

引用格式:

肖霄, 罗海峰, 张贝贝, 吴明亮. 4SY-1 型油菜割晒机切割与拨禾装置的优化设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 222–226.

XIAO X, LUO H F, ZHANG B B, WU M L. Optimized design and test of cutting and reeling device of 4SY-1 rape windrower[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 222–226.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 4SY-1 型油菜割晒机切割与拨禾装置的优化设计与试验

肖霄<sup>1</sup>, 罗海峰<sup>1,2\*</sup>, 张贝贝<sup>1</sup>, 吴明亮<sup>1,2</sup>

(1.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.智能农机装备湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 研制的 4SY-1 型油菜割晒机主要由机架、循环式切割装置、双向对搂式拨禾装置、传动机构等组成。工作时, 被循环式切割器切断后的油菜茎秆在左右两侧对称拨禾机构驱动下, 从两侧向放铺通道推送挤压, 实现双向对搂拨送和后侧放铺, 达到茎秆首尾搭接式条铺。为保证循环式割刀切割过程的可靠性, 对切割刀片的刃口参数进行了优化设计。运用仿人工拨禾作业原理设计了双向对搂中间放铺式拨禾装置, 确定了拨禾装置主要结构尺寸。田间试验结果表明, 在工作速度 0.8 m/s、割幅 1 m、种植密度 22.5 万株/hm<sup>2</sup>时, 油菜铺放角为 11.48°, 角度差为 6.64°, 油菜平均铺层高 562.7 mm, 平均铺层宽 955.6 mm, 油菜茎秆以首尾搭接方式铺放, 该油菜割晒机的切割与拨禾装置可以完成田间油菜有效切割、拨禾、放铺作业。

**关键词:** 油菜割晒机; 循环式切割; 对搂式拨禾

中图分类号: S225.2<sup>+1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0222-05

## Optimized design and test of cutting and reeling device of 4SY-1 rape windrower

XIAO Xiao<sup>1</sup>, LUO Haifeng<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Beibei<sup>1</sup>, WU Mingliang<sup>1,2</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2.Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** The 4SY-1 rape windrower is mainly composed of frame, circulating cutter, two-way symmetric reeling mechanism, and transmission mechanism, etc. During the work, the rape stalks are cut by the circulating cutter driven by the symmetrical reel mechanism on the left and right sides, and pushed and squeezed from both sides to the laying channel to achieve two-way symmetric reeling and back-side laying. The stalks are laid in a lap at the beginning and end. The parameters of cutting blade edge were optimized to ensure the reliability of the circulating cutter during the cutting process. The two-way symmetric reeling mechanism for intermediate laying was designed by using the principle of manual spreading, and the main structural dimensions of the reeling mechanism were determined. The field test results show that the rape laying angle is 11.48°, the angle difference is 6.64°, the average laying height of rape is 562.7 mm, and the average laying width is 955.6 mm, at the working speed of 0.8 m/s, cutting width of 1 m and planting density of 225 000 plants/hm<sup>2</sup>. It is found that the rape is laid in the field in the way of first and last lap, and the cutting and reeling device of the rape windrower can complete the field rape cutting, reeling and laying operation in the field at one time effectively.

**Keywords:** rape windrower; circulation cutting; two way symmetric reeling mechanism

收稿日期: 2020-10-25

修回日期: 2021-08-25

基金项目: 湖南省科学技术厅重点研发项目(2018NK2064); 湖南省教育厅项目(18A107)

作者简介: 肖霄(1995—), 男, 湖南湘潭人, 硕士, 主要从事农业机械结构创新设计研究, xiao582846319@qq.com; \*通信作者, 罗海峰, 博士, 高级实验师, 主要从事农业机械性能试验与创新设计研究, luohaifeng@hunau.edu.com

割晒作业是机收油菜的首要关键环节,切割、晾晒质量直接影响油菜全程的收获质量。目前,油菜割晒机的晾晒有平行放铺和首尾搭接放铺 2 种方式,而首尾搭接放方式的空气流通性较好,更方便田间捡拾作业<sup>[1-2]</sup>。

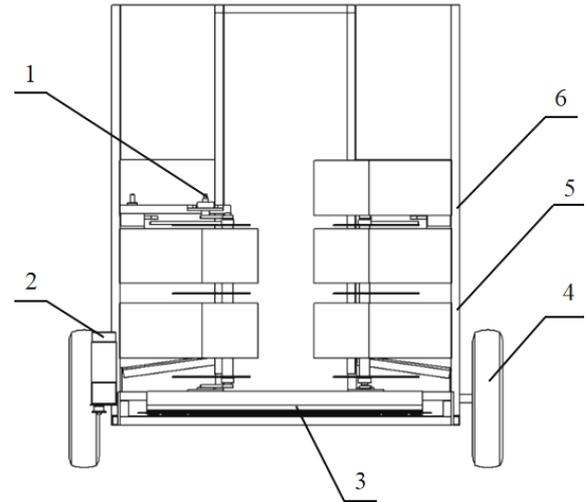
国外油菜割晒机主要在平原宽幅收割作业上应用,难以适应中国南方小田块稻田油菜割晒作业。国内油菜割晒机主要以联合收割机底盘或以拖拉机底盘为动力来源进行切割铺放作业。金城谦等<sup>[3]</sup>设计的 4SY-2 型油菜割晒机、王修善等<sup>[4]</sup>设计的 4SY-2.0 型自走式油菜割晒机都可完成茎秆侧向平铺作业。廖宜涛等<sup>[5]</sup>设计的 4SY-2.2 型油菜割晒机可完成双侧条铺作业。石增祥等<sup>[6]</sup>设计的 4SY-2.2 型油菜割晒机可实现茎秆横向输送、侧向条铺作业。曹震等<sup>[7]</sup>设计的 4SY-1.8 型油菜割晒机可实现中间卧式输送条铺作业,利用中间输出带和侧向拨禾滚轮完成茎秆辅助输送,但机组纵向尺寸偏大。这类单(双)侧放铺割晒机型分平铺或条铺 2 种放铺方式,大部分需在田间作业前进行人工收割让道,其中平铺作业茎秆不利于通风晾晒和后期捡拾。现有的割晒机切割装置大部分采用往复等传统切割器,切割惯性大,机械振动大<sup>[8-9]</sup>,易造成黄熟期油菜掉粒损失。

为了提高割晒机作业下田的便利性,简化输送结构,增强晾晒期间茎秆的通风透气性,结合油菜种植农艺规程和收割特点,笔者采用循环式切割和仿人工对搂式拨禾方式,设计了一种新型循环式切割对搂式拨禾中间放铺油菜割晒机(4SY-1型),并对切割与拨禾装置进行了优化设计,该机可一次性完成油菜茎秆对厢切割、拨送、中间放铺作业,以期油菜机械化切割提供新型切割方法及配套装备的设计研发提供参考。

## 1 4SY-1 油菜割晒机的结构与工作原理

### 1.1 结构

4SY-1 型油菜割晒机总体结构如图 1 所示,主要由机架、循环式切割装置、双向对搂式拨禾装置(由曲柄连杆机构、拨禾齿等组成)、传动机构等组成。



1 传动系统; 2 电机; 3 循环式切割器; 4 行走机构; 5 对搂式拨禾装置; 6 机架。

图 1 4SY-1 油菜割晒机的结构

Fig.1 Structure of the 4SY-1 rape windrower

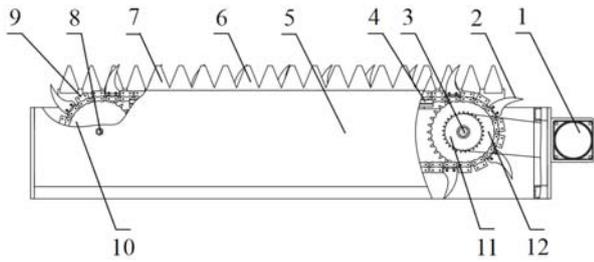
### 1.2 工作原理

循环式切割器利用自带电源驱动直流电机,带动切割主动链轮、链条运动,链条外缘安装切割动刀,动刀上下两端配套上、下定刀,实现双支撑单向高速切割。切割后的茎秆在左右两侧对称拨禾机构的驱动下,从两侧向放铺通道推送挤压,实现双向对搂拨送和后侧放铺,达到茎秆首尾搭接条铺。采用弧形护板隔离拨齿工作区和拨送放铺区。拨禾机构采用 3 层式分层拨齿安装,实现入禾、拨送、出禾过程仿人工对搂式作业,切割后的茎秆快速平移向中间后侧放铺。

## 2 关键部件的优化设计

### 2.1 循环式切割刀片的结构优化

采用张贝贝等<sup>[10]</sup>设计的循环式切割装置,如图 2 所示。循环式切割器主要由动弯刀、上定刀、下定刀、电机及传动部件组成。动弯刀与链条外侧垂直安装,上、下双定刀安装在链条直线运行段,动弯刀与上、下定刀组合成双支撑切割模式。工作时,通过电机驱动主动链轮带动循环链进行循环运动,切割区链条带动动刀在双定刀之间进行快速单向直线匀速切割运动,进入切割区的茎秆在动刀高速直线运动下完成双支撑有效切割,刀片在链条导轨的支撑下保证其切割期间工作平稳。



1 电机; 2 动弯刀; 3 主动轴; 4 链条导轨; 5 割台板; 6 上定刀; 7 下定刀; 8 从动轴; 9 板形链; 10 从动链轮; 11 小链轮; 12 主动链轮。

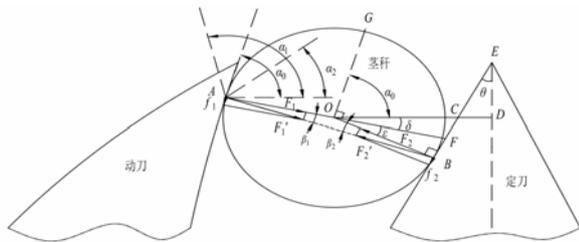
图2 循环式切割器的结构

Fig.2 Structure diagram of the circulating cutter

刀片受力分析如图3所示,对渐开线段AB的定位,主要是确定切割角( $\alpha$ )的大小, $\alpha$ 为弯刀刀刃任意点A切线与水平的夹角。该夹角的大小对茎秆的切割过程有较大影响。切割入口端A点不同倾角大小条件下的切割状态可以分为3种。

第1种,当切割角为 $\alpha_0$ 时,动弯刀与定刀对茎秆的合力在一条直线上,合力为0,此时没有向外滑出的趋势,也没有向内滑的趋势,处在一个稳定的切割状态。

第2种,当 $\alpha_1 > \alpha_0$ 时,动弯刀和定刀对茎秆的切割力不在一条直线上,且在定刀刀刃线方向上有向外的分量,切割时茎秆有向外滑出的趋势。



A、B点分别为茎秆与动刀和定刀的接触点; $f_1$ 为茎秆与动刀之间的动摩擦力; $f_2$ 为茎秆与定刀之间的动摩擦力; $F_1$ 为动刀对茎秆的正压力; $F_2$ 为定刀对茎秆的正压力; $F_1'$ 为动刀对茎秆产生的合力; $F_2'$ 为定刀对茎秆产生的合力; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 分别为动刀、定刀与茎秆之间的摩擦角; $F$ 点为AO延长线与EB线的交点; $OG$ 垂直于OF; $\theta$ 为定刀刃口倾角。

图3 油菜茎秆切割的受力

Fig.3 Force analysis of the rape stalk under cutting

第3种,当 $\alpha_2 < \alpha_0$ 时,动弯刀和定刀对茎秆的切割力不在一条直线上,且在定刀刀刃线方向上有向内的分量,切割时茎秆有向内滑移的趋势。

由于动刀刃口相对于茎秆之间的摩擦角( $\beta_1$ )会大于锯齿形刃口相对于茎秆之间的摩擦角( $\beta_2$ ),因此在临界状态下,以 $\beta_1$ 为基准,B点处的实际摩擦

系数按 $\beta_1$ 计算, $\beta_1 = \beta_2$ 。以圆心O点作水平线OD交三角形刀刃口线上点C,将动刀与茎秆接触点A延长至F点,从三角形OAB可以看出, $\varepsilon = \beta_1 + \beta_2 = 2\beta_1$ 。

由于 $OB \perp BE$ , $OD \perp ED$ ,由相似三角形关系可以得出: $\angle CED = \angle COB$ , $\theta = \delta + \varepsilon$ , $\delta = \theta - \varepsilon$ ,且 $\alpha_0 + \delta = 90^\circ$ ;因此 $\alpha_0 = 90^\circ - \delta = 90^\circ - (\theta - \varepsilon) = 90^\circ - (\theta - 2\beta_1)$ 。则茎秆稳定切割(不滑出切割区)的弧形刃口入口端倾角必要条件为 $\alpha \leq \alpha_0$ 。

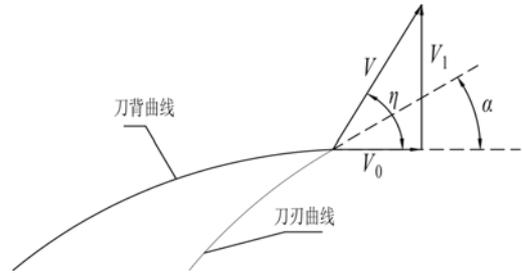


图4 动刀切割过程

Fig.4 Analysis of the cutting process

在茎秆切割不滑出条件下,进一步分析切割过程,如图4所示,其中 $\alpha$ 为刀刃曲线入口处的切线与水平线的夹角, $\eta$ 为机组前进速度 $V_1$ 和刀片切割速度的合速度 $V$ 与刀片切割速度 $V_0$ 的夹角。当 $\alpha < \eta$ 时,切割茎秆时刀背会先与待割油菜茎秆接触,出现推挤茎秆现象,反而造成刀刃无法正常切割油菜茎秆,因此正常切割的第2个条件,弯刀刃口曲线入口角度必须满足 $\alpha > \eta$ 。

结合2个必要条件,切割角 $\alpha$ 稳定切割应满足 $\eta < \alpha \leq \alpha_0$ 。

将机具作业速度0.8 m/s、平均切割作业速度2 m/s、定刀切割角 $26^\circ 56'$ 、摩擦角 $26^\circ 05'$ 代入可得: $21^\circ 8' < \alpha \leq 63^\circ 4'$ ,说明切割角 $\alpha$ 稳定切割合理区间为 $21^\circ 8' \sim 63^\circ 4'$ 。

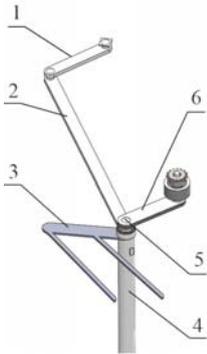
基于切割稳定性分析,将动弯刀刃口曲线优化为基圆半径 $r = 8.5$  mm,展角为 $\frac{7}{4}\pi \sim \frac{12}{7}\pi$ 的渐开线方程曲线。在此刀刃曲线参数下,计算可得切割角 $\alpha$ 为 $48^\circ 56'$ ,落入稳定切割合理区间,满足稳定切割要求。

## 2.2 双向对搂式拨禾机构的设计与优化

双向对搂式拨禾机构如图5所示,主要由摇杆、连杆、曲柄、拨齿组成。作业时电机驱动曲柄作旋转运动;拨齿作圆周运动的同时,在摇杆和连杆的

带动下作偏摆运动。

切割部件将油菜茎秆切断后，导禾机构为油菜茎秆导向，拨禾机构负责拨送放铺油菜。拨禾机构的工作过程分为拨送和放铺 2 个阶段：拨送是将割幅内油菜向中间平推拨拢；放铺是将已拨拢的油菜向排禾口推送，在机具向前推进与拨禾机构拨送的共同作用下，油菜茎秆向后有序放铺至割茬上。

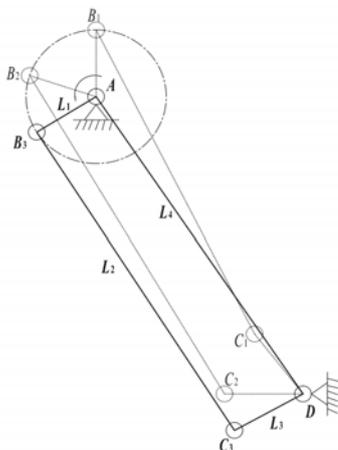


1 摇杆; 2 连杆; 3 拨齿; 4 拨齿套筒; 5 拨齿轴; 6 曲柄。

图 5 拨禾机构(单侧)的结构

Fig.5 Structure of the reeling mechanism(one-sided)

双向对接式拨禾机构如图 5 所示,主要由摇杆、连杆、曲柄、拨齿等组成。拨禾机构运动如图 6 所示,拨禾机构工作时,动力由 A 点输入,驱动曲柄  $L_1$  作回转运动,拨齿套筒通过拨齿轴与曲柄 B 点端同轴心安装,拨齿以一定角度固定安装在拨齿套筒上。曲柄驱动拨齿作圆周运动的同时,焊接在拨齿套筒上的连杆  $L_2$  和铰接在机架  $L_4$  的 D 点上的摇杆  $L_3$  带动拨齿做偏摆运动,对称的两组拨禾机构同时工作构成了双向对接拨禾作业。



$L_1$  曲柄长度;  $L_2$  连杆长度;  $L_3$  摇杆长度;  $L_4$  机架长度。

图 6 拨禾机构的运动

Fig.6 Kinematic analysis of the reeling mechanism

在曲柄摇杆机构中,当从动件摇杆与连杆处于共线位置时,传动角  $\gamma=0^\circ$ ,机构会处于死点位置。在死点位置上机构无法启动且具有运动不确定性,而机构无死点位置的条件为最短杆与最长杆的长度之和小于另外两杆长度之和。

$L_1$  与  $L_4$  分别为最短和最长杆,  $L_2$  与  $L_3$  之和应大于  $L_1$  与  $L_4$  之和,即  $L_1 + L_4 < L_2 + L_3$ 。

将  $L_1$  设定为 145 mm,  $L_2$  为 585 mm,  $L_3$  为 160 mm,  $L_4$  为 590 mm。

如图 7 所示,割晒机工作幅宽为 1 m,为提高机具在中国南方丘陵地区田间通过性,在满足拨禾作业效果的条件下降低机具尺寸,机架宽度设定为 1260 mm。结合喂入量、割幅、机架宽度和农业机械设计要求,排禾口大小设定为 200 mm,即单侧拨禾机构横向工作空间仅有 530 mm,为保证机构正常工作,避免产生干涉,将曲柄  $L_1$  设定为 145 mm;考虑到传动系统布置,摇杆与机架的铰接点 D 距曲柄 A 点距离简称为机架长度  $L_4$ ,为 590 mm;对机构设计时发现当摇杆长度  $L_3$  小于 160 mm 时,摇杆将与机架产生干涉,无法正常工作;而过长,摇杆产生偏摆幅度大,降低机构稳定性,因此将  $L_3$  设定为 160 mm;结合曲柄摇杆机构稳定运行需满足的条件  $L_1 + L_4 < L_2 + L_3$ ,将连杆长度  $L_2$  设定为 585 mm。

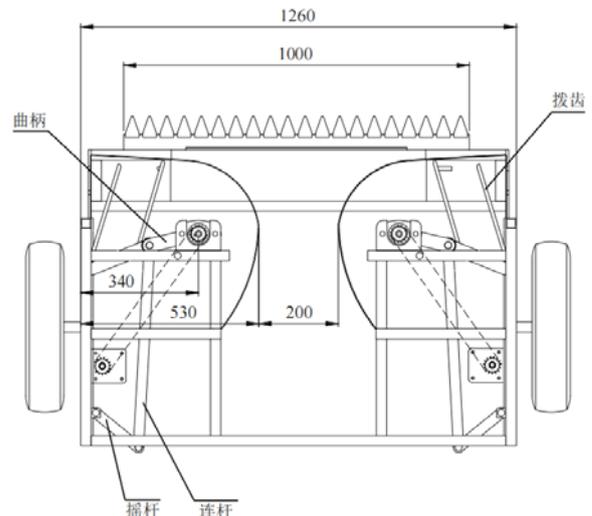


图 7 拨禾机构俯视图

Fig.7 Top view of the reeling mechanism

拨禾轮圆周线速度  $v_2$  与机具前进速度  $v_1$  的比值  $\lambda$  为拨禾速比。对接式拨禾装置在工作中其拨齿工作轨迹需为余摆线方能对油菜起到拨禾、扶持、输送作用,因此需满足拨禾速比  $\lambda > 1$ 。

根据《农业机械设计手册》<sup>[11]</sup>, 拨齿线速度应满足  $v_2 \leq 3 \text{ m/s}$ 。割晒作业时, 油菜的角果不易炸荚。拨齿转速设定在 80~100 r/min, 依据设定机具田间作业速度 0.8 m/s, 对应线速度为 1.26~1.58 m/s, 速比  $\lambda > 1$ , 符合拨禾要求, 且线速度不超过规定值。

依据这些参数, 对拨禾运动轨迹进行仿真, 实际拨禾作业过程中其轨迹对切割区域可实现全覆盖, 拨禾轨迹符合作业要求。

测定直播油菜‘湘杂油 W37’黄熟期植株性状, 种植密度 22.5 万株/hm<sup>2</sup>, 含水率 81.1%; 油菜平均植株高度为 1468 mm, 切割高度 350 mm 以上的油菜平均重心位置为 708 mm。依据油菜植株性状特征, 将拨齿与割刀垂直高度空间分布由下往上分别设定为 145、445、745 mm; 下部最低拨齿高度相比切割位置高出 145 mm, 中间拨齿位置按等差分布, 最上层拨齿高度位于油菜平均重心高度 708 mm 以上, 可保证机构顺利完成拨禾输送作业。拨禾机构拨齿空间分布如图 8。作业时拨齿作用在茎秆与少量分枝上, 可减少对果荚牵扯造成的炸荚损失。

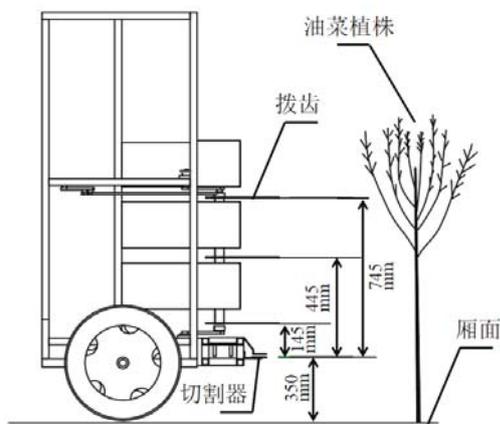


图 8 拨禾机构拨齿纵向间距分布

Fig.8 Spatial distribution of the teeth of the reeling mechanism

### 3 田间试验

2018年5月在湖南农业大学耘园基地进行油菜割晒田间试验。割晒机挂接到拖拉机上, 采用低速倒 I 档、厢面对中进行割晒。

由拖拉机牵引割晒机, 机组作业平均速度 0.8 m/s, 切割速度 2 m/s, 拨禾同步转速控制在 80~100 r/min, 割幅 1 m, 参照稻麦割晒机技术标准 JB/T 7733—2007<sup>[12]</sup>, 进行田间割晒作业。完成后每隔 2 m 选取 1 m 作为测试区, 分别测量、记录油菜茎秆铺

条的铺放角度、铺放宽度、铺放高度, 以作为衡量割晒机作业铺放质量的评价指标<sup>[13]</sup>。将作业质量评价指标测量结果与相关标准进行比对, 可以看出, 4SY-1 油菜割晒机铺放角为 11.48°, 由于标准里的参考数值对应的是侧向 90°放铺, 本试验割晒顺向条铺可以套用标准里的误差值  $\pm 20^\circ$ , 因此 11.48°处在要求范围之内; 茎秆条铺叠加在已割油菜割茬上, 割晒作业后铺层平均高度为 562.7 mm, 铺层平均宽度为 955.6 mm, 铺条整齐, 厚度均匀, 铺晒面积大, 利于干燥通风; 割晒条铺平均角度差为 6.64°。田间试验结果表明, 割晒机切割顺利, 拨禾装置田间铺放效果良好, 油菜首尾搭接呈鱼鳞状铺放在割茬上, 利于后续田间晾晒和机械捡拾脱粒作业。各田间试验参数均能够满足割晒机割晒铺放作业相关质量标准要求。

### 参考文献:

- [1] 吴崇友, 肖圣元, 金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 10-16.
- [2] 罗海峰, 汤楚宙, 官春云, 等. 油菜机械化收获研究进展[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 1-8.
- [3] 金诚谦, 吴崇友, 金梅, 等. 4SY-2 型油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 76-79.
- [4] 王修善, 刘大为, 李旭, 等. 4SY-2.0 型自走式油菜割晒机的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 445-453.
- [5] 廖宜涛, 陈传节, 舒彩霞, 等. 4SY-1.8 型手扶式油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 94-100.
- [6] 石增祥, 谢伟, 任述光, 等. 4SY-2.2 型油菜割晒机设计与试验[J]. 中国农学通报, 2017, 33(10): 140-145.
- [7] 曹震, 金鑫, 黄海东, 等. 4SY-1.8 型油菜割晒机的设计[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 521-524.
- [8] 李青林, 戴青玲. 基于 ADAMS 油菜联合收获机割刀驱动机构的仿真[J]. 农机化研究, 2009, 31(3): 56-58.
- [9] 李仲恺, 谢方平, 刘科, 等. 油菜收获圆盘式切割器的设计与性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 83-88.
- [10] 张贝贝, 罗海峰, 肖霄, 等. 油菜循环链式切割器的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 440-443.
- [11] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 [K]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [12] JB/T 7733—2007 割晒机技术条件[S].
- [13] 林景尧, 郑文华. 割晒机放铺质量的研究[J]. 农业机械学报, 1983, 14(2): 66-73.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立