doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.004

果园四头倾斜螺旋式精准排肥器设计与试验

徐文智[1,2] 袁全春[2,3] 曾 锦[2,4] 吕晓兰[1,2]

(1. 南京林业大学机械电子工程学院，南京 210037；2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所，南京 210014；
3. 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室，南京 210014；
4. 农业农村部南方果园(桃、梨)全程机械化科研基地，南京 210014)

摘要：针对现有传统螺旋排肥器排肥量波动大、稳定性差等问题，设计了一种四头倾斜螺旋式精准排肥器。通过运动分析和理论计算，确定了影响排肥量稳定性的主要参数及其取值范围。以螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径、螺旋叶片螺距和螺旋叶片转速为试验因素，以排肥量变异系数为试验指标，开展了单因素和多因素离散元仿真试验。单因素仿真试验结果表明，螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速等4个因素对排肥量稳定性有显著影响，采用四头倾斜排肥螺旋输送肥料，可以提高排肥量稳定性。多因素仿真试验结果表明，当采用四头排肥螺旋时，最优参数组合为：排肥器倾角38°、螺旋叶片直径46 mm、螺旋叶片转速31 r/min。在该组合下，排肥量变异系数达到最小值，为1.65%。最后，在最优参数组合基础上，通过排肥量稳定性台架试验验证了仿真结果。结果显示，实测排肥量变异系数为3.69%。进一步优化得到，当螺旋叶片转速为33 r/min时，排肥量变异系数达到最小值，为2.92%。仿真和台架试验表明，经过改进优化后的四头倾斜螺旋式精准排肥器在排肥稳定性方面表现良好，符合果园施肥规定标准，能够满足果园施肥作业要求。

关键词：农业机械；四头倾斜螺旋式精准排肥器；离散元仿真；参数优化；台架试验

中图分类号：S224.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S2-0030-11

Design and Experiment of Four-head Inclined Spiral Precision Fertilizer Dischargers in Orchard

XU Wenzhi[1,2] YUAN Quanchun[2,3] ZENG Jin[2,4] LÜ Xiaolan[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*
2. *Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing* 210014, *China*
3. *Key Laboratory of Modern Horticultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
4. *Southern Orchard (Peach, Pear) Fully Mechanized Research Base, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: To address the issues of significant fertilizer discharge fluctuations and poor stability in traditional spiral fertilizer dischargers, a four-head inclined spiral precision fertilizer discharger was designed. Through motion analysis and theoretical calculations, the key parameters affecting the stability of fertilizer discharge rate were identified, along with their optimal value ranges. Experimental factors included the number of spiral blades, discharger inclination angle, spiral blade diameter, spiral blade pitch, and spiral blade rotational speed, with the coefficient of variation of fertilizer discharge rate as the evaluation metric. Discrete element method (DEM) simulations were conducted for both single-factor and multi-factor scenarios. The single-factor simulation results indicated that the number of spiral blades, discharger inclination angle, spiral blade diameter, and spiral blade rotational speed all significantly impacted the stability of fertilizer discharge rate. It was found that using a four-head inclined spiral to convey fertilizer can enhance discharge stability. Multi-factor simulation results showed that the optimal parameter combination for a four-head spiral configuration was with discharger inclination angle of 38°, spiral blade diameter of 46 mm, and spiral blade rotational speed of 31 r/min. Under this combination, the coefficient of variation of fertilizer

收稿日期：2024-08-10 修回日期：2024-09-20

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001400)、国家梨产业技术体系项目(CARS-28)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2025)

作者简介：徐文智(1999—)，男，硕士生，主要从事精准施肥技术与装备研究，E-mail: xuwenzhi678@163.com

通信作者：吕晓兰(1980—)，女，研究员，主要从事果园智能农机装备研究，E-mail: lxlanny@126.com

discharge rate reached minimum value of 1.65%. Finally, bench tests were conducted to validate the simulation results under the optimal parameter combination. The tests revealed that the measured coefficient of variation for fertilizer discharge rate was 3.69%. Further optimization determined that at spiral blade rotational speed of 33 r/min, the coefficient of variation could be minimized to 2.92%. Both simulation and bench test results demonstrated that the improved four-head inclined spiral precision fertilizer discharger performed well in terms of fertilizer discharge stability, which can meet orchard fertilization standards, and satisfy the operational requirements for orchard fertilization.

Key words: agricultural machinery; four-head inclined spiral precision fertilizer discharger; discrete element method simulation; parameter optimization; bench test

0　引言

农产品的生长离不开肥料的养分给予，联合国粮农组织（UNFAO）指出，肥料的合理运用可以提高农作物产量的40%～60%[1]。施肥是农产品增产的主要手段[2]，但长期施肥不足会对果树生长造成影响，而过多地施肥则会对土壤环境造成严重破坏。因此，精准施肥具有重要意义，而精准施肥装备是实施精准施肥的载体，有必要进行深入的研究[3]。作为施肥装备的关键部件，排肥器的性能直接影响整机的施肥作业稳定性和均匀性。为实现精准施肥，对排肥器性能的要求越来越高[4]，在实现排肥高准确性、稳定性、均匀性的同时，还要保证其灵活性和精确地调控排肥量，能够适用于更多的肥料种类和应用场合[5-6]。

近年来，国内外在精准排肥器领域进行了持续研究，主要集中于螺旋式、槽轮式、圆盘式和气送式等4种类型[7]。市场上常用的外槽轮式排肥器虽然适合于干燥颗粒肥料的排放，但对潮湿颗粒肥和粉状肥的效果欠佳。相比之下，螺旋式排肥器对肥料物理特性要求较低，能够同时施用颗粒和粉状肥，排肥量可精准调节，且性能均匀稳定。为了实现精准排肥，国内外研究人员对螺旋式排肥器进行了深入的研究[8-16]。目前，排肥器的研究大多集中在针对传统水平式排肥器单头排肥螺旋的结构和工作参数优化改进上面，并有向结构创新设计发展的趋势，以进一步地提高排肥量稳定性。

为了解决现有传统螺旋排肥器排肥量波动大、稳定性差的问题，本文设计一种四头倾斜螺旋式精准排肥器，以实现更均匀和稳定的肥料输送和排出。通过运动分析和理论计算，确定排肥器的主要参数及其取值范围，并采用离散元仿真试验，研究这些参数对排肥量稳定性的影响，确定最优参数组合，以实现最小排肥量变异系数。通过台架试验对研究准确性进行验证，并进一步优化参数。旨在实现精准变量施肥，提高肥料利用率，为排肥器的优化设计提供参考。

1　排肥器结构设计和理论分析

1.1　总体结构

四头倾斜螺旋式精准排肥器结构示意图，如图1所示，主要包括肥箱、壳体、排肥管、四头排肥螺旋（图2）等结构。其中，肥箱和壳体、螺旋叶片和螺旋轴等部件通过焊接固定，采用减速机将螺旋轴一端与步进电机相连接，另一端采用带座轴承进行固定。工作时，步进电机带动减速机里面的蜗轮蜗杆转动，进而再带动螺旋轴及螺旋叶片转动，从而实现持续稳定地排肥。

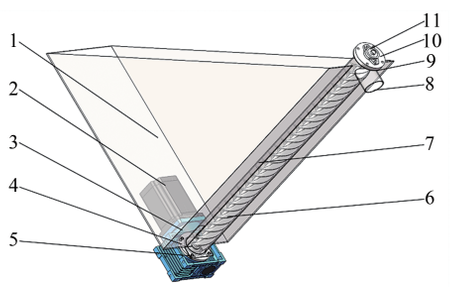


图1　四头倾斜螺旋式精准排肥器结构示意图

Fig. 1　Schematic of four-head inclined spiral precision fertilizer discharger structure

1. 肥箱　2. 步进电机　3. 减速机　4. 厚垫板　5. 连接板　6. 四头排肥螺旋　7. 壳体　8. 排肥管　9. 端盖固定板　10. 端盖　11. 带座轴承

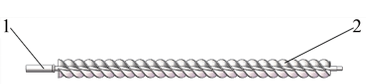


图2　四头排肥螺旋结构示意图

Fig. 2　Schematic of four-head fertilizer discharge spiral structure

1. 螺旋轴　2. 螺旋叶片

1.2　排肥过程运动分析

1.2.1　肥料颗粒力学分析

通过图3（G表示肥料颗粒所受重力；θ表示排肥器倾角；F_n表示肥料颗粒所受法向推力；F_f表示肥料颗粒所受切向摩擦力）几何关系，可以得出颗粒所受力之间的关系

$$\begin{cases} F_z = F\cos(\alpha+\beta) \\ F_\tau = F\sin(\alpha+\beta) \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\alpha = \arctan\frac{S}{2\pi r} \tag{2}$$

$$\beta = \arctan\mu \tag{3}$$

式中　F——肥料颗粒所受合力，N

F_τ——肥料颗粒所受周向分力，N

F_z——肥料颗粒所受轴向分力，N

α——与轴线距离r处的螺旋升角，(°)

S——螺旋叶片导程，mm

μ——肥料颗粒与螺旋面摩擦因数，取0.10

β——肥料颗粒外摩擦角，取6.3°

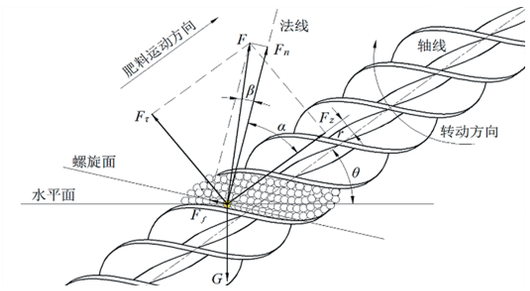


图3 肥料颗粒力学分析

Fig. 3 Mechanical analysis of fertilizer particles

1.2.2 肥料颗粒运动学分析

通过图4几何关系，可以得出颗粒运动速度之间的关系

$$\begin{cases} V_z = V\cos(\alpha+\beta) \\ V_\tau = V\sin(\alpha+\beta) \end{cases} \tag{4}$$

由图4中几何关系可得

$$\begin{cases} \sin\alpha = \dfrac{V_n}{V_0} \\ \cos\beta = \dfrac{V_n}{V} \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$V_0 = r\omega = \frac{2\pi nr}{60} \tag{6}$$

由式(5)、(6)可得

$$V = \frac{\pi nr\sin\alpha}{30\cos\beta} \tag{7}$$

由式(2)~(4)、(7)可得

$$\begin{cases} V_z = \dfrac{nS\left(1-\dfrac{\mu S}{2\pi r}\right)}{60\left[1+\left(\dfrac{S}{2\pi r}\right)^2\right]} \\ V_\tau = \dfrac{nS\left(\mu+\dfrac{S}{2\pi r}\right)}{60\left[1+\left(\dfrac{S}{2\pi r}\right)^2\right]} \end{cases} \tag{8}$$

式中 V——肥料颗粒合速度，m/s

V_τ——肥料颗粒周向速度，m/s

V_z——肥料颗粒轴向速度，m/s

V_0——肥料颗粒牵连速度，m/s

V_n——肥料颗粒绝对速度，m/s

n——螺旋叶片转速，r/min

ω——螺旋角速度，rad/s

1.3 排肥器主要参数的确定

1.3.1 螺旋叶片头数

排肥螺旋可以按螺旋叶片头数进行分类，有一头螺旋叶片的，称为单头排肥螺旋，有两头及以上螺旋叶片的，称为多头排肥螺旋。多头排肥螺旋相当于有多条线路在输送和搅动肥料，可减小排肥量脉动的周期，相同条件下的排肥器总体的排肥量稳定性要优于单头排肥螺旋[17-18]。同时考虑到排肥螺旋结构不可过于复杂及不同相位的互补性，本研究采用单头、双头、三头、四头等排肥螺旋的排肥器进行试验。

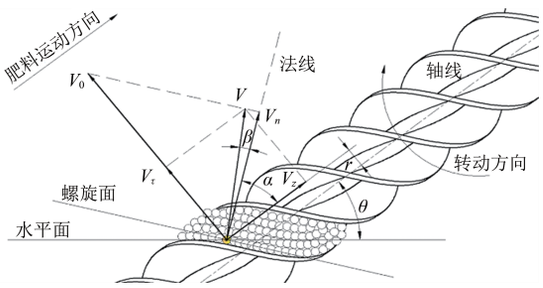


图4 肥料颗粒运动学分析

Fig. 4 Kinematic analysis of fertilizer particles

1.3.2 排肥器倾角

螺旋输送机主要分为水平螺旋输送机、垂直螺旋输送机、倾斜螺旋输送机。螺旋式排肥器正是由螺旋输送机进行改进而投入农业施肥应用当中。倾斜螺旋式排肥器用于倾斜方向的肥料输送，其结构类似于水平式。排肥量稳定性受倾角影响显著，较大倾角时，输送机理类似垂直式，需要较高转速和功率，较小倾角时，输送机理接近水平式，需要较低转速但扭矩较大[19-21]。

综合考虑整机的结构以及3种螺旋输送机的输送性能，选择倾斜螺旋式排肥器作为研究对象。螺旋式排肥器的输送效率与其倾斜角度呈反比关系[22]，倾角越小，则输送效率越高，所以应当设置合理的排肥器倾角。为避免出现水平或垂直螺旋式排肥器效果，将排肥器的倾角设定在25°~75°。同时考虑到如果倾角变化过大而造成排肥量的差距过大，故所选的5个排肥器倾角的差值不应过大，5个水平为：30°、35°、40°、45°、50°[23]。

1.3.3 螺旋叶片直径

作为螺旋式排肥器的重要参数，螺旋叶片直径对排肥量稳定性影响较大。螺旋叶片直径的确定依据排肥螺旋的结构、肥料特性和排肥量大小等方面。在输送肥料时，螺旋叶片、螺旋轴及螺旋叶片与壳体内壁间隙对于整机排肥量稳定性影响较小，可忽略不计，从而对排肥量的计算公式[17-18,24]进行简化得到

$$Q = 47ZK_1A\rho\varphi\varepsilon D^{\frac{5}{2}} \tag{9}$$

令

$$K_2 = \sqrt[2.5]{\frac{1}{47ZK_1A}} \tag{10}$$

则式(9)可转换为

$$D \geqslant K_2\sqrt[2.5]{\frac{Q}{\rho\varphi\varepsilon}} \tag{11}$$

式中 Q——排肥量，取0.03 t/h

D——螺旋叶片直径，mm

Z——螺旋叶片头数

ρ——肥料堆积密度，取0.8 t/m^3

φ——填充系数，取0.3

ε——倾斜系数，取0.65[23]

K_1——螺旋叶片螺距和直径比例系数，取0.6

A——物料综合特性系数，取25

最后将以上所需参数代入公式计算可得$D \geqslant 22$ mm，为了防止忽略排肥螺旋的部分体积对排肥量造成影响，以及需要的排肥转速较大而造成排肥的不稳定，适当扩大螺旋叶片直径。因此，本研究仿真试验采取的螺旋叶片直径5个水平为：40、45、50、55、60 mm。

1.3.4　螺旋叶片转速

为了确保肥料的正常输送，螺旋轴的转速需低于其临界值。在临界状态下，肥料所受的惯性离心力与其自身重力应满足

$$\begin{cases} m\omega_{\max}^2 r \leqslant mg\cos\theta \\ \omega_{\max} = \dfrac{2\pi n_{\max}}{60} \end{cases} \tag{12}$$

式中　m——肥料颗粒质量，g

考虑到受肥料不同物理特性的影响，得到

$$n_{\max} \leqslant \frac{30k}{\pi}\sqrt{\frac{2g\cos\theta}{D}} \tag{13}$$

式中　k——物料综合系数

令物料综合特性系数

$$A = \frac{30k\sqrt{2g\cos\theta}}{\pi} \tag{14}$$

则式(13)可转换为

$$n_{\max} \leqslant \frac{A}{\sqrt{D}} \tag{15}$$

对于颗粒状化肥，取A为25，则计算可得$n_{\max} \leqslant 102$ r/min。基于以上计算，以及对于目标排肥量的要求，本研究仿真试验采取的螺旋叶片转速5个水平为：20、25、30、35、40 r/min。

1.3.5　螺旋叶片螺距

多头排肥螺旋相邻螺旋叶片之间的距离，称为螺距。沿螺旋叶片旋转一周所前进的距离，称为导程。螺距和导程一方面影响着螺旋升角的取值，另一方面也会影响肥料颗粒的运动状态，因此螺距对排肥量稳定性具有一定影响。

根据经验，螺距计算公式为

$$P = K_1 D \tag{16}$$

则导程

$$S = ZP = ZK_1 D \tag{17}$$

式中　P——螺旋叶片螺距，mm

根据物料的流动特性，排肥口的最小尺寸应为物料颗粒尺寸的3~6倍，这意味着螺距应满足能容纳至少3颗或以上更多的肥料，即

$$P \geqslant 3D_{f_{\max}} \tag{18}$$

式中　$D_{f_{\max}}$——肥料最大等效直径，mm

确定最大许用螺距时，需要确保在排肥器作业时肥料颗粒具有合理的受力和速度分量，即要有较大的轴向分力F_z和轴向速度V_τ，且轴向推力需满足$F_z>0$，轴向速度$V_z>0$，才能实现轴向运动，根据式(1)~(3)、(8)，螺旋升角应满足

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \beta \tag{19}$$

螺旋叶片上各点的螺旋升角随点到螺旋轴轴线的距离的变化而变化，根据式(2)可知，螺旋叶片在螺旋轴附近的螺旋升角最大，肥料颗粒受到的轴向分力和速度为最小值。结合式(2)、(3)、(19)可得

$$S < \frac{\pi d}{\mu} \tag{20}$$

式中　d——螺旋轴与叶片相接处直径，mm

根据肥料输送过程中受力与运动的分析，结合式(17)、(18)、(20)可得，螺距应满足

$$\begin{cases} P \geqslant 3D_{f_{\max}} \\ P < \dfrac{\pi d}{Z\mu} \\ P \leqslant K_1 D \end{cases} \tag{21}$$

将相应参数代入计算，对于四头排肥螺旋，得到合理的螺旋叶片螺距范围为15~40 mm。基于此，本研究仿真试验采取的螺旋叶片螺距5个水平为：20、25、30、35、40 mm。

2　排肥过程仿真与分析

2.1　仿真模型建立

2.1.1　排肥器模型建立

排肥器实际模型零部件较多且复杂，需要对排肥器的模型进行简化，在三维建模软件Solidworks 2016中建立简化后初始的螺旋式排肥器模型，该仿真模型主要由肥箱、壳体、排肥管、排肥螺旋和接料桶等组成。进行离散元仿真之前，将此模型以stl格式导入到EDEM 2022软件前处理模块中，导入后仿真模型以filled实体形式显示，如图5所示。

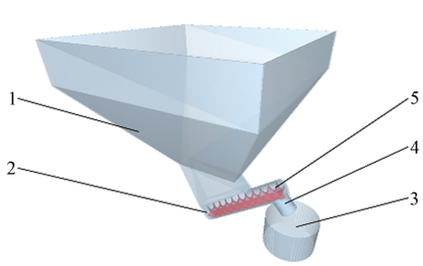


图5　初始排肥器仿真模型

Fig. 5　Initial fertilizer discharger simulation model

1. 肥箱　2. 壳体　3. 接料桶　4. 排肥管　5. 排肥螺旋

2.1.2　肥料颗粒模型及颗粒工厂建立

通过离散元法模拟肥料颗粒在排肥器中的排肥过程，所设定的肥料颗粒形状和尺寸越接近于真实情况，排肥试验结果的可靠性就越高[25]。本研究选取果树早

期追肥常用美丰牌(高氮型)复合肥料颗粒100颗,总养分质量分数36%以上,肥料中N、P_2O_5、K_2O质量比为30∶6∶0,测量得出长度均值为4.20 mm、宽度均值为3.89 mm和厚度均值为3.25 mm,并计算得出其等效直径为3.79 mm,球形率达到了90.24%。

所选择的复合肥颗粒样本球形率较高,达到90%以上,形状近似球体。因此,为了便于计算,将复合肥颗粒模型简化为4 mm的离散元球形模型,设置生成的肥料颗粒尺寸服从正态分布,使其更加符合真实尺寸。将颗粒工厂设置在肥箱的正上方处,每秒生成50 000粒颗粒,共生成25 000粒颗粒,下降速度为2 m/s。

2.2 仿真参数设置

在进行仿真试验前,需设置排肥器相关仿真参数数值。在前处理模块添加并设置肥料颗粒和排肥器模型的材料,参考已有复合肥和钢制材料相关研究[26-28],设置参数如表1所示,分别是泊松比、密度和剪切模量,其中复合肥肥料真实密度通过测量和计算获得。此外,还需要设置颗粒与颗粒之间、颗粒与排肥器之间相互作用时的粒子行为,输入碰撞恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数。设置完成之后,即可完成上述创建的肥料颗粒和导入排肥器模型的属性定义。

表1 EDEM仿真所需复合肥和钢板物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of compound fertilizer and steel plate required for EDEM simulation

类型	参数	数值
复合肥	泊松比	0.25
	真实密度/(kg·m^{-3})	1 300
	剪切模量/Pa	2.8×10^7
钢板	泊松比	0.30
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
复合肥-复合肥	碰撞恢复系数	0.39
	静摩擦因数	0.48
	动摩擦因数	0.21
复合肥-钢板	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.43
	动摩擦因数	0.10

EDEM仿真过程中使用排肥螺旋旋转推动壳体内的肥料颗粒运动,需要定义其线性旋转运动,包括转动的速度、方向以及开始和结束转动的时间。颗粒与颗粒和颗粒与排肥器的相互作用均使用默认的Hertz-Mindlin(no slip)接触模型。为了提高计算工作效率、缩短计算时间,设置时间步长为瑞利时间步长的30%,单元网格尺寸为最小肥料颗粒半径的3倍,目标储存间隔为0.1 s。完成所有设置之后,点击Progress进行仿真。

2.3 仿真试验与分析

2.3.1 试验设计

由排肥器理论排肥量公式可知,其主要参数为螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径、螺旋叶片螺距和螺旋叶片转速等。因此,本研究以螺旋叶片头数Z、排肥器倾角θ、螺旋叶片直径D、螺旋叶片螺距P和螺旋叶片转速n为试验因素,以排肥量变异系数C_V为试验指标进行单因素和多因素离散元仿真试验。

在EDEM仿真结束之后,可通过其后处理模块获取接料桶内肥料质量随时间变化的数据,对其进行处理,任意选取仿真稳定阶段1 s内的排肥量数据,每隔0.2 s计算一次排肥量,再根据排肥量计算得到1 s内的排肥量变异系数,重复以上选取和计算5次,最后取平均值得到排肥量变异系数的相关数值。

2.3.2 单因素试验

以螺旋叶片头数Z、排肥器倾角θ、螺旋叶片直径D、螺旋叶片螺距P和螺旋叶片转速n为试验因素,以排肥量变异系数C_V为试验指标进行单因素离散元仿真试验,探究其对排肥量稳定性的影响以及与排肥量变异系数的关系。结合排肥器主要参数相关计算和排肥量的要求,确定单因素试验因素及水平如表2所示。

表2 单因素试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels for single-factor experiment

水平	因素				
	Z	θ/(°)	D/mm	P/mm	n/(r·min^{-1})
1	1	0	40	20	20
2	2	30	45	25	25
3	3	35	50	30	30
4	4	40	55	35	35
5		45	60	40	40
6		50			

(1)螺旋叶片头数对排肥量稳定性的影响

当排肥器倾角为40°、螺旋叶片直径为50 mm、螺旋叶片螺距为30 mm、螺旋叶片转速为30 r/min时,螺旋叶片头数分别设置1、2、3、4共4个水平。排肥量随着螺旋叶片头数的增加而变化,通过计算得到排肥量变化情况仿真试验数据,如图6所示。从图中可以看出,随着螺旋叶片头数的增加,稳定阶段排肥量先增加而后下降,而排肥量的波动越来越小。

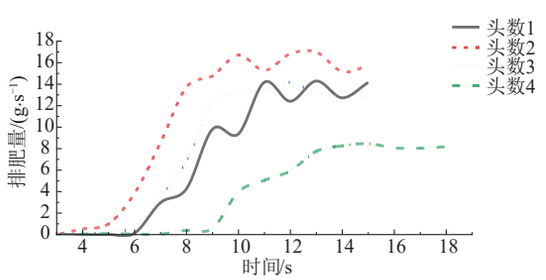


图6 不同螺旋叶片头数排肥量变化曲线

Fig. 6 Variation of fertilizer discharge rate with different numbers of spiral blades

根据仿真试验数据分析螺旋叶片头数对排肥量变异系数的影响,通过计算得到在不同螺旋叶片头数下排肥量变异系数,关系如图7所示。由图可知:当螺旋叶片

头数在1~4范围变化时，随着螺旋叶片头数的增加，排肥量变异系数呈现的趋势为持续下降。

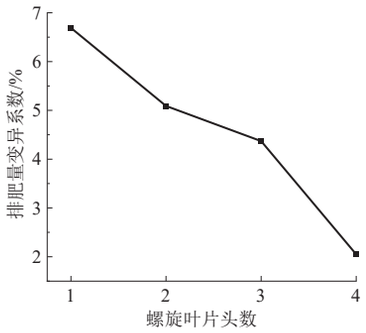


图7　螺旋叶片头数与排肥量变异系数关系

Fig. 7　Relationship between number of spiral blades and coefficient of variation of fertilizer discharge rate

运用Design-Expert 13数据拟合功能，得到螺旋叶片头数与排肥量变异系数关系的拟合方程，检验数学模型及其系数的显著性可以得到：螺旋叶片头数对排肥量变异系数影响显著，$p<0.05$。

（2）排肥器倾角对排肥量稳定性的影响

当螺旋叶片头数为4、螺旋叶片直径为50 mm、螺旋叶片螺距为30 mm、螺旋叶片转速为30 r/min时，排肥器倾角分别设置0°、30°、35°、40°、45°、50°共6个水平。排肥量随着排肥器倾角的增加而变化，通过计算得到排肥量变化情况仿真试验数据，如图8所示。从图中可以看出，随着排肥器倾角的增加，稳定阶段排肥量越来越小，而排肥量的波动先减小而后又增大。

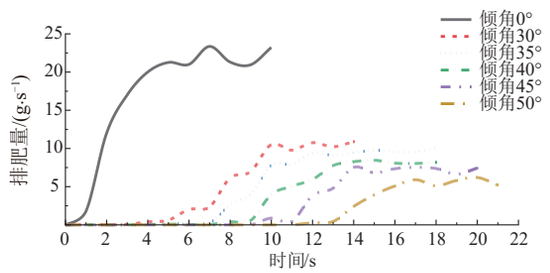


图8　不同排肥器倾角排肥量变化曲线

Fig. 8　Variation of fertilizer discharge rate with different fertilizer discharger inclination angles

根据仿真试验数据分析排肥器倾角对排肥量变异系数的影响，通过计算得到在不同排肥器倾角下排肥量变异系数，关系如图9所示。由图9可知：当排肥器倾角在30°~50°范围变化时，随着排肥器倾角的增加，排肥量变异系数趋势为先下降后上升，当排肥器倾角为40°左右时，排肥量变异系数达到最小值。此外，当排肥器倾角为0°时，水平螺旋式排肥器波动现象相较于倾斜式较为明显，排肥量变异系数达到了10.63%。

运用Design-Expert 13数据拟合功能，得到排肥器倾角与排肥量变异系数关系的拟合方程，检验数学模型及其系数的显著性可以得到：排肥器倾角对排肥量变异系数影响显著，$p<0.05$。

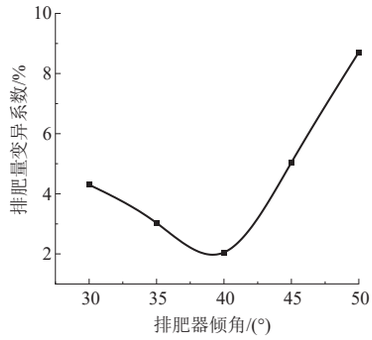


图9　排肥器倾角与排肥量变异系数关系

Fig. 9　Relationship between fertilizer discharger inclination angle and coefficient of variation of fertilizer discharge rate

（3）螺旋叶片直径对排肥量稳定性的影响

当螺旋叶片头数为4、排肥器倾角为40°、螺旋叶片螺距为30 mm、螺旋叶片转速为30 r/min时，螺旋叶片直径分别设置40、45、50、55、60 mm共5个水平。排肥量随着螺旋叶片直径的增加而变化，通过计算得到排肥量变化情况仿真试验数据，如图10所示。从图中可以看出，随着排肥器倾角的增加，稳定阶段排肥量越来越大，而排肥量的波动先减小而后又增大。

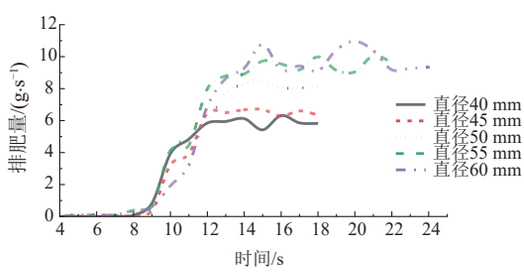


图10　不同螺旋叶片直径排肥量变化曲线

Fig. 10　Variation of fertilizer discharge rate with different spiral blade diameters

根据仿真试验数据分析螺旋叶片直径对排肥量变异系数的影响，通过计算得到在不同螺旋叶片直径下排肥量变异系数，关系如图11所示。由图11可知：当螺旋叶片直径在40~60 mm范围变化时，随着螺旋叶片直径的增加，排肥量变异系数趋势为先下降后上升，当螺旋叶片直径为50 mm左右时，排肥量变异系数达到最小值。

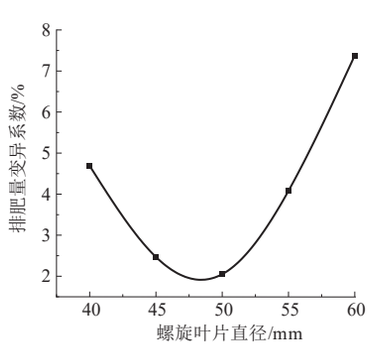


图11　螺旋叶片直径与排肥量变异系数关系

Fig. 11　Relationship between spiral blade diameter and coefficient of variation of fertilizer discharge rate

运用Design-Expert 13数据拟合功能，得到螺旋叶片直径与排肥量变异系数关系的拟合方程，检验数学模型及其系数的显著性可以得到：螺旋叶片直径对排肥量变异系数影响极显著，$p<0.01$。

（4）螺旋叶片螺距对排肥量稳定性的影响

当螺旋叶片头数为4、排肥器倾角为40°、螺旋叶片直径为50 mm、螺旋叶片转速为30 r/min时，螺旋叶片螺距分别设置20、25、30、35、40 mm共5个水平。排肥量随着螺旋叶片螺距的增加而变化，通过计算得到排肥量变化情况仿真试验数据，如图12所示。从图中可以看出，随着螺旋叶片螺距的增加，稳定阶段排肥量先增加而后下降，而排肥量波动先减小而后又增大。

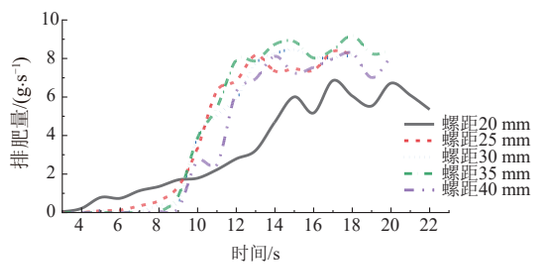


图12 不同螺旋叶片螺距排肥量变化曲线

Fig. 12 Variation of fertilizer discharge rate with different spiral blade pitches

根据仿真试验数据分析螺旋叶片螺距对排肥量变异系数的影响，通过计算得到在不同螺旋叶片螺距下排肥量变异系数，关系如图13所示。由图13可知：当螺旋叶片螺距在20~40 mm范围变化时，随着螺旋叶片螺距的增加，排肥量变异系数趋势为先下降后上升，当螺旋叶片螺距为30 mm左右时，排肥量变异系数达到最小值。

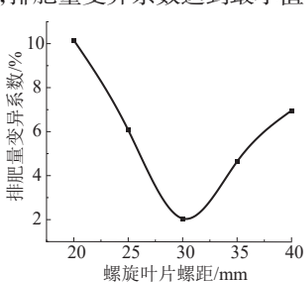


图13 螺旋叶片螺距与排肥量变异系数关系

Fig. 13 Relationship between spiral blade pitch and coefficient of variation of fertilizer discharge rate

运用Design-Expert 13数据拟合功能，得到螺旋叶片螺距与排肥量变异系数关系的拟合方程，检验数学模型及其系数的显著性可以得到：螺旋叶片螺距对排肥量变异系数影响不显著，$p>0.05$。

（5）螺旋叶片转速对排肥量稳定性的影响

当螺旋叶片头数为4、排肥器倾角为40°、螺旋叶片直径为50 mm、螺旋叶片螺距为30 mm时，螺旋叶片转速分别设置20、25、30、35、40 r/min共5个水平。排肥量随着螺旋叶片转速的增加而变化，通过计算得到排肥量变化情况仿真试验数据，如图14所示。从图中可以看出，随着螺旋叶片转速的增加，稳定阶段排肥量越来越大，而排肥量的波动先减小而后又增大。

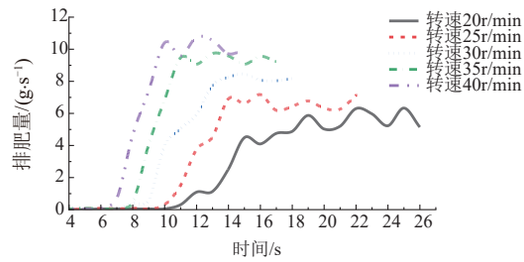


图14 不同螺旋叶片转速排肥量变化情况

Fig. 14 Variation of fertilizer discharge rate at different spiral blade rotational speeds

根据仿真试验数据分析螺旋叶片转速对排肥量变异系数的影响，通过计算得到在不同螺旋叶片转速下排肥量变异系数，关系如图15所示。由图15可知：当螺旋叶片转速在20~40 r/min范围变化时，随着螺旋叶片螺距的增加，排肥量变异系数趋势为先下降后上升，当螺旋叶片转速为30 r/min左右时，排肥量变异系数达到最小值。

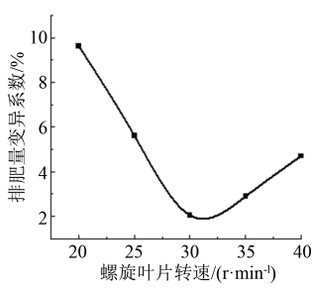


图15 螺旋叶片转速与排肥量变异系数关系

Fig. 15 Relationship between spiral blade rotational speed and coefficient of variation of fertilizer discharge rate

运用Design-Expert 13数据拟合功能，得到螺旋叶片转速与排肥量变异系数关系的拟合方程，检验数学模型及其系数的显著性可以得到：螺旋叶片转速对排肥量变异系数影响显著，$p<0.05$。

由上述结果可知：螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速等4个因素对四头倾斜螺旋式精准排肥器排肥量稳定性影响较大。螺旋叶片头数、排肥器倾角和螺旋叶片转速对排肥量变异系数影响显著，而螺旋叶片直径对排肥量变异系数影响极显著。采用四头倾斜排肥螺旋输送肥料，可以提高排肥量稳定性。

2.3.3 多因素试验

单因素试验结果表明螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径与螺旋叶片转速等因素对排肥量稳定性有较大影响，为进一步明确上述因素对排肥器排肥量稳定性的影响及其最优参数组合，选择排肥量稳定性较优的四头排肥螺旋，以排肥器倾角θ、螺旋叶片直径D和螺旋叶片转速n为试验因素，以排肥量变异系数C_V为试验指标进行多因素离散元仿真试验，探究其与排肥量变异系数的关系。采用三因素三水平Box-Behnken响应面

设计试验确定最佳参数组合的范围，参考单因素试验分析规律，试验因素和编码如表3所示。

表3　多因素试验因素编码

Tab. 3　Factors codes for multi-factor experiment

编码	因素		
	θ/(°)	D/mm	n/(r•min^{-1})
−1	35	45	25
0	40	50	30
1	45	55	35

根据三因素三水平的正交试验设计，进行了17组试验，通过计算得到排肥量变异系数。具体试验方案与结果如表4所示。X_1、X_2和X_3分别为排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速编码值。

表4　正交试验方案与结果

Tab. 4　Orthogonal experiment design and results

序号	因素			C_V/%
	X_1	X_2	X_3	
1	−1	−1	0	2.06
2	1	−1	0	4.30
3	−1	1	0	3.06
4	1	1	0	8.43
5	−1	0	−1	8.25
6	1	0	−1	12.02
7	−1	0	1	5.74
8	1	0	1	8.46
9	0	−1	−1	7.14
10	0	1	−1	9.20
11	0	−1	1	5.18
12	0	1	1	6.88
13	0	0	0	2.05
14	0	0	0	2.38
15	0	0	0	2.51
16	0	0	0	1.47
17	0	0	0	3.35

（1）试验因素对排肥量变异系数的影响

运用Design-Expert 13数据拟合功能，对仿真试验结果进行函数分析，得到排肥量变异系数与排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速的二次回归方程为

$$C_V = 2.35 + 1.76X_1 + 1.11X_2 - 1.29X_3 + 0.782\,5X_1X_2 - 0.262\,5X_1X_3 - 0.09X_2X_3 + 1.81{X_1}^2 + 0.296\,5{X_2}^2 + 4.45{X_3}^2 \tag{22}$$

检验回归方程的显著性，由排肥量变异系数方差分析（表5）可知，回归方程模型p<0.01，表明该回归方程模型极显著。此外，失拟项p>0.05，表明失拟不显著，回归方程模型拟合程度高。

从表5可得：X_1、X_2和X_3对排肥量变异系数影响极显著，p<0.01；X_1X_2对排肥量变异系数影响显著，p<0.05，X_1X_3、X_2X_3对排肥量变异系数影响不显著，p>0.05；${X_1}^2$、${X_3}^2$对排肥量变异系数影响极显著，p<0.01，${X_2}^2$对排肥量变异系数影响不显著，p>0.05。去除不显著因素项，得到优化后回归方程为

$$C_V = 2.35 + 1.76X_1 + 1.11X_2 - 1.29X_3 + 0.782\,5X_1X_2 + 1.73{X_1}^2 + 4.37{X_3}^2 \tag{23}$$

表5　排肥量变异系数方差分析

Tab. 5　Variance analysis of coefficient of variation in fertilizer discharge stability

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	153.79	9	17.09	44.58	<0.000 1**
X_1	24.85	1	24.85	64.84	<0.000 1**
X_2	9.88	1	9.88	25.78	0.001 4**
X_3	13.39	1	13.39	34.94	0.000 6**
X_1X_2	2.45	1	2.45	6.39	0.039 4*
X_1X_3	0.275 6	1	0.275 6	0.719 2	0.424 5
X_2X_3	0.032 4	1	0.032 4	0.084 5	0.779 7
${X_1}^2$	13.86	1	13.86	36.15	0.000 5**
${X_2}^2$	0.370 2	1	0.370 2	0.965 8	0.358 5
${X_3}^2$	83.44	1	83.44	217.70	<0.000 1**
残差	2.68	7	0.383 3		
失拟项	0.791 9	3	0.264 0	0.558 4	0.670 1
纯误差	1.89	4	0.472 7		
总和	156.47	16			
数学模型拟合度			0.982 9		

注：**表示极显著（P<0.01），*表示显著（0.01≤P<0.05）。

由上述分析可知：排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速等3个因素对四头倾斜螺旋式精准排肥器排肥量稳定性影响较大，对排肥量变异系数影响极显著。影响排肥量变异系数因素顺序依次为排肥器倾角、螺旋叶片转速、螺旋叶片直径。

（2）交互因素对排肥量变异系数的影响

根据正交试验结果以及表5方差分析，得到3个试验因素排肥器倾角θ、螺旋叶片直径D和螺旋叶片转速n与试验指标排肥量变异系数C_V的响应曲面，如图16所示。

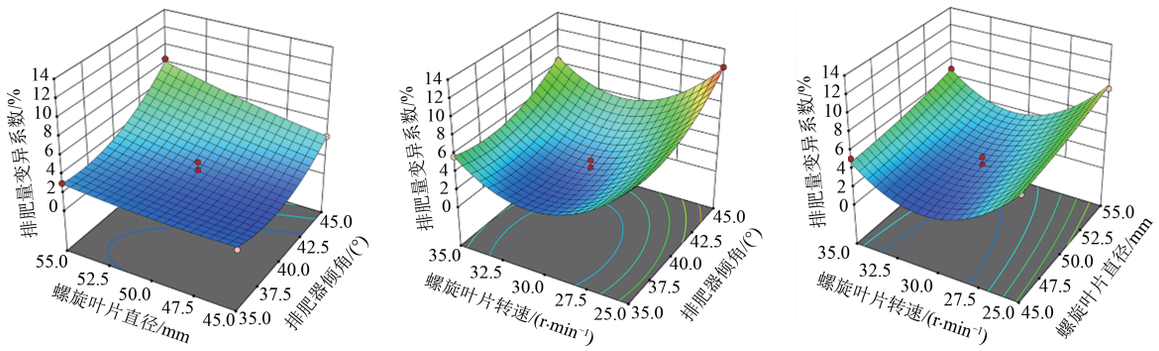
结果表明，当排肥器倾角在35°~45°、螺旋叶片直径在45~55 mm、螺旋叶片转速在25~35 r/min范围变化时，排肥器倾角和螺旋叶片直径越小，且螺旋叶片转速处于区间中间值阶段时，排肥量变异系数越小。

2.3.4　参数优化

根据四头倾斜螺旋式精准排肥器的设计要求以及果园施肥规定标准，排肥量变异系数应不超过7.8%，对排肥器倾角、螺旋叶片直径、螺旋叶片转速以及排肥量变异系数进行约束，建立的约束区间式为

$$\begin{cases} 35° \leqslant \theta \leqslant 45° \\ 45\ \text{mm} \leqslant D \leqslant 55\ \text{mm} \\ 25\ \text{r/min} \leqslant n \leqslant 35\ \text{r/min} \\ \min C_V \\ 0 \leqslant C_V \leqslant 7.8\% \end{cases} \tag{24}$$

运用Design-Expert 13的优化模块，对排肥排肥量变异系数进行优化，得到当采用四头排肥螺旋时，最优参数组合为：排肥器倾角38°、螺旋叶片直径46 mm、螺旋叶片转速31 r/min。此时，排肥量达到7.74 g/s，排肥量



(a) X_3=0 (b) X_2=0 (c) X_1=0

图16 试验因素对试验指标影响的响应曲面

Fig. 16 Response surface of test factors on test indicators

变异系数达到最小值,为1.43%。

根据实际排肥情况以及结构紧凑性的要求,对排肥器模型其他参数进行适当改进,最终确定:螺旋叶片头数4、螺旋叶片螺距30 mm、螺旋叶片长度800 mm,排肥管口外径50 mm。通过EDEM仿真进行比较验证试验,重复5次取平均值,其结果如图17所示。得到排肥量为7.71 g/s,排肥量变异系数为1.65%,与优化计算得出的结果误差较小,优化结果准确可靠。

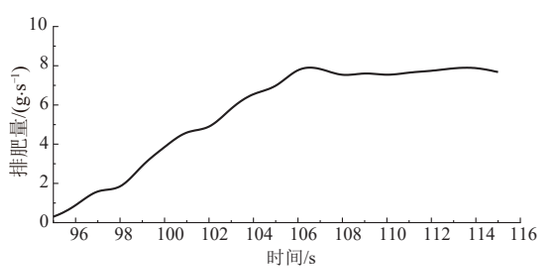


图17 最优参数组合下排肥量变化曲线

Fig. 17 Variation in fertilizer discharge under optimal parameter combination

3 台架试验

为了进一步验证优化后四头倾斜螺旋式精准排肥器排肥量稳定性,进行台架试验。

3.1 试验条件

台架试验地点为江苏省农业科学院农业设施与装备研究所实验室,肥料选用美丰牌(高氮型)复合肥颗粒(等效直径约为3.79 mm,真实密度约为1 300 kg/m^3)。自行设计的排肥系统如图18所示,主要由四头倾斜螺旋式排肥器、悬挂架、接料桶、控制面板、称量传感器、称量变送器、数据采集盒、电源和计算机采集软件等部分组成。

3.2 排肥量稳定性试验

在排肥量稳定性试验中,将接料桶放置在排肥管口正下方,分别对不同螺旋叶片转速下的排肥情况进行试验。以螺旋叶片转速为试验因素,分别设置20、25、30、31、35、40 r/min等6个水平,以排肥量变异系数为试验指标。通过称量传感器记录桶中肥料质量的变化情况,从而得出不同转速下排肥量变化情况和排肥量变异系数,

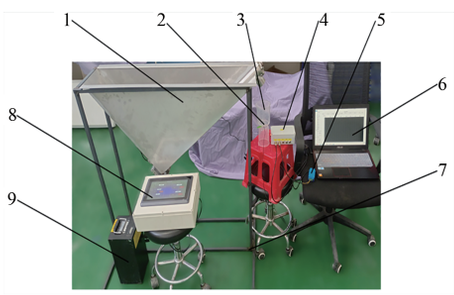


图18 台架试验排肥系统

Fig. 18 Test bench fertilizer discharge system

1. 四头倾斜螺旋式精准排肥器 2. 称量传感器 3. 接料桶 4. 数据采集盒 5. 称量变送器 6. 计算机采集软件 7. 悬挂架 8. 控制面板 9. 电源

每种转速下重复进行5次试验,最后取5次数据的平均值作为最终数据,得到排肥量变化情况和关系图如图19、20所示。通过台架试验,得到在上文最优参数组合下的实测排肥量为7.02 g/s,排肥量变异系数为3.69%。考虑仿真参数与实际有一定差别,以及肥料破碎、堵塞等因素对排肥稳定性所造成的影响,仿真值与实测值会存在一定的误差。

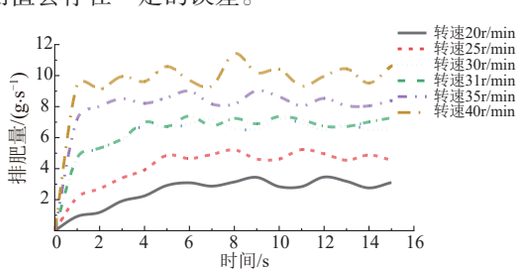


图19 台架试验不同螺旋叶片转速排肥量变化曲线

Fig. 19 Variation of fertilizer discharge rate at different spiral blade rotational speeds in bench tests

经过多次实际台架试验和计算,取平均值可得:当螺旋叶片转速优化提升至33 r/min时,排肥量达到7.67 g/s,排肥量变异系数达到最小值,为2.92%。

4 结论

(1)通过单因素仿真试验得到,螺旋叶片头数、排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速等4个因素对

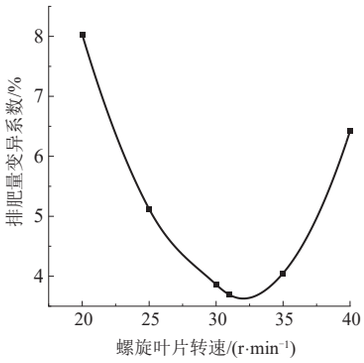


图20　台架试验螺旋叶片转速与排肥量变异系数关系

Fig. 20　Relationship between spiral blade rotational speed and coefficient of variation of fertilizer discharge rate in bench tests

设计的排肥器排肥量稳定性影响较大。螺旋叶片头数、排肥器倾角和螺旋叶片转速对排肥量变异系数影响显著，而螺旋叶片直径对排肥量变异系数影响极显著。采用四头倾斜排肥螺旋输送肥料，可以提高排肥量稳定性。

(2)通过多因素仿真试验得到，当采用四头排肥螺旋时，最优参数组合为：排肥器倾角38°、螺旋叶片直径46 mm、螺旋叶片转速31 r/min，排肥量变异系数达到最小值，为1.65%。排肥器倾角、螺旋叶片直径和螺旋叶片转速等3个因素对设计的排肥器排肥量稳定性影响较大，对排肥量变异系数影响均为极显著。影响排肥量变异系数因素顺序依次为：排肥器倾角、螺旋叶片转速、螺旋叶片直径。

(3)通过排肥量稳定性台架试验得到，在最优参数组合的基础上，实测排肥量变异系数为3.69%。当排肥器倾角为38°、螺旋叶片直径为46 mm和螺旋叶片转速优化提升至33 r/min时，排肥量变异系数达到最小值，为2.92%，符合果园施肥规定标准。

参　考　文　献

[1] 胡显威，毛伟. 施肥机械的研究现状及发展趋势[J]. 现代农业装备，2023，44(2)：25－29，50.
HU Xianwei，MAO Wei. Development status and expectation of the fertilizer machinery[J]. Modern Agricultural Equipment，2023，44(2)：25－29，50.(in Chinese)

[2] 杨龙飞. 推广测土配方施肥技术 促进农业可持续发展[J]. 黑龙江粮食，2023(9)：110－112.
YANG Longfei. Promoting soil testing and formulated fertilization technology to facilitate sustainable agricultural development[J]. Heilongjiang Grain，2023(9)：110－112.(in Chinese)

[3] 宫帅，郝文雅. 精准施肥技术发展现状研究[J]. 现代农业研究，2022，28(3)：136－138.
GONG Shuai，HAO Wenya. Research on the development status of precision fertilization technology[J]. Modern Agricultural Research，2022，28(3)：136－138.(in Chinese)

[4] 李圳鹏，梁春英，李普，等. 精准施肥技术研究现状和展望[J]. 热带农业工程，2022，46(3)：47－50.
LI Zhenpeng，LIANG Chunying，LI Pu，et al. Research status and outlook of precision fertilization technology[J]. Tropical Agricultural Engineering，2022，46(3)：47－50.(in Chinese)

[5] 张宏图，解恒燕，贾辰钰. 有机肥施肥机排肥器的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究，2022，44(8)：262－268.
ZHANG Hongtu，XIE Hengyan，JIA Chenyu. Present status and development trend of the fertilizer apparatus in organic manure applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，44(8)：262－268.(in Chinese)

[6] 王祺，王艳玲，俄胜哲. 我国果园机械装备现状及发展思路[J]. 农业机械，2019(1)：109－111.
WANG Qi，WANG Yanling，E Shengzhe. Current situation and development ideas of orchard machinery and equipment in China[J]. Agricultural Machinery，2019(1)：109－111.(in Chinese)

[7] XU Wenzhi，YUAN Quanchun，ZENG Jin，et al. Research progress regarding the precision of dosing and distribution devices for fertilizers[J]. Applied Sciences，2024，14(7)：3059.

[8] MONDAL D，GHOSH N. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition[J]. Materials Today：Proceedings，2018，5(1)：1286－1291.

[9] LYALIN E A，TRUTNEV M A，TRUTNEV N V. Parameters of the spiral-screw device for dosing mineral fertilizers with different consumption characteristics[J]. Perm Agrarian Journal，2022，36(4)：14－22.

[10] ZIMMERMANN G G，JASPER S P，SAVI D，et al. Distribution of granulated fertilizers in dispensers mounted with single and double helicoidal[J]. Ciência Rural，2024，54(6)：e20220358.

[11] 赵亮. 基于离散元的芒果施肥机螺旋式排肥器仿真与试验[D]. 昆明：昆明理工大学，2020.
ZHAO Liang. Simulation and test of spiral fertilizer sprinkler of mango fertilizer based on discrete element[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2020.(in Chinese)

[12] 薛忠，赵亮，王凤花，等. 基于EDEM的螺旋式排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究，2020，42(6)：87－95.
XUE Zhong，ZHAO Liang，WANG Fenghua，et al. Study on the performance of spiral fertilizer distributor based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(6)：87－95.(in Chinese)

[13] 薛忠，赵亮，王凤花，等. 基于离散元法的螺旋式排肥器性能模拟试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2019，45(5)：548－553.
XUE Zhong，ZHAO Liang，WANG Fenghua，et al. Performance simulation test of the spiral fertilizer distributor based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)，2019，45(5)：548－553.(in Chinese)

[14] 方龙羽. 电驱式螺旋排肥装置的设计与试验[D]. 广州:华南农业大学,2020.
FANG Longyu. Design and experiment of electric driven spiral fertilizer discharge device[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.(in Chinese)

[15] 杨文武,方龙羽,罗锡文,等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2020,36(17):1-8.
YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1-8.(in Chinese)

[16] 李鑫,姜新波,纪欣鑫,等. 基于遗传算法的螺旋双轮排肥器优化设计与试验[J]. 河南农业大学学报,2023,57(6):1026-1034.
LI Xin, JIANG Xinbo, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiments of double-spiral fertilizer discharge device based on genetic algorithm[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(6): 1026-1034.(in Chinese)

[17] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):68-77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68-77.(in Chinese)

[18] 肖文立. 油菜机械直播精量深施肥系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
XIAO Wenli. Design and experiment of precision deep fertilization system for rapeseed direct-seeder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.(in Chinese)

[19] 涂亚东. 螺旋输送机输送性能及螺旋体磨损研究[D]. 荆州:长江大学,2018.
TU Yadong. Study on conveying performance and screw body wear of screw conveyor[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.(in Chinese)

[20] 王鹏宇. 红小豆穴施颗粒肥装置与控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.
WANG Pengyu. Research on granular fertilizer device and control system for red bean spot fertilization[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022.(in Chinese)

[21] 王鹏宇,梁春英,李普,等. 基于EDEM的垂直螺旋式排肥器性能模拟试验[J]. 南方农机,2021,52(20):1-3.
WANG Pengyu, LIANG Chunying, LI Pu, et al. Simulation experiment on the performance of vertical spiral fertilizer discharger based on EDEM[J]. Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(20): 1-3.(in Chinese)

[22] 何彦涛. HS210型螺旋输砂器动态特性及结构优化分析与研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2023.
HE Yantao. Analysis and research on dynamic characteristics and structure optimization of HS210 sand screw conveyer[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.(in Chinese)

[23] 郑欣欣. 倾斜式螺旋输送机输送性能及螺旋体有限元仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
ZHENG Xinxin. Research on the conveying performance of inclined screw conveyor and finite element analysis of screw body[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.(in Chinese)

[24] 周磊. 基于EDEM的螺旋卸船机倾斜作业时性能研究及仿真分析[D]. 太原:太原科技大学,2023.
ZHOU Lei. Study on performance and simulation analysis of screw ship unloader during inclined operation based on EDEM[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023.(in Chinese)

[25] 王宇兵. 茶园侧位深施肥机的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
WANG Yubing. Design and experiment of lateral deep fertilizer applicator in tea garden[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.(in Chinese)

[26] LIU Heng, XU Wenzhi, YUAN Quanchun, et al. Optimization and experimental study of operation parameters for fertilizer injection drilling device based on discrete element simulation[J]. Applied Sciences, 2024, 14(6): 2642.

[27] 刘洪男. 颗粒化肥气送式集中排肥器设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学,2021.
LIU Hongnan. Design and experiment of a pneumatic centralized fertilizer metering device for granular fertilizer [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021.(in Chinese)

[28] 李陶. 风送式集中排肥系统设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学,2023.
LI Tao. Design and experiment of air-assisted centralized fertilization system[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023.(in Chinese)