

抛扬式秸秆促腐还田复式作业机设计与试验

吴正阳^{1,2} 李洪文^{1,2} 何进¹ 王庆杰¹ 卢彩云¹ 王超¹ 李蓉蓉¹ 杨宗府¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 秸秆腐解可释放作物生长所需的养分,有提升土壤有机质含量和培肥地力的作用。为实现还田秸秆快速腐解,本文围绕促腐直接还田设计了一种抛扬式秸秆促腐还田复式作业机。依据格拉霍夫定理和压力角条件,对曲柄摇杆式回转抛扬机构进行了优化设计。利用 Kneading 接触模型构建了可模拟液相腐熟剂与固相(土壤与秸秆)混合的离散元模型,并耦合多体动力学进行仿真。采用混合均匀性指数量化了机具在仿真和田间的混合性能。优化求解得到曲柄、连杆、摇杆、机架杆和最大理论耕深长度因子分别为 1.00、2.60、2.60、3.50 和 1.492;仿真和田间试验平均混合均匀性指数分别为 0.54、0.47,相对误差为 12.94%。提出了一种适用于量化液-固混合情况的技术体系,可同时在仿真和物理环境生效,研究结果为机械化实现玉米秸秆促腐还田提供了解决方案。

关键词: 秸秆催腐; 腐熟剂; 固液混合; 混合均匀性指数; 图像处理; 离散元法

中图分类号: O347.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0045-10

OSID: 

Design and Test of Combination Machine for Accelerated Decomposition of Straw and Field Returning

WU Zhengyang^{1,2} LI Hongwen^{1,2} HE Jin¹ WANG Qingjie¹ LU Caiyun¹ WANG Chao¹
LI Rongrong¹ YANG Zongfu¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources,

China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The decomposition of straw releases nutrients that support crop growth, thereby increasing soil organic matter and fertility. Aiming to achieve rapid decomposition based on the field returning, a tossing-type combination machine was designed for rapid decomposition in the field return of straw. The optimized crank-rocker dimensions were solved based on Graff's theorem and pressure angle conditions, where the length of the crank was defined as one length factor. A model coupling the discrete element method and multibody dynamics was established to simulate the mixing process of liquid decomposition agents and solid phases (soils and straws), utilizing the Kneading contact model. A mixing index was innovatively defined to quantify the mixing performance of the machine in simulations and the field. It was shown that the length factors of crankshaft, connecting rod, rocker arm, frame, and theoretical maximum tillage depth were solved as 1.00, 2.60, 2.60, 3.50, and 1.492, respectively. By using the definition of the mixing index, the calculated mixing indices of the simulation and field were 0.54 and 0.47, respectively, where the relative error between simulations and fields was 12.94%. A systematic technology was proposed for quantifying the solid-liquid mixing, which could take effect simultaneously in both simulation and physical environments. Novel research perspectives and solutions were provided for the mechanization of promoted decomposition in maize straw returned directly.

Key words: straw decomposition; decomposition agent; liquid-solid mixing; mixing index; image processing; discrete element method

收稿日期: 2025-12-07 修回日期: 2025-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500902)

作者简介: 吴正阳(1997—),男,博士生,主要从事农业机械性能试验与创新设计研究,E-mail: zhengyu_wu@cau.edu.cn

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

0 引言

秸秆还田是保护性耕作技术体系的重要组成部分,能够有效减少土壤风蚀和水蚀^[1-2]。在田间腐解的秸秆能释放作物生长所需的养分,提升土壤有机质含量和培肥地力^[3],对耕地保护和可持续农业发展有重要意义^[4-5]。

作物能否有效地利用秸秆中的养分与秸秆腐解速率密切相关。为实现还田秸秆快速腐解,有“离田堆沤再还田”和“促腐还田”2种常见的解决方案^[6-7]。促腐还田技术是在秸秆还田环节或者耕整地环节中施加秸秆腐熟剂,在经济效益和生态效益方面具有显著优势^[8-11]。戴飞等^[12]设计了一种悬挂在拖拉机前端的腐熟液喷施装置,联合秸秆还田机集成快速腐熟秸秆还田联合作业机,并与单独机械粉碎还田进行对比试验,结果表明约7个月的时间内,秸秆腐熟还田腐解率相较于直接粉碎还田提高17.1%。葛宜元等^[13]在水稻高秆翻埋装置的基础上增加了腐熟剂喷施装置,探究了工作参数对牵引阻力的影响。方志超等^[14]在稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机^[15]的基础上增加了腐熟剂喷施装置,在覆土前使腐熟剂喷施于秸秆表面,探究了腐熟剂施用量对腐解速度的影响,证明了配施腐熟剂在秸秆翻埋过程中快速腐解的优势。杨雪岷^[16]研制了一种能将田间玉米秸秆归拢集行并同步撒施粉末腐熟剂的玉米秸秆聚垄腐熟还田机,实现田间秸秆聚垄、排菌、镇压和覆土联合作业。向禹舜^[17]设计了一种水稻秸秆集条沟埋腐熟还田机,集成开沟集条、药剂喷施、埋草覆土等多项功能,加速东北寒区还田秸秆腐解率。上述机械化实现秸秆促腐还田研究重点多在腐熟剂剂量,鲜有关注腐熟剂-土壤-秸秆三者的混合均匀度。

HAN等^[18]探究了“仅含秸秆”和“混合土壤的秸秆”的腐解率差异,结果表明在掩埋深度等初始条件相同情况下,后者腐解率比前者高60%~160%。WANG等^[19]对比了辽宁南部秸秆直接覆盖还田和旋埋还田的秸秆腐解率差异,结果表明后者秸秆腐解率显著优于前者。此外,在土壤引入腐熟剂能刺激原土壤微生物群落繁殖和降低土壤环境的碳氮比,并进一步提升土壤微生物活性^[20-22]。因此,在机械化施行秸秆促腐还田时,秸秆表面喷施腐熟剂并进行沟埋或翻埋不能构造加速秸秆腐熟的有利条件。机械化实现腐熟剂、土壤、秸秆均匀混合是充分发挥秸秆腐熟剂效能的更有效手段。腐熟剂-土壤-秸秆三者的均匀混合,是集约化施行秸秆促腐还田技术的必要研究点。

本文以实现腐熟剂-土壤-秸秆三者的均匀混合为目标,设计一种玉米秸秆促腐还田复式作业机,对关键部件进行优化设计,并开展模拟仿真和田间试验验证,以期为实现玉米秸秆促腐还田机械化提供解决方案。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

玉米秸秆促腐还田复式作业机是面向耕整地环节研发的,可在不增加作业环节的前提下完成腐熟剂-土壤-秸秆三者混合,主要结构为回转抛扬铲、腐熟液箱底座、喷剂系统、挡秸栅格、碎土镇压辊等,如图1所示。该机具设计耕深为150 mm,工作幅宽为1 350 mm。

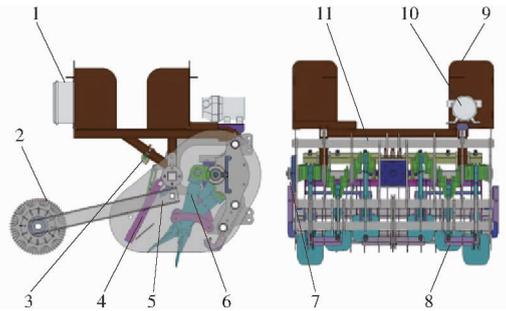


图1 玉米秸秆促腐还田复式作业机整机结构

Fig. 1 Main components of combination machine

1. 配电箱 2. 碎土镇压辊 3. 顶层喷嘴 4. 挡秸栅格 5. 中层喷嘴 6. 回转抛扬铲 7. 编码器 8. 底层喷嘴 9. 腐熟液箱底座 10. 隔膜泵 11. 机架

1.2 工作原理

如图2所示,曲柄摇杆式的回转抛扬机构能够将地表秸秆和表层土壤抛扬滞空,被抛扬的秸秆会被挡秸栅格阻拦,表土则会通过挡秸栅格间隙继续向上运动,如图2b所示。继续向上运动的土壤会被顶层喷剂施加腐熟剂,下落过程又继续在顶层喷剂范围内,运动的土壤会被充分混入腐熟剂。被阻拦的秸秆上表面将被中层喷剂施加腐熟剂,秸秆表面和底层土壤则被底层喷剂事先施加腐熟剂。为保障底层土壤与腐熟剂充分混合,在回转抛扬机构周期性运动的间隙中间歇性地施加底层喷剂。

2 关键部件设计

2.1 回转抛扬机构

2.1.1 工作部件设计

如图3所示,用于拌混土壤-秸秆-腐熟剂的核心机构是以曲柄连杆机构为依据而设计的回转抛扬机构。杆AB、BC、CD和AD组成了曲柄摇杆式四连杆机构,杆BC为连杆,杆AD为机架,主动件为曲柄AB,从动件为与连杆BC刚性连接的三铰点部件,铰

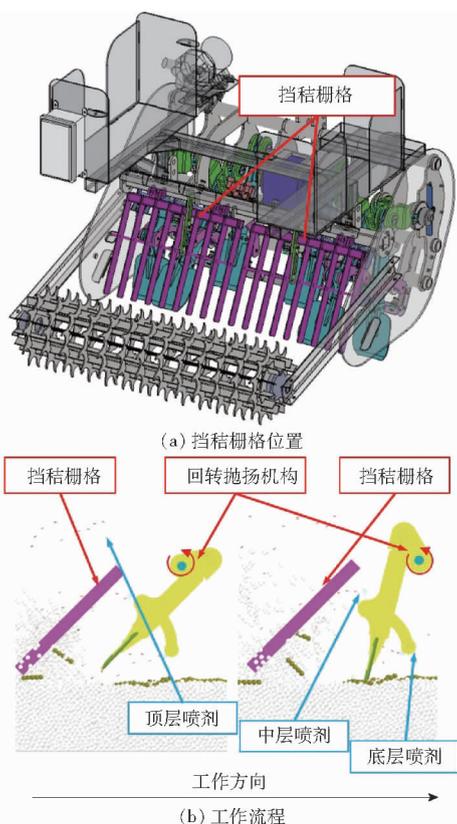


图 2 工作原理

Fig. 2 Working principles

$$\alpha = \left| \arccos \frac{l^2 + c^2 - b^2}{2lc} - \arccos \frac{d^2 + l^2 - a^2}{2dl} \right| \quad (1)$$

$$l = \sqrt{a^2 + d^2 - 2ad\cos\theta} \quad (2)$$

其中 θ ——曲柄输入角(曲柄与机架之间的夹角), rad

l ——点 B 、 D 之间的距离, mm

a ——曲柄长度, mm

b ——连杆长度, mm

c ——摇杆长度, mm

d ——机架长度, mm

根据格拉霍夫定理,四连杆机构中曲柄存在须同时满足机架条件和杆长条件,其中机架条件为整周回转的曲柄必须是最短杆邻边(即最短杆为机架时,得到双曲柄机构;最短杆邻边为机架时,得到曲柄摇杆机构)。因此,定义曲柄为最短杆,故而杆长条件为

$$a + \max\{b, c, d\} \leq b + c + d - \max\{b, c, d\} \quad (3)$$

根据《机械设计手册》,大功率传动的曲柄摇杆机构中,许用压力角为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。将式(1)~(3)转为 Matlab_v2024a 的代码,以许用压力角 35° 为目标,以曲柄长度为单位 1,通过 0.1 步长的全局搜索法得到曲柄摇杆机构相对尺寸分别为:曲柄长度因子为 1.0、连杆长度因子为 2.6、摇杆长度因子为 2.6 和机架长度因子为 3.5。

利用求得的各个杆长长度因子,以曲柄回转中心为原点,机架杆与 y 轴重合,通过原点垂直于机架杆方向为 x 轴建立平面直角坐标系,如图 4 所示。

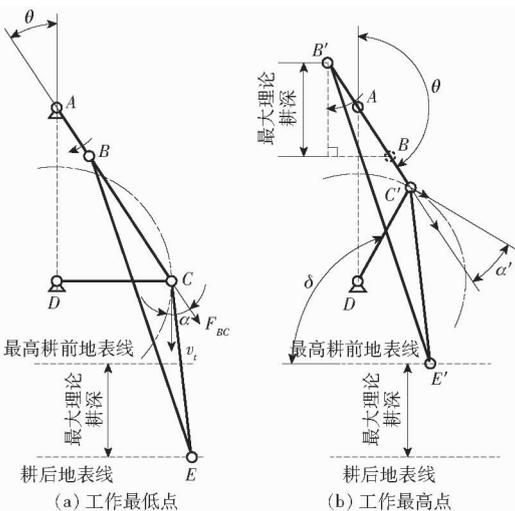


图 3 回转抛扬机构简图

Fig. 3 Schematics of rotary throwing mechanism

点 E 表示触土部件末端。为了尽可能地增大触土部件入土角,减少机具对土壤的压实作用,利用三铰点部件作为触土部件。

如图 3a 所示,当曲柄与连杆共线且不重合时,铰点 E 可到达垂直方向最低点即最大耕作深度。如图 3b 所示,当曲柄与连杆共线且重合时,铰点 E' 到达垂直方向最高点即最高耕前地表线。 EE' 垂直距离为最大理论耕深。

曲柄摇杆机构压力角即摇杆末端速度方向与连杆所夹的锐角 α , 计算式为

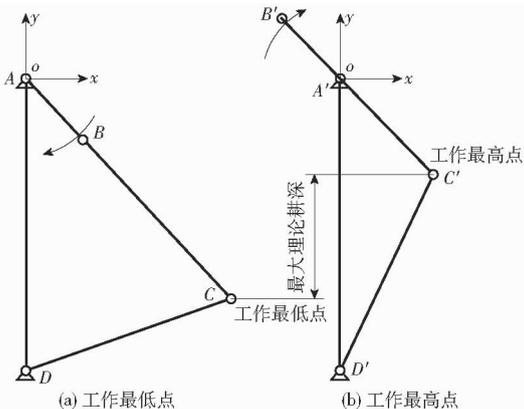


图 4 确定杆长长度因子后的机构简图

Fig. 4 Mechanism diagrams after determining length factor

曲柄与连杆重合 2 个位置为摇杆运动末端在深度方向极值,依据各杆长长度因子和余弦定理,解得相对长度因子最大理论耕深为 1.492。

该设计趋向表土耕作,因此额定耕深确定为 150 mm,考虑到触土部件在往复运动过程中需要一定的离地间隙以避免拖曳秸秆,因此确定最大理论耕深为 180 mm。经由长度因子计算得曲柄杆长为

121 mm、连杆与摇杆杆长为 314 mm、机架杆杆长为 422 mm。

2.1.2 触土部件设计

如图 5 所示,当连杆与曲柄重合时,连杆运动铰点 C' 达到垂直方向位移极值,即触土部件工作深度极值。设计的触土部件分为可拆卸的曲柄铰点段、摇杆铰点段和铲头段。

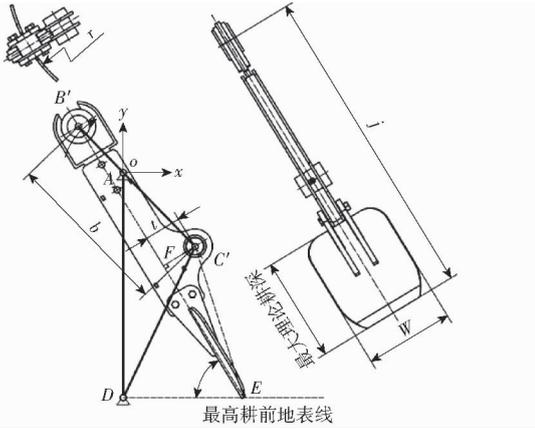


图 5 触土部件基础参数

Fig. 5 Basic parameters of ground contact component

铲头段长度尺寸按照最大理论耕深设计,依据 2.1.1 节所得相对长度因子的最大理论耕深 1.492,以及曲柄长度因子为 1 且实际设计长度为 121 mm,可得铲头长度尺寸为 180 mm。

为保障机具田间通过性,机架杆铰点 D 不得低于最高耕前地表线,而在工作部件位于工作最高点时铲头刃缘又要低于机架杆铰点 D ,否则在机架完全贴于地表时触土部件将拖曳地表土壤和秸秆。因此触土部件的设计限制条件之一为:当工作部件运动到图 5 所示的位置时,铰点 E 与铰点 D 处于同一水平位置。采用许用入土角不小于 60° ,利用 Linkage 软件对设计目标和限制条件求解 $C'F$ 长度和 $B'E$ 长度分别为 70 mm 和 597 mm。

2.2 喷剂系统

设计的喷剂系统包含 3 个主液路,分别为顶层喷嘴、中层喷嘴和底层喷嘴,其安装位置如图 6 所示。总液路腐熟剂经由分流阀分为 3 个相同流量的主液路,如图 7 所示。

顶层喷剂和中层喷剂都被分接在 6 个相同型号的扇形喷嘴上,喷嘴孔径 2.8 mm,喷雾角 65° 。因为分接的喷嘴同样由分流阀接出,所以在喷剂系统原理简图上全部画出。底层喷剂由分流阀分接至 3 个由常闭型电磁开关控制的分支液路,每个分支液路又分接 2 个相同型号的喷嘴。原因为:底层喷嘴需要在工作部件回转往复过程中间歇性地喷出腐熟剂以防止持续的喷剂造成触土部件粘土且容易

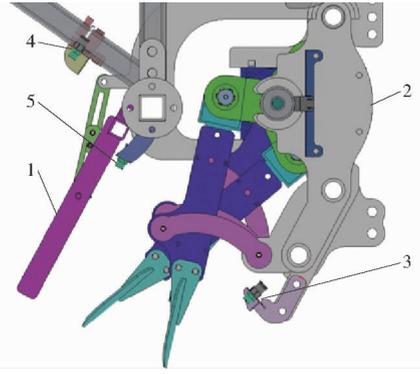


图 6 喷嘴安装位置

Fig. 6 Installation locations of nozzles

1. 挡秸栅格 2. 机架 3. 底层喷嘴 4. 顶层喷嘴 5. 中层喷嘴

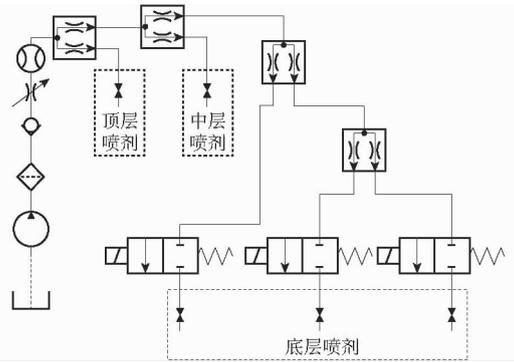


图 7 喷剂系统原理简图

Fig. 7 Schematic of spray system principle

锈蚀。电磁阀控制系统将在后续详细介绍。

2.3 交替式启停控制系统

为实现底层喷嘴在工作部件回转往复过程中间歇性启停,采用曲柄相位(旋转编码器捕获相位)作为信号输入,PLC 为主控单元,常闭型电磁开关阀为响应元件,设计了交替式启停控制系统,系统硬件参数如表 1 所示。

表 1 交替式启停控制系统硬件参数

Tab. 1 Hardware parameters of alternating opening and closing control system

名称	型号	参数注释
PLC 控制器	Siemens S7 1200	CPU 1212C, 数字量 8 入 6 出, 模拟量 2 出
旋转编码器	YSK 80	PPR 2000, DC 24 V
常闭型电磁开关阀	2W160-15	DC 24 V
光耦继电器	PWM 20 kHz	I/O, DC 3 ~ 20 V, DC 3.7 ~ 27 V, 10 A
降压模块	LM2596S DC-DC	I/O, DC 4 ~ 36 V, DC 1.25 ~ 32 V

采用 TIA Portal V20 编写控制系统程序,程序包含断电保持型初始化模块和主控制模块,如图 8 所示。

控制系统程序中输入值为编码器输出的当前值,以创建的布尔类型“设置新的当前值”和“激活

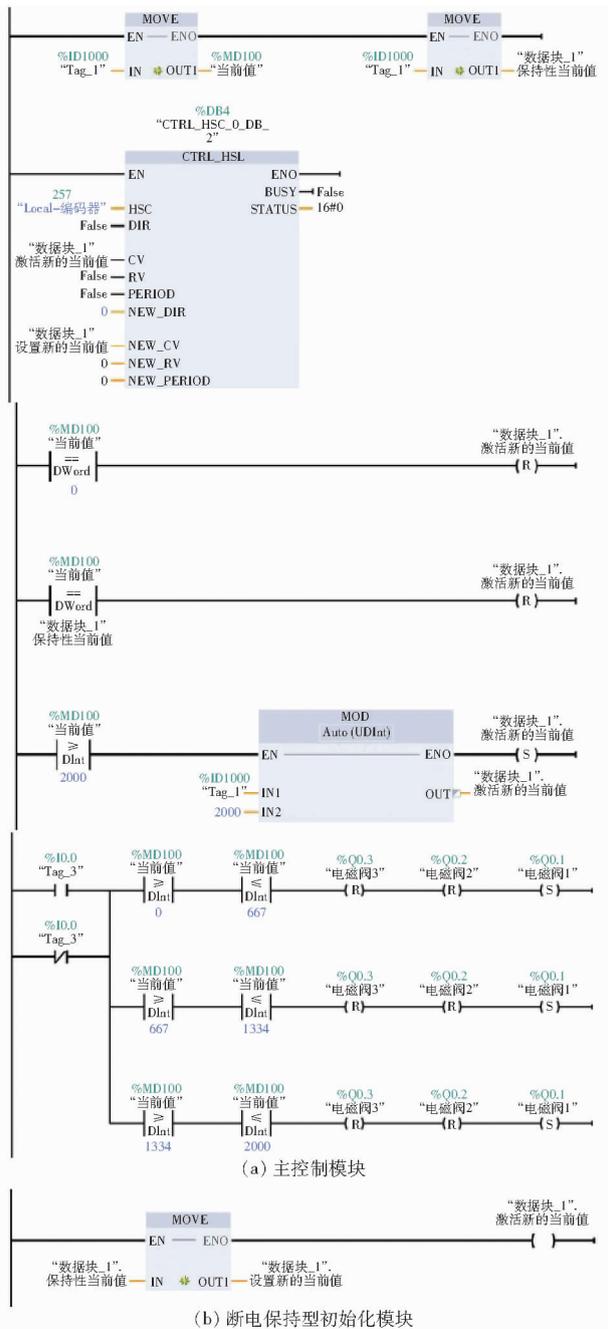


图 8 交替启停控制系统程序

Fig. 8 Procedure of control system for alternating opening and closing

新的当前值”数据控制高速计数器,实现无系统中断的快速响应。

利用 MOD 指令(对输入的编码值取 2 000 的余数)将编码器输出值控制在 0 ~ 2 000,以防止工作部件持续旋转造成计数超限;将当前值持续地赋值给“保持性当前值”,并配合断电保持型初始化模块实现系统断电再上电后编码器输出值不变;以 120°(编码值增量为 667)的间歇控制电磁阀,以实现 3 个由常闭型电磁开关阀控制的分支液路可间歇性启停。

电磁阀 1、2、3 所控制的底层喷嘴为以变速箱位

置为起点向两侧顺序排列,即电磁阀 1 控制最内侧 2 个喷嘴;电磁阀 3 控制最外侧 2 个;电磁阀 2 则控制剩余 2 个。

3 DEM - MBD 耦合仿真

3.1 DEM 模型

3.1.1 接触模型

仿真中为实现液态腐熟剂在固态土壤/秸秆之间的吸附和液相传递,选用 Kneading 接触模型作为颗粒之间的基础模型,它是一种适用于模拟固液混合过程的离散元接触模型,文献[23 - 25]证明它在模拟液态腐熟剂/改良剂与固相混合的能力。颗粒与几何体之间仍采用 Hertz - Mindlin(no slip)。

如图 9a 所示,Kneading 模型定义了液相颗粒、干颗粒和湿颗粒 3 种颗粒类型。湿颗粒由固体核心与液膜构成,其接触标准以固体核心为准而非液膜。固体核心相关的接触类型包含:液相与固体内核接触;固体内核之间接触(图 9b)。第 1 类可表征固相对液相的吸收过程。第 2 类则可表征液相在固相之间的传导。在模拟迭代中,液态颗粒质量在固体颗粒间分散传导直至完全被吸收,每个颗粒液相增量决定了每个仿真时间步长内传导的液相质量。

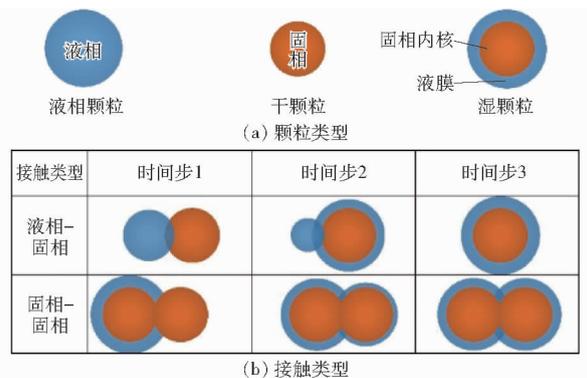


图 9 Kneading 接触模型原理

Fig. 9 Principles of Kneading contact model

第 1 类接触液相质量增量计算式为

$$\Delta m = \frac{m_i t_s}{t_a} \quad (4)$$

式中 Δm ——液相质量增量
 m_i ——液相颗粒初始质量
 t_s ——仿真时间步长
 t_a ——液相吸收力

第 2 类接触液相质量增量计算式为

$$\Delta m = \frac{\Delta \omega m_{pn} t_s}{t_c} \quad (5)$$

式中 m_{pn} ——具有固体核心的颗粒当前总质量
 $\Delta \omega$ ——液相含量差
 t_c ——液相传导力

3.1.2 仿真参数

采用 EDEM v2023.1 软件构建离散元模型。依据“仿真容重变异系数不超过 5%”原则^[26],土壤颗粒模型采用固定半径 10 mm 的单球颗粒。腐熟剂颗粒模型采用固定半径 5 mm 的单球颗粒。秸秆模型采用 5 个半径 10 mm 的小球连续均匀地刚性连接而成,秸秆总长为 100 mm,以模拟秸秆粉碎还田后的长度。材料本征参数如表 2 所示,构建 DEM 模型所需的接触参数如表 3 所示,仿真时间步长为 2.5×10^{-4} s。

表 2 材料本征参数

Tab.2 Properties of material

参数	数值
土壤泊松比	0.38
秸秆泊松比	0.33
腐熟剂泊松比	0.50
钢泊松比	0.30
土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2300
秸秆密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	640
腐熟剂密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1000
钢密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7861
土壤剪切模量/Pa	1.0×10^6
秸秆剪切模量/Pa	5.0×10^6
腐熟剂剪切模量/Pa	1.0×10^4
钢剪切模量/Pa	7.9×10^{10}

表 3 构建模型所需的接触参数

Tab.3 Contact parameters for modeling

参数	数值
土壤-土壤碰撞恢复系数	0.37
土壤-土壤静摩擦因数	0.44
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.12
秸秆-秸秆碰撞恢复系数	0.22
秸秆-秸秆静摩擦因数	0.64
秸秆-秸秆滚动摩擦因数	0.37
土壤-秸秆碰撞恢复系数	0.31
土壤-秸秆静摩擦因数	0.50
土壤-秸秆滚动摩擦因数	0.29
土壤-钢碰撞恢复系数	0.25
土壤-钢静摩擦因数	0.81
土壤-钢滚动摩擦因数	0.22
秸秆-钢碰撞恢复系数	0.24
秸秆-钢静摩擦因数	0.56
秸秆-钢滚动摩擦因数	0.23

依据文献[25]设置 Kneading 模型,其中液相吸收力为 1.0×10^{-3} s,液相传导力为 29.89 s,最小液相含量梯度为 0.666%,初始液相含量为 8.63%,最小液相颗粒体积率为 5%,饱和含液量为 28.60%。

因为液相吸收力非常小,液相颗粒在模拟过程中会在极短的时间内被内核吸收,几乎不会与其他

颗粒发生碰撞或者摩擦,它们之间也不会发生碰撞或者摩擦,所以与液相颗粒相关的接触参数均设置为 0.01。

采用静态工厂生成 $7000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的仿真土槽,仿真土壤容重为 1353 kg/m^3 与后续的田间试验土壤容重一致,共计生成 613 552 个土壤颗粒,如图 10 所示。

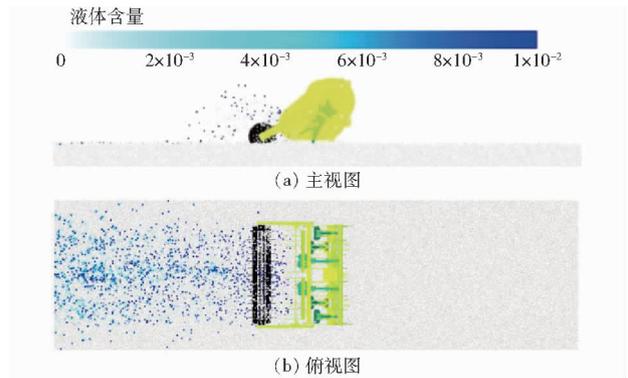


图 10 离散元仿真模型

Fig.10 Simulated model of discrete element method

通过调整土壤颗粒密度改变仿真土壤容重,其间以边长为 300 mm 的虚拟正方体空间对容重进行监测^[27-30]。以随机位置方式在土槽表面生成秸秆颗粒 1.47 kg 以达到秸秆覆盖量 0.3 kg/m^2 。采用 Spray 颗粒工厂实现喷嘴效果,喷雾角为 65° ,质量流率为 0.03 kg/s 。6 个顶层喷嘴和 6 个中层喷嘴自仿真开始到结束一直开启。底层喷嘴则按照减速器传动比 3:1、拖拉机输入轴转速 540 r/min 和回转部件动平衡角 120° 计算的 0.11 s 喷剂间隔设置。因此,整个仿真过程中底层常开的喷嘴数量为 2,仿真喷剂系统总流量为 25.2 L/min 。

3.2 MBD 模型

采用 RecurDyn v2023 软件建立多体动力学模型。利用 SpaceClaim v2021 R1 软件重新组织玉米秸秆促腐还田机的零部件从属关系。删除配电箱、腐熟液箱底座、泵等不与土壤或秸秆发生直接接触的零部件,再导入 RecurDyn 中。如图 11 所示,构建了工作部件、碎土镇压辊等定轴转动副 23 对,碎土镇压辊限位实体接触副 2 对,机架与 Ground 平动副 1 对。依据拖拉机后输出低速挡转速 540 r/min 和减速器传动比 3:1,设工作部件转速为 180 r/min 。设机具前进速度 0.83 m/s (约 3 km/h),仿真结束时间设置为 20 s 。

3.3 耦合仿真试验

仿真结束后选择仿真土槽中间 5 m 作为数据采集段,每间隔 2000 mm 设置 1 个混合均匀度采样空间,共设置 3 个采样空间,如图 12a 所示。

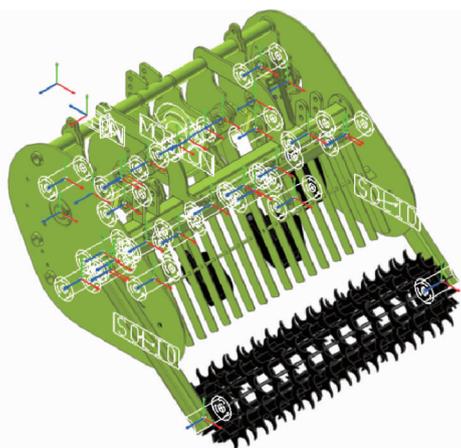


图 11 多体动力学模型

Fig. 11 Multibody dynamics model

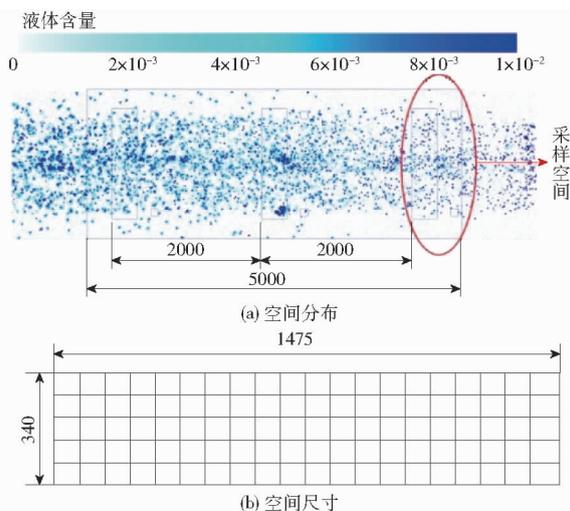


图 12 计算混合均匀度的采样空间

Fig. 12 Sampling space for calculating mixing indexes

如图 12b 所示,覆盖层采样空间为长×宽×高为 1475 mm×340 mm×100 mm 的立方体,长度方向均匀划分 20 份,宽度方向均匀划分 5 份,共 100 个最小子空间。

在耦合仿真过程,液相颗粒会在极短的时间(液相吸收力参数)内被固相内核吸收,因此从相态上可将颗粒分为干颗粒和湿颗粒。定义混合均匀性指数量化覆盖层采样空间中每个最小子空间中干颗粒和湿颗粒的混合程度,以及根据最小子空间混合均匀性指数计算每个采样空间混合均匀性指数,以描述液相腐熟剂在固相(土壤和秸秆)中的混合情况。混合均匀性指数计算式为

$$I_i = \frac{I_{II} + 1}{2} \quad (6)$$

其中

$$I_{II} = \begin{cases} \frac{1}{E-1} \left(2 - \sum_{k=1}^q P_{ki} \right) & (P_{k=dyeed} = 1) \\ \frac{1}{E-1} \left(\sum_{k=1}^q P_{ki} - 2 \right) & (P_{k=dyeed} \neq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{ki} = \frac{n_{ki} f_k}{\max(n_{1i} f_1, n_{2i} f_2)} \quad (8)$$

$$f_k = \frac{\max \left(\sum_{i=1}^M n_{1i}, \sum_{i=1}^M n_{2i} \right)}{\sum_{i=1}^M n_{ki}} \quad (9)$$

式中 I_i ——第 i 个最小子空间混合均匀性指数

I_{II} ——未归一化的 I_i

E ——颗粒类型数量,取 2

P_{ki} ——第 i 个最小子空间中 k 型颗粒比例因子

$P_{k=dyeed}$ ——第 i 个最小子空间中湿颗粒比例因子

Q ——最小子空间总数

f_k —— k 型颗粒在第 i 个最小子空间中的参与因子

n_{1i} —— $k=1$ 时,第 i 个最小子空间中的颗粒总数

n_{2i} —— $k=2$ 时,第 i 个最小子空间中的颗粒总数

M ——采样空间中最小子空间数量,取 100

n_{ki} ——第 i 个最小子空间中 k 型颗粒数量

覆盖层腐熟剂混合均匀性指数计算式为

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \left(I_i \sum_{k=1}^E n_{ki} \right) \quad (10)$$

式中 N ——每个采样空间中的颗粒总数

3.4 仿真结果分析

通过 EDEM v2023.1 软件后处理导出采样空间内总颗粒数 N 。以 standard 类型导出包含采样空间每个最小子空间的颗粒液相含量(Water content)属性,大于初始液相含量记为 1,否则记为 0,所有计数和作为颗粒类型为湿颗粒总数,再经由总颗粒数获得干颗粒总数。采用上述数据处理方法,应用到整个采样空间可获得 n_{ki} ,并计算参与因子。应用到最小子空间可计算比例因子。最终 3 个测量空间内每个最小子空间混合均匀性指数计算结果如图 13 所示。

依据式(10)计算得 3 个采样空间混合均匀性指数分别为 0.535、0.544 和 0.541。所有采样空间混合均匀性指数变异系数为 0.67%。根据式(6)可知,混合均匀性指数为 0~1。结果表明,玉米促腐还田复式作业机在模拟中可获得不低于 0.5 的混合均匀性指数。

4 田间试验

4.1 试验地点

试验地点为内蒙古自治区兴安盟扎赉特旗图牧

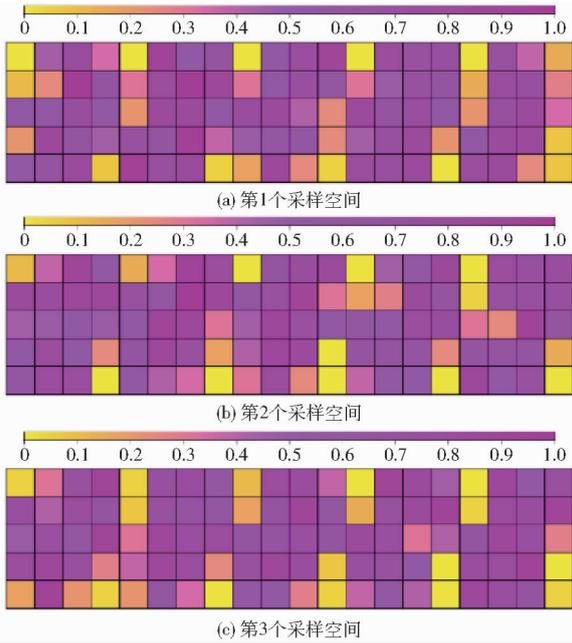


图 13 混合均匀性指数计算结果

Fig. 13 Results of mixing indexes in sampling spaces

吉镇双兴嘎查(40.84°N, 111.75°E), 该地土壤类型为黑钙土。通过 60 cm^3 环刀取样深度 $10\sim 30\text{ cm}$ 的土样, 测量得试验地土壤容重为 $(1\,353 \pm 42)\text{ kg/m}^3$ (仿真土壤容重依据此数据建立), 土壤质地为砂壤土(砂粒含量 65.45%, 黏粒含量 24.38%, 粉粒含量 10.17%), 含水率为 12.03%。种植模式为一垄(垄宽 1350 mm) 双行(宽行 800 mm, 窄行 550 mm)。采用单垄 1600 mm 长的 5 点取样法, 测得秸秆覆盖量为 $(0.305 \pm 0.042)\text{ kg/m}^2$, 秸秆干基含水率为 $(36.11 \pm 19.00)\%$ 。

4.2 试验方法

使用的秸秆腐熟剂由腐熟剂原液(河南益富源生物科技发展有限公司)、液态尿素(河北银海化工有限公司)、亮蓝染色剂(山东鲁中生物科技发展有限公司)和水以质量分数 10%、10%、10% 和 70% 混合而成。通过地磅对比腐熟液箱空载和装水后质量差, 确定水总质量, 然后依据预设的质量分数配比添加其他成分。田间试验如图 14 所示。



图 14 田间试验

Fig. 14 Field tests

作业过程拖拉机挂低速 1 挡, 行进速度约为 3 km/h , 后悬挂下压保证机具作业过程处于最大耕

深, 采用节流阀调整总液路流量为 25.2 L/min (流量计获取), 试验区为单垄长度 20 m , 测量区为中间 5 m 。机组作业后, 采用内框尺寸为 $1\,475\text{ mm} \times 340\text{ mm}$ 的金属框, 按照仿真间隔设置在测量区内放置 3 次, 每次使用手机相机采集图像, 如图 15 所示。

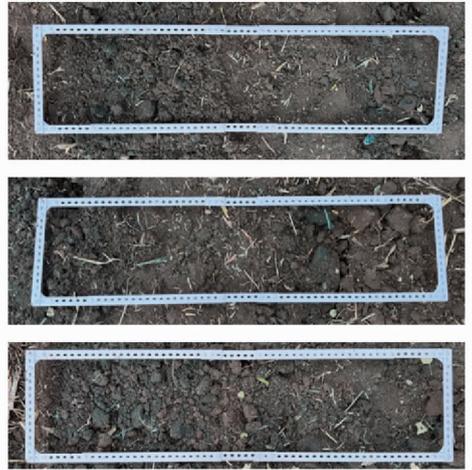


图 15 测量区内采集的图像

Fig. 15 Images captured within measurement area

使用亮蓝染色剂^[24,31-32]是为了在试验后能明显地在颜色上区分固相(土壤和秸秆)的浸渍区域和未浸渍区域。

4.3 试验结果与分析

田间试验图像处理分为预处理、确定染色区域阈值和分割染色区域 3 个部分, 如图 16 所示。

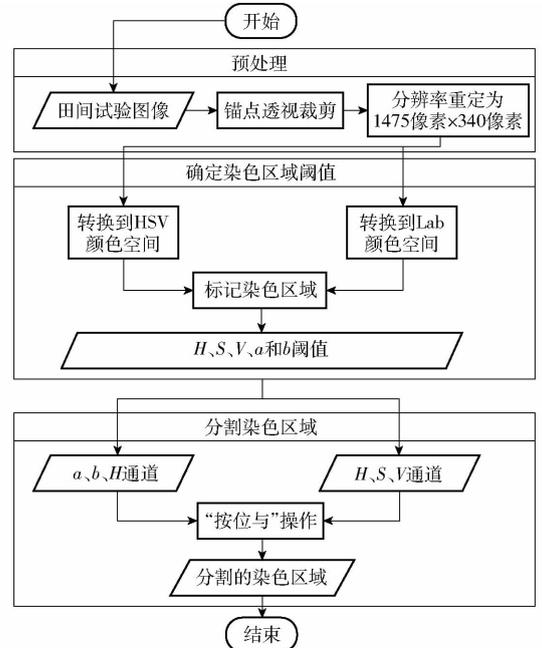


图 16 图像处理流程

Fig. 16 Workflow of image processing

(1) 手动选取金属框架内嵌矩形顶点作为锚点, 依据锚点进行透视变换并裁剪保留内嵌区域的像素, 将裁剪后的图像分辨率重定义为 $1\,475\text{ 像素} \times$

340 像素(每个像素表示 $1 \times 1 \text{ mm}$ 的区域)。

(2)重定义分辨率的图像分别转换到 HSV(色相、饱和度、明度)色彩空间和 CIE Lab 色彩空间,以提升亮蓝染色区域的对比度。分别在这 2 个色彩空间中人为地标记若干个染色区域,其间所有通道数值都设定为不可见,以避免人为倾向性决定阈值范围。然后确定所有标记区域在 H 、 S 、 V 、 a 、 b 通道的极值,其中极大值作为染色区域阈值上限,极小值作为染色区域阈值下限。

(3)重组图像为 abH 和 HSV 色彩空间的 2 幅新图像,根据步骤(2)确定的阈值范围提取这 2 幅图像上染色区域像素的坐标集,最后根据这 2 个坐标集对重组图像进行“按位与”操作,获得分割后的图像。采用 CIE Lab 色彩空间是基于其与人类视觉感知具有良好一致性。采用 HSV 色彩空间是因为光照强度随时间变化,每幅图像的环境亮度并不相同。省略 CIE Lab 色彩空间中的 L (亮度)分量旨在避免环境亮度不一致对染色区域阈值的影响。3 幅田间试验图像采集间隔不足 1 min (光线条件几乎一致),且相机未设置智能滤镜,所以在染色区域分割前并没有使用统一的颜色校正。

依据以上图像处理流程,将分割后田间图像二值化结果如图 17 所示。

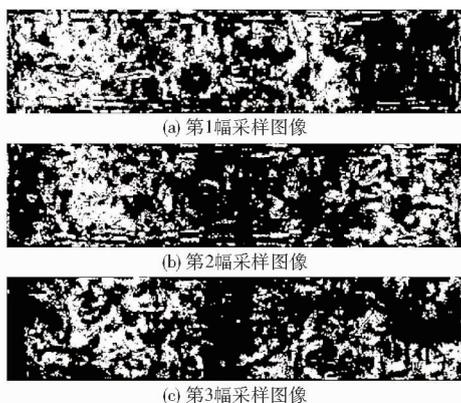


图 17 分割染色区域后二值化图像

Fig. 17 Binarized image following segmentation of stained area

混合均匀性指数计算方法与仿真计算方法类似,其中二值化图像中的白像素对应湿颗粒,黑像素对应干颗粒。田间试验混合均匀性指数如图 18 所示。

依据式(10)计算得 3 个采样空间的混合均匀

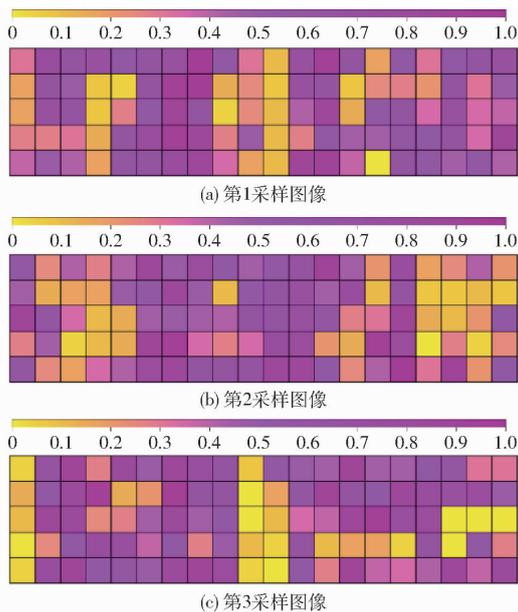


图 18 田间试验混合均匀性指数

Fig. 18 Results of mixing indexes of field test

性指数分别为 0.476、0.453 和 0.481。所有采样空间混合均匀性指数变异系数为 2.54% (小于 5%),较仿真预测变异系数高,表明田间试验混合均匀性指数变异性较仿真更高,但在可接受范围内。田间采样平均混合均匀性指数为 0.470,相对仿真预测误差为 12.94%。

5 结论

(1)设计了一种以曲柄为主动件的曲柄摇杆式回转抛扬机构,依据格拉霍夫定理和压力角条件,确定了以曲柄长度为单位 1 的各个杆长长度因子,并依据最大理论耕深设计了符合预设耕深工作部件,确定了玉米秸秆促腐还田复式作业机核心机构尺寸。

(2)构建了一种能模拟液相腐熟剂与固相土壤/秸秆混合的离散元模型,搭建了玉米促腐还田复式作业的离散元-多体动力学耦合模型。采用混合均匀度指数衡量液相与固相混合程度,同时在仿真和田间图像中生效。

(3)提出了一种适用于量化液态-固态混合物混合情况技术体系,包含仿真环境的混合均匀性指数计算方法,物理环境图像处理办法。田间试验结果表明混合均匀度指数相对仿真预测误差为 12.94%。

参 考 文 献

- [1] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)
- [2] 王晓燕,高焕文,李洪文,等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000,

- 16(3): 66-69.
WANG Xiaoyan, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on runoff and erosion under conservative tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 66-69. (in Chinese)
- [3] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276.
DAI Zhigang, LU Jianwei, LI Xiaokun, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 272-276. (in Chinese)
- [4] 杨爱峥,迟浩诚,王秋菊,等. 东北黑土区秸秆和生物炭混施对土壤氮素与大豆氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 523-533.
YANG Aizheng, CHI Haocheng, WANG Qiuju, et al. Impact of combined straw and biochar application on soil nitrogen and soybean nitrogen use efficiency dynamics in northeast China's black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 523-533. (in Chinese)
- [5] 王春雷,刘冲,林东洪,等. 东北黑土地保护性用养技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 1-21.
WANG Chunlei, LIU Chong, LIN Donghong, et al. Research progress of protective utilization and maintenance technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 1-21. (in Chinese)
- [6] 南雄雄,田霄鸿,张琳,等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 626-633.
NAN Xiongxiang, TIAN Xiaohong, ZHANG Lin, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 626-633. (in Chinese)
- [7] 张成娥,王栓全. 作物秸秆腐解过程中土壤微生物量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 96-99.
ZHANG Cheng'e, WANG Shuanquan. Study on soil microbial biomass during decomposition of crop straws[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 96-99. (in Chinese)
- [8] 毕于运,高春雨,王红彦,等. 我国农作物秸秆离田多元化利用现状与策略[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 1-11.
BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Hongyan, et al. Research on the present situation and corresponding strategies of off-field straw collection and comprehensive utilization in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(9): 1-11. (in Chinese)
- [9] 聂文翰,戚志萍,冯海玮,等. 复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 783-791.
NIE Wenhan, QI Zhiping, FENG Haiwei, et al. Straw composts with composite inoculants and their effects on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activity[J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 783-791. (in Chinese)
- [10] WANG Xiaogang, WANG Qiongshan, ZHANG Youchang, et al. Influence of decomposition agent application and schedule in wheat straw return practice on soil quality and crop yield[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 8.
- [11] 胡诚,陈云峰,乔艳,等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 59-66.
HU Cheng, CHEN Yunfeng, QIAO Yan, et al. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(1): 59-66. (in Chinese)
- [12] 戴飞,张锋伟,赵春花,等. 快速腐熟秸秆还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 47-51.
DAI Fei, ZHANG Fengwei, ZHAO Chunhua, et al. Design and experiment on straw returning machine with fast decomposing inoculant spray equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 47-51. (in Chinese)
- [13] 葛宜元,王金武,李亚芹,等. 水稻高秆翻埋快腐还田机研究[J]. 中国农业科技导报, 2014(6): 81-88.
GE Yiyuan, WANG Jinwu, LI Yaqin, et al. Study on returning machine of rice high straw for quickly rotted[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014(6): 81-88. (in Chinese)
- [14] 方志超,陈玉仑,丁为民,等. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机喷菌装置的设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 32-38.
FANG Zhichao, CHEN Yulun, DING Weimin, et al. Design and test of bacteria spraying device for harvest ditch and stalk-disposing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 32-38. (in Chinese)
- [15] 陈玉仑,丁为民,汪小岳,等. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 62-66.
CHEN Yulun, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. Design of harvest ditch and stalk-disposing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 62-66. (in Chinese)
- [16] 杨雪岷. 玉米秸秆聚垄腐熟还田机的设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
YANG Xuedi. Design of corn stalks mulching and returning machine[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [17] 向禹舜. 水稻秸秆集条沟埋腐熟还田机设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
XIANG Yushun. Design and experiment of rice straw collecting decomposing and returning machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)

- [25] 张铭, 卫波, 王晋东. 基于启发式算法的卫星反应式调度[J]. 计算机科学, 2019, 46(10): 90-96.
ZHANG Ming, WEI Bo, WANG Jindong. Satellite reactive scheduling based on heuristic algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(10): 90-96. (in Chinese)
- [26] HUBER M, GRUPEN R A. A hybrid discrete event dynamic systems approach to robot control[R]. Amherst, MA: University of Massachusetts, Department of Computer Science, 1996: 96-43.
- [27] 唐亮, 靖可, 何杰. 网络化制造模式下基于改进蚁群算法的供应链调度优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1267-1275.
TANG Liang, JING Ke, HE Jie. Supply chain scheduling optimization under networked manufacturing based on improved ant colony optimization algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(5): 1267-1275. (in Chinese)
- [28] 李丽, 侯兴华, 陈行政, 等. 深松作业下多机协同任务分配优化方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 1-9.
LI Li, HOU Xinghua, CHEN Xingzheng, et al. Optimizing multi-machine task allocation for deep loosening operations[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(21): 1-9. (in Chinese)
- [29] 陈鸿海, 蒋增强, 左乐, 等. 基于近亲变异 NSGA-II 算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 344-350.
CHEN Honghai, JIANG Zengqiang, ZUO Le, et al. Multi-objective flexible job-shop scheduling problem based on NSGA-II with close relative variation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 344-350. (in Chinese)
- [30] 张浩为, 谢军伟, 张昭建, 等. 基于混合自适应遗传算法的相控阵雷达任务调度[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1761-1770.
ZHANG Haowei, XIE Junwei, ZHANG Zhaojian, et al. Task scheduling of phased array radar based on hybrid adaptive genetic algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9): 1761-1770. (in Chinese)

(上接第 54 页)

- [18] HAN Ya, YAO Shuihong, JIANG Heng, et al. Effects of mixing maize straw with soil and placement depths on decomposition rates and products at two cold sites in the mollisol region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104519.
- [19] WANG Xiao, WANG Xuexin, GENG Peng, et al. Effects of different returning method combined with decomposer on decomposition of organic components of straw and soil fertility[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 15495.
- [20] 刘熙明, 王滢渺, 田洪涛, 等. 秸秆还田方式与施氮量对秸秆腐解及玉米氮素利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 15-26.
LIU Ximing, WANG Yingmiao, TIAN Hongtao, et al. Decomposition characteristics of maize straw and its effect on nitrogen utilization of maize in black soil region[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 15-26. (in Chinese)
- [21] AL-KAISI M M, GUZMAN J G. Effects of tillage and nitrogen rate on decomposition of transgenic Bt and near-isogenic non-Bt maize residue[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 32-39.
- [22] ZHOU Zhenghu, WANG Chuankuan, ZHENG Mianhai, et al. Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 433-441.
- [23] WU Zhengyang, LI Hongwen, HE Jin, et al. Discrete element simulation and experimental verification: effect of spray position in rotary tillage on the spatial redistribution of liquid soil amendments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 111021.
- [24] WU Zhengyang, LI Hongwen, HE Jin, et al. Analysis of mixing liquid amendments by rotary tillage using discrete element modelling and digital image processing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110699.
- [25] WU Zhengyang, LI Hongwen, HE Jin, et al. Calibration of the Kneading contact model by a simplified infiltration test for modeling rotary-tillage mixes of liquid amendments and soils[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109079.
- [26] De PUE J, Di EMIDIO G, FLORES R D V, et al. Calibration of DEM material parameters to simulate stress-strain behaviour of unsaturated soils during uniaxial compression[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104303.
- [27] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105123.
- [28] KIM Y S, SIDDIQUE M A A, KIM W S, et al. DEM simulation for draft force prediction of moldboard plow according to the tillage depth in cohesive soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106368.
- [29] MUDARISOV S, FARKHUTDINOV I, KHAMALETDINOV R, et al. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105228.
- [30] ROESSLER T, KATTERFELD A. DEM parameter calibration of cohesive bulk materials using a simple angle of repose test [J]. Particuology, 2019, 45: 105-115.
- [31] FORRER I, PAPRITZ A, KASTEEL R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(2): 313-322.
- [32] KASTEEL R, GARNIER P, VACHIER P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. Geoderma, 2007, 137(3-4): 360-369.