

现代农业科学学术专著
国家科技计划和现代农业产业技术体系资助

旱作覆盖集雨农业探索与实践

樊廷录 李尚中 等 著



现代农业科学学术专著
国家科技计划和现代农业产业技术体系资助

旱作覆盖集雨农业探索与实践

樊廷录 李尚中 等 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

旱作覆盖集雨农业探索与实践 / 樊廷录等著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5116-3238-8

I. ①旱… II. ①樊… III. ①旱作农业-降水-蓄水-研究②旱作农业-地膜覆盖-节约用水-研究 IV. ①S343.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 219754 号

责任编辑 史咏竹

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82105169(编辑室)
(010)82109702(发行部)
(010)82109709(读者服务部)

传 真 (010)82109707

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京科信印刷有限公司

开 本 787mm×1 092mm 1/16

印 张 35.25

字 数 864 千字

版 次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价 198.00 元

版权所有·翻印必究

《旱作覆盖集雨农业探索与实践》

著者名单

主 著	樊廷录	李尚中		
副主著	王 勇	张建军	王淑英	赵 刚
	李兴茂	王 磊	党 翼	倪胜利
著 者	唐小明	张国宏	马明生	宋尚有
	秦富华	牛俊义	乔小林	程万莉
	王立明	罗俊杰	周广业	丁宁平
	王晓巍	雍致明	张兴高	冯成荣
	崔明九	高育峰		

前 言

中国是世界上严重缺水的国家之一，干旱、半干旱面积和没有灌溉条件的旱作耕地面积均超过了国土面积和全国耕地面积的 1/2。改革开放 40 年来，随着中国经济的快速发展和气候干暖化趋势的加剧，水资源日趋紧张，加之农业结构战略性调整，农业用水特别是粮食生产用水呈现零增长或负增长，灌溉粮田面积趋于减少，使得旱作农业在我国粮食安全、水生态安全和精准扶贫中的基础性战略性地位上升，已成为粮食安全的重要支撑体。特别是在完全依靠自然降水进行农牧业生产的旱作农区，合理高效利用有限的降水资源对确保该区粮食安全和经济发展显得尤为重要，降水高效利用无疑成为旱作农业发展永恒的主题。然而，在传统旱作技术条件下，只有 20%~25% 的天然降水形成了植物初级生产力，10%~15% 通过径流损失，无效蒸发高达 60%~70%，大田降水生产潜力开发度不足 50%，这对于中国北方约 4 000 万公顷的旱作耕地而言，农业增产潜力是巨大的。因此，针对旱作区降水量少且无效降水多、季节性分配不均及土壤蒸发损失强烈等水分平衡现状，旱作农业开发解决水问题的基本思路是通过农艺、生物、工程、农机、结构五大环节集成配套，建立集水、蓄水、保水、节水和用水技术体系，形成旱作高效用水一体化综合解决方案，提高水分“三率”，即土壤水分保蓄率、降水利用率和作物水分利用效率。

世界各国高度重视旱作区降水高效利用与环境协调发展，盛行模式有美国夏休闲轮作制和少免耕秸秆覆盖保护性耕作制、澳大利亚草田轮作制、印度和以色列等径流拦蓄利用等。20 世纪 80 年代以来，中国旱作高效用水农业研究与应用取得了一系列重大突破，建立了以旱地耕作、轮作、施肥和抗逆作物及节水品种为支柱，以蓄水保墒、豆科作物轮作和施用有机肥为核心的有机旱作农业，以水土保持和梯田建设为核心的水保型旱作农业，以径流集蓄和关键生育期补灌为主的集水高效农业，以覆盖和垄沟为主的农田覆盖集水种植技术与模式。以旱作农业为主的甘肃省中东部，水资源短缺，耕地亩均水资源不到全国平均水平的 1/4，长期以来始终坚持保住天上雨、蓄住地里墒和用好地表水的抗旱思路，确立了“品种+梯田+水窖+覆盖+结构”旱作农业发展模式，在抗旱作物新品种选育、集水农业工程及集雨补灌、全膜双垄沟集雨种植、稀植作物地膜穴播等方面取得了技术突破，特别是玉米全膜双垄沟种植技术解决了旱地粮食产量长期低而不稳的问题，创造了同类型区旱地玉米单产和水分利用效率的世界纪录，被称为旱地农业技术的一场革命。

本书以黄土高原区降水资源高效利用与粮果增产增效为主线，阐述了覆盖集雨农业研究与应用成效。第一章回顾了国内外覆盖集雨农业研究进展，第二章估算了黄土高原降水资源化潜力，划分了集雨农业类型区，第三章总结了非耕地集雨高效利用的理论与关键技术，第四章阐述了旱作农田和果园土壤水分动态及平衡规律，第五章系统论述了旱地农田作物覆盖集雨种植类型及水分调控机理、作物产量—水分关系、玉米密植增产及农艺农机

融合、应对气候变化减灾策略等问题，第六章介绍了定位试验所揭示的黄土旱塬土壤肥力演变规律及施肥效应，第七章在总结国内外生物节水研究进展的基础上，阐述了高产和高水分效率品种评价指标及方法，第八章分析了旱作农田残膜潜在污染问题，评价了生物降解地膜的降解性能，第九章分析了甘肃省粮食生产发展轨迹及对粮食生产的需求，提出了粮食生产能力提升的构思及可持续发展的重点科技任务。

本书是依托国家科技计划项目和国家现代农业产业技术体系，在6个五年计划30多年研究工作的基础上总结形成的系统性成果，包括国家“八五”至“十三五”科技计划“陇东高原半湿润偏旱区农业综合发展研究(85-07-01-07)”“陇东高原半湿润偏旱区集水高效农业研究与开发(96-004-04-04)”“北方旱塬区优质粮食产业开发模式与技术研究(2001BA508B11)”“西北半湿润偏旱区优质粮果稳产高效技术集成与示范(2006BAD29B07)”“西北旱作区抗逆稳产旱作农业技术集成与示范(2012BAD09B03)”和“西北旱塬区增粮增效技术与示范(2015BAD22B0-2)”，国家农业科研行业专项“粮食主产区土壤肥力演变与培肥技术与示范(201203030-08)”“黄土高原雨养农田玉米水分高效利用技术与示范(201303104)”和“黄土高原小麦玉米油菜田间节水节肥节药综合技术方案(201503124)”，国家玉米产业技术体系兰州综合试验站(2011—2020)和甘肃省重大专项“旱地作物关键生产环节农艺农机融合及产业化(143NKDJ018)”等项目资助所取得的研究成果，期间获甘肃省科技进步一等奖3项、省部级科技进步二等奖8项，汇集了以镇原旱农试验站为平台、国家“旱地集雨高效用水技术与应用”创新团队为核心的集体智慧与长期辛勤劳动的结晶。

在编写和资料积累整理过程中，除了本书作者外，还得到了甘肃省科学院高世铭研究员，西北农林科技大学王立祥教授、贾志宽教授、李军教授和王朝辉教授，中国农业科学院信乃诠研究员、梅旭荣研究员、徐明岗研究员、张燕卿研究员和严昌荣研究员，甘肃农业大学牛俊义教授、柴强教授、吴建民教授和赵武云教授的指导和支持，甘肃农业大学在镇原试验站从事研究的许多专家和研究生，都付出了辛勤努力，在本书出版之际向他们表示衷心感谢！

本书涉及内容较多、时间跨度相对较长，由于时间仓促和著者水平有限，归纳梳理不够，书中难免存在不足之处，希望得到同行的批评和指教，使其更加完善。

樊延录

2017年10月于兰州

序

水孕育了生命，也造就了人类文明，水是农业的命脉，农耕文明的发展推动了用水文明的进步。纵观历史，中华农业文明的发展实际上是一部与洪涝、干旱作斗争而不断前进的历史，中华民族所创造的一切物质财富和精神财富都蕴含着治水与雨水高效利用的成果。黄土高原是我国古代农业的发祥地和曾经的农业最为发达地区之一，而今正成为旱作马铃薯、玉米、苹果以及草食畜牧业的重要基地，承担着生态脆弱区和扶贫开发区确保粮食安全、绿色增效和生态保护的重大任务。然而，这里长期面临着严重水土流失和频繁干旱缺水并存的问题，水是该区域农业发展最大的制约因素，探索雨水高效利用之路是历史赋予我们的永恒命题。

国内外在旱作农田水分循环与调控，包括覆盖保护性耕作栽培、集雨补灌、高水分效率作物与品种应用等方面开展了大量工作，取得了显著成效；但对以农田和非耕地雨水资源时空富集叠加利用为核心的关键技术与模式研究方面还不够系统完善。樊廷录研究员及其团队依托承担的各类科研项目，以自然降水高效利用为主线长期致力于提高半干旱地区旱作农田生产力研究，《旱作覆盖集雨农业探索与实践》一书是对他们“八五”以来研究工作的全面总结，体现了 20 世纪 90 年代以来我国旱作农业研究发展阶段的转变和新思路的逐步形成。该书在回顾国内外径流集蓄利用研究进展的基础上，以长期试验数据积累和生产应用效果为基础，系统介绍了他们在黄土旱塬区开展覆盖集雨农业方面的研究进展与实践。书中内容抓住了农田覆膜集雨种植机艺一体化、非耕地集雨补灌、作物品种节水及施肥效应等旱作高效用水的关键环节，探讨了高产农田水分可持续性、旱作粮食生产能力提升、农田地膜污染及替代技术等热点问题，内容丰富、主线清晰、思路方法有创新，研究成果有效支撑了旱作粮食持续增产和高产纪录刷新，应用效果明显，较好地回答了半干旱区一方水土能养活一方人的历史性命题。

该书的出版，为从事旱农研究与生产应用的科技人员提供了一部有价值的参考读物，科学性、实用性强，其内容丰富了旱农高效用水的相关理论，技术新颖，可操作性强。尽管书中有关内容和研究工作仍需进一步完善，如适宜于推广应用区域的划定、长期实施对土壤基础肥力的影响等，但它对生产的应用价值和给予我们的启发是十分宝贵的。在该书出版之际，愿以序为贺。

山色

中国工程院院士

西北农林科技大学、中国科学院水利部水土保持研究所研究员

2017 年 10 月 20 日

序

黄土高原农耕文化历史悠久，是华夏文明的发祥地和我国典型的旱作农业区。依靠科技进步不断提高降水资源利用率和水分利用效率，是旱作农业发展长期的战略任务和热点科学问题。自 20 世纪 80 年代以来，我国在黄土高原先后组织实施了以旱作节水和水土流失综合治理为主的科技计划项目，不断创新和集成应用了一批旱作节水品种和突破性技术及模式，使旱作区成为区域粮食安全的压舱石和稳压器，保障了农业结构战略性调整和特色农产品生产基地的形成。

樊廷录同志 1990 年研究生毕业以来，就步入国家“八五”旱农科技攻关项目——甘肃镇原试验区建设行列，不忘初心，长期坚守在陇东黄土旱塬，开展以降水高效利用和抗旱增粮为中心的旱农科技创新与应用工作，在旱作农田作物—水分关系、土壤水肥演变、机械化覆膜集雨种植、非耕地径流补灌、生物节水品种筛选评价等方面，取得了一系列研究成果与科技奖励，形成了抗旱增粮的重大技术，在不同阶段完善了旱作高效用水技术体系，显著提高了粮食产量。他推动镇原旱地农业试验站进入国家农业科学试验站和农业部植物营养与施肥科学观测实验站，成为承担国内外农业科技项目、服务地方农业科技创新和人才培养的基地平台，他领衔的“旱地集雨高效用水技术研究与应用”研究团队入选国家农业科研创新团队。

出于对旱作农业发展的高度关心和农业科技工作者的担当责任，基于近 30 年大量科研数据积累与生产一线工作经验，樊廷录同志组织团队成员，系统总结撰写了《旱作覆盖集雨农业探索与实践》一书。该书以水为主线，按照全方位解决旱作农田水问题的思路，通过生物、覆盖、田间微地形工程、农艺农机融合等手段，构建了集水、蓄水、保水、节水、用水的五大旱作高效用水体系，对目前关注的农田地膜残留现状及地膜减量和替代、旱作覆盖作物全程机械化等热点问题，进行了深入研究。该书的面世，对我国旱作粮食稳定生产、绿色节本增效、地力提升和地膜污染控制等必将发挥应有的推动作用。

全书立意清新，集创新性、整体性和实践性于一体，资料翔实，图文并茂，具有重要的理论、科学和应用价值，可供广大农业科技工作者阅读。特此向大家推荐这本书。



中国工程院院士
中国农业大学教授
2017 年 11 月 26 日

目 录

第一章 国内外覆盖集雨农业研究进展	(1)
第一节 覆盖集雨农业概念与内涵	(1)
第二节 覆盖集雨农业的发展与创新	(13)
第三节 覆盖集雨高效用水农业的理论基础	(19)
第四节 黄土旱塬覆盖集雨高效农业模式探索	(22)
第五节 覆膜集雨对旱地农业的贡献	(36)
参考文献	(36)
第二章 黄土高原降水资源化潜力与集雨农业类型区划分	(39)
第一节 黄土高原的黄土地貌类型及分区特征	(39)
第二节 黄土高原降水特征及降水资源转化利用	(42)
第三节 黄土高原地面坡度分析	(45)
第四节 黄土高原旱作地区径流集蓄利用基础	(46)
第五节 黄土高原旱作地区降水资源化潜力研究	(49)
第六节 黄土高原集雨农业类型区划分	(60)
参考文献	(64)
第三章 旱作农区非耕地径流高效利用的理论与技术	(65)
第一节 非耕地径流高效利用的原则	(65)
第二节 非耕地径流高效利用的依据	(66)
第三节 非耕地径流补灌关键技术	(69)
参考文献	(79)
第四章 旱地土壤水分变化特征及平衡规律	(81)
第一节 覆盖黑垆土的持水特性及抗旱性	(81)
第二节 旱作农田降水和土壤贮水与作物产量的关系	(87)
第三节 黄土高原旱地苹果园土壤水分动态及调控	(94)
参考文献	(112)
第五章 旱地农田作物覆盖集雨种植研究	(115)
第一节 旱作区农田水分管理的基本原理	(115)

第二节	旱地微集雨种植类型及水分调控机理	(117)
第三节	旱地垄膜微集雨种植的水分生产潜力开发	(123)
第四节	旱地全膜双垄沟种植的集雨效率及高效用水机制	(127)
第五节	覆膜方式、密度和品种对旱地玉米产量和水分利用的影响	(144)
第六节	旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化	(153)
第七节	夏休闲期覆盖耕作对麦田土壤水分与周年生产力的影响	(164)
第八节	旱地玉米地膜秸秆耦合覆盖的技术效应研究	(171)
第九节	旱地小麦地膜覆盖穴播种植技术及产量水分效应	(176)
第十节	旱地全膜双垄沟玉米产量—水分关系及持续增产技术研究	(200)
第十一节	气候变化对旱地玉米生产影响及减灾技术策略	(237)
第十二节	旱地留膜留茬少免耕的土壤水温及产量效应	(261)
参考文献		(270)
第六章	旱地农田土壤肥力演变及施肥效应研究	(275)
第一节	长期施肥下旱地作物产量和肥料贡献率的变化	(275)
第二节	长期施肥下旱地作物产量—水分关系	(286)
第三节	长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异	(292)
第四节	长期施肥下旱地黑垆土氮磷钾的变化特征	(308)
第五节	长期施肥下旱地农田系统养分循环与平衡	(317)
第六节	旱作农田施肥原则及关键技术	(323)
第七节	旱地磷肥不同分配方式的肥效、残效及利用率研究	(328)
第八节	施肥对旱地冬小麦水肥效率研究	(336)
第九节	有机肥对旱地黑垆土磷素形态转化及有效性的影响	(340)
第十节	密度与氮肥运筹对旱地全膜双垄沟播玉米产量及生理指标影响	(347)
第十一节	耕作与施肥对旱地小麦/玉米轮作系统土壤养分与产量影响	(354)
第十二节	控释氮肥对旱地地膜玉米生长发育及氮利用率的影响	(366)
第十三节	旱地不同有机物料化肥氮替代技术效应研究	(369)
参考文献		(376)
第七章	生物节水研究进展及高效用水品种评价	(379)
第一节	农业生物节水内涵及研究进展	(379)
第二节	作物抗旱节水评价指标及应用	(384)
第三节	旱地冬小麦灌浆期冠层温度与产量和水分利用效率的关系	(389)
第四节	雨养条件下不同基因型玉米冠层温度与水肥利用的关系	(394)
第五节	稳定碳同位素比值与小麦产量和水分利用效率的关系	(401)
第六节	不同冬小麦品种穗下茎可溶性糖与产量和水分利用率的关系	(410)
第七节	冬小麦抗旱种质资源遗传多样性研究	(415)
第八节	基于播前土壤贮水的冬小麦抗旱性研究	(429)

第九节 不同水分条件下中麦 175 的农艺和生理特性解析	(435)
第十节 水分胁迫下旱地冬小麦生理变化与抗旱性的关系	(440)
第十一节 旱地作物高光效品种筛选指标及评价	(445)
参考文献	(462)
第八章 地膜覆盖对农业贡献及生物降解膜筛选评价	(466)
第一节 地膜覆盖——农作物栽培史上的重大变革	(466)
第二节 可生物降解材料研究进展及评价方法	(472)
第三节 我国降解地膜研究应用进展及评价方法	(477)
第四节 作物地膜覆盖安全期及估算方法	(484)
第五节 生物降解地膜性能监测评价及作物种植技术	(487)
第六节 生物降解膜环境友好型覆盖技术研发应用	(500)
参考文献	(505)
第九章 旱作粮食生产能力提升及面向未来的发展重点	(506)
第一节 甘肃省粮食产量变化轨迹与生产重心转移	(507)
第二节 甘肃省粮食社会供需平衡影响因素分析	(513)
第三节 发展中的甘肃省对粮食生产能力的要求	(516)
第四节 甘肃省粮食生产能力提升应予的着重点	(519)
第五节 甘肃省粮食生产能力提升的战略构思	(520)
第六节 黄土旱塬区优质粮食生产潜力与品质增优	(523)
第七节 旱作区农业面向未来的重点科技任务	(546)
参考文献	(549)

第一章 国内外覆盖集雨农业研究进展

第一节 覆盖集雨农业概念与内涵

水,孕育了生命,也造就了人类文明,四大文明古国就是在适合农业耕作的大河流域诞生的,其各具特色的文明发展史,构成了灿烂辉煌的大河文明,对整个人类进步做出了巨大贡献。人类社会的发展总是伴随着科学技术的进步而不断提升,促进了人类文明的不断升华,带来了用水文明的进步。随着干旱趋势的加剧和水资源短缺的压力,广大的旱作农业区受发展与生存之动力牵引,人们再次把对水资源的渴求转向源头水——自然降水资源的利用,认为仅将地表水和地下水作为水资源总量是一个不完整的水资源总量的概念,降水资源总量才是水资源总量,地表水与地下水由其转化而来,属于降水派生的资源。然而,我国降水资源化系数仅45%,二次转化系数不足14%,大部分降水尚未得到较好利用。随着经济持续增长和粮食及农产品需求刚性增加,加剧了水资源短缺与用水矛盾,同时用水生态文明、农业水生态建设和高效用水也越来越迫切。因此,水利工程、集雨、结构调整、覆盖、节水无疑就成为解决水问题的五大战略选择,农业领域降水资源利用行为已经不再是一种简单的生产行为,而是基于农产品生产稳定增产与水资源可持续利用的协调发展。为实现这一目标,需要创新农业用水理念,尤其是要丰富旱作区高效用水概念与内涵。

一、径流集蓄及覆盖集雨农业的概念

雨水资源的利用有广义和狭义之分。从广义上讲,凡是利用雨水的活动都可以称为雨水集流利用。如兴建水库、塘坝和灌溉系统等开发利用地表水,打井开采地下水以及人工增雨措施等活动,而狭义的雨水集流是指直接利用雨水的活动,如利用一定的集水面收集雨水用于生活、农业生产和城市环境卫生等。雨水集流最初被定义为“收集和贮存径流或溪流用于农业灌溉使用”(Geddes, 1963),后来在此基础上进行了修改,发展为“通过人为措施处理集流面增加降雨和融雪径流,进而收集利用的过程”,并指出“贮存”是集水系统重要的有机组成部分(Myers, 1964, 1967)。20世纪80年代,有些学者全面地将雨水集流定义为收集各种形式的径流(Reij等, 1988),用于工农业生产、人畜饮水或其他用途。地表径流是集水系统中的关键因素,包括降雨、融雪径流和季节性溪流。

径流是在降雨条件下地表出现的超渗或超蓄产流。即当降雨强度或降水量超过土壤的入渗能力或超出土壤的保蓄能力时,水在地表积存并发生流动迁移的现象。由此看来,径流是一种正常的自然现象,遍布世界各地,径流产生及产流量受制于地貌类型、土壤类型

和土壤入渗率、植被类型和植被覆盖度、土地利用方式、土壤含水量和土壤容重、降雨强度与历时、不透水面积比例与位置、风向和风速等因素的综合影响。综观全球地球水分循环特征,径流形成过程是陆地水文循环的一个重要环节。从全球观点看,大大小小的径流汇聚形成了河流,推动全球水体循环,对促进农业发展,滋养人类文明产生着积极的作用,生活在河流下游的人们,也正是依赖来自河川上游的径流水资源及其蕴含的极为丰富的营养物质灌溉、滋润着下游的农田,保证那里的人们正常地繁衍生息。从这个意义上讲,一切以径流水资源(河川、水库、冰川、湖泊、塘坝等)作为灌溉水源的灌溉农业,包括绿洲农业等,都是径流集蓄利用农业的形式,分布在河口三角洲、开阔的山前洪积扇、四面八方径流汇聚的盆地,以及依附于流域河口径流源的水库、堰塘、沟坝等工程聚流的灌溉农业,实为径流集蓄农业的精华所在,这可称之为广义上的径流农业。

然而,径流又以其特有的形式——水土流失破坏农业文化,阻碍人类进步,尤其在植被匮乏和降水量少的旱农地区,径流的这种消积作用表现明显,在西北黄土高原地区径流的这种负面作用更为突出。从这个意义上讲,旱作覆盖农业的实质是对径流的拦蓄和水土环境的保护,提高降水的利用率和利用效率。它一方面是控制径流非目标性输出和汇聚非耕地的径流,另一方面是对汇聚的径流资源加以充分、高效的利用。现今的集水农业、集雨农业、聚流农业、窑窖农业等,特指在雨养农区旱作农业较为艰难的半干旱地区的一种有别于灌溉农业的微型径流农业技术,其核心是将较大范围内的降水以径流形式聚集到较小面积的田块中,或者将雨季降雨暂时贮存在贮水容器或土壤水库中,以备作物播种或生长季节抗旱之需,这称之为旱作地区的集雨农业。但旱作地区散见性降雨比较多,低效降水次数多、数量多,难以利用,加之土壤裸露时间长,大量水分通过蒸发损失掉了,抑制蒸发损失是解决旱地缺水问题的核心。

因此,以降水资源化利用为核心,实施非耕地径流向耕地富集和耕地降水就地富集,通过覆盖措施最大限度抑制水分的无效蒸发损失,增加作物水分满足率和土地生产力的综合农业技术体系,称之为旱作地区的覆盖集雨农业。由于灌溉农业已成体系,人们在习惯上将灌溉农业与覆盖集雨农业截然分开,但从本质上看,灌溉农业与覆盖集雨农业同为径流向耕地富集和高效利用。

二、覆盖集雨农业意义及中国实践

水资源短缺是全球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,年降水量在300~550mm,降雨时空分布不均,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和社会经济发展的主要因素。如何充分利用天然降雨、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要研发和推广高效、低廉的旱作栽培技术。旱作集雨栽培技术在中国历史上有2000余年的发展历程,早在公元前157—前87年的《汉书·食货志》中就有“代田法”记载:“耨陇相间,苗生耨中。今岁为垄者,明岁作耨;今岁作耨者,明岁为垄。”

自20世纪80年代地膜引入中国农业生产,经历了几次更新换代。中国集水农业创始人赵松龄教授在20世纪80年代中期便系统地阐明了适合中国西北地区集雨农业发展的新思路 and 新技术。20世纪90年代中期,我国学者提出了生态型集水农业(李凤民,2000)

和集水高效农业概念(马天恩和高世铭,1997);90年代后,根据旱塬农田土壤水库蓄水特征与7—9月雨热同季规律,提出了旱地夏休闲期农田覆膜集雨保墒土壤水库扩蓄增容概念,研究形成了旱地冬小麦周年覆膜降水高效利用技术(樊廷录,王勇等,1999),在陕西渭北旱塬提出了夏休闲期地膜与秸秆全程覆盖高效用水技术(韩思明,2001)。最近10多年,集水农业在西北雨养农业区得到了长足发展,其中核心技术就是秋覆膜保墒技术、垄沟集雨全膜覆盖技术。以甘肃省为例,2013年以来该技术年推广面积1000万亩^①,在玉米、小麦、马铃薯等所有大宗作物及其他经济作物得到广泛应用。该技术主要利用田间起垄、沟垄相间、垄面产流、沟内高效集雨,并依靠增温、抑蒸等生理生态效应,已经作为水分缺乏的干旱和半干旱地区一项重要的抗旱措施。沟垄覆盖结合的栽培模式可使当季无效和微效的降水形成径流,叠加到种植沟内,覆盖之后还可抑制下层土壤水分的无效蒸发,促进降水下渗,改善作物根区的土壤水分供应状况,进而提高作物产量和水分利用效率。

大量的研究表明,垄沟结合地膜、禾草、秸秆和砾石等覆盖材料通过合理的耕作还具有提高作物养分利用率,增加土壤表面温度,活化土壤养分,缓解水土流失,抑制土壤盐碱,改善作物光照条件和提高光合强度等作用,最终促进作物生长发育和实现产量品质的提高。发展至今,该技术不仅广泛应用于小麦、玉米、马铃薯等大宗作物上,如谷子、苜蓿等其他小杂粮和牧草栽培中同样也得以实现。

垄沟覆盖集雨技术为缓解日益增长的人口与粮食紧缺的矛盾,目前在旱地农业的生产中发挥着至关重要的作用。然而,当前以追求高产和经济效益最大化为目的,对该技术,尤其是垄沟地膜覆盖技术进行多年重复的单一操作势必使潜在可持续问题日益凸显,如土壤质量下降、地膜残留和土壤底墒下降等问题。在黄土高原雨养农业区,多年高强度耕作、作物秸秆难以还田、降水时空分布不均衡等导致土壤肥力衰退,土地承载力下降,严重影响该地区农业和环境的可持续发展。学术界已经重视并致力于该方面的研究,但是在生产实践中仍面临较大的挑战。

三、农田覆盖集雨技术研究进展

对垄沟覆盖集雨栽培技术的现状进行总结,分析可能带来的环境恶化和气候变化问题,为其在未来的应用和发展提出一些建议和意见。

(一) 沟垄集雨和覆盖系统的设计

田间微集雨和覆盖技术一般为垄沟相间排列,垄上产流,沟内集流,在沟内种植作物,两者共同构成了田间微集雨种植系统,称为沟垄系统。因作物类型、当地气候条件、耕作习惯和生产实践等因素,垄沟覆盖栽培体系设计包含了丰富的内容,主要包括垄沟尺寸比例、覆盖物类型、覆盖持续时长等。由于不同设计的沟垄和覆盖模式在不同气候条件和作物栽培下均会产生各异的雨水收集和利用效率,进而形成不同的田间气候、土壤、水分微环境,最终导致作物产量和水分利用效率的明显不同。田间设计模式在黄土高原旱地

^① 1亩≈667平方米,全书同

农业区的种类较多,地域差异也很大。

1. 垄沟比例

对于垄沟规格的设计,依据作物类型、降水量等因素的不同,同样有差异性表现。以马铃薯为例,有研究指出通过对经济产量和沟垄的宽度进行回归分析,发现在年降水量300~450mm的半干旱地区,最佳沟垄比为60cm:40cm,马铃薯经济产量最高,而在降水量较高的地区没有发现固定的设计模式。近年来,在各地政府推动下,黄土高原半干旱地区推广全膜双垄沟播高产玉米栽培技术。该技术按照模式化的垄沟尺寸和地膜覆盖可以获得较高的产量,垄沟尺寸比例以30cm:70cm和60cm:60cm的种植模式较为广泛。

垄沟覆盖栽培技术的种类较多,不同自然条件对技术的要求均不相同。通过总结在不同作物类型下能带来相对高产和普适性较好的设计模型发现,对于大宗作物玉米而言,半干旱偏旱地区垄沟宽度比为60cm:60cm是相对较为广泛采取的种植模式,甘肃全膜双垄沟宽垄70cm和小垄40cm。马铃薯属喜凉作物,较小的垄沟宽度能够很好地形成郁闭的冠层从而改善地下部分的生物量积累,50cm:50cm的垄沟宽度比例是半干旱和干旱区较为普遍适用的。对于一些密植作物,如小麦、燕麦、谷子等,因受种植密度、农业机械的限制,目前尚未发展出推广成熟的垄沟覆盖栽培模式。

2. 覆盖材料

目前,国内外传统覆盖材料有沙石、卵石、树叶、畜粪、谷草、秸秆、油纸、瓦片、泥盆、铝箔和纸浆等。黄土高原旱地雨养农业生产实践中主要依靠地膜,这主要是因为地膜抑蒸效果好、增产效果显著且价格低廉所致。随着保护性耕作农业受到广泛关注,一些环境友好型的覆盖物如禾草、作物秸秆、树叶及砾石等材料逐渐被采用。近年来,随着覆盖技术有利于农田生态环境良性发展的转变,新型覆盖材料开始问世,例如生物降解膜和液态膜覆等也正在研发之中,它们不仅满足普通地膜蓄水保墒效果和增产增收效应,也能降低对环境的污染。

3. 覆盖农具

伴随地膜覆盖栽培技术的日益成熟和完善,与之相配套的农机设施也得以广泛的发展和推广。因黄土高原主要农业产区地理条件所限,近年来以发展中小型机械化,以及半机械化农具等配套设施为思路的农机创新,对促进地膜覆盖技术的高产高效发挥了至关重要的作用。以全膜双垄沟栽培技术为例,从播种前土地整理至垄沟修筑,地膜覆盖到播种,再到中期追肥及后期地膜回收,相配套的农机具依次有:整地机、起垄覆膜机、播种机和残膜回收机。就整地机而言,一些集灭茬、旋耕和深松于一体的联合整地机的发展避免了多次扰动土壤给土壤环境带来的不利,如1GSZ-350型灭茬旋耕联合整地机,1LZ系列联合整地机。最新研制的起垄施肥铺膜机,可完成起垄、施肥、喷药、铺膜和覆土压膜联合作业,2BFM-8玉米全膜双垄沟播种施肥起垄覆膜机,能一次性完成田间松土整地、深施化肥、开沟起垄、大小双垄成形和铺膜覆土压膜作业过程,在该机具上安装开沟器,拆除起垄铺膜覆土装置后,可实现对小麦、黄豆、糜子、油菜等作物的机械播种,达到一机多用的功能。为了更有效地贮存播前水分,目前全膜双垄沟栽培技术在覆膜时间上较作物播种时间早,如秋覆膜、顶凌覆膜等,这使得耕作一体化的农具发展较为受限,尽管目前已经出现了一些集土地整理、起垄覆膜、施肥和播种等于一体的农具设备,但增产效应不

及提前覆膜后播种的耕作措施明显。针对地膜残留问题,近年来同样发展的一些回收装置使得这一问题在很大程度上得以缓解。如 1SM-II 地膜回收机,05-2 残膜回收机,SMJ-2 地膜回收条机,4JSM-1800 棉秆还田及残膜回收联合作业机,4MBCX-1.5 棉花拔秆清膜旋耕机等,均针对作物收获后农田土壤中的地膜残留进行设计。尽管,一系列配套于全膜双垄沟栽培技术的农机设备在近年来得以发展和应用,但对地块地理条件要求高、一种作物和技术对一种农机、系统化程度低而导致的未能灵活拆装和组合,实现多子模块协调控制和综合管理等诸多问题仍亟待解决。

4. 田地选取、施肥和播种问题

全膜双垄沟栽培技术其设计思路围绕建造农田降雨的产流面和收集区供作物生长所需。这便决定了该技术对田块的选择有一定的限制。目前的研究表明:选择地势相对平坦,坡度在 15° 以下的地块最为适宜。在一些坡度较大的山区或沟壑地带,该技术在集雨效率上将受到不同程度的影响。全膜双垄沟栽培技术下作物的播种时间一般取决于当地的气候条件和品种本身特征,最低的要求是 $5\sim 10\text{cm}$ 表层土壤温度通过 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ 被认为是可进行播种操作。播种深度一般为 $3\sim 5\text{cm}$,每穴下籽 $2\sim 3$ 粒,并用细沙土封严播种孔,以防散墒和遇雨板结而影响出苗。根据品种特性和土壤肥力状况确定种植密度,肥力较高的地块株距 $27\sim 30\text{cm}$,每公顷保苗 63 000 株左右;肥力中等的地块株距 $30\sim 35\text{cm}$,每公顷保苗 55 000 株左右。肥力稍差的地块株距 $35\sim 40\text{cm}$,每公顷保苗 48 000 株左右。施肥可分底肥和追肥两个阶段,底肥的实施可在起垄覆膜前进行或利用机械设备实现一体化,施肥位置在种子一侧 $5\sim 7\text{cm}$,土深 $7\sim 10\text{cm}$ 为宜。作物中后期的追肥可按照作物自身的需肥特征曲线进行叶面喷施和根旁侧点施。

(二) 田间水分动态变化

1. 土壤水分迁移和变化

在黄土高原干旱半干旱区,降水主要集中在 7—9 月,占全年降水的 60% 左右,造成雨季与春季作物生长季的严重错位。而垄沟覆盖系统主要从时间和空间上拉小了黄土高原作物需水期和雨水供给期错位的矛盾。

一方面,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。研究指出垄沟覆膜能把小于 5mm 的无效降水转化为有效水分贮存于土壤中,平均集水效率 90%。

另一方面,垄沟并辅之以覆盖材料在蓄水基础上实现了保水,改变了降雨空间分布。沟内覆盖地膜、秸秆、禾草、沙石等有效抑制了蒸发,也为垄上顺利节流创造了条件,尽可能将自然降雨最大化接纳到沟内种植区,最大限度满足作物对各个生育期水分的摄取。与露地种植相比较,垄沟全膜种植模式能够明显的提高土壤水分,表现出随生育进程的变化土壤水分向深层增加的趋势,这种土壤水分的增加趋势对于缓解各生育进程的干旱威胁有一定的作用。同时它还能改变作物耗水模式,即减少前期蒸发、增加后期蒸腾,促进了干物质积累,从而使水分消耗由物理过程向生理过程转化,由无效消耗向有效消耗转化。

2. 土壤径流

径流是地表水循环重要过程之一，是地表土壤侵蚀和物质迁移的主要动力，径流的形成源自于降雨，当它超过下渗强度时的降雨到达地面以后就会形成土壤的径流，造成水土流失。坡耕地也是中国水土流失的主要区域之一，每年的土壤流失量约为 15 亿 t，占全国水土流失总量的 1/3。

黄土高原是中国乃至全球水土流失最严重的地区之一，降雨大部分集中在作物生长后期，极易突发暴雨，土壤表面遭受严重的冲刷破坏，熟土层减薄、土壤肥力流失严重，生态环境极其脆弱。垄沟覆盖栽培模式由于垄沟存在改变了地表微地貌，粗糙度改变，提高土壤抗冲抗蚀能力，特别在暴雨多发季节，可以通过增加地表粗糙度来减少或延缓降雨的径流损失。在黄土丘陵沟壑半干旱雨养农业区坡耕地采用双垄全膜覆盖沟播栽培，因降低了水分流失率和土壤流失量，具有良好的减少土壤水土流失的作用。

杂草、秸秆、沙石等覆盖材料同样是增加土壤粗糙度的一种有效途径，可以使雨水不直接落入土壤表面，阻断了雨水与土壤的直接接触。且由于土埂起阻碍作用，使降雨在地里滞留时间更长，从而增加水分渗透量，减少地表土壤流失。土壤质量高低是决定农业生产的基础，沟垄覆盖栽培方式为黄土高原改变地表径流，防止水土流失，提升耕地质量，增加耕地产出做出了很大贡献。

3. 水分利用效率

在水分资源短缺的黄土高原半干旱地区，提高作物产量的有效途径便是对有限水分的高效利用。农田水分利用效率的提高主要通过栽培措施的有效集雨和作物本身的高效利用两个方面实现，垄沟覆盖栽培技术对雨水的有效收集可分为时间和空间两个方面。

空间上，通过设计田间微集雨场将水分收集在种植区，即通过垄沟交替布置，以垄面为田间微集雨面，雨水通过垄侧的叠加汇集于种植沟内供作物所需。垄沟地膜覆盖栽培可将降水量小于 5mm 的无效降雨叠加汇集转化为作物利用的有效水资源，覆膜特别是提高了降水量小于 10mm 的农田降水资源化程度，改善作物根际土壤水分状况，干旱和正常年份均能显著提水分利用效率。受黄土高原特殊地貌、温带大陆性季风气候影响，降雨存在很大变率，加之农业生产中技术投入、推广和生产实践的不同步性等矛盾，致使大部分地区还存在着自然降水大量流失、水分利用效率低等问题。

时间上，秋季覆盖和顶凌覆膜将非生长季的降雨收集贮存下来用于作物生长季，它通过对天然降水的时空调控，达到秋雨春用，实现了降雨在时间上的就地调节，以秋前覆膜为例，它明显抑制了土壤冬春季水分散失，一方面可以解决当地春旱玉米春播难问题，另一方面，在玉米生长中后期（吐丝期—成熟期）可以将深层水分提到上层供玉米生长所需，具有保持和提高耕层含水量的作用，显著改善玉米生长的水分环境，提高了作物水分利用效率。

垄沟覆盖栽培技术在高效雨水收集的基础上，使作物摆脱了旱季胁迫，保证了播前水分，改善了雨水渗透作用，协调了水热关系，从而提高了作物水分利用效率。但是不同作物之间的水分利用效率存在着差异，一般来说， C_4 植物的水分利用效率比 C_3 作物高出 2.5~3.0 倍。以小麦和玉米对比发现，在年降水量比较接近的陕西杨凌和合阳两地，相比于传统耕作模式，垄沟覆盖栽培对土壤水分利用效率的提高玉米更为显著。而受地区间土