



灌区水生态修复 和不同尺度灌区水资源问题研究

赵振国 刘丽 黄修桥 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

灌区水生态修复 和不同尺度灌区水资源问题研究

赵振国 刘丽 黄修桥 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共7章,通过理论探析和不同尺度水资源问题研究,采用软件和硬件相结合的方法,建立了灌区水资源问题完整的理论和技术体系;通过灌区水生态诊断和退化机理研究,结合人工湿地研究,提出了灌区水生态修复的理论和技术体系。这对于灌区的水资源调度和水生态的理论及实践,具有重要的意义。

本书可作为农业水土工程专业本科生教材,也可供水文学及水资源和农业水土工程研究生作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

灌区水生态修复和不同尺度灌区水资源问题研究 / 赵振国, 刘丽, 黄修桥著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.7

ISBN 978-7-5170-1035-7

I. ①灌… II. ①赵… ②刘… ③黄… III. ①灌区—水环境—生态恢复—研究②灌区—水资源—研究 IV. ①S274

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第154883号

书 名	灌区水生态修复和不同尺度灌区水资源问题研究
作 者	赵振国 刘 丽 黄修桥 著
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	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 12.5印张 204千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	35.00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

| 前言 |

虽然灌溉农业面积不到作物种植总面积的 20%，但产量却占到粮食总产量的 40%~45%。水资源短缺地区灌溉要求对水资源进行优化调度，调度中还要考虑到水生态问题。本书针对灌区水资源和水生态问题进行深入研究，力求建立生态友好的灌区运行模式。

本书应用计算机领域可信概念及其理论，提出了灌区水资源可信调度的概念；根据宏观和微观相结合等原则，阐述了不同尺度灌区水资源问题研究的内容。在空间分辨率为 30 弧分的全球范围内，运用 GEPIC 模型估计了全球范围灌溉对增加作物产量的作用，得出了全球不同地区小麦产量的高低对灌溉的依赖性；为水利决策部门运用大范围区域上的信息来制定水和粮食政策提供了可靠依据，解决了灌区水资源调度的必要性问题。在研究典型灌区生态系统的结构与功能的基础上，根据引黄灌区水循环特点，设计以水文特征、水环境状况、泥沙状况、盐碱化状况等表征灌区水生态健康状况的指标体系。着重分析了引黄水文情势、灌区盐碱化变化情况及规律等重要水生态问题。采用 Pearson 相关分析法，对灌区生态系统的退化机理进行了研究。针对多级配水过程，采用逐级分解协调的方法，进行灌区灌溉水资源调度，得出了灌区主要农作物适宜灌水模式和灌溉制度。根据人民胜利渠灌区的基本情况和运行特点，确立

了调控地下水水位为解决灌区地下水与地表水联合运用问题的主线。研制了集信息采集、数据分析、优化调度和可视化操作于一体的分布式人机交互多水源联合调度智能监控系统。以人民胜利渠灌区为例,建立了多层次模糊综合评价模型来评价大型灌区水资源承载力。建立了灌溉水入渗的土壤水—地下水转换过程及相应的数学模型,对土壤水分深层渗漏进行了研究;建立了地下水优化管理模型,对地下水进行优化。以实验为基础,对人工湿地系统去除面源污染的总体净化效率、植物优选和运行参数精确调控等方面进行了研究。

本书第1章、第3章、第6章、第7章由赵振国编写,第2章、第5章由刘丽编写,第4章由黄修桥编写。

本书得到“十二五”国家科技支撑计划(项目编号:2011BAD25B01)、华北水利水电学院高层次人才引进资助项目(项目编号:201248)和河南省教育厅科学技术重点研究项目(项目编号:13A570704)的资助,在此深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年6月1日

于郑州

| 目录 |

前言

第 1 章 绪论 /1

- 1.1 研究背景与意义 /1
- 1.2 国内外研究现状及发展趋势 /3
- 1.3 灌区水资源调度理论探析 /14
- 1.4 全球尺度小麦主产区灌溉必要性研究初步尝试 /22

第 2 章 灌区尺度水生态诊断和退化机理初探 /35

- 2.1 灌区水生态系统的结构与功能 /35
- 2.2 灌区退化的表征指标 /37
- 2.3 灌区水生态问题诊断——以人民胜利渠灌区为例 /39
- 2.4 灌区水生态退化机理初探 /57

第 3 章 灌区尺度水资源调度研究 /62

- 3.1 灌区尺度水资源调度研究方法 /62
- 3.2 大系统分解协调理论 /64
- 3.3 地表水与地下水联合运用基本原则 /64
- 3.4 人民胜利渠灌区水资源优化分配模型及其应用 /71

第4章 灌区尺度水资源承载力模糊综合评价模型 /89

4.1 灌区水资源承载力模糊综合评价模型的建立 /89

4.2 人民胜利渠灌区水资源承载力的评价 /93

第5章 试验小区尺度井灌区地下水资源优化管理 /105

5.1 研究区背景 /105

5.2 土壤水分深层渗漏的研究 /106

5.3 井灌区地下水位动态与水文地质参数求解 /110

5.4 井灌区地下水位动态模拟 /111

5.5 地下水位与其影响因素的关系 /112

5.6 地下水优化管理模型 /117

第6章 试验小区尺度水资源调度系统研制 /127

6.1 灌区地下水与地表水联合调度数值模拟和运用技术研究 /127

6.2 灌区地下水与地表水联合调度智能监控系统的研制 /135

第7章 人工湿地去除灌区退水面源污染方法和效率研究 /144

7.1 人工湿地构建方法 /144

7.2 湿地系统来水水量水质分析 /150

7.3 人工湿地系统总体净化效率 /152

7.4 潜流人工湿地参数精确调控 /154

7.5 虹吸实验加大流量去除效果 /169

7.6 小结 /172

参考文献 /174

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 我国的水资源问题

人类可利用的淡水资源仅占地球全部水资源极小的一部分，水是生物界必须的资源，具有不可替代的特殊属性。人类的发展更需要水资源的支撑，没有水就没有人类文明的明天和人类社会的进步。虽然淡水资源的总量很大，但是可供人类利用的却极其短缺，人类农业、工业等产业的发展需要对有限的可利用水资源进行有计划的合理利用。

随着经济社会的发展和人类人口的急剧膨胀，人类对水资源的依赖性越来越强。同时由于工业革命以来人类社会的耕作方法的改变以及工业产品的生产，改变了水资源中的各类元素的天然含量，地表水和地下水污染越来越严重，造成水资源的可利用量进一步缩减。水资源不仅短缺和污染严重，而且由于降雨的随机性，有时又



会造成洪涝灾害。因此,水资源的问题已引起全世界的普遍关注。

我国是一个水资源严重短缺的国家,人均水资源占有量 2300m^3 ,排世界第109位,仅为世界平均水平的 $1/4$ 。根据用水现状分析,全国总缺水量在300亿 m^3 以上,属世界13个贫水国家之一。水资源总量不足是我国基本国情,成为我国和谐稳定发展的重要制约因素。

我国水资源短缺,一方面是因为水资源总量不足;另一方面,则是我们从管理到技术层面均未合理解决的水浪费问题。农业渠系水利用系数不到0.5,灌溉水利用率低;配套工程老化,不少灌区达不到设计灌溉面积,经济作物的用水效率与以色列等国相比也有较大差距。我国工业以制造业为主,但是有很多低水平工业,耗水量非常大,水的循环利用效率低下,造成水的浪费。

井渠结合灌溉是我国华北大部分灌区的主要灌溉模式,井渠结合灌溉要求对地表水和地下水进行联合调度,调度中还要考虑到水生态问题。地表水和地下水具有不同的水资源特征,两者之间还可以相互转化,这些特点决定了灌区水资源高效利用的难度。本书对灌区水资源联合调度进行深入研究,通过理论探析,不同尺度水资源问题研究,采用软件和硬件相结合的方法建立了灌区水资源联合调度完整的理论和技术体系,对于华北地区井渠结合灌区的水资源调度的理论和实践具有非常重要的意义。

1.1.2 解决水资源问题的途径

针对我国水资源问题,需要根据我国水资源的特点,理清我国水资源调配的思路。索丽生(2002)提出了现代水利的新概念,治水首先需要考虑的是水资源的可持续性,即水资源的问题关系到国

家经济的发展和社会的稳定,需要通过水资源特性分析,水资源时空分布,采取比如南水北调等工程和非工程措施,满足不同地区的用水需求,达到水与经济社会的和谐。汪恕诚(2002)阐述了水资源承载力研究的重要性,指出需要改革我国现有的经济结构,在水资源状况较好的地区采取一种经济发展模式,在水资源紧缺地区应该调整经济行业组成,推进水利和经济社会的协调发展。水污染的治理也是水资源利用的关键问题,采取何种方式加强河流、湖泊的水污染治理,工业、农业点源和面源污染治理,以达到水的循环利用。应该统筹城市与农村等各方面的关系,提高区域和流域水资源的利用效率,实现水资源开发利用的可持续发展,建设资源节约型、生态友好型社会。陈雷(2009)指出信息革命是第三次工业革命,信息技术可以加强水资源的配置精度和准度。水利需要信息化,也必须信息化,水利信息化包括水资源的联合调度、山丘区洪水预报预警、水利工程监控系统、水污染监测系统、灌溉智能管理系统,等等,最终目标要实现各类信息的共享和交流,实现水资源和水利工程的管理现代化,提高水利为国民经济和社会发展服务的能力和水平。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 灌区地表水地下水联合调度研究现状

1.2.1.1 国外研究现状

对于地表水地下水联合调度,国外已有较深入的研究,通过建立各类的优化模型来解决调度问题,建模方法多种多样。



系统工程应用于水资源系统,始于20世纪50年代中期,首先是在美国,随着电子计算机技术的发展,使系统思想方法的具体实现得到了较快的发展。

Richard Bellman (1957) 提出了动态规划,以逆推的方法进行多阶段决策的求解; M. Heidari 等 (1971), 提出离散微分动态规划法, 解决动态规划所带来的“维数灾”问题; H. R. Howwson (1975) 提出渐近优化算法, Mozden (1975) 提出双状态动态规划法, 也用于解决动态规划所带来的“维数灾”问题。

N. Buras 等 (1961), 用动态规划建立了一个地表水和地下水联合运用的模型, 把水资源利用量分成地表水和地下水两种, 进行优化分配, 但计算中未考虑地表水和地下水之间的物理转换关系。Johnson 等 (1973) 把动态规划与模拟技术结合起来, 确定地表水与地下水联合系统的地表水库和地下水库最优容积。Chaudnry (1973) 利用多层优化技术, 确定地表水库库容, 渠道给水能力、抽水容量的最优化组合等。

Dracup (1966) 应用参数线性规划确定外引水、地表水、地下水、回收废水等四种水源在城市生活、工业、农业及回灌用水之间的优化分配。后续研究主要集中在各类模型的建模方法和模型处理方法上。Maddock (1974) 提出随机来水与回灌、污水处理及抽水的二次规划管理模型。Young 等 (1972) 提出了将水文过程和经济过程结合起来, 建立模拟模型。“交互式模型方法”在这一时期得到长足进展, 比如小区的优化运行模型作为第一层优化, 各类水量分配作为第二层优化。

20 世纪 90 年代以来, 水质水量统一调度提上日程, 对于水环境效益和水质问题主要以水质约束作为处理问题的方法。其中包括地

下水水质水量管理模型、灌溉系统线性规划模型以及水质运移的滞后作用分析、地表水地下水的处理费用分析、地下水恶化的防治措施、污水和地表水以及地下水等多种水源的管理模型、污水排放模糊优化模型。这类模型在一定程度上体现了水质水量统一优化配置的思想,有些采用水力梯度作为约束来控制污染扩散,体现了水资源利用和水资源保护之间的关系,模型中考虑了不同用水部门对水质的不同要求,在需水预测中充分考虑了未来经济社会的发展规划和目标,提出流域水质管理经济上和技术上可行的方案。

21 世纪以来,新的优化(进化)算法[遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、基因算法和灰色模拟等]不断地引入水资源管理模型中。

灌区农作物间的最优水量分配的研究主要是在种植比例确定的情况下确定灌溉制度或者在水源不足情况下的经济灌溉定额,以及已知灌溉制度的情况下进行种植比例的优选等。目前采用较多的是线性规划模型(LP)求解。研究中有有的将作物全生育期水分生产函数分为若干段,有的在水分生产函数中考虑灌水均匀度对产量的影响,或者一定水量下求作物最优种植面积。比如 NLP 模型用于求解作物最优布局问题,确定缺水条件下的最优作物布局,确定不同效益费用比时某种作物的最优种植面积。

后期的模型开始考虑非充分灌溉条件下的问题,就是将有限的水资源进行分配,得出最优灌溉制度,其中以 J. L. Teixeira 及 L. S. Pereira (1997) 的 ISAREG 模型为代表,通过计算机模拟农田根层土壤水循环。求解方法用得比较多的是动态规划(DP)或随机动态规划(SDP)模型求解。模型如果将非线性规划目标采用方法线性化,也可以利用线性规划(LP)得出结果。



1.2.1.2 国内研究现状

我国的水资源联合调度是以国外的相关研究借鉴为基础,但发展迅速。水资源联合调度以水库最优运用问题开始,进入20世纪80年代以后,我国系统地开展了水资源优化配置和灌区水资源调度研究,比如内蒙古河套灌区永联试区的大系统谱系模型,区域水资源供需协调模型,大系统分解协调模型,等等。有的采用动态规划确定作物的灌水定额及灌水次数,有的以水资源系统为研究对象,采用水资源供水、需水、污水处理三大系统分解协调方法,并利用计算机的数据处理功能求解。

谢金荣等(1990),正确处理了基础数据分析研究与采用新的计算方法的关系。加强了三水转化的观测和机理的试验研究,把降雨、地表水和地下水资源与水质进行统一综合评价,提高了水资源评价的科学性。在研究中,注意采用了系统分析的新思路新方法,对重点地区和城市的水资源优化,引入了水资源系统分析理论,采用了优化调度、优化规划和决策模型的研究方法。

郭元裕等(1994),注意吸收和介绍国外水资源系统分析方面的先进科学技术,总结了各种系统分析的理论和技术,具体说明了对应于灌排工程的系统分析的方法和步骤。

许宜新等(1997),充分利用已经取得的成果,根据20世纪90年代以来的社会主义市场经济特点,将宏观经济研究与水资源研究结合起来,初步形成基于宏观经济的区域水资源优化配置理论;用可持续发展的观点,将决策理论与区域水资源规划实践结合起来,形成水资源优化配置方法;利用系统工程方法和先进的计算机技术,用优化与模拟技术相结合的定量手段及定性分析与定量计算相结合的综合集成方法,建立充分体现宏观经济水资源规划和水资源优化

配置方法论的区域水资源优化配置决策支持系统。以决策支持系统为工具,对水资源的现状及发展趋势进行分析研究,并说明针对水资源短缺的对策措施及相应工程方案。

常炳炎等(1998),进行了黄河流域水资源合理分配和优化调度研究。在模型运算及方案分析中尽量反映水资源配置的复杂情况,对于引水与回归水、地表水与地下水参与平衡问题,不同工程条件下多水源、多用户的供水顺序问题等进行了深入的研究。

“十五”期间,在国家重大科技产业工程示范项目和国家“863”重大专项以及重大科技攻关项目的支持下,齐学斌等(1999)对井渠结合灌溉类型区的农业高效用水模式、节水农业综合技术体系、水资源联合调控与保护技术等开展了专项研究,在“水资源优化调度、配置与保护技术”、“井渠结合灌溉类型区农业高效用水模式”、“地下水限量开采无线自动控制系统的研制”和“水资源联合调控与保护技术”等方面取得了许多有价值的研究成果。

邱林等(2003),以可持续发展理论为指导,以区域水资源的可持续利用为目标,研究了水文预报方法,提出了区域农业水资源的评价理论及方法,进行了半结构多目标优化多层指标划分的方法探讨及应用研究,以上述理论研究为依据,开发了灌区水资源管理软件。

灌区水资源联合供水,统一调度,是把所有可利用的灌区满足水质要求的水资源进行合理的利用,并考虑生态环境问题。在丰水年,根据地表水多于多年平均的特点,应该多利用地表水,使地下水得到一定的补充。在枯水年,有时必须多利用地下水,地下水可以超过多年平均的可开采水量,在丰水年再补充。这样从多年情况看,虽未增加新的水源工程(增加的只是供水工程),而水资源的可



利用量和供水保证率却是大大地增加和提高了。

灌区水资源联合调度目标函数的选取一般是灌区灌溉净效益最大, 后来, 生态和社会等方面的目标开始逐步列入, 也有其他类型目标, 比如以灌区全部地块综合平均产量最大为目标。建立的模型从线性规划 (LP) 模型发展到 NLP - DP 模型、模糊动态规划模型、二维单增量搜索动态规划模型、LP - DP 模型, 其中以 LP - DP 模型应用最多。

姚崇仁 (1989) 运用 LP 模型, 用于求解限额供水时作物水量分配。袁宏源等 (1984, 1991), 用 NLP - DP 模型求解了多作物间水量优化分配问题。曾赛星 (1991) 较早应用 LP - DP 模型解决井渠结合灌区灌溉问题。对于不同水源进行统一考虑, 以月为单位对水资源在作物之间进行配水, 以达到优化的目标。

黄宝全、沈菊艳 (1992) 运用 Tensen 模型计算不同供水情况下的作物产量, 对地表水、地下水和降雨等水资源统一调度, 实现小麦、玉米、水稻、棉花等作物间水量优化, 并对水资源的年内分配进行了研究, 力求达到水资源年内优化分配。

康绍忠等 (1999) 将大系统分解协调和模糊技术结合起来, 建立了包括经济目标、生态目标和社会目标的多目标渠灌区水资源优化调度模型, 在模型求解时, 将生态目标和社会目标处理成约束条件, 采用单目标解法进行求解。

程吉林等 (1996) 在研究缺水、干旱地区的地面水、地下水联合调度的非线性数学模型求解问题时, 采用试验选优方法和其他优化方法相结合求解, 并与传统的近似规划的求解方法比较, 可在一定程度上节省计算机 CPU 的占用时间, 为求解大型复杂的非线性系统优化问题提供了一条新的途径。

徐建新（2000）采用动态规划方法进行了已定种植结构下，作物水量优化分配及渠系实时灌溉的研究，并研制了相应的软件程序。

20 世纪 90 年代中后期，灌区水资源调度开始引入模糊理论，认识到各阶段灌水量对产量影响的模糊性，考虑了时间提前或推后对产量的影响和主要农作物水分生产函数，考虑来水和降雨的随机性，以非充分灌溉的试验资料为基础，通过二维动态规划模型、LP—SDP 模型、随机动态规划模型等进行冬小麦的最优灌溉制度、水稻优化灌溉制度等非充分灌溉制度的设计。

1.2.1.3 存在的问题及发展趋势

纵观国内外地表水地下水联合调度研究进展，水资源联合调度的理论基础已经明确，研究方法以建立线性、非线性的单目标和多目标模型为主，研究尺度集中于区域（流域），大尺度研究较少，水资源配置模型的求解应用了大量优化算法，但是从可持续发展思想审视已有研究成果，尚存在如下不足。

（1）系统模型缺乏实用性。现有水资源联合调度模型具有重要的生产指导意义，但是由于模型建立过程进行了大量的概化处理，在配水实践中难于应用，不能真正达到水资源实时调度。对生态环境的研究处于初级阶段，一般以地下水允许开采量为约束，对于地表水和地下水转化过程和长期影响研究仅限于定性研究，未上升到定量研究的高度，使得现阶段水资源的调度模型对水资源的时空长期变化趋势无法探明。

（2）国内外学者在中长期灌溉制度的研究上虽然已取得了不少成果，但通过模型求解得出的灌溉制度与实际之间仍有很大的距离，因为降雨的随机性，使得准确得出何时灌水、灌多少水成为模型无法解决的问题。随着信息技术的发展和天气中长期预报的精度提高，



使得在中长期灌溉制度指导的基础上,软硬件结合的实时灌溉系统研究成为可能。

人水和谐要求水资源能够保证经济社会的可持续发展,同时经济社会的可持续发展要处理好需水和供水平衡以及水环境问题。因此,如何从理论和技术上体现人水和谐的思想,体现水资源的优水优用、劣水劣用的分质供水的思想,建立以生态友好为原则,可持续发展和人水和谐理论为指导的多水源多用户地表水地下水联合调度模型,以使水资源满足经济、社会的发展目标,已成为面向可持续发展的地表水、地下水联合调度理论的研究目标。

综上所述,灌区水资源优化配置研究中,软件和硬件结合的灌区地表水、地下水调度理论和技术体系应该进一步研究,本书在这方面进行了初步尝试。

1.2.2 灌区水生态修复研究现状

1.2.2.1 国外研究现状

水生态构建与修复已经变成了一个世界现象,并成为一种快速发展的产业。水生态修复从20世纪70年代从德国开始。瑞士、奥地利等也随之颁布法规进行生态修复的尝试。其中,在2000年,欧洲颁布了《欧洲水框架条令》,明确了整个欧洲水生态修复的目标和分阶段的实施方法。除欧洲外,其他许多国家也进行了大量的水生态修复的尝试。澳大利亚于1993年启动了“国家水生态健康项目”,美国更是从1990年起年投资10亿美元以上用于水生态修复。日本将河流、水库和海岸作为水生态修复的重点,其中河流生态修复覆盖了全国大部分的河流。可以说,近20年是国际水生态构建与修复实践发展速度最快的时代。