

DOI: 10.5846/stxb201911122393

荣飞龙, 蔡正午, 覃莎莎, 张凯, 吴立群, 阳树英, 肖智华, 任勃, 林元山, 陈法霖. 酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响——基于 5 年大田试验. 生态学报, 2020, 40(13): 4413-4424.

Rong F L, Cai Z W, Qin S S, Zhang K, Wu L Q, Yang S Y, Xiao Z H, Ren B, Lin Y S, Chen F L. Effects of biochar on growth and yield of rice in an acidic paddy field: findings from a five-year field trial. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4413-4424.

## 酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响 ——基于 5 年大田试验

荣飞龙<sup>1</sup>, 蔡正午<sup>1</sup>, 覃莎莎<sup>1</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 吴立群<sup>3</sup>, 阳树英<sup>1</sup>, 肖智华<sup>1</sup>, 任 勃<sup>1</sup>, 林元山<sup>4</sup>, 陈法霖<sup>1,\*</sup>

1 洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

2 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052

3 湖南金健种业科技有限公司, 长沙 410128

4 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128

**摘要:**开展生物炭对农田生态系统长期效应的大田试验对全面评价生物炭调控农田生产力的效果具有重要意义。以南方酸性稻田为对象, 采用单因素随机区组设计开展了 5 年大田试验, 探讨不同水平生物炭(0、20、40、60、80 t/hm<sup>2</sup>和 100 t/hm<sup>2</sup>)一次性添加对水稻生长和产量的多年效应。主要结果为:(1)水稻齐穗期的 LAI、倒 4 叶叶绿素含量及地上部干物质积累量和产量均随生物炭添加量增加而增加;(2)生物炭对齐穗期剑叶叶绿素含量以及粒叶比的影响不显著;(3)生物炭显著促进稻田增产的添加量分别为: ≥60 t/hm<sup>2</sup>(增幅 17.0%—23.7%, 第 1 年)、≥40 t/hm<sup>2</sup>(增幅 15.5%—32.4%, 第 2 年)、20—100 t/hm<sup>2</sup>(增幅 9.6%—21.8%, 第 3 年)、均无显著差异(第 4 年)、100 t/hm<sup>2</sup>(增幅 15.7%、第 5 年);(4)生物炭对稻田累计产量的增幅分别为: 5.9%—23.7%(第 1 年)、5.5%—27.8%(第 2 年)、6.8%—25.9%(第 3 年)、5.4%—22.0%(第 4 年)、4.6%—20.6%(第 5 年);(5)产量与齐穗期的 LAI、倒 4 叶叶绿素含量、干物质积累量及每穗粒数显著正相关。综上所述:酸性稻田生物炭一次性添加有利于改善水稻群体质量, 促进稻田增产, 高炭量添加(80 t/hm<sup>2</sup>和 100 t/hm<sup>2</sup>)相比于中低炭量添加持续增产效应更好, 至少可稳定维持 3 年。研究结果可为指导生产实践中利用生物炭以实现稻田增产提供科技支撑。

**关键词:**生物炭; 水稻; 生长发育; 产量

## Effects of biochar on growth and yield of rice in an acidic paddy field: findings from a five-year field trial

RONG Feilong<sup>1</sup>, CAI Zhengwu<sup>1</sup>, QIN Shasha<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, WU Liqun<sup>3</sup>, YANG Shuying<sup>1</sup>, XIAO Zhihua<sup>1</sup>, REN Bo<sup>1</sup>, LIN Yuanshan<sup>4</sup>, CHEN Falin<sup>1,\*</sup>

1 Hunan Provincial Key Laboratory of Rural Ecosystem Health in Dongting Lake Area, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

3 Hunan Jinjian Seed Industry Science & Technology Co., Ltd., Changsha 410128, China

4 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

**Abstract:** Biochar has been widely suggested as an effective amendment to improve crop growth and productivity. However,

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(41501325, 41761067); 国家重点研发计划子课题(2017YFD0200803-01); 湖南省科技计划项目(2016NK2114)

收稿日期: 2019-11-12; 修订日期: 2020-06-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cfl224@163.com

its long-term effects on rice growth and productivity, especially in acidic paddy are less understood. We conducted a five-year (2015—2019) field experiment with the single factor randomized block design in an acidic paddy of Changsha, Hunan Province, south China. We aim to investigate (1) how do rice growth and productivity respond to different amount of biochar amendment (i.e., 0 t/hm<sup>2</sup>(CK), 20 t/hm<sup>2</sup>(B20), 40 t/hm<sup>2</sup>(B40), 60 t/hm<sup>2</sup>(B60), 80 t/hm<sup>2</sup>(B80), and 100 t/hm<sup>2</sup>(B100)) and (2) how long can the effects of biochar amendment sustain? The results showed that: (1) leaf area index (LAI), the chlorophyll content of the reciprocal fourth leaf, and dry matter accumulation at the heading stage increased with the increasing amount of biochar amendment, so did the rice yield. (2) Biochar amendment showed no significant effects on the chlorophyll content of the flag leaf at the heading stage and the grain-leaf area ratio. (3) The amount of biochar amendment significantly impacted its role in increasing rice yield. Rice yield significantly increased 17.0%—23.7% in the first year with  $\geq 60$  t/hm<sup>2</sup> biochar amendment compared with CK). The corresponding numbers for the other four years were 15.5%—32.4% rice yield increase with  $\geq 40$  t/hm<sup>2</sup> biochar amendment in the second year, 9.6%—21.8% rice yield increase with 20—100 t/hm<sup>2</sup> biochar amendment in the third year, no significant increase for all treatments in the fourth year, and 15.7% rice yield increase with 100 t/hm<sup>2</sup> biochar amendment in the fifth year. (4) Biochar amendment increased the accumulated rice yield for the consecutive five years by 9%—23.7%, 5.5%—27.8%, 6.8%—25.9%, 5.4%—22.0%, and 4.6%—20.6%, respectively. (5) Rice yield significantly correlated with LAI, the chlorophyll content of the reciprocal fourth leaf, and dry matter accumulation at the heading stage, and also significantly correlated with grain number per panicle. We found that biochar amendment could significantly improve rice growth and productivity in acidic paddy and the effects were stronger with higher amount of biochar amendment (i.e., 80 t/hm<sup>2</sup> and 100 t/hm<sup>2</sup>). We also found these effects could sustain at least three years. The findings of this study can extend our understanding of the long-term effects of biochar amendment on rice growth and productivity and can also help farmers to increase rice yield through proper biochar amendment in acidic paddy.

**Key Words:** biochar; rice; growth and development; yield

生物炭是生物质材料在无氧或缺氧的条件下经 250℃ 以上高温热解炭化除去挥发性油和气后产生的富含碳素的固态物质<sup>[1]</sup>。由于其高度羧酸酯化和芳香化的结构、较高的 pH 值、盐基离子含量以及孔隙度和比表面积等特殊性质<sup>[2-3]</sup>, 生物炭具有提高酸性农田土壤 pH 值<sup>[4-5]</sup>、改善土壤质量和养分循环<sup>[6-7]</sup>、减少土壤养分淋失<sup>[8-9]</sup>、提高作物肥料利用率<sup>[10-11]</sup> 等功能, 在促进作物生长发育和提高产量<sup>[10-12]</sup> 等方面具有积极效应。

大量研究已证实添加生物炭具有促进作物生长和增产作用<sup>[13-15]</sup>, 但关于这些效应如何随生物炭添加量的变化而变化, 以及这些效应可持续多长时间等问题仍有待进一步研究。研究显示酸性红壤添加生物炭对油菜和甘薯的增产效应随添加量增加而增强<sup>[16-17]</sup>; 酸性土壤中萝卜产量的增加也与生物炭施用量增高有关, 且施用量为 100 t/hm<sup>2</sup> 时的增产效果最好<sup>[18]</sup>; 生物炭施用梯度为 10、20 t/hm<sup>2</sup> 及 40 t/hm<sup>2</sup> 时, 水稻产量增幅随添加量增加逐渐上升<sup>[19-20]</sup>。但也有研究发现增产效应并非随添加量增加而持续增加, 即当添加量达到一定量后, 其增产效应开始降低或产生抑制作用<sup>[14, 21]</sup>。明确酸性稻田水稻产量对生物炭梯度一次性添加的持续响应有助于明确适合南方酸性稻田的最佳施用量。农田施用生物炭促进增产的持续时间是另一研究重点。然而目前大多研究只揭示了生物炭的短期效应(1—2 年), 揭示其长期影响的研究较少<sup>[22]</sup>。Jin 等<sup>[16]</sup> 研究发现酸性红壤生物炭一次性添加对油菜的增产效果可持续 5 年, 但增产效果逐年下降; Cornelissen 等<sup>[23]</sup> 发现施用可可壳生物炭对玉米的增产效应能维持 5 季, 但从第 3 季开始增产效果逐季下降; 此外, 有研究在肥力较高稻田进行多年生物炭添加试验, 发现生物炭对水稻产量没有显著影响<sup>[24]</sup>。但是关于酸性稻田一次性添加生物炭对水稻增产效应的持续时间还鲜见报道。

本研究通过 5 年大田试验研究酸性稻田生物炭不同水平一次性添加对水稻生长及产量的长期影响。主要回答 2 个问题: (1) 生物炭促进水稻生长和增产的作用如何响应生物炭添加量的变化? (2) 生物炭一次性

添加在促进水稻生长和增产方面的效应可持续多久? 研究结果可揭示大田环境下生物炭添加对促进酸性稻田水稻生长和产量的持续效应,为指导生产实践中利用生物炭以实现稻田增产提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于湖南省长沙市长沙县长安村(28°14'00"N,113°23'06"E)。属于亚热带湿润气候,四季分明,气候温和,水热充足,年平均气温 16—20 °C,日照时数为 1600—1800 h,全年无霜期 260—300 d。降水年际变化大,年均降水量 1877.1 mm,集中于春夏两季。土壤类型属于第四纪红色黏土发育的红黄泥水稻土。

### 1.2 试验设计

试验所用生物炭为稻壳炭,来源于湖南正恒农业科技发展有限公司,最高热处理温度 500 °C,基本性质为 pH 值 9.21、有机碳 163.9 g/kg、总氮 1.7 g/kg、总磷 2.14 g/kg、总钾 3.24 g/kg、碱解氮 51.1 mg/kg、有效磷 28.3 mg/kg、速效钾 176 mg/kg。

选取土壤肥力中等的稻田(土壤基本性质见表 1),采用单因素随机区组设计开展小区试验。沿稻田自然的肥力梯度排列 4 个区组,每个区组设置 6 个小区(大小为 4 m×5 m),小区间通过覆盖双层塑料膜的田埂相隔以防止串水串肥。6 个小区分别施加不同量生物炭:0 t/hm<sup>2</sup>(对照,CK)、20 t/hm<sup>2</sup>(B20)、40 t/hm<sup>2</sup>(B40)、60 t/hm<sup>2</sup>(B60)、80 t/hm<sup>2</sup>(B80)和 100 t/hm<sup>2</sup>(B100)。生物炭于 2015 年水稻移栽一周前一次性与当季基肥同时施入,此后不再添加,采用人工耙田,耙田深度 20 cm 左右,保证生物炭与土壤充分混匀。

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Soil properties of the tested plot

土壤性质 Soil properties	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
pH	3.95	5.43	4.67	0.74
总碳 Total C/(g/kg)	16.02	19.40	17.92	1.15
总氮 Total N/(g/kg)	1.89	2.03	1.97	0.06
碳氮比 C:N ratio	8.48	9.65	9.09	0.39
总磷 Total P/(g/kg)	0.60	0.72	0.65	0.04
总钾 Total K/(g/kg)	11.07	11.96	11.40	0.30
碱解氮 Alkaline hydrolyzed N/(mg/kg)	173.92	246.08	215.58	26.11
有效磷 Available P/(mg/kg)	20.78	31.98	25.65	5.24
速效钾 Available K/(mg/kg)	90.70	136.11	110.70	15.64

本试验开展于 2015—2019 年。2015 和 2016 年进行一季中稻栽培,供试品种为广两优 143(杂交稻)。5 月初播种,5 月下旬移栽至各试验小区(插植密度为 20 cm×26.7 cm,每蔸插 2—3 株基本苗),9 月中下旬收获。中稻每个生育期施纯氮 181 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 153 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥采用复合肥作基肥、尿素作追肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2 施用。磷肥采用复合肥作基肥一次性施用。钾肥采用复合肥作基肥、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60.0%)作追肥按基肥:穗肥=6:4 施用。2017 年进行一季晚稻栽培,供试品种为玉针香(常规稻),6 月 18 日播种,7 月 12 日移栽(插植密度为 20 cm×20 cm,每蔸插 4—5 株基本苗),10 月 10 日收获。2018 年进行一季晚稻栽培,供试品种为桃优香占(杂交稻),6 月 20 日播种,7 月 12 日移栽(插植密度为 20 cm×20 cm,每蔸插 2—3 株基本苗),10 月 11 日收获。2019 年进行一季晚稻栽培,供试品种为泰优 553(杂交稻),6 月 20 日播种,7 月 15 日移栽(插植密度为 20 cm×20 cm,每蔸插 2—3 株基本苗),10 月 15 日收获。晚稻每个生育期施纯氮 150 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 100 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥采用复合肥和有机肥作基肥、尿素作追肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3 施用。磷肥采用复合肥和有机肥作基肥一次性施用。钾肥采用复合肥和有机

肥作基肥、氯化钾作追肥按基肥:穗肥=4:1 施用。其他稻田水分及病虫害管理按当地大田管理进行。

### 1.3 指标测定

#### 1.3.1 叶面积指数及粒叶比

水稻齐穗期于每小区选取代表性水稻植株 5 蔸,按长宽系数法测定叶面积。用颖花数/叶面积、实粒数/叶面积、粒重/叶面积来计算粒叶比<sup>[25]</sup>。颖花数、实粒数、粒重分别指总颖花数、总实粒数、总粒重,叶面积为齐穗期叶面积。

#### 1.3.2 叶绿素含量

水稻齐穗期于每小区选代表性剑叶和倒 4 叶各 20 片,用 SPAD-502Plus 手持叶绿素仪(Minolta, 日本)测定各叶片的 SPAD 值,测定部位为叶片中部及中部上下 2 cm 处,避开叶脉,以 3 处测定的平均值表示该叶片叶绿素的相对含量。

#### 1.3.3 干物质积累

于齐穗期和成熟期分别采样测定干物质积累。齐穗期时,每个小区选取生长均匀并且有代表性的水稻植株 5 蔸,分部位装袋,于 105 °C 杀青 30 min 后,经 80 °C 烘干至恒重后称重,计算单蔸茎、叶、穗及群体地上部干物质积累量。成熟期时,每个小区选取 3 个 1 m<sup>2</sup> 的测产样方,收割稻株地上部分进行鲜样称重,取部分样蔸测定含水量后换算群体地上部干重。

#### 1.3.4 产量及产量构成

每小区收获 3 个 1 m<sup>2</sup> 样方的稻谷,每个样方取部分稻谷测定含水量,最后以 13.5% 的含水量折算稻谷产量。收获时记录各样方有效穗数。每个小区选取 5 蔸代表性植株测定每穗粒数、结实率及千粒重。

### 1.4 统计分析

采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)进行处理间差异比较,采用 Duncan 法进行多重比较。采用 Pearson 相关分析水稻产量与各生育性状指标间、土壤肥力指标之间的相关性。所用软件为 SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面积指数及粒叶比

添加生物炭显著提高水稻群体的叶面积指数(Leaf area index, LAI),且 LAI 随生物炭添加量的增加而增加。试验前 3 年,高炭量处理 B100 和 B80 的 LAI 均显著高于 CK,其增幅也高于 B60、B40 和 B20;试验第 4 年处理间差异不显著;试验第 5 年 B100 处理的 LAI 显著高于 CK,表明高炭量添加在促进叶片生长,提高水稻叶面积指数方面的作用效果及持续效应更好(图 1)。

不同处理间的总颖花数/叶面积、总实粒数/叶面积以及总粒重/叶面积在 5 年试验间均无显著差异(表 2,  $P>0.05$ )。

### 2.2 叶绿素含量

生物炭添加第 1 年,当添加量达到或超过 60 t/hm<sup>2</sup>,水稻齐穗期剑叶的叶绿素含量显著低于对照( $P<0.05$ ),但从第 2 年开始,其负面影响消失。后 4 季

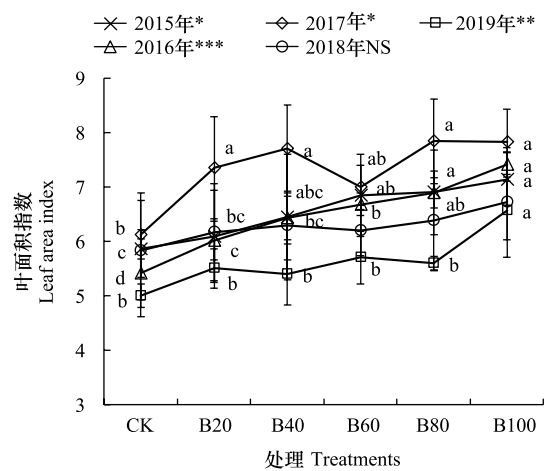


图 1 不同生物炭处理水稻齐穗期群体叶面积指数

Fig.1 Leaf area index of rice at full heading stage with different biochar treatments

CK: 为未添加生物炭处理, soil without biochar amendment; B20: 生物炭施用量为 20 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 20 t/hm<sup>2</sup>; B40: 生物炭施用量为 40 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 40 t/hm<sup>2</sup>; B60: 生物炭施用量为 60 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 60 t/hm<sup>2</sup>; B80: 生物炭施用量为 80 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 80 t/hm<sup>2</sup>; B100: 生物炭施用量为 100 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 100 t/hm<sup>2</sup>; NS 和 \* 表示方差分析的结果, NS (no significance) 表示  $P>0.05$ , \* 表示  $P<0.05$ , \*\* 表示  $P<0.01$ , \*\*\* 表示  $P<0.001$ ; 不同的小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )

添加生物炭对剑叶叶绿素含量的影响均不显著(图 2)。这可能是由于生物炭含碳量较高,高量添加导致初期土壤碳氮比过高,影响了水稻对土壤氮素的吸收。

表 2 不同生物炭处理的水稻粒叶比

Table 2 Grain-leaf area ratio of rice with different biochar treatments

年份 Years	处理 Treatments	颖花数/叶面积 Number of spikelets/ leaf area/(No./cm <sup>2</sup> )	实粒数/叶面积 Number of filled grains /leaf area/(No./cm <sup>2</sup> )	粒重/叶面积 Grain weight/ leaf area/(mg/cm <sup>2</sup> )
2015	CK	0.49±0.05	0.42±0.04	12.50±1.17
	B20	0.50±0.06	0.43±0.06	13.07±2.08
	B40	0.53±0.06	0.45±0.07	13.78±1.92
	B60	0.50±0.03	0.43±0.04	13.16±1.22
	B80	0.48±0.07	0.43±0.09	12.98±2.68
	B100	0.53±0.10	0.47±0.07	14.45±2.39
	ANOVA	NS	NS	NS
2016	CK	0.53±0.14	0.39±0.12	12.21±4.03
	B20	0.53±0.10	0.39±0.11	12.45±3.38
	B40	0.50±0.06	0.37±0.10	11.77±3.16
	B60	0.48±0.07	0.38±0.07	12.09±2.62
	B80	0.47±0.03	0.38±0.03	12.40±1.06
	B100	0.44±0.02	0.37±0.03	11.67±0.95
	ANOVA	NS	NS	NS
2017	CK	0.47±0.15	0.37±0.14	9.93±3.40
	B20	0.41±0.07	0.34±0.07	9.23±1.64
	B40	0.41±0.02	0.34±0.02	9.37±0.87
	B60	0.50±0.08	0.38±0.04	10.64±1.18
	B80	0.43±0.08	0.33±0.07	9.29±1.85
	B100	0.44±0.10	0.35±0.11	9.76±3.18
	ANOVA	NS	NS	NS
2018	CK	0.58±0.13	0.49±0.13	13.98±4.06
	B20	0.58±0.09	0.47±0.11	13.83±3.57
	B40	0.62±0.08	0.51±0.08	14.60±2.32
	B60	0.64±0.06	0.54±0.07	15.58±1.94
	B80	0.58±0.08	0.50±0.07	14.27±2.17
	B100	0.62±0.13	0.53±0.12	15.46±3.55
	ANOVA	NS	NS	NS
2019	CK	0.75±0.12	0.53±0.15	11.86±3.80
	B20	0.84±0.07	0.54±0.17	12.67±4.16
	B40	0.80±0.03	0.54±0.07	12.78±1.66
	B60	0.78±0.13	0.50±0.11	11.91±2.96
	B80	0.80±0.07	0.58±0.16	13.97±3.21
	B100	0.71±0.08	0.48±0.08	11.03±2.35
	ANOVA	NS	NS	NS

CK: 为未添加生物炭处理, soil without biochar amendment; B20: 生物炭施用量为 20 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 20 t/hm<sup>2</sup>; B40: 生物炭施用量为 40 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 40 t/hm<sup>2</sup>; B60: 生物炭施用量为 60 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 60 t/hm<sup>2</sup>; B80: 生物炭施用量为 80 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 80 t/hm<sup>2</sup>; B100: 生物炭施用量为 100 t/hm<sup>2</sup> 的处理, soil with biochar amendment at the rate of 100 t/hm<sup>2</sup>。NS 和 \* 表示方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 的结果, NS (no significance) 表示  $P > 0.05$ , \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ ; 不同的小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

添加生物炭显著提高水稻齐穗期倒4叶的叶绿素含量,且随生物炭添加量增加表现为增加趋势。添加生物炭对水稻倒4叶 SPAD 的增效具有较强的持续性。试验第2年至第4年,B100、B80 和 B40 处理倒4叶的 SPAD 值均显著高于对照,且在第5年仍有增加趋势(图2)。

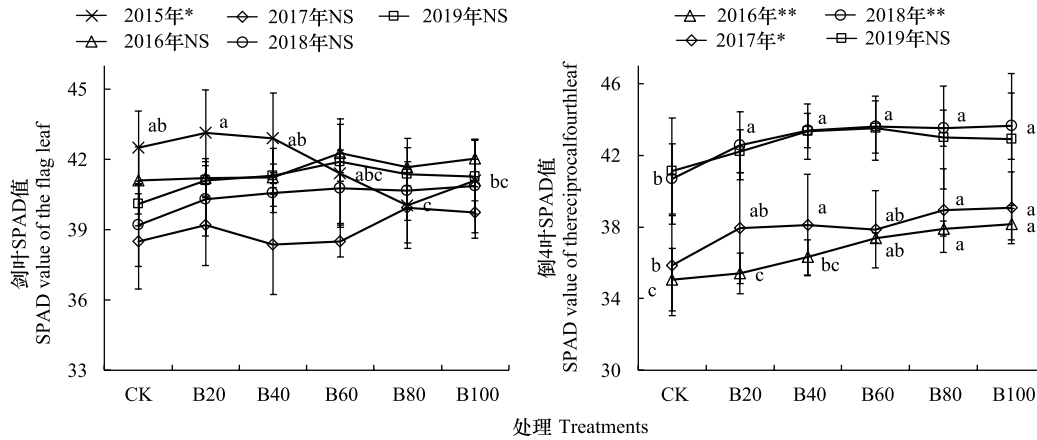


图2 不同生物炭处理的水稻齐穗期叶片叶绿素含量

Fig.2 Leaf chlorophyll content of rice at heading stage with different biochar treatments

SPAD:指用 SPAD(Soil and Plant Analyzer Development)方法测量的叶绿素浓度

2.3 干物质积累

添加生物炭有利于提高水稻地上部的干物质积累,随生物炭添加量增加水稻的干物质积累呈现出增加趋势(表3)。5年间,水稻齐穗期茎鞘重均随生物炭添加量增加而显著增加;除第4年没达到显著水平,其余年份,齐穗期水稻叶重的变化规律与茎鞘重一致;穗重也呈现出相似的规律,但仅在第5年达到显著水平。无论是齐穗期还是成熟期,水稻地上部总干物质积累均随生物炭添加量增加而增加。

表3 不同生物炭处理水稻茎鞘、叶及收获期地上部干物质积累量

Table 3 Dry matter accumulation in stem-sheath, leaf, panicle and aboveground parts of rice with different amount of biochar amendment

年份 Year	处理 Treatments	干物质积累				
		茎鞘	叶	穗	干物质积累	
		Stem-sheath/(g/蔸)	Leaf/(g/蔸)	Panicle/(g/蔸)	Dry matter accumulation/(t/hm <sup>2</sup> )	
		齐穗期				
		Full heading stage		齐穗期	成熟期	
		Full heading stage		Full heading stage	Mature stage	
2015	CK	34.83±4.57c	18.60±1.61c	9.81±1.25a	10.15±1.18c	14.52±1.69c
	B20	35.44±3.18c	19.22±1.96bc	10.52±2.04a	10.41±0.56c	15.08±1.31c
	B40	39.64±5.37bc	19.75±3.28bc	10.95±1.51a	11.24±1.61bc	15.93±0.68bc
	B60	42.71±6.60ab	20.9±0.99ab	10.50±0.66a	11.82±0.75ab	16.70±0.97b
	B80	45.21±6.02ab	21.02±1.71ab	11.17±1.64a	12.34±0.99ab	16.72±1.35b
	B100	47.18±4.53a	22.19±2.21a	11.93±1.52a	12.98±1.05a	18.50±1.59a
	ANOVA	**	*	NS	***	***
2016	CK	24.53±1.72d	12.9±1.57b	10.88±1.82a	9.06±0.34d	13.59±0.89c
	B20	26.88±1.37cd	15.38±0.84ab	10.99±1.1a	9.98±0.51c	13.67±1.16c
	B40	27.96±2.93c	16.64±1.92a	12.09±0.17a	10.63±0.87bc	15.01±1.10b
	B60	31.77±3.56b	16.78±1.66a	11.94±0.4a	11.34±0.82b	15.50±1.14ab
	B80	35.56±2.34a	17.67±2.46a	12.08±0.73a	12.25±0.55a	15.84±1.73ab
	B100	38.16±1.03a	17.66±2.26a	12.43±0.79a	12.80±0.59a	16.56±1.16a
	ANOVA	***	*	NS	***	***
2017	CK	16.14±1.45b	10.64±0.68b	9.09±0.31a	8.96±0.47b	10.45±1.44b
	B20	17.26±1.11ab	11.42±0.2ab	9.49±0.71a	9.54±0.23ab	12.23±1.94ab

续表

年份 Year	处理 Treatments	茎鞘	叶	穗	干物质积累	
		Stem-sheath/(g/蔸)	Leaf/(g/蔸)	Panicle/(g/蔸)	Dry matter accumulation/(t/hm <sup>2</sup> )	
		齐穗期 Full heading stage			齐穗期 Full heading stage	成熟期 Mature stage
2018	B40	17.75±1.09ab	11.82±0.83a	9.46±0.62a	9.76±0.32a	13.00±1.19a
	B60	17.71±0.54ab	12.07±0.62a	9.72±0.64a	9.87±0.42a	13.32±1.91a
	B80	18.75±1.36a	12.17±0.39a	9.56±1.27a	10.12±0.71a	13.64±1.67a
	B100	18.94±1.25a	12.09±0.09a	9.91±1.10a	10.23±0.51a	13.76±2.41a
	ANOVA	*	* *	NS	*	*
	CK	20.06±1.78b	9.65±0.33a	7.42±1.34a	9.28±0.82a	13.07±1.89b
	B20	22.41±2.00ab	9.86±0.63a	7.45±1.13a	9.93±0.93a	13.43±1.92b
	B40	24.23±2.00a	10.88±0.76a	8.09±0.98a	10.80±0.78a	14.78±1.35b
	B60	24.20±2.19a	10.71±0.82a	7.79±1.08a	10.68±0.88a	14.17±1.46b
	B80	24.24±1.86a	11.15±0.84a	7.87±0.66a	10.81±0.79a	15.51±0.25ab
B100	25.18±2.83a	11.3±0.99a	9.09±1.23a	11.39±1.13a	17.54±2.17a	
ANOVA	*	NS	NS	NS	*	
2019	CK	16.31±2.12b	8.75±0.79c	7.22±1.16c	8.07±0.55c	11.02±1.66c
	B20	16.92±1.18b	9.20±0.39bc	8.40±3.01bc	8.63±0.62bc	11.71±1.21bc
	B40	16.27±1.23b	9.22±0.75bc	7.97±2.06bc	8.36±0.80bc	11.85±1.61abc
	B60	18.67±2.98b	10.54±1.17ab	9.49±1.99ab	9.68±1.04b	11.47±2.18bc
	B80	18.84±1.77b	9.97±0.80bc	9.91±3.93ab	9.68±1.18b	12.27±1.61ab
	B100	22.86±2.03a	11.43±1.02a	10.57±3.12a	11.22±0.75a	12.80±1.32a
	ANOVA	* *	* *	*	* *	*

2.4 产量及产量构成因素

添加生物炭显著促进稻田增产,且稻谷产量随生物炭添加量的增加而增加。第 1 年,添加量 ≥60 t/hm<sup>2</sup> 显著促进稻田增产,增幅达 17.0%—23.7%;第 2 年,添加量 ≥40 t/hm<sup>2</sup> 的显著增幅达 15.5%—32.4%;第 3 年,添加量为 20—100 t/hm<sup>2</sup> 的显著增幅为 9.6%—21.8%;第 4 年,水稻仍呈现增产趋势,但各处理间无显著差异,且水稻增幅开始减弱;第 5 年,仅 100 t/hm<sup>2</sup> 添加量仍显著增产,增幅为 15.7% (图 3)。

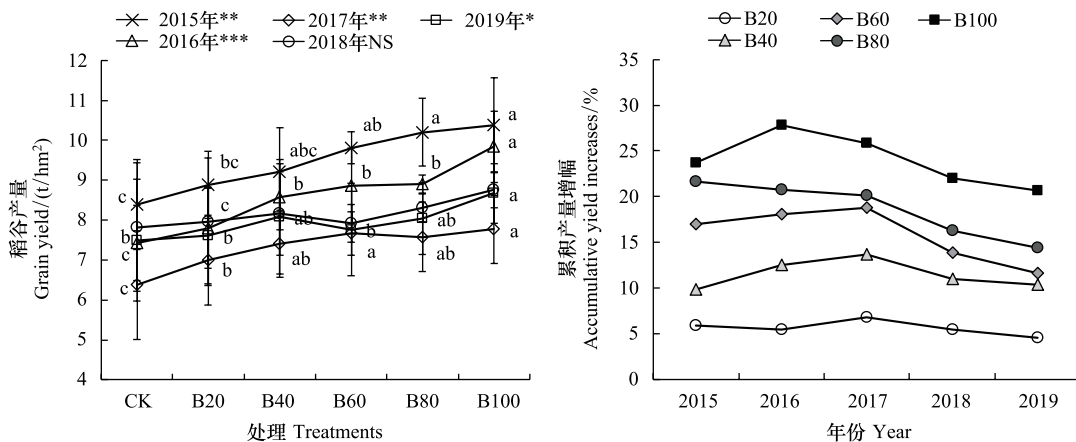


图 3 不同生物炭处理稻谷产量及累计产量增幅

Fig.3 Grain yield and accumulative yield increases of different amount of biochar amendment

高炭量添加的增产效果优于低炭量添加,不同生物炭添加量的处理与对照的累积产量增幅随时间推移呈现出不同规律,但均在第 3 年后表现为递减趋势。从试验第 1 年至第 5 年,与对照稻田相比,B100 处理的累

积产量增幅在第2年达到峰值之后递减,依次为23.7%、27.8%、25.9%、22.30%、20.6%;B80处理的累积产量增幅依次下降,分别为21.7%、20.8%、20.2%、16.3%、14.4%;B60、B40和B20处理累积产量增幅的峰值均出现在第3年,B60的累积产量增幅依次为17.0%、18.1%、18.8%、13.8%、11.6%;B40的累积产量增幅依次为9.8%、12.5%、13.6%、11.0%、10.3%;B20的依次为5.9%、5.5%、6.8%、5.4%、4.6%(图3)。

表4 不同生物炭处理水稻产量构成因素

Table 4 Rice yield composition with different levels of biochar amendment

年份 Year	处理 Treatments	有效穗数 Number of effective spike/( $\times 10^5/\text{hm}^2$ )	每穗粒数 Number of grain per spike	结实率 Seed-setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g
2015	CK	17.6 $\pm$ 2.4a	165.6 $\pm$ 13.3c	86.1 $\pm$ 5.1a	29.5 $\pm$ 0.6b
	B20	17.2 $\pm$ 2.0a	175.3 $\pm$ 16.4bc	86.1 $\pm$ 3.3a	30.4 $\pm$ 0.3a
	B40	17.7 $\pm$ 1.7a	189.4 $\pm$ 6.9ab	85.7 $\pm$ 5.8a	30.5 $\pm$ 0.5a
	B60	17.2 $\pm$ 2.1a	200.0 $\pm$ 9.8a	85.2 $\pm$ 6.6a	30.9 $\pm$ 0.2a
	B80	16.6 $\pm$ 0.8a	198.5 $\pm$ 11.6a	88.2 $\pm$ 5.7a	30.3 $\pm$ 0.3a
	B100	17.5 $\pm$ 1.8a	213.8 $\pm$ 22.9a	89.0 $\pm$ 3.2a	31.0 $\pm$ 0.7a
	ANOVA	NS	* *	NS	* *
2016	CK	18.7 $\pm$ 2.2a	150.7 $\pm$ 4.2b	72.3 $\pm$ 10.8b	31.4 $\pm$ 0.7a
	B20	19.7 $\pm$ 2.7a	161.0 $\pm$ 12.4ab	72.9 $\pm$ 10.2b	31.8 $\pm$ 0.7a
	B40	19.5 $\pm$ 2.3a	165.2 $\pm$ 4.0a	72.6 $\pm$ 10.2b	31.9 $\pm$ 0.5a
	B60	19.2 $\pm$ 1.4a	166.3 $\pm$ 11.2a	78.1 $\pm$ 8.5ab	32.1 $\pm$ 0.8a
	B80	19.2 $\pm$ 1.1a	169.6 $\pm$ 8.1a	81.5 $\pm$ 6.2a	32.2 $\pm$ 0.3a
	B100	19.0 $\pm$ 1.1a	171.5 $\pm$ 8.0a	83.3 $\pm$ 3.4a	32.0 $\pm$ 0.5a
	ANOVA	NS	*	*	NS
2017	CK	27.7 $\pm$ 1.9b	99.6 $\pm$ 21.4a	79.4 $\pm$ 6.9a	26.8 $\pm$ 1.3a
	B20	29.1 $\pm$ 1.1ab	104.7 $\pm$ 22.6a	81.6 $\pm$ 4.7a	27.4 $\pm$ 0.6a
	B40	29.2 $\pm$ 1.8ab	107.3 $\pm$ 6.1a	83.0 $\pm$ 2.2a	27.7 $\pm$ 0.8a
	B60	30.3 $\pm$ 0.6a	114.7 $\pm$ 20.8a	76.7 $\pm$ 4.8a	28.1 $\pm$ 0.3a
	B80	30.1 $\pm$ 0.6a	111.3 $\pm$ 17.5a	77.3 $\pm$ 5.6a	27.9 $\pm$ 0.5a
	B100	30.4 $\pm$ 2.7a	111.8 $\pm$ 15.1a	77.3 $\pm$ 10.9a	28.2 $\pm$ 0.6a
	ANOVA	*	NS	NS	NS
2018	CK	26.0 $\pm$ 2.3a	127.2 $\pm$ 13.1b	83.5 $\pm$ 5.6a	28.7 $\pm$ 0.5a
	B20	27.8 $\pm$ 2.5a	126.7 $\pm$ 14.1b	81.7 $\pm$ 8.6a	29.1 $\pm$ 0.9a
	B40	28.0 $\pm$ 1.2a	138.3 $\pm$ 8.9ab	81.5 $\pm$ 5.9a	28.8 $\pm$ 0.4a
	B60	28.2 $\pm$ 1.6a	141.1 $\pm$ 7.0a	84.1 $\pm$ 3.1a	28.7 $\pm$ 0.4a
	B80	26.6 $\pm$ 1.1a	136.9 $\pm$ 8.6ab	84.7 $\pm$ 1.9a	28.8 $\pm$ 0.6a
	B100	28.5 $\pm$ 2.1a	143.7 $\pm$ 4.2a	85.0 $\pm$ 2.4a	29.0 $\pm$ 0.7a
	ANOVA	NS	*	NS	NS
2019	CK	28.4 $\pm$ 1.0a	123.1 $\pm$ 15.4b	72.7 $\pm$ 8.4a	24.0 $\pm$ 0.4a
	B20	29.1 $\pm$ 0.7a	144.4 $\pm$ 5.3a	74.3 $\pm$ 7.4a	24.2 $\pm$ 0.5a
	B40	28.2 $\pm$ 1.8a	140.1 $\pm$ 16.2a	77.4 $\pm$ 4.0a	24.4 $\pm$ 0.3a
	B60	28.5 $\pm$ 2.0a	139.4 $\pm$ 10.2a	75.6 $\pm$ 9.3a	24.6 $\pm$ 0.5a
	B80	29.5 $\pm$ 0.7a	145.1 $\pm$ 8.7a	77.4 $\pm$ 4.3a	24.4 $\pm$ 1.0a
	B100	30.1 $\pm$ 2.1a	147.6 $\pm$ 9.1a	79.1 $\pm$ 4.9a	24.9 $\pm$ 0.3a
	ANOVA	NS	* *	NS	NS

添加生物炭显著影响水稻的产量构成因素,虽然不同年份发生显著变化的产量构成因素存在差异,但每穗粒数的变化最显著。添加生物炭显著增加水稻的每穗粒数,除第3年没达到显著水平,其余年份B100、B80及B60与对照的差异均达到显著或极显著水平(表4)。



## 2.5 产量与其他生育指标的关系

生物炭影响下,水稻产量与齐穗期时群体叶面积指数、干物质积累(单茛茎鞘、叶及地上部总重)以及倒 4 叶 SPAD 均呈显著正相关。生物炭影响下水稻产量的增加主要与产量构成中每穗粒数的增多有关(图 4)。

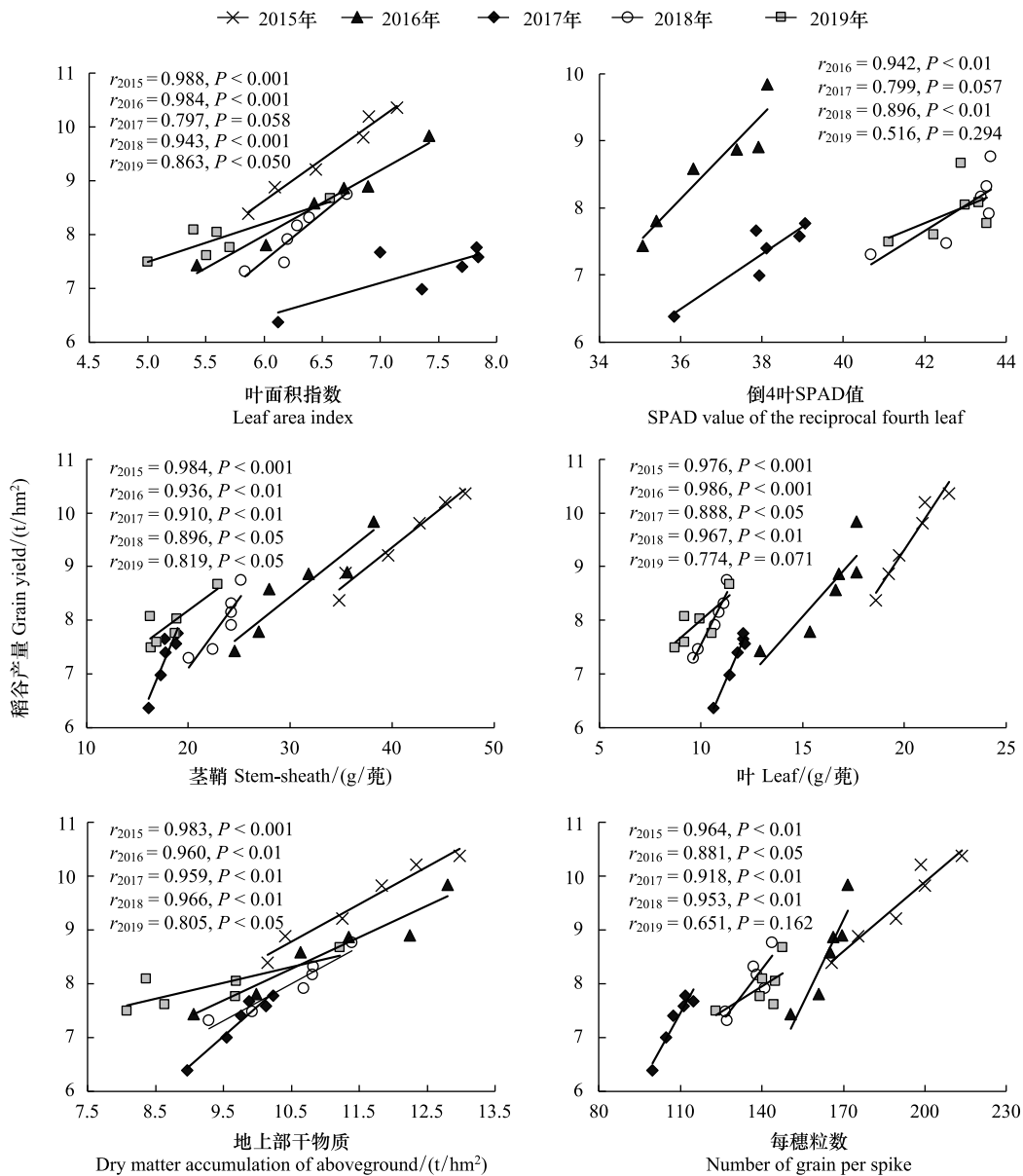


图 4 稻谷产量与生长指标的关系

Fig.4 Relationship between grain yield and growth indicator

## 3 讨论

农田施用生物炭对不同作物生长发育和产量的良好效应已被大量研究证实<sup>[16,26]</sup>。不同研究中生物炭的添加量从低于 1 t/hm<sup>2</sup>到超过 100 t/hm<sup>2</sup>不等,与对照相比,施用生物炭促进产量增加的百分比从低于 10%到超过 200%<sup>[14,27]</sup>。如此高的变异可能与不同作物、土壤类型、生物炭原料及施用量的变化有关。本研究选取土壤肥力中等的酸性稻田,在正常施肥基础上开展生物炭梯度增施试验,生物炭一次性添加量为 0—100 t/hm<sup>2</sup>,结果表明与对照相比,生物炭处理单季最高产量增幅达 32.4%,五年累积产量增幅为 4.6%—20.6%。

水稻群体质量的优劣是水稻各产量构成因素形成是否协调、水稻产量高低的决定因素<sup>[28]</sup>,齐穗期水稻的群体叶面积指数、干物质积累以及倒4叶叶绿素含量等均是表征水稻群体质量的重要指标。本研究发现施加生物炭显著提高水稻群体的叶面积指数、倒4叶叶绿素含量、茎鞘及叶的干物质积累以及每穗粒数,且稻谷产量与上述指标均呈现出显著正相关的关系,表明酸性稻田施加生物炭有利于提高水稻群体质量,形成壮秆大穗群体,从而促进增产。水稻籽粒产量中60%—80%来自于抽穗到成熟期的光合产物积累<sup>[28]</sup>,齐穗期较大的叶面积指数意味着较高的群体光合能力;齐穗期较高的茎鞘重则为增加水稻每穗颖花数,促进灌浆,提高结实率等提供了物质基础<sup>[28-29]</sup>;水稻倒4叶的叶绿素含量与根系活力显著正相关<sup>[30]</sup>,本研究中生物炭处理显著提高水稻齐穗期时倒4叶的SPAD值,表明生物炭不仅能提高水稻生殖生长期时下部叶的光合能力,也间接说明生物炭对促进水稻根系生长,提高生长后期的根系活力具有潜在作用。前人研究也表明农田施用生物炭能提高水稻叶面积指数<sup>[31]</sup>、增加叶片光合能力<sup>[32]</sup>,促进水稻根系生长<sup>[33]</sup>,增加干物质积累量<sup>[34]</sup>,有利于每穗粒数增加<sup>[31, 33]</sup>,最终促进水稻增产。

本研究发现添加生物炭对水稻生长和产量的促进作用随添加量的增加而增强,B100和B80的水稻群体质量最好,产量最高。这与Chan等<sup>[18]</sup>在酸性旱地土壤上开展的研究结果一致,萝卜产量随生物炭施用量增加而增高,且施用量为100 t/hm<sup>2</sup>时的增产效果最好。Liu等<sup>[17]</sup>的研究也表明生物炭对酸性红壤中油菜和甘薯产量的促进作用随添加量增加而增强。但是阿力木·阿布来提等<sup>[35]</sup>的研究显示水稻产量随生物炭施用量增加并未呈线性增加,而呈先增加后降低趋势,可能与他们的土壤偏碱性有关。Haefele等<sup>[36]</sup>发现施用稻壳炭导致前3季水稻产量略有下降,但是他们试验地土壤肥力较高,表层土壤中原本含有较高的氮、磷、钾等有效养分,添加高碳氮比的生物炭反而限制了氮的有效性,导致生物炭的作用难以发挥。Jeffery等<sup>[37]</sup>通过全球尺度的Meta分析发现,添加生物炭对低营养、酸性土壤的增产效果尤为明显,作物产量平均提高了25%。Jin等<sup>[16]</sup>连续5年的大田试验也表明在酸性土壤施用生物炭有利于提高土壤肥力,促进油菜生长和增产,油菜株高、生物量及产量均随生物炭添加量增加而增加。

通过不同生物炭处理与对照间单季及累积产量的增幅比较,本研究发现尽管前3年不同生物炭处理随时间呈出不同趋势,但是从第4年开始,所有生物炭处理与对照的单季及累积产量增幅均呈现下降趋势,表明生物炭对酸性稻田的增产效应可稳定维持3年,之后开始下降。Jin等<sup>[16]</sup>连续5年的大田试验也发现酸性土壤一次性添加生物炭对油菜的增产效果可持续数年,但是呈现出逐年下降的趋势。Cornelissen等<sup>[23]</sup>的研究也表明一次性添加可可壳生物炭能持续5季促进玉米增产,增产效果在第2季达到高峰,然后呈现逐年下降趋势。还有研究发现生物炭对作物的增产效果随年际推移而逐年增加,如Major等<sup>[38]</sup>发现,施用生物炭第1年对玉米产量无显著影响,但第2—4年玉米增产效果持续增高,产量分别增加28%、30%和140%。

土壤中输入生物炭能够综合改善土壤水、肥、气、热等环境条件,为水稻提供良好的生长环境<sup>[32]</sup>,从而促进水稻生长发育,改善水稻群体质量,最终促使水稻持续增产。本研究中酸性稻田一次性添加生物炭对水稻生长和持续增产的良好效应可能与生物炭及研究区土壤特性有关。首先,土壤酸性是影响酸性土壤中土壤肥力提升和作物产量增加的关键因子<sup>[16]</sup>。本研究稻壳炭本身pH较高(9.21),而土壤的pH值只有4.67,添加生物炭有利于提高土壤pH值<sup>[39-41]</sup>,降低酸性土壤中磷的固定,提高磷素的生物有效性<sup>[42-43]</sup>。其次,本研究土壤肥力不高,由于稻谷壳中的磷钾钙镁等矿质养分在经过高温热解后大部分仍保留在生物炭中,施用生物炭可直接为水稻生长提供养分<sup>[44-45]</sup>。同时,生物炭比表面积较大,孔隙及表面官能团丰富,具有较强的吸附能力,有利于增加土壤的阳离子交换量<sup>[46]</sup>,吸附土壤水溶液中的N、P、K等有效养分<sup>[47]</sup>,提高作物的养分利用率<sup>[48]</sup>。隋阳辉等<sup>[34]</sup>发现施用生物炭提高了氮肥利用率,增加了水稻茎鞘和叶中的氮素含量,促进了地上部干物质的积累。此外,生物炭较小的容重和多孔结构也有利于改善土壤物理结构,提高土壤透气性,降低土壤容重,促进水稻根系生长,提高根系活力<sup>[33]</sup>。陈盈等<sup>[32]</sup>认为由于生物炭提高了水稻根系活力,又为水稻生长提供了额外养分,从而提高了水稻生长后期叶片的光合性能,有利于促进水稻灌浆,提高每穗实粒数,促使水稻增产。最后,由于生物炭富含有机碳且相对稳定,分解速度慢,对土壤有机质的固持和土壤肥力的提升具有

长效作用<sup>[48-49]</sup>。史思伟等<sup>[50]</sup>也发现长期施用生物炭,土壤物理结构的得到显著改善,土壤有机质、土壤总氮及氮磷钾速效养分的含量均显著提高。Jin<sup>[16]</sup>和许云翔<sup>[51]</sup>等还发现生物炭对表征土壤肥力的土壤微生物量及土壤酶活性的提高同样具有积极的长效作用。因此,施用生物炭对土壤理化性质的持续改善及土壤肥力的稳定维持或提高是促进作物生长和持续增产的可能原因。

#### 4 结论

综合 5 年试验结果表明,酸性稻田添加生物炭有利于改善水稻群体质量,最终促进水稻增产,且增产效果随着生物炭添加量增加而增加;酸性稻田一次性添加生物炭后,其增产效果至少能稳定维持 3 年;高炭量添加(100 t/hm<sup>2</sup>和 80 t/hm<sup>2</sup>)相比于低中炭量添加在促进水稻生长和增产方面的作用更明显,且持续增产潜力较好。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. London: Routledge, 2015: 1-10.
- [ 2 ] Xie T, Reddy K R, Wang C W, Yargicoglu E, Spokas K. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(9): 939-969.
- [ 3 ] Tan X F, Liu Y G, Zeng G M, Wang X, Hu X J, Gu Y L, Yang Z Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 2015, 125: 70-85.
- [ 4 ] Abujabrah I S, Doyle R, Bound S A, Bowman J P. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9): 2211-2222.
- [ 5 ] Jin Z W, Chen C, Chen X M, Jiang F, Hopkins I, Zhang X L, Han Z Q, Billy G, Benavides J. Soil acidity, available phosphorus content, and optimal biochar and nitrogen fertilizer application rates: a five-year field trial in upland red soil, China. *Field Crops Research*, 2019, 232: 77-87.
- [ 6 ] Tian J, Wang J Y, Dippold M, Gao Y, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil. *Science of the Total Environment*, 2016, 556: 89-97.
- [ 7 ] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [ 8 ] Bu X L, Xue J H, Zhao C X, Wu Y B, Han F Y. Nutrient leaching and retention in riparian soils as influenced by rice husk biochar addition. *Soil Science*, 2017, 182(7): 241-247.
- [ 9 ] Madiba O F, Solaiman Z M, Carson J K, Murphy D V. Biochar increases availability and uptake of phosphorus to wheat under leaching conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(4): 439-446.
- [ 10 ] 包立, 刘惠见, 邓洪, 黄维恒, 张乃明, 董新星. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响. *土壤学报*, 2018, 55(4): 815-824.
- [ 11 ] Huang M, Yang L, Qin H D, Jiang L G, Zou Y B. Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(6): 997-1000.
- [ 12 ] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [ 13 ] 张娜, 李佳, 刘学欢, 刘杨, 王永平, 梁海燕, 廖允成. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [ 14 ] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, Joseph S, Bian R J, Li L Q, Pan G X, Paz-Ferreiro J. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 583-594.
- [ 15 ] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1348-1352.
- [ 16 ] Jin Z W, Chen C, Chen X M, Hopkins I, Zhang X L, Han Z Q, Jiang F, Billy G. The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield-A five year field trial with biochar addition in upland red soil, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 649(1): 1467-1480.
- [ 17 ] Liu Z X, Chen X M, Jing Y, Li Q X, Zhang J B, Huang Q R. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *CATENA*, 2014, 123: 45-51.
- [ 18 ] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(8): 629-634.
- [ 19 ] Yang S H, Xiao Y N, Sun X, Ding J, Jiang Z W, Xu J Z. Biochar improved rice yield and mitigated CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake Region of China. *Atmospheric Environment*, 2019, 200: 69-77.
- [ 20 ] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, Cui L Q, Hussain Q, Li L Q, Zheng J W, Zheng J F, Zhang X H, Han X J, Yu X Y. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153-160.

- [21] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 张雯, 高海英. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [22] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, Bastos A C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175-187.
- [23] Cornelissen G, Jubaedah, Nurida N L, Hale S E, Martinsen V, Silvani L, Mulder J. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 561-568.
- [24] Liu X Y, Zhou J S, Chi Z Z, Zheng J F, Li L Q, Zhang X H, Zheng J W, Cheng K, Bian R J, Pan G X. Biochar provided limited benefits for rice yield and greenhouse gas mitigation six years following an amendment in a fertile rice paddy. *CATENA*, 2019, 179: 20-28.
- [25] 冯跃华, 邹应斌, Buresh R J. 免耕移栽对两系杂交水稻两优培九若干群体特征的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(1): 65-70.
- [26] 唐春双, 杨克军, 李佐同, 王智慧, 赵长江, 王玉凤, 张翼飞, 徐晶宇, 王聪, 付健, 张发明, 杨系玲, 张文超, 张静, 陈天宇, 吴琼, 张鹏飞, 范博文. 生物炭对玉米茎秆性状及产量的影响. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 93-97, 133-133.
- [27] Wang Y C, Villamil M B, Davidson P C, Akdeniz N. A quantitative understanding of the role of co-composted biochar in plant growth using meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 741-752.
- [28] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本. 北京: 中国农业出版社, 2003: 27-31.
- [29] 薛亚光, 陈婷婷, 杨成, 王志琴, 刘立军, 杨建昌. 中梗稻不同栽培模式对产量及其生理特性的影响. 作物学报, 2010, 36(3): 466-476.
- [30] 潘启民, 徐大勇, 潘长红, 陈庭木, 方兆伟, 秦德荣, 樊继伟, 樊宁声. 利用叶绿素含量测定水稻根系活力的水稻品种选育方法: 中国, 102356752A. 2012-02-22.
- [31] 孙爱华, 华信, 叶晓思, 詹焕楨, 李英海, 朱士江. 施加生物炭对节水灌溉水稻生长特征及产量影响. 节水灌溉, 2016, (6): 6-9.
- [32] 陈盈, 张满利, 刘宪平, 代贵金, 侯守贵. 生物炭对水稻齐穗期叶绿素荧光参数及产量构成的影响. 作物杂志, 2016, 32(3): 94-98.
- [33] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 范淑秀, 陈温福. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [34] 隋阳辉, 高继平, 刘彩虹, 徐正进, 王延波, 赵海岩. 东北冷凉地区秸秆还田方式对水稻光合、干物质积累及氮素吸收的影响. 作物杂志, 2018, 34(5): 137-143.
- [35] 阿力木·阿布来提, 姚怀柱, 宋云飞, 费远航, 余冬立. 海涂土壤结构改良对水稻叶绿素荧光参数和产量的影响. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3435-3442.
- [36] Haeefe S M, Konboon Y, Wongboon W, Amarante S, Maarifat A A, Pfeiffer E M, Knoblauch C. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 430-440.
- [37] Jeffery S, Abalos D, Prodana M, Bastos A C, van Groenigen J W, Hungate B A, Verheijen F. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 053001.
- [38] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S J, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [39] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, Li Y S, Jin J, Liu X B, Wang G H. Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110: 56-67.
- [40] Zhang R, Zhang Y L, Song L L, Song X Z, Hänninen H, Wu J S. Biochar enhances nut quality of *Torreya grandis* and soil fertility under simulated nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 321-329.
- [41] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 陈义, 唐旭, 吴春艳, 钟哲科, 杨生茂. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2166-2172.
- [42] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, Clay D E, Malo D D, Papiernik S K, Clay S A, Julson J L. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, 42(5): 626-634.
- [43] Cui H J, Wang M K, Fu M L, Ci E. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(7): 1135-1141.
- [44] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, Das K C, Bibens B. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [45] Cao X D, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [46] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, Fortier C A, Lima I M. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2501-2510.
- [47] Mukherjee A, Zimmerman A R, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 2011, 163(3/4): 247-255.
- [48] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [49] 郭雄飞. 生物炭对间作体系中刨花润楠生长及土壤养分年际变化的影响. 生态学报, 2019, 39(13): 4910-4920.
- [50] 史思伟, 姜翼来, 杜章留, 王芊, 韩硕, 张庆忠. 生物炭的 10 年土壤培肥效应. 中国土壤与肥料, 2018, (6): 16-22.
- [51] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 吕豪豪, 汪玉瑛, 陈金媛, 杨生茂. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110-1118.