doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.015

旱作板结土壤下组合式机械除草单体设计与试验

刘进宝[1,2]　刘菊明[1]　李　帆[2]　郑　炫[2]　王子龙[2]　杨怀君[2]　张　惠[2]
（1. 新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；2. 新疆农垦科学院机械装备研究所，石河子 832000）

摘要：为解决新疆旱作板结土壤中传统除草机构入土性能差、除草率低、伤苗风险高的问题，以玉米行间与株间协同除草为目标，本研究设计了一种由铲齿和指轮式除草盘构成的组合式除草单体，包含人字除草铲、柔性橡胶指轮和刚性指盘。基于 EDEM 建立了土壤-除草部件的互作仿真模型，模拟分析了指轮式除草盘对土壤扰动、土壤颗粒运动和除草盘受力变化等过程，以除草盘直径、刚性指盘折弯角、柔性指轮齿数为因素，通过正交试验及 SPSS 分析获得指轮式除草盘最优结构参数：除草盘直径为 200 mm、刚性指盘折弯角为 130°、柔性指轮齿数为 16。开展了组合式除草单体三因素三水平田间试验和作业参数优化，得到最优作业参数组合：人字除草铲距苗 16 cm、入土深度 8 cm、除草盘距苗 20 cm。田间性能试验结果表明，优化后组合式除草单体除草率为 82.4%、伤苗率为 2.65%、碎土率为 91.87%，平均耕作阻力为 1 052 N，有效解决了指轮式除草盘入土难和伤苗的问题，满足旱作板结土壤的行间与株间协同除草作业的需求，为智能除草机械优化提供支撑。

关键词：除草单体；除草铲；指轮式除草盘；EDEM 仿真；耕作阻力；土壤扰动
中图分类号：S224.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)12-0165-11　　**OSID**：

Structural Design and Testing of Combined Mechanical Weeding Unit for Compacted Soil in Dry Farming

LIU Jinbao[1,2]　LIU Juming[1]　LI Fan[2]　ZHANG Xuan[2]　WANG Zilong[2]　YANG Huaijun[2]　ZHANG Hui[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Institute of Mechanical Equipment*, *Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of poor soil penetration performance, low weeding efficiency and high risk of seedling damage of traditional weeding mechanisms in dryland compacted soil in Xinjiang, the coordinated weeding between rows and plants of corn was selected and a combined weeding unit composed of shovel teeth and finger-wheel weeding discs was designed. This single unit consisted of a herringbone weeding shovel, flexible rubber finger wheels and rigid finger discs. Based on EDEM, a simulation model of the interaction between soil and weeding components was established. The processes of soil disturbance caused by the finger-type weeding disc, soil particle movement and force changes on the weeding disc were simulated and analyzed. Taking the diameter of the weeding disc, the bending angle of the rigid finger-type disc and the number of teeth of the flexible finger-type disc as factors, the optimal structural parameters of the finger-type weeding disc were obtained through orthogonal experiments and SPSS analysis: the diameter of the weeding disc was 200 mm, the bending angle of the rigid finger disc was 130°, and the number of teeth on the flexible finger wheel was 16. Field performance tests and operation parameter optimization of the combined weeding unit were carried out. The optimal operation parameter combination was obtained as the distance between the shovel teeth and the seedlings being 16 cm, the depth of soil penetration being 8 cm, and the distance between the weeding tray and the seedlings being 20 cm. The field performance test results showed that the optimized combined weeding unit had a weed removal rate of 82.4%, a seedling damage rate of 2.65%, a soil fragmentation rate of 91.87%, and an average tillage resistance of 1 052 kN. It effectively solved the problems of difficult penetration of finger-type weeding discs into the soil and seedling damage, and met the requirements of inter-row and inter-plant coordinated weeding operations in dryland compacted soil.

收稿日期：2025-11-02　修回日期：2026-01-16
基金项目：新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目(2024AB045)
作者简介：刘进宝(1988—)，男，副研究员，主要从事智能高效耕作装备研究，E-mail：baouser@126.com

The research result can provide support for the optimization of intelligent weeding machinery.

Key words: weed control unit; weeding shovel; wheeled weeding disc; EDEM simulation; tillage resistance; soil disturbance

0 引言

玉米是新疆主要种植作物[1-2],玉米生产涵盖春播、中耕除草、追肥、病虫害防控等多环节,主要生产环节已实现机械化[3-4]。当前,草害是影响新疆玉米产量与品质的关键因素之一,目前当地应用最普遍的除草方式是喷施化学药剂,虽能适配新疆大规模种植的效率需求,却易因绿洲农业区水资源相对集中的特性,增加土壤与地下水污染风险,而机械除草可大幅减少化学除草剂用量,更契合新疆绿洲农业可持续发展与生态保护的双重需求[5-10]。

从现有研究来看,针对机械除草的探索已取得一定进展,弹齿式除草装置入土适应性较强,但对板结土壤易出现弹齿变形、杂草清除不彻底问题[11-13];梳齿式装置对株间杂草针对性不足,且伤苗风险随土壤紧实度升高而增加;圆盘式装置耕作阻力相对稳定,却难以兼顾行间深层土壤疏松与株间浅层杂草清除的协同需求[14-17]。韩豹等[18]对水平圆盘式苗间松土除草装置的设计经验,以及赵淑红等[19]在玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计中运用的离散元仿真方法,为板结土壤除草装备研发提供了参考,但多数研究仍聚焦单一部件性能优化,相关研究多基于良好的土壤条件,针对新疆旱作板结土壤坚实度高、黏结性强、耕作阻力大等条件的性能优化较少,对"行间-株间"协同除草的整体结构设计、核心参数匹配性关注不足[20]。孙叶丰[21]在农业机器人发展现状分析中提到,欧美部分智能除草装备虽集成了视觉识别与精准作业功能,但其中指轮式除草盘在我国旱作板结土壤中存在显著适配缺陷,入土阻力大导致难以穿透板结层、柔性指易发生不可逆变形、株间杂草清除不彻底且伤苗风险高,加之维护成本高,难以直接满足新疆玉米田规模化、高效化中耕除草需求。现有指轮式除草盘在新疆板结土壤中普遍存在入土难、变形严重、除草效果不佳、伤苗率偏高等行业痛点,均表明现有机械除草技术在新疆旱作板结土壤中存在除草率与碎土率难以平衡、伤苗风险高等现实问题[22-25]。

因此,设计适配新疆旱作板结土壤特性的组合式机械除草结构,明确关键部件参数与作业参数最优匹配关系,以期提升除草效率、降低伤苗率。

1 除草单体设计

通过实地测量得到玉米田环境参数,如图 1 所示,行距 D 为 500 mm,中耕除草期玉米苗高度 h 为 450 ~ 650 mm,根部分布深度 h_1 为地表以下 120 ~ 160 mm,茎叶最大围度 C 为 80 ~ 100 mm,杂草根部分布深度 h_2 为地表以下 10 ~ 30 mm,杂草高 10 ~ 150 mm。通过对新疆维吾尔自治区石河子市玉米种植区进行实地采样和测量,土壤类型为沙壤土,含水率为 16%。由此可见,玉米根部明显比杂草根部深。

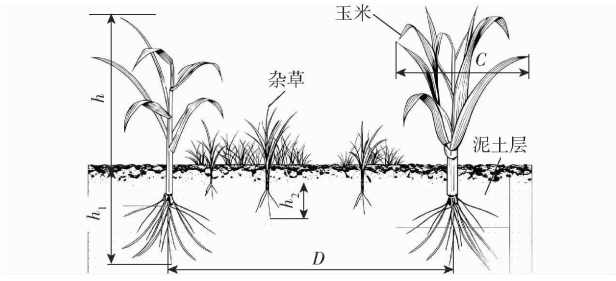

图 1 玉米田除草作业参数示意图

Fig. 1 Cornfield weed control operation condition parameter diagram

针对玉米行间与株间除草需求,设计的除草单体结构如图 2 所示,主要由指轮式除草盘、深松铲、人字除草铲、平行四杆机构、仿形轮、仿形弹簧、悬挂装置及机架等部件构成。其中,除草指盘与除草指轮协同作用,负责清除株间杂草;人字铲作为行间除草核心部件,可有效切断行间杂草根系并疏松土壤;仿形轮根据田间地形变化实时调整除草部件的作业高度,确保除草深度稳定,避免因地形起伏导致伤苗或除草不彻底;悬挂装置将除草单体与拖拉机等动力设备连接,实现动力传递与作业角度调整;机架采用高强度钢材焊接而成,为各部件提供稳定支撑,确保作业过程结构的稳定性与可靠性。

组合式除草机整体结构如图 3 所示,采用多单体并列布局,可根据玉米种植行距灵活调整单体间距,适配不同的种植模式,满足大面积玉米田间高效除草需求。

2 指轮式除草盘

2.1 指轮式除草盘结构

指轮式除草盘是组合式机械除草单体实现株间精准除草的核心部件,作业时成对安装在除草单体

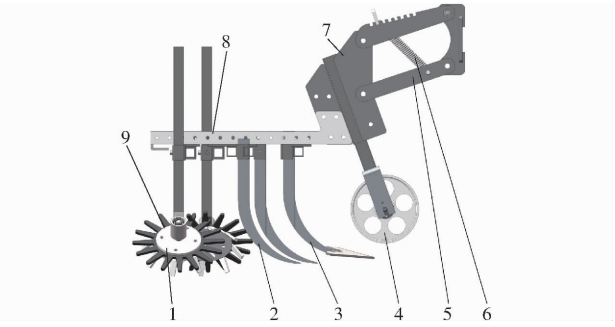

图 2　除草单体结构

Fig. 2　Single structure for weeding

1. 指轮式除草盘　2. 深松铲　3. 人字除草铲　4. 仿形轮　5. 平行四杆机构　6. 仿形弹簧　7. 悬挂装置　8. 机架　9. 除草指



图 3　组合式除草机整体结构

Fig. 3　Overall structure of combined weeding

上，在作物株间工作，由动力底盘带动除草单体以一定速度前进。由柔性指轮、刚性指盘、支架、转轴、轴承及除草指轮压盘构成，如图 4 所示。

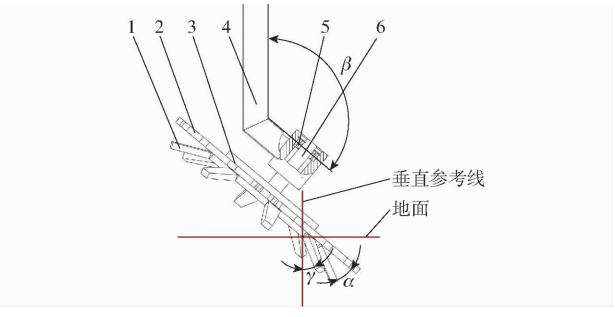

图 4　指轮式除草盘结构

Fig. 4　Wheeled weeding disc structure

1. 刚性指盘　2. 柔性指轮　3. 除草指轮压盘　4. 支架　5. 轴承　6. 转轴

对向斜置的指轮式除草盘在土壤阻力作用下对向旋转，各除草指顺次入土，搅动土壤并带动杂草根部，杂草在除草指上离心旋转并被带离株间区域。刚性指盘上折弯的钢指深入土壤，获得较大的阻力转矩使除草盘旋转运动。柔性指轮上均匀分布多个一定厚度的柔性指，其材质为低硬度橡胶，具备弹性形变能力，且由于杂草根部处在土壤表层而玉米根部比杂草更深，并且玉米茎秆比杂草具有更高的刚度，因此当遇到柔性指时，杂草会被卷起而玉米苗不受影响，达到株间除草目的。同时，针对新疆板结土壤坚实度高及砂质黏壤土的特性，柔性指轮选用丁腈橡胶（NBR）为基材，添加 5% 碳纤维与 3% 氧化铝粉的复合材料，既提升抗弯曲性能，又能降低砂石磨损，适配当地砂壤土作业需求。柔性指整体设计为统一结构尺寸，截面厚度 10 mm，在保证杂草拖拽力的同时，避免损伤玉米幼苗。

2.2　关键参数选择

如图 4 所示，指轮式除草盘作业时，刚性指盘工作垂直夹角 γ 是决定其入土性能与作业安全性的重要空间参数，并非由单一因素决定，而是受折弯角 α 与转轴倾角 β 的共同影响，其中，转轴倾角 β 是刚性指盘提供基础安装角基准，直接决定刚性指盘整体的倾斜方向，设计为 120°；刚性指盘折弯角 α 针对齿端入土方向进行二次调整，通过改变刚性齿与指盘本体的夹角，进一步优化入土深度与切削角度，最终形成刚性齿切入土壤的实际工作垂直夹角 γ，为确定刚性指盘折弯角提供设计依据。

除草盘直径、刚性指折弯角、柔性指轮齿数是影响工作状态的关键参数。直径决定作业幅宽与土壤接触面积，过小有除草盲区、过大则阻力增大，参照玉米株距（300 ~ 350 mm）选 180、200、220 mm 3 个水平；折弯角决定除草指入土深度与切割效率，过小会伤苗、过大则除草率低，结合杂草根系深度（10 ~ 30 mm）选 115°、130°、145° 3 个水平；齿数决定柔性指分布密度与作业频率，过少会漏除、过多则阻力增大，匹配杂草直径选 15、16、17 齿 3 水平。3 个参数与新疆土壤特性、玉米株间环境适配，且其变化对除草率、伤苗率、碎土率影响显著，通过正交试验可探究主效应与交互作用，为确定最优参数组合奠定基础。

3　仿真模型构建与结果分析

3.1　仿真模型构建

在 Solidworks 2025 软件中构建指轮式除草盘与人字除草铲三维几何模型，以 STP 格式导出并导入 EDEM 软件；为模拟真实田间板结土壤环境，在 EDEM 中构建尺寸为 2 000 mm × 700 mm × 200 mm 虚拟土槽（图 5），板结土壤模型采用单个球形颗粒Ⅰ和四球体聚合形式Ⅱ共同构成，其中，单个球形颗粒采用半径 5 mm 的 Hertz - Mindlin 模型和半径 4 mm 的Bonding V2 模型；四球体聚合形式采用半径 10 mm 的 Bonding V2 模型。通过“颗粒工厂”功能以生成速率 10 000 个/s、Z 轴负方向下落生成颗粒，直至充满土槽并稳定，重力加速度为 9.81 m/s^2；依据新疆旱作板结土壤特性与材料力学参数，在 EDEM 中设定材料属性与接触参数（表 1）；最后基

于土壤颗粒最大半径 5 mm 与除草铲作业速度(约 3.6 km/h),设定仿真时间步长为 20% 瑞利时间步长(约 5×10^{-6} s),既保障计算稳定性,避免颗粒穿透,又防止步长过小增加计算量,完成仿真模型的整体构建。土壤模型参数和橡胶力学参数根据前期研究及参考相关文献选取[26]。

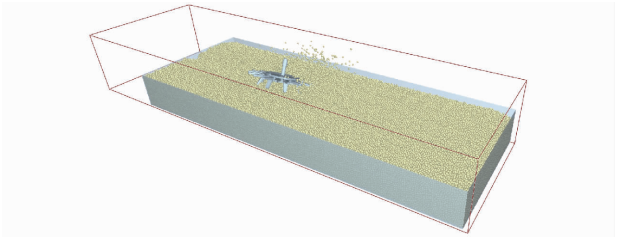

图 5 虚拟土槽

Fig. 5 Virtual soil trench

表 1 颗粒和材料属性参数

Tab. 1 Particles, material properties parameters

参数	数值
土壤泊松比	0.37
土壤剪切模量/MPa	1
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 480
刚性盘泊松比	0.29
刚性盘材料密度/(kg·m^{-3})	7 861
刚性盘剪切模量/MPa	7.9
柔性指盘泊松比	0.48
柔性指盘材料密度/(kg·m^{-3})	2 500
柔性指盘剪切模量/MPa	6.50
土壤恢复系数	0.57
土壤静摩擦因数	0.65
土壤动摩擦因数	0.03
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与刚性盘恢复系数	0.51
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与刚性盘静摩擦因数	0.56
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与刚性盘动摩擦因数	0.08
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与柔性指盘恢复系数	0.05
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与柔性指盘静摩擦因数	0.70
板结土Ⅰ、Ⅱ土壤与柔性指盘动摩擦因数	0.01

3.2 仿真结果分析

为了确定指轮式除草盘的最优工作参数,系统分析不同参数对土壤扰动、耕作阻力及除草效果的影响,进行除草盘-旱作板结土壤模拟仿真。

3.2.1 正交试验设计

通过分析指轮式除草盘作业情况可知,除草盘直径 d 是影响除草效果的核心因素,指轮式除草盘作业时,如图 6 所示,除草盘直径 d、刚性指盘折弯角 α、柔性指轮齿数 z 均会对作业性能造成影响。其中,除草盘直径 d 为柔性指轮外圆直径,d_1 为刚性指盘齿根圆直径,d_2 为柔性除草盘齿根圆直径,d_1 与 d_2 相等。

为优化指轮式除草盘结构参数,探究影响作业

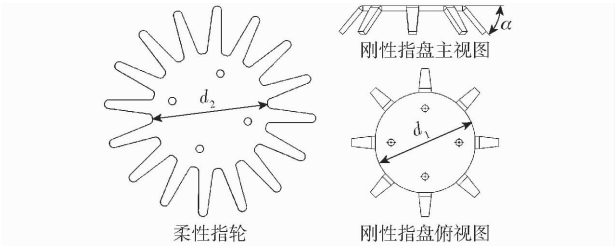

图 6 指轮式除草盘关键参数

Fig. 6 Key parameters of finger wheel weeding disk

效果的主次因素,对除草盘直径 d、刚性指盘折弯角 α、柔性指轮齿数 z 进行正交试验,依据实际田间除草作业速度,选择三因素三水平正交试验,选取除草盘直径、刚性指盘折弯角、柔性指轮齿数为试验因素,探究不同参数对土壤颗粒速度与耕作阻力的影响规律,以此确定指轮式除草盘的最优参数组合,试验因素水平如表 2 所示,试验方案与结果如表 3 所示,A、B、C 为试验因素水平。

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Levels of test factors

水平	因素		
	除草盘直径/mm	刚性指盘折弯角/(°)	柔性指轮齿数/个
1	180	115	15
2	200	130	16
3	220	145	17

表 3 正交试验方案与结果

Tab. 3 Orthogonal experiment scheme and results

序号	因素			土壤颗粒速度均值/(m·s^{-1})	耕作阻力均值/N
	A	B	C		
1	1	1	1	0.014	0.008 0
2	1	3	3	0.015	0.008 5
3	2	1	2	0.029	0.009 1
4	2	3	1	0.032	0.009 8
5	3	3	2	0.030	0.010 1
6	1	2	2	0.017	0.008 9
7	2	2	3	0.027	0.009 5
8	3	2	1	0.033	0.010 5
9	3	1	3	0.035	0.011 2

对正交试验结果进行极差分析,得到各因素水平、显著性顺序及优化组合,如表 4、5 所示。

由表 4 可知,除草盘直径是影响耕作阻力的主导因素(极差 0.002 13),其次为柔性指轮齿数(0.000 36),刚性指盘折弯角度影响最小(0.000 20)。随直径从 180 mm 增至 220 mm,耕作阻力从 0.008 47 N 升至 0.010 60 N,增幅 25.1%,因直径增大增加了除草盘与土壤的接触面积。折弯角从 115°增至 145°时,耕作阻力先升后降,整体变化幅度仅约 2.1%。齿数从 15 齿增至16齿时阻力降至最低(0.009 37 N),增至17

表 4　耕作阻力试验结果极差分析

Tab. 4　Analysis of extreme differences in tillage resistance test results

项目	参数	因素		
		A	*B*	*C*
K	K_1	0.008 47	0.009 43	0.009 43
	K_2	0.009 57	0.009 63	0.009 37
	K_3	0.010 60	0.009 47	0.009 73
R		0.002 13	0.000 20	0.000 36
最佳水平		A_1	B_1	C_2
显著性顺序			*A*、*C*、*B*	

表 5　土壤颗粒速度试验结果极差分析

Tab. 5　Test result range analysis of soil particle velocity

项目	参数	因素		
		A	*B*	*C*
K	K_1	0.015 33	0.026 00	0.026 33
	K_2	0.029 33	0.025 67	0.025 33
	K_3	0.032 67	0.025 67	0.025 67
R		0.017 34	0.000 33	0.001 00
最佳水平		A_3	B_1	C_1
显著性顺序			*A*、*C*、*B*	

齿时阻力回升，说明 16 齿可在保证作业频率的同时避免阻力过大。

由表 5 可知，除草盘直径是影响土壤颗粒速度的主导因素（极差 0.017 34），其次为柔性指轮齿数（极差 0.001 00），刚性指盘折弯角度的影响最小（极差 0.000 33）。随着除草盘直径从 180 mm 增至 220 mm，土壤颗粒速度从 0.015 33 m/s 升至 0.032 67 m/s，增幅达 113%，因除草盘直径增大显著增加了除草盘对土壤的扰动范围和动能传递能力。折弯角度从 115°增至 145°时，土壤颗粒速度变化幅度极小（约 1.3%）。齿数从 15 齿增至 16 齿时土壤颗粒速度略有下降，当增至 17 齿时变化不大，15 齿时速度最高（0.026 33 m/s）。

综合考虑耕作阻力与土壤颗粒速度的矛盾优化目标，除草盘直径 200 mm 在边际效益上最优，较 180 mm 速度提升 91.3% 而阻力仅增 11.8%，较 220 mm 阻力降低 11.8% 而速度仅降 9.8%。折弯角三水平对 2 项指标影响差异极小（不足 1.3%），考虑结构强度与作业稳定性选取 130°。齿数 16 齿在阻力指标中最优且与 15 齿的速度差异微小。最终确定指轮式除草盘最优结构参数为：除草盘直径 200 mm、折弯角 130°、齿数 16。

3.2.2　指轮式除草盘受力分析

在最优参数组合下，图 7 为指轮式除草盘受力云图，分为 3 个阶段。图 8 为阻力变化曲线，除草盘作业受力呈现明显阶段性特征。

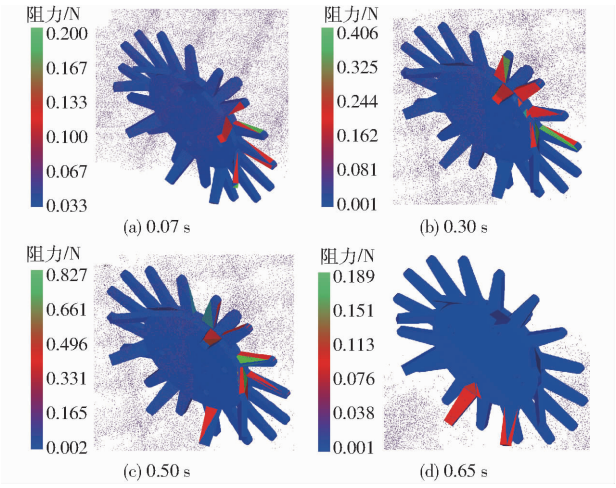

图 7　指轮式除草盘受力云图

Fig. 7　Force cloud diagrams of finger wheel type weeding disc

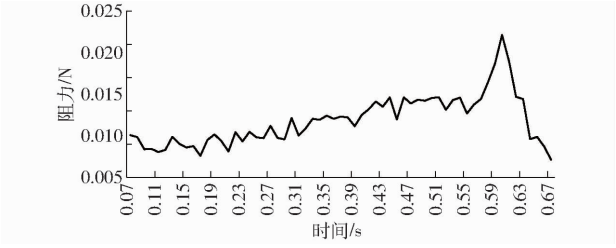

图 8　指轮式除草盘阻力曲线

Fig. 8　Resistance curve of ring-type weeding disc

入土初始阶段（0 ~ 0.07 s），如图 7a 所示，阻力从 0 快速上升至瞬时峰值 0.2 N。此阶段柔性指端部刚接触板结土壤表层，受力云图中仅端部呈现浅色调应力分布，无明显深色集中区域，表明阻力均匀且处于低载荷区间。该特征与土壤颗粒初始挤压作用相匹配，由于阻力未超过复合材质弹性阈值，柔性指未出现形变累积。

稳定切削阶段（0.07 ~ 0.5 s），如图 7b 所示，应力主要分布在柔性指中部-根部过渡区，阻力为 0.162 ~ 0.406 N，均值为 0.284 N。云图中无局部深色峰值区域，整体色调均匀，表明柔性指整体受力均衡。此阶段阻力波动主要源于土壤颗粒的持续摩擦作用与杂草根系的拖拽力，而阻力稳定在中低载荷区间，证明除草盘结构参数与新疆旱作板结土壤特性匹配良好，能够维持稳定的入土深度与切削姿态，避免因阻力突变导致作业偏差。

板结土块冲击与出土阶段（0.5 ~ 0.65 s），如图 7c 所示，柔性指根部与刚性指盘连接处出现深色调应力集中，峰值阻力达 0.827 N，是稳定阶段均值 2.91 倍，峰值与板结土块的瞬时冲击直接相关。受力云图中该区域色调最深，表明应力高度集中，此阶段复合材质的高强度特性充分发挥，有效抵御了冲击载荷。

在图 7d 中,色调快速变浅,阻力回落至 0.05 ~ 0.1 N,表明柔性指逐步脱离土壤,接触面积减小,阻力快速消散。此时柔性指材料进入弹性恢复阶段,无残留应力集中区域,证明材质回弹性能良好,可避免不可逆变形。

此外,采用“丁腈橡胶 +5% 碳纤维 +3% 氧化铝粉”复合材质,可提升抗应力集中与抗磨损性能,适配新疆板结土壤特性,降低结构失效风险。

图 8 阻力变化曲线清晰呈现指轮式除草盘作业全程阻力动态,整体随入土、切削、冲击板结土块及出土的流程,呈现“快速上升-稳定波动-急剧冲高-快速回落”的特征,直观反映出不同作业阶段阻力变化规律。

3.2.3 指轮式除草盘速度场分析

为探究除草末端扰动下泥土颗粒的运动状态,选择除草末端与土壤互作稳定阶段,土壤颗粒速度场如图 9a 所示,在指轮式除草盘的旋转扰动作用下,位于除草盘前方的土壤颗粒,受其圆周运动的直接拖拽作用,向两侧区域加速移动。株间杂草因与土壤颗粒紧密结合,随颗粒运动一同被带离,实现株间杂草的高效清除。从图 9b 可看出,随着除草盘入土深度的增加,土壤颗粒的运动速度呈显著下降趋势。原因是土壤深度越大,土壤紧实度越高,土壤颗粒间的黏结力与摩擦力显著增强,形成更大的运动阻力。

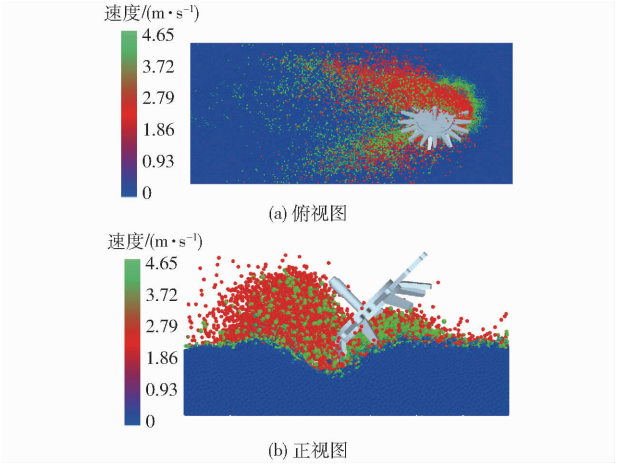

图 9 土壤颗粒速度场

Fig. 9 Soil particle velocity field

图 10 为土壤颗粒速度曲线,速度随作业进程呈“快速上升-稳定波动-平缓回落”趋势,与最优参数下除草盘的适度扰动特性契合,既保障杂草清除,又避免土壤过度扰动。

4 田间试验

4.1 试验方案确定

4.1.1 试验装置搭建

为验证指轮式除草盘在实际田间条件下作业效果,搭建以拖拉机为动力源的田间除草试验装置。通过悬挂系统将组合式除草单体与拖拉机连接,实现动力传递与作业角度调节,除草机如图 11 所示。根据玉米种植行距灵活调整除草单体间距,适配玉米试验田种植模式宽行 500 mm,满足大面积田间高效除草需求。

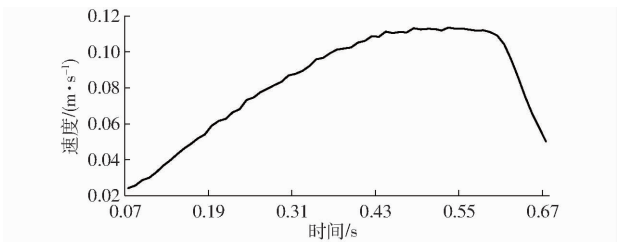

图 10 土壤颗粒速度曲线

Fig. 10 Soil particle velocity curve



图 11 田间除草机

Fig. 11 Field weed remover

4.1.2 试验因素与水平

选择人字除草铲距苗距离、除草盘距苗距离、人字除草铲入土深度为试验因素,三者分别对应组合式除草单体“行间-株间”协同作业的核心控制变量,且与新疆旱作板结土壤特性、玉米田环境(行距 500 mm、株距 300 ~ 350 mm,玉米根系深 120 ~ 160 mm、杂草根系深 10 ~ 30 mm)高度适配,直接决定除草与中耕效果。

从独立影响来看,人字除草铲距苗距离直接关联行间伤苗风险与除草覆盖完整性,取值偏离合理区间会导致伤苗率上升或除草盲区产生;除草盘距苗距离关联株间除草覆盖范围,参数不适配会导致伤苗或杂草漏除;人字除草铲入土深度关系行间松土深度,进而影响杂草清除效果,过浅则除草不彻底,过深易损伤玉米根系。

从交互影响来看,人字除草铲距苗距离与人字除草铲入土深度存在协同适配关系,需根据距苗距离动态调整松土深度;人字除草铲入土深度与除草盘距苗距离形成互补效应,松土深度增加时可适当扩大除草盘距苗距离取值以降低伤苗风险,松土较浅时需减小除草盘距苗距离取值保障除草覆盖;人字除草铲距苗距离与除草盘距苗距离需基于玉米株行距进行参数调整,避免行间与

株间作业区域交界处出现除草空白，图 12 为人字除草铲与除草盘距苗距离示意图。同时，试验过程使用的除草盘结构参数为指轮式除草盘最优参数组合。

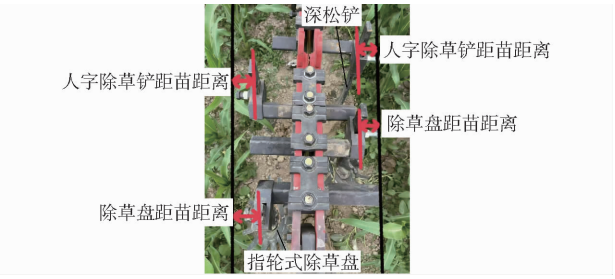

图 12　人字铲及除草盘距苗距离

Fig. 12　Distance between herringbone shovel and weeding disc from seedling

4.1.3　试验地点与基础条件

于 2025 年 8 月 8 日在新疆农垦科学院复播玉米试验田开展试验，土壤类型为砂壤土，含水率 16%，典型坚实度数据呈现“表层低、中层高、深层缓降”的特征，由表 6 可知，0 ~ 7.62 cm 土层深度坚实度从 0 kPa 迅速升至 3 102.64 kPa 峰值后略有回落，体现表层土壤随深度增加坚实度急剧上升的特点；7.62 ~ 15.24 cm 土层深度坚实度逐步降至 1 295.99 kPa，仍维持较高水平，反映板结土壤中层的致密特性；15.24 ~ 25.4 cm 土层深度坚实度进一步降至 665.35 kPa，虽较中层有所降低，但仍高于常规耕作土壤对应深度的坚实度水平，符合新疆旱作板结土壤的整体特征。

表 6　试验田土壤坚实度实测数据

Tab. 6　Measured data of soil compaction in experimental field

取样深度/cm	坚实度/kPa
5.08	2 068.43
7.62	3 102.64
10.16	2 433.11
15.24	1 295.99
25.40	665.35

试验田玉米苗高 450 ~ 650 mm，杂草高度 10 ~ 150 mm，玉米宽行间距约 500 mm，根据除草单体核心部件的作用区域，将试验田划分为行间区域（人字铲作业区）与株间区域（指轮式除草盘作业区），分别监测不同区域的除草效果与土壤扰动情况。

4.1.4　评价指标与测定方法

除草率、伤苗率和碎土率是评价组合式机械除草单体作业性能的核心指标，采用五点取样法进行田间实测。

除草率检测时，在作业后将样方内已经除去和被明显破坏的杂草拔除，去除土壤杂质后，使用精度为 0.1 g 的电子秤称量杂草总质重；再拔去未被除去的杂草，将 2 部分杂草一起称量，计算鲜重除草率。碎土率检测时，收集样方内全耕层土壤样本，人工分拣结合标尺测量方式，将土块按最长边尺寸≥5 cm 的土块拣出，使用精度为 0.1 g 电子秤分别称量直径≥5 cm 的土块和所有土块质量，以直径≥5 cm 的土块质量占样方总土块质量的百分比作为碎土率。伤苗率检测时，统计每个样方内受伤幼苗数量，再除以样方内作物幼苗总数量，得到单个样方的伤苗率。所有指标均重复测定 3 次，取平均值作为最终检测结果，以确保数据的可靠性与重复性。

除草试验指标除草率ω_c、伤苗率ω_d和碎土率ω_a计算式分别为

$$\omega_c = \frac{m_F - m_D}{m_F} \times 100\% \tag{1}$$

$$\omega_d = \frac{n_S}{n_Z} \times 100\% \tag{2}$$

$$\omega_a = \frac{l_M}{l_N} \times 100\% \tag{3}$$

式中　m_F——1 m 测点内作业前杂草总质量，kg

m_D——作业后残留杂草质量，kg

n_S——受损玉米苗数量，个

n_Z——1 m 测点内玉米总苗数，个

l_M——粒径≥50 mm 土块质量，kg

l_N——1 m 测点内土块总质量，kg

选择三因素三水平正交试验，探究不同参数对除草率、伤苗率和碎土率的影响规律，试验场景如图 13 所示，以此确定除草单体的最优参数组合，试验因素水平如表 7 所示，试验方案与结果如表 8 所示，D_1、D_2、D_3 为因素水平。



图 13　田间试验场景

Fig. 13　Field experiment scenario

表 7　正交试验因素水平（田间试验）

Tab. 7　Levels of test factors　cm

水平	因素		
	人字铲距苗距离	除草盘距苗距离	人字除草铲深度
1	12	-10	8
2	16	20	11
3	20	50	14

表 8 正交试验方案与结果(田间试验)

Tab. 8 Orthogonal experimental scheme and results

序号	因素			伤苗率/%	除草率/%	碎土率/%
	D_1	D_2	D_3			
1	3	3	1	6.25	78.36	88.34
2	2	1	2	11.76	78.17	94.94
3	2	3	3	5.88	78.98	72.47
4	3	1	3	0	82.17	78.66
5	1	1	1	0	82.61	96.11
6	1	3	2	0	82.85	86.49
7	3	2	2	0	76.77	88.68
8	1	2	3	0	79.88	87.92
9	2	2	1	0	79.44	91.49

4.2 极差分析

将正交试验原始数据导入 SPSS 26.0 软件进行描述性统计,计算各因素不同水平下评价指标的均值 K 与极差 R。其中,极差 R 为同一因素不同水平下指标均值的最大值与最小值之差,极差越大,表明该因素对指标的影响越显著;通过比较各因素极差,确定影响指标的主次顺序,并结合均值分析筛选各指标的最优因素水平。伤苗率、除草率、碎土率极差分析结果见表 9~11。

表 9 伤苗率极差分析

Tab. 9 Analysis of extremely poor seedling survival rate

项目	参数	D_1	D_2	D_3
K	K_1	0	3.92	2.08
	K_2	5.88	0	3.92
	K_3	2.08	4.04	1.96
R		5.88	4.04	1.96
最佳水平		D_{11}	D_{22}	D_{33}
显著性顺序			D_1、D_2、D_3	

表 10 除草率极差分析

Tab. 10 Analysis of extreme differences in weed control rate

项目	参数	D_1	D_2	D_3
K	K_1	81.78	80.98	80.14
	K_2	78.86	78.70	79.26
	K_3	79.10	80.06	80.34
R		2.92	2.28	1.08
最佳水平		D_{11}	D_{21}	D_{33}
显著性顺序			D_1、D_2、D_3	

表 11 碎土率极差分析

Tab. 11 Analysis of extreme differences in soil fragmentation rate

项目	参数	D_1	D_2	D_3
K	K_1	90.17	89.90	91.98
	K_2	86.30	89.36	90.04
	K_3	85.23	82.43	79.68
R		4.94	7.47	12.30
最佳水平		D_{11}	D_{21}	D_{31}
显著性顺序			D_3、D_2、D_1	

4.2.1 伤苗率极差分析

由表 9 可知,人字除草铲距苗距离是影响伤苗率的主导因素(极差 5.88),其次为除草盘距苗距离(4.04),人字除草铲深度影响最小(1.96)。当人字铲距苗距离 12 cm、除草盘距苗距离 20 cm、人字除草铲深度 14 cm 时伤苗率最低;当人字铲距苗距离 16 cm 时伤苗率升至 5.88%,因作业幅宽变化可能导致铲臂姿态不稳定;当除草盘距苗距离 20 cm 时伤苗率为 0,距苗过近或过远均会升高伤苗风险;人字除草铲深度以 14 cm 最为适宜(极差 1.96)。

4.2.2 除草率极差分析

由表 10 可知,人字除草铲距苗距离是影响除草率的主导因素(极差 2.92),其次为除草盘距苗距离(2.28),人字除草铲深度影响最小(1.08)。当人字铲距苗距离 12 cm 时除草率最高(82.61%),因距苗过近可充分覆盖株间杂草区域;当人字铲距苗距离 16 cm 时除草率降至 78.17%,过远则产生除草盲区。当除草盘距苗距离 -10 cm 时除草率最高(82.61%),因株间覆盖范围大,杂草清除彻底;当除草盘距苗距离 20 cm 时降至 76.77%。当人字除草铲深度 14 cm 时除草率最高(82.17%),深度增加可切断更深层杂草根系,提升除草效果。

4.2.3 碎土率极差分析

由表 11 可知,人字除草铲深度是影响碎土率的主导因素(极差 12.30),其次为除草盘距苗距离(7.47),人字铲距苗距离影响最小(4.94)。当人字除草铲深度为 8 cm 时碎土率最高(96.11%),深度增加至 11 cm 时降至 86.49%,至 14 cm 时锐减至 72.47%,因过深作业易使土壤重新压实,反而不利于碎土。当除草盘距苗距离 -10 cm 时碎土率最高(89.90%),株间扰动增强有利于辅助碎土;当除草盘距苗距离 50 cm 时降至 82.43%。当人字铲距苗距离 8 cm 时碎土率均值为 91.98%,距苗距离增加则碎土率下降。

综合考虑伤苗率、除草率与碎土率的极差分析结果,人字除草铲距苗 12 cm 时 3 项指标均优于 16 cm,但此时铲臂距玉米茎秆过近,在实际田间作业中受地形起伏、拖拉机行驶偏差等因素影响,易增加铲臂与幼苗意外碰撞的机械损伤风险。为保障田间作业的稳定性与避障安全性,避免因操作误差导致伤苗率上升,最终选取 16 cm 作为人字除草铲距苗最优参数。结合除草盘距苗距离与人字除草铲深度对 3 项指标的影响,确定组合式机械除草单体的最优作业参数为:人字铲距苗距离 16 cm、除草盘距苗距离 20 cm、人字除草铲深度 8 cm。

4.3　参数优化与验证

通过仿真优化与田间正交试验验证，最终确定组合式机械除草单体的最优作业参数组合为：人字铲距苗距离（D_1）16 cm、除草盘距苗距离（D_2）20 cm、人字铲深度（D_3）8 cm，且配套指轮式除草盘核心结构参数为直径 200 mm、刚性指盘折弯角 130°、柔性指轮 16 齿。

为进一步验证最优作业参数组合下设备的实际作业性能，采用土壤平整度测试仪（图 14）与测力架系统开展测试，作业后土壤平整度曲线如图 15 所示，由图 15 可知，以仪器测试架基准面为零点，作业后地表相对基准面整体下沉高程波动标准差为 4.8 cm，纵向坡度 1/750，横向坡度 1/780，均优于旱作农田耕作后 ±5 cm 平整度控制标准。

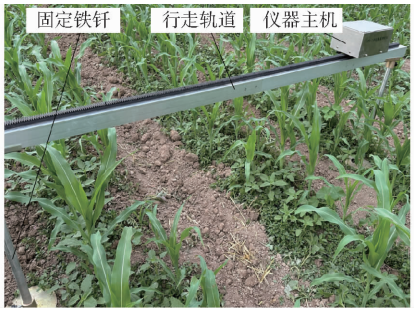

图 14　土壤平整度测试仪

Fig. 14　Soil flatness tester

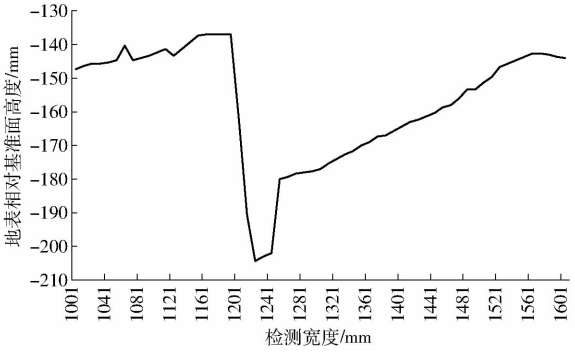

图 15　作业后土壤平整度曲线

Fig. 15　Soil flatness curve after work

耕作阻力测试通过测力架系统实现，将除草单体通过三点悬挂机构与测力架刚性连接，如图 16 所示，在试验田典型板结土壤中连续采集 3 组有效数据，每组测试时长 20 s，去除启动与停机阶段异常值后取平均值，耕作水平阻力曲线如图 17 所示，除草单体稳定作业时平均水平阻力为 904 N，平均垂直阻力 148 N，计算得整体平均耕作阻力为 1 052 N，该阻力特性与配套拖拉机的动力输出匹配性良好，可避免作业过程因动力不足导致入土深度不稳定问题。

田间实测结果显示，在最优参数组合下，组合式除草单体除草率达 82.4%、伤苗率仅为 2.65%、碎土率为 91.87%，既保障了除草效果与土壤疏松程度，又最大限度降低了伤苗风险。在最优作业参数组合下田间除草效果如图 18 所示，作业后田间杂草清除彻底，无明显杂草残留；土壤呈疏松颗粒状，无板结层复现；玉米幼苗茎秆直立、叶片无机械损伤，15 d 后无杂草复生，作物生长状态稳定。



图 16　测力架与组合式除草单体作业状态

Fig. 16　Schematic of working state of force measuring frame and combination

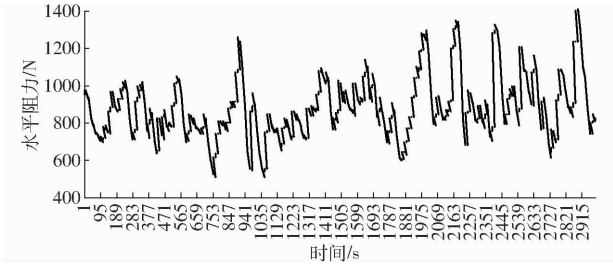

图 17　水平阻力曲线

Fig. 17　Horizontal resistance curve

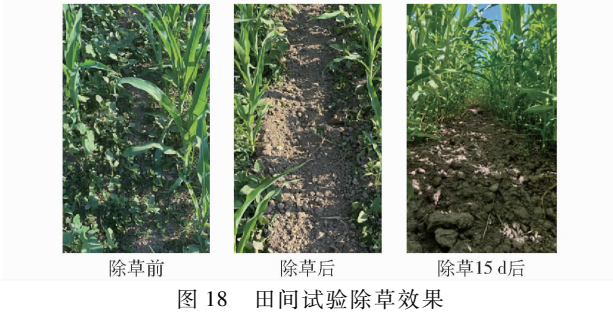

图 18　田间试验除草效果

Fig. 18　Weeding effect in field trials

5　结论

（1）针对新疆旱作板结土壤除草难题，设计了集成人字除草铲与指轮式除草盘组合式机械除草单体，明确核心部件结构与作业参数范围。

（2）EDEM 离散元仿真结合正交试验与 SPSS 分析表明，除草盘直径是影响土壤扰动与耕作阻力的主导因素，确定最优结构参数为直径 200 mm、刚性指盘折弯角 130°、柔性指轮 16 齿。

（3）通过田间正交试验及多目标优化，兼顾除草率、碎土率与伤苗率核心指标，确定最优作业参数为人字除草铲距苗 16 cm、入土深度 8 cm、除草盘距苗 20 cm。

(4)机具田间试验结果表明,优化后除草单体除草率 82.4%、伤苗率 2.65%、碎土率 91.87%、平均耕作阻力 1 052 N,有效解决板结土壤除草效率低问题。

参 考 文 献

[1] 郝建学,古丽再努尔·玉山,林明,等. 减少灌溉量配施土壤改良剂对新疆制种玉米产量、氮素利用及硝态氮动态的影响[J]. 干旱地区农业研究,2025,43(6):1 – 20.
HAO Jianxue, GURIZENUR Yushan, LIN Ming, et al. Effects of reducing irrigation amount combined with soil amendment on yield, nitrogen utilization and nitrate nitrogen dynamics of seed maize in Xinjiang[J]. Agriculture Research in the Arid Area, 2025,43(6):1 – 20. (in Chinese)

[2] 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机设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(6):1 – 11.
LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiment of 2FHF – 4.56 type wide row spacing crop base fertilizer deep application machine[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(6): 1 – 11. (in Chinese)

[3] GAZOULIS I, KANATAS P, ANTONOPOULOS N, et al. The integrated effects of biostimulant application, mechanical weed control, and herbicide application on weed growth and maize(*Zea mays* L.) yield[J]. Agronomy,2023,13(10):2614.

[4] 方会敏,牛萌萌,薛新宇,等. 玉米田间机械-化学协同除草的杂草防除效果[J]. 农业工程学报,2022,38(6):44 – 51.
FANG Huimin, NIU Mengmeng, XUE Xinyu, et al. Weed control effect of mechanical – chemical synergistic weeding in maize field[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 44 – 51. (in Chinese)

[5] HU W, HAQ U I S, LAN Y, et al. Design and performance evaluation of a spiral bar precision weeding mechanism for corn fields [J]. Scientific Reports,2024,14(1):28186.

[6] 曹成茂,向旺,罗坤,等. 抛推组合式草土分离前胡除草机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):106 – 114.
CAO Chengmao, XIANG Wang, LUO Kun, et al. Design and experiment of throwing-pushing combined weeder for grass-soil separation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3): 106 – 114. (in Chinese)

[7] 张青松,郑中原,廖庆喜,等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(7):20 – 37,149.
ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Application status and prospect of coupling simulation technology in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7): 20 – 37,149. (in Chinese)

[8] 祝诗平,林曦,冯川,等. 基于改进 DeepLabv3 + 的马铃薯幼苗与杂草识别方法[J]. 农业工程学报,2025,41(10):147 – 156.
ZHU Shiping, LIN Xi, FENG Chuan, et al. Recognition method of potato seedlings and weeds based on improved DeepLabv3 + [J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(10): 147 – 156. (in Chinese)

[9] 赵宏波,王学振,郑智旗,等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(7):1 – 19.
ZHAO Hongbo, WANG Xuezhen, ZHENG Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method application in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7): 1 – 19. (in Chinese)

[10] 张馨悦,王超,王庆杰,等. 玉米苗期行间除草二级对行装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):42 – 51,60.
ZHANG Xinyue, WANG Chao, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of two-stage inter-row weeding device for maize seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(4): 42 – 51, 60. (in Chinese)

[11] 邹金浪,刘陶红,姚冠荣,等. 中国化肥减量降碳效应评估[J]. 中国环境科学,2024,44(1):438 – 448.
ZOU Jinlang, LIU Taohong, YAO Guanrong, et al. Assessment of carbon reduction effect of chemical fertilizer reduction in China[J]. China Environmental Science, 2024,44(1): 438 – 448. (in Chinese)

[12] 李世柱,黄文明,王海翔,等. 机械除草技术在农业“双减”政策下推广应用研究[J]. 农业工程,2025,15(5):1 – 9.
LI Shizhu, HUANG Wenming, WANG Haixiang, et al. Study on the popularization and application of mechanical weeding technology under the policy of agricultural ‘double reduction’[J]. Agricultural Engineering, 2025,15(5): 1 – 9. (in Chinese)

[13] 权龙哲,张景禹,姜伟,等. 基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):115 – 123.
QUAN Longzhe, ZHANG Jingyu, JIANG Wei, et al. Design and experiment of inter-plant weeding robot system based on maize root protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12): 115 – 123. (in Chinese)

[14] 刘星星,车金宁,杨潇,等. 枸杞株间电驱动避障除草机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(23):104 – 114.
LIU Xingxing, CHE Jinning, YANG Xiao, et al. Design and experiment of electric drive obstacle avoidance weeding machine for wolfberry plants[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 104 – 114. (in Chinese)

[15] 黄文明. 机械除草技术研究现状及作业模式选择[J]. 农业工程,2024,14(5):10 – 13.
HUANG Wenming. Research status and operation mode selection of mechanical weeding technology [J]. Agricultural Engineering, 2024,14(5): 10 – 13. (in Chinese)

[16] 洪方伟,陈东顺,赖海林,等. 基于离散元的水田株间除草末端设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(12):29 – 37.

HONG Fangwei, CHEN Dongshun, LAI Hailin, et al. Design and experiment of weeding end between plants in paddy field based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(12): 29 - 37. (in Chinese)

[17] 张志熠,程博宇,王胜蒲,等.摆动型正弦转轭式玉米株间除草装置设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(8):28 - 38.
ZHANG Zhiyi, CHENG Boyu, WANG Shengpu, et al. Design and experiment of swinging sinusoidal rotary yoke weeding device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(8): 28 - 38. (in Chinese)

[18] 韩豹,郭畅,高英玲,等.大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):112 - 121.
HAN Bao, GUO Chang, GAO Yingling, et al. Design and test of soybean inter-plant weeding monomer mechanism and key components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6): 112 - 121. (in Chinese)

[19] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等.玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J].农业机械学报,2021,52(3):75 - 87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Interactive layered subsoiler design and discrete element simulation of corn straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3): 75 - 87. (in Chinese)

[20] 马中洋.基于改进 U - Net 模型的白菜株间避苗除草装置设计与试验[D].长春:吉林大学,2023.
MA Zhongyang. Design and experiment of Chinese cabbage seedling avoidance and weeding device based on improved U - Net model[D]. Changchun:Jilin University, 2023. (in Chinese)

[21] 孙叶丰.农业机器人发展现状及展望[J].现代农业研究,2022,28(3):92 - 94.
SUN Yefeng. Development status and prospect of agricultural robots[J]. Modern Agricultural Research, 2022,28(3): 92 - 94. (in Chinese)

[22] SUN C,JIANG Z,CAI Y, et al. Dual-branch CNN-transformer synergy with multi-scale striped convolution for sugarcane-weed segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,239(PC):111059.

[23] 张馨悦,王庆杰,王超,等.旱田智能化机械除草技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2025,56(4):22 - 41,71.
ZHANG Xinyue, WANG Qingjie, WANG Chao, et al. Research progress on weeding technology and equipment of intelligent mechanical weeding in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(4): 22 - 41, 71. (in Chinese)

[24] 赵润茂,丁帅奇,何杰,等.履带式除草机路径跟踪误差补偿改进型 MPC 控制方法[J].农业机械学报,2025,56(9): 326 - 334,354.
ZHAO Runmao, DING Shuaiqi, HE Jie, et al. Improved MPC control method for path tracking error compensation of crawler weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9): 326 - 334, 354. (in Chinese)

[25] 陈佶,刘伟华.稻田机械除草技术装备研究与应用现状[J].农业工程,2024,14(11):17 - 22.
CHEN Ji, LIU Weihua. Research and application status of mechanical weeding technology and equipment in paddy fields[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(11): 17 - 22. (in Chinese)

[26] 刘军恒,何春霞,刘静,等.硼改性酚醛树脂与丁腈橡胶比例对摩擦材料性能的影响[J].农业工程学报,2013,29(18): 84 - 89.
LIU Junheng, HE Chunxia, LIU Jing, et al. Effect of the ratio of boron modified phenolic resin to nitrile rubber on the properties of friction materials[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 84 - 89. (in Chinese)

(上接第 20 页)

[132] High-capacity grain handing and unloading system[EB/OL]. [2025 - 12 - 05]. https://www.newholland.com/en/cis/products/combine-harvesters/cx5-cx6-tier-3.

[133] 胡炼,张鸿,何杰,等.再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究[J].农业机械学报,2025,56(2):19 - 27.
HU Lian, ZHANG Hong, HE Jie, et al. Path planning technical research of low-rolling compaction harvesting operation for the first season of ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 19 - 27. (in Chinese)

[134] 李文鑫,张璠,姚竟发,等.联合收割机与运粮车协同作业调度技术研究[J].中国农机化学报,2023,44(2):119 - 125.
LI Wenxin, ZHANG Fan, YAO Jingfa, et al. Research on cooperative operation scheduling technology of combine harvester and grain truck[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(2):119 - 125. (in Chinese)

[135] 金诚谦,蔡泽宇,杨腾祥,等.基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究[J].农业机械学报,2022,53(5): 125 - 135.
JIN Chengqian, CAI Zeyu, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of yield monitoring system of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 125 - 135. (in Chinese)

[136] CHAI X Y, ZHANG P T, HU J P, et al. Development and experimentation of a universal array-style grain flow sensor for multiple crops based on random forest flow regression model[J]. Electronics, 2024, 13(23): 4791.