北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

沙柳网格立式沙障铺设装置插枝机构设计与性能试验

吴立国 刘志辉 李三平 严红艳 周建波

Design and performance experiment of the branch insertion mechanism for a vertical *Salix psammophila* grid sand barrier laying device

Wu Liguo, Liu Zhihui, Li Sanping, Yan Hongyan, Zhou Jianbo

引用本文:
吴立国, 刘志辉, 李三平, 严红艳, 周建波. 沙柳网格立式沙障铺设装置插枝机构设计与性能试验[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):154–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250295
Wu Liguo, Liu Zhihui, Li Sanping, Yan Hongyan, Zhou Jianbo. Design and performance experiment of the branch insertion mechanism for a vertical *Salix psammophila* grid sand barrier laying device[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):154–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250295

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250295

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区防风固沙功能辐射效益
Radiation effects of windbreak and sand fixation function in Baijitan National Nature Reserve, Lingwu, Ningxia of northwestern China
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 78–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210034

风沙环境下防风挡沙墙复变作用规律的风洞模拟
Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 108–117. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200339

沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应
Response of runoff and sediment production on sand–covered loess slopes to slope length and sand covering thickness
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 81–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240229

杨树苗移栽机齿轮齿条式扶苗机构设计与研究
Design and research on rack and pinion seedling supporting mechanism of poplar seedling transplanter
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 146–155. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210542

毛乌素沙地黑沙蒿灌丛微环境对其幼苗生长的影响
Effects of *Artemisia frigida* shrubland microenvironment on its seedling growth in the Mu Us Sandy Land of northern China
北京林业大学学报, 2026, 48(5): 82–93. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250512

格库铁路桥路过渡段风沙流场数值模拟
Numerical simulation on wind–sand flow field at the bridge and roadbed transition section of Golmud–Korla Railway in northwestern China
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 75–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210213

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250295

沙柳网格立式沙障铺设装置插枝机构设计与性能试验

吴立国[1] 刘志辉[2] 李三平[2] 严红艳[2] 周建波[1]
（1. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所，黑龙江 哈尔滨 150086；2. 东北林业大学机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】针对传统沙柳网格沙障人工铺设劳动强度高、作业效率低以及扦插姿态杂乱等问题，设计一种自动化铺设装置，提出折线形沙柳布设模式，重点对核心插枝机构开展结构设计与性能优化，以期降低枝条扦插偏斜程度，并控制扦插倾角，为沙地沙障铺设装备研制提供设计参考。**【方法】**采用柔性压辊挤压方式实现不同直径沙柳枝条扦插；建立插枝过程的力学模型，分析压辊和沙柳受力特性，明确枝条产生扦插倾角原因，研究铺设速度与压辊转速比值（r）对扦插倾角的影响规律，确定最优参数区间。**【结果】**（1）铺设装置前行与枝条竖直扦插构成复合运动，沙土对枝条底端的水平阻滞作用是扦插倾角形成的主要诱因，扦插深度超过 60 mm 后，沙土阻力持续增大，大幅削弱枝条底端水平速度，致使枝条上下端产生水平位移差，扦插倾角进一步增大。（2）扦插倾角随铺设速度与压辊转速比值（r）单调递增，比值越大，枝条扦插倾角越大；提高压辊转速、降低铺设速度均可减小扦插倾角。（3）在最优参数区间（压辊转速 100 ~ 200 r/min、铺设速度 600 ~ 1 500 mm/s）内，r 约等于 7 时，扦插倾角可稳定控制在 10°以内；超出该区间后扦插倾角快速增加，不满足沙障铺设工艺标准。（4）在最优参数工况下，铺设装置适配直径 9 ~ 12 mm 沙柳枝条，扦插姿态规整，插枝成功率达到 88.3%，整机表现出较好的作业稳定性。**【结论】**本研究设计的沙柳网格沙障铺设装置适用于平地及缓坡的作业环境，插枝机构设计合理，工作参数优化结果可为同类机构设计提供参考。

关键词：农林业机械；防风固沙；沙柳沙障；插枝机构；扦插倾角
中图分类号：S776 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)07−0154−12
引文格式：吴立国，刘志辉，李三平，等. 沙柳网格立式沙障铺设装置插枝机构设计与性能试验［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：154−165. Wu Liguo, Liu Zhihui, Li Sanping, et al. Design and performance experiment of the branch insertion mechanism for a vertical *Salix psammophila* grid sand barrier laying device[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 154−165.

Design and performance experiment of the branch insertion mechanism for a vertical *Salix psammophila* grid sand barrier laying device

Wu Liguo[1] Liu Zhihui[2] Li Sanping[2] Yan Hongyan[2] Zhou Jianbo[1]
(1. Harbin Forestry Machinery Research Institute, State Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, Heilongjiang, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [**Objective**] To address the issues of high labor intensity, low operational efficiency and irregular insertion posture associated with manual laying of traditional *Salix* grid sand barriers, this study designed an automatic laying device and proposed a zigzag layout pattern for *Salix* sand barriers. Particular attention was devoted to the structural design and performance optimization of the core branch insertion mechanism, so as

收稿日期: 2025−07−31 **修回日期:** 2026−06−07
基金项目: 鄂尔多斯市国家可持续发展议程创新示范区建设科技支撑“揭榜挂帅”重大项目（JB20251437），中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（ZQTYB240400002）。

第一作者: 吴立国，副研究员。主要研究方向：林业机械装备技术研究。Email: wlg0041@163.com 地址：150086 黑龙江省哈尔滨市国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所。
责任作者: 李三平，副教授。主要研究方向：农林业机械装备技术研究。Email: bluelii73@163.com 地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区 26 号东北林业大学机电工程学院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

to mitigate branch deflection and excessive insertion inclination, thereby providing design references for the development of sand barrier laying equipment in sandy regions. [**Method**] A flexible pressure roller extrusion method was employed to insert *Salix* branches of varying diameters. A mechanical model of the insertion process was established, and force analysis was conducted on both the pressure roller and the *Salix* branches. The cause of the insertion inclination angle was analyzed: the insertion direction of the *Salix* is subject to fluid resistance from the sandy soil. As the insertion depth increases, the velocity of the *Salix* branch entering the soil decreases. The deceleration displacement was solved and used to construct a geometric relationship with the initial insertion point and the insertion depth, yielding the theoretical deflection angle of the *Salix* branch. [**Result**] (1) The composite motion formed by the equipment advancing and the branch being vertically inserted into the soil causes sand resistance to hinder the horizontal movement of the branch bottom end, which is the main reason for the insertion inclination angle. When the insertion depth exceeds 60 mm, soil resistance significantly attenuates the horizontal velocity at the bottom end, resulting in a horizontal displacement difference between the upper and lower ends of the branch and leading to an increase in the insertion inclination angle. (2) The insertion inclination angle increases monotonically with the speed-to-rotation ratio; the larger the ratio, the greater the branch tilt angle. Increasing the pressure roller rotation speed or reducing the laying travel speed can both decrease the insertion inclination angle. (3) Within the optimal parameter range (pressure roller rotation speed 100–200 r/min, laying speed 600–1 500 mm/s), when r is approximately 7, the insertion inclination angle can be stably controlled within 10°. Beyond this range, the inclination angle increases rapidly and steeply, failing to meet the sand barrier laying process standards. (4) Under optimal parameter conditions, the equipment can adapt to full-size *Salix* psammophila branches of 9–12 mm, with regular insertion posture, branch insertion success rate reached 88.3%, and the complete machine demonstrates excellent operational stability. [**Conclusion**] The *Salix* grid sand barrier laying device designed in this study is suitable for flat and gently sloped terrain. Focusing on the branch insertion mechanism, its rationality was analyzed and verified. The structural design of the insertion mechanism was completed. The influence of different operating parameters on sand barrier formation quality was investigated, and optimal operating parameters were determined. This work provides a reference for the design and optimization of *Salix* grid sand barrier laying mechanisms.

Key words: agricultural and forestry machinery; windbreak and sand fixation; *Salix* sand barrier; cutting insertion mechanism; insertion angle

根据国家林业和草原局 2025 年数据，我国荒漠化和沙化土地面积潜在发生区域约占全国陆域面积的 50%（约 480 万平方公里），主要分布在西北、华北和东北地区[1]，是世界上荒漠化影响较为严重的国家之一。

流动沙丘固定是防沙治沙的核心内容，沙障是固定流动沙丘的重要工程措施之一，我国西北的乌兰布和沙漠、毛乌素沙地、库布齐沙漠等地通常为多变风向，因此普遍采用网格状沙障[2]。按材料来源和作用方式，沙障可分为植物沙障和工程沙障。植物沙障具有持续生长和生态恢复优势，沙柳（*Salix psammophila*）沙障即属此类[3]。沙柳是我国西北沙漠地区优良的防风固沙树种，种植广泛。沙柳生长 2～3 年后需通过平茬进行抚育管护，以保障后续正常生长[4]。平茬作业产生的大量枝条为制作沙障提供了天然原材料[5]。沙柳网格沙障属于隐蔽式沙障，人工扦插铺设劳动强度大、作业效率低[6]。

目前，已有沙柳防沙机械化研究主要集中于种植设备方向。如王慧等[7]设计了一种沙柳种植机，可实现沙柳自动化种植，但该设备针对苗木垂直种植，难以直接满足沙障铺设过程中连续高密度插植需求。近年来，沙柳沙障扦插铺设装置研究逐渐受到重视，但适用于沙障施工的成套自动化铺设装备仍较为匮乏[8]。鉴于此，本研究以沙柳枝条为沙障材料，提出一种折线形铺设模式的沙柳网格立式沙障铺设装置整体结构方案，采用往返一次成型网格的作业模式，可完成枝条连续排布、姿态矫正和网格化扦插一体化作业，有效提升沙障铺设效率与扦插规整度。重点对关键部件插枝机构进行结构设计与分析，并通过仿真和试验验证其合理性与有效性，为沙柳沙障

自动化铺设提供技术参考。

1 总体方案设计

1.1 农艺要求

沙柳网格沙障主要为直立式沙障(栅栏式)[9],通常将平茬后的沙柳条剪成 300 ~ 350 mm,按规划好的格状样线插入沙土中,铺设于沙漠路基两侧(图 1a)[10]。折线形几何结构使沙障在不同风向条件下均能拦截沉积物,适用于风向多变环境[11]。沙障高度和沙障孔隙度等参数是影响沙障防风性能的重要参数,本装置以沙柳尺寸参数为设计依据,结合网格沙障铺设规格要求,确定的主要铺设指标为扦插深度 150 mm 和扦插间距 80 mm,如图 1 b 所示,沙柳及沙障铺设尺寸参数见表 1。

1.2 总体方案

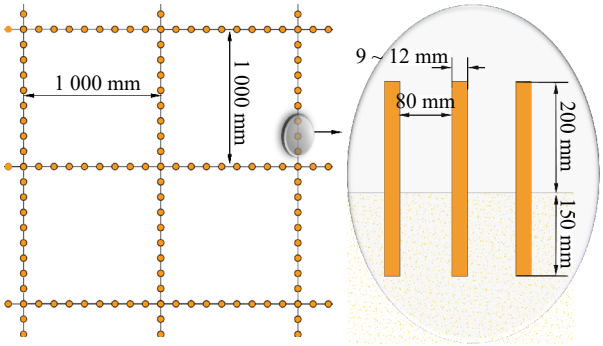
依据表 1 中沙柳及沙障铺设参数,设计沙柳网格沙障铺设装置(图 2)。该装置由储料箱、输送机构、排布机构、换向机构、插枝机构、下料口、定位螺杆等组成。

1.3 工作原理

根据网格沙障铺设的实际要求,装置工作过程如下:铺设装置整体沿固定方向匀速行进,储料箱、输送机构、排布机构和插枝机构组成一体式插枝系统,工作时,将成捆的沙柳枝条放入储料箱中,经挤压式输送机构剥离并有序整排输送至排布机构;排布机构按设定间距将枝条逐根运送至下料口,枝条呈竖直状态落入插枝机构,双对辊插枝机构矫正枝条姿态将枝条按要求深度插入沙地,完成连续插枝。同时,换向机构在履带底盘上往复平移,配合履带底盘行进,基于运动合成理论,形成折线形铺设轨迹,其工艺流程如图 3a 所示。通过铺设装置连续往返作业,实现网格沙障的铺设如图 3b 所示。



a 沙柳网格沙障



b 沙柳沙障尺寸参数

图 1 农艺要求

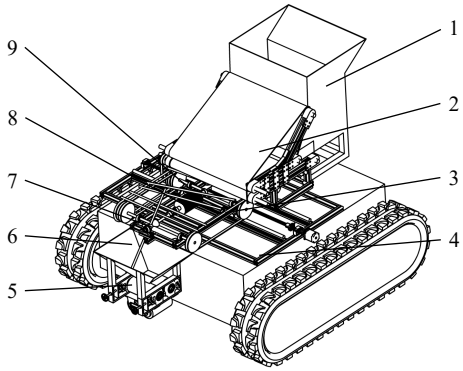
Fig. 1 Agronomic requirements

表 1 沙柳及沙障铺设尺寸参数

Tab. 1 *Salix psammophila* and sand barrier laying size parameters

沙柳及沙障铺设尺寸参数	数值	本研究试验取值
沙柳枝条直径/mm	9 ~ 12	9 ~ 12
沙柳枝条长度/mm	300 ~ 350	350
沙障铺设规格	1 m × 1 m	1 m × 1 m
扦插深度/mm	150	150
沙面障高/mm	150 ~ 200	200
扦插间距/mm	80 ~ 100	80
孔隙度/%	30 ~ 40	30
网格每排扦插沙柳/株	10 ~ 16	12 ~ 15

注:孔隙度为沙障空隙面积占沙障总迎风面积的比例。



1.储料箱;2.输送机构;3.排布机构;4.换向机构;5.插枝机构;6.下料口;7.倾斜滚轮;8.定位螺杆;9.沙柳枝条

图 2 沙柳网格沙障铺设装置整体结构

Fig. 2 Overall structure of sand willow grid sand barrier laying device

2 插枝机构设计与分析

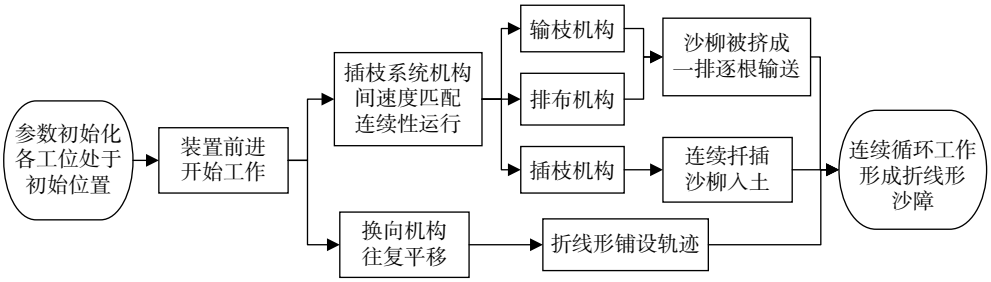
2.1 扦插阻力测试

插枝机构对不同尺寸沙柳提供的扦插力均需大于扦插阻力才能满足扦插条件,因此需对实际扦插阻力进行测试。

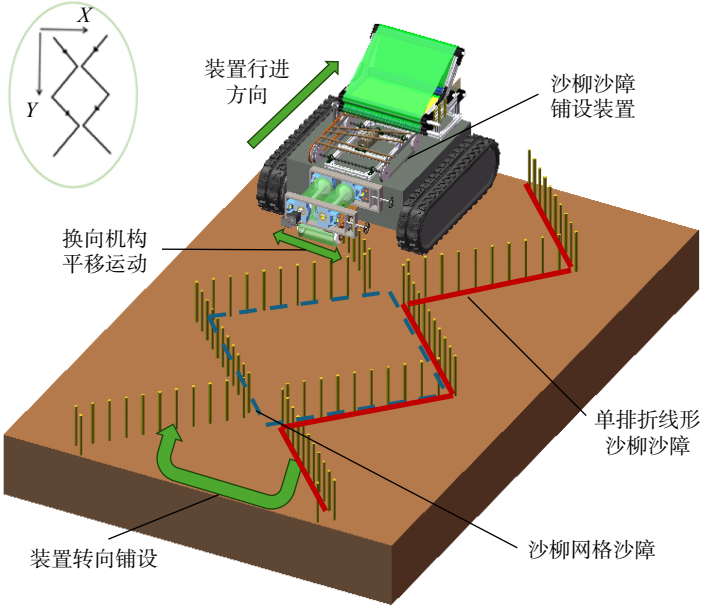
2.1.1 试验地点及介质参数

本研究的插枝阻力测试在实验室条件下完成(试验场所:东北林业大学农林机械实验室),为提高试验介质与实际作业环境的相似性,所用沙样来自鄂尔多斯市库布奇沙漠地区,试验前对沙样进行如下物理参数测定(图 4)[12]。

筛分测定:通过标准筛分析得到颗粒级配曲线,



a 工艺流程图



b 折线形铺设轨迹

图 3　沙柳网格沙障铺设工艺流程图

Fig. 3　*Salix* grid sand barrier laying process flow chart



a 沙样筛分



b 沙样含水率



c 沙样堆积密度

图 4　沙样参数测定

Fig. 4　Testing of sand sample parameters

测得平均粒径为 0.25 mm；含水率测定：取代表性样品经 105 ℃ 烘箱烘干 24 h，按质量法计算，含水率为 3.49%；堆积密度测定：采用环刀法[13]测定松散堆积密度为 1.45 × 10^3 kg/m^3。

2.1.2　扦插阻力测试

试验装置：横向固定试验沙槽（长度 1.2 m × 宽 0.3 m × 深 0.6 m），用力传感器采集即时扦插力，采样频率 200 Hz。

测试样本：选取直径 9、9.5、10、10.5、11、11.5、12 mm 7 组，每组不少于 10 株，每组 10 次有效重复。

测试步骤：如图 5 所示，枝条垂直扦插入沙中至 150 mm 深度，扦插速度控制在 150 mm/s 范围，插入



图 5 沙地阻力测试

Fig. 5 Sand resistance test

过程通过力传感器(量程 500 N，精度 0.1% F.S.)取峰值作为扦插阻力。

不同尺寸沙柳枝条的实测扦插阻力如表 2 所示，沙柳枝条的沙地扦插阻力与其直径呈显著的增长关系，当直径从 9 mm 增加至 12 mm 时，平均扦插阻力从 72.5 N 急剧增加至 330.1 N，随着枝条直径增大，端阻和侧摩阻增加，受截面积变化影响显著。

表 2 实测沙地扦插阻力

Tab. 2 Measured cutting resistance in sandy land

沙柳尺寸/mm	实测扦插阻力/N
9	72.5
9.5	96.4
10	126.3
10.5	163.5
11	208.7
11.5	263.8
12	330.1

2.2 插枝机构工作原理

如图 2 所示，插枝机构设置在排布机构下方，排布规整沙柳经过倾斜下料口翻转落入插枝机构，完成沙柳扦插入土作业。

如图 6 所示，插枝机构主要由两组交叉垂直布置的压辊装置组成，随着压辊的转动，倾斜落料的沙柳枝条受到挤压力，经过纵向压辊和横向压辊两次姿态矫正，沙柳枝条被竖直挤压入沙地中，完成插枝过程。

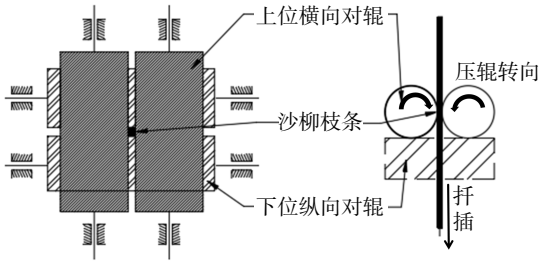


图 6 插枝机构原理图

Fig. 6 Schematic diagram of cutting mechanism

2.3 压辊尺寸设计

压辊是插枝机构完成沙柳扦插的关键构件，根据沙柳枝条扦插过程中的不同状态，首先针对一组压辊上的枝条进行受力分析，压辊表面与沙柳枝条挤压临界点为 A、B，引两点处切线交于点 C，如图 7 和 8 所示。

挤压插枝过程中，沙柳成功扦插入土的前提是压辊对沙柳的扦插力需大于沙地阻力，即

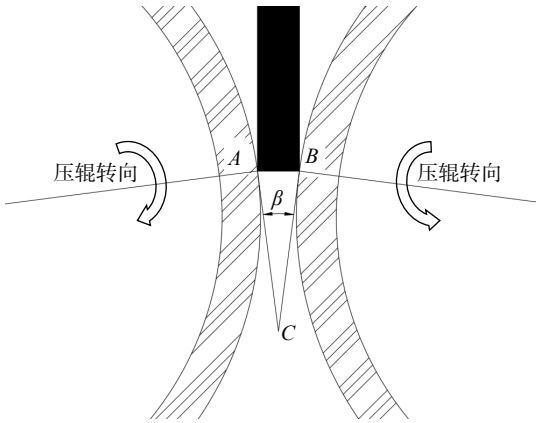
$$2fN\cos\frac{\beta}{2}+mg>2N\sin\frac{\beta}{2}+F_Z \tag{1}$$

整理得

$$f>\tan\frac{\beta}{2}+\frac{F_Z-mg}{2N\cos\frac{\beta}{2}} \tag{2}$$

式中：β 为压辊与沙柳间初始摩擦角(°)；N 为压辊对沙柳的挤压力(N)；F_Z为沙地扦插阻力(N)；f为压辊与沙柳间摩擦系数；m 为沙柳质量(g)。

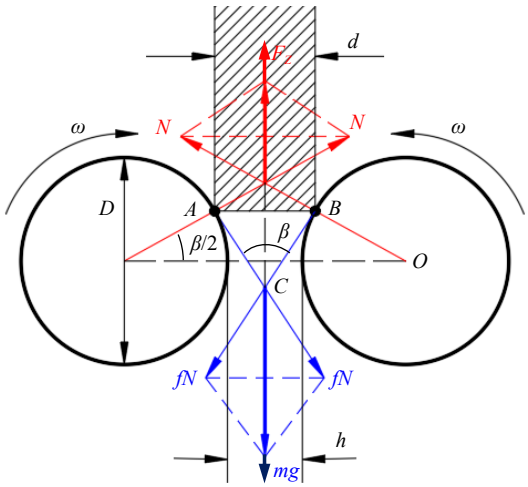
由式(2)可知，压辊对沙柳的扦插力受挤压力、摩擦系数及初始摩擦角共同影响。提高挤压力与摩



β 为压辊与沙柳间初始摩擦角（°）。

图 7 压辊挤压过程

Fig. 7 Roller extrusion process



O 为压辊回转轴心；β 为压辊与沙柳间初始摩擦角（°）；N 为压辊对沙柳的挤压力（N）；F_Z为沙地扦插阻力（N）；d为沙柳直径（mm）；D 为压辊直径（mm）；h 为压辊间距（mm）；f为压辊与沙柳间摩擦系数；m 为沙柳质量（g）；ω 为压辊回转角速度（rad/s）；g 为重力加速度（m/s²）。

图 8 受力分析

Fig. 8 Force analysis

擦系数、减小初始摩擦角，均可增强扦插效果。据此，本文优化措施如下:通过上压辊支撑座调节挤压力;采用橡胶辊筒增大摩擦系数;选取较大压辊直径以减小初始摩擦角。

由几何关系可知

$$\cos\frac{\beta}{2}=1+\frac{h-d}{D} \tag{3}$$

联立式(2)得

$$D>\frac{(h-d)\left(f^2+1\right)}{f\cdot\dfrac{F_Z-mg}{2N}+\sqrt{f^2-\left(\dfrac{F_Z-mg}{2N}\right)^2+1}-f^2-1} \tag{4}$$

进一步得

$$D>(d-h)\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+f^2}}\right)^{-1} \tag{5}$$

式中:O 为压辊回转轴心;d 为沙柳直径(mm);h 为压辊间距(mm)。

根据前期实地调研，沙柳枝条直径为 9 ~ 12 mm，设置压辊间距 8 mm，沙柳枝条与压辊(胶辊)之间滚动摩擦系数 f 一般取 0.3 ~ 0.6[14]，本文取 f = 0.5，将上述参数带入式(5)中，求得 D > 37.74 mm。

选取较大的压辊回转直径减小挤压初始摩擦角将增大扦插力，压辊回转直径尺寸 D 设定为 50 mm。基于前期实况调研获取的沙柳和沙障尺寸规格，压辊宽度设为 150 mm。

2.4　压辊支撑座设计

为保证沙柳在合理的压紧力下成功扦插入土，设计可自适应调节辊间距的压辊支撑座。每组压辊装置由定轴压辊与移动压辊组成，定轴压辊通过立式座轴承固定安装，移动压辊座轴承与压缩弹簧相连，弹簧提供横向挤压力。喂入沙柳时，移动压辊可随枝条尺寸在活动范围内自适应移动，始终保持压紧状态，如图 9 所示。

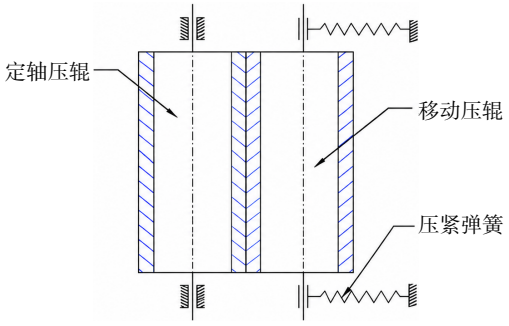


图 9　压辊结构示意图

Fig. 9　Schematic diagram of the roller structure

可调辊间距与预紧力控制:移动压辊通过弹簧预压提供挤压力，试验中通过调节弹簧刚度与初始压缩量，使最大压缩应力低于枝条断裂的经验限值。根据实测扦插阻力选取压缩弹簧并计算插枝机构提供的理论扦插力，插枝机构主要通过压缩弹簧的弹性形变完成对辊间距的自适应调节，依据《GB/T 2089—2009 普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数》，选取原长为 30 mm，外径 14 mm，刚度 28 N/mm 的圆柱螺旋压缩弹簧[15]，选取支撑座如图 10 所示。

对压辊作业过程进行力学分析，k为压紧弹簧刚度，可得理论扦插力计算公式

$$F_Z=8fk(d-h) \tag{6}$$

代入设计参数计算，得理论最小扦插力为 112.0 N，最大扦插力为 448.0 N。不同直径沙柳的理论扦插力与实测沙地阻力对比如图 11 所示，所设计扦插机构的理论扦插力均高于实测沙地阻力，满足扦插条件，可实现不同直径沙柳的顺利入土。

3　沙柳扦插倾角分析

3.1　扦插倾角产生因素

铺设装置连续作业时，沙柳竖直扦插与装置水平行进形成复合运动，导致枝条倾斜入土。倾角过大将引起倒伏，影响扦插质量，因此围绕沙柳扦插倾角形成机理及影响因素开展理论分析。

如图 12 所示，将沙柳枝条简化为刚性杆，入土过程视为在沙介质中的斜向运动。沙地对枝条产生与运动方向相反的阻力，随着入土深度增加，竖向速度递减。假设水平速度恒定、竖向等减速运动，建立位移方程并与扦插深度构建几何关系，即可求解理论倾角。因此，影响扦插倾角的主要因素包括沙地阻力特性、装置行进速度、扦插速度和枝条尺寸。



图 10　压辊支撑座

Fig. 10　Roller support seat

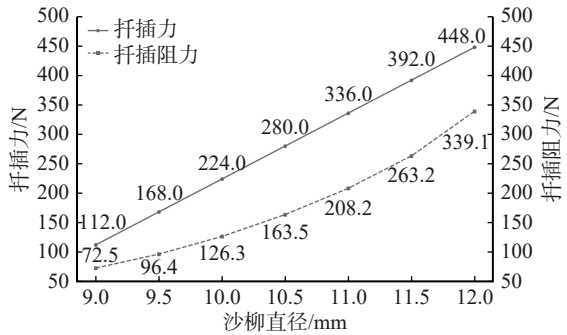
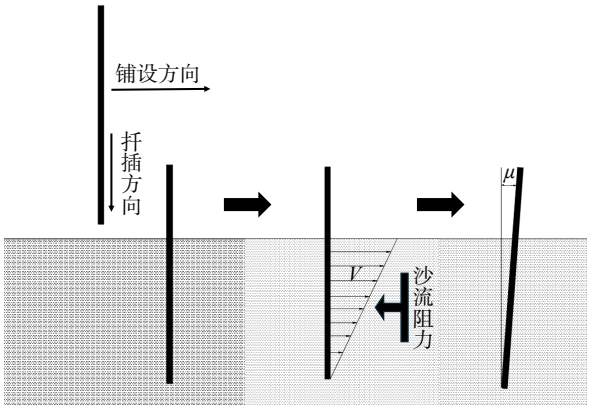


图 11　理论扦插力与实测沙地阻力

Fig. 11　Theoretical cutting force and measured resistance in sand



V为沙柳沙障铺设速度，μ为沙柳扦插倾角。

图 12 沙柳扦插姿态变化图

Fig. 12 Cutting posture change diagram

3.2 扦插倾角理论计算

沙柳枝条在沙地流体中所受阻力为

$$F_D = \frac{C_D \rho V^2 A}{2} \tag{7}$$

竖直方向压辊线速度恒定，即

$$V_n = \frac{\pi n D}{60} \tag{8}$$

水平方向上，装置以恒定速度行进，枝条受沙地阻力做减速运动。沙柳竖直扦插过程中浸入沙地的深度随时间增加，参考面积 A 随时间 t 变化。

$$A(t) = V_n \mathrm{d}t \tag{9}$$

$$t = \frac{150}{V_n} \tag{10}$$

沙柳底端水平方向速度(V_x)为

$$V_x = \frac{V}{1 + \frac{cVt^2}{2m}} \tag{11}$$

水平方向位移

$$x(t) = 2\sqrt{\frac{mV}{C_D \rho d V_n}} \arctan\left(t \cdot \sqrt{\frac{C_D \rho d V_n V}{4m}}\right) \tag{12}$$

进一步可得

$$x = 4\sqrt{\frac{15mV}{C_D \rho d \pi n D}} \arctan\left(2\,250\sqrt{\frac{C_D \rho d \pi n D}{15mV}}\right) \tag{13}$$

根据几何关系(图 13)，沙柳枝条倾斜的弧度φ与水平方向位移关系为

$$L\sin\varphi = \frac{9\,000V}{\pi n D} - x \tag{14}$$

弧度与角度转换关系为

$$\mu = \frac{180}{\pi}\varphi \tag{15}$$

整理可得沙柳扦插倾角μ

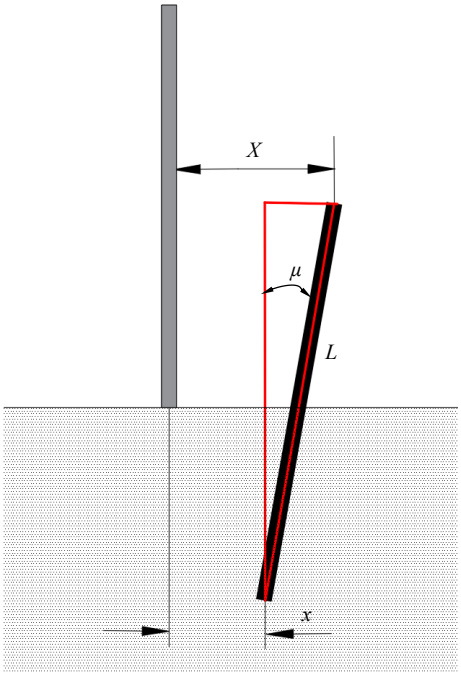


图 13 几何关系图

Fig. 13 Geometric relationship diagram

$$\mu = \frac{180}{\pi}\arcsin\left(\frac{0.1V}{n} - 0.15\sqrt{\frac{V}{n}}\arctan\left(\sqrt{\frac{198n}{V}}\right)\right) \tag{16}$$

式中：X为沙柳顶端水平位移，x为沙柳在沙地中的底端水平位移 (mm)；C_D为沙地流体阻力系数[16]，针对沙地流体内圆柱体绕柱平均阻力系数，取 0.79；ρ为沙地流体密度 (kg/m^3)，取 1 400 kg/m^3；V为沙障铺设方向速度 (mm/s)；V_n为沙柳竖直方向速度 (mm/s)；n为插枝机构压辊转速 (r/min)；D为压辊直径 (mm)，取 100 mm；L为沙柳长度 (mm)，取 300 mm；A为沙柳枝条入沙投影面积 (mm^2)。

扦插倾角(μ)的变化主要依赖于铺设速度和压辊转速的比值 r($r = V/n$)，r与μ对应关系如图 14 所示。

由图 14 可知，μ随r单调递增。按μ变化特征划分 3 区：低倾角区($r < 12$，$\mu < 30°$，绿色)、高倾角区($r > 14.6$，$\mu > 45°$，红色)及最优区($r \approx 7$，$\mu < 10°$，

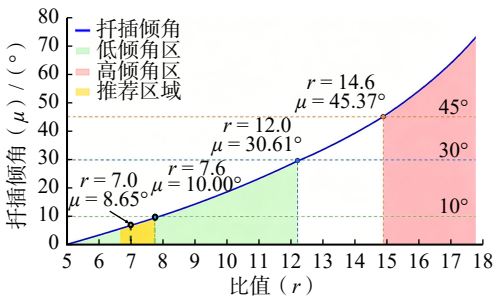


图 14 比值(r)与扦插倾角(μ)关系

Fig. 14 Relationship between velocity ratio (r) and cutting inclination angle (μ)

黄色)。设计时应优先选取最优区参数,以保证扦插稳定性。

绘制 V-n 平面等角度线图(图 15),以 $\mu < 10°$ 为约束条件,根据图 15 确定最优工作参数:n = 100 ~ 200 r/min,V = 600 ~ 1 500 mm/s。

为验证参数敏感性,分别固定 n = 150 r/min、V = 1 000 mm/s,得到 μ 随 V 的变化(图 16a)和 μ 随 n 的变化(图 16b)。

由图 16 可知:固定 n = 150 r/min,μ 随 V 线性增加,V 取值在 800 ~ 1 100 mm/s 时,扦插倾角小于 10°;固定 V = 1 000 mm/s 时,μ 随 n 线性减小,n 取值在 130 ~ 180 r/min 时,扦插倾角小于 10°。

进一步分析扦插过程,同时固定 n = 150 r/min、V = 1 000 mm/s,沙柳顶端水平位移 X、沙柳底端水平位移 x、沙柳底端在沙中水平速度 V_x 和扦插倾角 μ 随扦插深度变化情况如表 3 所示。

表 3 表明:当固定 n = 150 r/min、V = 1 000 mm/s,沙柳顶端位移 X 呈线性增长,沙柳底端位移 x 增速逐渐减缓,顶端与底端位移差逐渐增大;扦插倾角 μ 初期增速较缓,后期增速快;沙柳底端水平速度 V_x 初始缓降,末期陡降。

沙柳在扦插过程中经历 3 阶段动力学转变,深层土壤阻力(扦插深度 > 60 mm)是导致沙柳枝条运动滞后、倾角增大和速度崩溃式衰减的关键因素。位移差(X-x)与倾角 μ 的正相关性揭示了装置–沙柳运动解耦机制(表 4)。

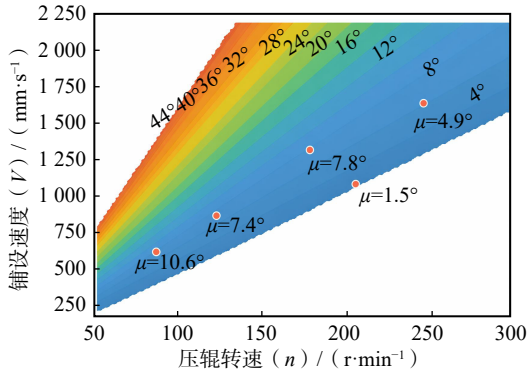


图 15　V-n 平面上等角度线图

Fig. 15　Equiangular line diagram on the V-n plane

综上,最优工作参数为 $r \approx 7$(对应 n = 100 ~ 200 r/min、V = 600 ~ 1 500 mm/s),以此作为后续试验研究参数。

4　插枝试验设计与分析

4.1　插枝试验平台设计

试验平台设计基于理想平坦沙地条件。考虑非理想条件(地形凹凸、设备抖动)可能放大倾角变化,需在分析中预留 r 的容忍范围,并通过试验验证稳定性[17]。

设计挤压式沙柳扦插试验平台如图 17 所示,可实现沙柳指定深度插入,压辊转速和铺设速度可调的功能。根据前文分析得到插枝机构的模型参数

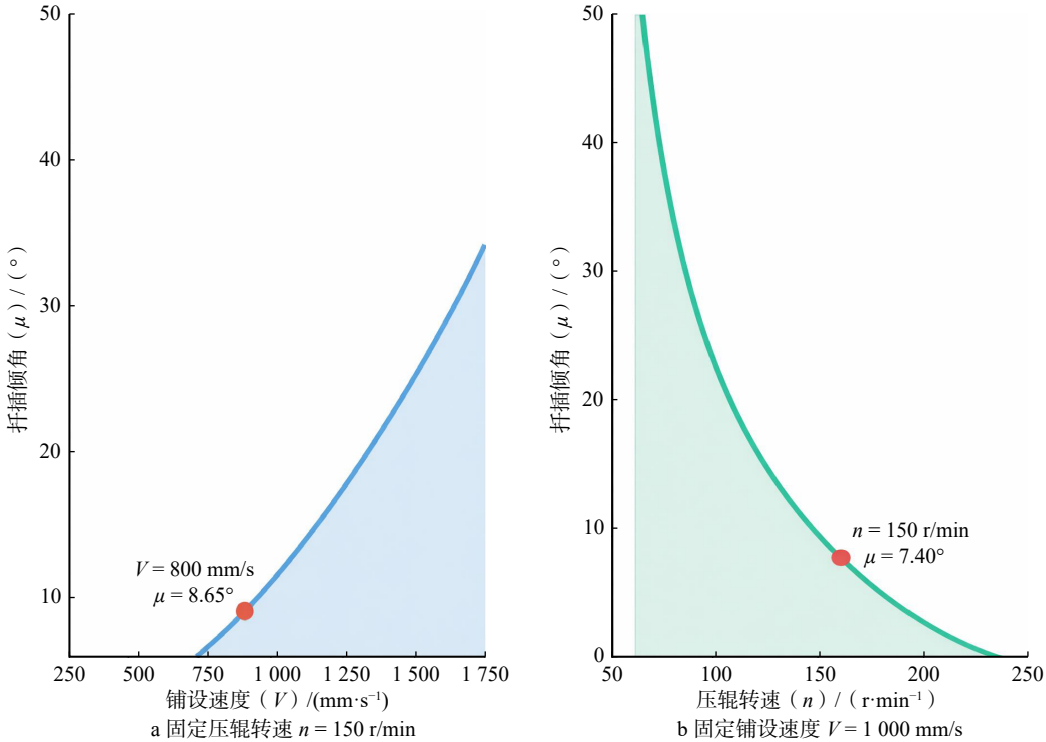


图 16　单因素对扦插倾角影响

Fig. 16　Effect of a single factor on insertion inclination angle

表 3 水平位移、速度和扦插倾角随扦插深度变化

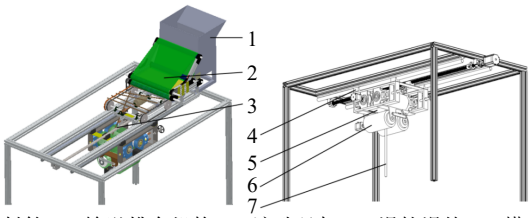
Tab. 3 Horizontal displacement, velocity and inclination angle of cuttings changed with the depth of cuttings

组别	扦插深度/mm	顶端水平位移(X)/mm	底端水平位移(x)/mm	扦插倾角(μ)/(°)	水平速度(V_x)/(mm·s^{-1})
1	0	0.0	0.0	0.00	1 000.0
2	10	13.3	13.2	0.02	983.7
3	20	26.6	26.2	0.08	965.8
4	30	40.0	39.0	0.16	946.1
5	40	53.3	51.4	0.32	924.3
6	50	66.6	63.6	0.50	903.4
7	60	80.0	75.4	0.76	852.6
8	70	93.3	86.8	1.08	801.4
9	80	106.6	97.8	1.44	745.5
10	90	120.0	108.3	1.93	683.4
11	100	133.3	118.1	2.52	623.0
12	110	146.6	127.2	3.19	555.3
13	120	160.0	135.4	4.05	475.0
14	130	173.3	142.4	5.12	327.7
15	140	186.6	148.0	6.36	167.7
16	150	200.0	151.6	7.95	0.0

表 4 扦插过程转变因素分析

Tab. 4 Analysis of transformation factors in the cutting process

阶段	位移特性	倾角变化	衰减速度	主导因素
浅层(≤ 60 mm)	位移差小	缓慢增长(< 0.5°)	缓降	初始惯性主导
过渡层(60 ~ 130 mm)	沙柳位移滞后显著扩大	加速增长(0.5° ~ 5°)	急降	阻力增强效应
深层(≥ 130 mm)	沙柳底端位移近乎停滞，位移差大	陡增(> 5°)	崩溃式下降	土壤锁固效应



1.储料箱；2.输送排布机构；3.滚珠丝杠；4.滑轨滑块；5.横向对辊；6.纵向对辊；7. 沙柳

图 17 沙柳插枝试验平台

Fig. 17 Cuttings experimental platform

表 5 模型相关参数

Tab. 5 Model-related parameters

模型参数	数值
压辊直径/mm	100
沙柳长度/mm	350
压辊驱动转速/(r·min^{-1})	100 ~ 200
行进速度/(mm·s^{-1})	600 ~ 1 500
特殊约束	2D线约束

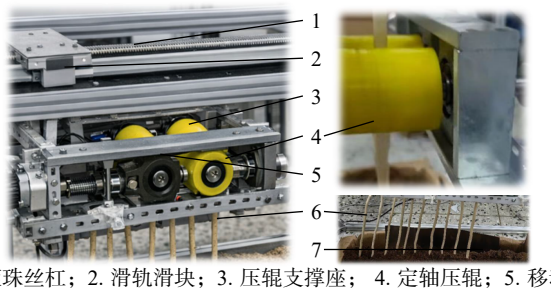
(表 5)。

试验设备(图 18)包括试验沙槽、驱动滑轨装置和双对辊挤压装置，装置框架由 30 mm × 30 mm 铝合金型材搭建。驱动滑轨装置通过驱动电机带动丝杠螺母，实现插枝装置在直线轨道上的进给，两组滑轨提供支撑。本试验主要验证挤压扦插可行性及速度影响，故仅制作了一组横向对辊。

4.2 扦插效果评价指标

根据以上沙柳挤压扦插受力和运动学分析可知，在已知插枝机构相关参数情况下，压辊转速和装置铺设速度是影响沙柳扦插效果的主要因素。

根据扦插要求，选取长度为 350 mm，直径为 9 ~



1.滚珠丝杠；2. 滑轨滑块；3. 压辊支撑座； 4. 定轴压辊；5. 移动压辊；6. 沙柳；7.沙槽

图 18　插枝试验主要机构及插枝效果

Fig. 18　Main mechanism of cutting test and the effect of cuttings

12 mm 粗细不一的沙柳枝条，按照扦插深度 150 mm，沙面障高 200 mm，扦插间距 80 mm，沙柳扦插倾角小于 10°为铺设效果评价指标，验证插枝机构的合理性和有效性。

4.3　作业参数筛选

在铺设方向速度 600 ~ 1 500 mm/s，压辊转速 100 ~ 200 r/min 范围内，以压辊转速递增设计初步试验，进一步筛选出合适参数，得到沙柳扦插倾角如表 6 所示。

由表 6 可知，沙柳扦插倾角与压辊转速呈正相关，与铺设速度呈负相关。铺设速度在 600 mm/s 时，压辊转速在给定范围内取任意值均能满足沙柳扦插倾角要求；铺设速度在 1 000 mm/s 时，压辊转速高于 140 r/min 可以满足沙柳扦插倾角要求；当铺设速度高于 1 200 mm/s 后，压辊达到 180 r/min 才能满足沙柳扦插倾角要求，设备产生明显震动。

表 6　初筛试验下沙柳扦插倾角测定结果

Tab. 6　Measured insertion inclination angles of *Salix* psammophila in preliminary screening tests　　(°)

铺设速度 (V)/(mm·s^{-1})	压辊转速(n)/(r·min^{-1})					
	100	120	140	160	180	200
600	4.9	4.2	3.3	2.7	1.5	0.8
800	12.6	7.1	5.5	4.3	2.6	1.1
1 000	21.0	13.8	8.9	5.7	3.2	1.7
1 200	30.6	21.0	15.5	10.6	7.1	5.9
1 400	41.7	28.9	21.0	15.6	11.7	10.2
1 500	62.5	32.0	26.2	16.3	12.4	11.3

4.4　扦插试验结果与分析

综合考虑铺设速度和装置稳定性，选取铺设速度 1 000 mm/s，压辊转速 140 r/min 进行扦插试验验证。每组扦插 60 株沙柳枝条(直径 9 ~ 12 mm)，重复 6 次，作业效果如图 19 所示，指标结果见表 7 所示，平均插枝成功率达 88.3%，达到沙地沙柳枝条机械化扦插作业要求[18]。

5　结　　论

(1)结合沙柳网格沙障农艺要求，提出一种折线形沙障铺设模式，通过插枝机构连续扦插与换向机构往复平移配合，实现沙柳网格一次成型。

(2)设计柔性压辊挤压式扦插机构，可自适应不同直径(9 ~ 12 mm)沙柳枝条的扦插需求。

(3)建立扦插过程力学模型，理论扦插力均大于实际扦插阻力，满足扦插要求；揭示三阶段动力学特

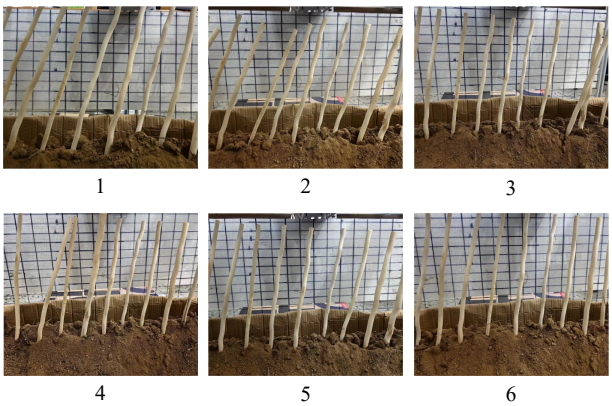


图 19　作业效果图

Fig. 19　Renderings of the assignment

表 7　作业指标结果

Tab. 7　Job indicator results

组别	1	2	3	4	5	6	均值
成功株数	46	55	59	53	57	48	53
成功插枝率/%	76.7	91.7	98.3	88.3	95.0	80.0	88.3

征，明确深层土壤阻力（扦插深度大于 60 mm）是导致沙柳枝条运动滞后、倾角增大和速度崩溃式衰减的关键因素；扦插倾角随铺设速度和压辊转速比值（r）单调递增，$r\approx7$（对应 $n=100\sim200$ r/min、$V=600\sim1\,500$ mm/s）时，满足倾角小于 10°。

（4）扦插试验验证表明，存在稳定低倾角参数区间。当铺设方向速度 1 000 mm/s、压辊转速 140 r/min 时，插枝成功率 88.3%，扦插倾角指标小于 10°，满足作业要求。

本文设计的沙柳网格沙障铺设装置适用于平地及缓坡的作业环境，后续研究将从防风固沙角度优化折线形沙障的可调几何参数[19]，并通过 CFD 风洞与田间试验确定最佳形状[20−21]；开展输送机构与排布机构的连续性铺设试验；进行系统性断裂率测试[22]与插入力对比，以量化破损率与插入力的关系；针对凹凸不平地形，通过缓冲装置缓解设备抖动[23]，同时集成自动清堵反转功能[24]，实现塞条问题的实时检测与处理，确保非理想地形下的稳定作业[25]；探究不同工作参数对沙障成型质量的影响规律，最终完善沙柳网格沙障铺设装置。

参 考 文 献

［1］ 国家林业和草原局. 中国荒漠化和沙化土地现状公报 [R]. 北京: 国家林业和草原局, 2025.
State Forestry and Grassland Administration. Bulletin of desertification and sandification land status in China[R]. Beijing: State Forestry and Grassland Administration, 2025.

［2］ 赵国平, 左合君, 徐连秀, 等. 沙柳沙障防风阻沙效益的研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 38−41,65.
Zhao G P, Zuo H J, Xu L X, et al. Effect of *Salix* deserts barrier on reducing wind and stabilizing sand [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 38−41,65.

［3］ 贺瑞芳. 沙柳种植对鄂尔多斯地区改善生态环境的作用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2006(6): 12−14.
He R F. The function of planting the sand willow tree to improving the ecological environment in Erduose area [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2006(6): 12−14.

［4］ 裴志永, 段广东, 郝少荣, 等. 基于防风效益的毛乌素沙地沙柳灌丛平茬方法优选 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 153−161.
Pei Z Y, Duan G D, Hao S R, et al. Optimization of stumping method based on wind control benefit for *Salix psammophila* shrub in Mu Us sandy land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 153−161.

［5］ 梁钰镁, 高永, 王瑞东, 等. 沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 305−311.
Liang Y M, Gao Y, Wang R D, et al. Effects of *Salix psammophila* sand barriers decay on soil microbial biomass and enzymes activities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 305−311.

［6］ 郑明锋, 叶鹏博, 唐涛, 等. 柳条扦插机链板式自动出料装置设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 14−21.
Zheng M F, Ye P B, Tang T, et al. Design and testing of automatic chain plate discharge device for willow branch cutting machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 14−21.

［7］ 王慧, 洪晨, 陈安雨, 等. 自动化沙柳种植机的设计与协调性试验 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2023, 44(3): 309−317.
Wang H, Hong C, Chen A Y, et al. Design and coordination test of automatic *Salix* planter [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 309−317.

［8］ 师文豪, 童香兰, 张梦雅, 等. 沙漠沙柳自动化种植研究与创新 [J]. 工程机械, 2023, 54(5): 118−121,12.
Shi W H, Tong X L, Zhang M Y, et al. Research and innovation on automated planting of desert *Salix* [J]. Construction Machinery and Equipment, 2023, 54(5): 118−121,12.

［9］ 陈志斌, 张智武. 基于机械控制系统的全自动沙柳种植装置创新研究 [J]. 农业技术与装备, 2022(8): 50−52.
Chen Z B, Zhang Z W. Innovative research on automatic *Salix psammophila* planting device based on mechanical control system [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(8): 50−52.

［10］ 王奕轩, 乔靖然. 治沙魔方: 格状沙障 [J]. 内蒙古林业, 2023(8): 40−41.
Wang Y X, Qiao J R. Rubik's cube for sand control-lattice sand barrier [J]. Inner Mongolia Forestry, 2023(8): 40−41.

［11］ 汲文峰, 吴启明, 黄海东, 等. 基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2015(S1): 21−27.
Ji W F, Wu Q M, Huang H D, et al. Design and experiment of seedling seperation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(S1): 21−27.

［12］ 李延民, 蔡志源, 霍征征, 等. 对辊制粒机压辊的有限元分析及优化 [J]. 机械设计与制造, 2024(1): 90−94.
Li Y M, Cai Z Y, Huo Z Z, et al. The finite element analysis and optimization of the press roller of roller granulator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 90−94.

［13］ 柳亚峰, 方志超, 夏海峰, 等. 对辊拨刷式蒜头收获机设计与试验 [J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6): 72−81.
Liu Y F, Fang Z C, Xia H F, et al. Design and experiment of a opposite roller extrusion type *Allium chinense* harvester [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(6): 72−81.

［14］ 夏维学, 王聪, 李佳川, 等. 倾斜放置圆柱体入水流体动力特性实验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(1): 67−76.
Xia W X, Wang C, Li J C, et al. Experimental investigation on motion hydrodynamics of water entry for inclined cylinders [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(1): 67−76.

［15］ 王磊, 黄海东, 汲文峰, 等. 藜蒿扦插机扦插装置的设计与扦插轨迹分析 [J]. 湖北农业科学, 2013, 52(22): 5592−5595.

Wang L, Huang H D, Ji W F, et al. Design of transplanting device of *Artemisia selengensis* transplanter and analysis of its transplanting track [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(22): 5592−5595.

[16] 李标. 带式输送机多电动机驱动系统转速同步控制方法 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 112−119.
Li B. Speed synchronization control method for multi motor drive system of belt conveyor [J]. Industry and Mine Automation, 2023, 49(5): 112−119.

[17] 何达力, 王磊, 黄海东, 等. 藜蒿扦插机分苗取苗机构的设计与运动分析 [J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 116−121.
He D L, Wang L, Huang H D, et al. Mechanism design and kinematic analysis of parting and taking of transplanter for *Artemisia selengensis* using fresh cuttings [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(4): 116−121.

[18] 王存国. 带式输送机的大功率驱动系统的研究及应用 [J]. 石化技术, 2023, 30(8): 206−207.
Wang C G. Research and application of high-power drive system of belt conveyor [J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(8): 206−207.

[19] 辛江博, 马志鹏, 鲜永豪, 等. 沙柳种植机器人及其控制系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(5): 67−70.
Xin J B, Ma Z P, Xian Y H, et al. Design and application of control system for *Salix psammophila* planting robot [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2022(5): 67−70.

[20] 王鹏, 权江坤, 胡俊, 等. 沙漠沙柳湿法种植机 [J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(7): 62−66.
Wang P, Quan J K, Hu J, et al. Desert *Salix* wet planter [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(7): 62−66.

[21] Casarin N, Hasbroucq S, Pesenti L, et al. Salicaceae as potential host plants of *Xylella fastidiosa* in European temperate regions [J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 165(3): 489−507.

[22] 李玉凤. 甘蔗横向种植机液压系统的设计 [J]. 液压气动与密封, 2024, 44(7): 111−117.
Li Y F. Design of hydraulic system for horizontal sugarcane planting machine [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(7): 111−117.

[23] McCollom J, Smith K, Duever M, et al. Vegetation response to mechanically and chemically treating willows (*Salix caroliniana*) invading marshes in the corkscrew watershed, southwest *Florida* [J]. Natural Areas Journal, 2022, 42(1): 39−55.

[24] Weicherding P J, Giblin C P, Gillman J H, et al. Mechanical root-disruption practices and their effect on circling roots of Pot-Bound *Tilia cordata* Mill. and *Salix alba* L. '*Niobe*' [J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2007, 33(1): 43−47.

[25] Hu Z H, Shen Y B, Luo Y Q, et al. Aldehyde volatiles emitted in succession from mechanically damaged leaves of poplar cuttings [J]. Journal of Plant Biology, 2008, 51(4): 269−275.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　李文彬）