

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.011

机械移栽黄瓜穴盘苗育苗品质评价与试验

刘洋^{1,2} 毛罕平^{1,3} 徐静云^{1,3} 沈宝国^{1,3} 韩绿化^{1,3} 李亚雄²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000;
3. 江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了得到兼顾生长质量和机械移栽性能的黄瓜穴盘苗,以育苗基质配比(草炭:珍珠岩:蛭石混合体积比为2:1:1、3:1:1和4:1:1)、基质压实度(基质与穴孔的体积比为1.0、1.2和1.4)和营养液浓度(营养液电导率为1.0、1.2、1.4 mS/cm)为因素开展正交试验。进行压缩和拉拔试验,测量黄瓜穴盘苗的抗压力和脱盘力;计算黄瓜穴盘苗的壮苗指数;利用X射线 μ CT扫描仪对苗钵进行检测和根系三维重构,在垂直方向用根系分布密度最小和最大值的比值表达根系均匀程度,水平方向上用外围根系分布密度表达根系包裹苗钵的紧密程度。通过方差分析可知各因素对试验指标有不同程度的影响。以苗钵的抗压力、脱盘力、壮苗指数、根系均匀系数和外围根系分布密度为优化目标,用综合评分法得出当育苗基质配比为3:1:1、基质压实度为1.2、营养液电导率为1.2 mS/cm时,育苗品质最优。在取苗频率为43、48、53株/min时进行取苗试验,结果表明,在该组因素组合条件下,苗钵破损率分别为3.6%、3.9%和4.3%,取苗成功率为97.2%、96.1%和94.8%,优于其它因素组合的试验结果,与综合评分方法优选的结果一致。

关键词: 黄瓜穴盘苗; 移栽; 育苗品质; 评价

中图分类号: S233.2; S188 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0075-08

Seedling Quality Evaluation and Experiments of Cucumber Plug Seedlings for Mechanical Transplantation

LIU Yang^{1,2} MAO Hanping^{1,3} XU Jingyun^{1,3} SHEN Baoguo^{1,3} HAN Lühua^{1,3} LI Yaxiong²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China
3. High-tech Key Laboratory of Agricultural Equipment & Intelligentization of Jiangsu Province, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Automatic transplanters can improve the transplanting efficiency of vegetable seedling plugs, which are widely applied and valued in production. However, the transplantation of automatic transplanters is limited by pick-up failure or root lump destruction. To get plug seedling quality suitable for mechanical transplantation, orthogonal experiments targeting at cucumber plug seedlings and involving factors of substrate composition (ratios of sphagnum peat moss to perlite and vermiculite volume were 2:1:1, 3:1:1 and 4:1:1), substrate compaction (ratios of substrate to pore volume were 1.0, 1.2 and 1.4) and liquid fertilizer concentration (EC values were 1.0 mS/cm, 1.2 mS/cm and 1.4 mS/cm) were conducted. The cucumber plug seedlings were compressed or drawn by using a texture analyzer to test the compressive resistance and plug abscission force. The stem thickness, plant height, dry root weight and dry stem weight were measured, and the growing quality was evaluated using a sound seedling index. Root lumps were scanned by an X-ray micro-computed tomography (μ CT). Roots were isolated from root lumps by using a threshold segmentation method and three-dimensionally reconstructed. The roots were divided into five equal parts vertically and six equal parts horizontally; the ratio of root volume in each

收稿日期: 2018-07-05 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475216)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、现代农业装备与技术教育部重点实验室和江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室开放基金项目(NZ201607)、江苏省高校优势学科建设工程项目(苏财教[2014]37号)、江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB210002)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ16_0329)

作者简介: 刘洋(1978—),男,博士生,新疆农垦科学院副研究员,主要从事蔬菜移栽机械研究,E-mail: lyshz@163.com

通信作者: 毛罕平(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与设施农业环境控制技术研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

part to the volume of root lump in this zone was defined as the root density. Then the root volume and density were statistically analyzed. It was found that the compressive resistance and plug abscission force were both significantly affected by the substrate composition and substrate compaction. Both compressive resistance and plug abscission force were improved with the rise of sphagnum peat moss concentration or compaction degree. The sound seedling index was firstly increased and then decreased with the rising concentration of sphagnum peat moss in the substrate, compaction and fertilization concentration. Vertically, the ratio of minimum to maximum root distribution densities was defined as the root uniformity degree, which was used to evaluate the root uniformity. Horizontally, the peripheral root distribution density was used to evaluate the lump enveloped degree. Clearly, substrate composition, compaction and fertilization concentration all significantly affected the root uniformity coefficient and root enveloping coefficient. Multi-object optimization of compressive resistance, plug abscission force, sound seedling index, root uniformity and peripheral root distribution density were conducted via a comprehensive scoring method, which identified the optimal three-factor combination were substrate composition of 3:1:1, substrate compaction of 1.2 and liquid fertilizer EC value of 1.2 mS/cm. Experiments on automatic pick-up transplanter showed at the frequency of clamping seedlings were 43 plants/min, 48 plants/min and 53 plants/min, the root lump destruction rates were 3.6%, 3.9% and 4.3%, respectively, the pick-up success rates were 97.2%, 96.1% and 94.8%, respectively, which were better than other factor combinations and consistent with the comprehensive scoring result.

Key words: cucumber plug seedling; transplants; plug seedling quality; evaluation

0 引言

自动移栽机可以提高工作效率,在蔬菜穴盘苗移栽种植过程中得到了应用^[1]。移栽作业时,取苗爪将穴盘苗从穴盘中取出并投入到栽植部件中,这个过程会发生取苗失败和苗钵破损^[2-3]。为了解决这个问题,JIN等^[4]研究了取苗爪夹取角度、夹取力和取苗速度对取苗成功率和苗钵质量损失的影响;王跃勇等^[5]研究了取苗爪形状与苗钵完整率之间的关系;高国华等^[6]研究了夹针间距离、插入深度和角度对苗钵极限破坏力的影响;以上研究是通过优化取苗爪夹取苗钵的受力来提高取苗成功率和减小苗钵破损。JIANG等^[7]研究了基质配比、苗钵含水率和密度等因素对取苗成功率和苗钵破损率的影响;韩绿化^[8]用跌落试验研究了穴盘苗的基质配比、填充量和含水率与苗钵抗破碎特性之间的关系;这两项研究是通过提高苗钵的抗破碎性能来减小破损。SAOIRSE等^[9]研究了土壤类型和压实度与黄瓜苗根粗、根体积和主根长度等参数之间的关系;张硕等^[10]研究了不同成分的基质和对比对黄瓜苗株高、茎粗和植株干鲜重的影响;JONG等^[11]研究了施肥时营养液浓度与黄瓜苗株高、茎粗和茎叶鲜重的关系。这些报道是用蔬菜苗的物理参数来评价生长质量。可以看出,现有方法主要是用苗钵力学特性或者蔬菜苗的物理参数来研究穴盘苗的移栽性能和育苗质量,但是机械移栽时,不仅要保证良好的苗钵力学特性,还要保证穴盘苗生长壮和根系盘根效果好^[12-13],即适用于机械移栽的穴盘苗需要保持良好的育苗品质(以下简称育苗品质)。

育苗基质配比、压实度和施肥时营养液浓度是影响穴盘苗生长质量和苗钵力学特性的主要因素。本文以黄瓜穴盘苗为研究对象,以苗钵力学特性、壮苗指数和根系分布特征为指标,开展试验,优化得到具有良好育苗品质的育苗参数。

1 材料与方法

1.1 样本制备

在江苏大学现代温室用128孔穴盘培育黄瓜苗,穴孔的尺寸为:上宽30 mm,下宽13 mm,高40 mm,体积为19.45 cm³。育苗基质用草炭、珍珠岩和蛭石混合构成^[14],试验时苗龄28 d,长出两片子叶和一片心叶,苗钵含水率50%~55%。

1.2 试验设计

1.2.1 力学特性试验

用TA-XT2i型质地分析仪(英国Stable Micro System公司)对苗钵进行压缩和拉拔测试,得到位移与力的关系曲线。测试时压缩和拉拔的位移都为10 mm,速度为1 mm/s。

1.2.2 生长质量研究

用壮苗指数评价黄瓜穴盘苗的生长质量^[10],用游标卡尺测量茎粗和株高,在80℃条件下将根和茎叶干燥后测量质量。

$$R = \left(\frac{S}{H} + \frac{M}{N} \right) (M + N) \quad (1)$$

式中 R ——壮苗指数, g

S ——茎粗, mm H ——株高, mm

M ——根干质量, g

N ——茎叶干质量, g

1.2.3 根系分布特征研究

用 X 射线 μ CT 100 扫描仪 (瑞士 SCANCO Medical AG 公司) 对苗钵进行扫描和根系三维重构。将苗钵在垂直和水平方向分别划分成 5 和 6 等份 (图 1), 将每份中根系体积与所在区域苗钵体积的比值定义为根系分布密度, 对每个区域的根系体积和分布密度进行统计。

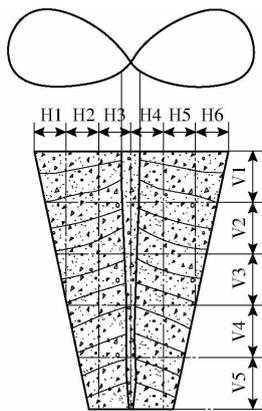


图 1 苗钵划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plug division

扫描时, μ CT 的参数设置为电压 55 kV, 电流 75 μ A, 分辨率 50 μ m, 断层图片整合时间 400 ms, 用 ALO. 1 过滤器对信号进行降噪处理, 苗钵含水率取 30% ~ 35% [15]。

1.2.4 统计分析

以育苗基质配比、压实度和营养液浓度为因素进行试验。育苗基质配比是指草炭、珍珠岩和蛭石混合时的体积比, 草炭是向黄瓜苗提供营养的物质, 它在基质中的含量应多于其他成分 [16], 试验中基质配比取 2:1:1、3:1:1 和 4:1:1。压实度是指育苗基质与穴孔的体积比, 适当增大压实度可以增加根系与基质的接触, 促进作物生长, 试验中压实度取 1.0、1.2 和 1.4。用倪纪恒等 [17] 报道的营养液配方配置母液, 将母液分别取 29、36、45 mL, 溶解在 10 L 水中, 制成 3 种浓度的营养液。用 HI9932 型电导率测试仪 (中国托普公司) 测量这 3 种浓度营养液的电导率分别为 1.0、1.2、1.4 mS/cm。分别在苗龄为 14、19、24 d 时对每盘穴盘灌溉营养液 2 L。试验因素和水平见表 1, 选取正交表 $L_9(3^3)$ 安排试验。

表 1 因素与水平

Tab. 1 Factors and levels

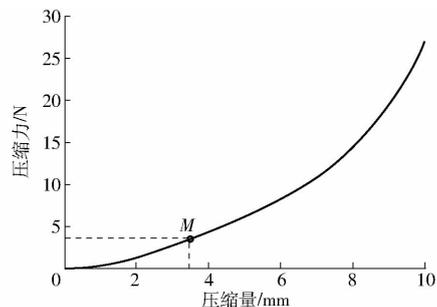
水平	因素		
	基质配比	压实度	营养液电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
1	2:1:1	1.0	1.0
2	3:1:1	1.2	1.2
3	4:1:1	1.4	1.4

每组试验测试 15 个样本, 用 SPSS 18 软件对数据进行处理。

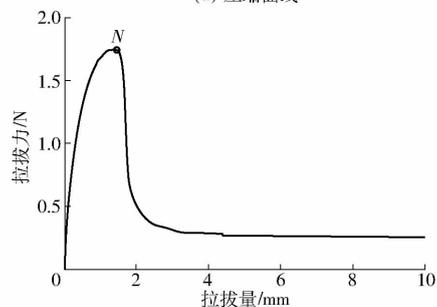
2 结果和讨论

2.1 力学特性分析

在不同因素组合条件下培育的黄瓜穴盘苗具有相似的力学特性, 取任意一组的压缩和拉拔曲线进行分析。图 2 是基质配比为 3:1:1、压实度为 1.2 和营养液电导率为 1.4 mS/cm 时, 得到的压缩力和拉拔力曲线。可以看到, 压缩力随着压缩量的增加而增大 (图 2a)。取苗爪对苗钵的夹紧应超过屈服点, 将苗钵压缩变形量为 3.5 mm 时点 M 的压缩力作为抗压力 F_M [18]。在拉拔穴盘苗的初始阶段, 拉拔力急剧增加, 当拉拔力增加到极限点 N 后迅速减小, 此时苗钵克服与穴孔壁面的粘附脱离穴盘 (图 2b), 将点 N 的拉拔力称为脱盘力 F_N 。



(a) 压缩曲线



(b) 拉拔曲线

图 2 力学特性曲线

Fig. 2 Mechanical characteristics curves

力 F_M 和 F_N 的正交试验和方差分析结果见表 2、3 (A 、 B 、 C 为因素编码值)。由表 3 可以看出, 基质对比对 F_M 影响显著 ($P < 0.05$), 对 F_N 影响非常显著 ($P < 0.01$); 压实度对 F_M 和 F_N 影响都非常显著 ($P < 0.01$); 营养液浓度对两个力的影响不显著 ($P > 0.05$)。

从表 2 可以看出, 力 F_M 和 F_N 随着基质中草炭含量的增多而增大, 这是因为含有水分的草炭具有粘结作用, 增加基质中草炭含量, 可以将珍珠岩和蛭石紧密联结在一起, 使苗钵的抗压力增大 [16]。草炭可以增大苗钵与穴孔壁面的粘附力, 使苗钵不易脱盘。增大压实度会减少苗钵中较大孔隙的体积和增

大苗钵与穴孔壁面的接触压力,使苗钵不易发生变形和粘附力增大^[12],因此力 F_M 和 F_N 随着压实度的增加而增大。

表2 压缩和拉拔正交试验结果

Tab.2 Orthogonal experiments of compression and drawing

试验号	A	B	C	抗压力 F_M/N	脱盘力 F_N/N							
1	1	1	1	2.659	1.268							
2	1	2	2	3.421	1.591							
3	1	3	3	4.095	1.918							
4	2	1	2	2.928	1.446							
5	2	2	3	3.547	1.759							
6	2	3	1	4.253	1.975							
7	3	1	3	3.596	1.631							
8	3	2	1	4.013	1.867							
9	3	3	2	4.843	2.227							
F_M	K_1 3.392	K_2 3.576	K_3 4.151	R 0.759	K_1 3.061	K_2 3.660	K_3 3.746	R 1.336	K_1 0.104			
F_N	K_1 1.592	K_2 1.727	K_3 1.908	R 0.316	K_1 1.448	K_2 1.739	K_3 2.040	R 0.592	K_1 1.703	K_2 1.755	K_3 1.769	R 0.066

表3 压缩和拉拔试验方差分析

Tab.3 Variance analysis of compression and drawing

因变量	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
F_M	A	0.940	2	0.4701	81.56	0.012
	B	2.687	2	1.343	233.03	0.004
	C	0.019	2	0.010	1.65	0.377
	误差	0.012	2	0.006		
F_N	A	0.151	2	0.075	275.26	0.004
	B	0.525	2	0.262	957.93	0.001
	C	0.007	2	0.004	13.14	0.071
	误差	0.001	2			

2.2 壮苗指数分析

壮苗指数的正交试验和方差分析结果见表4、5。从表5可以看出,基质配比和压实度对壮苗指数影响非常显著($P < 0.01$),营养液浓度对壮苗指数影响显著($P < 0.05$)。

由表4可以看到,壮苗指数随着基质中草炭含量、压实度和营养液浓度的增加都是先增大然后减小。增加基质中的草炭含量可以给黄瓜苗提供充足的营养物质,促进黄瓜苗的生长^[16],但是当基质配比为4:1:1时,基质中珍珠岩和蛭石比例很少,苗钵的透气性和保持水分能力降低^[14],这不利于黄瓜苗的生长。中等压实度的基质具有良好的保留水分能力,可以改善根与土壤的接触,使根系吸收足够的营

养物质,但是当压实度为1.4时,根系的生长阻力增大,致使根生长的短而粗,侧根的数量也会减小,这会减小根系与育苗基质的接触,影响根系对营养物质的吸收^[9]。因此基质压实度为1.2时壮苗指数最高。灌溉营养液,可以补充基质中营养物质的流失,促进黄瓜穴盘苗的生长^[17],但是当营养液的电导率为1.4 mS/cm时,较大的穴孔密度使黄瓜穴盘苗徒长,黄瓜苗生长得较高,而茎较细,导致壮苗指数降低^[19]。

表4 壮苗指数正交试验结果

Tab.4 Orthogonal experiments of sound seedling index

试验号	A	B	C	壮苗指数 R/g
1	1	1	1	0.0649
2	1	2	2	0.0747
3	1	3	3	0.0704
4	2	1	2	0.0720
5	2	2	3	0.0795
6	2	3	1	0.0748
7	3	1	3	0.0681
8	3	2	1	0.0756
9	3	3	2	0.0731
K_1	0.070	0.068	0.071	
K_2	0.075	0.076	0.073	
K_3	0.072	0.073	0.072	
R	0.005	0.008	0.002	

表5 壮苗指数方差分析

Tab.5 Variance analysis of sound seedling index

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
A	4.47×10^{-5}	2	2.23×10^{-5}	957.57	0.001
B	1.03×10^{-4}	2	5.13×10^{-5}	2200.43	0.001
C	3.42×10^{-6}	2	1.71×10^{-6}	73.28	0.019
误差	4.67×10^{-8}	2	2.33×10^{-8}		

2.3 根系分布研究

2.3.1 根系的三维重构

对苗钵扫描后(图3a),会生成多张体素为50 μm 的断层图片(图3b)。在断层图片中可以直观的辨别出主根所在的区域,围绕主根绘制封闭的边界线,可以在 μCT 操作系统中得到所选区域的阈值为81~97,对断层图片中的根系进行阈值分割和重构,得到根系的可视化图形(图3c、3d)^[20]。可以看到,侧根从主根向四周发散生长,接触到穴孔壁面后,改变生长方向,将苗钵缠绕包裹住。

在根系图中,包含有少量的育苗基质颗粒,这是因为部分育苗基质和根系的X射线衰减系数叠加在一起,断层图片中这些育苗基质和根系的对比度很低^[21],导致无法将育苗基质从根系中全部分离出。为了验证根系分割提取的精确度,将扫描过的苗钵用水洗去育苗基质并放入10 mL的量筒中,添

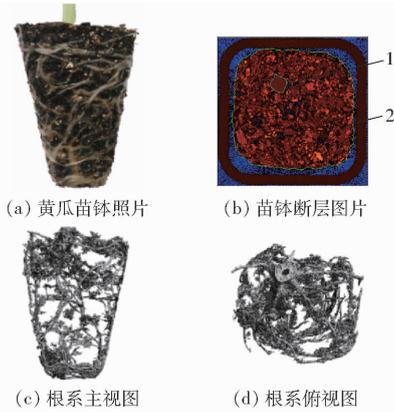


图3 根系的三维重构图形

Fig. 3 3D visualized images of root

1. 主根与边界线 2. 苗钵边界

加已知体积的水,可以测得根系的体积为 378.5 mm^3 ,在 μCT 操作系统中可以测得根系体积

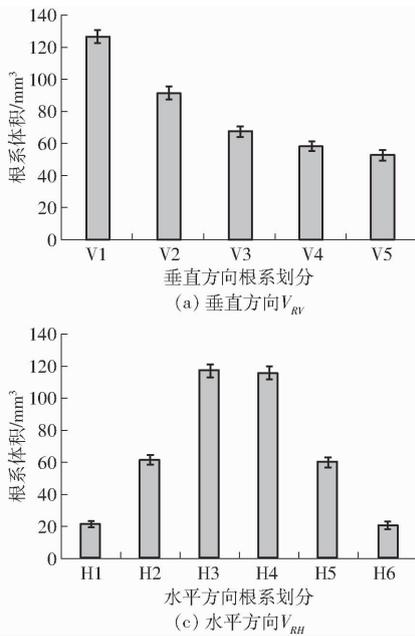


图4 根系体积和分布密度的分析值

Fig. 4 Analysis value of root volume and density

由图4的分析可知,根系的体积和分布密度在垂直和水平方向都发生变化。为了减小苗钵破碎,应该使较多的根系均匀分布在苗钵外围,将基质紧密地缠绕包裹住^[8,12]。在垂直方向,将 D_{RV} 的最小和最大值的比值定义为根系均匀系数 E_V ,作为评价垂直方向根系均匀程度的指标;在水平方向,H1和H6区域(I1和I2),以及H2、H5与V4、V5相交的区域(I3和I4)是外围根系分布的位置(图5),可以将这4个区域根系分布密度的平均值定义为外围根系分布密度 E_H ,作为评价根系包裹苗钵紧密程度的指标。

2.3.3 根系分布特征分析

根系分布特征的正交试验和方差分析结果见表6、7。从表7可以看到,基质配比对 E_V 影响显著

为 396.2 mm^3 ,相对误差为 4.68%,误差较小。

2.3.2 根系分布特征评价指标的制定

图4是基质配比为 3:1:1、压实度为 1.2 和营养液电导率为 1.4 mS/cm 时,根系体积和分布密度的分析值。垂直方向上 V1 到 V5 区域的根系体积 V_{RV} 分别为 126.5 、 91.6 、 67.4 、 58.2 、 52.5 mm^3 , V_{RV} 逐渐减小(图4a);V1 到 V5 区域根系分布密度 D_{RV} 分别为 0.0246 、 0.0209 、 0.0187 、 0.0196 和 0.0281 , D_{RV} 先减小然后增大(图4b)。水平方向上 H1 到 H6 区域根系体积 V_{RH} 分别为 21.7 、 61.5 、 116.7 、 115.4 、 60.1 、 20.8 mm^3 , V_{RH} 先增大然后减小,近似地呈对称分布(图4c)。H1 到 H6 区域的根系分布密度 D_{RH} 分别为 0.0273 、 0.0173 、 0.0252 、 0.0247 、 0.0169 和 0.0262 , D_{RH} 在 H1 和 H6 区域最高,在 H2 和 H5 区域最低(图4d)。

($P < 0.05$),对 E_H 影响非常显著($P < 0.01$);基质压实度对 E_V 和 E_H 影响非常显著($P < 0.01$);营养液浓度对 E_V 和 E_H 影响显著($P < 0.05$)。

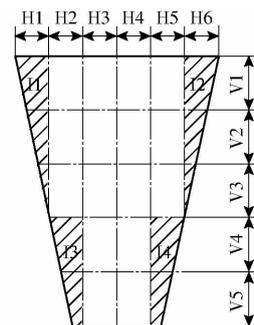


图5 外围根系分布密度统计区域示意图

Fig. 5 Statistical schematic diagram of peripheral root distribution density

表6 根系分布特征正交试验结果

Tab.6 Orthogonal experiments of root uniformity coefficient and peripheral root density

试验号	A	B	C	根系均匀系数 E_V	外围根系分布密度 E_H
1	1	1	1	0.651	0.0237
2	1	2	2	0.653	0.0245
3	1	3	3	0.556	0.0215
4	2	1	2	0.671	0.0263
5	2	2	3	0.665	0.0269
6	2	3	1	0.552	0.0229
7	3	1	3	0.663	0.0253
8	3	2	1	0.645	0.0252
9	3	3	2	0.553	0.0222
K_1	0.620	0.662	0.616		
K_2	0.629	0.654	0.626		
K_3	0.621	0.554	0.628		
R	0.009	0.108	0.012		
K_1	0.023	0.025	0.023		
K_2	0.025	0.026	0.024		
K_3	0.024	0.022	0.026		
R	0.002	0.003	0.002		

表7 根系分布特征方差分析

Tab.7 Variance analysis of root uniformity coefficient and peripheral root density

因变量	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
E_V	A	0.0002	2	8.41×10^{-5}	58.23	0.0169
	B	0.0218	2	1.09×10^{-2}	7564.00	0.0001
	C	0.0002	2	1.21×10^{-4}	84.07	0.0117
	误差	2.89×10^{-6}	2	1.44×10^{-6}		
E_H	A	6.84×10^{-6}	2	3.42×10^{-6}	439.43	0.0023
	B	1.97×10^{-5}	2	9.85×10^{-6}	1267.00	0.0008
	C	6.16×10^{-7}	2	3.08×10^{-7}	39.57	0.0246
	误差	1.56×10^{-8}	2	7.78×10^{-9}		

由表6可以看到, E_V 和 E_H 都随着基质中草炭含量的增加先增大然后减小。这是因为增加基质中草炭含量可以促进根系生长,但是当基质配比为4:1:1时,育苗基质的透气性和保持水分能力降低,这会阻碍根系的生长和分布的均匀性^[14,22]。增大压实度会使较大和连续的孔隙减少^[9],基质的透气性降低,根系会向透气性较好的穴孔顶部和底部生长,因此 E_V 随着基质压实度的增大而降低。适当增大基质压实度可以增加根系与育苗基质的接触,促进根系的生长,但是当压实度为1.4时,根生长得短、粗和弯曲,阻碍根系向四周生长^[9],因此 E_H 随着基质压实度增加先增大然后减小。增大营养液浓度,可以促进根系的生长,因此 E_V 和 E_H 都随着营养液浓度的增大而增加^[11]。

2.4 育苗品质综合评价与优选

通过正交试验和方差分析的结果可以看出,每个因素对各指标的影响是不相同的。可以用综合评分法确定最优因素组合,得到较优的育苗品质^[23]。

苗钵的抗压力、壮苗指数、根系均匀系数和外围根系分布密度应该达到最大值,其归一化方程为

$$Q_N^* = \frac{Q_N - Q_{\min N}}{Q_{\max N} - Q_{\min N}} \quad (2)$$

式中 Q_N^* ——每个指标的各组试验归一化值

Q_N ——每个指标的各组试验值

$Q_{\max N}$ ——每个指标的各组试验中最大值

$Q_{\min N}$ ——每个指标的各组试验中最小值

脱盘力达到最小值的归一化方程为

$$P^* = \frac{P_{\max} - P}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (3)$$

式中 P^* ——每组试验脱盘力的归一化值

P ——每组试验脱盘力的试验值

P_{\max} ——每组试验中脱盘力的最大值

P_{\min} ——每组试验中脱盘力的最小值

评估育苗品质时,应该先保证苗的生长质量,然后兼顾苗钵的力学特性和根系分布特征,因此壮苗指数的权重系数应高于其他指标,并认为苗钵力学特性和根系分布特征同等重要。取壮苗指数的权重系数为0.4,其他指标的权重系数都为0.15。综合评分 K 的计算公式为

$$K = (0.15Q_1^* + 0.4Q_2^* + 0.15Q_3^* + 0.15Q_4^* + 0.15P_5^*) \times 100 \quad (4)$$

式中 Q_1^* 、 Q_2^* 、 Q_3^* 、 Q_4^* 、 P_5^* ——苗钵抗压力、壮苗指数、根系均匀系数、外围根系分布密度和脱盘力的归一化值

通过对各指标的综合评分结果可以看出(表8),各因素对综合评分 K 的影响都是先增大然后减小,最优因素组合为 $A_2B_2C_2$,试验5是次优试验,试验2、4、8的 K 大于60,也具有较好的育苗品质。

2.5 试验验证

为了验证综合评分优选得到的最优因素组合的取苗效果,用自动取苗机构进行试验(图6a)^[24]。试验时,进给穴盘装置和取苗爪同步运动,保证将黄瓜穴盘苗从穴盘中逐个取出。用一个圆形气缸控制取苗爪摆动,将黄瓜穴盘苗从穴盘中取出并投入到投苗杯中。取苗爪为2指4针结构(图6b),用一个方形气缸控制夹针的收缩和张开。在取苗频率分别为43、48、53株/min时进行试验。

用最优因素组合 $A_2B_2C_2$ 和综合评分 K 大于60的5组试验设计进行试验,每组试验取苗256株。

表 8 各指标综合评分的正交试验结果
Tab.8 Comprehensive scores of different indices

试验号	A	B	C	抗压力 F_M/N	脱盘力 F_N/N	壮苗指数 R/g	根系均匀 系数 E_V	外围根系分布 密度 E_H	综合评分 K
1	1	1	1	2.659	1.268	0.0649	0.651	0.0237	33.59
2	1	2	2	3.421	1.591	0.0747	0.653	0.0245	63.10
3	1	3	3	4.095	1.918	0.0704	0.556	0.0215	30.25
4	2	1	2	2.928	1.446	0.0720	0.671	0.0263	61.85
5	2	2	3	3.547	1.759	0.0795	0.665	0.0269	82.66
6	2	3	1	4.253	1.975	0.0748	0.552	0.0229	45.90
7	3	1	3	3.596	1.631	0.0681	0.663	0.0253	49.07
8	3	2	1	4.013	1.867	0.0756	0.645	0.0252	66.25
9	3	3	2	4.843	2.227	0.0731	0.553	0.0222	39.54
K_1	42.313	48.170	48.579						
K_2	63.471	70.668	54.827						
K_3	51.618	38.564	53.996						
R	21.158	32.104	6.248						

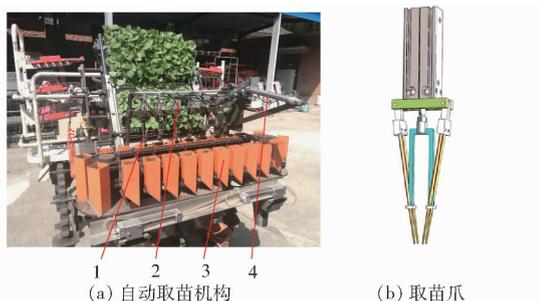


图 6 取苗试验装备和取苗爪

Fig.6 Pinch extraction seedling test equipment and pinch extraction seedling claw

1. 黄瓜穴盘苗 2. 取苗爪 3. 投苗杯 4. 气缸

认为苗钵质量损失大于 25% 时为破损严重^[11,25]。苗钵破损率 R_1 和取苗成功率 R_2 为

$$R_1 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (5)$$

表 9 取苗试验结果

Tab.9 Transplanting tests and results

试验号	A	B	C	取苗频率 43 株/min		取苗频率 48 株/min		取苗频率 53 株/min	
				苗钵破损率 R_1	取苗成功率 R_2	苗钵破损率 R_1	取苗成功率 R_2	苗钵破损率 R_1	取苗成功率 R_2
1	1	2	2	5.8	90.1	6.1	88.9	6.4	85.3
2	2	1	2	6.3	87.4	6.5	85.6	6.9	83.4
3	2	2	2	3.6	97.2	3.9	96.1	4.3	94.8
4	2	2	3	4.2	95.7	4.4	94.2	4.7	92.1
5	3	2	1	5.2	92.3	5.6	90.4	5.9	87.6

1.2 mS/cm 时,可以得到较优的育苗品质。

3 结论

(1) 通过正交试验和方差分析得出, 试验因素对各指标影响程度不同。抗压力和脱盘力随着基质中草炭含量和压实度的增加而增大; 壮苗指数随着

$$R_2 = \frac{N_1 - N_3}{N_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中 N_1 ——每组试验黄瓜穴盘苗的总株数, 株
 N_2 ——苗钵质量损失大于 25% 的株数, 株
 N_3 ——取苗失败的株数, 株

从取苗试验结果可以看出(表 9), 取苗频率为 43、48、53 株/min 时, 试验 3 的苗钵破损率分别为 3.6%、3.9% 和 4.3%, 取苗成功率分别为 97.2%、96.1% 和 94.8%, 优于其他因素组合的试验结果, 试验 4 的苗钵破损率分别为 4.2%、4.4% 和 4.7%, 取苗成功率分别为 95.7%、94.2% 和 92.1%, 是次优的试验结果; 在每组试验中, 随着取苗频率的增加, 苗钵破损率增大, 取苗成功率减小; 取苗试验结果与综合评分优选结果一致。可以得出, 当基质配比为 3:1:1、基质压实度为 1.2 和营养液电导率为

基质中草炭含量、压实度和营养液浓度的增加都是先增大然后减小; 根系均匀系数和外围根系分布密度随着基质中草炭含量和压实度的增加先增大然后减小, 随着营养液浓度的增大而增大。

(2) 用综合评分法对各指标进行优化, 得出当基质配比为 3:1:1, 基质压实度为 1.2, 营养液电导

率为 1.2 mS/cm 时,育苗品质较优。在自动取苗机构上进行试验,结果表明,当取苗频率为 43、48、53 株/min 时,该组因素组合的苗钵破损率分别为 3.6%、3.9% 和 4.3%,取苗成功率分别为 97.2%、96.1% 和 94.8%,优于其他因素组合的试验结果,与综合评分优选结果一致。

参 考 文 献

- 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140808&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008.
- YU Xiaoxu,ZHAO Yun,CHEN Baocheng,et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):44-53. (in Chinese)
- 金鑫,杜新武,杨传华,等. 蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):103-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160715&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.015.
- JIN Xin,DU Xinwu,YANG Chuanhua,et al. Design and experiment on automatic transporting mechanism for vegetable potted seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):103-111. (in Chinese)
- 刘洋,毛罕平,王涛,等. 吊杯式移栽机构中番茄穴盘苗运动分析优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):143-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180516&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.016.
- LIU Yang,MAO Hanping,WANG Tao,et al. Collision optimization and experiment of tomato plug seedling in basket-type transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):143-151. (in Chinese)
- JIN Xin,DU Xinwu,JI Jiangtao,et al. Physical characteristics of plug seedling transplanted by the return-blank type transplanter[J]. International Agricultural Engineering Journal,2015,24(4):1-10.
- 王跃勇,于海业. 穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(14):65-71.
- WANG Yueyong,YU Haiye. Experiment and analysis of impact factors for soil matrix intact rate of manipulator for picking-up plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(14):65-71. (in Chinese)
- 高国华,冯天翔,李福. 斜入式穴盘苗移栽手爪工作参数优化及试验验证[J]. 农业工程学报,2015,31(24):16-22.
- GAO Guohua,FENG Tianxiang,LI Fu. Working parameters optimization and experimental verification of inclined-inserting transplanting manipulator for plug seedling[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(24):16-22. (in Chinese)
- JIANG Z H,HU Y,JIANG H Y,et al. Design and force analysis of end-effector for plug seedling transplanter[J]. Plos One,2017(5):1-15.
- 韩绿化. 蔬菜穴盘苗钵体力学分析与移栽[D]. 镇江:江苏大学,2014.
- HAN Lühua. Mechanical analysis of the root lumps and development of a robotic transplanter for vegetable plug seedlings[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2014. (in Chinese)
- SAOIRSE R T,COLIN R B,JEREMY A R,et al. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in cucumber (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography[J]. Annals of Botany,2012,110(2):511-519.
- 张硕,余宏军,蒋卫杰. 发酵玉米芯或甘蔗渣基质的黄瓜育苗效果[J]. 农业工程学报,2015,31(11):236-242.
- ZHANG Shuo,YU Hongjun,JIANG Weijie. Seedling effects of corncob and bagasse composting substrates in cucumber[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(11):236-242. (in Chinese)
- JONG M C,CHANG S K,JOO W A,et al. Influence of fertilizer concentrations on the performance of seedling grafts of cucumber grown in coir based root media[J]. Hort Environ Biotechnol,2011,52(4):393-401.
- CHOI W C,KIM D C,RYU I K,et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transaction of the ASAE,2002,45(1):13-19.
- MAO H,HAN L,HU J,et al. Development of a Pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedling[J]. Applied Engineering in Agriculture,2014,30(4):547-556.
- KUMI F,MAO H,LI Q,et al. Assessment of tomato seedling substrate-root quality using X-ray computed tomography and scanning electron microscopy[J]. Applied Engineering in Agriculture,2016,32(4):417-427.
- SUSAN Z,JONATHAN R H,SAOIRSE R T,et al. Effects of X-Ray dose on rhizosphere studies using X-ray computed tomography[J]. Plos One,2013,8(6):1-8.
- KUMAR G V P,RAHEMAN H. Volume of vermicompost-based potting mix for vegetable transplants determined using fuzzy biomass growth index[J]. International Journal of Vegetable Science,2010,16(4):335-350.
- 倪纪恒,毛罕平,马万征. 不同营养液浓度对温室黄瓜叶片光合特性的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(10):277-281.
- NI Jiheng,MAO Hanping,MA Wanzheng. Effect of different electrical conductivity on photosynthetic characteristics of cucumber leaves in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(10):277-281. (in Chinese)
- 韩绿化,毛罕平,胡建平,等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报,2013,29(2):24-29.
- HAN Lühua,MAO Hanping,HU Jianping,et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(2):24-29. (in Chinese)

- 23 孟志军,刘卉,付卫强,等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141 - 145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 141 - 145. (in Chinese)
- 24 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 114 - 117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114 - 117. (in Chinese)
- 25 赵静,曹冲. GNSS 系统及其技术的发展研究[J]. 全球定位系统, 2008, 33(5): 27 - 31.
ZHAO Jing, CAO Chong. The development trend investigation of GNSS system and its technologies [J]. GNSS World of China, 2008, 33(5): 27 - 31. (in Chinese)
- 26 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68 - 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.008.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68 - 74. (in Chinese)
- 27 陈立平,黄文倩,孟志军,等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101 - 104.
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101 - 104. (in Chinese)
- 28 吉建斌,王秀,张文爱. 半自动变量施肥控制器的研究与开发[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 65 - 68.
JI Jianbin, WANG Xiu, ZHANG Wenai. Study and development on the controller of semi-automatic variable rate fertilizer applicator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 65 - 68. (in Chinese)
- 29 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247 - 253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247 - 253. (in Chinese)
- 30 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97 - 103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97 - 103. (in Chinese)
- 31 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12 - 20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12 - 20. (in Chinese)

(上接第 82 页)

- 19 TAKASHI F, KUNIO S, TAKASHI O, et al. Growth characteristics of cabbage plug seedlings due to mutual shading among neighbouring seedlings [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 77 - 84.
- 20 刘洋,毛罕平,韩绿化,等. 基于 Micro-CT 的黄瓜苗坨夹取破损检测及取苗参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 27 - 34.
LIU Yang, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Plug damage detection and parameter optimization of picking up cucumber seedlings from tray cells based on Micro-CT [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 27 - 34. (in Chinese)
- 21 MOONEY S J, PRIDMORE T P, HELLIWELL J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil [J]. Plant and Soil, 2012, 352: 1 - 22.
- 22 ALAMEDA D, ANTEN N P R, VOLLAR R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 121 - 129.
- 23 陈立周. 机械优化设计方法 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.
- 24 胡建平,杨丽红,常航,等. 一种自动移栽机取苗控制系统及其控制方法:201610913731.4 [P]. 2017-04-19.
- 25 韩绿化,毛罕平,缪小花,等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 260 - 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131144&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044.
HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260 - 265. (in Chinese)