doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.019

苏打盐碱土秸秆深埋机设计与试验

王宇星[1,2]　王晓燕[1,2]　李洪文[1,2]　王庆杰[1,2]　高世杰[1,2]　刘　迪[1,2]
(1.中国农业大学工学院, 北京 100083; 2.农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测试验站, 北京 100083)

摘要:针对苏打盐碱土渗透性差及传统改良设备适应性不足等问题,设计了一种盐碱土秸秆深埋机。采用离散元法(Discrete element method, DEM)与中心复合试验设计法(Central composite design, CCD)对开沟装置进行阶梯减阻优化。结果表明:当深松铲入土深度为 38.4 cm、入土角为 24.7°、刃角为 60.1°时,开沟铲阻力为 9 752.5 N,系统总阻力为 12 401.9 N,较对照组分别降低 27.7% 和 0.4%。对优化组合参数进行田间验证,可得系统总阻力为 14 500.5 N,较对照组增加 2.6%;开沟铲所受阻力 11 801.8 N,较对照组降低 16.5%。开沟平均深度 39.1 cm(变异系数 5.06%),平均宽度 9.4 cm(变异系数 5.16%),说明设备在作业稳定性上具备较高一致性。秸秆填充深埋合格率 80%,表明设备能够较好地完成填埋任务。通过结构设计与参数优化有效解决了苏打盐碱土开沟作业中高阻低效问题,为盐碱地改良提供了可靠的技术装备支撑。

关键词:苏打盐碱土; 秸秆深埋机; 离散元法; 阶梯减阻; 田间试验
中图分类号:S224.29　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)05-0202-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Deep Burial Machine on Sodic Saline-alkali Soil

WANG Yuxing[1,2]　WANG Xiaoyan[1,2]　LI Hongwen[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　GAO Shijie[1,2]　LIU Di[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Scientific Observing and Experiment Station of Arable Land Conservation* (*North Hebei*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the low permeability of sodic saline soils and the limited adaptability of conventional reclamation equipment, a specialized machine was designed for saline-alkali soil improvement based on deep straw incorporation. Soil column experiments revealed that filling the 20 ~ 40 cm soil layer with straw increased permeability by 59.52%. A stepped drag-reduction optimization of the trenching device was conducted by using the discrete element method (DEM) and central composite design (CCD). The results showed that at subsoiler shovel working depth of 38.4 cm, penetration angle of 24.7°, and blade angle of 60.1°, the trenching shovel resistance reached 9 752.5 N, while the total system resistance was 12 401.9 N, representing decreases of 27.7% and 0.4% compared with that of the control, respectively. Field validation of the optimized parameter combination revealed that the total system resistance reached 14 500.5 N, a 2.6% increase compared with that of the control, whereas the trenching shovel resistance dropped by 16.5% to 11 801.8 N. The average trenching depth was 39.1 cm (coefficient of variation 5.06%), and the average trenching width was 9.4 cm (coefficient of variation 5.16%), demonstrating a high degree of operational consistency. The straw burial qualification rate was 80%, indicating that the equipment was capable of effectively accomplishing the deep burial task. Through structural innovation and parameter optimization, the research can effectively address the high-resistance, low-efficiency issues inherent to trenching in sodic saline soils, providing a reliable technical and equipment solution for saline-alkali land improvement.

Key words: sodic saline-alkali soil; deep burial machine; discrete element method; stepped drag-reduction; field experiment

收稿日期:2025-02-09　修回日期:2025-02-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1500602-03)
作者简介:王宇星(1992—),男,博士生,主要从事机械设计及理论研究,E-mail:b20213070563@cau.edu.cn
通信作者:王晓燕(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail:xywang@cau.edu.cn

0　引言

松嫩平原作为我国重要的商品粮生产基地，同时也承担着保障国家粮食安全的重要使命。然而该区域是我国盐渍化最严重的地区之一，盐碱土面积达 3.2×10^6 hm^2，其中 56.2% 处于未利用状态[1-3]。三面环山的低洼地形，导致排水不畅，气候干旱少雨，构成了盐分迁移富集区，形成有利于土壤积盐的地质地貌特征[4]。盐碱地改良与利用不仅是实现耕地总量动态平衡的战略需求，更是突破区域农业生产瓶颈的关键举措[5]。

土壤中的水盐运动遵循“盐随水来，盐随水去”的规律[6]，通过灌溉、泡田等方法，将盐碱淋洗到深层，实现淡化表层[7]。研究表明，种植水稻可一定程度降低土壤盐分和碱化度[8]，并且仅需在耕作层范围内实现脱盐、脱碱即可满足生长需求，无需全面改良整个土体[9]。然而，松嫩平原水稻田在耕作中形成致密犁底层严重阻碍表层盐分下渗，使用深松、深翻等改良措施可暂时打破犁底层结构，但因苏打盐碱土结构性差、分散性强，导致其改良后效持续较短[10]。研究表明，打破犁底层后，填充有机物料可有效改良盐碱土，并延长改良时效。王秋菊等[11]研究表明，稻壳填埋深度 20～30 cm 土层时，各层土壤 pH 值降低 0.37～0.41，Na^+ 含量降低 40.68～212.35 mg/kg，相比于单一机械耕作，后效长效果好。HUANG 等[12]将不同长度水稻秸秆（2、10、50 mm）进行深埋形成夹层，可以促进盐分在表土中溶解和下渗，同时抑制盐分在底土中上升运动，促进番茄生长，最终提高产量。乔海龙等[13]将玉米秸秆铺设在地表和深度 20 cm 的土层中，可以减轻土壤表层积盐，使得小麦吸收更多的水分和养分，出苗率可达 99%。有机物料深埋的配套装备也取得不少进展，北川巖等[14]设计了一种滤料沟埋机，可以将有机滤料埋设于任意深度，并改善土层透水、透气性。陈桂斌等[15]设计的秸秆条带捡拾粉碎深埋机，当作业深度为 290 mm 时，秸秆掩埋合格率为 64.2%；仝振伟等[16]设计的直注式秸秆捡拾粉碎深埋机，当作业深度为 250～300 mm 时，秸秆平均深埋率为 90.02%。然而，目前作业设备普遍存在作业深度较浅，且作业阻力较大的问题。

针对苏打盐碱土水稻田的特殊情况，本文设计一款水稻秸秆深埋机，通过优化设备结构与作业方式，以期实现水稻秸秆深埋改良，并提高盐碱土改良效果。

1　秸秆深埋改良工艺参数确定

1.1　秸秆深埋改良土壤渗透性理论

将秸秆深埋在耕作层以下作为输水滤料形成输水通道（图 1）。根据达西定律可知与渗透速率相关参数关系为

$$q=-K\frac{\Delta h}{L_d} \tag{1}$$

式中　q——单位面积流量，m^3/s

K——渗透系数，m/s

Δh——水头差，m

L_d——流动路径长度，m

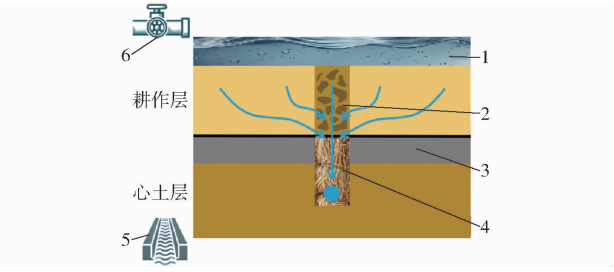


图 1　秸秆深埋改良原理图

Fig. 1　Diagram of principle of straw deep burial for soil improvement

1. 水层　2. 开沟覆土区　3. 犁底层　4. 开沟秸秆填充区　5. 排水渠　6. 进水口

秸秆被深埋在土壤中时，由于其高纤维结构形成的支撑作用，可以增大土壤孔隙度[17]，进而增强其渗透系数 K。同时，通过向下深层开沟以增加流动路径长度 L_d，促进水盐融合，盐分更多的被水带到更深的土层中。在排水系统修缮完毕条件下，水头差 Δh 为定值，由排水渠与进水口之间的高度差决定。

1.2　秸秆集条作业模式探讨

根据实测数据，苏打盐碱水稻平均稻谷产量 3 750 kg/hm^2 和稻谷与秸秆产量比为 1∶1.5～1∶2，推算水稻秸秆产量为 5 625～7 500 kg/hm^2。鉴于秸秆资源有限，且直接撒布于地表难以收集，因此采用搂草机进行集条。该作业模式可减少机械作业频次的同时减少土壤扰动。此外，该技术方案与当地作业方式兼容，将“集条-打捆-离田”模式改为“集条-深埋”处理模式。

1.3　秸秆填充参数

根据窦森等[18-19]对秸秆深埋还田研究，通过机械化手段将秸秆集条并施入土壤亚表层，即深度 20～40 cm 土层，包含犁底层和心土层上部分。

开展一维土柱渗透对比试验，设置试验组（秸秆填充组）与对照组（原状土组），装置如图 2 所示。采用透明圆柱形土柱，内径 20 cm，有效高度 70 cm，

底部配置多孔承托板,连接排水阀。外壁设有刻度尺及防水贴纸用于记录水位变化信息。

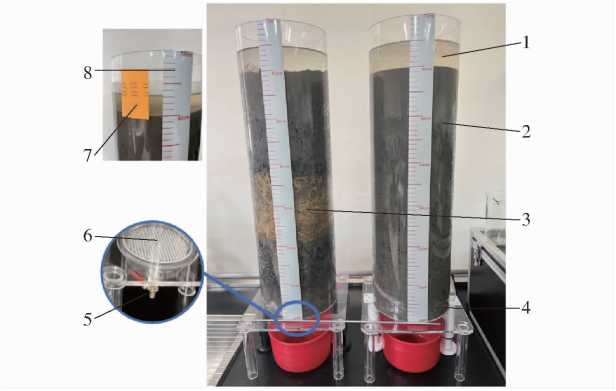


图 2 苏打盐碱土土柱试验

Fig. 2 Sodic saline-alkali soil column experiment

1. 水层 2. 土层 3. 秸秆层 4. 基层 5. 排水阀 6. 多孔承托板 7. 防水贴纸 8. 刻度尺

土柱填充分为 3 层:①水层,位于土柱顶部,厚度为 5 cm,模拟灌溉过程,并提供水分下渗驱动力。②土层,填充在基层之上,厚度为 60 cm。由粉碎后的苏打盐碱土分层填充,每层润湿至饱和状态后均匀压实。③基层,位于土柱最底层,厚度为 5 cm,采用 200 目尼龙筛网包裹石英砂结构,防止土壤颗粒流失并保障排水通畅。

试验组土柱中,在土层 20 ~ 40 cm 处填充厚度 20 cm 的水稻秸秆。该秸秆经收获机揉丝抛撒并自然晾晒处理。对照组采用纯苏打盐碱土填充作为基准参照。

试验每隔 48 h 进行观察,并记录数据(表 1)。结果显示,试验组平均渗透速率为 2.01×10^{-5} mm/s,相较于对照组 1.26×10^{-5} mm/s,渗透速率提升 59.52%。表明秸秆填充可显著改善苏打盐碱土透水性能。

表 1 土柱试验观测结果

Tab. 1 Observation results of column test

项目	观测段	下渗量/mm	渗透速率/(mm·s^{-1})
试验组	1	3.68	2.13×10^{-5}
	2	3.28	1.90×10^{-5}
	3	3.25	1.88×10^{-5}
	4	3.65	2.11×10^{-5}
对照组	1	2.31	1.34×10^{-5}
	2	2.05	1.19×10^{-5}
	3	2.03	1.17×10^{-5}
	4	2.28	1.32×10^{-5}

2 苏打盐碱土秸秆深埋机设计

2.1 整体结构与工作原理

苏打盐碱土秸秆深埋机结构如图 3a 所示,主要由秸秆捡拾机构、阶梯开沟机构、螺旋输送机构和曲柄滑块填充机构构成。作业过程包含秸秆捡拾、开沟和秸秆填充 3 个关键环节,工作流程如图 3b 所示,传动系统如图 3c 所示。

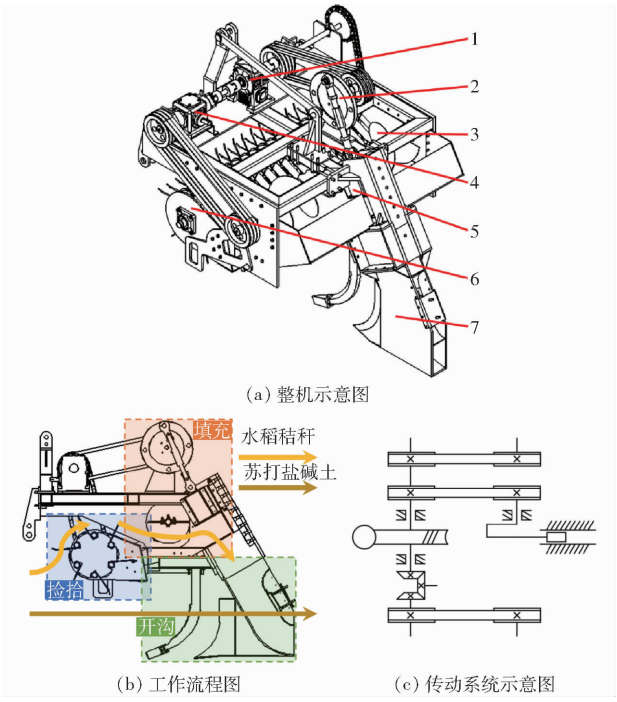


图 3 苏打盐碱土秸秆深埋机结构图

Fig. 3 Structural diagrams of sodic saline-alkali soil straw deep-burial machine

1. 蜗轮蜗杆减速器 2. 曲柄滑块填充机构 3. 螺旋输送机构 4. 齿轮箱 5. 下压推头 6. 秸秆捡拾机构 7. 阶梯开沟机构

采用拖拉机牵引作业。拖拉机动力输出轴(PTO)通过万向节传动轴将初始动力输入蜗轮蜗杆减速器(传动比 i 为 5),经扭矩放大后传递给其他机构。减速器经链传动($i = 0.5$)驱动秸秆捡拾机构,转速为 216 ~ 400 r/min。捡拾器通过弹齿完成对地表秸秆连续捡拾,并将秸秆向后抛送至螺旋输送机构。减速器通过齿轮箱换向($i = 1$)后,通过皮带将动力传替给螺旋输送机构,随后秸秆被螺旋输送机构聚拢后由导向器向后抛送。阶梯开沟机构,在拖拉机牵引下入土开沟,形成宽度 10 cm、深度 40 cm 的沟槽。减速器通过皮带传动($i = 0.5$)驱动曲柄滑块机构。下压推头在导轨限位作用下做直线往复运动,将导向器抛来的秸秆推入输送通道,填充到开好的沟中。苏打盐碱土秸秆深埋机主要技术参数如表 2 所示。

2.2 关键部件设计

2.2.1 捡拾器

捡拾器是一种结构简洁、高效可靠的物料捡拾装置(图 4),主要由弹齿、滚子、挡板、侧板(安装板)、支架构成。弹齿通过滚子驱动做圆周运动,实

表 2　主要技术参数

Tab. 2　Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 900×1 500×1 640
整机质量/kg	900
配套动力/kW	≥90
作业幅宽/mm	1 200
作业速度/(km·h^{-1})	2.7～4.0
填充深度/mm	200～400

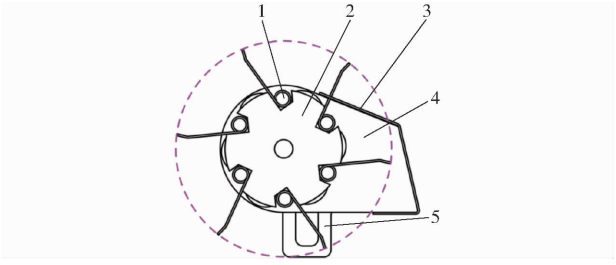


图 4　捡拾器结构示意图

Fig. 4　Schematic of collector

1. 弹齿　2. 滚子　3. 挡板　4. 侧板(安装板)　5. 支架

现物料连续拾取与抛送；挡板对抛送轨迹进行导向，防止物料掉落；侧板作为安装基体与机具主体连接；支架通过刚性支撑限定捡拾高度，避免弹齿触地断裂。作业时，高速旋转的弹齿将秸秆挑起并向后抛送完成捡拾。

基于 GeoGebra 软件建立弹齿末端 P_t 运动轨迹模型如图 5 所示。轨迹形状由速度 v_t、捡拾器旋转角速度 ω_t 决定，通过无量纲参数 λ_t 表示，即

$$\lambda_t = \frac{r_t \omega_t}{v_t} \tag{2}$$

式中　r_t——捡拾器回转半径，m

$\lambda_t > 1$ 时，轨迹为余摆线，此为完成捡拾作业必要条件。研究表明，捡拾弹齿末端绝对速度越大捡拾弹齿捡拾效率越高[20]。

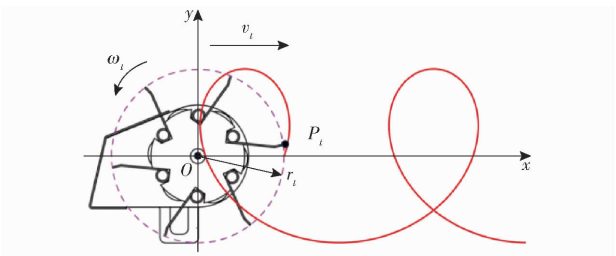


图 5　弹齿运动轨迹图

Fig. 5　Tine motion trajectory diagram

在无挡圈捡拾器作业过程中，弹齿沿固定圆周轨迹运行，且在结构上不具备回缩功能。若物料未能及时脱离弹齿作用范围，易导致其缠绕或卡滞，进而引发运行故障。

在无挡圈捡拾器工作过程中，弹齿对秸秆施加推力 F_t，该推力作用于弹齿末端点 P_t，使秸秆从该点抛出。抛送点定义为弹齿末端运动方向与水平方向垂直位置，此时秸秆抛送轨迹为 D_t，最小抛送轨迹与挡板交点为 $D_{t,\min}$，即物料刚好能够脱离弹齿旋转范围临界情况，如图 6 所示。

抛送轨迹 D_t 横向距离 x_{Dt}、纵向距离 y_{Dt} 计算式为

$$x_{Dt} = \frac{F_{t,x}}{m_t} t \Delta t \tag{3}$$

$$y_{Dt} = \frac{F_{t,y}}{m_t} t \Delta t - \frac{1}{2} g t^2 \tag{4}$$

式中　m_t——秸秆质量，kg　　t——起始时间，s

Δt——时间间隔，s

$F_{t,x}$——F_t 在 x 轴方向上分量，N

$F_{t,y}$——F_t 在 y 轴方向上分量，N

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

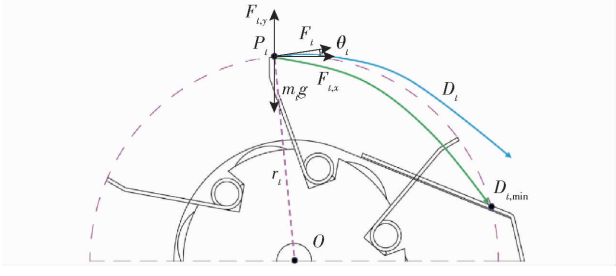


图 6　无挡圈捡拾器弹齿抛送轨迹示意图

Fig. 6　Trajectory diagram of tine ejection in a non-ring collector

根据式(3)求解秸秆从 P_t 抛送到 $D_{t,\min}$ 所需的时间 t_t 为

$$t_t = \frac{x_{Dt} m_t}{F_{t,x} \Delta t} \tag{5}$$

将 $t = t_t$ 代入式(4)可得

$$y_{Dt} = \frac{F_t \sin\theta_t \Delta t}{m_t} \frac{x_{Dt} m_t}{F_t \cos\theta_t \Delta t} - \frac{1}{2} g \left(\frac{x_{Dt} m_t}{F_t \cos\theta_t \Delta t} \right)^2 \tag{6}$$

其中

$$y_{Dt} = x_{Dt} \tan\theta_t - \frac{g x_{Dt}^2 m_t^2}{2 F_t^2 \cos^2\theta_t (\Delta t)^2} \tag{7}$$

$$F_t = m_t r_t \omega_t^2 \tag{8}$$

$$\omega_t = \frac{2\pi n_t}{60} \tag{9}$$

$$n_t = \sqrt[4]{\frac{60^4 g x_{Dt}^2}{(2\pi)^4 r_t^2 \cos^2\theta_t (\Delta t)^2 (x_{Dt} \tan\theta_t + y_{Dt})}} \tag{10}$$

式中　n_t——捡拾器转速，r/min

θ_t——F_t 与水平方向夹角，(°)

对牧草打捆机 9YG－1.25D 型捡拾器进行实物测量获取关键结构参数：$x_{Dt} = 0.32$ m，$y_{Dt} = 0.2$ m，$r_t = 0.3$ m，$\theta_t = 5°$。求解出 n_t 约等于 222 r/min，因此捡拾器转速不得低于 222 r/min。根据搂草机作业后秸秆带宽约为 1 m，捡拾器幅宽设计为 1.25 m。

2.2.2　开沟铲

(1)开沟铲结构设计

常见的开沟铲分为：锄铲式、翼铲式、船形铲式

和芯铧式等多种。芯铧式开沟铲结构简单、入土性能优异,开出的沟渠沟底、侧壁平整。开沟过程中,不扰动土壤结构,且具有一定回土功能。可以满足秸秆深埋开沟需求[21]。因此,基于芯铧式开沟铲设计一种可以引导物料填充的开沟铲。

如图 7 所示,开沟铲采用法兰式安装基板与作业机具实现刚性连接。导料系统采用 U 形槽结构,上部开放式设计为防堵,也便于堵塞后清理。填充厚度调控机构通过旋转厚度控制螺母驱动填充厚度控制螺栓进行轴向位移,带动压板实现物料填充厚度 20 ~ 25 cm。开沟铲是对称双曲面分土设计,实现土壤向上抬升和向两侧挤压,不翻动土层。

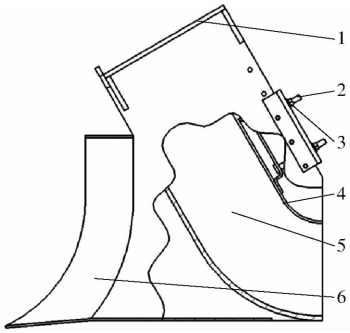


图 7 芯铧式开沟铲

Fig. 7 Core ploughshare furrow opener

1. 安装板 2. 填充厚度控制螺栓 3. 填充厚度控制螺母 4. 压板 5. U 形导料槽 6. 开沟铲

(2)开沟铲作业阻力

开沟铲作业阻力主要由土壤抬升阻力与侧向挤压阻力构成。土壤抬升阶段开沟铲受力分析如图 8a所示,向前运动的阻力 Q_C和土垡重力 G_S计算式[22]为

$$Q_C = R_C\sin(\alpha+\varphi) \tag{11}$$

$$G_S = R_C\cos(\alpha+\varphi) \tag{12}$$

式中 R_C——土壤阻力的法向力与开沟铲表面摩擦力合力,N

α——开沟铲入土角,(°)

φ——土壤摩擦角,(°)

可得

$$Q_C = G_S\tan(\alpha+\varphi) \tag{13}$$

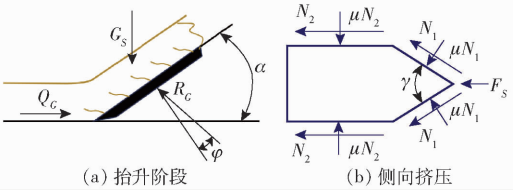


图 8 开沟铲受力分析

Fig. 8 Force analysis of furrow opener

当作业参数(开沟深度、宽度)和工况条件(土壤类型、铲体材料)确定后,土垡几何尺寸与 φ 均转换为定值参数。α 会改变土垡抬升轨迹、破裂模式与滑移行为,进而影响 Q_C。将开沟过程中土体向两侧挤压阻力 F_S进行分解后,可得开沟铲受力模型(图 8b)表达式为

$$F_S = 2\left(N_1\sin\frac{\gamma}{2}+\mu N_1\cos\frac{\gamma}{2}+\mu N_2\right) \tag{14}$$

其中

$$N_1 = \xi_S A_O \tag{15}$$

$$N_2 = \delta_S A_C \tag{16}$$

式中 N_1——开沟铲刃口上法向压力,N

N_2——开沟铲侧面法向压力,N

μ——摩擦因数

γ——刃角,(°)

ξ_S——土壤变形比阻,Pa

δ_S——土壤比压,Pa

A_O——铲刃口面积,m^2

A_C——铲刃侧面面积,m^2

工况条件(土壤类型、铲体材料)确定后,土壤变形比阻 ξ_S、土壤比压 δ_S、摩擦因数 μ、铲刃口面积 A_O、铲刃侧面面积 A_C均为定值,总阻力 F_S与刃角 γ 呈正相关[23-24]。随着 γ 减小,作业阻力呈下降趋势,但过小的刃角会导致开沟铲结构过于细长,进而引发结构强度不足。

(3)阶梯减阻开沟组合设计

针对苏打盐碱土高作业阻力导致开沟部件易损问题,提出阶梯式减阻设计(图 9)。通过在开沟铲前加装深松铲的方式降低开沟铲承受载荷。关键参数通过离散元法(Discrete element method, DEM)确定[25]。DEM 因其在颗粒动态响应及复杂接触行为中的独特优势被广泛应用[26],结合试验设计方法能高效筛选最优几何参数组合,显著降低物理试验成本。

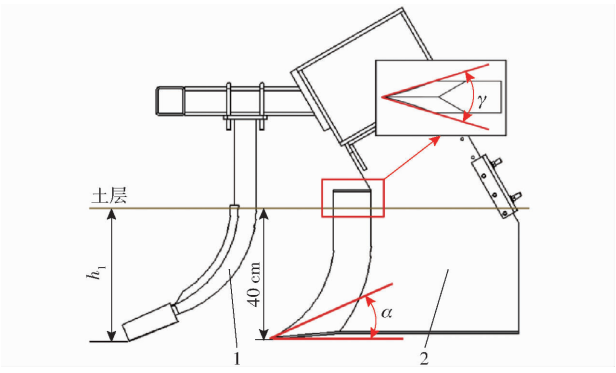


图 9 阶梯减阻开沟组合示意图

Fig. 9 Schematic of stepped resistance-reducing trench combination

1. 深松铲 2. 开沟铲

为准确模拟苏打盐碱土粘性特性,在 Hertz - Mindlin 接触模型基础上引入 Bonding V2 模型作为

附加模型，通过在两颗粒间建立 Bond 键，可定量表征颗粒体系黏结强度、断裂阈值等关键参数[27]。采用单球颗粒填充，建立长度 2 000 mm、宽度 1 200 mm、高度 600 mm 虚拟土槽，模拟开沟铲在实际田间条件下作业环境。相关参数参照文献[25]，如表 3 所示。

表 3　离散元仿真参数

Tab. 3　Discrete element simulation parameters

参数	数值
颗粒物理半径/mm	5
颗粒接触半径/mm	6
65Mn 泊松比	0.29
65Mn 剪切模量/MPa	8.0×10^4
65Mn 密度/(kg·m^{-3})	7 860
土壤泊松比	0.38
土壤剪切模量/MPa	1
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 680
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.12
土壤-土壤静摩擦因数	0.99
土壤-土壤恢复系数	0.5
土壤-65Mn 滚动摩擦因数	0.09
土壤-65Mn 静摩擦因数	0.97
土壤-65Mn 恢复系数	0.61
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	3.68×10^7
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	2.97×10^7
法向应力/kPa	197.37
切向应力/kPa	96.28

根据文献[28]建立开沟铲模型，并导入 EDEM 软件进行仿真。设定速度作业为 3 km/h，开沟铲作业深度为 40 cm，时间步长为 0.000 1 s。

(4)试验方案与结果分析

基于阶梯式减阻机理研究，选取 α、γ 作为关键试验变量。根据文献[21]确定 α 为 10°～30°，γ 为 60°～90°，深松铲入土深度 h_1 作为试验因素。h_1 取值范围遵循：h_1 下限取 0 cm，表征无深松铲介入传统开沟模式，作为对照组；参考开沟铲最大作业深度，h_1 上限取 40 cm。采用中心复合设计法(Central composite design，CCD)构建三因素五水平试验矩阵，确定各因素及其交互作用，通过方差分析(ANOVA)辨识显著性影响因素。试验因素编码如表 4 所示，EDEM 仿真试验过程如图 10 所示。

表 4　仿真试验因素编码

Tab. 4　Simulation experiment factors and codes

编码	因素		
	h_1/cm	α/(°)	γ/(°)
1.682	40	30	90
1	32	26	84
0	20	20	75
-1	8	14	66
-1.682	0	10	60

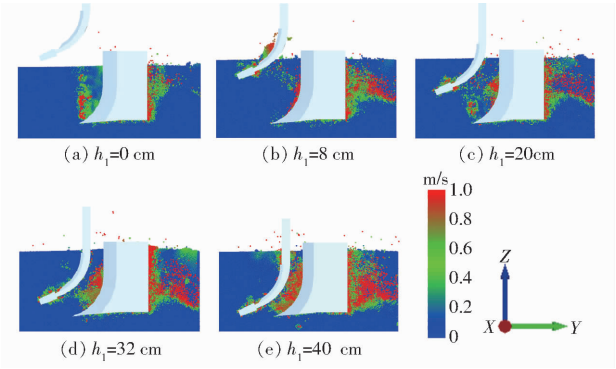


图 10　EDEM 仿真过程图

Fig. 10　EDEM simulation process diagrams

通过 EDEM 后处理模块获取深松铲与开沟铲的作业阻力曲线，待图像呈稳定变化趋势后截取有效数据区间，并计算平均值。得到开沟铲作业阻力 R_p、系统总阻力 R_T(深松铲与开沟铲阻力之和)，并将其作为评价指标，对试验结果进行二次回归分析和多元参数拟合，得到 R_p 和 R_T 回归方程。试验方案与结果如表 5 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Experimental design and results

试验号	因素			R_p/N	R_T/N
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	11 300.07	12 402.88
2	1	-1	-1	11 052.76	13 620.04
3	-1	1	-1	11 777.44	12 847.33
4	1	1	-1	10 891.66	13 417.32
5	-1	-1	1	12 353.26	13 405.14
6	1	-1	1	11 952.40	14 435.39
7	-1	1	1	12 832.35	13 911.81
8	1	1	1	11 604.44	14 199.65
9	-1.682	0	0	12 451.60	12 451.60
10	1.682	0	0	10 726.03	13 740.03
11	0	-1.682	0	11 791.46	13 752.19
12	0	1.682	0	11 852.81	13 841.96
13	0	0	-1.682	10 881.87	12 896.44
14	0	0	1.682	12 487.19	14 392.77
15	0	0	0	12 088.50	14 234.08
16	0	0	0	12 238.11	14 326.39
17	0	0	0	12 438.60	14 569.02
18	0	0	0	11 920.30	14 062.81
19	0	0	0	12 257.52	14 477.44
20	0	0	0	12 086.50	14 205.76

由表 6 可知，试验模型极显著($P<0.01$)，说明模型可信度高。因素 X_1 和 X_3 极显著。交互项 X_1X_2 显著($P=0.010\,4$)。二次项 X_1^2 和 X_3^2 极显著，X_2^2 显著。失拟项($P\geqslant0.05$)说明模型未遗漏显著影响因子，当前模型能充分解释数据变异。

将不显著的交互项进行剔除，得到 R_p 回归方程为

$$R_p = 12\,169.95 - 414.73X_1 + 40.31X_2 + 470.11X_3 - 183.18X_1X_2 - 195.33X_1^2 - 112.84X_2^2 - 161.49X_3^2 \tag{17}$$

由表 7 可知,试验模型极显著($P < 0.01$),说明模型可信度高。因素 X_1 和 X_3 极显著。交互项 X_1X_2 极显著($P < 0.01$)。二次项均极显著。失拟项($P \geqslant 0.05$)说明模型未遗漏显著影响因子,当前模型能充分解释数据变异。

表 6 R_p 方差分析

Tab.6 ANOVA for R_p

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	6.63×10^6	9	7.37×10^5	27.14	<0.000 1 **
X_1	2.35×10^6	1	2.35×10^6	86.51	<0.000 1 **
X_2	2.22×10^4	1	2.22×10^4	0.82	0.387 2
X_3	3.02×10^6	1	3.02×10^6	111.15	<0.000 1 **
X_1X_2	2.68×10^5	1	2.68×10^5	9.89	0.010 4 *
X_1X_3	3.07×10^4	1	3.07×10^4	1.13	0.312 6
X_2X_3	4.282×10^3	1	4.282×10^3	0.16	0.699 6
X_1^2	5.50×10^5	1	5.50×10^5	20.25	0.001 1 **
X_2^2	1.83×10^5	1	1.83×10^5	6.76	0.026 5 *
X_3^2	3.76×10^5	1	3.76×10^5	13.84	0.004 0 **
失拟	1.11×10^5	5	2.22×10^4	0.69	0.651 4
残差	2.71×10^5	10	2.71×10^4		
总和	6.90×10^6	19			

注:** 表示极显著($P < 0.01$),* 表示显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),下同。

表 7 R_T 方差分析

Tab.7 ANOVA for R_T

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	8.29×10^6	9	9.21×10^5	47.61	<0.000 1 **
X_1	2.03×10^6	1	2.03×10^6	105.22	<0.000 1 **
X_2	3.22×10^4	1	3.22×10^4	1.67	0.225 7
X_3	2.80×10^6	1	2.80×10^6	144.63	<0.000 1 **
X_1X_2	2.414×10^5	1	2.414×10^5	12.48	0.005 4 **
X_1X_3	2.75×10^4	1	2.75×10^4	1.42	0.260 6
X_2X_3	106.61	1	106.61	5.51×10^{-3}	0.942 3
X_1^2	2.50×10^6	1	2.50×10^6	129.11	<0.000 1 **
X_2^2	4.08×10^5	1	4.08×10^5	21.11	0.001 0 **
X_3^2	7.12×10^5	1	7.12×10^5	36.80	0.000 1 **
失拟	2.03×10^4	5	4066.73	0.12	0.982 7
残差	1.93×10^5	10	3.46×10^5		
总和	8.48×10^6	19			

将不显著交互项进行剔除,得到 R_T 回归方程为

$$R_T = 14\,310.45 + 386.04X_1 + 48.59X_2 + 452.59X_3 - 173.70X_1X_2 - 416.27X_1^2 - 168.34X_2^2 - 222.24X_3^2 \tag{18}$$

(5)参数优化

为获得阶梯减阻开沟组合的最优工作参数,利用 Design-Expert 软件的优化模块,对参数进行优选,遵循 R_p 和 R_T 最小原则,根据文献[21]以及工作要求,确定目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min R_p(X_1, X_2, X_3) \\ \min R_T(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{19}$$

h_1 与 R_p 负相关,增大 h_1 可以有效降低开沟铲损坏风险。文献[21]推荐 α 取 23°。γ 与 R_p 和 R_T 均负相关,因此 γ 取下限值。在决定系数 R^2 为 1 的解中,选择符合上述描述的最优参数组合为:h_1 为 38.4 cm、α 为 24.7°和 γ 为 60.1°。在此条件下,R_p 为 9 752.5 N,R_T 为 12 401.9 N。较对照组(h_1 = 0 cm),R_T 减少 0.4%,R_p 减少 27.7%。

2.2.3 填充部件

填充部件可将捡拾器收集秸秆进行聚拢,并将聚拢后秸秆有效地填充到沟内。

(1)聚拢装置采用螺旋输送结构,由对称布置的螺旋输送器与导向器协同配合(图 11)。螺旋输送器主体参数为外径 300 mm 确保覆盖捡拾器最大抛撒范围,基于该外径尺寸及加工工艺,确定内径为 60 mm,壁厚 5 mm 以保证结构强度,螺距 200 mm 保证合理的轴向输送速度。装置总长 1 000 mm 与捡拾器形成匹配宽度。导向器采用对称布置橡胶拨片结构(厚度 10 mm),实现秸秆向后抛送。

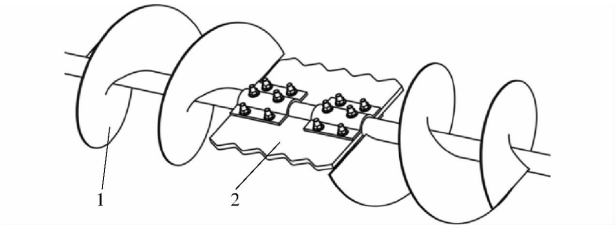


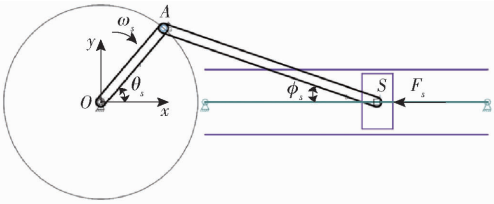
图 11 螺旋式聚拢装置逆向建模对比

Fig. 11 Auger-type gathering device reverse engineering comparison diagram

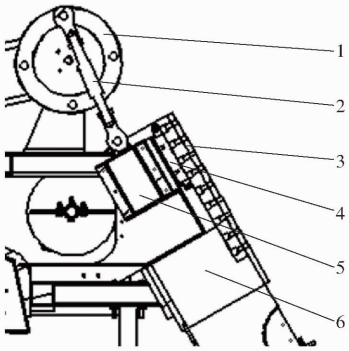
1. 螺旋输送器 2. 导向器

(2)注入装置核心功能是通过直线运动,将导向器抛送来的秸秆向下压入输送通道。选用曲柄滑块机构,使用 Linkage 软件进行辅助设计,确定曲柄滑块部件运动轨迹等。

曲柄滑块机构由绕点 O 自由转动的曲柄 OA、连杆 AS 和滑块 S 组成(图 12a)。点 A 为曲柄 OA 与连杆 AS 的铰接点,滑块 S 沿直线进行往复运动。以点 O 为圆心,滑块 S 运动方向为 x 轴,建立坐标系。点 A 坐标为(x_A,y_A),点 S 坐标为(x_s,0)。滑块 S 在推动秸秆时受到的阻力为 F_s。点 A 速度为



(a) 曲柄滑块原理图



(b) 曲柄滑块机构

图 12　填充装置

Fig. 12　Filling equipment

1. 圆盘形曲柄　2. 鱼眼关节轴承连接杆　3. 直线导轨　4. 滑块　5. 下压推头　6. 输送通道

$$\boldsymbol{v}_A = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} -l_{OA}\omega_s \sin\theta_s \\ l_{OA}\omega_s \cos\theta_s \end{bmatrix} \tag{20}$$

其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{OA}\cos\theta_s \\ l_{OA}\sin\theta_s \end{bmatrix} \tag{21}$$

点 S 速度为

$$v_s = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{S}}{\mathrm{d}t} = -l_{OA}\omega_s \sin\theta_s \pm \frac{-l_{OA}^2\omega_s \sin\theta_s \cos\theta_s}{\sqrt{l_{AS}^2 - l_{OA}^2 \sin^2\theta_s}} \tag{22}$$

其中

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} x_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{OA}\cos\theta_s \pm \sqrt{l_{AS}^2 - l_{OA}^2\sin^2\theta_s} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$l_{AS} = (x_s - x_A)^2 + y_A^2 \tag{24}$$

$$x_s^2 - 2x_s l_{OA}\cos\theta_s + l_{OA}^2 - l_{AS}^2 = 0 \tag{25}$$

$$x_s = l_{OA}\cos\theta_s \pm \sqrt{l_{AS}^2 - l_{OA}^2\sin^2\theta_s} \tag{26}$$

式中　θ_s——曲柄 OA 与 x 轴夹角，(°)

l_{OA}——曲柄 OA 长度，m

l_{AS}——连杆 AS 长度，m

ω_s——曲柄 OA 角速度，rad/s

滑块 S 阻力 F_s 为

$$F_s = m_s a_s + F_{\text{inertial}} \tag{27}$$

其中

$$a_s = \frac{\mathrm{d}^2 x_s}{\mathrm{d}t^2} = -l_{OA}\omega_s^2\cos\theta_s \pm \frac{l_{OA}^2\omega_s^2(\cos^2\theta_s - \sin^2\theta_s)}{\sqrt{l_{AS}^2 - l_{OA}^2\sin^2\theta_s}} \tag{28}$$

式中　m_s——滑块质量，kg

a_s——滑块在 x 轴方向加速度，m/s^2

F_{inertial}——滑块惯性力，N

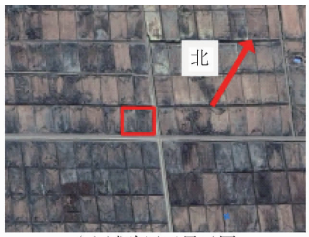
根据式(27)、(28)可知影响阻力 F_s 因素为：m_s、ω_s、l_{OA}、l_{AS}、F_{inertial}、θ_s。

注入装置由圆盘形曲柄驱动系统、鱼眼关节轴承连接机构、直线导轨滑块总成、下压推头组成(图 12b)。相较于传统曲柄结构，直径 450 mm 的圆盘形曲柄代替常规曲柄，可显著提升高速旋转工况下动平衡稳定性。鱼眼关键轴承连接杆，通过球面副结构实现 ±15°的多向自由度补偿，有效缓解装配误差和运动震动。直线导轨模组采用 RGH55 型导轨上置安装，下压推头与滑块通过螺栓刚性连接后，悬挂吊装，最大行程不少于 400 mm。装置整体采用 60°倾斜布局设计，保证机具结构紧凑。由于导向器每转 1 周，向后拨 2 次，因此圆盘形曲柄转速为螺旋输送器转速 2 倍，保证导向器每向后拨一次，下压推头向下推动一次。

3　田间试验

3.1　试验条件与方法

在黑龙江省安达市永冠水稻合作社(46.77°N、125.47°E)开展田间试验，该区域属于典型北温带大陆性季风气候，冬季寒冷干燥，夏季雨热同期。在合作社选取试验田(图 13a)，并采用阶梯剖面法进行分层采样(图 13b)。通过环刀法测定容重、孔隙度等参数。测试结果如表 8 所示。



(a) 试验田卫星云图　　(b) 阶梯采样坑

图 13　苏打盐碱土试验田

Fig. 13　Sodic saline-alkali soil experimental field

表 8　苏打盐碱土基本参数测定结果

Tab. 8　Sodic saline-alkali soil basic parameter measurement results

深度/cm	含水率/%	容重/(kg·m^{-3})	孔隙度/%	坚实度/kPa
0 ~ 10	27.2	1 523	45.29	200.06
10 ~ 20	27.4	1 524	45.36	253.53
20 ~ 30	28.1	1 520	45.73	457.53
30 ~ 40	29.6	1 522	45.21	697.60
40 ~ 50	30.1	1 531	45.89	1 106.13

由表 8 可得，随着土壤深度增加，含水率由表层 0 ~ 10 cm 的 27.2% 递增至 40 ~ 50 cm 的 30.1%。土壤容重为 1 520 ~ 1 531 kg/m^3，孔隙度稳定于 45% 左右，土壤整体呈高密实、低孔隙特征。土壤坚实度随深度增加呈指数增长。从土层 0 ~ 10 cm 的

200.06 kPa 上升到土层 40 ~ 50 cm 的 1 106.13 kPa，增加 452.9%。

机具田间试验于 2024 年 11 月 10—11 日，气温为 7 ~ 10℃。整机田间作业过程如图 14a、14b 所示。开沟和填充试验选择不同的路线，进行 2 次试验。采用人工测量法，使用卷尺在作业路径上按 2 m 间距设置 10 个连续采样点。主要测量指标为：沟底垂直深度和沟道横向宽度。



(a) 田间作业过程 (b) 填充效果图 (c) 作业阻力测定

图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiment

1. 作业机具 2. 挂载拖拉机 3. 牵引绳和传感器 4. 牵引拖拉机

3.1.1 开沟阻力测定

参考文献[29]，对 R_T 和 R_p 进行测定，需要 2 台拖拉机，牵引绳和拉力传感器完成，测试过程如图 14c 所示。具体步骤如下：

(1)空载阻力测定，1 台用于匀速(3 km/h)牵引，另 1 台负责挂载作业机具空挡滑行，待拉力传感器读数稳定后记录空载阻力。

(2)R_T 测定时，1 台以速度 3 km/h 匀速牵引，1 台负责挂载作业机具并入土 400 mm，待拉力传感器读数稳定后采集作业阻力。作业阻力与空载阻力差值为 R_T。

(3)R_p 测定时，预先深松 38.4 cm，随后，作业机具拆除深松铲，挂载作业机具的拖拉机将开沟铲沿着预先开出深松沟道切入深度 400 mm 土层后空挡滑行，牵引拖拉机以速度 3 km/h 匀速行进，待拉力传感器读数稳定后采集开沟铲作业阻力。开沟铲作业阻力与空载阻力差值为 R_p。

为了评估阶梯减阻效果，测定单开沟铲作业阻力作为对照。只装载开沟铲拖拉机将深松铲切入 400 mm 深土层后空挡滑行，牵引拖拉机以速度 3 km/h 匀速行进，待拉力传感器读数稳定后采集作业阻力。

3.1.2 开沟稳定性

开沟稳定性通过开沟深度变异系数 h_{CV} 和宽度变异系数 w_{CV} 来量化，变异系数越小，说明实际沟深或沟宽的波动越小，作业稳定性越高。计算式为

$$h_{CV} = \frac{S_h}{x_h} \times 100\% \tag{29}$$

$$w_{CV} = \frac{S_w}{x_w} \times 100\% \tag{30}$$

其中

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_h)^2}{n - 1}} \tag{31}$$

$$S_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_w)^2}{n - 1}} \tag{32}$$

式中 x_i——第 i 个点测量值，cm

x_h——深度目标值，取 40 cm

x_w——宽度目标值，取 10 cm

n——总测量点数，取 10

S_h——深度标准差，cm

S_w——宽度标准差，cm

3.1.3 秸秆填充合格率

秸秆填充合格率用于衡量秸秆填充深度是否满足要求。合格标准定义为秸秆深埋深度达到 20 cm 的测量点数。填充合格率计算式为

$$\eta_j = \frac{n_j}{n} \times 100\% \tag{33}$$

式中 η_j——秸秆填充合格率，%

n_j——合格测量点数

3.2 试验结果与分析

田间试验表明，苏打盐碱土秸秆深埋机整机运行稳定，传动系统运转平稳，未出现机械故障或异常停机现象。样机结构强度满足设计要求，作业过程中未观测到明显形变现象。

开沟阻力测试结果如表 9 所示。阶梯减阻 R_T 相比对照组阻力增加 2.6%，主要源于增加深松铲导致触土面积增大引起的土壤粘附效应。但 R_p 相比对照组降低 16.5%，说明阶梯减阻有效降低开沟铲所受到的阻力，有助于延长关键部件寿命。

表 9 开沟阻力测试结果

Tab. 9 Result of trenching resistance test N

空载阻力	阶梯减阻组合		对照组阻力
	R_T	R_p	
8 002.4	14 500.5	11 801.8	14 127.1

开沟与填充试验结果如表 10、图 15 所示。开沟宽度和开沟深度变异系数均较低，说明开沟作业具有较高的均匀性与稳定性。秸秆填充深度结果表

表 10 田间试验结果

Tab. 10 Results of field experiment

参数	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差/cm	变异系数/%	η_j/%
开沟深度	43	36	39.1	2.02	5.06	
开沟宽度	10	9	9.4	0.52	5.16	
填充深度	25	17	21.1			80

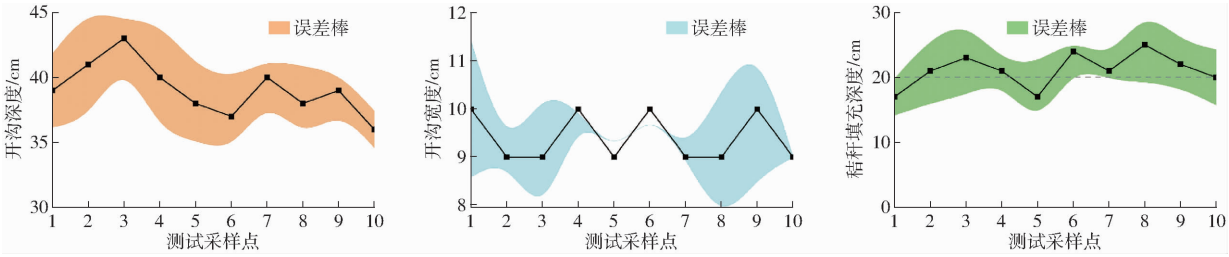


图 15　田间试验结果

Fig. 15　Field experiment data

示，大部分填充结果满足设计要求，局部区域秸秆填充不均。

4　结论

（1）提出了一种基于秸秆深埋的苏打盐碱土透水改良方法，通过将秸秆填充至 20 ~ 40 cm 的土层，渗透性能提升 59.52%。

（2）基于 DEM 与 CCD 相结合，确定了阶梯减阻最优参数组合：深松铲入土深度为 38.4 cm、入土角为 24.7°、刃角为 60.1°。在此条件下开沟铲阻力为 9 752.5 N，系统总阻力为 12 401.9 N，较对照组分别降低 27.7% 和 0.4%。

（3）田间试验结果表明，系统总阻力为 14 500.5 N，较对照组增加 2.6%；开沟铲所受阻力 11 801.8 N，较对照组降低 16.5%。苏打盐碱土秸秆深埋机作业性能测试表明：开沟深度均值 39.1 cm，变异系数 5.06%；宽度均值 9.4 cm，变异系数 5.16%。填充作业中，深埋深度合格率为 80%。

参　考　文　献

[1] 裘善文，张柏，王志春. 吉林省西部土地荒漠化现状、特征与治理途径研究[J]. 地理科学，2003,23(2):188 - 192.
QIU Shanwen, ZHANG Bo, WANG Zhichun. Study on the current status, characteristics, and management strategies of land desertification in western Jilin Province[J]. Geographical Sciences, 2003,23(2):188 - 192. (in Chinese)

[2] WANG L, SEKI K, MIYAZAKI T, et al. The causes of soil alkalinization in the Songnen Plain of Northeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2009,7(3):259 - 270.

[3] 俞仁培，陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报，1999,30(4):158 - 159.
YU Renpei, CHEN Deming. Saline soil resources in China and their exploitation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4):158 - 159. (in Chinese)

[4] 赵兰坡，尚庆昌，李春林. 松辽平原苏打盐碱土改良利用研究现状及问题[J]. 吉林农业大学学报，2000,22(增刊 1):79 - 83,85.
ZHAO Lanpo, SHANG Qingchang, LI Chunlin. The current status and issues of research on the improvement and utilization of soda saline-alkali soil in the Songliao Plain[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2000,22(Supp. 1):79 - 83,85. (in Chinese)

[5] 关胜超. 松嫩平原盐碱地改良利用研究[D]. 长春：中国科学院大学，2017.
GUAN Shengchao. The research of reclamation of saline-sodic soil in Songnen Plain[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)

[6] 尹广生，王祥，陈冲，等. 暗管排水技术治理盐碱地的研究进展[J]. 灌溉排水学报，2022,41(增刊 2):45 - 51.
YIN Guangsheng, WANG Xiang, CHEN Chong, et al. Research progress on subsurface drainage technology for saline-alkali land improvement[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(Supp. 2):45 - 51. (in Chinese)

[7] 王翊婷. 深埋秸秆及淋洗处理对莫莫格地区苏打盐碱土壤改良效果的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨师范大学，2022.
WANG Yiting. The research on the effect of deep burial of straw and leaching treatment on soil improvement of soda saline-alkali soil in Momoge region[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022. (in Chinese)

[8] 赵兰坡. 不同利用方式的苏打盐渍土剖面盐分组成及分布特征[J]. 土壤学报，2011,48(5):905 - 911.
ZHAO Lanpo. The salt composition and distribution characteristics of soda saline-alkali soil profiles under different utilization methods[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(5):905 - 911. (in Chinese)

[9] 雒鹏飞，高勇，宋凤斌，等. 吉林省西部盐碱土资源开发利用中的若干问题[J]. 吉林农业大学学报，2004,26(6):659 - 663.
LUO Pengfei, GAO Yong, SONG Fengbin, et al. Some issues in exploitation and utilization of saline-alkaline soil resources in the west of Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2004,26(6):659 - 663. (in Chinese)

[10] 赵朋成，李佩东，王烨，等. 大庆地区盐碱地改良及研究进展综述[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报，2016,29(5):4 - 6.
ZHAO Pengcheng, LI Peidong, WANG Ye, et al. Review and research progress on improvement of saline-alkaline land in Daqing region[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2016,29(5):4 - 6. (in Chinese)

[11] 王秋菊, 刘峰, 常本超, 等. 稻壳深施改良苏打碱土理化性质长期效应[J]. 农业工程学报, 2018,34(2):147 - 152.
WANG Qiuju, LIU Feng, CHANG Benchao, et al. Long-term effect of deep application of rice husk improving physical and chemical properties of soda alkaline soil[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(2):147 - 152. (in Chinese)
[12] HUANG D, GUO Y, CHEN S, et al. Different straw lengths and burial modes affect the salt distribution in coastal saline soil and the regulation of salt stress resistance in tomato[J/OL]. Plant and Soil, 2024. https://doi.org/10.1007/s11104-024-07138-z.
[13] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2006,37(5):885 - 889.
QIAO Hailong, LIU Xiaojing, LI Weiqiang, et al. The effect of deep straw covering on soil water and salt movement and wheat growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(5):885 - 889. (in Chinese)
[14] 北川巖, 丸山健次, 山中信昭, 等. 資材溝埋設機及び資材溝埋設施工方法: JP 特開 2011 - 78322[P]. 2011 - 04 - 21.
[15] 陈桂斌, 卢彩云, 何进, 等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(10):16 - 27.
CHEN Guibin, LU Caiyun, HE Jin, et al. Design and experiment of a straw strip collecting, crushing, and deep-burying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):16 - 27. (in Chinese)
[16] 仝振伟, 李洪文, 卢彩云, 等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(7):83 - 95.
TONG Zhenwei, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Design and experiment of direct-injection straw picking and crushing deep burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):83 - 95. (in Chinese)
[17] 丁奠元, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,22(3):650 - 658.
DING Dianyuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016,22(3):650 - 658. (in Chinese)
[18] 窦森, 董雪, 董丽娟, 等. 松辽平原表土剥离技术体系——以吉林省松原市为例[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(2):127 - 133.
DOU Sen, DONG Xue, DONG Lijuan, et al. The topsoil stripping technology system of the Songliao Plain: a case study of Songyuan City, Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2014,36(2):127 - 133. (in Chinese)
[19] 窦森. 秸秆"富集深还"新模式及工程技术[J]. 土壤学报, 2019,56(3):553 - 560.
DOU Sen. The new model of straw "enrichment and deep return" and its engineering technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(3):553 - 560. (in Chinese)
[20] 仝振伟. 玉米秸秆捡拾粉碎带状深埋关键技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2024.
TONG Zhenwei. Research on the key technologies and devices for corn straw picking, crushing, and strip deep burial[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[21] 王万钧. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
[22] 西涅阿科夫, 潘诺夫. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 重庆: 中国农业机械出版社, 1977.
[23] 张喜瑞, 曾望强, 刘俊孝, 等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3):40 - 49.
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of lateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):40 - 49. (in Chinese)
[24] 张学宁, 尤泳, 王德成, 等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(11): 176 - 187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):176 - 187. (in Chinese)
[25] 王宇星, 王晓燕, 李洪文, 等. 基于屈服阻力的苏打盐碱土离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2025,56(1): 301 - 310.
WANG Yuxing, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Calibration of parameters for soda saline-alkali soil discrete element model based on yield resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):301 - 310. (in Chinese)
[26] 张智泓, 甘帅汇, 左国标, 等. 以砂鱼蜥头部为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9):33 - 42.
ZHANG Zhihong, GAN Shuaihui, ZUO Guobiao, et al. Bionic design and performance experiment of sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):33 - 42. (in Chinese)
[27] 张冲, 范旭辉, 李明森, 等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(增刊 2): 52 - 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.2):52 - 59. (in Chinese)
[28] JB/T 9788—2020 深松铲和深松铲柄[S]. 2020.
[29] T/CAMDA 17—2023 悬挂式耕整地机械田间作业功耗试验方法[S]. 2023.