

生物炭对甜瓜幼苗质量与根系生理特性的影响

马光恕,梁 泉,张 婷,李润哲,廉 华

(黑龙江八一农垦大学园艺园林学院,黑龙江 大庆 163319)

摘要:于2021年4—7月,采用盆栽方法,在育苗营养土中设置了不同的生物炭添加量(分别为0、10、20、40、80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),研究生物炭对土壤物理性状、甜瓜幼苗根表面积、根系生理指标以及幼苗质量的影响。结果显示:生物炭不同添加量均能改善土壤物理性状,以80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应用效果最好,提高了土壤pH和含水量,分别比CK提高了1.86%和3.16%;且降低了土壤容重,比CK降低5.93%。与CK相比,生物炭不同添加量均能提高甜瓜根系生理活性,以40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应用效果最好,在甜瓜出苗后25 d,根系活力、根系中硝态氮含量、NR、CAT、POD、SOD、APX、PPO活性分别比CK提高了20.88%、5.70%、126.67%、10.47%、23.42%、31.58%、54.21%、62.88%。生物炭不同添加量均能提高甜瓜根表面积,以40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应用效果最好,在甜瓜出苗后25 d,根体积、根系总吸收面积、活跃吸收面积、活跃吸收面积百分比、根比表面分别比CK提高了21.07%、40.19%、71.82%、22.56%和15.76%。生物炭不同添加量均能提高甜瓜幼苗质量,以40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应用效果最好,在甜瓜出苗后25 d,株高、茎粗、叶面积、全株鲜质量、全株干质量、根冠比、壮苗指数分别比CK提高了34.87%、31.71%、33.91%、31.92%、45.10%、64.94%、43.33%。研究表明添加生物炭能够促进甜瓜幼苗形态建成,通过调节根系生理活性和改善根际土壤环境来提高幼苗质量。

关键词:甜瓜;生物炭;幼苗质量;根系;生理特性

中图分类号:S652 **文献标志码:**A

Effects of biochar on seedling quality and root physiological characteristics of melon

MA Guangshu, LIANG Xiao, ZHANG Ting, LI Runzhe, LIAN Hua

(College of Horticulture and Landscape Architecture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: Different biochar amounts (0, 10, 20, 40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively) were added to the seedling nutrient soil to evaluate the effects of biochar on soil physical properties, root surface area, root physiological indexes and seedling quality of melon seedlings through pot culture from April to July 2021. The results showed that different amounts of biochar improved soil physical properties. Among them, the treatment of 80 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the most effective, with soil pH and water content increased by 1.86% and 3.16% respectively compared with CK, and the soil bulk density decreased by 5.93% compared with CK. Compared with CK, different amounts of biochar improved the physiological characteristics of muskmelon roots, and the treatment of 40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the most effective. The root activity, nitrate nitrogen content, nitrate reductase activity (NR), catalase activity (CAT), peroxidase activity (POD), superoxide dismutase activity (SOD), ascorbate peroxidase activity (APX) and polyphenol oxidase activity (PPO) of melon root increased by 20.88%, 5.70%, 126.67%, 10.47%, 23.42%, 31.58%, 54.21% and 62.88% respectively at 25 days after emergence. Compared with CK, different amounts of biochar improved the root surface area of muskmelon seedlings, and the treatment of 40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the most effective. The root volume, total root absorption area, active absorption area, percentage of active absorption area and root specific surface increased by 21.07%, 40.19%, 71.82%, 22.56% and 15.76% respectively compared with CK at 25 days after emergence. Compared with CK, different amounts of biochar could improve mel-

on seedling quality, and the treatment of $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the most effective. The plant height, stem diameter, leaf area, whole plant fresh weight, whole plant dry weight, root shoot ratio and strong seedling index increased by 34.87%, 31.71%, 33.91%, 31.92%, 45.10%, 64.94% and 43.33% respectively compared with CK at 25 days after emergence. The research results showed that the biochar application promoted the morphogenesis of melon seedlings, enhanced the quality of seedlings by regulating root physiological activity and improved rhizosphere soil environment.

Keywords: melon; biochar; seedling quality; root; physiological characteristics

生物炭是一种新型的土壤改良剂,是当前农业、环境等领域共同关注的热点。生物炭是在厌氧或无氧条件下,经高温热解($350 \sim 600^\circ\text{C}$)产生的一种多孔富碳、高度芳香化难溶性的固态物质,具有稳定性强、比表面积大、吸附能力强的特点^[1],近几年因其独特的结构特征和理化性状,在土壤理化改良、增加土壤肥力及提高作物产量等方面具有良好的效果^[2-5]。生物炭主要是通过有机物质在缺氧的环境下热解所形成的,不同的原料以及生产方式都会影响到生物炭的性能^[6]。

根系作为植物的主要器官之一,具有吸收、分泌和感知等多种重要的生理功能^[7]。根系不仅为植物从土壤中吸收水分和矿质营养的主要器官^[8],更是多种激素、氨基酸与有机酸合成的重要场所,其形态与生理指标对地上部的生长发育、产量和品质形成均有重要作用^[9]。根系的功能受根系的形态和生理指标影响,并且也需要良好的根系来支撑地上部分的正常生长^[10]。因此在作物生产中,通过营养调控促进根系发育、提高幼苗质量,将是作物获得高产的重要保证。

甜瓜(*Cucumis melon* L.)是具有高附加值的世界性水果,我国是世界重要的甜瓜种植国和消费国。据FAO数据库显示,2018年全球甜瓜收获面积和产量分别为104.73万 hm^2 和2 734.92万t,分别占世界水果面积的1.54%和3.15%^[11];同时根据《2019中国农村统计年鉴》等资料显示,2018年我国甜瓜收获面积和产量分别为35.45万 hm^2 和1 272.73万t,分别占全球的33.85%和46.54%^[12]。我国甜瓜产业发展迅速,面积、产量均位居全球第一,人们日益关注甜瓜产量和品质^[13]。生物炭在甜瓜生产上也有一定的研究,De Souza Laurentino等^[14]通过测定不同剂量生物炭下甜瓜幼苗的生物量(地上、根系)及根长,评价甜瓜幼苗质量,确定甜瓜幼苗发育的最佳剂量为 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;Elbashier等^[15]在温室内进行了甜瓜盆栽试验,采用生物炭、沼渣和氮、磷、钾不同配施量,用自来水和NaCl溶液灌溉植株,结果显示,在盐渍灌溉条件下,生物炭与

沼渣配施对甜瓜的生长、光合速率、水分利用效率和产量均有显著影响,特别是在盐灌水和不加N、P、K肥的条件下。单用沼气比使用生物炭更有效,可作为无机NPK肥料的替代肥料;张芙蓉等^[16]研究了生物炭在盐渍化土壤中的改良作用以及对甜瓜生长的影响,结果表明:与施用有机肥(对照)相比,生物炭处理降低了土壤中可溶性盐分的含量以及土壤的呼吸作用,减少了温室气体 CO_2 的排放,同时提高了植株的净光合速率,但对甜瓜生物量及果实品质没有显著改善效果。而生物炭施用对甜瓜幼苗及其根系生理特性的影响鲜有报道。本研究利用盆栽试验,设置不同生物炭添加剂量,针对生物炭对甜瓜根表面积、根系生理指标以及幼苗质量的影响进行研究,以期对甜瓜壮苗培育提供理论基础和实践依据,为甜瓜高产和优质生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

供试薄皮甜瓜品种为‘金妃’,供试土壤为蔬菜营养土,均购于大庆市长青种子公司。

供试蔬菜营养土基本理化性质为:有机质含量 $45.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.86,碱解氮含量 $96.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $31.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $189.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,含水量13%,电导率 $0.57 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,容重 $1.28 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

供试生物炭:以玉米秸秆为原料制备(制备温度为 450°C),由沈阳隆泰生物工程有限公司提供。基本理化性质为:pH 8.43,电导率 $1.27 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, NH_4^+-N $8.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_3^--N $38.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效P $106.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效K $3 540.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $0.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

2021年4—7月在黑龙江八一农垦大学教学试验基地的现代化温室和塑料大棚开展试验。

试验设5个处理,即生物炭含量分别占风干蔬菜营养土质量 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CK)、 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T1)、 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T2)、 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T3)、 $80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T4),每

个处理 4 次重复。

将蔬菜育苗营养土和生物炭全部过 2 mm 筛,与化肥混匀后做育苗基质备用。化肥使用量计算如下:按照 30 cm 深土层的重量为 $3.84 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计,甜瓜基本施肥量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷酸二胺、 $675 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 硫酸钾、 $625 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素,相当于每 kg 营养土中需要施入 0.059 g 磷酸二胺、0.176 g 硫酸钾、0.098 g 尿素。

甜瓜苗期试验采用塑料育苗盒(长×宽×高=34.5 cm×24 cm×11 cm),每盒装育苗基质 2.5 kg。每盒播种催芽后的甜瓜种子 140 粒,出苗后均匀保留 70 株,每个处理播种 28 盒。

1.3 试验实施

2021 年 4 月 20 日,将甜瓜种子置于 55~60℃ 温水下浸种 15 min,降温后继续浸种 12 h。然后将甜瓜种子置于 28~30℃ 条件的恒温培养箱中催芽 18 h,甜瓜种子全部发芽。

在育苗盒中装满育苗基质,热水打透底水。将催芽处理后的甜瓜种子均匀播种在育苗盒中。甜瓜出苗后 15 d 和 25 d 取样 2 次,每个处理选取 160 株(每个重复 40 株),用于幼苗期甜瓜根系生理指标的测定。出苗后 25 d,每个处理选取 80 株(每个重复 20 株),用于测定甜瓜幼苗形态指标和物质积累量,计算根冠比和壮苗指数;同时,测定根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积,计算活跃吸收面积百分比和根系比表面积。出苗后 25 d,每个处理选取 20 株(每个重复 5 株)收集甜瓜根系周围的根区土壤,过 2 mm 的网筛,将土壤带回实验室,在室温下自然风干,用于物理性质分析。

1.4 试验测定指标与方法

生理指标测定:

根系活力采用 α -萘胺氧化法;硝态氮含量采用水杨酸-硫酸法;硝酸还原酶(NR)活性采用活体分光光度法;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用抗坏血酸比色法;多酚氧化酶(PPO)活性采用邻苯二酚分光光度法。

根系总吸收面积和活跃吸收面积采用甲烯蓝比色法。计算公式为:

根系活跃吸收面积(%) = 活跃吸收面积/总吸收面积×100

根系比表面积($\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$) = 总吸收面积/根体积

形态指标测定:

株高:植株的茎基部到生长点之间的距离,用直尺测定;茎粗:植株子叶节下 1 cm 处粗度,用游标卡尺测定;根体积:采用排水法;叶面积:采用剪纸称重法。

物质积累量指标测定:

利用清水反复冲洗植株,再用吸水纸吸干,将其地上部与地下部分开后分别测其鲜质量;然后将鲜样在 105℃ 杀青 15 min 后,于 70℃ 烘至恒重,用北孝感亚光医用电子有限公司 TB-4002 型分析天平分别测定地上部与地下部干质量。

根冠比计算公式为:根冠比 = 地下部鲜质量/地上部鲜质量

壮苗指数计算公式为:壮苗指数 = (茎粗/株高 + 地下部干质量/地上部干质量) × 全株干质量

土壤物理性状指标测定:

pH 值用上海雷磁台式酸度计 PHSJ-5 型测定;土壤含水量在 80℃ 烘箱中烘至恒重测定;土壤容重利用环刀法测定。

1.5 数据分析

采用 Excel 2007 软件进行数据处理,用 DPS 7.05 软件进行数据统计和方差分析,不同处理间数据的多重比较采用 Duncan 新复极差法检验($P < 0.05$);采用 Excel 2007 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对甜瓜幼苗根系生理指标的影响

2.1.1 甜瓜幼苗根系活力 在甜瓜出苗后 15 d 和 25 d,生物炭不同处理下根系活力如图 1 所示,CK 根系活力最低,分别为 $69.980 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $92.397 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 15 d 和 25 d, T3 根系活力最高(分别为 $77.367 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $111.693 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)且显著高于其他处理,分别比 CK、T1、T2、T4 处理高 10.56%、8.35%、2.47%、1.46% 和 20.88%、17.13%、7.03%、5.71%; T4、T2 之间差异不显著但二者均显著高于 T1 和 CK,出苗后 15 d 分别高 6.79%、8.96% 和 5.74%、7.89%,出苗后 25 d 分别高 10.80%、14.35% 和 9.44%、12.95%; T1 显著高于 CK(2.03% 和 3.21%); CK 根系活力最低,分别为 $69.980 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $92.397 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。说明适量生物炭处理对甜瓜根系活力具有促进作用。

2.1.2 甜瓜幼苗根系硝态氮含量和 NR 活性 不同处理下甜瓜幼苗根系硝态氮含量如图 2A 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系硝态氮含量相比,

在甜瓜出苗后 25 d 各处理的硝态氮含量均有所下降,CK、T1、T2、T3、T4 下降幅度分别为 68.19%、67.29%、67.74%、68.40%、68.10%。在甜瓜出苗后 15 d,T3 与 T4、T4 与 T2 之间差异均不显著,T3、T4、T2 均显著高于 T1 和 CK,分别高 6.38%、4.31%、2.46%和 6.39%、4.32%、2.47%;T1 与 CK 之间差异不显著。在甜瓜出苗后 25 d,T3 与 T4 之间差异不显著,T3 显著高于 CK、T1、T2,分别高 5.70%、2.77%、1.72%;T4、T2、T1 之间差异不显著但三者均显著高于 CK,分别高 4.61%、3.92%、2.85%;CK 根系硝态氮含量最低,为 $1\ 158.013\ \mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。说明适量生物炭处理对甜瓜根系硝态氮含量提高具有促进效果。

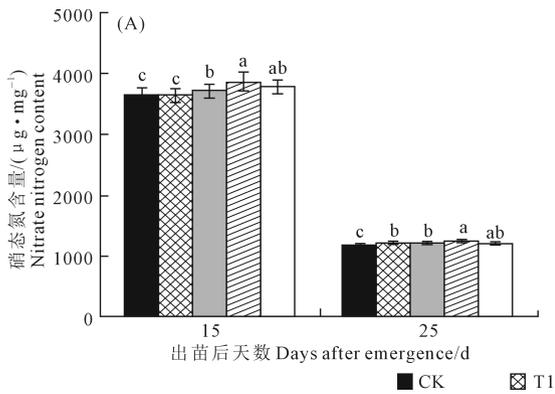
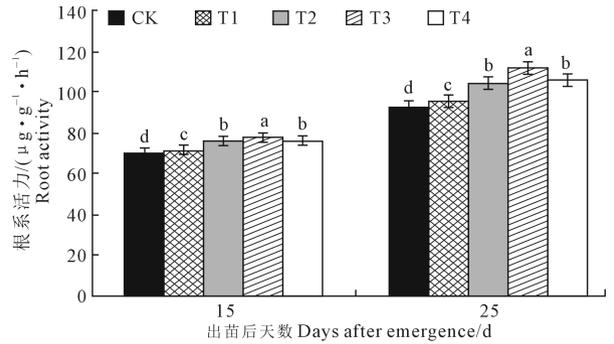


图 2 生物炭对甜瓜幼苗根系硝态氮含量和 NR 活性的影响

Fig.2 Effect of biochar on nitrate nitrogen content and NR activity of melon seedlings root

不同处理下甜瓜幼苗根系 NR 活性如图 2B 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 NR 活性相比,在甜瓜出苗后 25 d 各处理的 NR 活性均有所下降,CK、T1、T2、T3、T4 下降幅度分别为 75.81%、73.01%、65.89%、61.36%、63.41%。在甜瓜出苗后 15 d 和 25 d,T3 根系 NR 活性均最高,分别为 $0.880\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.340\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$;T3 显著高于 T4、T2、T1、CK,分别高 16.25%、20.05%、31.93%、41.94%和 22.74%、36.00%、88.89%、126.67%;T4、T2、T1、CK 之间均存在显著差异,CK 根系 NR 活性最低,分别为 $0.620\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.150\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。说明适量生物炭处理能提高甜瓜根系 NR 活性,提高氮代谢能力,有利于提高幼苗质量。

2.1.3 甜瓜幼苗根系抗氧化酶系活性 不同处理下甜瓜幼苗根系 CAT 活性如图 3A 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 CAT 活性相比,在甜瓜出苗后 25 d 的 CAT 活性均有所上升,CK、T1、T2、T3、T4 上升幅度分别为 38.24%、33.39%、34.02%、

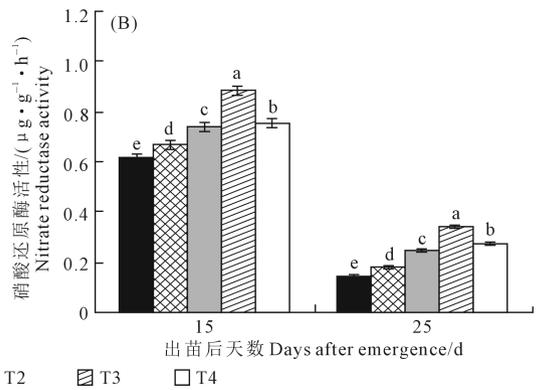


注:图中正负误差线表示标准差大小。不同小写字母表示在同一时期各处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values in the chart are standard error. Different lowercase letters in the same period indicate that the difference reach a significant level ($P<0.05$) among different treatments. The same below.

图 1 生物炭对甜瓜幼苗根系活力的影响

Fig.1 Effect of biochar on root activity of melon seedlings



27.67%、26.73%。在甜瓜出苗后 15 d,T3 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1、T2,分别高 19.61%、14.67%、8.18% 和 17.37%、12.52%、6.15%;T2 显著高于 CK、T1,分别高 10.57%、6.00%;T1 显著高于 CK(4.31%);CK 根系 CAT 活性最低,为 $23.223\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 25 d,T3 处理 CAT 活性最高,为 $35.463\ \text{U}\cdot\text{g}^{-1}$;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,增幅分别为 10.47%、9.75%、3.05%、2.66%;T4、T2 之间差异不显著但二者均显著高于 T1、CK,分别高 6.90%、7.60%和 6.50%、7.20%;T1、CK 之间差异不显著。说明适量生物炭处理能提高甜瓜根系 CAT 活性。

不同处理下甜瓜幼苗根系 POD 活性如图 3B 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 POD 活性相比,在甜瓜出苗后 25 d 的 POD 活性均有所上升,CK、T1、T2、T3、T4 上升幅度分别为 46.45%、33.53%、28.78%、20.98%、24.95%。在甜瓜出苗后 15 d,T3 处理 POD 活性最高,为 $34.927\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3

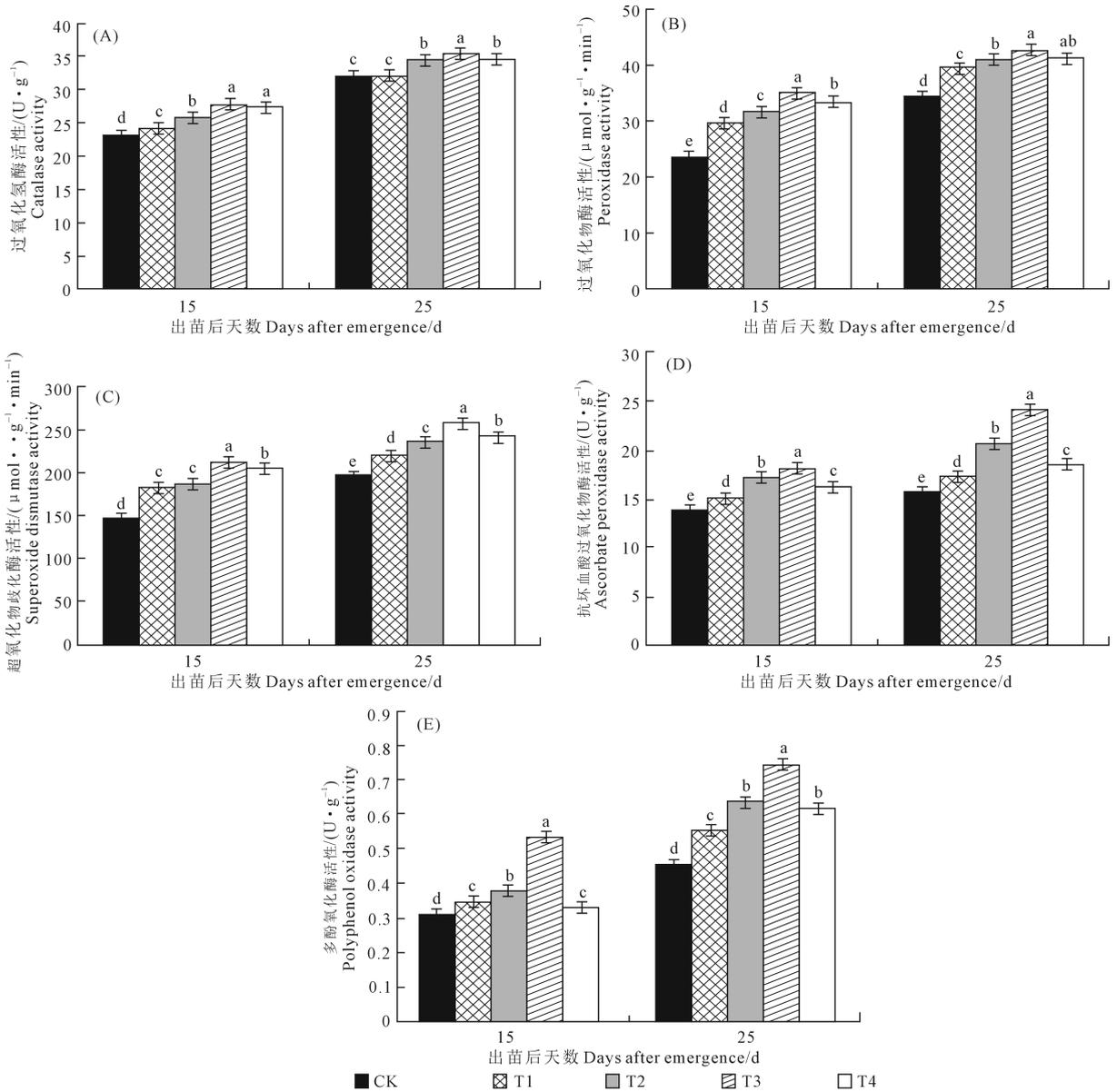


图 3 生物炭对甜瓜幼苗根系抗氧化酶系活性的影响

Fig.3 Effect of biochar on the activities of antioxidant enzymes in roots of melon seedlings

显著高于 CK、T1、T2、T4，增幅分别为 49.41%、18.21%、10.85%、5.68%；T4、T2、T1、CK 之间均呈显著性差异，CK 根系 POD 活性最低，为 $23.377 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 25 d，T3 与 T4、T4 与 T2 之间差异均不显著；T3 显著高于 CK、T1、T2，分别高 23.42%、7.10%、4.13%；T4 显著高于 CK、T1，(20.63%、4.67%)；T2、T1、CK 之间均呈现差异性表现，CK 根系 POD 活性最低，为 $34.235 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

不同处理下甜瓜幼苗根系 SOD 活性如图 3C 所示，与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 SOD 活性相比，在甜瓜出苗后 25 d 的 SOD 活性均有所上升，

CK、T1、T2、T3、T4 上升幅度分别为 33.63%、19.85%、26.97%、21.17%、18.65%。在甜瓜出苗后 15 d，T3 处理 SOD 活性最高，为 $213.463 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ；T3 显著高于 CK、T1、T2、T4，高 45.12%、16.36%、13.94%、4.46%；T4 显著高于 CK、T1、T2，分别高 38.92%、11.39%、9.07%；T1、T2 之间差异不显著但二者均显著高于 CK，分别高 24.71%、27.36%；CK 的 SOD 活性最低，为 $147.098 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 25 d，T3 处理 SOD 活性最高，为 $258.653 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ；T3 显著高于 CK、T1、T2、T4，分别高 31.58%、17.64%、8.74%、6.68%；T4、T2、T1、CK 处理之间差异显著，CK 根系 SOD 活性最

低,为 $196.569 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

不同处理下甜瓜幼苗根系 APX 活性如图 3D 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 APX 活性相比,在甜瓜出苗后 25 d 的 APX 活性均有所上升,CK、T1、T2、T3、T4 上升幅度分别为 13.20%、14.35%、20.89%、33.98%、12.65%。在甜瓜出苗后 15 d,APX 活性以 T3 最高,为 $17.919 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,分别高 30.29%、18.39%、4.99%、9.99%;T2 显著高于 CK、T1、T4,分别高 24.10%、12.76%、4.77%;T4 显著高于 CK、T1,分别高 18.45%、7.63%;T1 显著高于 CK(10.06%);APX 活性以 CK 最低,为 $13.753 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 25 d,APX 活性以 T3 最高,为 $24.007 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,分别高 54.21%、38.70%、16.35%、30.81%;T2 显著高于 CK、T1、T4,分别高 32.53%、19.21%、12.43%;T4 显著高于 CK、T1,分别高 17.88% 和 6.03%;T1 显著高于 CK(11.18%);APX 活性以 CK 最低,为 $15.568 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

不同处理下甜瓜幼苗根系 PPO 活性如图 3E 所示,与甜瓜出苗后 15 d 各处理幼苗根系 PPO 活性相比,在甜瓜出苗后 25 d 的 PPO 活性均有所上升,CK、T1、T2、T3、T4 上升幅度分别为 49.67%、62.46%、70.78%、41.02%、87.61%。在甜瓜出苗后 15 d,T3 处理 PPO 活性最高,为 $0.529 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,分别高 72.88%、55.13%、41.82%、59.82%;T2 显著高于 CK、T1、T4,分别高 21.90%、0.09%、0.13%;T1、T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK,分别高 11.44%、8.17%;CK 的 PPO 活性最低,为 $0.306 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在甜瓜出苗后 25 d,T3 处理 PPO 活性最高,为 $0.746 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,分别高 62.88%、34.66%、17.11%、20.13%;T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1,分别高 39.08%、14.98% 和 35.59%、12.09%;T1 显著高于 CK(20.96%);CK 的 PPO 活性最低,为 $0.458 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.2 生物炭施用对甜瓜幼苗根表面积的影响

在甜瓜出苗后 25 d,测定了生物炭不同处理下甜瓜幼苗根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积,计算了活跃吸收面积百分比和根比表面,结果如表 1 所示。表 1 表明,生物炭不同处理下甜瓜幼苗根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积均显著高于 CK,T3 处理的根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积均最高,分别为 0.293 cm^3 、 0.865 m^2 、 0.622 m^2 ;T3 显著高于 CK、T1、T2、T4,根体积分别高 21.07%、11.41%、6.16%、3.90%,根系总吸收面积分

别高 40.19%、25.91%、17.85%、13.37%,活跃吸收面积分别高 71.82%、43.65%、25.66%、18.70%;T4、T2、T1、CK 之间均呈现差异性表现,CK 根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积均最低,分别为 0.242 cm^3 、 0.617 m^2 、 0.362 m^2 。T3 活跃吸收面积百分比和根比表面均最高,分别为 71.908% 和 $2.952 \text{ m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$;T3 显著高于 T4、T2、T1、CK,活跃吸收面积百分比分别高 22.56%、14.09%、6.63%、4.71%,根比表面分别高 15.76%、13.02%、11.02%、9.09%;T2、T4 活跃吸收面积百分比之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1,分别高 14.94%、8.96% 和 17.05%、8.96%;T2、T4 根比表面之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1,分别高 4.27%、1.80% 和 6.12%、3.60%;T1 活跃吸收面积百分比和根比表面均显著高于 CK,分别高 7.43%、2.43%;CK 活跃吸收面积百分比和根比表面均最低,分别为 58.671% 和 $2.550 \text{ m}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。说明在苗期,施用适当生物炭可以提高根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积,甜瓜幼苗可以获得更多的养分和水分,增强幼苗根冠比,提高幼苗质量。

2.3 生物炭施用对甜瓜幼苗形态建成的影响

在甜瓜出苗后 25 d,测定了不同处理下甜瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、地上部鲜质量和干质量、地下部鲜质量和干质量,计算出全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数,结果如表 2 所示。表 2 表明,不同处理下甜瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数均呈现一定差异。上述形态建成指标中均以 T3 处理最高,与 CK、T1、T2、T4 相比,其株高分别高 35.14%、27.14%、21.09%、15.35%,茎粗分别高 31.71%、23.93%、17.76%、8.31%,叶面积分别高 33.91%、29.36%、12.58%、24.27%,全株鲜质量分别高 31.92%、28.23%、19.85%、18.12%,全株干质量分别高 45.10%、37.04%、27.59%、17.46%,壮苗指数分别高 43.33%、19.44%、13.16%、10.26%;T3 与 T4 根冠比之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1、T2,分别高 64.94%、56.79%、47.67% 和 57.14%、49.38%、40.70%;CK 株高、茎粗、叶面积、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数均最低。说明在苗期施用适当生物炭对甜瓜幼苗形态建成和物质积累具有促进作用,可增大幼苗根冠比,提高壮苗指数,改善甜瓜幼苗质量。

2.4 生物炭施用对土壤物理性状的影响

在甜瓜出苗后 25 d,测定了不同处理下土壤的 pH 值、含水量和容重,结果如表 3 所示:T4 土壤的

表 1 生物炭施用对甜瓜幼苗根表面积的影响

Table 1 Effect of biochar on the root area of melon seedlings

处理 Treatment	根体积 Root volume/cm ³	根系总吸收面积 Total root absorbing area/m ²	根系活跃吸收面积 Root actively absorbing area/m ²	活跃吸收面积百分比 Percentage of active absorption area/%	根比表面 Root specific surface / (m ² · cm ⁻³)
CK	0.242±0.015e	0.617±0.026e	0.362±0.011e	58.671±2.045d	2.550±0.145d
T1	0.263±0.009d	0.687±0.031d	0.433±0.024d	63.028±3.347c	2.612±0.162c
T2	0.276±0.016c	0.734±0.021c	0.495±0.023c	67.439±2.624b	2.659±0.162b
T3	0.293±0.012a	0.865±0.034a	0.622±0.031a	71.908±5.047a	2.952±0.185a
T4	0.280±0.012b	0.763±0.029b	0.524±0.034b	68.676±4.432b	2.706±0.132b

注:表中的数值分别代表平均值±标准差,同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Values are mean values±standard error in the table. Different lowercase letters mean significant difference at $P<0.05$ probability level within the same column. The same as below.

表 2 生物炭施用对甜瓜幼苗形态建成的影响

Table 2 Effect of biochar on morphological formation of melon seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积/cm ² Leaf area	全株鲜质量/g Fresh mass	全株干质量/g Dry mass	根冠比 Root shoot ratio	壮苗指数 Strong seedling index
CK	2.435±0.162d	0.287±0.012e	20.743±1.325e	1.181±0.082d	0.102±0.008d	0.077±0.002c	0.030±0.002d
T1	2.583±0.185c	0.305±0.022d	21.473±1.467d	1.215±0.071c	0.108±0.004cd	0.081±0.003b	0.036±0.001c
T2	2.712±0.132b	0.321±0.017c	24.673±1.625b	1.300±0.032b	0.116±0.009c	0.086±0.004b	0.038±0.002b
T3	3.284±0.214a	0.378±0.019a	27.777±1.412a	1.558±0.045a	0.148±0.006a	0.127±0.008a	0.043±0.002a
T4	2.847±0.177b	0.349±0.025b	22.353±1.385c	1.319±0.061b	0.126±0.007b	0.121±0.006a	0.039±0.002b

表 3 生物炭施用对土壤物理性状的影响

Table 3 Effect of biochar on soil physical properties

处理 Treatment	pH	含水量/% Water content	容重/(g · cm ⁻³) Bulk density
CK	6.98±0.32c	19.95±0.87c	1.25±0.08a
T1	6.99±0.28c	20.12±1.32c	1.24±0.06a
T2	7.02±0.62bc	20.32±0.94b	1.24±0.03a
T3	7.05±0.53b	20.65±1.63a	1.23±0.07a
T4	7.11±0.61a	20.58±0.84a	1.18±0.07b

pH 值最高,为 7.11,显著高于 CK、T1、T2、T3,分别高 1.86%、1.72%、1.28%、0.85%; T3 显著高于 CK、T1,增幅分别为 1.00% 和 0.86%; T2 与 T1、CK 之间无显著性差异; CK 的 pH 值最低,为 6.98。T3、T4 土壤的含水量之间差异不显著但二者均显著高于 CK、T1、T2,分别高 3.51%、2.63%、1.62% 和 3.16%、2.29%、1.28%; T2 含水量显著高于 CK、T1,分别高 1.85% 和 0.99%; T1、CK 之间无显著性差异; CK 含水量最低,为 19.95%。T4 土壤的容重最低,为 1.18 g · cm⁻³,其显著低于 CK、T1、T2、T3,分别低 5.93%、5.08%、5.08%、4.24%; CK、T1、T2、T3 的土壤容重之间差异不显著。说明在苗期施用生物炭造成土壤 pH 值和含水量升高,具有降低土壤容重的趋势,对改善土壤物理性质具有积极作用。

3 讨论

作物高产稳产的物质基础是获得较高的生物产量,而生物产量高低则在很大程度上取决于根系

发育状况^[17]。高产作物的根系必须既有一定的数量(根质量),又有较高的质量(生理活性)^[18],这样才能高产稳产。研究表明,根系形态和生理特征是根系质量优劣的体现,与作物地上部的生长发育关系非常密切^[19],适宜的根系发育状态对植物生长和产量形成具有十分重要的作用^[20-21]。

植株根系活力为植株根系生理活性强弱的直接表征,根系活力能够影响植株干物质的累积及植株的光合速率,从而影响植株的生长发育进而影响植株产量^[22-23]。根系的活跃吸收面积能够反映出根系活力的强弱,徐春梅等^[24]在水培条件下研究通气增氧对水稻苗期根系生长和氮代谢的影响,结果表明,秀水 09 水稻品种在增氧处理后根系干物质积累量、根长、根体积、根系活力以及吸收面积较对照增加 44.64%、119.94%、43.88%、4.15% 和 14.14%, 国稻 6 号增氧后根系硝态氮含量和可溶性糖含量分别是对照的 2.58 倍和增加 9.43%; 肖元松等^[25]研究增氧栽培对桃幼树根系构型及根系氮素代谢的影响,结果发现增氧栽培桃幼树根系总长度、总表面积、一级侧根数、二级侧根数、根尖数、总体积、分枝数、交叉数较对照均有不同程度增加,分别比对照增加了 50.53%、42.66%、13.64%、18.51%、44.94%、5.48%、37.01% 和 54.41%; 增氧栽培的根系活力、根系硝酸还原酶(NR)、谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)活性分别比对照提高了 19.04%、29.80%、6.56% 和 19.91%; 根系全氮含量较对照提

高了18.90%;增氧栽培的桃幼树植株干物质积累量、干茎均高于对照;Voeselek等^[26]研究发现当根际氧含量过低时,植株根长变短,根系数目增多,适当增加不同根系径级的根系数目、根长、根系总表面积及根系的活跃吸收面积,有利于植株吸收养分。本研究结果表明,在苗期,施用适当生物炭可以提高甜瓜根系根体积、根系总吸收面积和活跃吸收面积,提高其活跃吸收面积百分比和根比表面积,甜瓜幼苗可以获得更多的养分和水分,促进幼苗质量提高,以T3即生物炭含量占风干土质量40 g·kg⁻¹应用效果最好。这可能是由于生物炭疏松多孔,可以降低基质容重,增加孔隙率,增加基质的通透性^[27],因此生物炭可以改善根系的外在环境,对根系周围养分的供应产生增益效果,促进根系生长并增强根系活力。

壮苗指数则是幼苗质量的综合数量化指标,是评价幼苗质量优劣的主要参考^[28],幼苗质量的强弱也需辅以若干形态指标、物质积累指标和生理指标的变化才能准确判断。王颖^[29]研究发现,叶面积的增加对生长发育、光能利用、干物质积累、产量均有着积极的显著影响。叶面积的增加加强了植株的光合作用能力,使植株同化产物增加、根系同化产物的分配比例增加,根系吸收能力增强从而影响甜瓜的果实重量及品质。作物的干物质积累量是反映作物生殖生长的一项重要指标,可直接反映作物体内代谢能力的强弱;张文哲等^[30]研究了不同灌水量和不同生物炭施用量对温室番茄株高、茎粗的影响,结果表明,不同生物炭施用量对番茄株高的影响大致相同,灌水量分别为0.8 ET(Evapo-Transpiration,蒸发蒸腾量)、1.0 ET、1.2 ET时,番茄的株高长势随着生物炭施用量的增加而增加;0.8 ET、1.0 ET、1.2 ET灌水量下,5%的生物炭施加量对番茄茎粗的增幅促进作用最大。说明生物炭作为添加剂可以改善温室番茄株高茎粗的生理特性,提高番茄植株质量;吕伟静等^[31]研究结果显示,在土壤中添加生物炭和改性生物炭均可显著提高甜茶幼苗生物量,改性生物炭的效果更加明显。添加改性生物炭分别使土壤硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾、有机质的含量增加了91.9%、78.5%、114.0%、32.5%、159.4%;添加改性生物炭处理的甜茶幼苗株高、地径、鲜质量和干质量与对照组相比分别增加了53.1%、20.4%、78.9%和79.2%。本研究结果表明,施用适当生物炭可以提高甜瓜株高、茎粗、叶面积,提高植株鲜质量和干质量,使根冠比和壮苗指数维持在比较适合的范围,保证了甜瓜幼苗质量,以T3

应用效果最好。这可能与生物炭施用后土壤结构的改善有密切关系,本研究发现,添加生物炭可以提高土壤的pH值,降低土壤容重,增加土壤含水量,以T4即生物炭含量占风干土质量80 g·kg⁻¹对土壤物理性状改善效果最好,T3应用效果较好,这可能是因为生物炭是一种具有强吸附性能、高灰分含量、偏碱性的粉末状固态颗粒物质,施于土壤后,提高了土壤酸碱性、增加了孔隙度、减少了容重有关^[32],这与Gul等^[33]发现生物炭可以改变土壤理化性质、促进养分循环、增加碳固存的研究结果一致。同时,生物炭的孔隙构造发达、比表面积大,并且拥有强大的吸收能力^[34],有助于在土壤中保持更多的水分和养分^[35],从而改善植物的生长。

植物根系的形态变化也能够影响植物对营养元素的吸收^[36]。赵浩波等^[37]研究发现,氮含量会响应根系形态,若含氮量过低会抑制根系生长;谭龙涛^[38]研究也表明,氮的利用率与根系体积、总吸收面积、活跃吸收面积有关。本研究结果表明,施用适当生物炭可以提高甜瓜幼苗硝态氮含量和硝酸还原酶(NR)活性,促进物质积累和幼苗形态建成,改善了幼苗生理活性,T3应用效果最好。NR作为植物硝态氮还原的关键酶,在以硝态氮为氮源的植株中,NR活性可以作为其利用氮素能力的重要指标^[39]。硝态氮含量是作物氮素同化和利用的主要指标,NR的活性高低直接影响植物体对氮素营养的利用效果,对作物品质和产量也会产生一定的影响^[40]。

在正常的生理状态下,植物组织中的活性氧产生与清除处于平衡状态,一旦植物受到逆境胁迫,这种平衡体系就会遭到破坏,植物体内会产生O₂⁻和H₂O₂等活性氧,致使细胞膜通透性增加、代谢紊乱,最终使植物受到伤害。为了清除体内的活性氧,植物形成了由SOD、CAT、POD等组成的抗氧化防御酶系统^[41]。本研究结果表明,在甜瓜出苗后15 d和25 d,生物炭施用后均提高了甜瓜幼苗根系CAT、POD、SOD、APX、PPO等氧化酶活性,促进了甜瓜幼苗生长,提高了幼苗质量。这些抗氧化酶可灵敏反映植物对氧化胁迫的响应幅度,从而可以从生化方面评价生物炭对植物生长的影响效应^[42]。

4 结 论

综上所述,生物炭改善了土壤物理性状,以T4即生物炭含量占风干土质量80 g·kg⁻¹应用效果最好;同时提高甜瓜根系生理特性,增强根表面积,促进了甜瓜幼苗形态建成,提高了幼苗质量,以T3即

生物炭含量占风干土质量 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应用效果最好。在甜瓜出苗后 25 d, 生物炭提高了土壤 pH 值和含水量, T4 分别比 CK 提高 1.86% 和 3.16%; 降低土壤容重, 比 CK 即生物炭含量占风干土质量 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低 5.93%。在甜瓜出苗后 25 d, T3 甜瓜幼苗根系活力、根系硝态氮含量、NR、CAT、POD、SOD、APX、PPO 分别比 CK 高 20.88%、5.70%、126.67%、10.47%、23.42%、31.58%、54.21%、62.88%; 根体积、根系总吸收面积、活跃吸收面积、活跃吸收面积百分比和根比表面分别比 CK 高 21.07%、40.19%、71.82%、22.56% 和 15.76%; 甜瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数分别比 CK 高 34.87%、31.71%、33.91%、31.92%、45.10%、64.94%、43.33%。

参考文献:

- [1] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [2] 吴昱. 施加生物炭对黑土区坡耕地土地生产力的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- WU Y. Influences of biochar on soil productivity of sloping farm land in black soil region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [3] 刘怀优. 生物炭在酸性土壤改良中的应用[J]. *生物化工*, 2020, 6(4): 126-129, 142.
- LIU H Y. Application of biochar in acid soil improvement [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2020, 6(4): 126-129, 142.
- [4] 廖萍, 汤军, 曾勇军, 等. 生物炭和石灰对酸性稻田水稻产量、土壤性状和经济效益的影响[J]. *中国稻米*, 2019, 25(1): 44-48.
- LIAO P, TANG J, ZENG Y J, et al. Effects of biochar and lime on yield, soil properties and economic benefit of double rice-cropping system[J]. *China Rice*, 2019, 25(1): 44-48.
- [5] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/4): 6-28.
- [6] MANYÀ J J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 7939-7954.
- [7] NADEEM M, PHAM T H, THOMAS R, et al. Potential role of root membrane phosphatidic acid in superior agronomic performance of silage-corn cultivated in cool climate cropping systems[J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, 167(4): 585-596.
- [8] BLOUIN M, BAROT S, ROUMET C. A quick method to determine root biomass distribution in diameter classes[J]. *Plant and Soil*, 2007, 290(1): 371-381.
- [9] YANG J C, ZHANG H, ZHANG J H. Root morphology and physiology in relation to the yield formation of rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(6): 920-926.
- [10] PIERRET A, DOUSSAN C, CAPOWIEZ Y, et al. Root functional

- architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(2): 269-281.
- [11] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT 数据库 [EB/OL]. (2020-03-04), <http://www.fao.org/faostat/en/data>.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Database [EB/OL]. (2020-03-04), <http://www.fao.org/faostat/en/data>.
 - [12] 王娟娟, 李莉, 尚怀国. 我国西瓜甜瓜产业现状与对策建议[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(5): 69-73.
WANG J J, LI L, SHANG H G. Present situation and countermeasures of watermelon and melon industry in China [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(5): 69-73.
 - [13] 胡国智, 熊韬, 冯炯鑫, 等. 施肥对甜瓜风味物质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(2): 93-98.
HU G Z, XIONG T, FENG J X, et al. Effect of fertilization on flavor compounds of muskmelon[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(2): 93-98.
 - [14] DE SOUZA LAURENTINO L G, CHAVES L H G, CAVALCANTE A R, et al. Melon seedlings phytomass under poultry litter biochar doses [J]. *Agricultural Sciences*, 2021, 12(3): 181-197.
 - [15] ELBASHIER M M A, SHAO X H, 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[J]. *Agronomy*, 2018, 8(2): 22.
 - [16] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(1): 54-58.
ZHANG F R, ZHAO L N, ZHANG R, et al. Effects of biochar on saline soil improvement and melon growth[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(1): 54-58.
 - [17] 石超, 邢毅, 冯军, 等. 减氮增密对西南丘陵区旱地直播油菜根系发育及水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 9-17.
SHI C, XING Y, FENG J, et al. Effects of dense planting with less Nitrogen fertilizer on root system development and water use efficiency of direct-sowed rapeseed in hilly dryland area in southwest of China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 9-17.
 - [18] 白彩虹. 小麦吸氮量、株高、产量和苗期根系性状的 QTL 定位[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
BAI C H. QTL identification of nitrogen uptake, plant height, grain yield and seedling root traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Xianyang: Northwest A and F University, 2014.
 - [19] ZHANG H, XUE Y G, WANG Z Q, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in “super” rice[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 31-40.
 - [20] DE COSTA W, ZÖRB C, HARTUNG W, et al. Salt resistance is determined by osmotic adjustment and abscisic acid in newly developed maize hybrids in the first phase of salt stress[J]. *Physiologia Plantarum*, 2007, 131(2): 311-321.
 - [21] HERDER G D, VAN ISTERDAEL G, BEECKMAN T, et al. The Roots of a new green revolution[J]. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(11): 600-607.
 - [22] KUMAR B, DHAR S, PAUL S, et al. Microbial biomass carbon, activity of soil enzymes, nutrient availability, root growth, and total biomass production in wheat cultivars under variable irrigation and nutri-

- ent management[J]. *Agronomy*, 2021, 11(4): 669.
- [23] 邱晓丽,周洋子,董莉,等.生物有机肥对马铃薯根际土壤生物活性及根系活力的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):162-169.
QIU X L, ZHOU Y Z, DONG L, et al. Effects of bio-organic fertilizer on bioactivity and root activity of rhizosphere soil of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 162-169.
- [24] 徐春梅,王丹英,陈松,等.增氧对水稻根系生长与氮代谢的影响[J].中国水稻科学,2012,26(3):320-324.
XU C M, WANG D Y, CHEN S, et al. Effect of aeration on root growth and nitrogen metabolism in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(3): 320-324.
- [25] 肖元松,彭福田,张亚飞,等.增氧栽培对桃幼树根系构型及氮素代谢的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1995-2002.
XIAO Y S, PENG F T, ZHANG Y F, et al. Effects of aeration cultivation on root architecture and nitrogen metabolism of young peach trees[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1995-2002.
- [26] VOESENEK L A C J, COLMER T D, PIERIK R, et al. How plants cope with complete submergence[J]. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 213-226.
- [27] MUKHERJEE A, LAL R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 313-339.
- [28] 黄红荣,李建明,胡晓辉,等.提高营养液镁浓度可缓解黄瓜幼苗亚低温胁迫[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):740-747.
HUANG H R, LI J M, HU X H, et al. Increasing magnesium level in hydroponic solution will relieve suboptimal temperature stress to cucumber seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 740-747.
- [29] 王颖.厚皮甜瓜光合特性及产量和品质形成特点的研究[D].海口:海南大学,2016.
WANG Y. Study on the photosynthetic characteristics, yield and quality formation of muskmelon[D]. Haikou: Hainan University, 2016.
- [30] 张文哲,陈可欣,欧琦骏,等.灌水量和生物炭施用量对温室番茄株高茎粗的影响[J].南方农机,2021,52(19):48-51.
ZHANG W Z, CHEN K X, OU Q J, et al. Effects of irrigation and biochar application on plant height and stem diameter of greenhouse tomato[J]. *South Agricultural Machinery*, 2021, 52(19): 48-51.
- [31] 吕伟静,陈冉,马志婷,等.生物炭及改性生物炭对平邑甜茶幼苗生长及土壤的影响[J].植物生理学报,2021,57(3):597-604.
LV W J, CHEN R, MA Z T, et al. Effect of biochar and modified biochar on the *Malus hupehensis* seedlings and soil[J]. *Plant Physiology Communications*, 2021, 57(3): 597-604.
- [32] LYU H H, HE Y H, TANG J C, et al. Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1-7.
- [33] GUL S, WHALEN J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 1-15.
- [34] 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 and Agriculture*, 2015, 95(6): 1321-1327.
- [35] DE MEDEIROS E V, DOS SANTOS MORAES M D C H, DA COSTA P, et al. Effect of biochar and inoculation with *Trichoderma aureoviride* on melon growth and sandy entisol quality[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2020, 14(6): 971-977.
- [36] RENGEL Z, GRAHAM R D. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution[J]. *Plant and Soil*, 1995, 176(2): 317-324.
- [37] 赵浩波,任卫波,于秀敏,等.不同氮素水平对羊草形态及生理指标的影响[J].中国草地学报,2020,42(3):15-20.
ZHAO H B, REN W B, YU X M, et al. Effects of different nitrogen levels on morphological and physiological indices of *Leymus chinensis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 15-20.
- [38] 谭龙涛.苜蓿氮代谢高效基因型筛选及表达分析[D].北京:中国农业科学院,2015.
TAN L T. Screening and expression analysis of ramie (*Boehmeria nivea* L.) with nitrogen efficiency[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [39] 马光恕,刘涛,廉华,等.氮钾配施对麦瓶草(面条菜)品质性状及相关酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2013,(4):77-82.
MA G S, LIU T, LIAN H, et al. Effects of combined application of nitrogen and potassium on quality traits and related enzymes activity of *Silene conoidea* L.(noodles greens)[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013,(4): 77-82.
- [40] LI D D, TIAN M Y, CAI J, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2013, 70(3): 257-263.
- [41] ZHANG Y P, YANG S J, CHEN Y Y. Effects of melatonin on photosynthetic performance and antioxidants in melon during cold and recovery[J]. *Biologia Plantarum*, 2017, 61(3): 571-578.
- [42] 刘硕,周启星.抗氧化酶诊断环境污染研究进展[J].生态学杂志,2008,27(10):1791-1798.
LIU S, ZHOU Q X. Research advances in antioxidant enzymes for diagnosing environmental contamination[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1791-1798.