

HSPF 流域模型 原理与模拟应用

Hydrological Simulation Program-Fortran: Principle and applications

董延军 陈文龙 杨芳 周丰 著



黄河水利出版社

国家“十二五”水专项

“滇池流域水资源联合调度改善湖体水质关键技术与工程示范”(2013ZX07102006)项目资助

HSPF 流域模型原理与模拟应用

董延军 陈文龙 杨 芳 周 丰 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以 HSPF 模型为基础,系统介绍了分布式水文水质模型的理论与方法,详细说明了流域水文水质模型构建的框架与步骤。主要内容包括:流域水文水质研究的重要性、HSPF 模型介绍、流域污染物迁移转化模拟基本原理、HSPF 模型关键技术、空间和属性数据库、HSPF 模型构建、水文模拟与校准和非点源污染模拟与校准等。

本书适合于点源与非点源污染研究、流域环境管理和水文水资源研究的科研人员、大学教师以及相关专业的研究生阅读,同时也可供水土流失、生态科学等相关领域的专家学者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

HSPF 流域模型原理与模拟应用/董延军等著. —郑州:黄河水利出版社,2014.3

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0700 - 3

I. ①H… II. ①董… III. ①流域模型 - 水文实验 - 应用软件 ②流域模型 - 水质模型 - 应用软件 IV. ①P344 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 002431 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:15

字数:346 千字

印数:1—1 000

版次:2014 年 3 月第 1 版

印次:2014 年 3 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

2009 年我们编写出版了一本《流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南》,一转眼四年过去了。这四年来,一直陆续接到不少读者特别是高校师生的来信,向我们询问软件的使用情况,并索取书中相关的资料。一本书能得到众多读者的关注,这充分说明这本书还是有一定的意义和价值的,这一点也是我们感到十分欣慰的地方。

《流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南》已经提到了,与 SWAT 模型一样,HSPF 模型在国外特别是在美国,也是具有一定影响力的非点源模拟模型。但不知什么原因,HSPF 模型在国内较少为人所熟知,相反 SWAT 模型却得到了极大的普及,已经取得了不少的研究成果,如在密云水库、太湖等重要湖泊的非点源模拟,一些单位甚至还不定期举办 SWAT 模型培训班,这对于推动和普及 SWAT 模型在国内的运用起了重大的作用。对比 SWAT 模型,HSPF 模型还较少为人熟知,更谈不上大规模的普及应用。我们也是无意间通过水利部“948”项目的实施,慢慢接触 HSPF 模型,从对模型的不了解到如今能实现一些流域的模拟应用,其间也走过不少弯路,经历不少辛酸。总结学习 HSPF 模型的过程,实际上主要有两个难点,一是没有现成的 HSPF 模型原理介绍以及比较好的应用成果;二是公开的 HSPF 模型,非商业软件,有很多漏洞,有可能是开发者没考虑到,也有可能是开发者故意埋的炸弹,内核故意有所保留。第一个原因,由于没有现成的学习材料,学习者必须阅读原始的英文文献,模型的应用、参数的校准都须学习者有较高的专业领悟和理解能力,才能驾轻就熟,这给一般人员的学习造成一定的困难和不便。第二个原因,软件本身的问题。软件本身是非商业化的,不对用户负责,所以很多人在学习过程中会遇到这样或那样的问题,很容易打退堂鼓。另外,还有一个因素,就是国内很多人对 HSPF 模型的理解存在一定的误区,认为 SWAT 模型是纯物理模型,HSPF 模型是概念模型,国人一提到概念模型,就认为不如 SWAT 模型好。实际上,SWAT 模型与 HSPF 模型一样,严格地讲都是半分布式水文模型。SWAT 模型水文原理基于 SCI 曲线,HSPF 模型基于 Standford 水文模型,这两个水文模型都是集总式水文模型,因此不存在纯物理模型和物理模型的区分,不能以纯物理模型的帽子压低 HSPF 模型的价值。HSPF 模型是美国环保署牵头开发的,SWAT 模型是美国农业署牵头开发的,二者重点面向非点源的模拟,二者的水质模块都能较好地模拟氮、磷等水质成分的迁移与转化,这是模型的精华和难点所在,也是国内模型所不及的地方。

面对 HSPF 模型学习和普及的这个苦差事,我们所幸完成了其中的一件事情,就是编著了国内首部系统介绍 HSPF 模型的专著,为国内广大爱好和关注 HSPF 模型的读者提供了一个学习的教程。但是这本专著还只侧重于模型的介绍和使用,对模型原理和模型在中国的应用介绍则是这本书的不足,这也是我们进一步要完成的任务,也是很多读者关注的重点。这四年来,一直想尽快完成这个心愿,但是由于种种原因始终没有完成,成为我

们心头一个心结。我们在当年“948”项目结束时建了一个 HSPF 模型的 QQ 群 (76188400),经常看到不少人特别是在校的学生正在热火朝天地学习 HSPF 模型,当看到这一幕情景时,我们深深感到编写《HSPF 模型原理与模拟应用》已经十分必要,而且这几年我们也做了大量的工作,需要与大家进一步的交流。这就是我们编写本书的初衷,《HSPF 模型原理与模拟应用》可以说是《流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南》的姊妹著作。

通过这几年的工作实践,我们认为 HSPF 模型可以在以下三个领域进行应用,包括流域水循环模拟、非点源模拟和暴雨洪水模拟。

第一,流域水循环模拟。当前变化环境下水资源定量评估是一个热点,HSPF 模型既可以考虑下垫面的因素,又可以考虑气象因素、光照辐射因素,因此完全可以应用在流域水资源演变的量化评价研究中。

第二,非点源模拟。非点源模拟是一个十分复杂的物理过程模拟,国内鲜有成熟的模型,目前主要是应用国外模型,HSPF 模型开发集成于 BASINS 系统中,BASINS 是英文 Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources 的缩写,是模拟点源与非点源重要的集成工具,HSPF 模型主要目的就是模拟流域水文与水质过程。

第三,暴雨洪水模拟。模拟暴雨洪水是 HSPF 模型优于 SWAT 模型的显著特点,SWAT 模型是日模型,HSPF 模型模拟时间尺度可到小时,因此 HSPF 可模拟场次洪水。

因此本书的编排,前面部分重点介绍模型的工具和原理,其中工具部分略简要一些,读者可重点参考我们编著的上一本书《流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南》,原理部分介绍是本书的一大特色,目前国内还没有这么详尽介绍 HSPF 模型原理的书籍。后面几章结合前述的三大方面的功能,依次分别介绍南盘江流域模拟、滇池流域非点源模拟和星丰江流域暴雨洪水模拟。

本书由董延军、陈文龙、杨芳、郑江丽(珠江水利科学研究院)和周丰(北京大学)共同编写完成。具体编写分工如下:第1章、第10章、第11章由董延军编写,第2章、第3章、第4章由陈文龙编写;第5章、第6章由杨芳编写;第7章由郑江丽编写;第9章由周丰编写;第8章由杨芳和郑江丽共同编写,全书由董延军最后统稿和定稿。

在本书编写过程中,彭俊台硕士、孙春敏硕士、解河海博士、邹华志博士、陈钰祥博士、马志鹏博士、石赟赟硕士等人先后帮助搜集素材、整理文稿和校对,付出辛勤劳动。本书第一作者董延军在北京师范大学博士后流动站进站期间,得到了北京师范大学京师学者、博士生导师徐宗学教授的悉心指导,徐老师为 HSPF 模型在水文领域的应用提供了宝贵的意见和耐心的帮助。在本书出版过程中,还得到了珠江水利科学研究院王现方院长、李亮新副院长、谢宇峰副院长、亢庆副院长、邓家泉副院长、王琳副院长、徐峰俊总工、科技处李杰处长、资源与环境研究所副所长贺新春博士等的大力支持和帮助。借此机会向他们一并致谢。

本书的出版得到了国家“十二五”水专项“滇池流域水资源联合调度改善湖体水质关键技术与工程示范”(2013ZX07102006)、水利部“948”项目“流域水文水质模型在珠江流域推广与应用”(200830)和国家“十一五”水专项“流域产污汇污模型、入河污染物迁移转

化过程及重要参数率定”(2008ZX07211-10-02)项目的资助支持。

这几年笔者一直从事流域水文模型、非点源模型的开发工作,本书是这几年来的一些研究成果。我们期望通过这些研究成果,促进 HSPF 模型在我国流域水资源、水环境研究中大力推广和普及。由于笔者水平有限,成书仓促,书中的缺点和错误在所难免,竭诚欢迎读者批评指正和学术争鸣。相关建议可通过电子邮件 hspf@163.com 与作者联系。

作 者

2013 年 8 月

目 录

前 言	
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 流域水文水质模型研究的重要性	(1)
1.2 国内外相关研究现状	(3)
第 2 章 HSPF 模型介绍	(7)
2.1 HSPF 模型简介	(8)
2.2 HSPF 模型组织结构	(8)
2.3 HSPF 模型功能特点	(13)
第 3 章 流域污染物迁移转化模拟基本原理	(19)
3.1 非点源污染概述	(19)
3.2 流域水文过程模拟	(21)
3.3 流域水污染物迁移转化模拟	(31)
第 4 章 HSPF 模型关键技术	(37)
4.1 流域水循环部分	(37)
4.2 流域产污汇污部分	(53)
第 5 章 数据准备工作	(79)
5.1 自然地理数据	(79)
5.2 河流水系及水文气象数据	(81)
第 6 章 HSPF 模型构建	(91)
6.1 模型运行流程	(91)
6.2 流路网的划分及流域属性构建	(94)
6.3 HSPF 模型构建	(102)
第 7 章 模型参数识别与校准方法	(138)
7.1 遗传算法的基本理论	(138)
7.2 多目标遗传算法	(142)
7.3 目标函数的构建	(145)
7.4 基于 PEST 的 HSPF 模型参数自动校准	(147)
第 8 章 HSPF 模型在南盘江流域水文模拟中的应用	(156)
8.1 流域概况	(156)
8.2 数据库建立	(158)
8.3 模型建立	(164)
8.4 水文模拟结果	(169)

第 9 章	HSPF 模型在滇池流域非点源模拟中的应用	(186)
9.1	流域概况	(186)
9.2	数据库建立	(188)
9.3	模型校准与验证	(195)
9.4	结果分析	(195)
9.5	泥沙输移模拟与校准	(201)
9.6	氮模拟与校准	(202)
9.7	磷模拟与校准	(208)
第 10 章	HSPF 模型在星丰江流域暴雨洪水模拟中的应用	(212)
10.1	流域概况	(212)
10.2	水文气象资料	(213)
10.3	子流域划分	(214)
10.4	站点数据的空间分布	(216)
10.5	洪水精度评价指标	(217)
10.6	模拟结果	(218)
第 11 章	结 语	(223)
11.1	小 结	(223)
11.2	需要进一步研究的问题	(224)
参考文献		(225)
附录	英制与公制单位换算表	(230)

第 1 章 绪 论

1.1 流域水文水质模型研究的重要性

1.1.1 模型研究的必要性

随着社会经济的迅速发展,水污染已成为人类当前面临的主要环境问题之一。水污染通常分为点源污染和非点源污染。点源污染(Point Source Pollution)主要是工业废水和城市生活污水通过固定排污口排向水体而产生的污染。非点源污染(或面源污染)是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流的冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)所引起的水体污染(Novotny, Olem, 1993),其主要来源包括水土流失、农业化学品过量施用、城市径流、畜禽养殖和农业与农村废弃物等(Mingteh et al., 2004)。大量的泥沙、氮磷污染物负荷进入江河、湖库,会引起水体悬浮物浓度升高、有毒有害物质增加、溶解氧减少、水体出现富营养化以及酸化趋势,不仅破坏水生生物的生存环境和水生生态系统平衡,还会影响人类的生产生活,威胁人体健康(Kevin et al., 2004)。非点源污染与点源污染相比,点源主要表现为工业与生活的排污口,相对容易标识,而非点源表现为污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。

近年来,许多国家由非点源污染所造成的水环境恶化问题日益突出。据美国、日本等国家的报道,即使点源污染得到全面控制以后,江河的水质达标率仅为 65%,湖泊的水质达标率为 42%,海域水质达标率为 78%。研究指出,美国的非点源污染量占污染总量的 2/3;荷兰农业非点源的总氮(TN)、总磷(TP)污染分别占水环境污染的 60% 和 40% ~ 50%;丹麦 270 条河流 94% 的氮负荷、52% 的磷负荷由非点源污染引起。

我国目前也正处在污染构成快速转变时期,面源污染的负荷比重在逐步上升。据研究,非点源污染已成为太湖、巢湖、滇池等重要湖泊水质恶化的主要原因之一(金相灿, 1995;陈吉宁等, 2004)。在我国农村,氮、磷肥料,农药的投入仍然是粮食作物增产的有效措施之一。但是氮、磷的过量施用已带来了令人担忧的环境问题,近一二十年来的研究表明,氮、磷非点源污染负荷已占受纳水体的 50% 以上,并对受纳水体产生了严重影响。例如,我国湖泊达到富营养化水平的已占 63.6%,一些农业发达地区的湖泊,如太湖、巢湖、滇池等总氮、总磷浓度是 20 世纪 80 年代的十几倍。除氮、磷等污染源外,泥沙也是我国常见的非点源污染源之一。在我国北方地区,由于受季风气候控制,汛期降雨集中,水土流失严重,河流水体中含沙量较大。例如,黄河中游河段,多年平均含沙量保持在 $25 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ 。进入水体中的泥沙由于含有相当数量的黏土矿物和有机、无机胶体,本身就是一种污染物,除影响水体视觉感官、降低水体的透明度和复氧条件外,同时由于络合、吸附等作用,泥沙又成为许多污染物的载体。非点源对水环境污染的贡献越来越大,逐步成为水

环境质量改善的首要问题,受到管理决策者和科研机构越来越多的关注。

对流域非点源污染的量化研究、影响评价以及污染治理,最为有效和直接的研究方法是建立流域水文水质模型即非点源模拟模型,进行时间和空间序列上的模拟。流域水文水质模型可通过对整个流域系统及其内部发生的复杂污染过程进行定量描述,帮助分析非点源污染产生的时间和空间特征,识别污染物的主要来源和迁移路径,预测污染负荷及其对水体的影响,并进一步评估土地利用的变化、不同的管理与技术措施等对非点源污染负荷和水质的影响,为流域管理和规划提供决策依据。

总之,流域水文水质的建模与模拟在解决流域水环境问题方面具有十分重要的现实意义,它通过对污染物在流域范围内(包括陆域与水域)迁移转化过程的模拟,查明污染物运移的时空分布规律,从而为流域水质预测、管理和规划决策提供有力的技术与方法支持。

1.1.2 模型研究的意义

为了缓解水资源面临的压力,适应现代水利发展的要求,传统的水管理观念与方法要转变和创新。21 世纪水资源管理的目标是确保人类系统、社会经济系统和生态系统可持续发展,因此研究和提出新的高效用水管理模式,实现水资源的可持续利用是摆在我们面前的一项急需解决的重要课题。

流域内实行水质与水量的统一管理是流域管理的一项重要内容。水量与水质模拟技术是可持续水资源管理量化研究的基础,为流域水资源管理和调度提供技术支撑与保障。水量与水质模拟的研究主要是通过两个途径,一是借助于分布式物理水文模型,实现河道水质模拟计算;二是利用国外现成的软件,比如 SWMM、HEC-HMS 和 SWAT 等软件实现水量和水质的模拟。分布式物理水文模型是一项复杂而又技术性很高的工作。分布式物理水文模型是从流域水循环的动力学机制来描述流域水文问题,能够分析流域下垫面变化后的产汇流变化规律,并为其他专业应用模型提供水的流场情报。目前,国内分布式物理水文模型主要针对研究流域对象的特点自主研发,需要处理大量复杂的专业基础数据,存在大量重复性劳动,且容易出现差错。现有的软件也存在着模拟功能的不足,如 HEC-HMS 软件只能模拟水量;SWMM 主要适用于城市水网的模拟,对城市以外地区的应用不太令人满意。

为解决这一问题,需要一个统一的界面、功能完备、便于操作使用的计算机仿真平台,通过这个平台提供水量与水质的模拟,以实现水资源管理的信息化、现代化和科学化,为流域水资源管理和决策提供有力的技术支撑。从这个意义上说,开展这个项目,不仅有利于推动我国流域特别是水环境污染严重的地区的管理和建设,也有利于国内科技人员了解、学习、吸收、跟踪国外先进技术。

本书以 HSPF 模型为例,介绍流域水文水质模型的原理与模拟应用。HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran)模型由美国环保署(USEPA)开发,并集成于 BASINS4.0 系统。BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)系统于 1988 年由美国环保署开发完成,是一套能够模拟点源与非点源污染的功能强大的软件,该系统是一套基于 GIS 技术的整合式平台,内嵌了 HSPF、SWAT、PLOAD、

AGWA 等水文模型和 WDMUtil、GenScn 等辅助工具。HSPF 模型成功地捆绑于拥有众多插件、功能强大的 BASINS 系统中,从而为该模型所需的地形、地貌、土地利用/覆被、土壤、流域等数据的自动生成和叠加处理提供了更加方便、精准的手段,同时延长了数据处理、模拟预测的时间序列长度。

1.2 国内外相关研究现状

1.2.1 国外流域水文水质研究进展

20 世纪 60 年代,大量的调查研究使人们逐渐认识到,单纯的点源控制无法从根本上改善水质,促使人们转向非点源污染的定量化研究,即基于水文水质耦合的流域水文水质研究。1972 年美国水污染控制法修正案的制定,标志着流域水文水质研究的重大转折。这项法律明确规定,在制订水污染防治规划时,必须同时包括点源与非点源污染防治规划。该方案极大地促进美国非点源污染调查与研究,重点放在湖泊富营养化的非点源污染研究上,提出了一些有影响的流域水文水质模型用于模拟非点源污染。1972 年,美国开始进行全国水体富营养化的调查,选择了近千个典型的非点源污染流域,详细研究了流域土地利用状况,力图探索全国范围内的土地利用-营养负荷-富营养化之间的关系,从而建立一种利用流域特征来估算水体营养水平的定量化方法。美国和加拿大还联合开展了土地利用与五大湖水水质污染关系的项目,研究了各种单一土地利用类型的单位面积污染负荷,探讨了多种因子(地形、土地利用程度、肥料、农药、气象条件等)对污染负荷的影响。从这个阶段的研究发展,我们可以看出,这一阶段的流域水文水质研究,侧重点在于水质方面,在流域水文循环机制方面则考虑较少。

20 世纪 70 年代中期是流域水文水质模型大发展时期。随着对非点源污染物理化学过程研究的深入和对非点源过程的广泛监测,从流域循环的机制角度出发研究非点源模型成为新的发展方向,其中有著名的模拟城市暴雨径流污染的 STORM、SWMM (Novotny),模拟农业污染的 ARM,以及本研究要介绍的 HSPF 模型等。HSPF 模型模拟了陆地表面、亚地面和地下水的水文路线以及污染物的输移,主要分为两部分:PERLND 模块和 RCHRES 模块。PERLND 模块模拟了发生坡面水流、壤中流、地下水流和水质水量的变化过程;RCHRES 模块模拟了径流汇入水渠或湖泊的过程。

这个时期流域水文水质的研究取得了两个方面的重要进展:一是从简单的经验统计分析提高到复杂的水文水质耦合机制模型;二是从长期平均负荷输出或单场暴雨分析上升到连续的时间序列响应分析。但是这个时期的模型机制复杂,模型通用性不强,对计算机、数据、用户素质要求很高,大多数模型通常只适用于很小的集水流域,不能适用于非点源污染的广泛性,从而限制模型的推广和应用。

20 世纪 70 年代后期,特别是 20 世纪 80 年代以来,流域水文水质模型的研究开始转向如何将模型应用于流域管理规划当中,开发新的实用模型;研究与广泛实施非点源污染控制与管理措施,并注意经济效益的分析。这一时期比较有代表性的有美国农业部农业研究所开发的 CREAMS(USDA,1980),这个模型的发展具有里程碑的意义,它首次成功

地对非点源污染的水文、侵蚀和污染物迁移转化过程进行系统的耦合。ANSWERS 模型采用概念模型模拟水文,用泥沙连续方程模拟侵蚀,用方形网格划分研究区域,可供水质规划者或其他用户模拟土地利用方式对水文和侵蚀响应的影响。

20 世纪 90 年代以来,随着计算机信息技术、GIS 和遥感等技术的快速发展,流域水文水质模型也得到了迅猛发展,使得大尺度流域的流域水文水质模拟分析成为可能。这主要表现在以下几个方面:

(1) GIS 在水循环过程模拟中的应用。

1993 年 Stuart 和 Stocks 将一组普通的模拟工具与 GIS 软件组合在一起,开发出半分布式水文模型。他们用 GIS 宏语言将一组解释地表水饱和状态的方程嵌入 GIS 软件中,这些方程所需要的信息,如地表坡度、降雨强度及土壤空隙度等均以 GIS 图层的格式存储。通过 GIS 可视化界面与所需方程的结合,调用数据图层计算某个区域地表水饱和状态的空间分布。

(2) GIS 在估测土壤侵蚀率和侵蚀量中的应用。

1992 年 Blaszcynki 将修正后的土壤通用流失方程(RUSLE)与 GIS 结合,成功地用于估测和评价土壤侵蚀对环境的影响。Blaszcynki 研究证明,GIS 所估测的土壤侵蚀量与传统人工计算方法非常一致,但所需投入的资金和时间可大大减少。基于 GIS 的土壤侵蚀量估测方法具有更强的适应性,只要根据当地的实际情况,对系统内有关数据调整后,就能较精确地估计土壤侵蚀率和侵蚀量。

(3) GIS 与水文水质模型结合应用。

进入 20 世纪 90 年代以来,GIS 与水文水质模型结合应用的发展速度非常快。比较有代表性的并为国人熟知的是 SWAT 模型。SWAT 模型是美国农业部(USDA)开发的模拟流域水文水质的模型,广泛地应用于非点源污染模拟方面。SWAT 模型是流域尺度的模型,可用于模拟地表水和地下水水质与水量,长期预测土地管理措施对于具有多种土壤、土地利用和管理条件下的大面积复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质对水质的影响。SWAT 模型在进行目标模拟时,将流域划分为多个子流域同时进行计算,加入了地下回流部分,增加了天气模拟模块以提供更长期的模拟和时空上更具代表性的天气数据。此外,SWAT 模型还改进了预测峰值径流量的方法。

1.2.2 国内流域产汇污研究进展

国内水文水质研究起步较晚,但是发展速度较快。最早模型起源于 20 世纪 60 年代,这个期间模型主要侧重于水文循环,而且是集总式的。我国在这方面最具代表性而且应用极广的水文模型是河海大学赵人俊研发的新安江模型。最初的新安江模型为两水源,即地表径流和地下径流。到 20 世纪 80 年代初期,模型研制者将萨克拉门托模型与 Tank 模型中的线性水库函数划分水源的概念引入新安江模型,提出了三水源新安江模型,即地表径流、壤中流和地下径流。在 1984~1986 年,赵人俊又提出了四水源新安江模型,即地表径流、壤中流、快速地下径流和慢速地下径流。

当流域面积较小时,新安江采用集总模型,当流域面积较大时,采用松散式分布式模型。近些年随着 GIS 技术和计算机技术的发展,一些研究者已将新安江模型与 DEM 技术

结合起来,建立流域分布式模型,取得了一定的进展。如河海大学李家致等构建了基于DEM 栅格和地形的分布式水文模型,并运用于黄河支流的洪水模拟。

20 世纪 90 年代以前,水文模型大体属于集总式的,虽然后期模型有分布式的理念,但从模型机制上讲,仍属于集总式的。90 年代以后,特别是进入 2000 年以后,国内学者已从集总式方向转向分布式物理模型,分布式物理模型是以水动力学为基础,模型中所涉及的植物截流、蒸散发、坡面水流、河道水流、土壤水运动、地下水流、融雪径流等物理过程均由基于质量守恒和能量守恒的偏微分方程组来描述,并用有限差分格式进行求解。分布式物理模型从理论上来说,就是尽可能客观反映降雨、参数、下垫面条件和模型结构的空間变化对流域径流形成过程的影响。国内最具代表性的模型就是中国水利水电科学研究院水资源研究所研发的 WEP 模型。WEP 模型已成功应用于国家“十五”科技攻关重点项目“黑河流域水资源调配和信息管理系统”,将分布式水文模型成功地应用于流域水循环实践当中。WEP 模型具备河川径流预报、动态水资源评价等功能,为黑河流域水资源的合理调配和水量实时调度提供科学依据、为流域工程规划和生态环境建设提供评价分析工具。

随着资源环境的日益恶化,全球气候的暖化,人们越来越关注环境和生态问题。譬如,珠江流域一直以来是我国水资源最为丰沛的地区之一,但是由于近年来珠江流域上游贵州、云南、广西等地社会经济的快速发展,需水量日益增加,从而造成径流下泄量减少,与此同时,全球变暖引发海平面上升,这两种因素共同作用造成珠江三角洲在枯水期的咸潮上溯入侵问题。咸潮上溯引发了珠三角地区特别是澳门、珠海的供水安全问题。为此,水利部珠江水利委员会从 2005 年 12 月开始连续几年实施调水压咸的战略,通过上游骨干水库的联合调度,加大上游径流下泄量,抵御咸潮的危害。由此可见,环境问题是制约社会经济可持续发展的最重要因素,解决环境问题也将是人类在 21 世纪面临的最重要的挑战。为了应对这种挑战,掌握水文循环模拟和与此伴生的水质模拟的方法与原理则是理解环境问题的一把最重要的钥匙,特别是更大尺度的流域水文水质的模拟。在这个大背景下,国内的相关学者开始关注流域水文水质的模拟,从流域水循环与水质的伴生机制来描述流域水文水质的迁移转化机制。中国水科院牛存稳、贾仰文等在 WEP 模型的基础上,增加相关水质模块,建立了流域水量水质综合模拟模型,提出了基于综合模拟模型的水量水质联合评价方法,并首次从“断面水”和“片水”两方面综合评价流域水资源的数量与质量。与此同时,国内许多单位引进国外的 SWAT 模型、HSPF 模型、MIKE SHE 模型等运用于滇池、太湖、海河等流域的管理与规划,模拟非点源污染,取得了较好的效果。

总体上说,国内流域水文水质模型研究主要呈现两个特点,一是应用国外现有的模型,如 SWAT 模型和 HSPF 模型,开发的较少,具有自主知识产权的产品则更少。二是开发简易的非点源估算模型。这类模型一般是运用相关分析法或单位线法估算非点源负荷。这类模型简洁实用,但对流域水文水质的迁移转化规律、污染物传输的空间分布描述不足。

1.2.3 水文水质研究进展及发展趋势

随着社会经济的快速发展和人民群众对生活质量标准要求的提高,当前水环境面临

的问题将越来越受到人们的重视,因此水文水质的研究将会是今后很长一段时间的研究热点和趋势。展望未来水文水质研究进展及发展趋势,笔者认为,主要有以下几个方面:

(1)半分布式流域模型是今后发展的重点。流域分布式水文物理模型经过这几年的发展,许多关键的技术都陆续得到解决和突破,但是遇到的最大瓶颈就是资料的问题。纯粹的物理水文模型应用需要大量空间信息资料,包括地形、地貌、地质、土壤、植被、污染监测资料和人类活动影响等,这些资料在一般流域或机构都难以得到满足。资料的问题限制纯粹的物理水文模型的推广与普及。另外,纯粹的物理水文模型结构和解法非常复杂,许多水文工作者和工程师对此了解不深,这也限制其推广应用。因此,水文水质模拟的方向应是分布式模拟与传统集总式模拟相互结合,研发实用的半分布式流域模型。

(2)水文与水质耦合是今后流域水文模型发展的趋势。流域的管理与规划不仅仅局限于水资源的配置与调度,还要考虑流域环境容量的管理规划,因此流域模型应是水文与水质耦合下的水文水质模型,能够模拟流域点源与非点源污染,为流域点源与非点源污染控制措施提供决策支持,服务于流域社会、经济、环境和生态的可持续发展。

(3)需要在大量引进消化国外先进技术的基础上,二次创新开发,研发出具有中国知识产权的水文水质模拟软件。引进国外先进的模拟软件技术,不仅有助于提升国内科研整体实力,更有助于我国的水利科技创新。在充分消化国外先进技术的基础上,研发出具有中国特色的新型模型技术,是今后的科技发展潮流。

第 2 章 HSPF 模型介绍

水文模型是水文学发展到一定阶段的产物,是描述和反映自然界中复杂水文现象的一个手段,是定量模拟水文现象特征量及其过程变化的一种有效工具。它既是水文科学研究中的一种比较实用的方法,又是当前水文科学研究和应用的重点、难点与热点之一,不仅丰富了水文学的研究体系和研究手段,而且随着水文学、计算机科学的发展而发展,促进了水文学的总体发展。

从模型构建的机制上分类,流域水文模型可分为物理模型、概念型模型和黑箱模型。若一个模型的每个关系式均是严格地以物理定律为基础,则该模型为物理模型;若一个模型的结构、参数都具有物理意义,但其结构不是严格地以物理定律为基础,则该模型是概念型模型;若一个模型的关系式无任何物理意义,则该模型是黑箱模型。

从对流域水文过程描述的离散程度分类,流域水文模型可分为集总式模型、分布式模型和半分布式模型三类。集总式模型最基本的特征是将流域作为一个整体来描述或模拟降雨径流形成过程。分布式模型最基本的特征是按流域各处气候(如降雨)信息和下垫面特性(如地形、土壤、植被、土地利用)要素信息的不同,将流域划分为若干个小单元,在每一个小单元上用一组参数反映其流域特征,具有从物理机制上考虑降雨和下垫面条件时空分布不均匀对流域降雨径流形成影响的功能。半分布式模型也称松散耦合分布式模型,其主要特点是在每一个水文模拟的小单元上应用概念型集总式模型来计算净雨,再进行汇流演算,计算出流域出口断面的流量过程。

目前国内外流域水文模型很多,但应用最多、影响最大、发展最快的还是概念流域水文模型,如国内的新安江模型、日本的 TANK 模型和美国的斯坦福模型等。随着计算机技术和遥感技术的迅速发展,分布式模型方兴未艾,分布式模型的研制与开发已成为水文水资源研究领域的一个热点话题。由于流域模拟问题的高度复杂性,纯粹意义上的分布式物理水文模型则需要大量的水文、气象、土壤、水质等基础数据的支持,在实际当中不便于推行,即使用偏微分方程等数学工具描述水文现象,也面临着一些参数的经验处理,因此在实践当中半分布式水文模型更有广阔的应用前景和推广价值。一些国家已将其核心模型技术成功地进行软件打包,发展成为便于用户操作的应用软件,广泛地应用于流域管理与决策部门,如美国的 SWAT(Soil Water and Assessment Tools)、HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran)和 LSPC>Loading Simulation Program in C++模型软件技术。本书重点介绍 HSPF 模型的应用。HSPF 模型于 1981 年由 Robert Carl Johanson(HSPF 之父)提出,它起源于 1966 年 SWM(Stanford Watershed Model)斯坦福模型,是将数学方法应用于水文计算和预报形成的流域水文模型。HSPF 模型不仅能长时间模拟水文系列,也能模拟流域面源污染和点源污染,是海外应用非常广的流域水文水质模拟软件。HSPF 模型功能虽然非常强大,但是在国内宣传甚少,使用者更是寥寥无几。不过笔者认为,使用者少不等于 HSPF 模型没有生命力。国内外尤其是国内,更多人关注物理机制的分布

式水文模型,物理机制虽然更完善地描述水文过程,但是纯粹的物理模型却需要大量的基础数据和参数验证工作,人为假定等因素客观上使分布式物理模型模拟效果等有更多的经验因素在里面。因此半分布式水文模型比纯粹的物理模型更具有生命力和实践性。HSPF 模型就是半分布式水文模型中优秀的代表,它不仅可以描述水文过程,而且可以模拟非点源和点源污染演进过程,在国外尤其在美国应用非常广泛。HSPF 模型与 SWAT 模型一样,也是功能强大,并且拥有独立运行界面的点源与非点源污染模拟工具软件。

2.1 HSPF 模型简介

美国环保署(USEPA)多年来长期致力于研发关于流域污染方面的数学模型用于环境灾害预测,HSPF 模型大量应用于模拟人为因素影响下的自然水系统的水情和水质,并随着应用实践,模型逐步得到完善和发展,目前已发展成为比较成熟的 BASINS 4.0 系统。BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)系统于 1988 年由美国环保署开发完成,该系统是一套基于 GIS 技术的整合式平台,内嵌了 HSPF、SWAT、PLOAD、AGWA 等水文模型和 WDMUtil、GenScn 等辅助工具。HSPF 模型成功地捆绑于拥有众多插件、功能强大的 BASINS 系统中,从而为该模型所需的地形、地貌、土地利用/覆被、土壤、流域等数据的自动生成和叠加处理提供了更加方便、精准的手段,同时延长了数据处理、模拟预测的时间序列长度。

此外,HSPF 模型结合了美国环保署多项非点源污染模型研究成果,集成了 HSP、ARM、NPS 等模块,其中 HSP 为集水区水文模式,水文仿真功能强大且精确度高,而 ARM 和 NPS 的功能在于针对农业区的非点源污染模拟。模型提供水解、氧化、光解、生物降解、挥发和吸收等 6 种沉积化学作用模式,并结合水动力学实现沙、粉沙和黏土三种沉积物以及 BOD、DO、氮、磷、农药等多种污染物的地表、壤中径流过程和蓄积、迁移、转化的综合模拟,是国际认可的模拟流域非点源污染效果最好的模型之一,在国际水旱灾害防治、水环境监测、水资源开发利用中得到了广泛的应用。受到该模型运行需要大量基础数据等方面的影响,关于 HSPF 模型的研究在我国处于起步阶段。本书中所采用的 WinHSPF12.0 软件同样嵌入于 BASINS 4.0 系统,该软件是 HSPF 模型最新视窗交互式版本,它与 BASINS、GenScn、WDMUtil 共同构成了该项研究的模拟工具主体。

2.2 HSPF 模型组织结构

HSPF 模型内嵌于 BASINS 系统平台当中,BASINS 系统由四个重要部分组成:①GIS 集成分析工具(BASINS GIS);②工具分析软件(WDMUtil、HSPFParm);③流域水文模型(WinHSPF、SWAT、AGWA、PLOAD);④决策支持分析工具(GenScn)。BASINS 4.0 系统总体结构见图 2-1。

2.2.1 BASINS GIS

BASINS 4.0 系统由美国环保署(USEPA)组织开发完成,该系统将 ArcView 提供的

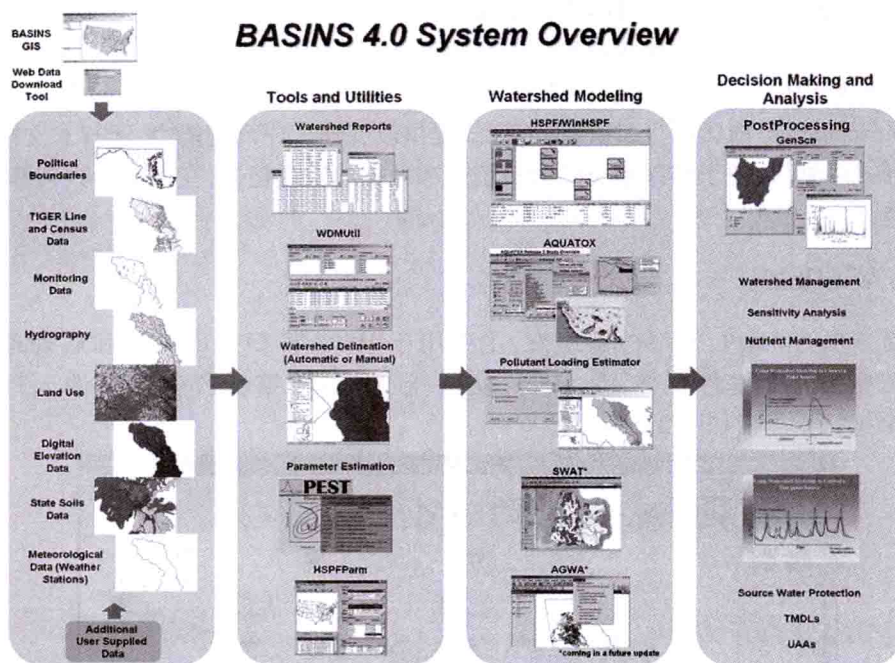


图 2-1 BASINS 4.0 系统总体结构

Dialog Desinger、Geopogressing、Spatial Analyst 等 GIS 核心插件与水文模型整合起来,自动叠加和处理 DEM、Soil、LUCC 数据,表征地形、地貌、覆被特性并设定参数,提取河段信息,完成水文响应单元准备,为系统内嵌的 SWAT、HSPF、PLOAD、AGWA 等 4 个水文模型提供完备的空间属性数据信息。

在完成 BASINS GIS 的前期数据准备和分析任务后,可以自动跳转到 WinHSPF、SWAT 或者 PLOAD 软件界面。

2.2.2 WDMUtil 工具

WDMUtil 程序由美国环保署科学技术所(USEPA's Office of Science and Technology)组织研发,主要用于时间序列文件的检验、运行以及 WDM 文件的生成。BASINS 与 WinHSPF 使用的时间序列数据结构为 WDM 格式(Watershed Data Management),WDMUtil 就是管理 WDM 数据的有效分析处理工具,可以分解与合成新的时间序列数据,也可以填补完善原有序列数据中缺失的数据。WDMUtil 工具是运行 HSPF 模型不可缺少的重要工具之一。

2.2.3 GenScn 工具

分析与流域模型大量复杂的输入和输出数据是一项艰巨的任务。一方面,HSPF 模型数据的传统方式为手动录入,通过运用 Word、Notebook 等文字编辑器构建数据输入序列来描述流域的物理机制和水文管理特性,即使流域背景不很复杂,也往往需要输入数