doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.017

高坚实度退化草地低扰动复式开沟单体设计与试验

贺长彬[1,2]　郭艳颖[1,3]　郭晓晴[4]　周建成[5]　姚　一[1]　暴鹏宇[1]

(1.内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018;
2.牧草饲料生产全程智能化装备内蒙古自治区工程研究中心,呼和浩特 010018;
3.中国农业大学工学院,北京 100083;4.内蒙古自治区农牧业技术推广中心,呼和浩特 010012;
5.内蒙古宏昌机械制造有限公司,呼和浩特 010200)

摘要:为解决现有草地开沟部件存在的作业效果差、对地表破坏与扰动严重等问题,结合草地补播作业过程中的地表低扰动作业需求,提出了“主动开沟—扩沟播种—V 型镇压”的低扰动复式开沟作业工艺,并通过田间试验验证了该工艺的可行性。在此基础上,设计了一种低扰动复式开沟单体,主要由传动系统、主动开沟刀具、滑刀式开沟器、扩沟导种装置、V 型镇压轮和仿形装置等组成,并通过田间试验对单体的作业效果进行评估。试验结果表明:退化草地低扰动复式开沟单体在天然草地作业后形成的种沟深度为 63 mm,宽度为 7 mm,开沟深度稳定性系数达到 91.39%,地表破坏率仅为 1.33%。

关键词:退化羊草草地;草地补播;低扰动;复式开沟装置

中图分类号:S222.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0181-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Low-disturbance Integrated Furrowing Unit for High-compaction Degraded Grassland

He Changbin[1,2]　Guo Yanying[1,3]　Guo Xiaoqing[4]　Zhou Jiancheng[5]　Yao Yi[1]　Bao Pengyu[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*
2. *Inner Mongolia Engineering Research Center of Intelligent Equipment for the Entire Process of Forage and Feed Production, Hohhot* 010018, *China*
3. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
4. *Inner Mongolia Agriculture and Animal Husbandry Technology Extension Center, Hohhot* 010012, *China*
5. *Inner Mongolia Hongchang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Hohhot* 010200, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of poor operational performance and severe surface disturbance that caused by existing grassland furrowing components, a novel low-disturbance integrated furrowing process of “active furrowing - furrow widening and seeding-V-shaped compaction” was proposed. This process was specifically developed based on the composite soil-layer structure of grassland characterized by litter-soil-roots, as well as the essential low-disturbance requirements of grassland reseeding operations. Field experiments were systematically conducted to compare the surface disturbance effects of different furrowing modes and verify the overall feasibility of the proposed process. On this basis, a low-disturbance integrated furrowing unit was carefully designed, which was mainly composed of a transmission system, active furrowing blades, a sliding-knife furrower, a furrow-widening and seed-guiding device, a V-shaped compaction wheel, and a profiling mechanism. The operational performance of the unit was comprehensively evaluated through field experiments. The results showed that, after operation on natural grassland, the device achieved a furrow depth of 63 mm and a width of 7 mm, with a furrow depth stability coefficient of 91.39% and a surface disturbance degree of only 1.33%. These research findings can provide reliable technical and data support for the future development of specialized

收稿日期:2026-07-20　修回日期:2026-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52465032)、内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS05001)、内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0019)、内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT24046)和内蒙古自治区一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-046)

作者简介:贺长彬(1991—),男,副教授,博士,主要从事草地机械化改良技术研究,E-mail:changbin_he@imau.edu.cn

furrowing components for grassland improvement.

Key words: degraded *Leymus chinensis* grassland; grassland overseeding; low-disturbance; integrated furrow opening components

0 引言

中国草地面积约为 2.65×10^8 hm^2,综合植被盖度达 50.32%[1],在维持生物多样性和调节全球碳平衡等方面发挥着不可替代的作用[2-3]。然而,当前草原生态系统整体仍较脆弱,70% 以上的草地存在不同程度的退化,保护修复力度不足、科技支撑能力薄弱等问题依然突出,生态形势依旧严峻[4]。草地退化不仅破坏了生态系统的平衡,还直接降低了草地的质量和产量,给畜牧业发展和生态环境建设带来了巨大困难与挑战[5-6]。

目前,退化草地机械化改良主要从改善土壤环境和恢复原有植被两方面进行[7]。针对重度退化草地,补播改良是恢复原有植被的有效方法之一,草地补播改良是在退化草地上补种优势牧草,以快速提高单位面积的牧草密度,进而加快退化草地的恢复过程[8-9]。国外的草地补播作业,大多集中在人工种植草地,用于草地的免耕播种机多为联合作业模式,具有较大工作幅宽和高效的作业性能,如 Solitair 8 + 气力式条播机、Frontier™ 系列补播机、1006NT 免耕播种机、5000HD Air Drill 免耕播种机等[10-14]。国内用于草地的补播机械多为条播机,如 2BM-9 型牧草免耕播种机、6119 型免耕播种机、9MSB-2.10 型草地免耕松播联合机和 2BMX 系列免耕施肥条播机等[15-16],撒播机和精量播种机等其他类型的补播机相对研究较少。

由于退化草地地表坚实度高,草地土层结构复杂,传统的开沟部件存在入土性能差等问题[17]。此外,草原枯落物(包括地表枯落物及地下原有植被枯落残茬)会影响耕作部件的作业效果,大量枯落物堆积在耕作部件刃口处会产生拥堵[18-20]。在未充分考虑草地形成的“枯落物-土壤-根系”复合土层结构的情况下,关键耕作部件在应用到天然草地上作业时,易产生翻垡、拉扯根系、枯落物拥堵等现象,对草地地表产生较大的扰动和破坏[21]。为此,本文结合草地复合土层的结构特点,提出一种草地补播低扰动复式开沟工艺,基于该工艺设计一种适用于草地补播机的低扰动复式开沟单体,并通过田间试验验证单体的作业性能,以期解决现有草地开沟部件存在的作业效果差、对草地地表破坏程度大等问题。

1 草地补播低扰动复式开沟工艺

现有的草地补播改良规程中,针对不同退化程度的草地,在原有植被条件下播种适应当地气候和土壤条件的优良草种,以增加草群中优良牧草的种类成分,从而修复退化草地并改善牧草质量。其中,对于土壤墒情恶化及土壤坚实度较高的退化草地,补播作业不仅需要打破高坚实度的地表土层,同时作业后的地表应保持平整,避免翻垡和起垄,减少风蚀和水蚀等问题。

采用极窄齿主动贯入土层的草地破土开沟方式,可以有效打破高坚实度的土层,同时对地表产生较小的扰动[22]。同时,现有的研究也发现,钝角开沟器在作业阻力、地表翻垡率等方面作业性能均优于锐角开沟器,且采用开沟部件组合作业模式,可降低开沟部件的作业阻力及地表翻垡率[23-24]。因此,本文提出一种草地补播低扰动复式开沟技术工艺,该工艺集成了主动开沟、滑刀式开沟器扩沟导种,以及 V 型镇压轮覆土镇压技术,可概括为“主动开沟—扩沟播种—V 型镇压”复式开沟工艺,该工艺示意图如图 1 所示。

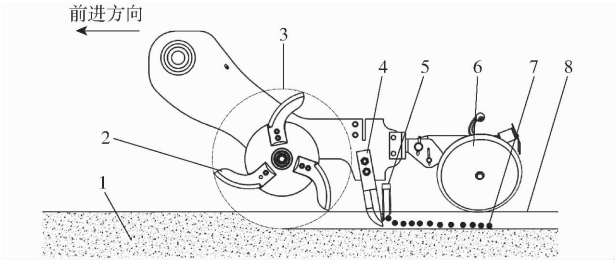


图 1 草地补播低扰动复式开沟工艺示意图

Fig. 1 Schematic of low-disturbance compound furrowing process for grassland reseeding

1. 草地土层 2. 主动开沟刀具 3. 刀尖点回转圆 4. 开沟器 5. 导种管 6. V 型镇压轮 7. 牧草种子 8. 地平线

该工艺的作业原理如下:首先,通过主动开沟刀具破坏坚实的草地复合土层,随后使用钝角开沟器(本文采用滑刀式开沟器)进行扩沟,并通过紧邻开沟器的导种管将牧草种子精准导至开好的种沟中,最后通过 V 型镇压轮完成覆土和镇压,实现草地低扰动补播作业。

2 草地低扰动开沟作业模式对比试验

2.1 低扰动开沟作业模式对比试验设计

为验证提出的草地补播低扰动复式开沟工艺的

作业效果，通过田间试验方法，对比分析以下 3 种开沟作业模式对草地地表的扰动情况：①滑刀式开沟器单独开沟。②单圆盘开沟器开沟 + 滑刀式开沟器扩沟。③主动开沟刀破土开沟 + 滑刀式开沟器扩沟。

为进一步验证技术工艺效果，试验过程中选用有“枯落物-土壤-根系”复合土层结构明显的人工羊草草地进行田间试验，试验地位于内蒙古自治区呼和浩特市某一人工种植羊草草地（北纬 40°38′34″，东经 111°46′11″），该草地连续 3 年未进行任何改良措施，羊草根系在地表至地下 15 cm 土层范围内均有分布，地表坚实度高，地表枯落物覆盖明显，草地及土壤条件与重度退化草地相似，如图 2 所示。



图 2　试验地草地根系分布及地表枯落物覆盖情况

Fig. 2　Distribution of grassland root systems and surface litter coverage in experimental field

2.2　试验装置与方法

试验使用的装置为草地切根开沟综合性能试验台，试验台的结构如图 3 所示。试验台由拖拉机牵引，能够实现主动开沟、滑刀式开沟器开沟、单圆盘开沟单独作业及组合开沟等多种作业模式的耕作试验。试验台的数据采集系统中，数字式动态扭矩传感器（北京中航科仪测控技术有限公司，CKY－810 型）可用于采集主动开沟刀具的作业扭矩；上拉杆传感器（中国航天空气动力技术研究院，BK－1－LG 型）和下悬挂传感器（中国航天空气动力技术研究院，BK－5－XG 型）用于采集开沟部件的水平作业阻力；无线测力箱（黑龙江农业科学研究院，NJTY3 型）则可将扭矩及阻力数据无线传输至接收装置（便携式计算机）。

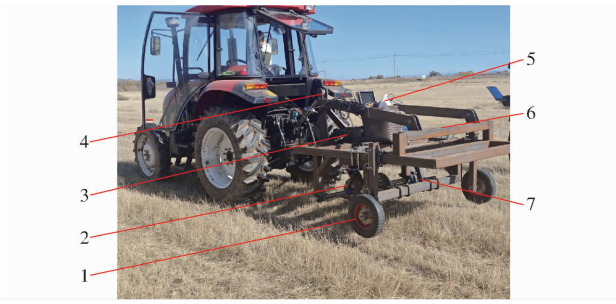


图 3　草地切根开沟综合性能试验台

Fig. 3　Comprehensive performance test bench for grassland root-cutting and furrowing

1. 限深装置　2. 主动切根开沟装置　3. 传动系统　4. 三点悬挂装置　5. 数据采集系统　6. 机架　7. 耕作部件

试验中使用的主动开沟刀具为现有草地切根装置中最常见的破土切根刀。刀具刃线采用偏心圆弧曲线，开沟刀具宽度为 60 mm，刀齿厚度为 6 mm。刀齿沿刃口曲线方向双面开刃，刃宽为 15 mm，刃厚为 2 mm，刀尖点回转半径为 260 mm[25]。主动开沟刀具通过螺栓固定在刀盘上，每个刀盘上安装 3 把主动开沟刀具。扩沟导种装置由滑刀式开沟器后焊接导种管组成，滑刀式开沟器刀具宽度为 50 mm，刀齿厚度为 8 mm，刀齿刃口曲线为指数函数曲线，沿刃口曲线方向双面开刃，刃宽为 15 mm，刃厚为 2 mm[26]。根据 NY/T 4295—2023《退化草地改良技术规范》，牧草补播的最佳深度约为 2 cm。故本研究中导种管出种口最上端距地表 2 cm，最下端距地表 4 cm，中部设有挡土舌，既能保证落种深度在 2 ~ 3 cm，又能防止导种管在垂直入土过程中被土壤堵塞。由于开沟作业后会有少量回土落入种沟，且导种管的横截面积较小，可能存在堵种问题，因此将主动开沟刀具与滑刀式开沟器的作业深度设定为 6 cm。

利用草地耕作试验台，对比 3 种作业模式的地表扰动程度。图 4a 为滑刀式开沟器单独作业模式，东方红 MK704 型拖拉机牵引试验台，使耕作部件水平前进，实现开沟作业。图 4b 为单圆盘开沟器开沟



(a) 滑刀式开沟器单独开沟　(b) 单圆盘开沟器+滑刀式开沟器　(c) 主动开沟刀具+滑刀式开沟器

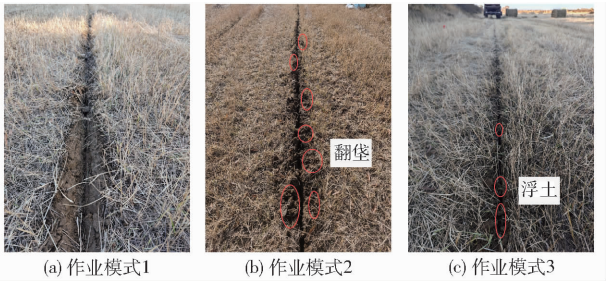
图 4　3 种作业模式

Fig. 4　Three operating modes

+滑刀式开沟器扩沟组合作业模式,单圆盘开沟器先划破地表,再通过滑刀式开沟器进行扩沟。图 4c 为主动开沟刀具+滑刀式开沟器组合作业模式,通过拖拉机后输出轴提供动力驱动主动开沟刀具旋转,使其主动贯入土层,同时拖拉机牵引整个试验台水平前进,利用滑刀式开沟器进行扩沟。

2.3 试验结果与分析

试验后的直观结果如图 5 所示。图 5a 仅依靠开沟器水平向前的拉力将根系扯断,无法瞬间剪切根系使其失效。随着作业的持续进行,土壤-根系复合体及地表枯落物不断堆积,最终形成严重的挡土墙。堆积的土壤、根系及枯落物形成一个团聚体。在开沟器水平推力的作用下共同作用于土壤,最终形成浅且宽的沟槽,对地表造成极大破坏。挡土墙的形成过程如图 6 所示。



(a) 作业模式1 (b) 作业模式2 (c) 作业模式3

图 5 不同组配方式作业效果图

Fig. 5 Operational effect images for different configuration methods



入土阶段 挡土墙形成 挡土墙脱落

图 6 挡土墙形成过程

Fig. 6 Formation process of retaining wall

图 5b 先通过单圆盘开沟器先切开草地表层,再利用滑刀式开沟器进行扩沟。这种组合作业方式可避免挡土墙的形成,相较于滑刀式开沟器单独作业,降低了对地表的扰动程度。分析其原因,单圆盘开沟器在水平滚动切割土壤-根系复合体的过程中,不仅对根系施加拉扯作用,还伴随一定的滑切效应,使根系在作业过程中被扯断或切断。虽然该模式相较于滑刀式开沟器单独作业造成的翻垡现象有所减少,但仍存在对根系的拉扯作用,对地表造成了破坏。

图 5c 为作业模式 3,即在机具前进的同时,主动开沟刀具高速旋转并主动贯入土层,打破坚实度较高的草地表层。该组合作业方式形成的沟缝较窄,相较于前两种作业模式,对土壤的扰动程度最小。其主要原因在于高速旋转的主动开沟刀具能够快速剪切土壤、浅层根系及地表枯落物,直接导致土壤-根系复合体失效,滑刀式开沟器在扩沟时不再对根系施加作用力,避免了拉扯根系的现象,所以不会产生翻垡。该模式下滑刀式开沟器仅起到扩沟作用,地表扰动程度最小。

为进一步量化 3 种作业模式对地表扰动的影响,测量并计算作业后的沟宽和地表翻垡率。沟宽的测量方法如下:以 10 m 为一个作业量程,分别在 3、6、9 m 处测量作业后的沟槽宽度,并计算其平均值,以表征不同作业模式下的地表扰动程度。每种作业模式重复试验 3 次,共采集 9 个测量点的数据[27]。

地表翻垡率参考 JB/T 7135—2007《羊草地潜松耕犁》的相关规定测量并计算,具体方法如下:观察作业后沟面的状态,若沟面一侧与沟底的夹角大于 100°,则视为翻垡,使用盒尺记录翻垡长度。地表翻垡率 f 计算式为(为便于测量,仅统计直径大于 5 cm 的土块)

$$f=\frac{L_f}{qL_z}\times 100\% \tag{1}$$

式中 L_f——翻垡总长度平均值,m

q——耕作部件总数

L_z——行程总长度,m

3 种作业模式的沟宽和地表翻垡率如表 1 所示。

表 1 3 种作业模式沟宽和地表翻垡率

Tab. 1 Furrow width and soil turnover rate under three operating modes

参数	试验序号	作业模式 1	作业模式 2	作业模式 3
沟宽/mm	1	35.3±5.0	31±6.2	14.7±2.5
	2	41.7±16.1	23.7±6.4	12.0±1.0
	3	36.0±16.5	26±2.6	14.3±1.2
	均值	(37.7±12.2)^a	(26.9±5.7)^b	(13.7±1.9)^c
翻垡率/%	1	2.8	1.8	0
	2	2.0	1.1	0
	3	2.5	1.0	0
	均值	(2.43±0.4)^a	(1.3±0.4)^b	0^c

注:同一行的不同字母表示通过 Duncan 多重比较下在显著性水平为 0.05 的条件下存在显著性差异。

田间试验结果表明,不同作业模式下的沟宽和翻垡率均有显著性差别。3 种作业模式中,作业模式 3 的地表扰动程度最小,其沟宽和翻垡率均最低,符合低扰动作业的技术要求,也进一步表明所提出的低扰动复式开沟作业方式能够有效实现草地低扰动开沟作业,为低扰动开沟单体的设计提供了依据。

3　低扰动开沟单体设计

3.1　低扰动开沟单体设计要求

根据上述研究结果，低扰动开沟单体应满足以下要求：①最大开沟深度大于等于 60 mm，且开沟深度稳定性系数大于 90%。②作业后地表保持平整（不翻垡、不起垄），且地表破坏程度应小于 5%。③具备单体仿形功能，能够适应复杂环境下的天然草地作业。④针对不同退化程度的天然草地，作业行距及作业行数可调节。

3.2　主动开沟刀具运动学分析

草地补播机低扰动开沟单体主要由 3 部分组成：主动开沟部分、开沟播种部分以及覆土镇压部分。现有的草地主动开沟刀具主要用于草地切根作业，其作业深度一般在 150 ~ 200 mm，刀具厚度为 6 mm，对天然草地的扰动较小，本研究所设计的低扰动开沟单体选用 6 mm 厚的月牙形刀具。

主动开沟刀具在作业过程中，其运动形式为刀具绕轴旋转运动与机具沿前进方向直线运动的组合。在匀速条件下，刀尖点的运动轨迹为摆线，如图 7 所示。图中，x 轴正方向指向机具前进方向，y 轴正方向指向竖直向上。则主动开沟刀具刃口上任意点的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = v_a t + R\cos(\omega t) \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中　v_a——主动开沟刀具的前进速度，m/s

R——主动开沟刀具刃口上任意点到回转中心的距离，m

ω——刀盘旋转角速度，rad/s

t——作业时间，s

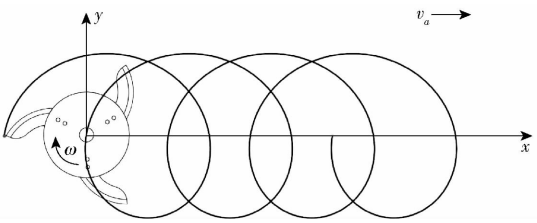


图 7　主动开沟刀具运动轨迹

Fig. 7　Motion trajectory of active furrowing blade

根据研究经验，选用速比 λ 反映运动参数对刀具与土壤相互作用的影响，其定义为刀盘旋转角速度与机具前进线速度的比值[27]。设主动开沟刀具的旋转角度为 θ，则 λ 和 θ 的计算公式为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_a} \tag{3}$$

$$\theta = \omega t \tag{4}$$

将轨迹方程对时间求导，可得到主动开沟刀具在运动过程中的速度方程

$$\begin{cases} v_x = v_a(1 - \lambda\sin\theta) \\ v_y = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{5}$$

式中　v_x——刀具刃线任一点水平方向的速度，m/s

v_y——刀具刃口曲线任一点竖直方向上的速度，m/s

结合上述公式，对刀具切土过程进行分析，在实际作业过程中，当刀尖点的水平分速度 $v_x > 0$ 时，其运动方向与机具前进方向一致，此时刀尖对土体产生推土作用；若 $v_x = 0$，则会出现刀尖顶土现象；当 $v_x < 0$ 时，水平分速度方向与机具前进方向相反，刀具才能对土体进行切削。对刀具与土壤接触的整个过程进行分析，在刀具接触土壤的瞬间，θ 最小，此时的水平分速度最大，最易出现刀尖顶土或推土现象。

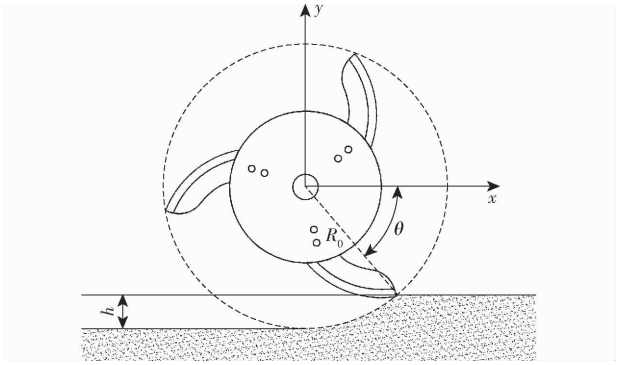


图 8　主动开沟刀具入土示意图

Fig. 8　Schematic of soil penetration by active furrowing blade

由图 8 中几何关系可得，刀尖点瞬时入土状态时有

$$\sin\theta = \frac{R_0 - h}{R_0} \tag{6}$$

式中　R_0——刀尖点回转半径，mm

h——刀具作业深度，mm

进一步分析入土瞬间切土的速度条件：若要使 $v_x < 0$，则需满足 $\lambda\sin\theta > 1$。而在刀具接触土壤的瞬时，由公式(6)可以计算此时的 $\sin\theta$，本研究刀尖点回转半径为 260 mm，刀具作业深度为 60 mm。求得 $\lambda > 1.3$ 时，主动开沟刀具可实现切土作业。现有草地切根机的刀轴转速为 254 r/min，草地补播机的机具前进速度为 1 m/s[27,29]，由式(3)计算可得 $\lambda \approx 6.9$，符合本研究中主动开沟刀具切土作业要求。故低扰动开沟单体作业时刀轴转速为 254 r/min、机具前进速度为 1 m/s。

3.3　扩沟导种部件设计

扩沟导种部件的主要功能是对主动开沟形成的窄缝进行适当拓宽，以满足落种要求。由于羊草种子呈细长状，长度在 5 ~ 6 mm 之间，为确保种子能

够顺利落入种沟,导种管最窄处的宽度应大于羊草种子长度,以防止种子悬空滞留在导种管内。本研究使用 8 mm 厚的滑刀式开沟器进行扩沟,并在其正后方焊接窄扁形金属导种管。导种管与开沟器等宽,内部中空,壁厚 0.6 mm,与滑刀式开沟器、主动开沟刀具共处同一竖直平面,确保能将羊草种子送入种沟。

开沟器与地表垂直线的夹角设定为 30°,以确保作业过程中刃口对土壤能产生滑切效应,降低作业阻力并减少对土层的二次扰动。通过该开沟导种方案,可形成符合羊草补播需求的合理种床结构。作业后形成的种床示意图如图 9 所示。

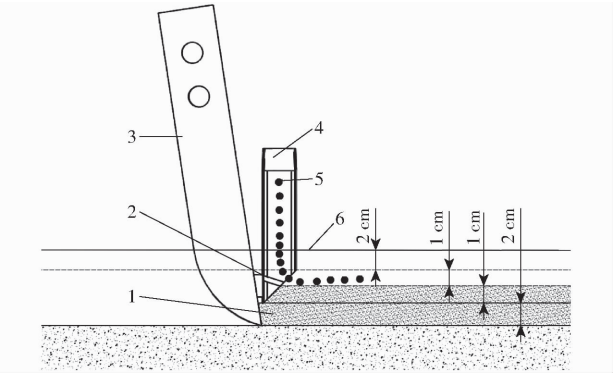


图 9 作业后形成的种床示意图

Fig. 9 Schematic of seedbed formed after operation

1. 回土层 2. 挡土舌 3. 开沟器 4. 导种管 5. 牧草种子 6. 地平线

3.4 低扰动开沟补播单体设计

根据提出的草地补播低扰动复式开沟工艺,低扰动开沟单体需同时满足主动开沟、扩沟导种及覆土镇压的复式作业要求。因此,将主动开沟装置、扩沟导种装置和覆土镇压装置集成至同一作业单体,并尽可能缩小各装置之间的距离,同时确保所有作业部件的中心位于同一竖直平面上。为保证作业深度的一致性,该作业单体需配备限深轮及仿形装置。低扰动开沟补播单体结构示意图如图 10 所示。

主动开沟装置的刀轴与限深轮共用同一回转中心,并通过仿形装置配合限深轮使作业深度始终保持在 60 mm。由于刀轴与限深轮的转速差距非常大,所以在二者之间安装大载荷带密封圈深沟球轴承,实现差速旋转。整个主动开沟回转部分通过方形带座轴承固定在单体侧板上,并在侧板上预留拆卸槽,提高拆装便捷性。仿形装置安装在低扰动开沟补播单体的正上方,通过调节内连接杆来改变仿形弹簧的初始弹力,可根据不同地表坚实度手动调节单体对地表的压力。

扩沟导种装置安装在主动开沟刀具正后方 10 cm 处,并与主动开沟刀具处于同一竖直平面内。

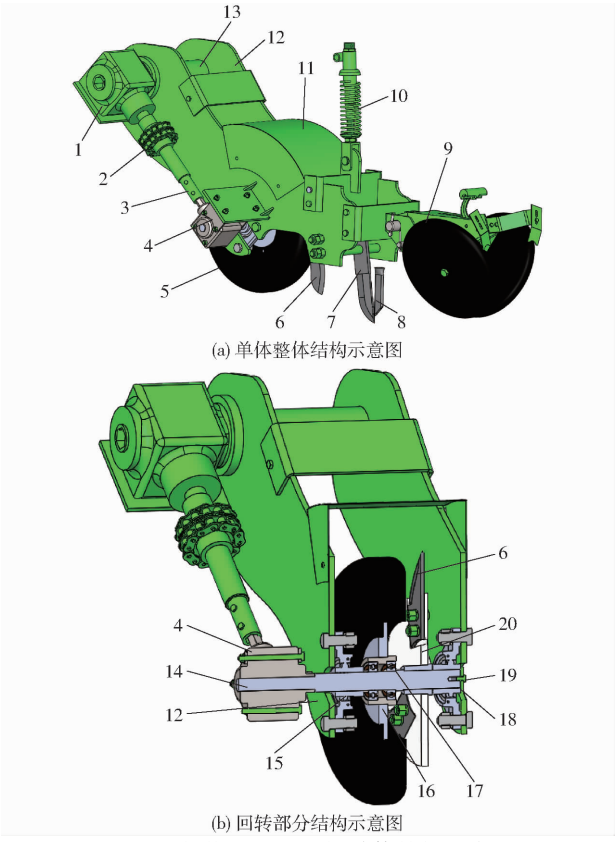


图 10 低扰动开沟补播单体结构示意图

Fig. 10 Structural schematics of low-disturbance furrowing and reseeding unit

1. T 型齿轮箱 2. 靠背轮联轴器 3. 内六方轴套 4. L 型齿轮箱 5. 限深轮 6. 主动开沟刀具 7. 滑刀式开沟器 8. 导种管 9. V 型镇压轮 10. 仿形装置 11. 回转部件护罩 12. 侧板 13. 支撑套筒 14. 刀轴 15. 方形带座轴承 16. 轮毂 17. 深沟球轴承 18. 轴端挡圈 19. 轴端顶丝 20. 刀盘

避免与主动开沟刀具发生干涉的同时尽可能靠近主动开沟刀具,避免作业过程中因单体晃动而导致的扩沟导种沟缝偏离主动开沟沟缝,减小对地表的扰动。覆土镇压装置位于扩沟导种装置的正后方,两个镇压轮的作业中线与主动开沟刀具作业后的沟缝对齐,内置张紧弹簧,确保作业过程中镇压轮始终紧贴地表。

低扰动开沟补播单体动力传递路线如下:拖拉机动力通过 T 型齿轮箱输入,其内六方通孔作为动力输入端,底部花键轴作为动力输出端,靠背轮联轴器将 T 型齿轮箱输出轴与内六方轴套连接,内六方轴套与 L 型齿轮箱输入轴转动配合,带动输出轴及刀轴旋转,实现开沟刀具的作业。传动系统简图如图 11 所示。

3.5 草地补播机低扰动开沟单体总体设计

低扰动开沟补播单体动力输入六方轴的回转中心与单体仿形的回转中心一致,作业时以支撑套筒为回转中心,配合仿形装置及限深轮,整个单体可实现精准仿形功能,支撑套筒内径大于六方传动轴,六

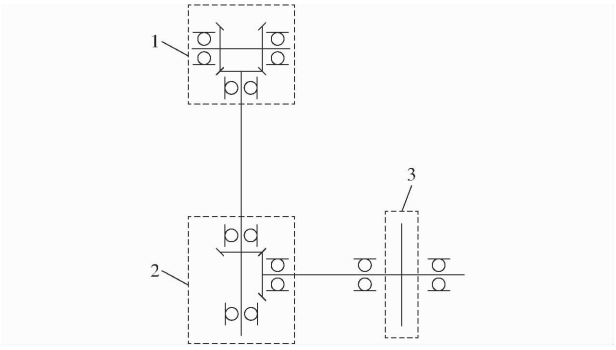


图 11　单体传动系统简图

Fig. 11　Schematic of unit drive system

1. T 型齿轮箱　2. L 型齿轮箱　3. 主动开沟刀具

方传动轴为整机总传动轴，为各单体提供动力输入。单体在草地补播机上的挂接示意图如图 12 所示。

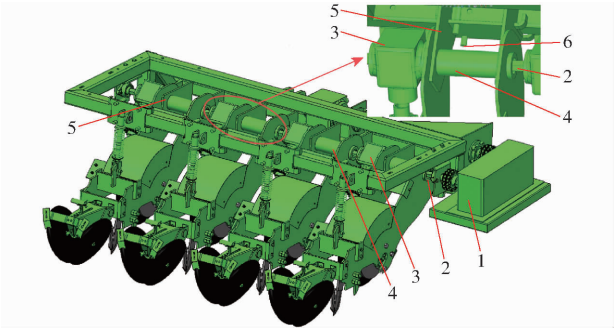


图 12　单体挂接示意图

Fig. 12　Schematic of unit attachment

1. 卧式圆柱齿轮箱　2. 六方传动轴　3. T 型齿轮箱　4. 支撑套筒　5. 前悬挂架　6. U 型螺栓

整机采用机械传动方式，由齿轮箱与传动轴进行动力传递。机械传动方式具有恒定的传动比，运行可靠，所有齿轮均封闭于齿轮箱体内，可有效防止灰尘进入，降低发热量及功率损耗，并可直接通过拖拉机后输出轴控制作业转速。整机传动系统简图如图 13 所示。

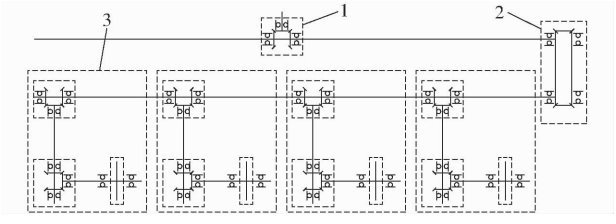


图 13　整机传动简图

Fig. 13　Schematic of transmission system of entire machine

1. L 型齿轮箱　2. 卧式圆柱齿轮箱　3. 低扰动开沟补播单体传动系统

整机传动系统包含大部分齿轮传动，齿轮传动存在机械损耗，其传动效率一般在 90% ~98% 之间[28]。卧式圆柱齿轮箱内含 3 对圆柱齿轮，L 型齿轮箱内含 1 对齿轮。由于拖拉机后输出轴转速能够满足作业需求，所有齿轮箱的传动比均设定为 1∶1。

根据课题组前期预试验研究，单刀最大切土扭矩为 350 N·m。整机共安装了 4 个低扰动开沟单体，每个单体安装 3 把主动开沟刀具，刀具呈螺旋状排列，如图 14 所示。

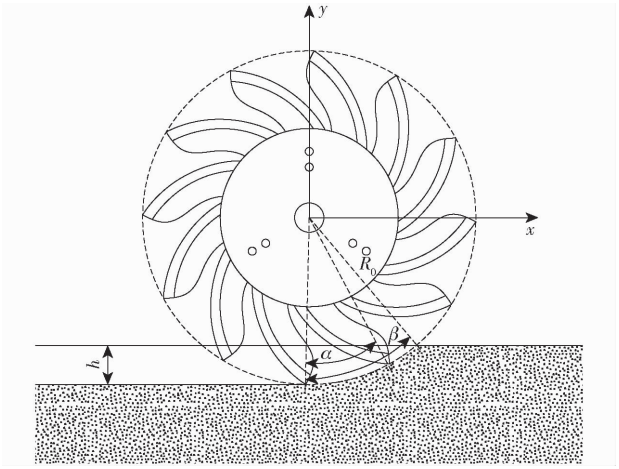


图 14　刀具排列状态示意图

Fig. 14　Schematic of blade arrangement

根据图中的几何关系，作业过程中从刀具入土到完成切土的角度 β 公式为

$$\cos\beta = \frac{R_0 - h}{R_0} \tag{7}$$

本研究中刀尖点回转半径为 260 mm，刀齿作业深度为 60 mm，计算得到 $\beta = 39.7°$。图 14 中每两把刀齿之间的间隔 α 为 30°，因此会出现两把刀齿同时入土的现象，但不会出现 3 把刀齿同时入土的情况。基于此，卧式圆柱齿轮箱所需的最大输出扭矩为 700 N·m。计算得出整个动力系统所需的输入扭矩为

$$T_i = \frac{T_o}{\eta_t} \tag{8}$$

其中

$$\eta_t = \eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 \tag{9}$$

式中　T_i——输入扭矩，N·m

T_o——输出扭矩，N·m

η_t——总传动效率

η_1、η_2、η_3、η_4——每对齿轮的传动效率，取 95%[30]

代入数值计算得 $\eta_t = 81.45\%$，输入扭矩为 859.42 N·m。输入功率 P 为

$$P = \frac{T_i n_i}{9\,550} \tag{10}$$

式中　n_i——输入转速，r/min

计算得最大输入功率为 64.79 kW，大多数拖拉机的后输出轴均可满足该功率和转速需求，因此该传动方式可行。

工作时，草地补播机由拖拉机牵引向前进行作业，动力传递系统通过拖拉机后输出轴将动力传输

至各低扰动开沟补播单体的刀轴,驱动刀轴上的主动开沟刀具旋转,实现主动开沟作业。主动开沟刀具后紧跟着滑刀式开沟器进行扩沟播种,最后通过V型镇压轮完成覆土镇压,完成高坚实度退化草地的低扰动补播作业。整机共有4个低扰动开沟补播单体,每个单体配备单独的仿形系统,由于开沟刀具采用主动贯入土层的方式,作业过程中对沟缝周围的土壤会产生一定微扰动作用,使沟缝两侧的土壤坚实度降低,从而优化种床环境,有利于牧草种子的萌发与生长。

草地低扰动补播机的主要技术参数如表2所示。

表2 草地低扰动补播机主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of low-disturbance grassland reseeding machine

参数	数值
工作幅宽/mm	2 100
开沟补播行距/mm	500(可调)
开沟补播行数/行	4(可调)
开沟宽度/mm	6~8
配套功率/kW	≤70
开沟深度/mm	60
播种深度/mm	20~30

4 田间试验

4.1 试验设计

为验证所提出草地补播低扰动复式开沟工艺的可行性,对草地补播机进行了试制加工,如图15a所示。同时为进一步检验所设计低扰动开沟单体的各项技术参数是否满足要求,开展了田间试验,其试验现场如图15b所示。



(a) 2QBC-2.1型草地补播机 (b) 作业现场

图15 草地低扰动补播机田间试验

Fig. 15 Field test of low-disturbance grassland reseeding machine

试验地点位于内蒙古呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站(北纬49°20′26″,东经120°0′02″,海拔627~635 m)。该区域属于羊草草甸草原,主要建群种及优势种为羊草[29]。

采集试验区的土壤物理特性参数,对试验地的坚实度、容重、含水率和孔隙度进行测定。随机选取试验区内5个取样点,分别在0~5 cm和5~10 cm深度处采集土样。土壤容重使用环刀法[30]测定,含水率使用烘干法[31]测定,并计算土壤孔隙度[32]。试验地不同深度土层的土壤物理特性参数如表3所示。

4.2 试验装置与方法

试验所用装置为2QBC-2.1型草地补播机,试验前对拖拉机的前进速度及后输出轴转速进行标定,使低扰动开沟单体的刀轴转速保持在254 r/min,拖拉机的前进速度为1 m/s。试验时,首先拆除2QBC-2.1型草地补播机左侧两个单体上的V型镇压轮,以对比有无V型镇压轮情况下的作业效果。随后将V型镇压轮全部安装,检测低扰动开沟单体的作业效果。

表3 试验地不同深度土层的土壤物理特性参数

Tab.3 Soil physical characteristic parameters of soil layers at different depths in experimental field

土层深度/cm	坚实度/kPa	容重/(g·cm^{-3})	含水率/%	孔隙度/%
0~5	2 320.43±905.22	0.91±0.05	18.24±4.18	65.89±2.66
5~10	3 696±583.99	0.92±0.07	19.73±5.37	65.23±3.03

试验方法参考DG15/Z 007—2019《草原切根改良机》,在试验测区内测定一个试验行程,每行测量5个点的开沟深度。测定方法为:切开土层断面,测量沟底至土层表面的距离,并计算其平均值,作为该行的开沟深度,计算开沟深度稳定性系数。

参考GB/T 25421—2010《牧草免耕播种机》,测量试验测区内被破坏的地表面积占总面积的百分比,以评估开沟作业时对草地地表的扰动程度。测定方法如下:在样本地块中,测区长度设定为20 m,宽度为机具的工作幅宽(2.1 m)。在测区内每隔5 m画一条垂直于机具行进方向的测量线,并分别测量该测量线与作业沟缝处的沟宽,计算切根补播沟缝宽度及地表破坏率

$$w = \frac{\sum w_i}{nh_z} \tag{11}$$

$$p = \frac{\sum h_i}{nb} \times 100\% \tag{12}$$

式中 w——切根补播沟缝宽度,mm

w_i——测点i切根补播沟缝宽度,mm

n——测定次数

h_z——作业行数

p——地表破坏率

h_i——每次各行 i 土壤破坏的宽度，mm

b——作业幅宽，mm

4.3　试验结果与讨论

试验后的作业效果如图 16 所示，左侧两条沟缝为拆除 V 型镇压轮后形成的种床，右侧两条沟缝为保留 V 型镇压轮形成的种床。作业后的地表情况表明，未经过 V 型镇压轮镇压过后的种沟明显出现了一条沟缝，且种床裸露在外，而镇压后的地表，种沟均已覆土，有效减少了对天然草地的破坏，增加了种床的蓄水保墒能力，为牧草种子萌发提供了良好的种床环境，实现了天然草地的低扰动开沟补播作业。

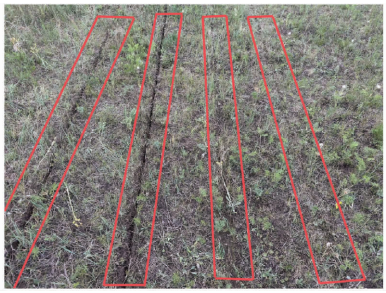


图 16　有无镇压轮作业效果对比图

Fig. 16　Comparison of operational effects with and without press wheels

作业前在试验地随机选取 3 个点进行土壤坚实度测量。为确保数据的准确性，每个点均测量 3 组坚实度数据，其结果见表 4。

表 4　试验地土壤坚实度

Tab. 4　Soil compaction of experimental field

深度/cm	坚实度/kPa			
	取样点 1	取样点 2	取样点 3	平均值
0 ~ 2. 5	2 265. 3 ± 431. 5	1 276 ± 813. 5	2 127. 3 ± 258. 7	1 889. 5 ± 535. 8
2. 5 ~ 5. 0	3 656. 7 ± 398	2 679 ± 1 306. 1	3 150. 7 ± 313	3 162. 1 ± 489
5. 0 ~ 7. 5	3 748. 7 ± 368. 7	4 243. 3 ± 157. 9	3 599. 3 ± 397. 1	3 863. 8 ± 337. 1
7. 5 ~ 10	3 406 ± 372. 2	4 415. 7 ± 359. 9	3 392. 3 ± 590	3 738 ± 586. 9

表中不同土层深度的坚实度平均值表明，该试验地整体土壤坚实度较高。同一作业深度下的显著性分析结果显示，各取样点天然草地的坚实度差异不显著。然而，受拖拉机碾压和牲畜践踏等外部因素影响，天然草地局部区域的坚实度可能高于其他区域。低扰动开沟单体的作业效果如图 17 所示。

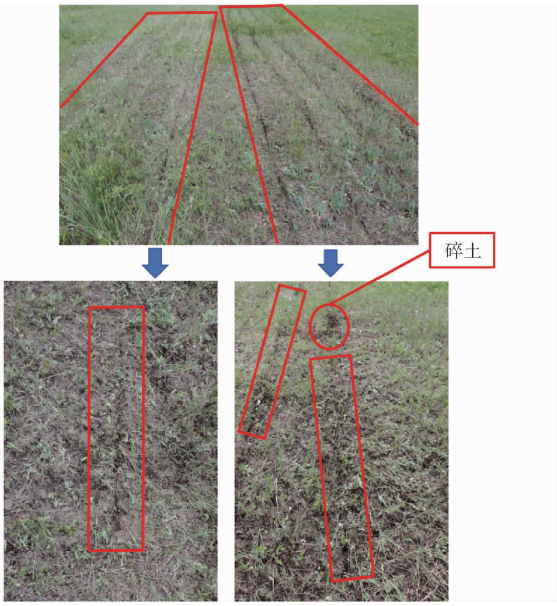


图 17　低扰动开沟单体作业效果

Fig. 17　Operation effect of low-disturbance furrowing unit

试验结果表明，作业后的草地无翻垡，沟缝完整且无明显扰动痕迹，部分地表出现极少量的碎土。分析其原因是由于局部土壤坚实度较低，土壤-根系复合体整体被拉扯出来，对地表扰动较大，而在坚实度较高的草地中，土壤-根系复合体的内聚力较强，刀具作业时以滑切方式破坏土壤-根系复合体结构，减小了对地表的扰动。田间试验作业效果表明本研究提出的草地补播低扰动复式开沟工艺及与之配套的低扰动开沟单体在高坚实度的退化草地上作业效果较好。

为定量评价低扰动开沟单体对地表的破坏程度，依据 4.2 节所述方法，对安装 V 型镇压轮作业后的开沟深度和沟缝宽度进行了测量，并计算了开沟深度稳定性系数及地表破坏率，分别为：开沟深度（63. 9 ± 5. 3）mm，开沟深度稳定性系数（91. 39 ± 0. 9）%，沟缝宽度（7 ± 2. 1）mm，地表破坏率（1. 33 ± 0. 08）%。

试验结果表明，草地补播机低扰动复式开沟单体能够有效实现草地低扰动作业，且开沟深度可稳定保持在 63 mm 左右，其开沟深度稳定性系数为 91. 39%。作业后草地表面无明显破坏痕迹，平均开沟宽度为 7 mm，地表破坏率仅为 1. 33%。所提出的“主动开沟—扩沟播种—V 型镇压”草地补播低扰动复式开沟工艺对草地地表破坏程度极小，所研制的草地补播机低扰动复式开沟单体可实现天然草地低扰动补播作业。

5 结论

(1)针对退化草地补播改良作业实际需求,提出了“主动开沟—扩沟播种—V 型镇压”的草地补播低扰动复式开沟工艺,即首先通过主动开沟刀具打破坚实的草地地表土壤-根系复合土层,然后使用滑刀式开沟器进行扩沟补播,最后通过 V 型镇压轮完成覆土和镇压,基于该工艺可实现补播作业过程中对草地地表破坏程度非常小。

(2)基于草地补播低扰动复式开沟工艺,设计了草地补播机低扰动复式开沟单体。主动开沟装置、扩沟导种装置和覆土镇压装置的中心位于同一竖直平面上,且按从前到后的顺序依次排列。仿形装置位于低扰动开沟单体的正上方,整个单体以支撑套筒为回转中心,配合仿形装置及限深轮可实现精准仿形功能。传动系统位于单体的左侧,通过齿轮箱将动力传递至刀轴,驱动主动开沟刀具旋转。

(3)田间试验结果表明,退化草地低扰动复式开沟单体作业后构建的种床深度为 0 ~ 63 mm,宽度为 7 mm,开沟深度稳定性系数达到 91.39%,地表破坏率仅为 1.33%,满足退化草地低扰动补播改良的作业需求。

参 考 文 献

[1] 国家林业和草原局. 2022 年中国国土绿化状况公报[EB/OL]. (2023 - 03 - 20)[2026 - 05 - 14]. https://www.gov.cn/xinwen/2023 - 03/20/content_5747510.htm.

[2] 潘丰十,牛香,郭珂. 呼伦贝尔市典型生态产品禀赋与价值化实现路径优化[J]. 林业科学,2024,60(12):146 - 157.
Pan Fengshi, Niu Xiang, Guo Ke. Typical ecological product endowment and optimized value realization pathways of Hulunbuir City[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024,60(12):146 - 157. (in Chinese)

[3] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546 - 1555.
Zhang Yingjun, Zhou Jiqiong, Yang Gaowen, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands[J]. Chinese Science Bulletin, 2020,65(16):1546 - 1555. (in Chinese)

[4] Scotton M, Ziliotto U. Long-term patterns of grassland vegetation and species richness in a full-factorial NPK fertilization experiment[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167555.

[5] Li Tong, Cui Lizhen, Scotton M, et al. Characteristics and trends of grassland degradation research[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(7): 1901 - 1912.

[6] Zhou Chan, Xia Hainan, Yang Tingting, et al. Grassland degradation affected vegetation carbon density but not soil carbon density[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 719.

[7] 张学宁,尤泳,王得伟,等. 板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1):135 - 146,164.
Zhang Xuening, You Yong, Wang Dewei, et al. Design and experiment of root-cutting and subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(S1):135 - 146,164. (in Chinese)

[8] 徐晓莹,沈有信,袁闯,等. 昭通南方草地本地物种群落特征对耕耙与补播处理的响应[J]. 草地学报,2023,31(8):2481 - 2489.
Xu Xiaoying, Shen Youxin, Yuan Chuang, et al. Responses of native grass communities to tillage and seed sowing treatments in Zhaotong,Southern China[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(8):2481 - 2489. (in Chinese)

[9] Mi Wentao, Zheng Hao, Chi Yuan, et al. Reseeding restoration significantly improves the physical and chemical properties of degraded grassland soil in China-a meta-analysis[J]. CATENA, 2025, 252: 108849.

[10] Aldoshin N V, Vasiliev A S, Kudryavtsev A V, et al. Improvement of forage lands in Central Non-Black Earth Zone of Russia by using some integrated approaches[J]. Plant Science Today, 2021, 8(1): 9 - 15.

[11] Lemken. Solitair 8 + [EB/OL]. [2026 - 05 - 14]. https://lemken.com/en-en/agricultural-machines/sowing/seed-drills/pneumatic-seed-drills/mounted-rigid-seed-drills/solitair-8-solitair-9/solitair-8.

[12] John Deere. CS13 Series[EB/OL]. [2026 - 05 - 14]. https://www.deere.com/en/attachments-accessories-and-implements/utility-tractors-attachments-accessories/seeding-equipment/cs13-conservation-seeder/.

[13] Great Plain. 1006NT DRILL[EB/OL]. [2026 - 05 - 14]. https://www.greatplainsag.com/en-gb/products/771/1006nt-drill.

[14] Flexi-Coil. 5000HD Air Drill[EB/OL]. [2026 - 05 - 14]. https://www.flexicoil.com/products/air-drills.

[15] 王江浩. 9MB - 4.0 型牧草免耕播种机关键部件设计分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
Wang Jianghao. Design and analysis of key components of 9MB - 4.0 forage no-tillage seeder[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2022. (in Chinese)

[16] 徐万宝. 9MSB - 2.10 型草地免耕松播联合机组的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(7): 115 - 117.
Xu Wanbao. Study on the 9MSB - 2.10 grassland no-tillage combination[J]. Transactions of the CSAE,2001,17(7):115 - 117. (in Chinese)

[17] 张学宁,尤泳,王昭宇,等. 板结羊草地折翼式松土铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):213 - 221.

Zhang Xuening, You Yong, Wang Zhaoyu, et al. Optimization design and experiment of folded-wing subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 213 – 221. (in Chinese)

[18] Keitaro Y, Hidetoshi I, Norifumi H, et al. Effect of sprouting and corresponding root distribution of the shrub species Eurya japonica on slope stability[J]. CATENA, 2024, 238: 107869.

[19] He Changbin, You Yong, Wang Decheng, et al. An experimental investigation of soil layer coupling failure characteristics on natural grassland by passive subsoiler-type openers[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 60(2): 293 – 302.

[20] He Changbin, You Yong, Wu Hongjian, et al. Effects of different geometrical structures on the soil disturbances and working resistances of very narrow tines applied on natural grassland[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2021, 64(2): 23 – 32.

[21] 贺长彬. 天然草地土壤-根系复合体与窄齿类耕作部件作用关系研究[D]. 北京：中国农业大学，2018.
He Changbin. Interaction relationship research of soil-root composite and narrow tillage tools on natural grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[22] You Yong, Wang Decheng, Liu Jude. A device for mechanical remediation of degraded grasslands[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 118: 1 – 10.

[23] 张浩然. 基于扰动试验的开沟部件与草地复合土层相互作用关系研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2024.
Zhang Haoran. Study on the interaction relationship between tillage openers and grassland composite soil layer based on disturbance experiments[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[24] 王昭宇，尤泳，贺长彬，等. 退化羊草地切根释压松土工艺研究与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(12)：404 – 417.
Wang Zhaoyu, You Yong, He Changbin, et al. Research and experiment on loosening soil by cutting roots to release pressure for degraded *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 404 – 417. (in Chinese)

[25] 尤泳，王德成，王光辉. 9QP – 830 型草地破土切根机[J]. 农业机械学报，2011，42(10)：61 – 67.
You Yong, Wang Decheng, Wang Guanghui. 9QP – 830 soil-gashing and root-cutting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 61 – 67. (in Chinese)

[26] 杨秀丽，陈彬，邢航，等. 滑刀开沟-气力引射式液肥雾化侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(16)：13 – 25.
Yang Xiuli, Chen Bin, Xing Hang, et al. Design and experiments of the side-deep fertilization device with sliding-knife furrow opener and pneumatic ejector for a liquid fertilizer atomizer[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 13 – 25. (in Chinese)

[27] 梁方. 草地切根施肥补播复式改良机械的优化设计与试验研究[D]. 北京：中国农业大学，2015.
Liang Fang. Optimization design and experiment study on root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[28] 濮良贵，陈国定，吴立言，等. 机械设计[M]. 北京：高等教育出版社，2019.

[29] 陈思思，王淼，张楚，等. 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料，2023(11)：16 – 24.
Chen Sisi, Wang Miao, Zhang Chu, et al. Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(11): 16 – 24. (in Chinese)

[30] NY/T1121.4—2006　土壤检测第 4 部分：土壤容重的测定[S].

[31] NY/T1121.3—2006　土壤检测第 3 部分：土壤机械组成的测定[S].

[32] 吕英华，秦双月. 测土与施肥[M]. 北京：中国农业出版社，2002.