doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.017

面向等离子体苜蓿种子处理的均匀布料系统设计与试验

惠云婷[1,2]　席军辉[1,2]　王俊武[3]　王守炎[1,2]　邵国虎[3]　李百成[3]
黄　晨[1,2]　王德成[1,2]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部牧草种子生产加工机械装备重点实验室, 石嘴山 753400;
3. 甘肃奥凯农产品干燥装备工程研究院有限公司, 兰州 730070)

摘要: 为满足介质阻挡放电(DBD)等离子体处理工艺对种子需以均匀单层形态通过电极区的核心要求,针对苜蓿种子在输送中易出现的堆积、粘连与分布不均等问题,本文设计了一套多级组合式均匀布料系统。通过螺旋定量装置实现种子初始分散,利用散料振动器与多通道匀种振动输送器协同作用,完成种子多级高效匀化与稳定单层排布,提升了种子分布均匀性与一致性,解决了传统进料方式因种子重叠和大面积堆积导致的等离子体处理不均等问题。运用理论建模、动力学分析、高速摄像观测以及多目标参数优化等方法,确定了系统关键结构参数与振动输送过程中避免抛掷运动的临界条件,揭示了激振电压对种子个体及群体运动特性的影响机制。通过单因素与正交试验明确了各操作参数对均匀性的影响,并基于 Matlab 图像处理平台对种子图像进行二值化处理,应用分水岭分割算法提取种子边界,保障了最近邻距离变异系数计算的准确性与可靠性。结果表明,散料振动器电压对均匀性影响最为显著,输送带转速为影响覆盖率(S)的关键因素。最优工艺参数组合为:散料振动器电压 120 V、匀种振动器电压 70 V、输送带转速 15 r/min。此时,种子层均匀性变异系数为 48.12%,覆盖率 S 为 40.93%,实现了处理均匀性与作业效率的良好平衡。研究结果为种子加工领域均匀布料技术提供了理论依据。

关键词: 苜蓿种子; 均匀单层布料; 振动输送; 高速摄像; 等离子体处理
中图分类号: S223.1+9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0184-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Uniform Distribution System for Plasma Treatment of Alfalfa Seeds

HUI Yunting[1,2]　XI Junhui[1,2]　WANG Junwu[3]　WANG Shouyan[1,2]　SHAO Guohu[3]
LI Baicheng[3]　HUANG Chen[1,2]　WANG Decheng[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Forage Seed Production and Processing Machinery and Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shizuishan* 753400, *China*
3. *Gansu Ok Agricultural Products Drying Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd.*, *Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: Aiming to address the core requirement for seeds to pass through the electrode zone in a uniform monolayer during dielectric barrier discharge plasma seed treatment, a multi-stage integrated uniform seed distribution system was developed to resolve issues such as clogging, adhesion, and uneven distribution frequently observed in small-sized seeds like alfalfa during transportation. The system achieved initial seed dispersion via a screw metering device and utilized a dispersing vibrator combined with a multi-channel leveling vibratory conveyor to realize efficient multi-stage homogenization and stable monolayer arrangement of seeds. This approach significantly enhanced the uniformity and consistency of seed distribution, effectively overcoming the problem of uneven plasma treatment caused by seed overlap and accumulation in conventional feeding systems. The research integrated theoretical modeling, dynamic analysis, high-speed imaging, and multi-objective parameter optimization to determine critical structural parameters and establish the threshold conditions for avoiding seed throwing movement during vibration

收稿日期: 2025-08-12　修回日期: 2025-09-06
基金项目: 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: 惠云婷(1992—),女,讲师,博士,主要从事种子播前处理机械化及智能化装备研究,E-mail: hyt@cau.edu.cn
通信作者: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草全程机械化及智能化装备研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

conveyance. It systematically revealed the influence mechanism of excitation voltage on individual and collective seed motion behavior. Through single-factor and orthogonal experiments, the significant effects of operational parameters on uniformity indicators were identified. Using Matlab-based image processing, seeds were binarized and boundaries were accurately extracted via watershed segmentation, which ensured reliable calculation of the coefficient of variation of the nearest neighbor distance. Results demonstrated that the dispersing vibrator voltage most significantly affected uniformity, while the conveyor speed was the dominant factor influencing coverage rate (S). The optimal parameter combination was determined as: dispersing vibrator voltage of 120 V, leveling vibrator voltage of 70 V, and conveyor speed of 15 r/min. Validation tests showed that under these parameters, the seed layer uniformity reached 48.12% and coverage rate S achieved 40.93%, representing an effective balance between distribution uniformity and processing efficiency. The research successfully achieved high-efficiency monolayer uniform coating of alfalfa seeds, providing a critical theoretical basis for uniform distribution technology in the seed processing industry.

Key words: alfalfa seeds; uniform single-layer distribution; vibration conveyance; high-speed imaging; plasma treatment

0　引言

苜蓿是优质的豆科牧草,在改良土壤、培肥地力及发展畜牧业中具有不可替代的重要作用[1-3]。提高苜蓿种源品质与产量对于保障国家粮食安全和草畜产品有效供给至关重要。近年来,低温等离子体种子处理技术成为了一种新兴的物理农业技术,因其高效、环保、无残留等优势,在种子活化、病虫害防治及增产增效方面展现出巨大的应用潜力[4-5]。研究表明,适宜参数的等离子体处理可有效打破种子休眠、提高种子表面亲水性、增强体内酶活性,从而显著促进种子萌发和幼苗生长[6-8]。

目前,适用于实验室研究的批次式等离子体处理设备难以满足大规模工业化生产的连续作业需求[9]。为实现种子高效、工业化处理,连续流动式等离子体处理装备已成为主要发展方向。介质阻挡放电(DBD)是一种在大气压条件下产生低温非平衡态等离子体的关键方法。其典型结构是在电极间设置绝缘介质层,并通过高频高压交流电源激励,使气体发生阻挡式击穿,形成大量微放电通道,从而获得高能量密度、高活性粒子浓度的等离子体[10]。该放电形式对发生环境要求较低,支持大气压下大面积、开放式或连续流操作,易于实现规模化应用。

介质阻挡低温等离子体技术在农业与食品领域的应用研究主要围绕产前优化与产后保障两大方向展开。在产前阶段,该技术作为一种高效的种子处理方法,旨在提升作物抗逆性和生长活力[11-12];在产后阶段,则被用于食品加工与保鲜,以延长货架期、改善营养和功能品质[13-14]。在种子处理与萌发调控上,PEREA-BRENES 等[15]发现大气压空气介质阻挡放电等离子体处理可驱动大麦种子内部阳离子向表层迁移富集,并促进氮物种转化为硝酸根,从而揭示了等离子体促进发芽的物理化学耦合机制。王凯等[16]通过比较功率 100 ~ 500 W 的冷等离子体处理对盐地碱蓬黑色种子发芽及幼苗生理指标的影响,发现功率 300 W 处理可显著提高发芽率、活力指数、根长及叶片抗氧化酶活性,并降低丙二醛含量,表明冷等离子体能有效增强种子活力和幼苗抗逆性。李想等[17]发现适宜剂量 DBD 等离子体虽未显著提高紫云英发芽率与发芽势,但可提升发芽指数、活力指数、抗氧化酶活性和可溶性物质含量,增强代谢与抗逆能力,且品种间响应差异显著。惠云婷等[18]提出了一种小微粒种子多环境胁迫适应及丸粒化工厂化处理方法,该方法将大气压介质阻挡放电等离子体处理装置集成于生产线中,通过等离子体处理优化种子萌发内环境,并与丸粒化包衣所提供的外环境协同作用,显著提升种子的综合品质与田间适应能力。食品加工与品质改良方面,WU 等[19]通过 DBD 等离子体处理多种豆类面粉,显著抑制脂肪氧化酶活性,调控膳食纤维、脂肪酸与淀粉消化特性,有效改善营养品质、理化性质及贮藏稳定性。LIU 等[20]利用 DBD - CP 处理稻谷,激活苯丙烷代谢途径,促进酚类积累与抗氧化能力,抑制高温贮藏品质劣变,提升贮藏稳定性。

介质阻挡放电等离子体在种子处理中展现出显著的效果与广阔的应用前景,然而,目前该技术实际应用效果高度依赖于处理过程均匀性与一致性。在该类设备中,实现种子以单层分布与均匀分散状态通过等离子体活化区,是确保每粒种子接收均衡的能量剂量、防止局部处理不足或过度处理现象发生的核心工艺难点[21-22]。现有的布料装置常采用振动盘、螺旋给料或简单溜槽等方式,对于苜蓿等小粒径、表观复杂的种子,极易出现堆积、粘连、布料不均等问题,导致处理效果离散性大,严重制约了等离子

体处理技术优势的发挥[23]。

国内外学者开展了大量均匀布料研究。罗海峰等[24]针对气吸式排种过程中易出现的种群堆积、含水率高、吸附困难及分布不均等问题,通过设计外凸扰种仿形型孔结构,结合 CFD - DEM 耦合仿真方法优化吸附与扰种性能,并经台架与田间试验验证,显著提升了排种均匀性与作业可靠性。马秋成等[25]为解决鲜莲子送料过程中易出现的堵料及损伤问题,提出了一种基于气流辅助的振动送料方法,通过振动实现种子的有序排列与连续输送,并借助间歇喷气有效疏通堵塞;该系统结合离散元仿真与流场分析优化了送料盘结构与气嘴布置,在保证低损伤的前提下显著提高了送料的连续性与稳定性。朱承天等[26]为实现超级稻种子在振动匀种过程中的流动均匀与姿态有序调控,采用 V 形槽与转向槽的组合式窄通道结构对种子进行物理约束与姿态控制,结合电压振动实现种子的有序定向输送[27]。为解决种子均匀布料问题提供了借鉴。但面向等离子体处理这一特定工艺场景,布料系统不仅要实现小微粒种子均匀分布,还需满足其单层特性、对种子零损伤等特殊要求。

本文以苜蓿种子为对象,设计一套可与连续式等离子体处理主机配套的单层均匀布料系统。通过理论分析苜蓿种子物料特性与运移规律,对关键部件进行结构设计与参数优化;利用高速摄像技术探究布料过程中种子运动轨迹与分布规律;通过台架试验,以种子单层率、最近邻距离变异系数及种子面积覆盖率为评价指标,分析布料系统可行性与有效性,以期为农业等离子体处理技术工业化应用提供理论支撑。

1 多级组配均匀布料系统总体方案设计

大气压 DBD 等离子体种子处理机如图 1 所示,主要由多级组配均匀布料系统和等离子体均匀发生系统等组成。其中,多级组配均匀布料系统由螺旋定量给料装置、散料输送装置、匀种多通道输送装置、种子输送装置组配而成,如图 1 虚线框所示。

处理机工作原理为:整机控制系统,除射频电源控制模块独立配置外,其余控制功能均集成于统一的人机交互控制界面。设备运行前,技术人员需根据待处理物料特性,通过极板升降模组调节高压电极与接地电极之间的间距,设定匹配物料的射频功率输出值,依次配置振动给料系统频率及物料输送带速度,确保物料输送过程的稳定性与均匀性,完成储料仓物料装填。

设备启动后进入自动化运行阶段,物料由储料仓经散料振动输送器实现初次分散,通过施加外力迫使物料分散,进入匀种多通道结构,利用机械分流通道实现种子强制均匀分散,物料随输送带匀速通过等离子体处理区域,在高压射频电场作用下完成表面改性或理化处理,经出料口流入接料斗,形成连续化的等离子体种子处理工艺链。

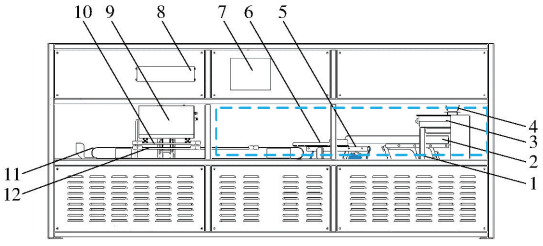


图 1 大气压式 DBD 等离子体种子处理机

Fig. 1 Atmospheric pressure DBD plasma seed treatment machine

1. 散料振动输送器 2. 散料通道 3. 螺旋定量给料装置 4. 储料仓 5. 匀种振动输送器 6. 匀种多通道 7. 控制界面 8. 射频电源 9. 极板升降模组 10. 高压电极 11. 输送带 12. 接地电极

2 关键部件结构设计

2.1 螺旋输送中种子运动特性与装置设计

水平螺旋输送机通过螺旋叶片旋转推动种子,种子颗粒既随螺旋转动又向前移动,形成空间运动轨迹。如图 2 所示,螺旋升角为 γ 的螺旋输送轴旋转时,位于螺旋轴内径处的种子颗粒在螺旋面上受到的作用力为 F_h,因摩擦力作用,F_h 与螺旋法线形成偏离角 θ,而 θ 由种子与螺旋面之间的摩擦角决定,主要与种子和接触面间摩擦因数 μ 相关,同时还受接触表面粗糙度的影响,计算时一般不考虑表面粗糙度,因此近似取 $\theta = \arctan\mu$。

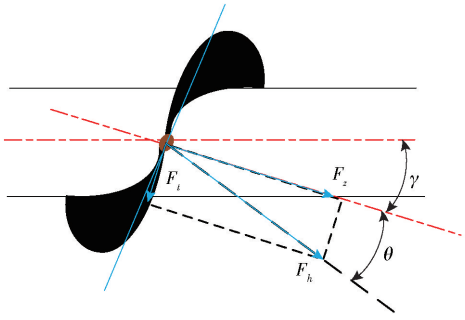


图 2 种子在螺旋叶片上的受力分析

Fig. 2 Force analysis on seed in spiral blade

视种子质点处于点 O,当螺旋轴以角速度 ω 旋转时,种子质点相对于螺旋面发生滑动,并同时产生轴向移动。种子运动速度分析如图 3 所示。圆周速度表示为 $\boldsymbol{v}_r$,方向沿点 O 处螺旋轴旋转切向;由于种子与螺旋面之间存在摩擦,产生相对滑动速度,表示为 $\boldsymbol{v}_f$,方向平行于螺旋面。不考虑摩擦时,种子在

点 O 的绝对速度 v 的方向垂直于螺旋面，即沿法向，图中表示为 $\boldsymbol{v}$；在考虑摩擦时，实际运动速度 v' 与螺旋面法向呈一摩擦角 θ，计算式为

$$v' = \frac{sn\cos\gamma}{60\cos\theta} \tag{1}$$

式中　s——螺旋叶片螺距，m

n——螺旋转速，r/min

将实际运动速度 v' 分解为沿螺旋轴方向的轴向速度 v_a 和切向速度 v_t。轴向速度 v_a 推动种子沿轴向输送，切向速度 v_t 则导致种子在螺旋槽内发生搅拌与翻滚。

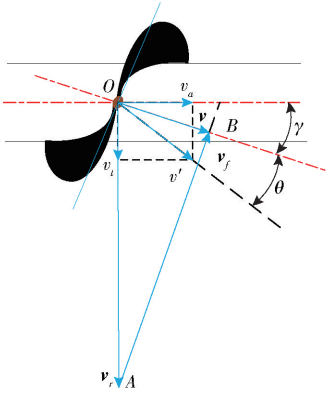


图 3　种子在螺旋输送过程的运动分析

Fig. 3　Kinematic analysis of seeds during spiral conveying process

轴向速度 v_a 计算式为

$$v_a = v'\cos(\gamma+\theta) = \frac{sn}{60}\cos^2\gamma(1-\mu\tan\gamma) = \frac{\pi r}{60}(\sin(2\gamma)-2\mu\sin^2\gamma) \tag{2}$$

其中

$$\tan\gamma = \frac{s}{2\pi r} \tag{3}$$

式中　r——螺旋轴内径，mm

为实现种子轴向输送，需满足种子轴向速度 $v_a>0$，即 $1-\mu\tan\gamma>0$，表明实现种子轴向输送须满足

$$\gamma \leqslant 90^\circ - \theta \tag{4}$$

由式(2)可知，当输送种子与螺旋叶片材料确定时，种子轴向速度与螺旋升角有关。研究表明，不同摩擦角下，轴向速度 v_a 随螺旋升角 γ 增大呈先增大后减小趋势，且摩擦角越小，轴向速度 v_a 越大[28]。

对式(2)求导，可得轴向最大输送速度为

$$\frac{\mathrm{d}v_a}{\mathrm{d}\gamma} = \frac{\pi r}{30}(\cos(2\gamma)-\mu\sin(2\gamma)) \tag{5}$$

令式(5)为 0，可得，当 $\gamma = 45^\circ - \theta/2$ 时，轴向输送速度达到最大值。当满足种子实现轴向运输时，根据计算获得轴向运输最大速度，有利于进行螺旋输送与后续种子处理的速度匹配。

基于多通道分散理念，设计四通道螺旋定量给料装置，如图 4 所示。该装置主要由机架、进料箱、螺旋机壳、螺旋输送器、出料口、动力源组成。4 条螺旋输送器均布在螺旋机壳内，其中 1 条直接与动力源相连，其余 3 条则通过同步带传动实现动力传递，从而确保所有输送器以相同转速运转。种子进入料箱后，经四通道分散并由螺旋输送器连续向前输送，最终经由出料口落入散料通道。基于上述分析并参考《螺旋输送机设计手册》，关键结构参数确定为：螺旋叶片为实体式结构，叶片厚度为 2 mm，螺旋输送器外径 D 为 40 mm，螺旋轴径 d 为 14 mm，螺距 s 为 40 mm，螺旋升角 γ 由式(3)计算得 17.66°。

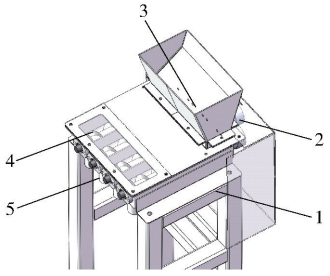


图 4　螺旋定量给料装置

Fig. 4　Spiral quantitative feeding device

1. 机架　2. 动力源　3. 进料箱　4. 螺旋输送器　5. 出料口

2.2　均匀布料过程中种子运动特性与装置设计

散料振动输送器、匀种振动输送器均选用电磁激振方式进行均匀布料。电磁振动给料是借助电磁激振器，使料槽在倾斜方向作周期直线往复振动过程。物料在激振力作用下在料槽中主要呈 3 种运动状态：相对静止、抛掷与滑行，而这 3 种状态取决于物料振动加速度垂直分量与重力加速度的关系。物料输送时，料槽振动频率高，振幅小，导致物料被抛起高度较低，此时只能观察到物料群在料槽内向前滑动，只有单颗粒物料在料槽中运动时，才能观察到细微的跳动现象。等离子体种子处理要求单层均匀，因此在研究物料在振动工作面上运动时，主要分析薄料层运动特性，此时，可忽略物料颗粒间的相互作用力，当料层厚度增加时，再确定其校正系数[29]。物料在振动料槽上的输送情况如图 5 所示。

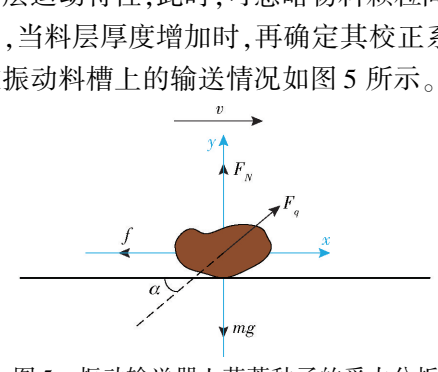


图 5　振动输送器上苜蓿种子的受力分析

Fig. 5　Force analysis of alfalfa seeds on a vibratory conveyor

为实现苜蓿种子的振动输送，其受力的关系应该满足

$$F_q\cos\alpha > f \tag{6}$$

式中 F_q——振动输送器对种子的激振力,N

α——振动方向角,(°)

f——种子输送过程中的摩擦力,N

在振动输送过程中,若物料在料槽工作面上以抛掷状态运输,物料颗粒被抛掷后又落回在工作面,物料与物料、物料与料槽之间频繁发生碰撞,产生的能耗较大,能量转化率相对较低,同时使物料运动轨迹复杂,难以准确控制物料输送速度和方向。为了能够精准控制物料运动,使其均匀分散进入等离子体处理室,需要避免物料产生抛掷运动,保证物料与料槽工作面始终保持接触状态,即有物料沿 y 方向对料槽工作面正压力 $F_N \geqslant 0$,物料相对料槽工作面沿 y 方向加速度为零。因此,若种子在输送器上刚好不跳动,则有

$$F_N + F_q\sin\alpha = mg \tag{7}$$

式中 F_N——输送板对种子的支持力,N

m——种子自身质量,kg

根据文献[30]可知,$F_q = m\omega^2\lambda\sin(\omega t)$,$f = F_N\tan\phi$,代入式(6)、(7)可得

$$m\omega^2\lambda\sin(\omega t)\cos\alpha > (mg - m\omega^2\lambda\sin(\omega t))\tan\phi \tag{8}$$

式中 ϕ——物料与料槽工作面摩擦角,(°)

λ——振幅,m

ω——振动输送器振动频率,Hz

对式(8)进行变换可得

$$\frac{\omega^2\lambda}{g}\sin(\omega t) > \frac{\sin\phi}{\cos(\phi-\alpha)} \tag{9}$$

其中 $\omega t \in [0,\pi]$,因此,出现正向滑动,需满足正向滑动指数 D_k 为

$$D_k = \frac{\omega^2\lambda}{g}\frac{\cos(\phi-\alpha)}{\sin\phi} > 1 \tag{10}$$

可得到满足物料正向滑动振幅临界值为

$$\lambda = \frac{g}{\omega^2}\frac{\sin\phi}{\cos(\phi-\alpha)} \tag{11}$$

基于上述分析,可初步完成电磁激振器选型。然而,苜蓿种子在实际中并不能被简单视为质点,其颗粒细小、表观形态复杂,在振动过程中易发生翻滚和位置偏移。为此,提出一种“散料+多通道匀种”的组合式散种方案(图 6),通过分段平铺与翻转受迫匀化相结合的方式,实现对种子颗粒运动轨迹的定向调控。根据苜蓿三轴尺寸(2.635 mm × 1.382 mm × 0.813 mm)与加工条件,设计多通道单个通道宽度 3 mm。

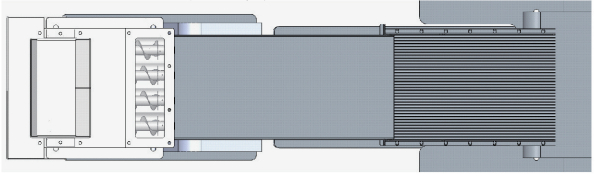


图 6 多级组配均匀布料机械系统俯视图

Fig. 6 Top view of multistage assembly uniform distribution mechanical system

3 样机作业性能试验

3.1 材料与方法

3.1.1 试验环境与材料

2025 年 8 月在兰州甘肃奥凯农产品干燥装备工程研究院有限公司试验制造中心开展多级组配均匀布料系统性能试验。

试验材料包括大气压 DBD 等离子体种子处理机(图 7)、高速摄像系统(千眼狼 S1307 型,合肥中科君达视界技术股份有限公司)、便携式计算机和卷尺等。



图 7 大气压式 DBD 等离子体种子处理机实物

Fig. 7 Atmospheric pressure DBD plasma seed treatment machine

3.1.2 评价方法

为检验系统单层均匀平铺性能,选取单层均匀性、最近邻距离变异系数和种子面积覆盖率为试验指标。

(1)单层均匀性为当作业停止后,随机选取输送带上 3 处位置的种子层横截面观察,若种子平铺均为单层或种子堆叠不超过该处单层种子数十分之一则记为 1,表示通过,否则记为 0。

(2)最近邻距离变异系数(Coefficient of variation of nearest-neighbor distance, CV_{NND})可以量化空间点状要素分布均匀性或聚集性的指标。通过计算所有点与其最近邻点之间距离标准差与均值比值,反映距离离散程度。CV_{NND} 越大,表明距离变异性越高,空间异质性越强,点分布趋于聚集态势,即呈“密集与稀疏并存”的不均匀格局;反之,该值越小,则表明点空间分布越均匀[31-33]。计算式为

$$CV_{NND} = \frac{\sigma_{NND}}{d_{NND}} \times 100\% \tag{12}$$

其中

$$\sigma_{NND} = \sqrt{\frac{1}{j}\sum_{i=1}^{j}(d_{\min}(i) - \bar{d}_{NND})^2} \tag{13}$$

$$\bar{d}_{NND}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}d_{\min}(i) \tag{14}$$

式中　$\bar{d}_{NND}$——所有点的最近邻距离平均值

σ_{NND}——所有点的最近邻距离标准差

$d_{\min}(i)$——第 i 个点到其最近邻点的距离

(3)种子面积覆盖率 S 是指当前区域种子投影面积与区域面积比值。计算式为

$$S=\frac{A_1}{A_2}\times 100\% \tag{15}$$

式中　S——种子面积覆盖率,%

A_1——当前区域种子投影面积

A_2——当前区域面积

除单层均匀性指标外,试验中最近邻距离变异系数 CV_{NND} 和种子面积覆盖率 S 的获取方法为:作业停止后,由操作人员手持拍摄设备,保持镜头平行于输送带平面,随机选取 3 处区域拍摄清晰图像,并将图像传输至计算机,最后使用自行编写的 Matlab 脚本对 2 个指标进行计算。

3.2　单因素试验与高速摄像试验

在预试验基础上,选取散料振动器电压(80 ~ 160 V,梯度 20 V)、匀种振动输送器电压(40 ~ 160 V,梯度 30 V)和输送带转速(5 ~ 25 r/min,梯度 5 r/min)3 个参数作为试验因素,并以单层均匀性、最近邻距离变异系数 CV_{NND} 和种子面积覆盖率 S 作为试验评价指标。采用控制变量法,以各参数中心水平作为零水平,分别探究各参数对试验指标的影响。

种子初始振动分散通过散料振动器实现,其运动行为具有显著代表性,可反映种子在振动激励下的位移、碰撞及扩散机制。匀种多通道振动器虽在结构上与散料振动器类似,但其通道结构对种子姿态和运动方向产生了限制,已不属于自由分散过程;而输送带上的种子处于相对静止或稳定输送状态,运动行为趋于统一,无法有效反映振动对种子分布的影响。因此,研究采用高速摄像系统拍摄散料振动器阶段的种子均匀分散工作过程,以此解析整个种子均匀分散布料系统的种子运动行为。

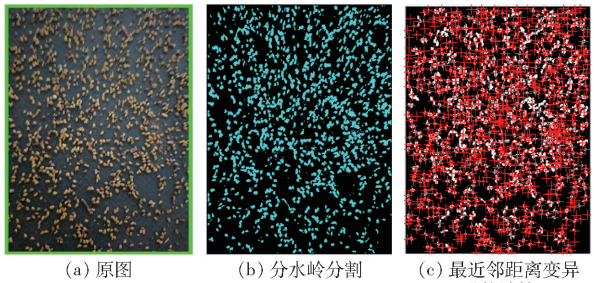
3.3　多因素正交试验

在单因素试验基础上,设计三因素三水平正交试验,以探究该系统对苜蓿种子均匀布料行为的最优控制参数组合。每组试验重复 3 次,其他参数保持不变。测量结果取处理后平均值。

4　结果与分析

4.1　单因素试验结果与分析

采用 Matlab 脚本对最近邻距离变异系数 CV_{NND} 和种子面积覆盖率进行计算,结果如图 8 所示。



(a) 原图　(b) 分水岭分割　(c) 最近邻距离变异系数计算

图 8　Matlab 计算试验指标结果

Fig. 8　Result of calculating test indicators using Matlab

Matlab 脚本运行时,选择 1 幅显微图像,并在已知实际长度的标尺区域绘制线段、输入实际长度,程序据此自动计算像素与微米的比例关系。随后,通过矩形框选定待分析的感兴趣区域(ROI)。在图像处理阶段,脚本对 ROI 进行灰度化与阈值分割,通过开闭运算平滑轮廓,并结合距离变换与分水岭算法以分离粘连颗粒,之后滤除面积小于 0.5 μm² 的干扰颗粒。若未检测到有效颗粒,程序提示后退出;否则,计算每个颗粒至其最近邻的距离,进而求得 CV_{NND};同时累计所有颗粒所占面积,与 ROI 总面积相比得到覆盖率 S。最终,程序在命令行窗口输出计算结果,并生成标注有各颗粒中心及最近邻连线的分析图像。所有数据同步保存为 PNG 图像与 MAT 文件。

4.1.1　散料振动器电压

当固定匀种振动器电压为 100 V、输送带转速为 15 r/min 时,改变散料振动器电压进行单因素试验,试验结果如图 9 所示。

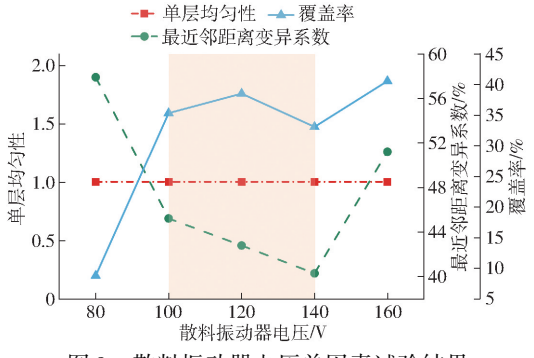


图 9　散料振动器电压单因素试验结果

Fig. 9　Bulk vibrator voltage single-factor test results

由图 9 可知,散料电压对种子分布均匀性及覆盖率具有显著影响。电压从 80 V 升高至 140 V,最近邻变异系数由 57.86% 降至 40.29%,表明提高电压有助于提升分散均匀性;但当电压继续增至 160 V 时,最近邻变异系数回升至 51.19%,分布均匀性下降,可能与种子反弹或飞溅有关。当电压为 160 V 时,覆盖率 S 达到最大值 40.50%,但在 120 V 时已具备较高覆盖率 38.45%,140 V 时略

降为 33.04%,表明电压对覆盖率的影响存在饱和甚至回落趋势。

综合考虑种子分布均匀性与输送效率,电压 100~140 V 时可在保持较高覆盖率的同时实现较优均匀性。因此,确定散料振动器电压为 100~140 V。

4.1.2 匀种振动输送器电压

当固定散料振动器电压为 120 V、输送带转速为 15 r/min 时,改变匀种振动输送器电压进行单因素试验,试验结果如图 10 所示。

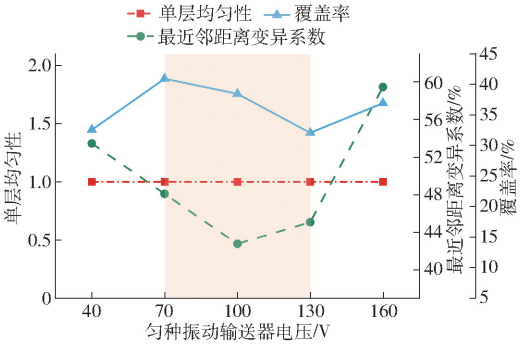


图 10 匀种振动输送器电压单因素试验结果

Fig. 10 Seed distribution vibratory conveyor voltage single-factor test results

由图 10 可知,最近邻距离变异系数随电压升高先降后升,在 100 V 时取得最小值为 42.78%,表明该电压下种子分布最为均匀。电压低于或高于 100 V 时均匀性均有所下降,尤其在 40 V 和 160 V 时变异系数较高,分别为 53.45% 和 59.47%,说明电压过低或过高均会导致均匀性不足。

由图 10 可知,电压为 70 V 时覆盖率达到峰值,为 40.93%,之后随电压上升呈下降趋势。电压 100、130 V 时覆盖率分别为 38.45% 和 32.09%,仍处于可接受范围,但电压 160 V 时覆盖率出现回升到 36.94%,仍低于电压 70 V 水平。

综合考量,电压 70 V 在效率方面表现最优,而电压 100 V 在均匀性方面最佳。130 V 作为均匀性尚可且覆盖率达中等水平的参数点。因此,确定匀种振动输送器电压为 70~130 V。

4.1.3 输送带转速单因素试验结果

当固定散料振动器电压为 120 V、匀种振动器电压为 100 V 时,改变输送带转速进行单因素试验,试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知,最近邻变异系数随转速增加呈下降趋势,当 25 r/min 时达到最优值 42.08%。覆盖率当转速为 10 r/min 时最高(41.67%),之后随转速上升持续下降,至 25 r/min 时降至 22.48%。此外,过低的输送带转速将导致种子层单层均匀性失效,因此不宜选用过低的输送带转速进行作业。

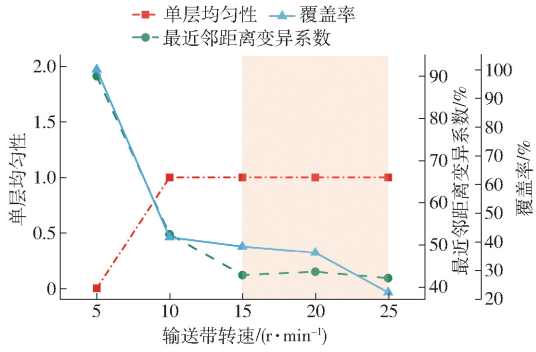


图 11 输送带转速单因素试验结果

Fig. 11 Conveyor belt speed single-factor test results

综合指标结果,转速为 15~25 r/min 内可兼顾良好的分布均匀性与可接受的作业效率,故确定转速为 15~25 r/min。

4.2 高速摄像试验结果与分析

试验采用高速摄像技术,分析散料振动器电压为 80~160 V 内对单粒及群体种子振动分散行为的影响,结果如图 12、13 所示。

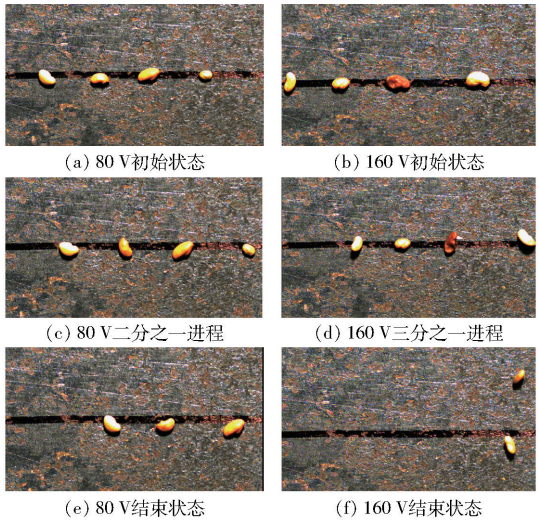
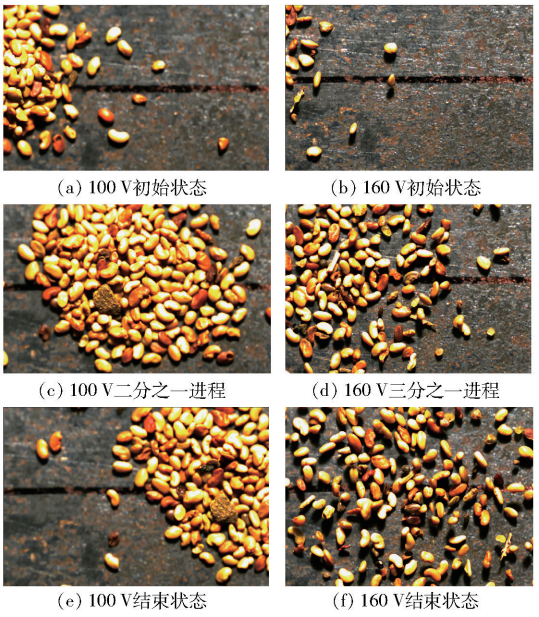


图 12 不同散料振动器电压下的单粒种子运动状态

Fig. 12 Motion state of a single seed under different voltages of bulk material vibrator

由图 12 通过对激振电压 80~160 V 下单粒种子运动状态分析可知,在电压 80~120 V 范围内,种子在整个运动过程中能够稳定保持在标准水平直线上运动,表现出良好的定向输送特性。当电压升高至 120~160 V 时,种子运动剧烈程度增加,虽在多数时段仍可维持在标准水平线上,但随着电压进一步增大,其在水平直线上的行进时间显著减少。表明在较低电压条件下,种子运动状态以直线输送为主;而随着电压提高,种子开始出现明显弹跳现象,运动轨迹稳定性下降,可控性逐渐减弱。

由图 13 可知,在不同散料振动器电压作用下,群体种子运动行为表现出明显差异。在较低电压下,种子发生部分分散并逐渐达到动态平衡,不再进



(a) 100 V初始状态　(b) 160 V初始状态　(c) 100 V二分之一进程　(d) 160 V三分之一进程　(e) 100 V结束状态　(f) 160 V结束状态

图 13　不同散料振动器电压下的群体种子运动状态

Fig. 13　Motion state of a population of seeds under different voltages of bulk material vibrator

一步散开，整体仍维持类似单粒种子的定向输送模式，如图 13a、13c、13e 所示。而在较高电压下，激振力显著增强，种子频繁撞击振动平面及彼此之间发生剧烈碰撞，导致群体迅速、完全分散。如图 13b、13d 所示，种子持续弹跳，下落到部分种子接触振动面后受强振动力作用，加之苜蓿种子呈“肾”形，易导致受力不均并发生持续翻转。最终如图 13f 所示，种子群达到近乎完全分散状态，并在短时间内形成互不碰撞的微妙平衡。

4.3　多因素正交试验结果与分析

基于单因素试验结果，可得三因素三水平正交试验编码如表 1 所示。

表 1　正交试验因素编码

Tab. 1　Test factors and coding

编码	因素		
	散料振动器电压/V	匀种振动器电压/V	输送带转速/(r·min^{-1})
-1	100	70	15
0	120	100	20
1	140	130	25

开展三因素三水平正交试验，并进行极差分析，试验结果如表 2 所示，A、B、C 为因素编码值。

由表 2 可知，对最近邻距离变异系数 CV_{NND} 影响的因素从大到小为 A、C、B。为获得最小的最近邻距离变异系数，各因素应取水平为 $A_2B_3C_2$，即散料振动器电压 120 V、匀种振动器电压 130 V、输送带转速 20 r/min。此组合下，理论最近邻距离变异系数最低。

表 2　正交试验结果与极差分析

Tab. 2　Orthogonal experimental results and range analysis

编号	因素			最近邻距离变异系数/%	种子覆盖率/%
	散料振动器电压 A	匀种振动器电压 B	输送带转速 C		
1	-1	-1	-1	39.816 7	31.436 7
2	-1	0	0	40.813 3	24.413 3
3	-1	1	1	45.416 7	18.300 0
4	0	-1	0	40.566 7	24.956 7
5	0	0	1	42.076 7	22.483 3
6	0	1	-1	38.593 3	32.516 7
7	1	-1	1	45.303 3	32.636 7
8	1	0	-1	51.303 3	24.236 7
9	1	1	0	40.556 7	20.426 7
K_1	126.046 7	125.686 7	129.713 3		
K_2	121.236 7	134.193 3	121.936 7		
K_3	137.163 3	124.566 7	132.796 7	最近邻距离变异系数	
k_1	42.015 6	41.895 6	43.237 8	因素影响由大到小：	
k_2	40.412 2	44.731 1	40.645 6	A、C、B	
k_3	45.721 1	41.522 2	44.265 6		
R_j	5.308 9	3.208 9	3.620 0		
优方案	A_2	B_3	C_2		
K_1	74.150 0	89.030 1	88.190 1		
K_2	79.956 7	71.133 3	69.796 7		
K_3	77.300 1	71.243 4	73.420 0	种子覆盖率	
k_1	24.716 7	29.676 7	29.396 7	因素影响由大到小：	
k_2	26.652 2	23.711 1	23.265 6	C、B、A	
k_3	25.766 7	23.747 8	24.473 3		
R_j	1.935 6	5.965 6	6.131 1		
优方案	A_2	B_1	C_1		

对覆盖率影响由大到小为 C、B、A。为获得最高的覆盖率，各因素应取水平为 $A_2B_1C_1$，即散料振动器电压 120 V、匀种振动器电压 70 V、输送带转速 15 r/min。

为验证理论最优组合并获取决策依据，对上述 2 组参数组合进行验证试验，结果如表 3 所示。

表 3　不同优化目标下的验证试验结果

Tab. 3　Verification test results under different optimization objectives

优化目标	参数组合	最近邻距离变异系数/%	覆盖率/%
变异系数最小	$A_2B_3C_2$	31.45	25.94
覆盖率最大	$A_2B_1C_1$	48.12	40.93

由表 3 可知，取 $A_2B_3C_2$ 时，其最近邻距离变异系数低至 31.45%，均匀性极佳，但覆盖率 S 较低，仅为 25.94%，意味着处理效率较低。而取 $A_2B_1C_1$ 组合时，其覆盖率 S 高达 40.93%，处理效率显著提升，但均匀性指标最近邻距离变异系数上升至 48.12%。

在保证基本均匀性最近邻距离变异系数小于50%的可接受前提下,尽可能追求高的处理效率。因此,为确定一个兼顾均匀性与效率的最优参数组合,采用综合平衡法对指标进行综合分析。若选择 $A_2B_3C_2$ 组合,虽能获得较好的均匀性,但覆盖率 S 相较 $A_2B_1C_1$ 组合降低 14.99 个百分点,制约了生产效率。若选择 $A_2B_1C_1$ 组合,虽最近邻距离变异系数相较 $A_2B_3C_2$ 组合升高 16.67 个百分点,但仍处于可接受的分布水平。因此,从工业化应用需兼顾性能与效率实际需求出发,兼顾种子分布均匀性和处理效率的最优参数组合为:$A_2B_1C_1$,即散料振动器电120 V、匀种振动器电压 70 V、输送带转速 15 r/min。在此参数下,系统能以覆盖率为 40.93% 稳定运行,且种子分布均匀性满足工艺要求,实现了整体性能最优平衡。验证试验效果如图 14 所示。



图 14 验证试验效果

Fig. 14 Verification test result

5 结论

(1)设计了一套多级组配均匀布料系统,包括螺旋定量给料、散料振动输送、匀种多通道分流和输送带传输等模块,实现了种子的初步分散、强力匀化和单层输送,满足了等离子体处理对种子分布均匀性与单层性的工艺要求。

(2)通过理论分析种子在螺旋输送与振动布料过程中的运动特性,确定了螺旋输送器和多通道结构参数,并基于力学模型推导了振动输送中避免抛掷运动的临界振幅条件,为系统结构设计提供了理论依据。

(3)利用高速摄像技术揭示了不同激振电压下单粒与群体种子运动行为:低电压下种子以定向滑动为主,高电压下出现弹跳与翻转,群体种子在强振下可达到近乎完全分散状态,为振动参数优化提供了依据。

(4)通过单因素与正交试验明确了各因素对布料均匀性与覆盖率的影响主次顺序:散料振动器电压对最近邻距离变异系数影响最大,输送带转速对种子覆盖率 S 影响最显著。试验结果表明,最优参数组合为:散料振动器电压 120 V、匀种振动器电压 70 V、输送带转速 15 r/min,该组合下最近邻距离变异系数为 48.12%,覆盖率为 40.93%,在均匀性与处理效率之间取得了良好平衡。

参 考 文 献

[1] HUANG Ze, SUN Lei, LIU Yu, et al. Alfalfa planting significantly improved alpine soil water infiltrability in the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285: 106606.

[2] 田德龙,侯晨丽,徐冰,等. 苜蓿对农田耗水过程与盐分变化的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 291 - 301.
TIAN Delong, HOU Chenli, XU Bing, et al. Effect of alfalfa on water consumption process and salt changes in fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 291 - 301. (in Chinese)

[3] 毛培胜,欧成明,贾志程,等. 我国牧草与草坪草种子生产技术的研究进展[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1): 1 - 11.
MAO Peisheng, OU Chengming, JIA Zhicheng, et al. Research progress for seed production technology of herbage and turfgrass in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1): 1 - 11. (in Chinese)

[4] PEREA-BRENES A, GARCIA J L, CANTOS M, et al. Germination and first stages of growth in drought, salinity, and cold stress conditions of plasma-treated barley seeds[J]. ACS Agricultural Science & Technology, 2023, 3(9): 760 - 770.

[5] SHELAR A, SINGH A V, DIETRICH P, et al. Emerging cold plasma treatment and machine learning prospects for seed priming: a step towards sustainable food production[J]. RSC Advances, 2022, 12(17): 10467 - 10488.

[6] 王永维, 曹林, 王俊, 等. 冷等离子体处理对水稻种子萌发的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 206 - 209.
WANG Yongwei, CAO Lin, WANG Jun, et al. Influence of cold plasma treatment on rice seed germination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 206 - 209. (in Chinese)

[7] BILEA F, GARCIA-VAQUERO M, MAGUREANU M, et al. Non-thermal plasma as environmentally-friendly technology for agriculture: a review and roadmap[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2024, 43(6): 428 - 486.

[8] KRIZ P, OLSAN P, HAVELKA Z, et al. Experimental investigation into the influence of plasma technology on seed surface wettability[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9994.

[9] 方海琴. 低温等离子体在保障食品安全和质量的应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(2): 231 - 239.
FANG Haiqin. Application of low temperature plasma in ensuring food safety and quality[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(2): 231 - 239. (in Chinese)

[10] 王瑞雪,叶巴丁,孔祥号,等. 低温等离子体表面强化技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 192 - 207.
WANG Ruixue, YE Bading, KONG Xianghao, et al. Research progress of low temperature plasma surface strengthening technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 192 - 207. (in Chinese)

[11] 王德成,黄晨,尤泳,等. 基于等离子体处理的苜蓿种子活力综合评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 234 - 242.

WANG Decheng, HUANG Chen, YOU Yong, et al. Comprehensive evaluation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed vitality based on plasma treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(22): 234 – 242. (in Chinese)
[12] 邵长勇,王德成,唐欣,等. 冷等离子体处理对紫花苜蓿种子萌发及田间长势的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 138 – 143.
SHAO Changyong, WANG Decheng, TANG Xin, et al. Effects of low-temperature plasma on seed germination characteristics and growth condition in field of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 138 – 143. (in Chinese)
[13] 孟宁,刘明,张培茵,等. 低温等离子体技术在全谷物加工中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 332 – 337.
MENG Ning, LIU Ming, ZHANG Peiyin, et al. Application of low temperature plasma technology in whole grains processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 332 – 337. (in Chinese)
[14] JIANG Hao, LIN Qian, SHI Wenqing, et al. Food preservation by cold plasma from dielectric barrier discharges in agri-food industries[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1015980.
[15] PEREA-BRENES A, RUIZ-PINO N, YUBERO F, et al. Ion mobility and segregation in seed surfaces subjected to cold plasma treatments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(11): 6486 – 6499.
[16] 王凯,何苏南,郁凯,等. 冷等离子体处理对盐地碱蓬黑色种子发芽及幼苗叶片生理指标的影响初探[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(2): 104 – 107.
WANG Kai, HE Su'nan, YU Kai, et al. Preliminary study on effects of cold plasma treatment on black seed germination and leaf physiological indexes of seedlings of *Suaeda salsa*[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2025, 34(2): 104 – 107. (in Chinese)
[17] 李想,张梦,刘春增,等. 等离子体处理对紫云英种子萌发和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 129 – 140.
LI Xiang, ZHANG Meng, LIU Chunzeng, et al. Effects of dialectric barrier discharge plasma treatment on seed germination and physiological characteristics of *Astragalus sinicus*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(10): 129 – 140. (in Chinese)
[18] 惠云婷,席军辉,王守炎,等. 一种小微粒种子多环境胁迫适应及丸粒化工厂化处理方法: CN202510178243.2[P]. 2025 – 04 – 11.
[19] WU Yingmei, FENG Xuewei, ZHU Yingying, et al. The effect of atmospheric dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the nutritional and physicochemical characteristics of various legumes[J]. Foods, 2023, 12(17): 3260.
[20] LIU Qiang, HOU Shuai, ZHANG Yijia, et al. Dielectric barrier discharge cold plasma improves storage stability in paddy rice by activating the phenylpropanoid biosynthesis pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(45): 25066 – 25077.
[21] JUDÉE F, DUFOUR T. Seed-packed dielectric barrier device for plasma agriculture: understanding its electrical properties through an equivalent electrical model[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(4): 44901.
[22] NISHIME T M C, WANNICKE N, HORN S, et al. A coaxial dielectric barrier discharge reactor for treatment of winter wheat seeds[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7133.
[23] 王德成,惠云婷,尤泳,等. 一种常压下介质阻挡放电等离子体种子均匀处理机: CN202021916918.8[P]. 2021 – 04 – 09.
[24] 罗海峰,刘光辉,吴明亮,等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 227 – 239.
LUO Haifeng, LIU Guanghui, WU Mingliang, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227 – 239. (in Chinese)
[25] 马秋成,孙宁,卢安舸,等. 鲜莲子低损伤单颗连续送料系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 12 – 20.
MA Qiucheng, SUN Ning, LU Ange, et al. Design and experiments of the sequential and continuous feeding system for fresh lotus seeds with low damage[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(8): 12 – 20. (in Chinese)
[26] 朱承天,刘彩玲,李方林,等. 分体组合振动式超级稻精量播种匀种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 27 – 36.
ZHU Chengtian, LIU Cailing, LI Fanglin, et al. Simulation and experiment of piezoelectric vibration super rice precision seeding and unifying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 27 – 36. (in Chinese)
[27] 杨明韶,杜健民. 草业工程机械学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
[28] 梅潇,薛玉坤,刘海文. 垂直螺旋输送不同物料特性的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(2): 26 – 33.
MEI Xiao, XUE Yukun, LIU Haiwen. Experimental study on characteristics of vertical screw conveying different materials[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(2): 26 – 33. (in Chinese)
[29] SUKHANOVA M, MUDARISOV S, ZABRODIN V, et al. Analysis of the interaction of seeds with a centrifugal disk working body of a chamber-type treater[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 5420.
[30] 闻邦椿,刘树英,张学良. 振动机械创新设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
[31] DUYCKAERTS C, GODEFROY G, HAUW J J. Evaluation of neuronal numerical density by Dirichlet tessellation[J]. Journal of Neuroscience Methods, 1994, 51(1): 47 – 69.
[32] 浩飞龙,王士君. 长春市零售商业空间分布特征及形成机理[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 855 – 862.
HAO Feilong, WANG Shijun. Spatial characteristics and forming mechanisms of retail businesses in Changchun, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 855 – 862. (in Chinese)
[33] 周婷,牛安逸,马姣娇,等. 国家湿地公园时空格局特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 26 – 39.
ZHOU Ting, NIU Anyi, MA Jiaojiao, et al. Spatio-temporal pattern of national wetland parks[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 26 – 39. (in Chinese)