

徐勇, 宋明翰, 孙国峻, 等. 刮板输送式大棚有机肥排肥装置的设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 79-87.
XU Yong, SONG Minghan, SUN Guojun, et al. Design and test of organic fertilizer discharging device with scraper conveyor for greenhouse[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 79-87.

刮板输送式大棚有机肥排肥装置的设计与试验

徐 勇, 宋明翰, 孙国峻, 余洪锋, 何瑞银
(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】解决现有有机肥排肥装置排肥稳定性差的问题, 提高大棚内有机肥施撒机械化水平, 设计一种刮板输送式大棚有机肥排肥装置。【方法】以苏南地区草莓种植大棚为例, 依据大棚基本尺寸参数和草莓种植农艺要求, 确定排肥装置设计的主要要求。结合散体力学理论对设计的排肥装置关键结构和参数进行分析和确定, 确定影响排肥量稳定性的主要因素为排肥轴转速和排肥器开度。搭建室内有机肥排肥试验平台, 进行转速与排肥量单因素试验和两因素五水平的响应面试验。【结果】转速与排肥量相关性试验结果表明, 在试验设定的转速和开度范围内, 不同开度条件下, 转速和排肥量均呈良好的线性关系, 整体的决定系数大于 0.985 7, 排肥量可通过实时调节开度和转速实现调节。响应面试验结果表明, 排肥范围内排肥量稳定性较好, 排肥轴转速对于排肥稳定性变异系数的影响大于排肥器开度。当排肥器开度为 30.42 mm、排肥轴转速为 51.5 r/min 时, 排肥稳定性变异系数结果最优, 为 1.84%。验证试验结果表明, 变异系数相对误差不大于 5%, 变异系数相对误差均值仅为 2.95%, 符合要求。对比验证试验表明, 常用的螺旋式有机肥排肥器的排肥稳定性变异系数均值为 6.12%, 本文设计的刮板输送式有机肥排肥器有效提高了有机肥的排肥稳定性。【结论】设计的刮板输送式排肥装置具有较好的排肥性能, 能够满足设施大棚内有机肥施肥作业要求。

关键词: 有机肥; 刮板; 受力分析; 排肥稳定性; 优化试验
中图分类号: S224.21 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2021)06-0079-09

Design and test of organic fertilizer discharging device with scraper conveyor for greenhouse

XU Yong, SONG Minghan, SUN Guojun, YU Hongfeng, HE Ruiyin
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: 【Objective】In order to improve the mechanization level of organic fertilizer application in the greenhouse and solve the problem of low fertilizer discharge stability of the existing organic fertilizer discharging device, an organic fertilizer discharging device with scraper conveyor for greenhouse was designed. 【Method】Taking the strawberry planting greenhouse in southern Jiangsu area as an example, the main requirements for the design of the fertilizer discharging device were determined according to the basic size parameters of the greenhouse and the agronomic requirements of strawberry planting. The key structure and parameters of the designed fertilizer discharging device were analyzed and determined by combining the bulk mechanics theory, and the main factors affecting the stability of the fertilizer discharging volume were

收稿日期: 2021-02-05 网络首发时间: 2021-09-26 09:31:33
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210924.1845.004.html>
作者简介: 徐 勇 (1996—), 男, 硕士研究生, E-mail: m740415467@163.com; 通信作者: 何瑞银 (1964—), 男, 教授, 博士, E-mail: ryhe_njau@163.com
基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(19)2012]; 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目 (NJ2019-14)

determined to be the rotational speed of the fertilizer discharging shaft and the opening degree of the fertilizer discharging device. An indoor organic fertilizer discharging test platform was built, and single-factor test and two-factor five-level response surface test of rotational speed and fertilizer discharging volume were conducted. 【Result】 The results of the correlation test between rotational speed and fertilizer discharging volume showed that within the range of rotational speed and opening degree set in the test, the rotational speed and fertilizer discharging volume had a good linear relationship under the conditions with different opening degree. The overall coefficient of determination was above 0.9857, and the fertilizer discharging volume could be adjusted by adjusting the opening degree and rotational speed in real time. The results of the response surface test showed that the stability of fertilizer discharging volume within the set range was good, and the rotational speed of the fertilizer discharging shaft had a greater influence on the coefficient of variation of the fertilizer stability compared with the opening of the fertilizer discharging device. The coefficient of variation of fertilization stability was optimal (1.84%) when the opening degree of fertilizer discharging device was 30.42 mm and the rotational speed of fertilizer discharging shaft was 51.5 r/min. The comparison test showed that the average value of the coefficients of variations of the commonly used spiral organic fertilizer discharger was 6.12%, and the organic fertilizer discharger with scraper conveyor designed in this paper effectively improved the stability of organic fertilizer discharging. 【Conclusion】 The designed fertilizer discharging device with scraper conveyor has good fertilizer discharging performance and meets the requirements of organic fertilizer application in greenhouse.

Key words: organic fertilizer; scraper; stress analysis; fertilization stability; optimization test

设施大棚种植业的发展能够有效保证蔬菜、瓜果的淡季供应,具有巨大的社会效益和经济效益^[1]。中国设施农业机械化发展水平相对滞后,综合机械化水平仅为 33%^[2-3]。施肥是设施大棚种植作业中最重要的环节之一,施撒有机肥能够有效改善土质、减少温室气体排放、改良作物品质、提高作物产量^[48]。但是,目前大棚中有机肥的撒施仍然主要依靠人工,劳动强度大、作业效率低^[9],要实现高效高质的设施农业生产,必须依靠机械施肥,排肥装置是施撒有机肥的关键部件^[10]。现阶段,国内外对于有机肥施肥机械的研究很多^[11-13],但专用于设施大棚的施肥机械鲜见介绍。为了提高我国设施大棚施肥机械化水平,有必要设计大棚有机肥排肥装置。目前用于有机肥施撒的主要排肥装置及原理为:离心圆盘式,利用圆盘的离心力抛撒肥料^[14];桨叶式,通过桨片高速旋转将肥料抛撒到田间^[15];锤片式,通过螺旋绞龙运送肥料至卸料口,再用高速运动的锤片将肥料撕裂、粉碎,自上而下抛出^[16];抛撒转轴式,通过排料口挡板调节落料量,落料通过旋转转轴抛撒而出^[17]。以上排肥装置都只适用于大型农场或大田^[18],施撒效率高,排肥原理都是利用排肥器高速旋转的离心力惯性抛撒有机肥,肥料经排肥器排出过程中会有大量泄漏,导致排肥量不稳定。

刮板输送装置对散体物料良好的输送特性保

证了散体物料运输、排施过程的稳定性和定量可控性^[19-21],但将刮板输送装置应用于有机肥施撒并不多见。本研究综合考虑刮板输送装置的机构特性和输送原理,设计一种刮板输送式有机肥排肥装置,对其关键结构参数进行设计和分析,搭建排肥器性能试验平台,对关键参数进行优化,以期为整机的设计提供参考依据。

1 整体结构与工作原理

1.1 大棚有机肥施撒农艺要求

以苏南地区草莓大棚为例,该地区草莓种植大棚多为 8 332 型大棚 (图 1),棚高 3.2 m,棚宽 8 m,长 80 m,大棚门宽 1.2 m,高度为 1.75 m,大棚内作业空间有限,一般采用人工作业^[22-23]。为了促进草莓开花结果,一般在草莓种植之前,在整个大棚内进行基肥施撒作业,施撒有机肥量为 1.50~2.25 kg·m⁻²,

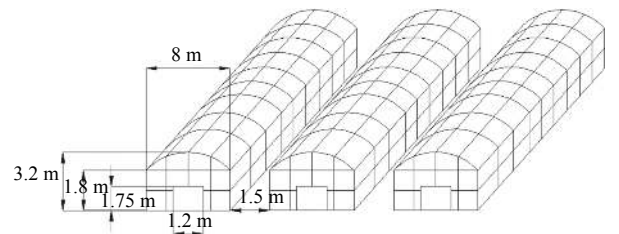


图 1 8332 型大棚基本尺寸
Fig. 1 Basic dimensions of 8332 greenhouse

有机肥种类为腐熟的肥类有机肥。施肥作业先将有机肥撒于地表, 后用旋耕机将有机肥旋入土壤。

1.2 排肥装置整体结构

刮板输送式排肥装置主要由承料箱、挡肥板升降装置、刮板输送式排肥器、传动装置和控制器组成。承料箱由箱体和挡肥板组成, 其中挡肥板安装在箱体两边的滑道中, 可以上下升降移动。挡肥板升降装置主要由齿轮轴、齿轮和齿条组成, 齿条焊接在挡肥板上, 依靠齿轮旋转运动带动齿条上下移动。刮板输送式排肥器由排肥轴、链轮、链条、链板、刮板等组成, 刮板用沉头螺钉安装在链板上, 链板与链板之间采用铰接。传动装置主要由步进电机、联轴器、三相异步电机和减速机组成, 步进电机通过联轴器连接齿轮轴, 减速机侧面轴孔连接三相异步电机轴, 正面轴孔连接排肥轴。控制器包括步进电机控制器、三相异步电机变频器以及编码器, 编码器通过联轴器安装在排肥轴上, 实时测量排肥轴转速。整体结构如图 2 所示。

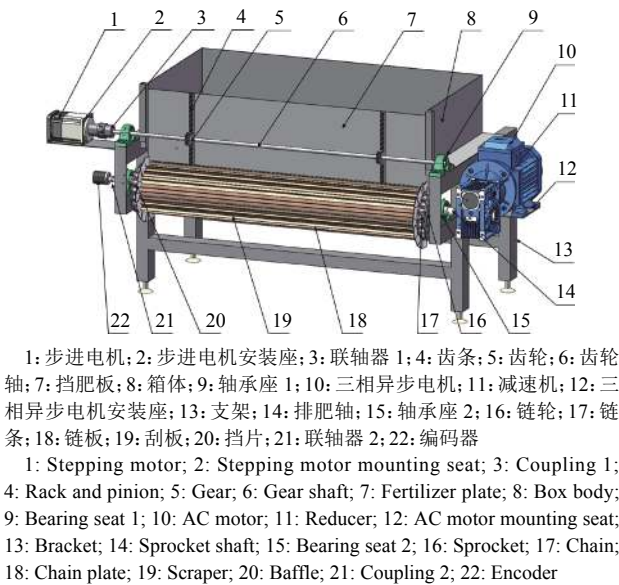


图 2 排肥装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of fertilizer discharging device

1.3 排肥装置工作原理

步进电机通过联轴器将驱动力传输到齿轮轴, 固定在齿轮轴上的齿轮带动齿条升降, 把电机的旋转运动转化为直线运动从而驱动挡肥板升降, 精准控制排肥装置开度。三相异步电机的动力通过减速机驱动排肥轴, 带动链条、链板和刮板向排肥口处运动, 刮板可把料箱底部的物料刮走, 上方物料在自身重力作用下, 克服摩擦力和内聚力而落下, 继续受刮板作用力, 使物料连续不断地稳定排出^[24]。实施排肥作业时, 分别调节步进电机控制器和三相异步电机变频器旋钮, 设置对应排肥器开度和排肥

轴转速。根据设定的开度值, 步进电机转动相应的步距角, 调节挡肥板开度; 根据设定的转速值, 三相异步电机带动排肥轴实施排肥作业。

2 排肥器主要参数

2.1 排肥量的确定

排肥轴的单转排肥量是衡量排肥装置排肥性能的重要指标^[25], 排肥器单转排肥量的稳定性决定了整个排肥装置的排肥稳定性。不考虑轴承座和支架两侧壁摩擦力影响, 其排肥轴理论单转排肥量用下式计算:

$$q = \pi d H b \left(\frac{a}{a+z} \right) \rho, \tag{1}$$

式中, q 表示输送链轮旋转一周排出的肥料, $\text{kg} \cdot \text{r}^{-1}$; H 为排肥器的开度, m ; b 为排肥刮板的长度, m ; a 为刮板间距, m ; z 为刮板厚度, m ; d 为输送链轮直径, m ; ρ 为有机肥的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2 刮板间距与高度

有机肥在承料箱中运动时, 呈连续的均质流输送, 整个肥料流分为上下两层, 下层有机肥高 h_1 , 刮板上方的有机肥高 h_2 , 任取 1 个刮板间距的有机肥为 1 个单元体, 参考文献 [26], 对刮板上层的有机肥进行受力分析, 结果如图 3 所示。

由散体力学理论可得, 由于上层有机肥对承料箱壁有侧向压力作用, 其大小随有机肥深度呈线性增加, 并作三角形分布, 其值为该点深度处的正压力与侧压系数之积, 则承料箱每侧边单位面积的平均侧向力(F_X)为:

$$F_X = \frac{1}{2} \frac{g}{ba} n = \frac{1}{2} \rho g h_2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right), \tag{2}$$

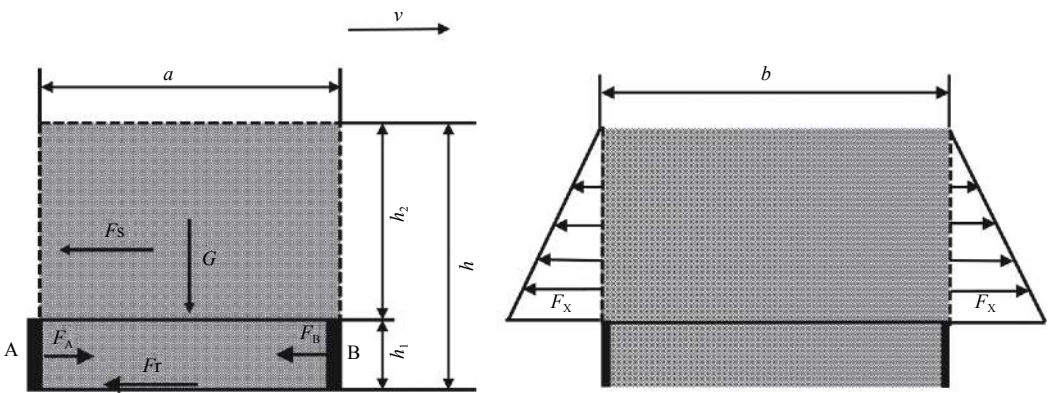
式中, n 为侧压系数; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; θ 为有机肥的休止角, ($^\circ$)。

有机肥对承料箱侧壁产生一个作用在 $1/3 h_2$ 高度处的外摩擦力 (F_S), 为:

$$F_S = \frac{h_2^2 a f_1}{2} \rho g \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right), \tag{3}$$

式中, f_1 为有机肥与承料箱的外摩擦系数。

如果假设在两刮板垂直平面之间的上层肥料流为一固定单元体, 摩擦力 F_S 使单元体承受一个弯矩, 弯矩在刮板 A 的上表面产生压应力, 在刮板 B 的上表面产生一个大小相等、方向相反的拉应力, 此应力将与上层有机肥在刮板 A、B 表面上产生的压应力叠加, 使 A 压应力增加, B 压应力减小, 此时 B 内摩擦力产生的剪应力为上下层有机肥接触面上各处内摩擦力产生的剪应力的最小值。则 B 内摩擦力产生的剪应力 (τ_B) 为:



a : 刮板间距; h_1 : 刮板间有机肥高度; h_2 : 刮板上方的有机肥高度; h : 输送有机肥整体高度; b : 排肥刮板的长度; F_S : 有机肥与承料箱侧壁的摩擦力; F_r : 有机肥体与承料箱底板的外摩擦力; F_X : 有机肥对承料箱壁的侧压力; F_A : 后刮板对单元体有机肥的推力; F_B : 前刮板对单元体有机肥的压力; G : 上层有机肥重力; A: 后刮板; B: 前刮板; v : 刮板前进速度

a : Scraper spacing; h_1 : Height of organic fertilizer between scrapers; h_2 : Height of organic fertilizer above the scraper; H : Overall height of transported organic fertilizer; b : Legth of the scraper; F_S : Friction between organic fertilizer and the side wall of the carrier box; F_r : External friction between the organic fertilizer body and the bottom plate of the carrier box; F_X : Lateral pressure of organic fertilizer on the wall of the carrier box; F_A : Thrust of the rear scraper on unit organic fertilizer; F_B : Pressure of the front scraper on unit organic fertilizer; G : Upper organic fertilizer gravity; A: Back scraper; B: Front scraper; v : Scraper forward speed

图 3 单元体有机肥的受力分析

Fig. 3 Force analysis of unit organic fertilizer

$$\tau_B = f \left(h_2 \rho g - \frac{4F_S h_2}{ba^2} \right), \tag{4}$$

式中, f 为内摩擦系数。

只有使上、下层有机肥接触面上各处的内摩擦力产生的剪应力均大于有机肥和承料箱两侧外摩擦力作用于整个接触面上均匀分布的剪应力, 才能保证有机肥能够整体运动, 在没有挡肥板的情况下, 倾仓而出, 根据这一条件得:

$$\tau_B \geq \tau = \frac{2F_S}{ba}, \tag{5}$$

式中, τ 为有机肥和承料箱两侧外摩擦力作用于整个接触面上均匀分布的剪应力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

取式 (4) 的 τ_B 和式 (3) 的 F_S 代入式 (5), 得到 h_2 的二次方程式:

$$h_2 \leq \frac{1}{4f} \left(\sqrt{\frac{8abf^2 + a^2 f_1 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right)}{f_1 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right)} - a} \right). \tag{6}$$

经过试验测得有机肥休止角 $\theta=47^\circ$, 内摩擦系数 $f=\tan\theta=1.07$, 根据文献 [27], 有机肥与承料箱的外摩擦系数 $f_1=0.35$, b 为刮板长度, 取 b 为 1 m。刮板高度通过试验取为 0.01 m, 可以达到施肥量的要求。承料箱中有机肥的最大输送高度依据排肥装置最大开度设定并预留一定的承肥空间, 承料箱高度取整为 0.2 m。由式 (6) 可得 h_2 和 a 的函数关系如图 4 所示。

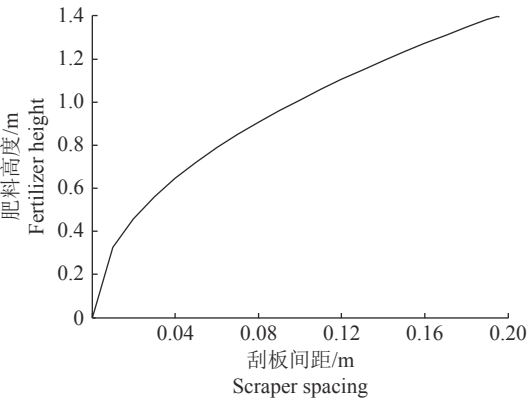


图 4 肥料高度和刮板间距的关系

Fig. 4 The relationship between fertilizer height and scraper spacing

由式 (6) 可得刮板间距的下极限值:

$$a_{\min} = \frac{2ff_1h_2^2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right)}{bf - h_2f_1 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right)}, \tag{7}$$

式中, $a_{\min}$ 是刮板间距 (a) 的最小值, 当承料箱中有有机肥的料层高度为最大 h_2 时取到。对于一定的有机肥和承料箱宽度, a 不能随意增大, 因为 a 增大, 将导致上层有机肥内部产生滑移, 使有机肥上层滞留在刮板后方, 影响排肥稳定性。为避免在承料箱中形成滑移面, a 必须有最大极限值。

假设两刮板之间整体肥料为一固定单元体, 不考虑挡肥板的阻力, 将肥料体即将产生滑移面时的情况作为受力平衡情况, 得:

$$F_A = F_r + 2F_S + F_B, \tag{8}$$

式中, 有机肥体与承料箱底板的外摩擦力 (F_r) 为:

$$F_r = b(h_1 + h_2)apgf_1。 \tag{9}$$

由于上层有机肥和承料箱侧壁外摩擦力 F_s 对上层肥料产生一个弯矩, 该弯矩在前后刮板上表面分别产生拉、压应力, 则前、后刮板上方的垂直压应力分别为

$$\sigma_{A1} = h_2\rho g + \frac{4F_s h_2}{ba}, \tag{10}$$

$$\sigma_{B1} = h_2\rho g - \frac{4F_s h_2}{ba}, \tag{11}$$

式中, σ_{A1} 为后刮板上方的垂直压应力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; σ_{B1} 为前刮板上方的垂直压应力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

刮板下方的垂直应力不受该弯矩的影响, 则有:

$$\sigma_{A2} = \sigma_{B2} = (h_1 + h_2)\rho g, \tag{12}$$

式中, σ_{A2} 为后刮板下方的垂直压应力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; σ_{B2} 为前刮板下方的垂直压应力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

用刮板上、下方的平均侧压力代替刮板对于单元体的作用力 (F_A 、 F_B), 则 F_A 、 F_B 分别为:

$$F_A = \frac{1}{2}(\sigma_{A1} + \sigma_{A2})\frac{1}{n}h_1b = \left[\left(h_2 + \frac{h_1}{2}\right)\rho g + \frac{2F_s h_2}{ba}\right]\frac{1}{n}h_1b, \tag{13}$$

$$F_B = \frac{1}{2}(\sigma_{B1} + \sigma_{B2})nh_1b = \left[\left(h_2 + \frac{h_1}{2}\right)\rho g - \frac{2F_s h_2}{ba}\right]nh_1b. \tag{14}$$

将式 (3)、(9)、(13)、(14) 的各计算值代入式 (8), 化简后得刮板间距上限值的二次方程式:

$$\left(h_2 + \frac{h_1}{2}\right)\left(\frac{1}{n} - n\right)h_1b + \frac{h_2^3 f_1}{a}(1 + n^2)h_1 - [b(h_1 + h_2) + h_2^2 n]f_1 a = 0, \tag{15}$$

令

$$B = \left(h_2 + \frac{h_1}{2}\right)\left(\frac{1}{n} - n\right)h_1b, \tag{16}$$

$$C = (1 + n^2)h_1h_2^3 f_1, \tag{17}$$

$$A = [b(h_1 + h_2) + h_2^2 n]f_1, \tag{18}$$

代入式 (15) 得:

$$B + \frac{C}{a} - Aa = 0, \tag{19}$$

$$a_{\max} = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}. \tag{20}$$

为保证有机肥的稳定排施, a 的合理范围应为 $a_{\min} \sim a_{\max}$ 。依据式 (7)、(20) 得 $a_{\min} = 0.004 \text{ m}$, $a_{\max} = 0.166 \text{ m}$ 。为了获得较大的有机肥承载量, 由图 4 中 h_2 和 a 的函数关系, 刮板间距应该选取尽可能大的值, 为了便于加工, a 取值为 0.15 m 。

2.3 排肥器转速

根据刮板输送式排肥装置的排肥原理, 由式 (1) 可以计算出刮板输送式排肥装置排施有机肥的理论单转排肥量。依据“1.1”所述苏南地区草莓大棚撒基肥习惯用量, 假设施肥机械的行驶速度为 $0.5 \sim 1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为了满足当地基肥习惯量, 刮板输送式排肥器的转速应该为 $16.5 \sim 59.5 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2.4 排肥器开度

排肥器开度的下限值取为刮板的高度, 上限值为最大单转排肥量所对应的排肥器开度。单位面积内的排肥量 (Q) 可由下式计算:

$$Q = qn \frac{s}{bv}, \tag{21}$$

式中, q 为排肥器单转的排肥量, $\text{kg}\cdot\text{r}^{-1}$; n 为排肥器转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; s 为施肥面积, m^2 ; b 为施肥幅宽 (即刮板长度), m ; v 为施肥机具前进速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据“1.1”所述最大基肥习惯用量可得单位面积内的最大施肥量 Q 为 2.25 kg , 施肥机具前进速度为 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 转速 n 为 $16.5 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 所对应的挡肥板开度为 35 mm , 则排肥器开度调节为 $10 \sim 35 \text{ mm}$ 范围内即可满足排肥量的要求。

在确定 h_1 、 a 、 b 、 z 、 d 、 ρ 这些参数后, 排肥装置的排肥量只与排肥轴转速 (n) 和开度 (H) 有关。

3 排肥器工作性能试验

排肥器开度大小会影响出料高度, 进而影响排肥过程中肥料的下落, 影响排肥量的稳定性; 排肥轴转速影响出料的初始速度和排肥装置的振动, 从而影响有机肥的落肥效果, 造成排肥量稳定性的变化。排肥器开度、排肥轴转速不仅影响排肥稳定性, 也是影响排肥量的重要因素, 为探讨排肥器工作性能, 优化其设计参数, 搭建试验台并进行排肥量和排肥稳定性试验。

3.1 材料与评价指标

3.1.1 试验材料 试验使用的有机肥为长春市新阳光有机肥料有限公司生产的粉末状有机肥, 主要以鸡粪为主, 其中氮、磷、钾总养分质量分数为 9.9% , 有机质质量分数为 75% 。

试验装置如图 5 所示, 采用步进电机 (86BYG250H) 通过步进电机控制器 (KH-01) 调节排肥器开度; 采用三相异步电机 (YS-903-4) 连接减速机 (型号为 NMRV63, 减速比为 $1:20$), 通过变频器 (AE200-2-1PH-3.0G) 调节排肥轴转速, 并用编码器 (LPD3806-400BM-G5-24C) 实时读取排肥轴转速。



图 5 有机肥施肥试验台

Fig. 5 Test bench of organic fertilizer discharging

3.1.2 排肥性能评价指标 试验以排肥量稳定性变异系数作为评价标准, 计算方法如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \tag{22}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n - 1}}, \tag{23}$$

$$V = \frac{S}{x} \times 100, \tag{24}$$

式中, x_i 为各次排肥量, kg; x 为各次排肥量的平均值, kg; S 为标准差, kg; V 为排肥稳定性变异系数, %; n 为测定次数。

3.2 转速与排肥量相关性试验

排肥轴转速和排肥器开度影响排肥量, 为考察各因素对排肥量的影响, 基于前文的分析, 在转速 15~60 r·min⁻¹ 和开度 10~35 mm 范围内进行试验, 试验时根据排肥器开度与步进电机步距角对应关系, 设置开度分别为 10、15、20、25、30、35 mm, 调节变频器旋钮, 设置转速分别为 15、24、33、42、51、60 r·min⁻¹, 排肥装置在设定参数下运行 10 s, 在排肥口处用塑料盆接肥, 结束后采用精度±5 g 的电子秤称量并记录排肥量, 每个转速和开度重复 3 次试验, 试验结果见图 6。

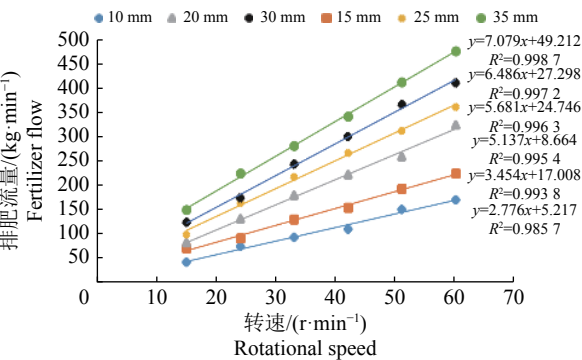


图 6 不同开度水平下转速与排肥流量的关系

Fig. 6 The relationship between rotational speed and fertilizer discharging flow under different opening degrees

由图 6 可得, 排肥量与排肥轴转速、排肥器开度密切相关, 排肥量随着排肥器开度和排肥轴转速的增大而增加, 且同一排肥器开度下排肥轴转速与排肥量呈良好的线性关系 (整体决定系数≥0.9857), 不同的转速匹配不同的排肥器开度可实现不同排肥量的需求。因此可以通过实时控制排肥轴转速或同时控制排肥器开度实现变量施肥。

3.3 响应面试验

3.3.1 试验设计 通过分析排肥轴转速和排肥器开度对刮板输送式排肥装置的排肥效果, 对排肥装置的结果参数和运行参数进行优化。选用二次通用旋转组合试验方法, 分析排肥轴转速和排肥器开度对排肥稳定性的影响, 以排肥稳定性变异系数为评价指标, 试验因素及水平编码见表 1。

表 1 试验因素及水平编码表
Table 1 Coding of test factors and levels

编码值 Code value	因素 Factor	
	开度/mm	转速/(r·min ⁻¹)
	Opening (x_1)	Rotational speed (x_2)
$\gamma(1.414)$	35.0	59.5
1	31.3	53.0
0	22.5	38.0
-1	13.7	23.0
$-\gamma(-1.414)$	10.0	16.5

3.3.2 试验方案与结果分析 应用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析, 以确定 2 个试验因素下排肥稳定性变异系数的变化规律, 试验方案及结果如表 2 所示。以排肥器开度和排肥轴转速为试验因素, 以排肥稳定性变异系数为试验指标, 运用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析, 方差分析结果见表 3。

由表 3 可知, 模型的显著性检验 $F=25.70$, $P<0.01$, 决定系数 $R^2=0.9483$, 表示回归模型极显著, 且在试验范围内拟合程度好。由变异系数模型可知, x_2 、 x_1x_2 、 x_2^2 对方程影响极显著 ($P<0.01$), x_1 、 x_1^2 对方程影响显著 ($P<0.05$), 得到变异系数的回归方程为:

$$V = 3.41 - 0.12x_1 - 0.34x_2 - 0.32x_1x_2 - 0.12x_1^2 + 0.24x_2^2. \tag{25}$$

3.3.3 试验因素对指标的影响 排肥器开度和排肥轴转速对排肥稳定性变异系数的影响如图 7 所示, 由图 7a 可知, 在排肥器开度较大时变异系数随着排肥轴转速减小而增大, 在排肥器开度较小时变异系数随着排肥轴转速先增大后减小。由图 7b 可

表 2 正交试验方案及结果¹⁾

Table 2 Orthogonal test plan and results			
试验编号 Test number	试验因素 Experimental factor		排肥稳定性变异系数/% Coefficient of variation of fertilization stability
	x_1	x_2	
1	22.5	38.0	2.47
2	31.3	53.0	1.89
3	35.0	38.0	1.85
4	22.5	38.0	2.53
5	31.3	23.0	3.21
6	22.5	16.5	3.38
7	22.5	59.5	2.47
8	13.7	23.0	2.62
9	22.5	38.0	2.31
10	13.7	53.0	2.59
11	22.5	38.0	2.45
12	10.0	38.0	2.43
13	22.5	38.0	2.31

1) x_1 、 x_2 分别表示排肥器开度和排肥轴转速
1) x_1 、 x_2 indicated opening degree of fertilizer discharging device and rotational speed of the fertilizer discharging shaft

表 3 方差分析表¹⁾

Table 3 Variation analysis table				
变异来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	2.080	5	25.70	0.0002
x_1	0.110	1	6.71	0.0359
x_2	0.960	1	59.10	0.0001
x_1x_2	0.420	1	25.73	0.0014
x_1^2	0.098	1	6.05	0.0434
x_2^2	0.430	1	26.68	0.0013
残差 Residual	0.110	1		
失拟项 Lack of fit	0.074	3	2.48	0.2000
纯误差 Pure error	0.040	4		
总和 Sum	2.190	12		

1) x_1 、 x_2 分别表示排肥器开度和排肥轴转速
1) x_1 、 x_2 indicated opening degree of fertilizer discharging device and rotational speed of the fertilizer discharging shaft
知排肥轴转速对排肥稳定性变异系数的影响比排肥器开度大, 该结论与方差分析得出的结论相吻合。

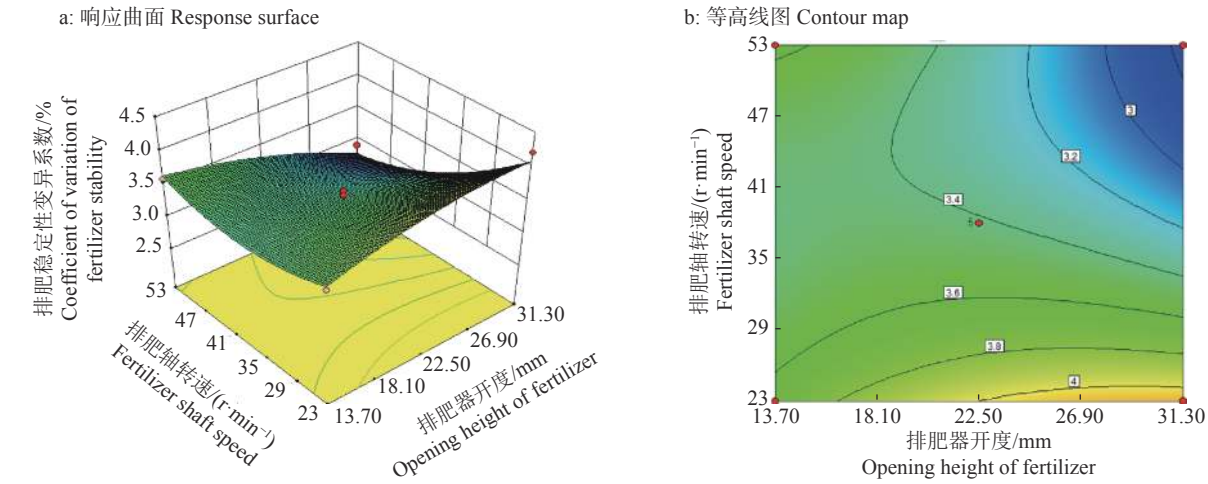


图 7 试验因素对变异系数的影响
Fig. 7 Influence of experimental factor on the coefficient of variation

3.3.4 试验结果目标优化与试验验证 为寻求各因素最优组合, 以排肥稳定性变异系数最小为原则, 应用 Design-Expert 软件对排肥稳定性系数优化求解, 得排肥器开度 30.42 mm, 排肥轴转速 51.5 r·min⁻¹, 预测变异系数最优值为 1.84%。在自制试验台上进行排肥稳定性变异系数和排肥量试验, 重复 5 次, 试验结果如表 4 所示。变异系数的相对误差最大值为 4.89%, 最小值为 0.54%, 平均相对误差仅为 2.95%, 相对误差均在 5% 范围内, 为可接受的误差范围, 满足实际试验要求。

3.3.5 排肥稳定性对比验证试验 为验证排肥器排肥稳定性, 与目前果园施撒有机肥应用最多的螺旋式排肥器^[28-30] 进行试验对比。果园内施肥作业空间有限, 基肥的施撒量也同样巨大^[31]。试验时设定两者的工作转速都是 51.5 r·min⁻¹, 试验时间 10 s, 进行 5 组试验, 每组试验重复 3 次取平均值, 统计排肥量和试验的稳定性变异系数, 试验结果如表 5 所示。本研究设计的刮板输送式排肥器排肥稳定性变异系数的均值为 1.84%, 而螺旋式排肥器排肥稳定性变异系数达 6.12%, 相较于螺旋式排肥器有效

表 4 最优条件验证试验结果
Table 4 Verification test result of optimal condition

试验编号 Test number	排肥量/g Fertilizer discharging volume				排肥稳定性变异系数/% Coefficient of variation of fertilization stability	变异系数相对误差/% Relative error of coefficient of variation
	1	2	3	均值 Mean		
1	60.22	61.56	60.59	61.46	1.93	4.89
2	60.36	62.64	61.15	61.45	1.89	2.71
3	62.34	60.15	61.49	61.33	1.80	2.17
4	61.06	62.40	63.23	62.23	1.76	4.43
5	61.54	63.75	62.15	62.48	1.83	0.54
均值 Mean	61.10	62.10	61.72	61.79	1.84	2.95

表 5 排肥稳定性对比验证试验结果
Table 5 Comparative verification test results of fertilization stability

试验编号 Test number	排肥量/g Fertilizer discharging volume				变异系数/% Coefficient of variation
	1	2	3	均值 Mean	
1	8.32	8.74	7.95	8.34	4.74
2	8.65	8.15	7.94	8.25	4.42
3	7.62	8.20	9.05	8.29	8.71
4	7.65	7.94	8.46	8.02	5.09
5	7.72	8.95	8.11	8.26	7.62
均值 Mean	7.99	8.40	8.30	8.23	6.12

提高了有机肥的排肥稳定性, 满足设计要求。

4 结论

1) 设计了一种刮板输送式有机肥排肥装置, 通过受力分析确定排肥装置的相关参数, 保证排肥装置具有较好的排肥性能。

2) 试验研究表明, 在试验设定的转速和开度范围内, 不同开度条件下, 转速和排肥量均呈良好的线性关系, 整体的决定系数大于 0.985 7, 表明可通过实时调节开度和转速实现排肥量的调节。

3) 通过排肥稳定性二次通用旋转组合试验的二次回归分析和响应面分析, 表明排肥轴转速对排肥稳定性变异系数的影响大于排肥器开度; 在排肥器开度为 30.42 mm、排肥轴转速为 51.5 r·min⁻¹ 时排肥稳定性变异系数最优, 为 1.84%, 验证试验与优化结果基本吻合, 对比目前常用的螺旋式有机肥排肥器, 设计的刮板输送式有机肥排肥器有效地提高了有机肥的排肥稳定性。

4) 初步试验表明, 该排肥装置设计合理, 满足大棚内有机肥施撒的农艺要求, 能够实现有机肥的定量准确施撒。

参考文献:

[1] 刘苹, 李彦, 江丽华, 等. 施肥对蔬菜产量的影响:以寿光市设施蔬菜为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1752-1758.

[2] 蒋卫杰, 邓杰, 余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3515-3523.

[3] 马爱平. 多态融合创新引领设施农业产业蓄势突破 [EB/OL]. [2020-11-05]. <http://zj.people.com.cn/n2/2019/0830/c186327-33307079.html>.

[4] 朱陆伟, 石慧, 王伟, 等. 施用猪粪后果园土壤中养分含量的动态变化[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 38-44.

[5] 张峻伟, 王志文, 季凌飞, 等. 有机肥替代化肥对不同生产模式茶园茶叶生产的影响[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(1): 127-135.

[6] ETIK P, SUDARNO S. Analysis of greenhouse gas reduction by using organic fertilizer in boyolali regency[J]. E3S Web of Conferences, 2018, 73(1): 08005.

[7] DAN O C, LAZAROVITS G, FLORIDA I, et al. Effect of organic fertilizer application on growth yield and pests of vegetable crops[J]. Proceedings of Florida State Horticultural Society, 2002, 115: 315-321.

[8] 张亚杰, 钱慧慧, 刘坤平, 等. 施肥对玉米/大豆套作土

壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. [华南农业大学学报](#), 2016, 37(3): 29-36.

[9] 许斌星, 王少康, 吴爱兵, 等. 设施大棚专用撒肥机的设计及试验[J]. [农机化研究](#), 2017, 39(6): 158-161.

[10] 谢方平, 刘敏章, 杨米米, 等. 袋装缓控释肥有序排肥装置设计[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(16): 40-49.

[11] 李洁, 吴明亮, 汤远菊, 等. 有机肥施肥机械的研究现状与发展趋势[J]. [湖南农业大学学报\(自然科学版\)](#), 2013, 39(S1): 97-100.

[12] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. [中国土壤与肥料](#), 2016(3): 1-4.

[13] 许斌星, 马标, 陈永生, 等. 我国设施蔬菜有机肥撒施装备研究现状及发展趋势[J]. [中国农机化学报](#), 2017, 38(6): 40-44.

[14] PATTERSON D E, REECE A R. The theory of the centrifugal distributor: I: Motion on the disc, near-centre feed[J]. [Journal of Agricultural Engineering Research](#), 1962, 7(3): 232-240.

[15] 闫飞, 张宏文, 张新建. 柴叶式有机肥撒施机输送抛撒装置工作机理分析[J]. [江苏农业科学](#), 2015, 43(12): 444-447.

[16] 范国强, 滕翔, 姜军鹏, 等. 奶牛卧床垫料抛撒机锤式抛撒机构设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2021, 52(5): 120-128.

[17] 李洁. 有机肥施肥机构设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.

[18] IQBAL, ACHMAD M, SAPSAL M T. Organic fertilizer applicator performance test on rice field[J]. [IOP Conference Series Earth and Environmental Science](#), 2019, 355: 012112. doi: 10.1088/1755-1315/355/1/012112.

[19] 黄良沛, 龚争理, 罗忠诚. 面向维护的刮板机可靠度建模与预测[J]. [机械科学与技术](#), 2012, 31(3): 456-460.

[20] 姚艳萍, 寇子明, 孟文俊. 散体物料在管道刮板输送机垂直段运行时的力学分析[J]. [起重运输机械](#), 2013(9): 34-37.

[21] 毛广卿, 王志山, 刘玉兰. 水平型埋刮板输送机肥料整体移动的条件分析[J]. [粮食与饲料工业](#), 2004(9): 16-18.

[22] 崔思远, 肖体琼, 陈永生, 等. 江苏省设施草莓机械化生产现状与制约因素分析[J]. [中国蔬菜](#), 2016(9): 5-7.

[23] 白如月, 汪小岳, 鲁伟, 等. 施药机器人对行施药系统的设计与试验[J]. [华南农业大学学报](#), 2018, 39(5): 101-109.

[24] Г. К. 克列因. 散体结构力学[M]. 陈大鹏, 等, 译. 北京: 人民铁道出版社, 1960.

[25] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. [农业工程学报](#), 2015, 31(3): 10-16.

[26] ZHAO X X, HAN G, YUN T T, et al. Designing calculation study of MZ masse scraper conveyor[J]. [Coal Mine Machinery](#), 2015, 36(5): 25-27.

[27] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. [农业工程学报](#), 2020, 36(17): 212-218.

[28] 张宏建, 徐春保, 刘双喜, 等. 自动调节深度式果园双行开沟施肥机设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2021, 52(1): 62-72.

[29] 袁全春, 徐丽明, 牛丛, 等. 果园有机肥深施肥分层变量排肥控制系统设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2020, 51(S1): 195-202.

[30] 王兰英, 徐洋. 葡萄有机肥施肥机的设计[J]. [河北大学学报\(自然科学版\)](#), 2019, 39(1): 18-22.

[31] 郝朝会, 杨学军, 刘立晶, 等. 果园多功能动力底盘设计与试验[J]. [农业机械学报](#), 2018, 49(12): 66-73.

【责任编辑 霍 欢】