

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响

刘沅^{1,2}, 汪祖丞^{1,2*}, 刘美华^{1,2}, 张天宇^{1,2}, 王健³

(1. 东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024; 2. 东北师范大学国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 保护性耕作能够显著提高土壤有机质, 改善土壤质量, 但是关于保护性耕作如何影响农药等污染物在土壤中残留的研究却较为匮乏, 而土壤污染又与粮食安全息息相关。因此, 选择 7 个实验地点, 针对传统耕作与保护性耕作两种耕作方式下土壤中 3 种除草剂(乙草胺、阿特拉津和二甲四氯钠)残留特征进行了分析。结果表明, 保护性耕作显著影响土壤的总有机碳含量、土壤含水率和土壤团聚体平均粒径等性质[使(2.1 ± 0.1)%、(19.1 ± 1.2)%和(82.2 ± 3.0) μm 分别增加至(2.9 ± 0.3)%、(22.3 ± 1.5)%和(97.2 ± 4.2) μm]。研究进一步发现, 保护性耕作对不同除草剂在土壤中残留的影响存在差异性。例如, 保护性耕作通过影响土壤总有机碳含量显著增加东丰试验田土壤中阿特拉津的含量[使(3.8 ± 0.3) ng·g⁻¹ 增加至(17.7 ± 3.0) ng·g⁻¹], 通过影响土壤团聚体平均粒径显著降低德惠试验田土壤中乙草胺的含量[使(50.6 ± 10.3) ng·g⁻¹ 降低至(9.2 ± 2.5) ng·g⁻¹]。然而, 由于不同土壤性质对土壤中除草剂迁移和降解的复杂作用, 保护性耕作对除草剂的影响仍存在较大的不确定性。

关键词: 保护性耕作; 除草剂; 玉米田; 土壤; 残留特征

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6257-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210033

Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil

LIU Yuan^{1,2}, WANG Zu-cheng^{1,2*}, LIU Mei-hua^{1,2}, ZHANG Tian-yu^{1,2}, WANG Jian³

(1. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountains, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: It is well known that conservation tillage can improve soil quality, such as soil organic matters. However, limited information on the conservation tillage impacts on pesticides has been reported, which is important to food security. To explore the specific effects of conservation tillage on herbicide residues in soils, parallel soil samples from seven sites under traditional tillage and conservation tillage were collected, respectively, in Jilin Province, Northeast China. The soil properties and characteristics of three herbicides (acetochlor, atrazine, and MCPA-Na) were measured. The results showed that conservation tillage significantly increased total organic carbon (TOC) content, soil water content, and the average particle size of soil aggregates [(2.1 ± 0.1)%, (19.1 ± 1.2)%, and (82.2 ± 3.0) μm increased to (2.9 ± 0.3)%, (22.3 ± 1.5)%, and (97.2 ± 4.2) μm, respectively]. The results also showed that different herbicides were correlated with different soil properties. For example, TOC content and soil water content were positively correlated with atrazine, whereas micro-aggregate content was negatively correlated with acetochlor. Therefore, the effects of conservation tillage on the three herbicide residues were different. For instance, conservation tillage significantly increased the residual amount of atrazine [from (3.8 ± 0.3) ng·g⁻¹ to (17.7 ± 3.0) ng·g⁻¹] in the Dongfeng site by increasing TOC content, whereas it significantly reduced the residual amount of acetochlor [from (50.6 ± 10.3) ng·g⁻¹ to (9.2 ± 2.5) ng·g⁻¹] in the Dehui site by increasing the average particle size of soil aggregates. Generally, this study suggests conservation tillage indeed affected herbicide residues in soils by affecting soil properties. However, the influence of conservation tillage on herbicide residue was dependent on the types of herbicides due to the complex effects of different soil properties on herbicide migration and degradation.

Key words: conservation tillage; herbicide; maize field; soil; residue characteristics

我国是一个农业大国, 玉米作为我国第一大粮食作物, 占我国粮食储备的 40%。位于黄金玉米带上的吉林省是玉米产出大省, 2020 年吉林省的玉米总产量为 2 973.4 万 t, 占全国玉米总产的 11.4%, 因此吉林省的玉米产量对我国粮食安全的保证具有重大意义。为了确保玉米产量, 农药在田间大量使用, 2010 ~ 2015 年, 吉林省农药的使用量逐年增加, 从 42 784 t 增加至 62 285 t。吉林省自 2016 年起实施《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》以来, 农田农药用量逐渐降低, 但依然处于高位。其中除草剂作为一种既能除杂草, 又不影响农作物生长的化学药剂, 因具有高效、方便和经济等特点, 成为了玉米种植过程中使用量最大的一类农药^[1,2]。然而, 长期过量的使用除草剂会使其残留在土壤中, 导致土壤

质量下降, 并降低作物产量^[3,4], 同时易溶于水的除草剂也会随地表径流迁移至河流中或者向下垂直迁移至地下水中, 造成水体污染^[5-8]。此外, 土壤中的除草剂还能通过粮食进入人体, 破坏神经系统的正常功能, 降低人体免疫力, 增加致癌风险^[9-11]。

吉林省的玉米种植多采取传统的耕作方法, 即利用机械、畜力和人工在一定深度上营造出松软的耕层, 但由于长期翻耕和焚烧秸秆会使表层土壤暴露, 破坏土壤结构, 从而造成土壤侵蚀^[12,13], 因此吉林省近年来逐渐在玉米种植中推广保护性耕作。保

收稿日期: 2022-10-06; 修订日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771497, 42171076)

作者简介: 刘沅(2000 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤有机污染物赋存特征, E-mail: liuy588@nenu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangzc100@nenu.edu.cn

护性耕作是一种通过免耕或少耕的方式,使土壤受到最小的干扰,同时使作物秸秆覆盖地面,降低土壤的风蚀和水蚀,从而增强土壤的肥力和耐旱性的一种耕作技术^[14,15],既能改善土壤结构,提高土壤有机质含量,提高土壤肥力,又能避免焚烧农作物秸秆造成的大气污染^[16].截至2020年,吉林省已实现总体达到100万 hm^2 保护性耕作面积的目标,并计划在各个县区每年建设5个保护性耕作示范区^[17].

由于土壤中除草剂的环境行为受到土壤性质的极大影响,因此保护性耕作能够通过改变土壤环境和土壤性质,影响土壤农药的归趋^[18~20].然而,目前对保护性耕作如何影响土壤中除草剂的环境行为仍存在争议.有研究认为秸秆还田下秸秆覆盖会拦截部分新施加的除草剂进入土壤,增大其光解速率,但同时也由于秸秆覆盖遮挡阳光,对进入土壤和土壤中原有除草剂的光解速率产生抑制作用,使得除草剂残留于土壤中^[18];也有研究认为秸秆覆盖能够增加土壤中的微生物量,从而增强除草剂的降解速率,降低土壤除草剂的残留量;然而秸秆覆盖地表导致的较低的温度和较高的酸度也可能降低微生物的活性^[19,21],同时秸秆还田带来的丰富的碳也会推迟除草剂作为碳源的使用^[19],从而降低了微生物对除草剂的分解速率,增加除草剂在土壤中的残留时间.此外,保护性耕作也能够增加土壤有机质^[22],加强土壤对除草剂的吸附作用,进一步增加土壤中除草剂的残留时间.因此本研究选择了吉林省主要玉米种植区内的7个地点,进行保护性耕作和传统耕作的对比研究,目的是探讨保护性耕作对土壤除草剂残留的影响及其可能的原因,以期为后续指导农业生产提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的采样点位于吉林省玉米主要种植区内,玉米主要种植区位于 $40^\circ \sim 46^\circ \text{N}$, $125^\circ \sim 128^\circ \text{E}$ 之间,是世界三大黄金玉米带之一^[4].种植区内的土壤大多都是黑土和黑钙土,年日照充足,将近3000 h,降水丰沛,年均降水400~800 mm,无霜期130~150 d,大于 10°C 积温为2850~3150 $^\circ \text{C}$,无论是土壤条件还是气候条件都对玉米生长有利.玉米主要种植区内的耕地面积占吉林省耕地面积的75.1%,玉米年产量占吉林省玉米年产量的82%^[4].

在吉林省大力推进保护性耕作的背景下,中国农业大学、中国科学院、市县农技农机推广部门和农民合作社等成立了国家黑土地保护与利用科技创

新联盟.依托吉林梨树试验站,吉林省一些农民合作社在梨树站相关技术人员的指导下,开展了保护性耕作生产模式的探索.为了让农民更愿意推广保护性耕作方式,在技术人员的指导下,很多合作社在同一地块进行了保护性耕作和传统耕作两种耕作方式的对比.在试验地块,保护性耕作采取秸秆全量还田覆盖归行免耕播种,即秋季秸秆覆盖地表-深松(秋季)-归行(春季)-免耕播种(春季).保护性耕作和传统耕作采用相同的农药使用量和喷洒方式,以阿特拉津(atrazine)、乙草胺(acetochlor)和二甲四氯钠(MCPA-Na)混合使用为主,一年两次,分别在5月10日前后和6月10日前后喷洒施用.传统耕作的地块在播种时一次性施肥,使用量约为氮肥280 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷肥125 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和钾肥115 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.保护性耕作地块在播种时施基肥,化肥使用量约为氮肥150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷肥70 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和钾肥65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在6月施用除草剂前再进行一次追肥,化肥使用量约为氮肥80 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷肥35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和钾肥30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.尽管未调查保护性耕作开始前土壤中的除草剂残留,但是考虑到保护性耕作地块和传统耕作地块之前同处一个地块,其耕作方式和施药施肥方式相同,因此两者土壤中的除草剂残留应大致相当.

1.2 样品采集与处理

本研究于2020年9月17日和20日,在吉林省的长岭、德惠、农安、梨树、榆树、东丰和九台这7个地点与当地农村合作社的试验地块合作,分别采集了传统耕作方式和保护性耕作方式下的表层(0~10 cm)土壤样品,每种耕作方式随机采集3~6个平行样,样点分布如图1所示.其中长岭、东丰和九台地区实施保护性耕作年限为5 a,梨树、德惠、农安和榆树地区实施保护性耕作年限为3 a,采样期间无明显降水,属于玉米生长末期.土壤样品采回后置于冰箱4 $^\circ \text{C}$ 保存.取适量新鲜土样放在干净且不吸水的玻璃板上,去除石块和树枝等杂质,测土壤含水率.剩余土壤样品冷冻干燥,研磨过筛(60目)待测.

1.3 样品测定

1.3.1 土壤性质测定

(1) 土壤含水率($W\text{-H}_2\text{O}$)测定 先对带盖容器的质量(m_0)进行称量,得到结果后取新鲜土壤样品放入容器中,盖好盖子,继续称得总质量 m_1 ,然后去掉盖子,将其放置于烘箱,温度 105°C 下烘干直到质量不发生变化,将容器盖也烘至干燥,放到干燥器里进行冷却,然后将其取出,称得带上盖子的容器和已经干燥的土壤的总质量为 m_2 ,从而计算得到土壤含水率,计算公式如下:

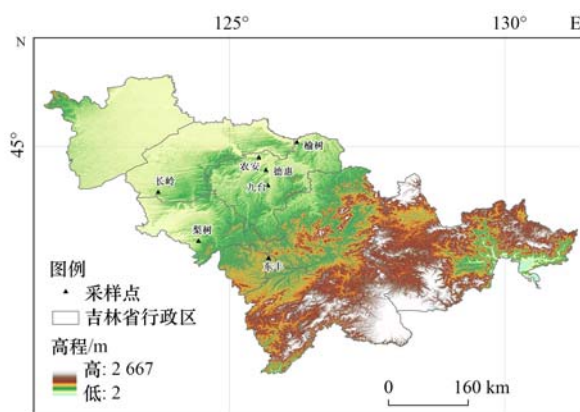


图1 吉林省玉米田土壤采样点分布

Fig. 1 Soil sampling sites in maize field of Jilin Province

$$W-H_2O = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 土壤总有机碳含量(TOC)和土壤总氮含量(TN)测定 向冷冻干燥研磨后的土壤样品中加入适量 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸溶液进行去除无机碳, 重复 2~3 次, 直至无气泡反应产生. 将处理后的土壤样品用超纯水洗至中性后烘干, 取 2~3 mg 土壤样品进行包样, 利用 EA3000 元素分析仪(Euro Vector, 意大利)进行土壤总有机碳含量(TOC)和土壤总氮含量(TN)的测定.

(3) 土壤团聚体粒径分析 取 1 g 左右待测样品用 20 mL 蒸馏水浸润 24 h 后, 加入六偏磷酸钠分散, 然后置于 S3500 激光粒度分析仪(Microtrac, 美国)中测定土壤团聚体粒径组成.

1.3.2 除草剂提取与测定

利用气相色谱-质谱法测定 3 种除草剂, 使用的仪器为 ISQ-QD300 气相色谱质谱联用仪(美国 Thermofisher 公司), 其中二甲四氯钠由于其自身性质特殊, 与阿特拉津和乙草胺的处理存在一定差异.

(1) 二甲四氯钠残留量的提取与测定 首先, 称取 2 g 处理后的土壤样品以及 2 g 无水的硫酸钠, 放到 50 mL 锥形瓶里, 向其中放入 10 mL 体积比为 1:1 的正己烷-丙酮溶液, 进行 10 min 超声提取, 并以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速离心, 然后将得到的上清液倒入另外一个相同体积的锥形瓶中, 重复上述操作 3 次, 合并上清液, 氮吹至干. 加入 1 mL 甲醇(HPLC 级)和 100 μL 三氟化硼乙醚溶液, 于 40°C 水浴回流 30 min 进行衍生. 将回流后的溶液从锥形瓶分别移至分液漏斗中, 加入 10 mL 二氯甲烷分层萃取, 将二氯甲烷相过无水硫酸钠柱进行脱水, 收集二氯甲烷相浓缩定容至 1 mL, 待测.

气质分析条件: 选择离子模式, 进样口的温度设置为 250°C , 离子源的温度设置为 280°C , 不分流进样; 柱箱的最初温度是 50°C , 并在此条件下保持 2

min, 用 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度将温度升高到 280°C , 并再次保持 5 min, 进样量为 1 μL . 采用外标法, 测定样品中二甲四氯钠的含量, 检出限 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 回收率 87%~96%.

(2) 阿特拉津和乙草胺残留量的测定 称 10 g 处理后的土样和 2 g 无水硫酸钠, 进行索式提取, 提取结束之后, 把提取液通过旋转蒸发浓缩到 1 mL, 过硅酸镁层析柱进行净化, 再次旋转蒸发浓缩定容到 1.0 mL 待测.

分析条件: 选择离子扫描模式, 离子源温度和接口温度设置为 250°C ; 初始柱温 100°C 并保持 1 min, 然后以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升温到 250°C 并继续保持 3 min; 进样前 1 min 不进行分流, 1 min 后, 分流率为 10:1, 进样口温度为 230°C , 进样流量为 1 μL . 阿特拉津和乙草胺的检出限分别为 $0.38 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 阿特拉津和乙草胺的回收率分别为 82%~94% 和 84%~101%.

2 结果与分析

2.1 保护性耕作与传统耕作的土壤性质

本研究发现, 传统耕作土壤中总有机碳含量、总氮含量、含水率和团聚体平均粒径分别为 $(2.1 \pm 0.1)\%$ 、 $(0.2 \pm 0.0)\%$ 、 $(19.1 \pm 1.2)\%$ 和 $(82.2 \pm 3.0) \mu\text{m}$, 而保护性耕作则分别为 $(2.9 \pm 0.3)\%$ 、 $(0.3 \pm 0.0)\%$ 、 $(22.3 \pm 1.5)\%$ 和 $(97.2 \pm 4.2) \mu\text{m}$. 虽然各采样点传统耕作和保护性耕作之间的土壤性质不总存在显著差异, 但是将 7 个样点当作一个总体, 其土壤性质在统计学上有显著差异, 总体上保护性耕作的土壤含水率、土壤总有机碳含量、总氮含量和团聚体平均粒径均显著大于传统耕作 ($P < 0.05$, 表 1).

根据前人研究, 可将土壤团聚体分成大团聚体 A1 ($>0.25 \text{ mm}$)、微团聚体 M1 ($0.25 \sim 0.062 \text{ mm}$) 和粉黏团聚体 M2 ($<0.062 \text{ mm}$) 这 3 类^[23].

总体上保护性耕作方式下的 A1 占比显著大于传统耕作方式 ($P < 0.05$). 而对于 M1 和 M2 而言, 在不同地点趋势不一致, 例如在德惠, 保护性耕作下的 M1 占比显著大于传统耕作 ($P < 0.001$), 在农安, 保护性耕作方式下的 M1 占比显著小于传统耕作 ($P < 0.05$), 而 M2 占比显著大于传统耕作 ($P < 0.05$). 总体上保护性耕作与传统耕作方式相比, 土壤微团聚体和粉黏团聚体均无显著差异(表 1).

虽然没有在各个地点均发现两种耕作方式下土壤性质的差异, 但是有差异的点的土壤性质大体上符合保护性耕作研究的结果, 即增加了土壤含水率、土壤总有机碳含量、总氮含量和大团聚体占比.

表 1 不同样点在两种耕作方式下的土壤性质¹⁾

Table 1 Soil properties of different sites under two tillage methods

样点	耕作方式	土壤含水率 /%	ω(总有机碳) /%	ω(总氮) /%	碳氮比	团聚体平均粒径 /μm	占比/%		
							土壤大 团聚体	土壤微 团聚体	土壤粉黏 团聚体
总体	传统	19.1±1.2*	2.1±0.1*	0.2±0.0*	9.8±0.4	82.2±3.0*	3.3±0.4*	53.4±2.1	43.3±2.2
	保护	22.3±1.5*	2.9±0.3*	0.3±0.0*	11.0±1.0	97.2±4.2*	6.7±1.3*	55.3±1.8	37.9±1.6
长岭	传统	7.5±0.5	1.0±0.3	0.1±0.0	8.0±1.7	87.0±2.1*	2.1±0.2*	66.8±1.8*	31.1±1.8*
	保护	8.9±0.6	2.2±0.6	0.3±0.1	9.0±0.1	97.1±1.5*	3.4±0.5*	71.1±0.7*	25.5±0.5*
榆树	传统	15.5±0.6	3.8±0.3	0.4±0.0	10.9±0.2	64.0±9.8	1.0±0.4	42.7±10.2	56.3±10.1
	保护	16.4±0.6	3.0±0.2	0.3±0.0	10.9±0.1	76.5±1.5	0.9±0.5	57.1±2.6	42.0±2.1
东丰	传统	25.3±1.2	1.9±0.1	0.2±0.0	9.5±0.3	71.7±9.9	4.4±1.3	39.4±3.9	56.2±4.8
	保护	26.3±1.4	3.1±0.8	0.3±0.1	10.0±0.3	93.9±8.2	5.8±2.2	51.3±3.4	42.9±3.5
九台	传统	25.0±0.5*	2.8±0.2	0.3±0.0	11.3±0.2	70.2±5.2*	2.2±0.7	44.7±3.7	53.1±4.1*
	保护	32.6±2.0*	3.3±0.3	0.3±0.0	11.6±0.3	111.4±14.7*	11.2±4.8	49.0±3.9	39.8±3.0*
德惠	传统	22.0±0.0*	1.9±0.2	0.2±0.0	10.7±0.8	104.8±0.0*	7.5±0.0*	55.1±0.0*	37.4±0.0*
	保护	25.3±0.0*	3.4±1.4	0.2±0.0	15.5±5.9	112.4±0.0*	11.1±0.0*	56.6±0.0*	32.3±0.0*
农安	传统	19.7±1.2	1.8±0.2	0.2±0.0	8.9±0.1	84.8±2.7*	2.5±0.4	61.6±1.0*	36.0±1.2*
	保护	21.2±0.4	1.9±0.2	0.2±0.0	8.9±0.2	71.8±4.2*	1.8±0.3	51.1±4.0*	47.1±4.2*
梨树	传统	25.2	2.7	0.3	10.2	61.0	1.3	39.5	59.2
	保护	25.3	2.2	0.2	9.6	154.5	26.6	36.0	37.4

1) 数据为均值±标准误差, * 为 $P < 0.05$

2.2 保护性耕作与传统耕作两种耕作方式下的土壤除草剂的残留特征

传统耕作方式下阿特拉津、乙草胺和二甲四氯钠的残留量变化范围分别为 0.1~30.2、0.5~86.2 和 16.4~271.0 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 保护性耕作方式下阿特拉津、乙草胺和二甲四氯钠的残留量变化范围分别为 0.0~27.7、0.0~52.2 和 47.6~176.3 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 由于各个采样点之间的不同种除草剂残留量差异较大, 整体上未能观察到传统耕作和保护性耕作之间土壤中除草剂残留量的差异. 尽管如此, 当两种耕作方式存在显著性差异时, 同种除草剂在保护性耕作和传统耕作之间所展示的差异性大体上一致. 例如, 对阿特拉津来说, 保护性耕作方式下土壤中残留量显著大于传统耕作方式[如东丰和农安, $P < 0.05$, 图 2(a)]; 对乙草胺而言, 保护性耕作方式下土壤中残留量显著低于传统耕作方式[如德惠、农安和榆树, $P < 0.05$, 图 2(b)]; 对二甲四氯钠来说, 仅在德惠观察到保护性耕作方式下土壤中残留量显著大于传统耕作方式[$P < 0.05$, 图 2(c)].

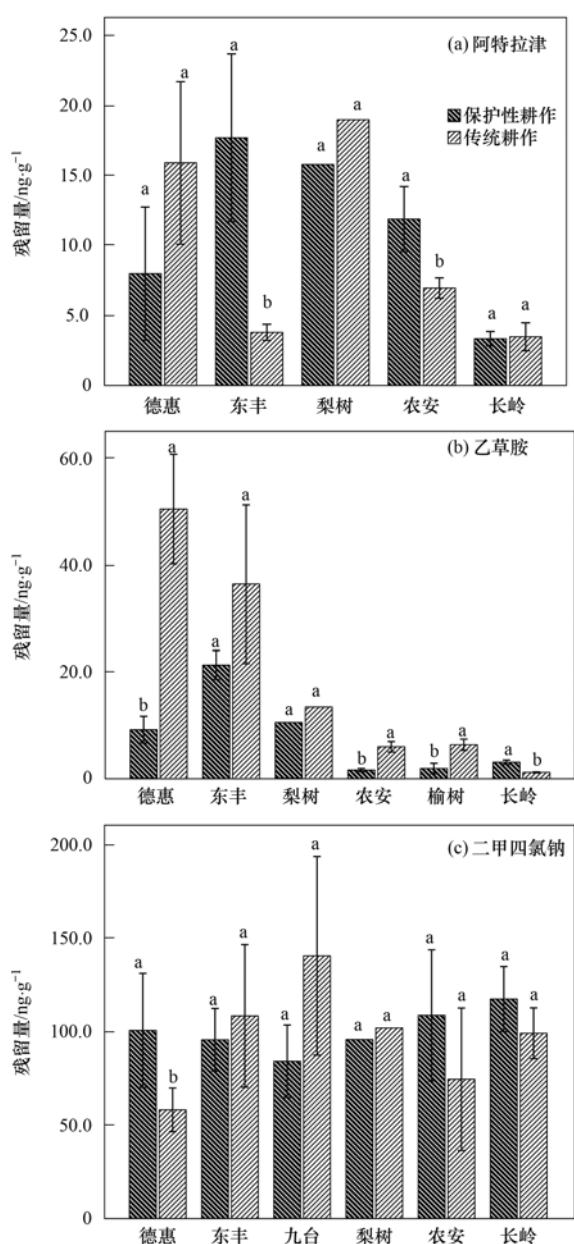
2.3 土壤中除草剂含量与土壤性质的关系

由于 3 种除草剂的性质不同, 本文并没有发现总除草剂的残留量与土壤性质的关系, 但是对于不同类型的除草剂, 土壤性质显著影响其在土壤中的含量(图 3). 例如, 土壤总有机碳含量、土壤含水率和土壤粉黏团聚体占比与阿特拉津含量显著正相关, 而乙草胺含量与土壤微团聚体占比显著负相关, 与土壤含水率和土壤大团聚体占比显著正相关, 二甲四氯钠仅与土壤微团聚体占比显著正相关.

3 讨论

3.1 保护性耕作对土壤性质的影响

本研究发现, 总体上保护性耕作显著增加了土壤总有机碳含量(表 1). 一方面, 秸秆分解所形成的小分子可以和土壤矿物结合, 形成矿物结合态有机碳, 增加土壤中稳定性碳的含量. 另一方面, 秸秆还田过程中大约有十分之一的秸秆碳会转化成为土壤慢性有机碳, 并在土壤团聚体中进行分配, 从而实现碳的固持^[24,25]. 本研究还发现保护性耕作增加了土壤大团聚体占比, 表明秸秆的输入带来的有机碳具有强烈的胶结作用, 可以促进土壤微团聚体聚集成为大团聚体^[26]. 此外, 保护性耕作方式降低了对土壤的扰动, 为土壤大团聚体的形成提供有利的条件^[27~29], 同时也使得形成的大团聚体更加稳定, 不易被外力破坏. 这也暗示着随着大团聚体的形成, 进入到土壤中的有机碳与大团聚体结合而被固定下来. 保护性耕作过程中的秸秆覆盖又会降低土壤表层的温度, 从而降低了微生物对有机质的分解作用^[19], 进一步增强了土壤有机碳的累积. 此外, 本研究发现保护性耕作增强了土壤总氮含量, 这是由于秸秆生长过程中吸收土壤氮素, 秸秆还田后随着秸秆分解会释放氮素, 使得氮素被保留在土壤中, 增加土壤营养元素^[30]. 本研究还发现保护性耕作增大了土壤含水率, 这是因为秸秆的覆盖还可以降低太阳辐射, 降低温度, 使得土壤水分不易挥发, 被留在土壤中, 从而提高土壤的含水量, 保障土壤的水分条件^[31]. 基于土壤理化性质的主成分分析将保护性耕



图中去除了标准误差较大的样点; 小写字母表示同一地点在不同耕作方式下的除草剂残留量的显著性差异, 同一个地点相同字母表示无显著差异, 同一个地点不同字母表示存在显著差异

图2 不同耕作方式下不同地点的土壤中阿特拉津、乙草胺和二甲四氯钠残留量

Fig. 2 Residues of atrazine, acetochlor, and MCPA-Na in soil at different locations under different tillage methods

作土壤和传统耕作土壤分成两部分(图4), 进一步表明保护性耕作对吉林省玉米田土壤性质具有显著影响, 有助于改善土壤的理化性质, 提高土壤肥力。

3.2 土壤性质对除草剂残留量的影响

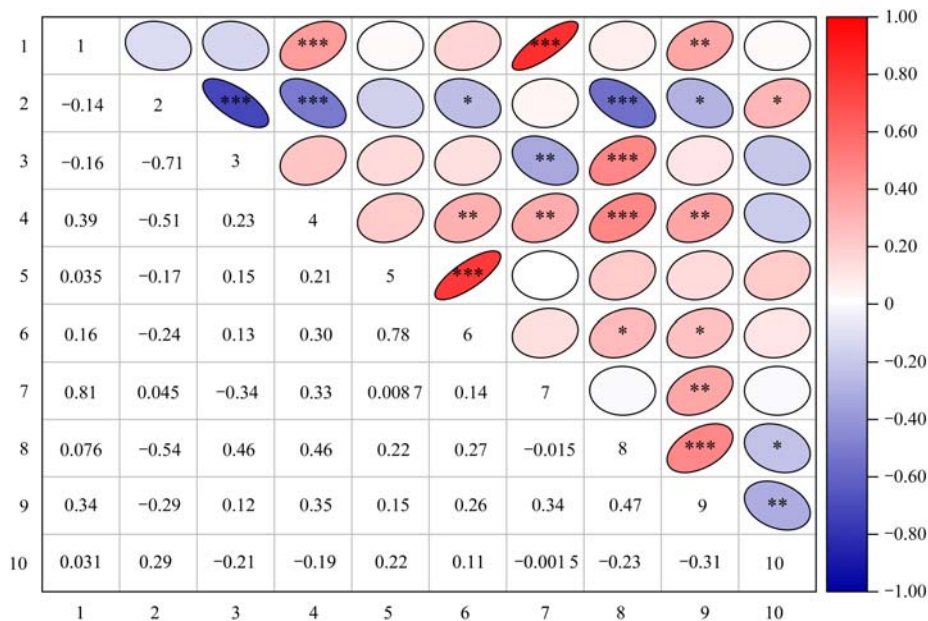
无论是施加在植物上还是施加在土壤中, 除草剂最终都会进入土壤, 在土壤中降解、迁移或者累积^[9]。而土壤中除草剂的残留量与其在土壤中的吸附和解吸有关, 若吸附作用大于解吸作用, 除草剂则被吸附在土壤中, 不易迁移; 若吸附作用小于解吸作用, 除草剂便会降解或随水迁移^[32], 保护性耕作

则通过影响土壤性质而影响除草剂在土壤中的吸附解吸, 从而影响除草剂的残留量。

土壤总有机碳含量在提高土壤对除草剂的吸附方面起着关键的作用, 有机碳的含量与吸附存在正相关的关系^[19,33]。本研究发现, 土壤总有机碳含量与阿特拉津残留量显著正相关, 表明随着土壤总有机碳含量的增加, 其对除草剂的吸附作用也会增加^[32,34,35]。此外, 尽管本文没有实测不同粒级团聚体中的有机碳含量, 但是有研究指出, 在农田表土中, 90%的有机碳赋存在土壤团聚体中^[36], 尤其在 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体中的含量更高^[23]。同时, 由于微团聚体向大团聚体团聚过程中碳发生了迁移, 有机碳向大团聚体聚集, 使得黑土中 $0.053\sim0.25\text{ mm}$ 团聚体中的有机碳含量低于 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体的有机碳含量^[37], 因此, 大团聚体对除草剂的吸附作用较强, 而微团聚体对除草剂的吸附作用较弱。这与本研究发现的乙草胺的残留量与大团聚体($>0.25\text{ mm}$)占比呈正相关关系和与 $0.062\sim0.25\text{ mm}$ 的土壤微团聚体占比呈负相关相一致。

除土壤总有机碳含量外, 土壤中除草剂残留量还与土壤含水率相关(图3)。以往研究认为土壤含水率的增加会使得水分子与除草剂在竞争吸附位点时处于优势^[38], 降低土壤对除草剂的吸附^[39], 从而增强除草剂的生物可利用性, 提高微生物对除草剂的降解^[40]。此外, 土壤含水率增加还可以使土壤通过毛细作用将阿特拉津送至土壤表面, 从而增大其光解速率, 降低阿特拉津的残留量^[41], 因此, 土壤除草剂含量往往与土壤含水率呈负相关关系。然而, 本研究发现乙草胺和阿特拉津含量与土壤含水率正相关。一方面可能是因为前人研究土壤的含水率为50%, 而本研究土壤含水率在19%左右, 对除草剂的运送能力不强。另一方面, 本研究土壤含水率的增加是由于降低了土壤温度减少蒸发导致的, 而温度降低同时也会抑制微生物对除草剂的降解^[19]。

RDA 分析结果表明, 不同的土壤性质对不同种类除草剂的解释度不同。对于阿特拉津来说, 土壤总有机碳含量和土壤含水率对其变化的解释度较高(图5)。土壤有机碳可以与土壤颗粒结合形成细小的封闭孔隙, 形成土壤团聚体和有机无机复合体, 提高对阿特拉津的吸附能力^[32], 同时碳的输入推迟了除草剂作为碳源的使用, 也降低了微生物对除草剂的分解速率^[19]。而土壤含水率对阿特拉津的作用较为复杂, 虽然土壤含水率的增加会使得水分子与阿特拉津在竞争吸附位点时处于优势^[38], 提高阿特拉津的生物可利用性, 然而温度的降低同时也抑制了微生物对阿特拉津的降解速率, 增加了阿特拉津的



1. 土壤大团聚体占比, 2. 土壤微团聚体占比, 3. 土壤粉黏团聚体占比, 4. 土壤含水率, 5. 土壤总氮含量, 6. 土壤总有机碳含量, 7. 土壤团聚体平均粒径, 8. 阿特拉津残留量, 9. 乙草胺残留量, 10. 二甲四氯钠残留量; * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$, *** 表示 $P \leq 0.001$; 色柱表示相关性大小, 蓝色表示负相关关系, 红色表示正相关关系, 白色表示无相关关系, 颜色越深相关性越强

图 3 除草剂残留量与土壤性质相关性热图

Fig. 3 Heat map of correlation between herbicide residues and soil properties

残留时间.

对于乙草胺来说,土壤总有机碳含量和土壤大团聚体占比对其残留变化的解释度较高.前文提到90%的有机碳赋存在大团聚体中,土壤有机碳可以促进大团聚体的形成^[36],也因其强烈的吸附作用可以增强对乙草胺的吸附,降低乙草胺下渗污染地下水的风险.

对于二甲四氯钠来说,土壤微团聚体占比对其变化的解释度比较高,相关性分析也显示二甲四氯钠的残留量与土壤微团聚体占比显著正相关(图3),这可能是由于微团聚体中黏粒与粉粒具有比表面积和表面电荷较大的特点,使其能够与土壤有机碳紧密结合形成有机-无机复合体,对二甲四氯钠的吸附作用更强^[42].

3.3 保护性耕作对除草剂残留的影响

保护性耕作可以通过改变土壤性质从而对除草剂的残留产生影响.对于阿特拉津和乙草胺来说,其残留量与多个土壤性质具有相关关系,因此采用多元线性回归逐步回归法分别对两种耕作方式下的阿特拉津、乙草胺与其各自相关的土壤性质进行回归分析,得到的结果分别见式(2)~(5),其中式(2)和式(3)分别为传统和保护耕作方式下乙草胺与土壤性质逐步回归分析的结果,式(4)和式(5)分别为传统和保护耕作方式下阿特拉津与土壤性质逐步回归分析的结果.

$$Y_1 = 0.811X_5 \quad (2)$$

$$Y_1 = 0.585X_5 + 0.421X_2 \quad (3)$$

$$Y_2 = -0.705X_6 \quad (4)$$

$$Y_2 = -0.615X_6 \quad (5)$$

式中, Y_1 为乙草胺的残留量($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$), X_2 为土壤总有机碳含量, X_5 为土壤大团聚体占比, Y_2 为阿特拉津的残留量($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$), X_6 为土壤微团聚体占比.

本研究发现,传统耕作模式下影响乙草胺残留量的主要因素是土壤大团聚体占比[式(2), $P = 0.000$],而保护性耕作实施后土壤总有机碳含量与大团聚体共同作用于乙草胺[式(3), $P = 0.001$],再次表明保护性耕作能够通过影响土壤总有机碳含量和大团聚体占比,影响对乙草胺的吸附作用^[23].对于阿特拉津来说,传统耕作方式和保护性耕作方式下,影响阿特拉津残留量的主要因素都是土壤微团聚体占比[式(4), $P = 0.001$; 式(5), $P = 0.005$],保护性耕作方式下秸秆的添加使得土壤微团聚体向大团聚体团聚,发生了碳迁移,使得更多的土壤有机碳富集在大团聚体中,降低了土壤微团聚体中有机碳的含量,使得阿特拉津主要集中于大团聚体中^[37],增强了土壤团聚体对阿特拉津的保护作用,增加其在土壤中的残留量.

对于二甲四氯钠来说,土壤微团聚体占比是使其发生变化的主要影响因素(图5),在二甲四氯钠残留量发生变化的德惠地区也发现土壤微团聚体占比显著增大(表1),说明保护性耕作方式增加了土

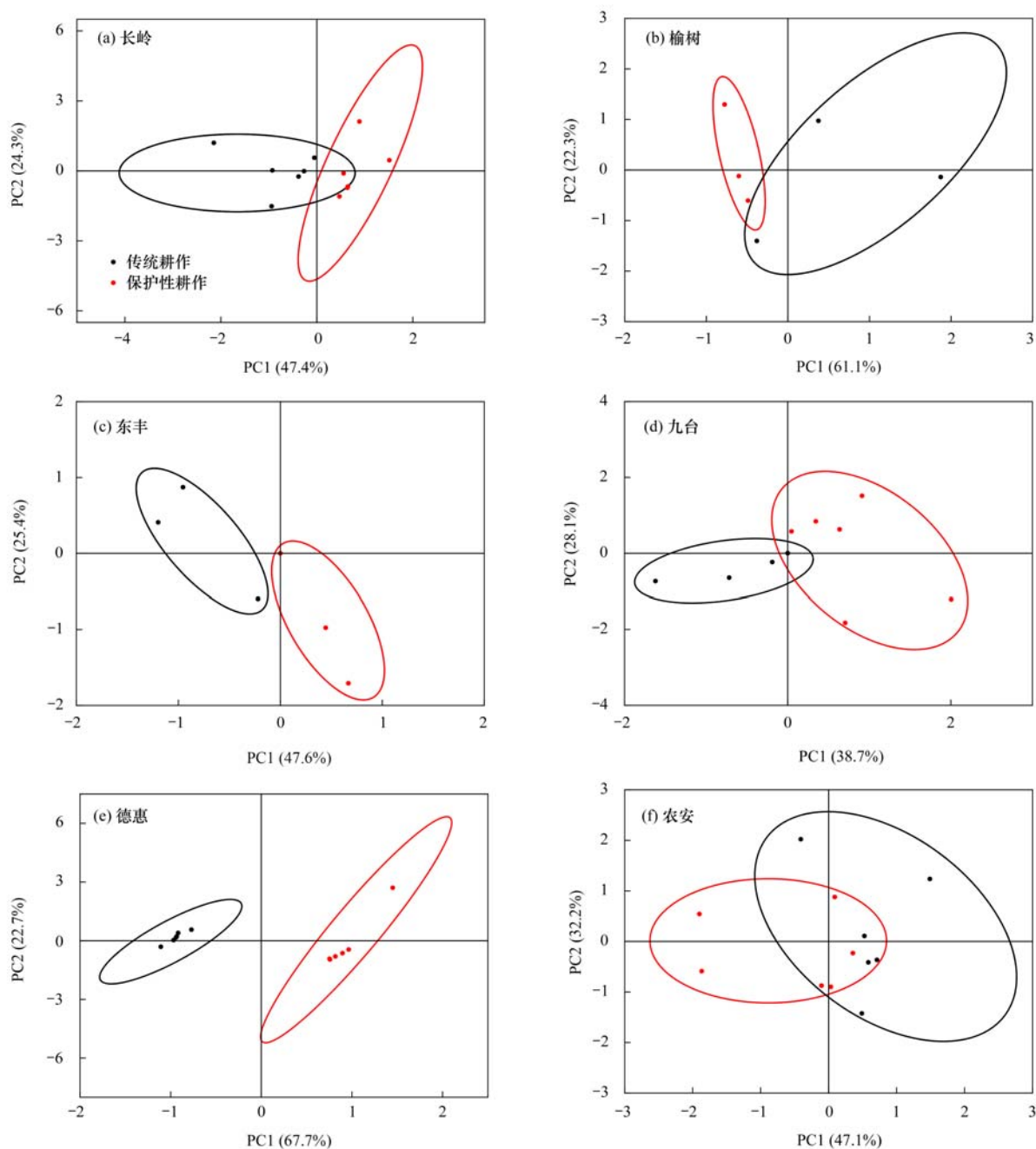


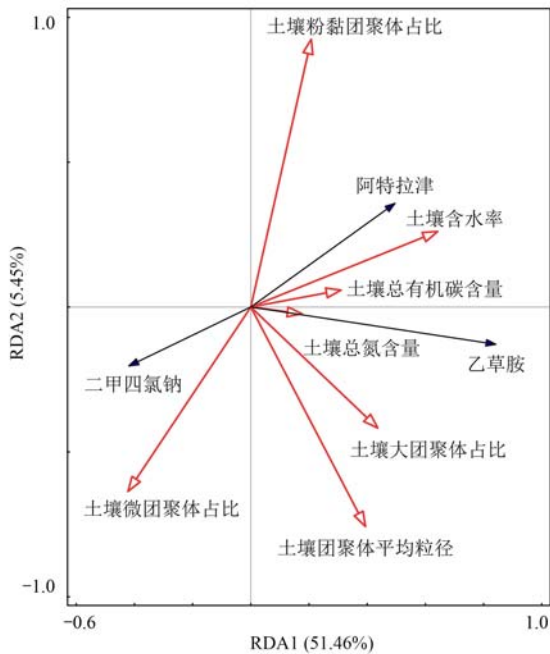
图4 两种耕作方式下不同地点土壤性质主成分分析

Fig. 4 PCA of soil properties in different locations under two tillage methods

壤微团聚体占比,从而促进了土壤对二甲四氯钠的吸附^[42].而在绝大部分样点并未发现二甲四氯钠残留量在两种耕作方式下的显著差异,这可能是因为二甲四氯钠在土壤中以阴离子形式存在,难以被土壤有机质吸附,且保护性耕作方式增加了土壤含水率,使其易于随水迁移^[43,44].

尽管在一些采样点发现了除草剂残留量在两种耕作方式下的显著差异,然而在多数采样点,并没有发现保护性耕作显著增加或降低了除草剂的残留量,这是由于保护性耕作能够改变土壤的多种性质,而这些土壤性质对土壤中除草剂迁移行为的影响是不同的.例如,一方面,玉米秸秆还田后,土壤中的胡

敏酸的物理化学特性发生变化,增加了胡敏酸维持离子状态的能力,提高了胶体特性,从而加速土壤对除草剂的吸附^[45];但是另一方面,保护性耕作也增大了土壤含水率和土壤平均粒径,使得水分子在与除草剂竞争吸附位点时处于优势^[38],土壤的平均粒径增大使得表面能减小,降低了对农药的吸附程度,从而降低了土壤中除草剂的含量^[46].同时,秸秆还田对除草剂的降解也是具有复杂作用的,一方面,秸秆还田可以增加土壤微生物量,促进其对除草剂的降解^[19],另一方面,秸秆还田也会由于其自身的作物残体覆盖土壤表层带来的低温而影响微生物对除草剂的降解速率,作物残体的覆盖作为土壤的物理



红线表示土壤性质,黑线表示3种除草剂的残留量

图5 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of herbicides and soil properties

保护层,可以限制土壤与大气之间以及土壤内部的空气流动,从而抑制微生物对除草剂的降解^[19],加上大团聚体中丰富的有机碳对除草剂的强烈吸附作用以及碳的输入延迟了除草剂作为碳源的使用,增加除草剂在土壤中残留的时间^[23,36]。此外,本实验地点实施的保护性耕作为3~5 a,对土壤性质的改变可能还不足以改变除草剂在土壤中的降解和迁移,保护性耕作年限越长,对土壤性质的改变越大,对除草剂的环境行为影响越大,有研究表明实施保护性耕作7 a的土壤中阿特拉津的降解速率更快^[19]。

4 结论

(1)保护性耕作显著增大了土壤含水率、总有机碳和总氮含量,提高了土壤团聚体平均粒径以及土壤大团聚体占比。

(2)单类除草剂的残留受到土壤性质的影响,其中土壤总有机碳含量和土壤含水率与土壤中阿特拉津的残留量呈显著正相关关系,而土壤总有机碳含量和土壤大团聚体占比显著影响土壤中乙草胺的残留量。

(3)保护性耕作能够通过影响土壤性质显著改变土壤中除草剂的残留量,但是由于保护性耕作的时间较短,未能呈现一致性的规律。

参考文献:

[1] 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 等. 我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2395-2408.

Li R, Wu Q M, Zhao G M, *et al.* Research progress and prospect of herbicide residues characteristics in black soil region of China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2395-2408.

[2] 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 等. 3种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2550-2557.

Li X, Liao H P, Cui P, *et al.* Effects of three commonly used herbicides on bacterial antibiotic resistance[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2550-2557.

[3] 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 等. 农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2384-2394.

Hu F Y, An J, Wang B Y, *et al.* Research progress on the remediation technology of herbicide contamination in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2384-2394.

[4] 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.

[5] 杜静, 胡超魁, 解怀君, 等. 辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1772-1780.

Du J, Hu C K, Xie H J, *et al.* Concentration levels and potential ecological risks of current use pesticides in the surface seawater of typical Liaoning Sea Areas[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1772-1780.

[6] Willkommen S, Lange J, Ulrich U, *et al.* Field insights into leaching and transformation of pesticides and fluorescent tracers in agricultural soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141658.

[7] Dong W W, Zhang Y, Quan X. Health risk assessment of heavy metals and pesticides: a case study in the main drinking water source in Dalian, China[J]. *Chemosphere*, 2020, 242, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125113.

[8] 叶敦雨, 孙小银, 赵忠强, 等. 白马河流域除草剂及其代谢产物的时空分布特征与生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 74-81.

Ye D Y, Sun X Y, Zhao Z Q, *et al.* Spatio-temporal distribution and ecological risk assessment for herbicide and its metabolites in Baima River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 74-81.

[9] 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.

[10] Liu Y H, Shen D Y, Li S L, *et al.* Residue levels and risk assessment of pesticides in nuts of China[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 645-651.

[11] Liu Y H, Li S L, Ni Z L, *et al.* Pesticides in persimmons, jujubes and soil from China: residue levels, risk assessment and relationship between fruits and soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 620-628.

[12] 张少良, 张兴义, 刘晓冰, 等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 11-15.

Zhang S L, Zhang X Y, Liu X B, *et al.* Tillage effect on soil erosion in typical black soil region[J]. *Journal of Soil and Water*

- Conservation, 2009, **23**(3): 11-15.
- [13] 张士秀, 贾淑霞, 常亮, 等. 保护性耕作改善东北农田黑土土壤生物多样性及其生态功能[J]. 地理科学, 2022, **42**(8): 1360-1369.
- Zhang S X, Jia S X, Chang L, *et al.* Conservation tillage improves soil biodiversity and its ecological function in the black soil region of northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(8): 1360-1369.
- [14] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, **42**(8): 1325-1335.
- Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, *et al.* Development and effects of conservation tillage in the black soil region of northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(8): 1325-1335.
- [15] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(6): 1277-1284.
- Liu H M, Li R Y, Gao J J, *et al.* Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(6): 1277-1284.
- [16] 叶常明. 农业管理实践对除草剂环境行为的影响[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, **2**(1): 3-8.
- Ye C M. Influence of agricultural management practice on herbicides behavior in soil environment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2001, **2**(1): 3-8.
- [17] 耿迪. 吉林省秸秆还田推广应用情况的调查分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- Geng D. Investigation and analysis of the promotion and application of straw returning in Jilin Province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [18] 叶常明, 郑和辉, 王杏君, 等. 作物植株残体还田土壤对除草剂的截留作用[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(3): 354-357.
- Ye C M, Zheng H H, Wang X J, *et al.* Interception of herbicides by soil within crop plant residues[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(3): 354-357.
- [19] Alletto L, Coquet Y, Benoit P, *et al.* Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, **30**(2): 367-400.
- [20] 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 等. 早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4706-4715.
- Huang Q Y, Huang J F, Huang X, *et al.* Effects of early rice straw returning with reducing potassium fertilizer on late rice yield and soil fertility[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4706-4715.
- [21] 孔滨, 孙波, 郑宪清, 等. 水热条件和施肥对黑土中微生物群落代谢特征的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(1): 100-106.
- Kong B, Sun B, Zheng X Q, *et al.* Effect of hydrothermal conditions and fertilization on metabolic characteristics of microbial community in a black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(1): 100-106.
- [22] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1530-1540.
- Wang S L, Wang H, Li J, *et al.* Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1530-1540.
- [23] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(5): 121-127.
- Wang J, Xue Y, Pan J J, *et al.* Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(5): 121-127.
- [24] Chivenge P P, Murwira H K, Giller K E, *et al.* Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: implications for conservation agriculture on contrasting soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **94**(2): 328-337.
- [25] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(2): 668-676.
- Yang Y H, Su Y, He Z C, *et al.* Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(2): 668-676.
- [26] Six J, Elliott E T, Paustian K, *et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**(5): 1367-1377.
- [27] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(22): 7116-7124.
- Tian S Z, Wang Y, Li N, *et al.* Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(22): 7116-7124.
- [28] 何绍浪, 黄尚书, 钟义军, 等. 耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(6): 127-132.
- He S L, Huang S S, Zhong Y J, *et al.* Effects of tillage depth on the characteristics of soil water-stable aggregates in sloping farmland of red soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(6): 127-132.
- [29] Siedt M, Schöffer A, Smith K E C, *et al.* Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141607.
- [30] Yang H S, Yang B, Dai Y J, *et al.* Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, **69**: 52-58.
- [31] Tao Z Q, Li C F, Li J J, *et al.* Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang-Huai-Hai Valley[J]. *The Crop Journal*, 2015, **3**(5): 445-450.
- [32] 孙涛, 杨再磊, 蒋靖伯伦, 等. 生物炭对土壤中阿特拉津吸附特征的影响[J]. 环境化学, 2021, **40**(3): 687-695.
- Sun T, Yang Z L, Jiang J B L, *et al.* Effect of biochar on the adsorption characteristics of atrazine in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(3): 687-695.
- [33] 黄玉芬, 刘忠珍, 魏岚, 等. 土壤不同粒径有机无机复合体对丁草胺的吸附特性[J]. 土壤学报, 2017, **54**(2): 400-409.
- Huang Y F, Liu Z Z, Wei L, *et al.* Effect of soil organo-inorganic compounds different in particle size on butachlor

- sorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(2): 400-409.
- [34] Bedmar F, Daniel P E, Costa J L, *et al.* Sorption of acetochlor, S-metolachlor, and atrazine in surface and subsurface soil horizons of Argentina [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, **30**(9): 1990-1996.
- [35] 张燕飞, 蔡磊明, 赵华, 等. 乙草胺在 3 种土壤中的吸附和解吸附特性[J]. *农药*, 2015, **54**(2): 98-102.
Zhang Y F, Cai L M, Zhao H, *et al.* Adsorption and desorption properties of acetochlor in three types of soil[J]. *Agrochemicals*, 2015, **54**(2): 98-102.
- [36] Karami A, Homaee M, Afzalnia S, *et al.* Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **148**: 22-28.
- [37] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 187-191.
Guan S, Dou S, Hu Y Z, *et al.* Effects of application of corn stalk on distribution of C and N in black soil aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 187-191.
- [38] Dao T H, Lavy T L. Atrazine adsorption on soil as influenced by temperature, moisture content and electrolyte concentration[J]. *Weed Science*, 1978, **26**(3): 303-308.
- [39] 马红, 滕春红, 陶波. 增效剂影响土壤吸附乙草胺的研究[J]. *东北农业大学学报*, 2005, **36**(1): 15-18.
Ma H, Teng C H, Tao B. Study on influence of adjuvant to acetochlor adsorption in soil [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2005, **36**(1): 15-18.
- [40] 朱九生, 乔雄梧, 王静, 等. 乙草胺在土壤环境中的降解及其影响因子的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(5): 1025-1029.
Zhu J S, Qiao X W, Wang J, *et al.* Degradation and the influencing factors of acetochlor in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(5): 1025-1029.
- [41] 叶常明, 雷志芳, 王杏君, 等. 除草剂阿特拉津的多介质环境行为[J]. *环境科学*, 2001, **22**(2): 69-73.
Ye C M, Lei Z F, Wang X J, *et al.* Multimedia environmental behavior of herbicide atrazine [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(2): 69-73.
- [42] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5481-5490.
Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [43] Wu D M, Ren C Q, Wu C Y, *et al.* Mechanisms by which different polar fractions of dissolved organic matter affect sorption of the herbicide MCPA in ferralsol [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/J.JHAZMAT. 2021.125774.
- [44] López-Piñeiro A, Peña D, Albarrán Á, *et al.* Environmental fate of bensulfuron-methyl and MCPA in aerobic and anaerobic rice-cropping systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **237**: 44-53.
- [45] 吴景贵, 席时权, 姜岩, 等. 玉米植株残体还田后土壤胡敏酸理化性质变化的动态研究[J]. *中国农业科学*, 1999, **32**(1): 63-68.
Wu J G, Xi S Q, Jiang Y, *et al.* Dynamic changes of physical and chemical properties of humic acid in soil applied with corn plant residues[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, **32**(1): 63-68.
- [46] 时雯雯, 魏兴, 周金龙, 等. 新疆不同质地土壤对石油类污染物的吸附作用[J]. *环境工程*, 2022, **40**(4): 127-133.
Shi W W, Wei X, Zhou J L, *et al.* Adsorption of petroleum pollutants on different texture soils in Xinjiang [J]. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(4): 127-133.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)