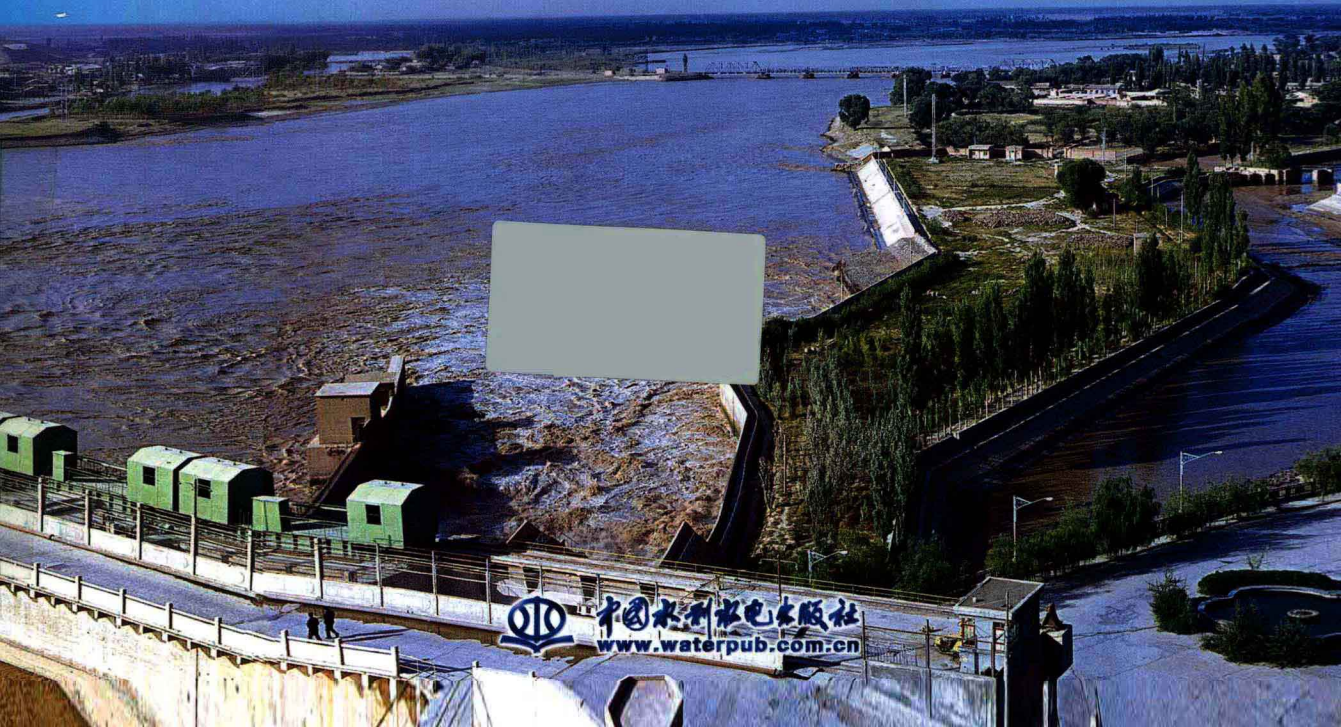


引黄灌区水资源合理配置 与精细调度研究

雷宏军 刘鑫 潘红卫 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

引黄灌区水资源合理配置 与精细调度研究

雷宏军 刘鑫 潘红卫 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于耗水的水资源管理理念,以水资源高效利用、水环境控制规划为依据,对灌区水资源合理配置的理论与方法体系进行探讨,构建了引黄灌区水资源合理配置与精细调度框架;建立了灌区水资源承载力评价指标体系;模拟分析了灌区蒸腾蒸发量时空分布规律;建立了灌区水资源多目标优化配置模型,对各类水资源在引黄灌区不同地区不同部门之间进行合理分配;建立了作物间及其生育期水量优化分配模型,采用动态规划的方法,结合地理信息系统(GIS)地统计技术,实现了灌区农业用水调度精细调度;以SWAT模型为工具,以ArcGIS为结果展现引擎,将水资源合理配置与灌区精细灌溉相结合,开发了引黄灌区水资源合理调配信息系统,实现了基于GIS的水资源合理配置与农业水资源精细调度,为引黄灌区水资源科学管理提供了基础平台。

本书具有系统性、综合性和创新性,可供从事水文、水资源、水环境等专业的科研、教学、管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

引黄灌区水资源合理配置与精细调度研究 / 雷宏军, 刘鑫, 潘红卫著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012.6

ISBN 978-7-5084-9914-7

I. ①引… II. ①雷… ②刘… ③潘… III. ①黄河—灌区—水资源管理 IV. ①TV213.4

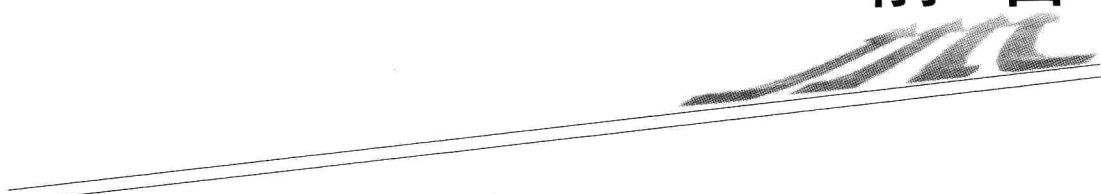
中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第136831号

书 名	引黄灌区水资源合理配置与精细调度研究
作 者	雷宏军 刘鑫 潘红卫 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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12印张 285千字
版 次	2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷
印 数	0001—1100册
定 价	38.00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



水资源短缺和水环境危机问题在世界范围内日益凸现,并成为制约经济发展、威胁人类生存的重要因素。尽管世界各国大型水科学会议都呼吁节约用水、保护水资源、提倡人水和谐,然而,关于如何开展对水资源的保护和合理开发利用并没有明确的实施方案。其原因主要有三:其一,水资源的开发、利用与管理是一个复杂的系统问题,牵涉到众多部门的利益,对于水资源的开发次序、分配优先权没有明确的法律法规约定;其二,由于各个国家和地区经济发展不平衡,节水管理难以采用同样的标准;其三,由于水资源系统的不确定性,给区域水资源利用规划带来较大困难。正是由于上述原因,长期以来水资源系统的管理没有科学的、综合性的理论指导依据。随着社会经济的发展,水资源及伴随的一系列水环境问题日益突出,水资源系统驱动力和水资源可持续利用等根本性问题开始摆在人们面前。

近 20 年来,随着“3S”(RS、GIS、GPS)技术和分布式水文模型的发展,对大尺度下水文过程的监测和反演逐渐成为可能,通过对流域水资源转化及水平衡过程的分析,人们逐渐认识到人类活动对地球上水循环过程的影响已不容忽视,尤其是在人口密集、生产活动集中的地区,人类活动改变了下垫面状况,改变了水资源的出流速率,区域水资源蓄变量呈现赤字的发展趋势,在我国黄河流域、华北平原地区水资源超采和地下漏斗问题令人震惊,这让我们逐渐认识到社会性水循环的作用越来越显著。

基于 ET 理念的水资源与水环境综合管理规划是当前流域水资源与水环境综合管理的最新研究成果,并在我国的海河流域得到成功应用。其核心思想是耗水控制,即以真实节水为基础,以提高水资源利用效率为重点,以水资源与水环境联合规划为手段,以严格实施水资源管理制度为根本,以实现区域水资源可持续利用为目标的水科学领域的一门新的方法论。本次研究结合 ET 理论、水资源配置理论、水权分配理论和灌区农业灌溉管理等理论方法,将水资源合理配置与高效利用综合方法应用于引黄灌溉典型灌区的水资源管理规划中,希望通过该研究为引黄灌区及其他地区水资源管理提供借鉴。

通过引黄灌区水资源合理配置与精细调度研究,主要取得了如下认识和

进展:

(1) 本次研究对 ET 的概念、意义、计算方法、规划思路进行了系统总结,对 ET 管理的机理——自然和社会水循环过程进行详细的论述,在此基础上推导出目标 ET 并指出基于 ET 的流域水资源管理规划应分为 4 个阶段。此外,基于真实节水相关理论提出了一些关于水资源高效利用方面的新概念,为水资源利用效率评价提供了新思路。

(2) 通过对人民胜利渠灌区水资源承载力、水资源可持续利用和地下水脆弱性的评价,主要得出以下认识:人均水资源量、人均用水量、人均产值等 7 个指标是影响灌区水资源承载力的主要因素,而人均水资源量是衡量灌区水资源承载力的最主要因素,灌区水资源保障因子、社会经济活动因子、水生态环境影响因子以及灌区总体承载状况均较弱;节水器具普及率、人均 GDP、水资源模数等 8 个指标是影响灌区水资源可持续利用的主要因素,其中节水器具普及率对灌区水资源可持续利用的影响最大,灌区现状水资源可持续利用能力为较弱;主成分分析结果表明地表土壤类型、含水层岩性等 9 个指标对地下水脆弱性的影响较大,灌区地下水脆弱性状况为一般。表明灌区水资源水环境问题的根本不在于区域水环境本身状况,而主要是由于社会和经济层面用水不合理造成的,因此,需要对水资源开发利用进行合理规划,提高水资源利用效率。

(3) 将 SWAT 模型初步应用于黄河中下游典型引黄灌区——人民胜利渠灌区水文循环的模拟评价中,表明通过对其子模块的修改和参数率定,该模型在平原区也具有较好的适用性,能够真实反演当地的径流、蒸腾蒸发等过程。通过对该灌区 ET 时空分布规律的评价,得出 ET 主要集中于灌溉地带和作物生长旺盛降雨丰沛的夏季 7~8 月。结合 ET 效率的概念,通过对各种土地利用类型以及农用地上不同作物的 ET 效率进行评价,得出 ET 效率由高到低的顺序为:农用地、城镇建设用地、草地、林地、水面。对于农用地,水浇地中水稻与秋作物轮作的 ET 效率最高,棉花—其他轮作的 ET 效率最低;望天田中小麦—花生轮作的 ET 效率最高,菜地和棉花—其他轮作的 ET 效率最低,水浇地的 ET 效率大于望天田。表明 ET 控制的重点在于农业,提高水资源利用效率的重点在于提高高耗水作物的水利用效率。

(4) 建立人民胜利渠灌区多水源多用户的水资源优化配置模型。通过对当前多目标优化求解方法的对比分析,提出了基于距离加权的逼近理想解的求解方法;同时,为将水资源配置与水资源水环境规划相结合,提出了基于方案优选的层次熵权模糊物元优选模型;结合区域发展及流域水资源与水环境管理目标,筛选出社会经济生态环境目标相协调的最合理的方案。根据最

优方案，以水资源保护和经济社会发展为依据，提出了水源开发利用次序和用水户的水资源分配次序等规则，最终得到灌区水资源开发利用方案和水资源在各部门各地区的配置结果。

(5) 结合灌区农业发展规划和灌区实际特点，以当地气象、种植、土壤资料为基础，采用彭曼-蒙特斯法 (Penman-Monteith equation) 模拟逐日参考作物需水量，通过对当地灌溉特点分析，指出双作物系数法更适用于相对缺水难以满足充分灌溉的引黄灌区。根据 FAO-56 文件的推荐方法，结合土壤水分消退函数和水田田间水量平衡方程，对灌区各种作物的逐日蒸腾蒸发和田间水分进行逐日模拟预报，并依据灌区作物间以及作物生育期水量优化分配模型对水资源优化配置结果的农业用水量进行精准分配；在上述基础上，采用 GIS 技术对控灌单元进行统计并确定了灌区水资源的调度过程。

(6) 在灌区水资源合理配置、精细灌溉及灌区水资源科学调度的基础上，编制了基于水资源高效利用及精准灌溉的人民胜利渠灌区水资源合理配置信息系统，克服了水资源评价、水资源配置、农业灌溉与水资源调度脱节的问题，为引黄灌区水资源系统科学的管理奠定了一定的基础。

本书作者均来自华北水利水电学院水利学院，各章编写分工如下：第 1 章由雷宏军、刘鑫撰写；第 2~6 章由潘红卫、刘鑫、雷宏军撰写；第 7 章由雷宏军撰写；第 8 章由潘红卫、雷宏军撰写。全书由雷宏军统稿。张芳、杨振法参与了引黄灌区水资源合理配置信息系统的研制工作；李道西对本书的修改提出了中肯的建议，在此一并表示感谢！本书的完成和出版得到了河南省重点科技攻关计划项目 (092102110032、102102110047) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07106-03-01) 的支持，在此表示感谢！

随着研究的深入，我们深刻认识到，引黄灌区水资源合理配置与精细调度研究是一个较为复杂、涉及面广的研究课题。本书力图为这方面的进一步深入研究提供借鉴，尚有许多内容需要继续深入探讨，且限于作者的水平和其他客观条件，书中定会存在许多不足甚至纰漏，恳请诸位专家批评指正。此外，本书中对于别人的论点和成果都尽量给予了引证，如有不慎遗漏，敬请谅解。

作者
2012 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义与目的	2
1.3 研究进展	3
1.4 水资源合理配置的原理与方法	9
1.5 研究内容	16
1.6 技术路线	16
1.7 本章小结	18
第 2 章 研究区概况及水资源现状评价	19
2.1 研究区概况	19
2.2 灌区水资源现状评价	28
2.3 本章小结	42
第 3 章 研究区 SWAT 模型构建及规划目标的确定	43
3.1 分布式水文模型构建	43
3.2 现状耗水分析	53
3.3 灌区蒸腾蒸发分布规律	55
3.4 ET 效率评价	58
3.5 规划目标	61
3.6 本章小结	63
第 4 章 基于 ET 指标的引黄灌区水资源配置模型	64
4.1 模型建立的原则	64
4.2 模型的关键指标	64
4.3 灌区水资源多目标优化配置模型构建	65
4.4 模型求解思路	66
4.5 求解方法	67
4.6 方案优选方法	68
4.7 本章小结	71
第 5 章 人民胜利渠灌区水资源合理配置研究	72
5.1 模型指标预测	72

5.2	水资源系统方案设置	81
5.3	水资源优化配置方案的求解	88
5.4	效益评价及方案优选	90
5.5	水资源分配结果	91
5.6	水资源最优管理方案	93
5.7	本章小结	94
第 6 章	基于农田尺度的灌区精细灌溉及调度研究	95
6.1	作物水分实时预报模型	95
6.2	作物精细灌溉制度动态规划预报模型	112
6.3	不同地区不同时期农业灌溉及用水量	115
6.4	灌区主要渠道水量分配及水资源调度过程	140
6.5	本章小结	144
第 7 章	典型引黄灌区水资源合理调配信息系统	145
7.1	系统框架	145
7.2	系统配置要求	145
7.3	系统功能展示	146
7.4	本章小结	151
第 8 章	结论与展望	152
8.1	结论	152
8.2	建议	154
8.3	展望	155
附录 A	附表	156
附录 B	引黄灌区水资源优化配置 Matlab 程序	165
附录 C	引黄灌区精细灌溉 Matlab 程序	171
参考文献		176

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

我国是一个有着几千年农田灌溉历史的国家，目前我国规划灌溉面积在 2 万 hm^2 以上的大型灌区共 402 处，粮食产量占全国 22%，商品粮率达 80%，是我国粮食安全的重要保障。灌区农业生产总值占全国农业生产总值的近 1/3，是我国农业和农村经济增长的重要支撑，灌区还承担了全国约 1/7 的城镇生活用水和工业用水总量的供水任务，受益人口 2 亿多，是我国经济社会发展的重要基础设施^[1]。

然而，随着经济的发展，我国大部分灌区已成为水资源匮乏地区，尤其是在北方，水资源已不能完全满足社会发展的需求，工业的快速发展使得农用灌溉用水转为工业用水，导致了水资源的分配矛盾。此外，灌区内生态环境也遭到了不同程度的破坏，生态用水无法保证，水土流失严重，造成了灌区生态环境及生活环境不断恶化，严重制约了灌区经济社会和水资源的可持续发展^[2-4]。本研究以人民胜利渠灌区引黄灌区为研究对象，并对其水资源进行合理配置研究。

人民胜利渠灌渠始建于 1951 年，因其有“新中国引黄灌溉第一渠”的美称而享誉国内外。开灌 60 年来，不仅使灌区的工农业生产得到了很大发展，同时对生态环境的改善及人民生活水平的提高都发挥了重要作用。但是，随着灌区经济社会的迅速发展，灌区水资源短缺和水生态环境恶化态势日益严重，造成灌区间上下游争水、工农业争水、城乡间争水、超采地下水、挤占生态环境用水等问题，成为制约灌区进一步发展的重要因素。另外，由于目前灌区水资源配置的不合理，致使短缺的水资源使用更加紧张^[5-6]。

传统的水资源配置方法在水源上仅注重地下水和地表水的控制，而不注重不易调控的土壤水资源。在用水方面仅重点考虑生活、工业、农业和生态用水，而忽略了天然生态循环中的水分；在供—用—排—耗水循环系统中，对于耗水系统的科学计算方法较少；在水资源配置中没有考虑水循环的作用，便不能准确地预测出区域水资源的供水和耗水；在经济快速发展的今天，工业用水挤占农业用水和生态用水的矛盾也越发突出，要使水资源得到高效利用、水资源能公平分配，就要充分考虑水资源在人工—自然二元水循环的影响，水资源配置才能更加合理和科学。



1.2 研究意义与目的

1.2.1 研究意义

黄河流域不仅是中华民族文明的发祥地,还是中国最大的粮棉基地,全国三大粮食产区河南、河北、山东均位于引黄灌区,全国五大商品棉基地中的3个主要依靠黄河水灌溉,因此黄河灌区对我国北方地区乃至全国的粮棉安全保障起着至关重要的作用。近年来随着黄河流域气候变化,黄河流域旱灾频繁发生,自1972年黄河首次出现断流,近40年以来黄河断流频次越来越高,黄河滩裸露面积也在持续增长,径流量则明显减小,黄河流域作为世界上人口最密集的地区,水资源本就捉襟见肘,两岸地区经济社会高速发展致使水资源问题更加严峻。自1980年以来,黄河流域地下水开采量增加迅猛,增幅占供水总量增幅的57%,尤其是黄河沿岸的一些大中城市,地下水超采严重^[7]。目前黄河流域存在较大地下水漏斗区65处,漏斗面积接近6000km²^[7-9]。一些专家指出,黄河流域有集中水源地的地区基本都存在漏斗,城市地下水超采已相当严重,如果不加以控制,有可能重蹈华北覆辙^[7-9]。一些地方不合理地开发利用地下水,不仅破坏了水资源循环,还带来环境安全问题。由于黄河流域水资源紧缺,地下水保护问题尤为突出。我国的华北地区由于超采地下水,已形成跨京、津、冀、鲁的大型降落漏斗,有近7万km²面积的地下水水位低于海平面,成为世界上最大的漏斗区^[10-12]。引黄灌区水资源状况及存在的水资源、水环境问题迫切要求我们对现有水资源利用方式进行转变,探寻新的水资源利用和管理模式,以逐步改善区域水生态问题,在合理的规划下实现区域水资源的可持续利用,避免“华北水环境危机”在黄河流域重演。

1.2.2 研究目的

降雨形成的水资源,除了消耗于蒸腾蒸发重返大气外,剩余汇流入海,只有地表径流、土壤水和地下水在一定条件下可相互转化,这些转化只是改变了水的存在场所,但并非水量的真正减少,只有水分的蒸腾蒸发(ET)才是水量实际的减少,也就是真正的耗水量。为此,只有从耗水着手,把不必要的蒸腾蒸发降下来,把超采地下水形成的蒸腾蒸发减下来,这样既考虑了人类生活和生产对水的需求,又考虑了自然环境生态平衡对水的需要,使水资源得到合理的利用,符合社会可持续发展的要求。

基于ET指标的水资源配置与传统的水资源配置的区别在于传统的水资源管理只注重取水管理,将取水的减少量作为节水的主要评判指标,取水的减少量等同于节约的水量^[13-15]。因此在传统水资源配置中,主要调配的是供水水源和部门间的供用水分配,而缺乏对ET的控制和分配,其结果是,发达地区或者强势部门通过提高水的重复利用率和消耗率,在不突破允许取水量限制的条件下,会消耗更多的水资源量(增加ET);在区域水资源条件基本不变的情况下,这就意味着欠发达地区或者弱势部门如农业、生态等可使用的资源将会被挤占。因此,按照传统水资源配置理念,水资源利用的公平性和合理性并不能得到保证,生态系统的安全也不能得到保障。所以,只有对ET进行控制才能真正实现区域水资源的可持续利用。对ET进行控制,不仅需要从区域整



体对 ET 进行控制,还需要对局部区域的 ET 和不同部门的 ET 进行分别控制。否则,即使整个区域 ET 得到控制,由于局部和分项的 ET 控制没有实现,也可能造成水资源问题。

ET 管理是以 ET 控制为基础的水资源管理,是对水资源需求更深层次的调控,是由“供水管理”向“耗水管理”转变的具体实施^[16-18]。重新认识水资源的内涵,准确估算区域 ET,客观解析区域蒸腾蒸发构成,合理鉴定区域水资源消耗过程中的低效与高效成分,是基于 ET 的水资源管理应用的理论基础与技术支持。ET 管理在流域尺度上的 ET 在水资源配置和管理中起着关键性的作用,区域水量平衡分析是水资源监测、评价和管理的依据,其中 ET 是水资源管理中最重要控制要素,在当前水资源严重短缺的情况下,ET 的监测和总量控制、定额管理对流域的水资源管理、区域规划和可持续发展研究,有着特别重要的意义,要把对水资源的管理与社会经济的发展综合起来考虑,以实现社会的可持续发展。

本研究依托河南省重点科技攻关计划项目(092102110032、102102110047),以我国重要的粮食生产区——引黄灌区为例,通过对气候变化条件下区域水循环的模拟分析与评价,结合当前流域水资源与水环境综合管理的最新研究成果,在确保粮食安全、经济发展和水环境可持续发展的基础上,以黄河流域典型灌区——人民胜利渠灌区为例,通过对真实节水理论与技术体系的研究,对有效、无效、低效、高效 ET 的界定与分析,对区域水文水循环、水资源利用与区域水生态响应机制的研究,建立了包含灌区水生态修复、区域水资源高效利用、水资源联合调度与优化配置、基于推导的真实节水理论与相应技术体系的引黄灌区水资源科学管理模式。通过本研究,希望对引黄灌区水资源科学管理与可持续利用提供一定的借鉴。

1.3 研究进展

1.3.1 流域水资源合理配置

1.3.1.1 流域水资源合理配置的内涵

对流域水资源合理配置的定义国内外学者给出了各种不同的描述^[19-31],综合这些学者的核心思想,可将流域水资源合理配置的概念定义为:流域水资源合理配置就是以流域为单元,以保障流域及上下游水循环的健康状况和流域内各子单元经济、社会、生态、环境子系统的协调发展为基础,依据社会和国民经济系统各部门用水、污染排放控制、生态环境需水特点和流域点源、非点源污染和地下水环境现状、发展趋势及防治规划,对其地表水资源、地下水资源和其他水资源进行宏观科学调度和优化配置,实现流域系统协调、稳定、可持续发展目标。

1.3.1.2 水资源合理配置的发展

我国水资源合理配置思想的发展大致经历了 5 个阶段^[23-25]:第 1 阶段,就水论水。起初是“以需定供”的水资源配置;之后由于水资源供需矛盾加剧,逐步发展到“以供定需”的配置阶段。第 2 阶段,基于宏观经济的区域水资源优化配置理论。由于“就水论



水”就供、需关系进行分析,忽视了区域经济发展的动态协调,于是综合考虑区域水资源供需和经济社会发展问题的基于宏观经济的区域水资源优化配置理论应运而生。第3阶段,基于人工—自然二元水循环模式的水资源合理配置。随着生态环境问题的日益突现,传统的仅考虑区域经济社会发展而忽略区域生态问题的配置模型已不适应区域可持续发展的要求,在这种情况下,以自然生态系统恢复与经济发展相协调为目的的基于二元水循环模式的水资源合理配置模式初步运用。第4阶段,以宏观配置方案为总控的水资源实时调配。区域水资源调配与其他区域以及整个系统之间都有着密切的联系,水资源配置不仅要实现区域的最优化,还要实现更大尺度上的全局优化,因此,以宏观大系统为对象的水资源调配对区域及流域水资源优化配置才更合乎实际。第5阶段,经济生态系统广义水资源合理配置。此前水资源优化配置中注重对地表水和地下水资源的优化配置,忽略了对土壤水资源的考虑,而土壤水对区域水资源尤其是农业来说是不可忽略的,该配置方法是当前水资源优化配置中相对最为全面也最科学的配置模式。

研究内容的转变和发展大致经历了5个阶段:第1阶段,单纯研究水资源在各部门间的调度;第2阶段,研究开源节流,包括节水理论与技术和跨流域调水;第3阶段,开始考虑区域水污染和生态问题的水资源配置模式;第4阶段,研究水权分配问题;第5阶段,研究真实节水。

1.3.1.3 水资源合理配置理论的最新成果

目前,较为系统、完善的流域水资源管理理论体系是由世界水资源管理委员会提出的流域水资源与水环境综合管理理论与KM(Knowledge Management)知识管理系统。在我国,该理论最早在全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理(IWEMP)中得到应用和发展,并取得了巨大成功,目前正在积极地向其他地区和流域管理中推广。

李锋瑞等^[32]指出,以水资源过度开发、水环境污染、水资源短缺及用水效率和效益低下为主要标志的水危机日益凸显的今天,探寻和构建与中国国情相适应并能反映先进生态水文化的现代水资源管理模式,是解决我国流域目前面临的水问题、应对未来不断加剧的水危机、实现区域经济社会可持续发展的必由之路和战略抉择,提出从传统的以行政区域为单元、以政府为主导、以供水管理为核心的水资源管理模式向以流域为单元、以市场为主导、以需水管理为基础的水资源综合管理模式的转变,是未来我国流域水资源管理模式理论创新的重要发展方向。

水权合理分配在国外水资源管理中取得了巨大成功^[32-39]。受国外水资源管理方法的启发,我国学者将水资源、水环境问题综合考虑,指出解决水资源、水环境问题的根本是要提高水资源利用效率,加强水资源、水环境管理,通过高效用水规划对流域水权进行合理分配,在此基础上较为系统地提出了基于ET的水资源管理理论^[40-46],其研究内容包括水资源管理的原则、方法和模型,具体包括综合ET与目标ET的量化方法、基于ET的水权分配方法、流域二元水文模型ET模拟的方法及水资源管理实现程度的评价方法,基本上建立了基于ET理论的水资源管理框架。其他学者也做了一些应用性的研究,王树谦等^[47]依据研究区域降水量、灌溉水量、土壤含水量,分析计算单一作物和多种作物的蒸腾蒸发、耕地与非耕地的综合蒸腾蒸发;依据降水量、可利用的入境水量计算区域可利用



水量,结合水资源配置等因素分析确定目标蒸腾蒸发,并根据计算出的目标蒸腾蒸发进行水权分配,在此基础上,采用3种节水措施,建立相应水资源配置方案,利用SWAT模型进行情景分析,通过方案比较,制定符合特定区域的、切实可行的用水规划方案;彭致功、刘钰等^[48]采用分类均值法构建了基于遥感ET数据的作物水分生产函数,分析了遥感ET与遥感产量和水分生产率的关系,在此基础上利用构建的一次抛物线模型计算了水分生产率最大时典型作物经济耗水量,并结合研究区域典型作物需水量计算成果,确定了区域典型作物的ET定额。

1.3.1.4 水资源合理配置模型与求解

1. 国内外水资源配置方法

水资源优化配置的思想最初来源于系统工程。1955年美国哈佛大学首先制定了水资源大纲,重点研究现代水资源系统工程的方法论。1957年美国加利福尼亚大学成立了水资源中心。20世纪60年代初,美国西部资源会议制定了以水资源为重点的长期科研规划。这些活动推动了水资源系统工程的发展。20世纪60年代,英、苏、法等国都开展了水资源系统工程的研究,并建立了相应的科研机构,例如美国北大西洋区域的水资源规划,阿根廷的科罗拉脱河流域水资源规划,前苏联的巴古参茨克水电站的施工设计等都应用系统分析方法进行了水资源系统的优化工作。此后,系统工程学家开始考虑人的因素并开始转向对复杂系统问题由求解转向在“学习过程”中寻求最优变化,这就形成了系统学和系统论,主要包括人工智能(20世纪50年代)、混沌(1963)、模糊集合(1965)、耗散结构(1969)、协同学(1969)、突变论(1969)、超循环(1971)、知识工程(1977)等理论,这些理论先后应用于水资源配置当中,并真正与实践相结合。在20世纪90年代,系统工程学进一步发展,这些方法统称为开放复杂系统理论。随着近代计算机理论的创立和计算机技术的日益发展,对复杂系统的求解已不再是不可能的问题,在计算机中几小时甚至几分钟便可得出优化结果,一些优化求解算法被提出,如神经网络理论、遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等算法及其交叉运用与改进,这些方法在现代水资源优化配置中已广泛应用^[49-51]。

我国水资源优化配置最早是在20世纪60年代,最初用多目标决策问题研究水库优化调度问题^[52]。20世纪80年代初,华士乾等^[53]利用系统工程方法对北京地区的水资源利用效率、水资源分配及水资源开发利用对国民经济发展的影响作用等进行了研究,成为我国水资源合理配置的先驱。20世纪90年代,许新宜、王浩等^[54-55]运用宏观经济学方法结合区域水文水资源概念模型,在模拟评价的基础上,对黄河及其他流域广义水资源配置模式进行研究,给出了水资源优化配置的概念、内涵、原则、方法和工具,标志着水资源优化配置模型系统的逐步完善。“十一五”期间是水利事业发展较快时期,各种水资源优化配置模型相继应用,余建星等^[56]运用模糊物元模型对天津市区域水资源优化配置方案进行优选;卞戈亚^[57]运用遗传算法求解河北省区域水资源配置各方案的解,并根据各方案综合评分优选出最优方案;史银军等^[58]基于水均衡模型和BP人工神经网络模型模拟的水量结果,构建了两级计算单元的两层水资源优化模型,采用模拟寻优和遗传算法对石羊河流域灌区水资源进行了配置;任高珊等^[59]采用遗传算法对绥德县水资源配置做了研究;甘治国等^[60]采用模型模拟和多目标规划相结合的方法对北京市水资源利用进行规划;李



颖智等^[61]用目标规划法对格尔木市水资源进行优化配置;高佳等^[62]构建了包括社会效益、经济效益、环境效益目标的水资源优化配置模型,运用层次分析法(AHP法)将多目标问题转化为单目标问题并利用线性规划工具对馆陶县水资源在各部门间进行合理分配;郭胜等^[63]用加速遗传算法对哈尔滨市水资源优化配置;于言哲^[64]采用系统动力学方法对新疆奇台县水资源系统进行仿真模拟,从高、中、低方案中优选出水资源最佳配置方案;钟平安^[65]运用群组决策特征根法对济宁市水资源配置方案进行优选;耿福明等^[66]基于效益最大原则对南水北调受水区枣林市水资源配置模型进行多目标求解;蒋云钟等^[67]采用基于蒸腾蒸发指标的流域水资源规划原理对北京市水资源进行优化配置;孙月峰等^[68]采用混合遗传模拟退火算法对海河流域的大清河小流域水资源进行配置调度;裴源生、张勇等^[69]基于广义水资源理论,根据供需平衡分析,在情景分析的基础上优选出宁夏水资源配置方案;曾国熙等^[70]采用投影法、模糊物元和投影寻踪算法对黑河流域水资源配置方案进行优选;黄显峰等^[71]将多目标混沌算法应用于举水流域水资源配置中;卢兴旺等^[72]以模糊神经网络方法对水资源配置方案进行评价;刘丙军等^[73]根据协同学理论中的系统演化过程的熵——Shannon Entropy 信息熵原理对东江流域水资源配置进行研究。

2. 水资源配置方法的比较

除前述以系统优化为基础的多目标问题外,水资源配置方法还有其他两类:一种是以传统的供需平衡分析为基础的水量配置;另一种是以情景分析为基础的水资源配置方案优选模型,如物元法、模糊综合评价方法等多指标评价方法及单指标评价法。这3种方法中,供需分析方法侧重于以需定供或以供定需,是一种较为粗略的配置方法,不能得到水资源的最优配置结果;情景分析方法是以前所拟定的可能性较大的水资源系统配置方案产生的效果做出定性或定量描述,通过对比筛选出最优方案,该方法能够充分体现人的主观判断能力,但同时也会受个人主观意志影响较大,因此在一定程度上不如多目标求解方法客观;多目标优化方法是现代水资源经济系统研究的热点,该模型综合考虑水资源系统所要达到的目标及所受限制,因此能够得到较为理想的水资源配置结果,但单纯依靠多目标优化配置模型,难以对平行方案进行比较分析,因此,还需要将纯优化问题与现代系统学的其他方法相结合。

1.3.2 流域水资源高效利用

1.3.2.1 流域水资源高效利用的内涵

水资源高效利用(High Efficient Utilization of Water Resources)是指:在维持当地生态环境状况下,要尽可能地减少水资源的无效消耗,控制水资源流向人类社会、生产、生活中,并使这些水资源都能充分发挥其效益。这其中包含两层含义:一是控制水资源不浪费在自然界;二是水资源不浪费在无效的人类生产生活当中。

1.3.2.2 实现手段

1. 流域水资源高效利用实现手段

水资源高效利用就是要通过对水资源系统中无效消耗和低效利用部分,采取工程、技术、管理等一系列调控措施,将无效和低效部分转化为高效部分。



2. 相关概念

可控 ET(Controllable ET) 指能够为人类控制的自然界蒸腾蒸发及人类社会的耗水。

不可控 ET(Uncontrollable ET) 指难以为人类控制的自然界蒸腾蒸发。

有效 ET(Effective ET) 指可产生对人类有益成果的 ET。

无效 ET(Inefficient ET) 指不能产生对人类有益成果的 ET。

高效 ET(High Efficient ET) 在 ET 总量中, 有效 ET 占据绝对优势的情况。

低效 ET(Low Efficient ET) 在 ET 总量中, 有效 ET 不占据优势的情况。

3. 真实节水的内涵

真实节水 (Real Water Saving) 指通过工艺措施、农艺措施、工程措施、管理措施、技术措施等手段, 增加工业、农业、生活、生态等系统对有效 ET 的利用, 减少对无效 ET 的消耗, 尽可能将低效 ET 向高效 ET 转变, 增加高效 ET 在自然和人类社会水循环中所占的比例^[74-77]。

4. 真实节水措施

对真实节水理论和技术体系的研究主要集中在农业上, 包括对真实节水计算方法和相应保障体系的研究^[78-80]。周忠生^[81]根据河北省馆陶县世界银行节水灌溉项目的实际, 推算渠系和田间水的有效利用系数, 得出在节水工程建设以后, 节水潜力主要在田间。最理想的目标是使地面蒸发越少越好, 直至趋于零。通过小畦化灌溉、沟灌、喷灌、滴(微)灌、土地深耕深松、地面覆盖、科学施肥培肥地力和种植结构调整等, 不断提高田间水的有效利用系数。罗学军^[76]指出, 节约和高效率用水的基本环节有 3 个: ①减少降水、渠系输水、田间灌溉过程中的深层渗漏和地表流失量(包括渠系退水量和田间排水量), 提高降水和灌溉水的利用率, 减少单位灌溉面积的用水量; ②减少田间输水过程中的蒸发蒸腾量; ③提高灌溉水和降水的水分利用效率, 为获取更高的产量和效益而奢侈消耗农田水分。减少田间和输水过程中的蒸发损失, 是节约不可回收的水量, 提高了有限水资源的利用率, 是资源型“节水”。而降低作物耗水系数是节约了奢侈性水分消耗, 提高了水资源的利用效率和效益, 是“效益型”节水。因此, 真正意义上的节水是节水增效, 具有显著的效益特征。雍友玉^[82]从经济学的角度出发, 提出冬小麦非充分灌溉制度下真实节水潜力的计算公式, 并指出通过对有机培肥、耕作、覆盖(地膜、秸秆)、栽培管理等农业措施与滴灌、喷灌、渠道防渗、管道输水等工程措施下的冬小麦真实节水潜力进行分析, 提出了工程节水、农业节水和管理节水的结合, 来提高农业综合生产能力, 建立节水型农业, 从而实现农业可持续发展。王树谦等^[47]的试验结果表明, 采用综合节水措施后的节水效果优于单一的工程措施, 综合节水措施与种植结构调整相结合节水效果更佳。彭致功、刘钰等^[48]分析了典型农作物 ET 定额管理耗水节水潜力, 从节水量角度得出, 夏玉米定额管理耗水节水量最大, 其次为冬小麦; 对于降低北京市大兴区综合 ET 贡献进行比较发现, 夏玉米定额管理耗水节水贡献最大, 其次为冬小麦, 其贡献量分别为 11.27mm、3.54mm。

1.3.3 分布式水文模型在流域水资源管理中的应用

分布式水文模型对流域水资源模拟评价具有较大的优越性, 在流域水资源管理中的应



用日益广泛^[83-87]。胡立堂等^[88]认为传统水资源评价方法在变环境作用下“还原失真”和“还原失效”，而分布式物理模型可以解决下垫面变化的问题，采用分布式模型对流域水资源评价更加合理；顾万龙等^[89]用 SWAT 模型研究气候变化下地表径流等水文过程的影响是当前全球气候变化情形下水文水资源领域的重要研究方向；采用分布式水文模型对流域蒸腾蒸发模拟评价，结合真实节水和高效用水，开展对农业水利工程节水改造和农业结构调整已取得初步成果；陈强等^[43]根据 SWAT 模型的模拟评价结果，结合水资源优化配置模型，对天津市流域水资源进行配置研究是当前流域水资源管理研究的热点；桑学锋等^[41-44]将改进的 SWAT 模型用于流域水资源开发利用管理模拟评价研究。分布式水文模型在水文水资源及流域水资源管理中的应用正越来越广泛。

1.3.4 精细灌溉动态规划

非充分灌溉条件下寻求作物最优灌溉制度的各类模型中，目标函数一般分为 3 种：一是以单位面积产量最大；二是以单位面积的净效益最大；三是以整个灌区的净效益最大。目标函数确定以后，选用合适的水分生产函数便可优化灌溉制度。其设计过程就是有限水量在不同时间（同一作物生育阶段及连作作物之间）和空间（不同地块作物）上进行合理的多阶段决策过程。一般运用运筹学中的动态规划（DP）或者随机动态规划（SDP）的模型求解。

国外对于非充分灌溉条件下最优灌溉制度的研究起步较早。1967 年，Flinn 和 Musgrave 论证了 DP 法用于有限水量灌溉时求解最优灌溉制度的可行性，并以阶段初可供水量为状态变量建立了相应的 DP 模型，但该模型忽略了阶段初土壤贮水量的作用^[90]。Hall 和 Butcher（1968）建立了以阶段初可供水量和土壤初始含水量为状态变量的二维 DP 模型，把各生育阶段灌水量作为决策变量^[91]。对于随机动态规划模型的研究，把降雨量或腾发量作为随机变量，通过统计、分析历史资料，运用随机过程的有关理论，找出降雨或腾发量年际间的变化规律，结合 DP 法，求出有限灌溉水量条件下作物的最优灌溉制度。如 Dulley 等（1971）用二维 SDO 模型，把土壤含水量和可利用的灌溉水量作为状态变量，把降雨量作为随机变量^[92]；Rhenals 和 Bras（1981）把腾发量作为随机变量建立 SDP 模型，状态变量为每个阶段的土壤含水量、上个阶段潜在腾发量和本阶段以后可用于分配的有限水量。按以上 DP 和 SDP 模型求出的水量仅是作物在各生育阶段之间，而不能解决在规划时段或短期内（周）的最优灌溉问题^[93]。基于此，Rao 等 1988 年提出了用生育阶段和周时段两级水平求解优化灌溉制度^[94]。

国内对于非充分灌溉条件下最优灌溉制度的研究起步较晚，但发展较快。荣丰涛（1986）用 DP 法对冬小麦作了最优灌溉制度的研究^[95]；袁宏源（1990）等用二维 DP 模型求解了几种干旱作物的最优灌溉制度^[96]；张展羽等（1993）把非充分灌溉条件下土壤水分的消长函数概化为计划湿润层含水量始终低于适宜下限的线性部分和含水量高于上限的非线性部分，并用动态规划的方法求解了最优灌溉制度^[97]；崔远来（1999）将降雨视为随机变量，建立了稻田高效节水优化灌溉制度的随机动态规划模型^[98]；崔远来（2002）用两层分解协调模型（DP—SDP 迭代法）求解了缺水条件下水稻的最优灌溉制度^[99]。



1.4 水资源合理配置的原理与方法

1.4.1 基于 ET 指标的流域水资源合理配置的原理与方法

在 GEF-IWEMP 中, 流域水资源与水环境综合管理的核心思想是 ET 管理, 基础是水资源与水环境的优化与调控, 重点是真实节水, 保障是法律、体制、建设和管理^[14]。

1.4.1.1 基本概念

耗水量 (Water Consumption) 指项目区水资源循环过程中的流失量 (通过狭义的蒸腾蒸发、流入污染水体、用于生产用途等), 且不能再次利用的水资源量^[14,80]。为便于水资源综合管理研究的需要, 将耗水量称为广义 ET, 即 ET 不仅包括流域的蒸发蒸腾量, 还包括转化为污水、进入产品中等的不可回收的水资源量。流域或区域 ET 的总和称为综合 ET (Comprehensive Evapotranspiration, 简称 ET_{com})^[14-18,46]。

$$ET_{com} = \sum_{i=1}^m ET_i + \sum_{j=1}^3 ET_{m+j} = ET_{lus} + ET_{nu} \quad (1-1)$$

式中: ET_i 为各种土地利用类型上的蒸腾蒸发量, 万 m^3 ; ET_{m+j} 为耗水量, 其中 $j=1, 2, 3$, ET_{m+1} 为工业耗水量, 万 m^3 , ET_{m+2} 为第三产业耗水量, ET_{m+3} 为生活耗水量, 万 m^3 ; ET_{lus} 为各种土地利用类型上的蒸腾蒸发量, 万 m^3 ; ET_{nu} 为非蒸腾蒸发耗水量, 万 m^3 。

目标 ET (Evapotranspiration Goal, 简称 ET_{goal}) 指在某一经济技术水平下, 在保障社会正常发展下, 为实现当地生态环境治理目标而确定的相对应的耗水总量与分量^[14,100-102]。

1.4.1.2 理论内涵

ET 是英文蒸发和蒸腾的合成词, 表示水通过一切形式由液态转换成气态的过程。在我国世界银行贷款开展节水灌溉项目中, 世界银行提出以“真实节水”为手段, 实现项目区农业增产增收和水资源可持续利用的目标。“真实节水”的含义为减少项目区 ET 消耗量, 只有减少水分的蒸发蒸腾, 才是区域水资源量的真正节约。

基于 ET 的水资源规划与传统的水资源规划是有区别的。传统的水资源管理, 注重取水管理, 节水的效果主要由取水量的减少来衡量, 取水的减少量等同于节约的水量。因此在进行水资源规划时, 主要在区域间和部门间分配各种可利用的水源, 缺乏对 ET 总量的控制和分配。这会导致部门水资源的分配不均, 产生水资源矛盾突出。因此, 按照传统水资源规划理念, 水资源利用的公平性并不能真正得到保证, 生态系统的安全也并不能真正得到保障。所以, 只有对 ET 进行控制才能真正实现流域/区域水资源的可持续利用。对 ET 进行控制, 不仅需要从流域/区域整体对 ET 进行控制, 还需要对局部区域的 ET 进行分别控制。否则, 即使整个流域/区域 ET 得到控制, 由于局部的 ET 控制没有实现, 可能会造成局部的水资源问题。

综上, 为实现水量目标, 需采用“耗水控制”替代“用水控制”, 因此应当进行“耗水平衡”分析, 而不是传统的“供需平衡”分析。“耗水平衡”分析是指在实际水资源消耗量和总的目标消耗量 (或称之为水资源允许最大消耗量) 间的平衡, 实际水资源消耗量