

有机肥和秸秆炭分别替代部分尿素和秸秆 降低黑土温室效应的效果

李桂花¹, 郭俊梅², 姜慧敏^{1*}, 张建峰^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:【目的】农田条件下研究用有机肥替代部分尿素、用秸秆生物炭替代秸秆对黑土有机质提升和温室气体排放的影响, 为秸秆有效还田和“固碳减排”提供理论依据。【方法】2013—2015 年在东北典型春玉米区进行田间定位试验, 所有处理采用相同方法施用同量磷钾化肥, 磷肥为磷酸氢二铵 (P_2O_5 60 kg/hm²), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 75 kg/hm²), 在施用 4 t/hm² 玉米秸秆前提下, 设置: 1) 不施尿素氮 (N0); 2) 尿素氮 100% (N 165 kg/hm², N1); 3) 尿素氮 60% + 有机肥氮 20% + 缓释氮 20% (N2)。另外, 处理 4) 除了用 2 t/hm² 玉米秸秆炭替代 4 t/hm² 玉米秸秆外, 其他与 N2 一致 (N3)。各生育期测定生态系统温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 排放量, 收获期测定作物产量和地上部生物量。【结果】N1、N2、N3 处理间玉米产量差异不显著。在等氮条件下, N1、N2、N3 处理生态系统 CO_2 排放分别为 13170、10521、9994 kg/hm², N2 和 N3 处理降低 CO_2 排放的效果显著好于 N1, N2 和 N3 处理差异不显著 ($P < 0.05$), N1、N2、N3 处理 N_2O 累积排放分别为 6.092、6.597、3.604 kg/hm², N3 降低 N_2O 累积排放的效果显著好于 N1 和 N2 处理; N1、N2、N3 处理 CH_4 累积排放分别为 0.694、1.652、-2.107 kg/hm², N3 处理降低 CH_4 累积排放的效果显著好于 N1 和 N2 处理。农田系统净碳收支 (NECB, 除土壤固碳外, 作物-土壤系统产生的碳收支, 如作物光合、呼吸和产量移出等), N2 处理为 C 766.5 kg/hm², 是碳汇, 而 N1 和 N3 处理是碳源 (C -621.3 kg/hm² 和 -673.3 kg/hm²)。当季作物尺度上用 NECB 估算的土壤固碳效应 N1、N2 和 N3 处理分别为 C -142.9、176.3、1385.1 kg/hm², N3 处理土壤固碳效应显著好于 N2 和 N1 处理。在化肥生产和运输以及农事操作等投入产生的间接碳排放量方面, 化肥氮是农业投入的主要碳源, 分别占 N1、N2 和 N3 处理农业投入的 73%、71% 和 66%。综合考虑农事操作带来的碳排放, 化学品投入带来的碳排放, 以及农田系统温室气体排放和土壤固碳的收支, 综合净温室效应 N1、N2、N3 处理分别为 2535.2、1488.2、-3769.7 CO_2 eq. kg/hm², 只有 N3 处理是碳汇。【结论】在供试黑土条件下, 用有机肥替代部分化肥增加生态系统净碳收入; 用秸秆生物炭替代秸秆显著增加土壤固碳效应、减少 N_2O 排放; 从综合净温室效应看, 有机肥与秸秆生物炭分别替代部分化肥与秸秆“固碳减排”效果最佳。

关键词: 生物炭; 有机肥; 黑土; 农田系统净碳收支; 土壤固碳效应; 净温室效应

Partial substitution of urea and maize straw with manure and straw biochar decrease net greenhouse effect in black soil

LI Gui-hua¹, GUO Jun-mei², JIANG Hui-min^{1*}, ZHANG Jian-feng^{1*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: 【Objectives】Information on long-term impacts of partial substitution of urea, maize straw with manure and straw biochar on agro-ecosystem greenhouse gas emissions is lacking under field condition.

【Methods】Partial substitution of urea, maize straw with manure and straw biochar was designed in a high fertile black soil under spring-maize in Heilongjiang Province, China from 2013 to 2015. Four treatments in

收稿日期: 2018-05-04 接受日期: 2018-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41440009, 41501322); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800402) 资助。

联系方式: 李桂花 E-mail: liguihua@caas.cn

* 通信作者 姜慧敏 E-mail: jianghuimin@caas.cn; 张建峰 E-mail: zhangjianfeng@caas.cn

quadruplicated plots were used: applying 4 t/hm² of maize straw in N0, N1 and N2, and 2 t/hm² maize straw biochar in N3; applying urea N 165 kg/hm² for N1; applying 60% urea N + 20% manure N + 20% slow-released N for N2; The same N input with N2 was applied in N3 except straw biochar replacing maize straw. Greenhouse gas (CO₂, N₂O and CH₄) emissions were measured during maize growth season. Maize yield, aboveground biomass and soil organic matter content in surface layer were measured after maize harvest. **【 Results 】** There was no significant difference in maize yield among fertilizer treatments. Under equal N input condition, CO₂ emissions in N1, N2 and N3 were 13170, 10521 and 9994 kg/hm², respectively. And N2 and N3 significantly decreased CO₂ emission compared with N1 treatment ($P < 0.05$). The cumulative N₂O emission in N1, N2 and N3 was 6.092, 6.597 and 3.604 kg/hm², respectively. And N3 significantly decreased N₂O emission compared with other treatments. The cumulative methane emissions in N1, N2 and N3 were 0.694, 1.652 and -2.107 kg/hm², respectively. And the methane emission under N3 was significantly decreased compared with other treatments. Based on net carbon budget of agro-ecosystem (NECB), N2 (C 766.5 kg/hm²) was C sink, while N1 (C -621.3 kg/hm²) and N3 (C -673.3 kg/hm²) were C sources. One-season soil C sequestration potential estimated with NECB was C -142.9, 176.3 and 1385.1 kg/hm² in N1, N2 and N3, respectively. And the soil C sequestration potential under N3 was significantly larger than those of N2 and N1. Given carbon emission from farming practices and chemical inputs included, chemical N production was the main source, which contributed 73%, 71% and 66% to CO₂ production from total agricultural management practices in N1, N2 and N3, respectively. Based on net global warming potential (Net GWP), which balancing CO₂ emission from agricultural management, chemical inputs, greenhouse gas emissions and soil C sequestration, net CO₂ emissions under N1, N2 and N3 were 2535.2, 1488.2 and -3769.7 CO₂ eq. kg/hm², respectively. This means only N3 treatment was C sink based on Net GWP.

【 Conclusions 】 In the black soil, partial substitution of chemical N with manure showed a positive potential for carbon budget in agro-ecosystem. Substitution of maize straw with straw biochar significantly increased soil C sequestration potential and decreased N₂O emission. Therefore, combining manure and straw biochar was an efficient choice for improving soil C sequestration and mitigating greenhouse effect.

Key words: biochar; manure; net ecosystem carbon budget; black soil ; soil organic C sequestration potential; net greenhouse effect

农田温室气体排放是全球温室气体的主要排放源之一, 而施肥模式对温室气体排放和土壤肥力提升影响巨大^[1]。因此, 采取合理措施, 增加土壤碳封存, 对农业可持续发展和缓解全球气候变化具有重要意义。

生物炭是“固碳减排”方面的研究热点^[2-4]。但是, 外加生物炭能否成为生态系统的碳汇, 还要取决于生物炭、微生物和土壤有机质间的相互作用。因此, 有关生物炭在“固碳减排”方面的研究得到了对立的结果^[5-8]。Spokas 等^[9]研究认为秸秆炭降低了土壤有机碳的矿化速率, 有利于积累土壤惰性碳, 降低 CO₂ 的排放; Lu 等^[10]认为秸秆炭显著降低土壤 CO₂ 释放, 但增加了秸秆炭的 CO₂ 释放, 所以总释放量与单施化肥相比没有差异; Zhang 等^[11]认为生物炭对总 CO₂ 的释放没有影响。而 Rogovska 等^[12]发现秸秆炭显著提高 CO₂ 的排放。刘玉学等^[13]认为秸秆炭改善了土壤的通透性, 减少了厌氧环境, 因此减

少了 CH₄ 的排放; 而 Feng 等^[14]认为秸秆炭改变土壤微生物群落结构, 促进产甲烷菌的生长, 因此促进 CH₄ 的排放。然而, 很多在室内培养或盆栽得到的生物炭“固碳减排”结果并没有在田间条件下得以重现^[7]。

除了生物炭外, 缓控释肥和有机肥的施用也影响温室气体的排放与有机质的提升。与尿素相比, 缓控释肥显著降低黑土玉米田和水田 CH₄ 和 N₂O 的排放量^[11, 15-16], 对 CO₂ 的排放没有影响^[15]; 而丁维军等^[17]研究表明施用缓释氮肥分别降低土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量 24.7%、3.0% 和 26.8%。另外, 有机无机配施与单施化肥相比能减少温室气体排放, 在保持产量的基础上达到“减排”和“固碳”的协同效果^[18]; 而高红军等^[19]发现, 长期有机-无机配施、秸秆还田比单施化肥显著增加黑土 CO₂ 和 N₂O 的释放, 而降低 CH₄ 的释放。董玉红等^[20]也发现有机肥施用抑制 CH₄ 的排放, 却增加 CO₂ 的排放通量。

总之, 因有机物料 (有机肥、秸秆、秸秆炭) 以及土壤和气候条件的差异, 温室气体释放结果也不同。而在等氮条件下, 有关有机肥、生物炭和缓释肥结合对高肥力黑土温室气体释放、有机质提升方面研究较少, 因此本文在田间原位情况下, 通过三年定位试验, 研究不同有机物料和控释肥施用对温室气体排放和土壤肥力的潜在影响, 为黑土“减排固碳”提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验地点位于哈尔滨市道外区民主乡黑龙江省农科院现代农业科技示范园区 (东经 126°48'55", 北纬 45°49'44"), 海拔 130 m, 属于寒温带大陆季风气候, 年均气温 3.6℃, 年降水量 486.4 mm, 无霜期 135d。土壤类型为黑土含砂粒 13%、粉粒 63% 和粘粒 24%。试验前耕层土壤理化性质: 有机质 28.7 g/kg、全氮 1.14 g/kg、全磷 0.39 g/kg、全钾 29.5 g/kg、碱解氮 85.19 mg/kg、有效磷 30.00 mg/kg、速效钾 185.98 mg/kg、pH 6.85。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 5 月—2015 年 10 月在春玉米地进行。在施用玉米秸秆 4 t/hm² 前提下设置: 1) 不施氮对照 (N0); 2) 100% 尿素氮 (N 165 kg/hm², N1); 3) 60% 尿素氮 + 20% 有机肥氮 + 20% 缓释氮 (N2); 4) 用 2 t/hm² 玉米秸秆炭替代 4 t/hm² 玉米秸秆, 其他用量与 N2 相同 (N3)。每个处理 4 次重复, 随机区组排列, 小区面积 60 m²。所有处理施磷量 60 kg/hm² (磷酸氢二铵) 和施钾量为 75 kg/hm² (硫酸钾)。

尿素按基肥 (4 月 28 日) 和追肥 (7 月 1 日) 2 : 1 施入, 有机物料、缓释肥和磷钾肥全部作为底肥施用。缓释肥为包膜尿素 (氮含量 41.8%), 由中国科学院南京土壤研究所提供。有机肥由江苏田娘农业科技有限公司生产 (含水量 30%、有机质 47.8%、氮 1.86%), 替代量参考前期研究结果^[1]。玉米秸秆炭 (500℃ 厌氧热解) 由黑龙江省农科院提供 (全氮 6.1 g/kg、全磷 5.17 g/kg、全钾 22.8 g/kg、pH 9.07、碳 77.1%)。玉米品种为当地主栽品种龙单 42, 播种量为 25 kg/hm²。

1.3 田间管理

播种后一周, 用金都尔乳油 (975 mL/hm²) 与 2, 4-D 丁酯乳油 (1125 mL/hm²) 混合施用封闭除草; 到玉米 4~5 叶时喷施耕杰除草剂 (1575 mL/hm²)。

机器中耕两次, 人工收获玉米。玉米收获后, 除 N3 处理外, 留一半的秸秆 (4 t/hm²) 用粉碎机粉碎, 人工回田。秋季翻地, 再用旋耕起垄机同时起垄。所有耗油量用实测值计算。

1.4 样品采集和测试

成熟期采集 0—20 cm 耕层土壤, 每个小区采集 5 个点混匀, 用四分法混合成一个样品, 风干、研磨、过筛。参照《土壤农化分析》^[21] 测定基本理化性质。温室气体 (N₂O、CH₄ 和 CO₂) 用静态暗箱 (长 60 cm、宽 60 cm, 高 80 cm + 70 cm) 原位采集, 气相色谱法测定^[22]。气体采集从基肥和追肥后第二天起, 每天采集一次, 连续 7 天, 之后一周采集一次。采样时间为上午 9—11 点, 遇到雨天第二天采样。每次采样分别在 0、5、10、15、20 min 采集, 共 5 次, 第一次采集箱外周边气体, 同时测定箱温、土温和气温。

温室气体通量公式为:

$$F = k \times V/A \times M/V_o \times T_o/T \times P/P_o \times dc/dt$$

式中: F 为气体排放通量 [mg/(m²·h)]; k 为量纲换算系数; V 为气室体积; A 为底座面积; M 为目标气体摩尔质量; V_o 为标准状况下气体的摩尔体积; T_o 为标准状况下绝对气温; T 为箱内温度; P 箱内气压; P_o 标准状况下绝对气压; dc/dt 为采集箱内气体浓度变化速率。将整个生育期测定结果进行累加, 并进行单位换算, 计算出生态系统温室气体总排放量。

1.5 当季作物尺度土壤固碳效应的计算

当季作物尺度土壤固碳效应 (δ SOC) 用农田生态系统净碳收支 (NECB) 进行估算^[22, 23]。

$$\text{NECB} = \text{NEP} - \text{H} - \text{CH}_4 + \text{有机肥碳}$$

$$\text{NEP} = \text{GPP} - \text{Re}$$

$$\text{GPP} = \text{NPP}/0.58$$

$$\text{NPP} = \text{NPP}_{\text{籽粒}} + \text{NPP}_{\text{秸秆}} + \text{NPP}_{\text{根茬}} + \text{NPP}_{\text{凋落物}} + \text{NPP}_{\text{根系分泌物}}$$

式中: NEP 表示生态系统净生产力; H 表示农田收获物移出农田系统的总碳量; GPP 表示总初级生产力; Re 表示生态系统呼吸; NPP 表示作物生态系统净初级生产力; $\text{NPP}_{\text{根茬}}$ (根茬碳) 按照种植密度 60000 株/hm² 条件下, 春玉米根冠比为 0.075^[24] 计算根质量, 再按成熟期春玉米根系的碳含量为 45%^[25] 计算根茬碳含量; $\text{NPP}_{\text{根系分泌物}}$ (作物根系沉积 C) 按光合作用同化碳的 5.3% 计算^[26]; $\text{NPP}_{\text{凋落物}}$ (作物凋落物 C) 按地上部和根系碳的 5% 计算^[27]; 玉米籽粒碳含量 ($\text{NPP}_{\text{籽粒}}$) 用产量的 45% 计算; 玉米秸秆碳含量 ($\text{NPP}_{\text{秸秆}}$) 用秸秆重量的 40% 计算。有机肥 C 投入量

是 C 491 kg/hm²。

$\delta\text{SOC} = \text{NECB} \times 0.230 + \text{秸秆炭的碳含量}$
式中: 0.230 是 NECB 转化为旱田土壤有机碳的表现平均转换速率^[22]; 秸秆炭的碳含量用 77% 计算。

1.6 综合净温室效应的计算

综合净温室效应 (Net GWP) = $\text{CH}_4 \times 28 + \text{N}_2\text{O} \times 265 + E_0 + E_i - \delta\text{SOC} \times 44/12$ ^[23]

式中: E_0 指农事操作带来的碳排放; E_i 指化学品投入带来的碳排放, 具体农事碳排放系数参照表 1。

温室气体强度 (GHGI) 为综合净温室效应 (Net GWP) 与玉米产量的比值。

表 1 各农业投入碳排放系数
Table 1 Carbon emission coefficient for agricultural management

项目 Item	碳排放系数 (kg/kg) C emission coefficient	文献 Reference
柴油 Diesel oil	0.94	[28]
种子 Seed	0.11	[29]
N	1.74	[30]
P ₂ O ₅	0.20	[28–29]
K ₂ O	0.15	[28–29]
除草剂 Weedicide	4.93	[29]

1.7 数据的统计分析

试验结果用 SigmaPlot10.0 进行方差分析, 不同处理间采用最小显著差数法 (LSD 法) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生态系统 CO₂、N₂O、CH₄ 气体的排放

不同施肥处理在春玉米生育期内的气体排放规律具有一致性。从累积排放量看 (表 2), N1、N2、N3 处理生态系统 CO₂ 排放为 N3≈N2 < N1, N2、N3 处理显著低于 N1 处理 ($P < 0.05$), N2 和 N3 处理差异不显著, N2 和 N3 处理降低 CO₂ 排放的效果显著好于 N1 处理; N₂O 累积排放各处理为 N1≈N2 > N3, N3 处理降低 N₂O 累积排放的效果显著好于 N1 和 N2 处理; CH₄ 累积排放各处理表现为 N1≈N2 > N3, N3 各处理降低 CH₄ 累积排放的效果显著好于 N1 和 N2 各处理 ($P < 0.05$)。

2.2 当季作物尺度农田生态系统净碳收支平衡

从地上部生物量光合固碳、移出碳 (如玉米产

表 2 不同施肥处理玉米生育期生态系统 CO₂、N₂O 和 CH₄ 累计排放量 (kg/hm²)

Table 2 Cumulative greenhouse gas emissions during maize growth period under different treatments

处理 Treatment	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
N0	10320.9 ± 885.1 b	2.020 ± 0.202 c	0.884 ± 0.299 a
N1	13710.3 ± 884.1 a	6.092 ± 0.216 a	0.694 ± 0.264 a
N2	10521.5 ± 608.3 b	6.597 ± 0.696 a	1.652 ± 0.876 a
N3	9994.1 ± 331.5 b	3.604 ± 0.138 b	-2.107 ± 0.552 b

注 (Note): N0、N1、N2 处理施 4 t/hm² 玉米秸秆, N3 施玉米秸秆生物炭 2 t/hm²; N1—尿素 N 165 kg/hm²; N2—60% 尿素 N + 20% 有机肥 N + 20% 缓释 N; N3 除了施用秸秆生物炭外, 施氮量与 N2 相同; 四次重复均值 ± 标准方差; 数值后不同字母表示处理间差异达到显著水平。Applying 4 t/hm² of maize straw in N0、N1、N2, and 2 t/hm² maize straw biochar in N3; N1—Urea N165 kg/hm²; N2—60% Urea N + 20% manure-N + 20% slow-released N; Same N input with N2 in N3 except straw biochar; Values are means ± standard variation; Values followed by different letters in the column mean significant difference at 5% level.

量)、外加有机物料碳和生态系统碳呼吸 (CO₂) 收支结果看, 当季作物尺度生态系统净碳收支 (NECB) 差异显著 (表 3, $P < 0.05$), N1、N2 和 N3 处理的生态系统净碳收支分别为 -621.3、766.5、-673.3 kg/hm², N2 处理净碳收支结果显著高于 N1 和 N2 处理。因秸秆炭直接作为土壤碳的增量来计算, 因此, 秸秆炭处理 (N3) 对生态系统净碳收支平衡的影响显著低于有机肥处理 (N2)。

2.3 当季作物尺度农田土壤固碳效应和综合净温室效应

农业投入 (农事操作和化学品投入) 所带来的碳排放见表 4。农机损耗的柴油包括自身燃烧和生产和运输过程中产生的 CO₂。化学品包括生产和运输产生的 CO₂ 排放。农事操作产生的碳排放为 61.3 kg/hm², 氮肥生产和投入是主要的碳排放源, N1、N2、N3 处理分别占农业投入的 73%、71% 和 66%。

从表 5 看出, 施肥处理间 (N1、N2 和 N3) 玉米产量无显著差异。三年不同施肥处理间土壤有机质含量差异不显著 (数据略)。如果把秸秆炭直接作为土壤固碳增量来计算, 则利用农田生态系统净碳收支平衡值 (NECB) 估算的当季土壤固碳效应分别为 C -142.9 kg/hm² (N1)、176.3 kg/hm² (N2) 和 1385.1 kg/hm² (N3)。说明施用有机肥处理 (N2 和 N3) 的土壤固碳效应显著优于化肥 (N1) 和不施肥 (N0), 且生物炭 (N3) 处理的土壤固碳效应最好。进一步从农事碳投

入、农田生态系统温室气体排放 (CH_4 和 N_2O 与 CO_2 应, 则只有 N3 处理 ($-3769.7 \text{ CO}_2 \text{ eq. kg/hm}^2$) 是碳的等效效应)、土壤固碳效应角度分析综合净温室效 汇, 其他三个处理的综合净温室效应都是碳源。如

表 3 当季作物尺度农田生态系统净碳收支平衡 (C kg/hm^2)
Table 3 Net carbon budget of agro-ecosystem in one growth season

处理 Treatment	籽粒 C Grain C	秸秆 C Straw C	根茬 C Root C	根沉积 C Rhizodeposit C	凋落物 C Litter C	GPP	肥料 C Fertilizer C	净碳收支 NECB
N0	2867.5 b	3217.5 a	486.3 b	340.7 b	328.5 b	12484.3 b	1600	-58.8 b
N1	4665.3 a	3371.2 a	634.3 a	450.0 a	433.5 a	16473.2 a	1600	-621.3 c
N2	4521.9 a	3646.5 a	646.8 a	457.4 a	440.8 a	16747.3 a	2091	766.5 a
N3	4687.8 a	3572.9 a	653.0 a	462.6 a	445.7 a	16934.5 a	491	-673.3 c

注 (Note): N0、N1、N2 处理施 4 t/hm²玉米秸秆, N3 施玉米秸秆生物炭 2 t/hm²; N1—尿素 N 165 kg/hm²; N2—60% 尿素 N + 20% 有机肥 N + 20% 缓释 N; N3 除了施用秸秆生物炭外, 施氮量与 N2 相同; 四次重复均值 $\pm$ 标准方差; 数值后不同字母表示处理间差异达到显著水平。Applying 4 t/hm² of maize straw in N0、N1、N2, and 2 t/hm² maize straw biochar in N3; N1—Urea N 165 kg/hm²; N2—60% Urea N + 20% manure-N + 20% slow-released N; Same N input with N2 in N3 except straw biochar; Values are means $\pm$ standard variation; Values followed by different letters in the column mean significant difference at 5% level.

表 4 农事操作和化学品投入所产生的碳排放量
Table 4 Amount of carbon emission from farming practices and chemical inputs

农事操作 Farming practice	燃油量 (L/hm ²) Diesel consume	碳排放量 (C kg/hm ²) C emission	化学品投入 Chemical input	用量 Input amount	碳排放量 (C kg/hm ²) C emission
翻地 Ploughing	14.74	13.90	种子 Seed	25 (kg/hm ²)	2.75
旋耕 Rotary tillage	6.19	5.80	N (尿素 Urea)	165 (kg/hm ²)	287.10
起垄 Ridge forming	4.42	4.20	N (缓控释肥 Control-released)	33 (kg/hm ²)	86.30
播种 Sowing	6.26	5.90	P ₂ O ₅	60 (kg/hm ²)	12.00
除草 Weeding	2.09	2.00	K ₂ O	75 (kg/hm ²)	11.25
2 次中耕 Twice intertill	9.23	8.70	除草剂 Herbicide	3.675 (L/hm ²)	18.10
追肥 Topdressing	6.26	5.90	生物炭 Biochar	2000 (kg/hm ²)	30.20
秸秆移除粉碎 Straw removing and smashing	16.30	15.30			

注 (Note): 生产生物炭 CO_2 排放量按 CO_2 15.1 kg/t 计算; 缓控释肥按尿素的 1.5 倍估算。CO₂ emission for biochar production is calculated by CO_2 15.1 kg/t^[31]; CO₂ emission for production of slow control-released fertilizer is calculated by 1.5 times of urea N fertilizer.

表 5 农田土壤固碳效应、综合净温室效应和温室气体强度
Table 5 Soil organic C sequestration potential, net global warming potential and greenhouse gas intensity

处理 Treatment	玉米产量 (kg/hm ²) Maize yield	δSOC (C kg/hm ²)	Net GWP (CO ₂ eq. kg/hm ²)	GHGI [CO ₂ eq. kg/kg, grain]
N0	6732.4 $\pm$ 1108.6 b	-13.5 $\pm$ 1.3 c	702.6 $\pm$ 67.2 c	0.11 $\pm$ 0.04 b
N1	10367.3 $\pm$ 934.2 a	-142.9 $\pm$ 7.5 d	2535.2 $\pm$ 528.3 a	0.25 $\pm$ 0.06 a
N2	10048.7 $\pm$ 441.3 a	176.3 $\pm$ 15.4 b	1488.2 $\pm$ 128.9 b	0.15 $\pm$ 0.02 b
N3	10417.4 $\pm$ 1321.9 a	1385.1 $\pm$ 26.6 a	-3769.7 $\pm$ 105.3 d	-0.36 $\pm$ 0.01 c

注 (Note): N0、N1、N2 处理施 4 t/hm²玉米秸秆, N3 施玉米秸秆生物炭 2 t/hm²; N1—尿素 N 165 kg/hm²; N2—60% 尿素 N + 20% 有机肥 N + 20% 缓释 N; N3 除了施用秸秆生物炭外, 施氮量与 N2 相同; 四次重复均值 $\pm$ 标准方差; 数值后不同字母表示处理间差异达到显著水平。Applying 4 t/hm² of maize straw in N0、N1、N2, and 2 t/hm² maize straw biochar in N3; N1—Urea N 165 kg/hm²; N2—60% Urea N + 20% manure-N + 20% slow-released N; Same N input with N2 in N3 except straw biochar; Values are means $\pm$ standard variation; Values followed by different letters in the column mean significant difference at 5% level.

果考虑玉米产量, 则温室气体强度 (GHGI, 综合净温室效应/作物产量) 三个处理的大小为 $N1 > N0 \approx N2 > N3$ 。说明 $N3$ 处理的综合净温室效应和温室气体强度最小。

3 讨论

3.1 不同施肥对农田综合净温室效应的影响

以现阶段低碳农业评价指标^[23]看, 只有 $N3$ 处理是碳汇, 其他是碳源 (表 5)。用有机肥替代部分化肥 ($N2$ 和 $N3$ 处理) 显著减少 CO_2 排放。用生物炭 ($N3$ 处理) 替代秸秆 ($N2$ 处理) 显著降低 N_2O 排放^[34], 增加土壤固碳效应, 从而降低综合净温室效应和温室气体强度。说明用有机肥和生物炭 ($N3$) 替代部分化肥和秸秆的“固碳减排”效果最佳。

东北黑土玉米产量高, 连续三年不施氮肥的玉米平均产量达 6700 kg/hm^2 。因此, 不同处理的 NPP 也较大 ($C 7240 \sim 9820 \text{ kg/hm}^2$)。而东北玉米季前期温度低, 生态系统 CO_2 释放少, 整个生育期释放量也相对较低, 所以施肥处理的 NEP ($C 5800 \sim 7000 \text{ kg/hm}^2$) 相对较高。这与战领等^[32]通过通量观测数据得到的相近纬度美国施肥玉米地的 NEP ($C 5600 \sim 6200 \text{ kg/hm}^2$) 较接近。

虽然本文参照的 NPP/GPP 比值 (0.58) 是水稻-小麦系统的比值^[23], 但 GPP 计算结果 ($C 12000 \sim 17000 \text{ kg/hm}^2$) 与战领等^[32]通过通量观测数据得到的相近纬度的美国玉米地 GPP 结果 ($C 13200 \sim 16400 \text{ kg/hm}^2$) 非常相近。说明黑土区玉米系统碳利用效率也接近这个值。Zhang 等^[33]通过 MODIS 数据与生态产量模型的结合, 计算出北半球作物系统 NPP/GPP 的比值为 0.5399。

3.2 有机物料对土壤肥力和 CO_2 气体排放的影响

从氮转化角度, 本试验结果已经表明, 用有机肥、缓释肥以及秸秆炭替代部分化肥氮, 不仅可以提高氮肥利用率, 降低 N_2O 环境污染风险, 而且改善土壤肥力的可持续性^[34]。然而有机物料的投入还会影响土壤原有有机质的分解, 即产生激发效应。本研究表明, 用有机肥替代部分化肥显著降低生态系统 CO_2 释放, 而且有机肥 ($N2$) 或有机肥 + 生物炭 ($N3$) 显著增加当季尺度生态系统净碳收支或土壤固碳效应。

黑土长期定位试验表明, 有机-无机配施比化肥 + 秸秆显著增加土壤肥力^[35]。本文碳平衡结果也表明有机肥和有机肥 + 生物炭处理比化肥 + 秸秆处理增加

土壤固碳效应。原因可能是有机肥中的养分比秸秆更均衡。Kirkby 等^[36]发现如果秸秆还田时, 配施一定比例的无机氮、磷和硫 (使 $C:N:P:S$ 形成一个合适的比例), 则显著增加土壤中耐分解碳的组分, 从而增加土壤碳的封存。

另外, 生物炭的加入对土壤有机质的分解可以产生正激发^[5]、负激发^[5, 8]或无显著作用^[7, 37]。产生这种差异的原因可能是生物炭对土壤有机质的激发效应受生物炭种类^[9]、炭化温度^[38]和土壤类型^[5]的影响。本研究表明, 粘粒含量高的黑土, 用秸秆炭 ($N3$ 处理) 替代秸秆 ($N2$ 处理) 对 CO_2 的排放没有显著影响, 而 Fang 等^[5]发现生物炭的激发效应与粘粒含量呈负相关。通常情况下, 粘粒吸附生物炭中的易分解有机物, 从而减少生物炭所引发的激发效应^[5]。但是如果存在有机肥, 它可以与粘粒形成稳定的有机-矿物结构, 从而保护有机肥、土壤有机质的分解, 但同时减少粘粒对易分解生物炭组分的吸附, 促进生物炭的分解, 最后达到增减平衡的结果, 对 CO_2 的排放没有产生显著影响。或者说有机肥的存在掩盖了粘粒与生物炭间的作用, 这从微生物量碳角度也可以发现存在有机肥的情况下, 不论是配施生物炭还是秸秆, $N3$ 和 $N2$ 处理的微生物量碳没有差异。说明只要土壤养分均衡, 微生物更多地将底物加以利用, 从而增加碳的封存, 而与秸秆或秸秆炭无关。另外一些试验发现, 随着外加生物炭时间的增加, 激发效应逐步由正激发变成负激发^[38]。但本研究并没有表现出相同的结果, 原因可能是施入生物炭后, 土壤温度持续较低, 影响了微生物活性, 而且作物生长较慢, 根系呼吸不活跃。

本质上说, 有机肥含有较多易分解成分, 因此与化肥处理 ($N1$) 相比, $N2$ 和 $N3$ 处理应当显著增加 CO_2 释放, 但因有机肥养分更加均衡, 所以微生物对碳底物利用率高, 因此, 与化肥 + 秸秆还田相比, 减少了 CO_2 的释放, 这与高红军等的结果一致^[19]。同时, 因秸秆炭的存在, 吸附了易分解底物和土壤有机物^[10], 所以在低温环境条件下, 快速生长型微生物 (r-strategist) 无法快速利用底物, 并参与 SOM 的分解, 从而减缓了 CO_2 的释放。而在玉米生长活跃期, 微生物分解有机物主要是为了供应作物生长 (竞争能力低于作物), 因此, 主要以生长缓慢型 (k-strategist) 微生物起作用, 以耐分解的 SOM 和生物炭为底物, 从而减缓了 CO_2 的释放。另外, 生物炭高温 (> 500) 热解, 也利于形成难分解的生物炭, 从而减少正激发的产生, 减少 CO_2 释放^[38]。

3.3 有机物料对 CH₄ 气体排放的影响

旱地土壤中产生的 CH₄ 一般情况下在未被排放到大气中时就被甲烷氧化菌氧化生成 CO₂, 因此旱地土壤中 CH₄ 的排放通量一般较低, 土壤含水量、通气性和土壤中易分解有机物含量均能对 CH₄ 的排放产生影响。本研究结果表明, 与有机肥相比, 生物炭的投入, 减少了 CH₄ 的产生。原因可能是生物炭通过自身多孔结构和对有机物质的高度亲和能力, 减少甲烷细菌的反应底物^[39]。另外可能是生物炭产生微生物抑制剂, 降低微生物活性, 从而减少 CH₄ 的产生^[9]。还有可能是秸秆炭通过调节土壤通气性和氧化还原电位等来减少 CH₄ 的排放^[40]。

4 结论

与施用 100% 尿素氮 (N1 处理) 相比, 用有机肥氮替代部分尿素氮 (N2 和 N3 处理) 能减少 CO₂ 排放 25% 和 27%; 用秸秆生物炭 (N3 处理) 替代秸秆 (N2 和 N1 处理) 可降低 N₂O 排放 45% 和 40%, 增加土壤固碳效应 8 倍和 10 倍, 所以从综合净温室效应看, 有机肥与生物炭配施是“固碳减排”的最有效措施。

参 考 文 献:

- [1] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269–273.
Dong H M, Li Y E, Tao X P, *et al.* China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269–273.
- [2] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt E, *et al.* Charred organic carbon in German chernozemic soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(2): 351–365.
- [3] Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, *et al.* Charcoal carbon in U. S. agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1249–1255.
- [4] Lehmann J, Czimczik C, Laird D, *et al.* Stability of biochar in soil[A]. Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*[C]. London: Earthscan, 2009. 183–206.
- [5] Fang Y Y, Singh W, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 80: 136–145.
- [6] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395–419.
- [7] Mukherjee A, Lal R, Zimmerman A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 26–36.
- [8] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8: 512–523.
- [9] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 179–193.
- [10] Lu W W, Ding W X, Zhang J H, *et al.* Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 76: 12–21.
- [11] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351: 263–275.
- [12] Rogovska N, Fleming P, Laird D, *et al.* Greenhouse gas emissions from soils as affected by addition of biochar[A]. Houston, USA: Joint Annual Meeting of ASA, CSSA and SSSA, 2008.
- [13] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失及温室气体排放特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2011.
Liu Y X. Effect of biochar on the characteristic of nitrogen loss and greenhouse gas emission[D]. Hangzhou: MS Thesis of Zhejiang University, 2011.
- [14] Feng Y, Xu Y, Yu Y, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46: 80–88.
- [15] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3227–3238.
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3227–3238.
- [16] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 314–323.
Wang B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314–323.
- [17] 丁维军, 陶林海, 吴林, 等. 新型缓释尿素对削减温室气体、NH₃排放和淋溶作用的研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(10): 2840–2847.
Ding W J, Tao L H, Wu L, *et al.* Effects of controlled release urea on greenhouse gases, NH₃ emissions and eluviation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2840–2847.
- [18] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田 N₂O 排放及净温室气体的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2502–2510.
Zhai Z, Wang L G, Li H, *et al.* Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2502–2510.
- [19] 高洪军, 张卫建, 彭畅, 等. 长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 422–430.
Gao H J, Zhang W J, Peng C, *et al.* Emission characteristics of greenhouse gas from maize field of black soil region under long-term

- fertilization[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 422–430.
- [20] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1303–1307.
Dong Y H, Ouyang Z. Effects of organic manures on CO₂ and CH₄ fluxes of farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1303–1307.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Soil and agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [22] Zhang X Y, Fan C H, Ma Y C, *et al.* Two approaches for net ecosystem carbon budgets and soil carbon sequestration in a rice-wheat rotation system in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100: 301–313.
- [23] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1433–1440.
Xiong Z Q, Zhang X X. Key role of efficient nutrient application in low carbon agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1433–1440.
- [24] 王春雷, 冯晔, 曹霞, 等. 深松和密度互作对北方春玉米生长特性的影响[J]. *东北农业科学*, 2016, 41(4): 27–31.
Wang C L, Feng Y, Gao X, *et al.* Effect of interaction between deep scarification with density on spring corn growth characteristics in Northern China[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(4): 27–31.
- [25] 芦思佳. 施肥对黑土有机碳组分及碳收支的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2011.
Lu S J. Impact of fertilization on the component and budget of black soil organic carbon[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2011.
- [26] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(2): 280–286.
Yang L F, Cai Z C. Effect of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon[J]. *Acta Scientia Circumstantiae*, 2006, 26(2): 280–286.
- [27] Kimura M, Murase J, Lu Y. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄)[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(9): 1399–1416.
- [28] Lal R. Carbon emissions from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30: 981–990.
- [29] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1): 217–232.
- [30] 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 H H, Yan C R, Zhang Y Q, *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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 240–247.
- [31] 成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用“碳足迹”方法评估小麦秸秆及其生物炭添加对农田生态系统净碳汇的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3): 604–612.
Cheng G, Zhang A F, Wang X D, *et al.* Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using “carbon footprint” method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 604–612.
- [32] 战领, 杨汉波, 雷慧闽. 基于通量观测数据的玉米碳交换量及水分利用效率分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 37(s1): 88–93.
Zhan L, Yang H B, Lei H M. Analysis of corn water consumption, carbon assimilation and ecosystem water use efficiency based on flux observations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 37(s1): 88–93.
- [33] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, *et al.* Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23: 144–155.
- [34] 姜慧敏, 郭俊娟, 刘晓, 等. 不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 933–941.
Jiang H M, Guo J M, Liu X, *et al.* Effects of combined application of nitrogen from different source on nitrogen utilization of spring maize and sustainability of soil fertility in Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 933–941.
- [35] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4649–4659.
Zha Y, Wu X P, Zhang H M, *et al.* Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4649–4659.
- [36] Kirkby C A, Richardson A E, Wade J L, *et al.* Inorganic nutrients increase humification efficiency and C-sequestration in an annually cropped soil[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(5): e0153698.
- [37] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, *et al.* Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45: 113–124.
- [38] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1169–1179.
- [39] Bossio D A, Horwath W R, Muters R G, *et al.* Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(9): 1313–1322.
- [40] 杨敏. 水稻秸秆生物质炭在稻田土壤中的稳定性及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2013.
Yang M. Stability of rice straw-derived biochar and its mechanism in paddy soil[D]. Hangzhou: MS Thesis of Zhejiang University, 2013.