

生物炭对盐胁迫下黄瓜叶片抗氧化酶活性和矿质元素累积的影响

张功臣, 秦玉红, 王 波, 展恩军, 李 磊, 张守才*

(青岛市农业科学研究院, 山东 青岛 266100)

摘要:【目的】研究生物炭对盐胁迫下设施黄瓜生长和生理特性的影响。【方法】以设施黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 专用品种‘翠龙’为试验材料, 开展温室盆栽试验, 设非盐胁迫和盐胁迫下栽培基质(草炭:蛭石=2:1)中添加 0% (B0, w/w)、3% (B3) 和 5% (B5) 的花生壳炭共 6 个处理, 调查黄瓜的生长、产量、品质、叶片抗氧化酶活性以及矿质元素含量等指标。【结果】生物炭施用可明显提高黄瓜的耐盐性, 在 NaCl 胁迫下, B5 处理黄瓜的株高、最大单叶叶面积、产量和抗坏血酸含量均显著高于不施生物炭处理, 且 B3 和 B5 处理的黄瓜果实硝酸盐含量在非盐胁迫和盐胁迫下均显著低于对照。盐胁迫下, 春、秋两季栽培试验中 B5 处理黄瓜产量分别为对照处理的 2.97 倍和 2.57 倍。生物炭处理使黄瓜叶片抗氧化酶活性在盐胁迫下维持较高水平, 特别是 B5 处理黄瓜植株叶片超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性与对照相比显著增加而丙二醛 (MDA) 含量与对照相比显著降低。盐胁迫下, 生物炭处理黄瓜顶部叶片中氮和钾的含量与对照相比显著升高, 磷、钠、钙和镁的含量与对照相比显著降低; 而在底部叶片中除钠含量显著高于对照外, 其他元素的含量在不同生物炭施用量间存在差异。【结论】基质中添加适量的生物炭促进盐胁迫下黄瓜生长, 增强抗氧化酶活性, 促进氮和钾在顶部叶片的累积, 减少钠的累积, 缓解盐胁迫对黄瓜的伤害, 且以添加 5% 生物炭处理效果较好。

关键词: 生物炭; 黄瓜; 盐胁迫; 抗氧化酶活性; 矿质营养元素

中图分类号: S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)04-0931-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021102204

张功臣, 秦玉红, 王 波, 展恩军, 李 磊, 张守才. 生物炭对盐胁迫下黄瓜叶片抗氧化酶活性和矿质元素累积的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 931 - 938

ZHANG Gong-chen, QIN Yu-hong, WANG Bo, ZHAN En-jun, LI Lei, ZHANG Shou-cai. Effects of Biochar on the Antioxidant Enzyme Activities and Mineral Element Contents In Cucumber Leaves under Salt Stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 931 - 938

【研究意义】土壤次生盐渍化是设施蔬菜优质高效生产的重要限制因子之一^[1]。据李涛等^[2]报道, 蔬菜种植大省山东省约有 39.73% 的设施菜地出现不同程度的盐渍化现象, 其中, 轻度盐渍化菜地占 28.64%, 中度盐渍化菜地占 8.37%, 重度盐渍化菜地占 2.29%, 盐土为 0.43%。次生盐渍化的成因与高度集约化的生产模式、高水平的肥料投入以及不合理的水肥管理密切相关, 生产中主要通过优化化肥施用量、增施有机肥和生物菌肥、施用土壤调理剂、合理轮作等综合防控手段来治理这一土壤障碍^[3]。生物炭是由农林生物质废弃物 (如锯木屑、秸秆、稻壳、粪肥等) 在无氧或缺氧状态下经相对低温 (≤ 700 °C) 热裂解而成的理化性状稳定的固态富碳

物质, 其良好的离子交换能力以及较强的吸收吸附特性为次生盐渍化土壤改良提供了可行途径^[4-5]。

【前人研究进展】盐胁迫对植物的危害主要是渗透胁迫和离子毒害。Thomas 等^[6]研究表明高剂量的生物炭 (50 t ha^{-1}) 主要通过 NaCl 的吸附作用以及增加土壤的持水能力缓解盐胁迫对两种草本植物的危害。Hammer 等^[7]也研究发现类似的吸附机制在生物炭缓解生菜盐胁迫中发挥了重要作用。Kim 等^[8]研究发现, 施用 5% (w/w) 的生物炭可增加围垦滩涂土壤中水稳性团聚体的稳定性, 提高土壤中磷含量, 其自身的富钾特性可增加土壤中钾含量, 减少作物对钠吸收, 进而缓解盐胁迫, 提高玉米产量。植物受盐胁迫后体内积累大量活性氧, 引起膜脂过氧化,

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 青岛市科技惠民示范引导专项 (21-1-4-ny-15-nsh) 和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-23-G10) 资助

作者简介: 张功臣 (1986-), 男, 山东青岛人, 博士, 副研究员, 主要从事设施蔬菜栽培研究。E-mail: gczhangnky@163.com

*通讯作者: E-mail: zsc403@163.com

是造成盐害的重要原因。Farhangi-abriz 等^[9]研究发现生物炭通过缓解氧化胁迫减少盐胁迫对菜豆幼苗的危害,盐胁迫条件下施用 20% 生物炭处理菜豆幼苗叶片中活性氧 O_2^- 、 H_2O_2 以及丙二醛 (MDA) 的含量明显降低,并且抗氧化酶活性和渗透调节物质含量维持在较低水平。此外,生物炭还可通过改善土壤微生物群落结构,提高荧光假单胞菌属和芽孢杆菌属有益微生物的丰度,促进作物生长,提高作物耐盐性^[10]。【本研究切入点】黄瓜是设施栽培重要的蔬菜作物之一,由于其根系弱、分布较浅,对盐渍化环境敏感,由次生盐渍化引起的盐胁迫已成为影响黄瓜产量和品质的重要限制因子^[11]。生产中迫切需要改良盐渍化土壤以及提高作物耐盐性的方法,然而目前关于生物炭缓解设施蔬菜作物盐胁迫作用效果的相关研究较为缺乏^[5]。【拟解决的问题】本研究以黄瓜为研究对象,通过基质盆栽试验模拟盐胁迫环境,解析生物炭施用对盐胁迫下黄瓜生长、抗氧化酶活性和矿质元素累积的影响,以期生物炭在设施蔬菜栽培中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

黄瓜‘翠龙’由青岛市农业科学研究院提供,为设施栽培专用品种。生物炭选用 450 °C ~ 550 °C 条件下缺氧裂解而成的花生壳炭,主要理化特性如下: pH 8.60、碱解氮 116.5 mg kg⁻¹、速效磷 371.0 mg kg⁻¹、速效钾 1.10 g kg⁻¹、有机质 35.56%、总盐分 13.40 g kg⁻¹、全氮 0.94%、全磷 0.17%、全钾 2.25%。无土栽培基质(草炭:蛭石 = 2:1)购自山东商道生物科技股份有限公司。

1.2 试验设计

盆栽试验分别于 2020 年春季 3 ~ 6 月和秋季 8 ~ 11 月在青岛市农业科学研究院玻璃温室进行。春季黄瓜定植前,将花生壳炭过 2 mm 筛后,按比例一次性添加到栽培基质中,充分混匀。采用随机区组设计,设盐胁迫和非盐胁迫条件下栽培基质中分别添加质量比 0% (B0)、3% (B3) 和 5% (B5) 的花生壳炭 6 个处理,每个处理重复 3 次。植株栽培和水肥管理方法参照张功臣等^[12]的方法进行。

盐胁迫处理:黄瓜幼苗定植后每隔 2 天浇一次 1/2 浓度园试配方营养液,控制 EC 值在 1.2 ~ 1.3 ds m⁻¹,定植 2 周后开始盐胁迫处理。盐处理参照孙

德智等^[13]的方法进行,具体如下:每隔 1 天浇一次含 NaCl 的 1/2 浓度园试配方营养液,每株浇 1 L。为避免盐激反应,NaCl 处理浓度从 50 mmol L⁻¹ 开始以 50 mmol L⁻¹ 为梯度逐步增加至 150 mmol L⁻¹,此时定为 NaCl 胁迫处理开始,盐处理 20 天后每个处理随机选 6 株进行生长指标统计,测定株高、叶片数、茎粗、最大单叶叶面积。同时,取黄瓜植株顶部起第 4 片完全展开叶片测定抗氧化酶活性和丙二醛含量;分别取顶部起第 4 片完全展开叶片以及底部起第 4 片叶测定矿质元素含量。

1.3 研究方法

生长及产量指标:株高采用卷尺测定,茎粗采用游标卡尺测定,叶面积的测定参照裴孝伯等^[14]报道的方法测定。在结瓜期,分次采收各处理组商品瓜,累计计产。

果实品质的测定参照李合生^[15]的方法进行。结瓜盛期采收各处理大小均匀的 10 根黄瓜,匀浆后测定抗坏血酸 (Vc)、硝酸盐和可溶性固形物含量。其中,抗坏血酸 (Vc) 含量采用 2,6-二氯酚测定法测定,硝酸盐含量采用水杨酸比色法测定,可溶性固形物含量采用手持式折光仪测定。

抗氧化酶活性:酶活测定试剂盒购自苏州格锐思生物科技有限公司,超氧化物歧化酶 (SOD) 采用 WST-8 法测定^[16];过氧化物酶 (POD) 采用愈创木酚比色法测定^[15];丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[15]。

叶片矿质元素测定参照鲍士旦等^[17]的方法进行,具体如下:叶片 N 含量采用凯氏定氮法测定;P 含量采用钼锑抗比色法测定;K⁺和 Na⁺含量采用火焰光度法测定;Ca²⁺和 Mg²⁺含量采用原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据分析

所得数据用平均值 ± 标准差表示,采用 Microsoft office 2013 进行数据整理及作图。采用 IBM SPSS 20.0 统计软件进行方差分析,并使用 Tukey HSD 测验 ($P < 0.05$) 比较各处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 生物炭对基质栽培黄瓜生长和产量的影响

由表 1 可知,非盐胁迫条件下添加生物炭处理黄瓜的株高、叶片数、茎粗和最大单叶叶面积与未

添加生物炭对照相比无显著差异。盐胁迫条件下, 各处理的黄瓜生长均受到显著抑制, 然而, 添加生物炭处理的黄瓜株高和最大单叶叶面积高于对照,

特别是 B5 处理黄瓜的株高和最大单叶叶面积与对照相比显著增加。

表 1 生物炭施用对盐胁迫条件下黄瓜生长的影响
Table 1 Effect of biochar on the growth of cucumber with NaCl treatment

处理 Treatment	生物炭 Biochar	株高(cm) Plant height	叶片数 Number of leaves	茎粗(mm) Stem diameter	最大单叶叶面积(cm ²) Maximum single leaf area
0 mmol L ⁻¹	B0	135.67 ± 8.81 a	12.67 ± 0.75 a	8.45 ± 0.43 a	462.90 ± 46.80 a
	B3	129.33 ± 5.55 a	12.38 ± 0.53 a	8.36 ± 0.41 a	450.63 ± 38.53 a
	B5	136.25 ± 7.61 a	12.58 ± 0.36 a	8.23 ± 0.43 a	454.65 ± 54.02 a
150 mmol L ⁻¹	B0	100.92 ± 12.49 d	10.38 ± 0.93 b	6.97 ± 0.52 b	312.74 ± 51.90 c
	B3	103.82 ± 6.72 cd	10.68 ± 0.40 b	6.88 ± 0.44 b	336.87 ± 37.19 bc
	B5	109.92 ± 10.06 b	10.63 ± 0.83 b	7.00 ± 0.60 b	354.94 ± 42.48 b

注: 同一列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

如表 2 所示, 非盐胁迫条件下, 春季各处理条件下黄瓜瓜条数和产量无显著差异, 而秋季 B5 处理条件下, 黄瓜的瓜条数和产量显著高于 B3 处理和对照。盐胁迫条件下, 各处理黄瓜的产量与非盐胁迫

处理相比显著降低。春季盆栽实验显示添加生物炭处理的黄瓜瓜条数和产量显著高于对照; 秋季 B5 处理条件下, 黄瓜的瓜条数和产量显著高于对照, 而 B3 处理条件下黄瓜瓜条数和产量与对照相比无显著差异。

表 2 生物炭施用对盐胁迫条件下黄瓜产量的影响
Table 2 Effect of biochar on the yield of cucumber with NaCl treatment

处理 Treatment	生物炭 Biochar	春季 Spring growing season		秋季 Autumn growing season	
		瓜条数 Number of fruits	产量 (kg) Yield	瓜条数 Number of fruits	产量 (kg) Yield
0 mmol L ⁻¹	B0	113.33 ± 5.13 a	15.93 ± 0.06 a	38.67 ± 4.16 b	5.00 ± 0.44 b
	B3	103.33 ± 4.51 a	15.92 ± 0.20 a	37.5 ± 4.36 b	4.99 ± 0.40 b
	B5	103.00 ± 2.00 a	15.11 ± 0.49 a	52.00 ± 7.81 a	7.26 ± 1.33 a
150 mmol L ⁻¹	B0	18.00 ± 1.00 d	1.70 ± 0.07 d	7.67 ± 1.15 e	0.82 ± 0.13 b
	B3	30.33 ± 8.39 c	3.03 ± 0.76 c	11.00 ± 1.00 de	0.92 ± 0.15 b
	B5	44.67 ± 3.21 b	5.05 ± 0.28 b	18.67 ± 2.08 c	2.11 ± 0.35 a

2.2 生物炭对基质栽培黄瓜果实品质的影响

如图 1a 和图 1b 所示, 无论是在非盐胁迫还是在盐胁迫条件下, 与不添加生物炭相比, 添加生物炭处理后黄瓜果实中抗坏血酸含量显著增加, 而硝酸盐含量显著降低。各处理条件下黄瓜果实可溶性固形物含量与对照相比无显著差异 (图 1c)。

2.3 生物炭基质栽培黄瓜叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

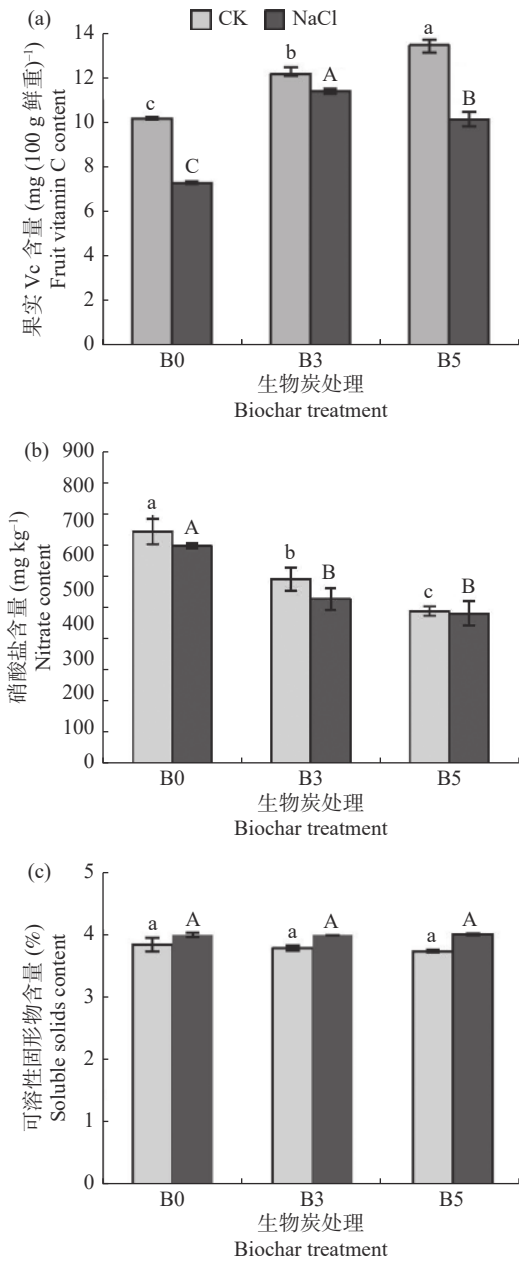
如图 2a 和图 2b 所示, 非盐胁迫条件下基质中添加生物炭处理黄瓜植株叶片 SOD、POD 活性与对照相比无显著差异。盐胁迫条件下, 与对照相比, 基质中添加生物炭处理植株叶片 SOD 和 POD 活性增加, 尤其是 B5 处理植株叶片 SOD 和 POD 活性显

著高于对照。丙二醛含量反应植物细胞损伤程度, 非盐胁迫条件下各处理间的 MDA 含量无显著差异, 而盐胁迫条件下添加生物炭处理植株叶片 MDA 含量均显著低于对照 (图 2c)。

2.4 生物炭对基质栽培黄瓜叶片营养元素含量的影响

如图 3a 和图 3b 所示, 黄瓜顶部叶片 N、P 含量显著高于底部叶片。盐处理条件下, 生物炭施用可显著增加黄瓜植株叶片 N 含量。而无论是在非盐胁迫还是盐胁迫条件下, 生物炭施用后黄瓜植株叶片 P 含量与对照相比均显著降低。

生物炭施用可增加黄瓜叶片 K⁺含量。除 B3 处理底部叶片之外, 非盐胁迫和盐胁迫条件下生物炭



注:柱上方不同小写字母和大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 生物炭对非盐胁迫和盐胁迫条件下基质栽培黄瓜果实品质的影响
Fig.1 Effects of biochar on the quality of cucumber fruits without or with NaCl treatment under substrate cultivation

施用均可显著提高黄瓜叶片 K^+ 含量 (图 3c)。盐胁迫可显著增加黄瓜叶片 Na^+ 含量, 然而生物炭处理后顶部叶片和底部叶片 Na^+ 含量的积累存在显著差异。盐胁迫条件下, B3 和 B5 处理黄瓜植株顶部叶片 Na^+ 含量与对照相比分别降低 22.6% 和 29.8%, 然而, 底部叶片 Na^+ 含量与对照相比分别增加 48.7% 和 54.7% (图 3d)。

盐胁迫条件下, 生物炭处理后黄瓜植株顶部叶

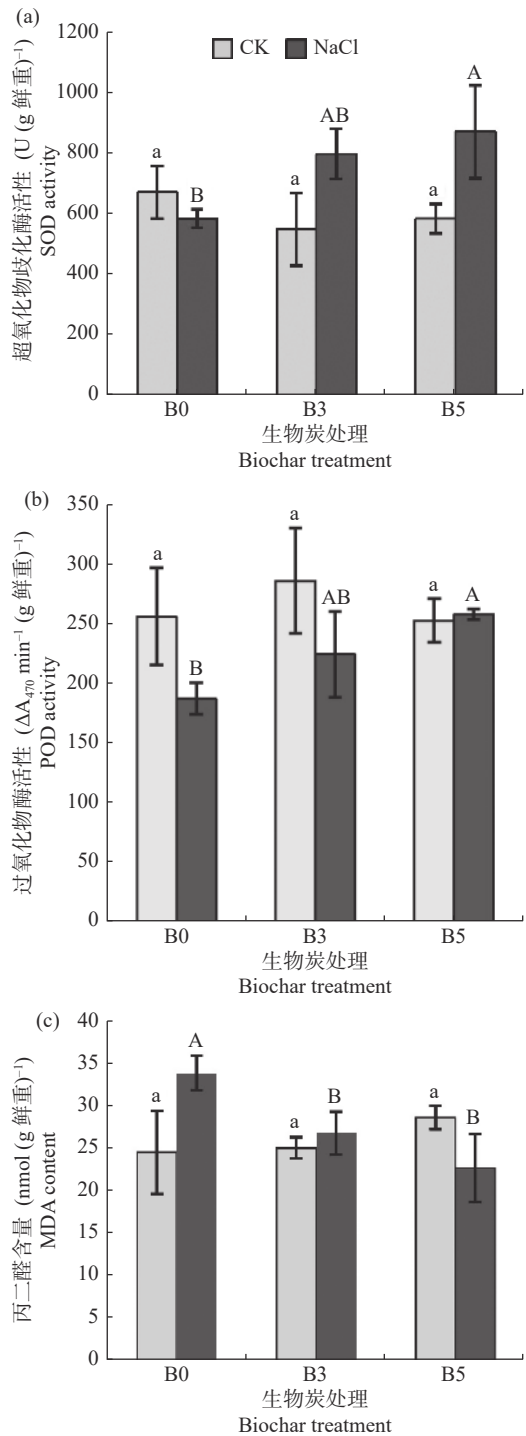
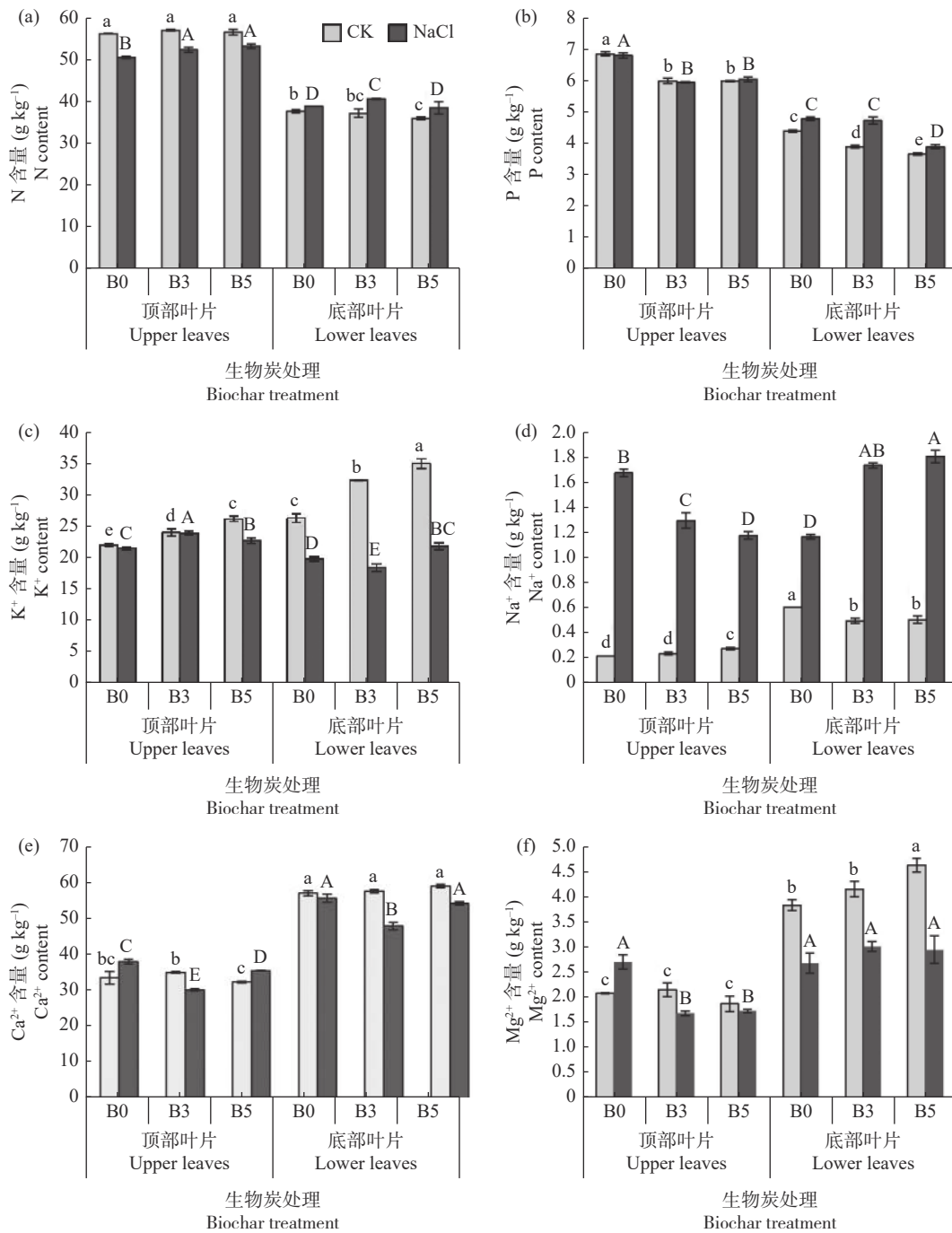


图 2 生物炭对盐胁迫条件下基质栽培黄瓜叶片抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响
Fig.2 Effects of biochar on the antioxidant enzyme activity and MDA content in cucumber leaves with NaCl under substrate cultivation

片中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量与对照相比显著降低, 而底部叶片中除 B3 处理 Ca^{2+} 含量显著低于对照外, 其他处理间底部叶片 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量无显著差异 (图 3e 和图 3f)。



注: 顶部叶片表示从植株主蔓顶部数第四片完全展开真叶; 底部叶片表示从植株主蔓底部数第四片真叶。

图3 生物炭对非盐胁迫和盐胁迫条件下基质栽培黄瓜叶片矿质元素含量的影响

Fig.3 Effects of biochar on the mineral element content in cucumber leaves with NaCl under substrate cultivation

3 讨论

土壤次生盐渍化是设施生产中的重要限制因子, 生物炭良好的离子交换能力以及较强的吸收吸附特性对改善设施土壤次生盐渍化具有很好的效果^[18]。本研究发现基质中添加生物炭能有效缓解盐胁迫对黄瓜生长的抑制, 促进黄瓜的生长, 提高黄瓜产量, 增加叶片抗氧化酶活性, 提高黄瓜果实品质, 这与

前期在甜瓜 (*Cucumis melo* L.)^[19] 和番茄 (*Solanum lycopersicum*)^[20] 等作物上的报道相一致。Mohammed 等^[19] 研究发现生物炭和沼液联合施用能促进盐胁迫条件下甜瓜生长, 增加光合效率和水利用率, 提高产量。She 等^[20] 报道, 生物炭可以缓解盐胁迫对番茄生长发育的抑制, 促进盐胁迫条件下番茄生长, 增加光合和呼吸效率。盐胁迫对黄瓜的危害主要是

渗透胁迫、离子毒害以及养分失调^[21]。相关研究表明,生物炭施用可提供氮、磷、钾等矿质养分,增加土壤有机质,提高作物对土壤养分的可利用率,缓解盐胁迫的危害^[7,10]。生物炭的富钾特性可提高土壤中 K⁺含量,减少盐胁迫条件下作物对 Na⁺的吸收^[22-23]。另外,生物炭良好的吸附特性及多孔性结构,还可通过吸附 Na⁺等有害离子,改善土壤容重、持水能力等理化性状,增强作物的耐盐能力^[6,8,23]。本研究中高盐胁迫条件下,生物炭处理黄瓜植株尽管生长受到显著抑制,但是仍具有正常的结瓜能力,春秋两季产量显著高于对照,说明耐盐性明显提高。

盐胁迫下,黄瓜体内的由非酶和酶抗氧化剂组成的活性氧清除系统启动可清除体内过多的活性氧^[11]。遭遇盐胁迫后,黄瓜氧化胁迫途径相关酶,如 SOD、POD、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶的活性提高,且随着盐浓度的增加呈现先上升后下降的趋势^[24]。曹齐卫等^[25]报道,随着盐浓度的增加不同生态类型的黄瓜品种抗氧化酶活性显著降低,盐浓度越高,受抑制程度越高,而丙二醛含量显著升高增幅变大,膜脂过氧化程度加重。本研究中,在 150 mmol L⁻¹ NaCl 胁迫条件下不添加生物炭处理黄瓜叶片抗氧化酶活性降低,而基质中添加生物炭处理后植株叶片 SOD 和 POD 活性与对照相比增加,尤其是 B5 处理植株叶片 SOD 和 POD 活性显著高于对照,MDA 含量显著降低。这一结果与 Hasanuzzaman 等^[26]在黄麻(*Corchorus olitorius* L.)上和 Mehmood 等^[27]在大豆(*Glycine max* L.)上的报道相一致。Mehmood 等^[27]研究发现生物炭和壳聚糖改性生物炭均可提高 80 mmol L⁻¹NaCl 胁迫条件下大豆抗坏血酸过氧化物酶(APX)、SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶活性,且壳聚糖改性生物炭处理显著诱导 CAT、APX、POD 和 SOD 基因以及两个耐盐基因 *GmSALT3* 和 *CHS* 的表达。然而, Farhangi-Abriz 等^[9]报道,盐胁迫处理条件下添加 10% 或 20% 的生物炭,菜豆抗氧化酶活性降低,这一现象可能与生物炭的施用量有关。周翠香等^[28]报道生物炭在较低添加量(1%~2%)时可增加盐碱地蓬的 SOD 和 POD 活性及其渗透调节物质,提高了植物的抗胁迫能力,而在较高添加量(4%~8%)时 SOD 和 POD 活性却显著降低。

盐胁迫条件下,植株矿质营养元素累积失调,叶片过量积累 Na⁺和 Cl⁻,而 K⁺含量降低,是导致植株生长发育受抑制的重要因素^[29]。生物炭中钾含量

丰富,研究发现施用生物炭可显著促进植株对 K⁺的吸收,减少叶片对 Na⁺的吸收,从而缓解盐胁迫的危害^[30-31]。本研究中,生物炭施用后黄瓜叶片 N 和 K⁺含量增加而 P 和 Na⁺含量降低。叶片 N 和 K⁺含量的增加可促进黄瓜的生长,增加抗逆能力。植株叶片 P 和 Na⁺含量的降低,可能是由于生物炭的吸附作用,减少了基质中可利用 P 素和 Na⁺的含量^[32]。另外,本研究发现盐胁迫下添加生物炭处理植株顶部叶片和下部叶片对 Na⁺的积累存在差异,顶部叶片 Na⁺含量与对照相比显著降低,而底部叶片 Na⁺含量与对照相比显著增加,说明生物炭处理阻碍或者迟滞了 Na⁺由底部叶片向上部叶片运输,然而其具体作用机理还需要进一步的研究。

4 结论

盐胁迫(150 mmol L⁻¹ NaCl)可显著抑制基质(草炭:蛭石=2:1)栽培黄瓜的生长。基质中添加 3% 或 5% 的生物炭能促进黄瓜生长,提高抗氧化酶活性,促进植株顶部叶片氮和钾的积累,减少钠的累积,缓解盐胁迫对黄瓜的危害。综合考虑生长表现、产量和品质指标,栽培基质中添加 5% 生物炭缓解黄瓜盐胁迫的效果较好。

参考文献:

- [1] 黄绍文,高伟,唐继伟,等.我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):965-977.
- [2] 李涛,于蕾,吴越,等.山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J].土壤学报,2018,55(1):100-110.
- [3] 魏丹,李艳,秦程程,等.环渤海地区设施蔬菜土壤障碍与治理措施[J].中国土壤与肥料,2021,(5):303-309.
- [4] Chen W, Meng J, Han X, et al. Past, present, and future of biochar[J]. Biochar, 2019, 1(1): 75-87.
- [5] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2017, 625: 320-335.
- [6] Thomas S C, Frye S, Gale N, et al. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 62-68.
- [7] Hammer E C, Forstreuter M, Rillig M C, et al. Biochar increases *Arbuscular mycorrhizal* plant growth enhancement and ameliorates salinity stress[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 114-121.
- [8] Kim H S, Kim K R, Yang J E, et al. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response[J]. Chemosphere, 2016, 142: 153-159.
- [9] Farhangi-Abriz S, Torabian S. Antioxidant enzyme and osmotic

- adjustment changes in bean seedlings as affected by biochar under salt stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 64 – 70.
- [10] Zheng H, Wang X, Chen L, et al. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41(3): 517-532.
- [11] 赖伟, 何鹏, 徐明远, 等. 黄瓜耐盐性与耐盐相关基因的研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2020, (6): 16 – 22.
- [12] 张功臣, 陈建美, 赵征宇, 等. 生物质炭对设施连作土壤性质及黄瓜生长和产量的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(3): 659 – 666.
- [13] 孙德智, 韩晓日, 杨恒山, 等. 外源NO对Ca(NO₃)₂胁迫下番茄叶片活性氧损伤的缓解效应[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 728 – 738.
- [14] 裴孝伯, 李世诚, 张福漫, 等. 温室黄瓜叶面积计算及其与株高的相关性研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 8: 80 – 82.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [16] Ukeda H, Kawana D, Maeda S, et al. Spectrophotometric assay for superoxide dismutase based on the reduction of highly water-soluble tetrazolium salts by xanthine-xanthine oxidase[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1999, 63(3): 485 – 488.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [18] He K, He G, Wang C, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103674.
- [19] Elbasher M M A, Xiaohou S, Ali A A S, 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. *Agronomy*, 2018, 8: 22.
- [20] She D, Sun X, Gamareldawla A H D, et al. Benefits of soil biochar amendments to tomato growth under saline water irrigation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14743.
- [21] 周俊国, 扈惠灵, 曾凯, 等. NaCl胁迫下黄瓜幼苗无机离子的渗透调节效应[J]. *河南农业科学*, 2010, (2): 79 – 82.
- [22] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66: 329-338.
- [23] Sun J, He F, Shao H, et al. Effects of biochar application on *Suaeda salsa* growth and saline soil properties. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1-6.
- [24] 刘东让, 董邵云, 苗晗, 等. 黄瓜耐盐胁迫遗传育种研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021, (7): 14 – 23.
- [25] 曹齐卫, 李利斌, 孔素萍, 等. 不同黄瓜品种幼苗对等渗Mg(NO₃)₂和NaCl胁迫的生理响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1171 – 1178.
- [26] Hasanuzzaman M, Raihan M, Hossain R, et al. Biochar and chitosan regulate antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems and enhance salt tolerance in jute (*Corchorus olitorius* L.) [J]. *Antioxidants*, 2021, 10: 2017.
- [27] Mehmood S, Ahmed W, Ikram M, et al. Chitosan modified biochar increases soybean (*Glycine max* L.) resistance to salt-stress by augmenting root morphology, antioxidant defense mechanisms and the expression of stress-responsive genes[J]. *Plants*, 2020, 9: 1173.
- [28] 周翠香, 孙军娜, 张馨文, 等. 生物炭对盐地碱蓬抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J]. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2019, 35(2): 110 – 115.
- [29] 王素平, 贾永霞, 郭世荣, 等. 多胺对盐胁迫下黄瓜(*Cucumis sativus* L.) 幼苗体内K⁺、Na⁺和Cl⁻含量及器官间分布的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1122 – 1129.
- [30] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 61 – 68.
- [31] Lashari M S, Ye Y X, Ji H S, et al. Biochar–manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2015, 95(6): 1321 – 1327.
- [32] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 54 – 60.

Effects of Biochar on the Antioxidant Enzyme Activities and Mineral Element Contents In Cucumber Leaves under Salt Stress

ZHANG Gong-chen, QIN Yu-hong, WANG Bo, ZHAN En-jun, LI Lei, ZHANG Shou-cai*
(Qingdao academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266100, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to explore the effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under salt stress. [Method] Pot experiments were conducted using the greenhouse cultivar ‘Cuilong’. Peanut shell biochar with mass ratios of 0% (B0), 3% (B3) and 5% (B5) was added to the cultivation substrate (peat : vermiculite = 2 : 1) with or without 150 mmol L⁻¹ NaCl, respectively. The cucumber growth, yield, fruit quality, antioxidant enzyme activity and leaf mineral nutrient content were investigated. [Result] Results showed that biochar application could significantly improve the salt tolerance of cucumber. Under NaCl stress, the plant height, maximum single leaf area, yield and ascorbic acid content of cucumber treated with B5 were significantly higher than those without biochar treatment, and the nitrate content of cucumber fruit treated with B3 and B5 was significantly lower than that of the control under both non-salt stressed and salt stressed treatments. The cucumber yields of B5 treatment in the spring and autumn cultivation experiments were 2.97 times and 2.57 times than those of the control treatment under salt stress, respectively. Higher levels of antioxidant enzyme activity were observed in biochar-treated cucumber leaves under salt stress. The activities of SOD and POD in cucumber leaves of B5 treatment were significantly higher compared with those in the control, while the content of MDA was significantly lower. Under salt stress, the contents of N and K⁺ in the top leaves of biochar-treated cucumber were significantly higher compared with those in the control, while the contents of P, Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ were significantly lower. In the bottom leaves, the change of the nutrient elements content was related to the biochar application rates, except for the Na⁺ content which was significantly higher in the bottom leaves than that of the control. [Conclusion] Appropriate biochar application to the substrate can alleviate the salt stress of cucumber, evidenced by enhanced growth performance, antioxidant enzyme activities, and higher N and K⁺ accumulation coupled with lower Na⁺ accumulation in the top leaves. The application of 5% biochar is recommended for substrate amendment to alleviate the salt stress in greenhouse cucumber production.

Key words: Biochar; Cucumber; Salt stress; Antioxidant enzyme activity; Mineral nutrient element

[责任编辑: 刘轶飞]