doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.09.009

大蒜直立种植机非对称式栽植器设计与试验

宋井玲[1]　张永政[1]　王　卓[1]　李昆桥[1]　崔志超[2]　房福海[1]　杨清华[1]
(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255091;2.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014)

摘要:针对大蒜直立种植机直立度偏低、作业效率低问题,设计了一种适用于连续式大蒜种植机非对称结构的栽植器,以抵消在栽植过程中栽植器的水平分速度不断变化对蒜种直立状态的影响。分析了栽植器和土壤对蒜种作用过程,建立了种穴底部轮廓曲线方程和大蒜直立种植装置 EDEM - ADAMS 仿真系统。首先根据栽植器在不同工作阶段的作用提出了上下锥角不同的两段式栽植器结构并确定了上部锥角为 20°。再通过对种穴形状的对称性、种穴底部形状以及种植蒜种直立度影响的单因素仿真试验,确定了栽植器打开方式为单侧向前打开、打开时刻为栽植器运动到最低点,打开旋转中心位于栽植器下部顶点的上方 110 mm、后侧 15 mm。通过栽植器打开后对蒜种作用过程的模拟仿真分析,确定了栽植器的非对称结构及其相应参数。最后以蒜种直立度为指标,进行了工作参数和栽植器下部锥角的四因素三水平正交仿真试验,确定了最佳组合参数为:速比 1.12、打开开度 29.69 mm、打开时间 0.51 s、栽植器下部锥角 40.90°,此时种植蒜种直立度为 72.84°。搭建了大蒜种植装置试验台对通过仿真分析设计的栽植器进行了试验验证,结果直立度为 68.66°,表明建立的仿真系统正确、仿真试验结果实用可靠。

关键词:直立种植机;栽植器;非对称式;直立度;EDEM - ADAMS
中图分类号:S223.2⁺3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)09-0116-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Asymmetrical Planting Implement for Garlic Upright Planter

SONG Jingling[1]　ZHANG Yongzheng[1]　WANG Zhuo[1]　LI Kunqiao[1]　CUI Zhichao[2]
FANG Fuhai[1]　YANG Qinghua[1]
(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255091, *China*
2. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of low upright degree and low working efficiency of garlic planter, the planting implement with asymmetrical structure suitable for continuous garlic planter was designed, in order to adapt to the continuous change of the horizontal speed of planting implement during the planting process and keeping the garlic seed upright state. The action process of planting implement and soil on garlic seed was analyzed, and the equation for the contour curve at the bottom of the seed hole and the simulation system of garlic upright planting device were established. According to the role of the planting implement in different working stages, a two-stage planting implement structure with different upper and lower cone angles was proposed, and the upper cone angle was determined to be 20°. Through the single-factor simulation experiment of the influence of some factors on the symmetries of the shape of the seed-hole, the shape of bottom of the seed-hole and the upright degree of planting garlic, it was determined that the opening mode of the planting implement was one side forward opening, the opening moment was when the planting implement moved to the lowest point, and the center of rotation of the opening side was 110 mm above the apex of the bottom of planting implement and 15 mm behind the apex of bottom of the planting implement. The structure of the planting implement was optimized to be an asymmetric structure and the corresponding parameters were determined by the simulation analysis of the action process of the planting implement on the garlic seed. Four-factor and three-level orthogonal

收稿日期:2023 - 12 - 14　修回日期:2024 - 04 - 10
基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022ME103)、济南市农业应用技术创新项目(CX202216)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX[22]3092)
作者简介:宋井玲(1964—),女,教授,主要从事大蒜机械化技术与装备研究,E-mail:songjingling@sdut.edu.cn

simulation experiments were carried out to study the effects of three working parameters and lower cone angle of planting implement on the upright degree of garlic seed and the optimal combination parameter was determined as the velocity ratio of 1.12, the horizontal distance of opening of 29.69 mm, the opening time of 0.51 s, the lower cone angle of the planting implement of 40.90°, and the upright degree of planted garlic of 72.84°. A test bed of garlic upright planting device was built to validate the simulation results which were verified by experiments. The test result showed that the upright degree of planted garlic was 68.66°, which indicated that the established simulation system was correct and the simulation test result was practical and reliable.

Key words: upright planter; planting implement; asymmetric form; upright degree; EDEM - ADAMS

0　引言

大蒜种植满足单粒芽尖向上直立种植的农艺要求，不但出苗快、整齐，便于田间管理，还能提高产量和质量[1]。目前国内外的大蒜种植机普遍采用栽植器来实现蒜种的直立种植，栽植器携带定向的单粒蒜种做种植运动，入土后打开将蒜种保持直立状态插送到土壤中，蒜种的种植是在栽植器和土壤的共同作用下完成的，因此栽植器的研究设计是提高蒜种种植直立度、保证大蒜种植机作业性能的关键。

西班牙、法国、荷兰、印度、日本、韩国、美国等国家都进行了大蒜种植机械的研究开发。其中西班牙、法国、荷兰、印度的大蒜种植机采用开沟器开沟播种方式，没有定向直立种植功能，因此没有设置栽植器[2-5]，也没有有关大蒜栽植器的研究。日本洋马公司的大蒜种植机单粒、定向都是人工辅助完成的，直立种植栽植器的结构是对称的并双侧对称打开，种植运动为往复式摆动，作业速度较慢，效率不高。韩国 HADA 公司的大蒜种植机的栽植器作连续圆周运动，但其结构仍为对称结构并双侧对称打开[6]。美国在 2003 年 9 月公开了一项大蒜种植机的发明专利[7]，此专利中大蒜种植机的栽植器结构和种植运动形式与韩国 HADA 公司的类似，但打开方式是单侧打开。韩国首尔国立大学生物系统工程系的 PARK 等[8]还研究了用于大蒜生产机械仿真分析的蒜瓣颗粒群组成的散粒体仿真模型。

国内的大蒜种植更注重芽尖向上直立种植的传统种植模式，国外大蒜播种机大多不能适应中国的播种环境，播种效果不理想[9]。为适应国内对大蒜种植机械化的迫切需求，崔荣江等[10-12]、孙伟等[13]、马伟童等[14]、李天华等[15]、李玉华[16]、何岳平等[17]、王永仁[18]、崔志超等[19]、金丽宇等[20]、杨启志等[21]、贾翠平[22]和廖庆喜等[23]都做了大蒜或秧苗栽植器的直立种植原理、性能等相关研究，研究的栽植器均是对称结构，以栽植器特殊点（最低点）的运动轨迹作为栽植器入土形成的种穴剖面形状进行了理论分析。

对于做连续圆周运动的栽植器，其对称结构和对称打开无法抵消在直立种植过程中其水平分速度连续变化对蒜种直立状态产生的影响。本文拟建立大蒜直立种植装置仿真模拟系统，通过仿真分析研究栽植器入土形成的准确种穴形状和栽植器对蒜种的作用过程，设计一种新型非对称式大蒜栽植器，以提高连续式大蒜种植机的直立度和作业效率。

1　大蒜直立种植过程分析和仿真系统建立

1.1　大蒜直立种植过程分析

1.1.1　栽植器运动分析

连续圆周运动栽植器种植蒜种时，栽植器在以角速度 ω 做半径 R 的圆周运动过程中开口始终保持向上，如图 1 所示，蒜种在栽植器内保持芽尖向上的状态。为提高种植效率和减小株距，一般沿圆周尽可能均匀布置多个栽植器，每个栽植器运动到最高点 G 附近接取芽尖向上定向的蒜种，运动到下方入土，至最低点 D 附近打开，蒜种开始离开栽植器进入土壤，栽植器继续向上运动离开土壤，完成蒜种的种植过程。在此过程中，机具不停歇以速度 v 匀速前进，栽植器种植运动是水平匀速前进和匀速圆周运动合成的复合运动。以栽植器下部顶点圆周运

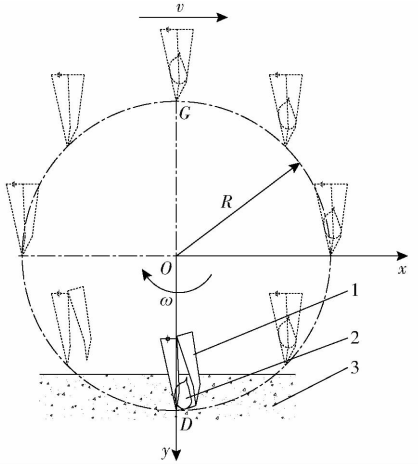


图 1　栽植器运动示意图

Fig. 1　Movement of planting implement

1. 栽植器　2. 蒜种　3. 土壤

动中心 O 为原点,建立如图 1 所示直角坐标系,以圆周运动到达最高点 G 为起始点,栽植器运动位移和速度方程分别为

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) \\ y = -R\cos(\omega t) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = v + R\omega\cos(\omega t) \\ \dot{y} = R\omega\sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 x、y——栽植器水平和垂直方向位移,m

$\dot{x}$、$\dot{y}$——栽植器水平和垂直方向速度,m/s

t——时间,s

设 λ 为栽植器圆周运动线速度 ωR 与机具前进速度 v 之比,即速比,为满足栽植器入土形成种穴并得到较小株距的大蒜种植条件,大蒜直立种植装置 $\lambda > 1$[10],故栽植器的一个运动周期存在 2 个水平分速度为零的点,即零速点。

令式(2)中 $\dot{x} = v + R\omega\cos(\omega t) = 0$,得

$$\omega t = (2i+1)\pi \pm \varphi_0 = \arccos\left(-\frac{1}{\lambda}\right) \quad (\lambda > 1) \tag{3}$$

即

$$\cos\varphi_0 = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

式中 φ_0——栽植器零速点相位角,rad

将式(3)代入式(1)得当 $\lambda > 1$ 时栽植器第 1 个运动周期水平分速度的 2 个零速点坐标($x_1^{(0)}$,$y_1^{(0)}$)、($x_2^{(0)}$,$y_2^{(0)}$)为

$$\begin{cases} x_1^{(0)} = \dfrac{R}{\lambda}(\pi - \varphi_0 + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \\ y_1^{(0)} = \dfrac{R}{\lambda} \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} x_2^{(0)} = \dfrac{R}{\lambda}(\pi + \varphi_0 - \sqrt{\lambda^2 - 1}) \\ y_2^{(0)} = \dfrac{R}{\lambda} \end{cases} \tag{6}$$

两个零速点关于 $x = \dfrac{\pi R}{\lambda}$对称,发生在最低点 $\mathrm{d}t = t_d = \dfrac{\pi}{\omega}$的两侧,即分别发生在 $t = t_1 = \dfrac{\pi - \varphi_0}{\omega}$和 $t = t_2 = \dfrac{\pi + \varphi_0}{\omega}$时。两点之间的水平距离为

$$w = x_1^{(0)} - x_2^{(0)} = \frac{R}{\lambda}(\pi - \varphi_0 + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - \frac{R}{\lambda}(\pi + \varphi_0 - \sqrt{\lambda^2 - 1}) = \frac{2R}{\lambda}\left(\sqrt{\lambda^2 - 1} - \arccos\frac{1}{\lambda}\right) \tag{7}$$

式中 w——两零速点之间的水平距离,m

w 影响种穴宽度,由式(7)可见 w 与栽植器圆周运动半径 R、速比 λ 有关。

1.1.2 栽植器和土壤对蒜种的作用

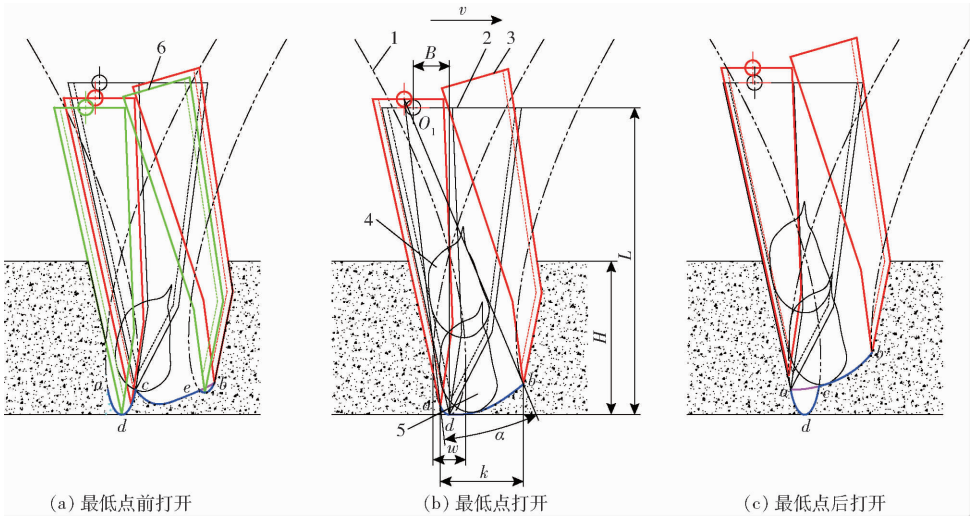
由于蒜种的自然稳定状态是平躺状态,离开栽植器后能否保持原来的定向状态直立在土壤中,取决于在这一过程中栽植器和土壤对它的共同作用。栽植器对蒜种的作用是在整个种植过程中直接作用于蒜种的,而土壤是在栽植器对它作用后再作用于蒜种,栽植器运动入土挤压土壤,在土壤中形成种穴后,土壤回流支撑蒜种使蒜种直立在土壤中。种穴形状关于垂线的对称度越高,土壤回流对蒜种的作用在水平面上各向差异越小,作用力越接近平衡,越有利于蒜种保持直立状态,种植蒜种的直立度越高。根据种穴形成和对蒜种作用的差异,种穴的形状可分为种穴底部和侧面两部分。种穴底部轮廓是栽植器下部顶点运动形成的,土壤回流较少,是蒜种离开栽植器最先接触到土壤的部位,其形状对称且有一定下凹锥度,与蒜种下部形状相适应有利于蒜种保持直立不倾倒。土壤的回流主要来自种穴的侧面,种穴的侧面是栽植器入土部分的外轮廓面在整体复合运动和打开运动过程中扫过的空间形成的,其边界是栽植器不同部位的轮廓交替产生的,需通过仿真试验得到。

1.1.3 种穴底部轮廓形状

种穴的底部轮廓是由栽植器下部顶点运动形成的,受诸多因素的影响。以栽植器单侧向前不同时刻打开为例,种穴底部轮廓是由固定侧顶点和打开侧顶点运动形成的,种植蒜种的过程及形成的种穴底部轮廓如图 2 所示。图 2a 为在最低点前打开的情形,种穴底部形状是由栽植器固定侧下部顶点复合运动轨迹 adc 段、打开侧下部顶点复合运动和打开运动的合成运动轨迹 ce 段和打开侧下部顶点的复合运动轨迹 eb 段 3 部分组成。图 2b 为在最低点打开的情形,种穴底部形状由栽植器固定侧下部顶点复合运动轨迹 ad 段和打开侧下部顶点复合运动和全部打开运动的合成运动轨迹 db 两部分组成。图 2c 为在最低点后打开的情形,种穴底部形状由栽植器固定侧下部顶点复合运动轨迹 adc 段和打开侧下部顶点复合运动和打开运动的合成运动轨迹 cb 段两部分组成。

若最低点前打开取第一零速点到最低点的中间时间点 $t_q = \dfrac{\pi}{\omega} - \dfrac{1}{2\omega}\arccos\dfrac{1}{\lambda}$,最低点后打开取最低点到第二零速点的中间时间点 $t_h = \dfrac{\pi}{\omega} + \dfrac{1}{2\omega}\arccos\dfrac{1}{\lambda}$,到达最低点 $\left(\dfrac{\pi R}{\lambda}, R\right)$的时间为 $t_d = \dfrac{\pi}{\omega}$。

设栽植器打开运动为匀速运动,其运动方程为



(a) 最低点前打开　(b) 最低点打开　(c) 最低点后打开

图 2　直立种植蒜种过程及种穴底部轮廓

Fig. 2　Upright planting process of garlic seed and contour of bottom of seed-hole

1. 栽植器运动轨迹　2. 开始打开的栽植器　3. 完全打开的栽植器　4. 未打开栽植器中的蒜种
5. 落入穴底的蒜种　6. 运动到最低点的栽植器

$$\begin{cases} x' = 2\sqrt{L^2+B^2}\sin\left(\dfrac{\alpha}{2T}t\right)\cos\left(\arctan\dfrac{B}{L}+\dfrac{\alpha}{2T}t\right)\approx\dfrac{k}{T}t \\ y' = -2\sqrt{L^2+B^2}\sin\left(\dfrac{\alpha}{2T}t\right)\sin\left(\arctan\dfrac{B}{L}+\dfrac{\alpha}{2T}t\right)\approx \\ \qquad -\dfrac{k}{T}\dfrac{B\sqrt{B^2+L^2}+2BL}{L\sqrt{B^2+L^2}+L^2-B^2}t \end{cases} \tag{8}$$

式中　k——打开开度，即栽植器完全打开时后侧和前侧下部顶点之间的水平距离，m

T——打开时间，即栽植器完全打开所需时间，s

α——打开角，即栽植器完全打开时打开侧绕打开旋转中心 O_1 旋转的角度，rad

B、L——栽植器打开旋转中心 O_1 与栽植器下部顶点的水平和竖直方向距离，m

打开开度 k 与打开角 α 之间的关系为

$$k = 2\sqrt{L^2+B^2}\sin\frac{\alpha}{2}\cos\left(\arctan\frac{B}{L}+\frac{\alpha}{2}\right) \tag{9}$$

则种穴底部各段的曲线方程为：

(1)最低点前打开且 $T < t_d - t_q$

adc 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) \\ y = -R\cos(\omega t) \end{cases} \quad (t_q \leqslant t \leqslant t_h) \tag{10}$$

ce 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) + \dfrac{k}{T}(t - t_q) \\ y = -R\cos(\omega t) - \\ \qquad \dfrac{k}{T}\dfrac{B\sqrt{B^2+L^2}+2BL}{L\sqrt{B^2+L^2}+L^2-B^2}(t - t_q) \\ \qquad (t_q \leqslant t \leqslant t_e) \end{cases} \tag{11}$$

$$t_e \approx t_q + T - \frac{2T}{k}\left[v\left(t_q + T - \frac{\pi}{\omega}\right) + R\sin(\omega(t_q + T))\right] \tag{12}$$

eb 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) + k \\ y = -R\cos(\omega t) - k\dfrac{B\sqrt{B^2+L^2}+2BL}{L\sqrt{B^2+L^2}+L^2-B^2} \\ \qquad (t_q + T \leqslant t \leqslant 2t_d - t_q - T) \end{cases} \tag{13}$$

(2)最低点打开

ad 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) \\ y = -R\cos(\omega t) \end{cases} \quad (t_d \leqslant t \leqslant t_h) \tag{14}$$

db 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) + \dfrac{k}{T}(t - t_q) \\ y = -R\cos(\omega t) - \\ \qquad \dfrac{k}{T}\dfrac{B\sqrt{B^2+L^2}+2BL}{L\sqrt{B^2+L^2}+L^2-B^2}(t - t_q) \\ \qquad (t_d \leqslant t \leqslant t_q + T) \end{cases} \tag{15}$$

(3)最低点后打开

adc 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) \\ y = -R\cos(\omega t) \end{cases} \quad (t_q \leqslant t \leqslant t_h) \tag{16}$$

cb 段

$$\begin{cases} x = vt + R\sin(\omega t) + \dfrac{k}{T}(t - t_q) \\ y = -R\cos(\omega t) - \\ \qquad \dfrac{k}{T}\dfrac{B\sqrt{B^2+L^2}+2BL}{L\sqrt{B^2+L^2}+L^2-B^2}(t - t_q) \\ \qquad (t_c \leqslant t \leqslant t_q + T) \end{cases} \tag{17}$$

$$t_c \approx t_h + \frac{T}{k}\left[v(t_q - t_h) + R\sin(\omega(t_q - t_h))\right] \tag{18}$$

由上述分析可见,种穴的底部轮廓组成的曲线段及其形状,与栽植器的打开方式、打开时刻、打开侧打开旋转中心 O_1 的位置以及复合运动和打开运动的运动参数等存在较复杂的关系。

1.2 大蒜直立种植装置仿真系统建立

在种植过程中,栽植器和土壤对蒜种的作用都与栽植器结构和运动密切相关,受多因素影响且多因素间有交互作用,特别是在栽植器打开后蒜种离开栽植器至直立在土壤中的时间段里,蒜种的运动和位姿受到栽植器和土壤的反复作用,而且栽植器的打开运动比栽植器整体的复合运动对种穴形状的影响更大,种穴特别是种穴侧面很难通过理论分析和试验观察得到其准确形状。为深入研究大蒜直立种植过程,观察分析随着各影响因素变化蒜种运动和状态的变化以及栽植器作用于土壤形成的准确种穴形状,以确定栽植器结构和运动参数,采用了建立直立种植装置仿真系统进行仿真分析的方法。

仿真系统主要包括蒜种、土壤和直立种植装置仿真模型,需利用三维建模软件、动力学软件和离散元软件联合建立。先通过三维建模软件建立直立种植装置三维模型,将三维模型导入 ADAMS 动力学软件和 EDEM 离散元软件中分别生成直立种植装置运动模型和离散元模型,按 ADAMS 和 EDEM 软件联合仿真要求建立联合接口文件并进行参数设置。在 ADAMS 运动模型中输入直立种植装置的运动,使 EDEM 中直立种植装置离散元模型可以做同样的运动。在 EDEM 中建立土槽和蒜种的离散元模型并插入到直立种植装置离散元模型中组成 EDEM - ADAMS 联合仿真系统,如图 3 所示。

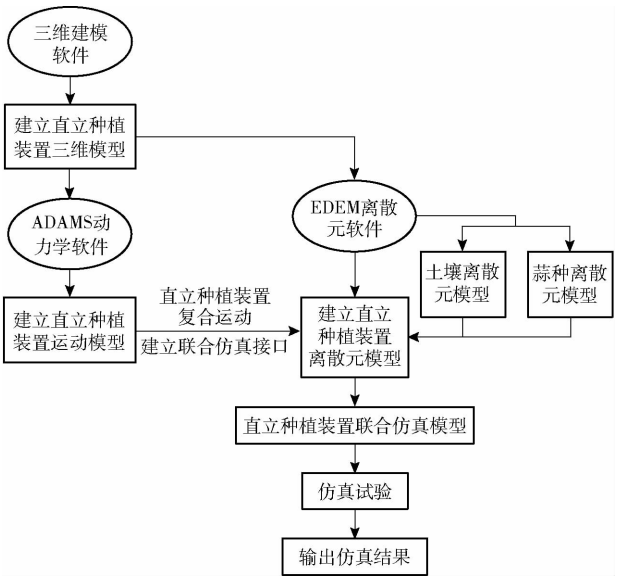


图 3 大蒜直立种植装置 EDEM - ADAMS 联合仿真流程图

Fig. 3 Flowchart of EDEM - ADAMS co-simulation system for garlic upright planting device

1.2.1 蒜种离散元模型

蒜种离散元模型的建立方法是先建立蒜种的三维模型,再在三维模型中填充球形颗粒。由于蒜种的形状复杂,不易准确测量,其特征参数又是随机量,因此采用三维扫描仪扫描建立蒜种的三维模型。在直立种植过程中,蒜种底部先与土壤接触,对蒜种种植在土壤中的直立度影响较大,蒜种的离散元模型的底部应有较高精度。填充的球形颗粒直径越小,离散元模型精度越高,但球形颗粒的数量增多,仿真分析的计算量增大,因此采用分上下两段填充球形颗粒的组合建模方法建立蒜种离散元模型[24-25]。上部采用划分网格单元自动填充建模法自动填充,底部采用半径 0.5 mm 的球形颗粒的 XML 法自动填充,建模过程如图 4 所示。建立的蒜种离散元模型体积差异率 2.1% 左右,轮廓极差 0.2 mm 左右,一粒蒜种填充球形颗粒的数量在 1 000 个左右。既提高了蒜种仿真模型的准确度,又满足了仿真对计算机运算能力的要求,有效地减少了仿真分析时间。

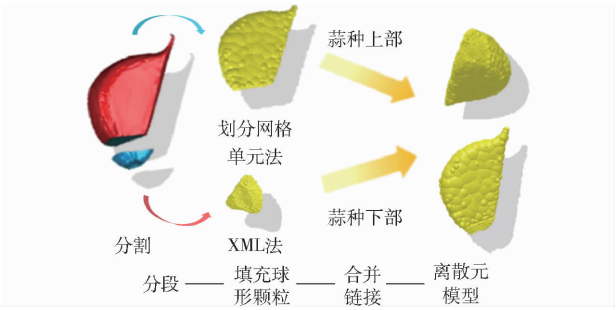


图 4 组合建模法建立蒜种模型过程示意图

Fig. 4 Process of establishing discrete element model of garlic seed by combined modelling method

蒜种长度、宽度和厚度集中在 27.5 ~ 31.5 mm、19.5 ~ 23 mm 和 16 ~ 19 mm 之间[26],按蒜种在该尺寸范围内的实际分布规律建立了 100 粒蒜种的离散元模型,供仿真试验分析随机调用。

1.2.2 土壤离散元模型

利用 EDEM Geometries 模块创建 200 mm × 120 mm × 150 mm 的土槽,在土槽上方建立颗粒工厂,土壤颗粒为球形颗粒,根据实际播前耕整地后土壤颗粒大小分布情况,按半径为 0.5、1.0、2.0 mm 分为 3 种,每种颗粒在相应颗粒半径的 0.8 ~ 1.2 倍的范围内随机产生,每种颗粒的占比分别为 15%、75% 和 10%。设置每秒生成 10 000 个土壤颗粒,在土壤颗粒填充土槽完成后,静置一段时间,待颗粒填充趋于稳定后停止。为便于后处理时观察分析土壤的变化,土壤模型分 3 层,每层生成 30 000 个颗粒,共 90 000 个颗粒,分别用红色、蓝色和粉色表示,如图 5 所示。

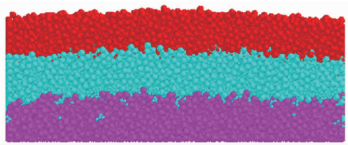


图 5　土壤离散元模型

Fig. 5　Discrete element model of soil

1.2.3　大蒜直立种植装置三维模型

要使蒜种在栽植器内保持芽尖向上的状态，栽植器在垂直面上做匀速圆周运动的过程中需保持方位不变，即栽植器的开口始终向上，满足这种要求的运动机构有平行四杆机构、星轮机构等，本文大蒜直立种植装置采用平行四杆双曲柄机构，沿圆周均匀设置的每个栽植器同步运动，种植蒜种过程原理相同，因此只建立其中的一个栽植器及其运动机构模型进行研究，如图 6 所示。将栽植器开口向上固定在平行四杆双曲柄机构的连杆上，栽植器携带单粒芽尖向上的蒜种随机具以速度 v 匀速前进，同时以角速度 ω 做相对连续圆周运动，即栽植器整体做复合运动。

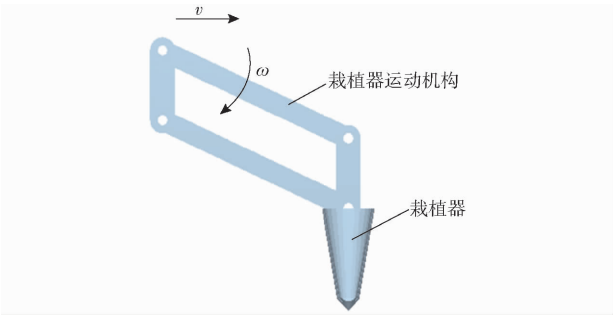


图 6　大蒜直立种植装置离散元模型

Fig. 6　Discrete element model of garlic upright planting device

1.2.4　仿真过程与指标获取方法

将土槽与蒜种离散元模型插入到直立种植装置离散元模型中，形成联合仿真模型。根据山东金乡和苍山两个大蒜主产区的土壤和蒜种特性，参考文献[16,27－29]中仿真模型参数的标定方法和数据，设置相关参数见表 1。仿真试验时，蒜种由栽植器开口正上方的颗粒工厂在建立的蒜种模型样本中随机以芽尖向上的姿态生成一粒，由栽植器开口中心落入栽植器中，土槽位置的设置在水平方向上满足栽植器运动到最低点附近入土形成的种穴在土槽中间位置附近、在垂直方向上达到大蒜播种深度要求，仿真过程如图 7 所示，截取相应时刻的画面进行观察和测量蒜种直立度，直立度为蒜种纵轴和水平面的夹角[15]。不产生蒜种，设置动画叠加，可得到栽植器运动入土扫过的空间形状即种穴的准确形状。栽植器结构和运动参数可根据试验要求加以变化。

表 1　联合仿真参数

Tab. 1　Co-simulation parameters

参数	数值
蒜种密度/(kg·m^{-3})	1 080
蒜种剪切模量/MPa	23.82
蒜种泊松比	0.23
栽植器密度/(kg·m^{-3})	7 801
栽植器剪切模量/MPa	33.5
栽植器泊松比	0.29
土壤含水率/%	19～21
堆积角/(°)	32～37
泊松比	0.34
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 600
土壤剪切模量/MPa	1.05
土壤颗粒间碰撞恢复系数	0.45
土壤颗粒间静摩擦因数	0.4
土壤颗粒间动摩擦因数	0.14
土壤表面能/(J·m^{-2})	2～6
蒜种与土壤颗粒间碰撞恢复系数	0.4
蒜种与土壤颗粒间静摩擦因数	0.3
蒜种与土壤颗粒间滚动摩擦因数	0.1
蒜种与栽植器间碰撞恢复系数	0.4
蒜种与栽植器间静摩擦因数	0.4
蒜种与栽植器间滚动摩擦因数	0.2
栽植器与土壤碰撞恢复系数	0.3
栽植器与土壤静摩擦因数	0.4
栽植器与土壤滚动摩擦因数	0.2

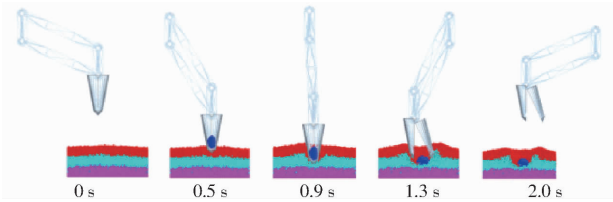


图 7　大蒜直立种植仿真过程

Fig. 7　Simulation process of upright planting garlic seed

2　栽植器设计

2.1　栽植器总成结构组成

栽植器总成结构如图 8 所示，主要由栽植器、旋转中心轴、拨杆和扭簧等组成，栽植器由固定侧和打开侧组成。拨杆和打开侧固定连接，可一起绕支撑在固定侧上的旋转中心轴旋转，扭簧的预紧力使栽植器处于闭合状态，逆时针拨动拨杆可打开栽植器。

2.2　栽植器整体结构形状及参数

栽植器从接取定向的蒜种到打开之前，栽植器上部接触蒜种对蒜种的作用是使其保持直立状态。栽植器打开后，蒜种离开栽植器的过程，栽植器对蒜种的作用主要取决于栽植器下部形状，因此将栽植器分为上、下两段。为满足强度要求，栽植器壁厚取 2 mm。

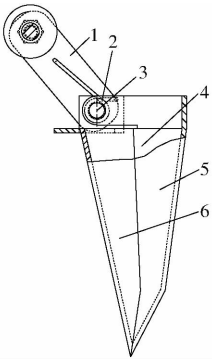


图 8 栽植器总成结构示意图

Fig. 8 Structure of the planting implement part

1. 拨杆 2. 扭簧 3. 旋转中心轴 4. 栽植器 5. 栽植器前侧(打开侧) 6. 栽植器后侧(固定侧)

栽植器上部形状确定为水平截面对称的圆锥形,为了确定其锥度,分别取 20°、25°、30°、35°进行单因素仿真试验。随机选取蒜种以芽尖向上直立状态下落进入栽植器,测试蒜种在栽植器内的直立度。结果表明,随着栽植器锥度的减小,蒜种在栽植器的直立度逐渐增大,栽植器锥度为 20°时,蒜种在栽植器内直立度平均值为 81.68°。但锥度越小,对栽植器接取蒜种时蒜种落入栽植器的位置精度要求越严格,同时还受到栽植器入口大小的限制,其锥度不宜过小,因此确定栽植器锥度为 20°。此时停留在栽植器圆锥内的蒜种底部对应的横截面外径 d 为 22 mm 左右,该截面和圆锥顶点的距离 h 约为 63 mm,以此截面为栽植器上部的底面,即栽植器上、下两段的分界面,如图 9 所示。

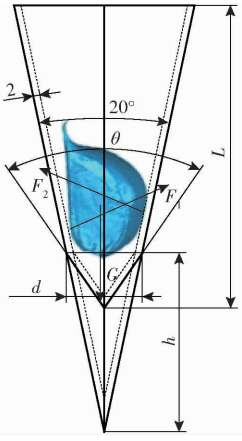


图 9 蒜种在栽植器内位置示意图

Fig. 9 Diagram of position of garlic seeds in planting implement

h 越大,蒜种距离栽植器入土形成的种穴底部越远,栽植器打开后蒜种下落时间越长,栽植器和土壤对蒜种作用的随机性增加,蒜种容易发生偏转,应适当增大下部锥度 θ 以减小 h。栽植器整体高度 L 以栽植器上端开口能可靠接取蒜种为宜,具体数值由后面的相关试验确定。

2.3 栽植器打开方式和打开时刻确定

栽植器入土打开时,横向两侧对土壤的作用相同,纵向前后两侧对土壤的作用不同。为使栽植器和土壤对蒜种前后的作用趋于相同,栽植器采取前后打开方式,由前侧和后侧两个零件组成。入土打开种植蒜种时,栽植器的打开侧绕其旋转中心转动打开,蒜种靠自重下落离开栽植器进入土壤。前后打开方式又可分为:前侧和后侧同时对称打开即双侧对称打开;后侧固定前侧向前打开即单侧向前打开;前侧固定后侧向后打开即单侧向后打开。

栽植器打开方式对种穴形状的影响还与打开时刻密切相关,为保证一定的入土深度且以尽量小的水平分速度打开投种即接近零速投种,栽植器应在最低点和零速点附近开始打开。故打开时刻可分最低点前 $t = t_q$ $\left($坐标为 $\left(\frac{R}{\lambda}\sqrt{\lambda^2-1}, \frac{R}{\lambda}\right)\right)$、最低点 $t = t_d$ $\left($坐标为 $\left(\frac{\pi R}{\lambda}, R\right)\right)$ 和最低点后 $t = t_h$ $\left($坐标为 $\left(vt - \frac{2R}{\lambda}\sqrt{\lambda^2-1}, \frac{R}{\lambda}\right)\right)$ 3 种情况。栽植器下部锥角取 $\theta = 60°$,分别以栽植器入土形成的种穴形状和种植蒜种的直立度为指标进行二因素仿真试验以确定栽植器的打开方式和打开时刻。

2.3.1 打开方式和打开时刻对种穴形状的影响

栽植器分别在 3 种打开方式、3 种打开时刻打开形成的种穴剖面形状如图 10 ~ 12 所示。由图 10、11 可知,栽植器双侧对称和单侧向前各对应时刻打开形成的种穴形状基本相同。最低点前打开时,种穴剖面下部宽度较大且穴底中间有凸起,种穴下部宽度越大落入的蒜种倾斜角度越大,穴底中部的凸起会使蒜种提前倾倒,不利于蒜种稳定直立。最低点打开时,种穴剖面趋于对称且穴底中部向下凹陷与蒜种底部向下凸起的轮廓相适应,有利于蒜种与土壤接触后保持立直状态。最低点后打开时,蒜穴形状对称度比最低点后打开小,而且蒜种下落过程中土壤已经开始回流,蒜种无法落入种穴底部,直立状态和种植深度受土壤回流影响较大。因此,在最低点双侧对称和单侧向前打开形成的种穴形状蒜种直立最好。

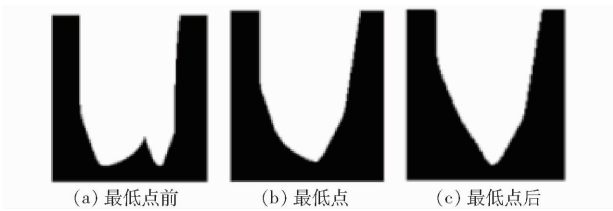


图 10 栽植器不同时刻双侧对称打开的种穴形状

Fig. 10 Shape of seed-hole formed by planting implement opening symmetrically on both sides at different times

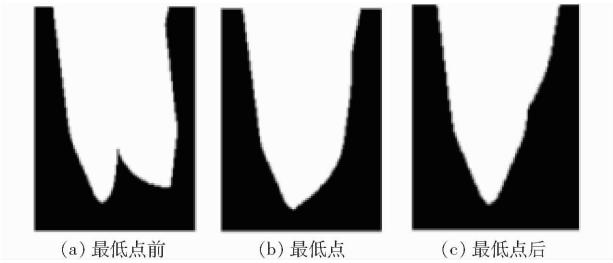


图 11　栽植器不同时刻单侧向前打开的种穴形状

Fig. 11　Shape of seed-hole formed by planting implement opening forward on one side at different times

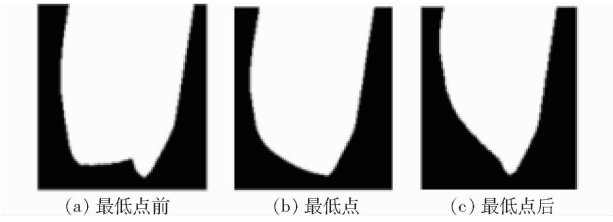


图 12　栽植器不同时刻单侧向后打开的种穴形状

Fig. 12　Shape of seed-hole formed by planting implement opening backword on one side at different times

栽植器单侧向后打开形成的种穴剖面形状如图 12 所示。3 种打开时刻单侧向后打开的种穴形状对称度都不高，且蒜种在下落的过程中，栽植器继续在水平方向上向后运动，其后侧迅速远离蒜种，不会干涉蒜种自由下落，只有前侧单向干涉蒜种下落，蒜种受力不平衡，不会保持原来的直立状态。经进一步试验表明，在第二零速点以后打开，前侧才不会干涉蒜种下落，但蒜种已经离最低点较多，能达到的土壤深度远离种穴底部，种植深度和蒜种状态受土壤回流影响较大，种植效果不稳定，因此栽植器不宜单侧向后打开。

2.3.2　打开方式、打开时刻对种植蒜种直立度的影响

蒜种直立度是蒜种的纵轴与水平面的夹角。以栽植器完全打开至离开土壤后种植的蒜种在土壤中的直立度为评价指标，与栽植器打开前蒜种在栽植器内的直立度对比，进行了仿真试验，结果如图 13 所示。结果表明栽植器在最低点双侧对称打开和单侧向前打开种植的蒜种直立度较高，在任意时刻单侧向后打开直立度都较低且直立度减少幅度较大，与上述种穴形状的分析结果一致。

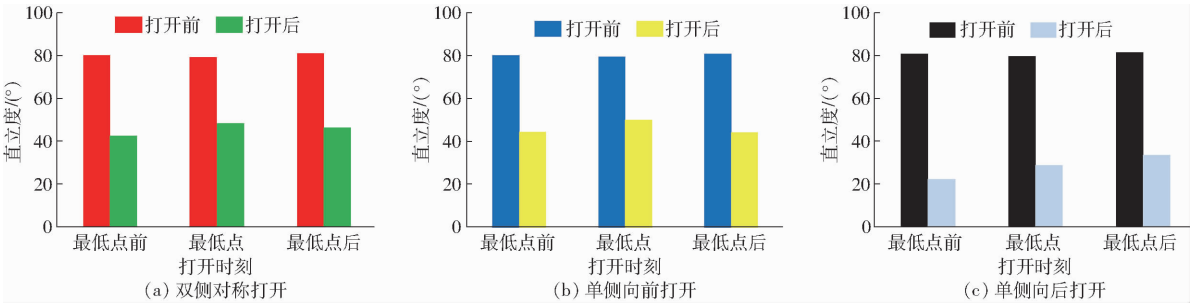


图 13　不同栽植器打开方式和打开时刻时蒜种直立度柱状图

Fig. 13　Bar charts of upright degree of garlic seeds at different opening ways and opening times

综合种穴形状分析和蒜种直立度结果可知，栽植器在最低点双侧对称打开和单侧向前打开种植的蒜种直立效果最好，与入土前蒜种在栽植器中的直立度相差较小。

2.3.3　栽植器单侧向前打开旋转中心位置确定

上述结果是栽植器打开旋转中心位于栽植器的对称轴上得到的，双侧对称打开方式打开的旋转中心只能在栽植器的对称轴上，而单侧向前打开方式仅打开侧即前侧转动，打开侧旋转中心位置可以不同。初步试验表明前侧打开旋转中心位置在垂直方向的变化对栽植器成穴形状的影响较小，考虑栽植器需要有一定的入土深度，确定前侧打开旋转中心位置在垂直方向上与栽植器下部顶点距离 110 mm，下面重点分析旋转中心位置在该高度水平方向上的变化对栽植器成穴形状和种植蒜种直立度的影响。

打开旋转中心位置和栽植器对称轴的水平距离 B 分别取 −30、−15、0、15、30 mm 进行试验（B 正值表示打开旋转中心位于栽植器对称轴前侧，B 负值表示打开旋转中心位于栽植器对称轴后侧），得到对应的种穴形状如图 14 所示，当 $B>0$ 时，随着栽植器单侧向前打开旋转中心与栽植器对称轴向前的距离增加，其种穴下部宽度增加较多，特别是种穴底部的宽度增大且逐渐趋于平坦，越来越不利于蒜种的直立。当 $B<0$ 时，随着栽植器单侧向前打开旋转中心与栽植器对称轴向后的距离增加，种穴形状逐渐改善，底部形成对称锥度。当向后距离增加至 15 mm 以上时，种穴形状变化较小，因此确定该旋转中心水平方向的位置为距栽植器对称轴后侧 15 mm，即 $B=-15$ mm。

以蒜种直立度为指标，对旋转中心位置处于栽植器对称轴前侧 $B=15$ mm、中心位置 $B=0$、后侧 $B=-15$ mm 进行仿真试验，试验结果如图 15 所示，栽植器单侧向前打开旋转中心位置由对称轴后移可提高蒜种直立度，后移至 $B=-15$ mm 时，蒜种直立度

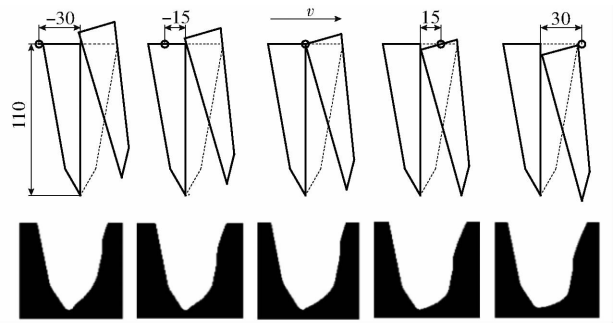


图 14 不同打开侧打开旋转中心位置时种穴形状

Fig. 14 Shape of seed-hole when open rotation center was on different position

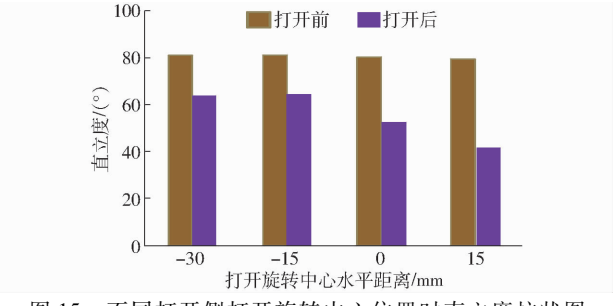


图 15 不同打开侧打开旋转中心位置时直立度柱状图

Fig. 15 Bar chart of upright degree of garlic seeds at different positions of open rotation center

由 52.5°提高到 64.3°,高于对称打开直立度,栽植器打开旋转中心位置在水平方向的变化对种植蒜种姿态的影响明显。

综合上述分析,确定栽植器打开时刻为最低点,打开方式为单侧向前打开,打开旋转中心即旋转中心轴的位置为在垂直方向距栽植器下部顶点上方 110 mm、在前后方向距栽植器对称轴后侧 15 mm。

2.4 栽植器结构形状优化及其对蒜种的作用机理

栽植器打开后对蒜种的作用取决于栽植器下部的结构形状,且其前后两侧下部对蒜种的干涉作用不同,为确定栽植器下部形状,提高种植蒜种的直立度,本文利用仿真系统分析栽植器打开后蒜种位姿的变化过程来优化栽植器下部结构及参数。

2.4.1 栽植器打开后蒜种位姿变化过程分析

栽植器入土打开投种前,蒜种的运动规律与栽植器一致,如图 1 所示,在栽植器内由上部锥度保证直立姿势不变,此时蒜种受力有重力 G、栽植器两侧的作用力 F_1、F_2(包括支持力和静摩擦力),如图 9 所示,合力通过蒜种重心等于蒜种和栽植器一起圆周运动的惯性力,在栽植器入土后其方向为前下方,随着栽植器的运动与竖直方向的夹角逐渐减小,到达最低点合力方向和重力方向一致,此时栽植器前侧开始打开,前侧的作用力随之减少,蒜种开始往前倾斜,栽植器继续运动通过最低点之后,后侧的水平分加速度的方向由向后改变为向前并逐渐加大,随着后侧上移,位于蒜种以下的后侧下部干涉蒜种底部下落,将蒜种往上带,加剧了蒜种向前倾斜。由此栽植器下部形状需进一步优化,既要保持良好的种穴形状,同时改变栽植器对蒜种作用力的作用点和方向,以改变对蒜种的转矩,使其保持直立姿态落入穴底,或者通过栽植器的干涉再次扶正倾斜的蒜种,以达到较高的直立度。

2.4.2 栽植器非对称结构优化

根据上述仿真过程观察分析,在保持栽植器整体高度、下部锥角、上部锥角和上下两段分界面直径不变的情况下,栽植器的上部后侧倾斜角度从 80°减小至 77.5°、前侧锥角从 80°增大至 82.5°,即栽植器上部由正圆台形向前倾斜 2.5°优化为斜圆台,栽植器的下部后侧锥角减小至和上部锥角一致、前侧锥角增加,即栽植器下部由正圆锥优化为斜圆锥,栽植器由原来的对称结构改变为如图 16 所示的非对称结构,既减少了栽植器后侧下部对蒜种向前倾斜的干涉作用,又加大了前侧对蒜种的回正转矩。栽植器前后方向没有了对称轴,打开旋转中心的水平位置以栽植器下部顶点为基准,即前侧打开旋转中心的水平位置在栽植器下部顶点后侧 15 mm 处。栽植器打开后蒜种离开栽植器过程如图 17 所示,蒜种先在后侧下部的作用下向前倾斜(图 17a),接触到前侧下部锥角处时,其下部尖端拨动蒜种上部使蒜种逆时针向后回转(图 17b),蒜种又倒向后侧(图 17c),后侧在上升过程中再次向前扶正蒜种,使蒜种以直立姿态离开栽植器(图 17d)。栽植器非对称优化后,蒜种离开栽植器过程受到栽植器前侧和后侧的反复交替作用,直立度明显提高。同时对应形成的种穴的对称性也明显改善,如图 18 所示,土壤回流对离开栽植器的蒜种的作用力前后平衡,不会引起离开栽植器的蒜种的位姿进一步变化。

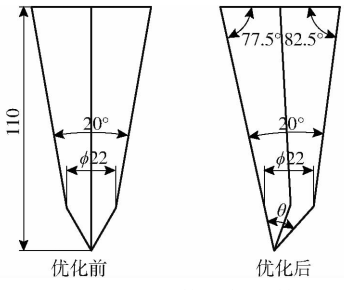


图 16 栽植器外形优化结果

Fig. 16 Results of shape optimization of planting implement

2.5 栽植器工作参数多因素仿真试验

影响栽植器直立种植性能的工作参数包括栽植器的整体复合运动和打开运动的参数,主要有栽植器圆周运动线速度与机具前进速度比(即速比 λ)、

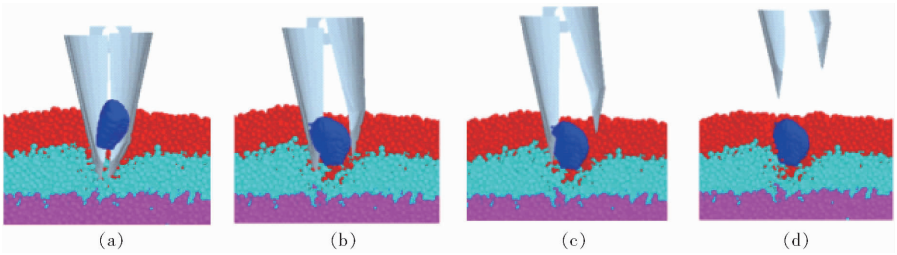


图 17　蒜种离开优化后栽植器位姿变化过程

Fig. 17　Change of pose of garlic seed leaving optimized planting implement



图 18　优化后的栽植器形成的种穴形状

Fig. 18　Shape of seed-hole formed by optimized planting implement

栽植器完全打开时后侧和前侧下部顶点之间的水平距离(即打开开度 k)和栽植器开始打开至完全打开所需时间(即打开时间 T)。为分析栽植器下部锥角 θ 及其工作参数对大蒜种植装置性能的影响,探索各参数最优值和种植蒜种最佳效果,以种植蒜种的直立度 E 为试验指标,对上述 3 个工作参数和待确定的栽植器下部锥角 θ 进行四因素三水平二次回归正交试验。试验因素编码见表 2。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Test factors and codes

编码	因素			
	速比 λ	打开开度 k/mm	打开时间 T/s	栽植器下部锥角 θ/(°)
−1	1.05	25	0.4	30
0	1.15	30	0.5	40
1	1.25	35	0.6	50

2.5.1　仿真试验方案及结果

根据 Box − Behnken 试验原理设计四因素三水平正交回归仿真试验,每个试验重复 10 次,直立度取平均值,试验方案和结果见表 3,X_1、X_2、X_3、X_4 为因素编码值。

2.5.2　回归模型建立与显著性检验

应用 Design-Expert 10 软件对试验数据进行多元回归拟合分析,建立直立度 E 和因素编码值的二次回归模型

$$E = 71.30 - 0.94X_1 - 2.41X_2 - 1.08X_3 + 4.45X_4 + 2.07X_1X_2 + 1.02X_1X_3 + 1.72X_1X_4 - 0.10X_2X_3 + 0.14X_2X_4 + 3.20X_3X_4 - 3.45X_1^2 - 5.79X_2^2 - 3.53X_3^2 - 6.79X_4^2 \quad (19)$$

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Experiment scheme and results

序号	因素				直立度 E/(°)
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	−1	−1	0	0	67.52
2	1	−1	0	0	60.28
3	−1	1	0	0	58.32
4	1	1	0	0	59.36
5	0	0	−1	−1	59.63
6	0	0	1	−1	51.36
7	1	0	−1	1	62.82
8	0	0	1	1	67.35
9	−1	0	0	−1	58.62
10	1	0	1	−1	52.95
11	−1	0	0	1	65.32
12	1	0	0	1	66.52
13	0	−1	−1	0	64.83
14	0	1	−1	0	60.36
15	0	−1	1	0	63.39
16	0	1	1	0	58.52
17	−1	0	−1	0	67.85
18	1	0	−1	0	65.52
19	−1	0	1	0	62.82
20	1	0	1	0	64.56
21	0	−1	0	−1	58.62
22	0	1	0	−1	53.58
23	0	−1	0	1	65.32
24	0	1	0	1	60.85
25	0	0	0	0	72.15
26	0	0	0	0	70.38
27	0	0	0	0	73.18
28	0	0	0	0	71.25
29	0	0	0	0	69.52

方差分析结果见表 4。回归方程的 F 值为 29.56,P 值小于 0.000 1,表明回归模型极显著。失拟项 P 值为 0.538 7,大于 0.05,表明回归模型拟合度高。模型中有 7 个回归项影响极显著($P < 0.01$),分别为 X_2、X_4、X_3X_4、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_4^2;有 4 个回归项影响显著($P < 0.05$),分别为 X_1、X_3、X_1X_2、X_1X_4,剔除不显著项 X_1X_3、X_2X_3、X_2X_4,对模型式(19)进行优化得回归方程

$$E=71.30-0.94X_1-2.41X_2-1.08X_3+4.45X_4+2.07X_1X_2+1.72X_1X_4+3.20X_3X_4-3.45X_1^2-5.79X_2^2-3.53X_3^2-6.79X_4^2$$

优化后模型的 F 值为 39.71，P 值小于 0.000 1，表明优化后模型仍极显著，失拟项 P 值为 0.584 7，大于 0.05，说明优化模型可靠。

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	869.39	14	29.56	<0.000 1
X_1	10.57	1	5.03	0.041 6
X_2	69.94	1	33.30	<0.000 1
X_3	14.11	1	6.71	0.021 3
X_4	237.81	1	113.21	<0.000 1
X_1X_2	17.14	1	8.16	0.012 7
X_1X_3	4.14	1	1.97	0.182 1
X_1X_4	11.80	1	5.62	0.032 7
X_2X_3	0.040	1	0.02	0.892 2
X_2X_4	0.081	1	0.04	0.846 9
X_3X_4	40.96	1	19.50	0.000 6
X_1^2	77.40	1	36.85	<0.000 1
X_2^2	217.49	1	103.54	<0.000 1
X_3^2	80.96	1	38.55	<0.000 1
X_4^2	299.21	1	0.43	<0.000 1
残差	29.41	14		
失拟	21.13	10	1.02	0.538 7
误差	8.27	4		
总和	898.80	28		

2.5.3 响应面分析

根据回归方程分析结果，对速比、打开开度、打开时间以及栽植器下部锥角 4 个因素之间交互作用显著项 X_1X_2、X_1X_4 和 X_3X_4 对响应值 E 的影响，绘制了因素交互作用对蒜种直立度 E 的响应曲面，如图 19 所示。由图 19 可知，3 个响应面都出现了拐点，说明直立度随各因素的增大均呈现先上升后下降趋势，在各试验因素试验水平的取值范围内存在直立度极大值。由图 19a、19b 可知，蒜种直立度随速比增加上升的速度高于下降的速度，随打开开度增加呈先急剧上升到达最高点后缓慢下降的趋势，说明打开开度不宜过小。由图 19b、19c 可知，蒜种直立度随栽植器下部锥角的增加呈先缓慢上升到达最高点后急剧下降趋势，说明栽植器下部锥角不宜过大，随打开时间增加上升的速度和下降的速度差异不大。

2.5.4 参数优化

为了获得栽植器最优的立直种植效果，应用 Design-Expert 10 软件，以蒜种直立度为优化目标，对速比 λ、打开开度 k、打开时间 T 和栽植器下部锥角 θ 进行参数优化。建立的优化数学模型为

$$\begin{cases}\max E(\lambda,k,T,\theta)\\ \text{s.t.}\begin{cases}1.05\leqslant\lambda\leqslant1.25\\ 25\ \text{mm}\leqslant k\leqslant35\ \text{mm}\\ 0.4\ \text{s}\leqslant T\leqslant0.6\ \text{s}\\ 30^\circ\leqslant\theta\leqslant50^\circ\end{cases}\end{cases}\tag{20}$$

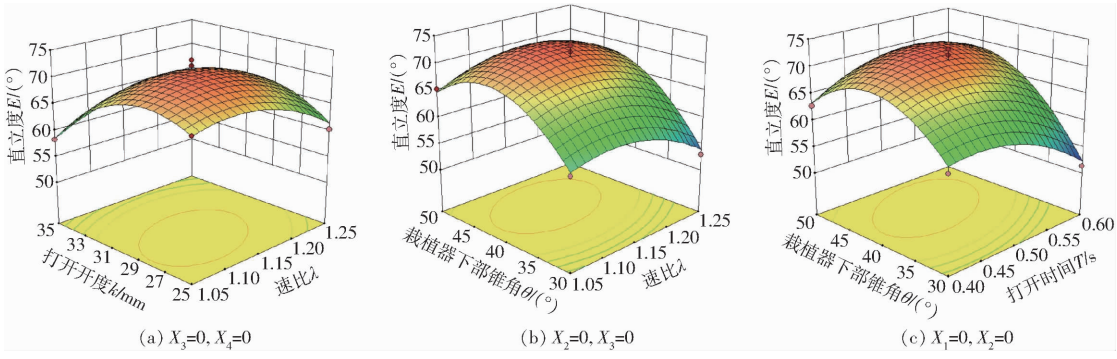


图 19 对蒜种直立度影响显著的因素交互作用的响应曲面

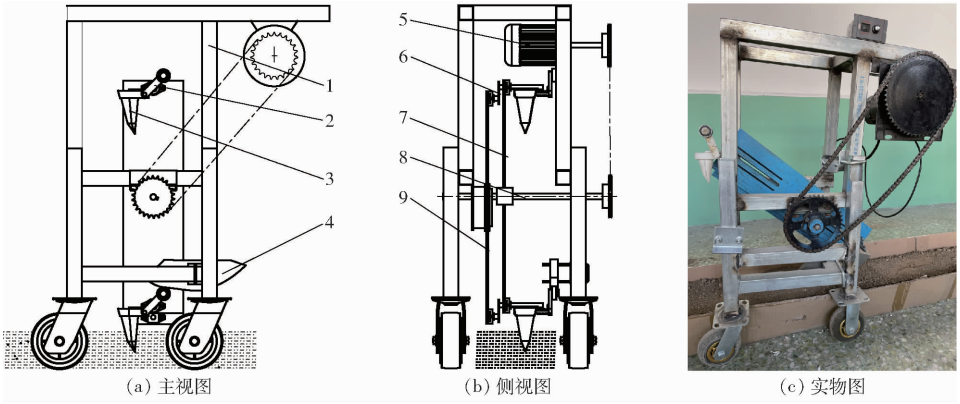
Fig. 19 Response surfaces of interaction between factors that significantly affecting upright degree of garlic seed

最佳参数为：速比 1.12、打开开度 29.69 mm、打开时间 0.51 s、栽植器下部锥角 40.90°，种植蒜种直立度为 72.84°。圆整后速比为 1.1、打开开度为 30 mm、打开时间为 0.5 s、栽植器下部锥角为 40°，此时种植蒜种平均直立度为 71.30°。

3 验证试验

为了验证通过仿真分析设计的栽植器的性能和仿真模型的正确性，搭建了如图 20 所示的大蒜直立种植装置试验台，栽植器由 3D 打印机打印而成，栽植器总成固定安装在连杆上，拨动栽植器拨杆可使栽植器前侧绕其打开旋转中心轴旋转打开。直立种植装置由小型电动车牵引向前均匀运动，可调节控制前进速度 v。试验台的调速电机调节栽植器圆周运动角速度 ω，通过链传动和主动轴驱动主动杆转动，由主动杆、偏心从动杆和连杆组成的平行四杆双曲柄机构使栽植器做圆周运动并保持开口向上。栽植器运动到开合凸轮位置时，由开合凸轮拨动栽植

器拨杆打开栽植器。试验时，人工将蒜种在栽植器入土前直立放入栽植器内，当栽植器入土运动到栽种位置，栽植器开合凸轮与栽植器拨杆接触下压拨杆，驱动栽植器前侧打开，在栽植器完全离开土壤后，栽植器拨杆与凸轮脱离接触，栽植器拨杆在扭簧的作用下回转使栽植器闭合，完成 1 粒蒜种种植。



(a) 主视图　(b) 侧视图　(c) 实物图

图 20　大蒜直立种植装置试验台

Fig. 20　Test bed of garlic upright planting device

1. 机架　2. 栽植器拨杆　3. 栽植器　4. 开合凸轮　5. 调速电机　6. 连杆　7. 主动杆　8. 主动轴　9. 从动杆

验证试验中各因素取圆整后的最佳参数，栽植器打开方式为单侧向前打开、打开旋转中心位置为在垂直方向距栽植器下部顶点 110 mm、在前后方向距栽植器下部顶点后侧 15 mm，土壤含水率 20.5%，5 cm 土壤硬度 4.13×10^5 Pa。试验种植 50 粒蒜种，测量各种植蒜种的直立度[15]，取平均值。验证试验结果(68.66°)与仿真分析结果(71.30°)相符，表明所设计的栽植器能达到仿真试验的性能，建立的仿真分析系统正确。

4　结论

(1)设计了一种非对称结构的新型大蒜栽植器，该栽植器壁厚 2 mm，分上、下两段，上部为下底面外径为 22 mm 的倒斜圆台形，整体向前侧倾斜 2.5°，圆台锥角为 20°，下部为锥角为 40°的倒斜圆锥形，后侧锥度与上部相同，底面外径与上部下底面相同为 22 mm，分别以通过上、下中心轴垂直于前后方向平面的两个相交平面将栽植器分为栽植器前侧和后侧。打开时刻为最低点，打开方式为单侧向前打开，打开旋转中心位置在栽植器下部顶点上方 110 mm、后侧 15 mm 处。

(2)采用该栽植器种植蒜种时，栽植器对蒜种的作用过程为：栽植器入土打开投种前，蒜种在栽植器内保持直立姿势。栽植器运动入土打开，蒜种开始向前倾斜，随着后侧上移，位于蒜种以下的栽植器后侧下部接触蒜种下部干涉蒜种，使蒜种加速向前倾斜，至蒜种上部接触到前侧下部锥角处时，蒜种上部逆时针旋转回正、向后倒向栽植器后侧，蒜种随栽植器后侧上升又被扶正后离开栽植器。

(3)经仿真试验优化后最佳参数为：速比 1.12、打开开度 29.69 mm、打开时间 0.51 s、栽植器下部锥角 40.90°，此时直立度达到 72.84°。圆整各参数：速比取 1.1、打开开度取 30 mm、打开时间取 0.5 s、栽植器下部锥角取 40°，采用圆整后的参数进行的台架验证试验结果为平均直立度达到 68.66°，与仿真试验结果相符，证明建立的仿真系统正确、仿真试验结果实用可靠。

参　考　文　献

[1] 金诚谦，袁文胜，吴崇友，等. 大蒜播种时鳞芽朝向对大蒜生长发育影响的试验研究[J]. 农业工程学报，2008，24(4)：155－158.
JIN Chengqian, YUAN Wensheng, WU Chongyou, et al. Experimental study on effects of the bulbil direction on garlic growth [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 155－158. (in Chinese)

[2] KUMAR D, KUMAR J, KANT K. Studies and performance of a garlic planter in Uttar Pradesh[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2017, 10(1): 228－233.

[3] MANJUNATHA M, SAMUEL D V K, ANURAG R K, et al. Development and performance evaluation of a garlic peeler[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3083－3093.

[4] GAJAKOS A V, SARAF V V, SNEHA-SINHA S S, et al. Performance evaluation of manually operated garlic planter[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1): 31－38.

[5] BAKHTIARI M R, AHMAD D. Determining physical and aerodynamic properties of garlic to design and develop of a pneumatic garlic clove metering system[J]. Agricultural Engineering International CIGR Journal, 2015, 17(1): 59－67.

[6] LEE S Y, PARK H J, KWEON G Y. Basic study on a garlic (*Allium sativum* L.) upright planter[J]. Korean Journal of

Agricultural Science,2019,46(2):341 - 350.
[7] CHOI D K, PARK W K, PARK S, et al. Garlic upright-positioning and planting device: US6,619,219B2[P]. 2003 - 09 - 16.
[8] PARK D, LEE C G, KIM D, et al. Analysis of inter-particle contact parameters of garlic cloves using discrete element method [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2021, 46(10):332 - 345.
[9] GENG A J, LI X Y, HOU J L, et al. Design and experiment of automatic garlic seed directing device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(6):85 - 93.
[10] 崔荣江,张华,徐文艺,等.大蒜种体入土后的直立栽种条件研究[J].农机化研究,2015,37(2):83 - 86.
CUI Rongjiang, ZHANG Hua, XU Wenyi, et al. Study on the vertical planting condition of garlic in soil [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(2):83 - 86. (in Chinese)
[11] 崔荣江,荐世春,徐文艺,等.大蒜直立栽种器的设计与试验[J].农机化研究,2016,38(9):201 - 205.
CUI Rongjiang, JIAN Shichun, XU Wenyi, et al. Design and test of garlic upright planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(9):201 - 205. (in Chinese)
[12] 崔荣江,王小瑜,信嘉程,等.弧形鸭嘴式大蒜正芽播种机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(11):120 - 130.
CUI Rongjiang, WANG Xiaoyu, XIN Jiacheng,et al. Design and test of arc duck-billed garlic seed planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):120 - 130. (in Chinese)
[13] 孙伟,冯江,蒋亦元.非圆齿轮系大蒜直立移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):73 - 82.
SUN Wei,FENG Jiang, JIANG Yiyuan. Optimal design and experiment of vertically transplanting mechanism with non-circular gears system for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):73 - 82. (in Chinese)
[14] 马伟童,宋井玲,孙倩,等.连续栽植式大蒜立直种植装置性能分析[J].农机化研究,2020,42(4):23 - 27,39.
MA Weitong, SONG Jingling, SUN Qian,et al. Performance analysis of continuous garlic upright planting device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(4):23 - 27,39. (in Chinese)
[15] 李天华,黄圣海,牛子孺,等.行星轮式大蒜插播机播种直立度优化与试验[J].农业工程学报,2020,36(3):37 - 45.
LI Tianhua, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Optimization and experiment of planting perpendicularity of planetary wheel garlic planter[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(3):37 - 45. (in Chinese)
[16] 李玉华.大蒜单粒播种种芽定向调控技术研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
LI Yuhua. Research on the technology of regulating the orientation of seed buds during single seeding of garlic[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2021. (in Chinese)
[17] 何岳平,陈青春,何瑞银,等.大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J].农业机械学报,2011,42(2):88 - 93,119.
HE Yueping,CHEN Qingchun,HE Ruiyin,et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system of garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):88 - 93,119. (in Chinese)
[18] 王永仁.一种新型鸭嘴式成穴器的设计及仿真[J].中国农机化学报,2015,36(2):29 - 31.
WANG Yongren. Design and simulation of a new duckbill type spade[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2015, 36(2):29 - 31. (in Chinese)
[19] 崔志超,管春松,徐陶,等. 甘蓝基质块苗移栽机双排链式栽植装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(6):46 - 54.
CUI Zhichao,GUAN Chunsong,XU Tao, et al. Design and experiment of double-row chain planting device for cabbage substrate block seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(6):46 - 54. (in Chinese)
[20] 金丽宇,张伟,付晓明,等.鸭嘴式蔬菜移栽机栽植机构设计与试验[J].黑龙江八一农垦大学学报,2021,33(5):100 - 105,134.
JIN Liyu, ZHANG Wei, FU Xiaoming, et al. Design and experiment of planting mechanism of duckbill type vegetable transplanter[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2021,33(5):100 - 105,134. (in Chinese)
[21] 杨启志,朱梦岚,贾翠平,等.穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器膜上成穴性能仿真与试验[J].中国农机化学报,2022, 43(7):1 - 7.
YANG Qizhi,ZHU Menglan,JIA Cuiping, et al. Simulation and experiment of hole forming performance on the membrane of hanging cup planter of high-speed transplanter for pot seedling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7):1 - 7. (in Chinese)
[22] 贾翠平.基于 DEM 的穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器-土壤相互作用机理的研究[D].镇江:江苏大学,2021.
JIA Cuiping. Study on the interaction mechanism between hanging cup planter and soil of high-speed transplanter for plug seedling based on DEM [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)
[23] 廖庆喜,王迪,姚露,等.油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):62 - 72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):62 - 72. (in Chinese)
[24] 杨清华,宋井玲,张明亮,等.蒜种离散元建模方法的研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2023,37(5):48 - 52.
YANG Qinghua, SONG Jingling, ZHANG Mingliang, et al. Research on discrete element modeling method of garlic seed[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2023,37(5):48 - 52. (in Chinese)

(下转第 261 页)

[35] 任欢. 偏最小二乘回归算法应用与改进[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
REN Huan. Application and improvement of partial least squares regression algorithm[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019. (in Chinese)
[36] 冯海宽,陶惠林,赵钰,等. 利用无人机高光谱估算冬小麦叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3575 - 3580.
FENG Haikuan, TAO Huilin, ZHAO Yu, et al. Estimation of chlorophyll content in winter wheat based on UAV hyperspectral [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(11): 3575 - 3580. (in Chinese)
[37] 张子晗,晏磊,刘思远,等. 基于偏振反射模型和随机森林回归的叶片氮含量反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(9): 2911 - 2917.
ZHANG Zihan, YAN Lei, LIU Siyuan, et al. Leaf nitrogen concentration retrieval based on polarization reflectance model and random forest regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(9): 2911 - 2917. (in Chinese)
[38] 姚雄,余坤勇,刘健. 基于无人机多光谱遥感的马尾松林叶面积指数估测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 213 - 221.
YAO Xiong, YU Kunyong, LIU Jian. Leaf area index estimation of Masson pine (*Pinus massoniana*) forests based on multispectral remote sensing of UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 213 - 221. (in Chinese)
[39] 张琳,汪廷华,周慧颖. 基于群智能算法的 SVR 参数优化研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(16): 50 - 64.
ZHANG Lin, WANG Tinghua, ZHOU Huiying. Research progress of SVR parameter optimization based on swarm intelligence algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(16): 50 - 64. (in Chinese)
[40] 刘忠,万炜,黄晋宇,等. 基于无人机遥感的农作物长势关键参数反演研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 60 - 71.
LIU Zhong, WAN Wei, HUANG Jinyu, et al. Progress on key parameters inversion of crop growth based on unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 60 - 71. (in Chinese)
[41] 翟丽婷,魏峰远,冯海宽,等. 基于综合指标的冬小麦长势监测[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 244 - 249.
ZHAI Liting, WEI Fengyuan, FENG Haikuan, et al. Winter wheat growth monitoring based on comprehensive indicators[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(18): 244 - 249. (in Chinese)
[42] PENG Y, NGUY-ROBERTSON A, ARKEBAUER T, et al. Assessment of canopy chlorophyll content retrieval in maize and soybean: implications of hysteresis on the development of generic algorithms[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 226.
[43] 杨雪峰,咎梅,木尼热·买买提. 基于无人机和卫星遥感的胡杨林地上生物量估算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 77 - 83.
YANG Xuefeng, ZAN Mei, MUNIRE Maimaiti. Estimation of above ground biomass of *Populus euphratica* forest using UAV and satellite remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 77 - 83. (in Chinese)
[44] 彭梓励,马丽娟,郭曾辉,等. 星机协同的冬小麦长势遥感监测研究——以陕西省咸阳市为例[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(10): 1 - 13.
PENG Zili, MA Lijuan, GUO Zenghui, et al. A study on remote sensing monitoring of winter wheat growth by star-machine synergy—taking Xianyang City, Shaanxi Province as an example[J]. Tournal of Triticeae Crops, 2023, 43(10): 1 - 13. (in Chinese)

(上接第 128 页)

[25] 侯加林,方立志,张海阔,等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):65 - 75,163.
HOU Jialin,FANG Lizhi,ZHANG Haikuo, et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 65 - 75, 163. (in Chinese)
[26] XU Tao, SONG Jingling, CUI Zhichao, et al. Physical properties of garlic seeds related to grading and planting[J]. International Agricultural Engineering Journal,2018,27(3):309 - 315.
[27] 贺一鸣,向伟,吴明亮,等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(2): 216 - 220.
HE Yiming,XIANG Wei,WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(2):216 - 220. (in Chinese)
[28] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):1 - 20. (in Chinese)
[29] 文恩杨,李玉华,牛子孺,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究,2021,43(5):160 - 167.
WEN Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameters calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(5):160 - 167. (in Chinese)