

稻田绿肥紫云英种子联合收获机设计与试验

游兆延¹ 颜建春¹ 吴惠昌¹ 王申莹¹ 曹明珠¹ 汪 玮²

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 芜湖青弋江种业有限公司, 芜湖 241000)

摘要:为解决现有稻田绿肥紫云英种子收获时存在的割台适用性差、脱粒分离能力弱以及清选除杂能力不强等问题,设计了稻田绿肥紫云英种子联合收获机。对防落荚柔性扶禾割台、纵向杆齿式脱粒装置、风筛式分层控杂清选装置等关键部件进行了参数设计,设计了紫云英机收专用扶禾器和割刀组件;确定纵向杆齿式脱粒装置结构参数(喂入段、脱粒段、排草段长度),对脱粒元件结构参数、数量及周向分布进行了计算;利用 ICEM - CFD 网格划分软件和 Fluent 流体动力学分析软件等对三风道清选装置离心风机转速 1 080 r/min、叶轮直径 385 mm 工作参数下的内部气流场开展数值模拟,并进行试验验证。以降低紫云英籽粒机收损失率、破碎率、含杂率为目标,选择对收获质量影响较大的机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速、鱼鳞筛开度共 4 个因素,利用 Box - Behnken 中心组合试验方法,进行四因素三水平响应面正交试验,使用 Design-Expert 对试验结果进行响应面分析,通过多目标参数优化,确定最佳工作参数组合为:机具前进速度 3 km/h,脱粒滚筒转速 550 r/min,清选风机转速 990 r/min,鱼鳞筛开度 35 mm。在此参数条件下进行了田间试验,实测紫云英籽粒损失率为 2.35%,破损率为 0.22%,含杂率为 0.51%,均满足相关标准技术要求。

关键词: 稻田绿肥; 紫云英种子; 联合收获机; 正交试验

中图分类号: S223.2⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0001-10

Design and Experiment of Seed Combine Harvester for Chinese Milk Vetch Green Manure in Paddy Field

YOU Zhaoyan¹ YAN Jianchun¹ WU Huichang¹ WANG Shenying¹ CAO Mingzhu¹ WANG Wei²

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China
2. Wuhu Qingyijiang Seed Industry Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: China is the country of origin of *Astragalus sinicus* L., and also the country with the earliest utilization and cultivation of *Astragalus sinicus* L. and the largest planting area in the world. *Astragalus sinicus* L., also known as Chinese milk vetch, Zi yunying and so on, is one of the main winter green manure crops in paddy fields of central and southern China. Currently, the harvest methods of *Astragalus sinicus* L. green manure seed are mainly include: artificial harvest and mechanical harvest, artificial harvest is time-consuming and laborious, and the yield of reserved seed for planting is low. Generally, the seed yield of *Astragalus sinicus* L. in paddy field is 300 ~ 650 kg/hm², there are two common ways of mechanical harvest; the first one is segmented harvest, using a rice, wheat, rape or bean swather to harvest *Astragalus sinicus* L. and then through natural drying, a thresher is used for threshing afterwards, the second one is combine harvest, by adjusting parameters and changing working components of traditional grain harvester or rapeseed combine harvester to complete harvest of *Astragalus sinicus* L seed. Segmented harvesting process is cumbersome and inefficient, combine harvest is of high efficiency, which is the development trend of *Astragalus sinicus* L. seed harvest, however, the harvest quality of existing *Astragalus sinicus* L. green manure seed combine harvester was affected by unreasonable structure configuration of header, weak separation ability of threshing mechanism, and poor impurity-removal

收稿日期: 2022-06-10 修回日期: 2022-07-01

基金项目: 中国农业科学院所属本科科研业务费专项(S202012-03)、国家绿肥产业技术体系建设专项资金项目(CARS-22)和中国农业科学院主要粮经作物初加工装备创新团队专项(31-NIAM-09)

作者简介: 游兆延(1988—),男,助理研究员,主要从事绿肥生产机械装备研究,E-mail: 17366350354@163.com

通信作者: 曹明珠(1985—),男,副研究员,主要从事经济作物收获机械装备研究,E-mail: cmzhu108@163.com

function of cleaning device, the loss rate of machine harvest in field measurement was in the range from 31.5% to 32.1%, and the seed impurity rate and breakage rate were high, which seriously affected the scale promotion and application of *Astragalus sinicus* L. green manure. In order to solve the problems such as poor applicability of header, weak separation ability of threshing mechanism and poor impurity-removal ability of cleaning device during the harvest process of existing *Astragalus sinicus* L. green manure seed harvester, a 4LGM-200 type *Astragalus sinicus* L. green manure seed combine harvester was designed. The Parameters of the key components, such as the flexible anti pod-dropping seedling-lifting header, the longitudinal rod teeth type threshing device and the air-sieve type layered impurity-controlled cleaning device were designed, the structural parameters (length of feeding section, threshing section and grass-discharging section) of the longitudinal rod teeth type threshing device were determined. Meanwhile, the structural parameters, number and circumferential distribution of threshing elements were designed and calculated. Both the ICEM-CFD mesh partitioning software and Fluent fluid dynamics analysis software were used to perform numerical simulation on the internal airflow field of the three-channel centrifugal fan under the condition when the rotation speed of the fan was 1 080 r/min and impeller diameter was 385 mm, and test verification analysis were carried out as well. Aiming at reducing loss rate, breakage rate and impurity rate of *Astragalus sinicus* L. seed during mechanical harvest process, four factors which had a great influence on the harvest quality were selected, including the machine forward speed, rotation speed of the roller, rotation speed of the fan and the scale sieve's opening. By adopting the Box-Behnken central composite test method, the response surfaces experiments with four factors and three levels were conducted, and then the response surface analysis of the test results was performed by using Design-Expert, through multi-objective parameter optimization, the best combination of working parameters was obtained: the machine forward speed was 3 km/h, rotation speed of the roller was 550 r/min, rotation speed of the cleaning fan was 990 r/min, and the scale sieve's opening was 35 mm. Under these parameters, the field test was carried out, the results showed that the loss rate of *Astragalus sinicus* L. seed was 2.35%, the breakage rate was 0.22%, and the impurity rate was 0.51%, which was better than the technical requirements of loss rate and breakage rate less than 5% and impurity rate less than 3% specified in relevant standards.

Key words: paddy field green manure; Chinese milk vetch seed; combine harvester; orthogonal test

0 引言

紫云英俗称草子、红花草等,是我国中南部水稻田主要的冬季绿肥作物之一^[1-4],其固氮能力强,利用效率高,具有提升土壤肥力、保护生态环境等作用^[5-6]。目前紫云英绿肥种子收获主要包括人工收获和机械收获。人工收获费时费力,留种产量低,一般稻田紫云英收种量为 300~650 kg/hm²。机械收获常见方式有两种:分段收获,借用稻麦、油菜或大豆等作物割晒机,进行紫云英收割,经自然铺晒晾干后,再用脱粒机进行脱粒;联合收获,由传统稻麦或油菜联合收获机通过参数调节、更换作业部件来完成紫云英种子收获^[7]。分段收获工序繁琐,效率较低,联合收获效率高,是紫云英种子收获的发展趋势,然而,现有紫云英种子联合收获机受割台结构配置不合理、脱粒分离能力较弱、清选装置除杂功能不强等因素影响,田间实测紫云英收获期机收损失率高达 32% 左右^[8],且种子含杂率、破损率较高,严重影响了紫云英绿肥的规模化推广与应用。

国内外现有种子收获研究主要集中在水稻、小

麦、玉米、谷子等粮食作物^[9-11],以及油菜、大豆、油菜、胡麻等经济作物上^[12-14],对于紫云英绿肥种子机械化收获的研究鲜有报道。为此,本文优化改进割台、脱粒、清选等关键部件相关结构和运动参数,筛选对稻田绿肥紫云英种子收获质量影响较大的因素:机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速、鱼鳞筛开度,进行四因素三水平响应面试验,探明各因素对紫云英种子收获质量评价指标的影响以及理想的参数组合,在此基础上,研制稻田绿肥紫云英种子联合收获机,一次性完成紫云英扶禾、分禾、切割、输送、脱粒、清选、卸种等工作,并对该机作业性能进行田间试验验证,以期对紫云英等稻田绿肥种子机械化收获装备的研发提供参考。

1 联合收获机结构与工作原理

1.1 整机结构与技术参数

稻田绿肥紫云英种子联合收获机结构示意图如图 1 所示。主要由拨禾轮、分禾器、割刀组件、扶禾器、限深装置、侧切刀、输送装置、履带底盘、离心风机、机架、清选筛面、脱粒装置、出料装置、种仓和驾驶室等组成。整机主要技术参数如表 1 所示。

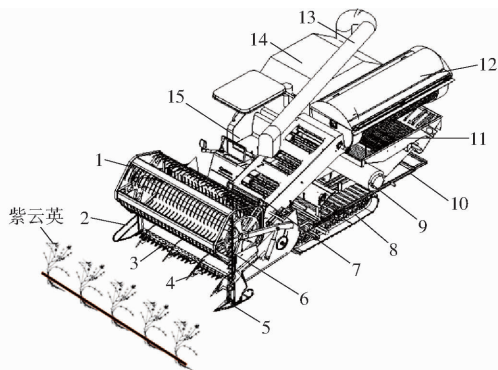


图 1 稻田绿肥紫云英种子联合收获机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of seed combine harvester for Chinese milk vetch green manure in paddy field

1. 拨禾轮 2. 分禾器 3. 割刀组件 4. 扶禾器 5. 限深装置
6. 侧切刀 7. 输送装置 8. 履带底盘 9. 离心风机 10. 机架
11. 清选筛面 12. 脱粒装置 13. 出料装置 14. 种仓 15. 驾驶室

表 1 稻田绿肥紫云英种子联合收获机主要技术参数

Tab.1 Key technical parameters of seed combine harvester for Chinese milk vetch green manure in paddy field

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 100×2 890×2 700
整机质量/kg	2 800
配套动力/kW	62
作业幅宽/mm	2 200
最大喂入量/(kg·s ⁻¹)	5.0
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.53~0.87

1.2 工作原理

稻田绿肥紫云英种子联合收获机在田间作业时,紫云英果荚及茎秆在拨禾轮、防落荚柔性扶禾割台及输送装置的共同作用下进入纵向轴流杆齿式脱粒装置,此时,紫云英果荚在杆齿和凹板筛的转动打击及挤压作用下实现脱粒,随后脱粒装置筛下脱出混合物落入到分层控杂清选筛面上,并在三风道离心风机的作用下完成脱粒物料的气流清选,紫云英籽粒顺着鱼鳞筛筛片间隙下落,透过圆孔筛落入籽粒水平螺旋输送机,籽粒螺旋输送机将其直接输送至种仓中,小部分未脱净物料未被吹出机外,而是落入杂余水平螺旋输送机中,杂余螺旋输送机将这部分物料运送回脱粒装置进行二次脱粒和清选,从而减少籽粒的损失率和含杂率,完成紫云英绿肥种子收获作业。

2 防落荚柔性扶禾割台

紫云英成熟后受天气影响较大,收获时田间紫云英多呈匍匐状,为减少种子损失率,提高紫云英收获质量,设计如图 2a 所示的紫云英防落荚柔性扶禾割台,主要由分禾器、扶禾器、割刀组件、拨禾轮、喂入螺旋输送器等组成,可一次完成分禾、扶禾、拨禾、

切割、导拢及输送作业。其中,紫云英种子机收专用扶禾器(图 2b)主要由起草杆头、弹杆连接板、弹杆和安装板组成,起草杆头保持与地面夹角 32°~38°,通过前置的起草杆头挑起待收获匍匐或倒伏紫云英,将紫云英茎秆及果荚引导至后方,避免切割器直接接触紫云英籽粒生长段,有效降低紫云英割台收获损失率;割刀组件(图 2c)由护刃器、压刃器、割刀片、左推锯齿、右推锯齿和传动连杆等组成,护刃器数量共配备 26 个,类型为 II 型双指式,尖顶部有护舌,切割时构成对紫云英茎秆的双支撑,割刀片类型选择标准 II 型,刀片厚度为 2~3 mm,每厘米刀刃长度上有 6~7 个齿^[15]。

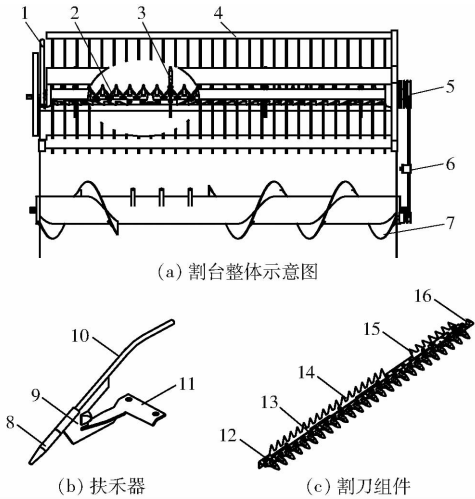


图 2 防落荚柔性扶禾割台整体及关键部件示意图

Fig.2 Schematics of flexible anti pod-dropping seedling-lifting header and its key parts

1. 分禾器 2. 割刀组件 3. 扶禾器 4. 拨禾轮 5. 带轮 6. 张紧轮 7. 喂入螺旋输送机 8. 起草杆头 9. 弹杆连接板 10. 弹杆 11. 安装板 12. 护刃器 13. 割刀片 14. 左推锯齿 15. 右推锯齿 16. 传动连杆

3 纵向轴流杆齿式脱粒装置

为了加强脱粒装置脱粒性能,设计纵向轴流杆齿滚筒式脱粒装置,主要由凹板筛、前端盖、喂入端、安装管、脱粒杆齿、辐盘、主轴、后端盖、顶盖、导流板构成,装置示意图如图 3 所示。脱粒滚筒分为喂入段、脱粒段和排草段,脱粒段总长度为 1 550 mm,喂入段长度设计约为脱粒段总长度的 1/5^[16],即 315 mm,排草段长度为 148 mm,滚筒上方的顶盖与凹板筛组成圆筒形的脱粒室,顶盖内壁装有螺旋线导流板,紫云英茎秆在脱粒杆齿和导流板共同作用下沿轴向向排草段移动。滚筒上钉齿数按脱粒装置的生产率来确定^[17],即

$$z \geq (1 - \beta) q / (0.6 q_d) \tag{1}$$

式中 z ——滚筒上杆齿数,个

q ——脱粒装置喂入量, 5 kg/s

β ——喂入物料中作物荚果所占质量比例, 紫云英黑荚期收获取 0.4

q_d ——每个钉齿的脱粒能力, 联合收获机取 0.025 kg/s

代入公式(1)得: 滚筒上钉齿数 $z \geq 200$ 。为提高紫云英种子筛下脱出率, 沿滚筒圆周方向相间安装杆齿间距不同的齿排 C1 和齿排 C2, 具体参数设计如下: 齿排 C1 齿距 d_1 为 30 mm, 齿排 C2 齿距 d_2 为 60 mm, 杆齿工作高度 l 为 67 mm, 杆齿直径 d 为 10 mm。经排列计算, 在保证脱粒滚筒可靠工作状态下, 齿排 C1 杆齿数为 53, 齿排 C2 杆齿数为 27, 滚筒上杆齿总数为 240 个, 满足紫云英脱粒装置的生产率要求。

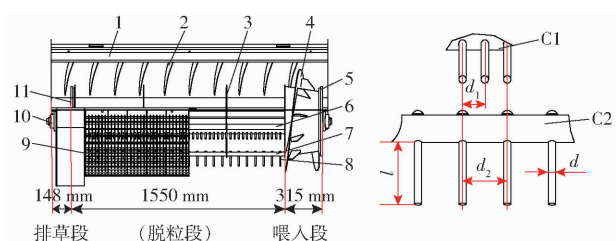


图3 纵轴流杆齿式脱粒滚筒装置示意图

Fig.3 Schematic of longitudinal rod teeth type threshing device

1. 顶盖 2. 导流板 3. 辐盘 4. 喂入段螺旋输送机 5. 前端盖
6. 主轴 7. 安装管 8. 杆齿 9. 凹板筛 10. 轴承座 11. 后端盖

4 风筛式分层控杂清选装置

4.1 结构及清选原理

风筛式分层控杂清选装置结构示意图如图4所示。清选风机采用三风道离心风机, 在风机的出风口安装两个可调倾角的气流隔板, 形成了上、中、下3个风道, 分别记作风道A、B、C, 可满足振动筛前、中、后部的清选需求, 其清选原理为: 从脱粒凹板筛格漏下的种子、碎茎秆和杂质等脱出物经抖动板连续地输送到清选筛面上, 上出风口的气流直接吹入抖动板和拨指筛面之间, 以较大的气流速度将抖动板抖落物料中的轻杂余吹向后方或机外; 中出风口的气流吹向筛子中部, 鱼鳞筛具有较好的导料能力, 配合筛体振动能够对落在筛面上的物料进行分层控杂, 中筛后端的锯齿筛面具有单向输送性, 能将杂质逐级输送到振动清选筛尾部排杂口, 在下出风口气流作用下, 能顺畅的将茎秆等杂质吹出机外。物料落在上筛面之后, 紫云英籽粒顺着筛片间隙下落, 透过圆孔筛落入籽粒水平螺旋输送机, 籽粒螺旋输送机将其直接输送至种仓。小部分未脱净物料未被吹出机外并透过后段筛片落入杂余水平螺旋

输送机中, 杂余螺旋输送机将这部分物料运送回脱粒装置进行二次脱粒和清选, 从而减少籽粒的含杂率。

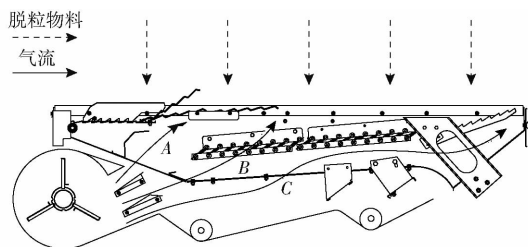


图4 风筛式分层控杂清选装置结构示意图

Fig.4 Schematic of air-sieve type layered impurity-controlled cleaning device

4.2 三风道离心风机流场分析

4.2.1 网格划分

在现有水稻、小麦等联合收获机的风筛式清选装置中, 风机大多为单风道离心风机, 在结构和运行参数确定的情况下, 单风道离心风机产生的气流速度和方向难以满足物料筛分过程中整个筛面对气流速度和方向的不同需求^[18-19]。参考国内外多风道离心风机结构特点, 在紫云英种子联合收获机清选装置上配置三风道离心风机, 离心风机叶轮直径为 385 mm, 叶片数目为 3 片, 为验证设计的三风道离心风机内部气流场大小、分布能否满足紫云英籽粒的清选需求, 运用 Inventor 软件建立了多风道离心风机的全流道模型, 采用 ICFM-CFD 划分多风道离心风机网格, 考虑流道模型体积较大及其内部流动的复杂性, 对流道模型进行四面体非结构网格划分, 风机进口与叶轮接触区及叶轮与蜗壳接触区分别设置为交界面, 并对交界面处的网格进行加密^[20-21], 网格划分完成后的离心风机模型网格总数为 3 617 588。

4.2.2 求解方法及风机内部数值模拟

将网格模型导入 Fluent 15.0 软件中, 根据风机的作业环境, 不考虑温度、湿度等环境对气体的影响, 同时忽略气体分子间黏性力作用, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值模拟, 利用 SIMPLEC 压力-速度耦合算法对风机内部气流速度和压力进行耦合计算, 将风机的蜗壳设置为静态壁面, 离心风机叶轮处的网格区域设定为 MRF 旋转区域, 参考已有离心风机结构和运动参数设计, 设置转速为 1 080 r/min, 叶轮直径为 385 mm, 离心风机 2 个进风口的边界条件设置为压力进口, 并给定压力 220 Pa, 模型 3 个出口边界设置为压力出口, 并给定压力 0 Pa, 收敛残差设置为 0.001, 迭代步数设置为 500 步^[22]。

三风道离心风机内部气流速度矢量图如图5所示, 由图中可知, 上、下出风口风速高而中间出风口

风速略低,上出风口风速(均不考虑摩擦阻力)范围在 7.33 ~ 29.3 m/s 之间,出风口风量约为 0.55 kg/s,中间出风口风速在 5.14 ~ 24.9 m/s 之间,风量约为 0.42 kg/s,下出风口风速在 6.6 ~ 25.6 m/s 之间,风量约为 0.57 kg/s。

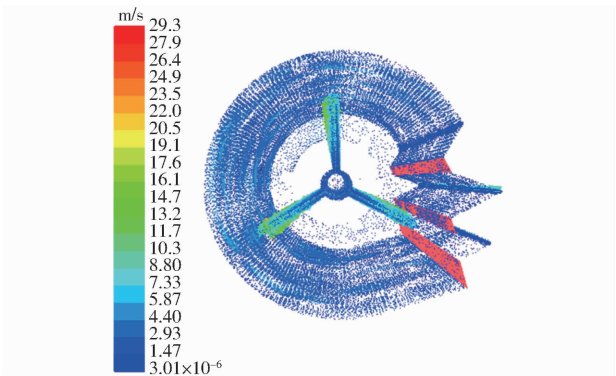


图 5 三风道离心风机内部气流速度模拟结果

Fig.5 Internal air velocity simulation results of three-channel centrifugal fan

4.2.3 风机气流场试验验证

采用布点法^[23],根据三风道离心风机结构参数,以离心风机蜗壳区上最低位置处且距离左进风口 50 mm 的点为原点,选取输种螺旋输送机运种方向为 X 轴,筛面垂直方向为 Y 轴,气流速度测量现场情况和测量点布置情况如图 6 所示。

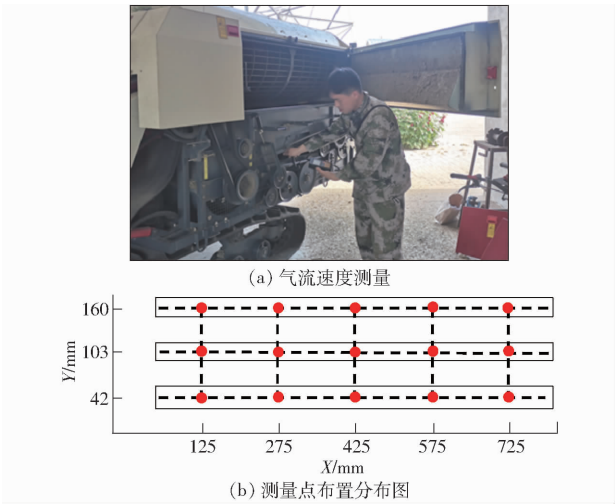


图 6 气流速度测量现场及测量点分布

Fig.6 Air velocity measurement site and measurement points distribution

其中 Y 方向 42、103、160 mm 分别对应 3 个风道中心测量面,每个测量面沿 X 方向 125、275、425、575、725 mm 处分别布置 5 个测点,采用 AR856 型数字风速风量计测得各测量点气流速度如表 2 所示,对比数值模拟和气流场实测试验结果可知,各出风口气流速度分布规律一致,其中上、下出风口处横向气流比较均匀,有利于脱出物的预清选和尾杂的排出,中间出风口呈现中间气流速度高、两侧气流速度

低的规律,可利于在脱出混合物下落过程中将其吹散分层,但气流速度数值略有差异,实测气流速度较仿真结果偏低,产生差异的原因在于数值模拟过程是在不考虑气体压缩、气体粘性力以及假设整个流道密闭的条件下完成的,该状态下气流速度衰减比现场试验小,而实际工作中,清选气流速度会因物料群的存在而有所衰减^[24]。

表 2 测量点气流速度

Tab.2 Airflow velocity of measuring points m/s

Y/mm	X/mm				
	125	275	425	575	725
42	9.7	11.1	10.7	8.8	9.2
103	6.2	5.7	10.1	6.6	6.4
160	9.2	8.6	10.3	7.7	8.1

4.3 分层控杂清选筛设计

收获期紫云英脱出物中茎秆含量较多,杂余以颖壳、碎秆和杂草种子为主,按照 GB/T 5982—2005,对紫云英根部 5 cm 长度以上茎秆样本进行脱粒试验,得出脱出物中籽粒质量占比 75.57%,杂余占比 24.43%。设计分层控杂筛结构如图 7 所示,主要由上抖动板、下抖动板、导风板、前拨指筛、后拨指筛、鱼鳞筛、锯齿筛和圆孔筛等组成。上抖动板采用双隔板结构设计并与清选筛架固定在一起,位于筛架最上方,随筛架一起运动;前后拨指筛将筛下脱出物中的长秸秆和残穗等拨离出来;鱼鳞筛设计为平行四连杆联动结构,筛片开度 γ 在 35 ~ 45 m 调节,能够引导气流吹走颖壳,排走残穗、碎秸秆等,从而保证紫云英籽粒高效透筛;圆孔筛能够将紫云英籽粒从鱼鳞筛面落下的籽粒、细碎秸秆等混合物中进一步分离出;安装在尾部的锯齿筛能够将风机无法吹走的谷粒、长秸秆和碎秆等逐级或多级向后移动排出机外。分层控杂清选筛参数如表 3 所示。

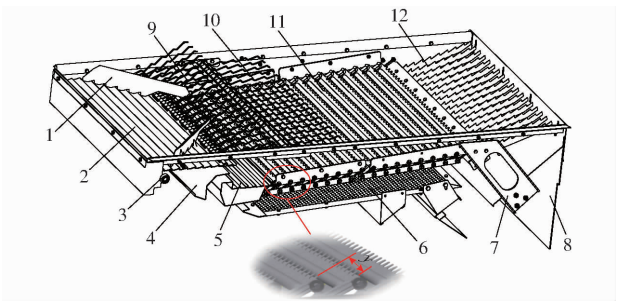


图 7 分层控杂清选筛结构及鱼鳞筛筛片开度示意图

Fig.7 Schematic of layered impurity-controlled cleaning sieve structure and scale sieve's opening

- 1.挡板 2.上抖动板 3.轴承 4.导风板 5.下抖动板 6.圆孔筛 7.连接板 8.橡胶板 9.前拨指筛 10.后拨指筛 11.鱼鳞筛 12.锯齿筛

表 3 分层控杂清选筛结构参数

Tab.3 Structural parameters of layered impurity-controlled cleaning sieve

参数	数值
上抖动板长度/mm	775
上抖动板宽度/mm	334
上抖动板阶梯间距×阶梯高/(mm×mm)	28×6
前拨指筛长度/mm	740
前拨指筛宽度/mm	225
后拨指筛长度/mm	680
后拨指筛宽度/mm	224
下抖动板长度/mm	775
下抖动板宽度/mm	203
下抖动板阶梯间距×阶梯高/(mm×mm)	30×4.5
鱼鳞筛长度/mm	754
鱼鳞筛宽度/mm	715
锯齿筛长度/mm	640
锯齿筛宽度/mm	328
圆孔筛长度/mm	756
圆孔筛宽度/mm	756
圆孔筛筛孔直径/mm	6

5 田间试验

5.1 试验条件

试验地点为芜湖市南陵县青弋江镇(图 8),试验时间为 2020 年 5 月 11—13 日,试验用稻田绿肥紫云英品种为皖紫 4 号,产量为 608.95 kg/hm²,紫云英植株茎秆平均株高为 33.08 cm,平均底荚高度为 11.85 cm,平均黑荚率为 80.68%,自然落粒损失为 3.31 g/m²,种子千粒质量为 3.3~3.5 g,籽粒平均含水率为 10.2%,从不同植株上取 10 株紫云英果荚测量长、宽,取平均值分别为 25.3 mm 和 4.2 mm。果荚内籽粒呈肾形,均长约 3 mm,紫云英植株长势良好。



图 8 田间试验

Fig.8 Field experiment

5.2 试验指标

目前尚无紫云英种子联合收获机作业的评价标准,为考察紫云英种子联合收获机作业质量,参照 JB/T 11912—2014、GB/T 5262—2008 等豆科、十字花科等绿肥籽粒收获标准,以籽粒损失率、破损率、含杂率作为紫云英种子联合收获机作业性能的评价

依据,其中损失率为收集取样区域内所有掉落或随茎秆排出机外的籽粒和果荚,得到全部的籽粒,并去除自然落粒;按收获的紫云英籽粒质量和对应的收获面积,得到每平方米紫云英籽粒收获量;杂质包括长短茎秆、果荚、草籽、砂石等;破碎籽粒为子叶残缺(包括整半粒)、横断、破裂的颗粒。具体计算方法为

$$Y_1 = \frac{M_{hl}}{M_{ha} + M_{hl}} \times 100\%$$

$$Y_2 = \frac{M_{ei} - M_{ps}}{M_{ei}} \times 100\%$$

$$Y_3 = \frac{M_{ss} - M_{ps}}{M_{ss}} \times 100\%$$

式中 Y_1 ——损失率,%
 Y_2 ——破损率,%
 Y_3 ——含杂率,%
 M_{hl} ——收获每平方米紫云英损失量,g/m²
 M_{ha} ——每平方米紫云英籽粒收获量,g/m²
 M_{ei} ——清除杂质后样品质量,g
 M_{ps} ——清除杂质和破损籽粒后样品质量,g
 M_{ss} ——样品质量,g

5.3 试验方案

根据前期文献检索^[25-26]、田间试验研究和收获经验,以籽粒损失率、破损率、含杂率作为稻田绿肥紫云英种子联合收获机作业性能的评价依据,选定机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速、鱼鳞筛开度 4 个因素作为试验变量开展试验研究。采用 Box-Behnken 中心组合设计理论,开展四因素三水平二次回归响应面试验,共 29 组。每组试验行程为 30 m,待收获机运行稳定后取样,每组试验取样 3 次,求平均值后得到每组试验的籽粒损失率、破损率及含杂率。

试验因素编码如表 4,结合紫云英收获期的生物学特性与收获机脱粒、清选参数之间的关系以及机具设计参数等确定各因素取值范围,参考小麦、大豆等作物脱粒滚筒转速,选取脱粒滚筒转速中间值为 675 r/min,脱粒滚筒最低转速 550 r/min,最高转速为 800 r/min;紫云英脱出物主要有籽粒、长茎秆、

表 4 试验因素编码

Tab.4 Experiments factors and codes

因素	编码		
	-1	0	1
机具前进速度/(km·h ⁻¹)	3	4	5
脱粒滚筒转速/(r·min ⁻¹)	550	675	800
清选风机转速/(r·min ⁻¹)	900	1 080	1 260
鱼鳞筛开度/mm	35	40	45

短茎秆及颖壳等,根据前期离心风机仿真模拟结果,同时参照粮油、牧草等种子悬浮速度测试方法和标准^[27-28],相应取风机最低转速为 900 r/min,最高转速为 1 260 r/min,并确定中间值 1 080 r/min;根据紫云英品种果荚、籽粒等外形尺寸,设计的鱼鳞筛开度范围为 35 ~ 45 mm,取中间值 40 mm,并相应取极限值为高低水平值。

5.4 试验结果与分析

应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行试验设计、数据处理与统计分析,根据 Box - Behnken 设计方法进行四因素三水平响应面试验,选择 29 个点,包括 24 个分析因子和 5 个零点估计误差,试验设计方案及结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值,试验结果方差分析如表 6 所示。

表 5 试验设计方案与结果

Tab.5 Experiment design and response values

试验 序号	因素				$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
	X_1	X_2	X_3	X_4			
1	-1	0	1	0	10.32	1.35	1.13
2	0	0	-1	1	1.23	1.87	2.93
3	0	1	1	0	12.20	3.01	0.89
4	0	1	-1	0	1.15	3.54	1.58
5	0	0	0	0	4.16	1.72	1.36
6	0	0	1	1	16.47	1.25	2.17
7	1	0	0	1	8.25	1.52	2.45
8	0	-1	1	0	10.69	0.13	1.51
9	1	1	0	0	6.93	2.78	1.32
10	1	0	0	-1	1.95	1.88	1.03
11	0	-1	-1	0	3.22	0.37	1.83
12	0	0	0	0	5.04	2.09	1.39
13	0	-1	0	1	7.36	0.26	2.65
14	0	0	0	0	4.35	1.66	1.28
15	1	0	-1	0	4.26	1.85	2.35
16	-1	0	-1	0	0.96	1.77	1.76
17	1	0	1	0	11.78	1.72	1.38
18	0	1	0	-1	2.13	2.93	0.65
19	0	-1	0	-1	3.46	0.32	0.73
20	0	0	1	-1	8.91	1.5	0.65
21	1	-1	0	0	3.88	0.29	1.57
22	-1	-1	0	0	3.57	0.19	1.38
23	0	0	0	0	4.74	1.74	1.33
24	-1	0	0	1	8.38	1.38	1.97
25	-1	0	0	-1	2.62	1.71	0.43
26	0	0	0	0	4.33	1.51	1.54
27	-1	1	0	0	5.49	2.52	0.93
28	0	0	-1	-1	0.43	1.96	0.78
29	0	1	0	1	9.30	2.37	1.87

5.4.1 模型建立与显著性检验

针对表 5 的样本数据,建立回归模型

$$Y_1 = 4.52 + 0.48X_1 + 0.42X_2 + 4.93X_3 + 2.62X_4 + 0.28X_1X_2 - 0.46X_1X_3 + 0.13X_1X_4 + 0.89X_2X_3 + 0.82X_2X_4 + 1.69X_3X_4 + 0.25X_1^2 + 0.37X_2^2 + 1.90X_3^2 + 0.51X_4^2 \tag{5}$$

$$Y_2 = 1.74 + 0.093X_1 + 1.30X_2 - 0.20X_3 - 0.14X_4 + 0.040X_1X_2 + 0.072X_1X_3 - 0.0075X_1X_4 - 0.073X_2X_3 - 0.13X_2X_4 - 0.04X_3X_4 - 0.1X_1^2 - 0.14X_2^2 + 0.065X_3^2 - 0.11X_4^2 \tag{6}$$

$$Y_3 = 1.38 + 0.21X_1 - 0.20X_2 - 0.29X_3 + 0.81X_4 + 0.05X_1X_2 - 0.085X_1X_3 - 0.03X_1X_4 - 0.093X_2X_3 - 0.17X_2X_4 - 0.16X_3X_4 + 0.025X_1^2 - 0.074X_2^2 + 0.18X_3^2 + 0.10X_4^2 \tag{7}$$

由表 6 数据分析可知,籽粒损失率 Y_1 、破损率 Y_2 、含杂率 Y_3 的响应面模型 $P < 0.000\ 1$,回归方程中各变量对指标影响的显著性由 F 检验判定,在同样误差程度下,试验数据越多,计算出的离差平方和就越大,因此仅用平方和来反映试验值间差异大小还是不够的,还需要考虑试验数据数对平方和的影响,为此需考虑自由度,即样本中可以自由变动的独立不相关的变量个数。从各因素 F 值可以看出,清选风机转速和鱼鳞筛开度对籽粒损失率有显著影响,各因素影响主次顺序为:清选风机转速、鱼鳞筛开度、机具前进速度、脱粒滚筒转速。脱粒滚筒转速和清选风机转速对破损率有显著影响,且影响主次顺序为:脱粒滚筒转速、清选风机转速、鱼鳞筛开度、机具前进速度。机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速和鱼鳞筛开度对含杂率有显著影响,且影响主次顺序为:鱼鳞筛开度、清选风机转速、机具前进速度、脱粒滚筒转速。籽粒损失率、破损率和含杂率各模型的决定系数 R^2 分别为 0.960 5、0.972 3 和 0.975 3,说明该模型误差较小,可以用此模型对紫云英绿肥种子联合收获机的籽粒损失率、破损率和含杂率进行分析和预测。

5.4.2 交互因素对各收获作业指标影响效应分析

根据建立的回归模型,分析机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速和鱼鳞筛开度对稻田绿肥紫云英种子收获机各作业指标影响及各因素间相互关系^[29]。

紫云英籽粒损失率响应曲面如图 9 所示,图 9a 中脱粒滚筒转速和鱼鳞筛开度均为零水平,固定清选风机转速,机具前进速度的增大对籽粒损失率的影响不大,固定机具前进速度,籽粒损失率随清选风机转速的增加而逐渐增高;图 9b 中机具前进速度和清选风机转速均为零水平,固定脱粒滚筒转速,籽粒损失率随鱼鳞筛开度的增大而变高,固定鱼鳞筛开

表 6 回归模型方差分析
Tab. 6 Variance analysis of regression model

变异来源	Y ₁				Y ₂				Y ₃			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	420. 99	14	24. 35	<0. 000 1	21. 47	14	35. 16	<0. 000 1	10. 63	14	39. 44	<0. 000 1
X ₁	2. 72	1	2. 20	0. 160 2	0. 10	1	2. 40	0. 143 9	0. 52	1	27. 05	0. 000 1
X ₂	2. 10	1	1. 70	0. 213 3	20. 25	1	464. 38	<0. 000 1	0. 49	1	25. 56	0. 000 2
X ₃	291. 26	1	235. 84	<0. 000 1	0. 48	1	11. 01	0. 005 1	1. 02	1	53. 03	<0. 000 1
X ₄	82. 64	1	66. 91	<0. 000 1	0. 23	1	5. 20	0. 038 7	7. 95	1	413. 18	<0. 000 1
X ₁ X ₂	0. 32	1	0. 26	0. 619 1	6. 40 × 10 ⁻³	1	0. 15	0. 707 4	1. 0 × 10 ⁻²	1	0. 52	0. 482 9
X ₁ X ₃	0. 85	1	0. 69	0. 421 6	0. 021	1	0. 48	0. 498 9	0. 029	1	1. 50	0. 240 7
X ₁ X ₄	0. 073	1	0. 059	0. 811 6	2. 25 × 10 ⁻⁴	1	0. 005 2	0. 9438	3. 60 × 10 ⁻³	1	0. 19	0. 672 0
X ₂ X ₃	3. 20	1	2. 59	0. 129 6	0. 021	1	0. 48	0. 498 9	0. 034	1	1. 78	0. 203 7
X ₂ X ₄	2. 67	1	2. 16	0. 163 3	0. 063	1	1. 43	0. 251 2	0. 12	1	6. 36	0. 024 4
X ₃ X ₄	11. 42	1	9. 25	0. 008 8	6. 40 × 10 ⁻³	1	0. 15	0. 707 4	0. 099	1	5. 15	0. 039 5
X ₁ ²	0. 40	1	0. 32	0. 579 4	0. 071	1	1. 64	0. 221 5	4. 054 × 10 ⁻³	1	0. 21	0. 653 4
X ₂ ²	0. 89	1	0. 72	0. 409 1	0. 12	1	2. 76	0. 119 0	0. 035	1	1. 83	0. 197 3
X ₃ ²	23. 45	1	18. 99	0. 000 7	0. 027	1	0. 63	0. 440 6	0. 22	1	11. 22	0. 004 8
X ₄ ²	1. 69	1	1. 37	0. 261 9	0. 073	1	1. 68	0. 216 4	0. 066	1	3. 45	0. 084 2
残差	17. 29	14			0. 61	14			0. 27	14		
失拟	16. 78	10	13. 07	0. 012 2	0. 43	10	0. 94	0. 576 1	0. 23	10	2. 39	0. 207 7
纯误差	0. 51	4			0. 18	4			0. 039	4	9. 65 × 10 ⁻³	
合计	438. 28	28			22. 08	28			10. 90	28		

度,脱粒滚筒转速对籽粒损失率的影响较小。原因分析:当清选风机转速不断增加且鱼鳞筛开度不断增加时,单位时间内通过鱼鳞筛筛面的风量越大,筛面上被风吹走的籽粒也就越多,同时也会将准备通过清选筛的籽粒吹出机外,导致籽粒损失率增大。

紫云英籽粒破损率响应曲面如图 10 所示,图 10a 中机具前进速度和清选风机转速均为零水平,固定鱼鳞筛开度,脱粒滚筒转速越快破损率越高;固定脱粒滚筒转速,随着鱼鳞筛开度的增大籽粒破损率变化不大。图 10b 中脱粒滚筒转速和鱼鳞筛开度均为零水平,固定机具前进速度,破损率随清选风机转速的增大略有减小;固定清选风机转速,机具前进速度对籽粒破损率的影响较小。原因分析:脱粒滚筒转速越快,脱粒元件对谷物的打击力度越大,籽粒破碎的可能性越高;当清选风机转速逐渐增大时,筛面上杂质被吹走的同时,一部分破损籽粒也被风机吹走,按破损率计算公式可得破损率也相应减小。

紫云英籽粒含杂率响应曲面如图 11 所示,图 11a 中脱粒滚筒转速和清选风机转速均为零水平,固定机具前进速度,鱼鳞筛开度越大籽粒含杂率高;固定鱼鳞筛开度,机具前进速度增大时籽粒含杂率也略微增大;图 11b 中鱼鳞筛开度和机具前进速度均为零水平,固定脱粒滚筒转速,随着清选风机转速的增大,籽粒含杂率降低;固定清选风机转速,脱

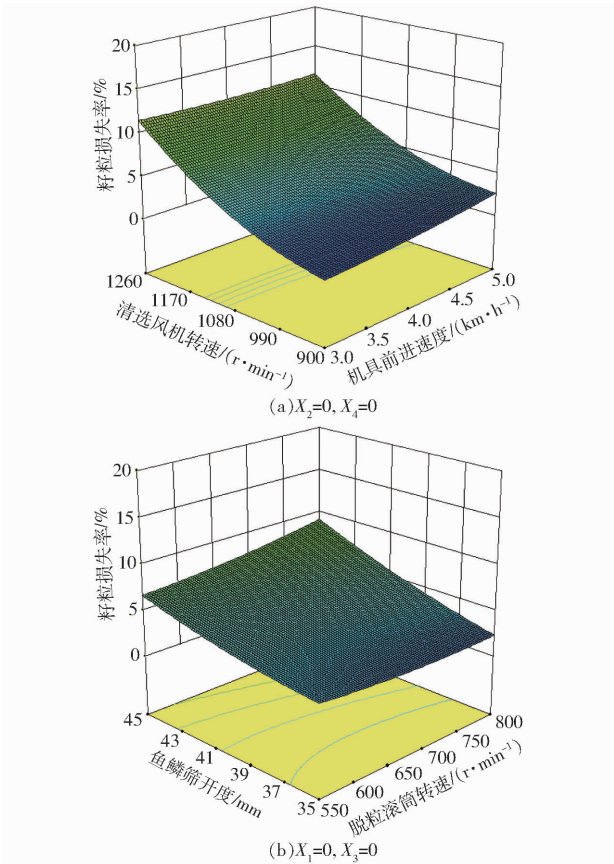


图 9 籽粒损失率响应曲面
Fig. 9 Response surfaces of seed loss rate

粒滚筒转速越大,籽粒含杂率越小。原因分析:鱼鳞筛开度增大时,大部分的细短茎秆从鱼鳞筛片的间

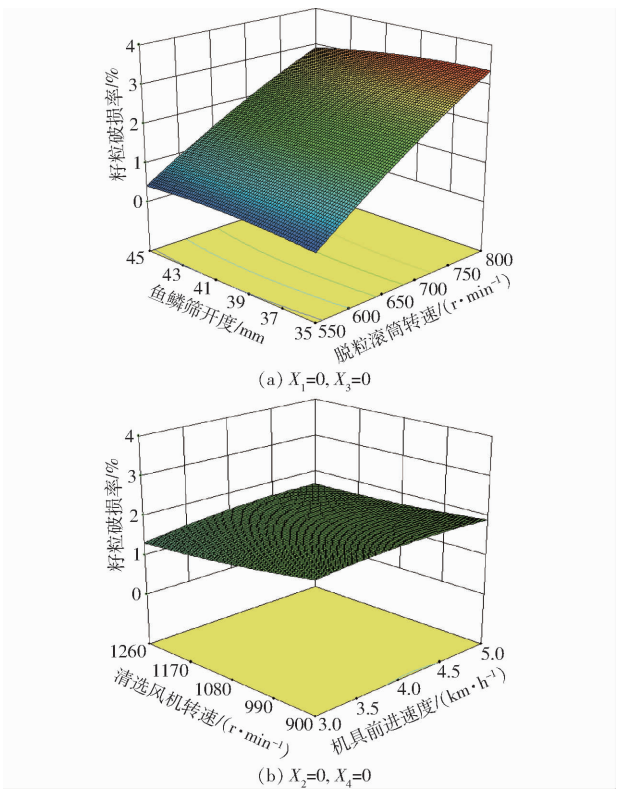


图 10 籽粒破损率响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of seed breakage rate

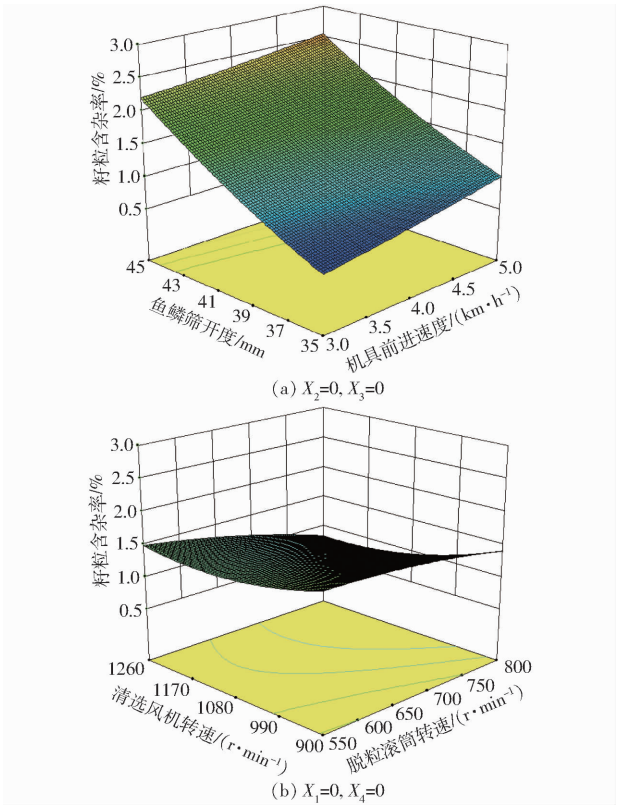


图 11 籽粒含杂率响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of seed impurity rate

隙中落入圆孔筛,进入圆孔筛面的茎秆变多,筛分效率降低,籽粒含杂率增加;清选风机转速越低,多余的茎秆还来不及被风机吹走就从鱼鳞筛片间落下,

导致清选分离不彻底,籽粒含杂率变大。

5.5 参数优化与验证

5.5.1 影响播种质量因素的参数优化

以紫云英籽粒损失率最低、破损率最低、含杂率最低的收获要求为优化目标,开展稻田绿肥紫云英种子联合收获机主要作业参数优化研究。运用 Design-Expert 数据分析软件对建立的 3 个指标的全因子二次回归模型最优化求解,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \\ -1 \leq X_4 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

优化后得到的各因素最优参数组合为:机具前进速度为 3 km/h,脱粒滚筒转速为 553.45 r/min,清选风机转速为 991.77 r/min,鱼鳞筛开度 35 mm。此时模型预测的籽粒损失率为 2.40%,破损率为 0.19%,含杂率为 0.48%。

5.5.2 验证试验

为验证以上模型准确性,2020 年 5 月 17—18 日,在南陵县青弋江镇开展验证试验,试验田紫云英长势与试验方法同前,考虑到试验参数设置的可行性,将优化参数调整为机具前进速度 3 km/h,脱粒滚筒转速为 550 r/min,清选风机转速为 990 r/min,鱼鳞筛开度 35 mm,进行 3 次试验,取平均值为试验验证值。根据 JB/T 11912—2014,要求损失率和破损率低于 5%,含杂率小于 3%,而试验测得的籽粒损失率为 2.35%,破损率为 0.22%,含杂率为 0.51%,均低于该标准,对比分析可知, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 试验值与优化值很接近,该研究结果可为紫云英绿肥种子联合收获机结构改进和作业参数控制提供参考。

6 结论

(1) 设计了稻田绿肥紫云英专用种子联合收获机,阐述了其结构组成和工作原理,并对防落荚柔性扶禾割台、纵向杆齿式脱粒装置、风筛式分层控杂清选装置等关键部件进行了参数设计和仿真分析,可有效解决紫云英规模化种植地区种子高效收获装备短缺的问题。

(2) 田间试验方法结合 Box - Behnken 中心组合设计理论,探索紫云英绿肥种子联合收获机主要作业参数对籽粒损失率、破碎率、含杂率的影响规

律,构建了紫云英绿肥种子联合收获机损失率、破碎率、含杂率与机具前进速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速、鱼鳞筛开度的数学模型,并采用响应面分析法对试验结果进行分析,确定了影响因素的重要顺序。

(3)建立了稻田绿肥紫云英种子联合收获机作业参数优化模型,得到在损失率、破碎率、含杂率最

小时最佳参数组合:机具前进速度 3 km/h,脱粒滚筒转速为 550 r/min,清选风机转速为 990 r/min,鱼鳞筛开度 35 mm。在此参数条件下,进行了田间试验检测,此时籽粒损失率为 2.35%,破损率为 0.22%,含杂率为 0.51%,优于相关标准规定的损失率和破碎率低于 5%,含杂率小于 3%。

参 考 文 献

- [1] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报,2017,33(23): 157-163.
ZHOU Guopeng, XIE Zhijian, CAO Weidong, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 157-163. (in Chinese)
- [2] 谢志坚,周春火,贺亚琴,等. 21 世纪我国稻区种植紫云英的研究现状及展望[J]. 草业学报,2018,27(8):185-196.
XIE Zhijian, ZHOU Chunhuo, HE Yaqin, et al. A review of *Astragalus sinicus* in paddy fields in south China since 2000s[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(8): 185-196. (in Chinese)
- [3] 兰延,黄国勤,杨滨娟,等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报,2014,30(13):146-152.
LAN Yan, HUANG Guoqin, YANG Binjuan, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 146-152. (in Chinese)
- [4] 游兆延,吴惠昌,彭宝良,等. 机收水稻留茬地紫云英双圆盘开沟撒播组合作业机设计[J]. 农业工程学报,2019,35(6): 18-28.
YOU Zhaoyan, WU Huichang, PENG Baoliang, et al. Design and experiment of sowing system for harvest ditch and stalk-disposing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 18-28. (in Chinese)
- [5] 游兆延,张冲,高学梅,等. 紫云英绿肥盛花期埋切翻压组合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):78-86.
YOU Zhaoyan, ZHANG Chong, GAO Xuemei, et al. Design and experiment of incisal-burying and ploughing combined machine for astragalus smicus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(3):78-86. (in Chinese)
- [6] SAMARAJEEWA K, TAKATSUGU H, SHINYA O. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a cover crop on weed control, growth and yield of wheat under different tillage systems[J]. Plant Production Science, 2005, 8(1):79-85.
- [7] 廖育林,鲁艳红,聂军,等. 水稻联合收割机收获紫云英种子的应用效果研究[J]. 湖南农业科学,2014(18):12-14.
LIAO Yulin, LU Yanhong, NIE Jun, et al. Effects of rice combine harvester application to harvesting Chinese milk vetch seed [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(18): 12-14. (in Chinese)
- [8] 游兆延,高学梅,吴惠昌,等. 紫云英种子收获期机收损失率测算[J]. 种子,2019, 38(7):140-143.
YOU Zhaoyan, GAO Xuemei, WU Huichang, et al. Calculation of the loss rate of machine-harvested during Chinese milk vetch seed harvesting[J]. Seed, 2019,38(7): 140-143. (in Chinese)
- [9] 王金双,熊永森,徐中伟,等. 纵轴流联合收获机关键部件改进设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):25-31.
WANG Jinshuang, XIONG Yongsen, XU Zhongwei, et al. Improved design and test of key components for longitudinal axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(10):25-31. (in Chinese)
- [10] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):89-99.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):89-99. (in Chinese)
- [11] 梁苏宁,金诚谦,张奋飞,等. 4LZG-3.0 型谷子联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):31-38.
LIANG Suning, JIN Chengqian, ZHANG Fenfei, et al. Design and experiment of 4LZG-3.0 millet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(12):31-38. (in Chinese)
- [12] 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):8-15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(24):8-15. (in Chinese)
- [13] 金诚谦,郭飞扬,徐金山,等. 大豆联合收获机作业参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(13):10-22.
JIN Chengqian, GUO Feiyang, XU Jinshan, et al. Optimization of working parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(13):10-22. (in Chinese)
- [14] 史瑞杰,戴飞,刘小龙,等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(5):59-67.
SHI Ruijie, DAI Fei, LIU Xiaolong, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountaineous flax combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(5):59-67. (in Chinese)
- [15] 曹明珠,吴惠昌,高学梅,等. 一种紫云英联合收获机的起草装置:ZL202010639348.0[P]. 2020-07-06.
- [16] 陈霓,熊永森,陈德俊,等. 联合收获机同轴差速轴流脱粒滚筒设计和试验[J]. 农业机械学报,2010,41(10):67-71.
CHEN Ni, XIONG Yongsen, CHEN Dejun, et al. Design and test on the coaxial differential-speed axial-flow threshing rotor of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):67-71. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [18] 徐立章,于丽娟,李耀明,等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(10):78-86.
XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):78-86. (in Chinese)

unmanned helicopters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105961.

[11] 文晟, 韩杰, 兰玉彬, 等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127–137. WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of singlerotor plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127–137. (in Chinese)

[12] PARRA H G, MORALES V D, GARCIA E E. Multiphase CFD simulation of photogrammetry 3D model for UAV crop spraying [C]//World Conference on Information Systems and Technologies, Springer, Cham., 2019: 812–822.

[13] YANG S H, TANG Q, ZHENG Y J, et al. Model migration for CFD and verification of a six-rotor UAV downwash[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 10–18.

[14] WU Y L, QI L J, ZHANG H, et al. Design of UAV downwash airflow field detection system based on strain effect principle [J]. Sensors, 2019, 19(11): 2630.

[15] TANG Q, ZHANG R R, DING C C, et al. Application of ultrasonic anemometer array to field measurements of the downwash flow of an agricultural unmanned helicopter[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(5): 1219–1230.

[16] 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 等. 旋翼无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77–86. LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 77–86. (in Chinese)

[17] 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54–61. WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 54–61. (in Chinese)

[18] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105–113. CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105–113. (in Chinese)

[19] 叶一舟. 高性能硅基 MEMS 热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. YE Yizhou. Investigation on the high-performance silicon-based mems thermal wind sensors [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)

[20] 苏玲. 低功耗 MEMS 热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. SU Ling. Research of low-power MEMS thermal wind sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

(上接第 10 页)

[19] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1–16. XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research process on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1–16. (in Chinese)

[20] 倪长安, 徐云云, 庞奇, 等. 通用型离心风机叶片数量对性能的影响规律[J]. 农业机械, 2009(14): 86–88.

[21] 邵卫, 李意民, 贾利红. 离心风机内部流场模拟[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 47–49. SHAO Wei, LI Yimin, JIA Lihong. Numerical simulation of internal flow in centrifugal fan[J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(7): 47–49. (in Chinese)

[22] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84–92. WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84–92. (in Chinese)

[23] 夏利利, 金玉良, 李耀明, 等. 联合收割机清选室空间气流场的实验研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 188–190. XIA Lili, JIN Yuliang, LI Yaoming, et al. Experimental study of air flow field of air-and-screen cleaning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 188–190. (in Chinese)

[24] 李洋, 徐立章, 周莹, 等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 48–55. LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 48–55. (in Chinese)

[25] 刘鹏, 金诚谦, 刘政, 等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 35–45. LIU Peng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Optimization of field cleaning parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 35–45. (in Chinese)

[26] 吴崇友, 丁卫民, 张敏, 等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 70–76. WU Chongyou, DING Weimin, ZHANG Min, et al. Experiment on threshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 70–76. (in Chinese)

[27] 侯华铭, 崔清亮, 郭玉明, 等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 43–49. HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43–49. (in Chinese)

[28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 牧草种子悬浮速度测定方法: JB/T 7290—2007[S]. 北京: 中国机械工业出版社, 2008.

[29] 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.