

不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响

郭 颂, 杨卫君*, 宋世龙, 陈雨欣, 杨 梅, 惠 超, 张金汕

(新疆农业大学 农学院/新疆优质专用麦类作物工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:【目的】探究水炭耦合对北疆灌区春小麦光合特性及产量的影响。【方法】开展常规灌水量 (w_0)、灌水量减少 10% (w_1)、灌水量减少 20% (w_2) 3 个灌水量水平和不施生物炭 (b_0)、施加生物炭 10 t/hm² (b_1)、施加生物炭 20 t/hm² (b_2) 3 个生物炭施加量的 2 因素 3 水平试验, 研究不同灌水量及生物炭用量对春小麦植株光合及产量的影响, 建立基于生物炭施加量、灌水量与产量的拟合模型。【结果】生物炭施用量显著影响开花期叶面积指数。与 b_0w_0 处理相比, 施生物炭与减少灌水量的组合春小麦 *LAI* 提升 9.1%~25.41%, 花后 20 d 春小麦 *SPAD* 值提升了 1.7%~10.73%。不同灌水量处理显著影响春小麦光合特性、干物质积累量和产量形成; 灌水量为 w_1 时, 施加适量的生物炭能促进春小麦开花期干物质积累量, 提升春小麦光合特性与产量; 灌水量为 w_2 时, 施加生物炭 (b_1w_2 、 b_2w_2 处理) 会使春小麦光合特性下降, 春小麦净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数分别下降 11.58%~18.15%、55.85%~66.3%、67.42%~75.94%和 16.2%~27.19%。灌水量对春小麦产量的影响较生物炭影响更大, 但灌水量为 w_1 时, 添加生物炭 (b_1w_1 、 b_2w_1 处理) 的春小麦产量均保持在较高水平, b_1w_1 处理春小麦产量较 b_0w_0 处理提升 7.57%, 而 b_2w_1 处理通过增加千粒质量提高产量, 产量增幅达到 3.36%。【结论】结合模型模拟分析可知, 灌水量减少 10% 和生物炭施加 20 t/hm² 组合是最有利于北疆灌区春小麦稳产、高产的施用模式。

关 键 词: 春小麦; 生物炭; 控水; 光合特性; 产量

中图分类号: S512.1⁺2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022223

OSID: 

郭颂, 杨卫君, 宋世龙, 等. 不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 65-73.

GUO Song, YANG Weijun, SONG Shilong, et al. Change in Photosynthesis of Spring Wheat with Irrigation Amount and Biochar Amendment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 65-73.

0 引 言

【研究意义】水资源紧缺、灌溉水利用率低是制约绿洲灌溉农业发展的重要限制因素^[1-2]。提高灌溉水利用率是解决水资源供需矛盾、保证绿洲地区农产品生产与供给的重要途径^[3-4], 对绿洲灌溉农业具有重大意义。【研究进展】光合作用是植物生长发育的重要过程, 而土壤水分是作物生长的重要环境指标之一。适量灌水有利于提高小麦净光合速率, 而干旱胁迫使叶绿素荧光参数显著降低^[5]且不利于光合产物的积累^[6]。但适量减水灌溉可实现作物生长与资源高效利用的双赢, 如王唯逍等^[7]研究表明, 轻度水胁迫有利于促进水稻的气孔导度开放, 提高净光合速率, 激发其生长与生产潜能。李彦彬等^[8]在保证产量的同时给予轻度水分胁迫可实现节水和高产的统一。生物炭是一类有机土壤添加剂, 生物炭的多孔性质可改变土壤持水能力进而影响作物的物质积累促进资源高

效利用^[9-10], 如适量水分胁迫加生物炭可提高番茄潜在光化学能力^[11], 当生物炭用量为 15 t/hm² 时可增加花前干物质转运量及花后干物质积累, 此用量下微咸水利用效率最高^[12]。良好的土壤环境和充足的养分对作物光合有积极的促进作用, 而生物炭以自身多孔性质与丰富的养分可改善土壤环境, 提高土壤肥力进而促进作物光合。阚正荣等^[13]研究发现, 生物炭可减弱小麦开花期和灌浆期的光合“午休”, 提高作物光合性能。【切入点】当前研究多涉及生物炭与其他因素胁迫(光照、温度、重金属等)和肥料配施等方面^[14-18], 且多集中在固氮减排、改善土壤性状、促进作物生长的研究^[13], 而水分耦合对灌溉农田小麦生长的影响研究虽有涉及, 但其潜在的生理和生理机制仍不明确^[19-20]。在不同地区不同灌溉水平下, 生物炭不同施用量产生的效应还不清晰^[21]。【拟解决的关键问题】因此, 研究不同灌水量与生物炭施用量下春小麦物质积累、光合生产及产量的变化, 探讨调亏灌溉下生物炭调节春小麦生长的机制, 建立基于生物炭施加量、灌水量与产量的北疆灌区春小麦拟合模型, 为生物炭在北疆灌区农业高效节水发展中的应用提供理论依据。

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32260326); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A87)

作者简介: 郭颂(1999-), 男。硕士研究生, 主要从事作物栽培生理研究。
E-mail: 2201485808@qq.com

通信作者: 杨卫君(1984-), 女。副教授, 博士, 主要从事农田土壤生态研究。E-mail: 1984_ywj@163.com

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 4—8 月在新疆昌吉奇台麦类试验站进行 (89°13'—91°22' E, 42°45'—45°29' N, 海拔 1 760 m)。该地属温带大陆性气候;灌区多年平均降水量为 265.6 mm, 2021 年 3—8 月降水量见图 1。年平均气温 5.5 ℃; 7 月平均气温 23.7 ℃, 极端最高气温 39 ℃; 1 月平均气温 -18.9 ℃, 极端最低气温 -37.3 ℃, 无霜期 153 d。试验地前茬作物为冬小麦, 土壤为沙壤土, pH 值 8.25。供试土壤中全氮量 2.24 g/kg, 全磷量 1.28 g/kg, 全钾量 18.08 g/kg, 有机质质量 42.88 g/kg, 碱解氮量 128.70 mg/kg, 有效磷量 11.40 mg/kg, 速效钾量 147.00 mg/kg。

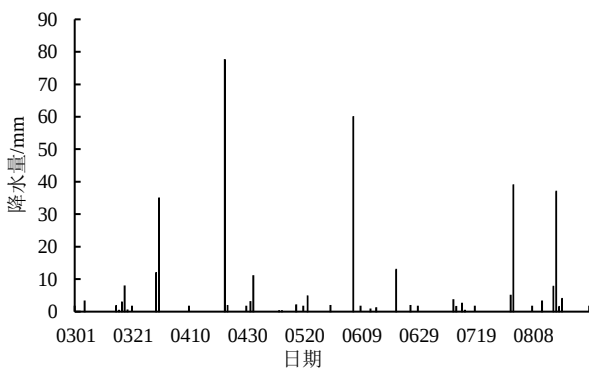


图 1 试验地 2021 年 3—8 月降水量分布

Fig.1 Precipitation distribution at the test site from March to August 2021

1.2 试验设计

试验设灌水量和生物炭用量 2 个试验因素, 其中灌水量设置 3 个水平, 分别为常规灌水 (w0)、灌水量减少 10% (w1) 和灌水量减少 20% (w2), 生物炭用量设置不施生物炭 (b0)、施加生物炭 10 t/hm² (b1) 和施加生物炭 20 t/hm² (b2) 3 个水平。大田试验采用完全随机区组设计, 共计 9 个处理, 各处理的具体设计见表 1。每个处理重复 3 次, 共计 27 个田间小区, 小区面积为 3 m×3 m=9 m²。试验所用的棉秆炭为辽宁金和福农业科技股份有限公司生产, 碳化温度 450 ℃, 碳化时间 4 h, pH 值为 9.37, 全氮量 21.76 g/kg, 碱解氮量 5.38 mg/kg, 速效磷量 200.94 mg/kg。生物炭与底肥一起于春小麦播前一次性施入, 通过人工翻耕于 30 cm 处, 使生物炭、底肥与土壤充分混合, 选用当地主栽高产品种新春 46 号为试验材料, 播种方式为条播, 行距 0.2 m, 种植密度为 450×10⁴ 株/hm²; 所有试验处理的管理措施均参照当地高产田的管理模式执行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 SPAD 值测定

使用 SPAD-502 型叶绿素仪测定春小麦旗叶

SPAD 值。各小区选取长势基本一致、无损伤的旗叶 5 片, 每片叶测定上、中、下 3 个部位, 最后取平均值使用。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	灌水量/m ³	生物炭用量/(t·hm ⁻²)
b0w0	300	0
b1w0	300	10
b2w0	300	20
b0w1	270	0
b1w1	270	10
b2w1	270	20
b0w2	240	0
b1w2	240	10
b2w2	240	20

1.3.2 叶面积测定

拔节期 (5 月 19 日)、孕穗期 (5 月 30 日)、开花期 (6 月 14 日)、灌浆期 (6 月 26 日) 在各试验小区内选择长势一致的春小麦 5 株, 测定全部叶片的长度和最大宽度, 用长宽系数法获得单叶片面积, 然后汇总平均, 结合种植密度, 计算确定小区的叶面积指数 (LAI)。

$$\text{叶面积} = \text{长} \times \text{宽} \times 0.83, \quad (1)$$

$$LAI = \text{叶面积} \times \text{每平方米茎数} / 10\,000. \quad (2)$$

1.3.3 光合参数测定

使用英国 PPSsystems 公司生产的 TPS-2 光合测定仪测定春小麦旗叶的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO₂ 摩尔分数。每小区随机选取 3 株旗叶生长一致且受光方向一致、叶位一致的春小麦, 每株测定 3 次取平均值。测定日期为小麦开花后的 2、10、18 d, 在晴朗无风日子的 11:00—13:00 测定。

1.3.4 干物质量测定

在各生育期测定叶面积时同步取样测定干物质量。每小区随机取 10 株, 从土壤表面处切取地上部分, 将茎叶穗分开放置, 之后在 105 ℃ 下杀青 30 min, 80 ℃ 下烘至恒质量称量。

1.3.5 产量及其构成因素测定

各小区选有代表性的 1 m² 区域, 在收获前进行有效穗数的测定, 并实收测产。脱粒后自然风干称质量, 然后按籽粒含水率 13% 的标准折算千粒质量与产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 作图, DPS 7.05 进行双因素方差分析, LSD 法进行各处理之间差异显著性多重比较, Design expert 11 进行模型拟合。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量与生物炭用量对春小麦 SPAD 值的影响

表 2 是春小麦开花前后一段时间内不同灌水量和生物炭用量下的春小麦 SPAD 值。整个生育期春小

麦 *SPAD* 值整体呈波动性变化。与 b0w0 处理相比，花前 5 d 时 b2w1、b2w2 处理 *SPAD* 值均有提升但差异不显著。生物炭用量与灌水量的交互作用对 *SPAD* 值影响分别在开花期、花后 9 d 和花后 20 d 达到极显著水平 ($p<0.01$)。由开花期与花后 9 d 春小麦 *SPAD* 值可以得出，b1w1、b2w1 处理花后 9 d 的 *SPAD* 值

较开花期 *SPAD* 值升高，其中 b2w1 处理的春小麦 *SPAD* 值提升最大，为 6.4%；b1w2、b2w2 处理花后 9 d *SPAD* 值较开花期 *SPAD* 值降低；由花后 9 d 与花后 20 d 各处理的春小麦 *SPAD* 值可知，各处理花后 20 d 的 *SPAD* 值较花后 9 d 均降低，但花后 20 d 各处理 *SPAD* 值高于 b0w0 处理。

表 2 不同灌水量与生物炭用量春小麦 *SPAD* 值Table 2 *SPAD* values of spring wheat with different irrigation amount and biochar use

处理	花前 5 d	开花期	花后 4 d	花后 9 d	花后 14 d	花后 20 d
b0w0	54.22±1.20ab	57.48±0.60a	54.9±1.64bc	53.88±0.51d	51.71±1.95d	47.05±0.07e
b0w1	54.52±0.60ab	56.02±0.29bc	56.13±0.97ab	55.72±0.70bc	54.43±0.44bc	50.85±0.32cd
b0w2	54.02±0.21ab	54.20±0.07e	55.13±0.90bc	53.70±0.29d	54.5±0.56bc	52.68±0.69ab
b1w0	55.90±0.16a	56.88±0.33ab	54.98±1.18bc	59.17±0.94a	57±0.79a	50.45±0.55d
b1w1	53.13±1.55b	55.13±0.70cd	52.75±0.83c	56.93±1.77b	54.25±0.27bc	49.90±0.24d
b1w2	54.72±2.06ab	54.38±0.63de	56.21±1.00ab	53.42±0.27d	53.2±0.50cd	47.85±0.45e
b2w0	53.62±0.90ab	54.38±0.13de	56.91±0.27ab	56.33±0.44bc	55.91±1.26ab	52.95±0.16a
b2w1	54.60±0.69ab	55.42±0.16c	57.78±1.61a	58.97±0.52a	54.73±0.16bc	52.10±0.67ab
b2w2	55.78±0.99a	55.67±0.41c	54.93±1.49bc	54.92±0.33cd	54.18±0.91bc	51.72±0.62bc
<i>b</i>	0.314 8	1.066 2	0.972	3.087 5	0.546 5	0.102 1
<i>F</i>						
<i>w</i>	0.098 1	0.271 8	0.008 5	1.787	0.194	1.304 7
<i>b×w</i>	2.132 4	16.558 6**	4.365 3*	10.051 1**	7.301 7*	41.356 3**

注 表中同列不同小写字母表示处理之间差异显著 ($p<0.05$) 下同。

2.2 不同灌水量与生物炭用量对春小麦叶面积指数的影响

表 3 是不同生育期不同灌水量与生物炭用量组合下春小麦叶面积指数 (*LAI*)。生物炭用量及灌水量对春小麦叶面积指数均有影响，不同处理下叶面积指数 (*LAI*) 呈先升高后降低的趋势。生物炭用量对开花期的春小麦叶面积指数有显著影响 ($p<0.05$)，且与 b0w0 处理相比，施生物炭与减少灌水量处理春小麦 *LAI* 可以提高 9.1%~25.41%。与孕穗期相比，开花期所有处理 *LAI* 均下降，但施生物炭且减少灌水量的处理下降幅度均小于不施生物炭的灌水处理。与 b0w0 处理比较，灌浆期各生物炭用量与不同灌水量处理春小麦 *LAI* 数提升 3.98%~35.65%，各处理间差异不显著。

表 3 不同灌水量与生物炭用量春小麦 *LAI*Table 3 Different amounts of irrigation amount and biochar used for spring wheat *LAI*

处理	拔节期	孕穗期	开花期	灌浆期
b0w0	3.74±1.20b	8.59±2.06a	4.08±0.20b	3.84±0.63a
b0w1	4.93±0.47ab	7.97±1.33a	4.86±0.52b	4.64±0.42a
b0w2	4.59±1.07ab	7.65±1.01a	4.30±0.39b	3.99±0.51a
b1w0	5.07±0.28ab	6.62±0.58a	5.59±0.98ab	5.20±1.56a
b1w1	5.64±0.66ab	6.05±0.86a	5.18±0.77ab	4.54±0.53a
b1w2	6.01±0.68a	7.18±2.87a	4.49±0.53b	4.18±1.31a
b2w0	5.69±1.62a	8.62±2.63a	6.77±1.82a	4.82±1.35a
b2w1	5.02±0.44ab	6.66±1.16a	5.46±0.25ab	4.26±0.39a
b2w2	5.06±0.45ab	8.68±1.29a	5.47±1.11ab	4.69±0.20a

2.3 不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响

图 2 是春小麦花后 2、8、18 d 时不同灌水量与

生物炭用量组合下的春小麦光合特性。灌水量与生物炭对春小麦光合特性有影响，灌水量较生物炭用量对光合特性的影响大。花后 18 d 时，与 b0w0 处理相比，除灌水量为 w2 处理的叶片净光合速率降低外，其余处理叶片净光合速率均提升，其中 b1w1 处理叶片净光合速率最高，但 b1w1、b2w1 处理与 w0 各处理间差异不显著；而 b1w2、b2w2 处理春小麦净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数均降低，其中 b2w2 处理最低。在花后 18 d 灌水量对春小麦蒸腾速率影响达到显著水平 ($p<0.05$)，生物炭用量与灌水量的交互作用也达显著水平 ($p<0.05$)，灌水量为 w1 结合施用生物炭降低了叶片蒸腾速率。生物炭用量与灌水量对春小麦气孔导度的交互作用在花后 2 d 和花后 10 d 达到显著水平 ($p<0.05$)，花后 18 d 无显著差异。对比花后 18 d 与花后 2 d 各处理胞间 CO_2 摩尔分数可知，除 b1w2 处理相对于花后 2 d 降低外，其余处理都呈上升趋势，生物炭用量与灌水量的交互作用不显著，生物炭用量、灌水量单因素的影响均达显著水平 ($p<0.05$)。

2.4 不同灌水量与生物炭用量对春小麦干物质累积量的影响

图 3 是各处理不同时期春小麦的茎叶穗干物质累积量。生物炭用量及灌水量对春小麦干物质累积量均有影响，不同灌水量与生物炭用量处理下春小麦干物质累积量随春小麦生育期呈逐渐增加趋势，而叶片干物质质量呈先增加后降低趋势。灌水量在春小麦拔节

期对茎与叶干物质积累量有显著影响 ($p<0.05$), 与 $b0w0$ 处理相比, 施加生物炭且减少灌水量处理春小麦茎叶干物质积累量均得到提高。生物炭用量及灌水量在开花期对叶干物质积累量交互作用达显著水平 ($p<0.05$), 与 $b0w0$ 处理比较, 施用生物炭与减少灌水量处理叶干物质积累量均下降, 幅度为

11.58%~25.48%。春小麦穗部干物质积累量呈升高趋势。灌浆期生物炭对春小麦穗干物质积累量影响显著 ($p<0.05$), 灌水量对穗干物质质量有影响, 但未达显著水平。与 $b0w0$ 处理相比, $b1w0$ 处理的穗干物质积累量最高, 提升了 9.2%。

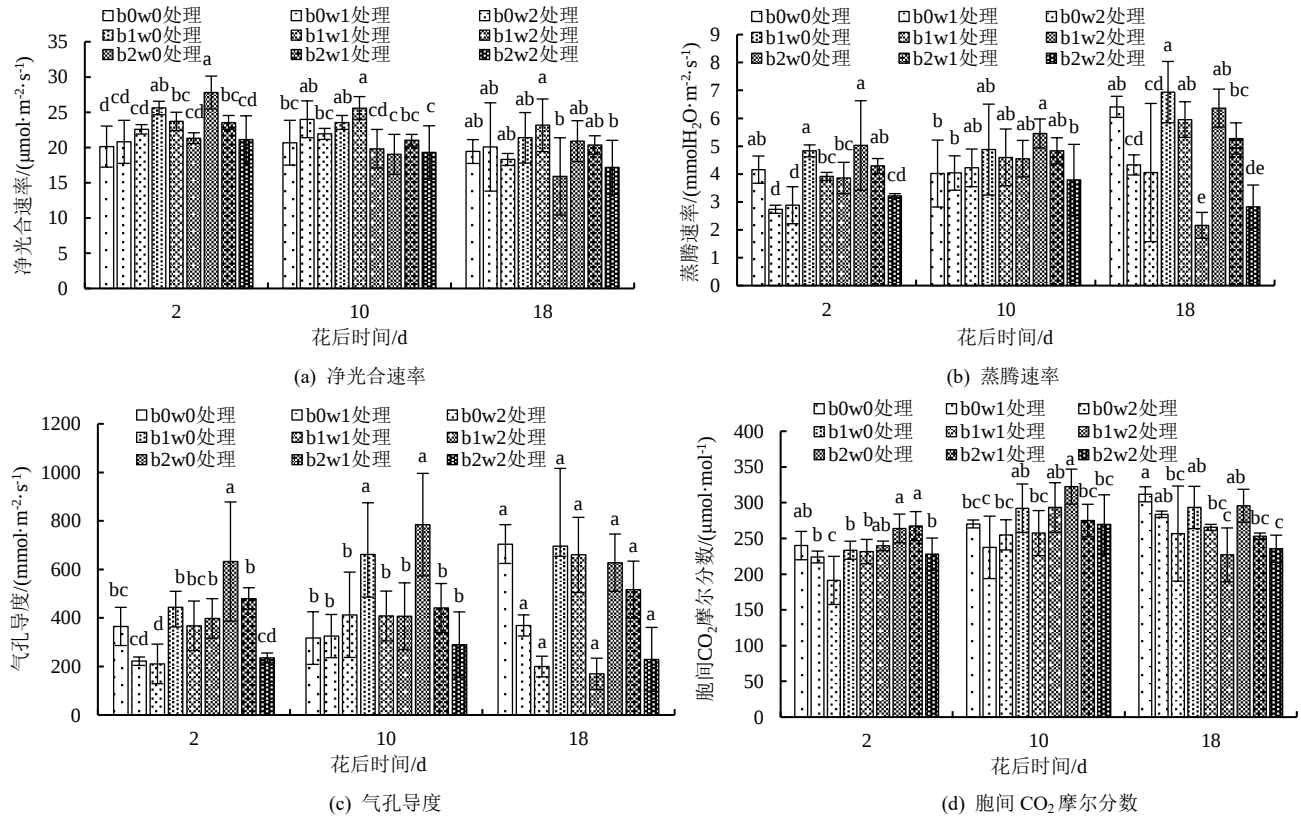


图2 不同灌水量与生物炭用量春小麦光合参数

Fig.2 Photosynthetic parameters of spring wheat with different irrigation amount and biochar use

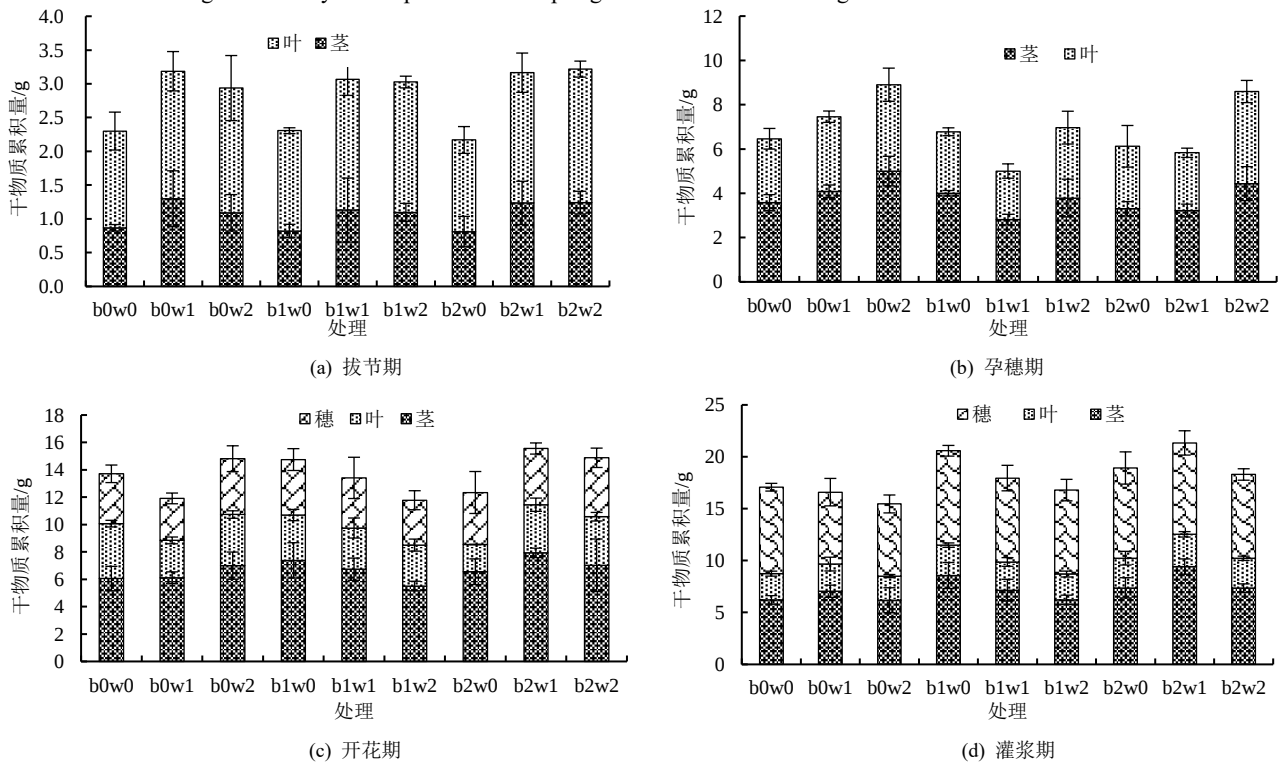


图3 不同灌水量与生物炭用量春小麦茎、叶、穗干物质积累量

Fig.3 Accumulation of dry matter in stems, leaves and ears of spring wheat with different irrigation amount and biochar use

2.5 不同灌水量与生物炭用量对春小麦籽粒灌浆速率的影响

表 4 是不同灌水量与施用生物炭组合下春小麦籽粒灌浆参数。与 b0w0 处理相比,生物炭与灌水组合春小麦干物质快速积累持续时间均有所降低,降低幅度为 0.87%~23.72%,而其余各处理春小麦干物质

最大积累速率均高于 b0w0 处理,增幅为 1.15%~20.2%。其中 b1w0 处理干物质最大积累速率与持续时间最高;b2w1 处理春小麦籽粒灌浆各项指标 (V_m 、 t_0 、 Δt) 均在较高水平;b2w2 处理春小麦干物质积累最大、增长速率最高。

表 4 不同灌水量与生物炭用量春小麦籽粒灌浆速率

Table 4 Different irrigation water and biochar uses for spring wheat grain filling rates

处理	Logistic 方程	V_m /(g·stem ⁻¹ ·d ⁻¹)	t_0 /d	t_1 /d	t_2 /d	Δt	R^2
b0w0	$y=2.043\ 3/(1+e^{(3.539\ 9-0.152\ 044\ t)})$	0.077 7	23.28	14.62	31.94	17.32	0.998 5
b0w1	$y=2.093\ 8/(1+e^{(4.157\ 2-0.166\ 856\ t)})$	0.087 3	24.91	17.02	32.81	15.79	0.990 8
b0w2	$y=1.794\ 7/(1+e^{(4.039\ 9-0.187\ 117\ t)})$	0.084 0	21.59	14.55	28.62	14.08	0.997 9
b1w0	$y=2.318\ 7/(1+e^{(3.912\ 6-0.153\ 442\ t)})$	0.088 9	25.50	16.92	34.08	17.17	0.999 2
b1w1	$y=1.682\ 3/(1+e^{(4.172\ 0-0.188\ 891\ t)})$	0.079 4	22.09	15.11	29.06	13.94	0.998 8
b1w2	$y=2.031\ 2/(1+e^{(3.938\ 8-0.169\ 984\ t)})$	0.086 3	23.17	15.42	30.92	15.50	0.996 8
b2w0	$y=1.930\ 9/(1+e^{(3.749\ 9-0.162\ 839\ t)})$	0.078 6	23.03	14.94	31.12	16.17	0.995 3
b2w1	$y=1.958\ 1/(1+e^{(4.255\ 9-0.179\ 185\ t)})$	0.087 7	23.75	16.40	31.10	14.70	0.998 2
b2w2	$y=1.873\ 4/(1+e^{(4.344\ 7-0.199\ 433\ t)})$	0.093 4	21.79	15.18	28.39	13.21	0.999 1

注 y 为干物质积累量; V_m 为干物质积累最大增长速率; t 为播种后天数; t_0 为干物质最大积累速率出现的时间; t_1 、 t_2 分别为 Logistic 方程生长函数的 2 个拐点; Δt 为干物质快速积累持续天数; R^2 为相关系数。

2.6 不同灌水量与生物炭用量对春小麦产量的影响

表 5 是不同灌水量与生物炭用量组合下春小麦产量构成。灌水量对春小麦产量影响极显著 ($p<0.01$); 添加生物炭可通过增加春小麦穗数、穗粒数、千粒质量, 进而提高产量。与 b0w0 处理相比, b1w1、b2w1 处理不会减产, 而 b1w2、b2w2 处理春小麦产

量明显下降。生物炭用量与灌水量的交互作用显著 ($p<0.05$), 在生物炭用量与灌水量共同作用下, 灌水量为 w0、w1 时施加生物炭可提升春小麦产量, 但灌水量为 w2 时即使配施生物炭仍造成显著减产, 春小麦产量降低 16.68%~20.1%。

表 5 不同灌水量与生物炭用量春小麦产量构成

Table 5 Factors constituting spring wheat yield with different irrigation amount and biochar use

处理	穗数/($\times 10^4$ 穗·hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
b0w0	524.66±86.24ab	30.79±3.82ab	42.53±0.56bc	640 0.3±16.72c
b0w1	508.33±34.45ab	32.92±3.95a	44.37±0.97ab	683 7.19±6.46bc
b0w2	473±53.03ab	23.33±3.25c	42.50±1.79bc	532 9.88±21.24d
b1w0	538.33±69.59ab	27.17±0.33bc	43.35±0.11ab	743 7.60±22.88a
b1w1	517±14.76ab	26.79±2.20bc	44.25±0.88ab	688 4.8±7.49b
b1w2	505±40.90ab	28.75±0.61ab	41.09±0.47c	533 2.72±31.51d
b2w0	590.33±88.64a	32.92±2.71a	42.31±1.96bc	735 3.88±26.45a
b2w1	464.33±37.72b	33.42±1.59a	44.93±0.39a	661 5.54±10.62bc
b2w2	479±46.05ab	29.13±1.59ab	43.61±0.31ab	511 4.85±51.95d
b	0.241 1	1.51	0.505 3	0.732
F w	3.614 4	1.440 1	4.623 5	20.949 4**
$b\times w$	0.646 4	2.910 5	1.708 2	6.256 6*

注 *和**分别表示 0.05 和 0.01 水平显著。

2.7 春小麦产量拟合

以影响因素 A (生物炭用量)、影响因素 B (灌水量) 为自变量, 产量 ($Yield$) 为因变量, 进行二次项多元拟合, 得到回归方程:

$$Yield = -48\ 919.844\ 64 - 199.035\ 46A + 390.923\ 46B + 0.973\ 8A \times B - 2.764\ 38A^2 - 0.686\ 263B^2.$$

其中, 模型模拟值与实测值的吻合度达到极显著水平 ($p<0.01$, 失拟项 $p>0.05$), 说明模型具有较高的可靠性。模型决定系数 $R^2=0.906\ 1$, 精确度为

16.746, 说明模型比较理想。根据模型响应面可看出, 随着灌水量的减少与生物炭用量的增多, 春小麦产量呈先增高后降低趋势, 过多减少灌水量与施加高量生物炭, 产量会进一步下降。根据回归方程计算出响应面最高点数值, 该数值为生物炭用量与灌水量交互影响下的春小麦最高产量, 即生物炭施加 16.185 t/hm², 灌水量为 296.322 m³ 得到最大产量 7 385.824 kg/hm², 运算值在试验结果范围内。

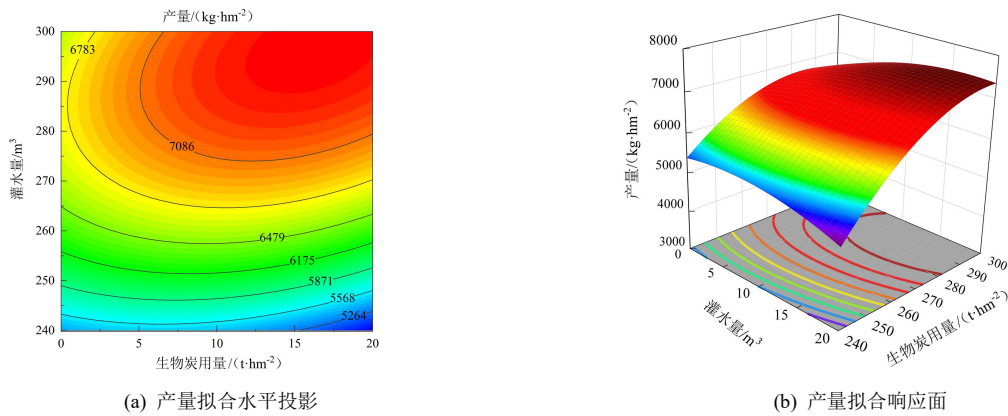


图4 不同灌水量与生物炭用量的春小麦产量拟合水平投影与响应面

Fig.4 Spring wheat yield planes and response surfaces with different irrigation amount and biochar use

3 讨论

3.1 不同灌水量与生物炭用量对春小麦地上干物质质量的影响

春小麦地上部生长受灌水量与生物炭用量影响显著,随着生育进程的推进,生物炭在不同灌溉水平下产生不同的效应,亏缺灌溉下植株地上部生长均受到抑制^[22-23]。生物炭可提高作物干物积累^[24-25],这与本试验结果基本保持一致。与 b0w0 处理相比,本试验中不同灌水条件下添加生物炭处理(除 b1w2 处理)地上干物质积累量均有提高,且 b2w1 处理的干物质质量累积量最高。这可能是因为生物炭提高了土壤养分供给,其自身特性使土壤的持水能力提高^[26],缓解水分胁迫对植株生长的抑制,促进植物地上部生长,增大地上部干物质质量^[27]。但春小麦生长初期土壤自身肥力较高,生物炭的效应并未发挥出来,随着土壤原有养分消耗,生物炭的作用得以体现^[28],则表现出在春小麦不同生育期生物炭对地上干物质质量影响不同,说明生物炭对植株生长的影响可能不仅与土壤水分有关,还与土壤自身肥力和生物炭作用时效有关^[29]。

3.2 不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响

本研究发现,灌水量为 270 m³ 时施加少量生物炭 b1w1 处理使叶片净光合速率得到提升,而灌水量为 240 m³ 时施加生物炭(b1w2、b2w2 处理)春小麦净光合速率与蒸腾速率气孔导度均降低,这与王浩等^[30]研究基本一致。综合分析认为生物炭的施用改变了土壤的孔隙分布与营养环境^[31-32]。将灌水量为 270 m³ 与常规灌溉 300 m³ 的各组合进行比较,在减少灌水量的条件下生物炭施用改善土壤孔隙分布,为作物根系的发展提供良好的空间,进一步提高土壤保水能力与持水量,同时生物炭自身含有营养元素,施用生物炭能促进作物根系形态的建成,增加总根长度、总根体积和总根表面积,降低根平均直径^[33-34],有利

于作物对水分和养分吸收^[35-36],使春小麦叶绿素量保持在较高水平,提高春小麦净光合速率;当灌水量为 240 m³ 时施加生物炭,土壤养分离子过高,根系吸收水分与养分能力下降,叶片得不到充分物质供给,导致作物净光合速率下降。

3.3 不同灌水量与生物炭用量对春小麦产量的影响

在水分亏缺条件下施加肥料,可提高作物产量,同时增强其抗旱性^[37],这与本研究一致。本试验中生物炭用量与灌水量交互作用显著,且灌水量对春小麦产量影响达到极显著水平,灌水量为 270 m³ 加生物炭(b1w1、b2w2 处理)时春小麦产量比常规灌溉提高 7.57%~3.36%,而灌水量为 240 m³ 配施生物炭(b1w2、b2w2 处理)却造成春小麦减产 16.68%~20.1%。添加生物炭可通过影响春小麦穗数、穗粒数和千粒质量,进而提高产量。本研究以拟合模型为基础, b1w1、b2w1 处理模拟产量较 b0w0 处理分别提升 5.61%与 2.72%,这与 b1w1、b2w1 处理增产趋势一致,说明应用此模型分析本试验条件下灌水量与生物炭用量最佳组合可行。根据模型拟合中生物炭用量、灌水量与产量的响应面趋势,分析增产原因可能是灌水量为 270 m³ 时施加生物炭可提高土壤可用水量^[38],改变土壤微生物的代谢偏好^[39-40],提高土壤全氮及有机碳质量分数,土壤肥力得到提升^[41-42],因而促进作物养分吸收。而灌水量为 240 m³ 时施加高量生物炭条件下减产原因可能是缺水条件改变土壤微生物量^[43],而土壤微生物活性因过量生物炭添加产生抑制^[44],则在缺水与高量生物炭共同影响下,土壤微生物对养分分解能力下降^[45],造成减产。

4 结论

1) 灌水量减少 10%并添加生物炭有利于促进春小麦开花期干物质积累,保障稳产增产,且灌水量对春小麦产量的影响较生物炭大。

2) 灌水量减少 10%并添加生物炭可提升春小麦

叶片净光合速率;而灌水量减少 20%添加生物炭下春小麦的光合性能下降,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 摩尔分数和气孔导度均降低。

3) 结合模型模拟分析可知,灌水量减少 10%和生物炭施加 20 t/hm^2 组合是最有利于北疆灌区春小麦稳产、高产的施用模式。

参考文献:

- [1] 张家欣, 邓铭江, 李鹏, 等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 131-140.
ZHANG Jiaxin, DENG Mingjiang, LI Peng, et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in Northwest China from the perspective of virtual water flow[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 131-140.
- [2] 邓铭江. 新疆十大水生态环境保护目标及其对策探析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 865-874.
DENG Mingjiang. Analysis of Xinjiang's top ten water ecological environmental protection goals and their countermeasures[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 865-874.
- [3] 王春宏, 张芮, 侯庆丰, 等. 世行可持续农业发展项目灌溉水利用效率测算与影响因素分析[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 35-40, 86.
WANG Chunhong, ZHANG Rui, HOU Qingfeng, et al. Analysis of irrigation water utilization efficiency and its influencing facto the World Bank sustainable agricultural development project[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(9): 35-40, 86.
- [4] 杨封科, 何宝林, 高世铭. 气候变化对甘肃省粮食生产的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 930-938.
YANG Fengke, HE Baolin, GAO Shiming. Impacts of climate change on food production in Gansu: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 930-938.
- [5] 蒿宝珍, 马静丽, 董嘉强, 等. 不同耐旱性玉米品种叶片光合特性和产量对干旱胁迫的响应[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 29-37.
HAO Baozhen, MA Jingli, DONG Jiaqiang, et al. Response of leaf photosynthesis characteristics and yield of maize hybrids differing in drought tolerance to drought stress[J]. Journal of Henan Normal University (Natrual Science Edition), 2022, 50(6): 29-37.
- [6] 杨霞, 李毅博, 白月梅, 等. 干旱条件下叶片非顺序衰老小麦顶二叶叶绿素荧光特性[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 173-179.
YANG Xia, LI Yibo, BAI Yuemei, et al. Chlorophyll fluorescence characteristics of top two leaves in non-sequential senescence wheat under drought condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 173-179.
- [7] 王唯逍, 刘小军, 田永超, 等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7 053-7 060.
WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7 053-7 060.
- [8] 李彦彬, 朱亚南, 李道西, 等. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 76-82.
LI Yanbin, ZHU Yanan, LI Daoxi, et al. Effects of alternating drought and watering on growth, photosynthesis and yield of wither wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 76-82.
- [9] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 85-92.
ZHAO Dianfeng, XU Jing, LUO Xuan, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition tobacco[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(3): 85-92.
- [10] XIU Liquan, ZHANG Weiming, WU Di, et al. Biochar can improve biological nitrogen fixation by altering the root growth strategy of soybean in Albic soil[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773(1): 144 564.
- [11] 杜兵杰, 曹红霞, 潘小燕, 等. 生物炭对亏缺灌溉下温室重壤土栽培番茄产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 136-142.
DU Bingjie, CAO Hongxia, PAN Xiaoyan, et al. Effects of biochar on the tomato yield and quality in heavy loam soil in greenhouse under deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 136-142.
- [12] 赵红玉, 朱成立, 黄明逸, 等. 生物炭添加量对冬小麦花后干物质积累及转运的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 16-23.
ZHAO Hongyu, ZHU Chengli, HUANG Mingyi, et al. Amending soil with biochar to improve accumulation and translocation of dry matter after anthesis in winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 16-23.
- [13] 阚正荣, 马守田, 祁剑英, 等. 施用生物炭对冬小麦光合潜力和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(6): 719-727.
KAN Zhengrong, MA Shoutian, QI Jianying, et al. Effect of biochar addition on photosynthetic potential and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(6): 719-727.
- [14] 李帅霖, 上官周平. 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 8-15.
LI Shuailin, SHANGGUAN Zhouping. Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions[J]. Arid Land Geography, 2018, 36(2): 8-15.
- [15] 吴文卫, 周丹丹. 生物炭老化及其对重金属吸附的影响机制[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 7-13.
WU Wenwei, ZHOU Dandan. Influence of biochar aging on its physicochemical properties and adsorption of heavy metals[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 7-13.
- [16] 金洪石, 金江华, 贺兆伟, 等. 生物炭和有机肥配施对重金属 Pb 胁迫下烟叶生长的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(9): 43-50.
JIN Hongshi, JIN Jianghua, HE Zhaowei, et al. Effect of biochar and organic fertilizer on growth of tobacco under Pb stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(9): 43-50.
- [17] LIU Sainan, MENG Jun, LAN Yu, et al. Effect of corn straw biochar on corn straw composting by affecting effective bacterial community[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2020, 51(8): 792-802.
- [18] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1 969-1 976.
SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1 969-1 976.
- [19] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113-119.
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 113-119.
- [20] 王颖, 孙层层, 周际海, 等. 生物炭添加对半干旱区土壤细菌群落的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2 170-2 179.
WANG Ying, SUN Cengceng, ZHOU Jihai, et al. Effects of biochar addition on soil bacterial community in semi-arid region[J]. China Environmental Science, 2019, 39(5): 2 170-2 179.
- [21] 李明阳, 王丽学, 姜展博, 等. 调亏灌溉和生物炭对大豆生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 1 966-1 973.
LI Mingyang, WANG Lixue, JIANG Zhanbo, et al. Effects of regulated deficit irrigation and biochar application on growth, yield and water use efficiency of soybean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 1 966-1 973.

- [22] 张鹏, 张富仓, 吴立峰, 等. 不同灌水和施氮对河西绿洲春玉米生长、产量和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 137-143.
ZHANG Peng, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Effect of different irrigation and nitrogen fertilizer on spring maize grow yield and water use[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 137-143.
- [23] 党根友, 魏亦勤, 沈强云, 等. 灌水次数对春小麦耗水特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(6): 48-55.
DANG Genyou, WEI Yiqin, SHEN Qiangyun, et al. Effect of irrigation times on water consumption characteristics and grain yield in spring wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(6): 48-55.
- [24] 徐晓楠, 陈坤, 冯小杰, 等. 生物炭提高花生干物质与养分利用的优势研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 444-453.
XU Xiaonan, CHEN Kun, FENG Xiaojie, et al. Preponderant effect of biochar application in peanut dry matter accumulation and fertilizer nutrient use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 444-453.
- [25] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对水稻苗期生长、养分吸收及土壤矿质元素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2 952-2 959.
ZHOU Jinsong, YAN Ping, ZHANG Weiming, et al. Effects of biochar on seedling growth, nutrient absorption of japonica rice and mineral element contents of substrate soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 2 952-2 959.
- [26] 代镇, 李伟, 韩娟, 等. 生物炭对壤土持水能力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 265-273.
DAI Zhen, LI Wei, HAN Juan, et al. Influences of biochar on soil water retention capacity in the Lou soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 265-273.
- [27] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1 569-1 574.
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xuehuan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1 569-1 574.
- [28] 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): 1 110-1 118.
XU Yunxiang, HE Lili, LIU Yuxue, 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): 1 110-1 118.
- [29] NGUYEN Thithunhan, XU Chengyuan, TAHMASBIAN Iman, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J]. Geoderma, 2017, 288: 79-96.
- [30] 王浩, 焦晓燕, 王劲松, 等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 253-257.
WANG Hao, JIAO Xiaoyan, WANG Jinsong, et al. Effects of biochar on water characteristics of soil and sorghum growth conditions of soil water stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 253-257.
- [31] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 293-300.
AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shixiang, et al. Effects of biochar application on soil aggregate distribution and moisture retention in orchards[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 293-300.
- [32] 张曼玉, 高婷, 吴永波, 等. 生物炭对贵州喀斯特山地石漠化土壤理化性质和构树幼苗生长特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 177-181.
ZHANG Manyu, GAO Ting, WU Yongbo, et al. Effects of biochar on physical and chemical properties of rocky desertification and growth characteristics of Broussonetia papyrifera seedlings in Karst mountain of Guizhou area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 177-181.
- [33] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1 348-1 352.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1 348-1 352.
- [34] 王芬, 刘会, 冯敬涛, 等. 牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1 795-1 801.
WANG Fen, LIU Hui, FENG Jingtao, et al. Effects of cow dung and biochar on root growth, soil properties and nitrogen utilization of apple[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1 795-1 801.
- [35] MAJOR Julie, RONDON Marco, MOLINA Diego, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [36] 唐光木, 侯艳艳, 潘金龙, 等. 棉秆生物炭对棉花根系特性及生理代谢的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(3): 370-378.
TANG Guangmu, HOU Yanyan, PAN Jinlong, et al. Effect of cotton stalk-char on root characteristics and physiological metabolism in cotton[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(3): 370-378.
- [37] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994(1): 38-46.
LI Shengxiu, LI Shiqing, GAO Yajun, et al. Mechanism and effect of nitrogen fertilizer application on improving soil moisture utilization of dryland crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994(1): 38-46.
- [38] OBIA Alfred, MULDER Jan, HALE Sarahe, et al. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia[J]. Agronomy, 2013, 3(2): 256-274.
- [39] 刘振香, 刘鹏, 贾绪存, 等. 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 113-121.
LIU Zhenxiang, LIU Peng, JIA Xucun, et al. Effects of irrigation and fertilization on soil microbial properties in summer maize field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 113-121.
- [40] 高文翠, 杨卫君, 贺佳琪, 等. 生物炭添加对麦田土壤微生物群落代谢的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 3 998-4 004.
GAO Wencui, YANG Weijun, HE Jiaqi, et al. Effects of biochar on soil microbial community metabolism in wheat field[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(12): 3 998-4 004.
- [41] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2 713-2 717.
ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2 713-2 717.
- [42] 刘露, 王梓廷, 刘杨, 等. 长期施用生物炭对壤土土壤理化性质及微生物的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4): 596-602.
LIU Lu, WANG Ziting, LIU Yang, et al. Long-term effect of application of biochar on physiochemical properties and microorganism of loessial soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(4): 596-602.
- [43] 谢志煌, 高志颖, 郭丽丽, 等. 土壤微生物活性和生物量对干湿交替的响应[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 348-354.
XIE Zhihuang, GAO Zhiying, GUO Lili, et al. Responses of soil microbial activities and biomass to drying and wetting: A review[J]. Soils and Crops, 2020, 9(4): 348-354.
- [44] 姚玲丹, 程广焕, 王丽晓, 等. 施用生物炭对土壤微生物的影响[J]. 环境化学, 2015, 34(4): 697-704.
YAO Lingdan, CHENG Guanghuan, WANG Lixiao, et al. Effects of biochar application to microorganisms in soil[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(4): 697-704.
- [45] 王强, 耿增超, 许晨阳, 等. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2 425-2 433.
WANG Qiang, GENG Zengchao, XU Chenyang, et al. Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in loess soil[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2 425-2 433.

Change in Photosynthesis of Spring Wheat with Irrigation Amount and Biochar Amendment

GUO Song, YANG Weijun*, SONG Shilong, CHEN Yuxin, YANG Mei, HUI Chao, ZHANG Jinshan

(College of Agronomy, Xinjiang Engineering Technology Research Center for High-quality Specialty Wheat Crops,

Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: 【Objective】 Amending soil with biochar can improve soil structure and fertility, but it could make soil slightly hydrophobic. Its combined effect with irrigation on crop growth is not well understood. This paper aims to fill this knowledge gap by using spring wheat as the exemplary plant. 【Method】 The experiment was conducted in a spring wheat field in northern Xinjiang and comprised three irrigation amounts: irrigation amount used by local farmers (w_0), reducing w_0 by 10% (w_1), and reducing w_0 by 20% (w_2). For each irrigation amount, there were three biochar amendments: no biochar (b_0), adding 10 t/hm² (b_1) and 20 t/hm² (b_2) of biochar. For each treatment, we measured photosynthesis and yield of the spring wheat; its relationship with biochar amendment rate and irrigation amount was fitted to pre-defined functions. 【Result】 Biochar application amount affected leaf area index at the flowering stage significantly. Compared to b_0w_0 , reducing irrigation amount combined with a biochar amendment increased *LAI* by 9.1%~25.41%, and *SPAD* by 1.7%~10.73% 20 days after the flowering. Irrigation amount had a significant impact on photosynthesis, dry matter accumulation and yield formation. Reducing irrigation amount by 10% coupled with an appropriate biochar amendment promoted material accumulation in the plant during the flowering stage, thereby improving photosynthesis and the ultimate yield. However, when the irrigation amount was reduced by 20%, biochar amendment reduced photosynthesis, with the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductivity and intercellular CO₂ concentration decreasing by 11.58%~18.15%, 55.85%~66.3%, 67.42%~75.94% and 16.2%~27.19%, respectively, from the control. Irrigation amount affected the yield more significantly than biochar, but an appropriate biochar amendment can compensate for the yield loss due to irrigation water reduction. In all treatments we compared, b_1w_1 was most effective, increasing the grain yield by 7.57% compared b_0w_0 . b_2w_1 was most effective in increasing 1 000-grain weight, and compared to b_0w_0 , it increased the grain yield by 3.36%. 【Conclusion】 The compressive experiment showed that reducing irrigation amount currently used by local farmers by 10% combined with a 20 t/hm² application of biochar is most effective for saving water and improving spring wheat yield in northern Xinjiang.

Key words: spring wheat; biochar; water control; photosynthetic characteristics; production

责任编辑：白芳芳