

退化草地改良工艺与装备发展综述

王得伟^{1,2}, 尤泳¹, 张学宁¹, 王旭峰², 王德成^{1*}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 1100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 中国有 90% 以上的草地处于退化或正在退化状态, 严重影响畜牧业和生态环境的可持续发展, 退化草地改良十分关键。目前, 草地改良技术相关科学研究、草地改良生产实践、草地改良机械研发等存在一定的脱节现象, 限制了中国草地改良的整体推进。针对以上问题, 该研究对 24 种目前常见的草地改良技术进行总结, 归纳了改良技术特点及适用条件。对草地改良技术进行系统分析, 建立草地改良技术分类框架, 形成草地综合改良工艺流程。在所建立的 4 类草地改良原理框架下, 分析了相应改良技术作业工艺及相关作业机械的特点, 并指出相关作业机械和设备的研发方向。基于目前草地退化还未彻底遏制的现状, 未来草地保护和退化草地的机械化改良应重点开展以下工作: 1) 加强草地保护, 增加草地退化预防环节, 坚持走用草养地相结合的道路。2) 草地改良工艺方面, 在现有免耕直播改良工艺基础上重组和优化改良工艺, 研发和推广复式改良机械。3) 在草地机械化改良技术方面, 应强化基础研究, 弥补现有改良机械的技术短板, 充分发挥特色技术优势。4) 在草地保护和改良政策方面, 应加强政策支持和对基层的技术指导, 提高基层对草地保护和草地改良的积极性。该研究可为退化草地改良工艺方案制定、相关作业机械选择、相关政策制定等提供参考, 为草地改良机械设备的研发提供借鉴。

关键词: 退化; 畜牧业; 草地; 修复; 技术分析; 工艺流程; 牧草机械

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310112

中图分类号: S812.8; S817

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-07-0017-17

王得伟, 尤泳, 张学宁, 等. 退化草地改良工艺与装备发展综述[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 17-33. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310112 <http://www.tcsae.org>

WANG Dewei, YOU Yong, ZHANG Xuening, et al. Review of the improvement techniques and equipment development for degraded grasslands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(7): 17-33. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202310112 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国草地面积约 2.65 亿 hm^2 , 占全球草地总面积的 12%^[1], 草原资源排世界第二。草地是中国最大的陆地生态系统, 其面积超过农田与森林面积之和, 是生态文明建设的主阵地, 也是粮食安全的重要保障^[2]。在自然和人为等多种因素的共同作用下, 中国有 90% 以上的草地存在不同程度的退化现象, 导致草地承载力下降和自身产草量严重不足^[3], 仅 2022 年中国进口草产品总量达 197.81 万 t^[4], 占国内草产品需求总量的 1/3 左右, 对生态安全、粮食安全等造成隐患。2019 年中央一号文件《中共中央 国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见》^[5] 提出要“坚持人与自然和谐共生”, 坚持“绿水青山就是金山银山”的生态文明建设理念, “统筹推进山水林田湖草系统治理”, 该文件在以往文件要求基础上加入了对“草”的治理要求, 突出了

草地改良的重要性。2023 年中央一号文件《中共中央 国务院关于关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见》^[6] 提出要“建设优质节水高产稳产饲草料生产基地, 加快苜蓿等草产业发展”和“深入推进草原畜牧业转型升级, 合理利用草地资源”, 明确要求加大草原保护和修复力度。草地是畜牧业饲料的重要来源, 草地的高产、稳产是畜牧产业可持续发展的基础, 也是畜牧业转型升级的关键, 所以退化草地的综合改良治理迫在眉睫。

草地改良是指在原有天然植被条件下, 采用措施使退化草地更新为优质高产草地。草地改良的常见技术有围栏封育、禁牧、灭鼠、松土、施肥、灌溉、植保、补播、切根等^[7]。退化草地改良要依托草地改良机械和相关作业设备, 如补播改良需要补播机械, 板结草地改良需要松土机械, 退化草地的病虫害防治需要植保机械等。经过多年的草地改良研究和实践, 中国的退化草地改良取得了可喜成果, 但并未完全遏制草地的退化, 主要有两方面原因: 一是由于地域广阔, 自然条件和农业生产条件差异大, 不同地区的草地退化原因和退化程度不尽相同, 不能采用相同的技术工艺和相关机械, 统筹改良难度大。二是退化草地改良相关理论与实践存在一定程度的脱节, 基层草地改良实践过程缺乏技术指导, 草地改良理论向实践转化难度大。

针对以上问题, 本文对现有的草地改良技术进行分

收稿日期: 2023-10-17 修订日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32360073); 现代农业产业技术体系专项 (CARS-34); 国家重点研发计划专项 (2022YFD2202102); 中国农业大学—塔里木大学科研联合基金项目 (ZNLH202304)

作者简介: 王得伟, 博士生, 副教授, 研究方向为现代农业机械装备设计。

Email: dewei_wang0528@163.com

*通信作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 研究方向为牧草机械。

Email: wdc@cau.edu.cn

类,结合草原综合顺序分类法,从草地改良工艺入手,根据改良原理归纳不同类型的草地改良工艺,在此基础上,总结草地改良相关机械和设备的特点和适用条件,最后提出展望,以期为草地改良工艺制定和作业机械的选择提供指导,为基层草地改良生产实践提供借鉴,为相关草地改良理论研究和相关机械设备的研发提供参考。

1 草地改良技术分类及工艺分析

1.1 草地改良技术及分类

中国目前有 90% 的天然草地存在不同程度的退化,

2001—2020 年间草地的平均退化面积占总面积的 34.04%^[8],各地区“三化”草地面积不断增加^[9-11],这些退化草地在短期内难以恢复,需要进行干预和改良。国内外的草地改良实践中,逐步衍生出围栏封育、补播、松土、施肥等常见的 24 种改良技术^[12]。本文参考任继周等^[13]的方法,将改良技术按原理划分为:避免破坏(改良 I 型)、优化牧草生长环境(改良 II 型)、促进牧草本体发育(改良 III 型)、改变生物群落(改良 IV 型)4 类,不同改良技术类型的主要特点、适用条件、实现方式等如表 1 所示。

表 1 国内外常用的草地改良技术
Table 1 Grassland improvement techniques commonly used in world

技术类型 Types of technology	名称 Name	原理 Principle	主要特点 Main characteristics	适用条件 Applicability	实现方式 Implementation method
避免破坏 (改良 I 型) Avoiding damage (improvement type I)	围栏封育	防止动物对草地过度啃食和践踏造成破坏	建设围栏将退化草地围封后静态管理数月甚至数年,直至草地完全恢复	可自然恢复的退化草地	架设围栏
	减畜	减少放牧牲畜数量以减轻草地负担	按草地的实际承载量或小于实际承载量放牧	超载放牧的草地	制定和建立相关制度、政策、法律等
	草地植保	消灭病虫害以促进退化草地恢复	通过化学、物理等植保方式,短时间内快速消灭草原爆发的病虫害	产生病虫害的草地	植保机械
	草地灭鼠	避免鼠、兔等破坏地表和牧草根系	人为干预引入天敌或捕杀,减少鼠、兔数量	被鼠兔破坏严重的退化草地	引入天敌和人工补杀
优化牧草生长环境 (改良 II 型) Optimization of grass growth environment (Improvement type II)	草皮移植	将人工或天然草皮整体替换移植	将草苗、草根连周围的附土一并挖起,切割成条状后整体移植	人工草地、施工取弃土场	草皮移植机械
	灌溉	提供牧草生长必须的水分条件	增加草地土壤含水率	因干旱缺水导致的退化草地	喷灌设备
	施肥	增加土壤养分,促进牧草生长发育	提高根际 N、P、K 等元素含量	土壤贫瘠的退化草地	施肥机械
	草地翻耕	翻埋病虫害、改善根际土壤结构环境	将表层和底层土壤通过翻袋的方式互换	土壤板结并伴有病虫害的重度退化草地	耕整地机械
	松土	改善坚实度、孔隙度等土壤物理结构	通过打孔、中耕、深松等方式打破板结的土壤结构	板结的退化草地	松土机械
	凋落物移除	去除占据牧草生长空间的覆盖物	去除地表覆盖的枯草和落叶等,不影响地表土壤状态	枯草等影响牧草生长的草地	草地梳理机
	表土去除	提供牧草生长所需的地表土壤条件	将表层荒漠化、盐碱化的贫瘠土壤铲除或以翻袋的形式与底层土壤互换	地表贫瘠、盐碱化的重度退化草地	耕整地机械
	草地牧鸡	通过禽-畜-草耦合综合改善牧草生长环境	鸡觅食过程松土,粪便为牧草提供养分	有虫害、地表板结的退化草地	人工放养鸡崽
	草方格沙障	防止风沙迁移	布置草方格沙障	沙化和荒漠化草地边缘	沙障草编织装置
	干草覆盖	通过地表覆盖物减少水肥散失、保墒	克服干旱、寒冷等不利气候因素	极端干旱和寒冷区的草地	摊草、搂草机
促进牧草本体发育 (改良 III 型) Promoting grass self cultivation (Improving type III)	切根促生	促进根系繁育	切断牧草的侧根或部分主根,将亚表层根系土壤复合体切断	轻中度退化草地	切根机械
	刈割	减少地表覆盖和刺激地上植株生长	减少枯老牧草对新萌发牧草影响,促进植株本体发育	轻中度退化草地	割草机、牧草收获机
	火烧	促进牧草根系重新发育和生长	焚烧除去地表枯草、病虫害等,形成的可草木灰作为肥料	枯草覆盖并伴有病虫害的草地	火焰除草机
改变生物群落 (改良 IV 型) Change of biological community (improvement type IV)	免耕补播	增加可利用牧草的群落密度	在原有退化草地基础上免耕补播牧草种子	覆盖度较低的退化草地	牧草免耕播种机
	栽培草地	增加可利用牧草的群落密度	建植人工草地,短期内提高草地生产性能	重度退化草地或荒地	牧草播种机
	退耕还草	减少毒杂草和牧草的种间竞争	将杂草、毒草剔除,保留可利用牧草	退耕还草地	除草机械
清除树木	减少树木遮盖和与树木与牧草的种间竞争	将影响牧草生长的灌木挖除,增加牧草的生长空间,提高牧草可获得的光热资源	灌木较多的退化草地	动力锯、挖掘机等	
	微生物接种	改变土壤微生物群落	增加土壤有益微生物,与牧草互利共生	缺乏有益微生物的退化草地	施肥机械

改良 I 型技术通过对草地采取保护性措施实现改良,包括围栏封育、减畜、草地植保、草地灭鼠和草皮移植等。其中,围栏封育是通过架设围栏防御外来伤害,使植被在自然状态下恢复至退化前的水平。减畜是通过草原生态奖补政策、法律等行政干预手段减少放牧行为^[14-17],减畜一般与围栏封育和联合应用^[18]。草地植保用于由病

虫害引起的退化草地治理,通过植保机械喷洒杀虫剂等消灭病虫害^[19]。草地灭鼠用于因鼠兔引起的退化草地治理,需要减少鼠兔数量并填平鼠洞^[20]。草皮移植一般用于严重退化草地的整体快速恢复,或途经草地的铁路等基础设施建设造成的破坏^[21]。改良 II 型技术通过创造和改善牧草适宜的生长环境实现改良,包括灌溉、施肥、草地

翻耕、松土、凋落物移除、表土去除、草地牧鸡和草方格沙障、干草覆盖等。其中，灌溉为牧草生长提供所需水分，施肥为牧草生长提供所需营养元素^[22]。草地翻耕、松土改善土壤物理结构，旨在打破板结土壤结构、增加土壤孔隙度、降低容重、提高草地蓄水性能。凋落物移除是指去除地表凋落物增加牧草的生长空间^[23]，表土去除是去除地表因风蚀、水蚀等导致的贫瘠、沙化等不良土壤，草地牧鸡是在草地上放养鸡崽，通过畜禽草耦合作用促进退化草地恢复^[24]。草方格沙障是通过铺设草方格沙障减少风蚀^[25]，防止草地沙漠化。干草覆盖是将牧草秸秆覆盖于地表，起到保墒、减少风蚀和水蚀等作用^[26]。改良Ⅲ型技术通过刺激牧草根系和植株促进牧草本体发育实现改良目的，包括切根促生、划破草皮、刈割和火烧等。切根促生和划破草皮是通过切断牧草的部分根系，促进根系繁育、降低土壤容重、增加土壤孔隙度和提高土壤蓄水能力^[27]。刈割可以避免枯落物积累影响牧草萌发^[28]，促进草地植物和群落更新。火烧是将地表的枯草残茬用火烧方式去除，消灭地表残茬和病虫害的同时为牧草生长提供肥料。改良Ⅳ型技术通过优化植被群落和微生物群落结构实现改良目的，包括免耕补播、栽培草地、退耕还草、控制毒杂草、清除树木、微生物接种等。免耕补播是指在保留原有植被的情况下采用免耕播种机播种优良牧草种子，在短时间内增加牧草密度并提高草地的饲喂价值^[29]。栽培草地是指对难以自然恢复的重度退化草地和荒地耕整后播种牧草种子，使其重新生长为优质草地。退耕还草是指将前期开荒为耕地的草地重新耕整后播种牧草种子形成草地。控制毒杂草是指将草地上的毒杂草剔除，清除树木是指将草地上影响牧草生长的灌木等清除，目的均是减少其与牧草的竞争。微生物接种是指将微生物菌种接种在退化草地中，以增加土壤中有益微生物群落密度并与牧草互利共生^[30-31]。

草地退化原因、改良目标、改良措施、相关机械设备分类、汇总如图 1 所示。

1.2 草地改良工艺分析

草地退化和草地恢复是草地变化过程的两个相反方向，解除草地退化因素，退化草地就会自然恢复。按草地生产时序分类法，干预草地退化的途径包括避免破坏、消除不利因素、创造有利条件和促进自身恢复、合理利用 4 个环节。将表 1 中的 24 种草地改良技术根据其特点对应于每个环节，形成草地改良综合工艺方案，如图 2 所示。

由于不同草地的退化原因和退化程度不同，选择改良工艺要因地制宜，如内蒙古自治区大部分草原无灌溉条件，可将改良工艺简化为：围栏封育→切根→施肥→补播。退化草地改良过程中，相关改良技术的实施离不开作业机械和设备，如补播主要用到补播机械，灌溉涉及到灌溉设备等。由于有些机械可应用于所有改良措施的改良工艺，而有些可能仅用于一个或几个措施的改良工艺，所以本文按照草地改良的 4 个环节将其分类，便于基层生产者制定改良工艺并选择相应的机械设备。

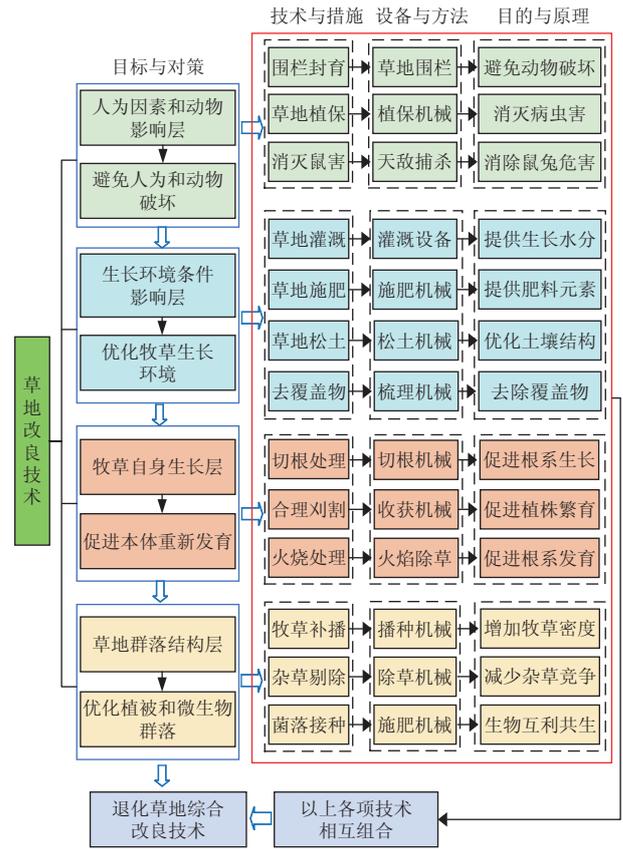


图 1 草地改良技术与目标及措施分类框图

Fig.1 Classification diagram of goals and measures for grassland improvement technology

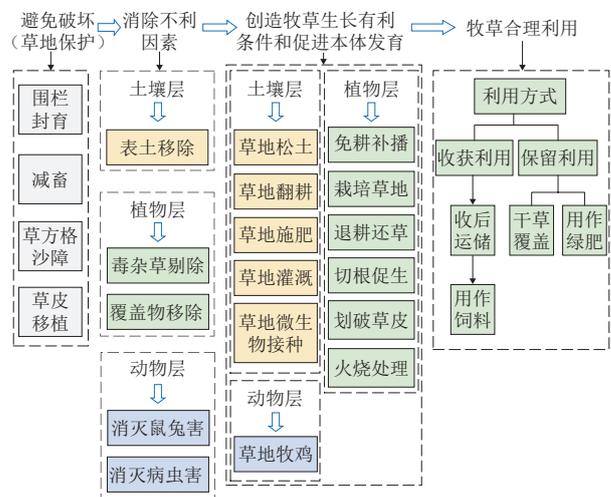


图 2 草地改良综合工艺方案

Fig.2 Comprehensive process plan for grassland improvement

2 改良 I 型工艺原理和相关机械

长期重度放牧、兔害鼠害、病虫害、人为施工等因素都会引起草地退化，放牧过程牛羊的长期啃食和践踏会破坏牧草根系并导致生产性能下降^[32]，兔害鼠害会破坏草原地表，影响草原群落根系功能，病虫害会引起草地植被衰退，人为施工会导致施工处的草地植被整体破坏。

2.1 草地灭鼠改良工艺

草原上的鼠、兔采食牧草导致草地生产力降低，挖掘洞道导致土壤有机质、母质被推到地表，经风蚀、水

蚀后逐渐形成次生裸地,降低了草原生态系统的抵抗力和恢复力,加剧了草地退化^[33],所以减少退化草地上鼠、兔数量是重要的干预的手段。鼠、兔等破坏引起草地退化的改良工艺流程为:捕杀鼠兔→填平鼠洞→补播→围封。捕杀由人工灭鼠或引入鼠兔天敌实现,鼠洞破坏面积小的情况下一般由人工填补,破坏严重且破坏面积大时宜采用耕整机械耕整后重新建植人工草地。

2.2 草地植保工艺和相关机械

草原上爆发的病虫害会导致植物体大量衰竭,造成产草锐减和退化,目前常用的防治方法是化学防治法和生物防治法。化学防治法利用植保机械喷洒化学药剂^[34],迅速消灭病虫害,其工艺流程为:围封→植保→恢复→再次利用。生物防治法即引入虫害的天敌消灭虫害,如草地牧鸡等。草地牧鸡是草地防治蝗虫灾害的有力措施^[35-36],通过捕食关系实现虫害的生物防治,捕食过程对草地的扰动可以改善地表板结情况,鸡产生的粪便又可以作为牧草生长的肥料,具有保护草地和优化牧草生长环境的双重作用。该技术在草地改良实践中取得了良好的效果^[37],一般用于伴有虫害和土壤板结的轻、中度退化草地。草地牧鸡改良退化草地的工艺流程为:围封→牧鸡→恢复。

目前草地植保机械主要是植保无人机,通过无人机搭载喷雾机进行喷雾作业^[38-39],药滴降落在牧草植株和地表,可快速消灭病虫害,具有效率高、不受地形影响等优势。

草地无人机植保作业效果易受风力等自然因素影响,且目前应用的草地植保无人机作业时为匀量喷雾。然而,草地病虫害的分布位置和量并不均匀,匀量喷雾会导致施药过量并引起草地环境污染。所以,基于遥感技术、机器视觉技术等研发病虫害快速定位并进行对靶、变量喷雾的草地专用植保机械十分关键。

2.3 围栏封育工艺和相关设备

围封即围栏封育^[40],通过搭建围栏防止大型啮齿类动物对草地的啃食和践踏,使草地得到修养并逐步恢复。目前应用的围栏类型主要有网围栏和电子围栏2类。相关研究表明^[41],围封能提高退化草地的植被盖度、植被高度和地上生物量,改变退化草地土壤性状^[42],是促进退化草地恢复的一种有利的措施。围封工艺适用于轻度和中度退化草地的改良,围封年限取决于草地的实际退化程度和恢复状况,当退化草地基本恢复时可拆除围栏并重新利用。退化草地围栏封育的工艺流程为:栽桩固定→搭建围栏→静态围封→管理→恢复→撤去围栏。在草地改良实践中一般将围栏封育和“减畜”相结合。“减畜”即减少放牧的牲畜量,是防止草地载牧量超过阈值的一种用草养地模式,一般通过行政手段推动。在新一轮草原生态补偿政策实施(2016—2020年)结束后,全国草原综合植被盖度从2011年的51%提高到2020年的56.1%^[43]。

围栏封育采用的围栏指用钢丝、混凝土、角钢立柱等架设后形成的阻隔防护设备^[44],包括网围栏、刺丝

围栏等类型。目前架设围栏角钢立柱的栽桩环节一般用挖坑机完成,围栏搭建、固定等由人工完成。国内的草地围栏建设存在成本高、重复利用率低的问题,围栏架设过程存在专用设备缺乏、人工投入大等问题。所以在围栏材料研发方面,要研发成本低、易于架设、可重复利用的围栏材料,在围栏架设机械设备方面要研发自动化程度高、作业成本低、作业效率高的专用围栏架设机械。

2.4 草皮移植工艺和相关机械

草皮移植是指将现有或培育草地的地上植株和地下根土同时揭取后移栽到裸地的方法,一般用于重度退化草地的快速修复和公路、铁路等施工的地表植被保护。重度退化草地经耕整处理后,可通过草皮移植使其快速达到生产状态。

途经草地的基础建设为减少施工过程对草地的破坏也常采用草皮移植,待工程建设完毕后再将草皮移回。草皮移植主要包括草皮揭取保护、草皮移植条件创造、草皮移植和恢复三个主要阶段。草皮移植机械主要包括草皮划线切割机和移植机。草皮移植作业时,先通过锯齿圆盘刀将草皮划线切割为条状,然后通过草皮移植机将条状的草皮揭下并切断,形成长方形草皮条块后由人工运移和存放。目前草皮移植过程的各环节采用分段式作业,机具大部分为小型机械,作业效率低、人工投入多、劳动强度大,所以研发能一次性完成草皮切割、移植、收集等环节的草皮切割移植联合作业机械十分迫切。

2.5 草方格沙障工艺和相关机械

草方格沙障也称作“挡风墙”,是在沙漠和草地的边缘用麦草、稻草或芦苇等材料扎成方格形状,有防风固沙和涵养水分等多种作用^[45-46]。草方格沙障是中国特有的草地保护手段,能有效遏制风沙移动,防止草地荒漠化。草方格沙障在国外的相关研究和应用较少,但在中国新疆、内蒙古等地区有广泛应用。草方格沙障建设的工艺流程为:秸秆→草绳草帘加工→机械聚合→多段刷状网绳→铺设。草方格沙障建设过程应用主要的机械是沙障草编织装置,其功能是将提前加工好的固结草绳和刷状草帘聚合为一体,制作成多段刷状网绳。由于待作业地表有大量沙丘并伴有植被,作业工况复杂,所以多段刷状网绳由人工铺设。

目前草方格编织、铺设联合作业机械尚处于研发试验阶段,如胡恩锴等^[47]设计了一种手扶式草方格沙障铺设机,可一次性完成理草、铺草、插草和拢沙等工序。林子钧等^[48]提出了一种基于全球导航卫星系统(GNSS)+惯性测量单元(IMU)的草方格固沙机自动巡航控制系统,可实现用户终端对草方格固沙机的智能监控。目前草方格沙障建设过程的各环节采用分段作业,在多段刷状网绳铺设环节缺乏相应的作业机械,存在作业成本高、劳动力投入大等问题,所以研发能在沙漠化退化草地铺设草方格的单项作业机械非常迫切。实现各环节作业机械化后,进一步研发可一次性完成草方格沙障编织和铺设的联合作业机械,并逐步提升其自动

化和智能化程度。

3 改良 II 型工艺原理和相关机械

牧草生长环境因素主要包括生长资源和土壤环境两个方面，生长资源指牧草个体获得的阳光、水肥等，一般通过合理放牧、刈割、去除覆盖物等方式保证。土壤环境包括土壤坚实度、容重、孔隙度、蓄水性能、土壤养分等，一般可通过耕作类机械改善土壤物理结构，通过施肥增加土壤养分。

3.1 松土改良工艺和相关机械

松土可以降低退化草地的土壤坚实度和容重，增加孔隙度和蓄水性能。目前草地松土改良方式包括打孔、浅松、深松、浅翻等，用于轻中度并伴有板结的退化草地，一般工艺流程为：机械松土→适度镇压→围封→恢复。目前国内草地松土改良机具匮乏，专用机具尚处于研发阶段，如董向前等^[49]研发的 9ST-460 型草地振动式间隔松土机，主要结构包括前导式双圆盘切根刀、激振式松土铲、镇压辊等，作业时松土铲在弹簧和土壤阻力共同作用下振动式前进，对土壤强制疏松作业的同时有一定减阻作用。

国外松土改良专用机械已经较为成熟，如美国的 RYAN 公司研发的打孔松土机，其主要工作部件是 96 个直径 2 cm 的打孔钉齿，作业时拖拉机牵钉齿辊在地表滚动，在自身重力作用下压出连续的孔洞^[50]，该机具特点是无翻垡。美国 AerWay 公司研制的 AWS-100 型草地疏松透气机，其主要工作部件为旋转轴上安装的 12 个间距为 17 mm 的齿盘，每个齿盘上安装有 4 个矩形刀齿，工作时通过矩形刀齿的垂直压切作用打出深度为 20 mm 的矩形孔洞^[51]，是一种垂直松土机具，通过旋转轴扭转调节装置实现松土程度调节，对地表扰动小。上述国外的草地松土机具属于草地松土改良专用机具，优点是松土作业效果好，缺点是只能完成单一的松土作业，对多因素引起的退化草地适用性不强。草地松土改良机械的研究应集中于研发对地表植被破坏小、土壤扰动小、翻垡率低、工作阻力小的机具和关键作业部件，保证松土效果前提下增加复式作业部件以增加机具的改良功能，提高机具通用性。深松在国内外的草地改良中均有应用，是指在尽可能不破坏地表的情况下，通过深松机打破地表以下的根土复合体结构，改变深层土壤结构和蓄水性能，该技术的优点是对地表结构和植物破坏小，属于一种保护性耕作技术。目前草地深松机械主要采用大田深松机的结构和工作原理，存在作业阻力大、对地表扰动大等问题，所以根据草地改良的工艺要求，基于仿生减阻原理研究作业阻力小、对土壤扰动小的极窄齿类深松部件和机具十分关键。

对退化严重的草地，在表层土壤板结、贫瘠、盐碱化、病虫害等情况下可以通过翻耕后重新建植人工草地进行改良，其工艺流程为：翻耕→整平→播种→围封→恢复草地。翻耕改良目前没有专用机械，主要采用大田耕整地机械，如铧式犁和圆盘犁等，通过翻垡将表层土、

残茬、病虫害等一起翻扣到土垡底部，并将底层土壤翻到表层。这类用机械的特点是适用性强、地表耕整效果好，但对草地地表植被破坏大、土壤扰动大、不利于作业后地表保墒。所以，研发对地表牧草植被伤害小、土壤翻垡率低^[51]、扰动小和保墒性能好的草地浅翻专用机械十分关键。

3.2 灌溉改良工艺和相关设备

干旱是引起草地退化的重要因素，中国绝大部分天然草地都处于干旱和半干旱区，降雨集中在 6—9 月份，具有雨热同季的特点，在春季和秋季干旱严重^[52]。在无降雨条件下灌溉可以快速提高土壤中的含水量，保证植物的生长需求。退化草地的灌溉改良工艺流程为：灌溉→围封→恢复。目前国内外草地灌溉主要利用喷灌设备进行，喷灌比传统漫灌节水 40% 以上，灌水均匀度达到 80%~90%，其优势是可以实现水肥一体化和水药一体化。目前草地灌溉主要采用移动喷灌，包括滚移式、卷盘式和中心支轴式喷灌设备^[53-54]。滚移式喷灌设备是一种单元组装多支点结构的节水设备，其特点是与排水、林带结合较好，对不同水源条件都适用，爬坡能力较强，可根据地块情况组装成长机组和短机组使用，是一种比较成熟的喷灌设备。滚移式喷灌设备在国外研究和应用较早，如 COURTRIGHT B^[55] 研究的滚移式喷灌设备的驱动机构、喷头和行走机构等。1935 年美国成功研制滚移式喷灌机样机并于 1950 年得到推广，1982 年美国用滚移式喷灌机喷灌面积已达 147 万 hm^2 ，占喷灌面积的 16.9%^[56]。卷盘式喷灌设备作业时牵引 PE 管缠绕在绞盘上，利用喷压驱动水涡轮旋转，经变速装置驱动绞盘旋转并牵引喷头车移动，经水涡轮流出的高压水流经 PE 管到达喷头，并随着 PE 管的移动实现连续喷洒作业。中心支轴式喷灌设备也称为指针式喷灌设备^[57-58]，是将喷灌机的转动支轴固定在灌溉面积中心，支轴座中心下端与井泵出水管相连，上端通过旋转机构与旋转弯管连接，通过桁架上的喷洒系统向作物喷水。喷灌设备及灌溉模式是节水农业的研究热点，孟令刚等^[59]研究出一种领航-跟随结构的灌溉设备，将导航技术融入了喷灌作业中，解决了传统喷灌机作业模式单一和非规则田块的喷灌机导航控制问题。莫锦秋等^[60]研究出一种基于 PWM 技术的大型变量喷灌可实现变量喷灌作业，能有效节约喷灌用水。张晓敏等^[61]研究出一种平移式喷灌机低压末端喷头，能实现节能保质灌溉。

国内草地灌溉的水源、水资源配置和利用、设备成本和运行管理成本等问题制约了退化草地灌溉改良的进一步发展。所以，草地灌溉改良中水资源配置研究和灌溉设备研发应同步进行，在水资源配置研究方面，鹿海员等^[62]提出“水-土-草-畜”的牧区水土资源配置模式，汪精海^[63-64]等研究表明草地的调亏灌溉模式可以优化草地喷灌设备的利用形式，实现区域水土资源高效利用。在草地灌溉设备的研发方面，可以参考目前国内北方旱作区推广应用的滴灌技术^[65-66]，在解决草地灌溉水源问题的基础上研发低耗水量、低成本、低耗能的草地专用

灌溉设备。

3.3 施肥改良工艺和相关机械

施肥改良通过提供 N、P、K 等生长必需元素^[67]优化牧草生长的土壤理化条件。退化草地的机械化施肥改良通过施肥机械将肥料撒在地表或深施于土壤中,其工艺流程为:机械施肥→围封→恢复。草地施肥有沟施、撒施、水肥一体化等多种方法,沟施一般在牧草播种机或松土改良机等机械上附加开沟施肥部件,在播种或切根松土同时开沟施肥。水肥一体化是利用喷灌等设备将水和肥料混合均匀后加压,经管道输送至目标位置后进行喷洒灌溉。撒施是通过无人机搭载撒施装置或拖拉机牵引撒肥车将肥料撒至地表,如加拿大 Vicon 公司研发的摆杆式撒肥机,其主要工作部件为撒施圆盘,作业时通过圆盘旋转产生的离心作用将肥料抛撒至地表,能适应有机肥和各类颗粒化肥。国外已研发出多种施肥改良专用机械,如液态肥喷施机和圆盘式肥料注射机等,液态肥喷施机是将肥料、水、保墒剂等混合加压后经喷头高速喷向地表,施肥后地表形成一层薄膜,在施肥的同时实现保墒。圆盘式肥料注射机前端设计有圆盘刀,作业时在圆盘刀的压切作用下形成一条窄缝,然后液态肥料被注射装置注入根系附近的土壤,有利于根系对营养物质的吸收^[68-69]。目前,国内外草地施肥机械的研发过程普遍忽略了退化草地地表肥力的差异性,等量匀施会带来环境污染隐患,所以基于遥感技术、机器视觉技术和 3S 技术的草地变量施肥机械的研发是未来的发展方向。

3.4 去除覆盖物改良工艺和相关机械

前茬干草覆盖在地表会占据新草的生长空间,影响牧草的重新萌发和生长。地表覆盖物去除可以减少昆虫和细菌对草地的危害,改善表土的通透性,增加牧草吸收水、空气、养分的空间,从而使草地恢复活力。退化草地的去覆盖物改良工艺流程为:去除表层覆盖物→围封→恢复。地表枯草落叶等覆盖物可以通过梳草机进行梳理去除,梳草机的主要工作部件为弹簧钢丝甩刀,作业时绕回转中心旋转的弹簧钢丝甩刀在机械离心力作用下清除枯草层,目前该机械主要用于人工草坪。

围封的退化草地每年会产生大量干草,不及时清理会影响草地的进一步恢复。但退化草地的去覆盖物环节常被忽视,专用机械缺失。针对该情况,可以考虑秋后将牧草用割草机整体收割覆盖于地表,开春后利用搂草机集条,最后集中处理。常见的搂草机有指盘式搂草机、水平转子式搂草机等。指盘式搂草机如俄罗斯生产的 RT-13 型牵引指盘式搂草机,其原理是通过拖拉机牵引带动搂草指盘旋转,将牧草向指盘末端集中和集条。水平转子式搂草机如中国自产的麦赛福格森 MF RK802 转子式搂草机,其原理是通过 2 组转向相反的搂草水平转子将草向 2 个转子的中间集中和集条。退化草地机械化改良需重视去覆盖物环节,研发具有干草梳理、粉碎还田功能的专用机械,发挥干草的覆盖保墒和绿肥功能。

4 改良 III 型工艺原理和相关机械

对根系和植物体的适当刺激会促进根系和植株的重新萌发和分蘖^[70-71],目前促进退化草地自主恢复的主要机械化技术包括切根、划破草皮、火烧、合理刈割等。

4.1 切根改良工艺和相关机械

切根改良是国内草地改良的重要技术,贺长彬等^[72]研究发现,退化草地的根系与土壤形成的根土复合体可以增加土壤硬度和抗剪强度,导致聚集根系向浅层分布、减少水分渗透和降低土壤通透性,从而加剧草地的退化,可通过切根或划破草皮改变这一不利因素。切根改良工艺流程为:围封→机械切根→恢复。

在切根机械的研发方面,尤泳等^[73]研发了 9QP-830 型盘齿式破土切根机,其主要工作部件为极窄齿式切根直刀,切根刀回转平面与地表平面垂直,作业时机组安装的 8 组切根刀在地表切出 8 条深度为 100~200 mm 窄缝,作业幅宽 2.4 m,生产率 1.16 hm²/h,该机械具有对地表扰动小、适应性强等优点,实践表明,该机械作业当年产草量增加了近 1 倍。梁方等^[74]研制的 9QFB-2.4 型破土切根施肥补播复式作业机是一种复式改良机械,能实现切根、施肥、补播、覆土镇压联合作业,可针对不同退化程度草场采用切根施肥、切根补播、切根施肥补播 3 种不同作业工艺。为降低切根刀具的阻力和减小对地表扰动,尤泳等^[75]设计了一种极窄刀齿,马文鹏等^[76]以食蚁兽爪趾为模型,通过逆向工程技术设计了一种仿生低阻切根松土铲,在此基础上结合适合小颗粒种子的气吹式排种原理^[77],研制出 2BFQ-4 型多年生苜蓿地切根松土补播施肥机,能实现切根-深松-补播复式改良工艺。张学宁等^[78]为降低切根刀的切根作业阻力,研究了退化草地根土复合体本构关系,基于离散元法优化了草地破土切根刀^[79],根据被动牵引式破土切根原理研究出一种刃口部分为锯齿状的寻优切根刀,能有效降低切根作业阻力。

目前国内外的草地切根改良、松土改良和浅翻改良等主要集中在降扰和减阻部件的研发,注重机具的宏观作业效果,对机具作业时工作部件与根土复合体相互作用、切根与施肥的协同改良作用^[80]、作业部件减阻机理和降扰动机理研究还不够深入,缺乏机械扰动条件下牧草植株复壮机理研究。同时,机械松土改良、切根改良、浅翻改良等的工艺相互独立,而这几种改良工艺是可以统一在“机械扰动改良”工艺框架下的。所以,从互作机理层面建立机械切根改良、机械松土改良和机械浅翻改良的相互联系,揭示退化草地机械扰动改良机理,形成机械扰动作用下退化草地综合改良工艺十分关键。

4.2 火烧改良工艺和相关机械

草地改良技术相关研究中,国外常用的改良方式还包括火烧。AGUILAR S 等^[81]认为计划使用低强度火是实现不同的草地恢复的一种管理方式,可以促进退化草地的恢复。ALCANIZ M 等^[82-83]研究发现植被火烧后产生的草木灰分对土壤特性和植物-土壤关系产生影响,耐

热、抗旱的植物在火烧后的生长特性被激发^[84-85]，进而促进了退化草地的恢复。退化草地的火烧改良一般工艺流程为：火烧处理→静置或浅翻→灌溉→围封→恢复。退化草地火烧改良设备主要是采用火焰除草机^[86]，美国、法国、意大利和日本等国家都已普遍采用该技术^[87-88]，作业时高温火焰枪除去地表的枯草和杂草，火烧产生的高温可以杀灭牧草根部的害虫、虫卵和细菌，地表形成的草木灰则作为肥料。火烧改良具有工艺简单、效率高、改良效果好等优点，但火烧产生的大量烟尘和 CO₂ 等不利于环境保护。研发具备一体化收集和处理燃烧产生的粉尘、CO₂ 等物质的草地火烧改良机械是未来的研发方向。

4.3 牧草合理利用改良工艺和相关机械

合理刈割可以改变牧草的植株形态，促进牧草的重新生长和发育。要振宇^[89]研究发现，围封和适当割草处理条件下的牧草产量没有显著差异。秸秆覆盖是一种典型的保护性耕作措施，该技术目前已广泛应用于以玉米为代表的粮食作物生产中^[90-92]，其抗旱保墒、防风固沙、改良土壤等效果显著。草地经干草覆盖后水分蒸发速度明显降低，温度显著高于无覆盖条件，具有良好的保墒效果。干草覆盖分为整草保留覆盖、整草刈割覆盖和粉碎覆盖三种，涉及的相关机械主要是牧草收割机械和摊搂草机械。草地绿肥可以增加牧草产量，提高经济效益，形成绿肥-土壤-牧草生态系统。所以牧草的合理利用要走用草养地相结合的路线，若草地生长环境和牧草生产状况较好，可以适当收获利用；若草地存在极端气候情况，如极端寒冷、极端干旱等情况，就要考虑是否将牧草刈割后覆盖地表以保温保墒或作为绿肥，牧草合理利用改良退化草地的工艺流程如图 3 所示。

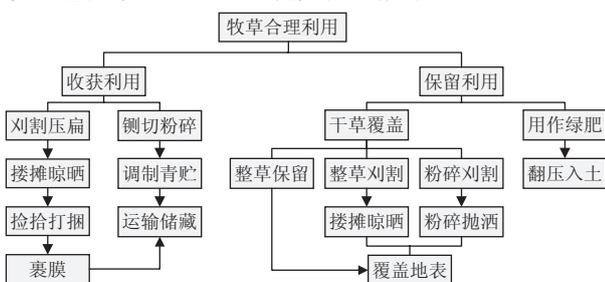


图 3 牧草合理利用改良退化草地的工艺流程

Fig.3 Technological process of reasonably utilizing grassland to improve degraded grassland

5 改良Ⅳ型工艺原理和相关机械

草地群落包括地表植被生物群落和土壤微生物群落 2 方面。优化微生物群落改良主要是通过退化草地上接种有益菌落以改善根际微生物环境^[93]，作业设备可与草地施肥机械通用。优化植被生物群落是通过增加优良牧草的种群密度增加地表生物量，减少毒杂草的种群密度以减少其与牧草的竞争，主要包括补播、毒杂草剔除等。

5.1 补播改良工艺和相关机械

补播改良在退化草地上补种优质牧草，快速增加单位面积的牧草群落密度，缩短退化草地的恢复时间^[94]。草地退化导致地表可利用牧草数量和生物量降低，自身恢复往往需要 4 年甚至更长时间，难以满足饲草需求和生态需求，而机械化补播可以快速增加牧草群落密度、提高草地的饲用价值^[95]。补播改良的一般工艺流程为：补播→围封→恢复。目前退化草地的补播常用飞播和免耕播种两种形式。飞播是指搭载排种器的无人机在草地上空由人工遥控进行排种作业^[96]，其关键作业装置是撒播圆盘，作业时可在人工遥控下调整排种量、飞行速度和飞行高度等，具有播种速度快、效率高、不受地表环境限制、对地表和植被无破坏等优点，缺点是播种效果受风力等环境因素影响较大，且种子土壤接触不紧密，发芽率和播种成活率较低。草地飞播机械未来的研发可以参考大田作物飞播技术，如何伟灼等^[97]采用“点射”原理研发的水稻飞播排种器，播种时种子通过射播排种器高速射出，靠种子自身的冲击力直接射入土壤，可以提高飞播质量。

免耕播种采用牧草免耕播种机在原状退化草地上直接播种作业，是国内外牧草补播改良的主要方式。由于退化草地土壤坚实度高，地表不平整且伴有大量残根茬，所以牧草免耕播种机要具有破茬入土、清草防堵、种肥分施、地面仿形等功能。

牧草种子与大田作物种子的显著区别是种子小、特异性强，如苜蓿种子的长×宽×高为(2.3±0.147) mm×(1.4±0.088) mm×(1.0±0.072) mm，千粒质量只有 1.48~2.26 g^[98]，需要具有适应种子特点的牧草专用免耕播种机。牧草免耕播种机作业时一般需要完成划破草皮、开沟、播种、施肥、覆土、镇压等多道工序，其作业流程如图 4 所示。

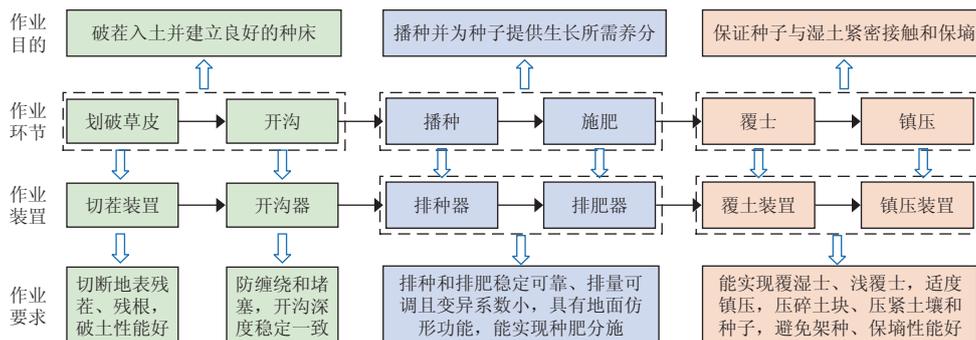


图 4 牧草免耕播种机作业流程

Fig.4 Operation process of no tillage seeder for grassland

牧草播种机按照排种方式分为撒播机、条播机、精量播种机3类,按照排种原理分为机械式和气力式2类。条播机是目前牧草播种机的主要类型,撒播机、精量播

种机等其他类型也有研究和应用,但相对较少,典型的国内牧草播种机的型号、主要结构和性能参数、特点等如表2所示。

表2 国内典型的牧草播种机械
Table 2 Typical grassland sowing machinery in china

型号 Model	主要结构和性能参数 Main performance parameters	特点 Characteristics
2BMC-9 型牧草精量播种机	外形尺寸(长×宽×高)1 800 mm×1 000 mm×900 mm, 整机质量250 kg, 播种行数9行, 行距15 cm, 作业幅宽1.35 m, 配套动力为16~25 kW, 作业速度4~6 km·h ⁻¹ , 播种深度调节范围20~60 mm, 排种量调节范围1.5~6 kg·(hm ²) ⁻¹ , 生产率0.5~0.8 hm ² ·h ⁻¹ 。	属于轻量化播种机具, 主要适用于苜蓿的精量播种; 采用微型控制式密齿排种器, 能保证单位面积产草量条件下实现最小播种量, 能有效节约种子
2BM-9 型牧草免耕播种机	外形尺寸(长×宽×高)3 300 mm×2 300 mm×1 840 mm, 整机质量1 500 kg, 播种行数9行, 行距15~60 cm, 作业幅宽1.8 m, 配套动力37~48 kW, 作业速度3~5 km·h ⁻¹ , 排种量调节范围4.5~7.5 kg·(hm ²) ⁻¹ , 生产率0.53~0.8 hm ² ·h ⁻¹ 。	采用无级调速的钉轮组合排种器, 排量变异系数小; 采用液压式播深调节装置控制播深, 播深一致性高; 开沟宽度小、破茬能力强, 适应于干旱、半干旱区的播种作业
2BMG-16 型牧草免耕精量播种机	外形尺寸(长×宽×高)4 580 mm×4 460 mm×1 730 mm, 整机质量3 600 kg, 播种行数16, 行距20 cm, 作业幅宽3.2 m, 配套动力58.8~73.5 kW, 生产率1.5~2.3 hm ² ·h ⁻¹ 。	采用“微型控制式密齿型排种器”控制排种量, 采用波纹圆盘破茬, 采用双圆盘开沟器开沟播种并实现种肥分施, 能实现完全免耕
6 115 型牧草免耕播种机	外形尺寸(长×宽×高)4 190 mm×3 970 mm×2 150 mm, 整机质量1 973 kg, 播种行数15, 行距19 cm, 作业幅宽2.85 m, 配套功率55.5~80.5 kW, 效率2.2 hm ² ·h ⁻¹ 。	采用波纹圆盘刀破茬排堵, 机组通过性强; 采用橡胶空心镇压轮, 不易粘土且镇压深效果好; 具有良好的仿形功能, 保证播深一致性
9MSB-2.10 型草地免耕松播机	外形尺寸(长×宽×高)2 700 mm×1 500 mm×1 450 mm, 整机质量820 kg, 播种行数6行, 行距35 cm, 作业幅宽2.1 m, 配套动力40 kW以上, 施肥深度150 mm, 生产率1.3~1.7 hm ² ·h ⁻¹ 。	机组结构上增加了圆盘犁、松土铲等装置, 可实现“间隔窄带式松土-补播-镇压”复式改良工艺, 作业后地表能保留原生植被70%, 对地表的破坏小
2BF-3 620 型草地免耕播种机	外形尺寸(长×宽×高)4 396 mm×5 083 mm×1 656 mm, 播种行数20, 行距18 cm, 播种深度0~90 mm可调, 作业幅宽3.6 m, 配套动力73.5 kW。播种和施肥深度合格率≥75%, 各行排种量一致性变异系数≤3.9%, 总排量稳定性变异系数≤1.3%, 播种均匀性变异系数≤45%。	在不同区域条件下作业适应性强, 破茬能力、地表仿形能力强, 播种深度和施肥深度一致性高, 排量一致性高, 能适应我国华北、东北、西北等多地区的草原牧草免耕补播
9BQM-3.0 气力式免耕播种机	整机质量3 460 kg, 播种行数18行, 行距16.5 cm, 作业幅宽3.0 m, 配套动力88.2 kW以上, 风机转速2 800 r·min ⁻¹ , 播种深度10~50 mm可调, 作业速度8~15 km·h ⁻¹ , 生产率2.0~3.6 hm ² ·h ⁻¹ , 排种量变异系数≤6.1%, 种子破碎率≤1.32%。	采用气吹式排种器, 对不同形状种子的适应性强; 有智能显示器及报警系统, 能实时掌握机组的前进速度、风机转速等作业参数; 可以实现高速播种

国外的牧草种植面积相对较大,畜牧业也更加发达。以美国为例,其畜牧业占农业总产值的63%,年均牧草的耕种面积占总面积的28%以上,牧草种子产量占世界牧草种子总产量的50%,尤其苜蓿的种植面积和产量多

年位居世界第一。由于国外牧草机械发展早且种植面积大,所以其播种机械更大型化、专用化。典型的国外牧草播种机的型号、主要结构和性能参数、特点等如表3所示。

表3 国外典型牧草播种机械
Table 3 Typical grassland sowing machinery in abroad

型号 Model	主要结构和性能参数 Main structural and performance parameters	特点 Characteristics
约翰迪尔 1 590 免耕播种机	作业幅宽有3.05、4.6和6.1 m三种类型, 配套动力依次为63、75、104 kW, 播种行距19 cm和25 cm二种可调, 带前锁定向机架离地间隙61 cm, 开沟器采用液压油缸施加压力, 压力值在75~204 kg之间可调, 种肥排量由电机控制。	破茬能力和地表穿透能力强, 机组通过性好、地表仿形能力强, 适用于残茬地等各种复杂工况下的免耕条播, 能适应豆科、禾本科等多类牧草的条播作业, 也可适应小麦等多类谷物的播种。
约翰迪尔 1890 型免耕播种机	作业幅宽13 m, 播种行距19、25、38和50 cm, 配套动力120 kW, 作业速度10~15 km·h ⁻¹ , 生产率14.16 hm ² ·h ⁻¹ 。	适应于大量残茬覆盖地的免耕播种作业, 液压式单体仿形机构, 地面仿形能力强, 可准确控制播种深度且播种深度一致性高。
雷肯 Solitair 10CL 免耕条播机	作业幅宽8~12 m可调, 折叠后宽度为3 m, 采用液压驱动排种风机, 播种量在0.5~500 kg·hm ⁻² 可调, 播种行数25行, 套动力120 kW, 作业速度15 km·h ⁻¹ , 生产率8 hm ² ·h ⁻¹ 。	可通过电子终端控制装种箱装入种子, 工作时驱动耙联合一个八排的精密播种机同时作业, 机具可折叠利于机具的道路运输。
大平原 PS25120 型牧草播种机	整机质量1 660 kg, 作业幅宽3 m, 播种行数16行, 行距20 cm, 配套动力37~44 kW, 播种量在0.6~180 kg·hm ⁻² 可调, 播种深度严格控制在1.2 cm。	能精确控制播种量和播种深度, 有效节约种子和保证出苗率, 前后组合式镇压轮设计能细碎苗床为种子创造理想的发芽环境, 属于牧草专用精量播种机。
大平原 1006NT 免耕播种机	作业幅宽3 m, 配套动力26 kW, 行距19.05 cm, 配套动力26 kW。采用多个种箱结构, 其中主种箱容量为880.95 L, 小粒种子种箱为84.57 L, 天然牧草种箱为352.38 L。	属于紧凑型牧草专用免耕播种机, 主要特点是多个种箱设计, 适合多种作物和牧草的播种作业, 作业部件可折叠, 机器存放占用空间小。
Flexi-coil 5 000 型免耕播种机	整机长17.4 m, 作业幅宽有18.3 m、22.9 m和36.6 m等4种类型, 排种器类型为气吹式排种器, 开沟器类型为铧铲式, 采用多排镇压轮。	开沟器的布置采用多梁交错排列的方式实现防堵塞功能, 通过性好, 开沟器开沟深度稳定性好, 适合在面积大的天然草原上作业。
凯斯纽荷兰 DV12R 种植施肥机	外形尺寸(长×宽×高)9 000 mm×2 400 mm×1 450 mm, 整机质量3 400 kg, 播种行数12行, 行距35~75 cm可调, 作业速度6~8 km·h ⁻¹ 。	可通过更换排种盘适应粮食、牧草、蔬菜等多种作物的播种作业, 机组结构上采用侧深施肥装置, 肥料利用率高。
百利灵 SS 系列保苗播种机	整机质量1 480 kg, 播种深度1.2 cm, 作业幅宽3 m, 作业速度5~8 km·h ⁻¹ , 生产率1.5~2.4 hm ² ·h ⁻¹ 。	采用撒播后双镇压方式保证播种作业深度, 可以节省50%的草籽, 对禾本科和豆科草籽都有很好的适应性。

总体来看,国内外的牧草播种机整体结构、原理差异不大,但播种方式及应用、作业工艺、设备性能等方面有较大差异。国内草地免耕补播机以外槽轮式等机械

式排种器的条播机为主,国外则以气力式排种器的条播机为主。在作业工艺和设备性能方面,国内针对不同农艺要求下的退化草地场景,以撒播-镇压、免耕直播、松

土-免耕播种、耕松-免耕播种等为主，突出“因地制宜”。而国外主要采用免耕直播作业工艺，并以此为基础集中优化作业部件性能，如提高破茬装置的破茬穿透性能、排种器对各类种子的适应性、机具通过性等，机具综合性能优异，对不同作业目标、作业工况都有较强的适应性，突出“通用性”。研发目标方面，国内牧草播种机械的研发注重多种作业工艺共存并以实现机械化为重，而国外的研发以一种工艺条件下的技术优化、技术集成、自动化、智能化为主。

目前国内外的牧草免耕播种机的结构、功能和作业工艺与大田免耕播种机无显著区别，没有将切根、松土、浅翻等机械扰动改良工艺有效融合。免耕播种机的破茬刀、开沟器等又有一定的切根、松土等作用，具备与切根、松土、浅翻等机械扰动改良工艺融合的条件。所以，基于机械扰动改良和补播改良工艺融合的草地免耕播种机研发十分关键。在免耕补播改良工艺方面，可以将免耕补播与切根、浅翻、松土等改良技术组合形成复式改良工艺，然后通过机械化技术融合研发具备机械扰动功能和补播功能结合的复式改良机械，逐步提高机具的自动化、智能化程度。

5.2 毒杂草剔除改良工艺和相关机械

毒杂草剔除是通过除去退化草地上的杂草、毒草及一些灌木，减少其与牧草的竞争。草地上部分植物牛羊不能食用，如狼毒草（又称断肠草、胡蔓藤等），含有钩吻碱等毒素，牛羊误食会引起中毒，引发腹泻、休克甚至死亡^[99]，对牲畜有害。这类植物生长能力较强，与羊草等主要牧草品种形成竞争关系，应予以剔除。剔除毒杂草保留优良牧草，可以优化牧草群落结构，保证牧草的生长空间，优化饲草的营养结构。毒杂草分布广泛且与牧草植株形态相似，剔除难度大，毒杂草剔除机械的研发十分关键。目前有大量的国内外研究人员对杂草剔除机械进行了研究，相关除草机械的杂草识别原理和剔除原理如表 4 所示。

表 4 国内外典型毒杂草剔除机械
Table 4 Typical grassland poisonous grass and weed removal machinery in the world

型号 Model	杂草识别原理 Principles of weed identification	杂草剔除方式 Weed removal method
基于雷达识别的狼毒草剔除装置 ^[100]	雷达	对靶喷药
四足激光除草机器人 ^[101-102]	机器视觉	激光热效应
英国 IbeX Automation 公司研发的履带式除草机器人	机器视觉	对靶喷药
瑞士 EcoRobotix 除草机器人	机器视觉	机械部件
四轮转动和驱动除草平台 ^[103]	利用全球导航卫星系统定位，通过机器视觉识别杂草	对靶喷药
空地协同式除草机器人 ^[104]	利用全球导航卫星系统定位，通过机器视觉识别杂草	对靶喷药

随着机器视觉、GNSS、雷达等多种传感器技术的融合发展，草地的毒杂草剔除机械向除草机器人方向快速发展，但大部分还处于研发阶段，在草地改良实践中没有广泛应用。所以一方面要加快高精度、低成本、易推

广的草地毒杂草剔除机械研发和推广，另一方面配置合理的机械-化学协同除草模式，实现草地改良、环境保护和经济发展共赢。

6 结语

草地机械化改良是应对草地退化的重要手段，综合已有草地改良工艺技术和相关机械可知，退化草地的机械化改良经过长期实践取得了积极成果，相关作业机械也在实践中不断完善和优化。在技术层面，国内外应用的改良技术大部分相同，如补播、松土、施肥、灌溉等，也有个别的技术应用存在差异，如国外应用火烧改良而国内应用切根改良、草方格沙障等。大规模应用某些综合改良技术还要考虑成本、环境影响、可持续发展等具体情况统筹，制定改良工艺后通过相关作业机械实施改良方案。

草地退化是世界性难题，目前国内大部分草地都存在不同程度的退化现象，已退化和正在退化的草地达 90% 以上，严重威胁生态安全和粮食安全。草地退化相关研究和实践取得了可喜的成果，但还没有实现全方位、全范围的遏制草地退化，部分地区的草地退化甚至还有逐步恶化的趋势。根据目前国内已退化草地的实际情况，提出以下展望：

重视草地退化预防，坚持走用草养地相结合道路。目前草地改良工艺是在草地已经产生退化情况下制定的，然而草地退化是在退化因素作用了一定时间后才显现，草地退化后的改良治理难度和投入比预防退化大很多。所以在草地保护和改良实践中应建立草地退化预防机制，如基于遥感技术等现代化技术手段建立草地监测系统，对草地生长状态、草地畜牧承载力、降水量、温度、病虫害等进行动态监控，通过智能监测系统及时发现草地退化因素并及时处理，将退化势头在萌芽期消除。基于 3S 技术、机器视觉技术等研发具有巡航功能的植保、灌溉、除草等草地退化预防相关设备，能根据草地退化预测情况、退化因素及定位等信息开展预防退化作业。深入研究“禽-畜-草-肥-机械”耦合机制，根据国内草地的实际情况，将养畜放牧、围栏封育、草地牧鸡、覆盖物用作绿肥、机械化改良等合理应用，形成经济效益、生态效益共赢的局面。

补足现有改良机械的技术短板，强化基础研究。草地综合改良工艺中包含的技术很多，但某些改良技术实施难度大、成本高或实施后带来的新问题难以有效解决，所以在改良工艺中应采用低成本、高效率、无后续隐患的改良技术。如切根改良是目前退化草地改良的重要技术之一，其低成本、对地表植被破坏小等特点适合大面积应用推广。同时应围绕现有作业机械的不足，开展相关基础研究和关键作业部件的研发，如针对切根机械，应深入根系-土壤-机器相互作用研究，揭示机械扰动作用下退化草地的促生机理，研制低阻力、小扰动的切根刀具，降低作业功耗和作业成本。针对补播改良中飞播技术存在播种质量差等问题，应考虑改变排种原理，可

参考大田作物中水稻的射播技术, 基于牧草种子小颗粒和特异性强的特点, 设计和改进适合牧草种子的射播排种器。针对毒杂草剔除机械的不足, 可参考大田作物的智能化机械除草技术, 基于遥感技术和机器视觉技术等研发草地毒杂草智能识别和激光除草等无后续隐患的草地除草专用机械。

草地改良机械研发要因地制宜, 充分发挥特色技术优势。在退化草地灌溉改良方面, 基于中国草地大部分处于干旱和半干旱区的自然条件限制, 可采用调亏灌溉等节水灌溉模式, 参考棉花、玉米等生产中广泛应用的滴灌技术, 研发适合我国草地灌溉改良的省水设备。充分发挥切根促生、草方格沙障等具有地方特色的草地改良技术优势, 加快相关机械设备的研发, 并向标准化、系列化发展, 力争早日大面积推广和应用。

重组优化改良作业工艺, 研发复式改良机械。复合改良工艺的改良效果比单一改良工艺好, 但涉及的相关作业机械较多, 需要分段作业, 作业成本高, 劳动力投入大。所以, 根据中国的草地退化实际情况重组和优化改良工艺, 研发复合式、多功能的改良机械设备是未来草地改良机械研发的方向。目前机械免耕补播是草地改良应用的重要手段, 草地免耕播种机的结构和功能与大田免耕播种机区别不大, 主要差异是播种和施肥功能。然而, 草地的多年生特点、通过改良可恢复的特点等与大田作物有明显区别, 免耕播种机的破茬刀和开沟器功能有一定相似性, 具备工艺融合的条件。所以在机械化免耕补播工艺中, 可以考虑将免耕补播与切根、松土、浅翻等工艺选择性组合形成机械化综合改良工艺, 充分发挥改良技术组合形成的协同交互作用, 在现有免耕播种机结构上增加实现相关改良技术的作业部件, 研发复式改良机械。

加强政策支持和技术指导, 提高基层对草地保护和草地改良的积极性。由于基层缺乏草地保护和改良相关理论和技术指导, 不合理利用导致草地退化现象发生后不能制定合理的改良工艺和选择相关改良机械。一方面由于承包责任制下牧民过于追求经济效益而忽略草地的可持续发展, 种子、机具、人工等成本投入制约了基层牧民对草地改良的积极性。另一方面, 基层缺乏对现有草地改良技术和相关机械的了解, 在选择改良工艺和作业机械时存在困难。针对以上问题提出以下对策: 第一, 要加大对基层草地保护和退化治理的政策支持, 如提高牧民的减畜补贴、牧草良种补贴、生产资料综合补贴等, 增加草地植保无人机、撒播无人机等轻简化改良机具的购置补贴, 加强草畜平衡管理同时提高牧民草地保护的积极性。第二, 加强基层行政单位对草地承包责任制下的监理, 明确生态环境破坏的责任主体, 强化“谁承包谁保护, 谁破坏谁恢复”。第三, 发挥相关高校和研究机构的科研和技术优势, 加大对草地保护和改良科技服务的政策支持力度, 以科技下基层的形式组建特派员团队为牧民提供草地保护、草地机械化改良等相关技术。

[参 考 文 献]

- [1] 全国绿化委员会办公室. 2022 年中国国土绿化状况公报 [EB/OL]. (2023-03-12) [2023-08-06]. <http://www.forestry.gov.cn/c/www/gtlhbg/360464.jhtml>.
- [2] 郝天象, 杨萌, 于贵瑞. 统筹草地生态系统五库功能构建国家生态安全屏障[J]. 中国科学基金, 2023, 37(4): 603-612. HAO Tianxiang, YANG Meng, YU Guirui. Coordinate the five-pool functions of grassland ecosystem and build a strong national ecological security barrier in China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(4): 603-612. (in Chinese with English abstract)
- [3] 乔郭亮, 金晓斌, 顾铮鸣, 等. 2000—2018 年天山中段高海拔草地暖季承载力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 253-261. QIAO Guoliang, JIN Xiaobin, GU Zhengming, et al. Carrying capacity of high-altitude grassland in warm seasons in the middle section of Tianshan Mountain from 2000 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 253-261. (in Chinese with English abstract)
- [4] 国家现代农业产业技术体系. 2022 年 12 月及全年主要草产品和草畜产品贸易动态. 国家现代农业产业技术体系四川创新团队信息服务平台 [EB/OL]. (2023-01-26) [2023-08-23]. http://www.scnycxtd.com/cdfmzj_nky/f/main/details?type=2&id=b1060364-b32b-4e40-b143-8c345b98bada.
- [5] 国务院. 中共中央、国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见. 中华人民共和国中央人民政府网 [EB/OL]. (2019-02-01) [2019-02-19]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-02/19/content_5366917.htm.
- [6] 国务院. 中共中央、国务院关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见. 中华人民共和国中央人民政府网 [EB/OL]. (2023-02-13) [2023-02-17]. http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/13/content_5741370.htm.
- [7] 刘延斌, 张典业, 张永超, 等. 不同管理措施下高寒退化草地恢复效果评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 268-275. LIU Yanbin, ZHANG Dianye, ZHANG Yongchao, et al. Evaluation of restoration effect in degraded alpine meadow under different regulation measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 268-275. (in Chinese with English abstract)
- [8] 阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 张发, 等. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2023, 40(7): 1779-1792. ABUDUREHEMAN·Wusiman, YUSUFUJIANG·Rusuli, ZHANG Fa, et al. Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1779-1792. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张军, 陶华昀, 李文杰, 等. 甘肃省草地生态系统时空变化特征[J]. 草业科学, 2022, 39(6): 1106-1114.

- ZHANG Jun, TAO Huayang, LI Wenjie, et al. Temporal and spatial changes of grassland ecosystems in Gansu Province[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1106-1114. (in Chinese with English abstract)
- [10] 闫志远, 张圣微, 王怡璇. 基于 GEE 的 1982—2021 年内蒙古地区植被覆盖度时空动态及气候响应特征[J]. *农业工程学报*, 2023, 39 (15): 94-102.
- YAN Zhiyuan, ZHANG Shengwei, WANG Yixuan. Spatiotemporal dynamics of fractional vegetation cover and climate response in Inner Mongolia during 1982-2021 based on GEE [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(15): 94-102. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李霞, 潘冬荣, 孙斌, 等. 甘肃省草地退化概况分析——基于甘肃省第一、二次草原普查数据[J]. *草业科学*, 2022, 39(3): 485-494.
- LI Xia, PAN Dongrong, SUN Bin, et al. Analysis of grassland degradation in Gansu Province based on two grassland surveys[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(3): 485-494. (in Chinese with English abstract)
- [12] 蒋胜竞, 冯天骄, 刘国华, 等. 草地生态修复技术应用的文献计量分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(4): 685-702.
- JIANG Shengjing, FENG Tianjiao, LIU Guohua, et al. Bibliometric analysis of grassland ecological restoration technology application[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(4): 685-702. (in Chinese with English abstract)
- [13] 任继周, 马志愤, 梁天刚, 等. 构建草地农业智库系统, 助力中国农业结构转型[J]. *草业学报*, 2017, 26(3): 191-198.
- REN Jizhou, MA Zhifeng, LIANG Tiangang, et al. Developing an agro-grassland think tank system to assist agricultural structuretransformation in China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 191-198. (in Chinese with English abstract)
- [14] 蒋振, 高雅罕, 靳乐山. 多元化生态补偿背景下牲畜暖棚对畜牧业收入和草地质量的影响——基于 PSM 的准自然实验[J]. *草地学报*, 2023, 31(2): 568-580.
- JIANG Zhen, GAO Yahan, JIN Leshan. Significance of cattle shed on herds' animal-husbandry revenue and grassland quality with the background of diversified eco-compensation: A quasi-natural experiment based on PSM[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(2): 568-580. (in Chinese with English abstract)
- [15] 付鹏飞, 姚娟, 胡继然, 等. 资本禀赋、政策感知与牧民减畜意愿——以巴音布鲁克世界自然遗产地为案例[J]. *草地学报*, 2021, 29(4): 780-787.
- FU Pengfei, YAO Juan, HU Jiran, et al. Capital endowments, policy perceptions and herdsmen's willingness to reduce livestock: A case study from the world natural heritage site of bayinbuluke[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 780-787. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭章栋, 冀昊, 李敏. 草原补奖政策下资源禀赋对牧民畜牧业代际意愿的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(2): 278-287.
- GUO Zhangdong, JI Hao, LI Min. Influence of resource endowment on herdsmen's willingness of intergenerational transmission of livestock farming under the grassland subsidy policy[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 278-287. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘辉, 宋孝玉, 覃琳, 等. 基于改进关键场的干旱风沙草原牧区草畜平衡评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 294-300.
- LIU Hui, SONG Xiaoyu, QIN Lin, et al. Evaluation of forage-livestock balance for the pastoral areas in arid sandy grasslands using improved key pasture approach[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(4): 294-300. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李佳秀, 张青松, 杜子银. 减畜对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展[J]. *草地学报*, 2022, 30(9): 2280-2290.
- LI Jiaxiu, ZHANG Qingsong, DU Ziyin. Research progress on the effects of livestock reduction on grassland vegetation growth and soil characteristics[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2280-2290. (in Chinese with English abstract)
- [19] 沈江龙, 陈吉军, 阿布都瓦里·伊玛木, 等. 新疆荒漠草地亮柔伪步甲虫害与草地变化关系研究——以昌吉州南山草场为例[J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 163-177.
- SHEN Jianglong, CHEN Jijun, IMAM Abuduwali, et al. The relationship between attack by prosodes dilaticollis and desert grassland changes in Xinjiang: A case study of southern mountain grassland in Changji[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 163-177. (in Chinese with English abstract)
- [20] 花立民, 柴守权. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 415-423.
- HUA Limin, CHAI Shouquan. Rodent pest control on grasslands in China: current state, problems and prospects[J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1): 415-423. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵科, 汪正芸, 李育庆, 等. 两种修复方式对青藏高原取弃土场修复后草地盖度的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(10): 2499-2506.
- ZHAO Ke, WANG Zhengyun, LI Yuqing, et al. Effect of two restorations on the grassland coverage after remediation of takeabandon soil field on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(10): 2499-2506. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李盼盼, 李彬彬, 王兵, 等. 模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 52-61.
- LI Panpan, LI Binbin, WANG Bing, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the *Bothriochloa ischaemum* community and its hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(16): 52-61. (in Chinese with English abstract)
- [23] 路文杰, 齐晋云, 吴聪, 等. 晋北半干旱草地不同分解程度凋落物混合对分解特征的影响[J]. *草业学报*, 2023,

- 32(12): 47-57.
- LU Wenjie, QI Jinyun, WU Cong, et al. Effects of mixed litter with different degrees of decomposition on the decomposition characteristics of semiarid grassland in northern Shanxi[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(12): 47-57. (in Chinese with English abstract)
- [24] 苏华, 苏本营, 许宏, 等. 畜禽草耦合模式探索——牧鸡对退化草地植物物种多样性的影响[J]. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49(6): 761-772.
- SU Hua, SU Benying, XU Hong, et al. Exploration of livestock-poultry-grassland systems: The influences of chicken farming on plant community in degraded grasslands[J]. *Sci Sin Vitae*, 2019, 49(6): 761-772. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王佳斌, 崔言晨, 张庆宇, 等. 风速对草方格沙障防沙效果的影响研究[J]. *中国水土保持*, 2021(12): 44-46.
- WANG Jiabin, CUI Yanchen, ZHANG Qingyu, et al. Research on theoretical basis in the field of ecological environment[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(12): 44-46. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王伟, 陈杨, 庄晓晖, 等. 极端降雨条件下秸秆覆盖坡面水流流速空间分布[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(2): 149-156.
- WANG Wei, CHEN YANG, ZHUANG Xiaohui, et al. Spatial distribution of overland flow velocity along straw-mulched slope under extreme rainfall[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(2): 149-156. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张楚, 王淼, 张宇, 等. 切根与施有机肥对羊草草甸草原打草场地上生物量与土壤养分的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(1): 220-228.
- ZHANG Chu, WANG Miao, ZHANG Yu, et al. Effects of root cutting and organic fertilizer application on aboveground biomass and soil nutrients in the mowing grassland of *Leymus chinensis* meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 220-228. (in Chinese with English abstract)
- [28] ANJA H, MARTIN S, HANNAH A, et al. Estimating the temporal heterogeneity of mowing events on grassland for haymilk-production using sentinel-2 and greenness-index [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2023, 100157(4): 1-10.
- [29] 岳丽楠, 师尚礼, 祁娟, 等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(11): 2583-2590.
- YUE Linan, SHI Shangli, QI Juan, et al. Effects of no-tillage reseeding on productivity and nutritional quality of degraded grassland in northern China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(11): 2583-2590. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李春玥, 马飞, 杨高文, 等. 接种 AMF 替代磷肥促进退化草地黄花苜蓿的补播建植[J]. *草地学报*, 2022, 30(10): 2541-2548.
- LI Chunyue, MA Fei, YANG Gaowen, et al. AMF inoculation instead of phosphorus fertilizer promotes the establishment of reseeded *medicago falcate* in degraded grasslands[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10): 2541-2548. (in Chinese with English abstract)
- [31] 谢开云, 孙伶俐, 张力文, 等. 菌根真菌和根瘤菌接种对紫花苜蓿和无芒雀麦混播牧草生物量的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(1): 182-188.
- XIE Kaiyun, SUN Lingli, ZHANG Liwen, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium inoculation on the biomass of alfalfa and smooth brome in mixed culture[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(1): 182-188. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李娜, 唐士明, 郭建英, 等. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的 meta 分析[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(9): 1256-1269.
- LI Na, TANG Shiming, GUO Jianying, et al. Meta-analysis of effects of grazing on plant community properties in Nei Mongol grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(9): 1256-1269. (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨可, 袁帅, 武晓东, 等. 不同利用方式荒漠区草地鼠害防治的危害阈值和经济阈值[J]. *草业学报*, 2022, 31(11): 36-47.
- YANG Ke, YUAN Shuai, WU Xiaodong, et al. Harmful and economic thresholds for rodent pests in the Alxa desert area under different grassland utilization patterns[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 36-47. (in Chinese with English abstract)
- [34] 兰玉彬, 单常峰, 王庆雨, 等. 不同喷雾助剂在植保无人机喷施作业中对雾滴沉积特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 31-38.
- LAN Yubin, SHAN Changfeng, WANG Qingyu, et al. Effects of different spray additives on droplet deposition characteristics during plant protection UAV spraying operations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 31-38. (in Chinese with English abstract)
- [35] 苏华, 许宏, 苏本营, 等. 养分添加对退化草地豆科植物草木犀功能性状的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(9): 926-938.
- SU Hua, XU Hong, SU Benying, et al. Effects of nutrient addition on the functional traits of melilotus officinalis growing in degraded grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(9): 926-938. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杜桂林, 赵海龙, 马崇勇, 等. 内蒙古草原牧鸡治蝗效果[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(2): 295-300.
- DU Guilin, ZHAO Hailong, MA Chongyong, et al. Use of herding chicken for control of locust in inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35(2): 295-300. (in Chinese with English abstract)
- [37] XU H, SU H, SU B, et al. Restoring the degraded grassland and improving sustainability of grassland ecosystem through chicken farming: A case study in northern China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 186(2): 115-123.
- [38] 曾文, 邓继忠, 高启超, 等. 用 P20 型植保无人机减量施药

- 防治稻纵卷叶螟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 53-59.
- ZENG Wen, DENG Jizhong, GAO Qichao, et al. P20 plant protection UAV to control *cnaphalocrocis medinalis* by reduced pesticide application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(15): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王昌陵, 何雄奎, 曾爱军, 等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 56-66.
- WANG Changling, HE Xiongkui, ZENG Aijun, et al. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 56-66. (in Chinese with English abstract)
- [40] 董轲, 丁新峰, 郝广, 等. 围封年限对内蒙古灌丛化草原小叶锦鸡儿灌丛结构及群落种间关联的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5775-5781.
- DONG Ke, DING Xinfeng, HAO Guang, et al. Effects of enclosure period on population structure of *Caragana microphylla* and interspecific associations in the Inner Mongolia shrub-encroached grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5775-5781. (in Chinese with English abstract)
- [41] 南万璐, 谢应忠, 彭文栋, 等. 补播与围封对不同退化程度荒漠草地植被的恢复效果[EB/OL]. 草业科学, [2024-03-22]http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20240314.1307.002.html, 2024:1-15.
- NAN Wanlu, XIE Yingzhong, PENG Wendong, et al. Restored effects of reseeding and enclosure on vegetation of different degraded desert steppes[EB/OL]. Pratacultural Science, [2024-03-22] http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20240314.1307.002.html, 2024: 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [42] ASKARI S M, HOLDEN M N. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management [J]. Geoderma, 2014, 4(13): 131-142.
- [43] 全国草原综合植被盖度达到 56.1%. 中华人民共和国中央人民政府网[EB/OL].(2021-07-19)[2023-08-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-07/19/content_5625861.htm.
- [44] 中华人民共和国农业农村部. 草原围栏建设技术规程: NY/T 1237-2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [45] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 不同年限的草方格沙障对生态恢复的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 10-15.
- ZHANG Shuai, DING Guodong, GAO Guanglei, et al. The impact of grass checkered sand barriers of different years on ecological restoration[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 10-15. (in Chinese with English abstract)
- [46] 王茂林, 宋玲, 刘杰, 等. 双排尼龙阻沙网-草方格联合沙障防风效应的风洞实验[J/OL][J/OL]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 9-17.
- WANG Maolin, SONG Ling, LIU Jie, et al. Wind tunnel experiment on windproof effect of double-row nylon sand-blocking net-grass square combination[J]. Journal of Desert Research, 2024(3): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [47] 胡恩锴, 陈承杰, 兰斐, 等. 一种手扶式草方格沙障铺设机的设计研究[J]. 机电信息, 2022(9): 45-48.
- HU Enkai, CHEN Chengjie, LAN Fei, et al. Design and research of a handheld grass grid sand barrier laying machine[J]. Electromechanical Information, 2022(9): 45-48. (in Chinese with English abstract)
- [48] 林子钧, 尤德安, 廖滔, 等. 基于 GNSS+IMU 的草方格固沙机自动巡航控制系统[J]. 农机化研究, 2024, 46(5): 37-44.
- LIN Zijun, YOU De'an, LIAO Tao, et al. Automatic cruise control system for grass grid sand fixer based on GNSS+IMU[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(5): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [49] 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 searifier for grassland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [50] SHAH S B, MILLER T J, BASDEN. Mechanical aeration and liquid dairy manure application impacts on grassland runoff water quality and yield[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 777 - 788.
- [51] 王德成, 尤泳, 贺长彬. 草地修复与改良机械化技术态势[J]. 林业和草原机械, 2020, 1(1): 13-20.
- WANG Decheng, YOU Yong, HE Changbin. Technical situation of mechanization for grassland restoration and improvement[J]. Forestry and grassland machinery, 2020, 1(1): 13-20. (in Chinese with English abstract)
- [52] 宋孝玉, 刘雨, 覃琳, 等. 内蒙古鄂托克旗天然草地植被生态需水量研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 107-115.
- SONG Xiaoyu, LIU Yu, QIN Lin, et al. Ecological water requirement of natural grassland vegetation in the Otog Banner of inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(3): 107-115. (in Chinese with English abstract)
- [53] 孙文峰, 王艳花, 王腾, 等. 滚移式喷灌机喷头优选及水力性能优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 99-106.
- SUN Wenfeng, WANG Yanhua, WANG Teng, et al. Spray head selection and hydraulic performance optimization of roll wheel line move sprinkling irrigation machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 99-106. (in Chinese with English abstract).

- [54] 林学吉, 严海军, 惠鑫, 等. 卷盘式喷灌机灌溉施肥计算模型与综合评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 53-59.
LIN Xueji, YAN Haijun, HUI Xin, et al. Irrigation fertilization model and comprehensive evaluation system for a hose-reel sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(21): 53-59. (in Chinese with English abstract).
- [55] COURTRIGIT B. Prime mover for and in wheel-line irrigation apparatus: US3848625 A[P]. 1974.
- [56] WILLIAMS L H. Automatic pipeline straightener and sprinkler head leveler for sprinkler irrigation systems, US 3658248 A[P]. 1972.
- [57] 陈震, 段福义, 范永申, 等. 喷灌机全喷洒域与叠加域水量分布特性的静态模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 104-111.
CHEN Zhen, DUAN Fuyi, FAN Yongshen, et al. Static simulation on water distribution characteristics of overlap area and whole spraying area for sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 104-111. (in Chinese with English abstract).
- [58] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 农业灌溉设备中心支轴式和平移式喷灌机水量分布均匀度的测定: GB/T 19797-2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [59] 孟令刚, 范松涛, 周燕. 基于领航-跟随结构的大型喷灌机协同导航控制方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 12-22.
MENG Linggang, FAN Songtao, ZHOU Yan. Collaborative navigation control method for large-scale sprinkler irrigation machine based on leader-followers structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 12-22. (in Chinese with English abstract)
- [60] 莫锦秋, 黄小林, 李文涛, 等. 基于 PWM 技术的大型变量喷灌机整机水力性能研究及优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 76-85.
MO Jinqiu, HUANG Xiaolin, LI Wentao, et al. Research and optimization of hydraulic characteristics of large-scale variable sprinkler irrigation machine based on PWM technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 76-85. (in Chinese with English abstract)
- [61] 张晓敏, 朱德兰, 葛茂生, 等. 轻小型平移式喷灌机低压末端喷头改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 75-82.
ZHANG Xiaomin, ZHU Delan, GE Maosheng, et al. Improved design and testing of the low-pressure end sprinkler nozzles for light and small pan irrigation sprinklers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 75-82. (in Chinese with English abstract)
- [62] 鹿海员, 李和平, 高占义, 等. 基于草原生态保护的牧区水土资源配置模式[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 123-130.
LU Haiyuan, LI Heping, GAO Zhanyi, et al. Water and land resources allocation model of pastoral area based on grassland ecological conservation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(23): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- [63] 汪精海, 李广, 银敏华, 等. 调亏灌溉对高寒荒漠区人工混播草地土壤环境与牧草生长的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 95-106.
WANG Jinghai, LI Guang, YIN Minhua, et al. Effects of regulated deficit irrigation on soil environment and grass growth of artificial mixed grassland in high cold desert regions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(1): 95-106. (in Chinese with English abstract)
- [64] KOU D, SU D R, WU D, LI Y. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 116-123.
- [65] 王振华, 韩美琪, 宋利兵, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花生长与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 108-116.
WANG Zhenhua, HAN Meiqi, SONG Libing, et al. Effects of aeration on the growth and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in the dry areas of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(14): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [66] 刘露, 侯鹏, 刘泽元, 等. 适用于黄河水滴灌的灌水器筛选研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 99-107.
LIU Lu, HOU Peng, LIU Zeyuan, et al. Selection of suitable drip-emitters for Yellow River water drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(6): 99-107. (in Chinese with English abstract)
- [67] 方玉凤, 曹志伟, 孙洪升, 等. 施肥和补播互作对松嫩平原退化草地产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 167-174.
FANG Yufeng, CAO Zhiwei, SUN Hongsheng, et al. The effect of fertilization and supplementary sowing on the yield and quality of degraded grasslands in the Songnen Plain[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(6): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- [68] KAROLINA K, STANISLAW S. Effect of cattle liquid manure fertilization on the yield of grassland and density of soil oribatid mites (Acari, Oribatida)[J]. Biological Letters, 2011, 48(1): 13-18.
- [69] RYAN D, KARPINSKA A, FORRESTAL P J, et al. The impact of bio-based fertilizer integration into conventional grassland fertilization programmes on soil bacterial, fungal,

- and nematode communities[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022(6): 1-17.
- [70] RUOYI N, HAO D, SHUWEN B, et al. Effects of root cutting on morphological characteristics and endogenous hormone levels of quercus variabilis seedlings[J]. *International Journal of Experimental Botany*, 2023, 92(10): 2907-2920.
- [71] WENJING N, WENPING L, WEN P, et al. Effects of decapitation and root cutting on phytoremediation efficiency of celosia argentea[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 21(5): 112162-112163.
- [72] 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 of Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 79-89. (in Chinese with English abstract)
- [73] 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 of Agricultural Machinery*, 2011, 42(10): 61-67. (in Chinese with English abstract)
- [74] 梁方, 王德成, 尤泳, 等. 草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(1): 231-241.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(1): 231-241. (in Chinese with English abstract)
- [75] 尤泳, 贺长彬, 王德成, 等. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 50-58.
YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 50-58. (in Chinese with English abstract)
- [76] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 86-95, 144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeding in perennial alfalfa field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 86-95, 144. (in Chinese with English abstract)
- [77] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 70-78.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 70-78. (in Chinese with English abstract)
- [78] 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 relation 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 with English abstract)
- [79] 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 with English abstract)
- [80] 刘琼, 乌仁其其格, 席青虎, 等. 切根与肥力调控对退化羊草草甸草原植被改良效果研究[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(10): 18-28.
LIU Qiong, WURENQQIGE, XI Qinghu, et al. Study on the effects of root cutting and fertilizer regulation on vegetation improvement in degraded leymus chinensis meadow steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(10): 18-28. (in Chinese with English abstract)
- [81] AGUILAR S, MONTIEL C. The challenge of applying governance and sustainable development to wildland fire management in Southern Europe[J]. *Journal of Forestry Research*, 2011, 22(4): 627-639.
- [82] ALCANIZ M, OUTEIRO L, FRANCO S, et al. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgri Massif, Catalonia, Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572(3): 1329-1355.
- [83] MACDOUGALL A S, MCCANN K S, GELLNER G, et al. Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse[J]. *Nature*, 2013, 494(7): 86-89.
- [84] NELSON M, HOSLER S C, BOETZL F A, et al. Reintroduced Grazers and prescribed fire effects on beetle assemblage structure and function in restored grasslands[J]. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 2021, 31(1): 1-13.
- [85] MORGAN W J, SALMON L K. Dominant C₃ tussock grasses are resilient to the reintroduction of fire in long-unburned temperate grasslands[J]. *Applied Vegetation Science*, 2020, 23(2): 149-158.
- [86] 郭文磊, 冯莉, 田兴山. 火焰灭草技术在果园中的应用效果[J]. *杂草学报*, 2019, 37(2): 35-39.
GUO Wenlei, FENG Li, TIAN Xingshan. Effect of flame

- weeding in orchards[J]. Journal of Weed Science, 2019, 37(2): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [87] GOODALL J V. Weeds and fire: the good, the bad and the ugly[J]. FarmBiz, 2019, 5(12): 29-31.
- [88] DAS A, KUMAR M, RAMKRUSHNA G, et al. Weed management in maize under rainfed organic farming system[J]. *Indian Journal of Weed Science*, 2016, 48(2): 168-172.
- [89] 要振宇. 中国羊草 (*Leymus chinensis*) 群落的分布、类型及其地上生产力的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. YAO Zhenyu. Study on the distribution, type and aboveground productivity of *Leymus chinensis* communities in china [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [90] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 133-140. LIANG Yao, CAI Hongguang, YANG Li, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 133-140. (in Chinese with English abstract).
- [91] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 等. 秸秆覆盖和滴灌制度对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 162-169. ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Effects of straw mulching and drip irrigation scheduling on photosynthetic characteristic and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 162-169. (in Chinese with English abstract)
- [92] 刘肖, 胡国庆, 何红波, 等. 连年秸秆覆盖对玉米产量及土壤微生物残体碳积累的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 117-122. LIU Xiao, HU Guoqing, HE Hongbo, et al. Effects of long-term maize stovers mulching on maize yield and microbial necromass carbon accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 117-122. (in Chinese with English abstract)
- [93] ZHOU Y, MA H, XIE Y, et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118(5): 1-10.
- [94] 徐晓莹, 沈有信, 袁闯, 等. 昭通南方草地本地物种群落特征对耕耙与补播处理的响应[J]. 草地学报, 2023, 31(8): 2481-2489. XU Xiaoying, SHEN Youxin, YUAN Chuang, et al. The response of local species community characteristics to tillage and replanting treatments in southern grasslands of Zhaotong[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(8): 2481-2489. (in Chinese with English abstract)
- [95] 张英俊, 周冀琼, 杨高文, 等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报, 2020, 65(16): 1546-1555. YUE Linan, SHI Shangli, QI Juan, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1546-1555. (in Chinese with English abstract)
- [96] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 138-147. ZHANG Qingsong, ZHANG Kai, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 138-147. (in Chinese with English abstract)
- [97] 何伟灼, 刘威, 姜锐, 等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 51-61. HE Weizhuo, LIU Wei, JIANG Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- [98] 刘敏, 侯占峰, 马学杰, 等. 基于离散元的紫花苜蓿种子仿真参数标定与试验[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(6): 168-175. LIU Min, HOU Zhanfeng, MA Xuejie, et al. Calibration and test of alfalfa seed simulation parameters based on discrete element[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 168-175. (in Chinese with English abstract)
- [99] 任丽, 李高攀, 谌赛男, 等. 钩吻炮制减毒存效的物质基础分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(3): 117-124. REN Li, LI Gaopan, CHEN Sainan, et al. Analysis of the material basis of the effect of processing *Gelsemium elegans* on reducing toxicity[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2020, 26(3): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [100] 赵建柱, 宗玉峰, 王枫辰, 等. 雷达识别狼毒草喷药灭除装置[J]. 农业机械学报, 2014, 45(Z1): 68-72. ZHAO Jianzhu, ZONG Yufeng, WANG Fengchen, et al. Radar Identification of *Stellera chamaejasme* Spraying Device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Z1): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [101] 胡炼, 刘海龙, 何杰, 等. 智能除草机器人研究现状与展望[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 34-42. HU Lian, LIU Hailong, HE Jie, et al. Research progress and prospect of intelligent weeding robot[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [102] 张良安, 唐锴, 赵永杰, 等. 四足激光除草机器人腿部结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 7-15. ZHANG Liang'an, TANG Kai, ZHAO Yongjie, et al.

- Optimization of leg structure parameter of quadruped laser weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 7-15. (in Chinese with English abstract)
- [103] BAKKER T, VAN ASSELT K, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a suga beet field[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 357-368.
- [104] PRETTO A, ARAVECCHIA S, BURGARD W, et al. Building an aerial-ground robotics system for precision farming: An adaptable solution[J]. *IEEE*, 2021, 28(3): 29-49.

Review of the improvement techniques and equipment development for degraded grasslands

WANG Dewei^{1,2}, YOU Yong¹, ZHANG Xuening¹, WANG Xufeng², WANG Decheng^{1*}

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

Abstract: More than 90% of grasslands in China are in a state of degradation or ongoing degradation. Some difficulties have posed on the sustainable supply and feed of animal husbandry. At the same time, the ever-increasing degree of ecological environment damage has seriously threatened sustainable animal husbandry and ecological environment. Therefore, it is crucial to improve the degraded grasslands at present. However, there is a great research gap among scientific theory, practice, technology, and machinery of grassland improvement in China. The overall promotion can be limited in the grassland improvement. In this review, 24 common technologies were summarized and then classified for grassland improvement. The characteristics and applicable conditions were given for the different technologies. A systematic analysis was implemented on the grassland improvement techniques. A classification framework was then established for a comprehensive process pipeline of grassland improvement. Four types of degraded grassland improvement were proposed, including less damage and improvement (improvement type I), the optimal growth environment of forage (improvement type II), the promoting development and improvement of forage (improvement type III), and the changing biological community and improvement (improvement type IV). The improvement techniques, processes, and machinery were analyzed within the framework of the four types of grassland improvement. The research and development direction of machinery and equipment were proposed after that. Four aspects were further determined in grassland improvement, including the intensive protection of grassland, the mechanized process of degraded grasslands, the new types of improvement machinery, as well as decision-making on grassland protection and improvement. The synergistic effect of these four aspects can bring positive promotion to the improvement of degraded grasslands. Since the current situation of grassland degradation cannot be fully curbed, the following work should be focused on the future grassland protection and mechanized improvement of degraded grasslands. 1) To strengthen grassland protection, the prevention of grassland degradation in the path of combining grass and land. 2) In grassland improvement, the existing no-till live broadcast can be optimized to develop compound machinery. 3) In grassland mechanization, the fundamental research should be strengthened for the technical improvement machinery, in order to fully leverage the technological advantages. 4) Grassland protection and improvement policies support and technical guidance to grassroots should be strengthened to enhance their enthusiasm for grassland protection and improvement. The technology schemes of degraded grassland improvement, machinery selection, and relevant policies can provide a strong reference for the research and development of grassland improvement machinery and equipment.

Keywords: degeneration; husbandry; grassland; degradation repair; technical analysis; technological process; forage machine