

H型层架间距对不同立体模式下果菜生长、光合、产量和品质的影响

王一超¹, 姚翔¹, 李金玲¹, 李猛^{1,2}, 马勇斌³, 汪虎^{1,2},
王吉庆^{1,2}, 李新峰⁴, 杜清洁^{1,2}, 肖怀娟^{1,2}

(1. 河南农业大学园艺学院 郑州 450046; 2. 河南省设施园艺工程技术研究中心 郑州 450046;
3. 郑州青青农场有限公司 郑州 450041; 4. 河南科技学院 河南新乡 453003)

摘要: 为探究H型双层栽培中不同层间距的立体栽培对果菜类蔬菜生长发育的影响,本研究采用下层番茄+上层辣椒、下层黄瓜+上层辣椒2种模式,设置3个层高梯度(120 cm、140 cm和160 cm),测定3种蔬菜的生长、光合、产量和品质等指标,确定H型双层栽培架的最优层间距。结果表明,在番茄+辣椒模式中,140 cm和160 cm层间距处理的上下层作物株高、茎粗和产量较高;160 cm处理对作物光合色素含量、光合特性和品质的提升效果较好。黄瓜+辣椒模式中,140 cm层间距综合优势更佳,该处理下层黄瓜667 m²产量较120 cm增加10.76%,与160 cm无显著差异,果实维生素C和可溶性糖含量分别提升22.14%与20.22%;同时上层辣椒维生素C含量提高49.62%,硝态氮积累量增加37.75%。经济效益分析表明,140 cm层间距净利润最高。综上,H型双层栽培中140 cm层间距能协同优化光环境、作物生产力与经济回报,为设施果菜立体栽培提供了有效技术参数。

关键词: 番茄+辣椒; 黄瓜+辣椒; 层架间距; H型双层栽培; 产量; 品质

中图分类号:S641.2+S642.2+S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)11-141-10

Effects of H-type cultivation rack spacing on the growth, photosynthesis, yield, and quality of fruit vegetables under different vertical cultivation models

WANG Yichao¹, YAO Xiang¹, LI Jinling¹, LI Meng^{1,2}, MA Yongbin³, WANG Hu^{1,2}, WANG Jiqing^{1,2}, LI Xinzhen⁴, DU Qingjie^{1,2}, XIAO Huaijuan^{1,2}

(1. College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. Henan Engineering Research Center for Protected Horticulture, Zhengzhou 450046, Henan, China; 3. Zhengzhou Qingqing Farm Co., Ltd., Zhengzhou 450041, Henan, China; 4. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China)

Abstract: To investigate the effects of different interlayer spacings in H-type cultivation racks on the growth and development of fruit vegetable, this study employed two cultivation models: Tomato (lower layer) + pepper (upper layer) and cucumber (lower layer) + pepper (upper layer). Three interlayer height gradients (120 cm, 140 cm, and 160 cm) were set, and parameters including growth, photosynthetic, yield, and quality of the three vegetables were measured to determine the optimal interlayer spacing for H-type double-layer cultivation. The results showed that in the tomato+pepper model, interlayer spacings of 140 cm and 160 cm resulted in higher plant height, stem diameter, and yield for both the upper and lower layer vegetables. The 160 cm treatment demonstrated better improvements in photosynthetic pigment content, photosynthetic characteristics, and quality. In the cucumber+pepper model, the 140 cm spacing exhibited comprehensive advantages. In this treatment, the cucumber yield in the lower layer was 10.76% higher than the 120 cm treatment, with no significant difference from the 160 cm treatment. The fruit vitamin C and soluble sugar content increased by 22.14% and 20.22%, respectively. Meanwhile, the vitamin C content of the upper pepper layer increased by 49.62%, and the ni-

收稿日期:2025-07-12; 修回日期:2025-09-16

基金项目: 河南省重大科技专项(241100110200); 河南省大宗蔬菜产业技术体系专项(HARS-22-07-G4); 河南省青年骨干教师项目(2023GGJS029); 河南省科技攻关项目(252102110174)

作者简介: 王一超,男,在读硕士研究生,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: 15938225659@163.com

通信作者: 肖怀娟,女,副教授,研究方向为设施蔬菜栽培生理和分子生物学。E-mail: xhj234@126.com

杜清洁,男,讲师,研究方向为设施栽培与生理。E-mail: duqj91@163.com

trate nitrogen accumulation increased by 37.75%. Economic analysis showed that the 140 cm spacing resulted in the highest net profit. In conclusion, a 140 cm inter layer spacing optimizes the light environment, crop productivity, and economic returns, providing valuable technical parameters for facility-based vertical cultivation of fruit vegetables.

Key words: Spacing in H-type cultivation Racks; H-type double-layer cultivation; Tomato+Pepper; Cucumber +Pepper; Yield; Quality

在全球人口持续增长与耕地资源日益紧缺的背景下,提高土地利用效率和农业生产效益已成为现代农业发展的关键问题^[1]。设施农业通过精准调控温度、光照、水分、气体和养分等环境五要素,实现了农产品周年化生产,为农业增效和农民增收提供了新途径^[2]。立体栽培技术通过空间立体化利用,显著提高了单位面积种植密度^[3],节省了空间。但同时也加剧了植株间的遮阴效应,导致不同层次的光照分布不均^[4]。刘伟等^[5]发现,在叶菜类柱式栽培中,下层光照比相邻上层降低15%左右,影响叶菜生长;宗静等^[6]研究发现,草莓双层栽培模式下,下层的光照和温度条件不如上层,导致草莓生育期延长。因此,如何保证下层作物适宜光照条件成为立体栽培的研究热点之一。

前人研究发现,优化立体栽培架的结构参数可显著改善作物受光环境。例如,杨海燕等^[7]发现,在草莓栽培中,H型架因具有优越的通风透光性,种植密度和产量显著高于A型架和“品”字型架;王春玲等^[8]发现,在H型栽培架采用两层相邻布局时,草莓下层达到光补偿点时长较两层、三层交替布局提高21.30%,单元产量达50.80 kg,较三层相邻布局显著提高33.70%;方慧等^[9]发现,生菜多层栽培时,中下层光照强度可能仅为上层的20%,但对中、下层进行补光处理后,可显著提高生菜产量及品质。上述研究结果表明,合理的层间结构可有效提高立体多层栽培作物的光合效率,进而提高作物的产量。

目前,我国设施蔬菜立体栽培的研究和应用多集中在绿叶蔬菜、草莓、番茄等单一作物的种植模式上,对于不同园艺作物最适宜的搭配方式及层间距离缺乏统一的科学标准。因此,本研究通过番茄+辣椒和黄瓜+辣椒两种作物组合,构建不同层间距的H型双层立体栽培系统,探究不同层间距对作物生长指标、光合特性、产量、品质和经济效益的影响,以期最大程度地达到利用空间的目标,进而推动现代农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

选用番茄品种浙樱粉为无限生长型,由浙江省

农业科学院选育,黄瓜品种博杰626由天津德瑞特种业有限公司选育,辣椒品种豫艺大麻花由河南豫艺种业科技发展有限公司选育。试验采用的H型双层栽培架由等边角钢组装而成,宽度30 cm,长度750 cm,栽培架由北向南呈1:75的坡降。栽培槽为泡沫板材质,长200 cm,宽27 cm,外深8 cm,内深5 cm,用PET黑白膜包装,白色面朝上,栽培槽底部铺设无纺布。栽培槽盖板按株距40 cm开定植孔,双行定植,每个H型栽培架间距为150 cm。

1.2 试验设计

试验于2025年2—6月在郑州市河南农业大学教园区日光温室中进行。试验设计3种不同层间距双层栽培架,下层架离地面40 cm,上层架离地面分别为120、140和160 cm(图1),具体栽培槽编号见表1。采用下层番茄+上层辣椒和下层黄瓜+上层辣椒的栽培模式,每个处理设置5个H型栽培架,作为5次重复。

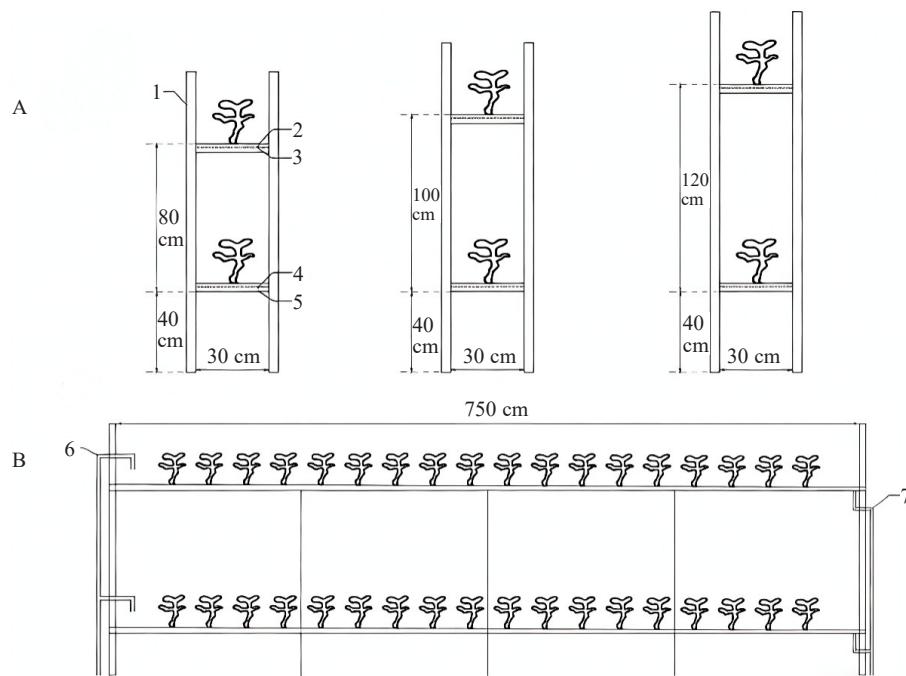
采用营养液膜水培(nutrient film technique, NFT)进行栽培,营养液按照Hoagland配方进行配制,营养液供液方式为06:00—21:00,20 min·h⁻¹;21:00至次日06:00,30 min·3 h⁻¹。定植后从各处理的5个重复中随机选取6个植株作为固定检测对象,进行指标的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光照强度的测定 选择光照充足的晴朗天气,使用照度计(AS803)测定光照强度。测定时间为09:00、11:00、13:00、15:00、17:00。测定位置为垂直方向和水平方向,垂直方向为下层栽培面垂直向上20、40和80 cm处。水平方向为下层栽培面垂直向上20、40和80 cm处向右水平方向的20和40 cm处。

1.3.2 生长、光合特性、产量和品质指标的测定 生长指标:在定植后15、30、45 d分别用卷尺从茎基部至生长点测量株高,用数显游标卡尺于茎基部测量茎粗。

光合特性:挑选植株垂直中间部位叶片,在开花期采用乙醇法来测定叶绿素含量和类胡萝卜素含量,在结果初期采用光合仪(LI-6400XT)测定光合参数。



注:1. 栽培架;2. 定植泡沫板;3. 无纺布;4. 黑白膜;5. 栽培槽;6. 进液分管道;7. 回液分管道。

Note: 1. Cultivation frame; 2. Seedling foam board; 3. Non-woven fabric; 4. Black-white mulch film; 5. Cultivation trough; 6. Liquid inlet pipeline; 7. Liquid return pipeline.

图 1 H型栽培架结构图(A. 主视图, B. 侧视图)

Fig. 1 Structure diagram of H-type cultivation frame (A. Front view, B. Side view)

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理编号 Treatment code	试验设计 Experimental design
下层番茄+上层辣椒栽培模式 Lower-layer tomato + upper-layer pepper cultivation	DT1 120 cm 下层 120 cm down layer DT2 140 cm 下层 140 cm down layer DT3 160 cm 下层 160 cm down layer UT1 120 cm 上层 120 upper layer UT2 140 cm 上层 140 upper layer UT3 160 cm 上层 160 upper layer
下层黄瓜+上层辣椒栽培模式 Lower-layer cucumber + upper-layer pepper cultivation	DC1 120 cm 下层 120 cm down layer DC2 140 cm 下层 140 cm down layer DC3 160 cm 下层 160 cm down layer UC1 120 cm 上层 120 upper layer UC2 140 cm 上层 140 upper layer UC3 160 cm 上层 160 upper layer

产量指标:番茄挂 6 穗果后打顶,待转色后采收;黄瓜商品成熟期(顶花未落、瓜刺硬挺、皮色鲜绿、瓜条硬实)采收;辣椒青熟期(果实饱满、果皮光亮、手感硬挺)采收。果实成熟后用分析天平称量果实质量,统计单株产量并计算 667 m² 产量。

品质指标:在盛果期,采集各处理植株同一部位果实,参照李合生^[10]的方法测定硝态氮、可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、可溶性固形物含量。

经济效益:按照一年 2 茬所得的产量乘以商品单价(按市场平均价格计算)获得总收入,总收入减去所耗成本(地租、水电、人工以及种子费用和耗材费用等)即得到净利润。

1.4 统计分析

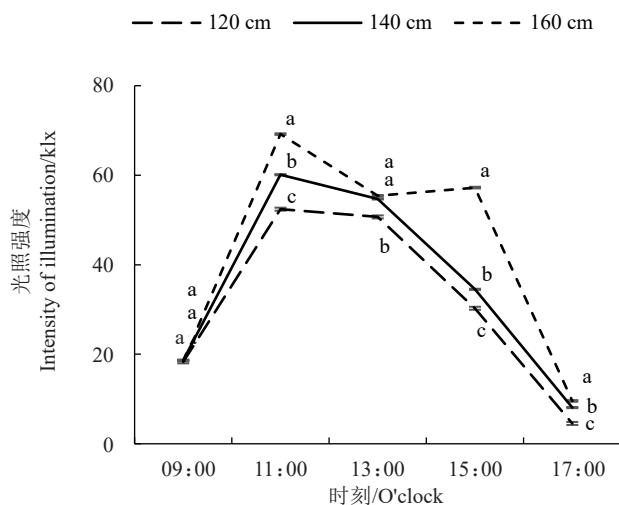
采用 Microsoft Excel 2019、CAD 对数据进行整理和作图。数据分析使用 IBM SPSS Statistics 26 软件完成。为进行多重比较分析,采用 LSD(最小显著差异)检验法和邓肯(Duncan)法进行组间差异的统计检验。

2 结果与分析

2.1 不同层间距光照强度日变化特征

如图 2 所示,不同层架高度(120、140、160 cm)

的光照强度随时间周期的推移均呈先升后降趋势。09:00—11:00时迅速上升,且在11:00达到顶峰,其中160 cm层架的光照强度最高,为69.19 klx,120 cm的最低,为52.41 klx。11:00—13:00,不同层架的光照强度均下降,在13:00时160 cm层架光照强度与140 cm的无显著差异,且显著高于120 cm的;13:00—17:00,140 cm和120 cm层架光照强度下降,且二者下降速率一致,而160 cm层架光照强度在13:00—15:00小幅度上升后开始下降。17:00,光照强度由大到小依次为160、140和120 cm。综上所述,针对H型双层栽培架,160 cm层架光照条件最优,140 cm次之,120 cm最差。



注:同一时间不同小写字母表示在0.05水平差异显著。
Note: Different lowercase letters in the same time indicate significant difference at 0.05 level.

图2 不同层架间距的光照强度日变化

Fig. 2 Daily variation of light intensity under different shelf spacing

2.2 不同层间距对番茄和辣椒生长指标的影响

由表2可知,对下层番茄,不同层间距处理在定植15 d和30 d时株高无显著差异,45 d时,DT2株

高显著高于DT1(增加9.19%),与DT3无显著差异。不同层间距处理的番茄定植15 d时茎粗无显著差异,定植30和45 d时,DT2与DT3无显著差异,但显著高于DT1。不同层间距处理的上层辣椒植株在不同时间下的株高无显著差异。辣椒茎粗与下层番茄茎粗变化一致,15 d时各处理间无显著差异,30 d和45 d时UT2与UT3间无显著差异,但显著高于UT1。上述结果表明,不同层间距通过调节下层番茄株高、茎粗及上层辣椒的茎粗来影响作物的长势,其中140 cm和160 cm层间距处理效果最好,且二者之间无显著差异。

2.3 不同层间距对番茄和辣椒光合色素含量的影响

由图3可以看出,DT3处理的番茄植株叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均最高,分别为1.03、0.33、1.36、0.27 mg·g⁻¹,显著高于其他2个处理。对上层辣椒植株而言,UT2处理的叶绿素a含量与UT1和UT3无显著差异,但UT3处理显著高于UT1。辣椒叶片不同层间距处理的叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量趋势与番茄相同,即UT3显著高于UT1和UT2,UT1和UT2无显著差异。结果表明,160 cm间距的H型双层栽培架有利于叶绿素和类胡萝卜素的积累。

2.4 不同层间距对番茄和辣椒光合特性的影响

由图4可知,下层番茄植株胞间CO₂浓度不受层间距的影响,DT3番茄植株的蒸腾速率最高,达到6.28 mmol·m⁻²·s⁻¹,与DT1相比,显著提高了23.14%,与DT2无显著差异。番茄的气孔导度和净光合速率则随着层间距的增大呈显著增加趋势,其中DT3的最高,分别是DT1处理的1.53倍和1.60倍。不同层间距处理对上层辣椒植株胞间CO₂浓度没有显著影响;UT2处理的蒸腾速率与其他处理无显著差异,UT3处理显著高于UT1;UT3处理的

表2 不同层架间距对番茄和辣椒生长指标的影响

Table 2 Effects of different shelf spacings on growth indicators of tomato and pepper

处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/mm		
	15 d	30 d	45 d	15 d	30 d	45 d
DT1	51.43±7.64 a	128.83±7.41 a	215.67±8.98 b	6.36±0.39 a	7.31±0.34 b	9.50±0.34 b
DT2	55.07±2.59 a	127.00±7.24 a	235.50±11.17 a	6.90±0.24 a	7.91±0.20 a	10.26±0.37 a
DT3	53.78±2.08 a	130.83±5.04 a	225.95±10.74 ab	6.68±0.60 a	8.12±0.27 a	10.21±0.66 a
UT1	16.05±1.78 a	24.25±2.13 a	52.79±2.98 a	4.35±0.30 a	5.16±0.11 b	7.10±0.12 b
UT2	17.18±3.29 a	24.63±2.68 a	53.67±1.46 a	4.49±0.35 a	5.67±0.23 a	7.47±0.18 a
UT3	15.27±1.60 a	22.07±3.13 a	54.73±3.00 a	4.24±0.44 a	5.73±0.48 a	7.66±0.39 a

注:同列数字后不同小写字母表示同一作物不同处理在0.05水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments of the same crop at 0.05 level. The same below.

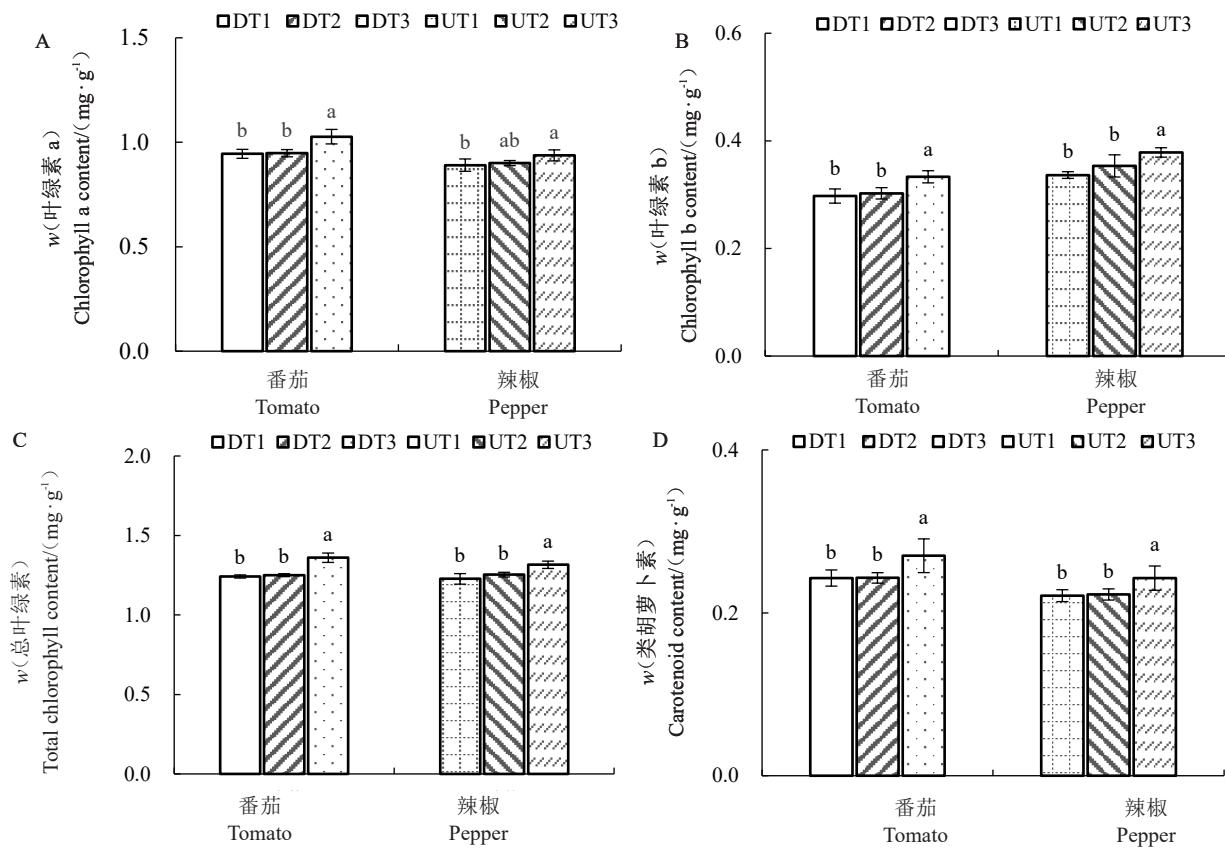


图3 不同层架组合对番茄和辣椒叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of different shelf configurations on chlorophyll content in tomato and pepper plants

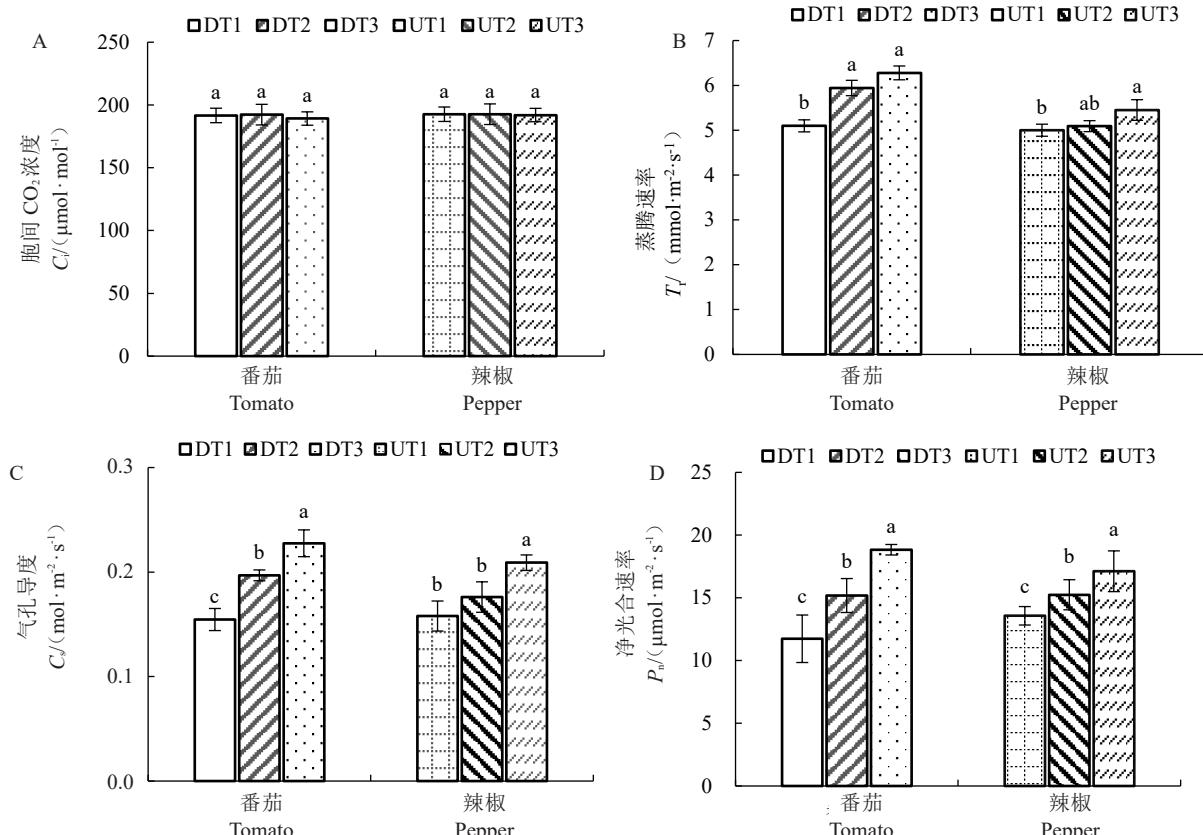
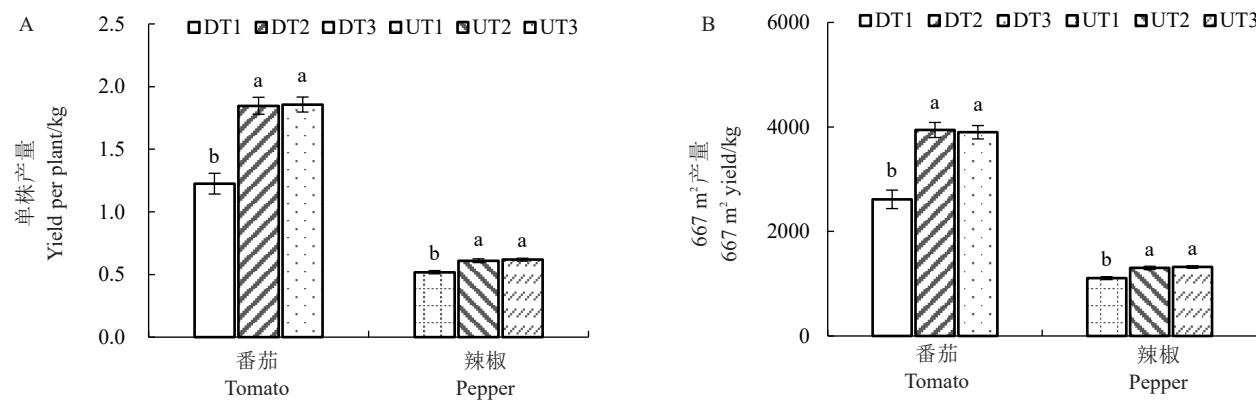


图4 不同层架组合对番茄和辣椒光合特性的影响

Fig. 4 Effects of different shelf configurations on photosynthetic characteristics of tomato and pepper plants

气孔导度最高,达到 $0.21\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其他处理,而其他处理间无显著差异;辣椒植株净光合速率随着层间距的增加而显著增加,UT3处理最高,为 $17.12\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别为UT1和UT2的1.26倍和1.12倍。



注:不同小写字母表示同一作物不同处理间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between different treatments of the same crop. The same below.

图5 不同层架组合对番茄和辣椒产量的影响

Fig. 5 Effects of different shelf configurations on yield of tomato and pepper

番茄同样的趋势,即UT2和UT3处理无显著差异,均显著高于UT1处理。上述结果表明,适当的层间距能显著促进番茄产量的提高,超过一定距离则作用不明显。

2.6 不同层间距对番茄和辣椒果实品质的影响

由表3可知,DT3处理的番茄植株硝态氮含量最高,达到 $87.90\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,与DT1和DT2相比,分别显著提高了28.19%和30.63%;DT2和DT3的维生素C含量无显著差异,但显著高于DT1;DT3处理的可溶性固体物和可溶性蛋白含量与DT2处理均无显著差异,但显著高于DT1,且DT1与DT2无显著差异;DT3处理的可溶性糖含量最高,达到9.57%,显著高于DT1,而与DT2无显著差异。上层辣椒UT3处理的硝态氮、维生素C、可溶性蛋白含量最高,分别达到 $53.28\text{, }133.10\text{, }7.90\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,与UT1相比,分别显著

提高了9.47%、27.26%、12.86%,与UT2无显著差异;辣椒的可溶性固体物含量随着层间距的增加而显著增加,即UT3处理最高,达到5.57%,分别为UT1和UT2的1.07和1.14倍;辣椒的可溶性糖含量则是UT2和UT3处理间无显著差异,均显著高于UT1。以上结果表明,较大层间距的上、下层果实品质较优。

2.7 番茄和辣椒组合经济效益分析

本研究经济效益按一年种植2茬作物来计算,支出包含肥料、电费、人工、地租,各处理的综合支出均为 $36452.60\text{ 元}\cdot667\text{ m}^2$ 。DT2+UT2处理组的净利润最高,达到 $91039.38\text{ 元}\cdot667\text{ m}^2$,比DT1+UT1高出73.45%,与DT3+UT3相差不明显。综合来看,不同处理经济效益存在差异,DT2+UT2的经济效益最高,DT3+UT3的次之,DT1+UT1的最低(表4)。

表3 不同层架间距对番茄和辣椒品质的影响

Table 3 Effects of different shelf spacing on quality of tomato and pepper fruits

处理	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/(mg·g ⁻¹)	w(维生素C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性固体物) Soluble solids content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ (mg·g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%
DT1	68.57±5.90 b	19.71±1.72 b	9.59±0.55 b	7.11±0.13 b	8.38±0.52 b
DT2	67.29±7.37 b	23.59±3.18 a	10.19±0.30 ab	7.65±0.58 ab	9.21±0.57 a
DT3	87.90±5.51 a	23.34±1.04 a	10.26±0.59 a	7.79±0.57 a	9.57±1.03 a
UT1	48.67±1.21 b	104.59±10.97 b	4.88±0.19 c	7.00±0.22 b	10.85±1.15 b
UT2	51.42±3.29 ab	117.83±11.45 ab	5.23±0.16 b	7.55±0.63 ab	13.38±0.56 a
UT3	53.28±2.98 a	133.10±12.21 a	5.57±0.29 a	7.90±0.86 a	13.00±0.78 a

表4 番茄和辣椒年经济效益
Table 4 Annual economic benefits of tomato and pepper production

处理 Treatment	肥料价格 Manure cost/ (Yuan·667 m ²)	电费 Electricity fee/ (Yuan·667 m ²)	人工 Labor cost/ (Yuan·667 m ²)	地租 Land rent/ (Yuan·667 m ²)	番茄单价 Unit price/ (Yuan·kg ⁻¹)	番茄收入 Income/ (Yuan·667 m ²)	辣椒单价 Unit price/ (Yuan·kg ⁻¹)	辣椒收入 Income/ (Yuan·667 m ²)	净利润 Net profit/ (Yuan·667 m ²)
DT1+UT1	3 784.60	6 418.00	24 000.00	2250	13.20	69 026.50	9.00	19 913.95	52 487.85
DT2+UT2	3 784.60	6 418.00	24 000.00	2250	13.20	104 056.27	9.00	23 435.71	91 039.38
DT3+UT3	3 784.60	6 418.00	24 000.00	2250	13.20	102 929.31	9.00	23 755.87	90 232.58

2.8 不同层间距对黄瓜和辣椒生长指标的影响

如表5所示,下层黄瓜定植15、30、45 d时,DC2处理的株高均为最高,分别达到22.40、101.12、222.08 cm,比DC1处理分别提高了24.31%、4.95%、4.67%,与DC3处理无显著差异;下层黄瓜的茎粗在15、30 d时不受层间距的影响,45 d时DC2处理的茎粗最大,达到9.93 mm,是DC1处理的1.13倍,与DC3处理无显著差异。对上层辣椒

而言,株高在15 d时,各处理间无显著差异;30 d时,UC2处理的株高最高,是UC1的1.16倍,与UC3无显著差异。在45 d时,UC2处理的株高显著高于UC1,与UC3无显著差异。辣椒植株定植15 d和30 d时,各处理茎粗无显著差异,45 d时,UC2和UC3无显著差异,但均显著高于UC1。上述结果表明,从生长指标来看,140 cm和160 cm层间距在黄瓜+辣椒模式中的效果较好。

表5 不同层架间距对黄瓜和辣椒生长指标的影响

Table 5 Effects of different shelf spacings on growth indicators of cucumber and pepper

处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/mm		
	15 d	30 d	45 d	15 d	30 d	45 d
DC1	18.02±2.52 b	96.35±4.71 b	212.17±2.71 b	5.50±0.72 a	7.01±0.61 a	8.82±0.65 b
DC2	22.40±1.31 a	101.12±4.07 a	222.08±3.50 a	5.46±0.12 a	7.12±0.30 a	9.93±0.16 a
DC3	22.23±1.96 a	100.13±4.70 a	220.55±4.03 a	5.07±0.60 a	7.15±0.43 a	9.52±0.54 a
UC1	16.90±0.87 a	23.13±2.60 b	50.50±3.08 b	4.49±0.26 a	5.33±0.24 a	7.00±0.22 b
UC2	16.23±0.76 a	26.73±1.28 a	54.93±1.92 a	4.51±0.29 a	5.49±0.29 a	7.56±0.13 a
UC3	16.75±1.35 a	25.28±1.56 ab	54.82±3.21 a	4.43±0.31 a	5.35±0.20 a	7.53±0.41 a

2.9 不同层间距对黄瓜和辣椒光合色素的影响

如图6所示,下层黄瓜中,DC2和DC3处理的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素以及类胡萝卜素含量均呈现DC2和DC3处理无显著差异,但显著高于DC1处理的趋势。上层辣椒的叶绿素b和总叶绿素含量与番茄的趋势一致,叶绿素a和类胡萝卜素含量,UC3处理与UC1、UC2均无显著差异,但UC2显著高于UC1。这表明140 cm和160 cm层间距对黄瓜+辣椒模式光合色素积累的效果较好。

2.10 不同层间距对黄瓜和辣椒光合特性的影响

由图7可知,不同层间距处理的黄瓜植株胞间CO₂浓度无显著差异;DC2处理的蒸腾速率和气孔导度分别显著高于DC1处理11.25%、14.29%,且DC3与DC1和DC2均无显著差异;黄瓜净光合速率,DC2处理的最高,为19.16 μmol·m⁻²·s⁻¹,分别显著高于DC1、DC3处理26.97%、8.80%。上层辣椒胞间CO₂浓度变化趋势与黄瓜一致,3个处理间无显著差异;UC1处理的蒸腾速率和净光合速率最低,显著低于UC2和UC3,且UC2与UC3无显著

差异;UC2处理的气孔导度最高,分别是UC1和UC3的1.12倍和1.16倍,且UC1与UC3间无显著差异。上述结果表明,黄瓜+辣椒模式中,140 cm层间距的光合特性最优。

2.11 不同层间距对黄瓜和辣椒产量的影响

由图8可知,DC2处理中单株产量和667 m²产量最高,分别为2.43和5 193.71 kg,较DC1处理显著提高了10.45%和10.76%,与DC3处理无显著差异。上层辣椒的单株产量和667 m²产量与下层黄瓜变化趋势一致,即UC2和UC3处理无显著差异,均显著高于UC1处理。结果表明,较大的层间距对下层黄瓜和上层辣椒的产量均有促进作用。

2.12 不同层间距对黄瓜和辣椒果实品质的影响

黄瓜的品质在不同层间距处理下存在显著差异。如表6所示,DC2处理的硝态氮、维生素C和可溶性蛋白含量均最高,分别达到35.77 mg·g⁻¹、10.04 mg·100 g⁻¹、7.80 mg·g⁻¹,显著高于DC1和DC3,且DC1和DC3间无显著差异;可溶性固形物和可溶性糖含量,DC2处理分别是DC1处理的

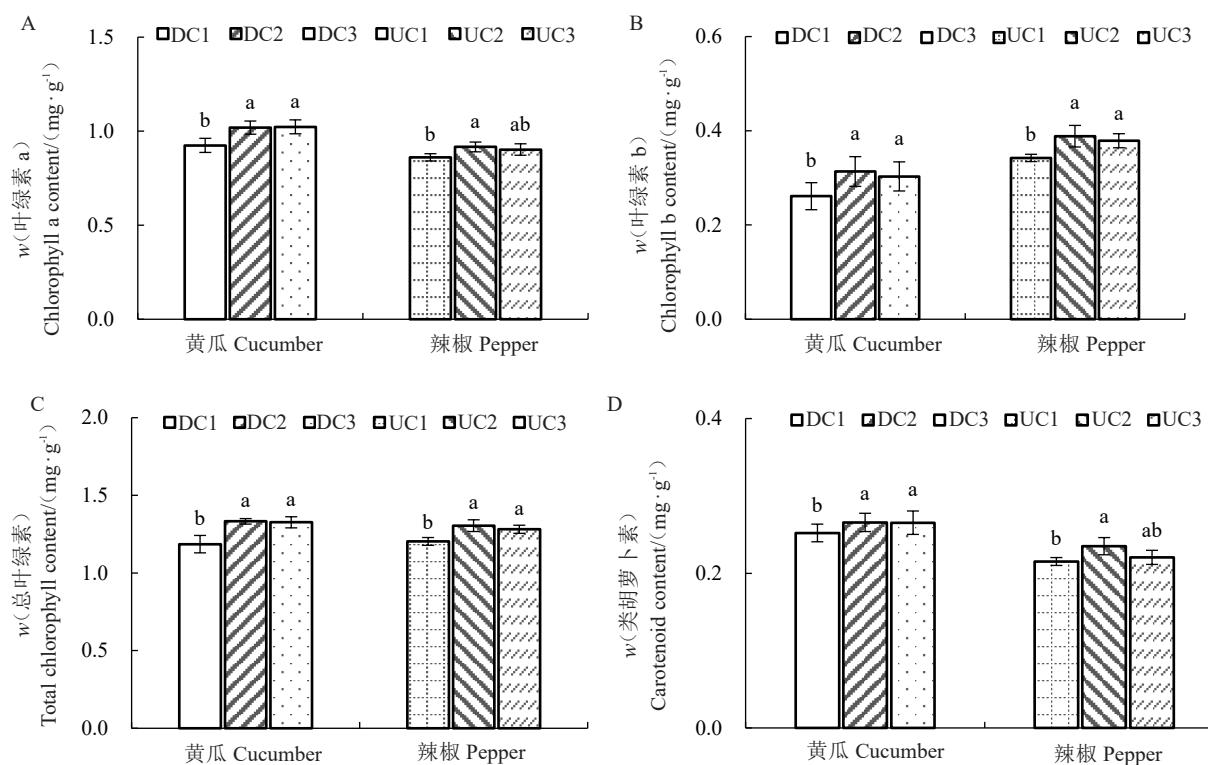


图 6 不同层架组合对黄瓜和辣椒叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effects of different shelf configurations on chlorophyll content in cucumber and pepper plants

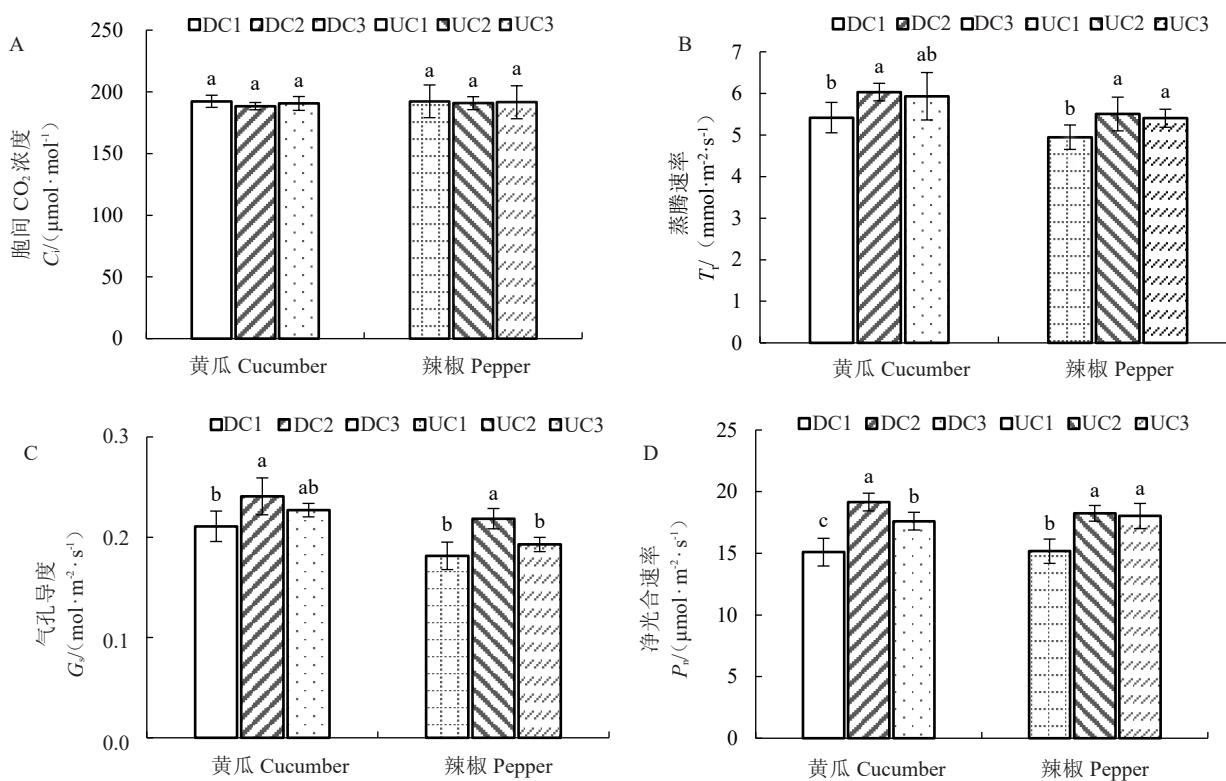


图 7 不同层架间距处理对黄瓜和辣椒光合特性的影响

Fig. 7 Effects of different shelf spacing treatments on photosynthetic characteristics of cucumber and pepper plants

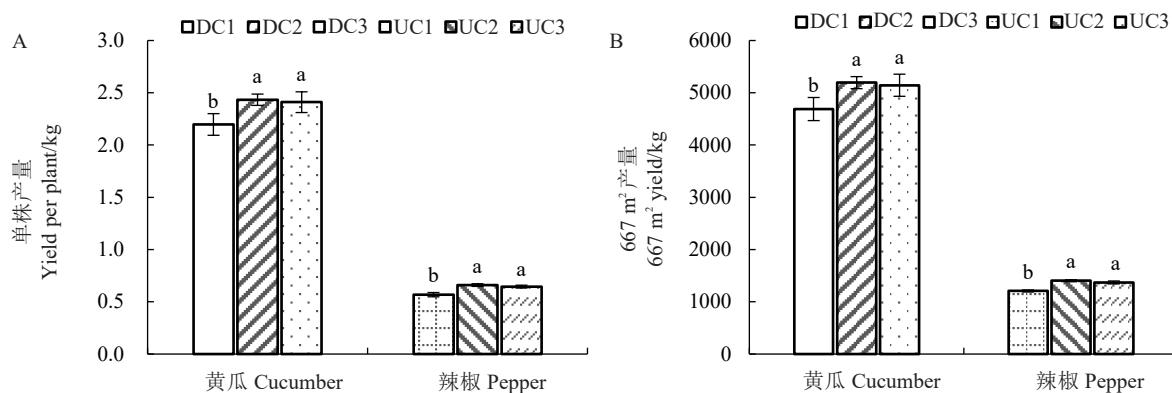


图 8 不同层架组合对黄瓜和辣椒产量的影响

Fig. 8 Effects of different shelf configurations on yield of cucumber and pepper

表 6 不同层架间距对黄瓜和辣椒品质的影响

Table 6 Effects of different shelf spacing on quality of cucumber and pepper fruits

处理 Treatment	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/ (mg·g ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%
DC1	30.59±2.54 b	8.22±1.08 b	3.67±0.28 b	6.94±0.36 b	5.34±0.92 b
DC2	35.77±3.71 a	10.04±1.17 a	4.17±0.14 a	7.80±0.68 a	6.42±0.43 a
DC3	30.90±3.04 b	8.64±1.02 b	3.99±0.17 a	7.04±0.29 b	6.22±0.47 ab
UC1	49.94±2.35 c	81.83±8.16 b	5.27±0.20 b	7.04±0.36 b	12.40±1.37 b
UC2	68.79±4.14 a	122.43±5.26 a	5.72±0.28 a	7.72±0.59 a	13.42±1.04 a
UC3	62.02±3.32 b	121.52±6.12 a	5.89±0.17 a	6.95±0.34 b	13.37±1.40 a

1.14 和 1.20 倍, 显著高于 DC1, 但与 DC3 无显著差异。在辣椒品质中, UC2 处理的硝态氮含量最高, 其次是 UC3, UC1 最低, 三者间差异显著。UC2 和 UC3 处理的维生素 C 和可溶性固形物及可溶性糖含量无显著差异, 且显著高于 UC1 处理; 可溶性蛋白含量, UC2 处理的最高, 分别是 UC1 和 UC3 处理的 1.10 和 1.11 倍。综上所述, 黄瓜+辣椒模式中, 140 cm 层间距的果实时品质最佳。

2.13 黄瓜和辣椒组合经济效益分析

如表 7 所示, 黄瓜+辣椒组合的经济效益按一年种植 2 茬作物来计算, 肥料、电费、人工、地租等固定支出为 35 127.6 元·667 m²。对净利润而言, DC2+UC2 处理的最高, 为 62 826.91 元·667 m², 比 DC1+UC1 高 20.25%, 与 DC3+UC3 处理相差不明显。综合来看, 双层水培架通过种植黄瓜和辣椒显著提高了净利润, 其中 DC2+UC2 处理表现最佳, 实

表 7 黄瓜和辣椒经济效益

Table 7 Economic benefits of cucumber and pepper production

处理 Treatment	肥料 Manure cost/ (Yuan·667 m ²)	电费 Electricity fee/ (Yuan·667 m ²)	人工 Labor cost/ (Yuan·667 m ²)	地租 Land rent/ (Yuan·667 m ²)	黄瓜单价 Unit price/ (Yuan·kg ⁻¹)	黄瓜收入 Income/ (Yuan·667 m ²)	辣椒单价 Unit price/ (Yuan·kg ⁻¹)	辣椒收入 Income/ (Yuan·667 m ²)	净利润 Net profit (Yuan·667 m ²)
DC1+UC1	2 459.60	6 418.00	24 000.00	2 250.00	7.00	65 639.91	9.00	21 736.70	52 249.01
DC2+UC2	2 459.60	6 418.00	24 000.00	2 250.00	7.00	72 711.89	9.00	25 242.62	62 826.91
DC3+UC3	2 459.60	6 418.00	24 000.00	2 250.00	7.00	72 014.66	9.00	24 668.93	61 555.99

现了黄瓜和辣椒的协同增效。

3 讨论与结论

立体栽培通过垂直空间分层显著提升种植密度, 但层间遮阴导致下层光合有效辐射(PAR)呈梯

度衰减^[11], 常不足上层的 20%~26%, 引发下层光照强度低于果菜类光补偿点, 进而导致光合抑制、茎节徒长及同化物分配失衡^[12]。H 型架的开放式结构通过增强侧向透射与优化漫反射可缓解部分矛盾, 而层间距扩大作为关键调控手段, 能重构光分布格

局。本研究结果证实, H型栽培架层间距通过优化光分布显著提升下层作物生产力, 随着层间距的增加, 下层光照强度增大, 与吴少博等^[13]在番茄栽培中的结果一致。光照增强有效缓解了立体栽培固有的遮阴问题, 周静等^[14]生菜多层栽培下层光照仅为上层的20%, 而刘新红等^[15]指出果菜类立体栽培需保障下层光照强度大于30 klx, 这种改善直接促进了下层作物光合能力, 160 cm层间距的番茄净光合速率较120 cm提高25.70%, 140 cm层间距的黄瓜气孔导度较120 cm提升14.29%。值得注意的是, 叶绿素含量与层间距呈“阈值依赖”特征, 非简单线性变化。番茄组在160 cm层间距叶绿素含量显著升高而黄瓜组在140 cm与160 cm无显著差异, 根本原因在于光响应特性与冠层互作的种间分异: 番茄因高光饱和点特性需160 cm层间距突破光合激发阈值; 黄瓜因低光饱和点特性在140 cm层间距下即达光饱和状态, 无需通过进一步增大层间距实现光合积累^[16-18]。

层间距扩大同步优化产量与营养品质。在黄瓜+辣椒模式中, 140 cm层间距较120 cm处理显著提升了下层黄瓜的产量与品质。667 m²产量提高10.76%, 维生素C和可溶性糖含量分别提升22.14%和20.22%, 这一结果与李合生^[10]所揭示的光合产物转化机制吻合: 优化的光照条件提高了光合作用的效率, 特别是光反应中ATP和NADPH的生成以及暗反应中碳同化速率, 从而增加了光合产物的总量; 同时, 更优的光环境也调控了光合产物的分配与代谢流向, 使得更多的同化产物被有效地转化为可溶性糖以及抗坏血酸等品质相关化合物在果实中积累。辣椒在140 cm层间距下同样表现优异, 与120 cm层间距相比, 667 m²产量增幅显著, 硝态氮积累量显著提高, 这印证了吕长山等^[19]关于强光能有效改善辣椒果实品质的结论。然而, 番茄的单株产量在140与160 cm层间距处理间没有显著差异, 这与杨延杰等^[20]提出的“光照阈值效应”理论相符, 即当光照强度超过作物光合作用饱和点后, 继续增加光照对产量的提升作用有限。在本研究中, 番茄植株在140 cm间距下可能已达到或接近其光饱和点, 且株高的持续增长在更大间距下可能加剧了植株内部的遮阴效应, 抵消了层间距增大的潜在优势。

经济效益验证140 cm层间距为最优。番茄+辣椒模式中, 140 cm层间距净利润达91 039.38元•667 m², 较120 cm层间距增收73.45%; 黄瓜+辣椒组合在

140 cm层间距净利润达62 826.91元•667 m², 较120 cm增幅20.25%。此外, 160 cm层间距虽与140 cm层间距净利润相差不大, 但因160 cm层间距更高, 钢材消耗量大, 采摘难度加大, 在经济性上不如140 cm层间距更优。

综上, 利用H型双层栽培架进行番茄+辣椒和黄瓜+辣椒组合的立体栽培, 140 cm层间距的综合效益最高, 为设施蔬菜高效栽培提供了理论依据和技术参数。

参考文献

- [1] GODFRAY H C J, BEDDINGTON R J R, CRUTE R I R, et al. Food Security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010, 327(5967): 812-818.
- [2] BENKE K, TOMKINS B. Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture[J]. Sustainability: Science, Practice and Policy, 2017, 13(1): 13-26.
- [3] 邵丽, 杨小龙, 王蕊, 等. 设施栽培蔬菜光环境及调控研究进展[J]. 中国蔬菜, 2018(8): 19-26.
- [4] 张攀伟. 弱光下不同硝铵配比对小白菜生长的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [5] 刘伟, 刘增鑫, 陈殿奎. 高效益立柱式无土栽培技术[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 137-139.
- [6] 宗静, 刘宝文. 草莓双层高架栽培模式的气象条件分析[J]. 北方园艺, 2015(23): 58-61.
- [7] 杨海燕, 曹建平, 王周平, 等. 草莓立体栽培套种食用菌高效生产技术[J]. 中国蔬菜, 2020(3): 99-101.
- [8] 王春玲, 宋卫堂, 赵淑梅, 等. H型栽培架组合方式对光照及草莓生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 234-239.
- [9] 方慧, 程瑞锋, 伍纲, 等. 温室多层立体栽培联合补光对生菜产量及品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 147-154.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 陈宗玲, 刘鹏, 张斌, 等. 立体栽培草莓的光温效应及其对光合的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 42-48.
- [12] 朱雨晴, 薛晓萍. 遮阴对花果期番茄植株生长及干物质分配的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(13): 157-163.
- [13] 吴少博, 张伟豪, 赵麒栋, 等. H型栽培架层间距对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(3): 112-120.
- [14] 周静, 李萍萍, 王纪章, 等. 立体栽培条件下光温环境对生菜生长和生理特征影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 530-535.
- [15] 刘新红, 严少华, 罗佳, 等. A型立体栽培架密集摆放对栽培小白菜生长及受光的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31(12): 1-7.
- [16] 赵玉萍. 不同温度光照对温室番茄生长、光合作用及产量品质的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2010.
- [17] 马德华, 庞金安, 霍振荣, 等. 环境因素对黄瓜幼苗光合特性的影响[J]. 华北农学报, 1997, 12(4): 97-100.
- [18] 李邵, 苏炜宣, 宋少恒, 等. 光温耦合对日光温室番茄生长、产量与品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(6): 122-128.
- [19] 吕长山, 王金玲, 于广建, 等. 不同光照强度对辣椒果实品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2005(1): 47-48.
- [20] 杨延杰, 李天来, 林多, 等. 光照强度对番茄生长及产量的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, 24(3): 199-202.