

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共附生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	
《环境科学》征稿简则(1984)	
信息	(2167, 2191, 2324)

小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析

刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳

(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘要: 快速的城市化、工业化和农业集约化造成了严重的土壤问题, 如土壤酸化和镉污染等, 严重威胁着中国的粮食安全和人体健康。小麦是中国第二大粮食作物, 对镉有较强的积累能力。探明小麦籽粒镉含量的影响因素对保障小麦安全生产至关重要。然而, 目前对小麦籽粒镉含量的影响因素还缺乏全面和定量的分析。对近 10 年发表的 56 篇相关论文进行 Meta 分析和决策树分析, 结果表明, 土壤样点中镉含量超过农用地土壤污染风险筛选值的比例为 52.6%, 小麦籽粒镉含量超过食品安全国家标准($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2017)的比例为 64.1%。土壤理化性质中, pH、有机质、有效磷和土壤全镉含量是影响小麦籽粒镉含量的重要因素。土壤的 $\text{pH} \leq 5.5$ 和 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时小麦籽粒镉含量超标率分别为 99.4% 和 76.2%; $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤有机质含量 $< 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率最高, 为 61.0%。农田土壤的 $\text{pH} \geq 7.1$ 且全镉含量 $< 1.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时有利于小麦安全生产。不同小麦品种籽粒镉含量和镉富集因子存在差异, 种植低镉积累小麦品种是降低小麦籽粒镉含量的经济有效措施。研究结果可为镉污染农田小麦安全生产提供科学依据。

关键词: 小麦; 镉; 影响因素; Meta 分析; 决策树分析

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2265-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202204090

Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis

LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, NING Rui-yan

(College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Rapid urbanization, industrialization, and agricultural intensification have resulted in serious soil problems, such as soil acidification and cadmium pollution, affecting food security and human health. Wheat is the second largest food crop in China and has a strong accumulation capacity for cadmium. Understanding the influencing factors of cadmium content in wheat grain is crucial to realize the safe production of wheat. However, a comprehensive and quantitative analysis of how soil physicochemical properties and cultivars affect wheat cadmium accumulation is lacking. The Meta-analysis and decision tree analysis of 56 related studies published in the past 10 years showed that the proportion of cadmium content in soil and wheat grain exceeding the national standard was 52.6% and 64.1%, respectively. Among soil physical and chemical properties, pH, organic matter, available phosphorus, and total soil cadmium content were the important factors affecting the cadmium content in wheat grains. When soil $\text{pH} \leq 5.5$ and $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard was 99.4% and 76.2%, respectively. When $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} < \text{soil organic matter content} \leq 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard was the highest (61.0%). Soil $\text{pH} \geq 7.1$ and total cadmium content $< 1.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was suitable for wheat safety production. There were significant differences in grain cadmium content and cadmium enrichment factors among different wheat cultivars. Planting wheat cultivars with low cadmium accumulation is an economical and effective measure to decrease cadmium content in wheat grains. The current study can provide guidance for the safe production of wheat in cadmium-contaminated farmland.

Key words: wheat; cadmium; influence factor; Meta-analysis; decision tree analysis

土壤酸化和重金属污染严重威胁着中国粮食安全和农业可持续发展。近年来, 中国耕地酸化面积不断扩大, 土壤 $\text{pH} < 5.5$ 的耕地面积由 30 年前的 $1.13 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到了 $1.51 \times 10^8 \text{ hm}^2$ [1]。文献[2]显示, 中国粮食主产区黄淮海平原、长江中游及江淮地区、四川盆地耕地土壤重金属点位超标率分别为 12.2%、30.6% 和 43.6%, 其中镉污染居于首位, 点位超标率达 17.4%。中国耕地资源有限, 为保障居民生活和农业生产, 在受酸化和轻中度污染的农田种植农作物已成为现在农业生产现状。镉容易被作物吸收, 通过土壤-作物运输系统对人体造成严重的健康风险。普通非吸烟者主要的镉暴露途径是通过植物源性食物从膳食中摄入, 占总镉摄入量的 90.0% [3,4]。

小麦是世界上最重要的粮食作物之一, 是全球

一半以上人口的主食, 全球年产量达 7.5 亿 t [5]。Li 等 [6] 通过 Meta 分析定量探究了粮食作物小麦和水稻对镉的吸收和转运能力, 结果表明小麦籽粒镉富集因子显著高于水稻。目前“镉麦”问题频发, 引起了国内外公众的广泛关注。Yang 等 [7] 在 2017~2019 年采集河南济源 206 对土壤和小麦点对点样品, 测定镉含量, 结果表明土壤镉含量均值为 $(1.52 \pm 2.20) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 小麦籽粒镉含量均值为 $(0.198 \pm 0.201) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过了食品安全国家标准 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2017)。Li 等 [8] 研究发现河南某铅冶炼厂附

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107044); 山西省回国留学人员科研项目(2021-069); 来晋工作奖励基金项目(SXBYKY2021038); 山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ55)

作者简介: 刘娜(1992~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为重金属污染农田安全利用, E-mail: liuna@sxau.edu.cn

近农田小麦籽粒镉含量超标率 100%。目前,湖南^[9]、四川^[10]、山东^[11]、湖北^[12]和河北^[13]等地也出现了“镉麦”问题。受镉污染的小麦制品占北方人群镉摄入量的 43.0%^[14],小麦的安全生产亟待解决。明确影响小麦镉吸收和迁移的因素至关重要。

到目前为止,学者对影响小麦吸收积累镉的因素进行了大量研究。陈洁等^[9]研究得出土壤镉含量和有机质与小麦籽粒镉富集因子呈显著负相关关系(50 对土壤小麦样品)。管伟豆^[15]研究则得出小麦籽粒镉富集因子与土壤 pH 和土壤黏粒呈显著负相关关系,与土壤有机质呈显著正相关关系,与土壤阳离子交换量和有效态镉(DTPA-Cd)无显著相关性(147 对土壤小麦样品)。Ran 等^[16]研究得出小麦籽粒镉含量与土壤 pH、钾含量、磷含量呈显著负相关关系,与有机质、阳离子交换量、粘粒呈显著正相关关系(99 对土壤小麦样品)。近年来研究者又发现小麦籽粒镉积累能力存在显著的品种差异^[11,17,18],品种也是影响小麦籽粒镉含量的重要因素。由于受样点数、试验地点、品种等因素限制,关于小麦吸收积累镉的影响因素,部分研究得出了相互矛盾的结论。而且大多数研究得出的结论是定性的,而非定量的。鉴于此,对小麦吸收积累镉的影响因素开展系统、综合和定量的分析是必要的。

Meta 分析是一种基于文献资料的定量化综合评价多个同类独立研究结果的统计方法,近年来被广泛用于研究环境和生态问题^[19~21]。本研究采用 Meta 分析探究了不同因素对小麦籽粒镉含量的影响,包括土壤镉含量、pH、有机质、阳离子交换量、碱解氮、有效磷、速效钾、研究区域和品种,进而运用决策树分析探究土壤理化性质中影响小麦籽粒镉含量的重要因素。目的:①评价和量化不同因素条件

下小麦籽粒镉含量超标率;②通过决策树分析确定影响小麦籽粒镉含量的重要因素,构建预测模型;③筛选低镉积累小麦品种。本研究结果可为小麦安全生产提供科学指导,完善农业污染土壤治理策略。

1 材料与方法

1.1 数据搜集

为分析小麦籽粒镉含量的影响因素,本研究搜集了 2011~2021 年期间发表的相关论文,数据库包括 Web of Science (<https://apps.webofknowledge.com/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), 中国知网 (<http://www.cnki.net/>) 和百度学术 (<https://xueshu.baidu.com/>)。搜索的英文关键词为“*Triticum aestivum* L. or wheat or wheat grain or wheat cultivar or crop”和“cadmium or Cd or Cd accumulation or heavy metal”,中文关键词为“小麦 & 小麦品种 & 作物 & 镉 & Cd & 重金属”。为确保数据的准确性,搜集的论文必须符合以下标准:①试验必须为田间试验,盆栽、水培和沙培研究除外;②试验地点必须位于中国,国外的研究除外;③小麦品种必须为中国品种,国外的品种除外;④土壤和小麦镉含量测定必须采用国家标准方法。经过严格的筛选,共有 56 篇论文符合要求。搜集的土壤和小麦基本信息如表 1 所示,分析区域涵盖中国河南、湖北和山东等 14 个省级行政区域。从文献中提取籽粒镉含量、土壤镉含量、小麦籽粒镉富集因子、pH、有机质、阳离子交换量、碱解氮、有效磷、速效钾、小麦品种和试验地点等信息。通过软件 GetData Graph Digitizer(版本 2.26)对图中数据进行提取。若未直接给出小麦籽粒镉富集因子,该数据由小麦籽粒镉含量/土壤镉含量,计算而得。

表 1 Meta 分析的土壤和小麦样品基本信息

Table 1 Basic information of soil and wheat samples for Meta-analysis

研究区域	分布状况
华北-东北组	北京($n=141$)、天津($n=136$)、河北($n=120$)和内蒙古($n=21$)
华南-华东组	山东($n=427$)、安徽($n=27$)、江苏($n=94$)和浙江($n=30$)
华中组	河南($n=635$)、湖北($n=548$)和湖南($n=62$)
西南组	四川($n=138$)
其它	黄淮海小麦优势产区和长江中下游小麦优势产区共采集($n=35$)、6 个省级行政区域共采集($n=146$, 新疆、陕西、河南、山东、北京和天津)

1.2 数据分析

1.2.1 Meta 分析

运用单组率的 Meta 分析定量研究各种因素对小麦籽粒镉含量的影响。小麦籽粒镉含量超标率效应值计算公式如下:

$$RR = X_n/X_N \times 100\% \quad (1)$$

式中, X_n 为小麦籽粒镉含量超过食品安全国家标准 0.10 mg·kg⁻¹ (GB 2762-2017) 的样点数, X_N 为样点总数。效应值越大,说明小麦籽粒镉含量超标率越高。

$$S_e = \sqrt{RR(1 - RR)/X_N} \quad (2)$$

$$95\% \text{ CI} = RR \pm 1.96S_e \quad (3)$$

式中, S_e 为标准误, 95% CI 为效应值的 95% 置信区间, 范围越窄, 横线越短, 说明估计的效应值越精确, 若综合效应的 95% CI 区间不包含 0, 则说明该因素对小麦籽粒镉含量有显著影响, 若两组数据之间的 95% CI 不重叠, 则表示两组数据有显著差异^[22].

数据异质性检验通过 Q 检验和 I^2 检验, 采用随机效应模型, 既考虑了研究内部的变异性, 也考虑了研究之间的变异性.

1.2.2 决策树分析

决策树模型是一种应用广泛的非参数分类器, 数据要求低, 对缺失数据的容忍度高, 可以同时使用连续变量和分类变量作为自变量. 本研究选用 CART(classification and regression trees) 算法创建决策树, 基于基尼系数进行特征选择, 选择基尼系数最小的特征及其对应的取值作为最优特征和最优切分点, 将结点的数据集划分成两部分, 同时生成当前节点的两个子节点, 递归建立 CART 分类树. 随机抽取 80% 的数据作为决策树的测试组, 剩余 20% 的数据用于决策树的检验.

1.3 数据处理

本文采用 Stata 16.0 “metan” 程序包对数据进行 Meta 分析, R 语言 4.1.2 “rpart” 和 “rpart. plot” 程序

包进行决策树分析, 箱线图由 OriginPro 9.1 制作, 数据描述性分析通过 SPSS Statistics 17.0 完成.

2 结果与分析

2.1 描述性分析

土壤镉含量、小麦籽粒镉含量、籽粒镉富集因子、pH、有机质、土壤阳离子交换量、碱解氮、有效磷和速效钾的数据分布特征见表 2. 不同研究中土壤镉含量差异很大, 范围为 0.030 0 ~ 19.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 1.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过农用地土壤污染风险筛选值的样点比例为 52.6% (农用地土壤污染风险管控标准 GB 15618-2018). 共搜集小麦样点数 1910 个, 小麦籽粒镉含量平均值为 0.528 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最小值为 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值为 3.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过食品安全国家标准 (0.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, GB 2762-2017) 的样点数为 1224 个, 占比为 64.1%, 其中籽粒镉含量为 0.10 ~ 1.00、1.00 ~ 2.00 和 >2.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比例分别为 44.5%、15.3% 和 4.29%. 小麦籽粒镉富集因子范围为 0 ~ 3.18, 均值为 0.547, 籽粒镉富集因子大于 1 的比例为 20.9%. 本研究土壤的 pH 范围为 4.96 ~ 8.66, 有机质和阳离子交换量均值分别为 20.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 16.4 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 2 土壤理化性质、籽粒镉含量和富集因子描述性分析¹⁾

Table 2 Descriptive statistical summary of soil physicochemical properties, grain cadmium content, and bio-concentration factor

项目	籽粒镉含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤镉含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	籽粒镉 BCF	pH	有机质含量 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
均值	0.528	1.00	0.547	7.35	20.2	16.4	102	37.8	158
中位数	0.209	0.550	0.241	7.51	19.3	15.5	100	28.6	116
极小值	0	0.030 0	0	4.96	0.150	6.00	22.6	7.60	46.1
极大值	3.50	19.6	3.18	8.66	44.6	32.3	253	105	350
标准差	0.631	1.54	0.687	0.84	7.47	4.56	39.8	23.3	88.8
下四分位数	0.064 2	0.285	0.107	7.03	15.7	13.2	83.9	20.6	93.5
上四分位数	0.862	1.36	0.498	8.01	24.6	18.4	120	47.6	211

1) BCF 为富集系数, CEC 为阳离子交换量

2.2 小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析

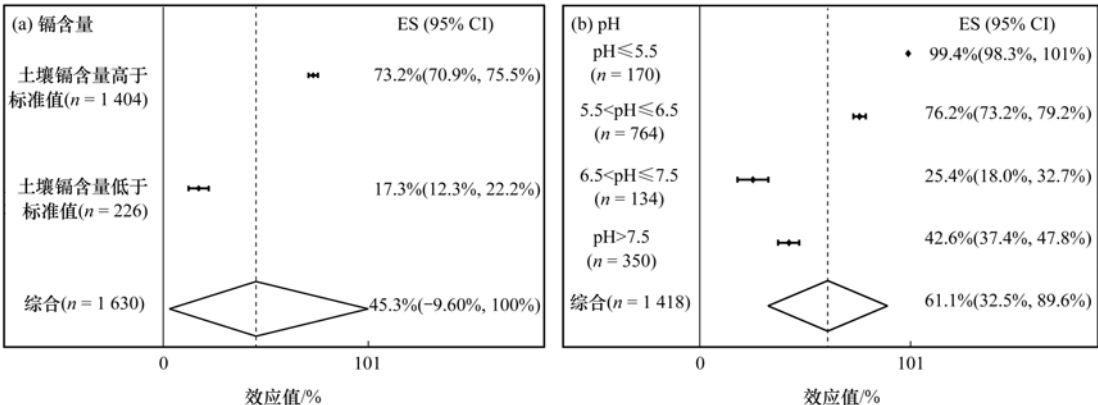
2.2.1 土壤理化性质对小麦籽粒镉含量的影响

如图 1(a) 所示, 基于农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018), 土壤镉含量低于或等于风险筛选值时, 小麦籽粒镉含量超过食品安全国家标准 (GB 2762-2017, 0.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的比例为 17.3% (12.3%, 22.2%) (95% 置信区间, 下同); 当土壤镉含量高于风险筛选值时, 小麦籽粒镉含量超标比例为 73.2% (70.9%, 75.5%).

土壤不同 pH 条件下小麦籽粒镉含量超标率的效应值如图 1(b) 所示. 土壤的 $\text{pH}\leq 5.5$ 、 $5.5<\text{pH}\leq 6.5$ 、 $6.5<\text{pH}\leq 7.5$ 和 $\text{pH}>7.5$ 的研究样点数分

别为 170、764、134 和 350. 土壤的 $\text{pH}\leq 5.5$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率最高, 为 99.4% (98.3%, 101%), 其次是 $5.5<\text{pH}\leq 6.5$, 小麦籽粒镉含量超标率为 76.2% (73.2%, 79.2%). $6.5<\text{pH}\leq 7.5$ 和 $\text{pH}>7.5$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率分别为 25.4% (18.0%, 32.7%) 和 42.6% (37.4%, 47.8%). 不同 pH 区间, 小麦籽粒镉含量超标率均呈现显著性差异.

为进一步探讨小麦籽粒镉含量影响因素, 对土壤养分状况 (有机质、碱解氮、有效磷和速效钾) 进行亚组 Meta 分析, 如森林图 2 所示. 当土壤有机质含量 $<10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (有机质很缺乏) 时, 小麦籽粒镉含



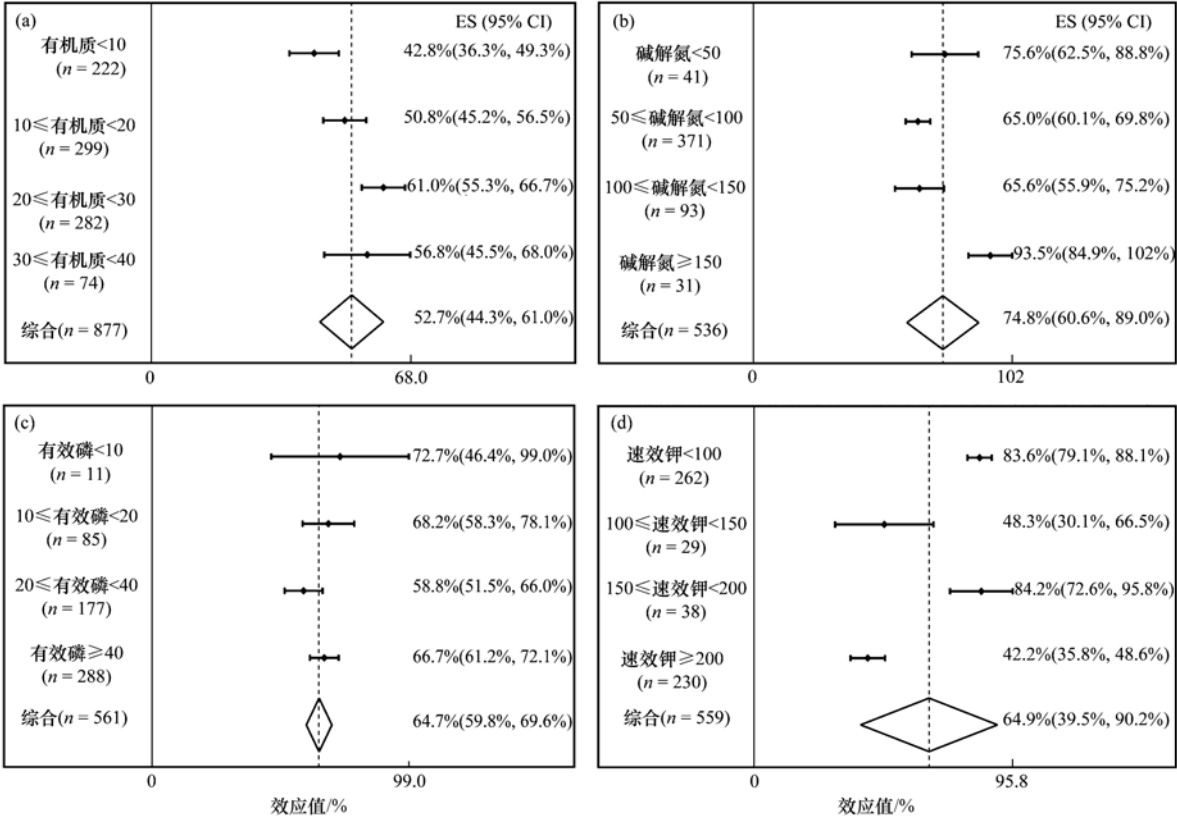
n 为样点数,综合表示所有样点的整体效应,◆为平均效应值,95% CI 为 95% 置信区间,下同

图 1 不同土壤镉含量和 pH 条件下小麦籽粒镉含量超标率效应值

Fig. 1 Effect size of the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard under different soil cadmium contents and pH conditions

量超标率最低,为 42.8% (36.3%,49.3%),研究样点数 222 个. $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤有机质含量 $< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (有机质缺乏)、 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤有机质含量 $< 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (中等有机质)和土壤有机质含量 $\geq 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (有机质丰富)时,小麦籽粒镉含量超标率分别为 50.8% (45.2%, 56.5%)、61.0% (55.3%, 66.7%) 和 56.8% (45.5%, 68.0%). 土壤有机质含量 $< 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时小麦籽粒镉含量超标率显著低于 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤有机质含量 $< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时小麦籽

粒镉含量超标率[图 2(a)]. 土壤碱解氮含量 $\geq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦籽粒镉含量超标率最高[93.5% (84.9%,102%)],显著高于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤碱解氮含量 $< 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \leq$ 土壤碱解氮含量 $< 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时小麦籽粒镉含量超标率[图 2(b)]; 土壤有效磷含量缺乏 ($< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中等 ($10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、丰富 ($20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和很丰富 ($> 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时小麦籽粒镉含量超标率分别为 72.7% (46.4%, 99.0%)、68.2% (58.3%, 78.1%)、58.8% (51.5%, 66.0%) 和 66.7% (61.2%, 72.1%)。



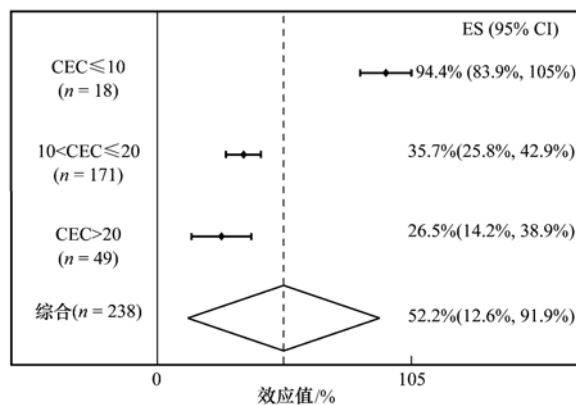
(a) 有机质,数值单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, (b) 碱解氮,数值单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, (c) 有效磷,数值单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, (d) 速效钾,数值单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

图 2 不同土壤养分条件下小麦籽粒镉含量超标率效应值

Fig. 2 Effect size of the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard under different soil nutrient conditions

78.1%)、58.8% (51.5%, 66.0%) 和 66.7% (61.2%, 72.1%) [图 2(c)]; 土壤速效钾很丰富 ($\geq 200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时, 小麦籽粒镉含量超标率最低, 为 42.2% (35.8%, 48.6%), 显著低于土壤速效钾缺乏 ($< 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时小麦籽粒镉含量超标率 [图 2(d)].

不同土壤阳离子交换量条件下小麦籽粒镉含量超标率如图 3 所示, 土壤阳离子交换量 $\leq 10 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1} < \text{土壤阳离子交换量} \leq 20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和土壤阳离子交换量 $> 20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样点数分别为 18、171 和 49. 当土壤阳离子交换量 $\leq 10 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率最高, 为 94.4% (83.9%, 105%); 而土壤阳离子交换量 $> 20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率最低, 为 26.5% (14.2%, 38.9%).



CEC 为土壤阳离子交换量, 数值单位为 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$

图 3 不同土壤阳离子交换量条件下小麦籽粒镉含量超标率效应值

Fig. 3 Effect size of the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard under different soil cation exchange capacities

2.2.2 分布区域对小麦籽粒镉含量的影响

本研究将小麦样点的分布区域划分为华北-东北组、华南-华东组、华中组和西南组, 样点数分别为 57、369、1 055 和 137 (图 4). 华北-东北地区小麦籽粒镉含量超标率最低, 为 7.00% (0.400%, 13.6%), 其次为华南-华东地区, 超标率为 25.7% (21.3%, 30.2%). 华中地区和西南地区小麦籽粒镉含量超标率显著高于华北-东北地区和华南-华东地区, 超标率分别为 78.1% (75.6%, 80.6%) 和 78.8% (72.0%, 85.7%).

2.2.3 品种对小麦籽粒镉含量的影响

不同小麦品种籽粒镉含量超标率的效应值和 95% CI 如图 5(a) 所示. 所有品种籽粒镉含量总超标率为 58.6% (47.4%, 69.9%). 12 个小麦品种中, 川麦 104 籽粒镉含量超标率最高, 为 83.3%

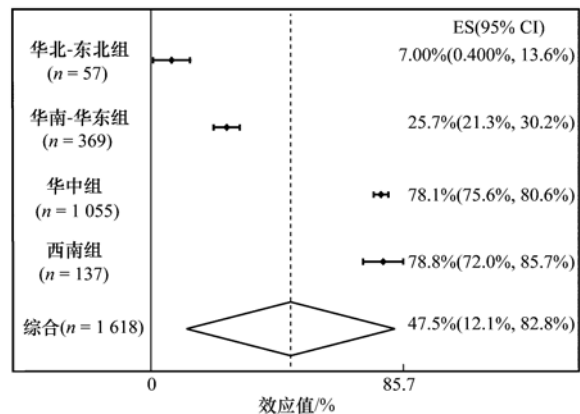


图 4 不同分布区域小麦籽粒镉含量超标率效应值

Fig. 4 Effect size of the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard under different distribution areas

(62.2%, 104%); 此外, 矮抗 58、内麦 11 和内麦 836 也呈现出较高的超标率, 均为 77.8% (50.6%, 105%). 而小麦品种良星 66、良星 99、烟农 19 和济麦 22 籽粒镉含量超标率较低, 分别为 33.3% (2.53%, 64.1%)、37.5% (3.95%, 71.0%)、37.5% (3.95%, 71.0%) 和 42.9% (16.9%, 68.8%). 不同小麦品种籽粒镉富集因子如图 5(b) 所示, 郑麦 9023、矮抗 58、烟农 19 和川麦 104 籽粒镉富集因子较高, 均值分别为 0.930 (0.130 ~ 1.98)、0.834 (0.060 0 ~ 2.07)、0.753 (0.050 0 ~ 2.38) 和 0.715 (0.160 ~ 2.07). 济麦 22 籽粒镉富集因子最低, 均值为 0.370, 其次为品种内麦 11 和内麦 836, 籽粒镉富集因子分别为 0.619 和 0.579. 综合考虑小麦品种籽粒镉含量和富集因子, 济麦 22 被筛选为低镉积累小麦品种, 优先推荐种植于镉污染农田, 而品种川麦 104 和矮抗 58 不建议种植于镉污染农田, 会增加小麦镉食用风险.

2.3 小麦籽粒镉含量影响因素决策树分析

基于决策树分析探究土壤理化性质中影响小麦籽粒镉含量的重要因素并建立预测模型 (图 6). 在 485 个样点中随机挑选 80% 的样点用于模型构建, 剩余 20% 的样点用于模型检验. 结果表明, 土壤 pH 是影响小麦籽粒镉含量的最主要因素. 当 $\text{pH} < 7.1$ 时, 土壤有机质含量是影响小麦籽粒镉含量的主要因素, $\text{pH} < 7.1$ 且有机质含量低于 $34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 预测小麦籽粒镉含量超标, 预测的准确率为 99.0% (206 个样点). 当 $\text{pH} \geq 7.1$ 时, 土壤有效磷含量和土壤总镉含量是影响小麦籽粒镉含量的两个重要因素. $\text{pH} \geq 7.1$, 有效磷含量 $< 25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且土壤总镉含量 $\geq 1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 预测小麦籽粒镉含量超标, 预测的准确率为 92.0% (12 个样点). 小麦籽粒镉含量影响因素为: 土壤 $\text{pH} > \text{土壤有机质含量}$ 、有效

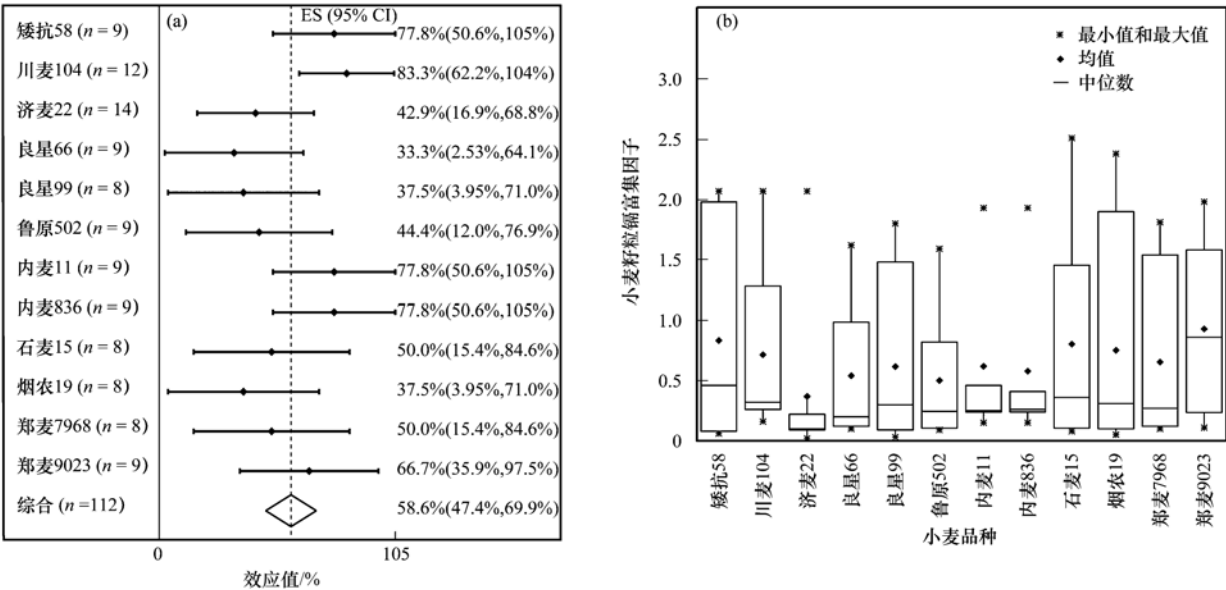
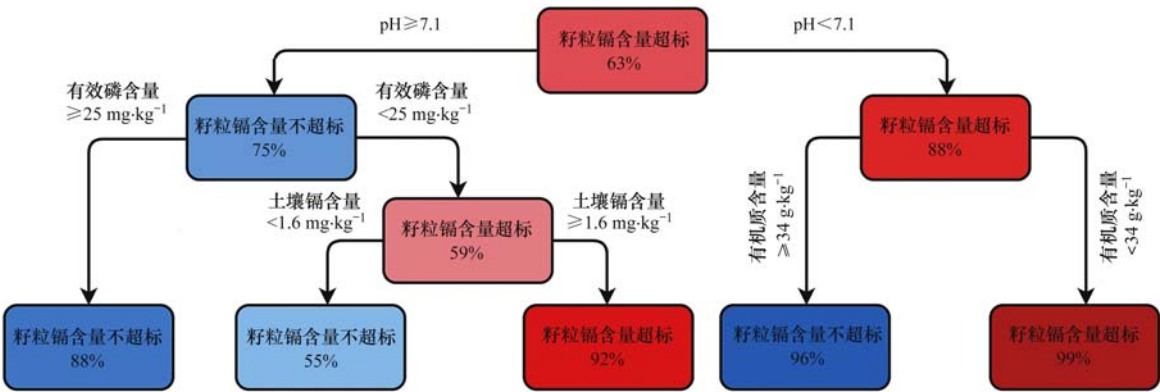


图 5 不同品种小麦籽粒镉含量超标率效应值和籽粒镉富集因子箱线图

Fig. 5 Effect size of the proportion of cadmium content in wheat grain exceeding the national standard under different wheat cultivars and boxplots of grain cadmium bio-concentration factor



每个节点表示预测的类别(籽粒镉含量超标/籽粒镉含量不超标)及籽粒镉含量超标率/不超标率, 蓝色表示籽粒镉含量不超标, 红色表示籽粒镉含量超标, 颜色越深表示预测的准确率越高

图 6 小麦籽粒镉含量影响因素决策树分析

Fig. 6 Decision tree analysis of factors affecting cadmium content in wheat grains

磷含量 > 土壤总镉含量. 检验决策树模型的 97 个样点中 90 个样点预测结果正确, 准确率 92.8%.

3 讨论

3.1 土壤理化性质对小麦籽粒镉含量的影响

3.1.1 土壤全镉含量和 pH 对小麦籽粒镉含量的影响

土壤 pH 和全镉含量一直被学者认为是影响土壤镉生物有效性的两个重要因素. 之前的一些研究通过土壤镉含量和 pH 构建回归模型预测小麦籽粒镉含量或镉富集因子, 如 $\lg Cd_{\text{wheat}} = 0.703 + 1.04 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.175 \text{pH}$ ($r = 0.783$, 模型线性关系检验 $P < 0.01$)^[16] 和 $\lg BCF = -0.566 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.170 \text{pH} +$

0.423 ($r = 0.726$, 模型线性关系检验 $P < 0.01$)^[9] 等. 从模型中可得出, pH 与小麦籽粒镉含量和镉富集因子呈负相关关系, 土壤全镉含量与小麦籽粒镉含量呈正相关关系, 与镉富集因子呈负相关关系. 本研究中森林图分析结果显示, 土壤镉含量与小麦籽粒镉含量超标率效应值可能存在正相关关系[图 1(a)], 土壤中镉含量低于或等于风险筛选值时, 小麦籽粒镉含量超标率为 17.3%, 当土壤镉含量高于风险筛选值时, 小麦籽粒镉含量超标率为 73.2%.

本研究结果显示[图 1(b)], 土壤的 $\text{pH} \leq 5.5$ 时, 小麦籽粒镉含量超标率最高, 为 99.4%, 其次是 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, 小麦籽粒镉含量超标率为 76.2%, 而 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, 小麦籽粒镉含量超标率仅为 25.4%. 土壤不同 pH 区间小麦籽粒镉含量超标率

呈显著性差异,土壤 pH 与小麦籽粒镉含量超标率呈负相关关系,这种负相关关系已被很多研究者证实^[23,24]. 决策树分析结果也表明了土壤理化性质中 pH 是影响小麦籽粒镉含量的重要因素(图 6). 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)也是基于 pH 规定了镉污染风险筛选值和管制值. 从之前研究的预测模型中也可得出 pH 对小麦吸收积累镉有重要作用, pH 均纳入了预测模型的自变量^[9,15,16]. pH 影响植物吸收积累镉的可能机制如下:①土壤 pH 的变化会破坏土壤中金属离子与有机和无机化合物之间的键来改变金属的化学活性. 酸性环境中,土壤中镉的溶解度增大,从而加速了碳酸盐态镉、铁锰氧化物结合态镉、有机态镉、残渣态镉向可交换态镉转化,增加植物对镉的吸收和积累^[25];酸性条件下,土壤溶液中的镉主要以 Cd^{2+} 或 CdCl^+ 的形式存在,而碱性条件下主要以 CdHCO_3^+ 、 CdCO_3 或 CdSO_4 形式存在^[26];②土壤 pH 降低,吸附到土壤固相中的金属阳离子被解吸到土壤溶液中,从而进入土壤-植物系统; pH 影响土壤固相净电荷量, pH 越高,土壤固相表面带负电荷越多,反之亦然;在酸性土壤条件下,氢离子与镉竞争结合位点,导致镉从土壤固相解吸到土壤溶液中,相反,在碱性条件下,土壤固相交换位点很容易与镉结合; Kicińska 等^[27]研究表明,镉污染土壤, pH 降低 3.5~3.7 个单位,土壤溶液中镉离子含量增加了 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;③土壤 pH 还会影响土壤 Zeta 电位、阳离子交换量和氧化还原电位,进而影响镉的生物有效性^[28]. 本研究中, pH 是土壤理化性质中影响小麦吸收积累镉的重要因素,增加土壤 pH 可有效降低小麦籽粒镉含量. 华中地区和西南地区小麦籽粒镉含量超标率显著高于华北-东北地区和华南-华东地区,主要是由于华中和西南地区土壤酸化情况严重,而且其重金属背景值较高,两者叠加导致华中和西南地区小麦籽粒镉含量超标率较高.

3.1.2 土壤养分对小麦籽粒镉含量的影响

土壤有机质来源于微生物、植物和动物的分解,对镉的迁移和生物有效性起着重要的调控作用. 本研究结果显示土壤有机质含量越低,小麦籽粒镉含量超标率也越低,有机质含量 $< 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦籽粒镉含量超标率最低,为 42.8%. 目前研究者对增加土壤有机质提高还是降低了土壤中镉的生物有效性存在一些争议. Chen 等^[29]通过紫外可见/荧光光谱发现,有机质的主要含氧功能基羧基和酚羟基与镉发生络合反应,形成腐殖质-镉络合物,降低了土壤镉的有效性,减少了植物对镉的吸收. Lu 等^[30]的研究也证实向土壤中添加有机质能降低土

壤重金属的有效性. 相反,一些研究则发现增加土壤有机质会提高土壤中镉的生物有效性^[31]. 孙秀敏等^[32]对 45 个土壤样品有机质含量与镉形态相关性进行研究,结果表明,土壤有机质与交换态镉含量呈显著正相关关系. 腐殖质是土壤有机质的主要成分,可溶性腐殖质与镉发生络合反应生成可溶性络合物将增加镉的移动性,促进植物对镉的吸收^[33,34]. 有机质对镉生物有效性的影响因其在土壤中的形式(悬浮或溶解)、含量、来源和物理化学性质(例如摩尔质量、腐殖化阶段、官能团类型)而不同. 除了这些直接影响之外,有机质还可以通过改变土壤的物理化学性质(如阳离子交换量、pH、粒度分布、孔隙度、微生物、酶活性和土壤溶液组成)影响镉的生物有效性^[35]. 从决策树的研究结果也可得出,土壤有机质含量也是影响小麦籽粒镉含量的重要因素之一.

本研究结果表明,土壤有效磷含量也影响小麦对镉的吸收和积累. Ma 等^[36]在两种镉污染程度相近但磷供应水平不同的石灰性土壤研究了小麦吸收镉的特性和机制,结果表明低磷土壤 pH、氧化物结合态镉和有机结合态镉含量显著低于高磷土壤,而可交换态镉含量、土壤碱性磷酸酶和植酸酶活性显著高于高磷土壤,导致低磷土壤小麦籽粒镉含量显著高于高磷土壤. 在低磷土壤中,植物根系向根际土壤释放质子和羧酸盐活化吸附的磷(主要是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)^[37,38],降低了根际土壤 pH,加速了碳酸盐结合态镉的溶解,增加了可交换态镉含量. 姚臻晖等^[39]研究结果表明施用含磷钝化剂,通过与镉生成磷酸盐沉淀,有效降低了土壤有效态镉含量. Li 等^[40]研究发现施用磷肥显著降低了土壤有效态镉含量,归因于:①施用磷肥增加了土壤负电荷和 pH,进而增强了土壤颗粒对镉的吸附;②有效磷的增加促进了土壤中 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{Cd}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH/Cl}$ 等镉沉淀的形成.

3.2 品种对小麦籽粒镉含量的影响

为了小麦安全生产,人们尝试在轻中度镉污染农田筛选和种植低镉积累小麦品种^[11,17]. Zhang 等^[17]在土壤镉含量为 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pH = 7.15)的镉污染土壤种植 8 个小麦品种,其中 6 个小麦品种籽粒镉含量低于食品安全国家标准 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 陈亚茹等^[41]在 261 个小麦品种中筛选出 10 个低镉积累品种种植于土壤镉含量为 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pH = 7.35)的镉污染农田,籽粒镉含量低于食品安全国家标准. 张成等^[42]在土壤镉含量为 $0.610 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH = 6.11 的农田研究不同小麦品种的镉积累特性,20 个小麦品种中仅川育 24、川麦

56、蜀麦 482 和内麦 11 小麦籽粒镉含量低于食品安全国家标准,这 4 个小麦品种种植于当前镉污染农田,可有效控制小麦镉食用风险.由此可见,种植低镉积累小麦品种是实现镉污染农田安全利用的有效措施.不同小麦品种籽粒镉含量和镉富集因子存在差异,综合小麦籽粒镉含量和富集因子,济麦 22 被筛选为低镉积累小麦品种(图 5).济麦 22 是全国推广种植面积最大的小麦品种,2017 年种植面积达 $1.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ (约 1687 万亩),山东种植面积 $8.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ (约 1324 万亩),河北种植面积 $7.91 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约 118 万亩),江苏种植面积 $5.36 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约 80 万亩),安徽种植面积 $4.82 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约 72 万亩),山西种植面积 $4.42 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约 66 万亩),天津种植面积 $1.74 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约 26 万亩),河南种植面积 6.70 km^2 (约 1 万亩).小麦品种的低镉积累与其遗传特性有关,例如转运蛋白的低表达^[43]、较小的根形态参数(根长、表面积和体积)^[44]等,也与其根际分泌物和微生物群落相关^[45].刘娜^[46]研究发现低镉积累小麦品种根际土壤细菌群落中 Gemmatimonadetes、Chloroflexi、Planctomycetes 和 Firmicutes 相对丰度显著高于高镉积累小麦品种.品种是影响小麦籽粒镉含量的重要因素.在中国和印度等一些人口众多的国家,利用重金属污染的农田进行农业生产是不可避免的,种植重金属低积累作物是这些地区实现粮食安全的有效措施.

Meta 分析和决策树分析的结果略有不同,比如 Meta 分析得出阳离子交换量、碱解氮、速效钾等土壤理化性质影响小麦籽粒镉含量,但这些指标在决策树分析中未体现其重要性.这是因为 Meta 分析基于整个数据集分别评估每个因素,而决策树通过顺序进程对因素重要性进行排序.决策树结果表明,土壤理化性质中影响小麦籽粒镉含量的主要因素依次为 pH、有机质、有效磷和土壤全镉含量.

4 结论

小麦籽粒镉含量超标率为:华北-东北地区(7.00%) < 华南-华东地区(25.7%) < 华中地区(78.1%)、西南地区(78.8%).种植低镉积累小麦品种,增加土壤 pH 和有效磷含量,降低土壤有机质和全镉含量可有效降低小麦籽粒镉含量.本研究结果有助于指导小麦安全生产,加强农业污染土壤的控制策略.

参考文献:

- [1] 孟远夺. 我国农田土壤酸化状况与治理措施探讨[J]. 中国农技推广, 2014, 30(6): 38-39.
- [2] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4670-4683.
- [3] Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, et al. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4670-4683.
- [4] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloids accumulation in crop plants and foods [J]. Annual Review of Plant Biology, 2016, 67: 489-512.
- [5] Wu H Y, Liao Q L, Chillrud S N, et al. Environmental exposure to cadmium: health risk assessment and its associations with hypertension and impaired kidney function [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 29989.
- [6] Organization for Economic Co-operation and Development/Food and Agriculture Organization (OECD/FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029 [EB/OL]. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2020-2029_1112c23b-en, 2020-01-01.
- [7] Li X F, Zhou D M. A meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: implications for food cadmium risk control [J]. Pedosphere, 2019, 29(5): 545-553.
- [8] Yang Y, Li Y L, Chen W P, et al. Dynamic interactions between soil cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: regional investigation and risk modeling [J]. Environmental Pollution, 2020, 267, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115613.
- [9] Li L P, Zhang Y Q, Ippolito J A, et al. Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans [J]. Environmental Pollution, 2020, 257, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113641.
- [10] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素 [J]. 环境科学, 2021, 42(4): 2031-2039.
- [11] Chen J, Wang J, Wang Y W, et al. Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 2031-2039.
- [12] 冯亚娟, 黄议漫, 余海英, 等. 籽粒镉低积累小麦材料的筛选及稳定性分析 [J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 842-850.
- [13] Feng Y J, Huang Y M, Yu H Y, et al. Screening of wheat materials with low cadmium accumulation in grains and characteristics of cadmium accumulation [J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(7): 842-850.
- [14] Liu N, Huang X M, Sun L M, et al. Screening stably low cadmium and moderately high micronutrients wheat cultivars under three different agricultural environments of China [J]. Chemosphere, 2020, 241, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125065.
- [15] 夏亦涛. 小麦镉高低积累品种筛选及其镉吸收转运的差异机制 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [16] Xia Y T. Screening of high and low cadmium accumulation *triticum aestivum* varieties and research on the difference and mechanism of cadmium absorption and transport [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [17] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 36-44.
- [18] Xiong Z, Li J M, Zhao H W, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 36-44.
- [19] Rizwan M, Ali S, Abbas T, et al. Cadmium minimization in wheat: a critical review [J]. Ecotoxicology and Environmental

- Safety, 2016, **130**: 43-53.
- [15] 管伟豆. 北方农田土壤重金属镉(Cd)污染区小麦、玉米安全生产阈值研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Guan W D. Study on safety production thresholds of wheat and maize in cadmium polluted farmland soil in the northern area of China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [16] Ran J, Wang D J, Wang C, *et al.* Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil-wheat system[J]. Science of the Total Environment, 2016, **544**: 422-431.
- [17] Zhang L G, Zhang C, Du B Y, *et al.* Effects of node restriction on cadmium accumulation in eight Chinese wheat (*Triticum turgidum*) cultivars [J]. Science of the Total Environment, 2020, **725**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138358.
- [18] Guo G H, Lei M, Wang Y W, *et al.* Accumulation of As, Cd, and Pb in sixteen wheat cultivars grown in contaminated soils and associated health risk assessment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15** (11), doi: 10.3390/ijerph15112601.
- [19] Wang Y L, Xing W Q, Liang X F, *et al.* Effects of exogenous additives on wheat Cd accumulation, soil Cd availability and physicochemical properties in Cd-contaminated agricultural soils: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152090.
- [20] Kong L L, Guo Z H, Peng C, *et al.* Factors influencing the effectiveness of liming on cadmium reduction in rice: a meta-analysis and decision tree analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146477.
- [21] Huang L K, Wang Q, Zhou Q Y, *et al.* Cadmium uptake from soil and transport by leafy vegetables: a meta-analysis [J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114677.
- [22] Yuan C P, Gao B L, Peng Y T, *et al.* A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: importance of soil and biochar properties [J]. Science of the Total Environment, 2021, **756**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144058.
- [23] Crommentuijn T, Doornekamp A, Van Gestel C A M. Bioavailability and ecological effects of cadmium on *Folsomia candida* (Willem) in an artificial soil substrate as influenced by pH and organic matter [J]. Applied Soil Ecology, 1997, **5**(3): 261-271.
- [24] Ardestani M M, Ortiz M D, Van Gestel C A M. Influence of Ca and pH on the uptake and effects of Cd in *Folsomia candida* exposed to simplified soil solutions [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, **32**(8): 1759-1767.
- [25] De Santiago-Martín A, Vaquero-Perea C, Valverde-Asenjo I, *et al.* Impact of vineyard abandonment and natural recolonization on metal content and availability in Mediterranean soils [J]. Science of the Total Environment, 2016, **551-552**: 57-65.
- [26] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils; dependence on pH, total metal burden, and organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(7): 1125-1131.
- [27] Kicińska A, Pomykała R, Izquierdo-Díaz M. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils [J]. European Journal of Soil Science, 2022, **73**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148337.
- [28] Xu T, Nan F, Jiang X F, *et al.* Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium (Ⅲ) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110459.
- [29] Chen W, Peng L, Hu K R, *et al.* Spectroscopic response of soil organic matter in mining area to Pb/Cd heavy metal interaction: a mirror of coherent structural variation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **393**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122425.
- [30] Lu K P, Yang X, Shen J J, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola* [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **191**: 124-132.
- [31] Impellitteri C A, Lu Y F, Saxe J K, *et al.* Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils [J]. Environment International, 2002, **28**(5): 401-410.
- [32] 孙秀敏, 陈琼, 张键, 等. 广东某区农田土壤重金属污染现状及潜在生态风险分析 [J]. 当代化工, 2021, **50**(2): 293-297.
- Sun X M, Chen Q, Zhang J, *et al.* Status of pollution of heavy metals in agricultural soil in an area of Guangdong and assessment of potential ecological risk [J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, **50**(2): 293-297.
- [33] Almås Å R, Singh R B. Plant uptake of Cadmium-109 and Zinc-65 at different temperature and organic matter levels [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(3): 869-877.
- [34] Guerrero N R V, Nahabedian D E, Wider E. Analysis of some factors that may modify the bioavailability of cadmium and lead by *Biomphalaria glabrata* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, **19**(11): 2762-2768.
- [35] Turrión M B, Lafuente F, Mulas R, *et al.* Effects on soil organic matter mineralization and microbiological properties of applying compost to burned and unburned soils [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **95**(S1): S245-S249.
- [36] Ma S J, Nan Z R, Hu Y H, *et al.* Phosphorus supply level is more important than wheat variety in safe utilization of cadmium-contaminated calcareous soil [J]. Journal of Hazardous Material, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127224.
- [37] Lambers H, Clements J C, Nelson M N. How a phosphorus-acquisition strategy based on carboxylate exudation powers the success and agronomic potential of lupines (*Lupinus*, Fabaceae) [J]. American Journal of Botany, 2013, **100**(2): 263-288.
- [38] Lambers H, Hayes P E, Laliberté E, *et al.* Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency [J]. Trends in Plant Science, 2015, **20**(2): 83-90.
- [39] 姚臻晖, 涂理达, 周慧平, 等. 稻田镉污染原位钝化修复及磷积累与迁移特征 [J]. 中国环境科学, 2021, **41**(5): 2374-2379.
- Yao Z H, Tu L D, Zhou H P, *et al.* In situ immobilization remediation of cadmium-contaminated paddy soil and the characteristics of phosphorus accumulation and movement in water-soil environment [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(5): 2374-2379.
- [40] Li J F, Zhang S R, Ding X D. Biochar combined with phosphate fertilizer application reduces soil cadmium availability and cadmium uptake of maize in Cd-contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(17): 25925-25938.
- [41] 陈亚茹, 张巧凤, 付必胜, 等. 中国小麦微核心种质籽粒铅、镉、锌积累差异性分析及低积累品种筛选 [J]. 南京农业大学学报, 2017, **40**(3): 393-399.
- Chen Y R, Zhang Q F, Fu B S, *et al.* Differences of lead, cadmium and zinc accumulation among Chinese wheat mini-core collections germplasms and screening for low Pb, Cd and Zn accumulative cultivars in grains [J]. Journal of Nanjing

- Agricultural University, 2017, **40**(3): 393-399.
- [42] 张成, 李浩, 任树友, 等. 不同小麦品种籽粒对土壤镉吸收差异性的初步研究[J]. 四川农业科技, 2016, (9): 39-41.
Zhang C, Li H, Ren S Y, *et al.* Study on the difference of cadmium uptake in grains of different wheat varieties [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2016, (9): 39-41.
- [43] Qiao K, Wang F H, Liang S, *et al.* New biofortification tool: wheat TaCNR5 enhances zinc and manganese tolerance and increases zinc and manganese accumulation in rice grains[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, **67** (35): 9877-9884.
- [44] Liang X, Strawn D G, Chen J L, *et al.* Variation in cadmium accumulation in spring wheat cultivars: uptake and redistribution to grain[J]. Plant and Soil, 2017, **421**(1-2): 219-231.
- [45] Liu N, Miao Y J, Zhou X X, *et al.* Roles of rhizospheric organic acids and microorganisms in mercury accumulation and translocation to different winter wheat cultivars[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **258**: 104-112.
- [46] 刘娜. 重金属汞/镉低积累小麦品种筛选及根际微环境研究[D]. 青岛: 山东大学, 2020.
Liu N. Screening low-mercury-or low-cadmium-accumulating wheat cultivars and exploring the rhizosphere microenvironment [D]. Qingdao: Shandong University, 2020.

环 境 科 学

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)