doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.030

气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置设计与试验

俞亚新　周俊伟　潘一隆　秦雯冰　王　昊　王　强
(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对缢蛏苗机械化播苗易损伤,人工播苗均匀性差、劳动强度高、工作环境差等问题,以 2 月龄缢蛏苗为研究对象,通过压缩试验,分析得到缢蛏苗的最低损伤力,设计了一种气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置。该装置由苗箱、槽轮、吹苗管、气流分流管等组成,工作原理是苗箱中的缢蛏苗通过槽轮进入吹苗管,在气流作用下被吹撒至滩涂中。分别建立了缢蛏苗在吹苗管内和空气中的动力学模型,分析了碰撞过程的接触力,确定了影响缢蛏苗运动轨迹的主要因素。通过 CFD－DEM 耦合构建仿真模型,以气流入口速度、装置离地高度、装置行进速度为试验因素,以播苗密度相对误差、损伤率为评价指标,分别进行了单因素与三因素三水平二次中心组合试验,得出影响播苗密度相对误差的主次因素为装置行进速度、气流入口速度、装置离地高度,影响损伤率的主次因素为气流入口速度、装置离地高度、装置行进速度。以播苗密度相对误差、损伤率为目标对各试验因素进行优化,得到优化后最优参数组合为气流入口速度 30 m/s、装置离地高度 490 mm、装置行进速度 0.17 m/s。采用优化后的参数进行台架试验验证,结果表明,在最优参数组合下,播苗密度相对误差为 7.02%,损伤率为 3.92%,证明此播苗装置性能良好,满足实际生产的要求。

关键词: 缢蛏苗; 播苗装置; 气吹式; 低损伤; CFD－DEM
中图分类号: S969　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0319-11　　**OSID**:

Design and Test of Air-blowing Seeding Device for *Sinonovacula constricta* Seedling

YU Yaxin　ZHOU Junwei　PAN Yilong　QIN Wenbing　WANG Hao　WANG Qiang
(*School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Manual sowing of *Sinonovacula constricta* seedling in tidal flat is a slow and labour-intensive operation, and damage of mechanical sowing limits the production of *Sinonovacula constricta*. The mechanical properties of 2-month-old *Sinonovacula constricta* seedling were tested and a pneumatic seeding device was proposed which mainly consisted of a seedling box, a grooved pulley, seedling-blowing pipe, and an air flow distribution pipe. *Sinonovacula constricta* seedling in the seedling box entered the seedling-blowing pipe via the grooved pulley, and then with the effect of air flow, they were blown and scattered onto the tidal flat. The kinematic model of seedling in the seedling-blowing pipe and air were established respectively. The contact forces of the collision process were obtained and the main factors influencing the movement trajectories of *Sinonovacula constricta* seedling were analyzed. Based on CFD－DEM method, single-factor and three-factor and three-level quadratic orthogonal central composite experiments were conducted respectively, with the inlet velocity of air flow, the distance from the ground, and the speed of the device selected as experimental factors, and the relative error of seeding density and the damage rate as performance indicators. The results showed that the factors affecting the relative error of seeding density, in order, were the speed of the device, the inlet velocity of air flow, and distance from the ground. The factors affecting the damage rate were the inlet velocity of air flow, the distance from the ground, and the speed of the device in order. The optimal combination of parameters was determined to be 30 m/s of the inlet velocity, 490 mm of the distance from the ground, and 0.17 m/s of the speed. Based on the parameters obtained in simulation experiments, a prototype pneumatic seeder was fabricated and tested for its performance. The seeder worked satisfactorily at the relative error of

收稿日期: 2024－12－24　修回日期: 2025－02－12
基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2023C02011)
作者简介: 俞亚新(1974—),女,教授,博士,主要从事农业机械设计与分析研究,E-mail: yyxin@zstu.edu.cn

seeding density of 7.02% and the damage rate of 3.92%. The research result can provide a technical support for the seeding devices of thin-shelled shellfish seedling on tidal flats.

Key words: *Sinonovacula constricta* seedling; seeding device; air-blowing; low-damage; CFD - DEM

0 引言

缢蛏是我国贝类养殖的主要产品之一,穴居生活在软泥滩上,正常情况下,缢蛏定居不移、不会离开洞穴。缢蛏苗是薄、软壳,所以目前常采用人工撒播方式[1-2]。人工撒播存在劳动强度高、撒播均匀度差、工作环境差等问题[3]。采用机械化撒播缢蛏苗可以提高效率、降低劳动强度,但减小缢蛏苗损伤是急需解决的问题[4]。

目前国内外学者对机械化撒播贝苗进行了相关研究,如离心式、气吸式和拖曳式等[5-8]。针对蛤蜊等硬壳贝苗,黄伟等[9]提出离心式播苗装置,采用离散元仿真方法确定了装置的最优参数组合。WARE 等[10]设计了一种气吸式底播象拔蚌幼苗装置,利用气吸力从料斗中吸取贝苗,将贝苗撒播到贴近海底的位置,其撒播均匀度较好。苑春亭等[11]提出了一种浅海拖曳式底播装置,通过随船移动的漏斗将贝苗直接播撒到海底,但未见实际应用。采用气力式播苗研究较少,梁健等[12]提出了一种便携式风扫贝类播苗机,通过风机吹出的气流将播种幼苗吹出进行播种,有水路两用的效果,可在滩涂与浅海中播种。为降低机械化撒播缢蛏苗过程中损伤率,研究者通过品种培育来提高缢蛏苗的硬度,董迎辉等[13]发明了一种蛏类硬壳新品种选育方法。

目前,由于气力式撒播对物料外形适应性强等特点,已应用在施肥、播种等方面[14-18],如 YUAN 等[19]通过 CFD - DEM 耦合模拟方法和试验研究弯头曲径比、波纹管长度、风速对气动施肥机施肥均匀性的影响,确定了使施肥均匀性最佳的参数组合。YATSKUL 等[20]研究了空气速度、流场集中度、管径对气力式播种机性能的影响,通过试验确定气力式播种机均匀性最佳参数组合。陈威等[21]通过分析不同管道内气流、压力、颗粒运动状态,结合试验得到最优结构参数,肥料破损率为 0.72%。高筱钧等[22]分析了种子在气流作用下在增压管中的运动,为气力式播种机设计优化提供了理论依据。雷小龙等[23]通过 CFD - DEM 耦合仿真分析了输种管结构对排种性能的影响,并通过试验明确较优的管道结构。

滩涂播苗常选取 2 月龄缢蛏苗[24],其形状为长扁形且为软壳,本文基于缢蛏苗的物理特性,设计一种气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置,建立缢蛏苗在吹苗管内和空气中的动力学模型,通过 CFD - DEM 仿真和响应面试验分析,确定气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置最佳工作参数,并通过台架试验对性能加以验证,实现低损伤缢蛏苗播苗。

1 缢蛏苗生物力学特性

1.1 缢蛏苗物理特性

缢蛏苗的几何特性研究是建立缢蛏苗颗粒仿真模型的基础。随机选取 100 颗 2 月龄缢蛏苗,采用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量其三轴尺寸,包括壳长、壳宽和壳高。壳长为壳前端至后端的距离,壳宽为张口方向到绞合线的最远距离,壳高为两壳间最大距离。结果表明,壳长为(17.31 ± 1.71) mm,壳宽为(6.46 ± 0.55) mm,壳高为(4.72 ± 0.60) mm。随机选取 1 000 颗 2 月龄缢蛏苗,采用 CNW BP - N 电子秤测量其千颗质量,重复 3 次取平均值得到缢蛏苗千颗质量为 193.62 g。随机选取一定质量 2 月龄缢蛏苗,采用浸液法测量其密度,重复 3 次取平均值得到缢蛏苗密度为 1 231 kg/m^3。

1.2 缢蛏苗压缩力学特性

采用 WDW - 1000 型微机控制电子万能试验机对 2 月龄的缢蛏苗进行压缩力学特性试验,获得最低损伤力。

缢蛏苗压缩加载方向如图 1 所示。图 1a 为缢蛏苗绞合线或张口线水平夹持,为壳高方向;图 1b 为张口向上绞合线向下夹持,为壳宽方向;图 1c 为绞合线或张口线垂直夹持,为壳长方向。以 2 mm/min 速度加载,记录压缩过程缢蛏苗的压缩载荷 F 和变形量 Δl 数据,每个方向重复 20 次,取平均值。

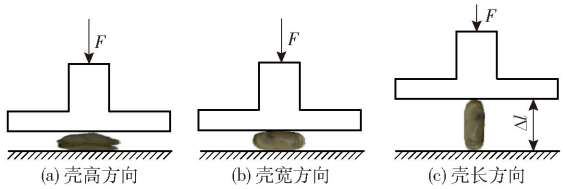


图 1 压缩加载方向示意图

Fig. 1 Schematics of compression loading direction

图 2 所示为缢蛏苗的压缩载荷-变形量曲线。在 3 个方向上,均为当载荷增大到某一值后,载荷突然下降,缢蛏苗壳破裂,载荷大小即为缢蛏苗的破裂力。3 个方向的压缩试验结果见表 1。

根据平均破裂力对应的平均变形量将 3 个方向的平均变形量分别分为 3 个区间,如表 2 所示。在

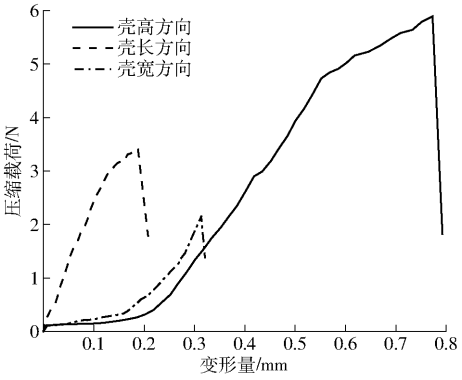


图 2　缢蛏苗压缩典型压缩载荷-变形量曲线

Fig. 2　Typical compression load-deformation curves of *Sinonovacula constricta* seedling

表 1　3 个方向压缩试验结果

Tab. 1　Three direction compression test results

加载方向	平均破裂力/N	平均变形量/mm
壳高方向	5. 57	0. 80
壳宽方向	2. 18	0. 30
壳长方向	3. 37	0. 18

壳高、壳宽和壳长方向每个区间做压缩试验。当变形量到区间末端值时停止压缩，记录在此区间内的压缩载荷最大值，每个区间做 20 组压缩试验，做完后将每个区间内的缢蛏苗放置海水中暂养，第 2 天观察其是否存活，记录下存活率，其试验结果见表 2。

表 2　3 个方向分区间压缩试验结果

Tab. 2　Compression test results between three directional partitions

加载方向	变形量区间/mm	最大载荷平均值/N	存活率/%
壳高方向	(0,0. 30]	1. 19	100
	(0. 30,0. 50]	2. 35	100
	(0. 50,0. 80]	4. 71	80
壳宽方向	(0,0. 10]	0. 45	100
	(0. 10,0. 20]	0. 78	100
	(0. 20,0. 30]	2. 02	60
壳长方向	(0,0. 06]	1. 00	100
	(0. 06,0. 12]	1. 35	100
	(0. 12,0. 18]	2. 32	80

由表 2 试验结果可知，在 3 个方向的平均变形量达三分之二以上时，存活率都在 80% 及以下。在 3 个方向的平均变形量在三分之二以下时，存活率为 100%，壳宽方向抗压能力最弱，为 0. 78 N；壳高方向抗压能力最强，为 2. 35 N。本文以缢蛏苗承受的损伤力小于 0. 78 N 为设计依据。

2　气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置设计

2. 1　结构及工作原理

气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置结构如图 3 所示，苗箱固定在机架上，壳体上端与苗箱相连接，壳体下端与吹苗管相连接，槽轮置于壳体内，槽轮两凹槽之间安装有软毛刷，电机固定安装在机架上，吹苗管的一端通过气流分流管与风机出风口连接。播苗装置长×宽×高为 1 100 mm×700 mm×1 100 mm，作业行数 4 行，最大作业幅宽 2 m，苗箱容积 22 L。工作原理如图 4 所示，落入苗箱的缢蛏苗通过槽轮进入吹苗管，在气流作用下被吹撒至滩涂中，完成缢蛏苗播苗。

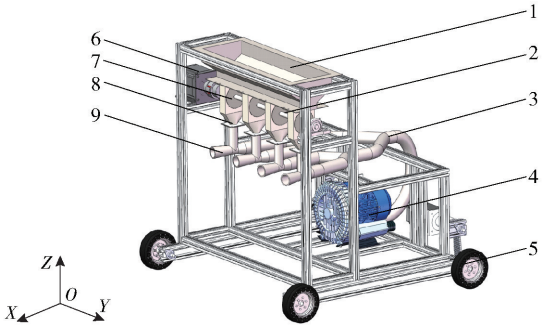


图 3　气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置结构图

Fig. 3　Structure diagram of air-blowing low-damage *Sinonovacula constricta* seedling device

1. 苗箱　2. 回转轴　3. 气流分流管　4. 风机　5. 蜂窝轮　6. 电机　7. 槽轮　8. 壳体　9. 吹苗管

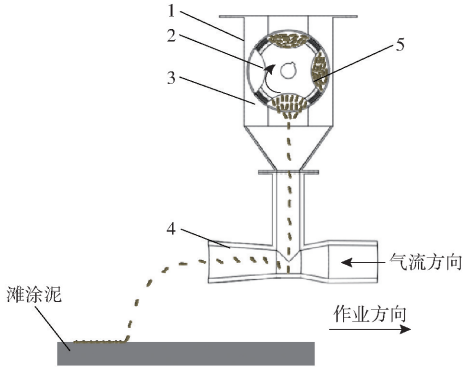


图 4　气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置工作原理图

Fig. 4　Working principle diagram of air-blowing low damage *Sinonovacula constricta* seedling device

1. 壳体　2. 槽轮　3. 软毛刷　4. 吹苗管　5. 缢蛏苗

2. 2　缢蛏苗播苗过程动力学分析

缢蛏苗播苗过程主要分为 2 个阶段：缢蛏苗在吹苗管内的运动和缢蛏苗在空气中的运动。缢蛏苗在吹苗管内的运动过程较为复杂，在输送过程中缢蛏苗与缢蛏苗之间、缢蛏苗与吹苗管管壁之间会发生接触。

2. 2. 1　缢蛏苗与缢蛏苗接触情况分析

缢蛏苗在吹苗管内的运动受到很多不确定因素的影响，比如气流速度不稳定、缢蛏苗自身的自转等。缢蛏苗在气流作用下，各个缢蛏苗的速度大小和方向相似，因此缢蛏苗之间的接触概率相对较低，

并且发生缢蛏苗与缢蛏苗接触时,会出现一个缢蛏苗加速另外一个缢蛏苗减速的现象,对缢蛏苗的运动影响较弱。由动量定理和恢复系数的物理含义可得

$$\begin{cases} m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2' \\ e = \dfrac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \end{cases} \tag{1}$$

式中 m_1、m_2——两颗缢蛏苗的质量,kg

v_1、v_2——缢蛏苗接触碰撞前速度,m/s

v_1'、v_2'——缢蛏苗接触碰撞后速度,m/s

e——缢蛏苗与缢蛏苗碰撞恢复系数

由式(1)可得

$$\begin{cases} v_1' = v_1 - \dfrac{m_1}{m_1 + m_2}(1 + e)(v_1 - v_2) \\ v_2' = v_2 - \dfrac{m_1}{m_1 + m_2}(1 + e)(v_1 - v_2) \end{cases} \tag{2}$$

2.2.2 缢蛏苗与管壁接触情况分析

建立全局坐标系 $OXYZ$,X 轴方向与前进方向相反,Z 轴方向与地面垂直向上,Y 轴方向与 XOZ 面垂直。如图 3 所示,以缢蛏苗与管壁接触点为原点建立动坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$,Y_1 轴方向为接触点的法线方向,X_1 轴方向为吹苗管轴线方向,Z_1 轴方向与 $X_1O_1Y_1$ 面垂直,如图 5 所示。OX 与 O_1X_1 之间的夹角为吹苗管偏置角度 θ,(°)。忽略缢蛏苗的外形尺寸差异,并假设吹苗管内各处气流速度相等[25]。

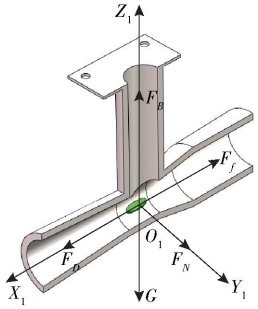


图 5 动坐标系建立

Fig. 5 Dynamic coordinate system establishment

缢蛏苗受力分析如图 5 所示,建立方程

$$\begin{cases} F_D - F_f = ma_{X1} \\ F_N = ma_{Y1} \\ F_B - G = ma_{Z1} \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} F_D = \dfrac{1}{8}C\pi d_p^2\rho(v_a - v)^2 \\ F_B = \dfrac{1}{6}\pi d_p^3\rho g \\ G = mg \\ F_f = \mu F_N \end{cases} \tag{4}$$

式中 F_D——缢蛏苗在气流中的流体阻力,N

F_B——缢蛏苗受到气流浮力,N

F_N——吹苗管管壁对缢蛏苗支持力,N

F_f——吹苗管管壁对缢蛏苗摩擦力,N

G——缢蛏苗重力,N

v——缢蛏苗速度,m/s

v_a——气流速度,m/s

m——缢蛏苗质量,kg

μ——吹苗管与缢蛏苗摩擦因数

d_p——缢蛏苗当量直径,取 10.78 mm

ρ——标准状态下空气密度,取 1.2 kg/m^3

C——粘性阻力系数,取 0.44

a_{X1}——缢蛏苗在 X_1 轴方向的加速度,m/s^2

a_{Y1}——缢蛏苗在 Y_1 轴方向的加速度,m/s^2

a_{Z1}——缢蛏苗在 Z_1 轴方向的加速度,m/s^2

由式(3)、(4)可求得

$$\begin{cases} a_{X1} = \dfrac{C\pi d_p^2\rho(v_a - v)^2 - 8\mu F_N}{8m} \\ a_{Y1} = \dfrac{F_N}{m} \\ a_{Z1} = \dfrac{\pi d_p^3\rho g}{6m} - g \end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可求得,缢蛏苗在吹苗管内总加速度 a 为

$$a = \sqrt{a_{X1}^2 + a_{Y1}^2 + a_{Z1}^2} = \sqrt{\frac{A - BF_N + DF_N^2}{m^2} - \frac{E}{m} + g^2} \tag{6}$$

其中

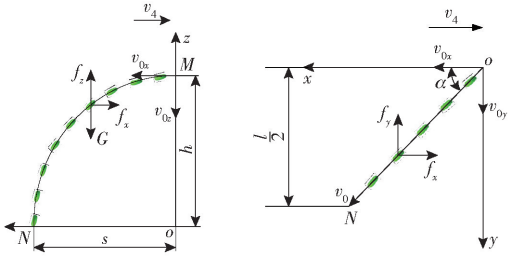
$$\begin{cases} A = \dfrac{1}{64}\pi^2 d_p^4\rho^2[C^2(v_a - v)^4 + d_p^2g^2] \\ B = \dfrac{1}{4}\mu C\pi d_p^2\rho(v_a - v)^2 \\ D = 1 + \mu^2 \\ E = \dfrac{1}{3}\pi d_p^3\rho g^2 \end{cases} \tag{7}$$

由式(6)、(7)可知,缢蛏苗在吹苗管内的运动除与自身质量、摩擦因数、直径等有关外,还受气流速度影响。

2.2.3 缢蛏苗在空气中运动分析

缢蛏苗以一定的初速度离开吹苗管,在重力和空气阻力的作用下沿着抛物线轨迹落到滩涂表面。缢蛏苗的受力与运动如图 6 所示,以缢蛏苗吹出点在地面上的投影点为原点 o 建立空间直角坐标系,其中 x 轴方向与运动方法相反,y 轴方向指向幅宽方向,z 轴方向垂直于地面向上。缢蛏苗在离开吹苗管时所具备的速度可以沿 x、y、z 方向分解为 v_{0x}、v_{0y}、v_{0z}。

图 6 中:点 M 为缢蛏苗吹出点;点 N 为落地点;h 为离地高度,m;s 为撒播距离,m;l 为撒播幅宽,m;f_x 为缢蛏苗沿 x 方向受到的空气阻力,N;f_y 为缢



(a) *xoz*面运动轨迹投影　　(b) *xoy*面运动轨迹投影

图 6　缵蛭苗在空中运动分析

Fig. 6　Analysis of movement of *Sinonovacula constricta* seedling in air

蛭苗沿 y 方向受到的空气阻力，N；f_z 为缵蛭苗沿 z 方向受到的空气阻力，N；α 为缵蛭苗离开吹苗管速度方向与吹苗管轴线方向的夹角，(°)。

空气阻力公式为

$$\begin{cases} f = kv_0^2 \\ v_0 = v_3 - v_4 \end{cases} \tag{8}$$

式中　f——缵蛭苗所受空气阻力，N

k——空气阻力系数

v_0——缵蛭苗与装置行进速度的相对速度，m/s

v_3——缵蛭苗离开吹苗管初速度，m/s

v_4——装置行进速度，m/s

根据牛顿第二定律列出 x、y 方向方程

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}v_{0x}}{\mathrm{d}t} = -kv_{0x}^2 \\ m\dfrac{\mathrm{d}v_{0y}}{\mathrm{d}t} = -kv_{0y}^2 \end{cases} \tag{9}$$

当 $t=0$ 时，根据投影可得到缵蛭苗离开吹苗管的初速度为

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0\cos(\theta+\alpha) \\ v_{0y} = v_0\sin(\theta+\alpha) \end{cases} \tag{10}$$

对公式(9)积分并将临界条件式(10)代入得到 v_{0x} 与 v_{0y} 关于 t 的函数关系式

$$\begin{cases} v_{0x} = \left(\dfrac{1}{v_0\cos(\theta+\alpha)} + \dfrac{kt}{m}\right)^{-1} \\ v_{0y} = \left(\dfrac{1}{v_0\cos(\theta+\alpha)} + \dfrac{kt}{m}\right)^{-1} \end{cases} \tag{11}$$

当 $t=0$，$x=0$，$y=0$ 时，对式(11)积分，当 $t=t_1$（t_1 为缵蛭苗运动到地面的总时间），得到 s、l 关于 t_1 的表达式

$$\begin{cases} s = \dfrac{m}{k}\ln\left(\dfrac{1}{v_0\cos(\theta+\alpha)} + \dfrac{kt_1}{m}\right) - \dfrac{m}{k}\ln v_0\cos(\theta+\alpha) \\ l = 2\left[\dfrac{m}{k}\ln\left(\dfrac{1}{v_0\sin(\theta+\alpha)} + \dfrac{kt_1}{m}\right) - \dfrac{m}{k}\ln v_0\sin(\theta+\alpha)\right] \end{cases} \tag{12}$$

由式(12)可知，撒播幅宽 l 与撒播距离 s 均与缵蛭苗离开吹苗管初速度方向、吹苗管偏置角度、装置离地高度、气流入口速度、装置行进速度、空气阻力有关，为研究撒播规律，借助 CFD－DEM 耦合仿真方法，仿真分析得出最优参数。

2.3　缵蛭苗碰撞过程接触力分析

缵蛭苗在运动过程中会碰到其他缵蛭苗或吹苗管管壁产生接触力，缵蛭苗的运动状态会因此改变，故而需要考虑接触力的影响。缵蛭苗与缵蛭苗、吹苗管管壁之间的接触力数学模型采用 Hertz－Mindlin 模型。将缵蛭苗的碰撞看作颗粒 i 与颗粒 j 之间的碰撞，颗粒间接触力 F_{ij} 分为法向接触力 F_n、切向接触力 F_t、法向阻尼力 F_{Rn}、切向阻尼力 F_{Rt}，其表达式为[26]

$$\begin{cases} F_{ij} = F_n + F_t + F_{Rn} + F_{Rt} \\ F_n = \dfrac{4}{3}E^*\sqrt{r^*}\delta_n^{\frac{3}{2}} \\ F_t = -k_t\delta_t \\ F_{Rn} = -2\sqrt{\dfrac{5}{6}}\gamma\sqrt{k_n m^*}v_{ij}^n \\ F_{Rt} = -2\sqrt{\dfrac{6}{5}}\gamma\sqrt{k_t m^*}v_{ij}^t \end{cases} \tag{13}$$

式中　E^*——颗粒的等效弹性模量，Pa

r^*——颗粒的等效半径，m

m^*——颗粒的等效质量，kg

δ_n、δ_t——两颗粒法向重叠量和切向重叠量，m

k_n、k_t——颗粒的法向刚度和切向刚度，N/m

v_{ij}^n、v_{ij}^t——颗粒 i 和颗粒 j 相对速度的法向分量和切向分量，m/s

γ——阻尼比

缵蛭苗在输送过程中各个缵蛭苗的速度大小和方向相似，缵蛭苗之间的接触概率相对较低，因此主要计算缵蛭苗与吹苗管管壁之间的接触力。对于缵蛭苗与吹苗管管壁碰撞，则将管壁看作是直径无穷大的球。在气流入口速度为 35 m/s 时，将缵蛭苗与管壁的参数属性代入式(13)，可得 F_n 为 0.207 N，所以缵蛭苗与管壁的接触力 F_{ij} 远小于本文测量的最低损伤力 0.78 N。

3　CFD－DEM 耦合仿真分析

3.1　缵蛭苗模型与几何模型建立

基于前期测量的缵蛭苗三轴尺寸，在 Solidworks 中建立缵蛭苗三维模型。建模完成后，导出 stl 格式的缵蛭苗模型文件并导入 EDEM 中进行 API 多球颗粒填充。在尺寸分布选项中，设置缵蛭苗模型的球体单元尺寸按正态分布生成，其中半径平均值为

1 mm,标准差为 0.05 mm,缀蛭苗模型如图 7a 所示。



(a) 缀蛭苗颗粒模型 (b) 简化仿真模型

图 7 耦合仿真模型

Fig. 7 Coupling simulation models

将播苗装置模型保留吹苗管和气流分流管,建立流场模型首先需要提取流道并划分网格,导出 x - t 格式并导入 SCDM 中提取流道,对边界进行命名,进而通过 CFX 模块进行网格划分[27-28],输出 msh 文件后导入 EDEM 中,并建立 2 m × 4 m 的滩涂底质平面为缀蛭苗承载面,如图 7b 所示。

3.2 仿真参数确定

测试了 2 月龄缀蛭苗物性参数,并测量了缀蛭苗与树脂材料吹苗管的接触力学特性参数,如表 3 所示。其中滩涂底质相关参数根据文献[29]获取。选择 Hertz - Mindlin 无滑动模型为仿真接触模型,在 EDEM 中设置时间步长为 2×10^{-6} s,Fluent 中时间步长为 EDEM 的整数倍,设置为 1×10^{-4} s,设置 Fluent 步数为 1.1×10^{5} 步,最大迭代次数为 50 次[30]。

表 3 仿真参数

Tab. 3 Parameters used in simulation

项目	参数	数值
缀蛭苗	泊松比	0.37
	剪切模量/Pa	1.3×10^{7}
	密度/(kg·m^{-3})	1 231
树脂	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	8.87×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 117
滩涂底质	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	8.3×10^{7}
	密度/(kg·m^{-3})	1 758
缀蛭苗-缀蛭苗	碰撞恢复系数	0.25
	静摩擦因数	0.58
	滚动摩擦因数	0.45
缀蛭苗-树脂	碰撞恢复系数	0.37
	静摩擦因数	0.51
	滚动摩擦因数	0.43
缀蛭苗-滩涂底质	碰撞恢复系数	0.1
	静摩擦因数	0.1
	滚动摩擦因数	0.3

3.3 播苗装置结构参数

播苗装置中吹苗部件结构参数决定撒播均匀性与撒播幅宽,其吹苗部件包括吹苗管和气流分流管,结构示意图如图 8 所示。在 4 根吹苗管上方分别设置颗粒工厂,使缀蛭苗颗粒自由落体到吹苗管内,设置缀蛭苗颗粒生成速度为 17 颗/s,仿真总时长为 11 s,气流入口速度为 35 m/s,装置行进速度为 0.15 m/s,装置离地高度为 500 mm。前期预试验确定主要影响因素及其取值范围:吹苗管管距 L 为 150 ~ 250 mm,吹苗管偏置角度增量 φ 为 2.5° ~ 7.5°。试验中吹苗管管距设 150、200、250 mm,吹苗管偏置角度增量为 2.5°、5.0°、7.5°。通过仿真试验得到不同吹苗管管距、偏置角度增量下播苗密度相对误差及有效撒播幅宽。在 EDEM 后处理界面通过 Selection Group 功能添加 Grid Bin Group 至滩涂底质,统计 1 m^2 内缀蛭苗的数量,并通过 Ruler 功能测量播撒的有效幅宽,如图 9 所示。每组试验重复 3 次取平均值,结果见表 4。其中播苗密度相对误差计算公式为

$$\delta = \frac{|N_1 - N|}{N} \times 100\% \tag{14}$$

式中 δ——播苗密度相对误差,%

N_1——单位面积撒播的缀蛭苗数量,颗

N——要求单位面积撒播缀蛭苗数量,375 颗

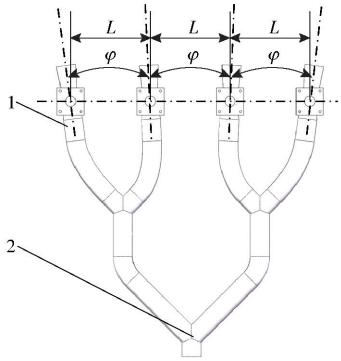


图 8 吹苗部件结构图

Fig. 8 Structural diagram of seedling-blowing parts

1. 吹苗管 2. 气流分流管

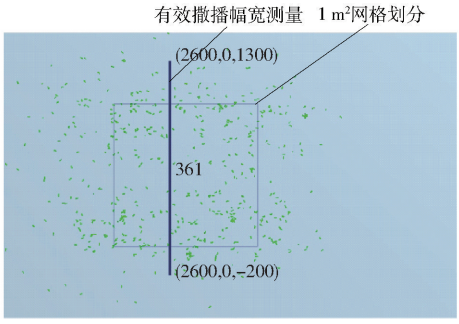


图 9 仿真结果

Fig. 9 Simulation result

由表 4 可知,当管距 L 相同时,偏置角度增量越大,有效撒播幅宽越大。偏置角度增量为 5.0°和 7.5°时,随着管距增大,播苗密度相对误差先减小后增大;偏置角度增量为 2.5°时,随着管距增大,播苗密度相对误差减小。当偏置角度增量 φ 相同时,管距越大,有效撒播幅宽越大。管距为 150 mm 和

表 4　试验结果统计

Tab. 4　Statistics of test results

序号	管距 L/mm	偏置角度增量 φ/(°)	播苗密度相对误差 δ/%	有效撒播幅宽 B/mm
1	150	2.5	21.28	900
2	150	5.0	11.04	1 000
3	150	7.5	7.31	1 200
4	200	2.5	16.05	1 100
5	200	5.0	3.73	1 500
6	200	7.5	4.37	1 530
7	250	2.5	5.81	1 170
8	250	5.0	15.31	1 500
9	250	7.5	31.89	1 600

200 mm 时，随着偏置角度增量增大，播苗密度相对误差减小；管距为 250 mm 时，随着偏置角度增量增大，播苗密度相对误差增大。由此，要满足有效撒播幅宽达 1 500 mm 以上、播苗密度相对误差尽量小，选择管距为 200 mm、偏置角度增量为 5.0°的结构参数为最优。

3.4　播苗装置播苗过程

为了较好地观察缢蛏苗仿真运动过程，设置整体仿真结构透明度为 0.2。仿真结束后，在 EDEM 后处理界面随机选取 3 种不同类型运动轨迹的缢蛏苗颗粒，其运动轨迹如图 10 所示。

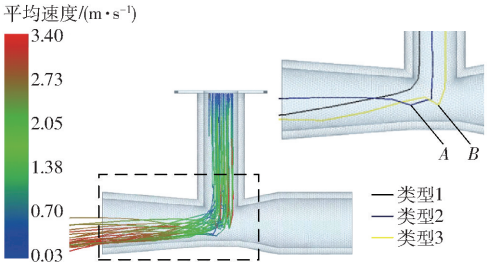


图 10　缢蛏苗颗粒运动轨迹

Fig. 10　Trajectory of *Sinonovacula constricta* seedling particles

由图 10 可知，吹苗管内缢蛏苗运动轨迹主要分为 3 种类型，其中类型 1 为缢蛏苗不与吹苗管管壁碰撞，与气流混合撒播出去；类型 2 为缢蛏苗与吹苗管管壁内点 A 发生一次碰撞后弹起经气流作用被吹撒出去；类型 3 为缢蛏苗与吹苗管管壁内点 B 发生一次碰撞后在气流作用下沿着吹苗管管壁方向滑动出去。

在 EDEM 后处理中导出 3 种类型运动轨迹的缢蛏苗受力曲线，类型 1 中最大受力为 0.003 04 N；类型 2 中最大受力为在点 A 发生碰撞时，其受力为 0.008 33 N；类型 3 中最大受力为在点 B 发生碰撞时，其受力为 0.006 98 N。3 种类型运动轨迹的缢蛏苗受力远小于前期测量的缢蛏苗最低损伤力，表明气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置对缢蛏苗的损伤较小。

3.5　单因素试验

为了确定气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置气流入口速度、装置行进速度、装置离地高度的最佳作业参数范围，根据播苗装置要求作业效率为 0.13 hm^2/h 以上以及前期预试验，确定试验因素取值范围：气流入口速度 25 ~ 45 m/s，装置行进速度 0.13 ~ 0.21 m/s，装置离地高度 300 ~ 700 mm，进行单因素试验。通过 EDEM 后处理界面获得缢蛏苗撒播到滩涂上单位面积的数量和缢蛏苗的最大受力。

受力大于 0.78 N 视为损伤，损伤率计算公式为

$$w = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \tag{15}$$

式中　w——损伤率，%

M_1——试验缢蛏苗总数量，颗

M_2——试验中损伤的缢蛏苗总数量，颗

每组试验固定其中 2 个试验因素水平，单因素仿真试验 1 m^2 内撒播的缢蛏苗数量统计结果如图 11 所示，试验结果如图 12 所示。随着气流入口速度、装置行进速度、装置离地高度增大，播苗密度相对误差都呈现出先减小后增大的趋势；损伤率随着气流入口速度增大而增大，随装置行进速度和装置离地高度的增大而保持基本不变，因此选择气流入口速度 35 m/s、装置行进速度 0.15 m/s、装置离地高度 500 mm 作为响应面试验的中心点。

3.6　中心组合试验

3.6.1　试验设计

根据单因素试验结果，为确定气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置的最优参数组合，利用 Design-Expert 软件开展 Box－Behnken 试验，试验因素编码如表 5 所示。

3.6.2　试验结果与分析

试验设计方案与结果如表 6 所示，x_1、x_2、x_3 分别为气流入口速度、装置离地高度和装置行进速度的编码值，δ 为播苗密度相对误差，w 为损伤率。

播苗密度相对误差方差分析结果如表 7 所示，播苗密度相对误差回归模型极显著（$P < 0.01$），且模拟失拟项不显著（$P > 0.05$），表明该模型拟合程度高，模型可信。x_1、x_3、x_1x_3、x_1^2、x_3^2 影响极显著，x_2^2 影响显著，其余项影响不显著。各因素对播苗密度相对误差影响由大到小为：装置行进速度 x_3、气流入口速度 x_1、装置离地高度 x_2。对试验结果进行多元回归拟合，得到各因素对播苗密度相对误差的回归方程为

$$\begin{aligned}\delta = {} & 2.43 - 3.33x_1 - 0.38x_2 - 3.34x_3 + \\ & 0.76x_1x_2 + 10.58x_1x_3 + 0.40x_2x_3 + \\ & 3.92x_1^2 + 3.21x_2^2 + 7.29x_3^2\end{aligned} \tag{16}$$

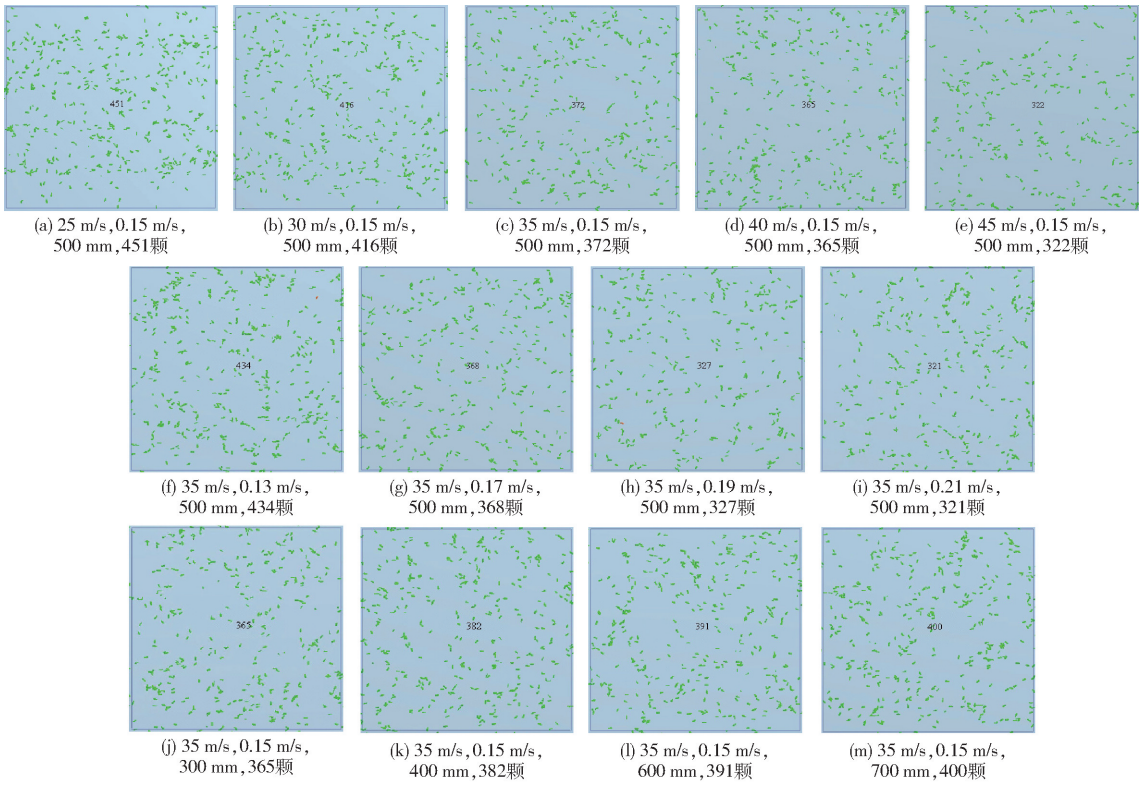


图 11 单因素仿真试验 1 m^2 内撒播的缢蛏苗数量统计结果

Fig. 11 Statistical results of number of *Sinonovacula constricta* seedling within 1 m^2 of single factor simulation experiment

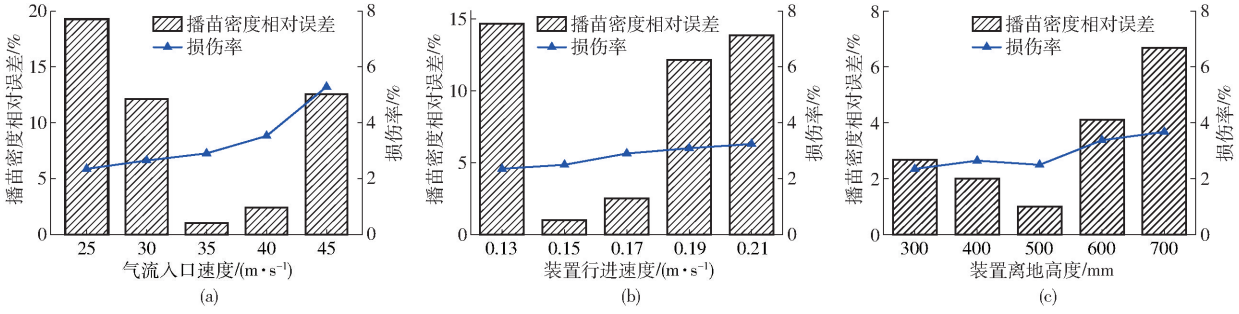


图 12 单因素试验结果

Fig. 12 Single factor test results

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Codes of testing factors

编码	因素		
	气流入口速度/(m·s⁻¹)	装置离地高度/mm	装置行进速度/(m·s⁻¹)
-1	30	400	0.13
0	35	500	0.15
1	40	600	0.17

损伤率方差分析结果如表 8 所示,损伤率回归模型极显著($P<0.01$),且模拟失拟项不显著($P>0.05$),表明该模型拟合程度高,模型可信。x_1、x_1^2 影响极显著,其余项影响不显著。各因素对损伤率影响由大到小为:气流入口速度 x_1、装置离地高度 x_2、装置行进速度 x_3。对试验结果进行多元回归拟合,可得到各因素对损伤率的回归方程为

表 6 试验设计与结果

Tab. 6 Experimental design and results

试验序号	x_1	x_2	x_3	δ/%	w/%
1	-1	-1	0	13.76	2.65
2	1	-1	0	4.59	4.27
3	-1	1	0	13.00	2.79
4	1	1	0	6.88	4.27
5	-1	0	-1	29.92	2.79
6	1	0	-1	3.09	4.12
7	-1	0	1	3.03	2.65
8	1	0	1	18.51	4.27
9	0	-1	-1	18.29	3.68
10	0	1	-1	15.21	3.82
11	0	-1	1	9.87	3.82
12	0	1	1	8.37	3.97
13	0	0	0	2.08	3.82
14	0	0	0	2.78	3.68

表 7　播苗密度相对误差方差分析

Tab. 7　Analysis of variance of relative error of seedling density

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	826. 16	9	91. 80	42. 46	0. 001 3 **
x_1	88. 71	1	88. 71	41. 03	0. 003 1 **
x_2	1. 16	1	1. 16	0. 537 9	0. 504 0
x_3	89. 31	1	89. 31	41. 31	0. 003 0 **
x_1x_2	2. 33	1	2. 33	1. 08	0. 358 2
x_1x_3	447. 53	1	447. 53	207. 01	0. 000 1 **
x_2x_3	0. 624 1	1	0. 624 1	0. 288 7	0. 619 6
x_1^2	49. 05	1	49. 05	22. 69	0. 008 9 **
x_2^2	33. 02	1	33. 02	15. 28	0. 017 4 *
x_3^2	170. 18	1	170. 18	78. 72	0. 000 9 **
残差	8. 65	4	2. 16		
失拟	8. 40	3	2. 80	11. 43	0. 213 3
误差	0. 245 0	1	0. 245 0		
总和	834. 81	13			

注：* 表示差异显著（0. 01 ≤ P ≤ 0. 05），** 表示差异极显著（P < 0. 01）。下同。

表 8　损伤率方差分析

Tab. 8　Analysis of variance for damage rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	5. 00	9	0. 555 7	88. 12	0. 000 3 **
x_1	4. 58	1	4. 58	725. 52	< 0. 000 1 **
x_2	0. 023 1	1	0. 023 1	3. 67	0. 128 1
x_3	0. 011 3	1	0. 011 3	1. 78	0. 252 6
x_1x_2	0. 004 9	1	0. 004 9	0. 777 0	0. 427 8
x_1x_3	0. 021 0	1	0. 021 0	3. 33	0. 141 9
x_2x_3	0. 000 0	1	0. 000 0	0. 004 0	0. 952 8
x_1^2	0. 307 5	1	0. 307 5	48. 76	0. 002 2 **
x_2^2	0. 009 7	1	0. 009 7	1. 53	0. 283 1
x_3^2	0. 001 0	1	0. 001 0	0. 155 4	0. 713 5
残差	0. 025 2	4	0. 006 3		
失拟	0. 015 4	3	0. 005 1	0. 524 7	0. 738 7
误差	0. 009 8	1	0. 009 8		
总和	5. 03	13			

$$w = 3.75 + 0.76x_1 + 0.05x_2 + 0.04x_3 - 0.04x_1x_2 + 0.07x_1x_3 - 0.002x_2x_3 - 0.31x_1^2 + 0.06x_2^2 + 0.02x_3^2 \quad (17)$$

由表 7 可得：气流入口速度、装置离地高度、装置行进速度存在交互影响，为了探究各因素对播苗密度相对误差的影响，忽略不显著的交互影响因素，绘制因素交互作用对播苗密度相对误差影响的响应面图，如图 13 所示。

由图 13 可知，装置行进速度较小时，播苗密度相对误差随气流入口速度的增大而减小；装置行进速度较大时，播苗密度相对误差随气流入口速度的增大而增大。气流入口速度一定时，播苗密度相对误差随装置行进速度增大呈现出先减小后增大的趋势。原因是气流入口速度较小导致缢蛏苗撒播的幅宽与距离越小，此时若装置行进速度较慢会导致缢蛏苗在滩涂表面堆积，难以撒播均匀。

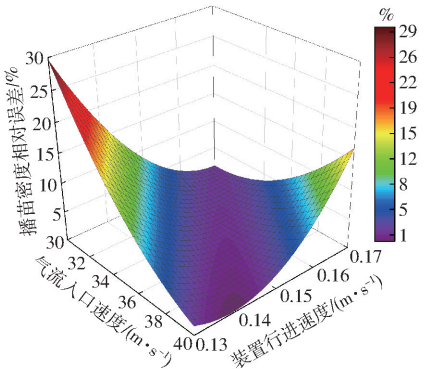


图 13　试验因素交互作用对播苗密度相对误差影响的响应曲面

Fig. 13　Response surface of effect of experimental factor interaction on relative error of seedling density

由表 8 可知，装置离地高度与装置行进速度对损伤率影响较小，其原因为：缢蛏苗与滩涂底质接触时，滩涂底质起到一个缓冲作用，使缢蛏苗受到的冲击力减小。根据前文理论分析，缢蛏苗在吹苗管内的运动状态与气流入口速度相关，当气流入口速度较大时，缢蛏苗与吹苗管管壁的碰撞力更大，导致缢蛏苗损伤，因此气流入口速度对损伤率影响较大。

3. 6. 3　参数优化

为得到播苗性能最优状态下各试验因素的组合，以播苗密度相对误差和损伤率最小为最终优化目标，结合各试验因素边界条件，对建立的二次回归模型进行多因素优化求解，目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min\ \delta(x_1, x_2, x_3) \\ \min\ w(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

运用 Design-Expert 优化模块求解得：气流入口速度为 30 m/s、装置离地高度为 490 mm、装置行进速度为 0. 17 m/s 时，播苗密度相对误差和损伤率达到最小值，播苗密度相对误差为 3. 13%，损伤率为 2. 66%。

4　台架试验

4. 1　试验材料与方法

为验证优化数据可靠性，加工播苗装置部件，搭建试验装置，并在浙江理工大学种植装备技术重点实验室进行试验。苗箱采用镀锌钢板加工，槽轮采用树脂软胶加工，其余与缢蛏苗接触部件均为树脂 3D 打印，风机变频器控制风机流量，通过 PLC 控制步进电机，并通过触摸屏实现数据交互，如图 14 所

示。试验缢蛏苗选用 2 月龄缢蛏苗,千颗质量为 193.6 g。为便于统计与观察试验结果,在表面铺设 4 m×1.5 m 的黑色尼龙布。

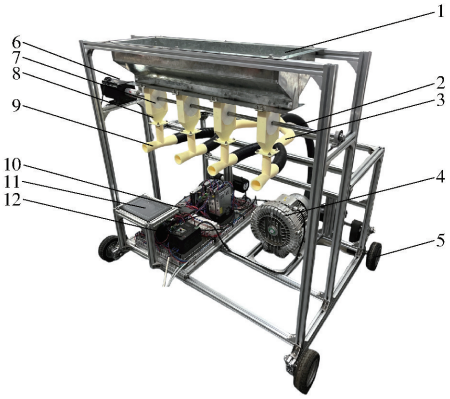


图 14 台架试验装置

Fig. 14 Bench test device

1. 苗箱 2. 回转轴 3. 气流分流管 4. 风机 5. 蜂窝轮 6. 电机 7. 槽轮 8. 壳体 9. 吹苗管 10. PLC 11. 触摸屏 12. 风机变频器

在试验过程中,设置气流入口速度为 30 m/s,装置离地高度为 490 mm,装置行进速度为 0.17 m/s,槽轮转速为 15 r/min。将缢蛏苗放入苗箱,缢蛏苗经过槽轮落至吹苗管与气流混合吹撒到黑色尼龙布上。试验后,在黑色尼龙布上用黄色胶带划分 1 m^2 网格,统计网格中缢蛏苗的数量,应用式(14)、(15)分别计算播苗密度相对误差及损伤率,试验重复 3 次取平均值。

4.2 试验结果与分析

播苗试验效果如图 15 所示,试验结果如表 9 所示,播苗密度相对误差为 7.02%,损伤率为 3.92%。

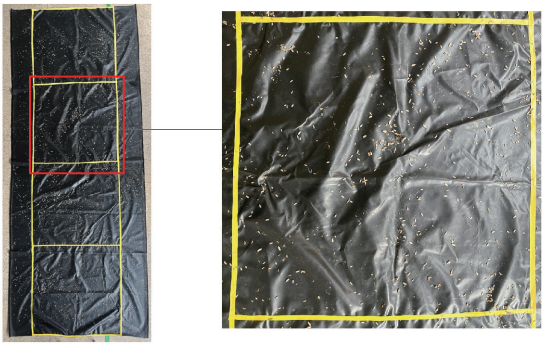


图 15 播苗试验效果图

Fig. 15 Seedling test effect diagram

由试验结果可得,播苗密度相对误差、损伤率测量结果都大于仿真优化结果。由于仿真试验所构建的模型及环境相对理想,无法准确模拟出复杂的实际环境,同时验证试验过程中,受自然风影响导致撒播出来的缢蛏苗会略偏于原本的轨迹,影响播苗密度相对误差的统计,缢蛏苗落到尼龙布表面的缓冲作用相对于滩涂泥表面较小,导致损伤率上升,但误差均在允许范围,并且结果都符合 SC/T 2066—2014《缢蛏亲贝和苗种》培育性能标准,证明此播苗装置播苗性能良好。

表 9 验证试验结果

Tab. 9 Test verification results %

试验序号	播苗密度相对误差	损伤率
1	7.47	4.03
2	6.67	3.43
3	6.93	4.30

本文所设计的播苗装置主要适用于尺寸范围在壳长(15.6~19.2) mm、壳宽(5.91~7.01) mm、壳高(4.12~5.32) mm 的缢蛏苗,具有一定的局限性。后续可通过更换不同尺寸的槽轮来适用于不同尺寸的薄壳贝苗,从而提高通用性。可通过调节槽轮转速来提高播苗效率,适应于不同的播苗需求。

5 结论

(1)测量 2 月龄缢蛏苗几何特性及仿真相关参数,通过万能试验机压缩试验台进行了缢蛏苗压缩力学试验,试验结果表明缢蛏苗抗压能力从大到小为壳高、壳长、壳宽,并得到了缢蛏苗的最低损伤力为 0.78 N。

(2)针对薄壳缢蛏苗撒播过程中损伤较大影响人工养殖的生产要求,结合缢蛏苗压缩力学特性设计了一种气吹式低损伤缢蛏苗播苗装置,通过对播苗过程进行分析,建立了吹苗管内及空气中缢蛏苗动力学模型,得到影响撒播幅宽与撒播距离的主要因素。采用 Hertz-Mindlin 模型分析了碰撞过程中的接触力,远小于测量的最低损伤力。

(3)通过 CFD-DEM 耦合仿真开展单因素试验确定了各试验因素的取值范围:气流入口速度为 30~40 m/s,装置离地高度为 400~600 mm,装置行进速度为 0.13~0.17 m/s。开展三因素三水平中心组合仿真试验,通过回归模型优化得出最优参数组合:气流入口速度为 30 m/s、装置离地高度为 490 mm、装置行进速度为 0.17 m/s。对优化后的参数进行台架试验验证,在最优参数组合下,播苗密度相对误差为 7.02%,损伤率为 3.92%,符合 SC/T 2066—2014《缢蛏亲贝和苗种》培育性能标准,该播苗装置播苗性能良好,满足实际生产的要求。

参 考 文 献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业

出版社，2022.
[2] LI H，MU G，ZHANG H，et al. Design and testing of a mechanized brush-screen cooperative vibration harvester for mudflat-buried shellfish based on the discrete element method[J]. Frontiers in Marine Science，2023，10：1134888.
[3] 刘文博，张寒冰，李秀辰，等. 面向机械化播苗的菲律宾蛤仔幼苗生物力学特性分析[J]. 大连海洋大学学报，2020，35(3)：455－461.
LIU Wenbo，ZHANG Hanbing，LI Xiuchen，et al. Analysis of biomechanical properties of juvenile Manila clam for mechanization sowing[J]. Journal of Dalian Ocean University，2020，35(3)：455－461.（in Chinese）
[4] 林志华，何琳，董迎辉. 浙江滩涂贝类种业科技创新发展及展望[J]. 水产学报，2023，47(1)：109－124.
LIN Zhihua，HE Lin，DONG Yinghui. Development and prospect for scientific and technological innovation of mudflat mollusk breeding industry in Zhejiang[J]. Journal of Fisheries of China，2023，47(1)：109－124.（in Chinese）
[5] ZHANG H，LI P，ZHANG H，et al. Design and experiment of cone disk centrifugal shellfish seeding device[J]. Frontiers in Marine Science，2023，10：1136844.
[6] 李哲，徐国强，徐开达，等. 悬拖式幼苗释放装置：201910289867.6[P]. 2019－08－06.
[7] 张浩楠. 底播养殖扇贝播苗设备研发[D]. 大连：大连海洋大学，2024.
ZHANG Haonan. Research and development of scallop seeding equipment for bottom sowing culture[D]. Dalian：Dalian Ocean University，2024.（in Chinese）
[8] 李鹏鹏. 离心式滩涂贝类播苗装置优化设计及试验研究[D]. 大连：大连海洋大学，2024.
LI Pengpeng. Optimization design and experimental study of centrifugal seeding device for shellfish in mudflat[D]. Dalian：Dalian Ocean University，2024.（in Chinese）
[9] 黄伟，李秀辰，母刚，等. 离心式滩涂贝类播苗装置设计与试验[J]. 大连海洋大学学报，2022，37(2)：320－328.
HUANG Wei，LI Xiuchen，MU Gang，et al. Design and test of a centrifugal shellfish seeding device for tidal flat aquaculture[J]. Journal of Dalian Ocean University，2022，37(2)：320－328.（in Chinese）
[10] WARE K，JACKSON R，SABO D，et al. Machine for planting shellfish seedlings：US6082303(A)[P]. 2000－07－04.
[11] 苑春亭，刘强，刘艳春. 一种底栖贝类苗种的浅海底播装置：201610258649.2[P]. 2018－08－03.
[12] 梁健，李永仁，梁爽，等. 一种便携式风扫贝类播苗机：202021908704.6[P]. 2021－06－11.
[13] 董迎辉，徐洪强，莫天宝，等. 一种蛏类硬壳新品种选育方法：202210881223.8[P]. 2023－07－18.
[14] XING H，CAO X，ZHONG P，et al. DEM－CFD coupling simulation and optimisation of rice seed particles seeding a hill in double cavity pneumatic seed metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2024，224：109075.
[15] 李衍军，刘瑞，刘春晓，等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：54－61，133.
LI Yanjun，LIU Rui，LIU Chunxiao，et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumutic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(4)：54－61，133.（in Chinese）
[16] 杨庆璐，王庆杰，李洪文，等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(13)：1－10.
YANG Qinglu，WANG Qingjie，LI Hongwen，et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(13)：1－10.（in Chinese）
[17] 何亚凯，杨学军，翟长远，等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：54－63.
HE Yakai，YANG Xuejun，ZHAI Changyuan，et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：54－63.（in Chinese）
[18] 于兴瑞，耿端阳，杜瑞成，等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊 1)：141－148.
YU Xingrui，GENG Duanyang，DU Ruicheng，et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp. 1)：141－148.（in Chinese）
[19] YUAN W，JI C，LIU Z，et al. Influencing factors of the distribution accuracy and the optimal parameters of a pneumatic fertilization distributor in a fertilizer applicator[J]. Agronomy，2022，12(9)：2222.
[20] YATSKUL A，LEMIERE J，COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering，2017，161(9)：120，34.
[21] 陈威，王川，王丽伟，等. 侧深施肥装置三通管气固两相流仿真与试验[J]. 中国农机化学报，2024，45(3)：74－80.
CHEN Wei，WANG Chuan，WANG Liwei，et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in three-way pipe of side deep fertilization plant[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(3)：74－80.（in Chinese）
[22] 高筱钧，王世同，吴晓鹏，等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 1)：47－56，75.
GAO Xiaojun，WANG Shitong，WU Xiaopeng，et al. Seed flow migration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp. 1)：47－56，75.（in Chinese）

（下转第 340 页）

[18] 陈平录,苏江红,许静,等. 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(10):223 - 233,274.
CHEN Pinglu, SU Jianghong, XU Jing, et al. Design and experiment of vertical spiral trenching-fertilizing machine for hilly orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2024. 55(10), 223 - 233,274. (in Chinese)
[19] HAN X Z, KIM H J, JEON C W, et al. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178: 70 - 85.
[20] VALENTE D S M, MOMIN A, GRIFT T, et al. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105128.
[21] AN G, ZHONG Z, YANG S, et al. EASS: an automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108123.
[22] JONES M H, BELL J, DREDGE D, et al. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 129 - 146.
[23] 林熙淼,叶云翔,王梦想,等. 基于侧偏力矩检测的旋耕起垄拖拉机自主导航控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):373 - 382,391.
LIN Ximiao, YE Yunxiang, WANG Mengxiang, et al. Autonomous navigation control method of rotary tillage ridging tractor based on lateral torque detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 373 - 382,391. (in Chinese)
[24] T/CAMA 37—2020 蔬菜机械化起垄作业技术规范[S]. 2020.

(上接第 329 页)

[23] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57 - 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 - 68. (in Chinese)
[24] 薛宝宝, 李浩, 牛东红, 等. 不同月龄缢蛏新品种数量性状的相关与通径分析[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 941 - 949.
XUE Baobao, LI Hao, NIU Donghong, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of new variety of *Sinonovacula constricta* at different months of age[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 941 - 949. (in Chinese)
[25] 黄小毛, 张顺, 朱耀宗, 等. 气送式油菜飞播装置投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 31 - 41.
HUANG Xiaomao, ZHANG Shun, ZHU Yaozong, et al. Seeding process analysis and test of the air conveying rapeseed aerial seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 31 - 41. (in Chinese)
[26] 周锋. 煤炭大颗粒气力输送关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHOU Feng. Study on key technology of pneumatic conveying for large coal particles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)
[27] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. (in Chinese)
[28] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM - CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48 - 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 - 57. (in Chinese)
[29] 陈鸿宇. 滩涂泥螺采收关键技术及装备研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
CHEN Hongyu. Research on key technology and device for the harvesting of mud snails (*Bullacta exarata*) in mudflats[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. (in Chinese)
[30] 心男. 基于 EDEM - FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
XIN Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM - FLUENT[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)