

混合秸秆还田对土壤有机碳组分和温室气体排放的影响^①

葛世强^{1,2,3,4}, 段富媛^{1,2,3,4}, 彭鹏^{1,2,3,4}, 张探探^{1,2,3,4}, 舒迎花^{1,2,3,4}, 王建武^{1,2,3,4*}

(1 农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 2 广东省生态循环农业重点实验室, 广州 510642; 3 广东省现代生态循环农业工程中心, 广州 510642; 4 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要: 为探讨玉米-大豆混合秸秆还田的固碳减排效应, 本研究通过微宇宙试验模拟秸秆还田, 以无秸秆还田处理为对照(CK), 设置玉米-大豆混合秸秆和单独玉米秸秆两种还田类型, 0.5、1、2、4 和 10 mg/g 五种秸秆还田量, 研究了不同秸秆还田处理下土壤有机碳(SOC)及其组分、SOC 矿化率和温室气体排放的差异。结果显示: 添加 0.5、1、2 和 4 mg/g 混合秸秆和玉米秸秆均未显著提高 SOC 的含量, 反而促进了 SOC 矿化和土壤 CO₂ 排放。当添加 10 mg/g 混合秸秆和玉米秸秆时, 均显著提高了 SOC、微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)和易氧化有机碳(ROC)的含量。与玉米秸秆处理相比, 混合秸秆处理显著降低了 SOC 矿化率、CO₂ 累积排放量及全球增温潜势, 同时显著增加了土壤 MBC 含量。然而, 在整个培养期间, N₂O 排放速率极低, 各处理间无显著差异。总体上, 添加 10 mg/g 的混合秸秆不仅显著促进土壤了碳的固存, 还有效减少了温室气体的排放, 对提高农业生产的可持续性具有重要意义。

关键词: 混合秸秆; 秸秆还田; 有机碳及其组分; 温室气体

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Mixed Straw Return on Soil Organic Carbon Fractions and Greenhouse Gas Emissions

GE Shiqiang^{1,2,3,4}, DUAN Fuyuan^{1,2,3,4}, PENG Peng^{1,2,3,4}, ZHANG Tantan^{1,2,3,4}, SHU Yinghua^{1,2,3,4}, WANG Jianwu^{1,2,3,4*}

(1 Key Laboratory of Agro-environment in the Tropics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-circular Agriculture, Guangzhou 510642, China; 3 Guangdong Modern Eco-circular Agriculture Engineering Center, Guangzhou 510642, China; 4 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To investigate the carbon sequestration and emission reduction effects of mixed maize-soybean straw in field return, this study simulated straw return by microcosmic experiment, which used no straw addition as control (CK), and set two types of mixed straw and maize straw with five straw additions of 0.5, 1, 2, 4 and 10 mg/g, and then the differences in soil organic carbon (SOC) and its carbon fractions, the rate of SOC mineralization and the emission of greenhouse gases were analyzed and compared. The results showed that the addition of 0.5, 1, 2 and 4 mg/g of mixed straw and maize straw did not significantly increase the SOC content, but promoted SOC mineralization and soil CO₂ emission. The contents of SOC, microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and readily oxidisable organic carbon (ROC) were significantly increased when 10 mg/g of mixed straw and maize straw were added. Mixed straw treatment significantly reduced the rate of SOC mineralization, cumulative CO₂ emissions and global warming potential, while significantly increasing soil MBC content compared to maize straw treatment. However, N₂O emission rates were extremely low throughout the incubation period, with no significant differences among different treatments. In conclusion, the addition of 10 mg/g of mixed straw not only significantly promoted soil carbon sequestration, but also effectively reduced greenhouse gas emissions, which is crucial for improving the sustainability of agricultural production.

Key words: Mixed straw; Straw return; Organic carbon and its fractions; Greenhouse gases

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901600)资助。

* 通信作者(wangjw@scau.edu.cn)

作者简介: 葛世强(1997—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事生态循环农业研究。E-mail: geshiqiang97@163.com

我国作为农业大国，每年秸秆产量近 10 亿吨，是世界上秸秆产量最丰富的国家^[1]。过去农民常常采用的焚烧处理残留秸秆的方式，会增加温室气体排放^[2]，进而加剧温室效应。秸秆本身含有丰富的养分，若将我国每年产生的秸秆充分还田，其养分可相当于 350 多万吨氮肥、80 多万吨磷肥和 800 多万吨钾肥，因而农作物秸秆又被称为“另一半农业”^[3-4]。为了充分利用秸秆资源，我国已经实施了秸秆还田政策。自 2020 年“双碳”战略实施以来，农田固碳减排问题受到了广泛关注。因此，研究秸秆还田的固碳减排效应具有重要现实意义。

秸秆中含有丰富的碳，还田后 8%~13.7% 的碳可转化为土壤有机碳(SOC)，有利于 SOC 的固存^[5]。然而，秸秆还田对 SOC 的影响与秸秆种类和还田量密切相关。有研究通过对秸秆进行 112 d 的还田试验发现，不同类型的秸秆表现出不同的分解特征，玉米秸秆的腐解率约为 54%，而碳氮比较低的大麻秸秆则有约 85% 被分解矿化^[6]。秸秆的碳氮比是决定其腐解率的关键因素^[7]，玉米秸秆因其较高的碳氮比，腐解速率相对较慢。而大豆秸秆则因碳氮比较低且含有较高含量的纤维素，腐解速率较快，并且分解后可提供较为丰富的氮源^[8]。已有研究表明，SOC 的增加量与秸秆还田量呈显著正相关，但随着外源碳输入的增加，SOC 含量会在达到一定阈值后趋于饱和^[9]。过量的外源碳输入可能引起土壤 pH 降低和养分供应失衡，抑制土壤微生物的生长与繁殖，进而减缓秸秆的分解过程^[10]。土壤有机碳库组成复杂，不同的碳库组分对秸秆还田的响应存在差异。研究表明，秸秆还田能加速活性有机碳组分的周转，短期内显著增加土壤微生物生物量(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(ROC)和颗粒有机碳(POC)等活性碳组分^[11]。这表明活性有机碳对外源有机物的输入具有较高的敏感性。相比之下，土壤稳定性有机碳组分如矿物结合有机碳(MAOC)对秸秆还田的响应较为迟缓^[12]。有研究发现，秸秆还田后土壤稳定性有机碳组分变化不明显，但随着还田时间的延长，稳定性有机碳逐渐显著增加^[13]。此外，秸秆还田可能会增加农田 CO₂ 的排放，这是因为秸秆在腐解过程自身释放大量的 CO₂^[14]。大多数研究认为，秸秆还田为微生物提供了更多可用的碳和氮，从而刺激了土壤中 CO₂ 和 N₂O 的排放^[15]。同时，秸秆还田后土壤性质的变化也会影响温室气体的排放^[16]。因此，秸秆还田不仅能够有助于 SOC 的积累和及其组分的改善，还可能增加温室

气体的排放，这使得在进行秸秆还田时，需要对其固碳效应和减排效应进行权衡与优化。

玉米和大豆是我国重要的粮食作物和油料作物，玉米-大豆间作是我国广泛采用的一种可持续发展模式^[17]。近年来，随着间作种植模式的推广，每年由于玉米-大豆间作产生了大量的混合秸秆。然而，目前关于玉米-大豆混合秸秆还田对土壤有机碳组分和温室气体排放影响的研究鲜有报道。基于此，本研究基于玉米-大豆间作长期定位试验，以玉米-大豆混合秸秆还田和单独玉米秸秆还田为研究对象，设置 5 个不同的秸秆还田量，开展微宇宙模拟秸秆还田试验，探讨玉米-大豆混合秸秆还田的固碳减排效应，以期对玉米-大豆间作模式下秸秆还田管理提供科学依据，促进我国农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料取自华南农业大学试验中心(23°08'N, 113°15'E)玉米-大豆间作长期定位试验田(连续种植 18 季)。该地区为亚热带海洋性气候，年平均温度 21.6 °C，年平均降水量 2 190.5 mm，降水主要集中在 4—9 月。长期定位大田试验设计为 4 种植模式(玉米单作、大豆单作、玉米-大豆 2 : 3 间作、玉米-大豆 2 : 4 间作)和 3 种施氮水平(N 0、300、360 kg/hm²)的双因素试验。供试玉米品种为“华珍”，购于山东禾之元种业；供试大豆品种为“毛豆 3 号”，由华南农业大学农学院年海教授团队提供。具体施肥方案及田间管理等细节参见文献^[17]。

供试秸秆和土壤均取自玉米-大豆 2 : 3 间作且不施氮肥的小区，于 2021 年 6 月春收后进行取样。每个小区随机挖取 2 株玉米和 5 株大豆，洗净根部后自然风干。风干的秸秆各自粉碎混匀，玉米-大豆混合秸秆按田间秸秆收获量等比例混合($m_{\text{玉米秸秆}} : m_{\text{大豆秸秆}} = 1.7 : 1$)。秸秆养分含量如表 1 所示。使用取土器在每个小区随机取 10 个 10 cm 深的土样，去除残根和石块等杂质，混合均匀，过 2 mm 筛备用。试验前，添加蒸馏水调节土壤含水量为田间持水量的 60%，将土壤置于恒温培养箱 25 °C 暗培养 7 d，以稳定土壤的初始环境。经测定分析，土壤有机质(SOM)含量为 18.96 g/kg，铵态氮(NH₄⁺-N)含量为 8.06 mg/kg，硝态氮(NO₃⁻-N)含量为 84.67 mg/kg，有效磷(AP)含量为 163.19 mg/kg，速效钾(AP)含量为 683.38 mg/kg，pH 为 7.08。

表 1 供试秸秆养分含量
Table 1 Nutrient contents of test straws

供试秸秆	有机碳 (g/kg)	氮 (g/kg)	磷 (g/kg)	钾 (g/kg)	C/N
大豆秸秆	403.20	16.20	1.79	30.94	24.88
玉米秸秆	439.20	16.30	1.68	7.08	26.94

1.2 试验设计

试验以无秸秆还田处理为对照(CK), 设置玉米-大豆混合秸秆(I)和玉米秸秆(M)两种秸秆还田类型、5种秸秆还田量包括 0.5、1、2、4、10 mg/g(I1~I5、M1~M5), 共计 11 个处理, 每个处理 3 个重复。试验时, 称取 30 g 预处理过的土样与相应的秸秆混合均匀, 置于 100 mL 带活塞的圆底烧瓶中; 添加蒸馏水调节土壤含水量至田间持水量的 60%, 烧瓶瓶口使用橡胶塞和凡士林密封后, 放入生化培养箱中在 25 °C 条件下黑暗培养 28 d。培养期间, 定期采集气体样品, 每周按照称重法补充损失的土壤水分。

1.3 样品采集与测定

在培养的第 1、2、3、4、5、6、7、11、15、19、23、28 天时进行温室气体取样, 共取样 12 次。采气前, 打开圆底烧瓶活塞和橡胶塞, 保持瓶内空气流通, 使用标准空气洗瓶 30 s, 随后用注射器吸取 10 mL 气体作为初始气体样品; 再密封培养 4 h 后, 第二次采集气体样品。此外, 土样于培养 28 d 后进行破坏性取样, 用于检测 SOC 及其组分。

由于玉米-大豆间作模式为旱作模式, CH₄ 的排放可忽略不计, 本研究仅考虑 CO₂ 和 N₂O 排放^[18]。气体样品采用气相色谱仪测定(Agilent 7890, Santa Clara, CA, USA)。CO₂ 和 N₂O 检测器为 uECD(后检测器), 检测温度 300.0 °C, 箱温 60.0 °C, 尾吹气流量 2.000 mL/min。

根据《土壤农化分析》^[19]与相关文献^[20]的方法对以下土壤指标进行测定: SOC 采用外加热重铬酸钾容量法测定; DOC 采用去离子水提取后 TOC 仪(Element high TOC II, Germany)测定; ROC 采用高锰酸钾氧化法测定; POC 采用偏六磷酸钠分离法测定; MBC 采用氯仿熏蒸提取法测定; MAOC 通过 SOC 和 POC 含量的差值获得。

1.4 数据处理与分析

温室气体排放速率^[21]:

$$F = \rho \times V / m \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为温室气体排放速率(mg/(kg·h)或(μg/(kg·h))); ρ 为标准状态下气体的密度(kg/m³); V 为圆底烧瓶中气体的有效体积(L); m 为土壤质量(g); $\Delta c/\Delta t$ 为单

位时间内圆底烧瓶内气体浓度的变化; 273 为气态方程常数; T 为培养温度(°C)。

温室气体累积排放量^[21]:

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中: C 为温室气体累积排放量(mg/kg 或 μg/kg); F 为温室气体排放速率; i 为第 i 次采集气体; $t_{i+1} - t_i$ 为连续两次采集气体间隔的时间(d); n 为采集气体的总次数。

全球增温潜势^[22]:

$$GWP = C_{CO_2} + C_{N_2O} \times 298 \quad (3)$$

式中: GWP 为全球增温潜势(mg/kg); C 为温室气体累积排放量; 298 为在 100 年的尺度下, 单位质量 N₂O 换算为单位质量 CO₂ 的全球增温潜势系数。

SOC 矿化率^[23]:

$$R = SOC \text{ 累积矿化量} / (SOC_0 + OC_X) \times 100\% \quad (4)$$

式中: R 为 SOC 矿化率; SOC_0 为土壤初始 SOC 含量; OC_X 为秸秆有机碳含量。

文中所有统计分析均采用 SPSS 26.0 进行, 数据以平均值±标准误表示。其中, 采用单因素方差分析对不同秸秆添加量处理间的差异进行检验并进行多重比较, 采用独立样本 t 检验对不同秸秆类型间的差异进行分析, 采用双因素方差分析对不同秸秆添加量和秸秆类型的影响进行检验。

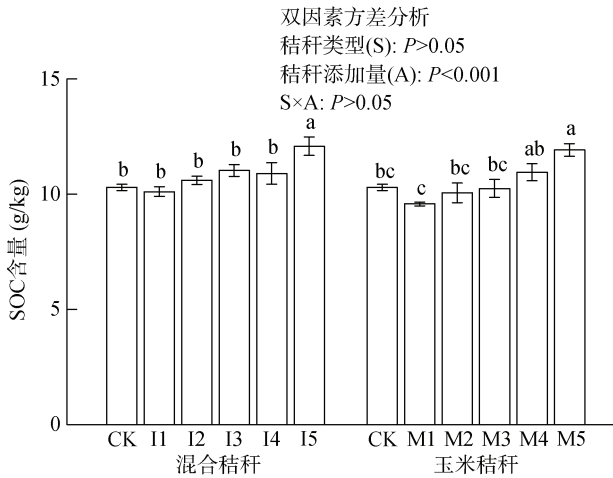
2 结果与分析

2.1 混合秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可知, 秸秆类型对 SOC 含量无显著影响 ($P>0.05$), 秸秆添加量显著影响了 SOC 含量 ($P<0.001$), 而两者之间无显著交互作用 ($P>0.05$)。具体而言, 与对照(CK)相比, 添加 0.5、1、2、4 mg/g 秸秆对 SOC 含量无显著影响, 但添加 10 mg/g 秸秆显著提高了 SOC 含量 ($P<0.05$)。添加 10 mg/g 的混合秸秆(I5)和玉米秸秆(M5)处理分别使 SOC 含量显著增加了 17.28% 和 15.73%, 且两者之间无显著差异。

2.2 混合秸秆还田对土壤有机碳矿化率的影响

由图 2 可知, 秸秆类型和秸秆添加量对 SOC 矿化率均有显著影响 ($P<0.001$), 且两者存在显著的交互作用 ($P<0.001$)。具体而言, SOC 矿化率随秸秆添加量的增加而增加, 在 10 mg/g 秸秆添加量时达到最大。此时, 混合秸秆 I5 和玉米秸秆 M5 处理的 SOC 矿化率分别为 11.55% 和 13.91%。在秸秆添加量为 0.5、1、2、4 mg/g 时, 不同秸秆类型对 SOC 矿化率



(柱图上方不同小写字母表示同一秸秆类型下不同添加量处理之间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

图 1 不同处理下土壤有机碳含量

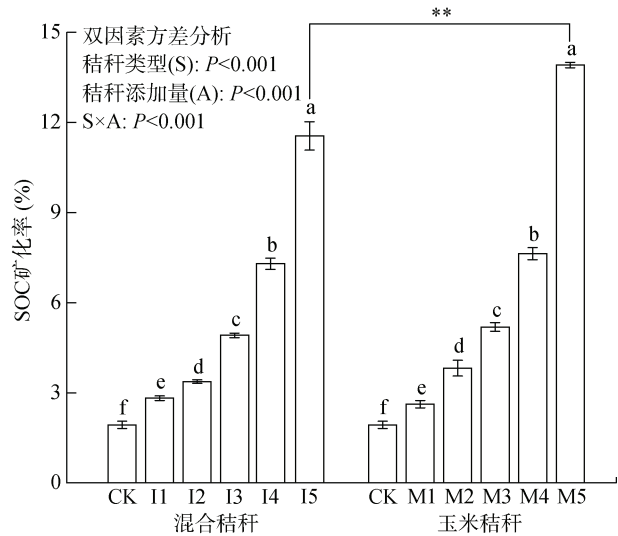
Fig. 1 Soil organic carbon contents under different treatments

的影响没有显著差异。然而，在 10 mg/g 添加量时，玉米秸秆 M5 处理的 SOC 矿化率显著高于混合秸秆 I5 处理，增幅为 20.43%。

2.3 混合秸秆还田对土壤有机碳组分含量的影响

由于添加 0.5、1、2 mg/g 的秸秆对 SOC 含量无显著影响，且秸秆类型间没有显著差异，所以仅对添加 4、10 mg/g 秸秆的土壤有机碳组分进行了分析(图

3)。如图 3A 所示，秸秆类型和秸秆添加量对土壤 MBC 含量均有显著影响($P<0.05$), 且存在显著交互作用($P<0.05$)。与对照相比，4、10 mg/g 混合秸秆处理显著增加了土壤 MBC 含量($P<0.05$), 而玉米秸秆处理无显著影响($P>0.05$)。此外，10 mg/g 混合秸秆处



(**表示同一秸秆添加量下不同秸秆类型之间存在显著差异 ($P<0.01$), 下同)

图 2 不同处理下土壤有机碳矿化率

Fig. 2 Soil organic carbon mineralization rates under different treatments

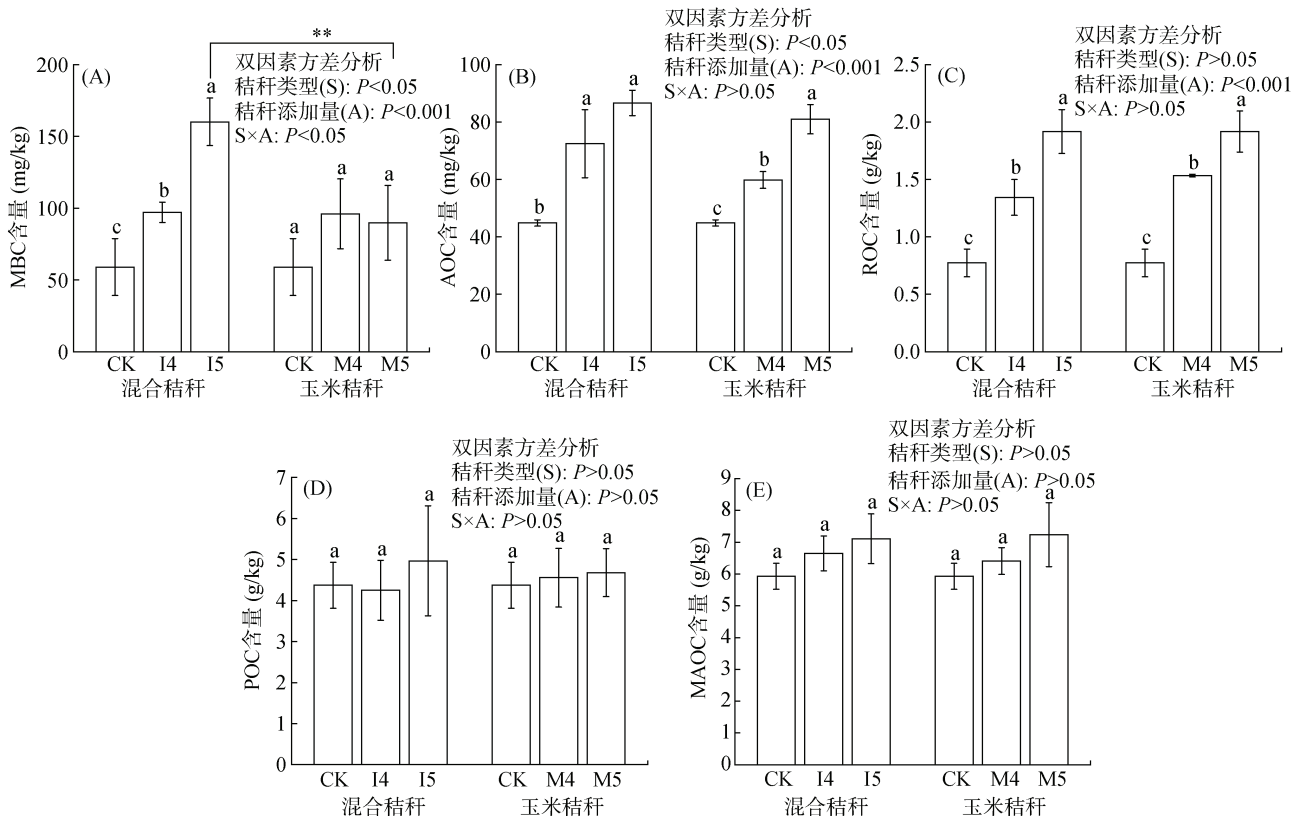


图 3 不同处理下土壤有机碳组分含量

Fig. 3 Contents of soil active organic carbon fractions under different treatments

理的土壤 MBC 含量显著高于玉米秸秆处理,增幅为 78.19%。如图 3B 所示,秸秆类型和秸秆添加量对土壤 DOC 含量均有显著影响($P<0.05$),但两者之间的交互作用不显著。与对照相比,4、10 mg/g 混合秸秆及玉米秸秆处理均显著增加了土壤 DOC 含量,但秸秆类型之间无显著差异。如图 3C 所示,秸秆添加量对土壤 ROC 含量有显著影响($P<0.001$),而秸秆类型及其交互作用不显著。与对照相比,4、10 mg/g 混合秸秆及玉米秸秆处理均显著增加了土壤 ROC 含量,但秸秆类型之间无显著差异。如图 3D 和 3E 所示,秸秆类型、秸秆添加量及其交互作用对土壤 POC 和 MAOC 含量均无显著影响。

2.4 混合秸秆还田对土壤温室气体排放的影响

由图 4A 可知,添加 2、4、10 mg/g 秸秆的土壤 CO_2 排放速率呈现相似的阶段性规律,即随着培养时间的增加呈先升高后降低的趋势,在第 19 天时趋于平缓。此外,在培养的前两天,添加 4、10 mg/g 混合秸秆的土壤 CO_2 排放速率显著高于添加玉米秸秆土壤,随后表现出相反的趋势。而添加 0.5、1 mg/g

秸秆的土壤 CO_2 排放速率随培养时间的增加而上下波动,在第 7 天时逐渐下降,在第 19 天时趋于平缓。同时,各处理 CO_2 排放速率均显著高于对照。由图 4B 可知,前 15 d 各处理的 CO_2 累积排放量占培养期间总排放量的 56%~85%,前 23 d 的 CO_2 累积排放量占总排放量的 82%~95%;同时,各处理 CO_2 累积排放量均显著高于对照(CK),并且表现为秸秆添加量越高, CO_2 累积排放量越高。而在整个培养期间, N_2O 排放速率极低,各处理间无显著差异,无明显的规律(图 4C)。前 15 d 各处理的 N_2O 累积排放量占培养期间总排放量的 52%~63%,前 23 d 的 N_2O 累积排放量占总排放量的 75%~84%;同时,各处理 N_2O 累积排放量与对照无显著差异,并且不同秸秆添加量之间 N_2O 累积排放量无显著差异(图 4D)。

由表 2 可知,秸秆类型、秸秆添加量及其交互作用对培养期间土壤 CO_2 总排放量均有显著影响($P<0.001$)。与对照相比,土壤 CO_2 总排放量随秸秆添加量的增加而逐渐增大,玉米秸秆处理的土壤 CO_2 总排放量整体上高于混合秸秆处理,在秸秆添加量为

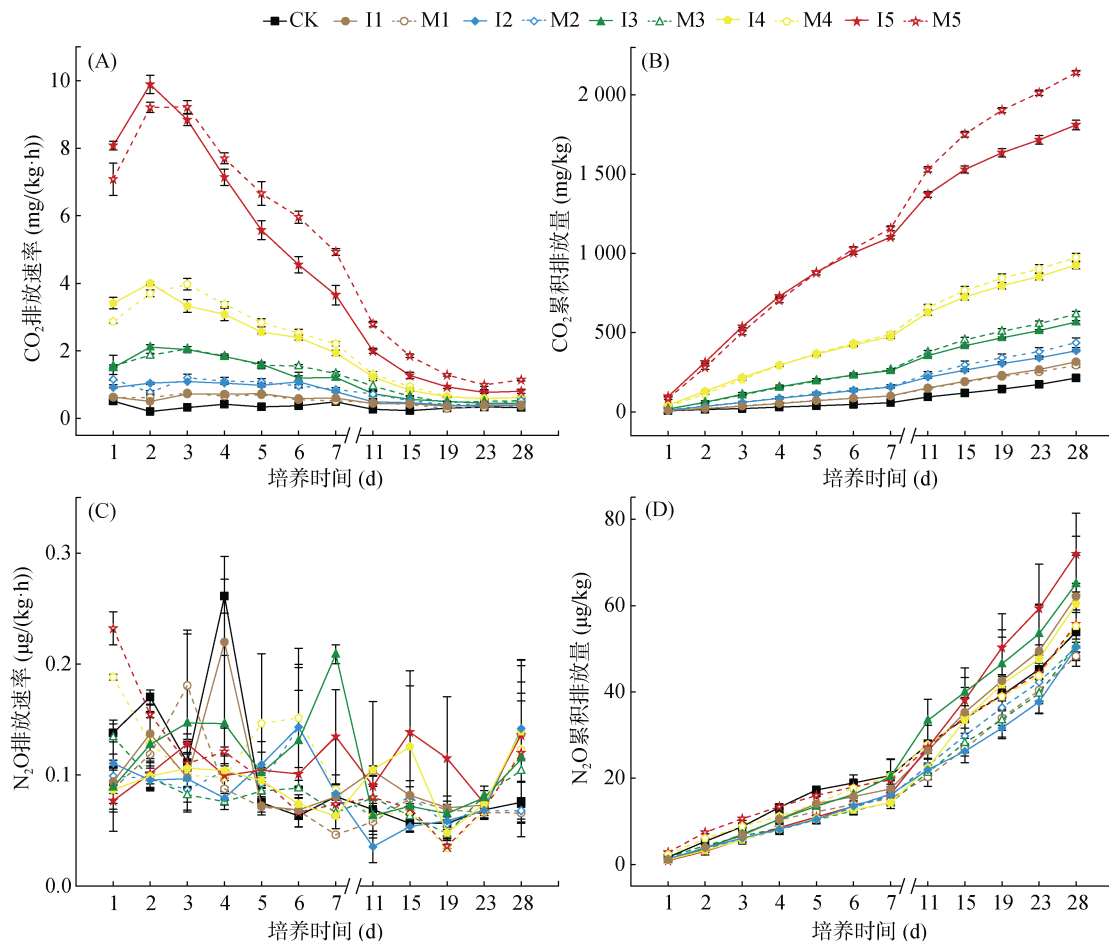


图 4 不同处理下 CO_2 和 N_2O 排放速率

Fig. 4 CO_2 and N_2O emission rates under different treatments

表 2 不同处理下温室气体累积排放量和全球增温潜势
Table 2 Cumulative greenhouse gas emissions and global warming potentials under different treatments

处理	CO ₂ 累积排放量(mg/kg)	N ₂ O 累积排放量(μg/kg)	全球增温潜势(mg/kg)
CK	212.66±13.46f	53.90±1.66a	228.72±13.76f
I1	315.69±9.18e	62.06±3.08a*	334.18±9.27e
I2	385.48±6.51d	50.28±2.94a	400.47±5.85d
I3	566.66±9.14c	65.09±11.01a	586.05±11.46c
I4	926.63±24.29b	60.41±11.27a	944.63±20.99b
I5	1 810.40±29.93a	71.98±9.41a	1 831.85±32.30a
CK	212.66±13.46f	53.90±1.66a	288.72±13.76f
M1	293.79±13.09e	48.29±2.36a	308.18±13.52e
M2	436.67±30.09d	50.40±1.09a	451.69±30.00d
M3	616.47±17.00b	50.82±3.10a	631.62±16.26c
M4	973.62±26.06b	55.19±7.95a	990.06±28.43b
M5	2 140.41±13.43a**	55.70±2.71a	2 157.01±12.78a**
方差分析 秸秆类型(S)	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> <0.05	<i>P</i> <0.001
秸秆添加量(A)	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> >0.05	<i>P</i> <0.001
S×A	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> >0.05	<i>P</i> <0.001

注：表中不同小写字母表示同一秸秆类型下不同秸秆添加量处理之间差异显著(*P*<0.05)；*、**分别表示同一秸秆添加量下不同秸秆类型之间差异在 *P*<0.05、*P*<0.01 水平显著。

10 mg/g 时达到显著水平(*P*<0.001)。秸秆类型对土壤 N₂O 总排放量有显著影响(*P*<0.05)，然而，秸秆添加量和两者交互作用对土壤 N₂O 总排放量均无显著影响(*P*>0.05)。在秸秆添加量为 0.5 mg/g 时，混合秸秆处理(I1)的土壤 N₂O 累积排放量显著高于玉米秸秆处理(M1)，其余处理间无显著差异。秸秆类型、秸秆添加量及其交互作用对全球增温潜势均有显著影响(*P*<0.001)。全球增温潜势的变化主要取决于土壤 CO₂ 总排放量。与对照相比，全球增温潜势随秸秆添加量的增加而逐渐增大，玉米秸秆处理的全球增温潜势整体上高于混合秸秆处理，在秸秆添加量为 10 mg/g 时，全球增温潜势最大且玉米秸秆处理显著高于混合秸秆处理(*P*<0.001)。

3 讨论

秸秆还田是提高农田 SOC 含量的重要措施，然而 SOC 固存受到多种因素的影响，如土壤类型、试验持续时间、秸秆类型和秸秆添加量等^[24]。尽管许多研究表明秸秆还田能显著提高 SOC 含量^[5]，然而本研究发现，添加 0.5、1、2、4 mg/g 的秸秆未显著提高 SOC 含量，而当秸秆添加量达到 10 mg/g 时，SOC 含量显著增加(图 1)，这表明 SOC 的固存与秸秆添加量密切相关。值得注意的是，在本试验条件下，混合秸秆和玉米秸秆对 SOC 含量未表现出显著差异，表明秸秆类型对 SOC 含量的影响较小。秸秆还

田的主要作用机制是通过微生物分解秸秆，增加 SOC 含量^[5]。已有研究表明，秸秆还田量能直接影响土壤微生物对碳底物的利用效率，从而调控土壤有机质的分解与积累^[25]。例如，张叶叶等^[26]指出，少量秸秆输入可能增强土壤有机质的激发强度，导致 SOC 固存减弱；而当外源碳输入量超过原有 SOC 含量的 30% 时，土壤有机质的激发强度反而会降低^[26]。在本研究 10 mg/g 的秸秆添加量下，两种类型秸秆碳输入分别占原有 SOC 含量的 40% 和 39%，这可能通过降低土壤有机质的激发强度，促进了 SOC 的固存。

SOC 通常被划分为活性碳库和稳定碳库两部分。MBC、DOC、ROC 和 POC 被认为是活性有机碳组分，是 SOC 变化的早期指标，而 MAOC 被认为是稳定有机碳组分^[27]。由于土壤活性有机碳组分对管理实践和环境变化的快速反应和高度敏感性，秸秆还田可以迅速改变其含量，但不同组分之间具有一定的差异^[11]。这些变化与秸秆还田后有机物的分解速率、碳源的可利用性以及微生物的代谢活动密切相关。在本研究中，混合秸秆处理显著提高了 MBC 含量，而玉米秸秆处理未表现出显著影响，尤其是在 10 mg/g 的秸秆添加量下，混合秸秆处理的 MBC 含量显著高于玉米秸秆处理(图 3A)。这可能是因为混合秸秆的碳源结构和性质不同于单一的玉米秸秆，可能通过协同效应加速了有机物的分解过程，从而为土壤微生物提供了更多的可用碳源，进而促进了微生物生物量的

增加^[28]。相比之下,玉米秸秆的高碳氮比和较慢的分解速率可能限制了其对微生物生物量的促进作用^[29]。无论是混合秸秆还是玉米秸秆,4 mg/g 和 10 mg/g 的秸秆添加量均显著增加了土壤 DOC 和 ROC 的含量(图 3B 和图 3C)。这表明秸秆还田通过其分解产物和微生物代谢产物的积累,提高了 DOC 和 ROC 的含量。尽管秸秆类型未表现出显著差异,但秸秆的添加量对这两种有机碳组分的增加具有重要作用。

POC 和 MAOC 是 SOC 的重要组成部分,与土壤碳稳定性及固碳潜力密切相关^[30]。POC 作为处于新鲜植物残体和腐殖化有机物之间的过渡态碳,易被土壤微生物分解利用,具有较快的周转速度。相较之下,MAOC 是与粉粒和黏粒矿物结合的有机碳,主要由不稳定的有机物通过微生物转化形成的腐殖质组成,具有较高的稳定性,是土壤中持久存在的有机碳形式^[12]。在本研究中,秸秆类型、秸秆添加量及其交互作用对 POC 和 MAOC 含量均未产生显著影响(图 3D 和图 3E),这可能与本试验周期较短(28 d)有关。秸秆还田后,经过微生物的分解和矿化,首先转化为更易被微生物利用的碳源,如 DOC 和 ROC,而这些组分在短期内通常比 POC 和 MAOC 变化更加显著。

秸秆还田为土壤微生物提供了能量和养分,刺激了土壤微生物活动,进而促进了 SOC 矿化^[31]。本研究结果显示,SOC 矿化率随秸秆添加量的增加而增加(图 2)。这一变化可以解释为秸秆添加量的增加提供了更多的可供微生物利用的养分,刺激了微生物的生长,进而增加了 SOC 的矿化^[32]。此外,10 mg/g 秸秆添加量下混合秸秆处理的 SOC 矿化率显著低于单一玉米秸秆处理,这可能是由于混合秸秆处理改变了微生物基质的来源和归宿,导致微生物群落的组成发生变化,从而导致 MBC 的增加,使更多的碳储存在土壤中,进而降低了 SOC 的矿化^[33]。

本研究中,在秸秆添加培养过程中,CO₂ 排放速率呈现先升高后降低、最终趋于稳定的规律(图 4A)。这一现象可能归因于秸秆中的易分解组分在培养初期被微生物迅速分解利用,微生物大量增殖导致 CO₂ 释放增加;随着易分解组分的逐渐减少,微生物转向利用难分解的组分,从而导致 CO₂ 排放速率逐渐降低而趋于稳定^[34]。随着秸秆添加量的增加,CO₂ 累积排放量逐渐增加(图 4B),这与前人的研究结果一致^[35]。在 10 mg/g 秸秆添加量下,混合秸秆处理的 CO₂ 累积排放量显著低于玉米秸秆处理(表 2),这可能是由于玉米秸秆具有较高的碳含量和 C/N,导致其碳释放潜

力较大,从而产生更多的 CO₂ 排放^[36]。然而,目前关于秸秆还田对 N₂O 排放的影响还存在争议。李新华等^[37]研究表明,秸秆还田促进了 N₂O 排放。而邹建文等^[38]发现,在常规灌溉条件下秸秆还田反而减少了 N₂O 排放。本研究中,秸秆还田对 N₂O 排放未表现出显著影响,这主要是因为 N₂O 排放受土壤的氧化还原特性影响较大。此外,秸秆还田会改变土壤的理化性质和微生物群落,二者相互作用的不断变化导致 N₂O 排放表现出较大的不确定性^[39]。总体上,由于旱地环境中 CH₄ 无明显排放,本研究中的全球增温潜势主要受 CO₂ 和 N₂O 排放影响。随着秸秆添加量的增加,全球增温潜势逐渐增加。在 10 mg/g 秸秆添加量下,混合秸秆处理的全球增温潜势显著低于玉米秸秆处理(表 2),这一趋势与 CO₂ 累积排放量的变化一致。因此,在 10 mg/g 秸秆添加量下,混合秸秆显著降低了 SOC 矿化率和 CO₂ 累积排放量,进而降低了全球增温潜势。

4 结论

1) 与对照相比,添加 0.5、1、2、4 mg/g 的秸秆对 SOC 的含量无显著影响,却促进了 SOC 的矿化,增加了 CO₂ 排放量,不利于 SOC 固存。

2) 与对照相比,添加 10 mg/g 的秸秆显著增加了 SOC、MBC、DOC 和 ROC 的含量,且混合秸秆处理的 MBC 含量显著高于玉米秸秆处理。

3) 在 10 mg/g 秸秆添加量下,混合秸秆处理的 SOC 矿化率、CO₂ 总排放量和全球增温潜势均显著低于玉米秸秆处理,有助于土壤固碳减排。

参考文献:

- [1] 陈云峰,夏贤格,杨利,等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 299-307.
- [2] Nguyen A T Q, Nguyen M N. Straw phytolith for less hazardous open burning of paddy straw[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 20043.
- [3] 宋平. 农作物秸秆开发利用研究进展[J]. 现代牧业, 2018(2): 26-30.
- [4] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2695-2702.
- [5] 马子钰,马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023, 55(1): 205-210.
- [6] Lynch M J, Mulvaney M J, Hodges S C, et al. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 973.

- [7] 寇太记, 刘世亮, 介晓磊, 等. 砂土中有机物质腐解与有机质调控[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 244–248.
- [8] 张红, 曹莹菲, 徐温新, 等. 植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1482–1492.
- [9] 徐国伟, 翟志华, 杨久军, 等. 秸秆还田量对直播稻苗期生长和土壤的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(19): 1–7.
- [10] 黄乙琼, 刘蓉, 赵长坤, 等. 油菜秸秆还田对土壤养分供应的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(20): 51–55, 87.
- [11] Li T T, Zhang J Z, Zhang H Y, et al. Fractionation of soil organic carbon in a calcareous soil after long-term tillage and straw residue management[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(12): 3611–3625.
- [12] Lavallee J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261–273.
- [13] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 322–328.
- [14] 李金, 任立军, 李晓宇, 等. 不同秸秆还田方式对玉米农田土壤 CO₂ 排放量和碳平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(14): 2738–2750.
- [15] 谢婉玉, 王永明, 纪红梅, 等. 秸秆还田种类对稻田 N₂O 排放及硝化反硝化微生物的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 769–778.
- [16] 涂昊泽, 林杉, 王军, 等. 秸秆添加对长期施肥旱地红壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3716–3724.
- [17] 王志国, 刘培, 邵宇婷, 等. 减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米农田氮平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1643–1652.
- [18] Wang X L, Chen Y, Yang K P, et al. Effects of legume intercropping and nitrogen input on net greenhouse gas balances, intensity, carbon footprint and crop productivity in sweet maize cropland in South China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127997.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 张慧, 王斌, 孙九胜, 等. 化肥减量配施有机肥对花生土壤有机碳及其组分的影响[J]. 土壤, 2024, 56(2): 333–341.
- [21] 李彬彬, 武兰芳. 土壤温室气体排放对 C/N 的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2067–2078.
- [22] 夏文斌, 张旭辉, 刘铭龙, 等. 麦秆还田方式对旱地土壤综合温室效应的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1010–1016.
- [23] 李银坤, 陈敏鹏, 梅旭荣, 等. 土壤水分和氮添加对华北平原高产农田有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 4037–4046.
- [24] Mo F, Yang D Y, Wang X K, et al. Nutrient limitation of soil organic carbon stocks under straw return[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 192: 109360.
- [25] 王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 等. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 807–816.
- [26] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381–1392.
- [27] Shi J W, Yang L, Liao Y, et al. Soil labile organic carbon fractions mediate microbial community assembly processes during long-term vegetation succession in a semiarid region[J]. *iMeta*, 2023, 2(4): e142.
- [28] 陈林康, 赵平, 王顶, 等. 玉米马铃薯秸秆混合腐解的非加性效应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(12): 1728–1738.
- [29] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 459–466.
- [30] Zhang J, Zhang F H, Yang L. Continuous straw returning enhances the carbon sequestration potential of soil aggregates by altering the quality and stability of organic carbon[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 358: 120903.
- [31] 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 等. 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2353–2362.
- [32] Li S L, Cui Y X, Xia Z Q, et al. The mechanism of the dose effect of straw on soil respiration: Evidence from enzymatic stoichiometry and functional genes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 168: 108636.
- [33] Pingthaisong W, Blagodatsky S, Vityakon P, et al. Mixing plant residues of different quality reduces priming effect and contributes to soil carbon retention[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 188: 109242.
- [34] 夏志敏, 周建斌, 梅沛沛, 等. 玉米与蚕豆秸秆配施对秸秆分解及土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 103–108.
- [35] 王亚芳, 赵以铭, 李英杰, 等. 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[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(21): 85–90.
- [36] 李欢, 赵平, 陈林康, 等. 添加不同类型秸秆对土壤 CO₂ 排放和化学性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 909–918.
- [37] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2228–2235.
- [38] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 409–414.
- [39] 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 246–250.

(责任编辑: 于 飞)