

SHUIZIYUAN ZONGHE DIAOPEI MOXING
JISHU YU SHIJIAN

水资源综合调配模型 技术与实践

蒋云钟 鲁帆 雷晓辉 等 著



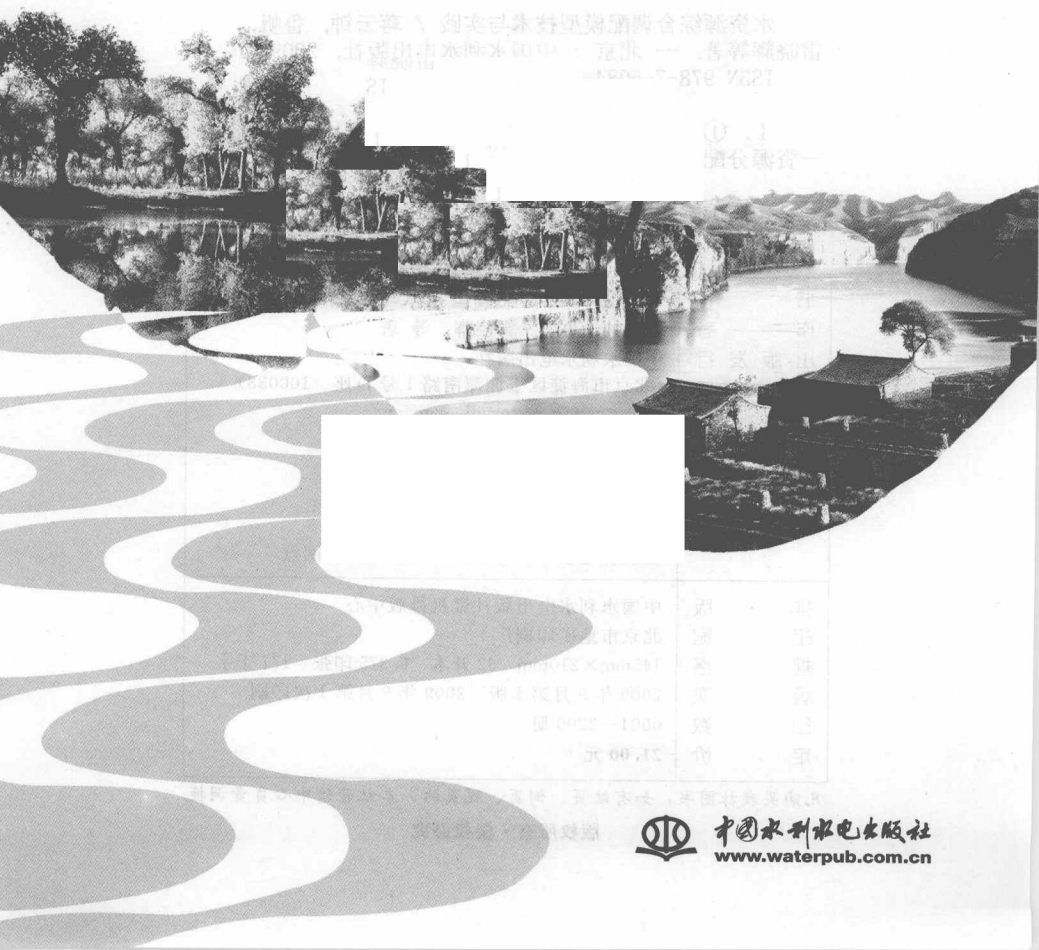
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

要 點 容 內

水资源综合调配模型 技术与实践

蒋云钟 鲁帆 雷晓辉 等 著

图例 (910) 国家水利部



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从水资源系统的“自然—人工”二元特性出发,面向资源型缺水地区水资源利用的实际需求,阐述了水资源综合调配模型的构建原理与实践应用。主要内容包括水资源综合调配技术体系,基于ET管理理念的水资源规划配置模型技术,基于自适应模式的水资源综合调度模型技术及北京市水资源综合调配研究实例。

本书理论紧密联系实际,所建模型具有较强的通用性和可拓展性,可供水资源规划、调度与管理领域的工作人员及水利、地理、生态、环境等相关专业的研究生和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水资源综合调配模型技术与实践 / 蒋云钟, 鲁帆, 雷晓辉等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2009
ISBN 978-7-5084-6821-1

I. ①水… II. ①蒋… ②鲁… ③雷… III. ①水资源—资源分配—研究—中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第164355号

书 名	水资源综合调配模型技术与实践
作 者	蒋云钟 鲁帆 雷晓辉 等 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	北京市地矿印刷厂
规 格	145mm×210mm 32开本 6.375印张 171千字
版 次	2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷
印 数	0001—2200册
定 价	21.00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

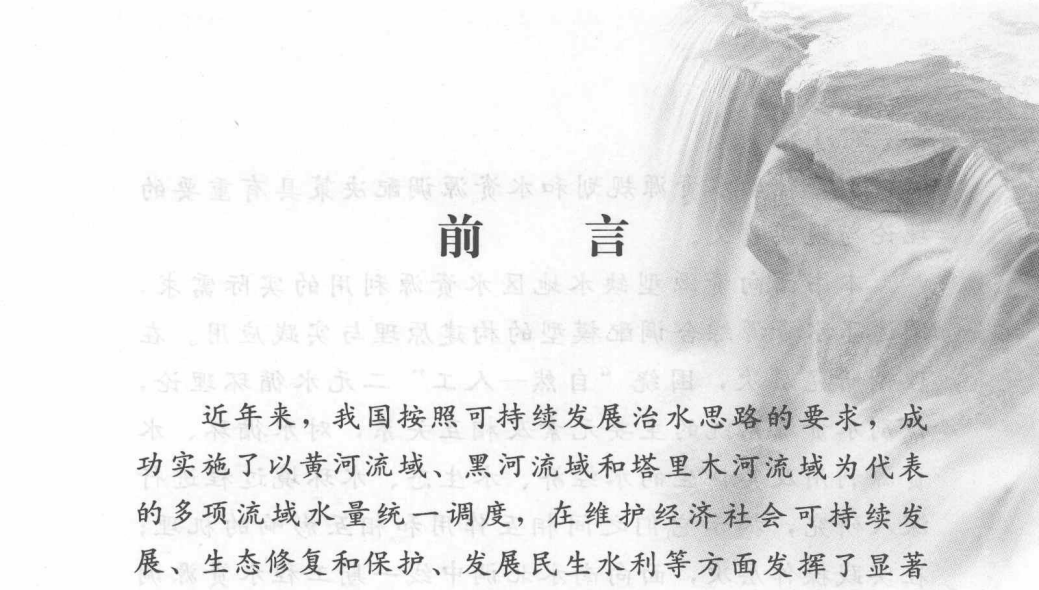
《水资源综合调配模型技术与实践》

编写人员名单

蒋云钟 鲁 帆 雷晓辉 王 浩

赵红莉 韩素华 甘治国 殷峻暹

张双虎 罗心暖 王海潮 沈媛媛



前 言

近年来，我国按照可持续发展治水思路的要求，成功实施了以黄河流域、黑河流域和塔里木河流域为代表的多项流域水量统一调度，在维护经济社会可持续发展、生态修复和保护、发展民生水利等方面发挥了显著

配模型，辅助水资源规划和水资源调配决策具有重要的理论与现实意义。

本书面向资源型缺水地区水资源利用的实际需求，阐述了水资源综合调配模型的构建原理与实践应用。在理论研究层次，围绕“自然—人工”二元水循环理论，识别水资源系统的主要元素及相互关系，对水循环、水资源利用及其伴生的水经济、水生态、水环境过程进行深入研究，揭示它们之间相互作用和相互影响的机理；在实践操作层次，面向南水北调中线一期工程水资源调度、流域水资源一体化管理、缺水型大城市水资源可持续利用管理等重大的实践需求，以问题为导向，建立实用的水资源综合调配模型和决策支持系统，辅助水资源调配决策。其主要内容包括以下几个方面。

(1) 水资源综合调配技术体系。从水资源综合调配的实践需求出发，论述水资源综合调配的概念与关键问题，概括水资源综合调配的类型和特点，并探讨了“自然—人工”二元水循环模式下的水资源综合调配方法。

(2) 基于ET管理理念的水资源规划配置模型技术。分析水资源规划配置的理论基础，从真实节水的基本概念出发，阐述基于ET指标的水资源配置总体思路，并提出支撑其研究的多目标分析模型、水资源配置模型、水循环模拟模型相耦合的模型框架结构。

(3) 基于自适应模式的水资源综合调度模型技术。分析水资源调度的理论基础，从自适应控制基本概念出发阐述水资源系统的自适应调控模式，提出了支撑其研究的模型框架结构，并详细介绍了其中的贝叶斯概率水

文预报技术、流量演进模型的参数估计方法、序贯优化调度模型构建等关键技术。

(4) 北京市水资源综合调配研究实例。根据南水北调中线一期工程实施后北京市水资源综合调配的实际需求,运用本书所建的通用性水资源综合调配模型,建立北京市水资源综合调配决策支持系统,以此为平台研究南水北调中线一期工程实施后北京市不同水源的调配方案。

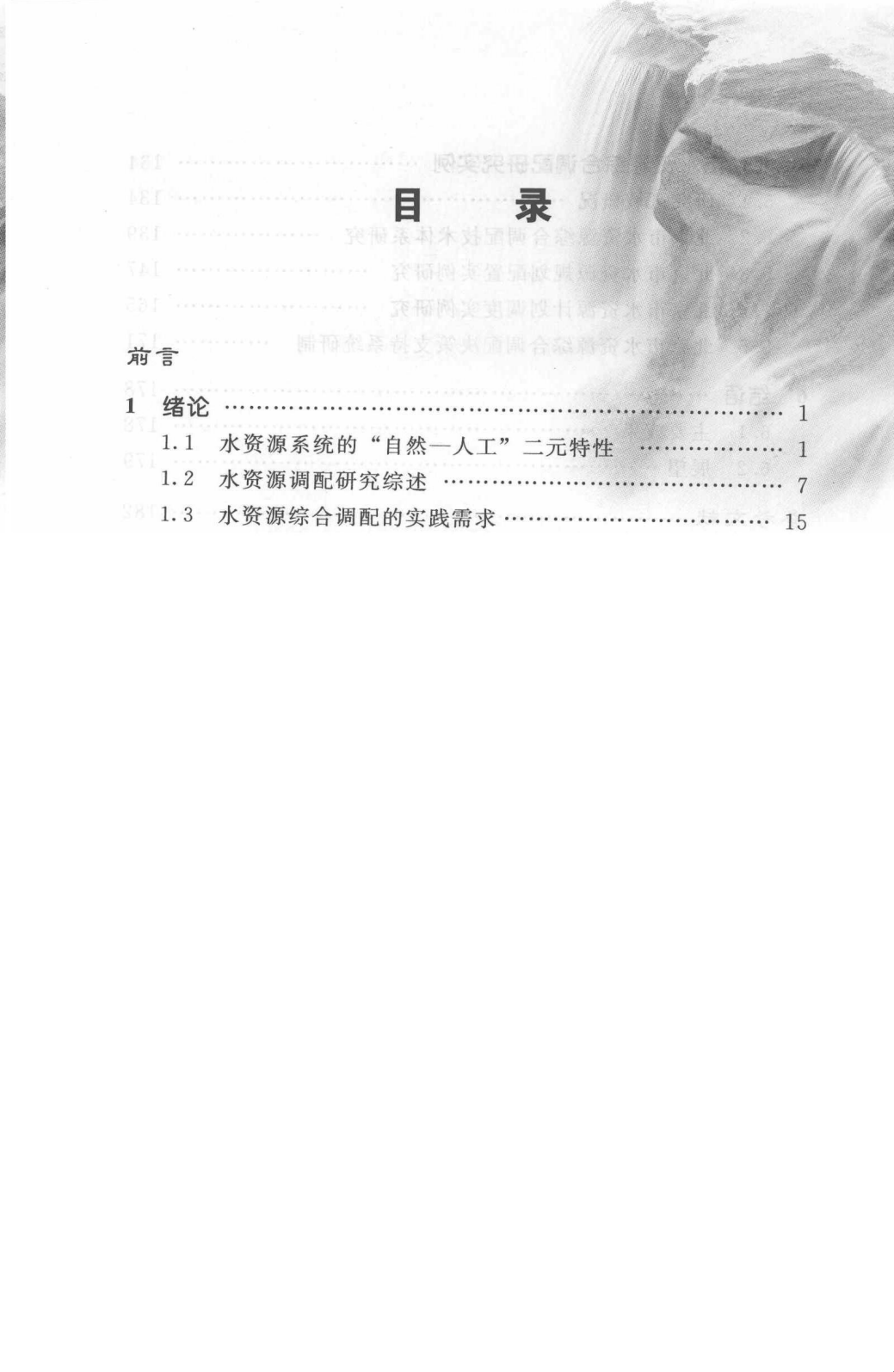
本书研究工作得到了国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水循环模拟与调控”(50721006)、“十一五”国家科技支撑计划项目“南水北调中线水资源调度关键技术研究”(2006BAB04A07)、国际科技合作重点项目“缺水型大城市水资源可持续利用管理研究”(2007DFA70610)、全球环境基金(GEF)项目“海河流域水资源与水环境综合管理”等的资助。上述课题研究及本书编写工作,还得到了中国水利水电科学研究院水资源研究所、水利部南水北调规划设计管理局、南水北调中线干线工程建设管理局、北京市水利规划设计研究院、北京市水利水电技术中心、北京市水文总站、河北省南水北调工程建设委员会办公室、河南省南水北调工程建设委员会办公室、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院、丹江口水利枢纽管理局等单位领导和专家的指导和帮助,韩亦方教授级高工提出了很多宝贵的意见,在此一并致谢。参加上述课题研究的主要人员除本书作者外,还有万毅、董延军、梁籍、赵立明、张小娟、陈宁、刘青娥、张丽丽、田雨、王旭、黄燕敏、王

宇晖、刘佳、邢志、李艳芬、余磊等。

由于水资源问题本身的复杂性，加之时间仓促和受水平所限，书中难免有不妥及错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2009年3月



目 录

前言

1 绪论	1
1.1 水资源系统的“自然—人工”二元特性	1
1.2 水资源调配研究综述	7
1.3 水资源综合调配的实践需求	15

5 北京市水资源综合调配研究实例	134
5.1 研究区域概况	134
5.2 北京市水资源综合调配技术体系研究	139
5.3 北京市水资源规划配置实例研究	147
5.4 北京市水资源计划调度实例研究	165
5.5 北京市水资源综合调配决策支持系统研制	171
6 结语	178
6.1 主要成果	178
6.2 展望	179
参考文献	182

1 绪 论

本章首先介绍水资源系统的“自然—人工”二元特性，并对水资源配置研究、水资源调度研究以及跨流域水资源调配的概况进行了系统的总结和分析，然后从水资源一体化管理、可持续发展治水思路、流域水资源统一调度、跨流域调水、特大型梯级枢纽群联合调度等方面详细论述了水资源综合调配的实践需求，最后分析了我国水资源调配的发展趋势。

1.1 水资源系统的“自然—人工”二元特性

1.1.1 自然水循环过程及特点

水文科学的历史十分悠久，中国、古埃及等文明古国都可以追溯到数千年以前。古希腊时期就有许多人开始讨论水文循环问题。公元前 239 年问世的《吕氏春秋·圜道篇》中这样记载：“云气西行云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休；上不竭，下不满，小为大，重为轻，圜道也。”其中，“云气西行”指出了流域水文的补给来源是大气降水，是更大尺度水文的有机组成部分；“水泉东流”说明了地球重力作用下河流的方向，以及径流方向地表水—地下水的相互转化；“上不竭，下不满”反映了流域的补给—排泄特性，上游区依靠降水有再生性补给，下游区汇入大海或散失于尾间湖泊；“小为大，重为轻”，一是指径流形成区内水平方向上由小及大的产汇流过程，二是指与产汇流同时存在的垂直方向的蒸发过程；“冬夏不辍”，“日夜不休”，“圜道也”，则着重强调了降水—蒸发、产流—汇流、补给—排泄等流域水文过程的循环转化特征。唐代大诗人李白的诗《将进酒》中的千古名句“君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回”形象地刻画了水循环过程。但 15 世纪以前的水循环理论一直模糊不清。



直到 16 世纪, 法国人 B. 帕里西和 J. 贝森才分别以严谨正确的方式证明了水流的最终来源只能是海水或大气中的水汽。法国人佩劳特 (P. Perrault) 于 1674 年撰写的《泉之源》论文, 论述了泉水的来源是降水, 泉水流入海, 产生蒸发, 为降水来源的水文循环思想, 并在 1974 年被联合国教科文组织认做是“水文循环学说的创始”。

自然界的水以液态、气态和固态的形式分布于地壳表层、表面、大气层和各类生物机体中, 形成地球的水圈, 并和地球上的岩石圈、大气圈及生物圈共同组成地球的自然圈层。水圈是地球圈层中最活跃的圈层, 水圈中的水在太阳辐射及地球引力的作用下, 不断交替转化三态, 并通过全球水文循环在地球表层及大气中不断运动。海洋表面从太阳获得能量, 水分通过蒸发现象逸入大气, 并通过大气环流在地球上空扩散到海洋和陆地上空, 在一定的条件下凝结, 并以降水形式回归到地球表面。在陆地表面因降水产生径流, 或直接从地表流入海, 或通过地表的蓄滞但最终仍回归入海, 这样就形成水在海洋和陆地之间的循环运动。通常对这种海陆之间的水文循环称为大循环。此外, 由海洋蒸发的水汽在空中凝结后, 直接又以降水形式回落到海洋, 这种水文循环称为海洋小循环; 还有陆面上的部分降水在陆地表面形成水体, 以及植物截留, 通过土壤及植被的蒸腾, 使陆面上的水分直接返回大气, 再凝结以降水形式返回陆面, 这种水文循环称为陆地小循环。水在各类生物的组成中占有重要位置。陆上生物以各种形式摄取水分, 并以蒸发或排泄形式使水分回归大气或海洋, 是陆地小循环的组成部分。自然水循环过程示意图 1.1。

自然水循环过程具有补给循环性、变化复杂性、利害双重性等主要特点, 其中补给循环性是水资源调配的基础, 变化复杂性是水资源调配的难点, 利害双重性是水资源调配的目的所在。

(1) 补给循环性。水资源是一种可再生资源。在水文循环过程中, 来自海洋的水汽约有 15% 被大气环流输送到陆地上空, 这些水汽形成陆地上降水量的 89%, 另外 11% 的陆地上降水量

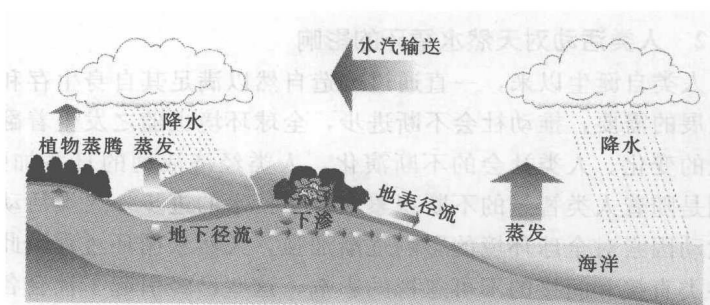


图 1.1 自然水循环过程示意

来自陆地本身的蒸发所产生的水汽。水圈中的水通过水文循环运动，从多年平均的意义上来看，海洋中的水量保持平衡，而陆地上各类水体中的水量也是收支相抵，各类水体中的水都在不断更新补充，这种循环又使陆地上的淡水周而复始，不断净化，反复为人类所利用。各类水体由于形态不同和体积上的差异，正常更新周期不同。

(2) 变化复杂性。自然水循环过程虽有客观规律可循，但其本身特性非常复杂，受气象、地理、人类活动等各类复杂因素的综合影响，水循环过程的各主要环节（降雨、径流、蒸发等）在时空分布上都具有明显的不确定性。近年来，强台风、强降水、持续干旱等极端事件发生频率增加进一步增加了水文循环过程的不确定性，对防汛抗旱、用水安全、水生态环境带来严重的影响。

(3) 利害双重性。水的多寡是一把双刃剑，水利和水害双重性十分明显。早在 2000 多年前，中国第一篇水利史学术专著《史记·河渠书》就提出了“甚哉！水之为利害也”的结论，其“治国必先治水”的思想对后世影响巨大。一方面，水是人类生产和生活不可缺少和不可替代的物质基础，也是生态环境的控制性因素；另一方面，“水多、水少、水脏和水浑”也可给人类带来巨大的灾害，《管子》一书中曾说“善为国者，必先除其五害”，“除五害之说，以水为始”。



1.1.2 人类活动对天然水循环的影响

人类自诞生以来,一直通过改造自然以满足其自身生存和经济发展的需要,推动社会不断进步,全球环境也随之发生着翻天覆地的变化。人类社会的不断演化,人类经济活动的日益加强,特别是随着人类智慧的不断积累和科学技术的进步,人类活动这一扰动因素对全球环境的影响逐渐加强,天然水循环过程因此受到各类直接和间接的不可忽视的影响,这些已经引起了社会各界的广泛关注。人类活动对天然水循环的影响主要体现在如下几个方面。

(1) 土地利用与覆被变化带来的影响。土地利用与覆被变化通过改变流域的产流、汇流、蒸散发、入渗、排泄等原有的水循环特性,直接影响流域的水量、水质及空间分布。如农业用地的结构直接影响到产水量;森林砍伐、过度放牧、围湖造田等会增加下游洪水泛滥的频率和强度;城市化迅速发展增加了不透水层的面积,使地表径流系数和流域的产水量增大;矿山开采改变了水循环过程等。大量研究表明,大尺度土地利用与覆被变化是导致区域气候与水文循环变化的重要因素,流域集水区土地利用与覆被变化对水文过程的影响以及植被组成结构与变化的区域水文响应机制是近 10 年来水文科学研究的热点领域。

(2) 水利工程修建带来的影响。水库、水电站、闸坝、引提水工程、跨流域调水工程等大量水利工程的修建,直接改变了天然径流的时空分配,在防洪减灾、发电、航运、供水、灌溉、旅游等诸多方面发挥了显著效益,同时也给“河流健康”与水生态系统的维护带来了一定的影响和副作用,如河流形态变化、水土流失、生物多样性退化、无效蒸发加大等。

(3) 全球气候变化带来的影响。全球气候系统指的是一个由大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈(陆面)和生物圈组成的高度复杂的系统,这些部分之间发生着明显的相互作用。在这个系统自身动力学和外部强迫作用下(如火山爆发、太阳变化、人类活动引起的大气成分的变化和土地利用的变化),气候系统不断地随



时间演变（渐变与突变），而且具有不同时空尺度的气候变化与变率（月、季节、年际、年代际、百年尺度等气候变率与振荡）。引起气候系统变化的原因有多种，概括起来可分成自然的气候波动与人类活动的影响两大类，其中人类燃烧化石燃料以及毁林引起的大气中温室气体浓度的增加、硫化物气溶胶浓度的变化、陆面覆盖和土地利用的变化等可能是引起全球气候变化的最主要因素。20 世纪 80 年代后，全球气温明显上升，导致全球降水量重新分配，冰川和冻土消融，海平面上升，不仅危害自然生态系统的平衡，还威胁人类的食物供应和居住环境。2007 年联合国政府间气候变化问题专门委员会（IPCC）发布报告认为，全世界大部分海洋和五大洲的自然生态体系都显现出了气候变化所造成的影响，全球变暖将使地球上数十亿人口面临水和食物短缺，洪涝、干旱、台风等自然灾害发生的频率也将增加。气候变化关系到环境变化、经济可持续发展和国与国之间的关系等，越来越引起国际社会的广泛关注，已成为当今世界最为关注的焦点。气候变化对水利行业也带来了一系列的不利影响，导致的气温上升、降水减少、高温热浪、强台风、强降水、持续干旱等极端事件发生频率增加将对防汛抗旱、用水安全、水生态环境带来重要的影响，海平面上升也将给沿海城市防洪（潮）安全、河口治理开发和沿海地区的经济发展等产生重大的直接影响。

（4）其他影响。如农药和化肥的大量使用、工业及城镇生活用水的废污水排放等导致的水体污染加剧了水资源短缺的矛盾，湖泊围垦导致湖面面积缩小和防洪抗旱能力的削弱，超采地下水造成地下水位下降和海水入侵等。

1.1.3 “自然—人工”二元水资源系统

由于人类社会的发展，用水量不断增加。各类用水不外由地表水体和地下水体中取水，经过使用后一部分消耗于蒸发并返回大气，另一部分则以废污水形式回归于地表或地下水体，这就形成另一个小循环，可称作是用水的侧支循环（陈家琦，1986）。在高强度人类活动作用下，人工侧支循环的径流量越来越大，

致使流域水循环及其伴生的水环境、水生态过程均呈现出越来越明显的“自然—人工”二元特性，集中体现在以下三方面：一是驱动力的二元化，即流域水循环的内在动力已由过去一元自然驱动演变为现在的“自然—人工”二元驱动；二是循环结构和参数的二元化，即人类聚集区的水循环过程由“大气—坡面—地下一河道”自然循环和“取水—输水—用水—排水”人工侧支循环耦合而成，变化环境下流域水循环对于降水输入的总体响应不仅取决于自然的陆面、土壤和地下等水文与地质参数，还取决于水资源开发利用及相关的社会经济参数；三是水资源服务功能的二元化，即水分在其循环转化过程中，同时支撑了同等重要的经济社会系统和生态环境系统。这种“二元”模式导致流域水资源形势加速演变，洪涝与旱灾发生的几率与不确定性增加，同样规模的洪水造成的损失急剧增大，同时还引起生态与环境的变化。

在分析水资源系统的天然与人工耦合关系方面，自 20 世纪 80 年代以来国内已经做了大量研究，近年来更是得到了快速的发展。王浩（2000）首先提出了“自然—人工”水循环二元模式的概念；雷晓辉（2001）考虑自然过程和人类活动的影响，提出了一种基于二元演化模式的流域水量平衡和循环模型，用于产流模拟；“973”项目“黄河流域水资源演变规律与可再生性维持机理”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”研究首次提出了分布式水循环模拟模型和集总式水资源调配模型耦合的建模思路，自主研发黄河流域二元水资源演化模型，实现了“坡面—河道”天然循环和“供—用—耗—排”人工侧支水循环的统一模拟，取得了流域水资源全口径层次化动态评价方法、流域水资源二元化模型与人类活动影响下的流域水资源演变规律等三项重要原创成果；“十五”国家科技攻关计划重大项目“水安全保障技术研究”第二课题“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”将二元水资源演化模型与黑河流域水资源管理的重大实践问题相结合，对流域二元水资源调配模式与方法进行了较为深入的研究。另外，惠泱河等（2001）以典型缺水地区陕西关中为



例,研究了二元模式下的水资源承载力问题;谢新民等(2002)结合安阳市水资源评价实例,研究和提出一种基于“四水”转化水文模型和地下水数学模拟模型的二元耦合模型;张军民(2005)研究了新疆玛纳斯河流域水资源及水文循环二元分化问题;王西琴等(2006)以辽河流域为例,建立了二元水循环下的河流生态需水的水量与水质计算方法,实现了河流生态需水水量与水质的综合评价。到目前为止,二元水资源系统的理论研究和实践应用还处于探索阶段,正在不断发展和深入之中。

1.2 水资源调配研究综述

水资源综合调配是指将水资源配置与调度相结合,建立一体化的水资源综合调配框架体系,通过水资源合理配置实现长期规划层面上的合理调控,通过水资源综合调度将配置方案落实到调控实践中,实现水资源宏观配置方案与实时调度方案的耦合与嵌套。鉴于水资源综合调配研究对于跨流域调水的重要性,本节分别综述水资源配置、水资源调度、跨流域水资源调配等三方面的研究进展。

1.2.1 水资源配置研究综述

早期水资源配置的研究对象主要集中于水利工程。随着国民经济迅速发展和人口增长,用水量不断攀升,缺水流域普遍存在地表径流时空分布不均、水环境急剧恶化、水资源供给严重不足等特点,流域用水具有强烈的竞争性,水资源短缺已成为制约经济、社会和生态环境持续发展的“瓶颈”,从而对水资源配置提出了更高更新的要求。与此同时,随着人类认识水平、科学技术和配置实践的不断深化,对水资源合理配置的认识和理解也呈现出一个不断深化的过程。

国家“八五”科技攻关项目专题“华北地区宏观经济水资源规划管理的研究”将水资源系统与区域自然—社会—经济协同系统结合,提出基于宏观经济的水资源优化配置理论与方法,有效地克服了水资源开发利用与区域宏观经济发展脱节的现象;王浩