

# 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响

李帅霖, 上官周平

(中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 研究生物炭与氮肥互作在不同水分条件下对小麦关键生育期旗叶光合参数、产量与主要农艺性状的影响, 探讨生物炭改良不同水肥条件土壤并提高其作物产量的效果与内在机理, 可为农田有机物资源合理利用提供理论支撑。本研究采用盆栽试验, 生物炭用量设置五个水平(0, 1%, 2%, 4%和6%), 氮肥设置 N0, N1 和 N2(0, 0.2 g·kg<sup>-1</sup>和 0.4 g·kg<sup>-1</sup>)三个水平, 小麦拔节期控制土壤田间持水量的 80%和 50%模拟正常水分和干旱胁迫两种水分环境。于小麦拔节期和抽穗期测定旗叶光合参数和 SPAD 值, 成熟后对小麦籽粒产量及主要农艺性状进行统计。结果显示:(1) 与不施生物炭处理相比, 1%和 2%生物炭用量平均增产 6.62%和 11.01%, 4%和 6%生物炭用量平均减产 6.88%和 10.1%, 同时会导致千粒重、穗粒数和株高的降低;(2) 正常水分条件下, 1%和 2%生物炭用量与 N1 和 N2 之间存在协同增产作用, 而 4%和 6%生物炭用量表现出负面效应;(3) 干旱胁迫条件下, 仅 1%和 2%生物炭用量与 N1 存在协同增产作用, 生物炭处理削弱 N2 增产潜力;(4) N0 水平下, 生物炭处理均表现出促进小麦旗叶光合速率, 增加产量的作用;(5) N1 条件下, 生物炭促进小麦旗叶光合速率且在干旱胁迫条件下效果更明显。总体上生物炭对小麦旗叶光合参数和产量的影响受生物炭用量、氮素水平和水分条件共同制约且存在复杂的交互作用, 干旱会限制生物炭与氮肥的协同增产作用;在低肥力土壤上应用生物炭的增产效果较好, 而在质地较细且肥力中等的土壤应用时推荐 48 t·hm<sup>-2</sup>(2%)生物炭用量。

**关键词:** 生物炭; 氮肥; 水分; 产量; 光合作用; 小麦

**中图分类号:** S156.2, S157.4<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A

## Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions

LI Shuai-lin, SHANG-GUAN Zhou-ping

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Studying how biochar affects wheat yield under different fertilizers, soil water conditions and explore the inner mechanism to providing a scientific support for the efficient use of agriculture organic wastes. A three factors interaction (biochar, nitrogen and soil water) pot experiment was conducted. Biochar addition rates were 0, 1%, 2%, 4% and 6% (mass ratio), nitrogen fertilizer application rates were 0, 0.2 g·kg<sup>-1</sup> and 0.4 g·kg<sup>-1</sup> (N0, N1 and N2), soil water content were 80% and 50% field water capacity (began with wheat jointing stage). Wheat flag leaf photosynthetic parameters and SPAD value were measured at jointing stage and heading stage, wheat grain yield and main agronomic traits were recorded at maturity. The results showed that: (1) With compared to no biochar treatments, 1% and 2% biochar application rates increased wheat yield by 6.62% and 11.01% (on average) respectively. 4% and 6% biochar application rate decreased wheat yield by 6.88% and 10.1% (on average) respectively, at the same time, it also decreased thousand kernel weight, kernels per spike and plant height; (2) Under the normal water conditions, there were synergistic effects in 1% or 2% biochar addition rates with N1 and N2 treatments, but 4% and 6% biochar addition rate treatments showed negative effects; (3) Under the condition of drought stress, there were synergistic effects in 1% or 2% biochar addition rates with N1 treatment only, N2 production improved potential were inhibited by all biochar process; (4) Under the N0 conditions, compared with no biochar treatment, biochar increased wheat flag leaf photosynthetic rate and final yield; (5) Under the N1 and drought stress condition, biochar improved wheat flag leaf photosynthetic rate

收稿日期: 2016-10-11

修回日期: 2016-12-08

**基金项目:** 国家科技支撑课题“黄土高原旱区增粮增效潜力与提升技术研究”(2015BAD22B01); 国家自然科学基金“黄土高原旱作小麦土壤呼吸及组分对长期施氮与降雨的响应”(31501276)

**作者简介:** 李帅霖, 男, 博士生, 主要从事生物炭改良旱作农田土壤效果与机制研究。E-mail: lishuailin007@163.com。

**通信作者:** 上官周平, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物生态, 旱地农业方面的研究。E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn。

more obvious than under N1 and normal water condition. Consequently, the effects of biochar on wheat flag leaf photosynthetic parameters and final yield affected by biochar addition rates, nitrogen level and soil water content, and there were complex interactions. The potential of crop productivity increased by biochar, fertilizers and their coordination was limited by drought stress. In terms of increasing wheat yield, adding biochar to barren soil was good, moreover,  $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (2%) biochar addition rate was recommended to improve the quality of fine texture and medium fertility soils.

**Keywords:** biochar; nitrogen; water; yield; photosynthesis; wheat

生物炭是生物质在限氧条件下热裂解、炭化产生的一类高度芳香化、难溶性的固态物质,具有比表面积大、孔隙结构好、吸附能力强和材料来源广等特性,是理想的农用基质材料<sup>[1-2]</sup>。生物炭对土壤中氮、磷等养分的持留作用<sup>[3-4]</sup>和对土壤水分的固持作用<sup>[5-6]</sup>可有效提高土壤保肥蓄水能力<sup>[7-8]</sup>,增加作物产量。

目前生物炭对作物生长和土壤肥力的影响相关研究在风化土及典型热带贫瘠土壤地带开展较多<sup>[9]</sup>,由于生态条件、气候条件、生物炭类型及土壤质地等诸多试验环境因子的不同,生物炭对作物生长发育的影响仍存在一定的不确定性<sup>[10]</sup>。如 Wang 等<sup>[11]</sup>向盆栽平邑甜菜添加生物炭,发现添加量为  $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  均可以显著提高甜菜叶片叶绿素含量,降低胞间二氧化碳浓度,增强气孔导度和光合效率;葛顺峰等<sup>[12]</sup>通过<sup>15</sup>N 标记实验发现添加生物炭可以有效促进苹果植株对氮肥的吸收,减少氮肥气态损失,提高氮肥利用率;而 Van 等<sup>[13]</sup>发现在施肥的碱性钙质土上,以造纸废物为原料的生物炭减少了小麦和萝卜的干质量;张晗芝等<sup>[14]</sup>发现生物炭对玉米苗期的生长有显著抑制作用。因此,目前就生物炭对不同水肥条件下作物产量的影响效果及其变化机理有待进一步试验研究。

我国旱作农业综合生产能力受降雨稀少和土壤保水保肥能力差等因素严重制约,生物炭与肥料配施对作物生长具有协同促进作用<sup>[15]</sup>,同时可以显著

提高农田土壤持水能力进一步提高作物产量<sup>[16-17]</sup>,因此,生物炭还田可能是提高旱作农业生产能力的有效途径。然而生物炭与氮肥互作在不同水分环境下对作物生长的影响以及生物炭“还田”是否可以保证农田不减产的情况下减少氮肥添加与水分输入等关键问题还未得到明确答案。本研究以陕西关中地区塿土和苹果木生物炭为供试材料,开展生物炭与氮肥互作及生物炭、氮肥和土壤水分含量间的量效关系对小麦关键生育期光合参数、产量和主要农艺性状影响的研究,旨在为应用生物炭改良旱作农田及大规模推广应用提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究以陕西关中塿土为供试土壤,采自陕西省杨陵区。土壤采用 Z 型采样方法,采集深度为 0 ~ 20 cm。土样去除杂质后,避光条件下自然风干,碾压过 2 mm 筛备用。土壤机械组成利用 MS2000 激光粒度分析仪 (Malvern Instruments Ltd, UK) 测定,土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 10.17%、73.02% 和 16.81%,质地为粉黏壤土 (国际制)。生物炭为苹果木炭 (陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司),炭化温度为  $450^\circ\text{C} \sim 480^\circ\text{C}$ ,炭化时间为 8 h,生物炭研磨后过 2 mm 筛备用。小麦选用小偃 22 号 (Xiaoyan22, 西北农林科技大学选育)。土壤与生物炭理化性质见表 1。

表 1 供试土壤与生物炭主要理化特性

Table 1 Chemical and physical properties of soil and biochar used in experiment

项目 Item	pH	容重 Bulk density $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	总碳 Total C $/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	总氮 Total N $/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	硝态氮 Nitrate $/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	铵态氮 Ammonium $/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	比表面积 Specific surface area $/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
土壤 Soil	7.33	1.20	14.99	0.71	18.20	15.90	
生物炭 Biochar	10.43	0.45	723.80	11.93	0.52	1.86	1.67

### 1.2 试验设计

试验设置五个生物炭添加水平 (B0, B1, B2, B4, B6), 分别为盆内所装干土质量的 0%、1%、2%、4% 和 6%, 对应田间应用水平分别为 0、24、48、96  $\text{t} \cdot$

$\text{hm}^{-2}$  和  $144 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。三个氮肥施用水平 (N0, N1, N2), 以纯 N 计分别为  $0, 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水分设置为土壤田间持水量的 80% (W80) 和 50% (W50) 两个水平 (拔节期开始控制, 苗期至拔节期水

分条件均为田间持水量的 80%)。各处理按照  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  标准添加磷肥。共计 30 个处理,每个处理 4 次重复。

试验采用直径 20 cm,高 30 cm 的塑料桶,底部铺有一层直径 2~3 cm 石子,桶壁固定内径 2 cm PVC 水管便于后期称重控水并防止因表面灌溉产生表层土壤板结。按照试验设计,控制每盆土与生物炭总质量为 14 kg,单独称重并将对应氮肥(尿素)与磷肥(过磷酸钙)混匀,人工搅拌均匀后添加适量水,控制每盆含水量为田间持水量 80%。

2015 年 10 月 15 日播种,三叶期每盆定植 10 株,2016 年 5 月 26 日收获。苗期至拔节期根据天气及作物生长状况采用称重法控制土壤含水量为田间持水量的 80%,于 2016 年 3 月 15 日(拔节期)至 2016 年 5 月 26 日(成熟期)控制对应处理的土壤含水量。

### 1.3 测定指标及方法

小麦拔节期和抽穗期使用 LI-6400XT 便携式光合仪(LI-COR, USA)测定小麦旗叶光合参数,使用 SPAD 叶绿素含量测定仪(Minolta SPAD-502,

Osaka, Japan)测定小麦旗叶叶绿素相对含量。小麦成熟后,用剪刀将穗剪下、植株沿茎基部剪下,带回实验室进行考种,并对每盆小麦产量,穗数,每穗粒数,千粒重,株高,穗长等进行统计分析。

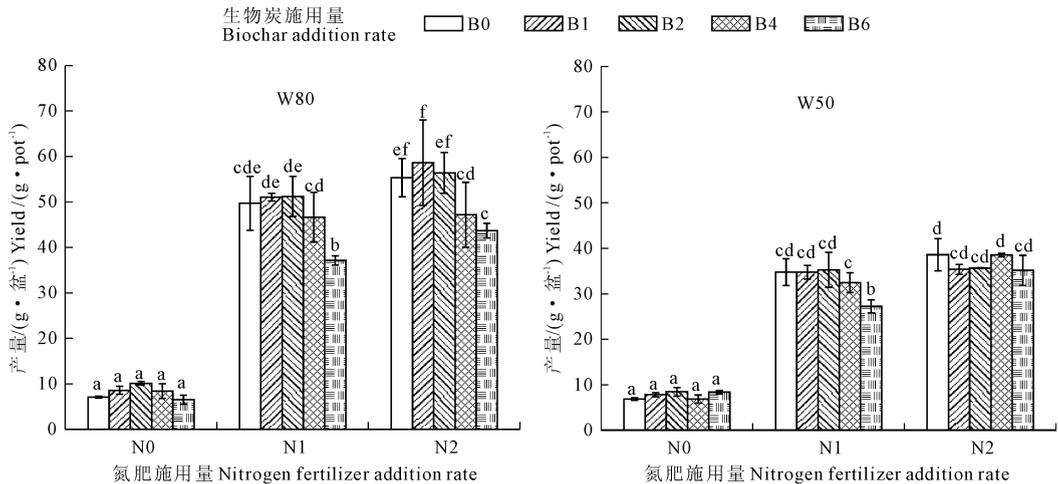
### 1.4 数据处理

试验中所有数据均为平均值,采用 Excel 2010 进行数据处理 SPSS 20.0 软件进行统计分析, LSD 多重比较处理间差异显著性( $\alpha = 0.05$ ), SigmaPlot 10.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对小麦产量的影响

生物炭对小麦产量的影响受生物炭用量,氮肥水平和水分条件共同制约。1%和 2%生物炭用量表现出增产趋势,而 4%和 6%生物炭用量均表现出负面作用,在低等氮肥(N0)条件下,添加生物炭会不同程度提高小麦产量,而在中高氮肥(N1, N2)条件下,随着生物炭用量的提高,小麦产量出现先升高再降低的趋势(图 1)。



注:生物炭施用量 B0, B1, B2, B4 和 B6 分别指在土壤中按照干土质量分数 0, 1%, 2%, 4% 和 6% 添加生物炭。N0, N1 和 N2 分别指按照 0,  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  标准添加对应量氮素。W80 和 W50 分别指在小麦拔节期至成熟期控制土壤含水量为田间持水量的 80% 和 50%。不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: The B0, B1, B2, B4 and B6 mean that biochar addition rate of 0, 1%, 2%, 4% and 6% (mass ratio), respectively. N0, N1 and N2 mean that adding N to soil with the dosage of 0,  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. W80 and W50 refer to control soil water content is 80% and 50% of field capacity (wheat jointing stage to mature stage), respectively. Different lower-case letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.

图 1 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响

Fig.1 Effects of biochar on wheat yield under different soil water and nitrogen conditions

具体地,与不施生物炭处理相比,1%生物炭用量平均增产量达 6.62%,在低氮肥(N0)水平下平均增产高达 18.05%;2%生物炭用量平均增产量达 11.01%,在 N0 水平下平均增产量达 33.62%;4%生物炭用量在中高氮肥(N1, N2)水平下,减产量达

6.88%,在低等氮肥(N0)水平下增产平均达 9.81%。6%生物炭用量会造成严重减产,平均减产量达 10.1%,在中高氮肥(N1, N2)条件下 B6 平均减产量高达 19.21%,而在低氮肥条件下 N0, B6 则平均增产 7.71%。

在正常水分(W80)条件下,各处理产量情况如图1(W80)所示。与B0N0处理产量( $7.09 \pm 0.22$  g)相比,中低生物炭用量(B1, B2)虽有增加小麦产量趋势,但均未达显著水平( $P > 0.05$ ),而高生物炭用量(B6)表现出减产作用;在中等氮肥(N1)水平下, B1N1和B2N1处理表现出一定增产趋势, B4处理表现出减产趋势,但都与B0N1处理产量( $49.17 \pm 5.88$  g)无显著差异( $P > 0.05$ ),而B6N1处理产量( $37.17 \pm 1.03$  g)下降,减产量达N0N1的25.23% ( $P < 0.05$ );在高量氮肥水平(N2)下,与B0N2处理产量( $55.37 \pm 4.22$  g)相比, B1N2与B2N2处理均表现出一定增产趋势,增量分别达B0N2处理的5.92%和1.90%,但差异均未达到统计学显著水平( $P > 0.05$ ),而B4N2和B6N2处理显著降低产量,减产量分别达B0N2处理的14.74%和21.06% ( $P < 0.05$ )。

在干旱胁迫(W50)条件下,各处理产量情况如图1(W50)所示。在N0条件下,与B0N0处理产量( $6.82 \pm 0.28$  g)相比, B1, B2, B4和B6处理小麦产量均表现出一定的增加趋势但差异均未达显著水平( $P > 0.05$ ),另外在较低生物炭用量(B1和B2)条件下,产量随生物炭用量增加而呈上升趋势;在N1条件下, B0, B1, B2和B4处理产量之间差异不显著( $P > 0.05$ ), B4N1处理表现出降低产量的趋势,减产量达B0N1产量( $34.77 \pm 2.91$  g)的6.67%。而B6N1处理产量显著低于B0N1处理,减少量达B0N1的21.63% ( $P < 0.05$ );在N2条件下,所有生物炭处理(B1, B2, B4和B6)产量均与未添加生物炭处理(B0)产量无显著差异( $P > 0.05$ ),但均表现出一定的减产作用。

## 2.2 氮肥对小麦产量的影响

小麦产量随氮肥施用量的增加而增加, N1和N2平均产量分别是N0处理平均产量的5.06倍和5.62倍, N2处理平均产量比N1处理平均产量提高11.09%。水分条件对氮肥增产效果影响较为明显,在正常水分条件下(W80),与N0相比, N1和N2处理平均产量分别是N0处理平均产量的5.78倍和6.41倍。在干旱胁迫条件下(W50), N1和N2处理平均产量分别是N0处理的4.29倍和4.78倍,与N1处理产量相比, N2处理平均增产11.46%。

如图1所示,在正常水分(W80)条件下,所有处理在N0条件下的产量均显著低于N1和N2处理产量( $P < 0.05$ )。在B0, B2和B4条件下, N1和N2处理之间差异均不显著( $P > 0.05$ )。B6条件下, N1和N2处理产量之间差异显著, N2产量比N1增加17.60% ( $P < 0.05$ )。

在干旱胁迫情况下,与正常田间水分处理情况类似,所有处理在N0条件下的产量与N1和N2处理产量之间的差异均显著( $P < 0.05$ ); B0, B1和B2处理在N1和N2条件下的产量之间无显著差异( $P > 0.05$ )。B4N2比B4N1产量提高了18.77% ( $P < 0.05$ ), B6N2比B6N1产量提高了29.03% ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 土壤水分含量对小麦产量的影响

如图2所示,干旱胁迫(W50)条件下各处理平均产量显著低于正常水分(W80)条件下各处理平均产量, W50处理平均产量为W80处理平均产量的70.79% ( $P < 0.05$ )。在N0条件下, B2W80和B4W80处理产量分别显著高于B2W50和B4W50处

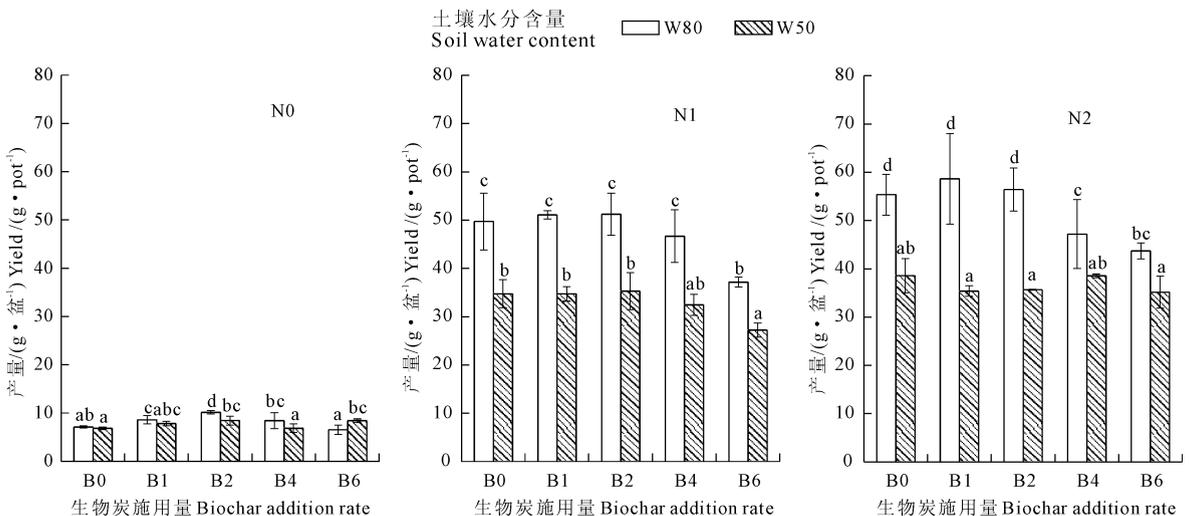


图2 土壤水分含量对小麦产量的影响

Fig.2 Effects of soil water content on wheat yield

理产量 ( $P < 0.05$ ), 而 B6W50 处理产量显著高于 B6W80 处理 ( $P < 0.05$ ); 在 N1 和 N2 条件下, 同一生物炭处理, W80 各处理产量均分别显著高于 W50 各处理产量 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 生物炭、氮肥和水分之间交互作用对小麦产量的影响

氮肥用量与土壤水分含量对小麦产量的影响明显强于生物炭处理, 但它们之间存在复杂的交互作用 ( $P < 0.05$ ), 共同影响小麦最终产量。如图 3 所示, 在正常水分 (W80) 条件下, 小麦产量随着生物炭用量增加呈先增后减的趋势, 而在干旱胁迫 (W50) 条件下, 小麦产量随生物炭用量变化受氮肥水平影响较大, 在中等肥力 (N1) 条件下, 小麦产量随着生物炭用量增加呈现先增后减的趋势, 而在较低 (N0) 或较高 (N2) 氮肥水平下, 未表现出明显变化趋势。

#### 2.5 生物炭在不同氮肥和水分条件下对小麦农艺性状的影响

小麦的农艺性状受生物炭、氮肥和水分共同影响, 在低氮肥 (N0) 水平下, 添加生物炭部分处理可以显著增加小麦穗长, 在高氮肥 (N2) 水平下, 添加

生物炭处理均会降低小麦株高, 较高的生物炭 (B4, B6) 输入会导致小麦千粒重、穗粒数和株高的降低。在相同水分和氮肥条件下, 大部分生物炭处理与未施生物炭处理 (B0) 相比, 农艺性状无显著差异 (表 2)。

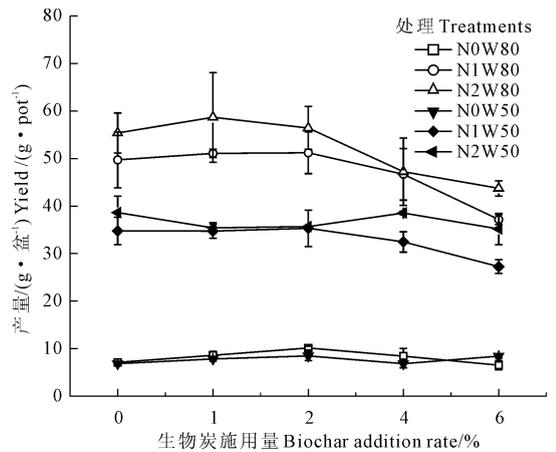


图 3 生物炭、氮肥和土壤水分含量交互作用对小麦产量的影响

Fig.3 Effects of the interaction of biochar, nitrogen and soil water content on wheat yield

表 2 生物炭对不同水氮条件下小麦农艺性状的影响

Table 2 The wheat agronomic traits of each treatment

性状 Agronomic traits	处理 Treatments	W80					W50				
		B0	B1	B2	B4	B6	B0	B1	B2	B4	B6
穗数 Spike number	N0	10.25	10.25	10.50	10.25	9.75	10.50	10.00	10.25	10.00	10.25
	N1	28.50	34.50	31.00	27.50	26.25	28.25	29.00	28.25	25.75	22.75
	N2	32.25	39.50	36.00	31.75	29.50	27.00	23.00	29.50	30.50	27.00
穗粒数 Kernels per spike	N0	21.17	23.33	23.58	21.08	20.58	18.83	21.42	20.75	19.58	24.42*
	N1	47.50	44.75	44.25	44.50	42.08	45.67	40.92	38.42*	36.08**	40.83
	N2	47.67	43.50	41.67	46.58	41.42	42.25	44.33	44.92	45.33	42.25
千粒重/g TKW	N0	41.02	43.02	42.92	43.73	41.62	42.40	40.66	44.27	41.47	41.33
	N1	43.86	42.33	41.44	40.27*	38.27**	42.26	46.37*	45.05	41.84	42.42
	N2	50.94	44.33	37.79**	44.43	39.53**	45.48	45.96	45.91	42.37	43.07
穗长/cm Ear length	N0	5.83	6.54**	6.49**	6.04	6.00	5.73	6.14*	6.03	5.94	6.18*
	N1	7.67	7.97	7.75	7.85	7.37	7.87	7.67	7.87	7.50	7.45
	N2	7.74	7.76	7.63	8.26*	7.90	7.64	7.84	7.73	8.03	7.47
株高/cm Plant height	N0	66.38	69.24	71.32*	67.20	64.61	60.60	65.37	65.62	64.78	64.64
	N1	70.01	70.13	73.58	73.28	73.61	72.70	68.40	68.35	67.18*	71.13
	N2	71.91	71.86	66.98	68.26	71.05	71.24	65.33**	68.83	66.47*	68.23

注: B0, B1, B2, B4 和 B6 分别指在土壤中按照干土质量分数 0, 1%, 2%, 4% 和 6% 添加生物炭。N0, N1 和 N2 分别指按照 0, 0.2 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.4 g·kg<sup>-1</sup> 标准添加对应量氮素。W80 和 W50 分别指在小麦拔节期至成熟期控制土壤含水量为田间持水量的 80% 和 50%。“\*”, “\*\*” 分别表示在同等水分和氮肥条件下, 添加生物炭处理与未添加生物炭处理之间差异在 5%, 1% 水平上显著。

Note: B0, B1, B2, B4 and B6 mean that biochar addition rate is 0, 1%, 2%, 4% and 6% (mass ratio) respectively. N0, N1 and N2 mean that adding N to soil with the dosage of 0, 0.2 g·kg<sup>-1</sup> and 0.4 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. W80 and W50 refer to control soil water content is 80% and 50% of field capacity (wheat jointing stage to mature stage), respectively. “\*” and “\*\*” indicating that the differences between the value of biochar treatment and no biochar treatment (under the same condition of water and nitrogen fertilizer) in 5%, 1% significant level, respectively.

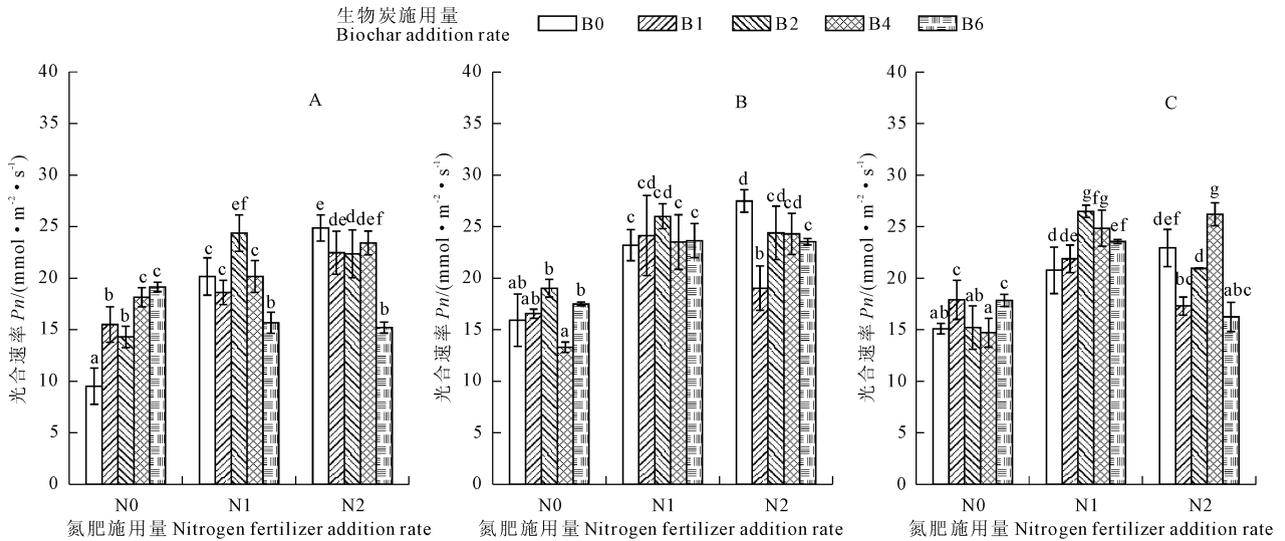
在 W80 水分条件下,生物炭与氮肥互作主要影响小麦千粒重、穗长和株高三个性状。B4N1W80 和 B6N1W80 处理的千粒重均显著小于 B0N1W80 ( $P < 0.05$ ),减少量分别达 B0N1W80 的 8.19% 和 12.75%。在 NOW80 条件下,添加生物炭处理的穗长均高于未添加生物炭处理,其中 B1 和 B2 处理穗长分别显著高于 B0 的 12.18% 和 11.32% ( $P < 0.05$ ),同时,B2 处理株高显著高于 B0,增量达 B0 处理的 7.44%。

在 W50 水分条件下,N0 处理,添加生物炭有助于增加穗长,其中 B1 和 B6 处理穗长分别显著高于 B0 的 7.16% 和 7.85% ( $P < 0.05$ );B6 处理显著提高 B0 处理穗粒数达 29.69% ( $P < 0.05$ )。但在 N1W50 条件下,B2 和 B4 则显著减少穗粒数,减少量分别达 B0 处理的 15.88% 和 21.01% ( $P < 0.05$ )。在

N2W50 条件下,添加生物炭处理均会不同程度降低株高,其中 B1 和 B4 处理株高显著低于 B0,分别达 8.31% 和 6.71% ( $P < 0.05$ )。

## 2.6 生物炭对小麦旗叶光合速率的影响

生物炭对光合速率的影响同样受到生物炭用量、氮肥水平和土壤水分含量及其交互作用的共同制约 ( $P < 0.05$ )。如图 4 所示,与不施生物炭处理相比,生物炭处理在低氮肥(N0)条件下表现出提高小麦旗叶光合速率的作用,且在小麦营养生长阶段(拔节期)较生殖生长阶段(抽穗期)促进作用更加明显。在中等氮肥(N1)条件下,生物炭处理均表现出促进小麦抽穗期旗叶光合速率的趋势且在干旱胁迫条件下促进作用更为突出。在高等氮肥(N2)条件下,除 B4N2W50 外,生物炭处理均表现出一定降低小麦旗叶光合速率的作用。



注:子图 A 表示拔节期小麦旗叶光合速率,子图 B 和 C 分别表示抽穗期小麦旗叶在 W80 和 W50 条件下光合速率。

Note: Subgraph A shows the wheat flag leaf photosynthetic rate of jointing stage, subgraph B and C show wheat flag leaf photosynthetic rate of heading stage under the W80 and W50 water conditions respectively.

图 4 生物炭对小麦旗叶光合速率的影响

Fig.4 Effects of biochar on photosynthetic rate of wheat flag leaf

在小麦拔节期,所有处理都在 W80 水分条件下,低氮肥(N0)添加生物炭处理显著提高光合速率,如 B1,B2,B4 和 B6 处理分别提高 B0 处理光合速率的 63.16%,50.53%,91.58% 和 101.05% ( $P < 0.05$ )。在中等氮肥(N1)条件下,B2 处理显著提高光合速率达 B0 处理的 20.79% ( $P < 0.05$ ),而 B6 处理光合速率则显著低于 B0 处理 ( $P < 0.05$ )。在高等氮肥(N2)条件下 B6 处理光合速率显著低于 B0 处理,减少量为 B0 处理的 38.96% ( $P < 0.05$ )。

在小麦抽穗期,生物炭处理对小麦旗叶光合速率的影响在正常水分处理和干旱胁迫条件下表现较为一致。在中低氮肥(N0,N1)条件下,生物炭处理不同程度提高小麦旗叶光合速率,其中 B2 处理作

用最为明显。在高等氮肥(N2)条件下,除 B4N2W50 外,生物炭处理均在不同程度上降低光合速率,其中 B1N2W80 和 B6N2W80 光合速率分别显著低于 B0N2W80 的 30.80% 和 14.44% ( $P < 0.05$ ),B1N2W50 和 B6N2W50 光合速率分别显著低于 B0N2W50 的 24.55% 和 29.22% ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

本研究结果显示,生物炭对小麦旗叶主要光合参数和产量的影响受生物炭用量,氮肥水平和水分条件共同制约。总体上,低量(1%,2%)生物炭表现出促进光合作用、增加产量的趋势。较高(4%,6%)生物炭用量对小麦生长表现出负面作用,其中 4%

和 6% 生物炭用量平均减产量分别达 6.88% 和 10.1%。在低氮肥水平下,生物炭处理均表现出促进小麦光合速率并提高小麦产量的作用,增产幅度为 6.62% ~ 33.62%。而在中高氮肥(N1,N2)条件下过高生物炭输入会表现出负面效应,4% 和 6% 生物炭用量处理平均减产量分别为 6.88% 和 19.21%。

低氮肥(N0)条件下,生物炭表现出一定增产作用,营养生长阶段净光合速率和蒸腾速率同步提高,利于积累更多光合产物;生殖生长阶段,干旱胁迫条件使得小麦较低的蒸腾速率与光合速率协同,减少水分与产物消耗,最终增加作物产量。这是由于生物炭的灰分中含有的水溶性矿质元素能直接提高土壤中营养元素总量和作物可利用态含量<sup>[18]</sup>,加之提高土壤阳离子交换量、总磷、总氮含量等作用使土壤理化性质的改善,进一步提高土壤肥力<sup>[19]</sup>,从而提高小麦物质生产能力与最终产量。

在中高氮肥(N1,N2)条件下,适量生物炭输入促进小麦拔节期和抽穗期光合作用,加速营养和生殖生长过程,最终增加小麦产量。生物炭对作物生长的影响与生物炭种类和土壤质地密切相关,本试验选用碱性木质生物炭,此类生物炭拥有较高增产潜力,平均可以提高 12.1% 的作物生产能力<sup>[20]</sup>。而针对土壤质地而言,生物炭施用于砂质土壤往往具有较高的增产作用,在质地较细土壤中增产作用并不明显。如 Jeffery 等<sup>[21]</sup>指出,在中等质地土壤和粗质地土壤中施用生物炭,作物生产力分别平均提高 12% 和 10%,而在细质地土壤中,生物炭施用并未表现出增产作用。本研究使用土壤为含黏粒 16.81% 的碱性粉黏壤土,由于生物炭的微孔丰富,碳架结构清晰稳固<sup>[22]</sup>,输入土壤后使其总孔隙度提高,容重降低,透气通水性增强<sup>[23]</sup>,为作物生长尤其是根系生长提供良好的环境条件<sup>[3,24]</sup>,利于作物增产<sup>[25]</sup>,但生物炭提高土壤阳离子交换量和养分持留等作用并没有在粗质地土壤中明显<sup>[20]</sup>,这在一定程度上限制了生物炭最大增产效应的发挥。

本试验高量(4%,6%)生物炭输入土壤造成小麦光合速率、小麦千粒重、穗粒数和株高降低,最终产量下降。其主要原因是:(1) 供试土壤为质地较细的碱性土壤,使改良土壤和增产主要机理为石灰效应和提高土壤持水能力的生物炭有利功能受到限制<sup>[19]</sup>;(2) 生物炭的大量输入造成土壤 pH 进一步提高,从而大大降低了磷和某些微量元素的有效性;(3) 随着生物炭的大量输入,土壤碳氮比和生物炭中易降解的脂肪碳含量也随之升高,微生物会对氮素产生强烈的固定,降低根系的可利用性进而影响作物产量<sup>[26-27]</sup>。这与目前国内外研究结果较为一致,如 Uzoma 等<sup>[28]</sup>将生物炭应用在种植于沙质土壤

的玉米中,结果发现 15 t·hm<sup>-2</sup>处理的产量高于 20 t·hm<sup>-2</sup>处理。Liu 等<sup>[20]</sup>综合分析了 2013 年以来近 10 年生物炭还田相关试验对作物产量的影响,得出生物炭的施用平均可以提高 11.0% 的作物生产力,平均提高 10.6% 旱地作物生产力的结论,同时指出当生物炭用量超过 40 t·hm<sup>-2</sup>时,其增产作用将受到限制。本试验 4% 和 6% 生物炭用量对应田间 96 t·hm<sup>-2</sup> 和 144 t·hm<sup>-2</sup> 用量,生物炭负增产效应开始展现。

在农业生产中,氮肥和水分是限制作物生产力的主要因素,光合作用是植物物质生产的基础,国内外研究表明生物炭对土壤氮和水分具有较好的固持作用,能有效提高土壤保水保肥能力<sup>[29-30]</sup>,促进作物光合作用<sup>[12]</sup>,增加作物产量<sup>[31-33]</sup>。在本文中,生物炭、氮肥和土壤水分含量之间存在复杂的交互作用,氮肥和水分条件起主导作用,但无论在正常水分还是干旱胁迫条件下,适量生物炭输入与一定氮肥水平之间均存在协同增产作用,这与 Jeffery 等<sup>[21]</sup>的研究结果较为一致。适量生物炭输入土壤,生物炭自身养分的带入、对土壤容重和孔隙度等物理性质的改良充分发挥作用,使作物根系水气状况得到改善,而微生物固持养分的激发效应不强烈,最终生物炭与氮肥的协同增产作用得到进一步体现。另外,本试验两种水分梯度之间差距较大,生物炭与氮肥协同增产作用并未突破干旱胁迫对作物生长的限制,但值得注意的是在干旱胁迫条件下,中低量氮肥与生物炭协作促进小麦光合作用,且 B6N0 处理产量显著高于正常水分条件下的产量,这说明在一定氮肥和水环境条件下,生物炭拥有提升作物抗旱能力的潜力。

本文研究了生物炭、氮肥和土壤水分及其交互作用对小麦产量、农艺性状和关键生育期旗叶光合速率的影响,并深入探讨生物炭适宜用量及内在机理,为在不同肥力和水分条件地区应用生物炭提升土壤质量和提高作物产量提供理论依据和技术支撑。本文采用盆栽种植小麦方法,其效果与大田实际应用存在一定差距,且在大田试验中,生物炭改良作用具有一定累加潜力,生物炭还田第二年起开始表现出越来越强的增产效应<sup>[20-21]</sup>。因此,生物炭、氮肥和水分交互的长期田间定位试验亟待开展。

## 4 结 论

1) 适宜生物炭用量(1%,2%)增加小麦产量,过高生物炭用量(4%,6%)显著降低小麦产量。低氮肥(N0)水平下,施用生物炭促进小麦光合作用,达到增产效果;中高氮肥(N1,N2)条件下产量随着生物炭用量增加呈先增后减趋势。

2) 生物炭对小麦光合作用及产量的影响受生

物炭用量,土壤肥力和水分条件共同制约且存在复杂的交互作用,1%和2%生物炭用量与氮肥之间存在协同增产作用。干旱胁迫会限制生物炭与氮肥的协同增产作用

3) 在贫瘠土壤上应用生物炭效果较好,在改良质地较细且肥力良好的土壤时推荐  $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (2%) 生物炭用量。

#### 参考文献:

- [1] ANTAL M J, GRONLI M. The Art, Science, and technology of charcoal production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003,42(8):1619-1640.
- [2] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2006,11(2):395-419.
- [3] Olmo M, Villar R, Salazar P, et al. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development [J]. *Plant & Soil*, 2016,399(1-2):333-343.
- [4] Farrell M, Macdonald L M, Butler G, et al. Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2014,50(1):169-178.
- [5] Lim T J, Spokas K A, Feyereisen G, et al. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties [J]. *Chemosphere*, 2016,142:136-144.
- [6] Lai J, Rren L. Estimation of effective hydraulic parameters in heterogeneous soils at field scale [J]. *Geoderma*, 2016,264,Part A:28-41.
- [7] Yang Y, Ma S, Zhao Y, et al. A field experiment on enhancement of crop yield by rice straw and corn stalk-derived biochar in Northern China [J]. *Sustainability*, 2015,7(10):13713-13725.
- [8] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2015,158:61-68.
- [9] 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(2):275-290.
- [10] Cranedoesch A, Abiven S, Jeffery S, et al. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis [J]. *Environmental Research Letters*, 2013,8(4):925-932.
- [11] Wang Y, Pan F, Wang G, et al. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014,175(1):9-15.
- [12] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响 [J]. *中国农业科学*, 2014,47(2):366-373.
- [13] Zwieten L V, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant & Soil*, 2010,327(1-2):235-246.
- [14] 张晗芝,黄云,刘刚,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010,19(11):2713-2717.
- [15] Antonio Albuquerque J, Salazar P, Barron V, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013,33(3):475-484.
- [16] Liang F, Gui-tong L I, Lin Q, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014,13(3):525-532.
- [17] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region [J]. *Organic Geochemistry*, 2000,31(7):669-678.
- [18] Xu G, Wei L L, Sun J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? [J]. *Ecological Engineering*, 2013,52(2):119-124.
- [19] Marris E. Putting the carbon back: black is the new green [J]. *Nature*, 2006,442(7103):624-6.
- [20] Liu X, Zhang A, Ji C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data [J]. *Plant & Soil*, 2013,373(1-2):583-594.
- [21] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M V D, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011,144(1):175-187.
- [22] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景 [J]. *中国农业科学*, 2013,46(16):3324-3333.
- [23] Bapat H, Manahan S E, Larsen D W. An activated carbon product prepared from milo (*Sorghum vulgare*) grain for use in hazardous waste gasification by chemchar cocurrent flow gasification [J]. *Chemosphere*, 1999,39:23-32.
- [24] Blackwell P, Krull E, Butler G, et al. Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertilizer use in southwestern Australia: an agronomic and economic perspective [J]. *Aust J Soil Res*, 2010,48:531-545.
- [25] Bengough A G, Bransby M F, Hans J, et al. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell [J]. *Obstetrics & Gynecology*, 2006,57(2):437-447.
- [26] Deenik J L, Mcclellan T, Uehara G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010,74(4):1259-1270.
- [27] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2007,43(6):699-708.
- [28] Uzoma K C, Inoue M, Aadry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use & Management*, 2011,27(2):205-212.
- [29] Zhang J, Chen Q, You C. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil [J]. *Pedosphere*, 2016,26(2):265-272.
- [30] Pratiwi E P A, Hillary A K, Fukuda T, et al. The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil [J]. *Geoderma*, 2016,277:61-68.
- [31] Zhao X, Wang J, Wang S, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil [J]. *Plant & Soil*, 2014,378(1-2):279-294.
- [32] Partey S T, Preziosi R F, Robson G. D. Short-term interactive effects of biochar, green manure, and inorganic fertilizer on soil properties and agronomic characteristics of maize [J]. *Agricultural Research*, 2014,3(2):128-136.
- [33] Macdonald L M, Farrell M, Zwieten L V, et al. Plant growth responses to biochar addition: an Australian soils perspective [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2014,50(7):1035-1045.