

珠江流域水循环模拟 与调控研究

雷晓辉 唐克旺 廖卫红 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

珠江流域水循环模拟 与调控研究

雷晓辉 唐克旺 廖卫红 王琳 唐蕴 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

针对珠江下游地区咸潮上溯问题,“抑咸”调度得到了越来越多的关注。本书的撰写基于国家水体污染控制与治理科技重大专项“多汊河口的水库—闸泵群联合调度咸潮抑制技术课题”(2009ZX07423-001-2)中的研究成果,从分布式水文模型 EasyDHM 及梯度水库群调度理论研究出发,详细阐述了珠江流域分布式水文模型的建模及计算过程。包括基础数据库的建设、空间单元划分、要素信息的提取以及模型的率定与验证等;利用突变分析、小波分析等方法对珠江流域气温、降水以及径流等水文要素的演变规律进行了系统的分析,特别是对于枯水期珠江流域水文要素变化进行了深入的分析;在考虑了流域短期及中长期径流预报的基础上提出了梯级水库抑咸调度的多种调度方案并通过优化分析给出了推荐方案的建议,以期为流域“抑咸”调度提供科学依据和建议。

本书可供水资源调查、规划、管理及科学研究等方面的人员参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

珠江流域水循环模拟与调控研究 / 雷晓辉等著. —
北京:中国水利水电出版社,2014.1
ISBN 978-7-5170-1649-6

I. ①珠… II. ①雷… III. ①珠江流域—水循环—研究 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319697号

书 名	珠江流域水循环模拟与调控研究
作 者	雷晓辉 唐克旺 廖卫红 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 (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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.75印张 200千字 4插页
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—1000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

珠江三角洲地区和香港、澳门特别行政区是我国重要的经济区，在我国经济建设中具有举足轻重的战略地位和政治地位。珠江下游地区河道处于感潮河段，在枯水季节和枯水年份，受海水上溯的影响，澳门、珠海、广州等城市饮水安全长期受到严重威胁。该地区的饮水安全问题关系到当地近 4000 万城乡居民的健康、生命安全和社会的稳定和谐。党中央、国务院及当地政府高度重视珠江三角洲地区的饮水安全，多次通过上游的水库调度、三角洲地区的水库建设等措施缓解饮水危机，但是水质问题目前尚未得到根本解决。

解决水源水质问题是保障饮水安全的第一个环节，是最基础的工作，是保障饮水安全的前提。水源水质问题在珠江下游地区首先体现为海水及人为污染物复合作用下的水质问题。季节性水质问题是珠江下游地区水源安全的重要特征，其突出表现就是咸潮威胁。由于人类活动对河口河道形态的改变，枯水期珠江上游河道下泄流量的减小，经济增长导致用水量增加以及潮汐动力、海平面季节变化、风场变化等因素的综合影响，珠江河口枯水季节咸潮入侵日益加重，咸潮上溯严重威胁珠海、澳门、中山等城市饮水安全。

2005 年以来，珠江流域水利委员会通过科学论证、精心组织，成功实施了 2005 年和 2006 年两次抑咸补淡应急调水、2006~2007 年和 2007~2008 年两次珠江骨干水库统一调度、2008~2009 年和 2009~2010 年及 2010~2011 年三次珠江枯季水量统一调度工作，确保了澳门及珠海等珠江三角洲重要城市的供水安全，取得了良好的社会、经济和生态效益，得到了社会各界的充分肯定。七次成功实施的珠江水量统一调度实践证明，通过流域和区域水资源合理调配来抑制咸潮是目前解决枯水期潮汐影响城市饮用水问题的一种有效途径。然而，目前水资源调度模式与现有水库以防洪、灌溉、发

电为主要功能的调度运行方式不相适应，还不能完全满足枯水期抑咸调度的需要。

针对珠江下游地区咸潮上溯问题，国家水体污染控制与治理科技重大专项中设立专门课题，研究河口地区的水质安全问题，其中“多汊河口的水库—闸泵群联合调度咸潮抑制技术课题”（2009ZX07423-001-2）是由珠江水利科学研究院承担的任务，该课题从珠江流域上游水库群的联合调度、三角洲地区的闸坝运用、海水动态及上溯机理分析预测等多角度，研究了珠江三角洲地区咸水上溯控制的技术方案并进行了示范。中国水利水电科学研究院承担了其中上游水库群联合调度的有关研究工作，本书是在该课题成果基础上撰写而成的。

本书共分10章，第1章由雷晓辉、贺新春等撰写，全面介绍了国内外分布式水文模型及水库调度的研究进展；第2章由廖卫红、雷晓辉、王宇晖等撰写，介绍了自主开发并获得软件著作权（软著登字第0480814号）的分布式水循环模拟模型EasyDHM；第3章由唐克旺、王琳、雷晓辉等撰写，介绍了水循环要素演变规律的几种研究方法，包括突变分析、小波分析等；第4章由雷晓辉、王旭、王宇晖等撰写，介绍了课题研制的梯级水库群抑咸调度模型；第5章由唐蕴、王琳等撰写，阐述了珠江流域尤其是珠江三角洲地区的水资源及其开发利用特点；第6章由廖卫红、王宇晖、张峰、孙甲岚等撰写，具体阐述了珠江流域分布式水文模型的构建，包括基础数据库的建设、空间单元划分、要素信息提取、模型率定及验证等；第7章由王琳、王宇晖、唐蕴、张峰、孙甲岚等撰写，系统阐述了珠江流域水循环的演变规律，包括温度变化、降水变化、径流演变等；第8章、第9章由雷晓辉、刘盈斐、张峰、王旭等撰写，在构建流域径流预报模型基础上，进行了流域短期及中长期的径流预测预报，提出了抑咸调度的多种方案并进行了优化分析及推荐方案的建议；第10章由唐克旺、王琳等撰写，提出了珠江流域水库群联合调度的对策建议。原书中多幅图为彩色，由于印刷限制，这些彩色图在书中正常位置以单色出现，为保证阅读效果图名中标“*”号

的图在书后附上了彩色插页。

在本课题的实施过程及本书的撰写过程中，中国工程院院士王浩一直给予悉心指导，教授级高级工程师贾仰文在模型模拟及动态预测等方面提出了很多建设性意见，珠江水利科学研究院副院长王琳等制定了科学合理的课题顶层设计，明确了研究方向及任务。在此，向上述专家表示诚挚的谢意。

本书可供水资源调查、规划、管理及科学研究等方面的人员参考借鉴，也可供高等院校相关专业师生阅读。

作者

2013年9月1日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 分布式水文模型研究进展	1
1.2 水库调度研究进展	5
第 2 章 分布式水循环模拟模型 EasyDHM	9
2.1 水文模拟	9
2.2 模型空间单元划分方法	18
2.3 气象要素空间展布方法	21
2.4 参数敏感性分析与优化方法	22
第 3 章 水循环要素演变规律研究方法介绍	27
3.1 线性回归	27
3.2 Mann—Kendall 检验法	28
3.3 突变分析	29
3.4 小波分析	30
3.5 Kendall tau 相关系数检验	31
第 4 章 梯级水库群抑咸调度模型	33
4.1 基于调度规则的梯级水库群抑咸调度理论基础	33
4.2 梯级水库群抑咸调度模型结构框架	34
4.3 调度图概化	34
4.4 基于调度图的水库调度模拟模型	36
4.5 多目标技术	37
4.6 优化方法	39
第 5 章 珠江流域概况	46
5.1 地理位置	46
5.2 流域水系	46
5.3 气象水文	47
5.4 社会经济状况	49

5.5	水利工程	50
5.6	水资源开发利用现状及存在的问题	51
第6章	珠江流域分布式水文模型构建	53
6.1	基础数据准备	53
6.2	空间单元划分	56
6.3	气象要素空间展布	59
6.4	参数率定	59
6.5	模型验证	65
第7章	珠江流域水循环演变规律分析	70
7.1	气温演变规律分析	70
7.2	降水演变规律分析	78
7.3	蒸发演变规律分析	87
7.4	水文站径流演变规律分析	90
7.5	水库入库径流演变规律分析	100
7.6	流域径流变化影响因素分析	107
7.7	小结	110
第8章	珠江流域径流预报模型构建	111
8.1	径流预报方法	111
8.2	短期径流预报	113
8.3	中长期径流预报	116
第9章	珠江流域抑咸规划调度	123
9.1	珠江流域抑咸规划调度模型	123
9.2	枯季生态调度图优化	124
9.3	长序列优化多方案对比分析	125
第10章	结论与建议	135
10.1	结论	135
10.2	建议	136
	参考文献	138

第1章 绪 论

1.1 分布式水文模型研究进展

水文模型是指将整个流域作为研究对象,考虑流域超渗产流、蓄满产流及汇流等概念,根据河川观测流量来率定模型参数及模拟流域产汇流过程;分布式水文模型则是从水循环的动力学机制描述流域水文问题,根据水移动介质的物理性质推定模型参数,能够分析流域下垫面变化后的产汇流变化规律。因分布式水文模型揭示的水文循环过程更接近客观世界,已成为当今水文水资源研究的热点之一^[1]。分布式水文模型最基本的特征是根据流域各处气象信息和下垫面特性要素信息的不同,将流域划分为若干个小单元,在每一个单元上用一组参数反映其流域特征,具有从机理上考虑降雨和下垫面条件空间分布不均匀对流域降雨径流的影响^[2]。

目前,流域分布式水文模型主要有三类:紧密耦合型、松散耦合型和半分布式水文模型^[3]。

(1) 紧密耦合型分布式水文模型又称为全分布式水文模型。这类模型是基于连续方程和动力学方程描述小尺度精细的物理过程,直接计算水量和能量的流动与增减,也是通常所指的具有物理机制的分布式水文模型。其优点是能涉及水文现象的本质或物理机制;缺点是计算量过大,需要数据资料过多,方程的数值求解困难^[4]。

(2) 松散耦合型分布式水文模型,又称为准分布式水文模型。这类模型将产流和汇流过程分开模拟,在每个基本计算单元上应用现有的集总式概念性模型或系统模型来推求净雨量,再进行汇流演算,最终求得出出口断面流量。与紧密耦合型相比,此类模型计算简单、使用方便,但一般适用于宏观水文现象的模拟。

(3) 半分布式水文模型则不再关注各个产流计算单元的空间位置,而是采用某种分布函数来描述各计算单元产流的空间差异性。

分布式水文模型在实践中的应用主要包括:流域条件变化与气候变化响应

模拟, 缺乏前期观测的流域模拟, 洪水预报, 水利工程影响以及污染物和沉积物的运移模拟等^[5]。

1.1.1 国外研究进展

国外对分布式水文模型的研究起步比较早, 1969年, Freeze、Harlan^[6]发表了《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章。随后, Hewlett等(1975)提出了森林流域变源模拟模型(VSAS), 该模型中地下径流被分层模拟, 地表坡面径流被分块模拟^[7]。1979年, Beven、Kirbby提出了以变源产流为基础的TOPMODEL模型(TOPgraphy based hydrological MODEL)^[8], 该模型基于DEM推求的地形指数可以反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响, 模型参数具有明确的物理意义, 不但能用野外的监测资料来确定, 而且还能用于无资料地区的计算, 但它并不是真正严格意义上的分布式水文模型。由丹麦、法国和英国的水文学者(Beven等, 1980; Abbott等^[9], 1986; Bathurst等^[10], 1995)联合研制的SHE模型(System Hydrologic European)是一个具有代表性的分布式水文物理模型, 模型中考虑了蒸散发、植物截留、土壤非饱和流及饱和流、融雪径流以及地表和地下水交换等水文过程; 此外, 该模型还可以研究人类活动对于产流等的影响。20世纪90年代, 法国SOGREAH咨询公司和丹麦水力学研究所(DHI)在SHE模型基础上研制了一个综合性的分布式水文模型MIKE—SHE, 该模型可以用于模拟陆地水循环中几乎所有主要的水文过程, 包括水流运动、泥沙运移和水质变化等, 目前, 已发展成为一个用户界面友好的商业化软件系统, 并被许多大学、研究院(所)及咨询公司所采用。1987年, 英国的Beven提出了一个具有物理机制的分布式降雨径流模型IHDM(Institute of Hydrology Distributed Model)^[11], 该模型根据流域坡面的地形特征, 将流域划分成若干部分, 并利用数学物理方程描述水分在地表和土壤中的运动, 计算得到暴雨的降雨径流关系。随后, IHDM模型得到了改进和应用^[12]。1982年, 美国农业部农业研究中心Alonso、Decoursey考虑到土地利用和管理将会影响到一个小流域的水文循环与化学循环, 设计了SWAM(Small Watershed Model)模型^[13]。1988年, Huber和Dickinson开发了暴雨洪水管理模型SWMM(Storm Water Management Model)^[14], 该模型具有良好的用户界面, 目前已发展到5.0版本。进入20世纪90年代, 出现了将土壤划分为饱和带和非饱和带的TOPOG模型^[15]和美国农业部农业研究中心的Arnold博士开发的SWAT(Soil and Water Assessment Tools)模型^[16,17], 该模型是一个具有很强的物理机制, 且能进行长时段模拟的分布式水文模型, 能够利用GIS和RS提供的空间信息, 模拟复杂流域中多种不同的水文物理过程, 被认为最适合模拟在不同

土壤、土地利用中,长期土地管理对水、土沙、营养物质及农业化学物质的影响^[18],因此,该模型得到了广泛的应用^[19,20]。随后,又相继出现了 HBV^[21]、HEC—HMS^[22]等分布式水文模型。

1.1.2 国内研究进展

相比国外,国内在分布式水文模型研究方面起步较晚,是从 20 世纪 90 年代逐渐发展起来的,但到现在也已取得了很多较显著的成果。

1.1.2.1 模型应用方面

近些年来,在国内应用比较多的国外分布式水文模型主要有 SWAT、TOPMODEL 及 HEC—HMS 等。刘昌明等^[23] (2003) 运用 SWAT 模型模拟分析了气候变化和土地覆被变化对黄河河源区径流的影响。冯夏清等^[24] (2010) 利用 SWAT 模型对乌裕尔河流域进行了径流模拟,并分析了未来气候变化情景下径流量的变化情况。庞靖龙等^[25] (2007)、于磊等^[26] (2008)、黄清华等^[27] (2010) 对 SWAT 模型也进行了相关应用研究,表明 SWAT 模型在国内一些流域也有良好的应用性。郭芳等^[28] (2000) 对 TOPMODEL 模型的基本理论进行了介绍,并将其应用于淮河流域中,结果表明该模型可以达到日模拟精度要求。针对现行的 TOPMODEL 模型仅局限于描述小尺度流域山坡水文特征及其计算流程存在一些与实际不相符的表达,黄晴等^[29] (2008) 对该模型的地形指数计算方法、产流机制和汇流方式进行了改进,并将其应用到中尺度半干旱流域中。张建军等^[30] (2009) 将 HEC—HMS 模型应用于黄土高原小流域中,验证了该模型的适用性。

1.1.2.2 模型开发创新方面

沈小东等^[31] (1995) 在研究降雨时空与下垫面参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一个在 GIS 支持下的动态分布降雨径流流域模型,实现了基于栅格 DEM 的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。贾仰文等^[32,33,34] (1997, 2000, 2001) 开发了一个网格分布式流域水文模型 WEP 模型,该模型对非饱和土壤水运动的模拟采取了比 SHE 模型更为简化的算法,但强化了对植物耗水与热输送过程的模拟,对水循环与热输送各过程的描述大都基于物理概念。为解决缺资料地区的堰塞湖入湖径流模拟预报的问题,赵志轩等^[35] (2011) 将 WEP 模型与热带降雨量卫星的降雨数据 (TRMM_PR) 结合,对唐家山堰塞湖日均入湖流量进行了模拟预报。此外,该模型在其他流域也得到了广泛应用^[36,37]。

杨大文等^[38,39] (Yang, 1998, 2000) 提出了基于流域地貌特征的大尺度分布式水文模型 GBHM (Geomorphology-Based Hydrological Model),该模型的基本思想是首先将大流域划分为若干小的子流域,然后利用流域的地貌特

征参数,将每个子流域划分为汇流区间,并将汇流区间表示为一系列山坡,在同一汇流区间内考虑不同植被和土壤类型对山坡产流的影响,其不仅扩展了分布式水文模型的尺度,而且较好地描述了流域水文空间的变异性。目前,该模型在黄河流域^[40]、洞庭湖区间^[41]、长江上游流域^[42]等都得到了较好的应用。

李兰等^[43,44] (1999, 2000) 提出了 LL—I 分布式水文模型,该模型由各个小流域产流模型、汇流模型、流域单宽入流和上游入流反演模型以及河道洪水演进四大部分组成。随后,又提出了基于 GIS 的 LL—II^[45] 分布式降雨径流模型,其产流模型为变动生态产流模式,该模型在洪水预报中得到了较好的应用效果^[46]。

郭生练和熊立华等^[49] (2001) 提出了一个基于 DEM (Digital Elevation Model) 的分布式流域水文物理模型,该模型详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流及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,该模型在美国缅因州 BBMW 流域得到了验证;随后 (2004),又提出了一个基于 DEM 的用来模拟湿润地区的蓄满产流机制模型^[50]。夏军等^[51,52] (2002, 2004) 将时变增益非线性水文系统 (TVGM) 与数字高程模型 (DEM) 结合,开发了一个分布式时变增益模型 (DTVGM),该模型既具有分布式水文概念性模拟特征,又具有水文系统分析适应能力强的特点,是水文非线性系统方法与空间分布式模拟的一种结合。

根据我国内陆河流域的自然地理和社会经济特点,贾仰文和王浩等^[53,54,55] 应用 WEP—L (Water and Energy Transfer Processes in Large River Basin) 模型,在 WEP 模型上集成积雪融雪模块和灌溉系统模拟模块等,开发了基于 GIS 和数据库平台、能够精细描述水循环各环节的黑河流域分布式二元水循环模型,进行逐日分布式水循环模拟计算。然后又将该模型与集总式水资源配置模型相耦合形成水资源二元演化模型,对黄河流域的水资源演变规律进行了评估分析。该模型较好地反映了人类活动影响下的黄河水资源演变规律^[56,57]。

为了推进分布式水文模型技术在实际水资源管理与洪水管理中的应用,雷晓辉等^[58,59] (2010) 开发了一个分布式水文模型 EasyDHM (Easy Distributed Hydrological Model),该模型集成了很多新技术,如基于 DEM 的快速建模技术、支持不同时空尺度的快速模拟技术以及参数自动识别及率定技术等。此外,该模型还集成了多种水循环伴生过程模拟功能,包括水质过程模拟、土壤侵蚀过程模拟,人工用水过程模拟及水库调度模拟等过程。该模型在汉江流域^[60]、海河阜平流域^[61]及南水北调中线受水区的应用中取得了较理想的效果。近年来,针对强人类活动地区,尤其是农田系统开发,中国水利水电科学研究院水资源研究所又开发了分布式水文模型 MODCYCLE (An Object Oriented Modularized for Basin Scale Water Cycle Simulation)^[62],并将该模型应

用到海河流域,对其“四水”(大气降水、地表水、土壤水和地下水)转化特征进行了定量分析。

1.1.2.3 珠江流域分布式水文模型研究状况

解河海^[63] (2006) 将 TOPMODEL 模型应用于东江星丰流域,对其洪水进行了模拟计算。文佩^[64] (2006) 将两水源 TOPMODEL 模型改进成三水源模型,并将其成功应用于东江流域产汇流模拟。符传君等^[65] (2007) 应用 TOPMODEL 模型对东江流域枯水径流进行了模拟,取得了较高的模拟精度。靳晓莉等^[66] (2008) 将 HBV 模型应用于东江流域及其子流域,采用代理流域法和全局平均法估计无资料流域的模型参数,取得了较好的模拟结果,验证了模型的适用性。杨宏伟等^[67] (2011) 运用 SWAT 模型对东江典型流域的地表径流进行了模拟,在此基础上对土地利用和覆被变化对径流的影响进行了探讨,结果显示林地面积的增加可导致年径流量的减少,年内分配上表现出枯水期径流明显增加,丰水期径流明显减少。

1.2 水库调度研究进展

作为河流的主要水利工程,水库在防洪、发电、供水、灌溉等方面均起着举足轻重的作用。水库调度是以兴利除害、综合利用水资源为原则,以大坝安全保证为前提,以尽可能地满足国民经济各部门用水需求为目的,根据水库承担的调度任务及规则,通过发挥水库的调蓄能力,实现对水库的天然入库径流进行有计划的蓄泄的技术手段。本节将从基于过程的水库(群)调度理论发展现状以及基于规则的水库(群)调度研究现状两个角度进行综述,并对存在的问题及发展趋势进行探讨。

1.2.1 基于过程的水库(群)调度理论发展现状

1995 年,美国 Little 等^[68] 提出了水电系统随机动态规划调度模型,对水库优化调度问题进行了研究,标志着用系统科学的方法研究水库优化调度的开始^[69]。目前,水库(群)调度优化调度方法主要包括:非线性规划方法、动态规划法方法以及启发式规划方法等。

非线性规划能够有效处理目标函数不可分和非线性约束问题,可为水库调度提供更为基本的数学方法。李寿声等 (1989)^[70] 结合一些地区水库调度实际问题拟订了一个非线性规划模型和多维动态规划模型,用于解决满足多种水源分配的水库最优引水量问题。樊尔兰等 (1996)^[71] 建立了综合利用水库优化调度的动态确定性多目标非线性数学模型,并利用逐次逼近的逐步优化法求解模型的最优解集。由于非线性规划方法并没有通用的程序和解法,因此,实际应

用常需要进行线性化或与其他优化方法相结合。

动态规划法 (DP) 是水库 (群) 优化调度中应用最为广泛的优化方法。水库群系统具有高度的非线性和典型的随机性, 而动态规划通过把复杂的初始问题划分为若干个阶段的子问题, 逐段求解, 从而突破了任何线性、凸性甚至连续性的限制, 因此在水库群优化调度中动态规划法可以较好地反映径流实际情况, 对目标函数和约束条件也没有严格的要求。Young 等 (1967)^[72] 首次采用 DP 模型求解水库优化调度问题; Hall 和 Shephard (1967)^[73] 在对美国加利福尼亚州的 Shasta 水库的优化计算中, 在 Young 的模型基础上对时段费用函数的表达式进行了改进, 从而提高了优化效果; Rossman (1977)^[74] 将 Lagrange 乘子理论用于解决有随机约束的动态规划问题。然而, 求解多变量复杂的高维问题时, 会遇到维数灾问题, 后来陆续研究出增量动态规划 (IDP)、微分动态规划 (DDP)、离散微分动态规划 (DDDP)、逐次优化算法 (POA) 等, 但是都无法从根本上解决维数灾问题。

启发式规划方法是近代发展起来的一种新式算法。与传统优化算法相比, 这类算法通常避免出现不能收敛或陷入局部最优的问题, 从而得到全局最优解。Chandramouli 等^[75] (2001) 将人工神经网络模型与专家系统相结合, 建立改进的决策支持模型进行水库优化调度。Kumar^[76] (2006) 用蚁群算法针对多目标水库分别进行了短期和长期的优化调度计算。Salvatore Barbagallo 等提出采用粗糙集方法提取水库调度规则。Paulo Chaves 提出一种随机模糊神经网络方法, 并将该方法应用于水库优化调度, 获得了很好的效果。Kumar 提出改进粒子群算法, 计算结果较优。但是, 遗传算法、蚁群算法等智能仿生算法都存在着进化速度慢, 易产生早熟收敛的问题, 并且其效果对参数有较大的依赖性。

1.2.2 基于规则的水库 (群) 调度研究现状

1.2.2.1 单一水电站调度规则

水库调度规则是根据水电站长系列来水、库容及出流过程总结出来的具有规律性的水库特征, 用以对水库实时调度进行有效控制。通过长系列的历史资料制定的调度规则可以规避来水预报不确定性对水库调度的影响, 保证水库的有效运行^[77,78]。水库调度规则的特点在于不连续性, 从表现形式上看, 主要偏重于调度函数和调度图。

调度函数是将径流序列、确定性优化方法得到的最优运行轨迹以及决策序列作为水库运行要素的实验观测数据, 通过回归分析等方式, 获得调度决策与运行要素之间的回归方程, 以指导水库调度运行。由于调度函数在面临实际水库状态时, 只能够做出唯一一个调度决策, 这就使得调度本身存在很大的风险性和不确定性。与此同时产生了另一种调度规则的表现形式——调度图。调度

图是将调度函数概化成调度参量（出库流量、电站出力）跟水位之间的线性阶段函数^[79]。

常规的调度图制定方法通常是选择某一典型年（或典型系列），通过径流调节计算得到，运用时可充分融合调度管理者的经验，并且由于其简单实用、易于操作的特点，成为目前应用最广泛的常规调度方式^[80,81]。然而，采用调度图指导水库调度存在的主要问题是：未考虑预报来水、正常出力区范围太大、难以达到全局最优和准全局最优等一些不可避免的缺点，更多的学者希望运用新型模型和优化算法进行改进，进而提出优化调度图。

国外学者对水库调度图优化的研究工作开展较早，Chen (1995)^[82]以及Oliveira和Locks^[83] (1997)先后将遗传算法应用于水库调度图优化中，结合水库综合利用要求，实现对水库调度图的制定；Chang、Chen^[84] (1998)采用实数型编码的基因算法对基于规则控制洪水的水库调度进行优化，同时，比较分析了二进制编码和实数编码对多目标GA在水库调度图优化应用中的影响，提出实数型编码形式计算效率和精度更好，并在Shih—Men水库进行了应用^[85]，2005年，Chen等^[86]又以进化多目标遗传算法为基础构建模拟模型，对水库的调度曲线进行了优化；同时，Ilich^[87] (2000)应用人工神经网络技术，构建优化模拟模型，对单一水库的调度线进行了优化；Kim等^[88] (2008)采用时间序列模型预报水库的径流数据，并以多目标遗传算法为基础构建优化模型，得到最优的调度曲线。

国内学者在单库调度图优化领域也取得很多成果。张铭等^[89] (2004)应用动态规划法，结合具体实际，建立相应的数学模型，对水库调度图进行优化；尹正杰等^[90] (2005)分析了常规方法求解综合利用水库调度图存在的问题，提出了一个基于遗传算法的调度图求解模型，直接以调度图的基本调度线为决策变量，对单库供水调度图进行了优化；邵琳等^[91] (2010)基于遗传算法与模拟退火算法，建立了适用于水库调度图优化的混合模拟退火遗传算法。

随着研究的深入，一些学者尝试将调度图和调度函数两种调度方式结合起来指导水库运行。Consoli等^[92] (2008)针对灌溉为主的水库设计了调度图和调度函数相结合的调度规则，并采用多目标优化技术对调度规则进行了优化。

1.2.2.2 水电站群调度规则

在研究初期，水库群联合调度以调度函数方式为主。黄永皓等^[93] (1986)采用约束微分动态规划对水库进行确定性优化调度，并在此基础上采用最小二乘回归分析的方法求得梯级水库中各水库各时段的调度函数；陈洋波等^[94] (1990)以水库群聚合分解法为基础，对梯级水库群隐随机优化调度函数的方法进行了探讨，以一个电网库群为例进行了应用。Jay^[95] (2000)对以发电为主的混联水库调度函数进行了推导，并通过案例分析验证了调度函数的优化效

果; Haddad^[96] (2008) 以蜂群杂交算法为基础, 构建以缺水最小为目标的模型, 经过计算得到放水和水位、入流的线性调度函数。

水库群调度图的优化与单一水库调度图优化的思路基本一致, 以梯级水库群整体效益最大为目标, 对所有水库进行统一优化, 从而得到各个水库的优化调度图。Tu^[97,98] (2003, 2008) 探讨了初始水位对多目标梯级水库群规则的影响, 并采用混合整数线性规划方法对梯级水库的一组调度曲线进行了优化。同时, 以多库系统为基础构建混合整数非线性规划模型, 在水资源优化配置为目标对各水库调度线进行了优化。Paredes^[99] (2008) 采用启发式网络流算法, 构建以最小必备容量为单目标的优化模型对多库调度曲线进行了优化, 并在西班牙东部的 Mijares 流域进行了应用。李智录等^[100] (1993) 采用逐步计算法编制水库群系统的调度图, 并在安徽省济河灌区等区域的水库群常规调度图制定中进行了应用。黄强等 (2008)^[101]、张双虎等 (2006)^[102] 在乌江渡水库群优化调度中, 分别采用差分演化算法和遗传算法构建以梯级发电量最大为目标的模型, 在给出最优化决策的同时给出了梯级总调度图及各电站的优化调度图。刘心愿等^[103] (2009) 采用多目标遗传算法 NSGA-II 对清江流域梯级水库调度图进行了优化。邵琳等^[104] (2010) 采用混合模拟退火遗传算法对三级梯级水库调度图进行了优化。

第2章 分布式水循环 模拟模型 EasyDHM

2.1 水文模拟

2.1.1 产流理论

本书提出的 EasyDHM 产流模型是在 Wetspa 模型 (Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere)、SWAT 模型 (Soil and Water Assessment Tool)、新安江模型等产流模型的基础上,通过集成创新而提出的一种产流模型,其不同地区、不同水文地质条件下均具有通用性,其产流过程概化见图 2-1。EasyDHM 模型在垂向上划分了 4 层,即植被冠层、地表层、土壤层和地下水含水层。首先降雨进入植被冠层,发生冠层截留,穿过

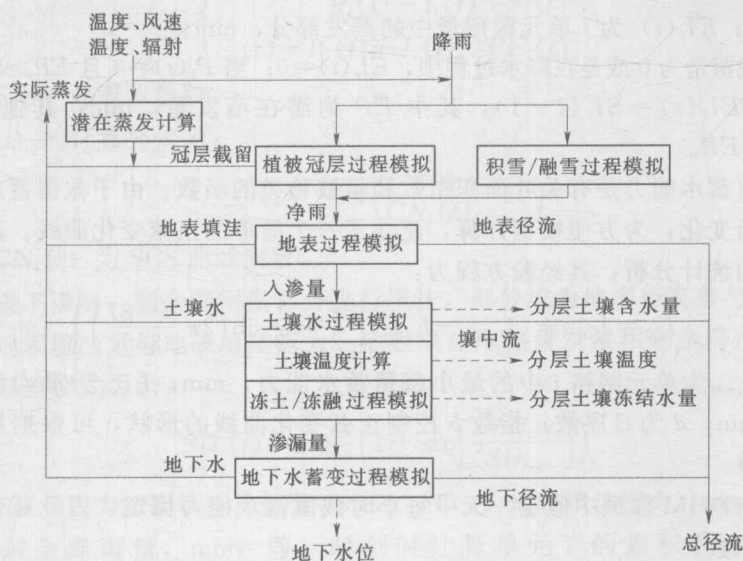


图 2-1 EasyDHM 模型产流过程概化 (垂向结构)