

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.014

桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验

刘莫尘^{1,2} 赵庆吉¹ 韩守强¹ 宋占华^{1,2} 李法德^{1,3} 闫银发^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;

3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 为实现桑园内氮、磷、钾和有机肥按需均衡施肥,保障桑叶产量、质量,减小肥料不合理使用造成的面源污染,设计了一种能够变比配肥和定向撒肥的桑园自走式变比配肥定向撒肥机。根据桑园农艺要求设计的整机长为1 450 mm、宽为655 mm、高为1 141 mm,并对履带行走系统、变比配肥掺混机构进行设计。通过离散元法对变比配肥掺混过程和撒肥盘撒肥效果进行仿真分析,发现槽轮转速在20~80 r/min范围内,配肥偏离度标准差低于0.4,掺混均匀性较好;抛撒肥料时,曲线形叶片撒肥盘肥料分布呈对称形状,撒肥效果较好。通过正交试验优化设计定向撒肥板长度为450 mm、高度为80 mm、折弯角为100°。通过响应面法分析因素对撒肥分布变异系数的影响,主次顺序为:撒肥盘转速、碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离、整机作业速度,并确定较优工作参数:撒肥盘转速为290.1 r/min、碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离为88.2 mm、整机作业速度范围为0.5~0.7 m/s。通过田间试验验证,桑园自走式变比配肥定向撒肥机工作时撒肥分布变异系数低于40%,试验表明自走式桑园变比配肥定向撒肥一体机田间工作时具有较高的可靠性。

关键词: 变比配肥; 槽轮排肥器; 定向撒肥; 桑园

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0120-11

Development and Test of Self-walking Mulberry Garden Integrated Machine with Variable Proportion and Directional Disperse Fertilization

LIU Mochen^{1,2} ZHAO Qingji¹ HAN Shouqiang¹ SONG Zhanhua^{1,2} LI Fade^{1,3} YAN Yinfa^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China

3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: A self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization was developed to balanced fertilization of nitrogen, phosphorus, potassium and organic fertilizers on demand and reduce non-point source pollution caused by unreasonable use of fertilization. The length, width and height of the integrated machine designed according to the planting row spacing of mulberry garden were 1 450 mm, 655 mm and 1 141 mm, respectively, and the key components were designed. It was found that the standard deviation of the fertilizer application deviation was less than 0.4 when the roating speed of the flute-wheel was in the range of 20 ~ 80 r/min. The distribution of the curved leaves was symmetrical and the fertilization effect was better. The orthogonal test was used to optimize the directional fertilization plate. The better combination of the directional fertilization plate was 450 mm in length, 80 mm in height and 100° in bending angle. Through response surface analysis, the influence order of the factors on the variation coefficient of fertilizer distribution was as follows: the speed of the fertilizer disperse plate, the distance between the receiving port of the collision blending device and the center of the fertilizer disperse plate, the working speed of the machine. The working parameters were optimized. The optimization results were that the speed of the fertilizer

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-18-ZJ0402)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ014)、山东省蚕桑产业技术体系项目(SDAIT-18-06)和山东省重点研发计划项目(公益类)(2017GNC12104)

作者简介: 刘莫尘(1980—),女,副教授,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: liu_mochen@126.com

通信作者: 闫银发(1976—),男,教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: yanyinfa@sdau.edu.cn

disperse plate was 290.1 r/min, the distance between the receiving port of the collision blending device and the center of the fertilizer disperse plate was 88.2 mm and the working speed of the machine was 0.5~0.7 m/s. It was verified that the variation coefficient of fertilizer distribution was less than 40% when the self-walking mulberry garden integrated machine working at the field experiment. The research result can provide a reference for the balanced fertilization of mulberry garden on demand.

Key words: variable proportion fertilization; flute-wheel discharger; directional disperse fertilization; mulberry garden

0 引言

根据桑树需肥规律进行合理均衡施肥,是保障桑叶优质丰产的重要环节^[1-2]。我国品种桑栽培行距一般为0.8~1.4 m,高产桑园一年施肥6次,包括分施春肥、重施夏肥、追施秋肥和普施冬肥,采用撒施、沟施或穴施^[3-4]。另外,夏季和秋季是桑树生长旺盛期,桑园郁闭度高,需肥量大,施肥环境恶劣,且没有专用的施肥机械,桑园施肥多采用人工施肥^[5],人工撒肥作业劳动强度大,且撒施不均匀,导致土壤中氮磷钾元素比例失调,营养不均衡,严重影响桑叶产量和质量^[6]。为提高桑树产量,降低劳动强度,实现桑园科学均衡施肥,本文根据桑园栽培模式和桑园施肥的农艺要求,采用槽轮式排肥器和离心式撒肥盘作为排肥、配肥和撒肥的关键部件,研制履带自走式桑园变比配肥定向撒肥机械。

槽轮排肥器结构简单,广泛应用于施肥机械,众多学者利用离散元技术、正交回归试验等方法,开展了槽轮半径、凹槽数目、工作长度、凹槽形状、槽轮转速等结构参数对排肥性能的影响研究,并进行了最优结构参数优化,结合3D打印技术验证仿真结果,发现凹槽数目、槽轮半径和凹槽形状对排肥性能影响较大,并得到最佳结构参数组合^[7-14]。诸多研究成果为多槽轮变比排肥掺混机械研究提供了参考。

此外,国内外科研人员利用建立撒肥机构模型^[15]、基于方差分析统计分析^[16]、基于四因素实验模型的完全随机化^[17]等方法对离心式撒肥机理、肥料抛撒模型也进行了理论和试验探究,来提高颗粒肥料撒施均匀性和实现精准施肥^[18-23]。

综合来看,现阶段撒肥机械都不能进行氮、磷、钾和有机肥4种肥料按需均衡施肥和行间定向撒肥,且没有桑园行间均衡施肥专用撒肥机械,本文研制桑园履带自走式变比配肥定向撒肥机,实现桑园内氮、磷、钾和有机肥4种肥料按需均衡施肥和行间定向撒肥,提高桑园生产管理机械化水平。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

自走式桑园变比配肥定向撒肥机由蓄电池组、

液压回路系统、槽轮式变比配肥掺混机构、定向撒肥机构、履带行走机构、底盘机架以及控制系统组成。槽轮式变比配肥掺混机构固定在定向撒肥机构的上方,定向撒肥机构固定在底盘机架前端,撒肥盘通过连接件与液压马达配合。动力总成安装在控制台前部,输出轴通过皮带连接变速箱,带动履带行走。蓄电池组和控制系统安装在底盘机架中间,蓄电池组为控制系统提供电力,驱动槽轮式变比配肥掺混机构进行配肥。设计整机长、宽、高分别为1450、655、1141 mm,其结构如图1所示。肥料从槽轮式变比配肥掺混机构落到撒肥盘上,在撒肥盘离心力和定向撒肥板作用下,实现4种肥料在桑园行间均匀撒施。

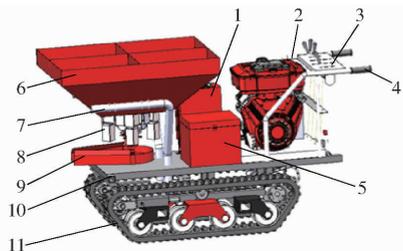


图1 桑园自走式变比配肥定向撒肥机结构图
Fig. 1 Structure diagram of self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization

1. 控制系统箱 2. 液压回路系统 3. 控制台 4. 扶手 5. 蓄电池组 6. 料箱 7. 固定支架 8. 步进电机 9. 定向撒肥装置
10. 底盘机架 11. 履带行走系统

1.2 液压回路工作原理

桑园自走式变比配肥定向撒肥机通过液压控制履带行走和转向,液压转向系统如图2所示。工作时,总电磁阀打开,电磁阀2通过控制液压缸2动作,完成履带行走与停止;左转和右转由液压缸1和液压缸3控制实现,电磁阀1和电磁阀3则分别控制液压缸1和液压缸3。

1.3 不同作业速度下变比配肥原理

槽轮式变比配肥掺混机构由控制系统控制,如图3所示。HMI人机交互接口进行系统参数设定和信息显示,速度传感器检测整机行进速度;料位检测传感器检测4个肥料仓的料位,当料位低于限定值时,发出料位低报警信号,整机停止作业。4个步进

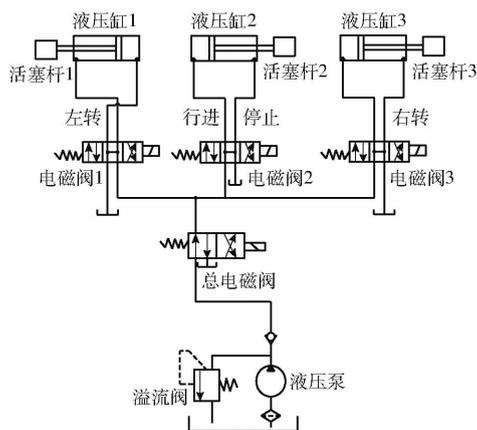


图2 液压转向系统原理图

Fig.2 Hydraulic steering control system

电机驱动器分别驱动槽轮式变比配肥掺混机构的4个步进电机。嵌入式ARM控制器向4个步进电机驱动器发送一定频率的PWM脉冲,控制步进电机转速,从而实现变比配肥。

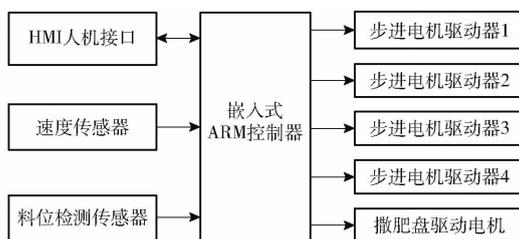


图3 槽轮式变比配肥掺混机构控制系统原理图

Fig.3 Control system schematic diagram of flute-wheel variable proportion fertilization blending device

根据桑园测土数据、桑树种植模式和桑树养分需求,建立氮、磷、钾和有机肥4种肥料施肥配比 P_x ,施肥配比满足 $\sum_{x=1}^4 P_x = 1$, x 为1、2、3、4代表氮、磷、钾和有机肥。根据配比计算氮、磷、钾和有机肥4种肥料需求量 F_x ,设整机行走速度为 V ,则4个步进电机单位时间内的脉冲个数为

$$N_x = \frac{VB_r F_x}{m_x} \quad (1)$$

式中 V ——整机作业速度, m/s

m_x ——排肥器每个脉冲排肥量, kg

F_x ——需肥量, kg/hm²

B_r ——桑园所需撒肥幅宽, m

N_x ——步进电机单位时间内的脉冲个数

单位时间内脉冲个数的倒数即为频率,即对应的4个步进电机驱动器的PWM频率为

$$f_x = \frac{1}{N_x} = \frac{m_x}{VB_r F_x} \quad (2)$$

式中 f_x ——步进电机驱动器PWM频率, Hz

施肥的桑园确定后,可根据桑园种植行间距确定 B_r ,根据桑园测土数据、桑树种植模式和桑树养

分需求,可以计算出 F_x 和 m_x 。从式(2)可知,当 B_r 、 F_x 、 m_x 确定后,4个步进电机驱动器的PWM频率 f_x 就为整机作业速度 V 的函数,通过履带上的速度传感器测定整机的作业速度,就可以实时改变 f_x 值,控制4个槽轮以不同转速排肥,实现变比配肥。肥料落到撒肥盘内,在离心力的作用下完成肥料抛撒,撒肥盘两侧装有定向撒肥板,通过调节定向板开口角度,改变肥料运动轨迹,限制肥料抛撒范围,实现定向撒肥。

2 关键机构设计

2.1 履带行走系统设计

2.1.1 履带行走机构

履带式行走机构主要由履带、驱动轮、导向轮、支重轮和张紧装置组成,为保证履带行走机构的可靠性,对履带节距、带板宽度、履带接地长度、履带轨距等参数进行设计。设计整机装载肥料后为565 kg,根据

$$t_0 = (15 \sim 17.5) \sqrt[4]{m} \quad (3)$$

$$b = (0.9 \sim 1.1) \times 209 \times \sqrt[3]{m \times 10^{-3}} \quad (4)$$

式中 t_0 ——履带节距, mm

m ——整机装载肥料后总质量, kg

b ——带板宽度, mm

设计履带节距为70 mm,带板宽为180 mm。

为保证带板宽度与履带接地长度匹配,减小平均接地比压力,设计履带轨距为630 mm,根据

$$L = \frac{b}{\lambda_1} \quad (5)$$

式中 L ——履带接地长度, mm

λ_1 ——比例系数,一般用途机械为0.18~0.22,本文取0.2

设计履带接地长度为900 mm。

履带行走系统中驱动轮直接与履带啮合,其参数直接影响履带使用寿命,为保证啮合度延长使用寿命,设计驱动轮齿数为9,驱动轮节圆直径计算公式为

$$D_k = \frac{t_0}{\sin \frac{2\pi}{z_1}} \quad (6)$$

式中 D_k ——驱动轮节圆直径, mm

z_1 ——驱动轮齿数

计算得到驱动轮节圆直径为108 mm。

2.1.2 动力选择

履带行走系统功率为驱动力与履带最快行走速度的乘积。根据经验,驱动力约为整机质量的6~7倍,设计样机加载肥料之后总质量为565 kg,计算得

样机行走所需的驱动力为 3 955 N, 整机作业最高速度为 0.7 m/s, 计算得最大行走功率为 2.8 kW。液压系统工作最大流量为 5 L/min, 额定压力为 10 MPa, 根据

$$N = \frac{PQ\eta}{60} \quad (7)$$

式中 N ——液压系统功率, kW

P ——额定压力, MPa

Q ——最大工作流量, L/min

η ——液压泵的效率, 取 0.98

计算得到液压系统的功率为 0.82 kW。

计算整机所需总功率为 3.62 kW, 为保证设计合理性, 选用三菱 GT1000 型发动机, 连续输出功率为 5.5 kW, 其技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机技术参数

Tab.1 Engine technical parameters

参数	数值
排量/cm ³	297
输出功率/kW	5.5
最大扭矩/(N·m)	19.3
质量/kg	27
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	394.5×434×431

2.2 槽轮式变比配肥掺混机构

根据桑园施肥的配比和需肥量的要求^[2-3,6], 排肥机构选用排料精度高的锥形圆弧凹槽槽轮排肥器^[24]。撒肥机在桑园行间(行距 0.8~1.4 m)行走作业, 并要实现 4 种肥料的排肥碰撞掺混, 所以 4 个槽轮排肥器采用“十”字型两两相对排布, 其结构如图 4 所示。

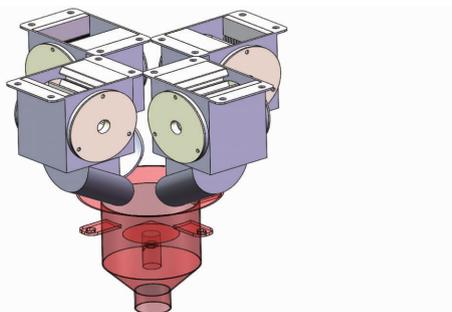


图 4 槽轮式变比配肥掺混机构

Fig.4 Distribution of fertilizer discharger

槽轮的横截剖面图如图 5 所示, 锥形圆弧凹槽的横截面积 s 满足

$$s = \frac{d^2}{8}\alpha + \frac{r_3^2}{2}(\pi - \alpha) - (r_2 + r_3)^2 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

其中

$$\alpha = \frac{2\pi}{z_2} \quad r_2 = \frac{d}{4}$$

$$r_3 = \frac{d \sin \frac{\alpha}{2}}{4 \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2}\right)}$$

式中 α ——相邻凹槽之间截距角

r_2 ——锥形圆弧凹槽根圆半径

r_3 ——锥形圆弧凹槽半径

那么槽轮每转排料量 q 满足^[7]

$$q = \pi d l_0 r_3 \left(\frac{\psi z_2 s}{\pi d} + \lambda_2 \right) \quad (9)$$

式中 l_0 ——槽轮工作长度, mm

d ——槽轮直径, mm

z_2 ——槽轮槽数

ψ ——填充系数

λ_2 ——带动层特性系数

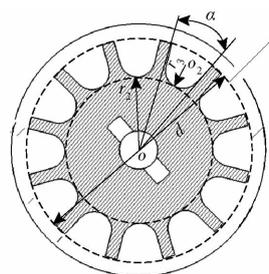


图 5 槽轮横截剖面图

Fig.5 Sectioned view of cross-section on grooved-wheel

综合分析计算槽轮直径、槽轮工作长度、凹槽数目、凹槽深度结构参数^[7,24-25], 设计的槽轮直径为 60 mm, 工作长度为 60 mm, 槽轮凹槽断面形状为锥形圆弧, 圆弧半径为 4 mm, 槽轮槽数为 12, 设计的槽轮排肥器单转排肥量分别为: 氮肥 82 g、磷肥 119 g、钾肥 133 g、有机肥 102 g。

氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料分别从 4 个槽轮排出后, 经导流板流出, 4 种肥料颗粒流在掺混腔内锥形体上方碰撞掺混, 如图 6 所示, 然后沿锥形体锥面分散下落, 在碰撞掺混腔收料口进行第 2 次碰撞掺混后流出, 完成肥料颗粒的碰撞掺混。

用单个的运动轨迹代替颗粒流的运动^[24], 颗粒从槽轮排出的速度很小, 可近似为 0, 假设颗粒竖直下落到点 m , 那么颗粒在点 m 的速度 v_3 为

$$v_3 = \sqrt{2gd_1} \quad (10)$$

式中 d_1 ——肥料下落到导流板高度, 为 37.5 mm

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

假设颗粒在导流板上没有弹跳, 那么 v_3 沿导流板方向的速度分量 v_1 为

$$v_1 = v_3 \sin \alpha_1 \quad (11)$$

式中 α_1 ——导流板和水平面的夹角

颗粒在导流板上的加速度 a 为

$$a = g \sin \alpha_1 - \mu_1 \cos \alpha_1 \quad (12)$$

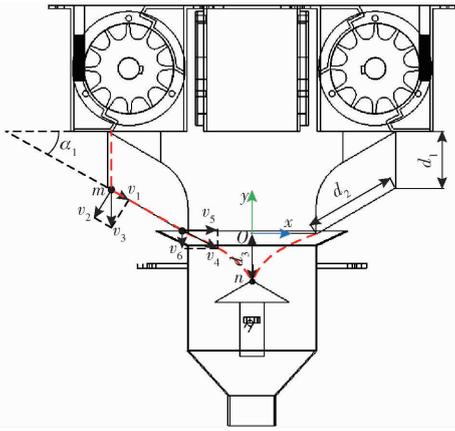


图6 颗粒流碰撞掺混示意图

Fig.6 Diagram of fertilizer particles flow collision blending

式中 μ_1 ——肥料颗粒与导流板之间的动摩擦因数
颗粒从导流板滑落时的速度 v_4 为

$$v_4 = \sqrt{2(g\sin\alpha_1 - \mu_1\cos\alpha_1)d_2 + v_1^2} \quad (13)$$

式中 d_2 ——导流板的长度

根据肥料颗粒流掺混运动设计碰撞掺混腔,其剖面图如图7所示。设计碰撞掺混腔内径 D_c 为 87 mm,碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度 h_1 为 32 mm,锥体角度 Φ 为 58.9° ,直径 φ 为 20 mm,壁厚 l 为 3 mm。根据碰撞掺混后肥料颗粒整体流动方式设计收料口为漏斗形状,由

$$\theta = \frac{1}{2}(180 - \gamma_x) - \frac{1}{2} \left(\arccos \frac{1 - \sin\gamma_e}{2\sin\gamma_e} + \arcsin \frac{\sin\gamma_x}{\sin\gamma_e} \right) \quad (14)$$

式中 θ ——能够保持肥料颗粒整体流的最大半顶角, ($^\circ$)

γ_x ——肥料颗粒与掺混腔内壁摩擦角, ($^\circ$)

γ_e ——肥料颗粒间内摩擦角, ($^\circ$)

计算 θ 为 26.6° ,根据 θ 设计收料口,其高度 h_2 为 30 mm,收料口下端内径 d_c 为 30 mm。

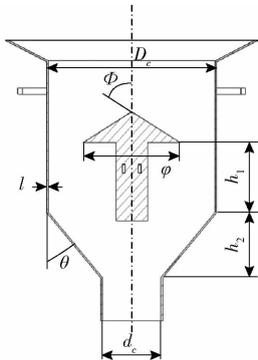


图7 碰撞掺混腔剖面图

Fig.7 Diagram sectional structure of blending device

试验所选用的氮肥(江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素)、磷肥(江苏美乐肥料有限公司生产的过磷酸钙)、钾肥(浙江农资集团有限公司的

氯化钾,原产国为加拿大)和有机肥(江苏中农肥业有限公司)4种肥料颗粒的物料特性参数如表2所示。

表2 肥料颗粒物料特性参数

Tab.2 Characteristic parameters of fertilizer particles

参数	氮肥	磷肥	钾肥	有机肥
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 184	2 083	2 291	1 447
等效直径/mm	2.143	3.084	4.195	3.874
球形率	0.970	0.906	0.735	0.978
泊松比	0.25	0.25	0.25	0.25
剪切模量/Pa	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
颗粒间恢复系数	0.100	0.144	0.188	0.212
颗粒间静摩擦因数	0.30	0.30	0.30	0.30
颗粒间动摩擦因数	0.26	0.26	0.26	0.26
颗粒与壁恢复系数	0.468	0.336	0.216	0.477
颗粒与壁静摩擦因数	0.447	0.474	0.400	0.394
颗粒与壁动摩擦因数	0.339	0.278	0.219	0.257

根据肥料颗粒的物料特性参数,建立肥料颗粒离散元模型,其中氮、磷和有机肥球形率高,可直接用硬球模型;钾肥形状不规则,采用多球面填充建立模型,如图8所示。

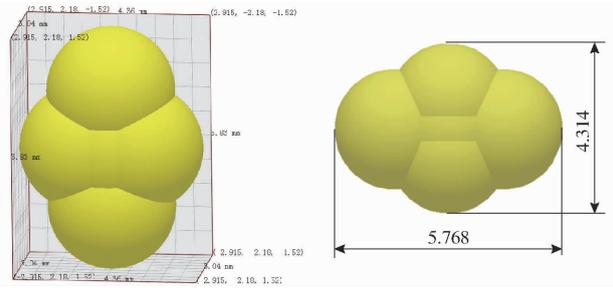


图8 钾肥离散元仿真模型

Fig.8 Discrete element simulation model of potash-fertilizer

在 EDEM2018 软件中设置产生 4 种肥料颗粒的工厂参数:颗粒产生速度为 50 000/s,下落速度为 0.1 m/s,颗粒生成总时间为 2 s。设置仿真参数为:时间步长 20%,仿真时间为 5 s,数据保存间隔为 0.04 s,网格单元尺寸为颗粒最小半径的 2 倍。仿真试验分别用白、绿、红和黑 4 种颜色渲染,不同转速时肥料颗粒流如图 9 所示。

将碰撞掺混后的肥料颗粒划分成 n 个网格,统计每个网格内氮、磷、钾和有机肥的颗粒个数,分别记为 N_i 、 P_i 、 K_i 和 O_i ,其中 i 表示第 i 个网格,那么第 i 个网格内每种肥料颗粒的占比可表示为

$$x_{F_i} = \frac{F_i}{N_i + P_i + K_i + O_i} \quad (15)$$

式中 F_i 为 N_i 、 P_i 、 K_i 或 O_i 。

每种肥料颗粒的总占比可表示为

$$X_F = \frac{F}{\sum_{i=1}^n (N_i + P_i + K_i + O_i)} \quad (16)$$

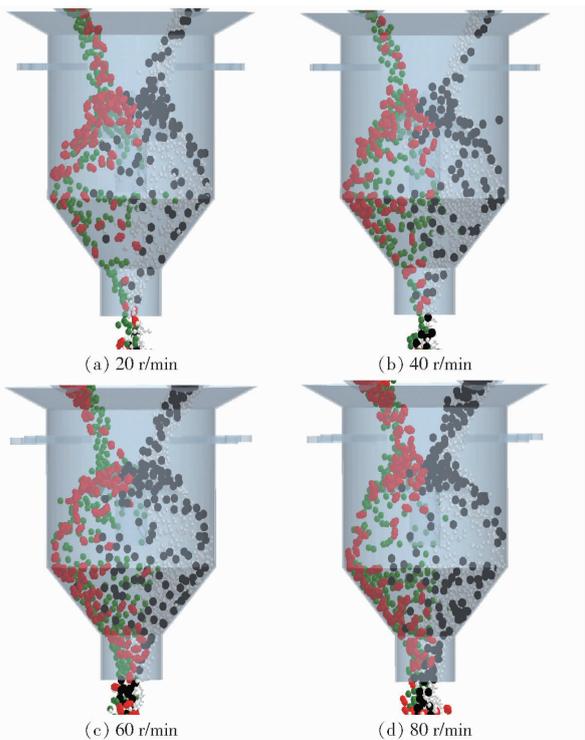


图 9 肥料颗粒掺混流动示意图

Fig. 9 Diagrams of fertilizer particles blending

式中 F 为 $\sum_{i=1}^n N_i$ 、 $\sum_{i=1}^n P_i$ 、 $\sum_{i=1}^n K_i$ 或 $\sum_{i=1}^n O_i$ 。

每种肥料颗粒在单个网格中掺混偏离度可表示为

$$B_{Fi} = \frac{x_{Fi}}{X_F} \quad (17)$$

计算氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料颗粒所有单元网格的掺混偏离度标准差,掺混偏离度标准差表示各单元格下肥料颗粒掺混均匀度与总体掺混均匀度偏离程度,其值越小表明肥料颗粒掺混波动越小,掺混效果越好。

对 4 种配比下肥料颗粒碰撞掺混偏离度进行计算,结果如表 3 所示,从表 3 中可以看出钾肥的掺混偏离度标准差较氮、磷、有机肥的大,是因为钾肥球形率低,沿二次碰撞掺混锥形面锥面分散时受到较大摩擦力导致分散不充分。但在进行变比配肥碰撞掺混时,4 种肥料颗粒总体掺混均匀,且在不同配比时均匀度基本一致。

表 3 不同配比偏离度标准差

Tab. 3 Standard deviation of different formulations

肥料比例	掺混偏离度标准差			
	氮肥	磷肥	钾肥	有机肥
4:2:2:1	0.26	0.26	0.29	0.24
1:2:1:2	0.24	0.29	0.32	0.26
2:3:1:1	0.28	0.24	0.33	0.24
4:3:6:2	0.24	0.27	0.39	0.28

2.3 定向撒肥机构

2.3.1 撒肥盘叶片选择

撒肥盘叶片一般为 2~6 个,研究发现叶片为 4 个时,撒肥均匀性好^[23],本文设计了 6 种叶片数为 4、直径为 200 mm 的撒肥盘进行试验,如图 10 所示。通过离散元仿真试验研究撒肥叶片对肥料抛撒分布的影响。

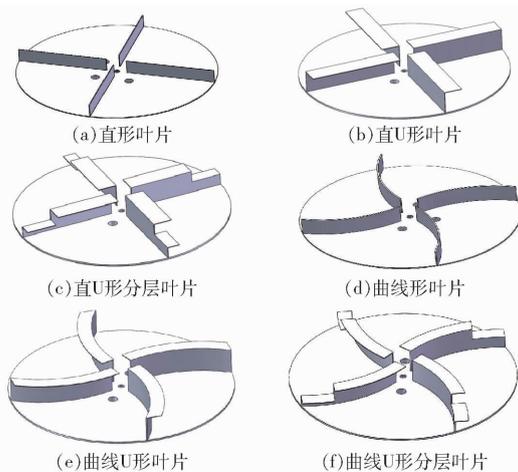


图 10 不同叶片撒肥盘

Fig. 10 Fertilizer disperse plate with different leaves

试验中肥料在撒肥盘上的落点与撒肥盘中心距离为 50 mm,设置撒肥盘距离地面高度为 450 mm,转速为 300 r/min,逆时针旋转抛撒,采用静态试验方法对颗粒进行收集计数,选取 7 500 mm × 3 000 mm (幅宽 × 收集长度)的矩形区域为颗粒收集区域,如图 11 所示,y 轴方向为肥料抛撒方向,原点 O 为撒肥幅宽的中点,撒肥盘右侧方向为 x 轴正方向取值为正, x 负方向取值为负,将收集区域划分为宽度为 300 mm 的单列肥料收集矩阵,各单列收集矩阵中的肥料颗粒数代表撒肥机穿过收集矩阵后沿幅宽方向撒肥的颗粒集中度^[26]。各单列收集矩阵中肥料颗粒数如图 12 所示,当撒肥盘转速为 300 r/min,6 种撒肥盘撒肥幅宽最大为 7.2 m。由图 12a、12b、12e 可知,直形叶片、直 U 形叶片和曲线 U 形叶片 3 种撒肥盘撒肥颗粒关于 y 轴明显不对称, y 轴右侧颗粒数多于 y 轴左侧,且 y 轴右侧肥料分布集中,整体来看肥料抛撒左右分布不均匀,撒肥效果差;由

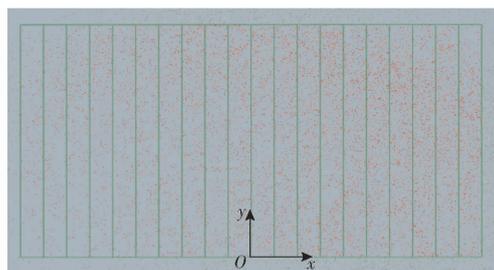


图 11 肥料收集矩形区域示意图

Fig. 11 Diagram of rectangular area for fertilizer collection

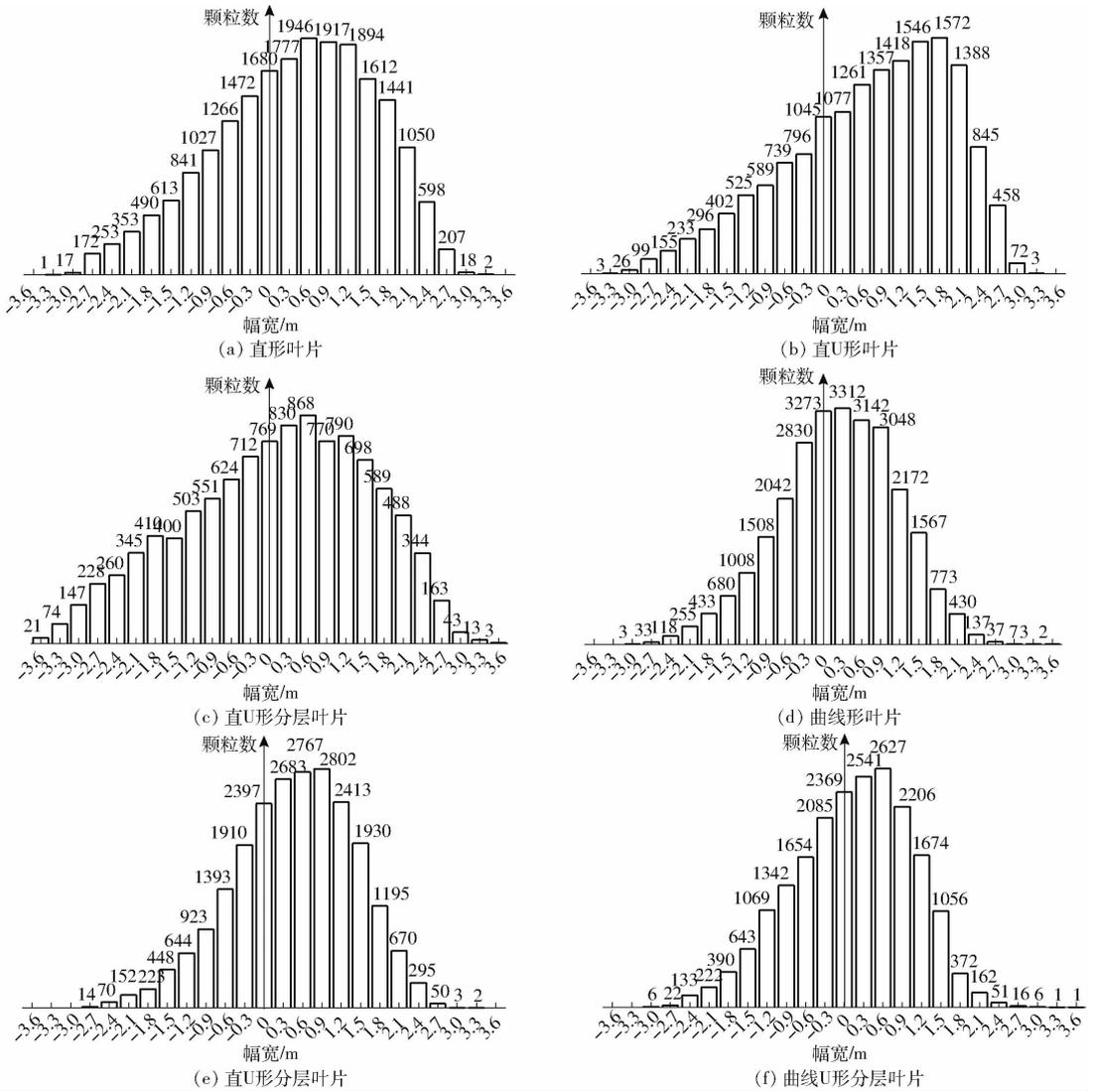


图 12 肥料抛撒分布柱状图

Fig. 12 Histograms of fertilizer disperse distribution

图 12c、12d、12f 可知,直 U 型分层拨齿、曲线形叶片和曲线 U 形叶片 3 种撒肥盘撒肥在靠近 y 轴肥料颗粒的集中度比图 12a、12b、12e 拨齿撒肥盘高;远离 y 轴后,图 12c 所示的直 U 形分层叶片撒肥盘在 y 轴左右两侧肥料颗粒数下降缓慢,而图 12d 和图 12f 两种撒肥盘撒肥颗粒数均快速下降,表明曲线形拨齿撒肥盘和曲线 U 形拨齿撒肥盘撒肥在靠近 y 轴位置肥料颗粒分布多且集中。因此,曲线形拨齿撒肥盘和曲线 U 形拨齿撒肥盘更适合桑树行间均匀撒肥的农艺需求。对比图 12d、12f 可看出,曲线形拨齿撒肥盘撒肥颗粒分布的对称位置在 $[0, 0.3]$ m 处,而曲线 U 形分层拨齿撒肥盘撒肥颗粒分布的对称位置在 $[0.3, 0.6]$ m 位置处,且曲线形拨齿撒肥盘在靠近撒肥中心位置时的肥料颗粒集中度更高,远离撒肥中心位置时的肥料颗粒数下降更快,因此,综合考虑桑园行间撒肥幅宽和撒肥颗粒分布规律,选择曲

线形叶片撒肥盘。

2.3.2 定向撒肥板设计

桑树栽培行距一般为 $0.8 \sim 1.4$ m,为实现桑树行间撒肥,撒肥机构外侧设计定向撒肥板,根据叶片高度和撒肥盘安装位置选择定向撒肥板长度 L_d 水平值为 350、400、450 mm,高度 H_d 水平值为 80、100、120 mm。部分肥料颗粒在离开撒肥盘后会沿垂直于撒肥盘的方向抛出,为了使肥料颗粒能够朝一个方向抛出,设计定向撒肥板为折弯状,选择折弯角 Φ_d 水平值为 100° 、 120° 、 140° 。利用 $L_9(3^4)$ 正交试验(表 4),A、B、C 表示因素水平值,计算极差优化定向撒肥板最优组合参数为:长度 L_d 为 450 mm、高度 H_d 为 80 mm、折弯角 Φ_d 为 100° ,其结构和尺寸如图 13。

通过离散元法对定向撒肥板工作效果进行仿真分析,设置撒肥盘转速为 300 r/min,距地高度 450 mm 进行离散元仿真试验,如图 14 所示,可以看

表 4 正交试验与极差分析

Tab.4 Orthogonal test and rang analysis

序号	试验因素				变异系数/ %
	A	B	C	空列	
1	1	1	1	1	30.06
2	1	2	2	2	33.86
3	1	3	3	3	34.43
4	2	1	2	3	32.02
5	2	2	3	1	30.58
6	2	3	1	2	34.93
7	3	1	3	2	30.62
8	3	2	1	3	33.29
9	3	3	2	1	33.39
K_1	98.35	92.7	98.28	94.03	
K_2	97.53	65.06	99.27	99.74	
K_3	97.3	102.7	95.63	99.74	
k_1	32.8	30.9	31.3	31.3	
k_2	32.5	32.6	33.1	33.1	
k_3	32.4	34.3	33.2	33.2	
R	0.35	3.35	1.9	1.9	
较优水平	A_3	B_1	C_1		

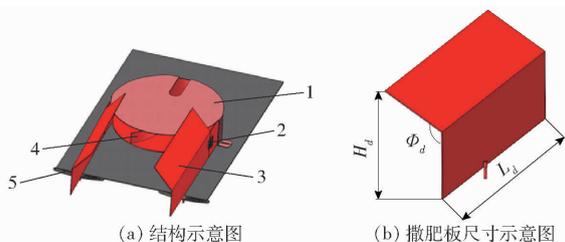


图 13 定向撒肥板结构图

Fig.13 Structure of fertilizer disperse distribution

1. 上端盖 2. 活动合页 3. 定向撒肥板 4. 曲线型叶片 5. 调节槽

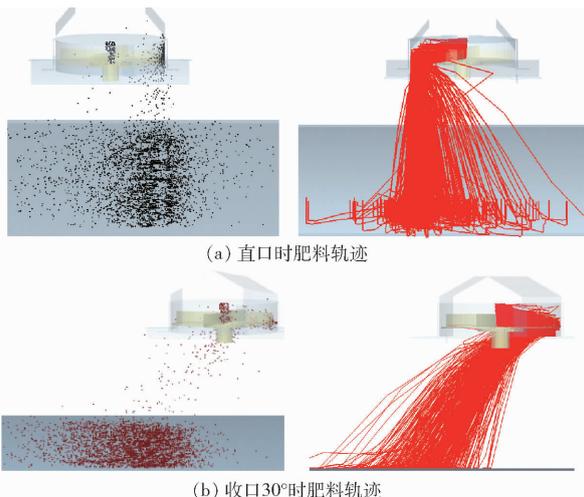


图 14 肥料抛撒运动轨迹

Fig.14 Trajectory of fertilizer disperse distribution

出肥料颗粒流在撒肥盘离心力的作用下,沿撒肥盘切线方向抛撒。抛撒的肥料颗粒流一部分直接落到地面,另一部分与定向撒肥板碰撞后沿相反方向抛

撒到地面。仿真结果显示定向撒肥板能够改变肥料运动轨迹,完成定向撒肥。

3 参数优化与样机试验

落肥位置距离撒肥盘轴心最小半径对颗粒肥料向撒肥盘边缘移动起决定作用,撒肥盘转速是影响撒肥变异系数的主要因素。机具进行作业时,作业速度的变化会导致撒肥分布均匀性降低。为检测整机工作性能,对桑园自走式变比配肥定向撒肥机进行田间试验。选择撒肥盘转速、整机作业速度和碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心的距离 3 个因素,研究对撒肥均匀性的影响,探究较优工作参数。

3.1 试验方法及数据处理

选取 1 000 mm × 1 000 mm 的撒肥区域,划分为 100 个相同大小的网格,统计每个网格中氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料颗粒的个数,计算肥料变异系数。

3.2 撒肥均匀性优化试验

采用三因素三水平正交试验组合,以撒肥分布变异系数^[27]为评价指标,进行三因素三水平响应面优化试验。桑园管理中,分施春肥每公顷施用氮肥 750 kg,重施夏肥每公顷施用氮肥 600 kg、磷肥 300 kg、钾肥 450 kg,追施秋肥每公顷氮肥施用 450 kg、磷肥 300 kg,普施冬肥每公顷施用有机肥 450 kg。曲线形叶片撒肥盘转速为 200 ~ 400 r/min 时,撒肥幅宽能满足 0.8 ~ 1.4 m 行距的桑树施肥需求,作业速度为 0.5 ~ 0.7 m/s 能够满足桑园管理施肥需求。因此选择撒肥盘转速为 200 ~ 400 r/min,作业速度为 0.5 ~ 0.7 m/s,碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离为 60 ~ 100 mm,设计正交试验。正交试验因素编码如表 5,响应面分析试验方案及结果如表 6 所示, R、S、D 为因素编码值。

表 5 正交试验因素编码

Tab.5 Experimental factors and codes of orthogonal test

编码	因素		
	撒肥盘转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	作业速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	距离/mm
1	400	0.7	100
0	300	0.6	80
-1	200	0.5	60

对撒肥分布变异系数进行多元回归拟合,得到撒肥分布变异系数与试验因素的二次多项回归方程为

$$C_v = 8.98 + 3.18R - 0.38S - 0.329D - 3.28RS - 0.99RD + 0.66SD + 8.42R^2 - 1.23S^2 + 2.02D^2 \quad (18)$$

表6 响应面分析试验方案与结果

Tab.6 Response surface analysis test program and results

编号	因素			变异系数/ %
	R	S	D	
1	0	-1	-1	11.75
2	0	1	-1	13.53
3	0	0	0	8.98
4	1	0	1	18.15
5	0	0	0	8.98
6	-1	0	1	13.26
7	1	1	0	13.51
8	1	-1	0	24.69
9	0	1	1	9.12
10	0	0	0	8.98
11	0	0	0	8.98
12	-1	1	0	14.21
13	0	-1	1	4.71
14	-1	0	-1	18.7
15	1	0	-1	27.56
16	0	0	0	8.98
17	-1	-1	0	12.27

通过方差分析(表7)可知,二次多项回归模型 $F = 13.31$, $P = 0.0013 < 0.05$,说明模型是显著的, $R^2_{adj} = 0.8738$ 说明该模型能解释 87.38% 的响应值的变化。决定系数 $R^2 = 0.9448 > 0.9$,表示模型仿真值与实测值之间相关性较高,可以用二次多项回归方程对试验结果进行分析和预测^[28-29]。

建立响应曲面图,如图15所示,根据响应曲面图及等高线图,分析撒肥盘转速、碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离和整机作业速度对撒肥分布变异系数的影响。

从图15a中可以看出等高线呈椭圆形,图15b、15c等高线不规则,说明整机作业速度与撒肥盘转速的交互作用显著,与碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离的交互作用不显著,撒肥盘转速和碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离的交互作用不显著。图15c撒肥盘转速响应曲面陡峭,表明撒肥盘转速比碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离对撒肥分布

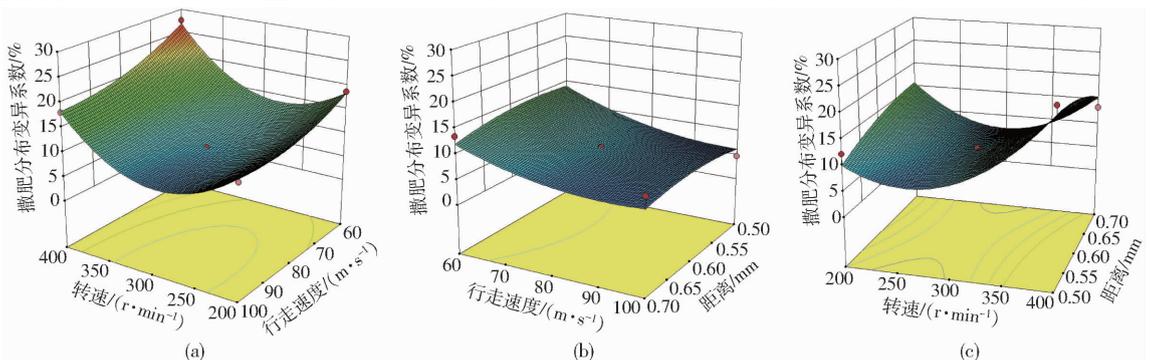


图15 撒肥分布变异系数响应曲面

Fig.15 Response surface of coefficient of variation of fertilizer distribution

表7 方差分析

Tab.7 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	543.00	9	60.33	13.31	0.0013
R	81.09	1	81.09	17.89	0.0039
S	1.16	1	1.16	0.26	0.6280
D	86.46	1	86.46	19.08	0.0033
RS	43.03	1	43.03	9.50	0.0178
RD	3.94	1	3.94	0.87	0.3821
SD	1.73	1	1.73	0.38	0.5563
R ²	298.16	1	298.16	65.08	<0.0001
S ²	6.32	1	6.32	1.39	0.2762
D ²	17.22	1	17.22	3.81	0.0922
残差	31.72	7	4.53		
失拟项	31.72	3	10.57		
总离差	574.72	16			

注: $P < 0.001$ 为影响极显著, $P < 0.05$ 为影响显著。

变异系数影响更大;由图15b可以看出碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离较整机作业速度方向陡峭,说明碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离比整机作业速度对撒肥分布变异系数影响更大。综合来看,对撒肥分布变异系数影响强弱顺序为:撒肥盘转速、碰撞掺混腔收料口与撒肥盘中心距离、整机作业速度。

以撒肥分布变异系数较小为目标,根据二次多项回归方程和响应曲面设计进行撒肥盘转速、碰撞掺混腔收料口距撒肥盘中心距离和整机作业速度3个因素较优工作参数优化,优化结果为:撒肥盘转速为290.1 r/min,碰撞掺混腔收料口距撒肥盘中心距离为88.2 mm,整机作业速度范围为0.5~0.7 m/s。

按照最优参数对各部分加工制造,组装完成后如图16所示。

3.3 样机田间试验

为验证桑园自走式变比配肥定向撒肥机撒肥均匀性优化结果,及在桑园内工作时的可靠性,2020年9月21日在山东省泰安市山东农业大学林学实验站蚕桑管理实验基地进行了田间试验。在桑树行



图 16 试验样机

Fig. 16 Structure diagram of sample test machine

间选取 $1\ 530\ \text{mm} \times 700\ \text{mm}$ 的矩形区域, 放置 3 行 8 列共 24 个尺寸为 $170\ \text{mm} \times 140\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$ 收集盒用于收集肥料颗粒, 桑园自走式变比配肥定向撒肥机距离矩形区域中心 $600\ \text{mm}$, 如图 17。



(a) 桑园撒肥试验

(b) 肥料收集盒

图 17 田间试验

Fig. 17 Field test

设置自走式桑园变比配肥定向撒肥一体机作业速度为 0.5 、 0.6 、 $0.7\ \text{m/s}$, 行走距离为 $10.1\ \text{m}$, 进行 3 次撒肥试验。试验结束后统计肥料收集盒内肥料颗粒个数, 计算肥料撒肥分布变异系数, 结果如表 8 所示。

表 8 撒肥分布均匀性试验结果

Tab. 8 Result of coefficient of variation of fertilizer distribution

速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	撒肥分布变异系数/%				
	氮肥	磷肥	钾肥	有机肥	总体
0.5	18.5	19.3	36.1	16.9	18.4
0.6	22.5	23.1	35.6	19.5	24.1
0.7	25.1	25.5	36.8	24.4	26.5

通过表 8 可知, 桑园自走式变比配肥定向撒肥机在不同速度下进行撒肥时, 钾肥的撒肥分布变异

系数受作业速度的影响不大, 与钾肥颗粒球形率低, 肥料颗粒流动性差有关。氮肥、磷肥和有机肥的撒肥分布变异系数随着作业速度的增大而增大, 4 种肥料总体的撒肥分布变异系数也随作业速度增大而增大, 但是整体撒肥分布变异系数变动幅度较小, 3 次撒肥试验结果表明, 整机作业速度对撒肥分布变异系数的影响不显著, 桑园自走式变比配肥定向撒肥机的撒肥分布变异系数远低于施肥机械质量评价技术规范^[30]中要求的 40%, 符合作业要求。通过田间试验发现桑园自走式变比配肥定向撒肥机在郁闭度较高的桑园内工作时能够保证变比配肥撒肥均匀性, 具有较高的可靠性。

4 结论

(1) 对变比配肥定向撒肥机进行整体结构设计, 确定槽轮式变比配肥掺混槽轮槽型为锥形圆弧, 设计槽轮直径为 $60\ \text{mm}$, 工作长度为 $60\ \text{mm}$, 槽数为 12, 碰撞掺混锥形角度为 58.9° , 半径为 $20.1\ \text{mm}$ 。通过离散元仿真模拟配肥撒肥工作过程, 发现槽轮转速在 $20 \sim 80\ \text{r/min}$ 范围内可以实现 4 种肥料均匀掺混。选择曲线形叶片撒肥盘, 设计定向撒肥板最优组合长度为 $450\ \text{mm}$ 、高度为 $80\ \text{mm}$ 、折弯角为 100° 。

(2) 通过响应面优化分析得出整机作业速度与撒肥盘转速的交互作用对撒肥分布变异系数的影响显著。建立撒肥分布变异系数二次多项回归方程对工作参数进行优化, 优化结果为撒肥盘转速为 $290.1\ \text{r/min}$ 、碰撞掺混腔收料口距撒肥盘中心距离为 $88.2\ \text{mm}$ 、机器作业速度范围为 $0.5 \sim 0.7\ \text{m/s}$ 。

(3) 田间试验表明桑园自走式变比配肥定向撒肥机在不同速度下进行撒肥时, 整机作业速度对撒肥分布变异系数的影响不显著, 自走式桑园变比配肥定向撒肥一体机的撒肥分布变异系数低于施肥机械质量评价技术规范要求的 40%, 整机田间工作具有较高的可靠性。

(4) 田间试验验证本文设计的桑园自走式变比配肥定向撒肥机能够进入郁闭度较高的桑园进行定向撒肥作业, 可以实现桑园科学均衡施肥。

参 考 文 献

- [1] 朱光书, 林强, 朱方容, 等. 不同配方施肥对桑叶产量和质量的影响试验[J]. 广西蚕业, 2009, 46(1): 8-12. ZHU Guangshu, LIN Qiang, ZHU Fangrong, et al. Test on the effects of fertilization with different formulas on yield and quality of mulberry leaves[J]. Guangxi Sericulture, 2009, 46(1): 8-12. (in Chinese)
- [2] 杨滨浩, 秦晋军, 张洁花, 等. 桑园科学施肥与桑叶增产提质[J]. 农业技术与装备, 2017(10): 7-8, 10. YANG Binhao, QIN Jinjun, ZHANG Jiehua, et al. Mulberry and mulberry leaf yield and quality of scientific fertilization[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2017(10): 7-8, 10. (in Chinese)
- [3] 张茜, 李淑芳, 胡山林, 等. 关于夏季和秋季的桑树施肥技巧探讨[J]. 农业技术与装备, 2021(1): 135-136. ZHANG Qian, LI Shufang, HU Shanlin, et al. Discussion on fertilization techniques of mulberry in summer and autumn[J].

- Agricultural Technology & Equipment, 2021(1):135-136. (in Chinese)
- [4] 王英民. 桑园科学施肥[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2019(5):19-20.
WANG Yingmin. Scientific fertilization in mulberry garden[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2019(5):19-20. (in Chinese)
- [5] 杨昌敏, 易文裕, 王攀, 等. 四川桑园施肥技术现状及机械化需求调研[J]. 四川蚕业, 2020, 48(4):10-12.
YANG Changmin, YI Wenyu, WANG Pan, et al. Investigation on the current situation of fertilization technology and mechanization demand in Sichuan mulberry garden[J]. Sichuan Sericultural, 2020, 48(4):10-12. (in Chinese)
- [6] 谢桂萍, 夏跃明. 桑园 N、P、K 肥的施用及缺肥诊断[J]. 云南农业, 2020(2):66-68.
XIE Guiping, XIA Yueming. Application of N, P and K fertilizers in mulberry garden and diagnosis of fertilizer deficiency[J]. Yunnan Agricultural, 2020(2):66-68. (in Chinese)
- [7] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18):12-20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):12-20. (in Chinese)
- [8] 杨洲, 朱卿创, 孙健峰, 等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(5):175-180.
YANG Zhou, ZHU Qingchuang, SUN Jianfeng, et al. Study on the performance of fluted roller fertilizer distributor based on EDEM and 3D printing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5):175-180. (in Chinese)
- [9] 施印炎, 陈满, 汪小昂, 等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7):97-103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):97-103. (in Chinese)
- [10] 汪博涛, 白璐, 丁尚鹏, 等. 外槽轮排肥器关键工作参数对排肥量影响的仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10):1-6.
WANG Botao, BAI Lu, DING Shangpeng, et al. Simulation and experimental study on impact of fluted-roller fertilizer key parameters on fertilizer amount[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10):1-6. (in Chinese)
- [11] 顿国强, 于春玲, 郭艳玲, 等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3):87-96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):87-96. (in Chinese)
- [12] YAN Y F, HAN S Q, MENG D X, et al. Discharging performance experiment and analysis for double flute-wheels discharger based on discrete element method[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(4):59-65.
- [13] 苑进, 刘勤华, 刘雪美, 等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):81-87.
YUAN Jin, LIU Qinhu, LIU Xuemei, et al. Simulation of multi-fertilizer variable ratio variable rate fertilization process and optimization of structure of row and fall fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):81-87. (in Chinese)
- [14] 苑进, 刘勤华, 刘雪美, 等. 配比变量施肥中多肥料掺混模拟与掺混腔结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6):125-132.
YUAN Jin, LIU Qinhu, LIU Xuemei, et al. Simulation of multi-fertilizer variable ratio variable rate fertilization process and optimization of structure of row and fall fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):125-132. (in Chinese)
- [15] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4):308-325.
- [16] PRZYWARA A. The impact of structural and operational parameters of the centrifugal disc spreader on the spatial distribution of fertilizer[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015(7):215-222.
- [17] PRZYWARA A, SANTORO F, KRASZKIEWICZ A, et al. Experimental study of disc fertilizer spreader performance[J]. Agriculture, 2020, 10(10):467.
- [18] DINTWA E, LIEDEKERKE P V, OLIESLAGERS R, et al. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4):407-415.
- [19] YILDIRIM Y, KARA M. Effect of vane height on distribution uniformity in rotary fertilizer spreaders with different flow rates[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(1):19-23.
- [20] 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14):32-39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CASE, 2017, 33(14):32-39. (in Chinese)
- [21] 芦新春, 陈书法, 杨进, 等. 宽幅高效离心式双圆盘撒肥机设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(8):100-103.
LU Xinchun, CHEN Shufa, YANG Jin, et al. Design and experiment on double-disc spreader with wide breadth and highly efficiency[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8):100-103. (in Chinese)
- [22] 施印炎, 陈满, 汪小昂, 等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3):86-93, 113.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):86-93, 113. (in Chinese)