

基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验

张学宁 尤 泳 王德成 王昭宇 廖洋洋 吕 杰
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 不同结构形式的破土切根刀作业性能差异较大,为更好的打破草地土壤板结结构,对破土切根刀进行了结构设计 与参数优化。应用离散元法构建土壤模型,并通过直剪试验对该模型进行参数标定;以破土切根刀的刃口角、滑切角及切齿角为试验因素,以耕作阻力、土壤扰动失效面积及比阻为目标参数,进行单因素试验和三因素五水平二次正交旋转中心组合设计试验,得到最优结构参数组合并加工优化破土切根刀进行草地试验。参数优化试验结果显示,当刃口角为37.8°、滑切角为33.6°、切齿角为51.8°时,破土切根刀作业效果最佳;草地试验表明,与三角形破土切根刀相比,优化破土切根刀在不同坚实度草地土壤的减阻率分别为11.8%和12.8%,作业后地表平整度更小且未出现明显翻垡,更符合草地作业农艺要求。研究结果可为破土切根刀的标准化设计提供理论依据。

关键词: 板结草地; 离散元; 破土切根刀; 耕作阻力; 土壤扰动失效面积

中图分类号: S221 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0176-12 OSID: 

Design and Experiment of Soil-breaking and Root-cutting Cutter Based on Discrete Element Method

ZHANG Xuening YOU Yong WANG Decheng WANG Zhaoyu LIAO Yangyang LÜ Jie
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The performance of soil-breaking and root-cutting cutters with different structural forms is quite different. To better break the soil compaction structure of the grassland, the structural design and parameter optimization of soil-breaking and root-cutting cutters were carried out. The discrete element method was applied to construct the grassland soil model, and the parameters of the model were calibrated by direct shear test. A three-factor, five-level quadratic orthogonal rotational combination design test was conducted with cutting edge angle, sliding angle, and cutting tooth angle as test factors, and tillage resistance, soil disturbance area, and specific resistance as target parameters, and a grassland verification test was conducted for the optimal parameter combination. The experimental results showed that when the cutting edge angle was 37.8°, the sliding angle was 33.6°, and the cutting tooth angle was 51.8°, and the operation effect was the best. Grassland tests showed that compared with the triangular soil-breaking and root-cutting cutter, the reduction rate of the optimized soil-breaking and root-cutting cutter was 11.8% and 12.8%, respectively in grassland soil of different firmness, and no significant overturning was produced after the operation, which was more in line with the agronomic requirements of grassland operation. The research results could provide a theoretical basis for the standardized design of soil-breaking and root-cutting cutter.

Key words: hardened grassland; discrete element; soil-breaking and root-cutting cutter; tillage resistance; soil disturbance area

0 引言

羊草(*Leymus-chinensis*)草地占我国天然草地面

积的50%以上,长期的过度利用和粗放式管理使得羊草草地产生板结性退化,草地表层土壤坚实度增大、通气透水能力降低^[1-2]。使用破土切根刀打破

收稿日期: 2022-06-26 修回日期: 2022-09-01
基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0019)
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: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事牧草机械化研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

草地板结层促进羊草分蘖生长并为羊草生长提供疏松的土壤环境是目前常用的草地机械化改良方式^[3-4]。

尤泳等^[5]设计了 9QP-830 型草地破土切根机,作业效果表明破土切根工艺可有效改善土壤结构并促进羊草生长。HE 等^[6]对 4 种不同形状的极窄刀齿进行了草地贯入失效试验,对刀齿与草地土壤的相互作用关系进行了研究。宋建农等^[7]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堡,并通过振动式松土铲对土壤进行疏松。综合分析,现有草地破土切根工艺及相关作业部件的研究较少,缺少破土切根作业部件设计标准也限制了该改良工艺的进一步发展。因此,为明确破土切根作业部件的设计标准并探究最佳的作业效果,应对破土切根刀进行结构设计 with 参数优化。

以相对较小的能耗需求切开草地土壤、打破草地板结结构是草地破土切根作业的理想效果。基于此,本文建立草地土壤的仿真模型并对其进行参数标定,以耕作阻力、土壤扰动失效面积和比阻为评价指标,利用离散元法对破土切根刀的结构参数进行试验优化,并进行草地试验。以期为草地破土切根作业部件的优化设计及相关作业标准制定提供理论支撑。

1 破土切根刀设计与离散元模型构建

1.1 破土切根刀结构设计

破土切根刀在机组牵引下利用刀具刃口将草地板结层划开,其在作业时的受力分析如图 1 所示,图中 N_2 为破土切根刀侧面上的压力, n_2 为破土切根刀侧面的粘附力。草地土壤在受到破土切根刀的剪切作用时会对其产生耕作阻力,耕作阻力主要表现为土壤对刀具的摩擦力、粘附力、抗压力和粘结力^[8],表示为

$$F = 2N_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2f_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2n_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2f_2 + 2n_1 + G \tag{1}$$

- 式中
- F ——耕作阻力

α ——破土切根刀刃口角

N_1 ——破土切根刀刃口上的压力

f_1 ——破土切根刀刃口上的摩擦力

n_1 ——破土切根刀刃口的粘附力

f_2 ——破土切根刀侧面上的摩擦力

G ——草地土壤粘结力

由式(1)可知,当作业对象确定后,耕作阻力 F 的大小仅与破土切根刀刃口角 α 有关。众多研究

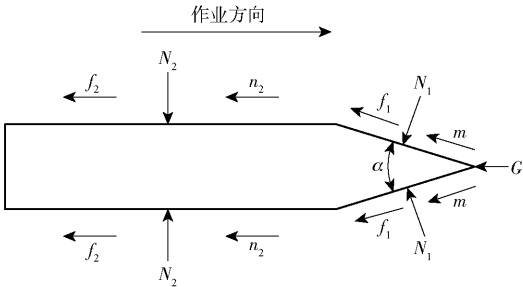


图 1 破土切根刀受力分析
Fig. 1 Force analysis of soil-breaking and root-cutting cutter

发现,可通过改变刃口角度来实现耕作部件的减阻^[9-10]。滑切角是耕作部件设计中最重要因素之一,其对耕作部件入土阻力和耕作阻力的影响至关重要^[11-12]。另外,研究人员在破(切)茬刀具的仿生设计中发现,在刀具刃口上添加切齿可以有效降低破(切)茬作业的阻力和能耗^[13-15]。破土切根刀属于极窄齿类耕作部件^[16],其作业过程不会对草地地表产生破坏扰动^[2],而是形成一条低扰动土壤环境下的极窄沟槽,其有利于提高板结草地的通气透水能力^[17],即可认为破土切根刀造成的土壤扰动是破除草地土壤板结结构的有益条件。而耕作部件的刃口角与滑切角则是影响土壤扰动的重要结构参数^[18]。

综上,结构适宜的刃口角、滑切角、切齿角可有效减小破土切根刀的入土阻力和耕作阻力,缓解刀具入土性能差、易拥堵的问题,同时还可提升破土切根刀破除草地板结结构的作业效果。通过结构优化减小破土切根刀的耕作阻力、提高板结草地的失效程度,同时提出破土切根刀的设计标准是本文的主要研究目标。综合分析,确定刃口角、滑切角、切齿角为破土切根刀的主要设计参数。

设计破土切根刀结构如图 2 所示。各破土切根刀主体尺寸相同,参考文献[2]设计的极窄齿类耕作部件,设置各破土切根刀主体尺寸(长×宽×厚)为 600 mm×60 mm×14 mm;参考文献[5]所设计破土切根机的作业深度,设置刃口长度 c 为 220 mm;

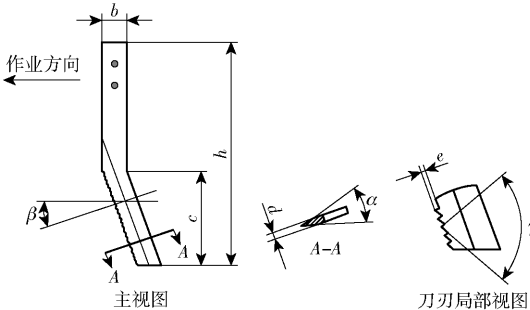


图 2 破土切根刀结构示意图
Fig. 2 Structure schematic of soil-breaking and root-cutting cutter

参考文献[13–14]设计的锯齿形刀片,设置切齿齿高 e 为5 mm。

1.2 土壤粘结模型参数标定

试验对象为河北省张家口市察北管理区内的天然草地土壤,草地土壤类型为砂壤土。由于草地土壤板结严重,土壤颗粒之间粘结力较大,故颗粒接触模型选用粘结接触模型(Hertz–Mindlin with bonding contact model)。该模型颗粒通过粘结键连接,土壤粘结模型生成后,粘结键中的法向粘结力 F_n 、切向粘结力 F_t 、法向力矩 M_n 及切向力矩 M_t 随时间而增加。当粘结键承受的切向应力和法向应力达到极限时发生断裂,粘结力消失后遵循无滑动接触模型^[19]。

土壤粘结参数不易获取,为确保数值模拟准确性,使土壤粘结模型能够表征土壤的实际力学特性,通常需要对粘结参数进行标定,本文以土壤颗粒间法向刚度、切向刚度和临界切向应力为试验因素对土壤模型进行参数标定。土壤直剪试验可以测定土壤的力学性能,故本文采用土壤直剪试验进行参数标定,通过对比物理试验和仿真试验的土壤内聚力及内摩擦角,标定出粘结参数。

1.2.1 土壤直剪试验

使用应变控制式直剪仪(图3)进行草地土壤直剪试验,在4种不同垂直压力(50、100、150、200 kPa)下对土壤试样进行剪切试验,下剪切盒的速度控制为0.8 mm/min,使试样在3~5 min内剪损。在此期间观察剪切盒水平受力,剪切盒受力为最大值且不再增加时关闭剪切传动机构,进行直剪试验数据记录。每组试验重复3次并取平均值,试验结果如图4所示,由库仑定律计算得出草地土壤的内聚力为42.86 kPa、内摩擦角为17.73°。



图3 应变控制式直剪仪

Fig.3 Strain controlled direct shear apparatus

1.2.2 土壤直剪仿真试验

草地土壤颗粒模型选用 EDEM 中默认的球形颗粒,通过筛分法确定 70% 左右的取样地土壤颗粒尺寸介于 0.25~5.00 mm,根据其粒径分布特征并考虑仿真效率,在 EDEM 中构建 3 种粒径的土壤颗粒,其半径分别为 1、1.5、2 mm。土壤离散元模型的

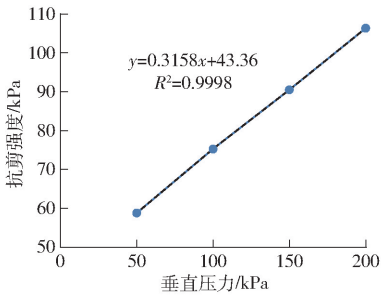


图4 直剪试验结果

Fig.4 Results of direct shear test

基本参数如表1所示。

表1 离散元模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of discrete element model

参数	数值
土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 300
钢密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 865 ^[20]
土壤剪切模量/Pa	1.0×10^6 ^[19]
钢剪切模量/Pa	7.9×10^{10} ^[20]
土壤泊松比	0.35 ^[19]
钢泊松比	0.30 ^[20]
土壤–钢间静摩擦因数	0.60 ^[21]
土壤间静摩擦因数	0.45 ^[19]
土壤–钢间恢复系数	0.60 ^[21]
土壤间恢复系数	0.60 ^[19]
土壤–钢间动摩擦因数	0.05 ^[21]
土壤间动摩擦因数	0.21 ^[19]
土壤颗粒间临界法向应力/Pa	5.5×10^5 ^[21]

仿真剪切模型尺寸为5 cm×5 cm×5 cm,由上剪切盒、下剪切盒、压板组成。由于无法直接对土壤模型施加垂直压力,故通过对压板施加一定的下压速度来获得对土壤模型的垂直压力,压板所受压力即为土壤模型所受到的垂直压力,压板下压速度为0.1 cm/s。通过预试验得出土壤模型在受到50、100、150、200 kPa垂直压力时压板所处位置,将压板下压到固定位置待土壤颗粒静止后,添加颗粒粘结模型,对下剪切盒施加水平方向、大小为1 mm/s的剪切速度。当土壤模型中粘结键达到极限值时(粘结键断裂),得到土壤模型不同垂直压力下的剪切强度。直剪仿真试验如图5所示。

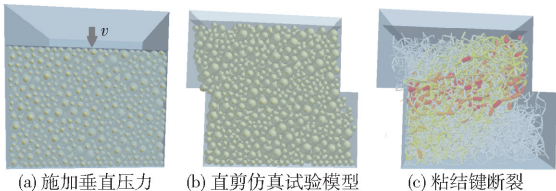


图5 直剪仿真试验

Fig.5 Direct shear tests of simulation

通过最陡爬坡试验确定土壤颗粒间法向刚度

X_1 、土壤颗粒间切向刚度 X_2 和临界切向应力 X_3 的优化范围,根据文献[22 – 23]以及前期预试验对各参数范围进行选取,试验方案与结果如表 2 所示。结果表明,内聚力 Y_1 和内摩擦角 Y_2 均随土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和临界切向应力的增大而增大,确定土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和临界切向应力的优化范围分别为 $4 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $4 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

表 2 最陡爬坡试验方案与结果

Tab.2 Test design scheme and results of steepest climb					
试验 序号	土壤颗粒间 法向刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	土壤颗粒间 切向刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	土壤颗粒 间临界切 向应力/ Pa	内聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ($^\circ$)
1	1×10^8	1×10^8	1×10^5	14. 43	13. 64
2	2×10^8	2×10^8	2×10^5	22. 83	14. 79
3	3×10^8	3×10^8	3×10^5	29. 07	15. 07
4	4×10^8	4×10^8	4×10^5	34. 61	15. 67
5	5×10^8	5×10^8	5×10^5	39. 59	17. 51
6	6×10^8	6×10^8	6×10^5	44. 63	18. 23
7	7×10^8	7×10^8	7×10^5	50. 83	20. 84
8	8×10^8	8×10^8	8×10^5	53. 27	22. 16

以直剪仿真试验的土壤内聚力和内摩擦角为响应指标,以土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和土壤颗粒间临界切向应力为试验因素进行中心复合正交试验设计(Central composite design, CCD)。每组试验重复 3 次并取平均值,各试验因素编码如表 3 所示。试验方案与结果如表 4 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

运用 Design-Expert 软件对试验数据进行回归

表 3 试验因素编码

Tab.3 Coding of experimental factors			
编码	因素		
	土壤颗粒间法向 刚度 $A/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	土壤颗粒间切向 刚度 $B/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	土壤颗粒间临界 切向应力 C/Pa
	– 1. 682	$3. 318 \times 10^8$	$3. 318 \times 10^8$
– 1	4×10^8	4×10^8	4×10^5
0	5×10^8	5×10^8	5×10^5
1	6×10^8	6×10^8	6×10^5
1. 682	$6. 682 \times 10^8$	$6. 682 \times 10^8$	$6. 682 \times 10^5$

表 4 参数标定试验方案与结果

Tab.4 Experiment schemes and results					
序号	因素			内聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
	X_1	X_2	X_3		
1	– 1	– 1	– 1	34. 66	15. 47
2	1	– 1	– 1	40. 12	18. 63
3	– 1	1	– 1	35. 15	15. 68
4	1	1	– 1	41. 67	19. 27
5	– 1	– 1	1	34. 63	15. 14
6	1	– 1	1	40. 84	18. 91
7	– 1	1	1	36. 92	16. 22
8	1	1	1	44. 61	21. 27
9	– 1. 682	0	0	33. 76	14. 19
10	1. 682	0	0	44. 84	21. 07
11	0	– 1. 682	0	36. 33	15. 93
12	0	1. 682	0	40. 47	18. 74
13	0	0	– 1. 682	37. 84	16. 87
14	0	0	1. 682	39. 89	18. 53
15	0	0	0	39. 53	18. 21
16	0	0	0	38. 87	17. 97
17	0	0	0	38. 57	17. 83
18	0	0	0	39. 26	18. 17
19	0	0	0	38. 14	17. 19
20	0	0	0	38. 38	17. 45

分析,方差分析结果如表 5 所示,并分别得到内聚力 Y_1 及内摩擦角 Y_2 与标定参数的回归方程为

表 5 方差分析结果

Tab.5 Results of variance analysis								
方差来源	内聚力				内摩擦角			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	171. 59	9	101. 57	<0. 000 1 **	64. 06	9	52. 24	<0. 000 1 **
X_1	145. 09	1	773. 01	<0. 000 1 **	53. 94	1	395. 85	<0. 000 1 **
X_2	16. 61	1	88. 51	<0. 000 1 **	5. 95	1	43. 68	<0. 000 1 **
X_3	5. 73	1	30. 54	0. 000 3 **	2. 04	1	14. 99	0. 003 1 **
$X_1 X_2$	0. 806 4	1	4. 3	0. 065	0. 365 5	1	2. 68	0. 132 5
$X_1 X_3$	0. 460 8	1	2. 45	0. 148 2	0. 535 6	1	3. 93	0. 075 5
$X_2 X_3$	2. 02	1	10. 76	0. 008 3 **	0. 838 5	1	6. 15	0. 032 5 *
X_1^2	0. 206 9	1	1. 1	0. 318 5	0. 042 3	1	0. 310 1	0. 589 9
X_2^2	0. 567 1	1	3. 02	0. 112 8	0. 361 8	1	2. 66	0. 134 3
X_3^2	0. 016 6	1	0. 088 6	0. 772 1	0. 012 5	1	0. 091 4	0. 768 6
残差	1. 88	10			1. 36	10		
失拟项	0. 463 1	5	0. 327 6	0. 877	0. 533 2	5	0. 643	0. 680 1
误差	1. 41	5			0. 829 3	5		
总和	173. 46	19			65. 42	19		

注: ** 表示差异极显著($P \leq 0. 01$), * 表示差异显著($0. 01 < P < 0. 05$)。下同。

$$Y_1 = 38.80 + 3.26X_1 + 1.10X_2 + 0.6479X_3 + 0.3175X_1X_2 + 0.2400X_1X_3 + 0.5025X_2X_3 + 0.1198X_1^2 - 0.1984X_2^2 - 0.0340X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 17.80 + 1.99X_1 + 0.6602X_2 + 0.3867X_3 + 0.2137X_1X_2 + 0.2587X_1X_3 + 0.3237X_2X_3 - 0.0541X_1^2 - 0.1584X_2^2 - 0.0294X_3^2 \quad (3)$$

1.2.3 参数优化

通过 Design-Expert 软件数字化模块中愿望函数 (Numerical) 对 3 个变量进行优化,选取两个响应值的愿望目标,即仿真土壤模型的内聚力和内摩擦角分别为 42.86 kPa 和 17.73°。将土壤内聚力作为目标值时,土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和土壤颗粒间临界切向应力为 $5.927 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $5.593 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $5.152 \times 10^5 \text{ Pa}$,而内摩擦角为 20.144°;将土壤内摩擦角作为目标值时,土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和土壤颗粒间临界切向应力分别为 $5.093 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $4.486 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $5.590 \times 10^5 \text{ Pa}$,而内聚力为 38.703 kPa。为协调两响应值的最优解,选用多目标优化方法中的罚款模型进行求解,设置土壤内聚力和内摩擦角为相同权重,优化问题的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Z = \frac{(Y_1 - 42.86)^2}{42.86} + \frac{(Y_2 - 17.73)^2}{17.73} \\ \text{s. t. } \begin{cases} 5.093 \times 10^8 \text{ N/m}^3 \leq A \leq 5.927 \times 10^8 \text{ N/m}^3 \\ 4.486 \times 10^8 \text{ N/m}^3 \leq B \leq 5.593 \times 10^8 \text{ N/m}^3 \\ 5.152 \times 10^5 \text{ Pa} \leq C \leq 5.590 \times 10^5 \text{ Pa} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

当土壤颗粒间法向刚度、土壤颗粒间切向刚度和土壤颗粒间临界切向应力分别为 $5.302 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $4.486 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $5.303 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,目标函数值最小。此时,仿真土壤模型的内摩擦角和内聚力分别为 18.070°和 39.263 kPa,与土壤直剪试验结果的相对误差分别为 1.92%、8.39%,证明通过土壤直剪试验标定的土壤粘结参数准确可靠,可应用于后续研究。

1.3 EDEM 仿真模型

使用参数标定后的土壤颗粒生成土槽模型,其长×宽×高为 600 mm×300 mm×210 mm。将破土切根刀几何模型导入 EDEM 软件,在 EDEM 软件中建立破土切根刀与土壤的互作模型,如图 6 所示。在保证仿真过程中土壤颗粒连续运动的前提下,设定 Rayleigh 时间步长为 $1.13 \times 10^{-4} \text{ s}$,固定时间步长为 $8 \times 10^{-6} \text{ s}$,网格单元尺寸为 10 倍的最小颗粒半径。

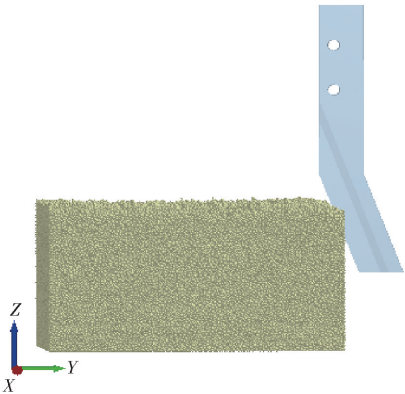


图6 破土切根刀-土壤互作模型
Fig.6 Soil-breaking and root-cutting cutter - soil interaction model

2 单因素参数仿真试验

为合理确定响应面试验中各试验因素的取值范围,对不同结构参数破土切根刀的仿真试验结果进行分析。在进行各单因素试验时,固定破土切根刀作业速度为 1 km/h、作业深度为 10 cm^[20,22]。

2.1 评价指标及测定方法

对各破土切根刀的作业效果进行综合评价,测定内容包括耕作阻力、土壤扰动失效面积及比阻。通过 EDEM 的 Selection 模块获取破土切根刀作业时的耕作阻力,取仿真作业平稳阶段,得到各破土切根刀的耕作阻力平均值^[24]。

以土壤颗粒是否具有运动速度为条件,绘制土壤颗粒的运动速度临界曲线作为土壤扰动的坑形轮廓;以土壤在地表的堆积轮廓作为土壤扰动的垄形轮廓,坑形轮廓和垄形轮廓共同组成土壤横剖面扰动轮廓^[25]。如图 7 所示,灰色图形轮廓即为土壤横剖面扰动轮廓,轮廓面积即为土壤扰动失效面积。利用 opencv 开源视觉库将土壤横剖面扰动轮廓原始图像转换为灰度图像,并对灰度图像进行二值化处理,在二值化图像中对土壤横剖面扰动轮廓进行提取,通过面积计算函数得到土壤扰动失效面积。

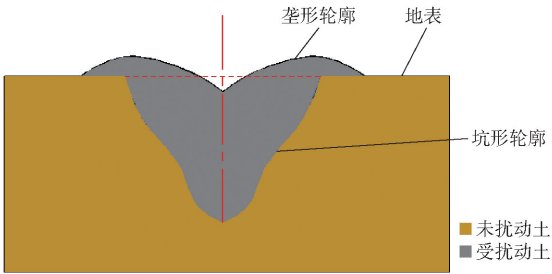


图7 土壤扰动轮廓示意图
Fig.7 Schematic of soil disturbance profile

耕作比阻(耕作阻力与土壤扰动失效面积的

比值)是机具-土壤耕作研究中的一个重要性能指标,能够反映耕作阻力与土壤扰动的综合效果。相比耕作阻力,耕作比阻能更加全面地反映机具耕作效率。

2.2 刃口角对破土切根作业的影响

刃口角过小会加剧刃口磨损,使刃口面发生变形失效,刃口角过大会导致入土阻力过大。结合《农业机械设计手册》及文献[9],设置刃口角分别为 30°、40°、50°、60°、70°。固定滑切角为 20°、无切齿,进行 5 组仿真试验。

试验结果如图 8 所示,随着刃口角的增大,破土切根刀的比阻呈先减小后增大的趋势,耕作阻力及土壤扰动失效面积呈现逐渐增长的趋势,但两者的增长速率差异较大,耕作阻力的增长趋势十分明显,而土壤扰动失效面积的增长速率则较为缓慢。刃口角在 30°~40°范围内时,破土切根刀的耕作阻力最小,但刃口角为 30°时比阻最大,作业效率不高。刃口角在 40°~50°范围内时,破土切根刀的比阻最小,作业效率较高,且耕作阻力在此范围内的变化幅度也最大。当刃口角在 50°~70°范围内时,破土切根刀的耕作阻力过高。在保证破土切根刀保持较高作业效率的同时,应选择受到较小耕作阻力时的参数条件,综合考虑 3 项评价指标曲线的变化规律,在进行后续的响应面优化试验时,设置刃口角的水平范围为 30°~50°。

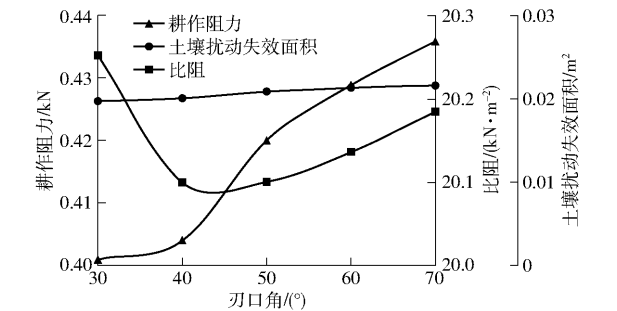


图 8 刃口角对破土切根刀作业的影响

Fig. 8 Influence of cutting edge angle on operation of soil-breaking and root-cutting cutter

2.3 滑切角对破土切根作业的影响

滑切角过小则滑切效应不明显,无法产生有益效果;而滑切角过大则会引起破土切根刀整体尺寸过大并由此引发强度不足和应力干涉等问题,结合《农业机械设计手册》,设置滑切角分别为 20°、25°、30°、35°、40°。固定刃口角为 30°、无切齿,进行 5 组仿真试验。

试验结果如图 9 所示,比阻随着滑切角的增大呈先减小后增大的趋势,耕作阻力和土壤扰动失效面积随着滑切角的增大而增大,土壤扰动失效

面积的增长趋势逐渐变得平缓,而耕作阻力的上升趋势则逐渐加快。滑切角为 30°时破土切根刀比阻最小,即作业效率最高;当滑切角为 20°~25°时,比阻较高,即作业效率较低;而当滑切角大于 35°时,耕作阻力过高。综上分析,在进行后续的响应面优化试验时,设置滑切角的水平范围为 25°~35°。

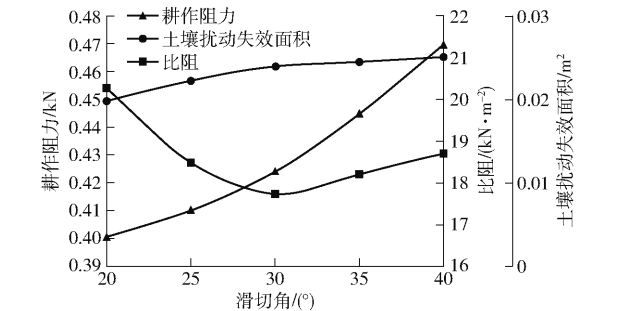


图 9 滑切角对破土切根刀作业的影响

Fig. 9 Influence of sliding angle on operation of soil-breaking and root-cutting cutter

2.4 切齿角对破土切根作业的影响

切齿角过小或过大时减阻效益均不明显,且切齿角过小刀具不易加工,参考文献[13],设置切齿高为 5 mm,切齿形状为等腰三角形,切齿角分别为 30°、40°、50°、60°、70°。固定刃口角为 30°、滑切角为 20°,进行 5 组仿真试验。

试验结果如图 10 所示,随着切齿角的增大,破土切根刀的耕作阻力和比阻均呈现先减小后增大的趋势,且两者均在切齿角为 50°时达到最小值,表明破土切根刀在此时具有最好的减阻效果和最高的作业效率。通过与前两组的单因素试验结果对比发现,与无切齿的破土切根刀相比,添加切齿具有明显的减阻效果。另外,土壤扰动失效面积的变化幅度较小,表明其受切齿角变化的影响较弱。

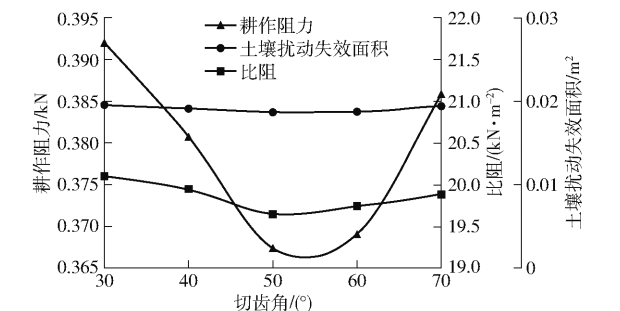


图 10 切齿角对破土切根刀作业的影响

Fig. 10 Influence of cutting tooth angle on operation of soil-breaking and root-cutting cutter

由于耕作阻力和比阻均在切齿角为 50°时达到最小值,并观察两者在切齿角 50°前后的变化规律,在进行后续的响应面优化试验时,设置切齿角的水平范围为 40°~60°。

3 参 数 组 合 优 化 试 验

为提高破土切根作业效率,以较低的耕作阻力得到较大的板结草地失效面积,需要对破土切根刀结构参数进行组合优化。

3.1 优化试验设计

为探究破土切根刀各结构参数之间的交互作用,运用 Design-Expert 12 软件进行三因素五水平二次正交旋转中心组合设计试验,依据 Central Composite 中心组合设计理论,通过仿真试验,分析破土切根刀结构参数对各评价指标参数的影响。与单因素试验相同,设置作业速度为 1 km/h、作业深度为 10 cm。综合考虑各单因素试验结果,确定试验因素编码如表 6 所示。

表 6 优化试验因素编码
Tab.6 Experiment factors code

编码	因素		
	刃口角/(°)	滑切角/(°)	切齿角/(°)
-1.682	30	25	40
-1	34	27	44
0	40	30	50
1	46	33	56
1.682	50	35	60

3.2 试验结果

优化试验结果如表 7 所示,表中 X_4 、 X_5 、 X_6 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 8 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,表明无失拟因素存在,回归模型拟合度较高。在耕作阻力 Y_4 响应面

模型中,因素 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_4^2 、 X_5^2 、 X_6^2 对模型影响极显著;在土壤扰动失效面积 Y_5 响应面模型中,因素 X_4 、 X_5 、 X_5^2 对模型影响极显著,因素 X_4X_5 对模型影响显著;在比阻 Y_6 响应面模型中,因素 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_4^2 对模型影响显著,因素 X_6^2 对模型影响极显著。

表 7 试验方案与结果
Tab.7 Experiment schemes and results

试验 序号	因素			耕作 阻力	土壤扰动 失效面积	比阻 $Y_6/$
	X_4	X_5	X_6	Y_4/kN	Y_5/m^2	($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)
1	-1	-1	-1	0.401 2	0.017 0	23.6
2	1	-1	-1	0.411 3	0.017 1	24.052 6
3	-1	1	-1	0.417 6	0.017 9	23.329 6
4	1	1	-1	0.433 7	0.018 5	23.443 2
5	-1	-1	1	0.391 0	0.016 9	23.136 1
6	1	-1	1	0.404 2	0.017 0	23.776 5
7	-1	1	1	0.411 0	0.017 8	23.089 9
8	1	1	1	0.429 1	0.018 5	23.194 6
9	-1.682	0	0	0.389 5	0.017 2	22.645 3
10	1.682	0	0	0.417 4	0.017 7	23.581 9
11	0	-1.682	0	0.387 1	0.016 9	22.905 3
12	0	1.682	0	0.419 5	0.018 8	22.313 8
13	0	0	-1.682	0.414 7	0.017 5	23.697 1
14	0	0	1.682	0.399 2	0.017 4	22.942 5
15	0	0	0	0.398 4	0.017 4	22.896 6
16	0	0	0	0.399 7	0.017 6	22.710 2
17	0	0	0	0.396 7	0.017 3	22.930 6
18	0	0	0	0.400 6	0.017 2	23.290 7
19	0	0	0	0.390 4	0.017 0	22.964 7
20	0	0	0	0.397 2	0.017 2	23.093 0
21	0	0	0	0.393 0	0.017 3	22.716 8
22	0	0	0	0.391 4	0.017 4	22.494 3
23	0	0	0	0.398 0	0.017 6	22.613 6

表 8 方差分析
Tab.8 Analysis of variance

方差 来源	耕作阻力				土壤扰动失效面积				比阻			
	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	0.003 4	9	17.02	0.000 1**	5.698×10^{-6}	9	26.67	0.000 1**	3.15	9	3.97	0.012 5*
X_4	0.000 8	1	35.94	0.000 1**	4.012×10^{-7}	1	16.91	0.001 2**	0.610 1	1	6.91	0.020 8*
X_5	0.001 4	1	62.95	0.000 1**	4.565×10^{-6}	1	192.33	0.000 1**	0.458 6	1	5.19	0.040 2*
X_6	0.000 2	1	9.82	0.007 9**	1.605×10^{-8}	1	0.676 3	0.425 7	0.456 7	1	5.17	0.040 5*
X_4X_5	1.485×10^{-5}	1	0.668 6	0.428 3	1.513×10^{-7}	1	6.37	0.025 4*	0.095 6	1	1.08	0.3170
X_4X_6	3.251×10^{-6}	1	0.146 4	0.708 2	1.250×10^{-9}	1	0.052 7	0.822 1	0.004 0	1	0.045 3	0.834 8
X_5X_6	4.651×10^{-6}	1	0.209 4	0.654 8	1.250×10^{-9}	1	0.052 7	0.822 1	0.007 9	1	0.089 7	0.769 3
X_4^2	0.000 3	1	11.99	0.004 2**	2.413×10^{-8}	1	1.02	0.331 7	0.513 5	1	5.82	0.031 4*
X_5^2	0.000 3	1	11.69	0.004 6**	5.170×10^{-7}	1	21.79	0.000 4**	0.000 0	1	0.000 4	0.983 7
X_6^2	0.000 5	1	20.34	0.000 6**	2.413×10^{-8}	1	1.02	0.331 7	1.01	1	11.49	0.004 8**
残差	0.000 3	13			2.373×10^{-8}	13			1.15	13		
失拟	0.000 2	5	2.68	0.103 4	1.707×10^{-9}	5	0.045 5	0.998 3	0.653 3	5	2.11	0.165 5
误差	0.000 1	8			3.750×10^{-8}	8			0.494 4	8		
总和	0.003 7	22				22			4.30	22		

剔除不显著交互项后得出各试验因素对耕作阻力 Y_4 、土壤扰动失效面积 Y_5 、比阻 Y_6 的回归方程为

$$Y_4 = 0.396\,0 + 0.007\,6X_4 + 0.010\,1X_5 - 0.004\,0X_6 + 0.004\,1X_4^2 + 0.004\,0X_5^2 + 0.005\,3X_6^2 \quad (5)$$
$$Y_5 = 0.017\,3 + 0.000\,2X_4 + 0.000\,6X_5 - 3.428\,2 \times 10^{-5}X_6 + 0.000\,1X_4X_5 + 0.000\,2X_5^2 \quad (6)$$
$$Y_6 = 22.85 + 0.211\,4X_4 - 0.183\,3X_5 - 0.182\,9X_6 + 0.179\,8X_4^2 + 0.252\,7X_6^2 \quad (7)$$

3.3 试验因素对评价指标的影响分析

根据试验结果可以得到刃口角、滑切角、切齿角

交互作用对破土切根刀各性能指标的影响,利用 Design-Expert 12 软件绘制响应曲面图。

各试验因素对耕作阻力的响应曲面图如图 11 所示。由图 11a、11b 可知,耕作阻力随着刃口角的增大而增大。耕作阻力受刃口角变化产生的增长幅度较大,这是因为刃口角的增大使得破土切根刀的入土性能变差,其入土阻力也逐渐增大,故其耕作阻力也逐渐上升。

由图 11a、11c 可知,耕作阻力随着滑切角的增大而增大。当刀具切削土壤时,一方面,切割阻力随

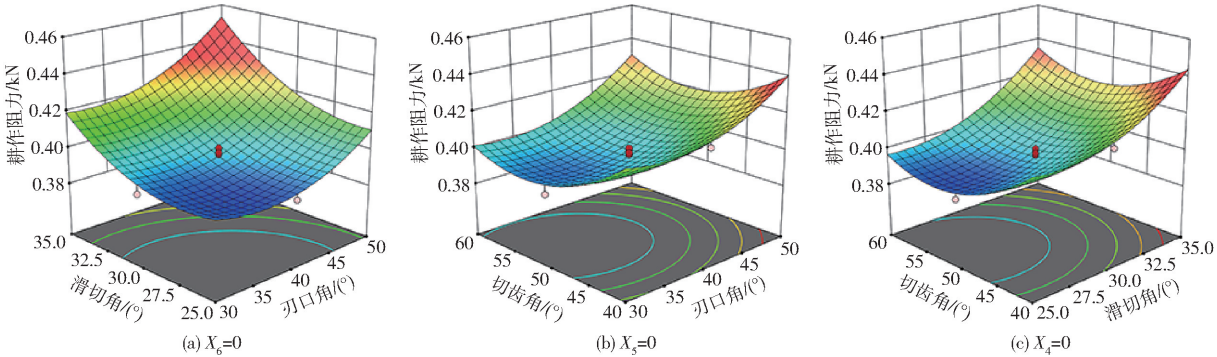


图 11 试验因素对耕作阻力影响的响应曲面
Fig. 11 Effect of experimental factors on tillage resistance

着滑切角的增大而减小^[17,19];另一方面,当作业深度固定时,随着滑切角的增大,刀具与土壤的接触面积变大,导致摩擦阻力增大^[18]。显然,对于破土切根刀来说,增大滑切角使其摩擦阻力的增大程度大于切割阻力的减小程度,且滑切角越大,此现象越明显,最终表现为耕作阻力随着滑切角的增大而增大。

由图 11b、11c 可知,耕作阻力随着切齿角的增大呈先减小后增大的趋势,这表明在此切齿角区间内存在最优的切齿角度使得破土切根刀的耕作阻力最低。

各试验因素对土壤扰动失效面积的响应曲面图如图 12 所示。从图 12a 可以看出,土壤扰动失效面积随着刃口角的增大而增大,且其变化幅度随着滑切角的增大而增大,说明两者有较强的交互作用。

从图 12b 也可以看出,土壤扰动失效面积随着刃口角的增大而增大,但增长速度较为缓慢,故变化幅度也相对较小。

从图 12a、12c 可以看出,土壤扰动失效面积随着滑切角的增大而增大。这是因为破土切根刀与土壤的接触面积随着滑切角的增大而增大,进而使得破土切根刀造成的土壤扰动失效面积增大。

从图 12b、12c 可以看出,随着切齿角的增大,土壤扰动失效面积无明显变化,并且其对刃口角和滑切角也无明显的交互作用,这表明切齿角对土壤扰动失效面积无显著影响。

各试验因素对比阻的响应曲面图如图 13 所示。从图 13a、13b 可以看出,比阻随着刃口角的增大呈现先减小后增大的趋势,这表明在此刃口角区间内

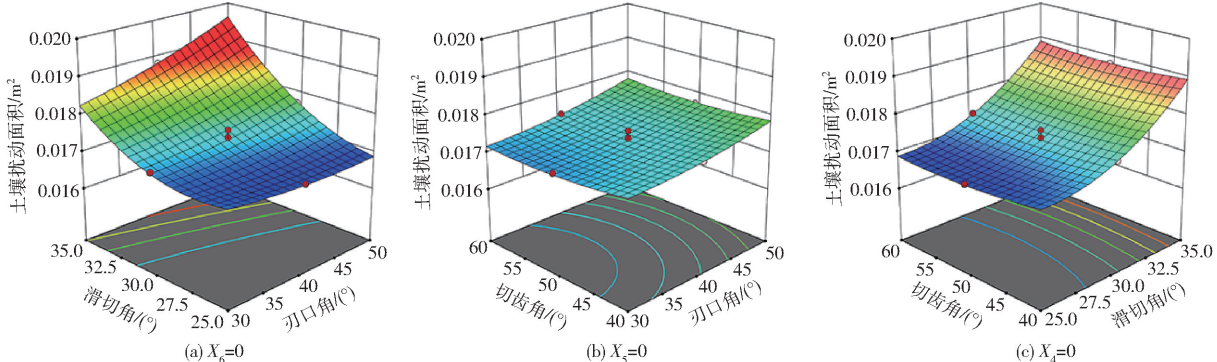


图 12 试验因素对土壤扰动失效面积影响的响应曲面
Fig. 12 Effect of experimental factors on soil disturbance area

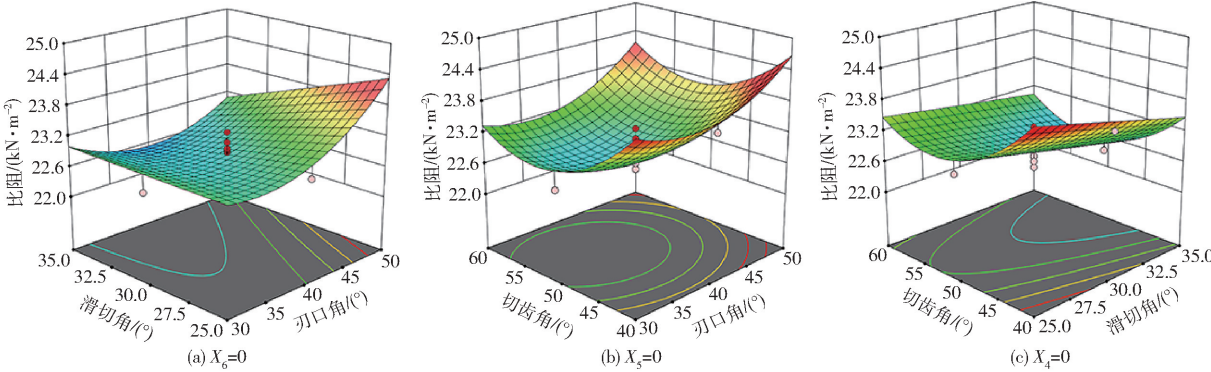


图 13 试验因素对比阻影响的响应曲面

Fig. 13 Effect of experimental factors on specific resistance

存在最优的刃口角度使得破土切根刀的作业效率最高。从图 13a、13c 可以看出,比阻随着滑切角的增大而减小,滑切角增大虽然使耕作阻力逐渐增大,但同时也提高了作业效率。从图 13b、13c 可以看出,比阻随着切齿角的增大呈现先减小后增大的趋势,这表明在此切齿角区间内存在最优的切齿角度使得破土切根刀的作业效率最高。

3.4 最优参数组合

在尽可能小的耕作阻力条件下获取较大的板结草地失效面积和较高的作业效率,据此选取目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_4 \\ \max Y_5 \\ \min Y_6 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_4 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_5 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_6 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

求解得到最优参数组合为:刃口角 37.8°、滑切角 33.6°、切齿角 51.8°。以该最优参数组合进行仿真验证试验,得到耕作阻力为 0.411 2 kN,土壤扰动失效面积为 0.018 2 m²,比阻为 22.593 4 kN/m²,与优化结果基本一致。

4 草地试验

由于破土切根刀尚无设计标准,本文通过与 HE 等^[26]设计的三角形破土切根刀相对比,以检验经寻优后破土切根刀的作业效果。根据参数优化结果加工破土切根刀,并于 2022 年 6 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。

4.1 试验设计

因该区域草地板结程度不一,导致草地土壤的坚实度差异较大。根据草地土壤的实际状况,按坚实度的不同选取 2 个试验区域(区域 A 和区域 B),

以评估破土切根刀对不同板结程度草地土壤的作业效果。使用土壤紧实度仪测定区域 A 的平均坚实度为 3 928 kPa,区域 B 的平均坚实度为 3 059 kPa。

试验装置主要由机架、破土切根刀、限深装置及测力系统组成,如图 14 所示。优化破土切根刀(T1)及三角形破土切根刀(T2)如图 15 所示。试验时,控制拖拉机以慢 2 挡((1.08±0.14)km/h)的速度前进,通过拖拉机悬挂系统和试验台限深装置控制作业深度为 8 cm。



图 14 草地试验装置

Fig. 14 Grassland test device

1. 数据记录仪 2. 压力传感器 3. 限深装置 4. 机架 5. 破土切根刀



图 15 两种破土切根刀

Fig. 15 Two types of soil-breaking and root-cutting cutters

选择水平耕作阻力、土壤扰动失效面积及地表平整度作为评价指标对两种破土切根刀的作业效果进行评价。取平稳阶段数据的平均值作为测力系统

采集到的水平方向运动阻力,并按照文献[2]的方法计算耕作部件在土层中受到的水平耕作阻力。使用土壤扰动截面轮廓测定装置获取土壤扰动失效面积,如图 16 所示。通过该装置分别测量作业后的垄形轮廓和坑形轮廓,将两者绘制在坐标参数纸上,并计算土壤扰动失效面积。在土壤扰动轮廓的最高点作水平线并将其作为基准线,在扰动范围内以 10 mm 为等分作标记点,测量各标记点至基准线的垂直距离,以所测垂直距离的标准差作为地表平整度^[27-28]。

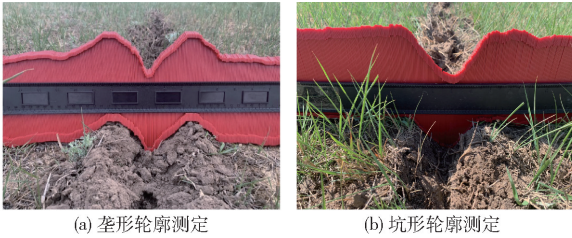


图 16 土壤扰动截面轮廓测定

Fig. 16 Determination of soil disturbance area

4.2 结果与讨论

试验结果如表 9 所示。试验结果表明,优化破土切根刀的水平耕作阻力小于三角形破土切根刀,其在区域 A 的减阻率为 11.8%,在区域 B 的减阻率为 12.8%。三角形破土切根刀作业时,受到土壤及根系等的壅堵作用较大;而优化破土切根刀对刃口设置了滑切角及切齿角,受到的壅堵作用较三角形破土切根刀明显减少,故优化破土切根刀表现出明显的减阻效果。

表 9 草地试验结果
Tab. 9 Grassland test results

试验 区域	水平耕作阻力/ kN		土壤扰动失效 面积/m ²		地表平整度/ mm	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
A	1.646 0	1.865 2	0.005 8	0.007 1	6.94	9.09
B	1.238 6	1.419 6	0.006 1	0.007 9	7.13	11.03

三角形破土切根刀的土壤扰动失效面积大于优化破土切根刀,即其对板结草地土壤的扰动失效程度要大于优化破土切根刀,但优化破土切根刀作业后的地表平整度小于三角破土切根刀。两种破土切根刀的作业效果如图 17 所示。三角形破土切根刀实施作业后,板结草地表层的翻垡现象相对明显,在坚实度较小的区域 B 尤为明显,正由于此,导致三角形破土切根刀作业后的土壤扰动失效面积和地表平整度较大。虽然三角形破土切根刀产生的扰动失效面积大于优化破土切根刀,但产生的翻垡并不属于有益扰动失效。因为耕作后地表平整度越小,土地的蓄水保墒能力越强^[29],处于干旱半干旱地区的

典型草原雨季较短且降水较少,但季风较强,三角形破土切根刀作业后产生的翻垡不利于草地土壤保墒。而优化破土切根刀在实施作业后,板结草地表层产生的土壤扰动形式类似于 U 形沟槽,使用钢尺测量沟槽底部宽度,其平均宽度(18.4 mm)略高于破土切根刀厚度(14 mm),地表并未产生明显翻垡,且地表平整度较小。综上,优化破土切根刀更符合草地作业农艺要求。

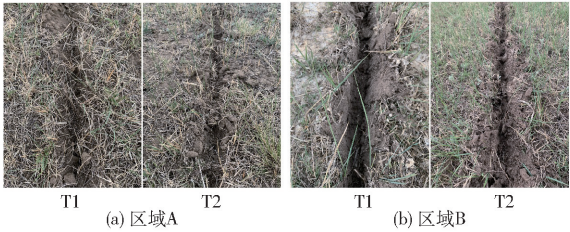


图 17 破土切根刀作业效果

Fig. 17 Operation effect of soil-breaking and root-cutting cutter

本研究的目的在于推进草地破土切根刀的标准
化设计,主要对其结构参数(刃口角、滑切角及切齿角)进行了优化试验。刃口角和滑切角是耕作部件设计中的重要结构参数,但其在破土切根刀设计中的作用原理尚不清晰。研究结果表明,刃口角与滑切角对耕作阻力和土壤扰动失效面积均有显著影响。当刃口角增大时,耕作阻力和土壤扰动失效面积均表现为上升趋势,滑切角亦是如此。一方面,增大刃口角或滑切角,耕作阻力加大使得机组能耗升高;但另一方面,刃口角或滑切角的增大也使得土壤扰动失效面积增大,由于板结草地的失效程度随着土壤扰动失效面积的增大而增大,故其对草地板结结构的破除以及草地板结土层的重构表现出积极作用。本文通过 Design-Expert 12 软件得到了破土切根刀最优结构参数组合,在进行草地作业时,可根据草地板结程度进行适度调整。当草地板结程度较为严重时,可适当增大刃口角或滑切角,以增大板结草地的失效程度,更有效的打破草地板结结构;当草地板结程度较轻时,可适当减小刃口角或滑切角,以减小耕作阻力,降低能耗损失。

在耕作部件上添加切齿有利于减小作业阻力^[30],但前人关于切齿角的研究更多集中在仿生借鉴上^[13,15],切齿角度选择原理不明晰且齿型复杂,本文在前人研究已确定切齿角可以有效降低耕作阻力的基础上,对切齿角进行了寻优。从本研究的试验结果来看,在刀具刃口添加切齿角可以有效降低耕作阻力,但对土壤扰动失效面积的影响并不显著。在进行破土切根作业时,草地板结使得刀具受到的耕作阻力过大,严重时会导致刀具发生变形破坏,建议在刀具刃口增设切齿以降低耕作阻力。

5 结论

(1)通过直剪试验标定了草地土壤的粘结模型参数,土壤颗粒间法向刚度为 $5.302 \times 10^8 \text{ N/m}^3$,土壤颗粒间切向刚度为 $4.486 \times 10^8 \text{ N/m}^3$,土壤颗粒间临界切向应力为 $5.303 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。以标定的粘结参数值进行验证试验,得到土壤内聚力的相对误差为1.92%,内摩擦角的相对误差为8.39%。

(2)对破土切根刀进行了结构优化设计,并建立土壤-破土切根刀互作仿真模型。通过单因素试

验和三因素五水平二次正交旋转中心组合设计试验分析刃口角、滑切角及切齿角对耕作阻力、土壤扰动失效面积、比阻的影响,对参数优化试验结果进行回归分析,并得到最优参数组合为:刃口角 37.8° 、滑切角 33.6° 、切齿角 51.8° 。

(3)草地试验表明,与三角形破土切根刀相比,优化破土切根刀具有更好的减阻效果,在不同坚实度草地土壤的减阻率分别为11.8%和12.8%,地表平整度较小且作业后未出现翻垡现象,更符合草地作业的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 尤泳.退化羊草草地机械化破土切根改良技术优化研究[D].北京:中国农业大学,2011.
YOU Yong. Mechanical remediation technology of degraded (*Leymus-chinensis*) by soil-gashing and root-cutting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[2] 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)

[3] YOU Yong, WANG Decheng, LIU Jude. A device for mechanical remediation of degraded grasslands[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 118: 1-10.

[4] 梁方,王德成,尤泳,等.草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(1):1-10.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 1-10. (in Chinese)

[5] 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)

[6] HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Effect of tine geometry on penetration resistance during vertical movement on natural grassland[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2019, 59(3): 19-26.

[7] 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)

[8] 尤泳,贺长彬,王德成,等.土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J].农业机械学报,2017,48(6):50-58.
YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 50-58. (in Chinese)

[9] 苑进,李金光,邹明亮,等.基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):85-98.
YUAN Jin, LI Jinguang, ZOU Liangliang, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup.2): 85-98. (in Chinese)

[10] 郝建军,于海杰,赵建国,等.楔形减阻旋耕刀设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(8):55-64.
HAO Jianjun, YU Haijie, ZHAO Jianguo, et al. Design and test of wedge drag reduction rotary blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 55-64. (in Chinese)

[11] 王加一,赵淑红,高连龙,等.玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(11):59-67.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in corn ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 59-67. (in Chinese)

[12] 侯守印,陈海涛,邹震,等.原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(6):41-51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41-51,217. (in Chinese)

[13] CHANG Zhiyong, LIU Wei, TONG Jin, et al. Design and experiments of biomimetic stubble cutter[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 335-343.

[14] 李默.基于螳螂前足结构特征的仿生切茬刀片设计[D].长春:吉林大学,2013.
LI Mo. Design of bionic stubble-cutting based on the structural characteristic of praying mantis (*Mantis religiosa Linnaeus*)’s foreleg[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)

[15] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等.免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J].农业机械学报,2018,49(10):103-114.

- JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103–114. (in Chinese)
- [16] GODWIN R J, O'DOHERTY M J. Integrated soil tillage force prediction models[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1): 3–14.
- [17] 尤泳, 贺长彬, 王德成, 等. 一种破除退化草地土壤根系复合体结构的方法及装置: CN106068751B[P]. 2018–02–09.
- [18] 王庆杰, 姚宗路, 高焕文, 等. 楔刀型免耕开沟器设计与试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 177–182.
- WANG Qingjie, YAO Zonglu, GAO Huanwen, et al. Design and experiment on a wedge shaped no-tillage opener[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 177–182. (in Chinese)
- [19] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85.
- WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 方会敏, 姬长英, AHMED ALI Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
- FANG Huimin, JI Changying, AHMED ALI Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- [22] 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- CAO Xiuzhen. Design and test of no-till seeding opener on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [23] 同霄, 朱兴华, 马鹏辉, 等. 颗粒离散元方法中黄土强度参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 120–127.
- TONG Xiao, ZHU Xinghua, MA Penghui, et al. Study on the strength parameters of loess in granular discrete element method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 120–127. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80–88.
- HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80–88. (in Chinese)
- [26] 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: 23–32.
- [27] 丁启朔, 李杨, BELAL Eisa Adam, 等. 基于田间摄像的多参数水稻土深松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)
- [28] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72.
- ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. (in Chinese)
- [29] 张喜瑞, 曾望强, 刘俊孝, 等. 基于离散元的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40–49.
- ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of 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)
- [30] 赵淑红, 杨罗罗, 张鑫, 等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 74–84.
- ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean didge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74–84. (in Chinese)