

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.005

基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究

史乃煜 陈海涛 魏志鹏 柴誉铎 侯守印 王 星
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对免耕播种机在湿黏土壤条件下施肥铲回填性能弱,导致种肥同床的问题,基于最速降线原理设计了一种强制回土装置,将理论分析、虚拟仿真与试验相结合,探究强制回土装置最优结构与参数组合。应用三因素三水平正交试验方法,以作业速度、回流挡板间距和回流挡板与地表夹角为试验因素,以土壤回填率和单体通过性为评价指标,对影响强制回土装置作业性能的相关参数进行试验与优化研究。试验结果表明,在参数组合为作业速度 1.5 m/s、回流挡板间距 112 mm、回流挡板与地表夹角 60°时,土壤回填率为 91.2%,作业过程未发生单体堵塞现象。对比试验表明,优化后的最速降线式强制回土装置较直板式强制回土装置的土壤回填率提升了 16.5%。

关键词: 免耕播种机; 最速降线; 强制回土装置; 土壤回填; 正交试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)02-0037-08 **OSID:** 

Design and Test of Forced-return Device Based on Principle of Brachistochrone

SHI Naiyu CHEN Haitao WEI Zhipeng CHAI Yuduo HOU Shouyin WANG Xing
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The seeding drill unit is mainly composed of working parts which include a seed and fertilizer opener, a seeding apparatus, a soil covering and pressure device, et al. The seeding operation is carried out, and when working under the condition of wet clay. The backfill performance of the fertilization shovel is weak, because of the soil fluidity is poor. The phenomenon of “burn seed” was occurred due to seed and fertilizer at the same seed bed. In addition, to ensure that soil has sufficient time to return the fertilizer ditch, the operation speed of the implement cannot be too fast. Moreover, the mechanical operation of high-efficiency seeding and fertilization is restricted. Aiming at the existing problems and the background of the existing research, a forced soil-returning device was designed on the basis of the principle of brachistochrone. The optimal structure and the parameter combination of the forced soil-return device were explored through the combination of theoretical analysis, the virtual simulation and the test, and the three-factor three-level orthogonal test method were applied. Taking the working speed, distance of return-baffle and included angle of return-baffle and soil surface as the test factors. The soil backfill rate and the pass-through property of drill unit were used as evaluation indexes. And the related parameters affecting the operation performance of the forced soil-returning device were tested and optimized. The test results showed that for the soil backfilling rate Y_1 , the working speed and backflow baffle spacing had a significant effect on it ($P < 0.01$), and the influence of the angle between the backflow baffle and the surface was not significant ($P > 0.05$). To the pass-through property of drill unit Y_2 , the backflow baffle spacing and the angle between the return baffle and the surface were extremely significant ($P < 0.01$), and the working speed had a significant effect on it ($0.01 < P < 0.05$). When the parameter combination was 1.5 m/s, the return baffle spacing was 112 mm, the angle between the return baffle and the surface was 60°, and the soil backfilling rate was 91.2%. There was no blockage of the drill unit during the operation. The comparison test showed that the optimized speed-reducing line forced earth-returning device, soil backfill performance was increased by 16.5%. The forced earth-

收稿日期: 2019-11-06 修回日期: 2019-11-22
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS-04)和国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)
作者简介: 史乃煜(1993—),男,博士生,主要从事农业装备研究,E-mail: 269029820@qq.com
通信作者: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备与生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

returning device designed based on the principle of the brachistochrone method can improve the soil backfilling rate without reducing the pass-ability of no-tillage sowing, and effectively avoided the seeding of the seedbed due to poor fluidity in the soil wet-adhesive environment. Tillage planter provided theoretical reference and technical support for high quality and high efficiency operation.

Key words: no-till seeder; brachistochrone; forced-return device; soil backfill; orthogonal test

0 引言

播种单体主要由种肥开沟器、排种器、覆土镇压器等多个工作部件构成,一次性可完成肥开沟、落肥、种开沟、投种、覆土和镇压等作业环节^[1-5]。其中,肥料落入肥沟后,依靠土壤回流填充肥沟,再进行播种作业。在湿黏土壤条件下作业时,由于土壤流动性差,施肥铲回填性能弱,易导致种肥同床,从而发生“烧种”现象^[6-7]。同时,为保证土壤有充足时间回流肥沟,机具作业速度不能过快,因此制约了高效率播种施肥机械的发展。

国内外相关学者针对开沟器与土壤作用规律开展了系列研究。BARR 等^[8]利用离散元仿真方法研究了开沟器结构参数对土壤运动规律和机具性能的影响,并对仿真与试验结果进行比较,得到作业后疏松土壤面积、垄高、土壤回填率和土壤侧向抛掷距离的相对误差分别为 9%、14%、0.8% 和 9%。赵淑红等^[7]通过建立开沟器与土壤的运动模型,分析了影响土壤颗粒运动的相关因素,并以牵引阻力和回土面积为指标对双圆盘开沟器进行优化研究,优化后的双圆盘开沟器较传统双圆盘开沟器牵引阻力减小 83 N、回土面积增加 8.5 cm²。曹晓东^[9]为解决现有芯铧式开沟器开沟宽度大的问题,将传统芯铧凹曲面变为凸曲面,并对改进后的装置进行试验验证,结果表明:改进后的开沟器在作业速度 5、8 km/h 时,

较传统开沟器土壤扰动率分别降低 6% 和 16.2%,回填率分别增加 17.1% 和 15.9%。谭贺文^[10]基于集成化思想设计一种集开沟、回土、镇压一体化的组合式播种开沟器,应用四因素五水平三元二次回归正交旋转组合试验方法对影响开沟质量的相关参数进行优化分析,优化后的组合式播种开沟器回土量比双圆盘和尖角式开沟器分别提升 21.6% 和 51.3%。

本文在现有研究的基础上,针对湿黏土壤条件下肥开沟器存在的问题,基于最速降线原理设计一种强制回土装置,通过理论分析、虚拟仿真和预试验确定装置关键结构参数,应用正交试验优化得到该装置最优参数组合,为高效率精准播种施肥机械的设计奠定基础。

1 结构组成与工作原理

增设强制回土装置的播种单体主要由施肥铲、强制回土装置、平行四连杆、种开沟器、排种器、种箱和覆土镇压装置 7 部分组成,其中,强制回土装置主要由铲柄裤、预紧弹簧以及对称布置的回流挡板支架、回流挡板构成,如图 1 所示,作业时肥料落入由施肥铲开出的施肥沟内,土壤在强制回土装置的作用下流入施肥沟后,由种开沟器开出种沟,种子经排种器均匀落入种沟,随后进行覆土镇压作业,完成施肥播种全部作业环节。

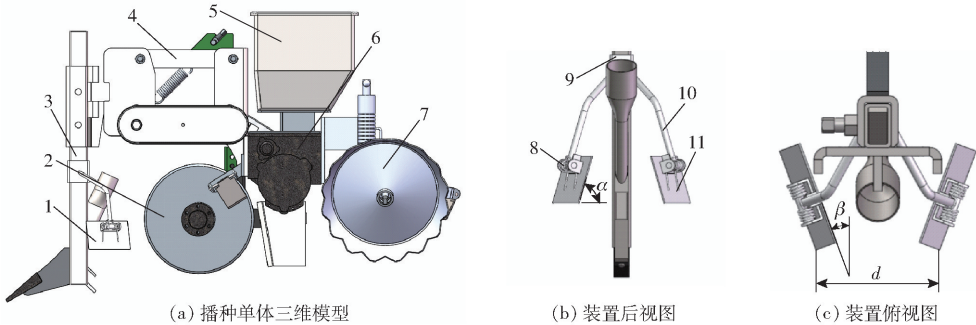


图 1 带有强制回土装置的播种单体结构图

Fig. 1 Structure diagrams of drill unit with forced return device

1. 强制回土装置 2. 种开沟器 3. 施肥铲 4. 平行四连杆 5. 种箱 6. 排种器 7. 覆土镇压装置 8. 预紧弹簧
9. 铲柄裤 10. 回流挡板支架 11. 回流挡板

作为与土壤直接接触的工作部件,回流挡板的相关结构参数对土壤回流情况有显著影响,其中回流挡板与地表夹角 α 将回流挡板与土壤的作用力

产生竖直分量,使回流挡板在被秸秆堵塞时受垂直反力绕轴旋转防堵,同时预紧弹簧可调节回流挡板防堵阈值,阈值大小影响土壤回流和单体通过性;土

壤回填率与回流挡板间距 d 负相关, 但间距过小会阻碍秸秆堵塞时自行流出。

2 结构参数分析

2.1 考虑阻力时的最速降线数值运算

最速降线问题指在不考虑摩擦力时, 质点从起始点 O 运动至不在其垂直下方的终点 B , 下滑时间最短的曲线, 如图2所示, 半径为 r 的圆沿直线 OB 滚动, 圆上一点扫过的轨迹即为 O 、 B 两点间的最速降线, 最速降线解析方程为^[11-13]

$$\begin{cases} x = r \left(\frac{\pi\theta}{180} - \sin\theta \right) \\ y = r \left(\frac{\pi\theta}{180} - \cos\theta \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x, y) ——质点坐标, m

θ ——质点滚动时的转角, ($^\circ$)

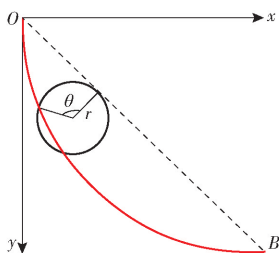


图2 最速降线几何含义

Fig. 2 Geometric meaning of brachistochrone

当最速降线问题应用于工程领域时, 常需考虑摩擦阻力的作用^[14-16], 因此对该解析方程进行处理, 对考虑摩擦时的质点进行能量分析。

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = mgdy - \mu mg \cos\varphi ds = mgd(y - \mu x) \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} v = \sqrt{2g(y - \mu x)} \\ \mu = \tan\varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中 v ——质点运动速度, m/s

m ——质点质量, kg

g ——重力加速度, m/s²

μ ——动摩擦因数

φ ——摩擦角, ($^\circ$)

s ——质点运动路程, m

从起始点 O 运动至终点 B 的时间 T 为

$$T = \int_0^{x_B} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(y-\mu x)}} dx \quad (4)$$

式中 x_B —— B 点横向位置坐标, m

将 Oxy 坐标系顺时针旋转 φ , 得到在摩擦因数作用下的 OXY 坐标系如图3所示, 坐标转换式为 $y - \mu x = Y/\cos\varphi$, 转换后运动时间

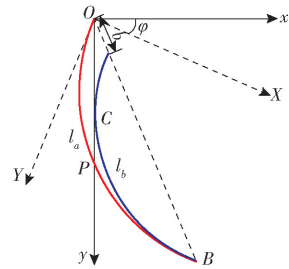


图3 转换坐标系后的最速降线

Fig. 3 Brachistochrone after transformation

$$T = \int_0^B \frac{ds}{v} = \int_0^{x_B} \frac{\sqrt{1+Y'^2}}{\sqrt{\frac{2g}{\cos\varphi} Y}} dX \quad (5)$$

式中 (X, Y) ——转换坐标系后质点坐标, m

X_B ——转换坐标系后 B 点横向位置坐标, m

由旋转后的坐标系可以看出, 曲线 l_a 开始的一部分进入 $x < 0$ 区域, 由式(5)可知, 质点沿曲线 l_a 在 P 处速度小于其自由落体速度, 因此该曲线不是从 O 到 P 的最优路径, 对最速降线解析方程进行伸缩平移变换^[17]

$$\begin{cases} x = R \left(\frac{\pi\theta}{180} - \sin\theta \right) + b \\ y = R \left(\frac{\pi\theta}{180} - \cos\theta \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 R ——变换后参数半径, m

b ——最速降线方程横向平移量, m

此时质点运动时在 OC 段自由落体, 后沿最速降线 l_b 滑动至终点 B 处, 运动时间

$$T = \sqrt{\frac{2y_C}{g}} + \int_{x_C}^{x_B} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(y-\mu x)}} dx \quad (7)$$

式中 (x_C, y_C) —— C 点坐标, m

当 C 处位置发生变化时有

$$\delta T = \frac{1}{\sqrt{2gy_C}} \left(1 - \frac{y'}{\sqrt{1+y'^2}} \right) \delta y_C \quad (8)$$

其中 C 为极值点, 条件满足 $\delta T = 0$, 即 $y' = \infty$, 因此得出结论: 当曲线 l_b 与 y 轴相切时, 即为在考虑摩擦阻力作用下从 O 到 B 的最速降线。此时 C 点位置满足

$$\begin{cases} \left. \frac{dX}{dY} \right|_C = \frac{1 - \cos\theta_C}{\sin\theta_C} = \mu \\ X_C = R \left(\frac{\pi\theta_C}{180} - \sin\theta_C \right) + b \\ Y_C = R(1 - \cos\theta_C) + b \\ X_C = \mu Y_C \end{cases} \quad (9)$$

式中 (X_C, Y_C) ——转换坐标系后 C 点坐标, m

θ_C ——质点滚动至 C 点时的转角, ($^\circ$)

其中最速降线平移量 $b = 2(\mu - \pi\varphi/180)R$ 。从起始

点 O 到终点 B 的最速降线参数 R 、 b 仅取决于 O 、 B 两点相对位置和回流挡板与土壤间的摩擦因数,其中,两点纵向位置由肥开沟铲与种开沟器空间位置确定,参考 2BMFJ 系列免耕播种单体,实际测量后取 120 mm,横向位置由肥开沟铲开沟后土壤泛起宽度决定。

2.2 开沟宽度建模分析

开沟铲作业时,将土壤泛起至肥沟两侧种床上,部分土壤回流至肥沟,形成如图 4 所示的 3 个区域, a 、 c 、 h 分别表示土壤泛起宽度、开沟宽度和开沟深度^[7,18]。

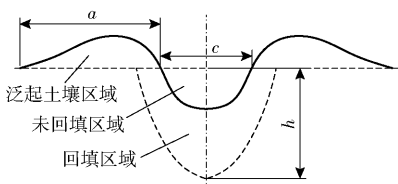


图 4 沟形示意图
Fig. 4 Diagram of groove shape

土壤泛起宽度、回流量由开沟铲参数、土壤含水率等共同决定^[19],很难通过理论分析或软件仿真求得准确数值,因此通过田间预试验对沟形建模分析,试验选取机具作业速度为变量,该值主要由排种器性能确定,排种器播种合格指数与作业速度负相关,但速度过慢会降低播种效率,综合考虑选取作业速度 1.5 ~ 2.5 m/s^[20];试验地平均含水率 20.6%,平均土壤硬度 28.1 kg/m²,应用铲式锐角开沟铲实施试验,其中,铲柄宽度 30 mm,设定开沟深度 100 mm,使用轮廓仪对沟形进行测绘,测量 5 次取平均值,如图 5 所示。



图 5 沟形测绘
Fig. 5 Mapping of groove shape

统计试验结果,开沟铲作业后沟宽 (112.2 ± 11.6) mm,土壤泛起宽度 (138.4 ± 13.1) mm,根据肥铲作业后土壤泛起宽度确定 O 、 B 两点横向距离,作业过程中随该横向距离的增加,单位时间喂入秸秆量增多,易造成拖堆堵塞,因此在能够填满肥沟前提下应减小该横向距离,由于土壤泛起后容重降低,且大部分土壤堆积在靠近肥沟两侧,强制回土装置仅输送部分土壤即可填满肥沟,根据前

期预试验效果选取泛起宽度的一半作为 O 、 B 两点横向距离。

2.3 自适应防堵结构设计

为防止播种苗带混入的秸秆堵塞强制回土装置,设计时加入自适应防堵结构,当秸秆塞入强制回土装置时,回流挡板绕轴转动防止拖堆堵塞,弹簧预紧力和回流挡板与地表夹角是影响该结构作业质量的关键参数,其中,预紧力过大易造成拖堆堵塞,过小则减弱土壤回流效果,因此取沿机器前进方向为截面,对塞入回流挡板间的秸秆进行受力分析,如图 6 所示,得到其不与种床发生相对位移的临界条件。

$$\begin{cases} F + f_1 \geq f_2 \cos \alpha + N_2 \sin \alpha \\ N_1 + f_2 \sin \alpha = Mg + N_2 \cos \alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中 F ——土壤对回流挡板的支持力, N
 f_1 ——土壤与秸秆间摩擦力, N
 f_2 ——回流挡板与秸秆间摩擦力, N
 N_1 ——土壤对秸秆的垂直反力, N
 N_2 ——回流挡板对秸秆压力, N
 M ——秸秆质量, kg

整理得到回流挡板对秸秆压力范围

$$F \leq N_2 \leq \frac{F + \mu_1 Mg}{(\mu_2 - \mu_1) \cos \alpha + (1 + \mu_1 \mu_2) \sin \alpha} \quad (11)$$

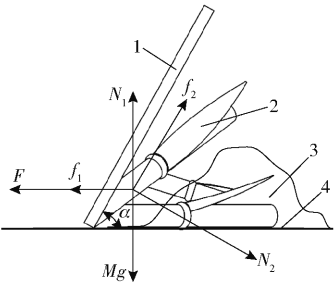


图 6 回流挡板受力分析
Fig. 6 Force analysis of return-baffle
1. 回流挡板 2. 玉米秸秆 3. 土壤 4. 种床

该作用力由土壤对回流挡板的支持力 F 、秸秆质量 M 、回流挡板与地表夹角 α 、土壤与秸秆间摩擦因数 μ_1 和回流挡板与秸秆间摩擦因数 μ_2 共同决定。查阅文献可知,通常情况下,秸秆与土壤、肥铲间动摩擦因数分别为 0.5、0.3^[21],由于 $Mg \ll F$,因此忽略秸秆重力,整理得到回流挡板与秸秆间正压力上限为 $F / (1.17 \sin(\alpha - 9.9^\circ))$,当满足上限值大于下限值 F 时, $1.17 \sin(\alpha - 9.9^\circ) < 1$,即回流挡板与地表夹角 α 小于 68.7° 。

2.4 离散元仿真分析

土壤对回流挡板的支持力很难通过理论分析得到,因此根据 EDEM 离散元仿真软件确定大致范围,应用 SolidWorks 2017 对装有强制回土装置的肥铲进行数字化建模,导入 EDEM 离散元仿真软件对

回流挡板和土壤间接触力进行分析,全局变量参数设置如表 1 所示^[22]。仿真采用 Hertz - mindlin (no - slip) 模型,设置肥铲开沟深度 100 mm,作业速度 1.5 ~ 2.5 m/s,仿真步长 9.25×10^{-6} s,数据记录间隔 0.01 s,仿真过程如图 7 所示。

表 1 全局变量参数设置

Tab. 1 Pre-treatment parameters setting

项目	参数	数值
土壤颗粒	泊松比	0.5
	剪切模量/Pa	2.0×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600
肥铲、强制回土装置	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
土壤颗粒-土壤颗粒	恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.02
土壤颗粒-肥铲、强制回土装置	恢复系数	0.1
	静摩擦因数	0.2
	动摩擦因数	0.02

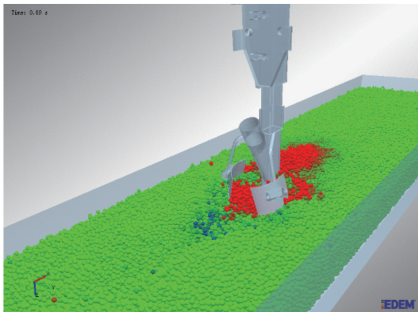


图 7 EDEM 仿真过程

Fig. 7 Simulation process of EDEM

对仿真后的单个回流挡板进行接触压力分析,得到在 1.5、2.0、2.5 m/s 3 个作业速度下,接触压力分别为 20.3、21.8、19.5 N,可将该力视为回流挡板防堵阈值,阈值高低影响土壤回流和单体通过性,为满足预紧力在各作业速度下均可有效保证作业质量,设定回流挡板防堵阈值 F 为仿真极大值 21.8 N,由图 6 分析得到此时弹簧预紧力为 $F/\sin\alpha$ 。

3 试验优化与分析

3.1 试验条件与设备

试验于 2019 年 10 月 20 日在东北农业大学向阳试验田进行,试验地为垄距 110 cm 的玉米原茬地,平均土壤硬度 29.3 kg/m^2 ,平均土壤含水率 21.7%,选用 2BMFJ - DL4 型免耕播种机作为试验实施载体,如图 8 所示。

3.2 试验设计与方法

应用三因素三水平正交试验方法^[23-26],选取作



(a) 最速降线式导流板 (b) 2BMFJ-DL4型免耕播种机

图 8 试验装置

Fig. 8 Testing apparatus

业速度、回流挡板间距和回流挡板与地表夹角为试验因素,土壤回填率与单体通过性为评价指标,对影响强制回土装置的结构参数进行优化分析。

结合前期理论分析、虚拟仿真和预试验结果确定各因素水平,其中免耕播种机作业速度主要由排种器性能确定,排种器播种合格指数与作业速度负相关,但速度过慢导致播种效率降低,综合考虑选取作业速度 1.5 ~ 2.5 m/s^[20];回流挡板间距根据预试验开沟宽度 100.6 ~ 123.8 mm 确定;由式(11)确定回流挡板与地表夹角小于 68.7° ,但随该角度减小会降低回流挡板对土壤的横向输送作用。最终确定各因素水平如表 2 所示,试验方案如表 3 所示。

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels

水平	因素		
	作业速度	回流挡板间距	回流挡板与地表
	$X_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	X_2/mm	夹角 $X_3/(^\circ)$
1	1.5	101	55
2	2.0	112	60
3	2.5	123	65

通过测量施肥铲通过后肥沟沟形计算土壤回填率

$$Y_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \times 100\% \tag{12}$$

式中 S_1 ——开沟后土壤回填区域面积, mm^2

S_2 ——开沟后土壤未回填区域面积, mm^2

单体通过性参考农业农村部农机鉴定总站免耕播种机性能检测要求^[27-28],在工作长度 120 m 范围内,出现秸秆堵塞现象且必须停机清理时为重度堵塞,出现秸秆堵塞现象不需停机清理为中度堵塞,出现堵塞现象但秸秆能随作业过程自行脱离或不影响正常播种为轻微堵塞,为量化试验指标,对重度堵塞、中度堵塞、轻微堵塞和不堵塞 4 种结果分别以 3、2、1、0 标记,试验 5 次对结果进行累加。

3.3 试验结果与极差分析

试验结果与极差分析如表 3 所示, A 、 B 、 C 分别为作业速度、回流挡板间距和回流挡板与地表夹角的水平值。

表 3 试验结果与极差分析

Tab.3 Test results and range analysis

试验号	影响因素				试验指标	
	A	B	C	空列	土壤回填率 $Y_1/\%$	单体通过性 Y_2
1	1	1	1	1	93	4
2	1	2	2	2	90	2
3	1	3	3	3	76	3
4	2	1	2	3	92	6
5	2	2	3	1	83	7
6	2	3	1	2	75	1
7	3	1	3	2	80	9
8	3	2	1	3	79	4
9	3	3	2	1	68	1
Y_1	k_{11}	86.3	88.3	82.3		
	k_{12}	83.3	84.0	83.3		
	k_{13}	75.7	73.0	79.7		
	R	10.7	15.3	3.7		
	因素主次	B、A、C				
Y_2	优化组合	$A_1B_1C_2$				
	k_{11}	3.0	6.3	3.0		
	k_{12}	4.7	4.3	3.0		
	k_{13}	4.7	1.7	6.3		
	R	1.7	4.6	3.3		
	因素主次	B、C、A				
	优化组合	$A_1B_3C_1/A_1B_3C_2$				

对于土壤回填率 Y_1 ,影响主次顺序为 B、A、C,优化组合 $A_1B_1C_2$,即作业速度 1.5 m/s、回流挡板间距 101 mm、回流挡板与地表夹角 60° ;对于单体通过性 Y_2 ,影响主次顺序为 B、C、A,优化组合 $A_1B_3C_1$ 或 $A_1B_3C_2$,即作业速度 1.5 m/s、回流挡板间距 123 mm、回流挡板与地表夹角 55° 或 60° 。

根据两优化结果,共同确定因素 A、C 最优水平分别为 A_1 、 C_2 ,对于土壤回填率 Y_1 ,B 因素各水平优化顺序为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,对于单体通过性 Y_2 ,B 因素各水平优化顺序为 B_3 、 B_2 、 B_1 ,综合考虑两指标,选取 B_2 为优化水平,此时土壤回填率 Y_1 与最优水平差 4.3 个百分点,单体通过性 Y_2 与最优水平差 2.6。

综上,通过极差分析得出优化因素组合:作业速度 1.5 m/s、回流挡板间距 112 mm、回流挡板与地表夹角 60° 。

3.4 试验结果方差分析

应用 Design-Expert 8.0 对试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

对于土壤回填率 Y_1 ,作业速度和回流挡板间距对其影响极显著 ($P < 0.01$),回流挡板与地表夹角对其影响不显著 ($P > 0.05$),这是因为土壤回流主要由土壤横向移动距离和流动时间决定,土壤横向移动距离与回流挡板间距正相关,流动时间与作业

表 4 方差分析结果

Tab.4 Results of variance analysis

指标	来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
土壤回填率	A	181.56	2	90.78	116.71	0.008 5
	B	374.89	2	187.44	241.00	0.004 1
	C	21.56	2	10.78	13.86	0.067 3
	误差	1.56	2	0.78		
	总和	579.56	8			
单体通过性	A	5.56	2	2.78	25.00	0.038 5
	B	32.89	2	16.44	148.00	0.006 7
	C	22.22	2	11.11	100.00	0.009 9
	误差	0.22	2	0.11		
	总和	60.89	8			

速度负相关,而回流挡板与地表夹角仅影响强制回土装置防堵阈值,无秸秆堵塞时对土壤回填率影响不显著。

对于单体通过性 Y_2 ,回流挡板间距和回流挡板与地表夹角对其影响极显著 ($P < 0.01$),作业速度对其影响显著 ($0.01 < P < 0.05$),这是因为随回流挡板间距减小或回流挡板与地表夹角增加时,秸秆堵塞时不易自行流出,降低单体通过性,作业速度与单位时间秸秆喂入量呈正相关,喂入量增加易导致单体堵塞。

综合考虑各因素对土壤回填率 Y_1 和单体通过性 Y_2 两指标影响,以保障单体通过性、增加土壤回填率为目标,对试验结果进行优化,得到优化结果为作业速度 1.5 m/s、回流挡板间距 112 mm、回流挡板与地表夹角 60° ,与极差分析优化结果相吻合。

3.5 对比验证试验

对优化后的最速降线式强制回土装置与直板式强制回土装置、未装有强制回土装置的单体进行工作性能对比试验,试验效果如图 9 所示,结果如表 5 所示。



图 9 田间试验效果

Fig.9 Results of field test

I. 未装有强制回土装置 II. 装有最速降线式强制回土装置
III. 装有直板式强制回土装置

由图 9 可知,未装有强制回土装置的单体作业后地表有明显开沟痕迹,装有强制回土装置的单体作业后地表较平整。由表 5 可知,最速降线式强制

回土装置较直板式强制回土装置土壤回填率提升16.5%,且作业过程中无秸秆堵塞现象,在保证单体通过性的同时有效增加土壤回填率,因此,最速降线式强制回土装置设计及优化结果满足作业要求。

表5 对比试验结果
Tab.5 Results of comparative test

装置	土壤回填率/%	单体通过情况
最速降线式强制回土装置	91.2	不堵塞
直板式强制回土装置	78.3	中度堵塞
未装有强制回土装置	45.7	不堵塞

4 结论

(1)基于最速降线原理设计的强制回土装置,在不降低免耕播种单体通过性的同时,有效提高了

土壤回填率,避免在湿黏环境下因土壤流动性差而导致种肥同床,为免耕播种机高质量、高效率作业提供理论参考与技术支撑。

(2)影响土壤回填率的因素顺序由大到小依次为:回流挡板间距、作业速度、回流挡板与地表夹角;影响单体通过性的因素顺序由大到小依次为:回流挡板间距、回流挡板与地表夹角、作业速度。

(3)基于最速降线原理设计的强制回土装置,在土壤硬度29.3 kg/m²、平均土壤含水率21.7%的玉米原茬地上,当参数组合为作业速度1.5 m/s、回流挡板间距112 mm、回流挡板与地表夹角60°时,土壤回填率为91.2%。对比试验表明,优化后的最速降线式强制回土装置较直板式强制回土装置土壤回填率提升了16.5%,且作业过程未发生单体堵塞现象。

参 考 文 献

[1] 付卫强,董建军,梅鹤波,等.玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(6):68-77. FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):68-77. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)

[2] 吴红丹,李洪文,梅峰,等.一沟双行小麦施肥播种单体的设计与试验[J].中国农业大学学报,2007,12(2):50-53. WU Hongdan, LI Hongwen, MEI Feng, et al. Design and experimental study on a combined fertilizing and seeding opener for wheat of two rows in one furrow[J]. Journal of China Agricultural University, 2007,12(2):50-53. (in Chinese)

[3] 冯夷宁.大豆玉米花生通用密植播种单体设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016. FENG Yining. Design and experimental research on density planting unit for soybean maize and peanut[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[4] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等.双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):92-101. HOU Shouyin, CHEN Haitao, SHI Naiyu, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):92-101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190411&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.011. (in Chinese)

[5] 蒋金琳,龚丽农,王明福.免耕播种机单体工作性能试验研究[J].农业工程学报,2000,16(5):64-66. JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Mingfu. Study on the working performance of the no-tillage planter unit[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(5):64-66. (in Chinese)

[6] 廖庆喜,丁幼春,舒彩霞,等.播种时同步开畦沟用船形畦沟成型装置:CN 205902359U[P].2017-01-25.

[7] 赵淑红,谭贺文,陈君执,等.深施肥条件下双圆盘播种开沟器性能优化[J].东北农业大学学报,2017,48(11):86-96. ZHAO Shuhong, TAN Hewen, CHEN Junzhi, et al. Performance experiment of double disk opener used for sowing under deep fertilization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017,48(11):86-96. (in Chinese)

[8] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1-15.

[9] 曹晓东.芯铰式开沟器结构优化及试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018. CAO Xiaodong. Structure optimization and experimental study of the core-drawing opener[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[10] 谭贺文.一种组合式播种开沟器的设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2018. TAN Hewen. Design and experiment of a combined seeding furrow opener[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[11] 邢家省,杨义川,王拥军.最速降线问题的充分性[J].四川理工学院学报(自然科学版),2019,32(4):76-80. XING Jiasheng, YANG Yichuan, WANG Yongjun. Proof of sufficient conditions for the solution of the brachistochrone problem[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2019,32(4):76-80. (in Chinese)

[12] 邢家省,杨义川.最速降线问题解的充分条件的证明[J].吉首大学学报(自然科学版),2019,40(2):1-4. XING Jiasheng, YANG Yichuan. Proof of sufficient conditions for brachistochrone problem solution[J]. Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition), 2019,40(2):1-4. (in Chinese)

[13] 师玉荣,马君,马丽珍.基于Matlab编程对最速降线问题的研究[J].物理与工程,2012,22(4):11-15. SHI Yurong, MA Jun, MA Lizhen. Research on brachistochrone problem based on Matlab programming[J]. Physics and Engineering, 2012,22(4):11-15. (in Chinese)

- [14] 李胜强, 谭铭, 张展博. 含黏性力最速降线问题的最优化解法及其在 ADS 设计中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(6): 563–569.
LI Shengqiang, TAN Ming, ZHANG Zhanbo. An optimization method of brachistochrone problem with viscous friction and its application in ADS design[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(6): 563–569. (in Chinese)
- [15] 史友进, 俞晓明. 库仑摩擦最速降曲线问题的讨论[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2012, 25(2): 1–4.
SHI Youjin, YU Xiaoming. On brachistochrone with coulomb friction[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 25(2): 1–4. (in Chinese)
- [16] 张正华, 赵祥涛, 张明学, 等. 最速降线在粮食仓储物流中的应用[J]. 粮食流通技术, 2010(2): 15–16, 31.
ZHANG Zhenghua, ZHAO Xiangtao, ZHANG Mingxue, et al. The application of brachistochrone for the grain storage logistics[J]. Grain Distribution Technology, 2010(2): 15–16, 31. (in Chinese)
- [17] 尤明庆. 最速降线求解和摩擦力影响的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 83–88.
YOU Mingqing. Study on the solution of brachistochrone and the effect of friction[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2005, 24(1): 83–88. (in Chinese)
- [18] 陈海涛, 徐源, 史乃煜. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 65–73.
CHEN Haitao, XU Yuan, SHI Naiyu. Design and experiment on three-way adjustable V-type soil-covering and soil-compacting device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 65–73. (in Chinese)
- [19] 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
CAO Xiuzhen. Design and test of no-till seeding opener on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] 史乃煜, 陈海涛, 王星, 等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 84–91.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WANG Xing, et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 84–91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.010. (in Chinese)
- [21] 张俊. 基于离散元法的秸秆还田机仿真优化与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
ZHANG Jun. Simulation optimization and experimental research of straw returning machine based on discrete element method[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [22] 顿国强, 陈海涛, 冯夷宁, 等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36–42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 36–42. (in Chinese)
- [23] 王汉羊, 陈海涛, 纪文义. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 64–70.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ-3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 64–70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.012. (in Chinese)
- [24] 陈海涛, 查韶辉, 顿国强, 等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 96–102.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 96–102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160714&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)
- [25] 谢建华, 侯书林, 付宇, 等. 残膜回收机弹齿拾膜机构运动分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 94–99.
XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl. 1): 94–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.018. (in Chinese)
- [26] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65–75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [27] 王汉羊. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕覆秸大豆精密播种机的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
WANG Hanyang. Study on 2BMFJ-3 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [28] 魏延富, 高焕文, 李洪文. 三种一年两熟地区小麦免耕播种机适应性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 97–101.
WEI Yanfu, GAO Huanwen, LI Hongwen. Experiment and analyses of the adaptabilities of three wheat no-tillage drills on corn stubble in the areas with two ripe crops a year[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 97–101. (in Chinese)