

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.007

槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置设计与试验

游兆延¹ 徐弘博¹ 高学梅¹ 吴惠昌¹ 颜建春¹ 李忠义²

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007)

摘要:为解决现有绿肥播种方式作业时存在的排种器适用性不强、撒播作业质量不高、生产效率低等问题,设计了一种槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置,设计了棱锥型种箱、槽穴组合式排种器、定量电动匀播组件等关键部件。试验测量了8种主要绿肥品种滑动摩擦角,设计棱锥型种箱最小倾面角为35.5°;根据所播绿肥种子大小、千粒质量和单位面积用种量等因素选择槽穴组合式排种器的排种通道并设定了通道有效开度;应用EDEM软件构建匀播机构排种仿真模型,验证了匀种圆柱直径在3.2~6.8 mm时,种子经匀种圆柱碰撞落地后的概率分布规律较好。以青弋江1号为试验材料,通过多因素试验和回归分析,得出影响出苗率和撒播均匀性变异系数的主次因素均为:排种轮转速、匀种圆柱直径、机具前进速度;影响各行排量一致性变异系数的主次因素依次为:匀种圆柱直径、机具前进速度、排种轮转速;最终确定影响槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置播种质量最佳因素参数组合为:机具前进速度3.36 km/h,排种轮转速44 r/min,匀种圆柱直径6.14 mm。通过田间试验验证,最优参数组合条件下紫云英绿肥出苗率为96.49%,各行排量一致性变异系数11.73%,播种均匀性变异系数8.67%,与模型预测优化结果的相对误差均小于6%,验证了所建模型与优化参数的合理性,与已有的绿肥播种方式相比,槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置作业效率为0.8~1.0 hm²/h,优于人工撒播作业效率0.1~0.125 hm²/h、手摇撒播作业效率0.2~0.3 hm²/h和电动喷播作业效率0.5~0.8 hm²/h,低于无人机飞播作业效率3~4 hm²/h。

关键词: 绿肥播种机; 槽穴组合式; 多品种; 匀播装置

中图分类号: S223.2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0054-10

Design and Experiment of Trough-hole Combined Type Multi-variety Green Manure Quantitative Electric Evenly-sowed Mechanism

YOU Zhaoyan¹ XU Hongbo¹ GAO Xuemei¹ WU Huichang¹ YAN Jianchun¹ LI Zhongyi²

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to solve the problems of low applicability of seed metering device, low quality of seeding operation and low production efficiency existing in the current seeding methods of green manure, a trough-hole combined type multi-variety green manure quantitative electric evenly-sowed mechanism was developed, the key components such as the pyramid seed box, the trough-hole combined type seed metering device and quantitative electric evenly-sowed components were designed. The sliding friction angles of the eight main green manure varieties were measured, and the minimum inclined surface angle of the designed pyramid seed box was 35.5°, on the basis of the seed size, totally 1000 grain weight and seed consumption of per unit area, the seeding channel of the trough-hole combined type seed metering device could be selected and the effective opening of the channel could be set as well, by using EDEM software, the simulation model of the evenly-sowed mechanism was built, and it was verified that the probability distribution of the seed fallen on the ground after colliding with the cylinder was quite consistent when the diameter of cylinder was ranged from 3.2 mm to 6.8 mm. Qingyijiang NO. 1 was used as the test material, the multiple factor experiments, as well as regression analysis of the test data were

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 国家绿肥产业技术体系专项资金项目(CARS-22)和中国农业科学院所级基本科研业务费专项(S202012)

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: 吴惠昌(1973—),男,研究员,主要从事农产品加工与农业装备智能化研究,E-mail: huichangwu@126.com

carried out, the results showed that among the three factors in the experiment, the rotation speed of sowing wheel had the greatest influence on the emergence rate and uniformity variation coefficient of sowing, while the forward speed of machine had the least influence on the emergence rate and variation coefficient of sowing uniformity, regarding the stability variation coefficient of each row sowing quantity, the most influential factor was the even-distributed cylinder diameter, and the minimum impact factor was the rotation speed of sowing wheel, the optimal factor parameters combination which affected the sowing quality of the trough-hole combined type multi-variety green manure quantitative electric evenly-sowed mechanism was as follows: machine forward speed was 3.36 km/h, rotation speed of sowing wheel was 44 r/min, even-distributed cylinder diameter was 6.14 mm. Verified by field experiments, the *Astragalus smicus* emergence rate was 96.49%, consistency variation coefficient of each row sowing quantity was 11.73%, variation coefficient of sowing uniformity was 8.67% in the condition of the optimal parameter combination, the relative error was below 6% compared with optimal values predicted by the model, which validated the optimal values of the three factors. Compared with the existing methods of sowing *Astragalus smicus* seeds, the designed trough-hole combined type multi-variety green manure quantitative electric evenly-sowed mechanism had a work efficiency of 0.8 hm²/h to 1.0 hm²/h, which was superior to the artificial sowing efficiency of 0.1 hm²/h to 0.125 hm²/h, the hand-shaking efficiency of 0.2 hm²/h to 0.3 hm²/h and the motorized sowing efficiency of 0.5 hm²/h to 0.8 hm²/h, which was lower than the UAV sowing efficiency of 3 hm²/h to 4 hm²/h. In addition, the seeding quality was also significantly superior to that of other methods, which had a good prospect for application.

Key words: green manure seeder; trough-hole combined type; multi-variety; evenly-sowed

0 引言

种植绿肥具有改变土壤理化性质、增加土壤有机质、提高作物产量和品质等优点,同时也是轮作休耕、耕地质量提升、化学肥料减施的重要绿色生产方式^[1-6]。实行豆科、禾本科和十字花科等多种绿肥作物混播,可充分利用空间和光能,增强植株的抗逆性,减少烂茎黄叶,使单位面积总苗数倍加,提高田间覆盖度,利用绿肥作物根系的固氮作用,积累土壤中的有机质,改良其理化性状^[7]。

国外绿肥播种已开始向机械化联合作业和多品种混播发展,如罗马尼亚 Moreni 公司研制出一款果园绿肥播种施肥机,可一次完成浅旋、播种、施肥、镇压等作业环节,英国 Simba Horsch 公司研制的双排种器同步播种机可一次性播种绿肥和其他作物种子。国内外现有绿肥播种方法主要有人工撒播、手摇撒播、电动喷播、播种开沟组合作业、无人机飞播等方式^[8-11],采用以上播种方式作业时主要有两方面亟需解决的问题,一是绿肥种子利用率、发芽率、播种均匀性等关键指标尚不能完全满足生产作业质量要求,二是绿肥种子易在种箱落种口附近堆积,导致种子无法完全进入排种器,且一种播种设备大多只适合播形状差异不大的绿肥种子,排种器适用性还不够,无法满足当前农业机械向多功能多用途方向发展的需要。

针对上述生产需求和国内现有绿肥播种方式的弊端,本文设计一种槽穴组合式多品种绿肥定量电

动匀播装置,以期提高播种质量的同时,适应多个绿肥品种的排种要求。通过优化试验确定影响该装置绿肥播种质量的因素最佳参数组合,为绿肥高效高质播种作业提供一种新方法。

1 装置整体结构与工作原理

1.1 装置结构

槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置结构示意图如图 1 所示,主要由盖板、棱锥型种箱、左侧安装板、右侧安装板、槽穴组合式排种器、定量电动调速组件、匀播机构等组成。12 组独立的棱锥型种箱并列固定安装在左、右两侧安装板上,槽穴组合式排种器经传动轴安装在棱锥型种箱出料口正下方,播种调速组件与槽穴组合式排种器采用链驱动连接方

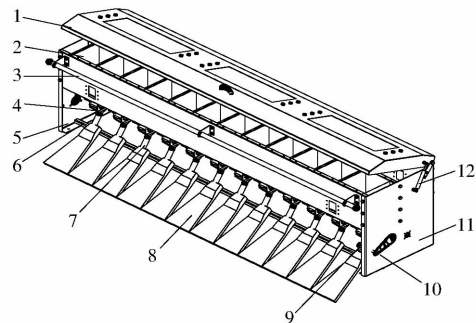


图 1 槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置示意图

Fig. 1 Diagram of trough-hole combined type multi-variety green manure quantitative electric evenly-sowed mechanism

1. 盖板 2. 棱锥型种箱 3. 扶杆 4. 槽穴组合式排种器 5. 左侧安装板 6. 支撑梁 7. 输种管 8. 匀播机构 9. 定量电动调速组件 10. 链轮 11. 右侧安装板 12. 气弹簧

式,盖板由气弹簧实现打开和闭合,盖板上内嵌设置有3个塑料玻璃视窗,便于驾驶员观察绿肥种子剩余量情况。

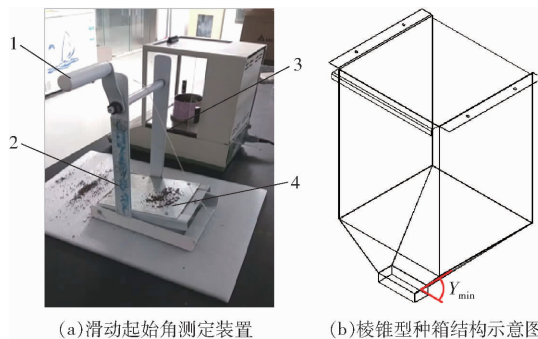
1.2 工作原理

工作时,首先将棱锥型种箱装满所播绿肥种子,根据所播绿肥品种播种量要求和混播农艺要求,调整好槽穴组合式排种器和排种调速组件各位置结构和工作参数,槽穴组合式排种器在播种调速组件控制下实现定量播种,排种器落种口播下的绿肥种子经输种管后进入匀播机构,最后经匀播机构均匀地撒播到地表完成播种作业。

2 关键部件参数设计

2.1 棱锥型种箱设计

为解决现有部分种箱种子在落种口附近堆积,



存在输种不畅和排种不彻底的问题,设计适应多款绿肥种子顺畅落种的棱锥型种箱,滑动起始角是棱锥型种箱结构设计的关键参考依据。图2a所示为自制的滑动起始角测定装置,主要由摇动手柄、支架、拉线、落种板等组成,其中落种板随着摇动手柄的摇转可由 0° 旋转至 90° ,为保证测定参数的准确性,落种板选用钢材与实际种箱材料保持一致,依次测量8种不同绿肥种子的滑动起始角,待落种板上绿肥种子开始持续滑动时,记录下此时落种板与水平面夹角,即为该绿肥种子的滑动起始角^[12],其中黑麦草种子滑动起始角最大为 30° ,油菜种子滑动起始角最小为 11.3° ,故设计棱锥型种箱如图2b所示,种箱最小倾面角 Y_{\min} ,取 Y_{\min} 为 35.5° ,该倾面角大于测得的最大黑麦草种子滑动起始角,确保绿肥种子都能顺畅进入排种器,图2c为测定的各品种绿

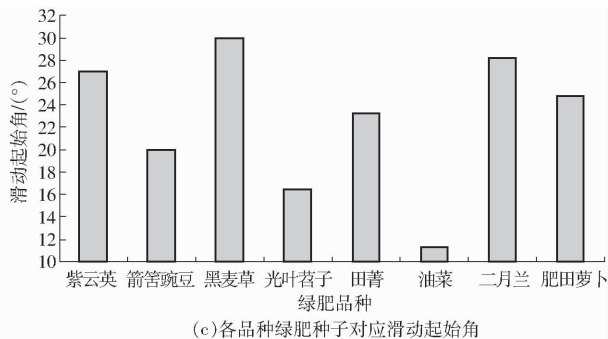


图2 棱锥型种箱

Fig. 2 Design of pyramid seed box

1. 摇动手柄 2. 支架 3. 拉线 4. 落种板

肥对应滑动起始角。

2.2 撒播部件

撒播部件是槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置的核心部件,主要由12个槽穴组合式排种器和12套定量电动匀播组件组成。

2.2.1 槽穴组合式排种器

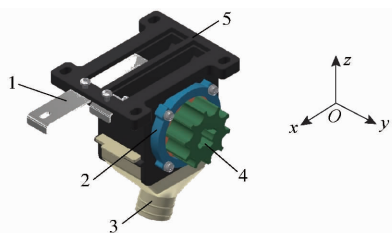
排种器设计为槽穴组合式,如图3a所示,每个排种器内置金属穴式排种辊,排种器内的排种轮采用同轴固定,并由调速电机驱动同步转动,开度调节插销可以对排种装置的接种口沿 x 向的长度进行调节,与沿 y 向的排种辊投影面的调节同时作用,进一步提升了排种量的调节精度。排种辊分为两段,一段外表面阵列设置为窝穴式,另一段外表面设置为齿槽式,图3b是采用窝穴式排种方式时不同撒播投影面积示意图,通过调节排种辊沿 y 向的位置,从而调节排种辊上的排种穴在投影面内露出的3种不同程度。图中,自左向右,3种状态排种穴在投影面下露出的程度逐渐减小。图3c是采用齿槽式排种方式时,通过调节排种辊沿 y 向的位置,从而调节排种辊上的排种槽在投影面内露出的3种不同程度的示

意图。图中自左向右,3种状态排种槽在投影面下露出的程度逐渐减小。

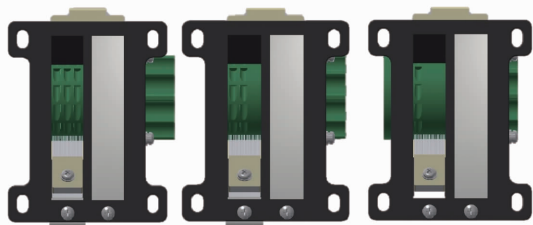
2.2.2 定量电动匀播组件

定量电动匀播组件主要由定量电动调速组件和匀播机构组成,定量电动调速组件实物图如图4所示,播种作业时定量电动调速组件可根据每个独立棱锥型种箱中绿肥品种所需单位面积播种量,实时输出直流调速电机转速控制信号,实现定量播种。

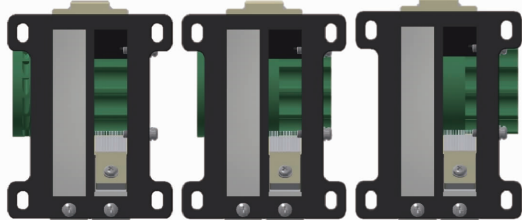
对设计的定量电动调速组件进行场地排种试验,以紫云英绿肥品种青弋江1号为试验材料,当排种轮转速为 $44 \sim 52 \text{ r/min}$ 时,排种轮每圈空隙每分钟落入料盒的排种质量为 $40 \sim 48 \text{ g}$,满足紫云英 $22.5 \sim 30 \text{ kg/hm}^2$ 的播种量需求^[13-14]。匀播机构结构如图5a所示,由在落种槽中上、下2行错位配置7个水平等间距匀种圆柱构成,匀播机构参数设计如下:落料槽上下2条边长度分别为 $L_1 = 60 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 200 \text{ mm}$,落料槽的最长边 $L_3 = 600 \text{ mm}$,上下两行匀种圆柱间的高度差 $L_4 = 150 \text{ mm}$, L_5 为相邻2个匀种圆柱间的空隙距离,随匀种圆柱直径的变化而变化。



(a)槽穴组合式排种器结构示意图



(b)窝穴式排种方式下排种辊不同位置示意图



(c)齿槽式排种方式下排种辊不同位置示意图

图 3 槽穴组合式排种器结构及不同排布方式

Fig. 3 Structure and different arrangements of trough-hole combined type seed metering device

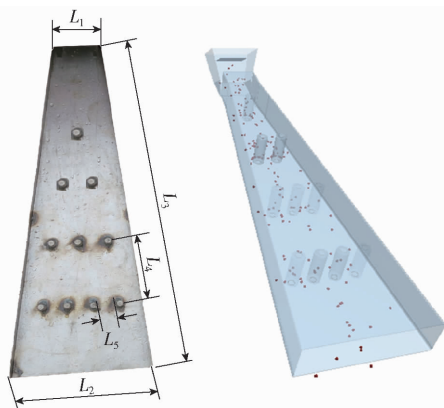
1. 开度调节插销 2. 挡圈 3. 输种管 4. 排种辊 5. 排种架

为反映匀种圆柱间的间隙距离对排种效果的影响,应用 EDEM 软件构建匀播机构排种仿真模型,如图 5b 所示。鉴于紫云英种子的撒播过程不涉及紫云英种子间的黏结作用,因此本研究选择 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型作为紫云英种子颗粒与紫云英种子颗粒以及紫云英种子颗粒与匀播机构之



图 4 定量电动调速组件

Fig. 4 Quantitative electric speed-control unit



(a)匀播机构 (b)匀播机构仿真模拟

图 5 匀播组件结构与仿真模拟

Fig. 5 Structure and simulation of evenly-sowed component

间的接触模型,并确定紫云英种子颗粒和匀播机构的相关材料和接触力学参数,相关参数设置如表 1 所示。

目前还没有紫云英种子撒播机构作业的评价标准,参考小麦等其它作物种子撒播效果评价方法,以紫云英种子颗粒的横向均匀度变异系数作为匀播机构的横向均布效果参量^[15-16],选取模拟种床长度

表 1 材料间接触模型的参数设置

Tab. 1 Parameter setting of contact model between materials

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
绿肥种子颗粒	0.4	1.00 × 10 ⁶	243	0.5	0.3	0.3
匀播机构	0.3	7.90 × 10 ¹⁰	7 865	0.6	0.3	0.01

1 000 mm 作为紫云英种子横向分布数据获取区域,匀播机构作业宽度为 200 mm,设置 Grid Bin Group,将中间 1 000 mm × 200 mm 区域均分为 25 个网格单位,如图 6 所示,然后对抽样网格内的紫云英颗粒数目进行统计,其中 t_{ij} 为第 i 行第 j 列网格内的紫云英颗粒数目。

分别求解网格单元内紫云英籽粒平均数目为

$$\begin{cases} \bar{t}_i = \frac{1}{u} \sum_{j=1}^u t_{ij} \\ \bar{t} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \bar{t}_i \end{cases} \quad (1)$$

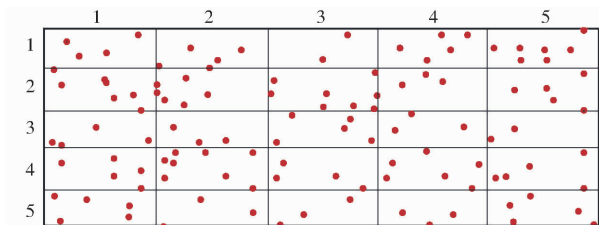


图 6 抽样区域数据采集

Fig. 6 Data collection in sampling area

式中 \bar{t}_i ——第 i 行所有网格单元内紫云英籽粒的平均数目

\bar{t} ——每列网格单元内紫云英籽粒平均数目

u ——每行网格的数目,取 $u=5$

v ——每列网格的数目,取 $v=5$

计算网格单元内紫云英籽粒数目标标准差为

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{v-1} \sum_{i=1}^v (\bar{t}_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

计算紫云英籽粒数目横向均匀度变异系数为

$$\tau = \frac{\rho}{\bar{t}} \times 100\% \quad (3)$$

在 EDEM 中模拟更换不同直径的匀种圆柱来改变匀种圆柱间的空隙距离,仿真观察种子从排种轮落下经匀种圆柱碰撞后的概率分布规律,仿真结果表明:当匀种圆柱间的空隙距离过小时,会发生堵种现象,而当圆柱间的空隙距离过大时,又会出现种子分布明显不均现象。经多次仿真模拟和横向均匀度变异系数公式计算可知,当匀种圆柱直径在 3.2 ~ 6.8 mm 时,紫云英种子颗粒的横向均匀度变异系数范围为 8.3% ~ 10.1%,匀播机构具有较好的排种效果。

3 室内试验与结果分析

为初步评价撒播部件的排种分布均匀性和撒种量准确性,对撒播开沟机撒播部件进行室内性能试验。

3.1 试验方法

室内撒播性能试验在农业农村部南京农业机械化研究所白马基地机具存放车间进行,如图 7 所示。试验材料为青弋江 1 号,紫云英种子千粒质量为 3.5 g,试验方法为:在厂房地面上标定长 9.5 m、宽 4 m 的区域,按 11 × 18 矩阵摆放物料盒(24 cm × 16.5 cm × 6 cm)198 个,将撒播部件装满紫云英种子并固定在车间叉车上。

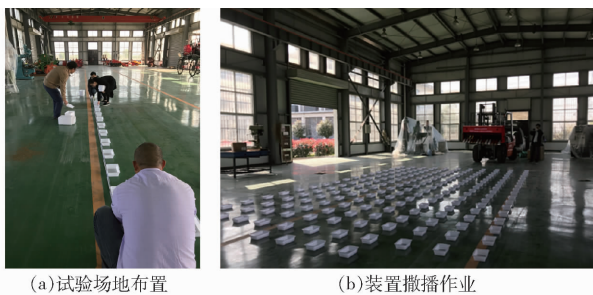


图 7 室内撒播性能试验

Fig. 7 Indoor performance test of sowing

针对撒播部件撒播质量和撒播可靠性要求,以单位面积排种量误差和播种均匀性变异系数为评价指标。根据前期排种试验可知,满足紫云英 22.5 ~ 30 kg/hm² 播种量需求时的排种轮转速范围为 44 ~ 52 r/min, EDEM 仿真分析结果得到,匀播机构具有

较好的排种效果时,匀种圆柱直径范围为 3.2 ~ 6.8 mm,机具前进速度则参考小麦、大豆等撒播机一般作业速度 3 ~ 5 km/h^[17]。鉴于上述工作基础,将室内撒播试验工作参数设置如下:机具前进速度为 4 km/h,排种轮转速设定为 44 r/min,匀种圆柱直径选择 3.2 mm,由于机收水稻后地块留茬高度最高超过 600 mm,试验时将撒播高度调整为 700 mm,试验过程中撒播作业往返共计 10 个行程,行程结束后分别记下各物料盒内最终的种子质量,试验重复 3 次取平均值,试验指标计算公式为

$$\gamma = \frac{\left| \frac{M}{S} - Q \right|}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

式中 γ ——单位面积排种量误差, %

M ——试验区域内的种子颗粒总质量, g

S ——试验区域面积, m²

Q ——理论目标排种量, g/m²

$$U_c = \frac{s}{\bar{U}} \times 100\% \quad (5)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \quad (7)$$

式中 n ——所有播行测量的测区个数

\bar{U} ——每个测区内的平均种子数量,粒

U_i ——每测区内种子数量,粒

s ——播种均匀性标准差

U_c ——播种均匀性变异系数, %

3.2 试验结果

室内撒播性能试验结果如表 2 所示,经计算,3 次播种均匀性变异系数试验中单位面积排种量误差最大为 4.90%,最小为 3.87%,播种均匀性变异系数最大为 7.59%,3 次试验单位面积排种量误差和播种均匀性变异系数平均值分别为 4.36% 和 7.28%,满足相关标准对播种质量的要求^[18],槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置排种分布均匀性和撒种量准确性较好。

表 2 室内撒播性能试验结果

Tab. 2 Performance results of indoor sowing test %

试验号	排种量误差 γ	变异系数 U_c
1	4.30	7.37
2	3.87	6.87
3	4.90	7.59
平均值	4.36	7.28

4 田间试验与结果分析

4.1 试验条件

在室内试验的基础上,槽穴组合式多品种绿肥种子定量电动匀播装置撒播田间试验在 2019 年 10 月芜湖南陵机收水稻留茬地进行(图 8),试验地水稻留茬高度为 100 ~ 350 mm,按水稻草谷比 1.09 来计算^[19],秸秆量约为 9 320 kg/hm²,土壤含水率由 TZS 型土壤水分测定仪测得为 27.1%,容重 1.26 ~ 1.32 g/cm³,试验材料为青弋江 1 号,紫云英种子千粒质量为 3.3 ~ 3.5 g,图 8 配套动力为中联耕王 RM-904 型拖拉机。



图 8 田间试验

Fig. 8 Field experiment

4.2 试验方法

试验时将田块分为 3 个小区,每个试验小区长为 30 m,宽 16 m,每次行程共播 10 行,试验后用 30 cm 宽度线框在每个播行内框出测区,剩余 2 个小区依次进行相同试验。

为考察紫云英撒播开沟机的播种作业质量,参考 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》、GB 8080—2010《绿肥种子》及播种实际情况,选择出苗率、各行排量一致性变异系数及播种均匀性变异系数为播种性能评价指标。

出苗率是种子破土出苗数占种子总数的百分比,试验播种 15 d 后每个播行随机选取 5 个测区,共测 5 个播行,计算方法为

$$R_e = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中 R_e ——种子出苗率,%

N_1 ——测区内种子出苗数量,粒

N ——测区内所播种子总数量,粒

各行排量一致性变异系数是指播种开沟一体机在播种相同长度行程内,各播行内播种量分布差异程度。试验后,每个播行随机选取 5 个测区测量其播量,5 个测区平均值作为该行播量,共测 5 个播行。计算公式为

$$S_c = \frac{\sigma}{\bar{S}} \times 100\% \quad (9)$$

其中
$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^r S_i}{r} \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (S_i - \bar{S})^2}{r - 1}} \quad (11)$$

式中 r ——试验测定的播行数
 \bar{S} —— r 行每行测区的平均播种量
 S_i —— r 行中各行测区的播种量
 σ ——各测区行内总播量稳定性标准差
 S_c ——各测区行内总播量稳定性变异系数,%

播种均匀性变异系数是指播种开沟一体机在同一播行内相同距离内,其播下的种子的分布均匀程度。试验后每个播行内随机选取 5 个测区,共测 5 个播行,计算方法参考式(5)~(7)。

试验时,以紫云英出苗率 R_e 、各行排量一致性变异系数 S_c 、播种均匀性变异系数 U_c 作为响应值,对机具前进速度、排种轮转速、匀种圆柱直径等因素开展试验研究,机具前进速度通过中联耕王 RM-904 型拖拉机的一体机无级变速挡位调节,排种轮转速通过控制器的输出电压来调节,匀种圆柱间距可通过更换不同直径的匀种圆柱获取。根据前期排种试验可知,满足紫云英 22.5 ~ 30 kg/hm² 播种量需求时的排种轮转速范围为 44 ~ 52 r/min, EDEM 仿真分析结果得到,匀播机构具有较好的排种效果时,匀种圆柱直径范围为 3.2 ~ 6.8 mm,机具前进速度则参考小麦、大豆等撒播机,一般作业速度 3 ~ 5 km/h,田间试验确定各因素范围如下:机具作业速度 3 ~ 5 km/h,排种轮转速 44 ~ 52 r/min,匀种圆柱直径 3.2 ~ 6.8 mm。在紫云英撒播开沟作业过程中,存在很多影响播种质量的非线性因素,设计三因素二次回归试验方案^[20-21],对影响出苗率、各行排量一致性变异系数、撒播均匀性变异系数的主要参数组合进行优化。试验因素编码见表 3。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Factors codes of test

编码	机具前进速度/ (km·h ⁻¹)	排种轮转速/ (r·min ⁻¹)	匀种圆柱 直径/mm
-1	3	44	3.2
0	4	48	5.0
1	5	52	6.8

4.3 结果与分析

4.3.1 撒播试验结果

撒播试验结果如表 4 所示,根据表 4 试验结果在 Originpro 2017 软件中绘制机具前进速度、匀种圆

柱直径、排种轮转速等因素对撒播性能的影响结果。

表4 试验方案和试验结果
Tab.4 Protocols and results

试验号	机具前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	排种轮转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	匀种圆柱直径/ mm	各行排量 撒播均		
				出苗率 $R_e/\%$	一致性变 异系数 $S_e/\%$	匀性变 异系数 $U_e/\%$
1	3	44	3.2	95.50	13.20	13.40
2	3	44	5.0	97.10	11.50	9.50
3	3	44	6.8	96.00	10.20	11.30
4	3	48	3.2	93.30	12.10	15.00
5	3	48	5.0	95.80	10.20	12.70
6	3	48	6.8	94.20	9.40	13.10
7	3	52	3.2	90.40	11.00	15.90
8	3	52	5.0	92.10	9.80	13.80
9	3	52	6.8	91.10	8.10	14.30
10	4	44	3.2	95.90	14.10	10.10
11	4	44	5.0	97.30	13.60	8.10
12	4	44	6.8	96.10	11.10	9.40
13	4	48	3.2	93.40	13.00	13.60
14	4	48	5.0	95.90	11.50	11.60
15	4	48	6.8	94.70	8.80	12.70
16	4	52	3.2	90.70	12.30	14.80
17	4	52	5.0	93.20	11.20	13.30
18	4	52	6.8	91.10	8.40	14.10
19	5	44	3.2	96.10	15.4	14.60
20	5	44	5.0	96.70	14.8	10.50
21	5	44	6.8	96.20	12.6	11.80
22	5	48	3.2	94.60	14.5	15.90
23	5	48	5.0	95.70	12.6	13.20
24	5	48	6.8	95.20	10.7	14.30
25	5	52	3.2	91.20	13.4	17.00
26	5	52	5.0	94.20	11.7	14.60
27	5	52	6.8	91.50	10.2	15.80

机具前进速度、匀种圆柱直径、排种轮转速对出苗率的影响如图9所示,图中a、b、c为显著性差异标记。由图可知,机具前进速度对出苗率影响不显著,匀种圆柱直径和排种轮转速对出苗率影响显著,随着匀种圆柱直径的增大,出苗率先升高后下降,在匀种圆柱直径5 mm,机具前进速度为4 km/h时,出苗率最高,为97.3%,在匀种圆柱直径3.2 mm时,出苗率最低,为90.4%。随着排种轮转速的增大,出苗率总体呈下降趋势,在排种轮转速44 r/min,机具前进速度为4 km/h时,出苗率最高,为97.3%,在排种轮转速52 r/min,机具前进速度为4 km/h时,出苗率最低,为90.7%。原因分析:出苗率主要取决于种子的生长环境和种子质量,与机具前进速度关系不大。匀种圆柱直径刚开始增加时,避免了匀种圆柱间的空隙距离过大时造成的种子重播问题,出苗率有所升高;随着圆柱直径进一步增加,匀

种圆柱间的空隙距离过小,种子与匀种圆柱间多次碰撞产生了伤种,造成出苗率下降。排种轮转速增加时,从排种轮落下的紫云英种子与匀种圆柱的撞击力随之增加,造成伤种率升高,出苗率下降。

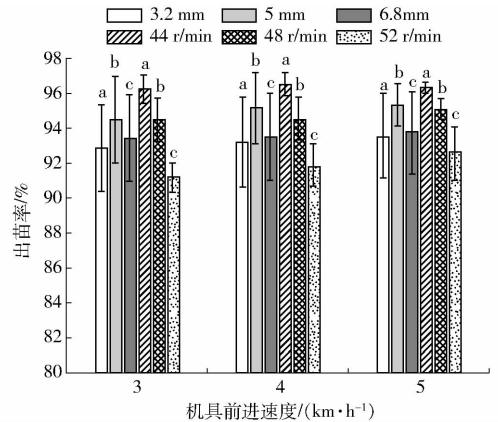


图9 各因素对出苗率的影响

Fig.9 Effects of various factors on emergence rate

由图10可知,机具前进速度、匀种圆柱直径和排种轮转速对各行排量一致性变异系数影响显著。随着机具前进速度的增大,各行排量一致性变异系数显著增大,在机具前进速度3 km/h时,各行排量一致性变异系数最小,为8.1%,在机具前进速度5 km/h时,各行排量一致性变异系数最大,为15.4%。随着匀种圆柱直径的增大,各行排量一致性变异系数显著下降,在匀种圆柱直径3.2 mm时,各行排量一致性变异系数最大,为15.4%,在匀种圆柱直径6.8 mm时,各行排量一致性变异系数最小,为8.1%。随着排种轮转速的增大,各行排量一致性变异系数显著下降,在排种轮转速44 r/min时,各行排量一致性变异系数最大,为15.4%,在排种轮转速52 r/min时,各行排量一致性变异系数最小,为8.1%。原因分析:当机具前进速度增加时,紫云英种子落到地里的分布就越稀疏,为保证单位面积内种子播量,需要经常调整播种量,导致各行排量一致性变异系数显著下降。匀种圆柱直径增加时,匀种圆柱间的空隙距离变小,种子在匀播机构内会经过更多次的碰撞来完成匀种过程,各行排量一致性变异系数变小,避免了种子直接落入播行,或还没有充分完成匀种过程便落到播行。排种轮转速增大时,种子落下的惯性作用力也会变大,种子和匀种圆柱碰撞后的运动区域也会更大,经匀播机构后种子更加分散,避免种子落入地表后产生重播、堆积现象,各行排量一致性变异系数变小。

由图11可知,机具前进速度、匀种圆柱直径和排种轮转速对撒播均匀性变异系数影响显著。随着机具前进速度的增大,撒播均匀性变异系数先减小再增大,在机具前进速度4 km/h时,撒播均匀性变异系数

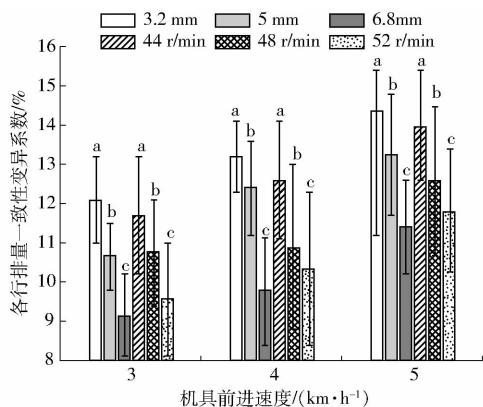


图 10 各因素对各行排量一致性变异系数的影响

Fig. 10 Effects of various factors on apiece row consistency variability coefficient of seeding quantity

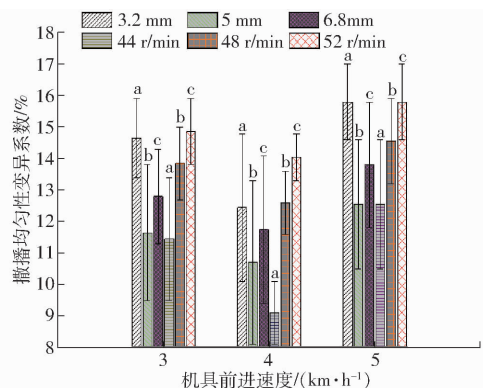


图 11 各因素对撒播均匀性变异系数的影响

Fig. 11 Effects of various factors on sowing uniformity variation coefficient

最小,为 8.1%,在机具前进速度 5 km/h 时,撒播均匀性变异系数最大,为 17.0%。随着匀种圆柱直径的增大,撒播均匀性变异系数先减小再增大,在匀种圆柱直径 3.2 mm 时,撒播均匀性变异系数最大,为 17.0%,在匀种圆柱直径 5 mm 时,撒播均匀性变异系数最小,为 8.1%。随着排种轮转速的增大,撒播均匀性变异系数显著增加,在排种轮转速 44 r/min 时,撒播均匀性变异系数最小,为 8.1%,在排种轮转速 52 r/min 时,撒播均匀性变异系数最大,为 17.0%。原因分析:机具前进速度较低时,单位行程内种子撒播过密,会有多个种子落入单粒种子播种区域的现象发生,造成撒播均匀性变异系数较大,随着机具前进速度的增大,种子与种子的撒播间隙趋向均匀,撒播均匀性变异系数开始减小,而当机具前进速度进一步增大时,种子经匀播机构落入到播行后有一种明显的滚动趋势,撒播均匀性变异系数又会增大。匀种圆柱直径刚开始增加时,匀种圆柱间的空隙距离变小,种子在匀播机构内经过更多次数碰撞后完成匀种过程,匀种过程较充分,撒播均匀性变异系数变小,随着匀种圆柱直径进一步增加,在某些圆柱间隙处发生堵种现象,撒播均匀性变异系数又会变大。排种轮转速增

大时,单位时间内匀播机构需完成的匀种量也会变大,匀种效率有所降低,同时,排种轮转速增大后,种子从排种器落下的加速度会变大,受到的惯性力也会更大,对种子经匀播机构的概率分布影响较大,撒播均匀性变异系数也会变大。

4.3.2 回归分析

运用 Design-Expert 数据分析软件,对撒播试验结果进行回归分析,各因素对出苗率 R_e 、各行排量一致性变异系数 S_c 、撒播均匀性变异系数 U_c 等撒播性能影响的显著性分析如表 5 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值)。

表 5 撒播性能的显著性分析

Tab. 5 Significance analysis on sowing performance

来源	F			P		
	R_e	S_c	U_c	R_e	S_c	U_c
模型	65.59	62.86	38.00	< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1
X_1	0.29	7.67	56.64	0.599 7	0.013 1	< 0.000 1
X_2	42.47	28.80	30.27	< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1
X_3	0.11	50.90	4.03	0.738 9	< 0.000 1	0.060 9
$X_1 X_2$	3.51	1.10	0.11	0.078 4	0.309 5	0.740 0
$X_1 X_3$	0.50	0.70	0	0.487 1	0.413 6	1.00
$X_2 X_3$	0.15	0.70	1.02	0.703 2	0.413 6	0.325 8
X_1^2	0.008 34	1.25	50.55	0.928 3	0.278 5	< 0.000 1
X_2^2	16.15	5.31	7.31	0.000 9	0.034 1	0.015 1
X_3^2	76.86	3.04	54.50	< 0.000 1	0.099 0	< 0.000 1

根据数据分析软件得到的拟合系数,得到响应值与自变量的二元多项式回归模型。

$$R_e = 96.53 + 0.79X_1 - 1.82X_2 + 0.094X_3 + 0.48X_1X_2 - 0.18X_1X_3 + 0.05X_2X_3 + 0.067X_1^2 - 0.73X_2^2 - 1.6X_3^2 \quad (12)$$

$$S_c = 14.51 + 3.78X_1 - 1.38X_2 - 1.84X_3 - 0.25X_1X_2 - 0.2X_1X_3 - 0.1X_2X_3 + 0.76X_1^2 + 0.39X_2^2 - 0.29X_3^2 \quad (13)$$

$$U_c = 19.13 + 14.88X_1 + 2.06X_2 - 0.75X_3 + 0.12X_1X_3 + 0.18X_2X_3 + 6.96X_1^2 - 0.66X_2^2 + 1.81X_3^2 \quad (14)$$

由表 5 可知,出苗率 R_e 、各行排量一致性变异系数 S_c 、播种均匀性变异系数 U_c 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,从各因素 F 值可以看出,排种轮转速、匀种圆柱直径对出苗率有显著影响,各因素影响由大到小次序为:排种轮转速、匀种圆柱直径、机具前进速度。机具前进速度、排种轮转速、匀种圆柱直径对各行排量一致性变异系数影响显著,影响程度由大到小为:匀种圆柱直径、机具前进速度、排种轮转速。机具前进速度、排种轮转速、匀种圆柱直径对撒播均匀性变异系数有显著影响,且影响由大到小次序为:排种轮转速、匀种圆柱直径、机具前进速度。

目标函数 R_e 、 S_e 、 U_e 的决定系数 R^2 分别为 0.972 0、0.970 8、0.952 6, 表明回归模型有很高的拟合精度, 能够准确预测各撒播性能指标的变化规律。

5 参数优化与验证

5.1 影响播种质量因素的参数优化

为使槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置达到理想的作业效果, 以出苗率最高、各行排量一致性变异系数最低和撒播均匀性变异系数最低的绿肥播种要求为优化目标, 应用 Design-Expert 数据分析软件的 Optimization - Numerical 模块对回归方程模型进行该目标下优化参数组合求解, 约束条件为

$$\begin{cases} \max R_e \\ \min S_e \\ \min U_e \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

优化后得到紫云英撒播开沟机播种作业最佳参数组合为: 机具前进速度为 3.36 km/h, 排种轮转速为 44 r/min, 匀种圆柱直径 6.14 mm。此时模型预测的紫云英出苗率为 96.87%, 各行排量一致性变异系数 11.24%, 撒播均匀性变异系数 9.17%。

5.2 验证试验

根据优化所得影响槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置播种质量因素的最佳参数组合(考虑试验可行性, 试验时最终确定将参数最佳条件修正为 3.4 km/h, 排种轮转速为 44 r/min, 匀种圆柱直径 6 mm), 以紫云英出苗率、各行排量一致性变异系数、播种均匀性变异系数为试验指标, 2019年11月在镇江丹阳另一块水稻留茬地进行3次重复验证试验, 由验证试验结果可知, 紫云英出苗率为 96.49%, 各行排量一致性变异系数 11.73%, 播种均匀性变异系数 8.67%, 与 Design-Expert 数据分析软件模型预测的出苗率、各行排量一致性变异系数、撒播均匀性变异系数等指标数值相对误差均小于 6%, 优化后的槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置作业指标满足作业要求。

5.3 作业性能比较

绿肥播种方式主要有人工撒播、手摇撒播、电动喷播和无人机飞播, 为比较槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置作业优势, 课题组在农业农村部南京农业机械化研究所白马基地进行多款绿肥播种装备播种试验, 将研制的槽穴组合式多品种绿肥定量匀播装置与已有绿肥播种方式作业性能进行对比, 以

播种紫云英绿肥为例, 以机具作业效率、播种均匀性变异系数为评价指标, 各种播种方式下对比试验结果如表6所示。分析表6可知, 槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置作业效率为 0.8~1.0 hm^2/h , 作业效率优于人工撒播作业效率 0.1~0.125 hm^2/h 、手摇撒播作业效率 0.2~0.3 hm^2/h 和电动喷播作业效率 0.5~0.8 hm^2/h , 低于无人机飞播作业效率的 3~4 hm^2/h , 槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置播种均匀性变异系数为 8.67%, 优于人工撒播播种均匀性变异系数 22%~23%, 手摇撒播播种均匀性变异系数为 18%~20%, 电动喷播撒播均匀性变异系数为 15%~21%, 无人机飞播播种均匀性变异系数为 9%~15%。

表6 绿肥不同播种方式性能对比

Tab.6 Performance comparison of different green manure sowing methods

播种方式	作业效率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	播种均匀性变异系数/%
人工撒播	0.1~0.125	22~23
手摇撒播	0.2~0.3	18~20
电动喷播	0.5~0.8	15~21
飞播	3~4	9~15

6 结论

(1) 研制了槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置, 可满足紫云英等多种绿肥种子的播种要求, 实现精量播种的同时提高了撒播均匀性, 降低了劳动强度, 作业效率可达 0.8~1.0 hm^2/h , 是人工撒播的 6.4~10 倍, 手摇撒播的 2.7~5 倍, 电动喷播机的 1~2 倍, 具有一定的推广应用前景。

(2) 影响槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置撒播质量的主要因素是机具前进速度、排种轮转速、匀种圆柱直径。通过三因素二次回归试验可得, 各因素对出苗率与播种均匀性变异系数影响强弱次序为: 排种轮转速、匀种圆柱直径、机具前进速度。各试验因素对于各行排量一致性变异系数的影响由大到小依次为: 匀种圆柱直径、机具前进速度、排种轮转速。

(3) 由回归分析得到影响槽穴组合式多品种绿肥定量电动匀播装置撒播质量因素的最佳参数组合为: 机具前进速度为 3.36 km/h, 排种轮转速为 44 r/min, 匀种圆柱直径 6.14 mm。在保持验证试验因素值与优化值基本一致的情况下进行试验, 试验结果可知: 紫云英出苗率为 96.49%, 各行排量一致性变异系数 11.73%, 播种均匀性变异系数 8.67%, 与模型预测优化结果的相对误差均小于 6%。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 林多胡,顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州:福建科学技术出版社,2000.
- [3] ASTIER M, MAASS J M, ETCHEVERS B, et al. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88(1-2):153-159.
- [4] XIE Zhijian, TU Shuxin, SHAH F, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188(1):142-149.
- [5] 李子双,廉晓娟,王薇,等. 我国绿肥的研究进展[J]. *草业科学*, 2013, 30(7):1135-1140.
LI Zishuang, LIAN Xiaojuan, WANG Wei, et al. Research progress of green manure in China[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7):1135-1140. (in Chinese)
- [6] 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/OL]. *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 sinicus* [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3):78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200309&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.009. (in Chinese)
- [7] 蔡文杰,胡海建,张国斌,等. 有机质提升—绿肥混播技术初探[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(20):47.
CAI Wenjie, HU Haijian, ZHANG Guobin, et al. Improvement of organic matter-preliminary study on green manure mixed sowing technology[J]. *Anhui Agri. Sci. Bull*, 2016, 22(20):47. (in Chinese)
- [8] 刘晔. SL-PBJ型水力草种喷播机的研制[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(2):187-188.
LIU Ye. Development of SL-PBJ type hydraulic grass sow spraying machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(2):187-188. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] LI Jiyu, LAN Yubin, ZHOU Zhiyan, et al. Design and test of operation parameters for rice air broadcasting by unmanned aerial vehicle[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(5):24-32.
- [11] 宋灿灿,周志艳,姜锐,等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6):80-88.
SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic rice sowing device for unmanned aerial vehicle[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(6):80-88. (in Chinese)
- [12] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2):49-56.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2):49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190206&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
- [13] 秦自果,刘威,李小坤,等. 播种量对紫云英种子产量及其构成因素的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20):4960-4962.
QIN Ziguang, LIU Wei, LI Xiaokun, et al. Effect of seeding rate on seed yield and its components of Chinese milk vetch[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(20):4960-4962. (in Chinese)
- [14] 曹卫东,徐昌旭. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010.
- [15] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [16] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1):1-11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(1):1-11. (in Chinese)
- [17] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4):75-86.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4):75-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [18] GB/T 9478—2005 谷物条播机试验方法[S]. 2005.
- [19] 王晓玉,薛帅,谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(1):1-8.
WANG Xiaoyu, XUE Shuai, XIE Guanghui. Value-taking for residue factor as a parameter to assess the field residue of field crops[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1):1-8. (in Chinese)
- [20] QIN Kuan, DING Weimin, FIAZ A, et al. Design and experimental validation of sliding knife notch-type disc opener for a no-till combine harvester cum seed drill[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(4):96-103.
- [21] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):46-52.
TIAN Liqun, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice sowing device [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007. (in Chinese)