

弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验

康建明¹ 彭强吉¹ 王士国² 宋裕民¹ 曹肆林² 何磊²

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对弹齿式残膜回收机捡拾装置与地面接触不充分造成残膜回收率低的问题,通过增设起膜部件,重置拾膜弹齿排布,改进了残膜捡拾装置结构。通过对田间覆膜特点和残膜在起膜杆齿上移动条件进行分析,确定了起膜杆齿入土角范围及排布方式。对拾膜弹齿进行运动学和动力学分析,确定了其在残膜捡拾过程中的运动方程和运动轨迹,并确定了残膜不漏挑的条件。依照 Box – Benhnken 试验设计原理,以机具前进速度、起膜杆齿入土角、输膜链耙转速为试验因素,以残膜回收率和残膜含杂率为响应值,通过回归分析和响应面分析,建立了机具前进速度、起膜杆齿入土角、输膜链耙转速与残膜回收率和残膜含杂率之间的数学模型,并对各因素及其交互作用进行分析。结果表明:各因素对残膜回收率的影响由大到小为:起膜杆齿入土角、机具前进速度、输膜链耙转速;各因素对残膜含杂率的影响由大到小为:输膜链耙转速、起膜杆齿入土角、机具前进速度。应用 Design-Expert 软件的寻优功能对回归方程进行优化求解,结果表明:当机具前进速度为 5.21 km/h、起膜杆齿入土角为 30.8°和输膜链耙转速为 236 r/min 时,残膜回收率最大值为 91.4%,残膜含杂率最小值为 3.21%,田间验证试验表明该参数下残膜回收率为 91.2%,残膜含杂率为 3.1%,理论值和试验值误差小于 3%。

关键词: 残膜回收机; 捡拾装置; 改进设计; 试验

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0295-09

Improved Design and Experiment on Pickup Unit of Spring-tooth Residual Plastic Film Collector

KANG Jianming¹ PENG Qiangji¹ WANG Shiguo² SONG Yumin¹ CAO Silin² HE Lei²

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China
2. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: Aiming at the problems that insufficient contact between ground and pickup attachment of spring-tooth topsoil residual plastic film collector, additional releasing film part and rearranged film-retrieving spring teeth was used to improve the structure of residual plastic film pickup attachment. The conditions for residual plastic film to move on the film-releasing rod teeth were analyzed to determine the scope and arrangement of penetrating angle of film-releasing rod teeth. The film-retrieving spring teeth were kinematically and kinetically analyzed to determine the kinematic equation and motion trail of spring teeth in the process of picking up residual plastic film. According to the design principle of Box – Benhnken experiment, taking the forward speed, penetrating angle of film-releasing rod teeth and rotational speed film-delivering chain harrow as experimental factors and the recovery rate and impurities rate of residual plastic film as response values, based on regression analysis and response surface analysis, a mathematical model between forward speed, penetrating angle of film-releasing rod teeth, rotational speed film-delivering chain harrow and recovery rate and impurities rate of residual plastic film was built and the aforesaid factors and their interactions were analyzed. The result showed that the factors that most affected the recovery rate of residual plastic film were the penetrating angle of film-releasing rod

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701102)、国家自然科学基金项目(51805305)、山东省重点研发计划项目(2018GNC112006)、山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF020-09)和山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2018E18)

作者简介: 康建明(1984—),男,副研究员,主要从事农田残膜污染技术及装备研究,E-mail: kjm531@126.com

通信作者: 王士国(1977—),男,研究员,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: 362256015@qq.com

teeth, forward speed and rotational speed film-delivering chain harrow in descending order; and the factors that most affected the impurities rate of residual plastic film were the rotational speed film-delivering chain harrow, penetrating angle of film-releasing rod teeth and forward speed in descending order. Design-Expert software was used to obtain the optimal solution to the regression equation, which showed that when the forward speed, penetrating angle of film-releasing rod teeth and rotational speed film-delivering chain harrow were 5.21 km/h, 30.8° and 236 r/min, respectively, the theoretical maximum recovery rate of residual plastic film and minimum impurities rate of residual plastic film were 91.4% and 3.21% . respectively. Field validation test showed that the recovery rate and impurities rate of residual plastic film under the above parameters were 91.2% and 3.1% , respectively, the error between theoretical and experimental values was less than 3% .

Key words: residual film recovery machine; pickup unit; improved design; test

0 引言

机械化回收是现阶段解决农田残膜污染问题的有效手段^[1-6]。国外使用的地膜较厚(0.02 ~ 0.05 mm),且在地膜中加入抗老化剂,地膜抗拉强度大,主要采用卷收式回收机构实现地膜与土壤的分离^[7-9]。国内使用的地膜厚度小于0.008 mm,回收时地膜拉伸强度低、膜面破损严重,回收难度大^[10]。近年来,国内科研院所研制出不同类型的残膜回收机具^[11-13],解决了残膜捡拾、脱膜防缠、膜杂分离、秸秆抛送等技术问题,在一定程度上缓解了农田残膜污染。相关学者也围绕如何提高残膜回收性能进行了深入研究,文献[14-17]针对弹齿式拾膜机构、直齿式捡拾滚筒等残膜捡拾部件进行了理论和仿真分析,得出了一些有益的结论。但在前期试验中发现,由于弹齿式残膜回收机拾膜弹齿与地面接触不充分,残膜捡拾时容易出现漏膜,进而造成残膜回收率降低。本文以现有弹齿式残膜回收机捡拾装置为基础,通过增设起膜部件,重置拾膜弹齿排布,改进残膜捡拾装置结构。采用回归分析和响应面分析,对改进后的残膜捡拾装置进行参数优化。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

改进后的弹齿式残膜回收机通过增设起膜部件,重置拾膜弹齿排布,提升了收膜装置的残膜捡拾性能。整机主要由机架、悬挂装置、起膜装置、卸膜装置、输膜链耙、拾膜弹齿、集膜箱、限深装置等组成,整机结构如图1所示。

1.2 工作原理

改进后的弹齿式残膜回收机通过三点悬挂方式与拖拉机联接,拖拉机动力输出轴将动力传递至变速箱,经变速箱降速后通过传动系统带动输膜链耙顺时针转动。工作时,随着机具的前进,起膜杆齿入土将残膜铲起并提升至一定高度,此时输膜链耙上

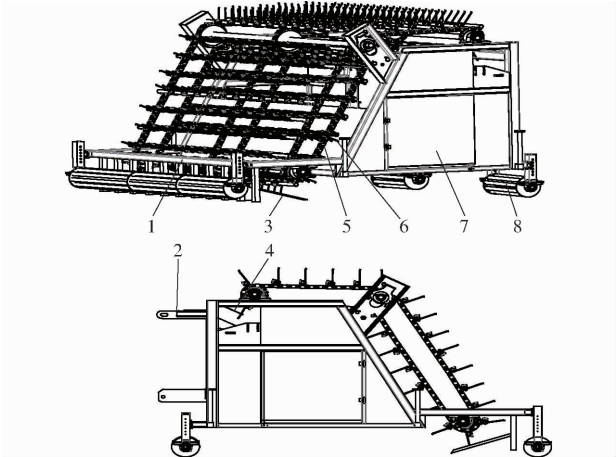


图1 改进后弹齿式残膜回收机结构示意图

Fig.1 Schematic of improved spring-tooth type residual film recovery machine

1. 机架 2. 悬挂装置 3. 起膜装置 4. 卸膜装置 5. 输膜链耙
6. 拾膜弹齿 7. 集膜箱 8. 限深装置

的拾膜弹齿将起膜杆齿上的残膜挑起并向上输送,在此过程中残膜中混杂的秸秆和土块等掉落至地面,当残膜运送至与脱膜辊接触时,弹齿齿尖朝下,大部分残膜在重力作用下掉入集膜箱,少量未能自动脱落的残膜在脱模辊上毛刷的作用下刷落至集膜箱。

1.3 主要技术指标

根据耕层残膜分布情况及残膜回收国家标准要求^[18],改进后的弹齿式残膜回收机主要技术参数如表1所示。

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值/类型
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.7×2.0×1.5
工作幅宽/m	2.0
配套动力/kW	55~73
挂接方式	后三点悬挂
整机质量/kg	450
作业速度/(km·h ⁻¹)	4~6
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.8~1.0

2 关键部件设计与参数确定

2.1 起膜装置

在改进后的样机上,借鉴深松铲与松垄割刀的设计原理^[19],增加了起膜装置。采用杆齿结构从膜下松土铲膜,最大限度地保证废膜完整,便于拾膜弹齿捡拾残膜。改进后的起膜装置结构如图 2 所示,由横梁、调整盘、杆齿套筒、起膜杆齿和调整销孔等组成。工作时,起膜杆齿在自身重力和入土角的共同作用下滑动进入膜下土壤,在机具前进过程中托起地表及耕层中的残膜。

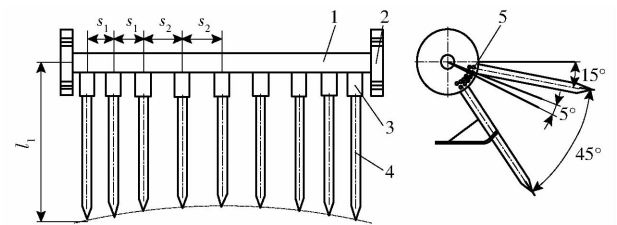


图 2 改进后起膜装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of improved structure of rising film components

1. 横梁 2. 调整盘 3. 杆齿套筒 4. 起膜杆齿 5. 调整销孔

起膜装置两端安装有调整盘,可使起膜杆齿入土角 α 在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 范围内调整。根据覆膜种植农田实际特点,覆膜范围内土壤呈现中间略高两端略低的地况,且地膜两边覆土相对紧实。为达到良好的起膜效果,起膜杆齿排布采取中间宽松 ($s_2 > s_1$) 略短、两端紧凑略长的排布方式(图 2),起膜杆齿长度可在杆齿套筒内调节。

机具田间作业时,起膜杆齿既要入土阻力小,又要尽可能多地积累残膜并且使残膜在机具前进过程中能平稳地向后滑移,残膜在起膜杆齿上受力如图 3 所示。

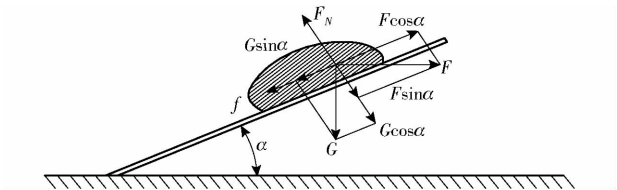


图 3 残膜在起膜杆齿上受力分析图

Fig. 3 Stress analysis diagram of residual film on lifting shovel

残膜在起膜杆齿上处于平衡状态时,其平衡方程为

$$\begin{cases} F\cos\alpha - f - G\sin\alpha = 0 \\ F_N - G\cos\alpha - F\sin\alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$f = \mu F_N \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{F - \mu G}{\mu F + G} \quad (3)$$

式中 F ——起膜杆齿所受工作阻力,N

F_N ——起膜杆齿对残膜的支持力,N
 α ——起膜杆齿入土角, ($^\circ$)
 G ——残膜所受重力,N
 f ——起膜杆齿上残膜所受摩擦力,N
 μ ——起膜铲与残膜间的摩擦因数

从式(3)可以看出,起膜杆齿入土角变小时,残膜沿起膜杆齿向后运动所需力变小,同时起膜杆齿入土阻力变小,对废膜的损坏程度较小,但此时起膜杆齿碎土性能差,易出现壅土现象;反之,起膜杆齿入土角变大时,残膜沿起膜杆齿向后运动所需力变大,起膜杆齿入土性能下降,对废膜的损坏程度大。

2.2 收膜装置

收膜装置的作用是通过拾膜弹齿将起膜杆齿托起的残膜进行捡拾,并在输膜链耙的作用下将残膜和秸秆等混合物运送至集膜箱,主要由固定支座、拾膜弹齿和输膜链耙等部件组成,输膜链耙转速对残膜回收率和残膜含杂率有较大影响,收膜装置结构如图 4 所示。

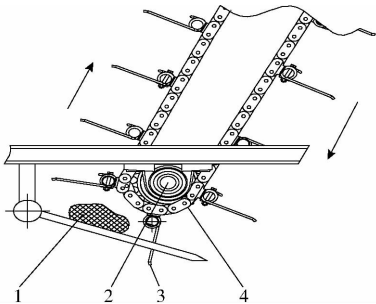


图 4 收膜装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of residual film pickup device

1. 膜杂混合物 2. 固定支座 3. 拾膜弹齿 4. 输膜链耙

工作时,拾膜弹齿将起膜杆齿上堆积的膜杂混合物向上挑起,膜杂混合物在输膜链耙的提升作用下运送至集膜箱,在此过程中部分土壤和秸秆因输膜链耙的抖动而掉落。

为保证膜杂混合物在输送过程中充分疏松分离,设计收膜装置有效输运距离为 2 240 mm,升运宽度为 1 800 mm。输膜链耙转速和拾膜弹齿的排布直接影响膜杂混合物能否顺利地被挑起,以及在挑起过程中是否存在遗漏,是影响收膜装置作业性能的关键参数。

2.2.1 拾膜弹齿运动分析

如图 5 所示,取输膜链耙转动的轴心 O 点为坐标原点, x 轴与机具前进方向相同, y 轴垂直向上,以 x 轴水平方向为初始相位,机具以速度 v_0 匀速前进,输膜链耙以角速度 ω 匀速旋转,经时间 t 后,输膜链耙转过 φ ($\varphi = \omega t$) 角,拾膜弹齿齿尖 A 的运动轨迹为 K 。

拾膜弹齿齿尖 A 的运动方程为

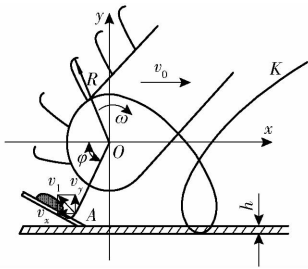


图 5 拾膜弹齿运动分析

Fig. 5 Motion analysis of pickup spring tooth

$$\begin{cases} x = v_0 t + R \cos \varphi = v_0 t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin \varphi = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 R ——拾膜弹齿旋转半径, m

将式(4)对时间求导可以得到拾膜弹齿在任何位置时的运动速度为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_0 - \omega R \sin(\omega t) \\ v_y = \frac{dy}{dt} = \omega R \cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, v_x 的大小决定拾膜弹齿是否有向后的水平分速度, 当 $v_0 - \omega R \sin(\omega t) = 0$ 时, 有

$$\frac{\omega R}{v_0} = \frac{1}{\sin(\omega t)} \quad (6)$$

$$v_1 = \omega R \quad (7)$$

令拾膜弹齿圆周线速度 v_1 与机具前进速度 v_0 比值为

$$\lambda = \frac{v_1}{v_0} \quad (8)$$

由式(5)可以看出, 当 $\lambda < 1$ 时, 拾膜弹齿没有形成向后的分速度, 即不能挑膜; 当 $\lambda > 1$ 时, 拾膜弹齿在挑膜区域内相对地面有向后的分速度, 在这一运动作用下, 残膜和部分土壤被挑起并随输膜链耙向上运动。因此, λ 的取值对残膜是否被挑起有重要影响, λ 值太小, 容易出现残膜漏挑现象, 起膜杆齿上容易出现壅土现象; λ 值太大, 拾膜弹齿容易产生将残膜回带的现象, 前期试验表明^[20], 当 λ 为 2.8 ~ 3.4 时, 收膜挑膜效果较好, 将 $R = 180 \text{ mm}$, $v_0 = 5 \text{ km/h}$ 代入式(6), 可初步确定输膜链耙转速 n 为 210 ~ 258 r/min。

2.2.2 残膜不漏挑的条件

整机残膜回收作业时, 输膜链耙上排列的拾膜弹齿依次对起膜杆齿上的残膜进行挑拾, 输膜链耙上相邻两排拾膜弹齿的运动轨迹如图 6 所示。

相邻拾膜弹齿 A 和 B 的运动轨迹分别是 L_1 和 L_2 , 拾膜弹齿伸入起膜杆齿上膜杂混合物中的深度为 h 。输膜链耙随整机向前运行, 在 t_1 和 t_2 时刻 ($t_2 > t_1$), 拾膜弹齿 A 齿尖与挑膜区域表面分别相交于 A_1 和 A_2 点; 在 t_3 和 t_4 时刻 ($t_4 > t_3$), 拾膜弹齿 B

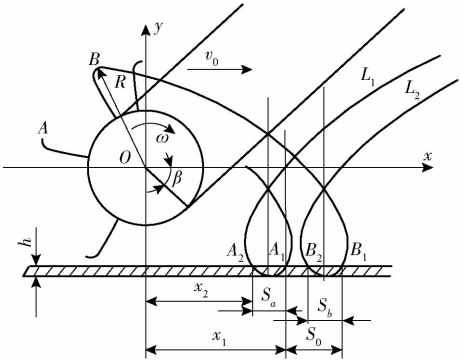


图 6 输膜链耙上两相邻拾膜弹齿运动轨迹

Fig. 6 Motion trajectory of two adjacent elastic teeth on film transmission tooth

齿尖与挑膜区域表面分别相交于 B_1 和 B_2 点。 S_0 为相邻两挑膜弹齿 A 与 B 的水平距离。由图 6 可知, 若要保证残膜回收作业时不漏膜, 则需相邻两弹齿的运动轨迹在挑膜区域的表面形成重合区域, 残膜不漏挑的条件为

$$S_a = S_b \geq S_0 \quad (9)$$

式中 S_a ——拾膜弹齿 A 在膜杂混合物中滑行的距离, m

S_b ——拾膜弹齿 B 在膜杂混合物中滑行的距离, m

将 $y = -R + h$ 代入式(4)可得

$$\sin(\omega t) = \frac{R - h}{R} \quad (10)$$

$$\cos(\omega t) = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{R - h}{R}\right)^2} = \pm \frac{\sqrt{2Rh - h^2}}{R} \quad (11)$$

将式(11)代入式(4)可得

$$x_1 = v_2 t_1 + \sqrt{2Rh - h^2} \quad (12)$$

$$x_2 = v_2 t_2 - \sqrt{2Rh - h^2} \quad (13)$$

由图 6 可知

$$S_b = S_a = x_1 - x_2 \quad (14)$$

将式(12)和式(13)代入式(14)得

$$S_a = v_2(t_1 - t_2) + 2\sqrt{2Rh - h^2} \quad (15)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{2\arcsin \frac{R - h}{R} - \pi}{\omega} \quad (16)$$

同理可得

$$t_3 - t_1 = \frac{2\pi}{3\omega} \quad (17)$$

将式(16)代入式(15)得

$$S_a = v_2 \frac{2\arcsin \frac{R - h}{R} - \pi}{\omega} + 2\sqrt{2Rh - h^2} \quad (18)$$

$$S_0 = v_2(t_3 - t_1) = \frac{2\pi v_2}{3\omega} \quad (19)$$

欲使 $S_a - S_0 \geq 0$, 即

$$v_2 \frac{2\arcsin \frac{R-h}{R} - \pi}{\omega} + 2\sqrt{2Rh-h^2} - \frac{2\pi v_2}{3\omega} \geq 0 \tag{20}$$

由式(20)可求得

$$\omega \geq \frac{v_2 \left(\frac{5\pi}{6} - \arcsin \frac{R-h}{R} \right)}{\sqrt{2Rh-h^2}} \tag{21}$$

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} \geq \frac{30v_2 \left(\frac{5\pi}{6} - \arcsin \frac{R-h}{R} \right)}{\pi\sqrt{2Rh-h^2}} \tag{22}$$

将前期试验所得参数 $h = 0.02\text{ m}$, $R = 180\text{ mm}$, $v_0 = 5\text{ km/h}$ 代入式(22), 可得输膜链耙转速 $n \geq 221.5\text{ r/min}$, 根据实际作业情况及拾膜弹齿运动分析, 最终确定输膜链耙转速范围为 $225 \sim 258\text{ r/min}$ 。

2.3 拾膜弹齿排布

残膜捡拾效果与拾膜弹齿间距密切相关, 间距过小, 残膜回收率高, 但却易捡拾大土块, 残膜含杂率也相应提高, 给后续分离造成困难; 拾膜弹齿间距过大, 易漏捡小块残膜, 降低残膜回收率。为解决这一矛盾, 改进后样机将原有拾膜弹齿分为左右两段彼此交错排布, 且遵循以下原则: 使拾膜弹齿与膜杂混合物均匀接触并挑起, 防止漏收; 确保秸秆和石块等杂物顺利通过, 降低残膜的含杂率。将输膜链耙展开, 拾膜弹齿排列方式如图 7 所示。

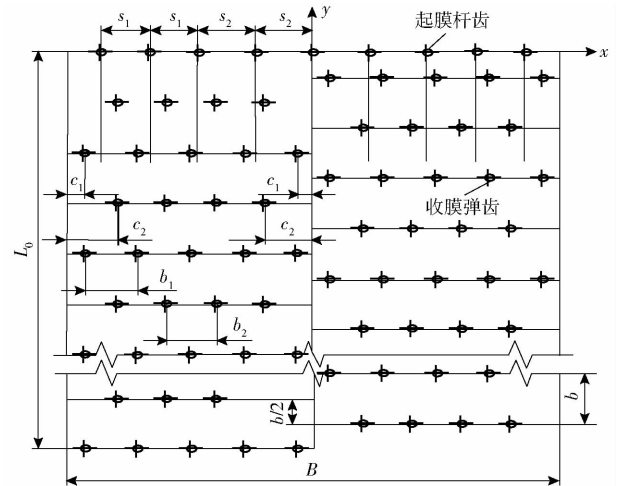


图 7 拾膜弹齿分布示意图

Fig. 7 Schematic of distribution of pickup spring tooth

其中, 输膜链耙宽度 $B = 1\,500\text{ mm}$, 输膜链耙长度 $L_0 = 3\,628\text{ mm}$, 起膜杆齿轴向间距 $s_1 = 180\text{ mm}$, $s_2 = 200\text{ mm}$, 拾膜弹齿纵向排列间距 $b = 20\text{ mm}$, 拾膜弹齿轴向间距 $b_1 = 140\text{ mm}$, $b_2 = 150\text{ mm}$, 拾膜弹齿与框架边缘的距离 $c_1 = 100\text{ mm}$, $c_2 = 150\text{ mm}$ 。

3 整机性能试验

3.1 试验材料

2018 年 4 月, 改进后的弹齿式残膜回收机在新疆石河子市 145 团北泉镇进行残膜捡拾性能田间试验, 选取试验用地面积 1.0 hm^2 , 地势平坦, 土壤为沙壤土, 含水率为 $16.75\% \sim 20.54\%$, 前茬作物棉花, 采用宽行覆膜种植模式, 地膜为新疆昌吉市新昌塑地膜厂生产的白色地膜(地膜厚度为 0.01 mm 、宽度为 $2\,050\text{ mm}$), 膜面上有少量棉铃壳、棉叶和土壤覆盖。

3.2 试验方法

按照国家标准 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》规定的试验方法进行改进后弹齿式残膜回收机捡拾装置田间作业性能试验(图 8)。选取残膜回收率和残膜含杂率作为改进后捡拾装置工作性能的主要测试指标。试验仪器主要有: HSTL-TRCS02 型便携式土壤水分测定仪(华控兴业, 精度 $\pm 3\%$)、VICTOR6234P 型激光转速表(胜利仪器)、秒表、卷尺、天平(深圳市无限量衡量器有限公司)、铁锹等。



图 8 改进后弹齿式残膜回收机田间性能试验

Fig. 8 Field performance test of improved spring-tooth type residual film recovery machine

试验测定区长度为 100 m , 宽度为 2.05 m , 其中, 试验测定区覆盖地膜总质量依照宽膜覆盖地膜的农艺要求计算, 约为 $2\,156.2\text{ g}$, 试验结束后, 首先测量集膜箱中膜杂混合物的质量 m_1 , 然后将残膜中的杂质(秸秆、小石块等)取出, 并测量其质量 m_2 , 残膜回收率和残膜含杂率计算式为

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{23}$$

式中 Y_1 ——残膜回收率, %
 m_0 ——测试区覆盖地膜总质量, g

$$Y_2 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \tag{24}$$

式中 Y_2 ——残膜含杂率, %

3.3 试验设计

依据式(3)和式(22)以及综合权衡残膜回收作业实际生产要求, 分别选取机具前进速度 x_1 ($4 \sim$

6 km/h)、起膜杆齿入土角 x_2 ($15^\circ \sim 45^\circ$) 和输膜链耙转速 x_3 (225 ~ 258 r/min) 作为试验因素,以残膜回收率 Y_1 和残膜含杂率 Y_2 作为改进后弹齿式残膜回收机作业性能评价指标。其中,通过拖拉机换挡和控制油门实现机具前进速度的改变,通过起膜装置两端安装的调整盘进行起膜杆齿入土角的调整,输膜链耙转速通过更换传动链轮进行匹配。采用 Box – Benhnken 试验设计原理,各试验因素及取值范围如表 2 所示,共实施 17 组响应面分析试验,如表 3 所示(表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值)。每组试验重复进行 3 次,取 3 次测试结果的平均值作为试验结果,由 Design-Expert 8.06 软件进行数据处理分析^[21–22]。

试验结果如表 3 所示,改进后的弹齿式残膜回收机作业后残膜回收率为 74.3% ~ 88.6%,残膜含杂率为 4.2% ~ 12.7%,符合 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》的作业标准要求。

表 2 试验因素编码

编码	因素		
	机具前进速度	起膜杆齿入土角	输膜链耙转速
	$x_1/(km \cdot h^{-1})$	$x_2/(^\circ)$	$x_3/(r \cdot min^{-1})$
-1	4	15	225
0	5	30	242
1	6	45	258

Tab.2 Test factors level and coding

表 3 响应面分析结果

Tab.3 Results of response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	-1	-1	77.6	5.2
2	0	0	0	87.4	6.3
3	1	1	0	85.6	12.7
4	-1	1	0	84.4	10.6
5	0	-1	1	81.2	4.2
6	-1	0	-1	83.6	6.4
7	1	-1	0	82.0	6.7
8	0	0	0	88.6	6.4
9	0	0	0	88.1	12.0
10	0	1	-1	78.1	9.8
11	1	0	-1	80.4	4.6
12	0	0	0	85.4	5.2
13	-1	0	1	86.5	4.8
14	-1	-1	0	74.5	7.5
15	0	0	0	86.8	5.4
16	0	1	1	82.7	11.5
17	1	0	1	74.3	4.7

4 试验结果与分析

4.1 回归模型建立与检验

借助 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行分析, $P < 0.01$ 表明参数对模型影响极显著, $P < 0.05$ 表明参数对模型影响显著。二次回归模型方差分析和回归系数显著性检验结果如表 4 所示。

表 4 模型显著性检验

Tab.4 Significance test of model

变异来源	残膜回收率 Y_1				残膜含杂率 Y_2			
	自由度	均方	F_1	P_1	自由度	均方	F_2	P_2
回归	9	40.17	30.73	<0.000 1**	9	11.56	21.35	<0.000 1**
X_1	1	4.50	16.16	0.007 0**	1	0.41	5.42	0.084 7
X_2	1	3.12	21.78	0.005 3**	1	55.13	10.98	0.012 9*
X_3	1	28.12	11.00	0.014 2*	1	0.02	10.34	0.008 9**
$X_1 X_2$	1	12.25	38.42	<0.000 1**	1	2.10	6.55	0.023 4*
$X_1 X_3$	1	20.25	9.27	0.046 1*	1	2.10	7.21	0.015 3*
$X_2 X_3$	1	25.00	20.88	0.006 2**	1	1.82	7.34	0.014 7*
X_1^2	1	105.26	21.37	0.006 0**	1	0.30	5.37	0.064 7
X_2^2	1	59.21	22.24	0.006 5**	1	28.08	16.84	0.003 7**
X_3^2	1	76.05	2.71	0.143 5	1	16.30	20.11	<0.000 1**
残差	7	28.04			7	5.02		
失拟	3	60.75	17.36	0.059 3	3	1.17	0.15	0.055 4
误差	4	3.50			4	7.91		

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

由表 4 分析可知,影响因素与残膜回收率、残膜含杂率所建立二次回归模型的 P_1 和 P_2 均小于 0.000 1,表明回归模型极其显著;失拟项 P_1 和 P_2 均大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映残膜回收率 Y_1

和残膜含杂率 Y_2 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系,回归模型可以较好地对性能试验中各种试验结果进行预测。

对于残膜回收率:模型的一次项 X_1 (机具前进速度)、 X_2 (起膜杆齿入土角)对残膜回收率的影响极显著, X_3 (输膜链耙转速)对残膜回收率的影响显

著;二次项 X_1^2 、 X_2^2 影响极显著;交互项 X_1X_2 和 X_2X_3 影响极显著, X_1X_3 影响显著,其余各项均不显著。对于残膜含杂率:模型的一次项 X_3 对残膜含杂率的影响极显著, X_2 对残膜含杂率的影响显著;二次项 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著, X_1^2 影响不显著;交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 和 X_2X_3 影响显著,其余各项均不显著。将不显著项剔除后获得编码值表示的残膜回收率 Y_1 和残膜含杂率 Y_2 的二次回归模型

$$Y_1 = 90 - 0.75X_1 + 0.63X_2 + 1.88X_3 - 1.75X_1X_2 - 2.25X_1X_3 - 2.5X_2X_3 - 5X_1^2 - 3.75X_2^2 \quad (25)$$

$$Y_2 = 7.06 + 2.63X_2 + 0.05X_3 + 0.72X_1X_2 + 0.73X_1X_3 + 0.67X_2X_3 - 2.58X_2^2 - 1.97X_3^2 \quad (26)$$

由表 4 分析和各因素 P 值可知,各因素对残膜回收率的影响由大到小为:起膜杆齿入土角、机具前进速度、输膜链耙转速;各因素对残膜含杂率的影响由大到小为:输膜链耙转速、起膜杆齿入土角、机具前进速度。

4.2 模型交互项解析

根据二次回归模型做出残膜回收率和残膜含杂率与各因素之间关系的响应面图,响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱关系。

由图 9a 可看出,随着机具前进速度和起膜杆齿入土角的增加,残膜回收率呈现先增大后减小的变化趋势,二者在零水平附近时残膜回收率出现最大值。这主要是因为当整机前进速度固定在某一水平,起膜杆齿入土角由 15° 递增至 30° 时,起膜杆齿入土性能随着起膜杆齿入土角的增大而提升,耕层中的残膜可最大限度地附着于起膜杆齿,但起膜杆齿入土角大于 30° 时,起膜杆齿对耕层中残膜的损伤程度变大,残膜被杆齿撕碎后由于几何尺寸变小,

不易附着于起膜杆齿,因此残膜回收率降低。整机前进速度大于 5 km/h 时,拾膜弹齿在较短的时间内无法将起膜杆齿上的残膜挑起,导致残膜回收率降低。由响应曲面变化趋势看出起膜杆齿入土角对残膜回收率影响略微大于整机前进速度。

由图 9b 可以看出,随着机具前进速度和起膜杆齿入土角的增加,残膜回收率呈现先增大后减小的变化趋势,当机具前进速度控制在 5 km/h 、输膜链耙转速在 242 r/min 时,残膜回收率呈现较高水平。这主要是由于随着输膜链耙转速的增加,拾膜弹齿在单位时间内可以将更多的残膜挑起并输送至集膜箱,进而提高残膜回收率;但当输膜链耙转速大于 242 r/min 时,整机振动加剧,由此造成拾膜弹齿上的残膜产生回落现象,降低残膜回收率。由响应曲面形状及其等高线密度可以看出,机具前进速度和输膜链耙转速的交互作用对残膜回收率影响显著,输膜链耙转速对残膜回收率的影响程度大于机具前进速度,与方差分析结果相同。

由图 9c 可以看出,当机具前进速度固定在零水平时,残膜回收率随着起膜杆齿入土角和输膜链耙转速的增加而增大,当二者增大至 0.5 水平附近时,残膜回收率达到最大值 89.3% ,随着起膜杆齿入土角和输膜链耙转速的继续增大,残膜回收率略微下降。分析其原因主要是由于残膜破碎严重及整机的振动,造成残膜回收率有所下降。因此,在实际作业时,输膜链耙转速不宜超过 242 r/min ,起膜杆齿入土角不宜大于 30° 。

由图 9d 可以看出,机具前进速度对残膜含杂率的影响较小,随着起膜杆齿入土角的增大,残膜含杂率略微下降后急剧上升。产生该现象的主要原因是

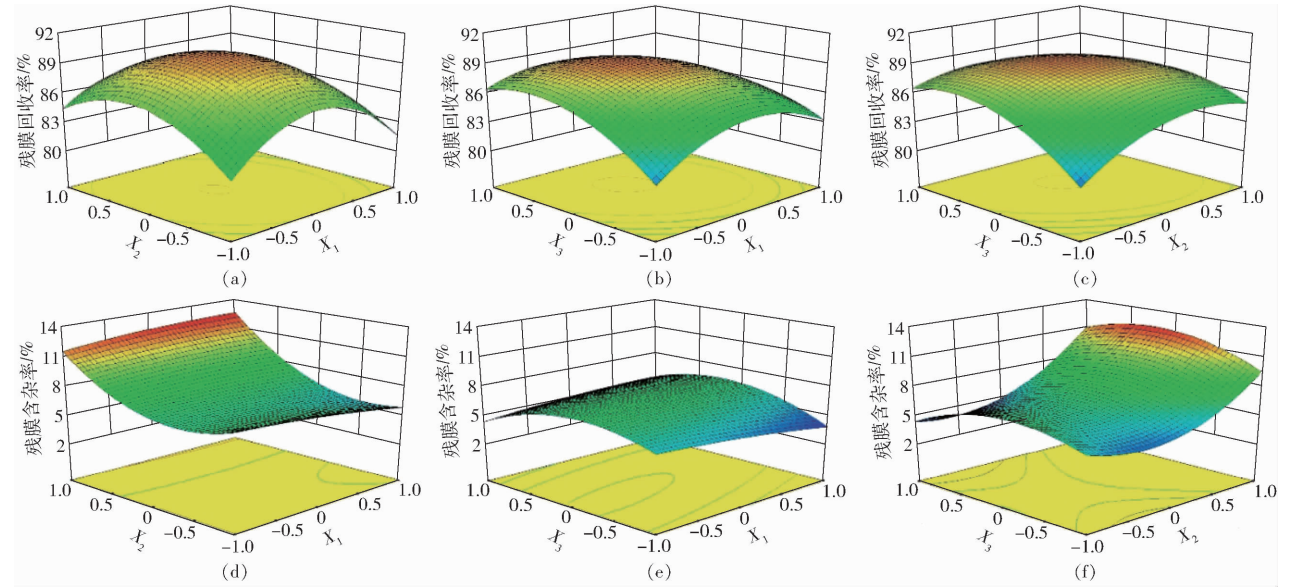


图 9 各因素对残膜回收性能的影响

Fig. 9 Influence of various factors on residual film recycling performance

当起膜杆齿入土角增大后,起膜杆齿与土壤接触的实际距离变长,耕层中的秸秆等杂物容易缠绕在杆齿上,从而造成残膜含杂率升高。从响应面图可以看出,起膜杆齿入土角对残膜含杂率的影响程度大于前进速度。

由图 9e 可以看出,随着机具前进速度的增加,残膜含杂率的变化较小,有略微下降的趋势。随着输膜链耙转速的增加,残膜含杂率呈现先增大后减小的趋势,但变化趋势不很明显。两因素对残膜含杂率影响权重有所差异,输膜链耙转速对残膜含杂率的影响大于机具前进速度,这与方差分析结果相一致。

由图 9f 可以看出,输膜链耙转速由 225 r/min 向 242 r/min 不断变化时,残膜含杂率呈现出先增后减的略微变化趋势。产生该现象主要是由于输膜链耙转速在 225 ~ 242 r/min 时,拾膜弹齿会将拾膜杆齿上的秸秆等杂质一块挑起,造成含杂率率上升;输膜链耙转速在 242 ~ 258 r/min 时,样机产生的振动会将秸秆等杂质抖落产生回流现象,从而使残膜含杂率降低,但同时也会造成残膜的回收率降低。随着起膜杆齿入土角的增大,残膜含杂率呈现持续增大的趋势,尤其是在起膜杆齿入土角从 30°到 45°的增大过程中,残膜含杂率急剧上升。由响应面和等高线图可以看出,输膜链耙转速和起膜杆齿入土角的交互作用对残膜含杂率影响较为显著,与方差分析结果相同。

4.3 作业参数优化与试验验证

为最大限度提升改进后的弹齿式残膜回收机作业性能,应用 Design-Expert 软件的寻优功能,对影响因素与性能指标的回归方程模型进行优化求解^[23],计算得到各影响因素的最优参数值:机具前进速度为 5.21 km/h,起膜杆齿入土角为 30.8°,输膜链耙转速 236 r/min,在此参数条件下残膜回收率为 91.4%,残膜含杂率为 3.21%。

为了验证优化结果的可行性,现按预测的数值进行试验,由于拖拉机实际条件和传动系统的限制,设定作业机具前进速度为 5.3 km/h、起膜杆齿入土角为 30.8°、输膜链耙转速 240 r/min。试验进行 3 次取平均值,结果如表 5 所示。结果表明,验证试

验的残膜回收率平均值为 91.2%,较优化前的残膜回收率 74.3% ~ 88.6% 有明显提升;残膜含杂率为 3.1%,较优化前的残膜含杂率 4.2% ~ 12.7% 有所下降,且与预测值的误差小于 3%,试验结果与预测值很接近,验证了所建模型的准确性。

表 5 优化结果与试验值对比
Tab.5 Comparison of optimization results with actual values

项目	机具前进速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	起膜杆齿入土角 $\alpha/(^{\circ})$	输膜链耙转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	回收率/%	含杂率/%
预测值	5.21	30.8	236	91.4	3.2
实际值 1	5.21	30.8	240	90.3	3.3
实际值 2	5.21	30.8	240	91.7	2.8
实际值 3	5.21	30.8	240	91.6	3.2

5 结论

(1)以现有弹齿式残膜回收机为基础,通过增设起膜部件,重置拾膜弹齿排布,对弹齿式残膜回收机捡拾装置进行了改进设计,通过对起膜装置、收膜装置等关键工作参数进行分析计算,确定了影响残膜回收率和残膜含杂率的相关试验因素及其取值范围。

(2)结合 Box - Benhnken 试验设计原理,采用 3 因素 3 水平响应面分析方法,对改进后的弹齿式残膜回收机进行残膜回收性能试验,通过响应曲面分析得到影响残膜回收率的因素由大到小依次为:起膜杆齿入土角、机具前进速度、输膜链耙转速;影响残膜含杂率的因素由大到小依次为:输膜链耙转速、起膜杆齿入土角、机具前进速度。

(3)建立残膜回收率和残膜含杂率与机具前进速度、起膜杆齿入土角、输膜链耙转速二次多项式回归模型。获得改进后弹齿式残膜回收机最佳工作参数为:机具前进速度为 5.21 km/h、起膜杆齿入土角为 30.8°和输膜链耙转速 236 r/min。田间验证试验表明,该参数条件下残膜回收率均值为 91.2%,残膜含杂率为 3.1%。整机性能较优化前有明显提升,各项作业指标均达到国家和行业标准要求。

参 考 文 献

1 张丹,胡万里,刘宏斌,等. 华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J]. 农业工程学报,2016,32(3):1 - 5. ZHANG Dan, HU Wanli, LIU Hongbin, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 1 - 5. (in Chinese)

2 严昌荣,刘恩科,舒帆,等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(2):95 - 102. YAN Changrong, LIU Enke, SHU Fan, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(2): 95 - 102. (in Chinese)

3 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):1 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170601&journal_id=jcsam = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 06. 001.

- ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1–14. (in Chinese)
- 4 谢建华, 侯树林, 付宇, 等. 残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 94–98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s118&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2013. S1. 018.
- 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(Supp. 1): 94–98. (in Chinese)
- 5 胡凯, 王吉奎, 李斌, 等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24–32.
- HU Kai, WANG Jikui, LI Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 24–32. (in Chinese)
- 6 张佳, 张宇涛, 董黎明. 国内残膜回收机械现状及发展趋势[J]. 农业装备技术, 2014(4): 29–31.
- ZHANG Jia, ZHANG Yutao, DONG Liming. Domestic residual film recovery machine research status and development trend [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2014(4): 29–31. (in Chinese)
- 7 蒋永新, 刘晨, 郭兆峰, 等. 新疆棉田残膜机械化回收技术现状分析及建议[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 246–248.
- JIANG Yongxin, LIU Chen, GUO Zhao Feng, et al. Analysis of residual mechanized recovery technology of membrane in cotton field in Xinjiang and recommendations [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6): 246–248. (in Chinese)
- 8 张佳喜, 张丽, 刘旋峰, 等. 不同边膜铲起膜性能分析及其起膜率对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 10–15.
- ZHANG Jiayi, ZHANG Li, LIU Xuanfeng, et al. Mechanical analysis and contrast experiment on collecting residual plastic film with different side-film shovels [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 10–15. (in Chinese)
- 9 于云海, 陈学庚, 温浩军. 秸秆粉碎与残膜集条联合作业机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 1–8.
- YU Yunhai, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Development and experiment of straw chopping and plastic film strip-collection combined machine [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 1–8. (in Chinese)
- 10 游兆延, 顾峰玮, 吴峰, 等. 垄作花生残膜回收技术研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 207–211.
- YOU Zhaoan, GU Fengwei, WU Feng, et al. Technology research on peanut residue film recycling [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 207–211. (in Chinese)
- 11 严伟, 胡志超, 游兆延, 等. 3种残膜回收机的作业性能对比试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 197–202.
- YAN Wei, HU Zhichao, YOU Zhaoan, et al. Comparative experimental study on working performance of three kinds of residue plastic film collectors [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 197–202. (in Chinese)
- 12 严伟, 胡志超, 周新星, 等. 残膜回收机拾膜机构研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 258–262.
- YAN Wei, HU Zhichao, ZHOU Xinxing, et al. Present situation of research and expectation on picking-up mechanism of plastic film collectors [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 258–262. (in Chinese)
- 13 康建明, 王士国, 颜利民, 等. 残膜回收机起膜铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 143–148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s022&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2016. S0. 022.
- KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin, et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 143–148. (in Chinese)
- 14 马少辉, 张学军. 边膜残膜回收机的设计与试验[J]. 农业工程, 2012, 2(1): 73–75.
- MA Shaohui, ZHANG Xuejun. Design and experiment of side of used plastic film collector machine [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1): 73–75. (in Chinese)
- 15 张琴, 张亚丽, 王保爱, 等. 残膜捡拾机起膜铲的设计与仿真[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 33–37.
- ZHANG Qin, ZHANG Yali, WANG Baoai, et al. Design and simulation on loosening shovel of residual plastic film pickup machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 33–37. (in Chinese)
- 16 李斌, 王吉奎, 胡凯, 等. 残膜回收机顺向脱膜机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 23–28.
- LI Bin, WANG Jikui, HU Kai, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 23–28. (in Chinese)
- 17 卢博友, 薛少平, 薛惠岚, 等. 弹齿滚筒式残膜捡拾机构捡膜特性分析[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(5): 101–104.
- LU Boyou, XUE Shaoping, XUE Huilan, et al. Research on the collecting property of the spring-tooth-cylinder type mulching plastic film collector [J]. Journal of Northwestern Agricultural University, 2000, 28(5): 101–104. (in Chinese)
- 18 GB/T 25412—2010 残地膜回收机[S]. 2010.
- 19 刘俊安, 王晓燕, 李洪文, 等. 基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 60–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170208&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 02. 008.
- LIU Junan, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60–67. (in Chinese)
- 20 闫盼盼, 曹肆林, 罗昕, 等. 弹齿链耙式播前残膜回收机的设计研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 137–142.
- YAN Panpan, CAO Silin, LUO Xin, et al. Research on the spring-tooth-chain-rake incomplete plastic film recycling machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(6): 137–142. (in Chinese)
- 21 戴飞, 郭笑欢, 赵武云, 等. 帆布带式马铃薯挖掘残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 104–113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180312&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 012.
- DAI Fei, GUO Xiaohuan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of canvas belt combined operation machine for potato digging and plastic film collecting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 104–113. (in Chinese)
- 22 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 正弦指数曲线型开沟刀片结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 91–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161112&journal_id=jcsam=1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 012.
- KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of sine exponential curve type ditching blade [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 91–99. (in Chinese)
- 23 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20–28.
- GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20–28. (in Chinese)