

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.04.003

张凤哲, 谢立勇, 赵洪亮, 等. 高浓度 CO₂ 与添加生物炭对水稻根系和产量的交互影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(4): 287–296

高浓度 CO₂ 与添加生物炭对水稻根系和产量的交互影响*

张凤哲, 谢立勇**, 赵洪亮, 金殿玉

(沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161)

摘要: 为明确大气 CO₂ 浓度升高背景下, 施加生物炭对水稻根系和产量的影响, 利用自由 CO₂ 富集系统 (free-air carbon dioxide enrichment, FACE) 对吉粳 88 号水稻进行研究。试验设计 4 组处理, 分别为大气 CO₂ 浓度不添加生物炭 (CK)、大气 CO₂ 浓度每千克干土加 20g 生物炭 (NB)、高浓度 CO₂ (550 μmol·mol⁻¹) 不添加生物炭 (CN)、高浓度 CO₂ 每千克干土加 20g 生物炭 (CB), 分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期取样测定根系形态和生理指标, 水稻成熟后测产, 比较各处理间的差异。结果表明, 单一因素及互作处理均增加了水稻根系形态指标中的总根长、总根表面积和根冠比, CN 处理使分蘖期根系干重降低了 39.24%, CB 处理对水稻总根长、总根表面积的互作效应在各试验期均达到极显著水平; 各试验期水稻根系生理指标对单一因素及互作处理均表现出积极响应, CB 处理各试验期根系伤流强度分别增加了 148.10%、34.21%、6.13% 和 40.43%, 对根系吸收面积的互作效应不显著; 单一因素及互作处理均增加了水稻产量构成中的每穴穗数、每穗粒数和千粒重, CN 和 CB 处理对结实率的影响表现为负效应, CB 处理使每穗粒数和千粒重分别增加了 0.11% 和 3.39%, 互作效应均未达到显著水平。试验结果显示, 除 CN 处理降低了分蘖期根系干重外, 单一因素及互作处理对水稻根系形态及生理指标的影响均表现为正效应, 互作处理对水稻根系形态的影响达到极显著水平, 对根系生理功能的影响则表现为不显著, 提高了水稻产量构成中的每穗粒数, 降低了结实率。

关键词: 二氧化碳; 生物炭; 水稻; 根系性状; 气候变化

Interactive Effects of High CO₂ Concentration and Biochar Addition on Root System and Yield of Rice

ZHANG Feng-zhe, XIE Li-yong, ZHAO Hong-liang, JIN Dian-yu

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: In order to clarify the influence of biochar on rice root and yield under the background of increasing atmospheric CO₂ concentration, the free-air carbon dioxide enrichment (FACE) was used to study the Jijing 88 rice. The experimental included 4 treatments: atmospheric CO₂ concentration without biochar (CK), atmospheric CO₂ concentration with 20g biochar per kilogram of dry soil (NB), high concentration CO₂ (550 μmol·mol⁻¹) without biochar (CN), and high-concentration CO₂ with 20g biochar per kilogram of dry soil (CB), samples at the tillering stage, jointing stage, heading stage, and mature stage were taken to determine root morphology and physiological indicators, and yield at the mature stage was measured and analyzed. The results show that the single factors and mutual treatment have increased the total root length, total root surface area and root shoot ratio of rice root morphological indexes, CN treatment reduced the root dry weight by 39.24% at the tillering stage, CB treatment had extremely significant interaction effect on total root length and total root surface area in all experimental periods; the

* 收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金 (41875141; 41175097)

** 通讯作者: 谢立勇, 教授, 研究方向为农业气象、气候变化影响与适应, E-mail: xly0910@163.com

第一作者联系方式: 张凤哲, E-mail: zhangfengzhe@126.com

physiological index of rice root system responded positively to single factors and interaction treatment, CB treatment increased root bleeding intensity by 148.10%, 34.21%, 6.13%, 40.43% in each test period, and the interaction effect on root absorption area was not significant; single factors and mutual treatment increased panicles per hill, grains per panicle and 1000 grain weight, CN and CB treatments had negative effects on seed setting rate, while the CB treatment increased the panicles per hill and 1000-grain weight by 0.11% and 3.39%, and the interaction effect did not reach a significant level. the results show that except CN treatment reduced the root dry weight at tillering stage, the effects of single factors and interaction treatment on rice root morphology and physiological indices were positive. The interaction treatment had a significant effect on root morphology, the effect on the physiological function of the root system was not significant, and the treatment increased the number of grains per panicle and reduced the seed setting rate.

Key words: CO₂; Biochar; Rice; Root traits; Climate change

目前, 大气中 CO₂ 浓度已由工业革命前的 280 μmol·mol⁻¹ 增至 400 μmol·mol⁻¹ 左右, 同时以每年 0.5% 的速度增长, 预计 2050 年可能增加到 450~550 μmol·mol⁻¹ (称为 CO₂ 倍增), 21 世纪末可能达到 790~1020 μmol·mol⁻¹ [1]。CO₂ 是绿色植物进行光合作用的底物, 其浓度的升高会使作物光合作用和干物质形成发生相应变化 [2]。研究发现, CO₂ 浓度增高对作物的影响表现为作物净光合速率增加, 促进了碳水化合物的合成和干物质的积累 [3]; 亦有研究表明, 作物在高 CO₂ 浓度环境下存在光合适应现象, 且存在品种间差异 [4]。为此, 大气 CO₂ 浓度增高对作物生理代谢的影响及其机理机制研究, 一直是气候变化背景下人们关注的科学问题之一。大田作物生产是诸多环境因素与人为干预的过程, CO₂ 浓度的影响也必然与其它环境因子相互促进或相互制约。因此, 作物在自然生长状态下, 开展人为干预与环境因子的交互影响的研究, 更有利于揭示 CO₂ 浓度增高对作物生理代谢过程的影响规律。

生物炭不仅能改良土壤, 而且能提高土壤蓄水储养的能力, 保护土壤中的微生物, 在修复污染土壤 [5]、提高作物产量 [6] 等方面也发挥着重要作用。农业秸秆生物炭有利于农业废弃物的资源化利用, 在减少农田秸秆焚烧、提供能源、保护环境等方面也具有重要意义 [7]。研究发现, 生物炭配施化肥的处理可以有效促进水稻生长发育 [8-9], 土壤中添加生物炭可以增加其养分含量, 并且能促进水稻根系生长 [10]。然而对于生物炭的不同研究结果之间差异较大, 且在不同环境影响下生物炭所发挥的作用很难总结出共性规律, 现阶段对生物炭的研究结果在未

来环境变化尤其是高浓度 CO₂ 背景下是否相同值得更深入的研究。

水稻根系不仅支撑其正常生长, 而且是吸收水分和营养物质的运输器官, 根系的形态结构直接调控作物及根部生长环境的理化过程, 与水稻的生长发育、产量、品质形成等密切相关。试验发现, 稻田施加生物炭能增加水稻生育前期根系形态指标, 提高水稻根系吸收面积, 生育后期生物炭延缓了根系衰老, 整个生育期内维持了较为适宜的根冠比, 根系生理功能增强 [11]; 高继平等试验表明, 生物炭可显著提高秧苗地上部和根系生长能力 [12]。此外, 生物炭还可提高水稻生育前期根系的总吸收面积, 在水稻生育后期生物炭又减慢了根系衰老速度 [13]。关于大气 CO₂ 浓度升高 (包括与不同施肥条件互作) 对水稻根系及产量的影响已取得一定进展, 而在高浓度 CO₂ 条件下施加生物炭对水稻的影响研究尚未开展, 大气 CO₂ 浓度增加和生物质炭化还田对水稻根系的协同作用存在的规律值得更高关注。本文拟通过研究 CO₂ 浓度增高和施加生物炭对水稻根系的影响, 揭示两因素互作下水稻根系对营养元素的吸收能力和有机物的最终积累情况, 为高浓度 CO₂ 背景下科学施肥和减少农田排放提供新的理论支持。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年在中国农业科学院昌平试验基地 (40°08'N, 116°08'E) 进行, 该地属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均日照时数 2684h, 年平均气温 11.8℃, 年平均降水量 550.3mm。试验区域平均大气 CO₂ 浓度约为 400 μmol·mol⁻¹。

1.2 供试材料

供试水稻品种为吉粳 88, 生育期 140d 左右, 需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2900~3100 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 由中国农业科学院作物科学研究所提供。供试土壤有机质含量为 14.10g·kg⁻¹, 全氮 0.82g·kg⁻¹, 速效磷 20.0mg·kg⁻¹, 速效钾 79.8mg·kg⁻¹, pH 值为 8.33。生物炭原材料为玉米秸秆, 粒径 1.5~2.0mm, pH 值为 9.23, 含氮 1.53%, 磷 0.78%, 钾 1.68%, 由辽宁省某公司提供。

1.3 试验设计

试验设置 2 个 CO₂ 浓度, 分别为大气 CO₂ 浓度和高浓度 CO₂ (550 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 高浓度 CO₂ 环境应用 FACE 系统进行调控。盆中土壤设 2 个生物炭处理, 分别为不添加生物炭和每千克干土加 20g 生物炭。共计 4 组处理, 以大气 CO₂ 浓度和土壤中不添加生物炭的处理为对照 (CK), 以大气 CO₂ 浓度和土壤中添加生物炭为 NB 处理, 以高浓度 CO₂ 和土壤中不添加生物炭为 CN 处理, 以高浓度 CO₂ 和土壤中添加生物炭为 CB 处理。

盆栽用土全部过 5mm 筛, 试验用盆长 60cm、宽 40cm、高 35cm, 每盆装土 50kg, 施加生物炭处理为将生物炭与土壤混匀后沉积 1 周备用。2019 年 6 月 4 日移栽, 每盆 6 穴, 每穴 3 株, 盆内每穴水稻用透水隔板隔开, 保证取样期各穴水稻根系能区分开的同时水肥条件一致, 每组处理栽培 12 盆, 同时向 FACE 圈内增施 CO₂ 气体, 使圈内 CO₂ 浓度稳定在 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 直到试验结束。每盆施加氮肥 (尿素) 20g, 磷肥 (磷酸二铵) 20g, 钾肥 (氯化钾) 10g, 在抽穗期施加穗肥 (尿素) 10g, 4 组处理管理方式相同, 水分管理为 6 月 4 日~7 月 5 日保持潜水层, 7 月 6 日~8 月 1 日进行多次轻搁田, 8 月 2 日以后间歇灌溉。通过对水稻的田间观察, 分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期取样测定相关指标。

1.4 测定方法

1.4.1 根系形态指标

于试验期各处理分别取 3 株长势一致的水稻, 连根带土放入 40 目尼龙网袋里, 用水浸泡约 30min 后, 用流水冲洗根系, 将单株水稻所有不定根剪下, 平铺在塑料凹槽内, 倒入蒸馏水使根系完全没入水中, 用镊子调整根系位置避免重叠, 使用根系扫描仪 (EPSON J221B) 扫描, 扫描得到的图片利

用 Win RHIZO 处理为数据信息, 获得总根长、总根表面积指标。

相同取样方法另取 3 株水稻洗净, 用吸水纸轻拭擦干根系表面水分, 将水稻根系距地上部 3cm 处切割, 用 AL104 电子分析天平分别称量根系和地上部鲜重, 应用所得数据计算根冠比, 随后将根系放入牛皮纸袋中置于烘箱内 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min、75 $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重后称量干重。

1.4.2 根系生理指标

分别于试验当日晚 18:00 各处理取 3 株水稻测定根系伤流, 方法为从距盆内土壤表面 10cm 处横切断植株, 用已称量好的脱脂棉覆盖切口处, 外围用自封袋包扎收集伤流液, 次日 6:00 取下脱脂棉称重, 每次收集 12h, 利用脱脂棉前后重量之差计算伤流强度。

试验期各处理分别取 3 株水稻, 连根带土放入 40 目尼龙网袋里, 用水浸泡约 30min 后, 用流水冲洗根系, 并用吸水纸擦干根系表面水分, 以甲烯蓝为吸光物质, 利用分光光度计测定根系吸附前后甲烯蓝溶液吸光度, 应用比色法得出甲烯蓝溶液浓度, 计算根系总吸收面积与活跃吸收面积。

1.4.3 产量指标

水稻成熟后, 各处理取植株形态相近、稻穗均匀的 10 株水稻样本逐一考察, 记录每株穗数、穗粒数, 并计算结实率。将成熟期水稻全部脱粒, 从样本中随机数出 3 组 1000 粒, 风干后称重 (精确到 0.01g), 得到千粒重。

1.5 数据处理

利用 SPSS 22.0 进行数据处理与方差分析, 采用 Duncan 法进行不同处理间的显著性水平检验 ($P<0.05$), 结果应用 Excel 2010 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 两因素对水稻根系形态特征的交互影响

2.1.1 总根长和总根表面积

由表 1 可见, 与对照 (CK) 相比, 单施生物炭、单增 CO₂ 浓度与互作处理水稻总根长均有不同程度增加。土壤中单施生物炭处理 (NB) 后, 在分蘖期水稻总根长与对照 (CK) 相比差异不显著, 其它各试验期均显著高于 CK。单独高浓度 CO₂ 处理 (CN) 在各试验期水稻总根长均显著高于 CK 处理。增加 CO₂ 浓度同时向土壤中添加生物

表 1 高浓度 CO₂ 和添加生物炭对水稻各试验期总根长的影响 (m)Table 1 Effects of high concentration of CO₂ and biochar addition on the total root length in each test periods of rice(m)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
CK	19.70±2.89b	22.33±2.33c	63.45±3.11c	80.40±2.04c
NB	23.78±3.43b	53.15±1.82a	100.92±8.03b	175.35±16.76b
CN	30.10±1.34a	32.76±4.55b	205.83±11.90a	236.36±25.89a
CB	20.45±1.44b	25.48±2.98c	105.32±0.96b	204.08±14.34ab
生物炭 Biochar	ns	**	**	**
CO ₂	ns	**	**	**
CO ₂ ×Biochar	**	**	**	**

注: CK 为大气 CO₂ (400μmol·mol⁻¹) 和土壤中不添加生物炭, NB 为大气 CO₂ 和每千克干土添加 20g 生物炭, CN 为高浓度 CO₂ (550μmol·mol⁻¹) 不添加生物炭, CB 为高浓度 CO₂ 每千克干土添加 20g 生物炭。表中数值为平均值±标准差, 不同字母表示在同一取样期内各处理间在 0.05 水平上差异显著。ns 表示某因素的影响不显著, * 和 ** 分别表示某因素的影响在 0.05 和 0.01 水平上显著。下同。

Note: CK: Atmospheric CO₂ (400μmol·mol⁻¹) concentration without biochar; NB: Atmospheric CO₂ concentration per kilogram of dry soil plus 20g biochar; CN: High concentration CO₂ without biochar; CB: High concentration CO₂ per kilogram of dry soil plus 20g biochar. Data are mean±SD, different letters indicate the significant differences at the 0.05 level between treatments during the same sampling period. ns means that the influence of a factor is not significant, * and ** indicate that the influence of a factor is significant at the level of 0.05 and 0.01, respectively. The same as below.

炭处理 (CB) 后, 总根长在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期分别增加了 3.81%、14.08%、66.00%、153.84%, 在水稻分蘖和拔节期仅高于 CK, 抽穗和成熟期仅低于 CN。方差分析表明, CO₂ 和生物炭单一因素对拔节期及其之后的各试验期水稻总根长的影响均通过了 0.01 水平的显著性检验, 互作处理在各试验期均通过了 0.01 水平的显著性检验, 说明增加空气中的 CO₂ 和土壤中添加生物炭均有利于水稻根系生长, 而两者的交互作用则降低了这种效应。

由表 2 可看出, 单施生物炭处理 (NB) 在抽穗期和成熟期均显著增加了水稻总根表面积。单独高

浓度 CO₂ 处理 (CN) 在分蘖期、抽穗期和成熟期显著增加了水稻总根表面积, 拔节期增加效应不显著。增加 CO₂ 浓度同时向土壤中添加生物炭处理 (CB) 后, 在各试验期较 CK 分别增加了 18.59%、17.07%、93.44%、125.48%, 在分蘖期仅高于 CK, 在拔节期及其之后的各试验期均显著增加了水稻根系总吸收面积。方差分析表明, 单施生物炭处理在拔节期和抽穗期对水稻总根表面积的影响极显著, 单独高浓度 CO₂ 及互作处理在各试验期对水稻总根表面积的影响均表现为极显著, 说明单一因素及互作处理均可增加水稻总根表面积, 这与对水稻总根长的影响基本一致。

表 2 高浓度 CO₂ 和添加生物炭对水稻各试验期总根表面积的影响 (cm²)Table 2 Effects of high concentration of CO₂ and biochar addition on the total root surface area in each test periods of rice(cm²)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
CK	160.55±27.17b	198.28±15.83b	490.20±41.80c	824.80±29.20d
NB	187.72±22.54b	299.94±150.13b	633.03±238.64b	1101.86±402.97c
CN	200.39±7.25a	383.88±148.11b	769.72±235.99b	1343.26±354.27b
CB	186.64±23.82b	495.02±21.78a	889.08±71.11a	1448.94±209.31a
生物炭(B) Biochar	ns	**	**	ns
CO ₂	**	**	**	**
CO ₂ ×B	**	**	**	**

2.1.2 根重和根冠比

单施生物炭处理（NB）处理后，水稻根系干重在各试验期分别增加了 67.16%、13.43%、5.73%和 42.17%，在分蘖期和成熟期达到显著水平（表 3）。单独高浓度 CO₂ 处理（CN）在分蘖期水稻根系干重较对照降低了 39.24%，为 4 组处理中最低，在抽穗期和成熟期根系干重显著高于其它 3 组处理。互作处理（CB）在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期分别较对照增加了 40.68%、75.62%、154.41%和 129.03%，在分蘖期根系干重仅低于 NB，拔节期最高，抽穗期和成熟期仅低于 CN。方差分析表明，CO₂ 对水稻根系干重的影响在除分蘖期外的各试验期均达到极显著水平，单施生物炭处理在分蘖期和拔节期对水稻根系干重的影响达到极显著水平，而在抽穗和成熟期则表现为差异不显著，互作处理在分蘖期和

抽穗期对水稻根系干重影响不显著，在拔节期和成熟期极显著增加了根系干重，说明互作效应存在但随生育期推进而无明显规律性。

根冠比是反映同化产物在水稻植株内部分配的重要指标。从图 1 可以看出，单因素和互作处理较对照在各试验期水稻根冠比均有所增加。在分蘖期，CN 处理根冠比显著高于其它 3 组处理，CK、NB 和 CB 处理间差异不显著。拔节期 CB 处理根冠比显著高于其它 3 组处理，CK、NB 和 CN 处理间差异不显著。抽穗期 4 组处理间差异均不显著。成熟期 NB 和 CN 处理根冠比显著高于 CK 和 CB 处理。互作处理在各试验期使水稻根冠比分别增加了 27.93%、27.15%、26.31%、17.36%，在分蘖期、抽穗期和成熟期的增幅依然低于单一因素处理。

表 3 高浓度 CO₂ 与添加生物炭对各试验期水稻根系干重的影响（g）

处理	分蘖期	拔节期	抽穗期	成熟期
Treatment	Tillering stage	Jointing stage	Heading stage	Mature stage
CK	0.79±0.27bc	2.01±0.06b	2.27±0.19c	6.52±0.79d
NB	1.32±0.06a	2.28±0.05b	2.40±0.32c	9.72±0.40c
CN	0.48±0.09c	2.20±0.18b	7.58±1.16a	19.36±1.05a
CB	1.11±0.14ab	3.53±0.34a	5.78±0.73b	14.93±1.50b
生物炭(B) Biochar	**	**	ns	ns
CO ₂	ns	**	**	**
CO ₂ ×B	ns	**	ns	**

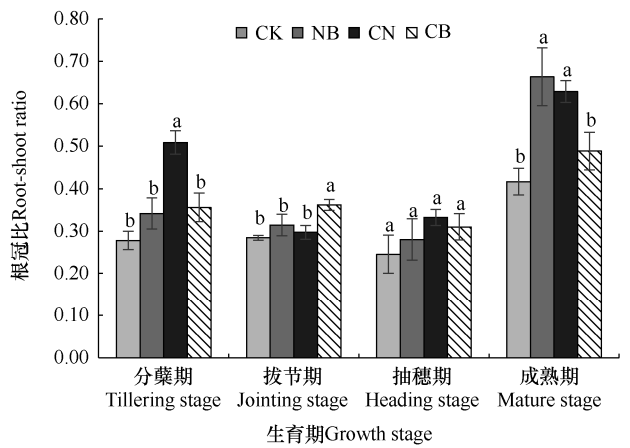


图 1 高浓度 CO₂ 和添加生物炭对各试验期水稻根冠比的影响
Fig.1 Effects of high concentration of CO₂ and biochar addition on the root-shoot ratio in each test periods of rice

2.2 两因素对水稻根系生理特性的交互影响

2.2.1 根系伤流强度

水稻根系伤流强度反映了植株根系活动能力的强弱。从图 2 可以看出，单一因素和互作处理在分蘖期均显著增加了水稻根系伤流强度，其中互作处理增幅最高，达到 148.10%。拔节期 CB 处理使水稻根系伤流强度增加了 34.21%，且显著高于其它 3 组处理。在抽穗期 4 组处理间差异不显著，NB 处理较 CK 增加了 8.71%，CN 处理较 CK 增加了 14.12%，CB 处理较 CK 增加了 6.13%。在成熟期互作处理仅高于对照，增幅为 40.43%。由此可见，水稻进入抽穗期后互作处理的水稻根系伤流强度均低于单一因素处理。

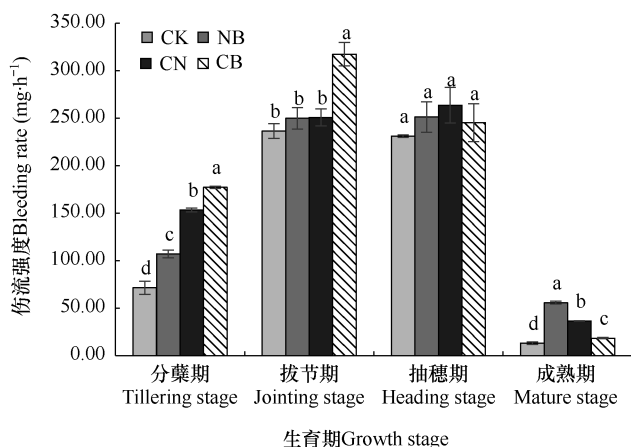


图 2 高浓度 CO_2 和添加生物炭对各试验期水稻根系伤流强度的影响

Fig.2 Effects of high concentration of CO_2 and biochar addition on root bleeding intensity in each test periods of rice

2.2.2 根系吸收面积

水稻根系活力与水稻对土壤中养分吸收及产量形成密切相关。由表 4、表 5 可看出, 单因素及互作处理水稻根系总吸收面积和活跃吸收面积相较对照均有不同程度增加。NB 处理水稻总吸收面积在成熟期前的各试验期高于 CK, 但差异不显著, 成

熟期显著高于 CK, 而活跃吸收面积在各试验期与 CK 相比差异均不显著。CN 处理在成熟期根系总吸收面积显著高于 CK, 在抽穗期根系活跃吸收面积显著高于 CK 和 NB 处理, 其它生育期两项指标与 CK、NB 间差异均不显著。CB 处理总吸收面积在各试验期较对照分别增加了 46.97%、48.99%、44.40%和 55.52%, 在分蘖期、抽穗期和成熟期显著高于 CK, 与单因素处理间差异不显著, CB 处理活跃吸收面积在各试验期较对照分别增加了 56.99%、108.35%、60.00%和 30.73%, 在拔节期显著高于其它 3 组处理, 其它生育期与单因素处理间差异不显著。方差分析表明, 单施生物炭处理对水稻根系总吸收面积的影响在成熟期达极显著水平, 对水稻根系活跃吸收面积的影响在分蘖期和拔节期达到显著水平。单独高浓度 CO_2 处理对水稻根系总吸收面积的影响在抽穗期达到显著水平, 在成熟期达到极显著水平, 对水稻根系活跃吸收面积的影响在拔节期达到显著水平, 在抽穗期达到极显著水平。互作处理仅在拔节期对水稻根系活跃吸收面积的影响达到显著水平, 说明互作效应降低了单一因素对水稻根系吸收面积的影响。

表 4 高浓度 CO_2 和添加生物炭对水稻各试验期根系总吸收面积的影响 (m^2)

Table 4 Effects of high concentration of CO_2 and biochar addition on the total absorption area of the root system in each test periods of rice(m^2)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
CK	0.16±0.03b	0.19±0.07a	0.66±0.09b	0.57±0.07b
NB	0.19±0.02ab	0.22±0.03a	0.73±0.14ab	0.77±0.02a
CN	0.18±0.02ab	0.20±0.05a	0.92±0.05ab	0.76±0.07a
CB	0.24±0.03a	0.28±0.08a	0.95±0.14a	0.89±0.07a
生物炭 Biochar	ns	ns	ns	**
CO_2	ns	ns	*	**
$\text{CO}_2 \times \text{Biochar}$	ns	ns	ns	ns

表 5 高浓度 CO_2 和添加生物炭对水稻各试验期根系活跃吸收面积的影响 (m^2)

Table 5 Effects of high concentration of CO_2 and biochar addition on the active absorption area of the root system in each test periods of rice(m^2)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
CK	0.06±0.00b	0.05±0.02b	0.20±0.05b	0.21±0.03a
NB	0.08±0.01ab	0.06±0.01b	0.24±0.02ab	0.23±0.03a
CN	0.07±0.01ab	0.06±0.01b	0.33±0.04a	0.26±0.03a
CB	0.09±0.01a	0.11±0.02a	0.32±0.04a	0.28±0.04a
生物炭 Biochar	*	*	ns	ns
CO_2	ns	*	**	ns
$\text{CO}_2 \times \text{Biochar}$	ns	*	ns	ns

2.3 两因素对水稻产量构成的交互影响

单一因素和互作处理后水稻每穴穗数、穗粒数和千粒重均有不同程度增加（表 6）。NB 处理每穴穗数、结实率和千粒重与 CK 相比差异不显著，显著增加了水稻的每穗粒数。CN 处理显著增加了水稻每穴穗数和每穗粒数，结实率和千粒重差异不大。CB 处理使水稻每穴穗数增加了 41.67%，每穗

粒数和千粒重增幅分别为 0.11%和 3.39%，使结实率降低了 8.42 个百分点，为 4 组处理中最低，但处理间差异不显著。方差分析表明，单一因素及互作处理对水稻每穗粒数的影响均达到极显著水平，对千粒重影响不显著，互作处理对水稻结实率的影响表现为负效应，说明不同处理对水稻产量的影响主要作用在对水稻每穗粒数指标上。

表 6 高浓度 CO₂ 和添加生物炭对水稻产量构成的影响
Table 6 Effects of high concentration of CO₂ and biochar addition on rice yield

处理 Treatment	每穴穗数 Panicles per hill	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)
CK	24.00±2.45c	149.50±4.49c	74.58±0.47a	21.43±0.46a
NB	25.00±0.00c	191.83±0.62a	76.37±1.72a	22.13±0.00a
CN	30.00±1.63b	163.67±1.25b	74.33±0.65a	21.60±0.51a
CB	34.00±0.82a	149.67±2.87c	66.16±1.91a	22.16±0.73a
生物炭(B) Biochar	*	**	*	ns
CO ₂	**	**	**	ns
CO ₂ ×B	ns	**	**	ns

3 结论与讨论

3.1 讨论

CO₂ 作为植物光合作用的底物，其浓度的增加理论上将影响作物原本的生长发育状态。多数研究表明，CO₂ 浓度增加对作物有积极影响，表现为提高了水稻的光合作用效率^[14]。本试验中关于水稻根系形态指标结果表明，除在分蘖期降低了根系干重外，高浓度 CO₂ 处理提高了各试验期水稻根系形态指标中的总根长、总根表面积及根冠比，这与李中阳等应用水培试验的研究结果相一致，该研究发现 CO₂ 浓度升高显著增加了水稻根冠比、根系生物量、幼苗根系总根长、表面积及细根比例^[15]。武慧彬等的研究结果也表明，CO₂ 浓度升高条件下水稻根长、密度、表面积和体积均有不同程度增加^[16]，可能是 CO₂ 浓度增加提升了水稻光合作用强度，使积累的有机物质向地下部传输更多进而促进了根系的生长。前人对 CO₂ 浓度增加条件下水稻根系生理特性的研究结果显示，高浓度 CO₂ 处理使不同生育时期单位干质量水稻根系的总吸收面积、活跃吸收面积等根系活性指标均小于对照^[17-19]，沙霖楠等的研究结果则表明，CO₂ 浓度升高增加了水稻根系总吸收面积和活跃吸收面积^[20]，出现结论不一致的原因可能是试验设置条件及数据处理方式不同所致。本试验结果显示，高浓度 CO₂ 处理下水稻根系伤流

强度及吸收面积均高于对照，这与 CO₂ 浓度升高处理对水稻根系形态指标的变化趋势一致。结合已有研究合理推断出如下结论，高 CO₂ 浓度影响糖类物质和各种激素之间形成综合效应导致植物根系形态发生变化，并且通过影响细胞分裂、伸长以及基因的表达等活动来影响根系的生长发育^[21]。

相关试验证明，生物炭能够积极协调土壤的水、肥、气、热，促进作物生长发育^[22]。胡茜等研究发现，生物炭配施化肥可以提高土壤的有机碳含量及碱解氮含量，对水稻生长具有明显的促进作用^[8]。亦有研究表明，生物炭对减轻盐胁迫对水稻幼苗的抑制作用起到了积极作用，促进水稻植株生长^[10]。本试验将生物炭作为肥料因子添加到水稻土壤中，探究其在大气 CO₂ 浓度升高的环境下对水稻根系及最终产量的影响，结果表明，单施生物炭处理增加了水稻根系的总根长、总根表面积、根系干重及根冠比，增加了水稻根系伤流强度及吸收面积，主要是因为施加生物炭后土壤孔隙度增加，有利于根系形态的生长，试验中施加生物炭后可以改善土壤理化性质，维持水稻根系生长的环境。

现有研究发现，在大气 CO₂ 浓度增加条件下，生物炭抑制土壤有机碳分解的作用将会减弱^[23]，并且降低了稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 排放^[24]，而目前有关二者互作对水稻的影响相关研究尚未见报道。本

试验中,从整个生育期来看,高浓度 CO_2 与生物炭互作对水稻根系形态指标和生理指标均表现为积极影响,通过与单一因素处理的对比可发现,互作处理对拔节期水稻总根表面积、根系干重、根冠比的增幅表现为 3 组处理中最高,分蘖期和拔节期根系伤流、总吸收面积及活跃吸收面积增幅最高,结合产量构成中互作处理后水稻每穴穗数增幅最高,可推论出互作处理促进了水稻分蘖-拔节期根系对土壤中养分的吸收转运能力,增加了水稻分蘖数,保证了后期每穴穗数的增长。

多数关于高浓度 CO_2 处理对水稻产量影响的相关研究表明,FACE 处理极显著提高了水稻产量^[25-26],杨连新在 10a 水稻 FACE 的产量响应中表示,光合作用增强是高 CO_2 条件下水稻增产的主要原因^[27]。大量研究证实,土壤中添加生物炭可提高作物产量^[6, 27-29]。本试验结果显示,高浓度 CO_2 处理显著增加了水稻每穴穗数和每穗粒数,降低了水稻结实率,提高了千粒重,但均未到达显著水平,单施生物炭处理显著增加了水稻每穗粒数,对每穴穗数、结实率和千粒重影响不显著,互作处理极显著增加了水稻的每穴穗数,对结实率的影响表现为负效应,对每穗粒数和千粒重的增加效应未达到显著水平,可能是由于高浓度 CO_2 处理促进了水稻生长,同时增加了水稻的空秕粒,导致结实率降低。限于盆栽试验条件和土壤中生物炭添加量的多少等因素影响,对水稻根系与产量的长期效应还需进一步试验研究,并对其作用机制等科学问题进一步探索讨论。

3.2 结论

(1) 与大气 CO_2 浓度不添加生物炭的对照组相比,单独高浓度 CO_2 和单施生物炭处理对水稻根系形态及生理特征均表现为增加效应,且二者增幅基本一致,高浓度 CO_2 和添加生物炭对水稻根系总根长及总根表面积的互作效应均达到极显著水平,互作效应对拔节期和分蘖期水稻根系干重的影响达极显著水平,并维持了较高根冠比,提高了各试验期水稻根系伤流强度,对吸收面积的影响不显著;

(2) 方差分析表明,单一因素及互作处理对水稻产量构成中每穗粒数的影响均达到极显著水平,对千粒重的影响不显著,高浓度 CO_2 处理降低了水稻结实率。相比单一因素处理,高浓度 CO_2 和添加生物炭对水稻根系生理功能的互作效应并不显著,

未来应加强其作用机制及对水稻地上部分的影响等相关问题的试验研究。

参考文献 References

- [1] IPCC.Climate change(2013):the scientific basis,contribution of working group- I to the fifth assessment report of intergovernmental panel on climate change(IPCC)[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.
- [2] Terrer C,Vicca S,Hungate B A,et al.Mycorrhizal association as a primary control of the CO_2 fertilization effect[J]. Science,2016,353 (6294):72-74.
- [3] 徐明怡,倪红伟. CO_2 浓度升高对植物光合作用的影响[J].国土与自然资源研究,2016(2):83-86.
Xu M Y,Ni H W.Response of photosynthesis to elevated atmospheric CO_2 [J].Territory & Natural Resources Study, 2016(2):83-86.(in Chinese)
- [4] 刘杨杨,李俊,于强,等.甘蔗叶片光合 CO_2 响应参数分析及其品种间差异[J].中国农业气象,2019,40(10):637-646.
Liu Y Y,Li J,Yu Q,et al.Sugarcane leaf photosynthetic CO_2 responses parameters and their difference among varieties[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(10):637-646. (in Chinese)
- [5] 梁媛,李飞跃,杨帆,等.含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J].农业环境科学学报,2013, 32(12):2377-2383.
Liang Y,Li F Y,Yang F,et al.Immobilization and its mechanisms of heavy metal contaminated soils by phosphate-containing amendment and biochar[J].Journal of Agro- Environment Science,2013,32(12):2377-2383.(in Chinese)
- [6] Hale S E,Nurida N L,Jubaedah,et al.The effect of biochar,lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics[J].Science of The Total Environment,2020,719.
- [7] 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.(in Chinese)
- [8] 胡茜,赵远,张玉虎,等.生物炭配施化肥对稻田土壤有效氮素以及水稻产量的影响[J].江苏农业科学,2019,47(15):108-

112.
Hu Q,Zhao Y,Zhang Y H,et al.Effects of biochar blended with chemical fertilizer on available nitrogen in paddy soil and yield of rice[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2019,47(15): 108-112.(in Chinese)
- [9] Zhang J H,Bai Z G,Huang J,et al.Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance[J].Soil & Tillage Research,2019,195.DOI: 10.1016/j.still.2019.104372.
- [10] 高悦,张爱平,杜章留,等.优化施氮条件下添加生物炭对宁夏灌区土壤条件和水稻生长的影响[J].中国农业气象,2019,40(5):327-336.
Gao Y,Zhang A P,Du Z L,et al.Effects of biochar on soil conditions and rice growth in Ningxia irrigated area under optimized nitrogen application conditions[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(5):327-336.(in Chinese)
- [11] 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.(in Chinese)
- [12] 高继平,隋阳辉,张文忠,等.生物炭对水稻秧苗生长及内源激素的影响[J].沈阳农业大学学报,2017,48(2):145-151.
Gao J P,Sui Y H,Zhang W Z,et al.Effects of biochar on seedling growth and endogenous hormone of rice[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2017,48(2):145-151. (in Chinese)
- [13] 张秀红,孙嘉琳,孙璐.生物炭对直播水稻生长发育的影响研究进展[J].农业与技术,2018,38(8):39.
Zhang X H,Sun J L,Sun L.Research progress on the effect of biochar on the growth and development of direct seeding rice[J].Agriculture and Technology,2018,38(8):39.(in Chinese)
- [14] 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.(in Chinese)
- [15] 李中阳,宋正国,樊向阳,等.CO₂ 浓度升高对不同水稻品种幼苗养分吸收和根系形态的影响[J].植物营养与肥科学报,2013,19(1):20-25.
Li Z Y,Song Z G,Fan X Y,et al.Effects of elevated CO₂ on nutrient element uptakes and root morphology of different rice varieties[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013,19(1):20-25.(in Chinese)
- [16] 武慧斌,宋正国,沈跃,等.水稻根系生长发育对 CO₂ 浓度升高的响应及其品种间的差异[J].生态环境学报,2014, 23(3):439-443.
Wu H B,Song Z G,Shen Y,et al.Response of root development on elevated CO₂ and its variation among different rice varieties[J].Ecology and Environmental Sciences,2014,23(3):439-443.(in Chinese)
- [17] 牛耀芳,宗晓波,都韶婷,等.大气 CO₂ 浓度升高对植物根系形态的影响及其调控机理[J].植物营养与肥科学报,2011, 17(1):240-246.
Niu Y F,Zong X B,Du S T,et al.Effect of elevated CO₂ on morphology change of plant roots and its regulatory mechanism[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011,17(1):240-246.(in Chinese)
- [18] 杨洪建,杨连新,刘红江,等.FACE 对水稻根系及产量的影响[J].作物学报,2005(9):1221-1226.
Yang H J,Yang L X,Liu H J,et al.Effects of Free-air CO₂ enrichment on root system and yield in rice (*Oryza sativa* L.)[J].Acta Agronomica Sinica,2005(9):1221-1226.(in Chinese)
- [19] 刘红江,杨连新,黄建晔,等.FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 根系活性影响的研究[J].农业环境科学学报,2009,28(1): 15-20.
Liu H J,Yang L X,Huang J Y,et al.Effect of Free Air CO₂ enrichment on root activity of Indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Shanyou 63[J].Journal of Agro-Environment Science,2009,28(1):15-20.(in Chinese)
- [20] 沙霖楠.CO₂ 浓度和温度升高对水稻根系生长的影响[D].南京:南京林业大学,2015.
Sha L N.Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on the growth of rice root[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University,2015.(in Chinese)
- [21] 陈改革,朱建国,庞静,等.CO₂ 浓度升高对水稻抽穗期根系有关性状及根碳氮比的影响[J].中国水稻科学,2006(1):53-57.
Chen G P,Zhu J G,Pang J,et al.Effects of Free-Air carbon dioxide enrichment (FACE) on Some traits and C/N ratio of

- rice root at the heading stage[J].Chinese Journal of Rice Science,2006(1):53-57.(in Chinese)
- [22] 田阿林,雷涛,邹应斌,等.施用生物炭对水稻生长生理特性及产量的影响[J].中国稻米,2018,24(3):25-29.
- Tian A L,Lei T,Zou Y B,et al.Effects of biochar addition on growth and physiological characteristics and yield of rice[J].China Rice,2018,24(3):25-29.(in Chinese)
- [23] Pei J M,Dijkstra F A,Li J Q,et al.Biochar-induced reductions in the rhizosphere priming effect are weaker under elevated CO₂[J].Soil Biology and Biochemistry,2020,142.DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.107700.
- [24] 孙雪.气温与大气 CO₂ 浓度升高下生物质炭输入对稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[D].杭州:浙江大学,2019.
- Sun X.Effect of biochar on CH₄ and N₂O emissions from paddy soil under elevated air temperature and atmospheric CO₂ concentration[D].Hangzhou:Zhejiang University,2019. (in Chinese)
- [25] Kumar A,Nayak A K,Das B S,et al.Effects of water deficit stress on agronomic and physiological responses of rice and greenhouse gas emission from rice soil under elevated atmospheric CO₂[J].Science of the Total Environment, 2019,650:2032-2050.
- [26] 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.(in Chinese)
- [27] 杨连新,王云霞,朱建国,等.十年水稻 FACE 研究的产量响应[J].生态学报,2009,29(3):1486-1497.
- Yang L X,Wang Y X,Zhu J G,et al.What have we learned from 10 years of Free Air CO₂ Enrichment (FACE) experiments on rice CO₂ and grain yield[J].Acta Ecologica Sinica,2009,29(3):1486-1497.(in Chinese)
- [28] Chew J,Zhu L L,Nielsen S,et al.Biochar-based fertilizer:supercharging root membrane potential and biomass yield of rice[J].Science of the Total Environment, 2020,713.
- [29] 荣飞龙,蔡正午,覃莎莎,等.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[J].生态学报,2020,40(13):4413-4424.
- Rong F L,Cai Z W,Qin S S,et al.Effects of biochar on growth and yield of rice in an acidic paddy field: findings from a five-year field trial[J].Acta Ecologica Sinica,2020, 40(13):4413-4424.(in Chinese)