

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响

郭怡婷¹, 罗晓琦¹, 王锐¹, 陈海心¹, 冯浩^{2,3*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:为探究生物可降解地膜覆盖对冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统温室气体排放的影响, 布设了普通地膜覆盖(PM)、生物可降解地膜覆盖(BPM)和无覆盖(CK)这3个处理, 采用静态暗箱-气相色谱仪法监测了2018~2019年土壤CO₂、CH₄和N₂O的排放通量, 并用水分利用效率(WUE)、温室气体排放强度(GHGI)和净生态系统经济预算(NEEB)指标评估覆膜对作物产量、农田环境和经济效益的影响。结果表明, 与CK相比, PM和BPM增加了玉米季土壤CO₂的排放, PM处理下CO₂排放总量高于BPM处理($P>0.05$)。PM和BPM处理均能够显著减少土壤对CH₄的吸收, CH₄的年吸收量较CK处理分别减少了42.0%和24.2% ($P<0.05$)。与CK相比, PM和BPM增加了小麦季N₂O排放总量($P>0.05$), 而显著降低了夏玉米季N₂O排放($P<0.05$)。覆膜能够提高作物产量和水分利用效率, 与CK相比, PM和BPM处理的小麦产量分别提高了51.7%和32.3% ($P<0.05$), 对应的水分利用效率分别提高了33.1%和36.3% ($P<0.05$)。在玉米季, PM和BPM相比CK产量显著提高了43.3%和19.5% ($P<0.05$), 水分利用效率分别提高了49.8%和18.4% ($P<0.05$)。结合年产量和温室气体排放, PM和BPM处理的GHGI相比CK降低20.5%和14.8% ($P>0.05$)。与CK相比, PM的NEEB在小麦-玉米季显著增加了84.2% ($P<0.05$), 而BPM增加了8.9% ($P>0.05$)。因此, 从产量、水分利用效率、环境效应和经济效益方面考虑, 生物可降解地膜具有代替普通地膜的可行性。

关键词:生物可降解地膜; 小麦-玉米; 温室气体; 产量; 水分利用效率; 温室气体排放强度; 净生态系统经济预算

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2788-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108205

Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain

GUO Yi-ting¹, LUO Xiao-qi¹, WANG Rui¹, CHEN Hai-xin¹, FENG Hao^{2,3*}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the effects of biodegradable plastic film mulching on the greenhouse gas emissions of a winter wheat-summer maize rotation system, the three treatments deployed in this experiment during a winter wheat-summer maize planting period from 2018 to 2019 included ordinary plastic film mulching (PM) and biodegradable plastic film mulching (BPM), with no film mulching as the control (CK). The emissions of soil greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) were monitored using a static opaque chamber and chromatography methods. Moreover, the water use efficiency (WUE), greenhouse gas emission intensity (GHGI), and net ecosystem economic budget (NEEB) indicators were used to assess the impact of mulching on crop yield, farmland greenhouse effects, and economic benefits. The results of this study showed that compared with that of CK, the PM and BPM treatments increased soil CO₂ emissions during the summer maize growing season, and the cumulative CO₂ emission of the PM treatment was higher than that of BPM ($P>0.05$). Both the PM and BPM treatments significantly reduced the CH₄ absorption flux of the soil, and the annual absorption of CH₄ decreased by 42.0% and 24.2%, respectively, compared with that of CK ($P<0.05$). Furthermore, the PM and BPM treatments increased the cumulative N₂O emission flux in the wheat growing season ($P>0.05$) but significantly decreased the emissions of N₂O from soil in the maize season compared with that of CK ($P<0.05$). Film mulching increased crop yield and water use efficiency compared with those of CK, the wheat yield under the PM and BPM treatments increased by 51.7% and 32.3% ($P<0.05$), respectively, and the corresponding water use efficiencies were respectively increased by 33.1% and 36.3% ($P<0.05$). Similarly, in the summer maize season, the yield of PM and BPM increased significantly by 43.3% and 19.5% ($P<0.05$), and the water use efficiency increased by 49.8% and 18.4% ($P<0.05$), respectively. Combined with annual production and greenhouse gas emissions, PM and BPM reduced the GHGI by 20.5% and 14.8% ($P>0.05$) compared with that of CK, respectively, and PM significantly increased NEEB by 84.2% ($P<0.05$) compared with that of CK during the wheat-maize growing season, whereas BPM increased by 8.9% ($P>0.05$). To summarize, considering the yield, water use efficiency, environmental effects, and economic benefit, biodegradable plastic film mulching has the feasibility to replace ordinary plastic film mulching.

Key words: biodegradable plastic film mulching; wheat-maize; greenhouse gas; yield; water use efficiency; greenhouse gas emission intensity; net ecosystem economic budget

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807328, 51879224); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA102904); 中国博士后科学基金项目(2018M643752)

作者简介: 郭怡婷(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田温室气体排放, E-mail: gyt@nwfau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

温室气体 (GHGs) 的大量排放是引起全球气候变暖的重要原因^[1], 农业活动是重要的 GHGs 排放源, 其对气候变化的影响主要是通过改变 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 这 3 种 GHGs 在土壤-植物-大气系统之间的交换而导致的^[2]. 中国的农业 GHGs 排放量占全国总排放量的 17%^[3], 预计到 2050 年的排放量将会再增加 30%^[4]. 良好的管理措施可以使农业减排潜力大幅度提升^[5], 因此在确保粮食安全的前提下, 制定合理的农田管理措施来有效减少我国农田土壤 GHGs 的排放, 对于缓解气候变暖、实现我国的减排目标具有重要意义.

地膜覆盖可有效改善土壤环境, 促进作物生长, 有较好的集水保墒、增产的作用^[6]. 地膜覆盖使全国作物产量和水分利用效率分别提高了 45.5% 和 58.0%^[7], 特别在干旱地区已成为重要的农艺措施^[8]. 然而连续多年覆盖聚乙烯地膜导致大量塑料碎片残留在土壤耕作层中, 进而造成土壤板结, 严重阻碍土壤中的水分和养分运输^[9,10], 对土壤生态环境造成严重影响^[11]. 生物可降解地膜的研究和推广在国内外引起了极大的关注^[12], 有研究表明, 生物可降解地膜能够减少土壤残膜污染, 具有保温、保墒、促进作物生长和增产等作用^[13-16], 与普通地膜相比, 生物可降解地膜对土壤水分、温度及作物生长和产量的影响相当, 且差异不显著^[13,14,17].

地膜覆盖措施显著改变了土壤水热条件及理化性质, 进而会影响到土壤呼吸过程和农田土壤碳、氮循环过程^[18]. 有研究表明, 地膜覆盖使得土壤表层温度升高, 土壤微生物活性增强, 土壤呼吸速率加快, 促进了 CO_2 的产生^[19,20], 但也有研究表明覆膜对 CO_2 的排放没有显著影响^[21]. Cuello 等^[22] 的研究认为覆膜降低了土壤中 O_2 的含量, 形成的厌氧环境促进了 CH_4 的产生, 从而减少了土壤对 CH_4 的吸收. 覆膜会使土壤含水量增加, 减少土壤的好气条件, 促进反硝化作用的发生而增加 N_2O 的排放量^[23], 然而也有研究表明覆膜对 N_2O 的排放没有显著影响^[21] 或者降低了旱地 N_2O 的排放^[24,25]. 生物可降解地膜覆盖下的土壤氮含量^[26]、温度^[27] 和水分^[28] 高于不覆盖, 且与聚乙烯地膜覆盖有差异, 因此 GHGs 的排放也不同于两者. 胡国辉等^[29] 在对水稻的研究中表明覆盖生物可降解地膜能够改善土壤通气性, 降低了土壤产甲烷菌丰度, 并提高甲烷氧化菌丰度, 进而减少了稻田 CH_4 排放量. Wang 等^[30] 的研究表明生物可降解地膜增加了氨氧化细菌 (AOB) 的丰度和多样性以及 N_2O 的浓度, 但明显减少了 N_2O 的排放. 由此可见, 不同的气候区、土壤性质和种植制度使得地膜覆盖下 GHGs 的排放结果不

尽相同.

目前国内外关于覆膜对农田 GHGs 排放影响的研究多集中在覆聚乙烯地膜方面, 而对生物可降解地膜覆盖下的农田 GHGs 排放的研究有待加强, 且对聚乙烯地膜和生物可降解膜覆盖下的经济效益、环境影响和综合效益的对比研究较少. 因此本文以关中地区的小麦-玉米轮作农田为研究对象, 通过设置不同地膜覆盖处理, 对比分析其对冬小麦-夏玉米农田土壤水热变化、作物产量和 GHGs 排放的影响差异. 利用水分利用效率 (WUE)、温室气体排放强度 (greenhouse gas emission intensity, GHGI) 和净生态系统经济预算 (net ecosystem economic budget, NEEB) 指标评估不同地膜覆盖对作物产量、农田温室效应和经济效益的影响, 通过探索生物可降解地膜替代聚乙烯地膜的可行性, 以期为关中地区粮食的可持续性生产和环境友好型覆膜种植技术提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站 (34°20'N, 108°24'E, 海拔高度 521 m), 属暖温带半湿润大陆性季风气候. 站内地形平整, 土层深厚, 土壤类型为壤土, 土壤质地为中壤土, 全年无霜期 221 d, 降水多集中在 7~9 月, 多年平均降水量为 620 mm, 多年平均气温为 13.0℃. 本试验初始时土壤 (0~20 cm), ω (有机碳) 为 8.14 g·kg⁻¹, ω (全氮) 为 0.95 g·kg⁻¹, ω (硝态氮) 为 5.41 mg·kg⁻¹, ω (铵态氮) 为 1.35 mg·kg⁻¹, ω (速效磷) 为 20.91 mg·kg⁻¹, ω (速效钾) 为 134 mg·kg⁻¹, pH 值为 8.20 (水土比 1:1), 田间持水量 (体积含水率) 为 27.92%, 土壤容重为 1.37 g·cm⁻³. 逐日气象资料由试验站内的气象站获取, 试验期间的气温和降水如图 1 所示.

1.2 试验设计

本试验于 2018 年 10 月~2019 年 10 月进行, 采用随机区组试验设计, 共设置 3 个处理, 即普通地膜覆盖 (PM)、生物可降解地膜覆盖 (BPM) 和无覆盖种植 (CK), 每个处理设置 3 次重复, 共计 9 个小区, 每个小区面积为 5 m×6 m. 小区之间有 0.5 m 的保护行, 试验区周围设有 0.5 m 宽的作物保护带. 普通地膜为透明聚乙烯塑料地膜 (PE), 膜厚 0.01 mm, 生物可降解地膜主要成分为聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT), 呈白色半透明状, 膜厚也为 0.01 mm, 降解产物为水、 CO_2 和所含元素的矿化无机盐. 供试小麦品种为“小偃 22”, 采用条播种植, 行距

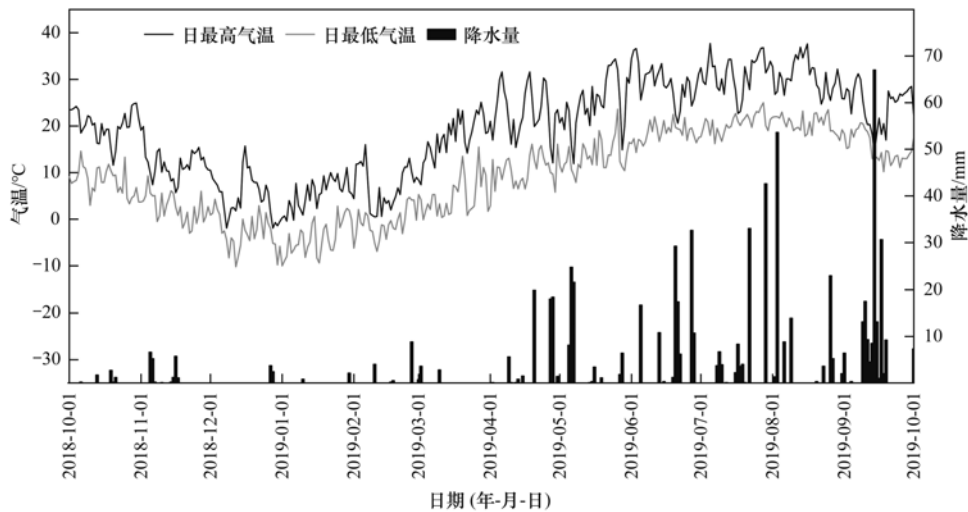


图1 小麦-玉米季节日最高温、最低温和日降水量

Fig. 1 Daily maximum air temperature, minimum air temperature and precipitation during the wheat-maize growing season

为 30 cm,播种量为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦播种后,用 1 m 宽地膜覆盖小区土壤表面,待小麦出苗后,用剪刀将地膜沿着小麦种植行剪开,使得小麦完全露出地膜,并用土块将地膜边缘压好。冬小麦于 2018 年 10 月 6 日播种,2019 年 6 月 3 日收获,播种前施入基肥:氮肥 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计),磷肥 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计),于拔节期进行追肥: $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计)。供试夏玉米品种为“秦龙 14”,采用先覆地膜后人工穴播的种植方式,播种深度 5 cm,株距 40 cm,行距 60 cm,播种密度为 $45000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。夏玉米播种时,先用地膜覆盖整个小区,然后在膜上开孔种植。播种前施入基肥,施用量为氮肥 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计),磷肥 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计),整个生育期内无追肥。夏玉米于 2019 年 6 月 14 日播种,2019 年 9 月 29 日收获。整个作物生长季无灌溉,其他田间管理措施与当地保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量、温度和水分测定

小麦收获后,在每个小区选取 1 m^2 的样点进行单独收割,风干脱粒后称取籽粒质量并计算产量。玉米收获后,随机选取小区代表平均长势的 15 株玉米,人工脱粒测量重量换算成单位面积产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。每次采气时,将酒精温度计从地膜表面插入 5 cm 深处以测定土壤温度,同时用土钻法采集 0~10 cm 土壤,取土时将接缝处地膜揭开,待取样完成后用土块将地膜压实。每个小区采 3 个点取平均值,采用烘干法测定土壤含水量,并换算成土壤孔隙度含水率 (WFPS),计算公式为:

$$\text{WFPS} = \theta \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{2.65}\right)^{-1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, θ 为 0~10 cm 土层体积含水率(%), γ 为土

壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

以 20 cm 土壤为一层,在每个小区分别采集作物播前和收获后 0~100 cm 土层的土壤样品用烘干法进行土壤含水量的测定。土壤蓄水量计算公式为:

$$W = h \times \gamma \times w \times 10 \quad (2)$$

式中, W 为土壤蓄水量 (mm); h 为土层深度 (cm); γ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); w 为土壤含水量 (%)。作物耗水量采用水量平衡法计算,计算公式如下:

$$\text{ET} = P + \Delta W + I + K - R - D \quad (3)$$

式中, ET 为作物耗水量 (mm); P 为生育期降水量 (mm); ΔW 为作物播种前和收获后 0~100 cm 土壤贮水量的变化 (mm); I 为生育期灌溉量 (mm); K 为地下水的补给量 (mm); R 为地表径流量 (mm)。由于试验区地势平坦,每个小区周围有高出 20 cm 的田埂,地膜覆盖小区并非百分百全部覆盖,降雨可沿地膜流入膜的缝隙和作物种植区域的孔内进而渗入土壤,降水后径流可忽略,因此 $R=0$; 经分析土壤水分动态变化情况,在计算深度 100 cm (根系活动层) 内不存在渗漏,因此 $D=0$; 此外,由于地下水埋藏深度较深,不存在地下水对作物的补给,因此 $K=0$; 整个生育期内无灌溉,因此 $I=0$, 即计算时 I 、 R 、 K 和 D 忽略不计。

根据冬小麦和夏玉米产量和生育期耗水量计算水分利用效率。作物水分利用效率计算公式如下:

$$\text{WUE} = Y/\text{ET} \quad (4)$$

式中, WUE 为水分利用效率 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{mm})^{-1}$]; Y 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.2 气体采集与测定

温室气体采用静态暗箱-气相色谱法进行采集和测定。采样箱由箱体和底座组成,箱体尺寸为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$,用不锈钢材料制成,表面覆有

隔热层,箱内安装搅匀气体的风扇和抽气接口,接口连接三通阀,箱体顶部配有数字温度计。底座尺寸为 50 cm × 50 cm × 5 cm,上面附有凹槽,在试验开展前 1 个月,将底座埋设于小区中间,埋设深度 5 m,后期保持不动。小麦和玉米种植于底座两侧,对于地膜覆盖处理,底座内土壤表面全部用地膜覆盖,在小麦出苗后将地膜沿中间剪一条缝,玉米播种时在中间开孔。采样之前槽内注水密封以保证箱内密封环境。气体采集时间为 09:00 ~ 11:00,在扣箱后 0、10、20 和 30 min 时用 60 mL 注射器采集箱内气体,同时记录箱体温度显示器上的开氏温度。每 7 d 采集一次,若施肥或降水,则增加采样频率,采样结束后立即带回实验室用气相色谱仪(Agilent 7890 A 型,美国安捷伦科技有限公司)进行分析。CH₄ 和 CO₂ 使用氢火焰离子检测器(FID)测定,载气为氮气,柱温为 80℃,检测器温度为 200℃,流速为 40 mL·min⁻¹;燃气是氢气,其流速 35 mL·min⁻¹;助燃气是空气,流速 350 mL·min⁻¹。N₂O 使用电子捕获检测器(ECD),载气为氩甲烷,其柱温是 65℃,检测器温度 330℃,流速为 30 mL·min⁻¹。气体排放速率由 4 个连续样品浓度的斜率经过线性回归分析得出,排放通量计算式为^[31]:

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \quad (5)$$

式中, F 为温室气体排放通量 [CO₂: mg·(m²·h)⁻¹; CH₄: mg·(m²·h)⁻¹; N₂O: μg·(m²·h)⁻¹]; ρ 为 CO₂、CH₄ 或 N₂O 在标准状态下的气体密度 (mg·cm⁻³); V 为密闭箱体积 (m³); A 为密闭箱占地面积 (m²); $\Delta c/\Delta t$ 为该次采样的 4 个气样由线性回归分析得到的 CO₂、CH₄ 或 N₂O 排放速率; T 为采样时密闭箱内的绝对温度 (K)。

生长季土壤温室气体排放总量计算公式如下:

$$En = \sum_{i=1}^n R_i D_i \quad (6)$$

式中(以 CO₂ 为例), En 为土壤的 CO₂ 排放总量 (kg·hm⁻²); R_i 为第 i 次采样时 CO₂ 的日排放通量 [mg·(m²·d)⁻¹]; D_i 为第 i 次采样到第 $i+1$ 次采样的间隔天数(d)。

1.4 全球增温潜势和温室气体排放强度

根据最新 IPCC 研究成果,在 100 年时间尺度下,CH₄ 和 N₂O 的增温潜势分别是 CO₂ 的 28 倍和 265 倍^[5]。由此,全球增温潜势(global warming potential, GWP)和温室气体排放强度(GHGI)计算公式如下^[32]:

$$GWP = 265En(N_2O) + 28En(CH_4) + En(CO_2) \quad (7)$$

$$GHGI = GWP/Y \quad (8)$$

式中, GWP 为全球增温潜势 (kg·hm⁻²); $En(CH_4)$ 、 $En(N_2O)$ 和 $En(CO_2)$ 分别为土壤的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放总量 (kg·hm⁻²); GHGI 为温室气体排放强度 (kg·t⁻¹); Y 为产量 (t·hm⁻²)。

1.5 净生态系统经济预算

净生态系统经济预算(NEEB,元·hm⁻²)是作物生产和农业活动的重要参考指标,可用来表示不同农业措施下农艺生产力和环境可持续性之间的关系,对实施不同措施的农田进行经济可行性评价^[33],计算公式如下^[34]:

$$NEEB = R_y - C - GWP_c \quad (9)$$

式中, R_y 为产量收益 (元·hm⁻²),为当地粮食收购的平均价格(小麦为 2.38 元·kg⁻¹,玉米为 1.86 元·kg⁻¹)与籽粒产量乘积来获得; C 为种植成本 (元·hm⁻²),本试验种植成本主要包括农资(如肥料、地膜、种苗等)和人工投入(播种、除草、揭膜、收获)等。其中,覆盖生物可降解地膜的地块的作物收获后未降解部分继续降解,最终产物是碳水化合物,不会对土壤环境造成危害,无需进行残膜回收处理。覆盖聚乙烯地膜的地块,在收获后还需进行残膜回收,以当地市场工价每人 60 元·d⁻¹计。生物可降解地膜价格为 24 元·kg⁻¹,聚乙烯地膜的价格为 12 元·kg⁻¹,GWP_c 为 GWP 成本,以碳交易价格(103.7 元·t⁻¹,以 CO₂-eq 计)与 GWP 的乘积计算 (元·hm⁻²)^[34]。

1.6 数据处理与分析

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,多重比较采用最小显著差异法 LSD,显著水平为 $P < 0.05$ 。所有数据均为 3 次重复,应用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤温度和水分的变化

各处理土壤表层含水量(0 ~ 10 cm)主要受降水影响,在降水后均有明显上升。如图 1 和图 2(a)所示,覆膜处理的土壤孔隙含水率普遍高于无覆盖处理,与 CK 相比,小麦季 PM 和 BPM 处理的平均土壤孔隙含水率显著提高了 27.0% 和 17.8% ($P < 0.05$),玉米季显著提高了 17.9% 和 10.1% ($P < 0.05$)。可见两种覆盖方式均具有较好地保水效果,且 PM 在小麦-玉米季内的保水效果最好。如图 2(b)所示,各处理表层土壤温度(0 ~ 5 cm)的变化趋势与气温一致。PM、BPM 和 CK 处理的土壤温度均于 1 月下降到最低值,7 月达到峰值。在冬小麦出苗期至越冬期,地膜具有一定的增温效应,PM 处理

的平均土壤温度较 CK 处理上升了 0.57℃. 而 BPM 处理在气温较低时(1~2月)也能明显提升 0.53~1.27℃ 的土壤温度. 返青期至成熟期,覆膜降低了土壤温度,与 CK 相比,PM 和 BPM 的平均土壤温度分别降低了 3.53℃ 和 3.24℃ ($P < 0.05$). 但对比小麦生育期内土壤温度的最大值与最小值之差发现,覆膜处理能够降低土壤温度的波动,CK 的最高温度与最低温度的差值高达 32.07℃,PM 和 BPM 分别为 26.97℃ 和 24.77℃. 在夏玉米生育期内,PM 处理于 8 月中旬之前均提高了土壤温度,增温幅度在 1.25~5℃ 之间,8 月中旬之后增温能力减弱. BPM 处理于 7 月中旬之前也提高了土壤温度,增温幅度在 1.67~3.5℃ 之间,增温性能与 PM 处理无显著差异. 然而随着生物可降解地膜的裂解和作物冠层的生长,BPM 处理的增温能力逐渐减弱,甚至降低了土壤温度. 与 CK 相比,BPM 从 8 月中旬至收获期,土壤温度降低了 0.1~1.23℃. 整体来看,玉米生长季 PM 处理的平均土壤温度显著提高了 6.8% ($P < 0.05$),BPM 提高了 4.3% ($P > 0.05$).

表 1 不同处理下温室气体排放与土壤温度(5 cm)和土壤孔隙含水率(10 cm)的相关系数¹⁾

处理编号	CO ₂ 排放通量		CH ₄ 吸收通量		N ₂ O 排放通量	
	土壤温度	WFPS	土壤温度	WFPS	土壤温度	WFPS
CK	0.757 **	0.320 *	0.380 **	0.126	0.196	0.407 **
PM	0.636 **	0.117	0.136	0.014	0.409 **	0.429 **
BPM	0.654 **	0.113	0.253	-0.003	0.383 **	0.377 **

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关

18.5% ($P > 0.05$) 和 7.8% ($P > 0.05$).

2.3 土壤 CH₄ 排放通量的季节变化

图 3(b) 给出了不同处理的 CH₄ 排放通量变化趋势,正通量表示土壤向大气排放 CH₄,负通量表示土壤从大气中吸收 CH₄. 从中可知,小麦-玉米季的 CH₄ 既有吸收特征又有排放特征,CH₄ 日排放通量在 -0.07~0.09 mg·(m²·h)⁻¹ 之间变化,各处理 CH₄ 排放没有表现出明显的季节排放规律. 相关分析表明,CK 处理的 CH₄ 吸收通量与土壤温度呈显著正相关($P < 0.01$),而覆膜处理与土壤温度和土壤含水量均没有显著的相关性(表 1). 覆膜处理在 8 月出现了 CH₄ 排放峰,这可能与覆膜处理的土壤含水量较高,造成土壤形成厌氧环境从而促进了产甲烷菌产生 CH₄ 有关. 由表 2 可知,各处理在小麦和玉米生长季均为 CH₄ 的吸收汇. 与 CK 处理相比,PM 与 BPM 处理分别显著降低了 42.0% 和 24.2% 的土壤对 CH₄ 的年吸收量($P < 0.05$).

2.2 土壤 CO₂ 排放通量的季节变化

从图 2(b) 和图 3(a) 中可以看出,各处理小麦-玉米生育期的 CO₂ 排放量变化趋势与土壤温度变化规律相似,呈现出鲜明的季节变化特点. 相关分析表明,CO₂ 排放通量与土壤温度显著相关($P < 0.01$,表 1). 在冬小麦越冬期,CO₂ 的排放量达到最低且基本保持不变. 随着气温上升,CO₂ 的排放量也随之增加,排放的高峰期为 5~8 月. 从排放总量来看,PM 和 BPM 对小麦季 CO₂ 排放总量没有显著影响. 在夏玉米生长季,PM、BPM 和 CK 处理的 CO₂ 日平均排放通量分别为 240.6、222.5 和 221.9 mg·(m²·h)⁻¹. 夏玉米种植初期气温较高且降雨较多使得 CK 的 CO₂ 排放通量高于覆膜处理,而 7 月中旬之后,PM 和 BPM 的 CO₂ 排放通量均高于 CK,且 BPM 的 CO₂ 排放量低于 PM 处理. 如表 2 所示,覆膜对小麦季 CO₂ 的排放总量无显著影响($P > 0.05$). 在夏玉米生长季,PM 和 BPM 相比 CK 的 CO₂ 季节排放总量分别增加了 23.8% ($P < 0.05$) 和 10.7% ($P > 0.05$). 从年排放总量看,与 CK 相比,PM 和 BPM 的 CO₂ 累积排放通量分别增加了

2.4 土壤 N₂O 排放通量的季节变化

如图 3(c) 所示,各处理的土壤 N₂O 排放表现出相似的季节规律. 相关分析表明,覆膜处理的 N₂O 排放通量与土壤温度和土壤孔隙含水量呈显著正相关,CK 处理仅与土壤孔隙含水量呈显著正相关($P < 0.01$,表 1). 玉米播种初期,受施肥与连续降雨的影响,各处理均在 6 月 23 日出现排放峰,且 CK 处理 N₂O 排放峰最高,峰值为 868.1 μg·(m²·h)⁻¹,BPM 峰值为 298.9 μg·(m²·h)⁻¹,PM 处理最低,峰值为 228.7 μg·(m²·h)⁻¹. 覆膜处理的 N₂O 排放峰明显低于无覆盖处理,可能是因为连续降雨使得无覆盖处理的土壤孔隙含水率骤增,加强了土壤的反硝化作用,也可能与地膜较好地阻隔了土壤 N₂O 的排放有关. 小麦季施基肥一周后覆膜处理出现了较小的 N₂O 排放峰,追肥后未出现明显的 N₂O 排放峰,其余时间 N₂O 的排放均未出现较大波动. 夏玉米播种后的两周为土壤 N₂O 的排放高峰期,此期间各处理 N₂O 的排放量占全生育期排放总量的

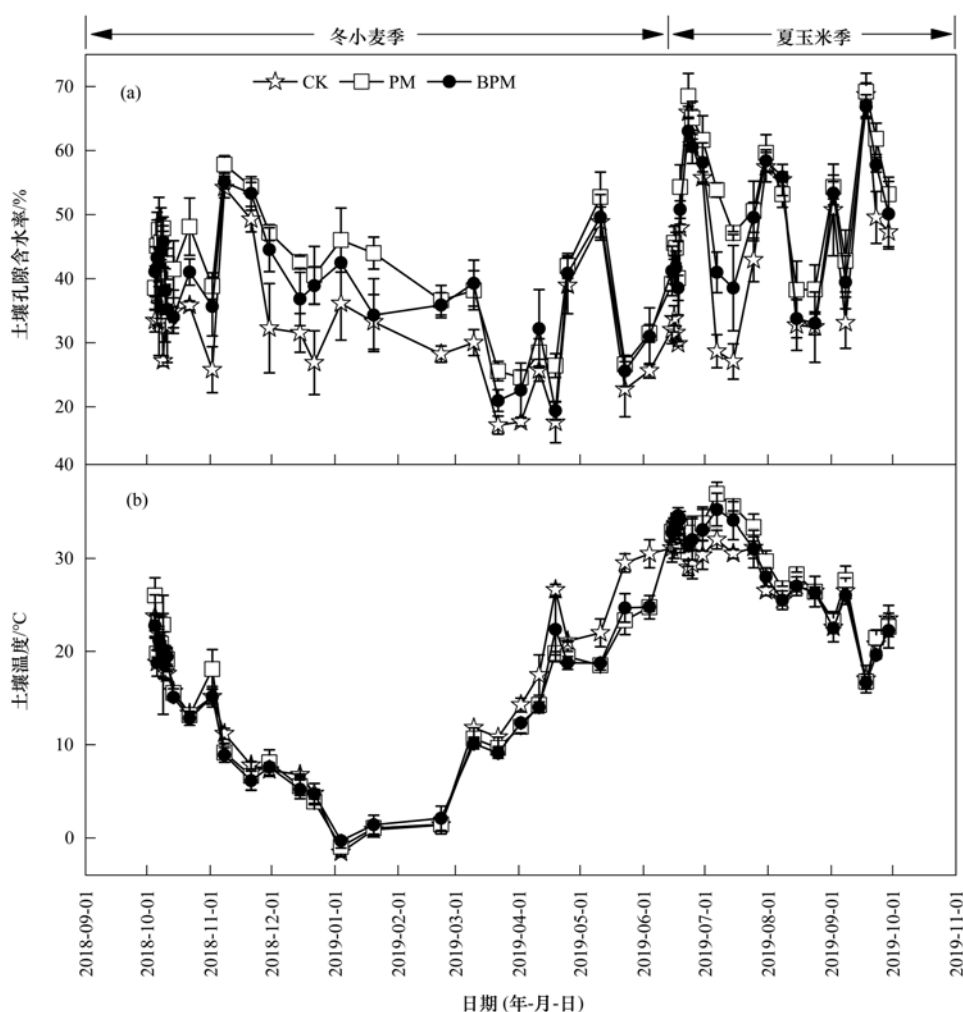


图2 不同处理土壤温度和土壤孔隙含水率的变化

Fig. 2 Dynamics of soil temperature and soil WFPS under different treatments

47.7%~64.7%,且PM和BPM较CK处理分别降低了48.5%和47.7%的 N_2O 排放量,而在非排放高峰期,PM的 N_2O 排放较CK处理减少了4.4%,BPM的 N_2O 排放较CK处理增加了5.2%。由表2可知,与CK处理相比,PM和BPM处理均增加了小麦季土壤 N_2O 的排放总量,但作用不显著($P>0.05$)。而覆膜能够显著降低夏玉米季土壤 N_2O 的排放总量,PM和BPM处理分别降低了32.9% ($P<0.05$)和29.0% ($P<0.05$)。整个轮作周期土壤 N_2O 排放总量在 $1.03 \sim 1.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间变化,与CK相比,PM显著降低了18.8% ($P<0.05$),BPM显著降低了18.2% ($P<0.05$)。

2.5 产量和WUE的变化

不同处理对作物产量、作物耗水和水分利用效率的影响如表2所示。两个覆膜处理均显著增加了冬小麦和夏玉米的产量,与CK处理相比,PM和BPM的冬小麦产量分别显著提升了51.7% ($P<0.05$)和32.3% ($P<0.05$),夏玉米产量分别显著上升了43.3% ($P<0.05$)和19.5% ($P<0.05$)。由于

PM和BPM增产的同时并未显著增加作物耗水量,使得PM和BPM处理小麦季的水分利用效率分别比CK处理提高了33.1% ($P<0.05$)和36.3% ($P<0.05$),夏玉米季提高了49.8% ($P<0.05$)和18.4% ($P<0.05$)。从小麦-玉米生长季来看,PM和BPM处理显著提高作物产量的同时也显著提高了作物的水分利用效率,其中,PM处理的产量显著高于BPM ($P<0.05$),但两者之间的水分利用效率差异不显著($P>0.05$)。

2.6 GWP、GHGI和NEEB的变化

全球增温潜势(GWP)可以反映各类气体对全球变暖所造成的实际影响,如表2所示,PM和BPM处理小麦季的GWP相对于CK均无显著差异($P>0.05$),玉米季PM处理的GWP相比CK显著提高了21.8% ($P<0.05$),BPM处理提高了9.2% ($P>0.05$)。温室气体排放强度(GHGI)是将环境效益和经济效益相协调的综合评价指标,PM和BPM处理能够通过显著提高产量而降低GHGI,PM和BPM处理小麦季的GHGI分别降低了26.2% ($P>0.05$)和

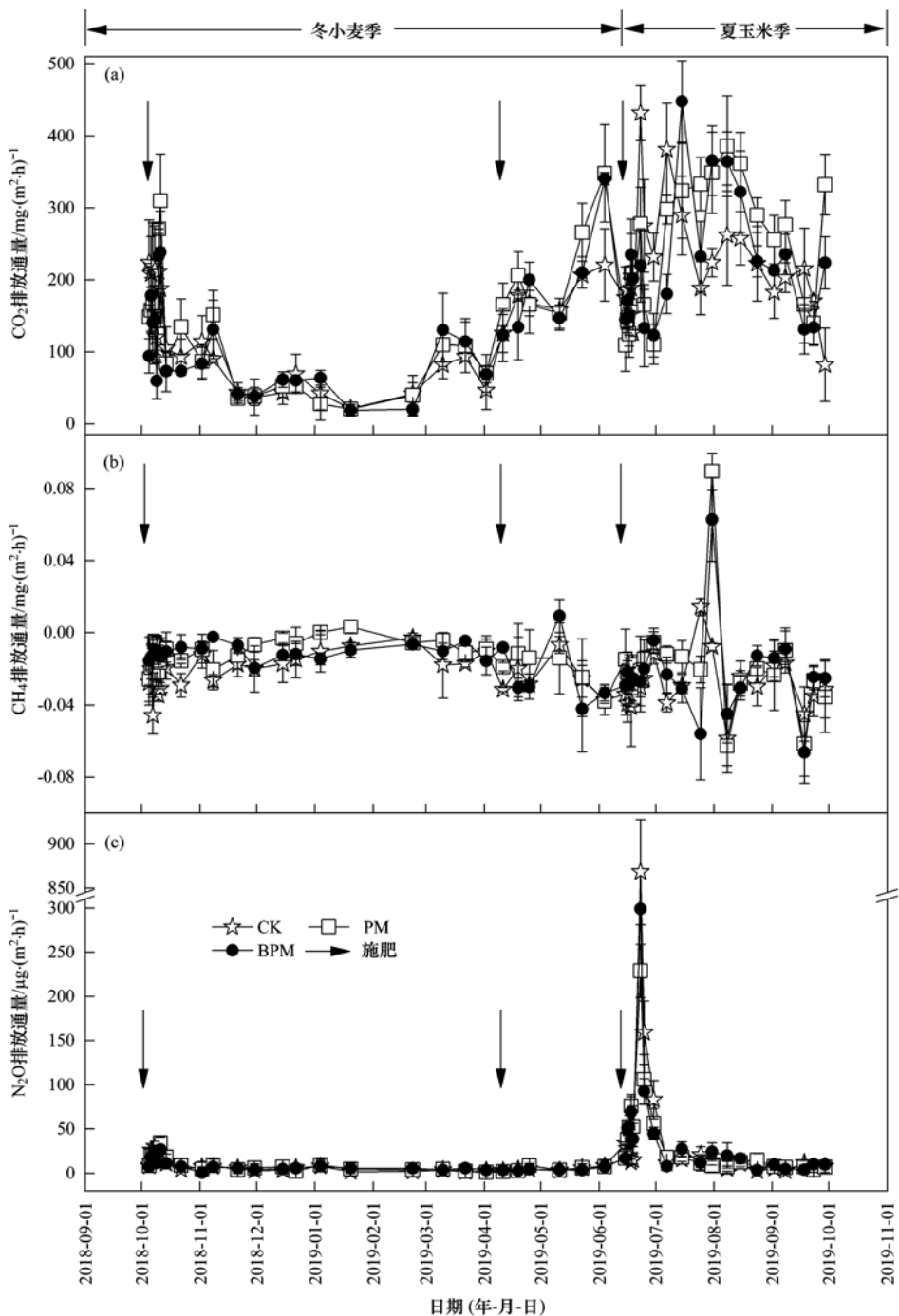


图3 不同处理下小麦-玉米生长季农田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量

Fig. 3 Dynamics of CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from the field during the wheat-maize growing season under different treatments

21.7% ($P > 0.05$), 玉米季分别降低了 15.7% ($P > 0.05$) 和 9.0% ($P > 0.05$). 净生态系统经济预算 (NEEB) 是将全球增温潜势成本考虑在内的计算经济效益的一个重要指标, 相比 CK 处理, PM 小麦季和玉米季的 NEEB 均显著增加, 增加比例分别高达 97.7% ($P < 0.05$) 和 72.9% ($P < 0.05$). BPM 处理由于较高的地膜成本, 小麦季的 NEEB 仅提高了 24.3% ($P > 0.05$), 甚至玉米季的 NEEB 略低于 CK 处理, 但差异不显著 ($P > 0.05$). 综合小麦-玉米生长季来看, PM 和 BPM 处理在一定程度上增加了

GWP 并降低了 GHGI, BPM 处理的 GWP 较 PM 处理降低了 8.9%, PM 和 BPM 两者的 GHGI 较 CK 处理降低了 20.5% ($P > 0.05$) 和 14.8% ($P > 0.05$), NEEB 提高了 84.2% ($P < 0.05$) 和 8.9% ($P > 0.05$).

3 讨论

3.1 覆膜对土壤水热及作物产量的影响

地膜覆盖能够消除土壤潜热交换、减弱显热交换和抑制夜间有效发射辐射来增加土壤温度^[35]. 在

表 2 不同处理对小麦-玉米农田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放总量、产量、作物耗水量、水分利用效率、全球增温潜势、温室气体排放强度和净生态系统经济预算的影响

Table 2 Cumulative emissions of CO₂, CH₄, and N₂O, Yield, ET, WUE, GWP, GHGI, and NEEB during the wheat-maize growing season under different treatments

作物	处理	CO ₂ 排放总量 /kg·hm ⁻²	CH ₄ 排放总量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放总量 /kg·hm ⁻²	产量 /t·hm ⁻²	ET /mm
小麦	CK	5 132 ± 710a ¹⁾	-1.00 ± 0.12a	0.28 ± 0.04a	4.02 ± 0.38b	237.6 ± 13.2a
	PM	5 742 ± 825a	-0.54 ± 0.09b	0.37 ± 0.03a	6.09 ± 0.54a	271.0 ± 22.3a
	BPM	5 352 ± 605a	-0.75 ± 0.13b	0.33 ± 0.06a	5.32 ± 0.72a	229.9 ± 32.6a
玉米	CK	6 325 ± 434b	-0.76 ± 0.06a	1.00 ± 0.12a	5.79 ± 0.46c	447.0 ± 6.5a
	PM	7 833 ± 169a	-0.48 ± 0.05c	0.67 ± 0.06b	8.29 ± 0.17a	428.8 ± 18.0a
	BPM	7 003 ± 661ab	-0.58 ± 0.02b	0.71 ± 0.11b	6.91 ± 0.67b	455.3 ± 39.1a
全年	CK	11 457 ± 1138a	-1.76 ± 0.17a	1.27 ± 0.12a	9.80 ± 0.80c	684.6 ± 11.4a
	PM	13 574 ± 972a	-1.02 ± 0.04c	1.03 ± 0.06b	14.39 ± 0.59a	699.8 ± 9.3a
	BPM	12 355 ± 1216a	-1.33 ± 0.12b	1.04 ± 0.05b	12.23 ± 1.00b	685.2 ± 14.6a
作物	处理	WUE /kg·(hm ² ·mm) ⁻¹	GWP /kg·hm ⁻²	GHGI /kg·t ⁻¹	NEEB /元·hm ⁻²	
小麦	CK	17.0 ± 2.6b	5 177 ± 707a	1 305 ± 288a	3 555 ± 968b	
	PM	22.6 ± 3.4a	5 823 ± 831a	963 ± 173a	7 030 ± 1 306a	
	BPM	23.2 ± 1.7a	5 420 ± 585a	1 023 ± 47a	4 418 ± 1 662ab	
玉米	CK	12.9 ± 0.9b	6 567 ± 465b	1 145 ± 178a	4 269 ± 909b	
	PM	19.4 ± 1.2a	7 996 ± 168a	964 ± 4a	7 383 ± 305a	
	BPM	15.3 ± 2.5b	7 174 ± 690ab	1 042 ± 112a	4 103 ± 1 224b	
全年	CK	14.3 ± 1.3b	11 744 ± 1 167a	1 210 ± 223a	7 824 ± 1 794b	
	PM	20.6 ± 1.1a	13 820 ± 969a	962 ± 73a	14 413 ± 1 368a	
	BPM	17.9 ± 1.7a	12 594 ± 1 224a	1 031 ± 64a	8 521 ± 2 049b	

1) 表中数据为平均值 ± 标准差, n = 3; 同列不同字母表示处理间差异显著 (P < 0.05)

对小麦覆膜的研究中,张保军等^[36]的研究发现,覆膜在小麦拔节期之前增温效果显著,拔节期后的增温效果不明显,甚至降低。刘宏胜等^[37]的研究表明,地膜覆盖在春小麦生长初期有明显的增温效果,而在春小麦扬花至灌浆期可降低土壤温度 0.25 ~ 0.43℃。赵刚等^[38]的研究表明,生物可降解地膜和普通地膜较裸地 0 ~ 20 cm 的土壤温度增加 6.43 ~ 7.65℃,且普通地膜较生物可降解地膜深层温度提高 0.26℃。本研究也得到了类似的结果,覆膜处理于冬小麦季可以减轻土壤温度的波动,在不同程度上有增温和降温的双重效应。普通地膜在冬小麦返青期之前土壤温度平均提高了 0.57℃,而生物可降解地膜在土壤温度较低时提升了 0.53 ~ 1.27℃,有效缓解了低温对冬小麦的生长造成危害。返青期至成熟期,普通地膜和生物可降解地膜均显著降低了土壤温度 (P < 0.05),这可能是由于冬小麦冠层的增大导致太阳辐射无法直射地面^[39],覆膜对土壤潜热的保持作用减弱,同时覆膜土壤的水分含量较高,土壤比热大而升温缓慢,所以覆膜表现出降低土壤温度的效果。在夏玉米生育前期,生物可降解地膜与普通地膜在提高土壤温度方面有着同等的效果,随着玉米冠层的逐渐增大,两种地膜的增温效应也逐渐减弱。到夏玉米生育后期,生物可降解地膜的保温效果不再明显,这与胡宏亮等^[40]的研究结果一致。

甚至生物降解地膜在夏玉米生育后期相比无覆盖降低了土壤温度,这可能也与生物降解地膜覆盖下更高的土壤含水量造成土壤比热大而升温缓慢有关。整体来看,普通地膜在小麦和玉米季的平均土壤温度高于生物可降解地膜,这一方面可能是两种地膜的材料影响太阳辐射对土壤的作用,另一方面也可能与生物可降解地膜在作物生育后期的裂解有关。地膜覆盖能够直接抑制土壤表面水分的蒸发,通过蒸汽转移促进水分从深层土壤向表层土壤移动,并在作物生长的关键阶段提高表层土壤的含水量^[41]。本研究中,覆膜相比于无覆盖处理的表层土壤含水率能显著提高 10.1% ~ 27.0% (P < 0.05),其中普通地膜的土壤孔隙含水率最高,生物可降解地膜的保水效果略弱于普通地膜,这也与生物可降解地膜的保墒效应在生育期内随着地膜裂解而明显减弱有关^[42~44]。

土壤覆盖模式的优化可以有效改善土壤水热条件,对提高作物产量有重要作用。赵刚等^[38]的研究表明,生物可降解地膜覆盖下冬小麦连续 5 a 平均产量和水分利用效率与普通地膜差异不显著。周昌明等^[45]的研究表明降解膜与普通地膜覆盖下玉米各生长指标、籽粒产量与氮肥利用率无显著差异,且均显著大于未覆膜处理。Zhang 等^[46]的研究表明与无覆盖相比,生物可降解膜覆盖显著提高了玉米

产量. 本研究的结果与上述结果一致, 即普通地膜和生物可降解地膜均显著提高了作物的产量和水分利用效率. 冬小麦生长季, 普通地膜和生物可降解地膜的增产比例分别高达 51.7% ($P < 0.05$) 和 32.3% ($P < 0.05$), 而生物可降解地膜由于更低的冬小麦耗水量, 其对应的水分利用效率为最高, 较无覆盖显著增加了 36.3% ($P < 0.05$). 由于冬小麦生育期恰好处于降水贫乏时期, 覆膜能够调控土壤水分的时空再分配^[47], 有效降低无效蒸发, 促进小麦根系下扎^[48], 充分利用深层土壤水分^[38], 同时, 覆膜对冬小麦生育前期的保温作用对培养冬前壮苗, 促进小麦高产做出了一定的贡献. 玉米是 C4 作物, 喜水喜热, 覆膜条件下适宜的土壤水热环境有助于玉米的生长发育和最终的产量形成. 普通地膜的夏玉米产量和水分利用效率较裸地显著上升了 43.3% ($P < 0.05$) 和 49.8% ($P < 0.05$), 生物可降解地膜也具有显著的增产作用, 夏玉米产量和水分利用效率较无覆盖显著上升了 19.5% ($P < 0.05$) 和 18.4% ($P < 0.05$). 全年来看, 普通地膜处理的作物产量显著高于生物可降解地膜, 这可能是因为生物可降解地膜在作物生长中后期的透水性增加, 保水保温性减弱, 力学性能也显著下降, 进而影响生物可降解地膜的增产效果.

3.2 覆膜对土壤温室气体排放的影响

旱地 CO₂ 的产生主要来自于微生物和作物根系的自养呼吸^[49]. 农田不同管理措施会改变土壤湿度, 影响农业生态系统中作物、土壤微生物的活性及土壤中碳的代谢作用, 调节农田碳的生物化学过程进而影响土壤 CO₂ 排放^[50]. 本研究的相关分析表明, CO₂ 的排放通量与土壤 5 cm 深度处的温度呈现显著正相关, 与覆膜条件下的表层土壤含水量没有显著的相关关系 (表 1), 说明土壤温度是影响 CO₂ 排放的主要因子之一, 表层土壤含水量的影响相对较小. 冬小麦越冬期土壤温度较低, 微生物和作物根系的呼吸作用较弱, CO₂ 排放量较低, 而在 7 ~ 8 月, 玉米根系呼吸作用强烈, 且土壤温度最高, 微生物活性增强, 产生大量的 CO₂. 小麦和玉米种植初期, 各处理土壤 CO₂ 均有较高的排放并出现排放峰, 这一方面是因为降雨前的土壤含水量较低, 降雨会使土壤微生物产生 Birch 效应, 使 CO₂ 通量瞬时增加^[51], 另外种植初期 CO₂ 的高排放与氮肥的施用也有一定的关系, 施氮肥降低了土壤中的碳氮比, 从而增加了土壤有机质中碳的分解和释放. 部分研究认为, 在地膜覆盖系统下, 土壤 CO₂ 排放总量是减少的, 但土壤中 CO₂ 的浓度增加, 主要是因为覆膜能够较好地阻隔气体释放到大气中, 出现了产量大

而排放小的现象^[52,53]. 然而, 也有研究认为膜下较高的土壤温度会加速气体分子的活动并从土壤中释放^[54], 这可能会降低塑料薄膜的阻隔效果. 本研究中, 普通地膜和生物可降解地膜均未显著增加冬小麦季 CO₂ 的排放, 可能与冬小麦生长后期薄膜呈现出一定的降温效应缓解了 CO₂ 的释放有关. 而普通地膜和生物可降解地膜均增加了夏玉米季 CO₂ 的排放, 这是因为覆膜整体上提高了土壤表层温度, 土壤中微生物的活性增强, 加速土壤有机碳的分解, 土壤呼吸速率加快, 进而促进了土壤 CO₂ 的排放. 尽管夏玉米生长前期由于地膜的阻碍作用使得覆膜处理下土壤 CO₂ 的排放量低于不覆盖处理, 但是在夏玉米生长后期, 玉米冠层随着叶片的萎蔫而收缩^[30], 太阳短波辐射可较好地透过破裂程度小的普通地膜^[55], 因此普通地膜后期依然具有增温作用, 使得土壤后期处于较高的 CO₂ 排放状态. 生物可降解地膜能在微生物的作用下最终分解为水、CO₂ 及其所含元素的矿化无机盐^[56], 而在本研究中生物可降解地膜的 CO₂ 排放相较普通地膜却并未增加, 可能是因为生物可降解地膜的增温效果稍弱于普通地膜, 且在夏玉米生育后期, 生物可降解地膜降低了土壤温度, 这在一定程度上会减弱土壤 CO₂ 的排放速率, 也可能是由于生物可降解地膜完全分解为 CO₂ 需要更长的周期. 与普通地膜相比, 生物可降解膜在冬小麦和夏玉米生长季能分别降低 6.8% 和 10.6% 的 CO₂ 排放, 对 CO₂ 的减排效果要优于普通地膜.

CH₄ 氧化菌是土壤中利用 CH₄ 作为唯一碳源和能源的一种微生物, 它可以消耗土壤中的 CH₄, 限制土壤中的 CH₄ 流向大气, 并吸收大气中的 CH₄^[57]. 目前认为水稻田是 CH₄ 的主要人为排放源, 但在好气条件下 CH₄ 又会被 CH₄ 氧化菌所氧化, 从而使好气土壤成为 CH₄ 吸收汇^[58]. 因此, CH₄ 的排放量不仅取决于 CH₄ 的生成能力, 还在于对 CH₄ 的氧化能力^[29]. 本研究结果显示 CH₄ 的吸收通量季节变化不明显, 小麦季的吸收通量与玉米季的吸收通量相差无几, 地膜覆盖显著减少了土壤对 CH₄ 的吸收量, 这可能是因为覆膜对大气 CH₄ 扩散到土壤中所产生的阻碍作用掩盖了其保水保温效应引起的 CH₄ 消耗^[59]. 但也有研究发现覆膜对 CH₄ 排放量的影响不大^[60,61], 可能是因为覆膜在一定程度上阻隔了土壤的气体流通, 创造了有利于产甲烷菌活动的土壤条件, 限制了甲烷氧化菌的活动, 但覆膜的保温作用利于甲烷消耗, 保水作用不利于 CH₄ 扩散, 加之覆膜并没有完全阻隔大气, 大气中的 CH₄ 还是可以扩散到土壤中, 因此覆膜和常规种植下的 CH₄ 排放量无显著差异. 本研究发现生物可降解膜覆盖在

小麦季和玉米季对 CH_4 的吸收能力均比普通膜覆盖更强,整个轮作周期内的吸收量比普通地膜提高了 30.5%,这可能与降解膜的逐步降解导致透气性优于聚乙烯地膜,土壤中含有足够的氧气,有利于 CH_4 氧化菌的生长有关。

N_2O 的排放主要来自于人为源,其中旱作农田是 N_2O 的主要排放源^[2]。土壤 N_2O 的排放量随着施肥和暴雨事件的发生而增加^[62],同时也受土壤温度和湿度等因素的影响^[63]。本研究的相关分析显示,覆膜条件下, N_2O 的排放与土壤表层温度和土壤水分均具有显著的相关性($P < 0.01$)。Nishimura 等^[23]的研究指出,地膜覆盖增加了 N_2O 的排放量,但也有研究表明,地膜覆盖降低了作物全年 N_2O 的排放量,这主要是因为其研究区域为亚热带地区,地膜覆盖的保湿作用并不明显,也可能与农田的管理方式以及气候差异有关^[21]。本研究与上述结果不尽相同,普通地膜和生物可降解地膜增加了小麦季土壤 N_2O 的排放,可能是由于地膜覆盖下的水热以及养分条件得到了协同改善^[64],土壤微生物的活性和数量迅速增加,并且地膜覆盖相对减少了土壤中局部氧浓度,使反硝化作用增强,从而引起土壤 N_2O 排放增加;也可能与地膜覆盖使干湿交替及冻融交替过程被有效抑制,膜下的氮素得到一定程度的累积,增加了 N_2O 的排放有关^[65]。但由于地膜的阻隔作用,土壤 N_2O 的增加并不显著,两种地膜覆盖下的土壤 N_2O 排放也没有显著性差异。夏玉米种植初期氮肥施入后 N_2O 出现了较高的排放,可能是因为土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度迅速增加导致硝化和反硝化过程加剧,进而使 N_2O 产生量增加^[66]。覆膜降低了施肥后土壤 N_2O 排放峰值,进而显著减少了夏玉米季农田土壤 N_2O 的排放总量,减排比例高达 32.9% 和 29.0%,其中覆膜在 N_2O 的高排放期能够减少 47.7%~48.5% 的排放。在非排放高峰期,普通地膜减少了 4.4% 的 N_2O 排放,生物可降解地膜增加了 5.2% 的 N_2O 排放,这一方面可能是因为普通地膜在夏玉米生长中后期依然较高的覆盖度阻挡了大部分 N_2O 的排放,生物降解地膜的隔绝作用减弱导致了更多的 N_2O 排放;另一方面可能是因为普通地膜促进了夏玉米根系对土壤氮素的吸收,降低了土壤硝化和反硝化作用所需的氮源,从而减少了 N_2O 的排放^[24],而生物可降解地膜覆盖下的根系对土壤氮素的吸收能力稍弱。总体而言,生物可降解膜对 N_2O 的减排效果与普通地膜无异。

3.3 覆膜对 GWP、GHGI 和 NEEB 的影响

地膜覆盖技术能够充分利用光照和水分等资源

促进旱地作物产量大幅度增加,但是同时也带来了不同程度的环境问题。按照单位质量的 CH_4 和 N_2O 全球增温潜势在 100 年时间尺度上分别为 CO_2 的 28 倍和 265 倍可计算农田的全球增温潜势。大部分的研究中 GWP 仅包括 GWP_{CH_4} 和 $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$,但处理间 CO_2 累计排放量达到显著差异时, CO_2 不能再当作非人为活动温室气体排放源,GWP 未包括 GWP_{CO_2} ,这样的增温潜势不够全面和客观,所得出的净生态系统经济预算也会高于实际^[32],因此本研究中的 GWP 包括 GWP_{CO_2} 、 GWP_{CH_4} 和 $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 。温室气体排放强度量化了农业温室气体排放和籽粒产量的关系,是判断农业管理措施是否符合可持续发展理念的重要指标之一^[67]。Chen 等^[20]的研究表明,地膜覆盖措施显著增加了 GWP,但显著降低了 GHGI,因此,提高粮食产量是降低 GHGI 的有效途径。秦晓波等^[68]的研究表明,减少稻田 CH_4 排放量会使整体的 GWP 下降而有效降低稻田 GHGI。本研究发现覆膜处理在小幅度增加了 GWP 的同时,作物的产量也显著增加,从而使得 GHGI 相比无覆盖均有所降低,普通地膜和生物可降解地膜小麦季的 GHGI 分别降低了 26.2% 和 21.7%,玉米季分别降低了 15.7% 和 9.0%。由于农民承担经济风险的能力有限,一种农业管理措施是否被采用往往取决于它所带来的经济效益而不仅仅依靠产量^[69]。净生态系统经济预算是农业生产和农业活动的主要考虑因素,它直接影响政府决策和农民参与的热情程度^[34]。净生态系统经济预算由产量收益、种植成本和 GWP 成本共同决定,种植成本在试验设计时已经固定。在小麦-玉米轮作期,普通地膜和生物可降解地膜种植成本比无覆盖处理分别高出 $2\,800\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $4\,400\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$,同时覆膜处理增加了 GWP,这也相应地增加了 GWP 成本。本研究中,普通地膜覆盖由于高的产量收益能够显著增加小麦季和玉米季的 NEEB,生物可降解地膜小麦季的 NEEB 较无覆盖处理增加了 24.3%,而玉米季的 NEEB 降低了 3.9%,但未达到显著水平,这说明尽管生物可降解地膜相比无覆盖能够带来可观的产量收益,相比普通地膜具有一定的减排效果,但仍无法完全抵消其高昂地膜成本产生的额外花费,这也是限制生物可降解地膜的广泛应用的主要原因。生物降解材料的原材料 PBAT 的价格在 $2\text{万元}\cdot\text{t}^{-1}$ 左右,比普通 PE 膜贵 1 倍。因此,降低生物可降解地膜的成本是摆脱其推广瓶颈的主要对策,一方面需要研发企业在保证降解性能的同时通过添加价格较为低廉的无机物添加剂、降低地膜厚度、降低降解高分子原材料的成本等方法缩小与普通地膜的差距,另一方面需要政府给予适当的

补贴政策促进生物可降解地膜的推广应用。

4 结论

(1) 与无覆盖相比,普通地膜显著增加了玉米季 CO_2 的排放总量 ($P < 0.05$); 小麦-玉米季的农田土壤总体表现为 CH_4 的吸收汇,覆膜能够显著减少土壤对 CH_4 的吸收 ($P < 0.05$); 普通地膜和生物可降解地膜覆盖均显著减少了夏玉米农田土壤的 N_2O 排放 ($P < 0.05$)。

(2) 普通地膜和生物可降解地膜显著提高了作物的产量和水分利用效率且一定程度上降低了 GHGI。普通地膜覆盖能够显著增加小麦季和玉米季的 NEEB ($P < 0.05$), 而生物可降解地膜显著提高了的产量收益无法抵消其高昂地膜成本产生的额外花费,小麦季的 NEEB 较无覆盖处理增加了 24.3%,玉米季的 NEEB 与不覆盖无显著性差异 ($P > 0.05$)。

(3) 综合以上分析,生物可降解地膜较无覆盖能够显著提高作物的产量和水分利用效率 ($P < 0.05$),在一定程度上降低了温室气体排放强度,并增加了净生态系统经济预算,同时在减少小麦-玉米农田土壤 CO_2 和 N_2O 的排放、促进 CH_4 的吸收及降低全球增温潜势方面显示出比普通地膜更好的效果。因此,生物可降解地膜具有代替普通地膜的可行性,从产量、水分利用效率、环境效益和经济效益考虑,生物可降解地膜覆盖方式是关中地区小麦-玉米轮作系统绿色高效生产的有效途径。

参考文献:

- [1] 金建康. 我国农业温室气体排放研究的文献计量学分析[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(Z1): 116-118, 136.
Jin J K. The document bibliometric analysis of agricultural greenhouse gases emissions in China[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(Z1): 116-118, 136.
- [2] 孙丽惠, 李中强. 北方旱地农田主要温室气体排放研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2020, (2): 52-56.
Sun L H, Li Z Q. Progresses in the research on major greenhouse gas emissions in the northern dry farmland[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020, (2): 52-56.
- [3] Tian Y, Zhang J B, He Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(6): 1393-1403.
- [4] Tubiello F N, Salvatore M, Golec R D C, et al. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990-2011 analysis[R]. Rome: FAO, 2014. 3-8.
- [5] IPCC. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [6] 毛安然, 赵护兵, 杨慧敏, 等. 不同覆盖时期和覆盖方式对旱地冬小麦经济和环境效应的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 608-618.
Mao A R, Zhao H B, Yang H M, et al. Effects of different mulching periods and mulching practices on economic return and environment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 608-618.
- [7] Sun D B, Li H G, Wang E L, et al. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency[J]. National Science Review, 2020, 7(10): 1523-1526.
- [8] 李仙岳, 冷旭, 张景俊, 等. 北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 113-121.
Li X Y, Leng X, Zhang J J, et al. Simulation and optimization of maize growth and nitrogen utilization under degradation film mulching in arid areas of north China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 113-121.
- [9] 张建军, 郭天文, 樊廷录, 等. 农用地膜残留对玉米生长发育及土壤水分运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 100-102.
Zhang J J, Guo T W, Fan T L, et al. The effect of the agricultural residual plastic film on maize growth and development and soil moisture movement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 100-102.
- [10] 贺怀杰, 王振华, 郑旭荣, 等. 典型绿洲区长期膜下滴灌棉田残膜分布现状研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 63-69.
He H J, Wang Z H, Zheng X R, et al. Distribution of size and quantity of film residuals in cotton fields under film-mulched drip irrigation in oasis region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 63-69.
- [11] 张丹, 刘宏斌, 马忠明, 等. 残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 310-319.
Zhang D, Liu H B, Ma Z M, et al. Effect of residual plastic film on soil nutrient contents and microbial characteristics in the farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 310-319.
- [12] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. PBAT 型全生物降解地膜对新疆棉花和玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 148-156.
Wang B, Wan Y F, Wang J X, et al. Effects of PBAT biodegradable plastic mulch film on soil physical and chemical properties and yields of cotton and maize in southern Xinjiang, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 148-156.
- [13] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 111-116.
Shen L X, Wang P, Zhang L L. Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 111-116.
- [14] 康虎, 敖李龙, 秦丽珍, 等. 生物质可降解地膜的田间降解过程及其对玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 54-58.
Kang H, Ao L L, Qin L Z, et al. Effects of biodegradable mulch film by reusing biomass residue on degradation in field and corn growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(6): 54-58.
- [15] 刘群, 穆兴民, 袁子成, 等. 生物降解地膜自然降解过程及其对玉米生长发育和产量的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 126-129.

- Liu Q, Mu X M, Yuan Z C, *et al.* Degradation of biodegradable mulch film and its effect on growth and yield of maize [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, **31** (6): 126-129.
- [16] 兰印超, 申丽霞, 李若帆. 不同地膜覆盖对土壤温度及水分的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(12): 120-126.
- Lan Y C, Shen L X, Li R F. Effects of different film mulching on soil temperature and moisture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(12): 120-126.
- [17] 杨迎春, 高玉山, 孙云云, 等. 降解地膜在玉米膜下滴灌栽培中的应用研究[J]. 玉米科学, 2013, **21**(2): 112-115.
- Yang Y C, Gao Y S, Sun Y Y, *et al.* Application research on degradable plastic film in drip irrigation cultivation of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, **21**(2): 112-115.
- [18] 商雨晴, 解梦怡, 王俊, 等. 不同覆盖措施下旱作玉米田土壤呼吸对氮添加的响应[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, **50**(5): 711-719.
- Shang Y Q, Xie M Y, Wang J, *et al.* Response of soil respiration to nitrogen addition under different mulching measures in a dryland corn field [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, **50**(5): 711-719.
- [19] 涂纯, 王俊, 刘文兆. 不同覆盖条件下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, **18**(5): 1103-1110.
- Tu C, Wang J, Liu W Z. Variation in soil respiration and its driving factors in rainfed winter wheat fields with different mulching measures [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, **18**(5): 1103-1110.
- [20] Chen H X, Liu J J, Zhang A F, *et al.* Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: a field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 814-824.
- [21] 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4213-4220.
- Chen S J, Jiang C S, Ni X, *et al.* Effect of plastic film mulching on greenhouse gas emissions from rice-rapeseed rotation in cropland [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4213-4220.
- [22] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, *et al.* Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation [J]. Applied Soil Ecology, 2015, **91**: 48-57.
- [23] Nishimura S, Komada M, Takebe M, *et al.* Nitrous oxide evolved from soil covered with plastic mulch film in horticultural field [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, **48**(7): 787-795.
- [24] Berger S, Kim Y, Kettering J, *et al.* Plastic mulching in agriculture—friend or foe of N₂O emissions? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **167**: 43-51.
- [25] Gao B, Ju X T, Su F, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the north China plain: a two-year field study [J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 112-124.
- [26] Chen N, Li X Y, Šimůnek J, *et al.* The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **292**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106817.
- [27] Wang Z H, Wu Q, Fan B H, *et al.* Testing biodegradable films as alternatives to plastic films in enhancing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under mulched drip irrigation [J]. Soil and Tillage Research, 2019, **192**: 196-205.
- [28] Chen N, Li X Y, Šimůnek J, *et al.* Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field [J]. Soil and Tillage Research, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.still.2021.105116.
- [29] 胡国辉, 王军可, 王亚梁, 等. 生物可降解膜覆盖对水稻温室气体排放及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(5): 977-986.
- Hu G H, Wang J K, Wang Y L, *et al.* Effect of biodegradable film mulching on greenhouse gas emission and yield of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(5): 977-986.
- [30] Wang W, Han L, Zhang X, *et al.* Plastic film mulching affects N₂O emission and ammonia oxidizers in drip irrigated potato soil in northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142113.
- [31] Rolston D E. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 5.1, Second Edition [M]. Madison: ASA and SSSA, 1986.
- [32] 武岩, 红梅, 林立龙, 等. 3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 310-320.
- Wu Y, Hong M, Lin L L, *et al.* Effects of three soil amendments on greenhouse gas emissions from corn fields in the Hetao irrigation district [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 310-320.
- [33] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, *et al.* Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in central China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 636-644.
- [34] Li B, Fan C H, Zhang H, *et al.* Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **100**: 10-19.
- [35] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖增温机制研究 [J]. 中国农业科学, 1991, **24**(3): 74-78.
- Wang S S, Deng G Y. A study on the mechanism of soil temperature in creasing under plastic mulch [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1991, **24**(3): 74-78.
- [36] 张保军, 杨文平, 王银银. 穴播地膜小麦土壤水分动态变化研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, **29**(4): 70-73.
- Zhang B J, Yang W P, Wang Y Y. Studies on the dynamic change of soil water of dibbling wheat in film-mulched field [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture (Natural Science Edition), 2001, **29**(4): 70-73.
- [37] 刘宏胜, 崔红艳, 吴兵, 等. 不同覆膜栽培方式对旱作春小麦土壤温度和籽粒产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2018, **38**(4): 469-477.
- Liu H S, Cui H Y, Wu B, *et al.* Influences of different plastic film mulching on soil temperature and grain yield of spring wheat in dryland [J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, **38**(4): 469-477.
- [38] 赵刚, 樊廷录, 党翼, 等. 旱塬区全生物降解地膜覆盖对冬小麦生长发育的影响 [J]. 干旱区研究, 2019, **36**(2): 339-347.
- Zhao G, Fan T L, Dang Y, *et al.* Effects of biodegradable plastic film mulching on the growth winter wheat on the Loess Plateau

- dryland[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(2): 339-347.
- [39] 殷涛, 何文清, 严昌荣, 等. 地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(19): 78-87.
- Yin T, He W Q, Yan C R, *et al.* Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(19): 78-87.
- [40] 胡宏亮, 韩之刚, 张国平. 生物降解地膜对玉米的生物学效应及其降解特性[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2015, **41**(2): 179-188.
- Hu H L, Han Z G, Zhang G P. Biological effect of biodegradable mulch films on maize and their degradation properties [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2015, **41**(2): 179-188.
- [41] Anikwe M A N, Mbah C N, Ezeaku P I, *et al.* Tillage and plastic mulch effects on soil properties and growth and yield of cocoyam (*Colocasia esculenta*) on an ultisol in southeastern Nigeria[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**(2): 264-272.
- [42] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. PBAT 型全生物降解地膜对南疆马铃薯产量及土壤温湿度与养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, **29**(1): 35-43.
- Wang B, Wan Y F, Wang J X, *et al.* Effects of PBAT biodegradable mulch film on potato yield, soil temperature, moisture and nutrient in southern Xinjiang, China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, **29**(1): 35-43.
- [43] 赵爱琴, 李子忠, 龚元石. 生物降解地膜对玉米生长的影响及其田间降解状况[J]. *中国农业大学学报*, 2005, **10**(2): 74-78.
- Zhao A Q, Li Z Z, Gong Y S. Effects of biodegradable mulch film on corn growth and its degradation in field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, **10**(2): 74-78.
- [44] 冯晨, 冯良山, 刘琪, 等. 辽西半干旱区不同类型地膜降解特性及其对玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, **54**(9): 1869-1880.
- Feng C, Feng L S, Liu Q, *et al.* The degradation characteristics of different plastic films and their effects on maize yield in semi-arid area in western Liaoning [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(9): 1869-1880.
- [45] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(2): 133-142, 112.
- Zhou C M, Li Y N, Gu X B, *et al.* Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(2): 133-142, 112.
- [46] Zhang W W, Wang L H, Zhou J Q, *et al.* Degradability of biodegradable plastic films and its mulching effects on soil temperature and maize yield in northeastern China [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, **13**(2): 146-153.
- [47] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(5): 917-926.
- Wang H L, Zhang X C, Song S Y, *et al.* Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of northwest Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(5): 917-926.
- [48] 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5580-5588.
- Wang H L, Song S Y, Zhang X C, *et al.* Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5580-5588.
- [49] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- Zhang D C, Cai D X, Dai K, *et al.* Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(6): 1916-1925.
- [50] 周君玺, 翟晓芳, 孙浩然, 等. 控释氮肥配施对不同覆盖旱作农田 CO₂ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(10): 2429-2438.
- Zhou J X, Zhai X F, Sun H R, *et al.* Effects of controlled-release urea on CO₂ emission from dry farmland under different mulching patterns [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2429-2438.
- [51] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, *et al.* Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(6): 1421-1431.
- [52] Li Z G, Zhang R H, Wang X J, *et al.* Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in northwestern China: effects of plastic mulching and drip irrigation [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(2): 178-185.
- [53] Yang Q D, Zuo H C, Xiao X, *et al.* Modelling the effects of plastic mulch on water, heat and CO₂ fluxes over cropland in an arid region [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **452-453**: 102-118.
- [54] Zhang F, Li M, Zhang W J, *et al.* Ridge-furrow mulched with plastic film increases little in carbon dioxide efflux but much significant in biomass in a semiarid rainfed farming system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **244-245**: 33-41.
- [55] Yaduraju N T, Mishra J S. Soil solarization [A]. In: Inderjit (Ed.). *Weed Biology and Management* [M]. Dordrecht: Springer, 2004. 345-362.
- [56] Tan Z J, Yi Y J, Wang H Y, *et al.* Physical and degradable properties of mulching films prepared from natural fibers and biodegradable polymers [J]. *Applied Sciences*, 2016, **6**(5), doi: 10.3390/app6050147.
- [57] 刘建黎, 王泽林, 岳善超, 等. 地膜覆盖和施氮量对旱作春玉米农田净温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(4): 1197-1204.
- Liu J C, Wang Z L, Yue S C, *et al.* Effects of plastic film mulching and nitrogen application rate on net global warming potential in semiarid rain-fed maize cropland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(4): 1197-1204.
- [58] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2002, **23**(4): 47-52.
- Xie J F, Li Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002, **23**(4): 47-52.
- [59] 倪雪, 江长胜, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 CH₄ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2404-2412.
- Ni X, Jiang C S, Chen S J, *et al.* Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on CH₄ emissions from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**

- (5): 2404-2412.
- [60] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, *et al.* Emission of N_2O and CO_2 and uptake of CH_4 in soil from a Satsuma mandarin orchard under mulching cultivation in central Japan[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2007, **76**(4): 279-287.
- [61] 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3451-3462.
Zhang K L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effect of plastic film mulching on methane emission from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3451-3462.
- [62] Flessa H, Dörsch P, Beese F. Seasonal Variation of N_2O and CH_4 fluxes in differently managed arable soils in southern Germany[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D11): 23115-23124.
- [63] Shepherd M F, Barzetti S, Hastie D R. The production of atmospheric NO_x and N_2O from a fertilized agricultural soil[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(9): 1961-1969.
- [64] 白红英, 孙华, 李世清, 等. 地膜的水热效应与麦田土壤 N_2O 排放[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(10): 2111-2118.
Bai H Y, Sun H, Li S Q, *et al.* Effects of film mulching on soil water and temperature and N_2O emissions in wheat fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(10): 2111-2118.
- [65] 白红英, 韩建刚, 张一平. 覆盖种植措施对农田土壤中 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(4): 394-396.
Bai H Y, Han J G, Zhang Y P. Effects of mulching and planting on N_2O discharge flux from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(4): 394-396.
- [66] 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(2): 167-174.
Wang Y Y, Li X X, Dong W X, *et al.* Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the north China plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(2): 167-174.
- [67] He G, Wang Z H, Li S X, *et al.* Plastic mulch: tradeoffs between productivity and greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **172**: 1311-1318.
- [68] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(6): 210-216.
Qin X B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(6): 210-216.
- [69] Zhang D B, Yao P W, Zhao N, *et al.* Responses of winter wheat production to green manure and nitrogen fertilizer on the Loess Plateau[J]. *Agronomy Journal*, 2015, **107**(1): 361-374.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)