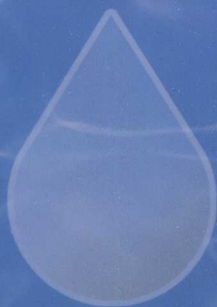
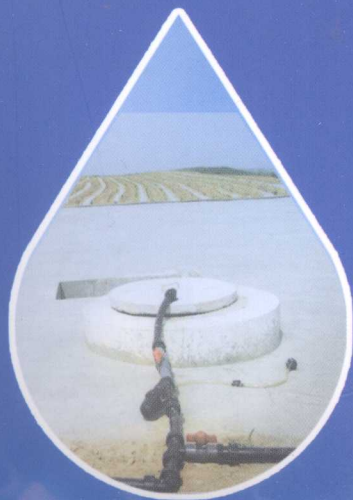




北方半干旱黄土丘陵区

集雨补灌旱作节水农业技术

程满金 郑大玮 马兰忠 等著



黄河水利出版社

北方半干旱黄土丘陵区 集雨补灌旱作节水农业技术

程满金 郑大玮 马兰忠 等著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书主要针对北方半干旱缺水地区的自然条件与特征,以集雨补灌旱作节水农业综合技术集成与示范为主题,系统地论述和介绍了雨水资源利用在半干旱区旱作农业中的地位 and 作用、半干旱黄土丘陵区雨水收集潜力评价、雨水高效收集与存贮技术、集雨补灌技术与补灌制度、集雨补灌旱作农业综合配套技术、北方半干旱黄土丘陵区集雨补灌旱作节水农业技术集成模式、集雨补灌节水农业效益的评价等,具有较强的实用性和可操作性。可供从事旱作节水农业技术研究和雨水集蓄利用工程建设的专业技术人员及有关地区的旱作农业技术推广人员参考,亦可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

北方半干旱黄土丘陵区集雨补灌旱作节水农业技术/
程满金等著. —郑州:黄河水利出版社,2009.3

ISBN 978-7-80734-575-6

I. 北… II. 程… III. 黄土区-丘陵地-旱作农业-
节约用水-研究-中国 IV. S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 019397 号

策划组稿:马广州 电话:13849108008 E-mail:magz@yahoo.cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:19.5

插页:4

字数:450千字

印数:1—1 100

版次:2009年3月第1版

印次:2009年3月第1次印刷

定价:48.00元

序

本书是以程满金教授为首的国家“863”农业节水重大专项集雨补灌内蒙古准格尔旗示范区项目组,历时4年完成的在旱作农业区发展集水农业的一本专著。旱作农业区是我国主要的低产地区,也是贫困人口最为集中的地区。特别是我国西北和华北的半干旱山区,地面、地下水严重匮乏,农业生产靠天吃饭,水平低下,结构单一。这里水土流失严重,土壤侵蚀居全国之首。过度的开垦又使土地进一步退化,形成“越穷越垦,越垦越穷”的恶性循环。尤为严重的是许多农村没有安全饮用水的保证,人的基本生存需求得不到满足。我国近20年来兴起的雨水集蓄利用为旱作农业区的生存和发展找到了一条有效途径。传统旱作农业措施的基本原理是把天然降水最大程度地转化为土壤水并提高土壤水的利用效率。雨水集蓄利用则是采取人工措施收集和贮存雨水,并加以高效利用。与传统旱农措施相比,它对雨水的富集和调控能力大大增强,使雨水资源的利用率和效益提高到一个新的高度。因而在传统旱农技术基础上发展起来的雨水集蓄利用,是旱作农业区雨水资源开发利用的新阶段,也是对雨水资源利用上的创新思维。雨水集蓄利用近20年的发展实践证明,它能够较大幅度地增加作物单产,提高土地的生产力;能为调整农业结构提供水分条件,发展地方特色农业,增加农民收入。利用集蓄的雨水在作物生长关键期进行有限度的补充灌溉,其水分生产率大大高于一般的常规灌溉水平,而且使包括天然降雨在内的整体水分利用率得到提高。目前,雨水集蓄利用已经成为许多省区农村可持续综合发展的一项战略性措施。可以预见,雨水集蓄利用的进一步发展,将促使我国的旱作农业发生突破性的进展。

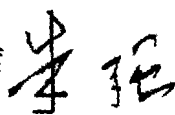
雨水集蓄利用工程在我国的发展也促进了这一领域学科研究的进展。20世纪80年代末期以来,我国的有关省区科技人员,在总结传统技术的基础上,取得了雨水集蓄利用的一批重要研究成果。在雨水集蓄利用学科界定、雨水集蓄系统的设计方法、新材料的开发研制、集雨节灌的原理和方法以及作物对有限供水的响应等问题上都取得了重要进展。在大量研究示范成果的基础上,雨水集蓄利用工程方面许多著作相继问世。我国2001年颁布的《雨水集蓄利用工程技术规范》是世界各国最早的一部由国家水主管部门正式颁布的本领域的技术法规,它的产生把雨水集蓄利用作为一项工程技术加以规范化。上述这些研究成果和学术著作对推动雨水集蓄利用向高效、规范、创新的方向发展起到了积极的推动作用。

本书是我国雨水集蓄利用学科的又一部力作,其最大特点是应用系统工程的方法,从雨水集蓄、集水农艺和社会经济与管理等方面对雨水集蓄利用的技术集成、开发模式和技术经济问题进行了深入的分析研究。书中提出了适合黄土高原集雨补灌旱作农业区的集雨高效种植型、集雨生态畜牧型和庭院集雨经济型3种发展模式,分别对这些模式的技术集成、技术经济指标作了深入探讨和阐述。本书在现场试验的基础上,提出了示范区主要农作物的适宜灌溉制度和灌溉方法,总结了农作物集雨补灌模式,对半干旱山丘区发展集

雨低定额补灌的实践有重要的指导意义。书中还对雨水集蓄工程的新材料、新结构,特别是固化土的技术经济性能及施工方法做了详尽的介绍。作者还采用“3S”技术对示范区的可集雨水资源进行了计算,是一项重要的前瞻性和开创性的研究。此外,书中对在雨水集蓄条件下的综合旱作农牧技术也作了论述。本书是在4年示范研究所得大量实际资料的基础上写成的,源自实际,又进行了理论提高和创新,因而具有很强的实用性和科学性。相信这部专著的出版必将对我国雨水集蓄利用工程技术和旱作农业的发展起到十分重要的指导作用。衷心感谢这一专家群体的辛勤劳动和无私奉献精神,使我国从事雨水集蓄利用和旱作农业发展研究的同行们得以分享他们的精湛知识宝库。

国际雨水集流系统协会原副主席

2008年12月29日



前 言

随着世界范围内的干旱加剧及水资源的日益紧缺,开发利用雨水资源已成为缺水国家和地区解决用水危机、发展生产的新途径,因此受到普遍重视。特别是从联合国在 20 世纪 80 年代发起“国际供水与卫生十年”以来,雨水利用这一项古老的技术迅速在世界各国复兴和发展,成为许多国家解决水资源不足,特别是解决农村人口生活用水困难的一个重要途径。

我国在雨水利用的生产实践方面历史悠久,20 世纪 80 年代以来,雨水集蓄利用在现代科技的支撑下得到进一步发展,在西北、华北、西南有关省区的缺水山丘区以及沿海岛屿兴建了大量的雨水集蓄利用工程,在解决生活用水的同时,将雨水集蓄利用扩大到旱作农业补灌上,积累了许多好的经验,对促进干旱缺水地区农业增产起到了十分显著的作用。实践证明:雨水集蓄利用是半干旱山丘缺水地区解决群众饮水困难、帮助农民摆脱贫困和发展生产的有效途径,是发展山丘区水利、推动旱作农业上新台阶的好形式,是缺水山丘区实施可持续发展的一项战略性措施。

为了充分发挥科学技术第一生产力的作用,依靠科技进步加快我国节水农业的发展,建成一批具有显示度的现代节水农业技术集成示范区,促进农业节水技术水平的提升,实现节水农业产业的跨越式发展,国家启动实施了“十五”节水农业重大科技专项“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”,“北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业综合技术体系集成与示范”是专项中的技术集成与示范类课题。示范区位于黄土高原北部的内蒙古自治区准格尔旗境内,建设规模 1 万亩,2005 年 10 月通过了国家科技部组织的验收,2005 年 12 月通过了内蒙古科技厅组织的鉴定,成果总体上达到国际先进水平,并获得内蒙古自治区科技进步一等奖。本书是该项研究的系统总结,可作为从事旱作节水农业研究和雨水集蓄利用工程建设的参考。

本书第一章由郑大玮、程满金、张建新编写;第二章由张建新、郑大玮、潘学标编写;第三章由冯浩、李少斌、高建恩编写;第四章由马兰忠、李兴、李彬、程争鸣、冯婷编写;第五章由妥德宝、段玉、潘学标、林启美、王砚田、龙步菊等编写;第六章由陈正新、王丽娟编写;第七章由马治国、马兰忠、郑大玮编写;第八章由郑大玮、程满金、张建新编写;第九章由程满金、邬来广、马兰忠、杜广兵编写;第十章由程争鸣、马兰忠编写。全书由程满金、郑大玮、马兰忠统稿。由于编者水平所限,加之试验研究的时间较短,对有些问题的认识仍需不断深入,书中难免有错误与不当之处,敬请广大读者批评指正。

参加本项目研究的人员还有孙惠民、奇·达楞太、闫树国、郭少宏、宋跃兴、傅贵锁、李贵桐、赵小蓉、苏艳华、张磊、李巧珍、唐小娟、邬福师、韩占全、袁虎、刘双全等。朱强等专

家对本项目研究始终给予关注和指导。另外,本研究在执行过程中得到国家科技部、内蒙古科技厅、内蒙古水利厅、内蒙古水利科学研究院、内蒙古农牧科学院、中国农业大学、西北农林科技大学、准格尔旗人民政府及准格尔旗水利局等单位的支持,在此一并表示衷心感谢!

编 者

2008 年 12 月

目 录

序	朱强
前 言	(1)
第一章 雨水资源利用在半干旱区旱作农业中的地位和作用	(1)
第一节 北方半干旱区旱作农业现状及存在的问题	(1)
第二节 国内外旱作农业雨水资源利用概况	(5)
第三节 北方半干旱黄土丘陵区雨水资源农业利用现状	(11)
第四节 黄土高原北部丘陵沟壑区的雨水资源化与农业利用	(19)
参考文献	(22)
第二章 半干旱黄土丘陵区雨水收集潜力评价	(25)
第一节 影响雨水收集潜力的因素	(25)
第二节 区域可收集雨水资源的时空分布	(28)
第三节 基于“3S”技术的可收集雨水资源潜力的计算与分析	(37)
参考文献	(45)
第三章 雨水高效收集与存贮技术	(46)
第一节 高效集雨面材料的研制、筛选及技术参数研究	(46)
第二节 集流面工程设计及施工方法	(63)
第三节 集雨存贮工程设计与施工	(72)
参考文献	(76)
第四章 集雨补灌技术与补灌制度	(77)
第一节 集雨补灌的特点与原则	(77)
第二节 提水设备与技术	(78)
第三节 旱作农业的集雨节水补灌技术	(83)
第四节 主要作物的集雨补灌灌溉制度	(90)
第五节 集雨补灌与作物水模型研究	(100)
第六节 集雨补灌的几种模式与实例	(130)
参考文献	(134)
第五章 集雨补灌旱作农业综合配套技术	(136)
第一节 半干旱黄土丘陵区旱作农业的发展方向	(136)
第二节 区域适应性抗旱品种及合理布局	(140)
第三节 黄土高原北部丘陵区的集雨保墒耕作技术	(145)
第四节 抗旱保墒技术	(151)
第五节 主要作物水肥耦合高效利用技术	(157)

第六节 土壤水库扩蓄增容的微生物技术	(162)
第七节 黄土高原北部丘陵区地形气候及开发利用前景	(184)
第八节 黄土高原北部丘陵区气候资源利用与种植结构优化	(194)
参考文献	(207)
第六章 北方半干旱黄土丘陵区集雨补灌生态畜牧业配套技术	(209)
第一节 半干旱黄土丘陵区植被资源与畜牧业现状及存在的问题	(209)
第二节 半干旱黄土丘陵区的植被恢复、营建与保护	(211)
第三节 半干旱黄土丘陵区草地生产力测定与评价	(218)
第四节 半干旱黄土丘陵区生态畜牧业技术集成	(222)
参考文献	(227)
第七章 北方半干旱区庭院雨水高效利用经济模式	(228)
第一节 黄土丘陵区庭院经济现状	(228)
第二节 黄土丘陵区庭院雨水收集潜力与集雨配套工程	(234)
第三节 庭院集雨高效利用转化技术	(238)
第四节 内蒙古庭院雨水集蓄利用工程与庭院经济的实例	(244)
参考文献	(249)
第八章 北方半干旱黄土丘陵区集雨补灌旱作节水农业技术总体模式	(251)
第一节 集雨补灌旱作节水农业技术总体模式的提出	(251)
第二节 总体模式的基本框架	(252)
第三节 总体模式的生产应用子模式	(256)
第四节 总体模式在示范区的初步应用与改进方向	(270)
参考文献	(271)
第九章 集雨补灌示范区的建设与管理	(273)
第一节 示范区建设的组织管理	(273)
第二节 示范区建设运行管理机制	(275)
第三节 微小型水利工程的管理体制与运行模式	(280)
第四节 科技推广工作	(282)
第十章 集雨补灌节水农业效益的评价	(284)
第一节 示范推广的主要内容	(284)
第二节 示范区效益分析与评价	(286)
第三节 辐射区的推广效益及成果应用前景	(302)

第一章 雨水资源利用在半干旱区旱作农业中的地位和作用

第一节 北方半干旱区旱作农业现状及存在的问题

一、旱作农业的重要意义

(一) 旱作农业的范畴与分布

旱作农业(Dryland Farming)是指半干旱地区或半湿润易旱地区依靠天然降水从事作物生产的农业,是雨养农业的一种,不同于干旱或极端干旱地区完全依靠灌溉的农业,也不同于降水充足的湿润地区的非灌溉雨养农业及具有排灌条件的水田农业。

1977年联合国教科文组织综合世界各地1600个气象站的资料,按湿润指数 K ,即当地年降水量与潜在蒸散量之比,把全球陆地的干旱地区划分为极端干旱地带、干旱地带、半干旱地带和半湿润地带。

(1)极端干旱地带。 $K < 0.03$,相当于真正的沙漠,全年甚至数年无雨。除有灌溉的绿洲外都不能从事农牧业生产,仅沙漠边缘有一些以骆驼为主的放牧业。

(2)干旱地带。 $0.03 < K < 0.20$,地面有多刺肉质植物和稀疏的一年生植被,一般不能进行旱作农业,但可从事游牧业。

(3)半干旱地带。 $0.20 < K < 0.50$,包括草原和热带灌木林地,并有不连续的草层和多年生草本植物,可定居饲养牲畜和从事旱作农业生产。

(4)半湿润地带。 $0.50 < K < 0.75$,植被稠密,包括热带稀树草原、常绿高灌木和黑钙土草原。由于人类活动,土壤易受风沙和水的侵蚀。

旱作农业主要分布在半干旱和半湿润地区,更干旱的地区已不能从事旱作生产,完全依赖灌溉。更湿润的地区,即使完全雨养也不属于旱作农业的范畴。世界上旱作农业的主要区域有中国北方、印度中西部、非洲大部、东欧、北美大部、南美中南部及澳大利亚东南部。世界灌溉农田只占耕地面积的16%,雨养农田除热带和亚热带湿润地区外大部分为旱作农田,由于灌溉农业、水田农业和湿润地区雨养农业的产量相对稳定,旱作农业的收成好坏往往决定了全球的农业年景。因此,世界各国对于旱作农业生产都十分重视。北美大平原的中西部为半干旱气候,是美国和加拿大的粮食主产区,也是世界最大的商品粮生产基地。经过半个多世纪的努力,美国已形成以保护性耕作为核心的旱作农业技术体系,大幅度提高了产量水平、稳产程度和劳动生产率。

为了弥补半干旱和半湿润易旱地区降水的不足,世界许多国家在旱作农业地区推广了利用有限水资源的少量水补充灌溉,使得旱作农业与灌溉农业的界限变得模糊起来。

为区分两类农业,我们仍将主要依靠天然降水,只在农作物生育的关键时期如播种、出苗及需水临界期进行极少量补水的农业,称为旱作农业。灌溉水量偏少,但仍在每公顷数百立方米以上的,则属节水灌溉农业。

(二) 中国的旱作农业区域

我国北方旱区,包括干旱区、半干旱区和半湿润易旱区,涉及 16 个省、市和自治区,总人口 4.3 亿人,耕地面积 505 706 万 hm^2 , 占全国耕地面积的 51%, 其中无灌溉条件的旱地面积 3 800 万 hm^2 。根据中国农业年鉴的统计资料,全国粮食总产量的 46%、棉花产量的 61%、大豆产量的 72%、油料产量的 46% 均产自北方旱作农业地区。北方旱作农业地区还拥有许多名特稀优产品,1995 年 6 个省、市和自治区的农产品出口创汇 46.3 亿美元,占全国农产品出口额的 35.6%。从现有生产水平看,绝大多数旱作农田属中低产水平,还有很大的增产潜力。北方旱作农业地区还集中了全国的大多数贫困县,生态环境的退化也很严重。搞好旱作农业生产,对于北方旱作农业地区的脱贫致富与生态治理,对于确保我国的粮食安全、建设现代农业和社会主义新农村,都具有十分重要的意义。

半干旱地区是北方旱作农业地区的主体,自东北向西南斜跨 13 个省和自治区,大致包括东北西部、冀北、晋北、陕北、甘肃中西部、内蒙古部分地区、河北平原中部、青海部分地区及新疆伊犁盆地等,约占全国国土面积的 1/5, 其中耕地、林地和牧地分别约占本区土地面积的 15%、10% 和 42%。年降水量平均为 250 ~ 500 mm。年平均气温从 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下到 8 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 1 500 ~ 5 000 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 无霜期 100 ~ 200 d。干旱、风沙、低温、霜冻、冰雹等灾害频繁发生,低平地还有夏涝的威胁。

半干旱地区在我国旱作农业中占有重要地位,具有悠久的旱地耕作栽培历史。主要作物是春小麦、玉米、高粱、谷子、大麦、莜麦、马铃薯、花生、向日葵、甜菜及豆类等。多为一年一熟,产量低而不稳,半干旱地区的耕地面积约 2 000 万 hm^2 , 灌溉农田只占 20%, 主要分布在河流沿岸,单位面积产量仅为全国平均值的 1/2, 其中典型半干旱地区,如黄土高原丘陵沟壑区,灌溉面积不足 10%, 单产仅为全国平均值的 1/3。

半干旱地区农业生产的主要问题如下:

(1) 水土流失和干旱缺水是农业生产的主要障碍。东北西部、长城沿线至宁夏、甘肃沙漠边缘及内蒙古东部,风蚀和土壤沙化严重,主要发生在冬春季。水蚀主要发生在夏季,最为严重的是在半干旱黄土高原,即甘肃中东部、宁夏南部、晋陕蒙接壤地区、山西大部 and 河南西部。干旱以春季最为频繁,有些年份春夏连旱常造成农作物大面积绝收。部分土石山区和黄土高原丘陵沟壑区人畜饮水困难。加上多数地区土壤贫瘠,除少数低平原和灌区外,半干旱地区的旱作农业单产普遍较低,肥料、燃料和饲料矛盾突出,生态平衡严重失调。

(2) 农业生态、经济结构失衡。大多数地区垦殖过度,种植业比重过大,土壤肥力逐年递减,产量低而不稳。植被破坏加重了土地风蚀和水蚀。牧区的草场普遍超载,退化严重。由于饲草饲料储备不足,抗灾能力差。

(3) 农业的产业化水平较低,耕种粗放,农田物质和能量投入少,广种薄收,只能维持低水平的物质循环。农村经济结构单一,农民收入和科技文化素质明显低于全国平均水平。

山仑、康绍忠等指出：“我国半干旱地区农业的可持续发展战略应该以实现资源的高效利用、提高作物生产力为目标，在协调、优化和永续利用农业资源和改善生态环境的基础上，重点实施以水土资源高效利用和基因资源的潜力开发为中心的旱地农业科学技术体系，服务于半干旱地区社会经济、食物、资源、环境的可持续发展。旱地农业与补充灌溉相结合的供水制度为同时实现节水与增产提供了一条新的途径。”

二、中国北方旱作农业的现状与增产潜力

我国北方旱作农业地区由于水资源短缺和土壤相对贫瘠，目前的生产水平和水分利用效率 (Water Use Efficient, WUE) 都较低，尚有较大的增产潜力 (见表 1-1)。按照理论值，还有一倍以上的增产潜力；按照目前试验田的高产水平，也有 46% ~ 73% 的增产潜力。

表 1-1 北方旱作农业地区的生产水平与水分利用效率

类型区	理论值		试验值		现实值	
	单产 (kg/hm ²)	WUE (kg/(mm·hm ²))	单产 (kg/hm ²)	WUE (kg/(mm·hm ²))	单产 (kg/hm ²)	WUE (kg/(mm·hm ²))
半干旱偏旱区	2 917.5	11.76	1 894.5	7.64	1 293.0	5.21
半干旱区	3 831.0	13.53	2 602.5	9.20	1 633.5	5.78
半湿润偏旱区	10 032.0	27.12	8 362.5	22.61	4 825.5	13.05
平均	5 593.5	17.57	4 287.0	14.82	2 584.5	8.01

北方旱作农业的增产潜力在自然条件下表现在三个方面：

第一，人均土地资源相对丰富。北方旱作农业地区人均耕地 0.119 hm²，人均草地 0.426 hm²，人均果园面积 0.01 hm²，分别为全国平均水平的 134%、156%、153%，而且集中了占全国 85% 以上的后备可开垦土地资源。

第二，光热资源较为丰富。年太阳总辐射 $46 \times 10^8 \sim 63 \times 10^8$ J/m²，其中光合有效辐射 $22 \times 10^8 \sim 28 \times 10^8$ J/m²，比我国南方湿润地区要高出 30% ~ 50%。全年 10℃ 以上活动积温 1 600 ~ 4 800℃·d，比我国南方湿润地区的 5 000 ~ 8 000℃·d 明显偏少，一般只能种植一季作物。但北方旱作农业地区的光热水资源匹配较好，作物生长盛期的气候生产潜力要高于世界同纬度其他地区。如能采取补水播种、地膜覆盖或育苗移栽等措施以克服春季干旱低温的不利条件，增产潜力是很大的。

第三，单位面积的地表径流和地下水等常规水资源虽明显少于湿润地区，但由于土地辽阔，多数旱作区的人均雨水资源比较丰富，如内蒙古的准格尔旗年降水量不足 400 mm，但人均降水资源量却超过了 10 000 m³，是我国现有人均水资源量 2 200 m³ 的 4 倍多或全国人均降水资源量的 2 倍多。如能通过集雨工程，将其中一部分降水资源用于旱作农业关键期的补充灌溉，增产效果将相当可观。

从“七五”开始，国家重点攻关项目“旱地农业增产技术”先后建立 8 个试验区，经过 4 个五年计划的试验研究，总结出具有中国特色和区域特点的旱作农业配套技术体系，包括

以改土兴水为重点的农田基本建设、覆盖技术、抗旱品种选育、粮草肥轮作技术、化学抗旱、农田耕作保墒和就地集雨等,推广各类实用技术成果 400 多项。1985 ~ 1995 年期间作物水分利用效率提高了 7 个百分点,粮食总产增幅比全国平均增幅提高 15.7 个百分点,并带动了整个北方旱作农业地区的技术进步和农村经济发展。

三、中国旱作农业存在的问题与发展方向

与世界旱作农业的先进国家相比,我国旱作农业生产还处于较低水平,作物的降水利用效率比美国和澳大利亚分别低 25% 和 17%,劳动生产率更是相差几十倍乃至上百倍。主要存在以下问题。

(一) 农业生态环境脆弱,自然灾害严重

北方旱作农业地区是我国水土流失和风蚀荒漠化最严重的地区。其中黄土高原的水土流失面积达 45 万 km^2 ,每年通过三门峡下泄泥沙总量达 16 亿 t,带走养分折合化肥纯量 3 800 万 t,接近全国一年的化肥总产量。黄土高原中北部水蚀最严重的准格尔旗等地年侵蚀模数超过 1 万 t/km^2 。农牧交错带的中西部则是我国风蚀荒漠化最严重的地区,最大年侵蚀模数也接近 1 万 t/km^2 ,成为影响内地大气环境质量的重要沙尘源区。这一地区的干旱、霜冻、山洪、大风、冰雹等气象灾害也十分严重。如 2005 ~ 2007 年连续 3 年的严重干旱使阴山北麓旱作农业区的粮食减产 50% ~ 70%。

(二) 农村经济基础薄弱,农业生产经营粗放

北方旱作农业地区集中了全国大多数贫困县,农村产业构成低级,乡镇企业数量很少,农业内部种植业产值比例高达 2/3,单产低而不稳。单位面积物质投入约为全国平均的 1/2,产投比很低,农田水分利用率只有 40% ~ 45%,肥料利用率也只有 30% ~ 35%。

(三) 旱作科技水平有待提高

虽然近 20 多年北方旱作农业的科技进步比较显著,在国家农业生产布局中的地位有所上升,但总体技术水平较低,仍处于传统农业向现代农业转变的过程中,农业的产业化与集约化水平都较低。近年来,随着北方气候的干暖化,干旱尤其是初夏干旱对农业生产的威胁更加严重,单纯依靠以耕作保墒为中心的旱作农业技术已不能适应气候变化和进一步提高产量的要求。

对此,梅旭荣在总结国家攻关北方旱作农业研究多年成果的基础上提出现代旱作节水农业的发展战略要点是:

- (1) 旱地有限降水资源高效利用技术;
- (2) 旱地农田土壤水库增容技术;
- (3) 旱地集雨与节水灌溉技术;
- (4) 旱地作物化学抗旱节水技术;
- (5) 旱地用养结合型施肥培肥和保护性耕作工程;
- (6) 旱地作物抗逆高产、高效、优质、集约栽培工程;
- (7) 旱地农田水分养分平衡及其调控技术工程。

旱地作物产量取决于可利用水分量与水分利用效率的乘积,即:

$$\text{旱地作物产量 } P = \text{可利用水分 } W \times \text{水分利用效率 } K$$

上述要点中,利用非耕地集雨,对旱地作物进行关键期的补充灌溉具有特别重要的意义。在年降水量远低于作物需求量的情况下,采取各种提高水分利用效率的措施,其效果总要受到有效水分数量不足的限制。通过集雨工程把非耕地的部分降水量转用到旱地,并与提高水分利用效率的措施相结合,无疑将具有更大的增产潜力。为此,山仑院士和康绍忠等提出:“旱地农业与补充灌溉相结合将作为今后半干旱地区农业供水技术的主要选择。由于水资源进一步紧缺,半干旱地区发展大规模常规灌溉已不可能,现有灌溉方式也受到挑战;但随着人口增长和人民生活水平的提高,该地区旱地农业生产也出现了对补充灌溉的要求。随着科学技术的进步,采取旱地农业与补充灌溉相结合的供水制度——有限灌溉制度,将使节水与增产同时实现成为可能。”

第二节 国内外旱作农业雨水资源利用概况

一、雨水收集利用的历史

雨水收集利用在世界范围内已有几千年的历史,正如国际雨水集流系统协会第二任主席 Adhityan Appan 教授在第九届国际雨水集流系统会议上所讲:雨水收集利用技术与大山一样老。无论是降水稀少的以色列 Negev 沙漠地区,还是年降水量在 4 000 mm 以上的西太平洋岛屿上,几千年来当地的居民一直是依靠集蓄利用雨水顽强地生存和繁衍下来。

根据墨西哥的一份报告,公元前 6 000 多年前的阿兹台克(Aztec)玛雅文化时期,人们就把雨水用于农业生产和生活所需,在安第斯山区建有大量梯田和渠系。公元前 2 000 多年的中东地区,典型的中产家庭都拥有雨水收集系统。

我国早在公元前 3 000 多年的周朝在农业生产中就已利用中耕来增加农田的降雨入渗,秦汉时期一些地区筑涝池、塘坝拦蓄雨水用于灌溉。我国在东汉就已出现梯田的雏形,南宋范成大在《骞鸾录》中最早使用了“梯田”的名称。干旱地区修筑水窖也已有几百年的历史。

近几十年来,特别是 20 世纪 70 年代以来,随着世界人口的不断增加和大范围干旱的频繁发生,人类对水的需求量的增大和水资源紧缺的矛盾日益突出,使得世界上许多国家的人民和政府对于雨水收集利用这项古老的技术越来越重视。

二、国际雨水收集利用研究概况

世界最早的雨水收集利用科学试验是澳大利亚 A. S. Kenyon 所做的雨水集蓄利用系统,他用面积为 $2\,415.4\text{ m}^2$ 的白铁皮收集雨水并把它输送贮存到 409.1 m^3 的带盖蓄水池中,并分析了 1878 ~ 1928 年的降水记录,平均年降水量为 304.8 mm。研究表明:即使在降水量最少的年份,该系统也能为 6 个人、10 匹马、2 头牛和 150 只羊提供足够的用水。20 世纪 50 年代,随着第二次世界大战结束和世界经济的复苏,雨水利用技术重新受到人们的重视,特别是进入 20 世纪 80 年代,随着国际雨水集流系统会议的召开和国际雨水集流系统协会的成立,掀起了雨水收集利用理论和技术研究的热潮,内容涉及集水面处理、

集水系统设计、集水模式和收集雨水的高效利用等。到 2007 年,共召开 13 届雨水集流系统会议。主要研究进展可归纳为以下几个方面。

(一) 集水农业可行性研究

从 1956 年至 1968 年,Evenari、Shanan 和 Tadmor 等一批科学家(包括植物学家、考古学家、生态学家、水文学家和水利工程专家)为了揭开古代 Negev 地区繁荣的农业文明之谜,在以色列进行了长达 10 多年的研究,摸清了古代 Negev 人如何在年降水不足 100 mm 的地区,通过收集利用雨水建立起闻名世界的古代文明。首先是采用了下列 3 项雨水收集利用技术:①小流域径流开发,集水面积为 100 hm² 以下,径流系数为 15% ~ 20%;②大流域径流开发,集水面积为 100 ~ 10 000 hm²,径流系数为 3% ~ 6%;③坎儿井。其次,集水区 and 耕作区面积之比为 17:1 ~ 30:1(平均 20:1)时效果较好。他们按照古代 Negev 人的技术,重建了两个集水径流农场。在 Shvithah 农场种植了葡萄树、杏树、桃树、李子树、橄榄树、石榴树和无花果树,用收集的雨水浇灌,一年过后小苗从 40 ~ 50 cm 长到 200 ~ 250 cm 高;在 Avdat 农场种植大麦,取得每英亩 500 kg 的产量。

(二) 集水面处理研究

Oweis 等(1999)将集水面处理方法总结为下列 6 个方面:

(1)清除集水坡面上的植被,移走能截留和阻碍雨水流动的石块及其他物质,以使集水坡面在下降雨滴的不断敲击作用下形成紧实连续的表面硬壳。

(2)通过对集水坡面进行平整压实处理,能减小土壤的渗透性,提高集水效率,注意要在适宜的土壤湿度条件下进行土壤压实处理。

(3)应用化学物质(主要是钠盐)疏散土壤胶体,使其充塞土壤孔隙,降低土壤渗水能力。

(4)应用化学物质(主要是石蜡和沥青)充塞土壤孔隙,使土壤表面形成致密层,增大径流率。

(5)在集水坡面上平铺混凝土板、木板或金属片等刚性材料,这种方法成本高,但使用寿命长(可用 20 年以上)。

(6)在集水坡面上覆盖塑料膜、橡胶布和用沥青处理过的玻璃纤维等软性材料,这种方法的成本也比较高。

各种方法的处理效果和使用寿命见表 1-2。

表 1-2 不同集雨方法的处理效果和使用寿命

项目	地表清理	平整土地	钠盐	石蜡	混凝土	薄膜	沥青	人造橡胶
径流系数(%)	20 ~ 30	25 ~ 35	40 ~ 70	60 ~ 90	60 ~ 80	70 ~ 80	85 ~ 95	90 ~ 100
使用寿命(年)	5 ~ 10	5 ~ 10	3 ~ 5	5 ~ 8	20	10 ~ 20	15	15

(三) 集水系统分类研究

Boers 和 Ben-Asher(1982)将此前世界各地的集水系统分为两类:

(1)微型集水区集水系统(Micro-Catchment Water Harvesting, MCWH)。它是指收集面积为 0.5 ~ 1 000 m² 的集水区(Contributing Area, CA)上的地表径流,经过不大于 100 m 的距离,存入邻近的入渗区(Infiltration Basin, IB)的根系土壤。CA 和 IB 是 MCWH 的两

个基本元素,其面积之比是 MCWH 设计的关键参数,也是各国研究的重点,但得出的数值相差很大,为 1~25,这主要是由于各地气候、土壤条件和作物需水量不同所致。MCWH 的优点是径流系数高、投资少、易建造;缺点是单位面积产量低、工程占地较多、作物种植区较小。

(2) 径流农场集水系统(Runoff Farming Water Harvesting, RFWH)。它是指收集集水区(CA)上的地表径流,通过沟渠引入地面储水设备(Surface Reservoir, SR)蓄存或导入作物根区直接利用。其设计关键是 CA 与 SR 相对大小的确定。没有 SR 的 RFWH 称径流农场。RFWH 的优点是可使有限的水在时空合理分配,常用于家畜饮用或关键期农田灌溉;缺点是建设 SR 和从 SR 到农田的输水系统需较大投资。

Prinz 等(2000)将集水系统进一步细分为 4 种类型:

(1) 屋顶集水系统(Rooftop Water Harvesting)。在屋顶和庭院安装管道、输水设备和蓄水设备,收集屋顶上的雨水供家庭饮水、卫生、养畜等使用。

(2) 小型集水系统(Microcatchment Water Harvesting)。与 MCWH 相似,集水区面积在 $1\,000\text{ m}^2$ 以下,种植区面积在 100 m^2 以下,两者之比为 1:1~10:1;种植区仅种一棵树或部分灌木或一年生作物;主要由手工建成,不设溢流口。

(3) 中型集水系统(Macrocatchment Water Harvesting)。集水区经过处理或不处理,坡度为 5%~50%,面积为 $1\times 10^3\sim 2\times 10^6\text{ m}^2$;种植区为梯田或坡度小于 10% 的缓坡;集水区与种植区面积之比为 10:1~100:1;由手工或机械建成,设溢流口。

(4) 大型集水系统(洪水集流系统)(Floodwater Harvesting)。这种集水系统需建设复杂的渠坝体系,收集雨季季节性河流形成的洪水;集水区面积 $2\times 10^6\sim 5\times 10^7\text{ m}^2$,集水区面积与种植区面积之比为 100:1~10\,000:1;收集的雨水蓄存于水库、池塘和农田土壤,主要用作补充作物所需土壤水分、回补地下水和减小洪水灾害损失;主要由机械建成,设溢流口。

(四) 集水系统模式研究

1982 年以前专门针对雨水收集利用的模型研究很少,相关研究集中在模拟降水径流关系的水文模型和模拟雨水入渗、径流等物理过程的土壤物理模型两类(Boers 和 Ben-Asher, 1982)。比较著名的降水—径流关系模型有径流系数模型、等时线模型、单位过程线模型、SCS 模型、Orstom 模型等(赵松岭, 1996)。1982 年以后,随着国际雨水收集利用研究热潮的形成,集水系统模型研究逐渐增多。Boers 等(1986)基于探寻不同气候、土壤条件下小型集水系统工程建设中如何确定集水区与种植区面积最佳比值的考虑,应用一维瞬时有限差分土壤水分平衡模型(SWATRE)建立了一个描述缺乏长期气象水文资料地区降水—径流关系的线性回归模型,并应用 Negev 集水径流农场的试验资料,对此模型进行了检验校正。Critchley 和 Siegert(1991)考虑了生长季作物需水量、预期降水量、集水区径流系数及种植区内水分蒸发、渗漏和非均匀分布等因素,提出一个简单的集水系统模型,旨在确定合适的集水区与种植区面积比。近年来,集水系统模型逐步向全面、准确和实用的方向发展,大多详细考虑了土壤水分平衡方程的各分项(降水、径流、渗漏、作物蒸散和土壤水分变化),具有模拟集水区径流量和种植区土壤水分含量的功能(Sanchez-Cohen, I. 等, 1997; Rockström, 1999; Panigrahi, B. 等, 2001)。Young 等(2002)提出了基于

动态过程的 Parched-Thirst 模型,在模拟降水径流过程、土壤水分运动的同时,还加入了对高粱、水稻、玉米、谷子等作物生长的模拟,可预测集水条件下的作物产量。在新技术应用方面,Abdinam(1998)和 Melesse 等(2002)应用陆地资源卫星图片和 GIS 系统结合 SCS 模型分别对伊朗 Gharachai 河流域和美国佛罗里达 Kissimmee 河流域的径流量进行了模拟评价。

(五)收集雨水高效利用研究

1. 利用雨水解决生活用水和城市用水

目前,世界上许多国家都在利用收集雨水解决生活用水和城市用水。德国从 20 世纪 80 年代初开始发展城市集水系统并逐渐走向产业化,到 1999 年全国已有 100 多家从事集水系统设计安装的公司,不少家庭、学校、工厂、洗车房都安装了集水系统。以屋顶集水系统为例,德国家庭住宅大多是 2、3 层的小楼,占地 $100 \sim 200 \text{ m}^2$,屋顶坡度在 45° 左右,屋檐设有雨漏管,每管下接一个过滤器,也可将多个雨漏管连接到过大过滤器,滤出的杂质冲入污水管道,过滤后的雨水排入蓄水池,水满后再进入的水经溢流管进入污水管道;蓄水池中的水经自动加压系统供冲厕、洗衣、灌溉使用。收集利用屋顶雨水既可减少饮用水使用量,又可减少排水量,对于一个拥有 100 m^2 屋顶的 4 口之家,每年的屋顶雨水径流约 80 m^3 ,如不收集利用,加上每年 146 m^3 饮用水,总排水量为 226 m^3 ;如将所产径流的 70 m^3 灌溉花园、冲厕所、洗衣服等,每年可减少排污量 70 m^3 ,减少饮用水使用量 70 m^3 。德国中小城市饮用水费为 4 马克/ m^3 ,排污费 12 马克/ m^3 ,每年可节省饮用水费 280 马克,排污费 840 马克,共节省 1 120 马克。安装一套屋顶雨水收集利用系统约需 1 万马克,其成本可在 10 年内收回,系统使用寿命 25 年以上,还是划算的(Herrmann 和 Schmida, 1999; 张书函等,2002)。日本、印度利用城市路面及一些建筑物表面集蓄的雨水通过一定的渗透过滤装置,回灌补充地下水,取得了很好的效果(Tadashi 等,1998; Shroff 等,1998)。

2. 利用雨水解决农业用水

世界各地收集雨水主要用于农业生产,已涌现出很多高效收集利用雨水的技术。约旦北部土壤主要为黏土,降雨入渗慢而浅,在高温强辐射下水分很快蒸发殆尽,对作物的有效性很低,科学家们发明了“沙沟(Sand Ditches)集雨法”,在作物或橄榄树行间隔一段距离挖一个 5 m 长、1 m 宽、80 cm 深的沟,填入入渗能力很强的沙子和砾石,直至填平或略低于四周,可有效集蓄雨水。对比观测,沙沟区水分入渗深度和土壤含水量分别为 100 cm 和 28%,对照区仅 68 cm 和 19%;沙沟区域土壤蓄水量达降水量的 73%,而对照区只有 45%(Abu-Zreig 等,2000)。Fox 和 Rockström(2003)在北 Burkina Faso 完成了一个集雨补灌与施肥相结合的抗旱试验,集雨设施为能收集 1.8 hm^2 集水面雨水径流,容积为 150 m^3 的人工池塘,试验作物为高粱,设集雨补灌、施肥、集雨补灌 + 施肥 3 个处理,以农民传统耕作方式不补灌不施肥为对照,试验共进行 3 年(1998 ~ 2000 年),年降水量为 418 ~ 667 mm。试验结果:集雨补灌处理 3 年平均单产 712 kg/hm^2 ,施肥处理 965 kg/hm^2 ,集雨补灌 + 施肥处理 $1 403 \text{ kg/hm}^2$,对照 455 kg/hm^2 ,集雨补灌 + 施肥处理的单产是对照的 3 倍多。该试验表明集雨补灌与施肥两项措施具有耦合作用。

(六)国际雨水集流系统会议和国际雨水集流系统协会

1977 ~ 1978 年美国夏威夷 Honolulu 岛大旱期间,夏威夷大学水资源研究中心教授