doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.009

基于草原鼢鼠爪趾曲线的羊草草地松土铲设计与试验

贺长彬[1,2]　姚　一[1]　郭艳颖[1,3]　袁　帅[4]　周建成[5]　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. 内蒙古农业大学草业学院, 呼和浩特 010018;
5. 内蒙古宏昌机械制造有限公司, 呼和浩特 010200)

摘要: 为解决松土部件在羊草草地疏松作业时存在的作业阻力大、疏松效果差等问题,基于鼢鼠前爪中趾内侧曲线轮廓,设计仿鼢鼠爪趾型一体式松土铲并进行田间性能试验。在此基础上,为提升松土铲疏松效果,设计了仿生翼型松土铲,并以铲翼安装高度、铲翼开角和铲翼倾角为试验因素,土壤扰动截面积、翻垡率和耕作阻力为评价指标,进行了铲翼结构参数优化试验,得到了最佳参数组合,进行了田间试验。试验结果表明,仿生松土铲能显著降低草地疏松作业过程中的阻力,仿生翼型松土铲具有较好的草地土壤疏松效果,铲翼的安装高度和铲翼倾角对于松土铲的作业阻力和土壤扰动的综合影响权重占比较大,最优结构参数组合为:铲翼开角 105°、铲翼倾角 20°、铲翼高度 5 cm,此时仿生翼型松土铲的作业阻力为 5 501.38 N,土壤扰动系数为 68.7%,翻垡率为 9.7%,相较于优化前,土壤扰动系数增加了 31.6%。研究结果为研制草地改良专用松土部件提供了技术支撑和数据支持。

关键词: 草地改良; 松土铲; 草原鼢鼠爪趾曲线; 耕作阻力; 土壤扰动

中图分类号: S221　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0103-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Bionic Subsoiler for *Leymus chinensis* Grasslands Based on Claw-toe Curve of *Myospalax aspalax*

HE Changbin[1,2]　YAO Yi[1]　GUO Yanying[1,3]　YUAN Shuai[4]　ZHOU Jiancheng[5]　BAO Pengyu[1]

(1. *College of Mechaical 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. *College of Grassland Science*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*
5. *Inner Mongolia Hongchang Machinery Manufacturing Co., Ltd.*, *Hohhot* 010200, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of high operational resistance and poor loosening effectiveness of soil loosening components during the cultivation of *Leymus chinensis* grasslands, a claw-toe-shaped integrated subsoiler and a biomimetic wing-shaped subsoiler were designed based on the inner curve profile of the middle toe of *Myospalax aspalax*. Field test was conducted to validate the operational performance. Building on this, a biomimetic wing-shaped subsoiler was developed to enhance the loosening effect, and an optimization experiment on the structural parameters of the shovel wings was carried out, the installation height of shovel wings, opening angle of wings, and tilt angle of wings were selected as experimental factors, the evaluation indicators included soil disturbance area, turnover rate, and cultivation resistance. The experimental results indicated that the biomimetic subsoiler significantly reduced the resistance during the grassland loosening operation, and the biomimetic wing-shaped shovel demonstrated a good soil loosening effect. The installation height and tilt angle of the wings had a substantial impact on the overall operational resistance and soil disturbance. The optimal structural parameter combination was found to be: wing opening angle of 105°, wing tilt angle of 20°, and wing

收稿日期: 2025-09-02　修回日期: 2025-09-16

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS05001)、国家自然科学基金项目(52465032)、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

installing height of 5 cm, the biomimetic wing-shaped shovel operation resistance was 5 501.38 N, soil disturbance factor was 68.7%, over-turning rate was 9.7%, compared with before optimization, the soil disturbance factor was increased by 31.6%. These findings provided technical supports and data for the development of specialized soil loosening components for degraded grassland improvement.

Key words: grassland improvement; subsoiler; curve of myospalax claw-toes; tillage resistence; soil disturbance

0 引言

羊草因其抗寒、耐盐碱和节水等特性,在防风固土、涵养水源和恢复退化草原等多方面发挥着重要的生态功能,是草甸草原和典型草原的重要建群种和优势种,也是开展退化草地生态修复和建立永久性人工草地的优选乡土草种[1]。近些年,随着天然草原修复和人工草地建设的推进,羊草草地覆盖面积正逐年增加。羊草具有发达的根系网络,易与土壤相互锚固,形成一种紧实的土壤-根系复合土层结构,这种结构易导致土层通气和透水能力变差,引起土层物化性质的改变[2-3],进而抑制牧草生长,是导致草地退化的主要因素之一,在部分种植密度较大的人工草地,该现象尤为明显[4]。通过机械化深松作业,疏松草地板结土层,改善土壤通透性,是恢复板结性退化羊草草地的有效手段之一[5-8]。

目前,机械化深松技术方面的研究主要围绕松土工艺优化和松土铲结构优化设计两方面展开。其中,松土铲作为关键部件,其结构参数直接影响松土作业效果。近年来,国内外学者从降低作业阻力和提升松土效果两个角度出发,一方面利用振动[5]、润滑[9]和曲线拟合[10]等方法,综合作业过程中力学传感器采集到的数据和作业后观测到的沟形、土壤失效区域以及地表状态等结果,对松土铲的铲柄结构[11-14]、铲柄曲线[10,15]和铲翼参数[16-19]等进行优化设计研究;另一方面,结合仿生学原理,通过模拟生物的形态轮廓和体表特征,如松鼠[20]、鼹鼠[21]、鲨鱼[22]等,对松土铲等触土部件结构进行优化设计[23],并对其作业性能进行对比验证[24]。

围绕松土铲结构优化设计方面的研究仍多数集中在农田作业方面,在草地土壤疏松技术方面,部分学者主要围绕深松部件与草地土层之间的互作关系开展了相关的研究,并在此基础上,针对松土铲铲尖部分开展了结构优化设计[14,17,25-26]。从现有的研究可以看出,进行草地疏松作业时,实现对退化草地进行松土作业改善土壤环境的同时避免草地的二次破坏仍是本领域的关键技术难点。草地松土改良农艺要求与松土部件融合度不高,松土作业阻力大,松土部件对草地地表破坏程度大,以及松土效果不理想等仍是草地疏松作业过程中需要持续关注的技术问题[15]。

因此,为进一步解决草地松土改良过程中出现的作业阻力大、土壤扰动大等问题,本文从羊草草地疏松技术需求入手,依托草地切缝疏松复式作业工艺,重点结合仿生技术和逆向工程技术,设计一种仿草原鼢鼠爪趾曲线型松土铲,并对松土铲关键结构参数进行优化,以期为羊草草地高质量松土改良作业提供技术支持。

1 羊草草地疏松作业技术需求

多年生的羊草草地土层结构具有以下特点:

(1)草地地下具有复杂的根系网络,纵横交错的根系与土壤锚固,形成复合土层结构,影响土层的通透性。

(2)羊草地上部分在地表形成枯落物层,对于人工羊草草地该现象尤为明显,同时,在自然因素(如风吹雨淋)的作用下,枯落物层一部分浸入表层土壤,一部分停留在地表。

因此,在进行羊草草地疏松作业时,需要综合考虑以上两点,作业过程中应能有效破除板结性根土复合土层结构,减少作业阻力,同时也要减少地表土壤扰动,作业后的草地土壤仍能维持原生地貌特征与生态功能,保护原生植被和土壤环境。

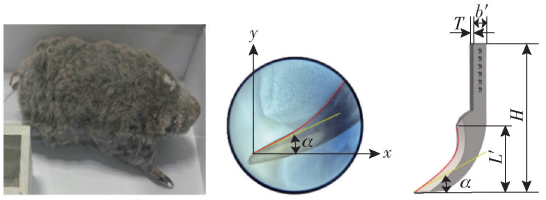
2 仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲设计与试验

2.1 仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲设计

鼢鼠(*Myospalax fontanieri*)主要栖息在草原、农田以及灌丛、半荒漠地区的草地上,属于典型的土壤洞穴动物[27]。鼢鼠前爪发达,挖掘能力强,中趾(第3趾)最长,在挖掘洞道的过程中起到重要作用[28]。在挖掘土壤过程中,爪趾的运动方式以水平运动为主,通过爪趾的移动切碎土壤,与松土作业原理相似[29]。因此,本文以草原鼢鼠前爪中趾为设计原型,将其前爪趾轮廓特征曲线应用于松土关键部件的设计中。

为精准拟合草原鼢鼠爪趾特征,基于逆向工程原理[30],选用内蒙古农业大学草业学院的草原鼢鼠标本(图1a),利用连续变倍显微镜对草原鼢鼠前爪中趾进行观察,并拍摄侧向高清图像(图1b),利用Matlab软件编写程序,调用其形态学数字图像处理

功能，对整个鼢鼠爪趾图像进行灰度和二值化等处理，对其内轮廓边缘进行曲线提取，提取部分如图 1b 中红色曲线，并存储爪趾的边缘轮廓坐标。



(a) 鼢鼠标本　(b) 鼢鼠爪趾　(c) 一体式松土铲

图 1　仿鼢鼠爪趾曲线的一体式松土铲设计结果

Fig. 1　Design result of integrated subsoiler mimicking curved contour of zokor's claw toe

对提取的边缘轮廓二维数据利用最小二乘法进行拟合，以曲线方程的形式对特征进行进一步描述，通过对比拟合方程系数、决定系数 R^2 以及残差平方和(SSE)，最终选择 7 阶多项式方程拟合中趾内轮廓曲线[29]。利用 OriginPro 软件进行轨迹拟合(图 2)，并获取鼢鼠爪趾内轮廓曲线拟合方程。

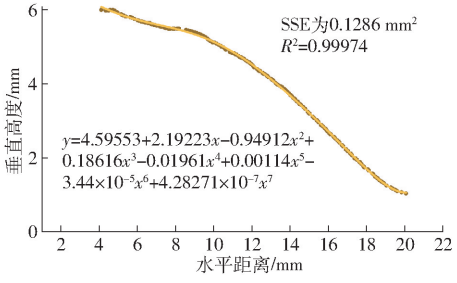


图 2　鼢鼠爪趾内轮廓拟合曲线

Fig. 2　Curve contour of zokor claw

羊草草地根系多分布在地下 5 ~ 15 cm 深度范围内，根据实际作业规律，松土深度一般不小于根土复合层的 1.5 倍[31]，因此松土深度不应小于 22.5 cm，结合目前草地疏松方面的研究过程，将羊草草地的松土部件的作业深度设计为 25 cm。基于草原鼢鼠前爪趾轮廓内侧曲线数学模型，界定 x 的取值范围为 4 ~ 8 mm，得出仿生铲的刃线曲线，由于生成的曲线较短，为此，参考国标中型松土铲柄相关结构参数，将优化曲线进行等比放大 20 倍，建立一体式仿生深松铲三维模型。为更好地模拟草原鼢鼠爪趾切割作用，将仿生刃线由铲柄延伸至铲尖处，形成一体式松土铲，如图 1c 所示，结构参数为：整铲高度 H = 586 mm，刃线高度 L' = 250 mm，宽度 b' = 60 mm，厚度 T = 25 mm，入土角 α = 27°。

2.2　仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲性能试验

2.2.1　试验设计

为验证仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲作业效果，搭建性能测试试验台，选取具有代表性的人工羊草草地进行性能试验，从作业阻力和对土壤的扰动效果两方面进行分析，并选取结构参数与之最为接近的凿型深松铲进行性能对比。

2.2.2　试验区域

试验地点位于内蒙古自治区呼和浩特市赛罕区金河镇曙光村南部的人工草地(40° 38′ 34″ N，111°46′11″E；海拔 1 065 m)。羊草种植密度较大，且连续 3 a 未进行任何草地改良措施(图 3a)。通过对土层剖面进行观测发现，人工羊草草地的根系主要分布在 0 ~ 15 cm，在表层 6 cm 左右深度范围内较为集中(图 3b)，土壤与根系锚固现象明显，有结块产生。



(a) 人工草地　(b) 根系分布

图 3　试验地概况

Fig. 3　Overview of test site

利用丹东百特仪器有限公司的 BT－9300HT 型激光粒度分布仪，对试验地的草地土壤进行粒径分析，结果表明，试验区土壤属于砂质壤土[32]，其中砂粒(粒径 0.05 ~ 2 mm)占 72.86%、粉粒(粒径 0.002 ~ 0.05 mm)占 24.642%、黏粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)占 2.498%。采集并测定试验区 0 ~ 25 cm 草地土层的坚实度、容重、含水率和孔隙度[2]，结果如表 1 所示。

表 1　试验区内草地土层物理特性参数

Tab. 1　Soil physical parameters in test area

深度/cm	容重/(g·cm⁻³)	含水率/%	孔隙度/%	坚实度/kPa
0 ~ 5	1.48 ± 0.10	23.1 ± 3.5	41.0 ± 1.3	793.5 ± 192.5
5 ~ 10	1.59 ± 0.10	20.4 ± 2.2	38.6 ± 2.9	1 319.4 ± 276.5
10 ~ 15	1.64 ± 0.30	16.9 ± 0.6	30.6 ± 1.2	1 798.0 ± 519.8
15 ~ 20	1.73 ± 0.02	21.3 ± 3.2	35.3 ± 0.6	2 958.3 ± 761.3
20 ~ 25	1.74 ± 0.10	19.5 ± 4.4	32.2 ± 2.7	3 622.4 ± 764.6

2.2.3　试验台设计

为满足仿生铲的设计及优化试验需要，设计了一种草地松土部件综合性能试验台，其主要由触土部件、传动机构和耕深调节机构等组成，可同时挂接多种耕作部件，且间距可调，能满足不同触土部件的土层耕作性能试验要求。该试验台的尺寸为 1 480 mm × 2 230 mm × 1 058 mm，作业行距在 300 ~ 800 mm 范围内可调，切缝深度为 60 mm，松土深度在 150 ~ 250 mm 范围内可调。

试验时，利用中国航天空气动力研究院研制的 NJTY3 型三点悬挂测力系统对作业阻力进行测定，拉力传感器量程为 30 kN，将上拉杆传感器和悬挂

销传感器通过三点悬挂安装方式连接在试验台和拖拉机之间。总水平牵引力是由上拉杆传感器和两个悬挂销传感器测得的 3 个水平分力的矢量和,由传感器内部计算得出。传感器采样频率设置为 5 Hz,即每 0.2 s 取一个数据点,整机结构及作业时的传感器及耕作部件布局如图 4 所示。

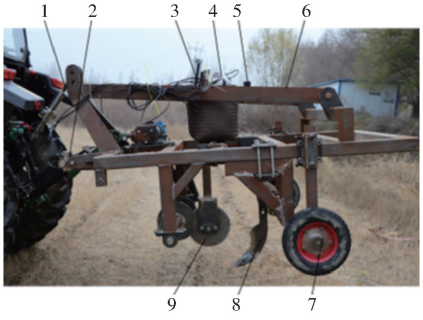


图 4 装置连接图

Fig. 4 Device connection diagram

1. 上拉杆传感器 2. 悬挂销传感器 3. 数据采集器 4. 移动电源 5. GoPro 摄像仪 6. 机架 7. 限深装置 8. 松土铲 9. 切缝装置

2.2.4 试验方案

试验区内以 20 m 为一个作业量程,作业稳定区(松土铲完全入土稳定移动)长度为 10 m,在其前、后各留 5 m 作为缓冲区。在作业稳定区内随机取 3 个点进行数据采集。将被测部件挂接在草地改良综合性能试验台上,使用东方红 Mk704 型拖拉机作为试验台的牵引工具。试验过程中,设定拖拉机行走速度为 3.6 km/h,松土深度设置为 25 cm。

试验前,先拆除图 4 中的单圆盘,只保留松土部件,分别单独牵引凿型深松铲和仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲进行疏松作业,对作业阻力和土壤扰动效果进行对比分析。

2.2.5 评价指标

松土作业后,分析两种松土铲在作业时受到的阻力和对草地土层的扰动情况,以传感器采集的数据作为作业阻力,以扰动参数对扰动情况进行评定和分析。土壤扰动参数主要包括土壤扰动截面积、土壤膨松度、土壤扰动系数和翻垡率。

(1)土壤扰动截面积

土壤扰动截面积可表征受扰动后原土层序列及其形态的变化情况,草地复合土层扰动截面积计算公式为[17,33]

$$A = \left[2\sum_{i=1}^{n} d_i - (d_1 + d_n)\right]\frac{h}{2} \tag{1}$$

式中 A——扰动截面积,cm^2

d_i——第 i 个测点的扰动深度,cm

h——相邻 2 个测点的水平间距,取 1 cm

(2)土壤膨松度和土壤扰动系数

土壤膨松度和土壤扰动系数是评价土壤扰动的重要指标[16],土壤膨松度越大说明作业过程中土壤受抬升作用越大,疏松效果越弱。土壤扰动系数越大,说明地下疏松范围越大,疏松效果越强。两者计算公式为

$$P = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{3}$$

式中 P——土壤膨松度,%

A_h——理论沟底曲线与耕作后地表曲线间的剖面面积,cm^2

A_q——理论沟底曲线与耕作前地表曲线间的剖面面积,cm^2

γ——土壤扰动系数,%

A_s——实际沟底曲线与耕作前地表曲线间的剖面面积,cm^2

(3)翻垡率

在草地松土作业时,若沟面一侧与沟底的角度大于 100°视为翻垡[16],翻垡率计算公式为

$$F_L = \frac{L_f}{bL} \times 100\% \tag{4}$$

式中 F_L——翻垡率,%

L_f——翻垡的总长度平均值,m

b——耕作部件个数

L——行程长度,m

2.2.6 试验结果

(1)草地土壤扰动特征

凿形铲在单独作业过程中,土层根系没有被切割断裂,而是被拉扯断裂,两侧草地土壤沿机具前进方向交替抬升,在地表未形成明显沟缝,而是左右交替的裂纹。土壤受铲尖推土作用以及铲柄挤压作用向机器前进方向运动,部分土壤受挤压粘结成块翻出至沟缝两侧,少量碎土受重力回填至沟缝内部,整体对地表破坏较大,作业后效果如图 5a 所示。

仿鼢鼠爪趾型的一体式松土铲在单独作业过程中,在一体式结构和仿生曲线的共同作用下,对于亚表层的根系切割能力提升,对地表产生的破坏相对较小,形成的沟缝较为规整,土壤受铲尖挤压力较小,剪切力较大,沟缝两侧并未形成块状黏结,仅有根土复合体和地表枯落物少量堆积并脱落在沟缝两侧,如图 5b 所示。

(2)土壤扰动参数与作业阻力

对作业后沟缝的土壤扰动参数进行测定,结果



(a) 凿型铲　　(b) 仿生铲

图 5　作业效果对比

Fig. 5　Comparison of soil loosening effects

如表 2 所示。结果表明，仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲在土壤扰动参数方面略优于凿形铲，但未有显著性差异。

表 2　土壤扰动参数对比

Tab. 2　Soil disturbance parameters comparison　%

测点序号	凿形铲			一体式松土铲		
	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率
1	7.3	51.1	11.3	7.8	55.6	15.2
2	8.1	52.5	15.1	7.4	53.4	14.3
3	8.3	50.4	18.8	6.5	48.9	12.3
均值	7.9^{a}	51.3^{A}	15.1^{b}	7.23^{a}	52.6^{A}	13.9^{b}

注：组间数据同一分类下不同字母说明通过 Duncan 法在 0.05 的显著性水平下存在显著性差异，下同。

采集传感器数据，得到两种松土铲作业过程中的平均耕作阻力，其中凿形铲阻力为 9 694.27 N，一体式仿生铲的阻力为 7 275.53 N，两种松土铲的平均耕作阻力存在显著性差异，仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲具有一定减阻效果，平均减阻 24.95%。

综合以上结果可以看出，仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲地下疏松效果和地表扰动情况与凿型松土铲基本上能达到相同的效果，但是仿生铲在作业阻力方面具有显著的减阻效果，证明了仿生曲线在减阻方面的优越性。

2.3　切缝疏松复式作业试验

2.3.1　试验设计

由于单独作业对于草地地表破坏程度较大，而相关研究表明复式作业的方式对降低草地地表扰动有积极影响[34]，因此，进一步针对一体式松土铲开展复式作业试验，并从作业阻力和土壤扰动两个方面进行分析。

复式作业部件安装图如图 4 所示，即在松土铲前方安装单圆盘，利用单圆盘较强的入土和剪切特性，先行在草地表层切开一道沟缝，同时切断表层土层根系，其后松土部件对缝跟进，进一步切断余下细小根茎，并打破板结土层，疏松土壤，两道工序协同并行，完成切缝松土复式作业。根据前期试验地勘测，发现羊草根系分布主要集中在深度 6 cm 范围内，故取切缝深度为 6 cm，其余作业参数、作业条件和评价指标等与 2.2 节所述相同。

2.3.2　试验结果

(1) 草地土壤扰动特征

切缝疏松的复式作业效果如图 6 所示。经单圆盘先行切缝后，多数表层根系被切断，仅有部分被圆盘压入沟缝中的细小根系残留，因此，松土铲疏松过程中受根土复合层的影响减弱，形成的沟缝规整，仅有少量碎土翻出至两侧。



图 6　复式作业效果

Fig. 6　Renderings of compound operations

(2) 土壤扰动参数与作业阻力

对作业后沟缝的土壤扰动参数进行测定，结果如表 3 所示。试验结果表明，相较于单独作业方式，复式作业方式在疏松作业后草地地表翻垡率显著降低，这是因为先行切缝使表层根系断裂，减少了疏松作业过程中拉扯根系等现象的发生，降低了翻垡率。

表 3　不同作业方式的土壤扰动参数对比

Tab. 3　Comparison of soil disturbance parameters in different operation modes　%

测点序号	单独作业			复式作业		
	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率
1	7.8	55.6	15.2	6.9	49.1	4.7
2	7.4	53.4	14.3	7.0	52.6	5.2
3	6.5	48.9	12.3	8.3	54.8	6.4
均值	7.23^{a}	52.6^{A}	13.9^{b}	7.4^{a}	52.2^{A}	5.4^{B}

结合传感器数据，对两种作业方式的耕作阻力进行对比分析，其中单独作业方式平均耕作阻力为 7 275.53 N，复式作业方式耕作阻力为 5 261.15 N，可以看出，切缝疏松复式作业方式显著降低了耕作阻力，平均减阻 27.68%。

综合上述试验结果可以看出，采用切缝疏松复式作业方式能有效降低作业阻力和地表翻垡情况，但在草地土层的膨松度和扰动系数方面未能产生显著性影响。若想改善对草地土层的疏松效果，仍需对松土铲进行进一步优化。

3 仿生翼型松土铲设计与试验优化

3.1 仿生翼型松土铲设计

研究表明,双翼型深松铲具有较好的土地疏松效果[35]。为进一步增强对羊草草地土层的疏松效果,在仿鼢鼠爪趾的一体式松土铲的基础上,在两侧增加双翼,参考张学宁等[14]和马文鹏等[15]关于松土铲的设计参数,以及仿鼢鼠爪趾曲线的刃线在前期试验过程中展现出的切割效果,铲翼曲线也采用鼢鼠爪趾曲线,曲线等比例放大 8 倍,铲翼结构如图 7 所示,参数为:铲翼张角 $\beta=65°$,铲翼宽度 $d=50$ mm,铲翼长度 $e=130$ mm,铲翼厚度 $t=8$ mm。

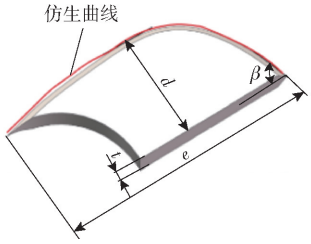


图 7 铲翼结构图

Fig. 7 Structural drawing of shovel wing

3.2 仿生翼型松土铲结构参数优化试验

3.2.1 试验设计

适宜的铲翼结构参数是提高疏松效果的关键,铲翼安装高度的改变直接影响不同深度土壤的各向位移,进而影响扰动范围[36],铲翼倾角和铲翼开角的变化会影响铲形宽度和与土壤互作时的角度,进而影响松土铲作业时的水平阻力和土壤扰动效果[15,37]。为此,本文在确定仿生深松铲柄和铲翼曲线的基础上,进一步围绕 3 种铲翼关键结构参数(铲翼安装高度、铲翼倾角和铲翼开角)进行研究,以获得最佳结构参数组合,结构如图 8 所示。

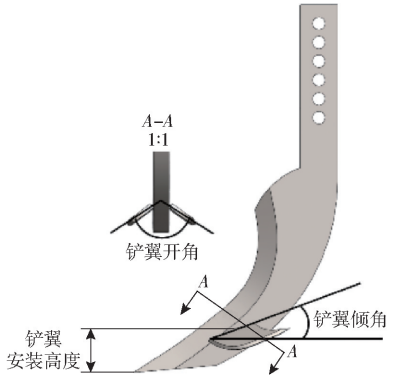


图 8 仿生翼型松土铲结构图

Fig. 8 Structure diagram of bionic wing-shaped loosening shovel

3.2.2 试验方案

由于土壤膨松度和土壤扰动系数均可由土壤扰动面积计算得出,因此,以铲翼开角 X_1、铲翼倾角 X_2 和铲翼安装高度 X_3 为试验因素,以耕作阻力 Y_1、土壤扰动截面积 Y_2 和翻垡率 Y_3 为试验指标,进行基于 Box – Behnken 原理的三因素三水平正交旋转组合试验,建立铲翼各结构参数对于松土性能影响的数学模型。试验因素编码如表 4 所示。

表 4 优化试验因素编码

Tab. 4 Parameter optimization test factors and codes

编码	因素		
	铲翼开角 X_1/(°)	铲翼倾角 X_2/(°)	铲翼安装高度 X_3/cm
–1	100	0	5.0
0	110	15	7.5
1	120	30	10.0

根据编码制作不同结构参数的双翼型仿生松土铲,进行田间试验,试验方案与试验结果如表 5 所示。

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Test scheme and results

序号	因素			Y_1/N	Y_2/cm²	Y_3/%
	X_1/(°)	X_2/(°)	X_3/cm			
1	100	0	7.5	7 086	344	11.6
2	120	0	7.5	6 941	342	11.4
3	100	30	7.5	8 503	473	8.7
4	120	30	7.5	7 515	298	10.4
5	100	15	5.0	6 726	570	6.2
6	120	15	5.0	7 110	421	4.2
7	100	15	10.0	8 503	267	5.5
8	120	15	10.0	6 844	235	3.7
9	110	0	5.0	7 186	272	8.7
10	110	30	5.0	6 974	463	6.5
11	110	0	10.0	6 828	315	8.4
12	110	30	10.0	8 956	373	3.1
13	110	15	7.5	6 660	431	8.2
14	110	15	7.5	6 639	369	6.5
15	110	15	7.5	6 541	350	9.2
16	110	15	7.5	6 408	435	6.6
17	110	15	7.5	6 518	358	5.4

3.2.3 方差分析

使用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,对表 5 中的数据进行多元回归拟合,得到耕作阻力 Y_1、土壤扰动截面积 Y_2 和翻垡率 Y_3 等响应值与铲翼开角 X_1、铲翼倾角 X_2 和铲翼安装高度 X_3 的回归方程为

$$Y_1=41\,024.23-700.06X_1-6.48X_2+1\,307.97X_3-1.41X_1X_2-20.42X_1X_3+15.61X_2X_3+3.84X_1^2+2.55X_2^2+57.424X_3^2 \quad (5)$$

$$Y_2=1\,415.899\,36-8.946\,52X_1+41.139\,69X_2-142.721\,79X_3 \quad (6)$$

$$Y_3 = 87.483\,75 - 0.638\,417X_2 + 0.011\,350X_2^2 - 0.489\,400X_3^2 \quad (7)$$

方差分析结果如表 6 所示，可以看出，在所选因素的水平范围内，根据各因素的 F 值，确定影响耕作阻力的因素从大到小依次为：铲翼倾角、铲翼安装高度、铲翼开角，影响土壤扰动截面积的因素从大到小依次为：铲翼安装高度、铲翼开角、铲翼倾角，影响翻垡率的因素从大到小依次为：铲翼倾角、铲翼安装高度、铲翼开角。

表 6　方差分析

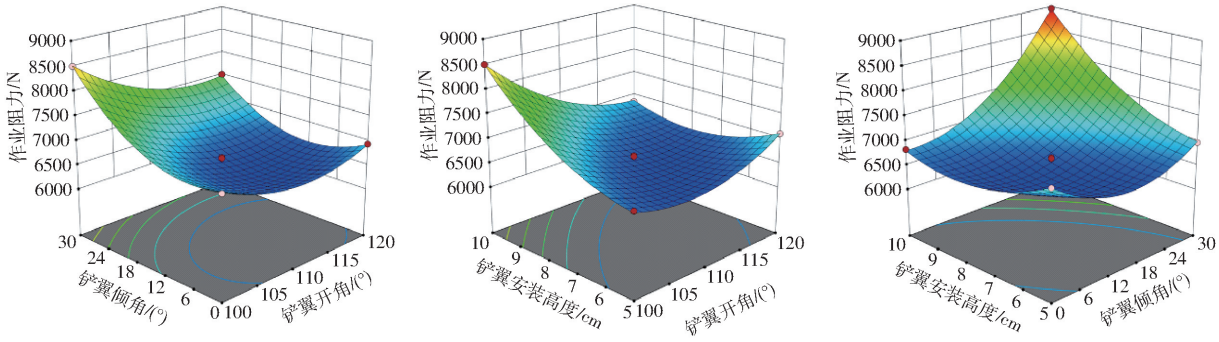
Tab. 6　Analysis of variance

方差源	耕作阻力 Y_1				土壤扰动截面积 Y_2				翻垡率 Y_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	9 281 465	9	156.5	3.1×10^{-7} **	81 257	6	3.6	0.04 *	89	9	4.6	0.03 *
X_1	725 133	1	110.1	1.6×10^{-5} **	15 984	1	4.3	0.07	0.6	1	0.3	0.6
X_2	1 906 978	1	289.4	5.9×10^{-7} **	13 976	1	3.8	0.08	16	1	7.6	0.03 *
X_3	1 227 799	1	186.4	2.7×10^{-6} **	35 982	1	9.7	0.01 *	3	1	1.4	0.3
X_1X_2	177 721	1	26.9	1.3×10^{-3} **	7 491	1	2.1	0.2	0.9	1	0.4	0.5
X_1X_3	1 042 931	1	158.3	4.6×10^{-6} **	3 445	1	0.9	0.4	0.01	1	0.004	0.9
X_2X_3	1 369 965	1	207.9	1.8×10^{-6} **	4 379	1	1.2	0.3	2	1	1.1	0.3
X_1^2	620 015	1	94.1	2.6×10^{-5} **					3	1	1.2	0.3
X_2^2	1 388 083	1	210.7	1.8×10^{-6} **					28	1	12.8	0.01 **
X_3^2	542 366	1	82.3	4.1×10^{-5} **					39	1	18.4	0.004 **
残差	46 122	7			37 266	10			15	7		
失拟	4 837	3	0.2	0.9	30 548	6	3.1	0.2	6	3	0.9	0.5
误差	41 284	4			6 718	4			9	4		
总和	9 327 586	16			118 523	16			104.4	16		

注：$P>0.05$ 表明模型或因素不显著；* 表示影响显著（$0.01<P\leqslant0.05$）；** 表示影响极显著（$P\leqslant0.01$）。

3.2.4　响应面分析

3 种试验因素（铲翼倾角、铲翼开角和铲翼安装高度）的交互作用对双翼仿生松土铲耕作阻力的影响响应曲面如图 9 所示。



(a) X_3=7.5 cm　(b) X_2=15°　(c) X_1=110°

图 9　各试验因素对作业阻力影响的响应曲面

Fig. 9　Response surfaces of each experimental factor to tillage resistance

由图 9a、9b 可知，当铲翼开角增大时，仿生翼型松土铲的耕作阻力表现出先减小再增大的变化趋势。由图 9b、9c 可知，耕作阻力随着铲翼安装高度的增大而增大，耕作部间-土壤互作关系领域的相关研究表明，耕作阻力随着松土铲铲翼安装高度的增加而减小[36]，由于草地与耕地的物理性质不同，越接近草地土壤表层，其根系的密度、粗细等均会增加，团聚在亚表层的根土复合体的锚固效应越强，作业阻力越大，因此图 9b 的耕作阻力增长幅度逐渐增加。图 9c 的耕作阻力随着安装高度的增加先减小后增大。从结果来看，仿生翼型松土铲作业时，受根土复合体阻力增大的程度要大于其随铲翼高度增加而阻力减小的程度。由图 9a、9c 可知，铲翼倾角增大，铲翼从切削土壤逐渐变为切削和推动土壤，导致耕作阻力增大。

采用 Design-Expert 软件多目标优化方法，以尽可能小的耕作阻力和翻垡率的条件下获取较大的土壤扰动截面积为优化目标，以铲翼倾角、铲翼开角和铲翼安装高度为优化对象。据此选取目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \max Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 100°\leqslant X_1\leqslant120° \\ 0°\leqslant X_2\leqslant30° \\ 5\text{ cm}\leqslant X_3\leqslant10\text{ cm} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

求解得到最优参数组合为:铲翼开角 105.261°、铲翼倾角 19.966°、铲翼安装高度 5.06 cm。

4 仿生翼型松土铲田间性能试验

4.1 试验设计

对前文所述的最优参数进行取整(铲翼开角 105°、铲翼倾角 20°、铲翼高度 5 cm),将取整后的仿生翼型铲进行加工制造,利用图 4 所述的试验台,进行草地切缝疏松性能试验,并从作业阻力和土壤扰动两方面,将其与一体式松土铲的草地疏松性能进行对比分析。

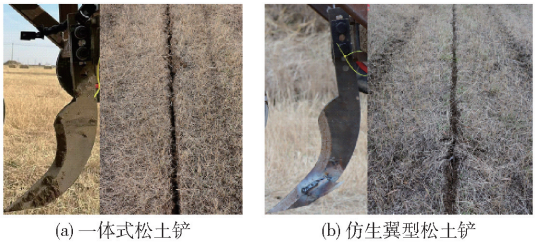
4.2 试验方案

按 2.3 节所述的复式作业将单圆盘部件和松土部件挂接在草地耕作综合试验台上。作业参数、作业条件和评价指标等均与 2.2 节所述相同。

4.3 试验结果与讨论

(1)草地土壤扰动特征

两种松土铲作业后的直观效果如图 10 所示,仿生翼型松土铲在作业过程中,草地土壤被切缝部件先行划开一条窄缝,切断亚表层根系,随后在铲柄的切割和挤压作用下,切断余下深层根系并对窄缝进行扩张,土壤整体向铲柄两侧移动,围绕在铲柄周围的部分土壤受反作用力作用,向铲柄方向移动、堆积、翻转;同时铲柄两侧的铲翼将其上方草地土壤进行抬升,形成轻微隆起,但并未过度抬升而产生翻垡;在这两个相互作用过程中,草地根土复合体板结层因受到侧翼的剪切、抬升作用而失效。



(a) 一体式松土铲 (b) 仿生翼型松土铲

图 10 松土铲作业情况对比

Fig. 10 Comparison of soil loosening shovel operation

当作业深度大于羊草根系分布深度时,其沟底宽度与松土铲的铲翼水平宽度基本一致,根土复合层受两侧铲翼的抬升推动作用,略微隆起,整体失效区域剖面大致呈五边形,其中地下土壤扰动截面大致为倒梯形,如图 11 所示。

为更好体现地下扰动情况,利用土壤坚实度仪对仿生铲作业后的土壤坚实度进行测定,绘制坚实度等高线图,如图 12 所示。可以看出,仿生翼型松土铲的主要土壤扰动范围在中层(10 ~ 20 cm),对于浅层(0 ~ 10 cm)和深层(20 ~ 35 cm)的扰动范围较小。

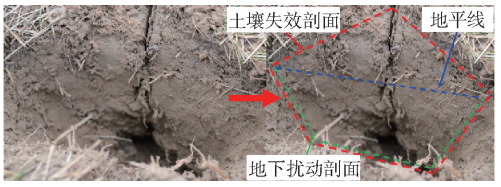


图 11 土壤扰动剖面

Fig. 11 Soil disturbance profile

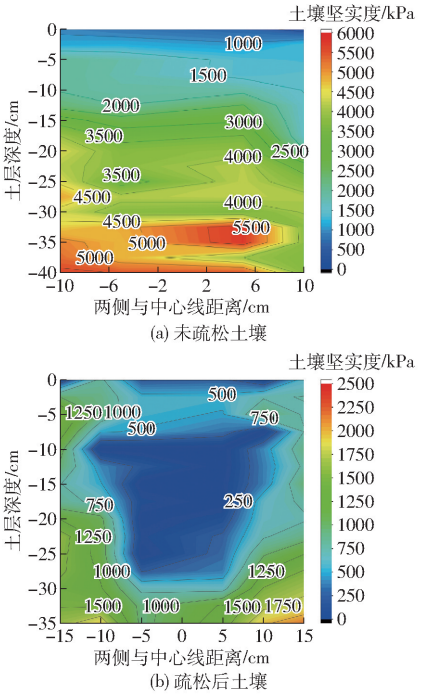


图 12 土壤坚实度等高线剖面图

Fig. 12 Soil compactness contour profile

(2)土壤扰动参数与作业阻力

按前文所述评价指标对作业后的草地土壤扰动参数进行测定,结果如表 7 所示。可以看出,由于在一体式松土铲的基础上增加了双翼,提升了侧向扰动能力,在疏松过程中,地下土壤内部受铲翼的抬升、挤压,以及土壤间的相互扰动等作用,一方面扩大了地下土壤扰动面积,提升了土壤扰动系数,另一方面作业过程中产生的碎土量不断增加,随机具前进翻出至沟缝两侧,翻垡率显著提升,而土壤膨松度略有提升但未出现显著性差异,如何降低仿生翼形松土铲的地表翻垡率仍需进一步研究。

表 7 仿生松土铲与一体式松土铲性能指标对比

Tab. 7 Comparison of evaluation indexes between two bionic subsoilers %

测点序号	仿生翼型松土铲			一体式仿生铲		
	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率	膨松度	土壤扰动系数	翻垡率
1	14.4	71.9	11.3	6.9	49.1	4.7
2	6.9	68.7	9.4	7.0	52.6	5.2
3	5.2	65.4	8.4	8.3	54.8	6.4
均值	8.8[a]	68.7[A]	9.7[A]	7.4[a]	52.2[B]	5.4[B]

根据传感器中的数据得出，一体式松土铲的平均耕作阻力为 5 261.15 N，仿生翼型松土铲的平均耕作阻力为 5 501.38 N，显著性分析表明，仿生翼型松土铲的作业阻力略有增加，但未呈现出显著性差异变化。这与齐关宇等[38]的研究结果有所不同，从原因上分析主要来自两方面，一方面因为仿生翼型松土铲是基于一体式松土铲结构改进的，其铲柄刃线由铲柄延伸至铲尖处，双翼在铲尖刃线略靠后的位置，减小了土壤与铲尖的接触面积，在土壤疏松作业过程中，对于土壤的剪切作用更强，降低了铲翼上方的土壤堆积程度，从而减小了作业阻力，另一方面，复式作业先行切断了表层根系，减弱了根土复合层对于疏松过程的影响，因此两种松土铲的疏松阻力未有显著差异。

5　结论

（1）仿草原鼢鼠爪趾曲线的松土铲能够有效地降低羊草草地土层疏松作业过程中的作业阻力，相比于一体式松土铲，仿生翼型松土铲能够提升土层的侧向运移能力，具有更好的草地土层疏松效果，土壤扰动系数增加了 31.6%。仿生翼型松土铲的铲翼安装高度和铲翼倾角对作业阻力和羊草草地土壤扰动的综合影响权重占比较大，取整后的最佳铲翼结构参数组合为：铲翼开角 105°、铲翼倾角 20°、铲翼安装高度 5 cm。

（2）切缝疏松复式作业方式相比于松土铲单独作业方式，能够显著降低羊草草地松土作业过程中的作业阻力和地表翻垡率，降幅可分别达到 27.7% 和 61.2%，有效降低了地表扰动情况。

参　考　文　献

[1] 内蒙古自治区农牧厅.《内蒙古自治区羊草产业发展规划（2023—2030）》[EB/OL].（2023－06－08）[2025－07－04]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/ghjh/202307/t20230707_2343411.html.

[2] 贺长彬，尤泳，王德成，等. 退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J]. 农业机械学报，2016，47(4)：79－89.
HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 79－89. (in Chinese)

[3] 张学宁，王德成，尤泳，等. 草地切根下根土复合体本构关系研究 [J]. 农业机械学报，2022，53(7)：337－346.
ZHANG Xuening, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Constitutive relationship of soil-root composite based on root-cutting of grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 337－346. (in Chinese)

[4] 焦巍，布库，万其号，等. 复合式羊草切根机的设计研究[J]. 农机化研究，2016，38(6)：132－136.
JIAO Wei, BU Ku, WAN QiHao, et al. Research on compound *L. chinensis* root cutting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(6): 132－136. (in Chinese)

[5] 武广伟，宋建农，李永磊，等. 草地振动式间隔松土机设计与试验[J]. 农业机械学报，2010，41(2)：42－46，41.
WU Guangwei, SONG Jiannong, LI Yonglei, et al. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 42－46, 41. (in Chinese)

[6] DIABATE B, WANG X, GAO Y, et al. Tillage and haymaking practices speed up belowground net productivity restoration in the degraded Songnen grassland [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 62－70.

[7] TANGYUAN N, ZHEN L, HENGYU H, et al. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 223: 105490.

[8] 任伟，王英哲，王志锋，等. 退化羊草草地改良技术[J]. 北方园艺，2019(13)：171－173.
REN Wei, WANG Yingzhe, WANG Zhifeng, et al. Grassland improvement techniques of degraded *Leymus chinensis*[J]. Northern Horticulture, 2019(13): 171－173. (in Chinese)

[9] 刘国敏. 蚯蚓体表减粘降阻功能耦合仿生研究[D]. 长春：吉林大学，2009.
LIU Guomin. Coupling bionic research on the adhesion and resistance reduction of the earthworm surface[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

[10] 赵淑红，王加一，陈君执，等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(2)：82－92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 82－92. (in Chinese)

[11] DONDINI M, MARTIN M, DE CAMILLIS C, et al. Global assessment of soil carbon in grasslands-from current stock estimates to seque stration potential[R]. FAO Animal Production and Health Paper No. 187, 2023.

[12] 郭艳颖，贺长彬，桑洪超，等. 耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型研究[J]. 中国农业大学学报，2025，30(1)：224－233.
GUO Yanying, HE Changbin, SANG Hongchao, et al. Comprehensive evaluation model for the operational suitability of tillage components applied on natural grassland[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(1): 224－233. (in Chinese)

[13] SANG Hongchao, HE Changbin, BI Yuge, et al. Evaluation of the performance of very narrow tines with different geometrical structures for tilling natural grassland [J]. Biosystems Engineering, 2022, 224: 34－48.

[14] 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)

[15] 马文鹏，尤泳，王德成，等. 多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验 [J]. 农业机械学报，2021，52(2)：86－95，144.

MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeding in perennial alfalfa field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 86 – 95, 144. (in Chinese)

[16] 贺长彬,桑洪超,刘美玉,等. 深松铲扰动下天然草地复合土层失效特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2023, 28(2):207 – 216.
HE Changbin, SANG Hongchao, LIU Meiyu, et al. Experimental study on failure characteristics of natural grassland composite soil structure under subsoiling operation[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(2):207 – 216. (in Chinese)

[17] HE C, YOU Y, WANG D, et al. An experimental investigation of soil layer coupling failure characteristics on natural grassland by passive subsoiler-type openers [J]. INMATEH—Agricultural Engineering, 2020, 61(2): 49 – 58.

[18] WANG Xuezhen, FU Zuoli, ZHANG Qingkai, et al. Short-term subsoiling effects with different wing mounting heights before winter wheat on soil properties and wheat growth in Northwest China[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 213: 105151.

[19] WANG X, GAO P, YUE B, et al. Optimisation of installation parameters of subsoiler' wing using the discrete element method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 523 – 530.

[20] MARQUEZ G F, REYES M E, MORALES M C, et al. Subsoiler tool with bio-inspired attack edge for reducing draft force during soil tillage[J]. Agri. Engineering, 2024, 6(3): 2678 – 2693.

[21] SONG Wei, JIANG Xiaohu, LI Lekai, et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers [J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105356.

[22] WANG Y, LI N, MA Y, et al. Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired (BioS) subsoiler for tillage resistance reduction[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 104432.

[23] ZHAO Jiale, LU Yun, WANG Xiaogeng, et al. A bionic profiling-energy storage device based on MBD – DEM coupled simulation optimization reducing the energy consumption of deep loosening[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 234: 105824.

[24] WANG Xuezhen, ZHOU Hao, WANG Shengsheng, et al. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: a review [J]. Soil & Tillage Research, 2023, 229: 105676.

[25] ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Soil failure characteristics and loosening effectivity of compacted grassland by subsoilers with different plough points[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 170 – 181.

[26] WANG Z, YOU Y, ZHANG X, et al. Bionic optimal design and performance study of soil loosening shovels for degraded grasslands[J]. Agriculture, 2025, 15(5): 487.

[27] 杨欢,金玉洁,段媛媛,等. 高原鼢鼠牧食洞道干扰对高寒草地生态系统植物碳库密度的影响[J]. 生态学报,2025, 45(5):2424 – 2435.
YANG Huan, JIN Yujie, DUAN Yuanyuan, et al. Effect of foraging tunnel disturbances created by plateau zokor on plant carbon pool density in different types of alpine grassland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5):2424 – 2435. (in Chinese)

[28] WANG Q, ZHOU W, WEI W, et al. The burrowing behavior of *Myospalax baileyi* and its relation to soil hardness[J]. Acta Theriologica Sinica, 2000, 20(4):277 – 283.

[29] 王洪昌,涂鸣,刘念,等. 鼢鼠挖掘活动及爪趾几何特征量化分析[J]. 安徽农业科学,2018,46(9):165 – 170.
WANG Hongchang, TU Ming, LIU Nian, et al. Burrowing activities of zokor and quantitative analysis of geometric features of its claws[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2018, 46(9):165 – 170. (in Chinese)

[30] 谭蓉凡. 基于逆向工程的典型机械零件优化设计应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(4): 98 – 100.

[31] RAPER R, REEVES D, SHAW J, et al. Benefits of site-specific subsoiling for cotton production in Coastal Plain soils [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 96(1): 174 – 181.

[32] 吴克宁,赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报,2019,56(1):227 – 241.
WU Kening, ZHAO Rui. Soil texture glassification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227 – 241. (in Chinese)

[33] ASKARI M, SHAHGHOLI G, ABBASPOUR-GILANDEH Y, et al. The effect of new wings on subsoiler performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 32(3):353 – 362.

[34] 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)

[35] 王学振. 土壤–带翼松土铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
WANG Xuezhen. Soil – winged subsoiler interactions and their effects[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[36] 王学振,岳斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10): 124 – 136.
WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124 – 136. (in Chinese)

[37] 刘俊安,王晓燕,李洪文,等. 基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J]. 农业机械学报,2017,48(2):60 – 67.
LIU Jun'an, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):60 – 67. (in Chinese)

[38] 齐关宇,刘林,赵艳忠,等. 深松铲入土深度及铲形对耕作阻力影响[J]. 农机化研究,2015,37(11):161 – 165.
QI Guanyu, LIU Lin, ZHAO Yanzhong, et al. Effects of subsoiler's penetrating depth and spade shape on traction resistance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11):161 – 165. (in Chinese)