doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.008

变径变距式螺旋混合排种装置设计与试验

尤　泳[1]　周小艺[1]　郭晓晴[2]　季　坤[1]　席军辉[1]　郭艳颖[1]　惠云婷[1]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 内蒙古自治区农牧业技术推广中心, 呼和浩特 010010)

摘要: 苜蓿和无芒雀麦同行混播有助于改善土壤结构,提升饲草品质,增强生态系统稳定性。针对因苜蓿和无芒雀麦种子形态、尺寸及流动性差异导致的排种堵塞、混合不均等问题,本文设计了一种变径变距式螺旋混合排种装置。通过力学分析与参数计算,明确了装置输送与混合机制,确定螺旋直径、螺距、轴长等关键结构参数;采用离散元仿真分析了螺旋叶片升角对排种性能与混合效果的影响,获取最优结构参数;以螺旋轴转速和混合种子填充率为试验因素,开展两因素五水平旋转组合台架试验,以排种速率、排种稳定性变异系数和混合比例精度为评价指标,利用响应面法优化工作参数组合。结果表明:当螺旋叶片升角为25°时,排种性能较优,排种速率达3.34 g/s,排种稳定性变异系数为5.17%,混合比例精度为0.874;台架试验确定最优工作参数组合为螺旋轴转速45 r/min、混合种子填充率70%,此时排种速率为3.49 g/s,排种稳定性变异系数为4.13%,混合比例精度为0.946。验证试验结果表明,实测值与模型预测值相对误差小于10%。研究结果表明,装置结构合理,可实现2种种子稳定均匀混合排种,满足苜蓿与无芒雀麦同行混播要求,为牧草混播装备研发提供了技术依据。

关键词: 同行混播; 混合排种装置; 变径变距螺旋; 排种性能
中图分类号: S233.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0093-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Variable-diameter and Variable-pitch Spiral Mixing and Seeding Device

YOU Yong[1]　ZHOU Xiaoyi[1]　GUO Xiaoqing[2]　JI Kun[1]　XI Junhui[1]　GUO Yanying[1]　HUI Yunting[1]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Inner Mongolia Autonomous Region Agriculture and Animal Husbandry Technology Promotion Center*, *Hohhot* 010010, *China*)

Abstract: The intercropping of alfalfa and smooth brome can improve soil structure, enhance forage quality and strengthen ecosystem stability. To address the problems of seed blockage and uneven mixing caused by differences in seed shape, size and fluidity between the two, a variable-diameter and variable-pitch spiral mixing and seeding device was designed to improve the intercropping quality of alfalfa and smooth brome. Through mechanical analysis and parameter calculations, the conveying and mixing mechanisms of the device were clarified and key structural parameters such as the spiral diameter, pitch and shaft length were determined. Using discrete element method (DEM) simulations, the effects of the spiral blade angle on seeding performance and mixing effectiveness were analyzed to obtain the optimal structural parameters. With the rotational speed of the spiral shaft and the filling rate of the mixed seeds as factors, a two-factor, five-level rotational combination bench test was conducted. Seeding rate, coefficient of variation of seeding stability and mixing ratio accuracy were used as evaluation indicators, and the response surface method was employed to optimize the combination of working parameters. The results showed that when the spiral blade angle was 25°, the seeding performance was optimal, with a seeding rate of 3.34 g/s, a coefficient of variation of 5.17% and a mixing ratio accuracy of 0.874. The bench test determined that the optimal working parameter combination of a spiral shaft speed of 45 r/min and a filling rate of mixed seeds of 70% resulted in a seeding rate of 3.49 g/s, a coefficient of variation of 4.13% and a mixing ratio accuracy of 0.946, with the validation test showing a relative error of less than 10%. The device had a rational structure, which can achieve stable and uniform mixing and seeding

收稿日期: 2025-08-10　修回日期: 2025-09-07
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)
作者简介: 尤泳(1980—),男,副教授,博士,主要从事牧草机械化研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

of the two types of seeds, meeting the requirements for intercropping alfalfa and smooth bromegrass and provided a technical basis for the development of intercropping equipment for forage crops.

Key words: peer mixed sowing; spiral mixing and seeding device; variable-diameter and variable-pitch; seeding performance

0 引言

苜蓿与无芒雀麦作为优质牧草,在改善土壤结构、提升饲草品质和增强生态系统稳定性方面具有重要作用[1-2]。苜蓿蛋白含量高,且固氮能力强;无芒雀麦碳水化合物丰富,抗逆性强,两者同行混播可实现营养互补和产量协同提升[3-4]。目前,苜蓿与无芒雀麦主产区重叠度高,混播需求显著,但现有播种方式仍以人工预混撒播为主,存在劳动强度大、播种均匀性差、种子浪费严重等问题[5-6]。实现机械化高效混播已成为推动牧草产业高质量发展的关键。

排种器作为播种机核心部件,其性能直接影响播种质量与效率。为改善混播作业质量,YOU 等[7]研制了一种多品种绿肥智能混播机,采用组合式电动排种器和自适应播量控制系统,实现了 4 类作物 12 个通道同步混播,在最优参数下紫云英出苗率达 96.71%,均匀性变异系数为 7.95%。LIAO 等[8]采用 DEM-CFD 耦合方法研究了燕麦与箭筈豌豆种子在混播机气流式分配器中的运动特性,结果表明凸面型分配器盖可有效提升混合种子分布均匀性。目前,针对混播作业的专用排种装置研究仍较为有限,但国内外在兼用型排种器方面已开展了较多研究。在机械式排种方面,黄小毛等[9]设计了一种稻油兼用型无人机条播装置,采用电驱外槽轮排种器和可折叠导种管结构,有效抑制了无人机下洗气流对种子的干扰,实现了水稻和油菜成条播种,作业效果显著优于传统撒播方式。在气力式排种方面,JIANG 等[10]开发了一种适用于玉米和大豆通用气吸式排种装置,通过 DEM-CFD 耦合仿真方法优化了排种盘结构和工作参数,在最佳参数组合下两种作物合格指数均超过 95%。近年来,气力式排种器因作业性能优良逐渐成为主流,通过改进排种或供种装置结构以提升油菜、小麦充种率[11-12],或借助更换滚筒实现水稻与小麦兼用播种[13],还有研究优化气送集排器文丘里结构,提高油麦兼用排种的通量上限与各行一致性[14-15]。

然而,现有的混播机或兼用型排种装置在用于苜蓿与无芒雀麦混播时存在两种种子粒径、形状和流动性差异极大、混合均匀度低等问题,其中无芒雀麦种子形态特殊,易堵塞、充种性能差,导致排种不稳定[16-18],难以满足高效、高质量的混播作业需求。此外,大部分兼用型排种器通过更换部件实现兼用,而非真正意义上的通用结构,无法完成同行同步混播作业。

随着牧草混播农艺研究深入,混播组合与比例对产量和品质的影响逐渐明确[19-20],但配套的混播机械研发滞后,缺乏牧草混播专用或兼用排种器研发[21]。针对上述问题,本文设计一种适用于苜蓿与无芒雀麦同行混播的螺旋式混合排种装置,通过优化结构与参数,提升豆、禾种子排种性能、混合排种稳定性及混合均匀性,实现两种种子高效、均匀、同步混合播种,以提高机械化混播作业质量与效率,为推动牧草混播机械化发展提供装备支撑。

1 苜蓿和无芒雀麦混播作业工艺

苜蓿作为豆科植物,具有固氮作用,无芒雀麦等禾本科植物的碳代谢能力较强,这种碳氮代谢协同效应可充分利用土壤有机质,增强草地生产力。苜蓿种子为千粒质量 2.539 g 的肾形小粒,粒径约为 2 mm,表面光滑,而无芒雀麦为千粒质量 4.382 g 的长扁形中粒,长径比约 5,长度可达 7 mm,带颖壳。两者通常在春季或夏季进行混播,现有研究表明[22],质量比 1∶2(苜蓿、无芒雀麦 7.5、15 kg/hm^2)适用于温带半干旱至半湿润区人工割草地与放牧地建设,尤其适合退化天然草场改良,符合我国退化草地情况,因此目前多采用该质量比进行同行条播。

苜蓿、无芒雀麦混播作业工艺如图 1 所示。作业时,苜蓿和无芒雀麦种子通常以一定比例进行人工或机器预混,后以条播方式进入预先开沟的种床中,开沟深度为 2 cm,种床内两种种子紧靠在一起,而后进行浅覆土,完成苜蓿和无芒雀麦同行、同层、同步混播作业。

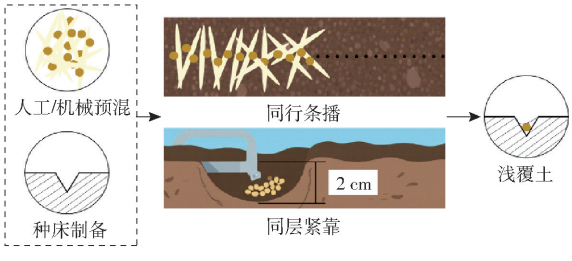


图 1 混播作业工艺示意图

Fig. 1 Schematic of mixed seeding operation process

2　变径变距式螺旋混合排种装置

2.1　结构与工作原理

传统槽轮式排种装置对种子几何尺寸与形态要求较高，为避免无芒雀麦种子在排种装置内堵塞，引入无型孔填充排种方式。为减少种子分层情况，增加装置内混乱度，类比螺旋搅拌方式，提出螺旋式混合排种装置。为使整体结构小巧紧凑，减少种子输送落差和输送距离对混合效果的影响，提出同轴变直径变螺距的结构形式，在同一装置上实现单一种子到混合种子输送量改变。变径变距式螺旋混合排种装置用于苜蓿和无芒雀麦种子定比例混播，分为单一输送区和混合输送区，主要由进种口 A、进种口 B、螺旋轴、料筒、排种口构成，如图 2 所示，其中螺旋轴为核心驱动部件，通过旋转产生的离心力与轴向推力协同作用，同时完成输送与搅拌，实现两种不同类型种子在装置内均匀混合与定向输送。

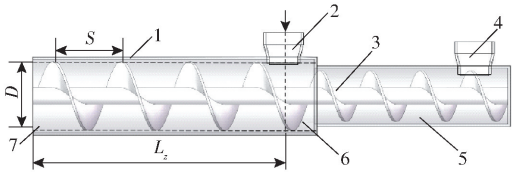


图 2　变径变距式螺旋混合排种装置结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of variable-diameter and variable-pitch spiral mixing and seeding device

1. 料筒　2. 进种口 B　3. 变径变距螺旋轴　4. 进种口 A　5. 单一输送区域　6. 混合输送区域　7. 排种口

工作时，无芒雀麦种子由进种口 A 进入排种装置，首先经过单一输送区到达进种口 B 下方，苜蓿种子由进种口 B 进入排种装置，与无芒雀麦种子相遇并简单混合，二者一同通过混合输送区，经螺旋叶片输送和搅拌，打破分层，均匀混合后直接进入导种管，低位排入种床。

2.2　力学分析

2.2.1　输送过程力学分析

在螺旋式混合排种装置中，输送过程中种子从进种口进入后沿螺旋轴轴向移动至排种口种群核心受力情况如图 3 所示，其中，F 为颗粒综合受力；F_z 为轴向力；F_1 为法向力；F_2 为切向力。其运动状态由螺旋叶片推力、料筒壁面摩擦力及自身重力相互作用决定。

种子在料筒内受到沿螺旋叶片切线方向的螺旋叶片推力 F_T。F_T 将螺旋轴旋转机械能转换为种子动能，驱动种子向出种口移动。其表达式为

$$F_T = km\omega^2 r\sin\alpha \tag{1}$$

式中　k——推力系数，与螺旋叶片几何形状及种子特性相关

m——单粒种子质量，g

ω——螺旋轴角速度，rad/s

r——螺旋半径，m

α——螺旋叶片升角，(°)

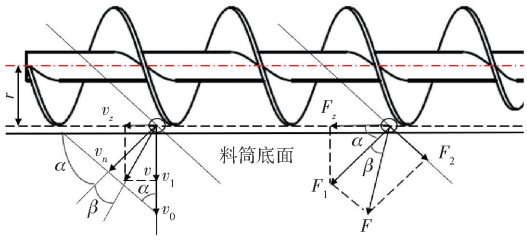


图 3　输送过程种群运动状态与受力分析

Fig. 3　Motion state and force analysis of population in conveying process

除此之外，种群受自身重力影响，与料筒底面持续接触，因此与料筒底面还存在摩擦力 f，其方向与种群运动方向相反，阻碍种群的轴向移动。其表达式为

$$f = \mu N = \mu mg\cos\theta \tag{2}$$

式中　μ——种子与料筒壁面的摩擦因数

N——正压力，N

θ——料筒倾斜角，(°)

种群运动状态如图 3 所示。其中，种群轴向运动速度 v_z 由推力与摩擦力动态平衡决定，运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = F_T - f \tag{3}$$

在稳态运输条件下，$\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = 0$，可得轴向速度近似表达式为

$$v_z = \frac{F_T - f}{m}t = \frac{km\omega^2 r\sin\alpha - \mu mg\cos\theta}{m}t \tag{4}$$

在料筒中种子群输送表现为连续流动，其质量流量 Q_{out} 可表示为

$$Q_{\mathrm{out}} = \rho A_e v_z \tag{5}$$

式中　ρ——种子堆积密度，kg/m^3

A_e——螺旋通道有效流通截面积，m^2

提高转速 n 或增大螺旋升角 α 可提升推力 F_T 和 v_z，进而提高 Q_{out}，但过高的转速可能会导致种子破损，过大的升角会导致螺旋轴离心效应减弱，影响混合效果。

2.2.2　混合过程力学分析

在排种装置内，除轴向输送外，种子间还存在混合过程。混合过程指不同种类 2 种种子在螺旋轴与料筒协同作用下实现随机分布、均匀混合的过程，主要由离心力 F_c、剪切力 F_q 和碰撞力 F_p 共同作用。

离心力 F_c 方向径向向外，垂直于螺旋轴，迫使

一种种子颗粒向外扩散至料筒壁面,增加与另一种种子颗粒相遇的概率,形成对流混合,其表达式为

$$F_c = m\omega^2 r \tag{6}$$

离心力与轴向推力协同形成的对流混合效果,促使种子在径向和轴向两个方向上的重新分布,实现相对均匀分散和混合。

当螺旋输送方向一定时,螺旋叶片前后表面可分为驱动面和尾面,如图 4 所示。

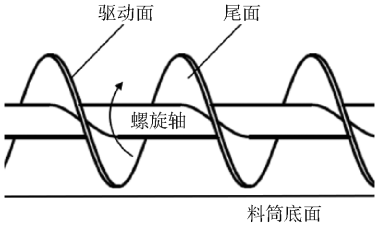


图 4 螺旋叶片各边界面

Fig. 4 Boundary surface of spiral blade

螺旋轴旋转,种子颗粒与螺旋叶片表面、种子颗粒间都存在摩擦力,因此驱动面与尾面会产生速度梯度,进而引发种群内部剪切力 F_q,表达式为

$$F_q = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r} A \tag{7}$$

式中 η——种子流动黏度

$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r}$——速度梯度

A——种子接触面积,m^2

在剪切力作用下,种子层间产生相对滑动,消除种群内部局部团聚,细化了混合尺度,达到剪切混合效果。

种子运动过程中,还会与壁面或其他种子颗粒产生碰撞,其碰撞力 F_p 随机分布,主要取决于种子与碰撞面的接触位置,其表达式为

$$F_p = \frac{\Delta p}{\Delta t} \tag{8}$$

式中 Δp——动量变化量,kg·m/s

通过频繁地随机碰撞打破种子的团聚,弥补局部浓度差,提升均匀度,完成扩散混合。

在离心力作用下种子沿径向扩散,在螺旋轴驱动作用下沿轴向移动,同时受到随机位置产生的剪切力和碰撞力,逐渐形成不规则的螺旋-扩散复合路径。轨迹方程近似为

$$r(t) = r_0 + \frac{F_c t^2}{m} \tag{9}$$

$$z(t) = v_z t \tag{10}$$

式中 $r(t)$——径向位移,m

r_0——初始径向位置,m

$z(t)$——轴向位移,m

2 种种子在对流混合、剪切混合和扩散混合 3 种机制下完成混合过程。降低螺旋升角 α,可增强离心效应,从而增强混合效果,但会导致轴向推力损失而影响输送性能;提高转速 n 可增加离心力和碰撞频率,但仍需考虑高转速下种子破损问题,另外,2 种种子密度差异过大会导致分层现象,需通过调节转速 n 补偿离心效应。

2.3 关键结构参数设计

2.3.1 混合种子物性参数测定

为使所设计的变径变距式螺旋混合排种装置质量输送量可满足混合种子排种量的要求,首先需要获取混合种子物料堆积密度 ρ_{mix} 和充填系数 ϕ_{mix}。

根据苜蓿和无芒雀麦混播农艺要求,以苜蓿和无芒雀麦质量比 1∶2 获取混合种子,并人工进行均匀混合。采用量筒法对混合种子的堆积密度进行测量,将混合种子缓慢倒入量筒中至自然堆积状态,获得混合种子堆积密度 ρ_{mix} 为 200 kg/m^3。采用提前设计的标准螺旋输送器(螺旋叶片直径 D 为 0.8 m、螺距 S 为 0.5 m)进行混合种子充填系数测定试验,将混合种子加入标准螺旋输送器中,以转速 40 r/min 运行,在出口处测定 5 min 内混合种子输送量,计算得到混合种子充填系数 ϕ_{mix} 为 0.39。

2.3.2 混合输送段结构参数设计

混播机作业过程中,每个排种装置单位时间内总排种量为

$$I' = \frac{I}{M} \tag{11}$$

其中

$$I = 100 B_m v_m Q \tag{12}$$

式中 I——单位时间总排种量,kg/h

B_m——混播机作业幅宽,km

v_m——混播机作业速度,km/h

Q——单位面积播量,kg/hm^2

I'——每个排种装置单位时间总排种量,kg/h

M——混播机行数

根据苜蓿和无芒雀麦混播农艺要求:苜蓿最小播量为 7.5 kg/hm^2,无芒雀麦最小播量为 15 kg/hm^2,则混合种子最小播量 Q_{mix} 为 22.5 kg/hm^2;作物行距为 30 cm。混播机行数 M 为 6,则作业幅宽 B_m 为 1.8 m,设机具作业速度 v_m 为 10 km/h。因此,为满足混合种子播量,单位时间内最小总排种量 $I_{\min}$ 为 40.5 kg/h,则每个螺旋式混合排种装置单位时间最小排种量 $I'_{\min}$ 为 6.75 kg/h。

根据文献[23],螺旋输送器质量输送量计算式为

$$I_m = 47\rho\phi D^2 S n \tag{13}$$

其中

$$S = (0.8 \sim 1.0) D \tag{14}$$

式中 I_m——质量输送量,kg/h

ϕ——物料充填系数

实际作业过程中，排种装置料槽填充率对作业效果会产生影响，保证混合效果的同时需兼顾排种装置作业效率，选定填充率为 50% ~90%，通过预试验验证范围的合理性，即

$$0.5I_m \geqslant I'_{\min} \tag{15}$$

混合均匀度与输送效率还需通过调整旋转轴转速实现动态平衡，并且作业过程中仍需避免种子破损，因此需计算临界工作转速以确定合理的工作转速。旋转轴最小转速 $n_{\min}$ 应确保种子所受的离心力克服自身重力，使种子可脱离料筒底面被带动混合，根据前期预试验结果，最小转速 $n_{\min} \geqslant 20$ r/min；脆性种子临界撞击速度 $v_{crit} < 2$ m/s，最大转速 $n_{\max}$ 需避免种子击打壁面破碎，则

$$v_t = \omega r \leqslant v_{crit} \tag{16}$$

$$\omega_{\max} = \frac{v_{crit}}{r} = \frac{2v_{crit}}{D} \tag{17}$$

$$n_{\max} = \frac{60\omega_{\max}}{2\pi} = \frac{60v_{crit}}{D\pi} \tag{18}$$

则

$$I_{mmin} = 47\rho_{\text{mix}}\phi_{\text{mix}}D^2Sn_{\min} = 47\rho_{\text{mix}}\phi_{\text{mix}}D^2S\frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2g}{D}} \tag{19}$$

$$0.5I_{mmin} \geqslant I'_{\min} \tag{20}$$

根据用于水平输送通用散料的常规螺旋输送器设计经验[24-26]，取 $S = D$。经计算得，$D \geqslant 0.058$ m，螺旋直径 D 通常取整数，因此 D 取 0.06 m，则螺距 S 取 0.06 m。

为保证混合种子稳定进种、排种和输送，螺旋轴长度 L_z 通常大于理论输送距离 L_{tr}，由进种口和出种口中心距决定，其公式为

$$L_z = L_{tr} + L_{\text{in}} + L_{\text{out}} \tag{21}$$

进种段位于进种口前方，确保种子平稳地进入螺旋叶片，避免弹跳或堵塞，对于短距离小流量输送，其长度 $L_{\text{in}} \geqslant 1.5D$；出种段位于出种口后方，确保种子完全排出，避免残留，对于非粘性物料，其长度 $L_{\text{out}} \geqslant 0.5D$；输送段是螺旋轴长主体，其长度 L_{tr} 与输送距离相关，混播机作业时对排种装置输送距离不做要求，但在保证种子可在排种装置内稳定混合一段时间的前提下，尽量做到结构紧凑，因此，输送段长度 $L_{tr} = 3D$。综合 3 个阶段长度要求，设计螺旋轴长度 $L_z = 5D$，即 $L_z = 0.30$ m。

查阅《农业机械设计手册》，螺旋输送器螺旋叶片厚度一般为 1.5 ~3.5 mm；料筒壁面厚度一般为 2 ~6 mm；叶片与料筒壁面间隙一般为 5 ~ 10 mm。因为螺旋式混合排种装置主要用于混合种子输送与混合，混合种子几何尺寸较小，千粒质量偏低，对叶片、壁面和主轴冲击力不足，选用标准范围内最小强度即可满足作业要求，因此螺旋叶片厚度选为 1.5 mm，料筒壁面厚度选为 2 mm。为防止混合种子在输送过程中出现堵塞，叶片和料筒壁面间隙需大于种子最大尺寸，混合种子中无芒雀麦种子形状特殊，其三轴尺寸中最长边可达 7.214 mm，因此间隙选为 7.5 mm，则料筒内径为 67.5 mm。

3　排种装置结构参数优化仿真

3.1　仿真设计

3.1.1　仿真方案

由受力分析可知，螺旋叶片升角 α 会影响装置混合输送区排种性能和混合效果。在本装置中，单一输送段主要负责将种子从进种口 A 稳定、连续地预输送至混合输送段，其结构参数仅由种子自身特性与对应输送量决定，主要影响单一品种输送效率和流动稳定性，对后续混合输送过程的影响有限；排种速率主要取决于最终排出段输送能力，对应混合输送段螺旋结构参数，单一输送段仅作为前置输送单元，其输送速率只要不低于混合输送段处理能力，就不会影响整个系统排种速率；混合均匀度主要由混合输送段内的流动特性决定，单一输送段仅提供单一品种初始输入，输入种子在进入混合输送段时的初始状态会在强烈混合过程中迅速“湮没”，对最终混合均匀度影响可忽略不计。因此，选择优化混合输送段螺旋叶片升角，研究不同螺旋轴结构参数对苜蓿和无芒雀麦混合种子排种稳定性和混合均匀度的影响。

对混合输送段螺旋叶片升角进行仿真优化，以确定螺旋叶片最优升角，并基于最优结构参数开展混合排种性能台架试验。螺旋叶片升角设为 20°、22.5°、25°、27.5°、30°共 5 个水平，当螺旋直径 D 和螺距 S 一定时，螺旋叶片升角 α 由物料接触的有效螺旋线直径 D_{eff} 决定，其公式为

$$\tan\alpha = \frac{S}{\pi D_{eff}} \tag{22}$$

其中

$$D_{eff} = \frac{D + d}{2} \tag{23}$$

因此，仿真中通过改变模型螺旋轴直径 d 以实现不同螺旋叶片升角的改变。试验因素水平如表 1 所示。

以排种速率、排种稳定性变异系数和混合比例精度为评价指标，其中排种稳定性变异系数及混合比例精度计算式为

$$C_V = \frac{\sigma_p}{\mu_p} \times 100\% \tag{24}$$

表 1 仿真试验因素水平

Tab. 1 Factor level of simulation test

水平	因素	
	混合输送段螺旋叶片升角 α/(°)	螺旋轴直径 d/mm
1	20.0	45.00
2	22.5	32.26
3	25.0	21.96
4	27.5	13.41
5	30.0	6.19

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{\sigma_s}{\mu_s} \right| \tag{25}$$

式中 C_V——排种稳定性变异系数,%

σ_p——混合种子排种速率标准差

μ_p——混合种子排种速率平均值

ε——混合比例精度

σ_s——排种口排出苜蓿和无芒雀麦种子质量比

μ_s——苜蓿和无芒雀麦混播质量比

仿真中,设螺旋轴工作转速为 40 r/min,填充率为 70%,苜蓿和无芒雀麦种子以质量比 1∶2 进入装置,在进种口入种速率为 1.20、2.40 g/s。设置 EDEM 时间步长为 2×10^{-6} s,仿真总时间设为 10 s,每 0.01 s 保存一次数据。

3.1.2 离散元模型建立

以苜蓿种子和无芒雀麦种子为研究对象,为了更符合种子真实特性,保证仿真结果准确性,需分别对 2 种种子基本参数进行测定,获得 2 种种子物理特性如表 2 所示。由于苜蓿和无芒雀麦种子外形不规则,难以通过少量颗粒建立仿真模型,因此使用 Solidworks 建模软件分别绘制 2 种种子三维模型,采用多球颗粒填充聚合的方式建立模型,以准确模拟种子特性[27],模型如图 5、6 所示。

表 2 种子物理特性

Tab. 2 Physical properties of seeds

品种	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	千粒质量/g	密度/(kg·m^{-3})	堆积角/(°)
中苜 1 号	2.635	1.382	0.813	2.539	858	32.50
乌苏 1 号	7.214	1.411	0.781	4.382	387	40.12



图 5 苜蓿种子离散元模型

Fig. 5 Discrete element model of alfalfa seed

采用离散元法分析螺旋式混合排种装置中 2 种种子颗粒在机械振动下的运动特性,选用 EDEM 2024 软件进行仿真。将种子模型和混合排种装置简化模型导入 EDEM 软件前处理界面,模型如图 7 所示,料筒、螺旋轴材料均为树脂,种子和装置材料力学参数和接触参数见表 3。在混合排种器进种口分别设置 30 mm × 40 mm 的苜蓿、无芒雀麦种子颗粒工厂,颗粒仅受自身重力影响,以模拟种子自然落入混合排种装置的过程。种子–种子和种子–装置间的接触选用 Hertz – Mindlin(no slip)接触力学模型。

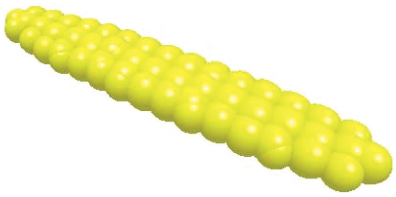


图 6 无芒雀麦种子离散元模型

Fig. 6 Discrete element model of awnless brome seed



图 7 混合输送区段离散元仿真简化模型

Fig. 7 Discrete element simulation of mixed conveying section

表 3 仿真试验参数

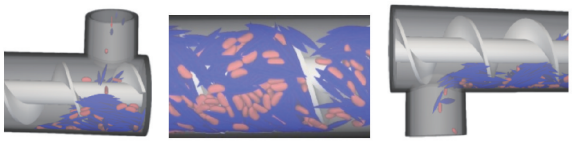
Tab. 3 Parameters of simulation test

材料	参数	数值
苜蓿种子	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	1.01×10^7
	密度/(kg·m^{-3})	858
	种间静摩擦因数	0.24
	种间滚动摩擦因数	0.032
	种间碰撞恢复系数	0.45
无芒雀麦种子	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	387
	种间静摩擦因数	0.44
	种间滚动摩擦因数	0.41
	种间碰撞恢复系数	0.5
	与苜蓿种子静摩擦因数	0.35
	与苜蓿种子滚动摩擦因数	0.320
	与苜蓿种子碰撞恢复系数	0.330
树脂	泊松比	0.34
	剪切模量/Pa	3×10^9
	密度/(kg·m^{-3})	1 250
	与苜蓿种子静摩擦因数	0.65
	与苜蓿种子滚动摩擦因数	0.462
	与苜蓿种子碰撞恢复系数	0.424
	与无芒雀麦种子静摩擦因数	0.80
	与无芒雀麦种子滚动摩擦因数	0.485
	与无芒雀麦种子碰撞恢复系数	0.303

在混合排种装置排种口下方设置辅助网格，以记录仿真总时间内 2 种种子排种量。

3.2　结构优化仿真结果

仿真效果如图 8 所示。不同螺旋叶片升角下混合种子排种速率、排种稳定性变异系数和和混合比例精度如图 9、10 所示。由图 9、10 可知，装置混合输送区域对混合种子排种时，随着螺旋叶片升角增大，排种速率先提高后小幅度下降，在 25°左右达到最大值，排种稳定性变异系数则持续增加。螺旋叶片升角小于 25°时，混合比例精度在小范围内变化，总体维持平稳，大于 25°后出现下降趋势，这是由于较大的螺旋叶片升角减弱了螺旋轴离心效应，影响了混合效果。综合考虑排种效率、排种稳定性和混合效果，结合仿真结果，混合排种时，适宜的螺旋叶片升角为 25°，此时，混合种子排种速率为 3.34 g/s，排种稳定性变异系数为 5.17%，排种性能较优，混合比例精度为 0.874，混合效果最佳。



(a) 进种过程　(b) 混合送种过程　(c) 出种过程

图 8　结构优化仿真效果

Fig. 8　Structural optimization simulation test effect diagrams

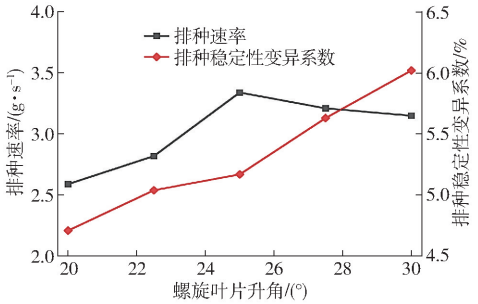


图 9　螺旋叶片升角对排种性能的影响

Fig. 9　Effect of spiral blade angle on seeding performance

4　混合排种性能台架试验

4.1　试验材料与方法

4.1.1　试验材料

为进一步明确混合排种装置混合效果和排种性能，根据优化后结构参数 3D 打印了螺旋式混合排种装置，搭建混播排种试验台架(图 11)。试验仍以中苜 1 号苜蓿种子和乌苏 1 号无芒雀麦种子为试验材料，其物理性质如表 2 所示。

4.1.2　试验方案

为探究工作参数对混合排种性能的影响效果并寻找该装置最优工作参数组合，以螺旋轴转速和混合种子填充率为因素进行两因素五水平的旋转组合试验，以排种速率、排种稳定性变异系数和混合比例精度为评价指标，通过 Design-Expert 对试验结果进行回归分析，通过响应面法进行工作参数组合寻优，最后以混合种子排种速率、排种稳定性变异系数和混合比例精度为评价指标，对最优工作参数组合进行重复验证试验，以证明拟合回归模型可靠性。

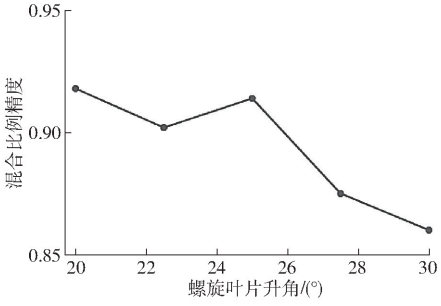


图 10　螺旋叶片升角对混合效果的影响

Fig. 10　Effect of spiral blade angle on mixing effect

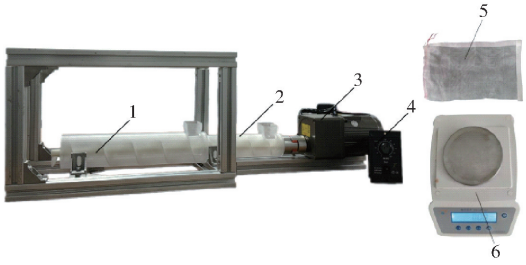


图 11　混播排种试验台架

Fig. 11　Mixed seeding test bench

1. 变径变距螺旋轴　2. 半透明料筒外壳　3. 调速电机　4. 调速器　5. 网袋　6. 电子秤

排种试验前，利用调速器调节电机转速，对每组试验所需的螺旋轴转速对应的电机转速进行标定。试验时，无芒雀麦种子按照设定的排种量通过进种口 A 持续进入混合排种装置的单一输送区，待种子流到达混合输送区时沿进种口 B 持续加入设定排种量的苜蓿种子，在螺旋叶片作用下种子流混合并向排种口移动，排种口外接网袋以收集排出的种子，每组试验时间 30 s。试验完成后，用筛网分离网袋中的混合种子并分别称量。

4.1.3　试验因素

螺旋轴转速应满足最小转速 n_{min} 可使种子脱离料筒底面被带动混合，最大转速 n_{max} 不能使种子超速击打壁面破损，根据理论分析和预试验结果，选定螺旋轴转速为 20 ~ 62 r/min。在装置充种时，根据结构设计，混合种子填充率小于 50% 时无法达到单位时间排种量要求，完全填充则低转速下种子流流动阻塞，出现堵种现象，因此选定混合种子填充率为 50% ~92%。试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Test factors and levels codes

编码	因素	
	螺旋轴转速/(r·min^{-1})	混合种子填充率/%
1.414	62	92
1	56	86
0	41	71
−1	26	56
−1.414	20	50

表 5 试验方案及结果

Tab. 5 Test schemes and results

试验编号	因素		排种速率 Y_1/(g·s^{-1})	排种稳定性变异系数 Y_2/%	混合比例精度 Y_3
	X_1	X_2			
1	−1	−1	1.90	3.65	0.879
2	1	−1	2.90	6.21	0.962
3	−1	1	3.81	3.23	0.867
4	1	1	6.69	5.73	0.818
5	−1.414	0	1.88	3.05	0.900
6	1.414	0	5.39	6.26	0.904
7	0	−1.414	2.02	4.68	0.926
8	0	1.414	6.23	3.70	0.809
9	0	0	3.52	3.53	0.933
10	0	0	2.97	3.88	0.943
11	0	0	3.09	4.02	0.946
12	0	0	3.42	3.40	0.951
13	0	0	3.21	3.92	0.947

4.2 试验结果

4.2.1 两因素五水平旋转组合试验

两因素五水平旋转组合试验方案及结果如表 5 所示,其中 X_1 为螺旋轴转速编码,X_2 为混合种子填充率编码。利用 Design-Expert 10 对试验结果进行回归分析,结果如表 6 所示。

表 6 工作参数对排种性能指标的显著性分析

Tab. 6 Significance analysis of working parameters on seeding performance index

方差源	排种速率 Y_1		排种稳定性变异系数 Y_2		混合比例精度 Y_3	
	F	P	F	P	F	P
模型	110.41	<0.000 1 **	39.40	<0.000 1 **	132.88	<0.000 1 **
X_1	185.95	<0.000 1 **	157.31	<0.000 1 **	4.34	0.075 6
X_2	322.89	<0.000 1 **	8.92	0.020 3 *	285.48	<0.000 1 **
X_1X_2	16.81	0.004 6 **	0.012	0.914 8	96.27	<0.000 1 **
X_1^2	4.42	0.073 6	26	0.001 4 **	73.15	<0.000 1 **
X_2^2	24.21	0.001 7 **	8.02	0.025 3 *	234.59	<0.000 1 **
残差						
失拟项	1.04	0.466 7	1.03	0.469 9	0.96	0.492 3
纯误差						
总和						

注:** 表示影响极显著($P<0.01$),* 表示影响显著($0.01\leqslant P<0.05$)。

由表 6 可知,3 个性能指标模型 P 均小于 0.01,表明模型极显著,并且失拟项 P 均大于 0.05,均不显著,说明无失拟存在,拟合的回归模型可靠性较高。其中,X_1 对 Y_1 和 Y_2 影响极显著,对 Y_3 影响较小;X_2 对 Y_1 和 Y_3 影响极显著,对 Y_2 影响显著;X_1 和 X_2 对 Y_1 和 Y_3 的影响存在交互作用。去除不显著项后,通过 Design-Expert 获得 Y_1、Y_2 和 Y_3 拟合回归方程为

$$Y_1 = 3.24 + 1.11X_1 + 1.46X_2 + 0.47X_1X_2 + 0.43X_2^2 \tag{26}$$

$$Y_2 = 3.75 + 1.2X_1 - 0.29X_2 + 0.52X_1^2 + 0.29X_2^2 \tag{27}$$

$$Y_3 = 0.94 - 0.04X_2 - 0.033X_1X_2 - 0.022X_1^2 - 0.039X_2^2 \tag{28}$$

试验因素对排种性能指标的响应曲面如图 12 所示。

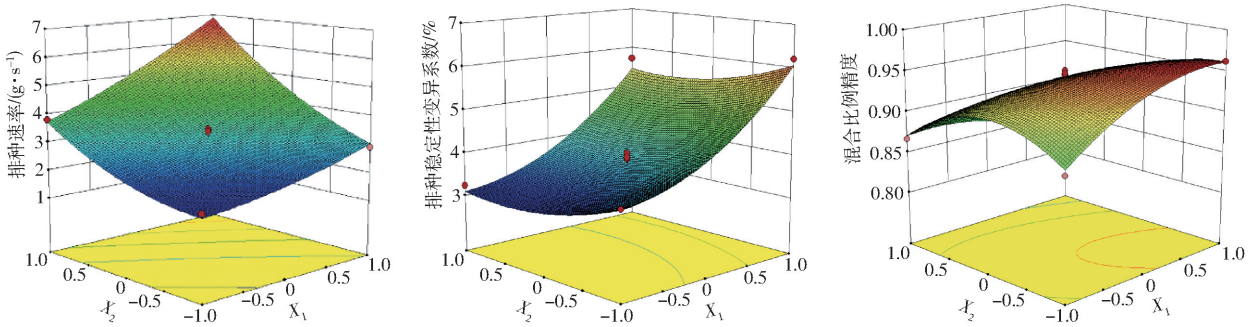


图 12 试验因素对评价指标影响的响应曲面

Fig. 12 Response surface of influence of experimental factors on evaluation index

由图 12 可知，混合种子填充率一定时，随着螺旋轴转速提升，排种速率快速上升，排种稳定性变异系数增大，混合比例精度总体呈上升趋势，但上升幅度较小，原因为：转速提升使螺旋叶片轴向推力增大，增加了种子流轴向运动速度，进而增加了单位时间排种量；另一方面，较高的转速会提高装置内种子流受到的离心作用以及种子间的碰撞概率，从而影响排种稳定性，但在一定程度上可促进混合比例精度提升。螺旋轴转速一定时，随着混合种子填充率提高，排种速率快速上升，排种稳定性变异系数缓慢下降，混合比例精度先上升至平缓后缓慢下降，原因为：填充率提高可使装置单位长度内携种量增加，相同时间内，单位长度携种量越大，排种量就越多，排种速率变大，且因为种子总量增加，种间作用增强，有利于种子进行更为充分的对流混合，而较高的填充率使充种后的装置内空隙变小，限制了种子运动范围，抑制了部分种子无序移动和碰撞行为，从一定程度上保持了稳定排种，但也影响了种间混合效果。试验结果表明，增大螺旋轴转速可提高排种效率，但排种稳定性也会随转速增大而下降，相较于转速对排种性能的影响，其对混合效果影响较小；提高混合种子填充率，可在增加排种效率的同时维持排种稳定性，还可以提高混合比例精度，对排种性能和混合效果的提升均有促进作用。

为得到螺旋式混合排种装置的最优工作参数组合，利用 Design-Expert 软件，以排种速率最大、排种稳定性变异系数最小和混合比例精度最大为目标，建立目标函数与约束条件方程组为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2) \\ \min Y_2(X_1, X_2) \\ \max Y_3(X_1, X_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.414 \leqslant X_1 \leqslant 1.414 \\ -1.414 \leqslant X_2 \leqslant 1.414 \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

对目标函数进行优化求解，得到最优工作参数组合为螺旋轴转速 45 r/min、混合种子填充率 70%。该组合下，螺旋式混合排种装置排种速率为 3.49 g/s，排种稳定性变异系数为 4.13%，混合比例精度为 0.946。

4.2.2　验证试验

在混播排种试验台上进行最优工作参数组合验证试验，设置螺旋轴转速为 45 r/min、混合种子填充率为 70%，排种装置稳定运行 10 s，统计 3 个评价指标。验证试验重复 10 次，试验结果如图 13 所示。

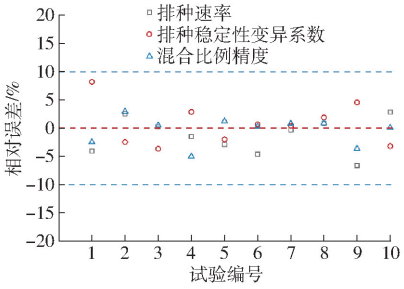


图 13　验证试验结果

Fig. 13　Results of verification test

由图 13 可知，3 个性能评价指标实测值与模型预测值相对误差均小于 10%，且大部分集中在 5%以内，可以认为实际试验与理论结果基本一致，表明最优工作参数拟合回归模型可靠。

5　结论

（1）设计了一种变径变距式螺旋混合排种装置，阐述了其结构组成与工作原理，明确了其输送与混合机制。通过力学分析与参数设计，确定了螺旋直径、螺距、轴长等关键结构参数，确定了螺旋叶片升角、转速、填充率等参数的合理范围。

（2）通过离散元仿真分析了螺旋叶片升角对排种性能与混合效果的影响规律，得出最优升角为 25°，此时排种速率达 3.34 g/s，排种稳定性变异系数为 5.17%，混合比例精度为 0.874。

（3）排种性能台架试验结果表明，螺旋轴转速与混合种子填充率对排种性能影响显著，通过响应面法优化得出最优工作参数组合为螺旋轴转速 45 r/min、混合种子填充率 70%，该条件下排种速率为 3.49 g/s，排种稳定性变异系数为 4.13%，混合比例精度为 0.946。验证试验结果表明，实测值与模型预测值相对误差小于 10%，模型可靠。

参　考　文　献

[1] PARRA C, BOLSON D, JACOVACI F, et al. Influence of soybean-crop proportion on the conservation of maize-soybean bi-crop silage[J]. Animal Feed Science and Technology, 2019, 257: 114295.

[2] MENG Lingchao, MA Yulei, CHENG Tianni, et al. Gramineae-Legumes-mixed cultivated grassland improves soil anti-erodibility of the steep loess slopes in semi-arid region[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 391: 126489.

[3] 张永亮，滕泽，张玉霞. 苜蓿-无芒雀麦混播方式和比例对禾草叶片碳氮代谢的影响[J]. 草地学报，2023，31(12)：3744－3749.
ZHANG Yongliang, TENG Ze, ZHANG Yuxia. Effects of the pattern and proportion of mixed sowing alfalfa to smooth brome on the carbon and nitrogen metabolism in its leaves[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3744－3749. (in Chinese)

[4] 包乌云，魏嘉瑶，郭蓉，等. 优化根系互作调控豆-禾混播系统建植期种间关系与生产力[J]. 草业科学，2025，42(9)：2322－2331.

BAO Wuyun, WEI Jiayao, GUO Rong, et al. Optimizing root interactions to regulate interspecific relationships and productivity in legume-grass mixtures during the establishment phase[J]. Pratacultural Science, 2025,42(9):2322 - 2331. (in Chinese)
[5] 杨昊谕,田绍楠,潘智浩,等. 草地农用机械发展现状[J]. 农机化研究,2025,47(7):1 - 8,17.
YANG Haoyu, TIAN Shaonan, PAN Zhihao, et al. Development status of grassland agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(7):1 - 8,17. (in Chinese)
[6] 刘彦清. 牧草种子处理及播种技术[J]. 畜牧兽医科学(电子版),2021(3):138 - 139.
[7] YOU Zhaoyan, GAO Ya, WU Huichang, et al. Development and test of 2BFLA - 200 type multi-variety green manure intelligent mixer[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization,2021,2(2): 42 - 50.
[8] LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Motion simulation of oat and vetch seeds in distributors based on DEM - CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,233:110176.
[9] 黄小毛,刘宇,朱耀宗,等. 稻油兼用型成条飞播装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):111 - 121.
HUANG Xiaomao, LIU Yu, ZHU Yaozong, et al. Design and experiment of striped aerial seeding device for rice and oil rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):111 - 121. (in Chinese)
[10] JIANG Xinming, ZHANG Jie, LIU Shuyan, et al. Development and evaluation of a universal seed discharger for precision planting in corn-soybean cropping system[J]. Processes,2024,12(8):1595.
[11] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12): 16 - 26.
[12] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9): 102 - 115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(9):102 - 115. (in Chinese)
[13] 杜俊, 夏俊芳, 张居敏,等. 稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 127 - 134.
DU Jun, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(3):127 - 134. (in Chinese)
[14] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12): 134 - 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12): 134 - 146. (in Chinese)
[15] 王磊,廖宜涛,万星宇,等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):68 - 79,97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):68 - 79,97. (in Chinese)
[16] 刘文昊,李嘉欣,王生菊,等. 天山北坡野生无芒雀麦种子形态特征分析[J]. 草业科学, 2023, 40(5): 1304 - 1314.
LIU Wenhao, LI Jiaxin, WANG Shengju, et al. Morphological characteristics of wild *Bromus inermis* seeds from the northern slope of the Tianshan Mountain[J]. Pratacultural Science,2023,40(5):1304 - 1314. (in Chinese)
[17] 戴亿政,罗锡文,张明华,等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 1 - 8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(10):1 - 8. (in Chinese)
[18] 姜永成,花梅,那亚,等. 10 种禾本科植物种子形态、萌发特性及幼苗生长的比较研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2025, 46(1): 45 - 51.
JIANG Yongcheng, HUA Mei, NA Ya, et al. Comparative study on seed morphology, germination characteristics, and seedling growth of ten poaceae species[J]. Animal Husbandry and Feed Science,2025,46(1):45 - 51. (in Chinese)
[19] 侯钰荣,许莹月,兰吉勇,等. 紫花苜蓿和冰草混播比例对根系属性的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(5): 1222 - 1234.
HOU Yurong, XU Yingyue, LAN Jiyong, et al. Effects of mixed sowing ratio on root properties of *Medicago sativa* and *Agropyron cristatum*[J]. Pratacultural Science,2025,42(5):1222 - 1234. (in Chinese)
[20] MI Yuqing, XU Hongbin, ZHANG Lei, et al. Effects of legume-grass mixture combinations and planting ratios on forage productivity and nutritional quality in typical sand-fixing vegetation areas of the Mu Us Sandy Land[J]. Agriculture,2025, 15(14):1474.
[21] 王得伟,尤泳,张学宁,等. 退化草地改良工艺与装备发展综述[J]. 农业工程学报,2024,40(7):17 - 33.
WANG Dewei, YOU Yong, ZHANG Xuening, et al. Review of the improvement techniques and equipment development for degraded grasslands[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 17 - 33. (in Chinese)
[22] 魏孔涛,鱼小军,白梅梅,等. 混播比例对半干旱区放牧型混播草地草产量及品质的影响[J]. 中国草地学报,2022, 44(9):56 - 65.
WEI Kongtao, YU Xiaojun, BAI Meimei, et al. Effect of mixed sowing ratio on the forage yield and quality of grazing mixed sowing grassland in semi-arid areas[J]. Chinese Journal of Grassland,2022,44(9):56 - 65. (in Chinese)
[23] 螺旋输送机:JB/T 7679—2008[S]. 2008.
[24] 贾宏禹,吴帮雄,孙文斌. 水平螺旋输送机输送规律及摩擦系数的影响研究[J]. 机械设计与制造,2017(9):236 - 239.
[25] 位国建,祁兵,焦伟,等. 水田机械式强制排肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):154 - 164.
WEI Guojian, QI Bing, JIAO Wei, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):154 - 164. (in Chinese)
[26] REN Hong, MENG Wenjun, SUN Xiaoxia, et al. Discrete element analysis on dynamic characteristics of directional material flow driven by horizontal trough-free screw conveyor[J]. Powder Technology,2023,418:118276.
[27] OLEKSANDR K, LARYSA B, SERHII H, et al. Mathematical modelling of the fruit-stone culture seeds calibration process using flat sieves[J]. Acta Technologica Agriculturae,2021,24(3):119 - 123.