

分层近根式液体粪肥施肥铲设计与试验

程红胜^{1,2} 张泽涵¹ 沈玉君^{1,2} 丁京涛^{1,2} 孟海波^{1,2} 周海宾^{1,2} 王娟^{1,2} 徐鹏翔^{1,2}

(1. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125;

2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100125)

摘要: 针对当前液体粪肥施肥铲存在的施肥不均匀、近根施肥难、作业功能单一等问题,从提高肥效、降低排放、提升性能角度出发,设计了一种分层近根、基施追施一体的液体粪肥施肥铲,设计了施肥器和避障器等关键部件,采用 EDEM 离散元法构建施肥铲-土壤力学仿真模型,优化追施过程施肥铲侧向排肥管参数,搭建施肥铲性能测试平台,采用清水模拟方式,开展了施肥铲分层施肥和近根施肥效果试验,结果表明:当施肥铲侧向排肥管后倾角为 15°、侧向排肥管刃角为 18°时,施肥铲基肥作业阻力最小;采用分层施肥方式时,当施肥铲作业速度为 3 km/h、排肥量为 5 L/s 时,肥料在土壤中纵向扩散深度为 235 mm,较改进前单口排肥方式,纵向覆盖范围提升 65%;采用近根施肥模式时,当施肥铲作业速度为 1.2 km/h、排肥量为 3 L/s 时,约 80% 的肥料分布在距作物根部中心 100 mm 半径范围内,较好地实现了近根施肥。

关键词: 液体粪肥; 施肥铲; 分层施肥; 近根施肥

中图分类号: S224.22; S220.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)05-0098-10

OSID:



Design and Experiment of Layered Near-root Liquid Manure Fertilization Shovel

CHENG Hongsheng^{1,2} ZHANG Zehan¹ SHEN Yujun^{1,2} DING Jingtao^{1,2} MENG Haibo^{1,2}
ZHOU Haibin^{1,2} WANG Juan^{1,2} XU Pengxiang^{1,2}

(1. Institute of Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China

2. Key Laboratory of Technology and Model for Cyclic Utilization from Agricultural Resources,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: In response to the current issues of the uneven application, difficulty in near-root application, limited operational functionality in liquid manure fertilizer shovel, a layered near-root and basic application of the liquid manure fertilizer shovel tracking the integration of the fertilizer was designed from the perspective of improving fertilizer efficiency, reducing emissions, and improving the performance. Fertilizer, obstacle avoidance device and other key components were developed. The fertilizer shovel – soil mechanics simulation model was designed by using EDEM discrete elements to optimize the parameters of the lateral discharge pipe of the fertilizer shovel during the follow-up application process, and to build the performance test platform of the fertilizer shovel. Fertilizer shovel layered fertilization and the effect of near-root fertilization were tested by clear water simulation method. The results showed that when the backward inclination angle of the lateral discharge pipe of the fertilizer shovel was 15°, and the cutting edge angle of the lateral discharge pipe was 18°, the resistance of fertilizer shovel basal fertilizer operation was the minimal. With the layered fertilizer application, when the operating speed of the fertilizer shovel was 3 km/h and the discharge volume was 5 L/s, the longitudinal spreading depth of the fertilizer in the soil was 235 mm, which was 65% higher than that of the pre-improvement single-port fertilizer discharge method. When the fertilizer shovel was operated at a speed of 1.2 km/h and a discharge rate of 3 L/s, the fertilizer was distributed within a radius of 100 mm from the center of the crop root by about 80% effectively achieving near-root fertilization.

Key words: liquid manure; fertilizer shovel; layered fertilization; near-root fertilization

收稿日期: 2023-09-06 修回日期: 2023-10-10

基金项目: 中国科学院战略先导技术专项(XDA28130202)

作者简介: 程红胜(1981—),男,研究员,博士,主要从事农业农村废弃物肥料化技术研究, E-mail: steerfeng@163.com

通信作者: 孟海波(1972—),男,研究员,博士,主要从事农业农村废弃物资源化利用技术研究, E-mail: newmh7209@163.com

0 引言

液体粪肥是由畜禽粪污或人粪污经无害化处理得到的液体状肥料,主要包括粪水和沼液等,具有水肥兼备的特点,施用液体粪肥不仅可以改善土壤的透气、透水性,还可提高土壤养分水平,促进作物增产。液体粪肥施肥机是实现液体粪肥还田的关键技术装备,按照作业方式不同分为表面施肥设备和注入式深施设备两类,相比表面施肥,注入深施不仅能提高液体粪肥利用效率,还可以减少液体粪肥中氨氮的排放,是未来液体粪肥施用技术的主要发展方向。

施肥铲是注入式液体粪肥施肥机械的核心部件^[1-2]。由于液体粪肥不同于普通液态肥料,导致液体粪肥施肥铲的设计具有独特性。相关学者、科研机构和企业从 20 世纪 70 年代开始对液体粪肥施肥技术进行研究,早期施肥铲的设计理念是以提高液体粪肥入土性能为主。根据施肥铲和破土器结合形式,分为一体式和组合式两类,如 MCKYES 等^[3]设计了一种组合式宽头施肥铲,该施肥铲能将液体粪肥注入到作物根部,最大排肥量达 200 m³/hm²,但存在破土效果差、作业阻力大、土壤扰动大等问题,主要用于饲草种植施肥。为降低施肥阻力,CHEN^[4]设计了一种“C 型弹铲柄 + V 型凿型铲头”的组合式施肥铲,依托弹柄作业时产生的振动和 V 型板切割土层,降低作业阻力。WARNER 等^[5]设计了一体式双翼施肥铲,采用“双翼铲尖 + 后倾铲柄”结构,降低作业阻力。RODHE^[6]设计了一种双圆盘施肥铲,采用双圆盘齿型注入施肥结构,降低作业阻力,但存在肥料外溢风险,造成环境污染和养分损失。为减少肥料外溢,袁虎^[7]设计了一体式鼠道施肥铲,将施肥铲铲头设计成鼠道结构,在降低施肥阻力同时能够防止肥料外溢。MCLAUGHLIN 等^[8]设计了一种带有分流装置的组合式施肥铲,也有效防止了肥料外溢。

综上分析,国内外对液体粪肥施肥铲的研究主要集中在如何降低作业阻力、减少土壤扰动、防止肥料外溢等方面,多采用单一出肥口结构,存在肥料分布不均匀、作业功能单一、近根施肥难等不足,影响了液体粪肥施肥机的推广和应用。为此本文设计一种组合式分层近根、追施基施一体的液体粪肥施肥铲,通过构建施肥铲-土壤离散元仿真分析模型,优化施肥铲关键结构参数,降低施肥阻力,通过施肥铲性能测试平台,开展液体粪肥分层施肥和近根施肥性能测试试验。

1 液体粪肥施肥铲结构与工作原理

1.1 液体粪肥施肥铲结构

基于凿式深松铲结构,集成设计了主排肥管 + 侧向排肥管 + 自动旋转避障装置的液体粪肥施肥铲。施肥铲采用组合式结构,主要由破土器和施肥器组成,其中破土器由铲尖、铲柄和切削刃组成,施肥器由主排肥管、侧向排肥管和避障器等组成,施肥器位于破土器后部,通过悬臂与破土器铲柄固定连接,如图 1 所示,与其配套的施肥机如图 2 所示。

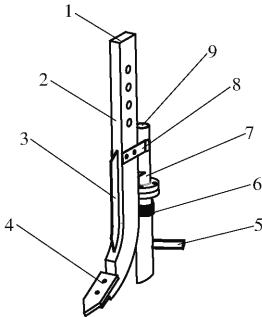


图 1 液体粪肥施肥铲结构示意图

Fig. 1 Liquid manure fertilizer shovel structure diagram

1. 破土器 2. 铲柄 3. 切削刃 4. 铲尖 5. 侧向排肥管 6. 避障器 7. 主排肥管 8. 悬臂 9. 施肥器

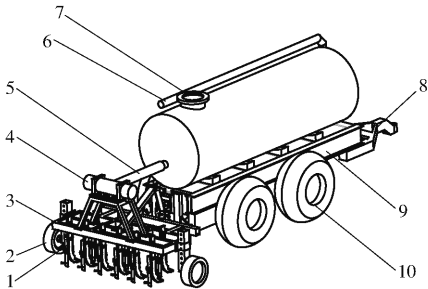


图 2 液体粪肥施肥机结构示意图

Fig. 2 Liquid manure fertilizer applicator structure schematic

1. 施肥铲 2. 限深装置 3. 机架 4. 分液器 5. 输肥管 6. 吸料管 7. 检修口 8. 牵引装置 9. 车架 10. 轮胎

1.2 施肥铲工作原理

基施作业时,调整排肥管法兰连接,将侧向排肥管旋转至破土器正后方,与破土器作业方向在同一直线上,如图 3a 所示。根据施肥农艺要求,通过分液器控制总排肥量,开启主排肥管底部出肥口和侧向排肥管出肥口,破土器在拖拉机等动力牵引下,向前移动,前进过程中将土壤破碎、抬起,液体粪肥通过泵注入排肥管,通过主排肥管底部出肥口和侧向排肥管出肥口注入土壤空隙,实现液体粪肥在耕作层的均匀分布。

追肥作业时,调整排肥管法兰连接,将侧向排肥管旋转至破土器侧后方,侧向排肥管中心线与破土器作业方向保持一定夹角,如图 3b 所示。关闭主排

肥管底部出肥口,破土器在拖拉机等动力牵引下,向前移动,前进过程中破土器和侧向排肥管共同将土壤破碎,液体粪肥通过污泥泵注入排肥管,通过侧向排肥管出肥口注入土壤空隙,实现液体粪肥还田。

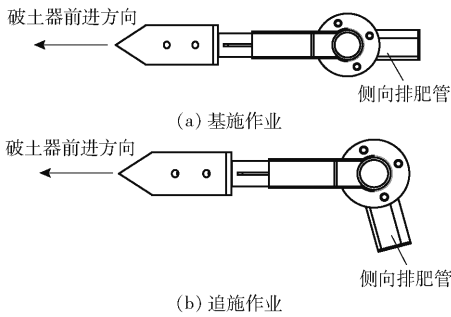


图3 施肥铲作业示意图

Fig. 3 Fertilizer shovel operation diagrams

1.3 液体粪肥施肥铲作业参数

为同时满足液体粪肥基施和追施作业要求,选择液体粪肥还田利用较多的黄淮海地区,该地区主要种植冬小麦和夏玉米,其中该地区液体粪肥在冬小麦上主要用作基肥,夏玉米上则主要用作追肥。作基肥施用时,肥料最佳位置在地表下 100 ~ 300 mm,采用分层施肥的方式,第 1 层施肥深度 100 ~ 200 mm,第 2 层施肥深度 200 ~ 300 mm^[9]。作追肥施用时,肥料最佳位置在地表下 80 ~ 100 mm^[10],同时为了减少作业过程中施肥铲对作物根系的损伤,施肥位置应距离作物根系中心 100 mm。基于此确定液体粪肥施肥铲作业项目如表 1 所示。

表 1 液体粪肥施肥铲作业项目
Tab. 1 Liquid manure fertilization shovel operation project

项目	参数	
	基施	追施
施肥时间	9—10 月	7—8 月
施肥量	45 ~ 75 m ³ /hm ²	15 ~ 30 m ³ /hm ²
施肥深度	100 ~ 300 mm	80 ~ 100 mm
施肥位置	作物根系中心	距离作物根系中心 100 mm
液体粪肥 pH 值	8.53 ± 0.22	
液体粪肥含固率	(6.9 ± 0.01) %	

2 液体粪肥施肥铲设计

2.1 施肥器

施肥器主要功能是实现排肥,其结构如图 4 所示。为同时满足液体粪肥基施和追施作业要求,设计了主侧排肥管协同 + 自动旋转避障结构的施肥器。主排肥管由上部排肥管、中间排肥管、下部排肥管 3 部分组成,上部排肥管与中间排肥管通过法兰连接,下部排肥管与中间排肥管通过旋转轴连接,下

部排肥管可以绕中间排肥管转动;侧向排肥管固定在下部排肥管上,与主排肥管连通;避障器采用扭簧结构,扭簧上端与中间排肥管连接,下端与下部排肥管连接。该施肥器具有如下优点:采用 2 个不同高度的主侧排肥管,满足液体粪肥分层和均布施肥;采用侧向排肥管结构,实现近根施肥;采用自动旋转避障器,保证侧向排肥管作业过程中不易被石块等损伤;采用法兰连接结构,方便调整侧向排肥管位置,满足基施和追施作业要求。

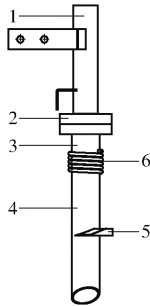


图4 施肥器结构图

Fig. 4 Structure diagram of fertilizer applicator

1. 上部排肥管 2. 法兰 3. 中间排肥管 4. 下部排肥管 5. 侧向排肥管 6. 避障器

2.1.1 主排肥管结构参数设计

主排肥管的作用是将液体粪肥导入土壤,主排肥管管径及长度对液体粪肥施用效果影响较大,主排肥管结构参数主要包括主排肥管管径 d_0 和主排肥管长度 L ,如图 5 所示。

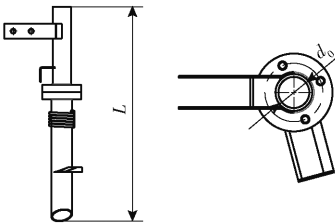


图5 主排肥管结构示意图

Fig. 5 Schematic of structure of main fertilizer discharge pipe

主排肥管管径一般由主排肥管排肥量决定,若主排肥管管径过大,管内压强就会降低,排肥均匀性就会变差;若主排肥管管径过小,施肥时容易发生堵塞,影响施肥效果。主排肥管管径 d_0 计算式^[11]为

$$d_0 = \sqrt{\frac{V_m}{v_1 \pi}}$$
 (1)

其中

$$V_m = \frac{Rzv}{A_1}$$
 (2)

- 式中 V_m ——主排肥管排肥量, L/s
 R ——液体粪肥基施施用量, m³/hm²
 z ——施肥铲横向间距, mm
 v ——施肥铲作业速度, km/h

A_1 ——耕地面积, m^2

v_1 ——主排肥管中液体粪肥流速, m/s

主排肥管的设计需同时满足液体粪肥基施、追施农艺要求, 由于液体粪肥基施时用量比较大, 所以需要根据液体粪肥基施用量来确定主排肥管的设计参数。根据液体粪肥基施农艺, 液体粪肥基施时施用量 R 为 $45 \sim 75 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 施肥铲横向间距 z 为 $300 \sim 600 \text{ mm}$; 基施作业时施肥铲作业速度 v 为 $3 \sim 5 \text{ km/h}$; 代入式(2), 得出主排肥管排肥量 V_m 为 $1.1 \sim 6.3 \text{ L/s}$ 。一般对于低粘度液体, 在管路中流速参考范围为 $1 \sim 3 \text{ m/s}$, 对于含有固形杂质的低粘度液体, 在管路中流速宜取大一些^[12], 考虑到液体粪肥中含有固形杂质, 其主排肥管中流速参考值 v_1 取 2 m/s , 代入式(1)得出主排肥管管径 d_0 为 $26.1 \sim 63.3 \text{ mm}$, 主排肥管管径过大, 会导致施肥铲作业阻力增加, 综合考虑主排肥管管径 d_0 取 40 mm 。

主排肥管长度 L 由离地间隙和施肥深度决定, 离地间隙主要由施肥铲固定方式确定, 借鉴现有施肥铲设计经验, 选择离地间隙为 200 mm 。施肥深度主要由施肥农艺决定, 玉米种植液体粪肥基施深度一般为 $100 \sim 300 \text{ mm}$ ^[9], 考虑肥料自身扩散性能, 选择基施深度为 200 mm , 综合考虑, 主排肥管长度 L 取 400 mm 。

2.1.2 侧向排肥管结构参数设计

侧向排肥管主要功能是实现分层基施与近根追施, 整体采用后掠翼楔型结构, 内部为空腔结构, 底部设出肥口, 侧向排肥管结构如图6所示。

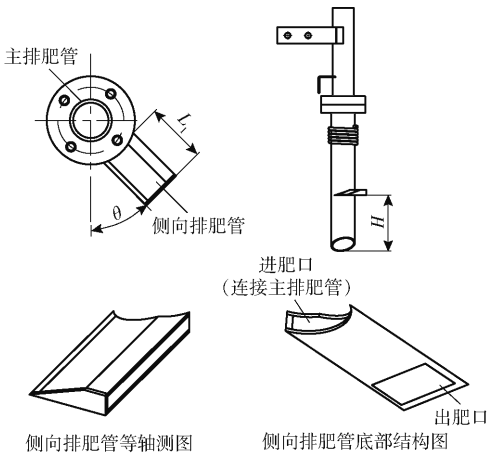


图6 侧向排肥管结构示意图

Fig.6 Lateral fertilizer discharge tube structure schematic

(1) 侧向排肥管受力分析

侧向排肥管破土施肥过程中, 主要受水平牵引力和土壤反作用力, 其受力情况如图7所示。

侧向排肥管受力平衡方程为

$$F_0 = N_2 \sin \alpha + \mu_1 N_2 \cos \alpha + F_1 \quad (3)$$

式中 F_0 ——水平牵引力, N

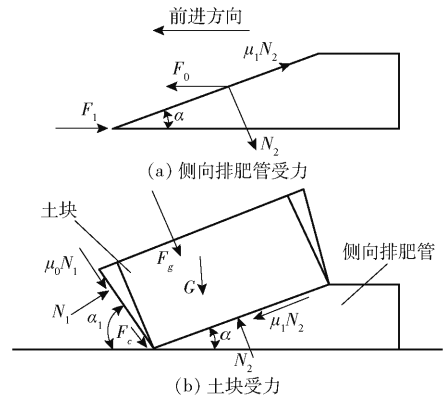


图7 侧向排肥管和土块受力分析

Fig.7 Force analysis of lateral fertilizer pipe and soil block

N_2 ——作用在侧向排肥管上的法向载荷, N

F_1 ——土壤对侧向排肥管的阻力, N

α ——侧向排肥管刃角, $(^\circ)$

μ_1 ——土壤与侧向排肥管间的摩擦因数

土块在水平方向与竖直方向上的平衡状态方程为

$$N_2 (\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha) - N_1 (\sin \alpha_1 + \mu_0 \cos \alpha_1) - (F_c + F_g) \cos \alpha_1 = 0 \quad (4)$$

$$G - N_2 (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha) - N_1 (\cos \alpha_1 - \mu_0 \sin \alpha_1) + (F_c + F_g) \sin \alpha_1 = 0 \quad (5)$$

$$\text{其中 } F_g = m \frac{dv_2}{dt_g} \quad (6)$$

式中 G ——土块重力, N

N_1 ——作用在土块前失效面的法向载荷, N

F_g ——土壤受到的加速力, N

F_c ——土壤内聚力, N

μ_0 ——土壤内摩擦因数

α_1 ——土块前失效面倾角, $(^\circ)$

m ——被加速土壤质量, kg

v_2 ——被加速土壤速度, m/s

t_g ——加速时间, s

作业时, 侧向排肥管水平牵引力与土壤阻力相平衡, 结合式(3)~(5)得

$$F_{Z1} = \frac{G}{w} + \frac{F_c + F_g}{(\sin \alpha_1 + \mu_0 \cos \alpha_1) w} \quad (7)$$

$$\text{其中 } w = \frac{\cos \alpha_1 - \mu_0 \sin \alpha_1}{\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha} + \frac{\cos \alpha_1 - \mu_0 \sin \alpha_1}{\sin \alpha_1 + \mu_0 \cos \alpha_1} \quad (8)$$

式中 F_{Z1} ——土壤阻力, N

(2) 侧向排肥管刃角

通过对侧向排肥管进行受力分析, 得出侧向排肥管刃角对侧向排肥管作业阻力有重要影响, 侧向排肥管刃角增大, 会增加侧向排肥管作业阻力, 根据设计经验, 侧向排肥管刃角 α 取 $20^\circ \sim 30^\circ$ ^[13-14]。

(3)侧向排肥管后倾角

侧向排肥管后倾角对侧向排肥管作业阻力有重要影响,侧向排肥管后倾角增大,侧向排肥管的作业阻力会增加,同时土壤的扰动也会增大,间接损伤作物根系。根据设计经验,侧向排肥管后倾角 θ 取 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ [15-16]。

(4)侧向排肥管长度

侧向排肥管长度对作物根系损伤情况和侧向排肥管排肥位置具有重要影响,侧向排肥管长度过大,作业时容易损伤作物根系;侧向排肥管长度过小,则无法将液体粪肥施入作物根部附近,在不损伤作物根系的前提下将液体粪肥施到作物根部,根据液体粪肥追肥农艺,施肥铲与作物根部的横向距离应保持150 mm,侧向排肥管与作物根部的横向距离 L_0 至少保持在50 mm,取侧向排肥管长度 L_1 为100 mm。侧向排肥管作业位置如图8所示。

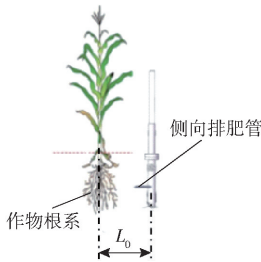


图8 侧向排肥管作业位置示意图

Fig.8 Lateral fertilizer discharge pipe operation location schematic

(5)出肥口横截面积

出肥口横截面积影响排肥效果,出肥口横截面积计算式为

$$S_1 = \frac{V_t}{v_3} \tag{9}$$

式中 S_1 ——出肥口横截面积,mm²
 V_t ——侧向排肥管排肥量,L/s
 v_3 ——侧向排肥管液体粪肥的流速,m/s

侧向排肥管主要用于追肥,根据液体粪肥追施农艺,液体粪肥追肥时施用量 R 为15~30 m³/hm²,根据式(2)计算出侧向排肥管排肥量 V_t 为0.2~1.0 L/s,侧向排肥管液体粪肥流速 v_3 取2 m/s,代入式(9)可计算出侧向排肥管出肥口横截面积 S_1 为500 mm²。

(6)出肥口高度

出肥口离地高度影响液体粪肥分层和基施效果,侧向排肥管离地高度过小,无法实现分层施肥,侧向排肥管离地高度过大,施肥后液体粪肥容易溢出地表,根据施肥铲分层和基施作业要求,取侧向排肥管出肥口高度 H 为100 mm。

2.2 避障器

避障器主要功能是避免侧向排肥管作业过程被

土壤中石块等坚硬物质损伤。避障器主要由扭力弹簧和旋转轴组成。作业过程中,当侧向排肥管触碰到石块时,在外力作用下驱动扭力弹簧转动,进而带动侧向排肥管向后偏转,实现避障;当侧向排肥管越过障碍物后,在扭力弹簧弹性力驱动下实现自动复位。扭力弹簧结构对自动旋转避障器可靠性有重要影响,避障器结构如图9所示。

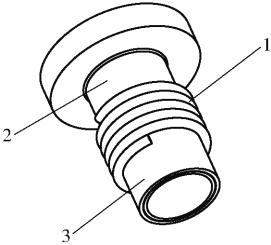


图9 避障器结构示意图

Fig.9 Schematic structure of obstacle avoidance device

1. 扭力弹簧 2. 中间排肥管 3. 旋转轴

扭簧基本参数有簧丝直径 d_1 和有效圈数 n_1 [17],计算公式为

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{10.2 K_1 T_0}{[\sigma]}} \tag{10}$$

$$n_1 = \frac{E d_1^4 \varphi}{3 670 D_1 T_0} \tag{11}$$

式中 K_1 ——曲度系数,扭簧旋向为顺时针时 $K_1=1$
 T_0 ——扭簧工作扭矩,N·mm
 $[\sigma]$ ——许用弯曲应力,MPa
 E ——材料弹性模量,MPa
 φ ——安装扭转角,(°)
 D_1 ——扭簧中径,mm

根据实际工况,设定初始安装角为10°,安装扭转角最大为90°。综合考虑扭簧工作特性和受力状况,得出簧丝直径 d_1 为5 mm,有效圈数 n_1 为4。

2.3 破土器

破土器的功能是破碎农田浅层或深层土壤,产生足够的土壤空隙,容纳施肥器所注入的液体粪肥。常见的破土器类型有圆盘式、靴式和凿式。圆盘式破土器和靴式破土器作业较浅,不适合液体粪肥深施作业[18]。凿式破土器作业深,能更好地适用液体粪肥深施场合,因此本研究选用凿式破土器。

3 施肥铲作业阻力仿真分析

3.1 仿真模型建立及仿真参数设定

(1)土壤颗粒模型

黄淮海地区农田土壤多为潮土[19-21],根据土壤性状设定土壤颗粒为单一球形颗粒,半径为1 mm。考虑到按1:1设置土壤颗粒大小,会影响计算机求解速度,造成仿真时长增大,因此需要采用缩放理论

对土壤颗粒模型进行放大处理^[22],设定颗粒模型半径为 10 mm,土壤颗粒之间的接触模型选用 Hertz Mindlin with Bonding 模型,利用颗粒工厂生成颗粒,土槽模型长度为 1 200 mm,宽度为 400 mm,高度为 300 mm。

(2)施肥铲模型

利用 Solidworks 软件对施肥铲进行建模,根据测定的土壤物理性质参数以及查阅文献[23–24],对土壤颗粒与施肥铲材料基本参数进行设置,土壤颗粒和施肥铲材料基本参数如表 2 所示。

表 2 土壤颗粒和施肥铲材料基本参数
Tab.2 Basic parameters of soil granules, fertilizer spade materials

参数	数值
65Mn 钢泊松比	0.3
65Mn 钢密度/(g·cm ⁻³)	7.82
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.6×10 ¹⁰
土壤颗粒泊松比	0.38
土壤颗粒剪切模量/Pa	6×10 ⁷
土壤颗粒密度/(g·cm ⁻³)	1.41
土壤颗粒间恢复系数	0.6
土壤颗粒间静摩擦因数	0.3
土壤颗粒间动摩擦因数	0.1
土壤颗粒与 65Mn 钢间恢复系数	0.6
土壤颗粒与 65Mn 钢间静摩擦因数	0.3
土壤颗粒与 65Mn 钢间动摩擦因数	0.1

施肥铲和土槽近根施肥仿真模型如图 10 所示。

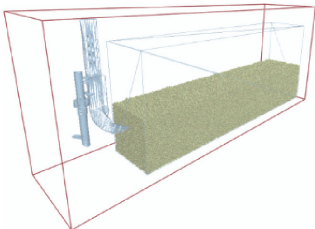


图 10 施肥铲和土槽 EDEM 仿真模型

Fig. 10 EDEM simulation model of fertilizing shovel and soil bin

(3)仿真参数设置

根据玉米种植施肥农艺,液体粪肥追施深度一般为 80~100 mm^[10],为使侧向排肥管达到施肥深度要求,设定施肥铲入土深度为 200 mm。同时,施肥铲追施作业时,速度不宜过快,选取作业速度为 1.2~3.2 km/h^[10,24],设定仿真时间步长 5.76×10⁻⁵ s,仿真时间为 1.6 s。

3.2 仿真试验设计

根据回归正交试验设计方法^[25–26],对施肥铲作业速度、侧向排肥管后倾角、侧向排肥管刃角进行三元二次回归正交旋转组合试验,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 仿真试验因素编码
Tab.3 Simulation experiment factor coding

编码	因素		
	施肥铲作业速度/(km·h ⁻¹)	侧向排肥管后倾角/(°)	侧向排肥管刃角/(°)
1	3.2	45	30
0	2.2	30	25
-1	1.2	15	20

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 仿真结果

对施肥铲作业阻力进行多元回归拟合,试验方案与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为施肥铲作业速度、侧向排肥管后倾角、侧向排肥管刃角因素编码值,施肥铲作业阻力 Y_1 为响应指标,建立二次多项回归方程

$$Y_1 = 735.41 + 5.19X_1 + 4.09X_2 + 4.51X_3 - 2.94X_1X_2 - 0.53X_1X_3 - 1.71X_2X_3 - 1.61X_1^2 - 0.67X_2^2 - 2.95X_3^2$$

(12)

表 4 仿真试验结果
Tab.4 Simulation experiment results

序号	因素			施肥铲作业阻力/N
	X_1	X_2	X_3	
1	0	1	1	737.66
2	-1	0	1	731.71
3	1	0	1	741.04
4	-1	-1	0	724.48
5	-1	1	0	736.35
6	0	-1	-1	722.48
7	1	1	0	735.91
8	0	-1	1	732.91
9	1	-1	0	735.79
10	1	0	-1	731.04
11	0	0	0	734.29
12	0	0	0	736.18
13	0	1	-1	734.09
14	-1	0	-1	719.61
15	0	0	0	735.03
16	0	0	0	734.25
17	0	0	0	737.31

由表 4 可知,近根施肥过程中,施肥铲作业阻力在 719.61~741.04 N,整体波动幅度不大,施肥铲作业速度越快,作业阻力越大。

对施肥铲作业阻力进行方差分析,如表 5 所示。由表 5 可知,施肥铲作业速度 X_1 、侧向排肥管后倾角 X_2 、侧向排肥管刃角 X_3 的 P 值均小于 0.01,说明各因素对施肥铲作业阻力的影响均极显著。

3.3.2 响应曲面分析

通过 Design-Expert 对仿真数据进行处理,可得到施肥铲作业速度、侧向排肥管后倾角和侧向排肥

表 5 施肥铲作业阻力方差分析

Tab.5 Analysis of variance of fertilizer shovel

operation resistance					
方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	503.93	11	45.81	15.12	0.003 8 **
X_1	107.74	1	107.74	35.56	0.001 9 **
X_2	66.91	1	66.91	22.09	0.005 3 **
X_3	162.90	1	162.90	53.77	<0.001 **
X_1X_2	34.52	1	34.52	11.39	0.019 8 *
X_1X_3	1.10	1	1.10	0.36	0.572 7
X_2X_3	11.76	1	11.76	3.88	0.105 8
X_1^2	10.88	1	10.88	3.59	0.116 6
X_2^2	1.90	1	1.90	0.63	0.464 0
X_3^2	36.76	1	36.76	12.13	0.017 6 *
残差	15.15	5	3.03		
失拟项	8.20	1	8.20	4.72	0.095 5
误差项	6.95	4	1.74		
总和	519.08	16			

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$)；** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

管刃角对施肥铲作业阻力的影响,其响应曲面如图 11 所示。由表 5 可得施肥铲作业速度 X_1 与侧向排肥管后倾角 X_2 的交互作用对施肥铲作业阻力有显著的影响,如图 10c 所示,当侧向排肥管刃角一定时,随着施肥铲作业速度和侧向排肥管后倾角增大,施肥铲作业阻力呈增大趋势。

构建目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

利用 Design-Expert 软件求解得到最优参组合,结果表明:施肥铲作业速度为 1.23 km/h、侧向排肥管后倾角为 15°、侧向排肥管刃角为 18°时,施肥铲作业阻力最小,为 714.77 N。

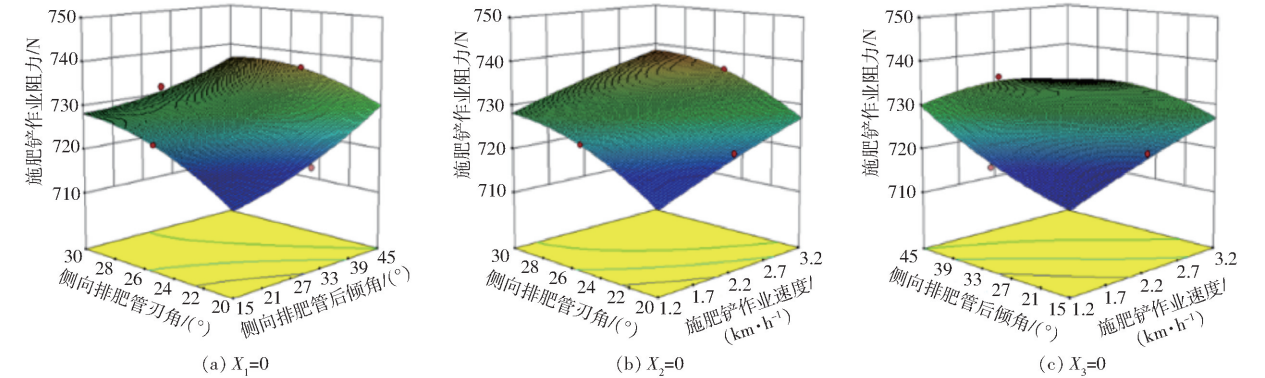


图 11 各因素交互作用对作业阻力影响的响应曲面

Fig. 11 Response surface diagrams of each factor interaction to working resistance

4 施肥铲性能试验

对施肥铲进行制造,并开展土槽试验。试验以肥料纵向扩散深度、肥料扩散中心与作物根部中心距离、开沟稳定性系数作为主要指标,综合评价液体粪肥施肥铲工作性能和作业效果。

4.1 试验条件

依托中国农业大学土槽试验平台,搭建施肥铲性能测试试验台架,以施肥铲作业速度、排肥量为试验因素,对施肥铲分层施肥效果以及近根施肥效果进行试验。为模拟大田环境,对土壤进行预压实和调水分处理,处理后土壤平均坚实度为 571 kPa,土壤平均含水率为 15%。液体粪肥还田前需要添加清水稀释,一般稀释 3 倍,根据液体粪肥理化性质相关试验^[27],发现稀释后的液体粪肥黏度、密度等与清水接近,考虑到在土槽中施用液体粪肥会污染土壤,影响土槽后续使用,采用清水模拟液体粪肥。

4.2 试验设备

试验设备包括自制的施肥铲、土槽、自走式试验台车、钢板尺、钢卷尺、铁锹、木销等,主要试验设备如图 12 所示。其中试验台车为黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的 ZJZ-28 型电力变频四轮驱动试验车,台车运行速度为 0.3~11 km/h;六分力测力装置为中国航空气动力技术研究院研制的 BK-1 型拉压力传感器,量程为 0~14 700 N。试验时,将单个施肥铲通过 U 型卡连固定台车机架上,施肥铲通过输肥管连接肥料桶。

4.3 试验方案

4.3.1 分层施肥试验

以施肥铲作业速度和排肥量为试验因素,以肥料纵向扩散深度 T_m 作为试验指标,开展施肥铲分层施肥效果验证试验,根据液体粪肥基施农艺,施肥铲基施作业时排肥量一般为 3~5 L/s,作业速度一般为 3~5 km/h,确定分层施肥试验因素水平为 3、5 L/s 和 3、5 km/h。

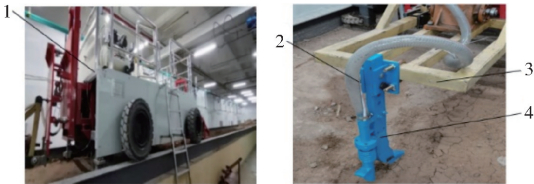


图 12 试验设备

Fig. 12 Experiment equipment

1. 台车 2. 输肥管 3. 机架 4. 施肥铲

4.3.2 近根施肥试验

将施肥铲固定在标定的作物根部位置一侧,距离作物根部横向距离为 150 mm,以施肥铲作业速度和排肥量为试验因素,以液体粪肥扩散中心到作物根部中心的距离为评价指标,开展施肥铲近根施肥效果验证试验,根据液体粪肥追施农艺,施肥铲追施作业时排肥量一般为 1~3 L/s,作业速度一般为 1.2~3.2 km/h,确定近根施肥试验因素水平为 1、3 L/s 和 1.2、3.2 km/h。

4.3.3 试验指标测定

(1) 肥料纵向扩散深度

在施肥铲作业路径上取 5 个点进行剖面,观察肥料在土壤断面中分布情况。为了更好地观察肥料分布情况,在肥料分布轮廓中插入木销,测量肥料在断面中的纵向扩散深度,如图 13 所示。试验重复 3 次,取平均值作为肥料纵向扩散深度 T_m [28]。

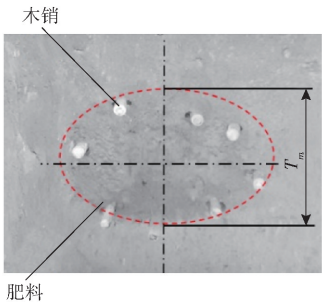


图 13 肥料纵向扩散深度测量示意图

Fig. 13 Schematic of fertilizer longitudinal diffusion depth measurement

(2) 肥料扩散中心与作物根部中心距离

在施肥铲作业路径上取 5 个点进行剖面分析,根据农艺要求的安全作业间距,以施肥铲开沟路径中心为基准,横向量取 150 mm 标记出作物根部中心位置,观察断面内肥料扩散中心与土槽中标定的作物根部位置的横向距离,试验重复 3 次,结果取平均值,如图 14 所示。

(3) 开沟深度稳定性系数

选定土槽中间 15 m 为测试区对施肥铲开沟深度进行测试,开沟后采用 5 点取样法对开沟深度进行测量,试验重复 5 次,计算出施肥铲开沟深度稳定性系数为

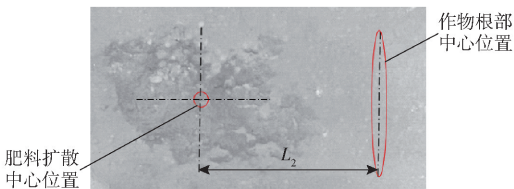


图 14 肥料扩散中心与作物根部中心距离测量示意图

Fig. 14 Schematic of measurement of distance between center of fertilizer diffusion and center of crop roots

$F = 1 - A$ (14)

其中

$A = \frac{B}{C} \times 100\%$ (15)

式中 F ——施肥铲开沟深度稳定性系数, %
 A ——施肥铲开沟深度变异系数, %
 B ——开沟深度标准差, mm
 C ——施肥铲开沟深度, mm

4.4 试验结果与分析

4.4.1 分层施肥效果

施肥铲分层施肥试验结果如表 6 所示,在不同作业速度与排肥量组合工况下,肥料纵向扩散深度为 171~235 mm。当施肥铲在作业速度为 3 km/h、排肥量为 5 L/s 时,肥料在土壤中扩散范围最大,纵向扩散深度达到 (235 ± 13.42) mm。与改进前采用单一出肥口的施肥铲相比 [28],施肥后肥料纵向覆盖区域提升 65%,达到较好的纵向均匀施肥效果,肥料在土壤中分布如图 15 所示。

表 6 肥料纵向覆盖深度试验结果

Tab. 6 Fertilizer longitudinal depth of cover test results

施肥铲类型	施肥铲工作速度/(km·h ⁻¹)	mm	
		排肥量/(L·s ⁻¹)	
		3	5
改进前	3	67 ± 3.29	83 ± 4.76
	5	61 ± 3.18	71 ± 1.18
改进后	3	190 ± 10	235 ± 13.42
	5	171 ± 8.94	201 ± 3.32

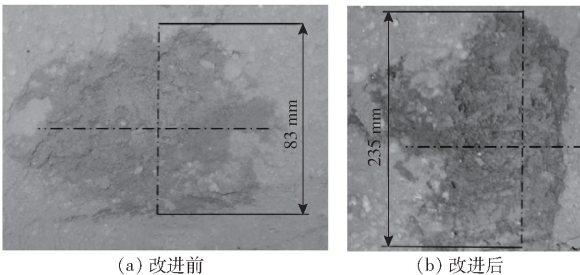


图 15 肥料在 100~300 mm 耕层中的分布状态

Fig. 15 Fertilizer distribution in 100~300 mm tillage layer

4.4.2 近根施肥效果

施肥铲近根施肥试验结果如表 7 所示,不同作业速度与排肥量组合下,肥料覆盖面积为 7 462~15 074 mm²。当施肥铲作业速度为 1.2 km/h、排肥

量为 3 L/s 时,肥料扩散面积最大,肥料扩散中心距离作物根部最近,经测算约 80% 肥料分布在距作物根部中心位置 100 mm 范围内,而改进前只有 50% ~ 60% 的肥料分布在作物根部中心位置 100 mm 范围内,与改进前施肥铲相比,较好地实现了近根施肥。

表 7 肥料距离作物根部中心 100 mm 处覆盖面积

Tab.7 Coverage area of fertilizer at 100 mm from center of crop root mm²

施肥铲 类型	施肥铲工作速 度/(km·h ⁻¹)	排肥量/(L·s ⁻¹)	
		1	3
改进前	1. 2	6 426 ± 869. 64	10 551 ± 500. 40
	3. 2	5 821 ± 886. 45	9 541 ± 1 821. 63
改进后	1. 2	8 803 ± 1 191. 28	15 074 ± 714. 85
	3. 2	7 462 ± 1 136. 47	12 894 ± 2 461. 67

4.4.3 开沟深度稳定性

施肥开沟深度试验结果如表 8 所示。施肥铲平均开沟深度为(202. 7 ± 7. 9) mm,开沟深度变异系数 A 为 2. 7%,开沟深度稳定系数为 97. 3%,施肥铲满足作业要求。

5 结论

(1)设计了一种组合式分层近根、追施基施液体粪肥施肥铲,设计了主侧排肥管协同 + 自动旋转

表 8 施肥铲开沟深度试验结果

Tab.8 Fertilizer shovel trenching depth test results

测量区	测量点编号				
	1	2	3	4	5
1	200	195	209	190	196
2	209	200	218	209	204
3	198	212	209	203	214
4	191	190	204	191	196
5	211	207	200	208	203

避障器的施肥器,基于 EDEM 仿真分析确定了施肥铲关键结构参数,即施肥铲作业速度为 1. 23 km/h、侧向排肥管后倾角为 15°、侧向排肥管刃角为 18°,此时施肥铲作业阻力最小,为 714. 77 N。

(2)依托土槽试验平台,开展施肥铲性能测试试验。分层施肥试验结果表明:当施肥铲作业速度为 3 km/h、排肥量为 5 L/s 时,液体粪肥在土壤中纵向分布较为均匀,纵向覆盖范围达到 171 ~ 235 mm,较改进前单出肥口施肥铲相比,肥料在土壤中纵向覆盖范围提升 65%;近根施肥试验结果表明:当施肥铲作业速度为 1. 2 km/h、排肥量为 3 L/s 时,近根施肥效果明显,约 80% 的肥料分布在距作物根部中心位置 100 mm 范围内,为液体粪肥精准、高效施用提供了相应机具。

参 考 文 献

[1] 张克强,杜连柱,杜会英,等. 国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2021,40(11):2472 - 2481,2591.
ZHANG Keqiang, DU Lianzhu, DU Huiying, et al. Application of livestock and poultry waste to agricultural land: a review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(11): 2472 - 2481, 2591. (in Chinese)

[2] 周茂茜,李家春,田莉,等. 山区烤烟液肥深施机的设计[J]. 农机化研究,2019,41(11):91 - 97.
ZHOU Maoqian, LI Jiachun, TIAN Li, et al. Design of deep application machine for fluid-fertilizer flue-cured tobacco in mountainous area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 91 - 97. (in Chinese)

[3] MCKYES E, NEGI S, GODWIN R J, et al. Design of a tool for injecting organic waste slurries in soil [J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(3): 127 - 136.

[4] CHEN Y. A liquid manure injection tool adapted to different soil conditions[J]. Transactions of the ASAE Online, 2002, 45(6): 1729 - 1736.

[5] WARNER N L, GODWIN R J, HANN M J. Modifications to slurry injector tines to reduce surface disturbance and improve slot closure under dry grassland conditions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 48: 195 - 207.

[6] RODHE L. Methods for determining the presence of slurry on the crop and in the upper soil layer after application to grassland [J]. Bioresource Technology, 2003, 90(1): 81 - 88.

[7] 袁虎. 沼液沼渣暗灌施肥机械的研制及关键部件的仿真研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
YUAN Hu. Development of biogas slurry residue injection machinery and simulation research of key components of fertilizer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[8] MCLAUGHLIN N B, CAMPBELL A J. Draft-speed-depth relationships for four liquid manure injectors in a fine sandy loam soil [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46: 2. 1 - 2. 5.

[9] 赵堂甫,肖厚军,赵欢,等. 基肥深施对贵州高产玉米产量和养分吸收利用的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(增刊 1):21 - 25.
ZHAO Tangfu, XIAO Houjun, ZHAO Huan, et al. Response of maize yield, biological traits and nutrient utilization and soil fertility to fertilization depth in Guizhou[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(Supp. 1): 21 - 25. (in Chinese)

- [10] 邢旭. 玉米液肥施肥机设计[D]. 保定:河北农业大学,2019.
XING Xu. Design of liquid fertilizer application machine[D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2019. (in Chinese)
- [11] CHEN Y,TESSIER S. Criterion for design and selection of injection tools to minimize liquid manure on the soil surface[J]. Transactions of the ASAE,2001,44(6):1421.
- [12] 王志魁,向阳,王宇. 化工原理[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2018.
- [13] 李国华. 十字槽开沟器结构设计及试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
LI Guohua. Structure design ang experimental study of cross-slot opener[D]. Yangling:Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
- [14] 李金光. 基于离散元法的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
LI Jinguang. Optimization design and test of spinach harvester's root-cutting shovel based on discrete element method[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2020. (in Chinese)
- [15] 夏雷. 基于离散元法的深松铲铲翼参数优化及试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
XIA Lei. Optimum parameter and experimental study of shovel wing based on discrete element method [D]. Yangling: Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
- [16] HANG C,GAO X,WANG B,et al. Optimization of the wing parameters for a winged subsoiler[J]. Applied Engineering in Agriculture,2017,33(3):313–319.
- [17] 张新奇,闵树超,丁强伟,等. 钛合金双瓣止回阀扭簧设计及试验性能研究[J]. 科技创新与应用,2022,12(8):86–89.
ZHANG Xinqi,MIN Shuaichao,DING Qiangwei,et al. Research on design and test performance of torsionspring of titanium alloy double-lobe check valve[J]. Technology Innovation and Application,2022,12(8):86–89. (in Chinese)
- [18] 刘汉朋. 深施肥下玉米免耕分段式播种开沟器设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
LIU Hanpeng. Design and experiment of maize no-till segmented sowing opener under deep-layer application of fertilizer[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [19] 李颖慧,姜小三. 黄淮海平原农区农用地土壤肥力评价及时空变化特征——以山东省博兴县为例[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(3):602–612.
LI Yinghui,JIANG Xiaosan. Spatiotemporal characteristics of soil nutrients and fertility evaluation of agricultural land in the Huang-Huai-Hai Plain agricultural area: a case study of Boxing County, Shandong Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022,39(3):602–612. (in Chinese)
- [20] 李勇,赵云泽,勾宇轩,等. 黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J]. 农业机械学报,2022,53(3):321–330.
LI Yong,ZHAO Yunze,GOU Yuxuan,et al. Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in Dry Farming Region of Huang-Huai-Hai[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):321–330. (in Chinese)
- [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 CSAE,2021,37(5):11–19. (in Chinese)
- [22] 石金杉. 深松旋耕分层施肥镇压联合作业机优化设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2019.
SHI Jinshan. Optimum design and test of subsoiling rotary tillage layered fertilization and pressure combined machine [D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2019. (in Chinese)
- [23] XU Lizhang,WEI Chuncai,LIANG Zhenwei,et al. Development of rapeseed cleaning loss monitoring system and experiments in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering,2019,178:118–130.
- [24] 赵超凡. 玉米液态追肥除草机设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2021.
ZHAO Chaofan. Design and experiment of liquid topdressing and weeding machine for maize[D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [25] 高连兴,郑世妍,陈瑞祥,等. 喂入辊轴流滚筒组合式大豆种子脱粒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(1):112–118.
GAO Lianxing,ZHENG Shiyan,CHEN Ruixiang,et al. Design and experiment on soybean breeding thresher of double feeding roller and combined threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):112–118. (in Chinese)
- [26] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):89–96.
LIU Rui,LI Yanjun,LIU Chunxiao,et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):89–96. (in Chinese)
- [27] 燕海朋. 基于液体粪肥滴灌还田的固液分离器优化设计与试验研究[D]. 青岛:青岛农业大学,2022.
YAN Haipeng. Optimal design and experimental research of solid-liquid separator based on liquid manure drip irrigation[D]. Qingdao:Qingdao Agricultural University,2022. (in Chinese)
- [28] 张泽涵,程红胜,沈玉君,等. 注入式液体粪肥施肥铲设计及试验[J]. 农机化研究,2023,45(11):161–168.
ZHANG Zehan,CHENG Hongsheng,SHEN Yujun,et al. Design and experiment of injection liquid manure fertilizing shovel [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(11):161–168. (in Chinese)