

# 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率

谢迎新<sup>1</sup>, 刘宇娟<sup>1</sup>, 张伟纳<sup>1</sup>, 董成<sup>1</sup>, 赵旭<sup>2\*</sup>, 贺德先<sup>1</sup>,  
王晨阳<sup>1</sup>, 郭天财<sup>1</sup>, 王慎强<sup>2</sup>

(1. 河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心/河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450046;  
2. 中国科学院南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 该文于 2011 年起在黄淮海典型潮土区建立的秸秆炭化还田定位试验的基础上, 系统观测了 2011 至 2017 年时间段秸秆生物炭连续施用下小麦生长及氮吸收情况, 分析了产量构成因素, 地上干物质及氮累积, 关键生育期叶面积指数 (LAI)、叶绿素相对含量 (SPAD 值) 和群体数量等与小麦增产的关系, 并监测了长期生物炭施用下土壤有机碳 (SOC) 与全氮 (TN) 含量的变化。该试验采用小麦/玉米周年轮作, 设每季 0、2.25、6.75 和 11.25 t/hm<sup>2</sup> 四个秸秆生物炭处理 (分别表示为 BC0 (对照)、BC2.25 (低)、BC6.75 (中) 和 BC11.25 (高))。结果表明, 与 BC0 相比, BC2.25 仅在 2015/2016 季提高小麦产量, 对其他 5 季无明显效果; BC6.75 则在 2014/2015、2015/2016 和 2016/2017 的后 3 季显著提高小麦产量; 而 BC11.25 提高了 2014/2015 和 2015/2016 季小麦产量。尽管生物炭处理对各季小麦产量影响各异, 但 6 季各处理平均产量数据显示低、中、高量生物炭处理均可提高小麦产量 7.0%~8.5%、生物量 5.2%~10.8% 和氮肥偏生产力 6.8%~8.6%, 且 3 个处理间并无差异; 中、高量生物炭处理还可提高小麦秸秆产量 11.4%~12.6%、穗数 10.1%~11.2%、籽粒氮积累量 9.4%~11.2%、秸秆氮积累量 17.4%~23.8%、地上部氮积累量 13.3%~20.9%。生物炭施用在促进小麦生长和氮吸收利用的作用方面与其增加小麦生育期 LAI 和 SPAD 值一致, 具体表现为低、中、高量生物炭处理均可明显增加 2015/2016 和 2016/2017 两季小麦主要生育期群体数量以及增加两季拔节期、抽穗期 SPAD 值和 LAI 值。3 个生物炭处理对提高 2011/2012 土壤 SOC 含量和 2011—2014 年土壤 TN 含量无明显效果, 中、高量生物炭处理可增加 2012—2017 年土壤 SOC 含量 32.6%~215.6% 和 2014—2017 年土壤 TN 含量 20.0%~36.8%。研究表明, 合理施用生物炭能够促进黄淮区潮土农田冬小麦籽粒产量和氮肥偏生产力以及促进小麦生长和地上部氮素吸收, 进而起到提高土壤肥力和增加土壤固碳的作用。

**关键词:** 氮; 生物炭; 潮土; 冬小麦; 籽粒产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.14.015

中图分类号: S156

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-14-0115-09

谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 董成, 赵旭, 贺德先, 王晨阳, 郭天财, 王慎强. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 115-123. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.14.015

<http://www.tcsae.org>

Xie Yingxin, Liu Yujuan, Zhang Weina, Dong Cheng, Zhao Xu, He Dexian, Wang Chenyang, Guo Tiancai, Wang Shenqiang. Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 115-123. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.14.015 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

生物炭是一种生物质原料经气化或热裂解转化而来的含碳量高达 60% 以上<sup>[1]</sup>的固态难溶物质<sup>[2]</sup>, 具有较大的比表面积和孔隙度<sup>[3]</sup>, 一般呈碱性。施用生物炭能够显著改善土壤肥力, 如降低酸性土壤的作物铝毒害<sup>[4]</sup>, 改善土壤耕层结构、降低土壤容重<sup>[5]</sup>以及增大土壤孔隙度等。王艳阳等<sup>[6]</sup>在黑龙江黑土区的研究表明, 添加生物炭可提高土壤饱和导水率 14.3%~52.4%, 促进作物生长并且减少地表径流和水土流失。张燕辉<sup>[7]</sup>连续 4 年施用生物炭的试

验结果表明, 土壤 pH、全碳、全氮含量随着生物炭用量的增加而升高。另有研究报道, 生物炭具有改善农田生态环境的效果, 尤其在土壤固碳和温室气体减排方面发挥着重要作用<sup>[8-9]</sup>。李露等<sup>[10]</sup>研究报道, 20、40 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭施用量均可降低稻麦轮作系统中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放。Warnock 等<sup>[11]</sup>研究表明, 施用生物炭可减少土壤硝化细菌和反硝化细菌的可用氮源, 进而改变农田生态系统的氮循环, 减少 N<sub>2</sub>O 的排放。

受制备生物炭的材料、生物炭施用量、生物炭施用年限以及土壤条件的影响, 作物生长和产量对生物炭施用的响应效果不尽相同。叶英新<sup>[12]</sup>试验结果表明, 与不施生物炭相比, 20 和 40 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭在施用 2 a 后, 对小麦和玉米的籽粒产量均无显著影响。Kerré 等<sup>[13]</sup>研究表明, 在施用生物炭的肥沃土壤上的玉米产量较相邻常规耕作土壤地块的玉米产量 3 a 平均增加 23%。当前关于生物炭的报道多集中在其影响作物产量及固碳减排方面, 而在黄淮海潮土农田多年连续施用生物炭对小麦产量及

收稿日期: 2018-02-28 修订日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金 (41771338); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD26B00) 联合资助

作者简介: 谢迎新, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与农业生态环境方面的研究。Email: xieyingxin@tom.com

\*通信作者: 赵旭, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农业生态环境方面的研究。Email: zhaoxu@issas.ac.cn

其生理机制方面的研究报道相对较少, 缺乏长期的田间监测。鉴于上述, 本文通过连续 6 a 小麦/玉米轮作种植下生物炭施用对冬小麦生长、产量、地上部干物质积累、氮素吸收利用及土壤有机碳和全氮含量影响的研究, 探究生物炭施用影响小麦产量和氮素吸收的生理机制, 以为黄淮海潮土农田秸秆炭化还田可行性评估提供一定科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及生物炭

试验地位于河南省封丘县潘店乡中国科学院封丘农业生态实验站 (35°00' N, 114°24' E), 该站位于黄淮海平原中部, 属暖温带大陆性季风气候, 年均气温 13.5~14.5 °C, 无霜期 214 d, 年均蒸发量 1 860 mm, 年均降水量 625 mm, 是典型的小麦/玉米轮作区。试验地耕层 (0~20 cm) 土壤质地为砂质潮土, 土壤基础养分为有机质 11.2 g/kg、全氮 0.79 g/kg、有效磷 10.5 mg/kg、速效钾 92.1 mg/kg、pH 值 8.30。生物炭为水稻秸秆在 500 °C 条件下, 以沼气为能源的炭化炉下热解制备<sup>[14]</sup>, 全碳含量为 514.8 g/kg、全氮含量为 10.3 g/kg、有效磷 1.71 g/kg、速效钾 49.2 mg/kg、灰分含量为 37.1%, pH 值 10.5。

### 1.2 试验设计

试验于 2011 年 10 月开始, 至 2017 年 6 月, 已完成 6 a 小麦/玉米轮作种植。生物炭在农田的施用量目前并无统一标准。通常, 中国小麦玉米秸秆每季产量约为 7.5 t/hm<sup>2</sup>, 如将每季秸秆在下季作物开始前全部炭化还田, 按照秸秆炭化率 30% 计算得到的生物炭 (500 °C, 8 h) 还田量为 2.25 t/hm<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。因此, 本研究从秸秆炭化还田的角度出发, 围绕每季秸秆全部炭化后还田的量 (2.25 t/hm<sup>2</sup>) 设置不施生物炭 (对照 0 t/hm<sup>2</sup>, BC0)、低量 (秸秆全量炭化还田 2.25 t/hm<sup>2</sup>, BC2.25)、中量 (3 倍量秸秆炭化还田 6.75 t/hm<sup>2</sup>, BC6.75) 和高量 (5 倍量秸秆炭化还田 11.25 t/hm<sup>2</sup>, BC11.25) 4 个处理。各处理重复 3 次, 随机排列, 小区面积 16 m<sup>2</sup> (4 m×4 m)。在小区四周水泥浇筑以防止小区间水肥互串。各小区 N、P、K 肥全生育期施用量保持一致, 分别为 N (常规尿素, 含氮量 46%) 240 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (重过磷酸钙, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%) 150 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O (硫酸钾, K<sub>2</sub>O 50%) 90 kg/hm<sup>2</sup>。P、K 肥作为基肥在播种前随翻地一次性施用, N 肥按照 6:4 比例分别作为基肥和小麦拔节期追肥施用。生物炭与肥料在播种前均匀撒施在每个小区内, 经人工翻地与耕层土壤 (0~20 cm) 充分混合。其他栽培管理措施同当地农田。

### 1.3 测定指标及计算方法

#### 1.3.1 小麦籽粒产量及构成因素

成熟期整个小区小麦单打单收全部收获, 充分风干后称质量, 并测定含水量 (105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒质量) 计算籽粒产量、秸秆产量和生物量。并调查 1 m 双行 (在小麦三叶期选取各处理均匀一致 1 m 双行作为定苗样点) 计算单位面积成穗数, 取 20 株小麦植株进行考种, 记录穗粒数和千粒质量。

#### 1.3.2 叶绿素相对含量 (SPAD 值) 及叶面积指数 (LAI)

在小麦越冬期和拔节期, 于上午 8:00-10:00, 用

SPAD-502 Chlorophyll Meter Model 仪测定小麦最上部完全展开叶 SPAD 值。LAI 与 SPAD 值测定同步, 各处理随机选取 10 株生长一致的小麦植株, 采用长宽系数法测定 LAI。

#### 1.3.3 群体动态

与 SPAD 值测定同步, 调查 1 m 双行样点小麦群体数量变化情况。

#### 1.3.4 氮素相关指标

将烘干籽粒、秸秆样品粉碎, 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 催化剂消煮, 半微量凯氏定氮法测定全氮含量。计算方法如下: 籽粒氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>)=籽粒含氮量(%)×100×籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>) (1)

秸秆氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>)=秸秆含氮量/100×秸秆产量(kg/hm<sup>2</sup>) (2)

地上部氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>)=籽粒氮积累量+秸秆氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>) (3)

氮素收获指数(%)=籽粒氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>)/地上部氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>)×100 (4)

氮肥偏生产力(kg/kg)=籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>)/施氮量(kg/hm<sup>2</sup>) (5)

#### 1.3.5 土壤有机碳和全氮

在每季小麦收获后, 采用五点取样法取每个小区 0~20 cm 混合土壤样品, 风干后过 0.15 mm 筛, 采用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机碳 (SOC, Soil organic carbon) 含量, 采用浓硫酸-混合催化剂消煮后凯氏定氮法测定全氮 (TN, total nitrogen) 含量。

## 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 处理和计算数据、SPSS 19.0 统计软件进行多重比较 (采用 LSD 法), 显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ , 采用 Origin 8.0 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对小麦籽粒产量、生物量及收获指数的影响

由表 1 可知, 与对照相比, 生物炭处理在前 3 季 (2011/2012、2012/2013 和 2013/2014) 对小麦籽粒产量、秸秆产量和生物量均无明显影响, 但自第 4 季 (2014/2015) 始逐渐表现出显著性影响。其中, BC2.25 处理籽粒产量、秸秆产量、生物量和收获指数在 2015/2016 分别较 BC0 处理显著 ( $P<0.05$ ) 提高 24.5%、14.8%、18.8% 和 4.8%; 与 BC0 处理比较, BC6.75 处理, 在 2014/2015、2015/2016 和 2016/2017 季, 分别显著提高籽粒产量 14.6%、8.8% 和 11.9%, 显著提高秸秆产量 14.9%、7.5% 和 33.3%, 显著提高生物量 14.8%、8.1% 和 24.7%。而对于 BC11.25 处理, 在 2014/2015 和 2015/2016 季分别较 BC0 处理显著提高籽粒产量 11.8% 和 9.1%, 2014/2015 季显著提高秸秆产量 13.4%, 2014/2015 和 2015/2016 季显著提高生物量 12.7% 和 6.1%。同时, 通过对各处理 6 季平均值多重比较分析结果表明, 低、中、高量生物炭处理分别较 BC0 处理显著提高籽粒产量 7.0%、8.5% 和 8.6%, 显著提高生物量 5.2%、10.8% 和 9.5%。试验结果表明, 连续施用生物炭具有提高小麦生物产量和籽粒产量的效果。

通过对产量构成分析发现, 与 BC0 处理比较, 连续 6 季施用生物炭处理对小麦千粒质量均无明显影响, 而对成穗数和穗粒数的影响在不同年际间存在差异。如, 低量生物炭 BC2.25 处理, 在 2011/2012 和 2015/2016 年度, 成穗数分别较 BC0 处理显著提高 14.9% 和 22.9%, 穗粒

数在 2011/2012 季显著提高 9.0%，而在其他季节 BC2.25 处理未对小麦成穗数和穗粒数产生显著影响。对于中量生物炭 BC6.75 处理，成穗数和穗粒数在 2015/2016 分别较 BC0 处理显著提高 31.4% 和 9.7%。而对于高量生物炭 BC11.25 处理成穗数在 2015/2016 和 2016/2017 分别较 BC0 处理显著提高 32.2% 和 12.3%。同时，通过连续 6 季

生物炭处理产量构成平均值分析表明，BC6.75 和 BC11.25 处理分别较对照显著提高成穗数 10.1% 和 11.2%，而对穗粒数和千粒质量无显著影响。该结果表明，施用生物炭具有提高小麦成穗数和穗粒数的作用，但不同年际间可能存在差异，分析原因可能与不同年际间小麦生育期降雨量存在差异进而影响了小麦成穗数和穗粒数有关。

表 1 不同生物炭施用量对小麦产量、生物量及收获指数的影响  
Table 1 Effects of biochar application on grain yield, biomass and harvest index

种植季 Crop seasons	生育期降雨量 Rainfall during growth/mm	处理 Treatments	成穗数 Spikes /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒质量 1000-kernal mass/g	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	秸秆产量 Straw yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	生物量 Biomass /(kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index/%
2011/2012	611	BC0	547.5b	31.4b	42.2a	5 722a	9 248a	14 970a	38.3b
		BC2.25	555.8b	32.7ab	41.4a	6 000a	8 306a	14 306a	42.0a
		BC6.75	629.3a	34.2a	41.4a	6 142a	8 755a	14 897a	41.2ab
		BC11.25	586.5ab	32.7ab	41.0a	6 008a	9 171a	15 178a	39.7ab
2012/2013	631	BC0	547.5a	34.4a	41.6a	5 778a	8 270a	14 048a	41.2a
		BC2.25	586.5a	32.5a	41.8a	5 811a	8 317a	14 127a	41.2a
		BC6.75	602.3a	34.9a	41.9a	6 036a	9 195a	15 231a	39.7a
		BC11.25	615.0a	38.4a	42.0a	5 701a	9 126a	14 827a	38.5a
2013/2014	566	BC0	450.0a	35.0a	49.1a	6 698a	7 261a	13 959a	48.3a
		BC2.25	531.8a	29.2a	51.2a	6 995a	7 812a	14 808a	47.3a
		BC6.75	524.3a	32.4a	49.5a	6 897a	8 112a	15 009a	46.0a
		BC11.25	511.5a	30.6a	48.7a	7 057a	8 782a	15 840a	44.6a
2014/2015	340	BC0	678.9a	32.6ab	39.7a	6 615b	8 050c	14 664b	45.1a
		BC2.25	648.8a	33.4a	40.8a	7 255ab	8 327bc	15 582ab	46.6a
		BC6.75	676.8a	28.8b	41.9a	7 583a	9 252a	16 835a	45.1a
		BC11.25	709.0a	31.3ab	41.6a	7 394a	9 125ab	16 520a	44.8a
2015/2016	243	BC0	410.8b	30.1b	52.2a	6 648c	8 552c	15 200c	43.8b
		BC2.25	505.0a	30.6ab	53.5a	8 274a	9 779a	18 053a	45.8a
		BC6.75	539.7a	33.0a	52.0a	7 232b	9 193ab	16 425b	44.0b
		BC11.25	543.3a	31.6ab	53.0a	7 251b	8 882bc	16 134b	44.9ab
2016/2017	346	BC0	524.2b	35.7b	46.6a	6 795b	10 071b	16 866b	40.3a
		BC2.25	533.4b	36.9b	45.9a	7 230ab	10 231b	17 461b	41.5a
		BC6.75	579.1a	35.9b	45.5a	7 605a	13 429a	21 034a	36.2a
		BC11.25	537.6b	40.0a	45.9a	7 541a	12 228ab	19 770ab	38.5a
平均值 Average	456	BC0	526.2b	32.6 a	45.2a	6 377b	8 575b	14 951c	42.8b
		BC2.25	557.5ab	33.2 a	45.4a	6 825a	8 795b	15 723b	44.1a
		BC6.75	586.9a	33.6 a	45.4a	6 916a	9 552a	16 572a	42.0b
		BC11.25	592.8a	34.1 a	45.8a	6 928a	9 656a	16 378ab	41.8b
变异 来源 (P)	年份		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	生物炭处理		0.005	0.432	0.804	0.000	0.001	0.000	0.002
	年份×生物炭处理		0.587	0.165	0.847	0.001	0.053	0.019	0.130

注：BC0、BC2.25、BC6.75 和 BC11.25 分别表示秸秆炭化还田量为 0、2.25、6.75、11.25 t·hm<sup>-2</sup>。多重比较分别在不同处理及同一年份间进行，不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，下同。

Note: BC0, BC2.25, BC6.75 and BC11.25 denote the amount of straw carbonization returning to the field were 0, 2.25, 6.75, 11.25 t·hm<sup>-2</sup>, respectively. Different letters in one column indicate significant difference among different treatments in the same year at 0.05 level, the same as below.

此外，通过对年份、生物炭处理两因素分析发现，生物炭处理、年份及二者的交互作用均显著影响小麦籽粒产量及生物量，年份显著影响小麦成穗数、穗粒数和千粒质量，而生物炭处理仅对成穗数有显著影响。该结果进一步表明，施用生物炭处理可影响小麦籽粒产量和生物量，而年份间存在差异可能与不同年份小麦生育期降雨量不同有关，施用生物炭主要是通过提高小麦成穗数进而实现产量提高的。

## 2.2 生物炭施用对小麦氮积累、吸收及利用的影响

由表 2 可知，与未施用生物炭 BC0 处理比较，试验开始后连续 3 个小麦生长季（2011/2012、2012/2013 和 2013/2014）生物炭处理均不能明显提高小麦氮素积累量、氮素收获指数及氮肥偏生产力，而自 2014/2015 年度开始，施用生物炭对提高小麦氮素积累、氮素收获指数及氮肥偏生产力才具有明显效果，特别是在生物炭施用量 ≥ 6.75 t/hm<sup>2</sup> 时更是如此。同时，通过对 6 季施用生物炭

对小麦氮积累、吸收及利用的平均值结果分析表明, BC6.75 和 BC11.25 籽粒氮积累量分别较对照提高 9.4% 和 11.2%, 秸秆氮积累量分别提高 17.4% 和 23.8%, 地上部氮积累量分别提高 20.9% 和 13.3%, 低、中、高量生物炭处理氮肥偏生产力分别较 BC0 处理提高 8.6%、8.3% 和 6.8%。通过对年份、生物炭处理两因素分析表明, 年份和生物炭处理均显著影响小麦氮素积累和氮肥偏生产力, 而年份与生物炭处理的交互作用则无明显效果。该试验结果表明, 大田条件下, 生物炭处理对提高作物氮素吸收具有明显的后效作用, 而短期生物炭施用可能效果不理想, 且生物炭处理存在明显的年际差异。

表 2 生物炭对收获期氮素积累量、氮素收获指数及氮肥偏生产力的影响

Table 2 Effects of biochar application on nitrogen accumulation, nitrogen harvest index and nitrogen partial productivity of wheat

种植季 Crop seasons	处理 Treatments	籽粒氮 积累量 Nitrogen accumul- ation in grain /(kg·hm <sup>-2</sup> )	秸秆氮 积累量 Nitrogen accumul- ation in straw /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素积累 量 Nitrogen accumul- ation /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素收 获指数 NHI/%	氮肥偏 生产力 NPP /(kg·kg <sup>-1</sup> )
2011/2012	BC0	146.6a	75.3a	221.9a	67.0a	23.8a
	BC2.25	157.2a	68.3a	225.5a	69.9a	25.0a
	BC6.75	160.2a	74.0a	234.2a	68.4a	25.6a
	BC11.25	159.3a	83.7a	243.0a	65.6a	25.0a
2012/2013	BC0	162.7a	68.3a	231.0a	70.5a	24.1a
	BC2.25	164.0a	59.0a	223.0a	73.5a	24.2a
	BC6.75	177.7a	69.3a	247.0a	72.2a	25.1a
	BC11.25	171.5a	70.5a	242.1a	70.9a	23.8a
2013/2014	BC0	155.3a	40.5a	195.9a	79.8a	27.9a
	BC2.25	163.5a	42.6a	206.1a	79.3a	29.1a
	BC6.75	167.1a	41.9a	209.0a	80.2a	28.7a
	BC11.25	172.7a	48.9a	221.6a	78.0a	29.4a
2014/2015	BC0	155.5a	44.1b	199.7b	78.0a	27.6b
	BC2.25	163.2a	53.1ab	216.4ab	75.5ab	30.2ab
	BC6.75	169.1a	62.5a	231.6ab	73.1b	31.6a
	BC11.25	176.3a	65.0a	241.3a	73.0b	30.8a
2015/2016	BC0	155.8a	47.8c	218.4b	71.3a	27.7c
	BC2.25	163.0a	63.6b	214.8b	75.9a	34.5a
	BC6.75	171.1a	83.0a	254.1a	67.3a	30.1b
	BC11.25	179.9a	81.1a	261.0a	68.8a	30.2b
2016/2017	BC0	103.4a	51.7b	155.1b	66.5b	28.3b
	BC2.25	114.6a	42.5b	157.1b	72.9a	30.1ab
	BC6.75	117.2a	53.7ab	170.9ab	68.6ab	31.7a
	BC11.25	118.2a	56.7a	174.9a	67.6ab	31.4a
平均值 Average	BC0	146.6c	54.6b	203.6b	72.2ab	26.6b
	BC2.25	154.2bc	54.9b	207.2b	74.5a	28.9a
	BC6.75	160.4ab	64.1a	224.5a	71.6ab	28.8a
	BC11.25	163.0a	67.6a	230.6a	70.6b	28.4a
变异 来源 (P)	年份	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	生物炭处理	0.000	0.001	0.000	0.057	0.000
	年份×生物炭处理	0.998	0.341	0.841	0.865	0.001

注: NHI, 氮素收获指数; NPP, 氮肥偏生产力。  
Note: NHI means nitrogen harvest index; NPP means nitrogen partial productivity.

### 2.3 生物炭对小麦叶片 LAI、SPAD 值及生育期群体动态的影响

叶面积指数 (LAI) 是反映植物群体生长状况的一个重要指标, 其数值大小直接与最终产量高低密切相关。由图 1 可以看出, 与 BC0 相比, 在 2015/2016 和 2016/2017 小麦生长季, 高量 (11.25 t/hm<sup>2</sup>) 生物炭处理可明显提高小麦越冬期 LAI, 中量 (6.75 t/hm<sup>2</sup>) 和高量 (11.25 t/hm<sup>2</sup>) 生物炭处理可显著提高小麦抽穗期 LAI, 而低、中、高量生物炭处理 (2.25~11.25 t/hm<sup>2</sup>) 均可明显提高小麦抽穗期 LAI。该研究表明, 施用生物炭在某种程度上具有提高小麦 LAI 的作用, 进而可为籽粒产量的提高奠定基础。

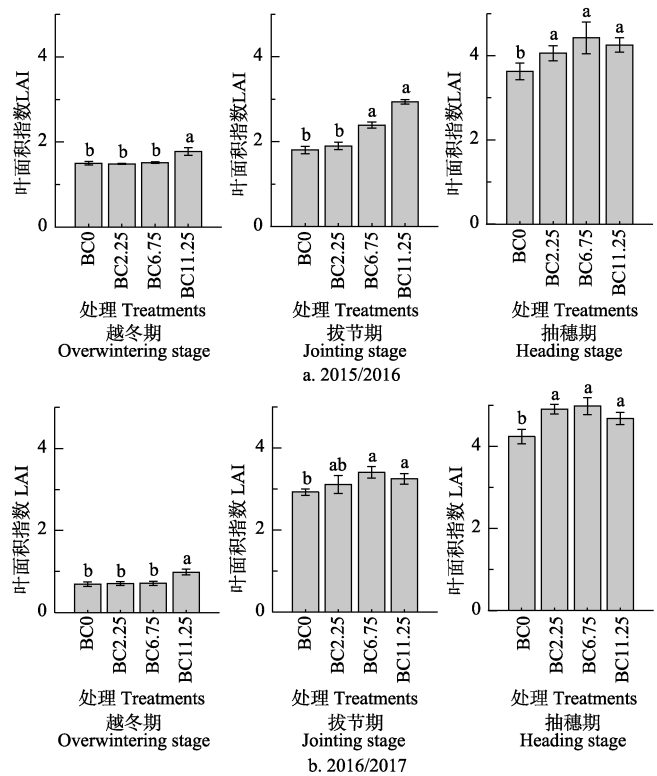


图 1 生物炭施用对小麦 LAI 的影响  
Fig.1 Effects of biochar application on LAI of wheat

叶绿素是植物进行光合作用的基础物质, 而 SPAD 值是由 SPAD-502 叶绿素仪测定的小麦叶色值, 即叶绿素相对含量, 也是反映小麦生长状况和氮素吸收的重要指标<sup>[16]</sup>。图 2 表明, 与 BC0 比较, 低、中、高量生物炭处理均能显著提高小麦拔节期和抽穗期叶片 SPAD 值, 但生物炭处理间越冬期 SPAD 值无明显差异。

此外, 合理的群体结构是小麦夺取高产的重要保证, 也是相关研究人员普遍关心的问题之一。由图 3 可以看出, 与 BC0 对照相比, 两年度施用低、中、高量生物炭处理均可明显增加小麦越冬期、拔节期、抽穗期及成熟期 (该期群体数量也为成穗数) 茎蘖群体数量, 特别是 BC6.75 和 BC11.25 处理更是如此。试验结果表明, 施用生物炭可在一定程度上提高小麦生育期茎蘖群体数量, 进一步提高最终成穗数, 可为小麦籽粒产量的提高奠定基础。

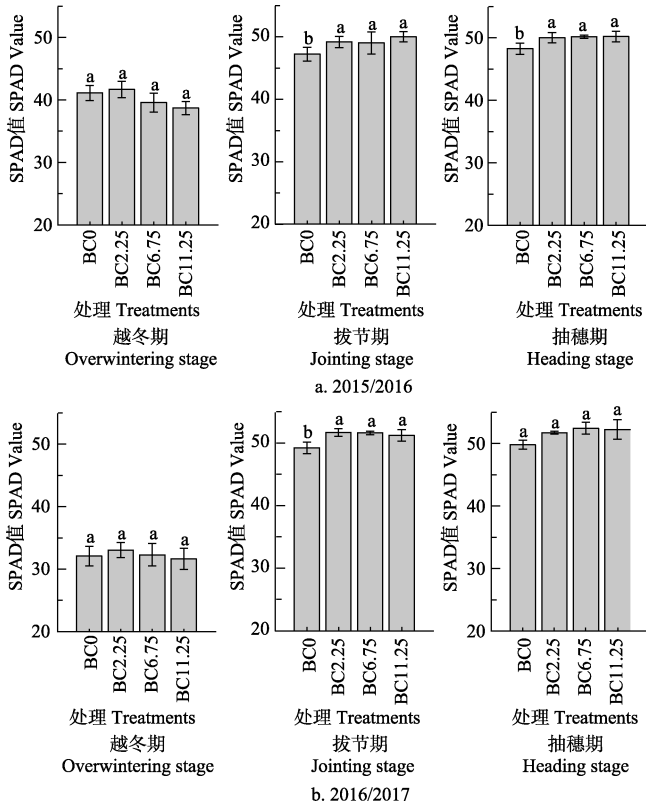
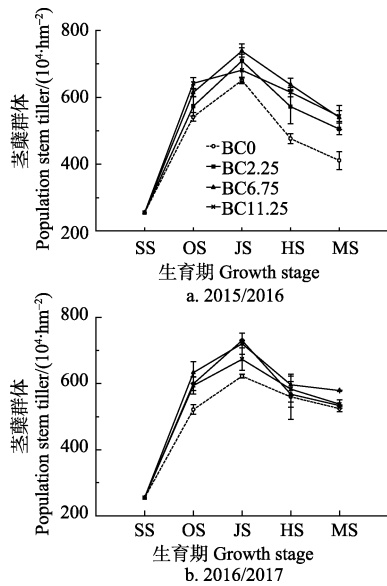


图 2 生物炭施用对小麦叶片 SPAD 值的影响  
Fig.2 Effects of biochar application on SPAD of wheat's leaves



注：SS- 苗期；OS-越冬期；JS-拔节期；HS-抽穗期；MS-成熟期。  
Note: SS- Seedling stage; OS-Overwintering stage; JS-Jointing stage; HS-Heading stage; MS-Maturity stage.

图 3 生物炭施用对小麦季茎蘖群体动态的影响  
Fig.3 Dynamic changes of population stem tiller of wheat under biochar application

#### 2.4 生物炭施用对土壤耕层有机碳和全氮含量的影响

由图 4 可知，生物炭持续施用可以稳定提高土壤耕层有机碳 (SOC) 含量。与对照相比，BC6.75 处理耕层 SOC 含量在后 5 季分别显著增加 32.6%、73.3%、126.9%、127.9%和 169.1%。BC11.25 耕层 SOC 含量在后 5 季分别显著增加 62.0%、136.5%、200.7%、179.6%和 215.6%。

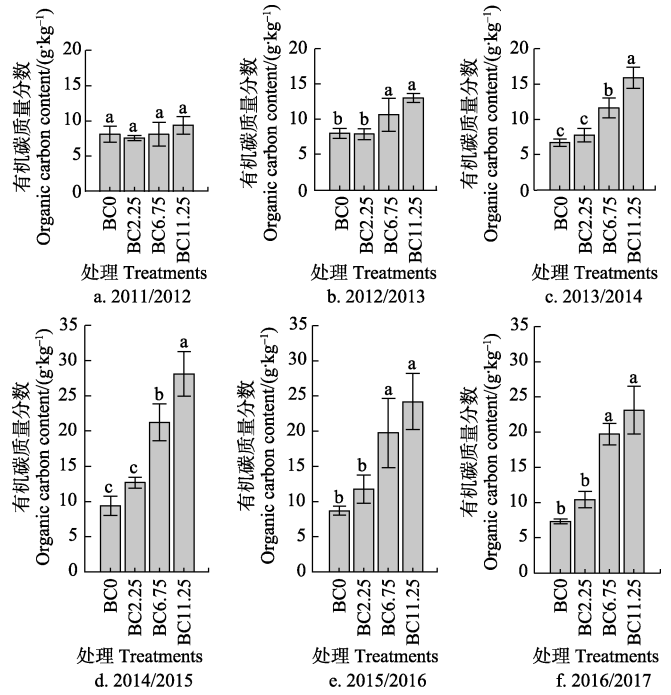


图 4 生物炭施用对小麦季土壤耕层有机碳含量的影响  
Fig.4 Effects of biochar application on content of SOC in top soil layer (0-20 cm) for wheat seasons

同样，与土壤有机碳含量相似，土壤全氮含量也是反映土壤肥力的另一个重要理化指标。由图 5 可以看出，前 3 季，生物炭处理对耕层全氮 (TN) 含量无明显影响，但随生物炭施用季节的延续，BC6.75 和 BC11.25 处理 TN 含量较对照显著增加。与 BC0 相比，BC6.75 处理耕层土壤 TN 含量在后 3 季分别显著增加 20.0%、25.4%和 24.3%，BC11.25 全氮含量在后 3 季分别显著增加 36.8%、30.5%和 36.4%。

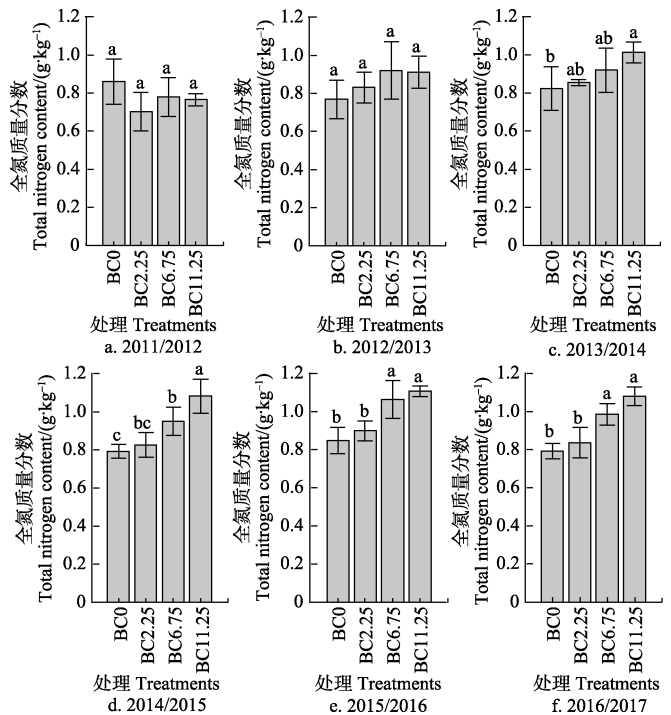


图 5 生物炭施用对小麦季土壤耕层全氮含量的影响  
Fig.5 Effects of biochar application on content of TN in top soil layer (0-20 cm) for wheat seasons

上述试验结果表明,短期施用生物炭在提高潮土地区土壤肥力方面效果不明显,至少需要连续施用3 a后才初具效果。因此,生物炭在提高土壤肥力方面的作用是一个漫长且复杂的过程,需要长期连续试验才能对生物炭的效果做出正确合理的评价。

### 3 讨论

秸秆生物炭施用到土壤中势必会影响土壤理化性质从而影响作物生长<sup>[17]</sup>。Niu等<sup>[18]</sup>在与本研究相同土壤类型上的试验表明,3~12 t/hm<sup>2</sup>的生物炭处理可增加小麦籽粒产量16.6%~25.9%。赵进<sup>[19]</sup>研究表明,BC2.25生物炭处理可增加红壤小麦籽粒产量5.6%~174.0%,增加潮土小麦籽粒产量39.8%。本研究结果表明,低、中、高生物炭处理均可提高小麦籽粒产量,进一步分析发现,生物炭主要通过增加小麦单位面积成穗数进而实现小麦籽粒产量的提高。张燕辉等<sup>[7]</sup>研究表明,生物炭添加对小麦单株成穗数无显著影响,可通过提高小麦出芽率增加单位面积成穗数,这与本试验生物炭处理均可明显提高小麦主要生育期群体数量的研究结果不太一致。本研究认为,生物炭处理可通过增加小麦茎蘖群体数量从而增加单位面积成穗数,进而提高小麦籽粒产量。王勇等<sup>[20]</sup>报道返青期追肥可促进春季小麦分蘖,增加穗数。在本研究相同氮肥水平下,生物炭处理下的土壤供氮能力高于对照(生物炭处理硝态氮含量显著高出对照,未发表数据),可能是增加小麦群体的原因之一。张娜<sup>[21]</sup>研究结果则表明,生物炭对小麦穗数、穗粒数和千粒质量的提升作用均未达到显著性水平,与本研究结果略有差异原因可能在于土壤类型、施肥状况等因素的不同,导致生物炭的增产效应不同。

冬小麦叶片、茎秆等营养器官进行光合作用,合成有机物后向籽粒运转,是小麦产量形成的主要机制<sup>[22]</sup>。而生物炭具有较强的吸水能力,适量生物炭施用能够显著提高土壤含水量<sup>[5]</sup>,提高土壤热容<sup>[9]</sup>,为作物根系生长提供良好环境,有利于水分和营养物质向叶片输送,进而促进植株生长<sup>[23]</sup>。其中,干物质是衡量植物有机物积累、营养成分多寡的一个重要指标<sup>[24]</sup>,小麦最终的籽粒产量受干物质积累、转运的重要影响<sup>[25]</sup>。有研究指出,开花期至成熟期是小麦籽粒产量形成的关键时期,小麦籽粒产量的高低取决于花后干物质的积累<sup>[26]</sup>。而施用生物炭基肥料可显著提高小麦干物质重<sup>[27]</sup>。在本研究中,生物炭处理可显著增加小麦秸秆产量11.4%~12.6%、生物量5.2%~10.8%,这可能由于生物炭具有良好的孔隙性,促进了作物根系生长,为地上部营养积累提供了保障<sup>[28]</sup>,进而增加同化作用<sup>[20]</sup>。然而生物炭处理下的小麦籽粒产量占生物量的比重较对照并未增加,说明生物炭尽管增加小麦干物质积累,但并未促进花后干物质向籽粒的转运。因此,干物质积累提高并不是生物炭提高小麦籽粒产量的主控因素,而小麦籽粒千粒质量主要依赖于花后至灌浆阶段,这可能也是各处理下小麦千粒质量无显著性差异的原因之一。故而在本研究中,小麦茎蘖群体数量的提高是生物炭提高小麦籽粒产量的主导原因。

有研究表明,施用生物炭具有提高氮肥利用率的作用<sup>[29-30]</sup>,主要原因得益于生物炭提高了潮土的保水性能和阳离子交换能力,进而促进地上部吸氮量的提高<sup>[31]</sup>。另外,生物炭因其较大的比表面积和孔隙度,可增加土壤中有菌群数量<sup>[32]</sup>,且对土壤硝态氮具有较强的吸附作用,从而减少氮素在土壤中的损失<sup>[33]</sup>。Zhao等<sup>[34]</sup>研究发现,施用生物炭能够增加土壤全氮含量以及有效元素含量,进而增加作物对氮素营养的吸收利用。本研究结果表明,生物炭施用具有提高小麦叶片光合作用面积和叶绿素相对含量的积极作用。而小麦叶面积系数和叶绿素含量与氮效率存在显著正相关关系<sup>[35]</sup>,故而叶面积系数和叶绿素含量的增加可提高茎叶对氮的吸收利用。施用生物炭可提高小麦植株不同地上部位氮积累量,但氮素收获指数并未增加,此结果表明,中、高量生物炭处理下,6季平均籽粒氮积累量的增加则是由于生物炭处理增加籽粒产量,而未能增加秸秆中氮向籽粒中的转移和运输,而氮肥偏生产力提高的原因同样在于生物炭处理对小麦籽粒产量的提高。

生物炭具有较强的稳定性,不易被矿化和分解,在潮土上的年平均分解率为3.52%~5.68%<sup>[19]</sup>。本研究表明,生物炭在连续施用2 a后即可显著增加土壤SOC含量,迅速提升土壤碳库,进而改善土壤肥力。本研究中土壤耕层C/N比可达26.0,但较高的C/N比抑制小麦生长的现象在本研究中并未出现(2014/2015,BC11.25籽粒产量较BC0显著增加11.8%),生物炭依然保持小幅增产作用,与Lemann等<sup>[36]</sup>提出的过高的C/N比会引起氮素固定以及生物炭带入过多的碳组分会促使土壤中微生物产生固氮的现象<sup>[37]</sup>有所差异。当每季生物炭用量增加至6.75~11.25 t/hm<sup>2</sup>时,土壤SOC含量较对照最高增幅可达215.6%,生物炭6年累积用量为81~135 t/hm<sup>2</sup>,相当于450 t/hm<sup>2</sup>的秸秆消纳量,每年可消纳37.5 t/hm<sup>2</sup>秸秆,而当前秸秆每季产量约为7.5 t/hm<sup>2</sup>。相较于秸秆直接还田带来的整地质量差、病虫害严重,进而影响下季作物种植等系列问题<sup>[38]</sup>,秸秆炭化还田不仅可以小幅增加籽粒产量,而且具有稳定持续增加土壤固碳的效果,为秸秆资源综合利用提供了新的有效途径。

### 4 结论

通过6季连续施用生物炭对小麦生长发育、氮素吸收及土壤肥力等指标影响的研究,主要结论如下:

1) 施用2.25~11.25 t/hm<sup>2</sup>生物炭,可起到提高小麦籽粒产量以及提高氮肥偏生产力的效果,但低、中、高量生物炭处理间无显著差异。同时2.25~11.25 t/hm<sup>2</sup>生物炭可提高小麦叶面积指数、叶绿素相对含量,进而起到提升小麦光合作用和增加小麦生物量的作用。

2) 施用6.75~11.25 t/hm<sup>2</sup>生物炭可显著增加地上部氮素吸收量,明显提高耕层土壤有机碳和全氮含量,进而使研究地区土壤碳库显著增加,土壤肥力得到提升。

3) 与未施用生物炭比较,生物炭在连续施用多年后对小麦籽粒产量、秸秆产量、生物量、氮素吸收以及土壤肥力的提升效果逐渐增强。

## [参 考 文 献]

- [1] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放及其环境效益的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3615—3624.  
Gao Decai, Zhang Lei, Liu Qiang, et al. Effects of biochar on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3615—3624. (in Chinese with English abstract)
- [2] Lemann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447: 143—144.
- [3] Braida W J, Pignatello J J, Lu Y F, et al. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environment Science Technology*, 2003, 37: 409—417.
- [4] Haefele S, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based system[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121: 430—440.
- [5] 刘园, M Jamal Khan, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 849—858.  
Liu Yuan, M Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 849—858. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113—119.  
Wang Yanyang, Wei Yongxia, Sun Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(8): 113—119. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张燕辉. 生物炭连续四年还田对小麦产量和土壤固碳减排的中长期效应[D]. 淮北: 淮北师范大学, 2015.  
Zhang Yanhui. Medium Term Effects of Biochar Application for 4 Years on Wheat Yield and Soil Carbon Sequestration[D]. Huaibei: Huaibei Normal University. 2015. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459—2463.  
Zhang A'feng, Pan Genxing, Li Lianqing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459—2463. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966—975.  
Zhang Yuming, Hu Chunsheng, Zhang Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966—975. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095—1103.  
Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. Combined effects of nitrogen and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and fertilizer*, 2015, 21(5): 1095—1103. (in Chinese with English abstract)
- [11] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant and soil*, 2007, 300: 9—20.
- [12] 叶英新. 生物质炭施用两年后黄淮海平原黄潮土土壤性质、作物产量及温室气体排放的变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.  
Ye Yingxin. Changes in Soil Properties, Crop Yield and Greenhouse Gas Emission Two Years After Biochar Amendment in a Calcareous Entisol from North China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [13] Kerré B, Willaert B, Corneli Y, et al. Long-term presence of charcoal increases maize yield in Belgium due to increased soil water availability[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91: 10—15.
- [14] Wang Shenqiang, Zhao Xu, Xing Guangxi, et al. Large-scale biochar production from crop residue: A new idea and the biogas-energy pyrolysis system[J]. *Bioresources*, 2013, 8: 8—11.
- [15] Zhao Xu, Wang Jiangwei, Wang Shenqiang, 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.
- [16] 薛香, 吴玉娥. 小麦叶片叶绿素含量测定及其与 SPAD 值的关系[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(11): 2701—2702.  
Xue Xiang, Wu Yu'e. Chlorophyll content determination and its relationship with SPAD value in wheat[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(11), 2701—2702. (in Chinese with English abstract)
- [17] Mohan D, Abhishek K, Sarswat A, et al. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration: A sustainable solution to crop-residue burning in India[J]. *Rsc Advances*, 2018, 8(1): 508—520.
- [18] Niu Yuhui, Chen Zengming, Müller C, et al. Yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions were effectively reduced by biochar amendment of sandy loam soil under maize - wheat rotation in the North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 58—70.
- [19] 赵进. 秸秆黑炭连续施用下红壤和潮土性质及肥力变化的对比研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
Zhao Jin. Comparison of Soil Properties and Fertility in an Agricultural Oxisols and Cambosols with Five-year Successive Straw Biochar Aoolications[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王勇, 孙本普, 李秀云, 等. 栽培条件对小麦穗数的影响[J]. 小麦研究, 2004(3): 11—20.
- [21] 张娜. 生物炭对麦玉复种体系作物生长及土壤理化性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
Zhang Na. Effects of Biochar on Crop Growth, Soil Physical and Chemical Properties in Wheat-maize Multiple Cropping System[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王玉杰, 王永华, 韩磊, 等. 不同栽培管理模式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(5): 894—900.

- Wang Yujie, Wang Yonghua, Han Lei, et al. Effect of different cultivation and management mode on the characteristics of accumulation and distribution of dry matter and the yield of winter wheat after anthesis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(5): 894–900. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵进, 赵旭, 王慎强, 等. 长期秸秆黑炭施加对石灰性潮土肥力、固碳以及氮挥发的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 176–184.  
Zhao Jin, Zhao Xu, Wang Shenqiang, et al. Effects of successive incorporation of rice straw biochar into an alkaline soil on soil fertility, carbon sequestration and ammonia volatilization[J]. *Chinese Journal of Application Ecology*, 2018, 29(1): 176–184. (in Chinese with English abstract)
- [24] 石祖梁, 顾克军, 杨四军. 氮肥运筹对稻茬小麦干物质、氮素转运及氮素平衡的影响[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1128–1133.  
Shi Zuliang, Gu Kejun, Yang Sijun. Effect of nitrogen application on translocation of dry matter and nitrogen, and nitrogen balance in winter wheat under Rice-wheat rotation[J]. *Journal of Triticeae Crop*, 2012, 32(6): 1128–1133. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孟凡德, 马林, 石书兵, 等. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究[J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(4): 693–698.  
Meng Fande, Ma Lin, Shi Shubing, et al. Dynamics changes of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(4): 693–698. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2002, 22(2): 55–59.  
Wang Yuefu, Yu Zhenwen, Li Shangxia, et al. Effect of nitrogen nutrition on carbon assimilation and transfer and yield after wheat anthesis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002, 22(2): 55–59. (in Chinese with English abstract)
- [27] 高海英. 一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
Gao Haiying. Research on Characteristics of a Biochar-based Nitrogenous Fertilizer and Its Effects on Soils and Crops[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forest University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特征及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445–1451.  
Zhang Weiming, Meng Jun, Wang Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445–1451. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 288–293.  
Qu Jingjing, Zheng Jinwei, Zheng Jufeng, et al. Effects of wheat-straw based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 288–293. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1352–1360.  
Zhang Aiping, Liu Ruliang, Gao Ji, et al. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1352–1360. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘园. 秸秆生物炭连续施用对潮土肥力和固碳减排的影响研究[D]. 郑州, 河南农业大学, 2015.  
Liu Yuan. Effects of Successive Application of Crop-straw Biochar on Soil Fertility, Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Emission in Cambosols[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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.  
Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324–3333. (in Chinese with English abstract)
- [33] 赵春晓, 郑春海, 郜翻身, 等. 不同处理对河套灌区玉米土壤硝态氮和铵态氮动态及氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, 54(6): 99–104.  
Zhao Chunxiao, Zheng Chunhai, Gao Fanshen, et al. Effect of different materials on dynamic change of soil nitrate and ammonium nitrogen and N uptake by maize in Hetao irrigation area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, 54(6): 99–104. (in Chinese with English abstract)
- [34] Zhao Xu, Wang Jiangwei, Xu Haojiang, et al. Effects of crop-straw biochar on crop growth and soil fertility over a wheat-millet rotation in soils of China[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30: 311–319.
- [35] 张旭, 田中伟, 胡金玲, 等. 小麦氮素高效利用基因型的农艺性状及生理特性[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(10): 1315–1322.  
Zhang Xu, Tian Zhongwei, Hu Jinling, et al. Agronomic and physiological characteristics of high efficient nitrogen utilization in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(10): 1315–1322. (in Chinese with English abstract)
- [36] Lehmann J, Jr J P D S, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [37] Liang Feng, Li Guitong, Lin Qimei, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil[J]. *Journal of Integrative Agricultural*, 2014, 13: 525–532.
- [38] 孙建飞, 郑聚锋, 程琨, 等. 基于可收集的秸秆资源估算及利用潜力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 404–413.  
Sun Jianfei, Zheng Jufeng, Cheng Kun, et al. Estimate of the quantity of collectable straw resources and competitive utilization potential[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(2): 404–413. (in Chinese with English abstract)



## Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization

Xie Yingxin<sup>1</sup>, Liu Yujuan<sup>1</sup>, Zhang Weina<sup>1</sup>, Dong Cheng<sup>1</sup>, Zhao Xu<sup>2\*</sup>, He Dexian<sup>1</sup>,  
Wang Chenyang<sup>1</sup>, Guo Tiancai<sup>1</sup>, Wang Shenqiang<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Engineering Research Center for Wheat/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450046, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture/Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Biochar, which is produced by the thermochemical decomposition of organic material under a limited supply of oxygen at temperatures between 300 and 1000 °C, has been the focus of researchers for the past several years. Each year straw of about 0.6-0.7 billion tons is produced in China, however less than half fails to reasonable use, which has resulted in a series of problems such as resource waste and environmental pollution. Converting cheap, abundant crop straw into biochar applied to soils may have significant agricultural and environmental benefits. Crop-straw biochar returned into soil not only can significantly increase carbon sequestration and reduce emission of greenhouse gases as well as protect soil quality, improve soil fertility, decrease soil bulk density and reduce the aluminum toxicity of crop in acid soil, but also provides effective way for comprehensive utilization of straw resource. In order to find out a rational solution for more and more straw in the farmland to provide scientific basis for comprehensive utilization of straw in the Huanghuai region, a field location experiment on straw biochar application was performed in the typical fluvio-aquatic soil of the Huanghuai region since 2011. Effects of continuous biochar application in 2011-2017 on growth and nitrogen absorption of winter wheat were studied. The yield components, accumulation of dry matter and nitrogen, LAI (leaf area index), chlorophyll relative content (SPAD (soil and plant analyzer development) value), and population number at the key growth stage of winter wheat, and the changes of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) under the long-term biochar application were also observed in the test. Four treatments in the experiment were set, including BC0 (control), BC2.25 (low), BC6.75 (middle) and BC11.25 (high), which were 0, 2.25, 6.75 and 11.25 t/hm<sup>2</sup> biochar added to the soil, respectively. The results showed that, compared with BC0, the BC2.25 increased grain yield of wheat only in 2011/2012, the BC6.75 increased grain yield in 2014/2015, 2015/2016 and 2016/2017, and the BC11.25 increased grain yield in 2014/2015 and 2015/2016. The average yield across 6 wheat seasons showed that 3 biochar application treatments markedly increased grain yield, biomass, and nitrogen partial productivity by 7.0%-8.5%, 5.2%-10.8%, and 6.8%-8.6%, respectively compared with the CK treatment, but no significant difference was found among 3 biochar treatments. In addition, biochar application treatments with middle and high addition amount also significantly increased straw yield, spike number, nitrogen accumulation of grain, straw nitrogen accumulation and plant nitrogen accumulation by 11.4%-12.6%, 10.1%-11.2%, 9.4%-11.2%, 17.4%-23.8% and 13.3%-20.9%, respectively. The roles of biochar in improving grain yield and nitrogen uptake were in accordance with response in increasing LAI and SPAD value of wheat leaves. We also found that 3 biochar application treatments increased population amount at the key growth stage of winter wheat in 2015/2016 and 2016/2017, and also increased the SPAD value and LAI at the jointing stage and heading stage in 2015/2016 and 2016/2017. Moreover, 3 biochar treatments also significantly increased SOC content in topsoil by 32.6%-215.6% in 2012-2017 and TN content by 20.0%-36.8% in 2014-2017. In conclusion, reasonable biochar application can increase grain yield and nitrogen partial productivity with promoting the growth and nitrogen absorption of winter wheat in the Huanghuai region, and also improve the soil fertility and carbon sequestration.

**Keywords:** nitrogen; biochar; fluvio-aquatic soil; winter wheat; grain yield