

蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化

王永维 唐燕海 王 俊 程绍明

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为了获取高速状态下蔬菜钵苗移栽机吊杯式栽植器的最佳工作参数,设计了移栽参数可调的栽植器试验台,并进行了钵苗移栽土槽试验。采用二次正交旋转中心组合设计法,以移栽速度、特征参数和吊杯倾角为影响因子,以直立度合格率、株距变异系数和栽植深度合格率为响应值,利用 SAS 9.1 软件进行回归分析和响应曲面分析,探究单因子及交互因子对响应值的影响效应,并结合非线性优化计算方法,对栽植器的结构参数和工作参数进行优化计算。结果表明:在满足栽植频率大于 90 株/min 的高速移栽状态下,各因子对直立度合格率的影响贡献由大到小为吊杯倾角、特征参数、移栽速度;对株距变异系数的影响贡献由大到小为移栽速度、特征参数、吊杯倾角;对栽植深度合格率的影响贡献由大到小为移栽速度、吊杯倾角、特征参数。优化所得栽植器最佳参数条件:移栽速度为 0.47 m/s、特征参数为 1.18、吊杯倾角为 87°,此时理论最优值为直立度合格率 98.01%、株距变异系数 5.93%、栽植深度合格率 89.25%,优化后验证试验表明直立度合格率为 96.6%,株距变异系数为 6.1%,栽植深度合格率为 87.8%,试验结果与理论结果一致,所建立的回归模型合理;优化后直立度合格率、栽植深度合格率较优化前分别提高 5.8、3.6 个百分点,也高于国家和行业标准规定的指标值。

关键词: 蔬菜钵苗; 高速移栽机; 吊杯式栽植器; 参数优化

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0091-10

Parameter Optimization for Dibble-type Planting Apparatus of Vegetable Pot Seedling Transplanter in High-speed Condition

Wang Yongwei Tang Yanhai Wang Jun Cheng Shaoming

(School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to obtain the optimum operating parameters for the dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter in high-speed condition, a test-bed with adjusted parameters was designed and a soil trough experiment was conducted for seedling transplanting. A central composite design method of second order regression orthogonal rotation was carried out with transplanting speed, characteristic parameter and oblique angle of dibble as experimental factors and with qualification ratio of perpendicularity, variation coefficient of planting spacing and qualification ratio of planting depth as response values. By using SAS 9.1 regression analysis method and response surface method, both single factor and interactive factor on response values were analyzed. Combined with nonlinear optimization calculation method, the structural parameters and working parameters were calculated optimally. The results obtained in the condition of high transplanting speed (90 seedlings per minute) indicated that, in terms of significant degree, the influence factors of qualification ratio of perpendicularity were oblique angle of dibble, characteristic parameter and transplanting speed; the influence factors of variation coefficient of planting spacing were transplanting speed, characteristic parameter and oblique angle of dibble; the influence factors of qualification ratio of planting depth were transplanting speed, oblique angle of dibble and characteristic parameter. The optimum parameter condition of the dibble-type planting

收稿日期: 2015-06-03 修回日期: 2015-06-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA10A504)

作者简介: 王永维(1975—),男,副教授,博士,主要从事种植机械研究,E-mail: wywzju@zju.edu.cn

通信作者: 王俊(1965—),男,教授,博士,主要从事农业机械和农产品品质检测与加工研究,E-mail: jwang@zju.edu.cn

apparatus after optimizing was 0.47 m/s of transplanting speed, 1.18 of characteristic parameter and 87° of oblique angle of dibble. At this time, qualification ratio of perpendicularity achieved theoretical optimum value of 98.01%, variation coefficient of planting spacing was 5.93%, and qualification ratio of planting depth was 89.25%. Through verification by an experiment in optimum condition, the experimental value of qualification ratio of perpendicularity was 96.6%, variation coefficient of planting spacing was 6.1%, and qualification ratio of planting depth was 87.8%, which indicated that the experimental results and predicted results were consistent, and regression models established by the experiment were appropriate. According to comparison of transplanting performance before and after parameter optimization, qualification ratio of perpendicularity and qualification ratio of planting depth increased by 5.8 percent and 3.6 percent respectively, and transplanting performance was superior to the technique indexes of national and industry standards as well.

Key words: vegetable pot seedling; high-speed transplanter; dibble-type planting apparatus; parameter optimization

引言

我国是世界上最大的蔬菜生产国,蔬菜的种植方式主要包括直播和育苗移栽两种,近年来由于育苗技术的发展和基质育苗的优越性,育苗移栽已经成为蔬菜的主要栽培模式^[1-3]。

蔬菜移栽机按照栽植器型式的不同分为钳夹式、链夹式、挠性圆盘式、导苗管式以及吊杯式等,其中吊杯式栽植器由于对柔嫩秧苗、大钵秧苗及钵体易碎秧苗的适应性强,获得了广泛的应用^[4-9]。宋洪波等^[10]建立了偏心吊杯式栽植器的运动方程,确定了较合理的机构参数和栽植器运动参数;封俊等^[11]分析了吊杯的运动轨迹,引入并证实了特征参数 λ 大于 1 是吊杯式栽植器设计的基本依据和满足移栽直立度要求必要条件;王文明等^[12]针对 2ZT-2 型圆盘吊杯式移栽机进行了研究,得出适合甜菜产区的移栽机最佳特征参数值和鸭嘴开启运动规律的匹配关系;张祖立等^[13]确定了钵苗在落苗过程中的速度方程,并对样机的主要性能指标进行了试验。但上述移栽机均为半自动型,受人工投苗速度限制,一般是单行栽植频率 30~40 株/min 的常规移栽,对吊杯式栽植器运动过程的分析 and 基于零速投苗原理优化和栽植性能改善等方面的研究也在低速移栽条件下进行,缺乏综合栽植器结构参数、工作参数对栽植性能的试验优化,因而无法为单行栽植频率大于 90 株/min 的蔬菜钵苗高速自动移栽提供最佳的结构与运行参数。为了满足自动取苗、植苗高速移栽的要求,提高机械化移栽质量,本文建立参数可调的栽植器试验台,通过番茄钵苗移栽土槽试验,研究高速移栽条件下移栽速度、特征参数和吊杯倾角对栽植器移栽性能的影响规律,获取栽植器最佳栽植参数,为蔬菜

高速移栽机设计与工作提供借鉴。

1 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器试验台

蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器试验台由机架、地轮、变频控制箱、调速电动机、吊杯式栽植器和土槽等组成,如图 1 所示。机架、地轮、地轮轴、驱动轴等组成行走底盘,调速电动机、吊杯式栽植器安装在机架上,调速电动机与驱动轴通过链传动连接并驱动行走底盘,变频控制箱控制调速电动机以调节试验台的行进速度即移栽速度;吊杯式栽植器的主轴设有不同齿数的链轮,通过驱动轴上的链轮与主轴设有不同齿数的链轮构成链传动改变吊杯式栽植器吊杯在植苗位置旋转线速度,以实现在吊杯旋转线速度与试验台行走速度配比下进行栽植试验;吊杯倾角可通过调节手板来调整;土槽内盛放基质并置于试验台下方。移栽作业时,调节好试验台参数,当吊杯旋转至栽植器上部投苗位置时人工投入钵苗,吊杯继续旋转至土槽上方栽植位置时打开,钵苗被栽植入土,完成一次钵苗栽植土槽试验。

吊杯式栽植器由主轴、连杆、吊杯、偏心盘、轨道、转动盘和凸轮等组成,如图 2 所示。偏心盘圆心 O_1 与转动盘圆心 O_2 水平距离为偏心距 D ,连杆左右铰接点水平距离为 L ,当偏心距 $D=L$ 时,栽植器转动时吊杯在偏心盘、连杆和转动盘的共同作用下始终保持水平平动,保证直立度要求。工作时,通过链条将动力传递给主轴,主轴带动转动盘转动,偏心盘沿轨道与转动盘同步转动,并同时带动吊杯转动,当吊杯运动到上方投苗位置时投入钵苗,钵苗随吊杯继续运动,当运动到底部栽植位置时吊杯在凸轮的作用下被打开,钵苗落入吊杯开好的孔里,完成一次栽植作业过程。

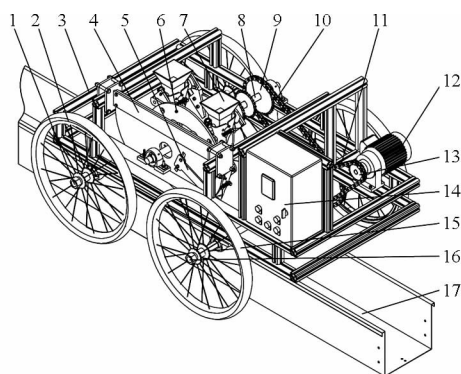


图1 蔬菜移栽机吊杯式栽植器试验台结构简图

Fig. 1 Test-bed for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter

1. 地轮轴 2. 地轮 3. 机架 4. 联接筋 5. 调节手板 6. 栽植器 7. 吊杯 8. 主轴 9、13. 链轮 10、11. 链条 12. 调速电动机 14. 变频控制箱 15. 驱动地轮 16. 驱动轴 17. 土槽

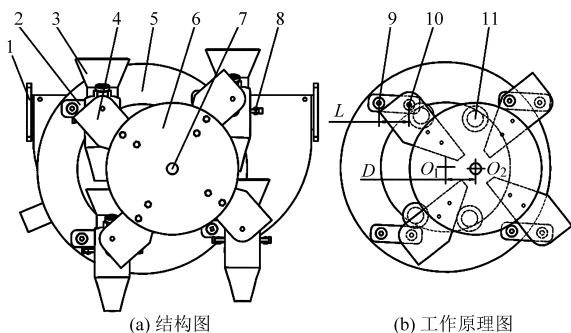


图2 吊杯式栽植器结构与工作原理图

Fig. 2 Sketch and operating principle of dibble-type planting apparatus

1. 联接筋 2. 连杆 3. 吊杯 4. 凸轮 5. 偏心盘 6. 转动盘 7. 主轴 8. 弹簧 9. 偏心盘铰链 10. 转动盘铰链 11. 轨道

2 试验方案

2.1 试验材料

试验钵苗为浙杂809番茄苗,采用128孔标准穴盘温室育苗,苗龄35 d,秧苗长势良好,平均苗高142 mm,平均茎粗3.86 mm。

2.2 试验设计

影响移栽机栽植质量的因素有移栽速度、吊杯旋转速度、钵苗质量、定植田地等,其中钵苗定植瞬间线速度的水平分速度与移栽机前进速度的比值(即特征参数)是影响栽植质量的主要因素之一,故在单因子预试验基础上选择移栽速度、特征参数、吊杯倾角为试验因素;移栽机的性能指标包括栽植均匀度、栽植状态、栽植生产率、移栽机适应性和移栽自动化等^[14],其中栽植均匀度和栽植状态是判定移栽机性能优劣的主要指标,故以直立度合格率、株距变异系数和栽植深度合格率为试验指标,采用三因子五水平二次正交旋转组合设计方法安排试验。

目前,受人工送苗限制,移栽频率通常为30~40株/min,为了探究高速状态下移栽机的栽植性能,试验设置移栽频率大于90株/min,番茄钵苗栽植株距定为200~400 mm。因吊杯式栽植器的优化需遵循零速投苗原理^[15],且应保证特征参数 λ 大于1^[11],根据相关文献^[16-19]及预试验结果,选取试验因素编码零水平移栽速度为0.47 m/s,特征参数为1.3,吊杯倾角为90°,并确定试验因素水平编码如表1所示。

表1 试验因素水平编码

Tab. 1 Coding of levels and factors

编码值	因素		
	移栽速度/(m·s ⁻¹)	特征参数	吊杯倾角/(°)
-1.682	0.40	0.96	82
-1	0.43	1.10	85
0	0.47	1.30	90
1	0.51	1.50	95
1.682	0.54	1.64	98

2.3 试验指标测定

2.3.1 直立度合格率测定

直立度合格率指秧苗栽植后的直立状态,为秧苗主茎与地面夹角不小于30°的秧苗占秧苗移栽的实测株数的百分比,不含漏栽、埋苗、伤苗和倒伏的株数^[20-21]。直立度合格率测定参照NY/T 1924—2010《油菜移栽机质量评价技术规范》,同时根据番茄钵苗移栽农艺要求,设钵苗主茎与地面的夹角为 ϕ ,当 $\phi \in [80^\circ, 90^\circ]$ 为优秀, $\phi \in [70^\circ, 80^\circ]$ 为良好, $\phi \in [55^\circ, 70^\circ]$ 为合格, $\phi < 55^\circ$ 为不合格。试验采用万能角度尺(精度:1°)测量移栽后番茄钵苗主茎与地面的夹角,并计算直立度合格率

$$T = \frac{N_{ZL}}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中 T ——直立度合格率,%

N_{ZL} ——直立株数,株

N ——测定的总株数,株

2.3.2 株距变异系数测定

株距变异系数定义为:在一定的栽植区间内所测得的实际株距的标准离差与平均值的百分比。株距变异系数是对移栽机纵向栽植均匀度的评价,体现移栽机械对钵苗栽植的均匀程度。参照JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》,用卷尺和直尺测量各试验组株距,并计算株距变异系数

$$C_x = \frac{S_x}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

其中

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

式中 C_x ——株距变异系数, %

\bar{X} ——株距平均值, cm

S_x ——株距标准差, cm

n ——实测株距数, 株

X_i ——实测株距, cm

2.3.3 栽植深度合格率测定

栽植深度合格率定义为: 在一定的栽植区间内所测栽植深度合格的秧苗数与总株数的百分比, 它影响秧苗的缓苗和根系的再生^[22-23]。参照 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》, 试验测量的栽植深度为从秧苗与覆土表面交点到秧苗根部的垂直距离, 栽植深度在理论深度的 $-1 \sim 2$ cm 范围内为合格, 栽植深度合格率计算公式为

$$H = \frac{N_h}{N} \times 100\% \quad (5)$$

式中 H ——栽植深度合格率, %

N_h ——栽植深度合格的总株数, 株

2.4 数据处理

采用 SAS 9.1 分析软件对试验数据进行分析处理。以栽植器性能评价指标(直立度合格率、株距变异系数和栽植深度合格率)为响应值, 考察移栽速度、特征参数和吊杯倾角 3 个因素(自变量)对响应值的影响效应, 响应值与自变量的关系用二次多项式回归模型表示为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (6)$$

式中 Y ——试验响应值

X_1, X_2, X_3 ——自变量编码值

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ 为预测模型的回归系数。

通过 t 检验对回归模型各因素影响的显著性进行检验, 并删除无统计学显著意义的参数。回归模型的充分性用决定系数(R^2)和失拟检验表示。根据建立的栽植器响应值(直立度合格率、株距变异系数和栽植深度合格率)与自变量(移栽速度、特征参数和吊杯倾角)编码值关系的有效回归方程, 采用非线性优化计算方法, 结合 Matlab 软件优化工具箱, 对试验高速状态下栽植器的结构参数和工作参数进行优化计算, 获得符合钵苗移栽农艺要求的最佳参数组合。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果回归分析

试验于 2015 年 2 月 5—6 日在浙江大学进行, 试验实施方案及结果如表 2 所示。根据表 2 的试验结果, 采用 SAS 9.1 软件进行统计分析, 结果如表 3 所示。

根据直立度合格率 Y_1 统计分析可知, 在 $p < 0.05$ 水平上 $X_1, X_2, X_3, X_1 X_3, X_1^2, X_2^2$ 和 X_3^2 的系数显著, 其余不显著。总模型的 p 值和决定系数(R^2)分别为 0.000 1 和 0.960 5, 而失拟项的 p 值为 0.67, 说明回归模型极其显著且具有很高的拟合精度, 失拟不显著, 回归有效。同理, 对于株距变异系数 Y_2 和栽植深度合格率 Y_3 统计分析可知, 总模型的 p 值分别为 0.000 5 和 0.000 1, 失拟项的 p 值分别为 0.44 和 0.16, 回归模型都呈显著, 失拟均不显著, 且模型的决定系数分别为 0.846 6 和 0.913 4, 回归模型拟合精度高。将不显著项删除后得到各响应值回归方程如表 4。

3.2 单因子对响应值的影响效应分析

采用降维方法分析单因子对响应值的影响效应, 根据响应值的回归方程, 将其他因子固定在零水平, 采用单因子效应方程描述该因子对响应值的影响, 单因子效应曲线如图 3。

3.2.1 单因子对直立度合格率影响效应分析

由图 3a 知, 直立度合格率与移栽速度、特征参数、吊杯倾角的关系均为上凸曲线, 其极值点分别在编码值为 $-0.37, -0.59$ 和 -0.63 处。当各因子编码值分别小于其极值点处编码值时, 因子对直立度合格率的影响呈正效应; 当各因子编码值分别大于其极值点处编码值时, 因子对直立度合格率的影响呈负效应。移栽速度编码值为 -0.37 , 实际对应的移栽速度为 0.46 m/s, 此时直立度合格率最大为 89.44% ; 特征参数编码值为 -0.59 , 实际对应的特征参数为 1.18 , 此时直立度合格率最大为 91.14% ; 吊杯倾角编码值为 -0.63 , 实际对应吊杯倾角为 86.8° , 此时直立度合格率最大为 95.47% 。

3.2.2 单因子对株距变异系数的影响效应分析

由图 3b 知, 株距变异系数与移栽速度、特征参数两个因子的关系均为下凹曲线, 其极值点分别在编码值为 $-0.33, -0.51$ 处, 而吊杯倾角对株距变异系数的影响不显著。当各因子编码值分别小于其极值点处编码值时, 因子对株距变异系数的影响呈负效应; 当各因子编码值分别大于其极值点处编码值时, 因子对直立度合格率的影响呈正效应。移栽速度编码值为 -0.33 , 实际对应的移栽速度为

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Experiment scheme and test results

编号	X_1	X_2	X_3	直立度合格率 $Y_1/\%$	株距变异系数 $Y_2/\%$	栽植深度合格率 $Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	87.4	9.2	79.8
2	-1	-1	1	76.5	7.8	70.6
3	-1	1	-1	68.8	10.6	68.5
4	-1	1	1	55.2	8.9	63.6
5	1	-1	-1	85.2	10.5	76.2
6	1	-1	1	58.6	9.7	51.2
7	1	1	-1	76.4	10.8	70.8
8	1	1	1	42.6	12.7	42.2
9	-1.682	0	0	86.5	8.6	77.5
10	1.682	0	0	68.8	15.8	50.8
11	0	-1.682	0	87.6	6.6	75.6
12	0	1.682	0	58.2	11.6	60.2
13	0	0	-1.682	89.6	9.2	75.6
14	0	0	1.682	42.6	10.9	70.2
15	0	0	0	94.6	4.5	85.6
16	0	0	0	96.5	5.3	82.6
17	0	0	0	85.5	4.9	90.6
18	0	0	0	95.5	8.5	92.6
19	0	0	0	86.2	7.2	80.5
20	0	0	0	93.5	6.5	87.2
21	0	0	0	86.6	4.6	94.2
22	0	0	0	96.8	6.7	84.5
23	0	0	0	89.4	4.2	90.4

表 3 试验统计分析结果
Tab.3 Results of statistical analysis for experiment

系数	直立度合格率 Y_1		株距变异系数 Y_2		栽植深度合格率 Y_3	
	系数值	F 值	系数值	F 值	系数值	F 值
β_0	91.67		5.84		87.62	
β_1	-4.02	11.61 **	1.41	12.26 **	-6.37	19.32 **
β_2	-8.36	50.23 **	1.04	6.64 *	-4.29	8.76 *
β_3	-12.00	103.62 **	0.06	0.02	-5.62	15.05 **
β_{12}	1.89	1.500	0.10	0.04	0.49	0.80
β_{13}	-4.49	8.48 *	0.525	0.99	-4.94	6.80 *
β_{23}	-1.24	0.64	0.30	0.32	0.09	0.96
β_{11}	-5.40	24.36 **	2.11	31.75 **	-8.65	41.48 **
β_{22}	-7.08	41.89 **	1.01	7.32 *	-7.33	29.74 **
β_{33}	-9.48	75.19 **	1.35	12.98 **	-5.56	17.12 **
模型 p 值	0.000 1 **		0.000 5 **		0.000 1 **	
失拟 p 值	0.67		0.44		0.16	
R^2	0.960 5		0.846 6		0.913 4	

注: * 表示差异显著 ($p < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$)。

表 4 响应值回归方程
Tab.4 Regression equations of response value

响应值	回归方程
直立度合格率 Y_1	$Y_1 = 91.67 - 4.02X_1 - 8.36X_2 - 12X_3 - 4.49X_1X_3 - 5.40X_1^2 - 7.08X_2^2 - 9.48X_3^2$
株距变异系数 Y_2	$Y_2 = 5.84 + 1.41X_1 + 1.04X_2 + 2.11X_1^2 + 1.01X_2^2 + 1.35X_3^2$
栽植深度合格率 Y_3	$Y_3 = 87.62 - 6.37X_1 - 4.29X_2 - 5.62X_3 - 4.94X_1X_3 - 8.65X_1^2 - 7.33X_2^2 - 5.56X_3^2$

0.46 m/s,此时株距变异系数最低为5.60%;特征参数编码值为-0.51,实际对应的特征参数为1.20,此时株距变异系数最低为5.57%。

3.2.3 单因子对栽植深度合格率影响效应分析

由图3c知,栽植深度合格率与移栽速度、特征参数、吊杯倾角的关系均为上凸曲线,其极值点分别在编码值为-0.37、-0.29和-0.51处。当各因子编码值分别小于其极值点处编码值时,因子对栽植

深度合格率的影响呈正效应;当各因子编码值分别大于其极值点处编码值时,因子对栽植深度合格率的影响呈负效应。移栽速度编码值为-0.37,实际对应的移栽速度为0.46 m/s,此时栽植深度合格率最大为88.79%;特征参数编码值为-0.29,实际对应的特征参数为1.24,此时栽植深度合格率最大为88.25%;吊杯倾角编码值为-0.51,实际对应的吊杯倾角为87.4°,此时直立度合格率为89.04%。

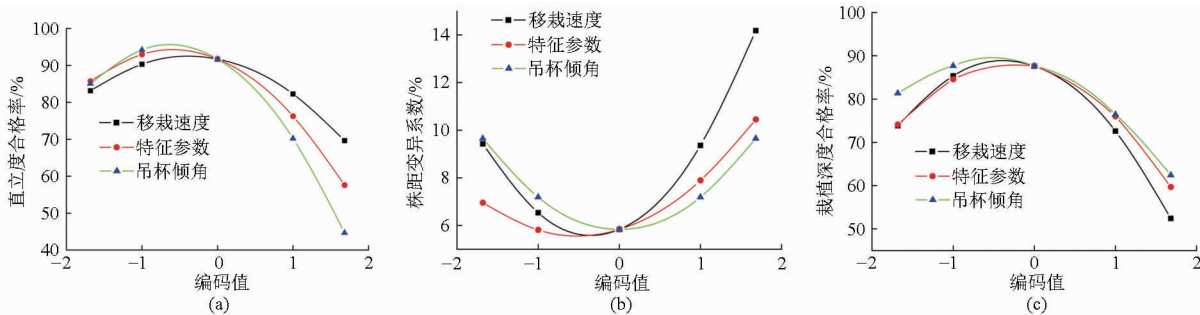


图3 单因子效应曲线
Fig.3 Curves of single factor effect

3.3 交互因子对响应值的影响效应分析

移栽速度、特征参数和吊杯倾角任意两因子作为交互因子对直立度合格率、株距变异系数、栽植深度合格率的响应曲面及等高线图分别如图4~6所示。

3.3.1 交互因子对直立度合格率影响效应分析

由图4a知,在吊杯倾角为90°时,随着移栽速度和特征参数的增大,直立度合格率先增大后减小。当移栽速度编码值在-1.682~0.5(移栽速度为0.40~0.49 m/s)、特征参数编码值在-1.682~0.5(特征参数为0.96~1.4)范围内时,直立度合格率有较大值,移栽速度和特征参数对直立度合格率的影响无交互作用。等高线图表明,直立度合格率沿特征参数方向的变化速率较移栽速度方向的变化速

率高,即栽植器工作时特征参数对直立度合格率的影响大于移栽速度对直立度合格率的影响。

由图4b知,在特征参数为1.3时,随着移栽速度和吊杯倾角的增大,直立度合格率先增大后减小。当移栽速度编码值在-1~1(移栽速度为0.43~0.51 m/s)、吊杯倾角编码值在-1.682~0.5(吊杯倾角为82°~92.5°)范围内时,直立度合格率有较大值,移栽速度和吊杯倾角对直立度合格率的影响存在明显交互作用。等高线图表明,直立度合格率沿吊杯倾角方向的变化速率较移栽速度方向的变化速率高,即栽植器工作时吊杯倾角对直立度合格率的影响大于移栽速度对直立度合格率的影响。

由图4c知,在移栽速度为0.47 m/s时,随着特

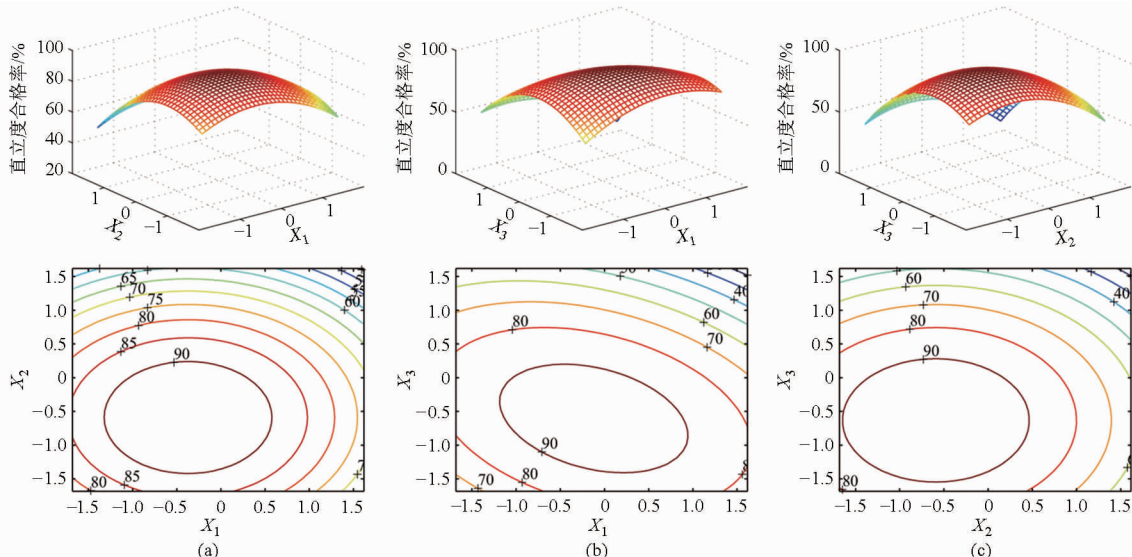


图4 交互因子对直立度合格率的影响

Fig.4 Effects of interactive factors on qualification ratio of perpendicularity

征参数和吊杯倾角的增大,直立度合格率先增大后减小。当特征参数编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (特征参数为 $0.96 \sim 1.4$)、吊杯倾角编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (吊杯倾角为 $82^\circ \sim 92.5^\circ$) 范围内时,直立度合格率有较大值,特征参数和吊杯倾角对直立度合格率的影响无交互作用。等高线图表明,直立度合格率沿吊杯倾角方向的变化速率较特征参数方向的变化速率高,即栽植器工作时吊杯倾角对株距变异系数的影响大于特征参数对株距变异系数的影响。

另外由表 3 可知,移栽速度、特征参数和吊杯倾角的 F 值分别为 11.61、50.23 和 103.62,结合响应曲面及等高线图的分析,各因素对于直立度合格率影响的贡献率从高到低依次为吊杯倾角、特征参数、移栽速度。

3.3.2 交互因子对株距变异系数影响分析

由图 5a 知,在吊杯倾角为 90° 时,随着移栽速度和特征参数的增大,株距变异系数先减小后增大。当移栽速度编码值在 $-1 \sim 0.5$ (移栽速度为 $0.43 \sim 0.49$ m/s)、特征参数编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (特征参数为 $0.96 \sim 1.4$) 范围内时,株距变异系数有较小值,移栽速度和特征参数对株距变异系数的影响无交互作用。等高线图表明,株距变异系数沿移栽速度方向的变化速率较特征参数方向的变化速率高,

即栽植器工作时移栽速度对株距变异系数的影响大于特征参数对株距变异系数的影响。

由图 5b 知,在特征参数为 1.3 时,随着移栽速度和吊杯倾角的增大,株距变异系数先减小后增大。当移栽速度编码值在 $-1 \sim 0.5$ (移栽速度为 $0.43 \sim 0.49$ m/s)、吊杯倾角编码值在 $-0.5 \sim 0.5$ (吊杯倾角为 $87.5^\circ \sim 92.5^\circ$) 范围内时,株距变异系数有较小值,移栽速度和吊杯倾角对株距变异系数的影响无交互作用。等高线图表明,株距变异系数沿移栽速度方向的变化速率较吊杯倾角方向的变化速率高,即栽植器工作时移栽速度对株距变异系数的影响大于吊杯倾角对株距变异系数的影响。

由图 5c 知,在移栽速度为 0.47 m/s 时,随着特征参数和吊杯倾角的增大,株距变异系数先减小后增大。当特征参数编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (特征参数为 $0.96 \sim 1.4$)、吊杯倾角编码值在 $-0.5 \sim 0.5$ (吊杯倾角为 $87.5^\circ \sim 92.5^\circ$) 范围内时,株距变异系数有较小值,特征参数和吊杯倾角对株距变异系数的影响无交互作用。等高线图表明,株距变异系数沿特征参数方向的变化速率较吊杯倾角方向的变化速率高,即栽植器工作时特征参数对株距变异系数的影响大于吊杯倾角对株距变异系数的影响。

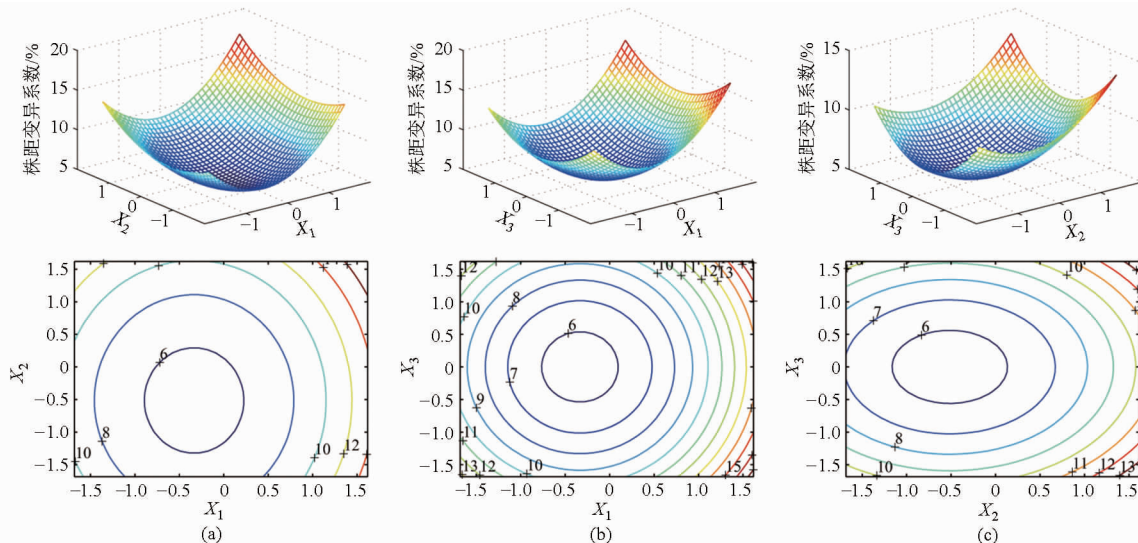


图5 交互因子对株距变异系数的影响

Fig. 5 Effects of interactive factors on variation coefficient of planting spacing

另外由表 3 可知,移栽速度、特征参数和吊杯倾角的 F 值分别为 12.26、6.64 和 0.02,结合响应曲面及等高线图的分析,各因素对于株距变异系数影响的贡献率从高到低依次为移栽速度、特征参数、吊杯倾角。

3.3.3 交互因子对栽植深度合格率影响分析

由图 6a 知,在吊杯倾角为 90° 时,随着移栽速度和特征参数的增大,栽植深度合格率先增大后减小。

当移栽速度编码值在 $-1.682 \sim 1$ (移栽速度为 $0.40 \sim 0.51$ m/s)、特征参数编码值在 $-1.682 \sim 1$ (特征参数为 $0.96 \sim 1.5$) 范围内时,栽植深度合格率有较大值,移栽速度和特征参数对栽植深度合格率的影响无交互作用。等高线图表明,栽植深度合格率沿移栽速度方向的变化速率较特征参数方向的变化速率高,即栽植器工作时移栽速度对株距变异系数的影响大于特征参数对栽植深度合格率的影响。

由图 6b 知,在特征参数为 1.3 时,随着移栽速度和吊杯倾角的增大,栽植深度合格率先增大后减小。当移栽速度编码值在 $-1.682 \sim 1$ (移栽速度为 $0.40 \sim 0.51$ m/s)、吊杯倾角编码值在 $-1.682 \sim 1$ (吊杯倾角为 $82^\circ \sim 95^\circ$) 范围内时,栽植深度合格率有较大值,移栽速度和吊杯倾角对栽植深度合格率的影响存在明显交互作用。等高线图表明,直立度合格率沿移栽速度方向的变化速率较吊杯倾角方向的变化速率高,即栽植器工作时移栽速度对栽植深度合格率的影响大于吊杯倾角对栽植深度合格率的影响。

由图 6c 知,在移栽速度为 0.47 m/s 时,随着特征参数和吊杯倾角的增大,栽植深度合格率先增大后减小。当特征参数编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (特征参数为 $0.96 \sim 1.4$)、吊杯倾角编码值在 $-1.682 \sim 0.5$ (吊杯倾角为 $82^\circ \sim 92.5^\circ$) 范围内时,栽植深度合格率有较大值,特征参数和吊杯倾角对栽植深度合格率的影响无交互作用。等高线图表明,栽植深度合格率沿吊杯倾角方向的变化速率较特征参数方向的变化速率高,即栽植器工作时吊杯倾角对栽植深度合格率的影响大于特征参数对栽植深度合格率的影响。

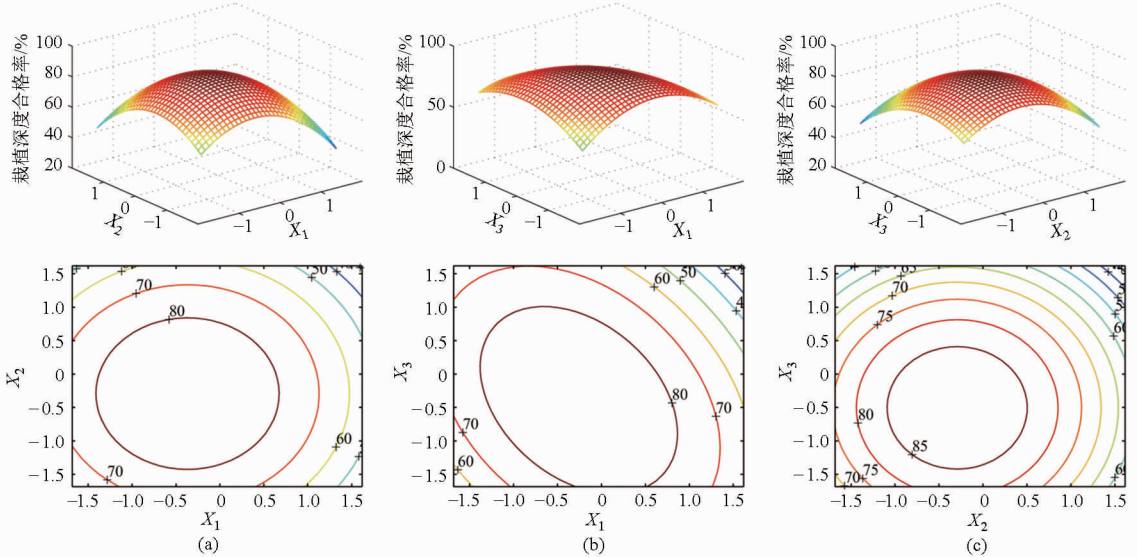


图 6 交互因子对栽植深度合格率的影响

Fig. 6 Effects of interactive factors on qualification ratio of planting depth

另外由表 3 知,移栽速度、特征参数和吊杯倾角的 F 值分别为 19.32、8.76 和 15.05,各因素对于栽植深度合格率影响的贡献率从高到低依次为移栽速度、吊杯倾角、特征参数。

4 栽植器参数优化与试验验证

4.1 栽植器参数优化

JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》规定的高速移栽机性能指标要求为:株距变异系数不高于 15%,且栽植深度合格率不低于 75%。在此约束条件下,对栽植器栽植后直立度合格率最大值进行求解,建立目标函数

$$f = \min(-Y_1) = -(91.67 - 4.02X_1 - 8.36X_2 - 12X_3 - 4.49X_1X_3 - 5.4X_1^2 - 7.08X_2^2 - 9.48X_3^2) \quad (7)$$

约束条件

$$\begin{cases} X_1, X_2, X_3 \in [-1.682, 1.682] \\ Y_2 \in [0, 15] \\ Y_3 \in [75, 100] \end{cases}$$

利用 Matlab 软件进行优化计算,得到高速状态下栽植器作业过程中最佳结构参数和工作参数。栽植器参数优化结果为: $X_1 = -0.12$, $X_2 = -0.59$, $X_3 = -0.60$,即栽植器移栽速度为 0.47 m/s,特征参数为 1.18,吊杯倾角为 87° ,此时理论上直立度合格率最优为 98.01%,株距变异系数为 5.93%,栽植深度合格率为 89.25%。

4.2 试验验证

为了验证优化后的最佳参数与优化效果,分别对优化后移栽速度 0.47 m/s、特征参数 1.18、吊杯倾角 87° 和优化前移栽速度 0.47 m/s、特征参数 1.3、吊杯倾角 90° 两种不同试验参数条件下按上述方法进行试验,测定相关性能指标。试验过程如图 7,试验结果如表 5。

由表 5 可知,优化后试验结果与理论结果一致,其指标值优于 NY/T 1924—2010《油菜移栽机质量评价技术规范》、JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》所设定的指标值,因此,所建立的回归模型是适合的。同时对比优化前后的数据可知,优化后直立度合格率和栽植深度合格率均有较大幅度提高,分



图 7 栽植器试验台土槽验证试验

Fig. 7 Validating experiment with soil trough for test-bed of planting apparatus

表 5 参数优化前后栽植性能对比

Tab. 5 Comparison of transplanting performance before and after parameter optimization

性能 试验	直立度合格率 $Y_1/\%$	株距变异系数 $Y_2/\%$	栽植深度合格率 $Y_3/\%$
优化前	90.8	6.9	84.2
优化后	96.6	6.1	87.8

别提高 5.8、3.6 个百分点,株距更加均匀,变异系数较优化前下降 0.8 个百分点,优化后的栽植性能满足高速移栽机移栽性能要求。

5 结论

(1) 在满足栽植频率大于 90 株/min 的高速移栽状态下,各因子对直立度合格率的影响贡献由大

到小为吊杯倾角、特征参数、移栽速度;对株距变异系数的影响贡献由大到小为移栽速度、特征参数、吊杯倾角;对栽植深度合格率的影响贡献由大到小为移栽速度、吊杯倾角、特征参数。

(2) 直立度合格率与移栽速度、特征参数、吊杯倾角的关系均为上凸曲线,当移栽速度为 0.46 m/s,特征参数为 1.18,吊杯倾角为 86.8°,直立度合格率分别取得最大值;株距变异系数与移栽速度、特征参数两个因子的关系均为下凹曲线,吊杯倾角对株距变异系数的影响不显著,当移栽速度为 0.46 m/s,特征参数为 1.20,株距变异系数分别取得最小值;栽植深度合格率与移栽速度、特征参数、吊杯倾角的关系均为上凸曲线,当移栽速度为 0.46 m/s,特征参数为 1.24,吊杯倾角为 87.4°,栽植深度合格率分别取得最大值。

(3) 通过优化得到栽植器获得最优栽植性能的参数组合为:移栽速度为 0.47 m/s,特征参数为 1.18,吊杯倾角为 87°,此时理论上直立度合格率最优为 98.01%、株距变异系数为 5.93%、栽植深度合格率为 89.25%,优化后验证试验可得直立度合格率为 96.6%、株距变异系数为 6.1%、栽植深度合格率为 87.8%,试验结果与理论结果一致,进一步验证了回归模型的正确性;优化后的性能指标明显优于优化前,直立度合格率、栽植深度合格率较优化前分别提高 5.8、3.6 个百分点,也优于行业标准规定的指标值,优化结果对蔬菜钵苗高速移栽机设计与运行具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报,2014,45(2):81-87.
Wang Jun, Du Dongdong, Hu Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):81-87. (in Chinese)
- 2 陈建能,王伯鸿,任根勇,等. 蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析[J]. 农业机械学报,2010,41(12):48-53.
Chen Jianneng, Wang Bohong, Ren Genyong, et al. Kinematics modeling and parameters analysis of seven-linkage vegetable seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):48-53. (in Chinese)
- 3 韩长杰,杨宛章,张学军,等. 穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(8):51-61.
Han Changjie, Yang Wanzhang, Zhang Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):51-61. (in Chinese)
- 4 金诚谦,吴崇友,袁文胜. 链夹式移栽机栽植作业质量影响因素分析[J]. 农业机械学报,2008,39(9):196-198.
- 5 Satpathy S K, Garg I K. Effect of selected parameters on the performance of a semi-automatic vegetable transplanter[J]. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America, 2008, 39(2):47-51.
- 6 王石,王笑岩,李成华. 基于量子遗传算法的挠性圆盘式移栽机投苗系统参数优化方法[J]. 中国农机化学报,2014,35(2):139-142.
Wang Shi, Wang Xiaoyan, Li Chenghua. Parameters optimization of soft disc-type vegetable seedling transplanting mechanism based on quantum genetic algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2):139-142. (in Chinese)
- 7 胡鸿烈,顾世康,曾爱军,等. 导苗管式栽植器的设计与试验[J]. 农业工程学报,1995,11(2):59-64.
Hu Honglie, Gu Shikang, Zeng Aijun, et al. The design and experiment on planting apparatus with seedling-guiding tube[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(2):59-64. (in Chinese)
- 8 崔巍,赵亮,宋建农,等. 吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):35-38.
Cui Wei, Zhao Liang, Song Jiannong, et al. Kinematics analysis and experiment of dibble-type planting devices[J]. Transactions

- of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):35-38. (in Chinese)
- 9 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.
Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese)
- 10 宋洪波,安凤平,史岩. 偏心式移栽机的研究[J]. 农业机械学报,1997,28(增刊):41-45.
Song Hongbo, An Fengping, Shi Yan. Study on eccentric transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(Supp.): 41-45. (in Chinese)
- 11 封俊,秦贵,宋卫堂,等. 移栽机的吊运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报,2002,33(5):48-50.
Feng Jun, Qin Gui, Song Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of dibble-type transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48-50. (in Chinese)
- 12 王文明,窦卫国,王春光,等. 2ZT-2型甜菜移栽机栽植系统的参数分析[J]. 农业机械学报,2009,40(1):69-73.
Wang Wenming, Dou Weiguo, Wang Chunguang, et al. Parameter analysis of the planting process of 2ZT-2 beet transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 69-73. (in Chinese)
- 13 张祖立,王君玲,张为政,等. 悬杯式蔬菜移栽机的运动分析与性能试验[J]. 农业工程学报,2011,27(11):21-25.
Zhang Zuli, Wang Junling, Zhang Weizheng, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cantilever cup vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 21-25. (in Chinese)
- 14 封俊,顾世康,曾爱军,等. 导苗管式栽植机的试验研究(II)栽植机的性能评价指标与检测方法[J]. 农业工程学报,1998,14(2):73-77.
Feng Jun, Gu Shikang, Zeng Aijun, et al. Study on transplanter with chute and seedling aid springs(Part II) judging-targets system for transplanters[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 73-77. (in Chinese)
- 15 张波屏. 现代种植机械[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 16 周福君,芦杰,杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2014,30(1):18-24.
Zhou Fujun, Lu Jie, Du Jiaying. Parameters optimization and experiment of corn-paper transplanting machine with seedling disk[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 18-24. (in Chinese)
- 17 赵作伟,陈海涛,赖庆辉,等. 甜菜链式纸钵苗分离装置参数优化[J]. 农业工程学报,2010,26(9):154-158.
Zhao Zuowei, Chen Haitao, Lai Qinghui, et al. Chain separator parameter optimization for the pot seedling of sugar beet[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 154-158. (in Chinese)
- 18 张彦军,刘成梅,刘伟,等. 热压凝胶法制备营养质米及其营养性质研究[J]. 农业工程学报,2012,28(5):282-287.
Zhang Yanjun, Liu Chengmei, Liu Wei, et al. Preparation and nutrient properties of texturized rice by hotpressing gelatinization technology[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 282-287. (in Chinese)
- 19 毕新胜,肖斌彬,张进,等. 加工番茄回转滚筒式果秧分离机构参数正交试验优化[J]. 农业机械学报,2012,43(8):94-98.
Bi Xinsheng, Xiao Binbin, Zhang Jin, et al. Orthogonal experiment optimization of parameters of rotary roller-type fruit-vine separation mechanism for processing tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 94-98. (in Chinese)
- 20 王君玲,高玉芝,李成华. 机械化移栽裸根的直立度试验研究[J]. 农机化研究,2007(2):146-148.
Wang Junling, Gao Yuzhi, Li Chenghua. Experimental study of mechanized transplanting bare root upright degree[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 146-148. (in Chinese)
- 21 李成华. 作物育苗制钵机与移栽机试验研究[M]. 北京:中国农业大学出版社,2012.
- 22 石铁. 全自动玉米秧苗移栽机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):23-30.
Shi Tie. Development and test of automatic corn seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 23-30. (in Chinese)
- 23 杨丽,苏益明,张东兴,等. 玉米纸筒苗移栽机运动轨迹分析与性能试验[J]. 农业工程学报,2014,30(13):35-42.
Yang Li, Su Yiming, Zhang Dongxing, et al. Motion analysis and performance test of corn paper pot seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 35-42. (in Chinese)