doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.015

黑水虻虫沙并排式双叶轮集料装置设计与试验

彭才望[1]　周　婷[1]　宋世圣[1]　孙松林[1]　向　阳[1]　许道军[2]
(1.湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128;2.湖南农业大学动物医学院,长沙 410128)

摘要:针对黑水虻虫沙收集过程劳动强度大、作业效率低等问题,设计了一种并排式黑水虻虫沙双叶轮集料装置。首先,依据黑水虻幼虫生物转化畜禽粪便工艺特点,确定并排式双叶轮的外形尺寸;通过对并排式双叶轮工作机理和动力学分析,确定弧形叶轮片曲线与数量,并获得叶轮集料运动轨迹和方程;在此基础上,确定了影响其集料性能的主要因素,选取前进速度、叶轮倾角、叶轮转速为试验因素,以集料效率和集料均匀度变异系数为响应值分别进行单因素及三因素三水平二次回归正交试验。建立了响应面数学模型,分析各因素对集料性能的影响,利用 Design-Expert 软件对影响因素进行综合优化。试验结果表明,各因素对集料效率的影响由大到小顺序为:叶轮倾角、前进速度、叶轮转速;对集料均匀度变异系数的影响由大到小顺序为:叶轮转速、前进速度、叶轮倾角。对优化结果进行试验验证得最优参数组合为:前进速度 0.06 m/s、叶轮倾角 18°、叶轮转速 16 r/min,此时集料效率为 4.67 kg/s,集料均匀度变异系数为 2.81%,评价指标的试验值与模型优化值的相对误差为 3.78% 与 6.84%,满足黑水虻虫沙集料输送要求。

关键词:黑水虻虫沙;集料装置;并排式;叶轮
中图分类号:S817.2;X713　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)12-0142-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Parallel Double Impeller Collecting Device for Black Soldier Fly Sand

PENG Caiwang[1]　ZHOU Ting[1]　SONG Shisheng[1]　SUN Songlin[1]　XIANG Yang[1]　XU Daojun[2]
(1. *College of Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*
2. *College of Veterinary Medicine*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity and low work efficiency in the process of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) sand collecting, a parallel double impeller collecting device for black soldier fly sand was designed. Firstly, the external dimensions of parallel double impeller were determined according to the agronomic requirements of black soldier fly larvae bio-transforming livestock and poultry manure. By analyzing the working mechanism and dynamics of the parallel double impeller, the curve and quantity of the arc-shaped impeller blades were determined, and the trajectory and equation of the impeller aggregate movement were obtained. On this basis, the main factors affecting its aggregate properties were determined. Then, single-factor and three-factor three-level quadratic regression orthogonal tests were conducted with forward speed, impeller inclination angle, and impeller speed as test factors and the aggregate efficiency and variable coefficient of aggregate uniformity as the response value. Besides, a response surface mathematical model was established to analyze the influence of various factors on aggregate performance, and Design-Expert software was employed to comprehensively optimize the influencing factors. The test results showed that the order of influencing factors on the aggregate efficiency from primary to secondary was as follows: impeller inclination angle, forward speed, and impeller speed; the order of influencing factors on the variable coefficient of aggregate uniformity from primary to secondary was as follows: impeller speed, forward speed, and impeller inclination angle. The optimization results were verified, and it can be obtained that the forward speed was 0.06 m/s; the impeller inclination angle was 18°; the impeller speed was 16 r/min; the aggregate efficiency was

收稿日期:2021-09-01　修回日期:2021-09-20
基金项目:湖南省大学生创新训练计划项目(S202110537054)和湖南省农机装备与技术创新项目(湘财农指[2020]0107)
作者简介:彭才望(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业与畜牧业机械设备研究,E-mail:hnndpcw@163.com
通信作者:许道军(1978—),男,副教授,博士后,主要从事猪场环境控制关键技术研究,E-mail:xudaojun29@163.com

4.67 kg/s；the variable coefficient of aggregate uniformity was 2.81%；the relative errors between the experimental values of each evaluation index and the optimized value of the model were 3.78% and 6.84%，respectively，which met the requirement of black soldier fly sand aggregating and conveying.
Key words：black soldier fly sand；collecting device；parallel；impeller

0　引言

应用生态学原理构建腐生生物链是发展畜牧业循环经济、减轻环境污染的重要举措。其中，以畜禽粪便为食的腐生性昆虫在畜禽废弃物资源化与肥料化利用中得到初步研究与应用[1-3]。

黑水虻，又名亮斑扁角水虻，幼虫取食畜禽粪便等废弃物，通过生物转化获得高附加值的黑水虻虫沙混合物（即黑水虻幼虫与有机肥），其中，黑水虻幼虫富含粗蛋白[4]，作为家禽[5]、家畜[6]和鱼类[7]的良好活体饲料或饲料添加成分；有机肥肥效高，在果蔬、牧草中广泛应用，降低了臭味[8]，因此，黑水虻成为畜禽粪便资源化利用研究的热点。近年来，国内外学者主要围绕黑水虻生长发育[9]、生物转化效率[10]、幼虫营养价值及利用[11]、有机肥肥效与应用[12]等方面开展了大量的研究与探索。但是，在黑水虻虫沙收集、输送、分选等方面的研究较少，黑水虻生物转化畜禽粪便过程中机械化水平较低，主要依靠人工完成，其劳动强度大，作业效率低。

黑水虻生物转化畜禽粪便过程中，黑水虻虫沙收集是劳动强度最大的环节之一，同时影响后续黑水虻虫沙分选效率。少数大型黑水虻养殖企业采用机械层叠料盘式结构，其翻转卸料、转移输送作业效率较高，但制造与控制系统成本较高；大多数的小型黑水虻养殖企业或一般养殖户受条件所限，主要依靠人工进行地槽式养殖，机械化程度低。因此，需要一种适合中小型养殖企业或养殖户使用且机械化程度较高的虫沙集料装置。课题组前期针对机械层叠料盘式黑水虻养殖特点，设计并试验研究了双向螺旋[13]、斗式取料[14]等装置，一定程度上实现了黑水虻虫沙机械收集、输送，提高了机械化作业效率。文献[15-17]研究了黑水虻养殖或分选方面的装置或方法，但地槽式黑水虻生物转化畜禽粪便过程中收集、输送、分选等环节仍缺乏针对性实用性装备，相关研究成果鲜有报道。

针对上述问题，本文参照撒肥装置或机构中常用的叶轮[18-20]，结合黑水虻生物转化畜禽粪便工艺与地槽式黑水虻养殖环境特点，设计一种并排式双叶轮集料装置，实现宽幅集料收集、提升，卸料口窄幅集中落料，并转移输送，完成黑水虻幼虫的分选。通过理论分析与试验研究确定集料装置的最佳作业参数组合，以期为黑水虻虫沙集料、输送等机械设备研究提供理论参考与技术支撑。

1　整体结构与工作原理

1.1　整体结构及主要技术参数

设计的地槽黑水虻虫沙集料输送分选机结构如图 1 所示，配有轮式电动自走底盘，由并排式双叶轮集料装置、输送装置、分选装置构成，可将地槽中养殖黑水虻幼虫生物转化畜禽粪便后产生的层铺状态有机肥进行集料、提升、输送、分选、分类利用。并排式双叶轮集料装置作为整机的关键取料结构，主要实现层铺状态虫沙的有序铲收，转移输送。

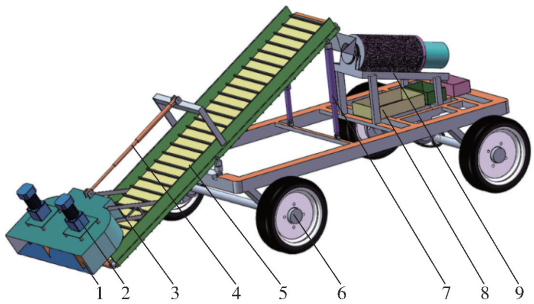

图 1　并排式黑水虻虫沙双叶轮集料机结构简图

Fig. 1　Structure diagram of parallel double impeller collecting device for black soldier fly sand

1. 并排式双叶轮集料装置　2. 叶轮驱动电机　3. 平行支撑杆　4. 电动推杆　5. 传送带输送装置　6. 车轮　7. 升降杆　8. 集料盒　9. 分选装置

黑水虻虫沙集料输送分选机主要技术参数：叶轮驱动电机功率 120 W，行走底盘驱动电机功率 250 W，整机质量为 55 kg（不包含分选装置），集料宽度为 0.8 m，集料深度为 0.15 m，车轮采用实心胎，车轮直径为 0.15 m，轮距为 0.75 m，整机外形尺寸（长×宽×高）2.50 m×0.80 m×0.80 m（并排式双叶轮前伸到极限位置）。

1.2　集料工作原理

并排式集料装置用于地槽中黑水虻幼虫生物转化猪粪后的虫沙收集、提升、转移，如图 2 所示。结合黑水虻幼虫生物转化猪粪工艺特点[10]，室内水泥地面上设计地槽宽度为 0.85 m，地槽两侧边高为 0.2 m，地槽长度可结合养殖规模需要调整，地槽两端留有空间，便于集料装置作业方向的调整。作业时，集料装置沿地槽内侧匀速前移，通过电动推杆调节叶轮与水平面的倾角，同时调节叶轮转速与叶轮

前进速度,完成沿地槽铲料、提升、转移过程。集料时,左右叶轮电机驱动叶轮匀速旋转,两叶轮旋转方向相对,在叶轮推力、滑动摩擦力、离心力、惯性力等作用力下,依次将地槽中的黑水虻虫沙由地槽两侧向中间推送。叶轮集料底板后端中心处沿两侧对称设计矩形开口,以便黑水虻虫沙经叶轮旋转集料后落料,进入下方倾斜的传送带,实现宽幅集料、窄幅落料、集中转移输送的过程。

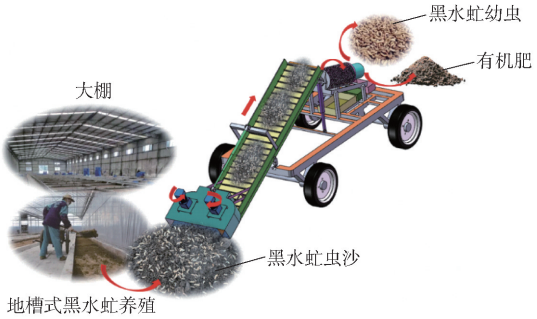

图 2 并排式双叶轮集料机工作原理图

Fig. 2 Working principle of parallel double impeller collecting device

2 关键部件与参数设计

并排式双叶轮集料装置的主要工作部件为双叶轮,双叶轮将地槽中层铺状态黑水虻虫沙进行收集、提升、转移,其作业性能直接影响后续虫沙分选与分类利用。因此,需要对并排式双叶轮结构参数与作业参数进行理论分析与设计。本文主要研究叶轮集料输送性能,黑水虻虫沙为黑水虻幼虫生物转化猪粪后形成的虫沙,料虫质量比为 8 ~ 10[14],同时考虑黑水虻幼虫负趋光机械蠕动特征明显,不便于试验设计,对黑水虻虫沙中混杂的黑水虻幼虫进行了预筛选处理,主要以虫沙中有机肥颗粒作为主要研究与分析对象。

2.1 叶轮结构设计

并排式双叶轮集料装置主要由两个并排叶轮、电动机、弧形叶轮片、集料底板、叶轮轴等部件组成。弧形叶轮片沿叶轮轴圆周方向焊接,左右叶轮的结构与参数相同,水平方向左右并排,左右叶轮轴轴心距离等于单个叶轮回转直径。并排式双叶轮集料装置结构参数包括整体外形参数和单个弧形叶轮片结构参数,分别如图 3 和图 4 所示。

并排式双叶轮集料装置整体外形参数根据地槽式黑水虻养殖特点及黑水虻虫沙工艺特点设计,地槽宽度为 0.8 m,因在猪粪堆积厚度为 0.15 m 环境下,黑水虻生物转化效益相对较高[10],经中间加料管理,第 5 龄期的黑水虻虫沙有机肥层铺厚度均值为 0.15 m,设计集料装置外形长 × 高($a \times c$)为

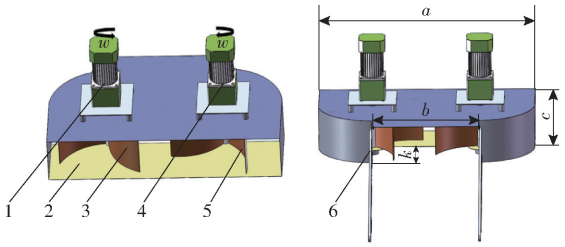

图 3 并排式双叶轮集料装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of parallel double impeller collecting device

1. 左叶轮电动机 2. 集料底板 3. 左弧形叶轮片 4. 右叶轮电动机 5. 右弧形叶轮片 6. 平行支撑杆

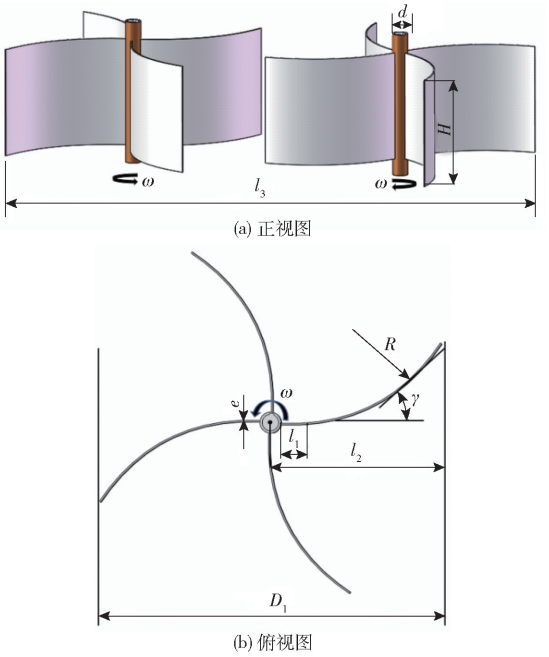

图 4 并排式双叶轮结构参数示意图

Fig. 4 Schematics of parallel double impeller structural parameters

0.8 m × 0.2 m,集料底板沿双叶轮中心线后端两侧对称开口,形成长 × 宽($b \times k$)为 0.4 m × 0.2 m 的卸料口。叶轮由 5IK60RGU - CF 型电动机(晟邦公司,120 W)驱动,并排式叶轮对向匀速旋转,转速可调,如图 3 所示。

根据并排式双叶轮集料装置整体外形参数,单个弧形叶轮片结构参数如图 4 所示。本文设计的叶轮回转直径 D_1 为 0.4 m,单个弧形叶轮片水平长度 l_2 为 0.2 m,并排式双叶轮作业水平宽度 l_3 为 0.8 m,并排式双叶轮弧形叶轮片高度 H 为 0.2 m,叶轮轴直径 d 为 0.02 m。沿叶轮轴圆周方向焊接的弧形叶轮片由直线段和弧形段组成,其中直线段 l_1 为 0.03 m,用于和叶轮轴轴向表面焊接固定。同时,为了使叶轮在一定转速下,弧形叶轮片能对层铺状态有机肥进行刮料、收集,设计弧形叶轮片的圆弧段的弯曲方向与叶轮旋转方向相同,弧形叶轮片弯曲角

γ 结合弧形叶轮片曲线方程确定参数。为降低叶轮旋转惯性，在满足弧形叶轮片强度要求下，经前期试验确定，弧形叶轮片的材料为不锈钢，厚度 e 为 0.003 m，R 为弧形叶轮片的半径。

2.2　叶轮倾角设计

并排式双叶轮回转平面若水平接地，集料时将起不到对地槽层铺状态有机肥进行集料、提升、转移输送的作用。为解决上述问题，并排式双叶轮回转平面与水平面设计一定的倾角，即叶轮前倾接地方式，将双叶轮集料底板前端局部接地，双叶轮回转平面与水平面设计一定的倾角 θ，如图 5 所示。

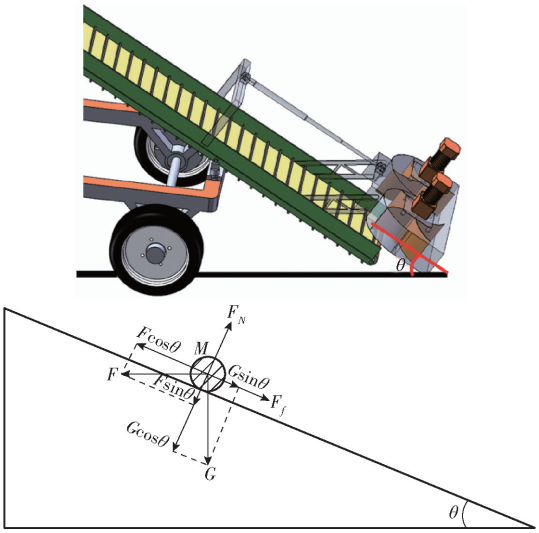

图 5　叶轮倾角分析

Fig. 5　Analysis diagram of impeller angle

叶轮旋转集料时，弧形叶轮片对集料底板上的有机肥产生推力 F，同时受重力 G、集料底板对其产生的摩擦阻力 F_f 等作用力的影响，有机肥 M 能够沿集料底板向上运动的条件为

$$F\cos\theta \geqslant G\sin\theta + F_f \tag{1}$$

其中

$$F_f = \mu(G\cos\theta + F\sin\theta) \tag{2}$$

则

$$\theta \leqslant \arctan\frac{F-\mu G}{G+\mu F} \tag{3}$$

式中　μ——集料底板与有机肥 M 间的摩擦因数

叶轮倾角 θ 的作用是将弧形叶轮片推送的有机肥进行一定高度的提升，便于转移输送。叶轮倾角 θ 的大小直接影响集料性能，由式(3)可知，叶轮倾角 θ 与弧形叶轮片对集料底板上有机肥的推力 F、有机肥重力 G、集料底板与有机肥间的摩擦因数 μ 有关，叶轮倾角 θ 过大，有机肥将会堵塞在弧形叶轮片上，工作阻力增加，集料性能降低；叶轮倾角 θ 过小，影响输送带结构设计，弧形叶轮片无法有效提升、转移输送有机肥，从而影响整机作业性能。参照文献[21－22]与有机肥物料滑动特性[23]，并考虑后端输送带安装接地高度需要，叶轮倾角 θ 设置为 10°～30°适宜，本设计通过试验进一步确定叶轮倾角 θ。

2.3　弧形叶轮片曲线方程

为使叶轮集料、提升、转移有机肥过程可靠，需确保物料沿弧形叶轮片滑动，使物料输送平稳、不发生堵塞粘结[24－25]。叶轮运动分析如图 6 所示。假定有机肥颗粒 M 在弧形叶轮片上的圆周径向速度分量 v_3 和切向的速度分量 v_2 分别为

$$v_3 = \omega R_1 \cos\alpha\sin\alpha \tag{4}$$

$$v_2 = \omega R_1(\cos\alpha)^2 \tag{5}$$

式中　ω——弧形叶轮片旋转角速度，rad/s

R_1——物料颗粒 M 的瞬时回转半径，m

α——物料颗粒运动方向与圆周切线方向的夹角，(°)

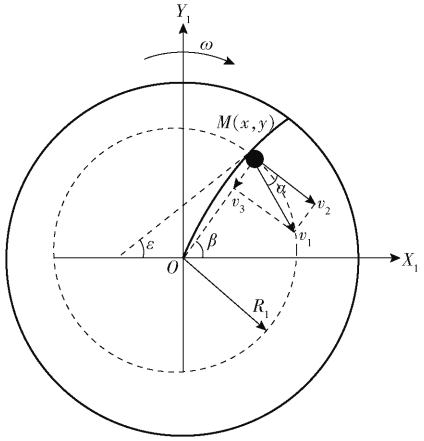

图 6　弧形叶轮片运动分析

Fig. 6　Kinematic analysis of arc impeller blade

由式(4)可知，当 α 为 $\frac{\pi}{4}$ 时，物料颗粒在弧形叶轮片沿圆周径向上可获得最大的速度分量 $v_3 = \frac{\omega R_1}{2}$，因此，若弧形叶轮片成形后的曲线任一点满足对应夹角 α 均为 $\frac{\pi}{4}$ 时，物料的输送流动性最佳，获得较理想的弧形叶轮片集料、输送效果。

因此，将物料颗粒 $M(x,y)$ 作为研究对象，弧形叶轮片曲线方程为

$$F(x,y) = 0 \tag{6}$$

即

$$y = f(x,y) \tag{7}$$

已知物料颗粒 $M(x,y)$ 在弧形叶轮片曲线上任一点，则

$$\tan\gamma = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{8}$$

直线 OM 的斜率为

$$K = \tan\beta = \frac{y}{x} \tag{9}$$

式中　β——颗粒 M 径向与水平方向夹角，(°)

当$\beta=\varepsilon+\frac{\pi}{4}$时($\varepsilon$为颗粒$M$沿弧形叶轮片切线方向与水平方向夹角,(°)),图4中弧形叶轮片弯曲角γ为45°,有

$$\tan\beta=\frac{\tan\gamma+1}{1-\tan\gamma} \tag{10}$$

$$\frac{y}{x}=\frac{1+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}}{1-\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}} \tag{11}$$

即弧形叶轮片曲线方程为

$$F(x,y)=\ln\sqrt{x^2+y^2}+\arctan\frac{y}{x}+c=0 \tag{12}$$

式中 c——任意实常数

2.4 叶轮运动学分析

集料过程中,弧形叶轮片依次完成对地槽中有机肥进行集料、沿集料底板提升、落料,在水平面上将形成一条余摆带阴影轨迹,如图7所示,弧形叶轮片自O_2M_1连线点接触集料底板并向有机肥物料方向运动,集料底板开始铲料、弧形叶轮片刮料、推动有机肥物料沿集料底板滑动提升;M_2N_2连线处弧形叶轮片开始往内推动物料向落料口,M_3N_3连线处时,开始落料,弧形叶轮片集料的有机肥落入下端的输送带上。通过图7分析可知,O_2M_1至O_2M_2过程中,为铲料、刮料主要作业区域,O_2M_2至O_2M_3过程中,为弧形叶轮片推送、挤压、提升物料主要阶段,集料量降低,部分物料因受挤压脱离弧形叶轮片内侧而外排;O_2M_3至O_2M_4过程中,在弧形叶轮片推力、有机肥自身重力以及惯性力等力作用下,物料脱离弧形叶轮片,落入输送带[26-27]。相邻弧形叶轮片依次完成物料的铲取、刮料、推送、落入输送带的过程。

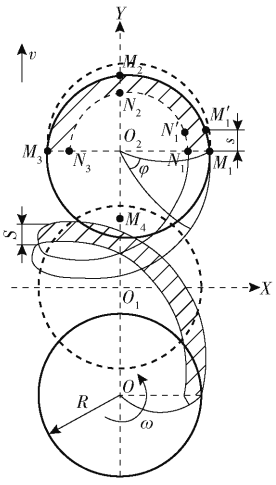

图7 弧形叶轮片集料运动轨迹

Fig. 7 Motion trajectory of arc impeller blade collecting

弧形叶轮片尖端运动轨迹方程为

$$\begin{cases}x=R\cos(\omega t)\\ y=vt+R\sin(\omega t)\cos\theta\end{cases} \tag{13}$$

式中 t——时间,s

v——弧形叶轮片前进速度,m/s

对时间t求导,得弧形叶轮片末端的速度方程为

$$\begin{cases}v_x=-R\omega\sin(\omega t)\\ v_y=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v+R\omega\cos(\omega t)\cos\theta\end{cases} \tag{14}$$

而相邻弧形叶轮片尖端运动轨迹方程为

$$\begin{cases}y=vt+R\sin(\omega t-\varphi)\cos\theta\\ x=R\cos(\omega t-\varphi)\end{cases} \tag{15}$$

式中 φ——叶轮相邻弧形叶轮片夹角,(°)

单个弧形叶轮片的前进距离S为

$$S=\frac{60v}{zn} \tag{16}$$

式中 n——弧形叶轮片转速,r/min

z——弧形叶轮片数量

在并排式双叶轮集料过程中,根据地槽养殖特点及黑水虻养殖工艺要求,叶轮回转直径已经固定,叶轮上弧形叶轮片过多,单个弧形叶轮片集料量降低,重复集料区域增大,考虑机械结构设计的对称性与受力均衡,当φ为90°时,即叶轮由4个弧形叶轮片周向均匀布置,间隔角为90°,合理控制前进速度与叶轮转速,利于减小叶轮相邻两个弧形叶轮片重复集料区域并实现不漏集。因此,设计弧形叶轮片数为4个。但是,当叶轮转速n最小、前进速度v最大时,理论上将出现最大的漏集区域,为保证叶轮相邻两个弧形叶轮片不漏集,相邻弧形叶轮片的运动轨迹不漏集的条件为

$$S\leqslant s \tag{17}$$

其中

$$s=R\sin(\omega t-\varphi)\cos\theta \tag{18}$$

式中 s——单个弧形叶轮片集料区域在水平面上的直线投影距离,m

将式(16)、(18)代入式(17)整理得

$$v\leqslant\frac{Rzn}{60}\sin(\omega t-\varphi)\cos\theta \tag{19}$$

由式(19)可见,并排式叶轮集料装置在集料过程中,叶轮前进速度v、回转半径R、弧形叶轮片数量z、叶轮转速n、叶轮倾角θ、叶轮相邻弧形叶轮片的夹角φ等因素对集料过程有着直接的影响作用,在叶轮回转半径、弧形叶轮片数量、相邻弧形叶轮片的夹角确定情况下,并排式双叶轮集料性能与叶轮前进速度、叶轮转速、叶轮倾角有直接关系。此外,前期预试验发现,叶轮前进速度影响集料质量,且前进速度的变化范围远小于叶轮转速。综上,由理论分

析可知，影响并排式双叶轮集料装置作业性能的因素为叶轮前进速度、叶轮转速、叶轮倾角，为后续进一步试验优化提供了依据。

3　试验

3.1　试验设备与方法

试验时间：2021 年 7 月；试验地点：湖南农业大学实训中心；试验采用湖南农业大学耘园黑水虻科研基地的黑水虻虫沙（黑水虻幼虫生物转化猪粪后形成的有机肥），试验采用电热鼓风干燥箱（型号为 WGLL－230BE）烘干法测量取样的虫沙含水率，具体步骤为：首先用 ACS－30 型电子天平（精度为 0.1 g）称取，虫沙湿质量记作 m_a，然后，将该取样虫沙置于 105℃的电热鼓风干燥箱内恒温烘烤 5～6 h 至恒质量，然后测定烘干取样虫沙，记作干质量 m_b，通过两次平行试验计算获得虫沙含水率（$(1-m_b)/m_a \times 100\%$）均值为 44.8%。其余试验设备包括摄像机、钢卷尺、秒表、DMI420 型数显倾角仪（精度为 0.05°）等。

试验根据理论设计模型，自制并排式黑水虻虫沙双叶轮集料装置，主要研究集料性能，对整机后端分选装置进行了删减，部分支撑件进行了简化，试验装置如图 8 所示。试验前，在自制地槽（长×宽×高为 5 m×0.85 m×0.20 m）中铺满含水率为 44.8% 的黑水虻虫沙，层铺高度均值为 0.15 m，与实际养殖条件保持相对一致。输送带单向长度为 1.5 m，宽度为 0.6 m，略宽于卸料口宽度，防止输送带两边侧漏。然后，通过变频控制器分别控制叶轮电动机、输送带电动机以及行走轮驱动电动机，分别调节叶轮转速、输送带转速以及叶轮前进速度。叶轮与地槽水平面倾角通过后端升降杆调节，数显倾角仪辅助显示叶轮与地槽水平面间的倾角。地槽两端预留空余区域，用于集料装置作业方向调整及叶轮倾角、叶轮转速、输送带转速、前进速度等参数预调节匹配。每次相同的集料时间间隔重复试验测量 3 次，相同时间间隔试验结束时，同步停止叶轮旋转电动机与行走轮驱动电动机，待输送带上物料完全输送卸料后，停止输送带电动机。最后，用电子天平称取输送带后方集料平台上的虫沙质量，取平均值，计算获得集料效率与集料均匀度变异系数。

3.2　集料性能评价方法

由于国内目前还没有黑水虻虫沙集料、输送等方面的试验标准以及评价作业效果的相关量化指标，本文主要研究并排式双叶轮工作参数对集料性能的影响，以期在地槽黑水虻虫沙集料、转移输送等作业过程中降低劳动强度，提高作业效率，同时，为后续虫沙分选提供连续物料流。因此，结合黑水虻虫沙养殖环境及工艺特点，为了准确评价并排式双叶轮集料装置在铲料、刮料、提升、转移方面的作业效果，参照文献[14,18－20]，以集料效率和集料均匀度变异系数为评价指标。集料效率越大，单位时间集料质量越大，作业效率越高；集料均匀度变异系数越小，相邻均匀时间间隔内的集料可靠性和均匀性越好，集料效果越佳，可为后续虫沙的分选提供稳定、连续的物料流。

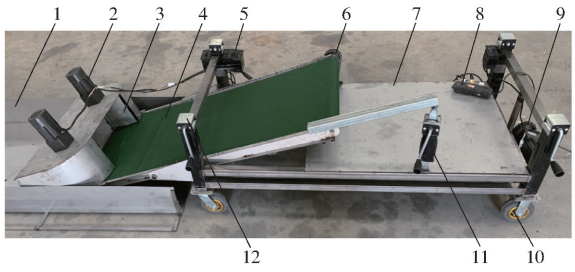

图 8　并排式双叶轮集料装置实物图

Fig. 8　Physical drawing of parallel double impeller collecting device

1. 地槽　2. 叶轮电动机　3. 弧形叶轮片　4. 输送带　5. 变频控制器　6. 输送带链轮　7. 集料升降台　8. 电源　9. 行走驱动链轮　10. 行走轮　11. 叶轮倾角调节杆　12. 叶轮-输送带一体升降杆

3.3　单因素试验

并排式双叶轮集料装置单因素试验主要研究集料装置前进速度、叶轮转速、叶轮倾角与集料效率、集料均匀度变异系数之间的变化关系，为后续组合优化试验选取合适的因素水平值提供参考。

3.3.1　前进速度

图 9 为叶轮倾角 15°，叶轮转速 15 r/min 时，叶轮前进速度对集料性能的影响。由图 9 可知，随着前进速度的增加，叶轮集料效率增加趋势先急后缓，集料均匀度变异系数先降低后增大。原因在于，随着前进速度增大，集料底板铲料、弧形叶轮片刮料填充量迅速增加，集料效率开始迅速增大；但随着前进速度进一步提高，弧形叶轮片单次集料填充量增多，甚至出现阻碍弧形叶轮片运动，易形成物料挤压黏结堵塞现象，集料效率增速减缓；而变异系数随着前进速度增加，进给量增加，弧形叶轮片集料量变得充分、均匀，变异系数降低，但随着前进速度持续增加，弧形叶轮片的前方物料填充量过大，存在相邻弧形叶轮片刮料量不均现象，变异系数反而增大。

3.3.2　叶轮倾角

图 10 为前进速度 0.03 m/s，叶轮转速 15 r/min 时，叶轮倾角对集料性能的影响。由图 10 可知，随着叶轮倾角的增加，集料效率和变异系数先升高然后降低。原因在于，叶轮倾角最小时，叶轮集料

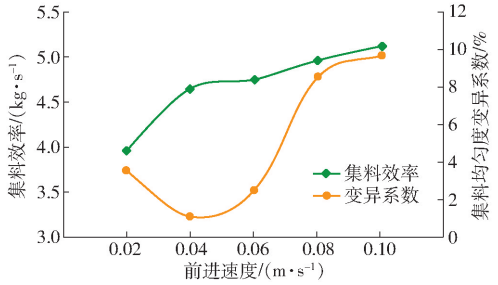

图 9 集料性能参数随前进速度的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of collecting performance parameters with forward speed

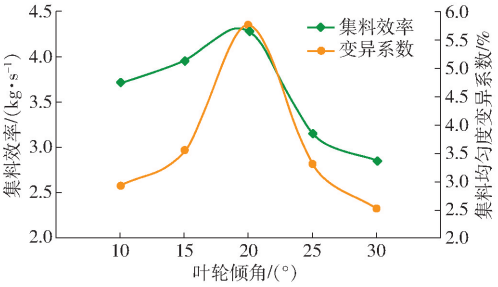

图 10 集料性能参数随叶轮倾角的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of collecting performance parameters with impeller angle

底板铲料不明显,主要依靠弧形叶轮片对作业前方的物料进行刮料,刮料量少,集料效率较低,但叶轮相邻弧形叶轮片刮料量相对较均匀,变异系数低;随着叶轮倾角增大,叶轮集料底板在一定前进速度条件下,对作业前方的物料进行铲料现象明显,物料堆积量明显增大,在自身重力、弧形叶轮片推力、物料与弧形叶轮片间滑动摩擦力等作用下,弧形叶轮片集料量增多,但易出现叶轮的相邻弧形叶轮片铲料量不均匀,变异系数提高;在叶轮倾角超过 20°时,叶轮集料底板及弧形叶轮片对物料的铲收、提升能力达到最大,然后受物料自身重力以及物料堆积滑动等因素影响而下滑,铲料与刮料能力降低,集料性能降低。同时,因为倾角增大,叶轮相邻弧形叶轮片集料量变小,但差异性降低,变异系数减小。

3.3.3 叶轮转速

图 11 为叶轮在前进速度 0.03 m/s,叶轮倾角 15°时,叶轮转速对集料性能的影响。由图 11 可知,随着叶轮转速的增加,集料效率先增加后降低,变异系数先降低后增大。原因在于,叶轮转速较低时,弧形叶轮片推送的物料运动缓慢,集料底板物料堆积现象严重,导致单位时间内集料效率降低,叶轮相邻弧形叶轮片推送、挤压的物料量变化差异增大,变异系数较高;叶轮转速较高时,单位时间内弧形叶轮片推送提升物料增加,集料效率增大,尤其是相邻弧形叶轮片挤压、推送物料较小,但均匀性增强,变异系数降低,在 10 ~ 20 r/min 范围内,保持相对稳定状态。但是当叶轮转速逐渐提高,因离心力的作用,弧形叶轮片产生侧向外抛现象,导致往内推送、挤压物料量减少,集料效率逐渐降低,尤其是叶轮相邻弧形叶轮片因离心力作用向外侧抛送物料量不一致,左右弧形叶轮片对向侧抛,导致集料物料不均匀度增加,变异系数提高;但是当叶轮转速超过 30 r/min 时,因为转速过高,弧形叶轮片离心力作用过大,集料量不断减小,集料效率持续降低,弧形叶轮片集料量变化幅度反而减小,变异系数降低。

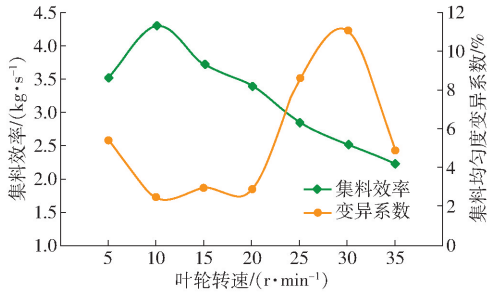

图 11 集料性能参数随叶轮转速的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of collecting performance parameters with rotating speed of impeller

3.4 响应面试验

3.4.1 试验设计

通过分析并排式双叶轮集料装置的前进速度、叶轮倾角、叶轮转速对集料性能影响的单因素试验,得到集料性能较好时的合理变化范围,在此基础上,以前进速度、叶轮倾角、叶轮转速为试验因素,集料效率和集料均匀度变异系数为评价指标,进行三因素三水平二次回归正交试验,试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Codes of test factors

编码	因素		
	前进速度 x_1/(m·s^{-1})	叶轮倾角 x_2/(°)	叶轮转速 x_3/(r·min^{-1})
-1	0.04	15	10
0	0.06	20	15
1	0.08	25	20

3.4.2 试验方案与结果

根据 Box - Behnken 试验原理设计的三因素三水平二次回归正交试验结果如表 2 所示[28],X_1、X_2、X_3为因素编码值。

3.4.3 回归模型建立与显著性检验

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行多元回归拟合分析,建立集料效率、集料均匀度变异系数对叶轮前进速度、叶轮倾角、叶轮转速的自变量编码值二次多项式回归模型

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Response surface analysis plan and test results

序号	因素			集料效率	集料均匀度变
	X_1	X_2	X_3	Y_1/(kg·s^{-1})	异系数 Y_2/%
1	−1	−1	0	3.99	3.62
2	1	−1	0	4.57	3.96
3	−1	1	0	3.23	3.87
4	1	1	0	3.84	3.96
5	−1	0	−1	3.19	3.15
6	1	0	−1	3.39	4.52
7	−1	0	1	2.22	3.03
8	1	0	1	3.24	2.95
9	0	−1	−1	4.14	3.05
10	0	1	−1	3.96	3.17
11	0	−1	1	4.18	2.72
12	0	1	1	3.43	2.68
13	0	0	0	4.21	2.88
14	0	0	0	4.35	2.65
15	0	0	0	4.15	2.62
16	0	0	0	4.52	2.75
17	0	0	0	4.48	2.64

$$Y_1 = 4.34 + 0.30X_1 - 0.30X_2 - 0.20X_3 + 7.5\times10^{-3}X_1X_2 + 0.21X_1X_3 - 0.14X_2X_3 - 0.68X_1^2 + 0.24X_2^2 - 0.66X_3^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 2.71 + 0.22X_1 + 0.041X_2 - 0.31X_3 - 0.063X_1X_2 - 0.36X_1X_3 - 0.04X_2X_3 + 0.83X_1^2 + 0.32X_2^2 - 0.12X_3^2 \quad (21)$$

对式(20)、(21)进行方差分析，结果如表 3 所示。由表 3 可知，响应面回归模型中集料效率 Y_1 和集料均匀度变异系数 Y_2 的 P 值均小于 0.001，模型极显著。失拟项 $P>0.05$，说明回归模型拟合度高。模型决定系数 R^2 分别为 0.969 1、0.955 9，表明 95% 以上的评价指标均可由上述 2 个模型进行优化分析。

将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项，对模型 Y_1、Y_2 进行优化得

$$Y_1 = 4.34 + 0.30X_1 - 0.30X_2 - 0.20X_3 + 0.2X_1X_3 - 0.68X_1^2 + 0.24X_2^2 - 0.64X_3^2 \quad (22)$$

$$Y_2 = 2.66 + 0.22X_1 + 0.041X_2 - 0.31X_3 - 0.36X_1X_3 + 0.82X_1^2 + 0.31X_2^2 \quad (23)$$

根据模型 Y_1、Y_2 的 P 值与模型 Y_1、Y_2 的失拟项 P 值可知优化模型可靠。试验因素影响叶轮集料效率的主次顺序为：叶轮倾角、前进速度、叶轮转速。试验因素影响集料均匀度变异系数的主次顺序为：叶轮转速、前进速度、叶轮倾角。

3.4.4　交互因素对集料性能影响效应分析

为了直观了解各交互因素对试验指标的影响，利用 Design-Expert 8.0.6 软件分别做出影响显著的各交互因素对集料效率与均匀度变异系数影响的响应面分析图，如图 12 所示。

表 3　回归模型方差分析

Tab. 3　Variance analysis of regression model

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	6.09	9	0.68	24.43	0.000 2
	X_1	0.73	1	0.73	26.20	0.001 4
	X_2	0.73	1	0.73	26.41	0.001 3
	X_3	0.32	1	0.32	11.69	0.011 1
	X_1X_2	2.25×10^{-4}	1	2.25×10^{-4}	8.118×10^{-3}	0.930 7
	X_1X_3	0.17	1	0.17	6.07	0.043 3
	X_2X_3	0.081	1	0.081	2.93	0.130 6
	X_1^2	1.92	1	1.92	69.42	<0.000 1
	X_2^2	0.25	1	0.25	8.86	0.020 6
	X_3^2	1.81	1	1.81	65.38	<0.000 1
	残差	0.19	7	0.028		
	失拟	0.089	3	0.030	1.13	0.437 6
	误差	0.11	4	0.026		
	总和	6.29	16			
Y_2	模型	5.16	9	0.57	16.88	0.000 6
	X_1	0.37	1	0.37	10.89	0.013 1
	X_2	0.014	1	0.014	0.40	0.546 8
	X_3	0.79	1	0.79	23.19	0.001 9
	X_1X_2	0.016	1	0.016	0.46	0.519 4
	X_1X_3	0.53	1	0.53	15.48	0.005 6
	X_2X_3	6.4×10^{-3}	1	6.4×10^{-3}	0.19	0.677 3
	X_1^2	2.87	1	2.87	84.58	<0.000 1
	X_2^2	0.43	1	0.43	12.58	0.009 4
	X_3^2	0.062	1	0.062	1.83	0.218 2
	残差	0.24	7	0.034		
	失拟	0.19	3	0.064	5.40	0.068 5
	误差	0.047	4	0.012		
	总和	5.40	16			

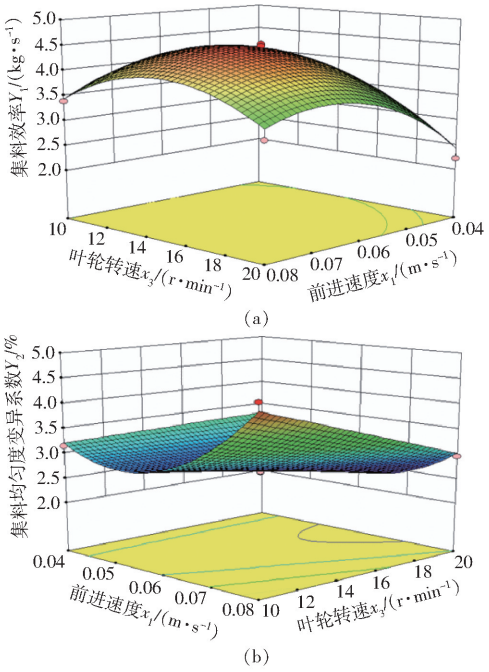

图 12　交互因素对集料效率和均匀度变异系数影响的响应曲面($x_2=20°$)

Fig. 12　Response surfaces of collecting efficiency and variable coefficient of collecting uniformity to interactive factors

图 12a 为并排式双叶轮集料装置在叶轮倾角位于中心水平(20°)时,前进速度与叶轮转速对集料效率 Y_1 交互作用的响应面图。由图 12a 可知,随着前进速度增加,集料效率先增加后减小;随着叶轮转速的增加,集料效率先增加后减小。且在中心水平下,前进速度对集料效率的影响比叶轮转速的影响幅度明显一些。原因在于,前进速度逐渐提高时,弧形叶轮片单位时间内集料量逐渐增加,集料效率提高;但当前进速度过高时,弧形叶轮片前方物料堆积不断增多,双叶轮的弧形叶轮片交界处产生堵塞积压现象、前进阻力增加,集料效率不稳定,导致集料效率降低。叶轮转速较低时,相邻弧形叶轮片集料量分散程度高,单位时间集料量降低;叶轮转速过高,叶轮相邻弧形叶轮片集料量均匀度较高,能较好形成稳定的物料流,尽管单个弧形叶轮片集料量明显降低,集料效率相对降低。

图 12b 为并排式双叶轮集料装置在叶轮倾角位于中心水平(20°)时,叶轮前进速度与叶轮转速对集料均匀度变异系数 Y_2 交互作用的响应面图。由图 12b 可知,随着前进速度的增加,均匀度变异系数先减小后增大,随着叶轮转速的增加,均匀度变异系数逐渐减小。原因在于,前进速度较小,集料底板铲料量降低,叶轮弧形叶轮片依次集料量较均匀,均匀度变异系数小;前进速度过高,集料底板铲料量增多,双叶轮弧形叶轮片交界处积压堵塞的物料增多,弧形叶轮片依次集料量不均匀度增大,均匀度变异系数升高。随着叶轮转速的增加,单位时间内弧形叶轮片集料次数增加,降低了叶轮前方物料积压量,相邻弧形叶轮片依次集料量虽然降低,但整体均匀性变好,均匀度变异系数降低。

4 参数优化与验证

为达到并排式双叶轮集料装置最佳的集料性能,并为后续提供连续的虫沙物料流,以便提高分选效率,需要使集料效率较高,集料均匀度变异系数较小。通过交互因素对集料效率与集料均匀度变异系数的影响效应分析可知:当要获得较高的集料效率,就要满足前进速度、叶轮转速、叶轮倾角位于中心水平;要满足集料均匀度变异系数较低,就要满足前进速度与叶轮倾角位于中心水平、叶轮转速较高。考虑各因素指标对响应值的影响程度变化不同,需进行多目标优化分析。

按照集料效率最大、集料均匀度变异系数最小的原则,运用 Design-Expert 8.0.6 软件对 2 个指标的全因子二次回归模型最优化进行求解,目标函数约束条件为

$$\begin{cases} \mathrm{Max}Y_1 \\ \mathrm{Min}Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

根据 2 个指标的重要性,设置集料效率与集料均匀度变异系数的权重分配配集为 $W = \{0.5, 0.5\}$。优化后得到最优工作参数组合为:前进速度为 0.06 m/s、叶轮倾角为 17.72°、叶轮转速为 15.85 r/min,此时集料效率为 4.54 kg/s,集料均匀度变异系数为 2.66%。根据优化结果,对数据进行取整,将前进速度设置为 0.06 m/s、叶轮倾角为 18°、叶轮转速为 16 r/min,其他条件不变,再次用软件求优,优化参数结果为集料效率 4.50 kg/s,集料均匀度变异系数 2.63%。为验证模型预测的准确性,在此方案下重复试验 3 次,取平均值,结果如表 4 所示。

表 4 模型优化与试验对比

Tab.4 Comparison between model optimization and experiment

项目	集料效率 Y_1/(kg·s^{-1})	集料均匀度变异系数 Y_2/%
试验值	4.67	2.81
优化值	4.50	2.63
相对误差/%	3.78	6.84

通过表 4 可知,试验结果与优化后的理论值相对误差分别为 3.78% 与 6.84%,可以看出 Y_1、Y_2 的试验值与理论优化值较接近,参数优化模型可靠。

5 结论

(1)针对黑水虻虫沙集料作业劳动强度大的问题,根据地槽黑水虻养殖特点与黑水虻虫沙工艺,采用理论与试验相结合的方法,设计了一种并排式双叶轮集料装置,通过双叶轮对向旋转集料,提高了地槽层铺状态黑水虻虫沙的集料效率,降低了劳动强度,并为虫沙分选提供了连续的物料流。

(2)采用 Box - Behnken 试验方法进行回归分析可知,并排式双叶轮集料装置的前进速度、叶轮转速、叶轮倾角对集料效率影响主次顺序依次为叶轮倾角、前进速度、叶轮转速;各因素对集料均匀度变异系数影响主次顺序依次为叶轮转速、前进速度、叶轮倾角。

(3)并排式双叶轮集料装置最优工作参数为前进速度 0.06 m/s、叶轮倾角 18°、叶轮转速 16 r/min,试验结果为集料效率 4.67 kg/s,集料均匀度变异系数 2.81%,与优化后的理论值相对误差分别为 3.78% 与 6.84%,验证了模型参数的准确性,基本满足试验设计要求。

参 考 文 献

[1] GOLD M, TOMBERLIN J K, DIENER S, et al. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review[J]. Waste Management, 2018, 82: 302 – 318.

[2] ZHU Fengxiang, YAO Yanlai, WANG Sujuan, et al. Housefly maggot-treated composting as sustainable option for pig manure management[J]. Waste Management, 2015, 35: 62 – 67.

[3] KASHIFUR R, MINMIN C, XIAO Xiaopeng, et al. Cellulose decomposition and larval biomass production from theco-digestion of dairy manure and chicken manure bymini-livestock (*Hermetia illucens* L.)[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 196: 458 – 465.

[4] WANG Shengyin, WU Lingli, LI Baoling, et al. Reproductive potential and nutritional composition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) prepupae reared on different organic wastes[J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 113(1): 527 – 537.

[5] CUTRIGNELLI M, MESSINA M, TULLI F, et al. Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute: intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens[J]. Research in Veterinary Science, 2018, 117: 209 – 215.

[6] 张放,朱建平,张政,等.黑水虻虫粉对育肥猪生长性能、血清指标和养分消化率的影响[J].河南农业科学, 2017, 46(6): 130 – 133, 146.
ZHANG Fang, ZHU Jianping, ZHANG Zheng, et al. Effects of black soldier fly meal on growth performance, serum indices and nutrient apparent digestibility in growing-finishing pigs[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(6): 130 – 133, 146. (in Chinese)

[7] 韩星星,叶坤,王志勇,等.脱脂黑水虻虫粉替代鱼粉对大黄鱼幼鱼生长、体成分、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J].中国水产科学, 2020, 27(5): 524 – 535.
HAN Xingxing, YE Kun, WANG Zhiyong, et al. Effect of substitution of fish meal with defatted black soldier fly larvae meal on growth, body composition, serum biochemical parameters, and antioxidant capacity of juvenile large yellow croaker (*Larimichthyscrocea*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(5): 524 – 535. (in Chinese)

[8] 余苗,李贞明,容庭,等.黑水虻在低碳畜牧业中的应用研究进展[J].广东农业科学, 2020, 47(12): 122 – 133.
YU Miao, LI Zhenming, RONG Ting, et al. Research progress in the application of *Hermetia illucens* in low-carbon animal husbandry[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(12): 122 – 133. (in Chinese)

[9] 徐齐云,龙镜池,叶明强,等.黑水虻幼虫的发育速率及食物转化率研究[J].环境昆虫学报, 2014, 36(4): 561 – 564.
XU Qiyun, LONG Jingchi, YE Mingqiang, et al. Development rate and food conversion efficiency of black soldier fly, *Hermetia illucens*[J]. Journal of Environmental Entomology, 2014, 36(4): 561 – 564. (in Chinese)

[10] 袁橙,魏冬霞,解慧梅,等.黑水虻幼虫处理规模化猪场粪污的试验研究[J].畜牧与兽医, 2019, 51(11): 49 – 53.
YUAN Cheng, WEI Dongxia, XIE Huimei, et al. Research on treatment of fecal pollution on large scale pig farms with black soldier fly larva[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2019, 51(11): 49 – 53. (in Chinese)

[11] YU M, LI Z M, CHEN W D, et al. Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source: effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs[J]. Meat Science, 2019, 158: 107839.

[12] NEWTON L, SHEPPARD C, WATSON D W, et al. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-addedtool for the management of swine manure[D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2005.

[13] 彭才望,孙松林,贺喜,等.双向螺旋黑水虻虫沙收集装置设计与试验[J].浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(5): 637 – 646.
PENG Caiwang, SUN Songlin, HE Xi, et al. Design and experiment of bidirectional spiral collecting device for *Hermetia illucens* insect sand[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2020, 46(5): 637 – 646. (in Chinese)

[14] 彭才望,贺喜,孙松林,等.斗式黑水虻处理猪粪有机肥取料机设计与试验[J/OL].农业机械学报, 2021, 52(2): 145 – 156.
PENG Caiwang, HE Xi, SUN Songlin, et al. Design and experiment on shoveling device of pig manure organic fertilizer by *Hermetia illucen* transforming based on bucket-wheel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 145 – 156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210213&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.013. (in Chinese)

[15] 段永改,陈伟.一种小型黑水虻自动养殖系统及其养殖方法:201910515101.5[P].2019 – 06 – 14.

[16] 卢强林.一种黑水虻养殖装置和养殖方法:201710932511.0[P].2017 – 10 – 10.

[17] 毛洪,魏敏,李燕.一种用于处理厨余垃圾的黑水虻幼虫筛分装置:202011132396.7[P].2020 – 10 – 21.

[18] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等.锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J/OL].农业机械学报, 2018, 49(6): 85 – 91, 111.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Optimization and experimentin conical of fertilizer particle motion model spreading disk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 85 – 91, 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180610&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.010. (in Chinese)

[19] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等.锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J].农业工程学报, 2016, 32(11): 16 – 24.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 16 – 24. (in Chinese)

[20] 刘宏新,王佳兴,苏航,等. 倾斜对置圆盘侧抛式有机肥撒播机设计及关键部件研究[J]. 东北农业大学学报,2018,49(8):83 -90,98.
LIU Hongxin,WANG Jiaxing,SU Hang,et al. Design on side type discharge organic fertilizer spreader with inclined opposite discs and research on its key components[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(8):83 -90,98. (in Chinese)
[21] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等.叠片式啮合圆弧齿轮排肥器设计与仿真试验[J].中国农业科技导报,2020,22(5):78 -85.
DUN Guoqiang,YU Chunling,GUO Yanling,et al. Design and simulation test of laminated-type meshing arc gear fertilizer device[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020,22(5):78 -85. (in Chinese)
[22] 康建明,王士国,颜利民,等.残膜回收机起膜铲设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):143 -148.
KANG Jianming,WANG Shiguo,YAN Limin,et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):143 -148. (in Chinese)
[23] 彭才望,许道军,贺喜,等.黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J[.农业工程学报,2020,36(17):212 -218.
PENG Caiwang,XU Daojun,HE Xi,et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for organic fertilizer of *Hermetia illucen* treated with pig manure[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(17): 212 -218. (in Chinese)
[24] 蔡维克.质点在绕水平轴等速旋转一般柱面型弧形叶轮片上运动的微分方程[J].四川工艺学院学报,1984(2):71 -76.
[25] 胡瑞谦.质点在绕水平轴等速旋转平面型弧形叶轮片上运动的分析[J].农业机械学报,1980,11(4):62 -72.
HU Ruiqian. The motive analysis of particle which is on the blade of plane type, the blade rotate round a horizontal axle with constant angular velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1980,11(4):62 -72. (in Chinese)
[26] 刘进宝,郑炫,赵岩,等. 新型杆齿滚筒式残膜捡拾机构的设计与试验[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):300 -306.
LIU Jinbao, ZHENG Xuan, ZHAO Yan, et al. Design and experiment of a new rod-toothed residual film pick-up mechanism [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(6): 300 -306. (in Chinese)
[27] 穆道欢,杨宛章. 残膜回收机弹齿式捡拾机构的设计及试验研究[J]. 农机化研究,2015,37(11):91 -94.
MU Daohuan, YANG Wanzhang. Design and experimental study of the elastic-type pick-up mechanism of residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 91 -94. (in Chinese)
[28] 徐中儒. 回归分析与试验分析[M]. 北京:中国农业出版社,1998.

(上接第 84 页)

[11] 罗金海,孙佳民,杨莉,等.9BQS -3.0 型气吹式松土播种复式作业机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):51 -55,66.
LUO Jinhai, SUN Jiamin, YANG Li, et al. Design and experiment of type 9BQS -3.0 pneumatic scarifying and sowing compound operation machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 51 -55, 66. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2013s110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.010. (in Chinese)
[12] 马锦颖,王方永,韩焕勇.种植模式对棉花农艺及产量和品质的影响[J].中国棉花,2019,46(6):28 -30.
MA Jinying, WANG Fangyong, HAN Huanyong. Effect of planting patterns on cotton agronomy characters, yield and fiber quality[J]. China Cotton, 2019, 46(6): 28 -30. (in Chinese)
[13] 蔡佳麟,张佳喜,叶尔波拉提·铁木尔,等.夹持带式棉秆收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(10):152 -160.
CAI Jialin,ZHANG Jiaxi,YEERBOLATI·Tiemuer, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10): 152 -160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.017. (in chinese)
[14] 陈佳林,曹肆林,卢勇涛,等.棉秆起拔力关键因素的研究及试验[J].农机化研究,2019,41(5):148 -151,167.
CHEN Jialin, CAO Silin, LU Yongtao, et al. The study and test of key factors of cotton stalk pulling force[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5): 148 -151, 167. (in Chinese)
[15] 宋占华,肖静,张世福,等.曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(增刊):162 -167.
SONG Zhanhua, XIAO Jing, ZHANG Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.): 162 -167. (in Chinese)
[16] ZHANG Guzhong,LI Yi,LI Zhaodong. Measuring system of cotton stalk real-time pull force in the field based on LabVIEW[C]// ASABE 2014 Annual International Meeting,Paper 141912493,2014.
[17] 何学迎.拉拔式棉秆拔秆装置的设计与试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2016.
HE Xueying. Design and experimental research of cotton stalk pulling-out mechanism[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)