



LIUYU SHUIWEN MONI MOXING

流域水文模拟模型

董延军 周 丰 李 杰 梁志宏 等 著

非
外
借



黄河水利出版社

水利部公益型项目《河湖水系生态连通规划关键技术与示范》(201501030)与国家“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)联合资助

流域水文模拟模型

董延军 周 丰 李 杰 梁志宏 等 著

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内容提要

流域模型是基于 C++ 语言开发的模拟流域水循环的分布式水文水质模型,由珠江水利科学研究院董延军等研发的,具有自主知识产权的分布式水文水质模型。主要内容包括基于多叉树的水文模拟模型、基于非线性回归方法与机理方法的水质模拟模型、基于 NSGA II 的水文参数自动校准技术,以及相关的模型数据前处理方法介绍等。

本书可用于流域管理、水文预报和非点源污染等方面的科研人员、大学教师以及相关专业的研究生阅读,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

流域水文模拟模型/董延军等著,一郑州:黄河水利出版社,2016.3

ISBN 978-7-5509-1390-5

I. ①流… II. ①董… III. ①流域-水文-模型
②流域-水质-模型 IV. ①P33②P734.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060057 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:hhsclcs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:7.25

字数:180 千字

印数:1—1 000

版次:2016 年 3 月第 1 版

印次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

从 2009 年开始接触流域模型,至今已经有 7 个年头了。在对模型的应用和研究当中,我们慢慢形成了对水文模型的一些理解。譬如,什么是流域模型,什么是水动力模型,什么是分布式模型,什么是半分布式模型。流域模型简单地说就是入湖或入河之前流域面上的水动力模拟,但是由于流域面积一般较大,涉及因素方方面面,用水动力学方程精确数值求解是不现实的,因此流域模型一般要概化,如马斯京根法就是典型的圣维南方程的简化版。分布式模型(distributed hydrologic model)中有关分布式的概念,国内外学者都有不同的看法。如有的人说 SWAT 是物理式分布模型,HSPF 是概念式半分布模型,这都是不准确的,因为 SWAT 与 HSPF 的水文学原理都是概念式的模型,SWAT 水文原理是基于 SCS 曲线,HSPF 是基于 Standford 模型。无论什么样的模型,立足点都是要解决问题,并且简单实用易推广。

国外流域模型发展几十年,较国内模型集成化成熟,但是由于非商业化,因此模型有这样或那样的 bug,这导致学习国外模型是一件十分消耗体力的事情。令人欣喜的是,国内许多高校和研究单位对我们出版的 HSPF 模型方面的书籍热情不减,陆续出版的几本相关方面的书籍受到读者广泛的欢迎。这充分说明,国外模型应用有强大的需求,特别是随着“流域共抓大保护,不搞大开发”背景下,流域越来越强调保护,流域水资源规划、水环境生态规划以及产业布局规划等越来越离不开流域模型的支持。在这样的背景下,根据我们对水文模型的理解与消化,才有了开发自己模型的想法。

我们自主开发模型并不是简单的重复,而是一件具有创新意义的事情。具体来说有以下几方面的考虑:

第一,我们命名流域模型为多叉树的分布式水文模型(MT-DHM)。国内对分布式的理解一般是从DEM汇流角度理解较多,从多叉树理解并不多见。我们引入多叉树的概念,从另外一个角度理解阐释流域模型,这在学术上有一定的意义,尤其是在暴雨汇流计算方面。

第二,构建基于流域倒多叉树的流域遍历搜索模型,实现空间拓扑的自动汇流演算,也便于模型集成推广。

第三,构建基于NSGA的参数校准模型,并实现与现有模型的紧密耦合,不需要外嵌其他模型(如PEST),实现参数的自动寻优。

第四,提出了基于机制过程与统计学方法的流域水污染迁移转化模拟技术,既吸收了SWAT、HSPF等的优点,同时又克服了这些模型操作复杂的难度,充分体现了水质响应的非线性、空间分异性。

模型开发了3年多,已经有了一个雏形,水文部分基本成熟,水质部分还在探索。由于我们自身力量薄弱,希望通过出版本书,认识、结交更多的研究工作者、老师和同学,不断推进模型的发展与进步。

全书共有11章。其中,重要几章的内容如下:第2章介绍了流域模型原理与构建,第3章介绍了流域水质模型,第4、5章介绍了模型前处理工作,第6章介绍了模型运用需注意的细节,第7章介绍了模型参数率定,第8~10章是模型的应用案例。

本书的编写分工具体如下:第1、2、8章由董延军编写,第3章由李杰、李兴拼编写,第4~7章由梁志宏编写,第9章由姜宇、梁志宏编写,第10章由李兴拼编写,第11章由周丰编写。全书由董延军和周丰最后统稿和定稿。

本书的出版得到了水利部公益型项目《河湖水系生态连通规划关键技术研究示范》(201501030)与国家水体污染控制与治理科技重大专项《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)项目的资助支持。

本书是这几年的一些研究成果,虽然不一定成熟,但热诚期望通过这些研究成果,促进流域模型在我国流域水文水资源、水环境研究中大力推广和普及。由于编者水平有限,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。相关建议可发作者电子邮件 hspf@163.com。

作 者

2016年1月

目 录

前 言

| | |
|------------------------------|------|
| 第1章 绪论 | (1) |
| 1.1 研究背景与意义 | (1) |
| 1.2 水文循环与流域水文模型 | (3) |
| 1.3 水文模型的分类 | (7) |
| 1.4 水文模型的发展历程 | (9) |
| 1.5 本书内容与思路 | (14) |
| 第2章 MT-DHM 流域模型原理与构建 | (17) |
| 2.1 MT-DHM 模型模拟过程 | (17) |
| 2.2 单元水文过程模拟 | (20) |
| 2.3 单元泥沙侵蚀与输移过程模拟 | (38) |
| 2.4 子流域汇流模拟 | (42) |
| 2.5 基于多叉树的全流域汇流演算原理与实现 | (53) |
| 第3章 MT-DHM 水质模型 | (67) |
| 3.1 非点源污染概述 | (67) |
| 3.2 流域水质模型类型 | (73) |
| 3.3 模型原理 | (74) |
| 第4章 分布式流域水文模型离散 | (78) |
| 4.1 流域的空间离散 | (78) |
| 4.2 以气象分布变异划分水文响应单元 | (81) |
| 4.3 以物理特性变异划分水文响应单元 | (84) |
| 4.4 流域分割与水文响应单元划分的关系 | (86) |

| | | |
|--------|-----------------------------|-------|
| 第 5 章 | 流域模型水文气象数据展布技术 | (88) |
| 5.1 | 降雨展布技术 | (88) |
| 5.2 | 蒸散发展布技术 | (92) |
| 5.3 | 工具软件应用 | (94) |
| 第 6 章 | MT - DHM 模型运用需注意的问题 | (96) |
| 6.1 | 水文过程中二元属性处理 | (96) |
| 6.2 | 水文过程中差分引起的误差及处理方法 | (104) |
| 第 7 章 | 水文模型参数率定 | (107) |
| 7.1 | 遗传算法的基本理论 | (108) |
| 7.2 | 多目标遗传算法 | (114) |
| 7.3 | 目标函数的构建 | (120) |
| 7.4 | 参数优选及不确定性分析 | (123) |
| 7.5 | NSGA - II 在 MT - DHM 模型中的应用 | (130) |
| 第 8 章 | MT - DHM 模型在南盘江水文模拟中的应用 | (135) |
| 8.1 | 流域概况 | (135) |
| 8.2 | 数据库建立 | (139) |
| 8.3 | 南盘江流域水文模拟 | (148) |
| 第 9 章 | MT - DHM 模型在星丰洪水模拟中的应用 | (167) |
| 9.1 | 流域概况 | (167) |
| 9.2 | 水文气象资料 | (168) |
| 9.3 | 子流域划分 | (170) |
| 9.4 | 站点数据的空间分布 | (172) |
| 9.5 | 洪水精度评价指标 | (174) |
| 9.6 | 模拟结果 | (175) |
| 第 10 章 | MT - DHM 模型在滇池流域模拟中的应用 | (181) |
| 10.1 | 流域概况 | (181) |
| 10.2 | 数据库建立 | (184) |
| 10.3 | 子流域划分 | (188) |

| | | |
|--------|----------|-------|
| 10.4 | 模型运用 | (188) |
| 10.5 | 水文模拟结果 | (197) |
| 10.6 | 泥沙模拟结果 | (204) |
| 第 11 章 | 结论与展望 | (208) |
| 11.1 | 研究结论 | (208) |
| 11.2 | 未来展望 | (210) |
| 参考文献 | | (212) |
| 附录 | 英制与公制换算表 | (219) |

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

水是生命之源,是承载自然界演变进化的重要物质,对人类社会的经济、生活和生产的发展有着极其重要的作用,因此人类社会的发展,离不开对水资源的有效利用。地球,又被称为“水球”,地球表面 70.8% 的面积被水体所覆盖,存在于地球的总水量约为 13.86 亿 km^3 ,96.5% 的水量存在于海洋之中,无法为人类所直接利用,而分布在陆地上的水量约为 0.48 亿 km^3 ,仅占总水量的 3.5%。由此,如何科学有效地管理和利用珍贵的水资源,永远是人类社会必须面对和重视的问题。

地球上的水以水循环的方式在水圈—大气圈—岩石圈和生物圈中进行交换,发生着一系列的物理和生化过程,对自然和人类社会有着深刻的影响。人类生活生产的供、用、耗、排等过程与水循环息息相关。随着社会的不断进步和发展,人口的急剧增长,各种水问题也层出不穷,引发的矛盾也日益突出。极端旱涝事件频发、水质污染严重、严重缺水等问题,是当今人们面临的严峻水问题。此外,在全球变暖、气候变异的情况下,研究区域乃至全球的水循环响应过程成为科学界面临的重要挑战。为了克服各类水问题,研究区域水循环对气候变异的响应过程,需要深刻了解水在自然界和人类社会中的传递演变过程,而作为描述水循环过程的水文模型能够起到有效的作用,成为解决水问题和水文变异的重要工具。水文模型,主要用于模拟自然界的水循环过程,是对自然界水

循环过程的合理简化和数学描述,描述了水体在自然地流动和传播过程,基于水文模型的模拟,可以从机制的层面了解水循环过程,从而有效地应对旱涝等水灾害问题;可以从系统的角度对水资源进行科学合理的利用,从而缓解水质污染和水资源短缺等问题;还可以设置气候的变异情景,模拟气候变化下的水文响应过程。因此,更深入地探究水文模拟过程,提高水文模型的模拟精度和效果,是如今应对水问题的重要途径,可以更好地指导人们管理利用水资源,可以更好地应对水质水害问题以及了解水文变异下水循环的演变过程。

水文模型经历了几十年的发展,取得了众多的成果,水文模型已经广泛应用于解决各类水和环境问题,表明了水文模型已经成为当今解决水资源问题的主要工具。总而言之,水文模型在水资源规划、水资源管理、水资源利用、防洪、抗旱、土壤侵蚀、非点源污染、土地利用,乃至与农业灌溉、工业污水管理中都有着广泛的运用,可以看出,随着社会和科学的发展,计算技术的普及和逐渐成熟,以及各种空间技术的不断涌现,水文模型将不断地发展和完善,模型的功能将越来越强大。以计算机和空间技术为支撑,水文模型将集成管理与决策,具备专业与广泛的模拟功能,能够应对各种时空尺度的情景模拟,能够有效地模拟气候变化、人类活动和土地利用变化下的水循环过程。

水文模型是伴随着水文学和数字科学的发展而发展的,从早期的基本定理,如水文学中的基本定律——单位线法、下渗定律、Penman 蒸散发公式等的发现,到在计算机技术的支撑下,各种集总式和分布式水文模型的诞生,如 Stanford 模型、TANK 模型、SHE 模型、新安江模型、TOPMODEL模型、SWAT 模型、HSPF 模型等,水文模型在理论上和应用上都取得了长足的发展。而如今,3S 空间技术——地理信息系统(GIS)技术、遥感系统(RS)技术以及全球定位系统(GPS)技术更好地促进了水文模型的发展,提高了水文

模型对于各种空间物质形态的描述,包括地形地势的起伏变化、土地利用类型的不同特征、土壤性质的差异等,使水文模型能更好地反映实际的地理空间信息,更符合自然界的水循环过程。虽然国内对于水文模型的研究起步较晚,除新安江模型外,比较缺乏有代表性的模型,更多的是停留在对已有模型的理论讨论和基本运用层面,但是经过国内众多学者的努力,20多年来我国对于水文模型的研究取得了显著的进步,涌现出一批批非常具有代表性的著作,如1984年由赵人俊等编写的《流域水文模拟》、1990年由袁作新等编写的《流域水文模型》、2004年由熊立华等编写的《分布式流域水文模型》、2005年贾仰文等编写的《分布式流域水文模型》、2008年由余钟波等编写的《流域分布式水文学原理及应用》、2009年由刘昌明等编写的《流域水循环分布式模拟》、2009年由徐宗学等编写的《水文模型》、2009年由董延军等编著的《流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南》、2009年由陈杨波等编著的《流溪河模型》、2010年由郝振纯等编写的《分布式水文模型理论与方法》、2010年由雷晓辉等编写的《分布式水文模型 EasyDHM》等代表了我国一些学者对水文模型的深入研究,他们的工作极大地推动了国内水文模型的发展。可以看到,水文模型将有广阔的发展前景,是人们研究和解决各种水问题强有力的武器与有效的手段,是我国水科学工作需要高度重视的研究内容。

1.2 水文循环与流域水文模型

水文循环描述的是地球上的水的存在以及迁移过程,地球上的水处于不断运动和变化的状态。在太阳辐射和大气运动的驱动下,水不断从水面(江、河、湖、海等)、陆面(土壤、岩石等)和植物的茎叶面,通过蒸散发或散发,以水汽的形式进入大气圈。在适当的条件下,大气圈的水汽可以凝结成水滴,小水滴合并成大水滴,

当凝结的水滴大到能克服空气阻力时,在地球引力的作用下,以降水的形式降落到地球表面,或者留在海洋,或者降落到陆地。到达陆地表面的降水,一部分在地表形成地表径流,在重力作用下汇入江、河、湖泊,最终汇入海洋;一部分在分子力、毛细力和重力的作用下,通过下渗进入土壤层,成为土壤水,可经由蒸散发和散发重新到大气圈,并以壤中流、地下水等形式汇入江、河、湖泊,最终流向海洋;同时,存在于地球表面的水也通过蒸散发和散发重新逸散到大气圈。水的这种既无明确的“开端”,也无明确的“終了”的永无休止的循环运动过程称为水文循环,如图 1-1 所示。



图 1-1 水文循环示意图

水文循环过程中主要包括如下要素:①海洋中的水;②蒸散发;③升华;④大气中的水;⑤凝结;⑥降水;⑦冰川中的水;⑧融雪径流;⑨地表径流;⑩河槽径流;⑪下渗;⑫土壤中的水;⑬地下水。其中,蒸散发、凝结、降水、下渗以及径流过程是水文循环过程中重要的要素。

蒸散发:大气中的水分来源于水的蒸散发或者散发过程,蒸散发是一种水由液态转变为气态的过程。蒸散发发生于各种含水的物体,如土壤水蒸散发、地表水蒸散发等,而散发是指植物的蒸腾作用,水从生物体内由蒸腾作用变为水汽。

凝结:是指水蒸气遇冷由气态变为液态的过程。水汽上升进入到大气过程中,会慢慢冷却,当达到凝结点时形成小水滴,在

凝结核的作用下,小水滴会不断变大。

降水:当在凝结核的作用下,小水滴变大到超过空气的阻力时,大水滴则会降落到地球表面,形成降水。

下渗:当水降落到地表后,在可渗透的地表上,水会继续往土壤中流动,称为水的下渗过程,水的下渗量以及下渗率与下垫面形态、土壤性质等要素关系密切。

径流:实质就是水的流动过程。水在地表的流动过程中,会下渗进入土壤,进入地下,或者蒸散发到大气中。水在不同的地方会有不同的流动方式,因此通常可以将径流划分成不同的形式,如地表径流、壤中流、地下径流等。

自然界的水循环过程是连接水圈、大气圈、岩石圈和生物圈的纽带,对于地球生物的生活繁衍有着极其重要的作用。流域尺度的水循环,作为全球大循环中的一个环节,呈现一种相对微观的水循环过程,与人类的生活与发展密切相关。流域水文循环包含的基本要素是降水、蒸散发、下渗以及径流,如图 1-2 所示,主要过程是流域产流与流域汇流过程。流域水循环的产汇流过程受流域气候和下垫面形态影响,并受人类活动的显著影响。

流域水文模型是水文学发展到一定阶段的产物,用于模拟自然界中流域空间尺度上的水文现象,是描述和反映流域水循环过程的有效手段。它是水文科学中研究流域尺度的径流时空演变过程比较实用和有效的方法,也是当前水文科学研究和应用的重点、难点和热点之一。

流域模型是对复杂的非线性自然流域水循环过程的数学模拟,通过对自然水循环过程进行抽象和概化,运用系统理论方法、数学物理方法或者一些简单的物理概念和经验关系,对流域水循环的各个环节进行数字化模拟。流域水文模型将流域概化为一个系统,研究流域的输入因素(降水、蒸散发、前期含水量等)与径流输出(洪量、洪峰流量等)之前的数学关系和逻辑表达式,使其能

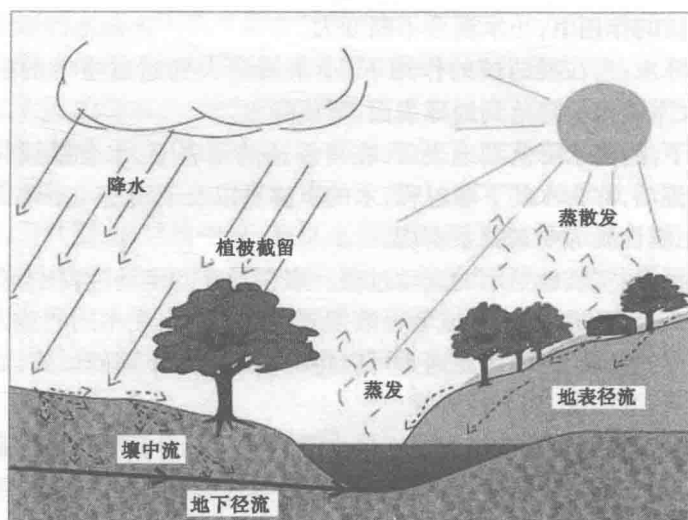


图 1-2 水文循环要素示意图

够在一定的目标下代替实际水文循环系统,对流域的行为进行模拟和预测。

随着计算机技术和数字高程模型 (DEM)、遥感 (RS) 和地理信息系统 (GIS) 等空间技术的迅猛发展,流域水文模型也蓬勃发展。在它们提供的坚固技术支撑平台下,分布式流域水文模拟模型上升了一个台阶,通过空间离散的分布式水文模型,从流域水循环的空间尺度,模拟流域水文过程的各环节,全方位地获悉流域内地表水、地下水和土壤水等各水文要素状态总量及其演变过程,为流域水资源管理提供科学依据。而目前,流域水文模型已成为流域降雨径流计算的一种重要途径,不仅在实际应用中获得了很大的成就,还推动了水文预报和水资源利用以及相关学科的发展。

可以说,流域模型的诞生是对流域水循环规律研究和认识的必然结果。流域模型在流域水资源开发利用、防洪减灾、水库规划与设计、城市规划、面源污染评价、人类活动的流域响应等诸多方

面都有十分广泛的运用,当今的一些研究热点,如生态环境需水、水资源利用等均需流域数字模型的支持。

1.3 水文模型的分类

由于水文模型的重要作用,近几十年来,不同的学者根据自身的需求和不同的角度研发了众多不同的水文模型,这些模型的结构和功能不尽相同,根据不同的理论基础描述了自然界的水循环过程,在这数量众多的水文模型中,根据不同分类标准,可以将水文模型划分成不同的类型。

1.3.1 根据模型结构和参数的物理完善性分类

根据模型结构和参数的物理完善性,可以将水文模型分为概念性水文模型和物理性水文模型。概念性水文模型用简化的方法表达流域的水文过程,具有一定的物理基础,也具有相当的经验性,模型结构简单,实用性强。当概念性水文模型的假设或者简化与实际情况比较相符时,概念性水文模型能够达到比较好的模拟效果,但通用性相对较差。物理性水文模型中的参数具有明确的物理意义,可以通过连续方程和动力方程求解,可以更准确地描述水文过程,具有很强的适应性。与概念性水文模型相比,物理性水文模型用严格的数学物理方程表述水文循环的各子过程,参数和变量充分考虑空间的变异性,并着重考虑不同单元间的水力联系,对水量和能量过程均采用偏微分方程模拟。因此,在土地利用、土地覆盖、水土流失变化的水文响应及面源污染、陆面过程、气候变化影响评价等方面的模拟中,物理性水文模型具有显著的优势。严格意义上说,物理性水文模型的参数一般不需要通过实测水文资料来进行率定,解决了参数间的相关性和不确定性的问题,可以在无实测水文资料的地区进行推广应用。由于水文复杂性和不确

定性,人们对水循环过程的认识显得非常有限,因此现阶段运用完全意义上的基于物理机制的物理性水文模型是非常困难的。

1.3.2 根据对水文空间过程的离散程度分类

根据对水文空间过程的离散程度,可以将水文模型分为集总式模型、分布式模型和半分布式模型三类。集总式水文模型将流域作为一个整体来进行描述,一般不从机制上考虑空间的变异性,仅从经验的角度描述流域的降雨和径流产生过程。分布式水文模型将流域划分成若干单元,在每个单元上用一组参数反映流域的基本特征,充分考虑下垫面的空间差异性,具有比较显著的物理意义。半分布式水文模型介于分布式水文模型和集总式水文模型之间,模型具有一定的物理基础,在一定程度上考虑空间的差异性,而在模型结构中又具有集总式模型的特点,采用经验性的规律反映水文过程。

1.3.3 根据数学处理方法分类

根据数学处理方法,可以将水文模型分为确定性模型和随机模型。确定性模型中每一个结构的关系都是确定的,而随机模型中的各个变量之间的关系存在一定程度的不确定性。这种分类方法是从数学的角度进行的。

1.3.4 按研究对象分类

根据研究对象,水文模型可分为降水模型、气温模型、蒸散发模型、土壤水模型、地下水模型、地表径流模型、水资源模型、水质模型等,根据研究对象的目标又可分为水量模型、水质模型、管理模型等。