

生物炭添加量对冬小麦花后干物质积累及转运的影响

赵红玉¹, 朱成立^{1*}, 黄明逸¹, 连裕雯¹, 翟亚明¹, 郑君玉²

(1.河海大学, 南京 210098; 2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要: 【目的】提高微咸水灌溉效率并降低土壤盐渍化风险。【方法】以冬小麦为研究对象, 设计避雨条件下不同微咸水-生物炭处理(CK, 淡水; B0, 5 g/L 微咸水; B15, 5 g/L 微咸水及 15 t/hm² 生物炭; B30, 5 g/L 微咸水及 30 t/hm² 生物炭; B45, 5 g/L 微咸水及 45 t/hm² 生物炭)的田间试验, 探讨了微咸水灌溉下生物炭添加量对土壤特性和冬小麦花后干物质积累及转运的影响机制。【结果】生物炭添加后土壤表层(0~20 cm)体积质量降低了2.27%~8.33%, 总孔隙度增加了4.52%~13.47%, 有机质量增加了30.02%~111.12%, 土壤表层(0~20 cm)及主根区(0~40 cm)钠吸附比降低了23.88%~33.27%和22.34%~30.80%; 15 t/hm²能够促进盐分淋洗, 降低了微咸水灌溉下土壤含盐量, 然而高剂量时将加剧盐分累积。单独微咸水灌溉下冬小麦生长受抑, 最终产量下降了12.04%。生物炭能够缓解盐胁迫下叶片早衰, 促进光合作用能力, 并增加花前干物质转运量及花后干物质积累量, 进而获取了更高的籽粒质量和收获指数。B15、B30、B45处理的最终产量较B0处理分别增加9.18%、7.73%、2.74%。【结论】15 t/hm²添加量的生物炭效果最佳, 可促进微咸水资源的农业利用。

关键词: 冬小麦; 微咸水; 生物炭; 光合; 干物质

中图分类号: S156; S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020429

OSID:



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.

0 引言

【研究意义】淡水资源供需矛盾日益突出, 合理开发咸水和微咸水资源已成为各国关注的问题。与旱作相比, 利用微咸水灌溉可获得更大的经济效益^[1-2]。然而同淡水灌溉相比, 微咸水灌溉会导致土壤中盐分的累积, 产生次生盐渍化的危险, 影响土壤质量^[3], 进而危害作物生长^[4]。因此, 采取适当的农业管理策略, 减轻灌溉不当对土壤和作物的不利影响, 对微咸水的高效利用及农业的可持续发展具有重要意义。

【研究进展】生物炭是由生物质在无氧或限氧条件下低温热解生成的富炭有机材料, 具有丰富的多孔结构、巨大的比表面积、较高的阳离子交换量以及高度稳定性^[5]。生物炭疏松多孔的结构可直接增加土壤孔隙度, 通过淋洗带走交换性 Na⁺, 降低盐渍土的碱

化度^[6]。同时生物炭能够降低盐土的淋溶损失, 显著提升盐碱土中的土壤养分^[7]。Munns 等^[8]认为盐胁迫使植物光合能力减弱, 生长受抑、衰老加速从而引起碳同化物积累量的降低, 进而造成作物的减产。而生物炭可通过改善土壤条件来促进盐胁迫下植物对养分的吸收, 提高叶片的气体交换参数, 改善光合作用^[9]。Usman 等^[10]研究表明, 生物炭可缓解盐胁迫对土壤生产力的不利影响, 提高了盐水灌溉下番茄的产量。Elbashier 等^[11]亦发现, 生物炭促进了盐水灌溉下的甜瓜产量。

【切入点】近年来, 生物炭越来越多地应用于盐渍环境的农业生产, 在盐碱土改良和劣质水灌溉中展现出较大潜力。目前生物炭试验以盆栽、土柱等形式为主, 田间微咸水灌溉-生物炭试验较少, 且生物炭的改良效果与其添加量密切相关^[10-12]。【拟解决的关键问题】以冬小麦为研究对象, 通过生物炭-微咸水灌溉田间试验, 探究微咸水灌溉下生物炭缓解叶片衰老、促进花后干物质积累及转运等机理, 提出恰当的微咸水-生物炭配套模式, 以期对冬小麦的微咸水灌溉模式提供理论依据。

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)

作者简介: 赵红玉(1996-), 女。硕士研究生, 主要从事高效灌排理论与技术研究。E-mail: zhongyuhhu@163.com

通信作者: 朱成立(1966-), 男。教授, 博士, 主要从事水土资源规划、高效灌排理论与技术研究。E-mail: clz@hhu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2018年11月—2019年6月在河海大学江宁校区节水园区的田间试验场进行。试验区位于北纬31°86′，东经118°60′，属亚热带湿润气候，年均温度

15.7℃，年均蒸发量900 mm，无霜期237 d，年均日照时间2 212.8 h，年均降水量1 021.3 mm，年内降雨不均，易出现季节性干旱。试验地点在固定式蒸渗仪测坑内，蒸渗仪面积为5.0 m² (2.5 m×2.0 m)，各蒸渗仪间通过混凝土墙体隔开，地面设移动遮雨棚。供试土壤为黄棕壤土，基本性质见表1。

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of experimental soil

土层深度/cm	颗粒组成/%			土壤体积质量/ (g cm ⁻³)	田间持水率/%	土壤盐分/ (μS·cm ⁻¹)	总孔隙度/%	有机质/ (g kg ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒					
0~20	41.04	36.36	22.60	1.32	27.32	143.2	48.97	10.07
20~40	34.18	38.47	27.35	1.36	28.78	102.9	47.43	9.98
40~60	28.28	41.83	29.89	1.41	29.38	86.7	46.62	9.86

1.2 试验设计

试验采用随机完全区组设计，试验处理为：微咸水灌溉 (B0)、微咸水灌溉和生物炭添加 15 t/hm² (B15)、微咸水灌溉和生物炭添加 30 t/hm² (B30)、微咸水灌溉和生物炭添加 45 t/hm² (B45) 以及淡水灌溉的对照组 (CK)，每个处理重复 3 次，共 15 个试验小区。供试生物炭为粉剂型秸秆炭，由小麦秸秆在无氧条件下约 550~600℃ 热解 4~6 h 制备而成。生物炭的体积质量为 0.19 g/cm³，比表面积为 9 m²/g，总孔隙度为 67.03%，通气孔隙度为 12.87%，持水孔隙度为 61.10%，pH 值为 10.24，EC 值为 4.68 dS/m，阳离子交换量为 60.8 cmol/kg，含固定碳 650 g/kg、速效磷 10.2 g/kg、速效钾 55.65 g/kg。

试验于2018年11月2日播种，供试冬小麦品种为烟农863，种植密度为300粒/m²，行距为15 cm，2019年6月2日收获。根据当地的种植习惯，播种前对试验田翻耕并分别以300、150和150 kg/hm²施用磷酸二铵、尿素和氯化钾基肥。播种前，将各处理对应的生物炭均匀摊铺在土壤表面，通过人工翻耕施入0~20 cm耕作层土体。淡水水源为节水园区自来水，微咸水为NaCl配置而成，设置矿化度5 g/L。播前灌溉80 mm底墒水。冬小麦生长过程中采取充分灌溉，采用取土烘干称重法测定土壤含水率，当60 cm深度的土壤含水率接近田间持水率的70%时进行灌水，每次灌水70 mm。微咸水处理当天用等量的盐水灌溉，采用塑料管和低压泵进行地面灌溉。为控制降雨对各处理的影响，冬小麦生育期内非雨天开棚，雨天关棚。试验在2019年(2月26日、4月7日、21日、30日和5月12日)进行了5次灌溉。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤指标

1) 体积质量、孔隙度及有机质量

冬小麦收获后，用环刀(体积100 cm³)和土钻(直径2 cm)在表层(0~20 cm)取原状土样，每个小区随机取3次计算平均值。

环刀土样在烘箱105℃下烘干至恒质量，测得干土质量，体积质量计算式为：

$$\text{土壤体积质量} = \text{干土质量} / \text{环刀体积} \quad (1)$$

环刀土样置于去离子水中浸泡24 h后，测得饱和和湿土质量。孔隙度计算式为：

$$\text{土壤孔隙度} = 1 - \text{干土质量} / \text{湿土质量} \quad (2)$$

采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质量。

2) 电导率 (EC_{1:5}) 及钠吸附比 (SAR)

冬小麦收获后，用土钻在0~20 cm和20~40 cm取原状土样，每个小区随机取3次计算平均值。土样置于温室自然风干后，将其充分研磨过1 mm标准筛，按照土水比1:5配制土壤浸提液，充分震荡后用离心机进行固液分离，用针筒提取出上层清液，用DS-307A型电导率仪测定土壤电导率。用ICP-MS电感耦合等离子体质谱法测定土壤可溶性Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺离子量，土壤钠吸附比计算式为：

$$\text{SAR} = [\text{Na}^+] / \sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}} \quad (3)$$

1.3.2 作物叶片生长及光合作用指标

冬小麦开花后，每隔7 d监测1次冬小麦生理生长指标。

1) 叶面积指数 (LAI) 和叶面积持续期 (LAD)

在每个小区随机采集10株冬小麦植株，采用LI-3000A型叶面积仪测定单株冬小麦叶面积。叶面积指数 (LAI) 计算式为：

$$\text{LAI} = \text{单株叶面积} \times \text{单位面积株数} / \text{小区面积} \quad (4)$$

叶面积持续期 (LAD) 计算式为：

$$\text{LAD} = \frac{\text{LAI}_1 + \text{LAI}_2}{2T} \quad (5)$$

式中: LAI_1 和 LAI_2 分别为任意 2 个生长阶段的叶面积指数; T 为这 2 个生长阶段之间的时间 (d)。

2) 净光合速率 (P_n) 和气孔导度 (G_s)

在不同处理的小区中随机选取 3 片旗叶, 在测定日的 09:00—11:00, 用 LI-6800 便携式光合作用测定系统在光照强度 $1\,000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\ \text{s})$ 和二氧化碳摩尔分数 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 下测定冬小麦旗叶光合气体交换参数, 包括净光合速率 (P_n) 和气孔导度 (G_s), 测量 3 次计算平均值。光合测定时段平均温度、相对湿度及风速见表 2。

表 2 光合测定时段的气象因子

Table 2 Meteorological factor data of photosynthetic determination period

气象因子	花后时间/d				
	0	7	14	21	28
温度/ $^{\circ}\text{C}$	19.5	19.2	22.3	24.9	25.7
相对湿度/%	78.3	66.7	61.5	83.3	56.0
风速/ $(\text{m}\ \text{s}^{-1})$	5.8	2.3	2.7	4.6	3.7

1.3.3 冬小麦籽粒形成及干物质转运指标

在各处理小区随机选取代表性样株 30 株并去除根部。花期按整株即全部营养器官、成熟期按籽粒和营养器官分样, $105\ ^{\circ}\text{C}$ 杀青后 (成熟期样品不杀青) $80\ ^{\circ}\text{C}$ 烘至恒质量并称量, 每隔 7 d 监测 1 次籽粒形成指标。干物质相关指标计算式为:

干物质转运量=花期单株营养器官干质量-成熟期单株营养器官干质量; 干物质转运率 (%) = 干物质转运量/花期单株营养器官干质量 $\times 100$; 花后干物质积累量=成熟期单株籽粒干质量-干物质转运量; 花后干物质贡献率 (%) = 花后干物质积累量/成熟期单株籽粒干质量 $\times 100$; 干物质转运贡献率 (%) = 干物

质转运量/成熟期单株籽粒干质量 $\times 100$ 。

1.3.4 冬小麦最终产量指标

冬小麦收获时, 从每个地块中心的 $1\ \text{m}^2$ 区域收集作物, 并风干至恒质量, 获得地上生物量。使用脱粒机对植株进行脱粒, 测量单位面积的籽粒产量, 并计算收获指数。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 进行记录、整理与作图, 并运用 SPSS 20 对试验数据进行方差分析, 采用 Duncan 法进行多重比较 ($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 微咸水灌溉下生物炭添加量对土壤特性的影响

表 3 为不同处理下土壤体积质量、总孔隙度、有机质 (SOM)、电导率及钠吸附比。随着生物炭添加量的增多, 土壤体积质量呈降低趋势, 总孔隙度增加, 有机质量增幅明显。与 B0 处理相比, B15、B30、B45 处理的体积质量分别降低了 2.27%、4.55% 和 8.33%, 总孔隙度分别增加了 4.52%、9.19% 和 13.47%, SOM 分别增加了 30.02%、65.06% 和 111.12%。单独微咸水灌溉处理下土壤表层和主根区的 $EC_{1:5}$ 和 SAR 值较 CK 分别高出 237.12%、225.42% 和 285.83%、277.87%。 $15\ \text{t}/\text{hm}^2$ 与 $30\ \text{t}/\text{hm}^2$ 的生物炭添加量有效促进了盐分淋洗, B15 和 B30 处理的土壤表层和主根区 $EC_{1:5}$ 较 B0 处理分别降低了 9.89%、3.82% 和 8.33%、3.39%, 而 $45\ \text{t}/\text{hm}^2$ 的高生物炭添加量下, 土壤电导率分别增加了 5.39% 和 3.65%。生物炭显著降低了土壤的钠吸附比。与 B0 处理相比, B15、B30、B45 处理的土壤表层和主根区 SAR 分别下降 23.88%、28.78%、33.27% 和 22.34%、27.11%、30.80%。

表 3 微咸水灌溉添加生物炭后的土壤特性

Table 3 Soil properties under brackish water irrigation and biochar application

处理	体积质量/ ($\text{g}\ \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	SOM/($\text{g}\ \text{kg}^{-1}$)	$EC_{1:5}/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$		SAR/($\text{mmol}^{1/2}\cdot\text{L}^{-1/2}$)	
				表层 (0~20 cm)	主根区 (0~40 cm)	表层 (0~20 cm)	主根区 (0~40 cm)
CK	1.31 $\pm$ 0.02a	48.56 $\pm$ 1.75c	10.58 $\pm$ 0.51d	132 $\pm$ 7.94d	118 $\pm$ 10.54d	1.27 $\pm$ 0.62c	1.22 $\pm$ 0.47c
B0	1.32 $\pm$ 0.03a	48.19 $\pm$ 2.21c	10.16 $\pm$ 0.34d	445 $\pm$ 10.39b	384 $\pm$ 17.58ab	4.90 $\pm$ 0.49a	4.61 $\pm$ 0.75a
B15	1.29 $\pm$ 0.03ab	50.37 $\pm$ 1.43bc	13.21 $\pm$ 1.03c	401 $\pm$ 9.54c	352 $\pm$ 11.36c	3.73 $\pm$ 0.35b	3.58 $\pm$ 0.22b
B30	1.26 $\pm$ 0.02b	52.62 $\pm$ 2.37ab	16.77 $\pm$ 0.78b	428 $\pm$ 14.11b	371 $\pm$ 8.72bc	3.49 $\pm$ 0.28b	3.36 $\pm$ 0.36b
B45	1.21 $\pm$ 0.04c	54.68 $\pm$ 2.10a	21.45 $\pm$ 1.27a	469 $\pm$ 13.08a	398 $\pm$ 14.73a	3.27 $\pm$ 0.42b	3.19 $\pm$ 0.19b

注 数据为平均值 $\pm$ 标准差。每列数值后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

2.2 微咸水灌溉下生物炭添加量对冬小麦花后叶片生长和光合作用的影响

图 1 为不同处理下冬小麦叶面积指数及叶面积持续期。由图 1 可知花后 7 d 内, 冬小麦 LAI 值保持

在较高水平, 但随花后天数的增加明显下降, LAD 值始终呈下降趋势。微咸水灌溉显著降低了冬小麦的叶面积指数和叶面积持续期, 使作物叶片生长受抑制, 出现了明显的叶早衰现象。花后 28 d 内, CK 的 LAI

和 LAD 分别比 $B0$ 处理高出 22.88%~49.31% 和 24.78%~46.50%。生物炭的添加改善了微咸水灌溉下冬小麦的叶片生长情况，花后 28 d 内的叶面积指数及叶面积持续期均高于单独微咸水灌溉处理。 $B15$ 、

$B30$ 、 $B45$ 处理的 LAI 值分别比 $B0$ 处理高出 16.99%~34.27%、13.73%~28.25% 和 5.31%~14.61%， $B15$ 、 $B30$ 、 $B45$ 处理的 LAD 值分别比 $B0$ 处理高出 19.73%~33.97%、14.80%~25.14% 和 5.94%~13.24%。

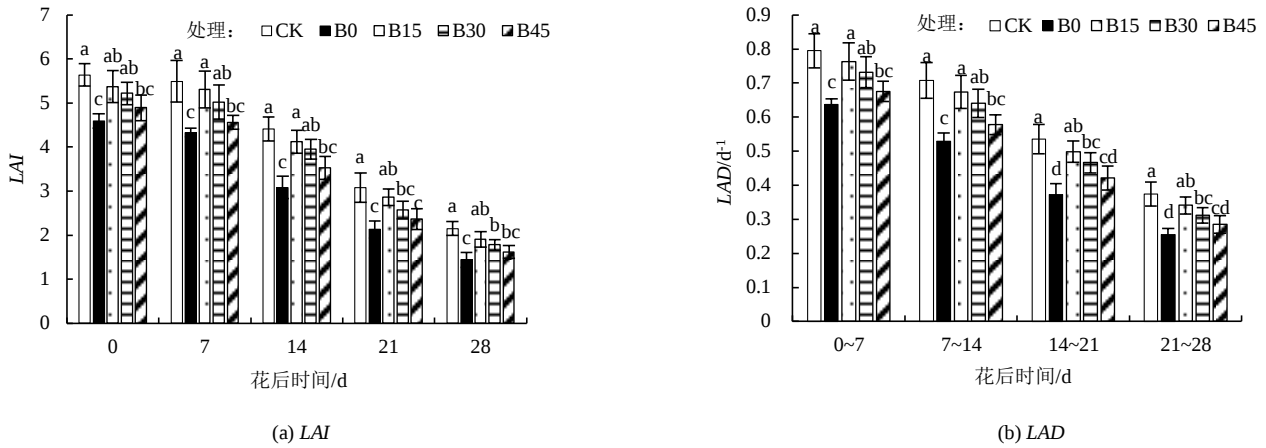


图 1 微咸水灌溉添加生物炭后冬小麦花后叶片生长情况

Fig.1 Leaf growth of winter wheat after anthesis under brackish water irrigation and biochar application

图 2 为不同处理下冬小麦净光合速率及气孔导度。由图 2 可知，净光合速率在花后 7 d 达到顶峰，随生长进程的推进不断降低，气孔导度自开花后呈持续下降趋势。微咸水灌溉可显著抑制冬小麦旗叶的光合作用， $B0$ 处理的 P_n 和 G_s 较 CK 分别减少 20.51%~56.38% 和 20.57%~49.36%。微咸水灌溉下，

添加生物炭的冬小麦表现出较高的净光合速率和气孔导度。与 $B0$ 处理相比， $B15$ 、 $B30$ 、 $B45$ 处理的 P_n 和 G_s 分别高出 18.29%~100.00%、12.37%~75.61%、2.69%~31.71% 和 20.32%~68.35%、14.34%~44.30%、7.17%~15.20%。

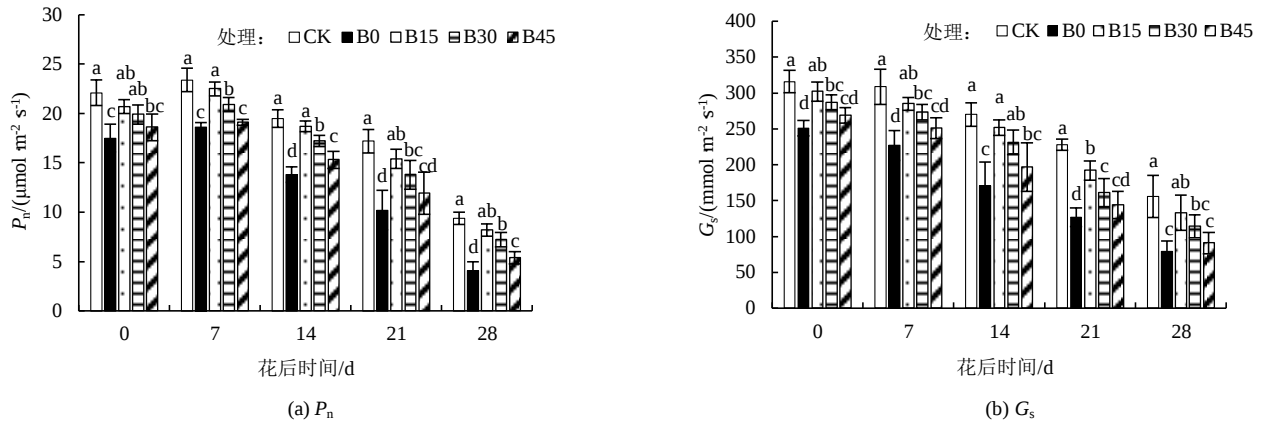


图 2 微咸水灌溉添加生物炭后冬小麦花后光合作用

Fig.2 Photosynthesis of winter wheat after anthesis under brackish water irrigation and biochar application

2.3 微咸水灌溉下生物炭添加量对冬小麦籽粒形成、干物质转运的影响

图 3 为不同处理下单株冬小麦营养器官干物质质量及籽粒质量的变化。由图 3 可知，冬小麦营养器官干物质质量随着花后时间先升高后降低，花后 14 d 最高。冬小麦灌浆初期，营养器官干物质生产量大于向籽粒的转运量，质量呈增加趋势。随着植株老化，灌浆后期干物质生产量降低并小于转运量，质量逐渐减少。开花后，营养器官干物质质量表现为： $CK > B15$ 处理 $> B30$ 处理 $> B45$ 处理 $> B0$ 处理，单独微咸水灌溉

较淡水灌溉显著降低了营养器官的干物质质量，而生物炭有效提升了营养器官的干物质质量。开花后，籽粒质量不断增加，在成熟期达到最大值，微咸水灌溉下籽粒质量增幅较小。与 CK 相比，花后 7~28 d 内， $B0$ 处理的籽粒质量显著减少了 12.17%~22.58%。生物炭添加后冬小麦籽粒形成较好，籽粒质量均高于单独微咸水灌溉处理，花后 28 d 时 $B15$ 、 $B30$ 、 $B45$ 处理的籽粒质量分别达到 CK 的 96.75%、94.16% 和 89.61%。

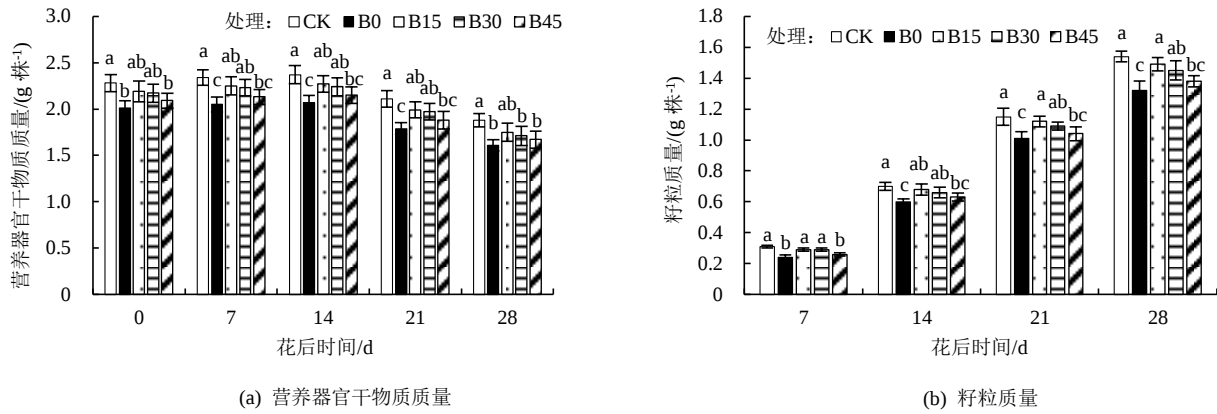


图3 微咸水灌溉添加生物炭后冬小麦籽粒质量的变化

Fig.3 Changes of winter wheat grain weight under brackish water irrigation and biochar application

表4 为不同处理对冬小麦干物质积累及转运的影响。单独微咸水灌溉抑制了干物质生产，B0 处理花前干物质质量、成熟期营养器官干物质质量和籽粒质量较 CK 降低了 11.84%、15.85%、15.66%。生物炭提高了干物质生产，尤其在 15 t/hm² 和 30 t/hm² 添加量下。与 CK 相比，B15、B30、B45 处理的花前干物质质量仅减少 3.95%、4.82%、8.33%，成熟期营养器官干物质质量减少 7.65%、9.29%、12.57%，籽粒质量减少 3.01%、6.02%、11.45%。微咸水灌溉促进了干物质转运，B0、B15、B30、B45 处理的花前营养器官干物质转运率较 CK 显著增加了 18.48%、15.74%、19.03%、18.75%，贡献率增加了 23.41%、14.24%、20.25%、22.53%。生物炭提高了干物质的转运量，B15、B30、B45 处理的转运量较 B0 处理

明显提高了 6.38%、8.51%、4.26%。从干物质质量构成来看，各处理花后干物质积累量占比为 66.43%~72.80%，是籽粒干物质的重要来源。与淡水灌溉相比，单独微咸水灌溉下花后干物质积累量及籽粒贡献率大幅下降，B0 处理较 CK 降低了 23.14% 和 8.75%。生物炭的添加提高了花后干物质积累，B15、B30、B45 处理的花后干物质积累量及贡献率较 B0 处理高出了 5.38%~19.35% 和 0.36%~3.76%。可见，微咸水有利于促进花前干物质向籽粒转运，但单独使用微咸水限制了整体干物质生产能力，花前干物质转运量和花后干物质积累量均较低，导致籽粒质量大幅减小。然而，生物炭处理的冬小麦在保持较高花前转运量的同时，有效提升了花后干物质积累量，从而使籽粒形成较好。

表4 微咸水灌溉添加生物炭后干物质积累及转运量

Table 4 Dry matter accumulation and transport amount under brackish water irrigation and biochar application

处理	花前干物质质量/(g 株 ⁻¹)	成熟期		开花前营养器官干物质贮藏再转运			花后干物质积累	
		营养器官干物质质量/(g 株 ⁻¹)	籽粒质量/(g 株 ⁻¹)	转运量/(g 株 ⁻¹)	转运率/%	贡献率/%	积累量/(g 株 ⁻¹)	贡献率/%
CK	2.28±0.09a	1.83±0.09a	1.66±0.11a	0.45±0.01c	19.75±0.60b	27.20±2.21c	1.21±0.12a	72.80±2.21a
B0	2.01±0.08b	1.54±0.08b	1.40±0.06c	0.47±0.03bc	23.40±1.43a	33.57±1.07a	0.93±0.04c	66.43±1.07c
B15	2.19±0.11ab	1.69±0.11ab	1.61±0.08ab	0.50±0.02ab	22.86±1.07a	31.08±0.79b	1.11±0.07ab	68.92±0.79b
B30	2.17±0.10ab	1.66±0.08b	1.56±0.08ab	0.51±0.02a	23.51±0.58a	32.71±0.92ab	1.05±0.06bc	67.29±0.92bc
B45	2.09±0.08b	1.60±0.07b	1.47±0.04bc	0.49±0.02ab	23.45±0.72a	33.33±0.60ab	0.98±0.03c	66.67±0.60bc

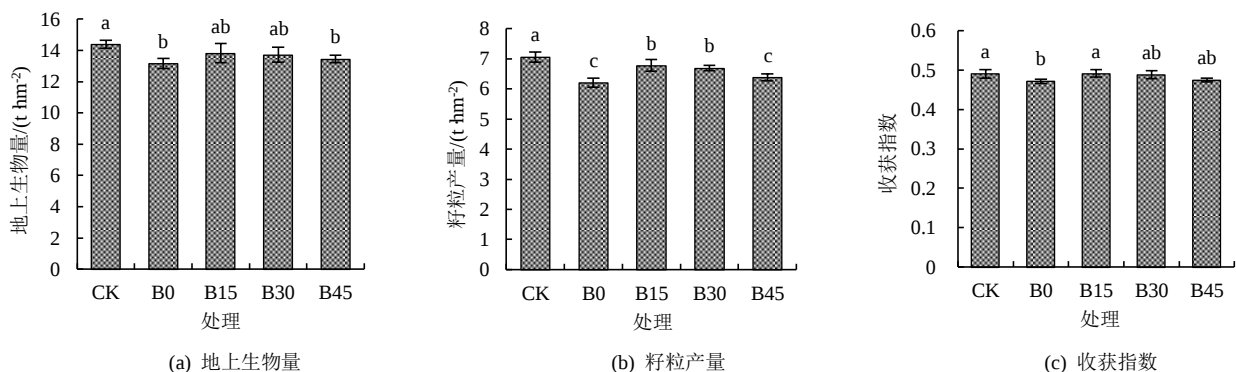


图4 微咸水灌溉添加生物炭后冬小麦最终产量和收获指数

Fig.4 The final yield and harvest index of winter wheat under brackish water irrigation and biochar application

2.4 微咸水灌溉下生物炭添加量对冬小麦最终产量的影响

图4为不同处理冬小麦收获时地上生物量、籽粒产量和收获指数。由图4可知微咸水灌溉显著抑制了冬小麦生产。与CK相比, B0处理的地上生物量、籽粒产量下降了8.48%、12.04%。在所有生物炭处理下, 冬小麦籽粒产量与单独微咸水灌溉相比均有一定程度的提高。B15、B30、B45处理的地上生物量及籽粒产量较B0处理分别增加4.94%、4.18%、2.13%和9.18%、7.73%、2.74%。特别在15 t/hm²与30 t/hm²的添加量下, 冬小麦产量有显著增幅, 这与生物炭处理下冬小麦收获指数的提高有关。B15、B30处理的收获指数较B0处理分别提高了4.09%、3.46%。B45处理下冬小麦产量增幅较小, 与B0处理无显著差异。

3 讨论

生物炭具有多孔结构和较大的比表面积, 在不同类型土壤中加入生物炭, 均表现出体积质量降低的现象^[13]。本研究中, 添加生物炭后土壤体积质量亦显著降低, 且总孔隙度增加, 可能是因为试验采用的生物炭体积质量较小, 添加后可以改善土壤密实度, 同时生物炭促进了土壤颗粒团聚, 有利于多级孔隙的形成^[14]。试验中生物炭处理的土壤有机质量增加, 这与冉成等^[7]的研究结果一致, 原因可能是生物炭本身含有丰富稳定的有机碳, 且其较强的吸附能力可促进有机小分子聚集, 减少养分淋失。试验中的生物炭含有一定量的Ca²⁺和Mg²⁺, 添加后可直接降低土壤钠吸附比。此外, 生物炭可以提高土壤阳离子交换量, 促进Na⁺从交换点的迁移, 并通过淋洗带走交换性Na⁺^[15]。微咸水灌溉下, B15处理的土壤电导率较B0处理显著降低, 这可能是因为生物炭改善了土壤结构, 增强了水分入渗性能, 促进了Na⁺的淋洗^[6]。同时, 也因为生物炭能够阻隔土壤毛细管中盐分随水分向上运移, 因此缓解了表层盐分累积^[16]。然而, 随着生物炭添加量的增多, 土壤含盐量上升, 这是由于生物炭中含有部分可溶性盐分。

光合作用是植物生长发育的基础, 作物生物量的90%以上来自光合产物^[17]。本试验中, 单独微咸水灌溉下冬小麦叶片发生早衰, 光合能力显著受抑。可能是因为微咸水灌溉下作物根系土层盐分累积, 土壤溶质势的变化诱发植物细胞生理干旱, 气孔导度下降, 叶片生长受限, 长期盐分胁迫下毒性离子损害细胞结构与功能, 影响光合活性^[18]。生物炭处理的冬小麦在盐胁迫下维持了较高的叶面积指数、叶面积持续期、气孔导度及净光合速率。Jin等^[19]亦报道了生物炭可

降低盐分胁迫, 缓解植物水分亏缺, 减弱毒性离子积聚, 提高叶片活性, 促进光合作用。本研究中, 适量的生物炭能够改善土壤结构, 提高肥力水平, 降低盐渍化程度, 为微咸水灌溉下的冬小麦创造更有利的生长环境, 提升抗盐性能。

小麦籽粒产量的提高与干物质积累转运特性的改良密切相关^[20]。有研究表明, 适度胁迫能够促进光合同化物向籽粒的运输, 加快灌浆速率^[21]。本试验微咸水灌溉下冬小麦花前干物质转运率提高, 与前人结果一致^[21]。但单独微咸水灌溉下由于花前干物质生产不足, 转运量较少, 生物炭的添加使冬小麦在保持较高转运率的基础上有效提高了转运量。田中伟等^[22]发现叶片光合面积及光合能力直接影响小麦花后光合产物和籽粒产量。本研究中, 单独微咸水灌溉下叶片提前衰老, 光合同化作用大幅削减, 而生物炭处理下花后叶片生长较好, 光合能力较强, 冬小麦花后干物质的积累量与贡献率提高, 促进了籽粒的生长发育。庞桂斌等^[23]报道微咸水灌溉下小麦的籽粒产量与干物质积累、收获指数呈正相关。本研究中, 生物炭处理的冬小麦地上生物量和收获指数均有增加, 进而提高了最终产量。可见, 生物炭能够改善微咸水灌溉下冬小麦干物质的积累转运特性, 有利于冬小麦植株形成较多的光合同化物, 充分满足籽粒灌浆的需要, 因而缓解了盐分胁迫对最终产量的负面影响。

综上, 生物炭土壤改良剂能够促进微咸水资源在冬小麦灌溉生产中的应用。微咸水灌溉下, 15 t/hm²和30 t/hm²生物炭改善了作物-土壤生长环境, 有利于盐分淋洗, 降低盐胁迫危害, 提高了花前干物质转运量、花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率, 并增加了收获指数, 较单独微咸水灌溉增产9.18%和7.73%。而45 t/hm²下, 可能随着添加量增多, 土壤中可溶性盐分增多, 产量增幅不明显。本研究建立在一年灌溉基础上, 还需开展长期试验进行深入研究和探讨。

4 结论

1) 生物炭改善了土壤性质, 使土壤体积质量降低、总孔隙度增加、有机质量提高、钠吸附比降低。15 t/hm²生物炭促进了盐分淋洗, 主根区(0~40 cm)EC_{1:5}降低了8.33%。由于生物炭含有部分可溶性盐分离子, 土壤含盐量随生物炭添加量增加而增加。

2) 生物炭的加入为作物生长提供良好的环境, 缓解了盐胁迫下的冬小麦叶片早衰, 提高了光合作用能力。

3) 生物炭改良了花后干物质积累转运特性, 促进了盐胁迫下的冬小麦生产。B15处理和B30处理下

籽粒产量增幅明显。综合试验成果并从经济合理角度, 15 t/hm²生物炭是适宜的添加量, 可促进微咸水资源的高效利用。

参考文献:

- [1] 郭丽, 郑春莲, 曹彩云, 等. 长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 183-190.
GUO Li, ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, et al. Effect of long-term saline water irrigation on photosynthetic characteristics of winter wheat and soil salt content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 183-190.
- [2] WANG Q M, HUO Z L, ZHANG L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 125-138.
- [3] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [4] 李国安, 蒋静, 马娟娟, 等. 咸水灌溉对土壤水盐分布和小麦产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(6): 544-552.
LI Guo'an, JIANG Jing, MA Juanjuan, et al. Effect of saline water irrigation on water-salt distribution and yield of wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(6): 544-552.
- [5] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37(1): 192-199.
TANG Xingcan, CHEN Jinlin. Review of effect of biochar on soil physi-chemical and microbial properties[J]. Ecological Science, 2018, 37(1): 192-199.
- [6] 孙军娜, 董陆康, 徐刚, 等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 532-538.
SUN Junna, DONG Lukang, XU Gang, et al. Effects of furfural and its biochar additions on physical-chemical characteristics of a saline soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 532-538.
- [7] 冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 46-51.
RAN Cheng, SHAO Xiwen, ZHU Jing, et al. Amending soda saline-alkali paddy soil with biochar improves soil nutrients and rice yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 46-51.
- [8] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [9] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14): 12 700-12 712.
- [10] USMAN A R A, AL-WABEL M I, OK Y S, et al. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation[J]. Pedosphere, 2016, 26(1): 27-38.
- [11] ELBASHIER M, SHAO X H, ALI A, et al. Effect of digestate and biochar amendments on photosynthesis rate, growth parameters, water use efficiency and yield of Chinese melon (cucumis melo L.) under saline irrigation[J]. Agronomy, 2018, 8(2): 22.
- [12] XIAO Q, ZHU L X, SHEN Y F, et al. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 284-293.
- [13] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1-12.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1-12.
- [14] DONG X L, GUAN T, LI G T, et al. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1 481-1 497.
- [15] WU Y, XU G, SHAO H. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil[J]. Solid Earth, 2014, 5(2): 665-671.
- [16] 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
XU Jian. Study on the influence of biochar experimental on the migration of soil water and salt[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [17] MAKINO A. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 125-129.
- [18] 张金林, 李惠茹, 郭姝媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 220-236.
ZHANG Jinlin, LI Huiru, GUO Shuyuan, et al. Research advances in higher plant adaptation to salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(12): 220-236.
- [19] JIN F, RAN C, ANWARI Q A, et al. Effects of biochar on sodium ion accumulation, yield and quality of rice in saline-sodic soil of the west of Songnen plain, northeast China[J]. Plant Soil and Environment, 2018, 64(12): 612-618.
- [20] 靖建国, 李有芳, 贾姝萍, 等. 花后高温胁迫下外施多胺对小麦干物质转运及籽粒生理特性影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 8-14.
JING Jianguo, LI Youfang, JIA Shuping, et al. Effects of applied polyamines on wheat assimilates transport and grain physiological characteristics under high temperature stress after anthesis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 8-14.

- [21] FAROOQ M, HUSSAIN M, SIDDIQUE K H M. Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, 33(4): 331-349.
- [22] 田中伟, 王方瑞, 戴廷波, 等. 小麦品种改良过程中物质积累转运特性与产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4): 801-808.
- TIAN Zhongwei, WANG Fangrui, DAI Tingbo, et al. Characteristics of dry matter accumulation and translocation during the wheat genetic improvement and their relationship to grain yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(4): 801-808.
- [23] 庞桂斌, 徐征和, 王海霞, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(1): 35-41.
- PANG Guibin, XU Zhenghe, WANG Haixia, et al. Effect of irrigation with slight saline water on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(1): 35-41.

Amending Soil with Biochar to Improve Accumulation and Translocation of Dry Matter after Anthesis in Winter Wheat

ZHAO Hongyu¹, ZHU Chengli^{1*}, HUANG Mingyi¹, ZE Yuwen¹, ZHAI Yaming¹, ZHENG Junyu²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: 【Background】 Winter wheat is a staple crop in China, but in many parts of the country rainfall during its growth season cannot meet its demand for water. Irrigation is, therefore, essential to safeguarding winter wheat production. The increasing disparity between water supply and demand has become a challenge in food production, and using saline water and brackish water as a supplementary irrigation water source has thus attracted increasing interest despite their risk of soil salinization. 【Objective】 The purpose of this paper is to experimentally investigate the feasibility of amending soil with biochar to ameliorate the risk of soil salinization induced by irrigation with saline water. 【Method】 The experiments were conducted in a rain-shelter and compared different combinations of biochar amendment and saline water with salt content 5 g/L: Freshwater irrigation (CK), saline water irrigation without biochar amendment (B0), saline water irrigation with 15t/hm² biochar amendment (B15), saline water irrigation with 30 t/hm² biochar amendment (B30), saline water irrigation with 45 t/hm² biochar amendment (B45). In each treatment, we measured the change in soil properties and dry matter accumulation and translocation after the anthesis stage. 【Result】 Biochar amendment significantly improved soil properties, with bulk density of the top 0~20 cm soil decreasing by 2.27%~8.33%, and the associated porosity, organic matter increasing by 4.52%~13.47% and 30.02%~111.12%, respectively. In the meantime, it also reduced the sodium adsorption ratio in the top 0~20 cm and the root zone (0~40 cm) soils by 23.88%~33.27% and 22.34%~30.80% respectively. Amending soil with biochar at 15 t/hm² facilitated salt leaching and reduced salt accumulation in the topsoil induced by saline water irrigation, but when the applied biochar exceeded a threshold, a further increase in biochar application could increase salt content and salt accumulation in the topsoil. It was also found that amendment with biochar under salt stress could alleviate premature senescence, promote photosynthesis, in addition to maintaining high leaf area index, leaf area duration and stomatal conductance. Biochar was able to improve dry matter accumulation and translocation in the vegetative organs before the anthesis stage, and maintain a good dry matter production capacity after the anthesis stage, thereby improving grain weight and harvest index. Compared with B0 without biochar amendment, B15, B30 and B45 increased grain yield by 9.18%, 7.73% and 2.74%, respectively. 【Conclusion】 Biochar amendment can improve soil properties and increase the yield of winter wheat when irrigated with saline water, but it needs to be used with care as over-application biochar could lead to salt accumulation and inhibit plant growth. In our study, applying biochar at 15 t/hm² is optimal to reduce salt accumulation and improve crop yield.

Key words: winter wheat; brackish water irrigation; biochar amendment; photosynthesis; dry matter accumulation and translocation

责任编辑：赵宇龙