

农业重大科学研究成果专著

EFFICIENT WATER USE TECHNOLOGIES
IN CHINA ARID AGRICULTURE
RESEARCH AND PRACTICE

吴普特 等 编著

中国旱区农业高效用水技术 研究与实践



科学出版社

农业重大科学研究成果专著

中国旱区农业高效用水技术 研究与实践

吴普特 等 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地总结了我国“十一五”国家科技支撑计划重点项目“节水农业综合技术与示范(2007BAD88B00)”的研究成果,主要包括:主要农作物水分适应性与水分响应尺度转化、降雨径流调控利用潜力与高效利用技术、农田高效灌溉技术与丰产灌溉模式、节水型农业种植结构优化、旱区粮食作物高效用水技术、旱区经济作物高效用水技术、城市绿地高效用水技术、区域农业节水潜力、农业高效用水健康性评价、农业高效用水管理体制、旱区农业高效用水技术发展方向等。全书详细论述了旱区农业高效用水的若干重要科学问题,粮食作物、经济作物以及城市绿地高效用水技术的集成与示范,既有应用基础研究和实际应用效果分析,又有宏观战略研究,具有较强的实用性和借鉴价值。

本书体系完整、内容丰富、数据准确、可操作性强,具有技术与实地示范应用相结合的显著特点,可供从事旱区节水农业技术研究和推广应用的科技人员、管理人员及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国旱区农业高效用水技术研究与实践/吴普特等编著. —北京:科学出版社, 2011

(农业重大科学研究成果专著)

ISBN 978-7-03-029996-3

I. ①中… II. ①吴… III. ①干旱区-农业工程-节约用水-研究-中国 IV. ①S27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 019363 号

责任编辑:李秀伟 李晶晶/责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬/封面设计:美光制版

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 3 月第一次印刷 印张:65 3/4 插页:10

印数:1—1 000 字数:1 550 000

定价:208.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编著者名单

第一章	吴普特		
第二章	曹红霞	张富仓	
第三章	贾志宽	吴普特	赵西宁
第四章	蔡焕杰	陈新明	王健
第五章	王玉宝	吴普特	赵西宁
第六章	张忠学	司振江	李芳花
第七章	高传昌	孙景生	张灿军
第八章	池宝亮	张冬梅	刘恩科
第九章	史海滨	郭克贞	于健
第十章	汪有科	辛小桂	杨荣慧
第十一章	张源沛	郭文忠	孙权
第十二章	张仁陟	陈佰鸿	张军
第十三章	李跃建	刘永红	李卓
第十四章	刘洪禄	吴文勇	郝仲勇
第十五章	吴普特	赵西宁	曹连海
第十六章	吴普特	王玉宝	赵西宁
第十七章	胡笑涛	蔡焕杰	李志军
第十八章	吴普特		

序

干旱缺水是制约农业生产的瓶颈性障碍因子，民间自古就有“有收无收在于水，收多收少在于肥”之说。在充分利用有限自然降水的基础上，尽量减少灌溉用水，提高农业用水效率，实施综合节水战略是解决这一问题的有效途径。为此，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020年）》已将开发灌溉节水、旱作节水与生物节水综合配套技术列入“水和矿产资源”领域“综合节水”优先主题中的重要内容。

“十一五”国家科技支撑计划重点项目“节水农业综合技术与示范”，在旱区主要农作物水分适应性、降雨径流调控利用潜力与高效利用技术、区域农业高效用水健康性评价，以及农业高效用水管理体制与运行机制等方面进行了有益的探索；依据旱区农业优势产业布局，粮食作物、经济作物、城市绿地统筹考虑，以降低农业用水综合成本和提高农业用水综合效益为目标，在黑龙江、河南、山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、四川、北京等省（直辖市、自治区）建立了9个具有区域特色的农业高效用水技术综合示范区，使一大批先进节水技术在生产实践中广泛应用。《中国旱区农业高效用水技术研究与实践》一书既是对该项目相关研究成果及实践经验的系统总结，同时又是对我国近中期旱区节水农业技术发展方向为进一步思考和探索，具有重要的参考应用价值。我相信该书的出版将能使更多的人重视和关注旱区节水农业技术的发展，进一步推动旱区节水农业技术的研究与实践。



2010年12月

前 言

中国旱区分布范围宽广，农业生产潜力巨大，在我国粮食生产中占有重要地位。旱区具有光、热、温、土地资源丰富的优势，干旱缺水是限制其进一步发展的关键因子。大力发展农业高效用水技术即旱区现代节水农业技术，降低农业用水综合成本，提高农业用水综合效益，不断提升现代科学技术对旱区农业生产的贡献率，已经成为我国旱区农业可持续发展的必然战略选择。

“十一五”期间，国家启动实施了国家科技支撑计划重点项目“节水农业综合技术与示范（2007BAD88B00）”。该项目以降低农业用水综合成本为突破口，以提高农业用水综合效益和效率为核心，依据我国旱区农业优势产业布局，以粮食作物、经济作物为重点，农业生产、生态建设与城市绿地用水统筹考虑，重点研究旱区高效、低能耗农业用水综合技术，形成具有区域特色的农业节水综合技术体系，并建立相应的示范区，探讨农业节水综合技术应用的新机制与新模式，为我国旱区大面积应用农业节水技术提供技术支撑，以期推动我国现代农业的建设与发展。

为系统总结“节水农业综合技术与示范”项目的最新研究成果与生产实践经验，探索近中期我国旱区农业高效用水技术的发展前景和方向，我们组织参加本项目的相关科技工作者编写了《中国旱区农业高效用水技术研究与实践》一书，力求较全面、较系统地反映该项目实施的最新研究进展和生产实践经验，推动旱区节水农业技术的进一步发展。本书主要包括三部分内容：第一部分是旱区农业高效用水技术的重要科学问题。其主要在对旱区农业的概念及其内涵分析基础上，提出了我国旱区农业高效用水实施的重点区域，探讨了主要农作物的水分适应性与水分响应尺度转化、降雨径流调控利用潜力与高效利用技术、农田高效灌溉技术与丰产灌溉模式，以及基于水资源高效利用的作物种植结构调整优化技术。第二部分是旱区农业高效用水技术的实践与示范。重点分析了项目实施示范的黑龙江、河南、山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、四川、北京9个节水农业技术试验示范区在主要粮食作物、特色经济作物、城市绿地高效用水技术方面的最新研究成果及生产实践经验。第三部分是旱区农业高效用水技术评价与展望。重点对区域农业节水潜力和农业高效用水健康性进行了分析和评价，探讨了区域农业高效用水管理体制与节水灌溉水价形成机制，提出了旱区农业高效用水技术发展方向和未来研发重点。

项目在实施过程中得到科技部，项目实施所在省（直辖市、自治区）科技厅和有关地方政府及有关专家、领导的大力支持与协助，在这里一并表示感谢。

由于编著者水平、时间有限，对有些问题的认识和判断有待进一步深化，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2010年11月

目 录

序

前言

第一章 概论	1
第一节 旱区农业的概念与内涵	1
第二节 旱区农业在我国农业生产中的地位及瓶颈性因素	3
第三节 旱区农业高效用水技术现状及面临的挑战	10
第四节 旱区农业高效用水的重点区域	15
第五节 研究目的与本书结构	19
参考文献	20
第二章 主要农作物水分适应性与水分响应尺度转化	22
第一节 陕西关中地区主要气象要素变化趋势	22
第二节 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量时空分布规律	30
第三节 陕西关中地区主要作物需水量、净灌溉需水量时空分布	42
第四节 宝鸡峡灌区主要作物土壤水分亏缺现状	61
参考文献	64
第三章 降雨径流调控利用潜力与高效利用技术	66
第一节 小流域降雨径流调控利用潜力计算模型及参数确定	66
第二节 基于 GIS 的小流域降雨径流调控利用潜力计算与评价	78
第三节 旱作农田秸秆覆盖技术	88
第四节 旱作农田集雨种植技术	99
第五节 旱作农田有机培肥技术	111
参考文献	125
第四章 农田高效灌溉技术与丰产灌溉模式	127
第一节 农田高效灌溉理论	127
第二节 农田高效灌溉技术	143
第三节 作物丰产灌溉制度和模式	170
参考文献	179
第五章 节水型农业种植结构优化	181
第一节 节水型农业种植结构的概念与科学内涵	181
第二节 节水型农业种植结构的优化原理与方法体系	183
第三节 节水型农业种植结构区划	193
第四节 节水型农业种植结构的优化模型及应用	203
第五节 节水型农业种植结构优化方案评价	211
参考文献	217

第六章 黑龙江粮食作物高效用水技术	220
第一节 区域农业用水现状.....	220
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容.....	231
第三节 农业高效用水技术体系与模式.....	232
第四节 农业高效用水技术模式应用与评价.....	309
参考文献.....	315
第七章 河南粮食作物高效用水技术	316
第一节 区域农业用水现状.....	316
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容.....	322
第三节 农业高效用水技术研究.....	324
第四节 农业高效用水技术集成与示范.....	355
参考文献.....	369
第八章 山西粮经作物高效用水技术	370
第一节 区域农业用水现状.....	370
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容.....	388
第三节 农业高效用水关键技术研究.....	396
第四节 作物高效用水技术体系集成.....	453
第五节 农业高效用水技术模式应用与评价.....	462
参考文献.....	465
第九章 内蒙古粮食作物高效用水技术	467
第一节 区域农业用水现状.....	467
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容.....	470
第三节 农业高效用水技术体系与模式.....	471
第四节 农业高效用水技术模式应用与评价.....	541
参考文献.....	547
第十章 陕西山地特色果品高效用水技术	552
第一节 区域农业用水现状.....	552
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容.....	563
第三节 经济林高效用水技术体系与模式.....	566
第四节 经济林高效用水技术模式应用与评价.....	575
参考文献.....	603
第十一章 宁夏设施蔬菜高效用水技术	605
第一节 区域农业用水现状及存在问题.....	605
第二节 研究内容目标及试验点基本情况.....	616
第三节 设施农业高效用水的节水技术及灌溉制度.....	622
第四节 设施农业高效节水模式应用及评价.....	712
参考文献.....	718
第十二章 甘肃特色经济作物高效用水技术	723
第一节 区域农业用水现状.....	724

第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容·····	731
第三节 农业高效用水技术体系与模式·····	733
第四节 农业高效用水技术模式应用与评价·····	768
参考文献·····	775
第十三章 四川季节性干旱区粮食作物高效用水技术·····	776
第一节 区域自然特点、农业发展状况及农业用水现状·····	776
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容·····	783
第三节 节水农业区域技术集成模式·····	811
第四节 示范推广效果与评价·····	817
参考文献·····	832
第十四章 北京绿地高效用水技术·····	833
第一节 区域农业用水与绿地用水现状·····	833
第二节 总体发展思路、目标和主要技术内容·····	836
第三节 绿地高效用水技术体系与模式·····	838
参考文献·····	923
第十五章 区域农业节水潜力评价·····	924
第一节 区域农业节水潜力的概念及科学内涵·····	924
第二节 区域农业节水潜力评价体系·····	928
第三节 基于模糊综合评判法的西北地区区域农业节水潜力评价·····	933
参考文献·····	942
第十六章 农业高效用水健康性评价·····	945
第一节 农业高效用水健康性的科学内涵·····	945
第二节 农业健康用水量计算模型及其应用·····	950
第三节 农业高效用水健康性评价·····	962
参考文献·····	968
第十七章 旱区农业高效用水管理体制与节水灌溉水价形成机制探索·····	970
第一节 我国旱区灌区管理体制与运行机制现状与存在问题·····	971
第二节 旱区灌区基层管理体制变革及主要经营方式·····	974
第三节 旱区灌区管理体制与运行机制的发展方向及主要模式·····	992
第四节 农业节水灌溉水价形成机制与农户承载力分析·····	1001
参考文献·····	1005
第十八章 旱区农业高效用水技术发展方向与探索·····	1007
第一节 旱区农业高效用水发展战略·····	1007
第二节 旱区农业高效用水技术发展方向·····	1012
第三节 旱区农业高效用水未来研发重点探索·····	1028
参考文献·····	1036
图版·····	1038

第一章 概 论

第一节 旱区农业的概念与内涵

水是生命之源，是人类赖以生存和发展的重要物质条件，水资源可持续利用是人类永恒的话题。根据联合国教科文组织 2006 年公布的《世界水资源开发报告》统计，20 世纪全球用水量增加了 6 倍，其增长速度是人口增长速度的 2 倍。目前全球约有 90% 的自然灾害都与干旱缺水有关，农业用水量已占全球淡水消耗量的近 70%，但因管道和沟渠泄漏，有 30%~40% 甚至更多的水被白白浪费。如何缓解日益严重的全球性淡水资源危机，已成为 21 世纪世界各国普遍关注的重大战略性问题。中国不仅是一个人均水资源十分短缺的国家，而且是一个水资源时空分布极为不均的国家。从水资源地域分布来分析，中国南方水资源相对丰富，而北方水资源则极为缺乏，南北差异悬殊。北方旱区耕地占全国的 60% 左右，人口占全国的 49.2%，而水资源总量只占全国的 14.4%，南方的人均水量和耕地平均水量分别为北方的 4.4 倍和 9.1 倍，我国耕地、人口分布与水资源分布不相匹配的矛盾十分突出（王立祥和王龙昌，2009）。旱区是一个地域范围的概念，从气候干旱角度理解，旱区一般包括北方干旱区、半干旱区和半湿润易旱区，但从农业高效用水角度理解，南方部分湿润地区也常受季节性干旱威胁而造成作物产量低而不稳定的现象。根据《中国旱区农业》（王立祥和王龙昌，2009）一书介绍，旱区不仅涵盖了我国北方的干旱区、半干旱偏旱区、半干旱区、半湿润易旱区和半湿润区，而且也涵盖了南方的部分季节性干旱区，共涉及 1401 个具有相当规模的县（市、旗、自治县），占全国相关的县（市）总数（不含市辖区）的 69%。其中，北方旱区 948 个，覆盖“昆仑—秦岭—淮河”一线以北全部的省（市、区），南方旱区 453 个县（市）集中分布在广西、四川、重庆、贵州、云南、西藏 6 个省（直辖市、自治区），少量的县散布在江苏、浙江、安徽、广东、海南、福建、台湾、湖南、湖北等省。基于上述认识，从农业高效用水角度考虑，本书所指旱区与《中国旱区农业》一书中所指旱区的地域范围相同。旱区农业在我国农业生产中具有至关重要的地位，但由于水资源短缺限制，现阶段我国旱区农业整体水平仍相对低下，致使旱区应予实现的潜在生产力远未能转化为现实生产力（王立祥和王龙昌，2009）。充分利用现代科学技术，大幅度提高旱区有限水资源的利用率和利用效率已成为我国旱区农业可持续发展的关键所在。

一、与旱区农业相关的几个概念

旱区一般是与某地区的区域范围联系在一起。与“干旱”相关联的农业词汇，过去人们多提“旱作农业”、“旱地农业”或者说“旱区农业”等。

旱作农业（dry farming）泛指无灌溉条件的雨养农业（rain-fed agriculture）生产，

一般指半干旱和半湿润地区主要依赖降水的农业生产活动。《大英百科全书》指出,旱农是在有限降水,典型的是在年降水量少于 500 mm 的地区,不采用灌溉而种植作物的农业。《美国百科全书》指出,旱农是在有限降水的半干旱气候区或其他地区从事无灌溉的作物生产,实际上是指雨养农业(集雨补灌),它是相对于灌溉农业而言的。借助现代农业科学技术的进步,提高自然降水的高效利用,挖掘雨水资源化的潜力,实现农业经济的合理用水,是促进旱作农业地区粮食安全综合发展的重要途径之一。旱农(dry farming)的含义与旱作农业基本相同,是指在特定条件下的一种雨养农业。国际上一般是指在有限降水的半干旱区从事的无灌溉的作物生产,国内许多学者将旱农视为旱作农业的同义词(王立祥和王龙昌,2009)。

旱地农业指的是降水量偏少,有水分胁迫而无充分灌溉条件或有限灌溉条件的半干旱和半湿润偏旱地区的耕地上所从事的农业生产或是在半干旱和半湿润偏旱地区基本没有灌溉条件的土地上进行综合性的农林牧生产活动。这一定义界定了旱地农业的地域范围(半干旱和半湿润地区),指出了旱地农业的生产特点(无灌溉条件),肯定了旱地农业生产的问题所在(依靠降水进行生产)。由于旱地农业区生态条件脆弱,农业系统生产力水平的提高比较困难,所以旱地农业所采取农业综合措施,不仅包括旱地上进行种植业生产,还包括在旱地上所进行的林业和畜牧业生产。半干旱和半湿润区域降水较少,主要靠降水资源进行农业生产,局部地区虽可灌溉,但无灌溉是其主要特征。我国农业科技工作者,从旱地农业生产实践出发,提出了一些新的见解,主要是:①旱地农业区的范围由半干旱地区扩大到半湿润偏旱地区,因为这个地区是我国主要的农业粮食生产地区之一;②主要依靠天然降水,在特殊干旱条件下采用补墒灌溉;③除了作物之外,还包括牧业、林业,以形成完整的旱地农业经济体系。旱地农业实际上更多地关注了土地或者土壤条件,从土壤资源是否受到干旱胁迫的角度来考察的,相对于“湿地农业”而言的。显然旱地农业要比旱作农业的范围更广泛,旱作农业只是旱地农业的一部分。

雨养农业是单纯依靠天然降水所从事的农业生产,是与灌溉农业相对而言的,其同义词就是非灌溉农业(吴普特,2006)。雨养农业与旱地农业不同,因为旱地农业也可能在有条件时进行补充灌溉(有限灌溉);同时,雨养农业的地域范围比旱地农业更宽,它既包括降水量较少的半干旱和半湿润易旱区,也包括雨量充沛而无灌溉条件的湿润地区。因此雨养农业又进一步分为干旱地区的雨养农业和湿润地区的雨养农业(吴普特和高建恩,2008;赵西宁等,2007)。湿润地区的雨养农业存在季节性干旱。旱地农业和雨养农业是有区别的。严格地说,两者都是单纯依靠天然降水从事的农业生产。不进行灌溉的雨养农业体系既包括降水适宜地区的农业生产体系,也包括有水分胁迫的农业生产体系,还包括降水丰沛的农业生产体系。而旱地农业仅是在降水量少的半干旱和半湿润偏旱地区内没有灌溉条件或有限灌溉的土地上进行的农业生产。

干旱半干旱地区农业是一个区域农业的概念,也可以说是一个相对概念。它是指在干旱半干旱地区从事的农业生产活动,也可认为是相对于半湿润、湿润地区而言的农业生产方式。

二、旱区农业概念及内涵

随着生产实践的不断积累,在上述概念基础上,又产生了一个新的概念,即旱区农业。关于旱区农业所指区域目前还没有统一的说法,众多科学家对其理解也不同。旱区农业实际上首次由西北农林科技大学的科学家提出,起初仅仅是对于干旱半干旱地区农业的简称。因为国家对杨凌示范区的定位是为我国干旱半干旱地区农业的可持续发展提供示范。同时,对1999年院校所七大单位合并组建的西北农林科技大学的定位则是为干旱半干旱地区农业的可持续发展提供技术与人才支撑,至此,干旱半干旱农业也是学校的学科建设和发展的特色。首次启用旱区农业这一概念,是在2004年西北农林科技大学申请国家“985”工程二期建设项目时所用的,当时为了突出干旱半干旱地区这一区域农业特色,在设计科技创新平台时启用了旱区农业这一概念,并设计了“旱区农业与生态修复”一类科技创新平台。但“旱区”所指区域到底是什么一直没有明确说法,或者说大家看法不是十分统一。一种观点认为,旱区就是干旱地区与半干旱地区;另一种观点认为,旱区就是干旱地区、半干旱地区,以及半湿润易旱地区的统称;还有一种观点认为,旱区就是干旱地区、半干旱地区、半湿润易旱地区以及湿润地区的旱作农业区(雨养农业)的统称。

王立祥在《中国旱区农业》一书中把我国旱区农业定义为:在北方气候干旱区以及在南方水利设施难以到位、实施多熟种植且季节性干旱频繁的湿润气候区从事的农业生产。旱区农业所涵盖的内容比旱地农业、旱作农业、雨养农业和旱农都要广,涉及的地域范围也更加宽广,它不仅包含了半干旱和半湿润偏旱区的旱地农业,也包含了干旱区的绿洲农业,还包含了湿润地区的雨养农业。显然,干旱是影响旱区农业生产水平的主要环境因素之一。在半干旱和半湿润偏旱区,年降水量及其分布状况一般波动较大,农业干旱频率高,对旱地作物、林木和牧草的水分供需平衡有直接的影响;干旱区属于典型的常年气候干旱区,虽然绿洲农业具备比较良好的灌溉条件,但干旱等气候因素造成灌溉水源的减少,制约农田的生产力水平;在湿润地区的雨养农业,降水量总体上比较充沛,但当季节性干旱出现时,农业生产也常常会遭受危害而减产。

其实干旱是相对于湿润而言的,其核心是旱,包括气候干旱和土壤干旱,而描述旱的主要参数是水,甚至确切地说是降水;从农业生产过程的角度考虑,干旱与不干旱主要是针对农业生产过程中的降水是否能满足作物需求而言的,不仅指总量是否满足,还指时间与空间上的量是否满足。区是一个空间概念,也可以称之为区域。从这个角度来理解,旱区则是指降水资源难以在时间、空间上满足其农业生产所需水量的区域,并将在这一区域从事的农业生产活动称为旱区农业。

第二节 旱区农业在我国农业生产中的地位及瓶颈性因素

一、旱区农业在保障粮食安全中具有重要作用

我国旱区面积在耕地资源构成中占有主导地位(表1-1)。在现有的13 003.92万 hm^2 耕地资源中,水田面积为3294.64万 hm^2 ,仅占耕地总面积的25.34%;而旱地

面积为 9559 万 hm^2 ，占耕地总面积的 73.51%。其中，旱地占耕地面积比例较高的地区主要分布在北方的 15 个省（直辖市、自治区），其中，河北、山西、内蒙古、黑龙江、山东、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆的旱地面积比例达到 90% 以上，北方其他地区旱地比例也均在 75% 以上。在其他各省（直辖市、自治区）中，西藏的旱地面积所占比例较高，达到 96.9%，旱地比例超过 50% 的还有云南、贵州、四川、重庆和安徽。在全国旱地中，拥有灌溉条件的水浇地面积为 2167.02 万 hm^2 ，仅占耕地总面积的 16.66%；而旱作农田面积为 7391.98 万 hm^2 ，占耕地总面积的 56.84%。其中，北方地区以山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、青海、河南为主要旱作农业区，旱作农田比例达到 50%~90%；南方以云南、贵州、四川、重庆、安徽为主要旱作农业区，旱作农田比例在 50% 以上（王立祥和王龙昌，2009）。

表 1-1 全国各省（直辖市、自治区）旱地面积及其比例

省 (直辖市、 自治区)	耕地总面积/ 万 hm^2	水田				旱地			
		水田面积 /万 hm^2	水田占 耕地/%	水浇地 /万 hm^2	水浇地占 耕地/%	旱作农田 /万 hm^2	旱作占 耕地/%	旱地合计 /万 hm^2	旱地占 耕地/%
北京	34.39	3.1	9.01	22.36	65.02	5.84	16.98	28.2	82.00
天津	48.56	7.01	14.44	19.97	41.12	16.91	34.82	36.88	75.95
河北	688.33	16.66	2.42	336.02	48.82	327.15	47.53	663.17	96.34
山西	458.86	1.3	0.28	90.68	19.76	364.68	79.48	455.36	99.24
内蒙古	820.1	8.02	0.98	160.17	19.53	647.15	78.91	807.32	98.44
山东	768.93	13.55	1.76	444.78	57.84	292.86	38.09	737.64	95.93
河南	811.03	75.04	9.25	314.4	38.77	412.98	50.92	727.38	89.69
辽宁	417.48	68.06	16.30	6.75	1.62	335.02	80.25	341.77	81.86
吉林	557.84	68.52	12.28	2.72	0.49	481.46	86.31	484.18	86.80
黑龙江	1 177.3	93.46	7.94	2.29	0.19	1 070.55	90.93	1 072.84	91.13
陕西	514.05	20.65	4.02	89.01	17.32	402.59	78.32	491.6	95.63
甘肃	502.47	1.48	0.29	96.82	19.27	403.43	80.29	500.25	99.56
青海	68.8	0	0.00	20.89	30.36	47.13	68.50	68.02	98.87
宁夏	126.88	4.61	3.63	32.86	25.90	89.05	70.18	121.91	96.08
新疆	398.57	7.89	1.98	365.4	91.68	22.35	5.61	387.75	97.29
上海	31.51	28.41	90.16	2.5	7.93	0	0.00	2.5	7.93
江苏	506.17	307.45	60.74	78.2	15.45	111.01	21.93	189.21	37.38
浙江	212.53	162.05	76.25	9.91	4.66	39.12	18.41	49.03	23.07
安徽	597.17	272.79	45.68	13.25	2.22	303.17	50.77	316.42	52.99
福建	143.47	114.95	80.12	4.09	2.85	23.08	16.09	27.17	18.94
江西	299.34	245.82	82.12	2.62	0.88	41.26	13.78	43.88	14.66
湖北	494.95	261.48	52.83	7.09	1.43	206.92	41.81	214.01	43.24
湖南	395.3	298.39	75.48	0.16	0.04	90.02	22.77	90.18	22.81
广东	327.22	227.92	69.65	10.25	3.13	85.34	26.08	95.59	29.21
广西	440.79	225.22	51.09	0.09	0.02	213.59	48.46	213.68	48.48

续表

省 (直辖市、 自治区)	耕地总面 积/万 hm ²	水田				旱地			
		水田面积 /万 hm ²	水田占 耕地/%	水浇地 /万 hm ²	水浇地占 耕地/%	旱作农田 /万 hm ²	旱作占 耕地/%	旱地合计 /万 hm ²	旱地占 耕地/%
海南	76.21	39.23	51.48	0.62	0.81	35.75	46.91	36.37	47.72
重庆	254.5	114.48	44.98	0.01	0.00	138.63	54.47	138.64	54.48
四川	662.41	300.45	45.36	2.71	0.41	357.13	53.91	359.84	54.32
贵州	490.35	146.85	29.95	0.01	0.00	340.95	69.53	340.96	69.53
云南	642.16	158.64	24.70	4.57	0.71	475.57	74.06	480.14	74.77
西藏	36.26	1.11	3.06	25.81	71.18	9.26	25.54	35.07	96.72
全国	13 003.92	3 294.64	25.34	2 167.02	16.66	7 391.98	56.84	9 559	73.51

资料来源：王立祥和王龙昌，2009。

旱作农区粮食产量占全国粮食总产量的一半以上，在保障我国粮食安全方面发挥着非常重要的作用。以 2004 年为例，全国粮食作物总播种面积为 10 160.62 万 hm²，其中旱粮播种面积为 7322.75 万 hm²，占 72.07%；粮食总产量为 46 947 万 t，其中旱粮总产量为 29 038 万 t，占 61.85%（表 1-2）。北方的 15 个省（直辖市、自治区）均属我国旱粮主产区，旱粮播种面积占有比例达 81%~100%，旱粮产量占有比例达 62%~100%；其他各省（直辖市、自治区）中，西藏的旱粮播种面积和产量占有比例均达 99%左右。此外，云南、贵州、四川、重庆和安徽的旱粮生产也居较高地位，其旱粮播种面积比例为 66%~76%，旱粮产量占有比例为 52%~59%。在我国粮食生产中，大约 85%的小麦和 90%以上的玉米、大豆、薯类是在旱地种植的；谷子、糜子、荞麦等耐旱作物全部在旱地生产，主要集中在北方的黄土高原、内蒙古高原等旱作农业区（王立祥和王龙昌，2009）。

表 1-2 全国各省（直辖市、自治区）旱地粮食面积、产量及其比例

省（直辖 市、自治区）	播种面积			单产		总产量		
	粮食总面 积/万 hm ²	旱粮面积 /万 hm ²	旱粮比 例/%	粮食平均 /(kg/hm ²)	旱粮平均 /(kg/hm ²)	粮食总产 量/万 t	旱粮总产 量/万 t	旱粮比例 /%
北京	15.45	15.37	99.48	4 544	4 489	70	69	98.57
天津	26.35	24.98	94.80	4 660	4 484	123	112	91.06
河北	600.34	591.99	98.61	4 130	4 110	2 480	2 433	98.10
山西	292.54	292.28	99.91	3 630	3 630	1 062	1 061	99.91
内蒙古	418.11	401.02	95.91	3 600	3 616	1 505	1 450	96.35
山东	617.63	605.19	97.99	5 694	5 661	3 517	3 426	97.41
河南	897.01	846.16	94.33	4 749	4 611	4 260	3 902	91.60
辽宁	290.67	236.25	81.28	5 917	5 579	1 720	1 318	76.63
吉林	431.21	371.2	86.08	5 821	5 582	2 510	2 072	82.55
黑龙江	845.8	687.02	81.23	3 548	2 723	3 001	1 871	62.35
陕西	313.41	298.83	95.35	3 318	3 189	1 040	953	91.63

续表

省(直辖市、自治区)	播种面积			单产		总产量		
	粮食总面积/万 hm^2	旱粮面积/万 hm^2	旱粮比例/%	粮食平均/(kg/hm^2)	旱粮平均/(kg/hm^2)	粮食总产量/万 t	旱粮总产量/万 t	旱粮比例/%
甘肃	253.46	252.97	99.81	3 179	3 170	806	802	99.50
青海	24.47	24.47	100.00	3 617	3 637	89	89	100.00
宁夏	79.17	72.73	91.87	3 669	3 272	291	238	81.79
新疆	141.39	134.71	95.28	5 633	5 627	797	758	95.11
上海	15.47	4.29	27.73	4 871	3 730	106	16	15.09
江苏	477.46	266.17	55.75	5 925	4 343	2 829	1 156	40.86
浙江	145.45	42.64	29.32	5 740	3 471	835	148	17.72
安徽	631.22	418.25	66.26	4 346	3 469	2 743	1 451	52.90
福建	148.24	49.73	33.55	4 968	3 841	737	191	25.92
江西	335.01	32.04	9.56	4 964	2 622	1 663	84	5.05
湖北	371.24	172.28	46.41	5 657	3 471	2 100	598	28.48
湖南	475.41	103.73	21.82	5 553	3 413	2 640	354	13.41
广东	278.97	65.07	23.33	4 983	4 103	1 390	267	19.21
广西	351.12	115.52	32.90	3 983	2 389	1 399	276	19.73
海南	47.18	13.71	29.06	4 029	3 136	190	43	22.63
重庆	251.64	176.71	70.22	4 548	3 593	1 145	635	55.46
四川	647.65	441.27	68.13	4 859	3 687	3 147	1 627	51.70
贵州	303.72	232.07	76.41	3 785	2 900	1 150	673	58.52
云南	415.85	307.23	73.88	3 630	2 835	1 510	871	57.68
西藏	17.89	17.87	99.89	5 339	5 316	96	95	98.96
全国	10 160.62	7 322.75	72.07	4 621	3 965	46 947	29 038	61.85

资料来源:王立祥和王龙昌,2009。

旱作农区也是我国其他种植业产品的重要生产场所。油料作物中,油菜 70%是在旱地生产的,主要集中在四川盆地、关中平原、长江中下游平原、黄淮海平原等地;葵花籽、胡麻 90%来自旱地,主要集中在西北干旱内陆区、黄土高原、内蒙古河套和东北地区;花生 95%来自旱地,主要集中在黄淮海平原、长江中下游平原和东南沿海地区。糖料作物中,南方的甘蔗 80%在旱地生产,主要集中在云南、广东、广西、海南等亚热带和热带地区;北方的甜菜全部在旱地生产,主要集中在新疆、内蒙古、宁夏等的绿洲农田和东北北部地区。棉花、烟草也是典型的旱地作物,其中,棉花主产区集中在黄淮海平原的河北、山东、河南三省,新疆为优质棉花生产基地;烟草则以云南、贵州、河南三省为主要生产基地。可见,我国旱作农区不仅是小麦、玉米、油料、大豆、棉花等农产品的主产区,而且还是其他多种农副产品的重要生产基地,在粮食安全保障、农产品加工原料和纺织品加工原料的供给方面发挥着十分重要的作用。

二、农业水资源短缺已成为限制旱区农业发展的瓶颈

(一) 旱区降水与作物需水时空分布错位, 利用效率低下, 浪费严重, 潜力有待进一步挖掘

我国旱区, 尤其是北方旱区降水量少, 大部分地区降水量为 300~500 mm。400 mm 降水量等值线以西的东北三省西部、内蒙古、宁夏、甘肃、青海的大部分地区, 以及新疆西部和北部的降水量为 300 mm 左右, 折合耕地平均水量为 2010~4005 m³/hm²。河北、天津、山东西部、安徽、河南西部以及辽宁、吉林、黑龙江三省西部地区, 山西、陕西大部分地区等年降水量平均为 400~600 mm, 折合水量为 4000~6000 m³/hm²。最干旱的内蒙古、新疆、青海、宁夏、甘肃等省(自治区)荒漠区年降水量少于 250 mm, 折合水量不足 2500 m³/hm², 难以满足作物生长正常需水量, 属于无灌溉就无农业地区(温晓霞等, 2000)。半干旱地区作为旱区农业中一个特定的生态类型和重要的农业区域, 其特点可归纳为: 生态环境极为脆弱, 严重的土壤侵蚀和频繁的干旱在同一区域每年之中交替发生; 天然植被、人工草地和旱作农业并存是该区土地利用的一般特征。林业受到地域降水的限制, 只能局部发展, 因此其成功的经营往往采取农牧相结合的方式, 以增强生产的稳定性和抗御自然灾害的能力; 同时由于降水量尚处在允许农业生产的范围之内以及土地利用的多方向性等因素, 往往在人口压力较大的情况下盲目开垦土地, 造成土地利用不合理, 引发人为的水土流失和土地贫瘠化现象, 使得本来就很脆弱的农业生产环境持续恶化(山仑等, 2004a; Zhu et al., 2004)。

年降水量为 300~550 mm 的黄河中游的黄土高原地区是我国主要的旱作农业区。其典型地带——黄土高原水土流失区, 耕地约占半干旱地区的 1/3, 坡耕地占耕地面积的 75%。但由于严重干旱缺水, 平均单位面积产量低于 150 kg/亩^①, 不少地方还低于 100 kg/亩(山仑等, 2004a; Zheng, 2006; Zhao et al., 2004)。实际上, 该地区农业生产主要依靠 300~500 mm 的雨水资源, 仅从数量上来分析, 该地区年平均降水量不算太少, 发展雨养农业是可以实现的, 但是由于该区域降雨相对集中, 6~9 月降雨占到全年降雨量的 60%~80%, 与作物生长需水关键季节错位, 而且多为大到暴雨, 导致季节性干旱缺水严重, 作物产量低下。陕北黄土高原丘陵沟壑区的特色果品——红枣闻名遐迩, 这里的果品品质有优势。目前仅陕西榆林黄土高原半干旱区, 红枣种植面积已经达到 160 万亩, 但由于严重干旱缺水, 生产效益并不高。红枣多年平均亩产量仅为 150 kg 左右, 只有其生产潜力的 15%, 优势一直没有得到充分发挥, 更难以形成规模化经营, 未得到较高的经济收益(赵西宁等, 2009b; Zhao et al., 2009b)。目前黄土高原半干旱地区自然降水生产潜力开发程度较低, 现实生产力产量只有旱作农田水分生产潜力理论值的 45.9%, 该地区降水资源还有 1 倍以上的潜力可以开发。从降水利用效率来看, 不同种类作物理论平均值为 17.27 kg/(mm·hm²), 而现实降水利用效率为 7.72 kg/(mm·hm²), 为理论值的 44.7%, 潜力巨大(冷石林, 1998; 冯浩等,

^① 1 亩≈666.67m², 下同。

2007)。上述分析可以看出,旱区天然降水与作物需水时空分布错位,其利用效率低下已成为限制旱区农业发展的重要因素。

(二) 旱区农业水资源短缺与农业用水浪费严重并存

我国北方大部分地区水资源开发已接近极限,淮河以北占全国 $3/5$ 的辽阔国土上,人均水资源量只有 501 m^3 ,是全国平均水平的 $1/5$,仅为世界平均水平的 $1/16$,与极度缺水的索马里人均 980 m^3 和以色列人均 461 m^3 几乎相当,是我国缺水最严重的地区。我国西北地区穷就穷在水资源匮乏上,经济发展难也难在干旱少雨和水资源的不足上。由于缺水,很多原来牧草茂盛的景象已经不复存在。目前西北五省(自治区)草地总面积为 $11\,975 \text{ 万 hm}^2$,因干旱缺水造成的退化草地总面积为 6960 万 hm^2 ,占草地总面积的 58% 。其中,轻度退化面积为 3020.9 万 hm^2 ,占退化总面积的 43.4% ;中度退化面积为 2650.7 万 hm^2 ,占退化总面积的 38% ;重度退化面积为 1289 万 hm^2 ,占退化总面积的 18.5% 。与 20 世纪八九十年代的调查结果比较,草地退化有加剧的趋势。北京作为我国的首都,人均水资源量不足 300 m^3 ,官厅和密云两大水库总库容量达到 65 亿 m^3 ,但 1999 年密云水库自然降水补水量仅为 0.8 亿 m^3 ,官厅水库仅为 2.56 亿 m^3 ,不到 80 年代自然补水量的 $1/10$,2002 年以来北京已连续出现缺水危机,2003 年密云水库可利用水量仅为 3.8 亿 m^3 ,官厅水库仅为 1.2 亿 m^3 ,2005 年北京密云水库可利用水量仅能提供一年的城市供水。

在我国干旱缺水形势日益严峻的同时,农业用水中的浪费现象仍相当严重,主要表现为:一是灌溉水的利用率较低,渠灌区仅为 $40\% \sim 50\%$,井灌区也仅有 60% ,与国外节水先进国家 $70\% \sim 80\%$ 的高利用率差距仍很明显。例如,内蒙古河套平原的毛灌溉定额为 $11\,364 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,宁夏引黄灌区的毛灌溉定额为 $10\,980 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,青海万亩以上灌区的灌溉定额为 $11\,337 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,新疆全区平均灌溉定额达 $14\,550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,平均每次的灌水定额高达 $2700 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,仍有 133.33 多万公顷农田采用落后的大水漫灌,南疆有些地州一次灌水定额高达 $3750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。水资源的浪费,导致了灌溉水有效利用率的低下,一般灌溉水的有效利用系数在 0.5 以下,有的甚至只有 0.3 。例如,新疆全区平均渠系水利用系数为 0.41 ;内蒙古河套灌区渠系水利用系数为 0.394 ,田间水利用系数为 0.71 ;陕西关中各大灌区比较重视渠道衬砌、防渗工作,但平均渠系水利用系数也只有 0.5 左右。甘肃民勤湖区灌溉水利用系数只有 0.28 ,湖区入渗水直接进入地下水系统后与苦水层混合,失去了重复利用价值。灌溉水的大量浪费致使农业用水占各项总用水量的比值过大。例如,西北内陆地区高达 95% ,黄土高原地区高达 87.3% ,而一些发达国家仅占 50% 左右。根据山西省调查资料,大型灌区灌溉水利用系数仅为 0.389 ,中型灌区为 0.618 ,小型灌区为 0.672 。二是自然降水的利用率较低, 8000 万 hm^2 旱作农业区的 70% 分布在年降水量只有 $250 \sim 600 \text{ mm}$ 的北方地区。由于经营管理粗放,在有限的降水中,因降雨径流损失的水分可占总降水的 20% ,而休闲期无效水分蒸发则占总降水的 24% ,可被农业生产利用的降水只有总量的 56% ,就是在仅有的 56% 中,也有 26% 由于田间蒸发而散失,作物真正利用的降水只有总量的 30% 左右。三是农业用水效率低,“十五”期末进行农业灌溉的作物水分生产效率仅为 1.25