环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第6期
2023年6月15日

目 次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 …… 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 …… 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于MSPA和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 …… 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺曈, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市区为例 …… 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市"十三五"期间$PM_{2.5}$减排效果评估 …… 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戢运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期$PM_{2.5}$中碳质气溶胶的影响 …… 罗宇骞, 张凯, 赵妤希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 …… 谢放尖, 郑新梅, 窦焘焘, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角2015~2020年臭氧变化的影响 …… 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 …… 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)
基于CMAQ和HYSPLIT模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 …… 林鑫, 仝纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020年成都市控制$PM_{2.5}$和$O_{3\text{-}8h}$污染的健康效益评价 …… 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市2022年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 …… 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玫 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 …… 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源 …… 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 …… 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律 …… 江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 …… 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 … 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 …… 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 …… 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中PPCPs分布特征及风险评估 …… 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 …… 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 …… 闫志雲, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素 …… 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 …… 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 …… 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中Cd(Ⅱ)和Ni(Ⅱ)的去除性能及机制 …… 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 …… 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 …… 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于Meta分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 …… 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 …… 黄静文, 刘磊, 颜晓元, 逯超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区NDVI变化的影响分析 …… 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)
基于InVEST模型和PLUS模型的环杭州湾生态系统碳储量 …… 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晟, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 …… 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 …… 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 …… 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露采矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响 …… 赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 …… 姚丽茹, 李伟, 朱员正, 普布仓决, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 …… 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤N_2O排放及其功能基因的影响 …… 陈绮琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 …… 蒋洪丽, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 …… 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于PMF模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 …… 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闵, 申哲民 (3450)
云南5城市道路扬尘$PM_{2.5}$中重金属含量表征及健康风险 …… 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 …… 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF和RF模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 …… 高越, 吕童, 张蕴凯, 张博晗, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于APCS-MLR受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 …… 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 …… 王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 …… 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 …… 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 …… 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 …… 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 …… 魏洪斌, 罗明, 向垒, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 …… 卫晓锋, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 …… 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型污灌区土壤-小麦重金属健康风险评估 …… 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 …… 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第6期 2023年6月
Vol.44, No.6 Jun., 2023

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响

蒋洪丽[1,2,3], 雷琪[4], 张彪[1,2,3], 吴淑芳[1,2,3]*
(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水研究院, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 4. 黄河水土保持绥德治理监督局, 榆林 719000)

摘要: 为探究地膜覆盖和有机无机肥等氮施用对夏玉米农田土壤温室气体(N_2O、CO_2 和 CH_4)排放、作物产量和水氮利用的影响,在关中地区设计了以地膜覆盖(M)和传统不覆膜为主因素,施肥为副因素的试验,副因素以不施肥(CK)为对照,设置等氮条件下有机肥替代化肥 0%(T0,有机肥 0.00 kg·hm^{-2},化肥 225.00 kg·hm^{-2})、25%(T25,有机肥 56.25 kg·hm^{-2},化肥 168.75 kg·hm^{-2})、50%(T50,有机肥 112.50 kg·hm^{-2},化肥 112.50 kg·hm^{-2})、75%(T75,有机肥 168.75 kg·hm^{-2},化肥 56.25 kg·hm^{-2})和 100%(T100,有机肥 225.00 kg·hm^{-2},化肥 0.00 kg·hm^{-2})这 5 个梯度,共计 12 个处理. 结果表明:①覆膜和施肥(无论是否覆膜)因素均显著增加了土壤N_2O和 CO_2 排放,减少了土壤对 CH_4 的吸收($P<0.05$). 与仅施无机肥处理相比,有机肥配施处理在覆膜和不覆膜条件下分别减少了 11.8%~52.6% 和 14.1%~68.0% 的N_2O排放总量,增加了 5.1%~24.1% 和 15.1%~48.7% 的 CO_2 排放总量($P<0.05$). 覆膜措施下的全球增温潜势(GWP)相比不覆膜增加了 140.7%~206.6%,相比对照处理,施肥处理的 GWP 在覆膜和不覆膜条件下分别增加了 36.6%~67.6% 和 31.2%~89.1%($P<0.05$). 结合产量因素,覆膜下单位产量的温室气体排放比不覆膜处理仅增加 103.4%~166.2%. 因此,可以通过提高产量来降低温室气体排放. ②覆膜提高了 8.4%~22.4% 的玉米产量和 4.8%~24.9% 的水分利用效率(WUE)($P<0.05$). 施肥能显著提高作物产量和 WUE,其中有机肥配施处理在覆膜条件下比 MT0 处理提高了 2.6%~8.5% 的产量和 13.5%~23.2% 的 WUE,在不覆膜条件下比 T0 处理提高了 3.9%~14.3% 的产量和 4.5%~18.2% 的 WUE. ③0~40 cm 土层中,覆膜能增加全氮含量 2.4%~24.7%,施肥处理覆膜和不覆膜条件下能分别增加 18.1%~48.9% 和 15.4%~49.7% 的全氮含量. 覆膜和施肥能促进玉米植株氮素积累和氮肥利用效率($P<0.05$). 对比无机肥处理,有机肥处理在覆膜和不覆膜条件下分别增加了 2.6%~8.5% 和 3.9%~14.3% 的氮肥利用效率. 综合生态效益和经济效益, 覆膜条件下的 MT50 和不覆膜条件下 T75 处理可推荐为保障稳产和实现农业绿色可持续生产的种植模式.

关键词:地膜覆盖; 有机肥; 温室气体排放; 水分利用效率; 氮肥利用效率
中图分类号: X16; X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)06-3426-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202206021

Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland

JIANG Hong-li[1,2,3], LEI Qi[4], ZHANG Biao[1,2,3], WU Shu-fang[1,2,3]*
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas in Northwest China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Yellow River Conservation of Water and Soil Suide Governs the Surveillance Bureau, Yulin 719000, China)

Abstract: To explore the effects of mulching and the application of organic and chemical fertilizer on N_2O, CO_2, and CH_4 emission; maize yield; water use efficiency (WUE); and nitrogen fertilizer use efficiency under the conditions of the same nitrogen fertilizer input in summer maize farmland, an experiment was conducted in the Guanzhong Plain of China. In this experiment, the two main experimental factors were mulching (M) and no-mulching, and the secondary experimental factors included no fertilizer application (CK), organic fertilizer substituting chemical fertilizer at 0% (T0, 0.00 kg·hm^{-2} organic fertilizer and 225.00 kg·hm^{-2} chemical fertilizer), 25% (T25, 56.25 kg·hm^{-2} organic fertilizer and 168.75 kg·hm^{-2} chemical fertilizer), 50% (T50, 112.50 kg·hm^{-2} organic fertilizer and 112.50 kg·hm^{-2} chemical fertilizer), 75% (T75, 168.75 kg·hm^{-2} organic fertilizer and 56.25 kg·hm^{-2} chemical fertilizer), and 100% (T100, 225.00 kg·hm^{-2} organic fertilizer and 0.00 kg·hm^{-2} chemical fertilizer), for a total of 12 treatments. The results showed as follows: ① both mulching and fertilizer application (with or without mulching) factors significantly increased soil N_2O and CO_2 emissions and reduced soil uptake of CH_4 ($P<0.05$). Compared to chemical fertilizer treatments, the organic fertilizer treatments reduced soil N_2O emission by 11.8% to 52.6% and 14.1% to 68.0% and increased soil CO_2 emission by 5.1% to 24.1% and 15.1% to 48.7% under mulching and no-mulching conditions, respectively ($P<0.05$). Compared to that under no-mulching, the global warming potential (GWP) under mulching increased by 140.7% to 206.6%. Compared to that in the CK treatment, the GWP of fertilized treatments increased by 36.6% to 67.6% and 31.2% to 89.1% under mulching and no-mulching conditions ($P<0.05$), respectively. Combined with the yield factor, the greenhouse gas intensity (GHGI) under the mulching condition increased by 103.4% to 166.2% compared to that under the no-mulching condition. Therefore, GHG emissions could be reduced by increasing yields. ② The mulching treatments increased maize yield by 8.4% to

收稿日期: 2022-06-02; **修订日期**: 2022-08-22
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD190070402)
作者简介: 蒋洪丽(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为农田温室气体排放,E-mail: honglijiang@nwafu.edu.cn
* 通信作者,E-mail:wsfjs@163.com

22.4% and WUE by 4.8% to 24.9% ($P<0.05$). Fertilizer application significantly increased maize yield and WUE. The organic fertilizer treatments increased yield by 2.6% to 8.5% and WUE 13.5% to 23.2% under the mulching condition compared to that in the MT0 treatment and increased yield by 3.9% to 14.3% and WUE 4.5% to 18.2% under the no-mulching condition compared to that in the T0 treatment. ③ In the 0-40 cm soil layer, the total nitrogen content of mulching treatments was increased by 2.4% to 24.7% compared with that of the no-mulching treatments. Fertilizer application treatments increased the total nitrogen content by 18.1% to 48.9% and 15.4% to 49.7% under the mulching and no-mulching conditions, respectively. Mulching and fertilizer application promoted nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer use efficiency in maize plants ($P<0.05$). Compared to that in chemical fertilizer treatments, the organic fertilizer treatments increased nitrogen fertilizer use efficiency by 2.6% to 8.5% and 3.9% to 14.3% under mulching and no-mulching conditions, respectively. Combining ecological and economic benefits, the MT50 under mulching conditions and T75 under no-mulching conditions can be recommended as planting models to guarantee stable yield and achieve green and sustainable agricultural production.

Key words: mulching; organic fertilizer; greenhouse gas emission; water use efficiency; nitrogen fertilizer use efficiency

温室气体(N_2O、CO_2 和 CH_4)排放引起的全球变暖是重要的生态问题[1]. 而农业活动是温室气体的主要排放源[2]. 施肥、灌溉、覆膜和耕作方式等农业管理措施对温室气体排放的影响很大[3]. 同时,覆膜和施肥措施对作物产量、水分利用效率和氮素吸收利用等也有重要影响. 运用合理的农业管理措施可以在保障作物产量、提高水氮利用的同时减少单位产量增温潜势[4,5],这对实现农业的可持续发展具有重要意义.

陕西关中地区地处西北干旱半干旱地区,主要发展旱作农业,以全省 15% 的土地面积生产了 40% 以上的粮食[6]. 农作物缺水是限制干旱地区农业发展的重要因素,地膜覆盖能改善土壤孔隙状况、增强土壤蓄水保墒能力、改善作物水分状况[5,7]; 还能增加地温,促进有机质分解和转化,提高土壤养分含量、培肥地力,有利于促进作物生长和提高氮素转化利用[8~10]. 地膜覆盖能较好解决干旱地区农业生产能力弱和产量低的问题,在全国范围内分别提高作物水分利用效率和产量 58.0% 和 45.5%[11]. 但也有研究表明,地膜覆盖在改善土壤水热条件时,加强了土壤硝化和反硝化过程和土壤呼吸作用,增加了农田温室气体N_2O和 CO_2 的排放[5,12]; 并且地膜的覆盖作用阻碍了土壤与大气之间的气体交换,土壤含水量的增加和作物根系的呼吸作用的增强导致氧气浓度下降,从而减少了土壤对 CH_4 的吸收[8,13]. 化肥对保障我国粮食产量稳定生产发挥了不可替代的作用[14]. 通过大量施用化肥获得高产的现象较为普遍[15],但随着化肥用量的增加,作物产量没有随之提高,肥料的利用率很低,还造成了一系列的环境问题[16]. 化肥减量配施有机肥对土地的生产力具有可持续性[17]. 宿顺顺[18]的研究表明,有机无机肥配施促进了作物的生长,提高了作物产量、土壤储水量和水分利用效率,增加了氮素在植株中的转运、积累和氮肥利用效率. 相比仅施无机肥,施用有机肥更能改善土壤结构、提高土壤全量养分和速效养分含量[19,20]. 有研究表明添加有机肥会促进硝化作用增加N_2O排放[21],土壤有机质含量的提高会增强土壤呼吸作用,增加 CO_2 排放量[22]. 但有人认为有机肥相比无机肥的速效氮成分有所下降,会降低土壤N_2O排放量[23,24]. 因此研究覆膜措施和有机肥等氮配施化肥的合适比例,对发展农田可持续生产和降低温室气体排放具有重要意义.

本文以关中平原玉米农田土壤为研究对象,通过设置有无地膜覆盖和不同的有机肥等氮配施化肥比例,分析其对玉米农田温室气体排放的影响,结合单位产量增温潜势、作物产量和水氮利用效率等指标评价其环境效益和经济效益,明确平衡温室气体排放与玉米产量和水氮利用的最佳覆盖措施和有机肥等氮配施比例,以期为实现农业减排和发展绿色可持续农业提供科学依据和技术支持.

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本试验于 2021 年 6 ~ 10 月在西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°20′N,108°04′E,海拔 521 m)进行. 试验区属于暖温带半湿润季风气候区,降水主要集中在 7 ~ 9 月,年平均降水量 635.55 mm,多年平均蒸发量1 440 mm,全年无霜期 169 ~ 200 d,年平均气温 12.9℃,年昼夜温差平均 11.5℃,日照时数2 196 h. 试验田土壤质地为中壤土,0 ~ 20 cm 土壤初始 pH 值(水土比 1∶1)为 8.07, ω(全氮)为 1.01 g·kg^{-1}, ω(速效磷)为 17.66 mg·kg^{-1}, ω(速效钾)为273.33 mg·kg^{-1},容重为1.39 g·cm^{-3}. 逐日气象资料来自于试验站内的气象站,如图 1 所示.

1.2　有机肥介绍

本试验选用的有机肥是由中国科学院水利部水土保持研究所节水中心团队和杨凌霖科生态科技股份有限公司联合研发、生产,将油渣(45%)、菌渣(25%)和秸秆(25%)等原料除去杂质后粉碎过筛(8 ~ 10 mm),加入发酵熟腐剂及粉饼等辅料(5%),密封厌氧发酵,完全发酵后加入聚丙烯酰胺(PAM)作保水剂,拌合均匀,即制成有机肥. 测得 ω(有机质)为 30.36%, ω(总氮)为 1.40%, ω(K_2O)为 0.38%, ω(P_2O_5)为 1.95%.

1.3　试验设计

本试验于 2021 年 6 月 20 日种植,10 月 2 日收

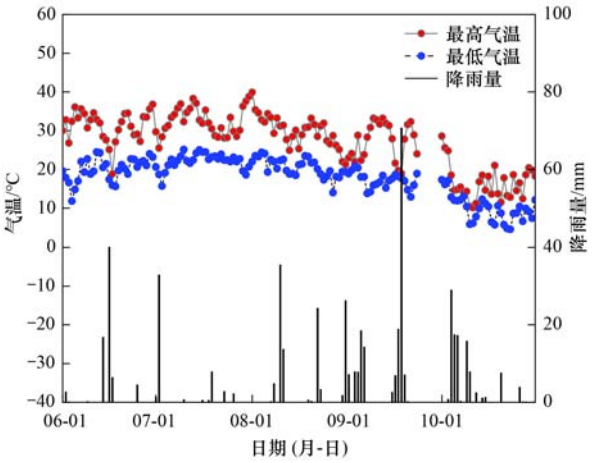


图 1 2021 年玉米季日最高气温、最低气温和日降雨量

Fig. 1 Daily maximum air temperature, minimum air temperature, and precipitation during the summer maize season in 2021

获. 采用是否覆膜和有机肥等氮替代化肥两因素裂区设计,其中主因素为是否覆膜,设置两梯度:全生育期内地膜覆盖(M)和传统不覆膜; 副区为施肥因素:不施肥(CK)、等氮条件下有机肥代替化肥 0%(T0,有机肥 0.00 kg·hm^{-2},化肥 225.00 kg·hm^{-2})、25%(T25,有机肥 56.25 kg·hm^{-2},化肥 168.75 kg·hm^{-2})、50%(T50,有机肥 112.50 kg·hm^{-2},化肥 112.50 kg·hm^{-2})、75%(T75,有机肥 168.75 kg·hm^{-2},化肥 56.25 kg·hm^{-2})和 100%(T100,有机肥 225.00 kg·hm^{-2},化肥 0.00 kg·hm^{-2}). 本试验共设计 12 个处理,每个处理 3 个重复,随机区组排列. 小区均为南北走向,面积为 4m×4.5 m,小区周围设置同类型作物做保护带. 供试夏玉米的品种为“郑单 958”,施氮肥(N):225 kg·hm^{-2}、磷肥(P_2O_5):90 kg·hm^{-2}. 所有处理的有机肥和化肥均在播种前一次性施入. 种植方式为先覆膜后人工穴播,行距 60 cm,株距 40 cm,播种深度 5 cm,种植密度为42 778株·hm^{-2}. 整个玉米生育期内无灌溉.

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤温室气体采集与测定

采用静态暗箱-气相色谱分析法对土壤 N_2O、CO_2 和 CH_4 气体进行原位检测采集和测定. 箱体由不锈钢材料制成,尺寸为 40 cm×40 cm×40 cm,外侧包隔热层防止太阳直射引起的温度变化,内部顶端安装风扇混匀箱内气体. 箱体底部在种植后埋于小区中央,底座上端设置约 3 cm 的凹槽在取样时加水密封,保证底座内全生育期无作物和杂草. 地膜覆盖处理的底座用地膜覆盖,在取样时取下地膜,取完样盖好,以保证地膜处理的一致性. 气体采集从播种后 1d 开始连续采集 7 d,以后每 7~10 d 采集一次. 采样时间为 09:00~11:00 间[25],在放置箱子后的第 0、10、20 和 30 min 用带三通阀的 50 mL 注射器采集混合均匀的气体,并同时记录下箱体温度. 气体采集当天用安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890 A 型,USA)进行浓度分析,气体排放通量计算公式见式(1)[26]:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中,F 为 N_2O、CO_2 和 CH_4 气体排放通量,μg·(m^2·h)$^{-1}$、mg·(m^2·h)$^{-1}$ 和 mg·(m^2·h)$^{-1}$; ρ 为标准状态下气体密度,g·cm^{-3}; h 为取样箱体高度,m; dc/dt 为箱内气体排放速率, T 为取样时的箱体温度,℃.

玉米全生育期内 N_2O、CO_2 和 CH_4 排放总量计算公式见式(2)[27]:

$$S_n = \sum_{i=1}^{n} R_i D_i \quad (2)$$

式中, S_n 为土壤温室气体的排放总量,kg·hm^{-2}; R_i 为第 i 次取样时温室气体的日排放通量,mg·(m^2·d)$^{-1}$; D_i 为第 i 次取样到第 $i+1$ 次的间隔天数,d.

1.4.2 全球增温潜势

全球增温潜势(global warming potential, GWP)用以衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响,以 IPCC 为依据,在 100 a 的时间尺度下,计算全球增温潜势和温室气体排放强度(greenhouse gas intensity, GHGI)[1]:

$$GWP = 265S_n(N_2O) + S_n(CO_2) + 28S_n(CH_4) \quad (3)$$

$$GHGI = GWP/Y \quad (4)$$

式中,GWP 为全球增温潜势,kg·hm^{-2}; $S_n(N_2O)$、$S_n(CO_2)$ 和 $S_n(CH_4)$ 为土壤温室气体的排放总量,kg·hm^{-2}; GHGI 为温室气体排放强度, kg·t^{-1}; Y 为玉米籽粒产量,t·hm^{-2}.

1.4.3 作物产量、土壤温度和土壤水分的测定

玉米收获期,每小区随机选取长势平均的 10 株玉米,风干后人工脱粒,烘干计算产量(t·hm^{-2}).

在采集气样时,读取暗箱底座旁的曲管地温计 5 cm 和 10 cm 地温,取平均值作为 0~10 cm 土层的平均温度. 在底座内一点和底座外随机两点采集 0~10 cm 土样样品,充分混合后用烘干法(105℃烘 12 h)测定土壤水分,并转化为土壤孔隙度含水率[5]:

$$WFPS = \theta \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{2.65}\right)^{-1} \times 100\% \quad (5)$$

式中,WFPS 为土壤孔隙含水率,%; θ 为 0~10 cm 土层的体积含水率,%; γ 为土壤容重,g·cm^{-3}.

在玉米种植前和收获后取土壤样品用烘干法测

定土壤含水量，0～100 cm 每 10 cm 一层，100～200 cm 每 20 cm 一层. 逐步计算作物水分利用效率如下[5]：

$$w = 10 \times h \times \gamma \times \theta \quad (6)$$

式中，w 为土壤蓄水量，mm；h 为土层厚度，cm.

$$ET = P + \Delta w \quad (7)$$

式中，ET 为作物耗水量，mm；Δw 为玉米播前和收获后 0～200 cm 的土壤蓄水量变化，mm.

$$WUE = Y/ET \quad (8)$$

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

1.4.4　植株生物量、植株和土壤全氮测定

在玉米收获期，每小区取 3 株玉米分成茎、叶和穗这 3 个部分，分别放于烘箱杀青后烘干，称重获得生物量. 烘干后的生物量粉碎后过筛，土壤风干后过 0.25 mm 筛，采用浓 H_2SO_4-H_2O_2 法消煮，A3 流动分析仪测定植物全氮. 关于氮素利用的计算如下[18]：

植株氮素吸收量($kg\cdot hm^{-2}$)
= 植株氮素含量 × 干物质质量

植株氮素积累量($kg\cdot hm^{-2}$)
= 植株(茎/叶/穗)氮素吸收量之和

$$氮素吸收效率(kg\cdot kg^{-1}) = \frac{植株氮素积累量}{施氮量}$$

$$氮素利用效率(kg\cdot kg^{-1}) = \frac{籽粒产量}{植株氮素积累量}$$

$$氮肥利用效率(kg\cdot kg^{-1}) = 籽粒产量/施氮量$$

$$氮素收获指数(\%) = \frac{籽粒氮素吸收量}{植株氮素吸收量}$$

1.4.5　数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行处理，用 SPSS 26.0 对数据进行统计分析，对覆膜和不覆膜处理采用单因素双水平的 T 检验方法，显著水平为 $P<0.05$，$n=18$；对施肥因素的多重比较采用最小显著差异法(LSD)，显著水平为 $P<0.05$，$n=3$. 制图用 Origin 2021 软件.

2　结果与分析

2.1　玉米农田水热动态变化和温室气体排放

2.1.1　土壤温度和土壤水分的动态变化

土壤表层温度随着玉米的生育期总体呈现出下降趋势[图 2(a)和 2(b)]，地膜覆盖下各处理的土壤表层温度平均为 26.4～26.9℃，不覆膜条件下各处理的土壤表层温度平均为 25.4～25.8℃，地膜覆盖下的地温在整个玉米季平均高出了 4.1%. 地膜覆盖条件下的地温在监测时段平均依次增加了 1.2、1.2、1.4、1.1、0.9 和 0.7 和 0.8℃，可看出覆膜在玉米生育前期的增温效果更好. 施肥处理普遍增加了土壤表层温度. 对比 MCK 处理，覆膜条件下的施肥处理增加了表层地温 0.1～0.3℃；对比 CK 处理，不覆膜条件下施肥处理则增加了 0.1～0.4℃.

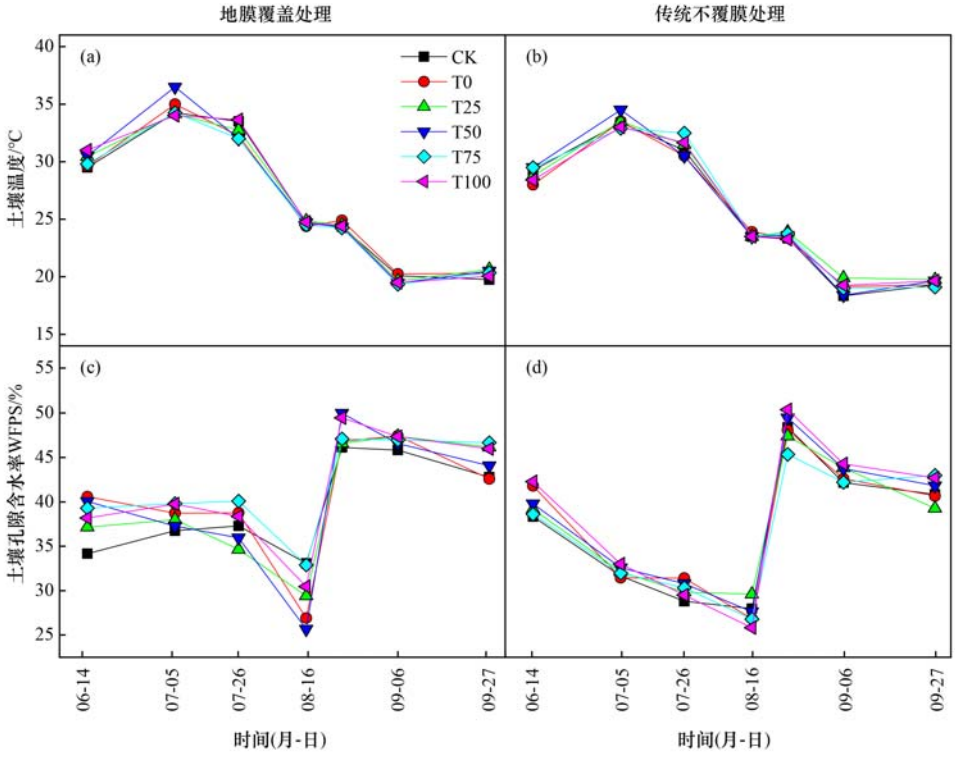


图 2　2021 年玉米季不同处理土壤温度和土壤孔隙含水率变化

Fig. 2　Dynamics of soil temperature and water filled pore space (WFPS) with different treatments during the summer maize season in 2021

各处理 0 ~ 10 cm 的土壤孔隙含水率呈现出一致规律,主要受降雨的影响,在降雨后均表现为含水率增加. 覆膜处理的 WFPS 要普遍高于不覆膜处理[图 2(c)和 2(d)],地膜覆盖下的 WFPS 为 39.4% ~41.8%,不覆膜条件下为 36.9% ~38.3%. 覆膜作用在前期的保墒效果较好,在后期因为大量的降雨使得保墒效果减弱. 施肥处理对土壤表层的土壤孔隙含水率影响不显著. 综上,覆膜有良好的增温保墒效果.

2.1.2 N_2O排放通量变化

覆膜因素、施肥因素及两因素交互对土壤N_2O排放通量都有极显著影响($P < 0.01$,表 1). 土壤N_2O排放与土壤温度和土壤孔隙含水率都呈正相关关系(表 2),覆膜处理改善了土壤的水热条件,使得整个生育期内地膜覆盖的土壤N_2O排放通量显著高于传统不覆膜处理[$P < 0.05$,图 3(a)和 3(b)]. 在种植后一周连续监测土壤N_2O排放通量发现,各施肥处理均呈现出土壤N_2O第一周高排放量、后排放通量下降的变化趋势,并且在种植第 3 d(6 月 22 日)出现排放高峰值. 受施肥因素的影响,在覆膜条件下,MT0、MT25、MT50、MT75 和 MT100 等施肥处理的土壤N_2O第一周排放量占生育期总排放量的 76.6%、65.8%、68.0%、58.0% 和 63.1%; 不覆膜条件下的占比分别是 76.2%、75.8%、43.0%、35.5% 和 61.4%. 7 月 6 日后各处理的土壤N_2O排放通量变化较为平缓,覆膜条件下平均为 11.3 ~27.7 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$,不覆膜条件下平均为 4.6 ~ 13.2 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$. 与仅施加无机肥处理相比,添加有机肥的处理降低了土壤N_2O排放(表 1). 在覆膜条件下,MT0 处理土壤N_2O排放总量对比 MT25、MT50、MT75 和 MT100 处理增加了 13.4%、110.9%、67.3% 和 50.2%; 不覆膜条件下,T0 处理对比添加有机肥的处理分别增加了 16.4%、132.9%、212.8% 和 146.6%. 其中,有机肥等氮配施 50% 和 75% 的处理显著减少了土壤N_2O的排放($P < 0.05$).

2.1.3 CO_2 排放通量变化

由表 1 可看出,覆膜因素和施肥因素对土壤 CO_2 排放通量都有极显著影响($P < 0.01$),但两因素交互对 CO_2 排放没有影响($P > 0.05$). 土壤温度和土壤孔隙含水率与土壤 CO_2 排放均有显著性正相关关系($P < 0.05$,表 2),各处理土壤 CO_2 排放与土壤温度的变化趋势相似[图 2(a)和 2(b),图 3(c)和 3(d)],因此覆膜显著性提高了土壤 CO_2 排放通量($P < 0.05$). 受施肥因素的影响,土壤 CO_2 排放在第一周表现出和N_2O一致的高排放通量规律,覆膜条件下施肥处理的第一周排放积累量占总排放量之比为 13.5% ~17.8%(平均值为 15.8%),不覆膜条件下的第一周排放积累量占比为 8.7% ~10.6%(平均值为 9.4%). 此后受温度的影响,在 7 月 6 日和 8 月 5 日温度下降,各处理的土壤 CO_2 排

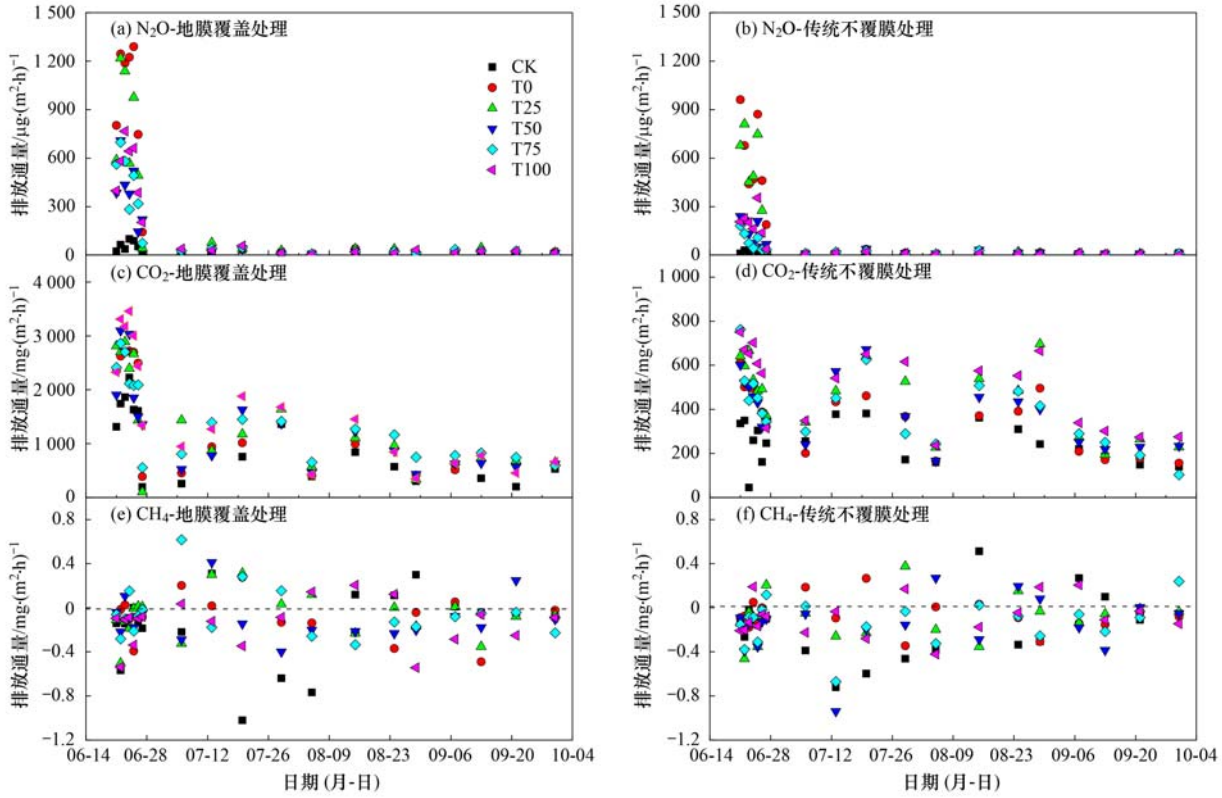


图 3 2021 年玉米季不同处理农田N_2O、CO_2 和 CH_4 排放通量

Fig. 3 Dynamics of soil N_2O, CO_2, and CH_4 emission flux with different treatments during the summer maize season in 2021

放通量出现低谷值；后随着气温的上升，CO_2 排放通量呈增加趋势，在 7 月 20 日和 29 日有排放高峰值. 在进入灌浆和成熟期时，土壤 CO_2 排放通量变化趋于平缓，覆膜条件下各处理变化间无显著性差异，T100 处理显著高于其他处理（$P < 0.05$）. 覆膜条件下，有机肥配施处理的 CO_2 排放总通量对比 MT0 增加了 5.1%～24.1%；不覆膜条件下，有机肥配施处理的 CO_2 排放总通量对比 T0 增加了 15.1%～48.7%. 其中，有机肥等氮配施 50% 的处理能显著降低 CO_2 排放量（$P < 0.05$）.

表 1　不同处理对玉米农田 N_2O、CO_2、CH_4 排放总量、全球增温潜势和温室气体排放强度的影响[1)]

Table 1　Total emissions of N_2O, CO_2, CH_4, global warming potential (GWP), and greenhouse gas intensity (GHGI) with different treatments during summer maize

覆盖因素（M）	施肥因素（F）	N_2O排放总量 /g·hm^{-2}	CO_2 排放总量 /kg·hm^{-2}	CH_4 排放总量 /kg·hm^{-2}	GWP /kg·hm^{-2}	GHGI /kg·t^{-1}
地膜覆盖	MCK	380 ± 35e	16 181 ± 1 670b	−4.12 ± 0.29d	16 166 ± 2 046b	3 248 ± 411a
	MT0	2 079 ± 51a	21 584 ± 3 161ab	−1.91 ± 0.71abc	22 081 ± 3 864ab	3 030 ± 530a
	MT25	1 834 ± 85b	24 992 ± 3 090a	−1.17 ± 0.67ab	25 445 ± 3 789a	3 404 ± 507a
	MT50	986 ± 42d	22 678 ± 2 742ab	−2.95 ± 0.01cd	22 857 ± 3 372ab	2 890 ± 426a
	MT75	1 243 ± 75c	26 294 ± 3 191a	−0.86 ± 0.53a	26 599 ± 3 914a	3 395 ± 500a
	MT100	1 384 ± 90c	26 776 ± 2 790a	−2.27 ± 0.63bc	27 079 ± 3 425a	3 605 ± 456a
传统不覆膜	CK	139 ± 31e	6 035 ± 701d	−4.35 ± 0.15c	5 950 ± 863b	1 296 ± 188bc
	T0	1 281 ± 28a	7 510 ± 753cd	−1.46 ± 0.40a	7 808 ± 918ab	1 312 ± 154bc
	T25	1 101 ± 27b	10 112 ± 1 050ab	−1.71 ± 0.14a	10 356 ± 1 290a	1 674 ± 208ab
	T50	550 ± 32c	8 763 ± 1 029bc	−3.45 ± 0.54b	8 812 ± 1 253ab	1 340 ± 191bc
	T75	409 ± 26d	8 643 ± 777bc	−2.73 ± 0.03b	8 676 ± 961ab	1 275 ± 141c
	T100	519 ± 21c	11 166 ± 1 270a	−1.90 ± 0.44a	11 251 ± 1 547a	1 746 ± 240a
显著性检验	M	**	**	*	**	**
	F	**	**	**	**	*
	M × F	**	ns	*	ns	ns

1）数值为平均值 ± 标准差，$n = 3$；同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$）；*、** 和 ns 分别表示有显著影响（$P < 0.05$）、极显著影响（$P < 0.01$）和没有显著影响

表 2　土壤温室气体排放通量与土壤温度和土壤孔隙含水率的相关系数[1)]

Table 2　Single Pearson's correlation coefficient between greenhouse gas emission and soil temperature and water filled pore space (WFPS)

项目	N_2O	CO_2	CH_4
土壤温度/℃	0.209	0.430**	−0.119
土壤孔隙含水率/%	0.159	0.226*	0.041

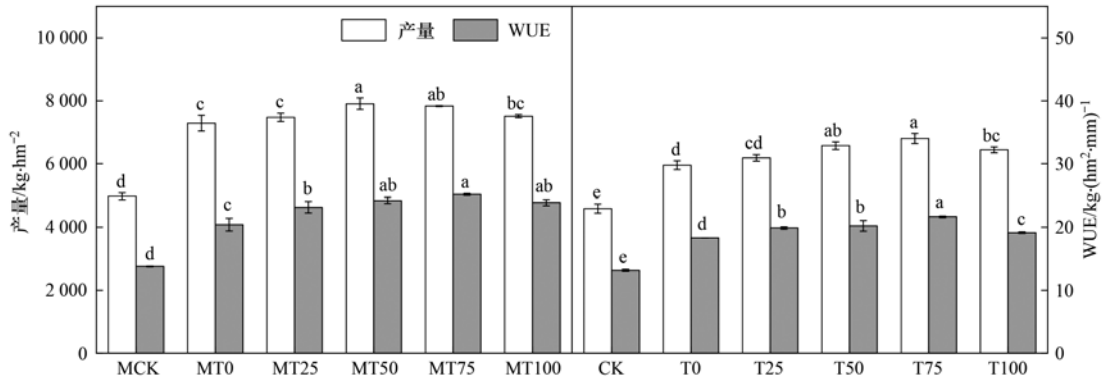
1）* 和 ** 分别表示有显著影响（$P < 0.05$）和极显著影响（$P < 0.01$）

2.1.4　CH_4 排放通量变化

覆膜因素、施肥因素及两因素交互对土壤 CH_4 排放通量有显著影响（$P < 0.05$，表 1），土壤温度和土壤孔隙含水率对土壤 CH_4 排放没有显著性影响（表 2）. 各处理的土壤 CH_4 排放通量没有明显的变化规律，有正通量和负通量，均表现出排放特征和吸收特征. 覆膜降低了土壤对 CH_4 的吸收. 各处理在整玉米季的积累量均表现为土壤的吸收汇，与对照处理相比，各施肥处理降低了土壤对 CH_4 吸收（$P < 0.05$）. 覆膜条件和传统不覆膜条件下的 CH_4 日排放通量在 −1.02～0.62 mg·(m^2·h)$^{-1}$ 和 −0.94～0.38 mg·(m^2·h)$^{-1}$ 之间. 在覆膜条件下，各处理对 CH_4 的吸收大小表现为：MCK > MT50 > MT100 > MT0 > MT25 > MT75，MCK 处理在整生育期内对 CH_4 的吸收积累量为 4.12 kg·hm^{-2}，对比其他处理分别增加了 39.7%、81.5%、115.3%、251.8% 和 380.8%. 在传统不覆膜条件下，各处理对 CH_4 的吸收大小表现为：CK > T50 > T75 > T100 > T25 > T0，CK 处理对 CH_4 的吸收积累量为 4.35 kg·hm^{-2}，对比其他处理分别增加了 26.0%、59.2%、129.4%、155.0% 和 198.1%.

2.1.5　全球增温潜势

由表 1 可以看出，地膜覆盖大幅增加了全球增温潜势（$P < 0.05$），主要是因为覆膜条件下土壤 CO_2 的高排放量，覆盖处理的 GWP 对比传统不覆膜处理增加了 140.7%～206.6%. 各施肥处理也增加了 GWP（$P < 0.05$），施肥处理的 GWP 比对照处理在覆膜条件下增加了 36.6%～67.6%，在不覆膜条件下增加了 31.2%～89.1%. GWP 随着有机肥等氮配施比例的增加先减小再增加，其中有机肥等氮配施 50% 和 75% 的处理有较低的 GWP 值. 覆膜和施肥均增加了玉米产量（图 4），单位产量的增温潜势有所下降，覆盖处理的 GHGI 对比不覆膜处理降低了 103.4%～166.2%，GHGI 也表现出随着有机肥替代比例的增加先减小再增加的趋势. 对比 MT25



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同

图 4 2021 年玉米季不同处理的产量和水分利用效率

Fig. 4 Yield and water use efficiency (WUE) with different treatments during the summer maize season in 2021

和 MT100 处理,MT50 的 GHGI 减少了 15.1% 和 19.8%,MT75 处理减少了 0.3% 和 5.8%($P>0.05$);对比 T25 和 T100 处理,T50 处理减少了 19.9% 和 23.2%,T75 处理减少了 23.8% 和 27.0%($P<0.05$).

2.2 玉米产量、水氮利用

2.2.1 玉米产量、水分利用效率

由图 4 可知,覆膜在不同程度上增加了玉米产量和水分利用效率,尤其在有机无机配施处理中提升效果更好.覆膜相比传统不覆膜在施肥处理中增加了 15.2%~22.4% 的产量和 11.4%~24.9% 的水分利用效率($P<0.05$),覆膜对产量和 WUE 的提升效果随着有机肥等氮配施量的增加先增加再减弱.施肥对产量和水分利用效率也有增加作用,施肥处理比对照处理在覆膜条件下增加了 46.5%~58.9% 的产量和 47.9%~82.2% 的 WUE,在不覆膜条件下增加 29.7%~48.2% 的产量和 39.0%~64.4% 的 WUE.有机肥等氮配施处理的产量和 WUE 与对照处理和仅施无机肥处理均形成显著性差异($P<0.05$).其中 MT50 和 MT75 处理对比 MT0 处理增产 8.5% 和 7.5%,提高水分利用效率 18.7% 和 23.2%;T50 和 T75 处理对比 T0 处理增产 10.5% 和 14.3%,提高水分利用效率 10.4% 和 18.2%.综上,覆膜和施加有机肥在增产和保水方面有较好的效果.

2.2.2 土壤全氮含量

各处理的全氮含量随着土壤深度的增加而减少(图 5),0~20 cm 土层的全氮含量占 0~40 cm 土层的 73.7%~83.0%.地膜覆盖条件能增加 0~10 cm(2.1%~29.0%)和 10~20 cm(2.7%~31.6%)土层的全氮含量,但是在 20~40 cm 土层没有表现出总体增加的效果.施肥增加了土壤供氮能力,尤其是有机无机肥等氮配施处理,在 0~10 cm 土层中,土壤全氮含量随着有机肥等氮替代比例的增加而增加.与对照处理相比,施肥处理在覆膜条件下能增加 0~10 cm 土层 23.4%~76.0% 和 10~20 cm 土层 15.7%~41.3% 的全氮含量;在不覆膜条件下能增加 0~10 cm 土层 8.4%~79.2%、10~20 cm 土层 6.6%~20.3% 和 20~40 cm 土层 50.6%~83.3% 的全氮含量.其中,有机肥等氮配施 50%、75% 和 100% 的处理对土壤全氮含量的提高作用更好($P<0.05$).

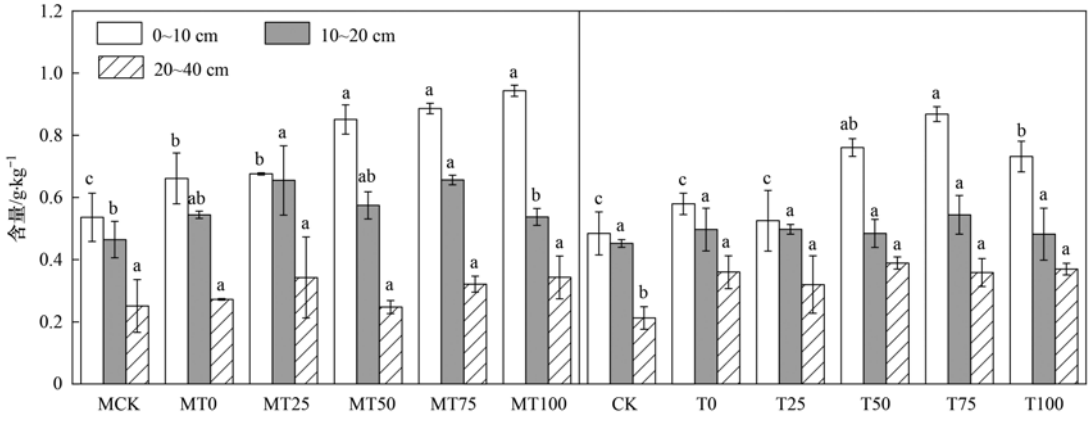


图 5 2021 年玉米季不同处理下土壤全氮含量

Fig. 5 Soil total nitrogen content with different treatments during the summer maize season in 2021

2.2.3　植株氮素积累和氮素吸收利用

由图 6 可看出，地膜覆盖增加了收获期玉米植株茎、叶和穗这 3 个部分的氮素含量，尤其穗的部分增加效果明显. 对比不覆膜处理，覆膜处理增加了玉米穗部 4.5%～31.6% 的含氮量和植株（茎、叶、穗）4.3%～31.1% 的含氮量. 施肥有利于植株积累氮素含量，尤其是配施有机肥的处理. 有机肥等氮替代 50% 和 75% 处理的穗部含氮量均显著大于仅施无机肥处理（$P<0.05$），MT50 和 MT75 处理对比 MT0 处理提高穗部含氮量 18.2% 和 28.1%；T50 和 T75 处理对比 T0 处理提高穗部含氮量 33.2% 和 25.1%. 相比对照处理，施肥处理在覆膜条件下分别平均增加了 17.2% 的茎和 49.5% 叶部的含氮量，在不覆膜条件下则平均增加了 65.7% 茎和 64.6% 叶的含氮量.

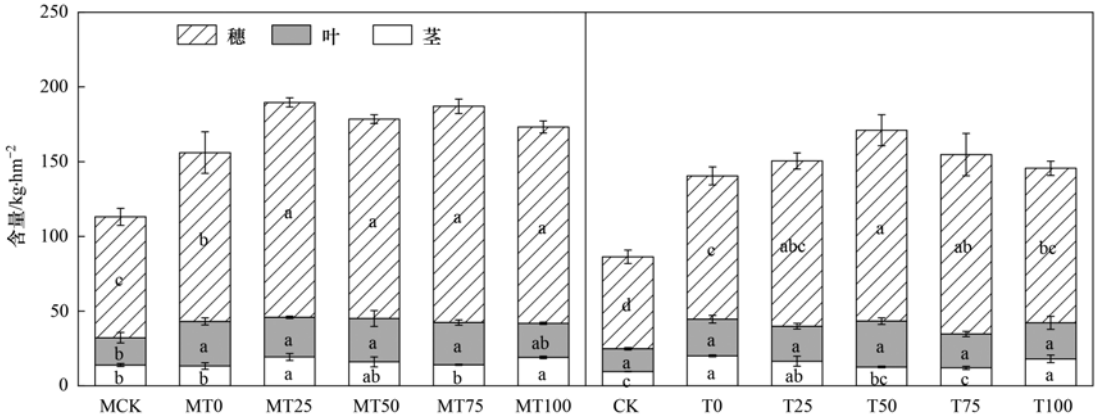


图 6　2021 年玉米季不同处理植株器官的氮素含量

Fig. 6　Nitrogen content of maize plant organs with different treatments during the summer maize season in 2021

由表 3 可知，地膜覆盖有利于提高氮素在玉米植株中的积累（$P<0.01$），相比传统不覆膜处理，覆膜在对照处理中增加了 31.1% 氮素积累量，在施肥处理中增加了 4.3%～26.0% 的氮素积累量（氮素吸收效率）. 是否覆膜对氮素利用效率没有显著影响（$P>0.05$），在各处理中没有明显的变化规律，MT0 的氮素利用效率对比 T0 增加了 10.4%，MT50 比 T50 增加了 14.0%，其余处理对比相同的施肥处理下降了 2.7%～17.7%. 同时，覆膜明显提高了氮肥利用效率和氮素收获指数（$P<0.05$），在施肥处理中，覆膜增加了 15.2%～22.4% 的氮肥利用效率和 0.0%～6.4% 的氮素收获指数.

有机无机肥等氮配施有利于植株对氮素的吸收利用（表 3）. 有机无机肥配施处理对比 MT0/T0 处理在覆膜和不覆膜条件下分别提高 11.0%～21.5% 和3.6%～21.8% 的植株氮素积累量（氮素吸收效率）. 施肥处理的氮素利用效率比不施肥低，尤其是在不覆膜条件下. 对比MCK，MT25、MT75和MT100

表 3　不同处理对氮素吸收利用的影响[1)]

Table 3　Nitrogen absorption and utilization with different treatments

覆盖因素（M）	施肥因素（F）	氮素积累量 /kg·hm⁻²	氮素吸收效率 /kg·kg⁻¹	氮素利用效率 /kg·kg⁻¹	氮肥利用效率 /kg·kg⁻¹	氮素收获指数 /%
地膜覆盖	MCK	113.14±3.90d		44.00±0.38ab		71.40±3.72a
	MT0	156.05±11.38c	0.69±0.05c	47.10±5.38a	32.39±1.35c	71.96±5.64a
	MT25	189.63±1.67a	0.84±0.01a	39.43±1.22b	33.23±0.73c	75.80±1.30a
	MT50	178.50±1.07ab	0.79±0.00ab	44.31±1.52ab	35.15±0.99a	74.75±1.56a
	MT75	187.04±4.21a	0.83±0.02a	41.91±0.86b	34.82±0.07ab	77.32±1.44a
	MT100	173.17±6.86b	0.77±0.03b	43.43±1.37ab	33.38±0.27bc	75.83±0.17a
传统不覆膜	CK	86.31±4.38c		53.44±4.76a		71.11±2.77bc
	T0	140.49±9.66b	0.62±0.04b	42.66±4.15b	26.46±0.76d	68.25±0.54c
	T25	150.50±4.90ab	0.67±0.02ab	41.13±0.51b	27.50±0.56cd	73.42±1.98ab
	T50	171.08±16.11a	0.76±0.07a	38.86±4.51b	29.22±0.65ab	74.63±0.40ab
	T75	154.75±18.2ab	0.69±0.08ab	44.73±6.55ab	30.23±0.88a	77.31±2.14a
	T100	145.58±14.30b	0.65±0.06b	44.62±3.59ab	28.64±0.51bc	71.30±2.95bc
显著性检验	M	**	**	ns	**	*
	F	**	**	**	**	**
	M×F	ns	ns	*	**	ns

1）数值为平均值±标准差，$n=3$；同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）；*、** 和 ns 分别表示有显著影响（$P<0.05$）、极显著影响（$P<0.01$）和没有显著影响

处理的氮素利用效率分别下降了 10.4%、4.8% 和 1.3%；对比 CK 处理,各施肥处理的氮素利用效率下降了 16.3%~27.3%(平均 20.7%). 添加有机肥显著提高了氮肥利用效率和氮素收获指数($P<0.01$),有机肥配施处理在覆膜和不覆膜条件下提高了 2.6%~8.5% 和 3.9%~14.3% 氮肥利用效率,且有机肥等氮替代 50% 和 75% 的处理均与仅施无机肥处理形成显著差异($P<0.05$). 有机肥配施处理在覆膜和不覆膜条件下能提高 3.9%~7.4% 和 4.5%~13.3% 的氮素收获指数,T50 与 T75 和 CK 处理间形成显著差异($P<0.05$).

3 讨论

3.1 覆膜和有机肥等氮替代对土壤水热和产量的影响

地膜覆盖可以提高土壤表层温度[8]. 地膜覆盖处理相比不覆盖处理全生育期平均增加了地温 0.6~1.3℃($P>0.05$),增温幅度略小于郭怡婷等[5]的研究,这可能是 2020 年玉米季降雨太多导致的. 在玉米生育前期,地膜覆盖增温效果较为明显,后期增温效果减弱(图 2). 这可能有两方面的原因,一是前期降雨少后期降雨多(7 月降雨 48.8 mm,8 月降雨 110.8 mm,9 月降雨 162.1 mm),加上后期地膜破损,保温效果有所降低. 另外是随着玉米植株的生长,冠层逐渐增大,地膜的增温效应也随之减弱. 地膜覆盖能抑制土壤表面水分的蒸发从而增加土壤含水量[5]. 地膜覆盖处理相比不覆盖处理在全生育期增加了 7.9% 的土壤孔隙含水率,对比图 2 中 6 月 21 日(种植第 1 d)和 9 月 30 日(收获前第 3 d)的土壤孔隙含水率可以看出,地膜覆盖促进了水分在土壤的贮存. 7 月降雨量较少,覆膜处理体现处理良好的保墒效果,在 7 月 13 日和 29 日分别增加了 6.3% 和 7.4% 的 WFPS,保证了作物的生长. 后期降雨量大,地膜处理的保墒效果减弱($P>0.05$)(图 2).

覆膜和施加有机肥能改善土壤的理化性质,有效提高产量和水分利用效率. Fang 等[7]的研究表明,地膜覆盖能够抑制水分的蒸发,通过蒸汽转移促进水分从深层土壤向表层土壤移动,以提高表层土壤的含水量促进作物生长,提高作物产量和水分利用效率. 垄沟覆膜和平栽覆膜相比平栽不覆膜处理能分别增加 9.6%、21.7% 的玉米产量和 60.0%、88.6% 的水分利用效率. 宿顺顺[18]的研究表明,有机无机肥的耦合作用能改善土壤结构,减少水分流失,增加土壤的保水保肥能力. 在充分灌溉下,有机无机肥配施处理能比无机肥处理提高 4.8%~6.3% 的玉米产量和 6.1%~8.9% 的水分利用效率；在亏缺灌溉条件下,有机无机肥配施处理能比无机肥处理提高 1.8%~2.3% 的玉米产量和 6.6%~15.4% 的水分利用效率. 这与本试验的研究结果一致,本试验中,覆膜处理平均增加了 17.3% 的玉米产量和 15.6% 的水分利用效率,有机肥配施处理增加了 7.3% 的玉米产量和 14.3% 的水分利用效率($P<0.05$).

3.2 覆膜和有机肥等氮替代与对温室气体排放的影响

本研究的土壤N_2O排放通量在施肥后一周出现了高排放量的特征,且在第 3 d 出现了排放峰值[图 3(a)和 3(b)],这与前人研究的结果一致[5,28]. 在覆膜措施下,土壤水热条件得到改善(图 2),土壤硝化和反硝化过程加强,N_2O排放量也随之明显增加(表 2). 透过地膜的 N_2O通量比从水平方向扩散的更高,N_2O 透过地膜排出,其通透性随周围环境温度的增加而增强[12],这可能是本研究中覆膜处理的N_2O排放量高于不覆膜处理的原因. 目前,有机肥对土壤N_2O排放的影响还没有一个明确的结论. 本试验中,有机肥等氮配施化肥的处理降低了土壤N_2O排放量[图 3(a)和 3(b),表 1],这可能是因为化肥释氮快,等氮施加有机肥处理氮的速效养分低于仅施加化肥处理的氮速效养分,参与硝化反硝化作用的底物减少,使得土壤N_2O排放量减少[23,24]. 也可能是因为氧气被有机质分解大量消耗,N_2O被当作氧气参与了有机物料的还原分解作用[29]. 但也有研究得到相反的结论,认为有机肥中的氮是产生N_2O的重要来源之一,施用有机肥增加了土壤孔隙度和透气性,能加快氨挥发速率和硝化作用[21,30],从而增加土壤N_2O排放. 有大样本分析结果显示,有机肥处理对比无机肥处理增加了 32.7% 的N_2O排放通量[31].

土壤 CO_2 排放主要来自于土壤有机质的分解、土壤动物和土壤微生物的呼吸、植物根系及根际微生物的呼吸[32]. 土壤温度和水分是影响土壤呼吸的主要非生物因素[8]. 在本研究中,覆膜提高了土壤表层的温度和土壤孔隙含水率,且与土壤 CO_2 排放呈显著正相关关系($P<0.05$,表 2). 土壤呼吸作用的各个方面都受土壤温度的影响,在一定温度下土壤呼吸速率和温度呈正相关关系,这在 7 月 6 日和 8 月 5 日因气温下降导致土壤 CO_2 排放降低,升温后排放增加的现象中得到了印证,且地膜覆盖在全生育期均体现了增温效果,增加了 CO_2 排放. 有研究表明,覆膜能增加土壤温度,增强微生物活性,加速有机质分解,有利于加快土壤呼吸速率,促进土壤 CO_2 排放[5]. 土壤水分能影响土壤透气性、微生物

和根系活性和有机质分解速率等,本试验发现在降雨后土壤 CO_2 排放增强,这与前人研究的结果一致[33,34]. 但也有研究表明,过多的土壤含水量会使土壤透气性降低,土壤 CO_2 排放会因受到阻碍而降低[35]. 与不施肥处理相比,施肥处理显著增加了土壤 CO_2 排放通量和累积排放量,尤其是添加了有机肥的处理,因为施肥后土壤碳氮比降低,促进了土壤有机质中碳的分解[36]. 李晓立等[4]的研究表明有机肥等氮替代化肥能显著增加 CO_2 排放量,这与本研究的结果一致. 原因可能是,施用有机肥在提高微生物活性、增强土壤呼吸作用方面更具潜力[29]; 其次,有机肥能增加土壤有机质含量,有机碳含量的增加和活性有机碳的分解都会促进产生 CO_2[22]; 另外,施用有机肥能改善土壤环境,增加土壤总孔隙度,促进土壤中 CO_2 的扩散和释放[21,37].

本研究的 CH_4 排放与大多数旱地农田一样,土壤 CH_4 排放量较低, 表现为 CH_4 吸收汇[38]. CH_4 的产生和排放是严格厌氧条件下产甲烷菌作用的结果[22]. 土壤水分、温度和肥料可以通过影响土壤氧扩散和微生物活性来影响 CH_4 的产生和排放[38]. 土壤 CH_4 的产生与土壤含水量呈正相关关系(表 2),覆膜条件下较高的土壤含水率促进了 CH_4 的排放,这与前人研究的结果一致[13]. 半膜和全膜覆盖均会减少土壤 CH_4 的吸收[8],这可能是因为覆膜阻隔了土壤与大气间的气体交换,覆膜增加的土壤孔隙含水量降低了土壤氧气浓度,为有机物不完全氧化形成 CH_4 提供了厌氧条件[12]; 且地膜覆盖促进了农作物的生长,根系呼吸进一步加剧了土壤氧气的消耗[39]. 地膜覆盖能增加甲烷营养菌的活性,促进甲烷的氧化吸收,这与本试验中地温与 CH_4 排放呈负相关(表 2)的研究结果一致. 但普遍认为在干旱雨养地区,土壤长期处于干旱状态,水分增加形成厌氧状态造成的抑制吸收作用大于温度增加的促进作用[40]. 本试验中的施肥处理显著降低了土壤 CH_4 的吸收. Yuan 等[41]的研究发现,有机肥的分解会使土壤中的氧化还原电位下降,降低甲烷营养菌的活性,抑制 CH_4 的吸收,从而使添加有机肥处理的 CH_4 累计排放量高于无机肥处理.

覆膜和施肥都显著增加了农田综合温室效应,而 CO_2 是农田综合温室效应的主要贡献者(表 1). 相同施肥条件下,覆膜处理改善了水热条件,增加了农田 N_2O 和 CO_2 的排放,地膜覆盖农田温室效应均高于不覆盖处理(图 2 和表 2),这与前人研究的结果一致[42]. 施肥提供了氮素,增加了 N_2O 排放,降低了土壤碳氮比,促进了分解有机质产生 CO_2,尤其是添加有机肥的处理 CO_2 排放更多. 同时,覆膜和施肥能改善土壤理化性质,为作物生长提供养分,增加玉米产量(图 4). 温室气体排放强度量化了农田温室气体排放效应和作物籽粒产量间的关系,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[43]. 本研究中,覆膜和施肥因素增加的玉米产量大幅降低了温室气体排放强度. 此外,在华北夏玉米[29]、西南稻-油轮作体系[44] 和滨海盐土稻田[45] 试验中,也得到了一样的结果. 因此,提高作物产量可以作为降低温室气体排放的有效措施[42].

3.3　覆膜和有机肥等氮替代与对玉米氮素利用效率的影响

本研究结果表明,覆膜提高了土壤全氮含量. 杨一凡等[10]的研究发现,在 0 ~ 40 cm 土层中,沟垄覆膜和平作覆膜的速效氮、全氮和有机质含量高于沟垄露地和平作露地. 覆膜措施能降低氨的挥发,减少铵态氮的损失,提高表层土壤的硝酸盐含量,提高氮在土壤中的积累. 本试验中施肥处理的全氮含量高于对照,且有机肥配施处理的含量更高. 有研究表明,长期施用氮肥能提高土壤供氮能力,但添加有机肥能增加土壤有机氮库的容量,改善土壤物理结构,比如增加有机胶体吸附更多 NO_3^--N[20],从而增加土壤氮素含量. 施用有机肥使土壤在供氮方式上具有持续性和渐进性,更适合作物根系对氮的吸收利用[46]. 31 a 长期试验表明,土壤全氮含量随施用氮肥的年限增长而增加,其中施加有机肥的处理含量最高[19]. 张黛静等[21]研究分析了土壤氮素投入与支出,表明增施有机肥处理的氮素均表现为盈余,且增加了土壤全氮含量.

植株氮素的吸收、利用与土壤水分状况有很大关系,土壤水分含量高的处理在小麦开花期后可提高植株氮素累积量,尤其是有机无机肥配施处理[18],这与本研究地膜覆盖处理和有机无机配施处理的植株氮素累积量较高结果一致. 地膜覆盖良好的水热条件能促进有机氮的矿化,增加植株对氮肥的吸收,减少系统氮的损失[47]. 任爱霞等[48]的研究表明,丰水年较欠水年增加了植株体内的氮素积累,覆盖较不覆盖促进了植株氮素吸收,且覆盖处理在平水年和欠水年促进叶片、穗或者茎秆、茎鞘和穗的氮素向籽粒中转移. 有研究表明,地膜覆盖模式下的作物对土壤氮素的吸收要大于无覆盖处理,籽粒吸氮量、地上部吸氮量均有增加的趋势[49]. 覆膜通过增加植株氮素积累量提高氮素吸收效率,增加产量来提高氮肥利用效率和氮素收获指数,这与 Zheng 等[42] 和张哲等[50] 研究的结果一致. 覆膜条件下的植株氮素积累量和产量均有提高,因为产量提

高的幅度不如植株氮素积累量,使得部分施肥处理的氮素利用效率在覆膜情况下低于不覆膜. 与覆膜因素一样,施肥能改善土壤理化性质促进作物对氮素的吸收,且有机肥本身含有更多的营养元素,能改善土壤微环境,有机肥配施化肥能显著提高氮肥利用效率和氮素收获指数[24,51]. 本试验中,无论覆膜与否,对照处理的氮素利用效率均高于施肥处理. 这与肖丽丽等[52]研究的结果一致,低地力水平处理的土壤供氮能力低,植株氮素积累少,同时产量也少,相比高地力水平的氮素利用效率反而偏高.

4 结论

(1)与传统不覆膜相比,地膜覆盖增加了玉米农田土壤N_2O和 CO_2 的排放总量($P<0.05$),减少了土壤对 CH_4 的吸收($P>0.05$). 不论覆膜与否,施肥处理均提高了土壤N_2O和 CO_2 的排放总量,减少了土壤对 CH_4 的吸收($P<0.05$). 相比仅施无机肥的处理,添加有机肥的处理降低了土壤N_2O排放量($P<0.05$),增加了 CO_2 排放通量($P>0.05$). 覆膜和施肥因素显著增加了全球增温潜势,但该农艺措施通过提高玉米产量降低了温室气体排放强度.

(2)地膜覆盖和有机肥等氮配施提高了作物产量和水分利用效率,促进了玉米植株对氮素的吸收利用,提高了玉米植株的氮素积累量,增加了氮肥利用效率和氮素收获指数($P<0.05$). 同时,地膜覆盖和施肥增加了 0~40 cm 土壤中的全氮含量,其中 0~10 cm 的土壤全氮含量增加显著.

(3)综合分析,覆膜条件下有机肥配施 50% 和不覆膜条件下有机肥配施 75% 可推荐为保证稳产和降低温室气体排放的绿色可持续生产的种植模式.

参考文献:

[1] 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 [M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

[2] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al*. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, **514**(7523): 486-489.

[3] 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.

[4] 李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(5): 948-961.
Li X L, He T Q, Zhang C X, *et al*. Effect of organic fertilizer replacing chemical fertilizers on greenhouse gas emission under the conditions of same nitrogen fertilizer input in maize farmland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, **55**(5): 948-961.

[5] 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 等. 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[J]. 环境科学, 2022. **43**(5): 2788-2801.
Guo Y T, Luo X Q, Wang R, *et al*. Effects of biodegradable plastic film mulching on greenhouse gas emissions under wheat-maize rotation system in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2788-2801.

[6] 黄鹏. 关中西部覆膜与施氮量对花生生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Huang P. Effects of film mulching and different nitrogen application on peanut growth and development in Guanzhong west area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[7] Fang H, Li Y N, Gu X B, *et al*. Optimizing the impact of film mulching pattern and nitrogen application rate on maize production, gaseous N emissions, and utilization of water and nitrogen in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2022, **261**, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107350.

[8] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5246-5256.
Luo X Q, Zhang A F, Chen H X, *et al*. Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5246-5256.

[9] 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(3): 671-676.
Xu X, Wang X Y, Bao X L, *et al*. Effects of long-term no-tillage and stover mulching on maize yield and its stability[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(3): 671-676.

[10] 杨一凡, 吴发启, 段红腾, 等. 青海主要枸杞产区不同耕作措施对灰棕漠土理化性质影响及肥力综合评价[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(2): 1-8.
Yang Y F, Wu F Q, Duan H T, *et al*. Effects of different tillage measures on physical and chemical properties of gray brown desert soil and comprehensive evaluation of fertility in major wolfberry production areas of Qinghai[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(2): 1-8.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 刘建粲, 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.

[14] 麻坤, 刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(4): 1113-1120.
Ma K, Diao G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(4): 1113-1120.

[15] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(9): 57-63.
Shi C L, Zhu J F. Economic evaluation and analysis of chemical fertilizer inputs in Chinese grain production[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, **30**(9): 57-63.

[16] Guo L Y, Wu G L, Li Y, *et al*. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **156**: 140-147.

[17] 范晓晖, 陈慕松, 刘文婷, 等. 化肥减量配施有机肥对葡萄产量、品质及土壤质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (3): 46-51.
Fan X H, Chen M S, Liu W T, *et al*. Effect of combined chemical fertilizer reduction with organic fertilizer on yield and quality of grape and soil quality[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (3): 46-51.

[18] 宿顺顺. 有机无机肥配施与亏缺灌溉对夏玉米/冬小麦生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Su S S. Effects of organic and inorganic fertilizer application and deficit irrigation on the growth and water and nitrogen utilization of summer maize/winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.

[19] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 灌漠土长期有机配施土壤肥力特征和作物产量可持续性分析[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(3): 333-340.
Wu K S, Che Z X, Bao X G, *et al*. Analysis on soil fertility characteristics and crop yield sustainability of irrigated desert soil with long-term organic fertilization application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(3): 333-340.

[20] 梁路, 张卫杰, 徐博涵, 等. 有机无机肥配施影响土壤肥力与土壤环境的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, **51**(3): 1-11.
Liang L, Zhang W J, Xu B H, *et al*. Research progress on effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and soil environment [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, **51**(3): 1-11.

[21] 张黛静, 胡晓, 马建辉, 等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(5): 1753-1760.
Zhang D J, Hu X, Ma J H, *et al*. Effects of tillage and fertility on soil nitrogen balance and greenhouse gas emissions of wheat-maize rotation system in central Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(5): 1753-1760.

[22] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(1): 175-181.
Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The Effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(1): 175-181.

[23] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 145-153.
Bu R Y, Li M, Han S, *et al*. Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(1): 145-153.

[24] 向伟, 王雷, 刘天奇, 等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(22): 4634-4645.
Xiang W, Wang L, Liu T Q, *et al*. Effects of biochar plus inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(22): 4634-4645.

[25] Zhao M L, Jiang C S, Li X X, *et al*. Variations in nitrous oxide emissions as manipulated by plastic film mulching and fertilization over three successive years in a hot pepper-radish rotated vegetable production system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **304**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107127.

[26] Klute A. Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods, 5.1 (2nd ed.)[M]. Madison: ASA, SSSA, 1986.

[27] Singh S, Singh, J S, Kashyap A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**(9): 1219-1228.

[28] Liang Z H, Jin X, Zhai P F, *et al*. Combination of organic fertilizer and slow-release fertilizer increases pineapple yields, agronomic efficiency and reduces greenhouse gas emissions under reduced fertilization conditions in tropical areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **343**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131054.

[29] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(21): 4381-4389.
Li Y Q, Tang J W, Che S G, *et al*. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(21): 4381-4389.

[30] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(11): 1835-1846.
Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, *et al*. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(11): 1835-1846.

[31] Zhou M H, Zhu B, Wang S J, *et al*. Stimulation of N_2O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(10): 4068-4083.

[32] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. The Botanical Review, 1977, **43**(4): 449-528.

[33] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2413-2425.
Wang X Y, Cai H J, Li L, *et al*. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2413-2425.

[34] 陈慧, 商子惠, 王云霏, 等. 灌水量对温室番茄土壤 CO_2、N_2O和 CH_4 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 3126-3136.
Chen H, Shang Z H, Wang Y F, *et al*. Effects of irrigation amounts on soil CO_2, N_2O and CH_4 emissions in greenhouse tomato field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(9): 3126-3136.

[35] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, **47**

(9): 1764-1773.
Qi Y C, Guo S F, Dong Y S, *et al*. Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(9): 1764-1773.

[36] 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 CO_2 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 CO_2 emission from dry farmland under different mulching patterns[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(10): 2429-2438.

[37] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 176-182.
Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, *et al*. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, **32**(1): 176-182.

[38] Li C J, Xiong Y W, Huang Q Z, *et al*. Impact of irrigation and fertilization regimes on greenhouse gas emissions from soil of mulching cultivated maize (*Zea mays* L.) field in the upper reaches of Yellow River, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120873.

[39] Berger S, Kim Y, Kettering J, *et al*. Plastic mulching in agriculture—friend or foe of N_2O emissions?[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **167**: 43-51.

[40] 李晓莎, 岳善超, 李世清, 等. 覆膜和氮肥用量对雨养春玉米农田甲烷吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, **35**(4): 1-9, 53.
Li X S, Yue S C, Li S Q, *et al*. Effect of film mulching and nitrogen fertilizer on CH_4 absorption of rainfed spring maize farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, **35**(4): 1-9, 53.

[41] Yuan J, Sha Z M, Hassani D, *et al*. Assessing environmental impacts of organic and inorganic fertilizer on daily and seasonal greenhouse gases effluxes in rice field[J]. Atmospheric Environment, 2017, **155**: 119-128.

[42] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, *et al*. Interactive effects of mulching practice and nitrogen rate on grain yield, water productivity, fertilizer use efficiency and greenhouse gas emissions of rainfed summer maize in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, **248**, doi: 10.1016/j.agwat.2021.106778.

[43] 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.

[44] 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4790-4799.
Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al*. Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rapeseed crop rotation[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4790-4799.

[45] 孙丽英, 马煜春, 邬明伟, 等. 有机-无机氮肥施用对滨海盐土稻田 CH_4 和 N_2O 排放及综合温室效应的影响[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(11): 2065-2072.
Sun L Y, Ma Y C, Wu M W, *et al*. Effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on CH_4, N_2O emissions and the global warming potentials in coastal saline rice paddy field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(11): 2065-2072.

[46] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 314-324.
Gao J S, Huang J, Dong C H, *et al*. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(2): 314-324.

[47] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 生物降解膜促进冬油菜养分吸收减少土壤硝态氮累积[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(10): 90-97.
Gu X B, Li Y N, Du Y D, *et al*. Biodegradable film enhancing nutrient uptake of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) and reducing soil nitrate accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(10): 90-97.

[48] 任爱霞, 孙敏, 高志强, 等. 夏闲期覆盖配施氮肥对旱地小麦土壤水分及氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(15): 2888-2903.
Ren A X, Sun M, Gao Z Q, *et al*. Effects of mulching during the fallow period and nitrogen fertilizer on soil water and plant nitrogen use of dry-land wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, **50**(15): 2888-2903.

[49] 陈秀文, 赵护兵, 毛安然, 等. 夏闲期不同覆盖方式对旱地小麦水氮利用和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (3): 113-119.
Chen X W, Zhao H B, Mao A R, *et al*. Effects of different mulching methods during the summer fallow period on water, nitrogen use and yield of wheat in dryland[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (3): 113-119.

[50] 张哲, 张旭, 冯良山, 等. 秋覆膜对辽西春玉米水肥利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(15): 150-158.
Zhang Z, Zhang X, Feng L S, *et al*. Effects of autumn mulching on water and fertilizer use efficiency and yield of spring maize in western Liaoning Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(15): 150-158.

[51] 王慧, 卜容燕, 韩上, 等. 有机肥配施化肥对直播油菜产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (6): 156-165.
Wang H, Bu R Y, Han S, *et al*. The effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizer on the yields, nutrient uptake and utilization of direct-seeding rapeseed[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (6): 156-165.

[52] 肖丽丽, 代兴龙, 孔海波, 等. 地力水平和种植密度对冬小麦子粒产量和氮素利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(8): 2239-2242.
Xiao L L, Dai X L, Kong H B, *et al*. Effects of fertility level and plant density on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, **42**(8): 2239-2242.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 6

Jun. 15, 2023

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals ····· ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, *et al.* (3017)

Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China ····· YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)

Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory ····· QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, *et al.* (3034)

Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City ····· CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, *et al.* (3043)

Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3054)

Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ During the Heating Period in Baoding ····· LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, *et al.* (3063)

Transport Influence and Potential Sources of $PM_{2.5}$ Pollution for Nanjing ····· XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, *et al.* (3071)

Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 ····· WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island ····· FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, *et al.* (3089)

Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models ····· LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, *et al.* (3098)

Health Benefit Evaluation for $PM_{2.5}$ as Well as $O_{3\text{-}8h}$ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 ····· ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, *et al.* (3108)

Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 ····· LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, *et al.* (3117)

Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province ····· WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, *et al.* (3130)

Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an ····· ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, *et al.* (3142)

Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City ····· LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, *et al.* (3152)

Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin ····· JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin ····· XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, *et al.* (3174)

Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River ····· LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, *et al.* (3184)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing ····· JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, *et al.* (3198)

Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes ····· GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, *et al.* (3206)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River ····· WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, *et al.* (3217)

Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City ····· LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, *et al.* (3228)

Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin ····· YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, *et al.* (3237)

Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir ····· CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, *et al.* (3247)

Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light ····· XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, *et al.* (3260)

Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar ····· CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, *et al.* (3270)

Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(Ⅱ) and Ni(Ⅱ) in Aquatic Environment ····· ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, *et al.* (3278)

Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar ····· HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, *et al.* (3288)

Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant ····· ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, *et al.* (3301)

Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis ····· FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, *et al.* (3309)

Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China ····· HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, *et al.* (3321)

Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China ····· JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, *et al.* (3329)

Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models ····· DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, *et al.* (3343)

Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye ····· SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, *et al.* (3353)

Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin ····· LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, *et al.* (3364)

Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of *Larix principis-rupprechtii* Forest in Luya Mountain ····· MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, *et al.* (3376)

Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau ····· ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, *et al.* (3386)

Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields ····· YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, *et al.* (3396)

Effects of Different Planting Years of *Dendrocalamus brandisii* on Soil Fungal Community ····· ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, *et al.* (3408)

Effects of Biochar Amendment on N_2O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas ····· CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, *et al.* (3418)

Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland ····· JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, *et al.* (3426)

Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield ····· MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, *et al.* (3439)

Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model ····· CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, *et al.* (3450)

Characterization and Health Risk of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province ····· HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, *et al.* (3463)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou ····· LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, *et al.* (3475)

Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China ····· GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, *et al.* (3488)

Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method ····· ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, *et al.* (3500)

Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics ····· WANG Mei-hua (3509)

Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area ····· LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, *et al.* (3520)

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone ····· LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, *et al.* (3531)

Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City ····· AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, *et al.* (3544)

Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City ····· TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, *et al.* (3562)

Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland ····· WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (3573)

Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials ····· WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, *et al.* (3585)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables ····· QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, *et al.* (3600)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province ····· WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-rui, *et al.* (3609)

Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning ····· NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (3619)