doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.020

# 板结羊草地折翼式松土铲优化设计与试验

张学宁[1]　尤　泳[1]　王昭宇[1]　张宇卓[1]　廖洋洋[1]　王得伟[1,2]　王德成[1]

(1.中国农业大学工学院, 北京 100083; 2.塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

**摘要**: 适用于草地耕作的松土部件较为缺乏,为彻底打破草地土壤板结结构,设计了一种草地专用松土部件——折翼式松土铲。以折翼式松土铲的铲柄滑切角、铲翼宽度、铲尖入土角为试验因素,以耕作阻力、土壤坑形轮廓面积和垄形轮廓面积为目标参数进行结构参数优化试验;并对比分析了折翼式松土铲和 3 种传统松土铲(凿形铲、棱形铲、箭形铲)对板结草地土壤的松土性能(垄形轮廓面积、坑形轮廓面积、土壤扰动系数、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度)。试验结果表明,折翼式松土铲结构参数最优组合为:铲翼宽度 40 mm、铲柄滑切角 20°、铲尖入土角 20°,此时耕作阻力 6 140 N,坑形轮廓面积 160 $cm^2$,垄形轮廓面积 68 $cm^2$。与 3 种传统松土铲相比,折翼式松土铲作业后的草地表面更为平整,产生的翻垡较少,且均为小土块翻垡;相同作业速度下折翼式松土铲造成的坑形轮廓面积和土壤扰动系数均最大,而垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度均最小,故折翼式松土铲的草地松土性能优于传统的凿形铲、棱形铲和箭形铲。

**关键词**: 草地改良; 板结草地; 折翼式松土铲; 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)05-0213-09　　**OSID**:

# Optimization Design and Experiment of Folded-wing Subsoiler for Compacted *Leymus chinensis* Grassland

ZHANG Xuening[1]　YOU Yong[1]　WANG Zhaoyu[1]　ZHANG Yuzhuo[1]　LIAO Yangyang[1]
WANG Dewei[1,2]　WANG Decheng[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *School of Mechanical Electrification Engineering*, *Tarim University*, *Alar* 843300, *China*)

**Abstract**: There is a lack of soil loosening components suitable for grassland ploughing. To better break the compacted structure of grassland soil, a special soil loosening component for grassland was designed: a folded-wing subsoiler. Optimization of the combination of structural parameters was carried out by using the shank slip angle, wing width and tip entry angle of a folded-wing subsoiler as test factors, and tillage resistance, furrow contour area and ridge contour area as target parameters. The working performance (ridge contour area, pit contour area, soil disturbance coefficient, soil bulkiness, turning rate, and surface flatness) of the folded-wing subsoiler and three traditional subsoilers (chisel point, diamond point, and arrow point) in grassland soil was compared. The test results showed that the optimal combination of the structural parameters of the folded-wing subsoiler was as follows: the wing width was 40 mm, the shank slip angle was 20°, and the tip entry angle was 20°. At this point, the optimal solution for the objective values was 6 140 N of tillage resistance, 160 $cm^2$ of pit contour area, 68 $cm^2$ of ridge contour area. Compared with the three traditional plough points, the surface of the grassland after the operation of the folded-wing subsoiler was more flat, and there were fewer turning pieces, and all of them were small pieces of soil; at the same operating speed, the pit contour area and soil disturbance coefficient caused by the folded-wing subsoiler were the largest, while the ridge contour area, soil bulkiness, turning rate and surface flatness were the smallest. Therefore, the grassland loosening

收稿日期: 2024-03-04　修回日期: 2024-04-15

**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(15053349)和国家自然科学基金项目(32360073)

**作者简介**: 张学宁(1997—),男,博士生,主要从事草地改良机械研究,E-mail: 2517551245@qq.com

**通信作者**: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

performance of the folded-wing subsoiler was better than that of the traditional chisel point, diamond point, and arrow point. The research results can provide technical reference for the creation of key tillage components suitable for mechanized improvement of compacted grassland.

**Key words**: grassland improvement; compacted grassland; folded-wing subsoiler; tillage resistance; soil disturbance

## 0 引言

羊草地占我国天然草地面积的一半以上,多年生羊草根系发达密集,地下根系与土壤交织在一起,两者相互锚固形成土壤-根系复合体结构,并在草地亚表层形成了大面积连片的土根复合体板结层[1]。草地板结性退化严重影响了羊草草地土层的通透性,使得草地质量大幅下降。为避免对草地根系造成破坏,一般通过在亚表层下方开展松土作业以改善羊草草地板结状况[2]。

国内外关于松土部件的研究多集中于土-机互作关系、仿生设计与结构参数优化等[3-4],且针对草地土壤耕作的松土部件研究较少。HE 等[5]研究了凿形铲、箭形铲、翼形铲作用下的天然羊草草地失效特性,对草地土层失效过程、扰动情况、扰动截面积、翻垡率和作业阻力进行了分析。宋建农等[6]研发的 9ST-460 型草地振动式间隔松土机利用双圆盘将草地表层土壤切开形成条状土垡,并通过振动式松土铲对土壤进行疏松。HE 等[7]设计了 4 种铲尖形状不同的极窄齿类开沟部件并进行了草地开沟扰动试验,为设计和优化退化草地开沟松土部件提供了参考。SANG 等[8]对不同铲柄厚度、刃口角度及入土角度的铲柄类耕作部件进行了铲柄类耕作部件的草地耦合失效试验,并分析了铲柄类耕作部件的运动、受力以及对草地土层的扰动情况。综合分析,现有的草地松土部件多由农田耕作部件改造而来,其作业时易产生草地土壤翻垡,对草地根系及植被的破坏较大,这些不适用的耕作部件在作业后极易引起草地侵蚀,进而使板结性退化草地的生态环境进一步恶化,缺少草地专用松土部件也制约了草地机械化改良技术的进一步发展。因此,开展草地专用松土部件的优化设计对提高板结草地机械化改良效果具有重要意义。

为改善羊草地板结状况,本文以增大松土面积并减少草地土壤翻动、降低松土铲耕作阻力为目标,设计一种板结草地折翼式松土铲。通过参数优化试验获取折翼式松土铲结构参数的最优组合,并探究折翼式松土铲对草地土壤的扰动特征,以期为草地专用松土部件的优化设计提供理论依据和技术支撑。

## 1 折翼式松土铲设计

### 1.1 板结羊草草地松土作业要求

板结羊草草地松土作业的理想效果为:在不破坏原生植被和土壤环境的前提下,利用机械手段对板结草地土壤进行局部疏松,形成虚实并存的草地土壤结构,以改善板结草地土壤的通气蓄水能力,提高并长时间保持草地生产力。

笔者前期探究了 4 种传统松土铲(条形铲、凿形铲、棱形铲、箭形铲)在草地耕作时对草地土壤造成的扰动特征,具体研究内容及结果见文献[9]。根据板结草地土壤的扰动特征,松土部件主要通过剪切作用、抬升作用和侧向扰动对板结草地土壤造成失效。然而,板结草地土壤被抬升较高易导致上下层间的草地土壤结构混乱[10],进而产生水分流失、土壤表层粗糙[11]、杂草种子萌发[12]等问题,故应减小松土部件对草地土壤的抬升作用。同时,应尽可能提升松土部件对两侧土壤的扰动能力,以扩大其对板结草地土壤的扰动范围,提高松土效率,这也有益于草地保墒[13]。

为提升松土铲对板结草地的作业效果,本文以提高松土铲的侧向土壤扰动能力和减小松土铲对土壤的抬升作用为目标设计一种板结草地折翼式松土铲。

### 1.2 折翼式松土铲结构设计

松土铲主要包括铲柄、铲翼和铲尖 3 部分,均会影响松土铲的作业效果[14]。为确保所设计的松土铲能够适应板结草地松土作业,对铲柄、铲翼和铲尖分别进行针对性设计。

将松土铲柄设计为倾斜式[15],倾斜式铲柄在作业过程中会对土壤产生向下运动的力,可以减小松土铲在作业过程中对草地土壤的翻动和抬升作用,进而减少松土作业对草地土壤的破坏,有利于草地土壤保墒。松土铲作业时倾斜式铲柄的受力分析如图 1 所示,松土铲作业过程中倾斜式铲柄在前进方向上的受力平衡方程为

$$F_q = F_h\cos\alpha + F_f + F_n \tag{1}$$

式中 $F_q$——铲柄所受水平牵引力

$F_h$——铲柄刀刃受到草地土壤合力

$\alpha$——铲柄滑切角

$F_f$——铲柄侧面受到的摩擦力

$F_n$——铲柄侧面的粘附力

由式(1)可知，铲柄滑切角 $\alpha$ 对折翼式松土铲的牵引力有着直接影响，适宜的铲柄滑切角对减小松土铲的作业能耗有重要作用[16]。

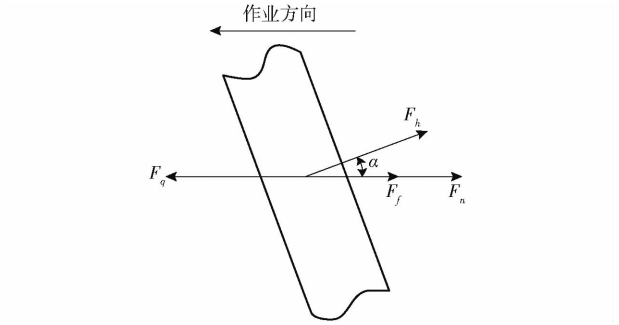



图 1　铲柄受力分析

Fig. 1　Stress analysis of shovel handle

单位长度铲柄刀刃在作业过程中受到的耕作阻力如图 2 所示，图中 $F_{N2}$ 为铲柄侧面上的压力，$F_{n2}$ 为铲柄侧面的粘附力。铲柄刀刃受到草地土壤对其的耕作阻力主要包括摩擦力、粘附力、抗压力和粘结力，表示为

$$F = 2F_{N1}\sin\frac{\varphi}{2} + 2F_{f1}\cos\frac{\varphi}{2} + 2F_{n1}\cos\frac{\varphi}{2} + 2F_{f2} + 2F_{n1} + F_G \tag{2}$$

式中　$F$——耕作阻力

$F_{N1}$——铲柄刃口上压力

$\varphi$——铲柄刃口夹角

$F_{f1}$——铲柄刃口上摩擦力

$F_{n1}$——铲柄刃口粘附力

$F_{f2}$——铲柄侧面上摩擦力

$F_G$——草地土壤粘结力

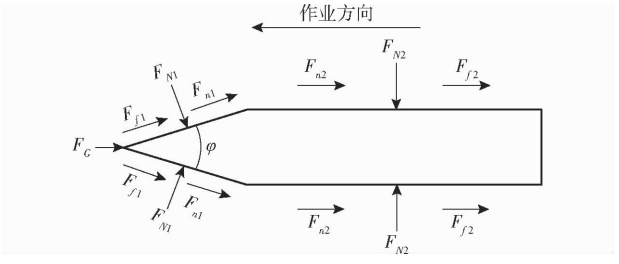



图 2　铲柄刃口受力分析

Fig. 2　Stress analysis of blade of shovel handle

由式(2)可知，当作业对象(草地土壤)确定后，耕作阻力 $F$ 的大小仅与铲柄刃口夹角 $\varphi$ 有直接关系，故可通过设置选取适宜的铲柄刃口夹角进行减阻，但刃口夹角过小会影响铲柄强度，相关研究表明[17]，当铲柄刃口夹角为 38°～48°时，耕作性能较优，本文设置铲柄刃口夹角为 43°。

为提高松土铲对板结草地土壤的侧向扰动能力，在松土铲底部增加两个对称的铲翼，且铲翼与地表平行[15]。当铲翼与地表平行时，铲翼对土壤的切削作用较强，且推土与抬土作用较弱，这使得折翼式松土铲在对草地土壤板结结构造成一定程度扰动的同时，不易产生草地土壤翻动[18]，有利于草地土壤保墒。将铲翼向后弯折形成一定倾角，铲翼倾角可以使两侧铲翼具有更好的滑切性能，以减少松土铲的耕作阻力。当铲翼宽度较小时，松土铲对板结草地土壤的侧向扰动能力也较小，而当铲翼宽度增大后，松土铲的耕作阻力也会增大，故铲翼宽度 $d$ 也是直接影响松土铲作业效果的因素之一。

铲尖采用凿形铲，其宽度和铲柄厚度相同，其受力分析如图 3 所示。

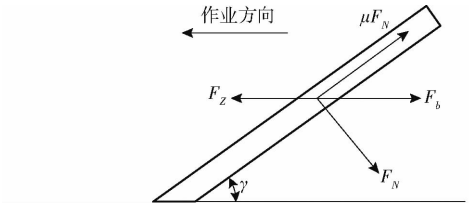



图 3　铲尖受力分析

Fig. 3　Stress analysis of blade tip

铲尖在作业过程中主要受到牵引力、土壤压力和土壤阻力等，铲尖在作业方向上的受力平衡方程为

$$F_Z = F_N\sin\gamma + \mu F_N\cos\gamma + F_b \tag{3}$$

式中　$F_Z$——铲尖所受水平牵引力

$F_N$——铲尖表面对土壤的支持力

$F_b$——土壤对铲尖的阻力

$\mu$——土壤与铲尖的摩擦因数

$\gamma$——铲尖入土角

由式(3)可知，铲尖的入土角是影响松土铲作业效果的另一重要因素。入土角主要影响松土铲的入土性能和耕作阻力，当入土角过大时，松土铲的入土性能较差，且耕作阻力也会增加；但当入土角过小时，不易打破草地土壤的板结结构，其对板结草地土壤的疏松效果变差[19]。

综上分析，适宜的铲柄滑切角、铲翼宽度和铲尖入土角可有效减小松土铲的入土阻力和耕作阻力，同时还可提升松土铲对板结草地土壤的松土效果。故确定铲柄滑切角、铲翼宽度、铲尖入土角为折翼式松土铲的主要设计参数，折翼式松土铲结构如图 4 所示。

一般来说，羊草地下根系的主要分布深度为 0～20 cm[20]，松土铲作业时不应对草地根系造成破坏，故设置折翼式松土铲的刃口长度 $L$ 为 300 mm。参考 HE 等[7]设计的铲柄类草地耕作部件及草地试验需要，设计折翼式松土铲的高度 $H$ 为 775 mm，铲柄宽度 $b$ 为 60 mm，铲柄厚度 $c$ 为 14 mm。凿形铲尖

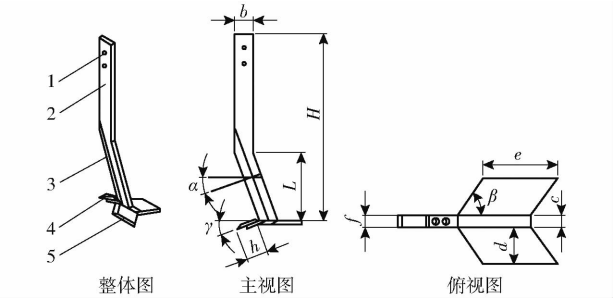



图 4 折翼式松土铲结构示意图

Fig. 4 Structural schematic of folded-wing subsoiler

1. 螺栓孔 2. 铲柄 3. 铲柄刃口 4. 铲尖 5. 铲翼

宽度和铲柄厚度相同,也为 14 mm,同时设置铲尖长度 $h$ 为 70 mm。参考张喜瑞等[15]设计的带翼深松铲,设置铲翼倾角为 65°,同时设置铲翼长度 $e$ 为 100 mm。

## 2 参数优化试验

为获得较好的板结草地松土效果,并减小松土铲的耕作阻力,对折翼式松土铲的结构参数——铲柄滑切角、铲翼宽度、铲尖入土角进行优化试验。

### 2.1 优化试验设计

为探究折翼式松土铲各结构参数之间的交互作用规律,进行三因素五水平二次正交旋转中心组合设计试验。每个试验因素设置 5 个水平,各试验因素编码如表 1 所示。

**表 1 参数优化试验因素编码**

**Tab. 1 Experiment factors and codes**

| 编码 | 因素 | | |
|---|---|---|---|
| | 铲翼宽度/mm | 铲柄滑切角/(°) | 铲尖入土角/(°) |
| -1.682 | 20 | 20 | 20 |
| -1 | 28 | 24 | 24 |
| 0 | 40 | 30 | 30 |
| 1 | 52 | 36 | 36 |
| 1.682 | 60 | 40 | 40 |

### 2.2 试验区域及试验装置

折翼式松土铲的草地试验于 2023 年 10 月在国家牧草产业技术体系张家口综合试验站内的天然羊草草地进行。试验装置主要由机架、松土铲、限深装置、拉压力传感器、变送显示器及数字记录仪等组成,如图 5 所示。试验时控制拖拉机以Ⅰ挡(3.26 km/h)的速度前进,并控制作业深度为 10 cm。试验所需的 15 把结构参数不同的折翼式松土铲如图 6 所示。

### 2.3 评价指标及测定方法

对不同结构折翼式松土铲的作业效果进行综合评价,评价指标包括耕作阻力 $Y_1$、土壤坑形轮廓面积 $Y_2$ 和垄形轮廓面积 $Y_3$。

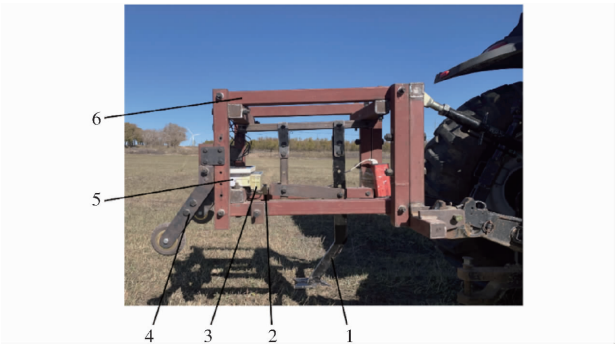



图 5 草地松土试验装置

Fig. 5 Grassland test device

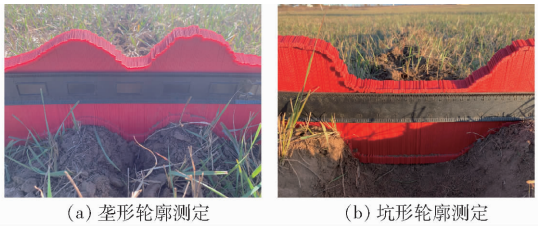
1. 松土铲 2. 拉压力传感器 3. 变送显示器 4. 限深装置 5. 数字记录仪 6. 机架



图 6 不同结构的折翼式松土铲

Fig. 6 Folded-wing subsoiler with different structural parameters

通过试验台测力系统获取松土铲作业时的耕作阻力。松土铲的侧向土壤扰动能力越强,其造成的土壤坑形轮廓面积越大,故将土壤坑形轮廓面积作为评价松土铲侧向土壤扰动能力的评价指标。松土铲对土壤的抬升作用越强,使得地表的堆积土壤越多,其造成的土壤垄形轮廓面积越大,故将土壤垄形轮廓面积作为评价松土铲对土壤抬升作用的评价指标。通过图 7 所示的取形仪在网格纸上分别绘制垄形轮廓和坑形轮廓。



(a) 垄形轮廓测定 (b) 坑形轮廓测定

图 7 土壤扰动轮廓测定

Fig. 7 Determination of soil disturbance area

### 2.4 优化试验结果

优化试验结果如表 2 所示。$X_1$、$X_2$、$X_3$ 为因素编码值,应用 Design-Expert 12 软件对回归模型进行方差分析,如表 3 所示,模型 $P$ 值均小于 0.05,模型显著,表明回归结果具有较高的可靠性;失拟项 $P$ 值均大于 0.05,失拟项不显著,表明无失拟因素存

**表 2　试验方案与结果**

**Tab. 2　Experiment schemes and results**

| 序号 | 因素 | | | $Y_1$/N | $Y_2$/cm² | $Y_3$/cm² |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | | | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 6 398 | 139 | 53 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 7 021 | 176 | 87 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 6 550 | 137 | 54 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 7 380 | 177 | 85 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 6 637 | 137 | 69 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 7 235 | 179 | 92 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 6 790 | 139 | 67 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 7 416 | 175 | 95 |
| 9 | -1.682 | 0 | 0 | 6 702 | 123 | 50 |
| 10 | 1.682 | 0 | 0 | 8 246 | 186 | 99 |
| 11 | 0 | -1.682 | 0 | 6 612 | 161 | 80 |
| 12 | 0 | 1.682 | 0 | 7 235 | 162 | 78 |
| 13 | 0 | 0 | -1.682 | 6 657 | 159 | 68 |
| 14 | 0 | 0 | 1.682 | 7 265 | 157 | 84 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 6 980 | 162 | 78 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 7 157 | 157 | 77 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 6 932 | 159 | 79 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 6 851 | 161 | 80 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 7 135 | 157 | 76 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 6 935 | 160 | 80 |

在，回归模型拟合度较高。在耕作阻力 $Y_1$ 响应面模型中，$X_1$ 对模型影响极显著，$X_2$、$X_3$、$X_1^2$ 对模型影响显著；在坑型轮廓面积 $Y_2$ 响应面模型中，$X_1$、$X_1^2$ 对模型影响极显著；在垄形轮廓面积 $Y_3$ 响应面模型中，$X_1$、$X_3$、$X_1^2$ 对模型影响显著，$X_1X_3$、$X_3^2$ 对模型影响显著。

剔除不显著项后得出各试验因素对耕作阻力 $Y_1$、坑型轮廓面积 $Y_2$、垄形轮廓面积 $Y_3$ 的回归方程为

$$Y_1 = 7\,004.74 + 386.16X_1 + 138.59X_2 + 128.25X_3 + 126.29X_1^2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 159.35 + 19.11X_1 - 0.096\,5X_2 - 0.173\,1X_3 - 1.82X_1^2 \quad (5)$$

$$Y_3 = 78.37 + 14.53X_1 - 0.246\,3X_2 + 5.19X_3 - 1.75X_1X_3 - 1.6X_1^2 - 1.07X_3^2 \quad (6)$$

## 2.5　最优参数组合

在尽可能小的耕作阻力和垄形轮廓面积条件下获取较大的坑形轮廓面积，据此选取目标函数和约束条件为

**表 3　方差分析**

**Tab. 3　Analysis of variance**

| 方差来源 | 耕作阻力 | | | | 坑形轮廓面积 | | | | 垄形轮廓面积 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 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 | 2 919 259 | 9 | 10.70 | 0.000 5 ** | 5 049.55 | 9 | 151.65 | 0.000 1 ** | 3 326.46 | 9 | 129.72 | 0.000 1 ** |
| $X_1$ | 2 036 471 | 1 | 67.20 | 0.000 1 ** | 4 986.25 | 1 | 1 347.78 | 0.000 1 ** | 2 882.48 | 1 | 1 011.68 | 0.000 1 ** |
| $X_2$ | 262 325 | 1 | 8.66 | 0.014 7 * | 0.127 2 | 1 | 0.034 4 | 0.856 6 | 0.828 4 | 1 | 0.290 8 | 0.601 5 |
| $X_3$ | 224 639 | 1 | 7.41 | 0.021 5 * | 0.409 1 | 1 | 0.110 6 | 0.746 4 | 368.17 | 1 | 129.22 | 0.000 1 ** |
| $X_1X_2$ | 690 3 | 1 | 0.227 8 | 0.643 4 | 1.13 | 1 | 0.304 1 | 0.593 4 | 0.5 | 1 | 0.175 5 | 0.684 1 |
| $X_1X_3$ | 655 5 | 1 | 0.216 3 | 0.651 8 | 0.125 | 1 | 0.033 8 | 0.857 8 | 24.5 | 1 | 8.60 | 0.015 0 * |
| $X_2X_3$ | 391 6 | 1 | 0.129 2 | 0.726 7 | 0.125 | 1 | 0.033 8 | 0.857 8 | 0.5 | 1 | 0.175 5 | 0.684 1 |
| $X_1^2$ | 229 850 | 1 | 7.59 | 0.020 3 * | 47.93 | 1 | 12.95 | 0.004 9 ** | 36.69 | 1 | 12.88 | 0.004 9 ** |
| $X_2^2$ | 67 307 | 1 | 2.22 | 0.167 0 | 6.11 | 1 | 1.65 | 0.227 7 | 0.000 3 | 1 | 0.000 1 | 0.991 9 |
| $X_3^2$ | 43 725 | 1 | 1.44 | 0.257 3 | 4.95 | 1 | 1.34 | 0.274 2 | 16.35 | 1 | 5.74 | 0.037 6 * |
| 残差 | 303 026 | 10 | | | 37.00 | 10 | | | 28.49 | 10 | | |
| 失拟 | 228 718 | 5 | 3.08 | 0.121 4 | 15.66 | 5 | 0.734 2 | 0.628 6 | 15.16 | 5 | 1.14 | 0.445 7 |
| 误差 | 74 307 | 5 | | | 21.33 | 5 | | | 13.33 | 5 | | |
| 总和 | 3 222 284 | 19 | | | 5 086.55 | 19 | | | 3 354.95 | 19 | | |

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$），* 表示差异显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \max Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

求解得到最优参数组合为：铲翼宽度 40 mm、铲柄滑切角 20°、铲尖入土角 20°。为验证优化结果的准确性，在上述参数组合试验条件下，进行 3 次验证试验，得到耕作阻力为 6 140 N，坑形轮廓面积为 160 cm²，垄形轮廓面积为 68 cm²，与优化结果基本一致。

## 3　折翼式松土铲性能试验

按上述最优参数组合制作折翼式松土铲，为探究折翼式松土铲的草地松土作业性能，在不同作业速度下（3.26、4.33、5.66、7.35 km/h）将折翼式松土铲和 3 种传统松土铲：凿形铲、棱形铲、箭形铲（图 8）进行对比试验。试验台架仍采用图 5 所示的

草地松土试验装置,设置耕深为 15 cm。



(a) 凿形铲 (b) 棱形铲 (c) 箭形铲

图 8 3 种传统松土铲

Fig. 8 Different types of chisel plough points

除了土壤坑形轮廓面积和垄形轮廓面积 2 个评价指标,还对各试验区域的地表平整度[21]、翻垡率[20]、土壤扰动系数和土壤蓬松度[9]等评价指标进行了测定。

### 3.1 折翼式松土铲草地土壤扰动特征

折翼式松土铲在草地的作业效果如图 9 所示。在折翼式松土铲带刃铲柄的切割和挤压作用下,草地土壤被划开一条沟缝,同时铲柄两侧的铲翼将其上方草地土壤微微抬起,但并未对两侧草地土壤造成过度抬升而产生翻垡;在这两个相互作用过程中,草地土根复合体板结层因受到折翼式松土铲剪切、抬升作用而失效。当作业速度较低时(3.26 km/h),沟缝两侧的草地土壤被抬起后又顺利回落至原位置,作业后的草地地表仅有一条沟缝,如图 9b 所示。随着作业速度的增加(图 9c),铲翼两侧的草地土壤受到更强的抬升作用,铲翼末端的受扰动草地土壤通过根系与未受扰动草地土壤相连,从而未被大幅度抬升;但靠近铲柄一侧的草地土壤由于被铲柄从中间切开而失去了根系的牵扯作用,故其被抬升幅度较大,靠近铲柄一侧的草地土壤被抬起后,其底部土壤相互挤压使得其回落深度较浅,故其隆起高度逐渐增加,造成中间的沟槽宽度较大,这易引起草地跑墒。

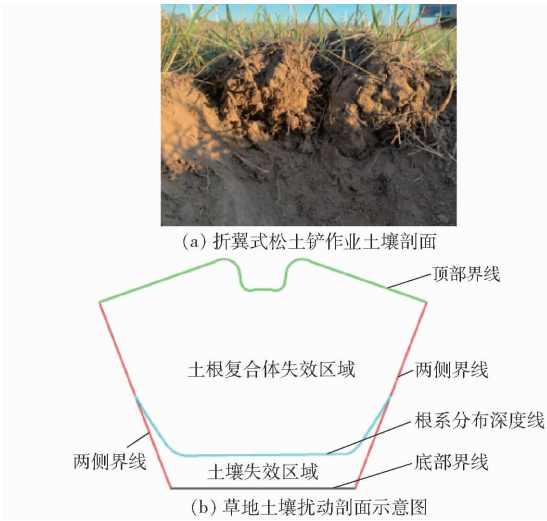


(a) 折翼式松土铲作业过程 (b) 作业速度 3.26 km/h效果 (c) 作业速度 7.35 km/h效果

图 9 折翼式松土铲作业过程与效果

Fig. 9 Working effect of folded-wing subsoiler

当作业深度(15 cm)大于根系分布深度(12 cm)时,从图 10a 中可以看出,沟底上方的草地土壤存在两部分失效区域:土根复合体失效区域和土壤失效区域。两部分失效区域形成了一条较为明显的分界线,这条分界线即为根系分布深度线。从草地表面至根系分布深度线的这一区域为土根复合体失效,由于根系对土壤的锚固作用,这部分区域的草地土壤未被充分扰动;从根系分布深度线向下至沟底的这一区域为土壤失效,而这一部分区域则被充分扰动。折翼式松土铲形成的草地土壤扰动剖面大致呈“五边形”,如图 10b 所示。“五边形”的底部界线为沟底,其长度与折翼式松土铲的两侧铲翼宽度基本一致;“五边形”的两侧界线以沟底一侧为起点,并未产生竖直向上的扰动边界,而是向外斜上方延伸至草地表面;“五边形”的顶部为铲翼两侧土壤的隆起界线,隆起高度从中间向两侧逐渐降低。



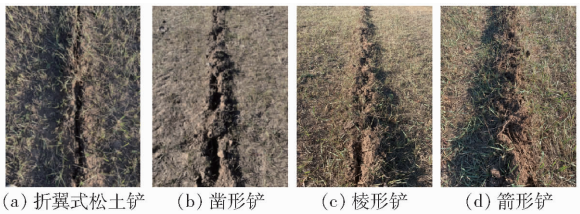

(a) 折翼式松土铲作业土壤剖面

(b) 草地土壤扰动剖面示意图

图 10 折翼式松土铲土壤扰动剖面示意图

Fig. 10 Soil disturbance profile diagrams of folded-wing subsoiler

各松土铲对草地土壤造成的扰动情况如图 11 所示,以作业速度 3.26 km/h 为例。折翼式松土铲作业后的草地表面比较平整,造成的翻垡较少,且均为草地表面的小土块翻垡,土块直径大多在 3 ~ 5 cm;当作业速度增加时,土块翻垡增多,且土块直径也会增大。凿形铲、棱形铲和箭形铲在作业时会把部分草地土壤翻起,且大部分是土根复合体翻垡,长度在 20 ~ 30 cm,这些翻垡将沟槽和底层土壤暴露在表面,对草地土壤造成了不同程度的破坏;当作业速度增加时,产生的土根复合体翻垡和对草地土壤的破坏情况会更加严重。



(a) 折翼式松土铲 (b) 凿形铲 (c) 棱形铲 (d) 箭形铲

图 11 各松土铲对草地土壤扰动情况

Fig. 11 Disturbance of each folded-wing subsoiler on grassland

### 3.2 草地土壤扰动参数

#### 3.2.1 垄形轮廓面积和坑形轮廓面积

各松土铲在不同作业速度下的垄形轮廓面积和

坑形轮廓面积如图 12、13 所示。下面各图中，小写字母分别表示，根据邓肯多重范围检验，在 0.05 的显著性水平下，相同作业速度下不同铲尖的垄形轮廓面积、坑形轮廓面积、土壤蓬松度、土壤扰动系数、翻垡率、地表平整度之间存在显著性差异。各铲尖的垄形轮廓面积和坑形轮廓面积均随着作业速度的增大而增大。当作业速度相同时，折翼式松土铲造成的垄形轮廓面积最小，且大幅度小于 3 种传统松土铲，这表明折翼式松土铲对草地土壤的抬升作用最小，也更符合板结草地松土的作业要求。当作业速度增加时，4 种松土部件造成的坑形轮廓面积从大到小依次为：折翼式松土铲、箭形铲、棱形铲、凿形铲，这表明折翼式松土铲对草地土壤的侧向土壤扰动能力最强。但与传统松土铲尖不同，折翼式松土铲仍可通过增加两侧铲翼宽度来扩大其对草地土壤的扰动范围，且并不会对草地土壤造成破坏；而传统松土铲尖一旦增加铲宽，其对草地土壤的破坏会更加严重。

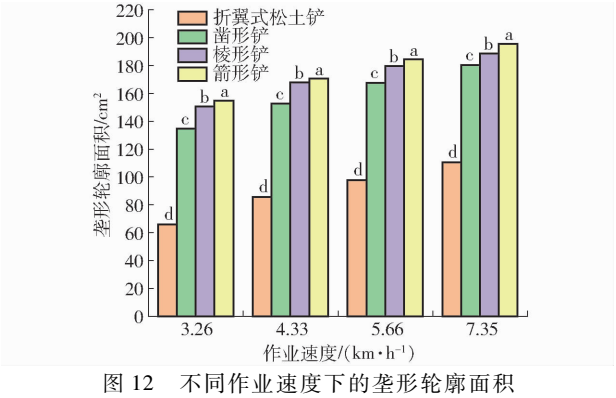



图 12　不同作业速度下的垄形轮廓面积

Fig. 12　Ridge contour area at different operating speed

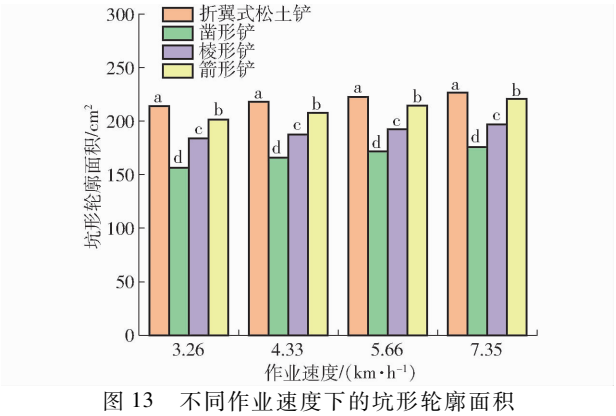



图 13　不同作业速度下的坑形轮廓面积

Fig. 13　Furrow contour area at different operating speed

### 3.2.2　土壤蓬松度和土壤扰动系数

各松土铲在不同作业速度下的土壤蓬松度和土壤扰动系数如图 14、15 所示。

在草地松土作业中，土壤扰动系数越大越好，土壤蓬松度越小越好。在不同作业速度下，折翼式松土铲的土壤扰动系数均最大，而其土壤蓬松度则均

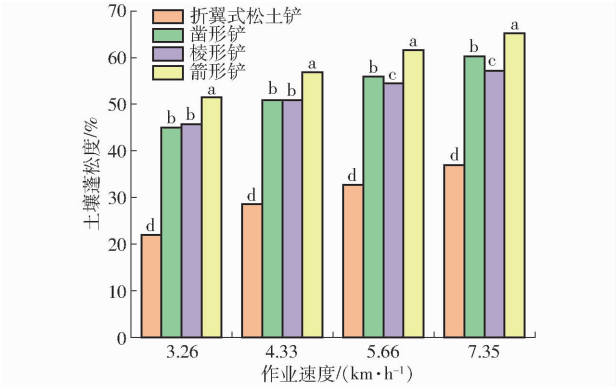



图 14　不同作业速度下的土壤蓬松度

Fig. 14　Soil looseness at different operating speed

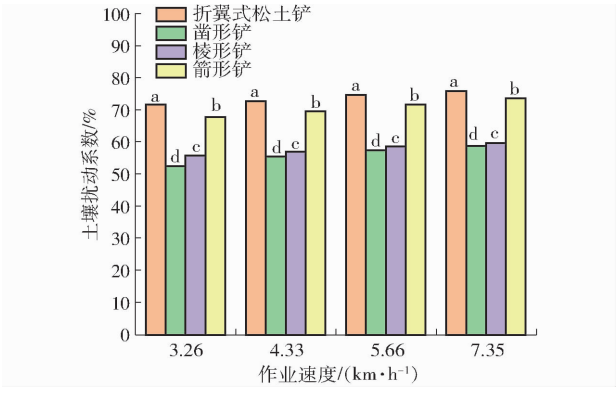



图 15　不同作业速度下的土壤扰动系数

Fig. 15　Soil disturbance coefficient at different operating speed

最小，这表明折翼式松土铲在板结草地土壤作业时的松土效率和松土质量优于其他 3 种传统松土铲。箭形铲的土壤扰动系数在 3 种传统松土铲中最大，而折翼式松土铲的土壤扰动系数又略高于箭形铲；凿形铲的土壤蓬松度在 3 种传统松土铲中最小，而折翼式松土铲的土壤蓬松度又大幅小于凿形铲，在相同速度下，折翼式松土铲的土壤蓬松度相比于凿形铲分别减小了 51%、44%、42%、39%；这表明折翼式松土铲在保持较高土壤扰动能力的同时又减少了对草地土壤的抬升作用，这分别得益于折翼式松土铲较宽的铲翼和倾斜式铲柄。

### 3.2.3　翻垡率和地表平整度

各松土铲在不同作业速度下的翻垡率和地表平整度如图 16、17 所示。当作业速度从 3.26 km/h 增加至 7.35 km/h 时，折翼式松土铲、凿形铲、棱形铲、箭形铲的翻垡率增长幅度分别为 4%、7.5%、8.5%、7%，折翼式松土铲的增长幅度最小，且翻垡率一直保持在 10% 以下，这表明折翼式松土铲对草地土壤作业时的翻垡率受作业速度影响较小。当作业速度从 3.26 km/h 增加至 7.35 km/h 时，折翼式松土铲、凿形铲、棱形铲、箭形铲的地表平整度增长幅度分别为 5.2、4.3、5、2.7 mm，虽然折翼式松土铲

的增长幅度最大,但不同作业速度下折翼式松土铲的地表平整度始终保持在 20 mm 以内,其地表平整度依然是最优的。显著性分析表明,当作业速度相同时,折翼式松土铲的翻垡率和地表平整度均是最小的,这表明其作业时对草地土壤的破坏是最小的,作业后的地表也更加平整。

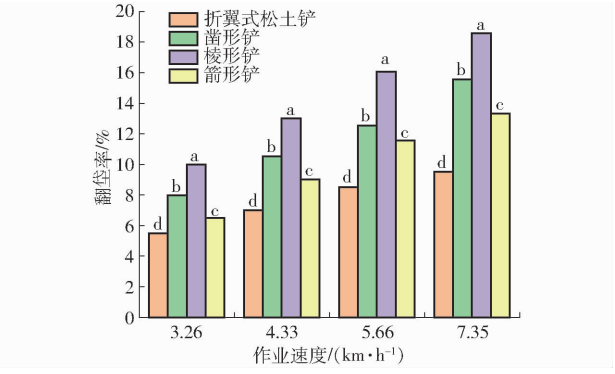



图 16 不同作业速度下的翻垡率

Fig. 16 Turning rate at different operating speed

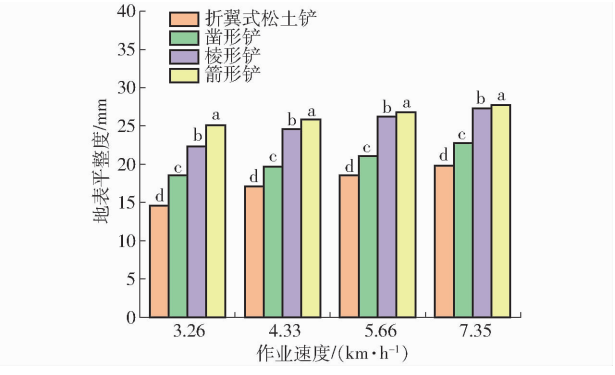



图 17 不同作业速度下的地表平整度

Fig. 17 Surface flatness at different operating speed

### 3.3 松土铲性能对比分析

传统松土铲对草地土壤造成的翻垡较多,且均为大块的土根复合体翻垡,对草地土壤破坏较大。而折翼式松土铲对草地土壤造成的破坏远远小于其他 3 种传统松土铲,其作业后的草地表面更为平整,造成的翻垡较少,且均为小土块翻垡。

为达到最佳草地耕作效果,各土壤扰动参数中,坑形轮廓面积、土壤扰动系数越大越好;而垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度越小越好。与其他 3 种传统松土铲相比,当作业速度相同时,折翼式松土铲造成的坑形轮廓面积和土壤扰动系数均最大,而垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度均最小。

综合对比折翼式松土铲和 3 种传统松土铲造成的草地土壤扰动特征和土壤扰动参数,折翼式松土铲的草地松土性能优于传统的凿形铲、棱形铲和箭形铲。

## 4 结论

(1)折翼式松土铲采用倾斜式铲柄设计以减小松土铲在作业过程中对草地土壤的翻动和抬升作用,在松土铲底部增加两个对称的、与地表平行的铲翼以提高松土铲对板结草地土壤的侧向扰动能力。

(2)折翼式松土铲结构参数的最优组合为:铲翼宽度 40 mm、铲柄滑切角 20°、铲尖入土角 20°,此时折翼式松土铲造成的坑形轮廓面积为 160 $cm^2$、垄形轮廓面积为 68 $cm^2$,耕作阻力为 6 140 N。

(3)与凿形铲、棱形铲和箭形铲相比,在 4 种作业速度下(3.26、4.33、5.66、7.35 km/h),折翼式松土铲作业后的草地表面均更加平整,造成的草地翻垡也更少,且翻垡直径也显著减小;折翼式松土铲造成的垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度均最小,而坑形轮廓面积和土壤扰动系数最大。故折翼式松土铲的草地作业性能优于上述 3 种传统松土铲。

## 参 考 文 献

[1] 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(Supp. 1): 135 – 146,164. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 张智泓,甘帅汇,左国标,等.以砂鱼蜥头部为原型的仿生松土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)

[4] AIKINS K A, JENSEN T A, ANTILLE D L, et al. Evaluation of bentleg and straight narrow point openers in cohesive soil[J]. Soil

and Tillage Research,2021,211: 105004.

[5] 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,2020,61:49 - 58.

[6] 宋建农,王继承,李永磊,等.9ST - 460 型草地振动式间隔松土机改进设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(4):62 - 65.
SONG Jiannong,WANG Jicheng,LI Yonglei,et al. Improved design and experiment of 9ST - 460 vibration spacing scarifier for grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):62 - 65. (in Chinese)

[7] HE Changbin,YOU Yong,WU Hongjian,et al. Effects of different geometrical structers on the soil disturbances and working resistances of very narrow tines applied on natural grassland[J]. INMATEH-Agricultural Engineering,2021,64:23 - 32.

[8] 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.

[9] 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.

[10] MAKANGE N R, JI Changying, TOROTWA I. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105848.

[11] LI Bo, CHEN Ying, CHEN Jun. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 177 - 185.

[12] BARR J B, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 53 - 64.

[13] ZENG Zhiwei, CHEN Ying, ZHANG Xirui. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130 - 138.

[14] 张鹏,郭志军,金鑫,等.仿生变曲率松土铲柄减阻设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(5):1174 - 1183.
ZHANG Peng,GUO Zhijun,JIN Xin,et al. Design and experiment of bionic subsoiler with variable variable curvature share shaft drag reduction[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2022,52(5):1174 - 1183. (in Chinese)

[15] 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松土铲设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):40 - 49.
ZHANG Xirui,ZENG Wangqiang,LIU Junxiao,et al. Design and experiment of iateritic 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)

[16] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻松土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 71 - 78.
ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71 - 78. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 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)

[19] 刘立晶,马超,刘忠军. 基于 EDEM 的带状松土全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):74 - 83.
LIU Lijing,MA Chao,LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):74 - 83. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 丁启朔,李杨,BELAL Eisa Adam,等. 基于田间摄像的多参数水稻土松土扰动行为与效应研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):44 - 55.
DING Qishuo,LI Yang,BELAL Eisa Adam,et al. Subsoiler-induced paddy soil disturbance and effects based on video-assisted multi-index quantification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):44 - 55. (in Chinese)