

国家重点基础研究发展规划[973]项目(G1999043601)资助

分布式水文模型

(荷) M. B. ABBOTT (丹) J. C. REFSGAARD 编

郝芳华 王 玲 等译

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书共分 14 章,系统阐述了分布式水文模型的基本原理及其在生产实践中的应用。主要包括:水文模型的术语、建立与分类,水文模型的建立、校准和验证,分布式物理模型和陆地水文循环,多组分反应输移模型,土壤侵蚀模型,农业化学物质污染模型,气象雷达降水数据及其在水文模型中的应用,遥感在水文模型中的应用,地质模拟, GIS 和数据库在分布式模型中的应用,工程案例研究等。本书可供从事水文水资源管理、研究的技术人员以及大专院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式水文模型/(荷)阿博特(Abbott, M. B.),
(丹)雷夫斯加德(Refsgaard, J. C.)编;郝芳华,
王玲等译—郑州:黄河水利出版社, 2003.12
书名原文: Distributed Hydrological Modelling
ISBN 7-80621-719-3

I.分… II.①阿… ②雷… ③郝… III.水文—
模型 IV. P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 126649 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址 河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码 450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真 0371—6022620

E mail yrcp@public zz ha cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张:12

字数:277 千字

印数:1—1 000

版次:2003 年 12 月第 1 版

印次:2003 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-719-3 / P·27

定价:29.00 元

著作权合同登记号:图字 16-2003-111

序

由荷兰 Dr. M. B. Abbott 和丹麦 Dr. J. C. Refsgaard 两位水文学家编写的《分布式水文模型》(Distributed Hydrological Modelling)一书,是一部综述性的著作。“分布式水文模型”用于小尺度水文过程的模拟已有 20 多年的历史,其中具有代表性的分布式水文模型之一是 SHE 模型,目前也有一些水文学者应用这种分布式水文模型于流域的研究,但是尚不够广泛。国内有关分布式水文模型的研究起步较晚,仅是近些年才刚刚兴起,尚处于联系中国实际进行开发的阶段。国家重点基础研究规划始于 1997 年 3 月,故称为“973”项目。1999 年 10 月国家科技部批准了“黄河流域水资源演变与可再生性维持机理”研究项目(简称黄河 973 项目),开展了比较系统的分布式水文模型的研究。本书的翻译为黄河 973 项目提供了重要参考。经作者 Dr. M. B. Abbott 与 Dr. J. C. Refsgaard 的同意和授权,现翻译出版,以供广大水文水资源领域的科技人员参考。

传统的水文模型种类很多,但绝大多数模型均属集总式的水文模型,不能很好地反映水文水资源要素在空间上的变化。这种变化不仅是来自自然条件本身空间变异性(如气象气候、地质地貌和土壤植被等)的影响,而且来自经济社会发展(工农业用水、城市化与土地覆盖利用等)的人类活动的影响,后者在空间上也是不均匀的。在这种情况下,为了识别这种空间变化的影响,过去的集总式水文模型则转向分割较大的流域为更小的流域(如流域的支流流域)的模拟方法,这种方法可以视为是一种半分布式的水文模型;而完全分布式的水文模型则是具有更高分辨率的网格式模型,它能更好地反映水文水资源形成演化的空间变异的影响,深化对流域水文水资源的物理过程的研究。

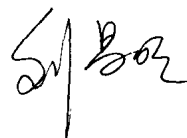
“分布式水文模型”之所以成为当前水文水资源研究的热点,在于它具有更多的模拟功能,能够把单一水量变化的模拟推向更加广泛的水文水资源生态环境问题的模拟,大大拓宽模拟领域,如地表水与地下水计算、水资源数量和质量的联合评价、非点源污染、土壤侵蚀与水土流失、洪水预报预警、土地覆盖与土地利用影响、生态需水、水生生物与生态系统修复、农业灌溉与城市工业用水,以及通过网格式的尺度转换与大气环流模式耦合,计算与预测全球变化对水文水资源的影响,从而纳入全球变化研究的前沿。由此可见分布式水文模型理论上的基础性和应用上的广泛性。

与采用基于经验与黑箱方法的集总式水文模型相比较,分布式水文模型在理论上的深化与应用上的广阔前景显示了它的优越性。但是,理论上的深化却带来了应用上的难度,主要是理论上所需要的资料与数据众多,而且要求精度很高,往往超出了目前常规水文要素观测的内容与精度,同时大量参数的累积误差往往会降低模拟精度。这是当前分布式水文模型的一个难题,也限制了分布式水文模型的广泛应用。目前,将系统水文学方法与物理水文学方法结合的分布式水文模型,也是一个值得探索的途径。但是,必须指出,科学技术的发展只有克服所遇到的问题才能创新,攻破难题采用适应性(指资料限制)方法,灵活地运用分布式水文模型的理论框架与概念,发展水文水资源模拟应是当

务之急。本书的出版不仅为黄河 973 项目的研究提供了借鉴，而且也为广大读者提供很好的参考。

该书的翻译出版，有助于水文水资源模拟技术的进一步发展，能活跃同行们的学术思想，增进交流，推动科技进步，以期提高我国水文水资源的整体研究水平。应译者之约，撰写了上述短文，是为序。

中国科学院院士



2003 年 6 月 10 日

序 言

对于模型开发者和其他专业人员而言,尽可能分析用户遇到的困难,在此基础上设计解决方案并付诸实践是他们的首要任务。分布式水文模型正是这样一种解决问题的方法。它在大量数据和知识验证的基础上,保证经济可行的前提下,对水文循环过程中遇到的问题进行分析,同时设计并执行补救措施。建立分布式水文模型的目的在于充分利用地图、地质、卫星、水文、农作物资料或植被、洪水和干旱的历史记录及任何有记录的资料,并将这些资料与气象学、植物生理学、土壤物理学、沉积物输移及其他相关的知识结合起来综合应用。当然,仅有资料和数据不一定能够解决问题,但是我们会致力于此种方式,尽最大的努力做得更好。

为什么要建立模型,尤其是要建立分布式水文模型呢?答案在于“我们能做什么”。由于我们所处的外部世界在空间上是分布的,在时间上是连续的,收集的资料也相应地具有这样的特性,而我们所掌握的大部分知识是关于这些时空上相互关联的数据在时间和空间上的数量变化。因此,为了能够更好地理解外部世界,我们需要一种在空间上是分布的、时间上是连续的并伴随相应过程描述的概念表达。另外,相应的分析、设计以及措施也必须以空间上分布、时间上连续的方式进行描述。从方法和思想精简的角度来讲,该表述必须是符号的形式,尤其是现代,这种符号表述要能为计算机所接受。由于这些符号表述要为我们提供更高层次的符号以引导我们的分析、设计及措施,这就必须建立相应的模型。因此,在该领域研究中建立空间上分布、时间上连续的模型是十分必要的。

既然分布式水文模型如此重要,自然会有这样的疑问:为什么分布式水文模型有这么大的潜能,却很少应用于解决水文环境的各种问题呢?模型应用的数量和深度好像与对模型所提供结果的广泛需求不成比例。当然,应用模型的组织或个人通常会提出数据不足、过程理解不充分、过于复杂或其他一些原因,其实很久以来,这些原因在极大程度上一直作为各种困难的托词。这类模型系统 20 多年来应用的经验表明:“科学”和“技术”上的原因掩盖了具有社会根源的政治制度和管理上的困难。作为水文信息学核心部分的水文模拟是一种社会技术活动,建立分布式水文模型所遇到的困难最主要是来自于社会(包括制度和管理)方面的,这些困难包括制度和管理结构、组织和协作模式等方面。

对于阻碍应用分布式水文模型的制度进行分析,使我们更深刻地理解了产生这种阻碍的根源。简言之,目前几乎没有一家机构可以独立提供满足分布式水文模型对数据和水文学知识的要求。此外,与这种负面影响相应,很少有合适的制度上的安排,以使提供水文数据和知识的组织间进行合作来改变这种情况。因此,从这些机构中的个人或小组看来,确实是“没有足够的数据”,“对过程的理解还不够”。同样,一个确定性模型在组织或协作体中出现必要地改变时,常常会带来“不必要的麻烦”。在这样一个商业压力不断增加的社会,很少有企业会承认他们没有足够的数据或不能动用足够的知识,因此就提出了数据不足、理解不充分或其他类似的科学或技术上的问题。有这样一些事

实很容易被忽视：对于综合性的应用来说(包括水库扩建、化学品泄漏后的土壤修复、垃圾填埋场迁移、引入新的取水政策等)，分布式水文模型将会大大降低干扰因素所影响的不确定性程度；而无论有什么样的数据和知识，应用分布式水文模型代表了在一定数据和知识投入水平下，我们所能做到的最好程度。如果我们再考虑这种研究正朝着以最经济的方式减少由不确定性所增加的数据和知识投资的方向发展，那么分布式水文模型的应用就应该予以进一步地强调。

在这种情况下，鼓励推广分布式水文模型应用的办法必须从社会技术的经验中寻求。这也清楚地表明，大多数好像是“社会”的问题可以通过恰当的技术发展及其在社会中的应用来解决。因此，这类模型的未来发展就在于详细地制定适当的技术发展策略，应包括技术自身和模型在社会中应用两个方面。同时，应注意将分布式水文模型与具有实时控制、自学习能力的决策支持系统和环境结合起来：一方面(输入)，这种结合有利于找到获取水文学之外的相关数据和知识，并将其融合在系统和环境适应性对象中；另一方面(输出)，这种结合有利于相关的地理信息系统模型与其他控制管理工具的进一步结合。由于这种技术目前已经在水文相关领域有相当深入的研究和应用(如城市排水系统实时监测控制和海岸水环境管理等)，将其应用于水文学研究会相对容易些。随着第一个此类系统走向成熟，我们期望分布式水文模型能够摆脱长久以来限制其发展的社会制度的束缚，迎来发展的全盛时期。

M. B. Abbott
J. C. Refsgaard

目 录

序	刘昌明
序 言	M. B. Abbott J. C. Refsgaard
第 1 章 分布式水文模型在水资源管理中的作用	(1)
1.1 水资源管理现状	(1)
1.2 水资源存在的主要问题及发展趋势	(2)
1.3 水资源管理模型应用前沿	(4)
1.4 讨 论	(7)
第 2 章 水文模型的术语、建立与分类	(11)
2.1 引 言	(11)
2.2 基本术语和方法	(11)
2.3 水文过程分类	(17)
2.4 水文参数空间变异性模拟	(22)
2.5 基于技术水平的分类	(22)
第 3 章 水文模型的建立、校准和验证	(24)
3.1 引 言	(24)
3.2 水文模拟不确定性的原因	(24)
3.3 拟合度和精度标准	(25)
3.4 模型建立	(26)
3.5 校准方法	(27)
3.6 模型验证	(29)
3.7 通用模型系统的可靠性	(32)
第 4 章 分布式物理模型和陆地水文循环	(33)
4.1 引 言	(33)
4.2 MIKE SHE 水文模型	(33)
4.3 径流过程	(34)
4.4 溶质输移过程	(36)
4.5 应用类型	(37)
4.6 分布式物理模型应用中存在的问题	(39)
4.7 小 结	(41)
第 5 章 多组分反应输移模型	(42)
5.1 引 言	(42)
5.2 历史回顾	(42)
5.3 反应过程的分类	(43)
5.4 宏观反应输移方程(以 MIKE SHE 模型为例)	(45)
5.5 数值解法	(48)

5.6	实例研究	(49)
5.7	多组分反应输移模型的展望	(52)
第 6 章	土壤侵蚀模型	(53)
6.1	引 言	(53)
6.2	土壤侵蚀模型的分类	(54)
6.3	物理模型的土壤侵蚀过程	(57)
6.4	土壤侵蚀模型的建立、校准和验证	(65)
6.5	案例研究: EUROSEM/MIKE SHE 土壤侵蚀模型的应用	(66)
6.6	讨 论	(70)
第 7 章	农业化学物质污染模型	(72)
7.1	引 言	(72)
7.2	点尺度过程模拟	(72)
7.3	田块和流域尺度模拟	(78)
7.4	案例研究: 流域尺度氮迁移转化模拟	(80)
7.5	模型适用性和局限性	(83)
第 8 章	气象雷达降水数据及其在水文模型中的应用	(85)
8.1	引 言	(85)
8.2	降水观测在分布式水文模型中的应用	(86)
8.3	单频单偏振雷达观测	(87)
8.4	多参数雷达技术	(92)
8.5	基于雷达测雨的水文预报精度	(93)
8.6	结 论	(95)
第 9 章	遥感在水文模型中的应用	(96)
9.1	引 言	(96)
9.2	遥感在流域水文研究中的发展现状	(97)
9.3	土壤水分的微波遥感	(100)
9.4	土壤含水量遥感和分布式水文模型	(105)
9.5	结 论	(110)
第 10 章	地质模拟	(112)
10.1	引 言	(112)
10.2	地质数据	(113)
10.3	模拟方法的选择	(113)
10.4	传统确定性地质模型	(114)
10.5	面模型/等高线模型	(117)
10.6	地质统计模型	(120)
10.7	结 论	(125)
第 11 章	GIS 和数据库在分布式模型中的应用	(126)
11.1	引 言	(126)

11.2	水文数据库	(126)
11.3	水文学中的 GIS	(127)
11.4	Wierdense veld 流域模拟	(128)
11.5	GIS 和数据库在建模环境中的结合	(136)
11.6	结 论	(137)
第 12 章	工程案例研究	(138)
12.1	引 言	(138)
12.2	模拟方法	(139)
12.3	多瑙河低地模拟研究的部分结果	(144)
12.4	结 论	(149)
第 13 章(A)	关于分布式水文模型的讨论	(151)
13(A).1	引言: 水文学分布式模型评论	(151)
13(A).2	流域尺度分布式模型能否成功	(153)
13(A).3	改进过程参数化描述的可能性	(155)
13(A).4	子流域尺度分布参数化的可能性	(156)
13(A).5	估计分布式模型预测中不确定性的可能性	(157)
13(A).6	分布式模拟的发展前景	(159)
13(A).7	结 论	(162)
第 13 章(B)	对 K. BEVEN “关于分布式水文模型的讨论” 的评论	(163)
13(B).1	引言: 评论的术语和内容	(163)
13(B).2	分布式水文模型的基本问题	(163)
13(B).3	流域尺度成功验证分布式模型的例子	(164)
13(B).4	改进过程参数化描述是否可能	(165)
13(B).5	分布化和尺度问题	(166)
13(B).6	模型预测不确定性的估计	(166)
13(B).7	分布式模型的发展前景	(167)
13(B).8	结 论	(167)
第 13 章(C)	对 J. C. REFSGAARD 等 “分布式水文模型的讨论” 的评论的回应	(168)
13(C).1	关于模型表述	(168)
13(C).2	关于模型验证	(169)
13(C).3	关于数据的价值	(170)
第 14 章	水信息学中的水文模型	(172)
14.1	水信息学简介	(172)
14.2	符号和亚符号	(173)
14.3	应 用	(179)
译者后记		(182)

第 1 章 分布式水文模型在水资源管理中的作用

1.1 水资源管理现状

“淡水缺乏和不合理利用日益严重地威胁着人类的可持续发展和环境保护。今后几十年里,如果人类仍然不能有效利用和管理水土资源,人类的健康、社会福利、食品安全、工业发展及人类赖以生存的生态系统将处于危急的边缘”(ICWE, 1992)。摆在水利学家和水资源管理者面前的现实和未来的挑战,正像都柏林宣言(ICWE, 1992)引言中所描述的那样。该宣言即《水资源可持续发展都柏林宣言》,是在国际水与环境会议(即 ICWE, 1992 年里约热内卢环境发展大会, UNCED 的筹备会议之一)上,由来自 114 个国家的政府派出的专家和 80 个国际组织、政府间组织及非政府组织的与会代表共同协商起草的。

自埃及、巴比伦、波斯等古文明出现四千多年以来,水资源和给水技术就在人类社会发展起着重要的作用。然而近几十年中,随着人口的快速增长和工业的迅猛发展,世界各地的水土资源都面临着巨大的压力。由于生活、工业、农业、娱乐业等行业用水量的增长以及地表水和地下水的污染,水资源成为一种日渐匮乏的自然资源。

可利用的水资源对人类的生存、经济和环境的发展是非常重要的,然而水资源管理却没有可持续高效的管理方式。在 ICWE 和 UNCED 会议上,水资源管理经验成为讨论的焦点。会议还就改善未来水资源管理方法的基本原则达成一致。世界银行组织也在 1993 年的报告中强调了三个水资源管理方面值得注意的问题:

(1)分散的政府投资和部门管理,没能充分考虑有关机构、部门和管辖单位之间的互相牵制,互相影响。

(2)过分依赖政府调节,忽视了市场、金融和公众参与的作用。同时对一些企业或个人也不能有效地提供服务。

(3)政府投资及法规忽视了对水质、卫生条件和环境的考虑。

采用一种综合的体制,把水资源作为一种商品对待,将以前的分散管理和传达机制有机地结合起来,更多地依靠价格体系,充分发挥公众参与的作用,是世界银行新政策的中心内容。

这种水资源管理的新方法需要多学科专家(经济学家、水力学家、生态学家、管理者、工程师等)的共同努力,并在规划管理中将这些学科有机综合。由于以前这些学科之间的联系很少,所以这将是我们将面临的一个重大挑战。此外,解决水资源问题,提出新的管理方法需要基于严谨的科学原则和高效的水资源管理工具。这种完善的技术工具的主要

特点在于,它必须在很大程度上比现有的工具更能体现水资源的整体性以及水资源管理中所涉及的不同学科间的合作,对水分循环的陆地阶段、水质、水量和生态要有完整的描述,并针对不同层次的决策者,提供集成水文、生态、经济和管理等方面信息的信息系统。

分布式水文模型的作用如上所述。在本章的后面以及本书的其他章节我们会看到,分布式水文模型的一些基本要素中包含了上述特征。因此,尽管分布式水文模型还很不完善,但它对于水资源管理是重要的和必须的工具。

在 1.2 节,我们简要地回顾了目前水资源的有关问题和发展趋势。1.3 节介绍辅助分析和解决这些问题的一些现有的水文模型。1.4 节讨论了分布式水文模型在水资源管理中应用的限制因素。

1.2 水资源存在的主要问题及发展趋势

1.2.1 水资源开发的影响

1940 年,全球总用水量约为 1 万亿 m^3 ,到 1960 年用水量翻了一番,1990 年翻了两番(Clarke, 1991)。如果全球用水量再翻一番的话,世界上绝大多数国家将面临水危机。中国、印度等国家的发展表明,如果再不提高水的利用率,水危机会在 2010 年提前到来。

水资源的过度开发利用已经导致地下水和地表水水位下降,有的甚至是永久性下降,从而限制了可利用水资源的质量和数量。持续过度的水资源开发利用和由此而引起的水资源在量和质以及可开采量上的改变,均会对当地的生物群落产生不可恢复的影响。例如:1986 年,尼罗河出现了历史上第一次断流,就是由于干旱和灌溉区扩大的综合影响加快了水的蒸散损失。另外的典型例子是科罗拉多河(Carrier, 1991)和咸海,这两者都是由于上游地区水资源的过度开发而导致水量锐减。

除了使水位下降,地下水过度开采还会产生其他不利影响,例如海水入侵、地面沉降以及由于流量减少和地质化学条件的改变而使水中污染物的浓度增高。地面沉降的典型例子是泰国首都曼谷,由于城市供水对地下水的过度开采导致地面沉降。世界上有些地区地面以每年 10cm 的速度下降,这样很容易导致严重的洪涝灾害(BMA, 1986)。

1.2.2 农业灌溉

灌溉的目的是使降雨量波动很大的地区能保证稳定的粮食产量,在不适合耕作的季节也能够种植庄稼。灌溉水主要取自河流、水库和地下水。另外,对那些在干旱季节只靠地表水不能满足灌溉的地区,往往同时开采地表水和地下水。

20 世纪 80 年代中期,全球需要灌溉的耕地面积达 2.2 亿 hm^2 ,占总耕地面积的 15%,而其农产品占总产量的 30%~40%(世界粮农组织 FAO, 1990)。世界上已开采的水资源中 70%用于农业灌溉,然而现在许多灌溉系统很不合理,低效的管理、运行和维护引发大量的环境问题。在某些灌溉系统中,60%的水在输送途中“流失”。因此,通过提高灌溉效率保护水资源的潜力是巨大的。

排水设施简陋或是根本没有排水设施的土地, 过度灌溉会导致更大的环境问题, 表现为地下水位上升、土地淹没、土壤盐渍化, 最终导致农作物减产。曾经一度繁荣的美索不达米亚、斯里兰卡等地就是由于土壤盐渍化而导致衰落的。今天, 印度河、尼罗河、底格里斯河、幼发拉底河等流域, 以及其他干旱半干旱地区, 土壤盐渍化的现象很普遍。根据 FAO 1990 年调查, 世界上约有 15% 的灌溉区属严重盐渍化区, 还有 30% 的地区有一定程度的盐渍化。

1.2.3 水土流失和土地退化

水土流失和土地退化也是一个世界性问题。水土流失使有营养价值的表层土壤流失, 同时给下游带来淤积和污染问题。例如, 在欧洲地中海的丘陵地区农业用地和北欧地区砂土和壤土的流失率达 $10\ 100\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (Morgan, 1992), 而为了保护土地资源、控制污染, 土壤的最大允许流失率是 $1\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (Evans, 1981)。

在一些发展中国家, 人口与家畜数量的增长导致过度放牧、森林火灾、耕地过度开发和森林退化等生态环境问题, 从而加速了土地退化。在干旱和半干旱地区, 这种土地退化被称为沙漠化。根据 1990 年 FAO 调查发现, 有几乎 75% 的高产水田受到沙漠化的影响, 而约有 60% 的农业人口(2.8 亿)居住在这些地区。对高海拔地区水土保持的重要性认识不清或不予考虑, 不仅会影响本地区, 还会使低海拔地区遭受洪涝和水库泥沙淤积等危害, 甚至造成更严重的后果。据统计, 在热带地区的发展中国家, 约有 $16\ \text{亿}\ \text{hm}^2$ 的高山丘陵地区土地严重退化, 约有 20% 的人口受到影响(Danida, 1988)。

1.2.4 地表水和地下水污染

直到几十年前, 水质问题对我们来说还并不重要, 除非是在那些有盐渍化现象的干旱地区。随着人口增长、城市化和工业化的发展, 导致需水激增和水体污染, 从而在许多地区用水受到水质而不是水量的限制。

地表水污染的主要问题是病原体污染、有机物污染、重金属污染、农药污染、水体酸化和富营养化(世界卫生组织 WHO, 1991)。过去由于含水层相对难于接近, 对其缺乏可靠的信息, 使人们过低估计了非饱和区和含水层污染的范围和严重程度。近二十年来, 地下水污染已经成为一些工业国家主要的问题。例如在丹麦, 99% 的用水取自地下水。15 年前, 地下水还很少被污染; 而现在的监测表明, 10 000 个地下水取水点都存在污染, 这些污染主要是由于垃圾填埋、油轮泄漏、化学物品堆放的原因造成的。为了保护地下水资源, 丹麦政府每年要花 4 亿 DKK(约 0.7 亿美元)用于地下水水质监测和修复。另外, 由于农业活动引起的氮污染和农药污染也是一类严重的水体污染。如果将来要减少这两种污染造成的影响, 必须进行广泛而重大的农业生产变革。

1.2.5 洪涝和干旱

在 1960 年到 1980 年之间, 由自然灾害造成的经济损失翻了三番(ICWE, 1992), 由洪涝和干旱造成的人口死亡和损失在所有自然灾害中居于首位(Rodda, 1995)。尽管水库、堤坝等防洪设施不断加强, 许多国家由于洪涝灾害造成的损失仍在增长。随着土地压力

的增加,尤其是在洪泛平原,人们更加意识到大型水库等水利调节设施产生的潜在的负面生态效应,使其未来的洪水破坏性更大。近年来(1993~1995年),密西西比河和莱茵河等大陆性河流发生了重大的洪涝灾害,这两条河流一向都被认为是控制得好的,洪涝发生的原因可能是气候变化或土地利用变化引起的水情变化,或是两者同时都有影响。

1.2.6 水生生态系统

水是地球环境的重要组成部分,是多种生物的家园,也是人类赖以生存和发展的物质基础。然而,河流、湖泊等水体的破坏使许多水生生态系统的生产力下降,并影响到渔业、农业和牧业的发展,使依赖这些产业生存的农村处于崩溃的边缘。另外,各种污染使问题更加恶化,导致供水能力降低,水处理费用增加,水生生物群落受到破坏,更谈不上水上娱乐活动了(ICWE, 1992)。例如,20世纪湿地破坏以惊人的速度发展(以前,湿地曾被错误地认为是荒地)。正是由于这个原因,在美国,到20世纪70年代中期,已有54%的原始湿地被破坏(Tiner, 1984),欧洲的一些国家也有类似比例的湿地遭到破坏(Adams, 1986; Dugan, 1993)。

1.2.7 气候变化

现在,人们普遍认为在未来的几十年里,由于人为原因,尤其是大气中二氧化碳浓度的增加,全球气候将发生重大的变化。气候变化将严重影响到全球的水文循环,以及与之相关的水资源管理系统。因此,世界上有的地方将变得干旱缺水,而另外一些地方却洪涝成灾。

1.3 水资源管理模型应用前沿

目前,有许多人就水文模型及其在水资源研究中的应用进行了回顾和总结,如Stanbury(1986)、Bowles和O'Connell(1988)、De Coursey(1988)、Mangold和Tsang(1991)以及Feddes(1988)等。但是现有的模型评论大多偏重于科学和技术方面,很少有关关注模型实际应用现状问题。在一篇为欧共体委员会准备的文章中(SAST, 1992),不仅阐述了现有水文模型的科学和技术特点,同时对模型实际应用现状也进行了回顾(见表1-1)。对于模型的每一个应用领域,表1-1都给出了其从无到有的质量现状评价以及实际应用中的主要限制因素。不同模型的技术问题在不同的应用领域差别很大。多种模型的最新发展现状也在表1-1中列出,并在1.3.1~1.3.9节中给出了更为详细的叙述。

1.3.1 水资源评价

水资源评价是对水质、水量和水资源的可获得性进行评价,并在此基础上对水资源的管理、控制和可持续发展进行评价。完善的水资源评价不仅需要完整的水文资料,还要有适当的水文模型。对于地表水和地下水,分别对应有水量平衡模型和二维地下水模型;对于地表水和地下水存在相互转换的情况,则需要综合性更强的模型,如流域分布式物理模型。

总之，无论哪种模型都有很丰富的模型代码和应用实例，但是水资源评价还需要更好更完善的模型，这方面的主要限制因素通常是行政管理上的。另外，诸如加强用户之间的合作以及提高计算机辅助参数估计等技术革新对水资源管理模型也是相当重要的。

表 1-1 水文模型对各种问题的应用现状

类 型	应用现状				
	科学依据	科学验证	有效性检验	实际应用	应用限制因素
水资源评价 •地下水 •地表水	充分 很充分	充分 很充分	充分 充分	部分地区专业应用 部分地区专业应用	行政管理 行政管理
农业灌溉	充分	充分	部分可行	有限的	技术/行政管理
水土流失	一般	一般	有限的	无	科学基础
地表水污染	充分	充分	充分	几个案例	行政管理
地下水污染 •点源污染 •非点源污染	充分 一般	充分 一般	部分可行 有限的	部分地区专业应用 部分地区专业应用	技术/行政管理
水环境预测 •河流/水位 •地表水水质 •地下水头/水位 •地下水水质	很充分 充分 很充分 一般	很充分 充分 很充分 一般	充分 充分 部分可行 无	多数地区专业应用 多数地区专业应用 有限的 无	无 数据/行政管理 数据/技术 科学基础
土地利用变化的 •影响 •流量 •水质	充分 一般	一般 一般	有限的 有限的	有限的 无	科学基础 科学基础
水生生态系统	一般	一般	有限的	有限的	科学基础/技术
气候变化的影响 •流量 •水质	充分 一般	充分 一般	有限的 无	有限的 无	科学基础 科学基础

注：1. 在科学依据中，“一般”是指其科学依据必须考虑进一步的提高；“充分”是指其科学依据还要有一些提高和改进；“很充分”是指目前尚无有提高的需要。

2. 在科学验证中，“一般”是指其科学依据必须要进一步的检验；“充分”是指其科学依据还要些检验；“很充分”是指目前尚无有检验的需要。

3. 在有效性检验中，“无”是尚无成功的试验验证，急需通过试验验证；“有限的”是指目前只有一些验证的案例，还需要更多的试验验证；“部分可行”是指一些案例已经试验成功的验证，但还需要进一步的验证；“充分”是指已经有很多成功的检验，目前尚无进一步验证的需要。

4. 在实际应用中，“无”是目前尚无实际可操作的应用；“有限的”是指目前只有很少的已经证明实际可操作的应用实例；“几个案例”是指有一些已证明实际可操作的应用实例；“部分地区专业应用”是指在某些地区已经成为标准的专业工具；“多数地区专业应用”是指在全世界很多地区已经成为标准的专业工具。

5. 在应用限制因素中，“数据”是指数据的获取是主要的限制因素；“科学基础”是指缺乏科学依据是其应用的主要限制因素；“技术”是指为使已经得到证明的方法获得更广泛的应用而需要的技术推广；“行政管理”是指管理的守旧或缺乏经济刺激是主要的限制因素。

1.3.2 农业灌溉

从水文学角度而言,目前的大多数农业灌溉技术水平很低。因此,通过现代科学技术提高灌溉效率对经济和环境发展产生的影响将会是巨大的,但是在这方面的研究不多。

现代化的农业灌溉包括以下几个要点:

(1)现代化的数据收集技术:探测器、数据实时传送、遥感获取空间信息等。

(2)能充分描述研究区域土壤湿度和地下水空间分布状况的水文模型,水体流动和存储的空间分布以及河网系统的动力学模拟。Lohani 等首先作了这方面的研究(1993)。

(3)管理水库及其他水利调控设施需要的最优化技术。

模型发展有着较充分的科学依据,然而由于行政管理和传统工程两者之间缺乏验证、协调以及用户友好技术解决方案的合作,使得问题更加复杂。

1.3.3 土壤侵蚀

水土保持方面的技术水平也很低,流域侵蚀量估计方法中应用最广泛的仍然是“通用土壤流失方程(USLE)” (Wischneier 和 Smith, 1965),该经验方程起初是用于手工计算的,非常简单。现在有许多土壤侵蚀模型,但是对于大规模的广泛应用来说,还需在过程描述方面做更多的研究。

1.3.4 地表水污染

由于科学技术的原因,地表水水质模型的发展现状相对好一些,并且模型的应用也比较广泛。

1.3.5 地下水污染

地下水污染研究的主要问题是要获得详细的水文地质资料,包括三维空间描述以及决定污染物迁移扩散的水力学参数的空间变化(见第 10 章)。总体上,地下水流运动和污染物输移模型技术取得的进展要好于在数据获取方面的进展(见第 4 章)。

地下水水质方面,仍需在过程辨识、有机与无机的相关参数估计及其关系等进行研究(见第 5 章)。对于农药化肥施用造成的非点源污染,其在根系区的作用过程和机理还需进一步研究,尤其要考虑如耕作方式等农业管理技术的重要影响(见第 7 章)。

1.3.6 实时预测

结合实时监测资料的水文模型已经成为洪水预报的标准工具。目前,结合河流水动力学的降雨—径流模型是这方面的典型代表,而不是更可靠、更精确但也更为复杂的分布式物理模型。在地表水水质和地下水预测中,实时预测系统有着充分的科学和技术依据。在这一应用领域中,传统的管理仍是限制模型发展的主要因素。

1.3.7 土地利用变化的影响

土地利用变化对水质和水量的影响也是很重要的。例如,城市化和森林退化对洪涝

和干旱的影响、耕作方式和其他农业生产活动对水土流失和地下水水质的影响,都是目前许多地区在水资源管理方面存在的主要问题(见第6章和第7章)。因此,应用现有模型解决这些问题是非常有效的,限制模型在该领域广泛应用的主要因素是缺少在过程描述和参数估计方面的基本知识。

1.3.8 水生生态系统

因为生态系统本身的作用过程很复杂,资料获取很难,所以以前的湿地和水生生态系统模型都是利用很简单的水文模型,并且到现在为止,即使最先进的水文模型也不能为生态系统模型的建立提供详细的资料。因此,目前对综合复杂的水生生态系统很少应用模型研究。建立用于管理具有预测能力的水生生态系统模型的一个前提条件就是要充分利用先进的分布式物理模型。一个典型的洪泛区模型的例子由 Sorensen 等人给出(见第12章)。

目前这类模型主要的局限性在于科学和技术本身,这些局限性可通过卡尔曼滤波、神经网络和遗传(基因)算法等方法来解决,当然要在该领域得到进一步发展则需要更先进的生态学模型。

1.3.9 气候变化的影响

预测由气候变化产生的水文效应大概是水文学所遇到的最难解决的问题。在合理的精度范围内,用现代的科学技术可以测算降雨量、蒸发量、温度的特定变化对河川径流量、土壤湿度、地下水补给的影响,而且还可以建立许多简单的模型来模拟气候变化的某一方面。然而,气候变化可导致植被类型、农业活动等一系列变化,这些将对水资源产生重大的影响。因此,在这方面还需要进一步研究。

目前,气候模型的一个主要缺点在于对地表过程的描述过于简单,尤其是土壤湿度及其空间变化,而它们在很大程度上控制着土壤和大气的物质交换。分布式水文模型可以很好地解决这方面的问题,但由于缺乏多学科的相互协作而没能广泛应用。

1.3.10 人类活动的影响

长期以来,由于土地利用方式的改变和水利调控设施的建造,人们对江河流域的水利改造保持着浓厚的兴趣,其历史之久长,完全可以用“水利考古学”一词来形容。目前,有必要通过风险评价、保险和投资计划、政府立法等,对洪涝灾害进行预测和实施修复。

1.4 讨 论

1.4.1 建立分布式水文模型的必要性

从1.3节可以明显看出,对先进的分布式模型的需求在不断增长。传统的水文模型对于水资源评价和洪涝干旱预测的一般问题是很适用的,但是新问题的出现需要更先进