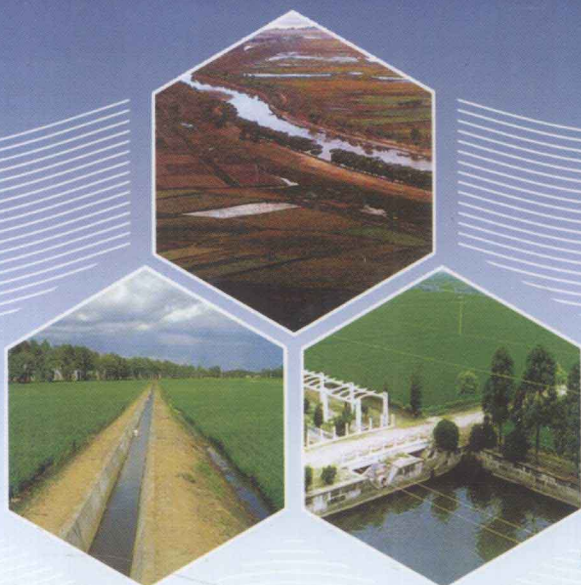


灌区水均衡演算与 农田面源污染模拟

王康 著



2009年实际灌水过程

灌水 灌水 灌水 灌水 灌水 灌水 灌水 灌水

实际田面水层深度
控制田面控制水层



科学出版社

2009年实际灌水过程

灌区水均衡演算与农田面源污染模拟

王 康 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以农业灌区水资源和水环境为研究对象,以内蒙古黄河河套灌区和吉林省松花江前郭灌区为背景,系统地总结了灌区水均衡计算理论与方法,灌区地下水资源量分析方法,灌区地下水模拟方法,灌区面源污染迁移、转化汇集机理及模拟方法,灌区水环境评价理论。本书是作者所主持和主要参加的多项国家自然科学基金等基础性研究项目成果的系统总结和提升。全书共6章,第1章为绪论,对农业灌区水资源及水环境问题进行了系统的综述;第2章以内蒙古河套灌区为背景,阐述了灌区水均衡分析资料收集、水均衡要素计算和灌区供需水平衡分析方法;第3章和第4章分别讨论了灌区地下水资源和土壤水资源类型、可开发利用潜力及灌区地下水模拟方法;第5章和第6章以吉林省松花江前郭灌区为背景,重点对灌区水环境问题进行分析,在灌区面源污染迁移、转化及汇集过程试验的基础上,模拟灌区排水及污染物入河过程。对灌区水环境现状和环境评价体系进行了分析。

本书可供水利水电工程、农业水利工程、水环境等相关专业本科生、研究生及相关技术人员参考,也可作为农田水利学参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

灌区水均衡演算与农田面源污染模拟/王康著. —北京:科学出版社, 2012.6

ISBN 978-7-03-034503-5

I. ①灌… II. ①王… III. ①灌溉水-水量平衡-演算-中国②农田污染-面源污染-模拟-中国 IV. ①S274.4②X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 109980 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:林青梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

北京佳信达胶艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:358 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2011 年中央 1 号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》的核心内容为加强农田水利基础建设,促进农田水利事业的发展。目前我国有大型灌区 434 处、中型灌区 5300 多处(其中 5~30 万亩的重点中型灌区 1505 处)、小型灌区 1000 多万亩,有效灌溉面积达 8.5 亿亩,在占全国耕地总面积 45%的土地上生产了近 70%的粮食。灌区水资源对保证我国粮食生产有举足轻重的作用。

灌区区域水平衡是极其复杂的动态过程,例如,区域地下水资源与地下水开采和补给量、灌区农作物需水量、灌溉水量、蒸发和渗漏量、降雨量及其他用水量都是随时间和空间变化的,具有很大的时间和空间变异性,并且这种时间和空间变异性随灌区面积的增大而增大,因此对大型灌区水平衡及耗水量进行准确计算十分困难。灌区水资源的统一管理和可持续利用,不仅指灌区引水河流干流水资源,而是指包括流域地表水和地下水在内的整个水系统。考虑维持人类生存的生态环境用水的流域水资源管理和优化配置,不能仅用传统的以限定流域水资源开发利用程度来调节人类活动系统与天然生态系统间的水资源分配,而应从全方位准确定量各类用水需求(包括生态用水)的角度来考虑。

我国的耕地面积不到世界的 1/10,但是近年来氮肥的使用量却占全世界的近 30%。来自农田的污染物质已成为水环境污染的主要来源。以松花江流域为例,松花江流域中下游是国家商品粮基地,现有耕地面积 5839 万亩,化肥年施用量约 203.8 万 t,平均化肥施用量为 34.9kg/亩,远高于全国平均 18.5kg/亩的水平,农田退水汇入江河,加剧了流域水污染状况,来自农田化肥农药的氮、磷污染已经成为松花江主要污染源之一。国务院 2009 年通过国家千亿斤粮食增产工程规划,其中吉林、黑龙江两省承担着 300 多亿斤的粮食增产任务,增产的主要途径是通过大规模调配松花江水资源在松嫩-三江平原发展灌溉农业,松花江流域新一轮大规模水田开发,使得农田退水带来的水环境污染形式更加严峻。农田面源污染水质水量联合调控技术的研发与应用,将切实有效地控制大规模水田开发所带来的面源污染增加问题,维护流域水质安全和生态安全,保障国家粮食增产工程在东北地区顺利实施的重大战略需求。

我国的现代农业主要取决于灌溉农业的快速发展,在灌溉农业持续地向集约、高效、多样运行一体化模式转变的趋势下,建立与之相适应的资源节约型生产方式迫在眉睫,而灌溉农业生产过程中对水肥资源的高效利用可达到促进农业增产、减少面源污染物的重要作用。由于农田灌溉排水系统受到人类生产活动和调控措施

的强烈干预,因此,研究灌排条件下农田氮磷转化、运移的规律及相关的控制措施,对提高化肥利用效率、减轻农业带来的面源污染程度、缓解水资源危机具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

作者针对农业灌区水资源和水环境问题开展了多年的研究工作,研究成果在灌区的应用也都取得了一定的效果,本书是对于灌区水资源高效利用及农业面源污染控制理论与方法的总结和提升。

本书的出版得到武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室资助。本书是国家自然科学基金重点项目“农业面源污染物运移转化及其环境效应”(51039007)、国家自然科学基金项目“土壤溶质非均匀迁移层析成像示踪及尺度特性研究”(50979076)、国家“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项课题“松花江流域水质水量联合调控技术及工程示范”(2008ZX07207-006-04)、国家重点基础研究发展计划(973项目)“华北平原地下水演变机制与调控”第二课题“浅层含水层结构变化与地下水补给变化机理”(2010CB428802-4)的研究成果。

本书的撰写得到武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室杨金忠教授,武汉大学水利水电学院沈荣开教授、张瑜芳教授,中山大学张仁铎教授,中国水利水电科学研究院水资源研究所周祖昊高级工程师,河北农业大学杨路华教授,吉林省水利科学研究院董建伟教授级高级工程师,中国农业科学院张寄阳高级工程师的支持和帮助,他们提出了很多宝贵意见。武汉大学水利水电学院陈会参与了本书部分内容的编写,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 灌区水资源与水环境	1
1.1.1 灌区水均衡机制	1
1.1.2 北方寒区及南方平原灌区水均衡特点与水文机制	3
1.1.3 灌区水资源利用及节水	6
1.2 灌区农业面源污染	11
1.3 灌区水循环、水环境及水生态	16
1.4 灌区水循环和尺度问题	18
1.4.1 SPAC 系统尺度提升	18
1.4.2 灌区尺度土壤水和地下水化学物质运移规律	20
参考文献	21
第 2 章 灌区供需水过程演算及平衡分析	27
2.1 内蒙古河套灌区现状综述	27
2.2 灌区供需水平衡演算数据收集与分析	29
2.2.1 灌区基本资料	29
2.2.2 灌溉分区及种植结构	33
2.3 灌区供需水过程演算与水平衡分析	34
2.3.1 设计典型年	34
2.3.2 作物需水量计算	35
2.3.3 有效降雨及地下水补给计算	37
2.3.4 灌溉制度推算	39
2.3.5 农业用水量估算	42
2.3.6 灌区农业及城镇农村需水量	54
2.3.7 生态需水量(乌梁素海需水量)预测	55
2.3.8 灌区侧向补给水量计算	55
2.3.9 来用水过程平衡分析	56
2.4 灌区节水改造潜力分析与水资源高效利用方案分析	58
2.4.1 井渠结合区地下水开发利用方案分析	58
2.4.2 节水改造方案与地下水动态分析	63

2.5 灌区节水改造及供需水配合过程分析	75
2.5.1 总量平衡	75
2.5.2 过程平衡	77
参考文献	78
第3章 灌区地下水资源	79
3.1 可开采地下水资源	79
3.1.1 水文循环中的地下水	80
3.1.2 灌区可以开采利用的地下水资源	82
3.2 灌区地下水调查	92
3.2.1 含水层性质调查	92
3.2.2 地下水补给	93
3.2.3 抽水试验	94
3.3 灌区土壤水资源	106
3.3.1 土壤水资源在灌区水资源分析中的作用	106
3.3.2 土壤水资源的估算方法	108
3.3.3 土壤水资源评价的必要性问题	111
3.4 灌区地下水资源评价及地下水开发利用规划	112
3.4.1 地下水资源评价的任务和内容	113
3.4.2 浅层地下水资源分析计算	113
3.4.3 深层承压水资源分析与评价	115
参考文献	130
第4章 灌区地下水运动模拟	132
4.1 地下水流运动计算	132
4.1.1 Visual MODFLOW	132
4.1.2 Visual MODFLOW 数据文件	134
4.1.3 Visual MODFLOW 参数处理	134
4.1.4 MODFLOW 计算模块	138
4.2 灌区地下水模拟计算	140
4.2.1 资料准备	140
4.2.2 模型概化	142
4.2.3 地下水开发利用分析评价典型计算区	143
4.2.4 计算区边界条件概化	147
4.2.5 模型校验	157
4.3 地下水开发利用区井渠结合方案的探讨	163
4.3.1 渠道衬砌对于地下水变化的影响	163

4.3.2 井渠结合区不同布井方案的分析比较	168
参考文献	195
第5章 灌区灌溉排水及面源污染过程演算	197
5.1 灌区面源污染概述	197
5.2 灌区面源迁移、转化及汇集机理试验研究	200
5.2.1 研究灌区	200
5.2.2 农田面源污染水质水量调控试验	206
5.2.3 灌区面源污染监测	210
5.2.4 田间水利利用效率及田间引、排水量测试	211
5.2.5 不同水质水量调控方案下的面源污染潜力分析	213
5.3 灌区灌溉引水及排水过程演算	220
5.3.1 灌区引水过程演算	220
5.3.2 田间排水过程演算	222
5.3.3 排水支沟汇流过程演算	223
5.3.4 干沟排水过程演算	225
5.4 主要面源污染物迁移、转化、汇集过程演算	228
5.4.1 污染物在明渠中的迁移规律	228
5.4.2 主要面源污染物迁移转化	229
5.5 面源污染演算分析与校验	233
5.5.1 模拟水量过程分析	233
5.5.2 主要面源污染物模拟分析	235
5.6 不同水质水量调控模式下的农田面源污染分析	238
5.6.1 灌区农田面源污染负荷及入河分析	238
5.6.2 水量调控的面源污染控制效果分析	241
5.6.3 水质调控的面源污染控制效果分析	249
5.6.4 不同典型年条件下的水质水量调控效果分析	250
参考文献	257
第6章 灌区环境与生态	261
6.1 灌区地表水环境	261
6.1.1 农田灌溉水质标准及执行情况	261
6.1.2 灌区水环境现状	263
6.1.3 灌区环境综合评价体系框架	263
6.2 灌区地下水环境	270
6.2.1 地下水的化学组成	270
6.2.2 地下水的物理化学作用	273

6.2.3 地下水资源及环境评价一些问题	275
6.3 灌区温室气体环境效应	277
6.3.1 灌区温室气体综合环境效应	277
6.3.2 灌区生态评价	280
参考文献	281

第 1 章 绪 论

灌区是指有可靠水源和输配水渠道系统及排水沟道的灌溉区域。灌区是一个半人工的生态系统,其依靠自然环境提供的光、热、土壤资源,加上人为选择的作物和安排的作物种植比例等人工调控手段组成一个具有很强社会性质的开放式生态系统。

我国水利行业的标准规定,控制面积在 30 万亩以上的灌区为大型灌区,控制面积为 1~30 万亩的灌区为中型灌区,控制面积在 1 万亩以下的为小型灌区。到 2009 年底,我国有大型灌区 434 处、中型灌区 5300 多处、小型灌区 1000 多万处。自 1998 年以来,国家先后启动了 434 个大型灌区和 1505 个中型灌区续建配套与节水改造工程,同时还启动了末级渠系配套与改造、民办公助小型水利工程、山区抗旱水池建设、农用地整理、灌区信息化建设等一系列建设计划。这些工作有效地改善了灌区的水利设施状况和灌区的工作条件,提高了灌区供水能力,对于保障灌区的灌溉用水、生活及生态用水发挥了重要的作用,灌区可持续发展的能力大大增强。目前,我国有效灌溉面积达 8.5 亿亩,在占全国耕地总面积 45%的土地上生产了近 70%的粮食。

1.1 灌区水资源与水环境

1.1.1 灌区水均衡机制

流域尺度天然状态下的水量平衡,是以降水为输入,以径流、蒸发为输出的一种自然水平衡形式。以 Horton 产流理论(Horton,1933)、谢尔曼单位线(Sherman unit hydrograph,Sherman,1932)概念、“四水(大气水、地表水、土壤水和地下水)”转换理论等为代表,研究人员在水文循环和水均衡要素方面开展了大量的研究工作。对于水量平衡中具有关键意义的蒸发和入渗问题,早在 20 世纪 30 年代就有研究人员开始了入渗率及入渗规律的定量研究,提出了大量用于模拟均质单元土体下渗的经验或半经验公式。在实际流域中,为了解决由于下垫面和土壤特性的空间变化而导致的下渗能力的空间变异性,又提出了垂向分层、面上分布式模型或集中参数模型。近年来对于入渗的研究主要集中在微观入渗的数学模拟和宏观区域土壤入渗特征的描述和测定两个方面。

区域蒸散发研究,既包括微观反映下垫面特性的单点模型,也包括宏观的区域

蒸散发模型,既有基于土壤、植物、大气(SPAC)相互作用的动力学模型,也有忽略蒸散发动力学过程的系统模型,如道尔顿的蒸发理论、Penman 蒸发公式及各种改进模型、大尺度蒸散发模型、Raupach 的大气混合层模型等。农田作为我国灌溉排水的主要控制对象,其空间模拟可分为大尺度(灌区尺度)、中观尺度和小尺度(田间尺度)三种类型,由于“四水”转化过程中的关联性、动态性、时空随机性等因素,农田“四水”转化过程中各水文要素的计算和评价受尺度效应的影响,不同尺度水平上,其变化规律及定量描述有所不同,并可能对灌排模式的选择产生影响,然而不同尺度间蒸散发模型的耦合和转化尚不理想,如何将小尺度上的物质与能量传输过程拓展到区域尺度,将大尺度物质与能量的传输表象用于区域蒸散发仍是目前区域蒸散发研究的一个重点。此外,有作物生长条件下的潜水蒸发研究有待深化。

由于下垫面和土壤特性的空间变异性,水循环具有显著的地域特点,尤其是灌区这种人工干预下的水系统,不同区域其水系统的平衡要素构成不同,要素的标定差异也较大,而且由于人工干预程度的变化,使区域水平衡在一定意义上还表现出时域性,所以水平衡机制和平衡要素的空间和时间标定就成了区域水循环研究的重点。以引黄灌区为例,引黄灌区由于黄河水的加入及大量的地下水提灌和地表水的拦蓄、区域作物种植面积增大、覆盖期延长等原因,不仅改变了灌区下垫面的自然状态,影响了区域的径流、蒸发等水平衡要素间的关系,而且改变了区域水平衡构成,影响了系统内各平衡要素的计算及相互间的转化关系。例如,灌溉引水增加了区域来水量,补充了土壤含水量和地下水;而土壤含水量的增加和地下水位的抬高,反过来又加大了地表产流量和陆面蒸发量;植物种植面积的扩大、生长期的延长,增加了区域用水量和蒸发量等。同时,由于黄河灌区引黄灌溉范围大,不同地区有不同的自然地理条件、农作物种植结构、灌溉习惯(如宁蒙灌区,尤其是宁夏灌区一直沿用水压盐、大定额灌溉的方式,下游引黄灌区边界不闭合、水系统开放,灌区内部黄河水、当地地表水、地下水并用,多种灌溉模式并存等),这些都影响着区域水平衡,导致不同地区水平衡模式的变异。

灌区尺度的耗水量计算,可以归纳为灌区引退水法、河段水量平衡法和面积定额法三种方法。这三种方法都是针对河流,仅从供水系统的水平衡考虑,而对实际的水资源耗用系统——灌区水系统采取了黑箱处理,没有考虑灌区水系统的平衡和各要素的变化,没有将供水系统和耗水系统相结合,从整个区域水平衡的角度来研究灌溉引水的消耗过程,即使局部无资料地区采用面积定额法,也主要是考虑农作物灌溉耗水定额,而对区域内的其他耗水要素(如非耕地的土壤蒸发、天然及人工林草植被的蒸散发、其他生态耗水等)较少考虑,加之一些灌区引退水资料误差较大,这样就不可避免地会出现区域水量估算的“不平衡”问题。

由于我国灌区大多兴建于 20 世纪 50~70 年代,由于当时科技条件有限,加之

多年的疲劳运行,目前我国大多数灌区工程老化失修严重,处于超期服役或带病运行状态,致使灌区水资源浪费严重,灌溉水利用率低,灌溉效益大幅度衰减。灌溉系统中 60% 的水量损失都发生在输水过程中,渠系的渗漏消耗除了造成灌溉水的有效利用率降低之外,还会引起地下水位的上升,最终导致环境的破坏(次生盐碱化、沼泽化等),研究灌溉系统长期运行后灌区地下水动态变化趋势对灌区制定科学水管理措施是一项重要工作。我国许多大型灌区进行节水改造和续建配套,其中一项主要措施是进行渠道的防渗,一般而言,渠道防渗可使灌溉水的有效利用率提高 20 个百分点,但渠系输水损失的减少将改变原来的平衡状态,形成新的平衡点,在新的平衡条件下,地下水埋深在什么程度,同样涉及灌区未来的环境状况,并且灌溉渠道采取防渗措施前后水文循环规律的变化对灌区水平衡要素的影响是不可忽视的。

灌区区域水平衡机制是极其复杂的动态过程,例如,区域地下水资源与地下水开采和补给量、灌区农作物需水量、灌溉水量、蒸发和渗漏量、降雨量及其他用水量都是随时间和空间变化的,具有很大的时间和空间变异性,并且这种时间和空间变异性随灌区面积的增大而增大,因此对大型灌区水平衡及耗水量进行准确计算十分困难。因为对大尺度区域内水平衡机制的研究不够,特别是相关资料的缺乏及分散,在传统的灌区水平衡及耗水量的计算中,常常对许多变量和参数只能在整个灌区和一个很长的时段内取一个经验值(或平均值)来进行计算,难于取得合理的计算结果,因而成为制约掌握灌溉耗水规律,合理和有效地利用灌区水资源的瓶颈因素。

灌区水资源的统一管理和可持续利用,不仅指灌区引水河流干流水资源,而是指包括流域地表水和地下水在内的整个水系统;考虑维持人类生存的生态环境用水的流域水资源管理和优化配置,不能仅用传统的以限定流域水资源开发利用程度来调节人类活动系统与天然生态系统间的水资源分配,而应从全方位准确定量各类用水需求(包括生态用水)的角度来考虑;流域水资源的可持续利用不是简单地以水定发展,而应在了解掌握流域各用水户需求规律的基础上,根据水资源的承载能力,通过对水资源的合理配置,科学调整经济结构,使之与相应阶段的水资源承载能力相适应。同时,随着工程水利向资源水利、传统水利向现代水利和可持续发展水利的转变,水资源管理的内涵和范畴也正在变化,水资源的配置必须与流域经济发展相结合,供水必须与用水、耗水相结合。

1.1.2 北方寒区及南方平原灌区水均衡特点与水文机制

我国的寒区遍布在中低纬度的青藏高原、西北高山和东北的大兴安岭及松花江流域地区,面积大约占全国的 43%,其中 30% 存在永久性冻土,70% 存在季节性冻土。寒区因为冻土层的广泛存在,该区水循环驱动机制、水平衡具有其自身特

色,水文特点与无冻土区相比有显著区别。永久冻土和季节性冻土对上层土壤含水量、土壤蒸发能力和土壤入渗有着深刻影响,从而影响区域产汇流甚至水循环特性。

Slaughter 等(1978)认为冻土层因其弱透水性可以提高流域降水的产流量。Kuchment 等(2002)开发了多年冻土区基于物理过程的分布式产流模型,模型在考虑基本水文过程的基础上又考虑了冻土冻融对水循环的影响。Warrach 等(2001)将陆面过程的水文模型与大气模式耦合,应用一些经验方程对土壤的冻融过程进行模拟,模拟的土壤温度和土壤水含量精度较高。Goran 等(2002)基于实测数据开发了一个简单的土壤冻结深度模型,并将其耦合到水文局模型(Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning, HBV 模型)中。Jansson 等(2001)开发了土壤-植物-大气连续体热量及物质传输耦合模型(coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems)并用来模拟寒区蒸腾作用,结果较好。Dornes 等(2008)将基于物理机制的分布式水文模型应用在加拿大的亚北极和北极地区,把水文模型的陆面植被参数进行区域化来模拟融雪和冻土对水资源的影响。William 等(2008)将空气动力学与下垫面土壤和雪的冻融过程中的水热耦合作用相结合,模拟了北极及高山冻土区的径流过程。我国对寒区冻土影响下水循环的研究开始于 20 世纪 60 年代,对寒区冰川、冻土的水文观测进行了实验研究,着重于地表与大气间的水热交换过程研究,研究发现其冻结和解冻过程直接影响着冻土区径流的产汇流过程及其径流特征。关志成等(2001, 2002, 2003)分别将水箱模型和萨卡拉门托模型与寒区水文物理模型相结合,开发了寒区概念性水文模型,描述寒区水文产流特性。张世强等(2004)应用可变下渗能力模型对青藏高原的多年冻土水循环要素的土壤湿度和蒸发量等进行模拟。陈仁升等(2006)将分布式水热耦合陆面过程模型(distributed water-heat coupled model, DWHC)与中尺度大气数值模型 MM5(mesoscale model version 5)嵌套,模拟了高寒地区的水文特征,从结果看,这些模型都有一定的模拟精度。牟丽琴(2008)将基于代表性元流域(representative elementary watershed, REW)的流域热力学系统水文模型(thermodynamic watershed hydrological model, THModel)应用在宏观尺度来描述流域的水文过程,为寒区水循环模拟提供了新思路。

研究人员不仅利用水文模型对寒区的各种物理机制及其伴生过程进行了研究,对于各种设定场景条件下的水文过程亦开展了相关研究。沈永平等(2002)认为在联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的情景下,青藏高原冻土区的气温到 2100 年将上升 $2\sim 3.6^{\circ}\text{C}$,同时冰川融水占河流总径流的比重将由现在的 25% 下降到 18%。Yamazaki(2006)认为由于受气候变暖的影响,多年冻土区冻土融化深度增加,河流直接径流率和退水系数将呈现明显减少的趋势。Oogathoo(2006)应用结合积雪和冻土条件的

MIKE SHE 模型对加拿大 Canagagigue Creek 流域进行模拟,并设定情景进行水资源演变分析,认为在砍伐森林的情景下会减少 11% 的总径流;在城市化的情景下洪峰流量减少,基流增加;在气温升高的情景下,湿润年份径流将增加,正常和雨量较少年份径流将会减少。Rawlins(2006)将泛太平洋水均衡模型(pan-Arctic water balance model, PWBM)模型应用在加拿大的泛北极地区,发现该地区对气候变化的水文响应较其对下垫面变化的水文响应敏感,并认为在气候变化的情况下,该地区土壤水资源已经由占总径流量 7% 增加到 27%。Doran 等(2008)根据统计方法分析南极洲干谷地区径流对极端气候下的夏季温度的响应,认为在暖夏的情况下该地区径流是冷夏的 3~6000 倍。胡宏昌(2009)将土壤和水评价工具(soil and water assessment tool, SWAT)模型应用在黄河生态源区,研究表明,土地利用/覆被变化(LUCC)对黄河径流影响约为 19%,其中枯水期影响较大,约为 28%;同时在小流域的水文过程和能量过程的模拟中考虑冻土草地水文过程,分析了不同气候变化和人类活动影响条件下的蒸发、总径流、地表径流和壤中流对气温和降水及植被覆盖度的响应。

需要指出,关于冻土层冻融条件下土壤水运动规律的研究还不成熟,冻土影响下的流域水循环演变机制尚不明确,影响了寒区具有物理机制的流域水循环模型研究进展。基于冻土水热耦合的研究在田间尺度及小流域尺度应用较好,而在大尺度的水文模拟应用中还不太成熟。基于具有水热耦合机制的寒区水文模型,在定量分析寒区大尺度流域水资源演变规律中的研究成果较少。国外对寒区的研究多集中在泛北极地区,国内研究集中在青藏高原及西北高山地区,我国东北地区与这些地区存在较大的差别,在该区域鲜有具有地区特色的分布式水文模型及基于分布式水文模型的水资源演变规律研究成果,而且对于寒区的灌区而言,冬季冰期不灌水,因而鲜见有关灌区冬季冰期水文循环对于水资源利用效率的影响及面源污染迁移作用等的相关报道。

南方平原湖区灌溉排水系统主要有三个特点:洪涝渍旱交替发生、人类活动的强烈干预及复杂的灌溉排水系统。平原湖区大多地势低洼,自然排水过程不畅。雨季受外河(湖、江)水位条件的依托,雨季易发生洪涝。同时,由于地势平坦,自流灌溉条件差,在降雨少的季节及年份,易发生干旱。例如,湖北江汉平原,由于降水时空分布不均,较大的涝、旱灾害发生频率基本一样,而且同年内旱、涝灾害相继发生(旱涝并存)的概率很大,1998 年大洪水后,2000 年、2001 年连续两年的大旱亦造成重大的损失;旱、涝同年发生的频率江陵为 0.68,潜江为 0.43,监利、洪湖为 0.82(刘章勇等,2003)。洪涝渍旱交替发生影响着平原湖区农田的水分状况和水环境。

南方平原灌区人口密度大,土地利用率高,农田、村庄、道路、水面、灌溉排水系统等覆盖了土地面积的绝大部分,人类活动强烈地干预了灌区水文及水循环过程,

对面源污染过程产生了显著的影响,例如,排水沟渠的布局在很大程度上影响了土壤水的滞留时间,进而影响田间水肥向排水系统渗流汇聚化肥物质的浓度;不同轮灌方式下的排水量和排水组成不同将导致化肥的流失过程及物质浓度的差异;随着灌溉水的引入与地表水的拦蓄等,灌区水平衡要素相互转化关系改变的同时,也改变了排水系统中的水流流态,进而影响化肥物质的对流、弥散和掺混过程;暴雨可能造成悬移质随地表径流进入排水系统。这些都使灌区的面源污染物运移转化流失规律表现出更多的不确定性。

需要进一步指出,我国的土地利用和种植方式与国外有较大的差别,即便是在平原农业区和大型灌区,灌溉田块一般小于1亩,北方的井灌区和井渠结合区,灌溉控制的面积更小,而国外主要以大片的耕种和农业机械化作业为主,两种不同种植方式的产流特点将有较大差别,目前国际上流行的农田产流计算模型(如SCS等)不一定适用于我国农业耕作的现状。另外,目前的产流模型以经验模型和统计模型为主,并且主要应用于流域尺度,对分布面积广,类型千差万别的农田径流而言,参数的率定和地区性差异限制了模型的应用。需要研究灌溉排水条件下农田产流的物理模型,根据非饱和土壤水分运动理论,在一定降雨过程和灌溉制度条件下,建立与土壤物理参数、灌排方式、气象条件和作物生长阶段相关的农田地表水径流模型,维持农田地表水、土壤水和地下水的基本平衡,精确描述灌溉农田的地表径流产流过程。

1.1.3 灌区水资源利用及节水

由水利部批准发布的《节水灌溉工程技术规范》(GB/T 50363—2006)中,对节水灌溉的定义如下:节水灌溉是指用尽可能少的水投入,取得尽可能多的农作物产出的一种灌溉模式,目的是提高水的利用率和水分生产率。节水灌溉的内涵包括水资源的合理开发利用、输配水系统的节水、田间灌溉过程的节水、用水管理的节水及农艺节水增产技术措施等方面。从水源形成作物产量要经过以下四个环节:通过渠道等输配水措施将水从水源输送到田间;将引入田间的灌溉水均匀地分配到指定的面积上转化为可供作物吸收利用的土壤水;作物吸收,利用土壤水以维持其生理活动;通过复杂的生理过程形成产量。从整个灌溉过程上着手,凡是能够减少灌溉水损失、提高灌溉水使用效率的措施、技术和方法都属于节水灌溉范畴。吴普特等将节水灌溉技术归纳为五种技术:水源开发技术、输配水技术、田间灌溉技术、农艺技术与管理技术。节水灌溉实际上是以农业高效用水为目标,以上述五种技术为核心的一种规范化和概念化模式,如图1.1所示。

目前标志我国节水农业水平现状的有关指标主要包括灌溉水利用率和水分生产率。

根据水利部“十一五”全国现状灌溉水利用率测算结果,我国灌区目前大部分

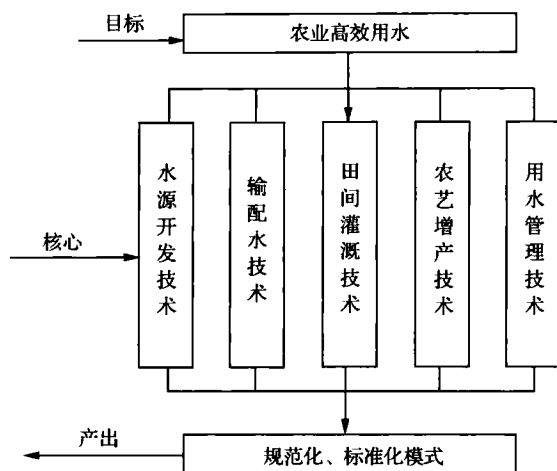


图 1.1 节水灌溉技术框图

采用传统的地面灌水技术,渠道灌区的渠系水利用系数一般只有 0.6 左右,田间水利用系数也只有 0.72 左右,即灌溉水利用系数一般为 0.48;提水灌区灌溉水利用系数一般为 0.55~0.65;井灌区灌溉水利用系数一般为 0.65~0.70;各省的灌溉水利用系数差异较大,通过加权平均,得出全国灌溉水利用系数为 0.52。

根据全国 22 个省(自治区、直辖市)1980~1988 年共 7 大类、11 小类的主要作物,共计 4863 个样点的灌溉试验资料,对我国主要作物的田间水分利用效率进行分析。其中粮食作物 4422 个样点,棉花 441 个样点。各种作物的水分利用效率采用全国范围内有关站点试验资料的平均值,以各种作物的田间水分利用效率为基础,按各种作物的种植面积进行加权平均,得出全国灌溉农田主要粮食作物平均水分利用效率为 $1.10\text{kg}/\text{m}^3$ 。

我国各地对于灌区节水有不同的理解,每个灌区都有其独特的自然条件、水资源状况、气象条件和灾害的类型,灌区改造的指导思想可能完全不同。以内蒙古河套灌区为例,灌区节水存在诸多理论与实际问题。尽管河套灌区曾有过完整的规划,但由于资金投入不足,一些规划工程没有完成,而已建工程的老化失修给管理工作带来很多不利;渠道渗漏严重,渠系水有效利用系数仅为 0.42。由于灌水技术落后,灌溉水的有效利用系数更是低至 0.3,世界银行贷款项目区外的区域骨干排水系统尚未达标,田间配套工程尚未建设,灌区次生盐碱化威胁并未根除,目前灌区仍有一半耕地属中、低产田;更为严重的是对节水没有明确的要求和保证措施,在水源充足时,浪费水的现象十分严重,而在水源不足的季节,由于没有科学的节水措施,很多农田得不到及时的灌溉,造成减产。黄河的连年断流使国家觉察到问题的严重性,只有对黄河水资源量入为出的开发利用,进行优化配置,才有望扭

转黄河变成内陆河的危险倾向。保证灌区的生产水平,改造盐碱化土地并保持生态环境的良性循环和可持续发展,是河套灌区续建配套节水设施,进行改造规划的核心内容。河套灌区节水改造完成后,引黄水量将减少 20%,一些研究人员(刘静等,1999;任树梅等,2000;李茂等,2001)提出了相应的对策,如改进和完善工程措施,进行以渠系防渗为中心的技术改造;开发利用地下水,利用井灌,推广非充分灌溉;合理确定作物种植比例和灌溉定额及推广先进的灌溉技术等。几乎所有的措施都包括渠道衬砌防渗,提高渠系的有效利用系数。有计算表明,河套灌区实施渠道衬砌后,渠系水利用系数将从 0.43 提高到 0.66,渗漏损失量由 29.64 亿 m^3 减少到 13.6 亿 m^3 ,仅输水系统就减少损失量 16.04 亿 m^3 。尽管渠系输水损失的减小是实行节水改造的必要手段,但是在河套灌区全面进行渠道衬砌明显是不现实的,首先,尽管在衬砌的冻胀问题上进行了大量的实验和研究,但是该问题仍然没有得到彻底解决,此外,工程投资,尤其是衬砌工程的维护投资将直接限制渠道衬砌规模。再者,研究表明,内蒙古河套灌区地下水补给来源主要是黄河引水量补给,渠道衬砌后,地下水补给量减小,将直接影响地下水的开采利用,地下水位下降将会产生一系列的生态问题。

先进灌水技术(如微灌、喷灌和管灌等)与地面灌水技术相比,可以人为地控制水量,对作物进行适时灌溉,不产生地表径流和深层渗漏。但是在河套灌区,先进的节水灌溉措施并没有得到推广,主要原因在于节水改造前,黄河水比较便宜,而微灌、喷灌和管灌等建设费和运行费都比地面灌溉高得多,维护和管理费用也很多,另外,微灌、喷灌对灌溉水质要求较高,而黄河水多年平均含沙量为 $3.1\text{kg}/\text{m}^3$,地下水适合进行微灌、喷灌的面积仅占河套灌区面积的 $1/3$,并且引黄灌溉水是其主要的补给来源,还必须做到采补平衡,这样就需要微灌、喷灌与渠灌相结合,可能会造成设备的利用率偏低。此外,内蒙古强烈的蒸发和生育季节多风,使喷灌的蒸发和漂移损失增大,是否具有节水效果还存在一定的争议。

由于河套灌区是一首制灌区,灌区面积很大,上游和下游对于灌水时间都有比较严格的要求,土地又很不平整,相对而言,地多人少,缺乏机械化作业的手段和条件,大水漫灌还是比较普遍的现象。

现阶段河套灌区所进行的节水改造措施主要是渠道的衬砌防渗,其他灌区的改造也与之类似(王国汉等,2001;汪富贵等,2001),多年来对于渠道防渗技术和渠道防冻胀技术开展了大量的研究,取得了大量的成果。其他措施(如咸水利用、井渠结合等)也都进行过一些探索,但实际效果仍有待进一步的研究。针对节水改造所进行的示范工程主要集中在水源开发技术,输配水技术和田间用水管理等方面。而在田间节水技术、作物生理节水技术,尤其是节水灌溉的环境影响效应、节水灌溉的环境效应检测和评价技术等方面所开展研究相对比较少。

节水灌溉对环境的影响有有利的和不利的两个方面。就不利的方面而言,节