

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.001

# 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析

戴飞<sup>1</sup> 赵武云<sup>1</sup> 张锋伟<sup>1</sup> 马海军<sup>2</sup> 辛尚龙<sup>1</sup> 马明义<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 定西 730500;

3. 甘肃省农用动力机械工程技术研究中心, 定西 730500)

**摘要:** 全膜双垄沟播技术抗旱增产,在我国西北旱区大面积推广应用,实现与提升其全程机械化作业水平主要包括对覆膜种床构建、膜上播种、残膜回收及种植作物收获技术与配套机具的研究。在分析西北旱区全膜双垄沟播技术应用概况、技术模式和实施效应的基础上,重点阐述了全膜双垄沟相关机械化起垄覆膜、膜上精量播种、种植作物收获及残膜回收关键技术特点及典型机具。结合实际生产应用中出现的问题与需求,在分析归纳现阶段全膜双垄沟播技术农艺、农机存在问题的基础上,从加强全膜双垄沟播技术农机农艺融合、持续开展基础研究与配套机具性能优化、创建全膜双垄沟全程机械化技术体系等方面展望了未来研究方向。提出研发经济高效全膜双垄沟全程机械化作业装备和农机农艺深度融合是创建全膜双垄沟全程机械化技术体系的关键,也是进一步形成科学合理的全膜双垄沟播技术,实现全膜双垄沟生产系统高效、节本增效的发展方向。

**关键词:** 全膜双垄沟播; 种床构建; 膜上播种; 对行收获; 残膜回收

**中图分类号:** S226.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0001-16

## Research Progress Analysis of Furrow Sowing with Whole Plastic-film Mulching on Double Ridges Technology and Machine in Northwest Rainfed Area

DAI Fei<sup>1</sup> ZHAO Wuyun<sup>1</sup> ZHANG Fengwei<sup>1</sup> MA Haijun<sup>2</sup> XIN Shanglong<sup>1</sup> MA Mingyi<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi 730500, China

3. Gansu Province Agricultural Power Mechanical Engineering Technology Research Center, Dingxi 730500, China)

**Abstract:** The furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges has been widely used in the arid region of northwest China, because it can resist drought and increase production. It is an inevitable trend to realize and improve the whole mechanized operation level. It is mainly reflected in the research on the construction of covered film seedbed, sowing on the film, residual film recovery and harvesting crop technology and supporting equipment. Based on the analysis of adoption, technical modes and application benefits of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges, the correlative key mechanization technical characteristics of ridging and covering film, precision sowing on film, harvesting crop and residual film recovery and representative typical machine of whole plastic-film mulching on double ridges were reviewed. Combined with the problems and demands in actual production and application of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges in China, on the basis of analyzing and summarizing the existing problems of agronomy and agricultural machinery, and future research emphasis and development direction were provided as following aspects: combination of agricultural machine with agronomy under furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges, continuing to strengthen basic research and supporting machine performance optimization, and forming full mechanization technical system of whole plastic-film mulching on double ridges. It was

收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2019-04-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51775115, 51405086)、现代农业产业技术体系专项(CARS-14-1-28)和甘肃省科技重大专项(18ZD2NJ021)

**作者简介:** 戴飞(1987—),男,副教授,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

**通信作者:** 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

suggested that the key to form full mechanization technical system of whole plastic-film mulching on double ridges were development of economic and efficient full mechanization equipment and combination of depth of agricultural machine with agronomy. It was also a scientific and reasonable technology of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges, to realize the development direction of its production system with cost saving and efficiency increasing.

**Key words:** furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges; seedbed construction; sowing on film mulch; line to harvest; residual film recycling

## 0 引言

水资源短缺、作物产量低而不稳是世界旱地农业面临的共同难题。在黄土高原为典型代表的中国雨养农业区,年降雨量在 300 ~ 550 mm 之间,降雨时空分布相对不均,与作物需水期之间出现严重供需错位,是制约该地区粮食生产安全和社会经济发展的主要因素<sup>[1-2]</sup>。如何充分、高效利用天然降雨,确保粮食生产安全和农田生态系统可持续性为长期以来难以破解的理论难题和实践难题,解决问题的关键途径是研发和推广高效、低廉的旱作栽培技术<sup>[3]</sup>。根据农业部《全国种植业结构调整规划(2016—2020年)》的有关要求,西北地区应稳夏优秋,以推广覆膜技术为载体,顺应天时、趋利避害,稳定小麦等夏熟作物,积极发展马铃薯、春小麦、杂粮杂豆,因地制宜发展青贮玉米、苜蓿、饲用油菜、饲用燕麦等饲草作物。过去的30年里,田间微集雨技术逐渐发展成为黄土高原雨养农业区的主要耕作技术。自20世纪80年代以来,不同田间微集雨及覆盖(地膜、砂石和秸秆)栽培技术在西北旱区不断更新换代,先后经历了垄沟无覆盖技术、平地覆盖技术、垄沟半覆盖技术和垄沟全覆盖技术等研究与发展过程,特别是全膜覆盖双垄沟播技术的大面积推广和应用,为西北旱区粮食单产大幅度提高、稳产增产提供了强大的技术支撑<sup>[3-6]</sup>。

在黄土高原雨养农业区,多年高强度的耕作、降水时空分布不均衡导致土壤肥力衰退,土地承载力下降,全膜双垄沟播技术在一定程度上改善了旱作农田土壤水分环境与增产节水的需求,在旱地农业的生产中发挥着至关重要的作用<sup>[7-8]</sup>。近年来,随着全膜双垄沟播技术在西北旱区推广应用面积的不断增大,实现全膜双垄沟播全程机械化作业已成为必然趋势,推广生产全程机械化作业技术将是推进现代旱作农业发展进程的重要举措。因此,本文在分析全膜双垄沟播技术各生产环节概况的基础上,阐述归纳起垄覆膜、膜上播种、残膜回收、机械化收获等主要技术与机具的研究进展及存在问题,分析各项技术相关原理、作业特点及配套典型机具,并展望全膜双垄沟播技术的发展趋势。

## 1 全膜双垄沟播技术概况

### 1.1 全膜双垄沟播技术应用面积

“蓄住天上水、保住地里墒”,全膜覆盖双垄沟播技术是近年来我国西北旱作农业发展的一项突破性技术(如图1所示),是针对玉米、马铃薯种植提出的,能很好适应大豆、高粱、胡麻及特色杂粮作物高密度种植<sup>[9-15]</sup>。生产实践证明,全膜覆盖双垄沟播技术比普通地膜覆盖栽培单产增幅超过近30%<sup>[16-17]</sup>,使得该项农艺技术近年来的推广应用面积一直在稳步上升。

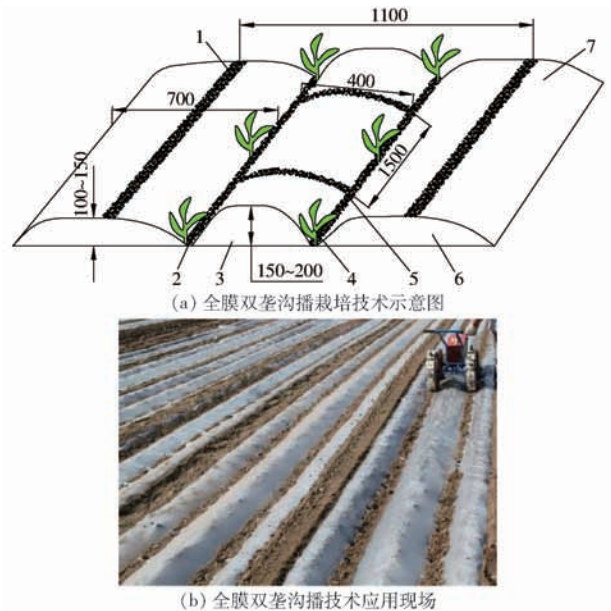


图1 玉米全膜双垄沟播栽培技术示意图

Fig. 1 Technical diagram of corn furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges

1. 中心覆膜土带(两幅地膜接缝处)
2. 垄沟覆土带(播种株距控制在300~400mm)
3. 小垄垄体
4. 沟播作物
5. 覆土横腰带(防止大风揭膜,拦截降雨径流)
6. 大垄垄体
7. 覆盖地膜(厚度大于等于0.01mm)

自2003年至今,西北旱区全膜覆盖双垄沟播技术的推广应用面积逐年增加,2017年仅甘肃省示范推广面积就达到 $1.07 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>以上,宁夏回族自治区示范推广面积超过 $1.3 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,陕北地区(榆林、延安)示范推广面积超过 $5.6 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,同时在青海省、内蒙古自治区等地皆进行了较大面积应用<sup>[18-19]</sup>,并尝试在巴基斯坦、肯尼亚等国家半干旱

地区进行相关栽培系统生产能力实验<sup>[20]</sup>。目前,甘肃省是西北地区全膜双垄沟播技术应用面积最大的省份,根据甘肃省农业技术推广总站统计,近10年来每年的平均推广面积保持在 $8.87 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以上;其中,从2014年开始每年的应用面积均超过 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,如图2所示。

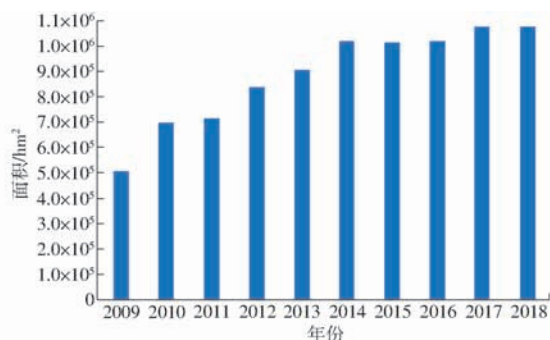


图2 甘肃省近10年全膜双垄沟播技术应用面积

Fig. 2 Application area of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology in Gansu Province in recent 10 years

表1 全膜双垄沟播典型技术模式

Tab. 1 Typical technical pattern of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges

技术模式	特点
全膜双垄沟播 <sup>[25-26]</sup>	当年秋覆膜(10月初至11月中旬)或来年顶凌覆膜(早春3月上旬),采用人工或机械化起垄铺膜,选用厚度为0.01 mm、宽度为1 200 mm地膜,小垄宽400 mm,小垄高150~200 mm,大垄宽700 mm,大垄高100~150 mm,翌年垄沟内人工或机械化穴播
全膜双垄沟播+休闲期免耕 <sup>[27]</sup>	按照全膜双垄沟播模式作业,待前茬人工或机械化收获后,清除全部秸秆,保留并管护好地膜,翌年旧膜直接人工或机械化穴播
全膜双垄沟播+休闲期秸秆覆盖 <sup>[27]</sup>	按照全膜双垄沟播模式作业,待前茬人工收获后,收割秸秆并与播种带平行覆盖于膜面上,翌年播种前清除秸秆后,直接人工或机械化穴播
全膜双垄沟播+休闲期留秸秆立茬 <sup>[27]</sup>	按照全膜双垄沟播模式作业,待前茬人工收获后,保留秸秆直立田间地表,翌年播种前将秸秆清除后直接人工或机械化穴播

## 2 全膜双垄沟播技术与机具现状

全膜双垄沟播技术实施时需要先完成大小双垄种床起垄、覆膜-覆土,随后在小垄垄沟内实现播种;同时,待种植作物成熟后进行机械化收获,并在后期开展残膜回收作业。其中,双垄覆膜种床构建质量是保障全膜双垄沟播技术的基础,覆膜-覆土质量的稳定性与可靠性直接关系到全膜双垄沟播实施效应<sup>[28]</sup>;膜上播种作业是引起种床膜面失效与产量效应的关键技术,因此缓解成穴器撕膜挑膜现象是顺利实施机械化沟播的前提<sup>[29]</sup>;融合该农艺技术的机械化收获是提高收割过程对行、玉米籽粒损失率低所采取的有效措施<sup>[30]</sup>;而残膜回收则是维护全膜双垄沟播技术可持续推广应用的重要保障<sup>[31]</sup>。

### 2.1 起垄覆膜技术与机具

“覆盖抑蒸、膜面集雨”是全膜双垄沟播农艺技术的重要功能,主要依靠起垄、覆膜-覆土关键作业

### 1.2 全膜双垄沟播技术实施效应

推广应用全膜双垄沟播技术是西北旱区实现高效节水、作物增产的关键措施与重要途径。全膜双垄沟播技术集覆盖抑蒸、膜面集雨、垄沟种植功能于一体,应用覆膜双垄产流、沟内集流原理,最大限度保蓄自然降水,使农田地面蒸发降到最低,特别是将小于5 mm的无效自然降水转化为有效水分贮存于土壤并集中入渗于作物根部,使得平均集水效率达到90%以上;且从时间和空间上缓解了西北旱区作物需水期与雨水供给期的错位,确保在干旱和正常年份均能显著提高水分利用效率<sup>[21-23]</sup>。同时大小双垄覆膜种床增加了地膜有效采光面积,解决了西部干旱地区温度供需矛盾,在保证作物产量稳定性的基础上进一步提升水热运移效应,最终实现集雨、保墒、抗旱、增产功效<sup>[24]</sup>。目前,不同地区针对不同的农业生态环境及作物形成了与全膜双垄沟播技术相适宜的耕作栽培技术模式,如表1所示。

环节实现,是挖掘降水利用潜力和创建高产田的有效途径<sup>[32-34]</sup>。首先沟垄集雨种植建立的垄沟产流、集水、蓄墒系统,改善了土壤水分生态环境,能够使降水通过垄面产生的径流首先抵达沟侧,然后通过侧渗逐渐向沟中央汇集,并同时向垄下扩渗,同时通过重力作用向深层土壤下渗,使降雨得到有效蓄存,在农田内部实现作物在时空上对水分的有效调控利用,提升旱作区作物的生产能力<sup>[35-36]</sup>。全膜双垄沟起垄、覆膜-覆土环节农艺要求较为特殊和复杂<sup>[37]</sup>,首先需构建大垄垄体(结构为宽700 mm、高100~150 mm)与小垄垄体(结构为宽400 mm、高150~200 mm)相间的异形垄体覆膜种床;其次以小垄垄体为中心基准,铺设宽度为1 200 mm的白(黑)色地膜(厚度为0.01 mm),即用整幅地膜覆盖小垄整体及其两侧垄沟,且分别均等向两侧各1/2大垄垄体延伸进行覆膜作业,并同时完成两侧膜边、垄沟内的覆土镇压。当下一组小垄垄体覆膜作业时,其左侧

1/2 大垄垄体覆土膜边正好与上一组右侧大垄垄体覆土膜边对接,并在中心覆膜土带的连接下完成大垄垄体的全膜覆盖,整幅地膜所覆盖双垄底部总体宽度约为 1 100 mm,覆盖经历了由垄到沟、沿沟至垄的双重跨越<sup>[38-40]</sup>。

针对上述双垄覆膜种床构建的特殊要求,按照应用配套动力与作业形式,全膜双垄沟起垄覆膜机

主要分为简易式起垄覆膜机和联合作业式起垄覆膜机 2 种。其中,简易式起垄覆膜机挂接动力要求低,没有旋耕整地功能,覆土作业主要依靠犁铧曲面翻土完成,适宜于小地块作业;而联合作业起垄覆膜机能够一次性完成整地、起垄、覆膜、覆土、喷药等多项工序,机械化程度高,适宜于较大的平整地块作业。部分典型的全膜双垄沟起垄覆膜机具如表 2 所示。

表 2 全膜双垄沟起垄覆膜典型机具

Tab. 2 Typical machines for ridging and plastic-film mulching with whole plastic-film mulching on double ridges

名称	类型	总体结构	技术特点
1MLQ-40/70B 型机引起垄铺膜机 <sup>[41]</sup>	简易式		采用三点悬挂形式,可完成小垄垄体、左右各 1/2 大垄垄体起垄覆膜及大垄中心覆土作业,垄沟施肥作业,配套动力 22.1 ~ 29.4 kW,作业幅宽 1 100 mm
圆盘式全膜双垄沟铺膜机 <sup>[42]</sup>	简易式		采用三点悬挂形式,可完成小垄垄体、左右各 1/2 大垄垄体起垄覆膜及大垄中心覆土作业,垄沟土带由人工辅助完成,配套动力 22.1 ~ 29.4 kW,作业幅宽 1 100 mm
1MLQ-40/70 型全膜双垄沟起垄铺膜喷药联合作业机 <sup>[25]</sup>	联合作业式		采用三点悬挂形式,可完成旋耕整地,小垄垄体、左右各 1/2 大垄垄体起垄覆膜,大垄中心、垄沟覆土作业,垄体喷药,垄沟施肥,配套动力 22.1 ~ 29.4 kW,作业幅宽 1 100 mm
双垄沟自动上土铺膜机 <sup>[43]</sup>	联合作业式		采用三点悬挂形式,可完成旋耕整地,旋耕提土,小垄垄体、左右各 1/2 大垄垄体起垄覆膜,大垄中心、垄沟覆土作业,垄体喷药,垄沟施肥,配套动力 22.1 ~ 29.4 kW,作业幅宽 1 100 mm
横腰带覆土式全膜双垄沟覆膜联合作业机 <sup>[44]</sup>	联合作业式		采用三点悬挂形式,可完成旋耕整地,小垄垄体、左右各 1/2 大垄垄体起垄覆膜,大垄中心、垄沟覆土作业,垄体喷药,垄沟施肥垄沟打渗水孔,小垄垄体横向覆土,配套动力 22.1 ~ 29.4 kW,作业幅宽 1 100 mm
2M-2XP 型旋耕双幅覆膜联合作业机 <sup>[45]</sup>	联合作业式		采用三点悬挂形式,可完成旋耕整地,小垄垄体、大垄垄体起垄覆膜,大垄中心、垄沟覆土作业,垄体喷药,垄沟施肥,垄沟打渗水孔,小垄垄体横向覆土作业,配套动力 66.2 ~ 88.2 kW,作业幅宽 2 200 mm

地膜覆盖农机装备的研发主要结合不同地域气候条件、种植作物品种、农作制及其农艺要求等进行配套设计,在作业机理与动力消耗方面存在较大差异。国外对于作物覆膜机械化栽培技术研究相对成熟,早在 20 世纪 90 年代末已有相关的作业机具出现<sup>[46]</sup>。其中,意大利、美国、以色列、日本等发达国家覆膜机械的工作性能可靠且一体化程度高,如法拉利 FPC 型全自动移栽机、雷纳多 RTME1100 型移

栽机等携有适宜于蔬菜、水果、烟草等相关种床覆膜与膜上栽培的关键机构与部件,能够完成平作宽幅覆膜与膜上移栽,联合作业所需的动力较大<sup>[47]</sup>。近年来,由于国外发达国家免耕技术与保护性耕作技术的大力推广,有关覆膜栽培种植模式与装备研究相对较少,大田地膜覆盖推广应用面积小<sup>[48-49]</sup>,使得覆膜机械及装置主要应用于温室栽培与设施农业,其覆膜-覆土机构所面临的作业地况与农业生产

条件良好,采用地膜厚度均在 0.012 ~ 0.020 mm 之间,在铺设过程中不易出现机械损伤;且主要为抑制种床杂草生长、提高作物出苗积温与种床地温,其种床构建以覆膜平作为主导,覆盖地膜主要在苗期回收,因此,对于覆膜种床铺设作业质量更多关注其膜面的平整一致性<sup>[50-51]</sup>。国内地膜覆盖农机装备的研发、应用与国外有所不同,在充分考虑抑制杂草和采光增温的前提下,还需兼顾覆膜种床膜面集雨(蓄水)与覆盖抑蒸(保墒)功能,目前主要开展了有关棉花、水稻、花生、马铃薯、玉米等作物的覆膜种植与移栽装备研究<sup>[52-58]</sup>。异形双垄起垄覆膜技术是全膜双垄沟播技术的重要组成部分,传统起垄、覆膜-覆土机构目前主要存在农艺农机不融合,双垄垄体耕作成型、覆膜-覆土质量低,覆膜种床拦截降雨径流效果不理想等问题,相关学者针对这些问题开展了研究。为降低采光面地膜机械破损率,应用响应曲面法、正交试验分别对双垄耕作施肥喷药覆膜机、1MLQS-40/70 型起垄全铺膜联合作业机工作参数进行优化<sup>[25,39]</sup>;为提高全膜双垄沟机械化覆土作业过程研究的准确性,对全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数进行仿真标定<sup>[38]</sup>;为解决全膜双垄沟种植马铃薯模式膜上覆土量不足造成的风力破坏、穴孔错位、烧苗等问题,设计一种适用于全膜覆盖铺膜机的膜上覆土装置与马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机<sup>[59-60]</sup>;为进一步提升全膜双垄沟覆膜种床抗风揭膜能力,增强拦截降雨径流效果,设计了横腰带覆土系统与镇压打孔装置等<sup>[44]</sup>。

## 2.2 膜上精量播种技术与机具

覆膜垄沟膜上精量播种是全膜双垄沟播农艺技术的关键作业环节,成穴器与覆膜种床各部位的互动规律、播种质量都将直接影响到全膜覆盖双垄种床生产系统的正常水热运移与产量效应。同时,实现机械化膜上精量播种是大面积推广全膜双垄沟播技术的重要载体和必然选择,将成为农机装备与全膜双垄沟播农艺技术相融合的重要纽带,是实现全膜双垄沟大田作物生产全程机械化的关键环节之一<sup>[61]</sup>。同时,旱地全膜双垄沟机械化技术要求相关播种机具作业时,除满足常规播种性能指标参数外,还必须减少对铺设地膜的损伤,且必须保证播种穴孔与膜孔无错移现象发生,避免后续人工再次放苗,降低劳动作业强度,主要研发能够实现成穴器近似垂直扎穴与复位的零速投种补偿机构以及成穴器强制开启机构,作业机轮胎适宜于覆膜垄沟行走且整机质量轻量化,以确保在播种作业过程中无撕膜挑膜、引起种床采光面地膜破损的现象出现,并在此基础上应尽量提高播种作业效率。相关全膜双垄沟膜

上精量播种典型机具如表 3 所示。

在国外,近年来由于免耕技术与保护性耕作技术的大力推广,以及精密播种技术的发展,美国、澳大利亚、俄罗斯、巴西、赞比亚等国家主要以研究免耕播种机为主<sup>[66-70]</sup>。我国对膜上播种机的研究起步于 20 世纪 80 年代,主要是以铲式、舵轮式及滚轮式穴播机为研究对象。随着农业科学技术与手段的不断创新,国内学者更多侧重于轮式穴播机相关精密播种技术的研究。其中,为实现内置双位投种、缩短投种距离,设计了一种内置式双位投种舵轮式穴播器<sup>[71]</sup>;通过正交试验、回归分析,确定了取种盘吸孔线速度和充种负压对排种性能的影响规律及较优工作参数组合<sup>[72]</sup>;应用力学分析计算与台架试验,采用高速摄像技术对改进型夹持式棉花穴播轮的工作过程进行分析,明确了轮体内棉种的动态运动特性<sup>[73]</sup>;为实现全膜双垄沟玉米精量播种,设计了一种适用于穴播轮的新型勺匙式取种器,得出影响勺匙式取种器性能的主要因素和临界条件<sup>[74]</sup>;为研究铲式玉米精密穴播机播种性能与农田不平度激励产生的振动间的关系,有学者推导了稳态响应与理论粒距关系数学模型<sup>[75]</sup>。

为避免轮式穴播机作业过程中成穴器回转余摆线引起的撕膜挑膜现象,我国于 20 世纪 90 年代初对直插式播种机开展研究,为适应少耕、免耕及地膜覆盖播种作业要求,陈晓光等<sup>[76]</sup>最初提出并研究了直插式播种机基本工作原理与总体结构形式。直至 2018 年相关科研人员分别采用平行四杆机构轨道控制研制了直插式覆膜小麦穴播机<sup>[77]</sup>;结合凸轮-曲柄滑块机构设计了玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机;应用转动导杆机构与正弦机构进行串联,研发了直插式近等速补偿机构<sup>[26]</sup>;开发了由转动导杆机构驱动平行四杆机构的直插式前进速度补偿机构<sup>[65]</sup>;研制了由共轭凸轮、强排-强启排种器为核心工作部件的玉米直插穴播机等<sup>[78]</sup>。相关田间试验表明设计的机具能有效减少覆膜种床扰动,缓解采光面机械破损,降低穴孔错位率。

## 2.3 机械化收获技术与机具

全膜双垄沟播作物机械化收获是实现其全过程机械化的最重要环节之一,目前主要集中于沟播玉米的机械化收获研究方面。全膜双垄沟异形双垄覆膜种床尺寸不一致、种植行距不规则等问题,使得传统多行玉米联合收获机无法实现对行收获。同时,除了西北旱区地块较小、农艺技术不匹配无法使用大型机具外,尽量减少对种床覆盖地膜的损伤、避免粉碎茎秆直接还田所带来的后续残膜回收困难也成了限制现有联合作业机具推广应用的主要原因。为

表3 全膜双垄沟膜上精量播种典型机具

Tab.3 Typical machines for precision sowing on film with whole plastic-film mulching on double ridges

名称	类型	总体结构	技术特点
单筒/双筒手持式点播(施肥)器	手持式		通过人工手持方式进行膜上播种与施肥作业,当为单筒结构时可根据需要盛装种子或肥料,当为双筒结构时可进行种肥分施,排种(肥)器能够按照不同类型进行更换,播种深度30~50 mm,施肥深度80~120 mm
2BY-1型手推式穴播机 <sup>[62]</sup>	手推式		通过人工手推方式进行膜上播种作业,种箱容量3.4 L,轮体直径440 mm,穴距121~425 mm(可调),穴粒数1~3粒(可调),播种深度40~60 mm,播种速度小于等于1.8 km/h
自走式玉米精量穴播机 <sup>[63]</sup>	牵引式		采用微耕机牵引式进行膜上播种作业,行距400 mm,轮体直径390 mm,穴距160~400 mm(可调),播种深度30~50 mm,播种速度小于等于2.0 km/h
2BT-2型电动精量穴播机 <sup>[64]</sup>	电动式		采用手扶式以蓄电池为动力源,直流电动机驱动地轮,行距400 mm,种箱容量3.4 L,轮体直径440 mm,播种深度40~60 mm,播种速度小于等于1.8 km/h,一次充电连续作业7 h
基于近等速机构的玉米全膜双垄沟直插式穴播机 <sup>[26]</sup>	电动式		采用手扶式以蓄电池为动力源,直流电动机驱动地轮,成穴器近似垂直破膜入土、出土完成膜上播种作业,配套动力750 W,行距400 mm,播种深度40~50 mm,播种速度小于等于1.8 km/h,播种株距360 mm
电驱式玉米膜上直插穴播机 <sup>[65]</sup>	电动式		采用手扶式以蓄电池为动力源,直流电动机驱动地轮,结合前进速度补偿机构,穴播杆入土到出土时前进速度接近零,行距400 mm,播种深度40~50 mm,播种速度小于等于0.62 km/h,播种株距330 mm

确保作物收获后双垄覆膜种床上残膜能够及时被高效率、高净度机械化回收,现有两种相对成熟作业模式:针对小型种植地块,先完成玉米果穗的收获,随后对田间滞留茎秆进行回收<sup>[79]</sup>;针对大型种植地块,应用携有穗茎兼收功能的联合收获机一次性完成玉米果穗的摘穗、输送、剥皮、收集和茎秆的切断、揉搓切碎、抛送、集车等作业工序<sup>[30]</sup>。相关全膜双垄沟机械化玉米收获典型机具如表4所示。

国外发达国家对玉米联合收获机具的研究起步早,发展比较成熟,对玉米联合收获有较深入的研究,近年来,其主要朝着大型、大功率、宽割幅、大喂入量和智能化方向发展,然而国外玉米种植作业与中国北方旱区小地块种植的方式不同,并且没有进行覆膜种植,所以可做参考的研究相对有限<sup>[30,82]</sup>。

中国大部分玉米联合收获机型同国外一样,大都采用卧式摘穗辊装置,对摘除玉米果穗的茎秆部分进行还田作业,这类机型不适用于小地块且以铺膜作业为主的收获。2005年,山东理工大学相关学者提出了采用立式摘穗辊装置的穗茎兼收型玉米联合收获机,通过生产试验证明了该种收获方式的可行性<sup>[83-84]</sup>。目前,国内对穗茎兼收型玉米联合收获机具的研究比较多,出现了各种立式割辊类型的机型,重点对多棱立辊式摘穗装置、立辊式玉米收获机割台间隙夹持输送装置进行了研究<sup>[85-86]</sup>,提出了玉米激振摘穗机理<sup>[87]</sup>。立辊式玉米摘穗技术是果穗在立辊作用下完成果穗收获的一项技术,其特点是果穗摘下后能在重力作用下立即离开摘穗辊,从而防止籽粒的啃伤和啃落,大大减少果穗的收获损失,具

表4 全膜双垄沟机械化玉米收获典型机具

Tab. 4 Typical machines for corn mechanized harvesting with whole plastic-film mulching on double ridges

名称	类型	总体结构	技术特点
4YWL-2型玉米收获机	背负式		割台为卧辊式,能一次完成摘穗装箱和茎秆收割作业,与动力为14.7~22.1 kW的四轮拖拉机相配套,收割2行,行距400 mm,作业速度2.1~2.5 km/h,样机配套动力小,仅能完成玉米果穗收获,无法回收田间茎秆与去除果穗苞叶,便于小地块收获作业
4YZ-2B型一代自走式玉米收获机 <sup>[80]</sup>	自走式		割台为卧辊式,能一次完成摘穗、装箱和茎秆收割作业,配套动力43 kW,收割2行,行距400 mm,作业速度2.0~4.5 km/h,样机配套动力适中,仅能完成玉米果穗收获及其苞叶去除,无法回收田间茎秆,便于小地块收获作业
4YZ-2B型二代自走式玉米收获机 <sup>[79]</sup>	自走式		割台为卧辊式,能一次完成摘穗、剥皮、装箱和茎秆收割作业,配套动力45 kW,收割2行,行距400 mm,作业速度2.5~2.6 km/h,样机配套动力适中,仅能完成玉米果穗收获及其苞叶去除,无法回收田间茎秆,便于中小地块收获作业
4YZ-2型两行茎穗兼收型玉米收获机 <sup>[81]</sup>	自走式		割台为卧辊式,能一次完成摘穗、剥皮、装箱和茎秆粉碎收获,配套动力36.6~58.8 kW,收割2行,行距650~700 mm,作业速度2.5~2.6 km/h,样机配套动力适中,能够完成玉米穗茎兼收及果穗苞叶去除,便于中小地块收获作业
全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机 <sup>[30]</sup>	自走式		割台为立辊式,能一次完成摘穗、剥皮、装箱和茎秆粉碎收获,配套动力44 kW,收割2行,行距400 mm,作业速度3.0~4.5 km/h,样机配套动力适中,能够完成玉米穗茎兼收及果穗苞叶去除,便于中小地块收获作业

有结构简单、摘穗快等优点<sup>[88-89]</sup>。但是针对旱地玉米全膜双垄沟种植模式下的联合收获机械研究才开始尝试,辛尚龙等<sup>[30]</sup>设计了全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机,目前仍处于进一步改进试制阶段。因此,沟播作物机械化收获属于全膜双垄沟播全程机械化相对薄弱的环节,也是未来机械化发展的主要方面。

## 2.4 残膜回收技术与机具

近年来,随着全膜双垄沟播技术的大面积推广,地膜投入和应用量不断增加,待种植作物收获后大量残地膜在田间滞留的问题不容忽视,不但造成了严重的田间土壤污染与环境污染,恶化了全膜双垄沟播农艺技术的生态效应,限制了大规模推广的持续性,而且制约了后续秸秆根茬还田与整地作业,最终影响了秋覆膜或来年顶凌覆膜工作的开展<sup>[90-91]</sup>。传统的人工收膜,劳动强度大、生产率低,因此,推行机械化残膜回收已成为必然趋势。全膜双垄沟残膜回收分为秋季揭膜(前茬作物收获后,10月中下旬)和顶凌揭膜(来年3月上中旬土壤解冻约15 cm时)两种类型。受制于种床覆膜多条土带镇压与垄沟内连续大根茬固定的特殊农艺要求,使得双垄种床表面切膜起茬、“膜-土-根”复合体分离与残膜回收质

量的稳定性与可靠性成为影响全膜双垄沟播技术产量效应的关键因素。因此,机械化残膜高效回收作业过程是保障全膜双垄沟播生产系统持续运转的关键环节与核心组成。部分全膜双垄沟残膜回收典型机具如表5所示。

地膜回收机具的研发需要结合不同地域气候条件、种植作物品种、铺设地膜厚度、农作制及其农艺要求等进行配套设计,在作业机理与动力消耗方面存在较大差异<sup>[98-100]</sup>。国内使用的地膜厚度较小(0.006~0.010 mm),回收时地膜拉伸强度低、膜面破损严重,因此,国内残膜回收机械研究重点与国外有所不同,主要围绕起膜、输膜、脱膜、集膜等关键工作部件及膜杂分离机构加以研究。目前主要开展了棉花、花生、马铃薯、玉米等作物收获后田间地表、耕层的残膜回收装备研究;研究主要针对半膜覆土的种植模式,残膜回收机相关切膜起茬主要由旋耕刀组(旋转类)、开沟铲、开沟圆盘(倾斜类)等触土触膜部件组成;膜杂分离机构的设计形式多样,采用偏心弹齿滚筒结构、振动栅条与滚筒筛组合机构、链筛式升运装置、链扒驱动成排弹齿机构等,可在配套单一或组合式机械-气力脱膜、卸膜机构的辅助作用下完成不同农艺要求的残膜回收作业<sup>[101-105]</sup>。针对国

表5 全膜双垄沟残膜回收典型机具

Tab.5 Typical machines for residual film collecting with whole plastic-film mulching on double ridges

名称	类型	总体结构	技术特点
扒齿式全膜双垄沟地膜 捡拾机 <sup>[92]</sup>	集堆式		采用三点液压悬挂,前、中、后搂膜耙齿相互错开,齿间间距依次变小,齿数依次变多,起膜宽度1200 mm,起膜深度40~60 mm,配套动力14.7~22.1 kW
1FMJ-1260型地膜捡拾 机 <sup>[93]</sup>	装箱式		采用三点液压悬挂,通过仿形齿、起茬铲和伸缩齿滚筒配合完成残膜回收与箱体集膜作业,起膜宽度1200 mm,起膜深度50~100 mm,配套动力29.4~36.8 kW
玉米全膜双垄沟残膜回 收机 <sup>[31,94]</sup>	卷轴式		采用三点液压悬挂,通过“先拢膜,后收膜”动态作业机理,应用浮动卷膜装置完成残膜缠卷回收,起膜宽度1200 mm,起膜深度50~80 mm,配套动力15~30 kW
玉米全膜双垄沟残膜回 收机 <sup>[95]</sup>	卷轴式		采用三点液压悬挂,通过凸轮间歇振动拢膜、偏心弹齿集膜,应用对称倒锥形装置完成残膜缠卷回收,起膜宽度1200 mm,起膜深度小于等于60 mm,配套动力23.2~29.4 kW
两级升运链卷轴式残膜 捡拾机 <sup>[96]</sup>	卷轴式		采用三点液压悬挂,通过两级升运链膜土分离机构,应用对称倒锥形装置完成残膜缠卷回收,根茬集箱回收,起膜宽度1200 mm,起膜深度小于等于150 mm,配套动力29.4 kW
全膜双垄沟废膜捡拾打 捆机 <sup>[97]</sup>	打捆式		采用牵引式,应用浮动起膜铲完成废膜的捡拾、入室、成型、打捆和放捆过程,起膜宽度1200 mm,膜捆为圆形,膜捆尺寸 $\Phi 800 \times 900$ mm,配套动力18.4~22.1 kW

内不同地域农作制要求,高效捡膜、膜杂分离机理与高性能机构研究已引起了农机学者的广泛关注。近期,陈学庚院士团队针对耐候膜开发系列化残膜回收装备,研制出能够随动整片捡膜的链板式钉齿捡拾装置和土壤、秸秆条带侧铺功能的螺旋清杂装置<sup>[106]</sup>,为残膜机械化回收提供了新思路与新途径。

### 3 现存问题分析

#### 3.1 农艺

不同区域覆膜方式与覆膜时间需要进一步优化,西北部分地区冬春干旱发生机率高,春季顶凌覆膜在一定程度上会受到干旱制约,覆膜时机较难把握,风险高,而秋季覆膜则存在着越冬管理难度大及草害严重等问题,需要进一步对现有的抗旱新材料、新技术、新品种、新机具进行融合模式探索<sup>[107]</sup>。同时,在现有种植结构中全膜双垄沟播技术主要在玉

米和马铃薯作物栽培上进行了大面积推广,而在特色杂粮、油料、蔬菜、水果、牧草等其他高效经济作物种植上还在完善阶段,应用面积相对较少,需要进一步探索,以形成增产、环保两位一体高效生态农业,将粮食生产与产业开发相结合,推动农业资源的循环利用<sup>[108]</sup>。全膜双垄沟最佳沟垄构建比例、播种密度、覆膜厚度与方式仍需深入研究,衍生出的“一膜两年用”农艺技术栽培管理措施不完善,制约了有效成本的降低效果<sup>[109]</sup>。

#### 3.2 配套机具

##### 3.2.1 种床机械化构建质量不高

依据全膜双垄沟机械化垄体成型工艺(即机械化单程耕作构建的种床形貌特征由小垄垄体及其两侧均等各1/2大垄垄体组成),沟垄不同构建比例、大垄垄体中心接缝、小垄垄沟覆盖土壤量的多少皆是影响覆膜种床对土壤水分抑蒸、雨水入渗叠加利



用、土壤温度提升的关键所在<sup>[110]</sup>。现有部分全膜双垄沟起垄覆膜机作业性能有待进一步提升,在机械化种床构建中垄沟比例与形貌不规范,出现小垄沟与大垄垄体接缝处覆盖土壤不足,双垄覆膜种床基准定位不稳,在外界风力、地表形貌的干涉作用下容易出现种床沟垄覆盖地膜滑移、翻接与撕裂,将对后续机械化膜上播种质量产生抑制影响;同时当覆盖土壤过量时,全膜覆盖双垄沟生产系统地膜的有效采光面积减小,直接导致种床对于太阳辐射的吸收能力减弱,使其膜面集雨功能丧失。同时,受双垄覆膜种床铺设质量稳定性、可靠性的影响,不同时期、周期全膜双垄沟覆膜种床物理机械特性差异所引起的后续机械化膜上播种撕膜、挑膜现象严重,残膜回收所面临膜土分布不规则、膜土分离困难等均是影响全膜覆盖双垄沟生产系统优化构建与可持续推广应用的关键问题。

### 3.2.2 膜上机械化播种性能不可控

我国西北地区旱地全膜双垄沟技术配套的相关播种机具主要依靠传统的铲式、轮式穴播器和手持式点播枪。前者机具作业时地膜受成穴器运动轨迹余摆线的影响,易产生撕膜、挑膜,地膜经反复拉伸产生错切,导致膜上播种穴孔错位现象发生<sup>[111]</sup>;作物出苗后会被封盖在地膜下面,不能从膜孔中顺畅长出,放苗不及时则会引发闷苗、扭曲及烧苗等现象,这是造成田间作物减产的关键影响因素之一;且当种床土壤松软时成穴装置开启机构失效,也会影响播种出苗率及作物产量;手持式点播枪虽在地膜上播种性能可靠,几乎无穴孔错位现象发生,但劳动强度高,作业效率低,人工操作播种质量得不到保障,不适宜作为今后全膜双垄沟播技术大面积推广所依托的播种机具载体<sup>[61,112]</sup>。近年来提出的直插式播种方式能够克服传统膜上播种机具作业所产生的地膜损伤、种穴与幼苗错位等问题,但是其工作机构的可靠性、耐久性与作业效率的提升仍需持续开展研究。

### 3.2.3 机械化收获农艺要求不融合

在机械化收获作业过程中,全膜双垄沟的大小垄体交错分布易造成收获地表不平整,致使割台持续喂入、切割不稳定,给机械化作业带来了难度。由于作物沟播行距不一致,呈400 mm与700 mm间隔交替分布,无法应用已有玉米联合收获机实现多行收获,现有研发的玉米联合收获机也仅能以小垄垄体为基准完成两行玉米的收获,作业效率相对较低<sup>[30]</sup>。同时,在黄土高原雨养农业区,丘陵山区的旱田地大都无机耕道,使得大中型机具无法进地,限制了作业机多功能与大功率的发展;且传统联合收

获机进地后对已覆盖地膜的损伤、收获作物茎秆粉碎还田等问题均无法达到后续“一膜两年用”免耕栽培技术实施的前提要求,致使全膜双垄沟覆膜生产系统集水保墒功能失效,进一步增加了全膜双垄沟机械化残膜回收过程中膜杂分离的困难程度<sup>[113]</sup>。

### 3.2.4 机械化残膜回收过程易失效

针对全膜双垄沟播不同地域、不同质量的覆膜覆土作业工况,高效捡膜、膜杂分离机理与高性能机构研究等已引起了相关学者的广泛关注<sup>[114-117]</sup>,但研发机具总体适应性不强;已有与全膜双垄沟残膜回收配套农机装备存在的最主要问题是:覆膜种床切膜起垄效率较低,膜杂分离效果不显著,残膜捡拾部件脱膜不彻底,覆土带边膜捡拾效率不高、回收残膜的含杂率较大,难以进行再次利用,尤其在残膜高速回收作业时问题更为复杂与突出,因此上述问题也是机械化残膜回收过程易失效的原因所在与表现形式。目前,西北旱区农膜残留问题已日趋严重,已逐步引起全膜覆盖双垄沟生产系统抗旱、增产功能弱化<sup>[118-119]</sup>,致使研制的相关残膜回收装备无法在生产实际中可靠使用,研制的部分关键作业部件仍然停留在实验室研究与探索阶段。

## 4 展望

### 4.1 加强全膜双垄沟播技术农机农艺融合

西北旱区各地区种植习惯、自然降水及生产条件的多样性,决定了全膜双垄沟播技术模式的复杂与差异,在种植密度、种床构建方面仍然存在较多技术模式,制约了配套机具的适应性。因此,需要进一步加强全膜双垄沟播技术农机农艺的相互协调与融合适应,探讨和制定西北各典型农业区完善的全膜双垄沟播技术模式,发展具有区域特点的配套机械化技术与装备。重点研究土壤类型、气候条件、覆膜类型、农作制要求、沟垄比例、产量效应等与机械化种床构建、膜上精量播种、作物机械化收获及残膜高效回收等关键作业环节的互作机制和评价机制,丰富全膜双垄沟播技术农机农艺融合的研究内涵,优化配套作业机具性能与适应性<sup>[120]</sup>。

### 4.2 持续开展基础研究与配套机具性能优化

目前,针对全膜双垄沟播技术需求,其配套机具研发有了较大进展,但大都在整机能够实现的功能方面进行研究,对相关技术与部件互作基础研究还不够深入,需要进一步完善。其中种床机械化构建方面,重点在不同时期、周期全膜双垄沟覆膜种床物理机械特性研究,高性能切削起垄、随动覆膜关键部件的研制,不同机械化覆土装置及覆土路径系统理论的完善等方面开展;在双垄种床膜上精量播种环

节,需要准确建立直插式播种系统与双垄覆膜种床高效互作模型,提升前进速度补偿机构可靠性与耐久性,降低直插播种方式与种床冲击惯性对播种质量的扰动,优化成穴器与播种系统结构,进一步研究适宜机械化沟播方式与作物产量效应;以全膜双垄沟玉米机械化收获机具为例,深入探究不对行、多行割台对异形双垄行距的适应性,探索最佳的全膜双垄沟“一膜两年用”玉米机械化收获模式,优化收获机进地缓解伤膜的相关措施;进一步研究残膜回收过程中双垄种床残膜、根茬布局随机特性,拓展和完善自适应捡膜、脱膜机器系统,优化高效的边膜捡拾工作部件,研究膜杂分离作业交互机制与特性,实现对残膜的机械化高效回收。目前,全膜双垄沟播配套机具相关产品的标准化、系列化、通用化程度相对较低,机具的适应性仍有待提高。因此,需要在进一步规范全膜双垄沟播农艺要求的基础上结合上述研发重点与核心内容加强基础研究工作的开展,研制与旱区区域多样性相适应的核心部件与配套机具将是未来全膜双垄沟全程机械化研究的重点。

#### 4.3 创建全膜双垄沟全程机械化技术体系

全膜双垄沟播技术有效增强了旱作农业的可控性与稳定性,促进了规模化种植和产业化经营,在西北旱区大面积推广应用。因此,需要进一步形成全膜双垄沟全程机械化技术体系,重点在起垄覆膜、膜上播种、机械收获、残膜回收4个关键环节上不断突破与完善机械化作业难题,提高全程机械化作业效率与性能质量,突出其技术集成和示范样板的引导作用。此外,推进全膜双垄沟播技术与机械化协调发展,不仅注重单一机械化作业与农艺技术的配套,还要纵观整套全程机械化技术体系的相互衔接,最大限度呈现全膜双垄沟播技术生态效益与社会效

益。并依托全膜双垄沟全程机械化技术体系,因地制宜调整旱作作物布局,大力发展高效旱作农业,创新集成现代覆膜保墒集雨技术模式,从根本上突破干旱制约,实现由被动抗旱向主动避灾转变,构建黄土高原雨养农业区抗旱减灾的长效机制。

## 5 结束语

全膜双垄沟播技术集覆盖抑蒸、膜面集雨、垄沟种植功能于一体,通过应用覆膜双垄产流、沟内集流原理,最大限度储蓄自然降水,使农田地面蒸发降到最低,将无效降水转化为有效水分贮存于土壤并集中入渗于作物根部,改善了黄土高原雨养农业区高用水机制,大田水生产力大幅提高,使得西北旱区农业综合生产能力显著提升,对保障粮食安全、农民增收具有重要意义,在全程机械化技术体系的辅助作用下将得到长期、有效的推广应用与可持续发展。

为满足全膜双垄沟播技术在实际生产中对全程机械化技术体系及配套机具的要求,需要加强对起垄、覆膜-覆土功能耕整地机械化技术的可靠性研究,优化提升垄沟膜上精量穴播机械化技术,探索适宜于全膜双垄沟播机械化穗茎兼收的作业模式,完善高效的机械化残膜回收机构与方法。其中,提高机械化种床构建过程中的覆膜-覆土可靠性,解决机械化膜上播种引起的穴空错位与地膜损伤,解决机械化收获过程中的不对行收割与秸秆处理,优化机械化残膜回收相关切膜起茬与膜杂高效分离机构,研发经济高效全膜双垄沟全程机械化作业装备和农机农艺深度融合是创建全膜双垄沟全程机械化技术体系的关键,也是进一步形成科学合理的全膜双垄沟播技术样板,实现全膜双垄沟生产系统高效、节本增效的重要载体和必然选择。

## 参 考 文 献

- [1] GAN Y T, KADAMBOT H M S, NEIL C T, et al. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118(1): 429-476.
- [2] 肖国举,王静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003-1008.  
XIAO Guoju, WANG Jing. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003-1008. (in Chinese)
- [3] 莫非,周宏,王建永,等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 1-17.  
MO Fei, ZHOU Hong, WANG Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8): 1-17. (in Chinese)
- [4] DU Y J, LI Z Z, LI W L. Effect of different water supply regimes on growth and size hierarchy in spring wheat populations under mulched with clear plastic film[J]. *Agriculture Water Management*, 2006, 79(3): 265-279.
- [5] DONG B D, LIU M Y, JIANG J W, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 93-101.
- [6] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41-47.
- [7] ZHOU L M, JIN S L, LIU C A, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interaction: opportunities and challenges in a semiarid agro-ecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2012, 126(1): 181-188.
- [8] 樊廷录,李永平,李尚中,等. 旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(19): 3721-3732.

- FAN Tinglu, LI Yongping, LI Shangzhong, et al. Grain yield and water use efficiency and soil water changes of dryland corn with film mulching and close planting[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(19): 3721–3732. (in Chinese)
- [9] 马忠明,白玉龙,薛亮,等. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 514–522.
- MA Zhongming, BAI Yulong, XUE Liang, et al. Effects of different plastic film mulching methods on soil water and temperature as well as watermelon yield in loess dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 514–522. (in Chinese)
- [10] 张建军,樊廷录,党翼,等. 密度与氮肥运筹对陇东旱塬全膜双垄沟播春玉米产量及生理指标的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(22): 4574–4584.
- ZHANG Jianjun, FAN Tinglu, DANG Yi, et al. The effects of density and nitrogen management on the yield and physiological indices of spring maize under plastic-covered ridge and furrow planting in Loess Plateau east of Gansu[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4574–4584. (in Chinese)
- [11] QIN S H, ZHANG J L, DAI H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 87–94.
- [12] JIA C J, ZHAO W L, CHEN Y X, et al. Delineation of suitable areas for maize in China and evaluation of application for the technique of whole plastic-film mulching on double ridges[J]. *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 2011, 344: 390–400.
- [13] 陈书珍,刘广才,周德录,等. 旱地大豆全膜微垄沟播技术的肥料效应[J]. *草业科学*, 2018, 35(6): 1480–1488.
- CHEN Shuzhen, LIU Guangcai, ZHOU Delu, et al. Study on fertilizer effects of techniques of whole-plastic-film mulching on microridges and planting in catchment furrows of arid-land soybean[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(6): 1480–1488. (in Chinese)
- [14] 李春喜,冯海生,郭万春,等. 青海旱作全膜双垄沟播甜高粱和复种产量及土壤养分含量[J]. *草业科学*, 2015, 32(9): 1530–1535.
- LI Chunxi, FENG Haisheng, GUO Wanchun, et al. The yield of sweet sorghum and soil nutrient after planting with multiple cropping, completely mulched and double furrow in Qinghai dryland[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(9): 1530–1535. (in Chinese)
- [15] 岳德成,史广亮,韩菊红,等. 全膜双垄沟播玉米田覆盖化学除草膜对后茬亚麻生长发育的影响[J]. *作物杂志*, 2016(6): 148–153.
- YUE Decheng, SHI Guangliang, HAN Juhong, et al. Effects of chemical weeding mulching film on growth and development of succeeding crop linseed in corn field of whole-mulching plastic films on double ridges[J]. *Crops*, 2016(6): 148–153. (in Chinese)
- [16] 刘广才,杨祁峰,段襁全,等. 甘肃发展旱地全膜双垄沟播技术的主要模式[J]. *农业现代化研究*, 2008, 29(5): 629–632.
- LIU Guangcai, YANG Qifeng, DUAN Rangquan, et al. Main modes for Gansu developing techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29(5): 629–632. (in Chinese)
- [17] 杨祁峰,刘广才,熊春蓉,等. 旱地玉米全膜双垄沟播技术的水分高效利用机理研究[J]. *农业现代化研究*, 2010, 31(1): 113–116.
- YANG Qifeng, LIU Guangcai, XIONG Chunrong, et al. Study on highly efficient water utilizing mechanisms on techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of dry-land maize[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(1): 113–116. (in Chinese)
- [18] 张翠红,张强,杜鹃,等. 延安玉米全膜双垄沟播栽培技术[J]. *陕西农业科学*, 2012(4): 260–261.
- [19] 马金虎,马步朝,杜守宇,等. 宁夏旱作农业区玉米全膜双垄沟播技术土壤水分、温度及产量效应研究[J]. *宁夏农林科技*, 2011, 52(2): 6–9.
- [20] 惠晓杰. 玉米垄沟覆盖栽培系统在巴基斯坦半干旱区的试验验证及生理生态机理[D]. 兰州:兰州大学, 2017.
- HUI Xiaojie. Experimental verification of ridge-furrow mulching farming system and its related eco-physiological mechanisms in maize in semiarid Pakistan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [21] 李福. 全膜双垄沟播技术[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 2011.
- [22] 赵凡,陈政仁. 全膜双垄沟播玉米密度对产量及植株性状的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 125–133.
- ZHAO Fan, CHEN Zhengren. Study on influence of all-film double-furrow corn density on yield and plant characters[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6): 125–133. (in Chinese)
- [23] 王红丽,张绪成,宋尚有,等. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2609–2614.
- WANG Hongli, ZHANG Xucheng, SONG Shangyou, et al. Effects of whole field-surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2609–2614. (in Chinese)
- [24] 李来祥,刘广才,杨祁峰,等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 114–118.
- LI Laixiang, LIU Guangcai, YANG Qifeng, et al. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 114–118. (in Chinese)
- [25] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 83–90.
- DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 83–90. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160112&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/

- j. issn. 1000-1298. 2016. 01. 012. (in Chinese)
- [26] 戴飞,赵武云,石林榕,等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):74-81.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):74-81. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161110&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161110&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.010. (in Chinese)
- [27] 黄高宝,方彦杰,李玲玲,等. 旱地全膜双垄沟播玉米高效用水机制研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(6):116-121.  
HUANG Gaobao, FANG Yanjie, LI Lingling, et al. High water use efficiency mechanism of maize planting in furrows of completely mulched alternating narrow and wide ridges systems in rainfed area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6):116-121. (in Chinese)
- [28] 史增录,赵武云,马海军,等. 全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机的研制[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):169-174.  
SHI Zenglu, ZHAO Wuyun, MA Haijun, et al. Whole plastic-film double furrow sowing cultivation of the design and manufacture of ridge fertilization filming machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2):169-174. (in Chinese)
- [29] 戴飞,赵武云,马军民,等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):49-56.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Junmin, et al. Operation performance test of hill-seeder based on mechanism with approximate constant speed for corn whole plastic-film mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):49-56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s008&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s008&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.008. (in Chinese)
- [30] 辛尚龙,赵武云,戴飞,等. 全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(4):21-28.  
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Development of corn combine harvester reaping both corn ear and stalk for whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):21-28. (in Chinese)
- [31] 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):50-60.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18):50-60. (in Chinese)
- [32] 李尚中,樊廷录,王勇,等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(2):458-466.  
LI Shangzhong, FAN Tinglu, WANG Yong, et al. Effects of plastic film mulching and rain harvesting modes on chlorophyll fluorescence characteristics, yield and water use efficiency of dryland maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2):458-466. (in Chinese)
- [33] BORUT G, DEA B. Incorporation of a ridge-furrow-ridge rainwater harvesting system with mulches in high-value plant production[J]. Irrigation and Drainage, 2011,60(4):518-525.
- [34] CANDIDO A V, ADDABBOB T, MICCOLISA V. Weed control and yield response of soil solarization with different plastic films in lettuce[J]. Scientia Horticulturae, 2011,130(3):491-497.
- [35] 张惠,李娟,贾志宽,等. 渭北旱塬不同覆盖材料对旱作农田土壤水分及春玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):93-100.  
ZHANG Hui, LI Juan, JIA Zhikuan, et al. Effect of different mulching materials on arid-field soil moisture and spring maize yield in Weibei arid fields[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2):93-100. (in Chinese)
- [36] HUO L, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017,165:286-293.
- [37] 李荣,侯贤清,王晓敏,等. 北方旱作区沟垄二元覆盖技术研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1314-1322.  
LI Rong, HOU Xianqing, WANG Xiaomin, et al. Research progress on the dual-mulching of ridge and furrow technology in dry farming regions of northern China: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4):1314-1322. (in Chinese)
- [38] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):49-56,77.  
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):49-56, 77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190206&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190206&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
- [39] 刘鹏霞,安世才,孟养荣,等. 1MLQS-40/70起垄全铺膜联合作业机性能优化试验[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(3):285-290.  
LIU Pengxia, AN Shicai, MENG Yangrong, et al. Optimal experiment of performance for the 1MLQS-40/70 combined machine as ridge forming and paving plastic mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3):285-290. (in Chinese)
- [40] DAI F, ZHAO W Y, WANG J X, et al. Physical properties of mechanical covering film seedbed with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. IAEJ, 2017, 26(4):149-156.
- [41] 1MLQ-40/70B机引起垄铺膜机[EB/OL]. <http://www.gsthlj.com/?/products/read/51/>.
- [42] 圆盘式全膜双垄沟铺膜机[EB/OL]. <http://www.dxsjsx.com/cp/20.html>.
- [43] 双垄沟自动上土铺膜机[EB/OL]. <http://www.dxsjsx.com/cp/17.html>.

- [44] 安世才,张勇,王赞,等.起垄全铺膜联合作业机的设计与试验研究[J].中国农机化,2009,30(8):73-76.  
AN Shicai, ZHANG Yong, WANG Yun, et al. Design and experimental study on the whole film mulching and ridge forming combined machine[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009, 30(8): 73-76. (in Chinese)
- [45] 2M-2XP型旋耕双幅覆膜联合作业机[EB/OL]. <http://www.gsthtlj.com/?/products/read/16/>.
- [46] 陈海涛,赵阳,侯守印,等.同步膜上开孔插秧装置运动学仿真与参数优化试验[J].农业工程学报,2016,32(11):25-30.  
CHEN Haitao, ZHAO Yang, HOU Shouyin, et al. Kinematics simulation and parameter optimization experiment for transplanting synchronous puncher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 25-30. (in Chinese)
- [47] SIVAKUMAR S, DURAIRAJ C D. Development of a gravity fed automatic vegetable transplanter with walking beam mechanism [J]. Trends in Biosciences, 2014, 7(6): 407-410.
- [48] SEFA A, AHMET C, ZINNUR G, et al. Effects of various no-till seeders and stubble conditions on sowing performance and seed emergence of common vetch[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 72-77.
- [49] BERGLUND R. Impact of plastic mulch and poultry manure on plant establishment in organic strawberry production[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(1): 103-112.
- [50] CHOI W C, KIM D C, RYU I H. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.
- [51] CHARLES L R, VINCENT A F. Transplant fertilizer solution and early season plastic mulch increase tomato yield in adequate fertility clay loam soil[J]. Hort Technology, 2016, 26(4): 460-465.
- [52] 陈学庚,赵岩.棉花双膜覆盖精量播种机的研制[J].农业工程学报,2010,26(4):106-112.  
CHEN Xuegeng, ZHAO Yan. Development of double-film mulch precision planter for cotton seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 106-112. (in Chinese)
- [53] 康建明,王士国,陈学庚,等.同步铺膜铺管旱作水稻播种机的设计与试验[J].中国农业大学学报,2016,21(2):124-131.  
KANG Jianming, WANG Shiguo, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of synchronous laying membrane and irrigation pipe for dry-land rice planter[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(2): 124-131. (in Chinese)
- [54] XU Zhuxin, TIAN Lizhong, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of 2BFD-4 type peanut membrane planter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 2): 13-17.
- [55] 李卫敏,曹卫彬,顾文俊,等.加工番茄移栽后铺膜机的设计与研究[J].农机化研究,2014,36(1):152-154.  
LI Weimin, CAO Weibin, GU Wenjun, et al. The design of mulching film machine used after transplanting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 152-154. (in Chinese)
- [56] 赵立军,何堤,周福君.2BF-1400型水稻覆膜播种机覆土机构参数优化与试验[J].农业工程学报,2015,31(8):21-26.  
ZHAO Lijun, HE Di, ZHOU Fujun. Parameter optimization and test on soil-covering mechanism of 2BF-1400 rice mulching film seeder machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 21-26. (in Chinese)
- [57] 吕小莲,胡志超,刘敏基,等.2BQHM-2型花生覆膜穴播机的设计与试验[J].华南农业大学学报,2015,36(1):96-100.  
LÜ Xiaolian, HU Zhichao, LIU Minji, et al. Design and experiment of the 2BQHM-2 peanut mulching film and punching planter[J]. Journal of South Agricultural Mechanization Research, 2015, 36(1): 96-100. (in Chinese)
- [58] 政东红,陈伟,杜文亮,等.马铃薯播种机取土部件的改进设计与试验[J].中国农机化,2010,31(9):15-19.  
ZHENG Donghong, CHEN Wei, DU Wenliang, et al. Advanced design and experiment on soil picker device of potato planter [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010, 31(9): 15-19. (in Chinese)
- [59] 孙伟,刘小龙,石林榕,等.刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J].机械工程学报,2016,52(7):38-45.  
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 38-45. (in Chinese)
- [60] 孙伟,刘小龙,张华,等.马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J].农业工程学报,2017,33(20):14-22.  
SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14-22. (in Chinese)
- [61] 戴飞,赵武云,张锋伟,等.西北旱区玉米全膜双垄沟机械化播种技术与装备研究进展[J].中国农机化学报,2016, 37(8):217-222.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Current status of mechanization planting technology and equipment for corn whole plastic-film mulching on double ridges in the arid of Northwest China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(8): 217-222. (in Chinese)
- [62] 2BY-1手推式穴播机[EB/OL]. <http://www.gsthtlj.com/?/products/read/35/>.
- [63] 自走式玉米精量穴播机[EB/OL]. <http://www.dxsunjx.com/cp/21.html>.
- [64] 2BT-2型电动精量穴播机[EB/OL]. <http://www.gsthtlj.com/?/products/read/12/>.
- [65] 石林榕,赵武云,孙伟,等.电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):32-38.  
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 32-38. (in Chinese)
- [66] FLOWER K C, CRABTREE W L. Soil pH change after surface application of lime related to the levels of soil disturbance caused by no-tillage seeding machinery[J]. Field Crops Research, 2011, 121(1): 75-87.
- [67] JOHANSEN C, HAQUE M E, BELL R W, et al. Conservation agriculture for small holder rainfed farming: opportunities and constraints of new mechanized seeding systems[J]. Field Crops Research, 2012, 132(1): 18-32.
- [68] MAZITOV N K, SAKHAPOV R L, RAKHIMOV R S, et al. Results of experiments to develop technology and machines for producing plant industry products under drought conditions[J]. Russian Agricultural Sciences, 2012, 38(1): 75-78.
- [69] TIMOTHY C. Performance of paper mulches using a mechanical plastic layer and water wheel transplanter for the production of

- summer squash[J]. Hort Technology, 2010, 20(2): 319-324.
- [70] CHRISTIAN T, MULUNDU M, LEONARD R. Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: long-term effects on soil quality and maize productivity[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 246-258.
- [71] 刘芳,杜瑞成. 内置式双位投种穴播器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 35-40.  
LIU Fang, DU Ruicheng. Embedded double-position throwing seeds dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 35-40. (in Chinese)
- [72] 王吉奎,郭康权,吕新民,等. 改进型夹持式棉花穴播轮排种过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 74-78.  
WANG Jikui, GUO Kangquan, LÜ Xinmin, et al. High-speed photography analysis on operating process of improved clamping dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 74-78. (in Chinese)
- [73] CHEN X G, KANG J M. Plastic-film-covered rice cultivation with drip irrigation and development of sowing planter[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(12): 2627-2632.
- [74] 孙伟,吴建民,黄晓鹏,等. 勺匙式玉米精量取种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 17-21.  
SUN Wei, WU Jianmin, HUANG Xiaopeng, et al. Design and experiment of spoon-shape maize precision seedmeter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 17-21. (in Chinese)
- [75] 张晓冬,李成华,李建桥,等. 铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 88-93.  
ZHANG Xiaodong, LI Chenghua, LI Jianqiao, et al. Mathematic vibration model of spade punch planter of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 88-93. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140215&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140215&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.015. (in Chinese)
- [76] 陈晓光,左春桢,高峰. 直插式播种机的研究-I. 直插式成穴器[J]. 农业工程学报, 1993, 9(3): 66-70.  
CHEN Xiaoguang, ZUO Chunzheng, GAO Feng. Study on the direct insert planter (I) the research and the principal study of the direct insert hole former of planter[J]. Transactions of the CSAE, 1993, 9(3): 66-70. (in Chinese)
- [77] 刘军干,王天辰,阎发旭,等. 直插式覆膜小麦穴播机的设计[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 55-58.  
LIU Jungan, WANG Tianchen, YAN Faxu, et al. Design of film-mulching wheat hill seeder with vertical dropping mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 55-58. (in Chinese)
- [78] 石林榕,赵武云,杨小平,等. 玉米直插穴播机强排-强启排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 41-47.  
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, YANG Xiaoping, et al. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 41-47. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180206&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180206&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.006. (in Chinese)
- [79] 刘鹏霞,王赞,雷明成,等. 4YZ-2B型自走式玉米收获机设计与试验[J]. 农业机械, 2018(1): 88-90.
- [80] 拓新 4YWL-2 玉米收获机参数介绍[EB/OL]. [https://www.mainongji.com/nongji/shouhuo/yumi/2014-11-05/mainongji\\_35377.html](https://www.mainongji.com/nongji/shouhuo/yumi/2014-11-05/mainongji_35377.html).
- [81] 冀新 4YZ-2 两行茎穗兼收型玉米收割机[EB/OL]. [https://www.nongjitong.com/product/jixin\\_4yz-2\\_corn\\_harvester.html](https://www.nongjitong.com/product/jixin_4yz-2_corn_harvester.html).
- [82] 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 251-257.  
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 251-257. (in Chinese)
- [83] 张道林,孙永进,赵洪光. 自走式穗茎兼收型玉米联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 79-82.  
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang. Design and experiment of the self-propelled combine harvester for corn and stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 79-82. (in Chinese)
- [84] 张道林,孙永进,赵洪光,等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 50-52.  
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of a vertical-roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 50-52. (in Chinese)
- [85] 耿端阳,李玉环,孟凡虎,等. 玉米收获机多棱立辊式摘穗装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 84-91.  
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Fanhu, et al. Design and experiment of corn harvester polygonal vertical-rollers snapping means[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 84-91. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170310&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170310&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.010. (in Chinese)
- [86] 耿端阳,李玉环,何珂,等. 立辊式玉米收获机割台间隙夹持输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 130-136.  
GENG Duanyang, LI Yuhuan, HE Ke, et al. Design and experiment on gripping delivery mechanism for vertical-rollers type of corn harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 130-136. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171116&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171116&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.016. (in Chinese)
- [87] 王骞,何珂,金诚谦,等. 玉米激振摘穗机理分析与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 249-257.  
WANG Qian, HE Ke, JIN Chengqian, et al. Mechanism analysis and experiment optimization on parameters of maize exciting and picking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 249-257. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s033&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s033&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.033. (in Chinese)

- [88] SHINNERS K J, BOETTCHER G C, HOFFMAN D S, et al. Single-pass harvest of corn grain and stover: performance of three harvester configurations[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1): 51-60.
- [89] JOHNSON P C, CLEMENTSON C L, MATHANKER S K, et al. Cutting energy characteristics of *Miscanthus × giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 42-48.
- [90] 张丹,胡万里,刘宏斌,等. 华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J]. 农业工程学报,2016,32(3):1-5.  
ZHANG Dan, HU Wanli, LIU Hongbin, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 1-5. (in Chinese)
- [91] 严昌荣,何文清,刘恩科,等. 作物地膜覆盖安全期概念和估算方法探讨[J]. 农业工程学报,2015,31(9):1-4.  
YAN Changrong, HE Wenqing, LIU Enke, et al. Concept and estimation of crop safety period of plastic film mulching[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 1-4. (in Chinese)
- [92] 王松林,敬志臣,韩正晟,等. 旱地全膜双垄沟残膜回收机的试验研究[J]. 甘肃农业大学学报,2015,50(3):160-164.  
WANG Songlin, JING Zhichen, HAN Zhengsheng, et al. Experimental research on retrieving machine for film residue with whole plastic film mulching on double ridges in arid land[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(3): 160-164. (in Chinese)
- [93] 庆阳前进1FMJ-1260地膜捡拾机[EB/OL]. [https://www.nongjitong.com/product/qyqianjin\\_1fmj-1260\\_film\\_pickup\\_machine.html](https://www.nongjitong.com/product/qyqianjin_1fmj-1260_film_pickup_machine.html).
- [94] 吴一非,戴飞,赵武云,等. 全膜双垄沟地膜捡拾机的设计[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(6):292-296.  
WU Yifei, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design of the film picking machine for double furrows[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2016, 34(6): 292-296. (in Chinese)
- [95] 辛尚龙,赵武云,戴飞,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):311-319.  
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):311-319. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s041&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s041&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.041. (in Chinese)
- [96] 程兴田,赵建托,潘卫云,等. 两级升运链卷轴式残膜捡拾机的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(4):31-34.  
CHENG Xingtian, ZHAO Jiantuo, PAN Weiyun, et al. Design and experiments of two elevator chain reel plastic film collector[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 31-34. (in Chinese)
- [97] 郭笑欢,戴飞,赵武云,等. 全膜双垄沟废膜捡拾打捆机的设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(9):32-36,55.  
GUO Xiaohuan, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design of the whole double furrow film picking baler machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9): 32-36, 55. (in Chinese)
- [98] 吕钊钦,张磊,张广玲,等. 链条导轨式地膜回收机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):48-54.  
LÜ Zhaoqin, ZHANG Lei, ZHANG Guangling, et al. Design and test of chain guide rail-type plastic film collector[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 48-54. (in Chinese)
- [99] 王吉奎,付威,王卫兵,等. SMS-1500型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. 农业工程学报,2011,27(7):168-172.  
WANG Jikui, FU Wei, WANG Weibing, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):168-172. (in Chinese)
- [100] 侯书林,胡三媛,孔建铭,等. 国内残膜回收机研究的现状[J]. 农业工程学报,2002,18(3):186-190.  
HOU Shulin, HU Sanyuan, KONG Jianming, et al. Present situation of research on plastic film residue collector in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3):186-190. (in Chinese)
- [101] 罗威,王吉奎,罗新豫,等. 夹指链式残膜回收装置仿形及收膜机构的改进设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(22):27-35.  
LUO Wei, WANG Jikui, LUO Xinyu, et al. Improved design and experiment of profiling and recycling plastic film mechanism for clamping finger-chain type device of recycling residual plastic film[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22):27-35. (in Chinese)
- [102] 张佳喜,杨程,郭俊先,等. 滚刀式青贮玉米起茬及残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(6):25-34.  
ZHANG Jiayi, YANG Cheng, GUO Junxian, et al. Design and experiment of hob-type joint operation machine for silage corn root stubble plucking and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6):25-34. (in Chinese)
- [103] 温浩军,牛琪,纪超. 地膜机械化技术现状及分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(3):145-153.  
WEN Haojun, NIU Qi, JI Chao. Current status of and analysis on the mechanical technology of plastic film[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 145-153. (in Chinese)
- [104] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):1-14.  
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):1-14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170601&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170601&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001. (in Chinese)
- [105] 戴飞,赵武云,孙伟,等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):64-72.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,

- 48(1):64-72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170109&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170109&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009. (in Chinese)
- [106] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):109-115. YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 109-115. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181213&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181213&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.013. (in Chinese)
- [107] 张涛,孙伟,张锋伟,等. 旱地全膜双垄沟玉米生产的 AquaCrop 模型模拟及管理措施优化[J]. 应用生态学报,2017,28(3):918-926. ZHANG Tao, SUN Wei, ZHANG Fengwei, et al. Simulation of AquaCrop model and management practice optimization for dryland maize production under whole plastic-film mulching on double ridges [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 918-926. (in Chinese)
- [108] 宋兴阳,王琦,李富春,等. 覆盖材料和沟垄比对土壤水分和紫花苜蓿干草产量的影响[J]. 生态学报,2017,37(3):798-809. SONG Xingyang, WANG Qi, LI Fuchun, et al. Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on soil moisture and alfalfa forage yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 798-809. (in Chinese)
- [109] 胡广荣,王琦,宋兴阳,等. 沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(5):590-599. HU Guangrong, WANG Qi, SONG Xingyang, et al. Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on soil moisture and alfalfa forage yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 590-599. (in Chinese)
- [110] DB62/T 1934—2010 全膜双垄沟玉米机械化作业技术规范[S]. 2010.
- [111] 戴飞,赵武云,唐学鹏,等. 旱地玉米全膜覆盖双垄沟精量播种机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):39-45. DAI Fei, ZHAO Wuyun, TANG Xuepeng, et al. Parameters optimization of precision seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges in dry land[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 39-45. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s108&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s108&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.008. (in Chinese)
- [112] 杨正,赵武云,戴飞,等. 西北旱地全膜双垄沟播技术配套播种机具的现状与发展[J]. 机械研究与应用,2013,26(4):191-192. YANG Zheng, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Development situation of ancillary seeding machine with whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of dry-land maize[J]. Mechanical Research & Application, 2013, 26(4): 191-192. (in Chinese)
- [113] 石林雄. 全膜双垄沟播玉米机械化收获技术研究[J]. 农业科技推广,2015(3):30-32.
- [114] 张勇,安世才,王赞,等. 1MLQS-40/70 起垄全铺膜联合作业机的改进设计[J]. 中国农机化,2011,32(4):89-92. ZHANG Yong, AN Shicai, WANG Yun, et al. Improved design on the 1MLQS-40/70 whole film mulching and ridge forming combined machine[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(4): 89-92. (in Chinese)
- [115] 戴飞,高爱民,张锋伟,等. 玉米全膜双垄沟气动直插式穴播机设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(5):284-286. DAI Fei, GAO Aimin, ZHANG Fengwei, et al. Design and simulation of pneumatic direct insert hill-seeder with corn whole plastic-film on double ridges[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 284-286. (in Chinese)
- [116] 王桂英,安长江. 残膜抗拉机械强度对残膜回收机适用性影响研究[J]. 中国农机化学报,2014,35(2):171-174. WANG Guiying, AN Changjiang. Degree that the mechanical strength of the residual plastic film influences applicability evaluation of residual film recovery machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 171-174. (in Chinese)
- [117] DAI F, ZHAO W Y, SONG X F, et al. Working process analyses of direct insert hill-device with corn whole plastic-film mulching on double ridges based on EDEM[J]. IAEJ, 2017, 26(4): 124-131.
- [118] 赵凡. 基于 Richards 模型的全膜双垄沟播与传统栽培模式玉米生长势差异研究[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(4):211-217. ZHAO Fan. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 211-217. (in Chinese)
- [119] 李磊,张强,冯悦晨,等. 全膜双垄沟播改善干旱冷凉区盐渍土水盐状况提高玉米产量[J]. 农业工程学报,2016,32(5):96-103. LI Lei, ZHANG Qiang, FENG Yuechen, et al. All-film double-furrow sowing improving water and salt conditions and increasing maize yield in saline soil of cold and arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 96-103. (in Chinese)
- [120] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180401&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)