

引用格式:

全伟, 石方刚, 马紫涛, 官梅, 蒋啸虎, 向伟, 吴明亮. 油菜钵苗移栽机成穴器参数优化与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 94–100.

QUAN W, SHI F G, MA Z T, GUAN M, JIANG X H, XIANG W, WU M L. Parameter optimization and experiment of soil opener for rapeseed pot seedling transplanter[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(3): 94–100.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 油菜钵苗移栽机成穴器参数优化与试验

全伟<sup>1</sup>, 石方刚<sup>2</sup>, 马紫涛<sup>2</sup>, 官梅<sup>3</sup>, 蒋啸虎<sup>2</sup>, 向伟<sup>4</sup>, 吴明亮<sup>2\*</sup>

(1.湖南农业大学东方科技学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南农业大学油料作物研究所, 湖南 长沙 410128; 4.中国农业科学院麻类研究所, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 为了降低成穴作业过程中的功耗和减少孔穴成型过程中的穴内回土量, 开展了油菜钵苗移栽机成穴器的参数优化研究。对成穴器的运动轨迹及受力进行分析, 确定影响成型孔穴外形尺寸及成穴作业功耗的因素, 选取成穴器底端尺寸、入土角度和入土深度为影响因素, 通过单因素试验及多因素试验进行参数范围选取及多目标优化仿真试验, 建立成穴器入土阻力和穴内截面回土率的数学模型, 得到成穴器各参数对成穴作业质量的影响规律及最优参数组合。仿真试验结果表明: 影响入土阻力的因素主次顺序为入土深度、入土角度、底端尺寸, 影响穴内截面回土率的因素主次顺序为入土角度、入土深度、底端尺寸; 成穴器的最优参数组合为底端尺寸 39 mm、入土角度 20.5°、入土深度 60 mm。利用成穴装置试验台对成穴作业效果进行验证, 结果显示孔穴穴口直径、有效深度、入土阻力、穴内截面回土率的土槽试验结果与仿真值的相对误差分别为 7.7%、3.7%、4.5%、8.3%, 所成孔穴满足钵苗移栽要求, 验证了所建模型和优化参数的准确性。

**关键词:** 油菜钵苗移栽机; 成穴器; 响应曲面; 离散元法; 入土阻力

中图分类号: S223.92

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0094-07

## Parameter optimization and experiment of soil opener for rapeseed pot seedling transplanter

QUAN Wei<sup>1</sup>, SHI Fanggang<sup>2</sup>, MA Zitao<sup>2</sup>, GUAN Mei<sup>3</sup>, JIANG Xiaohu<sup>2</sup>, XIANG Wei<sup>4</sup>, WU Mingliang<sup>2\*</sup>

(1.College of Orient Science & Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Mechanical and Electrical, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Oil Crops Research Institute, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 4.Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410205, China)

**Abstract:** In order to reduce the power consumption during the hole-forming operation and the amount of soil returned to the hole during the hole-forming process, this study was performed to find optimization of the parameters of the soil opener for rapeseed pot seedling transplanter. Analysis of the trajectory and force of the soil opener was used to determine the factors affecting the external dimensions of the molded hole and the power consumption of the hole-forming operation, and the bottom size of soil opener, the angle of entry soil and the soil opening depth were selected as the influencing factors. The parameter ranges and the multi-objective optimization simulation test through the single-factor and multi-factor tests were used to establish a mathematical model of the soil entry resistance of the soil opener and the rate of the soil return of the hole section to get the influence law of each parameter of soil opener on the quality of hole-forming operation and the optimal parameter combination. The results of the simulation tests showed that the factors affecting the soil entry resistance in the

收稿日期: 2024-04-03

修回日期: 2024-06-22

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(23A0193、22B0188); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40168、2021JJ40650)

作者简介: 全伟(1987—), 男, 湖南常德人, 博士, 副教授, 主要从事农业机械创新设计研究, B20170022@126.com; \*通信作者, 吴明亮, 博士, 教授, 主要从事农业机械创新设计研究, mlwu@hunau.edu.cn

order of predominance were the soil opening depth, the angle of entry soil, the bottom size, while the factors affecting the rate of the soil return of the hole in the order of predominance were the angle of entry soil, the soil opening depth, and the bottom size. The optimal combination of parameters for the soil opener was the bottom size of 39 mm, the angle of entry soil of  $20.5^\circ$  and the soil opening depth of 60 mm. Using the hole-forming device test bench to verify the effect of hole-forming operation, the results showed that the relative errors of soil tank test results and the simulation values for hole opening diameter, effective depth, soil entry resistance and the rate of the soil return of the hole were 7.7%, 3.7%, 4.5% and 8.3% respectively, and the holes formed satisfied the requirements of potting seedling transplantation, which verified the accuracy of the constructed model and the optimized parameters.

**Keywords:** rapeseed pot seedling transplanting machine; soil opener; response surface; discrete element method; soil resistance

机械化钵苗移栽不仅可缓解作物茬口矛盾, 而且还能提高幼苗的成活率与复种指数, 有显著的节本、增产、增收的效果<sup>[1-3]</sup>。油菜移栽机械分为开苗沟式移栽机、鸭嘴栽插式移栽机和打穴式移栽机等 3 类<sup>[4-7]</sup>。打穴式移栽机具有对幼苗要求较低、可实现快速移栽作业等特点<sup>[4,8-9]</sup>。成穴器是打穴式移栽机的关键部件, 其结构参数与作业参数对成穴作业功耗和成型孔穴穴内回土量均有影响。

向伟等<sup>[10-11]</sup>设计了履带式及纯滚动式栽植孔成型机, 并对其打孔机构进行了参数设计, 田间试验结果表明, 两种成型机均能成型满足油菜钵苗移栽要求的栽植孔。张翼夫等<sup>[12]</sup>设计了一种盐碱地后悬挂随动式打孔通气机, 对关键部件打孔针的分布及入土深度等参数进行了设计, 田间试验表明, 该机打孔密度为  $51\sim 128$  个/ $m^2$ , 工作效率为  $3\ 600\sim 6\ 000$   $m^2/h$ 。刘宏新等<sup>[13]</sup>设计了基于五杆成穴机构的免耕播种机, 得到了对应不同株距的结构调整参数与作业参数组合, 该成穴机构能有效穿透秸秆并按要求成穴, 挂带现象少。孙伟等<sup>[14]</sup>设计了双曲柄多杆式马铃薯膜上打孔种植机, 建立了成穴机构的运动学模型, 确定了成穴机构等核心部件的结构与工作参数, 田间性能试验指标均达到了国家和行业标准要求。综上所述, 相关学者主要是对驱动成穴器工作的执行机构及成穴器作业效果进行了大量研究<sup>[15-16]</sup>, 而对成穴器的优化研究较少, 结合作业功耗和穴内回土量两方面进行成穴器参数优化的研究更少。

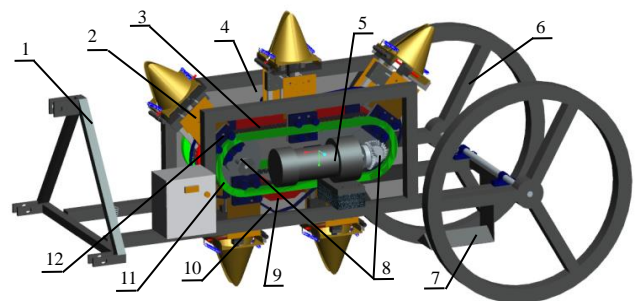
为得到较优的成穴器参数, 降低成穴过程中的功耗及减少穴内回土量, 笔者以成穴装置中的逆向回转式成穴器为研究对象, 结合成穴器垂直入土、出土的作业特点, 通过对成穴器的运动动力学分析及单因素仿真试验, 确定影响成穴作业功耗和穴内

回土量的关键因素及工作参数取值范围, 利用离散元仿真试验及土槽验证试验, 研究各因素对衡量成穴作业功耗的成穴器入土阻力和衡量穴内回土量的穴内截面回土率的影响规律, 建立各因素与评价指标的数学模型, 获取成穴器的最优工作参数组合, 以期为油菜钵苗移栽成穴器的优化与改进提供依据。

## 1 成穴装置结构与工作原理

### 1.1 整机结构与工作原理

逆向回转式成穴装置结构如图 1 所示, 主要由机架、成穴机构(5 组)、传动系统、侧板(三维图中透明处理)、成穴凸轮、推杆凸轮等组成。其中, 传动系统主要由链轮链条、环形导轨、滑块、电机、传动轴等组成; 侧板焊接在机架上, 环形导轨对称固定在侧板上, 滑块安装在环形导轨上, 成穴机构与滑块固定且能通过滑块绕环形导轨作回转运动, 成穴凸轮与推杆凸轮通过传动轴固定在机架内; 挡土板安装在机架内部, 与成穴器在同一平面内, 防止取出的土壤抛洒回填至成型孔穴内。



1 机架; 2 成穴机构; 3 链轮链条; 4 侧板; 5 电机; 6 地轮; 7 挡土板; 8 传动轴; 9 成穴凸轮; 10 推杆凸轮; 11 环形导轨; 12 滑块。

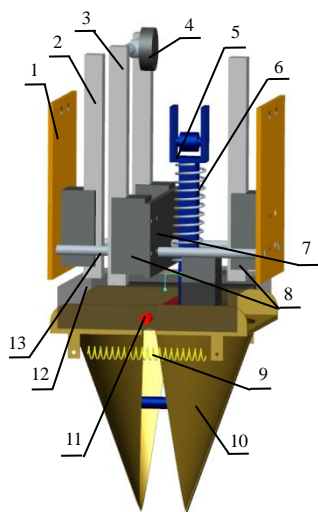
图 1 逆向回转式取土成穴装置的结构

Fig.1 Structure of reverse rotary soil picking type hole forming device

工作时,土槽车牵引成穴装置匀速前进,5组成穴机构逆向回转的动力由电机经传动轴、链轮链条及链条上的轴销传递至安装在环形导轨上的滑块,从而带动固定在滑块上的成穴机构进行回转运动(回转运动的线速度与成穴装置的前进速度大小相等),当成穴机构进入成穴阶段时其速度与机具前进速度大小相等、方向相反,故此阶段成穴机构相对土壤表面无水平方向速度,此时成穴机构内的成穴器在成穴凸轮与推杆凸轮的共同作用下,按照设计要求的时序作垂直入土(成穴器以打开的姿态入土)、旋转取土(成穴器闭合取土)、垂直出土(成穴器以闭合姿态出土)及排土复位(成穴器先张开最大角度排土后恢复至初始状态)等动作,完成在土壤中成型孔穴。

### 1.2 成穴机构的结构

成穴机构的结构如图2所示,主要由小侧板、直线导轨、成穴推杆、推杆轴承、张合推杆、推杆弹簧、支撑侧板、复位弹簧、成穴器、成穴器支架等组成。小侧板固定于滑块上,支撑侧板通过支撑光轴固定在小侧板上;直线导轨与成穴推杆分别安装在4个直线轴承上,可实现上下往复运动,成穴推杆上端安装有一推杆轴承,始终在成穴滑槽内运动,直线轴承分别固定在小侧板与支撑侧板上,直线导轨底端均焊接在成穴器支架上;成穴器通过支架轴、张合推杆、复位弹簧及推杆弹簧安装在成穴器支架上,可绕支架轴转动;其中,张合推杆通过



1 小侧板; 2 直线导轨; 3 成穴推杆; 4 推杆轴承; 5 张合推杆; 6 推杆弹簧; 7 支撑侧板; 8 直线轴承; 9 复位弹簧; 10 成穴器; 11 支架轴; 12 成穴器支架; 13 支撑光轴。

图2 成穴机构的结构

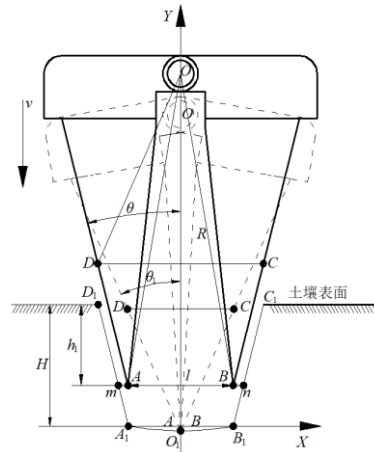
Fig.2 Structure of hole forming mechanism

直线轴承安装在成穴器支架内,其上端在推杆弹簧与复位弹簧的作用下始终与推杆凸轮的外轮廓接触,下端通过滚轮与成穴器内壁一直保持接触,推杆弹簧以压缩状态套装在张合推杆上,复位弹簧以拉伸状态挂接在成穴器上,张合推杆在推杆凸轮的作用下可在直线轴承内的上下滑动,从而实现成穴器的闭合、打开。

### 2 孔穴参数方程

油菜钵苗钵体的外形尺寸大都为方锥台形,上端边长( $a$ )为35或50mm,下端边长( $b$ )为25mm,高( $H_1$ )为40或45mm,栽植深度一般为30~60mm<sup>[17]</sup>。根据前期研究<sup>[18]</sup>,成穴器外形选取圆柱台形,底端尺寸为 $l$ ,若成型孔穴各参数满足穴口直径( $D$ )大于 $\sqrt{2}a$ 、穴底直径( $D_0$ )大于 $\sqrt{2}b$ 、有效深度( $h$ )大于 $H_1$ ,则所成孔穴满足农艺要求。

孔穴由成穴器与土壤相互作用形成,成穴器在土壤中形成的孔穴轮廓形状实际上就是成穴器运动轨迹的包络线<sup>[9,11]</sup>。如图3所示,建立成穴器入土、取土过程坐标系,成穴器以 $O$ 点为圆心,当其达到最大入土深度时向内旋转 $\theta - \theta_1$ 角度完成取土过程,点 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 的运动轨迹组成了孔穴的外形轮廓,孔穴由 $D_1-A_1-O_1-B_1-C_1$ 组成的包络线表



实线部分示成穴器入土阶段;虚线示成穴器的取土阶段。 $O$ 点为成穴器左右鸭嘴的旋转中心; $R$ 为成穴器的旋转半径; $\theta$ 为成穴器的入土角度; $\theta_1$ 为成穴器闭合时其侧壁截面与竖直方向的夹角;点 $D$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $B$ 是当成穴器到达最低位置时,其与土壤接触的最高位置与最低位置在成穴器正视图方向的投影点; $h_1$ 为成穴器的实际入土深度; $H$ 为理论入土深度; $m$ 、 $n$ 分别为轮廓线 $D_1A_1$ 、 $C_1B_1$ 上任意距土壤表面 $h_1(h_1 \leq H)$ 深度的水平直线与孔穴轮廓线的交点; $v$ 为成穴器的入土速度。

图3 成穴器入土和取土阶段的运动轨迹

Fig.3 The penetration and collecting stage movement trajectory of soil opener

示,  $D_1A_1$  与  $C_1B_1$  为入土阶段端点  $A$ 、 $B$  与阻力面  $DA$ 、 $CB$  的运动轨迹,  $A_1O_1$  与  $B_1O_1$  为端点  $A$ 、 $B$  在取土阶段中形成的运动轨迹。

成穴器垂直入土阶段与土壤接触形成的孔穴侧边  $D_1A_1$  与  $C_1B_1$  的参数方程为:

$$y_{D_1A_1} = -\frac{1}{2\tan\theta}(2x+l), \quad -H\tan\theta - \frac{l}{2} \leq x < -\frac{l}{2} \quad (1)$$

$$y_{C_1B_1} = \frac{1}{2\tan\theta}(2x-l), \quad \frac{l}{2} \leq x < H\tan\theta + \frac{l}{2} \quad (2)$$

取土阶段,  $A$ 、 $B$  以  $O$  点为圆心转动至成穴器完全闭合, 孔穴底边  $A_1O_1$  与  $B_1O_1$  的参数方程为:

$$y_{A_1O_1} = -\sqrt{R^2 - x^2} + \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}, \quad -\frac{l}{2} \leq x < 0 \quad (3)$$

$$y_{B_1O_1} = -\sqrt{R^2 - x^2} + \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}, \quad 0 \leq x < -\frac{l}{2} \quad (4)$$

由公式(1)~(4), 分 2 部分描绘出孔穴的轮廓。

由孔穴轮廓参数方程可直接求得曲线上各点的坐标, 通过计算各点的坐标来描述孔穴的形状并将其参数化, 有助于了解影响孔穴尺寸的主要因素。由于成穴器左右鸭嘴关于  $y$  轴对称且垂直入土, 故孔穴在  $h_1$  处的穴底尺寸( $l_{mm}$ )为:

$$l_{mm} = x_n - x_m = 2x_n = 2(H - h_1)\tan\theta + l \quad (5)$$

分析上述参数方程可知,  $l$ 、 $\theta$  和  $H$  是影响孔穴穴口尺寸与穴底尺寸的关键因素; 在其入土、取土过程中, 孔穴的轮廓由  $DA$ 、 $CB$  及特殊点  $A$ 、 $B$  的运动轨迹组成, 形成上端大、下端小的孔穴, 有利于孔型的稳定。

入土过程中, 成穴器对土壤的作用由弹性扰动变为塑性扰动, 即为土壤产生屈服的过程, 此过程成穴器的入土阻力可以用土壤的极限承载力来计算<sup>[19-20]</sup>。根据公式(5)及文献[19]可知,  $l$ 、 $\theta$  与  $H$  是影响成型孔穴外形尺寸及成穴器入土阻力的主要因素, 各因素的作业参数取值范围及最佳参数组合需要通过试验来确定。

### 3 EDEM 仿真分析

#### 3.1 单因素仿真试验

##### 3.1.1 试验设计

根据上述分析, 成穴器  $l$ 、 $\theta$ 、 $H$  是影响孔穴外形尺寸及成穴作业功耗的关键因素。结合油菜移栽农艺要求及相关研究, 为明确各因素工作参数对评价指标的影响, 分别对其进行单因素仿真试验。为

保证仿真分析的准确性, 运用 Pro/E 按 1:1 的比例建立不同工作参数的成穴器三维模型, 另存为 .stp 格式, 导入 EDEM, 仿真试验土壤参数与文献[8]的保持一致。入土阻力( $y_1$ )由 EDEM 的后处理功能得到; 参照文献[8]的方法, 计算穴内截面回土率( $y_2$ )。设定成穴器  $\theta$ 、 $H$  分别为  $17^\circ$ 、 $60$  mm, 根据油菜钵苗钵体外形尺寸要求<sup>[17]</sup>, 设定成穴器  $l$  为  $35$ 、 $40$ 、 $45$ 、 $50$ 、 $55$  mm 等 5 个水平, 以确定较适  $l$ 。设定  $l$ 、 $H$  分别为  $40$ 、 $60$  mm, 为保证钵苗在成型孔穴中的立苗率, 参照前期研究<sup>[8]</sup>成果与文献[21],  $\theta$  设定为  $17^\circ$ 、 $19^\circ$ 、 $21^\circ$ 、 $23^\circ$ 、 $25^\circ$  等 5 个水平, 以确定较适  $\theta$ 。设定  $l$ 、 $\theta$  分别为  $40$  mm、 $19^\circ$ , 根据成穴器外形结构与栽植深度要求<sup>[21]</sup>,  $H$  设定为  $60$ 、 $65$ 、 $70$ 、 $75$ 、 $80$  mm 等 5 个水平, 以确定较适  $H$ 。

##### 3.1.2 试验结果与分析

由表 1 可知, 随着  $l$  的增大, 成穴器入土阻力先缓慢增大, 当  $l$  为  $55$  mm 时又有所降低, 穴内截面回土率在一定的范围内上下波动, 整体变化趋势较稳定; 当  $l$  小于  $40$  mm 时, 入土阻力较小, 但穴内截面回土率较大, 孔穴成型后穴内回土较多; 当底端尺寸增大到  $40$  mm 时, 成穴效果综合性能指标较好, 穴内截面回土率达到最小值  $8.8\%$ , 入土阻力为  $53.7$  N; 随着底端尺寸的继续增大, 成穴器底端面接触的土壤面积增加, 成穴作业时进入成穴器内部的土壤增多, 导致入土阻力缓慢增加, 当底端尺寸增大到  $55$  mm 时, 成穴器外壁与土壤接触面积减小, 入土阻力下降, 穴内截面回土率无明显变化。

表 1 不同底端尺寸和入土角度及入土深度的成穴器的性能指标

Table 1 Performance index of soil opener with different bottom size and angle of entry soil and soil opening depth

$l/\text{mm}$	$y_1/\text{N}$	$y_2/\%$	$\theta/(\circ)$	$y_1/\text{N}$	$y_2/\%$	$H/\text{mm}$	$y_1/\text{N}$	$y_2/\%$
35	46.7	9.3	17	53.7	8.8	60	61.6	7.0
40	53.7	8.8	19	61.6	7.0	65	73.5	7.2
45	57.1	9.6	21	68.3	5.2	70	86.3	8.9
50	58.6	8.9	23	81.6	4.8	75	98.6	11.6
55	57.4	9.2	25	92.8	3.2	80	121.3	13.1

随着  $\theta$  的增大, 入土阻力逐渐增大, 穴内截面回土率逐渐减小; 当  $\theta$  为  $17^\circ$  时, 成穴器侧壁与土壤的接触面积最小, 此时入土阻力为最小值( $53.7$  N), 穴内截面回土率为最大值( $8.8\%$ ); 当  $\theta$  在  $17^\circ \sim 21^\circ$  时,

成穴器入土阻力缓慢增加,但穴内截面回土率逐渐减小,成穴综合性能指标较优;随着 $\theta$ 的继续增大,虽然穴内截面回土率有所下降,但成穴器的入土阻力急剧上升,导致成穴作业的功耗上升。

随着 $H$ 的增大,成穴器入土阻力与穴内截面回土率均呈快速增大趋势;当 $H$ 小于等于65 mm时,成穴器的穴内截面回土率变化较为平缓,分别为7.0%、7.2%;随着 $H$ 的继续增大,由于成穴器的触土面积增加,导致入土阻力增大,且由于成穴器对孔穴穴壁的土壤扰动面积增大,导致穴内截面回土率急剧增大。

### 3.2 多因素优化仿真试验

#### 3.2.1 试验设计

根据单因素仿真试验结果可知, $l$ 、 $\theta$ 、 $H$ 对入土阻力和穴内截面回土率的影响明显。以入土阻力和穴内截面回土率为评价指标,采用响应面法<sup>[22]</sup>开展3因素3水平正交组合优化试验。根据单因素仿真试验结果, $l$ 分别设置为35、40、45 mm, $\theta$ 分别设置为17°、19°、21°, $H$ 分别为60、65、70 mm。参照文献[23–24],运用Design-Expert 8.0.6软件制定二次旋转正交组合试验方案并对多因素试验结果(表2)进行分析,共进行17组成穴作业仿真试验,

表2 多因素优化仿真试验设计及结果

Table 2 Multi-factor optimization simulation test design and results

试验序号	$l/\text{mm}$	$\theta/^\circ$	$H/\text{mm}$	$y_1/\text{N}$	$y_2/\%$
1	45	17	65	68.8	8.9
2	40	19	65	73.5	6.9
3	35	21	65	78.7	7.2
4	45	19	70	88.3	8.4
5	40	21	70	98.2	8.2
6	40	19	65	72.8	7.3
7	35	19	70	76.6	8.6
8	40	21	60	68.9	6.3
9	45	21	65	85.2	6.6
10	40	17	60	58.4	8.8
11	35	19	60	55.0	7.9
12	40	19	65	72.1	6.9
13	40	19	65	74.5	7.1
14	40	17	70	78.3	9.2
15	45	19	60	63.9	8.0
16	35	17	65	61.5	9.0
17	40	19	65	73.1	7.4

每组试验重复3次,取平均值作为试验结果。构建 $y_1$ 、 $y_2$ 与 $l$ 、 $\theta$ 、 $H$ 之间的数学模型,分析交互作用的影响规律。

#### 3.2.2 试验结果与分析

对表2中的数据进行二次多元回归拟合,建立 $y_1$ 与 $l$ 、 $\theta$ 、 $H$ 之间的二次多项式回归模型,剔除影响不显著因素后得到的回归方程如式(6)所示;对试验结果进行方差分析,结果如表3所示。由表3可知,入土阻力模型的 $P<0.0001$ ,说明回归方程模型极显著,具有统计学意义;失拟项不显著( $P=0.1279$ ),表明无失拟因素存在,可用该回归模型代替真实试验对结果进行分析。根据 $F$ 值的大小可知,各因素对入土阻力的影响由大到小依次为 $H$ 、 $\theta$ 、 $l$ 。

$$y_1=73.2+4.3l+8\theta+11.9H+2.35\theta H-2.32l^2+2.68\theta^2 \quad (6)$$

表3 入土阻力方差分析

Table 3 Variance analysis of soil entry resistance

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
模型	1 867.32	9	207.48	126.29	<0.000 1
$l$	147.92	1	147.92	90.04	<0.000 1
$\theta$	512.00	1	512.00	311.65	<0.000 1
$H$	1 132.88	1	1 132.88	689.58	<0.000 1
$l\theta$	0.16	1	0.16	0.097	0.764 1
$lH$	1.96	1	1.96	1.19	0.310 9
$\theta H$	22.09	1	22.09	13.45	0.008 0
$l^2$	22.76	1	22.76	13.85	0.007 4
$\theta^2$	30.13	1	30.13	18.34	0.003 6
$H^2$	0.02	1	0.024	0.014	0.907 8
残差	11.50	7	1.64		
失拟项	8.34	3	2.78	3.52	0.127 9
纯误差	3.16	4	0.79		
总和	1 878.82	16			

对表2中的数据进行二次多元回归拟合,建立 $y_2$ 与 $l$ 、 $\theta$ 、 $H$ 之间的二次多项式回归模型,剔除不显著因素后得到的回归方程如式(7)所示,对试验结果进行方差分析,结果如表4所示。由表4可知,入土阻力模型的 $P=0.0003$ ,说明回归方程模型极显著,具有统计学意义;失拟项不显著( $P=0.2984$ ),表明无失拟因素存在,可用该回归模型代替真实试验对结果进行分析;根据 $F$ 值的大小可知,各因素对穴内截面回土率的影响由大到小依次为 $\theta$ 、 $H$ 、 $l$ 。

$$y_2=7.12-0.95\theta+0.42H+0.38\theta H+0.45l^2+0.35\theta^2+0.65H^2 \quad (7)$$

表 4 穴内截面回土率的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	12.91	9	1.430	21.01	0.000 3
<i>l</i>	0.080	1	0.080	1.17	0.315 0
$\theta$	7.22	1	7.220	105.73	<0.000 1
<i>H</i>	1.44	1	1.440	21.16	0.002 5
<i>l</i> $\theta$	0.063	1	0.063	0.92	0.370 6
<i>lH</i>	0.022	1	0.022	0.33	0.583 9
$\theta H$	0.56	1	0.560	8.24	0.024 0
<i>l</i> <sup>2</sup>	0.86	1	0.860	12.63	0.009 3
$\theta$ <sup>2</sup>	0.52	1	0.520	7.66	0.027 8
<i>H</i> <sup>2</sup>	1.79	1	1.790	26.25	0.001 4
残差	0.48	7	0.068		
失拟项	0.27	3	0.090	1.73	0.298 4
纯误差	0.21	4	0.052		
总和	13.39	16			

### 3.2.3 参数优化

为确保成穴器具有更好的成穴性能,以入土阻力最小、穴内截面回土率最低为优化目标,进行成穴器结构参数与作业参数优化,运用 Design-expert 8.0 中 Optimization 功能进行优化求解,其目标函数与约束条件如下。

$$\begin{cases} \min y_1(l, \theta, H) \\ \min y_2(l, \theta, H) \\ l \in [-1, 1] \\ \theta \in [-1, 1] \\ H \in [-1, 1] \end{cases}$$

根据约束条件,得到优化后的最佳参数组合,*l*、 $\theta$ 、*H* 分别为 38.54 mm、20.48°、60 mm,模型预测的入土阻力为 65.8 N、穴内截面回土率为 6.6%。为了方便参数的调试,对优化后的参数进行圆整,*l*、 $\theta$ 、*H* 分别为 39.0 mm、20.5°、60 mm。该优化参数条件下成穴器仿真试验所成孔穴穴口直径为 80.5 mm,有效深度为 45 mm,满足移栽要求。

## 4 土槽试验

### 4.1 试验条件与材料

将试制参数优化后的成穴器(*l*、 $\theta$ 、*H* 分别为 39.0 mm、20.5°、60 mm)在湖南农业大学工程实训中心数字化土槽中的成穴装置试验台上进行试验。试验土质为黏壤土,仪器设备主要有土槽车、成穴

装置试验台、坚实度测定仪、铝盒、电子秤、万能试验机、孔形测绘器等。

### 4.2 试验方法

设置土槽试验区长 9 m,宽 1.2 m,土槽车前进速度设定为 1.68 km/h。试验前对土槽土壤进行喷淋系统洒水、刮土板刮平、1.2 m 工作幅宽的旋耕机开沟起垄等处理;垄面深度 0~150 mm 内的土壤平均含水率为 19.8%,土壤平均坚实度为 192 kPa,与仿真模型土壤参数基本保持一致。

试验后测定试验区内每个孔穴的穴口直径及有效深度;采用万能试验机测定入土阻力,阻力测定试验中成穴器相关参数与仿真试验优化结果参数一致,小型土槽的长、宽、高分别为 300、250、250 mm,小型土槽内的土壤取自于土槽试验区内,与仿真模型土壤参数保持一致;参照文献[8]的方法,测定穴内截面回土率。试验重复 3 次,结果取平均值。

沿机具前进方向测量穴口端面轮廓线上 2 点最大距离处的尺寸,沿垂直于机具前进方向测量穴口端面轮廓线上 2 点最大距离处的尺寸,取两者的平均值作为单个孔穴的穴口直径(*D*)。试验时测定 9 m 内所有孔穴的穴口直径并取平均值作为此次试验的成型孔穴穴口直径。

沿成型孔穴上端面直至孔穴内部最小端面尺寸等于 35 mm( $\sqrt{2}b$ )时,测量其垂直高度作为有效深度。试验时测定 9 m 内所有孔穴的有效深度并取平均值作为此次试验的孔穴有效深度。

### 4.3 试验结果与分析

试验结果如表 5 所示,所得孔穴穴口直径、有效深度、入土阻力及穴内截面回土率分别为 87.2 mm、43.4 mm、68.9 N、7.2%。土槽试验结果与仿真结果的相对误差分别为 7.7%、3.7%、4.5%、8.3%,表明成穴质量影响因素选择合理,所建的优化模型正确,优化后的成穴器所成孔穴满足油菜钵苗移栽的农艺要求。

表 5 土槽试验结果与仿真值对比

项目	孔穴穴口直径/mm	有效深度/mm	入土阻力/N	穴内截面回土率/%
仿真值	80.5	45.0	65.8	6.6
试验值	87.2	43.4	68.9	7.2
相对误差/%	7.7	3.7	4.5	8.3

## 5 结论

1) 通过对逆向回转式成穴装置成穴器的成穴轨迹及入土过程受力情况进行理论分析, 得到影响孔穴外形尺寸及入土阻力的影响因素为底端尺寸、入土角度及入土深度。以底端尺寸、入土角度及入土深度为变量进行了单因素仿真试验, 得到了影响因素的取值范围。

2) 对成穴器进行了二次旋转正交组合仿真试验, 建立了各因素与评价指标之间的回归模型。仿真试验结果表明: 影响入土阻力的因素主次顺序为入土深度、入土角度、底端尺寸, 影响穴内截面回土率的因素主次顺序为入土角度、入土深度、底端尺寸; 采用响应曲面法对参数进行了优化, 得到成穴器的最优参数组合为底端尺寸 39.0 mm、入土角度 20.5°、入土深度 60 mm; 该参数组合条件下的入土阻力为 65.8 N, 穴内截面回土率为 6.6%。

3) 通过土槽试验可得, 孔穴穴口直径、有效深度、入土阻力、穴内截面回土率的土槽试验结果与仿真值的相对误差分别为 7.7%、3.7%、4.5%、8.3%, 土槽试验结果与仿真优化结果基本一致。

### 参考文献:

[1] 官春云. 中国油菜产业发展方向[J]. 粮食科技与经济, 2011, 36(2): 5-6.

[2] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53.

[3] 官春云, 陈社员, 吴明亮. 南方双季稻区冬油菜早熟品种选育和机械栽培研究进展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(2): 4-10.

[4] 向伟. 油菜移栽机栽植孔成型机构试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.

[5] TIAN S B, QIU L C, KONDO N, et al. Development of automatic transplanter for plug seedling[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 79-82.

[6] DIHINGIA P C, PRASANNA KUMAR G V, SARMA P K. Development of a hopper-type planting device for a walk-behind hand-tractor-powered vegetable transplanter[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2016, 41(1): 21-33.

[7] NANDEDE B M, RAHEMAN H. Multi-stage metering mechanism for transplanting of vegetable seedlings in paper pots[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series A, 2015, 96(4): 295-300.

[8] 全伟, 吴明亮, 罗海峰, 等. 油菜钵苗移栽机成穴作

业方式及参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 13-21.

[9] 韩长杰, 徐阳, 尤佳, 等. 半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机成穴器参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 48-56.

[10] 向伟, 吴明亮, 官春云, 等. 履带式油菜苗移栽栽植孔成型机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 12-18.

[11] 向伟, 吴明亮, 官春云, 等. 油菜钵体苗移栽栽植孔成型机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 40-48.

[12] 张翼夫, 李洪文, 胡红, 等. 盐碱地后悬挂随动式打孔通气机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 42-49.

[13] 刘宏新, 王盼, 改广伟, 等. 基于五杆机构的注射式免耕播种成穴轨迹分析与参数求解[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 21-29.

[14] 孙伟, 刘小龙, 王虎存, 等. 双曲柄多杆式马铃薯膜上打孔种植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 34-42.

[15] 周脉乐, 薛向磊, 钱孟波, 等. 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 77-83.

[16] 于英杰, 秦伟, 赖庆辉, 等. 花椰菜钵苗移栽机栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 102-112.

[17] 吴明亮, 颜波, 冯世杰, 等. 钵体苗活动苗盘的结构设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(6): 666-671.

[18] 全伟, 吴明亮, 官春云, 等. 油菜钵苗移栽机成穴器外形优化试验研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 97-106.

[19] 胡红. 玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[20] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[21] 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.

[22] 马晓晓, 李华, 曹卫彬, 等. 番茄钵苗移栽机自动取苗装置作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 46-55.

[23] 沈成, 李显旺, 张彬, 等. 苕麻茎秆台架切割试验与分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 68-76.

[24] 王磊, 张宏文, 刘巧. 胶棒滚筒棉花采摘头采收性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 35-41.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正