

分布式水文模型及 地貌瞬时单位线研究

石 朋 芮孝芳 陈 喜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

分布式水文模型 及 地貌瞬时单位线研究

石 朋 芮孝芳 陈 喜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对基于 GIS 平台下网格型松散结构分布式水文模型构建的理论基础及关键技术进行了探讨,首先提出并建立了流域蓄水容量同地形指数间的对数维布尔函数关系,从而解决了单元网格产流参数不易率定的问题;然后,探讨了模型汇流过程中如何利用地形地貌资料及天然河网的自相似性构建地貌瞬时单位线的方法,探索性地建立了考虑水流空间变异性的地貌瞬时单位线;针对网格型分布式水文模型的构建,给出了网格最优演算次序的计算方法;最后,分别在长江三峡区间沿渡河流域和下垫面条件更为复杂的贵州三岔河岩溶流域构建了两个分布式水文模型,并加以应用分析。

本书可供从事流域水文模拟及分布式模型构建领域的科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式水文模型及地貌瞬时单位线研究 / 石朋, 芮孝芳, 陈喜著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5170-2304-3

I. ①分… II. ①石… ②芮… ③陈… III. ①水文模型—单位线—研究 IV. ①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第195755号

书 名	分布式水文模型及地貌瞬时单位线研究
作 者	石朋 芮孝芳 陈喜 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 135千字 2插图
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
定 价	32.00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

分布式水文模型是在系统水文模型和概念性水文模型的成功经验上发展而来的。自从第一个严格意义上的分布式水文模型 SHE 于 1986 年被提出之后，分布式水文模型已成为了当今水文科学领域研究中的一个热点。这主要是由于分布式水文模型具有更多更强的功能，能够把单一水量变化的模拟计算推向更加广泛的水文水资源及生态环境等方面的模拟计算，从而大大拓宽了模型的使用范围。分布式水文模型不仅可以帮助人们更加深入地研究和了解自然界水文循环在不同时间尺度和空间尺度上的演变过程和规律，而且为综合解决在实践中各种和水文循环紧密相关的一些工程问题提供了一个有效的平台和工具。

现代研究认为，流域水文响应是地貌扩散和水动力扩散对降落在流域上具有一定时空分布的净雨共同作用的结果。地貌扩散作用取决于流域大小、形状和水系分布状况；水动力扩散作用与流域上流速分布有关，一般取决于流域的地形坡度和糙率的分布。这种对流域汇流机理的揭示，使得水文学家和自然地理学家试图从理论上建立流域地形地貌特征与流域水文响应之间的关系成为可能，并有助于解决无资料地区的汇流过程模拟问题。

通过流域地形地貌参数来定量流域水文响应已成为近 20 年来水文学中最富有吸引力的研究课题之一。

本书以蓄满产流理论为基础，建立了一个基于 DEM 的网格型松散结构分布式水文模型，并在非线性框架下讨论了考虑水动力参数空间变化和基于宽度函数构建地貌单位线进行流域汇流分析的方法。主要内容包括：以协克里金方法为基础，将高程作为控制降雨的第二影响因素引入到降雨空间模式计算公式中，提出了引入高程的协克里金方法。通过对沿渡河流域不同时间尺度的降雨空间模式的插值计算，初步证明所建议的方法具有较好的计算效果；以蓄满产流理论为基础，建立了一个网格型松散结构的分布式水文模型。在模型构建过程中，发现地形指数差值同包气带缺水量之间满足位移量为零的对数维布尔分布函数，建立了地形指数同包气带缺水量之间的定量关系，从而解决了模型产流计算过程各网格蓄水容量的确定问题；考虑到流域水系的分形特性，以两种变形元为基础构造出更加复杂多变的河网形态，修正并改进了前人提出的宽度函数的计算公式，拓宽了公式的使用范围。分别提出了路径等价流速、路径等价水动力扩散系数和河网等价流速、河网等价水动力扩散系数的概念及计算方法，从而在非线性的框架下以两种方法探讨了水动力参数空间变换条件下的地貌单位线计算方法，在实用中取得了较好的计算成果。

本书的研究工作部分得到了国家自然科学基金重大项目（51190091）、国家自然科学基金（41371048）、国家重点基础研究发展计划项目（2010CB951102）及河海

大学优秀创新人才支持计划等项目的资助，书稿编写过程中，瞿思敏教授、吴森硕士、乔雪媛硕士、周密硕士及马欣欣硕士对书稿的最终形成给予了极大帮助，在此深表感谢。

由于作者学识水平有限与时间仓促，书稿中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2014 年 4 月于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 降雨资料的处理方法	4
1.2.2 分布式流域水文模型的发展	8
1.2.3 地貌单位线研究综述	15
1.3 本书主要内容	22
1.3.1 考虑高程影响的降雨空间插值	22
1.3.2 网格型松散结构分布式水文模型的构建	23
1.3.3 考虑水动力参数空间变化的地貌单位线研究	23
1.3.4 实例研究	24
第 2 章 分布式水文模型中的产流计算	25
2.1 概述	25
2.1.1 分布式水文模型的分类	25
2.1.2 分布式水文模型涉及的几个理论问题	26
2.1.3 发展前景	27
2.2 基于地形指数的流域蓄水容量计算	28
2.3 单元网格上的产流计算	32

第 3 章 分布式模型中的汇流计算及地貌瞬时单位线	35
3.1 概述	35
3.2 经典 R - V GIUH	36
3.2.1 理论基础	36
3.2.2 状态空间模型	38
3.2.3 停留时间分布函数	41
3.2.4 扩散效应	42
3.3 考虑水流空间变异性的 GIUH	43
3.3.1 扩散系数的修正	43
3.3.2 水动力参数随空间变化的 GIUH	47
3.3.3 基于状态-空间模型构造的 GIUH	47
3.4 宽度函数与 GIUH	48
3.4.1 河网的自相似性	48
3.4.2 自相似网络的生成	49
3.4.3 宽度函数的生成	50
3.4.4 基于宽度函数的地貌瞬时单位线 (WGIUH)	56
3.4.5 WGIUH 的计算实例	57
第 4 章 基于 DEM 的流域信息提取	61
4.1 降雨空间插值技术	61
4.1.1 空间插值	62
4.1.2 协克里金法	67
4.1.3 引入高程的协克里金方法	75
4.1.4 精度检验	77
4.1.5 实例应用	78
4.2 基于 DEM 的流域信息提取	83
4.2.1 空间离散	83

4.2.2 基于 DEM 的流域信息提取	85
4.3 最优演算次序及计算流程	91
4.3.1 网格最优演算次序的生成	91
4.3.2 模型计算流程	94
第 5 章 网格型松散结构分布式水文模型的构建	96
5.1 冠层截留	97
5.2 蒸散发	99
5.3 单元网格上的产流	99
5.4 单元网格上的汇流	100
5.5 河道汇流	105
5.6 壤中径流汇流及地下径流汇流	107
5.7 算例	109
5.7.1 研究区简介	109
5.7.2 模型的率定与验证	111
5.7.3 成果分析	119
第 6 章 岩溶流域分布式水文模型的构建	121
6.1 模型结构	122
6.1.1 植被截留及蒸散发	123
6.1.2 表层岩溶带中的产流计算	124
6.1.3 径流成分的划分	125
6.1.4 汇流演算	125
6.2 模型参数获取及效果检验	126
6.2.1 研究区简介	126
6.2.2 模型控制方程中几个主要参数的获取	127
6.2.3 结果分析	128
6.3 结论与展望	130
参考文献	131

第 1 章 绪 论

1.1 引言

在现实世界中，影响流域降雨径流形成的气候因子（如降雨、蒸发等）和下垫面因子（如地形、地貌、地质、土壤、植被、土地利用等）均呈现空间分布不均匀状态。自 17 世纪水量平衡理论创立以来，由于受到科学技术发展水平的制约，水文学一般只能将流域作为一个整体，由流域的平均降雨量过程和平均状态参数来推求流域出口断面的流量过程。这种集总式流域水文模型虽然对水文学的发展起到了历史性的作用，但与实际流域的情况并不相符，因为不仅暴雨在空间上分布不均匀，流域的土壤、植被、地形、地貌、水文地质等条件在空间上也呈现不均匀分布，人类活动的影响一般也是随时空变化的。集总式水文模型显然只能用于模拟气候和下垫面因子空间分布均匀的虚拟状况，并只能给出流域产汇流过程空间均化的模拟结果，这样必然使得集总式水文模型的结构和参数的物理意义模糊，以致在模拟现实世界的流域降雨径流形成时必然存在较大的局限性，精度也常常不尽如人意。



只有分布式水文模型才能为真实地模拟现实世界的流域降雨径流形成机理提供有力的工具，因为它能客观地反映气候和下垫面因子的空间分布对流域降雨径流形成的影响。到目前为止，虽然人们还是无法用一个解析函数来精确地表达气候和下垫面因子的空间分布，以便精确地描述气候和下垫面因子在空间上的连续变化规律，但可以采用空间离散形式给出气候和下垫面因子的空间分布。与流域产汇流有关的地理数据主要有地面高程和反映土壤、植被、地质、水文地质特性的参数等，其中尤以数字高程模型（DEM）最为有用，因为 DEM 不仅表达了地面高程的空间分布，而且据此可以自动生成流域的水系和分水线、自动提取地形坡度和其他相关地貌参数。将 DEM 与表达土壤、植被、地质、水文地质特性的参数的空间分布叠加在一起，还可以描述这些下垫面参数与地面高程之间的关系。将所划分的子流域分布图与土壤、植被、地质和土地利用图叠加还可以生成离散化的下垫面因子的空间分布。故此，由 GIS 构建的数字化平台已能为探求流域降雨径流形成机理提供新的研究手段。本书在国家自然科学基金项目（基于数字平台的流域水文模拟研究，编号：50309002）的支持下，着重探讨在数字化平台上构建分布式水文模型来模拟流域降雨径流形成过程。这是流域水文模型发展的主要趋势，已成为国内外水文学的研究热点。这对推动我国水文水资源科学的发展，提高水文模拟预报精度，探讨水资源演化规律和可持续利用，均具有重要的理论价值和实际意义。

降水是径流模拟中最主要的影响因素之一，是洪水预报中最重要的输入信息。因此，了解降水的空间分布对洪水过程的影响是非常重要的。在分布式水文模型的研究与应用中也必须解决降雨空间分布的描述问题。目前，水利防汛部门获得的雨量信息主



要是通过地面雨量计的观测得到。对于湿润地区，一般站网的密度是 $200 \sim 300 \text{ km}^2$ ，由此得到的雨量信息一般不能正确代表真实的雨量空间分布，不能满足分布式水文模型的需要。雷达作为一种主动遥感手段可以探测较大范围的瞬时降水空间分布，而且其建立和维护费用要比建立稠密的雨量站网低，但是由于雷达测雨技术的复杂性和实验条件的限制等原因，使得目前雷达测雨存在一定的误差，特别是大范围降雨测量的准确性尚不能完全满足水文模拟和预报的要求。针对上述问题本书采用不同的空间插值方法来构建根据有限的站点资料获取流域降雨的空间分布模式。

水文学家对汇流问题的研究已有 100 多年历史。在“河道汇流”中建立了基于槽蓄概念的 Maskingum 洪水演算法。在“流域汇流”中建立了基于单位线基本假定的单位线法和基于等流时线概念的等流时线法。这些理论和方法在长期的发展中又出现了许多变种，并得到了广泛的应用。但由于这些理论和方法物理根据不强，适用条件较窄，因此，在一些复杂的实际条件下使用效果并不理想。加之这些理论和方法皆过多地依赖于实测水文资料，故在缺乏实测水文资料和人类活动影响情况下往往难以使用或使用效果不佳。因此，依据新的理论和技术建立新的流域汇流计算方法，尤其注重研制可适用于缺乏实测水文资料和人类活动影响情况下的汇流计算方法十分重要。

本书的研究目的：一是建立一个网格型松散结构的分布式水文模型，并寻求一种与之相配套的能够合理描述降雨空间分布及下垫面情况的方法；二是通过对河网结构的拓扑分析，探讨流域结构对水文响应的影响，寻求新的建立地貌瞬时单位线的方法。



1.2 国内外研究现状

1.2.1 降雨资料的处理方法

实测降雨资料对水文学中的许多问题都起着至关重要的控制作用。作为水文模型主要输入项的降雨,其时空变化是控制降雨径流过程的主导因素。诸多学者通过研究降雨空间变化模式的不确定性对水文模型的影响发现^[1-10],任何流域上都必须考虑到降雨的空间变化。因为它不仅对径流总量和洪峰流量有影响,同时对峰现时间也有极大影响^[11-14]。此外,它还明显增加了水文模型中参数估算的不确定性^[2,15]。文献 [16] 中曾指出,洪水预报的不确定性主要来源于降雨的不确定性而非流域模型的不确定性,对预测洪峰最敏感的变量就是降雨的空间变化。Winchell 等^[17]通过对前人工作的总结也发现,对径流形成而言,降雨的时空变化是一个高度敏感的因素。

随着科学技术水平的不断发展和提高,雷达测雨被认为是一种能够很好控制区域雨量空间变化的解决方法。从 20 世纪 50 年代开始已有一些国家先后建立了天气雷达探测站网,主要用于警戒强对流灾害天气。我国在 60 年代末开始着手研制和生产 711 型 X 波段测雨雷达。70 年代生产了 713 型 C 波段天气雷达作为正式布网之用,80 年代研制出具有数字处理系统的 714S 波段天气雷达,同时开始从国外引进多普勒天气雷达。到 90 年代已生产出 714CD、714SD 型脉冲多普勒天气雷达及 C 波段 3824 型全相干多普勒天气雷达。1999 年在对美国 WSR-88D 进行改进的基础上,生产出第一部先进的 S 波段全相干脉冲多普勒天气雷达,它已作为中国气象



局新一代布网的天气雷达^[18]。多年来,水文学家一直试图在水文模型中应用雷达降雨估测值并不断地开发出新方法以改善雷达测雨的精度^[19-23]。

英国国家河流管理局将雷达测雨资料用于洪水预报、预警。另外英国水文研究所在这方面作了大量的实验研究工作^[24, 25],主要有:水文雷达实验(HYREX);雷达-雨量计校正方法及精度估计;应用雷达降水资料的格点分布式降水预报模型;河流预报系统(RFFS)和水文雷达系统(HYRAD)软件开发等。HYRAD集成了雷达和雨量计估算面雨量和流域雷达降水预报的研究成果,用实时雷达和雨量计资料计算流域面雨量并进行未来两小时的流域面平均雨量预报,将计算和预报数据以时间序列的形式存入RFFS数据库用于河流预报。RFFS与HYRAD共同组成了实时降水与河流预报系统,目前已经在泰晤士流域等几个洪水预报警报中心进行日常业务应用。

美国在建设雷达网的同时,天气局水文降水分析项目HRAP也开始实施,HRAP的目的是将雨量站观测资料、卫星云图资料与雷达测雨资料相结合,产生用于水文预报的最优降水估算场。经过多年的实验研究,目前已正式应用。目前,美国天气雷达估算降雨并用于水文预报的工作达到了全面业务化水平。

欧盟的COST-717计划从1999年开始直至2004年完成,主要目标是评价、验证雷达信息用于NWP(Numerical Weather Prediction)和水文模型模拟的作用。该计划由三个工作组组成,其中与水文建模有关的第一工作组(WG-1)的具体任务^[26]是:①回顾当前雷达测雨信息在水文学中的作用;②在时空范围内识别不同雷达测量结果的误差特点,并检验其对水文模型的影响;③提供在不同的水文模型中对雷达测雨数据精度的不同需求;④评价雷达数



据和校正技术在水文模型中提供定量降雨预报的作用；⑤研究什么样的降雨率预报适合水文模型输入；⑥研究雷达资料如何才能提供与大气模型耦合的最佳方式；⑦为适应将来分布式水文模型和城市排水模型需要提出雷达的发展方向。

我国从20世纪80年代起也开始研究把雷达用于测雨并取得了进展，如北京大学和南京大学在淮河流域开展把安徽省气象局的数字天气雷达用于淮河水系重点防洪地区的降水量定量测量和预报研究。长江水利委员会在国家“八五”科技攻关三峡项目“长江防洪系统研究”中，也开展了类似的研究。

但是，就目前情况而言，雷达测雨技术并不十分完善。从水文学上来讲，流量资料的水文测验误差约为5%，在实时洪水预报中，洪峰与洪量的预报误差均要求小于10%。根据这些要求，目前雷达测雨得到的面雨量估计精度尚无法满足水文上的应用要求。文献[27]中对NEXRAD (Next Generation Weather Radar) 在美国南部地区的应用进行了检验，结果发现，雷达测雨资料出现了系统性偏差（系统偏小），且这种偏差与测量范围有关，仅仅通过地面雨量站的事后校正也不能完全解决。因此，要想把雷达测雨资料应用于水文预报，就必须提高雷达定量测量降水的准确性。许多专业人员对此进行了大量的研究和实验，也取得了一定的成果。许多水文工作者^[20-23, 28-32]做了很多实验证明了雷达雨量数据的优点，并把雷达雨量数据作为水文模型的输入项应用在实际的流域中，取得了较好的预报结果，充分显示了雷达测雨用于水文预报的潜力。将雷达等遥感估测降水资料引入到水文模型中是提高水文预报精度和增加预报预见期的重要途径，也是未来发展的必然趋势。但雷达测雨应用于水文模型时必须解决两个关键问题：第一，雷达测雨的精度问题；第二，水文模型与雷达测雨两者空间分辨率的匹配



问题。

作为一种替代手段,空间插值技术是一种能够将点属性拓展到面属性的很好的方法。在一定站网密度条件下,利用空间插值方法模拟出降雨的空间变化模式,既可以节省大量的经费,又能够基本达到应用的需求。在水文学领域中,特别是对实测降雨资料的处理过程中,常用的插值方法有很多^[1,33-37],比较简单的方法如泰森多边形法、距离平方倒数法、等雨量线法、样条函数法以及趋势面法等。虽然某些方法的应用效果并不十分理想,但由于方法的简单易行,故在很长的一段时间内得到了广泛的应用。将地质统计学方法引入到对降雨空间分布的描述是一种很好的尝试。

地质统计学方法以变量区域化理论为基础^[38-40]。由于该方法致力于利用相邻样本点间的相互关系来对未知点进行预测,因而逐渐受到青睐。许多研究者发现^[35,41],与传统方法相比,地质统计学方法(如 Kriging 方法)能够给出更好的降雨估算值。但是,近来 Dirks 等^[36]发现,估算结果与样本密度有关,对于高密度的站网(例如每 35km² 中有 13 个雨量站),Kriging 方法并不比那些简单的方法(如距离平方倒数法)能够提供出更好的结果。Borga 和 Vizzaccaro^[42]通过比较不同样本密度条件下 Kriging 方法和多重二次曲面法的插值效果后也得到了相同的结论。事实上,目前常用的这些降雨空间插值方法往往忽视了一些对降雨有明显影响的因素,譬如高程、距海距离等。尤其是在山谷地区,地形雨的形成与高程有着密切的关联,而常用的方法却无法考虑到这一点。可以注意到,除了能够提供插值误差(Kriging 方差)以外,Kriging 方法相对于其他方法的最大优点就在于,当主要属性的样本点较稀少时,可以通过样本点较密的第二属性加以补齐。就降雨而言,第二信息可采用天气雷达的观测值。一种多变量的 Kriging 方法——协



克里金 (co-Kriging) 方法已经被应用于雷达测雨资料同雨量站观测资料之间的数据融合技术中^[43,44]。近年来, 数字高程模型 (DEM) 的发展使得研究人员可以利用一种更有价值且成本更低的第二信息数据——高程。在一定的高程范围内, 随高程的增加, 降雨会有逐渐增大的趋势, 这主要是由于地形的起伏造成了空气的抬升且同时使空气发生冷凝作用造成的。Hevesi 等^[45,46]对美国内华达州和加利福尼亚州东南部 62 个站点的实测资料进行分析后发现, 高程同降雨量的相关系数可达 0.75 以上。国内也有类似的研究。因而, 高程可以被利用来作为降雨插值的第二影响因子。

1.2.2 分布式流域水文模型的发展

自 17 世纪末建立了水文循环和流域水量平衡的基本概念后, 产汇流问题就成为地表水文学研究的一个中心课题^[47,48]。20 世纪 50 年代以来, 随着计算机技术大量引入水文研究领域后, 人们开始用数学、物理学等方法对流域发生的水文过程进行模拟, 建立数学模型, 做产汇流计算, 并先后提出了许多产汇流模型。1966 年 Crawford 和 Linsley 开发了 Stanford 模型^[49], 之后水文模型进入了蓬勃发展的时期^[50]。80 年代中期涌现出了一些比较著名的水文模型, 如 HEC-1 模型、RORB 模型、TANK 模型、HBV 模型、SHE 模型, 我国也自行研制了许多水文模型, 其中最著名的有新安江模型和陕北模型^[50]。

20 世纪 80 年代后期至今, 流域水文模型的发展处于比较缓慢的阶段, 基本上没有新的水文模型出现, 大多数的水文模型是在原模型的基础上, 为适应不同的用途而进行的改进。随着计算机计算能力的提高, 地理信息系统、遥感技术特别是雷达测雨信息等新技术、新方法的引入及在水文模型中的应用, 使得萌芽于 20 世纪 60