



郭艳颖, 贺长彬, 桑洪超, 毕玉革, 刘美玉, 王新. 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(01): 224-233.
GUO Yanying, HE Changbin, SANG Hongchao, BI Yuge, LIU Meiyu, WANG Xin. Comprehensive evaluation model for the operational suitability of tillage components applied on natural grassland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 224-233.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.20

耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型研究

郭艳颖¹ 贺长彬^{1,2*} 桑洪超¹ 毕玉革¹ 刘美玉¹ 王新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)

摘要 针对现有的耕作部件在天然草地作业时存在一定的局限性, 缺少草地作业适用性综合评价方式和专用草地改良耕作部件作业效果评价体系的问题, 采用变异系数法和线性加权法对各评价指标权重和耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型进行研究; 采用田间试验方法对耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型进行验证。结果表明: 基于牵引力、地表翻垡率和土壤扰动系数3个指标构建的耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型, 能有效评估耕作部件的天然草地作业适用性, 应用该模型对不同耕作部件的作业效果进行综合评价, 与现有的研究结果相符, 模型具有可行性, 该模型为耕作部件在天然草地作业中的适用性综合评价提供了一种更为便捷的方法。

关键词 耕作部件; 综合评价模型; 变异系数法; 线性加权法

中图分类号 S222 文章编号 1007-4333(2025)01-0224-10 文献标志码 A

Comprehensive evaluation model for the operational suitability of tillage components applied on natural grassland

GUO Yanying¹, HE Changbin^{1,2*}, SANG Hongchao¹, BI Yuge¹, LIU Meiyu¹, WANG Xin¹

(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)

Abstract In view of the limitations of the current tillage components in natural grassland operation and the lack of comprehensive evaluation method for its applicability in grassland operations and the evaluation system for the operation effect of special grassland improvement tillage components, the coefficient of variation method and linear weighting method were adopted to study the weight of each evaluation index. A comprehensive evaluation model was constructed for the applicability of natural grassland operation of tillage components, and then field tests were conducted to verify the comprehensive evaluation model. The results showed that: The comprehensive evaluation model proposed in this study was constructed based on three indexes, e. g., traction force, surface turning rate and soil disturbance coefficient, which could effectively evaluate the applicability of tillage components in natural grassland operation. The operational effects of different tillage components evaluated by the new model in this study were consistent with the results of existing research, which confirmed the feasibility of the comprehensive evaluation model. In

收稿日期: 2024-03-30

基金项目: 内蒙古农业大学基本科研业务费专项资金资助(青年科技骨干基金项目)(BR220506); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51905277); 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0019)

第一作者: 郭艳颖(ORCID:0009-0001-0125-8121), 硕士研究生, E-mail: guo-yanying@emails.imau.edu.cn

通讯作者: 贺长彬(ORCID:0000-0002-2088-2261), 副教授, 主要从事草地机械化改良技术理论与应用研究, E-mail: changbin_he@imau.edu.cn

conclusion, this study provided a more convenient method for the comprehensive evaluation of the applicability of tillage components in natural grassland operation.

Keywords tillage component; comprehensive evaluation model; coefficient of variation method; linear weighting method

天然草地是陆地生态系统中的重要组成部分,对发展草原畜牧业具有重要意义,一旦天然草地遭受破坏,就会导致生态系统失衡,从而引发草地退化的问题,直接影响草地质量和产量,给畜牧业发展和生态环境建设带来巨大困难^[1-3]。

我国目前针对退化草地的修复方法主要包括围封禁牧、划区轮牧、浅耕、浅松和补播等^[4]。浅耕、浅松和补播等机械修复方式是实现退化草地生态恢复的有效方式,目前机械化改良方式大多采用传统的农田专用耕作部件,这些耕作部件在天然草地上作业时易产生翻垡、拉扯根系等现象,对草地地表产生一定的扰动和破坏,存在一定的局限性^[5-7];而且目前对退化草地改良过程中的耕作部件缺少综合性的草地作业适用性评价方式,这限制了专用草地改良耕作部件的创新研发以及作业效果的评价^[8]。

现有研究主要针对农田作业过程中所使用的耕作部件的作业性能进行评价,如刘俊安^[9]采用线性加权法建立了松土综合效应评价模型,能够直观评价不同类别深松铲的综合效果并进行参数优化;王加一^[10]在玉米灭茬刀设计中,为了优化耕作部件进行了综合评价,提出了作业性能指标,建立了土壤扰动量回归模型,并利用显著性检验分析各因素对土壤扰动量的影响;艾安君^[11]在手扶仿人田间铲土机设计过程中,利用标准差法和变异系数法对铲土机的参数进行优化,并综合评价与分析铲土机的作业性能,采用比较稳定性系数反映综合作业效果。然而,针对草地作业的耕作部件的作业适用性以及综合性能评价研究仍存在很大的缺口。由于草地土壤结构的特殊性,现有的农田耕作部件综合性能评价模型无法直接适用于草地作业,因此,根据草地特有的土层性质,提出针对草地耕作部件的综合性能评价模型成为十分重要的研究方向,对研发专用草地改良作业耕作部件以及评价相应的作业效果具有重要意义。

本研究拟以天然草地的耕作部件为研究对象,根据现有研究中的草地改良作业质量评价体系确定评价指标,建立适用于天然草地作业的耕作部件综合性能评价模型,利用田间试验对该评价模型进

行验证,旨在为天然草地耕作部件的综合性能评价提供参考依据。

1 天然草地耕作部件作业适用性综合评价体系构建

1.1 评价指标的确定

国内已有研究中,耕作部件优化的评价指标主要集中在阻力和功耗2方面,而从地表及地下扰动效果的评价较少,特别是综合这3个方面对耕作部件的结构参数进行全面优化的研究尚不充分^[12]。研究表明,天然草地的土壤-根系复合结构与草地作业耕作部件的相互作用受到复合土层结构和耕作部件几何参数的影响,其中地表扰动情况、土壤翻垡率、扰动横截面积、土壤蓬松度和土壤扰动系数能够很好地描述耕作部件在天然草地上作业的综合性能^[8,13]。因此,在评价天然草地专用耕作部件的工作性能时,应综合考虑工作阻力以及与土壤扰动相关的参数作为评估因素。

天然草地耕作部件作业时的理想效果是采用相对较小的能耗实现相对适度的土壤扰动^[14]。牵引力能够准确反映出耕作部件在作业过程中的能耗水平,因此是衡量耕作部件性能最重要的指标。地表翻垡率则是评估耕作部件在草地作业中对地表层土壤翻转程度的指标,能够表征耕作部件作业时对地表的扰动情况。土壤扰动系数则用于衡量耕作部件对土壤深层扰动的能力,合适的土壤扰动能够促进土壤松散度的提升^[12,14]。本研究确定以下3项适用性评价指标:牵引力(F)、地表翻垡率(f)和土壤扰动系数(D)。这些适用性评价指标的期望是牵引力越小越好,地表翻垡率越小越好,土壤扰动系数越大越好。这样的综合评价模型将有助于全面评估草地耕作部件的综合性能,并为其进一步优化提供科学依据。

依据JB/T 7135—2007《羊草地潜松耕犁》^[15]中地表翻垡率的测量方法:观察耕作部件作业后的地表,若沟面一侧与沟底的夹角大于 100° ,则为翻垡,用盒尺记录翻垡长度。为方便测量,只计算土块直径大于5 cm的情况。地表翻垡率(f)的计算公

式^[15]为:

$$f = \frac{L_i}{qL_z} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_i 为翻垡总长度平均值, m; q 为耕作部件总个数; L_z 为行程总长度, m。

土壤扰动系数的测量方法如下: 作业后每次重复试验随机选取1个测量点, 测量作业的沟型宽度, 然后挖取扰动横截面积, 以实际开沟作业线最左侧与作业前地表线交点为零点, 用钢板尺从左到右每隔10 mm测量作业前地表线到实际开沟作业线的距离, 绘制草地土层扰动截面积图。土壤扰动系数(D)的计算公式^[16]为:

$$D = \frac{A_h}{A_k} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_h 为实际开沟作业线与耕作后地表线围成的截面积, mm²; A_k 为实际作业深度沟底线和沟型宽度围成的截面积, mm²。

1.2 评价指标类型的一致化

根据对耕作部件评价指标的期望, 将3项指标分为“极大型”指标和“极小型”指标2个类别, 此处牵引力(F)和地表翻垡率(f)是“极小型”指标, 因为土壤扰动系数(D)是“极大型”指标, 所以采用倒数法将土壤扰动系数(D)转化为“极小型”指标。公式为:

$$x_{i3} = \frac{1}{D} \quad (3)$$

式中: x_{i3} 为变换后的“极小型”指标; i 为耕作部件的类别。

1.3 评价指标的量纲一化

避免量纲不同对指标产生影响, 需要对评价指标进行量纲一化处理, 采用直线型量纲一化方法同时采用标准差法^[17]对3项评价指标进行量纲一化处理, 公式^[9]为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (4)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_i x_{ij} \quad (5)$$

$$S_j = \left[\frac{1}{m} \sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: x_{ij} 为耕作部件 i 的第 j 项评价指标; j 为第 j 项评价指标, $j=1, 2, 3$; x'_{ij} 为标准化后的指标值; m 为耕作部件的种类(个数); $\bar{x}_j$ 为 m 种耕作部件第 j 项指标均值; S_j 为 m 种耕作部件第 j 项指标标准差。

1.4 评价指标的权重

为达到综合评价的目的, 体现出耕作部件综合性能的差异, 采用变异系数法确定各评价指标之间的权重, 该方法依据各指标间的差异程度分配权重, 有效反映各适用性评价指标的重要性^[18]。差异大的指标更能体现出评价对象之间的性能差距。用指标的变异系数衡量指标之间的差异程度, 公式^[9]为:

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^3 C_j} \quad (7)$$

$$C_j = \frac{S_j}{\bar{x}_j} \quad (8)$$

式中: C_j 为第 j 项指标的变异系数; ω_j 为第 j 项指标的权重系数。

1.5 基于扰动和受力的综合评价模型

本研究旨在利用多因素线性加权综合评价方法^[19]构建耕作部件天然草地作业适用性评价模型, 即DFW模型。该模型综合考虑了草地扰动程度和耕作部件受力2个方面, 共3项评价指标, 为多因素评价模型。DFW模型的核心在于计算耕作部件的综合效应系数, 该系数直接反映了耕作部件的性能优劣。公式为:

$$DFW_i = \sum_{j=1}^3 \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\bar{x}_j \left\{ \sum_{j=1}^3 \frac{\left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x}_j} \right\}} \quad (9)$$

式中: DFW_i 为耕作部件综合效应系数。

DFW_i 反映耕作部件对草地的扰动程度和受力2方面的综合性能优劣, 是耕作部件的综合性能相对于耕作部件平均水平的相对值。 DFW_i 为“极小型”指标, 即数值越小, 表明对应耕作部件的综合性能越好; 数值越大, 表明对应耕作部件的综合性能越差。根据 DFW_i 值和单项指标观测值的大小和正负, 耕作部件的综合性能优劣分为3个等级。

等级1: $DFW_i < 0$, 3项指标的标准化值部分指标值为负值或全部为负值。表明耕作部件某几项指标或全部评价指标系数低于该项指标系数的平均值, 对应耕作部件的综合性能水平高于平均水平。

等级2: $DFW_i = 0$, 3项指标的标准化值均为0或在0附近波动。表明耕作部件各项标准化之后的指标值均在平均水平, 或者各项标准化之后的指标值正负值都有, 低于平均水平的指标值和高于平均水平的指标值刚好相抵但线性加权值恰好为0。耕

作部件综合性能水平处于平均水平。

等级 3: $DFW_i > 0$, 3 项指标的标准化值部分指标值为正值或者都为正值。表明耕作部件某几项指标或全部评价指标系数高于该项指标系数的平均值, 对应耕作部件的综合性能水平低于平均水平。

2 综合评价模型验证试验

为验证所提出的耕作部件草地作业适用性综合评价模型, 选取铲柄式开沟器和深松铲进行草地耕作试验。

2.1 试验区域概述

试验地点位于河北省张家口市察北管理区的

天然退化草地(东经 115°0'42"、北纬 41°29'10")。试验区内的天然退化草地以羊草为主要建群种, 但其他杂草严重入侵, 草地呈现明显的退化趋势, 试验区处于禁牧状态。

试验地从地表至地下 20 cm 深度, 砂粒(粒径为 2~0.02 mm)所占质量分数为 76.72 %~83.12%, 粉粒(粒径为 0.02~0.002 mm)质量分数为 6.80%~13.6%, 粘粒(粒径<0.002 mm)质量分数为 9.08%~13.28%, 试验地土壤类型为砂壤土^[20]。土壤表层以上枯草较多, 羊草横走根系多分布在 10 cm 深, 试验区草地土层物理参数见表 1^[13]。

表 1 试验草地土层物理参数
Table 1 Physical parameters of soil layers in experimental grasslands

土层深度/cm Depth	坚实度 Soil cone index		容重 Bulk density		含水率 Moisture content	
	测定值/kPa Measured value	变异系数/% Coefficient of variation	测定值/(kg/m ³) Measured value	变异系数/% Coefficient of variation	测定值/% Measured value	变异系数/% Coefficient of variation
0~5	2 004.7±466.2	23.3	1 280±160	12.8	10.48±3.28	31.3
5~10	3 178.5±73.6	2.3	1 490±100	6.4	10.45±2.17	20.7
10~15	4 129.7±333.4	8.1	1 570±50	3.2	10.42±1.45	13.9
15~20	4 930.9±419.3	8.5	1 570±10	0.4	10.25±1.29	12.6

2.2 试验部件及设备

试验共制备了 2 类耕作部件, 第 1 类是深松铲, 第 2 类是铲柄式开沟器。以工作深度为 20 cm 的中轻型深松铲为基准, 其铲柄部分为通用设计, 使用不同种类的铲尖时可随时拆卸更换。铲尖分为 2 大类, 共 4 种设计: 1 种箭形铲尖和 3 种双翼形铲

尖。双翼形铲尖的倾角分别为 80°、115°(国标)和 150°, 所有深松铲均参考 JB/T 9788—2020《深松铲和深松铲柄》^[21]进行设计。箭形铲的铲宽为 100 mm, 双翼铲的铲宽为 150 mm, 其余参数和尺寸均依据标准中设计。图 1 为深松铲尖结构示意图, 4 种深松铲结构参数见表 2。

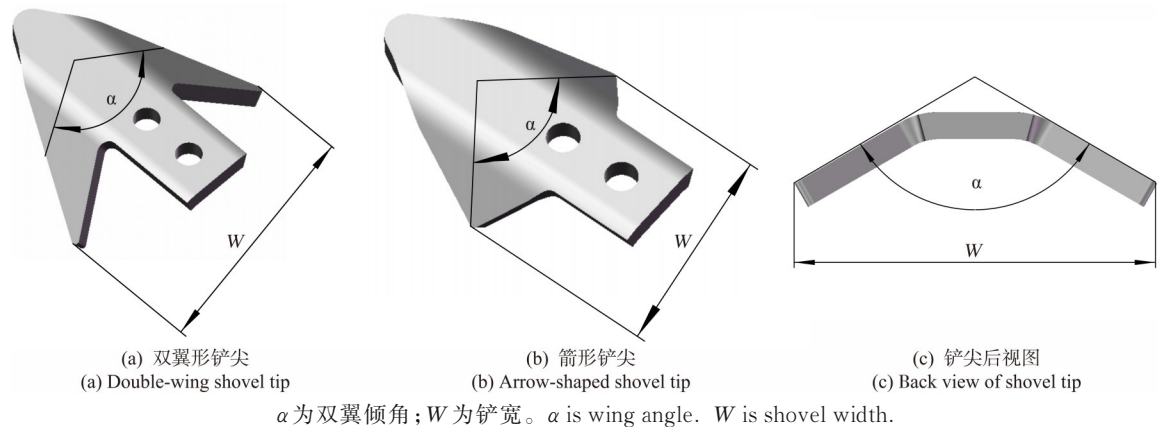


图 1 深松铲尖结构示意图
Fig.1 Structure diagram of subsoiler tips

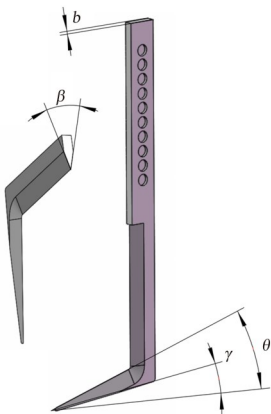
表2 4种深松铲的结构参数

Table 2 Structural parameters of four types of subsoilers

编号 Number	双翼倾角 $\alpha/(^{\circ})$ Wing angle	铲宽 W/mm Shovel width
25-60-80(1)	80	150
25-60-115(2)	115	150
25-60-150(3)	150	150
25-60-115 箭(4)	115	100

注:编号以铲柄厚度-刃口角度-双翼倾角(耕作部件类别)命名。
Note: The number is named after the thickness of the shovel handle-edge angle-wing inclination angle (categories of tillage components).

铲柄式开沟器共有4种型号。参考已有研究^[22-23],本研究中的铲柄厚度设计为14和25 mm 2种规格,其刃口角度设计为30°和60°,入土角度设计为15°和45°。所有铲柄的入土隙角均为6°^[8],铲柄的长度均相同,且铲柄部分均设计为垂直结构。图2为铲柄式开沟器结构示意图,其结构参数见表3。



β 为刃口角度; γ 为入土隙角; θ 为入土角度; b 为铲柄厚度。
 β is cutting edge angle; γ is clearance angle; θ is rake angle;
 b is thickness.

图2 铲柄式开沟器结构示意图

Fig.2 Structural representation of shovel handle opener

草地耕作部件性能测试试验台主要部件包括机架、耕作部件、限深装置、三点悬挂装置、悬臂梁测力传感器、数据采集系统等(图3)。试验台利用三点悬挂装置与悍沃1204拖拉机连接,试验中,拖拉机牵引试验台匀速前进。工作过程中,土壤对耕作部件的阻力被悬臂梁测力传感器(安徽省蚌埠大

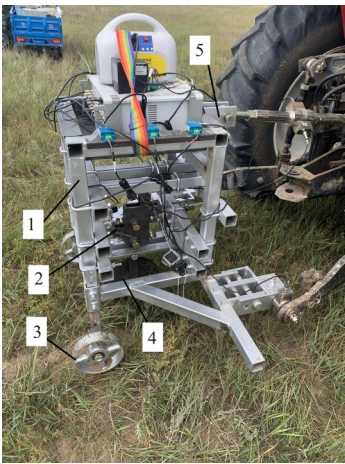
表3 4种铲柄式开沟器的结构参数

Table 3 Structural parameters of four types of shovel handle openers

编号 Number	铲柄厚度 b/mm Thickness	刃口角度 $\beta/(^{\circ})$ Cutting edge angle	入土角度 $\theta/(^{\circ})$ Rake angle
14-30-45(1)	14	30	45
14-60-15(2)	14	60	15
14-60-45(3)	14	60	45
25-60-45(4)	25	60	45

注:编号以铲柄厚度-刃口角度-入土角度(耕作部件类别)命名。
Note: The numbering is named after the thickness-cutting edge angle-clearance angle(categories of tillage components).

洋传感器公司,DYX-301型,量程0~2 000 kg)采集,采集到的传感器信号会被传输到拉压变送器(安徽省蚌埠大洋传感器公司,DY510型)进行转换,转换后的标准模拟信号会被输送到数据采集仪(杭州联测自动化有限公司无纸记录仪,SIN-R9600型)中进行显示并保存,保存的数据能够从U盘导入到笔记本电脑中进行分析。



1. 机架;2. 悬臂梁测力传感器;3. 限深装置;4. 耕作部件;
5. 三点悬挂装置
1. Frame; 2. Cantilever beam force sensor; 3. Depth roller;
4. Tillage time; 5. Three-point hitch device

图3 草地耕作部件性能测试试验台

Fig.3 Test bench for grassland tillage component performance

2.3 试验方法

在试验场地中,拖拉机以 $(1.8\pm0.14)\text{km/h}$ (慢2挡)的速度牵引草地耕作部件性能测试试验台匀

速前进。每次试验的长度设定为 12 m,并重复进行 3 次。耕作部件的作业深度由限深装置控制,可调节的深度范围为 0~30 cm。在进行深松铲性能测试试验时,参考 JB/T 9788—2020《深松铲和深松铲柄》^[21]规定的轻型深松铲作业深度,并根据试验地草地根系分布情况,设计深松铲的作业深度分别 10~15 cm 和 15~20 cm 2 个范围。试验以深松铲受力和土壤扰动程度作为评价指标,以双翼倾角作为独立变量进行单因素试验,以评估其对作业性能的影响。在进行铲柄式开沟器的性能测试试验时,参考现有的研究成果^[24],结合试验地草地根系的具体分布情况,利用拖拉机的三点悬挂装置与限深装置控制铲柄式开沟器的作业深度分别在 0~5、5~10、10~15 cm 的范围内。试验采用铲柄厚度、刃口角度和入土角度作为影响因素进行 3 因素 2 水平的正交试验。

3 结果与讨论

3.1 深松铲的适用性综合评价

将 4 种深松铲在 15 和 20 cm 作业深度下的适用性评价指标,牵引力、地表翻垡率、土壤扰动系数转化为“极小型指标”;利用式(4)~(8)计算适用性评价指标的标准观测值(表 4)和参考权重(表 5);应用 DFW 模型计算各耕作部件的综合效应系数见表 6。作业深度为 15 和 20 cm 时,厚度 25 mm,刃口角度 60°,双翼倾角 150°的耕作部件 DFW_i值最小且为负值,表明其作业效果最好。从观测值看,在作业深度为 15 cm 时,该耕作部件 3 项适用性评价指标的观测值均为负值,综合评定结果为等级 1;在作业深度为 20 cm 时,该耕作部件的地表翻垡率和土壤扰动系数为负值,牵引力为正值,综合评定结果仍为等级 1。利用 DFW 模型得到的最优参数与贺长彬

表 4 深松铲适用性评价指标的初值和观测值
Table 4 Initial values and observations for the suitability assessment indicators of subsoilers

作业深度/cm Working depth	编号 Number	牵引力(x_{i1}) Traction force		地表翻垡率(x_{i2}) Surface crust breakage rate		土壤扰动系数(x_{i3}) Soil disturbance coefficient	
		初值 Initial value	观测值 Observation value	初值 Initial value	观测值 Observation value	初值 Initial value	观测值 Observation value
15	25-60-80(1)	2 833.2	1.055	9.83	0.741	65.7	−0.755
	25-60-115(2)	2 581.0	0.643	10.33	0.957	61.7	−0.027
	25-60-150(3)	1 591.4	−0.972	5.67	−1.066	65.0	−0.640
	25-60-115 箭(4)	1 742.3	−0.726	6.67	−0.632	55.0	1.421
20	25-60-80(1)	3 271.3	1.153	5.67	−0.812	66.7	−0.381
	25-60-115(2)	2 783.2	−0.043	12.00	1.353	66.3	−0.312
	25-60-150(3)	2 870.2	0.170	6.00	−0.698	68.7	−0.775
	25-60-115 箭(4)	2 277.7	−1.281	8.50	0.157	58.7	1.468

表 5 深松铲各评价指标的参考权重
Table 5 Reference weights for the evaluation indicators of subsoilers

作业深度/cm Working depth	牵引力权重 Traction force weight	地表翻垡率权重 Surface crust breakage rate weight	土壤扰动系数权重 Soil disturbance coefficient weight
15	0.433	0.439	0.129
20	0.251	0.625	0.124

表6 深松铲的综合效应系数
Table 6 Composite effect coefficient of subsoilers

作业深度/cm Working depth	DFW ₁	DFW ₂	DFW ₃	DFW ₄
15	0.684	0.695	−0.97	−0.408
20	−0.270	0.797	−0.49	−0.042

注:DFW_{*i*}为综合效应系数,其中*i*=1,2,3,4,表示深松铲类别,各类别深松铲参数见表2。
Note: DFW_{*i*}represents the composite effect coefficient, where *i*=1,2,3,4, denoting the categories of subsoilers, parameters for each category are listed in Table 2.

等^[8]在深松铲作用下的草地扰动失效特性试验研究中得到的最优参数一致,验证了耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型的可行性。

3.2 铲柄式开沟器的适用性综合评价

将4种铲柄式开沟器在10、15、20 cm作业深

度下的适用性评价指标牵引力、地表翻垡率、土壤扰动系数转化为“极小型指标”;利用式(4)~式(8)计算这些适用性评价指标的标准观测值(表7)和参考权重(表8);应用DFW模型计算各耕作部件的综合效应系数(表9)。

表7 铲柄式开沟器适用性评价指标的初值和观测值
Table 7 Initial values and observations for the suitability assessment indicators of shovel handle openers

作业深度/ cm Working depth	编号 Number	牵引力(<i>x</i> ₁) Traction force		地表翻垡率(<i>x</i> ₂) Surface crust breakage rate		土壤扰动系数(<i>x</i> ₃) Soil disturbance coefficient	
		初值 Initial value	观测值 Observation value	初值 Initial value	观测值 Observation value	初值 Initial value	观测值 Observation value
10	14-30-45(1)	336.36	−0.507	0.5	0	53	1.207
	14-60-15(2)	1 101.92	1.500	0.5	0	66	−0.454
	14-60-45(3)	333.95	−0.513	0.5	0	59	0.350
	25-60-45(4)	346.56	−0.480	0.5	0	73	−1.103
15	14-30-45(1)	985.02	−0.671	2.0	0	57	0.468
	14-60-15(2)	1 461.59	1.125	1.5	−0.463	55	1.187
	14-60-45(3)	899.09	−0.995	1.0	−0.926	61	−0.828
	25-60-45(4)	1 306.91	0.542	3.5	1.389	61	−0.828
20	14-30-45(1)	2 149.14	0.674	1.0	−0.426	61	−0.564
	14-60-15(2)	2 272.62	0.999	0.5	−0.640	55	0.719
	14-60-45(3)	1 471.54	−1.108	1.0	−0.426	54	0.960
	25-60-45(4)	1 677.47	−0.566	5.5	1.492	64	−1.115

表8 铲柄式开沟器各评价指标的参考权重
Table 8 Reference weights for the evaluation indicators of shovel handle openers

作业深度/cm Working depth	牵引力权重 Traction force weight	地表翻垡率权重 Surface crust breakage rate weight	土壤扰动系数权重 Soil disturbance coefficient weight
10	0.839	0	0.161
15	0.278	0.659	0.063
20	0.138	0.806	0.056

表 9 铲柄式开沟器的的综合效应系数
Table 9 Composite effect coefficient of shovel handle openers

作业深度/cm Working depth	DFW ₁	DFW ₂	DFW ₃	DFW ₄
10	− 0.230	1.185	− 0.374	− 0.580
15	− 0.157	0.083	− 0.939	1.013
20	− 0.282	− 0.337	− 0.443	1.063

注:DFW_{*i*}为综合效应系数,其中*i*=1,2,3,4,表示铲柄式开沟器的类别,各类别铲柄式开沟器参数见表3。
Note: DFW_{*i*}represents the composite effect coefficient, where *i*=1, 2, 3, 4, denoting the categories of shovel handle openers, parameters for each category are listed in Table 3.

由表 9 可见,作业深度为 10 cm 时,铲柄厚度为 25 mm,刃口角度为 60°,入土角度为 45°的铲柄式开沟器 DFW_{*i*}值最小且为负值,其作业效果最好。从观测值看,此铲柄式开沟器牵引力和土壤扰动系数这 2 项适用性评价指标观测值均为负值,地表翻垡率的观测值为 0,综合评定结果为等级 1。在作业深度 15 cm 时,铲柄厚度为 14 mm,刃口角度为 60°,入土角度为 45°的铲柄式开沟器 DFW_{*i*}值最小且为负值,其作业效果最好。从观测值看,此铲柄式开沟器所有的适用性评价指标观测值均为负值,综合评定结果为等级 1。在作业深度 20 cm 时,铲柄厚度为 14 mm,刃口角度为 60°,入土角度为 45°的耕作部件 DFW_{*i*}值最小且为负值,其作业效果最好。从观测值看,此铲柄式开沟器牵引力和地表翻垡率这 2 项适用性评价指标的观测值为负值,土壤扰动系数这 1 项适用性评价指标的观测值为正值,综合评定结果为等级 1。利用 DFW 模型得到的铲柄式开沟器在 15 和 20 cm 作业深度下最优参数与 Sang 等^[13]研究中得到的最优参数一致,再次验证了耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型的可行性。

本研究构建了 DFW 模型,并对 4 种深松铲和 4 种铲柄式开沟器在不同作业深度下的综合效应系数进行了分析比较。利用 DFW 模型筛选出的耕作部件最优参数组合与现有研究结果一致,证实了该模型的适用性和可行性。然而,在使用 DFW 模型对 4 种铲柄式开沟器进行综合性能评价时,发现在 10 cm 作业深度下选取的最优开沟器与在 15 和 20 cm 深度下选取的最优开沟器存在差异。这种差异归因于以下 2 个方面。首先,DFW 模型基于 3 项评价指标综合评价耕作部件的性能,但在 10 cm 作业深度下,4 种铲柄式开沟器在地表翻垡率指标上的初值相同。这种同质性导致在该

特定深度下,地表翻垡率指标的权重被置为 0。由于缺少这个指标的变异性,DFW 模型在评估综合性能时的准确性受到了影响。其次,当使用铲柄厚度为 14 mm,刃口角度为 60°,入土角度为 15°的铲柄式开沟器在 10 cm 作业深度下作业时,其牵引力的初值与其他耕作部件相比存在明显差异。这种差异源于客观条件造成的粗大误差。由于这种误差的存在显著影响了评价的可靠性,使得该作业深度下的评价结果失去了参考价值。DFW 模型的构建采用变异系数法来计算各评价指标的权重,从而实现了耕作部件性能的客观综合评价。所得出的耕作部件综合效应系数完全由试验数据支撑,不带有任何主观性色彩。指标之间的变异程度被用于确定权重系数,这些权重系数没有继承性^[25]。

变异系数法所计算的不同作业深度下的权重表明,在牵引力、地表翻垡率、和土壤扰动系数这 3 个适用性评价指标中,地表翻垡率的权重最为显著,尤其是在 15 cm 作业深度的铲柄式开沟器中,其权重高达 0.896。这表明在优化天然草地耕作部件的综合性能参数过程中,降低地表翻垡率能更直接的提高其综合作业性能。

当前的耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型仅采用了牵引力、地表翻垡率和土壤扰动系数这 3 个性能评价指标,这些指标的选择是基于现有研究中对草地耕作部件扰动影响的可评估因素。为了更全面地评估耕作部件的效果,未来的研究可以考虑包括作物生长、土壤环境变化、土壤通气透水性能以及种床构建等指标在内。通过扩展 DFW 模型的评价指标范围,可以进一步完善模型,使其更加精确地反映耕作部件在天然草地上的作业适用性,从而为耕作部件的优化提供更为

精确的评价体系。

4 结束语

本研究以牵引力、地表翻垡率和土壤扰动系数为适用性评价指标,基于多因素线性加权方法构建了耕作部件天然草地作业适用性综合评价模型,即DFW模型,所提出的基于综合效应系数划分耕作部件综合性能的3个等级,能够综合反映耕作部件对草地的扰动程度和耕作部件的受力情况,有效评估天然草地耕作部件的作业适用性,为天然草地耕作部件的综合性能评价和参数选择提供了更简便的方法。

参考文献 References

- [1] 慈建勋. 天然草地改良技术研究[J]. 今日畜牧兽医, 2022, 38(9): 78-79
Ci J X. Study on improvement technology of natural grassland [J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2022, 38(9): 78-79 (in Chinese)
- [2] 张文军, 张英俊, 孙娟娟, 杨高文. 退化羊草草原改良研究进展[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 603-608
Zhang W J, Zhang Y J, Sun J J, Yang G W. *Leymus chinensis* grassland improvements (review) [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4): 603-608 (in Chinese)
- [3] 迟晓雪, 郭群群, 李东晖, 李欣, 魏红. 退化羊草草原改良研究进展与综合评价[J]. 当代畜牧, 2022, 490(12): 65-68
Chi X X, Guo S Q, Li D H, Li X, Wei H. Progress and comprehensive evaluation of degraded *Leymus chinensis* grassland improvement research [J]. *Contemporary Animal Husbandry*, 2022, 490(12): 65-68 (in Chinese)
- [4] 高丽, 丁勇. 世界退化草地恢复研究和实践进展[J]. 草业学报, 2022, 31(10): 189-205
Gao L, Ding Y. Progress in research and practice of restoration of degraded grassland around the world [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10): 189-205 (in Chinese)
- [5] 王宗松, 姜丽丽, 汪诗平, 王艳芬, 周华坤. 草地退化恢复评估方法述评[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6464-6473
Wang Z S, Jiang L L, Wang S P, Wang Y F, Zhou H K. Assessment methods for grassland restoration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6464-6473 (in Chinese)
- [6] 郑侃, 何进, 李洪文, 刁培松, 王庆杰, 赵宏波. 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 K, He J, Li H W, Diao P S, Wang Q J, Zhao H B. 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)
- [7] 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 C B. Interaction relationship research of soil-root composite and narrow tillage tools on natural grassland [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [8] 贺长彬, 桑洪超, 刘美玉, 毕玉革, 尤泳. 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 C B, Sang H C, Liu M Y, Bi Y G, You Y. 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)
- [9] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
Liu J A. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [10] 王加一. 玉米条带式直灭茬刀设计及耕作阻力与抛撒机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022
Wang J Y. Design of corn strip-type straight stubble-breaking blade and study on tillage resistance and throwing mechanism [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [11] 艾安君. 手扶仿人田间铲土机设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2022
Ai A J. Design and experiment of hand-held humanoid field shovel machine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022 (in Chinese)
- [12] 刘俊安, 王晓燕, 李洪文, 何进, 王庆杰, 李问盈. 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 J A, Wang X Y, Li H W, He J, Wang Q J, Li W Y. 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)
- [13] Sang H C, He C B, Bi Y G, Liu M Y, Wang X. Evaluation of the performance of very narrow tines with different geometrical structures for tilling natural grassland [J]. *Biosystems Engineering*, 2022(224): 34-48
- [14] Raper R L. Subsoiler shapes for site-specific tillage [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(1): 25-30
- [15] JB/T 7135—2007. 羊草地潜松犁型[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
JB/T 7135—2007. Subsoiling plow for *leymus chinensis* land [S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese)
- [16] 李霞, 张东兴, 王维新, 崔涛, 汤明军. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24
Li X, Zhang D X, Wang W X, Cui T, Tang M J. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 17-24 (in Chinese)
- [17] 韩胜娟. SPSS聚类分析中数据无量纲化方法比较[J]. 科技广场, 2008(3): 229-231
Han S J. Comparison of nondimensionalize method in SPSS cluster analysis [J]. *Science and Technology Square*, 2008(3): 229-231 (in Chinese)
- [18] 韩小孩, 张耀辉, 孙福军, 王少华. 基于主成分分析的指标权重确定方法[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(10): 124-126
Han X H, Zhang Y H, Sun F J, Wang S H. Method for determining indicator weights based on principal component analysis [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2012, 33(10): 124-126 (in Chinese)
- [19] 任国平, 刘黎明, 卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 252-263
Ren G P, Liu L M, Zhuo D. Analysis of spatial differentiation of landscape ecological quality and its affecting factors in metropolitan suburbs [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(21): 252-263 (in Chinese)
- [20] 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 K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):227-241(in Chinese)
- [21] JB/T 9788—2020. 深松铲和深松铲柄[S]. 北京:机械工业出版社, 2021
JB/T 9788—2020. Subsoiler and share shaft[S]. Beijing: China Machine Press, 2021(in Chinese)
- [22] 李博. 基于离散元法的深松铲减阻及耕作效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
Li B. Reducing force and tillage performance of a subsoiler based on the discrete element method (DEM) [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Technology, 2016(in Chinese)
- [23] 赵淑红, 杨悦乾, 闫以勋, 田佰亮. 鸭嘴式开沟器的设计试验[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11):113-117
Zhao S H, Yang Y Q, Yan Y X, Tian B L. Design of duck mouth type opener[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(11): 113-117(in Chinese)
- [24] He C B, Guo Y Y, Guo X D, Sang H C. A mathematical model for predicting the draft force of shank-type tillage tine in a compacted sandy loam[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228:105642
- [25] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:31-33
Guo Y J. *Comprehensive Evaluation: Theory, Methods, and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007:31-33(in Chinese)
- 责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 郭艳颖, 硕士研究生, 现就读于内蒙古农业大学机电工程学院, 研究方向为草地机械化改良。获研究生国家奖学金、研究生自治区学业奖学金、研究生校二等学业奖学金。参与内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目、国家自然科学基金项目、内蒙古自治区自然科学基金项目等。在 *Soil and Tillage Research* 发表学术论文1篇, 申请国家专利3项。



通讯作者简介: 贺长彬, 工学博士, 副教授, 博士生导师。中国农业机械学会青年工作委员会委员, 中国农业机械学会畜牧机械分会委员会委员, 中国草学会草业机械专业委员会委员, 内蒙古自治区“三区”科技人员专项计划选派人员。长期从事草原机械化改良技术理论与应用方面的研究, 先后参与了“十二五”国家科技支撑计划、公益性行业(农业)科研专项、国家牧草产业技术体系、国家自然科学基金青年基金等研究项目。现主持内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目1项, 国家自然科学基金项目1项, 内蒙古自治区自然科学基金项目1项, 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目1项。先后发表学术论文16篇, 其中SCI/EI收录论文11篇, 授权国家发明专利6项, 实用新型专利2项。