

成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用“碳足迹”的方法评估小麦秸秆及其生物质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 Gong, ZHANG A-feng, WANG Xu-dong, 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.

运用“碳足迹”的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响

成功^{1,2}, 张阿凤^{1,2*}, 王旭东^{1,2*}, 张卫华¹, 杜可清¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为分析添加秸秆、生物质炭后小麦生产过程中碳足迹的动态、分布以及构成,研究了不同处理在小麦生长期的 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放情况,以及不同处理的单位面积碳足迹构成与碳足迹总量,试验设置 5 个处理:对照(CK)、常规施肥(N)、施肥并添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆(NS)、施肥并添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭(NBC_{low})、施肥并添加 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭(NBC_{high})。结果表明,小麦生产中碳足迹的构成主要为农田生态系统净初级生产力(NPP)和氮肥生产过程中的能源消耗,与常规施肥相比:添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆、 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭与 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理,小麦产量分别增加了 30.9%、66.3%和 36.6%;添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆使土壤 CO_2 的季节排放总量增加了 68.7%,生态系统 N_2O 的季节排放总量降低了 33.9%,添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭生态系统 N_2O 的季节排放总量降低了 23.8%和 58.6%,但是土壤 CO_2 的季节排放总量没有显著性的差异;添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆使小麦生产过程中的碳足迹升高了 26.0%,添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭碳足迹分别降低了 198.0%和 112.9%。生物质炭的添加降低了小麦生产过程中的碳足迹。

关键词:小麦秸秆;生物质炭;碳足迹;碳汇

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0604-09 doi:10.11654/jaes.2016.03.026

Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using "carbon footprint" method

CHENG Gong^{1,2}, ZHANG A-feng^{1,2*}, WANG Xu-dong^{1,2*}, ZHANG Wei-hua¹, DU Ke-qing¹

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: This study assessed the dynamic, distribution and composition of carbon footprints in wheat production process under applications of wheat straw and its biochar using "carbon footprint" method. Crop yields and N_2O , CH_4 and CO_2 fluxes during wheat growth period were measured in five field treatments: control (CK), conventional fertilization (N), N plus $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ straw (NS) amendment, N plus $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (NBC_{low}) amendment, and N plus $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (NBC_{high}) amendment. The energy consumption in each step of wheat production process was also analyzed to calculate the carbon footprint. Results showed that the carbon footprint in wheat production was mainly net primary production and energy consumption related to fertilizer production. Compared with the conventional fertilization, Wheat yields in NS, NBC_{low} and NBC_{high} treatments increased 30.9%, 66.3% and 36.6%, respectively; The seasonal amounts of soil CO_2 emissions increased by 68.7% in NS treatment, but had no significant difference in biochar treatments. Cumulative N_2O emission was reduced by 33.9%, 23.8% and 58.6% under NS, NBC_{low} and NBC_{high} treatments, respectively; The carbon footprint increased by 26.0% in NS treatment, but reduced by 198.0% and 112.9% in NBC_{low} and NBC_{high} treatments, respectively. These findings indicate that applying wheat straw biochar reduces carbon footprint in the agricultural ecosystems.

Keywords: wheat straw; wheat straw-derived biochar; carbon footprint; carbon sink

收稿日期:2015-10-21

基金项目:国家 863 项目(2013AA100904, 2011AA100503);国家自然科学基金(41301305);西北农林科技大学基本科研业务费(2014YB062, 2452015355)

作者简介:成功(1989—),男,山西晋城人,硕士研究生,研究方向为农田生态系统碳氮循环。E-mail:chenggo103@126.com

*通信作者:张阿凤 E-mail:zhangafeng@nwsuaf.edu.cn;王旭东 E-mail:wangxudong01@126.com

自2003年到2012年,由于人为活动导致温室气体(GHGs)排放增加,使全球表面温度提高了 $(0.78 \pm 0.06)^\circ\text{C}$ ^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告^[1]表明,2010年全球农林业温室气体排放达到12.0 Gt CO₂-C_e(CO₂当量),占人类活动总排放的24.0%(49.00±4.50 Gt CO₂-C_e)。若通过良好的管理措施,农业的减排潜力可占总自然潜力的20%以上^[2],减少农田温室气体排放,对于减缓全球气候变化具有十分重要的作用。

我国农业每年产生6~8 Gt的作物秸秆^[3],但资源利用率较低。秸秆还田是秸秆利用的一种重要方式,其能够维持土壤养分平衡,改善土壤物理结构,提高土壤有机碳含量^[4],但同时增加了土壤呼吸^[5]。近年来,将秸秆在高温厌氧环境下转化为生物质炭施入土壤,作为一个有效的增汇减排途径被广泛研究^[6]。生物质炭自身具有多孔的结构,施入土壤后可以增加表层土壤孔隙度、田间持水量及土壤水分的渗透性^[7],并能够抑制土壤CO₂和N₂O的排放,增加土壤有机碳库^[8]。但是也有研究表明,生物质炭的施用增加了稻田CH₄的排放^[9],而有关生物质炭施用对关中地区壤土(土垫旱耕人为土)碳氮转化影响的研究还很少。

随着全球变暖成为社会关注的热点,碳足迹作为一个新的研究方法迅速得到学术界的认可,并成为气候变化领域新的研究热点^[10]。碳足迹研究法旨在系统、定量地研究个体生命周期内所有的碳源和碳汇^[11],有效评价农业生产活动对温室效应的影响。国内外学者从不同角度对农业碳足迹进行了研究^[12-13],但对添加秸秆及其生物质炭后作物生产碳足迹的分析较少。本文旨在研究添加秸秆及其生物质炭之后,小麦生长季土壤CO₂排放及生态系统N₂O、CH₄排放和小麦产量的变化,运用“碳足迹”的方法评价秸秆和生物质炭施用对小麦生长过程中净碳汇的影响,为合理评估秸秆、生物质炭的农田应用及农业固碳减排提供理论支撑与科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于陕西关中平原中部杨凌区,西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院。属暖温带季风半湿润气候区,海拔521 m,年平均降水量630 mm,年平均温度12.9℃,年昼夜温差平均11.5℃,年均蒸发量1440 mm,全年降雨主要集中在7、8、9三个月,属

于典型的冬小麦-夏玉米一年两熟种植区。试验站内土壤为壤土,1 m土层的平均田间持水量为23%~25%,萎蔫系数为8.5%(以上含水量均为质量分数),土壤容重为1.44 g·cm⁻³。

1.2 试验材料

供试的小麦秸秆及小麦秸秆生物质炭均购买于三利新能源有限公司,其碳氮含量见表1。生物质炭是由小麦秸秆在350~550℃无氧条件下热解制得,其中K、Ca和Mg的含量分别是0.16%、1.01%和0.62%。生物质炭过5 mm筛备用。

表1 秸秆及生物质炭的碳、氮含量

Table 1 Organic carbon and total nitrogen of wheat straw and its biochar

碳源	全碳含量/%	全氮含量/%	碳氮比
秸秆	37.78	0.76	50.02
生物炭	48.96	1.07	45.95

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,共5个处理,其中秸秆施用量为4 t·hm⁻²,生物质炭施用量为4 t·hm⁻²和8 t·hm⁻²(表2),每个处理重复3次,共15个小区,小区面积为2 m×5 m。试验区周围布0.5 m宽的作物保护带。除CK外,其他各小区分别施用225 kg N·hm⁻²的尿素和90 kg P₂O₅·hm⁻²的磷酸二氢钙,用作基肥。肥料、秸秆和生物质炭在播种前人工撒施之后通过旋耕机一次性翻入耕层土壤。其他管理措施与当地一致。

小麦于2013年10月3日播种,2014年6月5日收获。采样日期分别为出苗期(2013年10月23日)、三叶期(2013年11月1日)、分蘖期(2013年11月11日)、越冬前期(2013年12月24日)、越冬后期(2014年1月21日)、返青期(2014年3月8

表2 试验处理及说明

Table 2 Experimental treatments and description

编号	碳源类型	处理说明	净施入量/kg·hm ⁻²	
			C	N
CK	—	不施肥	0	0
N	—	常规施肥	0	103.5
NS	秸秆	常规施肥+4 t·hm ⁻² 秸秆	1 511.2	133.9
NBC _{low}	生物炭	常规施肥+4 t·hm ⁻² 生物炭	1 958.4	146.3
NBC _{high}	生物炭	常规施肥+8 t·hm ⁻² 生物炭	3 916.8	189.1

注:尿素含氮量为46%。

Note: Content of nitrogen in urea was 46%.

同时考虑土壤异养呼吸的碳排放及小麦生长过程中的碳固定(生态系统净初级生产力),文中用生态系统的净交换(NEE)综合表征生态系统的碳固定,并考虑小麦生态系统中 CH_4 和 N_2O 的排放,综合评价小麦秸秆及其生物质炭施用的固碳潜力,系统分析生物质炭生产-农田耕作系统碳平衡,这里用农田生态系统的单位面积碳足迹(CF)表征。在碳成本的计算过程中,秸秆以及生物质炭运输过程中产生的能源消耗用消耗的柴油量表示。生物质炭生产过程中产生的生物油是一种生物质热解产生的重要副产品,但由于生物油精炼的复杂性和缺乏对其估值数据,在这项研究中没有考虑生物油的利用率。

小麦生长过程的总 CF 计算公式为^[13]:

$$CF = \sum (A_i \times EF_j)$$

式中: A_i 为每个农业投入的总量(如化肥或农药消费, kg, 电力消耗, kWh); EF_j 为排放参数。

作物生产单位产量碳足迹 CF_y ($\text{kg CO}_2\text{-C}_e \cdot \text{kg}^{-1}$), 即生态系统生产每千克小麦所产生的碳排放, 计算公式为^[12]:

$$CF_y = \frac{CF}{TY}$$

式中: TY 为小麦产量。

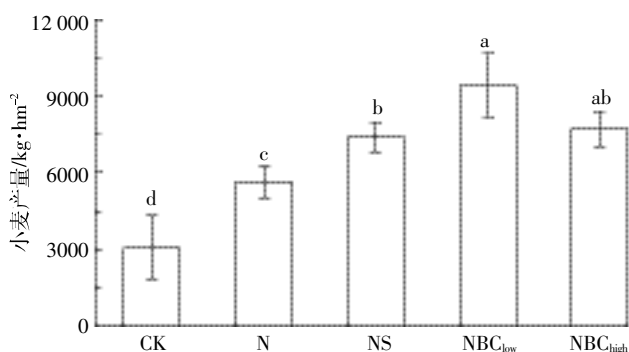
1.5 数据分析

所有数据均采用3次重复。采用 JMP 7.0 统计软件对数据进行处理和相关性分析, 应用 OriginPro 9.0 软件对数据进行制图, 采用 Duncan 法对数据进行方差分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理小麦产量及生态系统净初级生产力差异

小麦收获后, 各处理小麦产量见图2。小麦产量



不同字母表示处理间差异显著 $P<0.05$ 。下同

图2 小麦秸秆及其生物质炭对小麦产量的影响

Figure 2 Effects of wheat straw and its biochar amendment on wheat yields

由高到低依次为 $\text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{NS} > \text{N} > \text{CK}$ 。与 CK 相比, 其他处理的小麦产量分别提高了 83.7%~205.5%。与常规施肥相比, 添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆后小麦的产量提高了 30.9%, 添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理小麦产量分别提高了 66.3% 和 36.6%, 小麦产量随着生物质炭用量的增加而降低。

不同处理之间生态系统净初级生产力有显著性差异(图3)。与 CK 相比, 常规施肥处理的农田生态系统净初级生产力提高了 36.1%。与 N 相比, 添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆、 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理, 小麦生态系统净初级生产力分别提高了 30.9%、63.0% 和 27.8%。

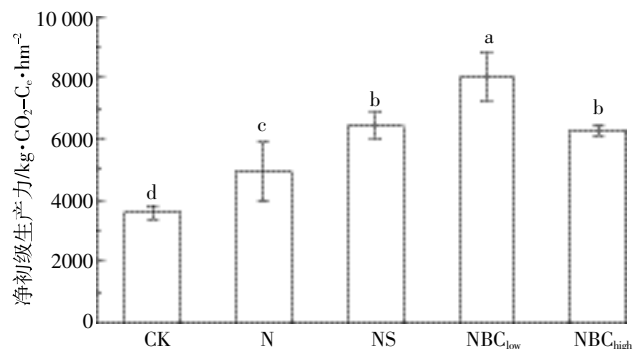


图3 不同处理农田生态系统净初级生产力

Figure 3 Net primary productivity in different treatments

2.2 不同处理之间 CO_2 排放差异

整个小麦生长期不同处理土壤 CO_2 排放速率的变化趋势与温度和水分的变化趋势一致(图4a), 都呈先降后升的趋势(图4b)。出苗期 NS、NBC_{low}、NBC_{high} 三个处理的土壤 CO_2 排放速率达到整个小麦生长期的最大值, 分别为 285.1 、 97.7 、 $73.9 \text{ mg CO}_2\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。受温度的影响, 各处理土壤 CO_2 排放速率均在越冬期出现最低值, 其中 CK 处理的排放速率最低, 只有 $6.69 \text{ mg CO}_2\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。返青期后 CO_2 排放速率随着温度的升高而升高, CK、N 两个处理在抽穗期达到整个生长期的最大值, 分别为 115.5 、 $109.8 \text{ mg CO}_2\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同处理 CO_2 排放速率的均值大小顺序为 $\text{NS} > \text{CK} > \text{N} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}}$ 。总的来说, 与常规施肥相比, 添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆处理, 土壤 CO_2 的排放总量增加了 68.7%; 而生物质炭施用下土壤 CO_2 排放总量与 N 处理相比没有显著性的差异(图5a)。

2.3 不同处理之间生态系统 N_2O 和 CH_4 排放差异

整个小麦生育期, 不同处理农田生态系统 N_2O 的季节排放特征见图4(c)。各处理土壤 N_2O 排放速率

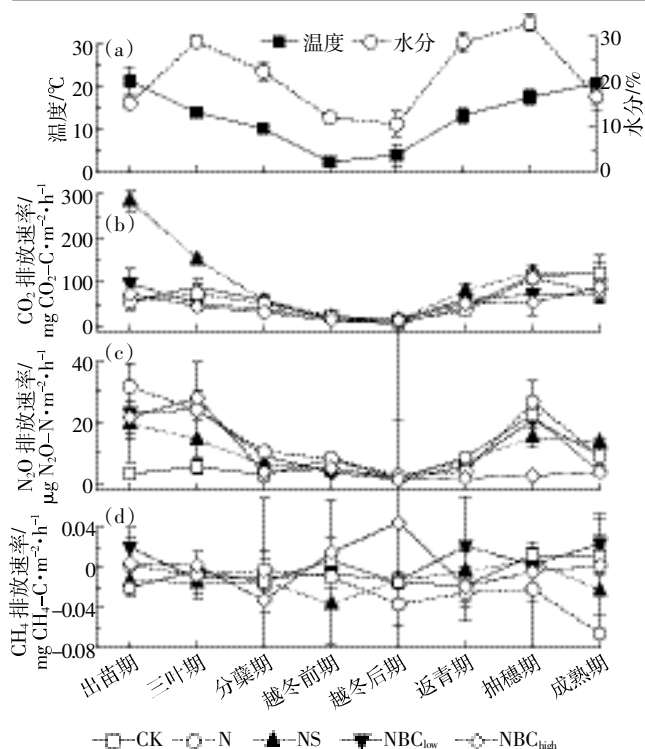


图4 小麦生长期不同处理 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 季节性排放特征

Figure 4 Seasonal dynamics of CO_2 , N_2O and CH_4 fluxes in different treatments during the whole wheat growing season

的季节变化规律基本一致,均呈现先降低后升高的趋势。除 CK 处理外,其余各处理 N_2O 排放速率的最高值集中出现在小麦生育的出苗期和在三叶期,分别为: N, $31.7 \mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; NS, $19.7 \mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; NBC_{low} , $24.2 \mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; NBC_{high} , $28.0 \mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。与常规施肥相比,秸秆和生物质炭施用降低了生态系统 N_2O 排放速率的最高值。总的来说,与施肥处理相比,添加 $4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆、 $4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭处理,生态系统 N_2O 季节排放总量分别降低了 33.9%、23.8% 和 58.6% (图 5b)。

一般认为旱地是 CH_4 的汇,各处理冬小麦生态系统 CH_4 的排放速率见图 4(d)。不同处理 CH_4 吸收速率均值由大到小依次为: NBC_{low} , $3.8 \text{ mg CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; NBC_{high} , $1.8 \text{ mg CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; CK, $-4.4 \text{ mg CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; NS, $-13.5 \text{ mg CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; N, $-20.4 \text{ mg CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。CK、N、NS 三个处理均表现为 CH_4 的净吸收汇,添加生物质炭的两个处理表现为 CH_4 的排放源。但总的来说,小麦生长季各处理之间 CH_4 的季节排放总量没有显著性差异 (图 5c)。

2.4 不同处理之间碳足迹差异

整个小麦生长季的碳足迹见表 3,各处理均表现

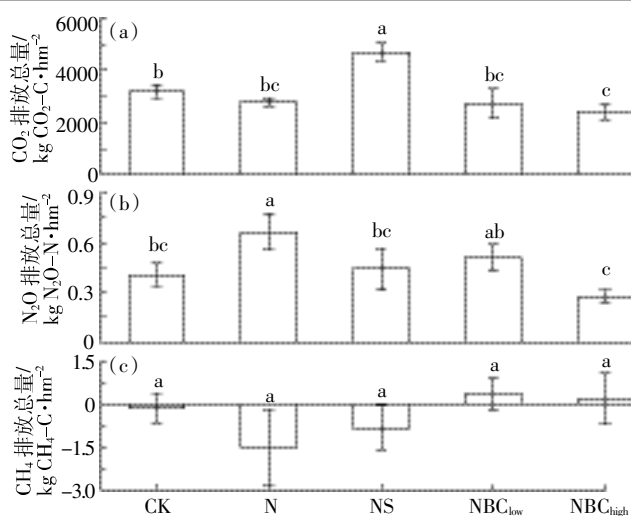


图5 小麦生长期不同处理温室气体排放总量

Figure 5 Seasonal amounts of CO_2 , N_2O and CH_4 emissions in different treatments during the whole wheat growing season

为净的碳吸收,即“碳负性”。与 CK 相比,常规施肥处理的总碳足迹值降低了 463.8%;而与 N 处理相比,添加 $4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆处理碳足迹值增加了 26.0%,但是添加 $4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭处理碳足迹值分别降低了 198.0% 和 112.9%。小麦生长周期的碳足迹构成见图 6。各处理中 CO_2 净交换值占碳汇的 97.0%~99.7%,而碳排放的主要来源是肥料、农药和 N_2O 的释放,分别占各处理中碳消耗总量的 59.8%~64.0%、12.0%~42.7% 和 5.8%~30.6%。氮肥产生的碳消耗最多,占肥料消耗总量的 95%。

各处理单位产量的碳足迹排放见图 7,单位小麦产量的碳排放均为负值,表现为“碳汇”。不同处理之间单位产量碳足迹差异较大,最高值为 $-0.074 \text{ kg CO}_2\text{-C}_e\cdot\text{kg}^{-1}$,最低值为 $-0.51 \text{ kg CO}_2\text{-C}_e\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相

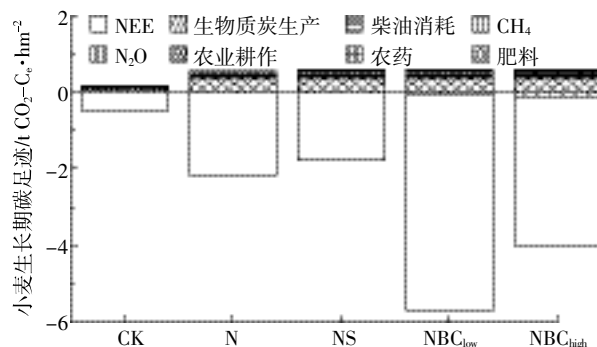


图6 不同处理冬小麦碳足迹构成

Figure 6 Composition of carbon footprint of wheat production in different treatments

表 3 不同处理碳消耗
Table 3 Carbon costs of different treatments

排放来源	项目	排放参数	农业用量	碳消耗/kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻²				
				CK	N	NS	NBC _{low}	NBC _{high}
肥料	N	1.52 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ^[15]	225 kg·hm ⁻²	0	342	342	342	342
	P	0.2 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ^[15]	90 kg·hm ⁻²	0	18	18	18	18
农药	—	4.88 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ^[15]	14.8 kg·hm ⁻²	72.2	72.2	72.2	72.2	72.2
农业活动	耕作	15.2 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ·time ⁻¹ ^[16]	1 次	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
	物料还田	20 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ·time ⁻¹ ^[17]	1 次	0	0	20	20	40
	施肥	0.9 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ·time ⁻¹ ^[16]	1 次	0	0.9	0.9	0.9	0.9
	喷洒农药	1.4 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ·time ⁻¹ ^[16]	5 次	7	7	7	7	7
	收获	22.9 kg CO ₂ -C _e ·hm ⁻² ·time ⁻¹ ^[16]	1 次	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9
	秸秆打包	0.27 kg CO ₂ -C _e ·t ⁻¹ ^[18]		0	0	1.08	1.08	2.16
	秸秆粉碎	0.86 kg CO ₂ -C _e ·t ⁻¹ ^[18]		0	0	3.44	0	0
温室气体排放	N ₂ O	298 kg CO ₂ ·kg ⁻¹ N ₂ O ^[1]		51.8	85.0	56.2	64.8	35.2
	CH ₄	34 kg CO ₂ ·kg ⁻¹ CH ₄ ^[1]		-1.6	-18.5	-9.9	4.6	2.6
CO ₂ 净交换	NEE	—	—	-450.7	-2 141.0	-1 752.6	-5 620.5	-3 880.6
运输消耗	柴油	0.717 kg CO ₂ -C _e ·L ⁻¹ ^[18]	—	0	0	22.0	22.0	44.0
生物质炭生产	生产消耗	—	—	—	—	—	—	—
	能源抵消	-15.1 kg CO ₂ -C _e ·t ⁻¹ ^[13]	—	0	0	0	-60.4	-120.8
总碳足迹	CF	—	—	-283.1a	-1 596.3c	-1 181.7b	-4 756.9e	-3 399.3d

注:不同小写字母表示处理间差异显著。下同。

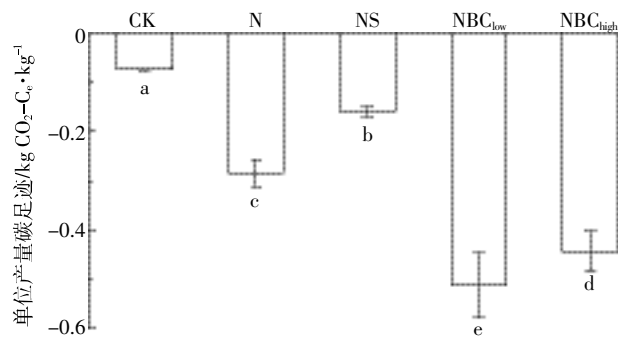


图 7 不同处理之间单位小麦产量的碳足迹
Figure 7 Carbon footprint of unit wheat production in different treatments

比,N处理的单位产量碳足迹降低了280.7%;与N处理相比,添加4 t·hm⁻²秸秆处理,单位产量的碳足迹增加了43.5%,而添加4 t·hm⁻²和8 t·hm⁻²生物质炭处理使单位产量的碳足迹分别降低了80.4%和56.0%。

3 讨论

3.1 秸秆和生物质炭施用对小麦产量的影响

由于秸秆和生物质炭的施用改善了土壤理化性质,对提高作物产量等方面有重要的作用^[19-20]。本

研究表明,秸秆和生物质炭的添加增加了小麦产量,而 Xia 等^[21]的研究表明,秸秆的长期施用,对太湖地区小麦-玉米的产量并没有显著性的差异。这可能与秸秆的施用量、土壤肥力情况及作物类型有关系。不同来源及用量的生物质炭施用对不同作物产量的影响也不同^[19-20]。施用4 t·hm⁻²生物质炭处理的小麦产量、生物量要比施用8 t·hm⁻²处理的分别提高21.8%和27.6%。这与 Zhang 等^[22]的研究结果一致,在低肥力的旱地土壤中,随着生物质炭用量的增加,作物的产量减低,可能是因为高C/N比值的外源物质施用,导致了氮的微生物固定,从而降低作物的产量。Uzoma 等^[23]的研究结果也表明,牛粪制成的生物质炭施用于砂质土壤中使玉米的产量显著增加,但是产量增加的幅度随着生物质炭用量的增加而降低。

3.2 秸秆和生物质炭施用对温室气体排放的影响

秸秆和生物质炭的施用为微生物提供了可利用的碳源和氮源,从而影响农田生态系统N₂O、CH₄和CO₂的产生、排放与碳固定^[9,24]。本试验的研究结果表明:与常规施肥处理相比,添加秸秆的土壤CO₂的排放总量显著增加了68.7%;秸秆还田之后,土壤可溶性有机碳含量、微生物生物量的增加导致土壤CO₂排放量的增加^[21]。Wang 等^[25]整合分析研究生物质炭施用对土壤有机碳的影响,表明生物质炭施用能够减缓本

土有机碳的矿化,为“负激发”效应。本研究的结果表明,与常规施肥处理相比,生物质炭的添加没有影响土壤 CO_2 的季节排放总量。这与 Liu 等^[26]的研究结果一致,可能与当地的气候条件、制备生物质炭的原料、热解温度以及土壤的粘粒含量有关^[26]。而与施用 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆相比,施用 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭, CO_2 的季节排放总量分别降低了 48.7% 和 48.6%。秸秆经过热解之后转化为更为稳定的生物质炭,与我们用 Py-GC/MS 的方法研究统计秸秆与生物质炭中化合物的组分结果相一致:秸秆里的化合物以胺类、酸类物质为主,而经过热解转化为生物质炭之后是以芳香族、烷烃及醇类物质为主(图 8)。Liu 等^[13]研究表明,秸秆的施用增加了稻田 CH_4 的排放,但是转化为生物质炭之后变为比较稳定的物质,不利于微生物的分解利用。这也佐证了我们上述的研究结果,而旱地一般认为是 CH_4 的汇。但是总的来说,各个处理之间 CH_4 的季节排放总量没有显著性差异。

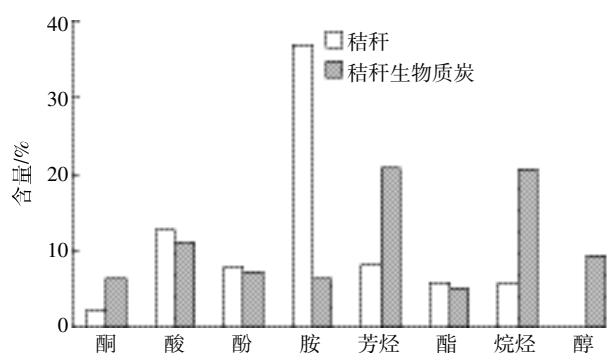


图 8 GC/MS 分析得到的特征产物

Figure 8 Representative products in wheat straw and its biochar identified by GC/MS

Shan 等^[27]整合分析研究秸秆还田对 N_2O 排放的影响,平均来说,秸秆施用对 N_2O 的排放没有显著性影响。这与我们的研究结果不同,与施肥处理相比,添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 秸秆处理生态系统 N_2O 季节排放总量降低了 33.9%。这可能与农田的管理方式、土地利用类型以及秸秆 C/N 有关^[28]。Cayuela 等^[28]研究表明,生物质炭的施用降低了 54% 的土壤 N_2O 排放,并且降低的幅度与生物质炭的施用量成正比,且制备生物质炭的原料、热解条件与生物质炭本身的 C/N 是影响 N_2O 排放的关键因子^[28]。本试验中,与常规施肥处理相比,添加 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理的生态系统 N_2O 季节排放总量分别降低了 23.8% 和 58.6%,其中添加 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理 N_2O 的季节排放总量显

著低于其他各处理,比不施肥处理的 N_2O 的季节排放总量低 32.2% (图 5c)。生物质炭施用之后一方面通过影响土壤理化性质而降低 N_2O 的排放^[9],另一方面影响土壤氨氧化细菌(AOB)的丰度,并降低了反硝化细菌(*nirK* 和 *nosZ*)的基因丰度,从而影响了土壤反硝化作用的过程^[29]。

3.3 秸秆和生物质炭施用对小麦生长季碳足迹的影响

评价农田生态系统碳平衡时,已有的研究只考虑了农业投入产生的间接 CO_2 排放的影响,但是没有考虑土壤呼吸 CO_2 释放量、生态系统的净初级生产力以及农田生态系统 CH_4 和 N_2O 的排放^[13]。本研究综合考虑了农业活动间接释放的 CO_2 、土壤呼吸、生态系统净初级生产力、生态系统 CH_4 和 N_2O 的释放量、秸秆打包、运输及秸秆在转化生物质炭工厂化生产过程中产生的能源,全面系统分析了秸秆及生物质炭施用农田之后生态系统的碳平衡。目前用涡度相关法、静态箱法和干物质积累法评估生态系统 CO_2 的吸收固定量^[30]。李俊等^[31]用涡度相关法对华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统进行碳通量的观测研究,结果表明,在观测的两年内系统年均 NEE 分别为 -1.98 、 $-3.18 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot \text{hm}^{-2}$;Zhang 等^[24]用静态箱法评估了生物质炭施用对太湖地区稻麦轮作系统碳汇的影响,小麦生长季的 NEE 值为 $-0.9 \sim -2.2 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究小麦生长季 NEE 的值为 $-0.4 \sim -3.8 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot \text{hm}^{-2}$,介于上述二者之间。试验中,各处理 CO_2 净交换值占碳汇的 97.0%~99.7%,这里用 NEE 作为碳固定量高于用土壤有机碳增量指标作为碳固定量^[32]。本试验中化肥投入占系统农业总投入的 59.8%~64.0%,是农业投入中主要的碳源,与 Cheng 等^[18]的研究结果一致。张恒恒等^[33]研究北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响,结果表明化肥投入占系统农业总投入的 73.5%~77.4%,略高于本研究结果,其次是农药和 N_2O 的释放,分别占各处理碳消耗总量的 12.0%~42.7% 和 5.8%~30.6%。

采用碳足迹分析方法结果表明试验中各处理均表现为净的碳吸收,与 CK 相比,施肥因增加了生态系统的净初级生产力,相应增大了生态系统净交换的能力。与常规施肥处理相比,秸秆的施用增加了土壤呼吸,因此增加了整个系统的碳足迹值及碳排放强度;而生物质炭的施用增加了生态系统净初级生产力,降低生态系统 N_2O 的排放,并且对土壤 CO_2 排放没有显著性的影响,因此降低了生态系统的碳足迹及碳排放强度。由于添加 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物质炭降低了生态系统净初级生产力,导致观测的 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物质炭处

理下碳足迹及碳排放强度最低。这与 Liu 等^[13]研究结果一致,生物质炭的施用显著增加了土壤有机碳库,并且在热解的过程中产生的能源替代排放,降低了水稻生产过程中的碳足迹及碳排放强度,但他们是用土壤有机碳的增量作为碳固定量,与我们的有所不同。但不管是用生态系统净交换量还是土壤有机碳的增量来表征碳汇,生物质炭的施用都降低了农业生产过程中的碳足迹及碳排放强度。

4 结论

(1)产量方面,与常规施肥相比较,添加秸秆或生物质炭均有利于小麦产量的提高,其中添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆、 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭与 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭处理,小麦产量分别增加了 30.9%、66.3%和 36.6%。

(2)温室气体排放方面:与常规施肥相比较,添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆使土壤 CO_2 的排放总量增加了 68.7%、生态系统 N_2O 排放总量降低了 33.9%;添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭分别使生态系统 N_2O 的排放总量降低了 23.8%和 58.6%,但是土壤 CO_2 的排放总量没有显著性差异。添加生物质炭利于降低农田土壤 CO_2 的排放总量和生态系统 N_2O 的排放总量。

(3)碳足迹方面:与常规施肥相比较,添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆使小麦生产过程中的碳足迹升高了 26.0%、添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭分别降低了 198.0%和 112.9%。综合考虑产量及碳足迹得出,在常规施肥的基础上,添加 $4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭更有利于小麦生长过程中农田生态系统的固碳减排。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Agriculture. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. Climate change 2014: mitigation of climate change[R]//Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York: 816.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Agriculture. Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation[R]//Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK and New York: 498–540.
- [3] 彭春艳,罗怀良,孔 静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 14–20.
PENG Chun-yan, LUO Huai-liang, KONG Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3): 14–20.
- [4] Lu F, Wang X, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281–305.
- [5] 张庆忠,吴文良,王明新,等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883–2887.
ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883–2887.
- [6] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143–144.
- [7] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477–1488.
- [8] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central amazonian upland soil[J]. *Plant & Soil*, 2007, 291(1/2): 275–290.
- [9] Zhang A, Cui L, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469–475.
- [10] 段华平,张 悦,赵建波,等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203–208.
DUAN Hua-ping, ZHANG Yue, ZHAO Jian-bo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203–208.
- [11] Wiedmann T, Minx J. A definition of "carbon footprint"[J]. *Ecological Economics Research Trends*, 2008(1): 1–11.
- [12] 王占彪,王 猛,陈 阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83–92.
WANG Zhan-biao, WANG Meng, CHEN Fu. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1): 83–92.
- [13] Liu Q, Liu B, Ambus P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment: A case study in a Chinese rice cropping system[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, 8(1): 148–159. DOI: 10.1111/gcbb.12248.
- [14] Hutchinson G, Mosier A. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45(2): 311–316.
- [15] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981–990.
- [16] Hillier J, Hawes C, Squire G, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(2): 107–118.
- [17] 李洁静,潘根兴,李恋卿,等. 红壤丘陵区双季稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2520–2525.
LI Jie-jing, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. Estimation of net carbon balance and benefits of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2520–2525.
- [18] Cheng K, Pan G, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop pro-

- duction; An estimation using agro-statistics data over 1993—2007[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3):231–237.
- [19] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos:1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(s1–2):81–84.
- [20] Haelele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3):430–440.
- [21] Xia L, Wang S, Yan X. 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.
- [22] Zhang A, Liu Y, Pan G, 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 & Soil*, 2012, 351(1/2):263–275.
- [23] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use & Management*, 2011, 27(2):205–212.
- [24] Zhang A, Bian R, Hussain Q, et al. Change in net global warming potential of a rice-wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 173(8):37–45.
- [25] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, DOI:10.1111/gcbb.12266.
- [26] Liu S, Zhang Y, Zong Y, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, DOI:10.1111/gcbb.12265.
- [27] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71:170–175.
- [28] Cayuela M L, Van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191:5–16.
- [29] 陈俊辉. 田间试验下秸秆生物质炭对农田土壤微生物群落多样性的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2013:110–113.
CHEN Jun-hui. Effects of biochar on soil microbial community diversity from croplands under field experiment[D]. Nanjing: Agricultural University of Nanjing, 2013:110–113.
- [30] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO₂, CH₄和N₂O)排放研究[D]. 南京:南京农业大学, 2005:3–13.
ZOU Jian-wen. A study on greenhouse gases(CO₂, CH₄ and N₂O) emissions from rice-winter wheat rotations in Southeast China[D]. Nanjing: Agricultural University of Nanjing, 2005:3–13.
- [31] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. 中国科学: D辑, 2006, 36(增刊 I):210–223.
LI Jun, YU Qiang, SUN Xiao-min, et al. Carbon exchange and its environmental regulation mechanism of farmland ecosystem in North China Plain[J]. *Science in China Ser: D Earth Sciences*, 2006, 36(Suppl I):210–223.
- [32] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6):2196–2210.
- [33] 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 Heng-heng, YAN Chang-rong, ZHANG Yan-qing, 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.