

灌区地下水承载力 评价理论与实践

陈南祥 屈吉鸿 著



科学出版社

灌区地下水承载力评价 理论与实践

陈南祥 屈吉鸿 著

“十一五”国家科技支撑计划(2006BAD11B05)
华北水利水电学院高层次人才科研启动项目

科学出版社

北 京

P64
C12

内 容 简 介

本书论述了灌区地下水承载力评价的理论与方法及在典型灌区的应用。主要内容包括:灌区地下水承载力的概念、内涵、影响因素及研究基础等基本理论,灌区水文循环的基本理论与模型,典型灌区分布式水文模型的建立,基于指标体系的灌区地下水承载力评价模型,灌区地下水承载力多目标评价模型,灌区地下水承载力风险分析。全书理论与实例相结合,内容翔实,层次分明,具有较强的实用性。

本书可供从事水利、环境、农业工程、水文地质等相关专业的科研和管理人员参考使用,也可供大专院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

灌区地下水承载力评价理论与实践 / 陈南祥, 屈吉鸿著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035852-3

I. ①灌… II. ①陈… ②屈… III. ①灌区-地下水-承载力-评价-研究 IV. ①P641.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 252481 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:钟 洋

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 9 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 226 800

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

灌区在我国社会经济发展中扮演着重要角色。但是,由于气候变化及人类活动的增强,灌区的水循环和水资源状况发生了巨大的变化,导致许多灌区出现了一系列生态环境问题,例如,地下水降落漏斗增多增大,地表水水质恶化,地下水总矿化度、总硬度、硝酸盐和氟超标,植被退化,土地荒漠化等。灌区水生态环境问题威胁着灌区的用水和生态环境安全,威胁到粮食生产安全,制约了当地社会的和谐发展。水是生命之源、生产之要、生态之基。人与自然和谐共处的关键问题在于人类社会的发展不能超过资源和环境的承载力。灌区地下水承载力研究,对灌区社会经济的可持续发展、生态环境的良性循环和地下水资源的可持续利用具有重要意义。

灌区水文循环及水资源演变规律受自然水循环和人类活动作用下的水循环共同影响,涉及气候气象、地形地貌、水文地质、河流水系、作物种植、土地利用、水利工程、灌溉排水、蓄水及地下水开采等诸多因素,形成了复杂的自然-人类活动复合水循环系统。水文循环过程决定了水资源的形成及其相关问题的产生,任何水资源问题的真正解决都不能脱离水文循环的研究。本书在系统研究灌区水文循环模式的基础上,建立灌区分布式水文模型,分析气象水文、土地利用等条件下灌区水文和水资源的演变规律;分析灌区地下水承载力基本理论,建立基于指标体系和多目标优化理论的灌区地下水承载力评价模型,分析地下水承载力风险。

本书的主要内容包括:探讨灌区地下水承载力的概念和内涵,分析灌区地下水承载力影响因素;分析灌区自然-人类活动作用下的水循环模式,针对 SWAT 模型在地下水模拟方面的不足,通过数据共享方式耦合 SWAT 模型与 MODFLOW 模型,建立灌区分布式水文模型,并以人民胜利渠灌区为典型灌区,利用分布式水文模型,评价灌区水文水资源演变规律;构建灌区地下水承载力综合评价指标体系,建立灌区地下水承载力多层次模糊综合评价模型和 TOPSIS 评价模型;分析灌区地下水承载力多目标评价的原理和流程,建立灌区地下水承载力多目标评价模型;采用蒙特卡罗模拟技术和承载力多目标评价模型计算灌区地下水承载力风险。

本书结合“十一五”国家科技支撑计划“灌区地下水开发利用关键技术研究”第一子课题“灌区地下水资源与环境承载力评价指标体系建立与应用研究”(2006BAD11B05)和华北水利水电学院高层次人才科研启动项目进行研究,得到了华北水利水电学院博士点建设专项经费的资助。

本书由陈南祥和屈吉鸿撰写和统稿。第 1、8 章由陈南祥撰写;第 2、3 章由陈

南祥、贾明敏撰写;第4、5章由屈吉鸿撰写;第6、7章由屈吉鸿、贾明敏撰写。

华北水利水电学院徐建新教授和西安理工大学黄强教授对本书进行了系统的审阅,提出了许多宝贵的修改意见,在此表达最诚挚的谢意。参加课题研究及书稿整理的人员还有华北水利水电学院谷红梅、冯翠红、李跃鹏、杨莉及黄河水利委员会供水局李振全,在此一并表示感谢。

本书较系统地研究了灌区地下水承载力问题,期望为这一问题的解决提供一些思路,完善灌区地下水承载评价的理论与方法。但由于作者水平和认识的局限性,书中难免存在不足和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水资源承载力研究现状	2
1.2.2 灌区水文循环研究现状	7
1.2.3 存在的问题及研究趋势	10
1.3 主要研究内容及技术路线	13
1.3.1 主要研究内容	13
1.3.2 技术路线	14
第 2 章 灌区地下水承载力理论探析	15
2.1 灌区地下水承载力的概念、内涵和特征	15
2.1.1 灌区地下水承载力的概念	15
2.1.2 灌区地下水承载力的内涵	18
2.1.3 灌区地下水承载力的特征	20
2.2 灌区地下水承载力影响因素	22
2.2.1 水资源数量和质量	22
2.2.2 水资源开发利用程度和方式	23
2.2.3 生态环境状况	23
2.2.4 社会经济发展水平	24
2.2.5 科技水平	24
2.2.6 人口及生活水平	24
2.2.7 其他资源	25
2.2.8 管理体制和政策法规	25
2.3 灌区地下水承载力研究的理论基础	26
2.3.1 灌区水资源-社会经济-生态环境复合系统	26
2.3.2 自然和人类活动作用下的水文循环过程与机制	28
2.3.3 可持续发展理论	28
2.3.4 广义水资源系统理论	29

2.4 本章小结·····	31
第3章 灌区水文循环的基本理论与模型 ·····	32
3.1 灌区水循环模式·····	32
3.1.1 自然水循环系统·····	32
3.1.2 人类活动对水循环的影响·····	33
3.1.3 灌区自然-人类活动作用下的水循环模式·····	34
3.2 SWAT 和 MODFLOW 耦合的分布式水文模型·····	36
3.2.1 SWAT 模型概述·····	38
3.2.2 MODFLOW 模型概述·····	40
3.2.3 SWAT 模型的不足与改进·····	41
3.2.4 SWAT-MODFLOW 耦合模型的结构·····	42
3.2.5 SWAT-MODFLOW 耦合模型的原理·····	43
3.3 本章小结·····	51
第4章 典型灌区的分布式水文模型建立 ·····	53
4.1 研究区概况·····	53
4.1.1 自然地理·····	53
4.1.2 灌排河渠·····	55
4.1.3 水文地质条件·····	56
4.1.4 水资源水环境状况·····	59
4.2 水文模型基础数据构建·····	62
4.2.1 地形·····	62
4.2.2 土壤属性·····	63
4.2.3 土地利用类型·····	67
4.2.4 气象数据·····	68
4.2.5 水文地质参数·····	69
4.2.6 农业管理措施·····	70
4.3 水文模型建立·····	71
4.3.1 流域划分·····	71
4.3.2 水文响应单元 HRUs 划分·····	71
4.3.3 地下水数值模型·····	74
4.4 水文模型率定和验证·····	76
4.4.1 模型率定·····	78
4.4.2 模型验证·····	83
4.5 基于分布式水文模型的水资源评价·····	88

4.5.1 水资源评价	88
4.5.2 水资源可用量	90
4.6 本章小结	92
第5章 基于指标体系灌区地下水承载力评价模型	93
5.1 灌区地下水承载力评价指标体系的建立	93
5.1.1 指标选取的原则	93
5.1.2 指标体系的构建	94
5.2 地下水承载力模糊综合评价模型	96
5.2.1 多层次模糊综合评价模型	97
5.2.2 评价典型年及评价分区	101
5.2.3 评价指标及等级界定	102
5.2.4 地下水承载力模糊层次综合评价	105
5.3 地下水承载力 TOPSIS 评价模型	111
5.3.1 评价原理和模型	112
5.3.2 基于 TOPSIS 法承载力评价	117
5.4 本章小结	120
第6章 灌区地下水承载力多目标评价模型	121
6.1 灌区地下水承载力多目标评价原理和流程	121
6.1.1 灌区地下水承载力多目标评价原理	121
6.1.2 灌区地下水承载力多目标评价流程	122
6.2 灌区地下水承载力多目标评价模型	122
6.2.1 模型建立	122
6.2.2 目标函数	124
6.2.3 约束条件	125
6.3 模型求解	127
6.3.1 多目标优化问题求解方法	128
6.3.2 改进的粒子群算法	133
6.3.3 基于 TOPSIS 法的承载力多目标 PSO 算法	137
6.4 灌区需水量预测	140
6.4.1 农业需水预测	140
6.4.2 第二产业需水预测	140
6.4.3 第三产业需水预测	141
6.4.4 生活需水预测	141
6.4.5 生态环境需水预测	142

6.4.6 需水总量	143
6.5 地下水承载力评价	144
6.5.1 承载力评价模型构建	144
6.5.2 现状年地下水承载力	147
6.5.3 规划水平年地下水承载力	147
6.6 本章小结	159
第7章 灌区地下水承载力风险分析	160
7.1 引言	160
7.2 地下水承载力风险的定义	161
7.3 灌区地下水承载力风险因素	162
7.4 灌区地下水承载力风险计算方法	163
7.4.1 蒙特卡罗法的原理	163
7.4.2 风险因素的概率分布	163
7.4.3 地下水承载力风险计算步骤	165
7.5 人民胜利渠灌区地下水承载力风险分析	166
7.5.1 风险因子及其概率分布	166
7.5.2 风险评价指标	167
7.5.3 地下水承载力风险分析	168
7.6 本章小结	168
第8章 结论与展望	170
8.1 结论	170
8.2 展望	171
参考文献	172

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

我国现有灌溉面积在 2 万 hm^2 以上的大型灌区 402 处,生产了占全国总量 1/4 以上的粮食,创造了占全国总量 1/3 以上的农业生产总值,提供了占全国 1/7 以上的工业及城市生活用水,受益人口达 2 亿多人^[1],灌区在我国社会经济发展中扮演着重要角色。但是,由于气候变化和人类活动的增强,灌区的生态环境遭到不同程度的破坏,农业生态和人类生存环境呈恶化趋势,严重制约了灌区经济社会的可持续发展。水资源作为灌区环境和资源的双重要素,对自然、生态环境保护起到核心作用,人与自然和谐共处的关键问题在于人类社会的发展不能超过资源和环境的承载能力。地下水资源作为水资源的重要组成部分,是灌区社会经济发展的基础资源之一。灌区地下水承载力研究,对灌区社会经济的可持续发展、生态环境的良性循环和地下水资源的可持续利用具有重要意义。作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的一个基础课题,水资源承载力研究已引起学术界高度关注,为水资源科学当前的重点和热点研究问题。众多学者对水资源承载力展开了多种形式的研究,从基本理论、研究方法到实际应用均进行了积极的探索。但是,水资源承载力的研究,特别是地下水承载力的研究,依然处于探索阶段,没有形成成熟的研究理论和方法。

近 50 年来,全球许多地区发生了严重的水问题和水危机,严重制约了社会经济发展。各种水问题和水危机的产生,追究其根源,除了近 50 年来气候变暖、人口剧增、城市和经济生产规模迅猛发展等原因之外,对水文水资源循环演化规律认识不足也是导致此类问题的重要原因^[2]。为探索变化环境下的水资源演变规律,解决日益严重的水问题和水危机,国际水文计划(international hydrological programme, IHP)、世界气候研究计划(world climate research programme, WCRP)等开展了一系列全球变化问题的前沿性研究,气候变化与人类活动对水循环过程的影响已成为其中的核心内容之一。目前,自然状态下的水循环过程的研究相对成熟,但在人类活动影响下,考虑自然水循环与社会水循环耦合的水文循环和水资源形成与演化规律的研究仍处于起步阶段,尚未形成完整的研究体系,相关问题的研究为水文学及水资源学研究的热点和难点。灌区水文循环及水资源演变规律受自然水循环和人类活动作用下的水循环共同影响,涉及气象气候、地形地貌、河流水系、水文地质、作物种植结构、土地利用、水利工程、灌溉排水、蓄水及水资源开发利用

用等诸多因素,形成了复杂的自然-人类活动复合水循环系统。水文循环过程决定了水资源的形成及其相关问题的产生,任何水资源问题的真正解决都不能脱离水文循环的研究,水资源承载力的研究也不例外。采用水文模型研究灌区自然-人类活动作用下的水循环及其伴生的水资源演化规律,对灌区水资源开发利用和生态环境保护具有重要的理论价值和实践意义。

本书结合“十一五”国家科技支撑计划“灌区地下水开发利用关键技术研究”第一子课题“灌区地下水资源与环境承载力评价指标体系建立与应用研究”(2006BAD11B05)和华北水利水电学院高层次人才科研启动项目,在分析灌区“自然-人类活动”复合水循环模式的基础上,建立灌区分布式水文模型,研究灌区大气水-地表水-土壤水-地下水转换过程,分析气象水文、土地利用、水资源开发利用等因素影响下的灌区水文和水资源演变规律。通过对灌区地下水承载力的概念与内涵的探讨及承载力评价原理和流程的分析,基于灌区分布式水文模型,建立灌区地下水承载力多目标优化模型和基于指标体系的地下水承载力评价模型,评价灌区地下水承载力,分析地下水承载力风险,为灌区地下水资源合理利用、灌区节水改造、生态环境的改善提供理论支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水资源承载力研究现状

承载力的概念源于生态学的研究。Park 和 Burgess 在生态学研究首次提出了承载力的概念,认为可以根据某地区的食物资源来确定区内的人口承载规模。20 世纪 80 年代初,联合国教科文组织正式提出了资源承载力的概念。水资源承载力的概念则由我国学者在 20 世纪 80 年代末提出^[3]。

国际上关于水资源承载力的专门研究较少,大多将其纳入可持续发展理论中,常使用可持续利用水量、水资源的生态限度或水资源自然系统的极限、水资源紧缺程度指标等来表述类似的涵义,且一般直接指自然水资源数量的开发利用极限。Joardor 从供水的角度对城市水资源承载力进行了相关研究^[4]。Rijsbermana 等在研究城市水资源评价和管理体系时将承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准^[5]。Harris 等研究了农业生产区域水资源农业承载力,将此作为区域发展潜力的一项衡量标准^[6]。美国的 URS 公司研究了佛罗里达 Keys 流域的承载力,研究内容包括承载力的概念、研究方法和模型量化手段等^[7]。Falkenmark 等研究了一些发展中国家的水资源的使用限度,为水资源承载力的专门研究提供了一定的基础^[8]。2002 年,美国环保总局计算了 Pine、Gull、Crooked、Sherman 4 个湖泊的环境承载力,并提出了保护和改善湖泊水质的建议^[9]。

国内关于水资源承载力的研究起步较晚,但进展很快。自 20 世纪 80 年代末

施雅风明确提出水资源承载力的概念以来,国内许多学者对此进行了深入的研究。目前,对水资源承载力的研究方法较多,概括起来主要有三类:经验公式法、综合评价法和系统分析法。

1. 经验公式法

经验公式法主要有背景分析法、常规趋势法和简单定额法等。

背景分析法是将研究区的经济发展、水资源利用、生产力水平、生活水平、生态环境等自然和社会背景同其他区域作对比,得到该区域可能的承载力的计算方法^[10]。背景分析法指采用一个或几个承载因子进行分析,因子之间相互独立,简单易行。但其分析多局限于静态的历史背景,割裂了资源、社会、环境之间的相互联系和作用,对水资源承载力这一复杂的自然-社会经济系统来说显得过于单薄^[11]。

常规趋势法是以可开采水量为基本依据,在满足维持生态环境的基本要求及合理分配国民经济各部门的用水比例的前提下,适当考虑建设节水型农业和节水型社会,并在此基础上计算水资源所承载的工业、农业及人口量。施雅风等采用常规趋势法对新疆乌鲁木齐河流域水资源的承载力进行了研究^[12];王在高等构建了岩溶地区水资源承载力的指标体系,建立了基于 Logistic 曲线的岩溶地区水资源承载力趋势预测模型^[13]。常规趋势法计算方便,简单直观。但该方法较多考虑的是单承载因子的发展趋势,忽略了各承载因子之间的相互联系^[14]。

简单定额法是在确定可利用水资源总量的基础上,研究人类生活、生产和生态环境对水资源需求的变化趋势,从而预测区域最大可支撑人口数量。该方法比较简单,应用较多。曲耀光等根据干旱区水资源开发利用阶段可用水量 and 内陆河流域社会经济发展及其需水预测,计算了黑河流域中游地区的水资源承载力^[15]。王煜等通过分析西北地区的水资源量、可利用量、水资源需求量,评价了西北地区水资源的人口承载规模^[16]。

2. 综合评价法

综合评价法主要有综合指标法、模糊综合评价法、主成分分析法、投影寻踪法、物元可拓法、集对分析法等。

综合指标法是一种利用单项或多项指标反映区域水资源现状和阈值的评价方法。例如,用区域人均占有水量和水资源开发利用率判断区域水资源承载力的现状与潜力。汪党献等在分析区域水资源变化特性的基础上,选取水资源及其利用状况、区域发展和生态环境状况三个方面共六类指标,通过计算综合协调度,分析了我国各区域发展的水资源支撑能力^[17]。由于综合指标法所选指标基本上可反映区域水资源承载力的状况,并具有直观、简便、综合的特点,得到了较广泛的应

用。但该方法指标的选取是否能准确反映当前水资源承载状况等问题尚需要深入研究。

模糊综合评价法将水资源承载力视为一个模糊综合评价过程,通过合成运算,得出评价对象对应于各评语等级的隶属度,通过模糊运算确定评价对象的最终评语。利用模糊综合评价法研究水资源承载力的文献较多,如许有鹏^[18]、高彦春等^[19]、周维博^[20]、闵庆文等^[21]、陈守煜等^[22]利用该方法研究了区域(流域)的水资源承载力。虽然模糊综合评价法在水资源承载力研究中应用较广,但该方法无论是在评判因素的选取上,还是因素对承载力的影响程度上,都存在一定的局限性。

基于主成分分析法的水资源承载力评价原理是利用数理统计的方法找出承载力系统中的主要影响因素和各因素的相互关系,然后将系统的多个变量(或指标)转化为较少的几个综合变量(或指标)的一种统计分析方法。傅湘等利用主成分分析法对陕西汉中平坝区的水资源承载力进行了评价研究^[23];孟凡德等采用主成分分析法分析了北京市水资源承载力变化的总体趋势和驱动因子^[24];周亮广等通过主成分分析法从 15 个指标中选取影响喀斯特地区水资源承载力动态变化的 3 个主成分,并用熵值法对其赋权,计算了贵阳市 1998~2003 年的水资源承载力^[25];周琳等采用主成分分析法对江门市水资源承载力进行了评判^[26]。主成分分析法在一定程度上克服了模糊综合评价方法的缺陷,在保证数据信息损失最小的前提下,经线性变换和舍弃少部分信息,以少数综合变量取代原始的多维变量,其实质是对高维变量系统进行综合和简化,同时客观地确定各个指标的权重,避免了主观随意性。但是,该方法一方面在评价参数的分级标准上难以选定主成分;另一方面该方法的多维目标的单指标复合形式的物理意义不明确,难以在经济活动中选择合适的控制点^[10]。

基于投影寻踪技术的水资源承载力评价的基本原理为将影响承载力的多因素指标通过投影寻踪聚类分析,建立投影特征值与影响指标的一一对应关系函数,得到反映其综合指标特征的投影特征值,以此特征值来分析水资源承载力。王顺久等采用该方法对全国 30 个省(直辖市、自治区)和淮河流域水资源承载力进行了评价^[27];郗建强等建立了遗传投影寻踪插值模型,对山西省水资源承载力进行评价^[28];王顺久等采用投影寻踪模型研究了关中平原地下水水资源承载力^[29];赵小勇等建立了基于偏最小二乘回归的神经网络投影寻踪耦合模型,并对城市水资源承载力进行了预测^[30]。由于投影寻踪模型是一种直接由样本数据驱动的探索性数据分析模型,无需预先给定各指标权重,结果更具客观性。但该方法存在评价模型复杂、计算工作量大等缺点。

物元可拓法的基本原理是将评价指标体系及其特征值作为物元,通过评价级别和实测数据,得到经典域、节域及关联度,从而进行定量综合评价的方法^[31],实质上属于多个特性的择近原则问题。门宝辉等采用物元可拓法研究了关中地区地

下水资源承载力^[32];汤亚林等采用物元可拓法对新疆地区水资源承载力进行综合评价^[33];张洪波等建立了基于非对称贴近度和粗集权重改进的水资源承载力物元可拓法评价模型,并应用于洮河流域水资源承载力研究^[34]。物元可拓法是从定性和定量两个角度去处理现实世界中矛盾问题的一种系统分析方法。但由于关联函数是一个分段函数,计算较为不便,而且指标间的互不相容性没有得到彻底解决,影响了该方法的推广应用。

集对分析法是一种处理不确定性问题的数学理论和系统分析方法^[35],其核心思想是从同异反三方面分析事物之间的联系与转化,应用联系度来描述系统的各种不确定性,把对不确定性的辩证认识转化成定量分析的数学工具。应用集对分析评价水资源承载力问题,是将评价地区水资源承载力的各定量指标值组成一个集合,将水资源承载力评价等级标准相应的指标值组成另一个集合,这两个集合组成一个集对,通过集对的联系度确定承载力大小。万星等应用集对分析法对关中地区的地下水资源承载力进行了综合评价^[36]。集对分析是一种不确定性分析方法,关联度是评价结果的关键,但表征关联度的相异系数如何确定是该方法的难点,需要从成因和统计角度进一步探索关联度机制^[37]。

3. 系统分析法

系统分析法将水资源承载力的主体和客体作为整体考虑,研究在不同的社会经济发展模式、不同的水资源开发利用方式下,水资源对区域的经济和人口的承载状况。系统分析法主要包括系统动力学法、多目标分析法、动态模拟递推法、压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型法等。

系统动力学法把包括社会经济、资源环境在内的大量复杂因子作为一个整体,综合考虑众多因子的相互关系,通过模拟不同发展战略得出人口增长、区域水资源承载力和经济发展间的动态变化趋势及其发展目标。由于该方法不仅具有系统发展的观点,而且具有模块化、可以使用非线性方程等优点,所以受到广泛的关注和应用。魏斌等运用指数评价模型和系统动力学模型,对城市工业用水变化情况和城市水资源系统发展趋势进行了分析预测^[38]。王建华等利用系统动力学模型对乌鲁木齐市 1993~2020 年水资源承载力进行了预测分析^[39]。陈冰等以人口为主要承载目标,建立了柴达木盆地的水资源系统动力学仿真模型,对 2020 年、2050 年的水资源承载力进行了预测^[40]。惠泱河等运用系统动力学动态仿真模型对关中地区水资源承载力进行了分析^[41]。吴九红等建立了城市水资源承载力的系统动力学模型^[42]。韩俊丽等运用系统动力学模型对包头市城市水资源承载力进行了模拟和预测^[43]。范英英等在水资源合理配置的前提下,通过动态仿真模拟,预测北京市 5 项水资源政策对水资源承载力的长期影响^[44]。孙新新等将宝鸡市水资源承载力系统划分为人口、农业、工业、水污染、水资源 5 个子系统,建立了水资

源承载力变化的系统动力学模型,提出了适合的经济发展方案和建议^[45]。系统动力学模型为水资源承载力的定量化描述和持续发展模式的建立提供了参考依据,其缺点是结构复杂,参变量、方程多,不易控制,描述系统内在关系的方程,特别是非线性方程参数的微小扰动,可能造成结果的荒谬,对数据的需求量也较大。

水资源承载力研究涉及水资源、宏观经济、社会、人口、水环境等众多因素,各因素之间相互促进、相互制约,水资源承载力评价是一个具有多目标性、动态性、极限性等特点的复杂系统问题。水资源承载力的多目标分析法是将研究区域作为一个整体系统,选取反映水资源承载力的社会、经济、人口、生态环境等若干目标,用系统分析和动态分析方法研究不同水平年、不同策略方案下水资源所能承载的生态、经济、人口规模,建立以水资源承载力度量指标为极限目标的数学模型,采用多目标优化方法确定水资源承载力。该方法可以将水资源系统(自然系统)与区域宏观经济系统(社会系统)作为一个综合体来考虑,按照社会可持续发展的原则,不是追求单个目标的优化,而只追求整体的最优。承载力多目标评价模型全面研究水资源开发利用与区域社会经济、生态环境发展目标之间,供水与需水之间,投资与效益之间的动态联系等。但在水资源承载力的研究中,多目标非线性规划问题在求解技术上存在一定的困难,目前的解法大多只是将多目标转化为单目标进行求解,而且规划目标和各目标的权重选定难以全面系统考虑。王根绪应用多目标规划法分析研究了黑河流域中下游间不同的输水条件下,额济纳绿洲东、西两河区域的水土资源利用方案和生态环境建设规模^[46]。贾嵘等考虑水资源、环境、人口、发展之间的关系,建立了水资源承载力的多目标评价模型,研究了关中地区的水资源承载力^[47]。徐中民等根据干旱地区水资源开发利用的特点,结合人口、资源、环境和发展之间的关系,将水资源承载力问题纳入自然社会经济环境复杂系统中,采用多目标决策分析技术,建立了包括国内生产总值、生化需氧量、林草面积指标、人均粮食占用量等指标的流域水资源承载力多目标分析模型,通过契比雪夫算法求解模型,分析了黑河流域张掖地区未来各规划水平年的水资源承载力^[48]。薛小杰等建立了水资源承载力多目标模型,研究了西安市 2000、2010、2020 水平年水资源承载力的大小和提高承载力的策略^[49]。方国华等建立了考虑社会经济发展、环境保护和水资源合理利用等目标的水资源承载力多目标分析评价模型,评价了张家港市的水资源承载力^[50]。庞清江等建立了包括经济、社会、环境的大汶河流域水资源承载力多目标决策分析模型^[51]。李韩笑等以武汉市为研究对象,建立了以人口最多、GDP 最大及 COD 排放量最少的多目标分析模型,计算不同决策意向方案下的水资源承载力^[52]。

动态模拟递推法是以水资源动态供需平衡分析为基础,计算水资源所能支撑人口和经济发展的最终规模,其实质是运用模拟法,将动态模拟和数学经济分析相结合,对地区水资源供需系统运动行为进行模拟预测,根据逐年运行的实际结果,

有目的地改变模拟参数或结构,使其与真实系统尽可能一致。当水资源供应能力达到“零增长”(对水资源紧缺地区)或地区人口经济增长达到“零增长”(对水资源丰裕地区)时,水资源承载力已达最大^[53]。但是,由于资料收集困难且逐年计算过于复杂,还未见到该方法的具体应用^[10,14,54]。

PSR 模型最初是由 Tony 和 David 提出的,用于分析环境压力、现状与响应之间的关系。20 世纪 70 年代,欧洲经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)对其进行了修改并用于环境报告;80 年代末至 90 年代初,OECD 在进行环境指标研究时,用该模型进行了适用性和有效性评价。PSR 模型设计的指标能较好地反映自然、经济、环境、资源之间的相互依存、相互制约关系,已应用在土地质量评价、农业可持续发展评价、水资源承载力评价等领域^[55]。陈洋波等将 PSR 模型扩展为驱动力-压力-状态-影响-响应模型(driving forces-pressure-state-impact-response, DPSIR),对深圳市水资源承载力进行了研究^[56]。

1.2.2 灌区水文循环研究现状

1. 灌区水文学含义

由于人类活动和水管理等措施的影响,使得灌区的水文特征十分复杂。在不同尺度水文特征的研究中,人们注意到灌溉排水与水文学的联系,并提出了灌溉水文学的概念。近年来,随着节水灌溉研究的不断深入,节水的尺度效应、节水潜力、节水型生态灌区等问题日益引起人们的关注,灌区水文学作为一门新兴的交叉学科正逐渐受到人们的重视,其重要性日益突出。由于灌区水文循环的复杂性,到目前为止,关于灌区水文学的研究还处于初步阶段,没有统一的认识。由希尧等认为灌区水文是农业水文的一个重要内容,主要是研究(农业)灌区内部的大气水、地表水、土壤水、生态水等的利用、消耗循环过程等水文现象^[57]。章曙明等认为灌区水文是指进入灌区的各类水体运动、变化、分布的规律。广义的灌区水文学是揭示以灌区为主体的人工绿洲区内各类水体运动、变化和分布规律的科学,其研究对象并不仅仅局限于农业,它涵盖了区域内各行业及人类生活与灌区内各类水体的内在联系^[58]。Wallender 等认为灌溉水文学是研究灌溉农业生态系统中物质的运输、转化、累积等特点及因社会、环境和资源保护等原因而引起的水资源短缺条件下(包括供水量减少和水质恶化)农产品产量可持续性的学科^[59]。许迪认为灌溉水文学是研究灌溉农业生态系统的一门科学,强调不同尺度上的水循环分析及其尺度转换过程,重点研究农田灌溉的水循环过程和农田生态系统的耗水过程,探索农田土壤-植物-大气系统中的水分运动、溶质运移、根系发育、植物生长、能量交换等过程间的相互关系及其系统中各界面间的转化机制与规律,分析从微观尺度的土

壤水到全球尺度的水文气候变化中不同时空尺度间的水循环过程转换关系,监测不同时空尺度的蓄水量与排水量、景观和生物过程及灌溉农业生态系统的变化趋势,评价不同时空尺度农业节水效果间的转换过程及其相应的节水潜力^[60]。代俊峰等认为灌溉水文学是灌区水文学和农业水文学的重要组成部分,是研究灌区的水文过程,重点研究灌溉对灌区不同尺度的水分循环、水量转化的影响及其对灌区生产力影响的一门学科。灌溉水文学包括地表径流、非饱和带水流、植物冠层截留、蒸发蒸腾、地下水流、河流、渠道流等多个水文过程,各个过程之间既相互联系又相互影响^[61]。

2. 田间尺度的水分循环

在灌区,当地下水埋深小于某一深度时,地下水与土壤水联系紧密,转化频繁,且转换关系是双向的、动态的。地下水在毛细力作用下,进入包气带土壤层,由土壤层到达植物根表皮,通过植物茎到达叶片,再由叶气孔扩散到大气,地下水、土壤水、植物水、大气水形成了一个统一的、动态的、相互反馈的连续性系统。随着土壤物理学、植物生理学、农田水利学的发展和农田生产的需要,人们一直致力于通过各种途径研究土壤与水、水与植物及土壤、植物、大气与水之间的相互关系,并已取得较大的进展。1966年,Philip提出了较完整的关于“土壤-植物-大气连续体”(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)的概念,认为SPAC系统虽然界面介质不同、界面不一,但在物理上却是一个统一的连续体,水在该系统中运动的各种流过程,就像链一样互相衔接,可以应用统一的能量指标——水势来定量地研究整个系统中各个环节的能量水平的变化,并计算出水分运动的能量^[62~64]。

SPAC系统涉及土壤学、气象学、植物学和水文学等学科,以包气带水、近地表大气水和植物体内水之间的转化关系为研究对象,充分考虑了水分运移的动力学机制及其生态学效应。SPAC中的水分、能量和盐分传输研究属于国际前沿课题之一。20世纪90年代初期,国际地圈生物圈计划(international geosphere-biosphere program, IGBP)将“水文循环生物圈方面”(biospheric aspects of hydrological cycle, BAHC)列为其四大核心课题之一,并将其归结为土壤-植被-大气传输过程(soil-vegetation-atmosphere transfer, SVAT);20世纪90年代,世界气候研究计划(world climate research programme, WCRP)研究了地表植被-大气间的相互作用,预测全球与区域的水文过程、水资源及其对环境的影响,并将陆面过程与气候模式结合^[64]。国内外许多学者对SPAC进行了相关研究。毛晓敏等对新疆叶尔羌河流域地下水均衡场1995年3~6月冬小麦返青至成熟期的田间水热状况进行了模拟^[65];王根绪等采用潜水蒸发公式和直接植物蒸腾估算等方法,对黑河流域中游防护林生态系统和下游荒漠绿洲生态系统的需水量进行了初步估算^[66];王少丽等将改进的有机氮肥管理模型(manurial nitrogen management; environment