

肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验

赵鹏飞¹, 巨晓腾¹, 杨鹏琨¹, 郑智旗¹, 黄玉祥^{1,2*}, 高筱钧¹, 史江涛³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程研究中心, 杨凌 712100;

3. 西安亚澳农机股份有限公司, 西安 710300)

摘 要: 针对传统小麦宽苗带旋耕施肥播种机存在的播深一致性差、易壅堵等问题, 该研究采用肥管与滑刀的组合设计, 将滑刀式开沟排肥管前置于宽苗带旋耕刀组工作范围间隙中, 实现了滑刀式开沟排肥管和旋耕刀组的耦合作业。通过理论分析和计算确定了滑刀式开沟排肥管刀线的基本参数、旋耕刀组的排列方式以及耦合作业原理, 并构建相应的离散元仿真模型。通过仿真试验对滑刀式开沟排肥管和肥管前置式宽苗带旋耕刀组作业效果进行了试验验证。试验表明, 终止滑切角为 40°时滑刀式开沟排肥管所受牵引阻力最小, 此外肥管前置式宽苗带旋耕刀组设计可以有效避免肥沟对播深一致性的影响, 提升播深一致性。田间试验表明, 机具前进速度 1.11 m/s 时, 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机能够实现宽苗带播种作业, 且播深合格率达 94.36%, 变异系数为 3.79%, 播深一致性表现好。此外, 肥管前置与旋耕刀的配合可以使肥料在种床形成“倒三角”空间立体分布, 有益于作物早期的养分吸收, 也进一步避免了因肥管与种子分布器间距小导致的壅堵现象, 提高了机具的通过性, 满足宽苗带小麦种植需求。研究结果可为小麦宽苗带播种装置的研发与优化提供支撑。

关键词: 农业机械; 优化; 免耕播种; 宽幅沟播; 小麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405006

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0012-10

赵鹏飞, 巨晓腾, 杨鹏琨, 等. 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 12-21. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405006 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Pengfei, JU Xiaoteng, YANG Pengkun, et al. Design and experiment of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 12-21. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405006 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

小麦是一种主要的粮食作物, 种植面积与产量均居世界之首^[1]。随着对小麦更高单产的要求, 具有植株带状均布、群体质量高和分蘖成穗率高等显著优势的宽苗带小麦匀播种植技术得到了快速的发展^[2-3]。宽苗带匀播技术中播深控制和构建适宜的种床结构是保障小麦全生长期正常生长发育的必备条件, 更是小麦增产增收的关键所在。

目前宽苗带播种主要采用肥管后置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机, 该机具首先通过旋耕刀作业形成疏松苗床后依次完成施肥、播种和镇压, 其肥料和种子颗粒通过各自的分配装置和输送管道撒入苗带中^[4]。为了保证种子可以获得良好的生长环境和稳定的生长质量, 播深一致性和平整的种床结构近年来受到大量国内外学者的广泛关注。如姜萌等^[5]设计了一种内四等分输种管间隔

输种的小麦宽苗带精量播种施肥机, 通过离散元仿真试验、台架试验与整机田间试验对机具性能进行了验证, 实现了种肥分层、种床 82 mm 宽苗带播种; 何勋等^[6]设计了种沟镇压播种装置, 利用挡板使种沟平整, 在种子下落到种沟后对种床镇压, 实现上松下紧的种床环境。郑侃等^[7]通过表土盖种装置抛土运动学明确了影响播深与稳定性的关键因素, 设计了土壤分流式宽苗带小麦播种机。LI 等^[8]从剖面调整装置、种沟深度检测技术和自动控制系统 3 个关键方面, 研究了播深稳定性对种子萌发和生长的重要性。LUO 等^[9]通过模拟不同结构种子均匀分布装置, 得到最优结构形式和相关参数, 设计优化了宽苗带种子分布装置, 以提高播种均匀性。然而上述研究尚未考虑排肥口与排种口高度差对种床平整度的影响。田间试验发现肥管后置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机会因施肥作业形成较深的肥沟, 影响种床的平整性, 进而影响播深一致性, 同时肥管与种子分布器间隙小也容易堵塞, 造成种床间距稳定性变差、耕作阻力增大等问题^[10-12]。

为此, 本研究将肥管与滑刀组合后前置, 并内嵌于带旋刀组工作范围内, 设计了肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机。以离散元仿真试验验证不同滑切角开沟器的牵引阻力和带旋刀组与滑刀式开沟排肥管不同位置对

收稿日期: 2024-05-04 修订日期: 2024-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2000405)

作者简介: 赵鹏飞, 博士生, 研究方向为现代农业装备与技术。

Email: 2022060440@nwfufu.edu.cn

*通信作者: 黄玉祥, 教授, 研究方向为现代农业装备与技术。

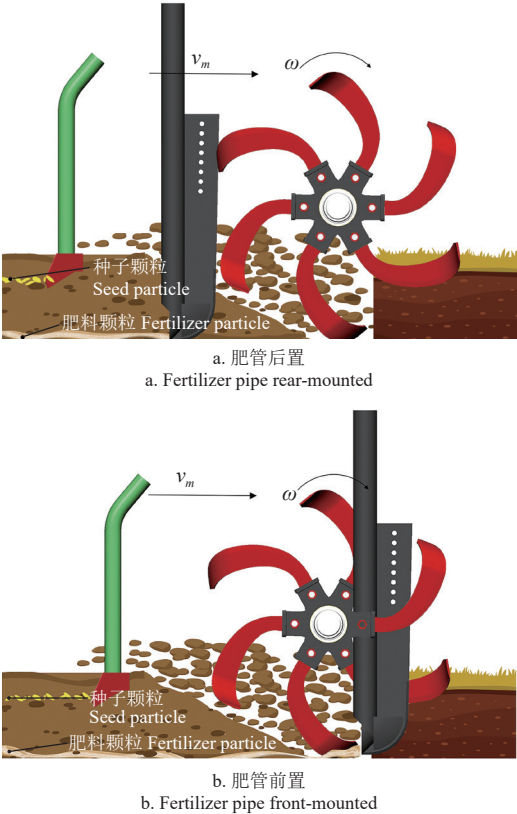
Email: hyx@nwsuaf.edu.cn

播深、种床结构等的影响规律，并开展田间对比试验，验证整机在最佳工况下的作业性能，拟为北方旱区宽苗带小麦旋耕施肥播种装备设计和优化提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

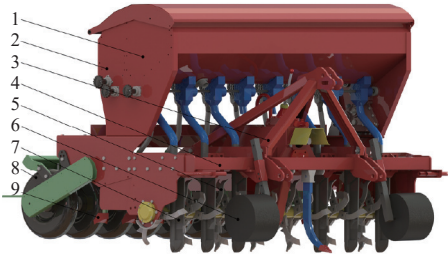
在传统肥管后置式旋耕施肥播种机中（图 1a），宽苗带播种过程中易出现肥沟，导致种床平整度变差，影响播深一致性和作物的正常生长。本研究所采用的设计方案将滑刀式开沟排肥管结构优化并前移至旋耕刀组间隙（图 1b），可以避免同位深施肥过程中肥沟的产生，形成土层厚度和松散度一致的高质量平整宽苗带种床，进而保证播种深度的一致性。此外传统肥管后置式旋耕施肥播种机排肥管和种子分布器间距较近，在秸秆覆盖较多的田间会发生壅土堵塞现象，而本研究所提方案增加了滑刀式开沟排肥管与种子分布器间距，避免壅土情况的发生。



注： v_m 为前进速度， $m\cdot s^{-1}$ ； ω 为旋耕刀角速度， $(^{\circ})$ 。
Note: v_m is forward speed, $m\cdot s^{-1}$; ω is rotary blade angular velocity, $(^{\circ})$.

图 1 旋耕刀组-滑刀式开沟排肥管配合作业示意图
Fig.1 Rotary tillage knife group-sliding knife-type ditching fertilizer pipe matching operation diagram

肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机结构如图 2 所示，主要由肥箱、种箱、三点悬挂装置、机架、旋耕刀组、滑刀式开沟排肥管、种子分布器和镇压轮等组成。种（肥）箱、排种（肥）装置和三点悬挂装置位于机架上方，旋耕刀组、刀轴、排肥管、种子分布器、镇压轮等则固定在机架下方，其主要技术参数如表 1 所示。



1.肥箱 2.种箱 3.三点悬挂装置 4.机架 5.旋耕刀组 6.仿形轮 7.滑刀式开沟排肥管 8.镇压轮 9.种子分布器
1.Fertilizer box 2.Seed box 3.Three-point linkage mounting 4.Frame 5.Rotary tillage knife group 6.Profiling wheel 7.Sliding knife-type ditching fertilizer pipe 8.Compaction wheel 9.Seed distributor

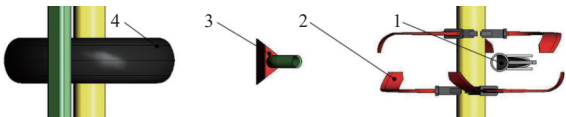
图 2 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机结构示意图
Fig.2 Structure diagram of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter

表 1 主要技术参数
Table 1 Main technical parameters

参数 Parameter	数值/形式 Numerical value/Form
外形尺寸（长×宽×高） Appearance size (length × width × height)/(mm×mm×mm)	1 930× 2 200 × 1 400
前进速度 Forward speed/($m\cdot s^{-1}$)	1.11 ~ 1.67
旋耕深度 Rotary tillage depth/mm	100 ~ 150
旋耕刀转速 Rotary blade speed/($r\cdot min^{-1}$)	280 ~ 350
作业幅宽 Working width/mm	2 000
配套动力 Matching power/kW	> 60
驱动方式 Driving mode	地轮
整机质量 Quality of the whole machine/kg	830

1.2 工作原理

在播种作业时，旋耕施肥播种机通过三点悬挂装置与配套拖拉机连接，实现牵引作业。拖拉机动力输出轴提供的动力通过变速箱强制带动旋耕刀轴回转，旋耕刀组的刀座焊接于刀轴表面随刀轴转动，实现旋耕作业。滑刀式开沟排肥管嵌于旋耕刀组间隙，滑刀式开沟排肥管外壁贴临刀轴，随着拖拉机前进的同时与旋耕刀配合将苗带土壤细碎，构建细碎种床，旋耕刀转动抛撒的土壤可以将滑刀式开沟排肥管形成的沟壑填平，以保证播种时种床的平整性。种、肥通过对应的外槽轮式排种器和排肥器从箱体排出，外槽轮式排种器和排肥器传动动力由镇压轮强制带动做回转运动，完成施肥、播种后由对行镇压轮完成压实作业，增加土壤密度，保障墒情。如图 3 所示，同一苗带的滑刀式开沟排肥管、旋耕刀组、种子分布器和镇压轮四者共线，以实现宽苗带施肥播种作业。



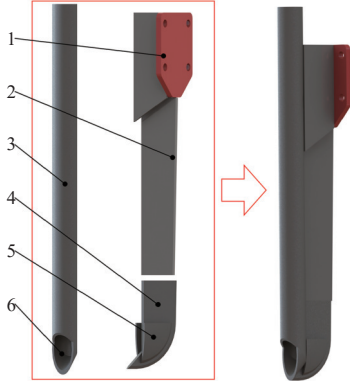
1.滑刀式开沟排肥管 2.旋耕刀组 3.种子分布器 4.镇压轮
1.Sliding knife-type ditching fertilizer pipe 2.Rotary tillage knife group 3.Seed distributor 4.Compaction wheel

图 3 苗带作业装置排布图
Fig.3 Seedling belt working device arrangement diagram

2 关键工作部件设计

2.1 滑刀式开沟排肥管

滑刀式开沟排肥管结构如图4所示,主要由固定座、加强板、肥管、滑刀和挡土板组成,滑刀位于滑刀式开沟排肥管前端,滑刀两侧焊接有挡土板并与肥管连接,其主要作用是开沟的同时压出肥沟,使肥料从排肥口直接滚落于沟底,以保证肥料分布直线性。



1.固定座 2.加强板 3.肥管 4.滑刀 5.挡土板 6.排肥口
1. Permanent seat 2. Reinforcing plate 3. Fertilization pipe 4. Slide knife 5. Retaining plate 6. Fertilizer outlet

图4 滑刀式开沟排肥管结构示意图

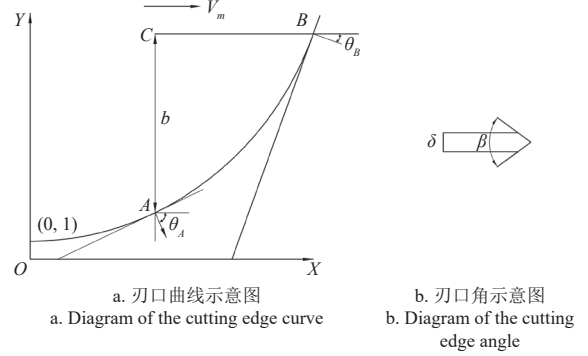
Fig.4 Structure diagram of sliding knife-type ditching fertilizer pipe

滑刀式开沟排肥管利用滑刀破土部件的刀刃以钝角开沟入土,使肥料与沟底土壤紧密接触^[13]。其结构包括两侧的挡土板、中间的滑刀和排肥口,滑刀可减小肥管开沟入土阻力和耕作阻力,两侧挡土板则可以紧实土壤,筑造沟型,保证肥料颗粒均匀撒在滑刀式开沟排肥管形成的沟型中。同时将滑刀式开沟排肥管嵌于旋耕刀组工作范围的设计可以有效提升入土性能、减少牵引阻力和排肥口壅土堵塞。但现有滑刀式开沟排肥管由多个部件焊接而成,焊接部分会增大牵引阻力,通过对滑刀式开沟排肥管开沟过程进行受力分析,设计滑刀式开沟排肥管。

在滑刀式开沟排肥管滑切入土过程中土壤会受到刀刃的挤压,在滑刀的作用下土壤发生剪切变形,土壤颗粒沿刀刃曲线向下滑移,当土壤所承受的挤压力达到破坏极限时发生剪切断裂,遭到破坏后的土壤沿刀刃的楔面滑动^[14]。已有研究表明滑刀刀所受牵引阻力与刃口曲线相关^[15],指数型函数曲线模型所受牵引阻力随着作业速度的增加增速最小^[16],为此本研究选用指数函数曲线模型,其刃口曲线和刃口角如图5所示,刃口曲线方程如式(1)所示。

$$y = (e^{(\cot\theta_B - \cot\theta_A)/b})^x \quad (1)$$

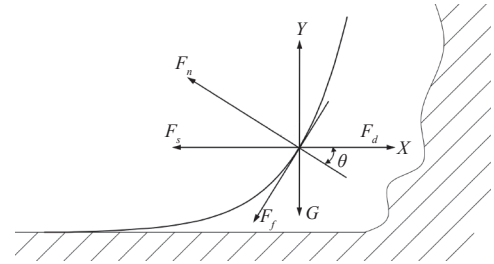
由式(1)可知,滑切曲线的形状由开沟深度 b 、终止滑切角 θ_A 和起始滑切角 θ_B 确定。开沟器的开沟深度应大于最大施肥深度,本文取 $b=100$ mm。为进一步明确滑切角的取值范围,需进行刃口曲线的受力分析。假设滑刀式开沟排肥管在土壤中所受摩擦力是定值,则刃口曲线上任意点 H 的受力分析如图6所示。



注: X 轴为刃口主平面宽度, mm; Y 轴为刃口主平面高度, mm; A 点为刃口曲线终止点; B 点为刃口曲线起始点; θ_A 为终止滑切角, ($^\circ$); θ_B 为起始滑切角, ($^\circ$); δ 为刃口宽度, mm; β 为刃口角, ($^\circ$)。
Note: X axis is the width of the main plane of the cutting edge, mm; the Y axis is the main plane height of the cutting edge, mm; A is the end point of the cutting edge curve; B is the starting point of the cutting edge curve; θ_A is the end sliding angle, ($^\circ$); θ_B is the initial sliding angle, ($^\circ$); δ is the width of the cutting edge, mm; β is the cutting edge angle, ($^\circ$).

图5 滑刀刃口示意图

Fig.5 Structure diagram of sliding-knife cutting-edge



注: F_n 为土壤对刃口的法向力, N; F_f 为土壤与刃口间的摩擦力, N; F_s 为土壤对刃口的切向阻力, N; F_d 为机具对滑刀式开沟排肥管的拉力, N; G 为滑刀式开沟排肥管的重力, N; θ 为滑切角, ($^\circ$)。
Note: F_n is the normal force of the soil on the cutting edge, N; F_f is the friction force between the soil and the cutting edge, N; F_s is the tangential resistance of the soil to the cutting edge, N; F_d is the pulling force of the plant on the furrow opener, N; G is the gravity of the sliding knife-type ditching fertilizer pipe, N; θ is the sliding-cutting angle, ($^\circ$).

图6 滑刀式开沟排肥管受力分析

Fig.6 Force analysis of sliding knife-type ditching fertilizer pipe

由图6可得:

$$\begin{cases} F_s + F_n \cos \theta + F_f \sin \theta = F_d \\ F_n \sin \theta = G + F_f \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$F_f = \mu F_n \quad (3)$$

式中 μ 为土壤与滑刀式开沟排肥管的摩擦系数。

由式(2)可知,当机具前进速度一定时,机具对滑刀式开沟排肥管的拉力 F_d 可视为定值,切向阻力 F_s 、摩擦力 F_f 和法向力 F_n 与土壤和滑刀式开沟排肥管的特性相关,滑切角是影响牵引阻力的关键参数。其中起始滑切角 θ_B 与土壤扰动情况相关,若 θ_B 过小则会增大土壤扰动,影响开沟效果, θ_B 应大于滑刀式开沟排肥管与土壤之间的摩擦角 φ ,在旱田土壤中摩擦角 φ 一般为 23° ^[17],所以本研究中 $\theta_B > 23^\circ$;终止滑切角 θ_A 直接影响牵引阻力,若 θ_A 过大则无法满足滑切条件,同时 $90^\circ - \theta_A$ 应大于摩擦角 φ ,所以本研究中 θ_A 取值范围介于 $23^\circ \sim 67^\circ$ 。为进一步探寻刃口曲线和刃口角对工作阻力的影响规律,

等差选取 θ_A 为 40° 、 50° 和 60° 。结合破土部件终止滑切角与刃口角的取值, 设计不同结构参数的滑刀式开沟排肥管, 并应用 SolidWorks 软件建立三维模型, 如图 7 所示。

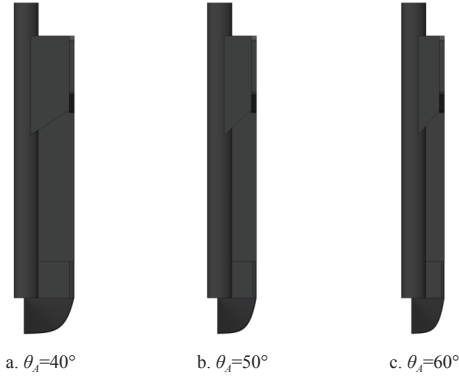


图 7 滑刀式开沟排肥管不同结构参数的三维模型

Fig.7 Three-dimensional model of different structural parameters of sliding knife-type ditching fertilizer pipe

2.2 带旋装置设计

宽苗带播种作业中要求尽可能减小土壤扰动并保证良好的种床条件, 旋耕刀作业方式有正旋和反旋两种类型, 结合机具结构和功能, 旋耕装置需配合滑刀式开沟排肥管作业, 受限于排肥管排肥口的情况, 本文选用正旋旋耕方案^[17-19]。已有研究表明正旋作业方式切土节距较小, 在作业过程中地表秸秆受旋耕刀作业先挤压入土, 随后与耕层土壤一起被翻抛于地表, 可以形成土壤细碎的种床结构, 同时秸秆具有良好的地表覆盖率^[20-21]。结合耕深 100 mm 的作业需求, 本设计选用国标 IT245 旋耕刀。

根据旋耕刀正旋作业的运动特性, 旋耕刀在时间 t 内刀刃端点的运动方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_m 为机具前进速度, m/s; ω 为旋耕刀角速度, $(^\circ)$; R 为旋耕刀片回转半径, mm。

为保证良好的灭茬碎土效果, 旋耕刀作业轨迹应为余摆线, 其中要求刀辊的转动速度与机具前进速度的比值 λ 大于 1, 此外该宽苗带滑刀式开沟排肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机在旋耕作业后直接播种, 并利用旋耕抛送的土壤对种子进行覆土, 因此对土壤细碎质量要求较高, 选择切土节距 S 为 70 mm, 则单个切土小区旋耕刀数量 L 为

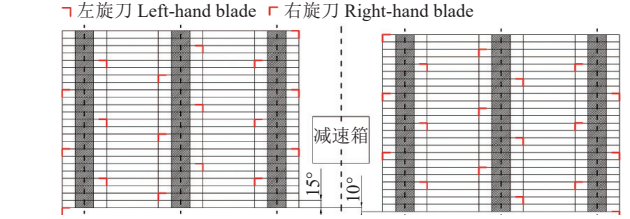
$$L = \frac{60\,000v_m}{nS} \quad (5)$$

式中 n 为旋耕刀转速, r/min。

由式 (5) 可知, 当机具前进速度取 1.11 m/s、旋耕刀轴转速为 300 r/min 时, 同切土小区内旋耕刀数量 L 为 3。即每个刀盘上安装 3 把旋耕刀, 相邻刀片夹角取 120° 。旋耕刀采用中间传动的驱动方式, 刀轴选用 80 mm 的空心钢管。为保证带旋两侧受力均衡, 采用对称螺旋线排布方式^[22], 以齿箱为中心对称, 保证机具作

业的稳定性, 左右刀辊各安装旋耕刀总数为 18 把, 排列示意图如图 8 所示, 其单个网格的宽度为 15° , 初始位置安装角度差 ψ 为 10° , 计算公式如式 (6)。

$$\psi = \frac{180^\circ}{L} \quad (6)$$



注: 虚线为中心线, 阴影部分为肥管安装间隙。

Note: The dotted line is the center line, and the shadow part is the fertilizer pipe installation gap.

图 8 旋耕刀组排列示意图

Fig.8 Diagram of rotary blade group arrangement

2.3 凸面镇压轮设计

凸面镇压轮可以在播种后使种子和土壤接触更加紧密, 同时压实的土壤畦面可以减小宽苗带种床孔隙度, 增强土壤毛细管效应, 实现调水保墒功能, 保障种子的发芽和生长。由农业机械设计手册得知镇压轮正常转动满足^[23]:

$$R_z \geq \frac{w_r + w_p}{Q \cdot f} \quad (7)$$

式中 R_z 为镇压轮半径, m; w_r 为轴套中的摩擦力矩, N·m; w_p 为带动排肥、排种部件所消耗的传动力矩, N·m; Q 为镇压轮重力及其附加载荷, N; f 为土壤对镇压轮的摩擦系数。

其中轴套摩擦力矩可以忽略不计, 为了使其有较大翻越性, 增大土壤的压碎率, 减少土壤的移动, 保障播种后种行较平整, 覆土一致, 将镇压轮直径设计为 450 mm。

3 仿真试验

为了验证滑刀式开沟排肥管前置对种床整备的影响规律, 应用离散元分析软件 EDEM 构建仿真模型, 在宽苗带播种中每个苗带的作业模式相同, 均为旋耕施肥后播种的过程, 为了简化模型, 取单个宽苗带旋耕刀组和滑刀式开沟排肥管进行仿真试验, 探寻旋耕刀组和滑刀式开沟排肥管的交互作用对种床平整性影响规律。

3.1 仿真设置与参数

土壤接触模型由离散元模型 EDEM 软件建立, 接触模型的土壤参数以西北农林科技大学旱区试验田为依据, 该试验田为壤土类型, 属于黄土母质, 具有重壤质的特征, 密度为 $1\,510\text{ kg/m}^3$, 湿基含水率约为 11.7%, 是陕西地区典型的农业土壤。土壤颗粒间接触模型使用 Hertz-Mindlin with bonding 模型, 土壤与工作部件间使用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型, 土壤颗粒选用 8 mm 的球形颗粒, 秸秆颗粒使用 Meta-Particle 功能组合成 108 mm (长) × 4 mm (粗) 的细长秸秆模型。最终建立 1 500 mm

(长)×500 mm(宽)×180 mm(高)的土槽模型,并将 SolidWorks 软件构建的三维模型导入 EDEM,相应仿真参数通过文献[24–26]获得,其中田间作物收货后的残茬以秸秆颗粒模型表示,旋耕刀组、肥管等触土部件的材料以钢材料代替。则土壤、秸秆和钢的泊松比分别为 0.40、0.40、0.30,密度分别为 1770、241、7850 kg/m³,剪切模量分别为 2.80×10⁷、1.00×10⁶、7.90×10¹⁰ Pa。具体模型接触参数如表 2 所示。

表 2 模型接触参数

Table 2 Contact parameters of model

参数 Parameter	数值 Value
土壤-土壤恢复系数 Soil-soil recovery coefficient	0.38
土壤-土壤静摩擦因数 Soil-soil static friction coefficient	0.48
土壤-土壤动摩擦因数 Soil-soil dynamic friction coefficient	0.28
土壤-秸秆恢复系数 Soil-straw recovery coefficient	0.50
土壤-秸秆静摩擦因数 Soil-straw static friction coefficient	0.50
土壤-秸秆动摩擦因数 Soil-straw dynamic friction coefficient	0.05
土壤-钢恢复系数 Soil-steel recovery coefficient	0.42
土壤-钢静摩擦因数 Soil-steel static friction coefficient	0.48
土壤-钢动摩擦因数 Soil-steel dynamic friction coefficient	0.22
秸秆-钢恢复系数 Straw-steel recovery coefficient	0.30
秸秆-钢静摩擦因数 Straw-steel static friction coefficient	0.30
秸秆-钢动摩擦因数 Straw-steel dynamic friction coefficient	0.01
法向刚度系数 Normal stiffness coefficient/(N·m ⁻³)	2.40×10 ⁷
切向刚度系数 Tangential stiffness coefficient/(N·m ⁻³)	1.70×10 ⁷
法向临界应力 Normal critical stress/Pa	2.35×10 ⁵
切向临界应力 Tangential critical stress/Pa	1.86×10 ⁵
粘结半径 Bonding radius/mm	4.40

3.2 仿真方法

本文主要针对宽苗带小麦播种中滑刀式开沟排肥管前置对种床结构和播种质量的研究,综合宽苗带小麦种床平整度、播深一致性和高通过性的农艺要求,对比 3 种不同滑切角开沟器的牵引阻力明确最佳终止滑切角,随后以种、肥分布情况和播深一致性探究肥管前置式宽苗带旋耕刀组的作业效果。

在 EDEM 软件中设定网格尺寸为最小颗粒半径的 3 倍,土壤颗粒和秸秆颗粒分别由不同工厂生成,本研究仿真共生成 290 044 个土壤颗粒和 660 个秸秆,仿真模型如图 9 所示。为更精确地掌握土壤运动状态,本研究不使用动态计算域。由于试验需要多次重复保证每次仿真试验中土槽结构的一致性,本研究将仿真过程分为土槽模型生成阶段和导入三维模型的试验阶段。

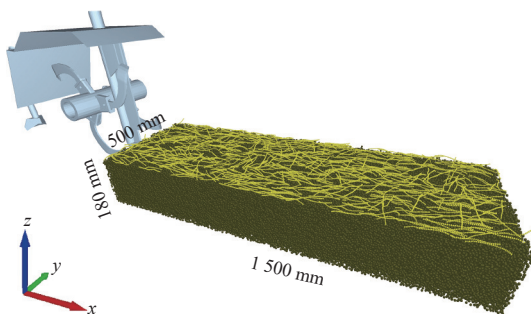


图 9 仿真试验模型

Fig.9 Simulation experiment model

土槽模型生成阶段即仿真 0~3 s 生成土壤颗粒,然

后待土壤颗粒稳定后开始生成秸秆颗粒,当秸秆颗粒与土壤颗粒的最大速度都小于 0.001 m/s 时表示土槽模型完成。随后利用 EDEM 软件后处理中模型输出功能,将稳定的土槽模型输出为固定模板,并设置仿真初始时间为 0,最后以此土槽模型为初始条件导入试验对应的三维模型进入试验阶段。设置旋耕深度 100 mm,旋耕刀转速 300 r/min,机具前进速度 1.11 m/s,同样以秸秆颗粒和土壤颗粒的最大速度都小于 0.001 m/s 时表示仿真试验完成。仿真过程中仿真步长设定均为 8.83×10⁻⁶ s,数据保存时间均为 0.01。

相关试验结果数据均通过 EDEM 软件后处理功能中 Analyst 模块实现数据提取,滑刀式开沟排肥管在仿真过程中主要承受水平方向的牵引阻力为主,故提取滑刀式开沟排肥管作业过程中的牵引阻力数值。在种、肥分布的试验中以颗粒的空间三维坐标进行分析,故分别提取种、肥颗粒的三维坐标,为了进一步分析肥管前置和后置的区别,采用变异系数对种子播深一致性进行计算,其计算式分别为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N K_i}{N} \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_i - K)^2}{N}} \quad (9)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{K} \times 100\% \quad (10)$$

式中 N 为试验采集数量; K 为播种深度平均值, mm; K_i 为 i 点的播深, mm; σ 为标准差; C_v 为变异系数, %。

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 滑刀式开沟排肥管仿真结果

EDEM 后处理器可以获取相关试验数据,Analyst 模块获取滑刀式开沟排肥管在工作时间内的牵引阻力数据如图 10 所示。

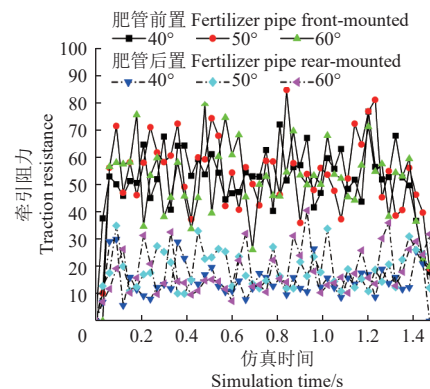


图 10 滑刀式开沟排肥管牵引阻力-时间曲线

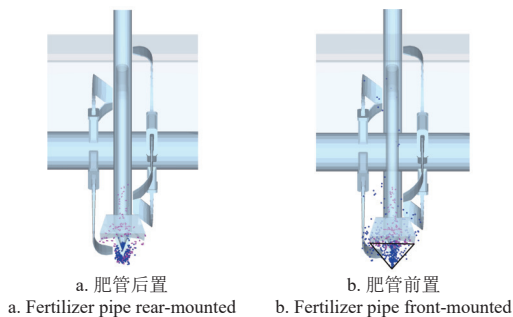
Fig.10 Traction resistance-time curve of sliding knife-type ditching fertilizer pipe

由图 10 可知,牵引阻力随仿真时间呈现先增加后在一定区间波动的趋势,这与滑刀式开沟排肥管由入土到

平稳作业息息相关,最后牵引阻力随着滑刀式开沟排肥管离开土壤归零。通过对比可知,开沟器的前置所承受牵引阻力明显大于开沟器后置,前置式开沟器直接作业于未旋耕土壤接触,而后置式开沟器作业于松软的旋耕土壤,所以前置式开沟器所承受的牵引阻力较大。此外在滑刀式开沟排肥管平稳作业过程中,不同滑切角开沟器所受牵引阻力变化趋势存在差异,其中 40° 、 50° 、 60° 终止滑切角开沟器在前置时所受平均牵引阻力分别为48.27、51.44、50.66 N,后置时不同开沟器所受牵引阻力分别为14.06、18.09、17.89 N。在实际生产中以牵引阻力最小为最佳,故本研究选取终止滑切角为 40° 。

3.3.2 种、肥分布情况

滑刀开沟器前后位置为1.4 s时种、肥在YZ平面的分布情况如图11所示。

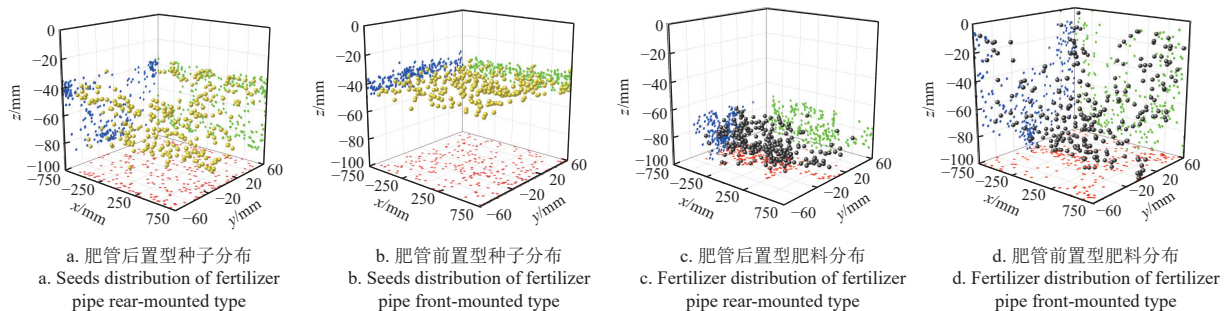


注:紫色为种子颗粒,蓝色为肥料颗粒。
Note: Purple is seed particles, and blue is fertilizer particles.

图 11 不同工况仿真对比

Fig.11 Simulation comparison of different working conditions

由图11可知,滑刀式开沟排肥管后置型小麦旋耕施



注:各个平面的数据为对应颗粒的投影。
Note: The data of each plane is the projection of the corresponding particles.

图 12 颗粒分布三维图

Fig.12 Three-dimensional diagram of particle distribution

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证 EDEM 仿真试验结果的准确性及肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机的实际作业性能,基于仿真试验结果与滑刀式开沟排肥管的最优结构参数完成样机加工和装配,并在西北农林科技大学旱区节水农业研究所试验田进行田间作业性能测试,同时与亚澳农机生产的肥管后置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机进行对比试验。

肥播种机部分种子会落入肥沟中,影响后续种子播深一致性,而滑刀式开沟排肥管前置型结构则避免了肥沟的产生,播深一致性较好。此外滑刀式开沟排肥管后置型结构所施加的肥料位于种床下端,肥料结构类似于同位深施肥,而滑刀式开沟排肥管前置型结构施加的肥料在旋耕刀作用下与种床土壤混合,实现肥料颗粒在种床中“倒三角”型空间立体分布,更有利于早期根系对养分的吸收^[27]。

3.3.3 颗粒分布情况

为进一步明确肥料颗粒和种子颗粒在种床的分布情况,利用 EDEM 后处理功能将仿真完成后颗粒坐标导出,并绘制三维坐标图,如图12所示。坐标原点为土槽模型的地表平面的中心,故长度 x 方向坐标区间与土槽长度一致,取 $-750\sim 750$ mm,宽度 y 方向坐标区间与排种口宽度一致,取 $-60\sim 60$ mm,深度 z 方向坐标区间与开沟深度一致,取 $-100\sim 0$ mm。

由图12a、12b可知,相较于滑刀式开沟排肥管后置型小麦宽苗带旋耕施肥播种机,滑刀式开沟排肥管前置型在小麦播种中可以保证更好的播深一致性,能满足播深 $30\sim 50$ mm的有效控制,其播深变异系数为7.63%,而滑刀式开沟排肥管后置型受肥沟的影响,部分种子落入肥沟,降低了种子播深一致性,其变异系数为36.87%,可见采用本研究所提方法可以有效保证播深一致性。同时由图12c、12d可知,滑刀式开沟排肥管前置于旋耕刀间隙时,滑刀式开沟排肥管排出的肥料颗粒会随土壤一同受到旋耕刀的抛撒作业,实现在肥料颗粒在种床的空间立体分布,而滑刀式开沟排肥管后置型肥料则集中分布于肥沟。

试验田土壤平均含水率为22%,紧实度为1 130 kPa,秸秆量为 1.32 kg/m^2 。试验设备包括铁牛 TTL1004 型拖拉机、肥管后置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机、肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机、土壤坚实度仪(Spectrum SC900 美国光谱科技有限公司)、土壤含水率仪器(浙江托普云农科技股份有限公司、精度 $\pm 3\%$)、环刀、米尺(100 m)、直尺(200 mm)、小麦种子(陕西隆丰种业有限公司、千粒质量46 g)和肥料,图13为播种机田间试验现场。



图 13 小麦宽苗带旋耕施肥播种机田间试验

Fig.13 Field experiment of wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter

4.2 试验指标与方法

播种作业性能试验标准参照农业机械推广鉴定大纲《DG/T 027-2019 旋耕播种机》和《GB/T 20865-2017 免(少)耕施肥播种机》，分别以肥管前置式和后置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机进行播种试验，选取往返行程中前进速度达 1.11 m/s 的稳定作业区间进行数据采集，将苗宽及播种均匀性、播种深度合格率和耕作深度等作为肥管前置式播种机性能的评价指标。

4.2.1 播种均匀性

在作业区间交错选定 6 个宽苗带，依次在 6 个苗带截取 10 段长 200 mm 检测区间，分别记录苗带宽度与检测区间内种子的数量。所有取样区域种子数量的总和记为 T ，取样区域总数记为 U ，均匀性指标采用变异系数计算，变异系数越小，说明均匀性越好。

$$W = \frac{T}{U} \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - W)^2}{n}} \quad (12)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{W} \times 100\% \quad (13)$$

式中 W 为平均种子数量； T_i 为第 i 个取样区域的种子数量。

4.2.2 播种深度合格率

在作业区间交错选定 6 个宽苗带，每个宽苗带区间取 20 个检测点。播种覆土后，扒开土层，测定并记录覆盖土层的厚度，覆盖土层厚度介于 30~50 mm 之间则表示播种深度合格，记为 N' 。其他计算方法和仿真试验中播深合格率 D (%) 计算方法一致。

$$D = \frac{N'}{N} \times 100\% \quad (14)$$

式中 D 为播深合格率，%。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 播种均匀性

本研究采用了排种口宽 120 mm 的种子分布器进行排种，无论肥管前置还是后置型旋耕播种机，苗带宽度

与种子分布器排种口宽度一致。故单检测区间苗带宽度可视为定值，则田间播种均匀性试验结果如表 3 所示，单检测区间种子数量实测值在 24 粒附近，相较于目标值 22 粒略高，总体变异系数小于 10.00%。但在田间作业中，种子分布器与土壤颗粒直接接触并碰撞，影响排种口种子的有序均匀排出，较多的碰撞导致播种均匀性变差，且肥管前后位置影响较小，出苗结果如图 14 所示。

表 3 种子分布均匀性试验结果

肥管类型 Type of fertilizer pipe	平均值 Mean value		标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation /%
	实测 Measured	目标 Targeted		
后置 Rear-mounted	25	22	2.39	9.71
前置 Front-mounted	24	22	2.08	8.63

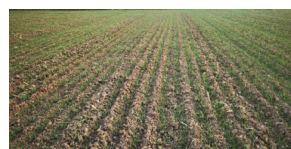
a. 20天
a. 20 dayb. 40天
b. 40 day

图 14 不同生长时长的田间试验小麦出苗情况

Fig.14 Wheat emergence of field experiment with different grow time

4.3.2 播种与施肥深度

播种深度结果如表 4 所示，肥管后、前置型旋耕施肥播种机种子平均深度分别为 61.08、41.85 mm。肥管前置型旋耕施肥播种机播深合格率和一致性更好，播种深度平均值符合农艺要求的 30~50 mm 区间，其中肥管前置型种子播深合格率为 94.36%，变异系数也远低于肥管后置型的 18.79%，仅为 3.79%，且田间试验结果与仿真试验结果基本吻合。由施肥深度的统计结果发现，肥管后置型施肥方案施肥深度仅受滑刀式开沟排肥管的影响，肥管前置型施肥方案受旋耕刀影响，部分肥料颗粒会被抛送至种床不同深度形成空间立体施肥。

表 4 种、肥深度测定结果

肥管类型 Type of fertilizer pipe	种类 Type	平均深度 Average depth/mm	合格率 Qualification rate/%	变异系数 Coefficient of variation/%
后置 Rear-mounted	种子	61.08	64.26	18.79
	肥料	87.82	—	8.50
前置 Front-mounted	种子	41.85	94.36	3.79
	肥料	60.56	—	27.11

4.3.3 其他指标

除上述关键评价指标外，对作业标准中的其他相关指标也进行了对比试验，两种类型机具均可以实现稳定的 100 mm 耕深，耕深稳定性系数大于 94.00%，平均碎土率大于 93.73%，但宽苗带肥管前置式旋耕施肥播种机秸秆覆盖率和地表平整度指标相较于传统肥管后置式旋耕施肥播种机变差，因为宽苗带旋耕播种机作业过程中只对苗带部分进行了旋耕作业，传统肥管后置旋耕播种

机则对全部作业区域进行旋耕作业。此外在 60 m 的防堵性能试验中发现本研究试制机型具有更好的防堵效果, 这是因为肥管前置加大了肥管与种子分布器的间距, 有效避免了类似肥管后置式旋耕施肥播种机因肥管与种子分布器间距导致的壅堵现象, 同时旋耕刀对肥管出现的壅堵可以进行有效清理, 田间秸秆等杂物也在作业过程中被旋耕刀从苗带清理, 进一步避免了壅堵现象, 提高了机具作业通过性。

5 结 论

提出了肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计方案, 通过理论分析和指数函数曲线模型确定了滑刀开沟式排肥管结构, 探究了旋耕装置的排布方案和旋耕刀-肥管配合作业原理。得出以下主要结论:

1) 通过 EDEM 仿真对比了不同滑刀开沟式排肥管的牵引阻力, 确定最佳终止滑切角为 40° 。由种、肥颗粒不同工况分布对比图和三维分布图可知, 相较于肥管后置型播种机, 肥管前置型播种机可以保证更好的播深一致性, 能满足播深 30~50 mm 的有效控制, 其播深变异系数为 7.63%, 而肥管后置型易受肥沟的影响, 其变异系数为 36.87%, 即肥管前置可以有效防止肥沟对播深一致性的影响, 保证了播深一致性。

2) 田间试验结果表明肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机能够实现 120 mm 的宽苗带播种作业, 且播深合格率达 94.36%, 变异系数仅为 3.79%, 播深一致性表现良好, 与仿真结果一致。此外, 肥管前置与旋耕刀的配合可以使肥料在种床形成“倒三角”空间立体分布, 有益于作物早期的养分吸收, 也进一步避免了因肥管与种子分布器间距导致的壅堵现象, 提高了机具的通过性。

【参 考 文 献】

- [1] 宫健. 宽苗带混播对不同品种小麦光合特性及产量的影响[D]. 青岛: 山东农业大学, 2021.
GONG Jian, Effects of Mixed Sowing on Photosynthetic Characteristics and Yield in Wheat of Different Variety[D]. Qingdao: Shandong Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [2] 于慧玲, 阚茗溪, 徐哲莉, 等. 匀播和条播小麦产量及干物质积累对春季灌水量的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(10): 2833-2844.
YU Huiling, KAN Mingxi, XU Zheli, et al. Yield and dry matter accumulation of wheat in response to spring irrigation water in uniform sowing and strip sowing[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(10): 2833-2844. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孔令英, 赵俊晔, 张振, 等. 宽幅播种下基本苗密度对小麦旗叶光合特性及叶片和根系衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 107-113.
KONG Lingying, ZHAO Junye, ZHANG Zhen, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics of flag leaf and senescence of leaf and root under wide-width sowing condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘运景, 郑飞娜, 张秀, 等. 宽幅播种对强筋小麦籽粒产量、品质和氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(3): 716-725.
LIU Yunjing, ZHENG Feina, ZHANG Xiu, et al. Effects of wide range sowing on grain yield, quality, and nitrogen use of strong gluten wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(3): 716-725. (in Chinese with English abstract)
- [5] 姜萌, 刘彩玲, 魏丹, 等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 53-62.
JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- [6] 何勋, 张景凤, 张润, 等. 小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 18-29.
HE Xun, ZHANG Jingfeng, ZHANG Run, et al. Development of the seed-ditch compaction device for wide-boundary sowing wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(18): 18-29. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑侃, 刘国阳, 国立伟, 等. 土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 128-138.
ZHENG Kan, LIU Guoyang, GUO Liwei, et al. Design and experiment of wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 128-138. (in Chinese with English abstract)
- [8] LI H, HE J, WANG C, et al. Research progress on the development of the planter unit for furrowing control and the depth measurement technology[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13: 11884.
- [9] LUO W W, CHEN X L, QIN M Y, et al. Design and experiment of uniform seed device for wide-width seeder of wheat after rice stubble[J]. Agricultural-Basel, 2023, 13: 2173.
- [10] 祝清震, 武广伟, 朱志豪, 等. 冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 25-35.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, ZHU Zhihao, et al. Design and test on winter wheat precision separated layer fertilization and wide-boundary sowing combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 25-35. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王磊. 油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
WANG Lei. Design and Experiment on Broad Width and High Speed Air-Assisted Planter for Rapeseed and Wheat[J]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)

- [12] 宋德平, 李伟, 李明军, 等. 小麦高低畦宽苗带播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 1-6.
SONG Deping, LI Wei, LI Mingjun, et al. Design and experiment of wheat high-low-border wide seedling belt planter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [13] 苟金保. 免耕播种机渐开线侧深施肥开沟器设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
GOU Jinbao. Design and Test of Furrow Opener for Deep Fertilizing at Involute Side of No-tillage Seeder [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [14] 贾洪雷, 郑嘉鑫, 袁洪方, 等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 16-24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 16-24. (in Chinese with English abstract)
- [15] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38-42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38-42. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨秀丽, 陈彬, 邢航, 等. 滑刀开沟-气力引射式液肥雾化侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 13-25.
YANG Xiuli, CHEN Bin, XING Hang, et al. Design and experiments of the side-deep fertilization device with sliding-knife furrow opener and pneumatic ejector for a liquid fertilizer atomizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 13-25. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李蒙良, 王立宗, 廖庆喜, 等. 油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 10-19.
LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(20): 10-19. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郝志豪, 郑恩来, 李勋, 等. 免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 1-13.
HAO Zhihao, ZHENG Enlai, LI Xun, et al. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王志伟. 小麦深松宽苗带免耕播种机研制及关键部件设计[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
WANG Zhiwei. Development and Key Components Design of Wheat Subsoiling Broad Seedlings and No-tillage Planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 71-78.
DING Tianyu, GUO Zichun, QIAN Yongqi, et al. Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil (Vertisol)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 71-78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 叶伟伟. 双轴旋耕施肥贴地宽带播种复式作业机设计及试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
YE Weiwei. Design and Experimental Study of Double-axis Rotary Tillage Fertilization and Ground Wideband Seeding Compound Operation Machine[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵淑红, 谭贺文, 王加一, 等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58-67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张孝安. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 李旭东, 臧家俊, 高翔, 等. 果园秸秆覆盖机宽幅覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 70-78, 120.
LI Xudong, ZANG Jiajun, GAO Xiang, et al. Design and test of broad soil-covering device for orchard straw mulching machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 70-78, 120. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张仕林, 黄玉祥, 赵宏波, 等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 40-52.
ZHANG Shiling, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of combined cutting and throwing Anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 40-52. (in Chinese with English abstract)
- [26] HOU S Y, ZHU Y F, ZHU X X, et al. Design and experiment of a straw clearing mulching no-tillage planter[J]. Biosystems Engineering, 2022, 221: 69-80.
- [27] 高丽萍, 陈慧, 刘嘉诚, 等. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 87-97.
GAO Liping, CHEN Hui, LIU Jiacheng, et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root

architecture and lodging resistance of rape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions

of the CSAE), 2023, 39(11): 87-97. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter

ZHAO Pengfei¹, JU Xiaoteng¹, YANG Pengkun¹, ZHENG Zhiqi¹, HUANG Yuxiang^{1,2✉},
GAO Xiaojun¹, SHI Jiangtao³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling 712100, China;

3. Xi'an Yaa Agricultural Machinery Co., Ltd, Xi'an 710300, China)

Abstract: Sowing depth and simple blockage can limit the traditional planters in the wheat wheat-wide seedling belt during rotary tillage. In this study, the combination design was adopted with the fertilizer pipe and slide knife-type ditching. The slide knife-type ditching and fertilizer pipe were situated at the front-mounted of the working range gap of the wide seedling belt rotary tillage knife group. The coupling operation was realized for the slide knife-type ditching fertilizer pipe and rotary tillage knife group. Among them, the slide knife-type ditching and fertilizer pipe, rotary tillage knife group, seed distributor, and compaction wheel of the same seedling belt were collinear to create a wide seedling belt fertilization and sowing mode. The fundamental parameters were calculated for the blade line of the slide knife-type ditching fertilizer pipe and the arrangement of the rotary tillage knife group. An exponential function curve was fitted for the blade line, with a working depth of 100 mm. The rotary tillage knife group was featured by a symmetrical spiral arrangement with three rotary blades ($L = 3$) within the same soil soil-cutting area. In addition, the theoretical analysis was also carried out on the principle of cooperation between the slide knife-type ditching fertilizer pipe and the rotary tillage knife group. The discrete element simulation model was constructed to explore the traction force resistance of different slide knife-type ditching fertilizer pipes in the seedbed over time. A systematic investigation was made to clarify the influence of the relative position of the slide knife-type ditching fertilizer pipe and the rotary tillage knife group on the indexes, such as seedbed and sowing depth. The simulation results showed that there was the smallest resistance of 40° slide knife-type ditching fertilizer pipe. The front-mounted fertilizer pipe and rotary tillage knife group were combined to effectively avoid the influence of the fertilizer ditch on the consistency of sowing depth in the wide seedling belt. The field experiment was carried out with reference to the performance experiment standard of sowing operation. The experiment demonstrated that the new planter was better performed to realize the wide seedling belt sowing, when the forward speed of the machine was 1.11 m/s. The bBetter performance was achieved in the uniform sowing and a highly qualified rate of sowing depth, compared with the traditional planter. The qualified rate of sowing depth was 94.36%, while the coefficient of variation was 3.79%, indicating the excellent sowing. The front-mounted fertilizer pipe and the rotary tillage knife group were combined to form an 'inverted triangle' spatial pattern of three-dimensional distribution in the seed bed. This was also beneficial to the early nutrient absorption of the crop. The blockage was further avoided to cause by the small spacing between the fertilizer pipe and the seed distributor. The high passing was fully met the requirements for the wide seedling belt wheat planting. The findings can provide the support to optimize the wheat sowing device in the wide seedling belt.

Keywords: agricultural machinery; optimization; no-tillage planter; wide-seedbed seeding; wheat