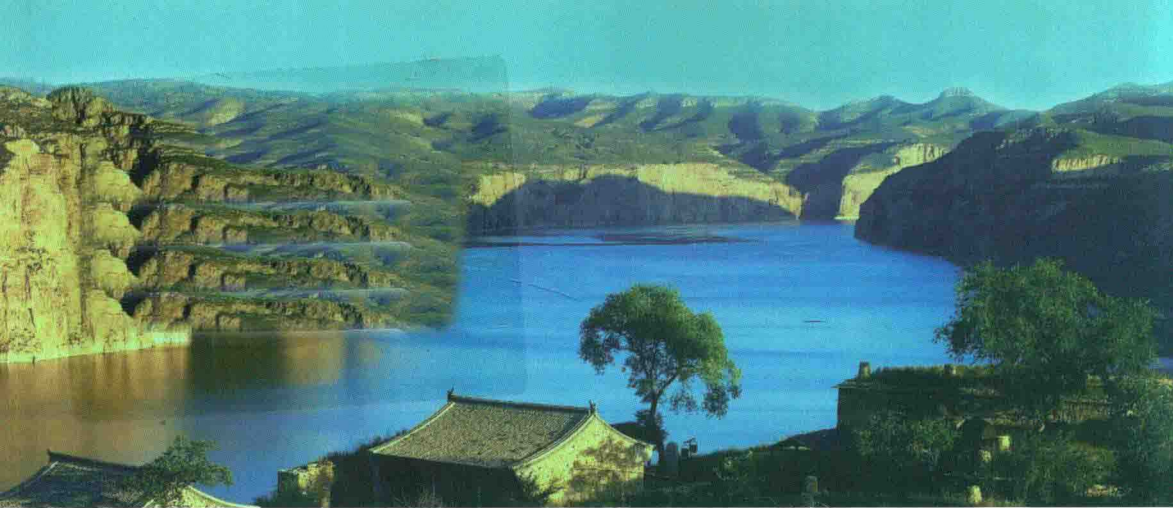




# 流域水循环分布式模拟与调控

董增川 安 婷 张文明 付晓花 著



科学出版社

# 流域水循环分布式模拟与调控

董增川 安 婷 张文明 付晓花 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书基于天然水循环和人工侧支用水过程耦合模拟的思想,利用数字高程模型和数字河湖网资料,构建了基于“天然-人工”双拓扑结构的数字河网和分布式水资源模拟模型。针对大流域配水供需单元之间往往存在时延性的情况,利用等流时带概念,通过空间上等流时带的平移反映调蓄工程放水在时间上的滞后性影响,建立流域水资源优化配置模型。利用大系统优化的分解协调方法进行求解,实现整体系统不同层次的优化。所建模型,不仅可用于模拟土地利用/土地覆被变化等不同下垫面条件对水资源形成转化的影响,而且可用于模拟人工侧支用水对水资源形成转化与利用的影响,以及大流域水资源的优化调控。

本书可供水文学及水资源、水利水电工程、地理科学等领域的科学研究人员、工程技术人员与政策管理人员参考,也可作为高等院校水文水资源、水利水电工程及相关专业高年级本科生和研究生的学习参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

流域水循环分布式模拟与调控/董增川,安婷,张文明等著. —北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059540-9

I. ①流… II. ①董…②安…③张… III. ①水循环-流域模型-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 258448 号

责任编辑:周 炜 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:333 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 前 言

地球在地壳表层、表面和围绕地球的大气层中存在着各种形态(包括液态、气态和固态)的水,形成地球的水圈,并和地球上的岩石圈、大气圈、生物圈共同组成地球的自然圈层。水在地球的自然圈层中是以循环运动的形式存在的,这个过程称为水文循环。

人们出于种种用水目的,通常在某一环节或某些环节上打开水文循环。几千年来,全球水资源开发利用的方式多种多样,人类一直在寻求各种方式,如疏通、拦蓄、调水、储存等,以增强对随意泛滥的河流或变幻莫测的降水的抵抗能力。早期的农业文明主要分布在降水丰富和河网发达的地区,灌溉渠道的出现,使得干旱地区作物的正常生长及生长季节的延长成为可能。随着城市化进程的加快,水源越来越远,近百年来,许多史无前例的巨型工程,如防洪工程、水电站工程、供水工程、灌溉工程等如雨后春笋般出现,导致水文循环规律发生极大的改变。

人类对水的开发利用形成了一个由供、用、耗、排组成的人工侧支过程。随着经济社会的快速发展,由于用水量剧增,人工侧支过程对天然水循环过程的影响越来越大。天然水循环过程和人工侧支过程相互作用、相互影响。没有天然的水循环过程做基础,人工侧支过程就无从谈起;人工侧支过程对天然水循环过程同样具有较大的影响。流域天然的水循环过程存在一种子流域源汇关系,人类的供用耗排结构又构成了另外一类相对独立的源汇关系,两者相互耦合、共同作用,反映了流域水资源形成、转化与利用的基本特征。

本书基于天然水循环和人工侧支用水影响耦合模拟的思想,首先通过数字高程模型及数字河湖网资料,自动提取流域天然状态下的排水结构及子流域源汇关系;然后将水利工程概化,获得水利工程形成的人工输排水结构及源汇关系;再将两种源汇关系耦合,实现蓄水、取水、输水、用水、排水工程与天然状态数字河网的耦合,构建基于“天然-人工”双拓扑结构的数字河网。在此基础上,基于等流时带划分子流域的方法,建立“天然-人工”双拓扑结构分布式水资源模拟模型,不仅可以基于 DEM、土地利用/土地覆被变化等多种信息模拟不同的下垫面条件对水资源形成转化的影响,还可以模拟人工侧支用水对水资源形成转化与利用的影响,实现对天然及人工两种因素的耦合模拟。

由于大流域配水供需单元之间往往存在时延性,会影响优化时段的水量平衡

及目标函数计算,因此研究了基于等流时带的水资源调控模型的建模方法。利用等流时带概念形成天然的时延系统,通过空间上等流时带的平移,反映调蓄工程放水在时间上的滞后性影响,将大流域水循环模拟模型与水资源优化配置模型耦合并进行求解。利用大系统优化的分解协调方法进行求解,实现整体系统不同层次的优化。

本书共 10 章。第 1 章比较系统地总结了国内外分布式水循环模拟与水资源配置方面的研究进展。第 2 章~第 5 章论述了基于“天然-人工”双拓扑结构水循环分布式模拟模型的建立,其中第 2 章主要介绍水资源的演化模式,分析了人工侧支用水对水循环的影响,建立了基于双驱动因素的径流演化模式;第 3 章主要论述基于双拓扑结构的数字河网的自动提取及子流域划分方法,描述了基于数字高程模型及数字河湖网资料自动提取数字河网的方法,建立了一种基于等流时带划分子流域的方法,提出了如何将人工控制节点耦合入天然河网,形成“天然-人工”双拓扑结构的数字水系;第 4 章主要论述了基于双拓扑结构数字水系建立水循环分布式模拟模型的过程,并详细描述了天然因素及人工侧支用水过程的模拟方法;第 5 章主要介绍了水循环模拟模型参数的率定方法,并对各参数进行了灵敏度分析。第 6 章~第 8 章建立了流域水资源优化配置模型与大系统分解协调算法,其中第 6 章介绍了各用水部门需水预测的方法、各需水要素的时空展布方法及各部门供水经济效益的计算方法;第 7 章介绍了水资源优化配置的基本概念,建立了流域水资源优化配置模型;第 8 章论述了大系统分解协调的原理,并对流域水资源优化配置模型进行了求解。第 9 章以黄河流域为实例进行了研究,建立了黄河流域基于“天然-人工”双拓扑结构的水循环分布式模拟模型和水资源优化配置模型,表明所提方法的实用性。第 10 章是对全书的总结和展望。

本书得到教育部重点科技项目(重点 14741)、水利部公益性行业科研项目(201101017)、国家重点研发计划(2016YFC0401306)、国家社会科学基金重大项目(2012 & ZD214)的资助。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 引言 .....                        | 1  |
| 1.2 分布式水资源模拟 .....                  | 3  |
| 1.2.1 国外分布式水资源模拟研究进展 .....          | 3  |
| 1.2.2 我国分布式水资源模拟研究进展 .....          | 5  |
| 1.3 水资源配置 .....                     | 6  |
| 1.3.1 国外水资源配置研究 .....               | 7  |
| 1.3.2 我国水资源配置研究 .....               | 10 |
| 1.4 本书的主要内容 .....                   | 14 |
| 1.5 技术路线 .....                      | 15 |
| 第 2 章 水循环过程 .....                   | 17 |
| 2.1 天然状态下的水循环过程 .....               | 17 |
| 2.2 人类活动影响下的水循环过程 .....             | 18 |
| 2.3 “天然-人工”双驱动因素相互影响与耦合 .....       | 19 |
| 2.3.1 人工驱动因素对天然状态下水循环过程的影响 .....    | 19 |
| 2.3.2 天然驱动因素对人工侧支用水的影响 .....        | 21 |
| 2.3.3 “天然-人工”双驱动因素的耦合 .....         | 21 |
| 2.4 基于“天然-人工”双驱动因素的径流演化 .....       | 22 |
| 2.5 本章小结 .....                      | 23 |
| 第 3 章 “天然-人工”双拓扑结构数字水系构建 .....      | 24 |
| 3.1 地理信息系统 .....                    | 24 |
| 3.1.1 地理信息系统的概念 .....               | 24 |
| 3.1.2 数字地面模型概述 .....                | 26 |
| 3.1.3 地理信息系统在分布式水资源模拟模型研究中的应用 ..... | 29 |
| 3.2 传统的基于 DEM 提取流域排水结构方法 .....      | 30 |
| 3.2.1 基于 DEM 的单元划分方法 .....          | 30 |
| 3.2.2 DEM 的预处理 .....                | 31 |
| 3.2.3 流向判断 .....                    | 32 |
| 3.2.4 河网提取 .....                    | 35 |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| 3.3 基于“天然-人工”双拓扑结构建立数字水系 .....        | 37        |
| 3.3.1 双拓扑结构数字水系构建流程 .....             | 37        |
| 3.3.2 基于 DEM 与 DRLN 自动提取河网 .....      | 38        |
| 3.3.3 基于等流时带的子流域划分方法 .....            | 46        |
| 3.3.4 引入人工影响因素的数字河网的构建 .....          | 50        |
| 3.4 土壤类型和土地利用分布概化 .....               | 54        |
| 3.4.1 下垫面条件变化对水循环的影响 .....            | 54        |
| 3.4.2 遥感信息反演 .....                    | 54        |
| 3.4.3 土壤类型和土地利用在子流域内的概化 .....         | 61        |
| 3.5 本章小结 .....                        | 61        |
| <b>第4章 基于“天然-人工”双拓扑结构的水资源模拟</b> ..... | <b>63</b> |
| 4.1 建模思路及整体框架 .....                   | 63        |
| 4.1.1 建模思路 .....                      | 63        |
| 4.1.2 整体框架 .....                      | 64        |
| 4.2 地表能量平衡 .....                      | 67        |
| 4.2.1 太阳辐射量 .....                     | 67        |
| 4.2.2 大气对太阳辐射的影响 .....                | 68        |
| 4.2.3 日净辐射 .....                      | 69        |
| 4.3 气象资料模拟 .....                      | 70        |
| 4.3.1 实测资料生成 .....                    | 70        |
| 4.3.2 自动生成资料 .....                    | 73        |
| 4.3.3 气象资料的高程修正 .....                 | 74        |
| 4.3.4 降雪和融雪 .....                     | 75        |
| 4.4 天然因素的模拟 .....                     | 77        |
| 4.4.1 蒸散发 .....                       | 77        |
| 4.4.2 截留 .....                        | 81        |
| 4.4.3 下渗与土壤水分运动 .....                 | 82        |
| 4.4.4 地表径流 .....                      | 85        |
| 4.4.5 汇流 .....                        | 88        |
| 4.5 人工影响因素的模拟 .....                   | 89        |
| 4.5.1 灌区水循环模拟 .....                   | 89        |
| 4.5.2 城镇地区水循环模拟 .....                 | 92        |
| 4.5.3 水利工程调蓄作用模拟 .....                | 95        |
| 4.5.4 其他用水模拟 .....                    | 96        |
| 4.6 本章小结 .....                        | 97        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 5 章 分布式水资源模拟模型参数率定 .....  | 99  |
| 5.1 目标函数及评价指标 .....         | 99  |
| 5.1.1 模型率定目标函数 .....        | 99  |
| 5.1.2 模型模拟效率评判准则 .....      | 100 |
| 5.2 分布式水资源模拟模型参数率定方法 .....  | 102 |
| 5.2.1 试错法 .....             | 102 |
| 5.2.2 传统数学优化方法 .....        | 103 |
| 5.2.3 几种常用的全局优化算法 .....     | 105 |
| 5.3 分布式水资源模拟模型参数灵敏度分析 ..... | 113 |
| 5.3.1 扰动分析法 .....           | 113 |
| 5.3.2 RSA 方法 .....          | 113 |
| 5.3.3 GLUE 方法 .....         | 114 |
| 5.4 本章小结 .....              | 114 |
| 第 6 章 用水部门需水预测 .....        | 115 |
| 6.1 需水概念及分类 .....           | 115 |
| 6.2 需水要素的预测 .....           | 117 |
| 6.2.1 生活需水 .....            | 117 |
| 6.2.2 工业需水 .....            | 119 |
| 6.2.3 建筑业和第三产业需水 .....      | 125 |
| 6.2.4 农业需水 .....            | 126 |
| 6.2.5 生态需水 .....            | 131 |
| 6.2.6 综合需水分析与计算 .....       | 143 |
| 6.3 需水要素的时间展布 .....         | 144 |
| 6.3.1 生活需水 .....            | 144 |
| 6.3.2 生产需水 .....            | 144 |
| 6.3.3 生态需水 .....            | 145 |
| 6.4 需水要素的空间展布 .....         | 145 |
| 6.4.1 没有辅助数据的面插值 .....      | 146 |
| 6.4.2 有辅助数据的面插值 .....       | 148 |
| 6.4.3 需水要素的空间展布 .....       | 148 |
| 6.5 用水效益计算方法 .....          | 149 |
| 6.5.1 农业用水效益计算 .....        | 149 |
| 6.5.2 工业供水效益计算 .....        | 154 |
| 6.5.3 其他部门用水效益计算 .....      | 156 |
| 6.6 本章小结 .....              | 157 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第7章 流域水资源优化配置模型的构建</b>    | 159 |
| 7.1 水资源优化配置的概念               | 159 |
| 7.1.1 水资源优化配置的目标             | 159 |
| 7.1.2 水资源优化配置的原则             | 160 |
| 7.1.3 水资源优化配置的手段             | 161 |
| 7.2 基于“天然-人工”双拓扑结构的水资源系统基本框架 | 163 |
| 7.2.1 系统概化方法                 | 163 |
| 7.2.2 系统框架                   | 165 |
| 7.2.3 供水的时延性                 | 166 |
| 7.3 流域水资源优化配置模型              | 168 |
| 7.3.1 全流域水资源优化配置数学模型         | 168 |
| 7.3.2 计算单元水资源优化配置数学模型        | 170 |
| 7.4 本章小结                     | 171 |
| <b>第8章 流域水资源优化配置模型的求解</b>    | 172 |
| 8.1 大系统概述                    | 172 |
| 8.1.1 大系统优化的分解协调技术           | 172 |
| 8.1.2 大系统优化方法概述              | 175 |
| 8.1.3 水资源大系统优化               | 179 |
| 8.2 分解协调方法                   | 181 |
| 8.2.1 系统描述                   | 181 |
| 8.2.2 系统分解与协调                | 183 |
| 8.2.3 非线性耦合的推广               | 189 |
| 8.3 水资源优化配置大系统递阶结构           | 190 |
| 8.3.1 水资源优化配置模型分析            | 190 |
| 8.3.2 各层目标函数的选取              | 191 |
| 8.4 协调步骤                     | 192 |
| 8.4.1 空间分解法分解协调              | 192 |
| 8.4.2 混合法分解协调                | 195 |
| 8.5 本章小结                     | 196 |
| <b>第9章 实例研究</b>              | 197 |
| 9.1 流域概况                     | 197 |
| 9.1.1 自然地理                   | 197 |
| 9.1.2 地形地貌                   | 197 |
| 9.1.3 土壤植被                   | 198 |
| 9.1.4 气候                     | 199 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 9.1.5 河流水系 .....                     | 200 |
| 9.2 资料分析 .....                       | 200 |
| 9.2.1 地理信息 .....                     | 200 |
| 9.2.2 气象资料 .....                     | 202 |
| 9.2.3 水文资料 .....                     | 202 |
| 9.2.4 宏观经济资料 .....                   | 205 |
| 9.3 黄河流域基于“天然-人工”双拓扑结构数字河网的建立 .....  | 210 |
| 9.3.1 黄河流域数字河网的生成 .....              | 210 |
| 9.3.2 等流时带的划分及参数率定 .....             | 212 |
| 9.3.3 人工影响因素的引入 .....                | 212 |
| 9.3.4 子流域间拓扑关系的建立 .....              | 213 |
| 9.4 黄河流域基于“天然-人工”双拓扑结构分布式水资源模拟 ..... | 213 |
| 9.4.1 模型参数率定 .....                   | 213 |
| 9.4.2 模拟结果及分析 .....                  | 214 |
| 9.5 黄河流域水资源优化配置 .....                | 219 |
| 9.5.1 系统概化 .....                     | 219 |
| 9.5.2 情景选取 .....                     | 220 |
| 9.5.3 配置结果 .....                     | 228 |
| 9.6 本章小结 .....                       | 238 |
| 第 10 章 结论与展望 .....                   | 239 |
| 10.1 结论 .....                        | 239 |
| 10.2 展望 .....                        | 242 |
| 参考文献 .....                           | 243 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

水是生命之源,人类起源、人类文明和发展都与水紧密相关。几千年来,全球水资源的开发方式多种多样,人类一直在寻求各种方法,如调水、储存、疏通等,以增强对随意泛滥的河流或变幻莫测的降水的抵抗能力。早期的农业文明主要分布在降水丰富和河网发达的地区,灌溉渠道的出现使得干旱地区作物的正常生长及生长季节的延长成为可能。随着城市化进程的加快,供水水源越来越远。工业革命的开始与人口的迅猛增长导致水文循环规律的极大改变。随后的 100 多年里,许多史无前例的大型工程,如防洪工程、供水工程、水电站工程、灌溉工程等也如雨后春笋般出现。通过世代、持续不断的巨大努力,人类开发利用水资源的能力显著增强。

就世界水资源总量而言,似乎并不缺水,但事实并非如此。20 世纪以来,随着人口迅速增长,再加上工农业生产的大发展,用水量也呈几何倍数增加。1900~1975 年,世界工业用水增加了 20 倍,农业用水增加了 7 倍,生活用水增加了 10 倍<sup>[1]</sup>。并且近几十年来,用水量正以每年 4%~8% 的速度持续增加。与此同时,污水剧增,且大部分没有经过处理就直接排入江河湖海,导致水质性缺水和水污染等一系列水安全问题。目前,全世界有一半的人口无法以卫生的方式处理污物,13 亿人得不到安全的饮用水;每年有超过 500 万人死于不洁水导致的疾病<sup>[2]</sup>。20 世纪后半叶,许多国家因用水量急剧增加,出现水资源短缺和水环境恶化等现象,引起国际社会的广泛关注。1997 年,联合国在马德里塔召开第一次世界性水会议,将水资源问题提高到全球战略高度。随后,很多国际会议和国际组织向世人发出类似“水危机将成为继石油危机之后另一项严重的社会危机”的警告<sup>[3~5]</sup>。

在全世界致力于应对水危机的 21 世纪,我国作为经济社会快速发展的人口大国,面临着更为巨大的水资源压力。这是多方面因素造成的:①人均水资源占有量低。根据 2012 年人口统计计算,我国人均水资源占有量为 2100m<sup>3</sup>,仅为世界人均水平的 28%。②受季风气候和地形条件影响,水资源时空分布极不均匀。长江以北水系流域面积为 64%,水资源量却只占全国的 19%;全国大部分地区降水的年内分配很不均匀,最大 4 个月(6~9 月)降水量约占全年的 70%~80%,致使

汛期洪水灾害,非汛期干旱缺水。③水污染没有得到有效控制。根据我国 2012 年的水质评价结果,在调查的 20.1 万 km 河长中,水质为Ⅳ类水的河长占 11.8%,Ⅴ类和劣Ⅴ类水的河长占 21.2%。河水污染又造成水资源大幅减少,因此我国水资源面临严峻挑战。④人口和经济快速增长,工农业和居民生活用水大幅度增加。1949 年全国总用水量仅 1031 亿  $\text{m}^3$ ,而 1979 年达到 4767 亿  $\text{m}^3$ ,增长了 3.6 倍<sup>[6]</sup>。其中,农业用水量增加 4 倍,工业用水量增加近 22 倍,城市生活用水量增加 8.2 倍。2012 年,全国总用水量增加到 6131 亿  $\text{m}^3$ ,比 63 年前增加了 4.9 倍。据预测,2050 年我国国民经济需水量将达到峰值,为 7000 亿~8000 亿  $\text{m}^3$ ,已接近水资源可利用总量(8000 亿~9500 亿  $\text{m}^3$ )<sup>[7]</sup>。⑤我国水资源利用效率低,浪费现象普遍存在。我国用水总量与美国相当,但工业增加值仅为美国的 1/8。全国农业灌溉水利用系数仅为 0.45,与世界先进水平 0.7~0.8 有较大差距。1997 年,全国工业万元产值用水量为 136 $\text{m}^3$ ,是发达国家的 5~10 倍;工业用水重复利用率为 30%~40%,而发达国家为 75%~85%;全国多数城市用水器具和自来水管网的浪费损失率估计在 20%以上<sup>[8]</sup>。⑥生活、工业用水的增长不断挤占农业和生态用水,水资源短缺地区地下水严重超采,经济发达地区水质恶化,造成水生态环境破坏,加剧了水资源短缺形势。

与需水增长趋势相比,供水增长受到资源条件和成本的制约,新增供水很难达到需水要求。尤其是华北地区,目前所处的水利发展阶段是绝大多数易于蓄水、控制和输水的工程建设基本完成,增加水利工程建设投资而产生的边际回报越来越小<sup>[9]</sup>。因此为了满足经济发展以及人们对生活质量和生态环境的要求,应更加深入地研究水资源的变化规律,加强水资源配置,使得有限的水资源保障人民饮水安全,发挥更大的经济效益和社会效益,维护优良的生态环境。

由于人类用水量剧增,对天然水循环过程的影响越来越大,甚至在一些人类用水量较大的地区,人工侧支用水改变了天然的水循环模式。自然界中存在一个天然的水循环过程,人类活动对水的开发利用又形成了一个人工侧支用水过程。天然水循环过程和人工侧支用水过程相互作用、相互影响。没有天然水循环过程作为基础,人工侧支用水过程就无从谈起;人工侧支用水过程对天然水循环过程同样具有较大的影响。

传统的水文模型建模,首先将水文资料进行还原处理,目的是把水文资料还原到天然状态,排除人工侧支用水影响,这样可以深入研究天然状态下的水循环过程。然而在人类用水量日益增加的今天,人工侧支用水对天然水循环的影响越来越明显,用传统方法构建的水文模型已经无法模拟人类活动影响较大地区的水循环过程。

2003 年,王浩等<sup>[10]</sup>提出将天然和人工影响耦合研究的思想。本书基于这种思想,深入研究了如何将人工侧支用水过程与天然水循环过程耦合实现水资源的

模拟及调控。方法是将天然和人工两个环节有机地统一起来,在提取数字水系时将人工控制点引入天然河网,构建“天然-人工”双拓扑结构数字水系;在此基础上建立分布式水资源模拟模型将天然和人工两种因素耦合模拟,研究下垫面条件及用水结构的改变对流域产汇流机制的影响;最后将模拟模型与水资源调控模型耦合,在维持水资源可持续利用的前提下对流域的水资源进行优化配置。

## 1.2 分布式水资源模拟

水资源模拟模型在水资源可持续利用、防洪减灾、水库建设、道路和城市规划、面源污染评价、人类活动的流域响应等诸多方面得到了广泛应用。当今的一些研究热点,如生态环境需水、水资源可再生性评价等均需要水资源模拟模型的支持。流域水资源模拟模型是产汇流理论与计算机科学相结合的产物,是信息革命带给水文科学的一个极具生命力的研究领域。20世纪50年代中期,流域水资源模拟模型概念出现以来,研究人员开始将流域的水文循环过程作为一个系统来探索<sup>[11]</sup>。由于软硬件条件限制,该时期大量的流域水资源模拟模型以集总式模型为主,萨尔模型(streamflow synthesis and reservoir regulation, SSARR)、Stanford模型、Sacramento模型、水箱模型、Boughton模型、前期降水指标(antecedent precipitation index, API)模型、新安江模型等是这一时期的典型代表。

20世纪80年代末,一些新技术,如地理信息系统(geographic information system, GIS)、遥感(remote sensing, RS)、全球定位系统(global positioning system, GPS)等不断完善,计算机技术和数值分析理论进一步发展,雷达测雨技术和卫星云图技术不断进步,促进了流域水资源模拟研究方法的创新,分布式水资源模拟模型成为近年来水文学研究的热点<sup>[12]</sup>。水资源模拟模型由概念式水资源模拟模型、灰色模型发展到现在的数字水资源模拟模型。

### 1.2.1 国外分布式水资源模拟研究进展

一般认为,国外分布式水资源模拟模型的研究始于1969年Freeze和Harlan<sup>[13]</sup>发表的论文《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》,其中建议用更精致的方法(主要是水力学方法)来研究降水在流域内部的运动规律,既要考虑流域内部垂直方向的水量交换,也要考虑流域内部水平方向的水量交换。随后,1975年,Hewlett和Troenale<sup>[14]</sup>提出了森林流域的变源面积模拟模型(variable source area simulator, VSAS),在该模型中,地下径流被分层模拟,在坡面上的地表径流被分块模拟。

1979年,Beven和Kirkby<sup>[15]</sup>提出以变源产流为基础的TOPMODEL模型(topography based hydrological model)。该模型基于数字高程模型(digital eleva-

tion model, DEM)推求地形指数 $[\ln(\alpha/\tan\beta)]$ ,并利用地形指数来反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响,模型的参数具有物理意义,能用于无资料流域的产汇流计算。在 TOPMODEL 里假设流域内所有地形指数相同的地区具有水文相似性,这就允许地形指数的空间分布聚合成一个区间的地形指数,然后根据地形指数将流域简单地划分为若干个单元,一个地形指数区间对应一个面积单元。离散单元的数目与地形指数区间的数目是相同的,在每一个单元里地形参数取均值,其他空间变量在整个流域内取均值。但 TOPMODEL 并未考虑降水、蒸发等因素的空间分布对流域产汇流的影响,因此,它不是严格意义上的分布式水资源模拟模型。

1980 年, Morris 对 IHDM 模型(institute of hydrology distributed model)进行了研究,根据流域坡面的地形特征,流域被划分为若干部分,每一部分包含坡面流单元、一维明渠段、二维(在垂面上)表层流及壤中流区域。Beven 等<sup>[16]</sup>和 Singh 等<sup>[17]</sup>对 IHDM 模型进行了改进。

1976 年,在 Freeze 和 Harlan 的思想指导和启发下,由丹麦、法国和英国联合研究提出的 SHE(system hydrologic European)模型<sup>[18,19]</sup>被认为是最早的分布式水资源模拟模型的代表。该模型是第一个真正的或者说是具有代表性的分布式水文物理模型。在 SHE 模型中,流域在平面上被划分为许多矩形网格,这样便于处理模型参数、降水输入及水文响应的空间分布性;在垂直面上,则划分为几个水平层,以便处理不同层次的土壤水运动问题。SHE 模型是研究人类活动对流域的产流、产沙及水质等影响的理想工具。SHE 模型考虑了截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、地表径流、壤中流、地下径流、融雪径流等水文过程。该模型的主要水文过程可由质量、动量和能量守恒偏微分方程的有限差分表示,也可由经验方程表示。它的物理基础和计算的灵活性使它适用于多种资料条件,不仅在欧洲,在其他地区也得到了应用和验证<sup>[20]</sup>。

这期间还有一些考虑流域空间特性和输入、输出空间变化的分布式物理模型,如 CEQUEAU 模型<sup>[21]</sup>,将流域分为方形网格,输入所有网格的地形、地貌、雨量等特征,对每一个网格进行计算,在水质模拟、防洪、水库设计等诸多方面有适用性。

1994 年,Arnold 为美国农业部农业研究中心(United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, USDA-ARS)开发了 SWAT 模型(soil and water assessment tool)。SWAT 模型是一个具有很强物理机制的、长时段的流域水资源模拟模型。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间信息,模拟长期土地管理措施对具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响<sup>[22]</sup>。

1995 年,Grayson 等提出了 THALES 模型,它是一个基于矢量高程数据的分

布式参数模型。Yao 等<sup>[23]</sup>提出了基于网格的集降水空间输入、降水—蒸发—径流过程模拟、河流演算和空间参数校准为一体的分布式水资源模拟模型。Yang 等<sup>[24]</sup>提出了基于山坡的和基于 10km 网格的大尺度分布式水资源模拟模型。此外, WATFLOOD 模型(hydrological model and forecasting system)、SLURP 模型(semi-distributed land-use runoff process hydrological model)、VIC 模型(variable infiltration capacity)等都属于分布式水资源模拟模型的范畴。

还有很多学者在数字水资源模拟方面也做了很多工作<sup>[25~35]</sup>。他们分别对数字河道的自动确定、模型参数的确定、不同尺度的流域中水资源模拟模型的建立等进行了研究,为数字水资源模拟技术的发展做出了一定的贡献。

### 1.2.2 我国分布式水资源模拟研究进展

我国在分布式水资源模拟模型方面的研究开展较晚,但也进行了有益的探索和研究。

1995 年,沈晓东等<sup>[36]</sup>在研究降雨时空分布与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一种在 GIS 支持下的动态分布式降雨径流流域模型,实现了基于栅格 DEM 的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。

1997 年,黄平和赵吉国<sup>[37]</sup>分析了国外一些具有物理基础的分布式水文数学模型的不足,在此基础上,提出了流域三维动态水文数值模型的构想。其后,又建立了描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律的二维分布式水资源模拟模型,并用迦辽金有限元数值方法求解模型。

2000 年,李兰等<sup>[38,39]</sup>提出了一种分布式水资源模拟模型,模型包括各小流域产流、汇流、流域单宽入流和上游入流反演、河道洪水演进四个部分,水源分坡面流、壤中流和地下径流,考虑了产流随空间和时间变化的分布特征,能计算产流的多种径流成分的物理过程。该模型将数学物理问题与洪水预报相结合,给出了流域产流、河道汇流、水库洪水演进三个动态分布预报耦合模型,不仅可以用于分析降水径流规律,还可以用于洪水预报。该模型在丰满、龙河口和陆浑等水库流域得到应用。

郭生练等<sup>[40~43]</sup>提出了两参数月水量平衡模型用来评价气候异常变化对水文水资源的影响;2000 年,郭生练等建立了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程。该模型将流域划分为网格单元,详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流、融雪等水文物理过程,在每一个网格上用地形高程来建立地表径流之间的关系。模型的结构中,植物截留过程引入了描述植物截留能力的物理参数——植物蓄积容量;流域的蒸散发主要考虑了太阳辐射、日云量、反射率、植物叶面指数、可供土壤水、大气温度等因素;用一维圣维南方程的运动波近似模拟坡面水流运动,用运动波模型

模拟地下径流。

唐莉华等<sup>[44]</sup>提出了一个针对小流域的分布式水资源模拟模型,包括产汇流和产输沙模型,这是一个典型的具有很强物理基础的分布式水资源模拟模型。该模型包括从降水到流域出口径流过程的各子过程,由林冠截留模型、降水入渗模型、坡面径流模型、地下水径流模型和河道汇流演进模型组成,主要过程用有限差分法和有限元法求解。

2004年,杨大文等<sup>[45,46]</sup>提出了清华模型(Tsinghua integrated hydrological modeling system, THIHMS)。该模型为使用大格网的分布式水资源模拟模型,采用山坡-河沟构成的地貌特性来进行格网内的地形参数化。模型的格网由一系列几何相似的山坡组成,而山坡又按格网内土地利用归类。同一土地利用类型的山坡是水资源模拟的最小计算单元。河网的分级和编码采用 Pfafstetter 的编码方法,河道汇流计算用运动波理论求解。该模型可用于评估流域水资源量及土地利用变化对水资源的影响,也可以直接利用大气模型的天气预测结果作为输入,对未来的水资源和洪水进行预测。

2004年,谢正辉等<sup>[47]</sup>建立了基于陆面物理过程模型 VIC 及我国内陆 50km×50km 分辨率网格的大尺度陆面水资源模拟模型框架。该模型考虑了陆气间的水分和能量平衡,径流机制同时考虑蓄满产流、超渗产流及土壤性质的空间非均匀性,并利用所建立的模型框架对处于半干旱区的渭河部分子流域进行分析。结果表明,所建模型框架具有一定的合理性和适应性。

我国还有很多研究人员在分布式水资源模拟模型的研究工作中做出了很多贡献。例如,任立良和刘新仁<sup>[48]</sup>进行了流域数字水资源模拟模型研究,并基于 DEM 考虑流域空间的变异性,建立数字高程流域水系模型;张成才等<sup>[49]</sup>进行了基于 DEM 的流域参数识别方法研究;牛振国等<sup>[50]</sup>建立了基于 DEM 的区域参考作物蒸散量的分布式模型;郭方等<sup>[51]</sup>将 TOPMODEL 应用在淮河流域史河水系;王中根等<sup>[52]</sup>建立了黄河典型流域分布式水资源模拟模型;夏军<sup>[53]</sup>建立了分布式时变增益模型(distributed time variant gain model, DTVGM),应用在黑河流域,并与 SWAT 模型在本地区的应用进行了对比。

### 1.3 水资源配置

流域水资源合理配置是在流域水资源可持续利用思想指导下,遵循自然规律与经济规律,通过工程和非工程措施,借助于先进决策理论和计算机技术,干预水资源的天然时空分配,统一调配流域地表水、地下水、废污水、外流域调水、微咸水和海水等水源,以合理的费用保质保量地适时满足不同用户的用水需求,充分发挥流域水资源的社会功能和生态环境功能,促进流域及区域经济的持续稳定发展

和生态系统的健康稳定。

从宏观上讲,水资源优化配置是在水资源开发利用过程中,对洪涝灾害、干旱缺水、水环境恶化、水土流失等问题的解决,坚持全面规划、统筹兼顾、标本兼治、综合治理的原则,兴利除害结合、开源节流并举、抗旱除涝并重,对水资源进行合理开发、高效利用、优化配置、有效保护和综合治理,协调上下游、左右岸、干支流、城市与乡村、流域与区域、开发与保护、建设与管理、近期与远期等各方面的关系。

从微观上讲,水资源优化配置包括取水方面的优化配置、用水方面的优化配置,以及取水用水综合系统的水资源优化配置。取水方面是指地表水、地下水、污水等多水源间的优化配置。用水方面是指生活用水、生产用水和生态用水间的优化配置。各种水源、水源点和各地各类用水户形成了庞大复杂的取用水系统,加上时间、空间的变化,水资源优化配置作用就更加明显<sup>[54]</sup>。

### 1.3.1 国外水资源配置研究

与受传统经济学重视的一些其他稀缺资源的分配问题相比,水资源配置可谓一个新兴的课题。国外在水资源分配理论研究和实践方面有较多实例。

美国是最早将系统分析方法应用于水资源规划与管理的国家。1950年,美国总统水资源政策委员会的报告,是最早综述水资源开发、利用和保护问题的报告之一。这个报告的出台推动了行政管理部门进一步开展水资源方面的调查研究工作。

20世纪50~60年代,很多研究者都致力于水资源配置的研究,提出很多设想。例如,最早由工程、社会与自然科学等学科的专家组成的美国哈佛大学哈佛水资源规划组(Harvard Water Program),于1955年提出将水资源与环境系统统一考虑的设想,探索经济目标、工程分析和政府决策间的关系。随着系统工程理论与计算机技术的发展,哈佛水资源规划组将系统分析方法应用到流域水资源系统规划中,于1962年出版了*Design of Water-resource Systems*<sup>[55]</sup>一书,将系统分析引入水资源规划,开始了流域水资源配置模型研究。美国科罗拉多州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。从此水资源配置模型在欧美地区得到极大的关注<sup>[56]</sup>。

20世纪70年代以后,随着计算机技术、数学规划和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用,水资源管理系统及水资源优化配置的研究成果不断增多<sup>[57]</sup>。1979年,美国麻省理工学院完成的阿根廷河 Rio Colorado 流域的水资源开发规划,是最成功和最有影响的例子,以模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究,并提出多目标规划理论、水资源规划的数学模型方法,并加以应用<sup>[58]</sup>。1972年Buras的*Scientific Allocation of Water Resources*是最早系统地研究水资源分配理论和方法的专著<sup>[59]</sup>。该书简要阐述了在20世纪60年代发展起来的水资源系