doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.009

蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验

袁　挺　王　栋　文永双　祝嗣朔　陈　英　谭豫之
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对我国全自动蔬菜移栽机取苗、投苗机构复杂等问题,设计了一种蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构及其配套苗盘。设计的取苗机构主要由送苗装置、振动装置和气吹装置等组成,各部分配合完成自动取苗、投苗工作。构建了振动过程中苗盘与钵苗的动力学模型,通过分析钵苗取苗条件,求解出振动过程中影响取苗成功率的 3 个主要参数:振动频率、振幅以及钵苗基质含水率。综合考虑振动与气吹相结合的取苗方式,以取苗成功率、基质破损率作为取苗效果评价指标,选取钵苗基质含水率、振动器振动频率、吹气气压为试验因素,进行多目标正交试验。试验结果表明:在给定因素水平下,当钵苗含水率为 55%、振动器振动频率为 36 Hz、吹气气压为 0.45 MPa 时,取苗效果最佳,此时取苗成功率为 92%,基质破损率为 3.46%。

关键词: 移栽; 穴盘苗; 振动; 气吹取苗
中图分类号: S223.92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0080-08

Design and Experiment of Seedlings Unloading Mechanism Based on Methods of Air-blowing and Vibration for Vegetable Transplanter

YUAN Ting　WANG Dong　WEN Yongshuang　ZHU Sishuo　CHEN Ying　TAN Yuzhi
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to improve the complicated seedling picking and throwing mechanisms of domestic vegetable transplanter, an air-blowing combined with vibration type seedlings unloading mechanism was designed based on a modified seedling tray at first. And the designed mechanism was composed of three main parts which were feeding device, vibrating device and air-blowing device and each part was cooperated to complete the automatic picking up and delivering seedings work. After that, the dynamic models of seedling and seedling tray were established during the seedlings unloading process. Through analyzing the models, the frequency of vibration, the amplitude of vibration and the water content rate of substrate were three main influence parameters which had effects on success rate of seedlings unloading. Furthermore, a multi-objective orthogonal test was performed considering the vibrating device and air-blowing device comprehensively. The success rate of seedlings unloading and the damage rate of substrate were chosen as the evaluation indexes, meanwhile the water content rate of substrate, the frequency of vibration and the air pressure were selected as the experimental factors. And the results indicated that when the water content rate was 55%, the vibration frequency was 36 Hz and the air pressure was 0.45 MPa, which were the best combination factors, led to a satisfactory result with 92% of success rate and 3.46% of damage rate. The result was able to provide a reference for automated transplanter.

Key words: transplants; plug seedlings; vibration; air blown seedling

0　引言

移栽是蔬菜生产中的重要环节,育苗移栽的机械化生产是减轻劳动强度、提高劳动生产率和保证作业质量的关键[1]。目前我国蔬菜仍然以半自动移栽为主,取苗、投苗过程主要靠人工完成,存在效率低、劳动强度大等问题,严重制约我国蔬菜产业发展[2-3]。取苗作业、投苗作业的机械化与自动化能

收稿日期: 2019-01-01　修回日期: 2019-03-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701300)
作者简介: 袁挺(1981—),男,副教授,主要从事农业智能装备和机器视觉技术研究,E-mail: yuanting122@hotmail.com
通信作者: 陈英(1969—),女,副教授,主要从事数字化设计及农业机器人研究,E-mail: cy@cau.edu.cn

够提高移栽效率、降低劳动强度、提高经济效益，是全自动蔬菜移栽机械发展的必然趋势[4]。

发达国家对育苗移栽技术的研究起步较早，研制的全自动蔬菜移栽机以大型、多行为主，整体结构复杂，价格昂贵，且国内蔬菜种植地块面积相对较小，没有与之配套的穴盘和育苗技术，因此国外机型难以在我国推广应用及批量生产[5-6]。国内的全自动移栽技术发展相对落后，主要以半自动移栽机为主。取苗机构作为全自动移栽机的关键部件，近年来被国内学者广泛研究，提出插入夹取结合式[7-17]、顶出式[18-19]、顶出夹取结合式[20-22]、气吸式[23]、气吹式[24]以及其他形式的取苗机构方案[25-29]，目前多以插入夹取结合式和顶出夹取结合式研究为主，但这两种取苗方式的取苗机构复杂，行程轨迹规划困难，容易造成钵苗的机械损伤，因此，未能在此基础上研制出相应的成熟机型并大规模推广使用[30]。

气吹等取苗方式具有结构简单、伤苗率低、取苗效率高等特点。现有的气吹式取苗机构，一般配套特制的苗盘，通过压缩空气产生的气吹力，将钵苗从苗盘吹出。但研究发现，只通过气吹的方式，并不能很好地取出钵苗，存在取苗成功率低、能耗巨大、对钵苗基质损伤率高等问题。为此，部分学者采用气吹与顶出相结合的取苗方式，先用顶出力打破钵苗与穴盘间的粘结力，然后用气吹将钵苗吹出，但此方式也存在定位困难、取苗成功率低等问题。

本文以甘蓝苗为移栽对象，设计一种振动与气吹相结合的蔬菜移栽机取苗机构，通过理论与试验分析，完成机构的优化设计与参数优选。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

气吹式取苗机构主要由送苗装置、振动装置、气吹装置等部件组成，整机结构如图 1 所示。与机器配套使用的苗盘由穴苗盘、无纺布育苗袋、钵苗组成，苗盘整体结构如图 2 所示。穴苗盘的苗穴为上下通透的中空圆柱，育苗基质与种子放入无纺布育苗袋置于苗穴中进行育苗。振动器固接在振动板下方中心位置，振动板 4 个边角下方由 4 个弹簧固定支撑在机架上，振动过程使钵苗产生一定惯性力，克服一部分钵苗与苗盘之间的摩擦力，穴孔移动到落苗管上方时，气吹装置将钵苗吹落至落苗管，振动装置与气吹装置相结合，共同完成自动取苗投苗工作。

1.2　工作原理

图 3 为气吹振动复合式取苗机构的取苗原理图。钵苗在钵体与穴孔内壁的摩擦力作用下留在上

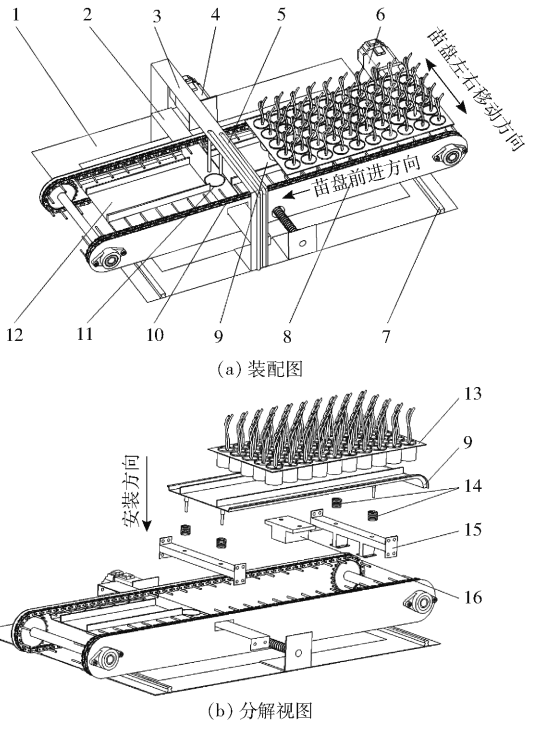


图 1　整机结构示意图

Fig. 1　Structure diagrams of seedlings unloading mechanism

1. 机架　2. 落苗管支架　3. 吹气管支架　4. 丝杠驱动电机　5. 吹气管　6. 链条驱动电机　7. 滑轨　8. 侧板　9. 振动板　10. 带拨杆链条　11. 落苗管　12. 底板　13. 穴苗盘　14. 弹簧　15. 支架　16. 振动器

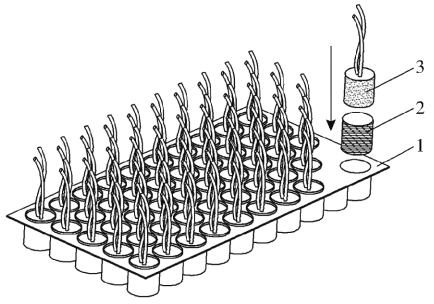


图 2　苗盘示意图

Fig. 2　Schematic of modified seedling tray

1. 穴苗盘　2. 无纺布育苗袋　3. 钵苗

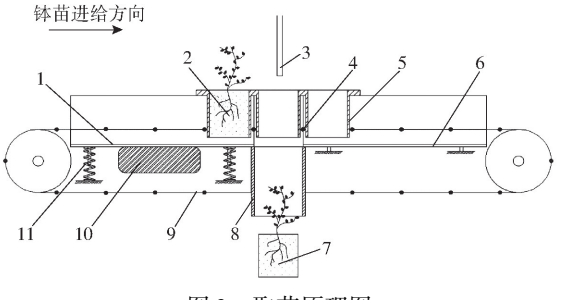


图 3　取苗原理图

Fig. 3　Principle of seedlings unloading

1. 振动板　2. 待取钵苗　3. 吹气管　4. 拨杆　5. 穴苗盘　6. 底板　7. 无纺布包裹钵苗　8. 导苗管　9. 带拨杆链条　10. 振动器　11. 弹簧

下通透的穴孔中，将钵苗连同穴盘一起放到链条下

方的振动板上,每个穴孔位于链条上两个相邻拨杆之间,在步进电机的带动下,链条顺时针旋转,拨杆带动苗盘向前进给,滚珠丝杠在步进电机的驱动下间歇正反转,带动振动板连同穴苗盘一起左右移动,方向如图 1a 所示。通过间歇匀速前进和间歇左右移动,机构可将每株钵苗精确运送到落苗管的正上方。振动板在振动器的带动下,依靠 4 个支撑弹簧,不断做简谐振动,带动苗盘上下振动,钵苗在振动过程中产生惯性力,用以抵消一部分钵体与穴孔内壁的摩擦力。当钵苗被运送到导苗管正上方时,吹气管中有向下的气流吹出,对钵体上表面施加向下的吹力,当吹力与振动过程中产生的惯性力与钵苗自身重力的合力大于钵体与穴孔内壁的摩擦力时,钵苗即可脱离苗盘竖直落入落苗管中,进而落入栽植机构进行移栽。

2 振动过程中苗盘与钵苗力学模型

以振动板左下角为原点 O,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,对苗盘单振动周期建立动力学分析模型,如图 4 所示。苗盘整体在振动板的作用下不断做简谐振动且受到水平方向链条拨杆的均速推力。

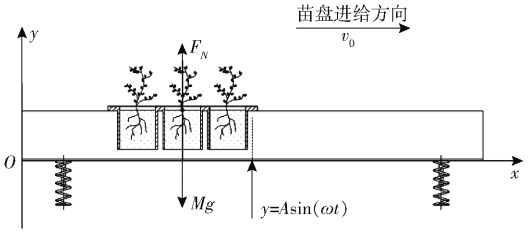


图 4 苗盘动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of seedling tray

振动器带动整个底板做简谐振动,不断带动苗盘上下振动,位移方程为

$$y = A\sin(\omega t) \tag{1}$$

对式(1)求导得其速度方程为

$$v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = A\omega\cos(\omega t) \tag{2}$$

式中 A——振动器振幅,mm

ω——振动器角速度,rad/s

t——时间,s

当苗盘与振动板的接触力 F_N 为 0 时,苗盘被抛起,假设此时 $t = B$。则此时苗盘竖直向上的速度为 $v_y = A\omega\cos(\omega B)$。

以苗盘整体为研究对象,由于振动时间间隔较小,故忽略水平方向所受链拨杆推力而产生的均速运动,苗盘整体被抛起后,在较小的时间间隔内做以水平方向速度为 v_0、竖直方向速度为 v_y 的抛体运动,建立如图 5 所示直角坐标系。考虑空气阻力,假设空气对抛体的阻力与速度成正比,即

$$F = -\mu v \tag{3}$$

式中 F——空气阻力, N

μ——空气阻力系数

v——抛体速度,mm/s

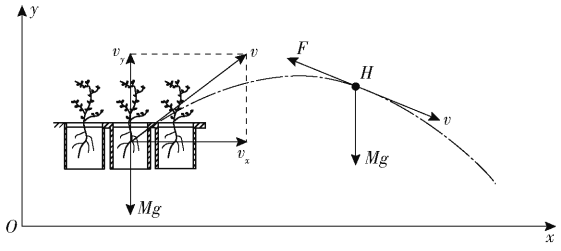


图 5 苗盘运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of seedling tray

苗盘整体在做考虑空气阻力的抛体运动时,在任意时刻 H 均受到重力 Mg 和空气阻力 F 的作用。

由此建立苗盘整体的运动微分方程:

水平方向

$$M\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = M\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = -F_x = -\mu\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -\mu v_x \tag{4}$$

竖直方向

$$M\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = M\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = Mg - \mu\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = Mg - \mu v_y \tag{5}$$

其中 $$M = m + \sum_{i=0}^{n} m_i$$

式中 M——苗盘与钵苗总质量, g

m——苗盘质量,g

m_i——单株钵苗质量,g

v_x——苗盘水平方向速度,mm/s

根据理论分析,当时间 $t = B$ 时,苗盘与振动板分离,此时苗盘水平方向速度为:$v_x = v_0$,竖直方向速度为:$v_y = A\omega\cos(\omega B)$。

通过对式(5)进行定积分

$$\int_{A\omega\cos(\omega B)}^{v_y} \frac{1}{\frac{Mg}{\mu} - v_y}\mathrm{d}v_y = -\int_0^t \frac{\mu}{M}\mathrm{d}t \tag{6}$$

求得竖直方向苗盘速度随时间变化规律为

$$v_y = \frac{Mg}{\mu}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{\mu}{M}t}) + A\omega\cos(\omega B)\mathrm{e}^{-\frac{\mu}{M}t} \tag{7}$$

苗盘整体被抛起后会在较短的时间内落到振动板上,设钵苗与苗盘在与振动板碰撞前整体速度为 v_1,碰撞后苗盘速度为 v_3,苗盘的速度变为 0,即 $v_3 = 0$,钵苗的速度为 v_2。

由于钵苗与苗盘分离前后,在 y 轴上没有受到外力的作用,故沿 y 轴动量守恒有

$$Mv_1 = mv_3 + (m_0 + m_1 + m_2 + \cdots + m_{14})v_2 \tag{8}$$

解得钵苗碰撞后的速度 v_2 为

$$v_2 = \frac{m + \sum_{i=0}^{n} m_i}{\sum_{i=0}^{n} m_i} v_1 \tag{9}$$

其中　　$v_1 = v_y$

最终求得钵苗碰撞后的速度 v_2 为

$$v_2 = \frac{m + \sum_{i=0}^{n} m_i}{\sum_{i=0}^{n} m_i} \cdot \left[\frac{Mg}{\mu}(1 - e^{-\frac{\mu}{M}t}) + A\omega\cos(\omega B)e^{-\frac{\mu}{M}t}\right] \tag{10}$$

对式(10)求导,得出碰撞时刻钵苗加速度为

$$a_2 = v_2' = \frac{m + \sum_{i=0}^{n} m_i}{\sum_{i=0}^{n} m_i} e^{-\frac{\mu}{M}t}\left(g - A\omega\cos(\omega B)\frac{\mu}{M}\right) \tag{11}$$

此时单株钵苗的受力分析如图 6 所示。在与振动板碰撞的一瞬间,钵苗与苗盘脱离之前,钵苗受力平衡,由牛顿第二定律得

$$m_i g + m_i a_2 = F_f \tag{12}$$

式中　F_f——钵苗与苗盘间的摩擦力,N

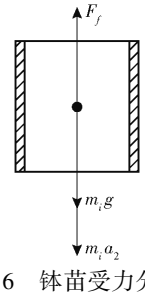


图 6　钵苗受力分析

Fig. 6　Force analysis of seedling

通过受力分析可知,钵苗要想脱离苗盘,要满足

$$m_i g + m_i a_2 > F_f \tag{13}$$

将式(11)代入整理得

$$A\omega < \left[g - \frac{(F_f - m_i g)\sum_{i=0}^{n} m_i}{m_i\left(m + \sum_{i=0}^{n} m_i\right)e^{-\frac{\mu}{M}t}}\right]\frac{M}{\cos(\omega B)\mu} \tag{14}$$

通过对苗盘进行单周期振动动力学分析可知,在振动过程中影响苗盘取苗成功率的主要因素为振动器振幅与振动器频率;通过对苗盘与振动板碰撞分析可知,影响取苗成功率的另一因素为钵苗与苗盘间的摩擦力,而摩擦力是由钵苗基质含水率决定的,不同的含水率,钵苗与苗盘之间的摩擦力不同,整体向下的合力也不同,所以基质含水率是影响取苗成功率的另一因素。

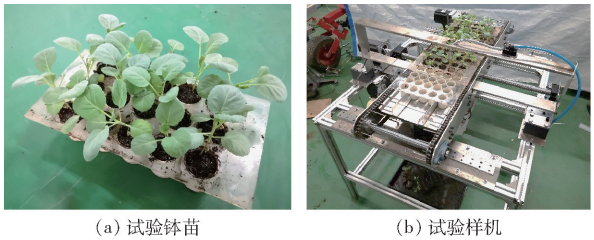
3　试验与结果分析

根据移栽机构取苗原理分析可知,气吹是影响取苗成功率的重要因素之一,是本文重点研究内容。由上述理论模型可知,取苗成功率与钵苗基质含水率、振动器振幅和频率、吹气气压等因素相关。试验所选用的振动器为常用的小型工业振动器,振幅不可调,恒定为 2 mm,所以本试验只讨论振动器的频率与取苗成功率的关系,对振幅不作讨论。

将钵苗基质含水率、振动频率和吹气气压作为本次试验的试验因素,取苗成功率与基质破损率为试验指标。

3.1　试验条件

2018 年 9 月 21 日至 11 月 21 日在中国农业大学工学院土槽实验室进行气吹振动复合式取苗机构取苗试验。试验苗为甘蓝苗,品种为中甘 21,产自北京通州科技农场,育苗盘采用 5 × 3 规格的自制苗盘,苗龄 31 d,含水率为 17.64% ~ 67.75%。钵苗平均株高 98 mm,钵苗展宽 79 mm,钵体为圆柱体,直径为 40 mm,钵体高度 40 mm。图 7a 为试验钵苗,图 7b 为试验样机。



(a) 试验钵苗　　(b) 试验样机

图 7　试验材料与样机

Fig. 7　Experimental materials and prototype

试验设备为:气吹振动复合式取苗机构;土壤温湿度仪(型号:科顺达 TR - 6,工作环境: - 40 ~ 80℃,含水率量程:0 ~ 100%,精度: ±3%);气泵空压机(品牌:奥突斯,功率:800 W,排气量:60 L/min,容积:18 L,气压可调);小型振动器(品牌:欣恒星,型号:TB - 0.28,电压:220 V/110 V,电流:0.23 A/0.45 A,功率:50 W,振幅:2 mm,频率:0 ~ 60 Hz 可调)等。

3.2　试验评价指标

试验选择取苗成功率、基质破损率为试验评价指标。取苗成功率是指取苗装置将钵苗从穴盘中取出的株数占穴盘苗总数的百分比。基质破损率是指取苗装置对钵苗进行取苗操作后,在此过程中钵苗散落的基质质量占总质量的百分比。

其中取苗成功率

$$S = \frac{D}{W} \times 100\% \tag{15}$$

基质破损率[31]

$$P=\frac{H-N}{H}\times 100\% \tag{16}$$

式中 D——取苗成功钵苗数量,株

W——钵苗总数量,株

H——单个钵苗基质总质量,g

N——吹落之后单个钵苗基质总质量,g

3.3 单因素试验

3.3.1 不同含水率钵苗的基质破损率与吹气气压关系试验

在取苗过程中,当喷嘴直径一定时,气压决定气吹力。本文描述的取苗机构要求气压提供的气吹力越大越好,但气压过高,气吹力过大时,基质破损率也就越大。

为了探究不同含水率钵苗的基质破损率与吹气气压之间的关系,进行不同含水率的气压吹苗与基质破损率关系单因素试验。在喷嘴直径为 4 mm 时,对吹气气压取 8 个水平分别进行试验,对基质的含水率(通过控制钵苗的灌溉水量实现)取 6 个水平进行试验。分别用不同的气压对不同含水率的钵苗进行吹苗试验,每个水平重复试验 15 次,共 48 组 720 次试验,得到基质破损率与吹气气压关系如图 8 所示。

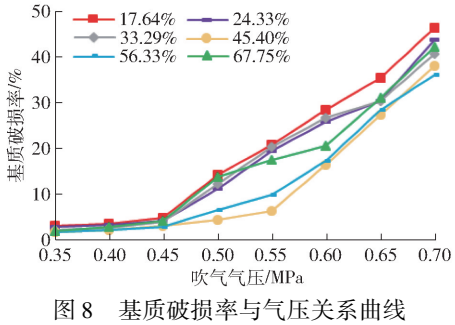


图 8 基质破损率与气压关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between damage rate of substrate and air pressure

由图 8 可知,不同的基质含水率在相同的吹气气压下,基质破损率不同,整体上随着吹气气压的增大而增大。在钵苗基质含水率为 45.40% 时,在不同气压下,基质破损率整体较低,此时,当气压小于等于 0.55 MPa 时,随着气压增加,基质破损率未明显增加,当气压大于 0.55 MPa 后,基质破损率明显增加。为了确保基质低破损率,当喷嘴直径为 4 mm 时,选取钵苗基质含水率为 45.40%、吹气气压为 0.55 MPa,此时效果较好。

3.3.2 振动频率与取苗成功率关系试验

取苗试验过程中,当钵苗基质含水率与吹气气压确定时,振动器振动频率直接影响最终取苗成功率。为了探究振动器振动频率对最终取苗成功率的影响,对振动器频率做单因素试验。试验所用的振动器振动频率为 0 ~ 60 Hz,分为 10 挡可调,每次提升 6 Hz。试验时,选取不同挡位所对应的频率作为试验水平。

选取钵苗基质含水率为 45.40% 左右的钵苗,喷嘴直径为 4 mm,吹气气压固定为 0.55 MPa 时,对振动器振动频率选择 8 个水平进行试验,每个水平重复试验 5 次,结果如图 9 所示。

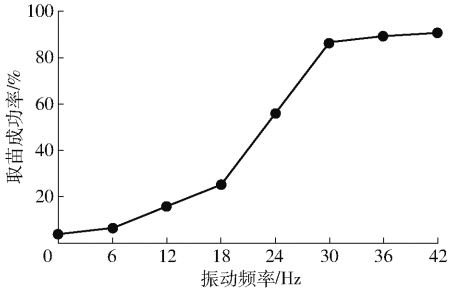


图 9 取苗成功率与振动频率关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between success rate of seedlings unloading and vibration frequency

由图 9 可知,随着振动器振动频率的增大,取苗成功率增大。当振动频率小于 30 Hz 时,随着振动频率增加,取苗成功率显著增加,当振动频率大于 30 Hz 后,取苗成功率未明显增加。所以当振动器振动频率为 30 Hz 时满足取苗要求,此时取苗成功率为 86.67%。

3.4 多目标正交试验

3.4.1 试验指标与试验结果

为了验证所设计的气吸振动复合式取苗机构的实际取苗效果,寻找最佳的参数组合,将取苗成功率与钵苗基质破损率设为试验指标,根据前文单因素试验测得的试验数据,选取钵苗基质含水率、吹气气压和振动器振动频率 3 个试验因素进行三因素三水平正交试验,即选用正交表 $L_9(3^4)$ 进行试验设计与分析,其因素与水平如表 1 所示。其中,钵苗基质含水率的水平通过控制钵苗的灌溉水量实现;吹气气压的水平通过控制气压表阀门实现;振动器振动频率的水平通过控制其自身挡位实现。试验结果如表 2 所示,A、B、C 为因素编码值。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	因素		
	基质含水率/%	吹气气压/MPa	振动频率/Hz
1	35	0.45	24
2	45	0.55	30
3	55	0.65	36

3.4.2 试验结果分析

根据试验结果进行相应的极差与方差分析,其中基质含水率、吹气气压和振动频率各水平对取苗质量

的影响如图 10 所示。由图 10 可知，各考察因子的极差越大，说明该因子对试验指标的影响越大。这样确定了影响取苗成功率的因素主次为振动频率、基质含水率、吹气气压，对基质破损率影响因素的主次顺序为吹气气压、基质含水率、振动频率。

方差分析结果如表 3 所示，由方差分析结果可知振动频率与基质含水率对取苗成功率有显著影响，吹气气压对基质破损率有显著影响。

通过极差和方差的试验数据分析，综合各因素对取苗效果的影响及其优化组合，按照取苗成功率高、基质破损率低的原则，确定$A_3B_1C_3$为较优组合，即钵苗基质含水率为 55%、吹气气压力 0.45 MPa、振动器振动频率为 36 Hz 时，综合取苗效果最佳，此时取苗成功率为 92%，基质破损率为 3.46%。

表 2　试验结果

Tab. 2　Experimental results

试验序号	因素			评价指标	
	A	*B*	*C*	取苗成功率/%	基质破损率/%
1	1	1	1	68.00	3.85
2	1	2	2	77.33	10.25
3	1	3	3	88.00	28.77
4	2	1	2	82.67	3.60
5	2	2	3	89.33	9.75
6	2	3	1	72.00	24.02
7	3	1	3	92.00	3.46
8	3	2	1	82.67	8.69
9	3	3	2	94.67	23.08

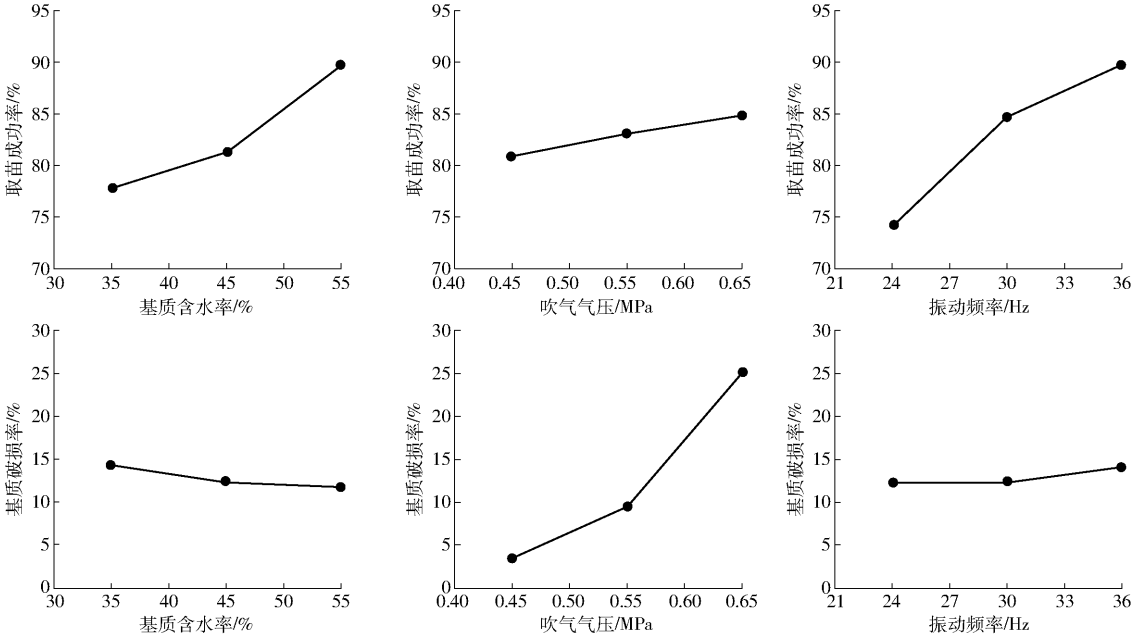


图 10　各指标对取苗效果的影响

Fig. 10　Effects of factors on seedling quality

表 3　方差分析结果

Tab. 3　Variance analysis result

试验指标	方差来源	偏差平方和	自由度	*F*	显著性
取苗成功率	*A*	228.076	2	8.611	*
	B	24.097	2	0.910	
	C	379.563	2	14.330	*
	误差列	52.97	4		
基质破损率	*A*	10.355	2	2.970	
	B	751.320	2	215.525	*
	C	6.113	2	1.750	
	误差列	3.49	2		
$F_{0.05}(2,4)=6.49$　　$F_{0.05}(2,2)=19$					

注：* 表示影响显著。

4　结论

（1）设计了一种气吹振动复合式取苗机构，取苗机构主要由送苗装置、振动装置、气吹装置等组成，各部分配合完成自动取苗投苗工作。

（2）建立了苗盘在振动前进时单周期动力学模型，得出振动器频率、振幅和基质含水率是影响取苗成功率的主要因素。

（3）进行单因素试验，测得当钵苗基质含水率为 45.40%、吹气气压为 0.55 MPa、振动器振动频率为 30 Hz 时取苗效果较好。

（4）以取苗成功率和基质破损率为试验指标，以钵苗基质含水率、吹气气压和振动频率为试验因素，对取苗机构进行三因素三水平正交试验。结果表明，基质含水率、振动频率是影响取苗成功率的显著因素，吹气气压是影响基质破损率的显著因素。3 个参数的最佳组合为：基质含水率 55%，吹气气压 0.45 MPa，振动频率 36 Hz，在该组合条件下，取苗成功率为 92%，基质破损率为 3.46%，满足甘蓝苗取苗要求。

参 考 文 献

[1] 吕志军,单伊尹,王杰,等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 30 - 34.
LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seeding-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 30 - 34. (in Chinese)

[2] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):44 - 53.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)

[3] 周海燕,杨炳南,颜华,等. 旱作移栽机械产业发展现状及展望[J]. 农业工程,2015,5(1):12 - 13.
ZHOU Haiyan, YANG Bingnan, YAN Hua, et al. Status quo and development prospects of dry land transplanting machine industry[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(1): 12 - 13. (in Chinese)

[4] 夏广宝,韩长杰,郭辉,等. 全自动移栽机械关键部件研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2019,41(2):1 - 7.
XIA Guangbao, HAN Changjie, GUO Hui, et al. Research status and development trend of key components of automatic transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 1 - 7. (in Chinese)

[5] 岳建魁,郭俊先,梁佳,等. 国内外移栽机械发展现状[J]. 新疆农机化,2016(5):30 - 32,36.
YUE Jiankui, GUO Junxian, LIANG Jia, et al. The development status of transplanting machinery at home and abroad[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2016(5): 30 - 32, 36. (in Chinese)

[6] 李华,曹卫彬,李树峰,等. 2ZXM - 2 型全自动蔬菜穴盘苗铺膜移栽机的研制[J]. 农业工程学报,2017,33(15):23 - 33.
LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Development of 2ZXM - 2 automatic plastic film mulching plug seedling transplanter for vegetable [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 23 - 33. (in Chinese)

[7] WAN ISHAK W I, AWAL M A, ELANGO R. Development of an automatic transplanter for the gantry system[J]. Asian Journal of Scientific Research, 2008, 1(4): 451 - 457.

[8] 赵匀,张卫星,辛亮,等. 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):105 - 112.
ZHAO Yun, ZHANG Weixing, XIN Liang, et al. Design and experiment of extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 105 - 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.011. (in Chinese)

[9] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplants[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(1): 13 - 19.

[10] 王永维,何焯亮,王俊,等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3):19 - 25.
WANG Yongwei, HE Chaoliang, WANG Jun, et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 19 - 25. (in Chinese)

[11] YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 43 - 55.

[12] JIN Xin, LI Daoyi, MA Hao, et al. Development of single row automatic transplanting device for potted vegetable seedlings [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 67 - 75.

[13] TIAN Subo, QIU Lichun, KONGDO Naoshi, et al. Development of automatic transplanter for plug seedling[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 79 - 82.

[14] HAN Lühua, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Development of a doorframe-typed swinging seedling pick-up device for automatic field transplantation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(2): e210.

[15] 周梅芳,徐建军,童俊华,等. 花卉穴盘苗取栽一体式自动移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(20): 44 - 51.
ZHOU Meifang, XU Jianjun, TONG Junhua, et al. Design and experiment of integrated automatic transplanting mechanism for taking and planting of flower plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 44 - 51. (in Chinese)

[16] 胡建平,靳合琦,常燕超,等. 基于 Delta 并联机构钵苗移栽机器人尺度综合与轨迹规划[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(5):28 - 35.
HU Jianping, JIN Heqi, CHANG Yanchao, et al. Dimensional synthesis and trajectory planning of plug seedling transplanting robot based on Delta parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 28 - 35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170503&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.003. (in Chinese)

[17] 廖庆喜,张照,胡乔磊,等. 油菜纸钵苗移栽机气动取苗机构设计与轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11): 70 - 78.
LIAO Qingxi, ZHANG Zhao, HU Qiaolei, et al. Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape

paper pot seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 70 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.009. (in Chinese)

[18] 韩振浩,颜华,陈科,等. 基于 Matlab 的顶苗机构设计与参数优化[J]. 农机化研究,2017,39(1): 142 - 146.
HAN Zhenhao, YAN Hua, CHEN Ke, et al. Design and parameter optimization of seedling expeller mechanism based on Matlab[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 142 - 146. (in Chinese)

[19] GEOFFRE A W. Apparatus for transferring seedlings from plant trays: US, 5868086[P]. 1999 - 02 - 09.

[20] 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲,等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 49 - 57.
WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49 - 57. (in Chinese)

[21] 韩长杰,郭辉,张学军,等. 硬质穴盘苗自动取苗装置设计[J]. 农业工程,2013,3(4): 99 - 102.
HAN Changjie, GUO Hui, ZHANG Xuejun, et al. Design of automatic hard-plug-seedlings pick device[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(4): 99 - 102. (in Chinese)

[22] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160715&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.015. (in Chinese)

[23] 包春江,李宝筏,包文育,等. 水稻钵苗空气整根气吸式有序移栽机的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 130 - 134.
BAO Chunjiang, LI Baofa, BAO Wenyu, et al. Air-sucking sequential rice transplanter for air-pruning tray grown seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 130 - 134. (in Chinese)

[24] 郭警伟,黄勇,戴远征,等. 气吹式落苗装置有序排苗性能的试验研究[J]. 中国农机化学报,2014, 35(2): 136 - 138.
GUO Jingwei, HUANG Yong, DAI Yuanzheng, et al. Performance experimental study of orderly rows seedlings on a type of seedling-falling device with air blast[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 136 - 138. (in Chinese)

[25] 童俊华,俞高红,朱赢鹏,等. 三臂回转式蔬菜钵苗取苗机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 113 - 121.
TONG Junhua, YU Gaohong, ZHU Yingpeng, et al. Design and experiment of three-arms rotary vegetable plug seedling pick-up mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 113 - 121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.012. (in Chinese)

[26] 赵匀,刘星,薛向磊,等. 茄子钵苗全自动移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5): 152 - 160.
ZHAO Yun, LIU Xing, XUE Xianglei, et al. Optimal design and experiment of fully-automated potted eggplant seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 152 - 160. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180517&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.017. (in Chinese)

[27] 蒋兰,吴崇友,汤庆,等. 油菜毯状苗移栽机栽植过程动力学模型及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 37 - 46.
JIANG Lan, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Kinematics model and parameter optimization of planting process of rape carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 37 - 46. (in Chinese)

[28] YANG Qizhi, XU Li, SHI Xinyi, et al. Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 131 - 145.

[29] JIN Xin, LI Mingyong, LI Daoyi, et al. Development of automatic conveying system for vegetable seedlings[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2018, 178: 2 - 9.

[30] 刘炜,刘继展. 穴盘苗移栽机器人末端执行器综述[J]. 农机化研究,2013,35(7): 6 - 10.
LIU Wei, LIU Jizhan. Review of end-effectors in tray seedlings transplanting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(7): 6 - 10. (in Chinese)

[31] 韩绿化,毛罕平,严蕾,等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7): 23 - 30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 23 - 30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150704&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.004. (in Chinese)