

西北地区农业节水 与水资源持续利用

WATER-SAVING AGRICULTURE
AND SUSTAINABLE
UTILIZATION
OF WATER RESOURCES
IN NORTHWEST CHINA

西北农业大学农业水土工程研究所
农业部农业水土工程重点开放实验室

主编



中国农业出版社

西北地区农业节水与水资源 持续利用

WATER-SAVING AGRICULTURE AND SUSTAINABLE UTILIZATION
OF WATER RESOURCES IN NORTHWEST CHINA

西北农业大学农业水土工程研究所 主编
农业部农业水土工程重点开放实验室



北林图 A00144788

中国农业出版社

453769

内 容 提 要

发展节水农业作为缓解中国水资源供需矛盾的一项根本性措施,受到了社会各界的广泛重视。本书共分九章,包括总论,农业节水机理,作物需水量与节水型灌溉制度,土壤与作物水分监测与预报技术,农田节水灌溉技术,输水系统节水技术,灌区水量流量调配技术,黄土高原雨水、浑水资源高效利用技术,西北地区地面水地下水资源持续高效利用技术等。

本书内容系统完整,资料丰富,理论联系实际,突出西北农业大学农业水土工程研究所的研究成果,可供农田水利、土壤物理、农业气象、植物水分生理、农田生态、农业水文与水资源、农业水土工程、节水农业、水环境、水土保持等方面的科技人员阅读,也可作为有关专业研究生和大学本科生的教学参考书。

西北地区农业节水与水资源持续利用

WATER-SAVING AGRICULTURE AND SUSTAINABLE
UTILIZATION OF WATER RESOURCES IN NORTHWEST CHINA

西北农业大学农业水土工程研究所 主编
农业部农业水土工程重点开放实验室

* * *

责任编辑 彭明喜 段丽君

中国农业出版社出版(北京市朝阳区农展馆北路2号 100026)

新华书店北京发行所发行 北京科技印刷厂印刷

787mm×1092mm16开本 32印张 730千字

1999年4月第1版 1999年4月北京第1次印刷

印数 1~1000册 定价 112.00元

ISBN 7-109-05427-6/S·3462

(凡本版图书出现印刷、装订错误,请向出版社发行部调换)

主要编写人员

主 编	康绍忠			
第一章	康绍忠			
第二章	康绍忠	梁宗锁	胡 炜	史文娟
第三章	康绍忠	蔡焕杰	胡 炜	胡笑涛
第四章	马孝义	蔡焕杰	康绍忠	
第五章	朱凤书	林性粹	王 智	苏德荣
第六章	林性粹	朱凤书	于志秋	韩克敏
第七章	汪志农	朱凤书	李明思	王 智
第八章	迟耀瑜	林性粹	包忠谟	康绍忠
	宋孝玉			
第九章	贺缠许	冯国章	蔡焕杰	王纪科
	魏晓妹	刘俊民	王鸣周	高军省

前 言

西北农业大学农业水土工程研究所是1992年经农业部正式批准成立的。它的前身可以追溯到1941年原西北农学院设立的农田水利研究部。该研究部是中国近代较早进行农田水利科学研究和培养研究生的机构。农田水利研究部成立后即着手进行浑水灌溉、泥沙问题等方面的理论与实验研究，其成果主要有《黄土及黄水之认识》、《黄河治本探讨》、《黄土区域之潜水问题》、《流水挟运泥沙之通式》等，并于当年11月开始招收研究生，至新中国成立时共招收研究生20名。

1949年后，由于学校面临院系调整、教学改革等重大问题，无暇顾及研究部的工作，其活动自行中止。但原有人员对农田水利科学的研究工作仍在继续进行，并取得了大量研究成果。1979年以后，在熊运章、朱凤书教授的积极努力下，重新进行研究室的恢复工作，1981年开始建设灌溉试验站。1982年经学校批准成立了农业水资源与灌溉研究室。同年，以该研究室为基础，申报并获准成立了中国第一个农田灌溉专业（即现在的农业水土工程专业）硕士点，1986年该专业点经国务院学位委员会批准获博士授予权。1992年，在原研究室的基础上经农业部（1992）农（教）函字第50号文件批准正式成立该研究所。1993年，以该研究所为基础的农业水土工程学科被批准为农业部部级重点学科。1996年经评审批准成立了农业部农业水土工程重点开放实验室。

西北农业大学农业水土工程研究所和农业水土工程学科在几代人的开拓、创建和努力下，克服种种困难和挫折，不断发展壮大。目前，农业水土工程研究所下设农田灌溉、农业水资源、水土保持、农田水利工程等4个研究室和1个灌溉试验站。研究所实行院所合一的管理体制，现有专职科研编制16人，兼职研究人员30余人。其规模和承担科研项目的能力不断增强。

今天，正逢祖国经济高速腾飞之时，综合国力不断增强，开发中西部地区和大西北的呼声愈来愈高，国家主席江泽民同志曾在1997年亲自批示“再造一个山川秀美的西北地区”，国家又于1997年开始建设杨凌农业高新技术产业示范区，这些均为我们提供了良好的机遇。

在研究所的发展历史上，几代人一直致力于中国西北地区农业可持续发展中的水土问题研究。早在30年代，中国近代水利先驱、原西北农林专科学校第一任水利组主任李仪祉先生就曾倡导要在当时的西北农林专科学校设立灌溉试验场，以便进行水、土、作物关系实验。特别是90年代以来，我们在深入分析西北地区水土资源特点和农业可持续发展制约因素的基础上，力求立足西北、面向全国，探索采用先进节水技术，提高农业水资源利用率、维持稳定的土地生产力、保持有限的水土资源和环境，促进农业可持续发展的方法与途径，特别是在农业节水、农业水资源持续高效利用、水土保持等领域内就一些对中国农业可持续发展有重大影响的关键科技问题进行了攻关，取得了一批富有创新性的成

果。

为了告慰奠定我们事业基础的老专家、老教授，感谢各级领导和国内外广大同行对我们工作的关心、帮助与支持，加强和国内外的学术交流，研究所决定对近 10 余年的有关成果在系统总结的基础上，出版《西北地区农业节水与水资源持续利用》一书，这是研究所近 10 余年，经共同努力完成成果的结晶。

农业节水不是一个简单的灌溉节水问题，而是一个包括提高灌溉水和天然降水利用率，提高单方水的产粮数和满足“生态用水”需求，促进农业持续发展的综合技术体系。进行农业节水研究是旱区农业持续发展的需要，是满足 2030 年中国人口高峰期 16 亿人口粮食需求的需要。因此，农业节水已作为缓解中国北方地区水资源供需矛盾和促进农业持续发展的一条根本措施得到了各方面的高度重视。

西北地区的水资源供需矛盾尤为突出，水资源短缺已严重影响到了该地区工农业生产的发展，并导致了严重的生态环境问题。如陕西关中平原有效灌溉面积 97.73 万 hm^2 ，保灌面积仅 58.29 万 hm^2 ；青海全省的保灌面积仅占 68%；新疆春灌期实际缺水量 20 亿 m^3 ，受此影响的灌溉面积达 66.7 万 hm^2 以上；河西石羊河流域的民勤绿洲，在超采地下水的情况下，保灌率仍只有 63.36%，河西石羊河流域、黑河流域、新疆塔里木河流域因水资源紧缺，地下水严重超采，导致了地下水位的急剧下降。地下水漏斗的发展，直接导致了沙生植物的枯蔸死亡，防风固沙林带急剧衰败，沙丘活化，沙漠不断向绿洲推进，使昔日内陆河流域下游数千年来“碧波荡漾，野鸭成群、游鱼无数”的流域终端湖泊，逐渐演变成了一片片浩大的盐碱化荒漠，部分地区因缺水，昔日的“粮仓”今日已成为干旱化、沙漠化、盐碱化、贫困化交加的地区。有的地区饮水困难，人心不安。因此，西北地区的缺水更为突出。

另一方面，为了缓解人口增长对粮食需求增加的矛盾，开垦新的耕地和开发新的灌区（西北将是开发的重点，如宁蒙“第二河套”的开发、南疆的开发、陕西“两北三区”的开发），未来矿产资源和城市工业及乡镇企业的发展，将会使水量供需矛盾更加突出。而农业用水的有效利用率目前仅在 40% 左右，节水还有很大潜力。大力发展节水农业是西北地区农业能否可持续发展？粮食问题能否可解决？农村生活能否安定以及生态环境能否向良性转化的关键问题。

西北农业大学农业水土工程研究所对农业节水与水资源持续利用问题的系统研究是从 70 年代中期开始的，近 20a 来，对农业节水的应用基础、关键技术、示范推广以及农业水资源的持续利用进行了系统、深入地研究工作。其研究过程大致可以划分为 3 个阶段：

(1) 70 年代中后期，在水利部科技司、陕西省科委、陕西省水利厅等有关部门的支持下，开展了以自压喷灌技术、高含沙浑水利用、黄土高原辐射井和地下水调灌利用为主的研究，其中自压喷灌技术成果获陕西省科技进步二等奖和陕西省科学大会奖，以及陕西省农业科技推广一等奖；高含沙量引水淤灌获全国科学大会奖、陕西省农业科技推广一等奖和国家科委、国家农委技术成果推广奖；渠道高含沙浑水运输问题的研究成果获陕西省科技进步三等奖；黄土地区辐射井研究成果获全国科学大会奖。

(2) 80 年代，在国家自然科学基金、高等学校博士点基金、水利部水利技术开发基金、农业部重点科研计划、水利部农水司、陕西省水利厅、内蒙古自治区水利厅、甘肃省

水利厅的资助下，主要围绕作物需水量与节水灌溉制度、灌区量水技术、地面灌水技术的改进、低压管道输水灌溉技术、灌区动态配水技术、作物水分生产函数与非充分灌溉、灌区用水管理信息系统、土壤墒情监测技术、旱区农业水资源持续高效利用决策、利用地下水的轻型井技术等方面进行了较系统的研究。其中陕西省作物需水量及其分区灌溉模式的成果获陕西省水利科技进步二等奖；洛惠渠灌溉用水的计算机管理研究成果获陕西省科技进步三等奖；土壤—植物—大气连续系统水分运行力能关系的理论分析成果获陕西省科技进步二等奖；U形渠道平底抛物线型无喉段量水槽及闸前短管量水技术被国家科委、水利部、农业部联合召开的全国节水技术评估会上评定为可大面积推广项目；轻型井技术成果获国家发明奖。

(3) 进入 90 年代以来，我们先后承担了国家杰出青年基金项目“黄土区土壤—植物—大气系统中水分溶质迁移与转化规律及其最优调控原理的研究”，中国科学院“百人计划”资助项目“黄土区土—植—气连续体水分运转与调控及其对土壤生产力和作物产量影响的研究”，国家“九五”重点科技攻关项目“作物调亏灌溉技术的研究与示范”，国家自然科学基金面上项目“SPAC 水分运移理论及其应用的研究”、“以节水高产为目标的田间土壤水分最优调控机理的研究”、“黄土区农田水分微循环理论及其应用的研究”、“干旱缺水条件下作物调亏灌溉机理与指标的研究”、“作物缺水诊断指标及有限水量在作物生育期内的最优分配”、“水平畦灌理论与技术要素的试验研究”、“灌溉实践中土壤空气阻力减渗效应及机理的研究”，霍英东教育基金会高校青年教师基金与水利部水利水电科学基金项目“农田水量转化规律及其节水调控原理”、“农业节水中作物适度缺水效应及缺水诊断指标研究”，中华农业科教基金项目“雨水聚集与节水灌溉技术”，中华农业科教人才基金和水利部技术开发基金项目“控制性分根交替灌溉新技术的研究与开发”，高校博士点基金项目“西北半干旱区非充分灌溉原理研究”、“黄土塬区三水转化机理及水资源最佳调控技术研究”、“渠道水量流量调控技术的研究”，新疆自治区“九五”重点科技攻关项目“主要农作物节水、优产、高效灌溉技术的研究与示范”，水利部农水司项目“灌溉用水管理数据库系统通用化软件开发和土壤湿度监测系统研制”，国家“九五”科技攻关项目子专题“关中平原水资源承载力的研究”，陕西省水利厅项目“双壁波纹塑料井管试验研究”、“泾惠渠、交口抽渭灌区用水管理微机应用”、“旱情评估指标体系及旱情信息系统”，甘肃省科委、水利厅项目“干旱缺水的民勤沙漠绿洲区主要农作物节水高产灌溉制度研究”、“甘肃河西地区块灌理论与技术的研究”、“太阳能咸水淡化技术研究”等 30 余项。其中“农田水分微循环规律及其节水调控原理的研究”成果获水利部科技进步（理论成果）一等奖，“SPAC 水分运移理论及其应用的研究”成果获陕西省教委科技进步一等奖和陕西省科技进步二等奖，“甘肃省河西地区块灌理论与技术研究”成果获甘肃省水利厅科技进步一等奖和甘肃省科技进步三等奖，“干旱缺水的民勤沙漠绿洲区主要农作物节水高产灌溉制度研究”获甘肃省武威地区科技进步一等奖和甘肃省星火科技二等奖。除此之外，在其它一些领域也取得了重要进展。结合这些研究工作，先后在《水利学报》、《土壤学报》、《生态学报》、《地理学报》、《农业工程学报》、《水利水电技术》、《灌溉排水》、《水科学进展》、《Agricultural Water Management》等科技期刊上发表有关农业节水与水资源利用方面的学术论文 200 余篇，先后出版了《土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其

应用》、《农业水管理学》、《陕西省作物需水量及其分区灌溉模式》、《旱区水—土—作物关系及其最优调控原理》等 10 余部学术著作。在农业节水中发挥了重要的作用。

多年来，我们一直把旱区农业节水应用基础与关键技术的试验研究、技术示范与推广以及技术培训作为一个整体，除了把校内灌溉试验站作为试验研究和技术示范的基地外，还先后在渭北旱原、甘肃河西、宁蒙河套、新疆、山西等省（自治区）建立了一些试验示范区。研究的节水灌溉制度已在陕西全省、甘肃河西等地推广；U形渠道平底抛物线型无喉段量水槽和闸前短管量水技术已在陕西东雷抽黄、交口抽渭、泾惠渠、宝鸡峡灌区，甘肃河西黄羊灌区、金塔河灌区、南营灌区、兰州永登引大入秦工程，新疆、湖南等地大范围推广采用；自压喷灌技术、动态配水技术、调亏灌溉和控制性分根交替灌溉新技术等亦有较大面积的推广与应用。而且先后受水利部、农业部及陕西、内蒙古、山西、甘肃等省（区）的委托，举办了全国性和地区性的农业节水技术方面的高研班、研讨班、学习班、培训班 30 多期，普及和推广农业节水技术。

我们力求通过该书的出版，不断改进我们在农业节水与水资源利用方面的研究与开发工作，为中国西北地区农业节水与水资源持续利用做出应有的贡献。

本书由西北农业大学农业水土工程研究所组织撰写，由康绍忠总策划并任主编，其内容基本概括了近 10 余年的研究成果，参加撰写的主要有：康绍忠（第一章，第二章，第三章第一、三节，第四章第三节，第八章第二节），朱凤书（第五章第二、四节，第六章第三节、第七章第二节），林性粹（第五章第一节、三节，第六章第一节，第八章第一节），蔡焕杰（第三章第二节、第四章第三节、第九章第三节），汪志农（第七章第一、三、五节），贺缠许（第九章第四、五节），马孝义（第四章第一、二节），迟耀瑜（第八章第三节），于志秋（第六章第二节），胡炜（第二章第二、三、四节，第三章第三节），冯国章（第九章第一节），王纪科、魏晓妹、刘俊民（第九章第二节），包忠谟、宋孝玉（第八章第二节），梁宗锁（第二章第一、三节），李明思（第七章第四节），王智（第五章第二节，第七章第二节），苏德荣（第五章第四节），胡笑涛（第三章第一节），史文娟（第二章第四节），王鸣周（第九章第四、五节），高军省（第九章第五节）等。全书由康绍忠制定编写大纲并统稿。西北农业大学农业水土工程研究所名誉所长熊运章教授不仅对编写大纲提出了宝贵的意见，而且审核了全部书稿。马孝义、宋孝玉、胡笑涛、史文娟、郝新梅等协助主编进行了部分统稿和审核校对工作。

在本书的撰写过程中，得到了中国科学院、水利部水土保持研究所山仑院士和蒋定生研究员的大力支持和指导，他们对编写大纲提出了宝贵的意见，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中还存在许多不足之外，恳请同行专家批评指正。

西北农业大学农业水土工程研究所所长
农业部农业水土工程重点开放实验室主任 康绍忠

1997 年 11 月 26 日于杨凌农科城

目 录

前言

第一章 总论	1
第一节 西北地区水资源供需状况及对发展节水农业的要求	1
一、节水农业在中国国民经济可持续发展中的地位	1
二、西北地区水资源供需状况与发展节水农业的紧迫性	1
三、西北地区节水农业的几种用水类型及其农业节水的途径	4
第二节 西北地区节水农业研究的现状与前景	6
一、西北地区农业节水研究的现状与存在的问题	6
二、西北地区节水农业技术研究的前景	15
第三节 西北地区节水农业发展的宏观决策研究	20
一、西北地区节水农业标准分析	20
二、节水农业分区及不同类型区节水农业发展模式研究	24
第四节 西北地区节水农业发展与水资源持续利用方略	32
一、西北地区发展节水农业的对策	32
二、西北地区农业水资源持续利用方略	35
参考文献	42
第二章 农业节水机理	43
第一节 农业节水的生物学基础研究	43
一、水分亏缺对作物生长和产量的影响机制	43
二、作物不同生育阶段对水分亏缺的允许程度	50
三、作物水分利用效率的潜力及其提高途径	51
四、节水农业中作物水分管理基本理论问题	55
第二节 作物根系吸水过程与 SPAC 中水分转化效率	62
一、作物根系生长与根系密度分布	62
二、作物根系吸水模式的研究	68
三、SPAC 中的水分转化效率与提高途径	74
第三节 控制性分根交替灌溉对作物水分利用的影响及其节水效应	76
一、控制性分根交替灌溉新技术的概念及其理论依据	76
二、控制性分根交替灌溉对作物水分利用影响的试验研究	78
三、控制性分根交替灌溉方法的田间运行及其节水效应	85
第四节 作物调亏灌溉机理研究	88
一、作物调亏灌溉研究状况与展望	88

二、模拟调亏灌溉对玉米根系生长及水分利用效率的影响	93
三、不同亏水处理对玉米水分利用效率的影响及最佳调亏灌溉方案分析	97
参考文献	104
第三章 作物需水量与节水型灌溉制度	108
第一节 作物需水量的计算与预报方法	108
一、作物需水量的计算方法	108
二、缺水条件下作物蒸发蒸腾量的计算	113
三、作物蒸腾量的计算方法	116
四、作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法	122
五、作物需水量的预报	125
第二节 作物水分生产函数及有限水量最优分配方法的研究	131
一、作物水分生产函数	131
二、缺水条件下有限灌溉水量在作物生育期内的最优分配方法	135
第三节 西北地区主要农作物节水型灌溉制度的研究	137
一、主要作物净灌溉需水量的分析计算方法研究	137
二、不同类型区主要作物节水高产型灌溉制度的确定	143
三、灌溉水源不足时的非充分灌溉制度	152
参考文献	158
第四章 土壤与作物水分监测及预报技术	160
第一节 土壤水分动态监测技术的改进研究	160
一、土壤水分电磁测量的理论与潜力分析	160
二、介电式土壤水分测定方法的研究	168
三、时域反射仪土壤水分测定方法的研究与改进	171
四、 γ 射线法测定土壤水分动态的研究	174
五、区域土壤水分的监测	177
第二节 土壤墒情预报技术的研究	179
一、经验公式法	179
二、水量平衡法	180
三、土壤水动力学方法	180
四、土壤含水率预报的随机方法	182
五、区域土壤水分的预报技术	182
第三节 作物水分诊断方法与预报	183
一、作物水分亏缺定量诊断方法	183
二、用作物冠层温度诊断作物水分状况	183
参考文献	191
第五章 农田节水灌溉技术	193
第一节 农田灌水质量指标分析与评估的研究	193
一、对农田灌水方法与灌水技术的基本要求	193

二、评估农田灌水方法与灌水技术的主要经济指标	193
三、评估农田灌水方法与灌水技术的质量指标	195
第二节 常规畦灌法的改进	199
一、畦灌条件下土壤入渗特性应用参数的计算	200
二、推算畦灌灌水技术要素的水量平衡法	203
三、灌区田间灌水技术测验与分析	206
四、长畦分段灌溉法	210
第三节 块灌法与阶式水平畦灌法灌水技术的研究	218
一、块灌与水平畦灌的概念及研究概况	218
二、块灌法灌水技术研究	219
三、水平畦灌法与阶式水平畦灌法	221
四、土壤气阻机理及其对土壤入渗影响的研究	225
五、侧堰式田间配水技术的研究	231
第四节 自压喷灌与微灌技术的研究	238
一、陕西省长安县王庄自压喷灌工程	238
二、自压喷灌系统中管道水力学实验	240
三、自压喷灌规划设计中的若干问题	244
四、固定式自压喷灌系统水力自动化	247
五、微灌系统中变孔径多孔管道的压力分区设计法	250
参考文献	256
第六章 输水系统节水技术	258
第一节 低压管道输水灌溉技术研究	258
一、管灌技术特点及发展概况	258
二、管灌系统管材的试验研究	260
三、渠灌区低压管道输水灌溉系统设计方法研究	269
四、低压管灌系统量水装置的试验研究	276
第二节 渠道防渗技术的研究与应用	287
一、渠道防渗的材料与技术	287
二、渠道防渗衬砌的优化设计	291
三、防治衬砌渠道冻胀破坏的技术	295
第三节 渠道量水新技术的研究	298
一、灌溉渠道量水方法与量水建筑物的选择	298
二、U形渠道平底抛物线形无喉段量水槽的研究与应用	303
三、闸前短管式量水分水闸	311
四、大比降渠道量水的应用	314
五、多功能量水仪表的研究与应用	317
参考文献	321
第七章 灌区水量流量调配技术	323

第一节 灌区计划用水管理系统的研究	323
一、灌区计划用水管理系统的基本功能	323
二、灌区计划用水管理系统的结构	323
三、灌区计划用水管理系统 (GQIHYS) 使用说明	334
第二节 斗渠系配水技术的研究	335
一、斗渠系配水的 0—1 规划模型	335
二、模型求解方法	336
三、出水口优化组合及闸门调节计划	337
第三节 灌区动态配水模型及其应用的研究	340
一、某次灌水全灌区净灌溉增产最大目标模型	340
二、某次灌水整个灌溉管理部门的水费收入最高目标模型	344
三、两种模型的比较与结论	346
第四节 灌溉渠系流量与水量实时调控技术	347
一、渠系运行与系统控制特征	347
二、系统控制建模与模块编制	349
三、模型应用	354
第五节 灌区节水灌溉决策支持系统的研究	355
一、决策支持系统 (Decision Support System, 简称 DSS) 概述	355
二、节水灌溉决策支持系统	356
参考文献	361
第八章 黄土高原雨水浑水资源高效利用技术	362
第一节 雨水集蓄技术及其利用模式的研究	362
一、雨水利用发展与研究概况	362
二、降雨模式的研究	363
三、集水技术	368
四、蓄水技术	371
五、雨水径流集蓄利用系统的优化调蓄模式	374
第二节 黄土区坡地降水入渗产流规律及土壤水调蓄技术研究	378
一、黄土区小流域降雨入渗分布规律的研究	379
二、黄土区天然降雨条件下坡地水量转化的动力学模式及其应用	384
三、利用成腔爆破技术调蓄土壤水分的研究	389
第三节 西北地区高含沙浑水综合利用技术研究	396
一、高含沙浑水利用概况与高含沙洪水水文特征	396
二、高含沙浑水的物理力学性质研究	397
三、明渠高含沙层紊流态及阻力规律研究	404
四、高含沙水流的冲淤挟沙规律与明渠输送	410
参考文献	415
第九章 西北地区地面水地下水资源持续高效利用技术	417

第一节 水文干旱与枯水径流预测及水资源评价理论与方法的研究	417
一、水文干旱预测方法研究	417
二、河流枯水径流预报方法研究	427
三、水资源评价理论与方法研究	435
第二节 西北地区地下水资源持续高效利用技术的研究	440
一、灌区地下水水位动态机理及其调控模型	440
二、新型井管的研制与应用	448
三、新型井管成井技术研究	454
四、辐射井技术	458
五、黄土台塬灌区地下水持续利用的理论与技术	462
第三节 用太阳能淡化苦咸水的研究	465
一、试验研究方法	465
二、不同棚型蒸凝水量的分析比较	467
三、影响蒸凝水量的主要因素	469
四、提高蒸凝水量和水质的措施	470
第四节 西北旱区灌溉水库优化调度模型与应用（以武威南营水库为例）	471
一、水库及灌区概况	471
二、数学模型建立与模型参数确定	471
三、模型优化成果与应用	475
第五节 区域水资源持续利用优化决策研究（以民勤湖区为例）	477
一、湖区存在的主要问题及其解决途径	477
二、湖区水资源分配及农林牧生产结构数学模型的建立	480
三、模型的求解	483
四、最优策略的确定	485
参考文献	496

第一章 总 论

第一节 西北地区水资源供需状况及对发展节水农业的要求

一、节水农业在中国国民经济可持续发展中的地位

水资源紧缺已是一个全球性的问题。中国水资源总量 2.8 万亿 m^3 ，居世界第六位。但按现有人口计算，人均年占有水资源量 2 200 m^3 ，不足世界人均水平的 1/4，居世界 109 位，属 13 个贫水国之一。耕地每公顷平均水量为 28 050 m^3 ，也仅为世界平均水平的 4/5。而且，中国水资源的地区分布很不均衡，81% 的水资源集中分布在长江流域及以南地区；长江以北地区人口占全国的 45.3%，耕地占全国的 64.1%，而水资源量却仅占全国的 19%，人均占有量为 517 m^3 ，相当于全国人均量的 1/5 和世界人均量的 1/20。因此，中国北方地区的水资源问题更为突出。联合国粮农组织近年也特别指出中国北方、印度南方和墨西哥部分地区缺水的严重性。

由于缺水，全国有 7 000 万人和 6 000 万头牲畜饮水困难。600 多个城市中有 300 多个城市处于缺水状态，其中严重缺水城市 110 多个。缺水还导致过量引用地表水和超采地下水，致使旱季常发生河流干涸断流、地下水位大幅度下降，产生严重的生态环境问题。80 年代以来，全球气候变暖趋势明显，中国北方干旱加剧。在中国自然灾害中，旱灾对农业产量影响最大，进入 90 年代以来，每年受旱面积 0.27 亿 hm^2 左右，比 50 年代增加 1.5 倍以上，成灾面积增加 3 倍。1994 年，全国受旱面积 0.3 亿 hm^2 ，成灾面积 0.173 亿 hm^2 ，减产粮食 260 亿 kg 。今后，随着工农业生产和城市的发展，水的供需矛盾将进一步加剧。除了开源以外，而节约用水则应是解决当前水资源紧缺的首要途径。

农业是用水大户，主要消耗于灌溉。中国目前灌溉面积已达 0.5 亿 hm^2 ，居世界首位，占全国耕地面积的 1/2 左右。中国农业灌溉年用水量约 4 000 亿 m^3 ，占总用水量的 80%。但农业用水的有效利用率很低，渠灌区只有 30%~40%，井灌区也只有 60% 左右。而一些发达国家可达到 80% 以上。另一方面，中国灌溉水利用效率也很低，每立方米水生产粮食不足 1 kg ，而以色列已达到 2.32 kg ，一些发达国家大体都在 2 kg 以上。这说明我们还远未做到节约用水和科学用水。因此，发展节水农业势在必行，它是缓解中国水资源紧缺状况，促进水资源持续利用和农业持续发展的一项根本性措施。

二、西北地区水资源供需状况与发展节水农业的紧迫性

(一) 干旱少雨、水资源不足，水土流失严重、生态环境脆弱是西北地区的主要自然特征，但农业生产的发展还有巨大潜力

西北干旱半干旱地区包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆和内蒙古西南部等区域，总土地面积 400 多万 km^2 ，占全国总面积的 42% 左右，人口占全国总人口的 8%。现已利用

的耕地 1 333.3 万 hm^2 ，可能开发利用的耕地还有 2 666.7 万~3 333.3 万 hm^2 ，人均占有耕地居中国之首。煤、石油、天然气、矿产资源都十分丰富。西北地区农业发展具有悠久的历史，大约在 6 000 年前，中华民族就开始在黄河流域的渭河河谷等肥沃的土地上定居。西周和春秋战国时代，黄河流域已经成了全国农业的中心。公元前 121 年，霍去病率 10 多万士兵在河西走廊建署兴陞，发展农业，当时所有河流中、上游地区都发展了灌溉农业，黑河中下游灌溉农业闻名当时，曾有金张掖、银武威之称。新中国成立以来，通过兴建蓄水、引水、提水灌溉工程，治理水土流失和改良盐碱地，农业生产得到了很大的发展。关中平原、河西走廊、新疆内陆河地区、青海湟水流域与柴达木盆地，以及黄河流域沿岸发展的许多高扬程提水灌区成为了中国的重要粮、棉产区。但是，由于本身的自然条件和长期的人为活动的不良影响，使植被破坏，生产力下降，生态系统退化，自然灾害频发。目前，这一地区是全国生态最为脆弱的地区，也是全国贫困人口较集中的地区之一。

降水稀少、气候干旱、水资源不足、水土流失严重、生态环境脆弱是该地区的主要自然特征。该地区大部分区域的年降水量在 400mm 以下，其中有 200 万 km^2 面积的年降水不足 200mm，南疆东部、河西西部和柴达木中西部不足 50mm，荒漠戈壁在 20mm 以下。蒸发量超过 1 000mm。西北黄土高原区强烈的土壤侵蚀不仅使区内生态环境恶化，更由于大量泥沙注入黄河，从而使其成为世界上一条多泥沙河流。据统计，黄河的年平均输沙量为 16.0 亿 t，约有 1/4 淤积于下游河床。陕北、陇东、定西等地是黄河中游水土流失最严重的地区，河流洪水含沙量高达 $900\text{kg}/\text{m}^3$ ，土壤侵蚀模数达 6 000~10 000 t/km^2 。个别强烈侵蚀地带达 20 000 t/km^2 以上。在南疆、河西走廊及宁夏等地的干旱春季，大风常形成沙暴，飞沙走石、漫天蔽日、沙丘移动，淹没农田，吞噬绿洲。这对发展农牧业生产和维护生态环境造成了严重的不利影响。

水资源短缺是西北地区工农业生产发展和恢复生态平衡最重要的制约因素。西北五省（自治区）面积占全国的 1/3，水资源量为 2 230 亿 m^3 ，仅占全国的 1/12。如西北黄土高原（包括河套）其土地面积占全国土地面积的 6.9%，耕地面积占全国总量的 12.2%，而水量仅占 1.8%，每公顷耕地水量 3 720 m^3 ，人均水量 654 m^3 ，单位耕地面积与人均水量分别仅占全国平均水平的 14% 和 24.1%；西北内陆区土地面积占全国土地面积的 25.8%，耕地占全国总量的 3.9%，水资源量占全国的 4.0%。一些局部地区的缺水更为严重。如河西石羊河流域水资源总量 17.28 亿 m^3 ，而该地区总的水资源耗用量 20.142 亿 m^3 ，占可用水资源量的 116.6%，地下水严重超采。但是，西北地区光照丰富、日温差大，适于粮棉和一些特作的生产，农业生产的发展还有着巨大的潜力。

（二）水资源短缺已严重影响到了西北干旱半干旱地区的工农业生产发展，并导致了严重的生态环境问题

因水资源不足等原因，保灌率很低。如关中平原有效灌溉面积 97.73 万 hm^2 ，保灌面积仅 58.29 万 hm^2 ；陕北有效灌溉面积 9.37 万 hm^2 ，保灌面积仅 6.18 万 hm^2 ；西北内陆河流域的准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地和河西走廊的有效灌溉面积分别为 82.68, 133.34, 4.15, 58.55 万 hm^2 ，而保灌面积分别仅为 48.99, 111.92, 3.41 和 41.89 万 hm^2 。青海全省的保灌面积仅占 68%；新疆春灌期实际缺水量 20 亿 m^3 ，受此影响的灌溉面积达 66.67 万 hm^2 以上，占全区灌溉面积的 1/5。河西石羊河流域的民勤绿

洲,在超采地下水的情况下,保灌率仍只有63.36%。大量农田和草场因缺水而弃耕和退化。如河西石羊河流域,因上游用水量增加,进入下游民勤盆地的水量逐年减少,在50年代平均为5亿 m^3 ,60年代为4.8亿 m^3 ,70年代为3.2亿 m^3 ,80年代为2.2亿 m^3 ,90年代以来还不足1.5亿 m^3 ,即使每年超采地下水2.0亿~2.5亿 m^3 ,7.53万 hm^2 耕地仍因缺水仅种植4.72万 hm^2 ,其中还有1.89万 hm^2 无法得到地面水,只能依靠地下水泡地安种,除盆地北部地下水水质超过灌溉标准的苦水地区必须用河水浇灌一次苗水以实现苦淡轮灌外,其余地区只能靠提取地下水进行作物生育期灌溉。民勤北部的湖区2.93万 hm^2 耕地只能耕种9333.3 hm^2 ,以供群众维持生活,其余的只能撂荒,任其沙化。青海柴达木盆地的格尔木和马海两灌区也因缺水有1333.33 hm^2 的农田弃耕。

因水资源紧缺,地下水严重超采,导致了地下水位的急剧下降。河西石羊河流域的地下水引用率达到132.6%,严重超采,导致机泵工作环境恶化,提水能耗、打井投资增加。特别是民勤盆地,已形成了总面积达22 km^2 的3个大漏斗区,年水位降幅达0.6~1.5m,迫使提水机泵几次更新换代。地下水漏斗的发展,直接导致了沙生植物的枯萎死亡、防风固沙体系急剧衰败,沙丘活化,沙漠化威胁日益严重。新疆塔里木河流域地下水水位下降,引起胡杨林干枯死亡,恰拉至阿尔汗胡杨林面积由1958年的5.53万 hm^2 减少到0.52万 hm^2 。闻名中外的古城西安,日最大缺水30万~50万 m^3 ,长期超采地下水,导致地面沉降和裂缝。

缺水导致了严重的生态环境问题。如石羊河流域民勤绿洲的青土湖地区,是数千年来“碧波荡漾、野鸭成群、游鱼无数”的流域终端湖泊,因无法得到水量补给而于60年代干涸,并逐渐演变成了一片浩大的盐碱化荒漠,湖泊景观消失殆尽,使绿洲北部的天然防沙屏障变成了沙漠大举入侵绿洲的通途,目前该处沙漠以每年10m的速度向绿洲推进,而且沙粒和盐分在强烈风力作用下,不断地被吹蚀、搬移到绿洲的农区,造成危害。黑河流域由于上游用水增加,下游水量逐渐减少,致使下游额济纳绿洲生态系统不断遭到破坏,酿成内蒙古阿盟和宁夏春夏之际沙暴灾害不断加剧,90年代以来愈演愈烈。额济纳地区可用的草场面积为39.47万 hm^2 ,近几十年沙漠化土地已占61.01%。新疆50年代大于5 km^2 的湖泊有52个,总面积9700 km^2 ,现已减少了一半。青海湖的水位也在不断下降,近30年平均每年下降0.12m。

因为内陆河流域下游地带的富含盐性、降水稀少的弱淋性、地下水的反复提取、反复消耗浓缩,加上大规模超采,地下水水质也急剧变化。如石羊河下游地下水的矿化度年增加0.1~0.2g/L。由于地下水矿化度升高,下游土壤和地下水均处于积盐状态,蒸发强烈,土壤盐碱化面积由60年代初的1.25万 hm^2 上升到目前的2万多 hm^2 ,因缺水冲洗改良也无可能。

由于地表水和地下水资源缺乏,加之部分地区水质变坏,农村人畜饮水也有一定的困难。在旱地农业区,也由于土壤水库的调蓄能力相当有限,经常因干旱使农作物产量低而不稳。

(三) 缓解人口增长对粮食需求增加的矛盾、开垦新的耕地和开发新的灌区以及矿产资源开发和城市工业与乡镇企业的发展,将需要更多的水资源

中国一直面临着人口多的巨大压力,迄今有增无减。目前全国人口已超过12亿。预

计 2030 年达到 16 亿。但耕地面积因建设占用而急剧减少，无疑粮食生产的形势将更加严峻。为了缓解耕地面积不断减少，而又要求粮食产量有较大幅度增长的矛盾，在提高水肥生产效率和粮食单产的同时，新开垦一些宜开垦的荒地、开发一批新的灌区也是一条重要的途径，西北将是开发的重点。如宁蒙“第二河套”、新疆南疆、陕西“两北三区”等地的开发，也是中国未来解决粮食问题的重要措施之一。荒地的开垦和新灌区的开发，将会使农业用水量更为增加，水量供需的矛盾会更加突出。

西北地区煤炭、石油、天然气和矿产的开发，城市及工业和乡镇企业的发展，工业及城市用水量也会增加，工农业争水的矛盾将会加剧。这将给水资源利用造成更大的压力。

(四) 西北地区农业用水效率还较低，农业节水还有很大潜力

西北地区水资源不足的矛盾，已对当地农业的持续发展构成了严重的威胁。但是，现有水资源的利用率还较低。因缺乏资金投入，无力挖潜改造，宝贵的水资源在输、配、灌过程中浪费、损失，不能高效利用。一些老灌区，长期以来习惯于大水漫灌、大块灌，土地不平整，田间工程不配套，渠系未衬砌或衬砌不全，农业管理粗放，灌溉定额过高，有的高达 $15\ 000\sim 22\ 500\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，远远超出全国平均毛灌溉定额 $9\ 930\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的水平，浪费严重，同时还造成土壤肥力流失，土壤养分的利用率低下，引起地下水的污染和水质的变坏，局部地区引起地下水位上升，加速土壤次生盐碱化，为农业生产带来极不利的影 响。如内蒙古河套的毛灌溉定额 $11\ 364\text{m}^3/\text{hm}^2$ ；宁夏引黄灌区的毛灌溉定额 $10\ 980\text{m}^3/\text{hm}^2$ ；青海灌区的灌溉定额 $11\ 337\text{m}^3/\text{hm}^2$ ；新疆全区平均灌溉定额 $14\ 550\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，平均每次的灌水定额高达 $2\ 700\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，仍有 133.33 万 hm^2 农田采用落后的大水漫灌。南疆有些地区一次灌水定额高达 $3\ 750\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

水量的浪费，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。如新疆全区平均渠系水利用系数 0.41；内蒙古河套灌区渠系水利用系数 0.394，田间水利用系数 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。民勤湖区灌溉水利用系数只有 0.28。由于灌溉水的大量浪费，致使农业用水占各项总用水量的比值过大，如西北内陆区高达 95%，黄土高原区高达 87.3%，而一些发达国家仅占 50% 左右。在旱地农业区，对天然降水未能充分有效的集蓄和利用，不仅导致了降水利用效率较低，而且还导致了严重的水土流失，使农作物产量低而不稳，生态环境遭受破坏，大量泥沙注入河流，增加了水资源开发利用的难度。更加剧了水资源紧缺的矛盾。

因此，要使西北地区工农业生产持续稳定的发展，必须发展节水农业，提高天然降水和灌溉水的利用率，提高单方水的生产效率，节水扩灌，提高粮食产量；同时通过节水来满足“生态用水”的需求，通过节水和提高水的利用效率来减少灌溉本身所产生的负效应和旱作农业区的水土流失。发展节水农业是西北干旱半干旱地区水资源持续利用和促进农业持续发展的根本出路。

三、西北地区节水农业的几种用水类型及其农业节水的途径

节水农业是充分利用天然降水和可用的水资源，采取水利和农业措施，提高水的利用率和生产效率，并创造出有利于农业持续发展的生态环境的农业。西北地区的节水农业包