

刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机设计与试验

谭好超 徐丽明 马 帅 牛 丛 闫成功 沈聪聪

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对果园有机肥人工施肥量不准确、施肥不均匀等问题, 本文根据施肥农艺要求, 设计了一种有机肥条铺与旋耕混合施肥机。该装置采用刮板式结构, 通过圆环链带动刮板向前排肥, 将有机肥呈条状铺撒在地表, 通过旋耕装置将其与土壤混合。通过计算确定了施肥装置最大开口高度、肥箱容积等结构参数, 分析了上、下层有机肥排肥过程。以排肥口开口高度、前进速度、链轮转速和刮板间距为试验因素进行离散元仿真试验, 以有机肥相对误差和变异系数为评价指标, 对排肥过程工作参数进行优化求解, 得到最优参数组合: 开口高度为 53.17 mm、前进速度为 2.8 km/h、链轮转速为 15.96 r/min、刮板间距为 160 mm。在最优工作条件下进行试验验证, 得到有机肥平均排肥量为 5.099 kg/m², 与理论施肥量相对误差为 4.5%, 变异系数为 8.8%, 表明仿真优化结果可靠, 排肥量准确且排肥均匀性较好, 该施肥装置施肥性能较优。在旋耕混合试验中, 通过测定得到上层有机肥混合比例为 11.83%, 下层有机肥混合比例为 6.29%, 表明经过旋耕后, 能够实现土肥混合效果, 上层土肥混合比例高于下层。

关键词: 有机肥; 刮板; 施肥机; 离散元仿真; 旋耕混合

中图分类号: S224.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0163-13 OSID: 

Design and Experiment of Scraper Organic Fertilizer Strip Spreading and Rotary Tillage Mixed Fertilizer Applicator

TAN Haochao XU Liming MA Shuai NIU Cong YAN Chenggong SHEN Congcong
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the inaccuracy of artificial fertilizer application amount and uneven fertilization of orchard organic fertilizer, an organic fertilizer strip spreading rotary tillage mixed fertilizer application machine was designed according to the requirements of fertilization agronomic. The device used scraper drainage fertilizer, through the ring chain to drive the scraper to the front row of fertilizer, and spread organic manure in strips on the surface, then the rotary tillage device would be mixed with the soil. First of all, through the design calculation, the maximum opening height of the fertilizer device, fertilizer box volume and other structural parameters were determined, and the upper and lower organic fertilizer discharge process was analyzed. Then, discrete element simulation test was carried out with the opening height of fertilizer discharge port, forward speed, sprocket speed and scraper spacing as test factors. The parameters were solved with the relative error and variation coefficient of organic fertilizer as evaluation indexes, and the working parameters of fertilizer discharge process were optimized and solved. The optimal parameter combination was obtained as follows: the opening height was 53.17 mm, the forward speed was 2.8 km/h, the sprocket speed was 15.96 r/min, and the scraper spacing was 160 mm. The experimental verification under the optimal working conditions showed that the average organic fertilizer discharge was 5.099 kg/m², the relative error was 4.5% and the coefficient of variation was 8.8%. This showed that the simulation optimization results were reliable, the fertilizer discharge was accurate and the uniformity of fertilizer discharge was good, and the fertilization performance of the fertilization device was good. Finally, in the rotary tillage mixing test, the mixing ratio of upper organic fertilizer was 11.83%, and that of lower organic fertilizer was 6.29%, indicating that after rotary tillage, soil and fertilizer mixing effect could be achieved, and the mixing ratio of upper soil and fertilizer was higher than that of the lower layer.

Key words: organic fertilizer; scraper; fertilizer applicator; discrete element simulation; rotary tillage mixing

0 引言

我国是农业生产大国,林果栽培面积居世界第一位^[1]。在林果生产过程中,若有机肥施用不合理直接导致优果率下降,降低农民收益,合理施用有机肥能够保证植株的生长发育,促进作物增产增收^[2-4]。

目前,国内外相关领域学者对有机肥施肥机械设计与应用进行了诸多研究。国外发达国家对施肥机械化研究起步较早,法国库恩公司研制了一款侧式撒肥机,该机器通过螺旋输送机输肥和锤片撒肥实现有机肥的稳定抛撒^[5];MARTYNOVA 等^[6]设计了一种有机肥深层施肥机,采用深层松土与有机肥施肥相结合的方式,提高了土壤肥力和透气性;德国 Amazone 公司研制了一款 ZA-TS 型离心式撒肥机,机器工作宽度 18~54 m 可调,配备有边界识别装置,可确保撒肥准确,不越边界^[7];国内对有机肥施肥机械的研究起步晚,肖宏儒等^[8]研制了 1KS60-35X 型果园双螺旋开沟施肥机,采用双轴设计,前刀轴实现破土,后刀轴实现搅土,刀轴中间采用通孔设计,实现了搅土施肥联合作业;胡永光等^[9]研制了一款茶园施肥机,采用叶片位置倾角可调的偏置式撒肥离心盘,可以获得较好的撒肥均匀性;何义川等^[10]研制了 2FK-40 型果园开沟施肥机,实现了开沟、施肥、覆土一体化作业。施肥机械多种多样,多集中在深施或表面撒施,表面撒施有机肥会造成肥料随雨水流失,且作物收获后土壤表层紧实,通气性较差,造成根部吸收能力减弱,对于根系较浅的作物又不适合深施。

本文针对上述问题并根据调研地区人工施肥的缺点,设计一种刮板式有机肥旋耕施肥装置,根据作业幅宽要求,将有机肥铺撒在地表,同时由旋耕机构将撒在表面的有机肥与表层土壤旋耕混合,不仅可以破碎结块的表层土壤,而且土肥混合后更利于作物养分吸收,以提高结果率和改善果实品相,解决人工施肥不准确和均匀性差的问题。

1 整机结构与工作原理

1.1 果园种植模式及施肥农艺要求

以棚架栽培果园为设计参考依据,其种植模式如图 1a 所示。行距 D_1 在 3~4 m 之间,株距在 1.5~3 m 之间,在离地高度 D_2 为 1.8 m 位置设有铁丝网。施肥位置以果树为中心,左右两侧铺施有机肥,单侧施肥宽度 D_3 为 0.8~1.2 m。施用的有机肥大多数呈粉末状,其间掺杂着少量块状有机肥,如图 1b 所示。

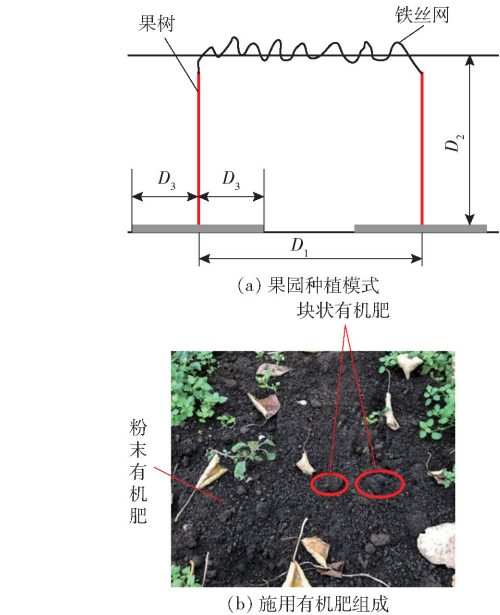


图 1 果园种植模式和有机肥类型
Fig. 1 Orchard fruit planting pattern and type of organic fertilizer

1.2 整机结构

刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机结构如图 2 所示,主要包括机架、肥箱、传动装置、刮板排肥装置、旋耕装置等,旋耕装置位于肥箱正下方,施肥口后方,能够实现先施肥后旋耕的作业顺序。

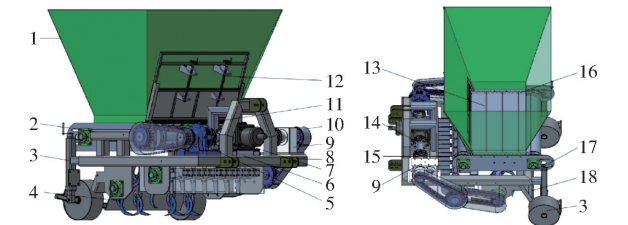


图 2 有机肥施肥机整体结构图
Fig. 2 Overall structure diagram of organic fertilizer applicator
1. 肥箱 2. 机架 3. 限深轮总成 4. 旋耕装置 5. 减速机 6. 底座 7. 传动装置 8. 三点悬挂 9. 平行轴变速箱 10. 链轮罩壳 11. 排肥口 12. 手轮 13. 刮板 14. 链条联轴器 15. 圆环链 16. 圆环链轮 17. 椭圆侧板 18. 拖板

1.3 工作原理

作业前,通过拖拉机三点悬挂与机具连接,并通过十字万向节传动轴将拖拉机动力输出轴(Power take-off shaft, PTO)和机具上变速箱连接,为其提供动力输入。在地头将有机肥装满肥箱,结合施肥量要求,通过旋转手轮,调整排肥口开口高度,通过限深轮调整旋耕深度。作业时,拖拉机靠近植株前进。圆环链轮旋转,带动刮板将有机肥连续地从排肥口排出,排出的有机肥呈条状平铺在地表;旋耕装置将铺撒在地表的有机肥与土壤旋耕混合,最后拖板将土肥拖平。

1.4 主要技术参数

结合种植模式和施肥要求,确定有机肥条铺施肥装置主要技术参数,如表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
配套动力/kW	40 ~ 60
作业速度/(km·h ⁻¹)	2 ~ 4
旋耕深度/mm	0 ~ 120
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 072 × 1 464 × 1 075
施肥宽度/m	1
圆环链轮转速/(r·min ⁻¹)	15.9
有机肥肥箱容积/m ³	0.7
作业行数	1

2 关键部件设计

2.1 肥箱设计

合理的肥箱结构减少装肥次数^[11],节省劳力。地块有效施肥长度 45 m,果树单侧施肥幅宽 1 m,两侧均需施有机肥,施肥量为 45 m³/hm²。结合施肥要求,同时要避免行驶途中出现肥料不足等情况,设计的有机肥肥箱容积约为 0.7 m³,此容积能够满足一次往返所需的施肥量。肥箱结构设计为倒梯台结构,梯台锥面与水平面夹角为 70°,大于有机肥料休止角^[12-13],保证有机肥能够顺利沿锥面向下流动。同时,在肥箱前端锥面设置有排肥口,通过 2 个手轮控制挡肥板在滑道槽中上下移动,从而调节开肥口高度,滑道槽表面每隔 1 cm 设置一条刻度线,可以实现开口高度准确调节,如图 3 所示。

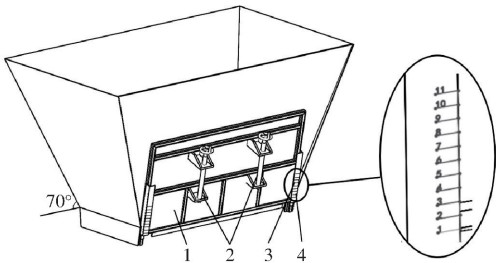


图 3 肥箱结构示意图

Fig.3 Schematic of fertilizer box structure
1. 挡肥板 2. 手轮 3. 滑道槽 4. 刻度线

2.2 有机肥排肥装置

为实现条状施肥作业,本文设计的排肥装置采用刮板式排肥结构,如图 4 所示,主要由圆环链、圆环链轮、刮板、肥料支撑板等组成。排肥支撑板安装在肥箱底部,通过螺栓与肥箱固定。工作时,刮板通过圆环链轮带动,以一定速度从肥箱底部刮有机肥并向前输送。

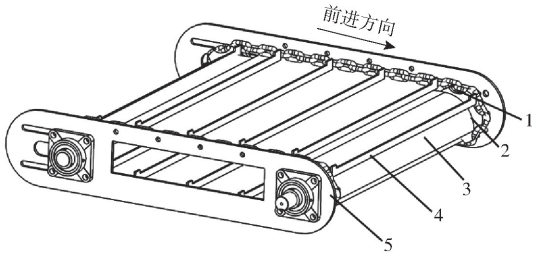


图 4 排肥链结构示意图

Fig.4 Schematic of fertilizer discharge chain structure
1. 圆环链 2. 圆环链轮 3. 肥料支撑板 4. 刮板 5. 椭圆侧板

2.2.1 排肥过程中运动分析

摩擦力是影响排肥性能的因素,为便于分析,将肥箱中的有机肥料分为上下两层,下层有机肥是指位于肥料支撑板上方,并处于前后两个刮板中间且与刮板等高的有机肥,上层有机肥是指位于刮板之间且处在下层肥料之上的有机肥^[14]。下层有机肥靠刮板推力和内摩擦力相互作用实现向前排肥,上层有机肥受到内摩擦力和有机肥与肥箱侧壁所产生的阻碍摩擦力作用,当内摩擦力大于阻碍摩擦力时才能实现向前排肥。若上层肥料排肥高度过大,所产生的阻碍摩擦力大于内摩擦力,不能将上层肥料全部排出,因此合适的上层排肥高度对排肥的准确性有重要影响。

将前后刮板间的上层有机肥简化为一个受力单体,受力分析如图 5 所示。

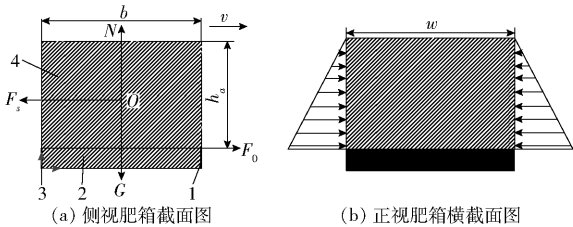


图 5 上层有机肥输送过程受力分析

Fig.5 Stress analysis of upper organic fertilizer transportation process

1. 前刮板 2. 下层有机肥 3. 后刮板 4. 上层有机肥

由图 5 可知,阻碍摩擦力^[15]、内摩擦力计算式为

$$F_b = \frac{1}{2}bh_a^2\mu_2\rho\alpha \tag{1}$$

$$F_s = 2F_b \tag{2}$$

$$F_0 = \mu_1N = \mu_1\rho w b h_a \tag{3}$$

式中 F_b ——单侧料箱侧壁对肥料的摩擦力,N
 F_s ——双侧料箱侧壁对肥料的摩擦力,N
 F_0 ——内摩擦力,N
 h_a ——保证上层肥料稳定排出的极限高度,mm
 b ——刮板间距,mm
 w ——刮板长度,mm

D_1 取 3.5 m, L 取 1 m, ρ_l 为 620 kg/m³, 将数值代入式(12), 得到目标施肥量为 4.88 kg/m²。

刮板理论排肥量计算公式为

$$Q_2 = \frac{\pi wh \gamma \delta \rho_l n R_r}{3 \times 10^7 Lv}$$
 (13)

式中 Q_2 ——理论排肥量, kg/m²
 h ——开口高度, mm
 n ——圆环链轮转速, r/min
 γ ——倾角系数 δ ——输送效率
 R_r ——圆环链轮半径, mm
 v ——拖拉机前进速度, km/h

从式(13)可以看到, 刮板的实际排肥量与排肥口高度、链轮转速、拖拉机的前进速度有关, 且与排肥口高度、链轮转速呈正相关, 与拖拉机前进速度呈负相关, 3 个变量因素共同影响排肥量。因此根据施肥量农艺要求, 需要确定合适的刮板间距、开口高度、链轮转速和拖拉机前进速度。

2.3 旋耕部分设计与转速确定

旋耕部分可实现向后向和侧向抛土^[18], 将地表有机肥旋入土壤, 并在抛撒过程中实现有机肥与土壤的混合。其主要由刀辊、刀库和旋耕刀组成, 其结构如图 8a 所示。旋耕刀作为入土部件, 合适的排列安装会减小作业时阻力, 能够避免漏耕和堵塞, 根据《农业机械设计手册》与相关研究^[19-20], 本文设计的旋耕刀排列方式为双头螺旋排列, 相邻同向旋耕刀的周向夹角为 60°, 相邻回转面距离为 65 mm, 远小

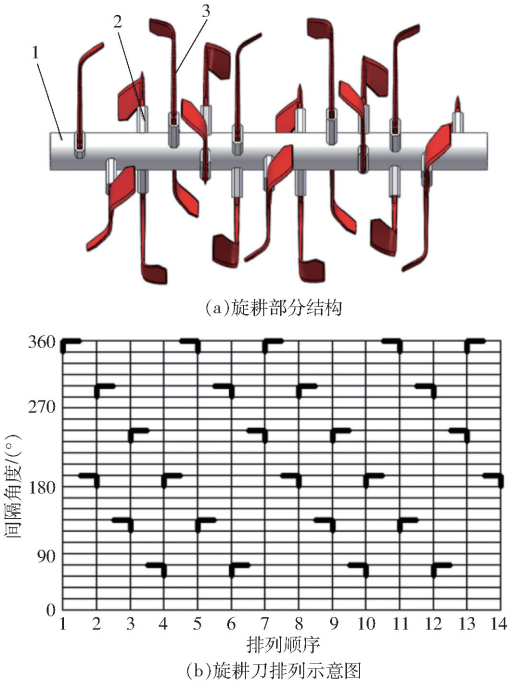


图 8 旋耕刀结构及排列示意图

Fig. 8 Schematics of structure and arrangement of rotary tillers

1. 刀辊 2. 刀库 3. 旋耕刀

于土壤侧向位移。为保证在旋耕过后地表平整, 左、右弯刀在刀辊上交错式安装, 刀辊两端旋耕刀向里弯, 防止往外抛土, 其弯刀排列展开图如图 8b 所示。

旋耕刀运动参数影响整机作业性能, 在作业过程中, 为保证刀片正常切土, 避免出现旋耕刀推土现象, 需使得旋耕速比 λ 大于 1。 λ 计算式为

$$\lambda = \frac{7.2 \pi n_r R}{v}$$
 (14)

式中 n_r ——旋耕刀转速, r/min
 R ——旋耕刀回转半径, mm

在旋耕刀刚接触土壤的状态下, 以刀辊的回转中心 O 为中心, 拖拉机前进方向为 x 轴, 竖直向下为 y 轴, 建立如图 9 所示的直角坐标系, 旋耕刀切削点 a 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R \cos(\omega t_x) + vt_x \\ y = R \sin(\omega t_x) \end{cases}$$
 (15)

式中 t_x ——旋耕刀运动时间, s
 ω ——旋耕刀角速度, rad/s

从式(15)得, 旋耕刀运动轨迹为摆线, 当轨迹为余摆线时才能实现抛土^[21], 本文设计的旋耕部分主要作用是将地下土壤抛起实现与表面有机肥混合, 因此需构建旋耕刀切土量参数方程, 以分析影响切土量的因素。以单把旋耕刀为例进行分析, 在同一回转周期内其切土体积可近似计算为切土面积与切土厚度 G 的乘积, 切土厚度 G 计算式为^[22]

$$G = C \sin(\pi - \theta)$$
 (16)

式中 C ——旋耕刀正切刃切削长度, mm
 θ ——正切刃弯折角

选用 T195 旋耕刀, 对于特定旋耕刀, 正切刃切削长度 L 与正切刃弯折角 θ 为定值, 即切土厚度不变, 因此切土面积 S 直接影响切土体积 V 。

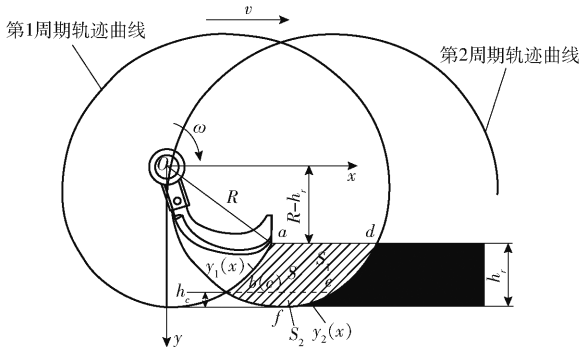


图 9 旋耕刀运动轨迹及切土面积示意图

Fig. 9 Schematic of motion track and soil cutting area of rotary tiller

切土面积 S 包括 a 、 b 、 d 、 e 围成的曲边四边形面积 S_1 和 b 、 e 、 f 围成的弧形面积 S_2 , 点 a 为旋耕刀第一周期轨迹曲线刚切削土壤的起始点; 点 b 、 c 为第 1

周期轨迹曲线与第 2 周期轨迹曲线的交点,其中,点 c 表示第 2 次相交;点 d 表示第 2 周期轨迹曲线刚与土壤接触的点;点 e 为过点 b 延长线与第 2 周期轨迹曲线的交点。则切土面积 S 可以表示为

$$S = S_1 + S_2 = \int_{d_y}^{e_y} x_2(y) dy - \int_{a_y}^{b_y} x_1(y) dy + \int_{c_x}^{e_x} y_2(x) dx - Db_y \quad (17)$$

式中 D ——切土节距,mm
 $y_2(x)$ ——曲线 ed 段函数方程
 $x_1(y)$ ——曲线 ab 段的反函数
 $x_2(y)$ ——曲线 ed 段的反函数
 $a、b、c、d、e$ 的下标为点 $a \sim e$ 在 x 轴或 y 轴上的坐标。
联立式(15)、(17)将其转换为含有时间 t 的方程

$$S = \int_{t_3}^{t_4} \left(R\cos(\omega t) + vt + \frac{2\pi v}{\omega} \right) R\omega\cos(\omega t) dt - Db_y - \int_{t_1}^{t_2} (R\cos(\omega t) vt) R\omega\cos(\omega t) dt + \int_{t_5}^{t_4} R\sin(\omega t) (v - \omega R\sin(\omega t)) dt \quad (18)$$

其中
$$\begin{cases} t_1 = \frac{\arcsin \frac{R-h_r}{R}}{\omega} \\ t_2 = \frac{\arcsin \frac{R-h_c}{R}}{\omega} \\ t_3 = t_1 + T \\ t_4 = t_2 + T \\ t_5 = \frac{3\pi}{\omega} - t_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中 $t_1 \sim t_5$ ——切削点运动到点 $a \sim e$ 的时间,s
 T ——旋耕刀周期时间,s
 h_r ——耕深,mm
 h_c ——沟底凸起高度,mm

切土节距 D 为

$$D = \frac{2\pi R}{z\lambda} \quad (20)$$

式中 z ——同一回转平面内旋耕刀数量
综合式(14)、(15)、(17) ~ (20) 可以计算切土面积 S 为

$$S = \frac{\pi R}{2} - D(R - h_c) - \frac{2\omega RD}{\pi} - \omega Rt_2 - 2D\sin(\omega t_1) + \frac{R}{2}\sin(2\omega t_2) \quad (21)$$

其中, $t_1、t_2$ 关系为

$$\sin(\omega t_2) = \frac{h_r - h_c}{h_r} + \frac{h_c}{h_r}\sin(\omega t_1) \quad (22)$$

结合式(20) ~ (22) 以及实际生产经验,可以看

出切土面积 S 与 $D、R、h、\omega、z$ 等参数有关,在选定旋耕刀工作条件下,回转半径 R 可视为定值,根据当地用户要求,耕深一般为 10 ~ 12 cm,本文设计的旋耕刀为双螺旋排列,故 z 为 2,根据排肥量前进速度取值为 2.8 km/h,由于果树种植以砂壤土为主,且本机器中的旋耕部件主要目的不以碎土为主,而是将表层有机肥旋入土壤,与土壤混合,提高有机肥利用率,故切土节距相对于旋耕标准可以取稍大值,以《农业机械设计手册》中含水率 20% ~ 30% 稻田土的切土节距为参考,本文取切土节距 D 为 14 cm,综合上述分析并结合式(14)、(20) 计算得到旋耕转速 n_r 为 167 r/min,取整为 170 r/min,旋耕速比 λ 约为 4.57,符合旋耕部件设计要求。

3 施肥过程 EDEM 仿真

3.1 仿真模型建立

为对有机肥排肥过程进行运动分析并求解最优工作参数,采用离散元仿真软件模拟刮板排肥过程,将求解的最优工作参数通过实际试验验证仿真结果的准确性。首先在 SolidWorks 软件中建立肥箱、刮板的简化三维模型,模型尺寸与实际大小一致,将三维模型保存为 parasolid(*.x_t) 格式,导入到 EDEM 软件中。在 EDEM 中建立长 20 m、宽 1 m 肥料收集槽,并设置质量传感器以检测施入收集槽中的有机肥料,如图 10a 所示。根据需要排出的有机肥量和预设的仿真时间,生成大量的有机肥料颗粒。有机肥离散元参数参照文献[23 - 25],选择 JKR (Hertz - Mindlin with Johnson - Kendall - Roberts) 接触模型,根据缩放理论和量纲分析^[26 - 27],对相应的离散元参数进行修正后,用休止角试验进行验证,如图 10b、10c 所示。最终相关仿真参数如表 2 所示。

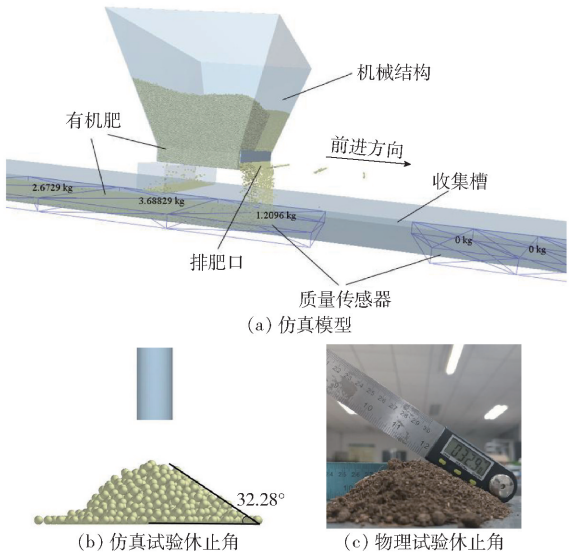


图 10 仿真模型示意图

Fig. 10 Schematic of simulation model

表 2 离散元仿真参数

Tab. 2 Discrete element simulation parameters		
类型	参数	数值
有机肥本征参数	剪切模量/Pa	1×10^6
	泊松比	0.25
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.072
有机肥-有机肥接触参数	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.65
	滚动摩擦因数	0.13
	泊松比	0.3
钢本征参数	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	7.85
	恢复系数	0.6
有机肥-钢接触参数	静摩擦因数	0.7
	滚动摩擦因数	0.11
JKR		0.012
颗粒半径/mm		5

3.2 响应面试验设计

由式(13)可知,影响排肥量的因素有刮板间距、拖拉机前进速度、圆环链轮转速、开口高度。根据旋耕作业拖拉机前进速度,设取值范围为2~4 km/h,结合文献[17]和刮板长度以及所要求的施肥量,圆环链轮转速取10、14、18 r/min 3个水平,其直径为175 mm,计算得到圆环链轮在3个转速下线速度均在0.08~1.0 m/s之间,符合链轮转速的农艺要求。开口高度计算式为^[28]

$$h = \frac{10^9 q}{\pi d \rho_l}$$

(23)

式中 q ——链轮转一圈的排肥量,kg
 d ——链轮直径,mm

在理想条件下,即有机肥料之间无空隙、无粘结、无阻碍的条件下进行估算,同时根据预试验,开口高度 h 取值为25~106 mm,根据所要求的理论施肥量,确定开口高度为25、45、65 mm。从图5、6受力分析可得,刮板间距直接影响排肥性能。根据式(11)以及设计经验,刮板距离太近会使得摩擦阻力增加,同时为防止出现断条现象,在前方刮板经过排肥口之后,至少保证有一个刮板已经进入到肥箱底部,因此选取刮板间距3个水平为160、240、320 mm。所要求的施肥量在结果范围内,表明各水平选择合理,试验因素编码如表3所示。

相对误差和变异系数分别作为施肥量准确性和均匀性的评价指标,相对误差越小,表明施肥量越接近目标值,变异系数越小,表明施肥均匀性越好。仿真中,0~3 s生成90 kg 有机肥颗粒,3~13 s使各部件按照所设定速度开始运动,在刮板作用下,有机肥颗粒会被带到排肥口排出,以条铺的形式铺到地面

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors codes				
编码	因素			
	开口高度	前进速度 $v/$	链轮转速 $n/$	刮板间距
	h/mm	($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	b/mm
-1	25	2	10	160
0	45	3	14	240
1	65	4	18	320

上。仿真结束后,在中间稳定排肥阶段以1 000 mm×1 000 mm×200 mm的取样器取样称量,数据可直接由质量传感器得出。连续取3次求平均作为仿真时排肥量,以此数据计算相对误差;距离第3次取样位置0.5 m处,以500 mm×1 000 mm×200 mm的取样器取样,连续取5次求标准差和平均值,以此数据计算施肥的变异系数。

3.3 响应面试验结果分析

选择Box-Behnken 响应面试验,5个中心点重复试验,总共29组试验,试验方案及结果如表4所示。

表 4 响应面试验方案及结果

Tab. 4 Response surface test scheme and results						
序号	因素				施肥量	施肥量
	开口高度	前进速度 $v/$	链轮转速 $n/$	刮板间距	相对误差	变异系数
	h/mm	($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	b/mm	$E/\%$	$C_v/\%$
1	25	3	18	240	73.7	25.30
2	65	2	14	240	-60.9	14.83
3	25	3	14	160	70.1	5.85
4	25	3	14	320	79.2	64.25
5	45	3	14	240	42.2	22.43
6	45	2	18	240	-10.4	14.37
7	65	3	14	320	-4.9	17.04
8	25	4	14	240	81.1	46.00
9	65	3	18	240	32.2	23.07
10	45	3	18	160	19.9	8.96
11	25	2	14	240	65.7	6.11
12	45	2	10	240	31.4	26.93
13	45	3	14	240	41.4	19.17
14	45	2	14	320	24.8	31.51
15	25	3	10	240	80.6	55.35
16	45	3	10	160	50.2	21.52
17	45	2	14	160	1.7	6.08
18	45	4	10	240	65.2	23.61
19	65	3	14	160	-11.0	10.95
20	65	4	14	240	16.9	15.23
21	45	3	10	320	58.1	31.72
22	65	3	10	240	10.0	13.07
23	45	3	18	320	40.8	34.65
24	45	3	14	240	41.0	22.80
25	45	4	18	240	47.6	24.40
26	45	3	14	240	40.7	24.63
27	45	4	14	320	60.3	37.30
28	45	3	14	240	41.4	21.66
29	45	4	14	160	51.7	15.58

使用 Design-Expert 8.0 软件对仿真试验结果进

行处理^[29-30],以 E 和 C_v 为因变量分别建立回归模型^[31],并对其进行显著性分析,分析结果如表 5 所示。

表 5 回归模型方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of regression model					
评价 指标	方差来源	平方和	自由度	F	P
E	模型	33 567. 33	14	149. 67	<0. 000 1 **
	h	22 985. 16	1	1 434. 81	<0. 000 1 **
	v	6 106. 33	1	381. 18	<0. 000 1 **
	n	1 843. 11	1	115. 05	<0. 000 1 **
	b	476. 66	1	29. 75	<0. 000 1 **
	hv	973. 85	1	60. 79	<0. 000 1 **
	hn	193. 74	1	12. 11	0. 003 7 **
	hb	2. 14	1	0. 13	0. 720 3
	vn	145. 74	1	9. 10	0. 009 2 **
	vb	52. 46	1	3. 27	0. 091 9
	nb	42. 51	1	2. 65	0. 125 6
	h^2	369. 26	1	23. 05	0. 000 3 **
	v^2	377. 64	1	23. 57	0. 000 3 **
	n^2	3. 93	1	0. 25	0. 628 2
	b^2	2. 41	1	0. 15	0. 704 0
	残差	224. 28	14		
C_v	失拟项	190. 30	10	2. 24	0. 227
	纯误差	33. 97	4		
	总和	33 791. 60	28		
	R^2	0. 993 4			
	模型	5 032. 09	14	9. 47	<0. 000 1 **
	h	1 202. 30	1	33. 69	<0. 000 1 **
	v	323. 36	1	8. 52	0. 011 2 *
	n	233. 05	1	6. 14	0. 026 5 *
	b	1 813. 76	1	47. 81	<0. 000 1 **
	hv	398. 84	1	10. 28	0. 006 3 **
	hn	204. 71	1	5. 40	0. 035 8 *
	hb	684. 12	1	18. 03	0. 000 8 **
	vn	44. 48	1	1. 17	0. 297 2
	vb	3. 44	1	0. 091	0. 767 6
	nb	59. 51	1	1. 58	0. 229 4
	h^2	10. 79	1	0. 28	0. 602 1
	v^2	18. 04	1	0. 48	0. 501 7
	n^2	26. 71	1	0. 70	0. 415 5
	b^2	10. 41	1	0. 27	0. 608 5
	残差	531. 10	14		
	失拟项	491. 43	10	4. 96	0. 068 4
	纯误差	39. 67	4		
	总和	5 563. 19	28		
	R^2	0. 904 5			

注: ** 表示极显著($P<0. 01$), * 表示显著($P<0. 05$)。

由表 5 可知, E 和 C_v 的回归模型 P 均小于 0. 000 1,失拟项大于 0. 05,表明回归模型准确,拟合较好。从 F 及显著性来看,4 个因素均对 E 有影响,影响 E 的主次顺序为:开口高度 h 、前进速度 v 、链轮

转速 n 、刮板间距 b 。影响 C_v 的主次顺序为:刮板间距 b 、开口高度 h 、链轮转速 n 、前进速度 v ,刮板间距和开口高度对 C_v 影响极为显著。删掉不显著项,得到修正的 E 和 C_v 的回归方程分别为

$$E = 100. 85 - 1. 56h + 13. 43v - 3. 71n + 0. 08b + 0. 78hv - 0. 09hn + 1. 51vn - 0. 02h^2 - 7. 85v^2 \tag{24}$$

$$C_v = -89. 91 + 1. 69h + 27. 4v - 5. 13n + 0. 52b - 0. 49hv + 0. 09hn - 0. 008hb \tag{25}$$

由表 5 可知,对相对误差而言,开口高度与链轮转速、开口高度与前进速度、前进速度与链轮转速具有交互作用;对变异系数而言,开口高度与链轮转速、前进速度、刮板间距均有交互作用,由生成的响应曲面图(图 11、12)分析交互作用因子对 E 和 C_v 的影响规律。

由图 11a 可知,在前进速度、刮板间距固定的情况下,开口高度对相对误差的影响较大,这主要是因为开口越大,排肥量呈正比增加。且随着开口高度的增加,相对误差逐渐减小,最后变为负值,这表示施肥量逐渐接近目标施肥量,当相对误差为零时,表明已经达到施肥要求,当相对误差为负值时,表明超过目标施肥量。当链轮转速在高水平时,开口高度的变化引起响应值的跨度较链轮转速在低水平时的跨度大。跨度越大,表明施肥量变化范围越大,故可以适当增大链轮转速、减小开口高度达到目标施肥量。

由图 11b 可知,开口高度对相对误差的影响与前进速度对相对误差的影响规律相反,相对误差随着开口高度的增加先正向减少后反向增大,随着前进速度的增加先反向减小后正向增大。当开口高度为低水平时,相对误差随着前进速度的增加而增大,但是变化幅度较小,当为高水平时,相对误差随前进速度的增大而增大,但变化幅度较大,这是因为开口高度较小时,排肥量很小,即使前进速度增加,较少的排肥量也不足以引起误差,所以变化幅度较小,开口高度为高水平时,正好与此相反。

由图 11c 可知,当链轮转速为低水平时,前进速度对相对误差的影响呈正相关,相对误差随前进速度的增加逐渐增大,当链轮转速在高水平时,相对误差由负变为零,后又逐渐增大,表现在施肥过程中为,施肥量逐渐减少,当小到目标施肥量时,误差为零,而后继续减少,逐渐小于目标施肥量,表现在误差逐渐增大。链轮转速在较低水平时,相对误差随前进速度的增加而逐渐增大,这是因为转速固定时,施肥量为定值,此时增大前进速度,使得抛撒在地表上的施肥距离增加,即单位距离上的施肥量变小,则

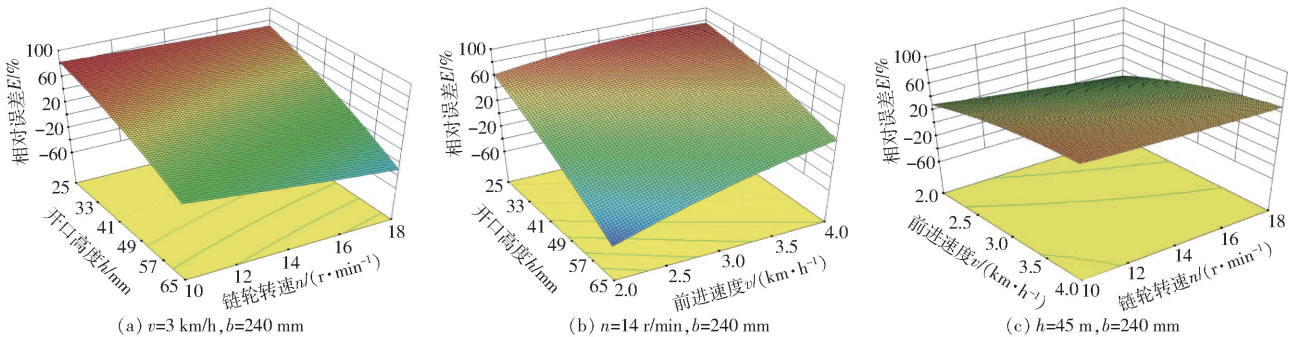


图 11 交互因子对相对误差的影响
Fig. 11 Influence of interaction factor on relative error

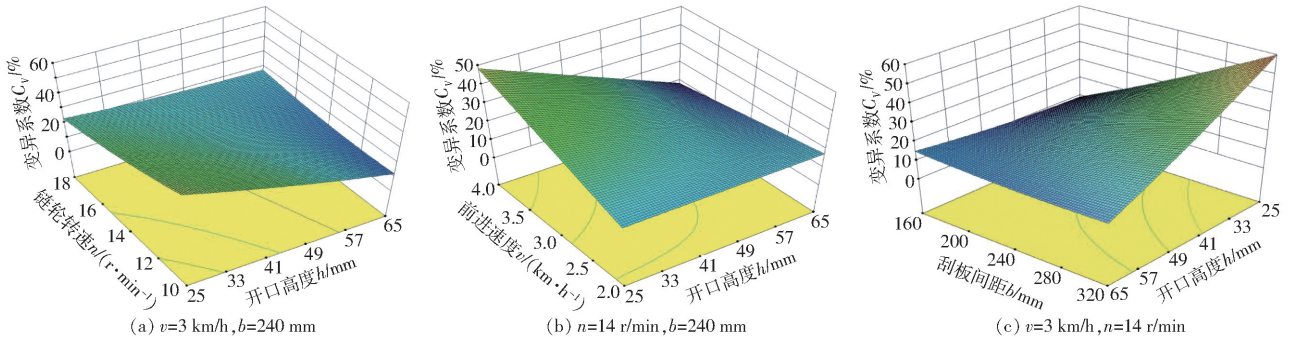


图 12 交互因子对变异系数的影响
Fig. 12 Influence of interaction factors on coefficient of variation

会引起相对误差增大。

由图 12 可知,开口高度与其他因素的交互作用均对变异系数有影响,在其他因素固定时,变异系数与开口高度呈负相关,当开口高度为高水平时,变异系数较小,变异系数为低水平时,变异系数较大。这是因为,在所选择的开口高度水平内,上层有机肥在摩擦力的作用下以连续整体的物料流运动^[14],开口高度越大,上层有机肥所占比重越多,远超下层有机肥的排肥量,使得下层排肥的不均匀性减弱, C_v 则会越小,当开口高度最大时,排肥量中上层均匀稳定的有机肥所占比重最多,此时其余因素无论如何变化,变异系数都不会发生很大变化。当开口高度较小时,上层排肥量减少,下层排肥量相对增多,排肥不均匀性更加明显,表现在 C_v 较大。

由图 12 可得,开口高度为 25 mm 时,此时施肥量仅为下层有机肥的排肥量,且变异系数随链轮转速的增加而减小,随前进速度和刮板间距的增加而急剧增加。这是因为前进速度和刮板间距不变时,增大链轮转速,即提高了前进方向上单位距离长度上的施肥量,使得在取样器内所取有机肥的量增多,刮板排肥的不均匀性减弱, C_v 就会减小;当链轮转速与刮板间距不变,则排肥量不变,前进速度越大,会使得排肥距离增加,即单位距离长度的施肥量减少,在取样器内所取有机肥的量减少,刮板排肥的不均匀性增加。

3.4 刮板间距排肥规律

固定其他因素不变,仅改变刮板间距,将不同刮板间距的下层有机肥等间距取 16 个样本,测得其平均速度增量(相对于前进速度)如图 13a 所示,速度增量使得肥料颗粒向排肥口(图 13b)运动。从图 13b 可知,距离刮板越近,速度增量越大,且越接近于刮板的速度增量(0.128 m/s),距离刮板越远,速度增量越

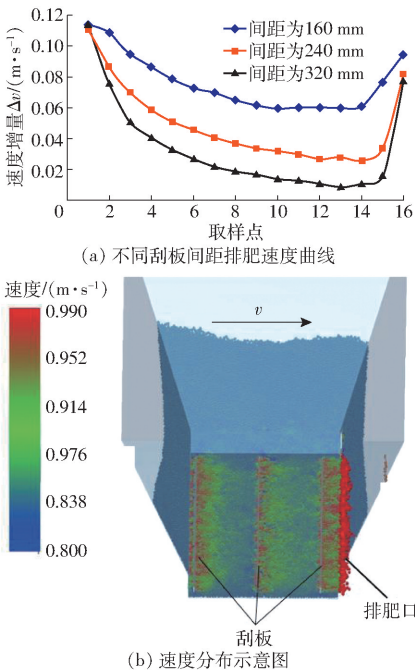


图 13 不同刮板间距的速度增量
Fig. 13 Speed increment of different scraper spacings

小。刮板间距越小,则速度增量变化曲线越缓慢,即因摩擦阻碍等因素造成的速度损失越小,刮板前后速度差也越小,相同时间内通过排肥口的颗粒数量差异越小, C_v 也越小,同理,刮板间距越大,前后速度差越大,施肥量差异越大,施肥越不均匀。

有机肥经过排肥口的施肥过程如图 14 所示,图 14a ~ 14f 表示刮板从距离排肥口最远逐步运动到排肥口的过程,从图 14a 可以看到,刮板此时离排肥口最远,排出的有机肥颗粒最少,从速度图例上看

到,此时排出的有机肥速度最低,随着刮板继续前行,排肥量逐渐增多,此时位于排肥口的有机肥排出速度也逐渐增大。在刮板的作用下,有机肥全部排至收集槽中,如图 14g 所示。从图 14g 可看出,有机肥在收集槽中以一多一少的规律相间排列,图 14a 为速度增量小的有机肥经过排肥口的情况,图 14f 为刮板靠近排肥口时(速度增量较大)的排肥情况,明显看出,图 14f 的排肥口颗粒数量比图 14a 中的多,此仿真结果与前受力分析得到的结果相一致。

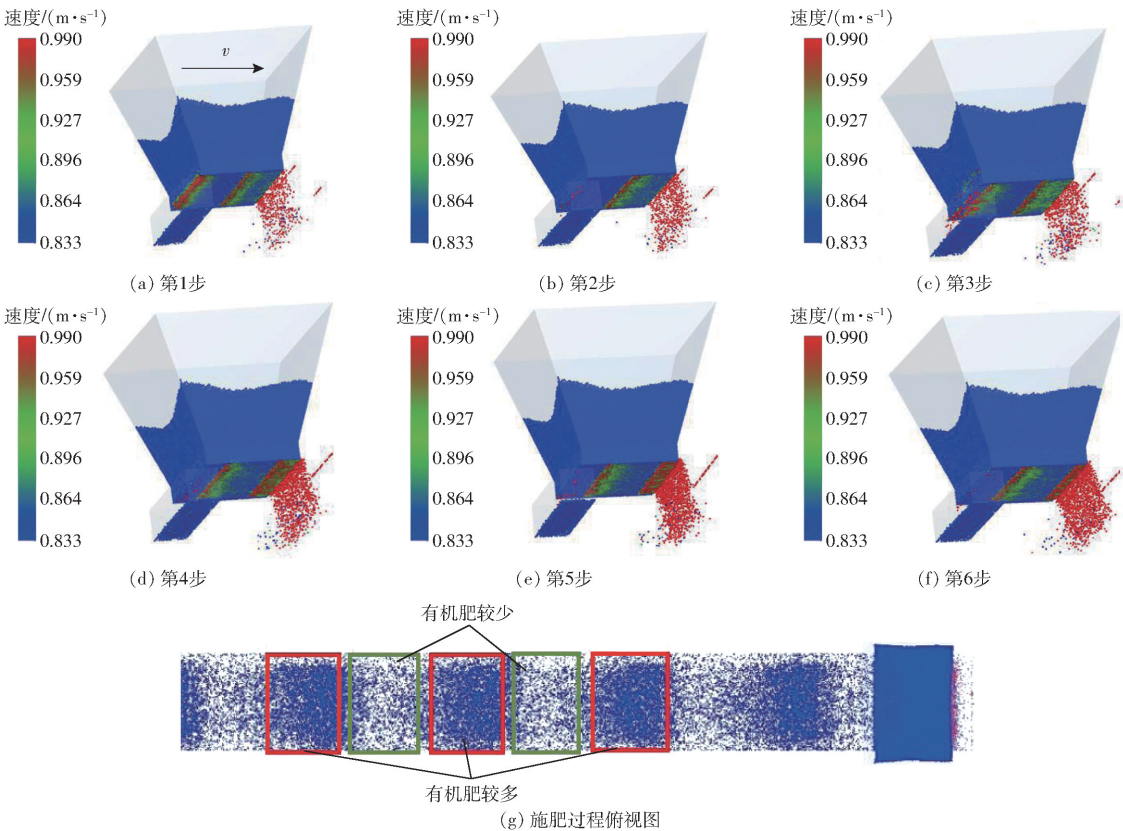


图 14 施肥过程示意图

Fig. 14 Fertilization process diagrams

3.5 优化工作参数

为寻求最佳工作参数,以相对误差、变异系数均小于 10% 为目标,通过 Design-Expert 的 Optimization - Numerical 模块对参数进行求解,求解得到开口高度 h 、前进速度 v 、链轮转速 n 和刮板间距 b 的最优组合为 53.17 mm、2.8 km/h、15.96 r/min、160 mm。

4 田间试验

4.1 排肥性能试验

4.1.1 试验条件及方法

排肥性能试验于 2021 年 9 月在山东省高密市益丰机械有限公司进行。试验所采用的有机肥为山东肥土家农资有限公司生产的粉末状羊粪有机肥,粒径小于等于 10 mm,含水率为 27.8%。

试验时,将肥箱中装入有机肥 150 kg,根据仿真

得到的最优工作参数进行试验,拖拉机输出转速为 540 r/min,刮板间距为 160 mm,排肥口高度为 53.17 mm,以速度 2.8 km/h 前进 20 m,得到铺在地面上的条状有机肥,取中间施肥较为稳定阶段进行取样,每 1 m 取一次,连续取 3 次,取平均作为一次试验的施肥量,以此数据计算排肥相对误差;中间隔 0.5 m,每 0.5 m 取一次,连续取 5 次,计算变异系数。试验情景及试验后取样如图 15 所示。此过程重复试验 3 次取均值,并记录试验结果。

4.1.2 结果分析

排肥性能试验结果如表 6 所示,3 次试验最低排肥量为 4.9 kg/m²,最大排肥量为 5.26 kg/m²,平均排肥量为 5.099 kg/m²,与理论排肥量相对误差为 4.5%,变异系数最大为 14%,最小为 3.3%,平均变异系数为 8.8%,表明通过仿真求得的参数可靠,根



图 15 试验场景及取样

Fig. 15 Test site and sampling

表 6 最优工况下施肥性能试验结果

Tab.6 Fertilization performance test results under optimal working conditions

序号	标准差/ (kg·m ⁻²)	理论 排肥量/ (kg·m ⁻²)	实际 排肥量/ (kg·m ⁻²)	相对 误差 E/%	变异 系数 C _v /%
1	0.199	4.880	5.136	5.3	9.1
2	0.079	4.880	5.260	7.8	3.3
3	0.319	4.880	4.900	0.4	14.0
平均值			5.099	4.5	8.8

据优化的参数加工的有机肥施肥装置排肥性能较好,满足施肥要求。

4.2 旋耕混合性能试验

4.2.1 试验条件及方法

旋耕混合性能试验于 2021 年 12 月 14 日在陕西西安某果园进行,使用肥料与排肥性能试验一致,试验条件与排肥性能试验相同。为便于混合试验取样,对 100 kg 有机肥用氧化铁蓝色染料染色,将染色的有机肥倒满肥箱,进行田地施肥作业;开始工作前,通过限深轮调整旋耕深度至 10 cm 左右,启动拖拉机动力输出,前进速度为 2.8 km/h。作业完成后,选取中间稳定施肥阶段取样,为研究旋耕混合效果,以 200 cm³的环刀进行取样,单层环刀高度 5 cm,用上下叠加的双层环刀一次性取 10 cm 厚的土肥混合物,每隔 1 m 取一次,总共取 8 个样本点,试验过

表 7 有机肥颗粒比例

Tab.7 Results of organic fertilizer granule ratio

项目	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	平均值
上层	12.66	8.74	8.87	12.98	10.83	12.27	14.11	14.18	11.83
下层	4.08	9.00	8.44	9.22	6.89	5.34	4.01	3.36	6.29
平均值	8.37	8.87	8.66	11.1	8.86	8.81	9.06	8.77	9.06

4.2.2 结果分析

由表 7 可知,田间试验的有机肥土壤混合比例平均值为 9.06%,略高于理论值,上层有机肥颗粒比例平均值为 11.83%,高于理论值 7.87%,下层有机肥颗粒混合比例平均值为 6.29%,略低于理论值。经过一次旋耕后,上层有机肥混合比例比下层混合比例高,随着深度的增加,有机肥混合比例

程如图 16 所示。



图 16 土肥混合作业试验

Fig. 16 Mixing soil and fertilizer experiment

土肥混合后,很难将其分离,为便于观察不同深度的混合浓度,将上下两层的土肥混合物分别倒入并平铺在 155 mm × 100 mm × 55 mm 的方盒中,通过图像采集装置,分别对每个样本上下层有机肥混合物进行图像采集,通过图像处理技术,对获取图像进行腐蚀、膨胀处理、有机肥区域面积比例计算等相关操作^[23,32-33](图 17),可得每个样本中上下两层的有机肥颗粒比例,如表 7 所示。忽略其他外部因素影响及系统误差,并将有机肥理想化,理论上深度 10 cm 内有机肥与土壤的均匀混合比例 e 为

$$e = \frac{3D_1}{66.7 \times 2L} \times 100\%$$
 (26)

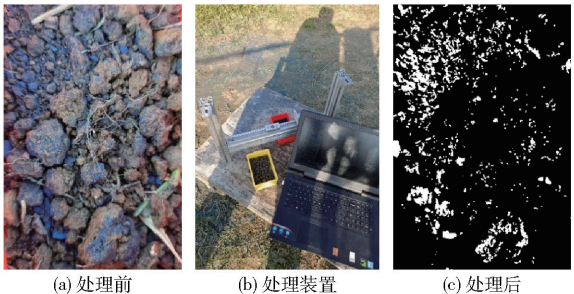


图 17 有机肥混合物图像处理

Fig. 17 Image processing organic compounds

经计算,理想情况下有机肥与土壤混合比例为 7.87%,实际由于人为误差,系统环境等因素会使得混合比例增高或略有降低。

降低。

5 结论

(1)设计了一种刮板式有机肥条铺旋耕混合施肥机,对施肥过程中上下层有机肥料分别进行了动力学分析,并计算了上层有机肥稳定排肥的临界值。结合并根据要求计算得目标施肥量为 4.88 kg/m²。

通过理论分析,得到影响旋耕切土量的相关参数,并结合相关要求以及实际经验,求得旋耕转速为 270 r/min,旋耕速比为 4.57,符合设计要求。

(2)通过离散元仿真,以相对误差和变异系数为评价指标,对开口高度、前进速度、链轮转速、刮板间距进行了最优工作参数求解,得到开口高度 h 、前进速度 v 、链轮转速 n 、刮板间距 b 的最优组合为 53.17 mm、2.8 km/h、15.96 r/min、160 mm。并对下层有机肥排肥规律进行了理论分析,得出了不同刮板间距的有机肥排肥速度。

(3)排肥性能试验得平均排肥量为 5.099 kg/m²,试验结果与理论施肥量的相对误差为 4.5%,变异系数为 8.8%,表明仿真所求参数可靠,施肥准确性和均匀性较好,根据最优参数加工的施肥装置施肥性能较好,满足施肥性能要求。旋耕混合试验中,通过图像处理,得到不同深度的有机肥混合比例,上层有机肥混合比例平均值为 11.83%,下层有机肥混合比例值为 6.29%,混合比例随深度增加而降低,平均混合比例为 9.06%,接近理论计算值 7.87%,表明混合性能较好。

参 考 文 献

- [1] 刘双喜,徐春保,张宏建,等. 果园基肥施肥装备研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):99-108.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Research status and development analysis of base-fertilizer application equipment of orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 99-108. (in Chinese)
- [2] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 果园肥料深施机研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究,2019,41(6):258-264.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Research status and trend of fertilizer deep machine in orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 258-264. (in Chinese)
- [3] HUSSAIN N, ABBASI T, ABBASI S A. Vermicomposting transforms allelopathic parthenium into a benign organic fertilizer[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2016. DOI:10.1016/j.jenvman.2016.05.013.
- [4] PARWANAYONI N M S, HAMID M H N A H, YAMIN B M. The combination of pper *Caninum blume* leaf extract and compost fertilizer for pressing blast disease and improving growth of bali red rice (*Oryza sativa* Linn)[J/OL]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019. DOI:10.18517/ijaseit.9.2.7449.
- [5] 郝延杰,王成,吴爱兵,等. 精准有机肥施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(3):87-94.
HAO Yanjie, WANG Cheng, WU Aibing, et al. Design and test of precise organic fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 87-94. (in Chinese)
- [6] MARTYNOVA N B, BONDAREVA G I, TOYGAMBAEV S K, et al. Machine for carrying out work on deep soiling with the simultaneous application of liquid organic fertilizers[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1679(4):42091.
- [7] 王飞. 国外撒肥机发展概况[J]. 农业工程,2016,6(2):31-34,42.
WANG Fei. Development situation about spreader at abroad[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(2): 31-34, 42. (in Chinese)
- [8] 肖宏儒,赵映,丁文芹,等. 1KS60-35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):32-39.
XIAO Hongru, ZHAO Ying, DING Wenqin, et al. Design and experiment on blade shaft of 1KS60-35X type orchard double-helix trenching and fertilization machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 32-39. (in Chinese)
- [9] 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报,2016,47(5):77-82.
HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77-82. (in Chinese)
- [10] 何义川,汤智辉,孟祥金,等. 2FK-40 型果园开沟施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2015,37(12):201-204.
HE Yichuan, TANG Zhihui, MENG Xiangjin, et al. Design and experiment of 2FK-40 orchard ditching fertiliser combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 201-204. (in Chinese)
- [11] 曾繁伟,张东峰,杨术明,等. 葡萄厩肥施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(12):180-183,264.
ZENG Fanwei, ZHANG Dongfeng, YANG Shuming, et al. Design and experiment of grape farmyard manure fertilizer application machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(12): 180-183, 264. (in Chinese)
- [12] 史丽娜,徐丽明,邢洁洁,等. 基于 EDEM 仿真的有机肥深施机施肥控制系统的设计[J]. 中国农业大学学报,2018,23(1):126-132.
SHI Li'na, XU Liming, XING Jiejie, et al. Design of fertilization control system based on EDEM simulation for deep application of organic fertilizer[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(1): 126-132. (in Chinese)
- [13] 张周. 不同有机肥排肥性能分析及排肥机构设计[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [14] 孙兴祚,刘潇,王忠军,等. 新疆果园有机肥条施机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2018,39(6):48-51,76.
SUN Xingzuo, LIU Xiao, WANG Zhongjun, et al. Design and experiment of organic fertilizer banding machine in Xinjiang's orchard[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2018, 39(6): 48-51, 76. (in Chinese)
- [15] 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.
ZHANG Hongjian, XU Chunbao, LIU Shuangxi, et al. Design and experiment of orchard double row ditching-fertilizer machine with automatic depth adjustment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 62-72.

- (in Chinese)
- [16] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2018,34(18):21–27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):21–27. (in Chinese)
- [17] 谭辰. 果园有机肥条铺机设计与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
TAN Chen. Development and experiment of organic fertilizer strip-spreader for orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University,2019. (in Chinese)
- [18] 方会敏,姬长英,FARMAN A C,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报,2016,47(3):22–28.
FANG Huimin,JI Changying,FARMAN A C,et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):22–28. (in Chinese)
- [19] 朱月青,王永亮,王柱,等. 旋耕机刀轴的设计及刀片排列[J]. 河北农机,2015(5):30–31.
- [20] 陈伟,朱继平,陈小兵,等. 旋耕刀排列方式对反转旋耕机作业性能的影响研究[J]. 农机化研究,2019,41(11):205–209,215.
CHEN Wei, ZHU Jiping, CHEN Xiaobing, et al. Study on the effect of rotary tillage knife arrangement style on operation performance of reverse rotary tiller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(11):205–209,215. (in Chinese)
- [21] 王斌. 果园避障旋耕机关键部件的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2016.
WANG Bin. Design and research on key components of orchard obstacle avoidance rotary cultivator[D]. Shihezi: Shihezi University,2016. (in Chinese)
- [22] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向往复土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):63–73.
ZHENG Kan,LI Yufei,XIA Junfan,et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):63–73. (in Chinese)
- [23] 袁全春,徐丽明,牛丛,等. 果园有机肥深施机土肥混合分层回填装置研制[J]. 农业工程学报,2021,37(5):11–19.
YUAN Quanchun, XU Liming, NIU Cong, et al. Development of soil-fertilizer mixing layered backfiller for organic fertilizer deep applicator in orchard[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(5):11–19. (in Chinese)
- [24] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78–85.
WANG Xianliang,HU Hong,WANG Qingjie,et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):78–85. (in Chinese)
- [25] 马帅,徐丽明,袁全春,等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(1):40–49.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(1):40–49. (in Chinese)
- [26] FENG Y T, OWEN D R J. Discrete element modelling of large scale particle systems—I: exact scaling laws[J]. Computational Particle Mechanics,2014,1(2):159–168.
- [27] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报,2019,50(2):49–56,77.
DAI Fei,SONG Xuefeng,ZHAO Wuyun,et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):49–56,77. (in Chinese)
- [28] 张睿,王秀,赵春江,等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(6):20–25.
ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(6):20–25. (in Chinese)
- [29] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
- [30] 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,2019.
ZHAO Liang. Simulation and test of spiral fertilizer sprinkler of mango fertilizer based on discrete element[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2019. (in Chinese)
- [31] 袁全春,徐丽明,牛丛,等. 果园有机肥深施机分层变量排肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):195–202.
YUAN Quanchun,XU Liming,NIU Cong,et al. Design and test of layered variable rate fertilizer discharge control system for organic fertilizer deep applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):195–202. (in Chinese)
- [32] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 葡萄硬枝嫁接苗木愈伤组织融合比例的视觉检测方法[J]. 中国农业大学学报,2018,23(7):126–132.
YUAN Quanchun,XU Liming,XING Jiejie,et al. Visual inspection method for the callus fusion ratio of grape hard branch grafting seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(7):126–132. (in Chinese)
- [33] 刘星星,王烁烁,徐丽明,等. 基于 OpenCV 的动态葡萄干色泽实时识别[J]. 农业工程学报,2019,35(23):177–184.
LIU Xingxing, WANG Shuoshuo, XU Liming, et al. Real time color recognition of moving raisin based on OpenCV[J]. Transions of the CSAE,2019,35(23):177–184. (in Chinese)