

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}-O₃ 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, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 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)
基于高空间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 O₃ 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)
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO₂ 排放模拟 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 卓海华, 姜保锋, 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, 刘辉, 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, 胡愈焯, 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, 张淑娟, 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)
亳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 (*Sinularia microclavata*) 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, 郝欣宇, 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)
不同海拔鳧箭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, 魏卢璐, 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)
磷渣与化肥配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, 薛利祥, 曹国帅 (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)

我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望

李睿^{1,2}, 吴秋梅^{1,2}, 赵归梅^{1,4}, 胡文友^{1,2*}, 田康¹, 黄标^{1,2}, 吴祥为⁵, 刘峰^{2,3}, 赵玉国^{2,3}, 赵永存^{2,3}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 4. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 5. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 粮食安全是“国之大事”. 东北黑土地作为我国重要的粮仓, 是保障国家粮食安全的“压舱石”. 但黑土地农田除草剂的长期高强度施用, 导致除草剂在土壤中积累和迁移, 影响土壤质量、作物产量和品质, 阻碍黑土地可持续利用和农业可持续发展. 解决黑土地农田除草剂残留问题, 既要从源头管控除草剂的施用, 也要掌握除草剂的残留特征、时空演变和驱动因素, 才能做到科学防控、精准施策. 系统总结了我国黑土地农田除草剂的施用状况和存在的问题, 全面梳理了除草剂的残留现状, 指出了当前在黑土地农田除草剂残留特征、空间分布和污染诊断等研究上的不足, 提出了我国黑土地农田除草剂残留诊断与风险管理研究思路与重点方向, 为保障我国黑土地农田土壤健康、粮食安全和生态系统安全提供科技支撑.

关键词: 黑土地; 除草剂; 残留特征; 空间分布; 环境行为; 风险诊断

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2395-14 DOI: 10.13227/j.hjck.202206031

Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China

LI Rui^{1,2}, WU Qiu-mei^{1,2}, ZHAO Gui-mei^{1,4}, HU Wen-you^{1,2*}, TIAN Kang¹, HUANG Biao^{1,2}, WU Xiang-wei⁵, LIU Feng^{2,3}, ZHAO Yu-guo^{2,3}, ZHAO Yong-cun^{2,3}

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 5. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Food security is the top priority of a country. As an important granary in China, the northeast black land is a “ballast” to ensure national food security. However, the long-term and high-intensity application of herbicides in black land farmland has led to the accumulation and migration of herbicides in the soil, which affects soil quality, crop yield, and quality and hinders sustainable agricultural development in the black soil. To solve the problem of herbicide residues in black land farmland, it is necessary to control the application of herbicides from the source, as well as to elucidate the current situation, spatial and temporal evolution, and driving factors of herbicide residues, in order to achieve scientific prevention and control and precise policy implementation. The main contents of this study were as follows: ① systematically summarize the application status and problems of herbicides in the farmland of black soil in China, suggesting that there are currently problems such as irregular application and insufficient product innovation of herbicides in the farmland of black soil; ② comprehensively analyze the current status of herbicide residues, identify the deficiencies in recent studies on herbicide residue characteristics, spatial distribution, and pollution diagnosis in the farmland of black soil, and clarify the gaps in the research on the residue characteristics of herbicides in the farmland of black soil; and ③ propose the research prospect and key orientation for the herbicide residue diagnosis and risk management in the farmland of the black soil region of China. The results of this study can provide science and technology support for guaranteeing soil health, food security, and ecosystem security of black land farmland in China.

Key words: black soil; herbicide; residual characteristics; spatial distribution; environmental fate; risk diagnosis

黑土地是珍贵的土壤资源,也是我国最肥沃的耕作土壤,是国家粮食安全的“压舱石”.我国黑土地区耕地面积约3 583.67万 hm^2 (约5.38亿亩)^[1],分布在辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古的东部,是我国重要的商品粮基地^[2].但是长期重用轻养造成“黑土层变薄、变硬、有机质锐减、结构变差、除草剂大量残留、生产性能降低”等问题,严重威胁黑土地的可持续利用和国家粮食安全.美国、俄罗斯和乌克兰等黑土地丰富的国家已经建立了黑土地资源清单,形成了黑土地质量动态数据库,建立了较为完善的评价体系.目前,我国学者通过多年的系统研究,

也构建了黑土地环境质量评价指标、耕地质量评价指标等体系^[3,4],提出了以黑土层保护为核心的东北黑土地利用和保护建议^[4-8].而在关注提升黑土地土壤肥力、增加有机质含量、减少土壤侵蚀的同时,黑土地农田除草剂的长期大量施用也需引起社会各界的高度关注.

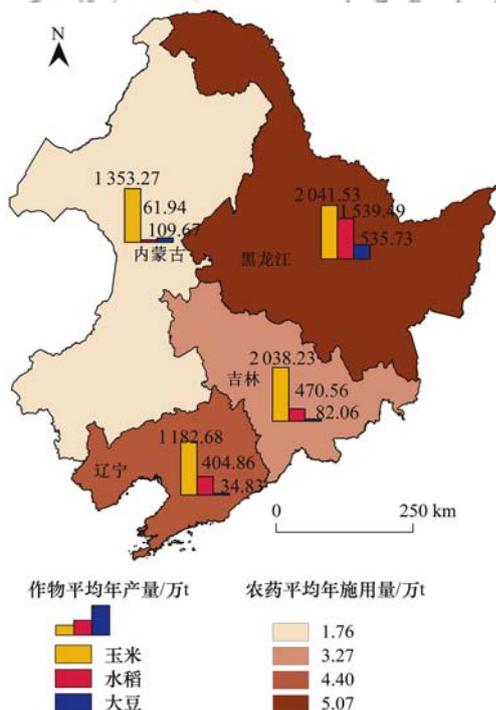
收稿日期: 2022-06-02; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010100); 国家重点研发计划项目(2021YFD1500202)

作者简介: 李睿(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为区域土壤环境质量调查和污染诊断评估, E-mail: rli@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wyhu@issas.ac.cn

东北黑土区巨大粮食供给的背后,除草剂等农药的大量施用成为保障粮食高产的重要条件. 据国家统计局统计数据,2015~2019年黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古的农药年平均施用量分别为7.74、5.54、5.60和3.16万t,粮食平均年产量分别为7490.4、3957.9、2291.1和3403.2万t^[9]. 1991~2019年不同省份农药施用量的统计数据显示,黑龙江农药施用量最高,其玉米、水稻和大豆年产量也处于领先地位(图1). 尽管2015年农业农村部印发了相关行动方案^[10],并达到了农药减量增效的目标,但农药的长期大量施用加重了黑土地农田农药的残留. 近年来农药的有效利用率有所提升,但经测算,2020年我国水稻、小麦和玉米这三大作物农药利用率为40.6%,绝大部分都进入农田及周边的生态环境中^[11]. 黑土地在保证粮食高产的同时,土壤除草剂和农药残留问题也日益突出^[12-14],对土壤质量、农产品安全和人体健康造成潜在威胁. 近年来,因除草剂的残留问题,后茬作物生长期出现黄化和矮化等事件,出现大面积的“癌症田”;土壤理化性质也会因此发生改变,造成土壤的退化,影响土壤健康和土壤生态系统服务功能;部分除草剂还会在农田周边水体和生物中富集,通过食物链(网)的富集作用,对人体健康造成危害.



数据来自国家统计局

图1 1991~2019年我国东北黑土区作物平均年产量和农药平均年施用量

Fig. 1 Average annual crop yield and average annual pesticide application amount in black soil region of northeast China from 1991 to 2019

习近平总书记多次强调“中国饭碗,中国粮食”,2020年在吉林考察时强调,要采取有效措施切实把黑土地这个“耕地中的大熊猫”保护好、利用好. 为深入贯彻总书记关于“把黑土地用好养好”系列指示精神,2021年农业农村部等七部门联合印发的方案明确了国家黑土地保护工程实施内容和分区实施重点^[15]. 2020年农业农村部印发相关计划^[16],旨在全面推广应用保护性耕作,促进东北黑土地保护和农业可持续发展. 此外,以文献^[17]为数据支撑,实施“黑土地保护与利用科技创新工程(黑土粮仓)”,旨在解决我国黑土地保护与利用的关键性科学问题^[18]. 而开展黑土地农田除草剂残留诊断和评估,明确我国黑土地农田土壤除草剂残留现状,是开展除草剂等农药污染防控和风险管理的的前提,也是对黑土地农田除草剂残留进行对症下药、精准施策的关键性步骤.

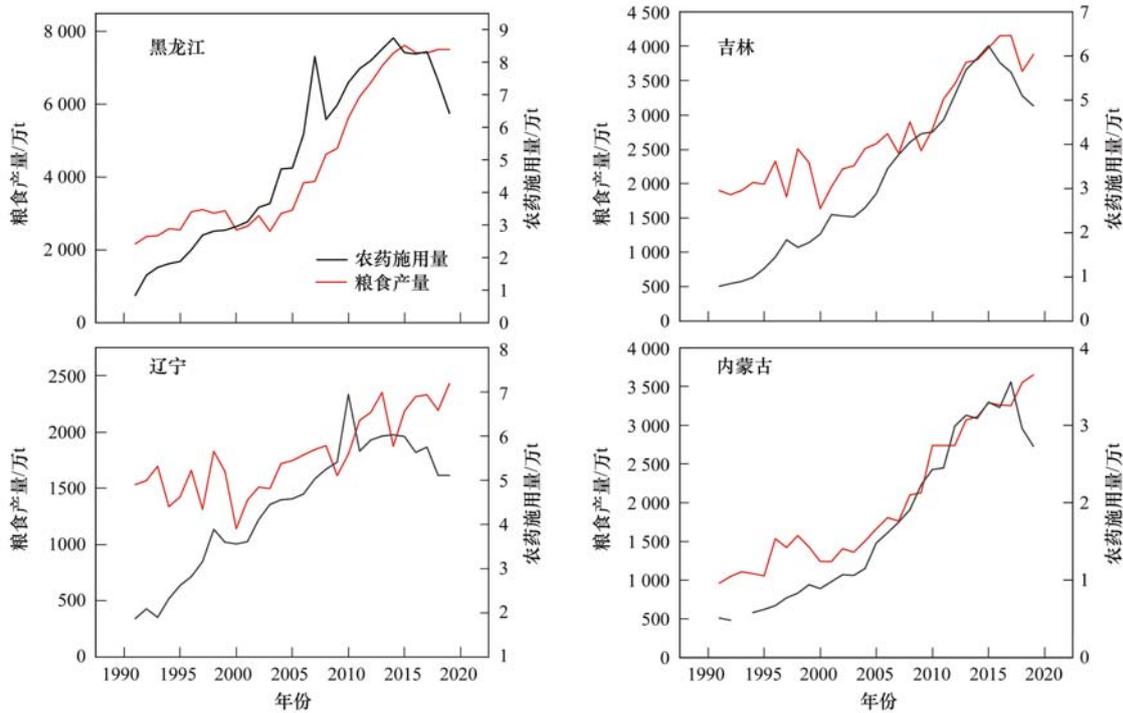
1 我国黑土地农田农药和除草剂施用现状

杂草是威胁农作物生产的有害生物,能够直接或间接地造成病虫害,严重影响粮食产量. 据统计,2002年我国受杂草危害面积超过7553万 hm^2 (约11.33亿亩)^[19],目前我国每年杂草发生9333万 hm^2 (约14亿亩)次以上,造成的粮食损失为300多万t^[20]. 除草剂的产生和发展减轻了农民的劳动强度,提高了作物产量和生产效率,是目前我国最主要的除草方式^[21]. 自20世纪50年代末以来,为解决耕地面积大和劳动力不足等问题,除草剂被引进并迅速发展,用于小麦、大豆和玉米等作物^[22]. 有研究表明,1991~2015年我国农药施用热点区域由东部沿海向中西部和东北地区演变^[23],东北四省(区)的农药施用量总体均为增长的态势,约2016年开始才有下降的趋势^[9](图2). 四省(区)的粮食产量和农药施用量表明,农药的大量施用在一定程度上促进了粮食的高产. 东北地区的农药施用以除草剂为主,杀虫剂和杀菌剂等占比较小,2008~2010年黑龙江的除草剂施用量占农药使用量的85%左右^[24],2017~2018年占比79%左右^[25]. 根据中国农药信息网提供的信息,黑龙江、吉林和辽宁除草剂生产企业占到各省农药企业的61%、68%和61%左右,目前生产的除草剂种类分别为140、133和182种,反映了除草剂在东北黑土地农业生产中的重要地位. 尽管除草剂已被长期广泛应用,但施用过程中仍存在各种问题,导致其负面影响逐渐显现.

目前我国黑土地农田除草剂的施用主要存在以下问题:①农户的除草剂应用技术不够规范,除草剂的科学规范使用未得到普及,导致一味追求“一棵草

不剩”的除草效果,盲目地加大施用量.黑龙江玉米田 82% 以上的农户苗前除草剂的施用量超过推荐施用量^[25],尤其是氯嘧磺隆、氯磺隆和莠去津等长残留性除草剂,对绿色食品生产和农业可持续发展造成了一定阻碍.此外除草作业机械化不规范,喷雾器不标准等,也是喷液量过大的原因.②除草剂更新速度慢,杂

草群落组成和优势种随时间和除草剂的长期使用不断演替,导致目前的除草剂品种无法防除恶性杂草,加之对除草剂的依赖性,成为很多农田除草的一大难题.有研究表明,高活性、作用靶标单一的除草剂的使用会加快杂草的抗药性^[26],而除草效果不佳,农民又会加大剂量,由此形成恶性循环.



数据来自国家统计局

图2 1991~2019年我国东北黑土区粮食产量和农药施用量

Fig. 2 Crop yield and pesticide application amount in black soil region of northeast China from 1991 to 2019

东北黑土地是我国玉米、大豆和水稻等作物的优势主产区.黑土地存在单作和轮作等多种种植体系,目前为了追求高产量,玉米长时间连作现象比较普遍,不同的种植作物和不同的种植体系中施用的除草剂种类和用量各有差异.除草剂分为苗前除草剂和苗后除草剂.调查显示,2018年黑龙江施用苗后除草剂的农户有所增加,而苗前除草剂比例有所减少.市场上出售有除草剂单剂现混和几种除草剂的混剂,农户们根据需求进行选择.尽管单剂种类多于混剂,但因混剂具有更广的杀草范围、更长的除草时效和更高的安全性等特点,越来越受到市场的青睐.目前我国东北黑土地农田常用的除草剂种类繁多,不同除草剂在自身性质、施用方式、施用量和适用农作物等方面差异明显(表1),导致其迁移转化过程和毒害程度也不同.因此有必要查清东北黑土地农田除草剂施用清单、施用历史,科学评估土壤除草剂残留,明确土壤中除草剂残留的驱动因素、迁移转化规律及其环境风险,探索优化作物除草策略,为东北黑土地的可持续利用与保护提供科

学依据.

2 我国黑土地农田除草剂残留及其空间分布特征

农药残留是影响农产品质量安全的重要因素.为加强农药残留检测与农产品质量监管和督促科学规范用药,欧盟、美国、日本和韩国等国家都制定了农药最大残留限量标准.我国于2021年9月开始实施的《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》(GB 2763-2021)是目前统一规定的食品中农药最大残留限量标准,全面覆盖我国批准使用的农药品种和主要植物源性农产品,与2019版GB 2763相比,其对黑土地农田中常用的除草剂(2,4-滴、2甲4氯和精喹禾灵等)残留限量标准进行了修订.而土壤是农田生态系统中农药储存和转运的纽带,土壤中的农药通过转运吸收、食物链等方式在动植物体内积累.土壤圈与生物之间频繁的物质和能量交换,使得土壤质量和农产品安全变得同等重要^[27].近年来,学者们围绕我国东北黑土地除草剂的残留状况开展了调查研究,主要集中在东北黑土区的几个重

表 1 我国东北黑土地农田常用除草剂及其性质

Table 1 Common herbicides and their properties in black soil farmland in northeast China

种类	除草剂	适用农作物	类型	特点	防除杂草类型
单剂	乙草胺 (acetochlor)	玉米 大豆	选择性苗前除草剂	杀草谱广,效果突出,价格低廉,施用方便	一年生禾本科和部分阔叶科杂草
	莠去津 (atrazine)	玉米	苗后早期除草剂	残效期长,易对后茬作物造成药害,水溶性大,易污染地下水	一年生禾本科和阔叶杂草
	灭草松 (bentazone)	玉米 大豆	触杀型、选择性苗后除草剂	高效低毒,杀草谱广,无药害,与其他除草剂混用性好,在土壤中残留期长	阔叶杂草和莎草科杂草
	丁草胺 (butachlor)	水稻	选择性芽前除草剂	杀草活性高,选择性好	一年生禾本科杂草和某些阔叶杂草
	扑草净 (prometryn)	水稻	高选择性内吸性除草剂	杀草谱广,药效长,低毒,化学性质稳定,难降解	多种一年杂草和多年生恶性杂草
	噻吩磺隆 (thifensulfuron methyl)	大豆	内吸传导型苗后选择性除草剂	对大豆安全,但持效期较短	一年生阔叶杂草
	氟磺胺草醚 (fomesafen)	大豆	选择性苗后除草剂	对大豆安全,持效期长,对玉米、高粱和蔬菜等作物敏感,在土壤中残留期长	阔叶杂草和香附子,对禾本科杂草也有一定防效
	噻草酮 (metribuzin)	大豆	内吸选择性苗前除草剂	持效期受气候条件和土壤类型影响;安全性较差,受低洼、潮湿和气候情况影响,容易引发药害	一年生阔叶杂草和部分一年生禾本科杂草
	烟嘧磺隆 (nicosulfuron)	玉米	苗后早期除草剂	杀草谱广,效果好而稳定,杀草除根,对土壤和气候要求不高,施药期较长,对已知玉米品种安全	一年生禾本科杂草和若干阔叶杂草
	草甘膦 (glyphosate)	玉米	苗后中晚期除草剂	杀草活性高,杀草谱广,较低的土壤残留,控草时间长	一年生杂草和多年生恶性杂草
	丙草胺 (pretilachlor)	水稻	芽前除草剂	对水稻安全,杀草谱广	一年生禾本科和阔叶科杂草
	吡嘧磺隆 (pyrazosulfuron-ethyl)	水稻	选择性内吸传导型除草剂	药效稳定,安全性高	一年生和多年生阔叶杂草和莎草科杂草
	西玛津 (simazine)	玉米	内吸选择性除草剂	难溶于水和大多数有机溶剂的固体,性质稳定,持效期长,对后茬作物有影响	一年生阔叶杂草和部分禾本科杂草
	苄嘧磺隆 (bensulfuron methyl)	水稻	选择性内吸传导型除草剂	对水稻安全,使用方法灵活	一年生和多年生阔叶杂草和莎草
混剂	硝磺·莠去津	玉米	苗后早期除草剂	抗旱抗高温,安全性高,杀草谱广,除草不复发	大部分阔叶杂草和部分禾本科杂草
	烟嘧·莠·氯吡	玉米	苗后茎叶除草剂	对玉米安全,防治效果突出,见效快	一年生禾本科杂草和阔叶杂草
	苄嘧·苯噻酰	水稻	选择性内吸传导型除草剂	对水稻安全,持效期长,内吸性强,渗透力强	一年生及部分多年生杂草
	乙·噻·滴辛酯	玉米 大豆	苗前除草剂	低毒,药效持久,高效安全	多种一年生杂草
	硝·烟·莠去津	玉米	苗后早期茎叶处理除草剂	杀草谱广,持效期长,杀草效果快	大部分一年生阔叶杂草和部分禾本科杂草
	噻草·丙草胺	水稻	选择性触杀内吸传导型除草剂	对水稻安全,杀草谱广,高效,使用方便	多种一年生杂草
	噻酮·乙草胺	玉米 大豆	苗后除草剂	对作物安全,成本低,使用方便,不影响下茬作物	多种一年生禾本科杂草和阔叶杂草
烟嘧·乙·莠	玉米	选择性内吸传导型苗后除草剂	对玉米选择性强,杀草谱广,持效期长	部分一年生阔叶杂草和禾本科杂草	

点城市,调查对象主要为酰胺类和三嗪类除草剂等(表2)。如蔡霖^[28]通过调查东北地区辽河平原、松嫩平原和三江平原的部分农业区 110 种农药残留状况,发现东北农业区土壤中农药总残留量高达 80.70~2 799.10 ng·g⁻¹,其中辽宁省部分地区的

生态风险较大。而更多的研究则是聚焦于某一个省、某一种作物和某一种或几种除草剂。如于晓斌^[29]检测了吉林 28 个县的玉米种植区在不同季节,不同深度的土壤中莠去津和乙草胺的残留分布特征,发现两种除草剂的分布强度均表现为吉

表 2 基于文献调研的我国黑土地农田主要除草剂残留特征

Table 2 Characteristics of main herbicide residues in black soil farmland in China based on literature research

省份/地区	研究对象	除草剂种类	残留量/情况	检测方法	文献
黑龙江密山地区	大豆田土壤(0~45 cm)	氟磺胺草醚、灭草松和烯草酮等	氟磺胺草醚: 3.34 ~ 67.84 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 灭草松: 6.27 ~ 56.03 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	QuEChERS 前处理; 超高效液相色谱-质谱法(UPLC-MS)	[30]
黑龙江鸡西市兴凯湖	草地、林地、大豆田、水稻田和用于处理农业排水自然湿地的土壤(0~10 cm)和地表水	丁草胺和乙草胺	大豆田土壤中乙草胺残留量最高; 稻田土壤丁草胺残留量最高; 两种除草剂在农田排水中都显著富集	气相色谱-质谱法(GC-MS)	[32]
辽宁铁岭市	玉米田、水稻田和蔬菜田土壤(0~20 cm)	莠去津、乙草胺和丁草胺	莠去津: 0.14 ~ 21.20 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 乙草胺: 0.53 ~ 203.20 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 丁草胺: $\text{nd} \sim 30.87 \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	气相色谱-质谱法(GC-MS)	[31]
辽宁沈阳市郊区大潘镇附近	农田土壤(0~20 cm)	三嗪类除草剂	莠去津、西玛津、扑草净和莠去津的降解产物(脱乙基脱异丙基莠去津 DEDIA 和脱乙基莠去津 DEA)在该地区农田土中广泛检出,也在玉米样品中被检出	高效液相色谱法(HPLC)	[33]
辽宁新民市辽河流域采样站	河水和饮用水	三嗪类除草剂	使用药物后的几个月,河水中除草剂显著上升,莠去津浓度达到 1.60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 在所有饮用水样品中都发现了除特丁津之外的所有检测的三嗪类除草剂	固相萃取; 气相色谱-质谱法(GC-MS)	[34]
辽宁沈阳市南部郊区	农田土壤(0~10 cm)	丁草胺等 114 种农药	丁草胺残留量为 0 ~ 22.08 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 检出率 71.4%	超声波溶剂萃取; 气相色谱-质谱法(GC-MS)	[35]
辽宁沈阳市郊区	水田、旱田和菜田土壤(0~20 cm)	莠去津、丁草胺、禾大壮和有机氯农药等	各类农田土壤中丁草胺和阿特拉津等除草剂低于最低检出限	气相色谱法(GC)	[36]
辽宁太子河流域	地表水、地下水	西玛津	地表水中的浓度为 35.00 ~ 1150.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 240.26 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	固相萃取; 气相色谱-质谱法(GC-MS)	[37]
吉林长春、白城、松原、四平、吉林和辽源 28 个县	玉米田土壤(0~30 cm)	莠去津和乙草胺	莠去津与乙草胺各土层平均残留量分别为 18.00 ~ 116.00 和 10.00 ~ 240.00 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	固相萃取; 气相色谱法(GC)	[29]
吉林乾安县和公主岭市玉米主产区	地下水和附近的玉米田土壤(0~15 cm)	莠去津及其代谢物 DEA、脱异丙基莠去津(DIA)和羟基莠去津(HA)	乾安县: 莠去津、DEA 和 HA 的地下水平均浓度分别为 137.90、1.00 和 0.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 土壤中残留量为 11.40、0.40 和 1.30 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 公主岭市: 莠去津、DEA 和 HA 的地下水平均浓度分别为 63.10、0.70 和 0.10 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 土壤中残留量为 10.70、0.30 和 17.00 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	高效液相色谱-二级质谱法(UPLC-MS/MS)	[38]
东辽河流域	旱田区和非旱田区地表水体	莠去津	旱田区地表水: 4.52 ~ 17.50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 非旱田区地表水: 4.50 ~ 17.50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	有机溶剂萃取; 高效液相色谱法(HPLC)	[39]
松花江流域	农田、草地、林地和裸地土壤(0~20 cm)	莠去津和乙草胺	乙草胺平均残留量: 农田 26.10 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 草地 1.76 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 林地 1.46 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 裸地 2.48 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 莠去津平均含量残留量: 11.28 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 草地为 0.51 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 裸地 0.13 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	气相色谱法(GC)	[40]
松花江流域	沉积物(0~10 cm)和河岸土壤(0~20 cm)	乙草胺	丰水期土壤样本乙草胺检出率 100%, 在河岸土壤中的残留量为 0.47 ~ 709.37 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 远高于沉积物	超声波萃取; 气相色谱法(GC)	[41]
辽河平原、松嫩平原和三江平原部分地区	水稻、玉米和大豆田土壤(0~20 cm)	莠去津、西玛津、乙草胺和丁草胺等 110 种农药	东北农田区农药总残留量: 80.70 ~ 2799.10 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 辽宁莠去津残留量: 0.41 ~ 191.66 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 乙草胺残留量: 2.59 ~ 495.83 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	QuEChERS 前处理; 高效液相色谱-二级质谱法(HPLC-MS/MS)和气相色谱-质谱法(GC-MS)	[28]
黑龙江、吉林和辽宁等 20 个地区	温室(种植豆类、蔬菜等)和附近露地土壤(0~20 cm)	莠去津	东北地区污染较严重, 哈尔滨温室土壤中残留量最高	气相色谱-质谱法(GC-MS)	[42]

续表 2

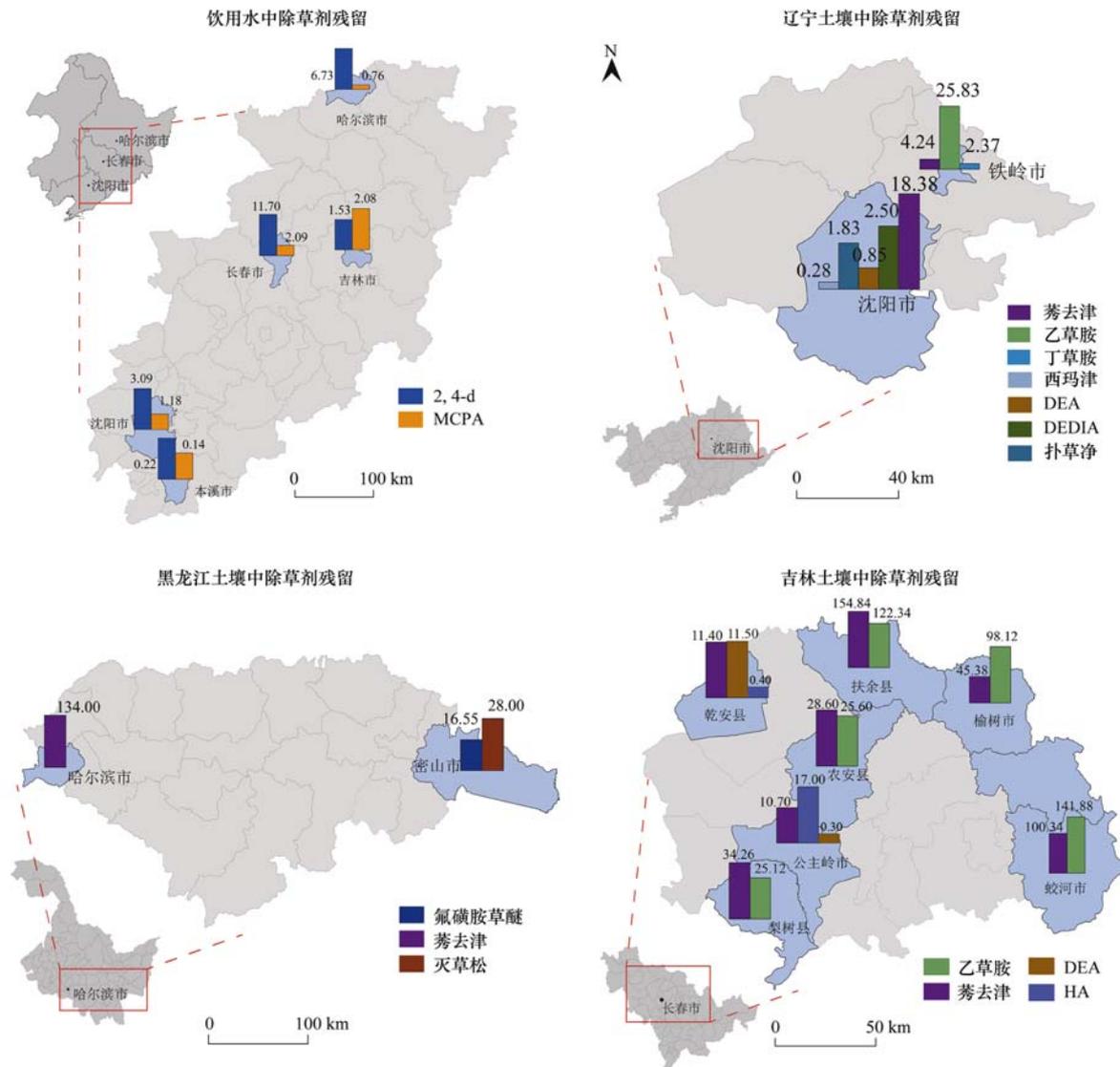
省份/地区	研究对象	除草剂种类	残留量/情况	检测方法	文献
香港和 31 个省份的省会城市、中小城市和农村	饮用水(包括自来水和地下水)	氯苯氧基类除草剂(CPHs), 包括 2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)和 2-甲基-4-氯苯氧乙酸(MCPA)	东北地区(黑龙江、吉林和辽宁) CPHs 检出率为 82.7%, \sum CPHs 的残留量中值($3.95 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)为全国最高;可能主要归因于玉米和水稻种植区大量使用除草剂	液相色谱法;电喷雾三重四极杆质谱法	[43]
香港和 32 个省份的省会城市、中小城市和农村	饮用水(包括自来水和地下水)	莠去津及其代谢物(ATZs)	\sum ATZs 残留量(范围: $0.44 \sim 3.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 中位数: $254.00 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)在中国东北部最高	固相萃取; Waters 三重四极质谱法	[44]
我国重点流域水体, 包括松花江流域和黑龙江流域等	地表水	29 种农药, 包括西玛津、莠去津、乙草胺、扑草净和噻草酮等	松花江流域和黑龙江流域莠去津与乙草胺污染最严重, 其他除草剂也都有检出	固相萃取; 气相色谱法(GC)	[45]
中国 36 个重点城市	水源水、出厂水	乙草胺	东北地区(黑龙江、吉林和辽宁)浓度平均值达到 $196.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 远高于其他地区; 松花江中浓度平均值为 $22.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 辽河中浓度平均值为 $171.90 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$	固相萃取; 气相色谱-质谱法(GC-MS)	[46]
辽宁和内蒙古的水产养殖场或水库	代表性鱼类等水产品	33 种农药(包括杀虫剂、杀菌剂和除草剂)	辽宁水产品中莠去津的残留量最高(范围为 $0.50 \sim 8.00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $2.30 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 利谷隆残留量为第二高; 内蒙古水产品中利尿隆残留量最高(范围为 $0.60 \sim 6.00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $2.80 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 乙草胺也是常见污染物	液相色谱-质谱法(LC-MS/MS)	[47]

林中东部地区高于西部地区, 各土层中莠去津和乙草胺最大残留量变化范围为 $169.00 \sim 295.00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10.00 \sim 235.00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 黑龙江密山地区大豆田土壤中氟磺胺草醚残留量范围为 $3.34 \sim 67.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 灭草松为 $6.27 \sim 56.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [30]. 莠去津和乙草胺在辽宁农田土壤中全部检出, 最大残留量分别为 $21.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $203.18 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 丁草胺检出率相对较低[31].

除草剂的长期大量施用除了可以导致其在土壤中残留和积累以外, 一些水溶性较强的除草剂可以随着降水或地表径流进入地下水或者地表水, 破坏水体生态平衡, 人饮用后也会影响身体健康. 如一些地区地表水及地下水中的莠去津残留量达 $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 足以杀死水底节肢动物[48]. 有学者估计农田中施用的莠去津有 0.3%~1.9% 的量通过各种渠道进入水体[49]. 目前国内外学者都关注到地下水和地表河流等水生生态系统中除草剂及其代谢物残留, 在美国 >5% 的水井中检测到了莠去津等几种长期使用的农药及其降解产物[50]. 据调查, 东辽河流域旱田施用的莠去津已经严重影响了流域地表水的水质, 一年中莠去津含量最大值可达 $18.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 东辽河流域的生态环境遭到破坏[39]. 为发展农业经济, 河岸带被开发用作农业种植, 降低了河岸土地的生态效应, 增大了土壤转移的风险, 有研究检测了松花江流域河岸农田土壤中的乙草胺和莠去

津残留量, 分别为 $26.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $11.28 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ [40]. 自来水是世界许多国家包括中国最常见的饮用水, 其摄入是人类接触除草剂的主要途径之一, 国际上针对世界不同地区饮用水中的莠去津含量已经展开了研究[51~53]. 近年来, 有关我国自来水中除草剂浓度的多项调查和研究结果显示, 我国东北地区饮用水中的典型除草剂含量在全国范围内处于较高水平[43~46], 可能导致人体每日除草剂的摄入量水平也较高. Sun 等[43] 的研究结果表明, 氯苯氧基类除草剂的人体每日摄入量在我国东北地区最高.

将近年来有关我国黑土区除草剂残留的调查结果进行整理和绘制(图 3), 发现现有对黑土地农田土壤除草剂残留的研究仅为零星区域和部分污染物, 且多为县级以下或小区域尺度, 针对整个东北黑土区或者省域尺度的研究缺乏. 黑龙江、辽宁和内蒙古相较于吉林, 除草剂残留分布研究空白区较多. 目前研究中关注的除草剂种类也相对有限, 多为莠去津、乙草胺和灭草松等, 其它多种除草剂类型尚未涵盖在调查清单之内. 土壤除草剂残留诊断与评价主要围绕土壤背景值(标准或基准含量)或人体健康风险评估开展, 且多以单项污染物指标为主[54~56]. 由于在黑土地农田除草剂残留及其对土壤质量退化负面效应方面研究较少, 导致土壤除草剂残留空间分布信息极度缺乏, 土壤除草剂诊断与评价方法不完善. 此外, 东北黑土区除草剂在河流沉积



柱状图数值单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 饮用水数据来源于文献[43], 土壤数据来源于文献[29~31,33,38,42]

图3 我国东北不同省份农田饮用水和土壤中除草剂残留空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of herbicide residues in agricultural drinking water and soils in different provinces of northeast China

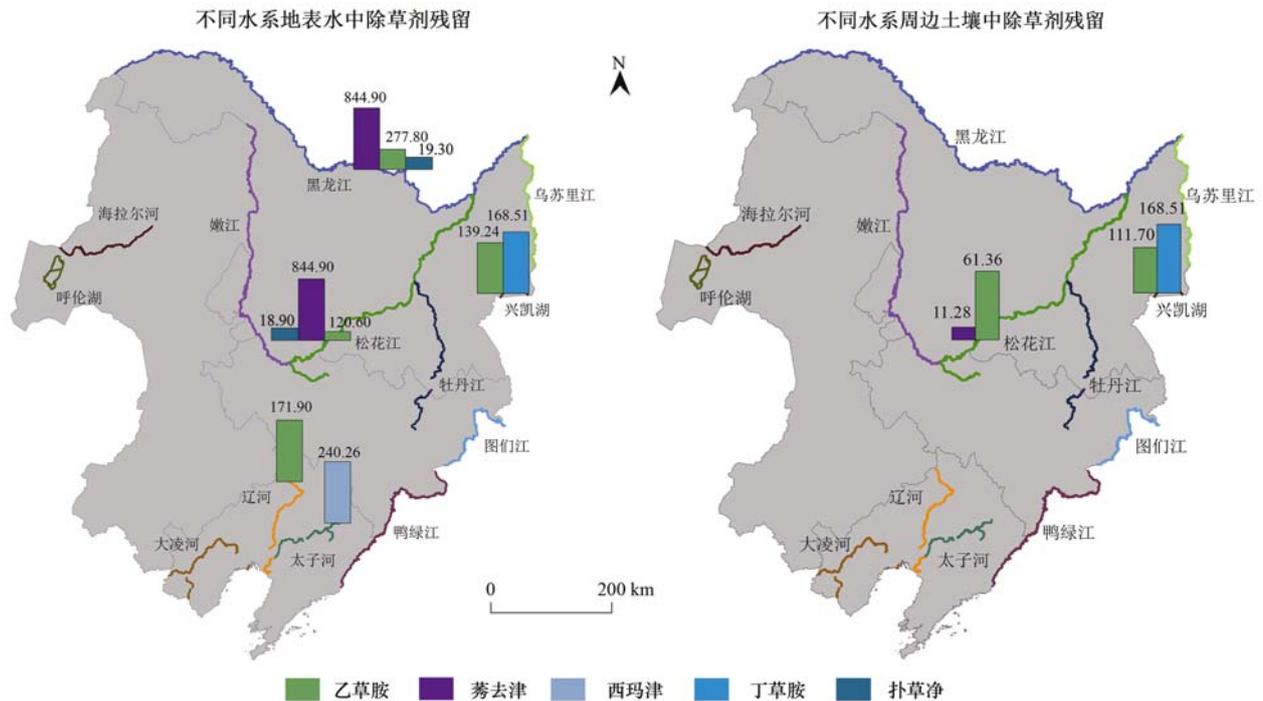
物、地表水和地下水中的分布特征已有相关报道, 但研究数量十分有限(图4), 且污染物种类具有较大的局限性, 未将其他可能污染的除草剂包括在内. 有研究表明^[34,44,46,47], 辽河和黑龙江等重要水系遭受了不同程度的除草剂残留污染, 导致除草剂最终在自来水和市场鱼类等地方富集, 威胁人体健康.

3 我国黑土地农田除草剂残留研究进展

3.1 黑土地农田土壤中除草剂的环境行为

土壤是除草剂的一个重要归宿场所, 被称作农药的“贮藏库”; 同时除草剂带来的环境污染和生态毒理问题也愈来愈严峻. 因此研究除草剂的环境行为, 明确其污染规律, 可为除草剂科学合理的使用和生态污染修复提供数据支撑, 为新品种除草剂的研发提供理论指导^[57]. 除草剂的基本性质、施用历史与方式、土壤的理化性质和自然环境条件等是影响

除草剂环境行为与污染生态效应的因素^[58]. 目前针对除草剂的吸附解析和降解等环境行为已经进行了大量研究, 但多聚焦于单一过程, 对多过程耦合作用研究较为有限^[59]. 除草剂的吸附过程是多种因素共同作用的结果, 一般认为土壤的有机质含量是重要因素之一, 吸附常数 K_f 与土壤有机质和黏粒含量呈正相关^[60~62]. 有研究表明, 腐殖酸会与除草剂发生共吸附现象, 形成腐殖酸-除草剂复合体, 削弱除草剂向下淋溶的能力, 增大土壤中污染物的持留量^[63]. 此外, 除草剂本身的理化性质、土壤的 pH 值、离子强度、温度和表面活性剂等也都影响除草剂的吸附, 但目前各种吸附机制的相对贡献尚未有明确的定论. 有关除草剂的消解动态和残留规律的研究已经趋向成熟, 普遍认为其降解过程遵循一级动力学方程^[64~67]. 基于东北地区广泛的黑土分布以及特殊的气候条件, 黑土中高含量的有机质和黏粒矿



柱状图数值单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 数据来源文献[32,37,40,41,45,46]

图4 我国东北黑土区典型水系地表水和周边土壤除草剂残留空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of herbicide residues in surface water and surrounding soils of typical water systems in black soil region of northeast China

物对除草剂的吸附、降解和迁移转化等过程分别造成何种程度的影响,高寒低温的气候条件与季节性冻融农田土壤是否是除草剂环境行为的驱动因素,以上研究问题都有待开展。

此外,对污染物环境行为的研究多围绕单一污染物展开,而土壤是一个多组分体系,污染物之间的相互影响和作用会导致其行为与单独存在时有所差别.因此,研究多成分污染物成分共存下污染物的环境行为更接近实际情况^[68].东北农田现代作物栽培中,农药的联合施用是一项常规的农业生产条件,这些污染物进入土壤后,不同分子之间的耦合作用是否会对生态系统中除草剂的降解消散等行为和毒性产生影响,这是人们需要重点关注的问题.作为常用的玉米田苗后除草剂混剂成分,莠去津和乙草胺在混合溶液中的吸附行为随着土壤性质的不同表现出竞争、无影响和协同作用^[69].此外杀菌剂在土壤的降解潜力中也起着主导作用,农药混施时杀菌剂可能会抑制除草剂的生物降解^[70].近年来,持久性有机污染物和微塑料等新型污染物成为了研究热点,它们加剧了土壤中合成化学品共存的复杂性.目前,微塑料-有机农药复合污染受到了学者们的关注,已有研究揭示了可降解微塑料在不同的环境条件下对有机农药具有相对稳定的吸附能力^[71-73],两种常见微塑料聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)会加剧除草剂在土壤中的残留以及迁移至地表水的风险^[74].东

北黑土地农田生态系统中,除了除草剂外,地膜微塑料也是使用最广泛、最持久的人为污染物之一^[75],研究微塑料-除草剂复合污染的环境行为和健康风险,有利于完善农田除草剂风险评估框架.综上,要体现土壤除草剂污染的形成过程、驱动机制和风险效应等研究的客观真实性,不能仅基于对个别的、单独的污染物进行研究。

此外,有研究发现^[76],一些除草剂的中间代谢产物具有较强的环境稳定性,经迁移转化之后,会对环境造成较大危害.因此除草剂及其代谢产物复合污染的环境行为研究,对除草剂的残留诊断、风险评估和科学防控具有重要意义.莠去津的两种主要代谢产物脱乙基莠去津(DEA)和脱异丙基莠去津(DIA)相比母体,具有毒性和水溶性更强、与土壤成分作用更弱的特点^[76].这些水溶性较强的除草剂及其降解产物在土壤-水系统中的迁移转化过程备受学者们的关注,近几十年来,一些欧美国家在地下水和河流等水生生态系统中不同程度地检测到了莠去津及其代谢物^[49,50,77].东北地区水系发达,亟需系统研究黑土耕作区除草剂在地表水和地下水中的迁移转化规律,理清除草剂性质、土壤类型、耕作制度和水文条件等对其迁移的贡献比及相应的驱动机制,为开展生态污染风险评估奠定基础。

3.2 黑土地农田除草剂残留的生态效应与环境风险
联合国 2030 年可持续发展目标 (sustainable

development goals, SDGs) 所涵盖的 17 项宏伟目标中,有 13 项目标直接或间接与土壤有关^[78],其囊括了土壤生态系统对于人类生产生活的两个关键影响方面,即粮食安全和环境污染防控.如今,农业在向质量效益型转变的过程中,长残留除草剂是种植业结构调整和土地自然生产力恢复的重要阻碍^[79].随着除草剂的广泛应用,国内外学者对除草剂的生态风险评估进行了较为系统的研究.早期研究主要聚焦生物个体生理响应,定性地评估除草剂风险,例如根据人体暴露于除草剂环境的概率和持续时间分析得出卵巢癌与三氮苯类除草剂之间有显著的相关性^[80];利用体内/体外实验研究除草剂的生物毒理学,例如实验发现莠去津可造成动物的代谢器官损伤^[81],损伤人和动物的淋巴细胞染色体^[82]和中枢神经系统^[83].近年来,现代生物技术的发展使学者们关注微观层面上分子生物方面的研究,在基因表达、生物酶活性、土壤酶活性响应、土壤群落结构组成、多样性、分布和生物标志物的选定等方面取得了不少进展^[84~87].利用土壤微生物分子生态技术进行物种多样性、遗传多样性、结构多样性和功能多样性等土壤生物学研究^[86,88~93].此外在高水平层次上生物(动植物和微生物等)群落的生态效应或

宏观尺度上更加复杂的生态系统功能方面,完善综合污染的生态风险评估体系^[94],开发定量预测模型也是最新进展^[95].

东北黑土地农田长期复杂的除草剂施用情况及其在国家粮食生产方面的重要性,使得对除草剂生态效应的研究成为迫切的任务之一,尤其是黑土地土壤除草剂长期残留对区域土壤质量退化和粮食安全的研究.以除草剂对土壤生态功能的影响为根本,以建立土壤生态系统的综合生态风险评估体系为核心,以确立土壤除草剂的生态安全阈值为突破,以暴露风险与毒性预测模型为手段,以细胞分子、生物个体、种群和群落对除草剂的响应机制为补充,建立完善的东北黑土地农田土壤除草剂风险评价技术体系.

4 我国黑土地农田除草剂残留研究展望

目前,相关部门致力于实现我国黑土地可持续利用,服务于国家粮食安全建设与现代农业发展,并取得了重大进展.推动科技创新,用好养好黑土地,保障国家粮食安全,协调水土资源与生态环境,是当前亟待解决的科学问题(图 5).我国黑土地由于农业生产中除草剂的长期大量施用导致其在农田土壤

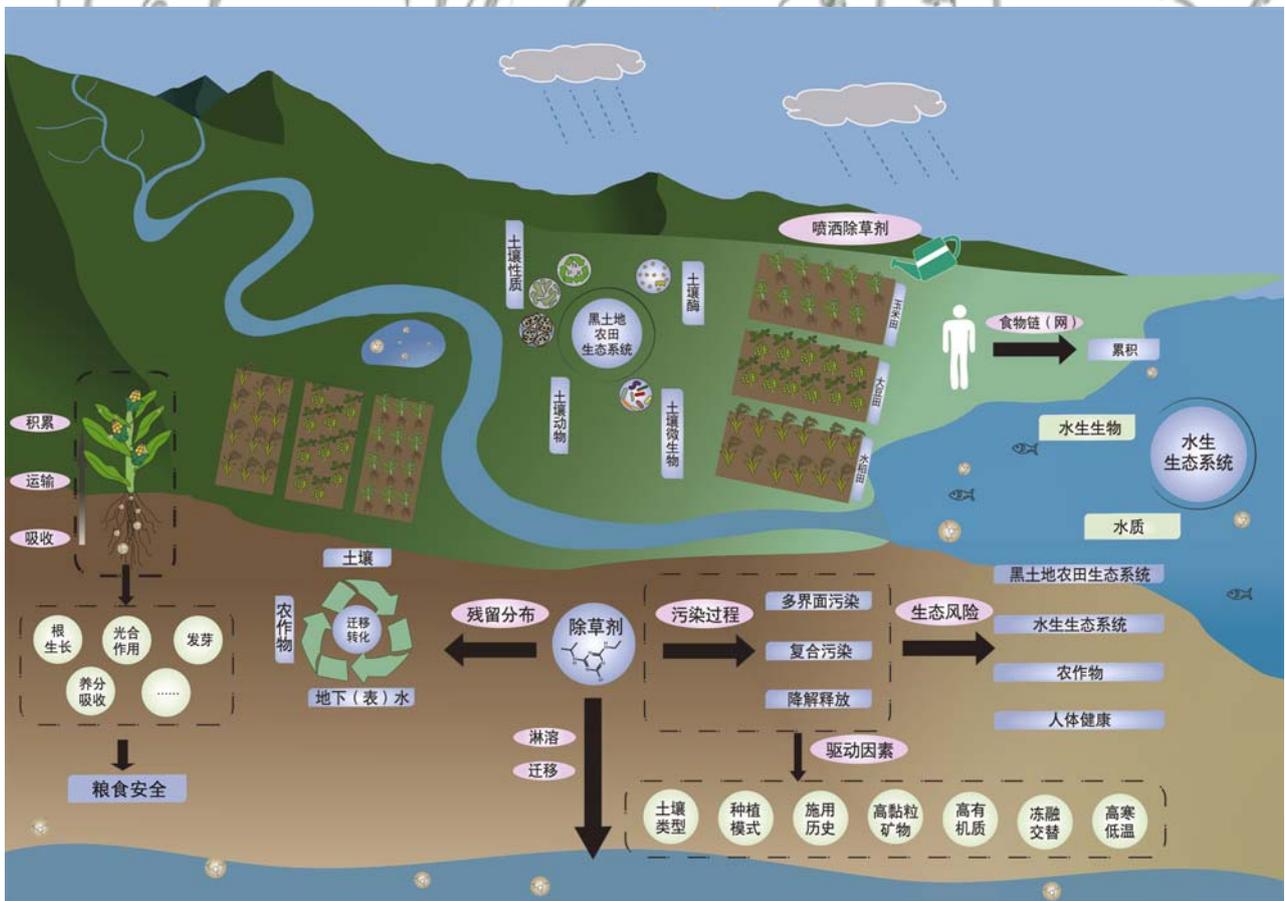


图 5 我国黑土地农田除草剂残留特征与风险管理研究框架体系

Fig. 5 Research framework of the herbicide residue characteristics and risk management in black soil region of China

中不断残留和累积,对黑土地农田土壤质量、粮食安全和人体健康造成潜在威胁。目前我国黑土地农田除草剂在残留现状和污染清单、时空演变过程和驱动机制、生态效应和风险管理等方面的研究尚不完善,缺乏对整个黑土区农田除草剂施用、除草剂残留、污染诊断和风险评价等方面的全面系统性认识。现有针对黑土区土壤除草剂残留与评价的研究,主要是围绕局部地区和部分污染物类型开展,对黑土地土壤除草剂长期残留造成的区域土壤质量退化和粮食安全风险的负面效应研究较少,缺乏整个黑土区农田土壤除草剂残留的整体和系统性调查和研究,更缺乏有效的土壤除草剂残留诊断方法与评价技术,难以满足黑土地农田除草剂污染防控及风险管理需求。

建议未来加强黑土地农田除草剂施用历史、现状和清单调查,土壤中除草剂的残留特征、时空演变和驱动力,除草剂多介质迁移和环境归趋以及农田除草剂残留的生态环境效应和风险管理等方面的研究(图5)。通过对黑土地农田除草剂施用历史和现状调查,明确黑土地农田优先控制除草剂类型,构建黑土地农田除草剂污染管控的源投入清单,调整和优化除草策略;采用时空序列对比、时空替代、情景分析和过程模型等方法,研究黑土区农田除草剂残留特征、时空演变和关键驱动因素,甄别影响黑土地农田除草剂残留的主控因子及其驱动机制;通过构建和优化统一的检测方法 with 评价标准,研究并建立黑土地农田土壤除草剂残留诊断方法、空间分布预测和风险评价技术体系,减少结果差异化,形成黑土地农田土壤除草剂残留类型、清单及其空间分布数据库;通过除草剂在区域复杂介质和多界面的迁移转化规律及环境风险研究,明确除草剂对农田生态系统、食物链和人体健康的影响及潜在风险,提出黑土地农田土壤除草剂污染分区、分类和分级管理模式及污染精准阻控策略;同时加强黑土地农田除草剂污染相关监管标准和法律法规的制定,为我国黑土地保护与可持续利用提供科学依据和决策支撑。并以上述工作为基础,研发功能材料,创新除草剂消减阻控技术,构建除草剂污染消减技术体系,为我国黑土粮仓粮食安全与生态系统安全提供科技支撑。

参考文献:

- [1] 全国农业技术推广服务中心,农业部耕地质量监测保护中心,沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京:中国农业出版社,2017.
- [2] 中华人民共和国农业农村部,国家发展改革委,财政部,等. 东北黑土地保护规划纲要(2017-2030年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nygbh/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm, 2021-07-09.
- [3] 姜宁,王斌,谢永刚. 黑龙江省黑土地质量评价指标体系构建[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(33): 98-104.
Jiang N, Wang B, Xie Y G. Construction of black soil quality evaluation index system in Heilongjiang Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(33): 98-104.
- [4] 姚东恒,裴久渤,汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, **28**(1): 104-114.
Yao D H, Pei J B, Wang J K. Temporal-spatial changes in cultivated land quality in a black soil region of northeast China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, **28**(1): 104-114.
- [5] 韩晓增,邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, **58**(6): 1341-1358.
Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(6): 1341-1358.
- [6] 姜明,文亚,孙命,等. 用好养好黑土地的科技战略思考与实施路径——中国科学院“黑土粮仓”战略性先导科技专项的总体思路与实施方案[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(10): 1146-1154.
Jiang M, Wen Y, Sun M, et al. Thinking and implementation approach of science and technology strategy of well-raising black soil—overall idea and implementation planning of strategy priority research program of Chinese academy of sciences on black soil conservation and utilization [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, **36**(10): 1146-1154.
- [7] 李保国,刘忠,黄峰,等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(10): 1184-1193.
Li B G, Liu Z, Huang F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, **36**(10): 1184-1193.
- [8] 张佳宝,孙波,朱教君,等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(10): 1155-1164.
Zhang J B, Sun B, Zhu J J, et al. Black soil protection and utilization based on harmonization of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland-sandy land ecosystems and strategic construction of ecological barrier [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, **36**(10): 1155-1164.
- [9] 国家统计局农村社会经济调查司. 2020 中国农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
- [10] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318_6309945.htm, 2015-03-18.
- [11] 袁会珠,杨代斌,闫晓静,等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, **37**(5): 14-20.
Yuan H Z, Yang D B, Yan X J J, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application [J]. Plant Protection, 2011, **37**(5): 14-20.
- [12] 陈文晶,王志刚,徐伟慧,等. 邻苯二甲酸酯污染对黑土转化酶与脲酶反应动力学的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, **30**(9): 1555-1560.
Chen W J, Wang Z G, Xu W H, et al. Effect of phthalate esters contamination on urease and invertase reaction kinetics of black soil [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, **30**(9): 1555-1560.
- [13] 高凤杰,王鑫,韩晶,等. 东北黑土区小流域耕地土壤重金

- 属污染特征及健康风险评价: 以海沟河小流域为例[J]. 中国农业大学学报, 2020, **25**(8): 73-83.
- Gao F J, Wang X, Han J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and its health risk assessment in a mollisul watershed of northeast China: Taking Haigou watershed as study case[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, **25**(8): 73-83.
- [14] 宋恒飞, 吴克宁, 李婷, 等. 寒地黑土典型县域土壤重金属空间分布及影响因素分析——以海伦市为例[J]. 土壤通报, 2018, **49**(6): 1480-1486.
- Song H F, Wu K N, Li T, *et al.* The spatial distribution and influencing factors of farmland heavy metals in the cold black soil region: a case of Hailun County [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(6): 1480-1486.
- [15] 中华人民共和国农业农村部. 国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025年)[J]. 中国农业综合开发, 2021, (8): 4-11.
- [16] 中华人民共和国农业农村部, 中华人民共和国财政部. 东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/18/content_5492795.htm, 2020-02-25.
- [17] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[EB/OL]. https://www.cas.cn/yw/202107/t20210709_4797892.shtml, 2021-07-09.
- [18] 中国科学院. “黑土粮仓”科技会战[EB/OL]. <https://www.cas.cn/zt/kjzt/hlcc/>, 2021-07-10.
- [19] 张朝贤. 我国农田杂草发生概况及防除对策[A]. 见: 提高全民科学素质、建设创新型国家——2006中国科协年会论文集(下册)[C]. 北京: 中国科学技术协会学会学术部, 2006.
- [20] 农民日报·中国农网. 第15届全国杂草科学大会提出——强化科技支撑推进草害综合治理[EB/OL]. http://www.agri.cn/V20/SC/jjps/202110/t20211026_7772486.htm, 2021-10-26.
- [21] 赵长山, 何付丽, 闫春秀. 黑龙江省化学除草现状及存在问题[J]. 东北农业大学学报, 2008, **39**(8): 136-139.
- Zhao C S, He F L, Yan C X. Current status and problems of chemical weed control in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, **39**(8): 136-139.
- [22] 苏少泉. 我国东北地区除草剂使用及问题[J]. 农药, 2004, **43**(2): 53-55.
- Su S Q. Problems with herbicide use in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Pesticides*, 2004, **43**(2): 53-55.
- [23] 郭利京, 王颖. 我国农药施用的时空演变[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(14): 327-331.
- Guo L J, Wang Y. Study on temporal and spatial evolution of China's pesticide application [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(14): 327-331.
- [24] 胡凡, 朴英, 王洪武, 等. 黑龙江省除草剂使用情况的调查研究[J]. 农学学报, 2015, **5**(1): 25-31.
- Hu F, Piao Y, Wang H W, *et al.* The investigation of the usage of herbicide in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Agriculture*, 2015, **5**(1): 25-31.
- [25] 王宇, 滕春红, 刘兴龙, 等. 黑龙江省玉米除草剂施用现状[J]. 玉米科学, 2021, **29**(3): 70-75.
- Wang Y, Teng C H, Liu X L, *et al.* Current status of herbicide implementation in maize in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, **29**(3): 70-75.
- [26] Heap I M. The occurrence of herbicide-resistant weeds worldwide [J]. *Pesticide Science*, 1997, **51**(3): 235-243.
- [27] 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 等. 农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 454-462.
- Wu S Z, Wang D Y, Li W B, *et al.* Risk zoning of heavy metals in a peri-urban area in the black soil farmland based on agricultural products [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 454-462.
- [28] 蔡霖. 东北农业区土壤中农药残留特征及风险识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Cai L. Residues and risk identification of pesticides in soil in northeast agricultural region of China [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [29] 于晓斌. 吉林省玉米种植区耕层土壤中莠去津和乙草胺残留分布特征及风险评价[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- Yu X B. Distribution characteristics and risk assessment of atrazine and acetochlor residues in topsoil of maize producing area in Jilin Province [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.
- [30] 张可鑫, 张金艳, 王亚飞. 密山地区大豆田除草剂残留的空间分布[J]. 农药, 2020, **59**(1): 56-59.
- Zhang K X, Zhang J Y, Wang Y F. The spatial distribution of herbicide residues in soybean fields in Mishan area [J]. *Agrochemicals*, 2020, **59**(1): 56-59.
- [31] 王万红, 王颜红, 王世成, 等. 辽北农田土壤除草剂和有机氯农药残留特征[J]. 土壤通报, 2010, **41**(3): 716-722.
- Wang W H, Wang Y H, Wang S C, *et al.* Residual characteristics of herbicides and organochlorine pesticides in agricultural soils in northern Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(3): 716-722.
- [32] Yu X F, Zheng S J, Zheng M J, *et al.* Herbicide accumulations in the Xingkai lake area and the use of restored wetland for agricultural drainage treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2018, **120**: 260-265.
- [33] Wang X C, Liu Q L. Spatial and temporal distribution characteristics of triazine herbicides in typical agricultural regions of Liaoning, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **105**(6): 899-905.
- [34] Gfrerer M, Wenzl T, Quan X, *et al.* Occurrence of triazines in surface and drinking water of Liaoning Province in eastern China [J]. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 2002, **53**(1-3): 217-228.
- [35] Shi R G, Lv J G, Feng J M. Assessment of pesticide pollution in suburban soil in south Shenyang, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **87**(5): 567-573.
- [36] 仲夏, 索丽珍, 于凤玲. 沈阳市农田土壤农药残留水平[J]. 农村生态环境, 1996, **12**(4): 58-60.
- Zhong X, Suo L Z, Yu F L. The pesticide residues in farmland soils of Shenyang [J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, **12**(4): 58-60.
- [37] Li L L, Zhang Y Z, Zheng L, *et al.* Occurrence, distribution and ecological risk assessment of the herbicide simazine: a case study [J]. *Chemosphere*, 2018, **204**: 442-449.
- [38] Geng Y, Ma J, Jia R, *et al.* Impact of long-term atrazine use on groundwater safety in Jilin Province, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**(2): 305-313.
- [39] 严登华, 何岩, 王浩. 东辽河流域地表水体中 Atrazine 的环境特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 203-208.
- Yan D H, He Y, Wang H. Environmental characteristics of the atrazine in the waters in east Liaohe River Basin [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(3): 203-208.
- [40] Sun X Y, Zhou Q X, Ren W J. Herbicide occurrence in riparian soils and its transporting risk in the Songhua River Basin, China

- [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, **33**(4): 777-785.
- [41] Sun X Y, Zhou Q X, Ren W J, *et al.* Spatial and temporal distribution of acetochlor in sediments and riparian soils of the Songhua River Basin in Northeastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1684-1690.
- [42] Dou R N, Sun J T, Deng F C, *et al.* Contamination of pyrethroids and atrazine in greenhouse and open-field agricultural soils in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **701**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134916.
- [43] Sun Y F, Cao M L, Wan Y J, *et al.* Spatial variation of 2,4-D and MCPA in tap water and groundwater from China and their fate in source, treated, and tap water from Wuhan, Central China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, **727**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138691.
- [44] Wang A Z, Hu X, Wan Y J, *et al.* A nationwide study of the occurrence and distribution of atrazine and its degradates in tap water and groundwater in China: assessment of human exposure potential [J]. *Chemosphere*, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126533.
- [45] 徐雄, 李春梅, 孙静, 等. 我国重点流域地表水中 29 种农药污染及其生态风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(2): 347-354.
Xu X, Li C M, Sun J, *et al.* Residue characteristics and ecological risk assessment of twenty-nine pesticides in surface water of major river-basin in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 347-354.
- [46] 于志勇, 金芬, 李红岩, 等. 我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1694-1697.
Yu Z Y, Jin F, Li H Y, *et al.* Residual levels of acetochlor in source water and drinking water of China's major cities [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1694-1697.
- [47] Fu L, Lu X B, Tan J, *et al.* Multiresidue determination and potential risks of emerging pesticides in aquatic products from northeast China by LC-MS/MS [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **63**: 116-125.
- [48] 弓爱君, 叶常明. 除草剂阿特拉津(Atrazine)的环境行为综述[J]. *环境科学进展*, 1997, **5**(2): 38-48.
Gong A J, Ye C M. Behavior of herbicide Atrazine in environment [J]. *Advances in Environmental Science*, 1997, **5**(2): 38-48.
- [49] Frank R, Sirons G J. Atrazine: its use in corn production and its loss to stream waters in southern Ontario, 1975-1977 [J]. *Science of the Total Environment*, 1979, **12**(3): 223-239.
- [50] Bexfield L M, Belitz K, Lindsey B D, *et al.* Pesticides and pesticide degradates in groundwater used for public supply across the United States: occurrence and human-health context [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(1): 362-372.
- [51] Almqvist K S, Turyk M E, Jones R M, *et al.* Atrazine contamination of drinking water and adverse birth outcomes in community water systems with elevated atrazine in Ohio, 2006-2008 [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(9), doi: 10.3390/ijerph15091889.
- [52] Padhye L P, Yao H, Kung'u F T, *et al.* Year-long evaluation on the occurrence and fate of pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disrupting chemicals in an urban drinking water treatment plant [J]. *Water Research*, 2014, **51**: 266-276.
- [53] Xu C, Chen L, You L H, *et al.* Occurrence, impact variables and potential risk of PPCPs and pesticides in a drinking water reservoir and related drinking water treatment plants in the Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2018, **20**(7): 1030-1045.
- [54] 崔健, 都基众, 马宏伟, 等. 沈阳市城郊表层土壤有机污染评价[J]. *生态学报*, 2012, **32**(24): 7874-7882.
Cui J, Du J Z, Ma H W, *et al.* Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(24): 7874-7882.
- [55] 刘媚媚, 高凤杰, 韩晶, 等. 黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, **25**(11): 12-21.
Liu M M, Gao F J, Han J, *et al.* Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a mollisol watershed of China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, **25**(11): 12-21.
- [56] 王粟, 史风梅, 裴占江, 等. 松嫩平原农田土壤污染现状分析与评价——以黑龙江省绥化地区为例[J]. *东北农业大学学报*, 2015, **46**(5): 75-83.
Wang S, Shi F M, Pei Z J, *et al.* Evaluation and analysis of farmland soils pollution status of Songnen Plain: for example Suihua area of Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, **46**(5): 75-83.
- [57] 张伟. 五种磺酰脲类除草剂在土壤中的环境行为[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
Zhang W. Environmental fates of five sulfonylurea herbicides in soils [D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [58] 华小梅, 单正军. 我国农药的生产, 使用状况及其污染环境因子分析[J]. *环境科学进展*, 1996, **4**(2): 33-45.
Hua X M, Shan Z J. The production and application of pesticides and factor analysis of their pollution in environment in China [J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, **4**(2): 33-45.
- [59] 任文杰, 滕应, 骆永明. 东北黑土地农田除草剂污染过程与消减技术研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2022, **59**(4): 888-898.
Ren W J, Teng Y, Luo Y M. Research progress and perspective on the pollution process and abatement technology of herbicides in black soil region in northeastern China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(4): 888-898.
- [60] 李克斌, 陈经涛, 魏红, 等. 表面活性剂和土壤有机质对莠去津在土壤上吸附的相互影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(8): 119-124, 131.
Li K B, Chen J T, Wei H, *et al.* Mutual effect of surfactant and soil organic matters on the absorption of atrazine in soils [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2008, **36**(8): 119-124, 131.
- [61] 李克斌, 刘广深, 刘维屏. 酰胺类除草剂在土壤上吸附的位置能量分布分析[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(4): 574-580.
Li K B, Liu G S, Liu W P. Site-energy distribution analysis for adsorption of selected acetanilide herbicides in soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(4): 574-580.
- [62] Liu Y H, Xu Z Z, Wu X G, *et al.* Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various chinese cultivated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **178**(1-3): 462-468.
- [63] 张瑾, 司友斌. 腐植酸对除草剂胺苯磺隆在红壤中淋溶迁移的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1645-1649.
Zhang J, Si Y B. Effect of humic acid on the leaching and movement of ethametsulfuron-methyl in red soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(5): 1645-1649.
- [64] 郭敏, 单正军, 石利利, 等. 三种磺酰脲类除草剂在土壤中的降解及吸附特性[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(6): 1459-1464.

- Guo M, Shan Z J, Shi L L, *et al.* Degradation and adsorption characteristics of three sulfonylurea herbicides in different soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(6): 1459-1464.
- [65] 王姗姗, 王颜红, 王万红, 等. 阿特拉津和乙草胺在玉米和土壤中残留动态研究[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(5): 1231-1235.
- Wang S S, Wang Y H, Wang W H, *et al.* Study on the residue dynamics of Atrazine and acetochlor in maize and soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(5): 1231-1235.
- [66] Beestman G B, Deming J M. Dissipation of acetanilide herbicides from soils[J]. *Agronomy Journal*, 1974, **66**(2): 308-311.
- [67] Kucharski M, Dzia-gwa M, Sadowski J. Monitoring of acetochlor residues in soil and maize grain supported by the laboratory study [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2014, **60**(11): 496-500.
- [68] Martins J M, Mermoud A. Sorption and degradation of four nitroaromatic herbicides in mono and multi-solute saturated/unsaturated soil batch systems [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, **33**(1-2): 187-210.
- [69] 李克斌, 魏红, 陈经涛, 等. 灭草松和莠去津在土壤中的竞争吸附[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1164-1171.
- Li K B, Wei H, Chen J T, *et al.* Competitive adsorption between bentazone and atrazine in soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(7): 1164-1171.
- [70] Schaeffer A, Wijntjes C. Changed degradation behavior of pesticides when present in mixtures [J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, **1**(1): 23-30.
- [71] Gong W W, Jiang M Y, Han P, *et al.* Comparative analysis on the sorption kinetics and isotherms of fipronil on nondegradable and biodegradable microplastics [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.095.
- [72] Hüffer T, Metzelder F, Sigmund G, *et al.* Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 242-247.
- [73] Jiang M Y, Hu L Y, Lu A X, *et al.* Strong sorption of two fungicides onto biodegradable microplastics with emphasis on the negligible role of environmental factors [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115496.
- [74] Zhou J, Wen Y, Cheng H G, *et al.* Simazine degradation in agroecosystems: will it be affected by the type and amount of microplastic pollution? [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, **33**(7): 1128-1136.
- [75] 丁凡, 严昌荣, 汪景宽. 黑土地保护中不容忽视的一个问题: 地膜残留及其污染[J]. *土壤通报*, 2022, **53**(1): 234-240.
- Ding F, Yan C R, Wang J K. An overlooked issue in black soil protection: plastic film accumulation and pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(1): 234-240.
- [76] Mudhoo A, Garg V K. Sorption, transport and transformation of atrazine in soils, minerals and composts: a review [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(1): 11-25.
- [77] Pucarević M, Šovljanski R, Lazić S, *et al.* Atrazine in groundwater of Vojvodina Province[J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5120-5126.
- [78] 张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 124-134.
- Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions”: soil functions for realization of sustainable development goals [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 124-134.
- [79] 赵长山, 何付丽. 长残留性除草剂与黑龙江省农业的未来发展[J]. *东北农业大学学报*, 2007, **38**(1): 136-139.
- Zhao C S, He F L. Effects of long residue herbicides on agricultural development of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, **38**(1): 136-139.
- [80] Donna A, Crosignani P, Robutti F, *et al.* Triazine herbicides and ovarian epithelial neoplasms [J]. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1989, **15**(1): 47-53.
- [81] 栾新红, 丁鉴峰, 孙长勉, 等. 除草剂阿特拉津影响大鼠脏器功能的毒理学研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2003, **34**(6): 441-445.
- Luan X H, Ding J F, Sun C M, *et al.* Toxicological effects of herbicide atrazine on visceral function in rats [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2003, **34**(6): 441-445.
- [82] Roloff B D, Belluck D A, Meisner L F. Cytogenetic studies of herbicide interactions *in vitro* and *in vivo* using atrazine and linuron [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1992, **22**(3): 267-271.
- [83] Podda M V, Deriu F, Solinas A, *et al.* Effect of atrazine administration on spontaneous and evoked cerebellar activity in the rat [J]. *Pharmacological Research*, 1997, **36**(3): 199-202.
- [84] 张家俊. 土壤中除草剂毒草胺的迁移行为和阿特拉津对水稻幼苗生物毒性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- Zhang J J. Mobility of herbicide propachlor in soils and biotoxicity of atrazine to rice seedlings (*Oryza Sativa*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [85] Wang J J, Zhang H W, Zhang X L, *et al.* Effects of long-term chlorimuron-ethyl application on the diversity and antifungal activity of soil *Pseudomonas* spp. in a soybean field in Northeast China[J]. *Annals of Microbiology*, 2013, **63**(1): 335-341.
- [86] Zhang X L, Li X, Zhang C G, *et al.* Ecological risk of long-term chlorimuron-ethyl application to soil microbial community: an in situ investigation in a continuously cropped soybean field in Northeast China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(3): 407-415.
- [87] Zhang X L, Li X, Zhang C G, *et al.* Responses of soil nitrogen-fixing, ammonia-oxidizing, and denitrifying bacterial communities to long-term chlorimuron-ethyl stress in a continuously cropped soybean field in Northeast China[J]. *Annals of Microbiology*, 2013, **63**(4): 1619-1627.
- [88] 郭立群. 除草剂氯嘧磺隆长期重复投入对土壤微生物的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- Guo L Q. Effects of longterm and repeated application of herbicide chlorimuron-ethyl on soil microbes [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [89] 王辰, 宋福强, 孔祥仕, 等. 阿特拉津残留对黑土农田中 AM 真菌多样性的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, **31**(2): 174-180.
- Wang C, Song F Q, Kong X S, *et al.* Effects of atrazine residues on the diversity of AM fungi in black soil farmland[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31**(2): 174-180.
- [90] Liu Y F, Fan X X, Zhang T, *et al.* Effects of the long-term application of atrazine on soil enzyme activity and bacterial community structure in farmlands in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114264.
- [91] Li X Y, Zhang H W, Wu M N, *et al.* Impact of acetochlor on ammonia-oxidizing bacteria in microcosm soils [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(9): 1126-1131.
- [92] Yang F S, Gao M Y, Lu H G, *et al.* Effects of atrazine on chernozem microbial communities evaluated by traditional detection and modern sequencing technology [J]. *Microorganisms*, 2021, **9**(9), doi: 10.3390/

microorganisms9091832.

- [93] Yang F S, Yang S Y, Xu J L, *et al.* Dynamic response of soil enzymes and microbial diversity to continuous application of atrazine in black soil of a cornfield without rotation in Northeast China [J]. *Diversity*, 2021, **13** (6), doi: 10.3390/d13060259.
- [94] Awuah K F, Jegede O, Hale B, *et al.* Introducing the adverse

ecosystem service pathway as a tool in ecological risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54** (13): 8144-8157.

- [95] Jiang R, Wang M E, Chen W P, *et al.* Ecological risk of combined pollution on soil ecosystem functions: insight from the functional sensitivity and stability[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113184.

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-qi, 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-ping, 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-ling, <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)