L, Jin Z J, *et al.* Canonical correspondence analysis for soil properties and heavy metal pollution from Pb-Zn mine tailings in different land use type[J]. *Rock and mineral Analysis*, 2014, **33**(5): 714-722.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)