doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.007

轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验

李玉华^{1,2} 张智龙^{1,2} 李天华^{1,2} 吴彦强^{1,2} 牛子孺^{1,2} 侯加林^{1,2} (1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018; 2.山东省农业装备智能化工程实验室,泰安 271018)

摘要:针对因大蒜颗粒大、形状不规则和表面粗糙而造成漏播及重播率高的问题,设计了一种轮勺式大蒜单粒取种装置,该装置主要由取种勺、取种轮、驱动电机、支架、种箱等组成。对取种区、输种区和排种区的大蒜分别进行了 受力分析,阐述了轮勺式大蒜单粒取种装置的原理,通过离散元仿真软件对取种勺及取种轮的结构形状进行了对 比优化,确定了取种勺及取种轮的最优结构,采用数理统计的方法确定了取种勺的尺寸区间。以取种勺的半径、长 度和取种轮转速为试验因素,以漏充率和合格率为响应指标进行了正交回归试验,建立了漏充率和合格率的回归 模型,对回归模型进行了参数优化。最优参数组合为取种勺半径 16.30 mm、取种勺长度 38.50 mm、取种轮转速 10.0 r/min,在最优参数组合下进行了台架试验,得漏充率 5.50%,合格率 91.10%,与回归模型预测结果基本 一致。

关键词:大蒜;排种器;轮勺式 中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号:1000-1298(2020)03-0061-08



Design and Experiment of Wheel-spoon Type Garlic Precision Seed-picking Device

LI Yuhua^{1,2} ZHANG Zhilong^{1,2} LI Tianhua^{1,2} WU Yanqiang^{1,2} NIU Ziru^{1,2} HOU Jialin^{1,2} (1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China 2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

Abstract: Due to large grain size, irregular shape and rough surface of garlic seeds, the missed sowing rate and reseeding rate are high. Aiming to mitigate these problems, a wheel-spoon type garlic seed metering device was designed, which was mainly composed of seed scoop, seed taking wheel, driving motor, bracket and seed box. The stress analyses of garlic seeds in seed taking zone, transferring zone and discharging zone of the device were carried out. The optimal structures of spoons and wheels after comparing the structural shapes of different types of spoons and wheels via discrete element simulation analyses were determined. The size of seed scoop was statistically determined. The orthogonal regression test was performed, treating the radius of seed scoop, the length of seed scoop and the rotation speed of seed wheel as test factors, and the rate of missed sowing and the qualified rate as response indexes. The regression models of missed sowing rate and qualified rate were established through analysis of the test data and then the parameters of garlic seed metering device were optimized based on the regression model. The platform test was carried out on the garlic seed metering device with radius, length and rotation speed of seed scoop as 16.30 mm, 38.50 mm and 10.0 r/min, respectively. The results showed that the missed seeding rate was 5.50% and the qualified rate was 91.10%, which were consistent with the results predicted by the regression model. The research can provide a solid basis for precision sowing technology in garlic.

Key words: garlic; seed metering device; wheel-spoon

收稿日期:2019-07-14 修回日期:2019-08-26

基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS-24-D-01)、山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF001)和山东省蔬菜产业技 术体系项目(SDAIT-02-021-09)

作者简介:李玉华(1983—),男,博士生,讲师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: liyuhua@ sdau.edu.cn

通信作者: 侯加林(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: jlhou@ sdau. edu. cn

0 引言

大蒜单粒取种^[1]是实现大蒜机械化播种的关键技术之一。大蒜颗粒大、形状不规则及表面粗糙,极易产生颗粒堆积^[2-3]、结拱堵塞等现象^[4],从而导致漏充率高。因此,相对比较成熟的玉米取种器^[5-6]、小麦取种器^[7]和大豆取种器^[8]等,无法通过简单改进而直接应用于大蒜单粒取种。

现有大蒜单粒取种方式主要有勺链式、勺带式、 夹持式及振动式等^[9-10]。大蒜属于中大籽粒种子, 其形状尺寸变异系数大,大蒜取种器漏充及重充现 象难以避免,勺链及勺带式取种器结构简单,但中高 速时振动明显,易引起掉种。近年来有学者对大蒜 取种进行了研究,耿爱军等^[11]采用链勺式结构进行 大蒜单粒取种,对取种勺及链板进行了优化;此外有 学者对大籽粒种子取种器^[12-15]进行了研究,为大蒜 单粒取种装置设计提供了技术参考。

针对大蒜单粒取种的漏播及重播问题,阐述轮 勺式大蒜单粒取种装置的工作原理,利用数理统 计^[16-17]方法对取种勺的结构尺寸区间进行分析。 通过离散元仿真软件 EDEM^[18-20]对取种过程及取 种勺结构参数进行仿真分析,利用 Box - Benhnken 中心组合设计理论设计试验方案^[21-23],并进行台架 验证试验,以期为大蒜单粒取种装置的设计提供参 考。

1 取种器结构与工作原理

1.1 取种器结构

轮勺式大蒜取种器主要由种箱、驱动电机、取种 轮、取种勺组成,结构如图1所示。

取种勺与取种轮通过圆弧面配合,可方便拆卸 及更换。驱动电机通过传动轴驱动取种轮运动,取 种轮带动取种勺旋转,取种勺与大蒜通过搅动挤压 使其进入取种勺空腔实现取种。

1.2 单粒取种原理

大蒜单粒取种过程分为4个阶段,如图2所示, 分别为:取种区、输种区、排种区和过渡区。

取种过程分析:取种区中进入取种勺的待取大



(a) 取种区大蒜受力分析



图 1 轮勺式大蒜取种器结构示意图 Fig. 1 Structure diagram of wheel-spoon type seed metering device for garlic 1. 种箱 2. 驱动电机 3. 取种轮 4. 取种勺



图 2 轮勺式大蒜取种器工作示意图 Fig. 2 Working process of wheel-spoon type seed metering device for garlic

蒜受到自身重力、周边大蒜及取种勺的作用力,如 图 3a,受力公式为

$$\begin{cases} mg + \sum_{i=1}^{n} F_{i} + N = ma \\ \sum_{i=1}^{n} M_{o}(F_{i}) + M_{o}(mg) + M_{o}(N) = m\dot{\omega} \end{cases}$$
(1)
式中 m — 大蒜质量,kg

N——取种勺对大蒜的支持力,N

a——待取大蒜的加速度,m/s²

 $\dot{\omega}$ ——待取大蒜的角加速度, rad/s²

M。——大蒜所受力对支撑点的力矩, N·m

按取种勺内有大蒜和无大蒜两种情况对大蒜运 动状态进行分析:取种勺内无大蒜时,待取大蒜将在 取种勺周围大蒜的挤压及勺壁的支撑力作用下进入 取种勺的空腔内;取种勺内已有大蒜时,勺内大蒜受 到周围大蒜及取种勺的作用力,此时取种勺周围大 蒜处于竞争状态,勺内大蒜将趋于更加稳定,否则将 被周边大蒜替代,因此经过取种区后勺内大蒜处于



图 3 取种过程大蒜受力分析 Fig. 3 Dynamic analysis of garlic during seeding process



(c) 排种区大蒜受力分析

62

稳定状态,不易在输种区滑落而引起漏种。

输种过程分析:输种区中取种勺的大蒜将在自 身重力和取种勺的支撑力作用下做匀速圆周运动, 如图 3b,受到重力及取种勺的支撑力,径向方向受 力公式为

$$\begin{cases} F_n = m\omega^2 r \\ F_n = mg\sin\theta \end{cases}$$
(2)

式中 ω——取种轮角速度, rad/s

r-----取种轮半径,m

θ——取种勺、取种轮中心连线与水平方向夹 角,rad

F_n——大蒜匀速圆周运动所需向心力,N

当重力产生的分力小于向心力时取种勺中的大 蒜将沿切向方向滑出而产生漏种,取种勺提供的向 心力与 ω 、r、 θ 及取种勺轮廓密切相关,需满足 $\omega^2 r \leq g \sin \theta_o$ 。

排种过程分析:排种区的大蒜将在自身重力和 取种勺的支撑力作用下做匀速圆周运动,如图 3c, 随 θ 的减小重力分量无法提供足够的向心力,使大 蒜沿切向方向飞出完成排种。

2 关键结构设计与仿真

大蒜具有籽粒大、形状极不规则和个体差异大 等特点,因此易产生漏播和重播现象,本文以概率统 计的大蒜外形尺寸为依据对大蒜单粒取种器进行了 设计,分析了取种勺的形状、尺寸及取种轮转速对单 粒取种性能的影响。

2.1 大蒜三维尺寸

大蒜外形为非规则的类扇形体,其长度 L_a 、宽度 W_d 、厚度 T_d 对取种勺尺寸影响最大,本文以金乡 大蒜为研究对象,随机选取 100 粒饱满的大蒜进行 测量,结果如表 1 所示。

表 1 大蒜三维尺寸 Tab.1 Three dimension size of garlic

参数	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
长度	32.38	2.22	6.86
宽度	16.32	3.16	19.36
厚度	18.98	2.91	15.33

对所测数据的概率分布进行分析,概率密度曲 线如图 4 所示,各尺寸基本符合正态分布,其中 $L_d \sim N(32.38, 2.22^2), W_d \sim N(16.32, 3.16^2), T_d \sim$ $N(18.98, 2.91^2), 取种勺尺寸参数设计以此大蒜三$ 维尺寸分布为依据。

2.2 离散元仿真模型

为缩短试验时间,提高试验针对性,本文采用离



Fig. 4 Probability distribution of 3D size of garlic

散元分析软件 EDEM 对取种器取种性能进行仿真 分析。以饱满的金乡大蒜为仿真分析对象,大蒜颗 粒的尺寸根据体积按正态分布进行设置。颗粒间及 颗粒与设备间的接触模型均采用 Hertz - Mindlin(no slip)模型,仿真参数如表 2 所示^[24]。

表 2 仿真参数 Tab. 2 Simulation parameters of seed metering device

参数	树脂材料	大蒜颗粒
密度/(kg·m ⁻³)	1 140	1 080
泊松比	0.394	0.230
弹性模量/MPa	2 000	23.82
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.432	0.460
静摩擦因数(与颗粒)	0.466	0.464
动摩擦因数(与颗粒)	0.214	0. 201

2.3 取种勺设计与仿真分析

取种勺是大蒜单粒取种器的核心部件,其结构 和尺寸均对漏充率和重充率具有直接的影响。

2.3.1 取种勺结构的确定

通过离散元分析软件对多种不同结构的取种勺 进行仿真分析,对比分析发现图 5 所示的 4 种取种 勺结构的取种性能相对较好,其中 D 型取种勺漏充 率和重充率在相同条件下比其他 3 种结构低,本文 选用 D 型取种勺进行结构参数优化。

A型取种勺漏充率及重充率均相对较高,因该 取种勺弧高恒定,取种勺容积大,容易一次取两粒大 蒜,且取种勺两端开口在输种阶段大蒜会从两端掉 落导致较高的漏充率;B型取种勺弧高恒定且两端 封闭,虽然漏充率较低但重充率较高;C型取种勺的 中间大两端小,重充率低,但两端开口导致漏充率较 高;D型取种勺弧高中间大两端小,且两端的边缘凸 起能避免大蒜在输种过程中滑落,克服了 B、C 两种 结构的缺点而保留了其优点,因此 D型取种勺具有 相对较低的重充率和漏充率。

2.3.2 取种勺尺寸的确定

取种勺的关键结构参数为半径 R、长度 L 和弧



高 H。为保证单粒取种成功率,取种勺尺寸需要在 合适的范围内。

为保证在取种勺长度方向不能同时容纳1粒以 上蒜种且空间尽量大以提高取种率,取种勺长度L 需满足

$$\begin{cases} L_d < L < 2L_d \\ L < L_d + W_d \\ L < L_d + T_d \end{cases}$$
(3)

由多个相互独立随机变量函数分布的性质知: $2L_d \sim N(64.76, 4.44^2), L_d + W_d \sim N(48.7, 3.86^2),$ $L_d + T_d \sim N(51.36, 3.66^2)$ 。式(3)各约束条件对应 的分布函数曲线如图 6 所示,随 L 取值增大重充率 升高而漏充率降低,为保证单粒取种合格率,计算分 析得 L 取值范围为 35.00 ~ 45.00 mm 时能两者兼 顾,当 L 为 45.00 mm 时重充率为 14.50%。



为保证在取种勺深度方向取种后不滑落且不能 同时容纳1粒以上蒜种,取种勺的弧高H需满足

$$\begin{cases} 0.5W_{d} < H < 1.5W_{d} \\ 0.5T_{d} < H < 1.5T_{d} \end{cases}$$
(4)

由多个相互独立随机变量函数分布的性质知: 1.5 W_d ~ N (24.48, 4.74²), 1.5 T_d ~ N (28.47, 4.37²),0.5 $W_d \sim N(8.16,1.58^2)$,0.5 $T_d \sim N(9.49$, 1.45²)。式(4)各约束条件对应的分布函数曲线如 图 7 所示,随 H 取值增大重充率升高而漏充率降 低,为保证单粒取种合格率,计算分析得 H 取值范 围为 13.00~17.00 mm。仿真和单因素试验发现弧 高 H 在此区间范围内对单粒取种性能影响不大。



为保证在取种勺宽度方向单粒取种成功率,取 种勺的弦长 S 需满足

$$\begin{cases} W_d < S < 2W_d \\ T_d < S < 2T_d \end{cases}$$
(5)

由多个相互独立随机变量函数分布的性质知: 2 $W_d \sim N(32.64, 6.32^2), 2T_d \sim N(37.96, 5.82^2),$ $W_d \sim N(16.32, 3.16^2), T_d \sim N(18.98, 2.91^2),$ 式(5)各约束条件对应的分布函数曲线如图 8 所 示,随 S 取值增大重充率升高而漏充率降低,为保证 单粒取种合格率,同时考虑弧高的限制,并通过先期 试验验证,S 取值范围为 26.5 ~ 34.0 mm 时取种效 果较好。



Fig. 8 Chord length range of seed spoon

由三角几何关系知取种勺半径 R 满足

$$R = \frac{H}{2} + \frac{S^2}{8H} \tag{6}$$

把弧高 H 及弦长 S 的取值范围代入式(6),计 算得取种勺半径 R 取值范围为 13.30~17.00 mm。 2.3.3 取种轮设计与仿真分析

取种轮外圆弧面与取种勺配合形成取种空腔, 取种轮外形对取种合格率有显著影响。通过仿真及 试验发现:取种轮外圆面采用由多个凸起圆柱面组 成的异型面结构时(图 9a),重种现象较少,落种位 置一致,因为在圆柱面的法向力作用下大蒜无法在 取种轮的表面堆积,且凸起的圆柱面对将进入取种 勺的大蒜进行搅动避免产生堆积和结拱堵塞现象的 发生;取种轮为规则圆面时(图 9b),大蒜会在取种 勺与取种轮的表面产生堆积,重种现象显著,落种时 刻提前且蒜种下落时易与上一个取种勺发生碰撞导 致落种轨迹不一致。



(a) 异型面取种轮
 (b) 光滑圆柱面取种轮
 图 9 取种轮外形对取种效果的影响
 Fig. 9 Effect of shape of seed-taking wheel on seed-taking effect

3 试验与结果分析

3.1 试验材料与设备

试验设备为搭建的大蒜单粒取种试验台,结构 如图 10 所示,主要包括支架、种箱、直流驱动电机、 调速器、取种轮、取种勺等。驱动电机转速 0 ~ 40 r/min连续可调。支架及种箱采用透明 PVC 板加 工而成,便于取种过程观察。



图 10 取种器试验装置 Fig. 10 Test device of seed-metering device

3.2 试验方法

试验方法参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密) 播种机试验方法》进行。由于漏充率、重充率和合 格率之和为 100%,因此选漏充率 y₁和合格率 y₂为 评价指标,漏充率和合格率数据通过试验过程录像 统计得到。

为确定最优单粒取种装置工作参数,选取对取种性能影响较大的取种勺半径 R、长度 L 和取种轮转速为试验因素,漏充率和合格率为响应指标。根据前期理论计算、仿真分析及单因素试验确定各因素取值范围:半径 R 为 14.0~18.0 m,取种勺长度 L 为 35~45 mm,取种轮直径为 130.00 mm 时,取其转速为 5.0~20.0 r/min。依据 Box – Benhnken 中心组合设计理论进行试验设计,试验因素编码如表 3 所示。

表3 试验因素编码

Tab. 3 Coding of experiment factors

	因素			
编码	取种勺半径	取种勺长度	取种轮转速	
	<i>R</i> /mm	<i>L</i> /mm	$n/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	
- 1	14.0	35	5.0	
0	16.0	40	12.5	
1	18.0	45	20.0	

3.3 结果与分析

3.3.1 试验结果

试验设计方案与结果如表 4 所示,其中 x₁、x₂、 x₃ 表示各因素编码值。

表 4 试验设计方案及结果

Tab. 4 Experiment design and results

	因素			响力	响应值		
序号				漏充率	合格率		
	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	$y_1 / \%$	$y_2 / \%$		
1	- 1	- 1	0	13.20	85.50		
2	1	- 1	0	4.70	82.20		
3	- 1	1	0	9.10	77.90		
4	1	1	0	1.30	71.20		
5	- 1	0	- 1	10.20	84.10		
6	1	0	- 1	1.80	77.50		
7	- 1	0	1	14.80	81.60		
8	1	0	1	4.10	79.20		
9	0	- 1	- 1	5.50	88.40		
10	0	1	- 1	1.50	73.10		
11	0	- 1	1	8.80	78.20		
12	0	1	1	4.10	75.40		
13	0	0	0	5.60	92.70		
14	0	0	0	6.30	91.40		
15	0	0	0	6.80	90.10		
16	0	0	0	5.90	91.80		
17	0	0	0	6.30	90.50		

3.3.2 回归模型建立与显著性检验

对表 4 中的试验结果,运用 Design-Expert 11.1.2.0数据分析软件进行多元回归拟合分析,得 到漏充率 y₁ 和合格率 y₂ 的回归方程

$$y_{1} = 6. 18 - 4. 42x_{1} - 2. 02x_{2} + 1. 6x_{3} + 0. 18x_{1}x_{2} - 0. 58x_{1}x_{3} - 0. 18x_{2}x_{3} + 1. 82x_{1}^{2} - 0. 93x_{2}^{2} - 0. 28x_{3}^{2}$$
(7)
$$y_{2} = 91. 3 - 2. 38x_{1} - 4. 59x_{2} - 1. 09x_{3} - 0. 85x_{1}x_{2} + 1. 05x_{1}x_{3} + 3. 13x_{2}x_{3} - 5. 14x_{2}^{2} - 5. 55x_{3}^{2}$$
(2)

5.
$$14x_1^2 - 6.96x_2^2 - 5.56x_3^2$$
 (8)

由表 5 分析可知,漏充率 y₁ 和合格率 y₂ 模型 均为 P < 0.01,表明漏充率和合格率回归模型高度 显著;回归模型失拟项均为 P > 0.05,失拟项不显 著,试验拟合程度高。通过 P 值可以得出:漏充率

回归模型方差分析 表 5 Tab. 5 Variance analysis of regression models

方差	漏充率 y1			合格率 y2				
来源	平方和	自由度	F	Р	平方和	自由度	F	Р
模型	228.62	9	84.15	**	765.96	9	55.38	**
x_1	156.64	1	518.94	**	45.13	1	29.36	**
x_2	32.81	1	108.68	**	168.36	1	109.55	**
x_3	20.48	1	67.85	**	9.46	1	6.16	*
$x_{1}x_{2}$	0.1225	1	0.4058		2.89	1	1.88	
$x_{1}x_{3}$	1.32	1	4.38		4.41	1	2.87	
$x_{2}x_{3}$	0.1225	1	0.4058		39.06	1	25.42	**
x_{1}^{2}	13.99	1	46.33	**	111.13	1	72.31	**
x_{2}^{2}	3.62	1	12.00	*	204.11	1	132.82	**
x_{3}^{2}	0.3242	1	1.07		130. 28	1	84.77	**
残差	2.11	7			10.76	7		
失拟	1.29	3	2.07	0.247	6.46	3	2.00	0.256
误差	0.828	4			4.30	4		
总和	230.74	16			776. 72	16		

注:* 表示影响差异显著(P<0.05); **表示影响差异极显著 $(P < 0.01)_{\circ}$

模型中回归项 x_1, x_2, x_3 和 x_1^2 对模型影响极显著, x²,回归项对模型影响显著,影响漏充率的因素主 次顺序是取种勺半径、取种勺长度、取种轮转速: 合格率模型中回归项 $x_1, x_2, x_3, x_1^2, x_2^2$ 和 x_3^2 对模 型影响极显著, x, 回归项对模型影响显著, 影响合 格率的因素主次顺序是取种勺长度、取种勺半径、 取种轮转速。

3.3.3 影响因素分析

(1)各因素对漏充率的影响

固定某个因素水平为零,分析另外2个因素的 相互作用对漏充率的影响,其响应曲面如图 11 所 示。

图 11a 为取种轮转速处于中心水平时,取种勺 半径及其长度交互作用对漏充率的影响。随取种勺 半径及长度的增加,漏充率逐渐减小。图 11b 为取 种勺长度处于中心水平时,取种勺半径及取种轮转 速交互作用对漏充率的影响。取种勺半径一定时,



Fig. 11 Effects of all factors on missing rate of seed-metering device

随取种轮转速升高,漏充率逐渐增大。当取种勺半 径增大时,会减弱因取种轮转速升高引起的漏充率 升高的趋势。图 11c 为取种勺半径处于中心水平 时,取种勺长度及取种轮转速交互作用对漏充率的 影响。取种勺长度一定时,随取种轮转速升高,漏充 率逐渐增大。当取种轮转速一定时,随取种勺长度 增加漏充率降低。

(2)各因素对合格率的影响

固定一个因素水平为零,分析另外2个因素的 相互作用对合格率的影响,其响应曲面如图 12 所 示。

图 12a 为取种轮转速处于中心水平时,取种勺 半径及其长度交互作用对合格率的影响。取种勺长 度一定时,随着取种勺半径增大,合格率先升后降。



各因素对合格率的影响

Fig. 12 Effects of all factors on qualified rate of seed-metering device

取种勺半径一定时,随着取种勺长度增大,合格率先 升后降。图 12b 为取种勺长度处于中心水平时,取 种勺半径及取种轮转速交互作用对合格率的影响。 取种勺半径一定时,随着取种轮转速增大,合格率先 升后降。取种轮转速一定时,随着取种勺半径增大, 合格率先升后降。图 12c 为取种勺半径处于中心水 平时,取种勺长度及取种轮转速交互作用对合格率 的影响。取种勺长度一定时,随着取种轮转速增大, 合格率先升后降。取种轮转速一定时,随着取种勺 长度增大,合格率先升后降。

3.3.4 参数优化与试验验证

以漏充率 y₁ 最低、合格率 y₂ 最高为目标函数, 以取种勺的半径 x₁、长度 x₂ 和取种轮转速 x₃ 为约 束条件,建立大蒜单粒取种装置工作参数规划数学 模型

$$\begin{cases} \min y_{1} \\ \max y_{2} \\ -1 \leq x_{1} \leq 1 \\ -1 \leq x_{2} \leq 1 \\ -1 \leq x_{3} \leq 1 \end{cases}$$
(9)

利用软件 Design-Expert 11.1.2.0 Optimization Numerical 模块进行优化,得最佳参数组合为:取种 勺的半径 16.32 mm、长度 38.46 mm,取种轮转速 9.9 r/min。此时模型预测的漏充率为 5.49%,合格 率为 91.59%。

为验证优化结果的准确性,设定工作参数为:取种勺半径 16.30 mm、长度 38.50 mm,取种轮转速 10.0 r/min。在大蒜单粒取种试验台进行 3 次重复试验,取平均值为试验值,试验结果为漏充率 5.50%,合格率 91.10%。结果对比表明理论优化

值和试验验证值非常接近,回归模型可靠。

3.4 讨论

本文的研究对象是未经过筛选分级的大蒜,采 用基于数理统计的理论进行取种勺的结构参数设 计。由于大蒜外形尺寸变异系数较大,为满足所有 大蒜的成功取种率采用了折中的方案,因此漏充率 及重播率略高,如果大蒜播种前进行筛选分级,并针 对不同等级的大蒜采用不同结构参数的取种勺,取 种合格率将会显著提高。

4 结论

(1)设计了一种轮勺式大蒜单粒取种装置,利用取种勺与取种轮形成的空腔进行单粒取种,取种勺与周边大蒜相互挤压作用力下大蒜处于相互竞争状态,并最终使某粒大蒜在空腔内稳定,实现单粒取种。

(2)对取种区、输种区和排种区的大蒜进行了 受力分析,阐述轮勺式大蒜单粒取种的原理。通过 离散元仿真分析对不同取种勺及取种轮的结构形状 进行了对比优化,确定了取种勺及取种轮最优结构。 采用数理统计的方法确定了取种勺的尺寸区间,为 取种勺设计提供了数据支持。

(3)采用 Box - Benhnken 中心组合方法进行了 三因素三水平回归正交试验,分别建立漏充率和合 格率多元回归模型,以漏充率和合格率为目标,对各 影响因素参数进行了优化。最优参数组合为:取种 勺半径 16.30 mm、取种勺长度 38.50 mm、取种轮转 速 10.0 r/min。在最优参数组合下进行了台架试 验,此时漏充率为 5.50%,合格率为 91.10%,与模 型预测结果吻合。

参考文献

- [1] 崔荣江,黄嘉宝,张振河,等.大蒜机械化播种技术研究现状[J].农业装备与车辆工程,2018(6):54-56.
 CUI Rongjiang, HUANG Jiabao, ZHANG Zhenhe, et al. Research status of garlic mechanized sowing technology[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018(6):54-56. (in Chinese)
- [2] CHAN K W, KWAN A K H. Evaluation of particle packing models by comparing with published test results[J]. Particuology, 2014, 16(5):108-115.
- [3] CHO G, DODDS J, SANTAMARINA J. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(5): 591-602.
- [4] 王会,贾富国,韩燕龙,等.圆锥料仓内颗粒周期性脉动特征研究[J].物理学报,2017,66(1):198-208.
 WANG Hui, JIA Fuguo, HAN Yanlong, et al. Cyclical pulsation properties of particles in cone silo[J]. Acta Physica Sinica, 2017,66(1):198-208. (in Chinese)
- [5] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48. YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/ reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [6] 刘佳,崔涛,张东兴,等.机械气力组合式玉米精密取种器[J/OL].农业机械学报,2012,43(2):43-47.
 LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device [J/OL].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):43-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120209&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009.

(in Chinese)

- [7] 程修沛,卢彩云,孟志军,等. 气吸型孔组合式小麦精密取种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(24):1-9.
 CHENG Xiupei, LU Caiyun, MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24):1-9. (in Chinese)
- [8] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等.集排式大豆精量取种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(6):112-118. WANG Yecheng,JIN Yadong,LUO Sibo, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):112-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180613&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06. 013. (in Chinese)
- [9] 崔荣江,荐世春,杨继鲁,等. 勺链式大蒜取种器的优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2017,39(2):99-102.
 CUI Rongjiang, JIAN Shichun, YANG Jilu, et al. Optimization design and test of take garlic spoon[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(2):99-102. (in Chinese)
- [10] 刘甲振, 耿爱军, 栗晓宇, 等. 大蒜播种机单粒取种及补种技术研究现状[J]. 农机化研究, 2019, 41(2):262-268.
 LIU Jiazhen, GENG Aijun, LI Xiaoyu, et al. Research status of garlic planting machine single seed-filling and resow[J].
 Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 262-268. (in Chinese)
- [11] 耿爱军,栗晓宇,侯加林,等.自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (11):17-25.
 GENG Aijun,LI Xiaoyu,HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):17-25. (in Chinese)
- [12] 侯加林,刘威,张万枝,等. 气力托勺式马铃薯精量取种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24):18-28.
 HOU Jialin, LIU Wei, ZHANG Wanzhi, et al. Design of precision pneumatic cup seed-metering device for potato[J].
 Transactions of the CSAE, 2018, 34(24):18-28. (in Chinese)
- [13] 刘文政,何进,李洪文,等. 马铃薯微型种薯振动排序播种装置播种性能优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7):1-11. LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Seeding performance optimization on vibration-arranging type seeding device for potato micro-seed[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(7):1-11. (in Chinese)
- [14] 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯取种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):44-53.
 LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):44-53.
 http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170505&journal_id = jcsam. DOI:10.
 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 05. 005. (in Chinese)
- [15] 吕金庆,杨颖,尚琴琴,等. 气吸式马铃薯取种器正压吹种零速投种性能优化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(20):40-48. LÜ Jinqing, YANG Ying, SHANG Qinqin, et al. Performance optimization test on air-suction potato seed metering device with positive pressure airflow and zero-speed seeding[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(20):40-48. (in Chinese)
- [16] 宋妮,申孝军,陈智芳,等.基于不同数理统计方法的河南省 ET₀ 气候影响因素分析[J].农业工程学报,2017,33(23): 145-156.

SONG Ni, SHEN Xiaojun, CHEN Zhifang, et al. Evaluation of meteorological factors influencing reference crop evapotranspiration based on different methods of mathematical statistics in Henan Province [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(23):145-156. (in Chinese)

[17] 刘巧斌,史文库,陈志勇,等.工程车辆车桥位移谱统计分布建模及分步参数识别[J].农业工程学报,2018,34(23): 67-75.

LIU Qiaobin, SHI Wenku, CHEN Zhiyong, et al. Statistical distribution modeling and two-step parameter identification of vehicle bridge displacement spectrum [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(23):67-75. (in Chinese)

- [18] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式取种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):62-69.
 SHI Song,ZHANG Dongxing,YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):62-69. (in
- Chinese)
 [19] LIEDEKERKE P V, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology, 2009, 190(3):348 360.
- [20] 王金武,唐汉,王奇,等.基于 EDEM 软件的指夹式精量取种器取种性能数值模拟与试验[J].农业工程学报,2015, 31(21):43-50.
 WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger

precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21); 43 - 50. (in Chinese)

- [21] CHEN C, CHEN F. Study on the conditions to brew rice vinegar with high content of γ-amino butyric acid by response surface methodology[J]. Food & Bioproducts Processing, 2009, 87(4):334 - 340.
- [22] 罗凯,袁盼盼,靳伟,等. 链筛式耕层残膜回收机设计与工作参数优化试验[J].农业工程学报,2018,34(19):19-27.
 LUO Kai,YUAN Panpan, JIN Wei, et al. Design of chain-sieve type residual film recovery machine in plough layer and optimization of its working parameters[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(19):19-27. (in Chinese)
- [23] CHEN Q, BI J, ZHOU Y, et al. Multi-objective optimization of spray drying of jujube (Zizyphus jujuba Miller) powder using response surface methodology[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(6):1807-1818.
- [24] 侯加林,黄圣海,牛子孺,等.双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):87-96.
 HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181110&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.010. (in Chinese)