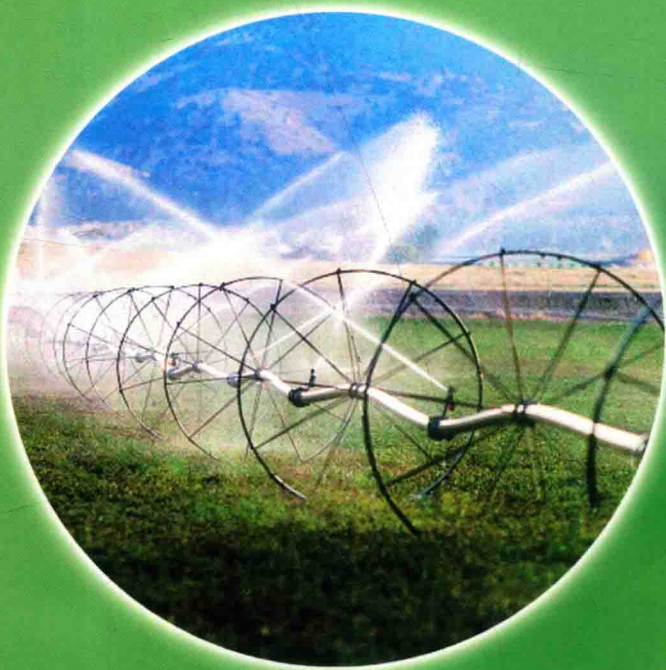


BEIFANG GUANQU SHUIZIYUAN JIESHUI GAOXIAO
ZHINENG GUANLI GUANJIAN JISHU YANJIU

北方灌区水资源节水高效 智能管理关键技术研究

马建琴 郝秀平 刘 蕾 著



非
外
借

 黄河水利出版社

河南省高校科技创新人才支持计划(15HASTIT046)资助出版

北方灌区水资源节水高效智能 管理关键技术研究

马建琴 郝秀平 刘 蕾 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书综合运用农田水利学、水资源系统分析、运筹学、工程模糊集控制理论、计算机科学、信息科学等多学科理论方法,采用理论分析、灌溉试验、系统模拟、调度仿真、优化计算、数据挖掘等多手段相结合的方法,对北方灌区水资源的节水高效智能管理关键技术展开研究及应用。主要内容包括:农业干旱评估与预报、典型区气象要素特征分析、作物非充分在线实时灌溉预报、非充分灌溉试验、基于旱情动态的作物适应性智能节水灌溉预报、多作物灌溉预报模型关键参数率定、水肥一体化灌溉模式、多水源实时配置模式、农业水资源智能管理系统框架等。

本书可供农业水土工程、水文水资源、管理科学等专业的研究生、科研人员及大中专院校师生参考,也可为灌区、农田水利等管理部门的领导和技术人员提供决策依据和参考。

图书在版编目(CIP)数据

北方灌区水资源节水高效智能管理关键技术研究/
马建琴,郝秀平,刘蕾著. —郑州:黄河水利出版社,2018.9

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2140 - 5

I. ①北… II. ①马…②郝…③刘… III. ①灌区 -
节约用水 - 水资源管理 - 研究 - 北方地区 IV. ①S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 218424 号

出版社:黄河水利出版社

网址:www. yrcp. com

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: hhsclbcs@ 126. com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11

字数:255 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 9 月第 1 版

印次:2018 年 9 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前 言

我国灌溉水资源严重紧缺,同时又存在着灌溉水利用效率较低等问题,灌溉水资源的智能高效利用一直是农业水管理中的热点与难点问题。随着计算机智能技术的发展,农业水资源高效智能管理技术必将成为农业节水、水资源高效利用的必要手段。

本书是作者近几年来在农业水资源,特别是针对北方灌区开展的实时高效利用理论与关键技术方面研究与实践的基础上,结合河南省高校科技创新人才支持计划(15HASTIT046)项目研究成果完成的。本书针对农业水资源高效利用的核心问题,围绕北方灌区水资源的节约、高效、实时、智能利用,重点开展了农业干旱动态评估与预报技术、作物适应性智能节水灌溉预报技术、多作物灌溉预报模型关键参数率定、多水源实时配置模式等方面的研究,是对近年来研究内容的全面总结与提升。全书共分11章,主要研究内容和研究成果概括如下:

第1章绪论。基于目前农业干旱、农业水资源高效利用、节水农业技术发展等方面的研究现状及研究中存在的问题,提出了本书的研究内容、技术路线与研究意义。

第2章以典型区为例,介绍了气象要素分析的研究方法,从年、季和月等不同时间尺度对研究区的降水变化特征、潜在蒸散发变化特征分别进行了分析。

第3章论述了农业干旱评估与预报技术,对常用的农业干旱指标进行了介绍。通过查阅已有国内外文献,综述了目前农业干旱评估和预报常用的方法,并介绍了常用的多种农业干旱指标,对比分析了各种方法和指标的优缺点,提出了基于SWAT模型的土壤含水量动态模拟方法,用于北方农业干旱动态评估与预报。

第4章介绍了作物实时在线灌溉试验方案与数据获取方法。为对理论研究、模型构建和参数率定提供基础实测数据,研究设计了实时灌溉试验方案,选取了所需测定指标,介绍了灌溉试验所需的设备和仪器、各指标数据的测取方法以及网络环境下监测数据的传输和获取技术,为研究开展提供基础数据支撑。

第5章对灌溉预报研究现状进行了综述,对作物需水量研究的理论与方法进行了评述,对作物的非充分灌溉理论与非充分灌溉研究中的问题进行了论述与剖析,针对现有研究中的不足,提出了作物的非充分灌溉在线实时预报理论和方法。基于实时土壤水分监测数据及降雨信息,利用田间水量平衡原理,提出了充分利用降雨的作物非充分在线实时灌溉制度模型及关键参数修正技术。包括作物非充分在线实时灌溉模型以及模型各要素的确定和修正。以冬小麦为例进行研究,把冬小麦按生长特点进行了生育期的划分,结合作物的非充分在线实时灌溉制度模型和试验测取数据,对本研究中非充分灌溉不同水分处理的冬小麦灌溉制度和生育期需水规律进行了逐日模拟分析,实现了冬小麦的非充分实时灌溉制度的制定和作物系数的逐日修正,对作物系数的修正情况进行了分析。

第6章为对北方灌区农业干旱进行评估,以郑州市为北方灌区典型区域,利用SWAT模型动态模拟研究区域多年来的逐日土壤含水量,基于土壤相对湿度干旱指数计算方法,

应用水文模型输出结果,结合北方灌区的典型作物——冬小麦和夏玉米,开展了不同作物生长季内农业干旱评价。通过对两种作物不同生长阶段不同等级干旱发生频率变化特征进行分析,为适应性灌溉中土壤含水率上下限的厘定提供科学理论依据。

第7章选择河南省典型代表作物作为研究对象,为提高灌溉预报对干旱的适应性和水资源的有效利用性,考虑面临阶段的动态干旱等级,提出适应性灌溉的概念、预报原理和步骤,建立基于不同干旱等级的作物实时适应性智能节水灌溉预报模型,提出模型的模拟与校验技术,并对适应性灌溉预报条件下冬小麦产量进行分析,为灌区水资源实时高效配置与管理决策提供核心技术支持。

第8章为实现灌区水资源的多水源、多用户、多目标优化配置,研究耦合 SWAT 模型和水资源配置模型,建立灌区多水源实时优化配水模型,开展灌区实时用水配置模式研究,对 SWAT 模型进行了二次开发,增加了渠系模块,用于模拟渠系的输水和蓄水功能,并将 SWAT 模型的灌溉模块内的单水源灌溉改写为多水源灌溉。通过多情景模拟,提出灌区多水源优化配置方案,对灌溉水资源从空间配置、时间配置等多个方面进行多水源配置模式研究。

第9章在现有水肥一体化模拟技术基础上,利用验证后的 SWAT 模型对研究区不同的灌溉与施肥一体化模式下农田地表径流流失特征以及对作物水分生产力的影响进行模拟研究,评价不同的灌溉与施肥一体化模式对研究区水体污染的扰动程度以及作物水分生产力的影响,提出最优的农业灌溉与施肥一体化管理模式。

第10章提出了适合北方灌区的水肥一体化农田智能灌溉管理系统框架,介绍了现代农田智能管理系统建设的主要内容,包括田间节水工程、土壤墒情监测系统、气象监测系统、实时在线水肥灌溉智能预报与发布系统、信息中心软硬件系统,重点介绍了实时在线水肥灌溉智能预报与发布系统设计模块与实现功能。实现了作物的在线实时灌溉,以及土壤水分、降雨、灌溉信息的可视化管理,为现代农田建设及智能化管理提供技术支撑。

第11章总结了本书的主要研究成果,并对有待进一步研究的问题进行了展望。

本书由马建琴、郝秀平、刘蕾共同撰写,其中第1、5章由马建琴撰写,第2、4、7、9、10、11章由郝秀平撰写,第3、6、8章由刘蕾撰写。全书由马建琴通稿,郝秀平、刘蕾校稿。

本书能够得以问世,还要特别感谢彭高辉副教授、丁泽霖副教授、杨学颖讲师等的参与和帮助,同时也要感谢宋智睿、崔弼峰、何胜、何鹏飞、毕静静、温婷婷、李鹏飞、郑柏杨、陈哲、郭金萍、何沁雪、郭薇等研究生为本书相关研究所做出的基础工作。在本书正式出版之际,特向有关领导、专家以及为本书付出劳动的各位同仁表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,且部分成果有待进一步深入研究,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2018年7月

目 录

前 言	
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 我国北方农业水资源利用现状	(1)
1.2 我国农业旱灾情况	(5)
1.3 我国节水农业技术发展现状及趋势	(7)
1.4 本书研究的主要内容和技術路线	(11)
第 2 章 典型区气象特征分析	(14)
2.1 研究方法	(14)
2.2 降水变化特征	(15)
2.3 潜在蒸散发变化特征	(22)
2.4 小 结	(25)
第 3 章 农业干旱评估与预报技术	(27)
3.1 农业干旱评估与预报研究	(27)
3.2 农业干旱评估指标研究方法	(34)
3.3 基于土壤含水量模拟的农业干旱评估与预报方法	(40)
3.4 小 结	(42)
第 4 章 作物实时在线灌溉试验方案与数据获取	(43)
4.1 试验区概况	(43)
4.2 试验方案设计	(43)
4.3 试验观测及数据的获取	(45)
4.4 小 结	(50)
第 5 章 作物实时在线灌溉预报模型及关键参数修正	(51)
5.1 灌溉预报研究动态	(51)
5.2 实时节水灌溉预报模型构建	(52)
5.3 灌溉预报模型关键参数的率定	(56)
5.4 冬小麦实时灌溉预报模型及关键参数修正	(61)
5.5 小 结	(70)
第 6 章 基于水文模拟的北方灌区农业干旱特征评估	(72)
6.1 基于土壤含水量模拟的区域农业旱情评估模型构建	(72)
6.2 干旱指数典型年份验证	(76)
6.3 不同作物生长季内干旱评价	(79)
6.4 小 结	(92)

第7章 基于灌区旱情动态的适应性实时在线灌溉预报技术	(93)
7.1 基于旱情动态的适应性灌溉预报技术	(93)
7.2 农业干旱评价指标及等级	(94)
7.3 适应性灌溉预报原理及步骤	(95)
7.4 冬小麦适应性实时灌溉预报结果与分析	(98)
7.5 适应性实时灌溉预报对冬小麦产量的影响分析	(103)
7.6 小 结	(105)
第8章 灌区多水源实时配置技术	(106)
8.1 灌区水资源优化配置研究现状	(106)
8.2 典型灌区基本情况	(109)
8.3 典型灌区多水源优化配置	(113)
8.4 小 结	(125)
第9章 水肥一体化灌溉施肥效应模拟研究	(126)
9.1 水肥一体化技术概述	(126)
9.2 水肥一体化技术研究方法	(130)
9.3 不同灌溉情景对农田氮磷流失及作物水分生产力的影响	(133)
9.4 不同施肥情景对农田氮磷流失及作物水分生产力的影响	(135)
9.5 小 结	(142)
第10章 农业水资源智能管理系统框架	(143)
10.1 农业水资源灌溉管理系统研究现状	(143)
10.2 研究区概况	(147)
10.3 水肥一体化现代农田智能灌溉管理系统框架	(148)
10.4 小 结	(156)
第11章 总结与建议	(157)
11.1 研究的主要成果	(157)
11.2 展 望	(159)
参考文献	(160)

第 1 章 绪 论

1.1 我国北方农业水资源利用现状

1.1.1 我国水资源现状及存在问题

水是生命之源,生产之要,是人类生存的重要物质基础。水资源禀赋条件一定程度上影响着经济社会发展的速度和格局。我国是世界上严重缺水的国家之一,我国年平均降水总量约为 6×10^4 亿 m^3 ,平均降水深 648 mm,小于世界平均降水深(798 mm)和亚洲平均降水深(741 mm)。我国降水中约有 45% 的降水转为地表和地下水资源量,其余 55% 的水量为植物蒸腾或地表水分蒸发所消耗。以河川径流量为代表的地表水资源量约为 2.7 万亿 m^3 ,地下水资源量约为 0.83 万亿 m^3 ,扣除地表和地下水重复计算量,水资源总量为 2.8 万亿 m^3 ,居世界第六位。但我国人口众多,人均水资源量只有 2 251 m^3 ,不足世界平均水平的 1/4,居世界 149 个国家的第 110 位;我国耕地每公顷占有水量平均约为 26 250 m^3 ,只占世界平均值的 1/2。按照现行国际标准,我国水资源量已经达到严重缺水边缘,是世界上 13 个贫水国家之一。

我国不仅水资源量短缺,而且时空分布不均匀。淮河流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%,但水资源量仅占全国总量的 19%。我国南方地区,特别是广东、福建、浙江、湖南、广西、云南和西藏东南部等地区水系发达,水量丰沛,其水资源量占全国水资源总量的 80% 以上,人均水资源占有量为 4 000 m^3 左右。而我国北方地区,如内蒙古、甘肃、宁夏、新疆西部和北部、东北西部等地区干旱少水,水资源严重缺乏,其水资源量仅占全国水资源总量的 14% 左右,人均水资源占有量仅为 900 m^3 左右,已低于国际水资源紧缺限度 1 000 m^3 的标准。

此外,水资源的年内、年际分配严重不均。对于我国绝大部分河流来说,径流的年内分配主要取决于降水的季节分配。我国大部分地区冬季少雨雪,各河流均为枯水季,全国降雨多集中在 6~9 月,夏季汛期 4 个月的径流量占全年的 60%~70%。我国北方河流的汛期径流更为集中,部分河流的最大 4 个月径流占全年径流的 80% 以上。我国水资源时空分配上的不均匀,极易造成频繁的大面积洪灾或旱灾,尤其是造成了北方大部分地区水资源匮乏,工农业用水短缺。

据统计,我国可利用的淡水资源多年平均为 1.1 万亿 m^3 ,按目前的正常需要和不超采地下水,年缺水总量在 300 亿~400 亿 m^3 。目前干旱缺水地区涉及全国 20 多个省(市、区),其中 18 个省(市、区)接近或处于严重缺水边缘,干旱缺水地区面积约 500 万 km^2 。在全国 600 多座城市中,有近 400 座城市缺水,其中严重缺水的城市有 108 座,有 40 个城市被列为水荒城市。全国城市每年缺水量为 60 亿 m^3 ,日缺水量 1 600 万 m^3 。全国用水

量低于日均 10 L 或 15 L 的严重缺水人口已达 4 700 万人。

缺水给城市工业产值造成的损失在 2 000 亿元以上,且呈增长趋势。农业的缺水问题也很突出,按现状用水统计,农业正常年用水缺水量为 300 多亿 m^3 ,受旱面积达 3 亿 ~ 4 亿亩^①,每年因干旱减产粮食几百亿千克;全国农村约有 5 000 万人、4 亿头牲畜饮水困难。根据水利部门调查分析,我国北方缺水地区总面积约 58 万 km^2 ,包括北京、天津、河北、山西、河南和山东等地,在干旱少雨的年份,常使河道干涸断流,水库储水锐减。

中华人民共和国成立以来,我国进行了大规模的防治水害和开发利用水资源的工作,取得了巨大成就,但同时在水资源利用和管理方面也存在着许多问题。

在水资源匮乏的同时,水污染问题也十分严重。由于经济的快速发展,工业废水和城市生活废污水排放量的急剧增加,以及农药、化肥施用量的不断增加,致使我国水体污染及水环境问题日益严重。水利部门对全国约 700 条大中河流近 10 万 km 河长的检测表明,我国现有河流约 1/2 的河段受到污染,1/10 的河长污染严重,已失去了使用价值。水污染问题无疑加重了水资源危机,因河流水质恶化导致供水困难的情况已日趋增加,使水资源短缺状况更为严重。

缺水还导致过量引用地表水和超采地下水,造成了西北内陆河流域下游湖泊干涸,荒漠化、盐碱化不断发展,华北等许多地区出现大规模的地下水降落漏斗,青岛、烟台等地大规模的海水入侵,黄河干流的高频率、长时间断流且不断加剧等十分严重的生态环境问题,也造成了地区之间、工农业之间、城乡之间用水矛盾等十分尖锐的社会问题,威胁到人类的生存环境和农业的可持续发展。

使用管理不当导致水资源的浪费。人们在用水方面还存在很大的浪费,一些水利设施在设计管理使用上不合理,存在用水制度粗放等管理弊端,造成了大量的水资源浪费。

水资源紧张严重阻碍了国民经济的发展,给人民的的生活带来很大的不便。我国的可利用水资源量极其有限,随着我国人口的增加和经济的快速发展,人们对水的需求将会进一步增加,从而导致水资源供需矛盾的加剧。预计到 2030 年左右人口达到高峰时,也将出现用水高峰。如果不能妥善处理水资源短缺问题,水资源短缺问题将会成为制约我国社会经济进一步发展和人民生活不断改善的重要因素。因此,必须加强水资源管理,合理调配和充分利用水资源。

1.1.2 我国农业水资源现状

我国是一个农业大国,社会经济的持续发展很大程度上依赖于农业生产的稳定发展。农业为我国第一用水大户,农业用水量为 3 870 亿 m^3 ,占总用水量的 63.5%,其中灌溉用水占农业总水量的 90% 以上,因此水资源高效利用的核心是农业水资源的高效利用,特别是灌溉用水的高效利用。

为满足人口持续增长和生活水平改善的需要,农业生产的规模和强度在过去几十年中迅速扩大,干旱缺水和水污染已成为我国农业可持续发展和粮食安全保障的重要制约因素。当前我国农业用水普遍存在灌溉方式落后、效率低、浪费严重等问题,进一步加剧

① 1 亩 = 1/15 hm^2 ,全书同。

了农业水资源短缺程度,由于缺水严重,农业发展、环境保护与经济效益的矛盾日益突出。

中华人民共和国成立以来,我国始终把增加农田灌溉面积作为农田水利基本建设的中心任务,农田灌溉面积已从1949年的1 600万 hm^2 增加到2001年的6 000万 hm^2 。水利灌溉的发展对促进我国粮食增长及整个农业的快速持续发展起到了关键性作用,整个农业用水量已占到全国总用水量的63.5%,而一些发达国家农业用水比例多在50%以下。据预测,到2030年左右我国人口将达到16亿高峰,到时候,人们为了满足粮食增长的需求,农业用水量将增长到6 650亿 m^3 。与此同时,社会发展对水资源的需求也在逐渐增加,水资源的供需矛盾将会更加突出。在水资源总量有限的条件下,农业用水受不断增加的工业和生活用水的挤占,势必会大幅减少。这意味着:在21世纪,我国农业用水量将面临零增长甚至负增长,农业水资源短缺的形势将更为严峻。

我国农业灌溉水资源一方面严重紧缺,另一方面又存在严重的用水浪费,目前我国农业的管理水平与生产力发展水平、社会需求已不相适应,灌溉水利用效率偏低、农业水资源紧缺等问题极为突出。我国农田对自然降水的利用率只有56%,一些土质较差的渠道输水渗漏损失占引水量的50%~60%,我国每年因渠道输水渗漏造成的损失高达1 500亿 m^3 ;我国灌溉有效水利用系数只有0.51左右,渠灌区水的有效利用系数只有0.4左右,井灌区也仅为0.6左右,单方水粮食生产率不足1 kg;而一些发达国家用水的有效水利用率可达80%以上,单方水粮食生产率大体都在2 kg以上。

目前灌溉水的现状导致了灌区灌溉用水尤为紧张,不少地方靠超采地下水、挤占生态环境用水维持用水现状,对农业可持续发展和水资源的可持续利用非常不利。传统的灌溉技术已无法适应客观现实的需要,急需采取措施,加强灌区水资源管理,完善灌溉水资源配置制度和技术,提高灌溉水利用效率等手段来缓解水资源危机。

水利是农业的命脉,是国民经济和社会发展的基础产业,而灌溉是农业生产发展的基本条件。农业发展的关键是节水,节水的關鍵在管理。因此,在有限的水资源条件下,农业要发展,必须加强农业水资源管理,提高农业灌溉水资源的利用率,加强灌溉水资源高效利用关键技术研究,发展并大力推广节水型农业。

1.1.3 北方灌区水资源利用现状

我国水资源分布状况与国民经济布局和发展分布严重不匹配,北方地区水资源形势尤为严峻。长江流域及以南,人口占全国的54%,国土面积占全国的36.5%,水资源却占全国的81%;长江淮河沿线以北地区,国土面积占全国面积的63.5%,耕地面积占全国的51%,人口占全国的46%,而水资源仅占全国的19%。

北方地区作为我国主要粮食产区,粮食产量占全国的52.3%,在保障我国粮食安全与水安全中的地位比南方地区更为重要。水资源的天然条件和水土资源的不相匹配是我国农业用水紧张的客观因素,因此保障北方地区水安全对保障我国粮食安全具有重要意义。

随着社会经济的快速发展和人民生活水平的提高,干旱、缺水已经成为制约北方农业发展和经济社会发展的两大瓶颈,成为影响社会稳定的一个重要因素,特别是21世纪以来呈迅速发展的态势。据预测,中国北方地区人均水量到2030年为712 m^3 ,远低于国际

公认的人均 $1\ 700\ \text{m}^3$ 的缺水警戒线,用水尤其紧张。水土资源格局的不匹配决定了农田灌溉在我国农业生产特别是粮食生产中占有极其重要的地位。因此,在北方地区开展农业节水灌溉对保障国家水安全、粮食安全、生态安全和社会安定,推动农业和农村经济可持续发展,具有重要的战略意义。

作为我国北方农业区的重要组成部分,黄河流域的农业发展对中国农业乃至整个国民经济发展具有举足轻重的作用。黄河流域位于我国北部干旱、半干旱地区,河川径流量较少,水资源比较匮乏,流域内 $1/3$ 地区年降水量不足 $400\ \text{mm}$, $2/3$ 地区的年降水量在 $400\sim 800\ \text{mm}$,全流域年平均降水量为 $471\ \text{mm}$,而年平均蒸发量达 $1\ 100\ \text{mm}$ 。黄河流域以占全国 2% 的径流量,供给全国 15% 的耕地和 12% 的人口用水;流域内人均占有水量和每公顷耕地占有水量分别为 $593\ \text{m}^3$ 和 $4\ 860\ \text{m}^3$,是全国平均水平的 25% 和 17% 。在黄河流域,灌溉农业是用水大户,其用水占全流域河川径流量的 92% 。

黄河下游引黄灌区是新中国成立后在黄河流域兴建的最大引黄灌区,经过几十年的发展,引黄灌溉模式已由最初的单一自流灌溉发展到了目前的自流、提水、抗旱补源相结合的多种灌溉模式。自 1980 年以来,黄河断流、支流干枯,灌区来水量明显减少,引起地下水超采,给灌溉农业带来极为不利的影响;加之人口增加,城市化率不断提高,工业快速增长,工业及城镇农村生活用水挤占农业灌溉用水的趋势加剧,农业用水占总用水量的比例已由 1949 年的 94% 下降至 1998 年的 78% 。由于工程、灌溉技术、灌区管理等方面的原因,农业灌溉水的利用率还较低,灌溉水利用系数仅为 $0.30\sim 0.45$,其中渠系水利用系数为 $0.45\sim 0.50$,田间水利用系数为 $0.80\sim 0.90$ 。为缓解黄河流域水资源短缺及供需矛盾,必须搞好有限的农业水资源配置决策,制定合理的灌溉制度,充分发挥现有水资源的生产潜力。

河南省地处黄河下游地区,是北方严重缺水的省份之一,人均水资源量仅为 $420\ \text{m}^3$,不足全国人均水资源量的 $1/5$,每公顷耕地平均占有水资源量为 $5\ 250\ \text{m}^3$,全省正常年份缺水 $40\ \text{亿}\sim 50\ \text{亿}\ \text{m}^3$ 。由于农业是用水大户,水资源短缺问题的日益剧烈,已严重影响到河南省农业的进一步发展。特殊的地理条件和气候特征决定了河南省是一个干旱及早灾频繁发生的地区。干旱具有影响范围大、后果严重等特点,给农业造成了极大的损失和影响。

20 世纪以来,全球气候变暖导致的干旱等极端气候事件的频率和强度均呈显著增加的趋势。农业关乎国家粮食安全和社会稳定,同时农业又是受气候和天气制约最大的领域,因此农业干旱研究成为各国政府和学者共同关注的焦点问题。在干旱缺水背景下,维持农作物高产量,增强农业抗旱能力,减缓旱灾损失势必要求对干旱规律、趋势及其管理政策进行深入研究,在此基础上加强农业水资源的适应性综合管理措施研究,提高农业用水效率,改进灌溉技术,制定节水灌溉机制,实施灌区水资源优化配置,促进农业经济的可持续发展。

为此,选取河南省的典型灌区进行研究,对区域农业水资源进行系统调控,采取节水措施,进行合理的配置和调度,提高有限资源的利用率,对维持农业水资源的可持续利用具有重要意义。

1.2 我国农业旱灾情况

干旱是指由水分的收与支或供与求不平衡形成的水分短缺现象。干旱灾害是我国最严重的自然灾害,其出现频率高,持续时间长,影响范围广,对农业造成了巨大的影响与冲击,导致粮食减产、土地资源退化、水资源耗竭,制约了农业乃至整个国民经济的可持续发展。干旱作为严重的自然灾害,一直备受科学研究和社会公众的广泛关注。伴随着经济的发展,由干旱以及水资源的匮乏所造成的生命财产损失不断增长,已经成为制约区域经济发展的瓶颈。

全球有一半以上的陆地生态系统面临着干旱的威胁,干旱半干旱地区遍及 50 多个国家和地区,总面积约占陆地面积的 34.9%。全球每年因干旱造成的经济损失高达 60 亿~80 亿美元,远超过其他气象灾害。

我国是一个干旱灾害频发的国家,由于幅员辽阔,地形复杂,局域性或区域性的干旱灾害几乎每年都会出现。如在 1979~1991 年的 13 年间,华北、华南及东北地区干旱出现 8 年,全国性干旱出现 2 年,长江以南的广大地区干旱出现 2 年,长江流域干旱出现 1 年。据统计,1949~2010 年我国有 22 年发生了重大旱灾,发生频率为 35%,其中 20 世纪 90 年代以来共有 13 年发生了重大旱灾,发生频率高达 65%。重大旱灾涉及范围广,影响面积大,其中 1994 年华北、西北、华中、华东大部分地区因降水时空分布差异大,都发生了较为严重的干旱,1997 年、1999 年、2007 年和 2009 年的旱灾受灾地区涉及东北、华北和西北在内的整个北方地区,1992 年和 2000 年的重大旱灾更是波及全国。

我国农业干旱具有显著的区域性,北方旱灾严重程度高于南方。华北、西北东部地区和东北地区发生频率较高。从受旱率、成灾率来看,北方地区也一般高于南方地区,华北地区平均受旱率、成灾率最高。主要是受气象干旱的影响,我国北方地区是气象干旱较为严重的地区。农业与气候紧密联系,除设施农业外,自然降水是地区农业生产的主要水源。据统计研究,东北区、内蒙古区、西北区和西南区的农业干旱存在显著的加重趋势,其中东北区和内蒙古区的趋势为极显著增加,意味着我国北方干旱化正在加剧。干旱化的加剧一定程度上加剧了北方地区生态环境的恶化,如内蒙古东部沙漠化加剧。而在华北地区,由于灌溉设施和技术的不不断提升,农业干旱化的趋势并不显著。

我国干旱灾害的发生具有明显的季节性,一般多见于春季和夏季,即春旱和夏旱,有时是连季的干旱,如春夏连旱、夏秋连旱。由于我国大部分处于亚洲季风气候区,降水在区域、季节和多年间分布不均衡,旱灾发生的时期和程度有明显的地区分布特点。秦岭淮河以北地区春旱突出,有“十年九春旱”之说;黄淮海地区经常出现春夏连旱,甚至春夏秋连旱,是全国受旱面积最大的区域;长江中下游地区主要是伏旱和伏秋连旱,有的年份会因梅雨期缩短或少雨而形成干旱;西北大部分地区、东北地区西部常年受旱;西南地区春夏旱对农业生产影响较大,四川东部则经常出现伏秋旱;华南地区旱灾也时有发生。

我国干旱具有出现频率高、持续时间长、波及范围广的特点,给人类社会带来了巨大的损失。据统计,1950~2010 年全国农作物因旱年均受灾面积接近 2 160 万 hm^2 ,因旱年均损失粮食 161.17 亿 kg 。其中,1950~1999 年期间,我国平均每年受旱面积约为 2 159.3

万 hm^2 , 约占各种气象灾害面积的 60%, 每年因旱灾损失粮食 100 亿 kg ; 2000 ~ 2010 年全国作物平均每年有 28.6 个省发生干旱灾害, 平均年受灾面积 2 400 万 hm^2 , 其中成灾面积 1 393 万 hm^2 。我国因干旱造成的经济损失也呈上升趋势。据统计, 20 世纪 90 年代以来, 我国因干旱灾害所造成的经济损失在一般干旱年约占 GDP 的 1.1%, 严重干旱灾害年约占 GDP 的 2.5% ~ 3.5%, 因干旱年均粮食损失高达 278 亿 kg 。2000 年我国因旱灾造成的经济作物损失达 500 亿元以上。2001 年全国因干旱造成的损失占气象灾害总和的 72%, 受旱面积、成灾面积和粮食损失分别达到了 3 850 万 hm^2 、2 370 万 hm^2 和 5 480 万 hm^2 , 经济作物损失 538 亿元。2006 ~ 2007 年, 东北、华北、西北地区连续两年都发生重大旱灾, 全国因旱受灾面积多于近 10 年平均值, 因干旱造成直接经济损失 785.2 亿元; 2009 年 10 月至 2010 年 3 月, 我国西南五省遭受了秋冬春 3 季连旱, 旱情极为严重, 耕地受旱面积达到 636.87 万 hm^2 , 其中重旱 164.27 万 hm^2 , 受灾人口有 2 019.9 万人, 占全国同期的 80%。重大旱灾的这种延续性可使灾害产生持续破坏, 并发生质变, 带来相应的后续连锁影响。如由于持续干旱少雨, 土壤缺水严重, 2000 年以来沙尘暴频发, 尤其是 2002 年春季在西北和华北发生了 10 多年来最严重的沙尘暴。因干旱灾害也导致了我国部分河道断流、湖泊萎缩以及土壤沙化等, 给经济社会的发展带来了巨大的影响。

华北作为中国经济发展快速增长的地区之一, 20 世纪 70 年代中后期以来华北地区出现了较严重的持续性干旱, 90 年代初干旱状况略有缓解, 但 90 年代中期以来干旱又有所回升, 呈加剧的趋势。自 20 世纪后期到 21 世纪初, 华北地区有半数以上的年份出现干旱, 甚至严重干旱。据统计, 华北地区在 1951 ~ 1980 年的 30 年间, 出现较大范围干旱的年份有 12 年, 中等范围干旱的年份有 11 年, 且干旱的持续时间较长, 一般在 1 ~ 2 个月或 4 ~ 5 个月。世纪之交, 干旱从 1997 年一直持续到 2002 年, 政府不得不从黄河引水济京津, 以解缺水之急。1997 年全年四季都有干旱发生, 以夏、秋两季干旱的范围广、持续时间长, 受灾面积大; 1998 年春季和初夏降水量较正常年份略偏多, 但是夏末之后干旱再次袭击华北地区, 造成华北冬小麦区受灾面积巨大。

华北地区是我国小麦的主产区, 社会经济持续发展很大程度上依赖于农业的安全稳定生产。农业的发展、粮食的产量很大程度上受控于气象状况和水资源条件。华北地区人口的急剧增加, 工业化、城市化的快速发展, 气候变化的影响及干旱事件的频发, 水资源短缺问题越来越严重, 农业灌溉用水形势日趋严峻。在干旱缺水背景下, 解决华北地区农业用水的根本途径是发展节水农业, 节水农业的核心是提高水资源利用效率。

20 世纪以来, 全球气候变暖导致的干旱等极端气候事件的频率和强度均呈显著增加趋势。与气候平均态相比, 极端事件的发生更具反常性、突发性和不可预见性, 其对气候变化响应也更为敏感, 成为陆地生态系统波动的主要风险源, 并已对生态系统和人类社会经济可持续发展造成了巨大而深远的影响。资料显示, 全球气象灾害造成的经济损失约占所有自然灾害损失的 85%, 其中干旱所造成的损失占气象灾害的 50% 以上。21 世纪全球干旱风险将进一步增加, 因而如何应对和减缓干旱及其影响已成为亟待解决的重大科学问题。

干旱对农业系统的影响最为明显也最为直接。农业关乎国家粮食安全和社会稳定, 同时农业又是受气候和天气制约最大的领域, 农业干旱研究成为各国政府和学者共同关

注的焦点问题。因此,在干旱缺水背景下,维持农作物高产量,增强农业抗旱能力,减缓旱灾损失势必要求对于干旱规律、趋势及其管理政策进行深入研究,在此基础上加强农业水资源的适应性综合管理措施,提高农业用水效率,改进灌溉技术,制定节水灌溉机制,实施灌区水资源优化配置,促进农业经济可持续发展。

1.3 我国节水农业技术发展现状及趋势

1.3.1 节水农业技术发展现状

新中国成立初期,我国大部分农田灌溉沿用旱田大水漫灌、水田串畦淹灌的方法。针对水资源供需矛盾日益尖锐,农业用水浪费严重且节水潜力巨大的现状,20世纪50年代我国开始大力开发水资源,发展农田灌溉,并取得了显著成就。20世纪50~60年代,水利部开始实施节水农业技术和以提高灌溉水有效性为目标的农业灌溉工程。到70年代初,某些技术已在生产中推广应用,如在自流灌区大力推广衬砌渠道工程、平整土地、划小畦块,并开始发展喷灌技术,并于1974年引进滴灌技术。“七五”期间,国家科学技术委员会把低压管道输水灌溉技术列入重点科技攻关项目。20世纪70年代后期至80年代初在丘陵区推广抗旱灌溉,主要推广喷、微灌等先进灌水技术,并于70~80年代提出了地膜覆盖栽培、节水栽培等有效技术措施,在玉米等大田作物上取得显著增产效果。20世纪80年代中期至90年代初,在全国范围内推广低压管道输水技术,80年代中期也开展了涌流灌溉技术的试验研究工作,取得了一批成果,但未能推广应用。80年代末,开展了雨水汇集利用技术的研究,在汇流表面处理技术、窖窑构建及布局、汇流面与种植面积比例方面取得了成果。20世纪90年代开始,国家和地方政府高度重视节水灌溉工作,研究节水工程技术同农业节水技术—水肥耦合、耕作措施、作物结构与布局、地表覆盖、优化灌溉、水稻浅湿灌溉、膜上灌、坐水种等的组合,积极引进国外先进灌溉技术,研究、推广和应用了多种适合中国国情的农业措施,节水农业技术发展进入了一个新时期。

在“九五”期间,科技部会同水利部、农业部等行业主管部门,组织全国百余家科研院所、大专院校和生产企业的近千支队伍,联合开展科技攻关,实施了“节水农业技术与示范”“黄土高原水土流失区农业综合发展技术研究”“北方旱区农业综合研究开发与示范工程”等一系列国家重大科技项目,组建了3个与节水农业相关的国家级工程技术研究中心,以加强农业节水科技成果向生产力转化的中间环节,促进科技产业化发展。经过5年的连续攻关,在节水灌溉新技术、水资源合理利用、主要农作物节水灌溉制度与节水灌溉设备等方面取得了一系列研究成果,研发出一批节水农业技术与产品,在生产实际中得到推广应用,取得了明显的节水增产、增效和环境生态效益。“十五”期间,科技部、水利部、农业部于2002年联合启动实施了“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”重大科技专项,并将其列入“863”高新技术研究发展计划,以重点突破制约我国节水农业技术发展的“瓶颈”问题。上述项目的开展和完成对于提高我国节水农业应用基础研究水平、开发节水农业新产品与新材料并实现农业产业化起到了重要作用,推动了节水农业领域的科技进步,促进了国家节水目标与农民增收的有机融合,为创建具有自主

知识产权的现代节水农业技术体系和解决我国水资源短缺问题做出了巨大贡献。

“十一五”期间,国家发展和改革委员会、水利部和建设部组织编制了节水型社会建设“十一五”规划,确定了节水型社会建设的重点和对策措施。提出在农业领域以提高灌溉水利用效率为核心,结合新农村建设,调整农业种植结构,优化配置水资源,加快建设高效输配水工程等农业节水基础设施,对现有大中型灌区进行续建配套和节水改造,推广和普及节水技术,优先在粮食主产区、严重缺水地区以及生态脆弱地区发展节水灌溉和开展旱作物节水农业示范试点。

“十二五”期间,在节水型社会建设“十一五”规划的基础上,在农业节水方面,仍然以提高灌溉水利用效率和发展高效节水农业为核心。在提倡农业节水的同时,提出逐步实现水肥一体化技术。2012年,国务院印发《国家农业节水纲要(2012~2020)》,强调积极发展水肥一体化;2013年,农业部发布《水肥一体化技术指导意见》,提出到2015年水肥一体化推广总面积达到8000万亩以上;2015年2月,农业部提出《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,要求控制用水总量,到2020年实现化肥零增长;2016年,《国家“十三五”规划纲要》提出,大力发展生态友好型农业,在重点灌区全面开展规模化高效节水灌溉行动;2016年,农业部发布《推进水肥一体化实施方案(2016~2020年)》要求,到2020年水肥一体化技术推广面积达到1.5亿亩,节水150亿 m^3 ,节肥30万t,增效500亿元;2017年中央一号文件提出大力普及喷灌、滴灌等节水灌溉技术,加大水肥一体化等农业节水推广力度。

目前,我国已在旱地农业水分调控和农作物增产技术、节水农业综合技术体系、低压管道输水、喷灌和微灌及其他新灌水技术,包括渠道衬砌、管道输水、喷灌、滴灌、渗灌、畦灌、沟灌、抗旱保墒的栽培耕作制度、集雨灌溉、抗旱育种、水肥耦合、非充分灌溉、灌溉制度优化、合理的轮作和间混套作、污水回灌等方面形成了自己的特色。

在节水农业应用基础及前沿与关键技术创新方面,较为系统地揭示了土壤-植物-大气连续体水分、养分迁移规律和调控理论,以及作物非充分灌溉理论与模式,特别在农田水分转化规律、根冠信息传递与信号振荡、水分养分传输动态模拟、作物需水规律与计算模型及抗旱节水机理等方面取得了重大突破,为我国节水农业技术发展提供了强有力的技术储备与支撑;取得的非传统水资源开发与高效利用技术、非充分灌溉与精细地面灌溉技术、节水产品激光快速成型技术等一系列成果,产生了明显的节水增产效益;首次在国际上建立的节水产品激光快速研发平台,使微灌产品单循环周期由90~150d缩短为3~5d,成本由3万~5万元降低为0.2万元,工效提高了30倍,成本仅为原来的1/20。筛选出的抗旱节水新品种在中等干旱条件下较对照产量提高10%,作物水分利用效率提高20%~40%;建立的激光控制平地自动作业技术,使土地平整精度达到2~3cm,灌溉水利用率提高20%~30%;提出的基于作物生命需水信号的控制性分根交替灌溉技术,作物水分利用效率达2 kg/m^3 ;研制的新型土壤固化剂集雨新材料比水泥土强度高出68%,集流效率达85%~91%,投资仅3~4元/ m^2 ;研制的植物生长营养调理剂可使生物集雨面郁蔽时间由3a缩短为30d,0.5cm厚水层停留6h不渗漏,径流量较对照提高30%。

在节水农业技术体系集成与示范方面,初步建立了适合我国国情和不同区域特点的

现代节水农业技术发展模式,提出适合我国北方干旱内陆河灌区、半干旱平原井灌区、半干旱平原渠灌区、半干旱平原抗旱灌溉区、集雨补灌旱作区、半湿润井渠结合灌溉区、半干旱生态植被建设区、半干旱都市绿地灌溉区、南方季节性缺水地区等9个现代节水农业区域发展模式,并以此模式在我国西北、华北、东北,以及华东与南方季节性缺水地区建立了17个示范区,面积达1.67万 hm^2 ,技术辐射24.5万 hm^2 ,推广0.13亿 hm^2 ,节水约24亿 m^3 ,增产粮食25亿 kg ,增加经济产值48亿元。另外,我国大田棉花膜下滴灌技术应用面积已达33.33万 hm^2 ,雨水集蓄利用技术应用面积200万 hm^2 ,均为世界之最。

1.3.2 节水农业技术发展存在的问题

我国是农业大国,农业用水效率决定着水资源利用总体水平。一直以来,党中央高度重视农业节水及灌溉技术,并取得了显著的成绩。

我国节水农业技术虽具备一定的基础积累,取得了一些在生产实际中发挥重要作用的创新科技成果,但是,我国农业节水还面临一系列制约因素,重投入轻管理、重建设轻使用、重设备轻技术等问题普遍存在,阻碍了节水农业功能和效率的发挥,亟待进一步解决完善。我国农业用水上存在很多薄弱环节,投巨资建起了各种水利工程设施,田间施水方法却落后粗放,在技术上仍广泛沿用原始方法,水分利用率低,水资源浪费严重,科研成果转化率低,没有市场约束,没有现代意义上的管理,缺乏有效的组织来维护合理的管理制度,节水农业功能和效率无法有效发挥,亟待进一步完善和解决。

在节水新技术方面,仍存在诸多重要的技术瓶颈,尚不具备为建设现代节水高效农业提供强有力的技术支撑,主要表现为:

(1)我国现代化农业起步较晚,目前大多数仍局限于节水灌溉工程措施的推广和应用,缺乏旱区半旱区农业水土资源高效利用发展所需要的基础数据积累和对农业用水状况的有效监测与控制。

(2)农业高效用水应用基础研究薄弱,特别是对农业高效用水发展起关键作用的从纯基础到应用层面的应用基础研究还很欠缺,在农田水分高效利用、区域高效用水和环境友好的农业用水优化模式等方面的研究还比较欠缺。

(3)根据不同地区特点的单项农业用水技术研究较多,但缺乏适合不同地区的标准化、模式化、集成化的北方旱区半旱区农业水资源高效节水利用综合技术体系。

(4)从整体上讲,多以理论性、探索性或专家咨询性研究成果为主,且多数研究成果都尚不完善,真正能在生产中应用、通用性较强、实用灵活且应用方便的程序软件尚未研制;尤其缺乏基于Web的在线实时灌溉调度工具,缺乏可用于生产实践的旱区半旱区农业水资源高效节水利用综合管理的系统研究成果。

到目前为止,我国农业灌溉管理决策支持系统方面的研究还处于探索研究阶段,与节水发达国家相比,我国灌溉管理存在着水平低、方法落后等问题。目前已有的灌溉管理系统,如中科院水土保持所开发的旱作物需水量预报决策辅助系统、扬州大学的周明耀开发的农田水分管理决策支持系统等,大部分是C/S(Client客户端/Server服务器)模式系统,要求有专门的客户端程序,常被称为胖客户端系统,存在难以适应大范围跨平台、跨系统的信息访问和共享需要、系统维护工作量大、升级困难和可移植性差等问题。

就国内的灌溉管理系统而言,现在的农业现代化和信息化水平还比较落后,总的来讲,主要有以下三个方面:

(1)农业基础设施不完善,田间数据特别是实时数据的采集与传输受到设备与技术方面的制约还很多;

(2)在管理软环境方面投入较少;

(3)缺少水资源管理软件的行业准则和规范,造成了管理软件的重复开发和资源的浪费。

总的来讲,我国农田水利灌溉技术的现代化水平与国际的先进水平还存在着一定程度的差距,成果的数据共享性较差、成果的规模化还有待提高、成果的技术水平还有待提高。

因此,根据国内实际情况,研制出符合国情的、系统相对简单、操作相对简易、维护费用相对较低的节水灌溉管理系统是很有必要的。

1.3.3 节水农业技术发展趋势

进入 21 世纪后,随着干旱缺水态势不断加剧,人口增长、城镇化和社会经济快速发展,我国用水矛盾日益尖锐。农业是我国节水潜力最大的行业,发展现代节水农业是确保我国粮食安全、水安全和生态安全的重大战略举措已经成为共识。我国现代节水农业发展正处在一个传统技术升级与高新技术发展相互交织的关键时期,如何在这一关键时期确定我国现代节水农业技术研发重点和发展方向,对于我国节水农业的发展,以及对确保我国战略水安全、生态安全与粮食安全均具有十分重要的意义。

纵观国内外农业水资源利用管理的发展历程,可见我国农业水资源利用管理方面存在以下三个发展趋势或方向。

1.3.3.1 农业管理措施一体化技术

在工程节水技术的基础上,发展综合一体化农业管理节水技术,发挥各项农业节水技术的综合优势,达到节水、高产、高效是当前世界各国研究的一个热点。美国和以色列开发的“水—肥预测预报”技术服务体系,能较准确地预报墒情及施肥水平,其氮素利用率达到 60% 以上,单方水生产率达 2.32 kg。今后,在作物对土壤干旱逆境信号感知及其传递,作物水分利用效率和抗旱性的改善与调控,不同农业措施条件下的水、热、肥运动、吸收和转化利用规律,不同作物水分、养分状况分析与土壤水分有效性的自动判别,作物水分—养分—环境—生产力形成的综合模拟模型等方面都需要进行深入、系统的研究。

1.3.3.2 农业高效用水智能决策系统

近十年来,随着信息、通信技术的发展及软硬件价格的不断下降,信息技术已广泛应用于生产、生活的各个领域。

在发达国家,信息技术已成为提高农业生产的最有效手段,世界各国学者相继开发了节水灌溉专家系统,如滴灌系统中过滤设备选择专家系统、灌溉水质与作物产量间关系的决策支持系统、渗灌技术要素与氮素间关系的决策系统等。国内在农业高效用水专家系统方面也进行了一些尝试,但这类系统都是针对灌溉中某一具体技术开发的,对指导环境条件复杂的农业生产尚有一定差距,特别是基于作物生长发育模型、土壤水肥模型、作物