

施继红, 刘贞彤, 黄东岩, 等. 基于玉米条耕技术的碎土镇压整地机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(1): 48-58.

SHI J H, LIU Z T, HUANG D Y, et al. Design and testing of soil crushing machine based on corn tillage technology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 48-58.

基于玉米条耕技术的碎土镇压整地机设计与试验

施继红¹, 刘贞彤¹, 黄东岩¹, 孟宪章^{1*}, 屈鑫誉^{1,2}, 王景立¹, 朱凤武¹, 马云海³

(1. 吉林农业大学 工程技术学院, 长春 130118; 2. 浙江三元龙兴科技股份有限公司, 浙江 台州 318020; 3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: [目的] 目前, 国内玉米条耕整地作业中碎土环节存在旋耕后土壤细碎、失墒较大, 易引起农田表土扬尘, 造成水土流失严重。同时, 镇压环节无法根据土壤墒情变化调节镇压强度, 导致土壤墒情无法满足作物播种需求, 进而影响播种质量等问题, 由此设计了一种圆盘耙碎土与变强度镇压作业相结合的条耕整地机。 [方法] 对驱动轴进行了静力学分析, 确定设计的合理性。测试了配重块数量对镇压强度的影响, 并以行进速度、耙深和耙片间距为试验因素, 以土壤破碎率为试验指标, 进行三因素三水平正交试验。同时, 以前进速度、镇压强度和耙深为试验因素, 以土壤坚实度、地表平整度为试验指标, 进行二次回归正交试验, 对该组合进行试验验证。 [结果] 确定当配置3块配重块时, 能产生22.1 kPa的镇压强度, 满足玉米出苗的条件。碎土性能的主要影响因素依次为行进速度、耙片间距和耙深; 最优工作参数组合为行进速度 $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、耙深10 cm、耙片间距140 mm, 此时土壤破碎率为73.15%, 为本试验的最佳碎土效果。分析得出土壤坚实度和地表平整度的主要影响因素依次为镇压强度、耙深、前进速度; 确定最优参数组合为前进速度 $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、镇压强度21 kPa、耙深8 cm, 此时的土壤坚实度为53.4 kPa, 地表平整度为2.7 cm, 各指标符合行业相关标准要求。 [结论] 该研究可为碎土镇压条耕整地机具的设计与优化提供参考, 为提升玉米条耕作业效果奠定基础。

关键词: 条耕技术; 碎土镇压整地机; 圆盘耙片; 土壤破碎率; 地表平整度

中图分类号: S222.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0048-11

Design and Testing of Soil Crushing and Compacting Machine Based on Corn Strip Tillage Technology

SHI Jihong¹, LIU Zhentong¹, HUANG Dongyan¹, MENG Xianzhang^{1*}, QU Xinyu^{1,2}, WANG Jingli¹, ZHU Fengwu¹, MA Yunhai³

(1. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Zhejiang Sanyuan Longxing Technology Co., LTD, Taizhou Zhejiang 318020, China; 3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: [Objective] At present, the soil breaking in the domestic corn strip ploughing operation has the problem that the soil is finely broken after rotary ploughing, and the moisture loss is large, which is easy to cause dust on the topsoil of the farmland, resulting in serious water and soil erosion. At the same time, the compaction of soil can not adjust the pressure according to the change of soil moisture, resulting in soil moisture can not meet the needs of crop sowing, which affects the quality of sowing. Therefore, a strip-till cultivator combining disc harrow crushing and variable pressure compaction operations was designed. [Methods] A static analysis of the drive shaft was carried out to determine the reasonableness of the design. The influence of the number of counterweight blocks on the compression strength was tested, and a three-factor, three-level orthogonal test was conducted with the travelling speed, harrow depth and harrow blade spacing as the test factors, and the soil crushing rate as the test index. At the same time, a quadratic

收稿日期: 2024-05-29 修回日期: 2024-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500404); 长春市科技发展计划项目(21ZGM04)

第一作者: 施继红(1971-), 女, 博士, 副教授, 从事农业智能装备工程研究, E-mail: 1422069908@qq.com

通信作者: 孟宪章(1970-), 男, 硕士, 高级实验师, 从事农业智能装备工程研究, E-mail: jlnydx2009@163.com

regression orthogonal test was carried out to verify the combination with travelling speed, suppression strength and harrow depth as test factors, and soil firmness and surface flatness as test indicators.[Results]It was determined that a compressive strength of 22.1 kPa could be generated when three counterweight blocks were configured, which met the conditions for corn emergence. The main influencing factors of soil crushing performance were travelling speed, harrow blade spacing and harrow depth; the optimal combination of working parameters was travelling speed of $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, harrow depth of 10 cm, and harrow blade spacing of 140 mm, then the soil crushing rate was 73.15%, which was the optimal crushing effect of this experiment. The main influencing factors of soil firmness and surface flatness were obtained as compression pressure, harrow depth and forward speed; the optimal combination of parameters was determined as forward speed of $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, compression strength of 21 kPa, harrow depth of 8 cm, and then, the soil firmness was 53.4 kPa, and surface flatness was 2.7 cm, which were in line with the relevant standards in the industry.[Conclusion] This study can provide a reference for the design and optimization of soil crushing and compaction strip-tillage implements, and lay a foundation for improving the effectiveness of maize strip-tillage operations.

Key words: strip tillage technology; soil crushing and compaction machine; disc harrow blade; soil crushing rate; surface flatness

保护性耕作技术是以机械化为手段、以“覆盖免耕、保土保水”为精髓的一种耕作技术,对降低土壤风蚀水蚀、增加土壤肥力、提高土壤的蓄水保墒能力具有积极效益^[1]。其包括免耕技术、条耕技术,垄作少耕技术、覆盖耕作与垂直耕作等主要技术模式^[2]。玉米是我国重要的粮食作物,近几年通过玉米条耕作业减少了低温冷凉区或者涝洼黏湿区由于秸秆覆盖地表导致的土壤温度回升缓慢、秸秆量大控制难而影响播种质量的问题。对土壤进行提前处理,为作物生长创造良好的条件^[3],条耕被认为是“最佳的耕作方法”,澳大利亚等多个国家广泛应用此技术,可实现大概率增产^[4]。

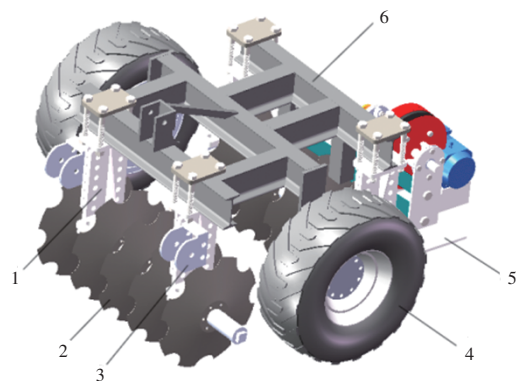
碎土和镇压作为条耕整地作业中的两个重要环节,一般在春天播种前进行,碎土可以松碎土壤,增加土壤透气性;镇压的作用是通过提高土壤坚实度,使苗带土壤保水能力增加,合理的镇压可以起到供墒、保墒和提墒作用,为后期播种提供良好的种床^[5-6],减少土壤侵蚀。美国大平原、迪尔和耶特生产的条耕机产品中,工作部件全部采用圆盘式切刀、耙片和铲子疏松土壤及圆滚式碎土镇压土壤、牵引式作业,无动力输出旋转部件^[7]。国内目前条耕作业中通常使用旋耕刀切碎土壤,达到了松碎土层的目的,但易造成旋耕后土壤细碎,破坏了土壤的团粒结构,使土壤失墒较大,易引起农田表土扬尘造成水土流失严重。其镇压装置大多数无法根据土壤墒情的变化调节镇压强度,其激振力难以在较大振动程度的范围内调节,导致作业后的土壤墒情不能达到作物播种需求,影响播种质量^[8-9]。

针对条耕整地作业中碎土和镇压环节存在的问题,亟待研制出一种采用耙松式条耕技术碎土、可调节镇压强度的联合整地作业机,开展碎土、镇压试验研究和参数优化,探明条耕整地作业最佳参数,以期提升玉米条耕作业效果提供一定参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

碎土镇压机具总体结构如图 1,该机具主要由耙片碎土部件、振动式镇压装置、机架和连接机构 4 部分组成。耙片碎土部件分为前后两组,通过连接机构和机架连接,机架两侧固定限深轮。连接机构通过螺栓将两个侧板反向固定构成,侧板中间设有加强肋,用于提高连接机构的强度和稳定性。振动式镇压装置位于机具尾部,用于将耙片组破碎的土壤进行压实。



1.连接机构;2.耙片碎土部件;3.牵引连接件;4.限深轮;5.振动式镇压装置;6.机架
1.Connecting mechanism;2.Harrow blade crushing parts;3.Traction connecting parts;
4. Depth wheel;5.Vibratory compaction device;6.Frame

图1 碎土镇压机总体结构示意图
Figure 1 Schematic diagram of the overall structure of the soil crushing and compacting machine

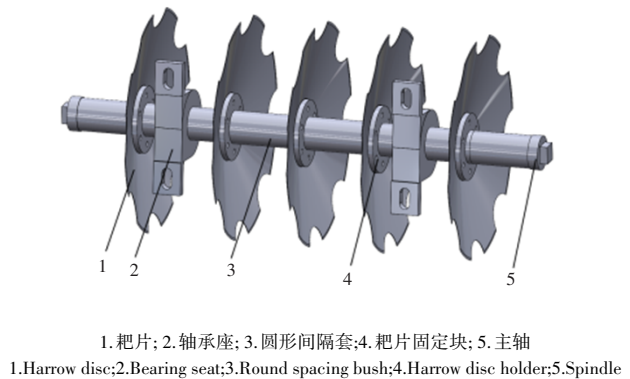
1.2 工作原理

碎土镇压整地机采用三点悬挂安装在拖拉机尾部,通过调节限深轮高度来调节作业深度。作业过程中,通过前后耙片组的错位排列可以有效地增加耙片与土壤的接触面积,从而提升碎土质量。随后,镇压装置对切碎后的土壤进行压实,得到有利于播种和植物生长的种床,蓄水保墒。一次可同时完成碎土和镇压作业,提高整地的工作效率,降低功耗。

2 关键部件设计

2.1 碎土部件总体设计

耙片碎土部件设计如图 2,包括主轴、耙片、间隔套、耙片固定块等结构。为使碎土部件作业范围内土壤破碎效果好,将耙片分为前后两组,两组相距 500 mm,前后两组耙片数量分别为 5 个和 4 个,反向安装。耙片固定块与耙片用螺栓连接,中间设方形孔以便穿过主轴。用外径 60 mm、厚度 5 mm 的圆形间隔套将相邻两耙片隔开并固定住,其内孔直径大于方形主轴对角线长,以便于主轴穿过。圆形间隔套不仅能固定耙片,还能防止土壤颗粒进入主轴和耙片连接处,减少磨损,延长机具使用寿命。两组耙片均通过轴承座与机架连接,由拖拉机牵引进行旋转作业。



1. 耙片; 2. 轴承座; 3. 圆形间隔套; 4. 耙片固定块; 5. 主轴

1.Harrow disc;2.Bearing seat;3.Round spacing bush;4.Harrow disc holder;5.Spindle

图2 耙片碎土部件

Figure 2 Harrow blade crushing parts

2.1.1 圆盘耙片设计 圆盘耙片在整地作业中是常见的碎土部件。半圆形缺口的圆盘耙片碎土能力强,但其工作时易滑动,因此,将耙片缺口设计为方形以防止滑动。影响圆盘耙片作业性能的因素除了材质外,耙片直径 D 、耙片厚度 δ 、耙片刃角 i 、曲率半径 ρ 等因素对圆盘耙片作业性能的影响同样很重要。圆盘耙片结构如图 3。

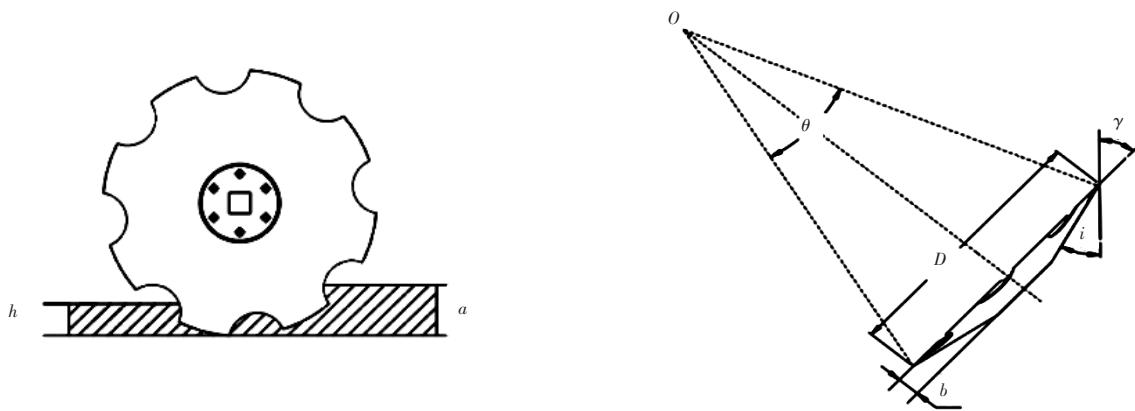


图3 圆盘耙片结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of harrow disc

圆盘耙片直径 D 可根据耙深要求进行确定,通常按照经验式进行确定:

$$D = Ka \tag{1}$$

式中: K 为径深比; a 为耙深(m)。

径深比的取值范围为 3 ~ 5,当耙深较大时,应取小值;反之,应取大值。

耙片曲率半径 ρ 计算式为:

$$\rho = \frac{D}{K} \sqrt{\frac{K-1}{\sin^2 \gamma} + (0.5K-1)^2} \tag{2}$$

耙片刃角 i 的选取对耙片性能影响较大,刃角 i 值越小,耙片越锋利,实际应用中耙片刃角取值范围为

14.5~22°。根据条耕技术少动土的农艺要求,选用轻型圆盘耙片,取值为 14.5°^[10]。

耙片厚度 δ 通常根据实际作业过程中工作负荷选取,利用经验式进行计算:

$$\delta = 0.008D \quad (3)$$

通常情况下,耙片厚度取值为 3.5~6 mm。根据碎土实际作业环境,其圆盘直径取 410 mm,耙片厚度为 5 mm。

2.1.2 主轴参数设计 由于耙片碎土部件采用被动式作业,用方形轴不致使耙片打滑。图4设计的方形轴断面边长为 32 mm,一端为固定端,耙片从另一端穿入且之间用间隔套隔开,再用螺母将方形轴这一端拧紧。

主轴的长度 L 取决于耙片间距和耙片自身的弦心距 b ,即:

$$L = d \times (n_0 - 1) + b \times n_0 \quad (4)$$

式中: L 为主轴长度(mm); d 为耙片间距(mm); n_0 为耙片数量(个); b 为耙片弦心距(mm)。

宽窄行耕作模式中休闲带宽为 800 mm,耕作带宽为 500 mm,碎土部件作业范围应在 500~600 mm,取前端耙片数量 $n_0=5$,因此得到耙片间距为 125~150 mm。为满足不同耙片间距的需求以及解决耙片拆装问题,需在主轴两侧留有一定的空间,因此确定主轴长为 980 mm。

2.2 振动式镇压装置总体设计

设计的镇压装置结构主要由镇压板、配重组件(驱动轴、配重盘、配重块、配重筒)、驱动电机和拉板等组成(图5)。作业时镇压装置在拉板的带动下滑动行进,电机带动驱动轴旋转,其滑动连接在驱动轴上的多个配重块也随之转动,促使驱动轴产生离心力进而产生激振力,激振力使镇压装置上下振动,以达到主动镇压的目的。

镇压产生的激振力随配重块数量变化而变化,根据文献^[11]测得激振力,计算得出镇压强度。由表 1 可知,配置 3 块配重块时能产生 22.1 kPa,达到了出苗所需镇压强度要求。

2.3 驱动轴静力学分析

驱动轴的强度决定镇压装置作业时的安全性和稳定性,因此需要对驱动轴进行静力学分析,选用四面体网格划分,驱动轴支撑在两支支撑板上,在驱动轴上施加电机额定转速 1 420 r·min⁻¹使其转动。

驱动轴使用的材料 Q235A 的屈服强度为 $\sigma_s=235$ MPa。根据实际使用情况,可取安全系数 $n=2$ 。该材料的许用应力 $[\sigma]$ 计算式为:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad (5)$$

表1 配重块数量对镇压强度影响试验

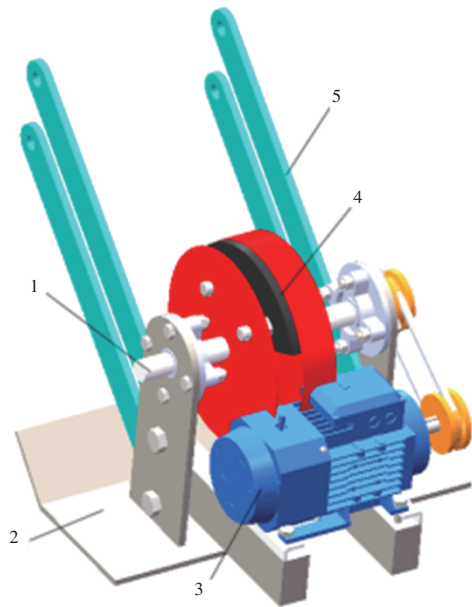
Table 1 Tests on the effect of the number of counterweight blocks on the compressive pressure of the machine

配重块数量/块 Number of counterweights	镇压强度/kPa Compaction pressure
2	16.8
3	22.1
4	27.2
5	32.6
6	37.8



图4 方形主轴三维图

Figure 4 A 3D diagram of the square spindle



1.驱动轴;2.镇压板;3.驱动电机及传动机构;4.配重组件;5.拉板
1. Drive shaft; 2. Crash down the plate; 3. Drive motor and transmission mechanism; 4. Counterweight components; 5. Pull the board

图5 振动式镇压装置

Figure 5 Vibration suppression device

计算得该材料的许用应力 $[\sigma]=117.5$ MPa。驱动轴的等效应力云图如图 6,其最大应力主要位于驱动轴和皮带轮连接处,最大值为 1.769 MPa,远小于材料的许用应力。整个驱动轴其他位置的应力值均小于 0.6 MPa 以下,驱动轴的变形量如图 7,其最大值为 0.001 mm,其变形量可忽略不计,主要集中于配重块与驱动轴的连接处。因此,驱动轴强度能满足作业要求。

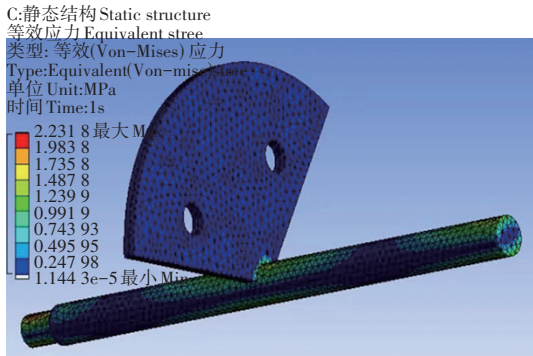


图6 驱动轴应力云图

Figure 6 Stress nephogram of driving shaft

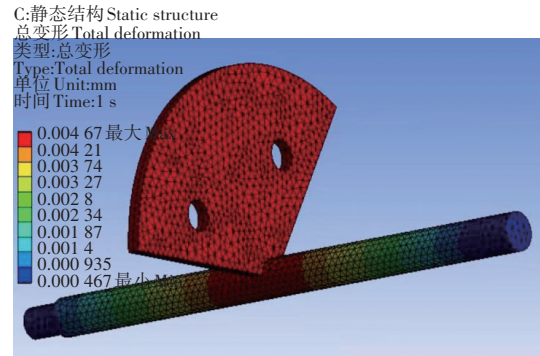


图7 驱动轴变形云图

Figure 7 Cloud map of driving shaft deformation

3 碎土作业性能试验

3.1 性能指标

碎土作业性能主要考量地表平整度^[12]和土壤破碎率两个性能指标。

3.1.1 地表平整度 在其他因素不变的情况下,在测试地块随机选定5个小区,每个长度20 m、宽度应不少于1个工作幅宽1 m。在每个小区沿作业方向均匀分布10个测试点,以每个小区作业后最高测试点作为水平基准线,测量各测试点至基准面的垂直高度,根据式(6)与式(7)计算平均值与标准差^[13],用标准差表示地表平整度,取5个小区的平均值。行业标准规定地表平整度应 ≤ 5 cm,即作业后地表最高值与最低值之差在5 cm之内^[14]。

$$\bar{Z} = \frac{\sum Z_i}{N} \tag{6}$$

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}{N - 1}} \tag{7}$$

式中: S_b 为标准差; Z_i 为地表记录点高度(cm); N 为记录点数(个); \bar{Z} 为记录点平均高度(cm)。

3.1.2 土壤破碎率 在测试地块内随机选择测试点,以1 m²的木框在测试地块内随机取土,用塑料袋封存并标记,在实验室内用标准筛网筛出小于5 mm的土块^[15]。根据式(8)计算土壤破碎率。

$$C_p(\%) = \frac{g_1}{g} \times 100 \tag{8}$$

式中: C_p 为土壤破碎率(%); g_1 为小于5 mm土块的质量(g); g 为土块总质量(g)。

3.2 试验条件与方法

试验地点位于吉林农业大学工程技术学院试验田,地里有少量秸秆覆盖。试验仪器包括TJL-1型拉力传感器、TYD-2型土壤硬度仪、环刀组件、JD1000-2电子天平、5 mm土壤筛等。试验前需要进行集茬作业。根据少动土的原则,对试验田0~10 cm的土壤进行理化性质的测量,其结果为:土壤温度15.6 °C,密度1.30 g·cm⁻³,含水率19.7%。

3.3 试验及结果分析

设计三因素三水平正交试验研究行进速度、耙深和耙片间距对土壤破碎率的影响。依据少动土的农艺要求,耙深应 ≤ 10 cm,因而参数选取如表2,通过5 mm的土壤筛来测量土壤破碎率。作业性能试验过程如图8,碎土后地表情况如图9。

表2 碎土部件性能试验因素水平

Table 2 Streering factors and levels of performance test of soil crushing parts

水平 Level	因素 Factor		
	行进速度 $A/(km \cdot h^{-1})$ Travel speed	耙深 B/cm Harrow depth	耙片间距 C/mm Harrow blades spacing
1	1	6	130
2	3	8	140
3	5	10	150



图8 碎土部件性能试验

Figure 8 Performance test of soil crushing components



图9 碎土后地表情况

Figure 9 Soil surface condition after soil breaking

由表2和表3可知,影响土壤破碎率的因素主次顺序从大到小依次为行进速度、耙片间距、耕深。最优方案取各因素最大值 K 所对应的水平,极差分析得 $A_2B_3C_2$ 为最优方案,以行进速度为 $3 km \cdot h^{-1}$ 、耙深为 $10 cm$ 、耙片间距为 $140 mm$ 时,土壤破碎率达到 73.15% ,为本试验最佳碎土效果。

表3 碎土部件性能试验数据分析结果

Table 3 Analysis results of the performance test data of soil crushing parts

试验号 Test number	A	B	C	交互作用 Interaction	土壤破碎率/% Soil crushing rate
1	1	1	1	1	64.27
2	1	2	3	2	66.45
3	1	3	2	3	69.23
4	2	2	3	1	71.36
5	2	3	1	2	69.82
6	2	1	2	3	72.71
7	3	3	2	1	71.84
8	3	1	3	2	66.73
9	3	2	1	3	68.06
K_1	199.95	203.71	202.15	210.47	
K_2	213.89	205.87	213.78	203.00	
K_3	206.63	210.89	204.54	210.00	
k_1	66.65	67.90	67.38	70.16	
k_2	71.30	68.62	71.26	67.67	
k_3	68.87	70.30	68.18	70.00	
R	4.65	1.67	3.88	2.49	
最优水平 Optimal level	2	3	2		

4 整机试验

碎土和镇压作业同时进行时会产生交互作用,因此需要对机具整体作业性能进行试验。以机具前进速度 X_1 、镇压强度 X_2 、耙深 X_3 为试验因素,以土壤坚实度 Y_1 、地表平整度 Y_2 为指标设计二次回归正交试验,每个水平

重复 3 次试验^[6], 试验因素水平如表 4。

表 4 整机试验因素水平

Table 4 Experimental factors and levels of the overall machine

水平 Level	试验因素 Experimental factors		
	前进速度 $X_1/(km \cdot h^{-1})$	镇压强度 X_2/kPa	耙深 X_3/cm
	Forward speed	Compaction pressure	Harrow depth
-1	1	18	6
0	3	20	8
1	5	22	10

通过调整配重块数量对土壤的镇压强度进行调节, 镇压力大小通过拉压力传感器来测定, 其数值由 LCD1602 液晶显示器显示, 通过计算得出镇压强度; 试验采用对角线采样法, 将土壤硬度计压入采样点 0~10 cm 土层处测量土壤坚实度。由查阅相关文献可知^[7], 在 0~10 cm 土层土壤坚实度需要达到 50 kPa 以上才符合玉米精量播种的农艺要求, 对后期生长无明显的物理障碍。田间整机作业性能试验如图 10, 作业后地表情况如图 11。



图 10 田间整机试验

Figure 10 Field experiment of the machine



图 11 作业后地表情况

Figure 11 Soil surface after the operation

试验结果如表 5, 利用 Design-Expert 进行多元拟合及回归性分析, 建立土壤坚实度、地表平整度与机具前进速度、镇压强度、耙深 3 个自变量间的响应面回归模型。

表 5 整机试验结果

Table 5 Test results of the machine

试验号 Test number	前进速度 $X_1/(km \cdot h^{-1})$ Forward speed	镇压强度 X_2/kPa Compaction pressure	耙深 X_3/cm Harrow depth	土壤坚实度 Y_1/kPa Soil firmness	地表平整度 Y_2/cm Surface flatness
1	1	18	8	42.03	4.24
2	5	18	8	44.73	4.44
3	1	22	8	53.76	3.76
4	5	22	8	51.52	3.97
5	1	20	6	52.62	3.58
6	5	20	6	53.65	3.95
7	1	20	10	46.45	3.98
8	5	20	10	49.88	4.16
9	3	18	6	48.73	3.15
10	3	22	6	58.21	2.54
11	3	18	10	45.69	4.43
12	3	22	10	56.12	3.15
13	3	20	8	48.56	2.71
14	3	20	8	49.27	2.65
15	3	20	8	49.05	2.69
16	3	20	8	49.20	2.78
17	3	20	8	48.62	2.79

4.1 土壤坚实度结果分析

试验数据经 Design-Expert 处理后,得出方程式(9),并对模型进行显著性检验如表 6。

$$Y_1=113+3.75X_1+0.608X_2-13.364X_3-0.154X_1X_2+0.12X_1X_3+0.0238X_2X_3-0.308X_1^2+0.019X_2^2+0.47X_3^2 \quad (9)$$

表6 土壤坚实度方差分析
Table 6 Variance analysis of soil firmness

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square error	F	P
Model	265.86	9	29.54	37.13	<0.000 1**
X_1	3.03	1	3.03	3.80	0.092 1
X_2	184.61	1	184.61	232.05	<0.000 1**
X_3	28.39	1	28.39	35.68	0.000 6**
X_1X_2	6.10	1	6.10	7.67	0.027 7*
X_1X_3	1.44	1	1.44	1.81	0.220 5
X_2X_3	0.2256	1	0.225 6	0.2836	0.610 8
X_1^2	6.41	1	6.41	8.06	0.025 1*
X_2^2	0.3885	1	0.388 5	0.4883	0.507 2
X_3^2	36.49	1	36.49	45.86	0.000 3**
残差 Residual	5.57	7	0.795 6		
失拟项 Lack of fit	5.13	3	1.71		0.011 2
纯误差 Pure error	0.435 4	4	0.108 9		
总和 Sum	271.43	16			
R^2	0.979 5				

注:*(P<0.05)为显著,**(P<0.01)为极显著。下同。

Note:*(P<0.05)means significant,**(P<0.01)means highly significant. The same below.

当P<0.01时,认为该回归模型极显著;若P>0.05,则认为回归模型不显著,P值越小则认为显著性越高^[18],具有研究意义。由表7土壤坚实度方差分析可知,方差R²>0.9,说明该模型显著性极高。 X_2 、 X_3 、 X_3^2 对土壤坚实度影响极为显著,影响因子 X_1X_2 、 X_1^2 在P=0.05时影响显著,其他影响因子不显著。由表中的F值可以得出因素影响土壤坚实度主次顺序为: $X_2>X_3>X_1$,即:镇压强度>耙深>前进速度。

去除土壤坚实度回归方程中的不显著项,优化后的回归方程为:

$$Y_1 = 113 + 0.608X_2 - 13.364X_3 - 0.154X_1X_2 - 0.308X_1^2 + 0.471X_3^2 \quad (10)$$

图 12a 为前进速度 3 km·h⁻¹时,镇压强度、耙深与土壤坚实度的关系曲面图。当镇压强度一定时,耙深增加,土壤坚实度无变化;当耙深一定时,镇压强度增加,土壤坚实度增加且上升趋势稳定,表明二者交互作用不显著,与土壤坚实度响应面方差分析结果相一致。图 12b 为耙深 10 cm 的关系曲面图,当镇压强度一定时,前进速度增加,土壤坚实度持续增加,但后期变化幅度小;当前进速度一定时,镇压强度增加,土壤坚实度几乎呈线性增加,说明二者的交互作用显著。图 12c 为镇压强度 22 kPa 时的关系曲面图,当耙深一定时,前进速度增加,

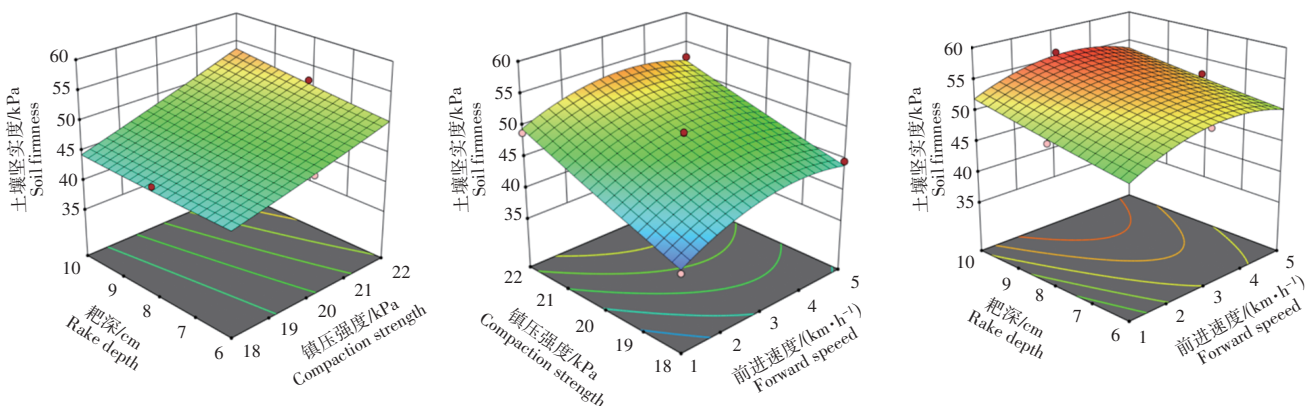


图 12 土壤坚实度响应面图

Figure 12 Response surface diagram of soil firmness

土壤坚实度先增加后降低,但变化幅度小;当前进速度一定时,耙深增加,土壤坚实度无变化,表明二者交互作用不显著。对土壤坚实度的回归方程求偏导得出最佳作业性能参数为耙深 8 cm、前进速度 2.92 km·h⁻¹、镇压强度 21.913 kPa 时,预测土壤坚实度为 53.748 kPa。

4.2 地表平整度结果分析

地表平整度回归方程:

$$Y_2 = 15.295 - 1.311X_1 - 0.853X_2 - 0.329X_3 + 0.03X_1X_2 - 0.01X_1X_3 - 0.017X_1^2 + 0.024X_2^2 + 0.033X_3^2 \quad (11)$$

由表 7 可知,方差 $R^2 = 0.9565 > 0.9$,说明该模型显著性极高。影响因子 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 极为显著,在 $P = 0.05$ 显著水平时, X_3^2 显著,由表中的 F 值可以得出因素影响地表平整度主次顺序为: $X_2 > X_3 > X_1$,即:镇压强度 > 耙深 > 前进速度。

将不显著因子剔除得优化后的回归方程:

$$Y_2 = 15.295 - 0.853X_2 - 0.329X_3 - 0.017X_1^2 + 0.024X_2^2 + 0.033X_3^2 \quad (12)$$

表 7 地表平整度方差分析

Table 7 Analysis of variance of surface smoothness

差异来源 Source of difference	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean square error	F	P
Model	7.30	9	0.811 4	17.11	0.000 6**
X_1	0.115 2	1	0.115 2	2.43	0.163 1
X_2	1.01	1	1.01	21.26	0.002 5**
X_3	0.781 3	1	0.781 3	16.47	0.004 8**
X_1X_2	0.000 0	1	0.000 0	0.000 5	0.982 3
X_1X_3	0.009 0	1	0.009 0	0.190 3	0.675 8
X_2X_3	0.112 2	1	0.112 2	2.37	0.167 9
X_1^2	4.12	1	4.12	86.87	0.000 1**
X_2^2	0.638 0	1	0.638 0	13.45	0.008 0**
X_3^2	0.175 7	1	0.175 7	3.70	0.095 7*
残差 Residual	0.332 0	7	0.047 4		
失拟项 Lack of fit	0.317 7	3	0.105 9	29.58	0.003 4
纯误差 Pure error	0.014 3	4	0.003 6		
总和 Sum	7.63	16			
R^2	0.956 5				

图 13a 为耙深 10 cm 时,镇压强度、前进速度与地表平整度的关系曲面图。当前进速度一定时,随着镇压强度增加,地表平整度呈线性下降;当镇压强度一定时,地表平整度随着前进速度增加,先下降后上升,幅度平稳。图 13b 为前进速度 3 km·h⁻¹ 时,耙深、镇压强度与地表平整度的关系曲面图。当耙深一定时,地表平整度随着镇压强度增加先下降后上升,但变化幅度小;当镇压强度一定时,耙深增加,地表平整度几乎无变化。图 13c 为镇压强度 24 kPa 时,前进速度、耙深与地表平整度的关系曲面图。当前进速度一定时,耙深增加,地表平整度略有增加;当耙深一定时,前进速度增加,地表平整度先下降后上升。表明它们的交互作用影响均不显著,与地表平整度响应面方差分析的结论相一致。同理,对地表平整度的回归方程求偏导得出最佳作业性能参数为耙深 8 cm、前进速度 3.598 km·h⁻¹、镇压强度 21.171 kPa 时,预测地表平整度为 2.754 cm。

4.3 参数优化试验

通过 Design-Expert 对回归方程模型进行优化求解,当前进速度为 3 km·h⁻¹、镇压强度 21 kPa、耙深 8 cm,此时的土壤坚实度为 53.4 kPa,地表平整度为 2.7 cm。利用最佳参数于田间进行 3 次验证试验,测得土壤坚实度为 53.1 kPa、地表平整度为 2.8 cm。试验结果与优化指标相差很小,说明参数优化模型可靠、作业效果好,达到了行业相关标准要求,为本试验条件下最佳整地措施。

5 讨论与结论

碎土和镇压是条耕整地作业的两道重要工序,对于碎土装置国内外研究成果颇丰。在美国使用由圆盘耙、深松铲、合墒器、镇压辊等构成的联合作业机可以一次性完成耙茬、深松、合墒、整地等多项作业^[19]。李成

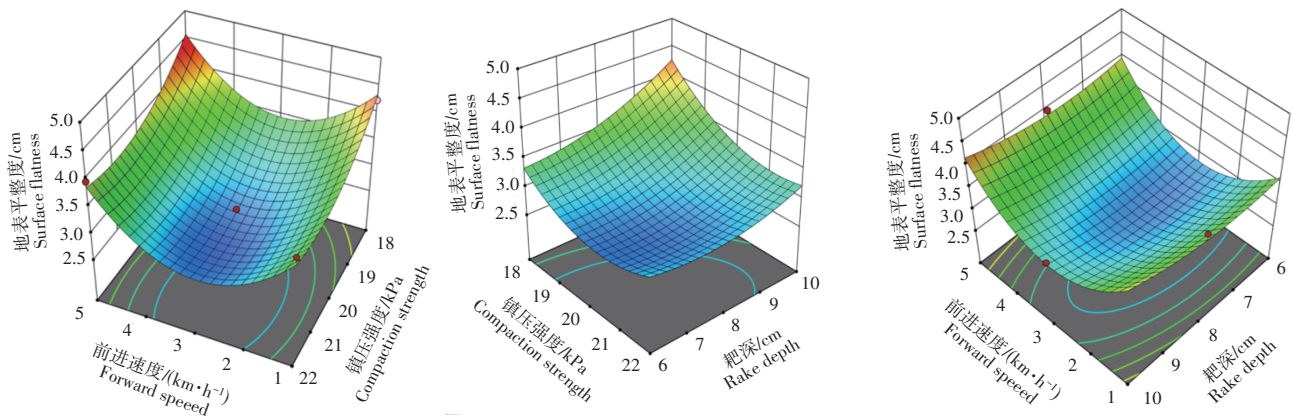


图 13 地表平整度响应面图

Figure 13 Response surface diagram of surface flatness

鑫^[20]设计并优化的深松整地联合作业机,康迪鑫等^[21]设计了一种深松、灭茬、镇压联合作业机,这些机具都能够将灭茬、旋耕、深松、整地、起垄中的部分作业功能相结合,提高了作业效率。对于变强度镇压装置研究鲜少涉及通过增减配重来改变镇压强度,多数集中于研究镇压器控制系统。王景立^[22]设计了一种可变量苗带镇压器,通过改变液压缸行程改变作用在轮轴上的力,进而改变镇压轮对种床土壤的压力,从而达到最佳的镇压效果。刘金凯^[23]研发了一种新型的镇压部件,它能够实时监测土壤对镇压辊的反作用力,并通过控制系统实时调整镇压深度,以保证垄面土壤坚实度。卢琦^[15]设计了一种镇压强度可调的镇压试验装置,通过受力分析和公式推导出镇压强度与配重的关系,通过田间标定试验求解不同镇压强度下试验配重值,结果表明适宜的镇压强度有助于燕麦生长。

本研究在借鉴现有耙片碎土和变强度镇压作业的经验基础上,设计了一种圆盘耙碎土与配重块镇压作业相结合的整地机,该机具有土壤破碎率高、地表平整度与土壤坚实度达到了行业相关标准要求的特点。对驱动轴进行了静力学分析,确定设计的合理性。测试了配重块数量对镇压强度的影响,确定当配置3块配重块时能产生22.1 kPa,达到玉米出苗条件要求。碎土装置正交试验证明土壤破碎率受因素的影响顺序为:行进速度>耙片间距>耙深;因素影响土壤坚实度和地表平整度主次顺序均为:镇压强度>耙深>前进速度。通过碎土试验得出当行进速度 $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、耙深10 cm、耙片间距140 mm时土壤破碎率达到73.15%,为本试验最佳碎土措施。通过分析得出当前进速度 $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、镇压强度21 kPa、耙深8 cm时,此时的土壤坚实度为53.4 kPa,地表平整度为2.7 cm,是最优工作参数。通过重复试验验证土壤坚实度为53.1 kPa、地表平整度为2.8 cm,达到了行业相关标准要求。

参考文献:

- [1] 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 X L. Research on straw incorporation returning of corn and its corresponding key components in black soil region[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [2] KOVACS G P, SIMON B, BELLA I, et al. Conservation tillage improves soil quality and crop yield in Hungary[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3): 894.
- [3] 王 营, 徐明洁, 辛明月, 等. 东北地区玉米春季渍害指标构建及时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 101–110.
WANG Y, XU M J, XIN M Y, et al. Indicator construction and spatial distribution characteristics of maize spring waterlogging in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 101–110.
- [4] 石东峰, 米国华. 玉米秸秆覆盖条耕技术及其应用[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(3): 349–355.
SHI D F, MI G H. Straw mulching strip-till technology and its application in corn production[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(3): 349–355.
- [5] 卢 琦, 王 璐, 刘 芸, 等. 不同镇压强度对燕麦生长特性的影响[J]. *农业工程*, 2022, 12(7): 88–94.
LU Q, WANG L, LIU Y, et al. Effects of different suppression intensity on growth characteristics of oat[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(7): 88–94.

- [6] ALTIKAT S,CELIK A.The effects of tillage and intra-row compaction on seedbed properties and red lentil emergence under dry land conditions[J].Soil and Tillage Research,2011,114(1):1-8.
- [7] 李社潮.美国的条带耕作与条耕机[J].农业机械,2018(6):47-48.
LI S C.American strip farming and tillage machine[J].Farm Machinery,2018(6):47-48.
- [8] 赵淑红,谭贺文,王加一,等.多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(11):58-67.
ZHAO S H,TAN H W,WANG J Y,et al.Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(11):58-67.
- [9] 王加一,赵淑红,杨智杰,等.玉米条带少耕作业驱动式破茬刀设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(8):51-61.
WANG J Y,ZHAO S H,YANG Z J,et al.Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less tillage operation[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):51-61.
- [10] 梁爱珍,张 延,陈学文,等.东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J].地理科学,2022,42(8):1325-1335.
LIANG A Z,ZHANG Y,CHEN X W,et al.Development and effects of conservation tillage in the black soil region of north-east china[J].Scientia Geographica Sinica,2022,42(8):1325-1335.
- [11] 屈鑫誉.基于玉米条耕技术的碎土镇压机具的设计与试验[D].长春:吉林农业大学,2023.
QU X Y.Design and testing of a crushed soil suppression machine based on corn strip-till technology[D].Changchun:Jilin Agricultural University,2023.
- [12] 魏子翔,何瑞银,李毅念,等.稻茬田带状立旋作业参数对种床清秸与平整效果的影响[J].南京农业大学学报,2024,47(5) : 1037-1048.
WEI Z X,HE R Y,LI Y N,et al.Effects of strip vertical rotation working parameters on seedbed[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(5):1037-1048.
- [13] 余 梦.西洋参种床深松碎土复式作业机的试验研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
YU M.Experimental study on compound machine for subsoiling and crushing soil in american ginseng seed bed[D].Changchun:Jilin Agricultural University,2021.
- [14] 康迪鑫.深松灭茬镇压联合整地机设计与研究[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
KANG D X.Design and research on subsoiling, stubbling and suppress soil crushing combined tillage machine[D].Langzhou: Gansu Agricultural University,2019.
- [15] 李传峰,李 珂,雷长军,等.JZ01-4800型联合整地机作业性能试验分析[J].农机化研究,2018,40(10):172-176.
LI C F,LI K,LEI C J,et al.Experimental analysis on working performance of JZ01-4800 combined soil preparation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(10):172-176.
- [16] 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 J T,TIAN X L,LIU K,et al.Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(1):141-147.
- [17] 刘 芳.玉米精量播种机紧凑型覆土镇压装置设计与试验[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
LIU F.Design and experimentation of a compact soil covering-compacting device for a maize precision planter[D].Yangling: Northwest A&F University,2024.
- [18] CARBONI M,BERETTA S,MONNO M.Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints[J].Engineering Fracture Mechanics,2006,73(2):178-190.
- [19] 钮生振.深松整地联合作业机的设计与试验研究[D].长春:吉林农业大学,2019.
NIU S Z.Design and experiment study of combined operation machine for deep loosening and land preparation[D].Changchun:Jilin Agricultural University,2019.
- [20] 李成鑫.深松整地联合作业机的优化设计[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
LI C X.Optimization of a combined machine for sub soiling and land preparation[D].Yangling:Northwest A&F University, 2015.
- [21] 康迪鑫,孙 伟,张 涛,等.干旱地区深松灭茬镇压联合整地机的研究与试验[J].中国农业大学学报,2018,23(1):133-142.
KANG D X ,SUN W,ZHANG T.Study and experiment on subsoiling, stubble-breaking and pressing soil combined tillage machine in arid area[J].Journal of China Agricultural University,2018,23(1):133-142.
- [22] 王景立.精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D].长春:吉林大学,2012.
WANG J L.The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder[D].Changchun:Jilin University,2012.
- [23] 刘金凯.精整地机设计与镇压力反馈控制技术的研究[D].镇江:江苏大学,2019.
LIU J K.Research on the design of soil preparation machine and feedback control technology of compacting force on roller[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2019.