

苏 开,王利春,郭文忠,等. 设施短程番茄栽培模式差异化比较及效益评估[J]. 江苏农业科学,2023,51(21):154-161.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.21.024

设施短程番茄栽培模式差异化比较及效益评估

苏 开^{1,2}, 王利春², 郭文忠², 范凤翠³, 陈晓丽², 崔金霞¹

(1. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003; 2. 北京市农林科学院北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100089;
3. 河北省农林科学院农业信息与经济研究所, 河北石家庄 050000)

摘要:为了比较不同模式短程栽培番茄生产表现,探索一种适合我国北方地区简易设施结构下番茄高效生产的短程栽培模式,以番茄丰收 74-560 RZ F1 为材料,设置 3 个试验处理,即土壤栽培(S)、岩棉栽培(R)和水培(H),分析短程栽培 3 种模式对番茄生长发育、产量品质、水分利用和经济效益的影响,并且利用主成分分析法对不同短程栽培模式进行综合评价。结果表明,R 处理能够明显增加番茄株高、茎粗、单株叶面积、叶片数,其地上部分干物质积累量与 S、H 处理相比显著提高 86.12%、42.45%。水培可以改善番茄的品质,提高水分利用效率,其中可溶性固形物、维生素 C 含量最高,比 R 处理显著高出 40.18%、29.37%,比 S 处理显著高出 22.19%、27.40%,水分利用效率比 R、S 处理显著高出 5.53%、22.78%。在试验中,R、H 处理与 S 处理相比单株产量均表现为增产,通过产量和成本计算利润,H 处理单位面积利润最高,分别是 R、S 处理的 7.70、1.53 倍,净利润为 38.692 元/m²。进一步对番茄的主要指标进行主成分分析,其中 H 处理的综合得分最高,通过综合得分发现短程水培番茄模式具有较好的推广价值。

关键词:番茄;栽培模式;短程栽培;品质;效益;综合评价

中图分类号:S641.204 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)21-0154-08

番茄(*Solanum lycopersicum*)富含类胡萝卜素、维生素、番茄红素等物质,是设施栽培主要作物之一^[1-4]。我国的设施番茄生产大多以大棚和日光温

室为主,其结构较为简陋且环境调控存在局限性,特别是大棚不具备保温蓄热功能,温度调控能力差,不利于作物越冬^[5],此外,日光温室也存在环控装备条件差等缺点,均会对作物周年高效生产造成不利影响^[6]。因此,目前针对国内简易设施结构,短程栽培番茄具有广泛的应用前景,它有以下特点:植株收获 1~4 穗果实、栽培周期短(70~100 d)、实现全年多茬栽培^[7-8]。

我国设施番茄栽培以土壤为主,但是由于较大的水肥投入和高复种指数导致土壤次生盐渍化、土传病虫害频发等问题,制约了设施农业可持续发展。而基质栽培利用人工基质种植蔬菜,摆脱了对

收稿日期:2023-02-04

基金项目:现代农业产业技术体系北京市创新团队项目(编号:BAIC08-2022);北京市农林科学院青年科研基金(编号:QNJ202119);北京市乡村振兴科技项目(编号:20220716);河北省重点研发计划(编号:21327005D)。

作者简介:苏 开(1999—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为农艺与种业。E-mail:898432993@qq.com。

通信作者:崔金霞,博士,教授,主要从事蔬菜作物抗逆机理研究。E-mail:Jinxiacui77@163.com。

214-217.

[53] Rothpfeffer C, Karlton E. Inorganic elements in tree compartments of *Picea abies*—Concentrations versus stem diameter in wood and bark and concentrations in needles and branches[J]. Biomass & Bioenergy, 2007, 31(10): 717-725.

[54] Zhu Y, Christakos G, Wang H, et al. Distribution, accumulation and health risk assessment of trace elements in *Sargassum fusiforme*[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 174(11): 31-55.

[55] Wu H X, Wu F B, Zhang G P, et al. Effect of cadmium on uptake and translocation of three microelements in cotton[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 27(11): 2019-2032.

[56] Rivelli A R, de Maria S, Puschenreiter M, et al. Accumulation of

cadmium, zinc, and copper by *Helianthus annuus* L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements[J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, 14(4): 320-334.

[57] 廉晓娟, 王 艳, 梁新书, 等. 不同施肥水平对设施番茄中微量元素吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(16): 197-200

[58] Lordkaew S, Dell B, Jamjod S, et al. Boron deficiency in maize[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1): 207-220.

[59] Ishka M R, Vatamaniuk O K. Copper deficiency alters shoot architecture and reduces fertility of both gynoecium and androecium in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant Direct, 2020, 4(11): 1-18.

[60] 张家春, 张珍明, 刘盈盈, 等. 高海拔地区土壤-党参系统微量元素富集特征[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 450-453.

土壤的依赖,从而避免了土壤栽培的局限性。何诗行等发现,在设施短程栽培番茄中,水培植株生长更健壮,品质更好,产量较土壤栽培显著增加^[9]。刘中良等发现,基质栽培较土壤栽培能明显提高番茄维生素 C 和番茄红素含量,有效增加产量、改善果实品质,提高经济效益,但基质栽培存在成本较高、废旧基质回收压力大等问题,因此推广受到限制^[10]。水培直接将作物种植在营养液中,节约了购买基质的成本,目前已广泛应用于叶菜生产^[11],在果菜上的应用还有待研究。此外,Verdoliva 等比较了土壤栽培、岩棉栽培以及深液流水培 3 种栽培模式番茄的水肥利用率,发现水培比土壤栽培的植株水分利用率高^[12],但并未对这 3 种栽培模式的其他指标进行综合评价。鉴于水培模式的诸多优势,探索我国北方地区短程栽培番茄适宜生产模式,对于设施农业番茄生产节本增效具有重要意义。

以往的研究中,试验处理设置一方面与实际生产管理施肥策略不符,另一方面针对设施番茄短程栽培下主要栽培模式效益评估的研究鲜有报道。因此,本试验旨在对短程栽培模式下土壤栽培、岩棉栽培以及水培番茄的生长发育、产量品质、水分利用、经济效益等进行综合评估,选出收益最优的短程栽培模式,进而为我国北方地区低端设施结构下番茄高效生产提供栽培依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2022 年 3—7 月在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地日光温室进行。供试番茄品种为丰收 74-560 RZ F1,中早熟、中大型果。试验设置 3 个处理,分别是土壤栽培(S)、岩棉栽培(R)、水培(H),每个处理 3 个独立的栽培槽(S:长、宽、高分别为 100、18、30 cm;R:常规岩棉栽培槽;H:长、宽、高分别为 100、20、20 cm),每个栽培槽种植 3 株。试验于 2022 年 3 月 30 日定植,定植株距为 35 cm,行距为 100 cm,定植时番茄 6 叶 1 心,4 穗果打顶。

在栽培槽中各安装 1 个三参数传感器(GS3, METER GROUP, Inc, 美国),用来监测各处理番茄根区介质温度、电导率以及含水量,并将栽培槽放在自主研发的称重系统上(WTS-300),通过称重传感器记录的数据来计算各处理番茄的水分利用效率^[13]。

1.1.1 土壤栽培 将风干土过 2 mm 筛后,按照 1.4 g/cm³ 的设计容重分层填装(田间持水量为 0.31 cm³/cm³),每隔 5 cm 铺 1 层土,然后压实,逐层打出毛面填装到长、宽、高分别为 100、18、30 cm 的栽培槽中,土壤的基本理化性质见表 1 和表 2。

表 1 供试土壤组成粒径

项目	粒径(Φ)范围	占比(%)
粗沙粒	0.250 mm $\leq \Phi <$ 2.000 mm	2.98
细沙粒	0.050 mm $\leq \Phi <$ 0.250 mm	15.90
细沙粒	0.020 mm $\leq \Phi <$ 0.050 mm	29.84
粉粒	0.002 mm $\leq \Phi <$ 0.020 mm	28.40
黏粒	$\Phi <$ 0.002 mm	22.80

表 2 供试土壤基本理化性质

指标	测定值
EC(mS/m)	42.4
pH 值	8.08
全氮含量(g/kg)	1.38
全磷含量(g/kg)	0.62
全钾含量(g/kg)	18.1
有机质含量(g/kg)	20.5
碱解氮含量(mg/kg)	114
有机磷含量(mg/kg)	66.8
速效钾含量(mg/kg)	180

土壤栽培处理采用滴灌方式进行灌溉,灌溉量依据 Li 等的研究^[14-15],即定植后当作物根区土壤体积含水量低于田间持水量的 75% 时,开始进行灌溉,灌水量为

$$I = 10 \times p \times (\theta_1 - \theta_2) \times H_0 \times S。 \quad (1)$$

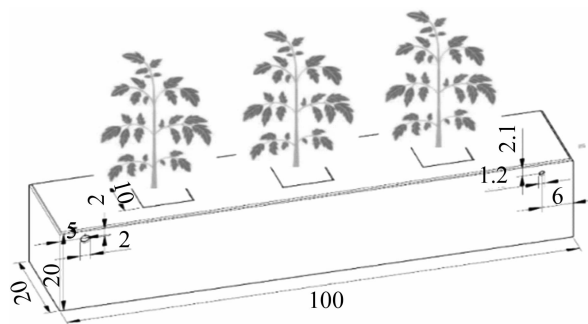
式中: I 为灌溉量,mm; p 为土壤湿润比,取值为 1; H_0 为湿润土层深度,25 cm; θ_1 为灌溉上限,即田间持水量的 90%; θ_2 为湿润土层的实际体积含水量; S 是栽培槽面积,m²。

定植前每个栽培槽施加鸡粪 200 g (1 111 kg/hm²),定植后每隔 7 d 施肥 1 次,肥料采用 18-18-18 的均衡型水溶肥,每个栽培槽每次的施肥量为 3.24 g (180 kg/hm²),将水溶肥溶解在水中,随水施入^[16-17]。整个生育期共进行 10 次施肥,以满足番茄的需肥量。

1.1.2 岩棉栽培 试验采用 SPLAND 岩棉条(容重:0.053 g/cm³,饱和持水量:0.880 0 cm³/cm³,最大持水量:0.934 4 cm³/cm³),在番茄移栽前 2 d 用 EC 为 1.6 mS/cm 的山崎配方营养液浸泡岩棉条

24 h。番茄生长过程中将营养液的 EC 调整至 (2.0 ± 0.2) mS/cm, pH 值为 6.0 ± 0.3 , 采用滴灌的方式进行灌溉, 滴灌速度为 40 mL/min^[18], 分别在每天 07:30、10:30、13:30、15:30、17:30 时灌溉, 共计 5 次^[19]。保证每天回液量约为灌溉量的 25%, 在保证番茄水分充足供应的同时, 充分淋洗根区富集的盐分^[20]。

1.1.3 水培 水培番茄种植在长、宽、高分别为 100、20、20 cm 的水培槽中, 如图 1 所示, 右侧圆孔为进液口, 左侧圆孔为回液口。营养液为山崎营养液, 营养液保持 EC 为 (2.0 ± 0.2) mS/cm, pH 值为 6.0 ± 0.3 ^[19], 采用潜水泵进行循环, 并且需要增加一个曝气设备, 每天在 07:00—19:00 的时间段内进行营养液循环曝气。



图中标注数据单位均为 cm

图1 水培槽立体图

1.2 测定项目

1.2.1 植株生长指标 每 7 d 测定 1 次植株生长指标, 用卷尺测量株高, 游标卡尺测量茎粗, 统计叶片数, 然后用 SPAD-502 便携式叶绿素仪测定叶绿素含量 (SPAD 值), 拉秧后用直尺测量叶长与叶宽, 叶面积计算公式^[21]如下:

$$LA = 0.347 \times L \times W - 10.7. \quad (2)$$

式中: LA 为叶面积, cm^2 ; L 为叶长, cm ; W 为叶宽, cm 。

拉秧后, 将茎、叶、果分开放进烘箱 105°C 杀青 30 min, 然后 85°C 烘干至恒质量, 测定生物量。

1.2.2 果实产量和品质 番茄果实采收后, 用电子天平测量各处理番茄果实单果质量, 统计单株果质量以及总产量。先用游标卡尺测量果实中最大的纵径 (H) 和横径 (D), 果形指数按照纵径/横径 (H/D) 计算, 可分为圆形 ($H/D = 0.86 \sim 1.00$)、扁圆形 ($H/D = 0.71 \sim 0.85$)、扁平形 ($H/D \leq 0.70$)、长圆形 ($H/D \geq 1.01$)^[22]。水果硬度用手持 GY-1 型果实硬度计进行测量, 有机酸含量用酸碱滴定法^[23]测定, 维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[23]

测定, 可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[24]测定, 硝酸盐含量采用紫外分光光度法^[25]测定, 可溶性固形物含量用手持折光仪测定。

1.2.3 水分利用效率 利用称重系统采集的数据计算每个处理下番茄的总耗水量, 并用于计算水分利用效率 (WUE)。水分利用效率计算公式^[26]如下:

$$WUE = Y/G. \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率, g/kg ; Y 为单株果实鲜质量, 根据称重系统采集的数据计算, g ; G 为单株耗水量, kg 。

1.3 经济分析

在番茄生长的整个生育期, 记录与产量相关的数据, 并且通过生产调研收集投入与产出数据, 包括种子费、肥料、劳动力、设备、农药等, 本试验仅对其差异化进行比较, 各处理成本相同不予考虑, 同时成本和收益折算为单位生产面积的成本和收益。

1.3.1 肥料投入 肥料包括土壤栽培定植前基肥 (鸡粪)、追施水溶肥 (定时定量施加) 以及岩棉、水培消耗的营养液量 (通过称重系统测定)。

1.3.2 劳动力 劳动力价格为 18.75 元/(人·h), 相关农事操作有定植、吊蔓、喷药、整枝打杈、采收、拉秧。个别处理的作业环节: 土壤起垄, 安装岩棉槽, 安放岩棉条、块, 清洗水培槽。

1.3.3 农药 使用相同的农药有 75% 百菌清、5% 阿维菌素、露娜森。土壤栽培处理病虫害较多, 需进行额外喷药, 有 10% 噻唑膦、呋虫胺、恶霉灵、青枯立克。

1.3.4 用电量 土壤栽培和岩棉栽培生产上采用功率为 0.55 kW 的水泵抽取营养液进行灌溉, 水培生产上采用功率为 40 W 的潜水泵和功率为 180 W 的曝气设备, 然后计算设备用电量, 公式为

$$\text{用电量} = \text{功率} / 1000 \times \text{时间}. \quad (4)$$

1.4 主成分分析

番茄的经济收益受其产量和品质共同影响, 因此选用产量、可溶性固形物含量、糖酸比、水分利用效率、硝酸盐含量、维生素 C 含量、有机酸含量和可溶性糖含量这 8 个指标进行主成分分析, 对不同栽培模式进行计算, 依据得分情况筛选一种综合评价最优的栽培模式。

1.5 数据分析

利用 WPS Office 和 SPSS 25 进行数据整理、单变量方差分析和主成分分析, 数据表示为“平均

值 ± 标准差”,利用 Origin 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同模式短程栽培番茄的生长指标

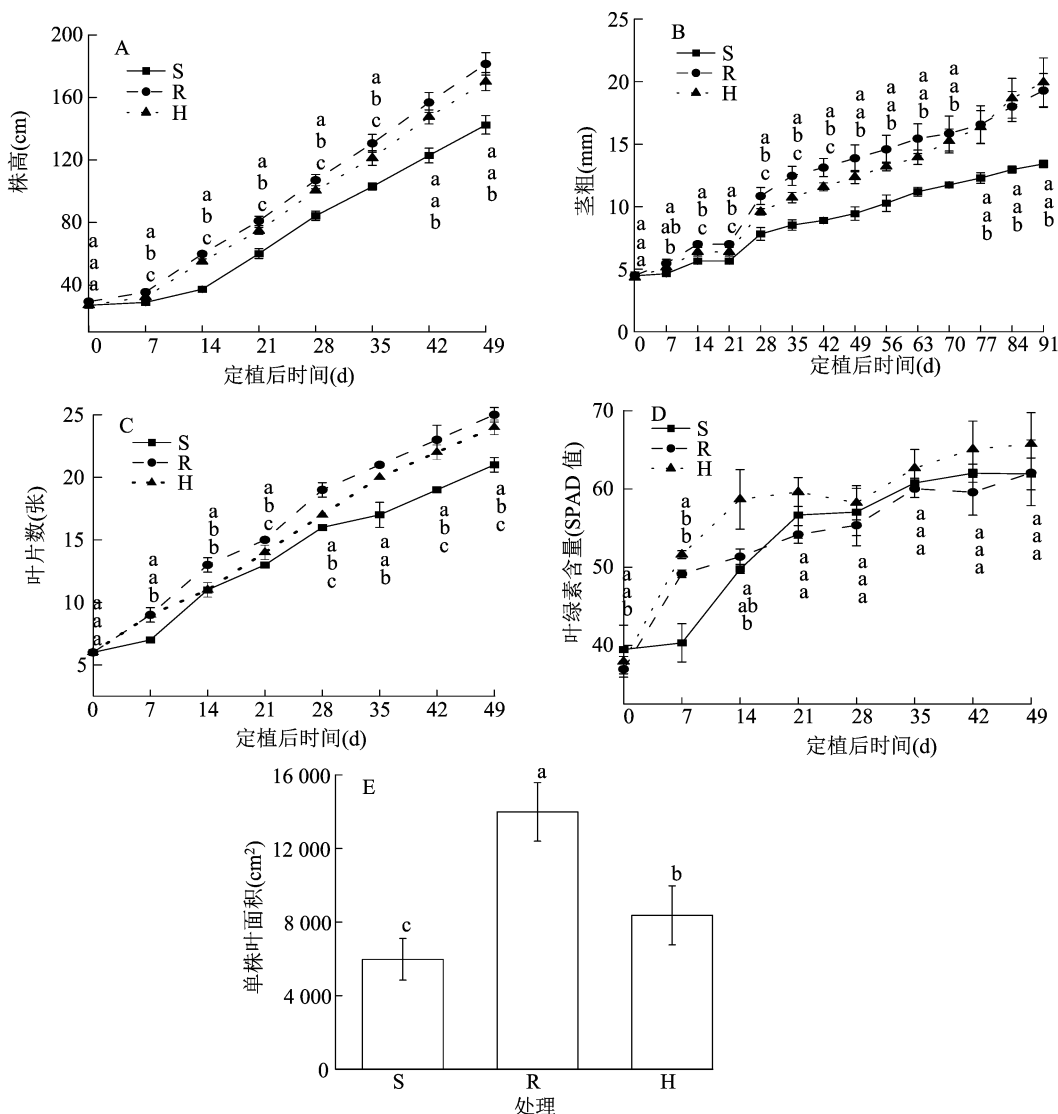
由图 2 可知,番茄定植后株高、茎粗以及叶片数随着番茄生长均在增加,不同栽培模式之间生长发育均存在显著差异。株高、茎粗、单株叶面积和叶片数整体表现为 R 处理显著高于其他处理($P < 0.05$),S 处理最低。定植后 49 d,S 处理株高为 142.45 cm,R、H 与 S 处理相比分别增加 38.99、27.66 cm,与 S 处理差异显著($P < 0.05$)。定植 91 d 后,S、R、H 处理茎粗较定植时分别增大 8.94、14.77、15.60 mm,定植后 91 d,R 与 H 处理茎粗间无显著差异,但都显著大于 S 处理($P < 0.05$)。打

顶前,S、R、H 处理叶片数较定植时分别增加 15、19、18 张,各个处理差异显著;叶绿素含量(SPAD 值)可以反映植株的光合作用,H 处理的叶绿素含量在番茄整个生育期高于其他处理,但定植后 21 d 各处理无显著差异。叶片是植物进行光合作用的场所,番茄采收后,对其叶面积进行测量,通过公式(2)计算不同栽培模式下的番茄单株叶面积,如图 2-E 所示,R、H 处理与 S 处理相比分别增加 134.21%、40.02%,差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2.2 番茄产量和品质

2.2.1 不同模式短程栽培番茄的产量及外观品质

由表 3 可知,不同模式下番茄一二穗、三四穗、单株产量和试验累计总产量不尽相同;R 处理番茄一二穗、三四穗、单株和累计总产量明显高于 S、H 处



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

图2 不同栽培模式对番茄生长指标的影响

表 3 不同栽培模式对番茄产量的影响

处理	一二穗产量 (g/株)	三四穗产量 (g/株)	单株产量 (g/株)	累计总产量 (g)	总果数 (个)	单果质量 (g/个)
S	1 065.67 ± 121.02b	773.91 ± 91.48b	1 839.57 ± 136.16c	16 556.1	137	120.85
R	1 662.71 ± 155.60a	1 402.73 ± 148.48a	3 065.45 ± 87.84a	27 589.0	142	194.29
H	1 136.50 ± 34.94b	1 156.59 ± 202.19a	2 293.09 ± 236.74b	20 637.8	142	145.34

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下表同。

理,累计总产量与 H、S 相比分别高出 33.68%、66.64%,一二穗果产量 H 与 S 处理间无显著差异,H 处理三四穗果产量显著大于 S,说明土壤栽培处理番茄长势较弱。H、R 处理累计采摘果实 142 个,S 处理果实数量偏少,为 137 个,对比单果质量,S 处理单果质量最小,是 R 处理的 62.20%,H 与 S 处理相比单果质量高出 20.26%。由分析可知,R 处理可以获得较为客观的产量,并且单果质量与其他处理相比最优。

果形指数和硬度是描述番茄果实外观的一项重要指标,直接影响果实商品性和耐贮性。由表 4 可知,S 处理番茄具有更大的硬度,与 H 处理差异显著($P < 0.05$);R、H 处理之间番茄果实硬度无显著差异;纵横径之比为番茄果形指数,R 处理下番茄横径、纵径显著大于其他处理,即番茄果实更大、更饱满,S、H 处理之间的横径、纵径无显著差异。由此可见,S 处理下番茄比其他处理果实硬度更大,更耐储存,但是番茄果径较小,商品性略差。

表 4 不同栽培模式下番茄的果形指数和硬度

处理	硬度 (kg/cm ²)	横径 (mm)	纵径 (mm)	果形指数
S	5.13 ± 0.69a	70.25 ± 1.40b	53.06 ± 2.24b	0.76 ± 0.03a
R	4.92 ± 0.16ab	78.05 ± 1.03a	59.37 ± 0.90a	0.76 ± 0.02a
H	4.29 ± 0.13b	70.01 ± 1.75b	53.59 ± 4.93b	0.76 ± 0.07a

短程栽培方式下不同栽培模式间干鲜质量存在差异,鲜质量反映番茄长势,干质量变化反映番茄物质累计量以及营养分配情况。由表 5 可知,R 处理与 S、H 处理相比,地上部分总鲜质量分别高出 101.59%、54.16%,H 处理与 S 处理相比高出 30.76%,差异显著($P < 0.05$)。R 处理地上部分总干质量比 S 处理高 86.12%,与 H 处理相比高出 42.45%;可见 R 处理番茄长势最好,干物质累计更多,对产量形成具有重要作用。

在不同器官中,各个处理之间也存在差异,R 处

理茎、叶的鲜干质量显著高于其他处理($P < 0.05$),S 处理最低,S、H 处理茎、叶、果干质量之间无显著差异。从表 5 中数据可以计算出不同模式下各个器官的物质分配,S、R、H 处理下生物量在果中的比例分别为 51.56%、39.47%、51.42%;在叶中的比例分别为 31.32%、43.04%、31.66%;在茎中的比例分别为 17.12%、17.49%、16.92%。由此可见,不同处理下在茎中的分配比例较为接近,S、H 处理养分多用于果实生长,R 处理更侧重叶片生长。

表 5 不同栽培模式对番茄干鲜质量的影响

处理	茎鲜质量 (g/株)	茎干质量 (g/株)	叶鲜质量 (g/株)	叶干质量 (g/株)	果干质量 (g/株)	地上部分总鲜质量 (g/株)	地上部分总干质量 (g/株)
S	149.40 ± 16.79c	36.79 ± 2.32b	273.39 ± 38.03c	67.29 ± 1.72b	110.77 ± 4.34b	2 262.36 ± 113.55c	214.84 ± 5.08c
R	376.13 ± 40.29a	69.94 ± 12.07a	1 119.00 ± 93.00a	172.09 ± 17.40a	157.83 ± 21.84a	4 560.58 ± 75.70a	399.87 ± 49.92a
H	223.41 ± 24.08b	47.51 ± 11.19b	441.84 ± 9.39b	88.87 ± 12.67b	144.33 ± 20.55ab	2 958.33 ± 258.61b	280.71 ± 37.78bc

2.2.2 不同模式短程栽培番茄的果实品质 糖酸含量在番茄中的占比可以衡量番茄的口感。由表 6 可知,S 处理番茄果实中有机酸、可溶性糖含量以及

糖酸比最高,但与其他处理间无显著差异;H 处理番茄果实可溶性固形物含量最高,与 R 处理相比增加 40.18%,差异达到了显著水平($P < 0.05$),与 S 处

理相比增加 22.19% ;由于番茄长期浸泡在营养液中,离子在营养液中扩散速度较快,H 处理硝酸盐含量比 S 和 R 处理分别显著高出 163.9%、96.98% ($P<0.05$);维生素 C 含量是番茄营养品质的重要

指标,H 处理番茄维生素 C 含量最高,与其他处理存在显著差异 ($P<0.05$),分别比 R、S 处理高 29.37%、27.40%,R 和 S 处理间番茄果实中维生素 C 含量无显著差异。

表 6 不同栽培模式对番茄果实品质的影响

处理	可溶性固形物含量 (°Brix)	有机酸含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (g/100 g)	糖酸比	硝酸盐含量 (mg/kg)	维生素 C 含量 (mg/100 g)
S	3.74 ± 0.572ab	5.63 ± 1.365a	7.11 ± 0.272a	13.13 ± 3.055a	3.21 ± 0.095b	14.45 ± 0.671b
R	3.26 ± 0.261b	5.37 ± 0.306a	6.66 ± 0.452a	12.40 ± 0.265a	4.30 ± 0.598b	14.23 ± 0.842b
H	4.57 ± 0.651a	5.50 ± 0.608a	6.79 ± 0.546a	12.47 ± 2.268a	8.47 ± 0.875a	18.41 ± 1.578a

2.3 番茄的水分利用

由表 7 可知,在简易设施结构温室中,栽培方式不同,番茄的 WUE 存在显著差异。从定植到拉秧,R 处理番茄耗水量最多,与其他处理存在显著差异,比 S、H 处理的耗水量分别高出 42.94%、41.25%,H、S 处理间耗水量无显著差异。通过计算 WUE 发现,H 处理番茄的 WUE 最高,其次为 R、S 处理,H 处理与 R、S 处理相比分别高出 5.66%、23.17%。由此可见,土壤栽培番茄产出单位质量的番茄耗水量较其他处理更高。

表 7 不同栽培模式下单株番茄生育期的水分利用效率

处理	耗水量 (kg/株)	单株果质量 (g/株)	水分利用效率 (g/kg)
S	67.44 ± 6.48b	1 839.57 ± 136.16c	27.28 ± 1.90b
R	96.40 ± 4.56a	3 065.45 ± 87.84a	31.80 ± 0.59a
H	68.25 ± 6.31b	2 293.09 ± 236.74b	33.60 ± 1.22a

2.4 效益比较

2.4.1 经济效益 由于不同模式番茄的成熟期不尽相同,岩棉栽培和水培番茄的生育期为 90 d、土壤栽培番茄的生育期为 110 d,故茬口安排不同,留果 4 穗后,由于土壤栽培番茄前期需要先缓苗,然后才开始生长,因此生长缓慢,即 1 年可种植 2 茬,而水培与岩棉栽培合理利用茬口后,可种植 3 茬,按照本试验获得的产量进行经济效益分析。

不同栽培模式在成本、收入和利润上存在很大差异,从表 8 中可知,按照收入排序为 R>H>S,R 处理单位面积番茄产量最高,即收入最高,收入分别为 H、S 处理的 1.34、2.50 倍;在岩棉栽培模式中,单位面积岩棉条、岩棉块的成本占据总成本的 69.21%,岩棉回收技术不成熟,无法进行回收,对环境保护造成较大压力;土壤栽培的成本来源主要为人工费用,单位面积人工费占总成本的 72.47%;水

培成本主要来自营养液及营养液桶;通过计算各栽培模式下的成本,从高到低排序为 R>H>S,R 处理单位面积成本最高,分别是 H、S 处理的 2.53、6.02 倍。利用公式计算利润发现 H 处理单位面积上的利润最高,分别是 R、S 处理的 7.70、1.53 倍,净利润为 38.692 元/m²,R 处理利润最低,为 5.023 元/m²。

投入产出比(ROI)是指项目全部投资与运行寿命期内产出的以货币形式表现的生产活动的最终成果。投产比的值越小,表明经济效益越好。计算运行寿命期内不同栽培模式的 ROI 发现,ROI 从低到高排序为 S<H<R,说明土壤栽培模式经济效益最好,即投入越多产出资金越多。

表 8 不同栽培模式成本、收入和利润差异

处理	成本 (元/m ²)	产出 (kg/m ²)	收入 (元/m ²)	利润 (元/m ²)	投入 产出比
S	16.559	11.04	41.84	25.281	0.396
R	99.697	27.63	104.72	5.023	0.952
H	39.418	20.61	78.11	38.692	0.505

2.4.2 综合评价 不同栽培模式对番茄产量品质的影响不同,从单一模式来看,不足以筛选出最优的栽培模式。采用主成分分析法,最终提取出了特征值大于 1 的 3 个主成分 PC1、PC2 和 PC3,贡献率分别为 35.797%、32.249% 和 19.937%,累计贡献率为 87.983%,因此可用这 3 个主成分代表所有指标进行分析。通过公式“综合得分 = PC1 的方差贡献率/累计贡献率 × FAC1 + PC2 的方差贡献率/累计贡献率 × FCA2 + PC3 的方差贡献率/累计贡献率 × FAC3”计算得出各处理的综合得分并排序^[27],从表 9 可知,H 处理的综合得分最高,为 0.580,说明该处理对这 3 个主成分影响最大,其次是 S 处理,为 0.003,而 R 处理综合得分最低,为 -0.583。

表 9 主成分分析结果

处理	FAC1	FAC2	FAC3	综合得分
S	-0.846	0.742	0.340	0.003
R	-0.443	-0.914	-0.305	-0.583
H	1.290	0.171	-0.035	0.580

注:FAC1、FAC 2、FAC3 分别代表 3 个主成分的分析因子得分。

3 讨论

3.1 不同模式短程栽培番茄的生长、产量及品质

番茄的品质和产量是衡量短程栽培模式效果的重要指标^[28-29],不同栽培模式下短程栽培番茄生长发育存在差异,相应地影响了番茄的产量和品质。本研究结果表明,番茄株高、茎粗、叶片数、单株叶面积、总鲜质量以及总干质量均表现为岩棉栽培最高,水培高于土壤栽培。在单株叶面积上岩棉栽培高于其他处理,土壤栽培最低,这表明岩棉栽培下番茄植株光合能力更强,光合产物积累更多,分配到果实的同化物就相应的增加^[30],最终产量更高。水培仅依据 EC 进行调整营养液,在长期循环下会造成作物需求较低的 SO_4^{2-} 等矿物离子积累,产生离子拮抗抑制了需求量较大的养分离子吸收利用,最终导致了番茄产量的降低^[18]。

土壤栽培下番茄可溶性糖含量、有机酸含量、糖酸比、硬度高于其他处理,番茄具有更好的口感,这与 Gosselin 等的研究结果^[18,31]相符。岩棉栽培下番茄可溶性固形物、维生素 C 含量最低,这与 Verdoliva 等的研究结果^[12]存在差异,这是由于栽培环境、试验处理和试验品种不同造成的;由于水培番茄营养液使用以硝酸盐作为氮源,其在水中扩散速度快,更有利于被作物吸收利用,导致番茄中硝酸盐含量偏高^[32]。除此之外,维生素 C 作为一种重要的营养物质^[33],在水培下,番茄的维生素 C 含量明显高于其他栽培模式,说明水培番茄具有较高的营养价值^[34]。

3.2 不同模式短程栽培番茄的水分利用情况

本试验各处理耗水量存在差异,S 处理采用地膜覆盖,H 处理处于封闭环境,均利用减少水分蒸发,来达到节约用水和水分精确控制的目的,Verdoliva 等研究发现水培植物将根系浸没在营养液中,与土壤栽培相比,植物水分蒸腾减少,果实用水量减少,即生产单位产量的番茄,土壤栽培需要消耗更多的水^[12,35],本试验结果与之相符;岩棉栽培植株水分利用效率略低于水培,试验结果表明,

岩棉栽培番茄地上部分总鲜质量明显高于其他处理,使大量的水分用于营养生长,果实中的水分消耗占比降低,从而造成了岩棉栽培水分利用效率较低的情况。

3.3 综合效益分析

目前最常用的栽培模式是土壤栽培,但产量低、水分利用效率低、管理繁琐,在种植过程中许多病虫害问题不可避免,农药成本相应增加;岩棉栽培在短程番茄栽培中可以获得更高的产量,管理简单,但岩棉购置成本太高、回收再利用难度大,不适合用于生产,水培产量低于岩棉栽培,高于土壤栽培,但生产成本较低,对土壤栽培、岩棉栽培、水培经济效益进行计算,发现水培的利润远远高于其他处理,在进行生产时,水培可以获得更大的收益,并且水培番茄维生素 C 含量高,果实品质好,水分利用率高,番茄生育期短,更适合我国北方地区短程番茄栽培生产。

主成分分析法目前广泛应用于园艺作物品质的综合评价^[36],本研究利用主成分分析法对 3 种栽培模式进行综合比较,通过得分可以看出,水培生产番茄的得分最高,因此可以得出结论,水培种植番茄可以用于我国北方地区短程栽培生产。

4 结论

短程栽培番茄下,岩棉栽培果实品质差,经济效益低,水分利用效率高于土壤栽培,低于水培;土壤栽培番茄糖、酸含量最高,硬度最大,水分利用效率最低,产量最低,经济效益优于岩棉栽培。对经济效益、产量、品质进行综合评估后,水培相比岩棉栽培、土壤栽培,收益最好,综合评价得分最高,可以用于我国北方地区番茄短程栽培生产。

参考文献:

[1] Nangare D D, Singh Y, Kumar P S, et al. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis [J]. Agricultural Water Management, 2016, 171 : 73 - 79.

[2] 李云洲, 闫见敏, 须文, 等. 番茄种质资源主要植物学性状的遗传多样性及相关性 [J]. 贵州农业科学, 2019, 47 (2) : 68 - 74.

[3] 高新昊. 农作物秸秆资源化利用及日光温室番茄长季节栽培肥水管理技术 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.

[4] Coyago - Cruz E, Corell M, Stinco C M, et al. Effect of regulated deficit irrigation on quality parameters, carotenoids and phenolics of diverse tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Food Research International, 2017, 96 : 72 - 83.

- [5] 武莹, 李建明, 肖金鑫, 等. 新型大跨度非对称塑料大棚内冬季温光变化特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 97–106.
- [6] 袁洪波, 王海华, 庞树杰, 等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 159–165.
- [7] Tsuchiya K. Development of tomato growing system with low node – order pinching and high density planting [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2007, 69(1): 13–17.
- [8] 叶林, 张光弟, 李建设, 等. 密植矮化对日光温室秋茬番茄生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 162–164.
- [9] 何诗行, 何堤, 许春林, 等. 栽培模式对设施短程栽培番茄生长及果实品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(8): 72–78.
- [10] 刘中良, 高昕, 张艳艳, 等. 基质栽培与土壤栽培番茄品质产量的比较研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(1): 124–127.
- [11] 李宗耕, 杨其长, 沙德剑, 等. 植物工厂水培叶菜生产全程机械化研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 12–21.
- [12] Verdoliva S G, Gwyn – Jones D, Detheridge A, et al. Controlled comparisons between soil and hydroponic systems reveal increased water use efficiency and higher lycopene and β – carotene contents in hydroponically grown tomatoes[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 279(5): 109896.
- [13] 张馨, 郑勇东, 郑文刚, 等. 基质栽培监测装置、系统及方法: CN110927002A[P]. 2020–03–27.
- [14] Li B, Shi B, Yao Z, et al. Energy partitioning and microclimate of solar greenhouse under drip and furrow irrigation systems [J]. Agricultural Water Management, 2020, 234(1): 106096.
- [15] 张占琴, 颜建辉, 李艳, 等. 氮、钾用量对机采加工番茄果实成熟、产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(6): 1–11.
- [16] Dingre K S, Kale D K, Surve S U, et al. Economic feasibility of water soluble fertilizer in drip irrigated tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. The Indian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 83(7): 703–707.
- [17] 高兵, 任涛, 李俊良, 等. 灌溉策略及氮肥施用对设施番茄产量及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(6): 1104–1109.
- [18] Gosselin A, Zekki H, Gauthier L. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121(6): 1082–1088.
- [19] Xu H L, Laurent G, André G. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT[J]. Scientia Horticulturae, 1995, 63(1/2): 11–20.
- [20] Xiao H J, Zhou Y, Mao K, et al. Effects of potassium fulvic acid and DA – 6 on the growth and yield of tomato cultivated with rock wool [J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2020, 16(2): 161–168.
- [21] Blanco F F, Folegatti M V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants [J]. Horticultura Brasileira, 2003, 21(4): 666–669.
- [22] 朱晓林, 魏小红, 冯悦, 等. 基于多元统计分析的番茄性状研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(7): 174–181.
- [23] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 75–76.
- [24] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 48–50.
- [25] 中华人民共和国农业部. 蔬菜、水果中硝酸盐的测定 紫外分光光度法: NY/T 1279—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [26] 庞婕, 韩其晟, 周爽, 等. 水气互作对温室番茄生长、产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 87–94.
- [27] Seabra J S, Gawski C J, de Lima T C A, et al. Selection of thermotolerant Italian tomato cultivars with high fruit yield and nutritional quality for the consumer taste grown under protected cultivation[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110559.
- [28] 丁小涛, 姜玉萍, 王虹, 等. LED 株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(6): 48–51.
- [29] 刘晓奇, 肖雪梅, 王俊文, 等. 水分亏缺对日光温室基质栽培番茄果实营养和风味品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 443–453.
- [30] 于龙凤, 李富恒, 安福全, 等. 番茄不同节位叶片形态特征与干物质含量的关系[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(6): 58–62.
- [31] Augusto S, Luciano A, Silvana B, et al. Off – the – Vine ripening of tomato fruit causes alteration in the primary metabolite composition [J]. Metabolites, 2013, 3(4): 967–978.
- [32] 别之龙, 徐加林, 杨小峰. 营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊1): 109–112.
- [33] Rasheed R, Iqbal M, Ashraf M A, et al. Glycine betaine counteracts the inhibitory effects of waterlogging on growth, photosynthetic pigments, oxidative defense system, nutrient composition, and fruit quality in tomato [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2018, 93(4): 385–391.
- [34] Anna V, Gemma O, Isabel O, et al. Effects of pulsed electric fields on the bioactive compound content and antioxidant capacity of tomato fruit[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2012, 60(12): 3126–3134.
- [35] Saleh M, Ismail, Kiyoshi O, et al. Influence of single and multiple water application timings on yield and water use efficiency in tomato (var. *First power*) [J]. Agricultural Water Management, 2007, 95(2): 116–122.
- [36] 王思威, 孙海滨, 常虹, 等. 基于主成分分析综合评价白糖罍荔枝果实品质[J]. 果树学报, 2022, 39(4): 610–620.