

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0645

生物炭及其替代泥炭比例对樱桃萝卜生长的影响

梁丽丽^{1,2}, 钟璐瑶², 张 辽², 侯 俊¹, 束良佐²

(1. 长江大学农学院 湖北荆州 434020; 2. 台州学院生命科学学院 浙江台州 318000)

摘要: 以 60%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥为对照(CK), 设置 2 种原料生物炭(水稻稻壳生物炭 R; 玉米秸秆生物炭 C)和 3 种替代泥炭比例(1/6、1/3 和 1/2)共 6 个处理, 分别为: R10(50%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+10%稻壳生物炭)、R20(40%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+20%稻壳生物炭)和 R30(30%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+30%稻壳生物炭), C10(50%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+10%玉米秸秆生物炭)、C20(40%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+20%玉米秸秆生物炭)和 C30(30%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥+30%玉米秸秆生物炭), 探究不同生物炭及其替代泥炭比例基质对樱桃萝卜生长的影响。结果表明, 与 CK 相比, 稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭替代泥炭处理的基质通气孔隙度分别显著提高了 85.32%~193.25%和 57.14%~93.65%, pH 分别提高了 12.44%~22.40%和 11.04%~16.02%, 电导率分别提高了 6.61%~20.66%和 1.65%~16.12%, 速效磷含量分别增加了 128.92%~226.51%和 137.35%~283.13%, 速效钾含量分别增加了 16.20%~42.88%和 50.25%~100.00%。与 CK 相比, 稻壳生物炭不同替代泥炭比例处理和玉米秸秆生物炭替代 1/6 泥炭比例处理的樱桃萝卜的蒸腾速率、可溶性糖和维生素 C 含量均显著升高, R10、R20 和 R30 处理的樱桃萝卜产量显著增加了 10.68%~25.54%, C10 处理的樱桃萝卜产量显著增加了 29.96%。PCA 分析结果表明, 通气孔隙度、pH、电导率、速效钾和速效磷含量是影响樱桃萝卜光合特性和生长的主要因素。不同泥炭替代比例的稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭均可通过改变基质的孔隙状况和养分含量来促进樱桃萝卜根系生长, 进而提高樱桃萝卜产量, 其中的稻壳炭替代 1/2 泥炭和玉米秸秆炭替代 1/6 泥炭比例的效果最佳。

关键词: 樱桃萝卜; 生物炭; 泥炭; 基质配比; 生长指标; 光合特性

中图分类号: S631.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-158-09

Effects of biochar and substitution ratio of peat on the growth of cherry radish

LIANG Lili^{1,2}, ZHONG Luyao², ZHANG Liao², HOU Jun¹, SHU Liangzuo²

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434020, Hubei, China; 2. College of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: In this experiment, 60% peat, 25% perlite and 15% organic fertilizer were used as control (CK), and two kinds of raw material biochar (rice husk biochar R; corn straw biochar C) and three alternative peat ratios (1/6, 1/3 and 1/2) were used for a total of six treatments, which were R10 (50% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 10% rice husk biochar), R20 (40% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 20% rice husk biochar), and R30 (30% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 30% rice husk biochar). C10 (50% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 10% corn straw biochar), C20 (40% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 20% corn straw biochar) and C30 (30% peat, 25% perlite, 15% organic fertilizer, 30% corn straw biochar) were used to explore the effects of different biochar and its alternative peat ratios on the growth of cherry radish. The results showed that compared with CK, the substrate aeration porosity of rice husk biochar and corn straw biochar treatment increased significantly by 85.32%-193.25% and 57.14%-93.65%, respectively, pH increased by 12.44%-22.40% and 11.04%-16.02%, respectively, conductivity increased by 6.61%-20.66% and 1.65%-16.12%, respectively, the available phosphorus content increased by 128.92%-226.51% and 137.35%-283.13%, respectively, the available potassium content increased by 16.20%-42.88% and 50.25%-100.00%, respectively. Compared

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31572202); 台州学院高层次人才科研启动费(T20220101059)

作者简介: 梁丽丽, 女, 硕士, 从事植物营养与土壤学研究。E-mail: 473958102@qq.com

通信作者: 束良佐, 男, 教授, 主要从事植物生理生态学、作物水肥资源高效利用及土壤肥料研究。E-mail: shulz69@163.com

侯 俊, 男, 讲师, 主要研究方向为养分资源管理及新型肥料的研发。E-mail: houjungoodluck1@163.com

with CK, the transpiration rate, soluble sugar and vitamin C content of cherry radish treated with different ratios of rice husk biochar and 1/6 peat substituted by corn straw biochar were significantly increased, the yield of cherry radish treated with R10, R20 and R30 was significantly increased by 10.68%-25.54%, the yield of cherry radish treated with C10 was significantly increased by 29.96%. The results of PCA analysis showed that the pores, pH, conductivity, available potassium and available phosphorus content were the main factors affecting the photosynthetic characteristics and growth characteristics of cherry radish. Rice husk biochar and corn straw biochar with different peat substitution ratios could promote the root growth of cherry radish by changing the pore condition and nutrient content of the substrate, then increase the yield of cherry radish, among which rice husk charcoal instead of 1/2 peat and corn straw charcoal instead of 1/6 peat had the best effect.

Key words: Cherry radish; Biochar; Peat; Matrix ratio; Growth indicator; Photosynthetic property

泥炭具有良好的物理化学性质,是温室栽培和苗圃行业最重要的基质之一^[1],但是泥炭作为不可再生能源,过度利用不仅会对环境造成破坏^[2],还会增加基质栽培的经济成本,因此,使用农林废弃物替代泥炭具有重要的现实意义。生物炭是农林废弃物等生物质在缺氧条件下高温裂解碳化形成的稳定的富碳固体物,孔隙结构丰富^[3],具有改良土壤,增加碳库,降解有害物质,促进微生物生长和减少化肥使用等优点,被广泛应用于农业生产、土壤修复和环境保护等领域^[4-6]。

研究表明,生物炭与珍珠岩、蛭石等无机材料复配的混合基质,不仅能提供充足的养分,还可使复配基质具有良好的透气性和保水性,有效改善植物根系生长环境^[7-8]。Hossain等^[9]认为,用不同种类生物炭替代泥炭可以调节基质的pH和电导率,以满足作物生长的需求。Fascella等^[10]研究表明,用25%的木屑生物炭替代泥炭的基质,玫瑰和薰衣草的生长性能和观赏质量得到提高。Kim等^[11]施用稻壳生物炭替代[1%-5%(w)]泥炭提高了基质中的营养物质和持水率,从而增加了甘蓝的生长速度。由此可知,采用生物炭替代泥炭可通过改善复配基质的理化环境促进植物生长。

然而,生物炭也会对植物的生长产生胁迫,这主要与生物炭的种类与施用量有关。Bu等^[12]研究表明,在生物炭替代40%(φ)泥炭比例下,与对照(100%泥炭)相比,施用稻壳生物炭的龙葵幼苗叶片数显著增加,而施用木屑生物炭的龙葵幼苗叶片数显著减少。Giulia等^[13]研究表明,木屑生物炭替代

30%(φ)泥炭的基质天竺葵花簇数量最多,花簇最大,而木屑生物炭替代70%(φ)泥炭的基质抑制了天竺葵的生长和开花。Alvarez等^[14]研究表明,生物炭替代12%(φ)泥炭时,矮牵牛花的大小和花朵数量相比对照(100%泥炭)显著减少,而天竺葵与对照(100%泥炭)无显著差异。上述研究结果表明不同植物对生物炭的种类和添加量的响应不同。因此,选择适宜的生物炭及其替代泥炭比例对促进植物的生长发育至关重要。

樱桃萝卜具有较高营养价值,其生长周期短,品质优良,受到种植者及消费者的广泛欢迎^[15]。因此,笔者以樱桃萝卜为试验对象,通过盆栽基质试验,从不同原料生物炭及其替代泥炭比例改善基质的理化性质入手,探讨生物炭代替泥炭调控樱桃萝卜根系生长和地上部生物量及营养品质的机制,为生物炭应用于基质栽培和农业资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用樱桃萝卜为京研红樱桃2号,由北京农林科学院京研种子公司提供。水稻稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭均在600℃高温下厌氧裂解制得,由南京勤丰秸秆科技有限公司提供,其理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

本试验为两因素试验,设置两种生物炭:水稻稻壳生物炭(rice husk biochar, R)和玉米秸秆生物

表1 稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭理化性质

Table 1 Physicochemical property of rice husk and corn straw biochar

生物炭种类 Biochar species	pH	电导率 Electrical conductivity/ (mS·cm ⁻¹)	密度 Density/ (g·cm ⁻³)	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg ⁻¹)	w(全钾) Total potassium content/(g·kg ⁻¹)
稻壳生物炭 Rice husk biochar	10.70	0.81	0.17	3.49	1.37	16.34
秸秆生物炭 Corn straw biochar	9.90	0.94	0.49	5.76	3.75	21.15

炭(corn stalks biochar, C);3种生物炭替代泥炭比例为1/6、1/3和1/2,占整体基质的比例为10%、20%、30%。以60%泥炭+25%珍珠岩+15%有机肥为对照(CK),共计7个处理,各处理基质体积配比见表2。每个处理8次重复,供试容器为底部无孔塑料盆,直径为15 cm,高17.5 cm,装栽培基质2 kg,共56盆,每盆播种后,保留3株长势均匀幼苗。试验于2023年8—9月在浙江省台州学院椒江校区实验室内进行,光照强度为200 μmol·m⁻²·s⁻¹,光照时间设置为12 h,温度为(25±1) °C,樱桃萝卜生长期无需追肥,每2 d浇1次水,培养期间定期更换盆的位置,在樱桃萝卜生长期集中采样并测定各项指标。

表2 各处理基质体积配比

处理 Treatment	泥炭 Peat	珍珠岩 Perlite	有机肥 Organic fertilizer	稻壳生物炭 Rice husk biochar	玉米秸秆生物炭 Corn stover biochar
CK	60	25	15	0	0
R10	50	25	15	10	0
R20	40	25	15	20	0
R30	30	25	15	30	0
C10	50	25	15	0	10
C20	40	25	15	0	20
C30	30	25	15	0	30

1.3 测定项目与方法

1.3.1 基质理化性质 在樱桃萝卜收获后,取每个处理盆中的基质,采用电位法测定pH(液土质量比为5:1),采用电导法测定可溶性盐浓度(电导率),采用碱解扩散法测定碱解氮含量,采用钼锑抗比色法测定速效磷含量,采用火焰光度法测定速效钾含量^[16]。参照郭世荣^[17]的方法测定基质的容重和孔隙度。

1.3.2 光合特性指标 播种30 d后,每个处理选取10株长势均匀的樱桃萝卜,每株选定2个叶片,采用便携式光合仪(Li-6400XT)和叶绿素仪(SPAD-520)分别测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)和SPAD值,测定时间为上午09:00—11:00。

1.3.3 叶片生长指标和根系形态 播种35 d后,每个处理取样10株,用直尺测量株高,分析天平称量叶片鲜质量。采用LI-3100 C台式叶面积仪(美国LI-COR公司)测定绿叶叶面积,叶片经浓H₂SO₄-H₂O₂消煮后,采用凯氏定氮法测定氮含量,采用钼锑抗比色法测定磷含量,采用火焰光度法测定钾含量^[16]。每个处理取样5株,将根系完整取出,用

流水缓慢冲洗干净。用根系分析系统(WinRHIZO)分析总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数。

1.3.4 品质和产量 播种40 d后,用游标卡尺测量樱桃萝卜肉质根直径。将已成熟的樱桃萝卜分成两份,一份采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,另一份采用2,6-二氯酚酚滴定法测定维生素C含量^[18]。

1.4 数据处理

采用Excel 2010进行试验数据统计,采用IBM SPSS Statistics 22.0软件对土壤理化性质进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和主成分(PCA)分析,采用Origin 2021绘制图表。

2 结果与分析

2.1 生物炭替代泥炭对基质理化性质的影响

由表3可知,水稻稻壳生物炭处理基质的通气孔隙度和总孔隙度随生物炭替代比例增大而升高,而容重和持水孔隙度随生物炭替代比例增大而下降。与CK相比,R10、R20和R30处理的通气孔隙度显著升高了85.32%~193.25%,持水孔隙度下降了0.88%~2.06%,总孔隙度升高了2.05%~4.57%;而玉米秸秆生物炭处理的持水孔隙度、总孔隙度和通气孔隙度随生物炭替代比例增大呈先升高后下降趋势。与CK相比,C10、C20和C30处理的通气孔隙度显著升高了57.14%~93.65%。

表3 生物炭替代泥炭对基质物理性质的影响

Table 3 Effects of biochar substitution of peat on the physical properties of the substrate

处理 Treatment	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	通气孔隙度 Ventilation porosity/%	持水孔隙度 Water-holding porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%
CK	0.21±0.00 cd	2.52±0.07 e	71.74±1.60 a	74.26±1.56 ab
R10	0.19±0.01 d	4.67±0.08 c	71.11±2.57 a	75.78±2.63 ab
R20	0.18±0.01 d	6.44±0.18 b	70.42±1.45 a	76.87±1.45 ab
R30	0.17±0.01 d	7.39±0.15 a	70.26±1.37 a	77.65±1.48 a
C10	0.25±0.01 bc	4.81±0.28 c	71.94±2.04 a	76.75±2.24 ab
C20	0.27±0.03 ab	4.88±0.13 c	70.26±1.63 a	75.14±1.65 ab
C30	0.32±0.03 a	3.96±0.18 d	66.36±1.40 b	70.32±1.36 b

注:同列中不同小写字母表示处理间差异显著(p<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments (p<0.05). The same below.

随着两种生物炭替代泥炭比例的增加,基质的pH、电导率、速效磷和速效钾含量逐渐提高,碱解氮含量逐渐降低(表4)。与CK相比,R10、R20和R30处理的pH显著增加了12.44%~22.40%;电导

表4 生物炭替代泥炭对基质化学性质的影响

Table 4 Effects of biochar substitution of peat on substrate chemical properties

处理 Treatment	pH	电导率 Electrical conductivity/ (mS·cm ⁻¹)	w(碱解氮) Alkaline hydrolyzable nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(速效磷) Available phosphorus content/(g·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(g·kg ⁻¹)
CK	6.43±0.01 e	2.42±0.02 e	6.60±0.12 a	0.83±0.04 e	6.11±0.07 f
R10	7.23±0.01 c	2.58±0.02 d	3.44±0.10 b	1.90±0.01 d	7.10±0.01 e
R20	7.50±0.01 b	2.76±0.02 b	2.19±0.05 c	2.45±0.04 c	7.97±0.02 d
R30	7.87±0.01 a	2.92±0.02 a	1.27±0.07 d	2.71±0.08 b	8.73±0.10 c
C10	7.14±0.02 d	2.46±0.03 e	3.67±0.09 b	1.97±0.02 d	9.18±0.12 c
C20	7.26±0.01 c	2.67±0.01 c	3.33±0.24 b	2.60±0.01 b	9.89±0.24 b
C30	7.46±0.02 b	2.81±0.02 b	2.56±0.09 c	3.18±0.04 a	12.22±0.34 a

率显著增加了 6.61%~20.66%;速效磷含量显著增加了 128.92%~226.51%;速效钾含量显著增加了 16.20%~42.88%;碱解氮含量显著减少了 47.88%~80.76%。与 CK 相比,C10、C20 和 C30 处理的 pH 显著增加了 11.04%~16.02%;C20 和 C30 处理的电导率显著升高了 1.65%~16.12%;速效磷含量显著增加了 137.35%~283.13%;速效钾含量显著增加了 50.25%~100.00%;碱解氮含量显著减少了 44.39%~61.21%。在相等生物炭替代比例下,稻壳生物炭比玉米秸秆生物炭基质的 pH 和电导率分别显著提高了 1.26%~5.50%和 3.37%~4.88%。

2.2 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜根系性状的影响

随着稻壳生物炭替代泥炭比例的增加,樱桃萝卜的主根长、总根表面积、总根体积和根尖数均逐渐增加(表 5)。与 CK 相比,R10、R20 和 R30 处理的主根长显著增加了 38.08%~61.17%;总根表面积显著增加了 27.74%~52.56%;总根体积增加了 13.62%~33.19%。随着玉米秸秆生物炭替代泥炭比例的增加,樱桃萝卜的主根长、总根表面积、总根体积和根尖数均随替代泥炭比例的增加先增加后下降。与 CK 相比,C10 和 C20 处理下的主根长显著增加了 56.93%~64.35%、总根表面积显著增加了 30.88%~

表5 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜根系性状的影响

Table 5 Effects of biochar substitution of peat on root traits of cherry radish

处理 Treatment	主根长 Capital root length/ cm	总根表面积 Total root surface area/cm ²	总根体积 Total root volume/cm ³	平均直径 Average diameter/ mm	根尖数 Number of root tips
CK	13.21±0.43 c	4.89±0.11 c	2.35±0.12 ab	0.24±0.01 a	56.50±2.33 c
R10	18.24±0.37 b	6.10±0.13 b	2.67±0.23 ab	0.25±0.01 a	68.00±2.04 bc
R20	18.48±0.44 b	6.39±0.19 b	2.80±0.17 ab	0.25±0.01 a	69.50±3.48 b
R30	21.29±0.37 a	7.46±0.18 a	3.13±0.29 a	0.24±0.01 a	78.50±3.23 a
C10	21.71±0.81 a	7.85±0.11 a	3.15±0.30 a	0.26±0.01 a	83.00±2.74 a
C20	20.73±0.92 a	6.40±0.20 b	3.15±0.29 a	0.27±0.01 a	78.75±2.39 a
C30	11.71±0.28 c	4.49±0.26 c	2.28±0.15 b	0.24±0.01 a	52.25±2.78 c

60.53%、总根体积均显著增加了 34.04%。

2.3 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜光合特性的影响

不同处理对樱桃萝卜光合特性的影响如表 6 所示。与 CK 相比,R30 和 C10 处理的净光合速率分别显著升高了 9.72%和 13.74%;R20、R30、C10 和 C20 的气孔导度分别显著升高了 12.50%、28.13%、9.38%、17.19%;R10、R20、R30 处理的胞间 CO₂ 浓度显著增加了 14.87%~25.54%,C10 和 C20 处理的胞间 CO₂ 浓度分别显著升高了 11.14%和 13.16%。与 CK 相比,R10、R20、R30 处理的蒸腾速率显著升高

了 11.17%~32.09%;C10 处理显著升高了 34.40%。随着生物炭替代泥炭比例的增加,稻壳生物炭处理叶片的 SPAD 值呈上升趋势,与 CK 相比,R20、R30 处理的 SPAD 值显著增加了 11.37%~18.07%;玉米秸秆生物炭处理叶片的 SPAD 值呈下降趋势,但均较 CK 显著增加,C10、C20 和 C30 处理显著增加了 13.33%~26.25%。

2.4 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜养分含量和产量的影响

生物炭替代泥炭比例的增加有利于提高樱桃

表6 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜光合特性的影响

Table 6 Effects of biochar substitution of peat on photosynthetic characteristics of cherry radish

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ (μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	SPAD值 SPAD value
CK	22.63±0.56 bc	0.64±0.01 de	290.07±7.23 d	5.64±0.11 c	44.87±0.80 e
R10	23.99±0.45 ab	0.69±0.01 cd	333.21±5.01 bc	6.27±0.11 b	47.22±0.87 e
R20	24.25±0.39 ab	0.72±0.02 bc	364.14±7.50 a	6.50±0.16 b	49.97±0.66 d
R30	24.83±0.65 a	0.82±0.01 a	343.35±3.96 ab	7.45±0.14 a	52.98±0.74 bc
C10	25.74±0.63 a	0.70±0.02 bc	322.37±7.67 bc	7.58±0.13 a	56.65±0.55 a
C20	21.83±0.42 cd	0.75±0.02 b	328.23±7.57 bc	5.45±0.07 c	54.72±0.74 ab
C30	20.09±0.63 d	0.61±0.01 e	310.36±6.83 cd	4.33±0.08 d	50.85±0.73 cd

萝卜叶片全钾含量(表7)。与CK相比,R20、R30处理的叶片的全钾含量分别显著增加了83.97%、91.60%,C20、C30处理的叶片的全钾含量分别显著增加了71.37%、75.57%。同等生物炭替代比例下,稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭的樱桃萝卜叶片全氮、全磷、全钾含量无显著差异。随着稻壳生物炭

替代比例的增加,樱桃萝卜的可溶性糖和维生素C含量逐渐增加(表7)。与CK相比,R10、R20和R30处理的可溶性糖含量显著增加了14.97%~37.06%;维生素C含量显著增加了18.86%~42.01%。另外,与CK相比,C10、C20和C30处理的可溶性糖含量显著增加了37.31%~57.11%;维生

表7 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜养分含量的影响

Table 7 Effects of biochar substitution of peat on nutrient content of cherry radish

处理 Treatment	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg ⁻¹)	w(全钾) Total potassium content/(g·kg ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugars content/ (mg·g ⁻¹)	w(维生素C) Vitamin C content/ (mg·kg ⁻¹)
CK	2.05±0.02 a	1.22±0.19 a	2.62±0.36 b	3.94±0.10 d	61.18±1.12 d
R10	1.94±0.05 a	1.38±0.13 a	2.85±0.20 b	4.53±0.09 c	72.72±0.71 c
R20	1.82±0.17 a	1.44±0.07 a	4.82±0.16 a	4.74±0.06 c	78.38±0.55 b
R30	1.94±0.05 a	1.50±0.07 a	5.02±0.47 a	5.40±0.06 b	86.88±0.61 a
C10	1.97±0.06 a	1.30±0.01 a	3.46±0.07 b	5.59±0.08 b	80.03±0.57 b
C20	2.03±0.11 a	1.41±0.01 a	4.49±0.22 a	6.19±0.09 a	78.05±1.28 b
C30	2.00±0.05 a	1.53±0.04 a	4.60±0.23 a	5.41±0.11 b	72.03±0.73 c

素C含量显著增加了17.73%~30.81%。

随着稻壳生物炭替代泥炭比例的增加,樱桃萝卜的产量、株高、叶片鲜质量、根鲜质量、萝卜直径均逐渐增加(表8)。与CK相比,R10、R20和R30处理的樱桃萝卜产量、株高、叶片鲜质量、根鲜质量

和萝卜直径分别显著增加了10.68%~25.54%、8.64%~24.50%、13.39%~21.76%、16.00%~48.00%、13.78%~22.76%。随着玉米秸秆生物炭替代泥炭比例增加,樱桃萝卜各生长指标先升高后下降。与CK相比,C10处理的樱桃萝卜产量、株高、叶片鲜

表8 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜产量性状的影响

Table 8 Effects of biochar substitution of peat on cherry radish yield traits

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	株高 Plant height/mm	叶片鲜质量 Fresh leaf mass/g	根鲜质量 Fresh root mass/g	萝卜直径 Radish diameter/mm
CK	353.38±16.38 c	57.05±1.33 d	9.56±0.11 d	0.25±0.01 e	32.29±0.53 d
R10	391.13±17.04 b	61.98±1.21 c	10.84±0.07 c	0.29±0.02 d	36.74±0.67 c
R20	414.72±16.71 b	65.37±0.92 b	11.30±0.05 bc	0.34±0.01 c	38.45±0.57 bc
R30	443.65±19.01 a	71.03±1.06 a	11.64±0.11 bc	0.37±0.01 bc	39.64±0.57 b
C10	459.26±16.25 a	73.03±1.23 a	13.37±0.42 a	0.47±0.02 a	41.69±0.40 a
C20	409.44±22.40 b	69.92±0.74 a	12.05±0.41 b	0.40±0.01 b	38.57±0.32 b
C30	309.15±14.35 d	52.65±0.85 e	8.15±0.25 e	0.24±0.01 e	28.98±0.34 e

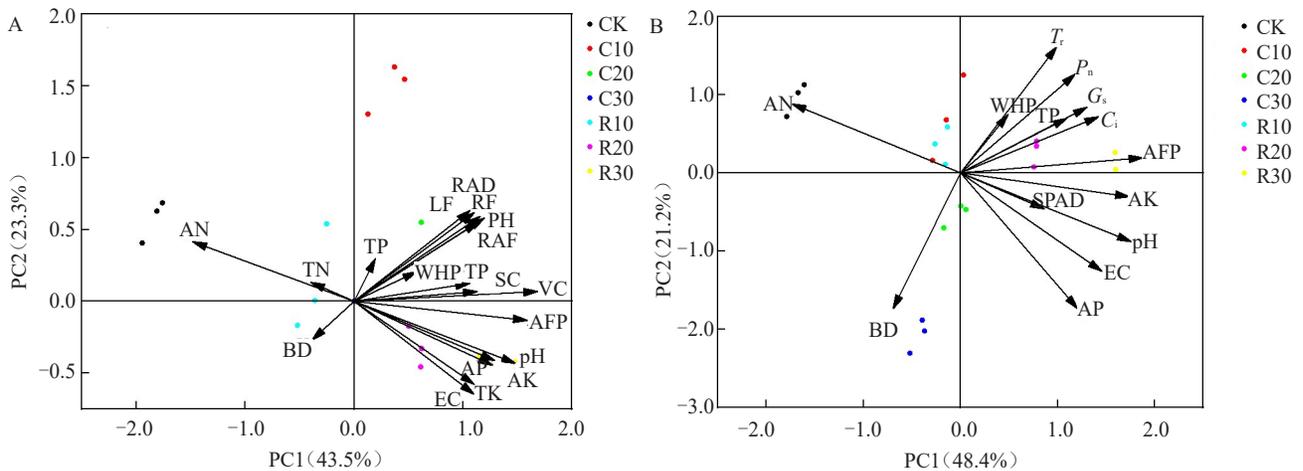
质量、根鲜质量和直径分别显著增加了 29.96%、28.01%、39.85%、88.00%、29.11%,且 C10 处理的萝卜叶片鲜质量、根鲜质量和萝卜直径均显著高于 R30 处理。

2.5 樱桃萝卜各指标与基质理化性质的主成分分析

为进一步了解不同生物炭替代泥炭比例对樱桃萝卜生长的影响,将生物炭替代泥炭后的基质理化性质与樱桃萝卜生长指标和光合特性进行主成分分析,分析结果如图 1 所示。由图 1A 可知,变量用两条轴表示,在樱桃萝卜生长指标中,轴 1 和轴 2 的特征值分别为 43.5%和 23.3%,2 个轴解释了 66.8%的累计方差,樱桃萝卜的生长指标受生物炭替代泥炭基质中的 pH、电导率、通气孔隙度、持水

孔隙度和总孔隙度的正调控,受容重和碱解氮含量的负调控。基质理化性质对樱桃萝卜生长指标的重要性由大到小为:通气孔隙度>pH>速效钾含量>速效磷含量>电导率>总孔隙度>持水孔隙度>容重>碱解氮含量。其中,通气孔隙度、pH、速效钾含量、速效磷含量和电导率对樱桃萝卜的生长指标有显著影响,是引起樱桃萝卜生长变化的主要因素,解释度分别为 31.81%、29.64%、25.83%、22.10%和 22.04%。

由图 1B 可知,在樱桃萝卜光合特性中,轴 1 和轴 2 的特征值分别为 48.4%和 21.2%,2 个轴解释了 69.6%的累计方差。樱桃萝卜的光合特性受生物炭替代泥炭基质中的 pH、电导率、通气孔隙度、持水孔隙度和总孔隙度的正调控,受容重和碱解氮含量



注:EC. 电导率;BD. 容重;AFP. 通气孔隙度;WHP. 持水孔隙度;TP. 总孔隙度;AN. 碱解氮含量;AP. 速效磷含量;AK. 速效钾含量;RF. 根鲜质量;PH. 株高;LF. 叶片鲜质量;RAF. 樱桃萝卜鲜质量;RAD. 樱桃萝卜直径;TN. 叶片全氮含量;TP. 叶片全磷含量;TK. 叶片全钾含量;SC. 可溶性糖含量;VC. 维生素 C 含量;P_n. 净光合速率;G_s. 气孔导度;C_i. 胞间 CO₂浓度;T. 蒸腾速率。

Note: EC. Electrical conductivity; BD. Bulk density; AFP. Ventilated porosity; WHP. Water-holding porosity; TP. Total porosity; AN. Alkaline hydrolyzable nitrogen content; AP. Available phosphorus content; AK. Available potassium content; RF. Root fresh mass; PH. Plant height; LF. Fresh mass of leaves; RAF. Fresh mass of cherry radish; RAD. Diameter of cherry radish content; TN. Leaf total nitrogen content; TP. Leaf total phosphorus content; TK. Leaf total potassium content; SC. Soluble sugar content; VC. Vitamin C content; P_n. Net photosynthetic rate; G_s. Stomatal conductance; C_i. Intercellular CO₂ concentration; T. Transpiration rate.

图 1 复配基质性质与樱桃萝卜生长指标(A)和光合特性(B)的 PCA 分析

Fig. 1 PCA analysis of compound substrate properties and growth indexes (A) and photosynthetic characteristics (B) of cherry radish

的负调控。基质理化性质对樱桃萝卜光合特性的重要性由大到小为:通气孔隙>速效钾含量>pH>电导率>速效磷含量>总孔隙度>持水孔隙度>容重>碱解氮含量。其中,通气孔隙度、速效钾含量、pH、电导率和速效磷含量对樱桃萝卜的光合特性有显著影响,是引起樱桃萝卜光合特性变化的主要因素,解释度分别为 37.57%、35.16%、34.76%、29.13%和 24.12%。

3 讨论与结论

3.1 生物炭替代泥炭对基质理化性状的影响

孔隙度是衡量基质结构特性的重要指标,良好的孔隙结构有利于植物根系的生长和生物量的积累。本研究中,与 CK 相比,稻壳生物炭替代泥炭后,基质的总孔隙度增加,但无显著差异;玉米秸秆

生物炭替代 1/6、1/3 泥炭后,基质的总孔隙度升高,替代 1/2 泥炭后,基质的总孔隙度降低,与范如芹等^[19]、范龙等^[20]的研究结果相似。这可能是由于生物炭疏松多孔的性质和较低的自身容重,提高了基质的透气性^[21]。同时其具有富碳和多微孔结构特性,施入土壤后作为胶结剂将较小粒径的团聚体吸附团聚成大团聚体,促进大团聚体的形成^[22]。此外,生物炭自身含有较多养分,替代泥炭施入基质之后,可促进养分的供应,提高樱桃萝卜根系对基质中养分的吸收能力。然而,随着生物炭替代泥炭比例的增加,基质的碱解氮含量降低,一方面,生物炭过高的 C/N 比使基质中铵态氮或硝态氮转化成微生物氮等形式,并以此形式固定下来,从而减少碱解氮的含量^[23-24];另一方面,Chen 等^[25]认为,添加生物炭可能使反硝化细菌丰度增加,反硝化作用加强,使硝酸盐完全被还原为气态氮,生物炭有促进电子转移到基质反硝化微生物中的作用,可以促进硝态氮还原为气态氮。此外,生物炭通常呈碱性,施入后可以提高基质的 pH, pH 升高可能会将铵态氮转化为气态氮,从而强化氮的挥发^[26-27],但是生物炭对基质氮循环的作用机制及长期效果需进一步深入探究。

3.2 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜光合作用及根系生长的影响

光合作用与植物生物量的积累和产量的形成有密切的关系^[28]。净光合速率、气孔导度、蒸腾速率等是衡量作物光合作用的重要指标。本研究中,与 CK 相比,R30 和 C10 处理显著提高了樱桃萝卜的净光合速率和 SPAD 值,这主要与叶片中叶绿体有关^[29]。生物炭替代泥炭混入基质中,为樱桃萝卜的生长提供了稳定的养分供应,且生物炭中富含 Mg^{2+} ^[30], Mg^{2+} 是叶绿体的重要组成成分^[31],因此有效地促进了光合速率和 SPAD 值升高。另外,本研究中,与 CK 相比,R10、R20、R30 和 C10 处理均显著提高了樱桃萝卜叶片的蒸腾速率,这是由于生物炭具有良好的保水性能^[32],在生物炭的制备过程中容易形成丰富的含氧官能团(羧基、羟基、内酯基等),它们的存在赋予了生物炭一定的极性,使其具有良好的亲水性。此外, O_2 -和 C-O-H 的极性氢键促进了 H_2O 分子与生物炭表面的相互作用,从而提高了土壤的持水率^[33],减少了基质的水分蒸发,为樱桃萝卜的生长提供充足的水分。玉米秸秆生物炭呈棒状且纤维素含量较高,施入土壤后会使得土壤容重增加^[34],这与本研究结果一致,随着玉米秸秆生物炭替

代泥炭比例升高,基质容重增加,总孔隙度先升高后下降,抑制了根系的呼吸,从而限制植物根系对水分和养分的吸收。Sun 等^[35]研究也表明,秸秆生物炭替代 5%(w)泥炭对玉米幼苗侧根的生长有促进作用,这与本文稻壳生物炭替代泥炭比例越高,樱桃萝卜根尖数越多相一致。

3.3 生物炭替代泥炭对樱桃萝卜产量及品质的影响

生物量和果实产量可以直观地反映植株的生长和营养吸收状况^[36]。本研究表明,R30 和 C10 处理的产量显著高于其他处理。樱桃萝卜适宜在碱性条件下生长,稻壳生物炭 pH 较高,施入基质后能够显著提高基质的 pH,因此 R30 处理的产量较高。基质中磷和钾元素含量随着稻壳生物炭添加量的增加而提高,并在 30%添加量时达最高值,养分吸收对作物的生长起关键作用,因此樱桃萝卜株高、叶片和根鲜质量及产量等生长指标也在 30%添加量时最高,这是因为生物炭添加后基质理化性状改善,促进作物养分的吸收,进而提高产量^[37]。但 C30 处理樱桃萝卜的产量显著低于 CK,这可能是 C30 处理基质容重显著增加,但持水孔隙度显著下降,基质变得紧实,孔隙减少,抑制了根系的呼吸,从而阻碍根系的伸展,导致樱桃萝卜根系鲜质量减少、生物量显著下降的主要原因。这与 Sarauer 等^[38]在针叶树幼苗中的研究结果相似,说明生物炭替代比例过高也会导致基质的孔隙度下降,限制植物根系对水分和养分的吸收,进而导致产量下降。

可溶性糖不仅可为植物的生长发育提供能量,也可作为渗透调节物质与信号物质,而维生素 C 是植物体内的抗氧化剂之一,在清除自由基和活性氧方面起着重要作用。在本研究中,与 CK 相比,生物炭替代泥炭后,显著提高了樱桃萝卜的可溶性糖和维生素 C 含量,这与张瑞花等^[39]在樱桃番茄上的研究结果相似。维生素 C 含量随着稻壳生物炭替代泥炭比例的增加逐渐升高,而玉米秸秆生物炭替代泥炭处理的含量则先上升后降低,其中,R30 处理的维生素 C 含量显著高于 C30,这与生物炭的自身理化性质密切相关。玉米秸秆生物炭中全氮含量高于稻壳生物炭,因此在同等替代比例下,玉米秸秆生物炭中全氮含量高于稻壳生物炭处理。研究表明,较高的施氮水平在维生素 C 合成途径中出现负调控现象^[40-41],导致维生素 C 合成受阻,因此含量降低。本研究中 PCA 分析也验证了樱桃萝卜生长与基质性质的相关关系,樱桃萝卜的生长指标和光合

特性均与基质容重和碱解氮含量呈负相关,与其他基质理化性质呈正相关。通气孔隙度、电导率、pH和速效磷含量、速效钾含量是影响樱桃萝卜生长和光合特性的主要因素,这与前人的研究一致^[42-43]。说明樱桃萝卜的生长和光合特性很大程度上依赖基质的孔隙状况和养分含量。本研究中,不同稻壳生物炭替代泥炭比例和玉米秸秆生物炭替代1/6、1/3泥炭比例一方面改善了基质的孔隙状况,增强了基质水、肥、气、热的协调能力及保水保肥能力^[44],促进根系生长;另一方面生物炭提高了基质中的养分含量,从而促进樱桃萝卜根系对养分的吸收,最终改善了樱桃萝卜的生长和营养品质。其中稻壳炭替代1/2泥炭的效果最佳。

综上所述,两种生物炭不同替代泥炭比例处理均能显著增加基质的通气孔隙度,提高基质pH、速效磷和速效钾含量。在樱桃萝卜生长指标方面,稻壳生物炭替代1/2泥炭和玉米秸秆生物炭替代1/6泥炭处理促进根系发育和光合特性的效果较好;在产量方面,玉米秸秆生物炭替代1/6泥炭处理产量最高,稻壳生物炭替代1/2泥炭处理次之,且均显著高于对照;在品质方面,两种生物炭替代泥炭处理均能提高樱桃萝卜的全钾、全磷、可溶性糖和维生素C含量,稻壳生物炭替代1/2泥炭处理综合效果更优;主成分分析显示,通气孔隙度、pH、速效钾含量、速效磷含量和电导率是影响樱桃萝卜生长和光合特性的主要因素,综合分析得出,稻壳生物炭替代1/2泥炭和玉米秸秆生物炭替代1/6泥炭分别为两类生物炭替代泥炭的最佳比例,可通过优化基质孔隙状况和养分含量的供应,促进根系生长及产量、品质提升,为基质栽培中生物炭替代泥炭提供了理论依据。

参考文献

- [1] AHMAD Y, BASIR A. Peat soil as an alternative soil substrate and its effect on balangeran (*Shorea belangeran*) seedling growth[J]. International Journal of Biosciences, 2019, 14(4): 188-196.
- [2] KOSYAKOV D S, UL'YANOVSKII N V, LATKIN T B, et al. Peat burning: An important source of pyridines in the earth atmosphere[J]. Environmental Pollution, 2020, 266(1): 115109.
- [3] NOCENTINI M, MASTROLONARDO G, MICHELOZZI M, et al. Effects of biochar and compost addition in potting substrates on growth and volatile compounds profile of basil (*Ocimum basilicum* L.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(3): 1609-1620.
- [4] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [5] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. Nature Communications, 2010, 1: 56.
- [6] 符云鹏,刘天,李耀鑫,等.等碳量添加生物炭和秸秆对烟田土壤呼吸及净碳收支的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1386-1396.
- [7] 张立芸,黎力,张海东,等.玉米秸秆及其生物炭复配基质对玉米根系构型的影响[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(2): 207-217.
- [8] 陆洁,冯嘉仪,盛晗,等.生物炭对污泥混合基质性质和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1082-1090.
- [9] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J]. Biochar, 2020, 2(4): 379-420.
- [10] FASCELLA G, MAMMANO M M, DANGIOLILLO F, et al. Coniferous wood biochar as substrate component of two containerized Lavender species: Effects on morpho-physiological traits and nutrients partitioning- ScienceDirect[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 267(1): 109356.
- [11] KIM H S, KIM K R, YANG J E, et al. Amelioration of horticultural growing media properties through rice hull biochar incorporation[J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, 8(2): 483-492.
- [12] BU X L, JI H J, MA W B, et al. Effects of biochar as a peat-based substrate component on morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* franch[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 302: 111148.
- [13] GIULIA C, BONASIA A, LAZZIZERA C, et al. Influence of biochar, mycorrhizal inoculation, and fertilizer rate on growth and flowering of *Pelargonium (Pelargonium zonale* L.) plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 429.
- [14] ALVAREZ J M, PASIAN C, LAL R, et al. Morpho-physiological plant quality when biochar and vermicompost are used as growing media replacement in urban horticulture[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2018, 34: 175-180.
- [15] 谢龙.不同水肥量对樱桃萝卜种子萌发和生长发育的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2000.
- [17] 郭世荣.无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [18] 李合生,孙群,赵世杰,等.植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 范如芹,张振华,严少华,等.生物炭和高吸水树脂可改善养殖垫料基质理化性状[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 435-443.
- [20] 范龙,吴啸鹏,黄敏,等.生物炭施用对水稻育秧土理化特性和秧苗素质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 40-44.
- [21] BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. Geoderma, 2016, 282: 96-102.
- [22] 张雨萌,郭艳杰,张丽娟,等.生物炭配合深松对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 368-375.

- [23] 余海燕,月培茜,贾永霞,等.生物炭替代草炭对生菜生长和营养品质的影响[J].农业资源与环境学报,2024,41(1):147-154.
- [24] 韩召强,陈效民,曲成闯,等.生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):272-278.
- [25] CHEN J H, LIU X Y, LI L Q, et al. Consistent increase in abundance and diversity but variable change in community composition of bacteria in topsoil of rice paddy under short term biochar treatment across three sites from South China[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91: 68-79.
- [26] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80-90.
- [27] CHEN A Q, LEI B K, HU W L, et al. Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(1):139-152.
- [28] 张作合,周利军,李浩宇,等.节水灌溉减氮配施生物炭对水稻光合特性与水氮利用的影响[J].农业机械学报,2024,55(7):386-395.
- [29] 滕守振,汪海,梁海生,等.玉米叶片叶绿素含量的全基因组关联性分析[J].生物技术通报,2017,33(4):98-103.
- [30] 毛明月,赵振勇,王守乐,等.炭化温度和时间对盐角草生物炭产率及理化性质的影响[J].干旱区研究,2019,36(3):614-620.
- [31] 魏家绵,李朝晖,李德耀. NaN_3 对叶绿体 Mg^{2+} -ATPase 的抑制作用再探[J].植物生理学报,1994,20(2):163-170.
- [32] 卜晓莉,姬慧娟,马青林,等.生物炭-泥炭复合基质对马缨杜鹃生长和生理的影响[J].植物资源与环境学报,2021,30(5):58-68.
- [33] 刘慧,焦岩,窦婉毓,等.减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J].农业机械学报,2024,55(19):391-401.
- [34] 李兴发,潘寒风,安小伟,等.核桃壳生物炭制备及其碘捕获性能[J].中国环境科学,2024,44(10):5404-5414.
- [35] SUN C X, CHEN X, CAO M M, et al. Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates[J]. Plant Soil, 2017, 416(1/2):487-502.
- [36] 徐嘉宁,唐姗姗,罗弦,等.生物炭替代草炭对金盏菊生长和观赏性状的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(10):119-126.
- [37] HE X Q, HAN L J, HUANG G Q. The effect of different particle sizes of biochar on ammonia mitigation during pig manure/wheat straw aerobic composting process[C]. Detroit, Michigan: Annual International Meeting of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.
- [38] SARAUER J L, COLEMAN M D. Biochar as a growing media component for containerized production of Douglas-fir[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2018, 48(5):581-588.
- [39] 张瑞花,兰超杰,刘雯,等.生物炭对反季节露地樱桃番茄生长及产量品质的影响[J].分子植物育种,2019,17(14):4831-4839.
- [40] LEE S K, KADER A A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 20(3):207-220.
- [41] ZHANG L, ZHANG F, WANG Y, et al. Physiological and metabolomic analysis reveals maturity stage-dependent nitrogen regulation of vitamin C content in pepper fruit[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13:1049785.
- [42] SHENG Z P, QIAN Y, MENG J S, et al. Rice hull biochar improved the growth of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) by altering plant physiology and rhizosphere microbial communities[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 322:112204.
- [43] PENG D H, GU M M, ZHAO Y, et al. Effects of biochar mixes with peat-moss based substrates on growth and development of horticultural crops[J]. Horticultural Science and Technology, 2018, 36(4):501-512.
- [44] YANG W, ZHANG L. Biochar and cow manure organic fertilizer amendments improve the quality of composted green-waste as a growth medium for the ornamental plant *Centaurea Cyanus* L[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(30):45474-45486.