doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.003

麦后直播棉联合耕整播种机垄体成型装置设计与试验

廖　青[1]　宋　悦[1]　丁幼春[1,2]　董万静[1,2]　魏　松[1]　黄　强[3]

(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070;
3.荆州市农业科学院,荆州 434000)

摘要:针对长江流域麦后棉耕整、播种模式中的农机装备急缺现状,提出一种旋耕灭茬、起垄和精量播种多功能于一体的联合作业模式,并设计了垄体成型装置(起垄装置主要包括船式起垄侧板、仿形上垄板、仿形上垄板连接机构和整型辊)。首先测试了长江中下游地区麦茬、土壤、旋耕刀的力学参数,并建立了离散元仿真模型;其次基于离散元仿真中旋耕机的抛撒情况,以降低土壤-部件间的磨损为目标,分别设计了船式起垄侧板和仿形上垄板,并根据力学分析和垄体农艺要求设计了仿形上垄板连接结构和整型辊;进而以离散元法-多体动力学耦合仿真的技术方法对所设计的垄体成型装置进行仿真验证,与此同时提出磨损寿命计算方法,耦合仿真结果表明,船式起垄侧板最低磨损寿命预测值为 2 577.8 h,垄体成型装置成垄稳定性系数为 98.4%;最后进行田间试验,田间试验与耦合仿真试验磨损位置一致,最低磨损寿命为 2 430 h,与仿真相差 5.7%,垄体成型装置成垄稳定性系数为 92.26%,与仿真相差 6.2%。后期田间出苗效果满足长江流域麦后棉花直播作业要求。本研究方法可为起垄装置、触土部件的设计与优化提供理论支撑与参考。

关键词:麦后棉;垄体成型装置;船式起垄侧板;仿形上垄板;磨损

中图分类号:S222.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0034-11　　**OSID**:

Design and Test of Ridge Forming Device for Combined Tillage and Sowing Machine for Post-wheat Direct-seeded Cotton

LIAO Qing[1]　SONG Yue[1]　DING Youchun[1,2]　DONG Wanjing[1,2]　WEI Song[1]　HUANG Qiang[3]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*
3. *Jingzhou Academy of Agricultural Sciences*, *Jingzhou* 434000, *China*)

Abstract: Aiming to address the shortage of agricultural machinery in the cotton cultivation and sowing mode of wheat in the Yangtze River basin, a combined operation mode integrating rotary tillage, stubble removal, ridge formation and precision sowing was proposed, and a ridge forming device (which mainly included boat-type side plate, contour-mimicking ridge plate, contour-mimicking ridge plate connecting mechanism and shaping roller) was designed. Firstly, the mechanical parameters of wheat stubble, soil and rotary tiller were tested in the middle and lower reaches of Yangtze River, and the discrete element simulation model was established. Secondly, based on the throwing situation of rotary tiller in the discrete element simulation, the boat-type ridge side plate and the contour ridge plate were designed respectively to reduce the wear between soil and components. The discrete element method (DEM) with multi-body dynamics (MBD) coupling simulation was employed to validate the designed ridge-forming device. A wear life calculation method was also proposed. The coupling simulation results demonstrated that the minimum service life of the boat-type ridge-forming side plate was 2 577.8 h, with a ridge-forming stability coefficient of 98.4%. Field tests confirmed the wear patterns matched the simulation results, showing a minimum service life of 2 430 h (5.7% deviation from simulation) and a stability coefficient of 92.26% (6.2% deviation from simulation). Ultimately, the field emergence results met the agronomic requirements for direct cotton seeding after wheat harvest in the Yangtze River Basin. The methodology

收稿日期:2026-01-09　修回日期:2026-01-11

基金项目:湖北洪山实验室重大科研项目(2021hszd006)和湖北省棉花科技支撑计划项目(2024)

作者简介:廖青(1995—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:qing_liao163@163.com

通信作者:丁幼春(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail:kingbug163@163.com

developed thereby can provide a theoretical framework and practical reference for the design and optimization of ridge-forming devices and their soil-engaging components.

Key words: post-wheat cotton; ridge forming device; boat-type ridge forming side plate; contour-mimicking upper ridge plate; wear

0　引言

棉花作为长江流域关键经济作物，其稳产对保障区域农业经济至关重要[1-3]。该地区在棉花播种季降水量较大，土壤黏重且易渍涝。传统作业模式分为平作和垄作，平作时棉种发芽期发芽率低、幼苗期死亡率高；垄作能够通过起垄栽培抬升种植面，可提高排水效率、提高地温，有效改善种子萌发环境，促进棉花早发[4-7]。

针对起垄装备研究，国外企业多与旋耕、播种实行联合作业[8-12]，在联合作业过程中，各部件独立作业、互不干涉，并辅以智能化、自动化控制[13-14]。此外，垄作耕作对种床和出苗的影响、起垄部件结构参数对作业性能的影响等理论也在不断推陈出新[15-16]，为设备的升级更新提供理论支撑，但部件间的相互作用机理鲜有研究。国内对于垄作模式下的耕作、播种机具研究还不成熟，可靠性、疲劳耐久等环节常出现问题[17-18]，这在作业季严重影响了农业生产与效益[19]。因此学者在不断研究与开发垄作机具，起垄配合旋耕、小型起垄机具成为 21 世纪初我国在垄作机械方面的聚焦点[20-23]。但针对长江流域春季多雨、土壤性质特殊、存在麦茬等特点的起垄机具还鲜有开发。

鉴于此，本文提出一种旋耕灭茬、起垄和精量播种多功能于一体的联合作业模式，并依据旋耕性能及麦茬土壤性能设计垄体成型装置，同时采用离散元法-多体动力学耦合仿真和田间验证的技术手段对设计进行验证，以期为长江流域棉区旋耕起垄播种一体化装备的研发提供理论与技术支撑。

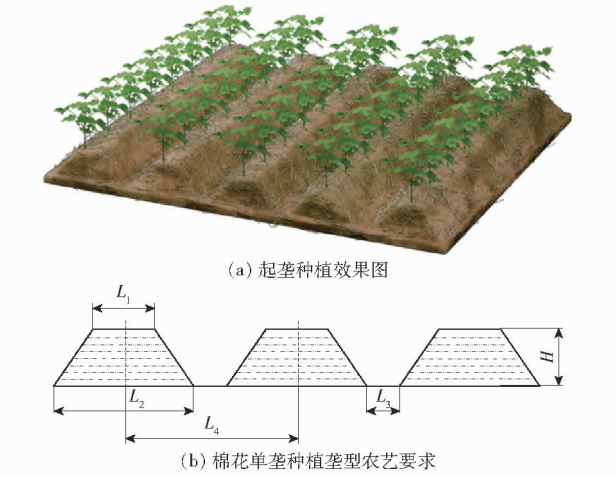
1　麦后棉起垄要求与机具作业原理

1.1　起垄农艺要求

根据田间调研，长江流域麦后直播棉起垄种植模式如图 1 所示，3 垄（3 行）为一厢，起垄高度 H = 20 cm，垄沟宽度 L_3 = 16 cm，垄面宽度 L_1 = 30 cm，垄底宽度 L_2 = 60 cm，垄距 L_4 = 76 cm，株距随种植密度在 14.6 ~ 21.9 cm 之间调整。

1.2　总体结构

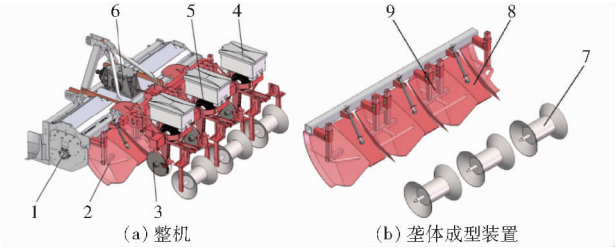
针对长江流域麦后直播棉起垄种植模式农艺要求，本文提出一种旋耕灭茬、起垄成型和精量播种多功能于一体的联合作业模式。麦后棉旋耕-起垄播种机三维图如图 2 所示，主要由旋耕灭茬装置、垄体成型装置、轻简化仿形播种单体（包括开沟器、种箱、排种器等部件）等组成。垄体成型装置位于旋耕机后方，主要由船式起垄侧板、仿形上垄板与整型辊组成。船式起垄侧板通过管结构与旋耕灭茬装置后方机架相连接，仿形上垄板通过销轴与机架相连接，整型辊置于播种单体后方，与单体机架连接固定，整机参数如表 1 所示。



(a) 起垄种植效果图　　(b) 棉花单垄种植垄型农艺要求

图 1　长江流域麦后直播棉起垄种植模式

Fig. 1　Ridge planting mode of direct seeding cotton after wheat in Yangtze River Basin



(a) 整机　　(b) 垄体成型装置

图 2　麦后棉旋耕-起垄播种机三维图

Fig. 2　Three-dimensional model diagram of wheat-cotton rotary tillage-ridge-seeding machine

1. 旋耕灭茬装置　2. 垄体成型装置　3. 开沟器　4. 种箱　5. 排种器　6. 变速箱　7. 整型辊　8. 仿形上垄板　9. 船式起垄侧板

表 1　整机参数

Tab. 1　Machine parameters

参数	数值
整机尺寸（长 × 宽 × 高）/（mm × mm × mm）	2 200 × 2 500 × 850
作业幅宽/m	2.3
作业速度/（km·h^{-1}）	3 ~ 6
配套功率/kW	≥104.4

1.3 作业原理

本文提出的麦后棉联合作业模式主要包括旋耕灭茬、起垄和精量播种。整机基于多组件沿机具前进方向协同作业,行进时,首先由位于机架机头处的旋耕灭茬部件切入未耕作的麦茬田,旋耕轴带动沿周向螺旋布置的旋耕刀高速旋转将土壤破碎为细碎颗粒,同时切断残留麦茬,形成碎土-短茬混合层。随着机具行进,旋耕灭茬后的混合土层经旋耕刀抛撒、垄体成型装置的船式起垄侧板和仿形上垄板引导,定向流向垄台;两船式起垄侧板形成渐缩式通道,对流动土壤进行聚拢挤压,同时仿形上垄板在弹性调节单元的预紧力作用下,对垄顶进行初步平整与压实,形成初步垄体。

随后进入播种作业段,四连杆机构带动开沟盘与精量播种机随地表起伏自适应浮动,开沟器在垄顶中央开出深度 25 ~ 40 mm 的种沟;同时排种器将棉花种子按 14.6 ~ 21.9 cm 株距精准播入种沟。

最后,播种后的垄体进入镇压组件作业范围,与播种单体联动的整型辊将垄肩富余土壤回填至垄顶中央凹陷区,同时镇压辊在升降部件调节下施加接地比压,对种沟进行覆土压实,使种子与土壤紧密接触,最终形成垄体作业效果,可实现垄顶无凹陷、种沟覆土均匀。整机作业原理如图 3 所示。

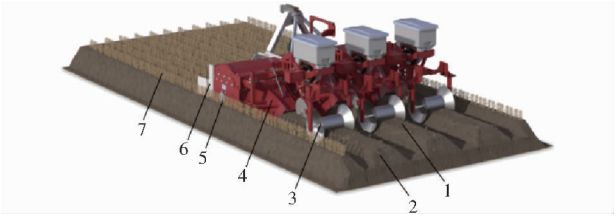


图 3 麦后棉旋耕-起垄播种机工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of post-wheat cotton rotary tillage-ridging-seeding machine

1. 穴播棉种 2. 碎秸秆 3. 整型辊 4. 垄体成型装置 5. 旋耕部件 6. 开沟前犁 7. 地面小麦秸秆

整个作业流程中,各组件沿机架长度方向依次衔接,单次进地即可完成全流程作业,有效减少土壤墒情流失,避免多次进地导致的土壤板结。

2 垄体成型装置设计

2.1 离散元仿真

垄体成型装置位于旋耕机后方,其作用是将旋耕刀作业后抛起的碎土、短茬聚集,并对垄体两侧的土壤切割、挤压形成垄体,同时在播种后对垄体进行二次整型。鉴于此,在设计垄体成型装置前先对长江流域麦茬地的旋耕作业进行探究,本部分仅探究旋耕作业,以旋耕土壤抛撒轨迹为依据,设计垄体成型装置。技术手段采用离散元仿真。

2.1.1 物料参数测试

在离散元仿真中,体现土壤、麦茬基本属性的主要参数为碰撞恢复系数[24]、静摩擦因数[25]、滚动摩擦因数[26]等,因此对土壤与土壤、土壤与麦茬、麦茬与麦茬、土壤与 65Mn 钢(旋耕刀)、麦茬与 65Mn 钢(旋耕刀)间的各参数进行测试,测试物料取样地点为华中农业大学荆州棉花种植示范基地,取样状态为小麦收获后的麦茬与土壤。

测试方法参考文献[24 - 26],测试设备如图 4 所示,测试结果如表 2 所示。

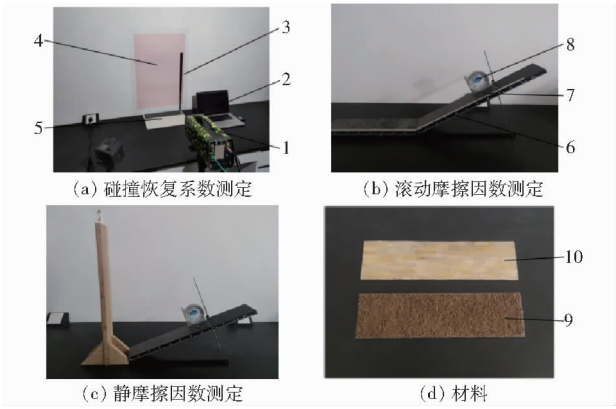


图 4 基础参数测试

Fig. 4 Basic parameter testing

1. 高速摄像机 2. 计算机 3. 高度尺 4. 坐标纸 5. 碰撞平台 6. 米尺 7. 滑道 8. 量角器 9. 土壤 10. 麦茬

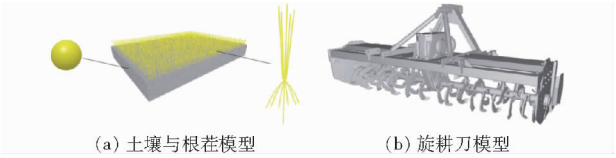
表 2 离散元基础参数

Tab. 2 Discrete element foundation parameters

参数	数值
麦茬泊松比	0.37
麦茬密度/(kg·m^{-3})	200
麦茬弹性模量/MPa	150
土壤颗粒泊松比	0.32
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 500
土壤颗粒弹性模量/MPa	40
旋耕机泊松比	0.3
旋耕机密度/(kg·m^{-3})	7 850
旋耕机弹性模量/MPa	210 000
麦茬-麦茬碰撞恢复系数	0.2
麦茬-土壤碰撞恢复系数	0.3
麦茬-旋耕机碰撞恢复系数	0.5
土壤-旋耕机碰撞恢复系数	0.3
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.2
麦茬-麦茬静摩擦因数	0.58
麦茬-土壤静摩擦因数	0.42
麦茬-旋耕机静摩擦因数	0.37
土壤-旋耕机静摩擦因数	0.32
土壤-土壤静摩擦因数	0.35
麦茬-麦茬滚动摩擦因数	0.25
麦茬-土壤滚动摩擦因数	0.21
麦茬-旋耕机滚动摩擦因数	0.15
土壤-旋耕机滚动摩擦因数	0.13
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.18

2.1.2　仿真设置

考虑到旋耕刀的作业幅宽，仿真中建立长 2 m、宽 3 m、高 0.5 m 的仿真土槽，用以生成土壤、麦茬。土壤颗粒半径设置为 5 mm，颗粒之间及颗粒与根茬颗粒之间采用 Edinburgh Elasto－Plastic Adhesion 模型；根茬颗粒半径设置为 3.5 mm，颗粒之间添加 Bonding V2 模型。旋耕刀前进速度为 3 km/h、转速为 300 r/min。土槽和几何模型如图 5 所示。仿真时间步长为 $8.989\,43\times10^{-6}$ s，离散元基本参数设置如表 2 所示。物理模型参数经标定确定，标定过程为首先通过土壤、麦茬、麦茬-土壤的拉伸、剪切试验确定各物料的粘结强度和断裂应力，其次在 EDEM 软件中对所建立的土壤、麦茬、麦茬-土壤模型进行拉伸与剪切仿真模拟，并逐步修正 Edinburgh Elasto－Plastic Adhesion 和 Bonding V2 模型的参数，直至仿真中的粘结强度和断裂应力与试验基本一致，即可确定当下状态的物理模型参数为建模参数，结果如表 3 所示，设置完毕后运行仿真。



(a) 土壤与根茬模型　　(b) 旋耕刀模型

图 5　仿真模型

Fig. 5　Simulation models

表 3　离散元物理模型参数

Tab. 3　Parameters of discrete element physical model

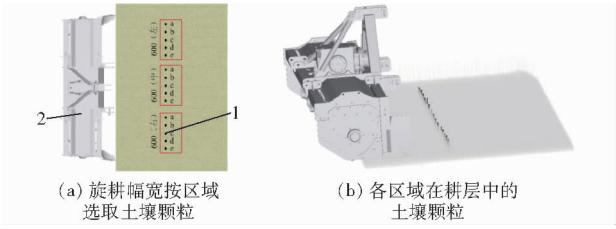
参数	数值
麦茬-麦茬法向接触刚度/(N·m^{-3})	9×10^{9}
麦茬-麦茬切向接触刚度/(N·m^{-3})	2.5×10^{9}
麦茬-麦茬法向强度/Pa	8×10^{7}
麦茬-麦茬切向强度/Pa	3×10^{7}
麦茬粘结粒子尺度	1.1
土壤-土壤斜坡指数	1
土壤-土壤拉伸指数	1
土壤-土壤切向刚度乘子	0.75
麦茬-土壤斜坡指数	1.5
麦茬-土壤拉伸指数	1.5
麦茬-土壤切向刚度乘子	0.75

2.1.3　仿真结果与分析

本文对整个旋耕刀幅宽上设计 3 个垄体成型装置，因此对旋耕刀幅宽进行三等划分，结合图 1b 中的农艺要求，在左、中、右每个区域的 60 cm 宽中，均匀选取土壤耕层的颗粒进行轨迹分析，如图 6 所示。

旋耕刀作业后各土壤颗粒的轨迹如图 7 所示。

灭茬刀在抛出土壤时，土壤颗粒为斜上抛，如图 8 所示，β 为旋耕刀与水平面夹角，φ 为旋耕刀抛出的土壤颗粒与水平面的夹角，d 为旋耕刀抛出土壤颗粒时入土深度，B 为上抛过程中的水平位移，h 为抛出后下落高度，L 为土壤颗粒抛出的水平面距离，Φ 为旋耕刀弯折角。



(a) 旋耕幅宽按区域选取土壤颗粒　　(b) 各区域在耕层中的土壤颗粒

图 6　土壤颗粒选取

Fig. 6　Soil particle selection

1. 从上到下整个耕层土壤颗粒　2. 旋耕机

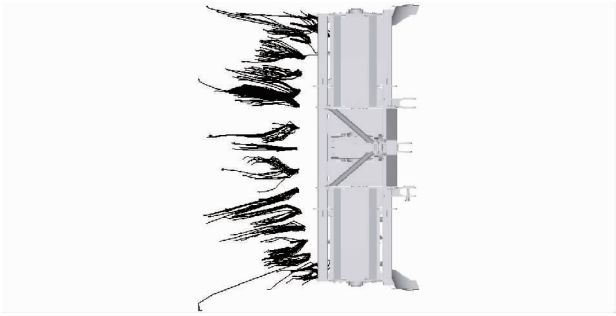


图 7　土壤颗粒轨迹

Fig. 7　Soil particle trajectory

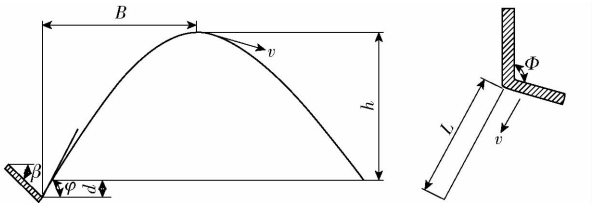


图 8　土壤颗粒抛撒原理图

Fig. 8　Principles of soil particle dispersion

若设旋耕刀任意一点的线速度为 v_o，将土壤颗粒抛出时的速度理想化为 v_o，土壤颗粒在地表抛出的前后距离 L_0 为

$$L_0=2\left(B-\frac{d}{\tan\varphi}\right) \tag{1}$$

若 t 为下落时间，g 为重力加速度，则

$$B=v_o\cos\varphi t+\frac{d}{\tan\varphi} \tag{2}$$

$$h=\frac{1}{2}gt^2 \tag{3}$$

将式(2)、(3)代入式(1)得到

$$L_0=2v_o\cos\varphi\sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{4}$$

$$L_0=L\cos(\Phi-90°) \tag{5}$$

土壤颗粒的幅宽 B_0 为

$$B_0=600+\frac{2v_o\cos\varphi\sqrt{2h/g}}{\cos(\Phi-90°)} \tag{6}$$

若 Φ 基本确定，旋耕刀抛出土壤的幅宽呈现

式(6)所示的趋势,即随初始抛出速度增大而增大、随着抛出高度的增高而增大。

2.2 船式起垄侧板设计

由于船式起垄侧板在垄体两侧约束土壤,故对图 6 中各区域选取的边界位置土壤颗粒轨迹进行提取(各区域 e、a 颗粒轨迹),其中左 e、中 a 如图 9 所示。

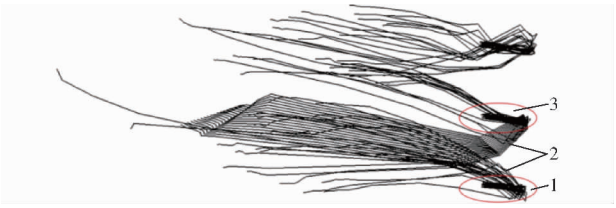


图 9 边缘土壤颗粒横向抛撒

Fig. 9 Lateral spraying of soil particles in marginal soil

1. 中 a 2. 抛撒起始段 3. 左 e

左中右土壤在旋耕机作用后会交错抛撒,因此在垄体成型装置中设计船式起垄侧板。为了降低船式起垄侧板作业中的磨损,提取图 7 中抛撒起始段的土壤颗粒俯视图平面(*xoy* 面)的运动方向,如图 10 所示(图中 $+\alpha$ 表示与 x 轴负向夹角为正,$-\alpha$ 表示与 x 轴负向夹角为负,机具前进方向为 x 轴)。

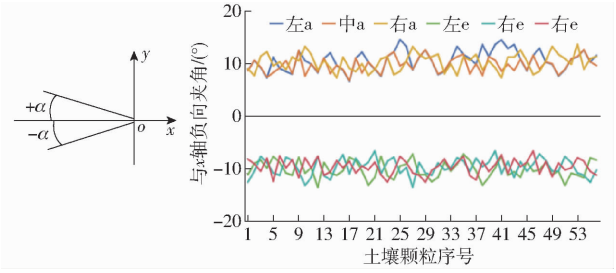


图 10 土壤颗粒抛撒起始段方向

Fig. 10 Direction of initial segment of soil particle scattering

综合分析,土壤颗粒抛撒起始段方向与 x 轴负向夹角在 7°~15°之间,因此船式起垄侧板切线方向设计为与 x 轴夹角 γ 为 7°~15°,由于土壤颗粒抛撒起始段最长距离为 486.4 mm,前端宽度依据图 1 中 L_1 宽度为 30 cm、后端 L_2 宽度为 60 cm,因此在 CAD 中控制此 3 个边界条件,采用样条曲线绘制船式起垄侧板的 *xoy* 面内曲线,如图 11 所示。

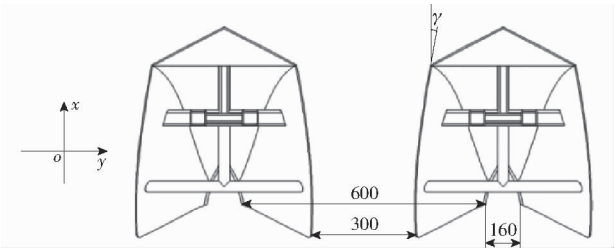


图 11 船式起垄侧板 *xoy* 面内曲线

Fig. 11 Curves of *xoy* plane on side panel of boat-type ridge

设计船式起垄侧板同时要考虑刃口对土壤的切削作用。依据滑切原理[27],当刃口的滑切角(机具前进速度与刃口法线间的夹角)大于刃口与土壤之间的摩擦角时,能够产生滑切作用,降低阻力。根据图 1 垄高要求,采用图 4 设备对 200 mm 耕作深度范围内刃口与土壤之间的摩擦角进行测试,每 25 mm 深测试一组(同一深度),每组测试 50 个数据,以平均值作为最后的评价结果,测试结果如表 4 所示。

表 4 耕层内刃口与土壤之间的摩擦角

Tab. 4 Friction angle between cutting edge and soil in cultivated layer

深度/mm	摩擦角/(°)
0	30.9
25	32.8
50	33.6
75	34.1
100	35.4
125	37.3
150	39.9
175	41.8
200	42.2

随着深度增加,刃口与土壤之间的摩擦角逐渐增大。因此刃口入土的 200 mm 设计为样条曲线,入土深度由 0 mm 至 200 mm 时,滑切角从 31°向 43°变化(滑切角稍大于摩擦角,过大会降低切割效率),如图 12 所示(图中 β_1 为 0 mm 深度的滑切角,β_8 为 200 mm 深度的滑切角)。

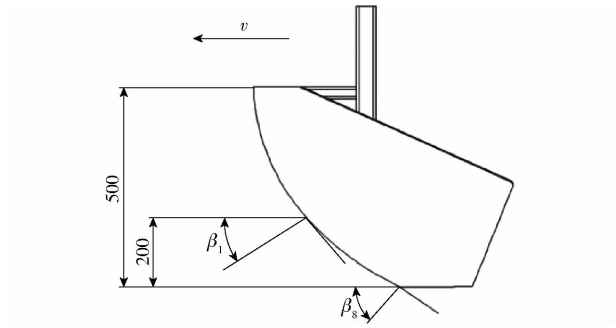


图 12 船式起垄侧板刃口曲线

Fig. 12 Curves of blade edges on side plates of boat-type ridge forming tool

结合图 10 和图 11 在 Solidworks 软件中绘制船式起垄侧板的三维图,如图 13 所示。

2.3 仿形上垄板设计

对图 5 中所有颗粒轨迹在 *xoz* 面内的投影进行提取,如图 14 所示。

土壤颗粒经旋耕刀作用后,经历下压、后推、抛起的过程,而在抛起后又经历上升和下落过程。当土壤下落时,仿形上垄板对土壤引流和镇压,为了降

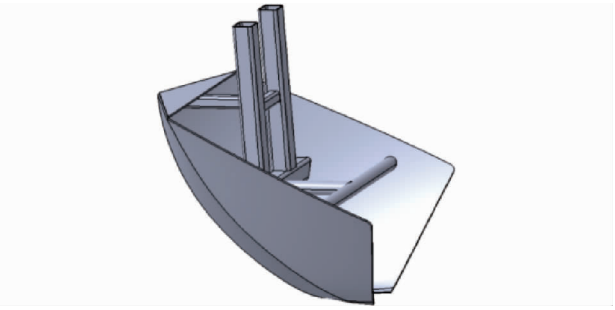


图 13　船式起垄侧板三维图

Fig. 13　3D diagram of side panel for boat-type ridge formation



图 14　土壤颗粒向后抛撒

Fig. 14　Soil particles thrown backward

1. 土壤后抛下落起始段

低土壤对仿形上垄板的磨损，对土壤后抛下落起始段的轨迹方向进行提取。旋耕刀后抛 300 mm 后，所有颗粒基本都已经下落，因此对所有土壤颗粒后抛 300 mm 位置的土壤颗粒轨迹方向进行提取，如图 15 所示（与 x 轴方向夹角）。

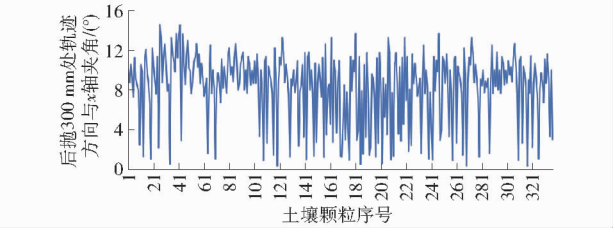


图 15　土壤后抛 300 mm 处轨迹方向

Fig. 15　Trajectory direction at 300 mm behind soil surface

所有土壤颗粒在后抛 300 mm 处与 x 轴夹角为 0°～15°，考虑到仿形转动，仿形上垄板与 x 轴夹角设计为 0°～20°，长度设计为 300 mm，采用样条曲线设计，如图 16 所示。

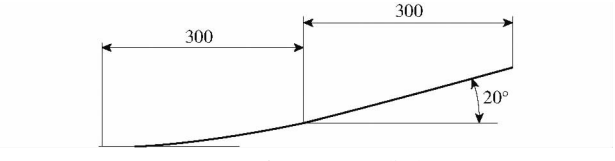


图 16　仿形上垄板曲线

Fig. 16　Contour of ridge plate curve

考虑到与图 13 中船式起垄侧板的装配，在 Solidworks 软件中绘制仿形上垄板三维模型，如图 17 所示。

2.4　仿形上垄板连接机构设计

仿形上垄板通过连接机构调整压实程度，进而

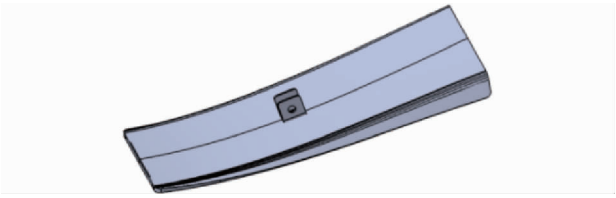


图 17　仿形上垄板三维图

Fig. 17　3D model of contour ridge plate

实现垄体平整，参考文献[28]，其结构原理如图 18 所示，仿形上垄板可在两位置调节，可调节的高度 Δh_1 为

$$\Delta h_1 = z\cos\sigma_1 - z\cos\sigma_2 = e_1\cos\sigma_3 - e_2\cos\sigma_4 \quad (7)$$

式中　z——上垄板长度，mm

σ_1——初始角度，(°)

σ_2——作业时角度，(°)

σ_3——弹簧杆初始角度，(°)

σ_4——弹簧杆作业时角度，(°)

e_1——非作业状态弹簧杆长度，mm

e_2——作业状态弹簧杆长度，mm

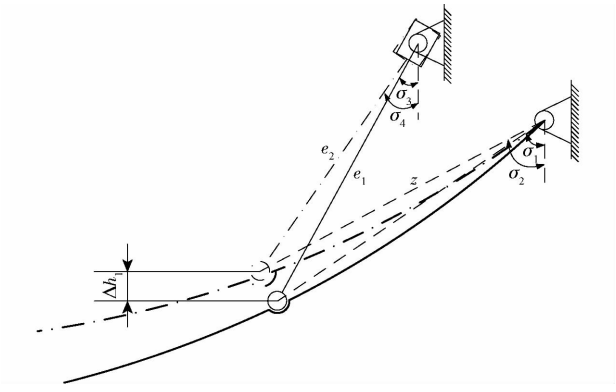


图 18　仿形上垄板连接机构原理图

Fig. 18　Schematic of connection mechanism for contour-shaped ridge plate

若仿形上垄板作业时处于水平状态，Δh_1 为 60 mm，σ_1 为 30°，z 依据设计为 488 mm，代入式(7)得到仿形上垄板作业时可调节角度为 12°（$\sigma_2 - \sigma_1$）。

参考文献[28]，对作业状态连接点 N 进行受力分析，如图 19 所示。

若作业状态受力平衡，在 x 轴和 y 轴方向有

$$\begin{cases} F_{2x} = F_1\sin\sigma_4 + f_1 \\ G_0 + F_{2y} + F_1\cos\sigma_4 = T_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中　G_0——仿形上垄板受的重力，N

T_0——垄体支持力，N

f_1——垄体摩擦力，N

F_1——弹簧杆支持力，N

F_{2x}——仿形上垄板拉力在 x 轴分力，N

F_{2y}——仿形上垄板拉力在 y 轴分力，N

若分析点 N 理想为质点，不计算 G_0，且仿形上

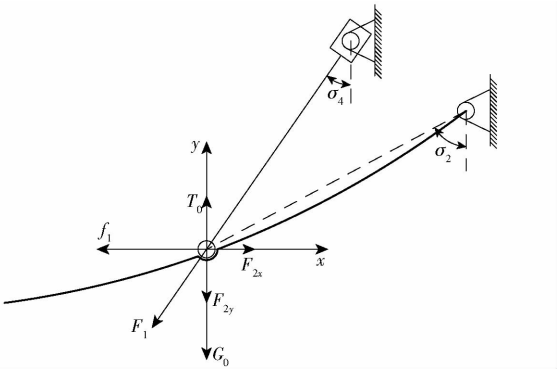


图 19 仿形上垄板连接机构受力分析

Fig. 19 Force analysis of connection mechanism of morphology ridge plate

垄板作业时基本处于水平，F_{2y} 近似为零。参考文献[29]，镇压垄体压强范围为 4 ~ 5 N/cm^2，则根据本文设计的仿形上垄板主要镇压面积为 900 cm^2，计算镇压力为 3 600 ~ 4 500 N，即 T_0 为 3 600 ~ 4 500 N，σ_4 为 35°，代入式(8)得到 F_1 为 4 390 ~ 5 488 N。结合几何模型 $e_1 - e_2$ 为 50 mm，得到弹簧的劲度系数为 87 800 ~ 109 760 N/m，仿形上垄板连接机构三维图如图 20 所示。

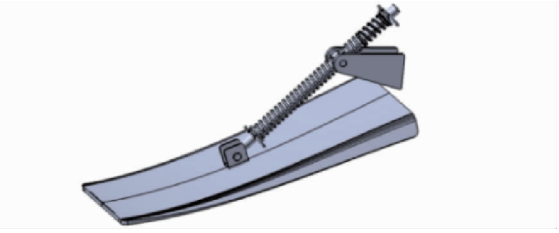


图 20 仿形上垄板连接机构三维图

Fig. 20 3D diagram of connecting mechanism of contour ridge plate

本文设计的垄体成型装置为 3 行，包含 2 个整体的船式起垄侧板、3 个仿形上垄板及连接结构、2 个单边船式起垄侧板，整体如图 21 所示。

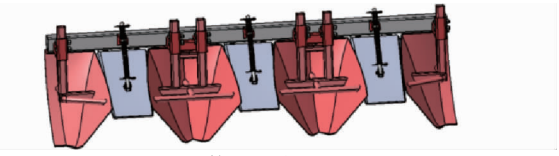


图 21 垄体成型装置三维图

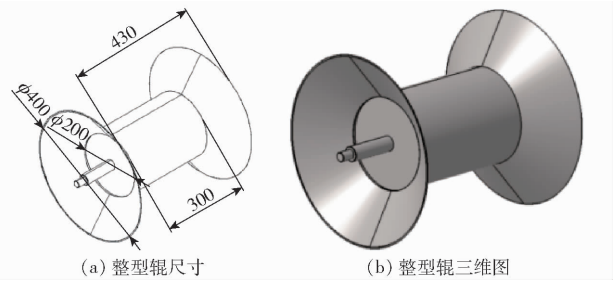
Fig. 21 3D diagram of embankment formation device

2.5 整型辊设计

整型辊位于整机的最后端，对于成垄、播种后的垄型进行整理。依据垄面宽度整型辊长度设计为 300 mm，直径为 200 mm，其它尺寸及整型辊三维图如图 22 所示。

3 仿真验证试验

为了验证垄体成型装置设计的合理性、可靠性以及作业性能，在仿真软件中对其进行模拟计算，由



(a) 整型辊尺寸 (b) 整型辊三维图

图 22 整型辊

Fig. 22 Integral roll

于仿形上垄板连接机构涉及动力学，采用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真的技术手段。

3.1 EDEM - RecurDyn 耦合仿真模型构建

为兼顾仿真效率与计算精度，在 RecurDyn 中对整机模型进行合理简化，保留机架、旋耕刀辊、起垄部件、开沟盘等核心作业部件。各部件间的连接关系通过固定副、旋转副及移动副进行定义，其中上垄板与机架间通过旋转副并添加扭簧单元来模拟其田间作业中的浮动仿形功能。通过 RecurDyn 的 External SPI 接口导出耦合 wall 文件，并在 EDEM 前处理模块中将其导入，实现两平台间作用力与位移数据的双向同步传递。设定 RecurDyn 仿真最大步长为 1×10^{-3} s，EDEM 颗粒计算步长为 2×10^{-6} s，总仿真时间为 8 s，EDEM 中其它建模方法同 2.1 节，此外在 EDEM 中添加 Archard Wear 模型。仿真模型如图 23 所示。

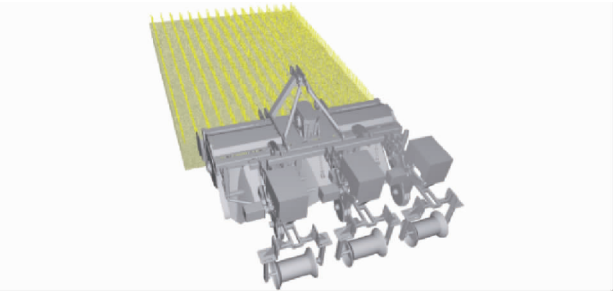


图 23 EDEM - RecurDyn 耦合仿真

Fig. 23 Coupled simulation of EDEM - RecurDyn

3.2 仿真试验指标

以垄体成型装置的磨损寿命和成垄稳定性系数为指标。

(1)磨损寿命

首先在 EDEM 软件后处理模块中对垄体成型部件的法向累积接触能量和切向累积接触能量进行提取，并测量总累积接触能量最大位置的面积，输出最大位置总累积接触能量的平均值；其次计算磨漏总累积接触能量最大位置所需的能量，公式为

$$E = \frac{V\sigma_s}{k} \tag{9}$$

式中 V——磨损体积，m^3

k——磨损系数，取 1.003×10^{-3}

E——累积磨损能量，J

σ_s——材料硬度，常取材料屈服强度，Pa

根据测量总累积接触能量最大位置的面积和部件厚度，可计算得到磨损体积 V，垄体成型装置的加工材料为 Q235 钢，材料硬度取 235 MPa，因此可根据式(9)计算得到磨漏该位置时所需的累积磨损能量 E。结合 EDEM 软件提取的仿真时间与该位置的总累积接触能量，可得到磨损寿命。

(2)成垄稳定性系数

为了验证垄体成型装置的作业性能，对成垄稳定性系数进行测定，依据文献[30]，在机具作业后的区域每垄同一横平面处随机取 5 点，测点成垄稳定性系数采用差值法。

成垄高度平均值计算公式为

$$a_j=\frac{\sum_{i=1}^{n_j}a_{ji}}{n_j} \tag{10}$$

其中

$$a_{ji}=h_{2i}-h_{1i} \tag{11}$$

式中　a_{ji}——第 j 个垄第 i 个点成垄高度，mm

h_{1i}——土槽土壤平面高度，mm

h_{2i}——测点位置高度，mm

a_j——成垄高度平均值，mm

n_j——总测点数

成垄稳定性系数计算公式为

$$U_j=1-V_j \tag{12}$$

其中

$$V_j=\frac{S_j}{a_j}\times100\% \tag{13}$$

式中　U_j——第 j 个垄成垄稳定性系数，%

V_j——第 j 个垄成垄变异系数，%

S_j——第 j 个垄成垄高度标准差，mm

3.3　仿真试验结果

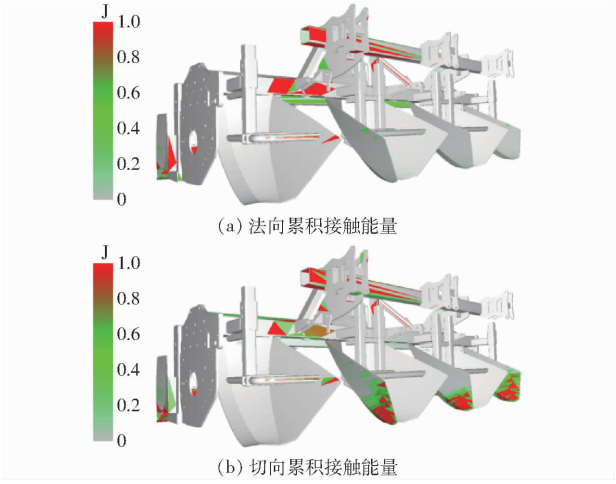
(1)磨损寿命

按 3.2 节中的方法提取垄体成型部件的法向累积接触能量和切向累积接触能量云图，如图 24 所示。

由图 24 可得，磨损最大位置为船式起垄侧板两侧后部，法向累积接触能量相对于切向累积接触能量可忽略不计。且总累积接触能量最大位置的面积为 1 213 mm^2，材料厚度为 4 mm，因此磨损体积为4 852 mm^3。仿真显示，仿真 8 s 累积磨损能量为0.98 J，根据式(9)计算得到磨漏该位置所需的累积磨损能量为 1 136 809 J，因此磨损寿命为 2 577.8 h。

(2)成垄稳定性系数

按 3.2 节中的方法对 EDEM 软件仿真后的 3 个垄体进行测试并计算，得到 3 个垄体的成垄稳定性系数分别为 98.15%、98.76%、98.29%，平均值为 98.4%，远高于评定指标规定的 80%[31]。



(a) 法向累积接触能量

(b) 切向累积接触能量

图 24　累积接触能量云图

Fig. 24　Cumulative exposure energy result diagrams

4　田间试验

4.1　试验条件与设备

为验证麦后棉直播机起垄装置的作业效果和耦合仿真模型的准确性，于 2025 年 5 月在华中农业大学荆州棉花种植示范基地开展田间试验。如图 25 所示，试验田前茬作物为小麦，土壤类型为粘壤土。平均麦茬密度 480 根/m^2，高度 16.5 ~ 23 cm(平均值 19.6 cm，变异系数为 10.7%)，呈高密度直立或半倒伏状态。0 ~ 30 cm 范围内土壤的平均含水率为 20.2%，前麦茬地土壤紧实度随深度递增明显，2.5 cm 处平均值 103.25 kPa，15 cm 处达 1 510 kPa，土壤与根系结合较为紧实。



图 25　田间试验

Fig. 25　Field test

4.2　试验指标与测试方法

田间试验面积为 13.33 hm^2，以垄体成型装置的磨损量和成垄稳定性系数为指标。

(1)磨损量

试验结束后选取垄体成型装置磨损最大位置进行扫描测试。钣金磨损测试采用高精度蓝色激光三维扫描仪，该仪器的最高点间距为 0.02 mm，扫描精度达 0.02 mm。测试流程如下：首先在被测钣金表

面粘贴反光标记点,随后通过扫描仪完成数据采集;数据采集完成后,将原始数据文件导入 Mountainsmap 软件进行偏差分析。分析结果以拟合基准平面为参照,通过高低色谱直观呈现磨损区域的偏差分布,扫描测试设备如图 26 所示。



图 26 扫描测试设备

Fig. 26 Scan test equipment

(2)成垄稳定性系数

机具作业时保证机具沿直线方向行进,作业后取中间工作行程的 30 m 区域测量成垄高度,进而计算出成垄稳定性系数,测试方法同 3.2 节的方法。

4.3 试验结果

船式起垄侧板及仿形上垄板作业后的磨损情况如图 27 所示。



(a) 仿形上垄板 (b) 船式起垄侧板

图 27 作业后磨损情况

Fig. 27 Wear after operation

由图 27 可知,仿形上垄板基本无磨损,船式起垄侧板前部也基本无磨损,仅船式起垄侧板两侧后部稍有磨损,与耦合仿真预测的磨损集中区域(图 24)吻合,验证了基于 DEM - MBD 耦合仿真进行磨损预测的有效性。对磨损最严重区域进行高精度扫描测试,结果如图 28 所示。

磨损量最大位置的磨损深度为 0.04 mm。试验总作业面积为 13.33 hm^2,总作业时间为 24.3 h。基于此,可推算当 4 mm 厚的船式起垄侧板被磨穿时,所需累计作业时间约为 2 430 h,即该位置的理论磨损寿命为 2 430 h。该数值与耦合仿真预测值的偏差为 5.7%。

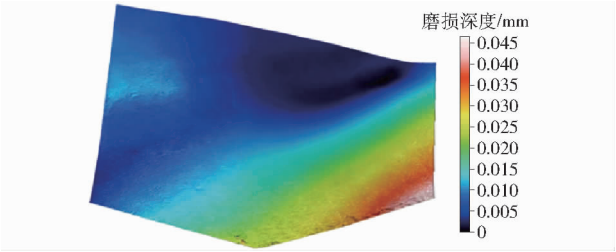


图 28 磨损扫描云图

Fig. 28 Scanning results of wear

按 3.2 节中的方法对田间作业后的 3 个垄体进行测试并计算,3 个垄体的成垄稳定性系数分别为 93.06%、91.53% 和 92.18%,平均值为 92.26%,高于评定标准。与仿真结果偏差为 6.2%。

耕整播种后,棉花在各生长阶段长势均匀、良好,如图 29 所示。苗期出苗整齐、无断垄,表明该联合作业模式在高效完成耕整起垄的同时,创造了良好的种床环境,验证了麦后棉花联合耕整直播机田间作业性能良好,其出苗效果满足长江流域麦后棉花直播的农艺要求。



(a) 苗期 (b) 蕾期 (c) 吐絮期

图 29 棉花长势

Fig. 29 Cotton growth

5 结论

(1)基于旋耕刀作业土壤的抛撒表现,以降低部件磨损为目的,设计了船式起垄侧板、仿形上垄板、仿形上垄板连接机构,确定了整型辊,进而形成了垄体成型装置。

(2)采用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真对垄体成型装置进行验证,并提出了磨损寿命计算方法,得到船式起垄侧板最低寿命位置的磨损寿命为 2 577.8 h,垄体成型装置成垄稳定性系数为 98.4%。

(3)田间试验与耦合仿真试验磨损位置一致,最低寿命位置为 2 430 h,与仿真相差 5.7%,垄体成型装置成垄稳定性系数为 92.26%,与仿真相差 6.2%。装置作业后棉花出苗效果良好,满足长江流域麦后棉直播农艺要求。

参 考 文 献

[1] 潘昊,张若宇,蔡凤杰,等. 棉花生产智慧农场标准体系研究[J]. 农业机械学报,2025,56(5):38 - 48.
PAN Hao, ZHANG Ruoyu, CAI Fengjie, et al. Standard system for smart cotton production farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 38 - 48. (in Chinese)

[2] 张若宇,张建强,夏彬,等. 数字棉花技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(5):1 - 16.
ZHANG Ruoyu, ZHANG Jianqiang, XIA Bin, et al. Research progress on digital cotton technology and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 1 - 16. (in Chinese)

[3] 张友昌,黄晓莉,胡爱兵,等. 长江流域麦/油后直播棉花播种时间下限研究[J]. 棉花学报,2021,33(2):155 - 168.
ZHANG Youchang, HUANG Xiaoli, HU Aibing, et al. Study on the limitation of late sowing date on cotton planted after wheat/rape in the Yangtze River Basin[J]. Cotton Science, 2021, 33(2): 155 - 168. (in Chinese)

[4] 魏松,张驰海,詹振宇,等. 基于 DEM - MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报,2025,56(2):275 - 289,341.
WEI Song, ZHANG Chihai, ZHAN Zhenyu, et al. Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 275 - 289, 341. (in Chinese)

[5] 侯轩慧,李建设,王文涛. 宁南山区甘蓝垄作覆膜对土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 农业工程学报,2025,41(22):125 - 136.
HOU Xuanhui, LI Jianshe, WANG Wentao, et al. Effects of cabbage ridge planting and film mulching on soil physical and chemical properties and microbial community in southern Ningxia mountainous areas[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(22): 125 - 136. (in Chinese)

[6] 马娇,王栋. 覆膜与滴灌对玉米生态系统碳足迹和净生态系统经济效益的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2025,43 (1):192 - 202,249.
MA Jiao, WANG Dong. Effects of mulching and drip irrigation on carbon footprint and net ecosystem economic benefits of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(1): 192 - 202, 249. (in Chinese)

[7] 沈熙童. 振动滚压式旋耕起垄机设计与试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2025.
SHEN Xitong. Design and experimental study of vibration rolling rotary plowing machine[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2025. (in Chinese)

[8] PINGALI P. Agricultural mechanization: adoption patterns and economic impact[J]. Handbook of Agricultural Economics, 2007, 3(4): 2779 - 2805.

[9] REDDY R. Innovations in agricultural machinery: assessing the impact of advanced technologies on farm efficiency[J]. Journal of Artificial Intelligence and Big Data, 2022, 2(1): 10.31586.

[10] CLEARINGHOUSE T. Orange fleshed sweet potato technology toolkit catalog. TAAT Clearinghouse technical report series 005[J]. Gates Open Research, 2021, 5(125): 125.

[11] HE P, ZHANG J, LI W. The role of agricultural green production technologies in improving low-carbon efficiency in China: necessary but not effective[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293(5): 112837.

[12] RAHMANIAR F D, ENDRI J, SALAMAH I. Design of automatic organic fertilizer processing tools by utilizing the internet of things (IOT) as a monitoring system[J]. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika, 2023, 9(3): 684 - 692.

[13] OLIVEIRA R C, SILVA R D S. Artificial intelligence in agriculture: benefits, challenges, and trends[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7405.

[14] MILYUKIN V, MASHKOV S, RUDOY D, et al. Efficient technology of potato cultivation with top dressing with liquid fertilizers during fertigation[C]// International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry "Interagromash". Cham: Springer International Publishing, 2022: 1705 - 1715.

[15] SEFA A, AHMET C. The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(1): 1 - 8.

[16] DAILSON D, MACOS A Z P. Pressure and angle of the seed-fertilizer drill press wheel on corn emergence[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2018, 22(10): 726 - 731.

[17] 刘文政,李问盈,郑侃,等. 我国保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 农机化研究,2017,39(7):256 - 261,268.
LIU Wenzheng, LI Wenying, ZHENG Kan, et al. The current research status of conservation tillage technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 256 - 261, 268. (in Chinese)

[18] 徐萍,杨宪杰,冯佐龙,等. 华北平原小麦新型耕作施肥播种方式增产增效研究[J]. 中国生态农业学报,2022,30(5):831 - 841.
XU Ping, YANG Xianjie, FENG Zuolong, et al. Yield- and efficiency-increasing effect of new tillage-fertilization-sowing method on wheat in the north China plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5): 831 - 841. (in Chinese)

[19] 程准,邢杰,李文杰. 农林作业机械静液压传动系统效率特性建模及减速比分析[J]. 机电工程,2024,41(1):99 - 106.
CHENG Zhun, XING Jie, LI Wenjie. Efficiency modeling and reducer ratio analysis of hydrostatic transmission system for agricultural and forestry machinery[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(1): 99 - 106. (in Chinese)

[20] 张传斌,张土领. 1YSG－1 型烟田施肥起垄机的改进与试验[J]. 农机化研究,2011,33(6):119－121,158.
ZHANG Chuanbin, ZHANG Tuling. The improvement and experiment of the 1YSG－1 type tobacco field fertilization ridging machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(6): 119－121, 158. (in Chinese)

[21] 叶湾大,张建瓴. 一种小型旋耕起垄机的设计[J]. 现代农业装备,2010(4):44－46.
YE Wanda, ZHANG Jianling. Design of a rotary cultivation ridger[J]. Modern Agricultural Equipment, 2010(4): 44－46. (in Chinese)

[22] 何进,李洪文,张学敏,等. 1QL－70 型固定垄起垄机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):55－60.
HE Jin, LI Hongwen, ZHANG Xuemin, et al. Design and experiment of 1QL－70 bed former for permanent raised beds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 55－60. (in Chinese)

[23] 葛大萌,吕钊钦. 小型甘薯旋耕起垄机的设计[J]. 农机化研究,2016,38(8):109－112.
GE Dameng, LV Zhaoqin. Design of a rotary cultivation ridger of sweet potatoes[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(8): 109－112. (in Chinese)

[24] 王立军,刘天华,冯鑫,等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(20):313－322.
WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313－322. (in Chinese)

[25] 王加一. 玉米条带式直灭茬刀设计及耕作阻力与抛撒机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
WANG Jiayi. Design of corn strip-type straight stubble-breaking blade and study on tillage resistance and throwing mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[26] 刘泽群,张丽梅,彭飞. 基于离散元仿真的核桃仁接触参数标定与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(22):316－324.
LIU Zequn, ZHANG Limei, PENG Fei. Calibration and experiment of the contact parameters of walnut kernels based on discrete element simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(22): 316－324. (in Chinese)

[27] 王加一,赵淑红,高连龙,等. 玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):59－67.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in corn ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 59－67. (in Chinese)

[28] 燕桓,魏国梁,张青松,等. 稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(9):199－211.
YAN Huan, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of combined seed furrow opener for rapeseed direct seeder in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 199－211. (in Chinese)

[29] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

[30] 赵艳忠,王运兴,刘海涛,等. 带状深松灭茬机灭茬部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):94－103.
ZHAO Yanzhong, WANG Yunxing, LIU Haitao, et al. Design and test of stubble-breaking components on strip subsoiling and stubble-breaking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 94－103. (in Chinese)

[31] 国家工业和信息化部. 旋耕深松灭茬起垄机:JB/T 8401.2—2017[S]. 北京:机械工业出版社,2018.