

葡萄园有机肥链式反转开沟施肥机研制与试验

谭好超，马 帅，沈聪聪，马俊龙，周慧能，徐丽明*

(中国农业大学工学院，北京 100083)

摘 要：针对葡萄园有机肥施用深度浅，施肥不均匀等问题，该研究设计了一种链式反转开沟施肥机。该机采用先切后抛的形式，实现开沟施肥回填一体化作业，开沟深度为 600 mm，通过理论分析确定了影响切土角的关键参数，构建了正置和侧置式两种施肥模式的仿真模型，并分析了两种模式的排肥规律。通过单因素试验，分析了刮板高度、角度和间距对法向接触力和变异系数的影响，并优选了刮板高度、角度和间距，分别为 20 mm，90°和 180 mm。田间试验表明，排肥变异系数为 8.34%，与仿真结果的误差为 2.32 个百分点，排肥量为 0.8~6 kg/m；两次试验的开沟深度稳定性系数分别为 93.57% 和 92.58%，开沟宽度一致性系数分别为 96.16% 和 95.04%，满足农艺要求。研究结果可为其他果园施肥机设计提供理论参考。

关键词：有机肥；葡萄；果园；施肥；反转；刮板；开沟刀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405199

中图分类号: S224.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-16-0012-12

谭好超，马帅，沈聪聪，等. 葡萄园有机肥链式反转开沟施肥机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 12-23. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405199 <http://www.tcsae.org>
TAN Haochao, MA Shuai, SHEN Congcong, et al. Design and experimentation of a chain reversal trenching and fertilization device for vineyard organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 12-23. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405199 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国林果园栽培面积广泛^[1]，其中葡萄种植面积逐年上升。合理施肥能够促进植株对营养物质的吸收，促进葡萄质优高产^[2-3]。健康土壤是生产优质葡萄的基础^[4]，而深施有机肥能改善土壤结构，提升果实品质^[5]。

目前，国内大部分地区有机肥仍以人工施用为主，劳动强度大，效率低，且施肥不均匀，易造成肥料聚集，影响作物吸收，只有少部分地区使用圆盘撒肥机^[6-7]和双圆盘开沟施肥机进行作业。沈从举等^[8]针对人工挖孔施肥作业效率低等问题，设计了一种自走式果园气爆深松施肥机，实现了 760 mm 的最大打穴深度，但不能连续开沟作业；赵淑红等^[9]针对粉末状有机肥湿度大、流动性差等问题，研制了一种粉末状有机肥排肥器，试验表明，排肥器施用有机肥的各性能指标均在规定的范围内；刘进宝等^[10]针对传统撒施肥料用量大、利用率低等问题，研制了基肥对行分层施肥机，结果表明，分层施肥作业对行精度偏差平均值为 27 mm，浅层和深层施肥深度为

124.4 和 204.9 mm，符合作业要求；张宏建等^[11]针对果园开沟施肥机效率低、一致性差等问题，设计了一种开沟深度可自动调节的果园双行开沟施肥机，试验表明，开沟深度稳定性系数大于 94.76%，肥料分布稳定性系数大于 93.7%，满足果园生产要求。上述学者依据行业要求设计了不同类型的开沟施肥机，但开沟深度普遍较浅，对于葡萄这种深根系作物，开沟深度需达到 600 mm，宽度为 300 mm，且开沟位置距作物根系 300~500 mm 为宜，但是目前已有的有机肥施肥机开沟深度多为 400 mm，难以达到上述要求。

因此，本文针对葡萄施肥要求，提出一种链式反转开沟施肥方案，通过刮板排肥方式将有机肥输送至地表，采用链式反向旋转开沟装置实现开沟、回填一体化作业过程，以解决人工施肥不均匀和开沟深度浅的问题，为葡萄园有机肥施用机械的研制提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整机结构

本文设计的刮板式有机肥链式反转开沟施肥机如图 1 所示，包括机架、肥箱、刮板式排肥机构、链式反转开沟机构、调节油缸等，传动机构能将动力传递至排肥机构和链式开沟机构（以下简称开沟装置），实现刮板排肥和链式反向旋转作业；调节油缸一端固定于机架上，另一端固定于开沟装置上，通过油缸的伸缩控制开沟深度；肥箱一侧设置出肥口，可以通过阀门的大小控制施肥量。

收稿日期: 2024-05-28 修订日期: 2024-06-20

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资助项目 (CARS-29); 国家自然科学基金项目 (32301710); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2024T170500)

作者简介: 谭好超，博士生，研究方向为生物生产自动化。

Email: 3540115585@qq.com

*通信作者: 徐丽明，教授，博士生导师，研究方向为生物生产自动化。

Email: xlmoffice@126.com

本文提出的链式反转开沟装置运转方向如图 2 所示，将开沟刀反向固定，链条反向旋转，采用先切土后抛土的方式，将切割后的土壤实时抛送回沟内。为了方便观看开沟位置，在图 2b 中省略了抛回沟内的土壤。相较于普通的开沟机^[12]，本研究的开沟方案省去将土壤输送至沟两侧再进行回填的作业工序，减少单独回填土壤的作业部件，在开沟后不会在地表面形成沟渠。

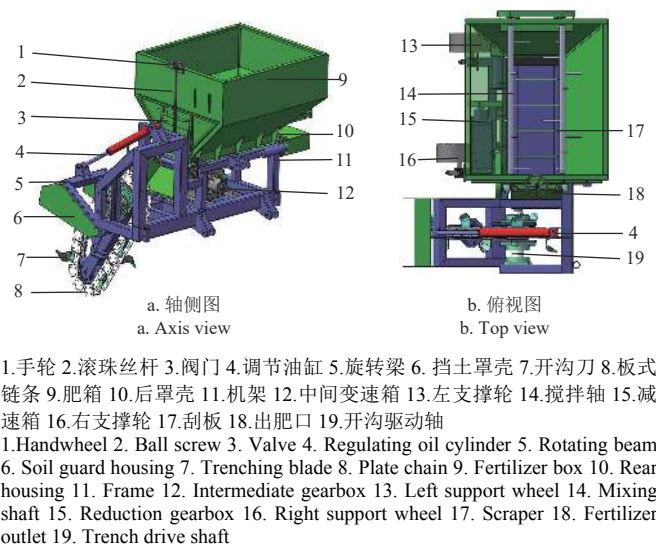


图 1 链式反转开沟施肥机结构图
Fig.1 Structure diagram of chain reversal trenching and fertilization device

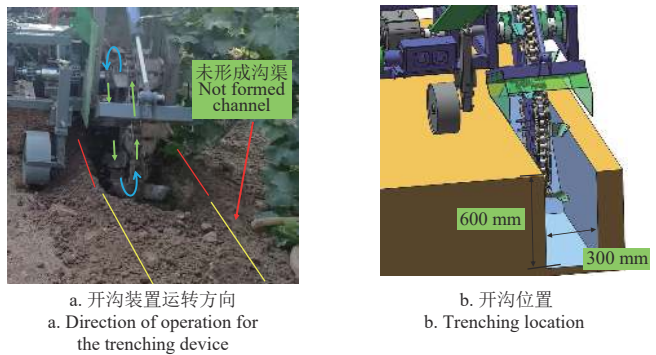


图 2 开沟装置运转方向及开沟位置
Fig.2 Operational direction and trenching position of the trenching device

1.2 工作原理

工作时，肥箱装满有机肥，通过手轮调整排肥口高度，将开沟装置调至离植株 30 cm 处，启动动力输出，调节液压油缸至合适作业深度，随拖拉机前进，有机肥在刮板的作用下向排肥口运动，排出的有机肥铺洒在开沟装置前面，开沟装置反向旋转实现切土作业，同时将有机肥和土壤一同带入沟底，实现开沟混肥回填作业。完成一行作业时，缩回油缸，开沟装置抬离地面，继续进行下一行作业。

1.3 主要技术参数

结合葡萄园种植模式及有机肥作业要求，确定有机肥链式反转开沟施肥机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 链式反转开沟施肥机的主要技术参数		
Table 1 Principal technical parameters of chain reversal trenching and fertilization device		
参数 Parameter	数值 Value	
配套动力 Auxiliary power/ kW	60~80	
外形尺寸 (长×宽×高)Dimensions (length×width×height)/ mm×mm×mm	1 700×1824×1 525	
作业速度 Working speed/ (km·h ⁻¹)	0.2~1.35	
作业宽度 Working width/mm	300	
作业深度 Working depth/mm	600	
施肥量 Fertilizer application rate/(kg·m ⁻¹)	0.8~6	
肥箱容积 Volume of fertilizer tank/m ³	0.7	

2 关键部件设计

2.1 排肥装置

根据施肥要求，本文设计的排肥装置选用刮板式结构（图 3），主要由支撑板、刮板、阀门、手轮和搅肥总成组成，排肥口宽度设计为 30 cm，肥箱容积设计为 0.7 m³，肥箱两壁面，与水平面的夹角为 55°，以保证肥料顺利下滑；若肥料含水率较大，在肥箱内部形成拱桥结构，驾驶员可通过按钮启动搅肥总成部件，打破拱桥；阀门开度范围为 30~115 mm。

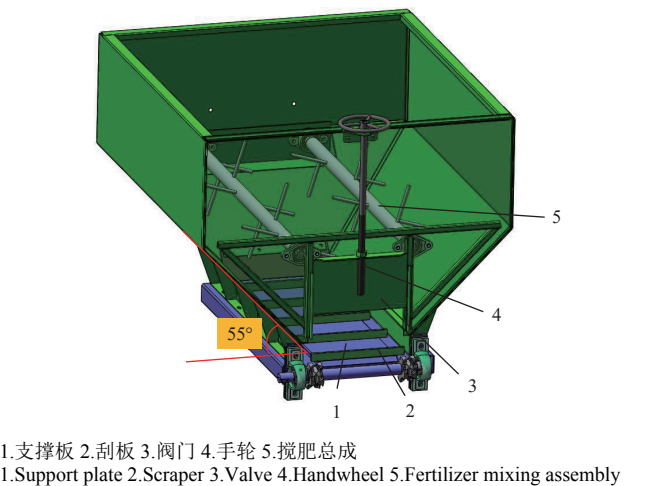


图 3 排肥装置结构示意图
Fig.3 Structure schematic of fertilizer distribution device

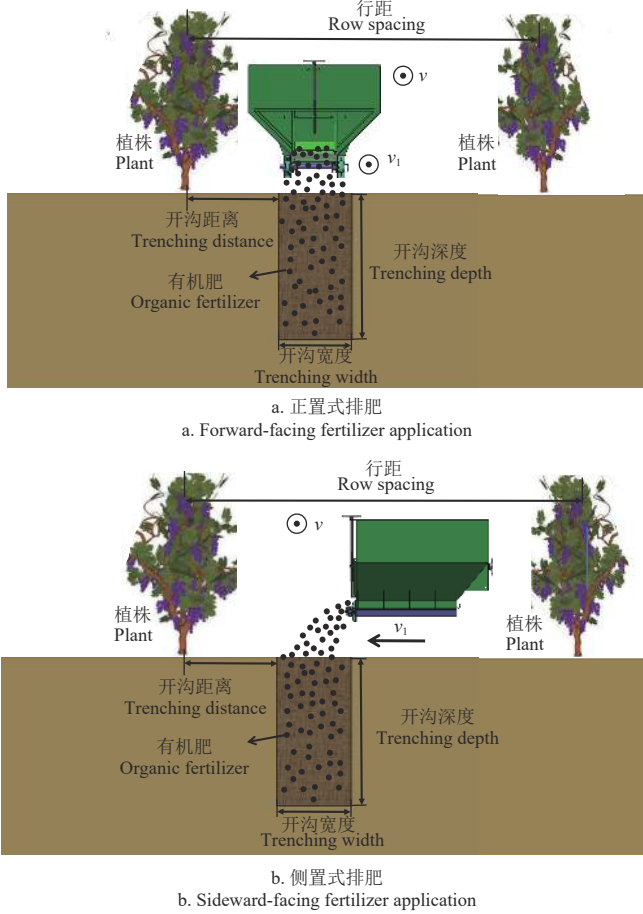
刮板是排肥的主要作业部件，其高度、角度、厚度以及排列间距均会影响排肥效果^[13]，厚度通常设计为 6~8 mm。刮板结构参数属于固定参数，因此，需进行刮板结构参数的仿真分析与优化，以确定最优结构。

除刮板结构参数之外，依据现有有机肥施用方式，排肥分为正置式和侧置式，正置式排肥的刮板运动方向与机器前进方向平行，开沟装置位于排肥口正下方；侧置式排肥的刮板运动方向与机器前进方向垂直（图 4），开沟装置位于排肥口一侧。为选择合适的施肥方式，需进行 2 种施肥模式的排肥规律分析。

2.2 链式反转开沟装置

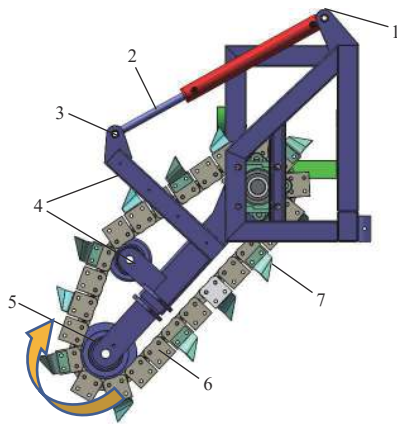
依据开沟深度要求，本文设计的开沟装置（图 5）主要包括开沟刀、油缸上下支点、支撑梁和尾轮等部分，油缸控制开沟深度；依据开沟宽度要求，选用开沟宽度为 12、15、20、25 和 30 cm 型号的开沟刀，不同开沟刀

交替安装, 确保每次只有一把开沟刀入土, 以减小切削阻力^[14]。



注: v 为前进速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; v_1 为刮板运动速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。
Note: v represents forward speed, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; v_1 represents scraper movement speed, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

图4 两种排肥模式
Fig.4 Two fertilization modes

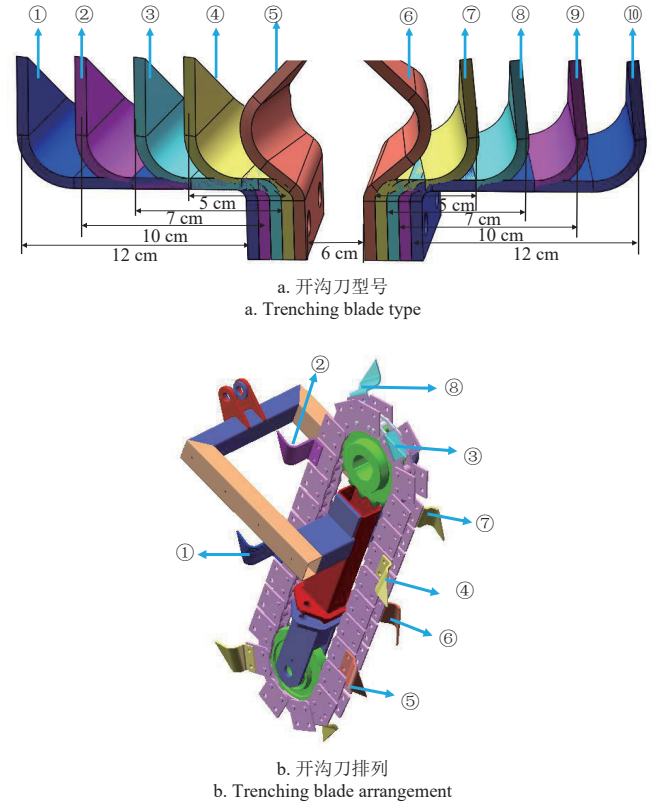


1. 油缸上支点 2. 液压油缸 3. 油缸下支点 4. 支撑梁 5. 尾轮 6. 板式链条 7. 开沟刀
1. Point on top of oil cylinder 2. Hydraulic oil cylinder 3. Point on bottom of oil cylinder 4. Support beam 5. Tail wheel 6. Plate chain 7. Trenching blade

图5 开沟装置示意图
Fig.5 Diagram of trenching device

2.2.1 开沟刀关键参数分析

开沟刀依据刀刃折弯方向分为左刀和右刀 2 种, 2 种刀对称布置 (图 6a)。开沟刀按型号从小到大依次排列在开沟链条上 (图 6b)。



注: ①~⑤为左刀, ⑥~⑩为右刀; 其中①和⑩、②和⑨、③和⑧、④和⑦、⑤和⑥分别表示开沟宽度为 30、25、20、15 和 12 cm 的开沟刀。
Note: ①~⑤ represent the left blades, ⑥~⑩ represent the right blades; where blades ① and ⑩, ② and ⑨, ③ and ⑧, ④ and ⑦, ⑤ and ⑥ denote blades with trenching widths of 30, 25, 20, 15 and 12 cm, respectively.

图6 开沟刀型号与排列

Fig.6 Type and arrangement of trenching blades

切土角表示工作过程中正切刃与水平地面所成的夹角, 是影响开沟阻力的重要因素, 而开沟刀切削面是一个空间斜面, 切土角难以获取。为便于分析, 根据右手定则, 以与弯折线 I 中心重合且指向刀刃为 x_3 轴, 垂直弯折线 I 为 y_3 轴, 垂直切削面为 z_3 轴建立坐标系 $x_3y_3z_3$, 坐标系先绕 x_3 轴负向旋转角度 β , 得到坐标系 $x_2y_2z_2$; 再绕 z_2 轴负向旋转角度 α , 得到坐标系 $x_1y_1z_1$, 由此得到开沟刀切削面展开图 (图 7)。

在 $x_3y_3z_3$ 坐标系下, A 、 B 两点坐标 (x_A, y_A, z_A) 、 (x_B, y_B, z_B) 分别为

$$\begin{cases} (x_A, y_A, z_A) = \left(\frac{d}{2}, 0, 0\right) \\ (x_B, y_B, z_B) = \left(\frac{d}{2} + L\sin\alpha, L\cos\alpha, 0\right) \end{cases} \quad (1)$$

通过笛卡尔坐标系变换, 得到 A 、 B 两点转化到 $x_1y_1z_1$ 坐标系下的关系式为

$$C = R_{0i}(z_2, \alpha)R_{0i}(x_3, \beta)i \quad (2)$$

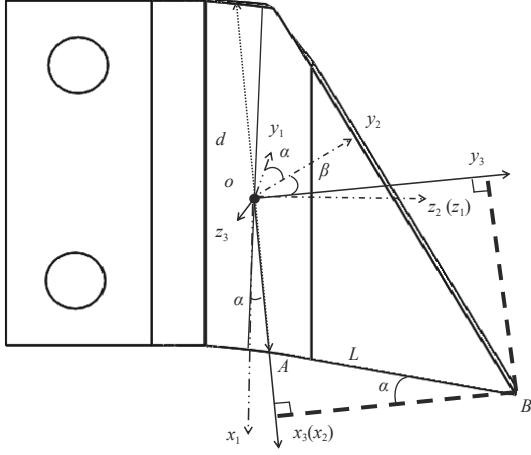
式中 i 为待转化坐标值, C 为转化后坐标值, 具体展开为

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

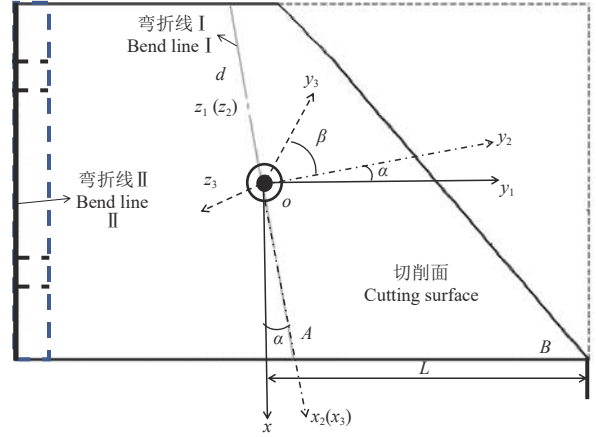
式中 a_1 、 b_1 、 c_1 和 a_3 、 b_3 、 c_3 分别为 A 和 B 两点在坐标系 $x_1y_1z_1$ 和 $x_3y_3z_3$ 下的坐标。

联立式 (1)~(3) 求得 A 、 B 两点在坐标系 $x_1y_1z_1$ 下的坐标为

$$\begin{cases} (x_A, y_A, z_A) = \left(\frac{d}{2} \cos \alpha, \frac{d}{2} \sin \alpha, 0 \right) \\ (x_B, y_B, z_B) = \left(\cos \alpha \left(\frac{d}{2} + L \sin \alpha \right) - L \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \left(\frac{d}{2} + L \sin \alpha \right) + L \cos \alpha \cos \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \sin \beta \right) \end{cases} \quad (4)$$



a. 开沟刀三维图
a. Trenching blade 3D diagram



b. 开沟刀展开图
b. Trenching blade unfolded diagram

注：A、B 为刀刃端点，O 为坐标原点；d 为折弯线 I 的长度，mm；L 为 A、B 点间距离，mm； α 为折弯线 I 的倾角， $^\circ$ ； β 为切削面的弯折角度， $^\circ$ 。
Note: A and B represent the two endpoints of the cutting edge, O represents coordinate origin; d represents the length of bend line I, mm; L represents the distance between A and B points, mm; α represents the inclination angle of bend line I, $^\circ$; β represents the bending angle of the cutting surface, $^\circ$.

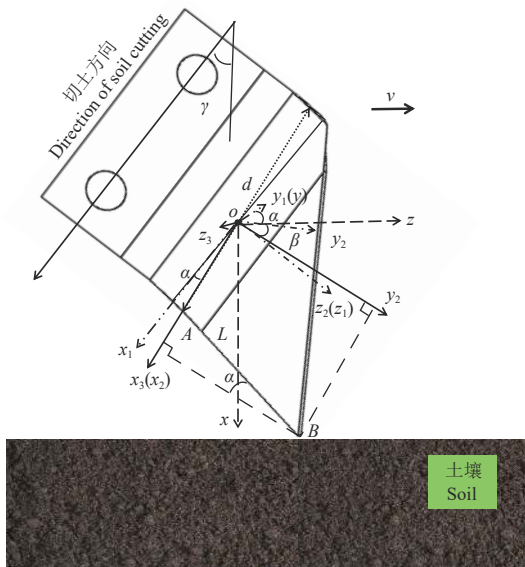
图 7 开沟刀坐标系示意图

Fig.7 Diagram of trenching blade coordinate

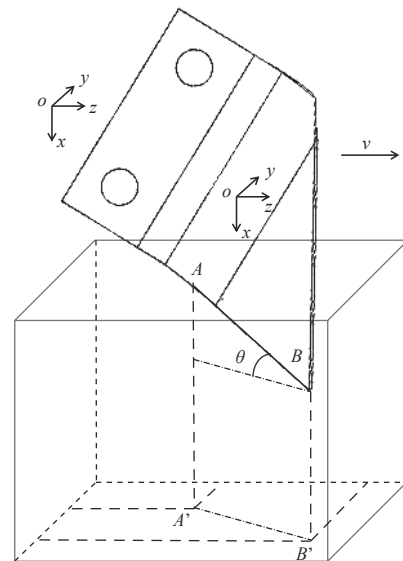
开沟刀实际作业时，开沟装置与地面角度固定。由于开沟刀与板式链条固定，因此链条倾角 γ 可代表开沟刀与地面的倾角（图 8a）。将坐标系 $x_1y_1z_1$ 绕 y_1 轴正向旋转角度 γ ，得到坐标系 xyz ，此坐标系 x 轴为垂直地面向下， y 轴与地面平行， z 轴与前进方向一致，坐标系间的转换关系为

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 a 、 b 、 c 为 A 和 B 两点在坐标系 xyz 下的坐标值，联立式 (1)、式 (3)、式 (5) 可得工作状态下正切刃 A 和 B 两点坐标为



a. 链条倾角 γ
a. Chain inclination angle γ



b. 切土角 θ
b. Cutting angle θ

注：A'、B' 为 A、B 两点在水平面的投影。
Note: A' and B' are the projections of points A and B onto the horizontal plane.

图 8 开沟刀倾斜角度示意图

Fig.8 Trenching blade tilt angle schematic diagram

$$\begin{cases} (x_A, y_A, z_A) = \left(\frac{d}{2} \cos \alpha \cos \gamma, \frac{d}{2} \sin \alpha, \frac{d}{2} \cos \alpha \sin \gamma \right) \\ (x_B, y_B, z_B) = \left(\cos \alpha \cos \gamma \left(\frac{d}{2} + L \sin \alpha \right) - L \cos \alpha (\sin \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma), \sin \alpha \left(\frac{d}{2} + L \sin \alpha \right) + L \cos^2 \alpha \cos \beta, \cos \alpha \sin \gamma \left(\frac{d}{2} + L \sin \alpha \right) + L \cos \alpha (\cos \gamma \sin \beta - \sin \alpha \sin \gamma \cos \beta) \right) \end{cases} \quad (6)$$

在坐标系 xyz 下, A 和 B 两点连线对地夹角 θ 即为切土角, 其在水平面上的投影为 A' 和 B' 。由图 8b 可知, 切土角正切值为

$$\tan \theta = \frac{x_A - x_B}{\sqrt{(z_B - z_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} \quad (7)$$

其中,

$$\tan \theta = \frac{\cos \alpha (\sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma)}{\sqrt{[\cos \alpha (\sin \alpha \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma)]^2 + (\sin \alpha + \cos \beta \cos^2 \alpha)^2}} \quad (11)$$

由上述分析可知, α 、 β 和 γ 与开沟刀切土角有关, 其中 α 和 β 是开沟刀结构参数, γ 是开沟装置的作业参数, 为获取参数的最优值, 在上述分析的基础上, 对每个参数取多个水平, 结合仿真与田间试验, 最终确定的 α 、 β 和 γ 分别为 10° 、 95° 和 15° 。

2.2.2 液压缸选型

由图 5 知, 需保证油缸完全伸出时满足 600 mm 的作业深度, 缩回时使整个开沟装置抬离地面, 因此必须确定油缸的行程。图 9 为油缸控制开沟装置运动简图。

油缸两端通过插销分别固定在油缸的上下两个支点中, 支撑梁可绕 P 点转动, 为确定油缸行程, 需求出开沟装置恰好抬离地面时支撑梁 D 的旋转角度, 如式 (12)~(13)。

$$h_1 = D \cos \gamma - h \quad (12)$$

$$\cos(\mu + \gamma) = \frac{h_1}{D} \quad (13)$$

联立式 (12)~(13), 可得抬离地面的旋转角度为

$$\mu = \arccos\left(\cos \gamma - \frac{h}{D}\right) - \gamma \quad (14)$$

在作业状态下, l_1 为

$$l_1 = \sqrt{g^2 + e^2 - 2ge \cos(\mu + w)} \quad (15)$$

当开沟装置处于抬升状态时, l_2 为

$$l_2 = \sqrt{e^2 + g^2 - 2eg \cos w} \quad (16)$$

由此求得液压缸行程 S 为

$$S = l_1 - l_2 \quad (17)$$

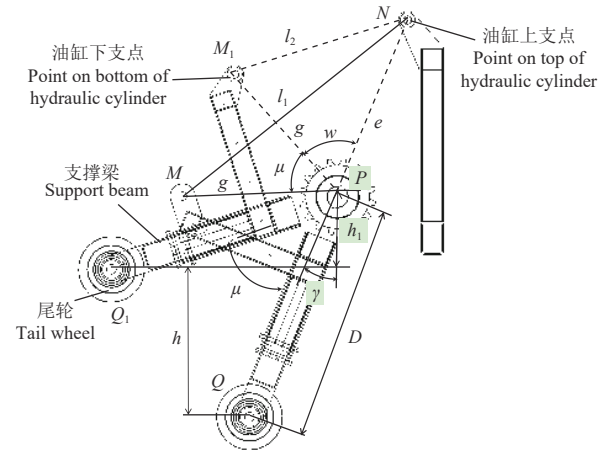
联立式 (14)~(17), 设计 $D=864$ mm, 依据油缸下支点的固定位置得到 $a=684$ mm、 $b=583$ mm, 当开沟装置抬离地面时, w 约为 60° , 最大作业深度 h 设置为 600 mm, 由 2.2.1 节分析可得, $\gamma=15^\circ$, 带入上述参数, 求得液压油缸的行程约为 454 mm, 综合考虑, 选取液压油缸型号为 HSGL01-63/45E-1421-450。

$$x_A - x_B = L \cos \alpha (\sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma) \quad (8)$$

$$z_B - z_A = L \cos \alpha (\sin \alpha \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma) \quad (9)$$

$$y_B - y_A = L \sin \alpha + L \cos \beta \cos^2 \alpha \quad (10)$$

联立式 (7)~(10) 得:



注: P 为旋转中心; h 为最大作业深度, mm; g 为油缸下支点到旋转中心的距离, mm; e 为油缸上支点到旋转中心的距离, mm; D 为支撑梁的长度, mm; h_1 为开沟装置恰好抬离地面时, 尾轮中心到旋转中心的垂直距离, mm; l_1 为液压缸完全伸出时的长度, mm; l_2 为液压缸完全缩回时的长度, mm; μ 为开沟装置从最大作业深度恰好旋转至抬离地表面的角度, $(^\circ)$; w 为开沟装置旋转角度, 即旋转中心 P 与油缸上支点和油缸下支点所形成的角度, $(^\circ)$; M 为油缸下支点, mm; N 为油缸上支点, mm; M_1 为开沟装置恰好抬离地面时, 油缸下支点的位置, mm; Q 为尾轮中心点; Q_1 为开沟装置恰好抬离地面时尾轮中心点的位置。

Note: P is the rotation center; h is the maximum working depth, mm; g is the distance from point on bottom of hydraulic cylinder to rotational center, mm; e is the distance from point on top of hydraulic cylinder to rotational center, mm; D is the length of support beam, mm; h_1 is the vertical distance from center of the tail wheel to rotation center when trenching device is just lifted off the ground, mm; l_1 is the length when hydraulic cylinder is fully extended, mm; l_2 is the length when hydraulic cylinder is fully retracted, mm; μ is the angle that trenching device rotates from the maximum working depth to just lifting off the ground, $(^\circ)$; w is the rotated angle of trenching device, at the angle formed between rotation center P and the top and bottom points of hydraulic cylinder, $(^\circ)$; M is the point on bottom of hydraulic cylinder, mm; N is the point on top of hydraulic cylinder, mm; M_1 is the position of the point on top of hydraulic cylinder when trenching device just lifts off the ground, mm; Q is the center point of the tail wheel; Q_1 is the position of the center point of the tail wheel when the trenching device just lifts off the ground.

图 9 开沟装置运动示意图

Fig.9 Trenching device motion schematic diagram

3 仿真优化

3.1 仿真模型的建立

为了选择合适的施肥模型并优化刮板参数以提高施肥均匀性, 在 SolidWorks 中分别建立侧置和正置式施肥

方式三维模型，并保存为 parasolid(.x_t) 格式导入到离散元仿真软件中^[15-18]。按照两种施肥模式在 EDEM 中建立长 4 500 mm、宽 500 mm、高 150 mm 的收集槽，在收集槽中每 0.3 m 设置一个传感器，共设置 6 个，用于获取施肥质量^[19]。仿真模型选用 JKR(hertz-mindlin with Johnson-Kendall-Roberts) 接触模型，仿真参数如表 2 所示^[13,20-21]，在肥箱上部建立颗粒工厂，生成 250 kg 有机肥。施肥仿真模型如图 10 所示。

设置的前进速度分别 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 km/h，模拟拖拉机不同的速度。刮板的运动速度设置为 0.1 m/s^[11]，仿真时间为 10 s，保存时间步长为 0.5 s，通过仿真进行排肥规律分析，从而选择合适的排肥方式。

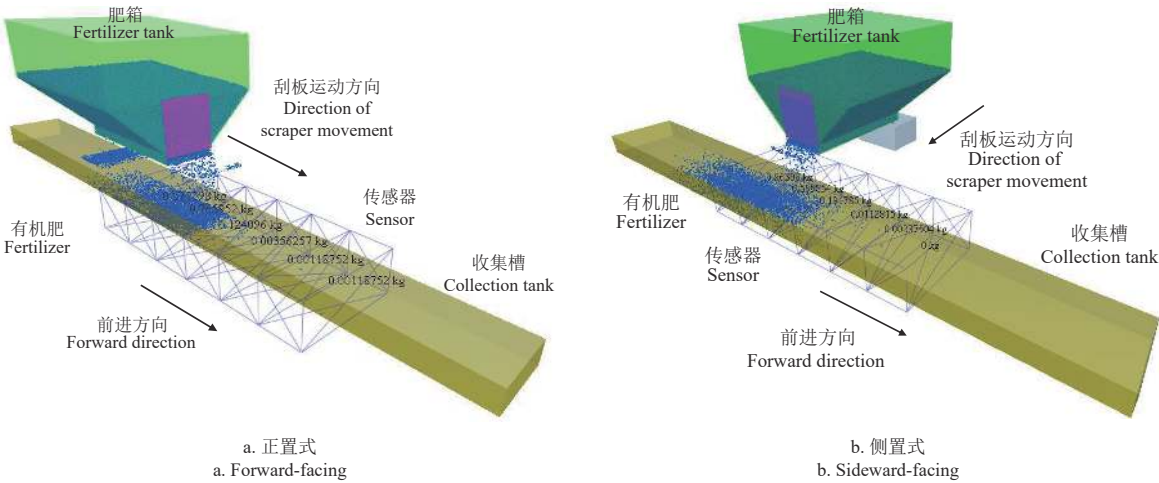


图 10 施肥模型
Fig.10 Fertilization model

3.2 排肥规律分析

仿真过程结束后，选取肥箱底部一个刮板间距内的有机肥颗粒进行分析(图 11)。从速度(图 11b)和受力云图(图 11c)可知，距离刮板较近区域内有机肥所受合力和运动速度相对较大，距离较远的区域运动速度较低，受力也相对较小，靠近刮板处的有机肥运动速度几乎和刮板速度一致。排肥时，前方受力和速度较小的有机肥先排出，此时排肥量最小，随着刮板继续向排肥口运动，排肥量逐渐增加，这是造成排肥不均匀的主要原因，无论是正置还是侧置排肥方式，均存在这种现象，这是由刮板排肥机构的特点所决定的，无法避免，因此需要优化刮板的结构参数，使得排肥尽可能均匀。

排出的有机肥落入收集槽中(图 12)，正置式施肥模式的施肥宽度较大，排出的有机肥近似呈带状分布，更适应于施肥宽度要求较大的作业环境；侧置式施肥模式的肥料分布更为集中，近似成条状分布，这种现象在 0.5 km/h 的速度下更加明显。施肥过程中，排肥均匀性是衡量排肥效果的重要因素，通常以变异系数(C_r)表示^[22-25]， C_r 越小表明排肥均匀性越好。选取稳定阶段进行数据分析，得到排肥质量并计算标准差和变异系数。

表 2 离散元仿真参数		
Table 2 Discrete element simulation parameters		
项目 Items	离散元参数 Discrete element parameters	数值 Values
有机肥本征参数 Organic fertilizer intrinsic parameters	剪切模量/Pa	1×10^6
	泊松比	0.25
	堆积密度/(g·cm ⁻³)	1.072
有机肥-有机肥接触参数 Organic fertilizer- organic fertilizer contact parameters	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.65
	滚动摩擦系数	0.13
钢的本征参数 Steel intrinsic parameters	泊松比	0.3
	剪切模量/ $\times 10^{10}$ Pa	7.94
	密度/(g·cm ⁻³)	7.85
有机肥-钢接触参数 Organic fertilizer-steel contact parameters	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.7
	滚动摩擦系数	0.11
接触模型 Contact model	JKR/(J·m ⁻²)	0.012
颗粒 Particle	半径/mm	5

结果如图 12e 所示，在相同的作业速度下，两种施肥模式的施肥量基本一致，但施肥均匀性却有明显差异。随着速度增加，变异系数呈现先增加后减小的趋势，在速度为 0.5 km/h 时，变异系数均为最小值，表明此速度下施肥均匀性最好；当速度为 2.0 km/h 时，变异系数最大，表明施肥均匀性最差。在不同速度条件下，侧置式施肥模式的均匀性均好于正置式。为保证有机肥排肥均匀性，使肥料全部集中落入沟内，侧置式施肥模式更具优势。

3.3 刮板结构参数优化

如图 13 所示，建立不同结构参数的刮板仿真模型，根据位置关系调整刮板初始状态，依据刮板高度及拖拉机行进速度，设定阀门高度为 45 mm，前进速度为 1.0 km/h，以侧置式施肥模式进行仿真，设置仿真时间为 10 s。在离散元仿真中，法向接触力（以下简称接触力）最能反映刮板与有机肥颗粒的受力情况，通常用于结构体与颗粒或颗粒之间的接触碰撞分析^[26]，接触力增加，相应的作业功耗会增大^[27]。因此，本研究以接触力和变异系数为评价指标，通过 SPSS(Statistical package for the social sciences) 设计单因素试验，以获得排肥最均匀和接触力最小的最优刮板参数组合，每个试验因素设置 5 个水平，如表 3 所示。

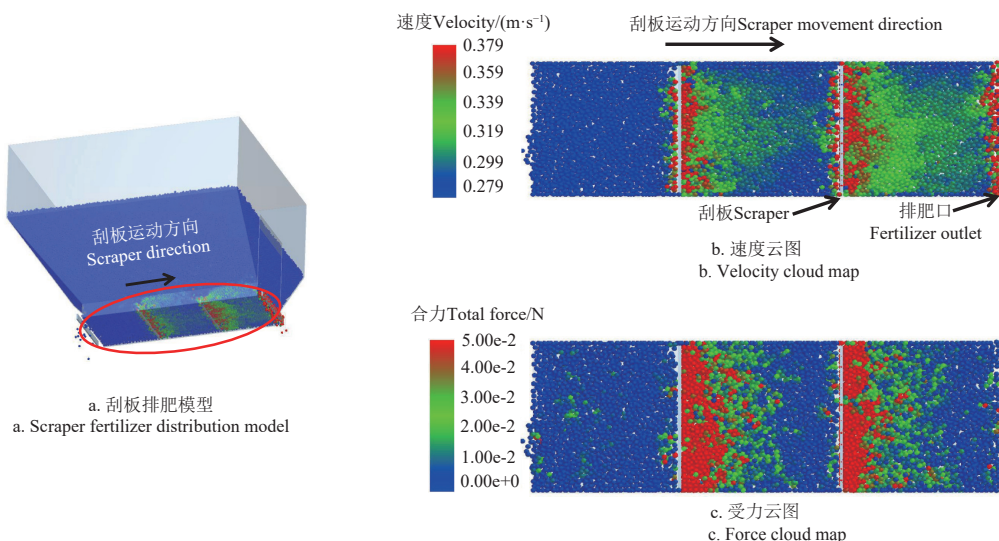


图 11 有机肥排肥速度和受力云图

Fig.11 Organic fertilizer spreading velocity and force cloud map

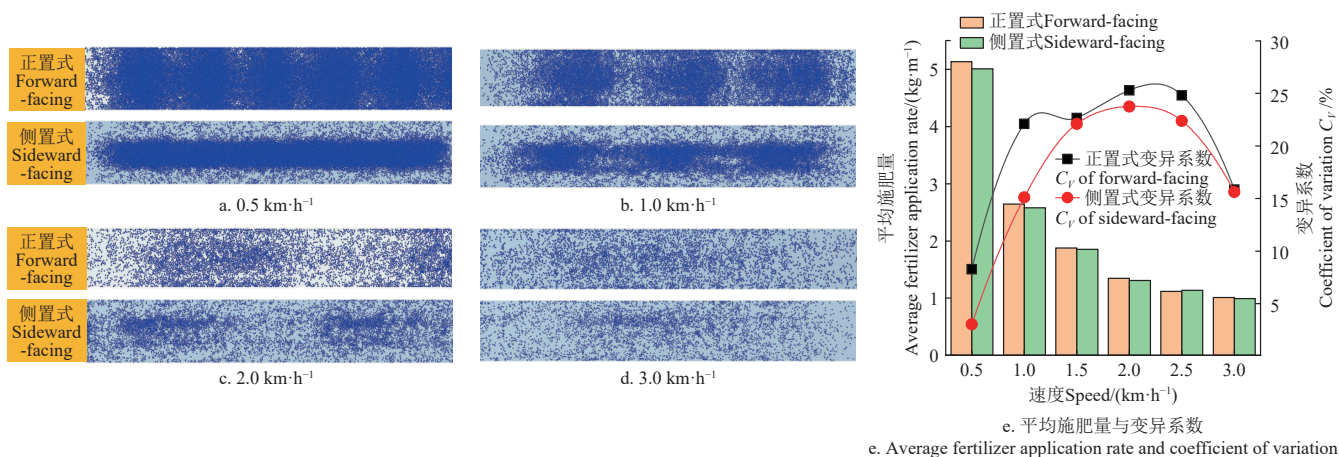


图 12 两种施肥模式下排肥仿真结果

Fig.12 Simulation results of discharged fertilizers under two fertilization modes

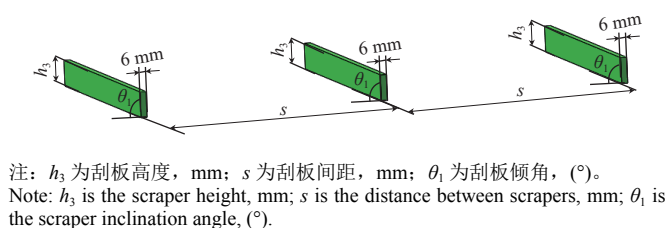


图 13 刮板结构参数示意图

Fig.13 Schematic diagram of scraper structural parameters

表 3 刮板试验因素水平表

水平 Level	刮板角度 Scraper angle / ($^\circ$)	刮板高度 Scraper height/mm	刮板间距 Scraper spacing/mm
1	50	15	180
2	70	20	240
3	90	25	300
4	110	30	360
5	130	35	420

选取稳定阶段进行分析, 图 14 为各因素对变异系数 C_V 的影响。由图 14a 可知, 当刮板角度小于 110° 时, 不同组间对 C_V 有显著影响 ($P < 0.05$), 刮板角度为

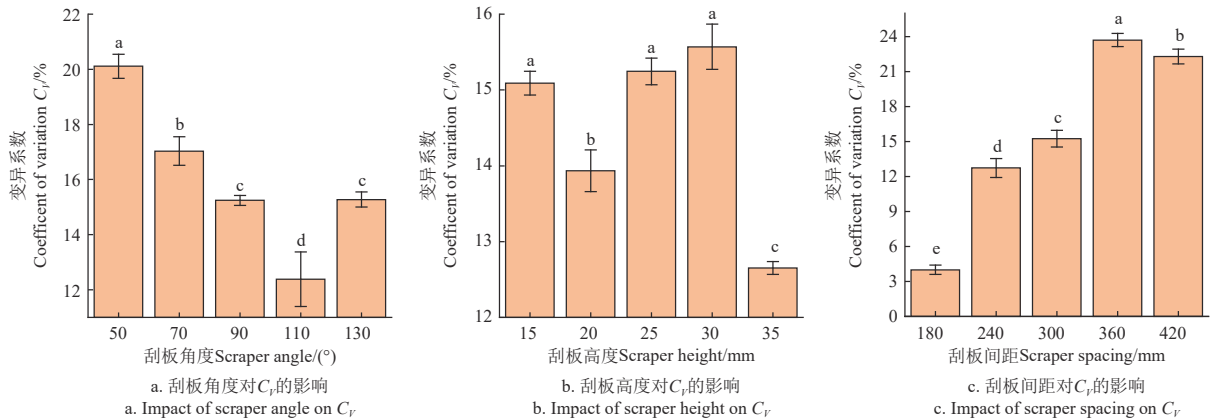
110° 时, C_V 最小, 刮板角度为 50° 时, C_V 最大, 施肥均匀性最差; 随刮板角度的增大, C_V 先减小后增大。从图 14b 知, 随刮板高度增加, C_V 呈现先减小后增大, 再减小的趋势, 尤其高度为 35 mm 时, C_V 最小, 施肥均匀性最好; 刮板间距同样对 C_V 有显著影响 ($P < 0.05$), 当刮板间距最小时, C_V 最小, 施肥最为均匀。随着刮板间距的增大, 施肥均匀性逐渐变差, 当刮板间距为 360 mm 时, 施肥均匀性最差。

图 15 表示施肥过程中刮板参数对接触力的影响规律, 由图 15a 可知, 在施肥过程中, 随时间增加, 接触力呈减小趋势, 不同角度对应的接触力变化趋势一致, 其中, 倾角为 50° 时, 接触力最大, 其次为 130° , 倾角为 90° 时, 接触力最小。受力从大到小的刮板角度为 50° 、 130° 、 70° 、 110° 、 90° 。由图 15b 可知, 随着时间增加, 不同高度的刮板受到的接触力整体呈现下降趋势, 且变化趋势一致。刮板高度为 15 cm 时, 接触力最小; 刮板高度为 35 cm 时, 接触力最大。图 15c 为间距对接触力的影响, 与其余两个参数相比, 间距对接触力的影响更加不规律,

但基本趋势均是随时间的增加逐渐下降。300 和 180 mm 间距时接触力相对较小，420 mm 间距时接触力最大。

求解不同刮板参数下的接触力平均值并结合图 14，根据 T/CAMDA 16-2022《有机肥旋施机》标准， C_v 小于 15% 即符合排肥均匀性要求，在满足均匀性的前提下，接触力尽量选较小值。分析可知，刮板角度为 90° 和 110° 时均满足排肥均匀性要求，但刮板角度为 90° 时平均接触力更低，因此，选取刮板角度 90°，可保证相对较低的变异系数（14.51%）和平均接触力（9.49 N）；刮

板高度为 20 和 35 mm 时满足排肥均匀性要求，但刮板高度为 20 mm 时平均接触力相对较低，综合考虑，选取刮板高度为 20 mm，可保证相对较低的变异系数（13.94%）和平均接触力（9.14 N）；同理，当刮板间距为 180 mm 时，可使变异系数最低（4.00%），同时使平均接触力相对较小（9.72 N），因此，综合分析，选取刮板间距为 180 mm。以优化的最优刮板参数进行仿真试验，得到该参数下的排肥变异系数为 6.02%，满足排肥要求，平均接触力为 9.03 N，均低于优化前。



注：误差棒为标准差；不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The error bars represent the standard deviation; different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 14 刮板参数对排肥均匀性变异系数的影响

Fig.14 Impact of scraper parameters on coefficient of variation of fertilizer distribution uniformity

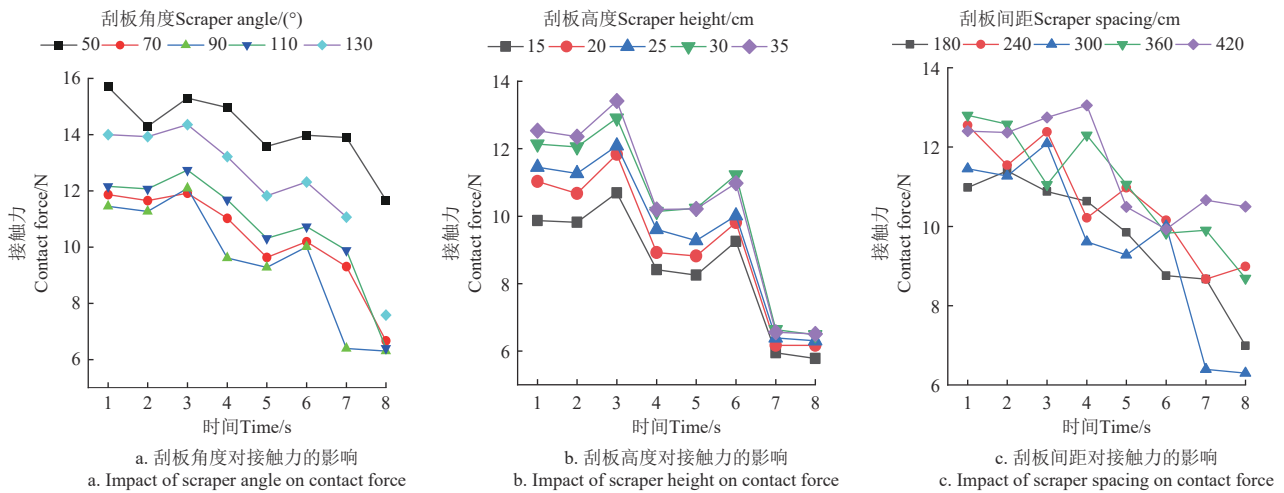


图 15 刮板参数对接触力的影响

Fig.15 Impact of scraper parameters on contact force

4 田间试验

4.1 排肥性能试验

4.1.1 排肥均匀性试验

依据优化结果设计有机肥链式反转开沟施肥机，于 2023 年 10 月在山东省高密市益丰机械有限公司进行排肥性能试验。选用鲁中-1004A 型拖拉机为整机提供动力，为减小开沟装置对排肥过程的影响，试验时拆掉链式开沟装置。试验前，先调整拖拉机前进速度为 1.0 km/h，拖拉机输出轴转速为 540 r/min。将有机肥装满肥箱，调

整阀门开口高度至 45 mm（与仿真参数一致）。有机肥在刮板的作用下从排肥口排出，平铺在地表面上，选取稳定阶段采集数据，每隔 0.5 m 选取 0.5 m 长度的区域为一个样本，共取 5 个样本，收集该区域有机肥质量并计算排肥均匀性变异系数。此过程重复 3 次，试验场景如图 16 所示。

使用电子秤（精度 0.1 g，量程 5 kg）称量样本的质量，排肥均匀性试验结果如表 4 所示。3 次试验最大排肥量 1 517.0 g，最小排肥量为 1 138.7 g，最大变异系数

为 9.64%，最小变异系数为 5.98%，平均变异系数为 8.34%，与仿真值 (6.02%) 的误差为 2.32 个百分点，在可

接收范围之内，表明刮板结构优化结果可靠，能够满足排肥均匀性要求，符合农艺施肥均匀性标准。

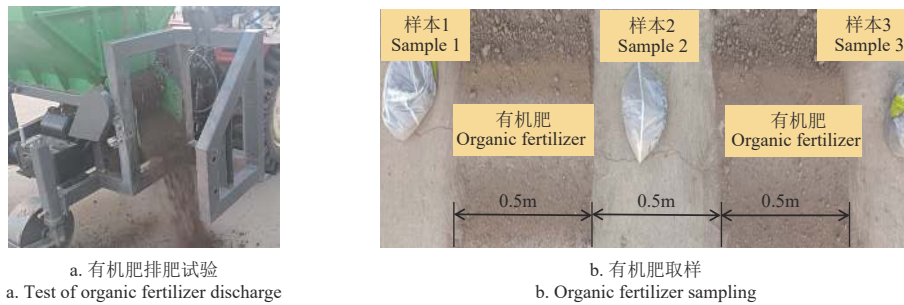


图 16 试验过程及取样

Fig.16 Experimental process and sampling

表 4 排肥均匀性试验结果

Table 4 Test result of fertilizer distribution uniformity

试验 Test	样本 1 Sample 1/g	样本 2 Sample 2/g	样本 3 Sample 3/g	样本 4 Sample 4/g	样本 5 Sample 5/g	$C_v/\%$
1	1 323.3	1 430.3	1 138.7	1 411.0	1 517.0	9.41
2	1 386.3	1 395.9	1 209.1	1 435.6	1 419.7	5.98
3	1 350.6	1 499.8	1 540.2	1 187.4	1 280.5	9.64

4.1.2 排肥量试验

排肥量是评估整机排肥能力的重要指标，需进行最

大、最小排肥量试验。试验条件与 4.1.1 节一致，以慢一档不加油门的状态行驶，首先将排肥阀门调整至最低位置进行排肥，以 0.5 m 为间隔取一个测量样本，试验 2 次，试验结果取平均值作为最小排肥量；然后将排肥阀门调整至最高位置，以同样的方法进行试验，将结果的平均值作为最大排肥量，以此测量整机的排肥性能。试验结果如表 5 所示。

表 5 排肥量试验结果

Table 5 Test result of fertilizer application rate

项目 Items	试验号 Test No.	样本 1 Sample 1/g	样本 2 Sample 2/g	样本 3 Sample 3/g	样本 4 Sample 4/g	样本 5 Sample 5/g	平均值 Average/g
最小排肥量 Minimum fertilizer application rate	1	498.1	554.4	385.6	408.5	360.7	448.6
	2	410.3	604.3	347.5	429.6	487.2	
最大排肥量 Maximum fertilizer application rate	1	3 210.2	2 987.5	3 541.2	3 695.1	3 200.6	3 273.5
	2	2 804.5	3 102.9	3 847.2	3 365.2	2 980.7	

由试验结果可知，当阀门处于最低位置时，平均最小排肥量为 448.6 g，当阀门处于最高位置时，平均最大排肥量为 3 273.5 g，这表明排肥能力约在 0.8~6.0 kg/m 之间，能够满足大多数地区的施肥量需求，具体施肥量可通过阀门开度进行调节。

4.2 开沟作业性能试验

由于作业过程中机器会产生振动，造成作业深度和宽度略有变化，为验证开沟作业性能，进行作业深度稳定性和宽度一致性检验^[28-29]，其计算如式 (18)~(21) 所示^[30]。

$$h_a = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad (18)$$

$$y_4 = 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h_a)^2}{N-1}}}{h_a} \times 100\% \quad (19)$$

$$x_a = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (20)$$

$$y_5 = 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_a)^2}{N-1}}}{x_a} \times 100\% \quad (21)$$

式中 N 为测量点数； h_i 和 x_i 分别为第 i 个测量点的深度和宽度，mm； h_a 和 x_a 分别为测量点的平均深度和宽度，mm； y_4 为作业深度稳定性系数，%； y_5 为作业宽度稳定性系数，%。

开沟作业性能试验于 2023 年 12 月在河北涿州葡萄园试验田中进行，土壤类型为沙壤土，含水率为 18.9%。依据葡萄园有机肥深施农艺要求，作业深度需达到目标值 600 mm，作业宽度为 300 mm。试验前，选取地势相对平坦的葡萄行间，将液压缸进出油口与拖拉机连接，启动动力输出，通过手柄控制油缸全部伸出，以 1 km/h 速度保持拖拉机匀速行驶。试验时，土壤在链式开沟装置反向运转的情况下被实时回填沟内。试验结束后，选取中间阶段作为数据采集区，使用铁锹清除沟内全部土壤，用卷尺（浙江奥奔工具有限公司，0~5 m，精度为 1 mm）测量地表到沟底的垂直距离，同时测量两侧沟壁之间的距离，每隔 1 m 进行一次测量，每行测量 5 次，共测量 2 行，试验场景如图 17 所示。

测量结果如表 6 所示，作业宽度和深度略有波动，但是基本呈稳定状。

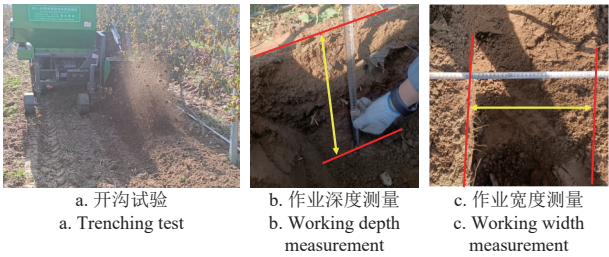


图 17 开沟作业性能试验
Fig.17 Trenching performance test

从表 6 中可看出，在作业过程中，最大作业深度为

697 mm，最小作业深度为 576 mm，两次作业的平均深度分别为 616.0 和 624.4 mm，与目标值的相对误差分别 2.67% 和 4.1%。作业稳定性系数分别为 93.57% 和 92.58%，均大于 90%，表明作业深度稳定性较好；由于机械振动的影响，作业宽度最小值为 274 mm，最大值为 312 mm，两次作业的平均宽度为 305.4 mm 和 295.4 mm，相对误差分别为 1.8% 和 1.53%，作业宽度一致性系数分别为 96.16% 和 95.04%，均大于 95%，表明所设计的链式反转开沟装置能够实现较为稳定的开沟作业，满足田间作业的农艺要求。

表 6 作业稳定性试验结果
Table 6 Test result of working stability

作业行 Working rows	参数 Parameter	目标值 Target value /mm	试验数据 Test date/mm					平均值 Mean value /mm	平均相对误差 Mean relative error/%	稳定性系数 Stability coefficient /%
			1	2	3	4	5			
1	作业深度	600	603	682	580	620	595	616.0	2.7	93.57
	作业宽度	300	312	291	321	298	305	305.4	1.8	96.16
2	作业深度	600	697	598	576	614	637	624.4	4.1	92.58
	作业宽度	300	302	287	310	304	274	295.4	1.5	95.04

5 结 论

1) 设计了一种果园有机肥链式反转开沟施肥装置，主要包括施肥装置和开沟装置，能够实现开沟施肥回填一体化作业，作业深度可达 600 mm，对开沟刀进行建模分析，确定了影响切土角的关键参数；根据开沟装置行程计算结果确定了液压缸型号。

2) 构建了正置和侧置式两种施肥离散元仿真模型，对两种模型的排肥规律进行分析，优选侧置式施肥模式；对刮板结构参数进行单因素试验和分析，确定刮板高度为 20 mm，角度为 90°，间距为 180 mm，并进行最优解仿真试验，结果表明，接触力仿真值为 9.03 N，变异系数为 6.02%，均比优化前低。

3) 田间试验表明，排肥量平均变异系数为 8.34%，与仿真结果误差为 2.32 个百分点，误差在可接受范围内；排肥量为 0.8~6.0 km/m，符合大多数施肥量的作业要求；在开沟性能试验中，2 次开沟的平均作业深度为 616.0 和 624.4 mm，平均作业宽度为 305.4 和 295.4 mm，深度稳定系数均在 90% 以上，宽度一致性系数均在 95% 以上，满足开沟作业的质量要求。

【参 考 文 献】

[1] 李同玺, 张猛强, 牛浩, 等. 果园施肥机关键技术研究现状与展望[J]. 新疆农机化, 2023(3): 24-26.
LI Tongxi, ZHANG Mengqiang, NIU Hao, et al. Research status and prospect of key technology of orchard fertilizer[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(3): 24-26. (in Chinese with English abstract)

[2] 白秋薇, 张信, 罗红品, 等. 设施果园自动对靶精准变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 28-35.
BAI Qiuwei, ZHANG Xin, LUO Hongpin, et al. Control system for auto-targeting precision variable-rate fertilization of fruit trees in a greenhouse orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

the CSAE), 2021, 37(12): 28-35. (in Chinese with English abstract)

[3] 方啸宇, 徐文清, 刘文, 等. 巨峰葡萄 9 种元素缺乏症的研究[J]. 核农学报, 2024, 38(6): 1196-1204.
FANG Xiaoyu, XU Wenqing, LIU Wen, et al. Study of 9 kinds of nutrient deficiencies on kyoho grape[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(6): 1196-1204. (in Chinese with English abstract)

[4] 王斌, 李云, 李瑞鹏, 等. 基于最小数据集的集约化葡萄园土壤健康评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 71-79.
WANG Bin, LI Yun, LI Ruipeng, et al. Soil health evaluation in the intensive vineyard based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(8): 71-79. (in Chinese with English abstract)

[5] 魏智博, 周高兴, 李欣, 等. 锯末堆肥对阿克苏地区苹果叶片养分、果实品质及果园土壤养分的影响[J]. 南方农业, 2024, 18(1): 122-128.

[6] GUAN Z, MU S, JIANG T, et al. Development of centrifugal disc spreader on tracked combine harvester for rape undersowing rice based on DEM[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 562.

[7] 孙锦秀. 有机肥撒施机研究现状及发展对策[J]. 农机使用与维修, 2023(7): 90-93.
SUN Jinxiu. Research status and development countermeasures of organic fertilizer spreader[J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2023(7): 90-93. (in Chinese with English abstract)

[8] 沈从举, 张立新, 周艳, 等. 自走式果园气爆深松施肥机打穴机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 44-52.
SHEN Congju, ZHANG Lixin, ZHOU Yan, et al. Kinematic analysis and tests of the insertion mechanism of a self-propelled orchard gas explosion subsoiling and fertilizing

- machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 44-52. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵淑红, 张鑫, 袁溢文, 等. 粉末状有机肥条施排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 98-107. ZHAO Shuhong, ZHANG Xin, YUAN Yiwen, et al. Design and experiment of powder organic fertilizer drilling fertilizer distributor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 98-107. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘进宝, 汤智辉, 郑炫, 等. 2FHF-4.56 型宽行距作物基肥对行分层深施肥设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 1-11. LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiments of the 2FHF-4.56 type base-fertilizer row-following and layered deep fertilizing machine for wide row spacing crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 with English abstract)
- [12] WANG J, XU Y, WANG C, et al. Design and simulation of a trenching device for rice straw burial and trenching based on MBD-DEM[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 207: 107722.
- [13] 谭好超, 徐丽明, 马帅, 等. 刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 163-175. TAN Haochao, XU Liming, MA Shuai, et al. Development and experiment of scraper organic fertilizer strip spreading and rotary tillage mixed fertilizer applicator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 163-175. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢金泉, 王新章. 链齿式开沟机工作部件的初步研究[J]. *江西农业大学学报*, 1992(2): 161-164.
- [15] YANG Y, HU Z, GU F, et al. Simulation and experimental study of the tillage mechanism for the optimal design of wheat rotary strip-tiller blades[J]. *Agriculture*, 2023, 13(3): 632.
- [16] ZHANG L, ZHAI Y, WU C, et al. Modeling the interaction between a new four-bar subsoiling mechanism and red soil using the improved differential evolution algorithm and DEM[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 208: 107783.
- [17] SUN Y, GUO C, LI Q, et al. Optimization of rock cutting process parameters with disc cutter for wear and cutting energy reduction based on the discrete element method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 391: 136160.
- [18] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105349.
- [19] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 54-64. DU Wenbin, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiments of anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(5): 54-64. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(18): 21-27. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [22] ZHANG X, PEI Y, CHEN Y, et al. The design and experiment of vertical variable cavity base fertilizer fertilizing apparatus[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1793.
- [23] LEI X, WU W, DENG X, et al. Determination of material and interaction properties of granular fertilizer particles using DEM simulation and bench testing[J]. *Agriculture*, 2023, 13(9): 1704.
- [24] WANG B, CHE G, WAN L, et al. Design and experiment of impeller type variable fertilizer discharger device based on EDEM simulation[J]. *Inmateh Agricultural Engineering*, 2023, 71(3): 734-744.
- [25] GALVAO C B, ALBIERO D, GARCIA A P, et al. Fertilizer metering mechanism with helical conic cylindrical thread for family agriculture[J]. *Engenharia Agricola*, 2018, 38(6): 934-940.
- [26] 牛丛. 北方露地葡萄防寒布辅助越冬的柔性清土与平整卷布技术和装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2023. NIU Cong. Research on Flexible Soil-clearing and Smoothly Cloth-winding Technology and Device for Northern Open-field Grape Overwintered on Cold-proof Cloth [D]. Beijing: China Agricultural University. 2023. (in Chinese with English abstract)
- [27] 袁全春. 果园自发酵有机肥分层施用技术与装备研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021. YUAN Quanchun. Study on the Technology and Equipment of Self-fermented Organic Fertilizer Layered Application in Orchard[D]. Beijing: China Agricultural University. 2021. (in Chinese with English abstract)
- [28] LIU D, GONG Y, ZHANG X, et al. EDEM simulation study

- on the performance of a mechanized ditching device for codonopsis planting[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1238.
- [29] CHEN W, REN J, HUANG W, et al. Design and parameter optimization of a dual-disc trenching device for ecological tea plantations[J]. *Agriculture*, 2024, 14(5): 704.
- [30] 张宏建. 现代苹果园双行开沟施肥机关键技术及试验研究[D]. 泰安：山东农业大学, 2021.
- ZHANG Hongjian. Research on Key Technologies and Experiments of Double Row Ditching-fertilizer Machine for Modern Apple Orchards [D]. Tai'an: ShanDong Agricultural University. 2021. (in Chinese with English abstract)

Design and experimentation of a chain reversal trenching and fertilization device for vineyard organic fertilizer

TAN Haochao , MA Shuai , SHEN Congcong , MA Junlong , ZHOU Huineng , XU Liming^{*}

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fertilizer application has been one of the most important facilities to advance agricultural mechanization. Particularly, manual fertilization cannot fully meet the large-scale production in recent years. In this article, a chain reversal trenching and application device was presented for the organic fertilizer in orchards, in order to enhance the trenching depth and uniform fertilization. A reverse-chain trenching mechanism was employed with a fixed trenching blade that moved in the opposite direction of the chain. The soil cutting and simultaneous backfilling were allowed within the trench, as the device progressed. A trenching depth of up to 600mm was achieved in the chain trenching mechanisms. The separate backfilling was reduced to leave no visible trenches on the surface after completion. This design was also a streamlined operation. The mathematical analysis of the trenching blade was conducted to establish a mathematical model using Cartesian coordinate transformations. The relationship equation was derived for the cutting angle. Optimal angle parameters were also provided. According to the trenching depth analysis, the hydraulic adjustment cylinders were selected for the trenching device. A scraper-type fertilizer application mechanism was adopted to develop the discrete element simulation models for both upright and sideways fertilizer application modes. The fertilizer distribution patterns were analyzed under the two modes. While both modes were similarly distributed fertilizer, and the forward-facing mode was more suitable for the operations with the larger fertilizer widths, while the sideward-facing mode was with the smaller fertilizer widths. In the two fertilizer application modes, the sideways application mode had better uniformity, especially at the lower forward speeds. Therefore, the application mode of sideward-facing fertilizer was selected to ensure that all organic fertilizer accurately fell into the trench. A single-factor experiment was carried out to explore the effects of scraper height, angle, and spacing on the normal contact force and coefficient of variation. All three parameters shared a significant impact on the coefficient of variation. In a coefficient of variation of less than 15%, the optimal height, angle, and spacing of the scraper were selected to minimize the normal contact force, resulting in values of 20 mm, 90°, and 180 mm, respectively. According to these optimal parameters of the scraper, the simulation was conducted to yield a coefficient of variation of 6.02% and a normal contact force of 9.03 N, both of which were lower than those before optimization. Subsequently, a physical prototype was fabricated and field-tested. An average coefficient of variation of 8.34% was obtained for fertilizer distribution, indicating better uniformity. Furthermore, the maximum and minimum fertilizer application tests showed that the quantities ranged from 0.8 to 6 kg/m, thus meeting the fertilization requirements of different plots. The trenching performance tests show that the average trenching depths of two operations were 616.0 and 624.4 mm, respectively, with stability coefficients of 93.57% and 92.58%, respectively, both exceeding 90%. The average trenching widths were 305.4 and 295.4 mm, respectively, with consistency coefficients of 96.16% and 95.04%, respectively, both exceeding 95%. Therefore, the device exhibited excellent performance in the fertilizer distribution and trenching operations, fully meeting the agronomic requirements. The findings can provide a new tool for the deep application of organic fertilizers in orchards, indicating the promising potential prospects. Innovative design and efficiency can also offer valuable insights into the agricultural fields.

Keywords: organic fertilizer; grapes; orchard; fertilization; reverse rotation; scraper; trenching blade