

王悦满, 高倩, 薛利红, 等. 生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 58-65.

WANG Yue-man, GAO Qian, XUE Li-hong, et al. Effects of Different Biochar Application Patterns on Rice Growth and Yield [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 58-65.

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满^{1,2}, 高倩^{1,2}, 薛利红¹, 杨林章¹, 李辉信², 冯彦房^{1*}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014; 2.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要:生物炭对固碳减排、土壤改良等有良好的效用,近年来对其应用研究得到了广泛关注。然而,到目前为止,鲜有报道考察生物炭施加方式对作物生长的影响,而这对于生物炭的推广应用及其环境效用综合评估都有直接影响。为此,本研究采用水稻土柱试验,通过添加不同生物炭,即小麦秸秆(WBC)和木质锯末(SBC)分别在500℃和700℃制备的4种生物炭,研究其在混合施加或表面施加这两种施加方式下对水稻生长的影响。研究表明:(1)与对照相比,施加生物炭的处理对水稻株高和反应叶绿素含量的SPAD值(Soil Plant Analysis Development)有积极影响,株高在抽穗期、灌浆期、成熟期表施处理大于混施处理。表施处理SPAD值和归一化植被指数NDVI(Normalized Different Vegetation Index)略小于混施处理。(2)生物炭施加显著提高水稻结实率,增幅4.88%~8.39%,表施处理的结实率均高于对应的混施处理,但表施和混施处理对有效穗数、穗粒数、千粒重影响差异不显著。(3)生物炭促进了水稻增产,而生物炭表施处理较混施对水稻增产的效应更为明显。(4)生物炭增加了水稻的收获指数,增幅2.58%~10.56%,表施和混施处理对收获指数影响无显著差异。(5)施加生物炭普遍提高了氮磷钾偏生产力,较对照提高了9.81%~36.25%。

关键词:水稻产量;生物炭;施加方式;表施

中图分类号:S156.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)01-0058-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0162

Effects of Different Biochar Application Patterns on Rice Growth and Yield

WANG Yue-man^{1,2}, GAO Qian^{1,2}, XUE Li-hong¹, YANG Lin-zhang¹, LI Hui-xin², FENG Yan-fang^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Biochar has positive effect on carbon sequestration and soil improvement, consequently biochar application has been attracted more and more attention in recent years. However, so far, few investigations about the effects of biochar application patterns on crop growth, which may have a direct impact on biochar's application and comprehensive environmental effects have been reported. Herein, soil column study was conducted using four biochars, i.e., wheat straw (WBC) and wood sawdust (SBC) that pyrolyzed at 500 °C and 700 °C, respectively, to study the effects of two different biochar application patterns on rice growth. These two typical biochar application patterns were: generally mixed application (mixed treatment) and surface application (surface treatment). The results showed that: (1) In comparison with CK, all biochar application treatments promoted the growth of rice in terms of plant height and SPAD (Soil Plant Analysis Development) value. Plant height of surface treatment was higher than that of mixed treatments at the heading, filling and maturation stages. SPAD and NDVI (Normalized Different Vegetation Index) value of surface treatments were slightly lower than mixed treatment. (2) Biochar significantly increased rice seeding setting rate by 4.88%~8.39%, moreover, surface treatments were observed higher rice seeding setting rate than mixed treatments. However, no significant difference was observed in the number of effective panicles, grains per spike and 1 000 - grain weight between surface and mixed treatment. (3) Application of biochar promoted rice yield, and surface treatments were more likely to increase rice

收稿日期:2017-06-16 录用日期:2017-07-26

基金项目:国家自然科学基金(41401345);江苏省自然科学基金(BK20140755);农业公益性行业科研专项(20150306);江苏省自主创新项目(CX(15)1004)

作者简介:王悦满(1993—),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事不同类型生物炭的环境效应研究。E-mail:757511824@qq.com

*通信作者:冯彦房 E-mail:jaasfengyanfang@163.com

yield compared with the conventional mixed treatments. (4) All biochar treatments increased rice harvest index by 2.58%~10.56%, and no significant difference was found between surface and mixed treatment. (5) All applications of biochar promoted nitrogen, phosphorus and potassium partial productivity, which was 9.81%~36.25% higher than that of CK.

Keywords: rice yield; biochar; application pattern; surface treatment

目前国内外围绕生物炭对作物生长与产量的影响已开展一些研究^[1-5]。然而,对于生物炭不同施加方式可能产生的环境及农业效应尚鲜有报道。生物炭在土壤中的空间分布随添加方式、施用深度、施用量和耕作方式而改变,而且生物炭施入土壤后,受降雨和生物物理扰动等影响,沿土壤剖面迁移,改变其在土壤中的空间分布^[6]。大田试验中往往是将生物炭翻入于土壤耕作层中^[7-9],土柱试验最为常见的施加方式则是将生物炭与土柱土壤充分混合施加^[10]。笔者认为将等量的生物炭施加在浅表层土(约0~3 cm)可以更有效地提高生物炭对土壤表层及田面水的养分的固持作用。而且以往对于生物炭与土壤混合施加(混施)和仅施加于浅表层(表施)的对比研究不多。因此,为考察生物炭与土壤混施与表施这两种施加方式对水稻生长有何影响,本试验将在同样实验条件下对比考察前述2种生物炭施加方式对水稻生长的影响。

基于本试验的科学假设,笔者认为将有限的生物炭集中施加在浅表层土(约0~3 cm)中的表施处理,可以在接近土水界面形成一个受生物炭强烈影响的“缓冲层”,大大强化生物炭对田面水养分含量的扰动,特别是对氨氮的固持效果更为显著,这有利于增加稻田氮素利用效率,进而对产量可能产生影响。同时,此前的研究更多局限于单一类型的生物炭在农田中的施用,对多个变量条件下考察生物炭对作物生长与产量的影响的报道比较有限。为此,本研究将从多个维度考察不同生物炭基质材料和不同烧制温度在不同施加方式的条件下对水稻生长和产量构成的影响,为更加深入了解生物炭对稻田的综合效应提供新的思考角度,为指导生物炭田间应用实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

水稻土柱试验供试水稻品种为武运粳23号,试验用土取自江苏省宜兴市周铁镇,在15 hm²的稻田选择6个采样点,采集0~20、20~40 cm和40~60 cm的土层。将采集来的供试土壤进行自然风干,剔除石子等杂质,过筛备用。将每层中的土壤按照与田间条

件相同的顺序和堆积密度装土柱中。土壤性质如下:pH值为6.38(土水比1:2.5),有机质含量2.28%,TN、TP、TK含量分别为1.56、0.96、4.12 g·kg⁻¹。试验选取小麦秸秆、木质锯末2种生物质材料,分别在2种处理温度(500、700℃)下制备的小麦秸秆生物炭(WBC)和木质锯末生物炭(SBC)(对应命名为WBC500、WBC700、SBC500和SBC700),使用之前过2 mm筛。生物炭的理化性质如表1所示。土柱容器使用PVC材料定制,具体尺寸为:内径30 cm,高度50 cm,底部设有排水孔,为水稻烤田时所用。

表1 供试生物炭理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of biochar

| 处理 | pH值 | TN/g·kg ⁻¹ | TP/g·kg ⁻¹ | TK/g·kg ⁻¹ |
|--------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| WBC500 | 9.51 | 13.30 | 4.40 | 20.90 |
| WBC700 | 8.91 | 14.15 | 4.61 | 21.06 |
| SBC500 | 8.37 | 2.81 | 3.83 | 13.67 |
| SBC700 | 9.63 | 4.72 | 3.09 | 25.71 |

本试验设置0.5%生物炭施加量(W/W);生物炭施加方式为混施与表施。生物炭混施即将耕层土壤加入0.5%(W/W)的生物炭并充分混合,而生物炭表施则是将同等质量的生物炭与土柱表层0~3 cm的土壤均匀混合后装入土柱中备用。所有土柱施氮量一致,皆为240 kg N·hm⁻²。基肥、蘖肥和穗肥总氮用量配比为4:4:2。试验全部处理均施加磷钾肥,且在基肥时一次性施入,磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)具体用量分别为96、192 kg·hm⁻²。日常水稻水层保持在3~5 cm,灌溉水为自来水。本研究采用土柱试验,共设置9组处理(表2),每个处理3个重复。每个土柱装入35 kg的水稻土,土柱土壤厚度约为50 cm。所有施加生物炭的处理,皆为生物炭与土壤按比例统一混合后装入土柱。于2015年6月22日插秧(3穴·盆⁻¹,3株·穴⁻¹),同年9月31日收获。

1.2 测定项目与方法

分别于水稻生长的5个关键生育期:分蘖期(7月16日)、拔节期(8月10日)、抽穗期(9月26日)、灌浆期(10月9日)和成熟期(10月30日),对其株高、叶绿素含量SPAD (Soil Plant Analysis Develop-

表 2 试验处理
Table 2 The experimental treatments

| 处理 | 基质材料 | 制备温度/°C | 施加量(% ,W/W) | 施加方式 |
|----------|------|---------|-------------|------|
| WBC500 | 小麦秸秆 | 500 | 0.5 | 混施 |
| SBC500 | 木质锯末 | 500 | 0.5 | 混施 |
| WBC700 | 小麦秸秆 | 700 | 0.5 | 混施 |
| SBC700 | 木质锯末 | 700 | 0.5 | 混施 |
| WBC500-B | 小麦秸秆 | 500 | 0.5 | 表施 |
| SBC500-B | 木质锯末 | 500 | 0.5 | 表施 |
| WBC700-B | 小麦秸秆 | 700 | 0.5 | 表施 |
| SBC700-B | 木质锯末 | 700 | 0.5 | 表施 |
| CKU | — | — | — | — |

注:CKU 为施加氮肥对照。

Note:CKU for the application of nitrogen control.

ment)、归一化植被指数 NDVI (Normalized Different Vegetation Index) 进行测量,其中 SPAD 的测定以水稻的旗叶为测量对象。株高的测试用直尺直接测量植株高度。使用由美国 Trimble 公司生产 GreenSeeker 手持式光谱仪测试水稻 5 个生育期的 NDVI,采用日本 Minolta 公司的 SPAD-502 叶绿素仪测试水稻 SPAD 值,两个指标测试时间皆为晴天的 9:00—11:00。基础土壤全氮采用硫酸催化消解-硼酸吸收滴定,全磷采用酸消解-钼锑抗比色法,全钾采用酸消解-火焰光度计比色法。

水稻成熟后,取其地上部分,分离籽粒与植株秆。水稻籽粒自然风干,冷却后称量每个土柱实际所得籽粒重量;测定每个土柱水稻穗数、每穗总粒数与瘪粒数、千粒重等产量性状指标。

1.3 数据分析

使用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20.0 进行数据统计与分析,用 OriginPro 8.0 进行绘图。

表 3 施加生物炭对水稻株高在不同关键生长期的影响(cm)

Table 3 Effects of applying biochar on rice plant height at the different key growth periods(cm)

| 处理 Treatments | 分蘖期 Tillering stage | 拔节期 Elongation stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 成熟期 Maturing stage |
|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| WBC500 | 47.36±4.20a | 71.93±1.83ab | 99.87±1.97ab | 100.30±1.73a | 98.01±2.98ab |
| WBC700 | 45.37±4.92ab | 71.74±2.25ab | 95.99±3.45bcde | 96.06±3.74ab | 96.62±3.15abc |
| SBC500 | 42.83±2.18ab | 72.79±2.38a | 93.96±2.62cde | 96.52±1.65ab | 92.63±1.30c |
| SBC700 | 45.60±1.72ab | 68.08±1.23cd | 93.26±3.21e | 93.39±2.46b | 92.87±2.78c |
| WBC500-B | 44.12±3.78ab | 68.42±1.39cd | 101.96±3.36a | 101.36±3.20a | 99.76±3.71a |
| WBC700-B | 42.83±4.19ab | 66.47±4.40d | 98.08±4.79abcd | 98.30±6.24ab | 95.26±4.48bc |
| SBC500-B | 41.00±3.56b | 68.68±2.95cd | 93.68±4.11de | 98.19±3.82ab | 94.59±3.77bc |
| SBC700-B | 43.39±4.28ab | 68.20±2.43cd | 98.49±4.48abc | 99.82±4.56a | 98.34±3.54ab |
| CKU | 43.44±3.32ab | 69.67±5.48bc | 95.97±2.10bcde | 97.63±2.20ab | 98.13±2.72ab |

注:同列不同字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note:Different letters in the same line mean significant difference among different treatments(P<0.05). The same below.

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对水稻生长的影响

2.1.1 施加生物炭对水稻株高的影响

由表 3 可知,各处理株高在分蘖期、拔节期、抽穗期呈现较高的增长水平,灌浆期和成熟期株高增幅不大甚至略有下降。施加生物炭处理与对照 CKU 相比,株高整体上高于 CKU,在灌浆期和成熟期表现较为明显。表施处理与其对应的混施处理相比,整体来说株高在分蘖期和拔节期表施处理小于混施处理,而在抽穗期、灌浆期和成熟期表施处理的水稻株高超过混施。除了 WBC700-B 在各个关键生长期的株高均低于 SBC700-B 以外,小麦秸秆生物炭对水稻株高的促进作用在后 3 个关键生长期均优于木质锯末生物炭处理,不同温度制备的生物炭,500 °C 比 700 °C 制备的生物炭对水稻株高的促进作用更明显,增加了 0.75%~8.84%。不同生物炭施加方式、基质材料和制备温度之间对水稻的株高在统计上均不显著。

2.1.2 施加生物炭对水稻 SPAD 值的影响

由表 4 可知整体趋势是在分蘖期、拔节期和抽穗期 SPAD 先上升,在灌浆期和成熟期,SPAD 显著下降。在水稻的抽穗期,生物炭处理的 SPAD 值较 CKU 增加 2.25%~8.63%。整体而言,表施处理较对应混施处理 SPAD 值较小,不同温度制备的生物炭处理中,500 °C 生物炭处理 SPAD 值高于 700 °C 生物炭处理。其中 WBC500 高出 WBC500-B 处理的 1.34%~57.22%,WBC700 高出 WBC700-B 处理 3.01%~43.96%。不同原料制备的生物炭处理之间 SPAD 值变化没有明显的规律。

2.1.3 施加生物炭对水稻 NDVI 的影响

由表 5 可知,NDVI 在水稻的分蘖期和拔节期之

表4 施加生物炭对水稻 SPAD 在不同关键生长期的影响

Table 4 Effects of applying biochar on rice SPAD at the different key growth periods

| 处理 Treatments | 分蘖期 Tillering stage | 拔节期 Elongation stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 成熟期 Maturing stage |
|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| WBC500 | 42.82±1.35ab | 45.40±1.91a | 46.60±0.70a | 45.19±1.47ab | 35.85±1.22a |
| WBC700 | 43.67±1.55a | 43.93±0.41ab | 44.04±1.93bcd | 43.93±1.29ab | 31.49±1.97b |
| SBC500 | 41.77±0.23b | 43.85±0.50ab | 44.6±0.70abc | 45.72±0.22a | 37.97±0.94a |
| SBC700 | 41.49±0.25b | 40.39±0.73cd | 43.64±1.24bcd | 43.57±0.61ab | 29.01±2.76b |
| WBC500-B | 42.25±1.25ab | 43.04±1.00b | 45.42±2.24ab | 41.35±2.4cd | 22.80±4.16d |
| WBC700-B | 41.62±0.56b | 39.31±2.41d | 42.75±0.77cd | 40.29±1.41d | 21.87±1.88d |
| SBC500-B | 42.27±0.89ab | 42.40±0.41b | 42.91±0.94cd | 40.72±0.87d | 27.09±1.40bc |
| SBC700-B | 43.02±0.19ab | 42.69±1.27b | 44.13±0.56bcd | 41.13±0.70cd | 24.05±3.59cd |
| CKU | 42.05±0.53ab | 41.80±1.01bc | 41.81±0.88d | 43.25±0.54bc | 30.13±4.56b |

表5 施加生物炭对水稻 NDVI 在不同关键生长期的影响

Table 5 Effects of applying biochar on rice NDVI at the different key growth periods

| 处理 Treatments | 分蘖期 Tillering stage | 拔节期 Elongation stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 成熟期 Maturing stage |
|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| WBC500 | 0.14±0.04a | 0.65±0.10a | 0.64±0.01ab | 0.67±0.01a | 0.51±0.05a |
| WBC700 | 0.14±0.05a | 0.63±0.04a | 0.60±0.02b | 0.64±0.01bc | 0.44±0.05ab |
| SBC500 | 0.14±0.02a | 0.68±0.03a | 0.66±0.01a | 0.65±0.02ab | 0.50±0.02a |
| SBC700 | 0.11±0.01b | 0.58±0.05a | 0.62±0.02ab | 0.62±0.02bcd | 0.44±0.07ab |
| WBC500-B | 0.14±0.06a | 0.66±0.08a | 0.64±0.02ab | 0.58±0.03e | 0.28±0.06c |
| WBC700-B | 0.17±0.01a | 0.52±0.10a | 0.64±0.02ab | 0.59±0.01de | 0.33±0.04bc |
| SBC500-B | 0.12±0.04a | 0.58±0.13a | 0.62±0.03ab | 0.60±0.02cde | 0.35±0.06bc |
| SBC700-B | 0.14±0.06b | 0.61±0.09a | 0.62±0.03ab | 0.63±0.01bcd | 0.34±0.04bc |
| CKU | 0.13±0.02a | 0.56±0.02a | 0.62±0.03ab | 0.62±0.01bcd | 0.43±0.01ab |

间增长很快,拔节期直到灌浆期较为平缓,增幅不大甚至有所下降,成熟期则普遍呈现下降趋势。生物炭混施处理 NDVI 普遍高于对照 CKU,高出幅度 4.01%~21.71%。表施处理则普遍低于施肥对照 CKU。因此,表施处理 NDVI 普遍小于混施处理。不同温度制备的生物炭处理在 NDVI 方面表现为混施条件下,WBC500 和 SBC500 的 NDVI 分别高于 WBC700 和 SBC700;表施条件下的不同温度制备的生物炭处理则不具有这一规律。不同原材料制备的生物炭,即小麦秸秆生物炭和锯末生物炭之间 NDVI 指数不存在明显规律性。

2.2 施加生物炭对水稻产量构成因子的影响

水稻产量的构成因子直接影响水稻产量。如表 6 所示,不同生物炭处理及其施加方式均显著增加了水稻结实率,较对照 CKU 增幅 4.88%~8.39%,其中 SBC500-B 增幅最高,SBC700-B 最低。WBC500、WBC700 和 SBC500 结实率均低于与其对应的表施处理。混施处理的千粒重均高于 CKU,除了 SBC700 其他处理增幅均不显著。生物炭表施处理与其对应的混

施处理相比,对水稻的穗粒数与千粒重的影响差异不显著。不同基质材料和温度制备的生物炭处理之间也没有一定的规律性。

2.3 施加生物炭对水稻产量的影响

由图 1 可知,与对照 CKU 相比不同生物炭处理及其施加方式均显著增加了水稻的产量,增幅 9.81%~36.25%。可以发现,生物炭混施处理与施肥对照 CKU 相比增产 10.28%~18.38%,平均增产约 13.54%。表施处理除了 SBC500-B 比 CKU 仅增产 9.81%以外,其他 3 个表施处理增产 24.57%~36.25%,平均增产 31.42%。生物炭表施比混施更能促进水稻增产。WBC500-B、WBC700-B 和 SBC700-B 与其对应的生物炭混施处理 WBC500、WBC700 和 SBC700 相比产量均显著增加,产量分别提高了 21.00%、12.15%和 19.06%。除了 SBC500-B 和 SBC700-B 差异显著,其他不同温度制备的生物炭之间对水稻产量的影响差异不显著。

2.4 施加生物炭对水稻收获指数的影响

收获指数(HI)为水稻实际所得的籽粒重量与其

表 6 施加生物炭对水稻产量构成因子的影响

Table 6 Effects of applying biochar on rice yield-components traits

| 处理 Treatments | 有效穗数 Effective spike number/ $\cdot\text{pot}^{-1}$ | 穗粒数 Grains per spike/grain $\cdot\text{spike}^{-1}$ | 结实率 Seed setting rate/% | 千粒重 1 000-grain weight/g |
|------------------|--|--|----------------------------|-----------------------------|
| WBC500 | 34.00 \pm 2.00bcd | 97.16 \pm 3.72ab | 94.17 \pm 0.31ab | 28.90 \pm 0.24abc |
| WBC700 | 32.00 \pm 1.00cd | 105.83 \pm 4.39ab | 93.74 \pm 2.63b | 30.56 \pm 1.29abc |
| SBC500 | 38.00 \pm 1.00b | 103.96 \pm 2.53ab | 95.11 \pm 0.68ab | 28.66 \pm 1.59abc |
| SBC700 | 34.00 \pm 3.00bcd | 95.68 \pm 6.83ab | 95.25 \pm 1.25ab | 32.25 \pm 1.44a |
| WBC500-B | 45.00 \pm 3.00a | 106.72 \pm 13.35ab | 94.69 \pm 0.16ab | 26.80 \pm 0.57c |
| WBC700-B | 35.00 \pm 3.00bcd | 118.22 \pm 1.25a | 94.54 \pm 0.80ab | 30.49 \pm 2.98abc |
| SBC500-B | 31.00 \pm 2.00d | 95.22 \pm 5.80ab | 96.85 \pm 0.29a | 30.99 \pm 3.23ab |
| SBC700-B | 35.67 \pm 2.31bc | 117.46 \pm 4.48a | 93.71 \pm 0.34b | 30.42 \pm 3.10abc |
| CKU | 34.00 \pm 1.73bcd | 95.83 \pm 4.31b | 89.35 \pm 3.41c | 28.27 \pm 0.26bc |

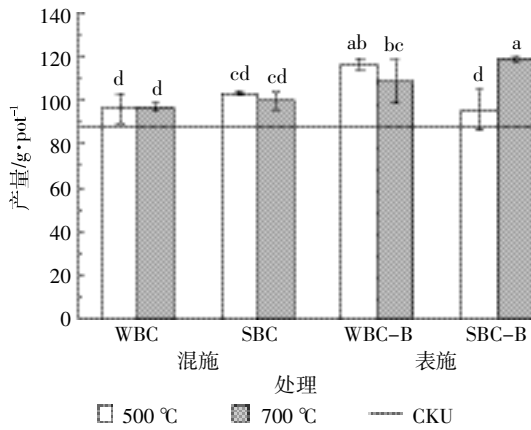


图 1 施加生物炭对水稻产量的影响

Figure 1 Effects of applying biochar on rice yields

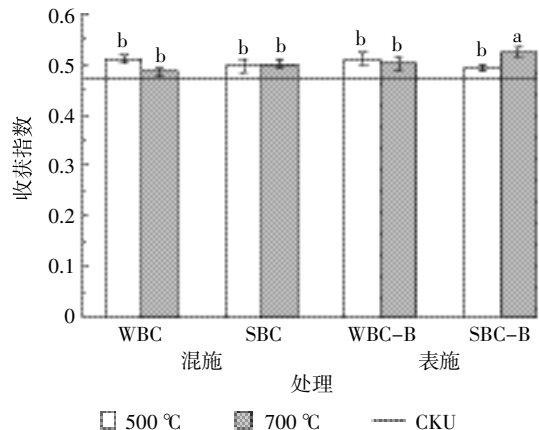


图 2 施加生物炭对水稻收获指数的影响

Figure 2 Effects of applying biochar on rice harvest index

地上部生物量的比例。由图 2 可知,不同生物炭处理与 CKU 相比均不同程度地增加了水稻的收获指数,增幅 2.58%~10.56%。除了 SBC700-B 处理,其他处理均没有显著差异,也即表施处理和混熟处理对收获指数的影响没有显著差异。

2.5 施加生物炭对肥料偏生产力的影响

偏生产力(partial fertilizer productivity, PFP)是指某一特定肥料下的作物产量与施肥量的比值,是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标。由图 3 可知,在等量施肥的情况下,添加生物炭处理的氮磷钾偏生产力高于对照 CKU。施加生物炭处理氮肥偏生产力 56.44~70.03 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 磷肥偏生产力 141.11~175.08 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 钾肥偏生产力 70.56~87.54 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于对照 CKU,其中 SBC700-B 肥料偏生产力最高,SBC500-B 最低。生物炭表施处理中除了 SBC500-B,肥料偏生产力均高于相应生物炭混施处理。不同温度制备的生物炭处理之间的规律与产量相似。

3 讨论

本试验结果表明,不同生物炭处理及其施加方式均促进了水稻增产,这与之前的一些研究报道的结果类似^[11-13]。施加生物炭的处理结实率与对照相比均有显著提高,但是有效穗数、穗粒数和千粒重并没有明显差异。郑悦等^[14]在盐碱地条件下不同施加生物炭量对水稻穗部性状及产量研究中也发现施加生物炭处理的结实率高于对照。生物炭自身含有丰富的 N、P、K、Ca、Mg 等营养元素,并在一定的条件下释放自身的养分,供水稻生长利用,提高土壤养分含量。有报道表明,生物炭以 1%炭土质量比施入土壤后,氨氮、硝氮淋溶量减少 15%以上^[15],提高了可吸收利用营养元素的有效性^[16]。生物质炭对养分具有固持作用^[17],促进植物对营养元素的吸收,提高肥料的利用率。与此同时,被吸附的氮素在水稻生长过程中可以缓慢释放^[18]。虽然不同处理穗肥施氮量相同,但这种缓释作用可能提高了水稻抽穗期土壤的供氮能力,并可合理分配

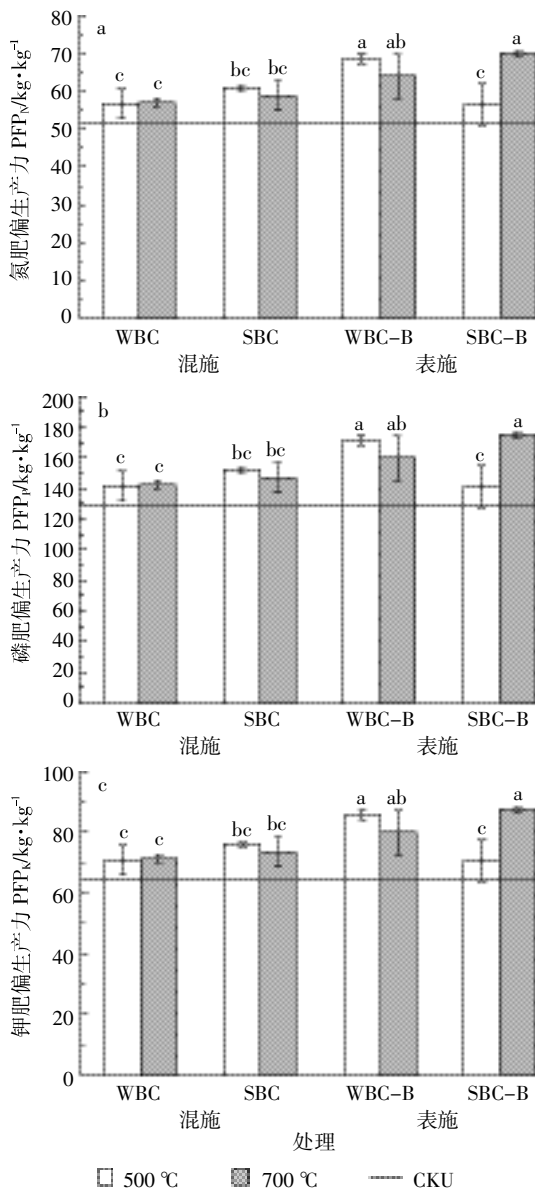


图3 施加生物炭对氮肥偏生产力(a),磷肥偏生产力(b)及钾肥偏生产力(c)的影响

Figure 3 Effects of applying biochar on (a) PFP_N , (b) PFP_P and (c) PFP_K

氮素释放,保证水稻各生育时期所需的营养,同时也可有效减少施肥前期的氮素流失,这样在水稻生长后期能保证较充足的氮素供应,因此水稻产量增加。SPAD值与叶绿素含量呈极显著正相关,即SPAD值能够反映水稻叶片光合作用制造有机物的能力^[19],从而影响到水稻的生物量与产量。NDVI与水稻的叶面积指数、生物量呈正相关关系^[20]。施加生物炭提高水稻株高,在分蘖、拔节、抽穗期SPAD和NDVI略有增加,可能是施加生物炭有利于叶片持绿并且能提高光合作用效率^[21]。提高水稻叶片中叶绿素含量高和持绿

时间,使得水稻在生长后期能充分进行光合作用,提高水稻产量。

生物炭表施与混施相比,在株高、SPAD和NDVI的差异统计上不显著。表施处理在有效穗数和穗粒数方面略高于混施处理,其他构成因子也没有显著性差异。本研究结果表明,生物炭表施比起混施更能促进水稻增产,增产幅度普遍比混施高出12.15%~21.00%。一方面生物炭表施本身也是将生物炭施入土壤,同样能够实现前述的促进养分吸收利用,改善土壤肥力,提高作物生产力等效用。另外一方面,生物炭表施使得表层土壤生物炭含量高,这能够更加有效地发挥其作用。而生物炭混施处理,将有限量的生物炭均匀混合在水稻生长的整个土壤体系中,分散了生物炭对特定耕作层特别是浅表层耕作土的影响强度。李帅霖等^[6]研究生物炭不同施加方式对土壤水分入渗和蒸发的影响,发现在土壤浅表层(0~10 cm)添加较高用量生物质炭相对于在耕层土壤(0~20 cm)施加生物炭更有利于强化黏性土壤的入渗特性。本研究在浅表层施加生物炭(表施),可能比生物炭混施更有利于改善土壤的入渗效果,考虑到施加的氮磷钾肥都易溶于水,表施能更有利于养分转移到水稻根部,从而促进水稻增产。

生物炭表层含量高有可能促进产量的增加。张娜等^[21]研究发现,对夏玉米而言高量的生物炭施用比低量生物炭施用增产6.6%。李东等^[22]研究表明不同添加量生物炭使小白菜地上部生物量增加约134%~277%,但是高生物炭施加量(3%~5%处理)小白菜地上部生物量小于低施加量(1.5%)处理。说明生物炭施加量和产量不一定是成正比关系。王忠江等^[23]研究表明沼肥表施后土壤的氨挥发主要集中在施肥后的前5 d,铵态氮和总氮主要集中在土壤表层0~5 cm,且铵态氮呈现先上升后下降的趋势。本研究施加氮肥是撒施,因此土壤表层氮素含量高,施加氮肥后氨氮浓度迅速升高。生物炭表施于水稻土表面即土壤表层生物炭含量高,能促进土壤表层氮的固持,降低氮素流失风险;同时,生物炭固定土壤中的N素,起到“缓释肥”的效果,在水稻生长后期缓慢释放,有助于水稻生长后期氮素供应。本试验通过改变施加方式发现表施或许对作物生长更有利这一现象,并初步推测其可能原因,而对于表施影响作物生长的内在机制尚需要未来开展进一步研究。

目前对于生物炭农田应用的环境效应,应该基于产量进行综合评估。单纯考察施加生物炭是否增加或减少温室气体排放、面源污染防控等是不全面的。我

们更需关注的是单位作物产量导致的温室气体等的排放是否有所降低。对于水稻这类大田作物,脱离了产量影响评估的环境效应研究是缺少现实意义的。本研究表明,通过生物炭施加方式的不同选择,对产量可能造成一定的影响,而这种影响在某种程度上比其他选择(比如生物质炭烧制温度)带来的影响更为显著。本文虽然侧重产量和产量构成的描述,但是着眼点是希望为生物炭的环境效应评估提供更全面的视角,在未来考虑生物炭的环境效应时,需要考察产量的因素,以及与产量直接相关的施用措施(比如施加方式)的影响。

4 结论

(1)施加生物炭一定程度上促进了水稻的生长。株高在水稻生长前期(分蘖期和拔节期)表施处理小于混施处理,而在中后期(即抽穗期、灌浆期、成熟期)表施处理则大于混施处理。

(2)生物炭施加显著提高了水稻结实率,增幅为4.88%~8.39%。表施处理水稻结实率均高于对应的混施处理。

(3)施用生物炭在不同施加方式条件下均促进了水稻增产,而表施处理较混施更能促进水稻增产。与对照CKU相比,表施处理的水稻增产普遍介于24.57%~36.25%,明显高于混施处理增产幅度(10.28%~18.38%)。

(4)施用生物炭在不同施加方式条件下,均不同程度增加了水稻收获指数,但表施和混施处理对收获指数影响无明显差异。

(5)施加生物炭提高了水稻氮磷钾偏生产力,其中表施生物炭处理的氮素偏生产力较混施处理提高了12.15%~21.00%。

致谢:本文作者对南京林业大学孙海军博士,以及江苏省农业科学院侯朋福博士、吴迪博士、周贝贝博士在试验和论文修改过程中提供的帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1948-1955.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, CHEN Xin-xiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):1948-1955.(in Chinese)
- [2] 陈琳,乔志刚,李恋卿,等.施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素

- 利用的影响[J].生态与农村环境学报,2013,29(5):671-675.
CHEN Lin, QIAO Zhi-gang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5):671-675.(in Chinese)
- [3] Cranedroesch A, Abive 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.
- [4] Cornelissen G, Martinsen V, Shitumbanuma V, et al. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2):256-274.
- [5] 金梁,魏丹,李玉梅,等.生物炭制备及其稳定性估测方法研究进展[J].农业资源与环境学报,2015,32(5):423-428.
JIN Liang, WEI Dan, LI Yu-mei, et al. Progress on biochar preparation and its assessment methods of stability[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(5):423-428.(in Chinese)
- [6] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
LI Shuai-lin, WANG Xia, WANG Shuo, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14):135-144.(in Chinese)
- [7] Sui Y, Gao J, Liu C, et al. Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 544:203.
- [8] Jie J, Kang M, Ke S, et al. Properties of biochar-amended soils and their sorption of imidacloprid, isoproturon, and atrazine[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550:504-513.
- [9] Xiang J, Liu D, Ding W, et al. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104:52-58.
- [10] Pandey V, Patel A, Patra D D. Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90:361-366.
- [11] Idris J, Shirai Y, Anduo Y, et al. Improved yield and higher heating value of biochar from oil palm biomass at low retention time under self-sustained carbonization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104:475-479.
- [12] 张爱平,刘汝亮,高霁,等.生物炭对灌淤土氮素流失及水稻产量的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(12):2395-2403.
ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, GAO Ji, et al. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic-alluvial soil irrigated with yellow river water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2395-2403.(in Chinese)
- [13] 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 and Soil*, 2013, 373(1):583-594.
- [14] 郑悦,郑桂萍,赵洋,等.生物炭对梗稻垦鉴稻5号穗部性状及产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(6):59-62.
ZHENG Yue, ZHENG Gui-ping, ZHAO Yang, et al. Effects of biochar on the panicle traits and yield of Japonica rice cultion"Kenjian dao No. 5"[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(6):59-62.(in Chinese)

- [15] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):821-828.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):821-828.(in Chinese)
- [16] Cao H, Xin Y, Yuan Q. Prediction of biochar yield from cattle manure pyrolysis via least squares support vector machine intelligent approach [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 202: 158-164.
- [17] 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 Gen-xing, LI Lian-qing. 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)
- [18] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer; ammonia capture[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1):35-42.
- [19] Lin F F, Qiu L F, Deng J S, et al. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2010, 71(Supplement 1):S60-S65.
- [20] Aboelghar M, Arafat S, Yousef M A, et al. Using SPOT data and leaf area index for rice yield estimation in Egyptian Nile delta[J]. *Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science*, 2015, 14(2):81-89.
- [21] 张 娜, 李 佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1569-1574.
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xue-huan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1569-1574.(in Chinese)
- [22] 李 冬, 陈 蕾, 夏 阳, 等. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2384-2391.
LI Dong, CHEN Lei, XIA Yang, et al. The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2384-2391.(in Chinese)
- [23] 王忠江, 蔡康妮, 王丽丽, 等. 沼肥表施对土壤氮素动态分布及氨挥发的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7):139-143.
WANG Zhong-jiang, CAI Kang-ni, WANG Li-li, et al. Influence of surface application of biogas slurry on ammonia volatilization and dynamic distribution of soil nitrogen[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):139-143.(in Chinese)

《草业科学》2018年征订启事

欢迎投稿 欢迎订阅

《草业科学》1984年创刊,由中国科学技术协会主管、中国草学会和兰州大学草地农业科技学院主办,是面向国内外公开发行的综合性科技期刊。本刊为“中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”和CSCD核心库来源期刊,并被《中国核心期刊(遴选)数据库》、中国科学期刊文献数据库、英国CABI、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、中国科技期刊数据库、《中国生物学文摘》和“中国生物学文献数据库”收录为固定源期刊。2015年《草业科学》入选第四期(2015-2017)中国科协精品科技期刊工程学术质量提升项目。近年来,《草业科学》相继获得“全国畜牧兽医优秀期刊一等奖”、“全国优秀农业期刊贰等奖”、“中国精品科技期刊”和“中国畜牧兽医精品期刊”等荣誉。据2016年版科技部中国科技信息所《中国科技期刊引证报告》,总被引频次和影响因子分别为2907和0.654,在草原类期刊中综合排名第2位。

《草业科学》主要刊载国内外草业科学及其相关领域,如畜牧学、作物学、园艺学、生物学、林学、环境工程与科学、经济学和管理学等领域的创新性理论研究、技术开发、成果示范推广等方面的论文、综述、专论和学科前沿动态等。本刊结合草业科学学科发展和科技期刊的定位,目前主要设有专论、前植物生产层、植物生产层、动物生产层、后生物生产层、基层园地、业界信息等栏目,不仅为高校、科研单位的师生提供交流平台,同时为基层科技人员的成果交流创造机会。

《草业科学》为月刊,大16开本,亚芬纸印刷,彩色封面覆膜,国内外公开发行,邮发代号54-51,每期定价20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系订阅。

标准刊号:ISSN 1001-0629 CN 62-1069/S

地址:兰州市城关区嘉峪关西路768号《草业科学》编辑部

电话:0931-8912486

传真:0931-8912486

网址: <http://cykx.lzu.edu.cn>

微信公众号:cykx-journal

邮发代号:54-51

邮编:730020

E-mail: cykx@lzu.edu.cn