

引用格式:

杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 赵秋梅, 张涛. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 75–81.

YANG S M, HE T B, YANG L, ZHAO Q M, ZHANG T. Effects of straw and biochar mulching on the soil nutrients and greenhouse gas emissions[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(1): 75–81.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响

杨世梅¹, 何腾兵^{1,2,3}, 杨丽¹, 赵秋梅¹, 张涛^{2,3*}

(1.贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳 550025; 3.贵州省山地畜禽养殖污染控制与资源化技术工程实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 设不添加秸秆和生物炭的对照(CK)、全量秸秆覆盖(S10)、半量秸秆覆盖(S5)、全量生物炭覆盖(B10)、半量生物炭覆盖(B5)和半量秸秆+半量生物炭覆盖(BS5)共6个处理, 其中全量、半量覆盖量分别为 11.6、5.8 t/hm², 开展室内原状土培养试验, 于 20 °C 恒温培养箱中, 预培养 7 d 后正式培养 32 d, 研究玉米秸秆及其生物炭覆盖对土壤养分和温室气体排放的影响。结果表明: 在短期的室内培养条件下, 秸秆与生物炭覆盖对土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷的质量分数影响并不显著; BS5 土壤 pH 显著高于 S10 和 B5 的; 与 CK 相比, S10、S5 和 B5 显著降低了土壤中速效钾质量分数; 秸秆和生物炭覆盖均提高了土壤 CO₂ 累积排放量, BS5 的 CO₂ 累积排放量显著高于 CK 和 S10 的; 与 CK 相比, B5 的 CH₄ 累积排放量降低了 93.39%, 而 BS5 的 CH₄ 累积排放量增加了 21.50%; 秸秆和生物炭添加均有降低 N₂O 累积排放量的趋势, 其中秸秆或生物炭单独覆盖处理的 N₂O 累积排放量均为负值, 即土壤由 N₂O 排放源转为汇, S10 的 N₂O 累积排放量显著低于 CK 的, 两者混合覆盖土壤虽有一定的降低效果, 但仍为 N₂O 的排放源; 所有处理均具有潜在温室效应, 随秸秆或生物炭覆盖量增加全球增温潜势(GWP)呈下降趋势, 以 BS5 的 GWP 最高, 显著高于 CK 和 S10 的。可见, 半量秸秆+半量生物炭覆盖导致的潜在温室效应最为明显, 不利于生态环境的友好发展, 在实践中应根据生产实际对秸秆的利用方式及使用量进行选择。

关键词: 玉米秸秆; 生物炭; 二氧化碳; 甲烷; 氧化亚氮; 土壤养分; 全球增温潜势

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)01-0075-07

Effects of straw and biochar mulching on the soil nutrients and greenhouse gas emissions

YANG Shimei¹, HE Tengbing^{1,2,3}, YANG Li¹, ZHAO Qiumei¹, ZHANG Tao^{2,3*}

(1.College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2.Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3.Guizhou Engineering Key Laboratory for Pollution Control and Resource Reuse Technology of Mountain Livestock Breeding, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Six treatments including control(CK) without adding straw and biochar, full straw mulching(S10), half straw mulching(S5), full biochar mulching(B10), half biochar mulching(B5) and half straw+half biochar mulching(BS5) were set up for soil test. The amounts of full and half mulching were 11.6 and 5.8 t/hm², respectively. This indoor undisturbed soil culture test in incubator at 20 °C to study and the effects of corn straw and biochar mulching on yellow soil nutrients

收稿日期: 2020-08-24

修回日期: 2022-01-16

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]119); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字(2017)67); 贵州省科学技术厅科研机构服务企业行动计划项目(黔科合服企[2018]4007(006)); 贵州省科学技术厅基础条件平台建设项目(黔科合平台人才[2019]5701 号)

作者简介: 杨世梅(1994—), 女, 贵州三穗人, 硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究, gdyangshimei@163.com; *通信作者, 张涛, 博士, 副教授, 主要从事生态系统碳循环研究, zhangtaoeco@outlook.com

and greenhouse gas emissions. The formally cultivated lasted for 32 d after pre-cultivated for 7 d. The results showed that under short-term indoor cultivation conditions, straw and biochar mulching had no significant effect on the mass fractions of soil organic matter, total nitrogen, alkaline hydrolyzed nitrogen and available phosphorus. The soil pH of BS5 was significantly higher than those of S10 and B5. Compared with CK, S10, S5 and B5 significantly reduced the mass fractions of soil available potassium. Both straw and biochar mulching increased soil CO₂ cumulative emissions, and the CO₂ cumulative emissions of BS5 were significantly higher than those of CK and S10. Compared with CK, the cumulative emission of CH₄ in B5 decreased by 93.39%, while the cumulative emission of CH₄ in BS5 increased by 21.50%. Both straw and biochar additions tended to reduce the N₂O cumulative emissions, and the N₂O cumulative emissions of the treatments covered with straw or biochar alone were all negative, which indicated the soil changed from a N₂O emission source to a sink, and the N₂O cumulative emission of S10 was significantly lower than that of CK. The straw and biochar mixed addition also tended to reduce the N₂O cumulative emissions, but it was still the emission source of N₂O. All treatments had potential greenhouse effect, and the global warming potential(GWP) decreased with the increase of the amounts of straw or biochar mulching. The GWP of BS5 was the highest, which was significantly higher than those of CK and S10. The potential greenhouse effect caused by the half straw+half biochar mulching treatment achieved to the summit, which is not friendly to the development of the ecological environment. Thus, straw utilization mode and usage amount should be optimized according to the actual situation in practice.

Keywords: corn straw; biochar; CO₂; CH₄; N₂O; soil nutrients; global warming potential

自 20 世纪以来, 全球平均地表温度持续升高, 模型预测结果显示, 从 2018 年到 2100 年全球平均地表温度将升高 0.3 ~ 4.8 °C^[1], 气候变暖严重影响自然、经济和人类生活, 已成为全球关注的问题^[2]。CO₂、N₂O、CH₄ 作为三大温室气体, 其在大气中的浓度不断增加是导致温室效应并造成全球变暖的关键因素^[3]。农业活动是温室气体的主要来源之一, 在全球农业温室气体排放中, 来源于土壤的 CO₂ 占 15%, CH₄ 占 47%, N₂O 占 84%^[4]。农田土壤温室气体的排放受到多方面的影响, 如土壤理化性质、水分、温度、秸秆还田量及还田方式等^[5-6]。在确保粮食生产安全的同时, 找到有效的途径降低温室气体排放, 从而改善全球气候变暖及环境恶化成为当今世界所面临的共同挑战。

中国作为农业大国, 秸秆资源十分丰富, 2016 年中国秸秆产量超过 8×10^8 t^[7], 传统秸秆处理方式主要为就地焚烧或直接丢弃在田间, 这不仅造成了一系列的环境问题, 也是对资源的一种浪费。生物炭是由生物质在厌氧状态下经过高温热解碳化而产生的稳定且富含碳的固态物。生物炭独特的多孔结构和表面化学特性使其成为一种优良的有机污染物吸附剂^[8]。大量研究^[9-12]认为, 秸秆还田和施用生物炭能够改善土壤理化性质, 提高土壤蓄水保墒能力, 减少硝酸盐的淋失, 提高作物的产量。有研究^[5-6, 13]表明, 秸秆还田会导致温室气体排放的增

加。与秸秆还田相反, 生物炭施用能抑制农田土壤温室气体的排放^[5, 9, 14]。保护性耕作措施中, 秸秆还田能促进土壤呼吸, 如果将秸秆制成生物炭则对 CO₂ 排放影响很小^[15]。生物炭能显著降低蔬菜土壤 N₂O 的年累积排放量, 同时降低反硝化酶活性, 显著提高蔬菜产量, 并通过提高土壤碳含量和阳离子交换容量改善土壤肥力^[16]。也有研究^[17]认为, 秸秆还田能减少温室气体的排放。在保证作物产量的同时, 不以牺牲生态效益为代价, 寻求合理的秸秆利用方式及施用量, 使其发挥出最大的优势逐渐受到大家的关注。

本研究中, 对贵州最为常见的长期种植玉米的典型旱地土壤进行玉米秸秆和生物炭还田模拟试验, 探究不同处理条件下土壤的肥力状况和温室气体排放规律, 以期探明农田土壤固碳减排和提升土壤肥力的秸秆利用方式, 为合理利用秸秆资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以贵州省花溪区麦坪镇典型多年种植玉米的黄壤为供试土壤, 其成土母质为砂页岩。土壤有机质和全氮质量分数为 34.61、2.52 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别为 159.08、9.11、114 mg/kg, pH 5.4。使用事先已知质量、直径 11 cm、

高约 15 cm 的 PVC 管采集 0~10 cm 原状土壤样品：将 PVC 管垂直打入土壤 10 cm 深，用铁锹从侧面向底部切入，去除多余部分，并将 PVC 管底部密封，另一端呈敞开状态，在采样及运输过程中尽量减少对土壤的扰动。在采集原状土样的同时，采集 0~10 cm 土壤样品带回实验室，测定其含水量及田间持水量。装有原状土样的 PVC 管带回实验室，称量总质量，再通过计算得到 PVC 管内土壤的总干质量。试验所用玉米秸秆与土壤样品来自同一地块，玉米秸秆齐地面刈割，茎叶一起完整带回实验室，烘干后粉碎，待用。生物炭为购买所得，炭化原料为玉米秸秆。玉米秸秆的有机碳、全氮、全磷、全钾质量分数分别为 214.31、7.69、0.46、6.92 g/kg；生物炭的有机碳、全氮、全磷、全钾质量分数分别为 518.11、1.11、1.83、14.46 g/kg。

1.2 试验设计

参照邵洪峰等^[18]及田宇欣等^[19]的研究确定秸秆覆盖量，设 6 个处理，分别为不添加秸秆和生物炭的对照(CK)、全量秸秆(S10)、半量秸秆(S5)、全量生物炭(B10)、半量生物炭(B5)和半量秸秆+半量生物炭(BS5)。全量为 10 g/管，即为 11.6 t/hm²；半量为 5 g/管，即为 5.8 t/hm²。每个处理 4 个重复。试验开始前，将原状土壤水分调节至田间持水量的 70%^[20]，然后将秸秆和生物炭均匀覆盖到土壤表层，置于 20 °C 恒温培养箱中培养，预培养 7 d 后开始为期 32 d 的正式试验。培养期间用重量法保持土壤水分恒定。

1.3 样品的采集与测定

每 3 或 4 d 采集一次气体样品。采集气体样品时，首先使用 30 mL 注射器抽取各处理敞开端气体样品，之后盖上带有三通阀的密封盖，使 PVC 管

完全密封，1 h 后再次使用 30 mL 注射器抽取气体样品，样品于提前抽成真空的采气袋中保存，2 d 之内使用气相色谱分析仪(岛津 GC-2014，日本)进行分析。气相色谱条件：载气为高纯 N₂；CO₂、CH₄ 浓度检测时采用氢火焰离子检测器(FID)，反应温度为 200 °C；N₂O 气体浓度检测时采用电子捕获检测器(ECD)，反应温度为 350 °C。参照文献[21]的方法，计算土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量；参照文献[22]的方法，计算土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的累积排放量，并将温室气体的增温潜势转化为 CO₂ 的排放当量，即全球增温潜势(GWP)。

试验结束后，将表层秸秆和生物炭去除干净，采集土样。土样经自然风干、过筛后，参照文献[23]的方法测定其基础养分指标：采用电位法测定 pH；采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定有机质；采用硫酸催化剂消煮+半微量凯氏定氮法测定全氮；采用碱解扩散法测定碱解氮；采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提+钼蓝比色法测定有效磷；采用醋酸铵浸提+火焰光度法测定速效钾。

1.4 数据处理与分析

试验所得数据运用 Excel 2010 进行整理及绘图；运用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析，并采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分特征的影响

从表 1 可知，秸秆和生物炭覆盖对土壤 pH 产生的影响并不一致，其中 BS5 的土壤 pH 显著高于 S10 和 B5 的，与 CK 相比，BS5、S5 和 B10 的土壤 pH 分别提高了 3.96%、2.18% 和 0.59%，但所有处理与 CK 间的差异均无统计学意义；S10、S5 和 B5 的速

表 1 秸秆与生物炭覆盖土壤的养分特征

Table 1 Nutrient characteristics of straw and biochar mulched soil

处理	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
CK	(5.05±0.10)ab	38.19±0.75	2.53±0.21	154.26±2.90	9.81±0.45	(254.33±36.66)a
S10	(4.92±0.08)b	36.33±0.26	2.33±0.19	154.02±1.91	8.46±0.46	(109.33±9.68)c
S5	(5.16±0.10)ab	37.05±0.79	2.47±0.05	155.46±5.64	8.13±0.45	(133.67±4.26)bc
B10	(5.08±0.06)ab	36.30±1.45	2.21±0.06	156.89±6.27	9.41±0.87	(259.67±25.44)a
B5	(4.96±0.04)b	36.39±0.30	2.23±0.04	153.55±1.44	7.71±0.83	(162.67±24.69)bc
BS5	(5.25±0.12)a	38.50±0.91	2.35±0.09	164.07±4.09	9.97±1.70	(204.00±37.36)ab

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

效钾质量分数均显著低于 CK 的, 分别降低了 57.01%、47.44% 和 36.04%; 土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷的质量分数在各处理间的差异均无统计学意义, 其中, BS5 的有机质、碱解氮和有效磷质量分数均为最高; 与 CK 相比, S10、S5、B10、B5 和 BS5 的全氮分别降低了 7.91%、2.37%、12.65%、11.86% 和 7.11%。

2.2 秸秆与生物炭覆盖土壤的 CO₂ 排放特征

从图 1 可知, 培养期间各处理 CO₂ 排放通量变化趋势基本相似, 试验前期 CO₂ 排放通量较高, 到后期逐渐降低直至趋于稳定, 总体表现为 CO₂ 排放源; 正式培养第 1 天 CO₂ 排放通量最高; 第 9 天时排放通量降低到达第一个排放谷; 第 12 天时排放通量迅速上升; 第 18 天时 CO₂ 排放通量再次降到排放谷, 之后一直到培养结束时 CO₂ 排放通量的波动范围较小, 并且逐渐趋于平稳。

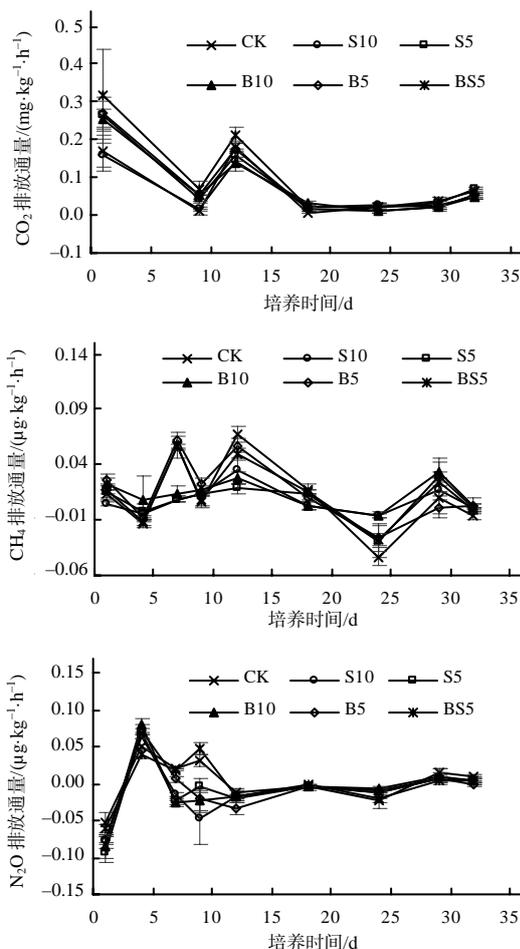


图 1 秸秆与生物炭覆盖土壤温室气体排放通量的动态变化

Fig.1 Dynamic change of greenhouse gas emission flux of straw and biochar mulched soil

2.3 秸秆与生物炭覆盖土壤的 CH₄ 排放特征

从图 1 可知, 培养期间各处理 CH₄ 排放通量动态变化不一致, 排放通量有正有负; 试验从开始到第 4 天, CH₄ 排放通量呈下降趋势, 且第 4 天时除 B10 外, 其余处理土壤均表现为对 CH₄ 吸收; CK、B5、BS5 第 7 天和第 12 天时分别出现 CH₄ 排放通量的排放峰, 第 9 天时排放通量虽有下降, 但均为 CH₄ 排放源, S5、S10、B10 则是第 7~12 天逐渐增加, 第 12 天时出现 CH₄ 排放通量的排放峰; 之后呈下降趋势, 直至第 24 天时再次出现 CH₄ 吸收; 第 29 天 CH₄ 排放量再次增加; 培养至第 32 天时 CH₄ 排放量又出现小幅度下降, 但除 CK 和 BS5 外, 其他处理土壤仍然表现为 CH₄ 的排放。

2.4 秸秆与生物炭覆盖土壤的 N₂O 排放特征

从图 1 可知, 除第 9 天各处理 N₂O 排放特征存在差异外, 整个培养期间各处理的变化趋势基本一致: 培养第 1 天 N₂O 排放通量最低, 表现为 N₂O 的吸收; 之后 N₂O 排放通量迅速升高, 至第 4 天时出现一个排放峰, 且所有处理均表现为 N₂O 排放源; 之后开始下降, 但是在培养的第 9 天各处理 N₂O 排放通量出现较大差异, CK 和 BS5 为 N₂O 排放源, 而其他处理则为汇; 培养后期 N₂O 排放通量逐渐趋于稳定, 且排放通量总体为负值。

2.5 秸秆与生物炭覆盖的土壤温室气体累积排放量及全球增温潜势变化特征

从表 2 可知, BS5、B5、S5、B10、S10、CK 的 CO₂ 累积排放量依次减少, 秸秆和生物炭覆盖均提高了土壤的 CO₂ 累积排放量, BS5 的 CO₂ 累积排放量显著高于 CK 和 S10 的, 分别是其 2.56 和 2.06 倍; 与 CK 相比, 秸秆和生物炭覆盖土壤的 CH₄ 累积排放量变化均不显著, B5 累积排放量最低, 降低了 93.39%, 而 BS5 则使 CH₄ 累积排放量增加了 21.50%; 秸秆和生物炭覆盖均有降低 N₂O 累积排放量的趋势, 其中秸秆或生物炭单独覆盖处理的 N₂O 累积排放量均为负值, 即土壤由 N₂O 排放源转为汇, 两者混合覆盖土壤虽有一定的降低效果, 但仍为 N₂O 的排放源, 各处理以 S10 对土壤 N₂O 排放抑制效果最佳, 其累积排放量显著低于 CK 的累积排放量。

表 2 秸秆与生物炭覆盖土壤的温室气体累积排放量及全球增温潜势

处理	CO ₂ 累积排放量/mg	CH ₄ 累积排放量/ μ g	N ₂ O 累积排放量/ μ g	全球增温潜势/mg
CK	(27.73±20.28)b	7.72±0.79	(1.87±2.32)a	(28.44±20.07)b
S10	(34.54±4.44)b	5.66±2.33	(-4.33±2.66)b	(33.55±4.62)b
S5	(54.17±5.72)ab	4.38±2.82	(-2.74±1.57)ab	(53.57±5.87)ab
B10	(52.50±4.58)ab	8.62±1.97	(-2.28±1.45)ab	(52.14±4.59)ab
B5	(57.97±6.57)ab	0.51±7.89	(-3.00±0.72)ab	(57.19±6.32)ab
BS5	(71.02±13.05)a	9.38±1.13	(0.58±1.64)ab	(71.44±13.27)a

同列数据后不同字母示处理间差异有统计学意义($P < 0.05$)。

从表 2 还可知,所有处理均具有潜在温室效应,以 CO₂ 对 GWP 贡献最大, N₂O 贡献最低;各处理 GWP 的变化特征与 CO₂ 累积排放量变化特征基本一致,随秸秆或生物炭覆盖量增加 GWP 呈下降趋势,以 BS5 的 GWP 最高,显著高于 CK 和 S10 的,可见,半量秸秆+半量生物炭覆盖导致的潜在温室效应最为明显。

3 结论与讨论

有研究认为,秸秆与生物炭还田均能提高土壤全氮、碱解氮、速效磷等养分的含量,改善土壤肥力状况^[16,24],提高表层土壤的有机碳^[10,25]、溶解有机碳、不稳定有机碳、颗粒有机碳和微生物量碳含量^[11],少耕或免耕与秸秆还田相结合有助于提高土壤有机碳含量和质量^[26]。还有研究表明,秸秆覆盖还田对土壤全氮含量并没有影响,且可提高土壤 pH^[27],施用生物炭同样可提高土壤 pH^[24]。LI^[16]等的研究表明,生物炭施用会导致 pH 降低。本研究中,秸秆与生物炭覆盖对土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷质量分数的影响并不显著,对 pH 和速效钾的影响不一致,既有降低作用,也存在提高现象。本研究中,土壤养分含量的变化特征与上述学者的研究结果存在差异,特别是部分处理土壤速效钾质量分数显著降低,可能原因是本试验培养周期较短且还田方式为覆盖还田,导致秸秆腐解速率相对较低,养分释放速率缓慢,在试验周期内秸秆本身的养分未能及时转移到土壤中。秸秆还田后被土壤微生物降解,将其木质素和木质纤维素等成分进行发酵、腐解、分解等方式转化后才能向土壤中输送有机质和矿质营养等成分^[28]。在秸秆腐解前期土壤中的微生物需要大量消耗土壤中的养分来维持自己的正常活动性,如需要消耗氮素^[29],从而导

致了土壤中养分的亏损。

本研究中,在培养前期各处理温室气体排放量普遍较高,特别是 CO₂ 排放峰出现在正式培养的第 1 天,这可能是培养初期由于干扰未稳定而带来的通量正常波动;培养后期各处理温室气体排放通量逐渐下降并趋于稳定,原因可能是玉米秸秆含有大量的糖类、脂肪等易分解组分,进入土壤后被微生物快速分解利用,微生物数量迅速增加,温室气体释放较快,到了培养后期易分解组分逐渐被消耗,微生物不得不转向开始利用难分解组分,温室气体降低且趋于稳定^[30-31]。本研究中,秸秆和生物炭覆盖有促进 CO₂ 排放、抑制 N₂O 排放的趋势,而对 CH₄ 排放的影响不一致;半量秸秆+半量生物炭覆盖增加 CO₂ 和 CH₄ 排放,降低 N₂O 抑制效果。有研究得出,在土壤中添加秸秆和生物炭会抑制 CO₂ 和 N₂O 的排放,促进 CH₄ 吸收^[9],秸秆和生物炭会促进土壤中形成腐殖质、碳水化合物等难以被微生物吸收利用的大分子物质^[32],使微生物对碳的吸收利用能力下降^[33],其本身具有较高的 C/N 比值,随着其输入,土壤的通透性和保水持水能力得到了增强,对硝化作用和反硝化作用起到了一定程度上的抑制^[34-35];还有研究^[5,36]表明,生物炭还田降低了土壤 CO₂ 排放量;但朱晓晴等^[13]认为,秸秆还田增加了 CO₂ 和 N₂O 排放,降低 CH₄ 吸收。各学者的研究结论并不一致,可能原因是温室气体排放受多种外部因素的影响,如各地环境差异较大、还田方式的不同、秸秆或生物炭的使用量不一致等。在本研究条件下,人为地控制了土壤水分及培养温度 2 个重要影响因子,仅考虑外源秸秆覆盖对温室气体排放的影响,这也可能导致得出的结论因环境问题而与其他学者的结论存在差异。

本研究中,各处理均有增加 GWP 的趋势。3

种温室气体中, CO₂ 对 GWP 的贡献最大。秸秆覆盖有增加土壤温室气体排放的潜势^[37]。向土壤不同深度添加秸秆, 均增加了玉米生长季温室气体的综合增温潜势^[13]。周际海等^[5]研究表明, 施用秸秆有增加 GWP 的趋势, 而施用生物炭有降低 GWP 的趋势, 且高剂量生物炭施用降低 GWP 的效果更为显著。但也有研究^[9]认为, 秸秆与生物炭施用均降低了 GWP。秸秆和生物炭还田于土壤表层, 使土壤有机碳大量矿化^[13]。向土壤中加入生物炭, 土壤中碳矿化率增加, 或者是由于所添加生物炭所含的不稳定碳的矿化^[38], 导致了温室气体排放的增加, 进而增加了 GWP。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change in 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [3] 杨雨滢, 易建婷, 张成, 等. 施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1647-1653.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 周际海, 陈晏敏, 袁颖红, 等. 秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 248-254.
- [6] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 等. 不同覆盖方式下旱作玉米田土壤呼吸对温度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 467-473.
- [7] 马骁轩, 蔡红珍, 付鹏, 等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 168-174.
- [8] MENG H, NIE C Y, LI W L, et al. Insight into the effect of lignocellulosic biomass source on the performance of biochar as persulfate activator for aqueous organic pollutants remediation: epicarp and mesocarp of *Citrus* peels as examples[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 123043.
- [9] 程功, 刘廷玺, 李东方, 等. 生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1004-1014.
- [10] 张影, 刘星, 任秀娟, 等. 秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 153-159.
- [11] YAN S S, SONG J M, FAN J S, et al. Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00962.
- [12] 彭志芸, 丁峰, 谌洁, 等. 麦油稻轮作秸秆还田与施氮对水稻光合特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 253-261.
- [13] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 977-989.
- [14] ZHANG Y J, LIN F, WANG X F, et al. Annual accounting of net greenhouse gas balance response to biochar addition in a coastal saline bioenergy cropping system in China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 39-48.
- [15] 张国, 王效科. 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 872-881.
- [16] LI B, HUANG W H, ELSGAARD L, et al. Optimal biochar amendment rate reduced the yield-scaled N₂O emissions from ultisols in an intensive vegetable field in South China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 138161.
- [17] NASER H M, NAGATA O, TAMURA S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(1): 95-101.
- [18] 邵洪峰, 梅洪飞, 潘忠潮, 等. 玉米秸秆还田对土壤有机碳、微生物功能多样性及甘蓝产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(5): 838-842.
- [19] 田宇欣, 窦森, 徐杨, 等. 玉米秸秆与土壤不同混合方式对腐殖质组成及结构的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(3): 363-368.
- [20] 田玉强, 陈颖, 欧阳胜男, 等. 外源性碳氮添加对北方半干旱草原土壤有机质矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1101-1108.
- [21] 张雪, 梅莉, 宋利豪, 等. 模拟氮沉降对马尾松土壤微生物群落结构及温室气体释放的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1917-1925.
- [22] 雷鸣, 程于真, 陈竹君, 等. 添加黄土或古土壤降低猪粪温室气体综合排放效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1624-1632.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 简秀梅, 陈学濡, 刘富豪, 等. 不同灰分生物质炭对红壤理化特性与微生物特性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 282-291.
- [25] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国

- 生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 96–103.
- [26] JIN Z Q, SHAH T, ZHANG L, et al. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice-wheat rotation system: a review[J]. *Food and Energy Security*, 2020, 9(2): e200.
- [27] 李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(2): 268–276.
- [28] 朱金霞, 孔德杰, 尹志荣. 农作物秸秆主要化学组成及还田后对土壤质量提升影响的研究进展[J]. *北方园艺*, 2020(5): 146–153.
- [29] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853–863.
- [30] XIA L L, WANG S W, YAN X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 118–127.
- [31] 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.
- [32] CROSS A, SOHI S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10): 2127–2134.
- [33] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 279–284.
- [34] LIU X Y, QU J J, LI L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N₂O emission in rice paddies?: a cross site field experiment from South China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 168–173.
- [35] CASE S D C, MCNAMARA N P, RAEY D S, et al. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil: the role of soil aeration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 51: 125–134.
- [36] 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 and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169–1179.
- [37] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦–玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 704–715.
- [38] TROY S M, LAWLOR P G, O' FLYNN C J, et al. Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 173–181.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正