

秸秆还田配施氮肥对黑土玉米田土壤 CO₂ 排放与碳平衡的影响

齐智娟^{1,2} 徐敬文^{1,2} 张忠学^{1,2} 宋芳^{1,2} 李铁成^{1,2} 孙嘉璐^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探寻不同秸秆还田方式配施氮肥对黑土玉米田土壤 CO₂ 排放与碳平衡的影响, 于 2023 年开展大田试验, 设置秸秆离田 (S0, 对照)、秸秆覆盖还田 (S1)、秸秆旋耕还田 (S2) 3 种秸秆还田方式, 同时设置常规施加氮肥 (N, 250 kg/hm²) 与不施加氮肥 (W, 0 kg/hm², 对照) 2 种施氮模式, 共计 6 个处理。测定不同处理下玉米生育期土壤 CO₂ 排放通量以及玉米收获后土壤有机碳 (SOC)、可溶性有机碳 (DOC)、微生物量碳 (MBC) 含量, 探究土壤 CO₂ 累积排放量与 SOC、DOC、MBC 含量的关系, 并分析黑土玉米田生态系统碳平衡状况。结果表明: 各处理中土壤 CO₂ 累积排放量从大到小依次为 S2N、S1N、S0N、S2W、S1W、S0W, 其中 S2N 处理土壤 CO₂ 累积排放量较 S0W 处理显著增加 70.31% ($P < 0.05$)。在相同施氮模式下, 秸秆还田能够有效增加 SOC、DOC、MBC 含量, 且土壤 CO₂ 累积排放量与 SOC、DOC、MBC 含量呈正相关关系。不同秸秆还田方式配施氮肥下, S1N 处理玉米产量最高, 为 13 534.4 kg/hm², 作物碳排放速率最低, 为 0.122 kg/kg。不同秸秆还田方式配施氮肥下黑土玉米田生态系统碳平衡值均为正值, 表现为较强的碳“汇”, 其中 S1N 处理碳平衡值和土壤固碳潜力最大, 较其他处理分别增加 13.12% ~ 94.05%、3.49% ~ 25.32%。综上所述, 在本试验条件下, 秸秆覆盖还田 + 常规施氮 (S1N 处理) 可以实现黑土玉米田土壤固碳减排和作物增产目的。

关键词: 玉米田; 黑土; 秸秆还田; 氮肥; CO₂ 排放; 碳平衡

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0284-10

OSID:



Effects of Straw Returning Combined with Nitrogen Fertilizer on Soil CO₂ Emission and Carbon Balance in Black Soil Maize Field

QI Zhijuan^{1,2} XU Jingwen^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} SONG Fang^{1,2} LI Tiecheng^{1,2} SUN Jialu^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Field experiment was conducted in 2023 to investigate the effects of different straw returning methods with N fertilization on soil CO₂ emission and carbon balance in black soil maize fields. The experiment included three straw return methods: straw leaving the field (S0, control), straw mulching returning to the field (S1), and straw rotary tillage returning to the field (S2), and two modes of N fertilization: regular N fertilizer application (N, 250 kg/hm²) and no N fertilizer application (W, 0 kg/hm², control), totaling six treatments. The soil CO₂ emission flux and the contents of soil organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) after maize harvest were measured under different treatments, and the relationship between soil CO₂ emission and the contents of SOC, DOC, MBC were explored, and the carbon balance of black soil maize field ecosystem was analyzed. The results showed that the cumulative soil CO₂ emissions in each treatment were S2N, S1N, S0N, S2W, S1W, S0W, and the cumulative soil CO₂ emissions of S2N treatment were increased significantly by 70.31% compared with S0W treatment ($P < 0.05$). Under the same nitrogen application

收稿日期: 2024-03-14 修回日期: 2024-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500802)、东农学者计划学术骨干项目(21XG18)和国家自然科学基金项目(51809042)

作者简介: 齐智娟(1987—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤水热运移和节水灌溉技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

mode, straw returning to the field effectively increased the contents of SOC, DOC, MBC. Additionally, the cumulative soil CO₂ emissions were positively correlated with the contents of SOC, DOC, MBC. Under different straw returning methods and nitrogen fertilizer, the yield of maize in S1N treatment was the highest (13 534.4 kg/hm²), and the crop carbon emission rate was the lowest (0.122 kg/kg). The carbon balance value of black soil maize field ecosystem under different straw returning methods and nitrogen fertilizer application were all positive, showing a strong carbon “sink”, and the carbon balance value and soil carbon sequestration potential of S1N treatment were the largest, which were increased by 13.12% ~ 94.05% and 3.49% ~ 25.32%, respectively, compared with other treatments. In summary, the results of this experiment suggest that straw mulching and returning to the field, in combination with conventional nitrogen application (S1N), can effectively achieve the goals of soil carbon sequestration, emission reduction, and increased crop yield in black soil corn fields.

Key words: maize field; black soil; straw returning; nitrogen fertilizer; CO₂ emission; carbon balance

0 引言

近年来,温室气体排放引起的全球气候变暖已成为国内外学者广泛关注的热点问题^[1]。CO₂作为温室气体的重要组成部分,对全球气候变暖的增温贡献率高达60%^[2]。农田土壤是CO₂排放到大气的主要源头之一,其排放量达到人类活动所产生CO₂总量的25%^[3],严重影响了农田生态系统的碳平衡^[4]。因此,在保证提高粮食产量的同时减少农田土壤CO₂排放,对缓解温室效应、确保生态可持续性和粮食安全具有重要意义。

秸秆还田是当今秸秆资源利用的重要渠道^[5],不仅能有效解决因秸秆焚烧产生的大气污染,还能提高土壤肥力和促进作物高产,是黑土农田资源保护与利用的重要措施^[6],但秸秆还田对农田土壤CO₂排放的影响也不容忽视。有学者认为,秸秆还田通过将秸秆中的碳转移到土壤有机碳来实现温室气体减排^[7-8]。但也有研究表明,秸秆还田虽然有利于土壤固碳,但会增加土壤活性有机碳含量,提高微生物活性,从而促进土壤CO₂排放^[9]。可见,秸秆还田对CO₂排放的影响仍存在分歧。同时,氮肥通过影响微生物活性和作物根系生长也会对农田土壤CO₂排放产生重要影响。有研究表明,施加氮肥会显著增加土壤CO₂排放量^[10]。但AERIS等^[11]研究发现,施加氮肥会抑制土壤CO₂排放。另有研究指出,施加氮肥对土壤CO₂排放的影响不显著^[12]。因此,施加氮肥对黑土农田土壤CO₂排放的影响还需进行深入研究。与此同时,农田生态系统作为CO₂的重要排放源,其碳平衡值为正,表示该农田为大气吸收的“汇”,碳平衡值为负,表示该农田为大气排放的“源”^[13]。李磊等^[14]研究表明,与秸秆离田相比,秸秆还田能够显著提高农田生态系统碳平衡值,可增加土壤碳库储量。夏旭等^[15]研究却发现,秸秆还田能够增加土壤碳输入并促进土壤CO₂排放,对

夏玉米季的碳平衡值没有显著影响,然而,施加氮肥会使夏玉米季的碳平衡值显著增加150%~158%。目前多数研究主要集中于秸秆还田或氮肥施加对土壤CO₂排放的影响,然而,秸秆还田和氮肥之间相互作用对土壤CO₂排放的调节、不同秸秆还田方式与氮肥配施对土壤有机碳及其组分的改变规律,目前尚不清楚。土壤有机碳储量和CO₂排放与秸秆还田配施氮肥之间的定量关系也同样未知,此外,有关黑土玉米田生态系统碳平衡状况的研究也鲜有报道。

本文通过田间试验测定玉米全生育期土壤CO₂排放通量,结合不同秸秆还田方式配施氮肥下土壤有机碳含量、可溶性有机碳含量和微生物量碳含量的变化,对CO₂排放规律进行分析,计算黑土玉米田生态系统碳平衡值,量化土壤有机碳和CO₂排放对秸秆还田配施氮肥的响应,并对不同秸秆还田方式配施氮肥的产量及其构成进行分析,以期对东北黑土区玉米田土壤固碳减排和作物增产研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2023年在黑龙江省水利科技试验研究中心(45°43'N,126°36'E,平均海拔137 m)进行。该试验区地属温带大陆性季风气候,雨热同季,降水量集中,易发生春旱。多年平均气温-4~5℃,无霜期130~140 d,年均降水量400~650 mm,7—9月降雨量占年降水量的70%,多年平均蒸发量796 mm,试验地为旱作土地,采用当地农户管理水平,无灌溉,日尺度气象条件如图1所示。试验区位于东北典型黑土带,试验土壤质地为壤土,耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质为:速效氮(N)质量比153.6 mg/kg、速效磷(P₂O₅)质量比38.9 mg/kg、速效钾(K₂O)质量比362.4 mg/kg、有机质质量比

25.27 g/kg、容重 1.20 g/cm³、pH 值 7.25。

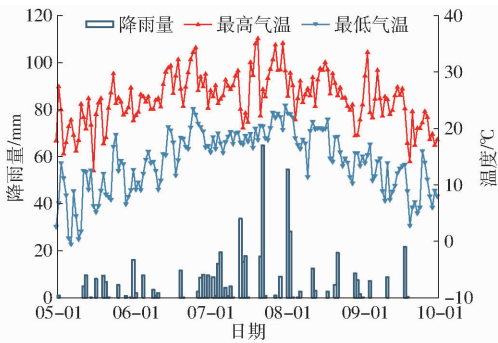


图1 玉米生育期内试验地日气温和降雨量

Fig.1 Daily temperature and rainfall of experimental site during maize growth period

1.2 试验设计

设置秸秆离田 + 不施加氮肥的对照处理 (S0W)、秸秆离田 + 常规施氮 (S0N)、秸秆覆盖还田 + 不施加氮肥 (S1W)、秸秆覆盖还田 + 常规施氮 (S1N)、秸秆旋耕还田 + 不施加氮肥 (S2W)、秸秆旋耕还田 + 常规施氮 (S2N) 共 6 个处理 (表 1), 每个处理进行 3 次重复, 共计 18 个试验小区, 随机排列, 每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m)。选取当地常规种植的玉米品种“大龙 568”为供试作物, 种植株距为 23 cm。结合当地玉米种植经验, 氮肥施用量为 250 kg/hm² (尿素, 含 N 质量分数 46%), 按照基肥 40%、拔节期 30%、灌浆期 30% 进行施用, P₂O₅ 和 K₂O 作为基肥施入, 施用量均为 90 kg/hm²。

表 1 田间小区试验处理设置

Tab.1 Field plot test treatment settings

处理	处理名称	处理方式
S0W	秸秆离田 + 不施加氮肥	采用免耕耕作, 玉米全生育期内不施加氮肥, 秸秆全部清除
S0N	秸秆离田 + 常规施氮	采用免耕耕作, 氮肥施用量 250 kg/hm ² , 秸秆全部清除
S1W	秸秆覆盖还田 + 不施加氮肥	采用免耕耕作, 玉米全生育期内不施加氮肥, 玉米收获后秸秆粉碎覆盖还田
S1N	秸秆覆盖还田 + 常规施氮	采用免耕耕作, 氮肥施用量 250 kg/hm ² , 玉米收获后秸秆粉碎覆盖还田
S2W	秸秆旋耕还田 + 不施加氮肥	玉米全生育期内不施加氮肥, 玉米收获后, 将秸秆粉碎覆盖于地表, 通过旋耕作业将粉碎后的玉米秸秆旋入表层土壤
S2N	秸秆旋耕还田 + 常规施氮	氮肥施用量 250 kg/hm ² , 玉米收获后, 将秸秆粉碎覆盖于地表, 通过旋耕作业将粉碎后的玉米秸秆旋入表层土壤

1.3 测定指标和方法

1.3.1 CO₂ 气体排放通量测定

采用静态箱-气相色谱法采集并测定各时期 CO₂ 气体排放通量, 测量频率为 7 d 一次, 遇强降雨推迟测量, 测量时间固定在 09:00—11:00。静态室

由静态箱和底座组成。静态箱由有机玻璃制成, 四周采用不透明隔热防晒漆进行隔热处理, 每个静态箱都安装一个空气温度计和电子风扇, 用于记录箱内温度变化以及混匀气体, 箱体侧面中上部设置气密性气体取样孔, 气样抽取后转入采气袋 (50 mL), 采样过程中需将静态箱安置在底座上, 采样过程外需将静态箱从底座上移走。采集的气体样品于东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室使用气相色谱仪 (GC-2010PLUS 型, 岛津公司, 日本) 进行测定。

CO₂ 排放通量计算公式为^[16]

$$F = \rho h \frac{P}{760} \frac{dc}{dT} \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中 F ——CO₂ 气体排放通量, mg/(m²·h)
 ρ ——气体在标准条件下的密度, g/cm³
 P ——气体采集时的标准大气压, Pa
 h ——箱体高度, m
 dc/dT ——箱体内存气体浓度随时间变化的回归曲线斜率, $\mu\text{L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
 T ——采样时箱体内存气体温度, °C

玉米全生育期内土壤 CO₂ 累积排放量计算公式为

$$E = 0.24 \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

式中 E ——CO₂ 累积排放量, kg/hm²
 F_i ——第 i 次采气时 CO₂ 气体排放通量, mg/(m²·h)
 F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采气时 CO₂ 气体排放通量, mg/(m²·h)
 t_i ——第 i 次采样时间, d
 t_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时间, d

土壤呼吸碳累积排放量计算公式为

$$C = 0.27E \quad (3)$$

式中 C ——土壤呼吸碳累积排放量, kg/hm²

1.3.2 土壤样品测定

玉米收获后采集土壤样品, 在每个试验小区使用土钻采集耕层 (0 ~ 20 cm) 土样, 采用五点取样法, 将土样均匀混合后分为 2 份, 一份鲜土过 10 目筛低温保存, 用于测定可溶性有机碳 (DOC) 含量和微生物量碳 (MBC) 含量; 另一份风干后研磨过 100 目筛混合均匀, 于东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室使用总有机碳分析仪 (Elementar vario TOC, 德国) 测定土壤有机碳含量; DOC 含量采用 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提, 滤液过 0.45 μm 滤膜后用总有机碳分析仪测定^[17]; MBC 含量采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提法测定^[18]。

1.3.3 作物产量及地上生物量测定

玉米收获期取各小区中间 2 行进行测产, 记录穗数, 并随机选择 20 个果穗记录穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数和穗粒数, 风干玉米穗部至质量恒定, 进行脱粒、称量, 并折算成籽粒含水率为 14% 的玉米籽粒产量^[19]。最后计算不同处理下玉米地上生物量。

作物碳排放速率计算公式为

$$E_1 = \frac{C}{Y} \quad (4)$$

式中 E_1 ——作物碳排放速率, kg/kg

Y ——玉米产量, kg/hm²

1.3.4 农田生态系统碳平衡计算

生态系统碳平衡值相关计算公式^[20-21]为

$$NEPC = NPPC - RmC \quad (5)$$

其中 $NPPC = 0.45(NPPa + NPPr)$ (6)

$$NPPr = NPPa/2.1 \quad (7)$$

$$RmC = 0.856C \quad (8)$$

$$C_s = NPPC/C \quad (9)$$

式中 $NEPC$ ——生态系统碳平衡值, kg/hm²

$NPPC$ ——净初级生产力固碳量, kg/hm²

RmC ——土壤微生物异养呼吸的碳释放量, kg/hm²

$NPPa$ ——地上生物量, kg/hm²

$NPPr$ ——根生物量, kg/hm²

C_s ——生态系统土壤固碳潜力

1.4 数据分析

采用 Excel 2021 软件对数据进行整理、Origin 2021 进行制图, 采用 SPSS 27.0 统计分析软件对数据进行方差分析及显著性分析; 不同指标间差异采用单因素方差分析, 运用最小显著差异法 (LSD) 进行多重比较分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式配施氮肥对 CO₂ 排放的影响

2.1.1 土壤 CO₂ 排放通量

不同处理下玉米生育期土壤 CO₂ 排放通量如图 2 所示, 各处理玉米生长初期和末期 CO₂ 排放通量较低, 中期排放通量高, 呈先升高后降低的变化趋势。各处理 CO₂ 排放通量均在 7 月 2 日达到第 1 次峰值, 其中施加氮肥的 S2N、S1N 和 S0N 处理 CO₂ 排放通量均高于未施加氮肥的 S2W、S1W 和 S0W 处理。随后各处理土壤 CO₂ 排放通量逐渐下降, 于 7 月 16 日出现转折, 土壤 CO₂ 排放通量呈上升趋势, 并在 7 月 30 日再次达到峰值, 各处理 CO₂ 排放通量变化趋势与第 1 次峰值一致, 此时 S2N 处理 CO₂ 排

放量最高, S0W 处理最低, 相较于 S0W 处理高 106.66%, 在施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S2N 处理 CO₂ 排放通量较 S1N、S0N 处理分别高 12.64%、25.34%, S1N 处理较 S0N 处理高 11.27%, 在未施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S2W、S1W 处理 CO₂ 排放通量较 S0W 处理分别高 38.49%、35.48%。

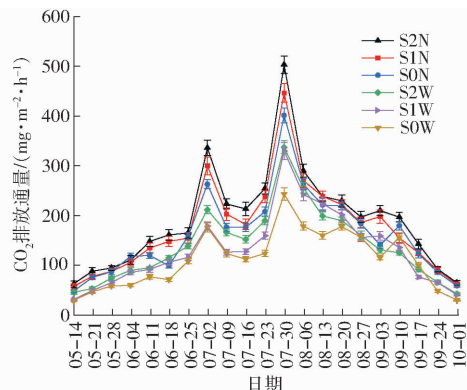


图 2 不同处理下 CO₂ 排放通量变化曲线

Fig. 2 Curves of CO₂ emission flux under different treatments

2.1.2 土壤 CO₂ 及呼吸碳累积排放量

不同处理下玉米生育期土壤 CO₂ 及呼吸碳累积排放量如图 3 (图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同) 所示。由图 3a 可知, S2N 处理土壤 CO₂ 累积排放量最高, S0W 处理最低, S2N 处理土壤 CO₂ 累积排放量较 S0W 处理显著增

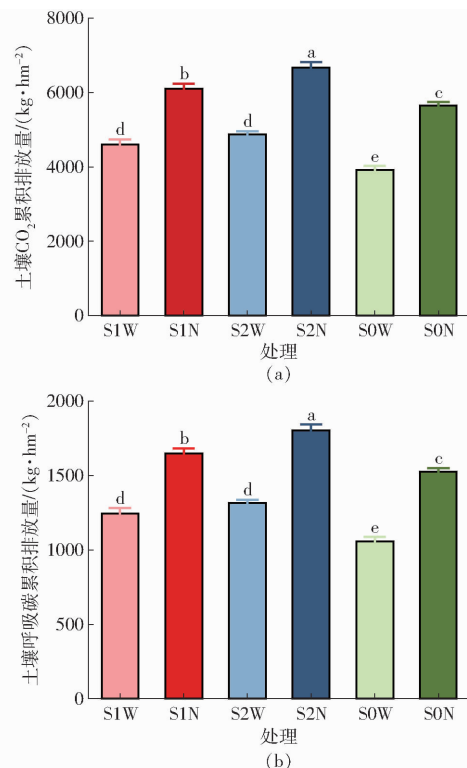


图 3 不同处理下土壤 CO₂ 及呼吸碳累积排放量

Fig. 3 Cumulative emissions of soil CO₂ and respiration carbon under different treatments

加 70.31% ($P < 0.05$), 在各处理中施加氮肥的 S2N、S1N 和 S0N 处理土壤 CO_2 累积排放量均显著高于未施加氮肥的 S2W、S1W 和 S0W 处理 ($P < 0.05$)。在不同施加氮肥模式下, 秸秆还田均能增加土壤 CO_2 累积排放量, 其中 S1N 处理和 S2N 处理土壤 CO_2 累积排放量较 S0N 处理显著增加 8.06% 和 18.07%, S1W 处理和 S2W 处理土壤 CO_2 累积排放量较 S0W 处理显著增加 19.55% 和 24.22% ($P < 0.05$); 在相同秸秆还田方式下, S1N 处理土壤 CO_2 累积排放量较 S1W 处理显著增加 32.63%, S2N 处理量较 S2W 处理显著增加 37.10%, S0N 处理较 S0W 处理显著增加 44.24% ($P < 0.05$)。由图 3b 可知, 各处理土壤呼吸碳累积排放量从大到小依次为 S2N、S1N、S0N、S2W、S1W、S0W, 与图 3a 土壤 CO_2 累积排放量规律一致。

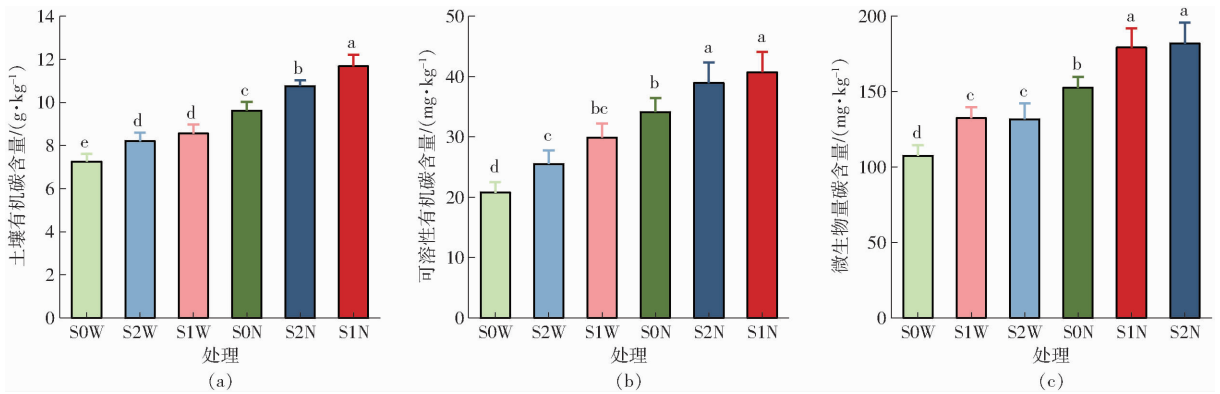


图 4 不同处理下土壤有机碳及其组分含量

Fig. 4 Soil organic carbon and its components under different treatments

理显著增加 11.85% ($P < 0.05$); 在未施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S1W 处理、S2W 处理土壤有机碳含量较 S0W 处理显著增加 18.07%、13.10% ($P < 0.05$)。

2.2.2 土壤可溶性有机碳和微生物量碳

由图 4b、4c 可知, 各处理中施加氮肥的 S1N、S2N 和 S0N 处理土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量均高于未施加氮肥的 S1W、S2W 和 S0W 处理, 其中 S2N 处理土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量较 S2W 处理显著增加 52.67%、38.05%, S1N 处理较 S1W 处理显著增加 36.33%、35.41%, S0N 处理较 S0W 处理显著增加 64.10%、41.68% ($P < 0.05$)。在施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S1N、S2N 处理土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量较 S0N 处理显著增加 19.50%、14.16% 和 17.56%、19.20% ($P < 0.05$)。在未施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S1W、S2W 处理土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量较 S0W 处理显著增加 43.84%、22.71% 和 23.17%、22.58% ($P < 0.05$)。

2.2 不同秸秆还田方式配施氮肥对土壤有机碳及其组分的影响

2.2.1 土壤有机碳

不同处理下土壤有机碳及其组分含量如图 4 所示。由图 4a 可知, S1N 处理土壤有机碳含量(质量比)最高, S0W 处理最低, S1N 处理土壤有机碳含量较 S0W 处理显著增加 61.10% ($P < 0.05$); 各处理中施加氮肥的 S1N 处理、S2N 处理和 S0N 处理土壤有机碳含量均高于未施加氮肥的 S1W 处理、S2W 处理和 S0W 处理, 其中 S2N 处理土壤有机碳含量较 S2W 处理显著增加 31.22%, S1N 处理较 S1W 处理显著增加 36.45%, S0N 处理较 S0W 处理显著增加 32.69% ($P < 0.05$); 在施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中, S1N 处理土壤有机碳含量较 S2N 处理、S0N 处理显著增加 8.55%、21.41%, S2N 处理较 S0N 处

2.2.3 CO_2 累积排放量与有机碳及其组分含量的关系

将各处理玉米成熟期土壤耕层(0~20 cm)有机碳及其组分含量与 CO_2 累积排放量进行线性拟合, 结果如图 5 所示。由图 5a 可知, 以土壤有机碳含量为自变量, CO_2 累积排放量为因变量, 建立线性拟合方程 ($y = 564.79x + 13.88$), 决定系数 $R^2 = 0.85$, 说明模型拟合较好, CO_2 累积排放量随着土壤有机碳含量增加而增加, 呈正相关关系。由图 5b、5c 可知, 将各处理土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量分别与 CO_2 累积排放量建立线性拟合方程, R^2 分别为 0.83、0.89, 说明两组模型拟合较好, 与 CO_2 累积排放量均呈正相关关系。

2.3 不同秸秆还田方式配施氮肥对玉米产量及构成的影响

多因素方差分析结果显示, 秸秆和氮肥对玉米产量和作物碳排放速率均产生极显著影响 ($P < 0.01$)。不同处理下玉米产量及构成如表 2 所示。S0W 处理穗行数、穗粒数和百粒质量均最小, 分别

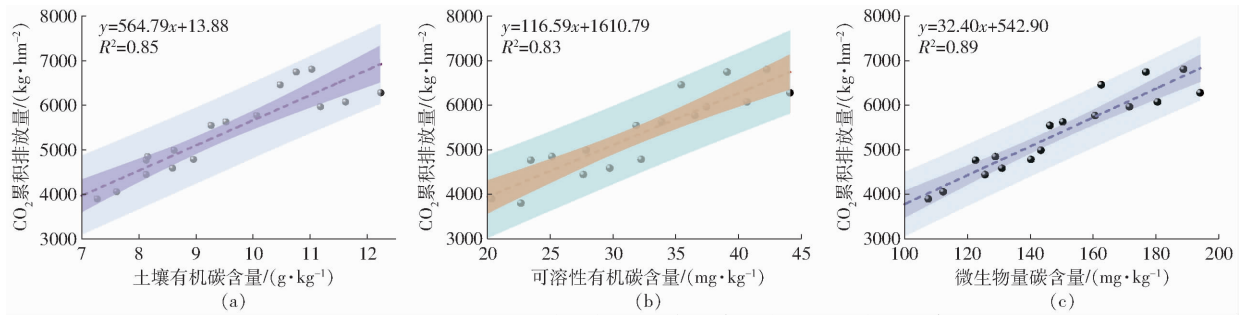
图5 不同处理下 CO₂ 累积排放量与有机碳及其组分含量的线性拟合分析Fig. 5 Linear-fitting analysis of cumulative CO₂ emissions and organic carbon and its component content under different treatments

表2 不同处理下玉米产量及构成

Tab. 2 Yield and composition of maize under different treatments

处理	穗行数	穗粒数	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	作物碳排放速率/(kg·kg ⁻¹)
S1W	17.3 ^a	629.3 ^{ab}	37.0 ^a	8 586.6 ^d	0.145 ^{bc}
S1N	16.7 ^a	696.7 ^{ab}	37.6 ^a	13 534.4 ^a	0.122 ^d
S2W	16.7 ^a	618.0 ^{ab}	36.7 ^a	7 874.2 ^e	0.167 ^a
S2N	18.0 ^a	768.7 ^a	37.3 ^a	13 034.4 ^b	0.138 ^c
S0N	17.3 ^a	664.0 ^{ab}	36.1 ^a	12 345.1 ^c	0.124 ^d
S0W	16.0 ^a	560.0 ^b	32.2 ^b	7 110.1 ^f	0.149 ^b
秸秆(S)				**	**
F 氮肥(N)				**	**
S × N					

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$);

**表示0.01水平上影响显著,下同。

较其他处理减少 4.38% ~ 12.50%、10.36% ~ 37.27% 和 12.11% ~ 16.77%;各处理中 S1N 处理产量最高,S0W 处理最低,S1N 处理产量较 S0W 处理显著增加 90.35% ($P < 0.05$),施加氮肥的 S1N、S2N 和 S0N 处理产量均高于未施加氮肥的 S1W、S2W 和 S0W 处理,其中 S2N 处理产量较 S2W 处理显著增加 65.53%,S1N 处理较 S1W 处理显著增加 57.62%,S0N 处理较 S0W 处理显著增加 73.63% ($P < 0.05$)。在施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中,S1N 处理产量较 S2N、S0N 处理显著增加 3.84%、

9.63%,S2N 处理较 S0N 处理显著增加 5.58% ($P < 0.05$)。在未施加氮肥的 3 种秸秆还田方式中,S1W 处理产量较 S2W、S0W 处理显著增加 9.05%、20.77%,S2W 处理较 S0W 处理显著增加 10.75%;各处理作物碳排放速率从大到小依次为 S2W、S0W、S1W、S2N、S0N、S1N,由此可知,S1N 处理作物碳排放速率最小,较其他处理减少 1.64% ~ 36.89%。

2.4 不同秸秆还田方式配施氮肥对玉米田生态系统碳平衡的影响

多因素方差分析结果显示,秸秆和氮肥对 $NPPa$ 、 $NPPr$ 、 $NPPC$ 、 RmC 和 $NEPC$ 均产生极显著影响($P < 0.01$),秸秆对 C_s 产生极显著影响,而氮肥对 C_s 影响不显著。不同处理下玉米田生态系统碳平衡如表 3 所示。S1N 处理地上生物量和根生物量均最大,较其他处理增加 11.25% ~ 90.72%;各处理净初级生产力固碳量从大到小依次为 S1N、S2N、S1W、S0N、S2W、S0W,其中 S1N 处理净初级生产力固碳量较 S0W 处理显著增加 90.72% ($P < 0.05$);不同处理对土壤微生物异养呼吸的碳释放量具有显著影响,整体由大到小依次为 S2N、S1N、S0N、S2W、S1W、S0W。由表 3 可知,各处理的碳平衡值均为正值,说明该黑土区玉米田生态系统是大气 CO₂ 的吸收“汇”,其中 S1N 处理碳平衡值最大,S0W 处理最小,S1N 处理碳平衡值较 S0W 处理显著增加

表3 不同处理下玉米田生态系统碳平衡

Tab. 3 Carbon balance of maize field ecosystem under different treatments

处理	$NPPa/(kg·hm^{-2})$	$NPPr/(kg·hm^{-2})$	$NPPC/(kg·hm^{-2})$	$RmC/(kg·hm^{-2})$	$NEPC/(kg·hm^{-2})$	C_s
S1W	21 969.18 ^b	10 461.51 ^b	14 593.81 ^b	1 075.06 ^d	13 518.75 ^c	11.73 ^a
S1N	30 128.63 ^a	14 346.96 ^a	20 014.02 ^a	1 425.85 ^b	18 588.17 ^a	12.14 ^a
S2W	18 651.94 ^c	8 881.88 ^b	12 390.22 ^{bc}	1 136.35 ^d	11 253.86 ^{de}	9.43 ^b
S2N	27 081.90 ^a	12 896.14 ^a	17 990.12 ^a	1 557.99 ^a	16 432.13 ^b	9.98 ^b
S0N	21 501.45 ^b	10 238.79 ^b	14 283.11 ^b	1 319.49 ^c	12 963.61 ^{cd}	9.36 ^b
S0W	15 797.36 ^c	7 522.55 ^c	10 493.96 ^c	914.82 ^e	9 579.15 ^e	9.95 ^b
秸秆(S)	**	**	**	**	**	**
F 氮肥(N)	**	**	**	**	**	**
S × N						

94.05%。在施加氮肥的3种秸秆还田方式中,S1N处理碳平衡值较S2N处理、S0N处理显著增加13.12%、43.39%,S2N处理较S0N处理显著增加26.76% ($P < 0.05$),在未施加氮肥的3种秸秆还田方式中,S1W处理碳平衡值较S2W、S0W处理显著增加20.13%、41.13%。在不同处理土壤固碳潜力中,S1N处理最大,相较于其他处理增加3.49%~25.32%,具有较强的固碳潜力。

3 讨论

土壤CO₂排放主要来自于土壤微生物的异养呼吸和作物根系的自养呼吸^[22]。本研究中,各处理间土壤CO₂排放通量峰值均集中在玉米生育中期,这可能是由于丰沛的雨水和较高的气温可以促进土壤微生物活性,从而加快土壤呼吸速率,尤其是在玉米生长旺盛的7—8月,玉米根系呼吸较为强烈,增加了土壤CO₂排放通量^[23]。有一些研究表明,秸秆还田能够抑制土壤呼吸,降低土壤CO₂排放^[24-25]。但李新华等^[26]在研究中发现添加秸秆会增加农田CO₂排放量,这与本研究结果一致,产生该结果的原因是添加到土壤中的秸秆富含大量营养元素,能够有效改善土壤肥力^[27],促进了作物根系呼吸和微生物代谢活动,进而增加了土壤CO₂排放,并且腐解秸秆也会产生一定量的CO₂^[28]。此外,本研究进一步发现秸秆旋耕还田方式土壤CO₂排放量高于秸秆覆盖还田方式,这可能是因为秸秆旋耕还田方式能够有效打破土壤犁底层,降低土壤紧实度,使得土壤变得疏松透气^[29],有利于土壤CO₂排放,且与秸秆覆盖相比,采取旋耕作业将秸秆与土壤紧密接触,可以加快秸秆腐解,释放出更多CO₂。除秸秆还田外,施加氮肥也会影响农田土壤CO₂排放^[30-31]。本研究结果显示,施氮处理土壤CO₂排放量均显著高于不施氮处理($P < 0.05$),产生差异的原因一方面是因为施加氮肥可以为土壤提供充足的养分,促进了作物生长,进而增强根系呼吸作用,另一方面是因为施加氮肥可以增加农田土壤中有效氮源,降低土壤中碳氮比,提高微生物种群数量,加快微生物对有机碳的分解,进而释放更多的CO₂^[32]。

土壤有机碳是农田土壤CO₂排放的主要碳源^[33]。本研究显示,土壤CO₂累积排放量与土壤有机碳含量呈正相关关系,这可能是由于土壤微生物主要通过对有机碳的矿化分解来释放CO₂^[34],土壤有机碳含量越高,释放的CO₂越多。在本研究中,秸秆还田相比于秸秆离田能够有效增加土壤有机碳含量,这主要是因为秸秆还田后,经过微生物的分解作

用,将秸秆腐解形成的有机碳源运移到土壤中,有利于土壤有机碳累积。黄璐等^[35]在研究中发现添加秸秆对土壤有机碳累积具有显著作用,这与本研究结果一致。土壤可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)作为土壤有机碳库最活跃的组分,对土壤CO₂排放量变化更加敏感^[36-37]。在本研究中,土壤CO₂累积排放量与DOC、MBC含量也呈正相关关系,产生该结果的原因是DOC是土壤微生物重要的能量和物质来源,并且MBC在一定程度上能够反映微生物数量^[38],DOC、MBC含量越高,微生物活性越强,异养呼吸会产生更多的CO₂。赵政鑫等^[39]研究发现,秸秆还田和施加氮肥能够有效提高玉米产量。本研究结果显示,与S0W处理相比,秸秆还田配施氮肥能够显著增加玉米产量($P < 0.05$),这主要是因为秸秆和氮肥能够为作物生长发育提供充足养分和改善土壤质量,从而提高了作物产量。此外,本研究还发现,秸秆覆盖还田+施加氮肥(S1N)相比于其他处理能够有效降低作物碳排放速率,这可能是由于作物碳排放效率受到土壤碳排放量和作物产量共同影响^[40],S1N处理显著增加了玉米产量,且增加幅度远大于土壤碳排放量,最终降低了其作物碳排放速率。

生态系统碳平衡值(NEPC)是评估农田生态系统碳平衡的主要指标,NEPC为正时,农田生态系统为碳汇,净固定碳;NEPC为负时,农田生态系统为碳源,净排放碳^[41-42]。NEPC受净初级生产力固碳量和土壤微生物异养呼吸碳释放量影响。有一些研究发现,秸秆还田和施加氮肥能有效提高农田生态系统的碳汇效应^[43-44]。在本研究中,S1N处理和S2N处理NEPC显著高于其他处理($P < 0.05$),这主要是因为S1N处理和S2N处理具有较高的地上生物量和根生物量,加强了其净初级生产力固碳量,抵消大部分的土壤碳排放量,从而提高农田碳汇效应。但WANG等^[45]研究指出,秸秆还田对农田生态系统碳汇效应影响较小,甚至会降低其碳汇效应,这与本研究结果不一致。产生差异的原因一方面可能是因为长期的秸秆还田会使农田土壤有机碳含量达到饱和状态,导致很难提高该农田碳汇效应^[46],而本试验采用的试验地土壤有机碳含量较低并未饱和,仍然能吸收更多的碳,达到更高的碳平衡,另一方面可能是因为不同地区的土壤类型和作物种类有所区别,导致不同农田生态系统的净初级生产力固碳量和土壤微生物异养呼吸碳释放量差异较大,进而影响到农田碳平衡值。此外,各处理间土壤固碳潜力以S1N处理最高,表明S1N处理的固碳潜力最强。因此在农业生产中,通过选择秸秆覆盖还田配

施氮肥的模式能够有效实现农田固碳增“汇”目的。

4 结论

(1) 不同秸秆还田方式配施氮肥下, 施加氮肥处理土壤 CO₂ 累积排放量显著高于未施加氮肥处理 ($P < 0.05$), 其中秸秆旋耕还田 + 常规氮肥处理土壤 CO₂ 累积排放量最高, 较其他处理增加 9.27% ~ 70.31%。

(2) 不同秸秆还田方式配施氮肥下, 秸秆还田能有效提高耕层土壤 SOC、DOC、MBC 含量, 且各处理中土壤 CO₂ 累积排放量分别与 SOC、DOC、MBC 含

量呈正相关关系。

(3) 不同秸秆还田方式配施氮肥下, 秸秆覆盖还田 + 常规氮肥处理玉米产量最高, 为 13 534.4 kg/hm², 作物碳排放速率最低, 为 0.122 kg/kg, 说明秸秆覆盖还田 + 常规氮肥处理能够有效增加玉米产量, 并降低其作物碳排放速率。

(4) 不同秸秆还田方式配施氮肥下, 各处理玉米田生态系统碳输入明显高于碳输出, 玉米田生态系统碳平衡值均为正值, 因此黑土玉米田表现为较强的碳“汇”, 其中秸秆覆盖还田 + 常规氮肥处理碳“汇”强度最大。

参 考 文 献

- [1] LI Z, ZHANG Q, LI Z, et al. Effects of straw mulching and nitrogen application rates on crop yields, fertilizer use efficiency, and greenhouse gas emissions of summer maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157681.
- [2] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966 - 975.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966 - 975. (in Chinese)
- [3] 武开阔, 张哲, 武志杰, 等. 不同秸秆还田量和氮肥配施对玉米田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 664 - 670.
WU Kaikuo, ZHANG Zhe, WU Zhijie, et al. Effects of different amounts of straw return and nitrogen fertilizer application on soil CO₂ emission from maize fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 664 - 670. (in Chinese)
- [4] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 240 - 247.
ZHANG Hengheng, YAN Changrong, ZHANG Yanqing, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 240 - 247. (in Chinese)
- [5] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 349 - 359.
HUO Lili, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 349 - 359. (in Chinese)
- [6] 胡立峰, 李洪文, 高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 308 - 312.
HU Lifeng, LI Hongwen, GAO Huanwen. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 308 - 312. (in Chinese)
- [7] SHAN J, YAN X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71: 170 - 175.
- [8] HE Z, CAO H, QI C, et al. Straw management in paddy fields can reduce greenhouse gas emissions: a global Meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109218.
- [9] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366 - 1381.
- [10] 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 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381 - 4389.
LI Yanqing, TANG Jiwei, CHE Shengguo, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381 - 4389. (in Chinese)
- [11] AERIS R, TOET S. Nutritional controls on carbon dioxide and methane emission from Carex-dominated peat[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29: 1683 - 1690.
- [12] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 992 - 999.
MENG Fanqiao, GUAN Guihong, ZHANG Qingzhong, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 992 - 999. (in Chinese)
- [13] CAO M K, PRINCE S D, LI K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536 - 546.
- [14] 李磊, 李晓慧, 刘龙强, 等. 玉米秸秆还田对盐碱地土壤碳平衡和真菌群落多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(11): 2507 - 2518.
LI Lei, LI Xiaohui, LIU Longqiang, et al. Analysis of soil carbon balance and fungal community diversity in saline-alkali soil

- under chopped straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2023,42(11):2507–2518. (in Chinese)
- [15] 夏旭,李银坤,陈敏鹏,等. 碳氮水添加对华北小麦-玉米双季轮作系统碳平衡的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020,50(2):250–260.
XIA Xu, LI Yinkun, CHEN Minpeng, et al. Effects of carbon, nitrogen and water addition on carbon balance of wheat – maize double rotation system in North China Plain[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(2): 250–260. (in Chinese)
- [16] 谭月臣, 诸葛玉平, 刘东雪, 等. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2016,36(7):2638–2649.
TAN Yuechen, ZHUGE Yuping, LIU Dongxue, et al. Effect of farmland management on N_2O and CH_4 emission from winter wheat – summer maize rotation system in North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(7): 2638–2649. (in Chinese)
- [17] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. *土壤通报*, 2010,41(4):1018–1024.
HU Huirong, MA Huancheng, LUO Chengde, et al. Forest soil organic carbon fraction and its measure methods[J]. *Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 1018–1024. (in Chinese)
- [18] 徐曼, 余添, 王富华, 等. 紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J]. *环境科学*, 2021,42(11): 5491–5499.
XU Man, YU Luo, WANG Fuhua, et al. Response of soil organic carbon content in different slope positions to fertilization management in purple soil sloping fields[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5491–5499. (in Chinese)
- [19] 齐智娟, 宋芳, 张忠学, 等. 保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2022,53(12): 380–389.
QI Zhijuan, SONG Fang, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different conservation tillage methods on soil hydrothermal condition as well as maize yield in cold black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 380–389. (in Chinese)
- [20] 李金, 任立军, 李晓宇, 等. 不同秸秆还田方式对玉米农田土壤 CO_2 排放量和碳平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(14):2738–2750.
LI Jin, REN Lijun, LI Xiaoyu, et al. Effects of different straw returning patterns on soil CO_2 emission and carbon balance in maize field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(14): 2738–2750. (in Chinese)
- [21] WU L F, LI B B, QIN Y, et al. Soil CO_2 emission and carbon budget of a wheat/maize annual double-cropped system in response to tillage and residue management in the North China Plain[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2017, 15(3): 253–263.
- [22] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, 43(4):449–528.
- [23] 佟玲, 戴永辉, 陈阳, 等. 水盐胁迫下老化生物炭对温室气体与玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2023,54(9):386–395.
TONG Ling, DAI Yonghui, CHEN Yang, et al. Effect of aged biochar on greenhouse gases and maize growth under water and salt stress[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 386–395. (in Chinese)
- [24] 李昌珍, 张婷婷, 杨改河, 等. 秸秆覆盖和施肥对关中灌区夏玉米生长后期土壤呼吸速率的影响[J]. *生态环境学报*, 2013,22(3):411–416.
LI Changzhen, ZHANG Tingting, YANG Gaihe, et al. Effect of straw mulching and fertilization on soil respiration from summer – maize farmland during later growth period in Guanzhong irrigation district[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3): 411–416. (in Chinese)
- [25] 李玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆还田方式和氮肥类型对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(7):842–849.
LI Wei, ZHANG Jiabao, ZHANG Congzhi. Effects of straw incorporation and N fertilization on soil respiration during maize growth in Huanghuaihai Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 842–849. (in Chinese)
- [26] 李新华, 董红云, 朱振林, 等. 秸秆还田方式对黄淮海区域小麦-玉米轮作制农田土壤周年温室气体排放的影响[J]. *土壤与作物*, 2019,8(3):280–287.
LI Xinhua, DONG Hongyun, ZHU Zhenlin, et al. Influences of straw returning on greenhouse gas emissions in a wheat – corn rotation farmland of Huang – Huai – Hai region[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(3): 280–287. (in Chinese)
- [27] WANG C, LIANG Y, LIU J, et al. The relationship of soil organic carbon and nutrient contents to maize yield as affected by maize straw return modes[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(22):12448.
- [28] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. *环境化学*, 2012,31(4):407–414.
PEI Shuwei, ZHANG Yuanyuan, LIU Junfeng, et al. Greenhouse gas emission under the treatments of fertilization and wheat straw returning during the maize growing seasons[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(4): 407–414. (in Chinese)
- [29] 余坤, 李国建, 李百凤, 等. 不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2020,38(3): 213–221.
YU Kun, LI Guojian, LI Baifeng, et al. Comprehensive evaluation of soil quality under different straw incorporation approaches[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 213–221. (in Chinese)
- [30] DING W X, MENG L, YIN Y F. CO_2 emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic

- manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 669 – 679.
- [31] 高大伟, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45 (增刊): 168 – 174.
GAO Dawei, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (Supp.): 168 – 174. (in Chinese)
- [32] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1934 – 1942.
HE Yunlong, QI Yuchun, PENG Qin, et al. Effects of short-term exogenous nitrogen and carbon input on soil respiration under changing precipitation pattern[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1934 – 1942. (in Chinese)
- [33] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1908 – 1914.
CAO Zhanbo, WANG Lei, LI Fan, et al. Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1908 – 1914. (in Chinese)
- [34] 郭殿坤, 尤孟阳, 何朋, 等. 不同生态系统土壤有机碳矿化的温度敏感性[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(3): 261 – 272.
GUO Diankun, YOU Mengyang, HE Peng, et al. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in different ecosystems[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(3): 261 – 272. (in Chinese)
- [35] 黄璐, 赵国慧, 李廷亮, 等. 秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 123 – 132.
HUANG Lu, ZHAO Guohui, LI Tingliang, et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(13): 123 – 132. (in Chinese)
- [36] CRESSEY E L, DUNGAIT J A J, JONES D L, et al. Soil microbial populations in deep floodplain soils are adapted to infrequent but regular carbon substrate addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 60 – 70.
- [37] 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 等. 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(6): 3000 – 3009.
LIU Zhenjie, LI Pengfei, HUANG Shiwei, et al. Effects of wheat straw-derived biochar application on soil carbon content under different tillage practices[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(6): 3000 – 3009. (in Chinese)
- [38] NSABIMANA D, HAYNES R J, WALLIS F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(2): 81 – 92.
- [39] 赵政鑫, 王晓云, 李府阳, 等. 秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 350 – 360.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, LI Fuyang, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 350 – 360. (in Chinese)
- [40] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(1): 120 – 131.
HU Falong, CHAI Qiang, GAN Yantai, et al. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 120 – 131. (in Chinese)
- [41] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 1 – 9.
LIU Yu, CHEN Minpeng, CHEN Jining. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 1 – 9. (in Chinese)
- [42] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 18 – 24.
LI Yinkun, CHEN Minpeng, XIA Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 18 – 24. (in Chinese)
- [43] GAO X, GU F, HAO W, et al. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1193 – 1203.
- [44] 熊简安然, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施氮水平下玉米农田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(1): 89 – 95.
XIONG Jiananran, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao, et al. Soil respiration and carbon balance under different nitrogen application levels in maize field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(1): 89 – 95. (in Chinese)
- [45] WANG Y, HU C, DONG W, et al. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 33 – 45.
- [46] BUYASSE P, ROISIN C, AUBINET M. Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 167: 52 – 59.