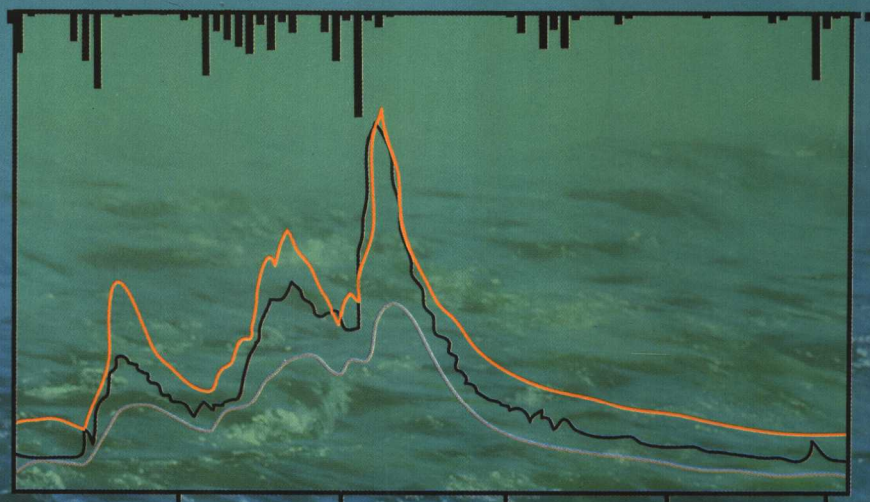


RAINFALL-RUNOFF MODELLING

降雨—径流模拟

[英] Keith J. Beven 著

马骏 刘晓伟 王庆斋 霍世青 刘筠 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

RAINFALL-RUNOFF MODELLING

降雨—径流模拟

[英] Keith J. Beven 著

马骏 刘晓伟 王庆斋 霍世青 刘筠 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对 1975 年以来有关降雨—径流模拟的研究作了全面的概括和介绍。随着计算机技术和空间数据库飞速的发展,使得现今的建模人员有了前所未有的可用技术资源,计算机模拟可轻易表述过去有着诸多难题的水文过程。本书既为初学者提供一个初级读本,又为水文技术和开发人员提供了翔实的技术方法。书中详尽地介绍了各种降雨—径流模型,包括用于实时洪水预报以及用于预报土地利用和气象变化影响的模型,并给出了一些应用实例。本书首次为初学者引入了在预报中应用不确定性评估方法,成为进行水文预报的实用工具。

本书可供大学高年级学生和研究生、水文研究和咨询人员、环保机构相关人员等阅读参考。

北京市版权局著作权合同登记号:图字 01-2004-4428

图书在版编目 (CIP) 数据

降雨—径流模拟 / (英) 贝文 (Beven, K. J.) 著; 马骏等译. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

书名原文: Rainfall-Runoff Modelling-The Primer
ISBN 7-5084-4184-2

I. 降… II. ①贝…②马… III. 降雨—地面径流—计算机模拟 IV. P331.3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 148184 号

All Rights Reserved. Authorized translation from the English Language edition published by John Wiley. & Sons, Ltd.

书 名	降雨—径流模拟
原 著	[英] Keith J. Beven
译 者	马骏 刘晓伟 王庆斋 霍世青 刘筠
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 18.5 印张 439 千字
版 次	2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

译著序言

当我收到译者的电子邮件，询问是否可将我的这本关于降雨—径流模拟的书译为中文时，我是有些吃惊。中国是个很大的国家，有些水文方面的问题非常有趣，但是我不知道，人们对于有关模拟的著作是否确实有足够的兴趣。本书现已翻译完成，这一事实充分说明，人们是有这样的兴趣，我很高兴也很荣幸，那些参与其事者已经认可我所做出的必要的努力是有价值的（我还高兴的是，我在书中用了一些篇幅介绍新安江模型及其一些改进形式）。这件事确实是不曾料到的！

当然我也有些困难，因为我不懂中文，因此不可能亲自校对译文。不过，我过去曾有过这样的经历：为一法文期刊用法文写一论文，然后请别人将其译回英文。一些重要的细微差别在译文中被漏掉了（不可否认，这也可能是我法文原文的问题！）。然而，对于本书的译者而言，从英文译为结构和表达方式都完全不同的中文，一定更加困难。我只能希望，译者不觉得翻译此书太过困难，并且中国读者会觉得他们译得不错！无论如何，写此前言给了我一个机会来总结和强调本书的一些重要信息。

第一个信息与一个现代计算技术快速发展的中国有关。这个信息告诉我们不要因为拥有这种计算技术而万事大吉。的确越来越强大的计算机功能、编程系统、遥感图像和时间—空间数据库等技术，对水文建模人员有着很大的直接吸引力。现在，我们可以使用比以往更高分辨率的空间数据集进行预

报。遗憾的是，这些技术并不能告诉地下可能正在发生的事情——而大多数有趣的水文现象就发生在那里。因此，尚未证明空间数据库在提供水文模型所需要的参数值估算方面很有用，也未证明在提供校正水文模型所需要的信息方面很有用。这是令人遗憾的，但却是事实。

第二个重要信息是，本书介绍的模型并不全都适用于中国的所有地区。例如，我个人的模型之一——TOPMODEL 模型，其基本形式在华北有深厚黄土的地区使用效果不会很好（虽然有可能放宽假定条件，在计算水文相似性指数时使用参照地下水水面而不是土壤表面）。建议读者要非常认真地接受第 1 章和第 10 章提出的建议，即考虑选择模型时，详细列出每个待选模型的假定情况，并与流域的已知数据进行比较。这也许是主观评估，但模拟人员不会愿意使用完全不适合特定流域的模型结构（尽管长久以来大家都在这样做）。

最后一个信息，是建立在长期经验基础上的信息，其试图进行一种在某种意义上认为是“适当地”水文模拟。也就是说尽管模拟技术神奇，水文模拟也并不是一个确定的过程。即使是最“基于物理”的水文模型，在模型结构、参数值、输入和边界条件等方面都带有不可避免的不确定性（参看第 7 章）。这意味着，模拟人员应当将不确定性评估作为一个有价值的工具。它之所以有价值是因为不确定性评估提供更大保护以避免出错（因为其覆盖范围更广），它之所以有价值是因为它容许对各种数据约束不确定性的价值提出疑问，它之所以有价值是因为它迫使模拟人员思考不确定性的来源（而不只是认为观测数据文件真正正确）。水文模拟的未来在于改进过程描述，也同样在于提出不确定性问题。

因此，祝愿所有阅读此书的中国读者好运。希望你们觉得此书可以读懂，有价值，并且从中学到如何进行水文模拟的知识。

Keith Beven
Lancaster 2005

原著序言

模型不可否认是美妙的，人们有理由为与模型为伍而感到自豪。但是模型可能有其隐藏的缺陷。归根结底，不但要看模型看起来是否美妙，而且要看我们是否能够与其愉快相处。

A. Kaplan, 1964

人们有这样一种看法：水资源模拟的状态就像一个遭受通货膨胀困扰的经济体系。建立的模型太多，而应用至今还太少；从事建模的人员太多，而新的观念太少；其结果就是印制的论文数量越来越多，含金量却降低了，其中大量的论文是水资源建模人员为保住其饭碗而炮制出来的。

Robin Clarke, 1974

在水文系统研究中有一个基本问题：大部分活动是发生在地下的。尽管遥感、地面探测雷达及其他地下探测技术取得了种种进展，我们对地下所发生的事情所知仍然十分有限。根据在实验室和小尺度现场研究中对土壤、岩石中的水流运动的详尽研究，我们所能确切了解的是，水流运动方式的确是非常复杂的，并且随着流速和湿度以非线性方式变化。从实用尺度（一般是中型到大型流域）的降雨—径流模拟角度来看，这种复杂性意味着，我们不能指望重现引起河流水文过程的水流过程的所有细节：以现有的测量技术，所涉及的复杂性的太多方面是不可知的。因此，在某种层面上说，降雨—径流模拟是一个不可能的问题！

当然，这并没有阻止许多水文学家、水文学家团队和水文协作机构开发降雨—径流模型。这时脑海中突然浮现出“过剩”一词，尽管在我的生涯的不同时期，我也曾参与到多种不同模型的开发试验中，尽力以各种方式做好这项工作。本书不可能列举所有的目前可用的降雨—径流模型，对那些只是一笔带过或根本未曾提及的模型的所有建模人员，我必须事先道歉。任何个人要了解文献中报道的所有的模型，这在现在几乎是不可能的，更不必说了解不同建模过程的历史框架。20多年前我发现模型类型已经过百，就放弃了列出可用模型清单的念头（那还是我在博士论文中也提出一个模型之前）。

但是，我还是试图简要介绍那些当前在努力提升水文预报能力过程中探索的有益主题，同时还力图反映这个题目的历史背景。这意味着，读者几乎看不到对在20世纪60年代启动了整个过程并在当今仍然广泛使用的概念蓄水模型的介绍。你也不会看到很多关于月水量平衡模型的介绍。这些模型代表着过去；我希望读者会发现，本书关注的是未来。尽管如此，这样一本书也只能对所取得的进展作一浮光掠影的介绍，即使是这样的介绍，也只能集总于某些方面。25年前，Robin Clarke将降雨—径流模拟活动比作受到通货膨胀困扰的经济体系，那时这种活动已经成为世界各地水文学家的主要工作。要在这样一本入门书中对有关文献作一完整回顾是不可能的，但是我尽力提供有关最近和经典论文的参考附注，使读者可以根据需要对研究文献做进一步探索。

对于水资源评估、洪水预报、整治河道的设计、污水对水质影响的评价、污染事件预测以及许多其他目的实际问题，仍然非常需要降雨—径流模拟。幸运的是，情况并不像不能详尽预测水流流路那样可怕。在很多实际用途中，开发预报模型并不需要包括所有的细节。事实上，很多成功的降雨—径流模型基本上是非常简单的。本书意在介绍使得这种实用的预报得以实现的降雨—径流模拟方面的最近进展。不过，做到这一点是要建立在一个认识的背景上，即不可能对涉及的水流过程做详尽预报，意味着所有的降雨—径流模型只能是降雨—径流过程的非常近似的描述，同样必须认识到，其预报结果是不确定的。

因此，本书用一节的篇幅专门讨论预报的不确定性。这在一般人认为是“高级”话题。我个人的看法是，认识环境模拟活动的不确定性是必要的，并且利用现代的计算机密集型统计试验技术，可以以一种概念上非常简单的方式引入不确定性评估。这种不确定性评估直接馈入决策风险评估，并且在多数实际情形中，精确地进行降雨—径流模拟以做出决策。考虑到未来6h河水

水位预报，是否应当发布洪水预报？要对付 50 年一遇的洪水，水库的溢洪道过水能力要多大？我们的水文知识如此有限，认识到我们的预报固有的不确定性，这些决定应当在风险评估框架内做出。

希望附送的演示软件能够帮助你更好地理解本书提出的材料，包括有关非确定性评估的章节。该软件主要基于过去 10 年在兰开斯特大学研究出的若干方法，许多同事、研究助理人员及学生给予了很多启发，或对研究直接做出了贡献。要特别提到 Peter Young，他的观点——数据（而不单单是理论本身）就可能提示了适当的模型结构——起了重要影响。Andrew Binley、Kathy Bashford、David Cameron、James Fisher、Stewart Franks、Jim Freer、Rob Lamb、Matthew Lees、Paul Quinn、Renata Romanowicz、Karsten Schulz 和 Jonathon Tawn，这些都是在兰开斯特大学的同仁，对模拟研究项目做出了重要贡献。与其他团队的协作也非常重要，特别是与 George Hornberger（夏洛特斯维尔）、Bruno Ambroise（斯特拉斯堡）、Charles Obled 和 Georges-Marie Saulnier（格勒诺布尔）、Eric Wood（普林斯顿）、Peter Germann（伯尔尼）、Sarka Blazkova（布拉格）和 Philippe Merot（雷恩）等的协作。本书若干部分是在休假期间在他人帮助下写成的，在美国圣巴巴拉得到 Tom Dunne 和 Jeff Dozier 的帮助，在瑞士洛桑得到 André Musy 的帮助，在比利时鲁汶得到 Jan Feyen 及 Francqui 基金会的帮助。

我还要因为持久的受益而向 Mike Kirkby 表示感谢。很早以前，我还是布里斯托尔大学的学生时，他的讲课就使我认识到，以一种考虑周全、洞察入微的方式模拟地貌和水文系统是可能的，而 TOPMODEL 模型的起源就是我在利兹跟随他从事博士后工作期间，依赖他的大量观点建立的。他在一堆相对简单的假设中抓住问题实质的技能一直在激发着我的灵感，甚至还在我绞尽脑汁去理解他讲课内容时就是如此！我希望他能在本书中看到某些这种影响。

最后，本书是要把水文模拟概念介绍给新一代同学，特别是要献给一位特殊的最近毕业的同学。如果安娜碰巧阅读并且试图理解本书，我希望她会发现，它对于现在和将来降雨—径流模型的使用都是一本清晰而有用的指南。这本书基本上就是为她这一代人而写的。

Keith Beven

Pully, 1997

Lancaster, Outhgill 和 Leuven, 1999

出版者衷心感谢 Günter Blöschl 审阅最后定稿。

目 录

译著序言

原著序言

第 1 章 追本溯源：降雨过程与模拟步骤	1
1.1 为什么要用模型?	1
1.2 怎样使用本书	2
1.3 模拟步骤	3
1.4 流域水文认知模型	5
1.5 水流过程与地球化学特性	10
1.6 产流与径流演进	11
1.7 选择概念模型的问题	12
1.8 模型率定和验证问题	13
1.9 本章要点	16
第 2 章 降雨—径流模型的演变：适者生存	17
2.1 起点：推理方法	17
2.2 实际预报：径流系数和时间转换	18
2.3 单位过程线的变异	22
2.4 早期的数字计算机模型：斯坦福流域模型及其派生模型	25
2.5 基于分布过程描述的模型	29
2.6 基于分布函数的简化分布式模型	31
2.7 最近的进展	31
2.8 本章要点	32
方框 2.1 线性、非线性与非平稳性	33
方框 2.2 新安江/Arno/VIC 模型	34
方框 2.3 控制量与微分方程	37
第 3 章 用于降雨—径流模拟的资料	39
3.1 降雨资料	39
3.2 流量资料	42
3.3 气象数据、截留和蒸散发估算	43

3.3.1 估算潜在的蒸散发	43
3.3.2 林冠截留水分的蒸发	45
3.3.3 实际蒸散发直接估算	45
3.4 气象资料与融雪估算	46
3.5 流域内气象数据分布	47
3.6 其他水文变量	47
3.7 数字高程数据	48
3.8 地理信息与数据管理系统	50
3.9 遥感数据	52
3.10 本章要点	53
方框 3.1 估算蒸散发率的 Penman-Monteith 组合方程	54
方框 3.2 估算截流损失	57
方框 3.3 用度一日法估算融雪	60

第 4 章 使用基于数据的模型预报水文过程 63

4.1 数据的可用性与经验模拟	63
4.2 经验回归方法	64
4.3 转换函数模型	65
4.3.1 IHACRES 模型	66
4.3.2 利用转换函数表述基于数据机制的模型	68
4.4 个案研究：在威尔士 Llyn Briane 区的 C16 流域的 DBM 模拟	69
4.5 TFM 软件	71
4.6 非线性与多输入转换函数	71
4.7 转换函数的物理推导	72
4.7.1 使用河网宽度函数	72
4.7.2 地貌单位线 (GUH)	74
4.8 在洪水预报中使用转换函数模型	76
4.9 基于神经网络概念的降雨—径流经验模型	76
4.10 本章要点	77
方框 4.1 线性转换函数	78
方框 4.2 利用转换函数来推断有效降雨	82
方框 4.3 转换函数时变参数估计	83

第 5 章 基于过程描述的分布式模型 87

5.1 分布式模型的物理基础	87
5.1.1 表层流	87
5.1.2 地表径流与河道流量演算	91
5.1.3 截留、蒸散发及融雪	93

5.2 基于物理的流域尺度降雨—径流模型	93
5.2.1 地表过程与表层过程描述的耦合：完全三维描述	93
5.2.2 基于栅格单元的模型：SHE 模型	96
5.2.3 基于山坡单元的模型：IHDM, TOPOG	97
5.3 个案研究：爱达荷州 Reynolds Creek 流域水流过程模拟	98
5.4 个案研究：SHE 模型在法国 Rimbaud 流域的盲检验试验	101
5.5 简化的分布式模型	102
5.5.1 动力波模型	102
5.5.2 地表径流动力波模型	103
5.5.3 表层降雨径流动力波模型	105
5.5.4 积雪径流动力波模型	107
5.5.5 动力波震荡与数值求解法	107
5.6 个案研究：美国亚利桑那州 Walnut Gulch 流域产流模拟	109
5.7 个案研究：美国俄克拉荷马州 Chickasha 流域 R—5 子流域模拟	111
5.8 分布式模型检验或评估	113
5.9 基于过程描述的分布式模型的讨论	114
5.10 本章要点	115
方框 5.1 表层流描述方程	115
方框 5.2 土壤表面入渗率估算	117
方框 5.3 偏微分方程求解法基本概念	122
方框 5.4 理查兹方程中使用的土壤含水量特征函数	126
方框 5.5 土壤转换函数	129
方框 5.6 地表水流描述方程	131
方框 5.7 动力波方程的推导	134
第 6 章 基于水文相似性与分布函数的降雨—径流模型	137
6.1 水文相似性与水文响应单元	137
6.2 分布式概率湿度模型 (PDM)	138
6.3 水文响应单元模型	139
6.4 TOPMODEL	142
6.4.1 TOPMODEL 的背景理论	143
6.4.2 地形指数推导	145
6.4.3 TOPMODEL 应用	146
6.4.4 TOPMODEL 中的水文相似性概念检验	148
6.4.5 TOPMODEL 软件	148
6.5 个案研究：TOPMODEL 在挪威 Saeternbekken 流域的应用	149
6.6 TOPKAPI 模型	152
6.7 本章要点	153

方框 6.1	SCS 曲线模型	153
方框 6.2	TOPMODEL 基本理论	158
第 7 章	参数估计与预报不确定性	165
7.1	参数估计与预报不确定性	165
7.2	参数响应面与敏感性分析	166
7.2.1	参数响应面	166
7.2.2	参数敏感性评定	168
7.3	性能量度标准与似然量度标准	170
7.4	自动最优化技术	171
7.4.1	爬山技术	171
7.4.2	退火法模拟	172
7.4.3	遗传算法	172
7.5	模型与数据不确定性识别：可靠性分析	173
7.6	利用集合论法的模型率定	174
7.7	识别等结局性：GLUE 方法	176
7.7.1	可行参数范围的决定	178
7.7.2	取样方法的决定	179
7.7.3	似然估计量度标准的决定	180
7.7.4	似然估计标准校正	180
7.7.5	GLUE 软件	181
7.8	个案研究：GLUE 方法在挪威 Saeternbekken MINIFELT 流域 模拟中的应用	181
7.9	降雨—径流模拟等结局性处理	185
7.10	预报不确定性与风险	187
7.11	本章要点	187
方框 7.1	用于模型评价的似然估计标准	188
方框 7.2	似然估计标准的结合	192
第 8 章	洪水预报	194
8.1	实时预报对资料的需求	195
8.2	用于洪水预报的降雨—径流模拟	197
8.3	Lambert ISO 模型	198
8.4	用于实时预报的自适应转换函数模型	198
8.5	个案研究：Dumfries 城镇实时预报系统	199
8.6	实时洪水淹没预报方法	202
8.7	使用降雨—径流模型进行洪水频率预报	202
8.7.1	随机暴雨生成	203

8.7.2 产流模块	205
8.8 个案研究: 威尔士 Wye 流域洪水频率特征模拟	205
8.9 包括融雪事件的洪水频率估计	206
8.10 相似性及洪水频率估算	207
8.11 本章要点	207
方框 8.1 用于实时预报的自适应增益参数估计	208
第 9 章 气候及土地利用变化对水文影响的预测	210
9.1 预测土地利用变化的影响	211
9.1.1 森林采伐与重新造林	212
9.1.2 火灾对径流的影响	213
9.1.3 城市化对径流的影响	214
9.1.4 农业排水对水文的影响	214
9.2 个案研究: 预测火灾及伐木对墨尔本供水流域的影响	215
9.3 预测气候变化的影响	216
9.3.1 宏观尺度水文模型	217
9.3.2 评估气候变化对水文影响的不确定性	220
9.4 个案研究: 模拟气候变化对 Wye 流域洪水频率的影响	221
9.5 本章要点	222
第 10 章 重复模型选择问题	223
10.1 作为假设检验的降雨—径流模拟的模型选择	223
10.2 优先信息的值	225
10.3 无资料流域问题	226
10.4 改变参数值与预报不确定性	226
10.5 不确定性预报与模型检验	227
10.6 最后评论: 不可预测的未来	228
附录 A 演示软件	230
A.1 TFM	230
A.2 TOPMODEL	231
A.3 DTM-ANALYSIS	233
A.4 GLUE	234
附录 B 术语表	236
参考文献	243
译者后记	282

第 1 章

追本溯源：降雨过程与模拟步骤

作为科学家，我们对一种可能性倍感兴趣，这种可能性就是将我们的知识打成一个简洁优雅的包，以显示我们确实是了解我们的学科以及它的复杂的相互联系的现象。

W. M. Kohler, 1969

1.1 为什么要用模型

如序言中所说，我们需要模拟降雨—径流水文过程有多种原因。不过，最主要的原因是水文测量技术种种限制。水文系统中我们想要了解的所有现象，不能够全都进行测量。事实上，在空间和时间上，我们的测量技术很有限，测量结果很有限。因此，需要一种手段根据那些已有的空间和时间测量结果来推断未知，特别是推断未经测量的流域（这里没有测量数据）和推断未来（这里不可能有测量数据），以便评估未来水文变化可能的影响。而各种类型的模型提供了一种很有希望有助于决策的定量推断或预报手段。

有大量降雨径流模拟活动，是作为水文系统的认识系统化的手段，纯粹为研究目的而进行的。证明这类认识是发展科学领域的一种重要方式。我们在知识上大有长进一般是在这样的时候，即模型或理论被证明与可靠的数据相冲突，因此必须寻求对模型所依据的认识作某些修正。然而，利用模型进行预报的最终目标必须是改进有关水文问题的决策，无论是在水资源规划、防洪、减污方面，还是在取水许可方面。随着全世界范围内对水资源需求的日益增长，在天气形势年年变化的背景下，改进决策就需要改进模型。这就是本书所要讨论的问题。

降雨径流模拟可以根据流域的输入输出条件观测资料，在纯分析的框架内进行。该流域被看作一“黑匣子”，完全不涉及控制降雨向径流转化的内部过程。第 4 章介绍了一些这样建立的模型，该章表明，根据对流域响应性质的认识，对建立的模型做一些物理解读也是可能的。这种认识应当是任何降雨径流模拟研究的出发点。

当然，有很多水文教科书以不同程度的数学分析和很多方程来描述水文过程，但是更为数学化的描述并不总是指明在其分析中所做的重要简化；它们提出这些方程，似乎这些方程处处皆适用。然而，只需向土壤表面喷洒染料溶液，然后挖开土壤看看染料浸染到何处，就能认识到水文理论的局限性（见图 1.1）。每当在现场进行水流流路的详尽研究，都会发现情况十分复杂。我们可以很容易察觉到这种复杂性，但是要做出适合于定量预报

的数学描述则要困难得多，并且总要涉及到很重要的简化和近似问题。因此，这开篇文章将讨论流域响应的认知模型，作为模拟过程的第一阶段。为什么没有共同接受的降雨径流过程的模拟方法，而是有后面各章将要讨论的多种选择、多种方法，这种复杂性就是一个原因。

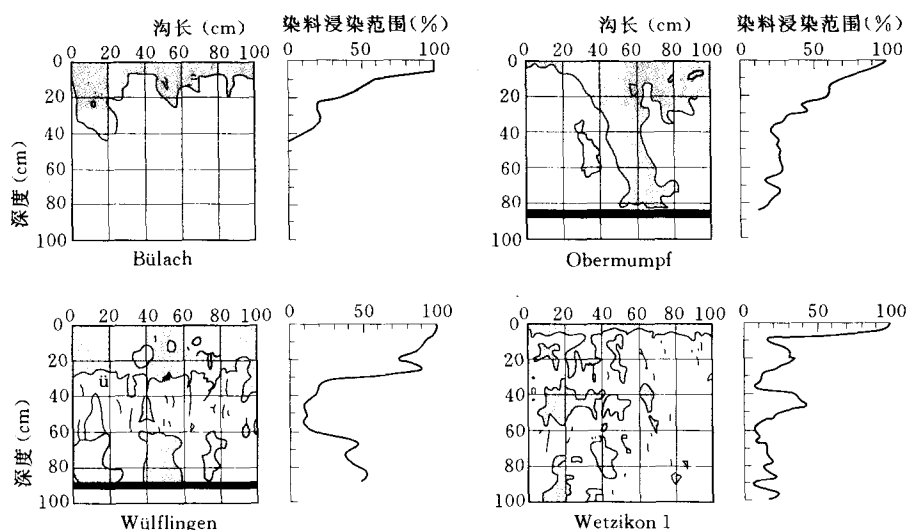


图 1.1 水入渗 40mm 后不同土壤剖面染料浸染情况
(根据 Flury 等, 1994。引自 *Water Resources Research*, 30 (7);
1945 - 1954, 1994, 美国地球物理协会版权所有)

1.2 怎样使用本书

在一开始就应当说明，这不是一本仅仅讨论现今用户可用的各种降雨—径流模型所依据的理論的书。比如，你会发现，书中用的方程式很少。各章末尾的方框内对某些理论进展进行了必要说明，初次阅读时可以略过。这些理论还可以在给出的（但必然是经过选择的）参考文献中进一步探究。

本书主要是讨论各种不同的模拟方法和现今广泛用于水文预报的软件包的临界分析所依据的观念。软件的模型演示正在变得越来越复杂，并结合地理信息系统，给人深刻印象的三维图形输出显示。这些显示很容易使人认为，模型的输出是真实流域响应的良好模拟，特别是如果没有资料可以用来检验所作的预报时更是这样。然而，即使对于目前可用的最为复杂精细的模型，情形也不一定如此，模型预报的评估还是必要的。希望读者从本书学到评估不同的模拟方法和可用的软件包，以及评估在特定的应用中模型的模拟成果所需要的观念和技术。

随本书附送 4 个软件包：TFM、TOPMODEL、DTMAanalysis 和 GLUE，这些软件包在第 4 章、第 6 章和第 7 章中做了介绍。前两个软件包代表了对降雨径流系统的响应做出具体假定的不同种类模型的例子。本书的目标之一就是训练读者评估模型，不仅是看模

型能够多么好地重现可以用作检验的数据，而且要用批评的眼光评估所做的假定。因此，凡在可能之处，模型都与一个所做假定的列表一起提出。我们鼓励读者每当初次遇到一个模型时，都做一个类似列表。GLUE 软件包是一套不确定性评价方法，可与任何水文模型一起使用（参看第 7 章）。这些软件运行于 PC 机 WINDOWS 下的最新版本，可以通过互联网下载（参看附录 A）。该网站还提供了互联网链接列表，链接指向其他有关各种降雨—径流模拟软件包的页面。

每章结尾有一个该章要点回顾。在阅读一章的正文之前先读读这个总结是个好方法。附录 B 提供了水文模拟所用术语表。这些术语在正文中初次出现时以斜体印刷。

1.3 模拟步骤

大多数关于模拟的书籍都是从选择用于特定应用的模型讲起。这里，我们将从模拟过程的更早阶段开始：流域降雨—径流过程的认知模型（参看图 1.2）。认知模型是我们对于流域在不同条件下对降雨怎样响应的感性认识的总结，或者说得更准确些，是你对于这种响应的认知。认知模型因人而异，它取决于水文学家曾经接受过的训练、他们曾经阅读过的书籍和文章、他们曾经分析过的数据集，特别是他们在不同环境中曾经体验过的野外场地。因此，可以预料，一个水文学家的认知模型不同于另一个水文学家的认知模型（关于典型的个人化的例子，参看 1.4 节）。

正确评价用于特定流域的认知模型很重要，因为所有的可能会用于预报的数学描述都不可避免地是认知模型的简化形式，在某些情况下，是粗略的简化形式，但是也许仍然足以提供适当的预报。这种简化是有道理的，认知模型不受数学理论的束缚，它基本存在于每个水文学家的头脑中，甚至不需要写下来。我们可以用纯粹定性的方式感知水流过程的复杂性 [例如，图 1.1 中 Flury 等（1994）所做的水流可视化试验]，而这种复杂性用数学语言加以描述却可能很困难。不过，数学描述传统上是建立定量预报模型的第一个阶段。

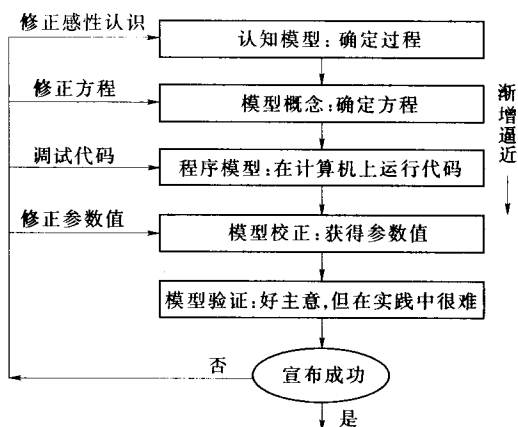


图 1.2 模拟过程各阶段示意图

这里我们将把这种数学描述称为正在考虑的过程的概念模型。在这一步，为了简化对过程的描述而做的假定或假设需要清楚地说明。例如，很多模型的基础是使用基于达西定律的对土壤中水流的描述，达西定律指出，水流与水力势能的梯度成比例（参看方框 5.1）。测量结果表明，结构化土壤中水力势能的梯度在很短距离内会有很大不同，这样，如果达西定律应用于土壤剖面尺度或更大尺度，那就是不加说明地假定某种平均梯度可以用来表现水流的特性，并且假定穿过土壤大孔隙的优先流的影响（图 1.1 中观测资料的一种解释）可以忽略。值得注意的是，在很多文章和模型用户手册中，虽然给出模型所基于

的方程，但是作为其基础的简化假定却没有明确地说明。不过，一般情况下，对方程的背景有所了解，列出这些假定并不困难。这么做应当是对于相对于头脑中的认知模型的特定模型进行评估的出发点。列出一个模型所有的假定是一种很有用的做法，这里在介绍不同的模拟方法时将采用这一做法。

概念模型或多或少有些复杂，从使用简单的质量平衡方程计算代表流域蓄水量的各个分量，到联立的非线性偏微分方程。有些方程可以很容易地直接编译成用在数字计算机上的程序代码。不过，考虑到真实系统的某些边界条件，如果方程不能以分析的方法求解（某些水文模型中的偏微分方程一般是这样的情况），那么就需要增加一个逼近阶段，使用数字分析技术来定义要在计算机上运行的代码形式的程序模型。用有限差或有限体积的等价形式来代替原方程的微分就是一个例子。人们非常注意的是：从概念模型的方程转换为程序模型的代码，有可能大大增加相对于原方程的真实解的误差。因为这类模型往往是高度非线性的，评估这种误差对于模型使用所处的各种情况可能很困难。

程序模型是一套在计算机上运行的代码。不过，运用代码进行特定流域的定量预报之前，一般需要经过一个参数率定阶段。所有在水文中使用的模型都有包含多种不同输入和状态变量的方程。有定义流域几何形状的输入，这种形状通常认为在特定模拟期间是恒定不变的。有定义模拟期间时间变量边界条件的变量，例如特定时间步长的降雨及其他气象变量。有状态变量，如土壤蓄水量或地下水面深，这些作为模型计算的结果在模拟期间是变化的。有定义模拟起始时流域状态的状态变量的初始值。最后，还有定义流域或水流区特性的模型参数。

模型参数可能包括各种特征值，如空间分布式模型中的不同土层的孔隙度和水力传导率，或者在流域尺度上使用状态变量的模型中的在饱和层的平均滞留时间。这些状态值通常认为在模拟期间是恒定不变的（虽然对于某些参数，例如正在生长的林冠的截留蓄水能力，可能有很强的时变性，而这对某些应用可能很重要）。在所有情况中，即使这些特征值认为是不随时间改变的，也不容易通过推理确切给出特定流域的参数值。事实上，最常用的参数率定模型是使用调整参数值的方法，以取得模型预报成果与可用的真实流域响应的观测资料之间的最佳匹配（参看 1.8 节和第 7 章）。

一旦规定了模型参数值，就可以进行模拟，并得到有关响应的定量预报。下一个阶段就是这些预报成果的验证或评估。这种评估也可以在定量的框架内进行，计算模型性能相对于关于径流响应的可用实测资料（如果有的话）的一个或几个指标。这一阶段的问题并不是难以找到可以接受的模型，特别是如果有可能通过与实测流量的比较来率定模型的参数，因为大多数模型结构都有足够数目的参数，这些参数可以变化以达到与数据的合理匹配。更经常的问题是，有很多模型结构的不同组合，有很多不同的参数集，都可以达到与流量数据的合理的拟合。因此，仅就流量预报而言，可能难以区分不同的切实可行的模型，因此难以验证单个模型。这一问题将在第 7 章有关评价模型预报不确定性的部分做更详细的论述。

另一方面，流量预报，以及流域内部响应的任何预报，也可以相对于流域原来的认知模型来进行评价。这里，找到完全可以接受的模型通常更加困难。随着模拟水文过程的认识的加深，种种误差可能导致修正所用的参数值，导致重新评估所用的概念模型，甚至导