

李浩,张森,田兴武,等. 减量基质下栽培密度及功能物质对甜椒植株生长的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):161-168.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.021

减量基质下栽培密度及功能物质 对甜椒植株生长的影响

李浩¹,张森¹,田兴武²,罗珊¹,张倩男¹,张晶晶³,杨玲³,张雪艳¹

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院,宁夏银川 750021; 2. 吴忠国家农业科技园区管理委员会,宁夏吴忠 751100;
3. 宁夏回族自治区银川市农业技术推广中心,宁夏银川 750004)

摘要:针对无土栽培基质成本较高,以及在宁夏减量基质下植株生长可能受一定抑制的问题,本试验采用轻简无土栽培系统,以甜椒为试验材料,以 30 000 株/hm² 种植为对照(CK),设置 30 000 株/hm² + 功能物质(OD1)、34 500 株/hm² + 功能物质(OD2)、40 500 株/hm² + 功能物质(OD3)、46 500 株/hm² + 功能物质(OD4)4 个处理,探究栽培密度和功能物质施用对甜椒植株生长的影响。结果表明,除 OD2 处理外,施用功能物质的处理随甜椒栽培密度增加基质 pH 值、EC 值降低,且 OD3 处理相比 CK 显著增加基质速效磷含量;功能物质施用处理植株的地上干重和总生物量随种植密度的增加呈降低趋势,而根冠比呈增加趋势;功能物质添加对根系发育有促进作用,相比 CK,根平均直径显著增加,OD2、OD3 处理的总根长分别显著增加 18.60%、34.10%,OD1 处理的根表面积、根体积分别显著增加 12.51%、85.56%;OD1、OD2 处理降低了叶片 SOD 和 POD 活性,OD1 处理的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度比 CK 分别显著增加 352.47%、14.74%;通过综合评价得出,OD1 处理的效果高于 CK,其他处理的效果均低于 CK。综上,功能物质添加对甜椒植株生长有促进作用,30 000 ~ 34 500 株/hm² 栽培密度的植株生长优于 40 500 ~ 46 500 株/hm²。

关键词:减量基质;栽培密度;功能物质;甜椒;生长指标

中图分类号:S641.304 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0161-08

多年连续种植的设施土壤,残留病原物较多、产量低品质差等问题越来越凸显,严重影响土壤的利用,无土栽培是有效解决连作障碍的措施之一,该栽培方式更利于现代化种植^[1]。但无土栽培基质价格昂贵,采用减量基质栽培可有效减少基质用量,节约无土栽培成本^[2]。

合理群体结构可以改善植株群体通风状况和透光水平,提高群体光合生产能力^[3]。种植密度是建立合理群体的基础,合理密植可以提高作物养分和光能的利用效率,形成最佳群体结构以发挥其增产潜力,这是提高作物产量的重要途径之一^[4]。目前,国

内外关于种植密度对作物影响的研究表明,一定范围内增加种植密度可提高植物群体的光能利用率,进而影响植株的生长;而过高的种植密度会使植株之间对光、水和养分等资源的竞争加剧,进一步造成植株生长受限^[5-6]。同时,作物自身的品种差异、地域之间气候因子也是影响作物最佳种植密度的重要因素^[7]。目前,尽管已有大量关于作物产量形成对密度响应的研究,但主要集中在玉米、水稻、小麦、棉花、烟草等作物上^[8-12],而在辣椒上鲜有报道。

施用微生物菌剂能改善作物根际微生态环境的理化、生物性状,促进根系生长,增强作物抗性。木霉菌(*Trichoderma* spp.)是一种广泛存在于自然界且具有重要作用的植物促生及抗逆潜能的真菌,其对作物生长发育和产量有显著促进作用^[13-14]。木霉菌具有一定的根际定殖能力,能维持根系正常生长,提高土壤肥力^[15]。它可通过与植物根系互动,诱导植物体内代谢发生变化,促进植物生长、提高作物产量及品质,已作为有益生防菌及生物肥料被应用于生产^[16]。在甜瓜、辣椒栽培中,化肥减量配施木霉菌可以通过改善土壤微生物群落,调节土壤酶活性,进而提高产量和品质^[17-18]。壳寡糖是一

收稿日期:2024-04-25

基金项目:吴忠市自治区级农业高新技术产业示范区建设专项项目(编号:2021WZYQ0002);宁夏西部一级学科项目园艺科学计划(编号:NXYLKK2017B03);宁夏冷凉蔬菜高效生产和特色瓜菜种植利用科技创新团队项目(编号:2024CXTD010)。

作者简介:李浩(1999—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事设施蔬菜栽培生理与生态研究。E-mail:lh15037688605@163.com。

通信作者:张雪艳,博士,教授,主要从事蔬菜栽培生理与生态研究。E-mail:zhangxueyan123@sina.com。

类低聚合度水溶性糖类,近年来被广泛用于抗逆、杀菌、植物生长调节等农业领域^[19-20]。在农业生产上,壳寡糖主要以叶面肥的形式施用,较少用于根施,其可提高植物对病原菌的抵抗能力,启动和激发植物的防御系统,作为植物生长调节剂,可促进植物细胞分化,刺激植物生长^[21]。

因此,本试验采用减量基质进行甜椒无土栽培,以 30 000 株/hm² 栽培密度为对照,在添加功能物质的情况下设置不同栽培密度,系统评价种植密度和功能物质施用对甜椒植株生长的影响,明确功能物质对甜椒植株生长特性的影响,以及减量基质下甜椒的合理栽培密度,从而为减量无土栽培在宁夏甜椒高效栽培种植中的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2020 年 11 月 1 日至 2021 年 5 月 3 日在宁夏吴忠孙家滩国家农业科技园区(38°33'75"N,

106°38'54"E)F 区 2 号日光温室内进行。试验以铝箔制作栽培槽,槽长 20 m、宽 0.15 m、高 0.1 m,呈东西行向,间距 1.5 m,填充复合栽培基质(草炭、蛭石、珍珠岩),并结合水肥一体化技术应用(图 1)。本试验以甜椒(红盾,购自山东欧瑞可种子有限公司)为试验材料,以 30 000 株/hm² + 无功能物质为对照(CK),设置 30 000 株/hm² + 功能物质(OD1)、34 500 株/hm² + 功能物质(OD2)、40 500 株/hm² + 功能物质(OD3)、46 500 株/hm² + 功能物质(OD4)处理。每个处理重复 3 次,小区面积 40 m²,采用完全随机区组排列,所有处理统一水分供应。功能物质为木霉菌(购自黑龙江八一农垦大学,主要为哈茨木霉菌和长枝木霉菌,菌种含量 20 亿个/g)和壳寡糖(购自黑龙江八一农垦大学),分别在缓苗后(定植 21 d)、果实转色期(定植 65 d)施用 1 次,施用方法为每次将 100 g 木霉菌剂溶于 40 kg 水中,使用前加入红糖活化 3 h 灌根,灌根的同时叶面喷施壳寡糖 400 mg/L。

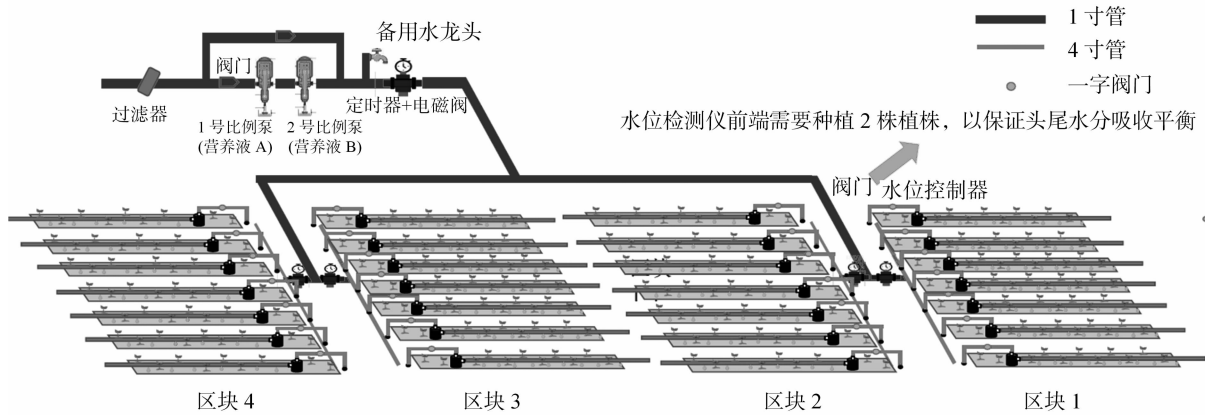


图1 减量基质自动化无土栽培技术

1.2 样品采集和分析方法

甜椒定植缓苗 14 d(2020 年 11 月 15 日)后,每个处理取代表性植株 5 株,测量株高、茎直径,每 3 周测定 1 次,连续测定 6 次。采用钢制卷尺从甜椒茎基部到生长点测定株高,用游标卡尺在距地面 1 cm 处测定茎直径。利用以下公式计算株高相对生长率(RGH - PH)、茎体积相对生长率(RGH - SV)。公式如下:

$$RGH - PH = (\ln Q_2 - \ln Q_1) / (t_2 - t_1); \quad (1)$$

$$RGH - SV = (\ln D_2 D_2 Q_2 - \ln D_1 D_1 Q_1) / (t_2 - t_1); \quad (2)$$

式中:Q₁、Q₂ 分别代表 t₁、t₂ 时的株高;D₁、D₂ 分别代表 t₁、t₂ 时的茎直径;t₁、t₂ 分别代表初始和结束

时间。

在甜椒盛果期,每个处理采集代表植株 5 株,植株分为地上部和地下部,用天平测定地上部鲜重、根鲜重,地下部根系通过根系扫描仪(EPSON V700)处理,并采用 WinRHIZO 软件分析得到根长、根体积、根直径、根表面积。在 105 ℃ 下杀青 30 min,后用烘箱烘干至恒重,分别测定地上部干重以及根干重。

甜椒盛果期每个处理选代表性植株 5 株,选取植株第 4 张叶,用光合仪(LI - 6800,美国)和荧光仪器(OS5p,美国)测定甜椒的胞间 CO₂ 浓度、净光合速率和最大光化学效率(F_v/F_m)。

甜椒盛果期每个处理选代表性植株 5 株,取第

4 张叶,将叶片用液氮冷冻后,置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;用愈创木酚-过氧化氢比色法测定过氧化物酶(POD)活性^[22]。

在甜椒盛果期(2021 年 4 月 21 日)采用五点取样法取每个处理的基质样品,风干过 1 mm 筛,进行基质养分含量测定。pH 值采用 pH 计测定,基质电导率(EC)值采用电导率仪测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 $1\text{ mol/L NH}_4\text{Ac}$ 浸提-火焰光度法测定^[23]。

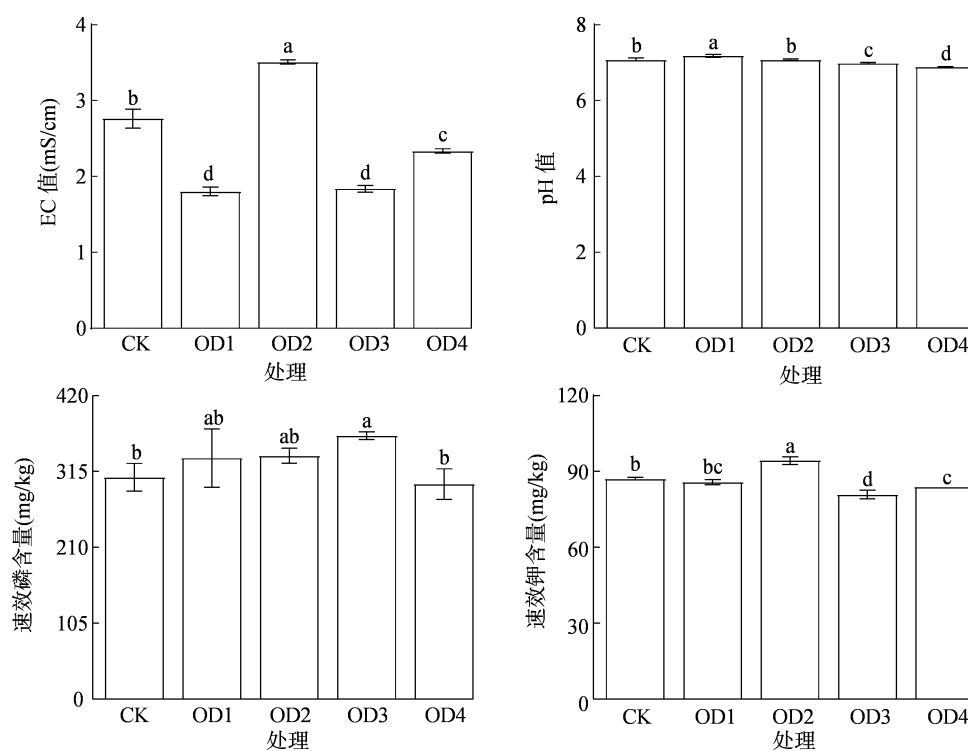
1.3 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 25 软件对试验数据进行统计与分析。采用单因素 Duncan's 检验法在 $\alpha = 0.05$ 水平进行显著性分析,使用 Graphpad Prism 9.5 和 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 栽培密度及功能物质对甜椒植株基质特性的影响

由图 2 可知,相比 CK,除 OD2 处理外其他处理均显著降低了基质的 EC 值,OD2 处理的 EC 值显著提高了 27.02%;OD1、OD3 处理的 EC 值最低,显著低于其他处理。功能物质灌溉和喷施处理下,相较于 CK,OD3、OD4 处理基质 pH 值显著降低 1.36%、2.78%,OD1 处理 pH 值显著增加 1.37%。随种植密度的增加,各功能物质处理基质的速效磷含量呈先增加后降低的趋势,与 CK 相比,OD3 处理显著增加了基质速效磷含量,为 18.68%。相比 CK,OD2 处理基质速效钾含量显著增加 8.25%,其余处理基质速效钾含量整体呈下降趋势。



柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

图2 栽培密度及功能物质对甜椒植株基质特性的影响

2.2 栽培密度及功能物质对甜椒植株生物量的影响

由图 3 可知,不同处理间甜椒株高相对生长速率无显著差异。相比 CK,基质添加功能物质显著降低茎体积相对生长率(除 OD3 处理外),OD3 处理与 CK 茎体积相对生长率间无显著差异;密度处理

总体对茎体积相对生长率先降低后升高趋势。

由图 4 可知,功能物质添加处理随种植密度的增加,地上部干重降低,与 CK 相比,OD1 处理植株的地上部干重无显著差异,且 OD3、OD4 处理的地上部干重低于其他处理。不同处理间地下部干重无显著差异。与 CK 相比,功能物质的添加在一定

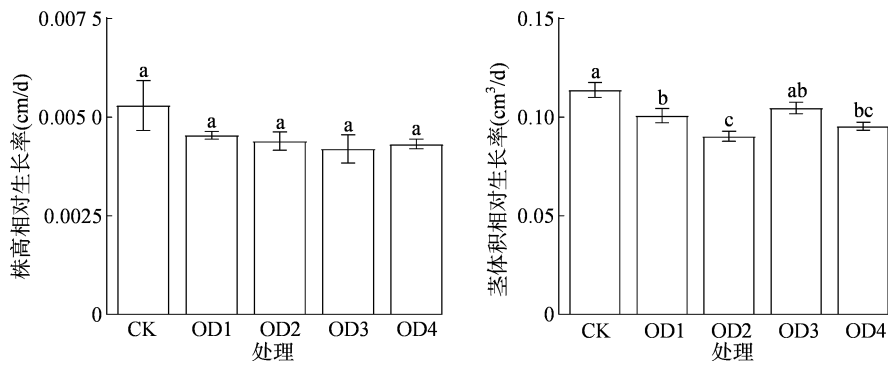


图3 栽培密度及功能物质对甜椒植株生长特性的影响

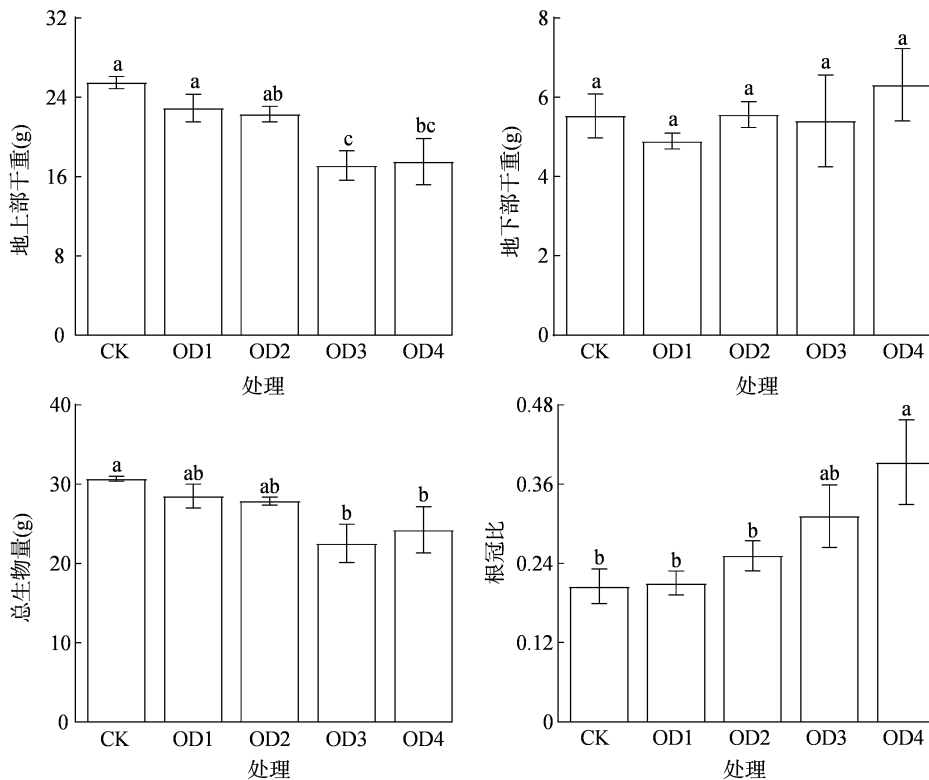


图4 栽培密度及功能物质对甜椒植株生物量的影响

程度上促进了根冠比增加,且 OD4 处理与其他处理存在显著差异。相比 CK, OD1、OD2 处理对总生物量无显著影响,但功能物质添加处理随栽培密度的增加,总生物量呈降低趋势,OD3、OD4 处理的总生物量显著降低 26.55%、20.98%。

2.3 栽培密度及功能物质对甜椒植株根系特性的影响

由图 5 可知,相比 CK, OD1 处理根平均直径、根表面积和根体积分别显著增加 24.77%、12.51%、85.56%。功能物质添加处理随种植密度增加总根长呈先增加后降低的趋势,根平均直径和根表面积呈降低趋势。相比 CK, OD3 处理根体积显著降低了 58.99%,与 OD2、OD4 处理无显著差异。

2.4 栽培密度及功能物质对甜椒植株叶片抗氧化酶活性、光合和荧光特性的影响

由图 6 可知,与 CK 相比, OD1、OD4 处理对 SOD 活性无显著影响, OD2 处理显著低于其他处理, OD3 处理的 SOD 活性最高。OD1 处理 POD 活性比 CK 显著降低 40.05%,且随栽培密度增加 POD 活性呈增加趋势。

由图 7 可知,相比 CK, OD1 处理显著增加净光合速率和胞间 CO₂ 浓度,分别增加 352.47%、14.74%; OD2、OD3、OD4 处理均比 OD1 处理显著降低净光合速率和胞间 CO₂ 浓度。OD1 处理 F_v/F_m 比 CK 显著降低 26.40%,但 OD2、OD3、OD4 处理未显著改变 F_v/F_m 。

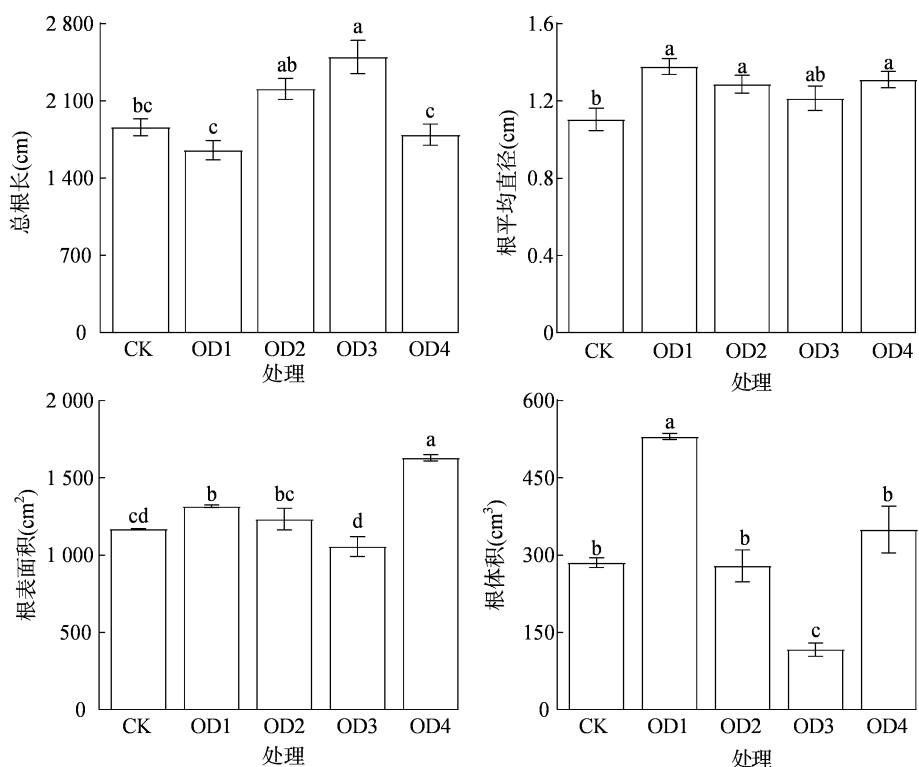


图5 栽培密度及功能物质对甜椒植株根系特性的影响

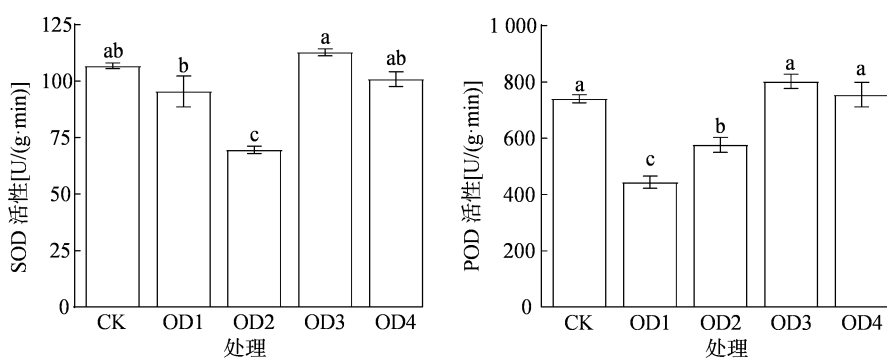


图6 栽培密度及功能物质对甜椒植株叶片抗氧化酶活性的影响

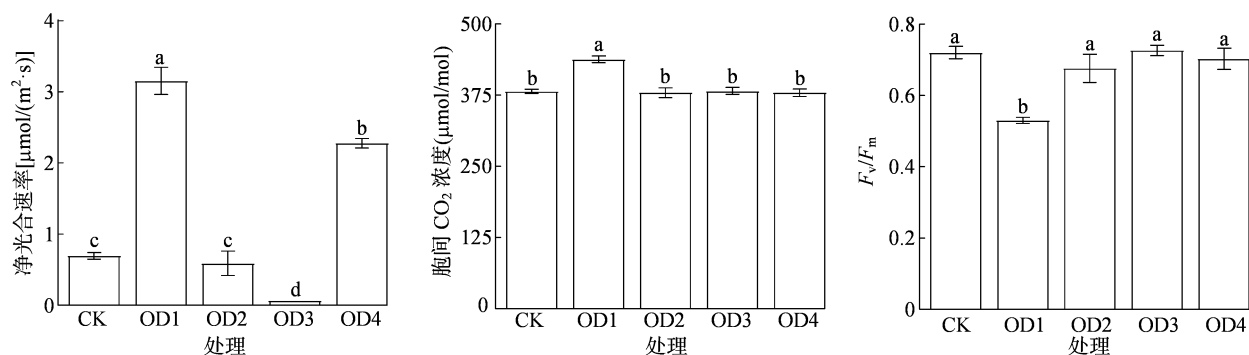


图7 栽培密度及功能物质对甜椒植株叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和 F_v/F_m 的影响

2.5 主成分分析

由表 1 可以看出,主成分 1、主成分 2、主成分 3 和主成分 4 初始特征值均大于 1,初始特征值中主成

分 4 的累计贡献率达到 100%。从表 2 可以看出,综合主成分值排名为 OD1 > CK > OD2 > OD4 > OD3。

对基质特性,甜椒植株的生长特性、生物量、根

表 1 总方差解释

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)	总计	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	7.323	38.541	38.541	7.323	38.541	38.541
2	4.888	25.728	64.269	4.888	25.728	64.269
3	3.559	18.734	83.003	3.559	18.734	83.003
4	3.229	16.997	100.000	3.229	16.997	100.000

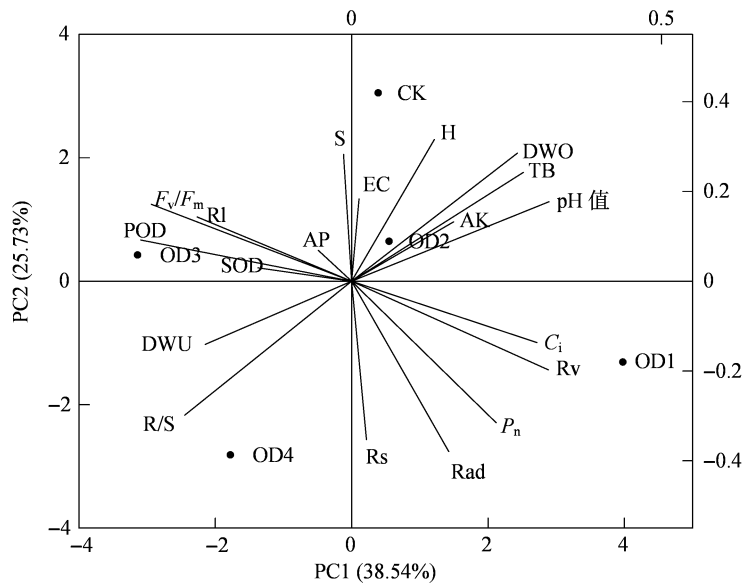
表 2 不同处理主成分值、隶属函数值、综合评价及综合排名

处理	F_1	F_2	F_3	F_4	U_1	U_2	U_3	U_4	F	排名
OD1	42.159	-23.877	-15.414	3.560	1.000	0.035	0.264	0.599	7.823	1
CK	-4.194	22.427	8.267	12.290	0.383	1.000	0.771	0.778	7.791	2
OD2	3.860	11.638	18.988	-25.827	0.490	0.775	1.000	0.000	3.649	3
OD4	-8.881	-25.573	15.929	23.198	0.320	0.000	0.935	1.000	-3.075	4
OD3	-32.944	15.385	-27.770	-13.220	0.000	0.853	0.000	0.257	-16.188	5

注： F 为主成分值， U 为隶属度。

系特性,叶片酶活性以及光合、荧光特性进行 PCA 分析,结果(图 8)表明,主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)分别解释差异的 38.54% 和 25.73%,即总变异的 64.27%。CK、OD2 处理与其他处理可以显著区分开,且 OD1 处理与 OD3、OD4 处理分布在 y 轴两侧。CK 和 OD2 处理具有较高的株高相对生长

率、地上部干重、速效钾含量和总生物量,OD1 处理具有较高的光合特性、根体积、根表面积和根平均直径,OD3 处理具有较高的根长、SOD 活性、POD 活性。根长度与根表面积、根体积、根平均直径呈显著负相关。



H—株高相对生长率; S—茎体积相对生长率; DWO—地上部干重; DWU—地下部干重; TB—总生物量; R/S—根冠比; SOD—叶片的 SOD 活性; POD—叶片的 POD 活性; AK—速效钾含量; AP—速效磷含量; P_n —净光合速率; C_i —胞间 CO_2 浓度; R_i —根长度; R_s —根表面积; R_v —根体积; Rad—根平均直径

图8 不同处理的各主成分分析

3 讨论

减量基质栽培相比传统无土栽培,基质投入量

减少 62.5%。另外,该减量基质安装水位控制器,因此培养液管理自动,可根据植株对培养液的需求而供给,实现施肥灌溉精准管控。同时,结合栽培

密度及功能物质施入,对甜椒植株生长具有重要意义。

功能物质添加处理中,增加栽培密度会使基质酸性上升。OD4 处理的基质 pH 值最低,可能是因为随着甜椒植株密度的增加,根系总生物量增加,根系分泌的有机酸含量增加,使根际基质酸化。相同栽培密度下添加功能物质(OD1 处理),EC 值降低,pH 值升高,表明木霉菌接种可以显著改善基质 pH 值。相关研究报道,木霉菌的代谢产物可以提高周围环境的 pH 值^[24]。木霉菌可以降解有机酸,包括阿魏酸、苯甲酸、羟基苯甲酸、肉桂酸等^[25]。Huang 等在设施蔬菜退化土壤中接种木霉菌后也发现,木霉菌能够显著提高土壤 pH 值、降低土壤电导率,同时,有利于集约化农业中退化土壤的修复^[26]。

功能物质添加处理中随栽培密度的增加,甜椒植株的地上部干重、生物量呈降低趋势,根冠比呈增加趋势。这可能是由于栽培密度增加,造成植株对基质养分、光和水资源的竞争加剧,继而对植株产生的胁迫增加,胁迫刺激根长增加,但对根直径和表面积产生负面影响,这与本试验中根系特性的研究结果一致。植物的高生长、生物量累积以及生物量累积分配(即根冠比)是表征其受胁迫程度的 3 个常用生长指标,其中,生物量是植物对胁迫反应的综合体现,即对胁迫的综合适应,也是植物耐胁迫的直接指标^[27-29]。因此,高生长、生物量累积和根冠比为评估胁迫强度和植物的耐胁迫能力提供了可靠标准^[30]。本研究中,随着栽培密度增加,生物量降低,根冠比增加,说明减量基质过大栽培密度会胁迫植株生长,且对甜椒植株地上部的抑制作用大于根系。根表面积可以反映植物与土壤的接触面,与根系吸收水分、养分含量和吸收能力相关^[31]。而根系直径可以反映植物根系总吸收功效,与植株对土壤水分和养分的吸收能力相关^[32]。根体积可以反映植株根系健壮程度^[33]。相比 CK,OD1 处理显著提高甜椒植株的根平均直径、根表面积、根体积。这可能是木霉菌在植物根系定植时产生了刺激植物生长和诱导植物防御反应的化合物,能够改善作物根系的微生物环境,从而明显促进甜椒根系对水分和养分的吸收能力。

在遭遇胁迫时,植株能够通过累积抗氧化酶来减轻对膜系统的过氧化伤害。相比 CK,在栽培密度为 30 000 株/hm² 时施入功能物质甜椒叶片的 POD 活性和 F_v/F_m 值降低,净光合速率和胞间 CO₂ 浓度

升高。CK 的甜椒叶片 POD 活性较高,说明受到的胁迫影响较大,植物需要累积更多的抗氧化酶来清除过多的活性氧,从而降低细胞受到的损害,较大程度地维持植物正常生长^[34]。而施入功能物质处理的甜椒叶片 POD 活性降低,可能是木霉菌通过分泌细胞壁降解酶类和次级代谢产物,诱导植物抗性,降低了胁迫对甜椒植株的影响;外源壳寡糖也能够抑制植株产生活性氧,并降低膜脂过氧化水平,从而增强其抵抗胁迫的能力^[35-36]。木霉菌通过调节逆境下的氧化还原信号状态及相关途径的基因表达,以及壳寡糖通过提高叶绿素含量和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(rubisco)活性来提高植物光合效率^[37-38]。功能物质添加处理随着密度的增加,甜椒植株叶片的 POD 活性呈升高趋势,净光合速率呈降低趋势,说明随着密度的增加,植株受到的氧化性伤害增大,净光合速率降低,减量基质过大栽培密度下植株受到的胁迫增加。

4 结论

本研究结果表明,功能物质添加处理中随栽培密度增加,甜椒植株生长受基质减量的影响增加,当栽培密度在一定程度时会缓解减量基质的危害,但栽培密度过大会造成基质养分等竞争,抑制地上部生长,促进根长增加。在种植密度为 30 000 株/hm² 时施入功能物质,可降低减量基质对甜椒植株生长的影响。主成分综合分析也表明,甜椒的栽培密度为 30 000 株/hm² 且施入功能物质的处理效果最优。

参考文献:

- [1] 蒋卫杰,邓杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3515-3523.
- [2] 寿伟松,梁晓东,董文其,等. 基质用量对黄瓜生长发育的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(12):223-225.
- [3] 王海泽,王振国,李岩,等. 不同施氮量与种植密度对高粱产量及品质的影响综述[J]. 现代农业科技,2024(3):6-9,12.
- [4] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:142-228.
- [5] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure[J]. Chemosphere, 2008, 72(7):1013-1019.
- [6] 欧阳素影,王志权,李青,等. 辣椒株型调控研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(5):1248-1256.
- [7] 杨竹,周宾寒,吴翠翠,等. 氮密互作对弱筋小麦长麦 8 号产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学,2024,52(5):23-27.
- [8] 李龙,王占海,赵海波,等. 不同种植密度对小麦产量及其构成

- 因素的影响[J]. 现代农业科技,2025(5):14-16.
- [9]刘春晓,汪黎明,董瑞,等. 种植密度对籽粒机收玉米‘鲁单608’生长发育和产量的影响[J]. 中国农学通报,2025,41(2):23-27.
- [10]卢志民. 棉花高密度种植技术对产量与品质的影响研究[J]. 粮油与饲料科技,2024(11):59-61.
- [11]柴紫薇,李亚东,杨升,等. 不同氮素对不同种植密度水稻产量的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2025,47(2):209-219.
- [12]王玉林,孙延国,高峻,等. 施氮量与种植密度对‘中烟100’烟叶产量及化学成分的影响[J]. 山东农业科学,2022,54(7):113-121,134.
- [13]Hyakumachi M. Plant-growth-promoting fungi from turfgrass rhizosphere with potential for disease suppression[J]. Soil Microorganism,1994,44:53-68.
- [14]Masunaka A,Hyakumachi M,Takenaka S. Plant growth-promoting fungus, *Trichoderma koningi* suppresses isoflavonoid phytoalexin vestitol production for colonization on/in the roots of *Lotus japonicus* [J]. Microbes and Environments,2011,26(2):128-134.
- [15]Hermosa R,Belén Rubio M,Cardoza R E, et al. The contribution of *Trichoderma* to balancing the costs of plant growth and defense[J]. International Microbiology,2013,16(2):69-80.
- [16]Bahrke M S,Morgan W P,Stegner A. Is ginseng an ergogenic aid? [J]. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism,2009,19(3):298-322.
- [17]熊亚男. 化肥减施与有机肥及木霉菌剂配施对薄皮甜瓜品质和肥料利用的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2022:57-60.
- [18]靳亚忠,熊亚男,孙雪,等. 化肥减施与木霉菌有机肥配施对辣椒产量、品质及根际土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报,2021,39(2):198-204.
- [19]赵政,陈巍,王欢,等. 木霉微生物肥与减量化肥配施对番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 土壤学报,2018,55(5):1243-1253.
- [20]刘瑶,钟志梅,赵智宏. 低聚壳寡糖(DP=6~8)的制备及其体外抗氧化活性研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2023,44(1):87-92.
- [21]姚艳平,王建明,张作刚,等. 几丁寡糖在木霉菌生物防治中的作用[J]. 山西农业科学,2013,41(2):194-196.
- [22]李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:195-197.
- [23]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.
- [24]赵静. 铜污染土壤的木霉强化海州香薷修复研究[D]. 武汉:华中农业大学,2009:51-52.
- [25]Chen L H,Yang X M,Raza W, et al. *Trichoderma harzianum* SQR-T037 rapidly degrades allelochemicals in rhizospheres of continuously cropped cucumbers [J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2011,89(5):1653-1663.
- [26]Huang X Q,Liu L L,Wen T, et al. Reductive soil disinfections combined or not with *Trichoderma* for the treatment of a degraded and *Rhizoctonia solani* infested greenhouse soil [J]. Scientia Horticulturae,2016,206:51-61.
- [27]Vicente O,Boscaiu M,Naranjo M á, et al. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae) [J]. Journal of Arid Environments,2004,58(4):463-481.
- [28]Levitt J. Response of plants to environmental stress [M]. New York:Academic Press,1980:365-434.
- [29]张帆,刘博,石玉,等. 干旱胁迫下嫁接对辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(5):186-191.
- [30]Zafar Z,Rasheed F,Delagrance S, et al. Acclimatization of *Terminalia Arjuna* saplings to salt stress: characterization of growth, biomass and photosynthetic parameters [J]. Journal of Sustainable Forestry,2020,39(1):76-91.
- [31]Ma Z,Baskin T I,Brown K M, et al. Regulation of root elongation under phosphorus stress involves changes in ethylene responsiveness [J]. Plant Physiology,2003,131(3):1381-1390.
- [32]Caplan J S,Meiners S J,Flores-Moreno H, et al. Fine-root traits are linked to species dynamics in a successional plant community [J]. Ecology,2019,100(3):e02588.
- [33]Guo H C,York L M. Maize with fewer nodal roots allocates mass to more lateral and deep roots that improve nitrogen uptake and shoot growth [J]. Journal of Experimental Botany,2019,70(19):5299-5309.
- [34]蔡琪琪,王堃,董寅壮,等. 不同中性盐胁迫对甜菜幼苗光合作用和抗氧化酶系统的影响[J]. 作物杂志,2022(1):130-136.
- [35]Harman G E. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. [J]. Phytopathology,2006,96(2):190-194.
- [36]陈芊如,丁蓬勃,胡希好,等. 外源壳寡糖对低温胁迫条件下烟草幼苗的保护作用[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):80-85.
- [37]陈双臣,姬德刚,李聪,等. 哈茨木霉诱导番茄叶片光合生理变化的研究[J]. 园艺学报,2014,41(3):489-497.
- [38]李映龙,单守明,刘成敏,等. 叶面喷施壳寡糖对华脆苹果光合作用和果实品质的影响[J]. 农业科学研究,2019,40(3):19-22.