

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.06.017

惯性气流式红枣清选系统设计与试验

史高昆^{1,2} 李景彬^{1,2} 丁龙朋^{1,2} 坎 杂^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 现代农业机械兵团重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 清选系统是气吸式红枣收获机的重要组成部分,降低清选含杂率、损失率和破损率是实现红枣收获机械化的关键技术。利用枣、杂惯性和流体力学特性差异,设计了一种惯性气流式红枣清选系统,并对其关键部件及结构参数进行设计和分析。采用 Fluent 软件探明了该清选系统内气流运动形成的“∞”形旋流有利于枣、杂的清选。为获得清选系统最佳工作参数,以气流速度、调节板开度为试验因素,以含杂率、损失率和破损率为评价指标,设计二次正交旋转组合试验。建立试验因素与指标间的回归模型,采用多目标优化算法进行参数优化,确定清选系统最优参数组合:气流速度为 32.0 m/s,调节板开度为 3.4 cm。在该条件下开展验证试验,得到含杂率、损失率和破损率分别为 1.38%、3.37% 和 0.60%,与优化参数相比分别增加了 0.06、0.12、0.03 个百分点。该清选系统满足枣、杂清选作业要求。

关键词: 红枣; 清选; Fluent 仿真; 参数优化

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0167-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Inertia Pneumatic Type Cleaner System of Jujube Fruit

SHI Gaokun^{1,2} LI Jingbin^{1,2} DING Longpeng^{1,2} KAN Za^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China
2. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi 832003, China)

Abstract: Xinjiang Uygur Autonomous Region is the major region for high quality dried processing jujube fruit. The period of jujube harvesting was usually after the frost to enhance the quality of jujube fruit. At this time, a large number of mature jujube fruit were fallen off from trees naturally. The method of jujube fruit harvester was usually picked-up from the ground. The jujube harvesting machine of air suction type was the most commonly used one among the jujube harvesters. Its working principle was to suck up the jujube fruit through negative pressure airflow. But when sucking jujube fruit, the impurities materials such as jujube leaf, jujube crane were sucking attached. Thus the cleaning device was employed to remove the impurities materials. Traditional cleaning devices would cause some problems such as high impurity, damage, and lost jujube fruit. Inertial airflow cleaning system was designed that utilized the difference between the mechanical properties and fluid properties of jujube fruit and impurity. The cleaning system was mainly composed of the feeding inlet, guide surface, closed-air aspirator, baffle, filtering impurities device etc. Then the structure size of the cleaning system was designed by combining the principle of cleaning and the principle of conservation of fluid flow rate. In addition, the guide surface shape was analyzed through characteristics of material motion trajectory and numerical analysis. Furthermore, Fluent software was used to simulate the flow field track in the clearing system. This can assess the flow field characteristics intuitively and determine whether swirling flow occurred that available for separating impurities with expectations. To analyze the influence regularity of single test factors on the evaluation index, the factors of airflow velocity and baffle opening size values were selected as the test factors. Meanwhile, the impurity rate, loss rate, and damage rate were chosen as evaluation indexes. The single factor tests were employed to determine the parameter interval. The results showed that airflow

收稿日期: 2021-06-24 修回日期: 2021-07-20
基金项目: 兵团区域创新引导计划项目(2021BB003)
作者简介: 史高昆(1989—),男,博士生,主要从事新疆特色林果机械收获装备研究,E-mail: sgk_shz@163.com
通信作者: 坎杂(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: kz-shz@163.com

velocity and baffle opening size values were 32 ~ 38 m/s and - 1 ~ 4 cm, respectively. Moreover, the central combination experimental method of Design-Expert 10.0.3 software was used to analyze the influence of the interaction factors on the evaluation index. After that, the analysis module were used to determine the optimal parameter values. The results showed that the impurity rate, loss rate, and damage rate were 1.32%, 3.25%, and 0.57%, respectively, when the airflow velocity was 32.0 m/s and the baffles opening size was 3.4 cm. Furthermore, the field tests were carried out at the combination of optimal parameters to verify the accuracy of the optimization parameters and the performance of the cleaning system. The verified results showed that the impurity rate, loss rate, and damage rate were 1.38%, 3.37%, 0.60%, respectively, which were increased by 0.06 percentage points, 0.12 percentage points and 0.03 percentage points respectively compared with the optimized parameters. The cleaning system can meet the requirements of jujube mixed cleaning operation and the research result can provide reference for the development of air suction type jujube harvester.

Key words: jujube fruit; cleaning; Fluent simulation; parameters optimization

0 引言

红枣作为新疆特色优势林果^[1-2],是新疆果农重要增收果品。目前,红枣机械化收获方式分为统收和落地红枣捡拾^[3],其中气吸式落地红枣收获机是当前研究热点^[4-5],但作业过程中会附带吸拾枣叶、枣吊等杂质^[6]。如何有效清除机收红枣中的杂质,提升红枣收获品质,是气吸式落地红枣收获机推广应用的关键。

目前,解决枣、杂清选问题的主要方法是在清选系统内安装拨轮^[7]、导向轮^[8]、拦枣栅^[9-10]等阻枣装置,利用枣、杂粒径差异,在阻挡红枣的同时允许杂质通过,以此实现枣、杂清选。但是红枣与阻枣装置碰撞时易造成红枣损伤,并且由于部分红枣与杂质粒径差异不显著,造成杂质被阻挡或者红枣通过阻枣装置,产生含杂率高及红枣损失的问题。利用待选物料各组分离学特性和流体动力学特性差异进行清选的技术,在钙果^[11]、水稻^[12-13]、红木种子^[14]、玉米面^[15]、亚麻籽^[16]等物料中已有成熟应用,其工作原理是:利用待选物料各组分离移过程中由于物料特性不同,产生的路径轨迹差异,实现清选作业,研究表明该技术可显著提升清选性能。当前,红枣收获机械研究尚处于功能实现阶段,关于枣、杂清选,尤其是利用枣、杂力学特性和流体动力学特性进行清选的研究还未见报道。

本文针对气吸式红枣收获机清选性能有待提高的问题,设计一种利用枣、杂惯性和流体特性差异进行清选的惯性气流式红枣清选系统(简称清选系统),对其关键部件进行设计,并开展参数优化及试验验证。

1 清选系统结构与工作原理

1.1 整体结构

气吸式红枣收获机结构如图 1 所示,主要由吸

拾装置、波纹软管、清选系统、离心风机、输送装置等组成。作业时,离心风机运转在进风口处形成的负压气流经清选系统和波纹软管传至吸拾装置,枣、杂经过清选系统分选后,红枣从排枣闭风器排出后由输送装置输送至周转筐,而杂质由排杂闭风器排出落至地面,完成红枣捡拾和清选。

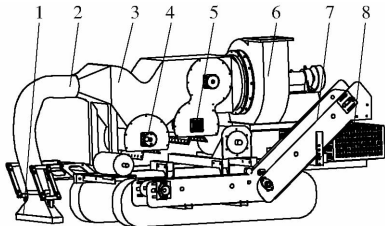


图 1 气吸式红枣收获机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of pneumatic type jujube fruit harvester

1. 吸拾装置 2. 波纹软管 3. 清选系统 4. 排枣闭风器 5. 排杂闭风器 6. 离心风机 7. 输送装置 8. 周转筐

在此过程中清选系统具有清选枣、杂,分离气、杂的作用,是气吸式红枣收获机的关键工作部件。其结构示意图和实物图如图 2、3 所示,由入料口、导流面、调节板、排枣闭风器、排杂闭风器、滤杂装置等组成。调节板处于排枣闭风器和排杂闭风器中间,可根据作业需求上下滑动调节,与导流面共同作用改变清选系统流体运动特性。作业时排枣闭风器和

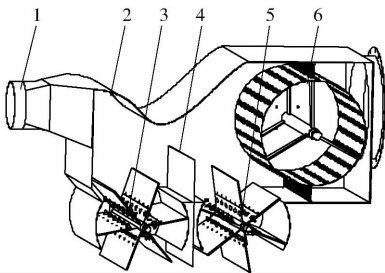


图 2 清选系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cleaning system

1. 入料口 2. 导流面 3. 排枣闭风器 4. 调节板 5. 排杂闭风器 6. 滤杂装置

排杂闭风器可实时排出枣、杂,并能够保持清选系统的气密性。



图 3 清选系统实物图

Fig.3 Physical image of inertia pneumatic type cleaner system

1.2 工作原理

工作时,枣、杂在负压气流作用下进入清选系统入料口后,由于导流面与调节板共同作用,使得清选系统内气流运动轨迹发生改变,枣、杂在流体动力学和惯性差异下,枣、杂运动轨迹产生分层^[17],红枣在调节板前沉降,经排枣闭风器排出;而杂质则越过调节板,被滤杂装置阻挡后经排杂闭风器排出清选系统,实现枣、杂清选工作。

2 关键部件设计

2.1 清选系统结构参数

为利于红枣沉降及提高枣、杂清选效果,清选系统内气流速度应大于杂质而小于红枣的悬浮速度,因此可根据清选系统内气流速度设计清选系统结构参数。在清选系统流场内,气体马赫数远小于 0.1,可认为空气是不可压缩流体^[18]。同时,忽略闭风器与外界气流交换、泄漏等情况,由流量守恒定律知单位时间内通过任意流断面的流量相同且与流速成正比^[19],即

$$\int u_A S_A = \int u_B S_B = Q \tag{1}$$

式中 u_A ——流断面 A 处流速, m/s
 u_B ——流断面 B 处流速, m/s
 S_A ——流断面 A 处面积, m²
 S_B ——流断面 B 处面积, m²
 Q ——流量, m³/s

参考文献[7-10,19-20]及项目组研制的与清选系统配套的气吸式红枣收获机作业参数可知,清选系统入料口的气流速度为 27~45 m/s,经测定杂质悬浮速度为 3.4~5.6 m/s。参照选用的电动履带底盘尺寸(长×宽为 2.00 m×1.20 m)及与清选系统相邻布置的柴油发电机尺寸(长×宽×高为 1.78 m×0.55 m×1.25 m),同时考虑配套的气吸式红枣收获机布局合理、结构紧凑,并且结合式(1)计

算得到清选系统横截面积(0.3 m²)等因素,共同确定清选系统长、宽、高分别为 1.2、0.6、0.5 m。

2.2 导流面曲线方程

对于部分从入料口上部进入清选系统且难以沉降的红枣(相比杂质惯性大,形面阻力小,所以更难以沉降),采用导流面与红枣非完全偏弹性碰撞方式改变其运动轨迹,使其快速沉降。由动量和冲量定理知,红枣与导流面碰撞时速度方向变化越小,红枣所受冲量也越小,越有利于减轻损伤。同时避免红枣越过调节板造成损失,其最小速度变化方向为红枣与导流面碰撞后汇集于调节板顶端的轨迹。由此确定导流面形状为椭圆曲线,同时红枣受重力作用,因此椭圆曲线与水平方向应呈一定倾角。

为便于分析导流面的椭圆曲线方程及倾角,以入料口中心位置为坐标原点 $O(0,0)$,平行于入料口方向为 x 轴,垂直方向为 y 轴,建立坐标系 Oxy 。导流面的椭圆曲线方程示意图如图 4 所示,其中 $F_1(x_{c0}, y_{c0})$ 和 $F_2(x_{cf}, y_{cf})$ 为焦点, $M(x_i, y_i)$ 为椭圆曲线方程上任意一点,建立椭圆面曲线方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} a^2 = \frac{1}{4} [\sqrt{(x_{c0} - x_i)^2 + (y_{c0} - y_i)^2} + \sqrt{(x_{cf} - x_{c0})^2 + (y_{cf} - y_{c0})^2}]^2 \\ b^2 = \frac{1}{4} [(x_{c0} - x_i)^2 + (y_{c0} - y_i)^2 - (x_{cf} - x_{c0})^2 + (y_{cf} - y_{c0})^2] \end{cases} \tag{3}$$

联立式(2)、(3),得

$$\frac{\left[x_i \cos \theta - y_i \sin \theta - \frac{\sqrt{(x_{cf} - x_{c0})^2 + (y_{cf} - y_{c0})^2}}{2} \right]^2}{a^2} + \frac{(y_i \cos \theta + x_i \sin \theta)^2}{b^2} = 1 \tag{4}$$

式中 a ——椭圆曲线方程长半轴长度, m
 b ——椭圆曲线方程短半轴长度, m
 θ ——椭圆曲线方程倾角, (°)

其中 $F_1(x_{c0}, y_{c0})$ 的坐标为 $(0,0)$,入料口与调节板顶点距离在 x 轴方向投影长度设计值为 0.6 m,

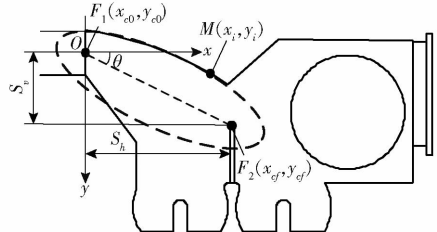


图 4 导流面椭圆曲线示意图

Fig.4 Schematic of elliptic curve of diversion surface

即 $x_{cf} = 0.6\text{ m}$, y_{cf} 的数值由公式 $y_{cf} = 0.6\tan\theta$ 得到。将以上数值代入式(4)并简化得导流面方程为

$$\frac{(4x_i\cos\theta - 4y_i\sin\theta - 0.6)^2}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \sqrt{0.6^2 + (0.6\tan\theta)^2}} + \frac{4(x_i\sin\theta - y_i\cos\theta)}{x_i^2 + y_i^2 - [0.6^2 + (0.6\tan\theta)^2]} = 1 \quad (5)$$

其中椭圆曲线方程的倾角 θ 可根据红枣在水平和垂直面的行进距离 S_h 、 S_v 的比值得出。红枣进入清选系统后的运动为有初速度且受重力作用的类平抛运动。选取单颗红枣 J 进行计算。因其与空气密度差异较大,且与气流相对速度较小^[21-22],忽略除曳力以外的气流作用力。建立红枣 J 运动轨迹切线方向力平衡方程^[23]

$$\begin{cases} a_J = \frac{du_J}{dt} \\ m_J a_J = m_J g \cos\gamma + F_D \end{cases} \quad (6)$$

式中 a_J ——红枣 J 加速度, m/s^2
 u_J ——红枣 J 速度, m/s
 m_J ——红枣 J 质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 t ——时间, s
 γ ——红枣 J 运动方向与水平方向夹角, $(^\circ)$
 F_D ——红枣 J 所受曳力, N
 F_D 计算公式为

$$F_D = \frac{C_D}{8} \rho_{\text{air}} |\cos\gamma u_{\text{air}} - u_J| (\cos\gamma u_{\text{air}} - u_J) \pi d_J^2 \quad (7)$$

其中

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & (1 \leq Re_p) \\ \frac{24(1 + 0.15Re_p^{0.687})}{Re_p} & (1 < Re_p \leq 10^3) \\ 0.44 & (Re_p > 10^3) \end{cases} \quad (8)$$

$$Re_p = \frac{\varepsilon \rho_{\text{air}} |\mu_{\text{air}} - \mu_J| d_J}{\mu_{\text{air}}} \quad (9)$$

式中 ρ_{air} ——空气密度,取 1.205 kg/m^3
 u_{air} ——气流速度, m/s
 d_J ——红枣 J 垂直于相对速度方向的投影直径, m
 C_D ——绕流阻力系数,由颗粒的雷诺系数^[19]决定
 Re_p ——引入空隙率之后的雷诺数
 ε ——孔隙率, %
 μ_{air} ——气体动力粘度,取 $1.48 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ ^[19]

联立式(8)、(9),计算得雷诺系数大于 10^3 ,属于湍流的范畴,即 $C_D = 0.44$ 。代入式(7)并与式(6)联立,得

结合红枣 J 运动轨迹方程,可得

$$F_D = 0.066 |\cos\gamma u_{\text{air}} - u_J| (\cos\gamma u_{\text{air}} - u_J) \pi d_J^2 \quad (10)$$

结合红枣 J 运动轨迹方程,可得

$$\begin{cases} S_h = u_0 t + \frac{1}{2} \frac{F_D \cos\gamma}{m_J} t^2 \\ S_v = \frac{1}{2} \left(\frac{F_D \sin\gamma}{m_J} + g \right) t^2 \\ \tan\theta = \frac{S_v}{S_h} \end{cases} \quad (11)$$

式中 u_0 ——红枣 J 进入清选系统初速度, m/s
前期试验知红枣以水平方向进入清选系统,且最大初速度为 6.5 m/s ,结合式(10)、(11)计算得 $\theta = 11.31^\circ$,即导流面曲线方程与水平方向的倾角为 11.31° 。

2.3 滤杂装置

滤杂装置结构如图 5 所示,主要由滚筒筛、滤杂条刷、清扫条刷、传动轴组成。滚筒筛固定于传动轴上,工作时逆时针旋转。滤杂条刷和清扫条刷对称安装在通过滚筒筛旋转中心的清选系统内壁上。滤杂条刷用于密封滚筒筛与清选系统的间隙,而清扫条刷则与滚筒筛紧密接触,用于清除吸附于滚筒筛面上的杂质。

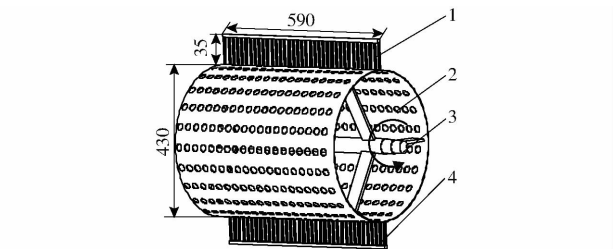


图 5 滤杂装置结构示意图
Fig. 5 Schematic of filter device
1. 滤杂条刷 2. 滚筒筛 3. 传动轴 4. 清扫条刷

结合清选系统结构尺寸,并且为便于安装,滚筒筛、滤杂条刷和清扫条刷在水平和垂直方向的配合安装尺寸应略小于清选系统内截面尺寸。因此确定滚筒筛直径为 0.43 m ,宽度为 0.59 m 。滤杂条刷和清扫条刷材质为尼龙丝,宽度与滚筒筛等宽,高度为 3.5 cm 。试验中运动至滚筒筛处的物料主要包括枣叶、枣吊、尘土和形貌尺寸较小且干瘪的残次红枣,其中残次红枣相比枣叶、枣吊、尘土硬度较大,穿过滚筒筛后经过离心风机时对其损伤更严重,因此,以残次红枣形貌参数确定筛孔的尺寸。对 50 颗残次红枣进行三轴尺寸参数测量,测得最小轴长为 6.13 mm ,同时为便于滚筒筛的加工制造,确定筛孔直径为 6 mm 。

3 清选系统气流运动特性仿真分析

采用 Fluent 19.0 软件对清选系统内流场进行仿真分析^[24-25],以探明清选系统内气流运动特性,仿真结果如图 6 所示。

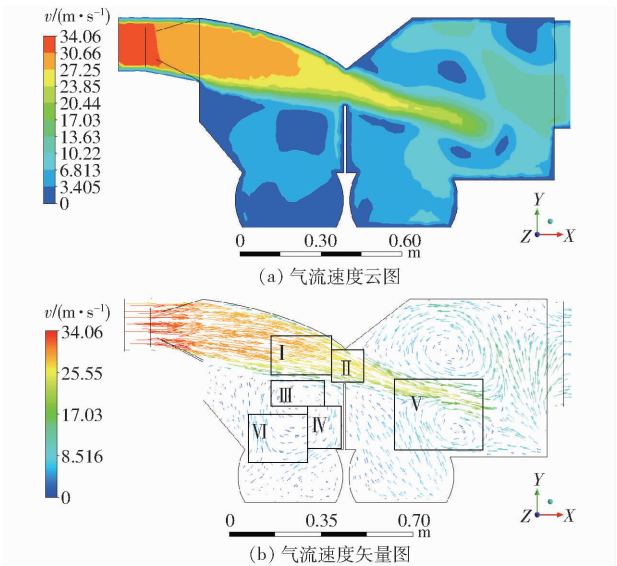


图 6 清选系统内气流运动特性仿真结果
Fig. 6 Fluid simulation analysis results of cleaning system

图 6a 为气流速度云图,可知气流进入清选系统后流速快速降低,有利于红枣的沉降;沿着导流面形成速度较高的气流带,便于携带轻质杂质越过调节板。图 6b 为气流速度矢量图,在导流面和调节板共同作用下形成“∞”形旋流,气流在调节板前为顺时针旋流,其轨迹方向在 I 区发生急剧变化,可有效引导红枣沉降;气流在 II 区出现汇集,利于携带杂质越过调节板顶端;少量被红枣遮挡并被携带至 IV 区的杂质,在枣、杂比重差异作用下再次形成分层,红枣落入排枣闭风器,杂质则随着 VI 区旋流进入 III 区实现二次清选;气流在调节板后侧的 V 区形成逆时针气流,有利于杂质向排杂闭风器处运移,使杂质快速沉降并排出。流场仿真分析结果表明清选系统内流体运动特性符合预期效果。

4 清选性能试验

4.1 试验条件

2020 年 11 月 22 日,在新疆维吾尔自治区第一师阿拉尔市 13 团矮化密植枣园开展清选系统性能试验,试验区长度为 220 m,宽度为 50 m。枣树行距 3 m,平均株距为 1.5 m;产量为 12 500 kg/hm²,品种为新郑灰枣,含水率为 23.09%。

4.2 试验方法

将清选系统集成于项目组研制的气吸式红枣收获机上。由预试验知,气流速度是决定枣、杂喂入量

和捡拾效果的关键因素,实际作业中,为保证作业速率、喂入量始终处于最大值,而前进速度视捡拾效果而定,故不以喂入量和前进速度作为试验因素。因此,确定气流速度和调节板开度为试验因素。气流速度由变频器控制风机转速进行调节,参数范围在 2.1 节确定的 27~45 m/s 内调节;调节板开度以理论计算值为零点,向上滑动减小开度记为负值,向下滑动增加开度记为正值,由预试验确定在 -6~6 cm 内调节。参照 DG/T 188—2019《果实捡拾机》和 Q/XNJ 001—2017《自走气吸式红枣捡拾机》标准,沿枣树行间划分若干长度为 30 m 试验区,试验时,调节气吸式红枣收获机运行参数达试验要求后驶入测试区进行试验。试验指标选取为含杂率 y_{im} 、损失率 y_{lo} 和破损率 y_{da} ,其中含杂率是收获的红枣中包含杂质的比例,即杂质与收获红枣质量之比。损失率是排杂闭风器排出红枣与收获红枣质量的比值。破损率是收获时机械造成的破损红枣占总收获红枣质量的比值,红枣表面出现可见的破损及裂纹均记为破损红枣^[26-28]。

4.3 单因素试验

为分析各试验因素对试验指标的影响规律,及选取正交试验因素水平范围^[29-31],进行含杂率、损失率和破损率的单因素试验,并通过 Origin 2018 软件对数据进行多项式拟合,绘制试验指标随因素的变化规律如图 7、8 所示。

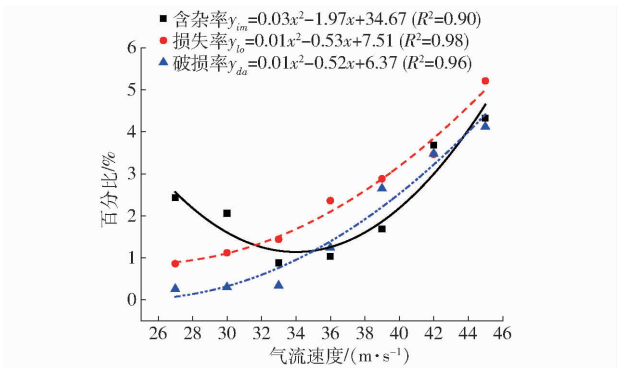


图 7 试验指标随气流速度变化曲线
Fig. 7 Impurity rate, loss rate, and damage rate change rule with airflow velocity

由图 7 可知,当气流速度小于 35 m/s 时,含杂率随着气流速度增加逐渐降低;当气流速度超过 35 m/s 时,含杂率随着气流速度增加而快速增长。原因是气流速度低于 35 m/s 时,气流速度增加有利于携带杂质分离,提高了清选效率;气流速度大于 35 m/s 时,随着气流速度的增加,吸拾的杂质数量也会增多,以及进入清选系统的枣、杂速度随着气流速度增加而提高,造成清选时间相对减少,使得含杂率升高。在气流速度为 27~38 m/s 时,损失率随着

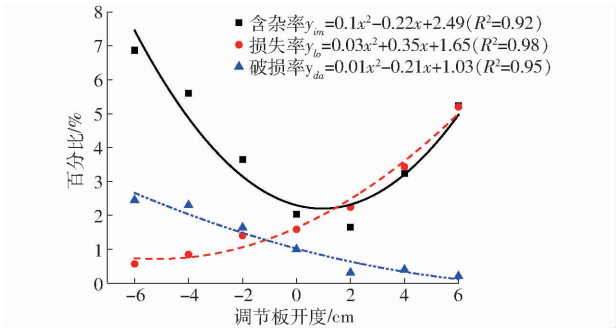


图 8 试验指标随调节板开度变化曲线

Fig.8 Impurity rate, loss rate, and damage rate changes with open values of baffle

气流速度缓慢递增,当气流速度超过 38 m/s 时,损失率快速增加,原因是随着气流速度继续增加时,枣、杂运动速度也随之升高,造成部分比重较小的红枣越过调节板随杂质排出,形成损失。随着气流速度增加,破损率逐渐增加,原因是气流速度增加使得红枣动能增加,沉降时碰撞冲量增加,造成破损率增加。当气流速度为 35 m/s 左右时,含杂率具有最小值;当气流速度超过 38 m/s 时,损失率和破损率急剧增长。由此以气流速度 35 m/s 作为中值,最终确定气流速度为 32 ~ 38 m/s。

由图 8 可知,在调节板开度小于 1 cm 时,含杂率随着开度增加快速降低,调节板开度大于 1 cm 时含杂率又逐渐增高。原因是开度较小时,随着开度增加被调节板阻挡的杂质变少,使得含杂率降低;当调节板开度继续增加,使得调节板顶端气流速度降低,利于二次清选的旋流减弱,造成含杂率升高。损失率随调节板开度的增加先缓慢增加随后增加趋势扩大,原因是调节板开度增加,携带红枣沉降的旋流强度减弱,并且调节板开度增加越大,减弱趋势愈加明显,造成损失率快速增长。随着调节板开度的增加,破损率缓慢降低,原因是调节板开度增加后,其上部流通截面积也增加,使得气流速度降低,对红枣作用力减弱,动能降低,因此破损率降低。当调节板开度为 1.5 cm 左右时含杂率具有最小值,以此值确定为调节板开度区间中值;随着调节板开度增加,损失率逐渐升高,破损率逐渐降低,其交点出现在调节板开度为 -1 cm 时,最终确定调节板开度为 -1 ~ 4 cm。

4.4 交互因素试验

4.4.1 试验方案

为探究试验因素交互作用对试验指标的影响规律,利用 Design-Expert 10.0.3 软件中 Central Composite Design 模块^[32]进行中心复合试验。因素区间为单因素试验确定的范围,试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of factors

编码	因素	
	气流速度 $A/(m \cdot s^{-1})$	调节板开度 B/cm
-1.414	30.76	-2.04
-1	32	-1
0	35	1.50
1	38	4
1.414	39.24	5.04

4.4.2 试验结果

采用 Central Composite Design 试验方法开展二因素五水平中心复合试验,试验方案和结果如表 2 所示。试验共计 13 组,由试验结果知含杂率为 0.67% ~ 4.25%,损失率为 0.32% ~ 5.36%,损伤率为 0.15% ~ 3.64%。

表 2 试验方案和结果

Tab.2 Test scheme and results

试验 序号	因素		$y_{im}/\%$	$y_{lo}/\%$	$y_{da}/\%$
	$A/(m \cdot s^{-1})$	B/cm			
1	32	-1	4.25	1.56	1.65
2	38	-1	2.67	0.87	3.21
3	32	4	1.10	3.56	0.15
4	38	4	0.67	5.36	0.28
5	30.76	1.50	2.12	2.13	1.26
6	39.24	1.50	1.22	2.50	1.87
7	35	-2.04	4.23	0.32	3.64
8	35	5.04	0.88	5.36	0.23
9	35	1.50	2.16	2.52	1.50
10	35	1.50	2.20	2.87	1.32
11	35	1.50	2.15	2.80	1.52
12	35	1.50	2.10	2.46	1.42
13	35	1.50	2.44	2.52	1.89

4.4.3 显著性检验与回归模型

对表 2 试验数进行分析和多元回归拟合,建立因素对试验指标的回归方程并对其进行显著性检验^[33]。

含杂率方差分析结果如表 3 所示,模型 $P < 0.001$,极显著。失拟项 $P = 0.2858$,不显著,表明不存在影响试验指标的未考虑因素。其决定系数 R^2 为 0.9887,表明该模型可拟合 98.87% 的试验结果。其中 A 、 B 、 AB 、 A^2 对含杂率影响极显著, B^2 对含杂率影响显著。各因素对含杂率的回归模型为

$$y_{im} = -24.89 + 1.79A - 1.93B + 0.038AB - 0.028A^2 + 0.030B^2 \quad (12)$$

损失率方差分析结果如表 4 所示,模型 $P < 0.001$,极显著。失拟项 $P = 0.2319$,不显著,表明不存在影响试验指标的未考虑因素。其决定系数 R^2 为 0.9857,表明该模型可拟合 98.57% 的试验结果。

表 3 含杂率方差分析

Tab.3 Variance analysis of impurity rate

来源	平方和	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	14.70	2.94	122.76	<0.000 1 ***
<i>A</i>	1.35	1.35	56.27	0.000 1 ***
<i>B</i>	12.22	12.22	510.43	<0.000 1 ***
<i>AB</i>	0.33	0.33	13.81	0.007 5 ***
<i>A</i> ²	0.45	0.45	18.89	0.003 4 ***
<i>B</i> ²	0.24	0.24	10.22	0.015 1 **
残差	0.17	0.024		
失拟项	0.096	0.032	1.81	0.285 8
误差	0.071	0.018		
总和	14.86			

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

表 4 损失率方差分析

Tab.4 Variance analysis of lost rate

来源	平方和	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	25.36	5.07	96.31	<0.000 1 ***
<i>A</i>	0.33	0.33	6.33	0.040 0 **
<i>B</i>	23.18	23.18	440.24	<0.000 1 ***
<i>AB</i>	1.55	1.55	29.44	0.001 0 ***
<i>A</i> ²	0.06	0.06	1.18	0.313 4
<i>B</i> ²	0.20	0.20	3.73	0.094 8 *
残差	0.37	0.05		
失拟项	0.23	0.08	2.19	0.231 9
误差	0.14	0.03		
总和	25.72			

注：* 表示差异较显著 ($0.05 \leq P \leq 0.1$)，下同。

其中 *B*、*AB* 对损失率影响极显著，*A* 对损失率影响显著，*B*² 损失率影响较显著。各因素对损失率的回归模型为

$$y_{lo} = -9.21 + 0.68A - 2.30B + 0.083AB - 0.011A^2 + 0.027B^2$$

(13)

破损率方差分析结果如表 5 所示，模型 $P < 0.001$ ，极显著。失拟项 $P = 0.136 3$ ，不显著，表明不存在影响试验指标的未考虑因素。其决定系数 R^2 为 0.948 7，表明该模型可拟合 94.87% 的试验结果。其中 *B* 对破损率影响极显著，*A* 对破损率影响显著，

AB 对破损率影响较显著。

各因素对破损率的回归模型为

$$y_{da} = -16.13 + 0.87A + 1.16B - 0.048AB - 0.010A^2 + 0.015B^2$$

(14)

表 5 破损率方差分析

Tab.5 Variance analysis of damage rate

来源	平方和	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	12.16	2.43	25.91	0.000 2 ***
<i>A</i>	0.81	0.81	8.68	0.021 5 **
<i>B</i>	10.70	10.70	113.99	<0.000 1 ***
<i>AB</i>	0.51	0.51	5.45	0.052 3 *
<i>A</i> ²	0.056	0.06	0.59	0.466 8
<i>B</i> ²	0.064	0.06	0.68	0.437 5
残差	0.66	0.09		
失拟项	0.47	0.16	3.36	0.136 3
误差	0.19	0.05		
总和	12.82			

4.4.4 交互作用对清选性能影响的响应曲面

为直观分析试验因素交互作用对试验指标的影响规律，绘制回归模型的响应曲面图，如图 9 所示。

图 9a 为因素交互作用对含杂率的影响规律，可知调节板开度较小时含杂率随着气流速度的增加缓慢增加。随着调节板开度增大，含杂率随气流速度增加而快速增加；当气流速度小于 35 m/s 时，含杂率随着调节板开度的增加而缓慢下降，当气流速度大于 35 m/s 时，含杂率随着调节板开度的增加而逐渐升高。原因是调节板开度较小时，随着气流速度增加形成的旋流强度也增加，造成清选时间相对减少，使得含杂率随气流速度增加缓慢上升。随着调节板开度增大，气流速度降低携带杂质能力减弱，造成含杂率快速升高；气流速度小于 35 m/s 时，调节板开度越大，越过调节板的杂质就越多，因此含杂率随之降低；气流速度大于 35 m/s 时，含杂率更多受气流影响，气流速度越大，旋流强度越高，随着旋流混入红枣的杂质也增加，造成含杂率上升。

图 9b 为因素交互作用对损失率的影响规律，可

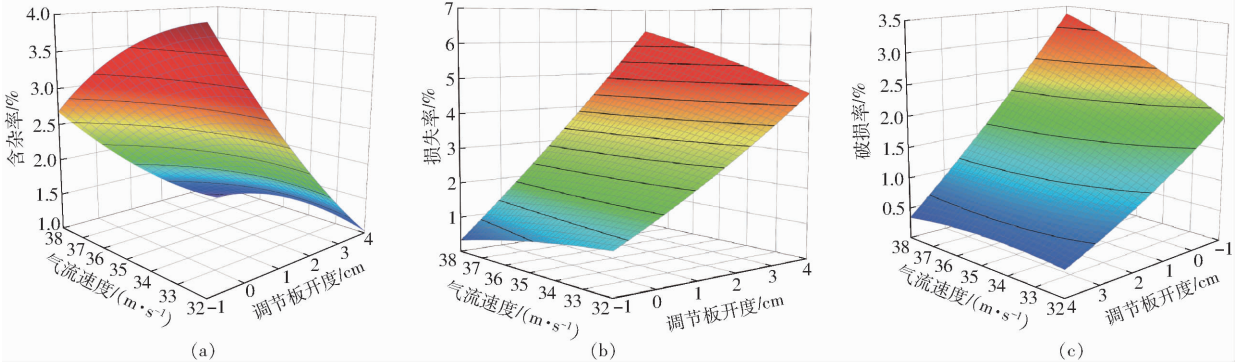


图 9 因素交互作用对指标影响的响应面

Fig.9 Response surfaces of experimental factors on response indicators

知当调节板开度小于 1 cm 时,损失率随气流速度增加缓慢降低;当调节板开度大于 1 cm 时,损失率随调节板开度增加而增加。原因是调节板开度小于 1 cm 时,气流速度增加形成气旋流强度升高,携带红枣能力增强,易于红枣沉降,使得损失率降低;而调节板开度大于 1 cm 时,随着调节板开度增加,红枣越过调节板随杂质排出的概率增大,造成红枣损失率增加。

图 9c 为因素交互作用对破损率的影响规律,可知当调节板开度大于 2.5 cm 时,气流速度对破损率影响不明显;当调节板开度小于 2.5 cm 时,破损率随气流速度的增加逐渐升高,并且交互因素对破损率增加有明显促进作用。原因是调节板开度大于 2.5 cm 时,旋流随着气流速度的变化趋势不明显,且气流速度变化区间较小,对破损率影响有限。当调节板开度小于 2.5 cm 时,随着调节板开度减小,气流速度增加,旋流强度增加明显,对红枣作用力也增加,造成沉降过程中碰撞冲量增加,因此破损率也随之增加。

4.4.5 参数优化

为使清选系统工作性能达到最佳,利用 Optimization 模块对回归模型进行优化,试验因素中气流速度设置为 32~38 m/s,调节板开度设置为 -1~4 cm,试验指标中含杂率、损失率和破损率目标值均选最小值。得到最优组合为:气流速度 32.0 m/s,调节板开度 3.4 cm,此时,含杂率、损失率和破损率分别为 1.32%、3.25% 和 0.57%。

4.5 验证试验

为验证参数优化结果及清选系统作业性能,在最优参数组合下开展验证试验,图 10 为试验过程及作业效果。试验共进行 5 次,验证试验结果取算术平均值(表 6)。



图 10 试验过程及作业效果
Fig. 10 Process and results of field test

表 6 验证试验结果

Tab. 6 Results of verification experiment %			
评价指标	优化值	试验值	相对误差
含杂率	1.32	1.38	4.55
损失率	3.25	3.37	3.69
破损率	0.57	0.60	5.26

结果表明:含杂率为 1.38%,比优化值增加了 0.06 个百分点,相对误差为 4.55%;损失率为 3.37%,比优化值增加了 0.12 个百分点,相对误差为 3.69%;破损率为 0.60%,比优化值增加了 0.03 个百分点,相对误差为 5.26%。

5 结论

(1)为提高气吸式红枣收获机清选系统作业性能,利用枣、杂惯性和流体力学特性差异设计了一种惯性气流式红枣清选系统。

(2)通过单因素试验得到气流速度区间为 32~38 m/s,调节板开度区间为 -1~4 cm。通过响应曲面试验确定清选系统最优工作参数组合,当气流速度为 32.0 m/s,调节板开度为 3.4 cm 时,含杂率为 1.32%、损失率为 3.25%、破损率为 0.57%。

(3)验证试验得到含杂率、损失率和破损率分别为 1.38%、3.37% 和 0.60%,与优化参数相比分别增加了 0.06、0.12、0.03 个百分点。

参 考 文 献

[1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.

[2] 刘江, 刘朝宇, 米强, 等. 南疆三地州红枣产区机械化发展现状及建议[J]. 现代农业科技, 2019(18): 123-125, 128. LIU Jiang, LIU Chaoyu, MI Qiang, et al. Status and suggestions on mechanization development of red jujube production area in three prefectures of Southern Xinjiang[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(18): 123-125, 128. (in Chinese)

[3] 鲁兵. 电动自走式落地红枣清选捡拾机的设计与试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017. LU Bing. Design and experimental study of self-propelled jujube harvester[D]. Alaer: Tarim University, 2017. (in Chinese)

[4] 周远航, 坎杂, 李成松, 等. 落地林果集果捡拾技术研究及进展[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 256-263. ZHOU Yuanhang, KAN Za, LI Chengsong, et al. The research and development of the falling tree fruits and nuts collect and pickup technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 256-263. (in Chinese)

[5] 张亚欧. 自走式矮化密植红枣收获机配套捡拾装置的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. ZHANG Yaou. Research of self-propelled dwarf and close planting jujube harvester pickup device[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016. (in Chinese)

[6] 胡灿, 鲁兵, 侯书林, 等. 新疆红枣收获机械的研究现状与发展对策[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 222-225, 240.

- HU Can, LU Bing, HOU Shulin, et al. Research status and development countermeasures on harvesting machinery of jujube in Xinjiang[J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization, 2016, 37(7): 222 – 225, 240. (in Chinese)
- [7] 张学军, 白圣贺, 靳伟, 等. 气力式矮密栽培红枣捡拾机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 1 – 9.
ZHANG Xuejun, BAI Shenghe, JIN Wei, et al. Development of pneumatic collecting machine of red jujube in dwarfing and closer cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 1 – 9. (in Chinese)
- [8] 庄子豪, 袁盼盼, 韩长杰, 等. 小型自走气吸式红枣捡拾机的设计及试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 80 – 83.
ZHUANG Zihao, YUAN Panpan, HAN Changjie, et al. Design and test of small self-removing air-suction jujube picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 80 – 83. (in Chinese)
- [9] 张凤奎, 于福锋, 李忠杰, 等. 气吸式落地红枣捡拾机的设计与试验[J]. 果树学报, 2020, 37(2): 278 – 285.
ZHANG Fengkui, YU Fufeng, LI Zhongjie, et al. Design and field testing of the air-suction machine for picking up Chinese jujube fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(2): 278 – 285. (in Chinese)
- [10] 张凤奎, 冉军辉, 李忠杰, 等. 气吸式落地红枣捡拾机作业参数优化[J]. 果树学报, 2021, 38(7): 1190 – 1200.
ZHANG Fengkui, RAN Junhui, LI Zhongjie, et al. Optimization of working parameters of air-suction machine for picking up ground jujube[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(7): 1190 – 1200. (in Chinese)
- [11] 吴楠, 贺俊林, 刘少华, 等. 基于 EDEM – Fluent 耦合的钙果风筛式清选装置仿真与试验[J]. 农业工程, 2021, 11(1): 82 – 87.
WU Nan, HE Junlin, LIU Shaohua, et al. Simulation and experiment of air screen clearing device for *Cerasus humilis* based on EDEM – Fluent coupling[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(1): 82 – 87. (in Chinese)
- [12] LIANG Z W, LI Y M, BAERDEMAEKER J D, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182(8): 95 – 106.
- [13] LI Y, XU L Z, ZHOU Y, et al. Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: a computational and experimental study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152(11): 141 – 148.
- [14] MATH R G, RAMESH G, NAGENDER A, et al. Design and development of annatto (*Bixa orellana* L.) seed separator machine[J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(1): 1 – 9.
- [15] PANDYA T S, SRINIVASAN R, JOHNSON J K. Operating air velocities for fiber separation from corn flour using the Elusieve process[J]. Industrial Crops & Products, 2013, 45: 100 – 105.
- [16] DAI F, SONG X F, GUO W J, et al. Simulation and test on separating cleaning process of flax threshing material based on gas-solid coupling theory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 73 – 81.
- [17] NAHAL A M, ARABHOSSEINI A, KIANMEHR M H. Separation of shelled walnut particles using pneumatic method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(3): 88 – 93.
- [18] SEPAHI-YOUNSI J, FOROUZI F B, MAADI S R, et al. Boundary layer suction for high-speed air intakes: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(9): 3459 – 3481.
- [19] 北京大学. 流体力学(下册)[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [20] 于福锋, 李平, 张凤奎, 等. 红枣悬浮速度特性试验测定与分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(6): 99 – 105.
YU Fufeng, LI Ping, ZHANG Fengkui, et al. Experiment determination and analysis of suspension velocity characteristics for red jujube[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 99 – 105. (in Chinese)
- [21] 于福锋. 脆熟期红枣物理特性及机械损伤试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
YU Fufeng, Experimental study on physical characteristics and mechanical damage of jujube during crisp ripening period[D]. Alaer: Tarim University, 2020. (in Chinese)
- [22] 张学军, 白圣贺, 靳伟, 等. 矮化密植种植模式红枣物料特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(8): 68 – 72.
ZHANG Xuejun, BAI Shenghe, JIN Wei, et al. Experiment study on characteristics of jujube material in dwarf dense plating mode[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(8): 68 – 72. (in Chinese)
- [23] ZEWDU A D. Aerodynamic properties of tef grain and straw material[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(3): 304 – 309.
- [24] DASANI D, CYRUS C, SCANLON K, et al. Effect of particle and fluid properties on the pickup velocity of fine particles[J]. Powder Technology, 2009, 196(2): 237 – 240.
- [25] CHAI X Y, XU L Z, SUN Y X, et al. Development of a cleaning fan for a rice combine harvester using computational fluid dynamics and response surface methodology to optimise outlet airflow distribution[J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 232 – 244.
- [26] 徐亭, 王丽红, 坎杂, 等. 红枣挑抛捡拾过程中机械碰撞有限元分析[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 176 – 180.
XU Ting, WANG Lihong, KAN Za, et al. Finite element analysis on mechanical collision of jujube in the process of picking-up[J]. The Food Industry, 2019, 40(4): 176 – 180. (in Chinese)
- [27] 丁凯. 矮化密植红枣收获机激振装置参数优化及试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
DING Kai. Parameter optimization and experiment of vibration excitation device for dwarf and dense planting jujube harvester [D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)

- [28] LI R, PENG J, SUN S P, et al. Determination of selected physical and mechanical properties of Chinese jujube fruit and seed [J]. CIGR Journal, 2016, 18(3): 294 – 300.
- [29] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [30] 张昆, 衣淑娟, 刘海军, 等. 气吸滚筒式玉米植质钵盘精密播种装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 62 – 69.
ZHANG Kun, YI Shujuan, LIU Haijun, et al. Optimization design and test of suction performance of air suction cylinder type precise seeding device for maize with plant material bowl-tray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 62 – 69. (in Chinese)
- [31] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47 – 56.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47 – 56. (in Chinese)
- [32] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 37 – 46.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37 – 46. (in Chinese)
- [33] KUMAR C S, PRADHAN R C, MISHRA S. Fabrication, performance evaluation and optimization of sal (*Shorea robusta*) seed decorticator [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 40(3): 1 – 10.
-

(上接第 61 页)

- [32] 辜松, 刘立意, 小松崎将一, 等. 覆盖作物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 41 – 44, 56.
GU Song, LIU Liyi, KOMATSUZAKI Masakazu, et al. Effect of cover crops on soil physical properties and rotary tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 41 – 44, 56. (in Chinese)
- [33] 郭亚军, 易平涛. 线性无量纲化方法的性质分析[J]. 统计研究, 2008, 25(2): 93 – 100.
GUO Yajun, YI Pingtao. Character analysis of linear dimensionless methods [J]. Statistical Research, 2008, 25(2): 93 – 100. (in Chinese)
- [34] 程永清, 庄永明, 杨静宇. 基于矩阵相似度的图象特征抽取和识别[J]. 计算机研究与发展, 1992, 29(11): 42 – 48.
CHENG Yongqing, ZHUANG Yongming, YANG Jingyu. Image feature extraction and recognition based on similarity of matrices [J]. Journal of Computer Research and Development, 1992, 29(11): 42 – 48. (in Chinese)
- [35] 毕于运, 王亚静, 高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 1 – 7.
BI Yuyun, WANG Yajing, GAO Chunyu. Straw resource quantity and its regional distribution in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 1 – 7. (in Chinese)
- [36] 王雨辰, 陈浮, 朱伟, 等. 江苏省秸秆资源量估算及其区域分布研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 305 – 310.
- [37] 王雪, 常志州, 张恒敢, 等. 基于 MODIS 和天地图遥感数据的区域作物秸秆产量估算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 177 – 182.
WANG Xue, CHANG Zhizhou, ZHANG Henggan, et al. Estimation methods for crop straw yield in township level based on MODIS and world map remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 177 – 182. (in Chinese)
- [38] 李洪文, 李慧, 何进, 等. 基于人工神经网络的田间秸秆覆盖率检测系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 58 – 62.
LI Hongwen, LI Hui, HE Jin, et al. Measuring system for residue cover rate in field based on BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 58 – 62. (in Chinese)
- [39] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513 – 1520.
ZHANG Peng, JIA Zhikuan, WANG Wei, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in Southern Ningxia of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1513 – 1520. (in Chinese)
- [40] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 127 – 133.
MENG Qingying, ZOU Hongtao, HAN Yanyu, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 127 – 133. (in Chinese)
- [41] ZHANG Ligang, VERMA B, STOCKWELL D, et al. Density weighted connectivity of grass pixels in image frames for biomass estimation [J]. Expert Systems with Application, 2018, 101: 213 – 227.