

不同生物质炭对蓝莓幼苗叶片光合性能和生长的影响

韦继光¹, 贾明云¹, 蒋佳峰¹, 曾其龙¹, 杨曙方², 于金平¹, 於虹^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 浙江蓝美技术股份有限公司, 浙江 绍兴 312000]

摘要: 通过盆栽试验, 研究添加不同用量蓝莓枝条生物质炭和玉米秸秆生物质炭对黄棕壤理化性质及蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 幼苗叶片光合性能和生长指标的影响。结果表明: 与纯土对照(CK0)相比, 施用生物质炭显著降低了土壤容重, 显著提高了土壤总孔隙度。与CK0处理相比较, 添加体积分数10%和20%生物质炭后, 蓝莓幼苗叶片叶绿素含量指数(CCI)、净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)均有所提高。添加体积分数20%生物质炭后, 蓝莓幼苗各光合指标与常规土壤改良对照[V(土壤): V(草炭): V(珍珠岩)=60:20:20, CK1]无显著差异。2种生物质炭均以添加量为体积分数20%时对蓝莓幼苗生长的促进作用最大; 其中, 与CK0处理相比, 添加20%玉米秸秆生物质炭处理[V(土壤): V(玉米秸秆生物质炭): V(珍珠岩)=60:20:20, CB20]可显著提高蓝莓幼苗单株的总枝长、总叶面积、地上部干质量和总干质量, 且除单株总叶面积显著低于常规土壤改良对照外, CB20处理的其余各生长指标均与常规土壤改良对照无显著差异。对单株总干质量与生物质炭添加量进行回归分析发现, 玉米秸秆生物质炭最佳添加量为17.1%。综上所述, 在黄棕壤中添加适量玉米秸秆生物质炭可促进蓝莓植株生长, 玉米秸秆生物质炭在蓝莓栽培土壤改良上具有一定的应用潜力。

关键词: 生物质炭; 蓝莓; 土壤理化性质; 叶片光合性能; 生长量

中图分类号: Q945.3; S663.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2023)01-0069-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.01.08

Effects of different biochars on leaf photosynthetic characteristics and growth of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings WEI Jiguang¹, JIA Mingyun¹, JIANG Jiafeng¹, ZENG Qilong¹, YANG Shufang², YU Jinping¹, YU Hong^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd, Shaoxing 312000, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(1): 69-76

Abstract: Effects of different application amounts of blueberry branch biochar and corn straw biochar on physicochemical properties of yellow-brown soil and leaf photosynthetic characteristics and growth indexes of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings were studied by using a pot experiment. The results show that compared with pure soil control (CK0), application of biochar significantly decreases soil bulk density but significantly increases total soil porosity. Compared with CK0 treatment, chlorophyll content index (CCI), net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), and transpiration rate (Tr) of leaf of blueberry seedlings all increase after application of 10% and 20% volume fractions of biochar. After application of 20% volume fraction of biochar, there are no significant differences between each photosynthetic index of blueberry seedlings and those of conventional soil improvement control [V(soil): V(peat): V(perlite)=60:20:20, CK1]. The promotion effects of two kinds of biochars on seedling growth of blueberry are the highest at the application amount of 20% volume fraction; in which, 20% corn straw biochar application treatment [V(soil): V(corn straw biochar): V(perlite)=60:20:20,

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(20)3019]; 江苏省属公益类科研院所自主科研项目(BM2018021-3)

作者简介: 韦继光(1978—), 男, 广西都安人, 博士, 副研究员, 主要从事蓝莓栽培生理方面的研究。

①通信作者 E-mail: njyuhong@vip.sina.com

引用格式: 韦继光, 贾明云, 蒋佳峰, 等. 不同生物质炭对蓝莓幼苗叶片光合性能和生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(1): 69-76.

CB20] can significantly increase total stem length, total leaf area, dry mass of above-ground part and total dry mass per plant of blueberry seedlings, and there are no significant differences in each growth index between CB20 treatment and conventional soil improvement control except that total leaf area per plant of CB20 treatment is significantly lower than that of conventional soil improvement control. Regression analysis is conducted for total dry mass per plant and application amount of biochar, which reveals that the optimum application amount of corn straw biochar is 17.1%. In conclusion, application of suitable amount of corn straw biochar into yellow-brown soil can promote the growth of blueberry plants, and corn straw biochar has certain application potential in improvement of blueberry cultivated soil.

Key words: biochar; blueberry (*Vaccinium* spp.); soil physicochemical properties; leaf photosynthetic characteristics; increment

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 是中国新兴果树, 为须根系植物, 适宜在酸性土地地区生长, 对黏重土壤适应性较差, 不能达到高产稳产^[1-2]。黄棕壤是中国南方酸性土地地区主要土壤类型之一, 但此类土壤贫瘠且黏重, 而蓝莓生长需要有机质含量高且疏松透气的土壤, 目前在生产上主要通过掺入草炭、珍珠岩等进行土壤改良。但草炭是不可再生资源且储量有限, 很多国家逐渐限制草炭开采, 导致草炭价格不断上涨^[3]。为此, 国内外陆续开展利用当地资源丰富、价格低廉的各种有机物料替代草炭改良蓝莓栽培土壤的研究^[4-8]。随着中国蓝莓种植面积的不增长, 因地制宜开发来源广泛、成本低廉、效果理想的新型土壤改良物料是中国蓝莓产业可持续发展的重要保障。

生物质炭是生物质在限氧条件下经过热裂解作用产生的固体物质, 其在土壤改良、污染土壤修复和碳封存等方面具有广阔的应用前景^[9]。农田作物秸秆、园林废弃枝叶、畜禽粪便等均可作为生产制备生物质炭的原料, 其中, 玉米秸秆来源广泛且可再生, 是制备生物质炭的优质原料之一^[10]。据统计, 2018年中国玉米秸秆的理论资源量达到 2.53×10^8 t^[11]。这些玉米秸秆除部分还田外, 其余大部分作为薪柴燃烧或是废弃田间地头, 未得到充分的资源化利用。近10余年, 中国蓝莓产业发展迅速, 截至2020年, 全国种植总面积达到 6.64×10^4 hm²^[12]。为保证蓝莓持续丰产、稳产, 需要在夏季采收后及冬季对蓝莓树体进行修剪, 进入成年的蓝莓园每年修剪下来的干燥枝条量约 2.25 t · hm⁻²。保守估算全国目前每年产生废弃的蓝莓枝条总量约 1.5×10^5 t, 且呈逐年上涨趋势。农田作物秸秆及果园废弃枝条无害化处理已成为困扰农村生态文明建设和美丽乡村建设的一大难题。将数量可观的农田作物秸秆和果园废弃枝条等生物质资源变废为宝, 制成生物质炭并将其用于土壤改良,

不仅可以为农林废弃物资源化利用提供新思路, 而且对于发展循环绿色可持续发展农业和建设环境友好型社会具有重大的现实意义。

生物质炭作为土壤改良剂在国内外已有较多的研究报道^[13-16]。多数研究结果表明: 施用生物质炭可降低土壤容重、改善土壤结构, 提高土壤有机质含量及养分有效性, 从而促进作物生长^[17-21]。但由于不同区域的气候条件、土壤类型、土壤肥力状况、生物质炭性质及用量等方面的差异, 都会造成生物质炭对作物生长及产量的影响不尽相同^[22]。与其他作物相比, 蓝莓喜酸性土壤, 但生物质炭通常呈碱性, 因此, 不同来源生物质炭及用量对蓝莓植株生长及产量的影响有其特殊性。在美国俄勒冈州科瓦利市的研究显示: 在沙质土壤上施入体积分数20%生物质炭可显著促进高丛蓝莓植株生长^[23]。而在中国山东省青岛市开展的大田试验研究结果表明: 施用生物质炭对蓝莓树体生长影响不大, 但可在一定程度上提高果实产量和品质^[24]。生物质炭在蓝莓栽培土壤(黄棕壤)改良中的应用尚缺乏相关研究, 不利于蓝莓产业的进一步发展。

鉴于此, 本文通过盆栽试验, 对添加不同用量蓝莓枝条生物质炭和玉米秸秆生物质炭后土壤理化性质及蓝莓幼苗叶片光合性能和生长指标进行了比较和分析, 探明生物质炭作为黄棕壤改良物料的适宜用量, 以为生物质炭在蓝莓栽培土壤改良上的科学合理利用提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试苗木为南方高丛蓝莓品种‘蓝美1号’ (*Vaccinium corymbosum* ‘Lanmei 1’) 半年生扦插苗,

株高 15 cm, 基径 1.0 mm。试验用土取自安徽省宣城市郎溪县蓝莓基地(地理坐标为东经 119°15'27"、北纬 31°10'13"), 土壤类型为黄棕壤, 碱解氮含量为 89.2 mg · kg⁻¹, 有效磷含量为 13.6 mg · kg⁻¹, 速效钾含量为 76.9 mg · kg⁻¹, 0~15 cm 土层土壤酸碱度为 pH 4.92, 有机质含量为 1.9%。试验所用草炭及珍珠岩由浙江蓝美农业有限公司提供。草炭酸碱度为

pH 4.45, 全氮含量为 3.27 g · kg⁻¹, 全磷含量为 1.06 g · kg⁻¹, 全钾含量为 13.3 g · kg⁻¹。珍珠岩酸碱度为 pH 7.53, 全氮含量为 0.63 g · kg⁻¹, 全磷含量为 0.09 g · kg⁻¹, 全钾含量为 33.1 g · kg⁻¹。供试蓝莓枝条生物质炭及玉米秸秆生物质炭均为在 500 °C 限氧条件下热裂解 1 h 制成。2 种生物质炭基本理化性质见表 1。

表 1 供试蓝莓枝条生物质炭和玉米秸秆生物质炭基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of test blueberry branch biochar and corn straw biochar

生物质炭种类 Biochar type	pH 值 pH value	电导率/(ms · cm ⁻¹) Electrical conductivity	碳含量/(g · kg ⁻¹) Carbon content	氮含量/(g · kg ⁻¹) Nitrogen content	碳氮比 Carbon/nitrogen ratio
蓝莓枝条生物质炭 Blueberry branch biochar	8.82	0.776	718.8	17.0	42.3
玉米秸秆生物质炭 Corn straw biochar	7.82	1.389	510.1	10.2	50.0

1.2 方法

1.2.1 试验设计 盆栽试验于 2020 年 11 月至 2021 年 3 月在江苏省中国科学院植物研究所进行, 试验采用完全随机试验设计, 共设 8 个处理: CK0 为不添加任何有机物料的黄棕壤, 即纯土对照; CK1 为 V(土壤): V(草炭): V(珍珠岩) = 60: 20: 20 的混合基质, 即常规土壤改良对照; BB10 为 V(土壤): V(蓝莓枝条生物质炭): V(珍珠岩) = 70: 10: 20 的混合基质; BB20 为 V(土壤): V(蓝莓枝条生物质炭): V(珍珠岩) = 60: 20: 20 的混合基质; BB30 为 V(土壤): V(蓝莓枝条生物质炭): V(珍珠岩) = 50: 30: 20 的混合基质; CB10 为 V(土壤): V(玉米秸秆生物质炭): V(珍珠岩) = 70: 10: 20 的混合基质; CB20 为 V(土壤): V(玉米秸秆生物质炭): V(珍珠岩) = 60: 20: 20 的混合基质; CB30 为 V(土壤): V(玉米秸秆生物质炭): V(珍珠岩) = 50: 30: 20 的混合基质。每种处理装 9 个塑料盆(直径 15 cm、高 15 cm), 浇水沉实 1 个月后, 3 盆用于土壤理化指标样品取样, 另 6 盆每盆栽植 1 株长势基本一致的幼苗。盆栽置于光照培养室培养, 温度为 25 °C, 光照强度为 100 μmol · m⁻² · s⁻¹, 光照时间为 6:00 至 20:00, 空气相对湿度为 50%~80%。试验期间视土壤墒情, 每次浇 0.1~0.2 L 水。所有处理每 2 周浇灌 1 次质量分数 0.5% 肥液, 肥液中 m[(NH₄)₂SO₄]: m(KH₂PO₄) = 3: 2, 每株每次浇 100 mL。及时进行病虫害防治, 确保植株正常生长。

1.2.2 土壤理化指标测定 于浇水沉实结束后, 采用环刀法^{[25]269-271}测定土壤容重; 同时, 用土钻采集盆

内土壤, 土壤样品置于通风处自然风干, 参照程斐等^[26]的方法, 将风干土壤样品与去离子水按 m: V = 1: 5 的比例混匀, 静置 2 h 后取滤液测定土壤 pH 值和电导率; 土壤总孔隙度参照鲁如坤^{[25]266-271}的方法测定。每种处理随机选取 3 盆采集土壤样品, 视为 3 个重复。

1.2.3 叶片光合指标测定 于栽植后第 120 天每处理随机选取植株 4 株(视为 4 个重复), 每株选取枝条上部健康功能叶片 2 枚做好标记, 用 CCM-200 叶绿素测定仪(美国 OPTI-SCIENCES 公司)测定标记叶片的叶绿素含量指数(CCI); 采用 LI-6800 便携式光合作用测量系统(美国 LI-COR 公司)测定标记叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO₂ 浓度(Ci)。测定时叶室光强设为 100 μmol · m⁻² · s⁻¹, 叶室 CO₂ 浓度控制在 400 μmol · mol⁻¹。

1.2.4 植株生长指标测定 于栽植后第 120 天每处理随机选取植株 4 株(视为 4 个重复), 洗净后, 将植株按根、茎和叶进行分样。用卷尺(精度 0.1 cm)测量每个单株所有当年生枝条的长度, 其总和即为单株总枝长。参照胡红玲等^[27]的方法测定单株总叶面积; 将每个单株所有叶片混匀后随机抽取鲜叶约 10 g, 用惠普(HP) LaserJet M1216nfh MFP 黑白激光多功能一体机[惠普(中国)投资有限公司]扫描并测量所抽取叶片的叶面积(S₀), 然后在 105 °C 条件下杀青 30 min, 之后于 75 °C 条件下干燥至恒质量, 称量其干质量(m_a); 同法干燥并称量剩余叶片的干质量(m_b)。单株总叶面积(S)根据公式“S = S₀(m_a + m_b)/

m_a ”计算。将各单株的根和茎分别置于 105 ℃ 条件下杀青 30 min,之后于 75 ℃ 条件下干燥至恒质量,分别称量茎干质量和根干质量,茎和叶的干质量之和为地上部干质量,根、茎和叶的干质量之和为总干质量。根冠比根据公式“根冠比=根干质量/地上部干质量”计算。

1.3 数据处理和分析

采用 EXCEL 2013 软件进行数据处理;采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,使用 Duncan's 新复极差法检验不同处理间的差异显著性($P<0.05$)。

2 结果和分析

2.1 不同生物质炭处理土壤理化性质分析

不同生物质炭处理土壤理化性质的影响见表 2。

表 2 不同生物质炭处理土壤理化性质的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on soil physicochemical properties of different biochar treatments ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	配方 ²⁾ Formula ²⁾	容重/($g \cdot cm^{-3}$) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	pH 值 pH value	电导率/($ms \cdot cm^{-1}$) Electrical conductivity
CK0	F1	1.13±0.01a	71.0±0.7g	4.90±0.04de	0.047±0.007f
CK1	V(F1) : V(F2) : V(F3) = 60 : 20 : 20	0.74±0.04e	81.2±0.9bc	4.72±0.03e	0.107±0.006d
BB10	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 70 : 10 : 20	0.86±0.04c	78.9±0.7e	5.70±0.33b	0.051±0.009f
BB20	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 60 : 20 : 20	0.79±0.02de	80.5±0.3cd	6.03±0.12a	0.076±0.013e
BB30	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 50 : 30 : 20	0.68±0.01f	83.5±0.4a	6.22±0.22a	0.093±0.012de
CB10	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 70 : 10 : 20	0.97±0.03b	75.8±1.2f	4.94±0.09cde	0.130±0.008c
CB20	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 60 : 20 : 20	0.83±0.04cd	79.1±1.3de	5.11±0.12cd	0.261±0.021b
CB30	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 50 : 30 : 20	0.75±0.01e	82.1±0.3b	5.24±0.18c	0.372±0.009a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

²⁾ F1: 土壤 Soil; F2: 草炭 Peat; F3: 珍珠岩 Perlite; F4: 蓝莓枝条生物质炭 Blueberry stem biochar; F5: 玉米秸秆生物质炭 Corn straw biochar.

2.2 不同生物质炭处理对蓝莓幼苗叶片光合性能的影响

不同生物质炭处理对蓝莓幼苗叶片光合性能的影响见表 3。结果显示:CK1[V(土壤):V(草炭):V(珍珠岩)=60:20:20]处理的叶片叶绿素含量指数(CCI)显著高于 CK0(纯土对照)处理;各生物质炭处理的叶片 CCI 值随生物质炭添加量的增加呈先升高后降低的趋势。BB10[V(土壤):V(蓝莓枝条生物质炭):V(珍珠岩)=70:10:20]和 BB20[V(土壤):V(蓝莓枝条生物质炭):V(珍珠岩)=60:20:20]处理的叶片 CCI 值略高于 CK0 处理, BB30[V(土壤):V(蓝莓枝条生物质炭):V(珍珠岩)=50:30:20]处理的叶片 CCI 值显著低于 CK0 处理; BB10 和 BB30 处理的叶片 CCI 值均显著低于 CK1 处理。CB10[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍

结果显示:CK1[V(土壤):V(草炭):V(珍珠岩)=60:20:20](常规土壤改良对照)处理的土壤容重显著低于 CK0(纯土对照)处理,而土壤总孔隙度显著高于 CK0 处理;各生物质炭处理的土壤容重随生物质炭添加量的增加而显著降低,土壤总孔隙度随生物质炭添加量的增加而显著升高。CK1 处理的土壤 pH 值略低于 CK0 处理,而土壤电导率显著高于 CK0 处理。各生物质炭处理的土壤 pH 值和电导率随生物质炭添加量的增加而升高。与 CK0 处理相比,各蓝莓枝条生物质炭处理及 CB30[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=50:30:20]处理的土壤 pH 值显著升高。除 BB10[V(土壤):V(蓝莓枝条生物质炭):V(珍珠岩)=70:10:20]处理外,各生物质炭处理的土壤电导率均显著高于 CK0 处理。

珠岩)=70:10:20]和 CB20[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=60:20:20]处理的叶片 CCI 值略高于 CK0 处理, CB30[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=50:30:20]处理的叶片 CCI 值略低于 CK0 处理; CB10 和 CB20 处理的叶片 CCI 值与 CK1 处理无显著差异, CB30 处理的叶片 CCI 值显著低于 CK1 处理。

结果(表 3)还显示:CK1 处理的叶片净光合速率(P_n)高于 CK0 处理,但差异不显著;各生物质炭处理的叶片 P_n 值随生物质炭添加量的增加呈先升高后降低的趋势。BB10、BB20、CB10 和 CB20 处理的叶片 P_n 值高于 CK0 处理, BB30 和 CB30 处理的叶片 P_n 值低于 CK0 处理; BB10、BB20、CB10 和 CB20 处理的叶片 P_n 值低于 CK1 处理, BB30 和 CB30 处理的叶片 P_n 值显著低于 CK1 处理。CK1 处理的叶片气

表 3 不同生物质炭处理对蓝莓幼苗叶片光合性能的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 3 Effect of different biochar treatments on leaf photosynthetic characteristics of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	配方 ²⁾ Formula ²⁾	CCI	Pn	Gs	Tr	Ci
CK0	F1	22.0±0.6bc	2.40±0.23abc	23.15±4.73b	0.42±0.10b	213.87±15.15a
CK1	V(F1) : V(F2) : V(F3) = 60 : 20 : 20	27.0±0.5a	3.17±0.19a	42.66±4.93a	0.72±0.05a	262.65±4.64a
BB10	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 70 : 10 : 20	22.4±0.5b	2.63±0.04abc	29.63±1.16ab	0.53±0.02ab	245.55±7.47a
BB20	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 60 : 20 : 20	23.1±0.6ab	3.05±0.33ab	34.34±4.73ab	0.61±0.07ab	235.50±26.37a
BB30	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 50 : 30 : 20	14.9±0.8d	2.02±0.48c	22.39±7.59b	0.40±0.12b	224.16±24.30a
CB10	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 70 : 10 : 20	22.9±1.8ab	2.71±0.16abc	29.44±3.88ab	0.54±0.08ab	235.01±20.48a
CB20	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 60 : 20 : 20	23.4±1.8ab	3.06±0.26ab	33.98±5.57ab	0.61±0.09ab	239.59±10.68a
CB30	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 50 : 30 : 20	18.0±2.6cd	2.25±0.27bc	22.07±3.55b	0.41±0.07b	221.00±13.03a

¹⁾ CCI: 叶绿素含量指数 Chlorophyll content index; Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Gs: 气孔导度 Stomatal conductance ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$). 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

²⁾ F1: 土壤 Soil; F2: 草炭 Peat; F3: 珍珠岩 Perlite; F4: 蓝莓枝条生物质炭 Blueberry stem biochar; F5: 玉米秸秆生物质炭 Corn straw biochar.

孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)显著高于CK0处理;各生物质炭处理的叶片Gs和Tr值随生物质炭添加量的增加呈先升高后降低的趋势。BB10、BB20、CB10和CB20处理的叶片Gs和Tr值高于CK0处理, BB30和CB30处理的叶片Gs和Tr值与CK0处理相差不大; BB10、BB20、CB10和CB20处理的叶片Gs和Tr值低于CK1处理, BB30和CB30处理的叶片Gs和Tr值显著低于CK1处理。叶片胞间CO₂浓度(Ci)以CK1处理略高, 但各处理间无显著差异。

2.3 不同生物质炭处理对蓝莓幼苗生长的影响

不同生物质炭处理对蓝莓幼苗生长的影响见表4。结果显示: CK1[V(土壤): V(草炭): V(珍珠岩) = 60 : 20 : 20]处理的单株总枝长、单株总叶面积、单株根干质量、单株地上部干质量和单株总干质量均显著高于CK0(纯土对照)处理, 而根冠比显著低于CK0处理。除BB20[V(土壤): V(蓝莓枝条生

物质炭): V(珍珠岩) = 60 : 20 : 20]处理的根冠比以及BB30[V(土壤): V(蓝莓枝条生物质炭): V(珍珠岩) = 50 : 30 : 20]处理的单株根干质量和根冠比低于CK0处理外, 各蓝莓枝条生物质炭处理的其余生长指标均高于CK0处理, 但无显著差异; 各蓝莓枝条生物质炭处理的单株总枝长、单株总叶面积、单株地上部干质量和单株总干质量均显著低于CK1处理。BB30处理的单株根干质量显著低于CK1处理, BB10[V(土壤): V(蓝莓枝条生物质炭): V(珍珠岩) = 70 : 10 : 20]和BB20处理的根干质量与CK1处理无显著差异。各蓝莓枝条生物质炭处理的根冠比均高于CK1处理, 其中BB10处理的根冠比显著高于CK1处理。随蓝莓枝条生物质炭添加量的增加, 单株总枝长、单株总叶面积、单株根干质量、单株地上部干质量和单株总干质量总体呈先升高后降低的趋势, 而根冠比呈逐渐降低的趋势。

表 4 不同生物质炭处理对蓝莓幼苗生长的影响 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 4 Effect of different biochar treatments on growth of blueberry (*Vaccinium* spp.) seedlings ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	配方 ²⁾ Formula ²⁾	l/cm	S/cm ²	m1/g	m2/g	m3/g	R
CK0	F1	60.25±4.89c	169.7±8.0d	0.27±0.01bc	1.05±0.05d	1.32±0.06d	0.26±0.01a
CK1	V(F1) : V(F2) : V(F3) = 60 : 20 : 20	95.75±4.53a	314.3±30.4a	0.36±0.04a	1.89±0.20a	2.25±0.23a	0.19±0.01b
BB10	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 70 : 10 : 20	65.75±4.96c	175.1±2.4cd	0.29±0.03abc	1.11±0.04cd	1.40±0.06cd	0.26±0.02a
BB20	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 60 : 20 : 20	74.13±5.21bc	208.3±17.3bcd	0.29±0.02abc	1.30±0.09bcd	1.59±0.09bcd	0.23±0.02ab
BB30	V(F1) : V(F4) : V(F3) = 50 : 30 : 20	70.50±4.73bc	185.8±18.5cd	0.22±0.02c	1.11±0.11cd	1.33±0.13d	0.21±0.02b
CB10	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 70 : 10 : 20	78.00±3.67bc	234.1±15.5bc	0.32±0.01ab	1.44±0.12bc	1.76±0.13bc	0.22±0.01ab
CB20	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 60 : 20 : 20	84.63±8.18ab	257.7±25.6b	0.34±0.02ab	1.63±0.12ab	1.97±0.13ab	0.21±0.01ab
CB30	V(F1) : V(F5) : V(F3) = 50 : 30 : 20	70.13±7.76bc	161.3±21.6d	0.22±0.03c	0.96±0.13d	1.18±0.16d	0.23±0.01ab

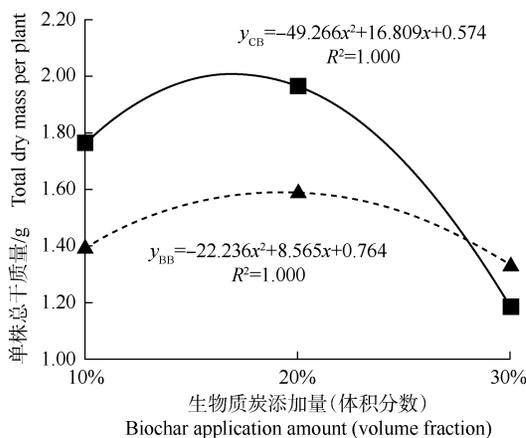
¹⁾ l: 单株总枝长 Total stem length per plant; S: 单株总叶面积 Total leaf area per plant; m1: 单株根干质量 Dry mass of root per plant; m2: 单株地上部干质量 Dry mass of above-ground part per plant; m3: 单株总干质量 Total dry mass per plant; R: 根冠比 Root/shoot ratio. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

²⁾ F1: 土壤 Soil; F2: 草炭 Peat; F3: 珍珠岩 Perlite; F4: 蓝莓枝条生物质炭 Blueberry stem biochar; F5: 玉米秸秆生物质炭 Corn straw biochar.

结果(表4)还显示:各玉米秸秆生物质炭处理的单株总枝长均高于CK0处理,其中CB20[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=60:20:20]处理的单株总枝长显著高于CK0处理。CB10[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=70:10:20]、CB20处理的单株总叶面积显著高于CK0处理, CB30[V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=50:30:20]处理的单株总叶面积低于CK0处理。CB10和CB20处理的单株地上部干质量和单株总干质量均显著高于CK0处理,单株根干质量高于CK0处理, CB30处理的单株根干质量、单株地上部干质量和单株总干质量均低于CK0处理。各玉米秸秆生物质炭处理的根冠比均低于CK0处理,但无显著差异。各玉米秸秆生物质炭添加量处理的根冠比高于CK1处理,其余生长指标均低于CK1处理,其中, CB10和CB30处理除单株根干质量和根冠比外的其余生长指标均显著低于CK1处理,而CB20处理除单株总叶面积显著低于CK1处理,其余各生长指标与CK1处理无显著差异。随玉米秸秆生物质炭添加量的增加,单株总枝长、单株总叶面积、单株根干质量、单株地上部干质量和单株总干质量均呈先升高后降低的趋势,而根冠比变化不大。

2.4 蓝莓单株总干质量与生物质炭添加量的回归分析

植株干物质积累反映了土壤状况、养分吸收和光合性能等对植株生长的综合影响,对蓝莓单株总干质量与生物质炭添加量进行回归分析,结果见图1。



▲: 蓝莓枝条生物质炭 Blueberry stem biochar; ■: 玉米秸秆生物质炭 Corn straw biochar.

图1 蓝莓单株总干质量与生物质炭添加量的回归分析
Fig. 1 Regression analysis on total dry mass per plant of blueberry (*Vaccinium* spp.) and biochar application amount

结果显示:单株总干质量与生物质炭添加量呈抛物线关系,其中,单株总干质量与蓝莓枝条生物质炭添加量的回归方程为 $y_{BB} = -22.236x^2 + 8.565x + 0.764$ ($R^2 = 1.000$),单株总干质量与玉米秸秆生物质炭添加量的回归方程为 $y_{CB} = -49.266x^2 + 16.809x + 0.574$ ($R^2 = 1.000$)。蓝莓枝条生物质炭最适添加量为体积分数 19.3%,玉米秸秆生物质炭最佳添加量为体积分数 17.1%。

3 讨论和结论

土壤质地过于黏重是黄棕壤限制蓝莓植株生长的最关键因子。本研究以不添加任何有机物料的黄棕壤为纯土对照(CK0),以目前生产实践中常用且改良效果较好的V(土壤):V(草炭):V(珍珠岩)=60:20:20的混合基质为常规土壤改良对照(CK1),探究以生物质炭替代草炭作为黄棕壤改良物料的可行性。生物质炭具有发达的孔隙结构、高的比表面积和丰富的表面官能团,因而具有良好的物理性质和养分调控作用,施入生物质炭可提高土壤孔隙度和保水保肥性能,改善植物根系的生长环境^[28-29]。本研究结果表明:随生物质炭添加量的增加,各生物质炭处理的土壤容重显著下降且显著低于纯土对照,而土壤总孔隙度显著增大且显著高于纯土对照,说明在黄棕壤中添加生物质炭显著提高了土壤疏松度和通气性。但生物质炭一般呈碱性,本研究所用生物质炭具有较高的pH值,中和了黄棕壤中的酸性物质,降低土壤交换性酸的数量,因而各生物质炭处理的土壤pH值随生物质炭添加量的增加而增大。尽管各蓝莓枝条生物质炭处理初始土壤pH值超过蓝莓适宜土壤酸度范围(pH 4.0~pH 5.5),但由于在栽培管理过程中每2周浇施1次含硫酸铵肥料,蓝莓喜铵态氮,在其生长过程中根系不断吸收铵根离子从而酸化根际土壤,进而营造适合其根系生长的微环境^[30]。本研究所用生物质炭含有较多的水溶性盐类,因而各生物质炭处理的土壤电导率随生物质炭添加量的增加而升高,尽管均未超过蓝莓适宜土壤电导率范围(小于0.76 ms·cm⁻¹)^[31],但添加体积分数30%玉米秸秆生物质炭处理的土壤电导率显著高于其他处理。土壤电导率过高时,植物根尖顶端分生组织的细胞分裂因土壤渗透势降低及离子毒害作用受到抑制,从而影响根系伸长生长及行使正常功能,根系水分和营养

吸收能力下降,最终导致植株生长缓慢,生长量降低^[32-33]。因此,添加适宜用量生物质炭才能尽可能降低生物质炭高 pH 值、高电导率的负面影响,同时最大限度提升土壤孔隙度和保水保肥性能,获得最佳改良效果。

前人研究发现,生物质炭能够有效促进烤烟 (*Nicotiana* sp.) 根系形态的生长发育,优化根系生理指标,并通过改善根系的发育,进而改善叶片光合生理特性^[34]。本研究中,与纯土对照相比,添加体积分数 10% 和 20% 生物质炭后,蓝莓幼苗叶片叶绿素含量指数、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度均有所提高,表明在黄棕壤中施入适量生物质炭可以在一定程度上增强蓝莓幼苗叶片的光合性能。这与刘宁等^[35]的研究结果相似,原因可能是适量的生物质炭改善了土壤结构和养分状况,促进了植株养分吸收,从而提高了光合能力。与常规土壤改良对照相比,添加体积分数 20% 的生物质炭处理的各光合指标虽然略低,但无显著差异,表明二者光合碳同化能力相当。

本研究结果显示:常规土壤改良对照的单株总枝长、单株总叶面积、单株根干质量、单株地上部干质量和单株总干质量均最高且显著高于纯土对照,表明常规土壤改良处理仍是目前改良效果最优的方案。生物质炭比表面积大且存在多微孔结构和大量负电荷,可吸附营养元素。因此,在土壤中施入生物质炭通常可以改善土壤的物理性状,提高土壤的养分有效性,从而促进植株生长^[28]。然而,生物质炭对作物的生长和产量的影响因土壤类型、生物质炭类型及施用量而异^[22,36-38]。本研究结果表明:与纯土对照相比,各蓝莓枝条生物质炭添加量处理在一定程度上提高了蓝莓幼苗生长及各部位干质量。添加体积分数 10% 和 20% 玉米秸秆生物质炭可促进蓝莓幼苗生长,当添加量达到 30% 时则对其生长产生抑制作用。2 种生物质炭均以添加量为体积分数 20% 时对植株生长的促进作用最大;其中,添加体积分数 20% 玉米秸秆生物质炭处理 [V(土壤):V(玉米秸秆生物质炭):V(珍珠岩)=60:20:20, CB20] 可显著提高蓝莓幼苗单株的总枝长、总叶面积、地上部干质量和总干质量,且除单株总叶面积显著低于常规土壤改良对照外,其余各生长指标与常规土壤改良对照无显著差异,即添加体积分数 20% 玉米秸秆生物质炭基本可以达到常规改良水平。因此,添加适量玉米秸秆生物

质炭具有替代草炭作为黄棕壤改良物料的潜力。对单株总干质量与生物质炭添加量进行回归分析发现,最适玉米秸秆生物质炭添加量为 17.1%。

综上所述,在黄棕壤中适量添加玉米秸秆生物质炭可提高土壤孔隙度,降低土壤容重,有效改善土壤结构,在一定程度上增强了蓝莓幼苗光合性能,从而促进植株生长。因此,玉米秸秆生物质炭在蓝莓栽培土壤改良上具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] 吴叶娇, 高源, 曹成亮, 等. 不同蓝莓品种根际 *phoD* 基因相关土壤解磷细菌群落结构分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 95-102.
- [2] 王亮, 韦继光, 葛春峰, 等. 基于 SSR 标记分析蓝莓品种‘蓝美 1 号’自由授粉子代遗传多样性及群体遗传结构[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(3): 35-43.
- [3] OSTOS J C, LÓPEZ-GARRIDO R, MURILLO J M, et al. Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 1793-1800.
- [4] 唐雪东, 窦森, 李亚东, 等. 玉米秸秆改土对越橘生长和产量的影响[J]. 北方园艺, 2009(7): 11-14.
- [5] 赵珊珊, 唐雪东, 李亚东, 等. 利用玉米秸秆和无机氮改良土壤对越橘生长结果的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(5): 565-569.
- [6] 李琪, 於虹, 王支虎, 等. 醋糟对土壤改良及兔眼蓝莓果幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(4): 25-31.
- [7] 张晴, 张思悦, 李凌. 有机物料改良紫色土对越橘生长发育的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 21-28.
- [8] OCHMIAN I, MALINOWSKI R, KUBUS M, et al. The feasibility of growing highbush blueberry (*V. corymbosum* L.) on loamy calcic soil with the use of organic substrates[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 257: 108690.
- [9] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆焚烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.
- [10] 许冬倩. 玉米秸秆生物炭制备及结构特性分析[J]. 广西植物, 2018, 38(9): 1125-1135.
- [11] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 等. 中国玉米秸秆草谷比及其资源时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 227-234.
- [12] 李亚东, 盖禹含, 王芳, 等. 2021 年全球蓝莓产业数据报告[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(1): 1-12.
- [13] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- [14] MULCAHY D N, MULCAHY D L, DIETZ D. Biochar soil amendment increases tomato seedling resistance to drought in sandy

- soils[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 88: 222-225.
- [15] 王典, 张祥, 朱盼, 等. 添加生物质炭对黄棕壤和红壤上油菜生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(3): 63-67.
- [16] VILLAGRA-MENDOZA K, HORN R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils [J]. *Geoderma*, 2018, 326: 88-95.
- [17] ZHANG A, CUI L, PAN G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [18] 蒯海红, 付琳琳, 李恋卿, 等. 生物质炭对土壤特性及葡萄幼苗植株生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(28): 195-200.
- [19] GITHINJI L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(4): 457-470.
- [20] 李晓, 张吉旺, 李恋卿, 等. 施用生物质炭对黄淮海地区玉米生长和土壤性质的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 269-274.
- [21] 谢婷婷, 赵欢, 肖厚军, 等. 生物质炭添加量对贵州尖椒生长及土壤肥力与酶活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(1): 82-88.
- [22] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(5): 57-63.
- [23] SALES B K, BRYLA D R, TRIPPE K M, et al. Amending sandy soil with biochar promotes plant growth and root colonization by mycorrhizal fungi in highbush blueberry [J]. *HortScience*, 2020, 55(3): 353-361.
- [24] ZHANG Y, WANG X, LIU B, et al. Comparative study of individual and co-application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality [J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125699.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] 程斐, 孙朝晖, 赵玉国, 等. 芦苇末有机栽培基质的基本理化性能分析[J]. *南京农业大学学报*, 2001, 24(3): 19-22.
- [27] 胡红玲, 张健, 万雪琴, 等. 巨桉与5种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较[J]. *生态学报*, 2012, 32(12): 3873-3882.
- [28] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68-79.
- [29] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 716-723.
- [30] IMLER C S, ARZOLA C I, NUNEZ G H. Ammonium uptake is the main driver of rhizosphere pH in southern highbush blueberry [J]. *HortScience*, 2019, 54(5): 955-959.
- [31] MESSIGA A J, HAAK D, DORAIS M. Blueberry yield and soil properties response to long-term fertigation and broadcast nitrogen [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 230: 92-101.
- [32] JACOBS D F, TIMMER V R. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function [J]. *New Forest*, 2005, 30: 147-166.
- [33] 常青, 王永亮, 杨治平, 等. 木醋液对土壤pH、EC与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 322-328.
- [34] 王欢欢, 任天宝, 张志浩, 等. 生物质炭对烤烟旺长期根系发育及光合特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 287-292.
- [35] 刘宁, 彭春菊, 雷赵枫, 等. 氮沉降和生物质炭对毛竹叶片光合特性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(4): 704-712.
- [36] BAROTI S, ALBERTI G, VEDOVE G D, et al. The biochar option to improve plant yields: first results from some field and pot experiments in Italy [J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2010, 5: 3-11.
- [37] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.
- [38] HAEFELE S M, KONBOON Y, WONGBOON W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 430-440.

(责任编辑: 郭严冬)