

秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究

徐高明^{1,2} 丁启朔^{1,2} 汪小昆^{1,2} 梁磊^{1,2} 何瑞银^{1,2} 陈信信³

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;
3. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 分析秸秆-土壤-机具之间的交互关系,明确秸秆运动规律及分布效果,对秸秆管理及耕作机械优化设计具有重要的作用。为探究秸秆-土壤-旋耕机交互下的关键作业参数对秸秆位移和埋覆效果的影响,利用 Design-Expert 软件,根据 Box - Behnken 试验原理进行了室内土槽试验。以旋耕埋草作业中的秸秆长度、耕作深度、刀轴转速为影响因素,以秸秆位移和埋覆率为指标进行三因素三水平的二次回归正交试验。通过建立响应面数学模型,分析了各因素对旋耕埋草效果的影响。试验结果表明:影响秸秆埋覆率和位移的主次顺序为耕作深度、秸秆长度、刀轴转速;秸秆长度与耕作深度交互作用对秸秆埋覆率和位移影响显著,其余参数交互作用不显著。多目标优化结果表明:当秸秆长度为 5 cm、耕作深度为 14.99 cm、刀轴转速为 320 r/min 时,埋草效果最优,其对应指标秸秆埋覆率与位移分别为 95.5% 和 27.6 cm。利用优化后的参数进行试验验证,秸秆埋覆率与位移分别为 93.3% 和 28.1 cm。研究结果可为旋耕埋草作业参数调整提供参考,为秸秆-土壤-机具交互机理研究提供理论支撑。

关键词: 旋耕埋草; 秸秆-土壤-旋耕机; 埋覆率; 秸秆位移; 作业参数; 正交试验

中图分类号: S233.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0023-07 OSID: 

Analysis of Straw Displacement and Burying Effect in
Straw - Soil - Rotary Tiller Interaction

XU Gaoming^{1,2} DING Qishuo^{1,2} WANG Xiaochan^{1,2} LIANG Lei^{1,2} HE Ruiyin^{1,2} CHEN Xinxin³

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China
2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China
3. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Analyzing the interaction of straw - soil - machinery and clarifying the movement and distribution of straw plays an important role in straw management and optimal design of farming machinery. Design-Expert software and Box - Behnken test were used to conduct an experimental study on the performance of key operation parameters under the interaction of straw - soil - rotary tiller on straw displacement and burying effect. In the tillage experiment, a quadratic regression orthogonal experiment was designed with three factors and three levels, including the influencing factors of the straw length, the tillage depth, and the rotary speed, and the response indexes of straw displacement and burial rate. By establishing the response surface mathematical model, the effects of various factors on the performance of rotary tillage were analyzed. The experimental results showed that the significant order of the influence on the amount of straw burial rate and straw displacement was as follows: the tillage depth, the straw length, and the rotary speed. The interaction between the tillage depth and the straw length had a significant impact on the straw burial rate and straw displacement, while the interactions between other parameters were not significant. When the straw length was 5 cm, the tillage depth was 14.99 cm and the rotary speed was 320 r/min, the straw returning effect was the best. The corresponding indexes of straw burial rate and straw displacement were 95.5% and 27.6 cm, respectively. The optimized parameters were

收稿日期: 2021 - 07 - 30 修回日期: 2021 - 09 - 17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300908)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX21_0573)、国家自然科学基金青年基金项目(31901455)、江苏省自然科学基金青年基金项目(SBK20180534)和江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(17)1002)
作者简介: 徐高明(1989—),男,博士生,主要从事土壤耕作与秸秆还田研究,E-mail: xgming55@163.com
通信作者: 丁启朔(1968—),男,教授,主要从事土壤-植物-机器系统科学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

used for experimental verification. The straw burial rate and straw displacement were 93.3% and 28.1 cm, respectively. The results can provide reference for the adjustment of operation parameters of rotary tillage and provide theoretical support for the study of straw – soil – machine interaction mechanism.

Key words: rotary tillage; straw – soil – rotary tiller; burial rate; straw displacement; operation parameters; orthogonal experiment

0 引言

在秸秆还田要求下,农业耕作系统的研究内容由以往土壤-机具两者的相互作用变成秸秆-土壤-机具三者间的交互作用。然而,目前对耕作机械与土壤、秸秆的交互作用规律缺乏深刻的认识。探究不同耕作机具作用下的秸秆与土壤运动规律及分布效果,有助于充分了解秸秆-土壤-机具交互作用机理,对秸秆管理及耕作机械优化设计具有重要的意义。

近年来,国内外学者采用离散元仿真或传统试验的方法从不同的角度对秸秆-土壤-机具的交互作用进行了研究^[1-8]。在离散元仿真方面,ZENG等^[9-10]运用离散元法构建了秸秆-土壤-凿型铲的相互作用模型,分析了前进速度这一因素对凿型铲耕作性能的影响;MARI等^[11]采用离散元法建立了秸秆-土壤-圆盘犁的交互作用模型,分析了不同前进速度对圆盘犁碎土性能的影响;周华等^[12]进行不同耕作机具的秸秆还田离散元仿真研究,模拟了深松铲和旋耕刀这两种机具作业下的秸秆还田质量;赵吉坤等^[13]基于离散元法构建了水稻土-旋耕刀-留茬秸秆相互作用模型,分析了不同留茬高度对耕作阻力的影响;胡建平等^[14]建立了双轴旋耕-秸秆-土壤的耕作仿真模型,研究了双轴配置参数对功耗的影响。在传统试验法方面,FARID等^[15]采用田间试验的方法对带挡草板铧式犁的埋草效果进行了研究,并指出随着前进速度的降低,秸秆掩埋率增加;TOROTWA等^[16]在室内土槽中进行了秸秆-土壤-仿生圆盘的交互作用研究,结果表明,相比于普通圆盘,仿生圆盘的耕作阻力更小、秸秆切割效率更高;黄玉祥等^[17]对草土分离装置-土壤-秸秆相互作用进行了研究,根据田间试验确定了草土分离装置的最优结构参数组合;郭俊等^[18]对正反转旋耕两种耕作方式下的土壤和秸秆位移进行田间对比试验分析,结果指出反旋作业的土壤及地表秸秆位移大于正旋作业,但随着刀轴转速的增加,反旋作业位移呈递减、正旋作业位移呈递增的趋势。

综上,国内外学者在不同耕作机具下的土壤与秸秆运动及掩埋规律方面取得了一定的成果,主要探究了前进速度、耕作机具、耕作方式等某一因素变化对秸秆与土壤运动及碎土埋茬性能的影响^[19-20]。

目前,关于秸秆-土壤-旋耕机交互作用机理的研究较少,仍然缺乏定量条件下秸秆与旋耕参数之间相互作用的详细数据,也有待深入从模型优化角度来获取多因素交互下的旋耕机最佳工作参数。因此,本文以江淮稻麦区常用的旋耕埋草还田方式为研究对象,开展三因素三水平的二次回归正交试验,探究秸秆-土壤-旋耕机系统中关键作业参数对秸秆位移与埋覆效果影响的规律,并寻求秸秆长度、耕作速度、刀轴转速三者的较优参数组合,以期旋耕埋草作业参数的调整提供参考,以及为秸秆-土壤-旋耕机交互机理的研究提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2021年6月在南京农业大学工学院的农业机械实验室内开展。由于田间试验不可控因素太多,且作业参数难以精准控制,故采用室内土槽耕作试验平台进行旋耕埋草试验。

该平台主要由试验台车、土槽、牵引系统、移动导轨、悬挂系统、旋耕机、操控系统和数据采集系统等组成,其整体结构如图1所示。试验选用IT245型旋耕刀,刀辊回转半径为245 mm,采用双螺旋排列方式。将装配好刀片的旋耕机挂接在试验台车上进行耕作,其作业幅宽为1.8 m,刀轴转速、耕作深度及前进速度等也可以通过台车控制系统方便且精确地进行调节。

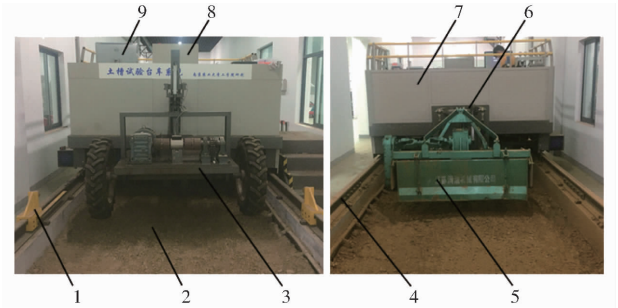


图1 室内土槽耕作试验平台

Fig.1 Soil bin and testing platform

- 1. 限位装置 2. 土槽 3. 牵引系统 4. 移动导轨 5. 旋耕机
- 6. 悬挂系统 7. 试验台车 8. 操控系统 9. 数据采集系统

土槽长为24 m、宽为3 m、深度为0.5 m,试验土壤类型为黏土,土壤砂粒、壤粒和黏粒质量分数分别为11%、47%和41%,取自南京市永宁镇^[21]。模拟

当地的土壤含水率与土壤容重,土壤经过调湿、压实后平均含水率为 16.8%,土壤容重为 1.25 g/cm³,且在整个试验过程中,土壤参数保持恒定。试验秸秆为切碎后的小麦秸秆,秸秆获取时先将田间秸秆从基部向上截取 20 cm 长度的秸秆,然后统一用铡刀切碎为 5、10、15 cm 3 种长度;并进行田间秸秆参数调查,获取秸秆量与含水率为 3 500 kg/hm²、20.2%,土槽试验所用秸秆的参数与田间秸秆保持一致,秸秆量控制在 3 500 kg/hm²,含水率为 20.2%。

1.2 试验方法

旋耕试验如图 2a 所示,先在土壤表层放置秸秆示踪器,再在上面均匀铺放 1 m × 1 m 的秸秆,最后进行不同耕作参数下的秸秆混埋试验。在试验过程中,测取每组试验下的秸秆位移和埋覆情况,各处理均进行 3 次重复试验。其中,耕后 3 种不同长度秸秆位移变化用图 2b 所示的示踪法^[22]进行追踪,通过标记后的蓝、红色秸秆来代表整体秸秆的位移变化情况。

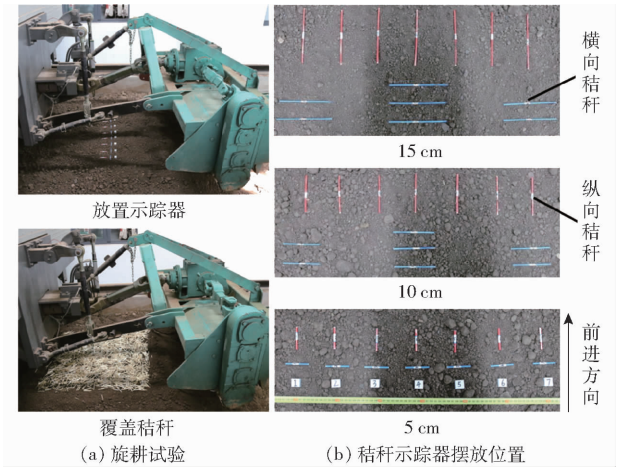


图 2 试验秸秆布置
Fig. 2 Experimental straws layouts

1.3 位移与埋覆率测试方法

1.3.1 秸秆位移测量

秸秆位移通过标记示踪器在旋耕前后的位置之差获得。如图 3a 所示,用相互垂直的标尺测定秸秆示踪器在旋耕前后 x 、 y 向坐标变化,根据二维地表坐标值变化来反映秸秆的位移变化。蓝、红色秸秆各设 7 组,分别标有数字 1~7,由 7 组示踪器的平均位移代表横向、纵向秸秆的位移。示踪器位移 L 计算式为

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

式中 (x_1, y_1) ——耕作前秸秆示踪器坐标
 (x_2, y_2) ——耕作后秸秆示踪器坐标

1.3.2 秸秆埋覆率测试

旋耕作业的秸秆埋覆率^[23]是衡量旋耕埋草性

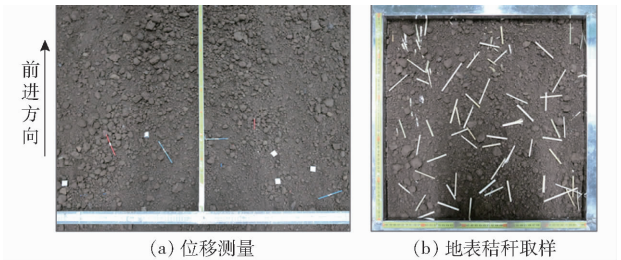


图 3 位移与埋覆率测试方法
Fig. 3 Measuring method of straw displacement and burial rate

能的重要指标之一,秸秆埋覆率越高,则耕作埋草性能越好。根据旋耕作业前后地表秸秆质量的变化测定秸秆埋覆率,采用 0.5 m × 0.5 m 的取样框进行秸秆收集并称量,如图 3b 所示。秸秆埋覆率 Y 计算式为

$$Y = \frac{m_q - m_h}{m_q} \times 100\% \quad (2)$$

式中 m_q ——耕整作业前单位面积秸秆量, g/m²
 m_h ——耕整作业后单位面积秸秆量, g/m²

2 试验设计与结果分析

有研究表明,秸秆长度、耕作深度、刀轴转速是影响秸秆还田质量的主要影响因素,秸秆还田质量随秸秆长度的增加而逐渐变差^[24];增加耕作深度可以有效提高秸秆埋覆率,提升秸秆埋覆效果^[13];而适当提高转速也有利于将更多的秸秆混埋到土壤中,提高秸秆还田质量^[18]。同时,旋耕秸秆还田质量包括秸秆埋覆质量和秸秆分布质量,其主要评价指标为秸秆埋覆率和秸秆位移。在旋耕作业时,秸秆埋覆率越高,则耕作埋草性能越好^[23];秸秆位移越大,也说明了秸秆在土壤中能均匀分散,可以获得较高的秸秆分布质量^[7-8]。因此,本文以秸秆长度、耕作深度、刀轴转速为试验因素,选择秸秆位移与埋覆率为评价指标,开展上述 3 个关键参数对秸秆位移与埋覆效果影响的单因素试验与多因素优化试验。

2.1 单因素试验

2.1.1 试验设计

先进行单因素试验,分别探究秸秆长度、耕作深度、刀轴转速 3 个因素与秸秆位移和埋覆率之间的关系。依据 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》,小麦、水稻等作物秸秆粉碎长度不大于 150 mm,同时考虑短秸秆有利于秸秆掩埋,但切碎长度减小会增加机具功耗,因此本研究取秸秆长度指标为 5、10、15 cm。增大耕作深度可以增加碎土量,从而提高秸秆埋覆效果。但耕作深度增加,会导致作业机具功耗增大。因此,旋耕作业深度

应合理选取,不宜过大,本试验分别选取耕作深度 5、10、15 cm 进行试验。随着刀轴转速的增加,切土节距也相应增大,旋耕碎土效果更好,从而秸秆埋覆质量也越好,但作业功耗也会增大。因此,结合当地常用作业参数,选取刀轴转速 240、280、320 r/min 进行试验。

以秸秆位移与埋覆率为评价指标进行试验。每次试验时的前进速度相同,保持在 0.5 m/s,且当只考察单一因素变化时,其他因素取零水平中间值,即秸秆长度、耕作深度、刀轴转速分别取 10 cm、10 cm、280 r/min。试验过程中记录秸秆位移变化值与秸秆埋覆率,其中秸秆位移变化值取横、纵向秸秆的位移平均值。每组试验重复 3 次,取平均值。

2.1.2 试验结果与分析

结合试验结果,分别分析秸秆长度、耕作深度、刀轴转速 3 个因素与秸秆位移和埋覆率之间的关

系。在耕作深度和刀轴转速一定的情况下,分别选取秸秆长度 5、10、15 cm 进行试验,随着秸秆长度的增加,秸秆位移和埋覆率逐渐减小,如图 4a 所示。分析其原因在于长秸秆运动速度小且入土阻力增加,导致秸秆位移减小且不利于秸秆掩埋。当秸秆长度和刀轴转速一定时,耕作深度分别选取 5、10、15 cm 进行试验,随着耕作深度的增大,秸秆位移越来越小,埋覆率越来越大,如图 4b 所示。该结果可能的原因是在旋耕深度大时,秸秆受到土壤的阻碍作用更多,导致秸秆位移减小;而增加耕作深度,有更多的土壤掩埋秸秆,其埋覆率也会增大。当秸秆长度和耕作深度一定时,增加刀轴转速会提高秸秆位移和埋覆率,如图 4c 所示。其可能的原因为增加刀轴转速,秸秆获得的动能也将增大,会使秸秆位移增加;同时适当提高刀轴转速会提升旋耕碎土效果,有利于秸秆掩埋。

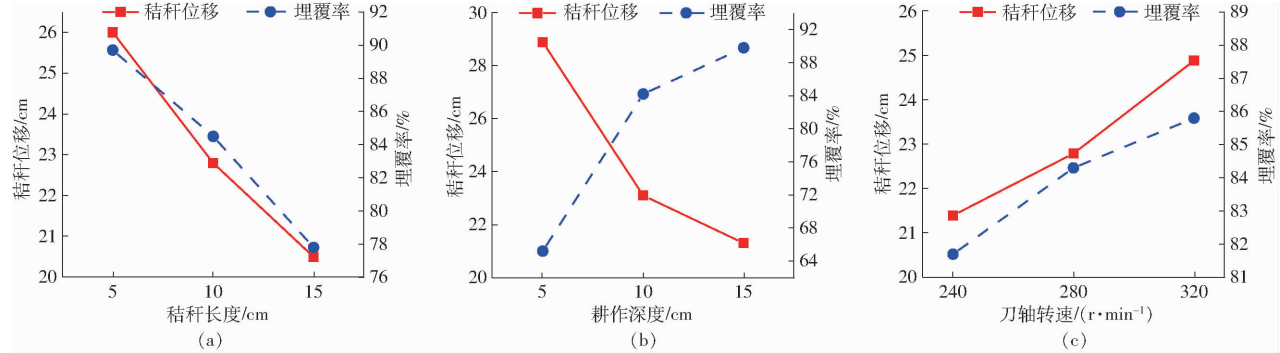


图 4 单因素对秸秆位移和埋覆率的影响

Fig. 4 Influences of single factor on straw displacement and burial rate

综合分析上述试验结果,减小秸秆长度、增加刀轴转速可以增加秸秆位移和埋覆率,从而提高秸秆还田质量;而随着耕作深度增大,秸秆位移减小,埋覆率增加。因此,为获取较高的秸秆还田质量,需要进行多因素优化试验,保证秸秆埋覆率最优的同时,秸秆位移达到最大。

2.2 多因素优化试验

2.2.1 试验设计

为了明确关键作业参数对秸秆位移与埋覆效果的影响及优化参数组合,以秸秆长度、耕作深度、刀轴转速为试验因素,选择秸秆位移 L 与埋覆率 Y 为评价指标,开展上述 3 个关键参数对秸秆位移与埋覆效果影响的多因素优化试验。利用 Design-Expert 软件的 Box - Behnken 试验原理开展三因素三水平试验,共包括 17 组试验。根据单因素试验分析结果,试验因素及编码如表 1 所示。

2.2.2 试验结果

试验结果如表 2 所示,利用 Design-Expert 软件建立秸秆位移和埋覆率与秸秆长度、耕作深度、刀轴

表 1 试验因素编码			
Tab.1 Codes of test factors			
编码	因素		
	秸秆长度 A/cm	耕作深度 B/cm	刀轴转速 C/(r·min ⁻¹)
-1	5	5	240
0	10	10	280
1	15	15	320

转速的数学模型,并分析各因素之间的交互作用规律。表 2 描述了 17 组试验中的秸秆位移和埋覆率,由试验数据可知,减小秸秆长度、增加耕作深度、增大刀轴转速可以增加秸秆位移、提高秸秆埋覆率,从而提升秸秆还田质量。

2.2.3 秸秆位移分析

(1) 秸秆位移回归结果分析

根据表 2 秸秆位移的试验结果,利用 Design-Expert 软件进行多元拟合与回归分析,建立以秸秆长度、耕作深度、刀轴转速为自变量的响应回归模型

$$L = 45.15 - 0.8615A - 2.78650B - 0.0255C - 0.046AB + 0.001125AC + 0.001625BC + 0.0222A^2 + 0.0962B^2 + 0.00008125C^2 \quad (3)$$

表 2 试验设计方案和结果
Tab.2 Test design and results

试验 序号	因素			秸秆 位移/cm	埋覆率/ %
	秸秆长度/ cm	耕作深度/ cm	刀轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)		
1	5	5	280	32.5	73.1
2	5	10	240	24.3	86.7
3	5	10	320	27.9	91.6
4	5	15	280	25.2	94.3
5	10	5	240	27.8	63.8
6	10	5	320	30.7	66.9
7	10	10	280	22.8	84.2
8	10	10	280	22.9	85.0
9	10	10	280	23.1	83.4
10	10	10	280	21.9	82.8
11	10	10	280	23.5	84.3
12	10	15	240	19.4	88.3
13	10	15	320	23.6	91.1
14	15	5	280	28.7	53.4
15	15	10	240	18.7	75.7
16	15	10	320	23.2	79.5
17	15	15	280	16.8	83.5

为进一步判定模型的拟合精度及各因素对秸秆位移的影响主次顺序,对表 2 秸秆位移进行方差分析及三元二次回归分析。如表 3 所示,该模型决定系数为 0.969 9,且模型显著性检验中 $F = 58.19$, $P < 0.000 1$,说明回归模型差异极显著;失拟性检验中, $F = 2.19$, $P > 0.1$,为不显著,说明该模型与实际结果拟合精度高,可以准确反映秸秆位移 L 与秸秆长度 A 、耕作深度 B 、刀轴转速 C 之间的关系,可用于秸秆位移的预测和分析。根据模型 F 值可发现,对秸秆位移影响的主次顺序为耕作深度、秸秆长度、

表 3 秸秆位移方差分析
Tab.3 Variance analysis of straw displacement

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	275.27	9	58.19	$< 0.000 1^{**}$
A	63.28	1	120.39	$< 0.000 1^{**}$
B	150.51	1	286.34	$< 0.000 1^{**}$
C	28.88	1	54.94	$0.000 1^{**}$
AB	5.29	1	10.06	$0.015 7^{*}$
AC	0.20	1	0.39	0.554 5
BC	0.42	1	0.80	0.399 7
A^2	1.30	1	2.47	0.160 2
B^2	24.35	1	46.33	$0.000 3^{**}$
C^2	0.071	1	0.14	0.723 8
残差	3.68	7		
失拟项	2.29	3	2.19	0.231 7
误差	1.39	4		
总和	278.95	16		
调整 R^2	0.969 9			

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$); * 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。下同。

刀轴转速。
(2) 秸秆位移与各因素响应曲面分析

根据模型利用 Design-Expert 软件生成各因素对秸秆位移影响的响应曲面。表 3 表明,秸秆长度与耕作深度交互作用对秸秆位移影响显著,秸秆长度与刀轴转速交互作用、耕作深度与刀轴转速交互作用对秸秆位移影响不显著。图 5 为秸秆长度、耕作深度对秸秆位移交互作用的响应曲面,可知随着秸秆长度和耕作深度的增加,秸秆位移呈减小的趋势,出现该现象的主要原因是秸秆长度增加后的秸秆质量增大,在旋耕刀相同力作用下,秸秆获取的运动速度小;耕作深度增加,秸秆掩埋得越深,其运动受到土壤的阻碍作用也越多,使秸秆位移减小。说明减少秸秆长度,且适当降低耕作深度,有利于增大秸秆位移,使得秸秆在土壤中充分分布,有利于提高秸秆还田质量。

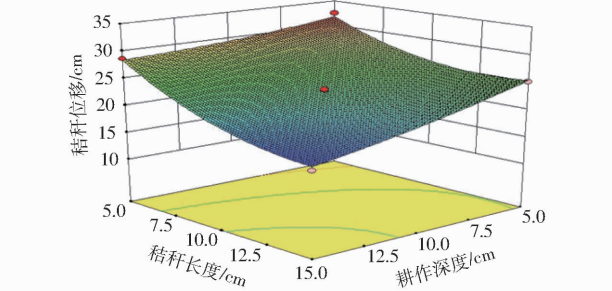


图 5 秸秆长度与耕作深度交互作用对秸秆位移影响的响应曲面
Fig.5 Response surface of straw length and tillage depth on straw displacement

2.2.4 秸秆埋覆率分析

(1) 秸秆埋覆率回归结果分析

根据表 2 秸秆埋覆率的试验结果,利用 Design-Expert 软件进行多元拟合与回归分析,建立以秸秆长度、耕作深度、刀轴转速为自变量的响应回归模型

$$Y = 53.787 5 - 1.039 A + 7.201 B - 0.091 75 C - 0.089 AB - 0.001 375 AC - 0.000 375 BC - 0.004 0 A^2 - 0.274 3 B^2 + 0.000 276 562 C^2 \quad (4)$$

为进一步判定模型的拟合精度及各因素对秸秆埋覆率的影响主次顺序,对表 2 秸秆埋覆率进行方差分析及三元二次回归分析。如表 4 所示,该模型决定系数为 0.985 9,且模型显著性检验中, $F = 125.03$, $P < 0.000 1$,说明回归模型差异极显著;失拟性检验中, $F = 3.97$, $P > 0.1$,为不显著,说明该模型与实际结果拟合精度高,可以准确反映秸秆埋覆率 Y 与秸秆长度 A 、耕作深度 B 、刀轴转速 C 之间的关系,可用于秸秆埋覆率的预测和分析。根据模型 F 值可发现,对秸秆埋覆率影响的主次顺序为耕作深度、秸秆长度、刀轴转速。

表 4 秸秆埋覆率方差分析

方差来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 861. 80	9	125. 03	<0. 000 1 **
<i>A</i>	359. 12	1	217. 05	<0. 000 1 **
<i>B</i>	1 250. 00	1	755. 48	<0. 000 1 **
<i>C</i>	26. 64	1	16. 10	0. 005 1 **
<i>AB</i>	19. 80	1	11. 97	0. 010 6 *
<i>AC</i>	0. 30	1	0. 18	0. 681 8
<i>BC</i>	0. 022	1	0. 014	0. 910 4
<i>A</i> ²	4. 27	1	2. 58	0. 152 0
<i>B</i> ²	198. 00	1	119. 67	<0. 000 1 **
<i>C</i> ²	0. 82	1	0. 50	0. 503 1
残差	11. 58	7		
失拟项	8. 67	3	3. 97	0. 108 1
误差	2. 91	4		
总和	1 873. 38	16		
调整 <i>R</i> ²	0. 985 9			

(2) 秸秆埋覆率与各因素响应曲面分析

根据模型利用 Design-Expert 软件生成各影响因素对秸秆埋覆率的响应曲面,进一步分析秸秆长度、耕作深度、刀轴转速 3 个因素对埋覆率的交互影响。表 4 表明,秸秆长度与耕作深度交互作用对秸秆埋覆率影响显著,秸秆长度与刀轴转速交互作用、耕作深度与刀轴转速交互作用对秸秆埋覆率影响不显著。由图 6 可知,当刀轴转速处于零水平时,在耕作深度处于较高水平时秸秆埋覆率随秸秆长度增加而逐渐降低,这是因为一定的耕作深度可以使得秸秆与土壤充分混合从而将秸秆掩埋于土壤中,较长的秸秆在旋耕时的位移量小,使得秸秆与土壤混合

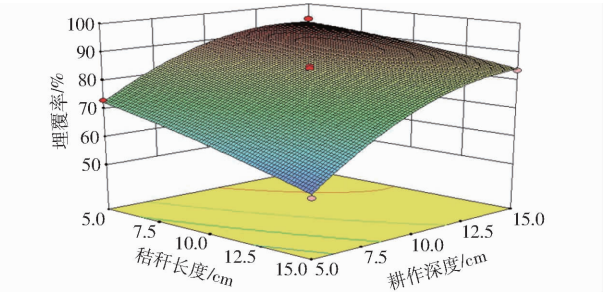


图 6 秸秆长度与耕作深度交互作用对秸秆埋覆率影响的响应曲面

Fig. 6 Response surface of straw length and tillage depth on straw burial rate

不充分,导致秸秆埋覆率随秸秆长度的增加而减少;当耕作深度处于高水平,秸秆长度处于低水平时,秸秆埋覆率出现极大值,这说明较小的秸秆长度和较大的耕作深度有利于秸秆与土壤充分混合,提高秸秆埋覆率。

2. 2. 5 参数优化与验证

根据模型分析效果,利用 Design-Expert 软件寻优功能进行参数优化,为提高旋耕秸秆还田质量,应在保证秸秆埋覆率最优的同时,秸秆位移达到最大。为此,建立秸秆埋覆率 *Y*、秸秆位移 *L* 双目标函数优化模型

$$\begin{cases} \max Y \\ \max L \\ 5\text{ cm} \leq A \leq 15\text{ cm} \\ 5\text{ cm} \leq B \leq 15\text{ cm} \\ 240\text{ r/min} \leq C \leq 320\text{ r/min} \end{cases} \quad (5)$$

求解得秸秆长度为 5 cm、耕作深度为 14.99 cm、刀轴转速为 320 r/min 时,秸秆埋覆率为 95.5%、秸秆位移为 27.6 cm。为了验证优化后参数准确性,将耕作参数调整接近最优解后进行 3 次重复试验,即秸秆长度为 5 cm、耕作深度为 15 cm、刀轴转速为 320 r/min 下进行旋耕埋草试验,得到秸秆埋覆率和秸秆位移分别为 93.3%、28.1 cm。试验数值与模型优化值相对误差均小于 5%,说明本研究模型可靠。

3 结论

(1) 通过室内土槽试验,研究了秸秆-土壤-旋耕机交互作用下关键作业参数对秸秆位移和埋覆效果的影响。由试验结果可知影响秸秆分布和埋覆效果的主次顺序依次为:耕作深度、秸秆长度、刀轴转速;秸秆长度与耕作速度交互作用对秸秆埋覆率和位移影响显著,其余参数交互作用不显著。

(2) 以秸秆埋覆率和秸秆位移为评价指标,对关键作业参数进行多目标优化,得到秸秆埋覆率、秸秆位移最大值的最优解为:秸秆长度 5 cm、耕作深度 14.99 cm、刀轴转速 320 r/min。该最优条件下的秸秆埋覆率为 95.5%,秸秆位移为 27.6 cm。将优化后的参数进行验证,试验数值与模型优化值误差小于 5%,说明研究模型可靠。

参 考 文 献

[1] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49-57, 273. ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49-57, 273. (in Chinese)

[2] ZHAO H, LI H, MA S, et al. The effect of various edge-curve types of plain-straight blades for strip tillage seeding on torque and soil disturbance using DEM[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 202(38): 104674.

- [3] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 37(6): 26–34.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 37(6): 26–34. (in Chinese)
- [4] LIU J, CHEN Y, KUSHWAHA R L. Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109(1): 9–17.
- [5] LIU J, CHEN Y, LOBB D A, et al. Soil-straw-tillage tool interaction: field and soil bin study[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2007, 49: 1–2.
- [6] 方会敏,姬长英,CHANDIO Farman Ali,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22–28.
FANG Huimin, JI Changying, CHANDIO F A, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22–28. (in Chinese)
- [7] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- [8] FANG Huimin, ZHANG Qingyi, CHANDIO F A, et al. Effect of straw length and rotavator kinematic parameter on soil and straw movement by a rotary blade[J]. Engineering in Agriculture Environment and Food, 2016, 9(3): 235–241.
- [9] ZENG Z, CHEN Y. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180(2): 25–35.
- [10] ZENG Z, MA X, CHEN Y, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197(4): 104505.
- [11] MARI I A, CHANDIO F A, JI C, et al. Performance and evaluation of disc tillage tool forces acting on straw incorporation soil[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2014, 51(4): 855–860.
- [12] 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 of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69–77. (in Chinese)
- [13] 赵吉坤,宋武斌. 秸秆留茬对水田耕作影响仿真分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 116–125.
ZHAO Jikun, SONG Wubin. Simulation analysis on the effects of straw stubble in the process of soil tillage[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(4): 116–125. (in Chinese)
- [14] 胡建平,赵军,潘浩然,等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 9–16.
HU Jianping, ZHAO Jun, PAN Haoran, et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 9–16. (in Chinese)
- [15] FARID E, DING W, DING Q, et al. Field investigation of a trash-board, tillage depth and low speed effect on the displacement and burial of straw[J]. Catena, 2015, 133(2–3): 385–393.
- [16] TOROTWA I, DING Q, MAKANGE N R, et al. Performance evaluation of a biomimetically designed disc for dense-straw mulched conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105068–105077.
- [17] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67–78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67–78. (in Chinese)
- [18] 郭俊,姬长英,方会敏,等. 正反转旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 21–26.
GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up-cut and down-cut rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 21–26. (in Chinese)
- [19] 徐高明,汪小岳,何瑞银,等. 基于复合指标与测试技术的旋耕秸秆还田质量评价研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 58–67.
XU Gaoming, WANG Xiaochan, HE Ruiyin, et al. Performance evaluation of rotary tillage straw returning based on composite indicators and measurement techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 58–67. (in Chinese)
- [20] XU G, XIE Y, DING Q, et al. Effect of straw length, stubble height and rotary speed on residue incorporation by rotary tillage in intensive rice-wheat rotation system[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 222.
- [21] 肖茂华,汪开鑫,杨望,等. 基于东方蜈蚣爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 55–63.
XIAO Maohua, WANG Kaixin, YANG Wang, et al. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of gryllotalpa orientalis burmeister[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 55–63. (in Chinese)
- [22] 郭俊,姬长英,CHAUDHRY A,等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 11–18.
GUO Jun, JI Changying, CHAUDHRY A, et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 11–18. (in Chinese)
- [23] 王志山,夏俊芳,许绮川,等. 船式旋耕埋草机螺旋刀辊作业功耗试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 44–47.
WANG Zhishan, XIA Junfang, XU Qichuan, et al. Power consumption experiment of rotary tillage and stubble-mulch knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 44–47. (in Chinese)
- [24] 石勇. 旋耕秸秆混埋还田质量试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
SHI Yong. Experimental research on the effect of straw incorporation with rotary tillage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)