

自走式NFT水培生菜一次成苗栽培载体筛选试验

李佳蔚*, 王月英, 马喆, 郭翼, 吴晓云

北京农业职业学院实验实训中心, 北京

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月10日

摘要

为提高水培生菜产能, 降低劳动成本, 近年来国内逐渐加大引进自动化水平更高的自走式浅液膜技术 (Nutrient Film Technique, 以下简称NFT), 但与之适配的水培载体多为国外进口, 缺少本土化一次成苗水培载体。为探索自走式NFT水培载体的国产化替代, 降低耗材成本, 本试验创新载体类型, 采用无纺布 + 复合基质组合, 与商品化的进口椰糠压缩育苗块, 以及市场上的几种新型水培载体(海绵、花泥、泥炭育苗钵、黑绵土)进行水培生菜对比研究。结果表明: (1) 自主创新的无纺布袋 + 复合基质水培生菜可一次成苗, 成本仅是进口椰糠块的1/3~1/4; (2) 无纺布袋 + 复合基质的通气孔隙度和气水比显著高于其他各处理, 具有较强的透气性与保水性; (3) 无纺布袋 + 复合基质保温性好, 冬季低温天气水培生菜生长快, 叶片多且舒展, 株型紧凑适于密植, 成苗期、定植后和采收期的单株叶面积、地上部同化物积累量显著高于其他处理, 采收期单株地上部鲜重分别比进口40椰糠块和50椰糠块处理高36.4%、40.4%; (4) 无纺布 + 复合基质处理下生菜可溶性糖含量较高, 比进口40椰糠块增幅27.4%, 不同处理的维生素C含量和亚硝酸钠含量均无显著差异。综合分析, 无纺布 + 复合基质载体最适用于自走式NFT水培系统生菜一次成苗栽培。

关键词

生菜, 水培, 基质, 载体, 国产化替代

Screening Test of Cultivation Carriers for One-Step Seedling Cultivation of Lettuce in the Moving NFT

Jiawei Li*, Yueying Wang, Zhe Ma, Yi Guo, Xiaoyun Wu

Experimental & Training Center, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

Received: March 1, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李佳蔚, 王月英, 马喆, 郭翼, 吴晓云. 自走式 NFT 水培生菜一次成苗栽培载体筛选试验[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 541-557. DOI: 10.12677/hjas.2026.164070

Abstract

In recent years, China has gradually increased the introduction of the moving Nutrient Film Technique (NFT) to improve the yield and automation level of hydroponic lettuce. However, the localized cultivation carriers compatible with such devices are still underdeveloped; most matching hydroponic carriers are imported from abroad. To explore the localized replacement of cultivation carriers and cut down on consumable costs, this experiment innovated the non-woven fabric bags with mixed substrate (peat:vermiculite:perlite = 3:1:1). A comparative study on hydroponic lettuce was conducted between this innovative substrate and several other new commercial substrates, including coco coir blocks, sponge, floral foam, Jiffypots, and black sponge soil. The results showed that: (1) The independently innovated non-woven fabric bag combined with composite substrate for hydroponic lettuce could achieve one-step seedling raising, with a cost only 1/3 to 1/4 of that of imported coco coir seedling blocks; (2) The aeration porosity and air-water ratio of non-woven fabric bag combined with composite substrate were significantly higher than those of other treatments, showing strong air permeability and water retention; (3) Non-woven fabric bag combined with composite substrate had excellent thermal insulation. Under low temperatures in winter, hydroponic lettuce grew fast with more and expanded leaves, and its compact plant type was suitable for dense planting. The leaf area per plant and aboveground assimilate accumulation at seedling establishment, post-transplanting and harvesting stages were significantly higher than those of other substrate treatments. The aboveground fresh weight per plant was 36.4% and 40.4% higher than that of imported 40 coco coir seedling block and 50 coco coir seedling block treatments, respectively; (4) In terms of quality, the soluble sugar content of lettuce under non-woven fabric combined with composite substrate treatment was relatively high, 27.4% higher than that of imported 40 coco coir seedling block. There were no significant differences in vitamin C content and nitrite content among all treatments. Based on a comprehensive analysis, the non-woven fabric bag combined with a compound substrate is the most suitable choice for one-step seedling cultivation of lettuce in MGS.

Keywords

Lettuce, Hydroponics, Substrate, Carriers, Localized Replacement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生菜(*Lactuca sativa* L.)作为重要的生食叶类蔬菜,是北京第一鲜食绿叶蔬菜,常年播种面积达8万亩,并呈递增趋势,年产量近5年来占北京市全部蔬菜产量的8.7%,为年度总产量第三的品种,是大型城市蔬菜供应的可靠应急保障。其生长周期短,从播种到采收仅需50~60天,在国内广泛应用于水培。营养液膜技术(Nutrient Film Technique,以下简称NFT)因其较低的设施投入和简便的营养液管理,成为水培蔬菜规模化生产的首选[1]。

自走式NFT系统,即移动式管道系统(Moving Gutter System,以下简称MGS),是国际先进的自动化改良式NFT栽培方式(图1(a))。与常规NFT相比,栽培槽的间距可随作物株幅的增大逐渐拉开,具有自动化程度高、种植密度大、作物稳定性强的特点,结合现代化智能温室生长环境调控,可实现全年不间断生产供应,平均栽培密度可达55株/平方米,较常规NFT提高约40%。自走式NFT系统虽在荷兰等国家

广泛应用,但国内案例少,近几年才开始逐渐引进,与之配套的生产耗材(如水培载体、育苗托架等)市场尚不成熟,目前国内常规 NFT 水培载体多为海绵块搭配定植篮使用(图 1(b)),一般直接播种于海绵块上,后期搭配定植篮放置于管道的定植穴内水培,存在二次分苗及定植篮使用与回收清洗等劳动成本高的问题,或采用常规穴盘育苗方式,成苗后先洗根,后用圆形定植海绵裹住植株茎基部放于定植篮内,后置于水培系统中栽培,操作极为费工。以上方式均不能实现水培载体一次成苗的生产需求。国外进口的椰糠压缩育苗块,通过浸泡吸水即可播种育苗,且育苗块外有一层网格布包裹,椰糠颗粒不会洒落堵塞灌溉管道,可实现一次成苗,育苗后无需处理直接用于移动式 NFT 水培系统(图 1(c)),操作较为简便,张超等在连动玻璃温室 NFT 水培生菜栽培技术中对该基质的应用已有报道[2],但进口基质成本高昂,是常规水培基质的 5~10 倍,限制了自走式 NFT 系统在国内的推广应用。



Figure 1. The moving NFT and main hydroponic carriers

图 1. 自走式 NFT 系统及主要水培载体

为探索自走式 NFT 水培载体的国产化替代,降低耗材成本,本试验以生菜为试验样本,自走式 NFT 系统为栽培环境,创新载体类型,采用价格低廉、易获取的无纺布 + 复合基质(泥炭:蛭石:珍珠岩 = 3:1:1)组合为水培载体,与进口椰糠育苗块、国内常规水培海绵块和新型水培载体(花泥、黑绵土、泥炭育苗钵)进行对比,探究不同水培载体对生菜育苗、植株生长及采收的影响。围绕简化生产流程,降低生产成本,提高单位产量与品质等方面评估不同水培载体的优缺点,筛选出适合自走式 NFT 系统的水培载体,为该水培系统耗材的国产化替代及类似新技术装备在国内的研究应用提供参考,进而最大程度发挥自动化、高密度和周年生产的优势,服务蔬菜稳产保供。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

Table 1. Basic information on test materials

表 1. 供试材料基本信息

序号	水培载体名称	产地/制造商	形状	规格/mm ³	材质/成分
1	Jiffy-7C 50 椰糠压缩育苗块	Jiffy Group in Netherlands.	圆柱形	吸水后 50*50*60	无纺布包裹的椰壳纤维
2	Jiffy-7C 40 椰糠压缩育苗块	Jiffy Group in Netherlands.	圆柱形	吸水后 40*40*60	无纺布包裹的椰壳纤维

续表

3	海绵块	淘宝	立方块	25*25*25	聚氨酯亲水海绵
4	花泥块	常熟绿洲花卉泡沫有限公司/OasisR	立方块	33*33*38	多孔发泡的酚醛塑料
5	Jiffypot 育苗钵(搭配复合基质)	Jiffy Group in Netherlands.	圆台形	34.2*60*60	泥炭藓加粘结剂
6	黑绵土	杭州云乘园艺科技有限公司	圆台形	45*35*35	泥炭、有机物和泡沫粘结剂混合而成
7	无纺布袋(搭配复合基质)	淘宝	圆柱形	装填后 60*55*55	25 g/m ² 聚丙烯丙纶无纺布

试验用的生菜为奶油生菜类型, 品种“富兰德里 Flandria”, 来源于瑞克斯旺(中国)农业科技种子有限公司。试验所用肥料为叶菜专用水溶肥, 购于艾格拉(北京)农业科技有限公司。试验中用到的水培载体原料基本信息见表 1。

2.2. 试验设计

试验于 2024 年 12 月至 2025 年 2 月在北京农业职业学院(东经 116.13°, 北纬 39.46°)现代化玻璃连栋智能温室(规格为长 96 米, 跨度 45 米)内进行, 温室内可进行智能环境与水肥控制。生菜成苗期定植到自走式 NFT 水培系统上, 采用间歇式循环供液模式, 施肥机配置标准营养液储存于日储罐中, 白天每 1 h 供液 15 min, 夜间每 3 h 供液 15 min, 回水经过滤与紫外消毒后可重复利用, 系统根据液位变化自动触发配肥程序, 以维持日储罐液位稳定[3]。

试验按照不同的水培载体类型设置 7 个处理, 分别为 50 mm 椰糠育苗块、40 mm 椰糠育苗块、海绵块、花泥块、育苗钵 + 复合基质组合、黑绵土、无纺布袋+复合基质组合(后简称 50 椰糠、40 椰糠、海绵、花泥、育苗钵 + 复合基质、黑绵土、无纺布 + 复合基质)。试验前对基质的体积、容重、总孔隙度、通气孔隙度、pH 值和电导率(EC)进行测定。

试验于 2024 年 12 月 2 日播种生菜, 播种前将基质用标准营养液(EC = 1.0, pH = 6.0)充分浸泡, 每穴一粒, 每处理播 50 粒, 3 次重复, 随机区组排列。播种后覆盖保鲜膜置于智能催芽室(温度 23℃, 相对湿度 90%, 12 小时 8000 lx 弱光照射, 12 小时暗环境)进行催芽。

播种后第 3 d、第 5 d、第 7 d, 调查不同处理下生菜的出苗数量, 用生菜出芽数量除以播种数量得到出苗率。生菜出芽后放置于潮汐式灌溉苗床进行育苗, 单次供液时间 15 min, 根据光照积累量、最大灌溉休息时间触发灌溉, 平均 1 d 灌溉一次, 营养液 EC = 1.0, pH = 6.0。

播种 28 d 后, 成苗期从每个处理随机选取 3 株生菜, 测量叶长、叶宽、开展度、叶片数、株高、茎粗、叶面积、地上部鲜重和地上部干重。调查后将不同处理的生菜苗按随机区组定植于 MGS 种植系统中。

定植后 20 d, 从每种处理上随机选取 3 株生菜, 测量叶片数、叶面积、茎粗、冠鲜质量、根鲜质量、冠干重、根干重和根系活力。

定植后 40 d, 采收阶段从每个处理随机选取 3 株生菜, 测量叶片数、茎粗、冠鲜质量、株高、根鲜质量、冠干重、根干重和根系测量。并对每个处理的生菜品质(维生素 C、可溶性糖、硝酸盐)进行测定。

2.3. 测定项目及方法

2.3.1. 基质理化性质测定

借鉴“一条龙”测定法[4], 取 2000 mL 量筒, 倒入标准体积水 $V_1 = 1500$ mL; 将不同基质处理没入

盛有标准体积 V1 的量筒中, 充分吸饱水分后, 读取液位处体积 V2; 将基质迅速捞出, 读取量筒液位体积 V3; 捞出的基质迅速放在不漏水的培养皿中控水 1 h 以上, 使基质中的自由水分完全排出, 测量排出水的体积为基质通气孔隙的体积, 用 AZ 公司多功能手持测定仪 IP67 测定排液的 pH 值和 EC 值。基质体积 = V2 - V3; 容重 = 干燥基质的质量 ÷ 基质体积; 总孔隙体积 = V1 - V3; 总孔隙度 = 总孔隙体积 ÷ 基质体积 × 100%; 通气孔隙度 = 通气孔隙体积 ÷ 基质体积 × 100%; 持水孔隙度 = 总孔隙度 - 通气孔隙度; 气水比 = 通气孔隙度 ÷ 持水孔隙度 × 100%。

2.3.2. 生菜生长指标测定

叶长和叶宽是选取生菜中最大的一片叶, 测量叶柄至末端长度和最宽处的宽度; 开展度是将生菜平放, 测量叶片展开的最大长度; 叶片数是测量全株大于 2 cm 的叶片个数[5]; 株高是用直尺测量茎基部到生长点的距离; 茎粗用游标卡尺测量基质表面下胚轴中间部位最大的地方; 生菜叶面积测量采用高建昌等“平台扫描仪结合 ImageJ 软件测定番茄叶面积”的方法[6]。

2.3.3. 生菜质量指标测定

生菜地上部质量为基质以上生菜的鲜重; 生菜地上部干重为常压烘干地上部鲜质量, 烘干方法是将样品放入烘箱 105℃ 杀青 15 min, 后降至 80℃ 烘干至衡重; 计算壮苗指数 = (茎粗/株高) × 冠干重 × 100% [7]。根鲜重和根干重分别用直接法测定, 计算根冠比 = 地下部干质量/地上部干质量[8]。根系活力采用氯化三苯基四氯唑(TTC)法测定[9]。将生菜基质块外的根系剪下洗净, 用爱普生(EPSON) Perfection V850 Pro 根系扫描仪对根系进行扫描, 并用 Win Rhizo 根系分析仪软件分析数据, 得出根系长度、根表面积、根体积和根直径[10]。

2.3.4. 生菜理化指标测定

采收的生菜委托成都栢晖检测技术有限公司在实验室对可溶性糖、维生素 C、亚硝酸钠进行测定, 方法分别为蒽酮比色法、钼蓝比色法和重氮化比色法(参照《食品安全国家标准食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》(GB 5009.33-2016))。

2.4. 数据处理

试验数据用 SAS 9.4 单因素方差分析(LSD, P < 0.05)、Excel 2021 软件制作图表。

3. 结果和分析

3.1. 水培载体成本分析

Table 2. Cost accounting of different hydroponic carriers
表 2. 不同水培载体成本核算

水培载体	单价(个/元)	人工操作	备注
50 椰糠	0.35	摆放、浇水、播种	吸水泡发 1 h
40 椰糠	0.22	摆放、浇水、播种	吸水泡发 1 h
海绵	0.03	摆放、浇水、播种、二次分苗、定植篮使用	无
花泥	0.15	摆放、浇水、播种	无
育苗钵 + 复合基质	0.53	搅拌、填充、摆放、压穴、浇水、播种	无
黑绵土	0.40	摆放、浇水、播种	无
无纺布 + 复合基质	0.08	搅拌、填充、摆放、压穴、浇水、播种	无

综合采购成本测算,育苗钵 + 复合基质成本为 0.53 元/个,单价最高,海绵块和无纺布 + 复合基质单价最低,分别为 0.03 元/个和 0.08 元/个,价格是进口椰糠块的 1/3~1/4。其次是黑绵土和 50 椰糠块,分别为 0.40 元/个和 0.35 元/个。40 椰糠块和花泥块的单价适中,从操作便利性和时间成本来看,各处理播前均需人工摆放基质入托架/托盘,浇透底水。花泥块、黑绵土为塑形基质,吸水后可直接使用;海绵穴间距小、幼苗 2~3 叶一心时叶片易相互遮挡,需二次分苗,定植后因支撑力不足还需配合定植篮使用,增加定植篮摆放、回收清洗等工作;椰糠育苗块为压缩饼状,充分泡发等候时间约 1 h;育苗钵和无纺布袋是栽培容器,需增加混合基质搅拌、装填、压实扎穴的操作,投入额外人工成本。综上,除海绵外各处理均可一次成苗,育苗后无需处理直接用于自走式 NFT 水培系统(见表 2)。

3.2. 水培载体理化性质对比

从表 3 可知,不同栽培载体体积差异较大,其中无纺布 + 复合基质的体积最大为 132 cm³,与育苗钵 + 复合基质差异不显著。各处理的容重均小于 0.25 g/cm³,属于轻容重基质[11],无纺布 + 复合基质和育苗钵 + 复合基质的容重显著高于其他载体,花泥和海绵的容重最小。花泥的总孔隙度最高为 91.08%,显著高于其他载体(除 50 椰糠外),黑绵土的总孔隙度最低为 51.80%,未达到 NY/T2118-2012 中的基质总孔隙度 >60%的要求。通气孔隙度以无纺布 + 复合基质最大,黑绵土最小;持水孔隙度以花泥最大,黑绵土最小,所有载体均符合 NY/T2118-2012 中的基质持水孔隙度 >45%的要求。气水比中,无纺布 + 复合基质的组合最高,水、气平衡,50 椰糠的气水比最低。不同水培载体的 EC 差异较大,无机基质的海绵和花泥 EC 值最低,而其他载体均含有机基质,EC 值较高。海绵、育苗钵 + 复合基质、黑绵土以及无纺布 + 复合基质的 PH 值在 5.37~6.71,适合生菜根系生长,40 椰糠和 50 椰糠的 PH 偏低,只有 4.60 和 4.86,而花泥的 PH 偏高为 7.50。综合看,无纺布 + 复合基质的体积、容重、通气孔隙度、气水比、pH 值等指标在 7 个处理中表现优异,适宜生菜生长。

Table 3. Comparison of physicochemical properties of different hydroponic carriers

表 3. 不同水培载体理化性质对比

水培载体	体积 /cm ³	容重 /g·cm ⁻³	总孔隙度/%	通气孔隙度/%	持水孔隙度/%	气水比/%	EC/mS·cm ⁻¹	pH
50 椰糠	82b	0.112b	83.37ab	1.34c	82.02ab	1.65d	5.29	4.86
40 椰糠	62c	0.103bc	78.48b	3.77b	74.71b	5.05cd	3.28	4.60
海绵	16f	0.012d	77.69b	4.38b	73.31b	5.99bc	0.04	6.66
花泥	33e	0.022d	91.08a	4.16b	86.92a	4.78cd	0.06	7.50
育苗钵 + 复合基质	131a	0.160a	68.03c	5.52b	62.51c	8.98b	1.25	5.60
黑绵土	46d	0.091c	51.80d	1.32c	50.48d	2.77cd	0.35	6.71
无纺布 + 复合基质	132a	0.152a	62.88c	8.64a	54.24cd	15.85a	1.55	5.37

3.3. 不同载体下生菜出苗情况对比

从表 4 可知,播种 3 d 后,生菜陆续出苗,海绵处理下生菜出苗率最高(94%),从照片看海绵出苗整齐度高,其次是 50 椰糠和花泥,40 椰糠、育苗钵 + 复合基质和黑绵土,无纺布 + 复合基质的出苗率最低(81%)。播后第 5 天各处理的出苗仍在增多,育苗钵 + 复合基质的出苗率最高,达到 100%出苗,其次是海绵、40 椰糠、花泥、50 椰糠和黑绵土,均在 94%以上,出苗率最低的是无纺布 + 复合基质(83%)。播种后第 7 天,生菜的出苗情况均已稳定,所有基质的出苗率均在 90%以上,出苗率均高于生菜种子说

明的出芽率 80%。由此可见,所有基质均符合生菜出苗标准。在使用无纺布 + 复合基质的组合时,要确保装填基质后压穴到位,避免基质过于蓬松产生较大空隙影响出苗。

Table 4. Emergence of lettuce in different hydroponic carriers

表 4. 生菜在不同水培载体的出苗情况

处理	播后 3 d 出苗率%	播后 5 d 出苗率%	播后 7 d 出苗率%
50 椰糠	94	94	98
40 椰糠	92	96	100
海绵	98	98	98
花泥	94	96	96
育苗钵 + 复合基质	92	100	100
黑绵土	90	94	94
无纺布 + 复合基质	81	83	90

3.4. 不同载体对生菜育苗期的影响

3.4.1. 不同载体对生菜苗期植株与根系生长的影响

播种 28 d 后,生菜苗四叶一心,达到成苗期标准。观察发现海绵处理下死苗严重,无法进行后续调查(图 2)。除无纺布+复合基质处理下生菜叶片最为舒展外,其余处理的叶片均出现不同程度向下卷曲,呈瘦长不良状态。观察根系发现,黑绵土扎出的根系最多,且侧根较为均匀,50 椰糠、40 椰糠、育苗钵 + 复合基质和无纺布 + 复合基质处理下生菜根系均有扎出且多有侧根,主要从根系底部伸出,花泥几乎没有根系扎出,仅可见少量主根且较短,海绵处理下有根系从底部伸出,但因失水皱缩干枯呈线状。综合分析,无纺布 + 复合基质的生菜生长状态最佳,海绵死苗严重,其他处理生菜地上部叶片出现不同程度生长不良。



Figure 2. Plant growth and root development of lettuce at the seedling establishment stage

图 2. 生菜成苗期植株生长情况和根系发育情况

3.4.2. 不同载体对生菜苗期生长指标的影响

由于海绵无法进行后续测量,定植前对除海绵外其他处理下的生菜进行调查。表 5 可知,无纺布 + 复合基质处理下生菜叶长显著长于 50 椰糠,花泥处理下生菜叶长最短;无纺布 + 复合基质的叶宽和单株叶面积显著大于其他 5 种基质处理,单株叶面积是其他处理的 2~3 倍,且其他处理间差异不显著;无纺布+复合基质的开展度最大,显著大于除 40 椰糠的其他处理,育苗钵+复合基质的开展度最小;从单株叶片数上看,无纺布 + 复合基质的叶片数最多为 6 片/株,其次是 40 椰糠、50 椰糠、育苗钵 + 复合基

质和黑绵土,花泥的叶片数最少,平均仅有4片/株;从株高看,无纺布+复合基质处理下株高最高,显著高于育苗钵+复合基质和花泥,其他处理差异不显著;无纺布+复合基质处理下生菜茎粗显著大于除40椰糠外的其他处理。总之,生菜苗期无纺布+复合基质处理下的各项生长指标均最大,在叶宽和单株叶面积上显著高于其他基质,与图2结果一致。

Table 5. Index values of lettuce at seedling stage under different treatments

表 5. 不同处理下成苗期生菜指标值

处理	叶长/cm	叶宽/cm	开展度/cm	单株叶片数	株高/cm	茎粗/mm	单株叶面积/cm ²
50 椰糠	7.91 ^{bc}	3.07 ^b	7.77 ^{bc}	5.33 ^{ab}	7.23 ^{ab}	0.97 ^b	40.43 ^b
40 椰糠	8.86 ^{ab}	3.33 ^b	9.03 ^{ab}	5.67 ^a	7.43 ^{ab}	1.10 ^{ab}	39.27 ^b
花泥	7.34 ^c	2.79 ^b	7.4 ^{cd}	4.00 ^c	6.4 ^b	0.81 ^b	30.69 ^b
育苗钵 + 复合基质	8.97 ^{ab}	2.84 ^b	6.00 ^d	5.33 ^{ab}	6.83 ^b	1.00 ^b	41.10 ^b
黑绵土	8.8 ^{ab}	3.32 ^b	7.73 ^{bc}	4.67 ^b	7.10 ^{ab}	0.86 ^b	41.83 ^b
无纺布 + 复合基质	9.6 ^a	4.69 ^a	9.6 ^a	6.00 ^a	8.33 ^a	1.36 ^a	86.84 ^a

3.4.3. 不同载体对生菜苗期同化物积累的影响

由于所选载体多为一体成型基质,生菜根系下扎后不能从基质中脱离,且育苗期生菜根系伸出基质外较少,无法对根系进行测量,故成苗期仅对生菜地上部鲜重和干重进行调查。从表6可见,无纺布+复合基质单株地上部鲜重和干重显著高于其他处理,单株地上部鲜重是其他处理的1.9~3.1倍,单株地上部干重是其他处理的2.0~3.1倍,花泥处理生菜同化产物最低,黑绵土与除无纺布+复合基质外的其他基质处理差异不明显。壮苗指数以无纺布+复合基质处理最大,显著高于其他基质处理。总之,无纺布+复合基质处理下生菜苗期生长势最强,地上部同化物积累量最多,呈壮苗状态。

Table 6. Accumulation of assimilates in lettuce at seedling stage under different treatments

表 6. 不同处理下生菜苗期同化物积累情况

处理	单株地上部鲜重/g	单株地上部干重/g	壮苗指数
50 椰糠	0.9900 ^b	0.0637 ^b	0.8046 ^b
40 椰糠	0.9967 ^b	0.0577 ^b	0.8585 ^b
花泥	0.6233 ^c	0.0407 ^c	0.5112 ^b
育苗钵 + 复合基质	1.0467 ^b	0.0582 ^b	0.8516 ^b
黑绵土	0.8733 ^{bc}	0.0509 ^{bc}	0.6548 ^b
无纺布 + 复合基质	1.9400 ^a	0.1244 ^a	2.0641 ^a

3.5. 不同水培载体对生菜定植后生长的影响

定植后20d,对生菜进行测量并统计生长指标、同化物指标和品质指标。

3.5.1. 不同载体对生菜定植后生长指标的影响

表7中,无纺布+复合基质的叶长最长,显著长于育苗钵+复合基质、黑绵土和花泥,花泥的叶长最短;无纺布+复合基质的叶宽最宽,显著宽于50椰糠、黑绵土、育苗钵+复合基质和花泥,花泥的叶宽最窄;生菜开展度和株高各处理差异不显著;无纺布+复合基质的单株叶片数显著高于其

他处理,比其他基质处理的叶片数多 5~7 片叶;无纺布 + 复合基质的茎粗最粗,显著大于花泥的茎粗,与其他处理的差异不显著,无纺布 + 复合基质处理的单株叶面积最大,是其他处理的 1.7~3 倍。总之,除株高外,无纺布 + 复合基质处理下生菜各生长指标均最高,其中单株叶片数和单株叶面积显著高于其他处理。

Table 7. Growth indices of lettuce 20 days after transplanting under different treatments

表 7. 不同处理定植 20 d 后生菜生长指标

处理	叶长/cm	叶宽/cm	开展度/cm	单株叶片数	株高/cm	茎粗/mm	单株叶面积/cm ²
50 椰糠	13.17 ^{ab}	9.72 ^b	19.17 ^a	15.33 ^b	9.27 ^a	6.02 ^{ab}	570.49 ^{bc}
40 椰糠	13.01 ^{ab}	10.39 ^{ab}	18.93 ^a	15.67 ^b	9.67 ^a	6.30 ^{ab}	632.78 ^b
花泥	10.84 ^c	7.41 ^c	19.17 ^a	13.00 ^b	9.00 ^a	5.61 ^b	358.87 ^c
育苗钵 + 复合基质	12.32 ^{bc}	8.88 ^{bc}	18.20 ^a	13.33 ^b	12.37 ^a	6.43 ^{ab}	470.09 ^{bc}
黑绵土	12.29 ^{bc}	9.17 ^{bc}	19.90 ^a	15.00 ^b	9.60 ^a	6.08 ^{ab}	551.03 ^{bc}
无纺布 + 复合基质	14.48 ^a	12.31 ^a	22.57 ^a	20.00 ^a	10.87 ^a	7.18 ^a	1052.31 ^a

3.5.2. 不同处理对生菜定植后同化物积累的影响

表 8 中生菜定植后 20 d, 无纺布 + 复合基质处理下生菜单株地上部鲜重最大, 显著高于其他处理, 比 40 椰糠高 57.7%, 花泥处理的地上部鲜重最小。无纺布 + 复合基质的单株地上部干重最大, 显著高于其他基质处理, 其次是 40 椰糠, 最小的是花泥和育苗钵 + 复合基质。在根系方面, 基质外侧根鲜重和外侧根干重上黑绵土和 40 椰糠处理的值显著高于其他基质, 其次是无纺布 + 复合基质和 50 椰糠育苗钵 + 复合基质。黑绵土处理生菜根冠比最大, 显著高于无纺布 + 复合基质处理, 但与其他基质处理间差异不显著, 无纺布 + 复合基质的根冠比最小。综合分析, 无纺布 + 复合基质的单株地上部同化物积累量显著高于其他处理, 根鲜重和根干重与其他处理差异不显著, 说明根系相当的情况下无纺布 + 复合基质的生菜定植后地上部生长更快, 同化物积累量更高。

Table 8. Accumulation of assimilates in lettuce under different treatments 20 days after transplanting

表 8. 不同处理定植 20 d 后生菜同化物积累情况

处理	单株地上部鲜重/g	单株地上部干重/g	单株基质外侧根鲜重/g	单株基质外侧根干重/g	根冠比
50 椰糠	21.81 ^{bc}	1.2690 ^{bc}	1.0887 ^{ab}	0.0714 ^{ab}	0.0577 ^{ab}
40 椰糠	27.05 ^b	1.5706 ^b	1.5824 ^a	0.0869 ^a	0.0550 ^{ab}
花泥	12.27 ^c	0.8282 ^c	0.6189 ^b	0.0392 ^b	0.0533 ^{ab}
育苗钵 + 复合基质	17.51 ^{bc}	0.9948 ^c	0.7051 ^b	0.0475 ^b	0.0597 ^{ab}
黑绵土	19.29 ^{bc}	1.2094 ^{bc}	1.6599 ^a	0.0972 ^a	0.0803 ^a
无纺布 + 复合基质	42.65 ^a	2.1869 ^a	1.2850 ^{ab}	0.0747 ^{ab}	0.0347 ^b

3.5.3. 不同处理对生菜定植后根系活力(TTC)的影响

由图 3 可知, 无纺布 + 复合基质处理下生菜的根系活力最强, 达 36.46 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 显著高于其他 5 种处理。由此可见, 无纺布 + 复合基质的栽培组合根系活力大, 说明根系吸收能力强, 有利于生菜地上部的快速生长。

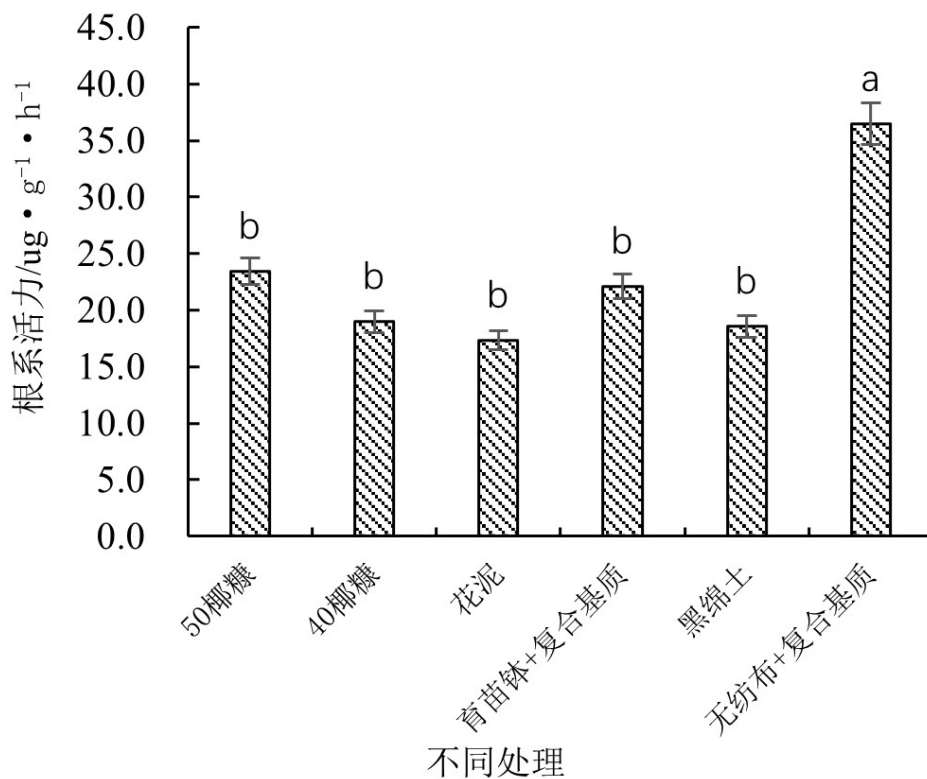


Figure 3. Comparison of TTC in lettuce after transplanting under different treatments

图 3. 不同处理下生菜定植后 TTC 比较

3.5.4. 不同处理下生菜定植后生长情况对比

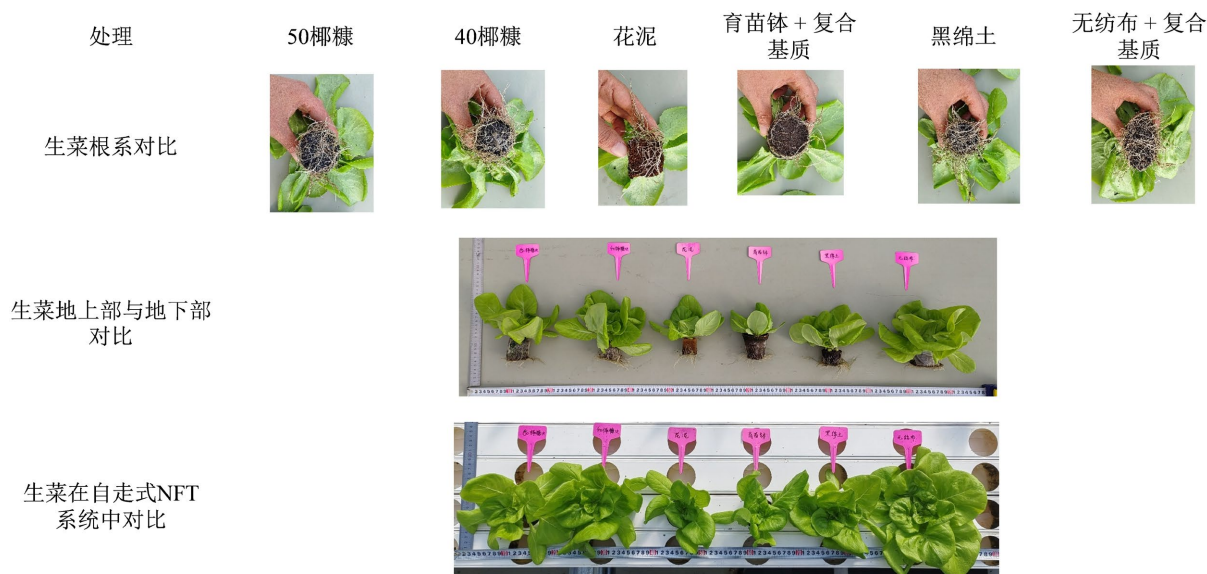


Figure 4. Growth status of lettuce 20 days after transplanting under different treatments

图 4. 定植后 20 d 生菜在不同处理下生长情况

定植 20 d 后，拍摄不同处理植株在自走式 NFT 系统中的生长情况，将带栽培载体的生菜取出，分别

拍摄地上部与地下部的生长情况(图 4)。从根系表现上,所有根系均扎出基质,其中无纺布 + 复合基质、黑绵土和 40 椰糠无纺布 + 复合基质处理下生菜的根系发育较好,根系茂密且粗白,逐渐向水源更充足的侧边延伸,根系密度最少的是花泥和育苗钵 + 复合基质,这与表 8 的同化物积累分析结果一致。从生菜地上部对比图可知,无纺布 + 复合基质的生菜长势最旺盛,叶片数多且舒展,周围空间覆盖完全,已完成莲座期并进入抱球阶段,其次是 40 椰糠长势较好,50 椰糠开展度虽大,但叶片数相对少,育苗钵 + 复合基质和花泥的地上部最小,叶片少且叶缘向下翻卷,叶片不舒展,表现出生理胁迫反应,这与表 7 的生长指标结果一致。

3.6. 不同水培载体对采收期生菜的影响

定植后 40 d 对生菜进行采收,测量并统计生长指标、同化物指标和品质指标。

3.6.1. 不同处理对采收期生菜生长指标的影响

表 9 可知,育苗钵 + 复合基质的叶长最大,其次是无纺布 + 复合基质和 50 椰糠,三者差异不显著。育苗钵 + 复合基质的叶宽最宽,其次是无纺布 + 复合基质,且两者差异不显著。从植株开展度上,50 椰糠的生菜开展度最大,花泥的开展度最小,6 种基质处理的生菜开展度差异不明显。从单株叶片数上,无纺布 + 复合基质的叶片数最多,达到了 33 片,显著多于除 50 椰糠和 40 椰糠外的其他处理,育苗钵 + 复合基质的叶片数最少,比无纺布 + 复合基质处理少 7 片叶。从茎粗上看,无纺布 + 复合基质处理下生菜茎粗最粗,显著高于花泥。单株叶面积上,无纺布 + 复合基质处理的单株叶面积最大为 2963.76 cm²,显著高于育苗钵 + 复合基质之外的其他处理,是单株叶面积最小花泥的 1.83 倍。总之,无纺布 + 复合基质处理下生菜采收期的单株叶片数、茎粗和单株叶面积最高,且单株叶面积显著高于其他处理,叶长、叶宽和开展度适中,表现生长紧凑且多叶的特点。

Table 9. Growth indices of lettuce at harvest stage under different treatments

表 9. 不同处理下采收期生菜生长指标

处理	叶长/cm	叶宽/cm	开展度/cm	单株叶片数	茎粗/mm	单株叶面积/cm ²
50 椰糠	17.08 ^{abc}	13.34 ^{bc}	29.70 ^a	31 ^{ab}	8.62 ^{ab}	2283.14 ^{bc}
40 椰糠	16.67 ^{bdc}	13.68 ^{bc}	25.70 ^a	30 ^{abc}	8.80 ^{ab}	2269.39 ^{bc}
花泥	15.88 ^{dc}	11.84 ^c	23.17 ^a	28 ^{bc}	7.98 ^b	1622.29 ^c
育苗钵 + 复合基质	18.51 ^a	15.84 ^a	26.50 ^a	26 ^c	9.10 ^{ab}	2371.22 ^{ab}
黑绵土	15.49 ^d	12.14 ^c	24.03 ^a	29 ^{bc}	8.16 ^{ab}	1727.38 ^{bc}
无纺布 + 复合基质	17.78 ^{ab}	14.98 ^{ab}	27.83 ^a	33 ^a	9.39 ^a	2963.76 ^a

3.6.2. 不同处理对采收期生菜同化物积累和根系形态的影响

表 10 可知,地上部鲜重以无纺布 + 复合基质处理最大,分别比进口 40 椰糠块和 50 椰糠块处理高 36.4%、40.4%,显著高于 50 椰糠、黑绵土和花泥,比花泥处理高 105.9%。无纺布 + 复合基质的地上部干重最大,显著高于 50 椰糠、黑绵土和花泥。所有处理的单株基质外根系鲜重均无显著差异。无纺布 + 复合基质的根冠比最小,显著低于黑绵土,但与其他处理差异不显著。说明根系相当的情况下无纺布 + 复合基质的生菜采收期同化物积累量最高。

不同处理的生菜根系存在较大差异(表 11)。从根系长度看,育苗钵 + 复合基质的长度最长、无纺布 + 复合基质次之,显著高于 50 椰糠,而黑绵土、40 椰糠、花泥与 50 椰糠这 4 个处理间在根系长度上差异不显著。无纺布 + 复合基质处理下生菜根表面积和根体积最大,显著大于 50 椰糠,其他处理间差异

不显著,说明无纺布 + 复合基质处理的生菜在根系的生长上,优于其他基质处理。除了花泥的生菜根直径显著粗于 50 椰糠外,其他处理的根直径均没有显著差异。综合看出,无纺布 + 复合基质处理的根表面积和根体积最多,根系最旺盛。

Table 10. Accumulation of assimilates in lettuce at harvest stage under different treatments
表 10. 不同处理下采收期生菜同化物积累情况

处理	单株地上部		单株基质外根系		根冠比
	鲜重/g	干重/g	鲜重/g	干重/g	
50 椰糠	94.56 ^{bc}	3.87 ^b	2.57 ^a	0.154 ^a	0.0404 ^{ab}
40 椰糠	97.37 ^{ab}	4.26 ^{ab}	3.40 ^a	0.188 ^a	0.0442 ^{ab}
花泥	64.49 ^c	3.12 ^b	2.49 ^a	0.128 ^a	0.0402 ^{ab}
育苗钵 + 复合基质	107.19 ^{ab}	4.53 ^{ab}	2.76 ^a	0.184 ^a	0.0409 ^{ab}
黑绵土	72.86 ^{bc}	3.35 ^b	3.20 ^a	0.189 ^a	0.0587 ^a
无纺布 + 复合基质	132.77 ^a	5.37 ^a	2.45 ^a	0.134 ^a	0.0262 ^b

Table 11. Root indices of lettuce at harvest stage under different treatments
表 11. 不同处理下采收期生菜根系指标

处理	根系长度/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根直径/mm
50 椰糠	226.03 ^c	38.22 ^b	0.51 ^b	0.54 ^b
40 椰糠	306.42 ^{bc}	57.49 ^{ab}	0.87 ^{ab}	0.60 ^{ab}
花泥	297.78 ^{bc}	62.23 ^{ab}	1.05 ^{ab}	0.66 ^a
育苗钵 + 复合基质	652.78 ^a	59.44 ^{ab}	0.87 ^{ab}	0.58 ^{ab}
黑绵土	355.15 ^{bc}	62.95 ^{ab}	0.89 ^{ab}	0.56 ^{ab}
无纺布 + 复合基质	433.55 ^b	80.33 ^a	1.19 ^a	0.59 ^{ab}

3.6.3. 不同处理对采收期生菜生长情况对比



Figure 5. Growth status of lettuce at harvest stage under different treatments
图 5. 采收阶段生菜在不同处理下生长情况

生菜采收期, 拍摄不同处理生菜在自走式 NFT 系统中的生长情况, 并将不同处理的生菜单株取出, 对比地上部与地下部的生长情况(图 5)。从照片可以看出, 无纺布 + 复合基质、40 椰糠、50 椰糠和育苗钵 + 复合基质的长势较好, 叶片多且颜色绿, 植株紧凑整齐呈半结球状态。花泥和黑绵土的团棵较小, 叶轮生长较扁平, 中心生长点叶片小而少, 未抱球, 这与表 9 和表 10 的结果一致。从根系上看, 6 种水培载体的根系均形成了根垫层, 无纺布 + 复合基质、育苗钵 + 复合基质和 40 椰糠的根系最密最多, 海绵和花泥的主根粗短, 侧根相对较少, 50 椰糠的根系最为细弱, 这与表 11 的结果一致。

3.6.4. 不同处理对采收期生菜品质的影响

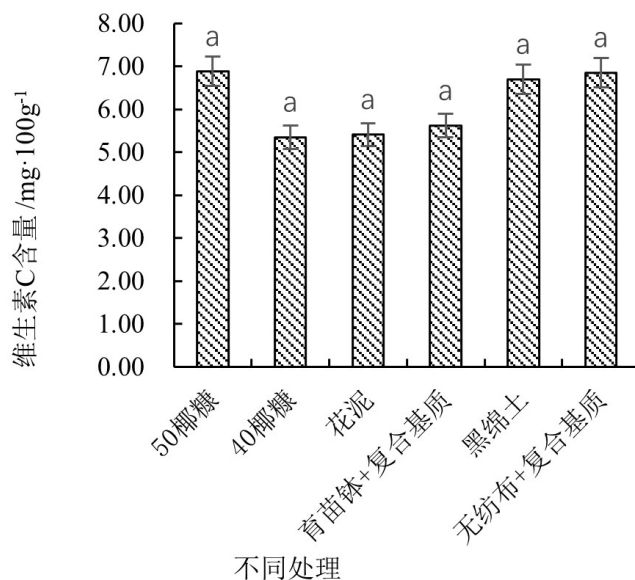


Figure 6. Comparison of VC under different treatments

图 6. 不同处理下生菜中维生素 C 含量比较

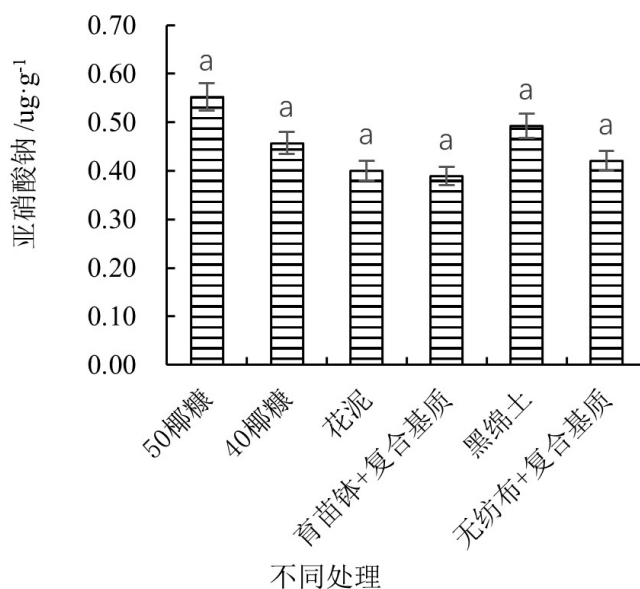


Figure 7. Comparison of Sodium Nitrite under different treatments

图 7. 不同处理下生菜中亚硝酸钠含量比较

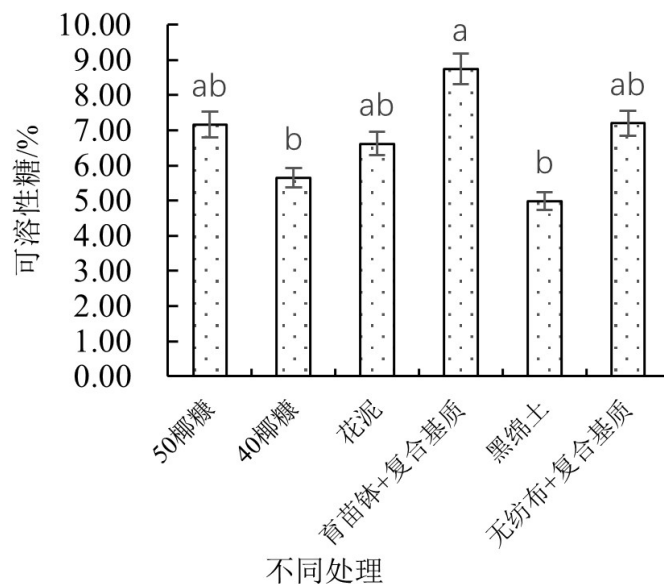


Figure 8. Comparison of soluble sugar content in lettuce under different treatments
图 8. 不同处理下生菜中可溶性糖含量比较

采收期对不同处理下生菜的维生素 C 含量进行测定, 范围在 5.35~6.88 mg/100g, 50 椰糠、无纺布 + 复合基质和黑绵土含量较高, 40 椰糠的含量最低, 不同处理间的差异不显著(图 6)。不同处理下亚硝酸钠含量在 0.39~0.55 $\mu\text{g/g}$, 育苗钵 + 复合基质与无纺布 + 复合基质的含量较低, 50 椰糠最高, 但处理间差异均不显著(图 7)。育苗钵 + 复合基质处理下的可溶性糖含量最高(8.74%), 显著高于 40 椰糠(5.65%)和黑绵土(4.98%), 其次是无纺布 + 复合基质的可溶性糖含量(7.20%), 比进口 40 椰糠块增幅 27.4%, 且与育苗钵 + 复合基质处理差异不显著(图 8)。

4. 讨论

无土水培载体(基质)的主要功能是支持、固定植株, 并为植物根系提供稳定协调的水、气、肥环境[12]。为节约生产成本、保障生产效率, 本文设置了为 50 椰糠块、40 椰糠块、海绵块、花泥块、育苗钵 + 复合基质组合、黑绵土和无纺布 + 复合基质组合等 7 种水培载体, 探讨了不同载体对生菜育苗、定植及采收的影响, 以期筛选出适合移动式 NFT 水培生菜一次成苗栽培的国产替代方案。

4.1. 载体成本与基质理化性质

载体耗材和人工成本是水培叶菜生产中关键指标之一。常用的 NFT 水培方法是把种子播种到整张不完全切割的海绵块上, 海绵块价格低廉(0.03 元/个), 但需二次分苗, 还需配合使用定植篮, 整个生产较为繁琐。花泥价格适中, 进口椰糠育苗块和新型基质黑绵土价格偏上, 一次成苗操作简便。进口 jiffy 育苗钵 + 复合基质价格最高(0.53 元/个), 无纺布 + 复合基质成本低(0.08 元/个), 育苗钵和无纺布袋是栽培容器, 需增加基质填充、压实扎穴的操作, 较为费工。

基质的理化性质直接影响栽培质量。海绵块和花泥块的容重最小, 未达到基质容重在 0.1~0.75 g/cm^3 最佳范围[11], 植株生长后期支撑力不足, 需要搭配定植篮使用。基质的通气性状主要用基质的总孔隙度、通气孔隙和气水比来表示, 与基质的容重、粒径和松紧程度密切相关, 郭世荣等研究认为基质的总孔隙度应在 54%~96%范围内[11], 本试验黑绵土的总孔隙度最低, 未达该范围, 说明黑绵土的保水透气性欠佳。50 椰糠块总孔隙度高, 气水比最低, 说明保水性好透气性差, 其通气孔隙度显著低于同产品系列的

40 椰糠块,说明不同规格的商品压缩育苗块理化性质存在差异。海绵和花泥为无机基质,EC 值最低,养分全靠营养液供给,缓冲性较小,对设施和营养液的管理要求较为严格[12]。生菜适合生长于保水透气且弱酸的根系环境中,由于 50 椰糠块和 40 椰糠块的 PH 值低于 5,播种前需用标准营养液充分浸泡与冲洗。育苗钵与无纺布袋均使用了复合基质填充,两者的基质体积、容重和总孔隙度无显著差异,无纺布 + 复合基质的气水比最高,其次是育苗钵 + 复合基质,说明两者基质保水透气性好,复合基质含有草炭、珍珠岩和蛭石结构性质的原料,增加了根系的缓冲性,在水、气、肥协调方面优于纯无机或纯有机基质。但两者也存在差异,无纺布 + 复合基质的气水比显著高于育苗钵 + 复合基质,说明育苗钵具有更好的保水性,而无纺布袋具有更好的透气性。

4.2. 水培载体与育苗

育苗基质提供种子萌发、幼苗生长必需的水分、营养成分和根系呼吸氧气,对培育壮苗至关重要[13]。海绵处理下生菜死苗严重,研究认为与潮汐灌溉方式及低频灌溉策略有关,海绵亲水性差,若无按压不能快速从底部吸水,海绵体积小保水弱,致使幼苗根系长期处于缺水状态死苗严重,说明海绵不适用于低频灌溉下的潮汐式育苗。花泥处理下生菜几乎没有根系扎出,花泥和海绵是无机基质材料,刘伟等认为无机基质缓冲性较小,对设施和营养液的管理要求较为严格[12],而其他 5 种基质均含有天然有机物,缓冲性强,可应对粗放的管理方式。

生菜苗期是整个生长的关键时期,如遇冷害等胁迫,根系活力下降,吸收能力减弱,植株发育迟缓。菊科莴苣属奶油生菜喜温喜光,生长适宜温度在 15℃~25℃之间,温度低于 10℃时生长缓慢,王璐瑶等认为持续 3 d 以上温度低于 15℃条件下,奶油生菜的生长发育受到抑制[14]。本试验育苗期在冬季 12 月份,昼夜温差大,夜温低于 10℃,对生菜苗期生长不利。综合生菜成苗期各项指标,推测多数幼苗表现的叶片卷曲、生长滞缓、根系细弱等症状均受夜间低温胁迫。其中,花泥处理下生菜苗长势弱,根系少,低温胁迫表现明显,可能与无机质材料结构单一,对环境的缓冲性与适应性差有关。无纺布 + 复合基质处理下的生菜成苗期各项数据均优于其他处理,其中叶宽、单株叶面积、地上部同化物积累量和壮苗指数等均显著高于其他处理,感官上亦表现出生长快,叶片多且舒展的苗壮特点,说明无纺布 + 复合基质缓冲了生长环境温度剧烈变化对根际温度的冲击[13],具有出色的保温性能。分析认为复合基质有机质含量高,其中草炭具有良好的保温性能,珍珠岩和蛭石使基质结构疏松多孔,可较好储存白天的余量,同时无纺布 + 复合基质的体积最大,保水透气性强,可进一步缓冲温度波动。

4.3. 水培载体与植株生长

生菜定植后进入快速生长期,此时植株生长速率直接影响最后的产量和品质。定植后 20 d 调查发现,无纺布 + 复合基质保持成苗期的壮苗优势,生长快,特别是在单株叶片数、单株叶面积、地上部同化物积累量和根系活力上显著高于其他基质处理,而该处理下单株外侧根鲜重和根干重与其他处理差异不显著,故根冠比最小,适合高密栽培。定植后生菜叶片卷曲小叶情况均有所缓解,体现在叶宽均有所增加,特别是 40 椰糠块的生菜叶宽与无纺布 + 复合基质差异不显著,基本恢复正常生长。50 椰糠块处理下生菜的开展度较大,但叶片数相对少,根系弱侧根少,这与 50 椰糠块的气水比低、透气保温性差,根系发育缓慢有关。育苗钵 + 复合基质的处理下生菜生长指标、地上部同化物积累量和根系活力等方面均显著低于无纺布 + 复合基质,从表 10 的照片中看,差异非常明显。结合两者的理化性质,说明育苗钵的保水性好于无纺布袋,但透气性不如无纺布袋,不适合冬季弱光蒸腾量较小的条件下使用。花泥处理下生菜的各项指标位于最后,生长速率慢,结合花泥的基质外侧根鲜重和根干重均低于其他处理,研究认为花泥的体积小、缓冲性弱,基质的气水比低、透气性差,导致根系发育受阻。陈宇冲等的研究也有相似

的结果,在用花泥水培生菜时,他们发现在定植初期生菜完全没有展现出根系,导致生长速率低于其他基质(海绵、岩棉、泥炭和椰糠)[5]。

4.4. 水培载体与植株采收

地上部同化物积累量直接影响生菜的产量。本试验中,无纺布+复合基质的生长优势一直保持至采收,采收期地上部同化量远高于其他处理,这与载体良好的保温性、保水性与透气性有关。育苗钵+复合基质处理下生菜生长后期由弱转强,采收阶段地上部同化量高于椰糠、黑绵土和花泥处理,推测生长后期光照增强,植株叶片增多,蒸腾量增大,育苗钵的根系透气性有所改善,利于植株快速生长。虽不同处理的地上部同化物量差异较大,但单株基质外根系鲜重和干重差异均不显著,说明采收阶段根系生长速率快于地上部生长量。自走式 NFT 水培系统是一种移动式高密叶菜栽培系统,要求栽培作物生长紧凑,株幅小,基质固定性强,避免在栽培管道自行走时株间牵绊倾倒。本试验中,无纺布+复合基质处理下的生菜叶长、叶宽和开展度适中,呈半抱球状态,但茎粗、叶片数、叶面积和单株地上部同化物最大,最适用于自走式 NFT 的高密高产栽培。

生菜品质是衡量经济效益的重要指标之一,水培生菜的营养液中富含大量的氮元素,容易积累硝酸盐,进而转化为亚硝酸盐危害人体健康。本试验结果显示,不同基质处理的亚硝酸盐含量差异不显著,远低于 GB2762-2022《食品安全国家标准食品中污染物限量》中蔬菜及其制品的亚硝酸盐限量 20 mg/kg。不同处理的维生素 C 含量无显著差异。可溶性糖是影响生菜口感甜度的关键成分,育苗钵+复合基质处理下的可溶性糖含量最高,无纺布+复合基质其次,两者差异不显著,且育苗钵+复合基质处理下的可溶性糖含量显著高于 40 椰糠块和黑绵土处理,表明用育苗钵+复合基质和无纺布+复合基质栽培的生菜口感更甜。

5. 结论

自主创新的无纺布袋+混合基质的水培载体可一次成苗,整个育苗与定植过程无需过多处理,不仅成本低,而且具有较好的透气性、保水性和出色的保温性,冬季低温亦可使生菜苗期正常生长。无纺布袋+混合基质处理下生菜定植后,生长快,长势好,叶片多,产量高,开展度和根量适中,株型紧凑,适合自走式 NFT 高密水培生产。同时可根据不同作物的需求,灵活调换复合基质配比,适应不同作物需求。但无纺布袋填装基质较为费工,播种前需注意压穴平整,保证出苗速度和出苗率,后期可配套研发无纺布袋自动填装、压穴、浇水、播种一体机,从而降低人工成本。综合分析,无纺布+复合基质载体适用于自走式 NFT 水培生菜一次成苗栽培,满足进口水培载体的国产化替代需求。

基金项目

北京农业职业学院院级科研项目(XY-YF-24-09),智能温室蔬菜产业技术体系北京市创新团队农职院综合试验站(T3348671)。

参考文献

- [1] 刘伟,赵秋菊,谢龙.北京水培蔬菜生产现状与发展建议[J].蔬菜,2023(8):53-56.
- [2] 张超,徐丹,刘康妮,等.连栋玻璃温室 NFT 水培生菜栽培技术[J].农业工程技术,2022,42(10):12-15.
- [3] 李佳蔚,王月英,马喆,等.基于 MGS 系统的水培生菜智能化生产技术集成与本土化应用[J].蔬菜,2025(12):75-80.
- [4] 荆延德,张志国.栽培基质常用理化性质“一条龙”测定法[J].北方园艺,2002(3):18-19.
- [5] 陈宇冲,刘康妮,裴帅,等.不同基质对水培生菜生长特性及品质的影响[J].农业工程技术(设施农业),2024(4):

43-49.

- [6] 高建昌, 郭广君, 国艳梅, 等. 平台扫描仪结合 ImageJ 软件测定番茄叶面积[J]. 中国蔬菜, 2011(2): 73-77.
- [7] 陆帼一, 张和义, 周存田. 番茄壮苗指标的初步研究[J]. 中国蔬菜, 1984(1): 13-17.
- [8] 韩旭东, 韩莹琰, 郝敬虹, 等. 不同体积盆钵对生菜生长的影响[J]. 北京农学院学报, 2021, 36(2): 26-30.
- [9] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 30-31.
- [10] 田雅楠, 曹玲玲, 赵立群. 番茄穴盘育苗基质特性及育苗效果研究[J]. 蔬菜, 2019(10): 8-14.
- [11] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005(S2): 1-4.
- [12] 刘伟, 余宏军, 蒋卫杰. 我国蔬菜无土栽培基质研究与应用进展[J]. 中国生态农业学报, 2006(3): 4-7.
- [13] 李平兰, 穆文强, 尚庆茂. 蔬菜功能性育苗基质生产技术规范[J]. 中国蔬菜, 2021(10): 131-135.
- [14] 王璐瑶, 刘涛, 董朝阳, 等. 幼苗期温度胁迫对装配式日光温室栽植奶油生菜的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(13): 49-55.