

流域水量水质联合模拟 技术与应用

王宇晖 廖卫红 雷晓辉 宋新山 王浩 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

— 内 容 要 点 —

流域水量水质联合模拟 技术与应用

王宇晖 廖卫红 雷晓辉 宋新山 王浩 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

流域水量水质联合模拟预测是流域环境管理领域的研究热点。本书理论部分介绍了流域水量水质联合模拟的基本框架,阐述了流域水循环与点面源伴生过程模拟评价理论与方法,提出了流域模型高维参数分析率定技术;实践部分重点给出了流域水量水质联合模拟的四个实例,包括三峡库区分布式水循环及伴生面源过程模拟、密云水库上游流域与库区二维生态动力学联合模拟、太湖流域山丘区水循环与湖区二维生态动力学联合模拟和太湖流域水量水质管理系统。

本书具有较强的学术性和实用性,可作为环境建模人员以及从事环境保护工作相关人员的参考书,也可供从事水文学、环境学等方向的研究学者和科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

流域水量水质联合模拟技术与应用 / 王宇晖等著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2015.4

ISBN 978-7-5170-3100-0

I. ①流… II. ①王… III. ①流域—水流量—预测技术—研究②流域—水质—预测技术—研究 IV.

①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第078641号

书 名	流域水量水质联合模拟技术与应用
作 者	王宇晖 廖卫红 雷晓辉 宋新山 王浩 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 204千字 6插页
版 次	2015年4月第1版 2015年4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

水是人类生活生产不可或缺的自然资源，也是生物赖以生存的环境资源和支撑国民经济健康发展的经济资源。我国是一个水资源贫乏国家，人类活动空前剧烈，严重影响了流域天然水循环过程，流域水环境污染更加剧了水资源的短缺，由水问题引起的社会矛盾逐年突出。

然而，流域水循环是一个复杂的过程，涉及水量和水质两个方面，而人类活动又使得水循环过程更为复杂化，这对流域水资源的有效管理带来了难度。为了流域水资源的合理利用和保护，国家十分重视在流域层面上的水管理。目前，我国七大流域综合规划已全面得到国务院批复，七大流域综合规划环评篇章基本编制完成，其他中小流域综合规划编制及规划环评工作也在陆续开展之中。在流域规划和评价工作中，对流域水量水质进行模拟与评价是十分重要的内容。对流域水量水质进行客观的定量化评价，是保证科学决策的前提。

本书以流域水量水质联合模拟为中心，阐明了流域水文模型与水质模型的耦合机制，并提出了流域水循环和面源过程的计算方法。针对流域模型高维参数率定难度大的问题，提出和验证了利用敏感性分析与优化技术相结合高效方法的可行性；此外，本书给出了作者在从事流域水循环模拟工作中遇到的水量水质联合模拟的三个实际案例，介绍了具体用于实际流域水量水质管理的模型系统。希望能对相关研究人员提供有用的借鉴和参考。

全书共8章。第1章对流域水循环、水环境模拟，国内外流域分布式水循环模型、流域水环境模型的应用和发展进行了综述，阐述了流域水循环与水环境模型联合模拟所存在的几个问题；第2章提出了流域水量水质耦合模拟的体系和方法，分析了流域水量水质

联合模拟的方式,给出了流域分布式水循环模型构建过程中水量平衡、土壤参数、土地利用参数和地表过程参数的提取方法;第3章提出了模型高维参数敏感性分析和率定技术,利用 LH-OAT 敏感性分析方法筛选敏感参数,并针对敏感参数进行多目标优化,提高优化效率;第4章利用分布式水文模型和流域点面源模型对三峡库区水循环过程和点面源过程进行了模拟,并对面源负荷进行评价,同时利用降水情景分析降雨变化对库区污染负荷输出的影响;第5章利用分布式水文模型对密云水库上游流域进行了水循环和水质模拟,并将得到的面源输出作为密云水库生态动力学模型的输入边界条件,对水库水质进行了模拟;第6章利用分布式模型与生态动力学模型对太湖流域山丘区及湖区进行了模拟;第7章介绍了太湖流域水量水质管理系统,展示了系统的主要用户界面和功能;第8章对本书进行了总结和展望。

本书编写分工如下:

第1章由王宇晖、廖卫红编写,第2章由雷晓辉、王宇晖编写,第3章由王宇晖、雷晓辉、廖卫红、宋新山编写,第4章由王宇晖、廖卫红、雷晓辉、宋新山编写,第5章由王宇晖、廖卫红、雷晓辉、宋新山编写,第6章由冶运涛、廖卫红、王佳、王宇晖编写,第7章由廖卫红、雷晓辉、冶运涛、王宇晖编写,第8章由王宇晖、雷晓辉编写。全书由王宇晖、廖卫红、雷晓辉、宋新山统稿。

本书研究工作得到了环保公益性行业科研专项“流域综合规划环境影响评价关键技术研究”(2013467042)和东华大学人才计划“励志计划”(B201310)项目的资助,在此表示感谢!

由于受时间和作者水平所限,书中较多内容还有待进一步研究和完善,其中难免出现不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2015年1月于上海



目录

前言

第1章 概述	1
1.1 流域水循环模拟研究进展	1
1.2 国内外分布式水循环模型研究进展	3
1.3 流域水环境模拟研究进展	5
1.4 流域水循环水环境耦合模拟中的几个问题	9
第2章 流域水量水质耦合模拟体系和方法	10
2.1 流域水循环水质模型耦合方式	10
2.2 流域分布式水循环模型构建	11
2.3 点面源污染与水土流失计算	22
2.4 流域水循环与点面源过程的耦合模拟	29
2.5 流域水文模型与水动力模型的耦合	33
第3章 模型高维参数敏感性分析及率定技术	34
3.1 LH-OAT 敏感性分析方法	34
3.2 多目标参数优化	36
3.3 高维参数敏感性分析和高效率定方法验证	40
3.4 LH-OAT 敏感性分析结果	42
3.5 MOSCEM-UA 多目标参数优化结果	44
第4章 三峡库区分布式水循环及点面源过程模拟	50
4.1 研究区概况	50
4.2 库区社会经济信息统计与空间展布	53
4.3 三峡库区点面源负荷统计与评价	62
4.4 水文模型与点面源污染负荷模型耦合模拟结果	66
第5章 密云水库上游流域与库区三维生态动力学联合模拟	71
5.1 研究区概况	71
5.2 密云上游流域分布式水文及伴生面源负荷模型的构建	72
5.3 水文模拟结果及面源负荷求算	79

5.4	密云水库三维生态动力学模型的构建	80
5.5	EFDC 模型参数率定	84
5.6	模拟结果	85
第 6 章	太湖流域山丘区水循环与湖区水质联合模拟	98
6.1	研究区概况	98
6.2	太湖流域山丘区分布式水文模型的构建	100
6.3	水文模拟结果	102
6.4	太湖 EFDC 三维生态动力学模型的构建	110
6.5	模拟结果分析	112
第 7 章	流域水量水质管理系统——以太湖为例	126
7.1	模型系统平台概述	126
7.2	太湖流域水量水质管理系统	127
7.3	太湖流域水雨情查询系统	128
7.4	太湖流域水质管理系统	132
第 8 章	结语与展望	144
8.1	结语	144
8.2	展望	144
参考文献		146

第 1 章 概 述

1.1 流域水循环模拟研究进展

水是人类生活生产不可或缺的自然资源，也是生物赖以生存的环境资源和支撑国民经济健康发展的经济资源。除了自然属性外，水有着独一无二的社会属性。水少将引发干旱和水荒，水多也能引起洪涝灾害；水资源虽然有可再生性，却存在时空异质性，若处理水的方式不当，可能引发河流上、下游之间，地区之间的用水矛盾，成为社会不稳定因素。水的储量虽然大，但是可人为开采的淡水量不到淡水总量的百分之一。这部分水资源主要分布于流域内河流和地下含水层。由于人口增长和社会经济的发展，需水量不断增长，加之气候变化影响以及水资源在各地的分布不均，使得洪涝干旱灾害频发，流域可利用水资源量日益紧缺。当前，人类活动空前剧烈，流域内争水、排洪、调水等工程严重影响了流域天然水循环过程，由此引发的水资源短缺和区域间用水矛盾问题尤为突出。近年来，又由于环境监管不力以及工业化生产排污量的增加，水质问题也已经成为水问题的一个矛盾焦点。这些问题的产生，究其根源可以认为是由水循环不畅所引起的，而引起水循环不畅的原因既有人为的，也有天然的。因此，对于水循环过程的深入认识，对实际解决水问题有着深刻的意义。

最初，人们对水循环的认识停留在一般模式，认为是降水、径流和蒸发过程的循环往复。对水循环的描述往往是利用现有的降雨径流资料建立起某种数学关系。对输入-输出间的物理因果关系考虑不够全面，对水循环的认识比较表面。水文模拟模型最初起源于解决实际问题，1850 年 Mulvany 提出了被公认为首个水文模型的推理法，用于解决排水管道的设计问题。此法被广泛应用于封闭的、不透水的小流域洪峰流量估计。此后，Sherman (1932) 提出了单位线法 (UH) 用于改进水库和防洪设施的设计。单位线法不但能提供洪峰流量计算，对洪水过程线的形状和洪量也能进行有效估计。将单位线法进行扩展又能生成一系列不同形状的洪水过程线，用于不同特征流域洪水过程的推算，此类模型通常被称为线性模型。为了将线性模型应用于相对更大的、非完全不透水的流域，Chow 等 (1988) 提出了“有效雨量”，即净雨量，用于线性模型的模拟。



20 世纪 50 年代以后, 计算机技术发展迅速, 人们开始把流域水循环作为一个整体, 在大空间尺度上进行系统研究, 提出了水文模型的概念。由于流域水循环过程十分复杂, 最初的水文模型主要以统计水文学和观测水文学为基础, 寻找降雨-径流对应关系, 如: 单位线模型、线性水库、总径流线性响应模型、神经网络模型等。这类系统理论模型着重考虑模拟精度, 不考虑模型输入-输出的内在物理因果关系。因此, 这类模型也常被称为黑箱模型或灰箱模型。

随着计算机技术的不断发展, 研究人员开始对复杂土壤产流过程进行模拟, 并由此产生了大家所熟悉的, 所谓的“概念模型”(Dawdy 和 O'Donnell, 1965)。为了更好地阐释流域“产-汇流”物理机制, 概念模型又逐渐发展成为由多个相互关联的概念型“产-汇流”子过程模型的集合。随着对水循环过程的深入研究, 开始把降雨-径流过程进行细分和概化, 并结合水文经验公式(如下渗曲线、汇流单位线、蒸散发公式等), 近似地模拟降水-径流过程。相继出现了一系列具有代表性的概念性水文模型, 如: 美国的斯坦福(Stanford)模型和萨克拉门托(Sacramento)模型, 瑞典的 HBV 模型、日本的 Tank 模型、国内的新安江模型和陕北模型等。概念性模型将陆面降雨-径流过程概化成若干主要的水文过程, 如: 截留、入渗、下渗、蒸散发、地下水退水等, 为今后的物理模型的出现和发展奠定了基础。

20 世纪 70 年代末, 人们认为降雨-径流过程的产生主要是受饱和含水带的动力学过程所支配的。因此, 将土壤水分含量用简单的单调函数来表示, 并由此产生了一类新型的“集总式模型”, 又被称为变产流面积模型。这些模型基本上采用了 Dunne 假设, 认为所有的净雨都进入土壤层, 并只从饱和上层土壤产流。这类变产流模型主要有新安江模型、PDM (Probability Distribution Model) 模型等。然而, 这些模型的模型参数往往不能直接获得, 需要通过模型参数率定来估计。

1965 年以来, 不少水文学家试图改进降雨-径流过程模拟的物理机制。此间, 出现了具有代表性的物理模型——SHE 模型 (Abbott 等, 1986)。该模型引入了描述表面流、饱和带及非饱和带壤中流偏微分方程来描述降雨-径流过程的一些子过程, 将各个子过程的输出作为其他子过程的边界条件, 有机地将各个子过程整合起来, 对流域水文过程进行模拟。但是, 这类模型的实际应用需要有大量的输入数据和计算时间。

近些年, 面上信息的可获得性大大提高, 其中包括了土壤类型、土地利用类型、雷达降雨等信息, 这对简化物理机制的水文模型提供了很大帮助。这有助于模型参数数量相对简化, 而同样能使其应用于实际水文预测。此类代表性模型主要有 TOPKAPI 模型 (Todini, 1995)、LISFLOOD 模型 (De Roo 等,



1998) 等。

随着对水循环研究的不断深入以及人类对水循环干扰的加剧,研究土地利用类型与土地覆被变化与水循环之间的作用关系已经成为了水问题研究的重点。1966 年澳大利亚水文学家飞利浦提出了土壤-植被-大气连续系统 (SPAC),将水文循环与生物圈作用直接联系起来。20 世纪 60 年代,联合国教科文组织 (UNESCO) 与世界气象组织 (WMO) 等国际机构,组织实施了一系列重大国际科学计划。重点对水循环在气候和生态环境变化中的作用开展了研究,其中包括国际水文计划 (IHP)、水文循环生物圈 (BAHC) 等,旨在研究地表植被在水循环中所起的作用。项目计划的实施获得了大量的实验数据,形成了水循环研究的资料库,确定了土壤-植被-大气系统水循环中的生物控制作用,建立起各种事件和空间尺度上的能量和水分通量模型。

从流域水循环模拟的处理方式来看,水文模型可以分为集总式模型和分布式模型两种。集总式模型将流域看做是一个整体进行建模,模型参数在流域上平均化。而分布式模型则根据流域下垫面的空间异质性和降水的均匀性,将流域分为若干个计算单元,可以是具有上下游水力联系的子流域、集水区,或者是将流域全部划分为网格,对每一网格单元采用不同特征参数进行模拟计算,然后按照计算单元间的水力联系进行汇流演算,得到流域的输出结果。

20 世纪 80 年代后,传统的水文模型发展较为缓慢,主要是利用先进的计算机技术,结合地理信息系统、遥感监测数据 (数字 DEM 等) 对水循环模型进行改进和完善,并形成模型系统。与概念性水文模型相对的是物理模型。水文物理模型产生相对较晚,水文过程相对复杂,特别是分布式水文模型,其最大的特点是能细化考虑模型物理参数在空间上的异质性。因此,基于物理过程的水文模型大多是分布式的。依据物理学质量、动量和能量守恒定律以及流域产-汇流特征,构造水动力学方程组,来模拟降水-径流在时空上的变化。

1.2 国内外分布式水循环模型研究进展

水循环模拟研究过程中,分布式水文模型逐渐成为研究流域水循环过程的热门手段。计算机技术、GIS 地理信息系统和遥感技术为分布式水文水循环过程研究开辟了新道路。早在 1976 年,丹麦水力学研究所、英国水文研究所和法国 SOGREAH 等部门合作研究,联合研制开发了基于水动力学方程的首个分布式水文模型——SHE 模型 (System Hydrological European)。随即,如 SWAT 模型、THALES 模型、HEC 模型、IHDM 模型等一大批分布式水文模型随之诞生。分布式水文模型能够较完整地模拟整个流域降雨径流过程,预测水文变量,如:径流量、土壤含水量以及蒸散发等的时空格局差异和变化。



Mike-SHE 模型水文过程利用质量、能量和动量守恒的偏微分方程的差分形式来描述,同时也采用了一些独立实验研究得来的经验关系,综合考虑降水、蒸发、地表径流、土壤对地下水的补给、地下水的流动等水文过程。IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) 最早是由英国水文研究所的 Morris 于 1980 年开发的具有物理机制的分布式降雨径流模型。模型利用数学方程来描述水分在地表和土壤中的运动方式计算得到降雨径流关系。该模型包含了降雨、蒸散发、入渗等过程,并考虑土壤导水系数的各向异性。SWAT 模型是美国农业部农业研究所历经 30 年开发的一套适用于复杂大流域的水文模型。SWAT 模型主要特点是基于物理机制,使用常规数据,计算频率高,可模拟长期影响。SWAT 模型对于每一个子流域可以根据其中土壤类型、土地利用类型和管理措施的组合情况,进一步划分为单个或者多个水文响应计算单元。

国内分布式水文模型的发展相对较晚。李兰等(1997)开发出一个全分布式水文模型(简称 LL 模型),并提出了基于分布式模型的水文动态分布参数反演算法和分布式实时校正技术。目前 LL 模型已经在国内外 20 余个流域有实际应用。贾仰文等于 1996 年开发和完善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 模型简化的算法,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。WEP 模型便于综合使用 GIS 和卫星遥感数据,具有物理概念强、计算精度高、计算速度快等特点。任立良等在数字高程模型基础上,进行子流域集水单元勾画、河网生成、河网与子流域编码及河网结构拓扑关系的建立,然后在每一集水单元上建立数字产流模型(新安江模型),再根据河网结构拓扑关系建立数字河网汇流模型(马斯京根法),从而形成数字水文模型。杨大文等(1998)开发了基于流域地貌特征的分布式水文模型——GBHH 模型。模型将一个流域划分为若干个较小的子流域,利用流域的地貌特征参数,即用流域的宽度方程和面积方程将一个子流域划分为汇流区间和山坡,进而将二维流域简化为一维,减轻了计算负荷。同时,模型使用了流域的地貌特征参数以及考虑了汇流区间内不同植被和土壤类型对山坡产流的影响,因此能够较好地描述流域水文过程的空间特性。郭生练等(2000)提出了基于 DEM 的分布式流域水文物理模型,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、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。其中引入植物截留能力的物理参数——植物蓄积容量来描述植物截留过程。夏军等(2002)提出了分布式时变增益水文模型——DTVGM 模型,将水文系统非线性理论与分布式流域水文模拟相结合,开辟了水文模拟的新途径。模型既具有分布式水文概念性模拟的特征,又具有水文系统分析适应能力强的优点,能够在水文资料信息不完全或者有不确定性干扰



条件下完成分布式水文模拟与分析。刘志雨等(2002)以数字高程模型为平台,应用数值分析来建立相邻网格单元时空关系的分布式水文模型——YOPKAPI模型。总体而言,国内对分布式水文模型的研究处于起步阶段,主要是对模型机理的探索和成熟模型的引进与应用,尚未形成完整的模型应用体系和技术平台。

虽然国内外开发了众多水文模型,特别是在水循环领域的研究,多引入了分布式的概念,然而,在模型描述很多水文环节上,还是借鉴了概念性元素或使用经验函数关系的描述,特别是对于汇流过程,采用经验单位线、线性或非线性水库等方法,难以解释水循环过程的物理机制,导致模型参数具有经验性和一定的异参同效性。同时,限于计算机水平和模型的实用性,分布式模型的实际应用受到局限。相反,对于洪水预报等实际业务,传统的经验性模型或半分布式模型应用较为广泛。经过半个世纪,在新模型不断出现的同时,传统模型继续发挥着重要作用。

如前所述,水文模型的发展经历了从概念模型到复杂的物理模型,逐渐引入细化的方程重现复杂的水循环过程。那么这些模型是否都能进行延伸进而能应用于无资料地区的水文预测呢?在应用过程中,集总式模型是否能应用于各种尺度的流域呢?即便是利用分布式水文模型,在遥感和地形数据信息十分丰富的今天,将率定后的分布式水文模型应用于具有相似特征的无资料流域也屡遭失败。具有物理意义的土壤和表面过程参数,也只有在较小的空间尺度上才能保持其原有的物理特性,水循环模型应用于无资料地区的模拟还有待发展。此外,水文模型用于气候变化的研究也在积极开展,例如,利用大气环流模型和IPCC情景假设生成未来降水序列以模拟未来的水循环过程。

1.3 流域水环境模拟研究进展

水量是流域水循环模拟的主要指标,但水更是流域内生命活动的重要载体,生命活动所需的养分需要由水来输送,流域内上下游之间、河流与湖泊之间的养分交换也需要有水流带动。近年来,人们在考虑流域水量的同时,也十分重视水的质量问题,即水质问题。在完成水循环认识的基础上,对于水质的时空变化的研究开始得到重视。

人为活动不仅对水循环过程产生了影响,对流域水环境质量破坏严重,导致水污染事件频繁发生,使得优质水资源量更为短缺。我国湖泊水库普遍受到污染,总磷、总氮超标严重。水体污染主要途径是流域面源污染。污染物进入湖库、河流,引起水体富营养物质增加,溶解氧浓度减少,从而破坏水生环境,影响人类生活生产正常取水,甚至对人体健康产生威胁。流域水循环过程



是污染迁移的主要载体,流域内水体污染的产生与流域降雨径流过程紧密相关。目前,国内点源污染得到有效控制,而与流域水循环过程相伴而生的污染物迁移转化过程往往缺乏定量描述,因其具有随机性、滞后性和广泛性等特点不易得到重视。此外,在我国水环境持续恶化的严峻形势下,为制定切实有效的水环境保护对策,也十分需要开展水环境及其与社会经济发展关系的研究。

水环境演变过程的研究是从理论上认识各种复杂物理、化学、生物等过程的客观变化规律,以及水环境对人类活动的响应关系。流域水环境模拟的研究和发展很大程度上取决于污染物在水环境中的迁移、转化和归趋研究的不断深入,以及数学方法在水环境研究中应用程度的不断提高。1925年,出现了第一个水环境数学模型——氧平衡模型(S-P模型),即河流BOD-DO模型。该模型认为水中污染物的自净过程是有机污染物在水中发生氧化反应,消耗溶解氧的过程,其速率与有机污染物的浓度成正比;同时大气还有复氧过程,复氧速率与氧亏成反比。并在这两个过程中,溶解氧达到平衡。此后,又出现了考虑底泥好氧和光合作用的Dobbin-Camp模型、Tomas模型、O Conner模型等。这些模型大多应用于河段的水质变化模拟,往往不能在时间上进行长期模拟,不能在空间上进行大范围模拟,不能满足环境保护的工作需要。

20世纪50年代,计算机技术的进步促使了水环境模型有了长足发展,以最初的溶氧模型为基础,增加了不同的污染物作用过程,在模型参数求解方面有了较大进步,模型也从单纯的水质模型发展到以溶氧平衡为基础的水生态模型,发展了多水质要素互相作用的动力学模型,其中包括以主要控制性营养物质氮、磷循环为基础的藻类生长动力学模型。其中,最具代表性的模型是1973年美国环保局推出的QUAL-II综合水质模型,以及1983年推出的WASP模型。20世纪90年代后,人们逐渐重视水中污染物质的形态变化,并开始研究特殊污染物的形态变化及迁移转化过程,由此也产生了一些用于重金属模拟、毒物扩散等模拟的方法。除了一些机理研究之外,模糊数学、人工神经网络等灰箱、黑箱模型也在水质模拟中广泛应用,例如,利用人工神经网络ANN和自回归滑动平均ARMA模型可以用于预测水体富营养化的趋势。

随着水质机理研究的不断发展,衍生出一批通用性高、综合性强的完整模型,至今已有不少模型成功应用于实际水体环境治理与保护中。由丹麦水动力研究所开发的MIKE模型,能用于模拟河网、河口、滩涂等多种区域,研究的变量包括氮、磷、溶解氧、化学需氧量、藻类、水生动物、岩屑、底泥、重金属等。此外,用户还可以自定义水中污染物成分,它有友好的建模操作界面,能处理许多不同类型的水动力条件,用来模拟湖泊、河口、海岸水域的水质变化。WASP是美国环境保护局推出的一个成熟的水质模型系统,可用于对河流、湖泊、河口、水库、海岸的水质模拟,可以模拟多个底泥层和水体层



的准二维水质模型。WASP 的水动力学模块 DYNHYD 和水质模块 WASP, 可以联合运行, 也可以分开独立运行。WASP 通过 EUTRO 和 TOXI 两个模块, 能广泛模拟不同水体的各种水质变量, 与 MIKE11 模型变量相似。CE-QUAL-R1 是由美国陆军工程兵团 (USACE) 开发的垂向一维水质模型。主要用于模拟湖泊、水库等水体水质在垂直方向上的变化, 可以模拟多种水质变化过程。该模型能够研究的状态变量过程众多, 如水温、氮、磷、硫、溶解氧、藻类、水生动物、鱼类、硅土、重金属、悬浮颗粒物、可溶固体颗粒、pH 值等。CE-QUAL-W2 模型是由 USACE 开发的二维水质水动力学模型。该模型建模过程中横向是均匀的, 即它只模拟纵向和垂向水体。这一模型由直接耦合的水动力学模型和水质输移模型组成, 用来模拟湖泊和水库, 同时也适用于一些具有湖泊特性的河流。它可模拟 DO、BOD、TOC、大肠杆菌、藻类等在内的 17 种水质变量浓度变化, 尤其对狭长的湖泊和分层水库的水质模拟极佳。CE-QUAL-ICM 能够模拟多维水质过程, 是目前发展程度最高的三维模型之一, 但其不能模拟流量, 必须从外源模型获取流量, 在大部分应用中它与水动力模型 CH3D 联合使用。EFDC 模型由美国环境署 (EPA) 支持, 美国弗吉尼亚州海洋研究所根据多个数学模型集成开发研制而成的, 其水动力学部分类似于 ECOM3D 模型, 水质变化过程基于 CE-QUAL-ICM 模型, 是 EPA 推荐使用的模型, 目前正考虑将其纳入到 BASINS 模型系统中。EFDC 模型可实现河流、湖泊、水库、湿地系统、河口和海洋等水体的水动力学和水质模拟。EFDC 模型的基本物理过程模拟是和 Blumberg-Mellor 模型 (ECOM3D) 以及 CH3D-WES 模型相似的, 是一个多参数有限差分模型。同时, EFDC 模型包含一些非常有用的扩展, 如水力构筑物的模拟、湿地植被条件的模拟和近海区高频表面波的模拟等。EFDC 模型在水平曲线正交网格、垂向 σ 拉伸网格上求解静水力学、湍流平均方程, 采用 Mellor-Yamada 2.5 阶紊流闭合方程。同时模型可有效进行干湿交替处理。EFDC 模型可模拟盐度、热量、附着性悬浮物、非附着性悬浮物、大肠杆菌和有毒物质等的迁移扩散过程。模拟包括 DO、COD、氮 (N)、磷 (P)、藻类等 22 种水质指标的浓度变化。EFDC 模型已经用于几十个海域的相关计算, 得到了广泛的应用。

近年来, 分布式水文模型在分析研究流域范围内, 对分布式水循环过程有突出作用。分布式水循环模拟能考虑下垫面空间差异对自然水文过程过程的影响。在分布式水循环模拟过程中, 除了开发分布式水文模型外, 还包含水文模型参数的敏感性分析、水文模型参数优化等相应技术的引入和开发, 以及这些技术方法的相互整合。基于水循环伴生面源过程模拟需要依托分布式水文模型中的水循环过程, 两种模型需要相互耦合。此外, 对流域中具体水体的水质水动力变化过程研究也需要分布式水循环模拟和伴生面源过程模拟结果作为边界



条件。

随着点源污染得到逐步控制,人们把污染治理重点集中于非点源污染。与点源污染不同,面源污染是指在较大范围内,在降雨径流的冲刷和淋溶作用下,大气、地面和土壤中污染物以分散的、微量的形式进入地表及地下水体,并在水体中富集,从而导致水环境的污染。20世纪70年代开始了面源污染模拟研究,特别是流域面源污染对水体富营养化的研究。伴随着分布式水文模型、遥感技术以及土壤流失方程的出现,流域面源污染模拟研究取得了较大进步,相继出现了许多非点源污染模型,比如SWAT、AGNPS等。以前环境模拟往往只适用于河道或者水体,对于流域宏观管理中流域的整体规划和水资源保护,需要将水体、土壤、大气、地下水等作为一个整体加以考虑,形成大型的流域管理模型,比如BASINS模型和WARMF模型。但是这些模型中,由于考虑的模拟过程复杂,往往将流域中的水体进行概化。因此,若需要进行某一具体水体的详细模拟,则需要更适用于水体模拟的具体化模型,比如EFDC、Delft3D模型等。面源污染的形成主要由以下几个过程组成,即:降雨径流过程、土壤侵蚀过程、地表溶质溶出过程和土壤溶质渗漏过程,这四个过程相互联系,相互作用。径流与面源污染关系紧密,对径流的量化研究作为水文学的重要组成部分发展较早,理论及模型较成熟;同时,无论是农业面源引起的地下水污染还是地表水污染,都与土壤水文过程有着密切关系,在径流形成过程中,下渗过程也是非常重要的因素。因此,国外对降雨中水分下渗的研究起步较早。比较著名的是Horton入渗方程、Phillip入渗方程和Green Ampt入渗方程。虽然,前两个都是过于简化的水文模型,但至今仍被广泛应用,并且影响着一些复杂的流域径流计算机模型。在一次降雨过程中,并非流域内的所有地区都能产生地表径流冲刷而带来面源污染。因此,许多学者从水文学、水动力学的角度出发,研究作为暴雨事件响应的径流动力形成的产汇流特性,重点是对其产流条件的空间差异性进行研究,有助于深刻揭示面源污染的形成。代表性的有早期美国水土保持局于20世纪50年代提出的SCS法。由于综合考虑影响径流形成的下垫面的空间差异性(如:土壤前期含水量、土地利用类型、土壤渗透性、降雨量大小等),而广泛地用于面源污染研究。AGNPS和SWAT等模型都采用了SCS法。目前,国内在这方面的研究工作主要是对这些模型进行应用。20世纪60年代以来,国内学者还从我国的具体情况出发,提出了许多有特色的产流计算方法。其中,代表性的模型有蓄满产流模型、流域平均下渗率流域分配曲线相结合的蓄满产流、超渗产流,以及综合产流等理论。由于适合我国国情,因而也被用于区域面源污染计算。

国内关于流域水环境模拟的研究处于起步阶段,与国际研究水平有一定差



距。近几年我国在水环境模拟方面,取得了长足的进步,构建了大量流域、河流、湖泊、河口等重要水域的水质模型和富营养化生态系统动力学模型,但是属于我国自主知识产权的水环境模拟模型的开发相对较少,大多是利用国外成熟的模型加以改进。

1.4 流域水循环水环境耦合模拟中的几个问题

1.4.1 流域水环境模型高维参数的率定

流域水环境模型涉及的物理参数众多,原则上,这些参数可以从遥感数据或在实验中获得。然而,在实际应用过程中,这些参数不一定能非常准确地描述下垫面过程,需要对这些参数做整体上的修正,以达到良好的模拟效果。一方面,在对模型结构了解透彻的情况下,可以通过手工调参的方式率定模型,但这种方法往往耗费大量的精力;另一方面,可以利用优化算法对模型进行自动调参。而模型参数的高维性却导致了算法搜索效率低下,算法收敛速度慢。因此,如何进行高维参数模型的高效率率定是分布式水文模型调参工作的难点。

1.4.2 输入数据及参数的空间尺度匹配

流域水文模型模拟空间分辨率可以达到栅格尺度。目前,国内常用的空间数据分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。然而,在做面源等伴生过程模拟时,主要考虑人工过程对流域生态环境的影响。这部分输入数据的空间尺度往往与水文模型的不匹配。通常情况下,面源过程主要考虑农村生活、畜禽养殖等面污染源输入。这些输入数据通常是按照行政分区给出的,缺少空间分布带来的面源负荷差异性。因此,如何在分布式水文模型基础上考虑面源负荷输入的空间差异性,使得水循环模拟和伴生过程模拟在空间尺度和精度上匹配起来,是目前研究水文伴生过程的一个重点和难点。

1.4.3 模型耦合与综合应用

在国内,水文模型的研究正处于发展阶段,并不成熟。构成能综合模拟流域水循环的模型体系尚待发展;同时现有水文模型以考虑天然情况下的水循环过程为主,对于流域面源负荷过程情况考虑较少。分布式水文模型同其他模型,例如湖泊、河流水动力、水生态模型的耦合研究案例不多,缺乏相互耦合机制方面的研究。

第2章 流域水量水质耦合模拟体系和方法

2.1 流域水循环水质模型耦合方式

由于水文模型、水动力模型对水文要素的模拟在实际应用过程中并不全面。因此,在分析流域水循环和水质影响时往往涉及多种模型共同使用。为更精确模拟水文循环过程,反映水循环过程和水质过程中各要素之间的动态联系,建立流域耦合模拟模型。流域水循环耦合模型中,耦合模式主要有三种:一是嵌套耦合,是将一个模型作为另一个模型的一个模块使用,计算过程中不断调用模型,是一种紧密耦合方式;二是双向耦合,是模型单步计算结果作为另一个模型的输入,经过单步计算后又反过来影响前者模型的耦合方式,也属于紧密耦合;三是松散耦合,松散耦合中大多耦合模式属于“串联耦合”,是将模型的计算结果作为另一个模型的输入条件,再计算结果。松散耦合是最常用的耦合方式,松散耦合相对于紧密耦合方式而言对模型使用者要求相对较低,容易实现。流域水量水质耦合模拟中,常使用松散耦合方式,不同模型间的主要耦合情况形式有:

- (1) 水文模型与水动力学模型的耦合。
- (2) 水文模型与地下水模型的耦合。
- (3) 水文模型与水质模型耦合。
- (4) 水动力模型与水质模型耦合。
- (5) 一、二维河流、湖库水动力水质模型耦合。
- (6) 水文模型与水资源配置模型耦合。
- (7) 水文模型与水调度模型耦合。

例如,水文水力学耦合模型包括水文模拟和洪水演进模拟两个部分。其中,洪水演进模拟部分是核心,是基于圣维南方程组的水动力学方法;水文模拟部分是应用合适的水文模型模拟流域上游区域的洪水过程以及中下游区间的产-汇流过程。通过水文模型模拟流域的蒸发、降雨径流、区域汇流和区域出流。其中,水文模型的输出部分区域出流预测,作为流域洪水演进模型的边界条件,是洪水演进模型的输入部分,通过边界条件的模拟,实现水文模型与洪水演进水力学模型的耦合。洪水演进模拟需要解决边界条件、河道水流、支流水量交