

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

李新华¹, 朱振林¹, 董红云¹, 杨丽萍¹, 郭洪海^{2*}

(1.山东农业可持续发展研究所, 济南 250100; 2.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘要:为了探讨小麦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,通过田间试验,测定了秸秆不同还田方式下玉米生长季温室气体(CO_2 、 N_2O 和 CH_4)的排放量和碳固定量,结果表明:秸秆不同还田模式对温室气体排放量影响不同,在玉米生长季, CO_2 和 N_2O 累计排放量表现为秸秆过腹还田(CGS)>秸秆直接还田(CS)>秸秆不还田(CK)>秸秆-菌渣还田(CMS), CH_4 的累计吸收量表现为CGS>CK>CMS>CS,且不同处理间差异显著($P<0.05$);秸秆不同还田模式也影响土壤和植物的碳储量,耕层土壤有机碳储量表现为CGS>CMS>CS>CK,且不同处理间差异显著($P<0.05$),植株、籽粒的固碳量表现为CGS>CS>CMS>CK,但不同处理间差异不显著($P>0.05$)。和CK相比,在CS、CGS和CMS模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应均增加,但增加量不同,表现为CGS>CMS>CS>CK,既秸秆过腹还田模式下玉米田对全球变暖的减缓效应最大,其次是秸秆-菌渣还田模式,之后是秸秆直接还田模式。在秸秆过腹还田模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应为 $22\,493.83\text{ kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$,分别比CK、CS和CMS模式下玉米田对全球变暖的减缓效应增加24.2%、18.7%和1.6%。从减缓全球变暖的角度,推荐秸秆过腹还田模式,该模式也有利于形成粮食-秸秆-饲料-牲畜-肥料-粮食的良性循环,实现农田的固碳、减排。

关键词: 秸秆还田;玉米田;温室气体排放;碳固定

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)11-2228-08 doi:10.11654/jaes.2015.11.027

Effects of Different Return Modes of Wheat Straws on Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration of Maize Fields

LI Xin-hua¹, ZHU Zhen-lin¹, DONG Hong-yun¹, YANG Li-ping¹, GUO Hong-hai^{2*}

(1.Shandong Institute of Agriculture Sustainable Development, Jinan 250100, China; 2.Institute of Resource and Environment SAAS, Ji'nan 250100, China)

Abstract: Returning crop residues to soil could improve soil fertility and increase crop yields, but it may also cause elevated greenhouse gas emissions. In this study, an experiment was conducted to assess the effects of different modes of wheat straw return on CO_2 , N_2O and CH_4 emissions and carbon sequestration in maize fields during maize growing season. The modes of wheat straw return included chopped straw direct return(CS), cow-digested straw return(CGS), and mushroom-cultivated straw return(CMS). The cumulative emissions of CO_2 and N_2O were both in order of CGS>CS>non-straw return(CK)>CMS, while the cumulative CH_4 absorption followed the sequence of CGS>CK>CMS>CS. Soil organic carbon content decreased in order of CGS>CMS>CS>CK, with significant difference between different treatments ($P<0.05$). However, carbon storage in plants and grains declined in the sequence of CGS>CS>CMS>CK, with no significant difference between different treatments($P>0.05$). Compared to CK, CS, CGS, and CMS all mitigated the global warming effects of maize fields. The post-livestock digestion straw return mode could be recommended from in order of CGS>CMS>CS>CK. The mitigating benefit of global warming by CGS was $22\,493.83\text{ kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$, 24.2%, 18.7%, and 1.6% greater than that of CK, CS, and CMS, respectively. Therefore, the perspective of decreasing the global warming, and it also forms benign cycle of food-straw-cattle manure-fertilizer-food.

Keywords: straw return; maize field; greenhouse gas emission; carbon sequestration

收稿日期:2015-06-24

基金项目:“十二五”科技支撑计划(2012BAD14B07-1)

作者简介:李新华(1979—),女,山东曹县人,博士,副研究员,研究方向为环境生态与生物地球化学。E-mail:xinhuali_2008@163.com

* 通信作者:郭洪海 E-mail:honghaig@163.com

秸秆作为物质、能量和养分的载体,是一种宝贵的自然资源,秸秆直接还田是目前秸秆利用的主要渠道^[1],也是提高土壤肥力、增加作物产量的主要农艺措施之一^[2-4],但同时也带来了播种质量差、与饲料争资源、病虫害大面积发生及影响温室气体排放等问题^[5-7]。已有研究表明秸秆还田能促进 CO₂、CH₄ 的排放^[8-9],但对 N₂O 排放的影响尚存在不确定性,与土壤特性、秸秆还田量、秸秆还田方式以及秸秆还田后水肥管理方式密切相关^[10]。秸秆还田在影响温室气体排放的同时,还可以通过增加土壤有机碳的直接输入实现固碳。研究表明,农田土壤有机碳的增加与近 20 年来秸秆还田、有机肥与化肥合理施用以及少(免)耕技术推广等农艺措施密切相关^[11]。秸秆全量还田(配施化肥)的土壤有机碳呈逐年递增趋势(约为 230 kg·hm⁻²·a⁻¹)^[12],可见秸秆还田不仅能增加农田固碳,也可能促进温室气体排放,而温室气体的增排会部分或全部抵消土壤固碳的减排效益^[13],故在评价农田措施的固碳潜力时,应全面考虑温室气体的收支和农田固碳的影响。目前的研究多集中在秸秆还田对农田土壤碳库或对温室气体排放影响的单一研究上,从而使农田碳减排核算存在泄漏^[13]。此外,通过长期定位试验虽然能够估算出土壤的年固碳量,但对于影响土壤有机碳变化的各个碳收支过程却不能定量评价,从而不利于土壤固碳机理的解释。因此,迫切需要开展短期(如 1~2 年)或者一个作物生长季内秸秆还田下土壤固碳效果的研究,并在此基础上结合温室气体排放监测定量温室气体净排放^[14]。可见在研究秸秆还田下农田固碳、减排时,既要考虑农田土壤、作物固碳,也要考虑秸秆还田对温室气体排放及综合增温潜力的影响。鉴于此,本研究在黄淮海小麦-玉米一年两熟制区域,选择典型研究区,通过研究秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固持的影响,分析秸秆不同还田模式下玉米田温室气体的综合增温潜势、碳固定及其玉米田对全球变暖的净减缓效应,以期对秸秆合理高效利用、农田温室气体减排和土壤碳固定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省农业科学院资源与环境研究所循环农业试验基地——山东省德州市平原县张华镇梨园村,属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候,冬冷夏热,雨热同期,四季分明。年平均气温 12.1~13.1

℃,极端最高气温 40.9℃,极端最低气温-22.8℃,多年平均降雨量 579.2~633.3 mm。土壤类型为壤土,种植制度为小麦-玉米一年两熟制。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil tested

指标	数值
有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	17.8
TOC/g·kg ⁻¹	11.47
全氮 TN/g·kg ⁻¹	1.04
铵态氮/mg·kg ⁻¹	25.68
硝态氮/mg·kg ⁻¹	9.38
全磷/g·kg ⁻¹	0.85
速效磷/mg·kg ⁻¹	15.58
全钾/g·kg ⁻¹	20.45

1.2 试验设计

试验于 2014 年 6 月—2014 年 9 月进行。供试作物为玉米,品种为郑单 958。试验设 4 个处理,分别为:小麦秸秆不还田(CK),小麦收获后,人工移除小麦秸秆及根系;小麦秸秆直接还田(CS),小麦收获后,用小型秸秆粉碎机将秸秆粉碎后还田,还田量约为 8100 kg·hm⁻²(小麦秸秆的平均产量约为 8100 kg·hm⁻²);秸秆过腹还田(CGC),从实验基地附近的旺源奶牛场购买牛粪,用塑料薄膜密封,腐熟约 3 个月,于小麦收获后均匀还田,还田量约为 16 200 kg·hm⁻²(牛粪量约为秸秆量的 2 倍);秸秆转化为食用菌基质,基质生长蘑菇后转化为菌渣还田(CMC),菌渣来自山东省农业科学院食用菌试验示范基地,为栽培双孢菇之后产生的菌渣,菌渣通过堆沤、发酵、腐熟转化后还田,还田量约为 4050 kg·hm⁻²(小麦秸秆到菌渣的转化率约为 50%)。

秸秆、牛粪和菌渣还田后,统一种植玉米。玉米种植时间为 2014 年 6 月 6 日,种植后统一水肥管理,肥料使用量为优化的经济施肥量,N、P₂O₅、K₂O 的施加量分别为 233.9、101.2、189.3 kg·hm⁻²,全部作底肥。每个处理设 3 个小区,共 12 个小区,每个小区的面积为 7 m×10 m=70 m²。在每个小区内随机设 3 个采样点,共 36 个观测点,分别于玉米种植后安装气体采样箱底座,底座由不锈钢制成,规格为 50 cm×50 cm×20 cm,底座上端有宽 2 cm、深 3 cm 的密封水槽。底座安装后,稳定 2 周左右的时间,开始采集气体样品,采集时间依次为 6 月 20 日、7 月 11 日、8 月 6 日、8 月 20 日、9 月 10 日和 9 月 29 日。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 温室气体样品的采集与分析

温室气体的采集与分析采用静态箱-气相色谱法。采样箱由 2.5 mm 厚的有机玻璃制成,箱体四周及顶部用白色泡沫包裹以确保采样时箱内温度变化不大。采样装置由采样箱、周转箱和底座 3 部分组成,采样箱和周转箱规格均为 50 cm×50 cm×100 cm。采样箱内装有小风扇、温度传感器、采气三通阀及气压平衡管,侧面安装有电源插头和气体样品接口。

玉米株高小于 1 m 时,仅用箱体采集。当玉米株高大于 1 m 后,用周转箱连接采样箱采集。采样时将箱体罩在底座上,各部分之间均以水密封,以防止箱体和底座的接触处漏气。采样由上午 10:00 开始,每次罩箱时间为 30 min,从采样箱密封放置到底座上,开始采集第一个气体样品,之后每间隔 10 min 采样 1 次,共采集 4 个气体样品。采集的气体样品置于 1 L 的铝塑复合气袋中(大连光明化工研究所生产),采集气体样品时同步测定气温、箱内温度。

样品采集后 36 h 内,在实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行分析。其基本原理是通过自编微机程序发出指令控制电路、气路系统和信号接收,电磁阀通过开关量改变管线中气流流量和方向以达到对色谱自动进样、分析和清洗的目的。

温室气体排放通量采用下式进行计算:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中: F 为气体通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), dc/dt 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率; M 为气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; P 为采样点气压,Pa; T 为采样时的绝对温度,K; V_0 、 P_0 、 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积($22.41 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$)、大气压(1013.25 hPa)和绝对温度(273.15 K); H 为地面以上采样箱高度,m。

温室气体累计排放量采用积分法计算^[15]。

1.3.2 土壤、植物样品的采集与分析

土壤样品采用“S”型采样法采集,用取土器在每个小区内采集 0~20 cm 的土壤样品 5~10 个,混合后带回实验室。自然风干并过 100 目筛备用。同时用环刀法测定土壤容重。

玉米收获时,在每个小区内随机取 3~5 个样方,测定玉米的生物量和产量,样方面积 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。采集的玉米植株和籽粒带回实验室,烘干、称重后待测。

土壤有机质的测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 氧化法,总有机碳的测定采用重铬酸钾高温氧化法^[16]。

1.3.3 计算方法

玉米季土壤固碳量为收获时与种植前土壤碳库之差,土壤碳库(SOCP)采用下式进行计算:

$$\text{SOCP} = \text{SOC} \times \text{BD} \times H$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; BD 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; H 为耕层厚度,m。本研究区域的耕层厚度为 20 cm。

玉米植株、籽粒的固碳量为收获时干物质生物量与碳含量的乘积。玉米季总固碳量(TCS)为土壤、玉米植株及籽粒固碳量之和。为在秸秆还田后,进行玉米田固碳和温室气体的综合增温潜势对比,本研究将玉米田总固碳量(TCS)折算为固持 CO_2 的量(ATCS)^[13],即:

$$\text{ATCS} = \text{TCS} \times 44/12$$

式中:ATCS 表示秸秆还田后玉米田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献, $\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

本研究以玉米田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献与温室气体的综合增温潜势的差值来表示净增温潜势。在 100 a 增温尺度上, CH_4 与 N_2O 的增温系数分别为 25 和 298^[17],因此净增温潜势 GWP($\text{kg} \cdot \text{CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}$)为:

$$\text{GWP} = (\text{CO}_2 + 25 \times \text{CH}_4 + 298 \times \text{N}_2\text{O}) - \text{ATCS}$$

1.4 数据分析

运用 Excel 2007 进行数据处理计算,Origin7.5 进行绘图,SPSS 13.0 等软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆不同还田模式对温室气体通量的影响

秸秆不同还田模式下,玉米季温室气体的通量特征如图 1 所示。由图 1A 可知,秸秆不同还田模式下, CO_2 排放通量具有相同的排放模式,呈单峰型排放,但排放强度不同。从 6 月至 8 月,各处理下, CO_2 排放通量均逐渐增加,于 8 月 6 日取得排放峰值,之后排放通量又逐渐降低。不同秸秆还田处理下,玉米生长季 CO_2 的累计排放量见表 2。秸秆不同还田处理下, CO_2 累计排放量表现为 $\text{CGS} > \text{CS} > \text{CK} > \text{CMS}$,方差分析表明,不同处理间差异显著($P < 0.05$)。和 CK 相比,CS 和 CGS 模式都使 CO_2 累计排放量增加,分别增加 5.6% 和 24.0%;CMS 模式则使 CO_2 累计排放量减少 3.8%。CS 模式下, CO_2 累计排放量比 CGS 模式降低 17.4%,比 CMS 模式增加 8.9%;CGS 模式, CO_2 累计排放量比 CMS 模式增加 22.4%。

秸秆不同还田模式下, N_2O 通量排放模式和排放

强度均不同(图 1B)。在 CK、CS 和 CMS 模式下, N_2O 通量呈单峰型排放,和 CO_2 排放通量相同,均在 8 月 6 日取得排放峰值;而 CGS 模式下, N_2O 通量呈双峰型排放,分别在 8 月 6 日和 8 月 30 日取得排放峰值。玉米生长季,秸秆不同还田模式下, N_2O 的累计排放量表现为 $\text{CGS}>\text{CS}>\text{CK}>\text{CMS}$ (表 2),且不同处理间差异显著($P<0.001$)。和 CK 相比,在 CS、CGS 模式, N_2O 累计排放量分别增加 12.7%和 14.5%;CMS 模式则使 N_2O 累计排放量减少 5.5%,即秸秆直接还田和过腹还田均使 N_2O 排放量增加,而秸秆-菌渣还田则使 N_2O 排放量降低。这与黄小林的研究结果相一致^[18]。在 CS 模式下, N_2O 累计排放量比 CGS 模式降低 17.4%,比 CMS 模式增加 8.9%;CGS 模式下, N_2O 累计排放量比 CMS 模式增加 17.5%。

秸秆不同还田模式下, CH_4 通量呈波动性变化,表现为吸收(图 1C)。玉米生长季,不同秸秆还田模式下, CH_4 的累计吸收量表现为 $\text{CGS}>\text{CK}>\text{CMS}>\text{CS}$ (表 2),且不同处理间差异显著($P<0.05$)。在 CGS 模式下, CH_4 的累计吸收量最大;CS 模式下, CH_4 的累计吸收量最小。CS、CGS 和 CMS 模式下 CH_4 累计吸收量分别是 CK 模式下的 97.6%、105.5% 和 99.4%,即秸秆过腹还田能促进 CH_4 的吸收,而秸秆直接还田和秸秆-菌渣还田则降低了 CH_4 的吸收量。在 CS 模式, CH_4 累计吸收量分别比 CGS 和 CMS 模式降低 8.1%和 1.9%;在 CGS 模式下, CH_4 累计吸收量比 CMS 模式增加 5.8%。

2.2 秸秆不同还田模式对玉米田碳固定的影响

秸秆不同还田模式下,玉米季土壤、玉米植株、籽粒及总的固碳量见表 3。在 CK 模式下,土壤固碳量为负值(均值为 $-209.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),表现为土壤有机碳的亏损。在秸秆还田处理下,土壤固碳量均为正值,表现为土壤有机碳储量的增加。可见在秸秆不同还田模式下,土壤固碳量变化不同。不同处理间,耕层土壤有机碳储量表现为 $\text{CGS}>\text{CMS}>\text{CS}>\text{CK}$,方差分析表明,不同处理间差异显著($P<0.05$)。这说明秸秆还田处理均可以增加土壤有机碳的储量。和 CK 相比,CGS 模式下,耕层土壤有机碳储量增加最多,增加量为 $813.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;其次是 CMS 模式,耕层土壤有机碳增加量为 $656.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;之后是 CS 模式,耕层土壤有机碳增加量为 $327.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

秸秆不同还田模式下,玉米植株、籽粒固碳量也不同(表 3),但方差分析表明,不同处理间差异不显著($P>0.05$)。秸秆不同还田模式,玉米季节总的固碳

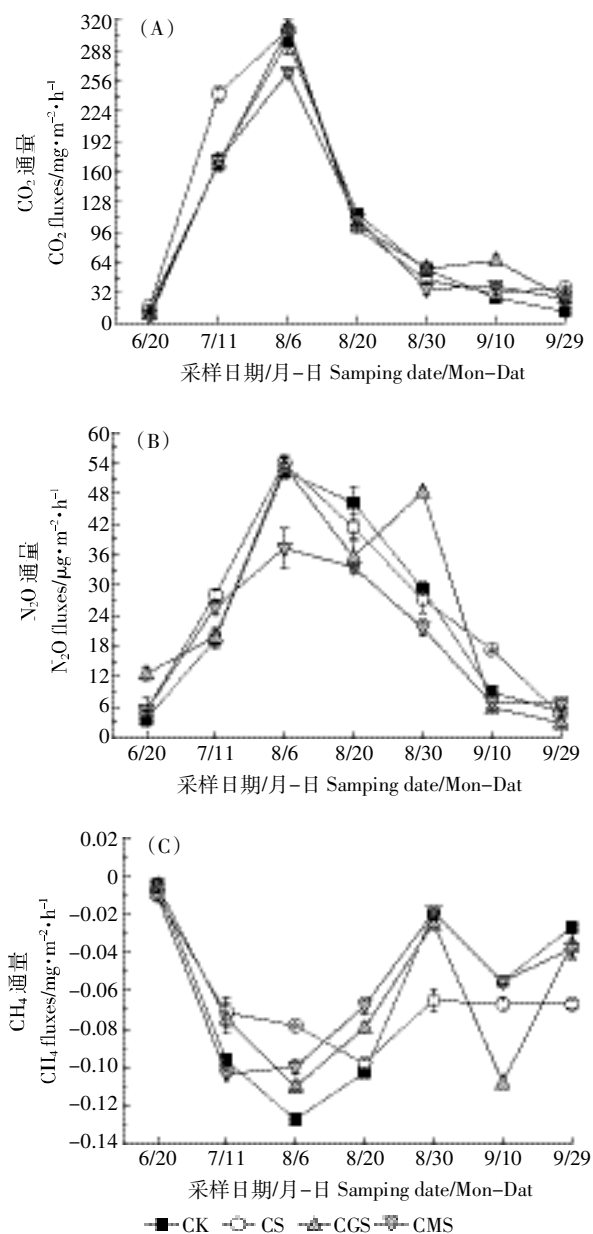


图 1 不同秸秆还田模式下玉米田温室气体的排放特征

Figure 1 Characteristics of greenhouse gas emissions from maize fields with different models of straw return

表 2 秸秆不同还田模式下,温室气体的累计排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 Cumulative emissions of greenhouse gases from maize fields with different models of straw return($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	CO_2	N_2O	CH_4
CK	2 654.30	0.55	-1.64
CS	2 803.48	0.62	-1.60
CGS	3 290.66	0.63	-1.73
CMS	2 554.76	0.52	-1.63

量也不同,表现为 $\text{CGS}>\text{CMS}>\text{CS}>\text{CK}$,且方差分析表明不同处理间差异显著($P<0.05$)。和 CK 相比,秸秆

还田能够使玉米田固碳量增加,在CS、CGS和CMS模式下,玉米田的总固碳量分别为 $7\,071.54\pm 219.81$ 、 $6\,767.28\pm 151.52$ 、 $5\,972.93\pm 183.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别比CK增加4.9%、24.1%和18.8%。

2.3 秸秆不同还田模式对玉米田减缓全球变暖效应的影响

为了比较玉米田固碳和温室气体排放的净效应,计算出玉米田固碳量相对于 CO_2 对减缓全球变暖的贡献ATCS,进而计算出玉米田对全球变暖的减缓效应,结果见表4。在秸秆不同还田模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应均为正值,即秸秆不同还田处理下玉米田均表现为碳汇,但碳汇大小不同,方差分析表明不同处理间差异显著($F=19.35$, $P=0.001<0.05$)。在秸秆不同还田模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应表现为 $\text{CGS}>\text{CMS}>\text{CS}>\text{CK}$ 。秸秆过腹还田模式下玉米田对全球变暖的减缓效应最大,其次是秸秆-菌渣还田模式,之后是秸秆直接还田模式。和CK相比,在CS、CGS和CMS模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应均增加,依次增加4.6%、24.2%和22.3%。和CS相比,在CGS和CMS模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应分别增加18.7%和16.9%;和CGS相比,在CMS模式下,玉米田对全球变暖的减缓效应降低1.6%。因此,从减缓全球变暖的角度出发,推荐秸秆过腹还田模式。在该模式下,玉米田对全量变暖的减缓效应为 $22\,493.83\text{ kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$,分别比CK、CS和CMS模式下增加24.2%、18.7%和1.6%。

3 讨论

3.1 秸秆不同还田模式对温室气体排放的影响

关于秸秆还田对 CO_2 排放的影响结论基本趋于一致,即秸秆还田后加速了微生物对有机物质的分解和矿物质养分的转化,从而增加了 CO_2 排放量^[10]。本研究也得到了类似的结论,即在秸秆直接还田和过腹还田模式中, CO_2 累计排放量均增加,其中秸秆直接还田模式下, CO_2 累计释放量比秸秆不还田增加5.6%。裴淑玮等的研究也证明秸秆添加对玉米季 CO_2 排放有一定的促进作用^[19],而在秸秆过腹还田后, CO_2 累计释放量比秸秆不还田增加24.0%。这是因为秸秆过腹还田是秸秆-饲料-牛粪之间的一个转化过程,牛粪作为有机肥投入农田后,可以增加土壤有机质含量,改善土壤理化性质,提高土壤温度和含水量,为微生物活动提供物质、能源和适宜的条件,从而促进土壤微生物呼吸释放 CO_2 ^[20-21]。秸秆-菌渣还田模式则与之相反,与秸秆不还田相比,降低了 CO_2 的累计排放量。这可能与菌渣具有较高的C/N,导致土壤微生物分解过程中对碳素的固定,从而减少了 CO_2 的排放^[18]。

秸秆还田对 N_2O 排放的影响还存在争议。邹建文等认为在常规灌溉方式下秸秆还田减少后季麦田 N_2O 的排放,而在持续淹水方式下,施用秸秆并不减少 N_2O 排放量^[22]。邹国元等研究表明秸秆还田可能促进土壤 N_2O 的排放^[23]。本研究中,在秸秆直接还田模式下 N_2O 排放量增加,与裴淑玮等^[19]、邹国元等^[23]和

表3 秸秆不同还田模式下玉米田的固碳量

Table 3 Carbon sequestration of maize fields with different models of straw return

处理 Treatment	种植前土壤有机碳含量 SOC content before planting/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	收获时土壤有机碳含量 SOC content at harvest/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤固碳量 Soil carbon sequestration/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	植株固碳量 Plant carbon sequestration/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	籽粒固碳量 Grain sequestration/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	累计固碳量 Cumulative carbon sequestration/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	11.47 ± 0.34	11.32 ± 0.79	-209.24 ± 7.3	$3\,068.66\pm 118.90$	$2\,836.64\pm 21.89$	$5\,696.06\pm 163.95$
CS	11.47 ± 0.34	11.89 ± 1.06	118.63 ± 22.58	$3\,092.40\pm 116.93$	$2\,761.90\pm 93.75$	$5\,972.93\pm 183.39$
CGS	11.47 ± 0.34	12.33 ± 1.15	604.44 ± 48.89	$3\,839.95\pm 88.06$	$2\,627.15\pm 97.08$	$7\,071.54\pm 219.81$
CMS	11.47 ± 0.34	11.97 ± 0.98	447.05 ± 26.09	$3\,430.94\pm 116.93$	$2\,889.29\pm 93.75$	$6\,767.28\pm 151.52$

表4 秸秆不同还田模式下玉米田温室气体综合增温潜势的减缓效应估算($\text{kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 4 Assessment of GWPs of greenhouse gases and mitigation benefit due to carbon sequestration by maize fields with different models of straw return($\text{kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	CK	CS	CGS	CMS
玉米田固碳对全球变暖的贡献 Contribution of carbon sequestration in maize fields to global warming	20 885.54	23 609.17	25 928.96	23 104.96
温室气体的综合增温潜势 Comprehensive warming potential(GWP) of greenhouse gases	2 777.19	2 952.18	3 435.13	2 668.07
减缓效应 Mitigation benefit	18 108.35	18 948.57	22 493.83	22 145.31

王改玲等^[24]的研究结果相一致。在秸秆过腹还田模式下, N_2O 的排放量也增加, 可能是因为禽畜粪便碳氮比较低, 氮素含量丰富, 由此引起 N_2O 的直接排放。据估算, 施用粪肥的 N_2O 排放对加拿大农业 N_2O 总排放的贡献为 10%^[25], 而在秸秆-菌渣还田模式下, N_2O 累计排放量降低。这与黄小林的研究结果相一致^[18]。

已有研究证实, 好氧农田土壤环境有利于甲烷氧化菌的生长, 可以氧化吸收大气中的 CH_4 , 此途径是除大气光化学反应外陆地生态系统 CH_4 最大的汇^[26-27]。本研究也发现各处理样地中 CH_4 的累积交换通量均为负值, 表现为大气中 CH_4 的汇。在秸秆直接还田和秸秆-菌渣还田模式中, CH_4 的累计吸收通量均降低。田慎重等对华北地区麦地的观测也发现秸秆还田后 CH_4 的吸收通量降低^[28], 与本研究所得结果一致。这可能是由于秸秆的添加降低了土壤氧化还原电位, 减少了 CH_4 的氧化潜势。

3.2 秸秆还田对玉米田碳固定及减缓全球变暖效应的影响

土壤有机碳库的平衡由输入和输出两方面因素共同决定^[29-30], 土壤固碳可以通过提高作物的生物量来增加土壤碳库的作物光合产物输入以及减少干扰等途径降低农田土壤碳的分解^[29-33]。本研究表明, 在秸秆不同还田模式下, 玉米田土壤有机碳含量均增加, 从而增加了土壤碳库储量, 与逯非等的秸秆还田具有可观的固碳潜力的观点一致^[13]。大量研究也表明, 在小麦/玉米一年两熟区的集约化农业生产中, 作物生产力的提高和秸秆还田的大力推广显著增加了进入土壤的作物残体数量, 进而有效提高了土壤有机碳的积累量^[27, 34]。本研究在秸秆过腹还田模式下, 土壤碳库储量增加最多。这是因为施用禽畜粪便可以增加农田土壤有机碳输入量, 促进土壤中水稳性团粒结构的形成, 加速土壤有机碳积累^[35], 同时禽畜粪便含有丰富的氮素等养分, 可以促进作物生长, 增加作物对土壤有机碳库的输入^[36]。可见在该模式下, 秸秆能被有效利用, 由于变为粪便后其有机质含量较多, 各种养分充足, 也有利于形成粮食-秸秆-饲料-牲畜-肥料-粮食的良性循环, 从而实现农田的固碳减排。

从本研究还可以看出, 不同秸秆还田模式均有效增加了玉米田的固碳量, 但增加量显著不同 ($P < 0.05$), 同时秸秆还田也促进了温室气体的增排。由于各种温室气体可能引起的增温潜力不同, 为了定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响, 统一转化为温室气体的综合增温潜势 (GWP), GWP 是各种温室

气体相对的增温效应的简单度量^[37]。在本研究中, 温室气体增排的综合增温潜势与玉米田固碳对全球变暖的减缓效应相比, 所占的比例较小 (11.5%~13.3%), 温室气体的综合增温潜势对玉米田固碳减缓全球变暖贡献的抵消作用并不非常明显, 所以在选择秸秆还田模式时, 可优先考虑农田系统的固碳效果, 以有效发挥玉米田的固碳潜力。

4 结论

(1) 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放量影响不同。在玉米生长季 CO_2 和 N_2O 的累计排放量表现为 $CGS > CS > CK > CMS$, CH_4 的累计吸收量表现为 $CGS > CK > CMS > CS$, 其不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

(2) 在秸秆不同还田模式下, 玉米田耕层土壤、植株和籽粒有机碳储量均有所增加, 但增加量不同。土壤有机碳储量表现为 $CGS > CMS > CS > CK$, 且差异显著 ($P < 0.05$); 植株、籽粒的固碳量表现为 $CGS > CS > CMS > CK$, 差异不显著 ($P > 0.05$)。

(3) 在秸秆不同还田模式下, 玉米田均表现为碳汇, 但碳汇大小不同, 且差异显著 ($P < 0.05$)。玉米田对全球变暖的减缓效应表现为 $CGS > CMS > CS > CK$, 因此从减缓全球变暖的角度出发, 推荐秸秆过腹还田模式。在该模式下, 玉米田对全量变暖的减缓效应为 $22\ 493.83\ kg\ CO_2 \cdot hm^{-2}$, 分别比 CK、CS 和 CMS 模式下玉米田的减缓增加 24.2%、18.7% 和 1.6%。由于在该模式下, 秸秆首先作为饲料被畜禽有效利用, 变为粪便后, 有机质含量较多, 各种养分充足, 也有利于形成粮食-秸秆-饲料-牲畜-肥料-粮食的良性循环, 实现农田的固碳和减排。

参考文献:

- [1] 路文涛, 贾志宽, 张 鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522-528.
- [2] 赵 鹏, 陈 阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1014-1018.
- [3] 唐海明, 汤文光, 肖小平, 等. 中国农田固碳减排发展现状及战略对策[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1755-1759.
TANG Hai-ming, TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, et al. Current

- situation and countermeasures of China's C sequestration and mitigation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7):1755-1759.
- [4] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):81-85.
MU Ping, ZHANG En-he, WANG Han-ning, et al. Effects of continuous returning straw to maize tilled soil on chemical character and microbial biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5):81-85.
- [5] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisols influenced by wheat residue amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67:147-157.
- [6] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):362-367.
LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):362-367.
- [7] 孟梦, 吕成文, 李玉娥, 等. 添加生物炭对华南稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4):396-402.
MENG Meng, LÜ Cheng-wen, LI Yu-e, et al. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emissions from early rice field in South China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4):396-402.
- [8] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO_2 排放的影响[J]. 土壤肥料, 2006, 1:14-16.
PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, MOU Zi-ping, et al. Effect of straw-return and nitrogen fertilizer application on the CO_2 emission in farmland[J]. *Soil and Fertilizers*, 2006, 1:14-16.
- [9] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 焚烧麦秆对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2):107-110.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Influence of wheat straw burning on CH_4 and N_2O emissions from rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(2):107-110.
- [10] 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.
HE Jing, LI Han-mao, FANG Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20):246-250.
- [11] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3):734-743.
JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3):734-743.
- [12] 王小彬, 武雪萍, 赵全胜, 等. 中国农业土地利用管理对土壤固碳减排潜力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11):2284-2293.
WANG Xiao-bin, WU Xue-ping, ZHAO Quan-sheng, et al. Effects of cropland-use management on potentials of soil carbon sequestration and carbon emission mitigation in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11):2284-2293.
- [13] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):99-108.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):99-108.
- [14] 史然, 陈晓娟, 沈建, 等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(2):1193-1198.
SHI Ran, CHEN Xiao-juan, SHEN Jian, et al. A review on application of rice straw in soil carbon sequestration and greenhouse gases emission in paddy ecosystems[J]. *Soil*, 2013, 45(2):1193-1198.
- [15] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):578-584.
XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578-584.
- [16] 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 Ru-kun. Analysis methods for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [17] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing [C]/Climate change: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [18] 黄小林. 菌渣还田对农田温室气体排放的影响研究[D]. 四川大学, 2012.
HUANG Xiao-lin. Effects of mushroom residues on GHS emissions from soils under rice-wheat rotation[D]. Sichuan Agricultural University, 2012.
- [19] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊峰, 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 Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, 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.
- [20] Manna M C, Swarup A, Wanjar R H. Soil organic matter in a west Bengal inceptisol after 30 years of multiple cropping and fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70:121-129.
- [21] 高峻岭, 宋朝玉, 李祥云, 等. 不同有机肥配比对蔬菜产试和品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(1):48-51.
GAO Jun-ling, SONG Chao-yu, LI Xiang-yun, et al. Effect of different combinations of organic manures on vegetables yield, quality and soil fertility[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008(1):48-51.
- [22] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4):409-414.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N_2O emission from following wheat growing season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4):409-414.
- [23] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6):47-50.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, et al. Effect of straw addition on denitrification in upland soil[J]. *Review of China*

- Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6):47-50.
- [24] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6):840-844.
WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6):840-844.
- [25] Gregorich E G, Rochette P, Vanden B A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 83(1):53-72.
- [26] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 38(2):151-163.
- [27] 蔡祖聪. 土壤痕量气体研究展望[J]. 土壤学报, 1993, 30(2):117-124.
CAI Zu-cong. Prospects for the research on soil trace gases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(2):117-124.
- [28] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉. 不同耕作措施对华北地区麦田 CH_4 吸收通量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(2):541-548.
TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, LI Zheng-jia. Effect of CH_4 uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):541-548.
- [29] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71:145-191.
- [30] Post W M, Izaurralde R C, Jastrow J D, et al. Enhancement of carbon sequestration in US soils[J]. *Bio Science*, 2004, 54(10):895-908.
- [31] Lal R. Carbon sequestration[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363:815-830.
- [32] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304:1623-1627.
- [33] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(2):303-322.
- [34] Wang X K, Lu F, Han B, et al. Carbon sequestration by cropland soil in China: Potential and feasibility[J]. *Earth and Environmental Science*, 2009, 6:242-247.
- [35] 陈泮勤. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策[M]. 北京:科学出版社, 2008:198-244.
CHEN Ban-qin. Carbon budget and its sink promotion of terrestrial ecosystem in China[M]. Beijing:Science Press, 2008:198-244.
- [36] Dendoncker N, Van Wesemael B, Rounsevell M D A, et al. Belgium's CO_2 mitigation potential under improved cropland management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 103(1):101-116.
- [37] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京:气象出版社, 2003.
YU Gui-rui. Global change, carbon cycle and storage in terrestrial ecosystem[M]. Beijing:Meteorological Press, 2003.



新书推荐

矿区污染源头控制

党志 郑刘春 卢桂宁 等著

本书是一部关于矿区污染控制源头控制之酸性矿山废水中重金属去除研究的成果专著。全书共7章,在全面介绍了酸性矿山废水的形成及其环境影响、酸性矿山废水中重金属的去除方法、农业废弃物改性利用研究现状的基础上,系统总结了作者研究团队对玉米秸秆、稻草秸秆、花生壳等农业废弃物进行改性制备高效吸附重金属的廉价生物质吸附材料方面的研究成果。这些研究成果的应用可从源头控制酸性矿山废水对环境的污染,是矿区污染源头控制的可行技术。

本书可供环境科学与工程、农业资源利用、地球化学、矿业工程等学科的科研人员,环境保护、矿产资源、农业及水利等部门的工程技术与管理人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

※出版社: 出科学出版社

※丛书名: 环境污染源头控制与生态修复系列丛书

※语种: 简体中文

※出版日期: 2015 年 3 月 1 日

※精 装: 221 页

※条形码: 9787030437563

