doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.015

板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验

张学宁[1]　尤　泳[2]　王得伟[2]　李思标[2]　王昭宇[2]　胡鹏展[2]　王德成[2]
（1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255091；2. 中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：为提升板结羊草草地机械化改良效果，提出了一种板结羊草草地机械化改良工艺并设计了一种草地切根松土镇压机。通过探究羊草草地根土复合体层物理结构特征和农艺农机融合，提出了板结羊草草地切根松土镇压改良新工艺，设计了专用于板结草地改良作业的斜柄式切根刀、折翼式松土铲、V形镇压辊，集成创制了草地切根松土镇压机，并通过草地试验验证了该机作业性能。试验结果表明，松土、切根松土作业后草地土壤坚实度分别降低59.99%、59.77%，容重分别降低23.62%、22.99%，孔隙度分别增加20.71%、20.16%，切根松土作业后沟槽缝隙宽度、土壤隆起高度、垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度均小于松土作业；松土和切根松土作业深度稳定性系数均不小于95.17%，但在相同作业速度下，切根松土作业深度稳定性系数始终高于松土作业，且切根松土比松土更接近预期作业深度(15 cm)；镇压作业可将切根松土作业产生的沟槽缝隙适度填合。

关键词：羊草；板结草地；草地切根；草地松土；草地改良机械
中图分类号：S221　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0135-12

Design and Experiment of Root-cutting and Subsoiler for Compacted *Leymus chinensis* Grassland

ZHANG Xuening[1]　YOU Yong[2]　WANG Dewei[2]　LI Sibiao[2]　WANG Zhaoyu[2]
HU Pengzhan[2]　WANG Decheng[2]
(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255091, *China*
2. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To improve the mechanized improvement effect of compacted *Leymus chinensis* grassland, a mechanized improvement process for compacted *Leymus chinensis* grassland was proposed and a grassland root-cutting and soil loosening compactor was invented. By exploring the physical structure characteristics of the root-soil composite layer of *Leymus chinensis* grassland and the analysis of the integration of agronomy and agricultural machinery, a technology for the improvement of the root-cutting and soil-loosening of *Leymus chinensis* grassland was proposed. An oblique-handled root-cutting knife, a folding-wing loosening shovel, and a V-shaped compacting roller specially used for the improvement of compacted grassland were designed. A grassland root-cutting, loosening and compacting machine was integrated and created, and its operating performance was verified through grassland tests. The test results showed that the firmness of grassland soil after loosening operation and root-cutting and loosening operation were decreased by 59.99% and 59.77% respectively, the bulk density was decreased by 23.62% and 22.99% respectively, and the porosity was increased by 20.71% and 20.16% respectively, and the groove gap width, soil uplift height, ridge contour area, soil looseness, tillage rate and surface flatness after root-cutting and loosening operations were all smaller than those after loosening operations. The operating depth stability coefficients of loosening operation and root-cutting and loosening operation were no less than 95.17%, but at the same operating speed, the operating depth stability coefficient of root-cutting and loosening operations was always higher than that of loosening operations, and root-cutting and loosening operations were closer to the expected operating depth (15 cm) than loosening operations. The suppression operation can fill the groove gap generated by the root-cutting and loosening operation appropriately.

Key words: *Leymus chinensis*; compacted grassland; grassland root-cutting; grassland loosening; grassland improvement machine

收稿日期：2024－07－30　修回日期：2024－09－20
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001903)
作者简介：张学宁(1997—)，男，讲师，博士，主要从事草地改良机械研究，E-mail: zxn@sdut.edu.cn
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

0 引言

羊草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，两者相互锚固形成紧实的根系-土壤复合体（简称根土复合体）结构，并最终在草地表层形成了根土复合体板结层，根土复合体板结层的形成使得草地土壤的孔隙度降低，容重和坚实度增加，成为草地土层板结的重要原因之一（内部原因）。而长期的过载放牧、作业机械碾压和缺乏科学管理（外部原因）更是加剧了羊草草地板结[1-3]。草地板结性退化严重影响了羊草草地土层的通透性，使得草地质量和牧草产量大幅下降。

通过对板结草地开展机械化耕作可以改善草地表层板结结构、增加其通透性，促进微生物分解并提高草地质量[4-7]。常用的板结草地机械化耕作手段包括打孔、切根（划破草皮）、松土、浅耕翻等。尤泳等[8]设计了9QP-830型草地破土切根机，该机通过传动系统将拖拉机动力传输至机具刀轴，进而驱动破土切根刀高速旋转将板结草地土壤切开，可实现作业深度在100~200 mm调整，试验结果表明该破土切根工艺可有效改善土壤结构并促进羊草生长，可使羊草产量增加近一倍。李栗等[9]对9QP-830型草地破土切根机进行了结构优化，优化设计了一种单体仿形结构，使得刀具单体可对草地进行仿形切根作业，减少了对破土切根刀具的损伤，确保了草地切根作业深度的一致性。文献[10-11]针对草地板结性退化问题，设计了9ST-460型草地振动式间隔松土机，该机对通过耕作部件上方的草地土壤进行强制振动松土（切削土壤并将土垡抛起）完成对板结草地土壤的疏松作业，该机松土比例为43.4%，植被破坏率仅为1.6%；并对机具进行了优化[12-14]：确定了激振系统最佳振动频率为4.4 Hz，此时机具耕作阻力可下降约40%，确定了机具最佳作业速度比为1.00~1.50，此时机具耕作阻力降低20%~40%。丹麦禾沃（HE-VA）研发了一种草地切根松土镇压机[15]，该机采用缺口圆盘划开草皮，可以最大限度地减少对草地的破坏，松土部件将传统的凿形铲和翼形铲相结合，其作业时使得草地土壤表面扰动被降到最低，防止土层扰乱混合，该机作业深度达到40~60 cm。英国麦康奈尔（McConnel）研发了一种草地切根松土镇压机械[16]，该机采用圆盘切刀将草皮划开，圆盘可通过液压调控耕深；松土部件配置了振动装置，该装置确保松土部件更易作业，并减少了表层草地土壤扰动，提高了燃油效率并降低了拖拉机动力要求。GSB Machinery的TerraTech草原松土机[17]改进了松土铲的排列布置方式，从单排布置变成了前后双排布置，减少了整体阻力负荷，同时也使作业后草地表面更加平整。对标国外先进的板结草地改良技术与装备，我国板结草地机械化改良方式选择较少，改良机械机型较为单一，缺乏系列化、复式作业成套装备，且缺少适宜草地耕作的关键部件。

为提升我国板结草地机械化改良效果与作业效率，亟需设计一种适用于板结草地土壤墒情、结构简单可靠的复合作业改良机械。因此，本文依据板结羊草草地机械化改良农艺农机融合分析，提出一种板结羊草草地切根松土镇压作业工艺，基于该工艺设计两种适用于板结草地改良作业的切根和松土部件，并集成一种草地切根松土镇压机，通过草地试验验证该机的作业性能。

1 板结羊草草地机械化改良工艺

1.1 板结羊草草地改良农艺农机融合

1.1.1 板结羊草草地根土复合体层结构特征

羊草是一种禾本科、赖草属的多年生根茎型草本植物，是我国北方草甸草原、典型草原的优势草种。羊草既可以有性繁殖，也可以无性繁殖，羊草依靠其强大的营养繁殖能力，在草地表层形成了巨大的根系网络，如图1所示。多年生羊草根系错综复杂，横向和纵向根系与土壤相互交织、锚固，并吸引土壤团粒、微量元素、微生物、有机物质、胶体物质等形成了紧实的根系-土壤复合体结构[18]，如图2所示。由于羊草根系依靠营养繁殖在地下形成了巨大的根系网络，再加上根土复合体紧实结构的形成，两方面因素导致羊草草地表层形成了大面积连片的根土复合体板结层，如图3所示。



图1 羊草草地根系网络

Fig. 1 *Leymus chinensis* grassland root network



图2 羊草草地根土复合体结构

Fig. 2 Soil-root composite structure of *Leymus chinensis* grassland

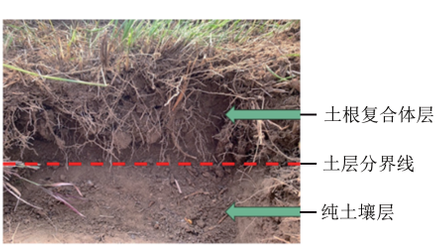


图3 羊草草地根土复合体板结层

Fig. 3 Soil-root composite layer of *Leymus chinensis* grassland

一旦草地土壤产生板结特征后，土壤板结会影响根系生长，不利于根系对养分的吸收，而且还会使根系与土壤颗粒接触更加紧密，使两者间的离子互换更加频繁、迅速，导致根土复合体结构更加紧密，使草地土壤产生板结性状的恶性循环。为探究根土复合体的形成对羊草草地的影响，对板结羊草草地根土复合体层结构特征进行了实地调查，试验地点位于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，试验区域属于张家口坝上高原区，试验结果如表1所示。

表1　板结羊草草地土壤物理特征与植被特征参数

Tab. 1　Soil physical characteristics and vegetation characteristics of *Leymus chinensis* grassland

特征参数	最小值	最大值	平均值	标准差
坚实度/kPa	1 445	4 938	2 760.1	811.445
含水率/%	5.664	12.046	8.218	1.430
容重/(g·cm^{-3})	1.003	1.544	1.313	0.115
孔隙度/%	41.722	62.147	50.469	0.043
植被生物量/g	5.4	62.1	21.963	13.830
植被高度/mm	173.8	433.1	260.610	72.288

根据陈奇乐等[19]测定的张家口坝上草原中未退化草地土壤容重为(1.16±0.11)g/cm^3，土壤孔隙度为(56.57±7.24)%；而本次所取样试验区域内草地土壤容重平均值为1.313 g/cm^3，最高值甚至达到1.544 g/cm^3；草地土壤孔隙度平均值为50.469%，而最小值仅为41.72%；而在本次所测定的30个样点中，仅有3个样点达到了未退化草地的容重和孔隙度要求，按照陈奇乐等[19]测定的张家口坝上草地土壤物理性质结果，本次所取样的试验区域草地介于轻度退化(容重为(1.27±0.10)g/cm^3，孔隙度为(52.74±4.62)%)和中度退化(容重为(1.49±0.06)g/cm^3，孔隙度为(44.14±3.18)%)之间。尤泳[6]测定的板结草地土壤坚实度为2 620 kPa，而本次所取样试验区域草地土壤坚实度已超过该值，平均值为2 760.1 kPa，最大值甚至达到4 938 kPa。通过对试验区域草地土壤坚实度、容重和孔隙度综合测定分析，表明该区域羊草草地已出现板结性退化特征，草地状况不佳。根据徐敏云等[20]测得的坝上草地植被特征，其植被高度为288.8 mm，植被生物量为326.835 g/m^2。本次试验所测得的草地植被高度偏低，平均值为260.610 mm，植被生物量偏少，植被生物量为244 g/m^2(根据样方内平均值为21.963 g换算所得)，这表明草地板结退化已影响了牧草正常生长。耕作是调控土壤容重和坚实度的重要途径之一，应采取适当的机械化改良措施以降低其板结程度，改善其通透性。陈奇乐等[19]测得的张家口坝上未退化草地土壤含水率为46%，但本次取样区域内草地土壤含水率偏低，平均值仅为8.218%。该区域属于干旱半干旱地区，板结使草地土壤中的孔隙减少进而导致水分入渗速率及饱和导水率下降，导致植被在板结土壤生长时更易受到干旱的影响，故在利用机械化手段破除草地根土复合体板结层的同时，应注意防止草地土壤跑墒。

1.1.2　农艺农机融合分析

我国板结草地机械化改良方式选择较少，主要以切根和松土为主。

以较小的耕作阻力划开板结草地土壤、打破草地根土复合体板结结构是草地切根作业的理想效果。目前，我国现有的草地切根机以主动旋转式为主，机具的功率消耗较大，且板结草地土壤的坚实度和容重较大，更是加剧了机具作业能耗。因此，亟需创新研究一种适用于板结草地土壤墒情、结构简单可靠、减少土壤粘附与根系拉扯的牵引式破土切根刀，以降低机具耕作能耗。

而板结草地松土作业相关研究表明[21-23]，使用传统的农田松土部件和耕作方式对板结草地进行机械化改良作业可以打破其板结结构，但也会对草地造成不同程度的破坏。考虑到羊草草地表层广泛存在的根土复合体板结结构，现有的农田松土部件无法在不破坏草地土壤的情况下对其造成扰动失效；另外，与农田传统耕作要求对土壤进行充分扰动不同，板结草地改良作业则更加追求对草地土壤进行适度扰动。综上所述，传统的农田松土部件和耕作方式并不适用于板结草地机械化改良作业。目前国内研究人员仍未找到适用于板结草地的松土改良方式，继而也未在草地专用松土部件研发方面取得有效进展，现有的机械化松土手段无法达到理想的板结草地松土效果，即：既能打破草地根土复合体板结结构又不破坏草地根系与植被。故应提出一种板结草地松土工艺，并创新设计一种专用于草地耕作的松土部件，以提升板结草地机械化改良效果。

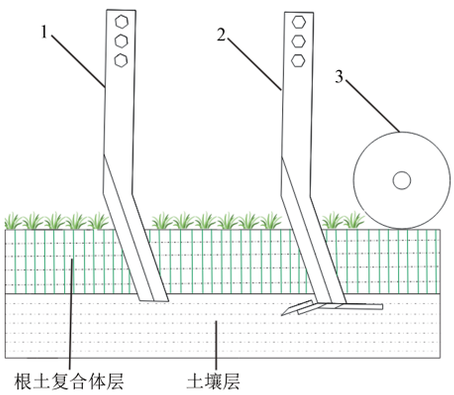
在板结草地改良机械方面，目前，我国现有的板结草地改良机械大多只能进行切根或松土单一行为的改良作业，如9QP-830型破土切根机[8]、9ST-460型草地振动式间隔松土机[14]等，而通过单一作业机具进行多次作业很可能对草地土壤造成二次压实，尚未有机具可进行草地切根、松土、镇压等环节的联合作业。因此，应增加板结草地改良机械的作业环节以减少对草地土壤造成的二次压实、提高作业效率。

综合板结羊草草地改良农艺农机融合分析，我国现有的机械化耕作手段还无法满足板结草地机械化改良技术的农艺要求，不恰当的耕作方式和不适用的耕作部件极易导致草地出现侵蚀退化现象，故应提出一种板结草地机械化改良作业新工艺，并创新设计出专用于草地耕作的切根、松土部件及复合作业机械，以提升板结草地机械化改良效果和作业效率。

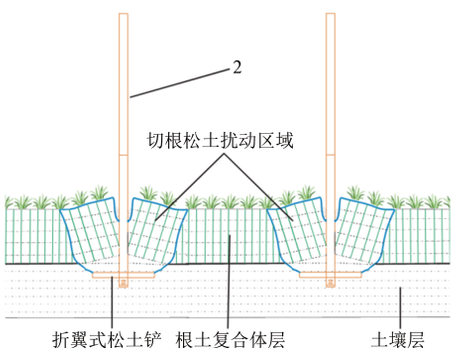
1.2　板结羊草草地切根松土镇压改良工艺

基于农机农艺融合分析，本文提出一种板结羊草草地切根松土镇压改良工艺，如图4所示。该工艺在不破坏草地原生植被和土壤环境的前提下，提出：首先利用牵引式破土切根刀划开草地根系-土壤复合体板结层，切断羊草横走根茎以促进其复壮保育及无性繁殖；创新

设计一种专用于草地作业的折翼式松土铲对板结草地土壤进行局部疏松，该松土铲作业时不翻动土壤、不破坏草根，在草地表层形成虚实并存的土壤结构，以改善板结草地的通气蓄水能力；利用镇压辊将切根松土后的草地沟缝进行填合，防止耕作后的草地通过切根松土沟缝跑墒，提高并长时间保持草地生产力。



(a) 正视图



(b) 侧视图

图4 板结羊草草地切根松土镇压改良工艺示意图

Fig. 4 Improved technology of root-cutting and loosening of compacted grassland

1. 牵引式破土切根刀 2. 折翼式松土铲 3. 镇压辊

草地根土复合体板结层的厚度由根系的聚集深度决定，从图4可明显看出，草地根土复合体板结层和纯土壤层之间存在一条较为明显的土层分界线，土层分界线上方为根土复合体板结层，分界线下方则为纯土壤层，根系的聚集深度即为这条土层分界线的位置深度。故在板结羊草草地切根松土作业深度的选取上，宜采用在根土复合体层切根、在根土复合体层下方松土的方法进行机械化改良作业，在根土复合体层切根可以使板结退化羊草草地复壮促生，而在根土复合体层下方松土则避免了松土部件破坏根系情况发生。

2 草地切根松土镇压机设计

2.1 整体结构

根据板结羊草草地切根松土镇压改良工艺，设计一种草地切根松土镇压机，结构如图5所示。

该机主要由机架、三点悬挂装置、限深轮、斜柄式破土切根刀、折翼式松土铲、V型镇压辊等组成。该草地切根松土镇压机的作业过程为：首先由斜柄式破土切根刀在草地土壤划出沟缝，同时切断羊草横走根茎促进其生长繁殖；折翼式松土铲沿着该沟缝对两侧草地土壤进行松土作业，改善草地板结状况；V形镇压辊将折翼式松土铲带出的草地土壤挤压回沟缝，并使沟缝填合，减少水分蒸发使草地土壤保墒。斜柄式破土切根刀布置在折翼式松土铲正前方，其除了用于切根，还能起到破土开沟缝的辅助作用，以提高折翼式松土铲入土性能和作业稳定性。

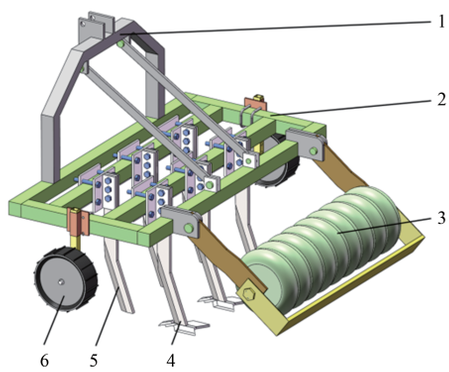


图5 草地切根松土镇压机结构示意图

Fig. 5 Schematic of root-cutting and loosening machine of grassland

1. 三点悬挂装置 2. 机架 3. V形镇压辊 4. 折翼式松土铲 5. 斜柄式破土切根刀 6. 限深轮

2.2 草地斜柄式破土切根刀结构设计

斜柄式破土切根刀结构示意图如图6所示。为减小破土切根刀的耕作阻力，将破土切根刀刃口设计为倾斜式，并在刃口上设置切齿。对斜柄式破土切根刀进行了结构参数优化[24]，得到了斜柄式破土切根刀最优参数组合为：刃口角38°、倾斜角34°、切齿角52°。参考贺长彬[7]设计的铲柄类破土切根刀，设计斜柄式破土切根刀高(h_2)×宽(b_2)×厚(d)为60 cm × 6 cm × 1.4 cm；参考尤泳等[8]开展的板结草地切根作业结果，设计斜柄式破土切根刀刃口高度(c)为22 cm；参考CHANG等[25]和LI等[26]所设计的锯齿类切(破)茬刀具，设计斜柄式破土切根刀刃切齿高度(e_2)为5 mm。

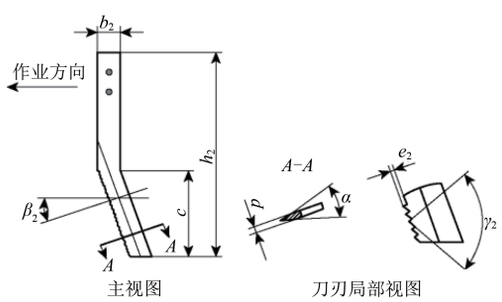


图6 斜柄式破土切根刀结构示意图

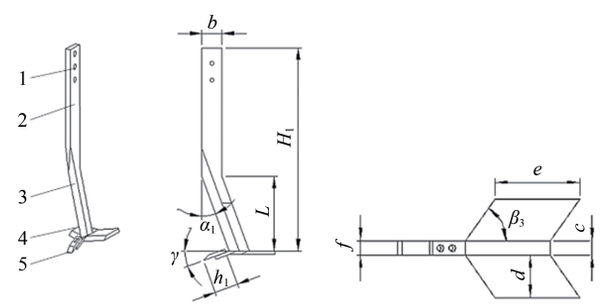
Fig. 6 Structure schematic of soil-breaking and root-cutting cutter

2.3 草地折翼式松土铲结构设计

文献[27]探究了条形铲、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。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[28]，进而产生水分流失[29]、土壤表层粗糙[30-31]、杂草种子萌发[32-33]等问题，故应减小松土部件对草地土壤的抬升作用。同时，应尽可能的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[34-35]。

综上分析，设计了一种折翼式松土铲，结构示意图如图7所示。为减小该松土铲对草地土壤的翻动和抬升作用，将铲柄设计为倾斜式，参考文献[36]，设置铲柄倾斜角α_1为20°。为提升该松土铲的侧向土壤扰动能力，在其铲柄两侧均添加了铲翼，设置铲翼宽度d为40 mm，且铲翼与地表平行。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，这样的铲翼结构设计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，不易使草地土壤产生翻动[37]，有利于草地土壤保墒。将铲翼设计为向后存在一定倾角的形式，铲翼倾角β_3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，铲翼倾角设置为65°[38]。前期的板结草地松土试验结果表明，凿形铲作业后的板结草地松土效果最优[25]，故选取凿形铲作为折翼式松土铲的铲尖。



（a）整体图　（b）主视图　（c）俯视图

图7　折翼式松土铲结构示意图

Fig. 7　Structure diagram of folding wing deep loosening shovel

1. 螺栓孔　2. 铲柄　3. 铲柄刃口　4. 铲翼　5. 铲尖

其他结构参数参考文献[36]和草地耕作实际经验进行设计，折翼式松土铲的其他结构参数如表2所示。

表2　折翼式松土铲结构参数

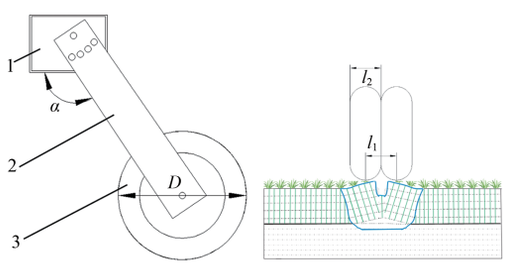
Tab. 2　Structural parameters of folding wing deep loosening shovel

参数	数值	参数	数值
松土铲高度H/mm	775	铲翼长度e/mm	100
刃口长度L/mm	300	铲尖入土角γ/(°)	20
铲柄宽度b/mm	60	铲尖宽度f/mm	12
铲柄厚度c/mm	14	铲尖长度h/mm	70

2.4　草地V形镇压辊结构设计

斜柄式破土切根刀和折翼式松土铲作业后会在草地表面形成一条沟槽缝隙，易造成草地跑墒。有土壤学研究表明，在干旱半干旱地区，当土壤含水率未达到饱和时，适度增加土壤紧实度有利于水汽缓慢聚集，起到土壤提墒作用[39-40]。为此，在机具后方加装了镇压装置，其作业时可将沟槽缝隙填合，同时保证了受扰动草地土壤保持一定的压实程度，达到蓄水保墒的作用。

镇压装置主要包括连接架、镇压力调节板、镇压辊，如图8a所示。镇压辊通过轴承与镇压力调节板下端相连；镇压力调节板上端与连接架铰接，且镇压力调节板上端设置有孔位，通过不同孔位和连接架进行刚性连接以调节镇压力大小。为避免镇压辊对草地土壤造成二次压实，将镇压辊设计为V形，如图8b所示。经测定，切根松土作业后的沟槽缝隙宽度约为20 mm，为确保镇压辊滚压过后能将切根松土沟槽缝隙填合，设计两相邻镇压轮中心间距l_1为80 mm，相应地，单个镇压轮宽度l_2也为80 mm。



（a）主视图　（b）侧视图

图8　镇压装置结构示意图

Fig. 8　Structure diagrams of suppression device

1. 连接架　2. 镇压力调节板　3. 镇压辊

以镇压辊和草地土壤接触面上点A为例，对镇压辊作业过程进行受力分析，如图9所示。图9中，F_q为连接架给镇压辊的牵引力，N；F_f为镇压辊所受摩擦力，N；F_n为草地土壤给镇压辊的支持力，N；F_y为连接架给镇压辊的压实力，N；G为镇压辊重力，N；R为镇压辊直径，mm；H为预设压实深度，mm；h为点A压实深度，mm；β为镇压辊在压实深度h下与草地土壤接触角度，(°)；β_1为镇压辊与草地土壤接触面角度，(°)；点A为镇压辊与土壤接触面一点；点B为镇压辊末端与土壤接触点；点C为镇压辊前端与土壤接触点；α为连接架与镇压力调节板之间的夹角，即镇压倾角。

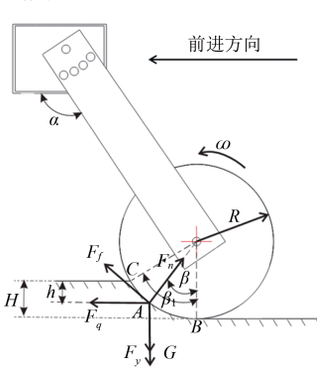


图9　镇压辊作业过程受力分析

Fig. 9　Force analysis of pressure roller during operation

由图9可知，镇压辊水平方向受力平衡方程为

$$F_q + F_f\cos\beta = F_n\sin\beta \tag{1}$$

又因为

$$F_f = \mu F_n \tag{2}$$

故

$$F_q = F_n(\sin\beta - \mu\cos\beta) \tag{3}$$

镇压辊在竖直方向的受力平衡方程为

$$F_y + G = F_n\cos\beta + F_f\sin\beta \tag{4}$$

其中

$$G = mg = \rho Vg = \rho g\pi R^2 l_2 \tag{5}$$

式中 ρ——镇压辊材料密度

V——镇压辊体积

G——单位质量镇压辊所受到的重力

根据文献[41-42]可知

$$F_y = Kl_2\frac{h^{n+1}}{n+1} \tag{6}$$

式中 K——土壤非弹性变形模量

h——点A压实深度，mm

n——沉陷指数

根据式(4)~(6)得到

$$F_n = \frac{Kl_2\dfrac{h^{n+1}}{n+1} + \rho g\pi R^2 l_2}{\cos\beta + \mu\sin\beta} \tag{7}$$

将式(7)代入式(3)，得到

$$F_q = \frac{Kl_2\dfrac{h^{n+1}}{n+1} + \rho g\pi R^2 l_2}{\cos\beta + \mu\sin\beta}(\sin\beta - \mu\cos\beta) \tag{8}$$

综上，可以得到镇压辊作业过程中受到的总牵引力F为

$$F = \int_0^{\beta_1} F_q\mathrm{d}\beta = \int_0^{\beta_1}\frac{Kl_2\dfrac{h^{n+1}}{n+1} + \rho g\pi R^2 l_2}{\cos\beta + \mu\sin\beta}(\sin\beta - \mu\cos\beta)\mathrm{d}\beta \tag{9}$$

由式(9)可知，在点A位置确定的情况下，镇压辊所受总牵引力F与积分上限β_1、镇压辊半径R、镇压辊宽度l_2有关。在这3个参数中，镇压辊宽度l_2已根据沟槽缝隙宽度所确定；而β_1则由镇压辊半径R和预设压实深度H决定，而预设压实深度H则通过镇压倾角α调节。综上，镇压倾角α和镇压辊半径R对镇压作业有重要影响。当镇压倾角α减小时，预设压实深度H增大，进而使β_1增大，总牵引力F也随之增大；反之，当镇压倾角α增大时，总牵引力F则会减小。根据作业要求和草地土壤状况的不同，设置镇压倾角α的调节范围为120°~150°。镇压辊半径R一般在15~30 cm[43-44]，其半径越大，不但使总牵引力F增大，还使得镇压时间变长，造成对草地土壤的镇压也越紧实，但草地切根松土后镇压不宜过度紧实，故设置V形镇压辊半径R为16.5 cm。

3 草地切根松土镇压机试验

3.1 草地切根松土镇压机

为检验草地切根松土镇压机的草地作业性能，对该机进行加工试制并进行草地试验，加工样机如图10所示。该机长×宽×高为1 700 mm×1 650 mm×1 300 mm，作业幅宽1.7 m，可挂接3组松土铲，铲距为35 cm，切根松土深度在0~25 cm内通过限深轮和拖拉机液压悬挂系统可调，该机配套动力应大于90 kW。

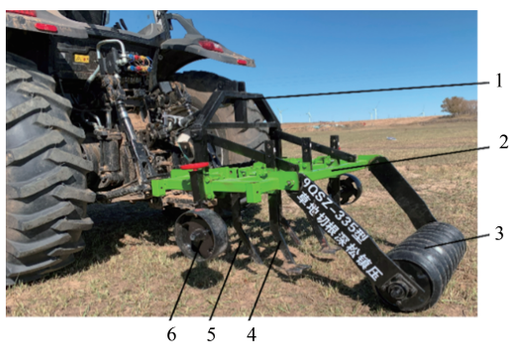


图10 草地切根松土镇压机

Fig. 10 Grassland root-cutting subsoiler

1. 三点悬挂装置 2. 机架 3. V形镇压辊 4. 折翼式松土铲 5. 斜柄式破土切根刀 6. 限深轮

3.2 试验条件

试验区域为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，试验区域地势较为平坦。在试验区域内选取20个样点，并对20个样点的草地土壤坚实度、容重、含水率、孔隙度进行测定。测定结果表明，该试验区域草地土壤坚实度平均值为1 663.6 kPa，容重平均值为1.24 g/cm^3，含水率平均值为11.11%，孔隙度平均值为53.27%。对20个样点坚实度、含水率和容重分别进行显著性分析，结果显示，各样点的草地土壤坚实度、含水率和容重均未有显著性差异，表明试验区域的草地质量趋于一致。

3.3 试验方案

为探究不同作业方式对板结草地土壤的作业效果，进行草地切根松土镇压样机的草地试验。3种作业方式包括：松土作业、切根+松土作业、切根+松土+镇压作业；拖拉机型号为雷沃欧豹MG2004，设置本次试验作业速度为：Ⅰ挡3.26 km/h、Ⅱ挡4.33 km/h、Ⅲ挡5.66 km/h、Ⅳ挡7.35 km/h。进行全因素试验，且每个试验条件下进行3组重复试验，并取重复试验平均值作为评价指标测定值。共需要36个试验区域，各试验区域长为15 m、宽为3 m。通过拖拉机液压悬挂系统和试验台限深装置控制作业深度为15 cm。

3.4 评价指标及其测定方法

草地试验完成后，测定各试验区域内板结草地土壤的作业效果，草地土壤物理指标包括：土壤坚实度、土壤容重、孔隙度；草地土壤扰动参数包括：地表平整度、翻垡率、作业深度稳定性系数、垄形轮廓面积和坑形轮廓面积、土壤扰动系数和土壤蓬松度。使用土壤紧实度仪(TJSD-750型，杭州托普仪器有限公司，探头直径

2.5 cm，锥度 30°，符合 ASAE standards 313.3 标准）测量草地土壤坚实度。使用环刀法测定草地土壤容重。通过烘干法计算草地土壤孔隙度。扰动土壤在地表的堆积轮廓即为垄形轮廓，地表以下的受扰动土壤轮廓即为坑形轮廓。通过图 11 所示的取形仪在网格纸上分别绘制垄形轮廓和坑形轮廓，当作业深度较深时，使用钢直尺进行辅助测定绘制，绘制完成后分别计算垄形轮廓面积和坑形轮廓面积。在土壤垄形轮廓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。



（a）垄形轮廓测定



（b）坑形轮廓测定

图 11　土壤扰动轮廓测定

Fig. 11　Determination of soil disturbance area

土壤蓬松度和土壤扰动系数是评价土壤扰动的重要指标，计算式为

$$p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \tag{10}$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{11}$$

式中　p——土壤蓬松度，%

A_h——理论沟底曲线距离耕作后地表曲线间的剖面面积，mm²

A_q——理论沟底曲线距离耕作前地表曲线间的剖面面积，mm²

y——土壤扰动系数，%

A_s——实际沟底曲线距离耕作前地表曲线间的剖面面积，mm²

在草地松土作业时，若沟面一侧与沟底的角度大于 100°视为翻垡[7]，翻垡率计算式为

$$F_L = \frac{L_f}{bL} \times 100\% \tag{12}$$

式中　F_L——翻垡率，%

L_f——翻垡总长度平均值，m

b——耕作部件个数

L——行程长度，m

为进一步描述不同作业方式在草地作业时的运动情况，使用作业深度稳定性系数（U）来衡量不同作业方式作业深度稳定程度。

3.5　试验结果与分析

3.5.1　不同作业方式对草地土壤的扰动特征

为检验草地切根松土镇压机作业效果，对其不同作业方式下草地土壤扰动特征进行了测定与分析。

3.5.1.1　松土作业

折翼式松土铲单独进行松土作业时对草地土壤的扰动特征如图 12 所示。折翼式松土铲作业时通过带刃铲柄和凿形铲尖将草地根土复合体层划破，并在草地表面形成一条沟槽缝隙；沟槽缝隙两侧的板结草地土壤则会受到铲翼的剪切和抬升作用，在折翼式松土铲带刃铲柄、铲尖和铲翼的相互作用下，草地根土复合体板结层受到扰动而失效。



（a）速度 3.26 km/h



（b）速度 4.33 km/h



（c）速度 5.66 km/h



（d）速度 7.35 km/h

图 12　松土作业对草地土壤扰动特征

Fig. 12　Disturbance characteristics of subsoiling operations on grassland soil

沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度越大，耕作后草地土壤越容易通过沟槽缝隙跑墒，这易使干旱半干旱区域的板结草地产生进一步退化。对不同速度下松土作业沟

槽缝隙宽度和土壤隆起高度进行了测定，结果如表3所示。结果发现，当作业速度增加时，沟槽缝隙宽度开始逐渐增大，且沟槽缝隙两侧的草地土壤隆起高度也逐渐增加。这是因为随着作业速度的增加，铲翼对沟槽缝隙两侧草地土壤的抬升作用逐渐增强，但沟槽缝隙两侧草地土壤的底部在回落过程中有时会出现相互挤压现象，进而导致了部分沟槽缝隙两侧草地的土壤隆起高度和沟槽缝隙宽度变大。

表3 松土作业沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度

Tab. 3 Groove gap width and soil uplift height of soil loosening operation

参数	作业速度/(km·h^{-1})			
	3.26	4.33	5.66	7.35
沟槽缝隙宽度/mm	18.0	18.3	18.7	18.9
土壤隆起高度/mm	41.0	47.0	52.0	56.0

3.5.1.2 切根松土作业

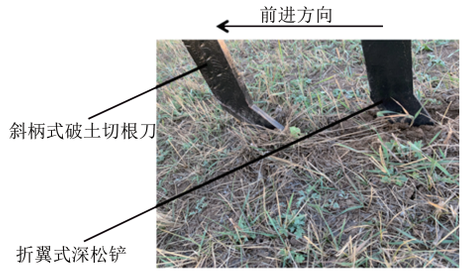
草地切根松土作业过程如图13a所示。在作业时，首先由斜柄式破土切根刀将草地土壤划开形成一条沟缝，紧接着由折翼式松土铲沿着这条沟缝对两侧的草地土壤进行松土作业。与折翼式松土铲单独作业相比，加装斜柄式破土切根刀作业后的草地表面产生的小土块翻垡明显较少，草地表面更加平整。当作业速度增加至本次试验最高值时，未出现图12d中沟缝两侧草地土壤因其底部相互挤压而无法顺利回落至沟底的情况。当折翼式松土铲单独作业时，铲尖和铲柄将底部草地土壤划开的动作和两侧铲翼将其上方草地土壤抬升扰动的动作几乎同时进行，这两个扰动动作相互影响，当作业速度较高时，则可能会出现两侧草地土壤因其底部相互挤压而无法顺利回落至沟底的情况；而加装斜柄式破土切根刀后，草地土壤被提前划开一条沟缝，折翼式松土铲对草地土壤扰动几乎全部表现为两侧铲翼对其上方草地土壤的抬升扰动，没有其他扰动动作的影响，即使作业速度较高时，沟缝两侧草地土壤也可回落至沟底，如图13b所示。

不同速度下切根松土作业沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度如表4所示。

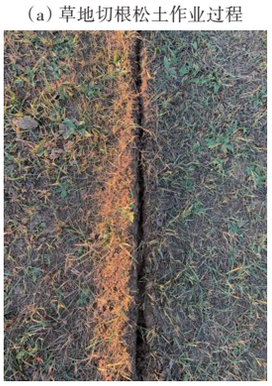
从表4可以看出，当作业速度增大时，切根松土作业造成的沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度也均逐渐增大。在同一作业速度下，切根松土作业造成的沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度均要小于松土作业，这说明切根松土作业对草地土壤造成的破坏性扰动要小于松土作业，切根松土作业更有利于耕作后的草地土壤保墒。

3.5.1.3 切根松土镇压作业对草地土壤的扰动特征

草地切根松土镇压的作业过程如图14a所示，板结草地在经斜柄式破土切根刀和折翼式松土铲进行切根松土作业后表面形成一条沟缝，后方挂接的V型镇压辊将沟缝两侧草地土壤进行适度挤压，使沟缝闭合。从图14b、14c中可以明显看出，沟缝经V型镇压辊作业后被有效填合。



(a) 草地切根松土作业过程



(b) 切根松土作业沟缝

图13 草地切根松土作业

Fig. 13 Grassland root-cutting loosening operation

表4 切根松土作业沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度

Tab. 4 Groove gap width and soil uplift height of root-cutting and loosening operation

参数	作业速度/(km·h^{-1})			
	3.26	4.33	5.66	7.35
沟槽缝隙宽度/mm	16.5	16.7	17.0	17.1
土壤隆起高度/mm	40.0	45.0	50.0	52.0



(a) 作业过程



(b) 切根松土作业沟缝



(c) 沟缝镇压作业

图14 草地切根松土镇压作业

Fig. 14 Grassland root-cutting and loosening suppression operation

3.5.2　不同作业方式对草地土壤作业效果

3.5.2.1　草地土壤物理参数变化

不同作业方式下草地土壤坚实度、容重和孔隙度如图15所示，不同小写字母表示：根据邓肯多重范围检验，在0.05的显著性水平下，不同作业方式土壤坚实度、容重、孔隙度之间存在显著性差异。松土试验区域的土壤坚实度和容重略小于切根松土试验区域，而其孔隙度又略大于切根松土试验区域，但显著性分析表明两者在此3种物理参数上未有明显差异，故此处将两者合并进行分析。未耕作试验区域的土壤坚实度和容重最大，切根松土镇压试验区域次之，松土（切根松土）试验区域最小；与之相反，松土（切根松土）试验区域的土壤孔隙度最大，切根松土镇压试验区域次之，未耕作试验区域最小。相比未耕作试验区域，松土、切根松土试验区域的土壤坚实度分别降低59.99%、59.77%，容重分别降低23.62%、22.99%，孔隙度分别增加20.71%、20.16%，这表明松土（切根松土）作业主要通过降低草地土壤的坚实度来改善其板结状况，由于草地土壤的容重和孔隙度变化幅度相对较小，使得草地土壤的物理稳定状态和孔隙状态得到了较好的保留，这样保证了折翼式松土铲在作业时不会对草地土壤原有物理结构产生破坏。切根松土镇压试验区域比松土试验区域的坚实度、容重分别增加26.38%、15.74%，孔隙度减小8.73%；切根松土镇压试验区域比切根松土试验区域的坚实度、容重分别增加25.70%、14.78%，孔隙度减小8.31%，这表明通过镇压作业适度增加了松土（切根松土）试验区域草地土壤的紧实度，防止通过沟缝跑墒。

3.5.2.2　作业深度与作业深度稳定性

与切根松土作业相同，切根松土镇压作业同样是由斜柄式破土切根刀和折翼式松土铲联合进行松土作业，故这里仅讨论松土和切根松土两种作业方式下的作业深度及作业深度稳定性系数变化情况，如图16和表5所示。相同作业速度下，切根松土作业时作业深度比松土作业时更接近预期作业深度（15 cm），这说明在折翼式松土铲前加装斜柄式破土切根刀有效提升了机具的入土性能；且切根松土作业标准差更小，说明其作业时还更加稳定，故相同作业速度下，切根松土作业作业深度稳定性系数始终高于松土作业。无论是松土作业还是切根松土作业，当作业速度增加时，作业深度均略有降低，且标准差均略有增加，这说明作业速度增加会对该机具作业稳定性产生不利影响，故作业深度稳定性系数随着作业速度的增加而减小。总体上来讲，不同作业速度下作业深度稳定性系数均不小于95.17%，这说明无论是松土作业还是切根松土作业，其作业深度都比较稳定，作业效果比较理想。

3.5.2.3　垄形轮廓面积和土壤蓬松度

由于镇压作业将地表土壤进行了压填，地表平整，故这里仅讨论松土和切根松土两种作业方式下的垄形轮廓面积和土壤蓬松度变化情况，如图17、18所示。另外，垄形轮廓面积和坑形轮廓面积、土壤扰动系数和土壤蓬松度通常是两两一组进行讨论分析的，但在相同速度下进行作业时，松土和切根松土作业的坑型轮廓面积和土壤扰动系数并无差异，故这里不对其进行分析。

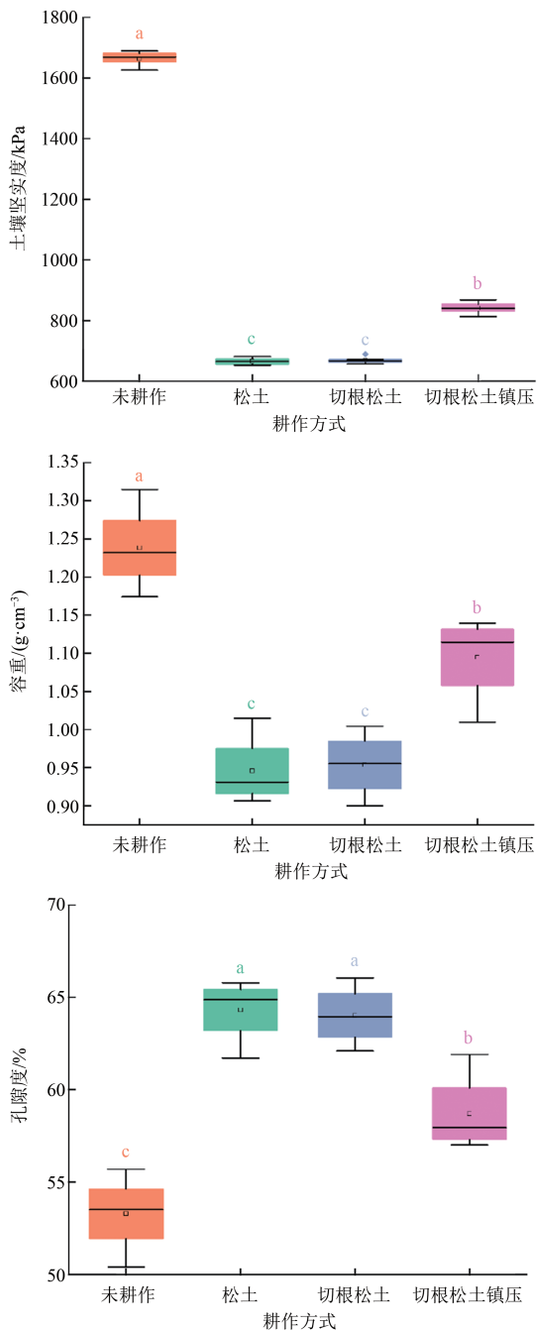
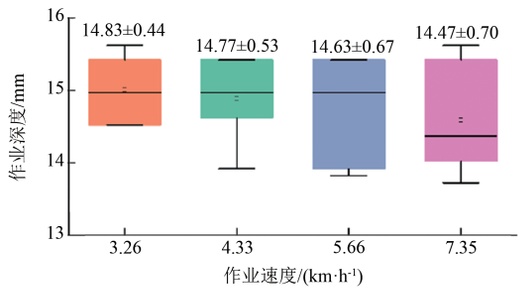


图15　不同作业方式下草地土壤物理参数

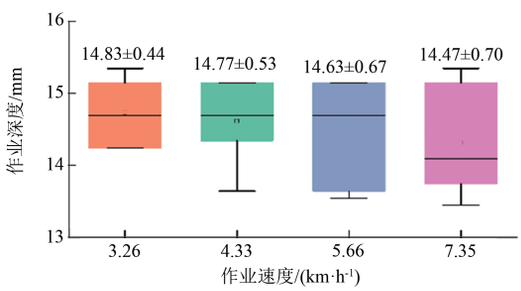
Fig. 15　Physical parameters of grassland soil under different operation modes

在折翼式松土铲前加装斜柄式破土切根刀可保证沟缝两侧的草地土壤顺利回落至沟底，故在相同作业速度下，切根松土作业造成的垄形轮廓面积要小于松土作业；对于松土作业和切根松土作业，在进行测量和

计算时发现，两者在土壤蓬松度计算中A_q相同，故在相同作业速度下，切根松土作业造成的土壤蓬松度也小于松土作业。无论是松土作业还是切根松土作业，垄形轮廓面积和土壤蓬松度均会随作业速度的增加而增加。



(a) 松土作业



(b) 切根松土作业

图16 不同作业方式下作业深度

Fig. 16 Depth of operation under different operation modes

表5 不同作业方式下作业深度稳定性系数

Tab. 5 Stability coefficient of operation depth under different operation modes %

作业方式	作业速度/(km·h⁻¹)			
	3.26	4.33	5.66	7.35
松土作业	97.06	96.38	95.44	95.17
切根松土作业	98.22	97.13	96.62	96.22

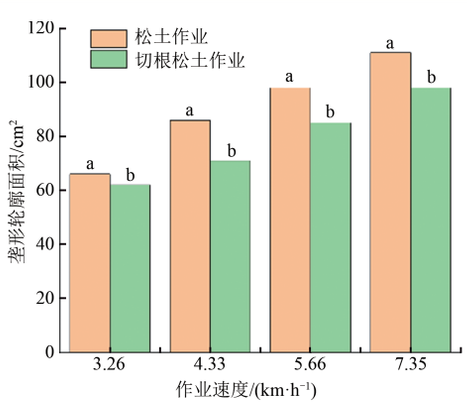


图17 不同作业方式下垄形轮廓面积

Fig. 17 Ridge contour area under different operation modes

3.5.2.4 翻垡率和地表平整度

由于镇压作业将地表草地土壤进行了压填，草地地表平整，草地地表基本未出现小土块翻垡，故这里仅讨论松土和切根松土两种作业方式下的翻垡率和地表平整度变化情况，如图19、20所示。

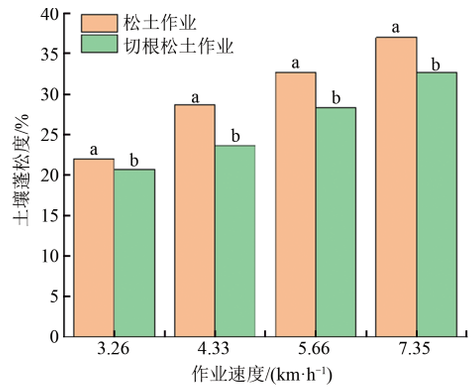


图18 不同作业方式下土壤蓬松度

Fig. 18 Soil fluffiness under different operation modes

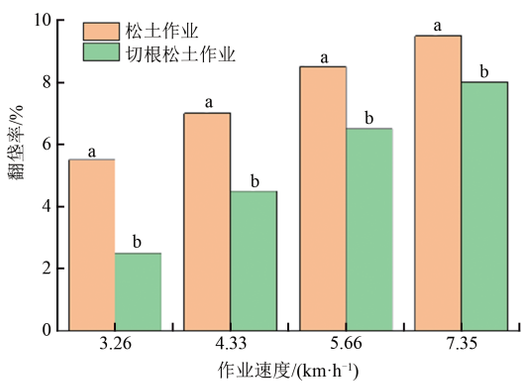


图19 不同作业方式下翻垡率

Fig. 19 Turbination rates under different operational modes

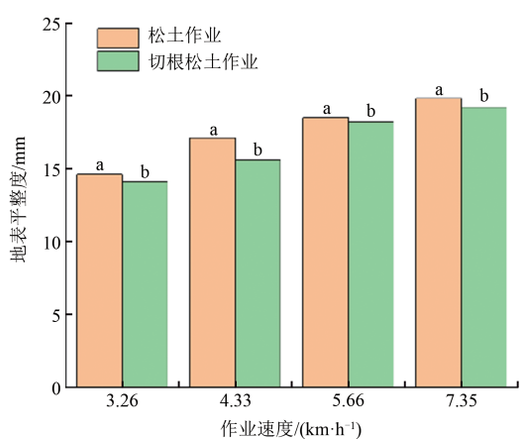


图20 不同作业方式下地表平整度

Fig. 20 Surface flatness under different operation modes

无论是松土作业还是切根松土作业，其翻垡率和地表平整度均随着作业速度的增加而增加。当作业速度相同时，切根松土作业的翻垡率和地表平整度均小于松土作业。当作业方式由松土变为切根松土后，草地土壤受到折翼式松土铲的抬升作用进一步减弱，产生的小土块翻垡减少，使得翻垡率受作业方式变换的影响较大，相比松土作业，切根松土作业在作业速度为3.26、4.33、5.66、7.35 km/h时分别降低54.5%、35.7%、23.5%、15.8%，但降低率随着作业速度的增大而减小。当作业方式由松土变为切根松土后，机具作业更加稳定，作业深度起伏更小，使得地表平整更加平整。但地表平整度

受作业方式变换的影响不如翻垡率明显，但显著性分析表明，相同作业速度下，松土作业和切根松土作业后的地表平整度是有明显差别的。

3.5.3 草地切根松土镇压机作业性能分析

试验结果表明，开展松土作业或切根松土作业后板结草地土壤的坚实度和容重显著降低、孔隙度增大，这说明羊草草地土壤的板结状况得到了有效改善。显著性分析表明，松土作业和切根松土作业在土壤坚实度、容重、孔隙度这3种土壤物理参数上未有显著性差异。但相比松土作业，切根松土作业在对草地土壤的扰动效果得到了有效提升：在折翼式松土铲正前方加装斜柄式破土切根刀后，即使当作业速度较高时，松土沟缝两侧的草地土壤仍可顺利回落至沟底，故切根松土作业后的草地沟槽缝隙宽度和土壤隆起高度均明显减小，草地表面产生的小土块翻垡也显著减少（翻垡率降低），草地地表更加平整（地表平整度减小），草地地表堆积土壤减少（垄形轮廓面积和土壤蓬松度减小）。

相比松土或切根松土试验区域，切根松土镇压试验区域的坚实度和容重有所增加、孔隙度则有所减小，这是因为镇压作业可将松土（切根松土）作业产生的沟槽缝隙适度填合，故在切根松土作业环节之后增加镇压环节可以有效防止耕作后的草地土壤通过沟槽缝隙跑墒。

试验结果及相关分析表明，本文提出的切根松土镇压新工艺符合研究区域内板结羊草草地机械化修复调控的作业要求：在不破坏草地原生植被和土壤环境的前提下破除了草地根土复合体板结结构，而草地切根松土镇压机则能很好地完成相应的机械化作业。

4　结论

（1）基于板结羊草草地根土复合体层结构特征和农机农艺融合分析，提出了一种板结草地切根松土镇压新工艺；设计了专用于草地耕作的斜柄式破土切根刀、折翼式松土铲及镇压辊，并集成创制了一种草地切根松土镇压机。

（2）松土作业和切根松土作业均能破除草地根土复合体板结层，但切根松土作业的效果更优。相比松土作业，切根松土作业后沟槽缝隙两侧的草地土壤均能顺利回落至沟底，草地表面产生的小土块翻垡更少，草地表面更加平整；镇压作业能将切根松土作业产生的沟槽缝隙填合，防止草地土壤跑墒。

（3）松土（切根松土）作业时主要通过降低草地土壤的坚实度来改善其板结状况，但同时又较好地保留了草地土壤的物理稳定状态和孔隙状态。松土作业和切根松土作业的作业深度稳定性系数均不小于95.17%，但相同作业速度下，切根松土作业时的作业深度要比松土作业时更接近预期作业深度（15 cm），且切根松土作业的作业深度稳定性系数始终高于松土作业。切根松土作业造成的垄形轮廓面积、土壤蓬松度、翻垡率和地表平整度均小于松土作业。

参　考　文　献

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

[2] ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Quality evaluation of the soil-root composites layer of *Leymus chinensis* grassland based on different degradation degrees[J]. CATENA, 2022, 215: 106330.

[3] LAI Liming, KUMRA S. A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties[J]. PloS one, 2020, 15(8): e0236638.

[4] KAREL P, IVANA J, KLARA Ř, et al. Restoration of grasslands on ex-arable land using regional and commercial seed mixtures and spontaneous succession: successional trajectories and changes in species richness[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 182: 131 - 136.

[5] DE BOER H, DERU J, VAN E. Sward lifting in compacted grassland: effects on soil structure, grass rooting and productivity[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184: 317 - 325.

[6] 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)

[7] 贺长彬. 天然草地根系-土壤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)

[8] 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)

[9] 李栗, 王光辉, 梁方, 等. 一种具有仿形功能的草地破土切根机[J]. 中国奶牛, 2016(1): 56 - 58.
LI Li, WANG Guanghui, LIANG Fang, et al. The design of grassland soil-gashing and root-cutting machine with profiling mechanism[J]. China Dairy Cattle, 2016(1): 56 - 58. (in Chinese)

[10] 董向前, 宋建农, 王继承, 等. 天然草场改良用振动式间隔松土机作业机理[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 119 - 123.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Working mechanism of vibration spacing scarifier for grassland[J].

Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 119 - 123. (in Chinese)
[11] 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)
[12] 董向前, 宋建农, 王继承, 等. 作业速度比对草地振动松土机作业性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 301 - 305.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Effect of velocity ratio on performance of oscillatory tillage[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition),2014, 35(3): 301 - 305. (in Chinese)
[13] 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)
[14] 董向前, 宋建农, 王继承, 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.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, WANG Jicheng, 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)
[15] HE-VA official website [EB/OL]. https://www. he-va. co. uk/.
[16] MCCONNEL official website [EB/OL]. https://www. mcconnel. com/.
[17] Lamma 2022 preview: TerraTech Grassland Subsoiler [EB/OL]. https://www. fwi. co. uk/machinery/cultivation-drilling/cultivators-drills-cultivators/lamma-preview-terratech-grassland-subsoiler.
[18] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 35 - 38.
GUO Weijun, HUANG Gaobao, WANG Fene, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2): 35 - 38. (in Chinese)
[19] 陈奇乐, 谢梦姣, 李智, 等. 坝上高原区不同退化草地土壤特征分析[J]. 中国草地学报, 2020, 42 (5):103 - 109.
CHEN Qile, XIE Mengjiao, LI Zhi, et al. Analysis of soil characteristics of different degraded grasslands in bashang plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42 (5):103 - 109. (in Chinese)
[20] 徐敏云, 李运起, 王堃, 等. 河北省草地资源分布及植被特征动态[J]. 草业学报, 2009,18(6): 1 - 11.
XU Minyun, LI Yunqi, WANG Kun, et al. Spatial distribution and dynamic characteristics of the grassland vegetation in Hebei[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009,18(6): 1 - 11. (in Chinese)
[21] 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(2): 49 - 58.
[22] 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.
[23] 贺长彬, 桑洪超, 刘美玉, 等. 松土铲扰动下天然草地复合土层失效特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(2): 207 - 216.
HE Changbin, SANG Hongchao, LIU Meiyu, et al. Experimental study on failure characteristics of natural grassland composite soil structure under subsoiling operation[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(2): 207 - 216. (in Chinese)
[24] 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)
[25] 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.
[26] LI Mo, XU Shun, YANG Yuwan, et al. A 3D simulation model of corn stubble cutting using finite element method[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 43 - 51.
[27] 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.
[28] 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.
[29] SOLHJOU A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A, et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries[J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 41 - 49.
[30] 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.
[31] SOLHJOU A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Soil translocation by narrow openers with various rake angles[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 65 - 73.
[32] 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.
[33] SOLHJOU A, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M. Soil translocation by narrow openers with various blade face geometries[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114: 259 - 266.

(下转第164页)

[J]. Mechanical Science and Technology, 2020, 39(10): 1526 - 1533. (in Chinese)
[23] 葛藤, 贾智宏, 周克栋. 计算点接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J]. 机械设计与研究, 2007(3): 14 - 15, 22.
GE Teng, JIA Zhihong, ZHOU Kedong. A theoretical model for the cofficient of restitution calculation of point impact[J]. Machine Design and Research, 2007(3): 14 - 15, 22. (in Chinese)
[24] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 - 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 - 56. (in Chinese)
[25] 梁振伟, 李耀明, 赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 18 - 26.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 18 - 26. (in Chinese)
[26] 张春, 杜文亮, 陈震, 等. 荞麦米筛分物料接触参数测量与离散元仿真标定[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 46 - 51.
ZHANG Chun, DU Wenliang, CHEN Zhen, et al. The measurement of contact parameters of buckwheat rice screening material and discrete element simulation calibration [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 46 - 51. (in Chinese)
[27] 张园, 邓怡国, 廖宇兰, 等. 响应面法优化橡胶专用颗粒肥碰撞恢复系数测定[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2534 - 2540.
ZHANG Yuan, DENG Yiguo, LIAO Yulan, et al. Determination of impact recovery coefficient of rubber granular fertilizer optimized by response surface method[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2534 - 2540. (in Chinese)
[28] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 50 - 57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50 - 57. (in Chinese)
[29] 杨勇, 侯俊铭, 白晶波, 等. 典型蓖麻蒴果碰撞恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 138 - 148.
YANG Yong, HOU Junming, BAI Jingbo, et al. Determination and analysis of typical castor seed collision restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 138 - 148. (in Chinese)
[30] 卢立新, 王志伟. 基于准静态压缩的果实黏弹塑性模型[J]. 农业工程学报, 2005, 31(12): 30 - 33.
LU Lixin, WANG Zhiwei. Nonlinear viscoelastic plastic model of the fruits under quasi-static compressive loading[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 30 - 33. (in Chinese)
[31] 孙慧杰, 吴杰, 冯哲, 等. 香梨与瓦楞纸板跌落碰撞的接触应力分布分析及损伤预测[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 48 - 52.
SUN Huijie, WU Jie, FENG Zhe, et al. Contact stress of drop impact to corrugated board and damage predication for korla pear[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(2): 48 - 52. (in Chinese)

(上接第146页)

[34] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 松土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)
[35] 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.
[36] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[37] 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)
[38] 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)
[39] 张岁岐. 根系与植物高效用水[M]. 北京:科学出版社,2010.
[40] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京:北京大学出版社,2009.
[41] 佟金,张清珠,常原,等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85 - 92.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85 - 92. (in Chinese)
[42] 张仕林, 赵武云, 戴飞,等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 20 - 30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20 - 30. (in Chinese)
[43] 郭慧, 陈志, 贾洪雷, 等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 56 - 65.
GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 - 65. (in Chinese)
[44] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135 - 140.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135 - 140. (in Chinese)