

大气 CO₂ 浓度升高条件下施加生物炭对水稻 生物量分配及产量的影响

张凤哲, 谢立勇*, 赵洪亮, 金殿玉
(沈阳农业大学农学院, 辽宁沈阳 110161)

摘要: 【目的】大气二氧化碳 (CO₂) 浓度升高会影响作物光合作用, 土壤中添加生物炭能够影响作物根系生长, 但关于二者互作对作物的影响尚未有明确结论, 鉴于此, 我们研究了 CO₂ 浓度升高与施用生物炭两者互作对作物的影响。【方法】盆栽试验在北京昌平进行, 供试水稻品种为吉粳 88。试验共设计 4 个处理, 常规大气 CO₂ 浓度 (CK)、常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 (B)、高浓度 CO₂ (F)、高浓度 CO₂ + 生物炭 (F + B), 常规大气和高浓度 CO₂ 分别为 400 和 550 μmol/mol, 生物炭添加量为 20 g/kg。于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期取样, 测定株高、各器官生物量、产量构成因素。【结果】相较于 CK, 其他 3 个处理均提高了分蘖期、拔节期和抽穗期的水稻株高, F + B 处理株高在 3 个时期平均分别增加了 2.4%、1.3%、4.9% ($P < 0.01$)。相较于 CK, 其他 3 个处理均增加了水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期的单茎、叶片、根系和地上部总干重, B 处理和 F 处理对水稻叶片、根系和地上部总干重的影响均达到极显著水平, F + B 处理仅对根系干重的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, F + B 处理的水稻根冠比在分蘖期没有显著变化, 抽穗期增加了 10.7%, 而拔节期和成熟期分别降低了 5.0%、12.7%。相对对照, 常规大气 CO₂ 浓度下施生物炭 (B) 及单增 CO₂ 浓度处理 (F) 水稻穗长和千粒重增幅达到极显著水平。F + B 处理水稻产量构成均表现出增加趋势, 仅对千粒重的影响达到极显著水平。【结论】高 CO₂ 浓度有利于水稻植株地上部和地下部生长及干物质积累, 但会降低结实率及最终产量; 在高 CO₂ 浓度下配施生物炭不仅促进植株生长和干物质积累的效果更佳, 还显著提高产量构成因素, 显示出良好的互作效应。

关键词: 二氧化碳; 生物炭; 水稻; 生物量分配; 产量

Synergistic effects of biochar application and elevated atmospheric CO₂ concentration on rice biomass allocation and yield

ZHANG Feng-zhe, Xie Li-yong*, ZHAO Hong-liang, JIN Dian-yu
(Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: 【Objectives】Elevation of atmospheric CO₂ concentration affects the photosynthesis of crops, and the application of biochar is beneficial to the root growth of crops. This paper investigates the interaction effects of elevated CO₂ and biochar application to reference proper nutrient management for increasing elevated CO₂ concentration in the future. 【Methods】A pot experiment was conducted in Changping, Beijing, using Jijing 88 as rice variety. There were 4 treatments in the experiment: normal ambient CO₂ concentration without biochar (CK) and with biochar (B), and high CO₂ concentration without biochar (F) and with biochar (F + B). The normal and high atmospheric CO₂ concentrations were 400 μmol/mol and 550 μmol/mol, and the biochar application rate was 20 g/kg. Rice samples were collected at the tillering, jointing, heading, and maturity stage to determine plant height and biomass distribution. Yield and yield components were investigated at harvest. 【Results】Compared with CK, treatment B significantly increased rice plant height at tillering, jointing and heading stage, but not at

收稿日期: 2020-10-28 接受日期: 2021-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41875141, 41175097)。

联系方式: 张凤哲 E-mail: zhangfengzhe@126.com; * 通信作者 谢立勇 E-mail: xly0910@163.com

the maturing stage, while treatment F and F + B did not significantly increase plant height at all the four stages. B, F, and F + B treatments all increased total dry weight of single stem, leaf, root system, and above-ground biomass of rice at the stages under consideration. The total dry weight of rice leaf, root system and above-ground biomass was higher in biochar (B) and high-concentration CO₂ (F) alone; F + B treatment only had a significantly ($P < 0.05$) impact on the dry weight of roots. Compared with the control (CK), there was no interaction effect ($P > 0.05$) on the rice root-to-shoot ratio at the tillering stage. However, the values increased by 10.7% at the heading stage, decreased by 5.0% at the jointing stage, and by 12.7% at the maturity stage. Application of biochar (B) and elevated CO₂ concentration (F) ($P < 0.05$) increased rice ear length, grain number, and one thousand-grain weight. Rice yield showed an increasing trend under the interaction of biochar and elevated CO₂; however, the interaction effect was significant on one thousand-grain weight only. 【Conclusions】 High-concentration CO₂ and biochar show a significant positive interaction effect on rice growth and yield components. Increasing atmospheric CO₂ concentration is beneficial to the growth and dry matter accumulation of rice plants above and below ground, but it reduces the seed setting rate and yield. Combined application of biochar under high CO₂ concentration not only promotes plant growth and dry matter accumulation, but also significantly increases yield components, showing a good interaction effect.

Key words: CO₂; biochar; rice; biomass allocation; yield

工业革命以来, 大气中二氧化碳 (CO₂) 浓度持续增高^[1], 预计 2050 年可能增加到 450~550 $\mu\text{mol/mol}$ (称为 CO₂ 倍增), 21 世纪末将达到 790~1020 $\mu\text{mol/mol}$ ^[2]. CO₂ 是绿色植物进行光合作用的原料之一, 其浓度的升高将会直接或间接地影响植物的代谢过程, 进而改变植物的最终生产力^[3-5]. 大田作物生长受环境因素与人为干预的共同影响, 在自然生长状态下, 研究 CO₂ 浓度增高与人为干预的交互作用对作物的影响规律, 是在环境变化下避免作物减产的关键措施^[6].

作物地上部分的生长受大气环境的调控, 而地下部分则受到与作物根系直接接触的土壤理化性质的影响。研究发现, 生物炭还田 6 年后土壤有机碳、有效磷和速效钾含量显著增加^[7], 农业生产中应用生物炭技术对减少土壤重金属含量具有一定作用^[8], 并可改善滩涂土壤结构^[9], 同时具备提高作物产量^[10-11]的良好效果, 是保持农田生态系统持续发展的重要途径^[12]. 近年来, 国内外学者在生物炭与其他试验条件互作对水稻的影响方面已取得一定研究进展^[13-15], 但是生物炭与二氧化碳浓度的交互作用对水稻的影响研究还非常有限。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一, 为全球半数以上人口提供 35%~60% 的营养。有研究表明, 秸秆炭化还田可提高水稻叶绿素相对含量, 同时施用氮肥可促进水稻地上部干物质积累^[16], 与单施化肥相比, 生物炭配施化肥处理能促进水稻生长发育^[17]. 干物质累积量是水稻对营养元素利用、光合作

用的积累及后期水稻产量的综合体现, 株高、单茎干重、叶片干重是衡量水稻储存干物质能力的重要指标。

目前关于 CO₂ 浓度增高和施加生物炭对水稻的影响研究均为单因素研究, 关于二者互作对水稻生物量和产量的影响研究较少。本试验利用自由 CO₂ 富集系统 (free-air carbon dioxide enrichment, FACE), 模拟高大气 CO₂ 浓度条件, 开展施加生物炭试验, 旨在揭示高浓度 CO₂ 和施加生物炭对水稻生物量分配和产量的影响是否存在互作效应, 为适应气候变化和充分利用生物炭资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与条件

本试验于 2020 年在中国农业科学院作物科学研究所昌平试验基地 (40.13°N, 116.14°E) 进行, 该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均日照时长 2684 h, 年平均气温 11.8℃, 年平均降水量 550.3 mm。利用的 FACE 系统由直径 4 m、长 1.8 m 的管道围成正八边形, 通过管道向圈内水稻生长区域喷射纯 CO₂ 气体, 利用计算机网络 FBox 平台对设备进行监测和控制, 使水稻在整个生育期圈内 CO₂ 浓度保持在 550 $\mu\text{mol/mol}$ 。

1.2 试验处理

供试水稻品种为吉粳 88, 生育期 140 天左右, 需 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2900℃~3100℃, 由中国农业科学

院作物科学研究所提供。供试土壤为褐潮土, 含有有机质 14.10 g/kg、全氮 0.82 g/kg、有效磷 20.0 mg/kg、速效钾 79.8 mg/kg, pH 为 8.33。供试生物炭原料为玉米秸秆, 炭化温度为 400℃~500℃, 炭化停留时间 2 h, 粒径 1.5~2.0 mm, 生物炭 pH9.23, 含氮 1.53%、磷 0.78%、钾 1.68%, 由辽宁东北丰有限公司提供。采用盆栽试验, 设置 4 个处理, 分别为试验区常规大气 CO₂ 浓度 (CK)、常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 (B)、高浓度 CO₂ (F)、高浓度 CO₂ + 生物炭 (F + B), 各处理重复 3 次。试验区常规大气 CO₂ 浓度约为 400 μmol/mol, 增高浓度 CO₂ 为 550 μmol/mol, 应用 FACE 系统控制, 生物炭添加量为 20 g/(kg, 干土)。

盆栽用土全部过 5 mm 筛, 试验用盆长 60 cm、宽 40 cm、高 35 cm, 每盆装土 50 kg, 将生物炭与土壤混匀后沉积 1 周备用。每盆 6 穴, 每穴 3 株, 穴间用透水隔板隔开, 使在抽穗期和成熟期各穴水稻根系能区分开的同时保证水肥条件一致, 每个处理 12 盆。移栽日期为 6 月 10 日, 10 月 2 日收获, 取样日期为水稻分蘖期 (7 月 10 日)、拔节期 (7 月 20 日)、抽穗期 (8 月 15 日)、成熟期 (10 月 2 日)。移栽当日向 FACE 圈内喷施 CO₂ 气体, 使圈内 CO₂ 浓度在整个生育期内稳定在 550 μmol/mol, 随水稻生长逐渐提高管道位置, 使之始终与水稻顶端相平行。4 个处理水肥管理相同, 适时防治病虫害, 以保证水稻正常生长。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 株高 各处理于各试验生育期内在田间随机选取 10 株水稻, 原位测量记录各小区水稻株高, 抽穗前为植株根部到最高叶叶尖长度, 抽穗后为植株基部到穗顶总长度。

1.3.2 生物量分配 各处理于各试验生育期内取不同盆的植株 1 穴, 避免因破坏性取样对盆内其他植株的影响。将植株连根带土放入 380 μm 尼龙网袋里, 用水浸泡约 30 min, 然后用流水仔细冲洗根系, 测定时用吸水纸擦干表面水分, 记录植株分蘖数, 分别称量植株地上 (距根系 3 cm 处切断, 抽穗前茎叶分开测量, 抽穗后茎叶穗均单独称量) 和地下部分鲜重, 放入牛皮纸袋中 105℃ 杀青 30 min、75℃ 烘至恒重后称量干重。其中:

单茎干重 = 样本总茎鞘重/总茎蘖数

地上部干重 = 叶片 + 茎鞘 + 稻穗干重

1.3.3 产量及其构成 水稻成熟期, 各处理分别取

植株形态相近、稻穗均匀的 10 株水稻样本逐一考察, 记录每株穗数、每穗粒数、空秕粒数、穗长。将全部样本脱粒晒干, 考察千粒重。

1.4 统计分析

利用 SPSS 22.0 进行数据处理, 本研究采用三因素重复测定方差分析法分析添加生物炭、增高 CO₂ 浓度及其交互作用对水稻株高的影响; 对水稻生物量分配及产量数据采用 LSD 法进行多重比较, 应用三因素方差分析法对添加生物炭、增高 CO₂ 浓度及其交互效应进行检验。应用 Excel 2010 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 株高

如图 1 所示, 与对照 (CK) 相比, 各处理株高均高于对照, 其中常规大气 CO₂ 浓度下施生物炭处理 (B) 增幅最大, 在分蘖期、拔节期、抽穗期分别较对照增加了 20.2%、15.0%、8.4%。高浓度 CO₂ 处理 (F) 在分蘖期至成熟期较对照分别增加了 9.2%、7.1%、1.8%、2.8%。F + B 处理在分蘖期、拔节期、抽穗期较对照分别增加了 2.4%、1.3%、4.9%。经方差分析可以看出, B 处理与 F 处理对水稻株高的增加效应均未达 0.05 显著水平, 交互效应达到极显著水平 (表 1)。

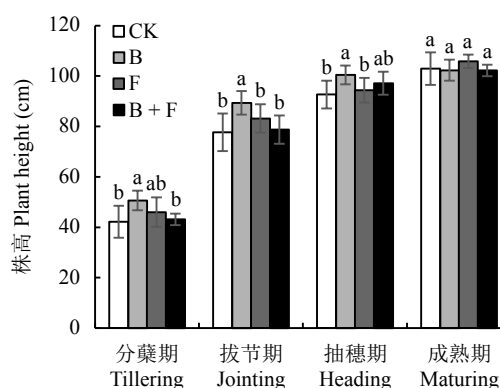


图 1 大气 CO₂ 浓度升高条件下施加生物炭对水稻株高的影响

Fig. 1 Effects of biochar on rice plant height under elevated atmospheric CO₂ concentration

[注 (Note): CK—常规大气 CO₂ 浓度 Normal atmospheric CO₂ concentration; B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ + 生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same growth period ($P < 0.05$).]

表 1 生物炭、CO₂ 浓度对水稻株高影响的方差分析
Table 1 ANOVA analysis of biochar, CO₂ concentration on rice plant height

因子 Factor	自由度 df	F值 F-value	P值 P-value
B	1	0.560	0.474
F	1	4.779	0.057
F + B	1	16.799	0.003**

注 (Note): B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ + 生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; **— $P < 0.01$.

2.2 生物量

干物质累积量是水稻对土壤中营养元素的积累和后期水稻产量的综合体现。从图 2 可以看出, 分蘖期和拔节期 B 处理的水稻单茎干重与对照无显著差异, F 处理对提高单茎干重的效果也不显著, 但高 CO₂ 浓度配合生物炭 (F + B) 处理则显著增加了这两个时期的单茎干重。抽穗期和成熟期 4 个处理在 0.05 水平差异均不显著。经方差分析可知, 高浓度

CO₂ 及其与生育期对水稻单茎干重的互作效应达到显著水平, 生物炭及其与高浓度 CO₂ 互作处理在 0.05 水平差异不显著 (表 2)。

分蘖期、拔节期各处理对水稻叶片干重的影响与对茎秆干重的影响基本一致, 拔节期 B、F 处理提高叶片干重的效果未达到显著水平, 而高 CO₂ 浓度和生物炭互作增加叶片干重的效果最好, 相比 CK 的增加量达到显著水平。在抽穗期各处理叶片干重无显著差异。在成熟期, 增加 CO₂ 浓度、施用生物炭均显著增加了叶片的干重, 二者互作的增加效果更好, 比对照显著增加了 18.4%。方差分析表明, 单因素处理和生育期对水稻叶片干重的影响达极显著水平, 互作效应未达到显著水平 (表 2)。

水稻地上部总重受茎秆和叶片干重及抽穗后穗重的综合影响。B 处理在成熟期前使水稻地上部总干重相对对照有所增加, 但未达到显著水平, 在成熟期相交对照显著增加了 34.7%; F 处理在抽穗期使地上部总干重降低了 5.8%, 其余生育期相对对照均呈增加趋势; 在分蘖期和拔节期, 互作处理 (B + F 处理) 的地上部干重比对照 (CK) 分别增加了 69.0%、

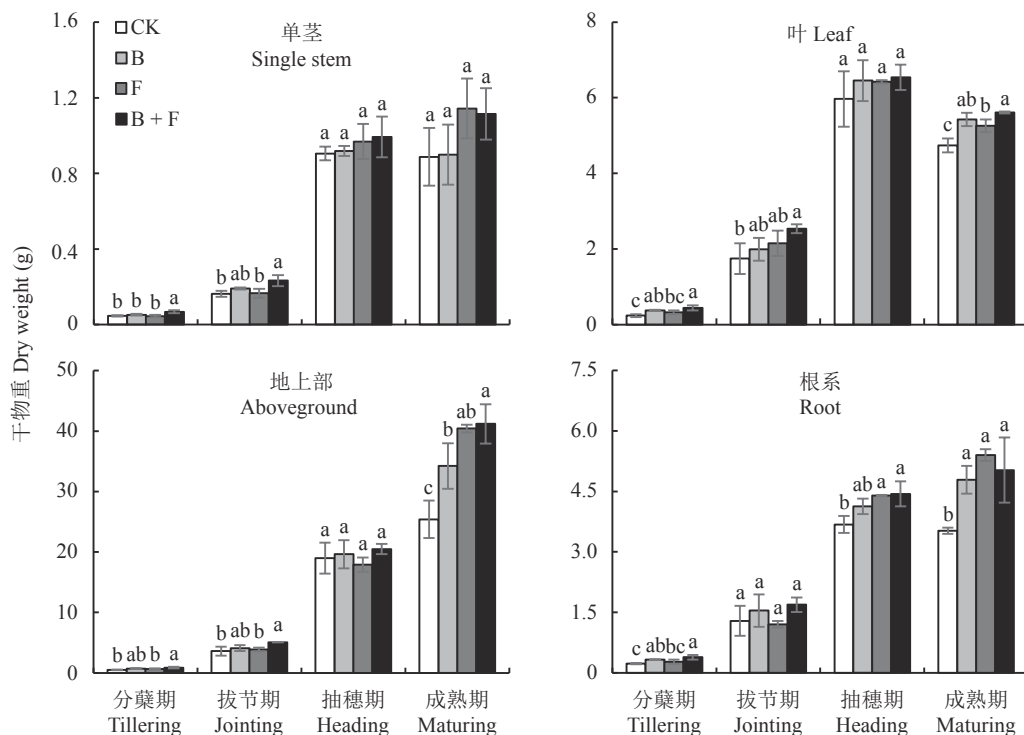


图 2 CO₂ 浓度和施加生物炭对不同生育期水稻各部位干重的影响

Fig. 2 Effects of atmospheric CO₂ concentration and biochar application on the dry weight of rice at different stages

[注 (Note): CK—常规大气 CO₂ 浓度 Normal atmospheric CO₂ concentration; B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ 加生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same growth period ($P < 0.05$).]

表 2 生物炭、CO₂ 浓度和生育期对水稻各部位干重的方差分析 (*P* 值)

Table 2 ANOVA analysis of biochar, CO₂ concentration and growing period on dry weight of each part of rice (*P* value)

因子 Factor	自由度 <i>df</i>	单茎干重 Dry weight per stem	叶片干重 Leaf dry weight	地上总干重 Aboveground dry weight	根系干重 Root dry weight	根冠比 Root to shoot ratio
B	1	0.540	0.005**	0.005**	0.007**	0.522
F	1	0.010*	0.009**	<0.001**	<0.001**	0.289
生育期 Growing stage (G)	3	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**
F + B	1	0.945	0.494	0.291	0.033*	0.418
B × G	3	0.949	0.628	0.066	0.658	0.569
F × G	3	0.045*	0.609	<0.001**	0.003**	0.180
(B + F) × G	3	0.971	0.797	0.032*	0.013*	0.895

注 (Note): B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ 加生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; *—0.01 < *P* < 0.05; **—*P* < 0.01.

41.0%，抽穗期差异不显著，成熟期增加了 62.1%。方差分析表明，相比单一因素处理，生物炭与高浓度 CO₂ 互作对水稻地上部总干重的影响并未表现出统计学差异。

水稻根系与土壤直接接触，根系干重是表征根系吸收水分和养分能力的重要指标。相较 CK，B 处理促进了各生育期水稻根系的生长，F 处理使水稻根系干重在拔节期降低了 6.3%，在分蘖期、抽穗期和成熟期表现出增加根系干重效应。B + F 处理较 CK 在分蘖期至成熟期分别增加了 70.6%、31.3%、20.7%、42.6%，除拔节期外，其他时期与对照在 0.05 水平上差异均显著。方差分析表明，添加生物炭与高浓度 CO₂ 的单因素处理及生育期对水稻根系干重的影响达极显著水平 (*P* < 0.01)，互作处理 (F + B) 对水稻根系的影响达 0.05 显著水平 (表 2)。

2.3 根冠比

根冠比是反映同化产物在水稻植株内部分配的重要指标。本研究 4 个处理在各生育期差异均不显著。添加生物炭 (B 处理) 使水稻根冠比在分蘖期至成熟期分别增加了 4.2%、6.3%、8.3%、0.4%；高浓度 CO₂ 处理使水稻根冠比在抽穗期增加了 25.6%，在分蘖期、拔节期和成熟期分别降低了 3.2%、10.1%、4.9%；互作处理 (B + F 处理) 在分蘖期和抽穗期较对照分别增加了 0.8%、10.7%，在拔节期和成熟期分别降低了 5.0%、12.7%，在成熟期根冠比为 4 个处理中最低 (图 3)。方差分析表明，添加生物炭与高浓度 CO₂ 单一因素及二者互作处理对水稻根冠比的影响均未达到显著水平 (*P* > 0.05)。

2.4 水稻产量及其构成因素

由表 3 可以看出，与 CK 相比，3 个处理的穗

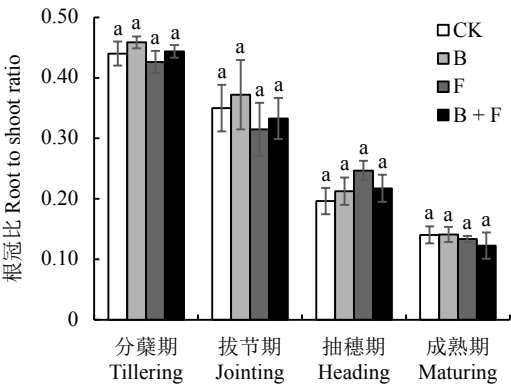


图 3 大气 CO₂ 浓度升高条件下施加生物炭对水稻根冠比的影响

Fig. 3 Effects of biochar on rice root to shoot ratio under elevated atmospheric CO₂ concentration

[注 (Note): CK—常规大气 CO₂ 浓度 Normal atmospheric CO₂ concentration; B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ 加生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; 柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异显著 (*P* < 0.05) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same growth period (*P* < 0.05).]

长、穗粒数和千粒重均有所增加，B 处理使水稻单株穗数、穗长、穗粒数、结实率、千粒重和产量分别增加了 7.5%、10.6%、3.3%、1.2%、2.9% 和 22.8%；高浓度 CO₂ 处理 (F) 使水稻穗长、穗粒数和千粒重分别增加了 8.4%、19.8% 和 4.3%，单株穗数与对照持平，结实率降低了 0.2%，产量降低了 1.6%；与 B 处理相比，F + B 互作处理使水稻单株穗数、穗长、穗粒数和千粒重分别增加了 4.7%、3.8%、23.0% 和 0.9%，水稻结实率相差不大，产量降低了 1.6%；与单独增加 CO₂ 浓度处理相比，互作

表 3 大气 CO₂ 浓度升高条件下施加生物炭对水稻产量构成因素的影响

Table 3 Effects of biochar application on rice yield components under elevated atmospheric CO₂ concentration conditions

处理 Treatment	单株穗数 Panicles per plant	穗长 (cm) Panicle length	穗粒数 Grains per panicle	结实率 (%) Seed-setting rate	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/m ²) Yield
CK	13.33 ± 1.25 a	17.73 ± 0.12 c	101.00 ± 2.45 b	92.84 ± 1.06 a	26.83 ± 0.03 d	1.37 ± 0.17 a
B	14.33 ± 0.47 a	19.62 ± 0.29 ab	104.33 ± 6.13 b	93.93 ± 0.71 a	27.62 ± 0.04 c	1.68 ± 0.21 a
F	13.33 ± 1.25 a	19.22 ± 0.24 b	121.00 ± 0.82 a	92.69 ± 1.09 a	27.98 ± 0.05 a	1.35 ± 0.34 a
F + B	15.00 ± 0.00 a	20.37 ± 0.54 a	128.33 ± 6.85 a	93.91 ± 1.59 a	27.88 ± 0.01 b	1.66 ± 0.14 a
方差分析 ANOVA analysis						
B	ns	**	**	ns	**	ns
F	ns	**	ns	ns	**	ns
F + B	ns	ns	ns	ns	**	ns

注 (Note): CK—常规大气 CO₂ 浓度 Normal atmospheric CO₂ concentration; B—常规大气 CO₂ 浓度 + 生物炭 Normal atmospheric CO₂ concentration with biochar application; F—高浓度 CO₂ Enriched CO₂ concentration; F + B—高浓度 CO₂ + 生物炭 Enriched CO₂ concentration with biochar application; **— $P < 0.01$.

处理使水稻单株穗数、穗长、穗粒数、结实率和产量分别增加了 12.5%、6.0%、6.1%、1.3% 和 22.4%，千粒重降低了 0.4%。经方差分析可知，B 处理对水稻穗长、穗粒数、千粒重的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)；单独高浓度 CO₂ 处理对水稻穗长、千粒重的影响达到极显著水平；互作处理对水稻千粒重的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。3 个处理对水稻最终产量的影响均未达到显著水平。

3 讨论

本试验尝试分析高浓度 CO₂ 配施生物炭对水稻生物量及产量的影响，结果表明，添加生物炭与高浓度 CO₂ 互作处理在分蘖期、拔节期、抽穗期使水稻株高较对照分别增加了 2.4%、1.3%、4.9%，影响达到极显著水平，单一因素处理则均未达到显著水平 (表 1)，说明高浓度 CO₂ 与生物炭的互作处理对水稻株高的影响并非单一因素的叠加效应。互作处理下，水稻单茎干重、叶片干重、地上部总重在各时期均高于其他 3 个处理，说明高浓度 CO₂ 与生物炭的互作使水稻各部位的干物质积累能力高于单一因素处理。施加生物炭对水稻的影响研究表明，施加生物炭使水稻分蘖期至抽穗期株高呈现较高增长水平，灌浆期后增幅不大^[18]。陈芳等^[19]的研究表明，施加生物炭在一定范围内能促进水稻干物质积累。高浓度 CO₂ 对水稻生长的影响研究表明，CO₂ 浓度增高处理使结实期杂交水稻株高显著增加^[20]，高浓度 CO₂ 对水稻地上部干重和根系干重均有促进作用^[21-22]。本试验互作处理对水稻株高及生物量的影响与前人

关于单一因素对水稻的影响研究结果基本一致。王悦满等^[18]的研究表明，施加生物炭处理对水稻叶绿素含量有积极影响。周劲松等^[23]的研究表明，施加生物炭促进了水稻根系的生长。冯芳等^[24]关于 CO₂ 浓度升高对水稻叶绿素荧光特性的影响研究表明，CO₂ 浓度升高使水稻可变荧光、光系统 II 最大光化学效率显著上升，即 CO₂ 浓度升高有利于提高水稻叶片光合系统的光能转换能力，对光合功能有促进作用。刘晓萌等^[25]的研究亦表明，CO₂ 浓度升高至 200 μmol/mol 后促进了水稻拔节孕穗期和抽穗开花期的光合作用，马娉等^[26]的研究则表明，高浓度 CO₂ 促进了水稻叶面积增长，进而增加了干物质积累。由此可见，大气 CO₂ 浓度升高与生物炭的互作处理对水稻地上和地下的影响均衡，其作用机制有待进一步研究揭示。

根冠比反映了水稻地下部与地上部的生长发育状况及协调性，也是植株能否适应环境因素 (如养分、水分等) 的重要标志^[27]。本试验结果表明，相较于对照 (CK)，常规大气 CO₂ 浓度下施生物炭处理在各生育期均增加了水稻根冠比，高浓度 CO₂ 处理在分蘖期、拔节期和成熟期使水稻根冠比降低，高 CO₂ 浓度与生物炭互作处理在分蘖期和抽穗期水稻根冠比分别增加了 0.8% 和 10.7%，拔节期和成熟期使根冠比分别降低了 5.0% 和 12.7%，均未达到 0.05 显著水平 (表 2)。大多研究表明，施加生物炭可使水稻根冠比增加^[13, 28]，CO₂ 浓度增加处理则维持了较为适宜的根冠比^[29-30]，本研究结果与前人研究结果基本一致。施加生物炭使水稻根冠比增加的主要原

因在于, 生物炭可吸附土壤中的氮、磷、钾元素^[31]。相关研究表明, 施加生物炭可提高土壤中有機碳、全氮、速效钾含量^[32]。王欢欢等^[33]的研究表明, 土壤中加入生物炭可提高土壤孔隙度、电导率以及持水量, 有利于根系的生长, 提高了水稻根冠比。CO₂ 浓度增加主要影响作物光合作用, 有研究表明, CO₂ 浓度升高可促进水稻剑叶光系统 II 的光合电子传递^[34], 进而促进作物生物量的增加^[35]。张凯等^[36]的研究表明, 高浓度 CO₂ 处理使小麦植株根冠比降低, 主要原因在于 CO₂ 浓度增加使小麦茎叶干物质质量增加, 物质积累对地上部分的贡献大于对地下部分。结合前人研究及本试验对水稻根冠比的研究结果可看出, 水稻生长前期高 CO₂ 浓度与生物炭互作处理对根系生长的促进作用高于地上部分, 在成熟期根系生物量增幅减缓, 地上生物量和产量增加, 导致根冠比降低。

产量是反映水稻植株生产力的重要参数, 实现增产是对作物研究的最终目的。本研究结果表明, 与对照相比, 常规大气 CO₂ 浓度下施生物炭水稻产量构成相关指标均有所提高; 单施高浓度 CO₂ 处理单株穗数与对照持平, 结实率降低了 0.2%, 产量降低了 1.6%; 高 CO₂ 浓度与生物炭互作处理水稻各测定指标均呈增加趋势 (表 3)。大多数研究表明, CO₂ 浓度增加能够提高水稻产量^[37-38], 高 CO₂ 浓度与生物炭且水稻产量增加主要与穗数增多和籽粒增重有关^[39-40]。黄建晔等^[41]的研究认为, 高浓度 CO₂ 通过提高水稻抽穗期茎鞘中可溶性糖、淀粉的含有率和含量, 进而提高了水稻产量。本研究结果显示, 水稻产量增加很可能是由于高浓度 CO₂ 增加了水稻前期生物量 (包括根系), 从而增加了后期生殖生长的潜力, 也许存在更加复杂的机理导致水稻增产。施加生物炭对水稻产量的影响研究表明, 生物炭可增加水稻产量^[19, 42]。陈盈等^[43]的研究表明, 生物炭促进了水稻灌浆期光合能力, 进而提高每穗实粒数, 实现增产。也有研究表明, 生物炭通过影响氮素的吸收利用影响水稻产量^[44]。赵海成等^[45]的研究则表明, 连年生物炭还田主要通过降低盐碱土容重, 提高土壤氮磷钾含量和孔隙度, 进而使水稻每穴穗数和穗粒数增加从而实现增产。本研究结果表明, 大气 CO₂ 浓度升高和添加生物炭互作对水稻产量的影响与单一因素处理对水稻产量的影响相似, 其中互作处理水稻每穗粒数与单独高浓度 CO₂ 处理结果差异不显著, 且二者均显著高于对照和常规大气 CO₂ 浓度下施加生物炭处理。结合前人研究结果, 本研究

认为, 生物炭和高浓度 CO₂ 互作主要改善了水稻生长发育环境, 从而释放了水稻生长发育潜力, 增加了水稻穗数、穗长及千粒重, 最终实现水稻增产^[35-36]。

4 结论

高浓度 CO₂ 下配合施用生物炭对水稻株高、根系干重及千粒重表现出良好的互作效应。大气 CO₂ 浓度升高会促进水稻的营养生长, 产量构成中的结实率及最终产量低于对照, 与生物炭进行互作处理后, 可使上述测定指标数值增加。限于盆栽试验条件和土壤及生物炭添加量多少等因素影响, 高浓度 CO₂ 配合施用生物炭对水稻生物量分配与产量的长期效应还需进一步试验研究, 需对其作用机制等科学问题进一步探索讨论。

参 考 文 献:

- [1] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 回顾 IPCC 30 年 (1988—2018 年) [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 540—546.
Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Review IPCC 30 years (1988—2018) [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 14(5): 540—546.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 袁漫漫, 朱建国, 刘钢, 等. 不同天气水稻光合日变化对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应——FACE 研究 [J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1897—1907.
Yuan M M, Zhu J G, Liu G, *et al.* Response of diurnal variation in photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature of rice between cloudy and sunny days: A free air CO₂ enrichment study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1897—1907.
- [4] Cai C, Yin X Y, He S Q, *et al.* Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 856—874.
- [5] 张振花, 袁宏霞, 刘洋, 等. 温室番茄对增施不同浓度 CO₂ 的光合响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1010—1018.
Zhang Z H, Yuan H X, Liu Y, *et al.* Photosynthetic responses of tomato to different concentrations of CO₂ enrichment in greenhouse [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1010—1018.
- [6] 郭丽丽, 张茜茜, 郝立华, 等. 大气 CO₂ 倍增条件下冬小麦气体交换对高温干旱及复水过程的响应 [J]. 作物学报, 2019, 45(6): 949—956.
Guo L L, Zhang X X, Hao L H, *et al.* Responses of leaf gas exchange to high temperature and drought combination as well as re-watering of winter wheat under doubling atmospheric CO₂ concentration [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 949—956.
- [7] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110—1118.
Xu Y X, He L L, Liu Y X, *et al.* Effects of biochar addition on

- enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1110–1118.
- [8] 王重庆, 王晖, 江小燕, 等. 生物炭吸附重金属离子的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(1): 692–706.
- Wang C Q, Wang H, Jiang X Y, *et al.* Research advances on adsorption of heavy metals by biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(1): 692–706.
- [9] 张继宁, 周胜, 李广南, 等. 秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(6): 492–499.
- Zhang J N, Zhou S, Li G N, *et al.* Improving the coastal mudflat soil chemical properties and rice growth using straw biochar[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6): 492–499.
- [10] 李伟, 代镇, 张光鑫, 等. 生物炭和氮肥配施提高垆土团聚体稳定性及作物产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 782–791.
- Li W, Dai Z, Zhang G X, *et al.* Combination of biochar and nitrogen fertilizer to improve soil aggregate stability and crop yield in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 782–791.
- [11] Huck Y C, Haruna A O, Majid N M N A, *et al.* Improving soil phosphorus availability and yield of *Zea mays* L. using biochar and compost derived from agroindustrial wastes[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2019, 14(1): 34–42.
- [12] 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 W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324–3333.
- [13] 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 等. 生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5170–5179.
- Yu Y L, Wang Y M, Hou P F, *et al.* Effects of returning nitrogen by biochar loading on paddy growth, root morphology, and nitrogen use efficiency[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5170–5179.
- [14] Yang X, Liu H B, Mao X T, *et al.* Non-flooding rice yield response to straw biochar and controlled-release fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(6): 4799–4809.
- [15] Panhwar Q A, Naher U A, Shamshuddin J, *et al.* Effects of biochar and ground magnesium limestone application, with or without bio-fertilizer addition, on biochemical properties of an acid sulfate soil and rice yield[J]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1100.
- [16] 隋阳辉, 高继平, 刘彩虹, 等. 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[J]. *作物杂志*, 2018, (5): 137–143.
- Sui Y H, Gao J P, Liu C H, *et al.* Effects of straw incorporation modes on rice photosynthesis, dry matter accumulation and nitrogen uptake in cool region of northeast China[J]. *Crops*, 2018, (5): 137–143.
- [17] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893–899.
- [18] 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 Y M, Gao Q, Xue L H, *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.
- [19] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(5): 57–63.
- Chen F, Zhang K K, Gu S C, *et al.* Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(5): 57–63.
- [20] 赖上坤, 周三妮, 顾伟锋, 等. 二氧化碳、施氮量和移栽密度对汕优63产量形成的影响——FACE研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 836–843.
- Lai S K, Zhou S N, Gu W F, *et al.* Effects of CO₂ concentration, nitrogen supply and transplanting density on yield formation of hybrid rice Shanyou 63: A FACE study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 836–843.
- [21] 陶文辉, 王丹. CO₂浓度升高对籼、粳稻光合生理和根系生长的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2021, 44(1): 27–35.
- Tao W H, Wang D. Effects of increased CO₂ concentration on the photosynthetic physiology and root growth of indica and japonica rice[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2021, 44(1): 27–35.
- [22] 王从, 李舒清, 刘树伟, 等. 大气CO₂浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统N₂O排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2535–2550.
- Wang C, Li S Q, Liu S W, *et al.* Response of N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature in rice–wheat rotation agroecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2535–2550.
- [23] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(1): 72–81.
- Zhou J S, Yan P, Zhang W M, *et al.* Effect of biochar on root morphogenesis and anatomical structure of rice cultivated in cold region of northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(1): 72–81.
- [24] 冯芳, 范佩佩, 刘超, 等. 水稻叶绿素荧光特性对CO₂浓度升高的代际响应研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(3): 463–471.
- Feng F, Fan P P, Liu C, *et al.* Intergenerational response of chlorophyll fluorescence characteristics of rice to elevated CO₂ concentration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(3): 463–471.
- [25] 刘晓萌, 于凌飞, 黄耀, 等. CO₂浓度升高下粳稻叶片光合作用对光强变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1051–1057.
- Liu X M, Yu L F, Huang Y, *et al.* Responses of photosynthesis in leaves of japonica rice to light intensity at elevated CO₂ concentration [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1051–1057.
- [26] 马嫖, 李如楠, 王斌, 等. 双季稻不同生育期净同化速率对大气CO₂浓度和温度升高的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 872–882.
- Ma P, Li R N, Wang B, *et al.* Responses of net assimilation rate to elevated atmospheric CO₂ and temperature at different growth stages in a double rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 872–882.
- [27] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 132–141.

- Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10): 132–141.
- [28] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445–1451.
- Zhang W M, Meng J, Wang J Y, *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445–1451.
- [29] 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 等. CO₂倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5708–5716.
- Tang M L, Xiao M L, Yuan H Z, *et al.* Effect of CO₂ doubling and different plant growth stages on rice carbon, nitrogen, and phosphorus and their stoichiometric ratios[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5708–5716.
- [30] 任逸文, 肖谋良, 袁红朝, 等. 水稻光合碳在植物-土壤系统中的分配及其对CO₂升高和施氮的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1397–1404.
- Ren Y W, Xiao M L, Yuan H Z, *et al.* Allocation of rice photosynthates in plant-soil system in response to elevated CO₂ and nitrogen fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1397–1404.
- [31] 彭启超, 刘小华, 罗培宇, 等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1763–1772.
- Peng Q C, Liu X H, Luo P Y, *et al.* Adsorption and desorption characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium by biochars from different raw materials[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1763–1772.
- [32] 王智慧, 殷大伟, 王洪义, 等. 生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *东北农业科学*, 2019, 44(3): 14–19.
- Wang Z H, Yin D W, Wang H Y, *et al.* Effects of different amounts of biochar applied on soil nutrient, soil enzyme activity and maize yield[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2019, 44(3): 14–19.
- [33] 王欢欢, 元野, 任天宝, 等. 生物炭对东北黑土理化性质影响研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(35): 67–71.
- Wang H H, Yuan Y, Ren T B, *et al.* Influence of biochar on the physicochemical properties of black soil in northeast China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(35): 67–71.
- [34] 范佩佩, 冯芳, 刘超, 等. 不同CO₂浓度升高水平对梗稻叶片荧光特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3735–3744.
- Fan P P, Feng F, Liu C, *et al.* Effect of different levels of elevated CO₂ concentration on leaf chlorophyll fluorescence characteristics of japonica rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3735–3744.
- [35] 石梦园, 郁红艳, 邹路易, 等. 大气CO₂浓度升高对水稻秸秆化学组成的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2717–2724.
- Shi M Y, Yu H Y, Zou L Y, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on chemical composition of rice straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2717–2724.
- [36] 张凯, 王润元, 李巧珍, 等. CO₂浓度增加对半干旱区春小麦生产和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2959–2969.
- Zhang K, Wang R Y, Li Q Z, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on production and water use efficiency of spring wheat in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 2959–2969.
- [37] 周娟, 舒小伟, 许高平, 等. 大气CO₂浓度升高对不同类型水稻品种磷素吸收利用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(12): 2726–2734.
- Zhou J, Shu X W, Xu G P, *et al.* Effects of elevated CO₂ on phosphorus absorption and utilization in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2726–2734.
- [38] 袁漫漫, 朱建国, 孙义祥, 等. 大气CO₂浓度和温度升高对水稻籽粒充实度的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2251–2262.
- Yuan M M, Zhu J G, Sun Y X, *et al.* Influence of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on grain plumpness in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2251–2262.
- [39] 户少武, 张欣, 景立权, 等. 高浓度CO₂对稻穗不同位置籽粒结实和米质性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3725–3734.
- Hu S W, Zhang X, Jing L Q, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on grain filling capacity and quality of rice grains located at different positions on a panicle[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3725–3734.
- [40] 周娟, 舒小伟, 赖上坤, 等. 不同类型水稻品种产量和氮素吸收利用对大气CO₂浓度升高响应的差异[J]. *中国水稻科学*, 2020, 34(6): 561–573.
- Zhou J, Shu X W, Lai S K, *et al.* Differences in response of grain yield, nitrogen absorption and utilization to elevated CO₂ concentration in different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(6): 561–573.
- [41] 黄建晔, 董桂春, 杨洪建, 等. 开放式空气CO₂增高对水稻物质生产与分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 253–257.
- Huang J Y, Dong G C, Yang H J, *et al.* Effect of free-air CO₂ enrichment on biomass accumulation and distribution in rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 253–257.
- [42] Farhangi-Abriz S, Torabian S, Qin R, *et al.* Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145869.
- [43] 陈盈, 张满利, 刘宪平, 等. 生物炭对水稻齐穗期叶绿素荧光参数及产量构成的影响[J]. *作物杂志*, 2016, (3): 94–98.
- Chen Y, Zhang M L, Liu X P, *et al.* Effects of biochar on chlorophyll fluorescence at full heading stage and yield components of rice[J]. *Crops*, 2016, (3): 94–98.
- [44] 桂锋, 廖萍, 黄山, 等. 施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(10): 2062–2068.
- Sui F, Liao P, Huang S, *et al.* Effects of biochar amendment on yield and nitrogen uptake in a double rice-cropping system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(10): 2062–2068.
- [45] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1836–1844.
- Zhao H C, Zheng G P, Jin M F, *et al.* Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9): 1836–1844.