

北方典型灌区水资源调控与 高效利用技术模式研究

齐学斌 樊向阳 主编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

北方典型灌区水资源调控与 高效利用技术模式研究

齐学斌 樊向阳 主编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了北方主要灌溉类型区水资源调控与高效利用技术模式的有关研究成果。全书分7章,第1章概括介绍了国内外灌区水资源高效利用与调控技术研究进展;第2章以山西潇河灌区为例,介绍了典型井灌类型区水资源持续高效利用集成技术模式;第3章以河北石津灌区为例,介绍了典型渠井结合灌区水资源优化调度与田间水分高效利用技术模式;第4章介绍了引黄灌区水资源与水沙优化调度技术与模式;第5章介绍了典型多水源灌区水源联合优化调度技术;第6章介绍了典型地下水超采灌区水资源可持续利用的回灌补源技术及模式;第7章介绍了基于灌区水资源高效可持续利用的节水农业综合评价技术体系。

本书可供水利、农业、环保等领域的技术人员及相关专业学生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

北方典型灌区水资源调控与高效利用技术模式研究 / 齐学斌, 樊向阳主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5170-1634-2

I. ①北… II. ①齐… ②樊… III. ①灌区—水资源—调控措施—研究—中国②灌区—水资源—资源利用—研究—中国 IV. ①S274

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319683号

书 名	北方典型灌区水资源调控与高效利用技术模式研究
作 者	齐学斌 樊向阳 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.5印张 391千字
版 次	2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷
印 数	0001—1100册
定 价	55.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



水资源危机是困扰世界的三大危机之一。目前世界上约有 80 多个国家、40% 的人口面临缺水问题。1997 年 1 月，联合国发布的《世界水资源综合评估报告》指出，水问题将严重制约 21 世纪全球的经济和社会发展，并可能导致国家间的冲突。我国是世界上最为缺水的国家之一，人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4，亩均耕地占有的水资源量仅为世界平均值的一半左右。我国水资源不仅总量缺乏，而且时空分布也很不均匀。水资源的时空分布与社会经济系统、生态系统对水资源需求的不一致性，是人们对水资源进行调控的内在动因。

据有关部门统计，目前我国农田有效灌溉面积已达 9.05 亿亩，居世界首位，其中节水灌溉面积约 4.5 亿亩。特别是近十多年来，在农业灌溉用水量基本不增加的情况下，实现了有效灌溉面积的不断扩大和灌溉保证率的不断提高。以占耕地面积一半的有效灌溉面积上，生产了占全国 75% 的粮食和 90% 以上的棉花、蔬菜等经济作物，保障了约占世界 1/5 人口的吃饭问题，为世界粮食安全作出了突出贡献。

目前，我国灌溉面积在 30 万亩以上的大型灌区有 456 处，灌溉面积 2.80 亿亩，占全国耕地灌溉面积 9.22 亿亩的 30%；设计灌溉面积 1 万~30 万亩的灌区 7316 处，灌溉面积 2.23 亿亩（《第一次全国水利普查公报》水利部，2013 年）。大中型灌区已成为我国农业规模化生产基地和重要的商品粮棉油基地，成为农民增收致富的重要保障。尽管大型灌区为我国农业和国民经济的稳定发展提供了可靠的依托基础，但由于我国的大型灌区大多数是在新中国成立前、上世纪 50 年代末到 60 年代初以及 70 年代这三个时期修建的，现在看来，灌区原来的规划和现状差异较大，加之老化失修，灌溉用水浪费比较严重，已不能适应目前供水与用水的要求，目前灌区发展普遍存在的问题主要包括：①工农业及生活用水竞争加剧，灌区可利用水量减少；②灌溉基础设施配套差，灌溉保证率及实灌面积低于设计标准；③工程建设标准低，灌排设施老化、损坏严重；④用水管理水平落后，灌溉水利用系数较低；⑤农田生态环境问题突出，制约灌溉农业可持续发展。为此，水利部等有关部门

自1998年开始陆续投入大量资金,开展以节水为中心的大中型灌区续建配套与节水改造工作,有效解决了部分灌区灌溉运行中的病险、卡脖子问题,抑制了灌溉用水的跑冒滴漏,恢复和增加了有效灌溉面积,很大程度上保证了灌区水资源可持续利用和经济社会的可持续发展。然而,由于我国地域辽阔,自然条件差异巨大,如何针对不同地区、不同条件及不同灌区类型,制定因地制宜的灌区水资源可持续利用技术方案,建立适宜的灌区水资源调控模式与农业高效用水模式显得尤为迫切。本书结合作者近年来承担的国家相关科研课题,在对我国不同类型灌区存在的主要技术问题进行全面调研基础上,开展了灌区水资源高效可持续利用研究与探索,提出了针对不同灌溉类型区特点的农业水资源高效利用集成技术模式,并建立了多个水资源高效利用技术集成试验示范区,积累了宝贵的经验,取得了明显的经济、社会与环境效益。

本书是在国家“九五”科技攻关课题“商丘试验区农业用水高效持续综合技术研究(编号:96-004-01-08)”、国家重大科技产业化工程项目“井渠结合灌溉类型区农业高效用水模式与产业化示范”(编号:99-021-01-08-02)、水利部大型灌区节水改造项目“山东位山灌区节水改造专题”[编号:农水灌(2000)7号]、国家“十五”科技攻关课题“黄淮海平原节水型高效农业模式与技术研究”(编号:2001BA508B02)、国家“十五”863重大科技专项课题“华东北部半湿润偏旱井渠结合灌区节水农业综合技术体系集成与示范”(编号:2002AA2Z4241)、国家“十一五”科技支撑计划课题“北方井渠结合灌区节水改造技术集成模式与示范”(编号:2006BAD11B09-2)、公益性行业(农业)科研专项课题“沿黄典型井渠结合灌区作物高效用水技术集成与示范”(编号:201203077-06)等课题研究成果基础上编撰而成。研究内容涉及北方主要灌溉类型区水资源供需平衡分析、水资源优化配置与调控技术、农业水资源高效用水模式以及水资源可持续开发利用涵养技术等方面。

本书是由上述课题主要科技人员编写而成,由齐学斌、樊向阳审定统稿。第1章由齐学斌撰写;第2章由齐学斌、樊向阳、王景雷、高胜国撰写;第3章由樊向阳、李平、齐学斌、张亮撰写;第4章由齐学斌、何晓科、赵辉、王景雷、樊向阳撰写;第5章由樊向阳、高胜国、黄仲冬、李平、齐学斌撰写;第6章由樊向阳、巩文军撰写;第7章由黄仲冬、齐学斌撰写。此外,上述课题组其他人员郎旭东、陈南祥、徐建新、梁春生、郭宗信、贾新台、于思亭、樊贵盛、许晓华等在课题研究过程中做了大量工作,并给本书的编写提供了大量素材。胡艳玲、梁志杰等在本书的编辑和校对过程中也做了大量工作。

另外，本书参考了其他单位及同志的研究成果，均已在参考文献中列出。本书的出版得到有关专家和学者的热心支持和帮助，中国水利水电出版社给予了大力支持，在此一并致谢。

虽然本书编著者对我国北方不同类型灌区水资源优化配置与调控技术、农业高效用水集成技术模式以及水资源涵养保护等方面进行了长期、大量的试验研究与示范，积累了一定的经验，但由于我国灌区的多样性与复杂性，书中所提出的技术模式及结论显而易见有一定的适用条件和范围，加之水平有限，书中难免出现不当之处，尚祈读者指正，不吝赐教。

作者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 灌区水资源高效利用调控技术研究进展	2
1.2.1 水资源可持续利用技术	2
1.2.2 水资源优化配置与地表水地下水联合调控技术	3
1.2.3 高效输配水技术	5
1.2.4 田间节水灌溉技术	6
1.2.5 农艺节水技术	8
1.2.6 农业生态节水技术	10
1.2.7 非常规水资源开发与综合利用技术	10
1.2.8 节水管理技术	13
1.2.9 节水综合技术集成与产业化	14
第 2 章 北方井灌区水资源高效利用技术模式——以山西潇河灌区为例	15
2.1 研究区概况及存在问题	16
2.1.1 研究区概况	16
2.1.2 灌区水资源开发利用存在的主要问题	17
2.2 研究区水资源供需平衡分析	18
2.2.1 地表水资源可利用量	18
2.2.2 地下水资源可利用量	21
2.2.3 农业供用水情况	22
2.2.4 水资源供需平衡分析	23
2.3 引洪水与地下水联合调度技术	29
2.3.1 引洪水、地下水联合调度系统模型	29
2.3.2 地表水、地下水联合调度	35
2.4 地下水引洪补源技术研究	36
2.4.1 引洪补源试验研究	36
2.4.2 引洪补源调节计算	37
2.5 田间高效用水技术模式	41
2.5.1 农田水分高效利用技术	41

2.5.2 配套农艺措施	51
2.6 地下水限量开采自动控制系统	56
2.6.1 概述	56
2.6.2 系统总体设计	57
2.6.3 系统硬件设计	58
2.6.4 系统软件设计	59
2.6.5 系统结构与功能特点	63
第3章 北方井渠结合灌区水资源高效利用模式——以河北石津灌区为例	65
3.1 研究区概况及水资源开发利用现状	65
3.1.1 研究区概况	65
3.1.2 水资源供需分析	66
3.1.3 水资源开发利用存在的主要问题	69
3.2 地表水地下水联合调度技术	70
3.2.1 地表水地下水联合调度模型	70
3.2.2 灌区灌溉水资源优化配置系统软件	81
3.2.3 地表水地下水联合调度灌溉软件应用	86
3.3 田间输配水工程模式	102
3.3.1 田间工程布局模式	102
3.3.2 田间渠道断面形式	103
3.3.3 渠系防渗材料	103
3.3.4 田间畦田适宜规格	107
3.4 适宜储水灌溉定额阈值研究	108
3.4.1 典型土壤水分特征曲线测定	109
3.4.2 灌水前后土壤水分动态变化	111
3.4.3 冬小麦-夏玉米生育期内土壤水分动态变化	111
3.4.4 土壤水分垂向分布动态变化	112
3.4.5 适宜储水灌溉定额阈值确定	113
第4章 北方引黄灌区水资源高效利用及水沙优化调度模式	115
4.1 地下水回灌补源研究	115
4.1.1 研究区概况及存在问题	115
4.1.2 地下水引黄回灌补源试验研究	118
4.2 典型引黄灌区农业水资源管理决策支持系统	121
4.2.1 系统总体设计	121
4.2.2 系统模块设计	125
4.2.3 系统应用	129
4.3 水沙优化调度技术	130
4.3.1 灌区概况及存在问题	130

4.3.2 水沙优化调度技术	132
4.4 井渠结合工程布局形式	138
4.4.1 井渠合理布局形式	138
4.4.2 适宜的灌溉模式	139
第5章 北方多水源灌区水资源高效利用技术模式	141
5.1 研究区概况	141
5.2 水资源供需平衡分析	143
5.2.1 水资源系统分析	143
5.2.2 所在流域水资源供需平衡与水均衡分析	145
5.2.3 水资源供需平衡分析	150
5.3 区域多水源联合优化调度管理模型	156
5.3.1 水资源系统概化	156
5.3.2 模型结构	157
5.3.3 目标函数	157
5.3.4 决策变量	158
5.3.5 主要约束方程	158
5.3.6 基本参数确定	159
5.3.7 联合调度原则	162
5.3.8 模型求解与成果分析	163
5.4 多水源联网无线自动控制系统	165
5.4.1 多水源联网供水原则与形式	165
5.4.2 多水源联网供水优化分配模型	166
5.4.3 多水源联网无线自动控制系统	170
第6章 北方地下水超采区回灌补源技术模式——以河南广利灌区为例	177
6.1 灌区及研究区概况	178
6.1.1 灌区概况	178
6.1.2 研究区概况	182
6.1.3 水资源开发利用及存在问题	187
6.2 研究区水资源供需平衡分析	203
6.2.1 水资源数量评价	203
6.2.2 现状年水资源供需平衡分析	209
6.2.3 预测水平年水资源供需平衡分析	210
6.3 研究区地下水采补失衡治理措施研究	214
6.3.1 回补水源分析	214
6.3.2 补源区规划及需水量	217
6.3.3 沟渠河网现状及补源能力分析	219
6.3.4 补源方案及其效果初步分析	223

6.3.5 提高沟渠河网入渗能力的措施	225
第7章 灌区节水农业综合评价技术与案例	227
7.1 节水农业综合评价基本流程	227
7.2 节水农业综合评价指标体系	228
7.2.1 评价指标体系构建的基本原则	228
7.2.2 评价指标体系	229
7.2.3 评价方法	234
7.2.4 评价指标权重计算	236
7.2.5 评价指标隶属函数确定	236
7.3 节水农业综合评价技术应用实例	239
7.3.1 评价指标数据	239
7.3.2 指标权重计算	242
7.3.3 计算模糊合成值	246
7.3.4 结论	246
参考文献	247

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着社会经济的发展,我国水资源供需矛盾日益尖锐、农业用水浪费现象严重、水污染问题日趋突出,已成为严重制约国民经济可持续发展的主要瓶颈之一。我国的农业缺水问题在很大程度上要靠节水解决,发展现代农业节水技术是保障我国粮食安全、水安全、生态安全及整个国家安全的重大战略。

我国水资源总量 2.81 万亿 m^3 , 人均水资源量约 2200 m^3 , 约占世界平均值的 1/4, 耕地亩均水资源量 1400 m^3 , 约为世界平均水平的一半。预计本世纪 30 年代, 我国人口将达到 16 亿高峰, 在降水不减少的情况下, 届时人均水资源占有量将下降为 1760 m^3 , 逼近国际上公认的人均水资源占有量 1700 m^3 的严重缺水警戒线。此外, 我国水资源时空分布不均, 与国民经济发展的布局严重错位。南方水多地少, 北方水少地多。南方地区单位耕地面积占有水资源量约为全国平均水平的 1.7 倍, 北方地区单位耕地面积所占有的水资源量仅为全国平均水平的 17%, 南北方差异达 10 倍。地处长江淮河以北的广大地区总面积占全国土地面积的 65%, 人口占 40%, 集中了我国的重要能源、化工等基地和全国 51% 的耕地, 但水资源总量只占全国的 20%, 许多地区人均水资源已大大低于 1700 m^3 的缺水警戒线, 区域性缺水更为严重。由于南北方水资源供需状况不同, 使水资源供需矛盾呈现不同的特点, 南方主要属于工程型、水质型或管理型缺水, 而北方则多以资源型缺水为主。

我国在水资源紧缺的同时, 一些地区农业用水浪费却相当严重。具体表现在: 一是灌溉水的利用率低。灌区水量损失严重, 渠灌区渠系损失达 50%~60%, 井灌区水的损失也达 40%, 浪费极为严重。二是自然降水利用率低。我国主要依靠降水的旱农区约有 8000 万 hm^2 , 70% 分布在年降水 250~600mm 的北方地区, 由于管理粗放, 农田对自然降水的利用率仅有 50%~60%, 其中大部分水分消耗于田间的无效蒸发。三是农业用水的效率不高。目前, 我国农业灌溉水的利用效率仅有 1.0 kg/m^3 左右, 旱地农田水分利用效率为 0.60~0.75 kg/m^3 , 全国平均水的利用效率约为 0.8 kg/m^3 。上述指标远低于发达国家的水平。可见, 在缺水现象的背后蕴藏着巨大的节水潜力。

农业是我国用水最多的产业, 也是节水潜力最大的产业。目前, 我国灌溉用水总量 3600 亿~3800 亿 m^3 , 占全国总用水量的 65%。按照水利部、中国工程院等的预测, 在不增加灌溉用水的条件下, 2030 年全国缺水高达 1300 亿~2600 亿 m^3 , 其中农业缺水 500 亿~700 亿 m^3 。如果把农业灌溉水的利用率由目前的 0.5 左右提高到发达国家的 0.7, 则仅节水灌溉一项即可节水 900 亿~950 亿 m^3 。如果同时能够提高单方水的效率, 农业不仅可以解决 7 亿 t 左右食物生产的用水, 还可以转移 400 亿~500 亿 m^3 的水用于国民经



济的其它重要领域,这无疑对整个国家的社会安全 and 经济安全是一个重大的贡献。

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,我国自 20 世纪 50 年代就开始大力开发利用水资源,发展农田灌溉,并取得了举世瞩目的成就。尤其是 90 年代以来,节水农业技术发展进入了一个新的时期。“九五”期间,节水农业技术与示范被列为国家科技攻关项目,从节水灌溉新技术、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分别进行了深入与综合研究;“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 高技术研究发展计划,重点突破制约我国节水农业技术发展的“瓶颈”问题;“十一五”期间,科技部在 863 计划“现代农业技术”领域和国家科技支撑计划农业领域,将节水农业技术与示范列为重点项目。上述项目的开展和完成对于提高我国节水农业应用基础理论水平,开发节水农业新产品与新材料并实现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目标的有机融合,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。

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。提出了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 1300 万 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。

目前,我国正处于工业化、城镇化快速发展阶段,保障粮食等农产品供求平衡的任务十分艰巨。耕地减少、水资源短缺等资源约束日益突出,气候变化和自然灾害对农业生产的不利影响明显加剧,特别是农田水利建设滞后问题亟待解决。因此,有必要对我国现有农业水资源高效利用及节水技术模式进行系统总结,为我国农业的长期稳定发展提供技术支撑。

1.2 灌区水资源高效利用调控技术研究进展

维护国家粮食安全,必须始终把农田水利作为提高农业综合生产能力的决定性因素。发达国家在灌区水资源可持续开发利用与农业高 eff 用水方面做了大量工作,取得了宝贵的经验,值得借鉴和学习;我国的科研工作者近年来在灌区水资源优化配置、灌区地表水地下水联合调控技术、灌区输配水技术及模式、灌区田间节水灌溉技术、农艺节水技术及灌区非常规水资源的开发利用等方面也开展了大量的工作,取得了一定的研究成果。

1.2.1 水资源可持续利用技术

发达国家非常重视灌区水资源的可持续开发利用管理,尤其是在灌区十分注意多灌溉



水源的合理开发利用以及基于地下水采补平衡的生态环境保护,不惜一切代价修建地下水回灌补源工程,以保持地下水位的稳定,并严防地下水受到污染。美国为了解决水资源短缺引起的地下水过量开采问题,修建了十个大坝储存洪水;为了阻止海水入侵布设了一些回灌井以形成水力帷幕;在控制地下水开采量方面采取了划分地下水分布带、征收地下水税等严格措施。日本政府一方面采取立法、科技、经济等手段,对开采的井位、井深、口径、抽水量等进行严格控制,加强对地下水的管理;另一方面,通过研究地下水资源的储量变化规律,科学指导地下水的开发利用。德国在地下水资源可持续利用方面,建立许可证制度,地下水资源的开发利用必须得到行政主管部门许可或批准后方可实施,发放许可证或批准书的行政主管部门一般为州的环境部和地方水资源局;批准水资源开发利用项目时,行政当局还要求当事人对此项目造成的一些不利影响采取弥补措施。以色列对工业和生活污废水进行净化处理后回灌南部沙漠的地下水灌区,保持地下水的采补平衡。发展中国家对水资源的合理开发利用也开展了大量的技术研究和应用,取得了值得借鉴的成果。印度政府近年来开展了大规模的集雨和地下水人工补给工作,并制定流域统一开发规划,为地方机构处理流域集水面积和建设集雨、人工补给设施提供指导。巴基斯坦的印度河平原灌区,采取井渠结合最终彻底摆脱之前困扰灌区发展的沼泽和盐害问题。

近年来,国内外在灌区水资源可持续利用研究方面方兴未艾,对区域生态水文过程与水资源持续高效利用研究得到了广泛重视,水资源的生态价值和生态需水、水资源系统承载力与社会经济和生态系统的动态响应过程定量模型、分布式水文模型、面向生态的水资源配置与调控等研究更加活跃。

1.2.2 水资源优化配置与地表水地下水联合调控技术

《全国水资源综合规划大纲》对水资源合理配置的定义是:“在流域或特定的区域范围内,遵循有效性、公平性和可持续性的原则,利用各种工程与非工程措施,按照市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行的配置”。水资源优化配置的目标,是兼顾水资源开发利用的当前与长远利益、兼顾不同地区与部门间的利益、兼顾水资源开发利用的社会、经济和环境利益以及兼顾效益在不同受益者之间的公平分配。有效性、公平性和可持续性水资源合理配置必须遵循的三大原则。水资源配置的主要内容包括:在空间上,通过跨地区、跨流域调水来调剂水资源的余缺;在时间上,通过水库等调节工程来解决年内和年际水资源分布不均匀的问题;在不同的国民经济用水部门间,按照协调发展的投入产出关系实行计划供水;在近期目标和长远目标之间,既注重满足当前需要,也要积极进行水资源的保护与治理以形成水资源开发的良性循环;在开源与节流的关系上,坚持在节约的基础上扩大供水能力,控制需水的过度增长;在水资源的开发利用模式上,不仅重视原水的开发,更要注重污废水的再生处理及回用;在除害与兴利的关系上,要注重化害为利,将洪水转化为可用的水资源。

水资源配置研究源于上世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题。上世纪50年代以后,随着系统分析理论和优化技术的引入以及上世纪60年代计算机技术的发展,水资源系统模拟模型技术得以研究和应用,并不断得到提高。上世纪70年代以来,伴随数学



规划和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用,水资源优化配置的研究成果不断增多。E Rom Jin 等(1983)考虑了水的多功能性和多种利益的关系,强调决策者和决策分析者间的合作,建立了水资源量分配问题的多层次模型,模型体现了水资源配置多目标和层次结构的特点。Willis Multiplie 等(1987)应用线性规划方法求解了1个地表水库与4个地下水单元构成的地表水、地下水运行管理问题。Camara A S 等(1990),提出了水资源管理的综合决策辅助模拟模型,把数字、语言、图片等自然语言用于水资源管理决策,增加了决策的可视化程度。上世纪90年代以来,由于水污染的加剧,传统的以供水量和经济效益最大为目标的水资源优化配置模式已不能满足需要,国外开始在水资源优化配置中注重水质约束、水资源环境效益以及水资源可持续利用研究,尤其是决策支持技术、模拟优化的模型技术和资源价值的定量方法等的应用,使得水资源水量与水质管理方法的研究成为热点。Floy G (1990)建立了地表水、地下水联合运用系统的多目标管理模型,模型中将地表水、地下水的处理费用纳入管理目标。Afzal Javaid 等(1992),针对巴基斯坦某地的灌溉系统建立了线性规划模型,对不同水质的水量使用问题进行了优化,在劣质地下水和有限运河水可供使用的条件下,模型能得到一定时期内最优的作物耕种面积和地下水开采量等成果,在一定程度上体现了水质水量联合优化配置的思想。Fleming R A, Adams R M 和 Kim C S (1995)以经济效益最大为目标,考虑了水质运移的滞后作用,并用水力梯度作为约束来控制污染扩散,建立了地下水水质水量管理模型;Wong, Hugh S, Ne-Zheng Sun 等(1997)在需水预测中考虑当地地表水、地下水、外调水等多种水源联合运用和地下水恶化防治措施后,提出了支持地表水、地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法。Carlos Percia, Gideon Oron 和 Abraham Mehrez (1997)以经济效益最大为目标,建立考虑了不同用水部门对水质不同要求的污水、地表水、地下水等多种水源管理模型。Gorantiwar S D 和 Smout I K (2005)针对干旱半干旱地区提出了采用非充分轮灌方式分配有限水资源的灌溉模式。Fortes P S, Platonov A E, Pereira L S 等(2005)以概念性的半分布式水量平衡模型为基础,在GIS上建立了提高水利用率的灌溉制度模拟模型——GISAREG 模型等。

灌区地表水与地下水联合调控,即通过对各种水利设施进行控制和合理调度,达到高效使用地表水、合理开采地下水的目的。随着水资源紧缺程度的进一步加剧和生态环境的逐步恶化,单纯开采地下水的井灌区和单纯引地表水灌溉的渠灌区已难以保证灌区的用水需求和实现水资源的合理利用,开展井渠结合已成为我国、特别是北方灌区的发展方向。实行井渠结合,通过地表水、地下水的联合调控,解决地面水供水与作物需水在季节上的矛盾,达到了开源的作用,又可以显著减少地表水的灌溉用水量和自河流和渠道的取水量,起到节流的作用。国内学者对灌区地表水地下水联合调度进行了一定的研究。尹大凯等(2003)为实现宁夏银北灌区水资源联合调度,对选定典型区的地表水、地下水联合调度进行了模拟,对井渠结合灌溉模式和运作方式进行了三维的数值模拟计算。沈佩君等(2004)以枣庄市水资源系统为实例,研究了地表水、地下水及客水等多种水资源的联合优化调度问题,建立了基于区域水资源特点的,包含分区管理调度及统一管理调度模型在内的大系统分解协调模型。齐学斌、樊向阳等(2004)根据水资源平衡的原理,对井渠结合灌区的地表水和地下水进行联合优化调度,并通过地膜覆盖集雨节灌种植技术和地下水



引洪补源技术等集成技术措施的应用,实现了灌区水资源的高效可持续利用。尤祥瑜等(2004)提出地表水、地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法,在需水预测中考虑了当地地表水、地下水、外调水等多种水源的联合运用,并考虑了地下水恶化的防治措施,体现了水资源利用和水资源保护之间关系。曲兴辉、谷秀英(2005)提出了基于费用准则和供水量准则的地表水地下水联合调控模型,实现了合理开发、优化调度区域水资源,充分发挥区域地表水库和地下含水层空间的联合调蓄作用,提高水资源的利用率,达到最佳社会、环境和经济效益的目标。

目前,我国在灌区多水源联合调度模型研究与应用方面已有了很大的进展,取得了不少有价值的成果,如计算模型由单一的优化模型发展为几种方法的组合模型,计算问题由单目标发展为多目标,以及大系统优化理论的应用,使复杂的地表水与地下水联合调度问题变得较为简单。但随着研究问题的深入,常规数学规划方法的局限性也越来越明显,采用人工智能技术、决策支持系统、专家系统、灰色模糊系统等计算机技术,建立基于3S技术的地下水动态监测可视化平台将是灌区多水源联合利用优化调度技术的发展方向。

1.2.3 高效输配水技术

灌区水资源输配水过程中的蒸发、渗漏等水量损失占水资源损失总量的比重较大,因此,提高输水效率是灌区水资源高效利用的关键。灌区输配水技术研究中,渠灌区重点以渠系防渗抗冻胀新技术、渠系高效输配水技术为主,井灌区则重点以低压管道输水灌溉技术为主,井渠结合灌区重点考虑以地表水、地下水联合利用技术为主进行关键技术研究。

(1) 渠道防渗技术。渠道衬砌是提高灌溉水利用率的主要措施。目前,国内外用于渠道衬砌的材料可分为刚性材料、土料和膜料三类,其中以刚性材料(尤其是混凝土)为主。美国的混凝土渠道约占全部渠道长度的52%,罗马尼亚占70%~80%,意大利几乎全为混凝土渠道,日本输水干渠一般采用预制混凝土衬砌。随着化学工业的发展和机械化施工技术的进步,膜料衬砌的比重日益增大。美国已实现从开挖渠床、铺设塑料薄膜到填土或浇筑混凝土保护层都由机械来完成。

目前,该领域的研究热点包括:利用纳米技术改进渠道防渗材料性能;研制新型土壤固化剂、新型复合土工膜料和填缝材料等专用防渗材料;开发新型保温复合材料和环保型混凝土补强新材料;创制基于高分子复合材料的管道输水大口径管材和管件;研究输水建筑物老化防治技术、病害诊断技术和防腐蚀、修复、堵漏技术等。

(2) 低压管道输水技术。灌溉渠系管道化已成为许多国家的发展趋势,低压管道输水灌溉技术已成为世界上农业节水灌溉的一项关键技术。在美国,近一半的大型灌区都实现了管道化灌溉,低压管道灌溉被认为是节水最有效、投资最省的一种灌水技术;美国还采用大口径地面可移管道(这种管道一般为可快速连接的铝制管材和塑料软管),通过带有闸管的管道输水,可便于进行波涌灌溉。以色列的输水管道工程堪称国际一流,全国除个别偏远山区外,全部实现了输水管道化和网络化,其输水管道连接了大多数地区的供水系统,通过统一的网络系统集中调度,可根据需要进行及时供水,且避免了输水过程中因蒸发和渗漏引起的损失;以色列的输水管道不仅用于供水,而且在冬季和旱季可用于北



方地区的排水,使水重新进入地下水层,促进了水的回归和再利用。日本早在上世纪 60 年代初,就在旱地灌溉系统中用管道取代斗、农渠,70 年代末开始利用大口径管道取代输水干渠,至 80 年代中期,全国新建灌溉渠系的大部分都实现了管道化。东欧各国也十分重视发展低压管道输水灌溉。罗马尼亚的灌区斗渠以上采用 U 形渠槽,农渠以下全部采用管道进行输水。发达国家的管道输水灌溉有如下特点:管道种类多样,且质量较好;管网具有多级性,由直径大小不同的管道组成,最大管径可达 3m;灌水利用系数较高;量水和自动控制技术先进,科学管理水平较高,计算机操作控制在管道输水灌溉中得到广泛应用。

我国自上世纪 50 年代开始低压管道输水灌溉技术的集中连片应用。进入 80 年代后,随着我国北方水资源供需矛盾的日益加剧和农村经济的发展,低压管道输水灌溉技术得到飞速发展。低压管道输水灌溉技术的研究在我国“七五”期间被列入重点科技攻关项目,管材及配套装置的研制取得了一些研究成果,以井灌区为重点的低压管道输水灌溉技术得到迅速推广和应用。到 2010 年底,全国低压管道输水灌溉面积已达 1 亿亩,覆盖全国大部分省(自治区、直辖市),为缓解灌区农业用水矛盾,实现灌区农业可持续发展起到了十分重要的作用。

(3) 量测水与输配水技术。在渠道输配水控制方式上,目前国外普遍采用的是下游控制运行方式,即系统运行时流量的改变首先发生在用户控制的取水口上,然后逐级上传,引起取水口上游渠段乃至渠首流量的变化,这种系统能最大限度地满足用户需求的变化,减少弃水或无弃水运行。由于用户需求变化首先由所在渠道的调蓄水体予以满足,可大大减少调蓄工程数量,大幅度降低工程费用。为适应灌溉系统灵活多变的特点,国外下游控制系统大多采用自动控制运行方式,特别是对于大型渠道工程多采用中央自动监控(遥测、遥信、遥调)方式。

目前,我国渠道的输配水方式均为上游控制运行方式,多为计划供水、人工控制。系统运行时,由渠首按计划引入流量,流量的变化受渠首控制。当系统中用户的用水量在时间和数量上与原计划不一致时,系统由于缺乏必要的灵活性,难以做到适时、适量供水,供水保证率低。

目前,该领域的研究重点主要为:开发精度高、造价低、适应性强、操作简便、便于管理和维护的小型量水设备;开发动态用水管理和实时灌溉预报技术;研发水头损失小、精度高、经济可行的渠系量水设备;研制具有量水和控制双重功能的取水口量水设施、新型管道量水仪表、适合高含沙渠道采用的量水装置等;研发基于局域网络、Internet 网络与 RS 和 GPS 技术相结合的灌区用水动态管理信息采集、传输和分析技术;研究灌溉系统计算机识别技术、动态配水系统下的非恒定流模拟仿真技术、水量与流量实时调控技术;研究灌区中央控制系统自控技术和水力自控技术;开发灌溉配水系统的闸门控制模式及其基于模糊控制方法的灵活方便的控制器。

1.2.4 田间节水灌溉技术

田间灌水技术是提高灌区水资源利用率的重要环节,包括地面灌水技术及喷灌、微灌等高效节水灌溉技术,以节水、节能为目标的田间节水灌溉技术研究和应用是灌区水资源



高效利用的重点。

(1) 改进地面灌溉技术。我国自上世纪 70 年代开始进行改进地面灌水技术的研究与应用工作以来,取得了显著成绩。在继平整土地、大畦改小畦,长畦改短畦,推行短沟灌和细流沟灌之后,科研工作者对膜上灌和波涌灌的节水机理也进行了一定的探索与研究。但仍存在以下问题:①各种改进地面灌水技术的节水机理还不完全清楚,其适用条件、灌水均匀度对作物产量的影响、改进地面灌水质量评估体系和方法、各种灌水技术要素之间的优化组合方式等尚无明确的结论;②国内尚缺乏如波涌灌田间灌水控制设备及设施等硬件设备。

目前,国内外改进地面灌溉技术方面的研究重点和热点包括:通过开发小畦灌溉、细流沟灌、波涌灌溉等改进地面灌水技术,实现田间入畦(沟)流量、水头、灌水定额等灌溉要素的科学控制;研究土地精细平整标准与激光平地技术,开发国产化的激光平地设备和液压升降控制系统,提出与激光平地技术实施相配套的农田灌排工程系统模式;研究精细地面灌溉技术控制参数,开发波涌灌溉控制设备、田间多孔闸管灌溉系统等精量灌溉自动控制设备;研究作物生长与土壤水分、养分,空气湿度、大气温度等环境因素的关系,分析农作物生理特性和需水规律,实现作物适时适量灌溉;研究作物对水分亏缺信息的感受、传递与信号传导过程,建立作物水分信号诊断指标体系,获得利用作物茎秆变形测量诊断作物缺水状况的新技术与新产品;研究作物水分区域分布监测技术和作物蒸腾过程快速监测技术,提出区域土壤水分空间变异性与最佳动态监测布点方式和区域土壤墒情监测预报技术,研发土壤水分动态快速测定与预报技术及新产品;研发智能化的灌溉信息采集装置和智能化的灌溉预报与决策支持软件。

(2) 喷、微灌技术。喷、微灌技术是当今世界上最先进的灌水技术。美国从上世纪 50 年代初到 80 年代初,新增喷灌面积 1 亿亩,占新增灌溉面积的一半。前苏联上世纪 50 年代初到 80 年代初新增的灌溉面积中喷灌占 70% 左右。以色列由于水资源极度贫乏,上世纪 80 年代中期喷、微灌面积即分别占总灌溉面积的 $\frac{2}{3}$ 和 $\frac{1}{3}$,90 年代初喷灌占总灌溉面积的比例下降到 30%,微灌则上升为 70%。

喷微灌设备以美国和以色列等灌溉发达国家的产品最为先进,如美国的雨鸟公司和以色列的 NETAFIM 公司,其产品不仅质量高、性能稳定可靠、而且规格品种齐全,且服务保障体系完善,产品畅销全世界。以色列仅微喷滴灌塑料器材品种就达近 160 种,规格 2000 多个。此外,以色列还研制出多种施肥灌溉设备,甚至研制出了喷、微灌专用肥料。由于化肥同灌溉水结合在一起,使作物能生长在最佳条件下,增产效果明显;同时大量减少化肥施入量,减轻了环境污染。随着能源问题越来越受到关注,美国等发达国家已开发出太阳能滴灌系统。

我国自上世纪 70 年代以来引进喷灌技术,先后经历了起步、发展、徘徊、提高等阶段。目前,无论是喷灌机具还是管材、喷头、泵的生产能力等都有了很大提高。与发达国家相比,我国喷灌行业目前仍存在着产品质量稳定性较低、喷灌机具成套性差、产品材质有待提高、新产品研制周期过长等问题。因此,迫切需要朝着“适用、成套、可靠、高效”的方向努力。

我国自 1974 年首次从墨西哥引进滴灌技术,迄今已走上快速发展的轨道,并由最初