

节水灌溉减氮配施生物炭对水稻光合特性与水氮利用的影响

张作合 周利军 李浩宇 孔凡丹 吕项龙

(绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061)

摘要: 为阐明节水灌溉减氮配施生物炭对水稻光合特性及水氮利用的影响, 采用田间小区试验与微区试验结合的方法, 应用¹⁵N示踪技术, 以 B0N1 (不施用生物炭 + 常规施氮水平) 作为对照, 设置 B1N2 (减氮 10% + 12.5 t/hm² 生物炭)、B2N2 (减氮 10% + 25 t/hm² 生物炭)、B1N3 (减氮 20% + 12.5 t/hm² 生物炭)、B2N3 (减氮 20% + 25 t/hm² 生物炭)、B1N4 (减氮 30% + 12.5 t/hm² 生物炭)、B2N4 (减氮 30% + 25 t/hm² 生物炭) 等处理, 观测水稻植株叶片的光合特性参数以及干物质积累和耗水过程, 并建立光合特性参数与水分利用效率 (WUE)、氮肥吸收利用率 (NUE)、干物质量及产量之间的关系。结果表明: 节水灌溉下适量减氮配施生物炭可以增加叶面积指数 (LAI)、叶绿素含量 (SPAD)、净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r), 减小气孔限制值 (L_s); 而过量减施氮肥或施加生物炭均会增加 L_s , 减小 LAI、SPAD、 P_n 、 G_s 和 T_r ; 与 B0N1 处理相比, B1N2 处理植株干物质总积累量提高 14.79%, 而 B2N4 处理降低 16.02%; B1N2 处理水稻 NUE、产量、WUE 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别提高 12.92%、9.95%、12.58%, B2N4 处理水稻 NUE、产量、WUE 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别降低 22.87%、18.20%、5.66%; WUE 与光合特性参数 (除 LAI—分蘖期、SPAD、 T_r —灌浆期外) 均呈显著或极显著正相关, 与 L_s 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$); NUE、干物质量、产量与光合特性参数 (除 LAI—分蘖期、SPAD—分蘖期、 T_r —灌浆期外) 均呈显著或极显著正相关, 与 L_s 均呈显著或极显著负相关。综合来看, B1N2 处理最优, 即节水灌溉下减施 10% 氮肥配施 12.5 t/hm² 生物炭有利于提高水氮利用率和产量, 研究结果可为节水灌溉减氮配施生物炭模式在寒地黑土稻田的应用提供理论依据和技术支撑。

关键词: 稻田; 节水灌溉; 减氮; 生物炭; 光合特性; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S14-3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0386-10

OSID:



Effect of Water-saving Irrigation and Nitrogen Reduction Combined with Biochar Application on Photosynthetic Characteristics and Water and Nitrogen Utilization of Rice

ZHANG Zuohe ZHOU Lijun LI Haoyu KONG Fandan LÜ Xianglong

(College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: To elucidate the effects of water-saving irrigation and nitrogen reduction combined with biochar application on the photosynthetic characteristics and water and nitrogen utilization of rice, a combination of field trials test and microzone test was used. ¹⁵N tracing technology was applied, with B0N1 (no biochar application + conventional nitrogen application level) as the control. B1N2 (10% nitrogen reduction + 12.5 t/hm² biochar), B2N2 (10% nitrogen reduction + 25 t/hm² biochar), B1N3 (20% nitrogen reduction + 12.5 t/hm² biochar), B2N3 (20% nitrogen reduction + 25 t/hm² biochar), B1N4 (30% nitrogen reduction + 12.5 t/hm² biochar) and B2N4 (30% nitrogen reduction + 25 t/hm² biochar) were set up, the photosynthetic characteristic parameters of rice plant leaves, as well as dry matter accumulation and water consumption processes, were observed, and the relationship between photosynthetic characteristic parameters and WUE, NUE, amount of dry matter, and yield was established. The results showed that under water-saving irrigation, appropriate nitrogen reduction combined with biochar application can increase leaf area index (LAI), chlorophyll content (SPAD), net

收稿日期: 2024-01-29 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 绥化学院 2021 年科研启动基金项目 (SQ21009) 和黑龙江省省属高等学校基本科研业务费一般项目 (YWF10236230215)

作者简介: 张作合 (1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: zhangzuohe@126.com

photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and transpiration rate (T_r), while reducing stomatal limitation values (L_s). Excessive reduction of nitrogen fertilizer or application of biochar would increase L_s , decrease LAI, SPAD, P_n , G_s , and T_r . Compared with B0N1 treatment, B1N2 treatment increased the total accumulation of dry matter in plants by 14.79%, while B2N4 treatment decreased that by 16.02%. The NUE, yield, and WUE of rice treated with B1N2 were significantly higher than those treated with B0N1 ($P < 0.05$), with increases of 12.92%, 9.95%, and 12.58%, respectively. The NUE, yield, and WUE of rice treated with B2N4 was significantly lower than that of B0N1 ($P < 0.05$), with decreases of 22.87%, 18.20%, and 5.66%, respectively; WUE and photosynthetic characteristic parameters (except LAI – tillering stage, SPAD, T_r – grouting stage) were significantly or extremely significantly positively correlated, and were significantly negatively correlated with L_s ($P < 0.01$). NUE, amount of dry matter, yield, and photosynthetic characteristic parameters (except LAI – tillering stage, SPAD – tillering stage, T_r – grouting stage) were significantly or extremely significantly positively correlated, and significantly or extremely significantly negatively correlated with L_s . Overall, B1N2 treatment was the most optimal, which meant reducing the application of 10% nitrogen fertilizer and apply 12.5 t/hm² of biochar under water-saving irrigation was beneficial for improving water and nitrogen utilization efficiency and yield. The research results can provide theoretical basis and technical support for the application of water-saving irrigation with nitrogen reduction and biochar application in cold and black soil paddy fields.

Key words: paddy fields; water-saving irrigation; nitrogen reduction; biochar; photosynthetic characteristics; isotope tracing technology

0 引言

我国是世界上最大的水稻生产国之一,根据 FAOSTAT 统计,中国水稻种植面积约占世界总面积的 18%,水稻产量约占世界总产量的 27%^[1]。近些年,我国水稻种植面积不断扩大,截止 2020 年我国水稻总种植面积超过 3×10^7 hm²,总产量达到 2.12×10^8 t^[2]。水稻产量的快速增长离不开高量化学氮肥投入,然而长期过量和不合理施肥会导致氮肥利用率降低^[3]。过量施用氮肥会抑制土壤供氮能力,造成黑土有机质逐年下降^[4]。适量减施氮肥可以提高氮素利用率,但过量减施氮肥会导致减产。因此,在保证节水灌溉稻田不减产前提下,实现氮肥减施,需要配合相应的碳管理措施。

光合作用与水稻干物质积累和产量形成有着密切的联系^[5]。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)等是衡量作物光合作用的重要指标^[6]。有研究表明,水稻产量的 80% 来自其花后叶片光合同化产物,水稻灌浆效率的提高与叶片 P_n 密切相关^[7]。目前,关于氮肥施用和水分胁迫对水稻光合作用的影响已有大量研究^[8-12]。张忠学等^[8]研究发现,控制灌溉模式下配施适量氮肥可以提高水稻叶片 P_n 和 G_s ,而过量施氮会增加水稻对水分亏缺的敏感性,使水稻 G_s 降低。施氮量过高会导致氮素在茎鞘和叶片分配过多,降低氮素向籽粒的转运率,进而使作物氮素利用率和产量降低^[9]。土壤含水率会影响稻株蒸腾和光合作用,土壤水分过高或过低时都会使叶片 P_n 下降。适度水分胁迫,会提高叶片

P_n 和 T_r ,有利于光合作用进行^[10]。此外,适当水分胁迫也能够提高光合产物和氮素向营养器官的转运率,提高水稻产量和氮素利用率^[11]。控制灌溉可以提高水稻孕穗前的群体 P_n ,增加后期的群体光合面积和透光率,促进干物质积累和转运,增加水稻产量^[12]。干湿交替灌溉则通过抑制无效分蘖和增加有效穗数,提高叶片 P_n ,促进营养器官氮素积累和转运,进而增加水稻产量^[10]。可见,适度的水分胁迫(节水灌溉)和氮肥减施对产量和氮肥利用率的积极作用已被证实,而生物炭施用会改变稻田土壤水分状况和氮素循环转化。因此,开展节水灌溉减氮配施生物炭对光合作用和水氮利用率的影响研究非常必要。

本文以节水灌溉施加 110 kg/hm² 氮肥处理作为对照,应用 ¹⁵N 示踪技术,观测水稻植株叶片光合特性参数,并计算气孔限制值(L_s);同步记录水稻干物质积累和耗水过程,并建立光合特性参数与水分利用效率(WUE)、氮肥吸收利用率(NUE)、干物质量及产量之间的关系,以期节水灌溉减氮配施生物炭在寒地黑土稻田的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 5—9 月在庆安国家灌溉试验重点站(46°57′28″N,127°40′45″E)进行。该站位于黑龙江省绥化市庆安县平安镇赵富有屯,是典型的寒地黑土水稻种植区。位于第三积温带,多年平均气

温 2.9℃,平均日照时数 2 600 h,多年平均降水量 560 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm,作物水热生长期 156~171 d。水稻本田生长期气温和降雨量变化如图 1 所示。

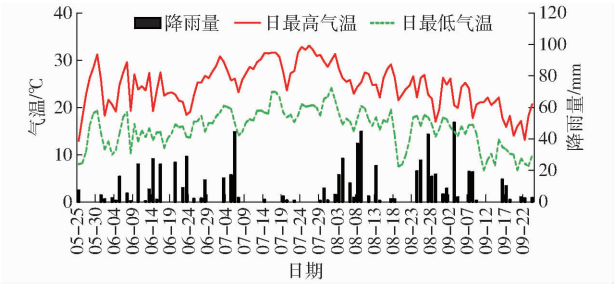


图 1 2020 年水稻生长期气温和降雨量日变化
Fig.1 Daily variations of air temperature and precipitation in 2020

1.2 试验材料

水稻秸秆生物炭(颗粒直径为 2 mm)购自辽宁金和福农业开发有限公司,每公顷稻草可制备约 2.5 t 生物炭,pH 值 8.86,C 质量分数为 42.72%,N 质量分数为 1.26%。供试土壤为黑土,0~20 cm 土层土壤基本理化性质:pH 值 6.42、有机质质量比

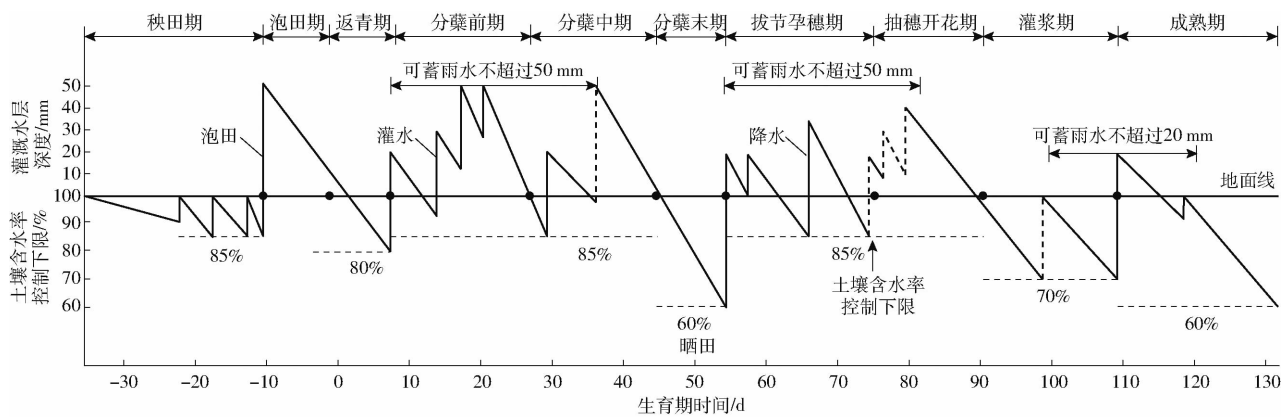


图 2 浅湿干灌溉模式各生育期水分管理示意图
Fig.2 Water management in different growth stages of shallow wet dry irrigation model

表 1 田间小区试验处理设计		
Tab.1 Treatment design of field plot experiment		
处理	生物炭量/ (t·hm ⁻²)	施氮量/ (kg·hm ⁻²)
B0N1(浅湿干灌溉、不施用生物炭、常规施氮水平)	0	110
B1N2(浅湿干灌溉、5 年秸秆生物炭还田、减氮 10%)	12.5	99
B2N2(浅湿干灌溉、10 年秸秆生物炭还田、减氮 10%)	25.0	99
B1N3(浅湿干灌溉、5 年秸秆生物炭还田、减氮 20%)	12.5	88
B2N3(浅湿干灌溉、10 年秸秆生物炭还田、减氮 20%)	25.0	88
B1N4(浅湿干灌溉、5 年秸秆生物炭还田、减氮 30%)	12.5	77
B2N4(浅湿干灌溉、10 年秸秆生物炭还田、减氮 30%)	25.0	77

42.51 g/kg、全氮质量比 1.62 g/kg、全磷质量比 15.43 g/kg、全钾质量比 20.08 g/kg、碱解氮质量比 168.37 mg/kg、速效磷质量比 34.54 mg/kg、速效钾质量比 125.81 mg/kg。试验选用水稻品种为绥粳 18,插秧密度为 2.5×10⁵穴/hm²。

1.3 试验设计

浅湿干灌溉模式各生育期水分管理见图 2(生育期时间负值表示移栽前秧田处理),水稻浅湿干灌溉模式各处理根据控制指标来确定灌水时间和灌水定额,当田面无水层后,每天 08:00 和 18:00,用土壤水分测定仪(TPIME-PICO64/32 型)分别测定各小区的土壤含水率,当土壤含水率接近或低于灌水下限时,灌水至上限,并记录各处理的灌水量。施氮量设 4 个水平,即 110 kg/hm²(当地施肥标准,N1)、99 kg/hm²(减氮 10%,N2)、88 kg/hm²(减氮 20%,N3)、77 kg/hm²(减氮 30%,N4)。生物炭施用量设 3 个水平,即 0 t/hm²(B0)、12.5 t/hm²(5 年还田量,B1)、25 t/hm²(10 年还田量,B2)。田间小区试验处理具体设置见表 1,共计 7 个处理,每个处理 3 次重复,共 21 个试验小区,方形小区面积 25 m²,

采用随机区组排列。秸秆生物炭在前一年水稻收获后施入,将生物炭翻耕于稻田土壤表层,并混合均匀;氮肥基肥、蘖肥、穗肥按 5:2:3 分施,基肥在泡田之前 3~5 d 深施,蘖肥和穗肥在田面无水层或水层较浅时撒施;K₂O 施入量 80 kg/hm²,基肥、穗肥按 1:1 分施;P₂O₅施入量 45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。供试肥料选择尿素(N 质量分数 46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅质量分数 12%)、硫酸钾(K₂O 质量分数 52%),并换算成实际化肥施入量。5 月 8 日施基肥,6 月 6 日施蘖肥,7 月 12 日施穗肥。水稻本田生长期加强田间管理,减少病虫草害发生。

在试验小区内设置¹⁵N 示踪微区,每个试验小区内设置 1 个微区试验,即同一处理下设置 3 个分处理:M1、M2、M3。分处理 1 为仅基肥施用¹⁵N-尿

素, 藁肥和穗肥施用未标记的普通尿素; 分处理 2 为仅藁肥施用¹⁵N-尿素, 基肥和穗肥施用未标记的普通尿素; 分处理 3 为仅穗肥施用¹⁵N-尿素, 基肥和藁肥施用未标记的普通尿素。稻田整地后立即在每个小区内埋设 2.0 m×2.0 m×0.5 m 的无底板矩形框, 将微区埋深 30 cm 至犁底层下, 施用上海化工研究院生产丰度为 10.22% 的¹⁵N 标记尿素, 深度与试验小区相同。微区内设置单独排灌系统, 水稻种植密度、肥料用量、生物炭施用量及灌水方式与所在的试验小区相同。

1.4 样品采集与测定

水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期在各小区内选取 6 穴长势相同的植株, 按长×宽系数法计算叶面积(校正系数 0.83), 小区内所有绿色叶片面积与小区土地面积之比即为叶面积指数(LAI)。

水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期各处理植株叶片的 SPAD 用叶绿素仪 (SPAD-520 型) 测定, 数据由仪器自动读出。各生育期选择晴天测定, 且一般在 09:00—11:00 进行。每个小区选取 5 株具有代表性且长势一致的稻株, 每株标定 2 个叶片, 要求选取的叶片无病虫害、无损伤、水分和营养状况良好, 叶片之间无相互遮荫且叶片叶龄一致。叶片做好标记, 便于下次测量。

采用便携式光合仪 (LI-6400XT 型, 美国) 测定各处理水稻植株叶片光合特性参数, 包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、大气 CO₂ 浓度(C_a)等。为保证测量结果的准确性, 各生育期(分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期)选择晴天测定, 一般在 09:00—11:00 进行。

气孔限制值 L_s 计算式为

$$L_s = \frac{C_i}{C_a} \tag{1}$$

在分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期测量每个处理水稻植株地上部分各器官干物质量。从各小区随机选取 6 穴, 冲洗干净后将水稻植株地上部分为穗、叶、茎鞘 3 部分, 分别装入样品袋并带回实验室, 放入电热鼓风干燥箱 105℃ 杀青 30 min, 然后调至 80℃ 干燥至质量恒定, 用电子天平(精度 0.01 g)称量各器官干物质量。称量后将样品用小型球磨粉碎机进行粉碎, 过 80 目筛后混合均匀, 再放入样品袋中密封保存。

稳定同位素测试在东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室完成, 将密封保存的样品带回实验室, 通过同位素质谱仪 (DELTA V Advantage, 美国) 和元素分析仪 (Flash 2000 HT 型, 美国) 联用的方法测定成熟期水稻植株各器官¹⁵N

的丰度, 并参照文献 [13] 计算植株吸收的肥料¹⁵N 总量。

氮肥吸收利用率 (NUE) 计算式^[13] 为

$$NUE = \frac{P_{FN}}{N_F} \times 100\% \tag{2}$$

式中 P_{FN} ——植株肥料¹⁵N 总吸收量, kg/hm²
 N_F ——氮肥施入量, kg/hm²

水分利用效率 (WUE) 计算式为

$$WUE = \frac{Y}{ET_{total}} \tag{3}$$

式中 Y ——水稻产量, 在成熟期各处理随机选 2 m² 水稻植株进行测产, kg/hm²

ET_{total} ——水稻生育期总耗水量, mm

1.5 数据统计

利用 Amos 26.0 的 Graphics 模块构建结构方程模型, 进行 Z-score 标准化处理, 并标记路径系数。采用 WPS 2019、SPSS 分析和处理数据, 用 Duncan 进行处理间的多重比较, 用 WPS 2019 和 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 节水灌溉减氮配施生物炭对叶片 SPAD 的影响

图 3 (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同) 为水稻各生育期叶片 SPAD, 不同处理叶片 SPAD 在整个生育期的变化趋势大致相同, 呈倒“V”字形, 且在抽穗期达到最大值。分蘖期, 减施氮肥配施生物炭处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理降低 1.79% ~ 11.01%; 拔节期, B1N2、B2N2、B1N3 处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理分别提高 3.19%、1.37%、1.42%, 其他处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理降低 0.63% ~ 5.06%; 抽穗期, B1N2、B1N3 处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理分别提高 3.20%、0.28%, 其他处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理降低 2.72% ~ 6.97%; 灌浆期, B1N2 处理叶片

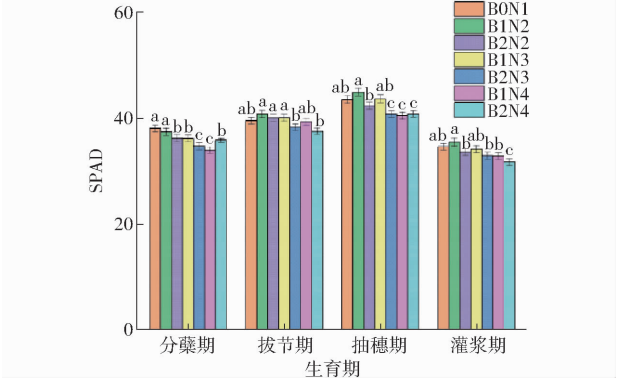


图 3 水稻各生育期叶片 SPAD
Fig. 3 Leaf SPAD at different growth stages of rice

SPAD 较 B0N1 处理提高 2.52%,其他处理叶片 SPAD 较 B0N1 处理降低 1.30%~8.42%。研究结果表明,除分蘖期外,减氮 10% 配施 12.5 t/hm² 生物炭可以提高叶片 SPAD,而过量减施氮肥配施生物炭会降低叶片 SPAD,其中 B2N4 处理表现最明显;除减氮 30% 外,在相同减氮水平下,生物炭施用量由 12.5 t/hm² 增加到 25 t/hm²,SPAD 减小。

2.2 节水灌溉减氮配施生物炭对光合特性参数的影响

各生育期水稻的 P_n 、 G_s 和 T_r 见图 4。光合特性参数 P_n 、 G_s 和 T_r 变化趋势大致相同,且在抽穗期达到最大值。分蘖期,B1N2、B2N2 处理 P_n 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B2N3、B1N4、B2N4 处理 P_n 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);拔节期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 P_n 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B2N3、B1N4、B2N4 处理 P_n 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);抽穗期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 P_n 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B1N4、B2N4 处理 P_n 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);灌浆期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 P_n 显著高于 B0N1 处理,分别增加 27.19%、18.32%、7.89%,而

B2N4 处理 P_n 显著低于 B0N1 处理,减小 14.62%。分蘖期,B1N2 处理 G_s 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B1N4、B2N4 处理 G_s 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);拔节期和抽穗期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 G_s 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B2N4 处理 G_s 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);灌浆期,B1N2、B2N2、B1N3、B2N3 处理 G_s 显著高于 B0N1 处理。分蘖期,B1N2、B2N2 处理 T_r 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B2N3、B1N4、B2N4 处理 T_r 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);拔节期,B1N2 处理 T_r 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B2N3、B1N4、B2N4 处理 T_r 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);抽穗期,B1N2、B2N2 处理 T_r 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),而 B1N4、B2N4 处理 T_r 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$);灌浆期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 T_r 显著高于 B0N1 处理。研究结果表明,随着氮肥减施幅度增加,节水灌溉减氮配施生物炭各处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 整体呈降低趋势;减氮 10% 配施 12.5 t/hm² 生物炭时 P_n 、 G_s 和 T_r 提升幅度最大,而减氮 30% 配施 25 t/hm² 生物炭时 P_n 、 G_s 和 T_r 降低幅度最大。

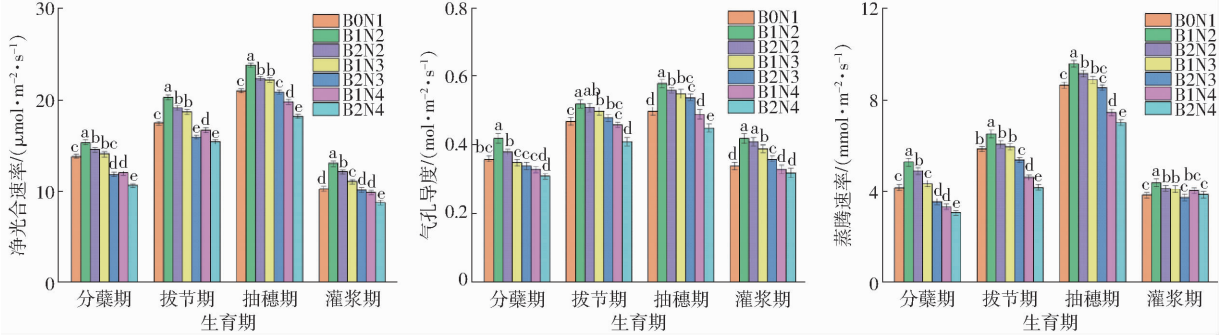


图 4 各生育期水稻的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度

Fig. 4 Net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of rice at different growth stages

图 5 为水稻各生育期叶片 L_s ,所有处理叶片 L_s 均在拔节期达到最大。严重的水分胁迫会导致气孔收缩,阻碍 CO₂ 进入植株叶片,光合速率降低^[14]。分蘖期,B1N2、B2N2、B1N3、B2N3 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理提高 8.33%~24.04%,B1N4、B2N4 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理降低 4.17%~6.09%;拔节期,B1N2、B2N2、B1N3 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理提高 4.99%~14.08%,B2N3、B1N4、B2N4 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理降低 1.76%~10.26%;抽穗期,B1N2、B2N2、B1N3、B2N3 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理提高 3.82%~21.97%,B1N4、B2N4 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理降低 7.01%~10.51%;灌浆期,B1N2、B2N2、B1N3、B2N3 处理叶片 L_s 较 B0N1 处理提高 4.05%~18.21%,B1N4、B2N4 处理叶片 L_s 较 B0N1

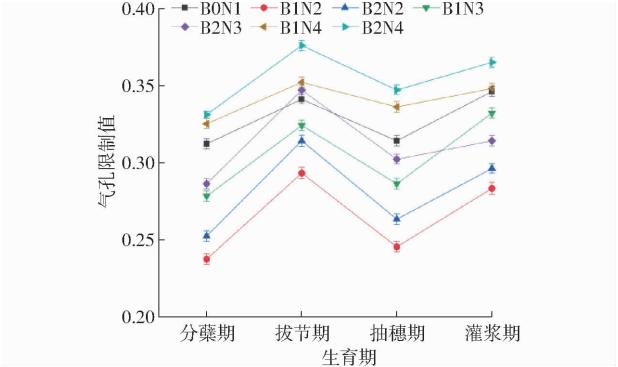


图 5 水稻各生育期气孔限制值

Fig. 5 Stomatal limitation at different growth stages of rice

处理降低 0.58%~5.49%。研究结果表明,适量减氮配施生物炭可以降低叶片 L_s ,减氮 30% 配施生物炭会大幅度提高叶片 L_s 。

2.3 节水灌溉减氮配施生物炭对水稻植株 LAI 及干物质的影响

图 6 为水稻各生育期 LAI,不同处理 LAI 在整个生育期的变化趋势大致相同,呈倒“V”字型,且在抽穗期达到最大值。分蘖期,减施氮肥配施生物炭处理 LAI 较 B0N1 处理降低 8.72% ~ 25.29%;拔节期-灌浆期,B1N2、B2N2、B1N3 处理 LAI 较 B0N1 处理分别提高 6.83% ~ 17.89%、1.02% ~ 8.08%、3.07% ~ 10.78%,B2N3、B1N4、B2N4 处理 LAI 较 B0N1 处理分别降低 5.12% ~ 5.50%、3.46% ~ 12.29%、2.75% ~ 16.89%。研究表明,除分蘖期外,减氮 10% 配施生物炭可以提高 LAI,而减氮 30% 配施生物炭会降低 LAI;除减氮 30% 的灌浆期外,在相同减氮水平下,生物炭施用量由 12.5 t/hm² 增加到 25 t/hm²,LAI 减小。

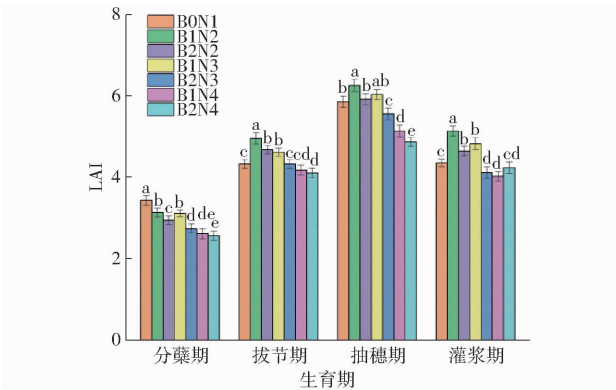


图 6 水稻各生育期 LAI

Fig. 6 LAI of rice at different growth stages

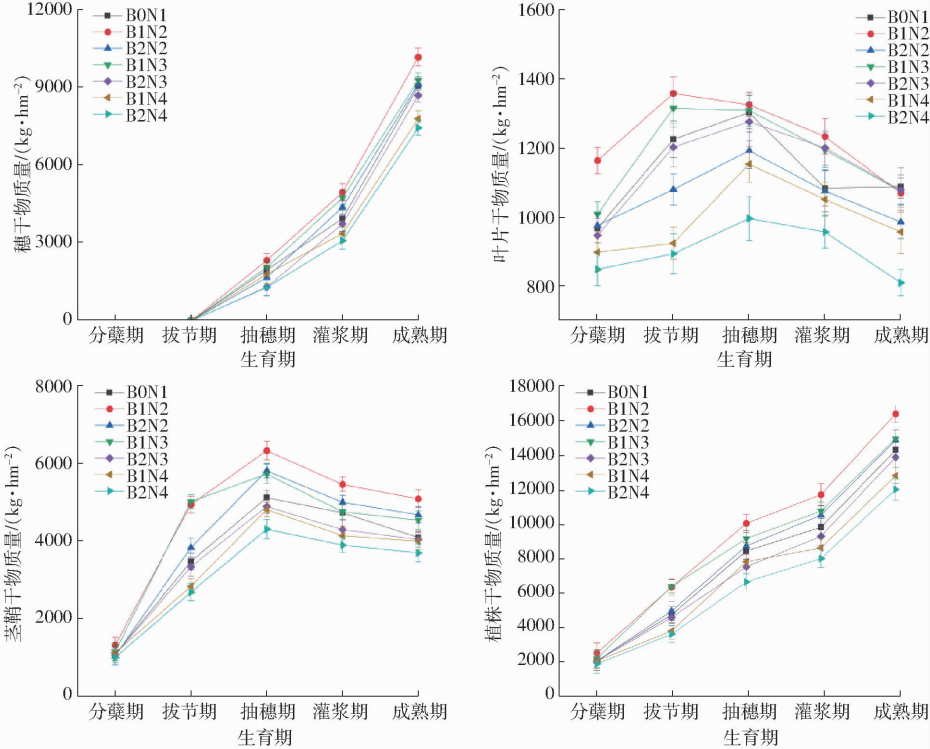


图 7 水稻植株不同生育期各器官干物质质量变化曲线

Fig. 7 Changes of amount of dry matter in various organs of rice plants at different growth stages

由图 7 可知,各处理植株的穗、叶片、茎秆干物质质量在水稻本田生长期的变化趋势基本一致。拔节期-成熟期,植株穗干物质积累量逐渐增加;成熟期,B1N2、B2N2、B1N3 处理植株穗干物质积累量较 B0N1 处理分别提高 12.40%、1.00%、2.53%,其他处理植株穗干物质积累量较 B0N1 处理降低 3.88% ~ 17.70%。各处理植株叶片干物质积累量先增加后减小,B1N2 和 B1N3 处理在拔节期达到最大值,其他处理在抽穗期达到最大值;成熟期,各处理植株叶片干物质积累量较 B0N1 处理降低 0.94% ~ 25.61%。植株茎秆干物质积累量先增加后减小,各处理均在抽穗期达到最大值;成熟期,B1N2、B2N2、B1N3 处理植株茎秆干物质积累量较 B0N1 处理分别提高 24.53%、14.45%、11.03%,其他处理植株茎秆干物质积累量较 B0N1 处理降低 1.21% ~ 9.72%。成熟期,B1N2、B2N2、B1N3 处理植株干物质总积累量较 B0N1 处理分别提高 14.79%、4.05%、4.68%,B2N3、B1N4、B2N4 处理植株干物质总积累量较 B0N1 处理降低 2.89%、10.42%、16.02%。

2.4 节水灌溉减氮配施生物炭对水稻 NUE、产量和 WUE 的影响

表 2 为各处理水稻的 NUE、产量、耗水量及 WUE。B1N2 处理水稻 NUE 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),提高 12.92%,而 B1N4、B2N4 处理水稻 NUE 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$),分别降低

11.41%、22.87%；B1N2、B1N3 处理水稻产量显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别提高 9.95%、4.59%, 而 B1N4、B2N4 处理水稻产量显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别降低 14.46%、18.20%；B1N2、B2N2、B1N3 处理水稻耗水量与 B0N1 处理之间无显著差异 ($P > 0.05$), B2N3、B1N4、B2N4 处理水稻耗水量显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别减小 8.96%、10.69%、13.08%；B1N2、B2N2、B1N3、B2N3 处理水稻 WUE 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别提高 12.58%、8.18%、10.06%、6.92%, 而 B2N4 处理水稻 WUE 显著低于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 降低 5.66%。研究结果表明, 适量减氮配施生物炭可以提高水稻的 NUE、产量和 WUE, 减氮30% 配施生物炭会大幅度降低水稻的 NUE、产

表 2 各处理水稻的 NUE、产量、耗水量和 WUE

Tab.2 NUE, yield, water consumption, and WUE of rice in each treatment

处理	NUE/%	产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ mm	WUE/ (kg·m ⁻³)
B0N1	34.37 ^b	8 722.38 ^c	546.87 ^a	1.59 ^c
B1N2	38.81 ^a	9 590.36 ^a	535.39 ^a	1.79 ^a
B2N2	35.36 ^b	8 807.21 ^c	511.45 ^{ab}	1.72 ^b
B1N3	36.95 ^{ab}	9 122.43 ^b	521.78 ^{ab}	1.75 ^{ab}
B2N3	33.72 ^b	8 487.97 ^{cd}	497.87 ^b	1.70 ^b
B1N4	30.45 ^c	7 461.02 ^f	488.42 ^b	1.53 ^{cd}
B2N4	26.51 ^d	7 135.07 ^f	475.35 ^b	1.50 ^d

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

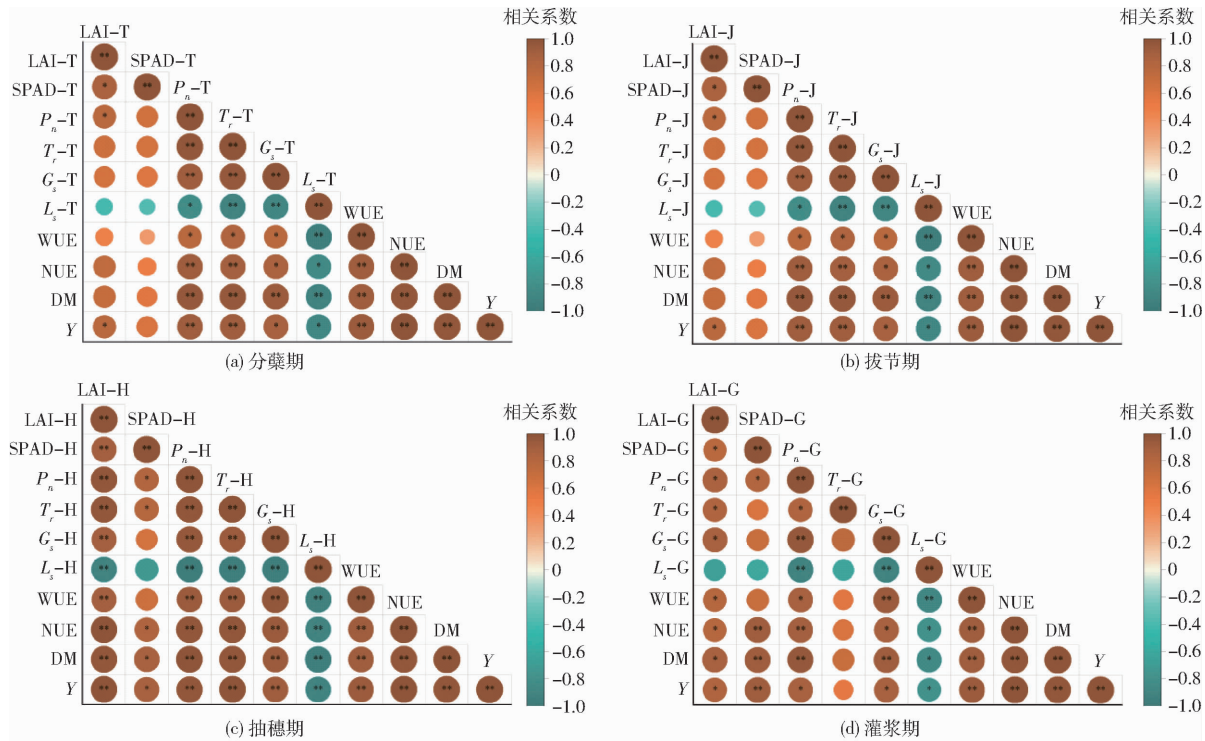


图 8 光合特性参数与 WUE、NUE、干物质量及产量相关分析

Fig. 8 Correlation analysis between photosynthetic characteristic parameters and WUE, NUE, amount of dry matter, and yield

量和 WUE。

2.5 光合特性参数与 WUE、NUE、干物质量及产量相关分析

相关分析结果表明 (图 8, 图中 * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; T、J、H、G、DM 分别表示分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、干物质量), WUE、NUE、干物质量、产量之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$); P_n -T、 T_r -T、 G_s -T、 P_n -J、LAI-G、 P_n -G 与 WUE 呈显著正相关 ($P < 0.05$), LAI-J、 T_r -J、 G_s -J、LAI-H、 P_n -H、 T_r -H、 G_s -H、 G_s -G 与 WUE 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 各生育期稻株叶片 L_s 与 WUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); G_s -T、SPAD-J、 P_n -J、SPAD-H、LAI-G、 G_s -G 与 NUE 呈显著正相关 ($P < 0.05$), P_n -T、 T_r -T、LAI-J、 T_r -J、 G_s -J、LAI-H、 P_n -H、 T_r -H、 G_s -H、SPAD-G、 P_n -G 与 NUE 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), L_s -T、 L_s -G 与 NUE 呈显著负相关 ($P < 0.05$), L_s -J、 L_s -H 与 NUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); SPAD-H、LAI-G 与干物质量呈显著正相关 ($P < 0.05$), P_n -T、 T_r -T、 G_s -T、SPAD-J、 P_n -J、 T_r -J、 G_s -J、 P_n -H、 T_r -H、 G_s -H、SPAD-G、 P_n -G、 G_s -G 与干物质量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), LAI-J、LAI-H、 L_s -G 与干物质量呈显著负相关 ($P < 0.05$), L_s -T、 L_s -J、 L_s -H 与干物质量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); LAI-T、 G_s -T、SPAD-J、 P_n -J、SPAD-H、LAI-G、 P_n -G、 G_s -G 与产量呈显著正相关 ($P < 0.05$), P_n -T、 T_r -T、LAI-J、 T_r -J、 G_s -

J 、 $LAI-H$ 、 P_n-H 、 T_r-H 、 G_s-H 、 $SPAD-G$ 与产量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)， L_s-T 、 L_s-G 与产量呈显著负相关 ($P < 0.05$)， L_s-J 、 L_s-H 与产量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

图 9(图中红色实线表示负反馈,黑色实线表示正反馈,虚线表示非显著路径 ($P > 0.05$), CMIN/DF 为 2.864; GFI 为 0.897; CFI 为 0.921; NFI 为 0.984; RMSEA 为 0.082) 为光合特性参数、生长指标对水氮利用影响的结构方程模型。叶片氮含量与 SPAD 密切相关, SPAD 可直接影响 P_n , 直接效应为 0.62。 L_s 通过影响 G_s 间接影响 P_n , 间接效应为 -0.51; P_n 对 T_r 直接产生影响, 直接效应为 0.67; 气孔部分关闭有利于减少叶片水分过度流失, 但同时也限制了光合作用, 应综合考虑 G_s 变化对作物叶片 P_n 及 T_r 的影响。分析光合特性参数对生长指标及水氮利用的影响发现: P_n 对 DM 直接产生影响, 直接效应为 0.67; DM 直接影响 WUE 和 NUE, 直接效应分别为 0.56、0.73, 而 P_n 则通过影响 DM 间接影响 WUE 和 NUE, 这也厘清了光合作用与干物质质量、水氮利用之间的关系。

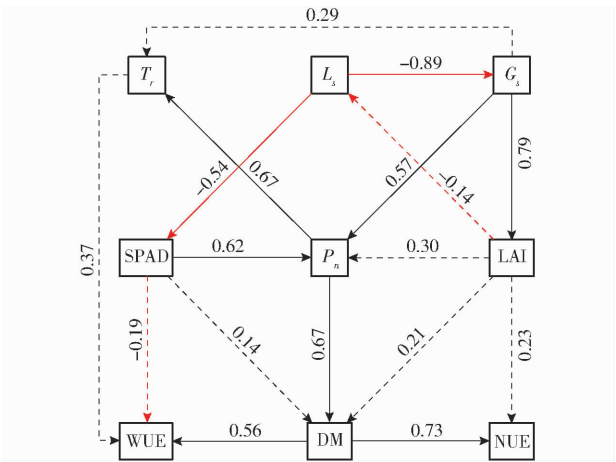


图 9 光合特性参数、生长指标对水氮利用影响的结构方程模型

Fig. 9 Structural equation model of effects of photosynthetic characteristic parameters and growth indicators on water and nitrogen utilization

3 讨论

氮是作物生长过程中所必需的营养元素,参与光合作用所需的酶、蛋白质和氨基酸的合成。然而,这并不意味着氮肥施用量越高,净光合速率越高。通常情况,施加氮肥对净光合速率的影响是通过改变叶片氮含量来实现^[15],叶片氮含量与 SPAD 密切相关,SPAD 随着叶片氮含量增加而增加^[16]。本研究也发现,在一定范围内随着氮肥减施幅度增加,叶片 SPAD 逐渐减少,叶片 P_n 随之降低。施加氮肥有

助于提高叶片氮含量,以提高植物净光合速率,但只有在叶片氮含量达到最高的条件下才能达到效益最大化^[17]。过量施氮会抑制植物对氮和磷的吸收,从而抑制光合作用^[18],同时降低了花前积累氮素转运对籽粒的贡献率,造成氮肥浪费^[19]。而节水灌溉适度减氮配施生物炭可以提高稻株叶片光合特性^[20],促进籽粒灌浆,从而提高水稻产量和 NUE^[21]。

光合作用是作物产量形成的基础,影响碳水化合物合成过程和干物质分布^[22]。叶片是作物进行光合作用的主要器官,水稻籽粒灌浆所需 70% ~ 90% 的光合同化物来自水稻抽穗后叶片的光合产物^[23]。在灌浆期,节水灌溉减施 10% 氮肥配施生物炭可以提高叶片 P_n ,原因是施加生物炭可以改善叶片碳氮代谢水平,提高叶片可溶性蛋白和硝酸还原酶(NR)活性,增加作物吸氮量^[24-25],有利于叶片维持较高的 SPAD,缓解叶片衰老,提高叶片光合能力,增加干物质积累量,从而提高水稻产量。减氮 20% 模式下,施用 12.5 t/hm² 生物炭可以提高 P_n ,增加水稻产量^[26]。这可能是生物炭通过增加通气孔隙、改善养分供应,促进水稻根系生长,保持叶片良好的功能状态^[27-28];但施用 25 t/hm² 生物炭 P_n 降低,原因可能是气孔限制因素占主导作用, L_s 升高, G_s 下降,阻碍 CO₂ 进入细胞,水稻植株体内 CO₂ 供应不足,进而降低 P_n ,抑制光合作用^[29]。通过结构方程模型分析结果,也可以看出 SPAD、 P_n 、 L_s 、 G_s 之间的关系。综合来看,施用 12.5 t/hm² 生物炭可以在提高水稻产量的同时减少 10% ~ 20% 化学氮肥施用量,实现“减量增效”^[30]。

从相关分析和结构方程模型分析结果来看,光合特性参数与 WUE、NUE、干物质质量、产量之间有着密切关系。张忠学等^[8]研究结果表明,水稻 WUE 与 G_s 和 T_r 的关系最密切,这与本研究的结果基本一致。施加生物炭会增加土壤有机质含量,提高土壤的养分供应能力,减少氨挥发和淋溶损失^[31],提高了 NUE。此外,生物炭对氮的保留和吸附作用,增加了 RuBP 羧化酶活性,提高碳同化,提高了光合速率^[32],促进了干物质积累和产量形成^[33]。生物炭应用对光合速率的总体影响是积极的,但随着生物炭施用量增加,光合速率的增加存在阈值,这与 GAO 等^[34]Meta 分析结果基本一致。过量施加生物炭使稻田土壤的碳氮比过高(大于 25:1),导致土壤微生物和作物争氮的现象^[35],这种竞争现象会导致土壤氮素矿化量减少,植物叶片中氮含量降低,从而削弱了植物光合作用^[36]。综合来看,节水灌溉减施 10% 氮肥配施 12.5 t/hm² 生物炭水稻叶片 LAI、SPAD 和 P_n 均为最高(除分蘖期外),有利于水稻干

物质积累和产量增加。

4 结 论

(1) 节水灌溉适量减氮配施生物炭可以增加 LAI、SPAD、 P_n 、 G_s 和 T_r , 减小 L_s ; 过量减施氮肥或施加生物炭均会增加 L_s , 减小 LAI、SPAD、 P_n 、 G_s 和 T_r 。

(2) 与 B0N1 处理相比, B1N2 处理植株干物质总积累量提高 14.79%, 而 B2N4 处理降低 16.02%; B1N2 处理水稻 NUE、产量、WUE 显著高于 B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别提高 12.92%、9.95%、12.58%, B2N4 处理水稻 NUE、产量、WUE 显著低于

B0N1 处理 ($P < 0.05$), 分别降低 22.87%、18.20%、5.66%

(3) WUE、NUE、干物质质量、产量之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$); WUE 与光合特性参数 LAI、 P_n 、 T_r 、 G_s (除 LAI - T、 T_r - G 外) 均呈显著或极显著正相关, 与 L_s 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$); NUE 和干物质质量与光合特性参数 LAI、SPAD、 P_n 、 T_r 、 G_s (除 LAI - T、SPAD - T、 T_r - G 外) 均呈显著或极显著正相关, 与 L_s 均呈显著或极显著负相关; 产量与光合特性参数 LAI、SPAD、 P_n 、 T_r 、 G_s (除 SPAD - T、 T_r - G 外) 均呈显著或极显著正相关, 与 L_s 均呈显著或极显著负相关。

参 考 文 献

[1] FAOSTAT[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.

[2] 张作合. 黑土稻田减施氮肥配施生物炭对氮肥有效率的影响[J]. 节水灌溉, 2023(10): 75 - 82, 90.
ZHANG Zuohe. Effects of reducing nitrogen fertilizer combined with biochar application on nitrogen efficiency in black soil paddy fields[J]. Water Saving Irrigation, 2023(10): 75 - 82, 90. (in Chinese)

[3] 张作合, 张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的¹⁵N 示踪分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 239 - 249.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. ¹⁵N tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 239 - 249. (in Chinese)

[4] 张忠学, 宋健, 齐智娟, 等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(3): 42 - 49, 60.
ZHANG Zhongxue, SONG Jian, QI Zhijuan, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer application on soil nitrogen distribution and nitrogen use efficiency under water-saving irrigation[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(3): 42 - 49, 60. (in Chinese)

[5] 刘慧, 龙学毅, 焦岩, 等. 生物炭与磷肥配施对水稻生长发育及产量的影响[J]. 作物杂志, 2023(5): 238 - 248.
LIU Hui, LONG Xueyi, JIAO Yan, et al. Effects of combined application of biochar and phosphate fertilizer on rice growth and yield[J]. Crops, 2023(5): 238 - 248. (in Chinese)

[6] 蔡威威, 艾天成, 李然, 等. 控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 54 - 60.
CAI Weiwei, AI Tiancheng, LI Ran, et al. Effect of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(3): 54 - 60. (in Chinese)

[7] LIU Lijun, CHEN Tingting, WANG Zhiqin, et al. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice[J]. Field Crops Research, 2013, 154(12): 226 - 235.

[8] 张忠学, 陈鹏, 郑恩楠, 等. 基于 $\Delta^{13}C$ 的不同水氮管理对水稻水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 303 - 312.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, ZHENG Ennan, et al. Effect of different water and nitrogen managements on rice leaf water use efficiency based on $\Delta^{13}C$ [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 303 - 312. (in Chinese)

[9] 胡梦芸, 门福圆, 张颖君, 等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 332 - 340.
HU Mengyun, MEN Fuyuan, ZHANG Yingjun, et al. Research progress on water-nitrogen interaction and its effects on crop growth and utilization of nitrogen[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(3): 332 - 340. (in Chinese)

[10] 杨佳鹤, 何进宇, 刘飞杨, 等. 不同土壤水分对植物光合作用的影响研究进展[J]. 节水灌溉, 2023(11): 39 - 46.
YANG Jiahe, HE Jinyu, LIU Feiyang, et al. Research progress on effects of different soil moisture on plant photosynthesis[J]. Water Saving Irrigation, 2023(11): 39 - 46. (in Chinese)

[11] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497 - 501.
WANG Shaohua, CAO Weixing, DING Yanfeng, et al. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 497 - 501. (in Chinese)

[12] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 159 - 169.
ZHAO Liming, LI Ming, ZHENG Dianfeng, et al. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and

photosynthetic characteristics of matter production in cold area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 159 – 169. (in Chinese)

[13] 张作合. 黑土稻田施加生物炭对水氮利用及温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and uitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[14] SMITH S D, HUXMAN T E, ZITZER S F, et al. Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem[J]. Nature, 2000, 408: 79 – 82.

[15] ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179(1): 277 – 287.

[16] LI Dandan, TIAN Mengyu, CAI Jian, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2013, 70: 257 – 263.

[17] LIAO Fen, YANG Liu, LI Qiang, et al. Effect of biochar on growth, photosynthetic characteristics and nutrient distribution in sugarcane[J]. Sugar Tech., 2019, 21: 289 – 295.

[18] 张猛, 李振山, 陈猛猛, 等. 氮肥运筹对水稻生长、光合特性及产量的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 54 – 61, 67.
ZHANG Meng, LI Zhenshan, CHEN Mengmeng, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on rice growth, photosynthetic charateristics and yield[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2023, 40(1): 54 – 61, 67. (in Chinese)

[19] ZHANG Fusuo, NIU Junfang, ZHANG Weifeng, et al. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply[J]. Plant and Soil, 2010, 335: 21 – 34.

[20] 赵金标, 胡雪, 徐承昱, 等. 高温下秸秆还田耦合减氮对水稻剑叶光合生理特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 39 – 53.
ZHAO Jinbiao, HU Xue, XU Chengyu, et al. Effects of coupling straw returning and nitrogen application reduction on the physiological characteristics of rice under high temperature[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(12): 39 – 53. (in Chinese)

[21] 徐国伟, 江孟孟, 陆大克, 等. 干湿交替灌溉与氮肥形态耦合对水稻光合特性及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1239 – 1250.
XU Guowei, JIANG Mengmeng, LU Dake, et al. Optimum combination of irrigation and nitrogen supply form achieving high photosynthetic and nitrogen utilization efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(7): 1239 – 1250. (in Chinese)

[22] ZLATEV Z, LION F C. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2012, 24(1): 57 – 72.

[23] 李铁成, 张忠学, 张作合, 等. 氮肥减施对节水灌溉稻田 NH₃ 与 N₂O 排放及氮肥利用的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 348 – 355.
LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction under water-saving irrigation on NH₃, N₂O emissions and absorption of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 348 – 355. (in Chinese)

[24] 吴龙龙, 虞轶俊, 田仓, 等. 干湿交替灌溉下施氮模式对水稻光合产物和氮转运的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(3): 295 – 307.
WU Longlong, YU Yijun, TIAN Cang, et al. Effects of different nitrogen application regimes on translocation of rice photosynthetic products and nitrogen under alternate wetting and drying irrigation[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(3): 295 – 307. (in Chinese)

[25] HUANG Min, YANG Liu, QIN Huadong, et al. Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(6): 997 – 1000.

[26] 赵艳泽. 生物炭配施氮肥对水稻生长发育和产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
ZHAO Yanze. Interaction effects of biochar and nitrogen fertilizer on rice yield and rice quality[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[27] 邢钰媛, 娄运生, 王坤, 等. 施用生物炭和硅肥对增温水稻叶片光合及荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 451 – 463.
XING Yuyuan, LOU Yunsheng, WANG Kun, et al. Effects of biochar and silicate supply on photosynthetic and fluorescence characteristics of rice leaves under nighttime warming[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(2): 451 – 463. (in Chinese)

[28] 张作合, 张忠学, 李铁成, 等. 水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的¹⁵N 示踪分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 295 – 304.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. ¹⁵N tracer analysis of nitrogen uptake and utilization by rice roots under water and biochar management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 295 – 304. (in Chinese)

[22] LI Dian, GUO Sheng, QU Haibo. A novel multiple working modes parallel mechanism with variable workspace[J]. Proc IMechE, Part C: J Mechanical Engineering Science, 2020, 234(1):211 – 224.

[23] SUN Tao, YANG Shuofei, HUANG Tian, et al. A way of relating instantaneous and finite screws based on the screw triangle product[J]. Mech. Mach. Theory, 2016, 108: 75 – 82.

[24] 刘伟,刘宏昭.具有 2T1R 与 2R1T 运动模式 3 自由度并联机构型综合[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 401 – 409.
LIU Wei, LIU Hongzhao. Type synthesis of 3-dof parallel mechanism with 2T1R and 2R1T motion mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 401 – 409. (in Chinese)

[25] 刘伟,刘宏昭,胡旭宇.具有多模式球面 4R 机构结构参数研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3):440 – 448.
LIU Wei, LIU Hongzhao, HU Xuyu. Structural parameters of spherical 4R mechanism with multiple modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):440 – 448. (in Chinese)

[26] HU Xuyu, LIU Hongzhao. Type synthesis and analysis of a new class of 3T2Rv parallel mechanisms with variable/invariable rotational axes[J]. IEEE Access, 2021(9): 164300 – 164315.

[27] 刘伟,刘宏昭,胡旭宇.具有固定转动轴线和变转动轴线 3T1R 并联机构型综合[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 451 – 458.
LIU Wei, LIU Hongzhao, HU Xuyu. Type synthesis of 3T1R parallel machine with fixed rotation axis and variable rotation axis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2):451 – 458. (in Chinese)

(上接第 395 页)

[29] 杨泽粟,张强,郝小翠.自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2):174 – 182.
YANG Zesu, ZHANG Qiang, HAO Xiaocui. Stomatalor non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2):174 – 182. (in Chinese)

[30] 柳瑞,高阳,李恩琳,等.减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 926 – 932.
LIU Rui, GAO Yang, LI Enlin, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5):926 – 932. (in Chinese)

[31] 张作合,李铁成,张忠学,等.水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 379 – 387.
ZHNG Zuohe, LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, et al. Relationship between ttrace greenhouse gas emission and water and nitrogen utilization under water biochar management in paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):379 – 387. (in Chinese)

[32] TANAZAWA Y, TOMOTSUNE M, SUZUKI T, et al. Photosynthetic response of young oaks to biochar amendment in field conditions over 3 years[J]. Journal of Forest Research, 2021, 26:116 – 126.

[33] CUI Qian, XIA Jiangbao, YANG Hongjun, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 756(20):143801.

[34] GAO Yang, SHAO Guangcheng, YANG Zhen, et al. Influences of soil and biochar properties and amount of biochar and fertilizer on the performance of biochar in improving plant photosynthetic rate: a Meta-analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 130(10):126345.

[35] 高德才,张蕾,刘强,等.旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6):54 – 61.
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6):54 – 61. (in Chinese)

[36] 卜祥焮.干湿交替驱动下生物炭管理方式对水稻生长发育及氮素利用的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.
BU Xiangxi. Effects of biochar managements methods on growth and nitrogen utilization of rice under the wet-dry cycling irrigation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)