

不同配比育苗基质对樱桃番茄砧木幼苗生长及生理特性的影响

冯鸿瑜, 王 静, 廖道龙, 尤志聪, 伍壮生*

海南省农业科学院蔬菜研究所/农业农村部热带果蔬遗传资源评价利用重点实验室(部省共建)/海南省瓜菜育种工程技术研究中心/海南省蔬菜生物学重点实验室, 海南海口 571100

摘 要: 为筛选出适宜海南樱桃番茄砧木育苗的基质配方, 本研究以海茄砧 1 号为试材, 将发酵好的牛粪、椰糠和商业育苗基质按不同体积比配制成 8 种基质配方, 以商业育苗基质为对照(CK), 研究不同育苗基质的理化性状及其对砧木幼苗生长及生理特性的影响。结果表明: 添加椰糠、牛粪的育苗基质容重和通气孔隙度均低于 CK, 而总孔隙度、持水孔隙度、pH 和电导率(EC)均高于 CK; 各处理的养分含量基本上高于 CK, 且达到极显著差异。各处理的出苗率均超过 90%, 除 T₈ 外均极显著高于 CK。随着幼苗生长期的延长, 株高和茎粗也随着增大, 且不同处理间存在较大差异, 其中, T₂ 和 T₄ 处理优于其他处理。同时, 添加椰糠、牛粪的育苗基质(除 T₅、T₆ 外), 还可提高砧木幼苗全株干鲜质量、地上部、地下部干质量和壮苗指数, 以 T₄ 处理最好, 壮苗指数达到 0.106, 显著高于 CK, 较 CK 提高 36.05%。与 CK 相比, 不同育苗基质对幼苗主根长影响不大, 可促进根平均直径、根表面积和根体积的提高, 但根系活力却极显著降低。经主成分综合评价依次为 T₄>T₃>T₂>T₆>T₇>T₅>T₈>T₁>CK。综上所述, T₄ 处理对海茄砧 1 号的育苗效果最好。

关键词: 育苗基质; 砧木; 幼苗生长; 生理特性; 综合评价

中图分类号: S663.9 文献标志码: A

Effects of Different Ratios of Seedling Substrates on Growth and Physiological Characteristics of Cherry Tomato Rootstock Seedlings

FENG Hongyu, WANG Jing, LIAO Daolong, YOU Zhicong, WU Zhuangsheng*

Vegetable Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Genetic Resources Evaluation and Utilization of Tropical Fruits and Vegetables (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hainan Provincial Engineering Research Center for Melon and Vegetable Breeding / Hainan Key Laboratory of Vegetable Biology, Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: The study was aimed to select suitable substrate formulations for seedling of Hainan cherry tomato rootstocks. Variety Haiqiezheng No.1 was used, and fermented cow dung, coconut husk, and commercial seedling substrate were made into eight substrate formulations according to different volume ratios, and commercial seedling substrate was used as the control (CK). The physicochemical properties of different seedling substrates and the effects on the growth and physiological characteristics of rootstock seedlings were investigated. The bulk density and aeration porosity of the seedling substrates with coconut husk and cow dung were lower than that of CK, while the total porosity, water-holding porosity, pH and EC were higher than that of CK. The nutrient contents of the treatments were basically higher than that of CK, and the differences reached a highly significant level. The emergence rate of each treatment was more than 90%, which was highly significantly higher than that of CK (except T₈). With the prolongation of seedling growth period, the plant height and stem diameter also increased, and there were large differences among different treatments. T₂ and T₄ were better than other treatments. Fresh and dry weight of the whole plant, above-ground and below-ground dry weights, and strong seedling index also increased with the addition of coconut husk and cow dung (except T₅ and T₆). The best

收稿日期 2024-07-31; 接受日期 2024-09-13

基金项目 海南省重大科技计划项目(No. ZDKJ2021005); 国家现代农业产业技术体系项目(No. CARS-23-G55); 海南省农业科学院科技创新团队项目(No. HAAS2023TDYD04)。

作者简介 冯鸿瑜(1998—), 男, 助理农艺师, 研究方向: 茄子育种及嫁接栽培技术。*通信作者(Corresponding author): 伍壮生(WU Zhuangsheng), E-mail: dawu0719@163.com。

treatment was T_4 , and the strong seedling index reached 0.106, which was significantly higher than that of CK, and improved 36.05% compared with that of CK. Different seedling substrates had little effect on the main root length of seedlings, which could promote the increase of average root diameter, root surface area and root volume, but the root vigour was extremely significantly lower than that of CK. The comprehensive evaluation of principal components was $T_4 > T_3 > T_2 > T_6 > T_7 > T_5 > T_8 > T_1 > CK$. In summary, T_4 had optimum formula on Haiqiezhen No.1.

Keywords: seedling substrate; rootstock; seedling growth; physiological characteristics; comprehensive evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.015

樱桃番茄 (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* A. Gray) 又名圣女果、爱情果、小番茄和迷你番茄等^[1-2]。因其口感好、风味佳,深受消费者的青睐。同时,樱桃番茄也是海南省冬季北运瓜菜的优势作物之一,据海南省农业农村厅有关数据统计,2023—2024 冬春季樱桃番茄种植面积约 4300 hm²,产区主要集中于陵水、昌江、澄迈和定安等市(县)。樱桃番茄已成为当地农民经济收入的主要来源之一,对海南省冬季北运瓜菜的产业结构调整及促进全国菜篮子工程建设等均作出了重要贡献。

嫁接育苗是樱桃番茄栽培中的重要环节,嫁接苗质量的好坏对樱桃番茄后期的种植管理和产量有很大影响^[3],而砧木幼苗的培育更是樱桃番茄嫁接育苗的基础和重中之重。育苗基质是幼苗根系生长的基础,其质量的好坏对种苗的质量影响巨大,是集约化育苗技术中的关键^[4]。冯雪峰等^[5]研究表明牛粪:花生壳:蛭石:通用基质(成分为河沙、珍珠岩、竹屑)为 2:2:4:2 基质配方,有利于番茄幼苗的生长,长势最强,其株高、茎粗、地上地下部干鲜质量最好,壮苗指数、出苗率最高,可用作番茄育苗基质。张爽等^[6]研究表明番茄育苗基质壮苗指数的最佳配比(体积分数)为玉米秸秆 55.61%、有机肥 24.39%、马铃薯渣 1.20%、田园土 18.80%,该配比条件下壮苗指数为 0.12281。牛先前等^[7]以珍珠岩、河沙、草炭土、椰糠、翠筠靛土等为材料,以田园土为对照,测定了不同配比的育苗基质对番茄出芽率及生长指标的影响,结果表明,珍珠岩:椰糠:草炭土为 1:1:6 以及河沙:草炭土为 1:6 作为基质有利于番茄苗的培育。邹宜静等^[8]比较了 3 种杭州市育苗中心常用商品育苗基质的理化性质指标,综合评价其对番茄、茄子苗期长势的影响,结果表明,金色 3 号是茄果类育苗较理想的商品基质。

然而,不同作物的育苗受基质种类、育苗季

节、区域温度与湿度等多因素的影响,其中基质配方是否合理是培育壮苗的关键所在^[9]。本研究以发酵的牛粪、椰糠和商品育苗基质为原料,通过不同的配比,开展育苗基质的理化性状及其对砧木幼苗生长和生理特性的影响研究,旨在筛选出适宜海南樱桃番茄砧木培育的基质配方,促进海南省樱桃番茄育苗产业的发展。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的樱桃番茄砧木品种为海茄砧 1 号,由海南省农业科学院蔬菜研究所自主选育。育苗基质为商品育苗基质,由山东绿珠农业科技发展有限公司提供。椰糠来源于海南文昌腾达生物科技有限公司,牛粪购自当地农户。经充分发酵腐熟后的理化性质和养分含量分别为椰糠容重 0.03 g/cm³,总孔隙度 79.94%,持水孔隙度 70.34%,通气孔隙度 9.60%,pH 6.20,电导率(EC) 2.14 mS/cm,全氮 8.22 g/kg,全磷 1.76 g/kg,全钾 15.38 g/kg,碱解氮 0.38 g/kg,有效磷 42.87 mg/kg 和速效钾 12.59 g/kg;牛粪容重 0.57 g/cm³,总孔隙度 95.17%,持水孔隙度 78.09%,通气孔隙度 17.08%,pH 7.39,EC 值 3.05 mS/cm,全氮 19.75 g/kg,全磷 12.10 g/kg,全钾 14.27 g/kg,碱解氮 1.15 g/kg,有效磷 612.19 mg/kg,速效钾 11.91 g/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2023 年 10 月 4 日—11 月 25 日在海南省农业科学院永发科研基地的育苗大棚内进行。采用单因素随机区组设计,以商品育苗基质、椰糠和牛粪为原料,按体积比进行复配,共设置 8 个基质配方:椰糠:牛粪:商品育苗基质为 1:1:8 (T_1);椰糠:牛粪:商品育苗基质为 2:1:7 (T_2);椰糠:牛粪:商品育苗基质为 1:2:7 (T_3);椰糠:牛粪:商品育苗基质为 3:1:6 (T_4);椰糠:商品育苗基质为 5:5 (T_5);椰糠:商品育苗基质为 2:8 (T_6);椰糠:

商品育苗基质：牛粪为 6：3：1（T₇）；椰糠：商品育苗基质：牛粪为 6：2：2（T₈）；以商品育苗基质为对照（CK）。选用 60 孔的穴盘进行育苗，每个处理播种 2 盘，重复 3 次，苗期管理同常规管理。

1.2.2 项目测定 （1）基质理化性状的测定。根据试验设计的基质配方复配后，取适量基质带回实验室，自然风干备用。然后参照郭世荣^[10]的试验方法测定复配基质的容重、总孔隙度、持水孔隙度和通气孔隙度。利用雷磁 PHS-3E pH 计测定复配基质的 pH^[11]；利用雷磁 DDBJ-350 电导率仪测定其 EC 值^[12]；分别采用凯氏定氮法、NaOH 碱熔-钼锑抗分光光度法、NaOH 熔融法、碱解扩散法、钼锑抗比色法和乙酸铵浸提法测定复配基质的全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾^[13]。

（2）砧木幼苗出苗率的调查。砧木幼苗的发芽试验参照《农作物种子检验规程 发芽试验》（GB/T 3543.4）。当种子发芽以后，每天调查其发芽数，直到 14 d 为止，并计算出苗率，出苗率=全部发芽种子总数/总播种数×100%。

（3）砧木幼苗生长指标的测定。种子发芽整齐后，每隔 7 d 随机抽取 10 株幼苗，分别用直尺和游标卡尺测量其株高和茎粗，直到幼苗长至 5~6 叶 1 心时停止调查。并计算其生长速率和茎粗的增幅。生长速率=2 次测量的株高差/2 次测量间隔的天数。增幅=最后一次测量的茎粗-第一次测量的茎粗^[14]。育苗期结束时，再随机抽取 10 株幼苗，用电子天平测量植株的干鲜质量^[15]，并计算根冠比和壮苗指数^[16]。根冠比=地下部干质量/地上部干质量；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。利用 LA-S 植物图像分析仪测量主根长、根平均直径、根表面积和根体积^[17]。

（4）砧木幼苗生理指标的测定。育苗结束时，采用 TTC 染色法测定根系活力^[18]。参照高俊凤^[19]的方法测定过氧化物酶（POD）、超氧化物歧化酶（SOD）活力、丙二醛（MDA）和脯氨酸（PRO）含量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2022 软件对原始数据处理后，用 DPS19.05 数据处理系统进行单因素方差分析、相关性分析和 Duncan 新复极差法多重比较。采用 SPSS 25.0 软件进行主成分分析和综合得分计算。

2 结果与分析

2.1 不同育苗基质的理化性质及养分含量

2.1.1 不同育苗基质的理化性质 从表 1 中可见，不同配比育苗基质的理化性质存在较大差异。添加椰糠、牛粪的育苗基质容重和通气孔隙度均低于商品育苗基质（CK），而总孔隙度、持水孔隙度、pH 和 EC 值则均高于 CK。其中 T₄、T₅ 和 T₇ 的容重极显著低于 CK 和 T₁、T₃；T₅ 和 T₇ 的容重极显著低于 T₂、T₄、T₆ 和 T₈；而 T₂ 和 T₆ 的容重则显著低于 CK，其他处理间则无显著差异。各处理的总孔隙度为 75.32%~94.79%，均极显著高于 CK；T₃、T₇ 和 T₈ 的总孔隙度极显著高于其他各处理；T₅ 则极显著高于 T₁、T₂、T₄ 和 T₆；T₂ 和 T₄ 亦极显著高于 T₁ 和 T₆，其他处理间则差异不显著。各处理的持水孔隙度介于 72.20%~90.48%之间，均极显著高于 CK；T₃、T₇ 和 T₈ 则

表 1 不同育苗基质的理化性质
Tab. 1 Physicochemical properties of seedling substrates in different treatments

处理 Treatment	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	持水孔隙度 Water-holding porosity/%	通气孔隙度 Aeration porosity/%	pH	EC/ (mS·cm ⁻¹)
T ₁	0.20±0.010 ^{abcA}	76.86±1.76 ^{dD}	72.31±1.27 ^{dD}	4.55±0.50 ^{eBC}	5.61±0.05 ^{cC}	1.64±0.020 ^{eE}
T ₂	0.19±0.010 ^{cdAB}	80.43±1.13 ^{cC}	74.33±0.38 ^{dD}	6.10±0.95 ^{bB}	5.61±0.02 ^{cC}	1.76±0.009 ^{dD}
T ₃	0.22±0.010 ^{abA}	94.79±1.05 ^{aA}	90.48±0.53 ^{aA}	4.31±0.57 ^{eBC}	5.82±0.03 ^{bB}	2.06±0.009 ^{cC}
T ₄	0.16±0.004 ^{dBc}	81.27±1.28 ^{cC}	76.81±0.63 ^{cC}	4.46±0.69 ^{eBC}	5.38±0.02 ^{dD}	1.74±0.002 ^{dD}
T ₅	0.12±0.010 ^{eD}	89.75±1.07 ^{bB}	86.16±1.87 ^{bB}	3.59±0.85 ^{cC}	5.05±0.01 ^{eE}	1.41±0.004 ^{fF}
T ₆	0.19±0.030 ^{bcAB}	75.32±0.34 ^{dD}	72.20±0.17 ^{dD}	3.12±0.49 ^{cC}	4.84±0.01 ^{fF}	0.85±0.010 ^{gG}
T ₇	0.14±0.002 ^{cD}	94.12±0.14 ^{aA}	90.39±0.71 ^{aA}	3.73±0.80 ^{cC}	5.83±0.06 ^{bB}	2.25±0.030 ^{bB}
T ₈	0.20±0.010 ^{abcAB}	93.45±0.44 ^{aA}	88.94±0.09 ^{aA}	4.51±0.39 ^{eBC}	6.38±0.06 ^{aA}	3.31±0.070 ^{aA}
CK	0.22±0.030 ^{aA}	60.30±1.54 ^{eE}	50.62±0.11 ^{fF}	9.68±1.43 ^{aA}	5.00±0.05 ^{eE}	0.66±0.060 ^{hH}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）；同列不同大写字母表示差异极显著（P<0.01）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (P<0.05); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference (P<0.01).

极显著高于其他处理; T_5 亦极显著高于 T_1 、 T_2 、 T_4 和 T_6 ; T_4 则极显著高于 T_1 、 T_2 和 T_6 , 而 T_2 则显著高于 T_1 和 T_6 。各处理的通气孔隙度则极显著低于 CK; T_2 则极显著高于 T_5 、 T_6 和 T_7 , 其他处理间无显著差异。除 T_5 和 T_6 外, 其他各处理的 pH 亦极显著高于 CK; T_6 则极显著低于 CK; T_8 的 pH 最高, 为 6.38, 极显著高于其他各处理; T_3 和 T_7 则极显著高于剩余各处理; T_1 和 T_2 也极显著高于 T_4 、 T_5 和 T_6 ; T_4 、 T_5 和 T_6 彼此间亦存在极显著差异, 其他处理间则差异不显著。EC 值最大的是 T_8 , 为 3.31 mS/cm, 极显著高于 CK 和其他各处理; 其次为 T_7 , 亦极显著高于其他各处理; CK 的 EC 值最低, 为 0.66 mS/cm, 极显著低于各处理; 除 T_2 和 T_4 处理的 EC 值无显著性差异外, 其他各处理间均存在极显著差异。

2.1.2 不同育苗基质的养分含量 试验对各育苗基质的养分进行测定, 结果表明, 各处理的养分含量存在较大差异 (表 2)。其中全氮含量为 10.39~13.84 g/kg, 除 T_5 外, 其他各处理均极显著高于 CK; T_3 和 T_8 又极显著高于剩余各处理; T_1 和 T_2 也极显著高于 T_4 ~ T_7 ; 而 T_4 ~ T_7 各处理间同样存在极显著差异, 其他处理间则无显著差异。

全磷含量介于 2.15~6.79 g/kg 之间, 除 T_5 极显著低于 CK 外, 其他各处理均极显著高于 CK; T_8 的全磷含量最高, 极显著高于其他处理; 其余各处理 (除 T_3 和 T_7 无显著差异外) 彼此间亦存在极显著差异。各处理的全钾含量为 11.13~13.95 g/kg, 均极显著高于 CK, 以 T_8 的含量最高, 极显著高于其他各处理; T_3 和 T_7 也极显著高于其余各处理; 而 T_5 则显著高于 T_6 , 其他处理间则差异不显著。各处理的碱解氮含量为 0.53~1.20 g/kg, 除 T_5 和 T_6 极显著低于 CK 外, 其他处理均极显著高于 CK; 碱解氮含量最高的是 T_8 , 极显著高于其他各处理; 其次为 T_3 , 极显著高于剩余各处理; T_2 和 T_4 亦极显著高于 T_1 和 T_5 ~ T_7 ; 同样 T_5 ~ T_7 彼此间也存在极显著差异, 其他处理间则差异不显著。各处理的有效磷含量为 22.53~105.79 mg/kg, 除 T_6 与 CK 差异不显著外, 其余各处理与 CK 以及各处理间的差异均达到极显著性水平。各处理的速效钾含量为 2.97~9.14 g/kg, 均极显著高于 CK; 以 T_8 的速效钾含量最高, 除 T_4 和 T_5 以及 T_1 和 T_2 处理间的差异未达到极显著水平, 其他各处理间的差异则均极显著; T_1 和 T_2 的差异显著, 其他处理间则无显著差异。

表 2 不同育苗基质的养分含量

Tab. 2 Nutrient content of seedling substrates in different treatments

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phospho- rus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(g·kg ⁻¹)
T_1	12.47±0.10 ^{bB}	3.96±0.01 ^{cC}	11.38±0.14 ^{cdC}	0.85±0.008 ^{ed}	70.49±0.08 ^{dD}	4.11±0.03 ^{fE}
T_2	12.49±0.04 ^{bB}	3.83±0.01 ^{dD}	11.36±0.25 ^{cdC}	0.94±0.005 ^{cC}	66.73±0.45 ^{fF}	4.27±0.10 ^{eE}
T_3	13.84±0.06 ^{aA}	6.11±0.05 ^{bB}	12.77±0.24 ^{bB}	1.10±0.007 ^{bB}	105.79±0.30 ^{aA}	5.28±0.05 ^{cC}
T_4	12.19±0.06 ^{cC}	3.52±0.03 ^{eE}	11.29±0.14 ^{cdC}	0.92±0.006 ^{dC}	67.97±0.07 ^{eE}	4.57±0.05 ^{dD}
T_5	10.39±0.07 ^{fF}	2.15±0.03 ^{hH}	11.60±0.22 ^{cC}	0.53±0.004 ^{hH}	26.31±0.07 ^{gG}	4.46±0.05 ^{dD}
T_6	10.92±0.03 ^{eE}	2.49±0.02 ^{fF}	11.13±0.22 ^{dC}	0.63±0.001 ^{hG}	22.53±0.39 ^{hH}	2.97±0.03 ^{fF}
T_7	11.55±0.08 ^{dD}	4.02±0.06 ^{cC}	12.54±0.14 ^{bB}	0.75±0.013 ^{fE}	74.29±0.70 ^{cC}	5.48±0.08 ^{bB}
T_8	13.80±0.05 ^{aA}	6.79±0.04 ^{aA}	13.95±0.22 ^{aA}	1.20±0.013 ^{aA}	100.60±0.28 ^{bB}	9.14±0.12 ^{aA}
CK	10.55±0.12 ^{fF}	2.24±0.01 ^{gG}	9.49±0.10 ^{eD}	0.71±0.007 ^{fF}	23.16±0.41 ^{hH}	2.10±0.05 ^{hG}

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

2.2 不同育苗基质对砧木出苗的影响

由图 1 可见, 各育苗基质的出苗率均超过了 90%。与常规育苗基质 (CK) 相比, 各育苗基质均存在较大差异, 除 T_8 显著高于 CK 外, 其他处理则均极显著高于 CK。其中, T_5 的出苗最高为 99.73%, 较 CK 提高 9.12%, 其次为 T_1 , 为 99.47%, 较 CK 提高 8.83%; T_8 的出苗率为 94.97%, 较 CK

提高 3.90%, 但显著低于 T_3 和 T_7 外的其余处理。

2.3 不同育苗基质对砧木幼苗生长的影响

2.3.1 不同育苗基质对砧木幼苗株高的影响 从表 3 可以看出, 海茄砧 1 号幼苗在生长过程中, 同一生长期不同处理的株高存在较大差异, 且各处理幼苗的株高随着生长期的延长而升高。在 10 月 16 日, 与 CK 相比, T_1 和 T_4 的株高显著高于

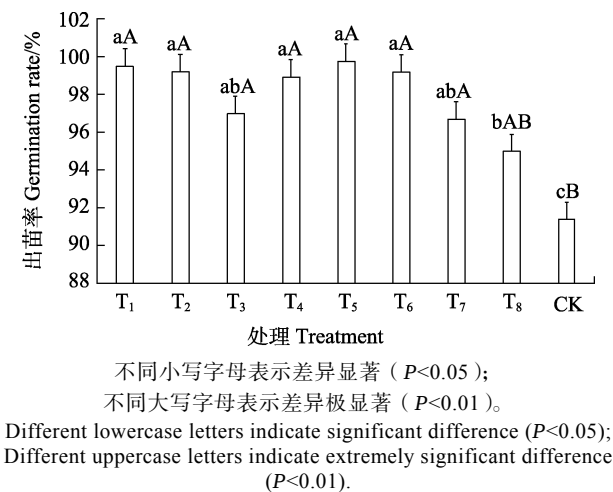


图 1 不同育苗基质对砧木出苗的影响

Fig. 1 Effects of different seedling substrates on emergence of rootstocks

CK, 分别较 CK 提高 21.77%和 18.09%, 其他处理则与 CK 差异不显著。在 10 月 24 日, T_1 、 T_2 和 T_4 的株高均极显著高于 CK, 分别较 CK 提高 33.20%、38.59%和 39.75%, 剩余处理则与 CK 无

显著差异。在 10 月 31 日, T_1 的株高显著高于 CK, 较 CK 提高 13.66%; T_4 的株高则极显著高于 CK, 较 CK 提高 18.50%; T_5 、 T_7 和 T_8 的株高则极显著低于 CK, 分别较 CK 降低 21.36%、18.58%和 24.81%; 剩余处理与 CK 间则无显著差异。在 11 月 7 日, 与 CK 相比, T_1 ~ T_4 处理的株高均极显著高于 CK, 而 T_5 处理的株高则极显著低于 CK, T_6 ~ T_8 处理的株高则与 CK 差异不显著。在 11 月 14 日育苗期结束时, 不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗株高的影响大小依次为 $T_2>T_4>T_3>T_1>T_6>T_8>CK>T_5>T_7$ 。

从表 3 中还可知, 不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗的生长速率有极显著的影响。其中 T_1 ~ T_4 的生长速率极显著高于 CK, 分别较 CK 提高 15.54%、23.65%、22.97%和 20.27%。其余各处理的生长速率则与 CK 差异不显著。 T_6 处理的生长速率显著高于 T_5 和 T_7 , T_8 处理的生长速率显著高于 T_7 , 其他处理间无显著差异。

表 3 不同育苗基质对砧木幼苗株高的影响
Tab. 3 Effects of different substrates on plant height of rootstock seedling

处理 Treatment	株高 Plant height/cm					生长速率 Growth rate/(cm·d ⁻¹)
	10-16	10-24	10-31	11-07	11-14	
T_1	4.08±0.21 ^{aA}	5.35±0.56 ^{aA}	8.46±0.72 ^{abAB}	15.37±0.18 ^{abAB}	20.63±1.03 ^{aA}	0.57±0.03 ^{abABC}
T_2	3.84±0.14 ^{abcAB}	5.57±0.38 ^{aA}	7.98±0.67 ^{abcABC}	15.65±0.38 ^{abA}	21.52±0.64 ^{aA}	0.61±0.02 ^{aA}
T_3	3.27±0.17 ^{dB}	4.31±0.22 ^{bBC}	6.81±0.09 ^{deCD}	14.81±0.68 ^{bcAB}	20.81±0.36 ^{aA}	0.61±0.02 ^{aA}
T_4	3.96±0.12 ^{abAB}	5.61±0.34 ^{aA}	8.82±0.19 ^{aA}	16.68±1.37 ^{aA}	21.21±0.23 ^{aA}	0.59±0.01 ^{aAB}
T_5	3.06±0.23 ^{dC}	4.40±0.15 ^{bB}	5.85±0.44 ^{lD}	9.84±0.32 ^{fE}	17.02±1.06 ^{cdC}	0.48±0.04 ^{deDE}
T_6	3.24±0.29 ^{dB}	3.93±0.16 ^{bcBC}	7.74±0.67 ^{bcABC}	13.52±0.54 ^{cdBC}	18.77±0.13 ^{bB}	0.54±0.02 ^{bcBCD}
T_7	3.46±0.33 ^{bcdABC}	4.18±0.25 ^{bBC}	6.06±0.41 ^{efD}	11.06±0.52 ^{efDE}	16.63±0.78 ^{dC}	0.45±0.04 ^{eE}
T_8	3.08±0.55 ^{dC}	3.52±0.13 ^{cC}	5.60±0.30 ^{lD}	11.06±1.02 ^{efDE}	18.09±0.29 ^{bcBC}	0.52±0.01 ^{cdCD}
CK	3.35±0.30 ^{cdABC}	4.02±0.15 ^{bcBC}	7.44±0.28 ^{cdBC}	12.32±0.58 ^{deCD}	17.76±0.34 ^{bcdBC}	0.49±0.01 ^{cdeDE}

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；同列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3.2 不同育苗基质对砧木幼苗茎粗的影响 从表 4 中可见, 不同育苗基质在同一测定时间内, 对海茄砧 1 号幼苗的茎粗有一定的影响, 且茎粗随着生育期的延长而增大。在 10 月 16 日, 除 T_6 和 T_8 的茎粗与 CK 差异不显著外, 其余处理的茎粗与 CK 均存在显著或极显著差异。各处理对海茄砧 1 号幼苗茎粗的影响大小为 $T_4>T_1>T_2>T_7>T_3>T_5>T_8>T_6>CK$ 。在 10 月 24 日, 除 T_6 的茎粗与 CK 不显著外, 其余各处理与 CK 均达到显著或极显著差异, 其中 T_2 和 T_4 的茎粗最大, 较 CK 高 50.91%,

极显著高于 T_3 、 T_5 、 T_7 和 T_8 ; 其次为 T_1 和 T_3 处理, 分别较 CK 高 42.38%和 35.98%, 极显著高于 T_5 和 T_8 ; T_7 处理的茎粗也极显著高于 T_5 , 其他处理间则差异不显著。在 10 月 31 日, T_1 ~ T_4 的茎粗均极显著高于 CK, 分别较 CK 高 38.45%、42.78%、32.85%和 53.07%; T_7 处理的茎粗则显著高于 CK, 较 CK 高 16.25%, T_5 、 T_6 和 T_8 的茎粗则与 CK 的差异不显著。各处理间的茎粗也存在一定的显著性, 其中 T_4 极显著高于 T_3 和 T_7 , 显著高于 T_1 和 T_3 , T_1 、 T_2 和 T_3 极显著高于 T_7 处理, 其他处理间

则无显著性差异。在 11 月 7 日, T_4 的茎粗极显著高于 CK 和 T_5 , 较 CK 高 18.65%; T_1 、 T_2 和 T_3 的茎粗极显著高于 T_5 , 显著高于 CK, 分别较 CK 高 11.04%、12.36%和 13.13%; 同时 T_2 和 T_3 亦显著高于 T_7 ; T_5 极显著低于 T_6 和 T_8 , 显著低于 T_7 和 CK, 其他处理间的差异不显著。在 11 月 14 日, T_2 处理的茎粗最大, 极显著高于 T_5 , 显著高于 CK 和 T_6 ~ T_8 处理; 其次为 T_3 和 T_4 , 极显著高于 T_5 , 显著高于 T_7 和 CK; T_1 和 T_8 显著高于 T_5 ; 不同育

苗基质对海茄砧 1 号幼苗茎粗的影响大小为 $T_2>T_3>T_4>T_1>T_8>T_6>T_7>CK>T_5$ 。

由表 4 还可以看出, 不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗茎粗的增幅也存在极显著的影响。 T_2 和 T_3 的茎粗增幅极显著高于 T_5 , 且 T_2 的茎粗增幅又显著高于 T_7 ; T_4 和 T_8 的茎粗增幅显著高于 T_5 , 其他处理间则无显著性差异。不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗茎粗的增幅影响大小为 $T_2>T_3>T_4>T_8>T_1>T_6>CK>T_7>T_5$ 。

表 4 不同育苗基质对砧木幼苗茎粗的影响
Tab. 4 Effects of different substrates on stem diameter of rootstock seedling

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/mm					增幅 Increasing range/mm
	10-16	10-24	10-31	11-07	11-14	
T_1	0.99±0.04 ^{abAB}	1.56±0.09 ^{abAB}	2.56±0.12 ^{bAB}	3.35±0.24 ^{abcAB}	3.79±0.20 ^{abcAB}	2.81±0.24 ^{abcAB}
T_2	0.99±0.04 ^{abAB}	1.65±0.04 ^{aA}	2.64±0.14 ^{abAB}	3.39±0.09 ^{abAB}	4.04±0.23 ^{aA}	3.05±0.27 ^{aA}
T_3	0.94±0.02 ^{bcBCD}	1.49±0.06 ^{bB}	2.45±0.05 ^{bB}	3.42±0.06 ^{abAB}	3.96±0.09 ^{abA}	3.02±0.10 ^{abA}
T_4	1.06±0.05 ^{aA}	1.65±0.05 ^{aA}	2.83±0.05 ^{aA}	3.58±0.14 ^{aA}	3.96±0.03 ^{abA}	2.90±0.02 ^{abAB}
T_5	0.92±0.03 ^{cdBCDE}	1.23±0.03 ^{dDE}	1.93±0.08 ^{cdC}	2.69±0.18 ^{cC}	3.32±0.26 ^{dB}	2.41±0.28 ^{cB}
T_6	0.86±0.02 ^{deDE}	1.04±0.02 ^{eF}	1.92±0.21 ^{cdC}	3.14±0.11 ^{bcdB}	3.61±0.15 ^{bcdAB}	2.76±0.17 ^{abcAB}
T_7	0.96±0.02 ^{bcBC}	1.47±0.05 ^{bBC}	2.15±0.15 ^{cC}	3.06±0.20 ^{cdBC}	3.57±0.28 ^{cdAB}	2.61±0.30 ^{bcAB}
T_8	0.90±0.03 ^{cdeCDE}	1.34±0.06 ^{cd}	1.96±0.06 ^{cdC}	3.18±0.22 ^{bcdAB}	3.78±0.15 ^{abcAB}	2.88±0.12 ^{abAB}
CK	0.85±0.01 ^{eE}	1.09±0.03 ^{eEF}	1.85±0.03 ^{dC}	3.02±0.06 ^{dBC}	3.55±0.10 ^{cdAB}	2.69±0.12 ^{abcAB}

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3.3 不同育苗基质对砧木幼苗干鲜质量、根冠比和壮苗指数的影响 从表 5 中可知, 不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗的干鲜质量、根冠比和壮苗指数有不同程度的影响。其中, T_2 、 T_3 和 T_4 的全株鲜质量均极显著高于 CK, 分别较 CK 增加 42.22%、47.24%和 41.59%; T_3 处理又极显著高于 T_1 、 T_5 ~ T_7 处理, 显著高于 T_8 处理; T_2 和 T_4 则极显著高于 T_5 ~ T_7 处理, 显著高于 T_1 和 T_8 处理, 其他处理间则差异不显著。全株干质量最大的是 T_4 , 极显著高于 CK 和 T_5 ~ T_7 处理, 较 CK 的全株干质量高 46.32%, 显著高于 T_8 处理; T_2 和 T_3 处理则极显著高于 CK 和 T_5 、 T_6 , 分别较 CK 增加 41.18%和 40.44%, 显著高于 T_7 和 T_8 ; T_1 极显著高于 T_5 , 而 T_8 则显著高于 T_5 , 其他处理间则无显著差异。 T_2 、 T_3 和 T_4 的地上部干质量极显著高于 CK 和 T_5 ~ T_7 , 分别较 CK 高 43.70%、44.54%和 47.06%, 显著高于 T_8 ; T_1 的地上部干质量极显著高于 T_5 , 而 T_8 则显著高于 T_5 , 其余处理间的差异则未达到显著性水平。地下部干质量以 T_4 最大, 且极显著

高于 T_5 , 剩余处理间的差异不显著。 T_5 处理的根冠比最大, 极显著高于 T_3 , 显著高于 T_1 和 T_2 ; 其次为 T_7 处理, 显著高于 T_1 ~ T_3 处理; T_6 处理则显著高于 T_2 和 T_3 ; CK 亦显著高于 T_3 , 其他处理间无显著差异。壮苗指数最大的是 T_4 为 0.106, 极显著高于 T_5 , 其余处理间则差异不显著。

2.3.4 不同育苗基质对砧木幼苗根系生长的影响 由表 6 可见, 不同育苗基质对海茄砧 1 号幼苗根系生长有显著或极显著的影响。主根长最长的是 T_1 为 26.45 cm, 显著高于 T_3 , 其他处理的主根长则差异不大。根平均直径为 0.28~0.37 cm, 其中 T_2 ~ T_5 极显著高于 T_1 , 显著高于 CK, 分别较 CK 高 20.88%、20.88%、19.78%和 19.78%, 其余处理间则无显著差异。根表面积最大的是 T_5 为 27.25 cm², 极显著高于 T_3 、 T_6 、 T_8 和 CK, 显著高于 T_1 ; 其次为 T_4 , 极显著高于 T_8 , 显著高于 T_6 和 CK; T_2 和 T_7 则显著高于 T_8 , 其他处理间的差异不明显。 T_4 处理的根体积极显著高于 T_1 、 T_8 和 CK, 较 CK 高 79.27%, 显著高于 T_6 ; T_5 则极

表 5 不同育苗基质对幼苗干鲜质量、根冠比和壮苗指数的影响

Tab. 5 Effects of different substrates on dry and fresh weight, root shoot ratio and strong seedling index of rootstock seedling

处理 Treatment	全株鲜质量 Whole plant fresh weight/g	全株干质量 Whole plant dry weight/g	地上部干质量 Shoot dry weight/g	地下部干质量 Root dry weight/g	根冠比 Root shoot ratio	壮苗指数 Strong seedling index
T ₁	5.91±0.36 ^{bBC}	0.54±0.01 ^{abABC}	0.48±0.01 ^{abAB}	0.06±0.01 ^{abAB}	0.13±0.02 ^{bcdAB}	0.081±0.011 ^{bAB}
T ₂	7.47±1.32 ^{aAB}	0.64±0.14 ^{aAB}	0.57±0.13 ^{aA}	0.07±0.01 ^{abAB}	0.12±0.02 ^{cdAB}	0.089±0.014 ^{abAB}
T ₃	7.73±0.44 ^{aA}	0.64±0.06 ^{aAB}	0.57±0.05 ^{aA}	0.06±0.01 ^{abAB}	0.12±0.01 ^{dB}	0.085±0.013 ^{abAB}
T ₄	7.43±0.16 ^{aAB}	0.66±0.02 ^{aA}	0.58±0.02 ^{aA}	0.08±0.01 ^{aA}	0.14±0.02 ^{abcdAB}	0.106±0.011 ^{aA}
T ₅	4.84±1.07 ^{bC}	0.36±0.09 ^{cD}	0.31±0.08 ^{cC}	0.05±0.01 ^{bB}	0.17±0.03 ^{aA}	0.067±0.013 ^{bB}
T ₆	5.21±0.30 ^{bC}	0.44±0.03 ^{bcCD}	0.38±0.02 ^{bcBC}	0.06±0.01 ^{bAB}	0.16±0.02 ^{abAB}	0.079±0.012 ^{bAB}
T ₇	5.51±0.53 ^{bC}	0.47±0.04 ^{bcCD}	0.40±0.03 ^{bcBC}	0.07±0.01 ^{abAB}	0.17±0.01 ^{aAB}	0.088±0.014 ^{abAB}
T ₈	6.02±0.18 ^{bABC}	0.49±0.02 ^{bABCD}	0.43±0.03 ^{bABC}	0.06±0.01 ^{bAB}	0.14±0.02 ^{abcdAB}	0.079±0.012 ^{bAB}
CK	5.25±0.18 ^{bC}	0.45±0.02 ^{bcCD}	0.40±0.02 ^{bcBC}	0.06±0.01 ^{bAB}	0.15±0.02 ^{abcAB}	0.078±0.010 ^{bAB}

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）；同列不同大写字母表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

表 6 不同育苗基质对砧木幼苗根系生长的影响

Tab. 6 Effects of different substrates on root growth of rootstock seedling

处理 Treatment	主根长 Main root length/cm	根平均直径 Average root diameter/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	根系活力 Root vigour/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
T ₁	26.45±1.20 ^a	0.28±0.01 ^{cB}	22.92±0.85 ^{bcdABC}	0.30±0.03 ^{cC}	1.26±0.14 ^{fF}
T ₂	20.39±1.36 ^{ab}	0.37±0.01 ^{aA}	23.79±1.80 ^{abcABC}	0.45±0.01 ^{abAB}	1.97±0.14 ^{efDEF}
T ₃	19.30±3.49 ^b	0.36±0.04 ^{aA}	22.10±2.04 ^{bcdBC}	0.46±0.06 ^{abAB}	3.61±0.97 ^{bB}
T ₄	21.67±1.67 ^{ab}	0.36±0.01 ^{aA}	25.60±2.26 ^{abAB}	0.49±0.05 ^{aA}	3.05±0.33 ^{bcBC}
T ₅	25.24±3.76 ^{ab}	0.37±0.05 ^{aA}	27.25±1.22 ^{aA}	0.47±0.08 ^{aAB}	2.83±0.09 ^{cdBCD}
T ₆	20.55±1.41 ^{ab}	0.34±0.02 ^{abAB}	21.20±1.92 ^{cdBC}	0.36±0.05 ^{bcABC}	2.26±0.22 ^{deCDEF}
T ₇	24.05±4.33 ^{ab}	0.34±0.03 ^{abAB}	24.46±2.59 ^{abcABC}	0.44±0.06 ^{abAB}	1.49±0.28 ^{feF}
T ₈	19.99±4.23 ^{ab}	0.32±0.02 ^{abcAB}	20.07±0.25 ^{dC}	0.34±0.04 ^{cBC}	2.39±0.07 ^{deCDE}
CK	24.09±4.31 ^{ab}	0.30±0.03 ^{bcAB}	21.29±2.12 ^{cdBC}	0.27±0.05 ^{cC}	5.01±0.16 ^{aA}

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）；同列不同大写字母表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different uppercase letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

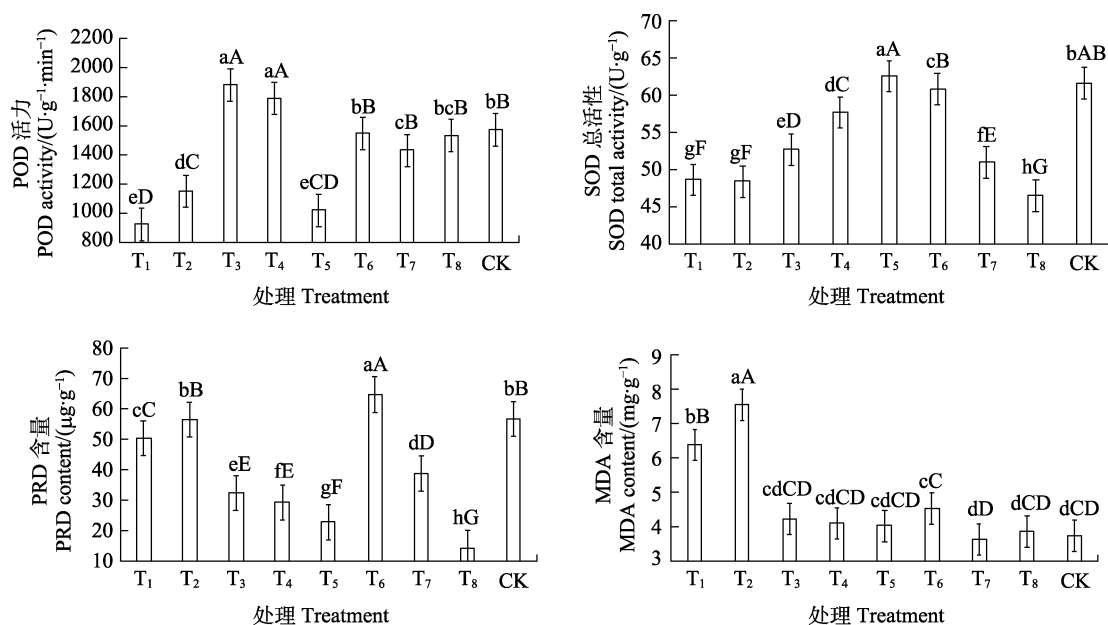
显著高于 T₁ 和 CK，较 CK 高 73.17%，显著高于 T₆ 和 T₈；T₂、T₃ 和 T₇ 亦极显著高于 T₁ 和 CK，显著高于 T₈，其余各处理间差异不显著。

2.4 不同育苗基质对砧木幼苗生理特性的影响

从表 6 中可知，各育苗基质的根系活力均低于 CK，且差异极显著，较 CK 低 28.01%~74.92%。其中 T₃ 则极显著高于 T₁、T₂ 和 T₆~T₈，显著高于 T₅；T₄ 则极显著高于 T₁、T₂ 和 T₇，显著高于 T₆；T₅ 极显著高于 T₁ 和 T₇，显著高于 T₂；T₈ 则极显著高于 T₁，显著高于 T₇；T₆ 显著高于 T₁ 和 T₇，其他处理间无显著差异。

如图 2 所示，各处理中海茄砧 1 号幼苗叶片 POD 活力最高的是 T₃，为 1881.7 U/(g·min)，其次为 T₄，为 1789.2 U/(g·min)，均极显著高于 CK 和其他处理；T₁ 的 POD 活力最低为 928.5 U/(g·min)，

极显著低于除 T₅ 外的其他各处理。SOD 总活性最高的是 T₅，为 62.47 U/g，极显著高于除 CK 外的其他各处理，显著高于 CK，最低的是 T₈，为 46.38 U/g，极显著低于其他各处理，总活性大小依次为 T₅>CK>T₆>T₄>T₃>T₇>T₁>T₂>T₈。各处理中 PRO 含量最高的是 T₆，为 64.96 μg/g，极显著高于其余处理，较 CK 高 14.36%，其次为 CK 和 T₂，分别为 56.80 μg/g 和 56.62 μg/g，极显著高于剩余处理，最低的是 T₈，为 14.10 μg/g，极显著低于其他各处理。各处理中 MDA 含量的高低为 T₂>T₁>T₆>T₃>T₄>T₅>T₈>CK>T₇，其中 T₂ 的 MDA 含量为 7.57 mg/g，极显著高于其他各处理；其次为 T₁ 为 6.40 mg/g，极显著高于剩余各处理；T₇ 的 MDA 含量最低，为 3.63 mg/g，极显著低于 T₆，而与其他各处理则差异不显著。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$); Different uppercase letters indicate extremely significant difference ($P < 0.01$).

图 2 不同育苗基质对砧木幼苗生理指标的影响

Fig. 2 Effects of different substrates on physiological characteristics of rootstock seedling

2.5 各指标的相关性分析

各育苗基质理化性状与海茄砧 1 号幼苗生长及生理指标的相关性见表 7。其中基质的容重与幼苗的根表面积呈极显著负相关, 与根冠比呈显著负相关。总孔隙度与持水孔隙度呈极显著正相关, 且二者均与 EC 值呈显著正相关, 但与通气孔隙度、PRO 含量呈显著负相关, 而通气孔隙度与出苗率呈显著负相关。基质的 pH 与 EC 值呈极显著正相关, 与 SOD 总活性呈极显著负相关, 而 EC 值与 SOD 总活性、PRO 含量均呈显著负相关。幼苗的株高与茎粗、全株干鲜质量以及地上部干质量彼此间均呈极显著正相关, 且均与根冠比呈极显著负相关。地下部干质量与茎粗、全株干鲜质量以及地上部干质量均呈显著正相关; 而壮苗指数则与全株干质量和地下部干质量呈极显著正相关, 与茎粗、全株鲜质量、地上部干质量呈显著正相关。根体积与根平均直径均呈极显著正相关, 与根表面积呈显著正相关。

2.6 不同育苗基质应用效果的综合性评价

为探究不同育苗基质对海茄砧 1 号应用效果的影响, 育苗结束期, 对各处理幼苗的 17 个生长、生理指标进行主成分分析。特征值大于 1 的因子共有 5 个, 累计贡献率达到 92.44%。从表 8 中可知, 第 1 主成分的特征值为 7.63, 方差贡献率为

44.89%, 主要因子包括株高、茎粗、全株干鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、根冠比、壮苗指数、主根长和 SOD 总活性。第 2 主成分的特征值为 3.12, 方差贡献率为 18.34%, 包含的主要因子分别为出苗率、根平均直径、根表面积和根体积。第 3 主成分的特征值为 2.51, 方差贡献率为 14.76%, 主要包括出苗率、根系活力和 POD 活力。第 4 主成分的特征值为 1.39, 方差贡献率为 8.18%, 地下部干质量和壮苗指数为主要因子。第 5 主成分的特征值为 1.07, 方差贡献率为 6.27%, 主要因子为 PRO 含量。从表 9 中可见, 排名前 3 的育苗基质处理是 T₄、T₃ 和 T₂, 综合得分分别为 0.969、0.606 和 0.570, 说明 T₂~T₄ 3 个育苗基质配比综合表现优良, 适宜海茄砧 1 号幼苗的培育, 其中 T₄ 的效果最佳。

3 讨论

基质的理化性质对蔬菜作物幼苗的生长发育有着重要作用^[20]。本研究结果发现将腐熟的椰糠、牛粪和商品育苗基质按一定比例混配后, 各处理的容重、总孔隙度、pH、EC 值、全氮、全钾和有效磷含量等指标基本均在育苗基质的理想值范围内, 理化性质较适宜。且添加椰糠或牛粪的育苗基质容重较 CK 基本呈现变小的趋势, 而

表 7 育苗基质理化性质与砧木幼苗生长及生理指标的相关性
Tab. 7 Correlation among physical and chemical properties of seedling substrate and growth and physiological indexes of rootstock seedlings

指标 Index	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀
X ₁	1.000																			
X ₂	-0.398	1.000																		
X ₃	-0.430	0.994**	1.000																	
X ₄	0.509	-0.709*	-0.781*	1.000																
X ₅	0.170	0.657	0.609	-0.181	1.000															
X ₆	-0.047	0.778*	0.744*	-0.361	0.953**	1.000														
X ₇	-0.475	0.319	0.396	-0.736*	-0.134	-0.018	1.000													
X ₈	0.426	-0.105	-0.096	0.021	0.114	0.002	0.402	1.000												
X ₉	0.491	0.099	0.080	0.046	0.466	0.342	0.163	0.889**	1.000											
X ₁₀	0.331	0.246	0.218	0.003	0.418	0.327	0.189	0.844**	0.937**	1.000										
X ₁₁	0.372	0.104	0.083	0.055	0.373	0.251	0.187	0.890**	0.963**	0.971**	1.000									
X ₁₂	0.409	0.075	0.052	0.092	0.365	0.235	0.168	0.902**	0.966**	0.970**	0.998**	1.000								
X ₁₃	-0.028	-0.014	-0.015	0.013	0.179	0.137	0.189	0.610	0.707*	0.698*	0.794*	0.768*	1.000							
X ₁₄	-0.676*	-0.065	-0.033	-0.161	-0.469	-0.291	-0.071	-0.844**	-0.881**	-0.827**	-0.824**	-0.849**	-0.342	1.000						
X ₁₅	0.023	0.032	0.032	-0.021	0.211	0.170	0.138	0.593	0.715*	0.717*	0.804**	0.777*	0.988**	-0.352	1.000					
X ₁₆	-0.448	0.500	0.503	-0.395	-0.060	0.097	0.407	0.150	0.175	0.422	0.266	0.239	0.275	0.029	0.286	1.000				
X ₁₇	-0.841**	0.239	0.257	-0.293	-0.275	-0.143	0.555	-0.028	-0.221	0.004	-0.028	-0.049	0.216	0.330	0.146	0.500	1.000			
X ₁₈	-0.593	0.619	0.625	-0.502	0.073	0.215	0.545	0.215	0.222	0.481	0.361	0.328	0.411	-0.014	0.409	0.920**	0.703*	1.000		
X ₁₉	-0.265	-0.440	-0.411	0.139	-0.886**	-0.771*	-0.067	-0.334	-0.599	-0.452	-0.473	-0.471	-0.261	0.606	-0.248	0.194	0.296	0.044	1.000	
X ₂₀	0.361	-0.725*	-0.695*	0.346	-0.564	-0.725*	0.016	0.205	0.045	-0.119	0.013	0.026	0.044	-0.040	0.002	-0.275	-0.257	-0.399	0.188	1.000

注：X₁~X₂₀分别表示容重、总孔隙度、持水孔隙度、通气孔隙度、pH、EC 值、出苗率、株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、地上部干质量、地下部干质量、根冠比、壮苗指数、根平均直径、根表面积、根体积、SOD 总活性和 PRO 含量。*表示显著相关（ $P<0.05$ ）；**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Note: X₁~X₂₀ indicate bulk density, total porosity, water-holding porosity, aeration porosity, pH, EC, germination rate, plant height, stem diameter, fresh weight, dry weight, shoot dry weight, dry weight of the root, root shoot ratio, strong seedling index, average root diameter, root surface area, root volume, SOD activity and PRO content respectively. * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 8 砧木幼苗生长、生理指标的主成分分析
Tab. 8 Principal component analysis of growth and physiological indexes in rootstock seedlings

指标 Index	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
出苗率	0.19	0.61	-0.68	-0.03	0.18
株高	0.90	0.12	-0.12	0.11	0.29
茎粗	0.99	0.00	0.01	0.13	-0.06
全株鲜质量	0.92	0.26	0.12	0.16	-0.12
全株干质量	0.94	0.13	0.06	0.30	-0.02
地上部干质量	0.94	0.10	0.07	0.27	0.00
地下部干质量	0.61	0.19	0.05	0.73	-0.02
根冠比	-0.92	0.16	0.05	0.16	0.01
壮苗指数	0.62	0.18	0.15	0.71	-0.06
主根长	-0.62	-0.25	-0.48	0.38	0.22
根平均直径	0.17	0.93	0.20	-0.06	-0.13
根表面积	-0.28	0.71	-0.35	0.45	0.04
根体积	0.19	0.92	-0.04	0.18	-0.23
根系活力	-0.12	-0.05	0.86	-0.02	0.21
POD 活力	0.30	0.10	0.86	0.11	-0.19
SOD 总活性	-0.59	0.34	0.45	0.05	0.54
PRO 含量	0.11	-0.27	-0.06	-0.03	0.85
特征值	7.63	3.12	2.51	1.39	1.07
方差贡献率/%	44.89	18.34	14.76	8.18	6.27
累计贡献率/%	44.89	63.23	77.99	86.17	92.44

表 9 砧木幼苗生长、生理指标的主成分综合得分
Tab. 9 Principal component composite scores of growth and physiological indexes in rootstock seedlings

排名 Rank	处理 Treatment	综合得分 Comprehensive score	主成分 Principal component				
			PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1	T ₄	0.969	1.341	0.935	0.741	1.011	-1.092
2	T ₃	0.606	1.112	-0.333	0.910	-0.803	0.807
3	T ₂	0.570	1.175	0.257	-0.775	0.064	0.984
4	T ₆	-0.129	-0.563	-0.150	0.214	0.466	1.446
5	T ₇	-0.241	-0.472	0.628	-0.145	-0.147	-1.459
6	T ₅	-0.347	-1.462	1.727	0.162	-0.483	0.535
7	T ₈	-0.468	-0.113	-1.022	0.074	-1.962	-0.758
8	T ₁	-0.472	-0.076	-0.564	-2.207	0.547	-0.235
9	CK	-0.487	-0.942	-1.478	1.026	1.307	-0.229

持水孔隙度呈现变大的趋势，这与徐达等^[21]和魏一苗^[12]的研究结果不一致，可能与基质的种类及配比不同有关。添加椰糠或牛粪的育苗基质的 pH 和 EC 值有不同程度的提高，这与王保平等^[14]和张颖等^[22]的研究结果一致，但大多数处理的 pH 仍低于作物生长适宜的范围 5.8~7.0^[23]，这可能是因为商品育苗基质过酸，配比不合理导致。添加椰糠或牛粪的育苗基质的全氮、全磷和碱解氮含

量有差异，主要是因为椰糠的全氮、全磷、碱解氮含量均低于 CK，而牛粪的全氮、全磷和碱解氮含量则均高于 CK，混配比例不同所致。各处理的全钾、有效磷和速效钾含量均高于 CK，这是因为椰糠和牛粪的全钾、有效磷和速效钾含量均高于 CK。

株高和茎粗是直观反映幼苗生长健康状况的形态学指标，也能体现育苗基质是否适合幼苗生

长需求^[14, 24]。本研究表明,株高和茎粗均随着育苗天数的延长而增大,但生长速率和茎粗增幅均呈现先增加后降低的趋势,这与刘衍晨等^[25]和贾湘璐等^[17]的报道一致。育苗结束期,各处理的株高和茎粗均存在较大差异,其中 $T_2 \sim T_4$ 极显著高于 CK,说明育苗基质混配合理,养分含量适宜,能促进砧木幼苗的生长发育,达到壮苗培育的目的。

根冠比主要反映幼苗地上部、地下部干物质积累的比例,而壮苗指数则是评判幼苗素质的指标,数值越大,幼苗越健壮^[26]。本研究结果表明, T_5 和 T_7 的根冠比较其他处理大,说明其根系生长较好。壮苗指数以 T_4 处理最大,显著高于 CK,说明适当添加椰糠和牛粪,有利于促进砧木幼苗干物质的积累,提高幼苗质量^[12, 27]。

根系是植株吸收水分和养分的重要器官,而根系活力则反映幼苗根系的生长状态^[28]。研究结果表明,不同育苗基质对砧木幼苗的主根长影响不大,但根平均直径、根表面积、根体积和根系活力则存在显著或极显著差异,适当增加椰糠或牛粪可促进根平均直径、根表面积和根体积,但根系活力则明显降低。这与刘衍晨等^[25]的结果不一致,可能由于复配育苗基质的通气孔隙度均较小,而持水孔隙度均较大,气水比(基质的大小孔隙比)均小于育苗基质的理想值,影响了根系的正常呼吸^[29],导致根系活力明显低于对照处理。

POD、SOD 和 PRO 决定了植物生理状况和对逆境环境的适应程度,是一种重要的植物逆境保护指标^[17]。其中,POD 活性最高的是 T_3 ,其次为 T_4 ,二者均极显著高于 CK,而 T_1 的活性最低。说明 T_3 和 T_4 能很好地抵御外部环境胁迫,有利于砧木幼苗生长。SOD 总活性最低的是 T_8 ,其次是 T_2 ,均极显著低于 CK,而 T_5 的 SOD 总活性最高,显著高于 CK,说明 T_8 处理配比不合理,不利于幼苗生长。PRO 是反映幼苗抗逆性的一个生理指标,抗逆性越强的处理,其含量越高。本研究中 PRO 含量最高的是 T_6 ,极显著高于 CK;其次为 CK,极显著高于除 T_2 外的其他处理,最低的亦是 T_8 ,说明 T_8 的抗逆性水平较低。MDA 是反映机体抗氧化潜在能力的重要参数,可以反映机体脂质过氧化速率和强度,也能间接反映组织过氧化损伤程度^[19]。其含量越高,说明其氧化损伤程度越大。该研究中 T_2 的 MDA 含量最高,其次为 T_1 ,二者均极显著高于 CK,说明这 2 个

基质配方不太适宜砧木幼苗的培育。

相关性分析表明,不同育苗基质的理化性质、幼苗生长指标和生理指标间均呈不同程度的相关性,且部分性状间的差异达到显著或极显著水平。添加椰糠或牛粪的育苗基质,其总孔隙度、持水孔隙度、pH 和 EC 值均有所升高,而容重和通气孔隙度则有所降低,说明为适合砧木幼苗健康生长,椰糠或牛粪需添加适宜。

根据主成分法,综合评判了不同育苗基质对砧木幼苗生长、生理特性及生物量等指标的影响。根据主成分综合得分排名,依次为 $T_4 > T_3 > T_2 > T_6 > T_7 > T_5 > T_8 > T_1 > CK$ 。综上所述,在复配的 8 个育苗基质中, T_4 (椰糠:牛粪:商品育苗基质为 3:1:6) 的育苗效果最佳,为海南省樱桃番茄砧木幼苗的培育提供参考。

参考文献

- [1] 田华,汪金萍,王远. 圣女果品质特征及检测技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 204-209.
TIAN H, WANG J P, WANG Y. Research progress on quality detection of cherry tomatoes[J]. Food Research and Development, 2018, 39(11): 204-209. (in Chinese)
- [2] 伍壮生,李雪娟,吴月燕,王小娟,高芳华. 海南樱桃番茄生产现状及发展瓶颈分析[J]. 中国蔬菜, 2018(5): 98-100.
WU Z S, LI X Q, WU Y Y, WANG X J, GAO F H. Analysis on cherry tomato production status and development bottleneck in Hainan[J]. China Vegetables, 2018(5): 98-100. (in Chinese)
- [3] 刘明池,季延海,武占会,何伟明. 我国蔬菜育苗产业现状与发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2018(11): 1-7.
LIU M C, JI Y H, WU Z H, HE W M. China's vegetable seedling industry status and development trend[J]. China Vegetables, 2018(11): 1-7. (in Chinese)
- [4] 段誉,裴希谦,田靖,赵维林,赵朔阳,王志伟. 不同育苗基质对辣椒幼苗生长发育的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(11): 1051-1055.
DUAN Y, PEI X Q, TIAN J, ZHAO W L, ZHAO S Y, WANG Z W. Effects of seedling substrates on the growth and development of chili seedlings[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2023, 2(11): 1051-1055. (in Chinese)
- [5] 冯雪锋,许雷,张梦恩,刘慧聪,张志芳. 不同配比育苗基质对番茄幼苗生长的影响[J]. 农业研究与应用, 2021, 34(4): 73-78.
FENG X F, XU L, ZHANG M E, LIU H C, ZHANG Z F. Effects of different substrate proportions on tomato seedlings growth[J]. Agricultural Research and Application, 2021,

- 34(4): 73-78. (in Chinese)
- [6] 张爽, 郑安旺, 刘涛, 晏磊. 以玉米秸秆为主料的番茄育苗基质配方优化[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(19): 138-145. ZHANG X, ZHENG A W, LIU T, YAN L. Optimization of tomato seedling substrate formulation using corn stover as the main material[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(19): 138-145. (in Chinese)
- [7] 牛先前, 林秀香, 郑涛, 许茹, 陈振东. 不同育苗基质对番茄出芽率及生长指标的影响[J]. 农业研究与应用, 2020, 33(6): 12-16. NIU X Q, LIN X X, ZHENG T, XU R, CHEN Z D. Effects of different seedling media on germination rate and growth index of tomato[J]. Agricultural Research and Application, 2020, 33(6): 12-16. (in Chinese)
- [8] 邹宜静, 王光锋, 任国华, 颜韶兵, 朱徐燕, 黄凯美. 不同商品基质对番茄和茄子育苗的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(10): 1830-1832, 1836. ZOU Y J, WANG G F, REN G H, YAN S B, ZHU X Y, HUANG K M. Effects of different commercial substrates on tomato and eggplant seedling[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(10): 1830-1832, 1836. (in Chinese)
- [9] 徐昱松, 宫彬彬, 吴晓蕾, 李敬蕊, 高洪波. 育苗基质喷施海藻肥对番茄幼苗生长的影响[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(4): 32-36. XU Y S, GONG B B, WU X L, LI J R, GAO H B. Effects of spraying seaweed fertilizer on the growth of tomato seedlings[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2022, 45(4): 32-36. (in Chinese)
- [10] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. GUO S R. Soilless culture[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [11] 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. LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 魏一苗. 不同废弃物基质化对黄瓜育苗应用效果探究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. WEI Y M. Study on the application of different waste substrates in cucumber seedling cultivation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [14] 王保平, 周静, 史向远, 李欣欣, 王秀红, 董晓燕. 不同配比杏鲍菇渣基质对西瓜生长及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2021(21): 8-15. WANG B P, ZHOU J, SHI X Y, LI X X, WANG X H, DONG X Y. Effects of different proportion of *Pleurotus eryngii* residue substrates on growth and photosynthetic characteristics of watermelon[J]. Northern Horticulture, 2021(21): 8-15. (in Chinese)
- [15] 吴海风. 不同物料配比基质对番茄和茄子幼苗生长及养分积累的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023. WU H F. Effects of substrates with different material ratios on the growth and nutrient accumulation of tomato and eggplant seedlings[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [16] 何亚飞, 季延海, 张彦萍, 武占会, 刘明池. 不同植物生长调节剂对穴盘茄子幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(31): 46-53. HE Y F, JI Y H, ZHANG Y P, WU Z H, LIU M C. Effects of different plant growth regulators on eggplant growth of plug seedling[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(31): 46-53. (in Chinese)
- [17] 贾湘璐, 欧阳子龙, 刘佳哲, 樊东函, 滕维超, 石景忠, 刘秀. 不同基质对红海榄幼苗生长生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(8): 21-29. JIA X L, OUYANG Z L, LIU J Z, FAN D H, TENG W C, SHI J Z, LIU X. Effects of different substrates on growth and physiological characteristics of *Rhizophora stylosa* seedlings[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(8): 21-29. (in Chinese)
- [18] LIU Y, ZHANG J. Lanthanum promotes *Bahia grass* (*Paspalum notatum*) roots growth by improving root activity, photosynthesis and respiration[J]. Plants, 2022, 11(3): 382.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. GAO J F. Plant physiology lab guide[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [20] 王攀磊, 郭玉蓉, 李向东, 姚照兵, 潘艳华. 多种原料基质配方的多元分析方法应用研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2652-2660. WANG P L, GUO Y R, LI X D, YAO Z B, PAN Y H. Application of multivariate analysis method on substrate formulation containing various components[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(11): 2652-2660. (in Chinese)
- [21] 徐达, 闫航, 胡佳未, 张金鑫, 王军伟, 黄科. 育苗基质配比及育苗方式对辣椒成苗的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(6): 1370-1384. XU D, YAN H, HU J W, ZHANG J X, WANG J W, HUANG K. Effect of seedling substrate ratio and seedling raising method on pepper seedling[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(6): 1370-1384.

- (in Chinese)
- [22] 张颖, 牟森, 张金梅, 白雪, 王虹. 不同配比菇渣基质对黄瓜产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(11): 1-5.
ZHANG Y, MOU S, ZHANG J M, BAI X, WANG H. Effect of different ratio of mushroom residue mixture on the cucumber yield and quality[J]. Northern Horticulture, 2019(11): 1-5. (in Chinese)
- [23] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊 1): 1-4.
GUO S R. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Suppl. 1): 1-4. (in Chinese)
- [24] 赵江涛, 李晓峰, 李航, 徐睿忝. 可溶性糖在高等植物代谢调节中的生理作用[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(24): 6423-6425, 6427.
ZHAO J T, LI X F, LI H, XU R W. Research on the role of the soluble sugar in the regulation of physiological metabolism in higher plant[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(24): 6423-6425, 6427. (in Chinese)
- [25] 刘衍晨, 刘志刚, 白新慧, 乔鹏, 徐诚, 白慧敏, 张娟. 蛭石复混基质对辣椒育苗的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(5): 1190-1199.
LIU Y C, LIU Z G, BAI X H, QIAO P, XU C, BAI H M, ZHANG J. The effect of vermiculite compound matrix on pepper seedling cultivation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(5): 1190-1199. (in Chinese)
- [26] 张颖. 不同基质对比对容器大叶女贞苗生长与生理指标影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
ZHANG Y. Studies on effect of different media on growth and physiological parameters of *Ligustrum lucidum* Ait. container seedlings[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [27] 杨延杰, 赵康, 陈宁, 林多. 不同基质理化性状对春季番茄幼苗生长及根系形态的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(7): 125-131.
YANG Y J, ZHAO K, CHEN N, LIN D. Effect of different substrate physicochemical properties on growth and root morphology of tomato plug-seedling in spring[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(7): 125-131. (in Chinese)
- [28] 石玉, 曹森, 刘嘉兴, 陈志杰, 张毅. 不同基质对比对番茄幼苗生长的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1129-1134.
SHI Y, CAO S, LIU J X, CHEN Z J, ZHANG Y. Effects of different substrate ratios on the growth of tomato seedlings[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2019, 60(7): 1129-1134. (in Chinese)
- [29] 王新右. 蔬菜栽培与基质理化性状的关系探讨[J]. 现代农业科技, 2018(13): 76-77.
WANG X Y. Discussion on relationship between substrate physicochemical properties and vegetable cultivation[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(13): 76-77. (in Chinese)