

退化羊草地切根释压松土工艺研究与试验

王昭宇¹ 尤泳¹ 贺长彬² 王德成¹ 张学宁¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 以羊草等根茎型或根茎疏丛型牧草为建群种的天然草地退化状况严重, 机械化松土是改良这类草地的重要手段之一, 但不恰当的松土方式极易破坏草地植被, 并导致土壤沙化。为探讨适宜改良退化羊草地的松土方式, 提出了一种切根释压松土方法。以海拉尔地区的退化草地为研究对象, 采用离散元仿真与田间试验结合的方式开展了传统松土、对缝松土和切根释压松土对比试验, 分析3种松土方式对草地的扰动过程、作业质量及松土阻力的影响。仿真结果表明: 切根释压松土比传统松土和对缝松土对土壤的疏松效果更好, 提高了深层土壤流动性并降低了表层土壤扰动。将仿真结果与田间试验结果对比, 结果表明3种松土方式作业后的耕作部件松土阻力变化趋势一致。切根释压松土方式松土阻力最小, 仿真结果为3 692.75 N, 田间试验结果为4 677.84 N。传统松土方式松土阻力最大, 仿真结果为5 348.80 N, 田间试验结果为6 489.40 N。对缝松土方式松土阻力介于两者之间, 仿真结果为4 713.33 N, 田间试验结果为5 433.24 N。这表明切根释压松土方式具有较好的减阻效果。田间试验结果表明, 松土方式对作业质量具有显著性影响。相同耕作深度土层内, 切根释压松土方式相较传统松土和对缝松土作业后的土壤坚实度均值分别降低6.19%和12.67%, 土壤容重均值分别降低1.19%和3.16%。同时切根释压松土方式对表层土壤扰动最小, 土壤疏松效果更好, 作业后的土壤扰动系数和土壤蓬松度均值分别为49.05%和25.81%。研究结果可为改进退化羊草地松土工艺, 优化设计草地松土改良机具提供依据。

关键词: 退化羊草地; 松土; 切根释压; 土壤扰动; 改良工艺

中图分类号: S221 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0404-14

OSID:



Research and Experiment on Loosening Soil by Cutting Roots to Release Pressure for Degraded *Leymus chinensis* Grassland

WANG Zhaoyu¹ YOU Yong¹ HE Changbin² WANG Decheng¹ ZHANG Xuening¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Natural grasslands with rhizome-type or rhizome-sparse grasses such as *Leymus chinensis* as the established species are in serious degradation. Mechanical soil loosening is one of the important means to improve this type of grassland. However, inappropriate methods of soil loosening can easily damage the grassland vegetation, and lead to soil desertification. In order to explore the suitable soil scarification method for improving degraded *Leymus chinensis* grassland, a method of loosening the soil by cutting roots to release pressure was proposed. Taking the degraded grassland in Hailar area as the research object, a comparative test of traditional loosening, loosening the soil along the cracks, and loosening the soil by cutting roots to release pressure was carried out by using a combination of discrete element simulation and field test. The effects of three loosening methods on the grassland disturbance process, work quality and loosening resistance were analyzed. The simulation results showed that loosening the soil by cutting roots to release pressure had a better loosening effect on the soil than traditional loosening and loosening the soil along the cracks. It improved the fluidity of the inner soil and reduced the disturbance of surface soil. Comparing the simulation results with field test, the results showed that the change trend of the loosening resistance of the tillage parts after the three loosening methods were consistent. The method of loosening

收稿日期: 2024-07-03 修回日期: 2024-08-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)

作者简介: 王昭宇(1995—), 男, 博士生, 主要从事土壤-机具-根系互作关系研究, E-mail: wzycau@126.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

the soil by cutting roots to release pressure had the smallest soil loosening resistance, the simulation result was 3 692.75 N, and the field test result was 4 677.84 N. The traditional loosening method had the highest loosening resistance, the simulation result was 5 348.80 N, and the field test result was 6 489.40 N. The loosening resistance of the method of loosening the soil along the cracks was between the two, the simulation result was 4 713.33 N, and the field test result was 5 433.24 N. The results showed that loosening soil by cutting roots to release pressure method had a better drag reduction effect. Field test results showed that soil loosening methods had a significant impact on work quality. In the soil layer with the same tillage depth, by comparing the traditional loosening and loosening the soil along the cracks, the soil compactness after loosening the soil by cutting roots to release pressure was decreased by 6.19% and 12.67%, respectively, and the mean soil bulk density was decreased by 1.19% and 3.16%, respectively. At the same time, loosening the soil by cutting roots to release pressure method caused the least disturbance to the surface soil and had a better soil loosening effect. The average values of the soil disturbance coefficient and soil bulkiness after the operation were 49.05% and 25.81%, respectively. The research results can provide an important basis for proposing soil scarification improvement technology for degraded *Leymus chinensis* grassland and optimizing the design of grassland scarification improvement equipment.

Key words: degraded *Leymus chinensis* grassland; soil loosening; root cutting to relieve stress; soil disturbance; improvement technology

0 引言

草地资源是自然生态系统重要的组成部分,对维护全球生态平衡和生物多样性等发挥着重要作用^[1]。中国是草地资源大国,天然草地面积约占中国国土面积的 40%,其中以羊草等根茎型或根茎疏丛型牧草为建群种的天然草地约占草地面积的 41%^[2-4]。草地退化是全球范围内的共性问题^[5],中国同样面临草地生态环境退化问题^[6-8]。据统计,中国约 70% 草地处于不同程度的退化状态^[9]。导致草地退化的外在因素主要为过度放牧和牲畜践踏等^[10]人为因素,草地土壤板结状况严重,草地生态系统超出自身调节能力;内在因素主要为羊草具有发达的横走根系,与土壤相互缠绕形成根-土复合体,进一步增强了土壤强度和渗透阻力等^[11-13]。

目前,针对退化羊草地改良的方法包括:①利用围栏封育和轮牧制度等^[14-18]生态恢复方式改良退化草地。②通过切根、松土和施肥等^[19-21]机械化手段打破土壤板结,创造利于植被生长的土壤环境并补充土壤养分及肥力等。作为草地改良方式的重要组成部分,机械化松土是打破根-土复合体的主要手段之一。围绕退化草地松土改良,国内外研究学者主要开展松土工艺和技术^[22-25]、松土部件设计^[26-28]、松土作业质量评测^[29-30]研究。

目前,国内针对退化草地松土改良技术的研究相对薄弱,多以传统农田松土方式为参考开展研究。但退化草地不同于农田土壤,由于多年生羊草地根系的存在,提高了草地土壤的抗剪强度及外载作用下抵抗破碎的能力。但专用于草地松土改良的机具

研发及优化相对较少,而且现有草地松土机具对退化草地改良的适配性较弱,以现有的草地松土作业方式进行退化草地改良时,不仅增大了松土部件松土阻力,同时产生根系损伤及土壤翻垡,不利于羊草复壮生长。因此,本文以传统农田松土方式为基础,结合现有退化草地机械化改良方式,提出一种切根与松土相结合的切根释压松土方式,通过切根与松土组合式作业,实现提高松土作业效果的同时提高切根密度,进而提高改良作业效率。同时,基于羊草地根-土复合体结构,通过对比分析传统松土、对缝松土和切根释压松土 3 种松土过程,提出改良退化羊草地的适宜松土工艺并开展田间验证试验,以期优化设计草地松土改良机提供依据。

1 切根释压松土方案

1.1 退化草地松土要求

为提高退化羊草地机械化松土作业质量,提出退化草地松土作业要求:①耕作时应减少松土区域碎土现象产生,同时避免产生土壤翻垡。②为减少松土部件对根系的损伤,松土深度应大于 150 mm (羊草根系纵向分布主要在 0~150 mm)。③对深层土壤进行适度松土,同时降低草地表层的土壤扰动及地表植被的破坏。④降低松土部件的松土阻力,提高机械化改良效率。

1.2 松土作业方式

与传统农田松土方式相比,影响草地松土质量的最大因素是羊草根系。松土装置疏松土壤时,铲尖楔面处土壤及铲柄两侧的土壤流动性较差,导致土壤扰动较大。同时根系具有阻裂与桥联作用^[31],

提高了草地土壤的抗破碎能力,加重耕作部件松土阻力。研究表明滚切式松土比滑切式松土对土壤表面破碎程度及作业过程中的松土阻力更小^[32],同时切根可有效促进羊草复壮生长^[18]。因此,提出将切根工序与松土工序进行组合的切根释压松土方式,并与传统松土方式、对缝松土方式进行对比试验。各松土方式作业过程如下:

- (1)传统松土方式结构组成及作业示意图如图 1a 所示。该方式作业时无其他辅助工序。与传统农田深松的方式相同,仅依靠机具的牵引带动松土装置以行进速度 V 进行待作业区域松土作业。
- (2)对缝松土方式结构组成及作业示意图如图 1b 所示。作业时,先由切根装置切断待松土区域的土壤,并形成切根沟缝,松土装置沿切根沟缝进行松土作业。该方式的切根装置位于松土装置前方,切根装置切割中心与松土装置的松土中心平齐。为

确保切根质量及控制切割深度相对稳定,避免未断的根系对后续作业的影响,选用主动式切根装置进行切根作业。

- (3)切根释压松土方式结构组成及作业示意图如图 1c 所示。该方式的主动式切根装置和松土装置的空间位置与对缝松土方式相同。但在主动式切根装置末端,松土铲两侧前端对称布置从动式切根装置。作业时,主动式切根装置切割待作业区域并形成切根沟缝,随后从动式切根装置在机具牵引下切割沟缝两侧的草地,并形成新的沟缝(释压沟缝),最后松土装置沿切根沟缝进行松土作业。该方式主要降低侧向根系对土壤破碎的影响,形成的沟缝有利于土壤流动及松土装置侧向压力的释放。从动式切根装置切割侧向根系的目的为利用主动式切根装置与土壤互作产生的推力,降低相同切根密度时机具的牵引阻力,同时提高切根密度。

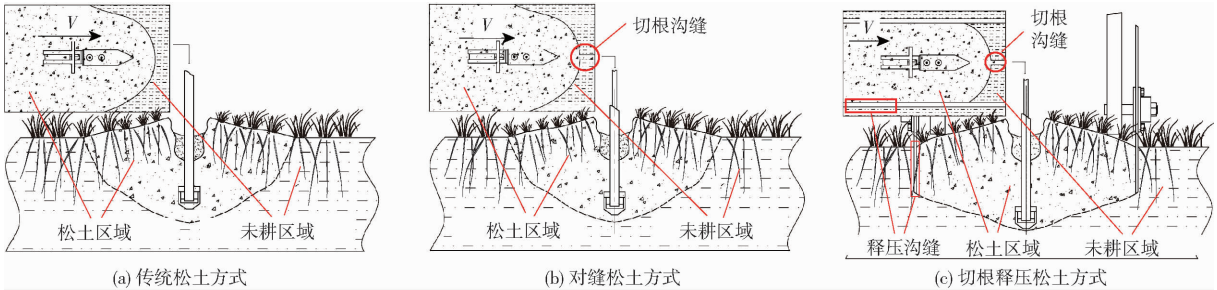


图 1 不同松土方式作业示意图

Fig. 1 Schematics of different soil loosening methods

1.3 试验装置

为开展上述研究,设计了一种退化草地松土改良机,如图 2a 所示。该机由主动式切根装置、从动式切根装置、松土装置、机架和限深轮等组成。试验时,通过调整各装置间的组配方式,可分别完成传统松土、对缝松土和切根释压松土 3 种作业方式。图 2b 为主动式切根装置,主要由切根刀单体和刀盘组成,单个刀盘均布 3 把切根刀单体,切根刀单体厚度为 10 mm,切根刀单体切割直径 D 为 420 mm,最大切根深度 $H_{\max}$ 为 200 mm^[33]。图 2c 为从动式切根

装置,由刀盘、切根刀轴和支撑立柱等组成。其中切根刀盘为平面形^[34],其刃口光滑,旋转切入土壤,直径 D_1 为 340 mm,厚度为 6 mm。相邻从动式切根装置间隔为 280 mm(与凿式松土铲扰动宽度有关),为确保破碎草地的基本切割能力,刀盘边缘进行刃口处设置 45°刃口角的锐化处理。试验前期开展凿形铲尖、箭形铲尖和菱形铲尖 3 种类型松土铲的扰动试验。结果表明,凿形松土铲对土壤扰动最小^[26],因此选择凿形松土铲尖进行试验。松土铲柄设计按照 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》^[35]进行变

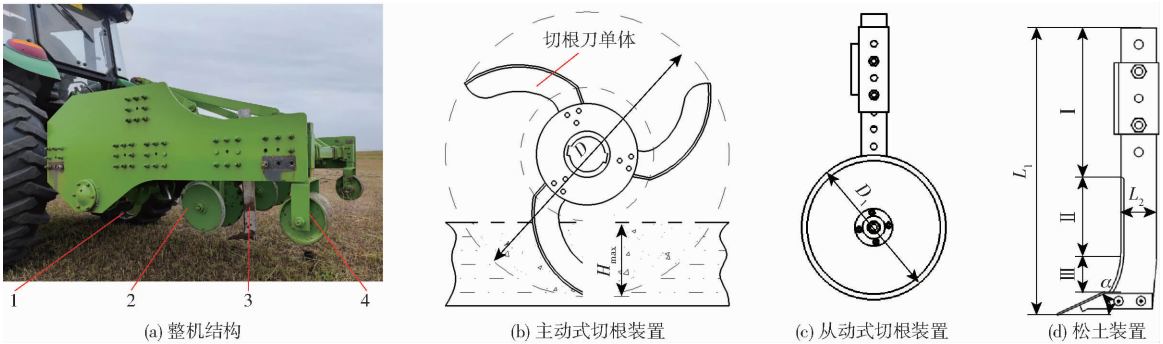


图 2 整机及关键部件结构示意图

Fig. 2 Schematics of structure of whole machine and key components

1. 主动式切根装置 2. 从动式切根装置 3. 松土装置 4. 限深轮

形而成。松土铲柄长度 L_1 为 820 mm,松土铲柄宽度 L_2 为 80 mm,铲柄厚度 d 为 20 mm,松土铲入土角 α 为 20°。作业时主要通过铲柄前端刃口切断羊草根系,松土铲柄刃口曲线主要由支撑端Ⅰ、刃口端Ⅱ和碎土端Ⅲ组成,如图 2d 所示。为满足草地松土要求,确定松土铲松土深度为 180 mm。

2 松土方式仿真分析

2.1 羊草地土壤结构离散元模型

为了对比切根释压松土方式与传统松土方式、对缝松土方式的作业效果,通过离散元法对各松土方式进行仿真试验。目前对作物根系的模型构建主要为三维扫描法和颗粒填充法等,包括对山药、玉米等作物根系与土壤的复合模型构建^[36-37]。但由于作业场景不同,农田与草地中的作物根系物理参数、根系分布和单位面积植株密度均不相同。羊草根系系统在空间结构上更为复杂,进行离散元模型构建时不仅要对其形表特征进行还原,还需要模拟分蘖生长和根土之间的连接。而且羊草根系具有分蘖特性,一年中耕作区间内的羊草根系密度和植株密度比农田作物(如玉米)更大。进行草地松土仿真试验的计算与分析要求更高,利用上述方法在计算效率和模型构建精度上难度较大。为提高计算效率,同时保证能够反映羊草根系对土壤加固作用的主要特征,本文提出将草地看作一种复合材料,通过将草地根系简化为分散的离散颗粒模型,并与土壤颗粒交互作用形成复合团粒组的模型构建方法。模型构建前,在试验地随机选择 3 个区域进行土壤样品取样。为便于取样,取样过程中首先挖取深 300 mm 土坑,随后以松土装置的作业深度为依据,以 50 mm 为间隔,利用环刀沿土坑侧壁分别取深度 0 ~ 200 mm 土层中土样,取样后立即用保鲜膜将带有土样的环刀包裹好,防止水分蒸发。通过分析各土层获取土样根系质量和土壤质量与总质量比值来衡量其在各土层占比。参数测定时,首先在 105℃ 干燥箱干燥至恒定质量,同时称量干燥后土样总质量 m_t ,随后利用水洗法将干燥后土样放入盛有水的容器中,轻轻搅拌以分离根系。使用细筛网将漂浮的根系与土壤颗粒分离,将清洗干净的根系在 60 ~ 70℃ 干燥箱中干燥至恒定质量,称量干燥后根系质量 m_1 ,计算各土层中土壤和根系占比。每组试验重复 3 次,以重复试验结果平均值作为各土层中根系和土壤占比,并用于根-土模型构建中。计算公式为

$$\begin{cases} n_1 = \frac{m_1}{m_t} \times 100\% \\ n_2 = 1 - n_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 n_1 ——根系质量占比,%
 n_2 ——土壤质量占比,%

退化羊草地土壤颗粒之间以及土壤颗粒与根系之间均存在相互粘结,对草地的抗剪强度等物理参数具有重要影响。其中,试验地的土壤类型为壤土,具有较强的内聚力,土壤颗粒间产生相互粘结。同时羊草根系在耕作过程中会发生形变并产生断裂,而 Hertz – Mindlin with Bonding 模型^[38-40]可通过设置粘结强度和断裂准则反映多种材料(包括具有内聚力的材料)的力学行为,并模拟颗粒在外力作用下的破碎过程。因此设置土壤颗粒之间及根系颗粒间的作用模型均为 Hertz – Mindlin with Bonding 模型,用于观察 3 种松土方式耕作过程中根系断裂及复合体破碎的变化过程。由于草地根系与土壤之间的粘附作用一般大于土壤颗粒之间的粘附作用,因此通过设置土壤颗粒间及土壤与根系颗粒间不同的粘结参数表征粘附效果的不同,具体参数如表 1 所示。基于此,本文选择 EDEM 中的 Hertz – Mindlin with Bonding 模型进行模拟。切根装置和松土装置主要材质为 65Mn 钢,其密度、泊松比和剪切模量通过公布的数据获得,土壤和羊草根系的密度、泊松比和剪切模量等物理参数,以及耕作部件对土壤和

表 1 草地复合模型基本参数

Tab. 1 Basic parameters of grassland composite model

材料	参数	数值
羊草根系	密度/(kg·m ⁻³)	470
	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	7×10 ⁶
	静摩擦因数	0.37
	动摩擦因数	0.15
	碰撞恢复系数	0.60
	与土壤间静摩擦因数	0.65
	与土壤间动摩擦因数	0.23
	与土壤间碰撞恢复系数	0.60
	与 65Mn 钢间静摩擦因数	0.60
	与 65Mn 钢间动摩擦因数	0.10
	与 65Mn 钢间碰撞恢复系数	0.58
土壤	密度/(kg·m ⁻³)	2 475
	泊松比	0.35
	剪切模量/Pa	1×10 ⁶
	静摩擦因数	0.45
	动摩擦因数	0.21
	碰撞恢复系数	0.60
	与 65Mn 钢间静摩擦因数	0.60 ^[41]
	与 65Mn 钢间动摩擦因数	0.05 ^[41]
65Mn 钢	与 65Mn 钢间碰撞恢复系数	0.60 ^[41]
	密度/(kg·m ⁻³)	7 865 ^[41]
	泊松比	0.30 ^[41]
	剪切模量/Pa	7.9×10 ¹⁰ ^[41]

根系之间的相互作用参数通过测定获得。研究表明,当土壤颗粒之间存在粘结键时,土壤颗粒形状对仿真结果的影响相对较弱^[42],本文采用块状和柱状土壤颗粒模型^[43-44]。试验前期对试验区域土壤粒径进行划分,该地区土壤类型为砂壤土,土壤颗粒主要为砂粒(粒径 0.02 ~ 2 mm)、粉粒(粒径 0.002 ~ 0.02 mm)和粘粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)。以此作为颗粒大小构建的依据。为提高仿真速率,确定土壤颗粒粒径分别为 2 mm 和 3 mm,生成颗粒粒径服从正态分布。进行羊草根系模型构建时,采用球形颗粒进行模拟仿真,通过对取样后的羊草根系测定,参数放大后确定羊草根系颗粒直径为 4 mm,构建的草地根-土复合体离散元模型(简称复合模型)如图 3 所示。

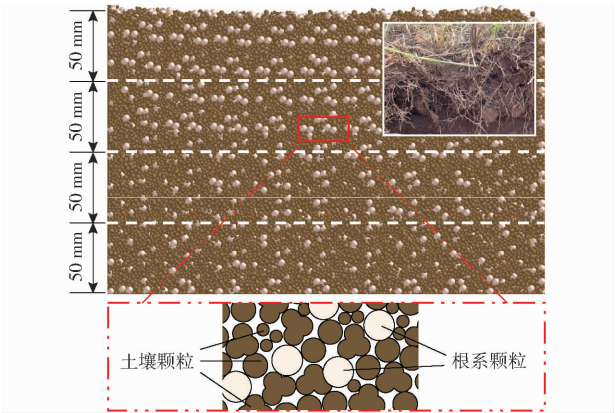


图 3 草地根-土复合体模型

Fig. 3 Discrete element model of grassland root - soil complex

2. 2 松土过程分析

2. 2. 1 土壤扰动过程对比

为分析各松土方式作业下的土壤扰动特性,按照图 1 所示的 3 种松土方式的关键装置空间分布为依据开展仿真试验,并对仿真过程进行图像截取分析。为提高仿真效率,仅开展两组松土装置的性能试验。仿真结束后,在稳定区域内利用 EDEM 后处理的 Clipping 功能^[45-46]沿机具行进方向(主视方向),在整个扰动区间内构建宽度为 40 mm 的观测区域。以 60 mm 为间隔,对相同时刻内松土装置扰动区间的复合模型扰动过程进行分析,结果如图 4 所示。图 5 为 3 种松土方式复合模型扰动俯视图。图 6 为 3 种松土方式复合模型速度变化俯视图。其中,观测区域厚度选择为 40 mm 的主要原因为厚度过小时,近似看作瞬间某处土壤颗粒的运动状态,该处土壤颗粒的变化只能反映该区域的颗粒扰动极值,不能反映根-土复合体整个扰动区间内的颗粒扰动最值。观测区域厚度较大时,不易选取扰动区间内的土壤颗粒。因此需要确保选择的土层厚度可以同时反映颗粒的扰动最大状态,还应便于对关键点

进行选取,最终确定断层厚度为 40 mm。为便于观察 3 种松土方式作业过程中复合模型的根系和土壤的扰动状态,通过颗粒速度区分原则设置复合模型土壤颗粒运动速度 V_1 从大到小依次为红色、绿色、蓝色,根系颗粒运动速度 V_2 从大到小依次为黄色、白色、蓝色。

图 4a、5a、6a 为传统松土方式复合模型扰动示意图。该方式下的复合模型可看作无限长土体(双侧边界无限长)。受铲柄和铲尖剪切与挤压等作用影响,颗粒首先沿铲尖楔面挤压被向上及向后抬起,并获得运动速度。随着抬起的高度逐渐增加,复合模型在外部载荷作用下产生破碎并形成多道裂缝。颗粒间相互粘结形成块状体。随后铲柄剪切被抬起的颗粒,并形成如图 6a 所示的速度云图。该过程中复合模型以整体的形式在铲柄刃口处发生剪切,破碎的颗粒由铲柄向两侧扩散,靠近铲柄处隆起最大。由于铲柄与复合模型间存在剪切及摩擦作用,块状体在铲尖和铲柄共同作用下产生运移。产生该现象的主要原因为复合模型颗粒间存在粘聚力,松土过程中以整体形式受铲尖作用被向上抬起,剪应力随着颗粒运动趋势由深层至表层逐渐降低,当复合模型所受剪应力超过自身失效应力时发生破碎现象并产生孔隙裂缝。同时复合模型不断破碎,改变了颗粒级配和孔隙结构,导致孔隙裂缝如图 4a 所示,在 0 ~ 180 mm 处观测区域的裂缝逐渐变大。铲柄剪切复合模型时,剪应力由铲柄向前方及两侧扩散,并且在失效应力最小的区域产生破碎,颗粒产生速度,速度分布主要为由接触平面向周边扩散,如图 5a 所示。最终在铲尖和铲柄的应力叠加作用下导致失效应力较大颗粒相互粘结,应力较小颗粒间发生破裂,最终形成团状体并随铲柄向上及两侧运移。

图 4b、5b、6b 为对缝松土方式复合模型扰动示意图。该方式下与松土铲相互作用的复合模型可看作半无限长土体(即单侧边界无限长)。由图 4b 可知,深层颗粒受到铲尖施加的外部载荷并被向上抬起,并通过颗粒间相互作用将应力扩散至沟缝两侧。复合模型产生破碎并沿沟缝不断向上及两侧扩散,形成如图 6b 所示的速度云图。随后铲柄沿沟缝进一步剪切与挤压,颗粒沿沟缝两侧扩散,破碎过程中无明显裂缝产生。与传统松土方式不同的是,由于切根沟缝的存在,降低松土过程中颗粒间的摩擦力和粘性力,颗粒速度变化主要集中在沟缝两侧并向两侧延伸。随后铲柄沿沟缝松土时,铲柄前方剪切的多为破碎土壤颗粒,颗粒相互间作用较小。该方式并无裂缝或团状体产生的主要原因为,铲柄主要对沟缝两侧土壤产生挤压和部分剪切作用,由于土

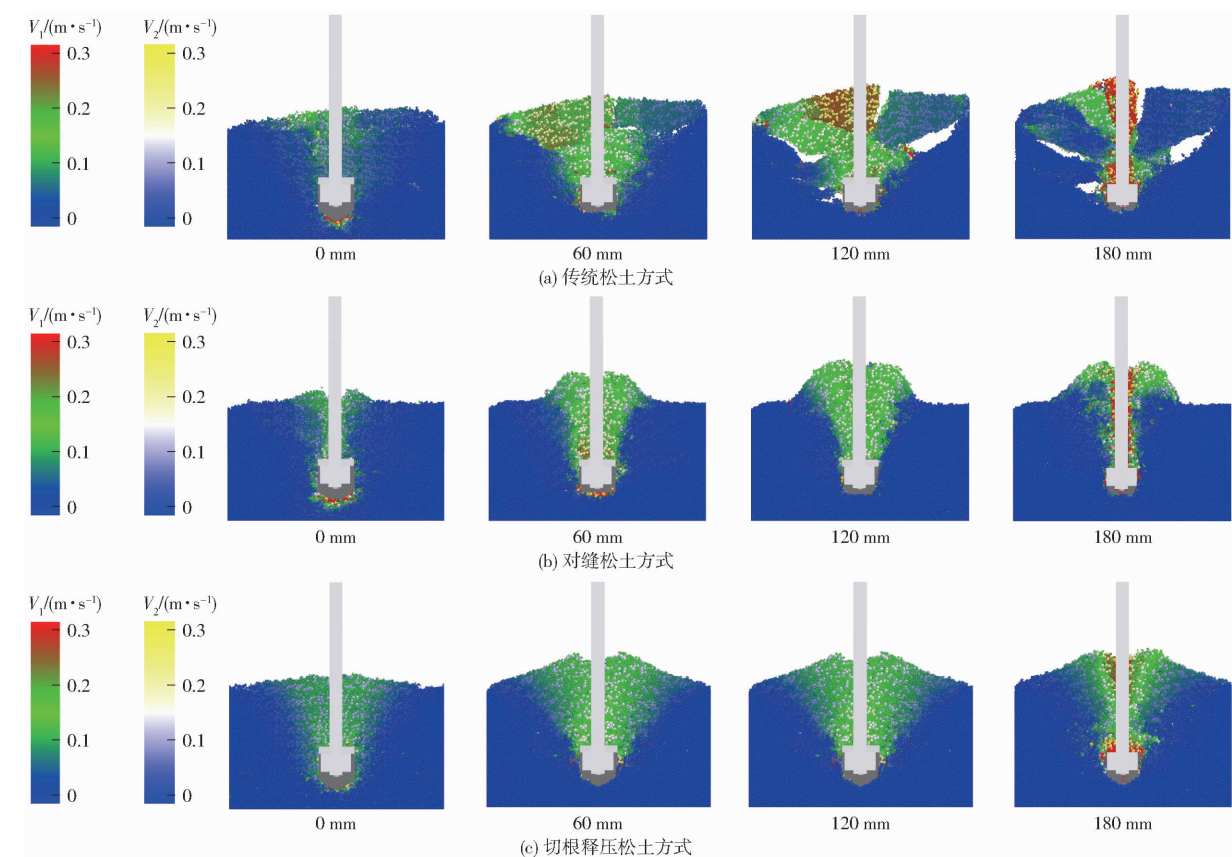


图 4 各松土方式不同间隔下的观测区域复合模型扰动图

Fig. 4 Composite model disturbance diagrams of observation area under different intervals of each loosening method

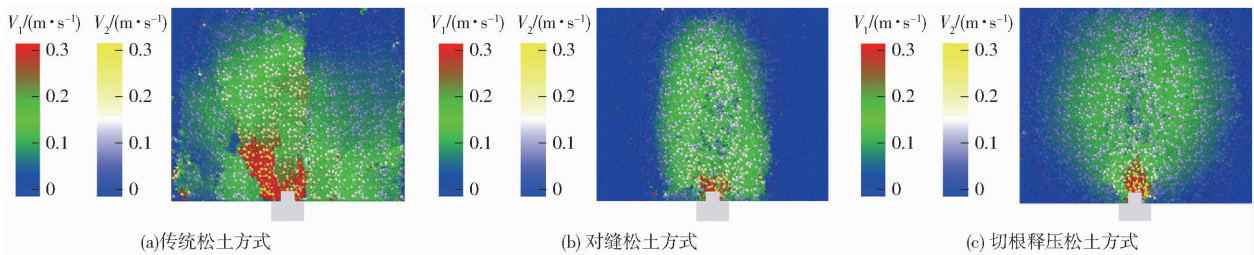


图 5 各松土方式观测区域复合模型扰动俯视图

Fig. 5 Top views of composite model disturbance in observation area for each loosening method

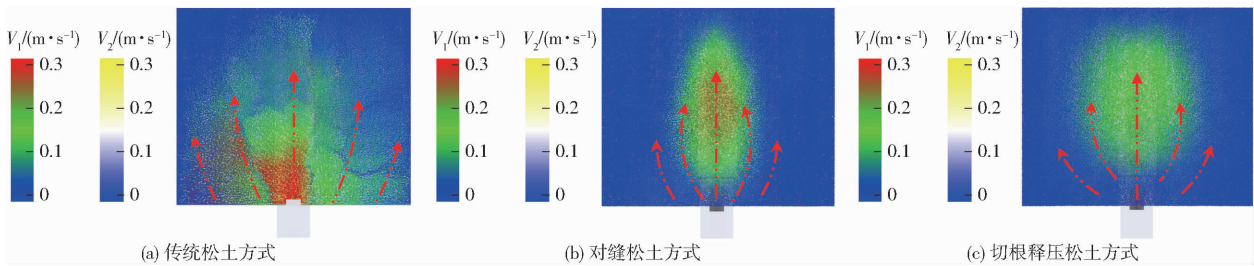


图 6 各松土方式观测区域复合模型速度变化俯视图

Fig. 6 Top views of composite model velocity changes in observation area for each loosening method

壤抗压强度高于抗剪强度,仅有少部分土壤发生破碎,所以该过程中裂缝较少。同时,与传统松土方式不同,该方式作业时由于切根沟缝的存在,速度较大的颗粒主要集中在土体中有限边界一侧,如图 6b 所示,应力沿铲柄侧面进行扩散,应力为零处土层形成固接点,有利于外载作用下颗粒间作用力释放,因此不易产生裂缝或团状体,但会增加地表扰动。

图 4c、5c、6c 为切根释压松土方式复合模型扰动示意图。该方式下的模型可看作有限长土壤。松土时,铲尖对切根沟缝及两侧土壤施加剪切及挤压力,土壤沿沟缝向上及两侧移动并产生局部化塑性变形,同时周围颗粒产生相互作用,带动沟缝两侧土层向上抬升。随后铲柄对抬升的土壤进行挤压与剪切,进一步提升颗粒间破碎和移动趋势,并带动两侧

的土层向释压沟缝偏移,并形成如图 6c 所示速度场。主要原因为铲尖剪切土壤时,土壤剪应力沿颗粒流向扩散并累积,但形成的释压沟缝切断了土层,阻隔了铲尖剪切时的应力扩散,增强了应力集中的效果,提升了切根沟缝到释压沟缝处土层的破碎范围,如图 5c 所示,最终提升了松土效果。

对各松土方式作业下的复合模型扰动过程进一步对比分析。通过图 5 可知,传统松土的扰动区间最大(图 5a)。但该过程伴随多个裂缝及块状团聚体的产生,等同于实际作业过程中土壤翻垡现象,不利于对草地的疏松;对缝松土的扰动区间集中于切根沟缝附近(图 5b),颗粒均匀性较好,但扰动区间最小;切根释压松土的扰动区间与传统松土相似,均大于对缝松土,同时颗粒流动性和均匀性更好。因此实际作业时,切根释压松土方式更适用于退化草地松土改良作业。

2.2.2 颗粒速度场对比分析

为了分析各松土方式的土壤运动规律,对各松土方式作用下的颗粒速度场进行分析。图 7~9 为 3 种松土方式的复合模型速度变化示意图。由图 7a、8a、9a 可知,传统松土方式复合模型颗粒速

度由铲柄到铲尖逐渐递减,同图 6a,土壤的隆起程度与速度正相关,即越靠近铲柄处土壤隆起越大,主要原因为该处颗粒速度最大,使得颗粒不断堆积。随着铲柄与颗粒进行交互作用,颗粒速度达最大,并且颗粒流向向行进方向偏移,如图 6a、7a 所示,即实际作业时土壤翻垡并带动团状体前移,结果与图 4a 的颗粒变化趋势一致。对缝松土方式作业下复合模型颗粒速度由铲柄到铲尖先增大后减小,方向及大小以垂直铲尖楔面为中心对称分布。原因为切根沟缝释放了颗粒间的相互作用力,降低了铲尖楔面处颗粒的堆积效应。垂直铲尖楔面的颗粒速度最大,易导致颗粒向上堆积,利于土壤疏松,但也会增大表层扰动。铲尖前方颗粒的速度变化规律同传统松土方式,而靠近铲柄的一侧受到颗粒的堆积效应,增加了颗粒的相互作用。与铲柄接触时,接触的颗粒速度增大,颗粒沿铲柄后方运动,如图 8a 所示,该运动趋势有利于颗粒的回流,整体过程为降低部件的松土阻力提供条件。切根释压松土方式作业下复合模型颗粒速度变化趋势与对缝松土方式变化趋势相同,但疏松区间内的颗粒速度小于对缝松土,即颗粒向上的堆积

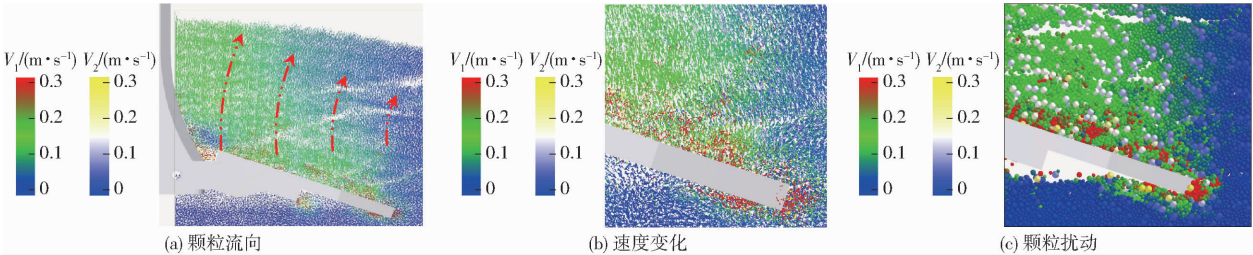


图 7 传统松土方式颗粒运动变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of particle motion changes in traditional loosening method

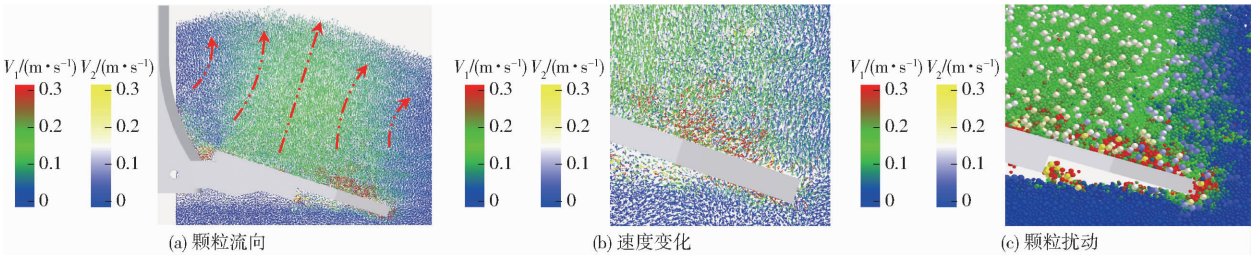


图 8 对缝松土方式颗粒运动变化示意图

Fig. 8 Schematics of particle motion changes in loosening soil along cracks method

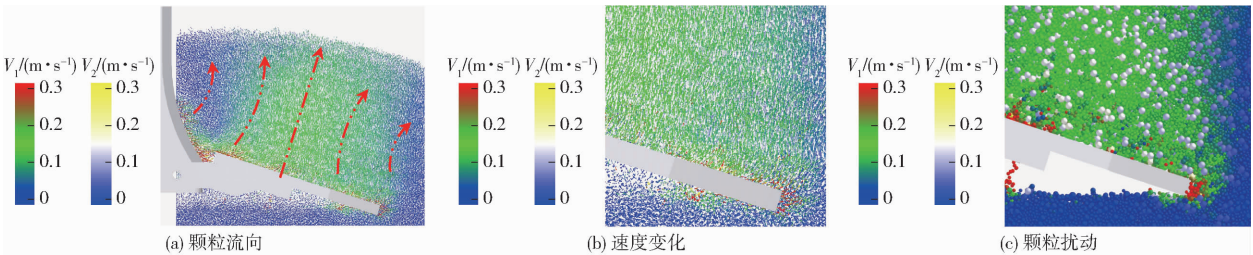


图 9 切根释压松土方式颗粒运动变化示意图

Fig. 9 Schematics of particle motion changes in loosening soil by cutting roots to release pressure

较少,产生的地表扰动较小。主要原因为释压沟缝的存在驱动颗粒向两侧运动,如图 6c 所示。这也解释了 2.2.3 节中传统松土、对缝松土方式与切根释压松土方式扰动参数不同的原因。

上述分析表明传统松土方式容易产生裂缝。由图 7b、7c 可知,形成的裂缝一定程度上降低了颗粒间速度的传递,团聚体之间的复合模型颗粒速度相近,颗粒的运动趋势与图 4a 一致;由图 7b、8b、9b 可知,对缝松土方式疏松区间的颗粒速度均值更大,更容易造成颗粒向上堆积,因此解释了对缝松土方式的隆起大于传统松土方式的原因。切根释压松土方式铲尖处颗粒速度最小,但速度分布更均匀,因此对地表的扰动最小。由图 8c、9c 可知,切根释压松土方式铲尖附近的颗粒速度均值较小,同时速度大的颗粒主要集中在铲尖前端,不会对颗粒产生较大的抬升效果。与传统松土方式和对缝松土方式相比较,切根释压松土方式颗粒速度变化较均匀,颗粒流动更加均匀,疏松效果更好,不会产生较大的地表扰动。综合分析图 4~9,切根释压松土方式作业产生的疏松范围更大,同时流动性较好,较好地分散了颗粒堆积,为降低松土部件松土阻力提供了依据。

2.2.3 土壤扰动参数

为探究 3 种松土方式对土壤扰动效果的影响,以土壤扰动面积、隆起角和地表平整度等参数为指标进行对比分析。

(1) 土壤扰动面积

土壤扰动面积是衡量松土后土壤疏松程度的重要指标之一,土壤扰动面积越大表征该松土方式作用下的草地松土量越大。为评价 3 种松土方式的作业效果,采集各作业方式稳定阶段时的土壤扰动轮廓参数,利用 AutoCAD 绘制对应的轮廓图并计算面积。获取土壤扰动轮廓参数时,以相同时刻观测区域内复合模型的扰动图作为参考,按照土壤颗粒是否具有运动速度为区分原则,进行关键点数据采集并绘制土壤扰动轮廓。数据采集时,以两从动式切根装置幅宽作为取样区间 L (240 mm),测定 3 种松土方式在该间隔内的松土面积,每种松土方式测定 3 次。结果表明,传统松土方式土壤扰动面积最大,均值为 35 298.34 mm²。对缝松土方式土壤扰动面积最小,均值为 29 259.96 mm²。切根释压松土方式土壤扰动面积略小于传统松土,均值为 32 994.32 mm²。

(2) 隆起角和地表平整度

隆起角和地表平整度是反映地表土壤扰动效果的重要评价指标。隆起角即松土部件耕作后的扰动土层与水平面的夹角,反映了松土后土壤地表的纵向堆积状态。地表平整度^[45-46]即作业前后耕作区

域内相同位置的土层高度差值,反映了松土后土壤地表的平整程度。隆起角和地表平整度数值越大表征对表层土壤扰动越大。为了对比 3 种松土方式的隆起角及地表平整度的变化趋势,采用与测定松土面积相同的方法获取取样区间 L 内松土前后土壤颗粒坐标值,并进行轨迹绘制(图 10)。数据提取时,以长度 l (20 mm) 为取样间隔将轨迹进行等分,测定各点松土前后垂直距离差值及相邻间隔点的水平夹角。通过计算各松土方式的垂直距离和隆起角均值作为扰动效果的评价指标。其中,传统松土方式地表平整度均值为 27.56 mm,对缝松土方式地表平整度均值为 22.54 mm,较传统松土方式地表平整度提高 18.21%,切根释压松土方式地表平整度均值为 25.18 mm,较传统松土方式地表平整度提高 8.64%。传统松土方式隆起角均值为 25.87°,对缝松土方式隆起角均值为 29.83°,切根释压松土方式隆起角均值为 22.41°。综合考虑各松土作业后的隆起角和地表平整度变化值,切根释压松土方式更利于退化草地的松土作业。

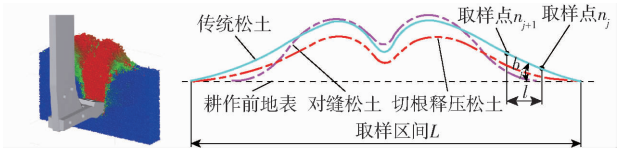


图 10 不同松土方式垄形截面示意图

Fig. 10 Schematic of ridge cross section for different loosening methods

2.2.4 松土阻力对比

为分析不同松土方式对土壤松土阻力的影响,以步长 0.03 s 获取 3 种松土方式平稳阶段松土阻力曲线,结果如图 11 所示。由图 11 可知各松土方式下松土阻力呈无规则变化。传统松土方式松土阻力最大,均值为 5 348.80 N,该方式作业下的松土装置同时抵抗剪切土壤和羊草根系的抗剪力,及周向土壤颗粒间的粘聚力。对缝松土方式松土阻力小于传统松土方式,均值为 4 713.33 N,较传统松土方式降低 11.88%。主要原因为对缝松土方式沿切根沟缝进行松土,提高了铲尖楔面处颗粒流动性,如图 8a 所示,降低了颗粒间抵抗剪切变形产生的粘聚力,释放土壤破碎过程中的颗粒间作用力。另一方面减少铲尖和铲柄对土壤和根系的直接剪切区域,降低了松土部件破碎土壤与根系的应力消耗。切根释压松土方式松土阻力最小,均值为 3 692.75 N。较传统松土方式降低 30.96%,较对缝松土方式降低 21.65%。主要原因为该松土方式以对缝松土方式为基础,在切根沟缝两侧形成释压沟缝。松土对象由半无限土层转变为对有限土层进行疏松,铲尖

及铲柄疏松土壤时,通过释压沟缝降低铲柄对侧向土壤的挤压,增加了颗粒侧向流向,提高了颗粒的流动性(图 6c),减少了松土装置摩擦阻力,另一方面降低根系对疏松土壤的影响,降低破碎土壤的动力消耗。结果表明,切根释压松土方式可有效降低耕作部件的松土阻力。

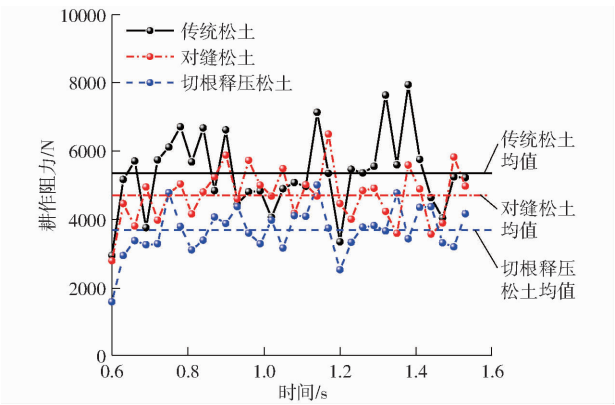


图 11 不同松土方式仿真松土阻力变化曲线
Fig. 11 Variation curves of soil resistance simulated by different soil loosening methods

3 田间试验

3.1 试验条件与方法

为对比 3 种作业方式的作业效果,以 1.2 节所述作业方式为参考,按图 1 所示的各装置空间分布为依据,并结合仿真分析结果进行 3 种松土方式的田间试验。其中,主动式切根装置、从动式切根装置和松土装置均可拆卸。开展传统松土试验时,拆卸前方松土装置,仅保留 2 个松土装置开展试验;开展对缝松土试验时,拆卸从动式切根装置,仅保留 2 个主动式切根装置和松土装置开展试验;开展对缝松土试验时,仅保留 2 个主动式切根装置、2 个松土装置和 4 个从动式切根装置开展试验。试验于 2023 年 7 月在内蒙古自治区海拉尔地区退化草地(49°20′32″N,119°59′39″E)进行。耕作前作业区域地况及整机田间试验如图 12 所示。试验前,设置试验田长度为 30 m,前 5 m 为各装置稳定作业准备阶段,剩下 25 m 为稳定运动阶段。每隔 8 m 对稳定阶段区域数据进行采集,每个松土方式设置 3 组重复试验。试验准备阶段,按照 GB/T 5262—2008 的方法利用环刀取样并测定该地区土壤含水率。取样过程中,随机选择 3 处待测区域,以 50 mm 为间隔,获取深 0 ~ 300 mm 土样,进行干燥与称量,最终测得地表至深层土壤深 0 ~ 300 mm 土壤含水率均值为 12.76%。试验时,选用约翰迪尔 1204 型拖拉机进行松土作业。分别开展 3 种松土方式中的田间试验时,确保各松土方式作业下的松土深度相同,机具行

进速度维持相对稳定状态。



图 12 耕作前作业区域地况及田间试验
Fig. 12 Diagram of ground conditions in working area before tillage and field test

为探究 3 种松土方式的田间作业效果,利用 SC-900 型土壤紧实度仪,以 25 mm 为间隔,测定深度为 300 mm,测定松土前后相同区域的土壤紧实度。同时以 50 mm 为间隔,测定深度为 300 mm,利用环刀取样并按照 NY/T 1121.4—2006 测定 3 种松土方式作业前的待耕作区域及耕作后区域的土壤容重。并利用 S 型拉压力传感器记录松土装置由入土到稳定阶段的松土阻力变化。土壤扰动系数和土壤蓬松度是评价各松土铲土壤扰动效应的重要指标^[47]。根据试验测定 3 种松土方式下土壤垄形截面和坑形截面坐标,拟合出土壤扰动截面轮廓曲线,并计算各松土方式作业后土壤扰动系数 E_r 和土壤蓬松度 E_p 。计算公式分别为

$$E_p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{A_s}{A_q} \times 100\%$$

式中 A_h ——耕前地表至理论松土沟底横断面面积,mm²
 A_q ——耕后地表至理论松土沟底横断面面积,mm²
 A_s ——耕前地表至实际松土沟底横断面面积,mm²

3.2 试验结果与分析

3.2.1 作业后土壤扰动状况

3 种松土方式作业效果如图 13 所示。由图 13 可知,传统松土方式对退化草地的破坏较大,草地土壤以土层的形式运移,同时伴有土壤翻垡现象产生,易造成草地根系损伤。松土装置主要承受土壤达到临界破碎状态和根系减缓土壤破碎扩散产生的拉应力,一方面钝化了铲柄刃口处土壤的应力集中,另一方面根系连接土壤各破碎单体,增大了土壤破碎阻力,使得土壤从根系较稀疏处发生断裂,造成了土壤翻垡。对缝松土作业对退化草地的破坏较小,作业后退化草地仅产生小幅度的土壤隆起现象。该松土方式预先破坏了土壤结构,等同于提高铲柄刃口处

土壤的应力集中,改善了土壤流动性,降低了部件松土阻力。切根释压松土作业和对缝松土作业效果相近,在对缝松土基础上,利用从动式切根装置强行阻断侧向根系的侨联作用,同时形成释压沟缝。该方式作业后退化草地仅产生小幅度的土壤隆起。与对缝松土方式相比,切根释压松土方式可减小地表扰动的同时提高深层土壤的扰动区间。

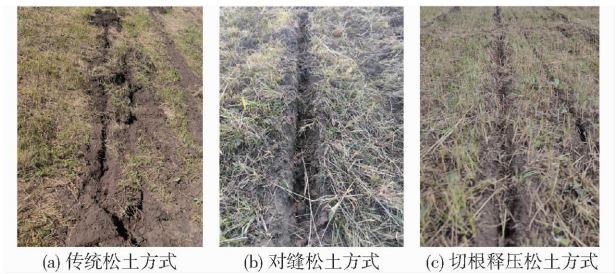


图 13 不同松土方式田间作业效果

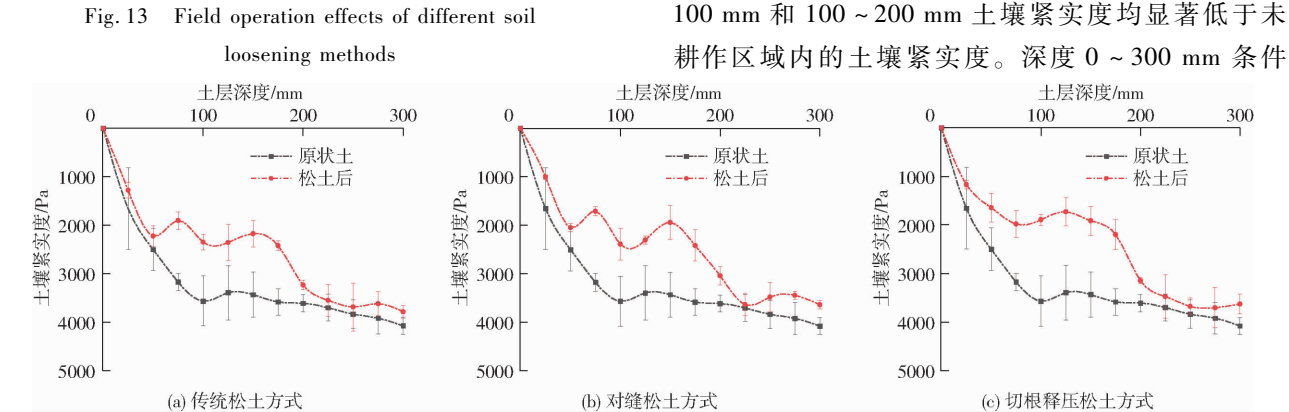


图 14 原状土及不同松土方式下的土壤紧实度变化曲线
Fig. 14 Changes in soil cone index in undisturbed soil and under different loosening methods

下,切根释压松土方式相较传统松土和对缝松土作业后的土壤紧实度均值分别降低 6.19% 和 12.67%。其中,深度 0 ~ 100 mm 对缝松土和切根释压松土作业后土壤紧实度较传统松土作业后土壤紧实度降低 7.93% 和 13.78%。深度 100 ~ 200 cm 土壤紧实度均值分别较传统松土作业后土壤紧实度降低 4.87% 和 11.82%,深度 200 ~ 300 mm 各松土方式耕作后土壤紧实度均值无明显变化。

3.2.3 作业后土壤容重

不同松土方式均可打破退化草地原有土层的致密结构,并形成不同的土层构造,不同耕层构造下土壤物理性状最直接表现是土壤容重变化。图 15 为 0 ~ 300 mm 未耕区域(原状土,对照组)及 3 种松土方式作业后的土壤容重变化情况。从整体来看,不同松土方式均能不同程度降低耕作区域内退化草地的土壤容重。深度 0 ~ 300 mm 下,未耕区域土壤容重呈先增加后稳定趋势,传统松土、对缝松土和切根释压松土作业后土壤容重均小于未耕区域。对比各松土方式整个作业区间的土壤容重均值可得,切根

3.2.2 作业后土壤紧实度

图 14 分别为 0 ~ 300 mm 深度范围内松土前后土壤紧实度变化情况。由图 14 可知,未耕作区域内的土壤紧实度随土壤深度的增加而增加,表明退化草地存在较为明显分层现象。深度 0 ~ 100 mm 的土壤紧实度增长速率最高,100 ~ 300 mm 土壤紧实度增长较为缓慢。其中深度 0 ~ 100 mm 土壤紧实度均值为 2 723.67 kPa,深度 100 ~ 200 mm 土壤紧实度均值为 3 504.42 kPa,深度 200 ~ 300 mm 土壤紧实度均值为 3 883.33 kPa,各土层土壤紧实度存在显著性差异。

采用不同松土方式进行退化草地松土作业,能够不同程度降低退化草地的土壤紧实度。传统松土、对缝松土和切根释压松土耕作后深度 0 ~ 100 mm 和 100 ~ 200 mm 土壤紧实度均显著低于未耕作区域内的土壤紧实度。深度 0 ~ 300 mm 条件

释压松土方式相较传统松土和对缝松土作业后的土壤容重均值分别降低 1.19% 和 3.16%。如图 15a 所示,3 种松土方式作业后土壤容重均呈下降趋势,但变化趋势不明显。主要原因为该层土壤属表层土壤,水分和微生物含量等较高,减缓了土壤板结。对试验数据进行显著性分析后发现,原状土与 3 种松土方式作业后的土壤容重相比均具有显著性差异。由图 15b 可知,传统松土区域土壤容重略小于对缝松土区域土壤容重,但大于切根释压松土区域土壤容重。可能原因为该层主要为土壤与根系混合层,形成的切根沟缝一定程度减小颗粒间应力传递及根系对土壤的作用,导致该区域的疏松效果传统松土方式优于对缝松土,而切根释压松土的作业对象为有限土土体,通过切断侧向根系,一定程度增加了侧向土层的应力集中,提高了对土壤的疏松效果。由图 15c、15d 可知,3 种松土方式中,传统松土方式土壤容重最大,切根释压松土方式土壤容重最小。当土层深度超过土壤松土深度时,各松土方式土壤容重相近,约等同于该深度的未耕区域土壤容重。结

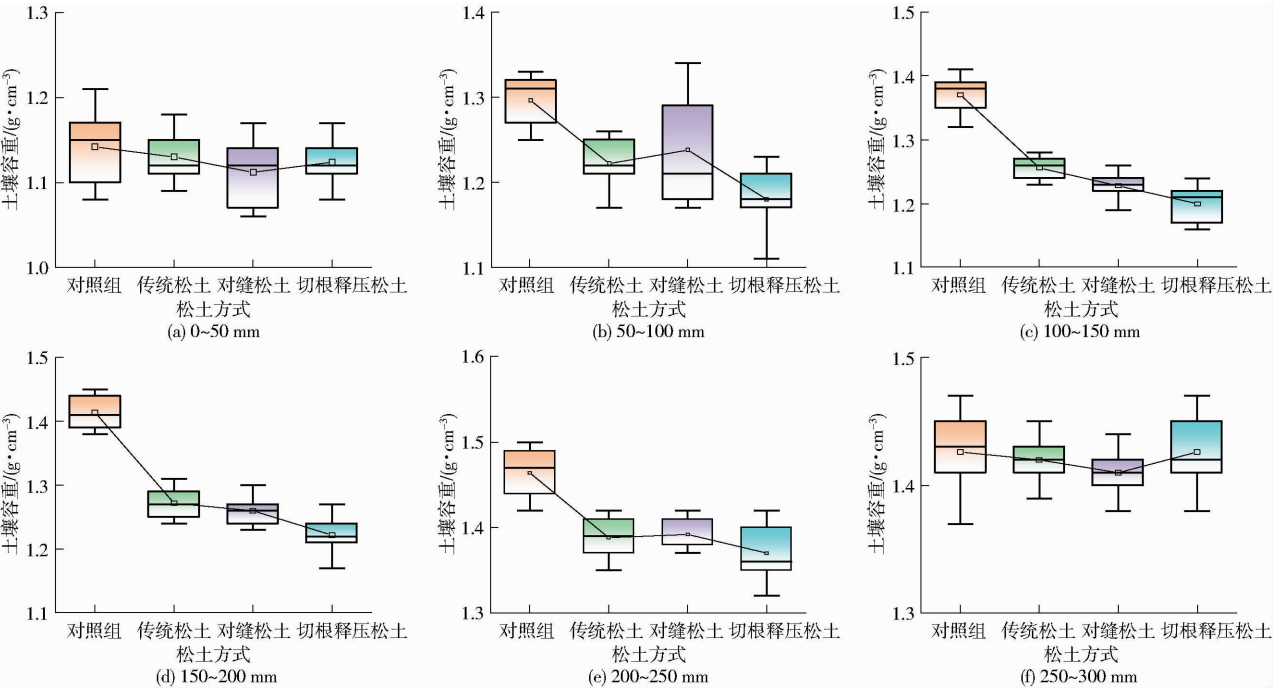


图 15 对照组及不同松土方式土壤容重

Fig. 15 Changes in soil bulk density of control group and different soil loosening methods

果表明,各松土方式对表层土壤的疏松效果无明显差异,松土区间内切根释压松土方式作业后的土壤容重最小,即该方式对草地深层土壤的疏松效果更好。

3.2.4 土壤扰动效应评价参数

由图 16 可知,采用不同松土方式作业后的土壤扰动状态存在较大差异。其中,传统松土作业后土壤扰动系数最大,均值为 52.31%。对缝松土作业后土壤扰动系数最小,均值为 40.16%,较传统松土方式小约 23.22%。切根释压松土与传统松土作业后土壤扰动系数结果相近,均值为 49.05%,较传统松土方式小约 6.23%。对缝松土方式作业后土壤蓬松度最大,均值为 30.18%。传统松土作业后土壤蓬松度最小,均值为 24.24%,较对缝松土方式小约 19.68%。切根释压松土作业与传统松土作业后的土壤蓬松度结果相近,均值为 25.81%,较对缝松

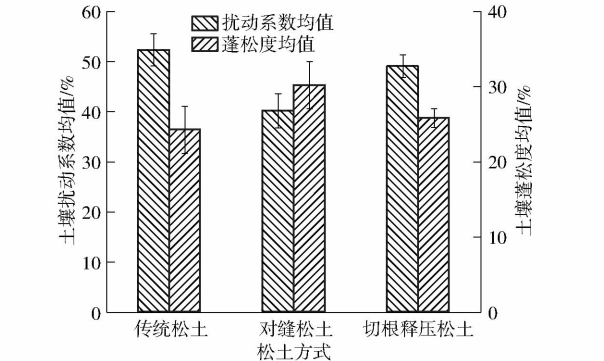


图 16 各松土方式土壤扰动系数均值及土壤蓬松度均值

Fig. 16 Soil disturbance coefficient and mean soil fluffiness for each loosening method

土方式小约 14.48%。综合上述参数,传统松土方式扰动效果较好,切根释压松土方式作业效果与传统松土方式相近。

3.2.5 松土阻力

图 17 为 3 种松土方式作业下的松土部件松土阻力随时间变化的田间试验结果。由图 17 可知,各松土方式作业过程中松土部件的承载能力变化明显,但整体变化趋势相近。均随着松土铲尖与草地接触时松土阻力先迅速增加后缓慢增加,最终趋于稳定。即从 0 s 开始,随着松土铲尖与土壤接触,松土阻力逐渐增加。约 0.5 s 后,松土铲柄进行草地松土作业,松土部件松土阻力进一步增加直至达到峰值。主要原因为松土铲尖刚接触土壤时,土壤承受较小的载荷并产生线弹性形变,随着松土铲不断剪切土壤,土壤承受的载荷超过自身屈服载荷而产生塑性变形,同时土壤产生硬化现象并继续承载松

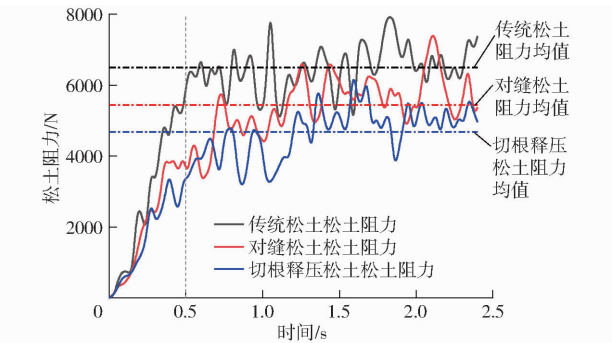


图 17 不同松土方式松土阻力变化曲线

Fig. 17 Variation curves of soil loosening resistance under different soil loosening methods

土铲柄施加的载荷,当超过土壤的破碎载荷时土壤破碎,松土铲承受负载逐渐稳定。对各松土方式作业下的松土阻力进行对比可知,传统松土方式作业后松土阻力最大,均值为 6 489.40 N,对缝松土作业后松土阻力略小于传统松土方式,均值为 5 433.24 N,较传统松土方式松土阻力降低约 16.02%。切根释压松土方式方式作业后松土阻力最小,均值为 4 677.84 N,较传统松土方式松土阻力降低约 27.48%,各松土方式的松土阻力变化趋势与仿真结果相一致,结果表明切根释压松土方式具有较好的减阻效果。

4 结论

(1)提出了一种退化羊草地切根释压松土方式,通过切根装置切割松土装置侧向土壤及铲尖楔面处土壤,并沿沟缝进行松土作业,可有效提高侧向土壤和铲尖楔面处土壤的流动性,增大深层土壤扰动区间的同时降低对表层土壤的扰动,同时降低了耕作部件的松土阻力。

(2)以海拉尔地区草甸草原为研究对象,采用离散元法开展了传统松土、对缝松土和切根释压松土扰动试验,分析了 3 种松土方式复合模型运动状态。结果表明,3 种松土方式对土壤扰动具有显著性差异。切根沟缝和释压沟缝分别改变了铲尖楔面处及铲柄侧向颗粒流向,传统松土方式土壤流动性最差,易产生裂缝和块状团聚体。对缝松土方式土壤流动性较

好,但扰动区间最小,同时增加对地表的扰动。切根释压松土方式土壤流动性和均匀性优于传统松土和对缝松土,疏松效果最佳且地表扰动较小。

(3)通过对 3 种松土方式下的仿真结果进行对比分析可知,不同松土方式对土壤扰动面积、隆起角、地表平整度和松土阻力具有显著性影响。传统松土方式土壤扰动面积略大于切根释压松土方式,对缝松土方式土壤扰动面积最小。对缝松土方式隆起角最大,传统松土方式隆起角略大于切根释压松土方式。传统松土方式地表平整度最差,切根释压松土方式地表平整度优于对缝松土方式。传统松土方式、对缝松土方式和切根释压松土方式的松土阻力依次减小。

(4)田间试验结果表明,传统松土方式土壤扰动面积最大,切根释压松土方式土壤扰动面积略小于传统松土方式,对缝松土方式土壤扰动面积最小。3 种松土方式均能不同程度降低退化羊草地土壤坚实度和土壤容重,但切根释压松土方式土壤坚实度均值最小,对土壤扰动效果最好。传统松土方式松土阻力最大,易产生土壤翻垡现象并损伤根系。对缝松土方式松土阻力略小于传统松土方式,对土壤的疏松效果优于传统松土方式。切根释压松土方式松土阻力最小,同时对土壤疏松效果最好。综上,切根释压松土方式在提高松土质量和降低松土阻力方面优于传统松土和对缝松土方式,更适用于退化羊草地松土改良作业。

参 考 文 献

[1] PETERMANN J S, BUZHDYGAN O Y. Grassland biodiversity[J]. Current Biology, 2021, 31(19): 1195 – 1201.

[2] 王德利,王岭,辛晓平,等.退化草地的系统性恢复:概念、机制与途径[J].中国农业科学,2020,53(13):2532 – 2540.
WANG Deli, WANG Ling, XIN Xiaoping, et al. Systematic restoration for degraded grasslands: concept, mechanisms and approaches[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2532 – 2540. (in Chinese)

[3] 刘源.2016 年全国草原监测报告[J].中国畜牧业,2017(8):18 – 35.

[4] 沈海花,朱言坤,赵霞,等.中国草地资源的现状分析[J].科学通报,2016,61(2):139 – 154.
SHEN Haihua, ZHU Yankun, ZHAO Xia, et al. Analysis of current grassland resources in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 139 – 154. (in Chinese)

[5] BARDGETT R D, BULLOCK J M, LAVOREL S, et al. Combatting global grassland degradation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(10): 720 – 735.

[6] HAN J G, ZHANG Y J, WANG C J, et al. Rangeland degradation and restoration management in China[J]. The Rangeland Journal, 2008, 30(2): 233 – 239.

[7] PULIDO M, SCHNABEL S, LAVADO C J F L, et al. Reduction of the frequency of herbaceous roots as an effect of soil compaction induced by heavy grazing in rangelands of SW Spain[J]. Catena, 2017, 158: 381 – 389.

[8] ZHANG Z, GONG J, WANG B, et al. Regrowth strategies of *Leymus chinensis* in response to different grazing intensities[J]. Ecological Applications, 2020, 30(5): e02003.

[9] 潘庆民,杨元合,黄建辉.我国退化草原恢复的限制因子及需要解决的基础科学问题[J].中国科学基金,2023,37(4): 571 – 579.
PAN Qingmin, YANG Yuanhe, HUANG Jianhui. Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(4): 571 – 579. (in Chinese)

[10] CHYBA J, KROULÍK M, KRIŠTOF K, et al. Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland[J]. Agronomy Research,2024, 12: 59 – 64.

- [11] 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)
- [12] 刘滨硕, 薛洪海, 李明, 等. 土壤紧实度对羊草形态及其生物量的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(2): 59–62.
LIU Binshuo, XUE Honghai, LI Ming, et al. Effects of soil bulk density on morphology and biomass of *Leymus chinensis*[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(2): 59–62. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] FAN D, KONG W, WANG F, et al. Fencing decreases microbial diversity but increases abundance in grassland soils on the Tibetan Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(17): 2577–2590.
- [15] JACOBO E J, RODRÍGUEZ A M, BARTOLONI N, et al. Rotational grazing effects on rangeland vegetation at a farm scale [J]. Rangeland Ecology & Management, 2006, 59(3): 249–257.
- [16] LI Q, ZHOU D W, JIN Y H, et al. Effects of fencing on vegetation and soil restoration in a degraded alkaline grassland in Northeast China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 478–487.
- [17] DENG L, ZHANG Z, SHANGGUAN Z. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 137: 7–15.
- [18] 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 Li, DING Yong. Progress in research and practice of restoration of degraded grassland around the world[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(10): 189–205. (in Chinese)
- [19] GLAB T, KACORZYK P. Root distribution and herbage production under different management regimes of mountain grassland [J]. Soil & Tillage Research, 2011, 113(2): 99–104.
- [20] DREWRY J J, LOWE J A H, PATON R J. Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a pallic soil in Southland, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2000, 43(2): 269–277.
- [21] ZHANG H, ARAYA K, KUDOH M, et al. An explosive subsoiler for the improvement of meadow soil. Part 3: field experiments[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(3): 327–332.
- [22] ZHANG H, ARAYA K, KUDOH M, et al. An explosive subsoiler for the improvement of meadow soil. Part 2: soil bin experiments[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(2): 209–219.
- [23] DE BOER H C, DERU J G C, VAN EEKEREN N. Sward lifting in compacted grassland: effects on soil structure, grass rooting and productivity[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184: 317–325.
- [24] 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)
- [25] 王斌, 李满有, 王欣盼, 等. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 107–117.
WANG Bin, LI Manyou, WANG Xinpan, et al. Combined ploughing and tilling to improve degraded alfalfa (*Medicago sativa*) stands in a semi-arid region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(1): 107–117. (in Chinese)
- [26] ZHANG X, YOU Y, WANG D, et al. Soil failure characteristics and loosening effectivity of compacted grassland by subsoilers with different plough points[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 170–181.
- [27] 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: 49–58.
- [28] 董向前, 宋建农, 王继承, 等. 草地振动松土机运动特性分析与振动频率优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 44–49.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Vibration frequency optimization and movement characteristics analysis of vibration shovel for meadow[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 44–49. (in Chinese)
- [29] NAVARRO-ROSALES F, FERNÁNDEZ-HABAS J, REYNA-BOWEN L, et al. Subsoiling for planting trees in dehesa system: long-term effects on soil organic carbon[J]. Agroforestry Systems, 2023, 97(4): 699–710.
- [30] 陈超, 刘洪来, 杨丰, 等. 羊草草地对原地放堡振动间隔松土的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5494–5502.
CHEN Chao, LIU Honglai, YANG Feng, et al. Response of *Leymus chinensis* grassland to situ-vibration scarifying technique [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5494–5502. (in Chinese)
- [31] 周云艳, 徐琨, 陈建平, 等. 基于 CT 扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 1–9.
ZHOU Yunyan, XU Kun, CHEN Jianping, et al. Mechanism of plant lateral root reinforcing soil based on CT scan and mesomechanics analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 1–9. (in Chinese)
- [32] CELIK A, RAPER R L. Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124: 203–210.
- [33] YOU Y, WANG D, LIU J. A device for mechanical remediation of degraded grasslands[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118: 1–10.

[34] 白晓虎,林静,吕长义,等.免耕播种机圆盘破茬刀工作性能分析与试验[J].农业工程学报,2014,30(15):1-9.
BAI Xiaohu, LIN Jing, LÜ Changyi, et al. Analysis and experiment on working performance of disc coulter for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(15): 1-9. (in Chinese)

[35] JB/T 9788—1999 深松铲和深松铲柄[S].1999.

[36] LIU Y, ZHAO J, YIN B, et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 55-72.

[37] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等.基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J].农业工程学报,2021,37(20):53-62.
ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, YUAN Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53-62. (in Chinese)

[38] WU Y, HAO H, GAO M, et al. A modified particle contact model for matching the ratios of uniaxial compressive to tensile strength of brittle rocks[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources, 2023, 9(1): 1-14.

[39] 赵淑红,王加一,杨超,等.保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(9):57-68.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, YANG Chao, et al. Design and experiment of stubble chopper under conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 57-68. (in Chinese)

[40] 刘芳,高筱钧,贾宪,等.高速精量播种机阿基米德螺旋线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J].农业机械学报,2024, 55(6):91-100,120.
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 91-100, 120. (in Chinese)

[41] 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)

[42] HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73-82.

[43] 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)

[44] 马跃进,王安,赵建国,等.基于离散元法的凸圆刀式深松铲减阻效果仿真分析与试验[J].农业工程学报,2019,35(3): 16-23.
MA Yuejin, WANG An, ZHAO Jianguo, et al. Simulation analysis and experiment of drag reduction effect of convex blade subsoiler based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 16-23. (in Chinese)

[45] 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)

[46] 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)

[47] GB/T 24675.2—2024 保护性耕作机械 第2部分:深松机[S].2024.