

灌区水资源可持续利用 规划理论与实践

徐淑琴 付强 王晓岩 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

2490637

灌区水资源可持续利用 规划理论与实践

徐淑琴 付强 王晓岩 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书结合我国灌区水资源规划的需求和现状, 基于可持续发展的观点, 通过田间试验与现代建模技术相结合的方法, 分析灌区尺度范围内水资源规划所涉及的主要问题。

主要内容包括: 调亏灌溉条件下水稻需水规律; 水稻水分生产函数及优化灌溉制度的试验方案及分析方法; 灌区水资源供需水量与动态变化过程及预测方法; 灌区水资源优化配置及承载能力理论与技术; 水资源规划的评价指标体系及评价方法等。

本书可供水利、农业、资源、环境等部门的规划、设计、科研、管理人员以及大专院校的有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

灌区水资源可持续利用规划理论与实践 / 徐淑琴, 付强, 王晓岩著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5084-8178-4

I. ①灌… II. ①徐… ②付… ③王… III. ①灌区—水资源—资源利用—可持续发展—研究—中国 IV. ①S274②TV213.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第245209号

书 名	灌区水资源可持续利用规划理论与实践
作 者	徐淑琴 付强 王晓岩 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 11.5印张 273千字
版 次	2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	40.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

灌区水资源系统是一个由地区政治、经济、资源和环境等要素组成的复杂大系统。在我国水资源日益短缺，农业灌溉用水不能增加，而粮食需增收的背景下，如何将有限的水资源在灌区各用水部门间、不同作物间以及作物不同生育期内优化配置，使水资源利用率和水分生产率进一步提高，这些已越来越成为农田灌溉领域和水资源领域的研究热点。基于灌区特点，实现水资源的合理开发、节约、保护与高效利用，具有客观必要性和现实紧迫性。为此，研究灌区水资源可持续利用规划问题，对地区农业可持续发展具有重要的理论和应用价值。

本书通过田间试验与现代建模技术相结合的方法，分析灌区尺度范围内水资源规划所涉及的主要问题。主要内容包括：调亏灌溉条件下水稻需水规律；水稻水分生产函数及优化灌溉制度的试验方案及分析方法；灌溉控制指标体系的组成；灌区水资源供需水量与动态变化过程及预测方法；灌区内河道生态环境需水量计算方法；水资源优化配置理论与技术；水资源承载能力理论与技术；水资源规划的评价指标体系及评价方法等。并侧重分析了如下问题。

1. 灌区水资源可持续利用规划理论与技术

我国在灌区水资源高效利用调控理论与技术方面已做了一系列探索性研究，但大多侧重于区域水资源可持续利用评价方法等研究。本书在借鉴前人研究成果的基础上，对灌区尺度的水资源可持续利用规划的内涵、规划原则、评价指标等进行了归纳和论述。

对灌区从水源取水到渠系输配水、从田间供水到农田用水等的一体化高效健康利用水资源的调控应用技术的研究十分必要。本书在吸纳前人研究成果的基础上，探讨了从水源到田间效率性节水和资源性节水的全过程。并提出了在资源性节水方面调亏灌溉与叶龄判断生育进程相结合的方法及指标。

2. 灌区水资源可持续利用规划计算方法

本书结合灌区水资源规划实例，应用符合当地条件的建模技术求解问题。如在水资源预测中应用时间序列小波消糙方法、小波神经网络方法等，在水

稻水分胁迫影响生育指标的评价中应用基于加速遗传算法的投影寻踪方法，在水稻生育期灌溉水量分配中应用了加速遗传算法，在水资源配置中应用了多目标分析以及大系统分解协调方法，在水资源承载力和可持续性评价中应用了层次分析确定指标权重的多因素模糊综合评判方法。

本书的资料主要取自笔者博士论文中的相关内容和近年来笔者在灌区水资源开发利用以及节水灌溉等方面研究成果，书中基本资料的收集和试验工作得到了查哈阳灌区管理局诸多水利同仁和朋友的支持和帮助。另外，本书也参考和借鉴了国内外有关论著的基本观点。

本书出版得到黑龙江省科技攻关项目（GB06B106—7）、黑龙江省农垦总局科技攻关项目（HNKSV—13—7）、东北农业大学科技创新团队项目（CXT001—2—4）、黑龙江省教育厅科学技术研究项目（11551044）联合资助。

由于笔者水平有限，错误和不足之处在所难免，恳请专家和读者不吝指正。

该书属“河海大学研究生教育创新计划系列教学用书”。

徐淑琴

2010年6月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究动态及实践状况	2
1.2.1 研究动态	3
1.2.2 我国目前理论研究和实践中尚需解决的问题	8
1.3 本书的主要内容、研究方法和技术路线	9
1.3.1 本书的主要内容	9
1.3.2 研究方法和技术路线	11
1.4 研究区的基本情况	11
1.4.1 自然气象	11
1.4.2 河流水系	11
1.4.3 水资源条件	13
1.4.4 社会经济和农业生产状况	14
1.4.5 水资源开发利用现状	14
第 2 章 灌区水资源可持续利用规划理论基本内涵	15
2.1 水资源及水资源规划概念的界定	15
2.2 灌区水资源可持续利用规划的理论基础	16
2.2.1 可持续发展理论概述	16
2.2.2 国内外可持续发展指标体系构成	19
2.3 灌区水资源可持续利用规划的内容和原则	21
2.3.1 灌区及其水资源规划的主要内容	21
2.3.2 基于可持续发展的灌区水资源规划原则	21
2.4 灌区水资源可持续利用规划评价指标体系	22
2.4.1 建立评价指标体系的原则	22
2.4.2 水资源可持续利用规划的评价对象及指标	23
2.4.3 评价指标体系的构建	24
2.4.4 指标体系构成	24
2.5 本章小结	26

第 3 章 灌区水资源评价及预测	27
3.1 灌区水资源评价	27
3.1.1 评价指标	27
3.1.2 降水资源	28
3.1.3 地表水资源量	29
3.1.4 地下水资源量	30
3.1.5 灌区水资源可利用量评价	31
3.2 基于小波消噪时序模型的地下水位动态预测	32
3.2.1 水文序列的小波消噪	32
3.2.2 建立时序模型	32
3.2.3 实例应用	34
3.2.4 结果分析	37
3.3 基于季节性时序模型的生育期降雨动态预测	37
3.3.1 季节性时序模型的建立	37
3.3.2 实例应用	38
3.4 基于小波神经网络模型的河川径流量动态预测	43
3.4.1 快速小波变换算法	43
3.4.2 小波神经网络模型 (WNN)	43
3.4.3 实例应用	44
3.5 本章小结	47
第 4 章 灌区水稻需水规律及水分生产函数	48
4.1 作物需水量与水分胁迫	48
4.1.1 作物需水量及耗水量	48
4.1.2 水分胁迫对作物的影响	51
4.1.3 调亏灌溉的理论基础	52
4.2 水稻灌溉试验设计	54
4.2.1 试验区概况	54
4.2.2 试验设计	54
4.2.3 试验观测内容及方法	57
4.2.4 农艺配套措施	58
4.3 水稻需水规律与需水量	58
4.3.1 充分灌溉条件下的需水规律	58
4.3.2 不同水分处理条件下的蒸发蒸腾规律	59
4.3.3 测筒水稻棵间蒸发强度及变化规律	60
4.3.4 小区水稻耗水强度及变化规律	61

4.4	试验区水稻光合速率变化规律	61
4.4.1	水稻各生育期净光合速率变化分析	61
4.4.2	水稻全生育期光合速率规律分析	64
4.5	水稻不同生育期水分胁迫对其生长特性及产量的影响	65
4.5.1	水稻各受旱处理生育指标实测值	65
4.5.2	不同程度的水分胁迫对水稻分蘖特性与分蘖成穗的影响	66
4.5.3	不同生育期不同程度水分胁迫对水稻株高的影响	66
4.5.4	不同生育期不同程度水分胁迫对千粒重的影响	66
4.5.5	不同生育期不同程度水分胁迫对水稻产量的影响	66
4.5.6	用 RAGA 的 PPC 模型评价水分胁迫对水稻生育及产量的综合影响	67
4.6	灌区水稻水分生产函数	70
4.6.1	作物水分生产函数概念	70
4.6.2	静态作物水分生产函数的数学模型简介	71
4.6.3	基于最小二乘法的静态模型求解	74
4.7	本章小结	78
第 5 章	灌区农作物灌溉制度	80
5.1	旱作物充分灌溉条件下需水量和灌溉制度	80
5.1.1	灌区主要旱作物需水规律	80
5.1.2	喷灌条件下旱作物充分灌溉制度	81
5.2	水稻充分灌溉条件下的耗水量和灌溉制度	82
5.2.1	灌区水稻逐日耗水量	82
5.2.2	水稻充分灌溉制度	85
5.3	基于加速遗传算法推求水稻非充分灌溉制度	85
5.3.1	基于产量最大的非线性规划模型	85
5.3.2	基于单位面积经济效益最大的动态规划模型	86
5.3.3	模型求解方法	88
5.3.4	求解结果及分析	88
5.4	水稻调亏灌溉的控制指标体系	92
5.4.1	叶龄模式与调亏灌溉组合	92
5.4.2	调亏阶段和调亏程度	94
5.5	本章小结	94
第 6 章	灌区用水现状及需水预测	95
6.1	灌区用水现状	95
6.1.1	旱田用水量调查分析	95

6.1.2	水田用水量调查分析	98
6.1.3	其他各行业用水量调查分析	99
6.1.4	总用水量分析	100
6.2	灌区生态环境需水预测	100
6.2.1	生态环境需水的内涵	100
6.2.2	生态环境需水的特性	101
6.2.3	灌区生态环境需水计算	102
6.3	农业需水预测	106
6.3.1	灌溉定额预测	106
6.3.2	农业需水总量	107
6.4	其他各业需水预测	108
6.4.1	工业需水预测	108
6.4.2	城乡居民生活需水预测	108
6.4.3	牲畜需水预测	108
6.4.4	总需水量	109
6.5	本章小结	109
第7章	灌区输配水技术方案研究	111
7.1	寒区渠道防渗方案的优化模式	111
7.1.1	渠道衬砌冻胀破坏的机理和防治措施	111
7.1.2	渠道防渗材料的选择	113
7.1.3	寒区渠道防渗工程结构形式	115
7.1.4	防渗模式的效果	117
7.1.5	基于模糊综合评判法的寒区渠道防渗工程优化组合模式	118
7.1.6	渠道防渗方案优选结果	122
7.2	旱田喷灌机选型	123
7.2.1	灌区常用喷灌机的类型与配套动力	123
7.2.2	基于投影寻踪主成分分析模型的旱田喷灌机选型	125
7.2.3	旱田喷灌机选型结果	128
7.3	本章小结	128
第8章	灌区水资源优化配置研究	129
8.1	水资源优化配置理论	129
8.1.1	基本概念	129
8.1.2	配置原则	130
8.1.3	配置方式	130
8.1.4	配置形式	131

8.1.5	水资源优化配置机理	131
8.2	基于灌区水资源承载能力的多目标优化配置模型	133
8.2.1	多目标决策模型的基本概念	133
8.2.2	多目标决策模型的优化技术	134
8.2.3	模型的建立	135
8.2.4	模型求解	136
8.2.5	实例分析	137
8.3	基于遗传算法的灌区水资源大系统分解——协调模型	142
8.3.1	大系统分解——协调理论概述	142
8.3.2	灌区水资源优化配置模型的建立	143
8.3.3	实例分析	146
8.4	本章小结	151
第9章	灌区水资源承载能力与可持续性评价	152
9.1	灌区水资源承载能力的多级模糊综合评判	152
9.1.1	理论基础	152
9.1.2	模型的建立	153
9.1.3	评判因素的选取、分级和评分	153
9.1.4	评判矩阵 R 的计算	154
9.1.5	综合评价	155
9.1.6	评价结果分析	158
9.2	灌区水资源规划方案的可持续性评价	158
9.2.1	基于层次分析法 (AHP) 的评价指标权重	158
9.2.2	量化指标的选取	161
9.2.3	判断矩阵的构造与计算	161
9.2.4	评价指标的赋分标准	164
9.2.5	评价结果排序	166
9.3	本章小结	167
第10章	结论	168
10.1	研究结论	168
10.2	研究的创新点	169
10.3	今后工作设想	170
	主要参考文献	171

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

人口、资源、环境、生态是当今世界面临的四大问题。水是一种重要的自然资源，它不仅是人类赖以生存的不可替代的保障资源，而且是经济发展不可缺少的物质基础，也是生态环境维持正常状态的基本要素。过去，水资源的开发利用在很大程度上是粗放型的，随着生产力的发展，愈加暴露出了这种开发模式与社会经济、环境生态的不协调性，如河道断流、地下水漏斗加大、土壤沙化、水体污染、水资源利用率低下等。

随着社会经济的快速发展、人口的日益增加、人民生活水平的不断提高，人类社会对水资源的数量和质量都提出了越来越高的要求。如果水不能可持续利用，人类将无法生存，更谈不上社会经济的持续、稳定发展。在 1987 年世界环境与发展委员会发表的报告《我们的共同未来》一文中指出：人们可以期待一个经济发展的新时代的到来，这一新时代必须建立在使资源环境得以持续发展的基础上，既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成威胁。现在，可持续发展已作为全球的基本发展战略和行动指南，成为 21 世纪全人类的共同选择。发展是人类永恒的主题，可持续发展就是要求人类在发展中实现社会与自然的协调，其核心问题是保证自然资源的可持续利用。水利部也明确提出了我国 21 世纪治水的新思路，就是要实现由“工程水利”向“资源水利”的转变，由“传统水利”向“现代水利、可持续发展水利”的转变。可见“可持续发展”的思想将推进水资源的开发和管理，并由此构成未来水资源利用的新理论。

水资源可持续利用是可持续发展理论用于可再生资源的具体体现，是可持续发展框架下水资源利用的一种新模式。水资源可持续利用的目的是在维持水资源的持续性和生态系统完备性的前提下，支持人口、资源、环境与社会经济协调发展和满足代内、代际用水需要的全过程，是水资源开发利用、保护和综合管理一体化的最合理利用方式。自 20 世纪 90 年代以来，国内外开始水资源可持续利用的研究，在水资源可持续利用的基本含义、基本原理和基本模式框架上已取得一些研究成果。但作为一个新的研究领域，由于问题的复杂性，使得对水资源可持续利用的理论研究和应用研究还远远满足不了发展的需要，尤其是在如何实现水资源可持续利用的定量化而使其结果具有可衡量性和可操作性方面。

水资源可持续利用规划是水资源可持续开发利用的手段，是社会经济发展的一个重要组成部分。其基本观点是水资源管理者通过协调供需关系，指导可持续的社会经济发展。包括水资源从获取、存储、供给、回收、再生等环节和过程。其根本任务是进行水资源的协调、规划、调配等内容，即包括水循环的全过程。使水资源规划从“供水定向”变为“管水定向”，管水包括需水管理和供水管理。也就是说，在供需平衡中，不再把水的需求量视为必须供给的量，而是受市场调节和资源总量的共同约束。

灌区水资源系统是一个由地区政治、经济、资源和环境等方面的要素组成的复杂大系统。我国是一个人口众多的农业大国，可持续发展决定了未来灌区发展的方向。一方面，我国灌区用水量大且效率较低。我国总用水量的 70% 为农业用水，而灌溉用水占整个农业用水的 90% 以上。由于技术及管理水平等原因，灌溉水利用效率以及灌溉水的生产效率远远低于发达国家，分别为 45% 和 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ ，而发达国家分别可达到 80% 和 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。水资源的紧缺亦使传统灌水方式难以维持。另一方面，农业发展所面临的供水危机非常严峻。随着城市需水的快速增长、水源的水质下降及其水量的减少，85% 的城市面临不同程度的缺水，从而挤占农业用水，使农业用水比例逐年下降。基于上述原因，如何科学合理高效地利用现有水资源，生产足够的粮食以满足众多人口的食物需求成为最为迫切的问题。灌区作为水资源利用与管理的集中区域，在水资源日益短缺，农业灌溉用水不能增加，而粮食需增收的背景下，如何将有限的灌溉用水在作物不同生育期优化配置，以及对作物进行精量灌溉控制，使灌溉效益最高，这些已越来越成为水资源领域和农田灌溉领域的研究热点。基于田间试验基础，建立作物水分需求与产量的关系模型，将有限的水资源进行合理调控，实现水资源的合理开发、节约、保护与高效利用，具有客观必要性和现实紧迫性。为此，灌区水资源可持续利用规划问题，是水资源系统工程研究的重大问题之一，对地区农业可持续发展具有重要的理论和应用价值。

近年来，我国大部分灌区相继开展了以节水为核心的续建配套与更新改造工程建设，在灌区水资源高效利用和生态环境保护方面已取得了阶段性成果。由于灌区水资源可持续利用规划涉及的因素比较多，灌溉系统的供水对象多，供水过程复杂，一般包括多个行政区、多种作物，并兼顾防洪、发电、养鱼、环境保护等，而作为灌溉系统主要用水户的农业灌溉，其用水量常常与当地降雨呈负相关关系，且年际、年内是变动的，所以以灌区为单元，根据灌区特点，研究作物需水规律、规划节水方案，研究灌溉系统、水源类型、供水对象三者的关系，提出多因素、多目标、多层次、多决策的大系统水资源优化配置和承载力是灌区水资源规划的首要问题。

黑龙江省是我国的重要商品粮基地之一，列入国家计划的大型灌区有 20 处。但单位耕地面积水资源占有量仅为全国平均水平的 31%，同时，水资源时空分布不均，降水量的 70% 集中在 7 月、8 月、9 月。如何合理调配灌区有限的水资源，使水利工程发挥更大效益，以及为实施千亿斤粮食生产能力战略工程服务显得尤为迫切。

1.2 国内外研究动态及实践状况

水资源可持续利用是一个崭新的概念，它是可持续发展对再生资源使用的专门术语。目前可持续利用的概念已被广泛接受，但理论研究还处于刚刚起步阶段，许多研究还停留于定性分析。研究热点包括以下内容：可持续发展理论、水资源生态经济复合系统理论、水资源可持续利用原理、水资源可持续利用规划、水资源可持续利用管理、水资源可持续利用评价等。

水资源持续利用规划的基本原则是以水资源持续利用为目标，是一项复杂的系统工程。它需要把水文系统模型、气候变化影响模型、水环境系统模型、社会经济发展预测模

型和多目标的水资源规划调度管理模型等有机联系起来。水资源可持续利用规划的基本任务在于支持水利、社会、经济与环境的协调持续发展,并使自身得到永续利用,因此,须遵守一些主要的可持续发展原则。要从可持续发展的内涵出发,遵从水资源及水环境容量和水环境承载力有限的原则。

与灌区水资源可持续利用规划有关的研究,大致可包括灌区水分生产函数及有限水量的分配、灌区需供水预测、灌区水资源配置与调度、水资源承载能力、水资源利用的可持续性等内容。

1.2.1 研究动态

1.2.1.1 作物水分生产函数及有限水量分配研究

农田节水的关键是把握住作物的需水高峰期和关键期,以减少无效灌水,要解决这个问题就必须弄清作物生长发育对水量和时间上的要求。随着节水农业不断深入研究,水分生产函数越来越受到人们的重视。作物水分生产函数是指在有限供水条件下,作物产量与灌溉供水(包括灌水时间和灌水量)之间关系的定量描述,是合理调控水分使之有利于作物生长的重要依据之一。研究作物水分生产函数的目的是为合理利用有限水资源,达到最大的作物产量或产值,为确定作物优化灌溉制度,实现有限供水在作物生长期、作物间,亦即在时间和空间上的合理配置提供定量依据。

1. 作物水分生产函数研究进展

国外从20世纪60年代以来对作物水分生产函数进行了较为系统的试验研究,取得了较大进展,提出了多种模型形式。从开始的产量与总供水量,到产量与生长期总蒸发蒸腾量绝对值模型,再到相对值模型,直到考虑了供水时间对产量影响的阶段相对值模型,使得水分生产函数模型结构更趋合理,拟合精度也逐渐提高。国内从20世纪80年代开始对水分生产函数进行了研究,主要以借鉴国外模型形式,并相应地开展了非充分灌溉专项试验,获得了相当多的多点多年系统数据。归纳起来,这些水分生产函数模型可分为两类:静态模型和动态模型。

(1) 静态模型又称为作物水分生产函数的最终产量模型,它是描述作物最终产量(干物质或籽粒产量)与水分的宏观关系,而不考虑作物生长发育过程中干物质是如何积累的微观机制。模型直接将作物产量表示为作物生育期内腾发量的函数,它是经验型或半经验型的,一般通过对试验数据的回归分析确定,可分为全生育期水分生产函数模型和分阶段水分生产函数模型。

(2) 动态模型描述作物生长过程中作物干物质的积累过程对不同的水分水平的响应,并根据这种响应来预测不同时期作物干物质积累及最终产量。

对于水稻水分生产函数模型的应用研究,国内许多学者根据不同地区的实际情况,得出了多种模型参数及模型适用条件。茆智、崔远来、李新建根据广西桂林地区灌溉试验中心站1988~1992年5年观测试验结果,分析研究了适用于我国南方水稻水分生产函数模型,探讨各种模型中水分敏感参数的变化规律,具体提出了Jensen模型中水分敏感指数与参照作物需水量的关系,预测效果良好。迟道才、王瑄、夏桂敏等参照前人旱作物动态产量模型,构造了水分亏缺影响函数,并对分阶段线性函数、指数乘子式函数和三次式函数进行参数拟合,得出水稻动态产量的数学模型。

2. 基于作物水分生产函数的有限水量分配方法研究进展

在单一作物优化配水方面,从 20 世纪 60 年代开始,有研究者就已对作物水分生产函数以及与产量的关系给出规划模型,用以寻求供水条件下农作物的最优灌溉制度。求解最优灌溉制度的方法有多种:线性规划(LP)、非线性规划(NLP)、动态规划(DP)以及随机动态规划(SDP)等。近年来,一些学者在模型求解方法上进行了大量的研究工作。张展羽、李寿声(1993)以缺水地区旱作物为研究对象,提出了非充分灌溉制度的设计方法,结合某灌区的灌溉水管理实际情况,将作物腾发条件下土壤水分的消长函数概化为线性和非线性两部分,用模糊动态规划的方法确定作物的非充分灌溉制度。该方法考虑了计划湿润层土壤含水量低于适宜含水量下限时对作物腾发速率的影响;将不同生育阶段的灌溉水量处理为模糊决策变量,较好地描述了各阶段灌水量对产量影响的模糊性,所编制的非充分灌溉制度模糊优化设计电算程序具有通用性。王志良等(2001)以非充分灌溉理论为基础,建立了灌区单一作物优化灌溉制度的动态规划模型。建模时考虑了灌区的降水、地表水、土壤水及地下水等多种水资源联合使用问题,在模型中体现了地表水的使用优先于地下水的事实。付强、王立坤(2003)提出了改进的加速遗传算法(RAGA)并与多维动态规划法(DP)相结合,建立了遗传动态规划模型(RA-GA-DP),解决了在求解作物非充分灌溉下,灌溉制度优化过程易早熟及陷入局部最优而难于求解得到真正最优解的问题。

在多作物结构调整和优化配水方面,如何安排作物的种植比例,将有限的水资源分配到各作物之间,才能使得全灌区获得最大的效益,是目前发展节水农业的重要问题。通常采用 LP、NLP、DP 以及 SDP 等模型来实现作物的优化配水。根据求解的方式不同,可将其分为单层模型、多层模型以及决策支持系统等。例如:崔远来、李远华(1997)提出了一个有限水量在多作物之间进行最优分配的两层分解协调模型(DP-DP)。1999 年崔远来又提出 DP-SDP(随机动态规划)求解灌区多作物灌溉水量最优分配问题,不需要由第一层结果导出作物全生育期生产函数,同时第二层分别考虑了固定种植模式(一维 DP)及非固定种植模式(二维 DP)两种情况,可同时确定各作物最优种植面积、最优配水量及最优灌溉制度等。邱林、马建琴(1998)提出了一个大系统结构模型,将作物子系统作为第一层,子区子系统作为第二层,灌区总系统作为第三层,通过供水量将第一、第二、第三层联系起来,并用大系统分解-协调模型求解。刘洪禄、车建明(2002)采用线性规划的方法,从农业供水资源对作物种植结构的影响,作物种植结构对农业用水量,农业水资源供需平衡的影响以及作物种植结构对农业节水灌溉方式的要求和对灌溉效益的影响等方面,研究探讨了农业节水与作物种植结构这种既相互制约又相互促进的关系。

1.2.1.2 供、需水量预测研究现状及方法

由于用水系统的复杂性,无法建立一个确定模型对它进行描述,所以绝大多数需水量预测方法都是建立在对历史数据的统计分析基础上,不同的只是数据处理方式及应用特点。根据对数据处理方式的不同,需水量预测方法主要可以分为:时间序列法、结构分析法和系统方法。根据预测模型对未来的描述能力,即预测周期的长短,需水量预测方法可以分为单周期预测方法和多周期预测方法。此处提及的周期可理解为时、日、月、年等时间单位。如以过去的历史数据预测未来一个单位时间的需水量,可视为单周期预测;预测未来两个以上单位时间的需水量,可视为多周期预测。一般来说,各种预测方法的预测误

差都会随着预测周期的增加而增加，然而，误差增长速度和抗随机因素的能力有很大差别。时间序列分析法由于其所用数据单一（只是用水量的历史数据），而最近的数据则包含了极其重要的预测信息，所以它的预测周期不宜太多。灰色预测方法实质上是一个指数模型，当需水量发生零增长或负增长时，系统误差严重，而且预测周期越多误差越严重。人工神经网络方法需要数据动态的训练系统，近期数据对系统影响很大，预测周期也不宜太多。上述三种方法均属单周期预测方法。而结构分析法和系统动力学方法是分析用水系统、收集多种用水数据后建立起来的，在用水系统未发生很大变化的条件下，可以得到较多周期的预测值，属多周期预测方法。

值得一提的是，按周期对预测方法的分类应与以前人们常用的长、短期分类区分开来，严格地讲，“长期、短期预测方法”的提法在概念上是不准确的。长、短期分类是针对预测的分类，而不是针对预测方法的分类，通常情况下，根据需水量预测目的、预测对象的特点，可将其分为长期预测和短期预测。短期预测一般是为用水系统实施优化控制而进行的日预测和时预测，这种预测对预测要求精确度高、预测速度快；长期预测一般是指以水资源规划为目的的年预测，它要求预测周期长、考虑因素多。

1. 回归分析法

该预测方法是通过回归分析，寻找预测对象与影响因素之间的因果关系，建立回归模型进行预测，而且在系统发生较大变化时，也可以根据相应变化因素修正预测值，同时对预测值的误差也有一个大体的把握，因此，适用于长期预测。而对于短期预测，由于用水量数据波动性很大、影响因素复杂，且影响因素未来值的准确预测困难，故不宜采用。该方法是通过自变量（影响因素）来预测响应变量（预测对象）的，所以自变量的选取及自变量预测值的准确性是至关重要的。针对我国基础数据短缺、预测及决策体系不完善的现状，在抓住系统主要影响因素的基础上，引入的自变量应适当。过多的自变量不仅会使计算量增加、模型稳定性退化，还容易把不可靠的自变量预测值引入模型，使误差累加到响应变量上，造成很大的误差。

2. 指标分析法

指标分析法是通过对比用水系统历史数据的综合分析，制定出各种用水定额，然后根据用水定额和长期服务人口（或工业产值等）计算出远期的需水量。该方法与回归分析有很多相似之处，在一定意义上它等效于以服务人口为自变量的一元回归，用水定额相当于回归系数。所不同的是，回归分析具有针对性，而用水定额具有通用性，与回归分析相比，它的工作量要小得多，但是由于用水定额的通用性，在对特殊城市或地区进行需水量预测时会造成很大的误差。

3. ARMA 方法

ARMA 方法集时间序列模型之大成，是对自回归模型和移动平均模型的综合，它将预测对象随时间变化形成的序列先加工成一个白噪声序列进行处理，所以它可对任何一个用水过程进行模拟，对时预测、日预测和年预测均有效，且预测速度快（用计算机动态建模预测），能得到较高的预测精度。但是该方法与其他时间序列方法一样，具有预测周期短、所用数据单一的缺点，只能给出下一周期需水量的预测值，且无法剖析形成这一值的原因及合理的误差估计，所以它更适用于优化控制的短期预测。此外，该方法还存在着明

显的滞后性，即最近一期实际数据发生异常变化时，由于模型的平滑作用，预测数据无法立即对之作出反应，使得在预测一些异常值时造成较大误差，甚至失真。

4. 灰色预测方法

灰色预测方法是一种不严格的系统方法，它抛开了系统结构分析的环节，直接通过对原始数据的累加生成寻找系统的整体规律，构建指数增长模型。该方法能根据原始数据的不同特点，构造出不同的预测模型。例如：应用于增长速度有变化的灰指数模型，应用于处理有季节变化数据或噪声数据的灰色拓扑模型，以及能包含多个用水量影响因素的 $G(L, N)$ 模型，所以该方法的预测范围很广，对长、短期预测均可，且所需数据量不大，在数据缺乏时十分有效。

5. 人工神经网络方法

人工神经网络是一种由大量简单的人工神经元广泛连接而成的，用以模仿人脑神经网络的复杂网络系统。它在给定大量输入/输出信号的基础上，建立系统的非线性输入/输出模型，对数据进行并行处理，被学术界称为无模型，而不像传统方法的建模过程。实质上它是把大量的数据交给按一定结构形式和激励函数构建的人工神经网络进行学习，然后在给出未来的一个输入的情况下，则可由计算机根据以往“经验”判断应有的输出。该方法实际上是对系统的一种黑箱模拟，更适于短期预测和动态预报短期负荷值以及动态训练系统，在这方面不乏成功的实例。而对于长期需水量预测，目前还未见有人进行研究。而且即使能得到较高的预测精度，由于其“黑箱操作”对制定用水政策、提高水的利用率方面并无帮助，因此，该方法不宜用于长期预测。

6. 系统动力学方法

系统动力学方法把所研究的对象看作是具有复杂反馈结构的、随时间变化的动态系统，通过系统分析绘制出表示系统结构和动态特征的系统流图，然后把各变量之间的关系定量化，建立系统的结构方程式，以便运用计算机语言进行仿真试验，从而预测系统未来。该方法应用效果的好坏与预测者的专业知识、实践经验、系统分析建模能力密切相关。通过系统分析、系统模型的建立，可以对系统进行白化，再经过计算机动态模拟，可以找出系统的一些隐藏规律。所以，该方法不仅能预测出远期预测对象，还能找出系统的影响因素及作用关系，有利于系统优化。不过，系统分析过程复杂，工作量极大，且对分析人员能力要求较高，所以不适用于短期需水量预测。而对长期需水量预测，其优势是十分明显的。该方法过于复杂，对于面积较小、功能较少的灌区反而误差会较大。

1.2.1.3 水资源合理配置研究及实践

水资源合理配置是人类可持续开发和利用水资源的有效调控措施之一，目前水资源合理配置已经被写入水法中。随着水资源合理配置实践的不断深化，其概念逐步明确，其内涵日益丰富，至今仍在发展之中。《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”。水资源配置的客观基础，是“社会、资源、生态”复杂巨系统中宏观经济系统、水资源系统和环境生态系统在其运动发展过程中的相互依存与相互制约的定量关

系,这一关系集中体现在用水竞争性和投资竞争性上。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、不同地区与部门间的利益、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。国内外有关学者已提出社会净福利函数、生态环境成本和绿色 GDP 等概念和计算方法。

1. 以水量配置为主的水资源优化配置研究

国外对水资源优化配置的研究始于 20 世纪 60 年代初期,1960 年美国科罗拉多的几所大学对计划需水量的估算及满足未来需水量的途径进行了研讨,体现了水资源优化配置的思想。20 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。20 世纪 80 年代,N. 伯拉斯所著的《水资源科学分配》系统地总结并研究了水资源分配理论与方法,同时也拉开了具体配置方法研究的序幕。我国学者李寿声(1986)在对内蒙古河套灌区地表水地下水联合优化调度中,采用动态规划方法确定各种作物的灌水定额及灌水次数;唐德善(1992)以黄河中游某灌区为例,运用递阶动态规划法确定水资源量在工业和农业之间的分配比例。此外,贺北方等(1995)、黄振平等(1995)、向丽等(1999)和马斌等(2001)对多库多目标最优控制运用的模型与方法、灌区渠系优化配水、大型灌区水资源优化分配模型、多水源引水灌区水资源调配模型及应用进行了研究。这些成果使水利工程单元的水量优化配置模型和方法不断丰富和完善,促进了以有限水资源量实现最大效益的思想在水利工程管理中的应用。

2. 考虑水质因素的水资源优化配置研究

20 世纪 90 年代以来,由于水污染和水危机的加剧,传统的以供水量和经济效益最大为水资源优化配置目标的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。进入 80 年代后期,随着水资源研究中新技术的不断出现和水资源量与质统一管理理论研究的不断深入,水资源量与质统一管理方法的研究也有了较大发展。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量与质管理方法的研究产生了更大的活力。

1.2.1.4 水资源承载力研究及实践

水资源承载力研究是随着水资源危机问题的日益突出,由我国学者在 20 世纪 80 年代末期提出的,但迄今为止仍未形成一个系统的、科学的理论体系。即便是对水资源承载力的概念,也尚无统一明确的界定,目前存有多种表达形式。如施雅风等认为水资源承载力是指某一区域的水资源,在一定社会历史和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可承载的工业、农业、城市规模和人口的能力,是一个随社会、经济、科学技术发展而变化的综合指标;许友鹏认为水资源承载力是指在一定的技术经济水平和社会生产条件下,水资源最大可供给工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力,是水资源最大开发容量,在这个容量下水资源可以自然循环和更新,并不断被人们所利用,造福于人类,同时不会造成环境恶化;冯尚友认为水资源承载力是在一定区域、一定物质生活水平下,水资源所能够持续供给当代人和后代人需要的规模和能力;惠泱河等认为水资源承载力是某一地区的水资源在某一具体历史发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,经过合理优化配置,对该地区社会经济最大支撑能力。此外,夏军、崔凤军、傅湘等许多学者就水