

网络出版时间: 2025-12-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251218.1021.002>

生物炭施用年限对春小麦生长及产量的影响

李欣瑞¹, 杨卫君¹, 冶晓花¹, 李茹雪², 王梓¹, 张力月¹, 席宁居¹, 张书芳¹, 赵立宁¹

(1. 新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆维吾尔自治区林业科学院林草资源研究中心/

国家林草种质资源设施保存库新疆分库, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为探讨生物炭施用年限对春小麦生长以及产量的影响, 采用随机区组试验, 以新春 37 为材料, 设置 2 个施氮处理(不施氮肥和施氮 $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 及 3 个施用生物炭处理(不施生物炭、生物炭施用 1 年和生物炭施用 5 年, 施用量 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 分析了不同处理下春小麦光合指标、叶绿素相对含量、干物质积累与转运、籽粒灌浆动态和产量及其构成因素的差异。结果表明, 与不施生物炭相比, 生物炭单施或与氮肥配施条件下, 生物炭施用 1 年和 5 年均显著提高春小麦净光合速率, 促进了各生育时期茎、叶、穗的干物质积累以及成熟期干物质向籽粒中的分配, 增加籽粒产量, 且生物炭施用 5 年的各方面效果总体优于生物炭施用 1 年; 其中, 生物炭施用 5 年配施氮肥处理的产量达到 $7\,508.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与不施氮肥和生物炭处理相比增加 37.56%。通过正交偏最小二乘判别分析, 不同生物炭施用年限间在单施或配施氮肥条件下, 春小麦净光合速率、有效穗数、产量间均差异显著。综上, 施用生物炭可以有效促进春小麦生长和增产, 且施用年限越长, 促进效果越明显。

关键词: 生物炭; 施用年限; 春小麦

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0500-11

Influence of Biochar Application Duration on the Growth and Yield of Spring Wheat

LI Xinrui¹, YANG Weijun¹, YE Xiaohua¹, LI Ruxue², WANG Zi¹,
ZHANG Liyue¹, XI Ningju¹, ZHANG Shufang¹, ZHAO Lining¹

(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. The Forest and Grass Resources Research Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region Forestry Science Academy/Xinjiang Branch of the National Forest and Grass Genetic Resources Facility Preservation Center, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To investigate the effects of biochar application duration on the growth and yield of spring wheat, a randomized block design experiment was conducted using the cultivar Xinchun 37 as material. Two nitrogen treatments (no nitrogen and $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and three biochar treatments (no biochar, one-year biochar application, and five-years biochar application, with an application rate of $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) were set up. Differences in photosynthetic parameters, relative chlorophyll content, dry matter accumulation and translocation, grain filling dynamics, yield, and yield components of spring wheat under different treatments were analyzed. The results showed that compared with no biochar application, both sole biochar application and biochar combined with nitrogen fertilizer significantly increased the net photosynthetic rate of spring wheat after 1- and 5-year biochar application, promoted the accumulation of dry matter in stems, leaves, and spikes at all growth stages, and enhanced the al-

收稿日期: 2024-07-14

修回日期: 2025-08-27

基金项目: 自治区天山英才-青年拔尖人才项目(2023TSYCCX0085); 国家自然科学基金项目(32260326); 新疆现代农业(小麦)产业技术体系项目(XJARS-01)

第一作者 E-mail: lixinrui20010820@163.com (李欣瑞)

通讯作者 E-mail: 1984_ywj@163.com (杨卫君)

location of dry matter to grains at maturity, thereby increasing grain yield. Overall, the effects of 5-year biochar application were better than those of 1-year. Specifically, the yield under the treatment of 5-year biochar combined with nitrogen fertilizer reached $7\,508.91\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 37.56% higher compared to the treatment without nitrogen fertilizer or biochar. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis revealed significant differences in net photosynthetic rate, effective panicle number, and yield of spring wheat under different biochar application durations, whether applied alone or combined with nitrogen. In conclusion, biochar application can effectively promote the growth and yield of spring wheat, and the longer the application duration, the more pronounced the promoting effect.

Keywords: Biochar; Application duration; Spring wheat

生物炭是由生物质在缺氧或厌氧环境下高温裂解而生成的固体物质,其比表面积大,含有丰富的官能团,能有效提高土壤养分吸持及持水能力^[1]。生物炭因其特殊的理化性质和较高的农业利用价值受到国内外研究者广泛的关注和应用。近年来,生物炭的应用涵盖了从土壤改良、农业生产、碳管理等多个方面,在推动农业可持续发展方面展现出巨大的价值^[2]。大量研究表明,在农田中,施用生物炭可以促进作物根系发育和光合作用,减少逆境胁迫影响,提高作物产量^[3-5]。但这些研究往往集中在生物炭施用1~3年的短期效应上,仅有少量研究报道了施用生物炭多年后对作物的影响^[6]。然而,通过整合分析,相比于短期施入,生物炭长期施入对作物增产效果更为显著^[7]。生物炭本身是一个连续体,施入土壤后其表面官能团、物理结构等会因为老化效应发生改变,进而导致其对土壤及作物的影响随施用时间而变化^[8-9]。研究发现,玉米产量在施用生物炭第一年后没有变化,但在接下来的三年中有所增加^[10]。随着施用年限的延长,生物炭对作物生长是否具有不同的效应值得关注。目前,生物炭施用对作物的影响研究大多通过短期试验进行,其对作物的长期效应仍需进一步探讨,特别是在不同气候和土壤条件下的表现^[11]。北疆灌区作为典型的绿洲灌溉农业,具有较强的粮食生产潜力,但随着该地区生产水平的提高,土壤肥力偏低、土地退化威胁农业可持续发展、作物产量不稳定等问题日益突显^[12]。适量施入生物炭可以有效提高作物产量,在低肥力土壤中生物炭增产效应可能更为明显^[13]。然而,在贫瘠低肥力地区施用生物炭对作物生长及产量的长期影响尚未得到充分研究。

基于以上现状,本研究依托前期生物炭田间定位试验平台,系统比较分析生物炭不同施用年

限后春小麦生长、光合及产量的变化,探讨生物炭施用对作物生长的长期与短期效应差异,以期为北疆灌区农田生物炭的科学、长期施用策略提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于新疆奇台麦类试验站($89^{\circ}13' \sim 91^{\circ}22' \text{E}$, $42^{\circ}25' \sim 45^{\circ}29' \text{N}$)进行。该地区海拔高度 895 m,属中温带大陆性气候区。试验期降水及温度见图 1。试验田土壤为壤质灰漠土,耕层土壤 pH 值为 8.50,全氮、全磷和全钾含量分别为 0.97、1.09、25.66 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机碳与有机质含量分别为 9.19 和 15.85 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾和有效磷含量分别为 10.50 和 31.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

供试生物炭是以玉米秸秆为原料制备的,由辽宁金和福农业科技股份有限公司提供。该生物炭的 pH 值为 9.37,全氮、全磷、全钾含量分别为 21.76、10.58 和 21.45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮和速效磷含量分别为 5.38 和 200.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试氮肥为尿素($\text{N} \geq 46\%$)。

1.3 试验设计

试验采用二因素随机区组设计。其中,氮肥设 2 个处理:不施氮(N0)、施氮 255 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1);生物炭设 3 个处理:不施生物炭(B0)、生物炭施用 1 年(FB) (2024 年一次性施用)、生物炭施用 5 年(AB) (2020 年一次性施用),生物炭施用量均为 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理设 3 个重复。供试春小麦品种为新春 37,种植密度为 450×10^4 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,等行距(0.2 m)条播,小区面积为 9 m^2 (3 m $\times$ 3 m)。生物炭均作为底肥翻施至 30 cm 土层中;氮肥以 5:5 比例分别基施和追施,追施部分于

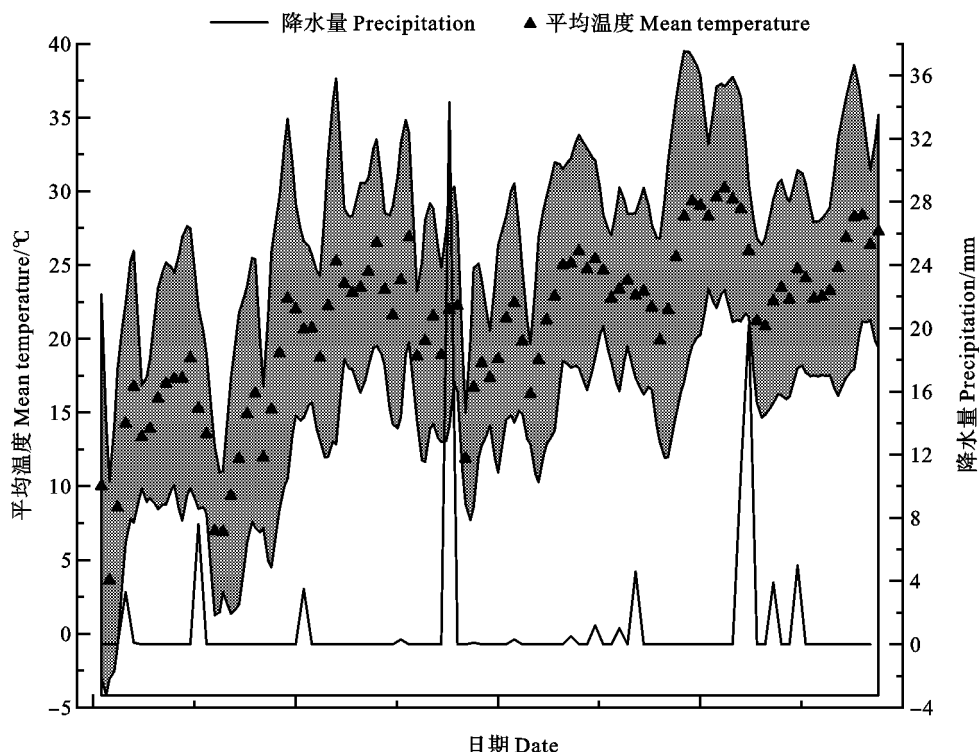


图 1 2024 年 4 月 12 日到 7 月 18 日平均温度和降水量

Fig. 1 Average temperature and precipitation from April 12 to July 18 in 2024

拔节期与孕穗期以 6:4 比例进行追施。取样时间为 2024 年 4—8 月份。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 旗叶光合参数和 SPAD 值测定

从春小麦开花后 5 d 开始,在晴朗无风的上午 10:00—12:00,选择具代表性的春小麦 5 株,采用光合仪 (Li-6400, 美国) 测定旗叶光合参数 (净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度);同时采用叶绿素仪 (SPAD-502) 测定春小麦旗叶上、中、下三个部位的 SPAD 值,取平均值作为旗叶最终值;每 5 d 测定 1 次,共测 3 次。

1.4.2 干物质积累及转运参数测定与计算

分别在春小麦拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期,各小区采集 5 株代表性植株的地上部分。拔节和孕穗期植株样品按茎秆、叶片分开,开花和灌浆期植株样品按茎秆、叶片、穗分开,成熟期植株样品按茎秆、叶片、穗轴和颖壳、籽粒分开,各部分样品装入信封袋中,杀青 30 min 后 80 °C 烘干至恒重,称重。参照下列公式计算春小麦干物质积累与转运参数^[14]:

$$A = W_a - W_m \quad (1)$$

$$E = A / W_a \times 100\% \quad (2)$$

$$C_a = A / W_g \times 100\% \quad (3)$$

$$P = W_g - A \quad (4)$$

$$C_p = P / W_g \times 100\% \quad (5)$$

式中, A 表示花前干物质物转运量; W_a 表示开花期营养器官干重, W_m 表示成熟期营养器官干重; E 表示花前干物质转运效率; C_a 表示花前干物质对籽粒产量贡献率; W_g 表示成熟期籽粒干重; P 表示花后干物质积累量; C_p 表示花后干物质对籽粒产量贡献率。

1.4.3 籽粒灌浆速率测定

在春小麦开花期开始每小区选择具代表性、长势一致的 100 株春小麦进行标记。从开花期开始,每小区取 5 个标记主穗,于每穗中部取籽粒 10 粒放入信封袋中,杀青 30 min 后 80 °C 烘干至恒重并称重。每 5 d 测定 1 次,共计 7 次。

1.4.4 产量及其构成因素测定

于春小麦成熟期,选取具代表性的春小麦 10 株考种,调查穗粒数。每个小区选取 1 m^2 区域,测定有效穗数。按小区收获后测定总籽粒重和千粒重。

1.5 数据处理

数据采用 Excel 2019、DPSV9.01 进行统计分析,用 Origin 2021 制图。基于 SIMCA 14.1 平台构建正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 模

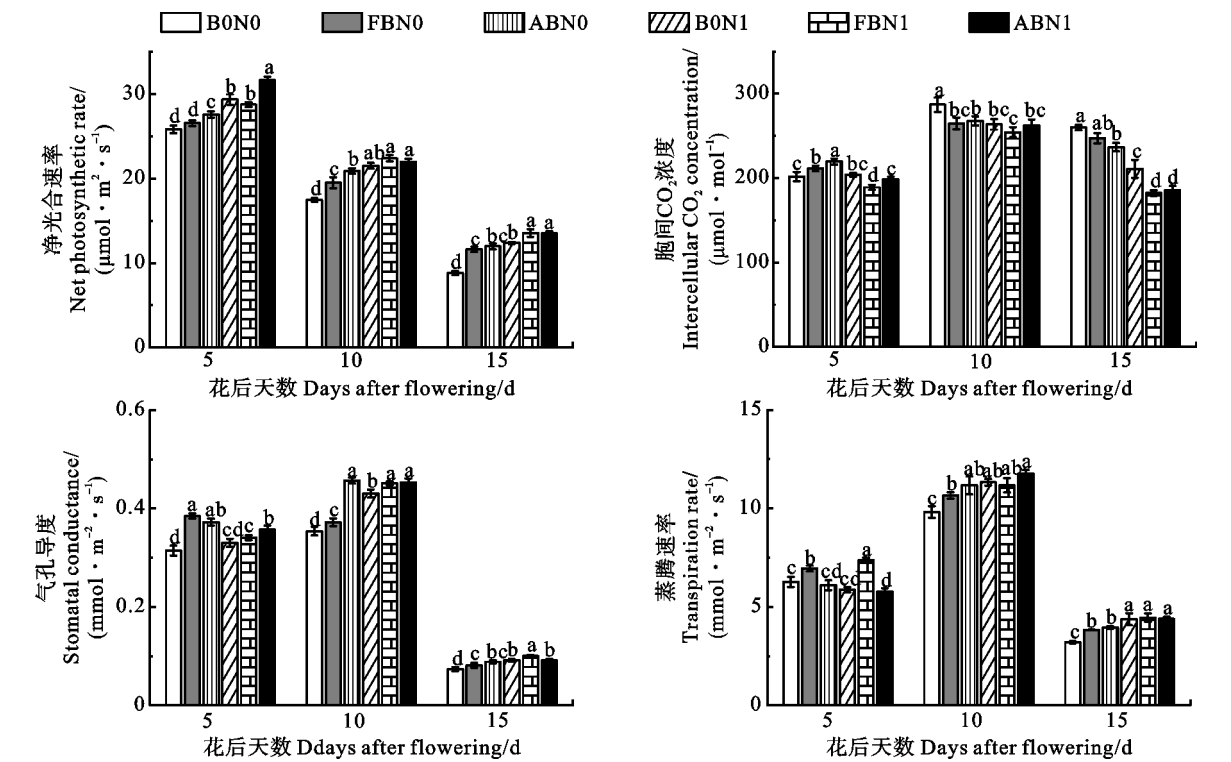
型并计算变量 VIP(变量重要性投影)值。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用年限对春小麦光合参数的影响

不同处理下春小麦旗叶净光合速率在花后 5~15 d 期间呈下降趋势,气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度则呈先上升后下趋势(图 2)。同一施氮水平下,与 B0(不施生物炭)相比,生物炭施用 1 年和 5 年后春小麦花后各时段的旗叶净光合速率总体上均不同程度提高,尤其是在不施氮(N0)时效果较明显,且生物炭施用 5 年的效果优于生物

炭施用 1 年。生物炭施用除花后 5 d 在不施氮条件下对胞间 CO₂ 浓度表现出增进效应外,其他条件下各时段均表现为降低效应。花后各时段内(花后 5 d 除外)与 B0 相比,同一施氮水平下,不同施用年限生物炭均可降低春小麦。生物炭施用 1 年和 5 年对春小麦花后各时段气孔导度和蒸腾速率的影响规律与净光合速率相近,总体上表现为促进效应,也是在 N0 条件下表现较明显,且生物炭施用 5 年的效果较佳。由此可见,生物炭施用有助于改善春小麦光合特性,且施用时间越长,效果越佳。



B0:不施生物炭;FB:施用生物炭 1 年;AB:施用生物炭 5 年;N0:不施氮;N1:施氮。图柱上不同字母表示同一测定时间不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同。

B0: No biochar; FB: Biochar applied for 1 year; AB: Biochar applied for 5 years; N0: No nitrogen N1: Nitrogen applied. Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments at the same measuring stages at 0.05 level. The same in figures 3—6.

图 2 春小麦旗叶光合参数

Fig. 2 Photosynthetic parameters of flag leaves of spring wheat

2.2 生物炭施用年限对春小麦旗叶 SPAD 值的影响

春小麦旗叶 SPAD 值随着花后天数的推移整体上呈先上升后下降趋势(表 1)。在花后同一时期,同一施氮水平下生物炭施用后春小麦旗叶 SPAD 值较 B0 均不同程度提高。其中,在 N0 条件下,生物炭施用 1 年和 5 年的 SPAD 值与 B0

差异均显著;在 N1 条件下,只有生物炭施用 5 年的结果在花后 5 和 20 d 与 B0 差异显著;总体上生物炭施用 5 年的效果优于生物炭施用 1 年。与 B0N0 处理相比,其他处理的 SPAD 值均显著提高,尤其是氮肥与生物炭配施的效果最明显。这表明,施用生物炭和氮肥均有助于春小麦叶片在花后保持较高的叶绿素含量,有助于光合和产量形成。

表 1 春小麦旗叶 SPAD 值
Table 1 SPAD value of flag leaves of spring wheat

处理 Treatment	花后天数 Days after anthesis/d			
	5	10	15	20
B0N0	49.37±0.70d	50.93±0.17c	48.40±1.85b	45.40±0.22d
FBN0	52.83±0.12c	54.40±0.37b	52.57±0.21a	48.77±0.41bc
ABN0	53.47±1.21c	56.83±0.21a	52.77±0.46a	48.03±0.31c
B0N1	57.37±0.48b	57.20±0.80a	52.73±0.61a	48.87±0.87bc
FBN1	58.60±0.22ab	57.60±0.85a	53.67±0.69a	50.17±0.99b
ABN1	58.97±0.50a	57.57±0.34a	53.57±0.61a	51.77±0.94a

B0:不施生物炭;FB:施用生物炭 1 年;AB:施用生物炭 5 年;N0:不施氮;N1:施氮。同列数值后不同字母表示同一测定时间不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。
B0: No biochar; FB: Biochar applied for 1 year; AB: Biochar applied for 5 years; N0: No nitrogen N1: Nitrogen applied. Different letters following data within the same columns indicate significant differences among different treatments at the same measuring stages at 0.05 level. The same in tables 2–4.

2.3 生物炭施用年限对春小麦干物质积累和转运的影响

同一施氮水平下,与 B0 相比,生物炭施用 1 年和 5 年后春小麦茎、叶、穗的干物质积累量均不同程度提高(图 3),其中叶片增幅分别为 2.6%~13.2%和 4.5%~18.0%,穗增幅分别为 6.7%~9.3%和 2.6%~8.4%。在春小麦成熟期,在两个施氮水平下,生物炭施用 1 年和 5 年后单株籽粒干重均显著提高,且生物炭施用 5 年的数值更高,其中在 N0 条件下,生物炭施用 1 年和 5 年间差异显著(图 4)。这说明施用生物炭可促进春小麦干物质在不同器官中的积累,显著提高植株生

产能力,且以生物炭施用 5 年效果较佳。
生物炭单施或与氮肥配施均能提高春小麦花前干物质转运量、转运效率及其对籽粒产量的贡献率,增加花后干物质积累量,其中在 N0 条件下仅生物炭施用 5 年的花后干物质积累量与 B0 差异显著,而在 N1 条件下生物炭施用 1 年和 5 年对花前干物质转运量、转运效率及其对籽粒产量的贡献率均与 B0 差异显著,但降低了花后干物质对籽粒产量的贡献率,各指标在两个年限间差异均不显著(表 2)。这说明施用生物炭可促进花前干物质转运和花后干物质的积累。

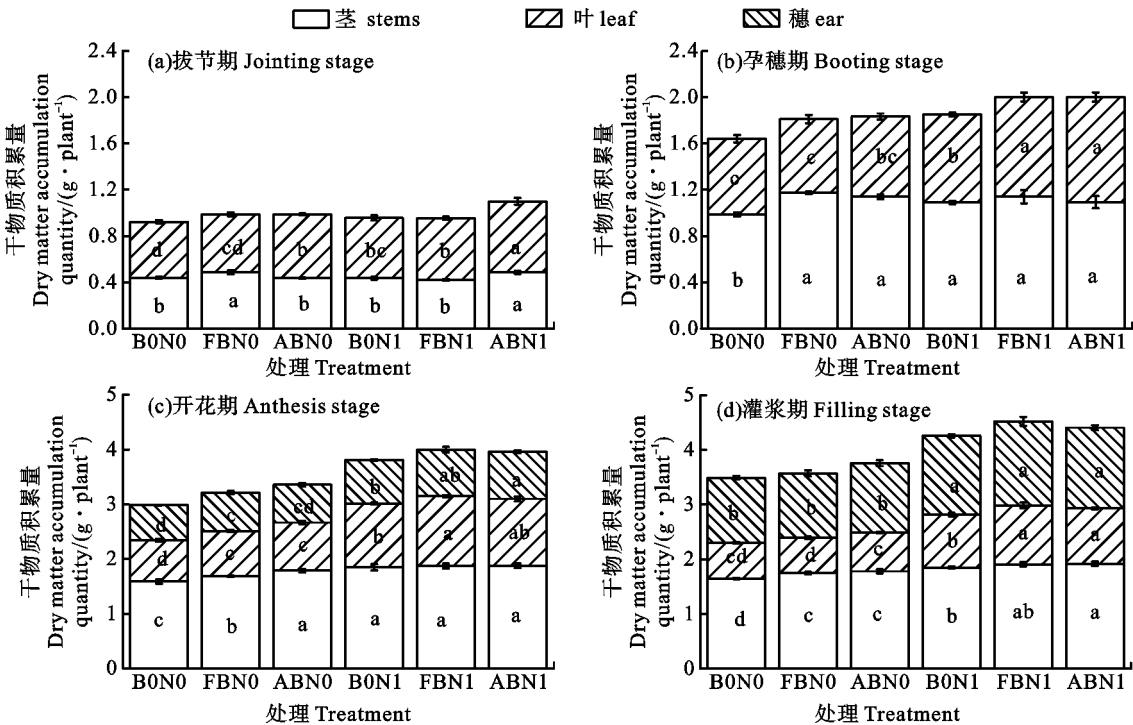


图 3 春小麦各生育时期干物质积累量
Fig. 3 Accumulation of dry matter at each growth stage of spring wheat

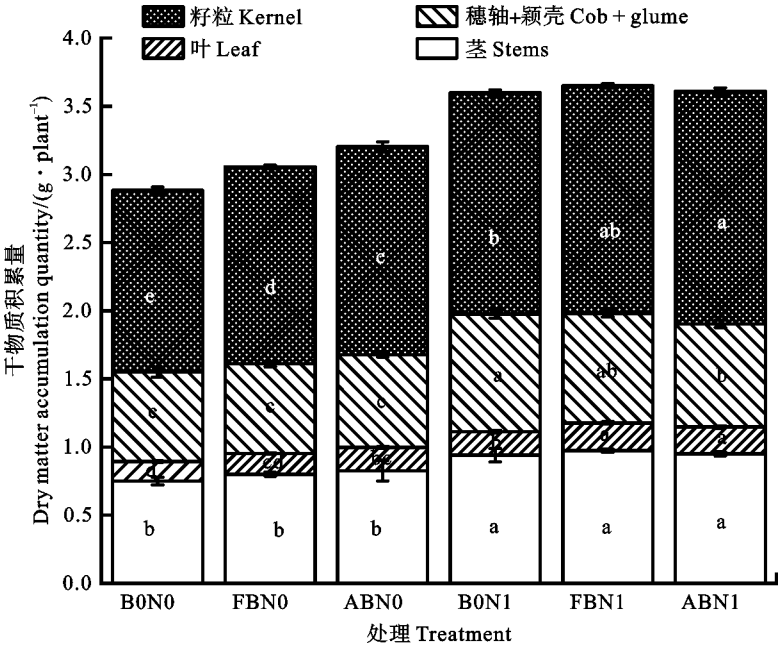


图 4 春小麦成熟期干物质干物质积累量

Fig. 4 Dry matter accumulation at the maturity stage of spring wheat

表 2 春小麦花前和花后干物质转运(积累)及其对籽粒产量贡献率

处理 Treatment	花前同化物 Assimilates before anthesis			花后同化物 Assimilates after anthesis	
	转运量 Translocation/ (g · stem ⁻¹)	转运效率 Transport efficiency/%	贡献率 Contribution rate/%	积累 Accumulation/ (g · stem ⁻¹)	贡献率 Contribution rate/%
B0N0	0.10±0.01c	3.47±0.44b	7.75±0.91b	1.23±0.02b	92.25±0.91a
FBN0	0.16±0.06bc	4.87±1.82b	10.86±4.19b	1.29±0.07ab	89.14±4.19a
ABN0	0.15±0.05bc	4.53±1.48b	10.13±3.74b	1.37±0.09a	89.87±3.74a
B0N1	0.21±0.05b	5.51±1.33b	12.98±3.29b	1.41±0.07a	87.02±3.29a
FBN1	0.35±0.05a	8.65±1.20a	20.76±3.28a	1.32±0.06ab	79.24±3.28b
ABN1	0.35±0.5a	8.84±0.88a	20.53±2.10a	1.36±0.05a	79.47±2.10b

2.4 生物炭施用年限对春小麦籽粒灌浆的影响

不同处理下 Logistic 方程的决定系数(R^2)均高于 0.98,说明利用此方程可较好地拟合春小麦籽粒灌浆动态。在 N0 条件下,与 B0 相比,生物炭施用 1 年和 5 年后籽粒干物质积累量、籽粒快速灌浆阶段持续天数均提高,但籽粒最大灌浆速率降低。而在 N1 条件下,与 B0 相比,生物炭施用 1 年后籽粒最大灌浆速率提高了 5.8%,籽粒快速灌浆阶段天数降低 4.4%;生物炭施用 5 年后籽粒最大灌浆速率下降 1.7%,籽粒快速灌浆阶段持续天数上升 2.8%;两个生物炭施用年限下籽粒干物质积累量均提升。由此可见,生物炭施用可通过提高籽粒最大灌浆速率或快速灌浆

阶段持续天数促进春小麦籽粒灌浆。

2.5 生物炭施用年限对春小麦产量的影响

氮肥和生物炭施用均可提高春小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量。在同一施氮水平下,生物炭施用 1 年 5 年后产量及其构成因素均不同程度增加,其中 N0 条件下,施用生物炭的效果较 N1 条件下明显,尤其是生物炭施用 5 年的效果最显著,而在 N1 条件下施用生物炭对穗粒数和千粒重影响不显著。由此可见,生物炭施用对春小麦的增产作用在 N0 条件下主要通过产量构成三个因素的协同提高来实现,而在 N1 条件下主要归因于穗数的增加。在所有处理中,ABN1 处理的春小麦产量最高,较 B0N0 处理增加 37.56%。

表 3 春小麦籽粒灌浆特性参数
Table 3 Characteristic parameters of grain filling in spring wheat

处理 Treatment	拟合方程 Fitting equation	W_m	t_0/d	t_1/d	t_2/d	Δ_t	$V_m/$ ($g \cdot d^{-1} \cdot stem^{-1}$)	R^2
N0B0	$y = 49.9336/[1 + e^{(2.5308 - 0.220798x)}]$	49.93	11.46	5.50	17.43	11.93	2.76	0.994
N0FB	$y = 51.7360/[1 + e^{(2.1883 - 0.188318x)}]$	51.74	11.62	4.63	18.61	13.99	2.44	0.984
N0AB	$y = 51.4703/[1 + e^{(1.9707 - 0.185685x)}]$	51.47	10.61	3.52	17.71	14.18	2.39	0.991
N1B0	$y = 48.9104/[1 + e^{(2.5119 - 0.170150x)}]$	48.91	14.76	7.02	22.50	15.48	2.08	0.990
N1FB	$y = 49.4525/[1 + e^{(2.4360 - 0.178026x)}]$	49.45	13.68	6.29	21.08	14.80	2.20	0.994
N0AB	$y = 49.3985/[1 + e^{(2.4090 - 0.16554x)}]$	49.40	14.55	6.60	22.51	15.91	2.04	0.996

W_m : 籽粒干物质积累量; x : 播种后天数; t_0 : 最大灌浆速率出现的时间; t_1 、 t_2 分别为 Logistic 方程生长函数的两个拐点; Δ_t : 籽粒快速灌浆阶段持续天数; V_m : 籽粒最大灌浆速率。
 W_m : Grain dry matter accumulation; x : Days after sowing; t_0 : Time of maximum grain filling rate; t_1 and t_2 are the two inflection points of the logistic equation growth function; Δ_t : Duration of rapid grain filling; V_m : Maximum grain filling rate.

表 4 春小麦产量及其构成因素
Table 4 Spring wheat yield and its components

处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot hm^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/ ($kg \cdot hm^{-2}$)
B0N0	429.67 $\pm$ 2.05e	32.67 $\pm$ 0.57c	45.76 $\pm$ 0.42b	5 458.63 $\pm$ 84.83e
FBN0	426.67 $\pm$ 2.49e	33.93 $\pm$ 0.23b	47.09 $\pm$ 0.34a	5 794.51 $\pm$ 31.43d
ABN0	449.67 $\pm$ 3.40d	34.93 $\pm$ 0.32a	47.56 $\pm$ 0.31a	63 50.86 $\pm$ 106.71c
B0N1	483.33 $\pm$ 5.25c	35.33 $\pm$ 0.64a	46.96 $\pm$ 0.54a	6 816.56 $\pm$ 161.22b
FBN1	507.67 $\pm$ 6.18b	35.63 $\pm$ 0.42a	47.34 $\pm$ 0.57a	7 278.73 $\pm$ 143.54a
ABN1	522.00 $\pm$ 5.10a	35.70 $\pm$ 0.72a	47.41 $\pm$ 0.72a	7 508.91 $\pm$ 199.79a

2.6 基于不同生物炭施用年限的春小麦农艺性状及产量 OPLS-DA 分析

由图 5 可知,在两个施氮水平下,生物炭施用 1 年和 5 年的数据分别均匀分布在横轴左半侧和右半侧。相同处理重复性良好,说明生物炭不同施用年限下处理间春小麦性状存在着一定差异。

结合图 6 来看,不同生物炭施用年限间,在 N0 条件下春小麦净光合速率、穗粒数、穗数、产量均存在显著差异(VIP>1),而在 N1 条件下净光合速率、穗数、产量均存在显著差异。这说明生物炭施用年限主要影响春小麦净光合速率、穗数、产量。

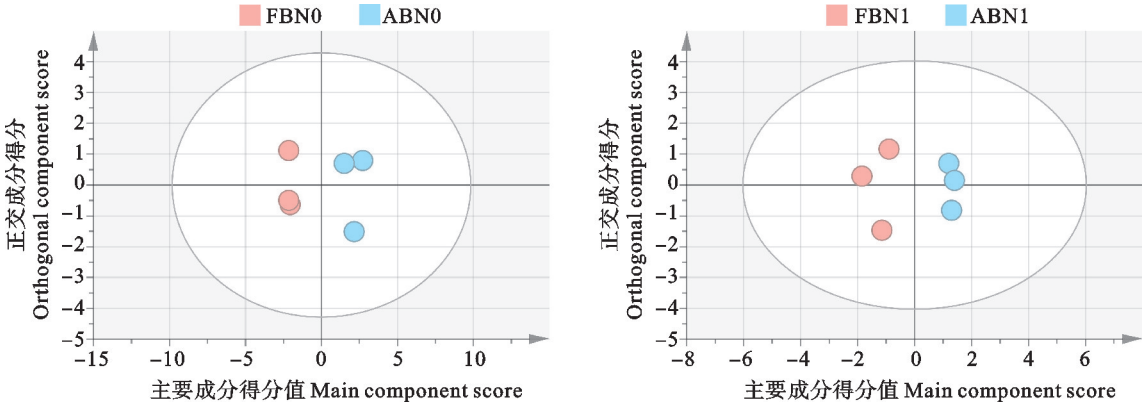
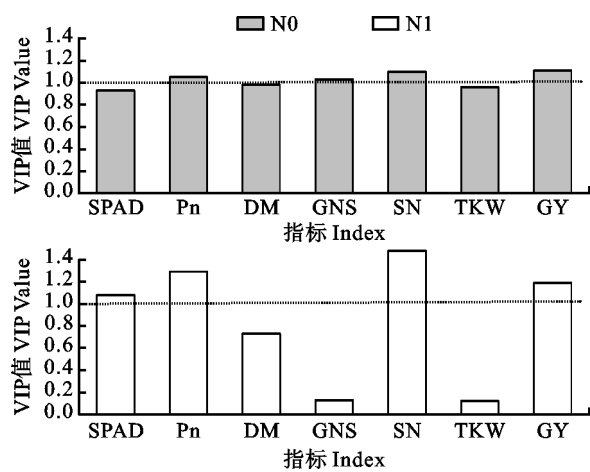


图 5 春小麦农艺性状及产量 OPLS-DA 分析得分图
Fig. 5 Scores of OPLS-DA analysis on agronomic traits and yield of spring wheat



SPAD: 叶绿素相对含量; Pn: 净光合速率; DM: 干物质重;
GNS: 穗粒数; SN: 穗数; TKW: 千粒重; GY: 产量。

SPAD: Relative chlorophyll content; Pn: Net photosynthetic rate; DM: Dry matter weight; GNS: Number of grains per spike; SN: Number of spikes; TKW: Thousand-kernel weight; GY: Yield.

图 6 OPLS-DA 计算的 VIP 值

Fig. 6 VIP scores calculated by OPLS-DA

3 讨论

旗叶是小麦叶片中进行光合作用的主要功能叶,叶片 SPAD 值可以反映出植物的光合能力^[15]。研究发现,施用生物炭可以改善土壤的物理结构,提高土壤的有机质含量和改善土壤的透气性和保水性以促进植物根系的生长,从而间接提高叶绿素的合成^[16-18]。本研究中,施用生物炭可以有效提高春小麦旗叶 SPAD 值,随着生物炭老化,ABN1 处理下花后各时段内春小麦旗叶 SPAD 值整体表现最优。阚正荣等^[19]通过 3 年田间试验发现,适量的生物炭施用在多年后仍能有效提高作物 SPAD 值,这与本研究结果相似。氮肥配施生物炭可有效提高春小麦光合特性,这是因为生物炭施用可以改善土壤氮素形态,进而促进作物光合作用^[20]。与生物炭施用 1 年相比,生物炭施用 5 年延缓了小麦花后光合能力的衰退。这可能是因为,田间老化过程中,生物炭比表面积、介孔体积和平均孔径增加,形成物理屏障,从而延缓氮素释放^[21-22]。

春小麦干物质的积累是小麦光合作用所得的最终产物,干物质积累和转运与产量之间有着密切联系^[23]。春小麦干物质积累的关键时期集中在开花至灌浆期,其对春小麦最终产量的影响最大^[24]。有研究认为,施用生物炭可以显著增加春

小麦开花和灌浆期干物质积累^[25-26]。本研究发现,施用生物炭可以有效促进春小麦开花与灌浆期干物质积累,这与 Wang 等^[27]的研究结果一致;生物炭在老化过程中可以进一步提高春小麦干物质积累量,这是因为生物炭老化后土壤的阳离子交换量提高,减少养分流失并改善土壤微生物群落结构,从而促进小麦干物质积累^[28]。

籽粒灌浆过程是光同化物质向籽粒转运的过程,对小麦的最终粒重、产量和品质起决定性作用^[29-30]。Akhtar 等^[31]的研究表明,生物炭对小麦光合作用有积极影响,施用生物炭可改善春小麦光合和叶绿素形成,促进干物质的积累和转运,提高作物光合性能。小麦籽粒最终产量和灌浆期时间长短和干物质积累量呈正相关,适量施氮可以提高春小麦籽粒灌浆速率和干重^[32]。Zaheer 等^[33]研究提出,生物炭因其良好的保水能力,可通过减少干旱地区土壤水分胁迫来显著提高小麦灌浆速率。本研究中,施用生物炭可以提高春小麦籽粒干物质积累量、籽粒快速灌浆阶段持续天数,表明生物炭可以优化春小麦灌浆特性,从而提高粒重;生物炭施用 5 年配施氮肥能有效提高春小麦快速灌浆阶段持续天数,这可能是因为生物炭经过田间老化,其表面形成有机-矿物复合层,增加表面氧含量,从而改善生物炭对土壤养分的固持与释放^[34]。

生物炭作为土壤改良剂,能够改善土壤的物理性质,降低土壤容重。增加土壤含水率,从而改善土壤的透气性和保水能力,为小麦的根系生长和分蘖提供良好的环境,促进有效穗数的增加^[35]。张鉉贵等^[36]报道,添加生物炭可以有效提高小麦穗数和穗粒数,进而增加产量。本研究中,生物炭施用 5 年后小麦有效穗数高于生物炭施用 1 年,这与刘宇娟等^[37]通过 9 年田间定位试验发现生物炭长期施用可以增加小麦有效穗数的结论一致。这是因为,生物炭长期施用可以增强土壤结构,改善土壤通气性和透水性等;为小麦根系生长创造良好环境,促进小麦分蘖,增加小麦穗数^[38]。南学军等^[39]研究认为,氮肥配施生物炭可以显著改善土壤孔隙度和持水性能,增加土壤 pH 以及营养元素的有效性,进而提高产量。本研究中,生物炭施用 5 年配施氮肥时春小麦产量最高,其效果优于生物炭施用 1 年。Liu 等^[40]研究发现,相比于新鲜生物炭,老化生物炭会促进土壤氮素积累,更适合与尿素一起施入土壤中,这与

本研究结果一致。本研究中,生物炭老化过程主要通过增加小麦穗数而促进产量提升。笔者分析认为,生物炭经田间老化后其含氧官能团增加、吸附 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等离子能力增强,促进土壤对矿质氮的吸附;被吸附的氮素在作物各生育时期逐步释放,提高小麦氮素利用率,进而产生增产作用。本研究通过大田试验证实了生物炭施用年限对春小麦生长和产量的显著影响,但受限于试验条件的限制,本研究尚未对生物炭及其施用年限对麦田土壤理化性质的影响开展系统分析。后续研究可通过土壤理化性质测定与电镜扫描、光谱分析技术结合,深入探讨生物炭长期施用对土壤结构优化、养分固存与释放动态的调控作用,从而阐明生物炭促进作物产量提升的长期效应与作用机制。

正交最小偏二乘判别分析(OPLS-DA)通过结合正交信号矫正(OSC)和PLS-DA方法,可区分不同组别的样本,并识别影响组别分类的关键变量。本研究基于OPLS-DA分析,以筛选出生物炭施用年限对春小麦农艺性状及产量的不同影响,能够更好地阐明生物炭施用对春小麦农艺性状及产量的时间效应。判别分析(OPLS-DA)结果表明,不同施用年限生物炭在单施或配施氮肥条件下,对春小麦净光合速率、有效穗数、产量均表现出明显差异,这与吕梦凡等^[41]的田间试验结果相符合。大田试验结果表明,生物炭施用5年可以改善春小麦光合性能,优化春小麦灌浆特性,促进产量形成。判别分析(OPLS-DA)则进一步揭示了随着施用年限的增加,生物炭对作物光合、有效穗数、产量的积极影响。

4 结论

在本研究条件下,生物炭一次性施入5年后,春小麦光合性能可以进一步提升,有效穗数和延长快速灌浆阶段持续天数显著增加,从而促进干物质积累与产量形成,表明生物炭在灌区农田应用具有明显的正向中长期效应。

参考文献:

- [1]杭嘉祥.湿地水生植物生物炭对水环境中抗生素与磷酸盐的吸附特性研究[D].抚顺:辽宁石油化工大学,2020.
HANG J X. Adsorption of antibiotics and phosphates by biochar of aquatic plants in wetland [D]. Fushun: Liaonign Shihua University, 2020.
- [2]LIU BT, LI H L, LI H B, *et al.* Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching [J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(1): 257.
- [3]赵立宁, 张力月, 孟祥睿, 等. 不同量氮肥与配施适量生物炭对春小麦光合和干物质积累及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(6): 1180.
ZHAO L N, ZHANG L Y, MENG X R, *et al.* Effects of different amounts of nitrogen fertilizer and biochar on photosynthesis characteristic, dry matter accumulation and yield of spring wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(6): 1180.
- [4]宋世龙, 杨卫君, 陈雨欣, 等. 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3): 311.
SONG S L, YANG W J, CHEN Y X, *et al.* Effect of reduced nitrogen fertilizer combined with biochar on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution, and yield of spring wheat in irrigated area of northern Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(3): 311.
- [5]张凤哲, 谢立勇, 赵洪亮, 等. 大气 CO_2 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 929.
ZHANG F Z, XIE L Y, ZHAO H L, *et al.* Synergistic effects of biochar application and elevated atmospheric CO_2 concentration on rice biomass allocation and yield [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(6): 929.
- [6]侯广庆, 程文肖, 邵徐杰, 等. 生物炭施入3年后对热带地区玉米生长发育和产量的影响[J]. 热带生物学报, 2025, 16(3): 379.
HOU G Q, CHENG W X, SHAO X J, *et al.* Effect of biochar on the growth, nutrient accumulation and yield of maize in the tropics after three years of application [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2025, 16(3): 379.
- [7]ZHANG XT, FENG X Y, CHAI N, *et al.* Biochar effects on crop yield variability [J]. *Field Crops Research*, 2024, 316: 109518.
- [8]谢言兰, 张润花, 黄兴学, 等. 生物炭田间老化后理化性质的变化[J]. 湖南农业科学, 2022(2): 106.
XIE Y L, ZHANG R H, HUANG X X, *et al.* Physicochemical properties changes of field-aged biochar [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2022(2): 106.
- [9]陈霞. 生物炭在不同土壤环境中的老化机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
CHEN X. The aging mechanism of biochar in different soil conditions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.
- [10]MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxazol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117.
- [11]YUAN QS, GAO Y, MA G Z, *et al.* The long-term effect of biochar amendment on soil biochemistry and phosphorus availability of calcareous soils [J]. *Agriculture*, 2025, 15(5): 458.

- [12]杨卫君,杨梅,郭颂,等.减氮配施生物炭对北疆小麦产量品质及固碳减排的影响[J].农业工程学报,2024,40(4):104.
YANG W J, YANG M, GUO S, *et al.* Effects of reducing nitrogen fertilizer combined with biochar on the yield and quality of wheat and carbon sequestration and emission reduction in Northern Xinjiang of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(4): 104.
- [13]于滨杭,姬建梅,王丽学,等.中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析[J].环境科学,2023,44(1):520.
YU B H, JI J M, WANG L X, *et al.* Meta analysis on yield effect of biochar for staple crops in China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 520.
- [14]熊淑萍,吴延鹏,王小纯,等.减氮处理对不同小麦品种干物质积累及氮素转运特性的影响[J].麦类作物学报,2015,35(8):1134.
XIONG S P, WU Y P, WANG X C, *et al.* Effect of lower nitrogen application on dry matter accumulation and nitrogen translocation of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8): 1134.
- [15]WANG L W, O'CONNOR D, RINKLEBE J, *et al.* Biochar aging: Mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(23): 14797.
- [16]李传哲,章欢,姚文静,等.生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(10):3424.
LI C Z, ZHANG H, YAO W J, *et al.* Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and winter wheat yield in the typical ancient region of Yellow River, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3424.
- [17]俞映侠,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.
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.
- [18]CHANG Y R, ROSSI L, ZOTARELLI L, *et al.* Biochar improves soil physical characteristics and strengthens root architecture in Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* L.) [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2021, 8(1): 7.
- [19]阚正荣,濮超,祁剑英,等.施用生物炭对华北平原冬小麦土壤水分和籽粒产量的影响[J].中国农业大学学报,2019,24(4):1.
KAN Z R, PU C, QI J Y, *et al.* Effects of biochar on soil water and grain yield of winter wheat in the North China Plain [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(4): 1.
- [20]谢迎新,刘宇娟,张伟纳,等.潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J].农业工程学报,2018,34(14):115.
XIE Y X, LIU Y J, ZHANG W N, *et al.* Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(14): 115.
- [21]黄家威,白嘉骏,关松,等.田间老化生物炭结构表征及吸附铵态氮效应[J].土壤学报,2023,60(5):1468.
HUANG J W, BAI J J, GUAN S, *et al.* Structural characterization of field-aging biochar and its adsorption effect on ammonia nitrogen [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1468.
- [22]高尚洁,刘杏认,徐春英,等.生物炭添加对土壤反硝化产物比的影响研究进展[J].中国农业气象,2024,45(7):777.
GAO S J, LIU X R, XU C Y, *et al.* Effect of biochar addition on the ratio of soil denitrification products: A review [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(7): 777.
- [23]王鹏飞,于爱忠,王玉珑,等.绿肥还田结合减量施氮对玉米干物质积累分配及产量的影响[J].中国农业科学,2023,56(7):1283.
WANG P F, YU A Z, WANG Y L, *et al.* Effects of returning green manure to field combined with reducing nitrogen application on the dry matter accumulation, distribution and yield of maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7): 1283.
- [24]MA L J, ALI M F, YE Y L, *et al.* Irrigation and nitrogen management determine dry matter accumulation and yield of winter wheat under dryland conditions [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2024, 210(5): e12745.
- [25]JIA Y L, XU Z, ZHANG D L, *et al.* Effects of a single biochar application on soil carbon storage and water and fertilizer productivity of drip-irrigated, film-mulched maize production [J]. *Agronomy*, 2024, 14(9): 2028.
- [26]陈雨欣,杨卫君,赵红梅,等.氮肥与生物炭配施对春小麦生长、产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2024,44(1):92.
CHEN Y X, YANG W J, ZHAO H M, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and biochar on growth, yield and quality of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 92.
- [27]WANG Z H, WANG H Y, ZHAO C J, *et al.* Effects of biochar on the microenvironment of saline-sodic soil and maize growth [J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2859.
- [28]WANG C, CHEN D, SHEN J L, *et al.* Biochar alters soil microbial communities and potential functions 3-4 years after amendment in a double rice cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 311: 107291.
- [29]吕亮杰,刘少兴,陈希勇,等.干旱胁迫下不同类型小麦灌浆期营养物质积累动态[J].华北农学报,2021,36(2):89.
LÜ L J, LIU S X, CHEN X Y, *et al.* Nutrient accumulation dynamics of different types of wheat during grain filling stage under drought stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(2): 89.
- [30]杨建昌,张建华.促进稻麦同化物转运和籽粒灌浆的途径与

- 机制[J]. 科学通报, 2018, 63(S2): 2932.
- YANG J C, ZHANG J H. Approach and mechanism in enhancing the remobilization of assimilates and grain-filling in rice and wheat [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(S2): 2932.
- [31] AKHTAR S S, ANDERSEN MN, LIU F L. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 61.
- [32] 石怡彤, 辛秀竹, 刘豆豆, 等. 不同强筋冬小麦品种旗叶衰老及产量构成差异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 50.
- SHI Y T, XIN X Z, LIU D D, *et al.* Differences in flag leaf senescence and yield components of different strong gluten winter wheat varieties [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(3): 50.
- [33] ZAHEER M S, ALI H H, SOUFAN W, *et al.* Potential effects of biochar application for improving wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and soil biochemical properties under drought stress conditions [J]. *Land*, 2021, 10(11): 1125.
- [34] JOSEPH S, KAMMANN CI, SHEPHERD J G, *et al.* Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1210.
- [35] 付玉荣, 张衍福, 刘凯, 等. 生物炭对冬小麦土壤理化性质和产量的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 38.
- FU Y R, ZHANG Y F, LIU K, *et al.* Effects of biochar on soil physicochemical properties and yield of winter wheat [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2022, 36(1): 38.
- [36] 张鈺贵. 秸秆炭化还田对水稻土壤肥力及水稻生长发育的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- ZHANG H G. Effects of straw-biochar returning on rice soil fertility and rice growth [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021.
- [37] 刘宇娟, 谢迎新, 董成, 等. 秸秆生物炭对潮土区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(3): 232.
- LIU Y J, XIE Y X, DONG C, *et al.* Effects of straw biochar application on grain yield of wheat and physicochemical properties in fluvio-aquatic soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(3): 232.
- [38] 冯中洲, 叶泽杰, 翟文露, 等. 长期施用生物炭对潮土理化特性和小麦产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(1): 49.
- FENG Z Z, YE Z J, ZHAI W L, *et al.* Effects of long-term application of biochar on physicochemical properties and wheat yield in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2025, 59(1): 49.
- [39] 南学军, 蔡立群, 武均, 等. 生物质炭与氮肥配施对春小麦产量及其 C : N : P 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1154.
- NAN X J, CAI L Q, WU J, *et al.* Effect of combined application of biochar and N-fertilizer on yield and C : N : P ratio of spring wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(8): 1154.
- [40] LIU Z Q, HE T Y, LAN Y, *et al.* Maize stover biochar accelerated urea hydrolysis and short-term nitrogen turnover in soil [J]. *BioResources*, 2017, 12(3): 6024.
- [41] 吕梦凡, 马向成, 蔡铁, 等. 生物炭施用对冬麦田土壤水热环境及土壤呼吸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 197.
- LÜ M F, MA X C, CAI T, *et al.* Effects of biochar application on soil hydrothermal environment and soil respiration in winter wheat field [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 197.