

陈涛涛, 刘晓晗, 孟凡超, 等. 减氮施炭对温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态损失的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(1): 9-20.

CHEN Taotao, LIU Xiaohan, MENG Fanchao, et al. Soil respiration and n losses from greenhouse cucumber under mulched drip irrigation as affected by reduced n fertilizer coupled with biochar incorporation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(1): 9-20.

减氮施炭对温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态损失的影响

陈涛涛^{1a,b,c}, 刘晓晗^{1a}, 孟凡超², 张妮子^{1a}, 迟道才^{1a}

(1. 沈阳农业大学 a. 水利学院; b. 国家生物炭研究院; c. 农业农村部生物炭与土壤改良重点实验室, 沈阳 110161;
2. 辽宁西北供水有限责任公司, 沈阳 110003)

摘要:为降低温室蔬菜过量施氮的不利影响,明确减氮施炭条件下温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态排放特征,以不覆膜不施炭(CK)为对照,设置覆膜(M)、覆膜施炭(MB)、覆膜施炭减氮(MBN_{80%})共4个处理,对覆膜条件下减氮施炭处理对黄瓜产量、耗水量、土壤养分动态、土壤呼吸、N₂O排放和氨挥发的影响进行探讨。结果表明:与CK相比,M可降低温室膜下滴灌黄瓜全生育期耗水量20.95%,提高水分利用效率41.03%,降低0~20 cm表层土铵态氮48.12%,降低全生育期氨挥发32.35%、N₂O排放量14.34%和CO₂排放量12.68%($p < 0.05$)。施炭后,与CK相比,MB可降低耗水量28.37%,提高水分利用效率55.60%,降低表层土铵态氮30.0%,提升硝态氮12.37%,有机质56.28%,降低氨挥发36.68%、N₂O排放18.64%,但却显著增大了CO₂排放4.66%($p < 0.05$)。同M对比,MB可在M基础上,进一步提升表层土有机质和铵态氮含量,降低氨挥发,但促进了CO₂排放。覆膜施炭减氮20%后,与CK相比,MBN_{80%}可增产25.47%,降低耗水量32.43%,提升水分生产率72.67%,降低表层土铵态氮56.33%,增加有机质51.72%,降低氨挥发40.48%、N₂O排放20.79%($p < 0.05$)。CK全生育期全球增温潜势(global warming potential, GWP)和活性氮排放分别为13.57 t·CO₂-eq·hm⁻²和6.54 kg·hm⁻²,M可显著降低GWP(14.15%)和活性氮排放(27.37%);在M基础上施炭,将进一步降低活性氮排放,但导致GWP显著增大;而在MB基础上减氮20%,可同时显著降低GWP和活性氮排放($p < 0.05$)。与CK相比,MBN80%在通过施炭20 t·hm⁻²,减氮20%条件下,实现增产25.47%,降低耗水量32.43%,增加有机质51.72%,增加收入17.52%,降低活性氮排放35.32%和GWP 2.28%,也可在MB的基础上,进一步实现增产,降低氨挥发,并破解M和MB处理CO₂排放增大的问题($p < 0.05$)。研究揭示了减氮施炭条件下温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态排放特征,为实现温室蔬菜节水增产固碳减排提供理论依据和技术支撑。

关键词:温室;生物炭;氨挥发;氧化亚氮;土壤呼吸;膜下滴灌

中图分类号:S511;S154.1

文章编号:1000-1700(2024)01-0009-12

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil Respiration and N Losses from Greenhouse Cucumber under Mulched Drip Irrigation as Affected by Reduced N Fertilizer Coupled with Biochar Incorporation

CHEN Taotao^{1a,b,c}, LIU Xiaohan^{1a}, MENG Fanchao², ZHANG Nizi^{1a}, CHI Daocai^{1a}

(1. a. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; b. National Biochar Research Institute, China; c. Key Laboratory of Biochar and Soil Improvement, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; 2. Liaoning Northwest Water Supply Co., Ltd., Shenyang 110003, China)

Abstract: To reduce the negative effects of excessive nitrogen application in greenhouse vegetables and to clarify the

收稿日期:2023-10-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1803801)

第一作者:陈涛涛(1986-),男,博士,副教授,从事北方寒区主要农作物高效用水与生态环境,E-mail:taotao-chen@syau.edu.cn

characteristics of soil respiration and nitrogen gaseous emission of cucumber under mulched drip irrigation in greenhouse under reduced nitrogen and biochar application conditions. Four treatments were set up: no mulching and no biochar application (CK), mulching (M), mulching with biochar application (MB), and mulching with biochar application and nitrogen reduction (MBN_{80%}). The effects of the reduced nitrogen application and biochar addition treatment on cucumber yield, water consumption, soil nutrient dynamics, soil respiration, N₂O emissions, and ammonia volatilization were explored. The results showed that compared to the CK treatment, the M treatment reduced water consumption by 20.95% throughout the entire cucumber growth period, increased water use efficiency by 41.03%, decreased ammonium nitrogen content in the top 0–20 cm soil layer by 48.12%, and reduced ammonia volatilization by 32.35%, N₂O emissions by 14.34%, and CO₂ emissions by 12.68% ($p < 0.05$). After biochar addition, compared to the CK treatment, the MB treatment reduced water consumption by 28.37%, increased water use efficiency by 55.60%, decreased ammonium nitrogen content in the topsoil by 30.0%, increased nitrate nitrogen content by 12.37%, increased soil organic matter content by 56.28%, decreased ammonia volatilization by 36.68%, and reduced N₂O emissions by 18.64%, but significantly increased CO₂ emissions by 4.66% ($p < 0.05$). Compared to the M treatment, the MB treatment further increased the content of soil organic matter and ammonium nitrogen in the topsoil, reduced ammonia volatilization, but promoted CO₂ emissions. After reducing nitrogen application by 20% in the MB treatment, compared to the CK treatment, the MBN_{80%} treatment increased yield by 25.47%, reduced water consumption by 32.43%, increased water productivity by 72.67%, decreased ammonium nitrogen content in the topsoil by 56.33%, increased soil organic matter content by 51.72%, reduced ammonia volatilization by 40.48%, and reduced N₂O emissions by 20.79% ($p < 0.05$). The global warming potential (global warming potential, GWP) and active nitrogen emissions during the entire growth period were 13.57 t·CO₂-eq·hm⁻² and 6.54 kg·hm⁻², respectively, in the CK treatment. The M treatment significantly reduced GWP (by 14.15%) and active nitrogen emissions (by 27.37%). Adding biochar on the basis of the M treatment further reduced active nitrogen emissions but significantly increased GWP. However, reducing nitrogen application by 20% on the basis of the MB treatment significantly reduced both GWP and active nitrogen emissions ($p < 0.05$). Compared to the CK treatment, the MBN_{80%} treatment achieved a 25.47% increase in yield, a 32.43% reduction in water consumption, a 51.72% increase in soil organic matter content, a 17.52% increase in income, a 35.32% reduction in active nitrogen emissions, and a 2.28% reduction in GWP, with the addition of 20 t·hm⁻² of biochar and a 20% reduction in nitrogen application. It also further increased yield, reduced ammonia volatilization, and addressed the issue of increased CO₂ emissions in the M and MB treatments ($p < 0.05$). This study revealed the characteristics of soil respiration and nitrogen gas emissions under the conditions of reduced nitrogen application and biochar addition in a greenhouse cucumber cultivation system, providing a theoretical basis and technical support for water-saving and yield-increasing, carbon sequestration, and emission reduction in greenhouse vegetable production.

Key words: greenhouse; biochar; NH₃ volatilization; nitrous oxide; soil respiration; mulched drip irrigation

近年来,我国日光温室蔬菜产业得到了快速发展,以温室大棚为主的全国温室蔬菜种植面积约 256.7 万 hm²,播种面积 400 万 hm²,年产量 2.6 亿 t,占蔬菜总产量的 1/3^[1]。氮是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,参与植物的生长发育。在农业生产上,大量施用氮肥是作物增产的主要手段之一^[2]。但是过量不合理施氮不仅导致蔬菜产量和品质下降,还会增加氮素损失,加剧大气环境污染^[3]。氮素气态损失是氮肥主要损失途径之一^[4],主要包括氨挥发和 N₂O。据统计,温室蔬菜生产产生的氨排放量约占我国农业源氨排放量的 33%^[5],氨挥发不仅会降低氮素利用率^[6],还会引起空气中二次无机颗粒物、PM_{2.5} 等有害物质形成^[7-8],加剧大气污染问题。同时,N₂O 的形成也引起了土壤酸化和水体富营养化等一系列环境问题^[9]。近年来大气中 CO₂ 的浓度成指数上升,达到了 200 万年来最高水平^[10],对全球温室效应的相对贡献约为 50%~60%^[11]。土壤 CO₂ 排放是植物根系自养呼吸和土壤微生物异养呼吸的综合结果,可使土壤空气中 CO₂ 浓度升高到 3 000 mg·kg⁻¹,约是大气中的 10~50 倍,其中异养呼吸增加会使土壤有机碳库下降^[12]。据估计,在推行优化管理措施(如保护性耕作、轮作、覆盖作物、养分管理、水管理等)下,未来 50 年中国农业土壤固碳减排潜力为 87~393 TgC·a⁻¹^[13],因此寻找合理措施提高农田土壤固碳减排能力对减缓气候变化具有重要意义。

近年来,在作物生产栽培中,生物炭与氮肥配施能节约灌溉用水、优化土壤肥力、提高作物产量等

观点已得到系统验证和广泛认可。刘遵奇等^[14]研究认为,生物炭与化肥配施可显著提高肥料利用效率,实现肥料减量施用。张伟明等^[15]研究表明生物炭与化肥配施效果优于单施化肥、常规施肥,其“减量增效”作用,可能因炭肥互作优化了土壤环境的水、气、热及微生物条件,尤其是改善了土壤总体供肥能力。生物炭施入土壤后,可有效提高土壤有机碳库储量,缓解大气CO₂浓度升高^[16]及气态氮产生和排放增大^[17]等问题。宋博影等^[18]研究发现,生物炭配合减氮处理可以显著降低温室蔬菜土壤N₂O累积排放量及全球增温潜势(global warming potential, GWP)并促进增产;王军^[19]研究发现,生物炭可提高设施蔬菜地pH值,改变反硝化关键功能微生物丰度,在缓解土壤退化问题同时降低N₂O排放;肖婧^[20]在将数据整合分析后发现,与不施生物炭相比生物炭的施用使温室作物产量平均提高22.0%~22.1%,N₂O平均减排44.0%。除此之外还有一些研究表明^[21-24],在某些土壤类型、气候条件和作物种类下,生物炭与氮肥配施的效果不显著或导致负面效果。目前生物炭与氮肥配施对农作物固碳减排增产的研究多集中在水稻或小麦等大田作物,有关减氮配施生物炭条件下温室作物的固碳减排增产效益还需进一步研究。因此,探究生物炭配施氮肥在不同条件不同作物不同系统的影响是十分必要的。综上所述,本试验通过减氮施炭两项措施,对温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸及氮素气态损失的影响进行研究,以期为辽宁地区温室减排提供数据基础与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况和试验材料

本试验于2022年8-12月在辽宁省灌溉中心站进行,该站位于辽宁省沈阳市黄家乡(120°30'E, 42°08'N),所处位置为平原地带,属温带大陆性季风气候。年日照时数为2 520~2 750 h,日照时数百分率60.1%,日照季节分布与作物生长期相适应。试验所在温室全长87 m,宽8.5 m,高4.5 m,结构形式为单拱结构,表面覆有500 μm厚度的塑料薄膜,试验期间温室内平均温度27.62 °C,平均湿度65%。供试土壤表层为黏壤土,地下1 m处为砂土。表层土壤容重为1.35 g·cm⁻³,田间持水率24%,土壤肥力中等偏下,有机质24.63 g·kg⁻¹,速效磷223.65 mg·kg⁻¹,速效钾217.05 mg·kg⁻¹,全氮3.19 mg·g⁻¹,铵态氮37.46 mg·kg⁻¹,硝态氮45.83 mg·kg⁻¹。

黄瓜供试品种为玛丽亚水果黄瓜,9月14日-10月12日为幼苗期,10月13-21日为开花坐果期,10月22日-12月31日为结果期。种植方式为当地典型的起垄覆膜栽培种植模式,垄上栽培两行,垄台长7 m,宽1 m,高15 cm,行距50 cm,株距30 cm,两垄之间距离为50 cm。试验采用膜下滴灌的灌溉方式,作物定植前在垄上铺设2条滴灌带,灌水时将水引至距地面2 m高的塑料桶(容量70 L)内,利用重力作用将桶内的水释放到滴灌带中,使灌溉水均匀流出;田间管理方式按照当地农民传统耕作习惯。

1.2 试验设计

试验采用完全随机试验设计,设置不覆膜不施炭(CK)、覆膜(M)、覆膜施炭(MB)、覆膜施炭减氮(MBN_{80%})4个处理,3次重复,设置如表1。施肥制度通过定植前施底肥和生育期内追肥来实现,幼苗期需肥量较少利用种植前施用的底肥肥力即可,其他生育期通过追肥施入。通过调查菜农实际施肥量和阅读参考相关文献制定小区肥料施用标准,肥料施用时期及施用量如表2。供试生物炭为玉米秸秆生物炭,施用量为20 t·hm⁻²^[25],由绥化市路森炭粉科技有限公司提供,热解温度为450 °C,含碳量为404.78 g·kg⁻¹,含氮量为8.45 g·kg⁻¹,pH值为9.35,阳离子交换量为44.19 cmol·kg⁻¹;有机肥施用量为800 kg·hm⁻²,含氮量为29.73 kg·hm⁻²,购自山东施可丰生物科技有限公司;氮、磷、钾肥分别选用尿素、过磷酸钙和硫酸钾。将有机肥、生物炭、50%的氮肥、100%的磷肥、70%的钾肥作为底肥一次性施入土壤0~20 cm处,其余氮肥和钾肥作为追肥分5次随水施入(开花坐果期1次,结果期4次),肥水比为1:200,减氮处理按照上述氮肥施用量的80%计。缓苗期对作物进行充分供水,幼苗期、开花坐果期和结果期控水标准如表3,灌水量根据灌水定额公式计算,其中 θ_j 为田间持水率。

1.3 测定指标

1.3.1 土壤水分 每天8:00和14:00利用TRIME-PICO便携式土壤水分测量仪分别测定0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 cm土层深度的含水量。

表1 试验处理及具体设置

Table 1 Experimental treatment and specific settings

处理 Treatment	覆膜情况 Mulch covering situation	施肥/% Fertilization situation	生物炭用量/(t·hm ⁻²) Biomass of biochar
CK	无膜 No mulching	100	0
M	有膜 Mulching	100	0
MB	有膜 Mulching	100	20
MBN _{80%}	有膜 Mulching	80	20

表2 肥料施用时期及施用量

Table 2 Fertilizer application period and rate

肥料 Fertilizer	总施肥量/(kg·hm ⁻²) Total fertilization amount	底肥施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilization amount of base fertilizer	追肥施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilization amount of top-dressing				
			开花坐果期 Flowering and fruiting period	结果期1 Fruit setting period 1	结果期2 Fruit setting period 2	结果期3 Fruit setting period 3	结果期4 Fruit setting period 4
N	360	180	36	36	36	36	36
P ₂ O ₅	180	180	0	0	0	0	0
K ₂ O	540	378	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4
有机肥 Organic fertilizer	800	800	0	0	0	0	0
生物炭 Biochar	20 000	20 000	0	0	0	0	0

表3 控水标准

Table 3 Water control standard

生育期 Period of duration	计划湿润层/m Planned wetting layer	控水上下限 Water control limit	单次灌水量/L Irrigation quantity
幼苗期 Seedling period	0.2	55%θ _f ~70%θ _f	36.23
开花坐果期 Flowering and fruiting period	0.3	75%θ _f ~90%θ _f	54.34
结果期 Fruit setting period	0.3	65%θ _f ~80%θ _f	54.34

1.3.2 产量和水分利用效率 各小区单打单收、分批计产,累计值为最终产量。

水分利用效率(water use efficiency, *WUE*)公式为:

$$WUE = Y/ET \quad (1)$$

式中:*WUE*为作物水分利用效率(kg·m⁻³);*Y*为作物产量(kg·hm⁻²);*ET*为作物全生育期耗水量(mm)。

$$ET = M + (W_t - W_0) \quad (2)$$

式中:*ET*为全生育期耗水量;*M*为生育期总灌水量;*W_t*为拉秧后土层总储水量;*W₀*为定植前土层总储水量。由于温室内试验,灌溉采取“少量多次”的灌水方法,不考虑降水、径流和深层渗漏。

1.3.3 土壤矿化氮动态变化和有机质的测定 采用三点取样法采集0~10 cm土样,取样频率与气体采集频率同步,2 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提土样,采用德国SEAL AA3连续流动分析仪测定土样中铵态氮和硝态氮含量。采用重铬酸钾-硫酸消化法测定土壤有机质。

1.3.4 氨挥发的采集与测定 通过间歇式密闭气室抽气法测定土壤氨气挥发量^[26]。在施氮肥后第1周内,第1,3,7天进行采样,施肥超1周后,每7 d采集1次气体,直至全生育期结束,每次抽气时间2 h。采用标准硫酸溶液滴定方法,测定收集氨挥发后的硼酸溶液中N浓度,公式为:

$$V_{\text{NH}_3 - \text{N}} = \frac{14(V - V_0) \times c}{A \times D} \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为单位时间单位面积上氨挥发通量(以纯氮计) [$\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$]; V 为滴定样品时所用标准酸溶液的体积(mL); V_0 为滴定空白时所用标准酸的体积(mL); c 为标准酸溶液的浓度($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$); A 为采气装置的横截面积(m^2); D 为每次采集氨挥发的时间(d)。对时段内的氨挥发通量进行内插积分求和即为本时段内土壤氨挥发累积排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.5 N_2O 和土壤呼吸的采集与测定 通过透明静态箱法观测 N_2O 和土壤呼吸排放^[27-28]。采样箱由顶箱(50 cm×50 cm×50 cm)和底座(50 cm×50 cm×20 cm)两部分组成,顶箱由透明有机玻璃制成,底座由PVC材料制成,底座安装位置为小区中间位置并穿过滴灌带施肥区,四周紧密挨着作物但其中无作物。膜下滴灌处理在埋设底座时,先将地膜铺好,在埋放底座的位置将地膜留好褶皱并在四周挖好约20 cm深的细沟,底座小心压放在地膜上并在底座外四周用土壤压实,同时底座中央在覆膜前也多堆放一定土,待底座放好后,隔着地膜将底座内土推平,使底座与垄面齐平。在0, 15, 30 min抽取箱内气体100 mL,存于100 mL铝箔气袋中。每次采样在9:00-11:00进行,采样频率与氨挥发一致。

采集的气体样品一周之内送到实验室,采用安捷伦7890B气相色谱仪分析进行气体样品的测定 N_2O 和 CO_2 浓度。 N_2O 和 CO_2 排放通量的公式计算为:

$$F = \rho h \times \frac{dC}{dt} \times \frac{273}{273 + t} \times \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

式中: F 为 N_2O 或 CO_2 的排放通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 或 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; ρ 为 N_2O 和 CO_2 在标准状态下的密度(N_2O 和 CO_2 密度均为 $1.964 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); h 为箱体有效高度(m); dC/dt 为采样过程中采样箱内 N_2O 或 CO_2 浓度变化率 [$\mu\text{L}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 或 $\text{mL}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$]; t 为采样箱内的平均温度($^{\circ}\text{C}$); P 为采样箱内气压; P_0 为标准大气压。这个区域属平原,基本上不受气压的影响, P 与标准大气压大致相等。

生育期内 N_2O 和 CO_2 累积排放量计算公式为:

$$f = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i-1}}{2} \times d \times 24 \times 10^{-2} \right] \quad (5)$$

式中: F_i 为第 i 次被测气体排放通量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 或 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]; d 为第 i 次与第 $i-1$ 次观测间隔天数; n 为气体观测总次数; f 为生育期内气体累积排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.6 N_2O 和 CO_2 排放的综合温室效应 本研究以 CO_2 为参考气体,将 N_2O 的排放量换算成 CO_2 当量,即单位质量的 N_2O 增温潜势是 CO_2 的273倍(以100年尺度计):

$$\text{GWP}(\text{N}_2\text{O} + \text{CO}_2) = f\text{N}_2\text{O} \times 273 + f\text{CO}_2 \times 1 \quad (6)$$

式中: $f\text{N}_2\text{O}$ 和 $f\text{CO}_2$ 同上; $\text{GWP}(\text{N}_2\text{O}+\text{CO}_2)$ 为 N_2O 和 CO_2 排放的综合增温潜势($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.7 氮素气态损失 氨挥发和 N_2O 是氮素气态损失中对温室效应影响较大的两种气体,本研究将以上两种气体累积排放量(以纯氮计)之和作为氮素气态损失。

1.4 数据分析

试验数据采用单因素完全随机试验设计模型单独进行方差分析,使用IBM SPSS Statistics 21软件实现。不同处理均值差异检测采用Tukey's HSD方法,显著性水平为 $p < 0.05$ 。采用Origin 2017进行作图。

2 结果与分析

2.1 耗水量与产量

不同处理下温室黄瓜生长季计划湿润层含水率动态变化如图1a。不同处理土壤含水率变化趋势相同,在每次灌溉后均有所升高,与不覆膜处理相比,覆膜后的土壤水分保持更为稳定,覆膜能有效减少土壤表面的水分蒸发,阻止水分流失,因此,在同样的控水条件下,覆膜能降低灌水量,节约水资源。不同处理下黄瓜产量、耗水量及水分利用率如表4。CK、M、MB、 $\text{MBN}_{80\%}$ 的黄瓜产量和水分利用率依次递增,耗水量依次递减。与CK相比, $\text{MBN}_{80\%}$ 显著增加25.47%的产量和72.67%的水分利用率,显著减少32.43%的耗水量。因此,相较于其余处理, $\text{MBN}_{80\%}$ 能够有效减少黄瓜耗水量,提高黄瓜产量和水分利用效率。

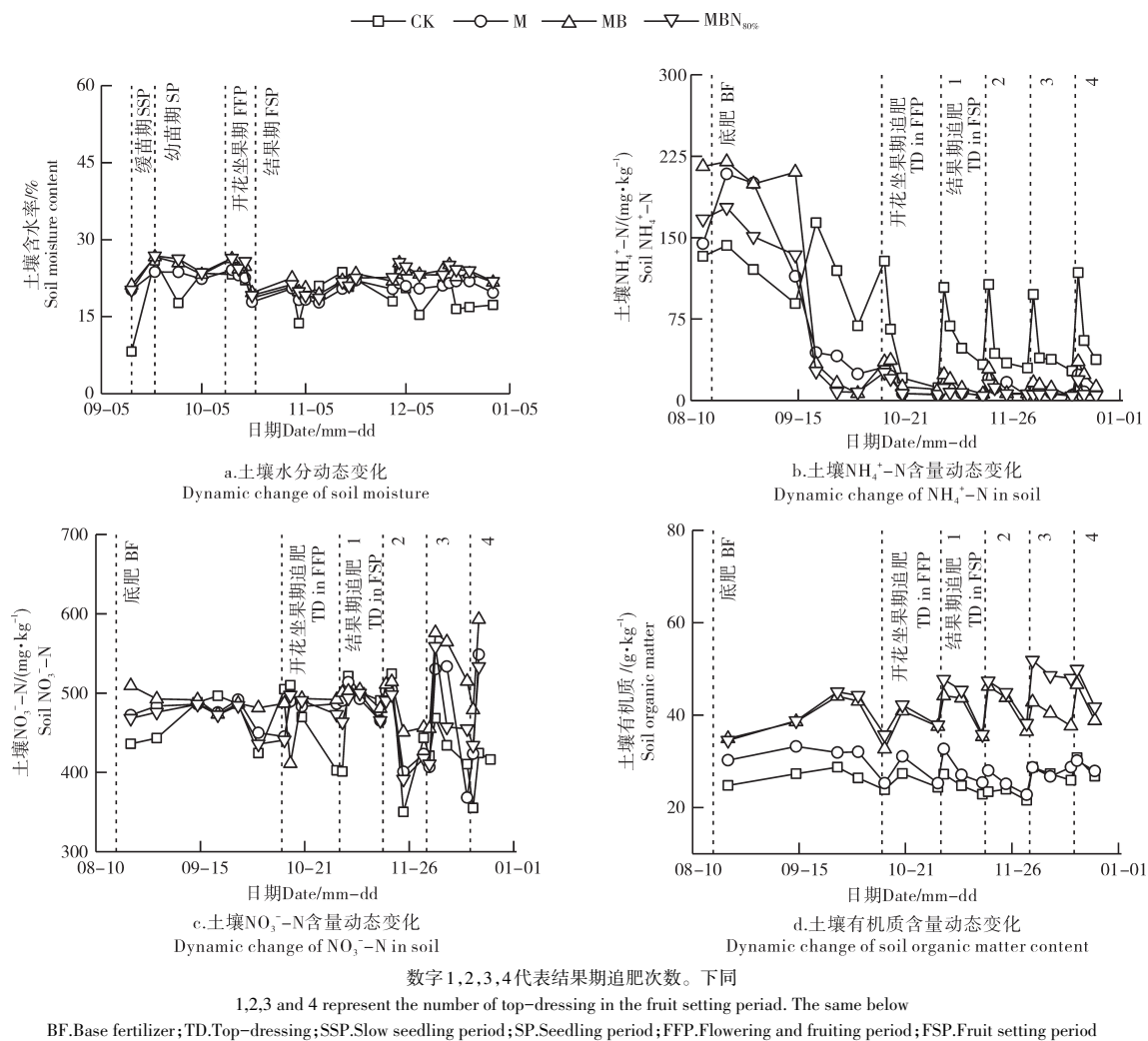


图1 不同处理条件下黄瓜表层土壤水分变化、铵态氮、硝态氮及有机质含量动态变化

Figure 1 Dynamic of soil moisture, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and soil organic matter in cucumber surface layer under different treatment conditions

表4 不同处理条件下黄瓜产量、耗水量及水分利用效率

Table 4 Yield, water consumption and water use efficiency of cucumber under different treatment conditions

处理 Treatment	产量/($\times 10^3 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield	耗水量/mm Water consumption	水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Water use efficiency
CK	24.85 ^b	191.92 ^a	13.94 ^c
M	26.69 ^{ab}	151.72 ^b	19.66 ^b
MB	29.02 ^{ab}	137.48 ^{bc}	21.69 ^{ab}
MBN _{80%}	31.18 ^a	129.69 ^c	24.07 ^a

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

Note: Data followed by different letters within the same column were significantly different at $p < 0.05$. The same below.

2.2 土壤矿化氮及有机质

2.2.1 不同处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响 不同处理下表层土壤铵态氮含量动态变化如图1b。整个生长季土壤铵态氮在 $3.65 \sim 220.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内波动,在缓苗结束后和5次追肥后的第1天均出现明显峰值,共6处。不同施肥期以及全生育期表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均值如表5。与CK相比,M可显著降低表层土壤全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,降幅达48.12%;与M相比,MB显著提高34.92%的表层土壤全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量;与MB相比,减氮20%后表层土壤全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低37.62%。由此可见,在覆膜施炭基础上减氮20%处理后能降低土壤中铵态氮残留量,有效缓解施炭引起的表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的增加。

表5 不同施肥期黄瓜表层土壤铵态氮、硝态氮及有机质含量均值

Table 5 Average contents of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and soil organic matter in cucumber topsoil under different fertilization periods

施肥期 Fertilization period	表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in topsoil				表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in topsoil				表层土壤有机质含量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Organic matter content in topsoil			
	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering and fruiting period	结果期 Fruit setting period	全生育期 Whole period	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering and fruit- ing period	结果期 Fruit Setting period	全生育期 Whole period	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering and fruiting period	结果期 Fruit setting period	全生育期 Whole period
CK	119.63 ^a	56.67 ^a	58.67 ^a	74.81 ^a	455.33 ^b	460.00 ^a	443.93 ^b	452.89 ^b	27.40 ^d	25.22 ^c	25.75 ^b	26.12 ^b
M	110.96 ^{ab}	16.30 ^b	11.11 ^{bc}	38.81 ^c	477.33 ^a	470.15 ^a	486.59 ^{ab}	484.67 ^{ab}	34.75 ^c	28.63 ^b	27.57 ^b	30.32 ^b
MB	104.67 ^{bc}	23.85 ^b	15.63 ^b	52.37 ^b	490.22 ^a	473.11 ^a	525.93 ^a	508.89 ^a	42.10 ^a	37.07 ^a	43.29 ^a	40.82 ^a
MBN _{80%}	96.00 ^c	14.59 ^b	8.00 ^c	32.67 ^c	479.63 ^a	471.78 ^a	478.37 ^{ab}	465.85 ^b	38.69 ^b	36.16 ^a	44.03 ^a	39.63 ^a

2.2.2 不同处理对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响 不同处理下黄瓜表层土壤硝态氮含量的动态变化如图1c。试验期间黄瓜土壤硝态氮含量为350.15~593.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同处理动态曲线均在缓苗结束的第1天和5次追肥后的第3天出现明显峰值,共6处。各施肥期及全生育期表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均值如表5。与CK相比,M的表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著提高7.02%;与M相比,MB表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著提高11%;与MB相比,MBN_{80%}表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低8.49%。由此可见,黄瓜土壤覆膜后表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量会有所提高,而施炭则会加剧这一不利影响,在此基础上减氮20%后可有效缓解该问题。

2.2.3 不同处理对土壤有机质含量的影响 不同处理下黄瓜表层土壤有机质含量的动态变化如图1d。试验期间黄瓜土壤有机质含量为25.90~43.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同处理动态曲线在缓苗结束后和开花坐果期追肥后的第7天,结果期4次追肥后的第1天分别出现6个明显峰值。各施肥期及全生育期表层土壤有机质含量均值如表5。与CK相比,覆膜后对全生育期土壤有机质含量无显著影响;施炭后,与M处理相比,MB处理显著提高各施肥期和全生育期表层土壤有机质含量,增幅分别可达21.15%(底肥期)、29.48%(开花坐果期)、57.02%(结果期)和34.63%(全生育期);在MB基础上减氮20%。表层土壤有机质含量无显著影响,在结果期显著增加1.71%。因此,施炭能效增加黄瓜表层土壤有机质含量,且在此基础上减氮20%可促进该效果。

2.3 氮素气态损失及土壤呼吸

2.3.1 氨挥发 不同处理下黄瓜土壤氨挥发排放通量动态曲线的变化如图2a。试验期间黄瓜土壤的氨挥发排放主要集中在追肥后的14 d内,排放通量在0.01~0.20 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 范围内,在缓苗结束后的第1天、5次追肥后的5~7 d均出现较为明显的峰值,5次追肥后14 d内氨挥发总量分别占全生育期氨挥发总量的62.13%。不同处理对黄瓜肥期氨挥发累积量的影响如表6。与CK相比,M的黄瓜土壤全生育期氨挥发累积量显著降低32.35%;施炭后,MB全生育期氨挥发累积量与M相比显著降低6.39%;减氮20%后MBN_{80%}全生育期氨挥发累积量和MB相比减少6.01%。因此,在覆膜基础上施加生物炭可减少氨挥发排放,而减氮20%后能有效抑制氨挥发的排放。

2.3.2 N_2O 排放 不同处理下黄瓜土壤 N_2O 排放通量动态曲线的变化如图2b。试验期间黄瓜土壤 N_2O 排放通量在20.95~268.60 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 范围内,施底肥后的第5天、缓苗结束后的第1天及5次追肥后的第3天均出现较为明显的峰值。黄瓜土壤的 N_2O 排放主要集中在有4次追肥的结果期,占总量的63.48%,而底肥期和开花坐果期追肥产生的 N_2O 排放分别仅占总量的23.78%和10.78%。不同处理对黄瓜肥期 N_2O 累积量的影响如表6。与CK相比,M黄瓜土壤 N_2O 排放全生育期显著降低14.34%;在施炭后,MB与M相比也有所降低但并不明显;减氮20%后MBN_{80%}与MB相比减少2.64%。因此,在覆膜基础上施加生物炭可减少 N_2O 排放累积量,减氮20%处理后能够有效抑制对 N_2O 排放。

2.3.3 土壤呼吸 不同处理下黄瓜土壤呼吸通量动态曲线的变化如图2c。试验期间黄瓜土壤呼吸通量为 $206.99\sim 1\,168.99\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,在施底肥后和5次追肥后的1~3 d均出现峰值。黄瓜土壤呼吸主要集中在底肥期和有4次追肥的结果期,分别占总量的42.52%和40.35%,开花坐果追肥期土壤呼吸总量的17.04%。不同处理对黄瓜肥期土壤呼吸累积量的影响如表6。与CK相比,M处理的全生育期黄瓜土壤呼吸显著降低,降幅达12.68%;覆膜施炭会显著增大土壤呼吸,MB比M显著提高19.86%;减氮20%处理后,土壤呼吸有所降低但不显著,且和CK相比 $\text{MBN}_{80\%}$ 处理全生育期土壤呼吸累积量无显著差异。因此,减氮20%处理后能够缓解覆膜施炭处理导致土壤呼吸增加的问题。

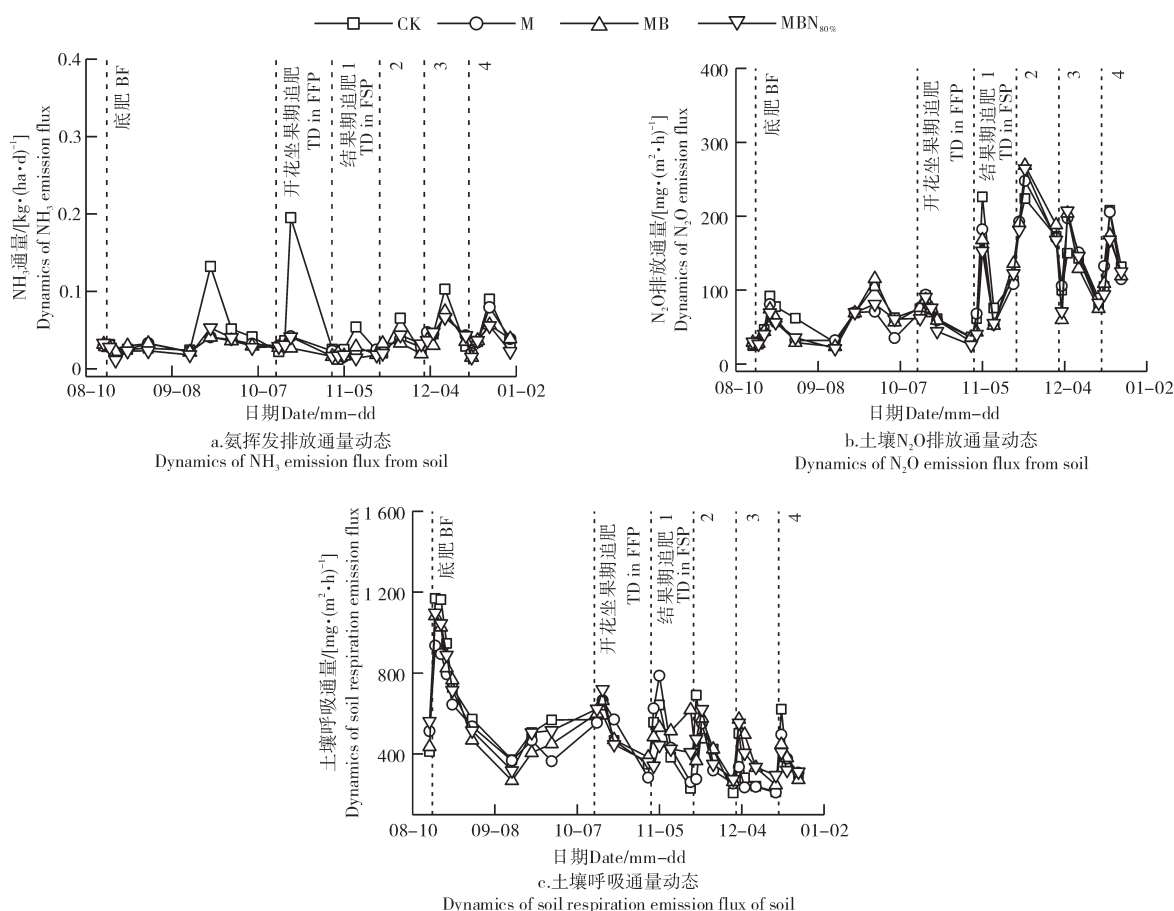


图2 不同处理条件下黄瓜氨挥发、 N_2O 及土壤呼吸通量动态

Figure 2 Dynamic diagram of ammonia volatilization, N_2O and soil respiration emission flux of cucumber under different treatment conditions

2.4 N_2O 和 CO_2 排放的综合温室效应和氮素气态损失

不同处理对黄瓜生长季 N_2O 和 CO_2 排放的综合温室效应的影响如表7。黄瓜生长季内 N_2O 和 CO_2 综合全球增温潜势为 $11.65\sim 13.67\text{ t}\cdot\text{CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与CK相比,M显著抑制GWP,降幅达14.15%;MB处理GWP最大,与M相比MB处理显著提高14.78%的GWP,因此,覆膜基础上施炭并不利于抑制黄瓜温室气体排放;减氮20%处理后, $\text{MBN}_{80\%}$ 与MB处理相比显著降低3%,减氮20%可缓解因施炭而造成的温室气体排放增加的问题。

不同处理对黄瓜生长季氮素气态损失的影响如表7,黄瓜生长季内氮素气态损失为 $4.23\sim 6.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与CK相比,覆膜可显著降低27.37%的黄瓜氮素气态损失;施炭后,与M处理相比MB显著降低6.11%;减氮20%能够有效抑制氮素气态损失,与MB相比 $\text{MBN}_{80\%}$ 处理显著降低5.16%。由此可见,覆膜施炭减氮处理在降低黄瓜氮素气态损失方面也有很大潜力。

表6 不同处理下黄瓜氨挥发、N₂O及土壤呼吸累积排放量Table 6 Ammonia volatilization, N₂O and soil respiration cumulative emissions of cucumber under different treatments

施肥期 Fertilization period	氨挥发累积量/(kg·hm ⁻²) Ammonia volatilization accumulation				N ₂ O排放量/(kg·hm ⁻²) N ₂ O emission				土壤呼吸排放量/(kg·hm ⁻²) Soil respiration emission			
	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering and fruiting period	结果期 Fruit setting period	全生育期 Whole period	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering and fruiting period	结果期 Fruit setting period	全生育期 Whole period	底肥期 Base period	开花坐 果期 Flowering And fruiting period	结果期 Fruit setting period	全生育期 Whole period
CK	2.15 ^a	0.94 ^a	2.69 ^a	5.78 ^a	0.70 ^a	0.32 ^a	1.78 ^a	2.79 ^a	5 978.13 ^a	2 030.56 ^{bc}	4 588.16 ^b	12 596.84 ^b
M	1.37 ^b	0.43 ^b	2.11 ^b	3.91 ^b	0.53 ^b	0.28 ^b	1.48 ^b	2.39 ^b	4 966.96 ^c	2 150.64 ^b	3 881.48 ^c	10 999.08 ^c
MB	1.28 ^{bc}	0.43 ^b	1.95 ^c	3.66 ^c	0.50 ^b	0.23 ^c	1.54 ^{ab}	2.27 ^{bc}	4 812.66 ^c	2 376.98 ^a	5 993.77 ^a	13 183.41 ^a
MBN _{80%}	1.20 ^c	0.42 ^b	1.81 ^c	3.44 ^d	0.57 ^b	0.22 ^c	1.34 ^b	2.21 ^c	5 202.39 ^b	1 887.90 ^c	5 617.48 ^a	12 707.77 ^{ab}

表7 不同处理下黄瓜N₂O和CO₂全球增温潜势及氮素气态损失

Table 7 GWP and reactive nitrogen gas emissions in greenhouse of cucumber under different treatments

处理 Treatment	N ₂ O和CO ₂ 综合全球增温潜势/(t·CO ₂ -eq·hm ⁻²) Global warming potential of N ₂ O and CO ₂	氮素气态损失/(kg·hm ⁻²) Reactive nitrogen gas emissions
CK	13.57 ^a	6.54 ^a
M	11.65 ^c	4.75 ^b
MB	13.67 ^a	4.46 ^c
MBN _{80%}	13.26 ^b	4.23 ^d

2.5 经济收益分析

不同处理下黄瓜净收益如表8。该支出仅展示4个处理不同之处,其他支出各处理均相同未在表中展示。生物炭(2 000元·t⁻¹)、地膜(0.12元·m⁻²)及尿素(14元·kg⁻¹)单价来源于试验期间实际购买价格,黄瓜(20元·kg⁻¹)单价来源于当地线上线下价格平均值。与CK相比,覆膜提升7.41%黄瓜净收益;施炭后,与M处理相比MB提升1.24%;在施炭上减氮20%后对黄瓜净收益的提升效果明显,MB相比MBN_{80%}提升8.07%,与CK相比提升17.52%。因此,覆膜施炭减氮处理在提升黄瓜净收益方面有很大的应用前景。

表8 不同处理下黄瓜净收益

Table 8 Profit of cucumber under different treatments

处理 Treatment	支出/(万元·hm ⁻²) Expend			收入/(万元·hm ⁻²) Income	净收益/(万元·hm ⁻²) Profit
	生物炭 Biochar	地膜 Mulch film	尿素 Urea		
	CK	0	0		
M	0	0.012	0.15	53.38	53.22
MB	4	0.012	0.15	58.04	53.88
MBN _{80%}	4	0.012	0.12	62.36	58.23

3 讨论与结论

3.1 减氮施炭对黄瓜耗水量与产量的影响

有研究表明,覆膜及适量生物炭的添加有利于提高土壤含水量,增强土壤的保水效果^[29]。本研究

表明,覆膜及覆膜加炭处理保水效果更好,可显著降低黄瓜耗水量,这与前人研究较为一致。一方面生物炭有较大的比表面积,施入土壤后降低土壤容重,增大土壤孔隙度,有利于土壤含水率的增加;另一方面,地膜作为一种屏障,阻碍了土壤中的水分向外界大气中扩散,使得水分横向进行移动至地表处,因此覆膜也会减少了土壤水分的流失,提高土壤的水分有效利用率^[30]。在本研究中,与覆膜处理相比,在覆膜基础上进行施炭处理黄瓜产量进一步提升,在减氮 20% 处理后黄瓜产量提升效果更为明显,究其原因,虽然生物炭可以一定程度上提高黄瓜产量^[31],但大棚土壤由于长期大量投入氮肥,连续高氮处理会导致土壤氮素过量积累,削弱植株光合作用,显著抑制作物产量^[32]。适量减氮处理可增加土壤速效养分含量^[33],且与常规施氮配施生物炭处理相比,合理的减氮配施生物炭能有效提高作物产量以及提高氮素利用效率^[34]。

3.2 减氮施炭对土壤矿化氮及有机质的影响

大量的室内室外试验研究表明,施用生物炭可有效提高土壤中的有机质含量^[35-36],在本研究中,覆膜会略微增加土壤有机质含量,施炭后土壤全生育期有机质含量显著提高 34.63%,在施炭基础上减氮 20% 后,表层土壤有机质含量未见下降,但在结果期增加 1.71%。表明减氮施炭处理在降低氮肥施入同时更有利于土壤肥力的提升。此外,施加生物炭可抑制土壤氮素矿化作用,提高土壤养分含量^[37]。在本研究中,覆膜以及施炭后土壤 NH_4^+-N 含量显著降低, NO_3^--N 含量却提高,这是由于施炭后可显著影响土壤氨化和硝化强度,促进作物对氮素的吸收,降低土壤铵态氮含量,提高硝态氮含量^[38]。M 处理相比,MB 处理土壤 NH_4^+-N 含量较高,这是由于生物炭对氮素固持效果更好,而作物并未完全吸收利用所导致,因此,减氮 20% 后土壤铵态氮含量较 MB 处理显著降低。综合不同处理对土壤矿化氮以及土壤有机质的影响来看,覆膜处理有利于降低土壤 NH_4^+-N 含量,促进黄瓜对氮素吸收利用,施炭提高土壤 NH_4^+-N 含量和 NO_3^--N 含量,加剧了土壤次生盐碱化问题等负面影响;而施炭后土壤有机质含量提升幅度超过 50%,有利于作物生长发育,因此在施炭基础上减氮 20% 处理后,能有效缓解因施炭所导致的负面影响。

3.3 减氮施炭对黄瓜氮素气态损失及土壤呼吸的影响

氮素气态损失是作物氮素损失的一大主要途径, N_2O 会加剧温室效应,而 NH_3 则会以干湿沉降的形式回归农田,造成环境污染^[39]。在本研究中,覆膜处理全生育期氨挥发累积量显著降低;而在施炭后生育期氨挥发累积量进一步降低 6.39%,这与前人研究发现施炭后氨挥发上升有所差异^[40],其原因可能是施炭后作物耗水量降低,进而导致灌水量下降,氮肥水解速率下降^[41],进而降低氨挥发,减氮 20% 能有效抑制氨挥发。覆膜施炭减少 N_2O 排放累积量,减氮 20% 处理有效抑制 N_2O 排放,究其原因,本研究中 MB 全生育期 N_2O 排放累积量显著高于 M,这说明施入生物炭后的土壤更适合氧化亚氮还原菌的生长从而减少 N_2O 排放^[42],这与前人研究保持一致,而 $\text{MBN}_{80\%}$ 在施炭同时减少氮素的输入,因而 N_2O 排放量更低^[43]。生物炭在施入土壤后加剧农田土壤呼吸排放,导致温室效应加剧^[44],危害地球环境。在本研究中,MB 全生育期土壤呼吸累积量显著高于其他处理也验证了这一观点, $\text{MBN}_{80\%}$ 全生育期土壤呼吸累积量相较于 MB 则减少 $475.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 CK 处于同一水平,说明减氮施炭处理可减弱因施炭所带来的土壤呼吸排放量提高负面影响。虽然 M 在抑制土壤呼吸排放方面有着极为明显的效果,较 MB 来说全生育期土壤呼吸累积量显著减少 16.57%,但就黄瓜土壤 N_2O 和 CO_2 的综合温室效应来说,M 与 MB 差异不明显, $\text{MBN}_{80\%}$ 处理 GWP 最低,与 CK 相比显著降低 20.05%,其在温室潜热方面则有更好表现的原因可能是由于其在施炭基础上配合了适量的减氮处理,在显著降低 N_2O 排放的同时也有效控制了因生物炭引入而导致土壤呼吸的过量排放。

本研究结合覆膜、覆膜施炭及覆膜施炭减氮 3 个处理对黄瓜耗水量、产量、土壤养分动态、土壤呼吸、 N_2O 排放和 NH_3 挥发等指标进行研究发现,覆膜施炭并减氮 20% ($\text{MBN}_{80\%}$) 处理可有效缓解施炭所导致的土壤氮素残余较高和温室气体排放等负面影响,在保证黄瓜稳产高产、提高水分利用效率、提高经济收益及减少温室气体排放等方面均显现较好效果,这对于优化温室作物生产模式、节约农民生产成本、增强农田土壤固氮减排能力,以及温室作物绿色高效生产方面有重要意义。而本研究也有一定的局限性,仅探究减氮施炭与覆膜及覆膜施炭处理的差异,在减氮以及施炭配比方面仍有研究空间,可展开不同程度减氮施炭进行研究,进一步探究其减排潜力。

M、MB、MBN_{80%} 均能降低温室黄瓜耗水量,提高产量及水分利用率,MBN_{80%} 有着更明显的优势,与 CK 相比,MBN_{80%} 产量和水分利用率分别显著增加 25.47% 和 72.67%。MBN_{80%} 会解决因施炭引起表层土壤 NH₄⁺-N 含量增加的问题,与 MB 相比,MBN_{80%} 表层土壤全生育期铵态氮和硝态氮含量分别显著降低 37.62% 和 8.49%,结果期土壤有机质增加 1.71%。MBN_{80%} 对氨挥发和 N₂O 排放抑制效果最好,与 CK 相比降幅分别达到 40.48% 和 21.00%;MB 会导致土壤呼吸排放量明显增加,减氮 20% 后降低 3.61%。施炭会增大温室黄瓜 GWP,与 M 相比显著提高 14.78%,MBN_{80%} 可以一定程度上缓解因施炭而造成的温室气体排放增大的问题,与 MB 相比显著降低 3%;与 CK 相比,M、MB、MBN_{80%} 氮素气态损失分别显著降低 27.37%、31.8%、35.32%,可见 MBN_{80%} 降低黄瓜氮素气态损失效果也较好。在施炭基础上减氮 20% 对黄瓜净收益的提升效果明显,MBN_{80%} 与 MB 相比提升 8.07%,与 CK 相比提升 17.52%。由此可见,减氮施炭在降低温室膜下滴灌黄瓜土壤呼吸和氮素气态损失,改善土壤环境,提高黄瓜产量及水分利用率方面有很大应用潜力,可为辽宁地区温室蔬菜节水增产,增汇减排及降低温室气体排放带来的环境代价提供参考。

参考文献:

- [1] 李天来. 设施蔬菜产业发展(一)我国设施蔬菜产业发展现状及展望[J]. 中国蔬菜,2023(9):1-6.
- [2] 李 娜,沈成波. 调控作物硝态氮代谢和利用的研究进展[J]. 南京农业大学学报,2022,45(5):848-855.
- [3] 张卫峰,马 林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学,2013,46(15):161-3171.
- [4] JU X T,ZHANG C.Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China:A review[J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(12):2848-2862.
- [5] 王秋菊,刘 峰,迟凤琴,等. 秸秆还田及氮肥调控对不同肥力白浆土氮素及水稻产量影响[J]. 农业工程学报,2019,35(14):105-111.
- [6] 杨 弘. 秸秆还田对农田棕壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [7] 薛文博,许艳玲,唐晓龙,等. 中国氨排放对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(12):3531-3539.
- [8] 陈亚梅,姜 璐,严萌,等. 基于文献计量的燃煤电厂碳排放研究进展[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2023,50(2):107-118.
- [9] PRAMANIK P,HAQUE M M,KIM P J.Effect of nodule formation in roots of hairy vetch (*Vicia villosa*) on methane and nitrous oxide emissions during succeeding rice cultivation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2013,178:51-56.
- [10] IPCC.Climate change 2021:The physical science basis.Working-Group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R].Cambridge:Cambridge University Press,2021.
- [11] 王艳华,徐俊增,卫 琦,等. 水分非均匀分布条件下土壤 CO₂ 的排放特征[J]. 中国农村水利水电,2015(2):13-17.
- [12] 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):48-53.
- [13] 王小彬,武雪萍,赵全胜,等. 中国农业土地利用管理对土壤固碳减排潜力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2284-2293.
- [14] 刘遵奇,孟 军,陈温福. 玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(6):1142-1148.
- [15] 张伟明,管学超,黄玉威,等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报,2015,41(1):109-122.
- [16] 袁海静,邓桂森,周顺桂,等. 生物炭的老化及其对温室气体排放影响的研究进展[J]. 生态环境学报,2019,28(9):1907-1914.
- [17] 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.
- [18] 宋博影,郭艳杰,王文赞,等. 生物炭和双氰胺对设施蔬菜土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(10):1935-1948.
- [19] 王 军. 退化设施蔬菜地土壤修复过程中温室气体排放及相关微生物研究[D]. 南京:南京师范大学,2016.
- [20] 肖 婧. 生物质炭施用影响作物产量及土壤温室气体排放的整合分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [21] 费永鑫,马会强,李 爽. 改性活性污泥生物炭对水中苯酚吸附性能研究[J]. 辽宁石油化工大学学报,2022,42(3):19-24.
- [22] 梁 雷,付金晶. 衬膜水稻技术对科尔沁沙地荒漠化土壤肥力修复效果的评价研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2022,49(3):274-277.
- [23] MARRIS E.Black is the new green[J]. Nature,2006,442(7103):624-626.

- [24] WANG Z Y,ZONG H Y,ZHENG H,et al.Reduced nitrification and abundance of ammonia-oxidizing bacteria in acidic soil amended with biochar[J].Chemosphere,2015,138:576-583.
- [25] 范靖尉,白晋华,任寰宇,等.减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J].中国农业气象,2016,37(2):121-130.
- [26] CHEN G,ZHAO G H,CHENG W D,et al.Rice nitrogen use efficiency does not link to ammonia volatilization in paddy fields[J].Science of the Total Environment,2020,741:140433.
- [27] CHEN T T,LIU C,ZHANG F,et al.Acid-modified biochar increases grain yield and reduces reactive gaseous N losses and N-related global warming potential in alternate wetting and drying paddy production system[J].Journal of Cleaner Production,2022,377:134451.
- [28] 石将来,郝庆菊,冯迪,等.地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].环境科学,2017,38(11):4790-4799.
- [29] 杨玲.灌水量和生物炭施用量对陕北沙质土马铃薯生长和土壤理化性质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [30] 郑险峰,周建斌,王春阳,等.覆盖措施对夏玉米生长和养分吸收的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):80-83,98.
- [31] 刘学方,仇美华,郁洁,等.秸秆及生物炭部分替代化肥对温室连作黄瓜生长与土壤性质的影响[J].安徽农业科学,2022,50(23):144-150.
- [32] 王芳,李春梅,马云珍,等.连续定位不同施氮水平对棉花光合特性及产量的影响[J].南京农业大学学报,2022,45(1):18-26.
- [33] 马星竹,郝小雨,高中超,等.氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响[J].玉米科学,2016,24(6):131-135.
- [34] 张爱平,刘汝亮,高霁,等.生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1352-1360.
- [35] KIMETU J M,LEHMANN J.Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J].Soil Research,2010,48(7):577-585.
- [36] 赵瑞雪,杨晨雪,郑建华,等.农业智能知识服务研究现状及展望[J].智慧农业(中英文),2022,4(4):105-125.
- [37] 杨镜秀.生物炭调节水稻土氮素矿化及水稻氮效率研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [38] 徐聪.华北平原长期氮肥施用和秸秆还田下温室气体排放及氮素损失特征[D].北京:中国农业大学,2018.
- [39] 佟鑫,王珊珊,张丽娟,等.不同施氮模式对设施茄子产量、品质及氮素气态损失的影响[J].土壤通报,2019,50(3):662-669.
- [40] 王喆.不同材料生物炭对干湿交替稻田氮素气态损失的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [41] 赵春江.农业知识智能服务技术综述[J].智慧农业(中英文),2023,5(2):126-148.
- [42] 刘宏元,周志花,赵光昕,等.黄淮海平原农田土壤温室气体排放对长期施加生物炭的响应[J].中国农业科技导报,2023,25(07):178-186.
- [43] 季国军,纪洪亭,程琨,等.江苏稻田轮作模式碳、氮足迹分析[J].南京农业大学学报,2023,46(3):510-521.
- [44] 王程,李玉双,侯永侠,等.生物炭对土壤中温室气体排放的影响及其机理研究进展[J].北方园艺,2023,(08):127-132.

[责任编辑 李薇]