doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.014

1ZLZ-300型全幅复式种床整地机设计与试验

侯锡彬 崔舒然 李明森 范旭辉 张 冲 马明洋
（吉林省农业机械研究院，长春 130022）

摘要：针对松耙联合整地机在秋季黏重土壤条件下作业后土块较大、地表不平、种床秸秆与土壤混拌不均等生产实际问题，设计一种具有种床土地平整及秸秆残茬梳理功能的1ZLZ-300型全幅复式种床整地机。根据覆混耕作春整地技术要求及黏重土壤特点确定种床整地机的总体设计方案，分别对自激振土壤水平剪切单元、弹性梳理单元进行研究。借助EDEM离散元仿真技术，根据田间测量数据与相关文献建立东北黑土区秸秆混埋土壤仿真模型，通过对种床整地机作业过程的模拟仿真得出各入土部件的工作机理以及对土壤的扰动效果。以松土铲入土深度、弹齿入土深度、弹齿入土角度为试验因素，以地表秸秆覆盖率、地表平整度为评价指标，进行Box-Behnken正交试验，确定了1ZLZ-300型全幅复式种床整地机在作业速度为10 km/h时最优工作参数为：松土铲入土深度10.0 cm、弹齿入土深度8.0 cm、弹齿角度0°。在上述工况下，通过田间试验测得秸秆覆盖率平均值为50.7%、地表平整度平均值为3.2 cm、深度0~10 cm种床土壤紧实度平均值为73.3 kPa、深度10~20 cm种床土壤紧实度平均值为690.2 kPa、碎土率平均值为89.7%。试验结果表明，机具各项性能指标均满足覆混耕作春整地技术要求。1ZLZ-300型全幅复式种床整地机的研制为吉林省中东部地区黑土地保护性耕作玉米秸秆覆混还田技术的推广提供了装备支撑。

关键词：覆混耕作；种床；整地机械；EDEM仿真；黑土地保护
中图分类号：S222.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0125-10

Design and Experiment of 1ZLZ-300 Full Width Compound Seed Bed Preparation Machine

HOU Xibin CUI Shuran LI Mingsen FAN Xuhui ZHANG Chong MA Mingyang
(*Jilin Provincial Academy of Agricultural Machinery*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Aiming at the practical problems of large soil clods, uneven surface and uneven mixing of straw and soil in seed bed after operation in autumn, 1ZLZ-300 fullwidth compound seed bed preparation machine with the function of seed bed land leveling and straw stubble combing was designed. According to the technical requirements of spring land preparation and the characteristics of viscous soil, the overall design scheme of seed bed land preparation machine was determined. The self-excited soil horizontal shear unit and the elastic carding unit were studied respectively. By means of EDEM discrete element simulation technology, a simulation model of straw mixed buried soil in northeast black soil area was established based on field measurement data and related literature. The working mechanism of each embedded component and its effect on soil disturbance were obtained through the simulation of the operation process of seed bed preparation machine. The Box-Behnken orthogonal test was carried out with the depth of the shovel, the depth of the spring tooth and the angle of the spring tooth as the test factors, and the straw coverage rate of the surface and the surface flatness of the soil as the evaluation indexes. The optimum working parameters of 1ZLZ-300 fullwidth compound seed bed preparation machine at the working speed of 10 km/h were determined to be the depth of 10.0 cm, the depth of 8.0 cm and the angle of 0° of the spring teeth. Under the above conditions, the average straw coverage rate was 50.7%, the average surface flatness of the soil was 3.2 cm, the average soil compactness of 0~10 cm depth seed bed was 73.3 kPa, the average soil compactness of 10~20 cm depth seed bed was 690.2 kPa, the average soil breaking rate was 89.7%. The test results showed that all the performance indexes of the machine met the technical

收稿日期：2024-07-21 修回日期：2024-09-12
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD1501102)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA28080202)
作者简介：侯锡彬(1973—)，男，高级工程师，主要从事覆混耕整地技术及配套机具研究，E-mail: houxibingyj@126.com
通信作者：李明森(1976—)，男，正高级工程师，主要从事秸秆还田耕整地技术及装备研究，E-mail: 715039470@qq.com

requirements of spring land preparation in overlying tillage. The development of 1ZLZ-300 full width compound seed bed preparation machine provided the equipment support for the popularization of black soil conservation tillage corn straw mulching and mixed returning technology in central and eastern Jilin Province.

Key words: mulching tillage; seed bed; land preparation machinery; EDEM simulation; black land protection

0 引言

东北黑土区是世界四大黑土区之一,作为中国重要粮食生产基地,多年来重利用轻养护,土壤地力减退、风蚀、水蚀严重。因此,对黑土地加以保护刻不容缓[1]。秸秆还田作为黑土地保护的重要措施,探究科学合理的秸秆还田耕作方式极为必要[2]。适宜的秸秆还田方式既能提高土壤蓄水保墒能力,改善土壤团粒结构,增强土壤有机物活性,加快土壤新陈代谢,提升土壤有机质含量,又能保证作物出苗率,增加粮食产量[3]。覆混耕作技术作为一种适用于雨养农业区的秸秆还田耕作方式,通过分时分段耕整地作业实现;秋季玉米机收后,采用松耙联合整地机对全量粉碎秸秆覆盖地表的土壤直接进行深耕混埋作业,将秸秆与土壤充分混合;翌年春播前采用全幅复式种床整地机对浅耕层土壤进行种床整地作业,将浅耕层的土壤与秸秆再次进行充分混合整理,创造一个有利于播种和出苗的播床[4-6]。种床整地机一次作业即可完成残茬切断、表土疏松、土块破碎、底土刮平压实、种床平整、地表秸秆梳理等工序,创建适宜玉米生长发育的耕层结构[7-8]。

国外农机装备发达国家对种床整地配套机具的研究起步较早。美国Great Plains公司的8321型耕耘机采用被动松土部件和拖链式钉齿耙组合达到作业效果,作业幅宽4.6 m,作业深度6~15 cm。德国AMAZONE公司的KG3000型动力驱动耙通过主动式碎土部件转子实现作业,作业宽度3 m,作业深度15~25 cm。国内对种床整地机具的相关研究较少,华中农业大学廖庆喜团队[9]研制了一种驱动犁翻与反转旋耕组合式油菜直播种床整理机。国内机具基本是以旋耕为主,或与其他方式结合,是灭茬、旋耕、起垄、镇压传统耕作配套机具。目前,国内还缺少适用于覆混耕作技术的种床整地机械。

针对上述问题,本文设计一款全幅复式种床整地机。分别对自激振土壤水平剪切单元、弹性梳理单元进行设计研究。通过EDEM软件建立东北黑土区秸秆混埋土壤模型,对整机作业效果进行仿真,得出各部件的工作情况以及对土壤的扰动效果,结合田间试验得出种床整地机的最优工作参数。

1 结构与原理

1.1 基本结构

1ZLZ-300型全幅复式种床整地机如图1所示,主要由牵引头、调节丝杠、圆盘切刀单元 、圆盘切刀深度调节油缸、主机架、中耕锄铲单元、地轮、地轮油缸、秸秆梳理部件深度调节装置、弹齿、秸秆梳理部件角度调节装置等组成。整机参数如表1所示。

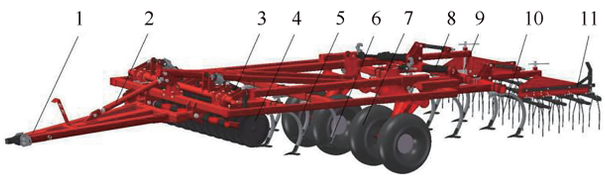

图1 1ZLZ-300型全幅复式种床整地机

Fig. 1 1ZLZ-300 full-width compound seed bed preparation machine

1. 牵引头 2. 调节丝杠 3. 圆盘切刀深度调节油缸 4. 圆盘切刀单元 5. 主机架 6. 中耕锄铲单元 7. 地轮 8. 地轮油缸 9. 秸秆梳理部件深度调节装置 10. 弹齿 11. 秸秆梳理部件角度调节装置

表1 1ZLZ-300型全幅复式种床整地机参数

Tab. 1 Parameters of 1ZLZ-300 full width compound seed bed preparation machine

参数	数值
整机尺寸/(mm×mm×mm)	8 927×3 000×1 292
整机质量/kg	3 150
工作幅宽/m	3.0
配套动力/kW	≥103
作业速度/(km·h^{-1})	≥8
作业深度/cm	6~10
弹齿作业深度/cm	2~8
弹齿作业角度/(°)	0、15、30

1.2 工作原理

整机依靠拖拉机提供前进动力,位于机具前端的圆盘切刀在滚动中切断机收后覆盖于地表的较长秸秆,保障机具良好通过性;交叉布置的松土铲在运动中松动浅耕层土壤、破碎土块,通过产生的土流将土壤和秸秆充分混合,依靠铲底形成的平面刮平压实底部土壤;机具后端的梳理弹齿通过合理排布在运动中平整松土铲工作后产生的沟棱,进一步梳理残茬、松散土壤,并将地表长秸秆沿机具前进方向梳理,最终实现种床的整理。机具上安装有2套液压装置,以此对圆盘切刀入土深度与其他土壤耕作部件工作深度进行调节;梳理弹齿的角度和高度通过对应机构进行调节。全幅复式种床整地机作业前后耕层土壤结构示意图如图2所示。

2 关键部件设计

2.1 松土铲设计

松土铲由弓型铲柄和箭形松土铲尖构成。松土铲尖设计成箭形,如图3所示,用于压实种床下方土壤并疏

松种床土壤。铲体宽度为221 mm，翼张角为55°。松土铲采用65Mn钢制造，刃部进行热处理。淬火区宽度30 mm，硬度为HRC52。

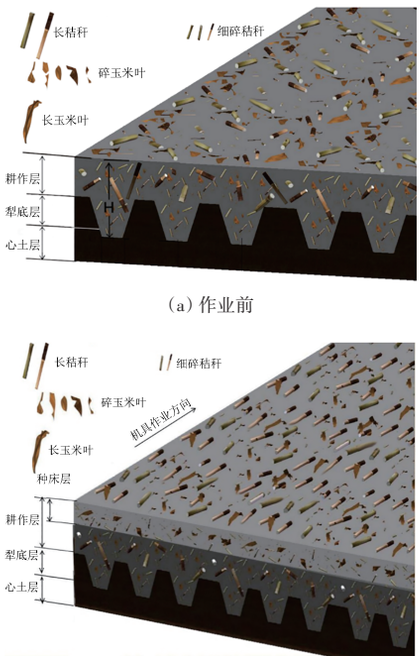

图2　种床整地机作业前后土壤结构示意图

Fig. 2　Schematics of soil structure before and after operation of two kinds of bed preparation machines

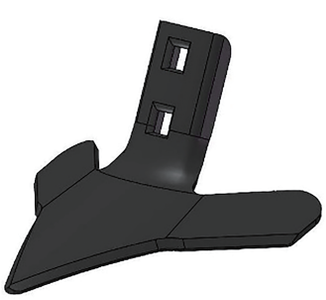

图3　松土铲三维模型

Fig. 3　3D model of soil loosening shovel

松土铲是种床整地机的主要工作部件，在土壤里进行作业时，铲体上部应具有较强的松土能力，铲底面与下方土壤紧密接触应形成平整坚实的播床，同时铲体要有足够的刚度、强度和耐磨性。松土铲主要由铲尖、铲柄及护板组成，铲尖是松土铲的关键部件。该设计采用箭形铲尖，其工作阻力小、结构简单、强度高、制作方便。铲尖通过高强度螺栓安装在铲柄下端，便于在磨损后更换。铲柄是种床整地机上重要的受力部件，种床整地机在北方玉米种植地块作业，必须要考虑到秸秆、残茬的影响，垂直立柱式和弯形铲柄容易挂秸秆，而弧形铲柄则可以很大程度上消除挂秸秆现象，同时对种床土壤有一定的压实作用，创造一个有利于播种和出苗的播床。松土铲的受力分为铲尖受力和铲柄受力，具体受力分析如图4、5所示。

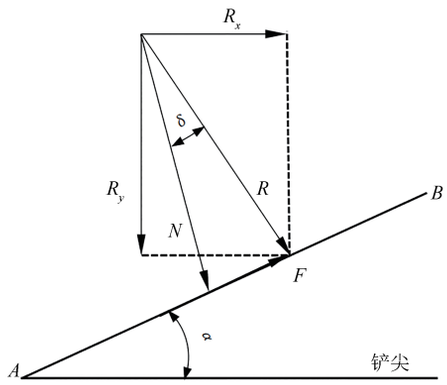

图4　铲尖受力分析

Fig. 4　Force analysis of shovel head

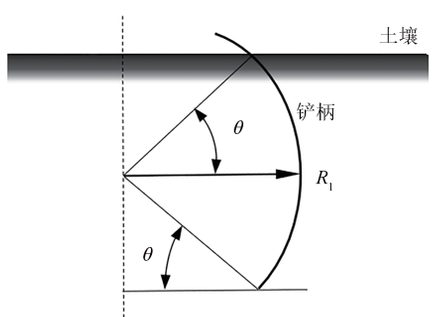

图5　弯曲铲柄受力分析

Fig. 5　Stress analysis of curved shovel column

作业时，松土铲尖在土壤中的受力如图4所示。种床整地机以一定的速度前进，铲尖AB面相当于一个楔面，与水平面间夹角为α，土壤对铲尖的作用力N垂直于铲尖AB面，作用点近似位于斜面AB的正中间。随着机具前进，土壤对铲尖产生摩擦力F，方向沿铲尖斜面且指向后方，作用力N与铲尖总阻力R之间的夹角为δ，δ取14°~26°[10]。摩擦力F和作用力N合成铲尖总阻力R，铲尖总阻力R可分解为水平分力R_x和垂直分力R_y，其中水平分力R_x是工作时牵引阻力的一个组成部分，在保证松土效果的情况下，R_x越小越好；垂直分力R_y是一个对松动耕层的工作阻力，作业时起到压实种床土壤的作用。由图4受力分析可得铲尖水平阻力R_x为

$$R_x = R\sin(\alpha + \delta) \tag{1}$$

铲尖总阻力R为

$$R = kS_1 \tag{2}$$

式中　k——犁耕比阻，粘土取6~8 N/cm^2

S_1——铲尖与土壤接触面积，cm^2

松土铲工作前，土壤处于静止状态，即初始速度v_1为0；作业时，随着松土铲带动土壤向前运动，土壤达到一定速度即松土铲的作业速度为v_2。则松土铲柄水平方向上的阻力R_1可按照动量进行计算

$$R_1 = \frac{M(v_1 - v_2)}{\Delta t} \tag{3}$$

式中 M——铲柄扰动土壤质量,kg

Δt——松土铲作业时间,s

弯曲铲柄挠动土壤体积V计算式为

$$V = \frac{1}{2} v_2 \Delta t (S_2 - rD\sin\theta) \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)得

$$R_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 (S_2 - rD\sin\theta) \tag{5}$$

式中 ρ——土壤密度,g/cm^3

S_2——铲柄横截面面积,cm^2

D——铲柄厚度,cm

r——弧形半径,cm

θ——地面以下部分圆弧夹角的一半,rad

由于铲柄的横截面积为铲柄厚度D与长度L的乘积,而弯曲铲柄的长度应为弧长,即

$$L = 2\theta r \tag{6}$$

则铲柄横截面积

$$S_2 = DL = 2\theta rD \tag{7}$$

将式(7)代入式(5)得铲柄的水平阻力R_1计算公式为

$$R_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 rD(2\theta - \sin\theta) \tag{8}$$

结合式(1)与式(8)得松土铲所受水平总阻力R_t计算公式为

$$R_t = R\sin(\alpha + \delta) + \frac{1}{2} \rho v_2^2 rD(2\theta - \sin\theta) \tag{9}$$

根据全幅复式种床整地机作业要求v_2取10 km/h;根据东北地区黑土特性k取8 N/cm^2,ρ取1.74 g/cm^3,δ取18°,α取12.7°[11-12]。经上述公式计算得出1ZLZ-300型全幅复式种床整地机作业过程中单一松土铲受到的理论水平阻力为1 047 N。

2.2 秸秆梳理部件

秸秆梳理机构作为全幅复式种床整地机的重要部件,其作用是平整地表、梳理残茬和松散土壤,将地表长秸秆沿机具前进方向梳理。主要由纵梁、仿形弹簧、提升螺杆、支撑板、固定杆、弹齿和调节手柄等部件构成,结构如图6所示。

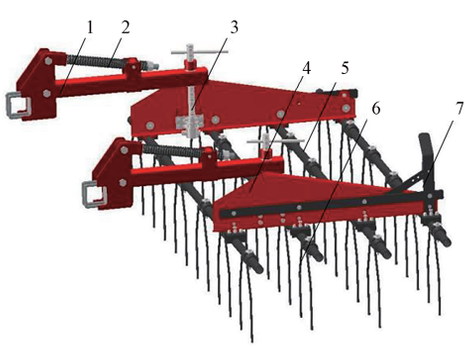

图6 秸秆梳理机构三维模型

Fig. 6 Three-dimensional model of straw carding mechanism

1. 纵梁 2. 仿形弹簧 3. 提升螺杆 4. 支撑板 5. 固定杆 6. 弹齿 7. 调节手柄

秸秆梳理机构通过U型卡与吊耳固定在主机架后端,通过长弹簧与方钢管构成仿形机构,使用丝杠对工作部件进行高度调节,共有4排梳理弹齿通过螺栓固定在圆钢管上,拉动调节手柄通过四连杆机构能够实现对弹齿角度的调整。梳理弹齿共4排,每排间距为350 mm,同排共有6个梳理弹齿,安装间距为510 mm,梳理弹齿长度为440 mm,使用65Mn钢制成。弹齿的排列方式如图7所示。

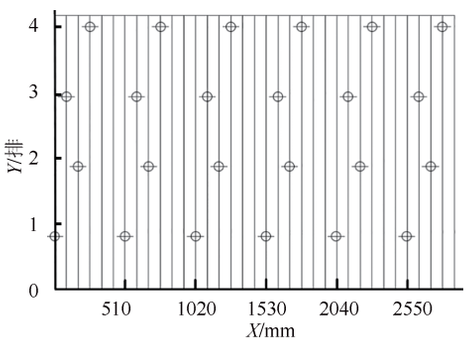

图7 梳理弹齿排布坐标

Fig. 7 Coordinates of tooth arrangement of carding bullet

3 EDEM仿真分析

3.1 秸秆混埋土壤模型参数

EDEM仿真模型参数包括材料参数与接触参数。材料类型固有的技术参数,主要有密度、泊松比和剪切模量。种床整地机的圆盘切刀、松土铲、梳理弹齿的材料均为65Mn钢。通过环刀取样方法测定秸秆混埋地块土壤密度,测得土壤内摩擦角后计算土壤泊松比,土壤内摩擦角可以利用直剪试验测定,土壤泊松比计算公式为[13-15]

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{K_0}{1 + K_0} \\ K_0 = 1 - \sin\phi \end{cases} \tag{10}$$

式中 μ——泊松比

K_0——土壤侧压力系数

ϕ——土壤内摩擦角

接触参数主要包括材料之间恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数。通过试验测定及查阅文献[16-19],设置土壤-土壤、65Mn钢-土壤、秸秆-土壤、秸秆-秸秆的仿真接触参数。离散元仿真模型基本参数如表2所示。

3.2 EDEM耕作模型

模型中的土壤颗粒由球形颗粒、柱状颗粒和核状颗粒组成,均基于5 mm球形颗粒构建;混埋层中的秸秆使用多个球体相连构成的柱体进行模拟,长度设置分别为6、8、10 cm[20-22]。土壤颗粒模型与秸秆模型如图8所示。

为了完整显示凿铲和松土铲的仿真作业效果,本文建立的虚拟土槽模型尺寸(长×宽×高)为3 000 mm×2 500 mm×300 mm,如图9所示。其中地表以下0~250 mm为混埋层(橘色区域),地表以下250~300 mm为

犁底层(红色区域)。本文设计的种床整地机各种入土部件切刀、松土铲、梳齿是以机具纵向中心线对称布置,左右两侧仿真作业效果一致。为减少仿真计算量,对种床整地机的三维模型进行简化,仅取机具纵向中心线左侧的入土部件进行仿真试验。

表 2　离散元仿真模型的基本参数

Tab. 2　Basic parameters of discrete element simulation model

参数	数值
65Mn钢密度/(kg·m^{-3})	7 830
65Mn钢泊松比	0.35
65Mn钢剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
混埋层土壤密度/(kg·m^{-3})	1 283
混埋层土壤泊松比	0.3
混埋层剪切模量/Pa	1×10^{8}
犁底层土壤密度/(kg·m^{-3})	1 997
犁底层土壤泊松比	0.33
犁底层剪切模量/Pa	1.02×10^{8}
土壤-土壤恢复系数	0.4
土壤-土壤静摩擦因数	0.6
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.24
土壤-65Mn钢恢复系数	0.3
土壤-65Mn钢静摩擦因数	0.75
土壤-65Mn钢滚动摩擦因数	0.15
秸秆-秸秆恢复系数	0.485
秸秆-秸秆静摩擦因数	0.142
秸秆-秸秆滚动摩擦因数	0.078
秸秆-土壤恢复系数	0.4
秸秆-土壤静摩擦因数	0.5
秸秆-土壤滚动摩擦因数	0.16
秸秆-65Mn钢恢复系数	0.3
秸秆-65Mn钢静摩擦因数	0.47
秸秆-65Mn钢滚动摩擦因数	0.01

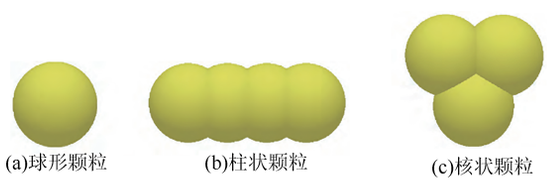

图 8　土壤颗粒模型

Fig. 8　Soil particle model

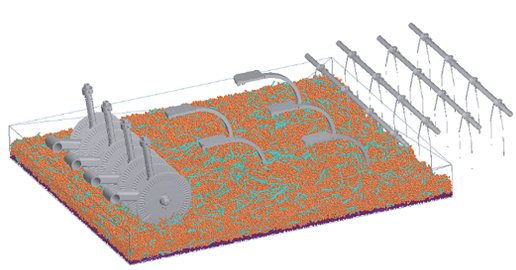

图 9　秸秆混埋土壤模型

Fig. 9　Soil model of straw mixed burial

3.3　仿真与分析

为探究种床整理机各部件在土壤中的运动状态,根据建立的土壤模型使用EDEM软件对简化后的种床整地机模型进行仿真。以仿真模型中心线进行剖视,观察各部件对土壤的作用效果,图 10 为种床整地机 0.68~1.95 s的仿真运动过程。

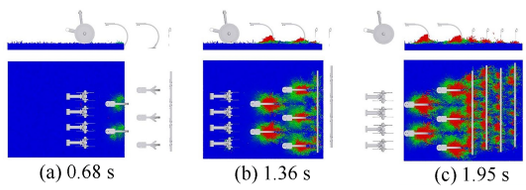

图 10　种床整地机仿真过程

Fig. 10　Simulation process of bed preparation machine

图 11 为各触土部件工作过程中剖视图,根据圆盘切刀剖视图(图 11a)可以看出,其能够对地表及浅层秸秆起到切断作用;根据松土铲剖视图(图 11b)可以看出,其能够使秸秆混埋层的土壤向上移动实现破碎、疏松土壤的作用,并对松土铲下方土壤起到压实作用;根据梳理弹齿剖视图(图 11c)可以看出,其能够对秸秆混埋层土壤进行二次破碎,并将地表秸秆进行梳理。

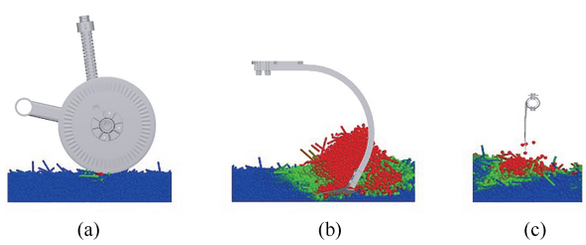

图 11　触土部件工作剖视图

Fig. 11　Working profile of earth-touching parts

图 12 为种床整地机作业过程仿真效果图,可以看出,作业前已留于地表的长秸秆在作业过程中被机具前端的圆盘切刀切碎;作业前已混埋于浅耕层中的部分长秸秆在作业过程中被松土铲扰动至地表;扰动至地表的长秸秆在梳齿的作用下沿机具工作方向纵向排布。

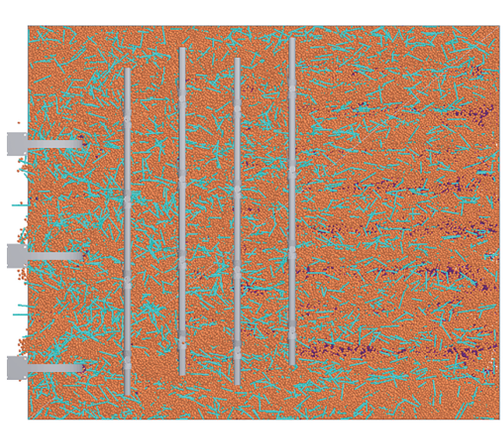

图 12　作业中与作业后仿真效果图

Fig. 12　Simulation results during and after operation

4　田间试验

4.1　试验条件

2023年4月17—21日,在长春市农安县开安镇吉林

省农业机械研究院试验基地进行种床整地机田间作业试验。试验地块为采用秸秆覆混还田耕作技术秋整地后的地块，即上一年秋季玉米机收后，采用1BSLZ-300型松耙联合整地机对全量秸秆覆盖耕地完成秸秆深层混埋作业的地块，试验地块面积为8 hm^2。参照标准LY/T 1219—1999《森林土壤温度的测定》、NY/T 52—1987《土壤水分测定法》、NY/T 1121.4—2006《土壤检测第4部分：土壤容重的测定》对试验地块相关特性参数进行测定，测定结果见表3[23-25]。

表3 试验前地块特性参数

Tab. 3 Property parameters of block before test

参数	平均值
0~10 cm土壤紧实度/kPa	143.7
10~20 cm土壤紧实度/kPa	452.5
土壤含水率/%	21.3
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.2
秸秆覆盖率/%	32.7
秸秆覆盖量/(g·m^{-2})	458.7
地表平整度/cm	4.5
耕层地温/℃	14.9

试验机具为1ZCLZ-300型全幅复式种床整地机，配套动力为纽荷兰1404型拖拉机。试验器材包括：皮尺（量程1~100 m，精度0.001 m）、直尺（量程1~600 mm，精度1 mm）、水平仪（iLevel 5，精度0.029°，上海钰诚电子有限公司）、耕深尺（精度0.01 mm）、土壤紧实度仪（浙江托普仪器有限公司，TJSD-750型，精度±0.5‰FS）、水分测试仪（SK-100型，精度0.01%，上海婉源电子科技有限公司）[26-27]。

4.2 试验方法

松土锄铲工作深度、梳理弹齿工作深度、梳理弹齿工作角度3个参数是影响种床整地机作业效果的主要因素。本次试验，通过前牵引点配合限深轮调节松土锄铲工作深度为6、8、10 cm，调节梳理弹齿工作深度为2、5、8 cm，调节梳理弹齿工作角度为0°、15°、30°，作业速度为10 km/h。参考JB/T 7864—2013《中耕追肥机》、GB/T 24675.1—2009《保护性耕作机械 浅松机》、GB/T 24675.3—2009《保护性耕作机械 弹齿耙》中规定的试验方法，机组沿直线作业100 m，取中间50 m为稳定测量区域，每组试验重复3次[28-30]。作业后测量秸秆覆盖率、碎土率、地表平整度以及种床土壤紧实度指标，田间试验如图13所示。

4.3 多因素优化试验

4.3.1 试验设计

为探究上述3个影响因素对秸秆覆盖率和地表平整度的影响规律，以秸秆覆盖率和地表平整度为评价指标，开展多因素优化试验。多因素优化试验利用Design-Expert软件进行设计，根据Box-Behnken试验原理设计的三因素三水平试验，共包括17组试验，各水平试验重复3次。由单因素试验结果可知：松土铲入土深度（简称铲深）x_1、弹齿入土深度（简称弹齿深）x_2以及弹齿角度（简称弹齿角）x_3对秸秆覆盖率Y_1和地表平整度Y_2有重要影响。根据单因素试验分析结果，将铲深分别设置为6、8、10 cm，弹齿深分别设置为2、5、8 cm，弹齿角分别设置为0°、15°、30°。表4为试验因素编码表。



图13 1ZCLZ-300型全幅复式种床整地机田间试验

Fig. 13 Field test diagram of 1ZCLZ-300 full-width compound seed bed preparation machine

表4 试验因素与编码

Tab. 4 Test factors and coding

编码	因素		
	铲深/cm	弹齿深/cm	弹齿角/(°)
-1	6	2	0
0	8	5	15
1	10	8	30

4.3.2 试验结果与分析

根据Box-Behnken中心组合设计三因素三水平分析试验，共进行17组试验，试验方案及结果如表5所示。

应用Design-Expert软件对试验结果进行多元回归拟合分析，得秸秆覆盖率Y_1回归模型为

$$Y_1 = 38.56 + 7.49x_1 + 1.70x_2 - 0.46x_3 + 1.12x_1x_2 - 0.35x_1x_3 - 0.12x_2x_3 + 2.29x_1^2 - 0.03x_2^2 + 0.65x_3^2 \tag{11}$$

式中 x_1、x_2、x_3——因素编码值

方差分析如表6所示，秸秆覆盖率Y_1回归模型P小于0.01，表明回归模型极显著；模型决定系数R^2=0.997 3、校正决定系数R^2_{Adj}=0.993 8，都趋近于1，表明模型与实际试验拟合良好，试验误差能够真实反映实际情况，其中变异系数为1.10%，表明试验具有较高可靠性，试验精确度为54.364，说明模型具有良好的精确度。

地表平整度Y_2回归模型为

$$Y_2 = 2.91 + 0.74x_1 - 0.27x_2 + 0.059x_3 - 0.17x_1x_2 + 0.018x_1x_3 - 0.01x_2x_3 + 0.23x_1^2 + 0.02x_2^2 + 0.005\,5x_3^2 \tag{12}$$

方差分析如表7所示，地表平整度Y_2回归模型P小于0.01，表明回归模型极显著；模型决定系数R^2=0.996 0、校正决定系数R^2_{Adj}=0.990 8，都趋近于1，表

明模型与实际试验拟合良好，试验误差能够真实反映实际情况，其中变异系数为1.82%，表明试验具有较高可靠性，试验精确度为47.636，说明模型具有良好的精确度。

表5　试验方案与试验结果

Tab. 5　Test plan and test results

试验号	因素			秸秆覆盖率/%	地表平整度/cm
	铲深/cm	弹齿深/cm	弹齿角/(°)		
1	6	5	30	34.0	2.42
2	8	5	15	39.2	2.97
3	8	8	0	41.4	2.64
4	6	2	15	32.6	2.58
5	6	8	15	33.9	2.32
6	8	5	15	38.7	2.95
7	10	8	15	51.3	3.41
8	8	2	30	37.2	3.26
9	8	5	15	37.8	2.84
10	8	5	15	38.2	2.92
11	10	5	30	48.1	3.98
12	8	5	15	38.9	2.89
13	6	5	0	34.2	2.35
14	10	5	0	49.7	3.84
15	10	2	15	45.5	4.01
16	8	8	30	40.2	2.75
17	8	2	0	37.9	3.11

表6　Y_1回归方差分析结果

Tab. 6　Y_1 regression room difference analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	503.68	9	55.96	288.16	<0.000 1
x_1	448.50	1	448.50	2 309.31	<0.000 1
x_2	23.12	1	23.12	119.04	<0.000 1
x_3	1.71	1	1.71	8.81	0.020 9
x_1x_2	5.06	1	5.06	26.07	0.001 4
x_1x_3	0.49	1	0.49	2.52	0.156 2
x_2x_3	0.063	1	0.063	0.32	0.588 2
x_1^2	22.18	1	22.18	114.19	<0.000 1
x_2^2	3.789×10^{-3}	1	3.789×10^{-3}	0.020	0.892 8
x_3^2	1.75	1	1.75	9.02	0.019 9
残差	1.36	7	0.19		
失拟项	0.11	3	0.036	0.11	0.947 0
误差	1.25	4	0.031		
总和	505.04	16			

4.3.3　响应曲面分析

根据模型利用Design-Expert软件生成响应面如图14所示，进一步分析铲深x_1、弹齿深x_2、弹齿角x_3 3个因素对秸秆覆盖率与地表平整度的交互影响。图14a为铲深x_1、弹齿深x_2对秸秆覆盖率Y_1交互作用的响应曲面图，可知当增大铲深与弹齿深有助于提高秸秆覆盖率，出现该现象的主要原因是随着松土铲与弹齿入土深度增加，可以将被混入土壤中更深层次的秸秆剥离至地表。图14b为铲深x_1、弹齿角x_3对秸秆覆盖率Y_1交互作用的响应曲面图，可知随着铲深增大，秸秆覆盖率Y_1有上升趋势，出现该现象的主要原因是铲深增大，使得深层次秸秆被剥离至地表。图14c为弹齿深x_2、弹齿角x_3对秸秆覆盖率Y_1交互作用的响应曲面图，由响应面的形状可以看出，增大弹齿深可以提高秸秆覆盖率，但随着弹齿角增加秸秆覆盖率出现小范围下降，出现该现象的原因是随着弹齿角增加有部分秸秆沿着弹齿的倾角方向滑落。根据图14d、14e、14f可知，随着铲深增加，地表土壤平整效果随之降低，分析其原因是随着铲深x_1增加其对种床土壤扰动效果也随之增强，造成大量土块生成影响了地表平整效果；随着弹齿深x_2的增加，种床地表平整效果随之提高，分析其原因是随着弹齿深增加提高了其冲击破碎土壤接触面积，提高了土壤破碎效果；弹齿角x_3对种床地表平整度的影响极小，可以忽略不计。

表7　Y_2回归方差分析结果

Tab. 7　Y_2 regression room difference analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	5.31	9	0.59	193.35	< 0.000 1
x_1	4.35	1	4.35	1 426.97	< 0.000 1
x_2	0.59	1	0.59	193.03	< 0.000 1
x_3	0.028	1	0.028	9.06	0.019 7
x_1x_2	0.11	1	0.11	36.80	0.000 5
x_1x_3	1.225×10^{-3}	1	1.225×10^{-3}	0.40	0.546 3
x_2x_3	4×10^{-4}	1	4×10^{-4}	0.13	0.727 9
x_1^2	0.22	1	0.22	71.78	< 0.000 1
x_2^2	1.769×0^{-3}	1	1.769×10^{-3}	0.58	0.471 1
x_3^2	1.274×10^{-4}	1	1.274×10^{-4}	0.042	0.843 9
残差	0.021	7	3.049×10^{-3}		
失拟项	0.011	3	3.608×10^{-3}	1.37	0.371 8
误差	0.011	4	2.630×10^{-3}		
总和	5.33	16			

4.3.4　参数优化

根据模型分析效果，利用Design-Expert软件寻优功能，对松土铲入土深度、弹齿入土深度、弹齿角度进行参数优化，寻求土壤表面最大秸秆覆盖率与最大地表平整度。利用Design-Expert软件中的优化求解器对回归方程模型(11)、(12)进行优化求解

$$\begin{cases}\max Y_1 = Y_1(x_1,x_2,x_3)\\ \max Y_2 = Y_2(x_1x_2,x_3)\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1 \leqslant x_1 \leqslant 1\\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1\\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1\end{cases}\end{cases} \tag{13}$$

优化后，得到当松土铲入土深度10.0 cm、弹齿入土深度8.0 cm、弹齿角度0°时，得到秸秆覆盖率为52.72%，地表平整度为3.401 cm。

4.4　优化后实际作业效果

根据正交试验的优化结果调整机具，分别以速度8、10、12 km/h进行试验，根据试验结果可知当作业速度提高时，碎土率、地表平整度与秸秆覆盖率有所提升，种床土壤紧实度有所下降，作业前后对比如图15所示。

通过试验可以证明，1ZLZ-300型全幅复式种床整

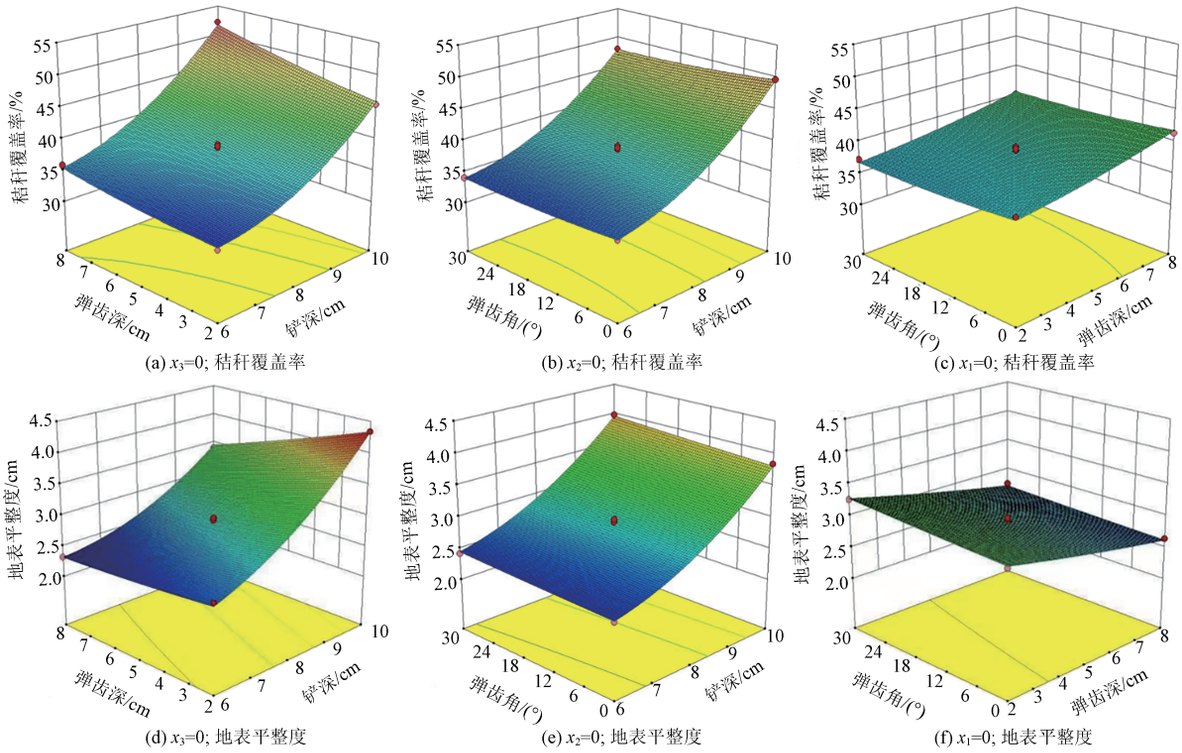

图14 响应面分析

Fig. 14 Response surfaces analysis

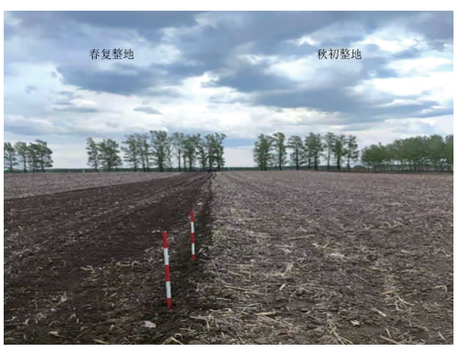

图15 作业前后效果对比

Fig. 15 Comparison of effects before and after operation

地机能有效切割、整理秸秆，并将少部分秸秆与土壤混埋。在合理耕深以上可形成细碎疏松层，以下形成紧实平整层，实现玉米秸秆全量覆混还田的“上松下实”的种床耕层结构。如表8所示，各项性能指标完全满足秸秆覆混还田耕作技术中关于春季种床整地的农艺要求和后续玉米播种作业要求。

4.5 种床整地机作业前后对比试验

为验证种床整地机作业对种床土壤耕层构造效果，在吉林省长岭县长岭镇(A)、农安县开安镇(B)、敦化市江南乡(C)、公主岭市刘房子乡(D)4个秸秆混埋示范区的16块试验田使用种床整地机进行二次整地，并分别测量秸秆覆盖率、地表平整度、0~10 cm种床土壤紧实度、10~20 cm种床土壤紧实度、碎土率等相关试验数据与一次整地进行对比，数据对比如图16所示。根据试验结果可知，使用种床整地机进行二次作业的地块与只使用松耙联合整地机一次作业的地块相比，种床整地机进行二次作业的地块秸秆覆盖率有所提高，分析原因松土铲与梳齿在运动过程中能够将混埋于土壤耕层中的秸秆拨离至地表；地表平整度有所提高，分析原因是梳理弹齿对锄铲松动后的土壤起到了有效平整作用；0~10 cm种床土壤紧实度有明显降低，10~20 cm种床土壤紧实度有明显增加，分析原因是种床整地机的松土铲在二次作业过程中对铲尖以上种床土壤进行了二次松碎，对铲尖以下的土壤进行压实，形成了“上松下实”的土壤耕层结构；碎土率有所提高，分析原因是机具下方的圆盘切刀、松土铲、梳齿在运动过程中对土壤均有破碎效果。

表8 种床整地机性能测试结果

Tab. 8 Bed preparation machine performance test results

参数	数值		
作业速度/(km·h^{-1})	8	10	12
松土铲工作深度/cm	10	10	10
梳齿工作深度/cm	8	8	8
梳理弹齿工作角度/(°)	0	0	0
0~10 cm种床土壤紧实度/kPa	82.5	73.3	71.2
10~20 cm种床土壤紧实度/kPa	702.5	690.2	681.4
碎土率/%	86.5	89.7	92.6
地表平整度/cm	2.9	3.2	3.4
秸秆覆盖率/%	48.4	50.7	53.8

5 结论

(1)设计的种床整地机，能较好地适用于秸秆覆混还田秋整地地块进行翌年春季整地。对秸秆混埋地块土壤和作物残茬二次处理，可形成耕深一致、秸秆均匀

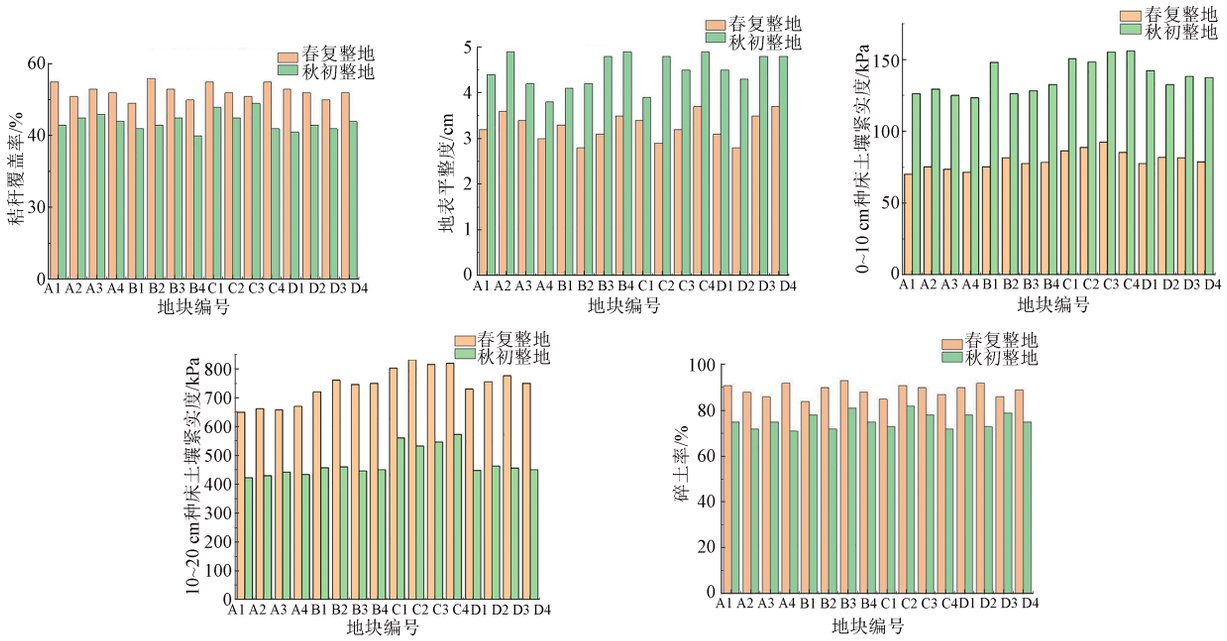

图16　作业前后数据对比

Fig. 16　Data comparison before and after operation

混埋，地表平整的种床。

（2）采用EDEM软件构建了机具与秸秆、土壤系统模型，对1ZLZ-300型全幅复式种床整地机作业过程进行了仿真分析，研究表明，机具各部件对土壤及秸秆的作用效果满足初始设想。

（3）松土铲工作深度、梳理弹齿工作深度和梳理弹齿工作角度是影响种床整地机作业效果的主要参数。利用Design-Expert软件BBD组合设计原理，设计了田间正交试验。在作业速度为10 km/h时，根据正交试验结果得出，松土铲入土深度10 cm、弹齿入土深度8 cm、弹齿角度0°，种床整地机作业效果较为理想。

（4）田间试验结果表明，1ZLZ-300型全幅复式种床整地机能有效切割、整理秸秆，并将少部分秸秆与土壤混埋。在耕深以上可形成细碎疏松层，以下形成紧实平整层，构建出“上松下实”的种床耕层结构。整机作业后地表平整度为2.9～3.4 cm，碎土率为86.5%～92.6%，秸秆覆盖率为48.4%～53.8%，各项整地指标均能满足玉米播种要求。

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 machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：1－19.(in Chinese)

[2]　贾洪雷，马成林，李慧珍，等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报，2010，41(10)：28－34.
JIA Honglei，MA Chenglin，LI Huizhen，et al. Cultivated land protection in Northeast China based on conservation tillage analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(10)：28－34.(in Chinese)

[3]　齐江涛，田辛亮，刘凯，等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆还田对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报，2021，37(1)：141－147.
QI Jiangtao，TIAN Xinliang，LIU Kai，et al. Effect of corn straw returning on soil water infiltration in black soil area under mixed tillage [J]. Transactions of the CSAE，2021，37(1)：141－147.(in Chinese)

[4]　杜朝伟. 一种新型玉米秸秆粉碎还田机的研制与试验[D]. 昆明：昆明理工大学，2016.
DU Chaowei. Development and experiment of a new corn straw crushing and returning machine[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2016.(in Chinese)

[5]　HUANG Tiantian，YANG Ning，LU Chen，et al. Soil organic carbon，total nitrogen，available nutrients，and yield under different straw returning methods[J]. Soil & Tillage Research，2021，214：46－55.

[6]　王跃勇，崔舒然，刘媛媛，等. 秸秆集行模式下精准喷药装置搭建与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(11)：12－20.
WANG Yueyong，CUI Shuran，LIU Yuanyuan，et al. Construction and experiment of precision spraying device in straw collection mode [J]. Transactions of the CSAE，2022，38(11)：12－20.(in Chinese)

[7]　范旭辉，李明森，李光，等. 一种玉米秸秆全量还田联合整地机：CN114041338B[P]. 2023-01-03.

[8]　侯锡彬，李明森，李光，等. 一种可以清理种床地表秸秆并归行的还田机：CN209170913U[P]. 2019-07-30.

[9]　孙文成，廖庆喜，张青松，等. 驱动犁翻与反转旋耕组合式油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报，2021，40(2)：67－76.
SUN Wencheng，LIAO Qingxi，ZHANG Qingsong，et al. Design and experiment of a combination of driven plow turning and reverse

rotary tillage for rape seed bed finishing machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 67 - 76. (in Chinese)
[10] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2018.
[11] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007
[12] 田钰枫. 秸秆归行模式下立式条带旋耕机设计及试验[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
TIAN Yufeng. Design and experiment of vertical strip rotary tiller under straw returning mode [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[13] 郭志军,周德义,周志立.几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J].机械工程学报,2010,46(15):71 - 75.
GUO Zhijun, ZHOU Deyi, ZHOU Zhili. Simulation study on mechanical properties of cultivation components with different soil contact surfaces [J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(15):71 - 75.(in Chinese)
[14] SALAMA D S, PIBARS S K, ABDELHAY Y B, et al. Developing a combined machine for seedbed preparation [J]. Agricultural Engineering International: GIGR Journal,2018,20(1):90 - 94.
[15] RIEGLER-NURSCHER P, MOITZI G, PRANKL J, et al.Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation[J].Soil & Tillage Research, 2020,196: 51 - 58
[16] 王宪良,胡红,王庆杰,等.基于离散元的土壤模型参数标定方法[J].农业机械学报,2017,48(12):78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Parameter calibration method of soil model based on discrete elements [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):78 - 85.(in Chinese)
[17] 张冲,范旭辉,李明森,等.基于EDEM的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊2):52 - 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp.2):52 - 59.(in Chinese)
[18] 田辛亮. 黑土区玉米秸秆混埋还田技术及其配套关键部件研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
TIAN Xinliang. Black soil area at the maize straw returning mixed buried technology and its key components supporting research [D]. Changchun:Jilin University, 2022. (in Chinese)
[19] SHI Yinyan, XIN Sun, WANG Xiaochan ,et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,166:32 - 43.
[20] 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. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiling shovel for corn straw returning to field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):75 - 87.(in Chinese)
[21] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等.基于DEM-MBD耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J].农业工程学报,2022,38(15):10 - 20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and test of rolling earth-touching parts of shovel plate based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2012,38(15):10 - 20.(in Chinese)
[22] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等.黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J].农业机械学报,2021,52(10):100 - 108,242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model of corn ststraw-soil mix in black soil area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):100 - 108,242.(in Chinese)
[23] 赵宏波,何进,李洪文,等.秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J].农业机械学报,2018,49(增刊):60 - 67.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Effects of straw returning methods on soil physical properties of seed bed and wheat growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):60 - 67. (in Chinese)
[24] 周华,李栋,刘政源,等.秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J].农业机械学报,2019,50(9):69 - 77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment on spatial distribution effect of straw spinning and returning to field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):69 - 77.(in Chinese)
[25] JENSEN T, KARSTOFT H, GREEN O, et al. Assessing the effect of the seedbed cultivator leveling tines on soil surface properties using laser range scanners[J]. Soil & Tillage Research,2017,167:54 - 60.
[26] ZHAO Z, LI H, LIU J, et al. Control method of seedbed compactness based on fragment soil compaction dynamic characteristics[J]. Soil & Tillage Research,2020,198:38 - 45
[27] 陈海涛,张昭,王星,等.大豆垄三栽培配套播种机种床整理装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):54 - 63.
CHEN Haitao, ZHANG Zhao, WANG Xing, et al. Design and experiment of seed bed finishing device for corrugations cultivation of soybean [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):54 - 63.(in Chinese)
[28] DUAN X, XIE Y, LIU B, et al. Soil loss tolerance in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Geographical Sciences,2012, 22(4):37 - 51.
[29] HEGAZY R, ABD-RABOU A, ABDELMOUTELEB I, et al. Development and testing mounted multi-use agricultural seedbed preparation machine for egyptian soils[J].Journal of Sustainable Agricultural Sciences, 2020, 46(4):13 - 26.
[30] 仵峰,王富斌,宰松梅,等.玉米秸秆复合渗灌管研制及渗水性能研究[J].农业工程学报,2019,35(14):98 - 104.
WU Feng, WANG Fubin, ZAI Songmei, et al. Development and water permeation performance of corn straw composite irrigation pipe [J]. Transactions of the CSAE,2019,35(14):98 - 104.(in Chinese)