

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅志, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响

陈曦¹, 张彦军^{1*}, 邹俊亮^{2*}, 李天姿¹, 于媛¹, 李晶¹

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013; 2. 北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097)

摘要: 秸秆还田和耕作深度处理是影响农田土壤呼吸最重要的农业管理措施之一, 但二者交互作用影响农田土壤呼吸的机制尚不清楚. 基于此, 针对中国的旱地农田生态系统, 利用已发表的 116 篇研究论文, 借助 Meta 分析技术, 探究秸秆还田和耕作深度处理及其二者交互作用对农田土壤呼吸的影响及其调控因素, 为农田生态系统实现“碳中和”提供重要的数据支撑和理论依据. 结果表明, 免耕导致土壤呼吸减少了 8.3%, 而浅耕和深耕处理对土壤呼吸的影响不显著, 但对土壤呼吸的增加量仍呈现出深耕>浅耕>免耕的趋势. 虽然, 浅耕和深耕对土壤呼吸和土壤有机碳 (SOC) 的影响均相对较小, 但是免耕导致土壤呼吸减少了 8.3% 的同时却又导致 SOC 增加了 7.05%, 因此实施免耕措施对农田土壤固碳减排具有重要意义. 此外, 耕作深度会显著调控秸秆还田对土壤呼吸的影响, 且土壤呼吸的增加量呈现出深耕秸秆还田>浅耕秸秆还田>免耕秸秆还田的趋势, 整体平均增加了 14.51%. 秸秆还田后不同深度耕作处理下土壤呼吸的增加量与土壤容重、农作物产量、土壤有机碳、以及土壤温度和水分的变化密切相关, 且对土壤呼吸增加量的贡献呈现出土壤容重>农作物产量>土壤有机碳>土壤水分>土壤温度的趋势. 虽然 SOC 在深耕秸秆还田、浅耕秸秆还田和免耕秸秆还田处理下分别增加了 29.32%、10.12% 和 23.94%, 但是土壤呼吸在深耕秸秆还田和浅耕秸秆还田处理分别增加了 29.32% 和 18.92%, 而在免耕秸秆还田处理下仅增加 1.2%. 所以, 免耕秸秆还田也有利于农田土壤固碳减排. 因此, 在中国的旱地农田生态系统中, 耕作深度会调控秸秆还田对土壤呼吸的影响程度, 而这种调控主要与土壤理化性质有关, 尤其与土壤容重关系最为紧密, 且免耕和免耕秸秆还田均是有利于农田土壤固碳减排的重要农业管理措施.

关键词: 耕作深度; 秸秆还田; 土壤有机碳; 农作物产量; Meta 分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1702-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304120

Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland

CHEN Xi¹, ZHANG Yan-jun^{1*}, ZOU Jun-liang^{2*}, LI Tian-zi¹, YU Yuan¹, LI Jing¹

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Beijing Research & Development Centre for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Straw return and tillage depth treatments are one of the most important agricultural management measures that affect farmland soil respiration, but the mechanism of their interaction affecting farmland soil respiration remains unclear. Therefore, 116 published research articles were used through Meta-analysis technology for dryland farmland ecosystems in China to explore the effects of straw return and tillage depth treatments and their interaction on farmland soil respiration and its regulatory factors, which will provide important data support and a theoretical basis for achieving "carbon neutrality" in farmland ecosystems. The results showed that no tillage reduced soil respiration by 8.3%, and the effects of shallow and deep tillage treatments on soil respiration were not significant, but the increase in soil respiration still showed a trend of deep tillage>shallow tillage>no tillage. However, both shallow and deep tillage had relatively small effects on soil respiration and soil organic carbon (SOC), whereas no tillage reduced soil respiration by 8.3% and increased SOC by 7.05%. Therefore, implementing no tillage measures is of great significance for soil carbon sequestration and emission reduction in farmland ecosystems. In addition, tillage depth significantly regulated the impact of straw return on soil respiration, and the increase in soil respiration showed a trend of deep tillage straw return>shallow tillage straw return>no tillage straw return, with an overall average increase of 14.51%. The increase in soil respiration under different tillage depth treatments after straw return was closely related to the change in soil bulk density, crop yield, SOC, soil temperature, and moisture, and the contribution to the increase in soil respiration showed a trend of soil bulk density>crop yield>soil organic carbon>soil moisture>soil temperature. However, SOC increased by 29.32%, 10.12%, and 23.94%, respectively, in the deep tillage straw return, shallow tillage straw return, and no tillage straw return treatments, whereas soil respiration increased by 29.32% and 18.92%, respectively, in the deep tillage straw return and shallow tillage straw return treatments, and it only increased by 1.2% in the no tillage straw return treatment. Therefore, no tillage straw return was also beneficial to soil carbon sequestration and emission reduction in farmland ecosystems. Thus, in the dryland farmland ecosystem of China, tillage depth treatments regulated the impact of straw return on soil respiration, which was mainly related to soil physical and chemical properties, especially being closely related to soil bulk density. Moreover, no tillage and no tillage straw return are important agricultural management measures that are conducive to soil carbon sequestration and emission reduction.

Key words: tillage depth; straw return; soil organic carbon; crop yield; Meta analysis

土壤碳库是陆地生态系统中最大且最活跃的碳库之一, 是仅次于海洋和岩石圈的第三大碳库, 在全球碳循环中有着重要的地位^[1]. 在全球尺度上, 0~1 m 土层的土壤有机碳储量约为 1 500 Pg, 是大气圈 (760 Pg) 碳库储量的 1.9 倍和生物圈 (560 Pg) 碳库储量的 2.7 倍^[2], 且每年通过土壤呼吸释放到大气中的

收稿日期: 2023-04-14; 修订日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801069); 陕西省科技厅项目 (2022JM-113); 大学生创新创业训练计划项目 (S202110721071); 宝鸡文理学院博士科研启动费项目 (ZK2017042)

作者简介: 陈曦 (1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态系统碳循环, E-mail: chenxi888263@163.com

* 通信作者, E-mail: kerberos55555@163.com; jlzou@nwfufu.edu.cn

CO₂(以 C 计)大约为 98 Pg^[3]. 因此,土壤碳库的微小变化可能对大气中的二氧化碳浓度产生显著的影响,从而加剧或减缓区域气候变暖^[3]. 土壤呼吸具有巨大的时空变异性,且土壤呼吸的时空变异性除了与土壤温度和水分^[4]、底物的有效性^[5]、土壤理化性质^[6]、植被类型^[7]及土壤微生物^[5]等因素密切相关以外,还会受到耕作深度和秸秆还田等因素的调控^[4,8].

有研究结果显示,农田秸秆还田一般会导致土壤呼吸显著增加^[5,9,10],这可能主要是由于农田秸秆还田可以为农作物的生长和土壤微生物的新陈代谢提供丰富的营养物质,从而促进根系呼吸和土壤微生物呼吸,而最终导致土壤呼吸的增加^[11]. 但是,目前关于农田秸秆还田对土壤呼吸的影响很少有研究考虑到耕作深度的调控作用^[12]. 然而,耕作深度(例如,免耕、浅耕、正常耕作以及深耕)对农田土壤呼吸的影响也不容忽视^[7,12]. 耕作深度的差异可以通过改变土壤孔隙度影响土壤的渗透性和土壤水分蒸发率(土壤水分),也可以通过改变土壤孔隙度和孔隙体积影响耕层结构和土壤环境质量,进而调控农作物根系生长,从而影响植株干物质积累量和养分吸收量(产量),还可以通过改变土壤的性质(土壤容重)影响土壤的紧实度,进而影响土壤中空气和土壤水分的存在和运行状况,甚至还可以通过改变底物供应(SOC)、pH值和酶的组成及活性等方式影响微生物的数量、活性和结构,最终影响土壤呼吸^[5,7,11]. 此外,目前针对耕作深度如何调控农田秸秆还田对土壤呼吸的影响研究结论不一致. 例如,有研究发现免耕秸秆还田、浅耕秸秆还田和深耕秸秆还田会导致土壤呼吸速率呈现出或增加或减少的趋势^[12-16],甚至免耕秸秆还田、浅耕秸秆还田和深耕秸秆还田三者到底如何影响土壤呼吸至今也没有定论^[17]. 造成上述研究结果不一致的主要原因可能是因为耕作深度调控秸秆还田对土壤呼吸的影响还会受到诸如土壤微环境(土壤温度、土壤含水量)^[4]、底物有效性(SOC)^[5]、农作物生产力(农作物产量)^[18]、土壤理化性质(pH、土壤容重)^[6]以及土壤微生物(群落结构和活性)^[19]等因素的调控,且这些因素均有可能混淆耕作深度如何调控土壤呼吸对农田秸秆还田的响应程度,而这对于准确理解中国农田生态系统 CO₂ 排放规律及其影响因素具有重要的意义^[12].

在中国,耕地每年释放到大气中的温室气体排放量大约占总温室气体排放量的 15%,其中 CO₂对温室效应的贡献率高达 56%以上^[20,21]. 此外,中国每年大约可以生产 6×10⁸ t 的秸秆,其中 25%~30%的秸秆被直接在田间焚烧,大约可以释放 90 Mt CO₂,但如

果合理利用这些农田秸秆(例如,进行秸秆还田),其每年的固碳潜力可以高达 42.89 Tg^[22,23]. 同时,有研究结果发现秸秆还田的固碳潜力也会受到耕作深度的制约,由于实行少免耕搭配秸秆还田措施使得农业土壤碳库呈稳定增长趋势,可以较显著地弥补其碳排放^[24]. 目前,针对秸秆还田以及耕作深度对土壤呼吸的影响分别展开了相关研究^[8-10],甚至也有学者利用 Meta 分析分别单独量化秸秆还田或者耕作深度对土壤呼吸的影响^[25,26],但是在全国尺度上至今没有研究者重点关注耕作深度如何调控秸秆还田对土壤呼吸的影响,而这对准确理解中国旱地农田生态系统碳循环具有重要的意义.

基于此,本文通过收集秸秆还田-耕作深度-土壤呼吸相关研究论文,借助 Meta 分析技术,系统分析耕作深度如何调控农田秸秆还田对土壤呼吸的影响,以及农田土壤呼吸改变量与土壤温度、土壤水分、土壤容重、土壤有机碳和农作物产量改变量之间的内在联系,以期为中国农田生态系统固碳减排提供重要的数据支撑和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究思路

秸秆还田是影响农田生态系统土壤呼吸的一个重要农业管理措施,但是这种影响会受到农田耕作深度(免耕、浅耕、正常耕作以及深耕)的调控,具体详见图 1.

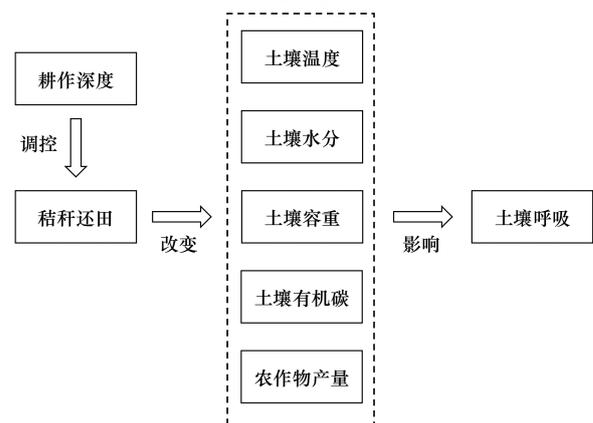


图 1 研究思路

Fig. 1 Research ideas

基于此,本研究通过收集秸秆还田-耕作深度-土壤呼吸的相关研究论文,借助 Meta 分析技术,全面系统探究耕作深度如何调控农田秸秆还田对中国旱作农田土壤呼吸的影响,具体研究处理见表 1.

1.2 文献检索

通过中国知网(CNKI)、维普、万方等中文数据库和 Web of Science 等英文数据库,以“农田”“秸秆还

表 1 耕作深度调控农田秸秆还田对土壤呼吸影响的处理
Table 1 Treatment of tillage depths regulating the effect of straw return on soil respiration

耕作深度	深度/cm	缩写
传统耕作	15 ~ 25	CT
传统耕作秸秆还田	15 ~ 25	CTS
浅耕	<15	ST
浅耕还田	<15	STS
深耕	>25	DT
深耕还田	>25	DTS
免耕	0	NT
免耕还田	0	NTS

田”“耕作深度”“保护性耕作”“免耕”“传统耕作”“深耕”“浅耕”“土壤呼吸”“Farmland”“Straw return”“Tillage depths”“Conservation tillage”“No tillage”“Conventional tillage”“Deep tillage”“Shallow tillage”“Soil respiration”等关键词进行文献的检索,收集筛选了 1912 年 1 月至 2022 年 8 月前发表的 116 篇研究论文进行 Meta 分析。

为了确保数据的代表性以及有效性,达到本研究的目的,同时避免选择的文献数据对研究的结果产生偏差,所以在文献的选择时应注意以下 3 点:①研究耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应的研究试验需为田间定位试验,且都以传统耕作且秸秆不还田为对照(表 1);②所获取的试验数据为当前种植农作物一个完整生育期的均值或者累计值;③如若研究论文提供的数据为标准误(SE),则标准差(SD)可通过公式(1)进行转换:

$$SD=SE\sqrt{N} \quad (1)$$

式中, N 为试验重复次数。

同时,数据的预处理结果显示,耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田响应的效应值均呈现出正态分布格局(图 2),因此论文的数据结果是可信的,即不存在文献的偏倚^[27]。在收集土壤呼吸的数据同时,还获取了土壤呼吸的影响因子的相关数据,例如 SOC、农作物产量、土壤容重、土壤温度和土壤水分。

1.3 Meta 分析

有关土壤呼吸的数据在论文中以表格的形式出现,可以直接从表格中提取有关土壤呼吸的均值;如以图的形式出现,则利用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件来提取图片中的有关土壤呼吸的均值。

耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应的研究通过 MetaWin 2.1 软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)进行分析,在 MetaWin 2.1 软件中输入对照组和处理组的土壤呼吸的均值(Mean)、样本重复次数(N)、标准差(SD)以及分类变量。在进行 Meta 分析时引用效应值对试验数据进行量化,为了

提高效应值的准确性,本研究选取自然对数响应比(lnRR)来反映耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应^[27,28]。

$$\ln RR = \ln \frac{X_t}{X_c} = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中,RR 为响应比,lnRR 为效应值, X_t 为传统耕作条件下(CT)土壤呼吸的均值, X_c 为不同耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应(CTS、ST、STS、DT、DTS、NT 和 NTS)条件下的土壤呼吸均值。

利用 MetaWin 2.1 软件首先得到每一对数据的效应值,然后利用随机效应模型计算方差(V)、权重系数(W_{ij})、合并效应值/平均加权响应比的标准误 $[S(RR_{++})]$ 、合并效应值/平均加权响应比(RR_{++})以及其 95% 的置信区间(95%CI),具体相关计算公式如下:

$$V = \frac{D_t^2}{n_t X_t^2} + \frac{D_c^2}{n_c X_c^2} \quad (3)$$

式中, n_t 、 n_c 和 D_t 、 D_c 分别为在不同耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应条件下处理组(CTS、ST、STS、DT、DTS、NT 和 NTS)和对照组(CT)的样本数和标准偏差。

$$W_{ij} = \frac{1}{V} \quad (4)$$

$$R_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (5)$$

$$S(R_{++}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}}} \quad (6)$$

$$95\%CI = R_{++} \pm 1.96 S(R_{++}) \quad (7)$$

式中, m 为某一个分类标准下的分组数, k_i 为第 i 组中的比较次数。

RR_{++} 为正值则为正效应,反之则为负效应。若置信区间包括 0,表明耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应没有显著影响($P>0.05$);若置信区间全部大于 0,表明耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应显著增加土壤呼吸($P<0.05$);若置信区间全部小于 0,则说明耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应显著减少土壤呼吸($P<0.05$)。同时,本研究通过式(8)计算土壤呼吸增加量的变化百分数^[29]:

$$\text{土壤呼吸增加量} = (e^{RR_{++}} - 1) \times 100\% \quad (8)$$

1.4 数据统计分析

采用 SigmaPlot 10.0 软件(Systat Software, Inc., San Jose, CA, USA)作图,并利用 SigmaPlot 10.0 软件对耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田的响应的改变

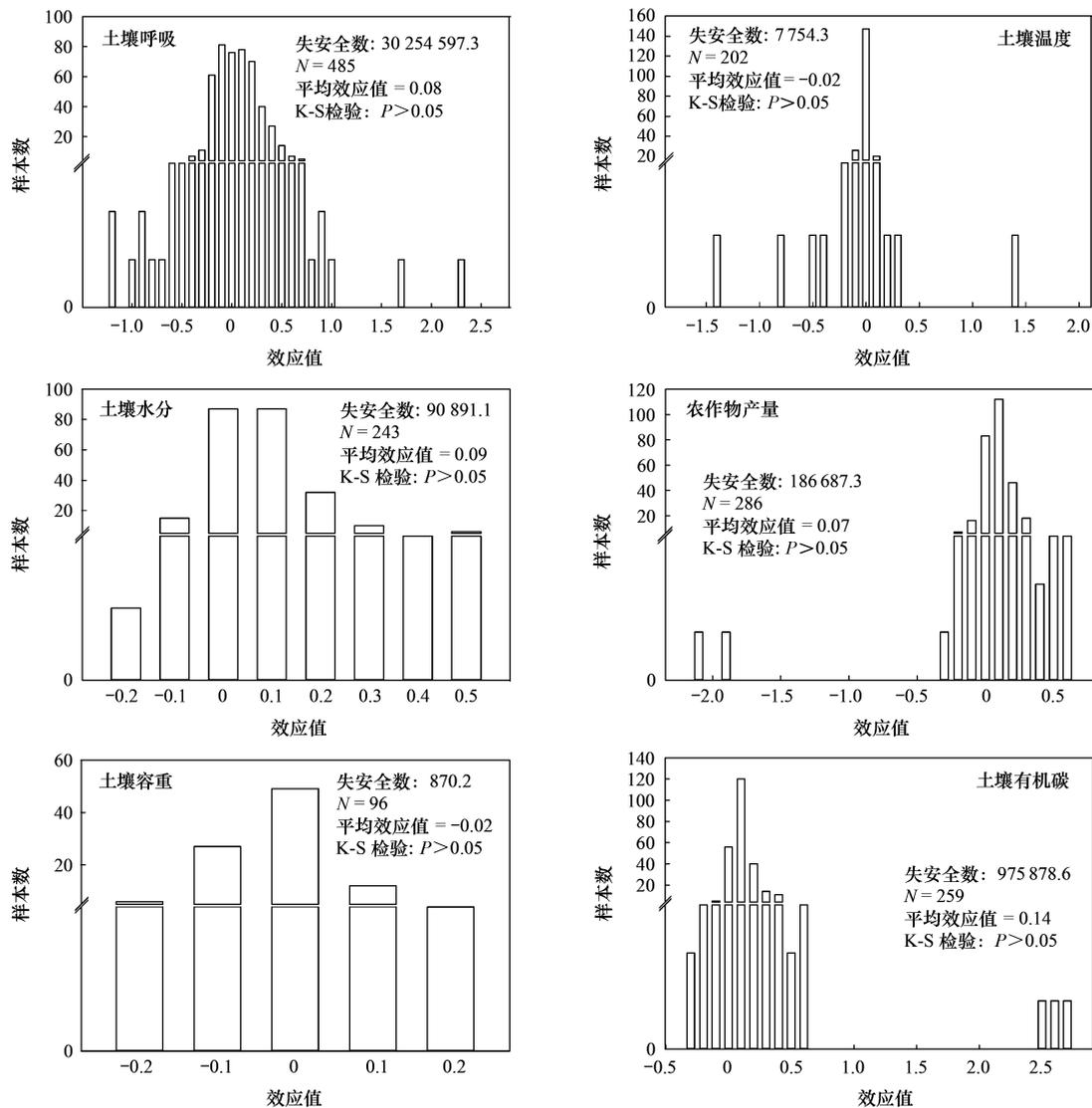


图2 耕作深度调控土壤呼吸、土壤温度、土壤水分、农作物产量、土壤容重以及土壤有机碳对秸秆还田的响应效应值的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of effect values of tillage depths regulating soil respiration, soil temperature, soil moisture, crop yield, soil bulk density and soil organic carbon in response to straw returning

量与土壤温度、土壤水分、SOC、农作物产量和土壤容重进行回归分析。此外,利用 SPSS 22.0 软件 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 通过路径分析研究土壤温度、土壤水分、SOC、农作物产量和土壤容重对耕作深度调控土壤呼吸对秸秆还田响应程度的贡献。

2 结果与分析

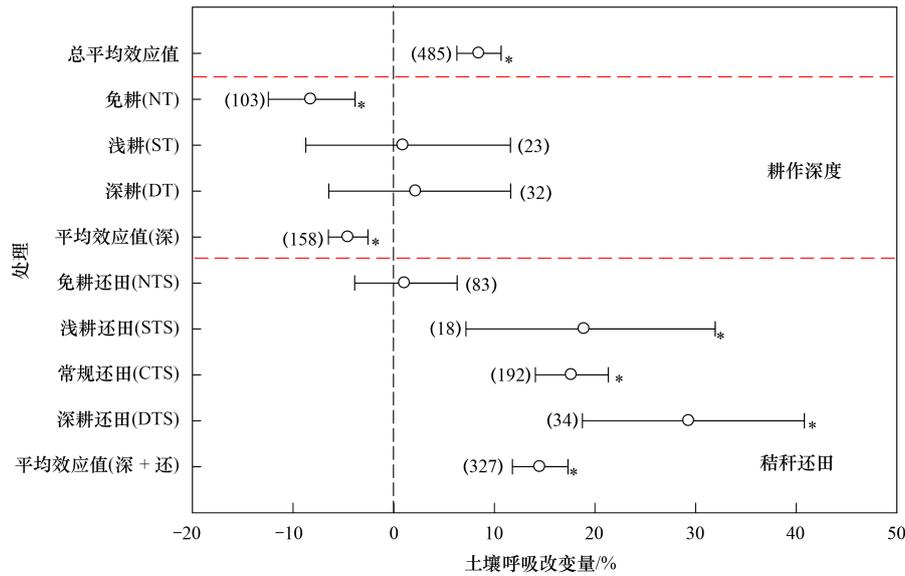
2.1 耕作深度调控秸秆还田对土壤呼吸的影响

耕作深度 (DT、ST 和 NT) 对土壤呼吸的影响显著, 平均导致土壤呼吸减少了 4.55% ($P < 0.05$)。NT 导致土壤呼吸减少了 8.25% ($P < 0.05$), 而 ST 和 DT 处理对土壤呼吸的影响不显著 ($P > 0.05$), 分别仅增加了 0.92% 和 2.19%, 但对土壤呼吸的改变量仍呈现出 DT > ST > NT 的趋势 (图 3)。此外, 耕作深度处理

会显著调控秸秆还田对土壤呼吸的影响, 其土壤呼吸的增加量呈现出 DTS (29.32%) > STS (18.92%) > CTS (17.66%) > NTS (1.08%) 的趋势, 平均增加了 14.51% (图 3, $P < 0.05$)。因此, 耕作深度会显著调控秸秆还田对土壤呼吸的影响, 且土壤呼吸的增加量呈现出深耕秸秆还田远远大于其它处理的趋势 (图 3)。

2.2 耕作深度调控秸秆还田对土壤温度和水分的影响

耕作深度对土壤温度的影响较小, 没有达到统计显著水平 [图 4(a), $P > 0.05$]。NT 导致土壤温度减少了 3.74% ($P > 0.05$), 而 ST 和 DT 却导致土壤温度增加了 2.07% ($P > 0.05$) 和 0.21% ($P > 0.05$), 平均减少了 0.11% ($P > 0.05$), 且土壤温度的增加量呈现出 ST > DT > NT 的趋势 [图 4(a)]。此外, 耕作深度也会调



*为 $P < 0.05$; 括号中数字表示不同处理下样本的数量; 平均效应值(深)表示不同耕作深度处理下土壤呼吸的平均效应值; 平均效应值(深+还)表示不同耕作深度调控秸秆还田处理下土壤呼吸的平均效应值, 下同

图3 耕作深度调控秸秆还田对土壤呼吸的影响

Fig. 3 Tillage depths regulation of the effect of straw return on soil respiration

控秸秆还田对土壤温度的响应, 且土壤温度的改变量呈现出 NTS (3.31%) > STS (-0.54%) > DTS (-3.69%) > CTS (-4.42%) 的趋势, 土壤温度平均减小了 2.63% [图 4(a), $P < 0.05$].

耕作深度对土壤水分的影响却十分显著, 且土壤水分的增加量呈现出 NT (12.24%) > ST (9.39%) >

DT (3.49%) 的趋势, 土壤水分平均增加了 10.12% [图 4(b), $P < 0.05$]. 此外, 秸秆还田对土壤水分的影响也会受到耕作深度的调控, 且土壤水分的增加量呈现出 STS (19.05%) > NTS (16.42%) > CTS (11.96%) > DTS (3.48%) 的趋势, 土壤水分平均增加了 8.35% [图 4(b), $P < 0.05$].

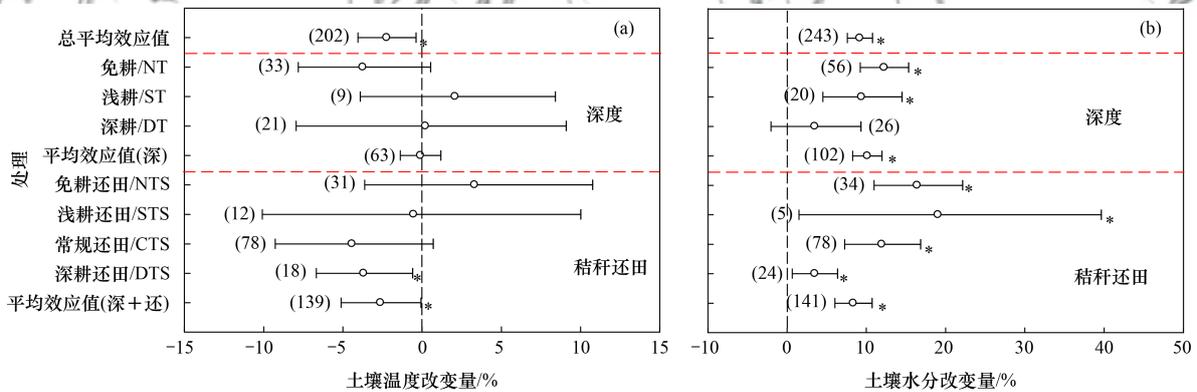


图4 耕作深度调控秸秆还田对土壤温度和水分的影响

Fig. 4 Tillage depths regulation of the effect of straw return on soil temperature and moisture

2.3 耕作深度调控秸秆还田对 SOC、产量和土壤容重的影响

耕作深度对 SOC 的影响十分显著, 平均增加了 5.90% ($P < 0.05$), 且 SOC 的增加量呈现出 NT (7.05%) > DT (5.56%) > ST (3.56%) 的趋势 [图 5(a)]. 同时, 耕作深度会显著调控秸秆还田对 SOC 的影响, SOC 平均增加了 18.43% ($P < 0.05$), 且 SOC 的增加量呈现出 DTS (26.98%) > NTS (23.94%) > CTS (13.95%) > STS (10.12%) 的趋势 [图 5(a)].

耕作深度对农作物产量的影响同样十分显著, 平均增加了 5.01% ($P < 0.05$), 且农作物产量的增加量呈现出 DT (12.91%) > ST (2.57%) > NT (1.31%) 的趋势 [图 5(b)]. 同时, 耕作深度也会显著调控秸秆还田对农作物产量的影响, 农作物产量平均增加了 8.16% ($P < 0.05$), 且农作物产量的增加量呈现出 STS (12.92%) > DTS (11.18%) > CTS (7.99%) > NTS (5.49%) 的趋势 [图 5(b)].

耕作深度对土壤容重的影响较小, 平均仅增加

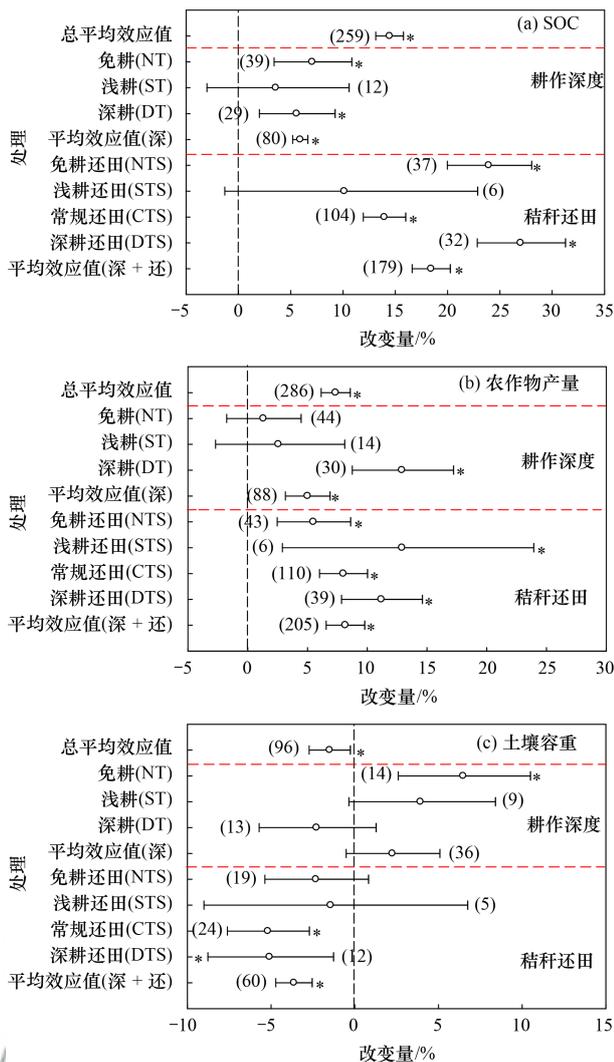


图5 耕作深度调控秸秆还田对 SOC、产量和土壤容重的影响

Fig. 5 Tillage depth regulation of the effect of straw return on SOC, crop yield, and soil bulk density

了 2.24% ($P>0.05$). 其中, NT 导致土壤容重增加了 6.48% ($P<0.05$), 而 DT 导致土壤容重减少了 2.29% ($P>0.05$)、ST 导致土壤容重增加了 2.93% ($P>0.05$), 且土壤容重的改变量呈现出 $NT>ST>DT$ 的趋势 [图 5(c)]. 耕作深度处理也会显著调控秸秆还田

表 2 土壤呼吸响应耕作深度的影响因素分析

Table 2 Influencing factors of soil respiration in response to tillage depths

项目	方程式	R^2	P	均方误差	均方根误差	平均绝对误差
土壤呼吸与土壤温度	$y = -3.02x + 8.94$	0.62	<0.05	135.63	11.64	3.56
土壤呼吸与农作物产量	$y = -0.28x^2 + 6.05x - 16.12$	0.58	<0.05	152.11	12.33	8.75
土壤呼吸与土壤有机碳	$y = -0.02x^2 + 1.48x - 5.54$	0.32	<0.05	118.96	10.91	8.78
土壤呼吸与土壤水分	$y = 0.29x^2 - 6.71x + 36.85$	0.46	<0.05	101.48	10.07	6.06
土壤呼吸与土壤容重	$y = 0.16x^2 - 2.51x + 3.88$	0.63	<0.05	121	11	0.69

3 讨论

3.1 耕作深度对土壤呼吸的影响

与传统耕作措施相比, NT 导致土壤呼吸减少了

对土壤容重的影响, 土壤容重平均减小了 3.64% ($P<0.05$), 且土壤容重的改变量呈现出 $STS (-1.45\%)>NTS (-2.33\%)>DTS (-5.10\%)>CTS (-5.20\%)$ 的趋势 [图 5(c)].

2.4 不同耕作深度下秸秆还田后土壤呼吸的影响因素分析

本研究发现, 不同耕作深度下农田秸秆还田措施实施后, 土壤温度、土壤含水量、农作物产量、SOC 和土壤容重均是影响土壤呼吸增加的重要因素, 且土壤温度、土壤含水量、农作物产量、SOC 和土壤容重分别可以解释 62%、46%、58%、32% 和 63% 的土壤呼吸改变量的变异性 (表 2). 在自然条件下, 土壤温度、土壤含水量、农作物产量、SOC 和土壤容重均是影响土壤呼吸的重要因素, 且上述各因素之间存在复杂的交互作用 (直接和间接作用), 因此量化各个影响因素对土壤呼吸改变量的相对贡献显得尤为重要. 路径分析结果表明 (表 3), 土壤容重对土壤呼吸增加量的直接贡献 (直接路径系数) 最大, 具体依次表现为: 土壤容重 (3.69) $>$ 农作物产量 (2.69) $>$ SOC (1.69) $>$ 土壤水分 (0.69) $>$ 土壤温度 (-0.31). 间接贡献中, 农作物产量通过土壤容重对土壤呼吸的贡献最大 (-0.30), 而土壤水分通过 SOC 对土壤呼吸几乎没有贡献 (0), 因此, 对土壤呼吸增加量的贡献呈现出土壤容重最大, 总贡献率高达 3.96%, 农作物产量的贡献次之, 总贡献率为 2.36%, SOC 和土壤水分的总贡献相对较小, 总贡献率分别为 1.54% 和 0.71%, 而土壤温度的总贡献率最小, 仅为 -0.37%.

综上所述, 不同耕作深度下农田秸秆还田措施实施后土壤容重是影响土壤呼吸增加的主导因素, 而其它因素 (土壤温度、土壤含水量、农作物产量和 SOC) 的影响相对较小. 因此, 在中国旱作农田生态系统中, 土壤容重是影响耕作深度调控秸秆还田对土壤呼吸影响的最重要驱动因素.

8.25% ($P<0.05$), 而 ST 和 DT 处理对土壤呼吸的影响并不显著 ($P>0.05$), 这与已有的研究结果相类似^[13,30]. NT 减少土壤呼吸的可能原因有: ① NT 由于不进行土壤耕作, 减少了对土壤的扰动程度, 导致土壤

表3 耕作深度影响土壤呼吸的路径分析

Table 3 Path analysis of soil respiration in response to tillage depths

变量	直接路径系数	间接路径系数					总贡献率/%
		土壤温度	土壤水分	土壤有机碳	农作物产量	土壤容重	
土壤温度	-0.31		-0.08	0.03	0.03	-0.05	-0.37
土壤水分	0.69	0.02		0.00	-0.01	0.01	0.71
土壤有机碳	1.69	-0.03	-0.01		0.06	-0.17	1.54
农作物产量	2.69	-0.04	-0.08	0.09		-0.30	2.36
土壤容重	3.69	-0.04	-0.05	0.17	0.19		3.96

微生物与土壤有机质不能进行充分的接触,影响土壤微生物的新陈代谢作用,最终导致土壤呼吸降低^[31];②NT显著增加了土壤团聚体的数量以及稳定性,而土壤团聚体对土壤有机质具有很好的保护作用,进而也限制了土壤微生物与底物的充分接触,最终也会抑制好氧性微生物的新陈代谢作用而导致土壤呼吸降低^[32,33];③NT也会改变土壤的理化性质,在本研究中免耕导致土壤容重增加了6.48% ($P < 0.05$),而土壤容重的增加会导致土壤中的孔隙变小,土壤中的氧气的转移以及养分的输送均会受到限制,不利于土壤中好氧性微生物对土壤有机质的分解以及植物根系的新陈代谢作用,从而导致土壤微生物呼吸以及植物根系呼吸降低,最终导致土壤呼吸速率的降低^[34];④NT也会改变土壤的微环境,NT一般会导致土壤温度降低,在本研究中NT导致土壤温度减少了3.74% ($P < 0.05$),而较低的土壤温度会导致土壤中的微生物活性、植物的新陈代谢速率以及土壤酶的活性不同程度受到抑制,从而导致土壤呼吸速率降低^[12,35]。

ST对土壤呼吸影响不显著可能原因是ST对土壤的扰动程度相对较小,因此会部分限制了土壤微生物与有机质的充分接触,而这会抑制土壤微生物的新陈代谢过程,从而引起与土壤微生物相关的土壤呼吸速率降低,最终导致土壤呼吸速率降低^[36]。此外,ST处理下的SOC仅增加了3.56% [图5(a)],导致ST处理下的SOC处于相对匮乏状态,进而导致土壤微生物可分解的土壤有机质较少,不利于土壤微生物的新陈代谢作用,从而引起土壤微生物呼吸降低,最终导致土壤呼吸降低^[31]。DT对土壤呼吸影响较小的可能原因是:①DT对土壤的恢复与调节产生一定影响,导致土壤团聚体的数量降低,因此微生物可利用吸附在土壤团聚体上暴露出来的有机质的总量减小^[37]。②DT处理会显著降低土壤微生物数量,这可能是由于DT处理加速了水分的挥发,以及频繁的干湿交替加速了有机质的矿化,SOC含量降低,土壤酶活性受到抑制,降低了菌群相对丰度,最终不利于微生物数量以及活性的提高^[37]。③虽然DT处理对土壤的

扰动程度最为剧烈,但会造成土壤团聚体的严重破坏,而土壤有机质会失去土壤团聚体的保护作用而导致DT处理下的SOC变化较小^[38,39],例如,DT处理下SOC仅增加了5.56% [图5(a)]。底物的匮乏直接降低了土壤微生物呼吸的底物有效性,不利于土壤微生物数量以及活性的提升,进而对有机质的分解速率产生影响,最终导致土壤呼吸降低^[40,41]。同时,SOC缺乏也会导致农作物的生长环境与营养物质变差,农作物的根系生长受到抑制,进而使根系呼吸减弱,最终也会导致土壤呼吸降低^[42,43]。因此,土壤中微生物数量、土壤团聚体数量的降低以及土壤中较低的SOC含量均可能是造成DT处理下土壤呼吸变化较小的可能原因。

3.2 耕作深度如何调控秸秆还田对土壤呼吸的影响

本研究结果显示,耕作深度调控农田秸秆还田对土壤呼吸的影响十分显著,NTS显著降低了土壤呼吸速率,而DTS显著提升了土壤呼吸速率,这与已有的研究结果相类似^[10,44,45]。DTS显著增加土壤呼吸的可能原因有:①DTS进一步降低了土壤紧实度,增大了土壤孔隙,提高了土壤的通透性,使得土壤有机质与土壤空气中的氧气充分接触,有机质的分解速度增加,导致土壤呼吸速率增加^[12];②DTS破坏了土壤团聚体结构,导致以前密闭在土壤团聚体内部以及吸附在土壤团聚体表面而不能被土壤微生物利用的土壤有机碳暴露出来,从而有利于土壤微生物的新陈代谢,土壤微生物呼吸速率增加,最终提升了土壤呼吸速率^[4,38];③DTS打破了犁底层,有效促进了根系生长,根生的新陈代谢以及根系生长产生的分泌物促进了根际土壤微生物呼吸,最终表现为土壤呼吸速率的显著增加^[12];④DTS也有可能通过调控底物有效性(SOC)和农作物生产力(农作物产量)等因素来影响土壤呼吸,DTS分别导致SOC增加26.98% ($P < 0.05$)和农作物产量增加了11.18% ($P < 0.05$)。一方面,SOC直接增加了土壤微生物呼吸的底物有效性,促进了土壤微生物的新陈代谢,加速了SOC的分解速率,导致土壤呼吸增加^[40,41]。另一方面,SOC也为农

作物提供了良好的生长环境与营养物质,促进了农作物的生长,从而促进根系呼吸增加,最终导致土壤呼吸增加^[42,43].农作物产量的增加表明农作物的生长环境与营养状况较好,农作物根系不断生长发育所产生的根系呼吸以及根系生长所产生的分泌物会促进根际土壤微生物呼吸,最终表现为土壤呼吸速率增加^[18].

NTS导致土壤呼吸增加幅度较小的可能原因:

- ①NTS处理有利于土壤团聚体的形成,土壤团聚体对土壤有机质具有很好的保护作用,这会限制好氧性微生物的新陈代谢作用,最终导致土壤呼吸降低^[32];
- ②NTS处理对土壤扰动较小,导致土壤中微生物与土壤有机质不能进行充分的接触,影响土壤微生物对有机质的分解速率,土壤微生物呼吸降低,从而导致NTS处理下土壤呼吸速率增加幅度较小^[31];
- ③NT处理下SOC仅增加了7.05%,而NTS处理下SOC增加了23.94% [图5(a)],这表明虽然秸秆输入后土壤中的底物显著提升,有利于增加土壤微生物的呼吸底物有效性和促进植物的根系呼吸,但是NTS处理土壤呼吸仅增加了1.08%,这可能是由于NTS处理对土壤扰动较小,导致土壤中微生物与土壤有机质的不能进行充分接触,进而免耕的减排作用会部分抵消秸秆还田的促进作用,最终导致NTS处理土壤呼吸增加幅度较小^[45,46].

耕作深度调控农田秸秆还田后土壤呼吸的增加量与土壤温度、土壤水分、SOC、农作物产量和土壤容重等因素密切相关,且这些影响因素分别可以解释32%~63%的农田土壤呼吸变异性.在自然条件下,上述各因素之间存在着复杂的交互作用,且进一步的研究发现土壤理化性质(土壤容重)是影响耕作深度调控农田秸秆还田后土壤呼吸增加的主要因素.这可能是因为:①土壤容重的变化会改变土壤的孔隙大小,影响土壤中的氧气的转移以及与外界的联系,从而影响土壤中好氧性微生物对土壤有机质的分解以及植物根系的新陈代谢作用,进而引起土壤微生物呼吸以及植物根系呼吸发生改变,最终导致土壤呼吸速率的变化^[34,47];②土壤容重的变化也会改变土壤的水肥供应能力,影响土壤肥力状况以及农作物根系的生长发育,进而影响农作物生长发育产生的根系呼吸,最终对土壤呼吸产生影响^[48].因此,在中国旱作耕作深度调控农田秸秆还田对土壤呼吸的影响研究中,土壤性质(容重)是影响农田土壤呼吸的重要驱动因素.

3.3 研究意义及应用

本研究结果显示不同耕作深度处理下(浅耕、深耕和免耕)农田秸秆还田措施实施后,SOC与土壤

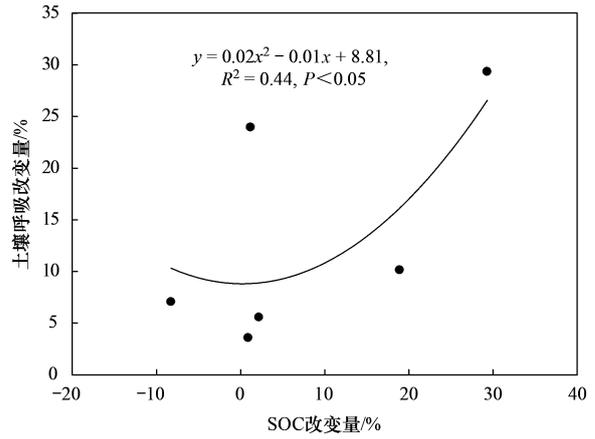


图6 不同耕作深度处理下秸秆还田后土壤呼吸改变量与SOC改变量的回归分析

Fig. 6 Regression analysis of the changes between soil respiration and SOC after straw return under different tillage depths treatments

呼吸呈二次相关关系($y = 0.02x^2 - 0.01x + 8.81, R^2 = 0.44, P < 0.05$),且SOC可以解释44%的土壤呼吸改变量的变异性(图6),这也间接证实了土壤呼吸的变化与SOC的变化密切相关.虽然不同耕作深度处理(浅耕、深耕和免耕)对土壤呼吸和SOC影响均相对较小,但是秸秆还田后不同耕作深度处理(浅耕、深耕和免耕)均显著增加了土壤呼吸和SOC水平[图7(a)],这就意味着在中国的旱地农田生态系统中土壤有机碳水平很有可能长期处于较低的水平,也就是农田土壤长期处于“低碳”或者“碳不饱和”状态.底物(SOC等)的供应例如秸秆还田后会很快显著提高

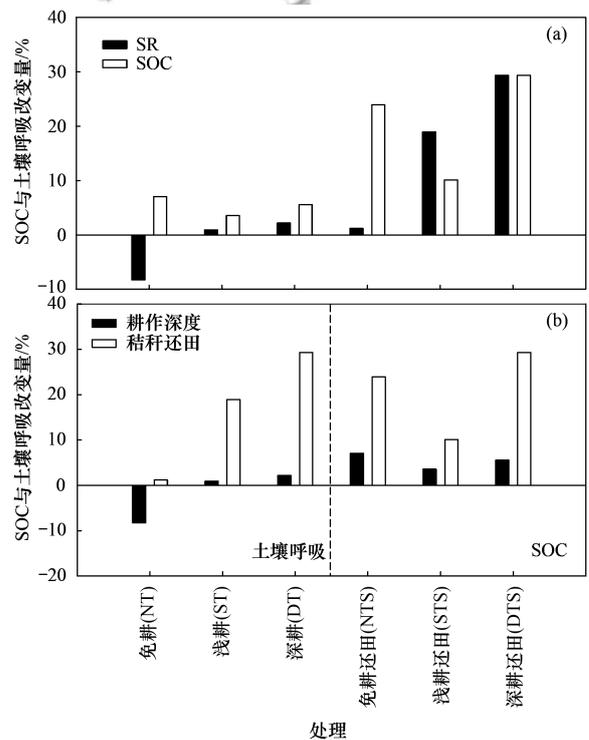


图7 耕作深度和秸秆还田对SOC和土壤呼吸改变量的影响

Fig. 7 Influence of tillage depths and straw return on the change in SOC and soil respiration

土壤微生物新陈代谢(腐殖化和分解转化)水平,然而秸秆还田后到底进行腐殖化过程还是分解转化过程则取决于秸秆还田与耕作深度的交互作用[图7(b)].虽然SOC在深耕秸秆还田、浅耕秸秆还田和免耕秸秆还田处理下分别增加了29.32%、10.12%和23.94%,且土壤呼吸在深耕秸秆还田和浅耕秸秆还田处理分别增加了29.32%和18.92%,但是土壤呼吸在免耕秸秆还田处理下仅增加1.2%[图7(b)].所以,免耕秸秆还田有利于农田土壤固碳减排.

4 结论

(1)免耕导致土壤呼吸减少了8.25% ($P < 0.05$),而浅耕和深耕处理对土壤呼吸的影响不显著 ($P > 0.05$).

(2)不同耕作深度处理下秸秆还田后土壤呼吸增加量呈现出深耕秸秆还田>浅耕秸秆还田>免耕秸秆还田的趋势.

(3)不同耕作深度处理下秸秆还田后土壤呼吸的增加量与土壤容重、农作物产量、土壤有机碳、以及土壤温度和水分改变量密切相关,且对土壤呼吸增加量的贡献呈现出土壤容重>农作物产量>土壤有机碳>土壤水分>土壤温度的趋势.

(4)免耕导致土壤呼吸减少了8.25%的同时却又导致SOC增加了7.05%,此外SOC在免耕秸秆还田处理下增加了23.94%,而土壤呼吸却仅增加了1.2%,所以,实施免耕和免耕秸秆还田措施均对农田土壤固碳减排具有重要意义.

(5)在中国的旱地农田生态系统中,耕作深度会调控秸秆还田对土壤呼吸的影响程度,而这种影响调控主要受土壤理化性质尤其是土壤容重的制约,且免耕和免耕秸秆还田均是有利于农田土壤固碳减排的重要农业管理措施.

参考文献:

[1] Sakschewski B, Von Bloh W, Boit A, *et al.* Resilience of amazon forests emerges from plant trait diversity [J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(11): 1032-1036.

[2] 徐敏,伍钧,张小洪,等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 393-404.

Xu M, Wu J, Zhang X H, *et al.* Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 393-404.

[3] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579-582.

[4] 孙宝龙,陶蕊,王永军,等. 长期少免耕对中国东北玉米农田土壤呼吸及碳氮变化的影响[J]. *玉米科学*, 2020, **28**(6): 107-115.

Sun B L, Tao R, Wang Y J, *et al.* Effects of long-term reduced and no-tillage on soil respiration, carbon and nitrogen changes of maize farmland in northeast China [J]. *Journal of Maize Sciences*,

2020, **28**(6): 107-115.

[5] Tian X P, Wang L, Hou Y H, *et al.* Responses of soil microbial community structure and activity to incorporation of straws and straw biochars and their effects on soil respiration and soil organic carbon turnover [J]. *Pedosphere*, 2019, **29**(4): 492-503.

[6] 张海龙,武润琴,李佳佳,等. 根系分泌物C:N对刺槐林地土壤理化特征和土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(4): 949-956.

Zhang H L, Wu R Q, Li J J, *et al.* Effects of root exudates C:N on soil physical and chemical characteristics and soil respiration in *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(4): 949-956.

[7] Gelybó G, Barcza Z, Dencső M, *et al.* Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, **216**, doi: 10.1016/j.still.2021.105239.

[8] 张国,王效科. 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(4): 872-881.

Zhang G, Wang X K. Impacts of conservation tillage on greenhouse gas emissions from cropland in China: A review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(4): 872-881.

[9] 何甜甜,王静,符云鹏,等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 450-458.

He T T, Wang J, Fu Y P, *et al.* Effects of adding straw and Biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 450-458.

[10] 刘平奇,张梦璇,王立刚,等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 1150-1160.

Liu P Q, Zhang M X, Wang L G, *et al.* Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of northeast China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1150-1160.

[11] 董文旭,胡春胜,陈素英,等. 保护性耕作对冬小麦-夏玉米农田氮肥挥发损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(11): 2278-2284.

Dong W X, Hu C S, Chen S Y, *et al.* Effect of conservation tillage on ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(11): 2278-2284.

[12] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(19): 155-165.

Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(19): 155-165.

[13] 禄兴丽,廖允成. 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2266-2273.

Lu X L, Liao Y C. Effects of tillage on soil respiration and root respiration under rain-fed summer corn field [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2266-2273.

[14] 牛新胜,牛灵安,张宏彦,等. 玉米秸秆覆盖免耕对土壤呼吸的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(1): 256-260.

Niu X S, Niu L N, Zhang H Y, *et al.* Effect of no-tillage with maize straw mulching on soil respiration [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(1): 256-260.

[15] 张宇,张海林,陈继康,等. 耕作措施对华北农田CO₂排放影

- 响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(4): 47-53.
- Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, *et al.* Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(4): 47-53.
- [16] 禄兴丽, Tanveer S K. 旱地保护性耕作对土壤呼吸和夏玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(8): 3352-3354.
- Lu X L, Tanveer S K. Effects of Conservation tillage on soil respiration and summer maize (*Zea mays* L.) yield in the arid areas [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, **41**(8): 3352-3354.
- [17] 涂纯, 王俊, 官情, 等. 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济环境效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(8): 931-937.
- Tu C, Wang J, Guan Q, *et al.* Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy-environment benefit in rainfed winter wheat fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(8): 931-937.
- [18] Heuer H, Tomanová O, Koch H J, *et al.* Subsoil properties and cereal growth as affected by a single pass of heavy machinery and two tillage systems on a Luvisol[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, **171**(4): 580-590.
- [19] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [20] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展[J]. 土壤通报, 2003, **34**(6): 562-568.
- Fang H J, Yang X M, Zhang X P. The progress of study on soil organic carbon dynamics in cropland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, **34**(6): 562-568.
- [21] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Computational Geometry, 2013, **18**(2): 95-123.
- [22] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- Jin Y T, Li X F, Cai Y, *et al.* Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- [23] 杨传文, 邢帆, 朱建春, 等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 1149-1162.
- Yang C W, Xing F, Zhu J C, *et al.* Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 1149-1162.
- [24] Dutta A, Bhattacharyya R, Jiménez-Ballesta R, *et al.* Conventional and zero tillage with residue management in rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains: Impact on thermal sensitivity of soil organic carbon respiration and enzyme activity [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, **20**(1), doi: 10.3390/ijerph20010810.
- [25] 杨卓颖, 张彦军, 邹俊亮, 等. 耕作方式影响旱作农田土壤呼吸的整合研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2023, **43**(1): 84-91.
- Yang Z Y, Zhang Y J, Zou J L, *et al.* Integrated study on the effects of tillage method on soil respiration in dry farmland [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2023, **43**(1): 84-91.
- [26] 李寒冰, 金晓斌, 杨绪红, 等. 不同农田管理措施对土壤碳排放强度影响的Meta分析[J]. 资源科学, 2019, **41**(9): 1630-1640.
- Li H B, Jin X B, Yang X H, *et al.* Meta-analysis of the effects of different farmland management measures on soil carbon intensity [J]. Resources Science, 2019, **41**(9): 1630-1640.
- [27] Zhang Y J, Zou J L, Meng D L, *et al.* Effect of soil microorganisms and labile C availability on soil respiration in response to litter inputs in forest ecosystems: A meta-analysis [J]. Ecology and Evolution, 2020, **10**(24): 13602-13612.
- [28] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, **80**(4): 1150-1156.
- [29] Zhang Y J, Zou J L, Dang S N, *et al.* Topography modifies the effect of land-use change on soil respiration: a meta-analysis [J]. Ecosphere, 2021, **12**(12), doi: 10.1002/ecs2.3845.
- [30] 任景全, 王连喜, 陈书涛, 等. 免耕与翻耕条件下农田土壤呼吸的比较[J]. 中国农业气象, 2012, **33**(3): 388-393.
- Ren J Q, Wang L X, Chen S T, *et al.* Comparison of soil respiration from farmlands under no tillage and tillage regimes [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, **33**(3): 388-393.
- [31] Lamptey S, Li L L, Xie J H, *et al.* Soil respiration and net ecosystem production under different tillage practices in semi-arid Northwest China [J]. Plant, Soil and Environment, 2017, **63**(1): 14-21.
- [32] Zarea M J, Ghalavand A, Goltapeh E M, *et al.* Effects of mixed cropping, earthworms (*Pheretima* sp.), and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on plant yield, mycorrhizal colonization rate, soil microbial biomass, and nitrogenase activity of free-living rhizosphere bacteria [J]. Pedobiologia, 2009, **52**(4): 223-235.
- [33] Mangalassery S, Mooney S J, Sparkes D L, *et al.* Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils [J]. European Journal of Soil Biology, 2015, **68**: 9-17.
- [34] 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 等. 庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4858-4866.
- Li X M, Yan J X, Du Z Q, *et al.* Detection of influencing factors of spatial variability of soil respiration in Pangquangou nature reserve [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4858-4866.
- [35] Bruun S, Clauson-Kaas S, Bobuškú L, *et al.* Carbon dioxide emissions from biochar in soil: role of clay, microorganisms and carbonates [J]. European Journal of Soil Science, 2014, **65**(1): 52-59.
- [36] 江晓东, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 少免耕模式对土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(2): 253-256.
- Jiang X D, Chi S Y, Ning T Y, *et al.* Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on soil respiration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(2): 253-256.
- [37] 段雅欣. 不同耕作措施下马铃薯 || 蚕豆体系对土壤呼吸及细菌群落的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- Duan Y X. Effects of potato-faba bean intercropping system on soil respiration and bacterial communities under different cultivation measures [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.

- [38] Paustian K, Six J, Elliott E T, *et al.* Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 147-163.
- [39] 韩上, 武际, 李敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(2): 276-284.
Han S, Wu J, Li M, *et al.* Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(2): 276-284.
- [40] Fang Y Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 136-145.
- [41] 刘峰, 赵鹏程, 张响, 等. 从微生物角度揭示气候变暖对土壤有机碳转化影响的研究综述[J]. *土壤通报*, 2022, **53**(6): 1492-1498.
Liu F, Zhao P C, Zhang Y, *et al.* Effects of climate warming on soil organic carbon storage from the viewpoint of soil microorganism [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, **53**(6): 1492-1498.
- [42] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [43] Kotroczó Z, Fekete I. Significance of soil respiration from biological activity in the degradation processes of different types of organic matter [J]. *DRC Sustainable Future*, 2020, **1**(2): 171-179.
- [44] 于淑婷, 赵亚丽, 王育红, 等. 轮耕模式对黄淮海冬小麦-夏玉米两熟区农田土壤改良效应[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(11): 2150-2165.
Yu S T, Zhao Y L, Wang Y H, *et al.* Improvement effects of rotational tillage patterns on soil in the winter wheat-summer maize double cropping area of Huang-Huai-Hai region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(11): 2150-2165.
- [45] 刘建民, 胡立峰, 张爱军. 保护性耕作对农田温室效应的影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2006, **22**(8): 246-249.
Liu J M, Hu L F, Zhang A J. Research progress in greenhouse effect caused by conservation tillage [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22**(8): 246-249.
- [46] 杨倩, 张清平, 蒋海亮, 等. 保护性耕作对黄土旱塬玉米土壤呼吸及微生物数量的影响[J]. *草业科学*, 2012, **29**(12): 1810-1815.
Yang Q, Zhang Q P, Jiang H L, *et al.* Effects of conservation tillage on soil respiration and microorganism amount in maize rhizosphere soil in Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2012, **29**(12): 1810-1815.
- [47] 胡立峰. 中国土壤类型下免耕对土壤容重的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(12): 73-78.
Hu L F. No-tillage affects soil bulk density under major soil types in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(12): 73-78.
- [48] 张音霄, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 免耕年限对东北旱田土壤性质及玉米根系、产量的影响[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(2): 433-437.
Zhang Y X, Zou H T, Zhang Y L, *et al.* Effects of no-tillage years on soil properties and maize growth [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(2): 433-437.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)