

秸秆和生物炭添加量及比例对华北下沉式设施菜田土壤 CO₂ 排放的影响王亚芳¹, 赵以铭¹, 李英杰¹, 徐梓楷¹, 李国元², 王敬国¹, 林杉^{1,2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 湖北工程学院生命科学技术学院(农学院), 湖北孝感 432000)

摘要 通过2组室内培养试验, 研究玉米秸秆和生物炭添加量及其添加比例对设施菜田土壤有机碳矿化的影响。试验1为2因素4水平试验设计, 主因素为有机碳源种类, 即玉米秸秆、生物炭; 副因素为碳添加量, 分别为0、1.31、2.62、5.24 g/kg土壤(按碳量)。试验2为单因素试验设计, 除对照外, 有机碳添加量均为5.24 g/kg土壤, 将玉米秸秆(S)和生物炭(B)按不同比例与土壤混合, 添加比例分别为100%S、75%S+25%B、50%S+50%B、25%S+75%B、100%B、0S0B(对照)。培养期间, 维持土壤含水量为田间最大持水量的65%, 测定和计算培养期间土壤CO₂日均排放通量、累积排放量和排放率、土壤微生物量碳含量。结果表明, 与施用生物炭相比, 施用等碳量秸秆显著增加了CO₂累积排放量, 其增幅为50%~337%; 与不施用有机物料的对照相比, 随着秸秆施用量增加, CO₂累积排放量显著增加了92%~463%, 而随着生物炭施用量增加, 其增幅仅为28%~39%。培养前30 d内, CO₂日均排放通量和累积排放量最高, 其后逐渐降低, 趋于平缓。随着秸秆添加比例降低和生物炭添加比例增加, CO₂日均和累积排放量、排放率和土壤微生物量碳含量显著减少; 随着培养时间延长, CO₂日均排放通量逐渐降低, 而累积排放量则逐渐增加。总之, 将秸秆与生物炭按比例混合施用, 一方面秸秆矿化过程产生的CO₂能够满足秋冬茬设施蔬菜对CO₂的高需求; 另一方面, 生物炭可以快速提升土壤碳储量, 并且可以避免蔬菜残茬直接还田可能造成土传病害的扩散, 有利于设施菜田土壤-植物碳循环和生产体系的可持续性。然而, 上述研究结果仍需在田间条件下进一步验证, 并根据种植茬口和土壤环境条件调整秸秆和生物炭添加量及其比例。

关键词 设施菜田; 玉米秸秆; 生物炭; 添加量; 比例; CO₂排放; 下沉式设施大棚

中图分类号 S152.6 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0085-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Additive Amounts and Ratios of Straw and Biochar on CO₂ Emissions from the Soil of Sunken Vegetable Fields in North China

WANG Ya-fang, ZHAO Yi-ming, LI Ying-jie et al (College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract Two laboratory incubation experiments were conducted to investigate the effects of additive amounts and ratios of maize straw and biochar on soil respiration. Experiment I included two-factors with four-level. The main factor was kinds of organic material, namely corn straw and biochar. The second factor was application amount which were 0, 1.31, 2.62 and 5.24 g/kg (according to carbon amount), respectively. Experiment II deal with the effect of application ratio of maize straw (S) and biochar (B) which included six treatments: 100%S, 75%S+25%B, 50%S+50%B, 25%S+75%B, 100%B, 0S0B (control). During the incubation period, soil water content was maintained at the 65% of field capacity. Daily CO₂ emissions were measured and soil microbial carbon contents were analyzed at the end of incubation for experiment II. The result showed that compared with biochar addition, application of maize straw at the same carbon addition rate significantly increased soil CO₂ emissions by 50%~337%. Compared with control, cumulative CO₂ emissions increased with the increasing of straw addition rate (increased by 92%~463%), whereas the biochar just increased cumulative CO₂ emissions by 28%~39%. Within the first 30 days of incubation, daily CO₂ emissions and cumulative CO₂ emissions were highest over the whole incubation period and then decreased slowly. With the decreased addition ratios of straw and increased addition ratios of biochar, daily CO₂ emissions, cumulative CO₂ emissions, CO₂ emission rates and soil microbial carbon content decreased significantly. Daily CO₂ emissions decreased with the incubation days, while cumulative CO₂ emissions increased. Our results highlight that incorporation of straw and biochar is an effective measure to increase soil respiration and facilitate greenhouse CO₂ limitation. On the other hand, addition of biochar will increase soil organic carbon stock. Therefore, simultaneously application of maize straw and biochar is an effective option to maintain the sustainable development of greenhouse vegetable production. However, the above research results still need to be further verified in field experiments, and the amount and proportion of straw and biochar added should be adjusted according to the planting seasons and soil environmental conditions.

Key words Greenhouse vegetable field; Maize straw; Biochar; Additive amounts; Proportion; CO₂ emission; Sunken facility greenhouse

近40年以来,我国设施蔬菜生产规模呈指数型增长。1983年种植面积仅为1.5万hm², 2016年迅猛增加到467万hm², 所生产的大约30种不同蔬菜产量近2.52亿t, 占我国蔬菜总产量的35%^[1]。设施蔬菜产量高、效益显著, 发展设施蔬菜已然成为解决我国季节性蔬菜均衡供应和农民致富的有效途径之一^[2]。然而, 下沉式设施大棚在建造过程中, 富含有机质的表层土壤用于构建迎风墙, 加之设施大棚

内高温高湿的环境条件, 导致土壤有机质矿化快、积累慢, 土壤保水保肥和供水供肥能力差^[3], 这与设施蔬菜对水肥的需求量大和强度高形成了十分尖锐的矛盾。

土壤有机质是评价土壤肥力的重要指标, 增加土壤有机质含量是改善土壤结构、增加土壤保蓄性和提高土壤肥力的关键措施^[4-5]。Lal^[6]研究指出增加土壤有机质含量是保障食品安全的必然选择。添加有机物料在增加土壤碳储量和减少温室气体排放方面受到越来越多的关注^[7-8]。秸秆还田能增加土壤有机质和活性有机碳含量, 提高土壤总孔隙度和土壤微生物活性。蔬菜残茬往往携带大量土传病原体, 直接还田将导致土传病害频繁发生^[8-10], 将其进行有效的高温(>450℃)热解炭化, 生产成生物炭再还田, 不仅可以完全消杀蔬菜残茬所携带病原体, 还因生物炭具有极高比例芳香碳和

基金项目 国家自然科学基金国际合作项目(41761134087); 湖北省科技厅重大专项(2019ABA117); 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B01-4)。

作者简介 王亚芳(1990—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向: 菜田土壤碳氮转化。*通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事水碳氮生物地球化学循环研究。

收稿日期 2021-02-23

极强的生物化学热稳定性,在土壤中可稳定存在几百年甚至上千年^[11-13],进而迅速提升土壤有机碳含量。然而,关于生物炭和秸秆添加量及其添加比例对土壤呼吸和设施菜田土壤-植物碳循环影响的研究尚存在争议。

设施大棚是半封闭的栽培体系,蔬菜作物对 CO₂ 的消耗难以从外界得到及时补充。尤其在气温低的冬季,为了保持棚内温度,大棚往往处于关闭状态。从 48 h 内设施大棚 CO₂ 浓度的动态监测结果可以看出,日落后设施大棚中 CO₂ 逐渐升高,日出后 CO₂ 浓度则随着作物光合作用而逐渐降低,尤其在光合作用最强烈的正午,大棚内 CO₂ 浓度,远远低于室外自由大气 CO₂ 浓度^[8],进而严重抑制了蔬菜作物光合效率^[14]。秋冬茬为了保温,设施大棚常常处于关闭状态,上述矛盾更加突出^[15]。因此,设施大棚通过土壤呼吸释放的 CO₂,成为蔬菜作物光合作用的重要来源^[16]。笔者在了解秸秆和生物炭矿化规律的前提下,将玉米秸秆与生物炭按一定比例混合施用,不仅可以提高设施菜田土壤有机碳储量、避免蔬菜残茬直接还田可能造成土传病害的传播,还可以有效增加设施大棚内 CO₂ 的浓度。

1 材料与与方法

1.1 供试材料 供试土壤采自天津农业科学院现代农业科技创新基地日光温室(116°57'E,39°25'N),该日光温室建于 2011 年,连续种植番茄。取下沉式日光温室 0~30 cm 耕层土壤,除去动植物残体和石块后,在室内自然风干后过 2 mm 土筛,用于土壤基础理化性质测定和后续培养试验。土壤质地为粉砂质壤土,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 30%、62%和 8%,容重为 1.34 g/cm³,田间最大持水量时的质量含水量为 37%,pH 8.62,有机碳含量 20.0 g/kg, CaCl₂ 浸提态 NO₃⁻-N 含量 106 mg/kg。

玉米秸秆取自中国农业大学上庄试验站,含碳量为 450 g/kg(按碳量,下同)。生物炭购于金未来农业技术有限公司,热裂解温度为 450 °C,含碳量为 550 g/kg。上述试材均粉碎后过 2 mm 筛。

1.2 试验设计和方法 设置 2 组室内培养试验。试验 1 为 2 因素试验设计,主因素为 2 种有机碳源,即玉米秸秆(S)、生物炭(B);副因素为 4 种碳添加量,分别为 0、1.31、2.62、5.24 g/kg 土壤。共计 7 个处理,其相应的代码分别为 CK、S1.31、S2.62、S5.24;B1.31、B2.62、B5.24。所有处理均重复 3 次,培养时间为 90 d。试验 2 为单因素试验设计,除对照处理外,所有处理的有机碳添加量均为 5.24 g/kg(相对于大田施用量 14 t/hm²);共 6 个处理,分别是①对照(0S0B),不添加有机物料;②100%玉米秸秆(100S0B);③75%玉米秸秆+25%生物炭(75S25B);④50%玉米秸秆+50%生物炭(50S50B);⑤25%玉米秸秆+75%生物炭(25S75B);⑥100%生物炭(0S100B)。

称取上述供试风干土壤 100 g,放入 250 mL 玻璃培养瓶中。将已过 2 mm 筛的有机物料加入瓶中,与土壤充分混匀,用称重法调节土壤含水量至田间最大持水量的 65%。培养瓶置于恒温恒湿培养箱中,培养温度为 25 °C,避光培养 56~

91 d。培养期间,每 2 d 通过称重法补充水分,维持土壤含水量分别为田间持水量的 65%。为了确保培养箱内通气良好,培养箱外连一个三通道的通气泵,调节流量为 45 L/min。为了防止通气的过程中培养箱内空气湿度过低,在培养箱中放入 2 个加去离子水的 500 mL 烧杯,通气管道插入盛水的烧杯中,以调节培养箱内空气湿度。

1.3 测定方法 用环刀取原状土,加水至饱和,沥干明水后放入烘箱,105 °C 下烘 24 h 至恒重,测定最大田间持水量和土壤容重。应用土壤粒径激光分析仪(MASTERSIZER 2000, Malvern, England)测定土壤砂粒、粉粒和黏粒含量。将土壤和去离子水按 1:2.5 的比例浸提,用 pH 计(HI98121, Hanna Instruments, Kehl am Rhein, Germany)测定土壤 pH。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。土壤无机氮采用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提,流动分析仪(AA3, Braun Luebbe, Nordstadt, Germany)测定。土壤微生物量碳含量采用新鲜土样氯仿熏蒸,0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液浸提法测定^[17-18]。

应用便携式红外线分析仪(华云 GXH-3010E1,北京华云分析仪器研究所有限公司),测定培养瓶中土壤 CO₂ 排放通量。培养前期 30 d 内,每天测定培养瓶中土壤 CO₂ 排放量;培养后期,每隔 1~3 d 测定一次 CO₂ 排放量;每天测定时间为 09:00—11:00。便携式 CO₂ 红外线分析仪的量程为 0~1 000 mg/kg,精度为 1 mg/kg。为了使测定时段内 CO₂ 排放通量变化值介于仪器测定量程内,经过预试验,最终确定添加秸秆的处理每次测定时长为 120 s,间隔为 20、40、60、80、100、120 s;仅添加生物炭和对照处理每次测定时长为 360 s,间隔为 60、120、180、240、300、360 s。所测 CO₂ 排放通量(F)计算公式为:

$$F = \left(\frac{dc}{dt} \times \frac{P \times V}{R \times T} \times 60 \times 60 \right) \times 24 \times 12 / 100$$

式中, F 为 CO₂ 排放通量,mg/(kg·d); $\frac{dc}{dt}$ 为 CO₂ 排放变化速率,mg/(kg·s); P 为标准大气压 101.3 kPa; V 为培养瓶中空气所占的体积(通过排水法测得培养瓶中空气体积为 0.15 L); R 取值 8.314 4; T 取值 298.13 K;60、60、24 为秒、分、小时转换系数;12 为 C 的分子质量;100 为每个培养瓶中土壤质量(g)。CO₂ 累积排放量由监测天的排放通量与未监测天的排放通量累积相加得到,其中未监测天的 CO₂ 排放通量由内插法计算得出。CO₂ 累积排放率=(添加物料处理 CO₂ 排放量-对照 CO₂ 排放量)/碳添加量×100%;CO₂ 日均排放通量=CO₂ 累积排放量/培养天数。

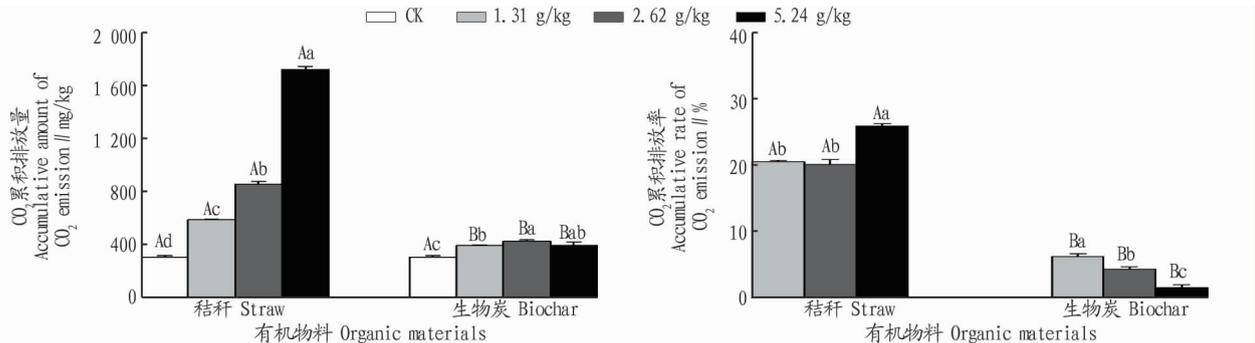
1.4 数据分析 用 Excel 2013 进行数据处理。统计分析采用 SAS V8.2 进行单因素及二因素方差分析,处理间差异显著性用 Duncan 单因素方差分析法。用 Sigmaplot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 秸秆和生物炭添加量对设施菜田土壤有机质矿化的影响 从图 1 可以看出,培养至 90 d 时,添加秸秆各处理 CO₂

累积排放量从高到低依次为 S5.24>S2.62>S1.31>CK。当秸秆添加量为 5.24 g/kg 时,土壤 CO₂ 累积排放量高达 1 723 mg/kg,分别是秸秆添加量 1.31 g/kg 处理的 2.9 倍(587 mg/kg)和对照处理的 5.6 倍(306 mg/kg)。随着生物炭添加量增加,土壤 CO₂ 累积排放量仅增加了 28%~39%。与生物炭处理相比,添加等碳量秸秆处理的土壤 CO₂ 累积排

放量显著增加了 92%~463%。秸秆碳累积排放率为 21%~27%,显著高于生物炭处理累积排放率(1.7%~6.6%)。当秸秆碳添加量为 1.31 和 2.62 g/kg 时,CO₂ 累积排放率不存在显著差异,但二者均显著低于秸秆碳添加量 5.24 g/kg 处理。随着生物炭添加量增加,CO₂ 累积排放率则显著降低。



注:不同大写字母表示不同有机物料间差异显著,不同小写字母表示不同添加量间差异显著($n=3, P<0.05$)

Note: Different capital letters indicate significant differences between different organic materials, and different lowercase letters indicate significant differences between different addition amounts ($n=3, P<0.05$)

图 1 培养 90 d 时有机物料添加量对土壤 CO₂ 累积排放量和排放率的影响

Fig. 1 Effect of organic material additive amounts on accumulative amount and rate of CO₂ emission over the 90 days incubation period

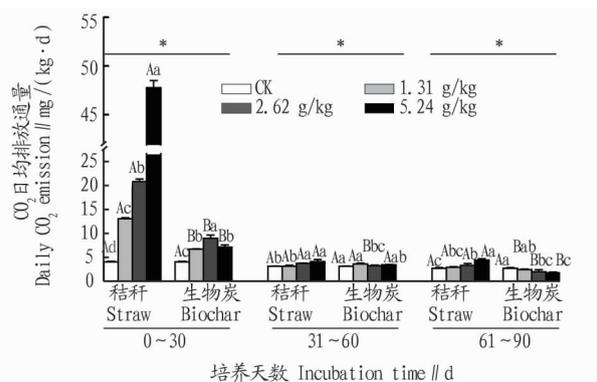
从图 2 可以看出,不同培养阶段,CO₂ 日均排放通量从大到小依次为 0~30, 31~60, 61~90 d。0~30 d,与对照相比,随着秸秆添加量增加,CO₂ 日均排放通量显著增加 224%~1 074%;而随着生物炭添加量增加,CO₂ 日均排放通量仅增加了 66%~123%。31~60 和 61~90 d,随秸秆添加量增加,CO₂ 日均排放通量增加;而随着生物炭添加量增加,61~90 d 时 CO₂ 日均排放通量降低。

从图 3 可以看出,培养 0~30 d,不同秸秆添加量间 CO₂ 日排放通量差异显著,而不同生物炭添加量间 CO₂ 日排放通量差异不显著;30 d 后,各处理 CO₂ 日排放通量趋于稳定。添加秸秆处理的 CO₂ 累积排放量在 0~30 d 快速增加,随后其增加趋势变缓慢,且 CO₂ 累积排放量与秸秆添加量成正比;培养 0~90 d,不同生物炭添加量处理的 CO₂ 累积排放量增长趋势平缓,且均低于秸秆处理的 CO₂ 累积排放量。

2.2 秸秆和生物炭添加比例对设施菜田土壤 CO₂ 排放的影响 从图 4 可以看出,培养 14、28、42、56 d,随着秸秆添加比例降低和生物炭添加比例增加,CO₂ 累积排放量显著减少,其大小顺序为 100S0B>75S25B>50S50B>25S75B>0S100B。添加 100%生物炭处理(0S100B)的 CO₂ 累积排放量甚至低于对照处理(0S0B),但二者差异不显著。

从图 5 可以看出,随着培养时间延长,各时段 CO₂ 日均排放通量显著降低;0~14 d 的日排放通量分别是 15~28、29~42 和 43~56 d 的 2.2、4.4、6.2 倍。0~14 d,随着秸秆添加比例降低和生物炭添加比例增加,土壤 CO₂ 日均排放通量呈显著降低趋势,100S0B 处理 CO₂ 日均排放通量是 0S100B 处理的 14 倍,而 50S50B 处理是 0S100B 处理的 6.8 倍。培养 29~42 和 43~56 d,各处理间 CO₂ 日均排放通量差异减小。

从图 6 可以看出,第 56 天时,各处理 CO₂ 累积排放量为



注: * 表示不同培养时间段间存在显著差异($n=24, P<0.05$);不同大写字母表示同一时段和添加量下不同物料间存在显著差异;不同小写字母表示同一时间段和物料下不同添加量间存在显著差异($n=3, P<0.05$)

Note: * indicate significant differences between different culture periods ($n=24, P<0.05$); different capital letters indicate that there are significant differences between different materials at the same time period and addition amount; different lowercase letters indicate that there are significant differences between different addition amounts under the same time period and materials ($n=3, P<0.05$)

图 2 不同培养时期有机物料添加量对土壤 CO₂ 日均排放通量的影响

Fig. 2 Effect of organic material additive amounts in different cultivation periods on the daily average emission flux of soil CO₂

292~1 551 mg/kg;除对照外,处理间差异显著。随着秸秆比例减少和生物炭添加比例增加,来自有机物料的 CO₂ 累积排放率呈显著降低趋势,100S0B 处理的 CO₂ 累积排放率为

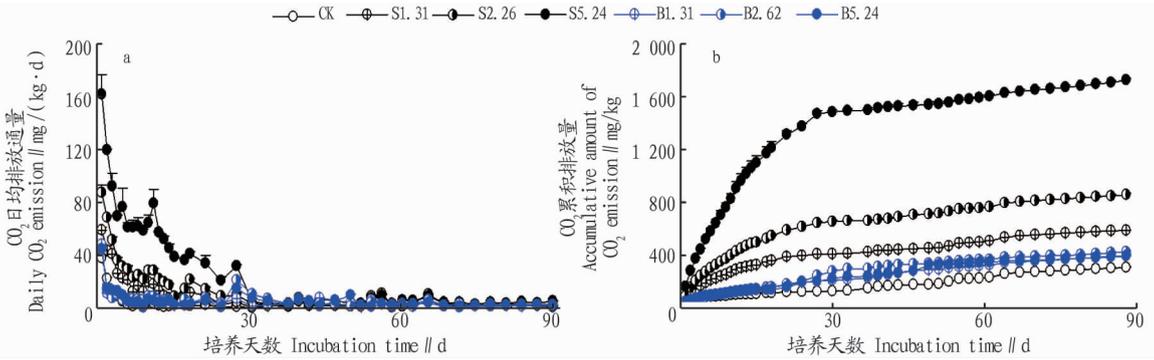
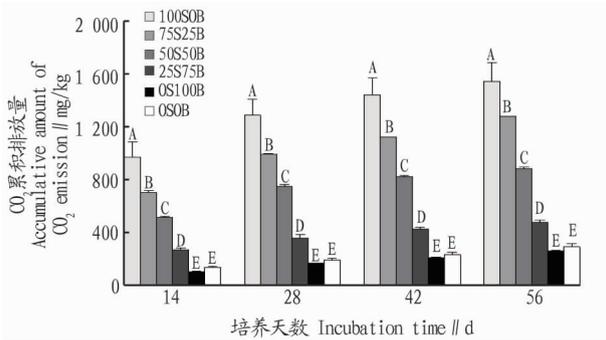


图3 有机物料添加量对土壤 CO₂ 日均排放通量 (a) 和累积排放量 (b) 的影响

Fig.3 Effect of organic material additive amounts on the daily emission flux (a) and cumulative emission (b) of soil CO₂



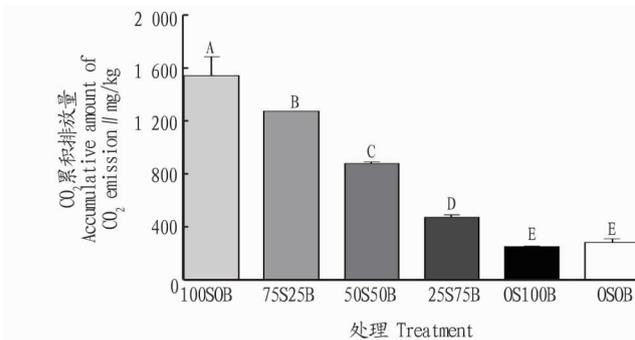
注:不同大写字母表示同一培养时间处理间差异显著 ($n=3, P<0.05$)

Note: Different capital letters indicate significant differences between treatments at the same incubation time ($n=3, P<0.05$)

图4 不同培养阶段各处理土壤 CO₂ 累积排放量

Fig.4 Accumulative CO₂ emissions for different incubation periods

26%, 75S25B 处理为 19%, 50S50B 处理为 11%, 25S75B 处理为 3.6%, 而 OS100B 处理则为 -0.6%, 表明添加生物炭降低



注:不同大写字母表示不同处理间差异显著 ($n=3, P<0.05$)

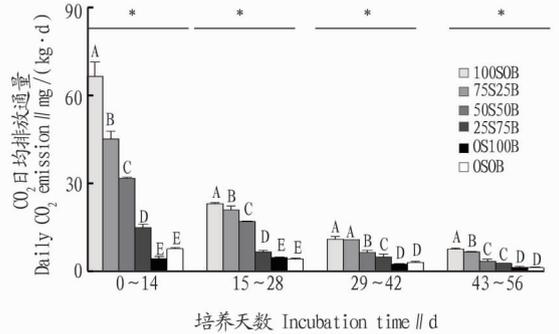
Note: Different capital letters indicate significant differences between different treatments ($n=3, P<0.05$)

图6 培养 56 d 时各处理土壤 CO₂ 累积排放量及累积排放率

Fig.6 Accumulative amount and rate of CO₂ emission over the 56 days incubation period

添加 100% 玉米秸秆处理 (100SOB), CO₂ 日排放通量和累积排放量最高, 其次分别为 75S25B、50S50B、25S75B、OSOB 和 OS100B 处理; 培养至 56 d 时, 50S50B 处理的 CO₂ 累积排放量为 886 mg/kg, 分别是添加 100% 生物炭处理 (OS100B) 的

了土壤呼吸。

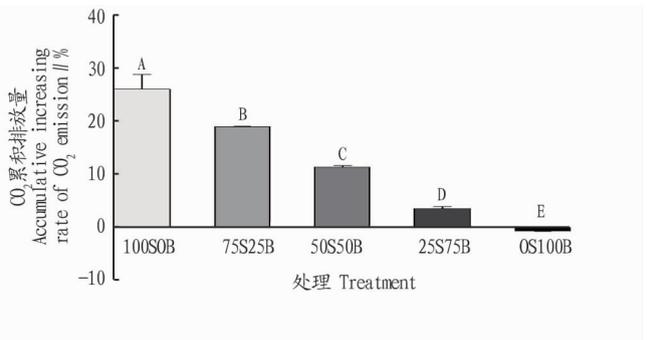


注: * 表示不同培养时段差异显著 ($n=18, P<0.05$); 不同大写字母表示同一培养时段不同处理间差异显著 ($n=18, P<0.05$)

Note: Different capital letters in italics indicate significant differences in different culture periods ($n=18, P<0.05$); different capital letters indicate significant differences between different treatments in the same culture period ($n=18, P<0.05$)

图5 不同培养阶段各处理土壤 CO₂ 日均排放通量

Fig.5 Average daily CO₂ emissions for different incubation periods



3 倍和添加 100% 玉米秸秆处理 (100SOB) 的 0.6 倍 (图 7)。从图 8 可以看出, 培养 28 d 时, 100SOB 处理土壤微生物量碳含量为 446 mg/kg, 分别是 50S50B 和 OS100B 处理的 1.7 和 2.9 倍; 随着秸秆添加比例减少和生物炭添加比例增加,

土壤微生物量碳含量显著降低。

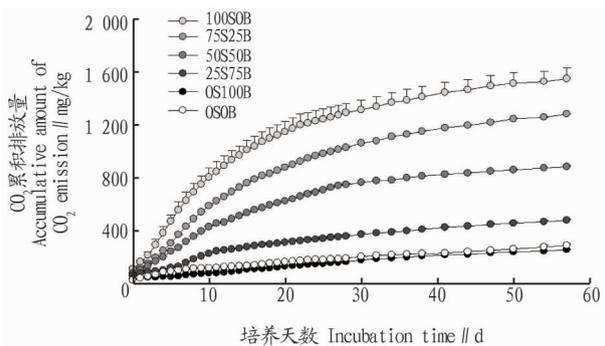


图7 不同处理 CO₂ 累积排放量动态

Fig. 7 Temporal dynamics of cumulative CO₂ emissions for different treatments

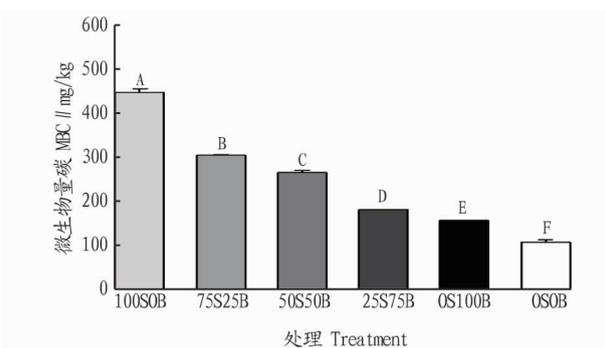


图8 培养 28 d 时不同处理微生物量碳的含量

Fig. 8 Microbial biomass carbon (MBC) in different treatments over the 28 days incubation period

3 讨论与结论

为了避免冬季保温造成的额外能源费用,华北地区传统的下沉式设施大棚在建造过程中,将表层土壤下挖 0.5~2.0 m,用于构建墙体厚度高达 1.5 m 的北侧保温墙。由此导致下沉式设施菜田表层土壤有机质含量低^[19],而蔬菜残茬由于携带大量病原体无法直接还田,以提高土壤有机质含量;另一方面,秋冬茬设施大棚为了保温,往往处于半关闭状态,导致棚内 CO₂ 浓度低,进而抑制了蔬菜作物光合作用^[8]。

生物炭性状稳定,难以被土壤微生物矿化释放 CO₂,可以快速增加土壤有机碳储量,这从 CO₂ 日排放通量和累积排放量并不随生物炭添加量增加而发生显著改变得到很好的验证;然而,随着秸秆添加量增加,CO₂ 日排放通量和累积排放量均显著提高^[20-22]。培养至 90 d 时,秸秆高添加量处理(S5.24)和低添加量处理(S1.31)CO₂ 累积排放量分别是对照处理的 5.6 和 1.9 倍。这与此前田间试验报道的研究结果(添加 3.5 t/hm²(相对于 1.31 g/kg)的秸秆后,CO₂ 累积排放量是不添加秸秆处理的 1.6 倍)^[22] 基本吻合。添加等碳量生物炭与对照处理虽有显著差异,但 CO₂ 累积排放量仅增加了 30%,而且,其排放率则随着生物炭添加量增加而显著

降低^[23],这与生物炭高温热裂解所形成的生物化学稳定性有关^[24],难以作为微生物生长的碳源。因此,生物炭还田是增加土壤有机质含量的有效措施^[25]。生物炭无法促进土壤呼吸,以满足半封闭式设施蔬菜生长发育对 CO₂ 的高需求。

培养试验 2 的结果表明,添加等碳量有机物料时,随着秸秆添加比例增加和生物炭添加比例降低,CO₂ 累积排放量和日排放通量均显著增加。与空白土壤相比,添加 100% 秸秆(5.24 g/kg)导致土壤呼吸所排放的 CO₂ 增加了 7 倍,近 1/4 的秸秆碳在培养期间被矿化。这与田间条件下添加 3.5 t/hm² 玉米秸秆,120 d 内土壤 CO₂ 排放量增加了 2.2 t/hm² 的结果基本一致^[22]。但是,当添加 100% 生物炭时,土壤 CO₂ 累积排放量并未显著增加,甚至抑制了土壤呼吸。类似的试验结果表明,通过 450 °C 裂解制得的生物炭在 60 d 内几乎不发生矿化;添加 4% 的生物炭,未显著增加土壤呼吸;而添加 1% 的秸秆,土壤 CO₂ 排放量增加了 4 倍^[24]。当秸秆和生物炭添加比例各占 50% 时(50S50B),CO₂ 累积排放量分别是只添加秸秆(100S0B)和只添加生物炭(OS100B)处理的 57% 和 303%。秸秆因含有大量易分解的有机含碳化合物,直接还田后,其中所含有的碳水化合物、蛋白质和半纤维素类物质将被土壤微生物利用^[26-27],加快了土壤有机碳矿化,速释放大量 CO₂。与此相反,生物炭中稳定性碳所占比例高,难以被土壤微生物利用,有利于快速提升土壤有机碳储量^[28]。

据此,针对华北地区下沉式半封闭设施大棚表层土壤有机质含量低,不能满足蔬菜作物对水肥和 CO₂ 高需求的现状,可以根据不同生长季蔬菜作物对 CO₂ 的需求特点和快速提升土壤有机碳储量的目标,确定还田有机物料中玉米秸秆和生物炭的添加比例。提升土壤有机碳储量和满足设施蔬菜对大气 CO₂ 的高需求,关系到下沉式设施蔬菜生产体系的可持续性。设施菜田土壤中单施秸秆或者单施生物炭,无法同时解决增加菜田土壤有机碳储量和棚内 CO₂ 浓度的问题。而将秸秆和生物炭混合施用,一方面,可以解决设施大棚内 CO₂ 浓度低的问题,满足设施蔬菜快速生长对 CO₂ 的高需求;另一方面,可以快速提升土壤碳储量,提高土壤肥力,还可以避免蔬菜残茬直接还田可能造成土传病害的扩散,有利于设施蔬菜生产体系的可持续发展。然而,针对不同土壤和气候条件以及蔬菜作物生长规律,秸秆和生物炭的施用量及比例仍需通过田间试验获得进一步验证。

参考文献

- [1] 费超,张士荣,梁斌,等.不同种植年限设施菜地土壤微生物量磷变化特征及相关性分析[J].华北农学报,2018,33(1):195-202.
- [2] 魏晓明,齐飞,丁小明,等.我国设施园艺取得的主要成就[J].农机化研究,2010,32(12):227-231.
- [3] FAN Z B, LIN S, ZHANG X M, et al. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. Agricultural water management, 2014, 144: 11-19.
- [4] PARSONS J W. Soil organic matter[J]. Nature, 1962, 194(4826): 324-325.
- [5] FIALHO R C, ZINN Y L. Changes in soil organic carbon under *Eucalyptus* plantations in Brazil: A comparative analysis[J]. Land degradation & development, 2014, 25(5): 428-437.

- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [7] AWASTHI M K, WANG M J, CHEN H Y, et al. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting[J]. *Bioresource technology*, 2017, 224: 428-438.
- [8] 田永强, 王敬国, 高丽红. 设施菜田土壤微生物学障碍研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2013(20): 1-9.
- [9] 王志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 539-542.
- [10] TU C, RISTAINO J B, HU S J. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2006, 38(2): 247-255.
- [11] PESSENDA L C R, GOUVEIA S E M, ARAVENA R. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with ¹⁴C ages of fossil charcoal[J]. *Radiocarbon*, 2001, 43(2B): 595-601.
- [12] ANTAL M J JR, GRØNLI M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [13] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3327-3333.
- [14] 贺超兴, 张志斌, 王怀松, 等. 蔬菜设施栽培 CO₂ 施肥技术(一)[J]. *中国蔬菜*, 2000(4): 51-52.
- [15] 杨克彬, 孟凡志, 郭先锋. 日光温室冬季增施 CO₂ 对切花红掌光合作用及生长发育的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1941-1947.
- [16] 刘汉文, 武国慧, 王玲莉, 等. 不同浓度 CO₂ 与化肥配施对番茄生长和养分吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(6): 118-125.
- [17] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil biology & biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [18] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil biology & biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [19] BAI X L, GAO J J, WANG S C, et al. Excessive nutrient balance surpluses in newly built solar greenhouses over five years leads to high nutrient accumulations in soil[J/OL]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2020, 288[2020-09-25]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106717>.
- [20] ALOTAIBI K D, SCHOENAU J J. Greenhouse gas emissions and nutrient supply rates in soil amended with biofuel production by-products[J]. *Biology and fertility of soils*, 2013, 49(2): 129-141.
- [21] NGUYEN T T N, XU C Y, TAHMASBIAN I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2017, 288: 79-96.
- [22] 王亚芳, 吕昊峰, 杜九月, 等. 灌溉方式和秸秆还田对设施番茄田 CO₂ 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 76-81.
- [23] ZAVALLONI C, ALBERTI G, BIASIOL S, et al. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study[J]. *Applied soil ecology*, 2011, 50: 45-51.
- [24] ZHU L X, XIAO Q, SHEN Y F, et al. Effects of biochar and maize straw on the short-term carbon and nitrogen dynamics in a cultivated silty loam in China[J]. *Environmental science and pollution research*, 2017, 24(1): 1019-1029.
- [25] NAUTIYAL P, SUBRAMANIAN K A, DASTIDAR M G. Adsorptive removal of dye using biochar derived from residual algae after *in situ* transesterification: Alternate use of waste of biodiesel industry[J]. *Journal of environmental management*, 2016, 182: 187-197.
- [26] AJWA H A, TABATABAI M A. Decomposition of different organic materials in soils[J]. *Biology and fertility of soils*, 1994, 18(3): 175-182.
- [27] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276.
- [28] ZHAO Y M, LIN S, LIU Y N, et al. Application of mixed straw and biochar meets plant demand of carbon dioxide and increases soil carbon storage in sunken solar greenhouse vegetable production[J]. *Soil use and management*, 2020, 36(3): 439-448.

(上接第 84 页)

木高度增加而减少;随灌木盖度增加而减少。当群落中没有灌木出现时,草本植物的根系就不需要太深入土壤汲取水分和养分。不同群落草本层片的生物量与该群落草本高度无明显联系。

该研究得出以下结论:

(1) 研究区有野生灌木植物 51 种,隶属于 11 科,29 属;野生草本植物 131 种,隶属于 28 科,79 属。其中,国家级珍稀濒危植物 8 种,包括木本植物 6 种,草本植物 2 种。

(2) 研究区生存环境差,不利于植被生长。植被种类较少,以旱生、超旱生植被为主。

(3) 研究区内灌木对草本植物生物量有显著影响。

参考文献

- [1] 陶治,张元明. 准噶尔荒漠 6 种类短命植物生物量分配与异速生长关系[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 38-48.
- [2] 陶治,张元明. 荒漠灌木生物量多尺度估测:以梭梭为例[J]. *草业学报*, 2013, 22(6): 1-10.
- [3] 方昭,张少康,刘海威,等. 黄土丘陵区草本群落生物量空间分布格局及其影响因素[J]. *草业学报*, 2018, 27(2): 26-35.
- [4] 杨阳,刘秉儒. 宁夏荒漠草原不同群落生物多样性与生物量关系及影响因子分析[J]. *草业学报*, 2015, 24(10): 48-57.
- [5] 王秀梅,董建军. 基于广义线性模型估算内蒙古荒漠草原及典型草原地上生物量变化[J]. *草地学报*, 2020, 28(6): 1711-1718.
- [6] 丁俊祥,范连连,李彦,等. 古尔班通古特沙漠 6 种荒漠草本植物的生物量分配与相关生长关系[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(5): 1323-1330.
- [7] 崔清涛, 阙丽梅, 刘清泉. 荒漠草原灌木与草本植物年度生物量测定分析[J]. *内蒙古林业科技*, 1994(3): 30-32, 9.
- [8] 刘敏, 杨东, 江华, 等. 内蒙古乌拉特荒漠草原植物营养价值研究[J]. *草原与草业*, 2020, 32(3): 40-42.
- [9] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第 1 卷[M]. 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1998: 151-281.
- [10] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第 2 卷[M]. 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1990: 11-702.
- [11] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第 3 卷[M]. 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1989: 49-666.
- [12] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第 4 卷[M]. 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1993: 116-814.
- [13] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第 5 卷[M]. 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1994: 618-634.
- [14] 赵杏花, 任雅涛, 赵宏胜, 等. 乌拉特荒漠草原木本植物区系分析[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1537-1543.
- [15] 余飞燕, 王坤悦, 叶鑫, 等. 金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(3): 793-800.
- [16] 王玉婕, 蓝登明, 郭威星, 等. 乌拉特中旗荒漠草原草本生物量研究[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2019, 42(6): 94-96, 27.
- [17] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 木兰, 孙海莲, 晔霁罕, 等. 内蒙古阴山北麓短花针茅(*Stipa breviflora*) 草原的群落特征和分类[J]. *北方农业学报*, 2020, 48(2): 112-119.
- [19] 樊如月, 李青丰, 贺一鸣, 等. 柠条林分密度对林带间草本群落的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(2): 177-182.
- [20] 刘广路. 天山云杉生长规律与天山植物群落生产力研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.