

李致家 孔凡哲 王 栋 陈 骥 叶金印 等编著

现代水文模拟与预报技术

Modern Hydrological Modelling and Forecasting Techniques

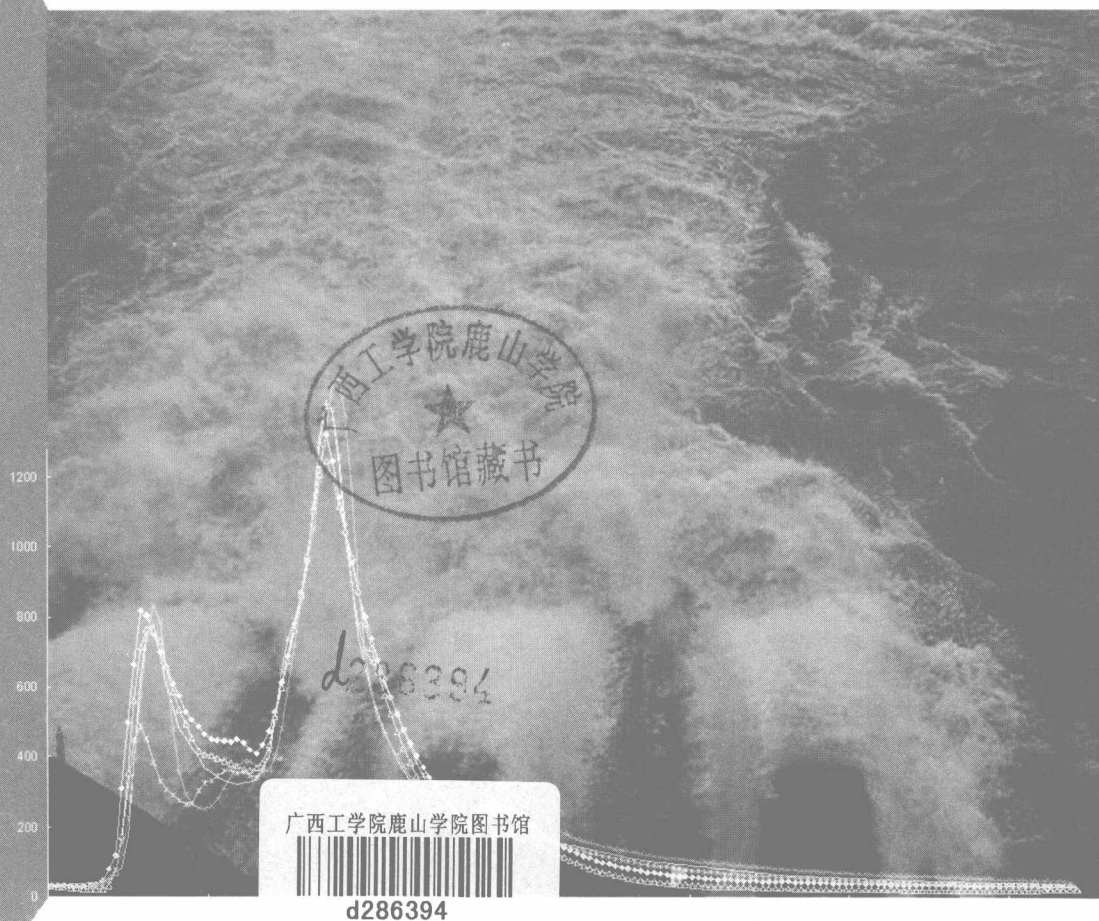


河海大学出版社

李致家 孔凡哲 王 栋 陈 骥 叶金印 等编著

现代水文模拟与预报技术

Modern Hydrological Modelling and Forecasting Techniques



河海大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍各种水文模型、雷达测雨和数值天气预报以及实时洪水校正的方法原理及其一些最新进展情况。主要内容包括:水文模型的发展综述;基于 DEM 数字流域原理、方法和开发的软件;概念性水文模型,如新安江、美国萨克拉门托与加拿大 WATFLOOD 模型;基于物理基础的半分布式 TOP-MODEL,介绍了 TOPMODEL 原理、应用、参数分析以及其与新安江模型的比较;基于网格的水文模型,介绍基于网格的新安江模型、TOPKAPI 和基于网格的萨克拉门托模型;实时校正方法和应用,包括一般性的误差自回归、卡尔曼滤波和集合预报等;分布式水文模型的基本原理;大尺度水文模型;SWAT 及其与 MODFLOW 的耦合;雷达测雨与数值天气预报;水文模型参数率定理论、方法以及水文模型不确定性分析理论和方法;生态水文模型。本书属于河海大学研究生教育创新计划系列教学用书,可供从事水情防汛、水文水资源和地理科学等的科学工作者和工程技术人员参考,也可作为上述专业的大学本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代水文模拟与预报技术 / 李致家等编著. —南京:
河海大学出版社, 2010. 10

ISBN 978 - 7 - 5630 - 2758 - 3

I. ①现… II. ①李… III. ①水文学—水流模拟 ②水文预报 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 195328 号

书 名 / 现代水文模拟与预报技术

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5630 - 2758 - 3/P · 19

编 著 者 / 李致家 孔凡哲 王 栋 陈 骥 叶金印

责任编辑 / 魏 连

特约编辑 / 彭桃英

封面设计 / 王志强

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

印 刷 / 南京工大印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 20.75

字 数 / 476 千字

版 次 / 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

定 价 / 35.00 元

前言

本书第1章为水文模型的发展综述,由河海大学李致家教授编著;第2章为基于DEM流域河网生成与特征提取,讲述基于DEM数字流域的基本原理、方法、主要软件介绍,最后介绍作者研制的一个软件,该章由河海大学姚成博士编著;第3章介绍了概念性水文模型如新安江、美国萨克拉门托与加拿大WATFLOOD模型,由李致家编著;第4章为TOPMODEL,介绍了TOPMODEL原理、应用、参数分析以及与新安江模型的比较,由河海大学李致家和天津市海河管理处谢帆工程师编著;第5章为基于网格的水文模型,介绍基于网格的新安江模型、TOPKAPI和基于网格的萨克拉门托模型,由河海大学姚成博士、水利部水文局刘志雨教授、河海大学李致家编著;第6章为实时校正方法和应用,由河海大学李致家编著;第7章介绍基于物理基础分布式水文模型,由中国矿业大学孔凡哲教授编著;第8章为大尺度水文模型VIC,由香港大学陈骥博士和牛俊博士编著;第9章介绍SWAT模型及其与MODFLOW的耦合,由江苏省水利厅毛媛媛高级工程师编著;第10章介绍雷达测雨与数值天气预报,由淮河流域气象中心叶金印高级工程师编著;第11章介绍水文模型的率定理论、方法,由河海大学李致家编著;第12章介绍水文模型的不确定性理论和方法,由南京大学王栋教授编写;第13章介绍生态水文模型,由美国蒙大拿大学张珂博士编著。全书由李致家统稿,包红军、刘晋、辛鹏磊、谢帆、李晓、徐倩、邓鹏和黄迎春等研究生参加了部分文字的整理工作。本书第2、4、11章的部分内容主要取自李致家编著的《水文模型的应用与研究》。

河海大学水文院“211工程”三期和研究生院“211工程”三期创新人才培养经费给予出版资助。这些研究得到过教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)、淮河流域气象开放研究基金、江苏气象开放基金、国家博士点基金(2009009411005)、水利部公益性行业专项“海河流域下垫面变化条件下设计洪水修订技术研究”以及公益性行业(气象)科研专项“基于地理信息系统的水文气象预报技术”的资助,在此一并表示感谢。

编著者

2010年6月

目 录

第 1 章 水文模拟与水文模型	1
1.1 水文模型的发展历史	1
1.2 水文模型分类	1
1.3 尺度及其影响	4
第 2 章 数字流域	6
2.1 数字高程模型(DEM)简介	6
2.2 基于 DEM 的流域信息提取	11
2.3 流域边界确定	15
2.4 流域地貌特征提取	16
2.5 常见数字流域提取工具应用分析	19
2.6 数字流域地形信息提取系统简介	22
第 3 章 概念性水文模型	29
3.1 新安江模型	29
3.2 萨克拉门托(SACRAMENTO,简称为 SAC)模型	40
3.3 WATFLOOD/SPL9 模型	52
第 4 章 TOPMODEL 及其应用	63
4.1 TOPMODEL 的原理	63
4.2 TOPMODEL 在钱塘江流域的应用	72
4.3 TOPMODEL 与新安江模型的比较	76
4.4 TOPMODEL 中初值问题的探讨	84
4.5 TOPMODEL 参数规律的研究	87
4.6 结论	92
第 5 章 基于网格的水文模型	94
5.1 Grid-Xinnanjiang 模型	94

5.2	TOPKAPI	104
5.3	美国水文实验研究所模型系统(HL-RMS)	112
第6章 实时校正的理论和应用		119
6.1	实时校正方法分类	119
6.2	预报误差	121
6.3	预报精度与预见期	123
6.4	误差自回归模型	125
6.5	卡尔曼滤波与马斯京根法结合的实时预报与校正方法	127
6.6	蓄满产流模型的卡尔曼滤波算法	130
6.7	一维非恒定流与卡尔曼滤波耦合的河道实时洪水预报模型	135
6.8	卡尔曼滤波在 ARMA 模型中的应用	139
6.9	时间序列与回归分析法	140
6.10	人工神经网络分析法	142
6.11	集合卡尔曼滤波算法	146
第7章 具有物理基础的分布式流域水文模型		149
7.1	概述	149
7.2	具有物理基础的分布式水文模型的模拟方法	150
7.3	Freeze 和 Harlan“蓝图”模型	152
7.4	SHE 模型系统	155
7.5	MIKE SHE 系统	161
7.6	具有物理基础的分布式水文模型的参数和所需资料	165
7.7	具有物理基础的分布式水文模型讨论	166
7.8	小结	169
第8章 大尺度水文模型 VIC		171
8.1	模型特点	171
8.2	模型结构	171
8.3	参数估计	178
8.4	模型调整	179
8.5	模型应用	180
8.6	小结	186
第9章 SWAT 模型		190
9.1	SWAT 模型的发展和结构简介	190
9.2	SWAT 模型原理	196
9.3	模型参数率定	209

9.4	计算实例	211
9.5	SWAT 模型与 MODFLOW 的耦合计算	215
第 10 章	雷达测雨与数值天气预报	226
10.1	雷达测雨	226
10.2	数值天气预报	238
第 11 章	新安江模型参数自动优化	247
11.1	引言	247
11.2	单纯形算法	252
11.3	SCE-UA 算法	258
11.4	结论与展望	278
第 12 章	水文模型的可靠性分析	281
12.1	不确定来源及量级	282
12.2	模型输出结果可靠性的估计	289
12.3	可靠性分析方法	290
12.4	不确定性的关键来源	299
12.5	小结	300
第 13 章	生态水文模拟	306
13.1	生态水文学简介	306
13.2	植物与水的关系	306
13.3	植被生物物理过程模拟	309
13.4	小结	320

第 1 章 水文模拟与水文模型

1.1 水文模型的发展历史

水文模型一直是水文学研究的热点。水文模型的研究和应用朝着两个明显的方向发展:水文和洪水预报;水文机理研究、气候变化和下垫面变化对水文过程影响等问题。

水文学的产汇流机制的发展经历了两个重要的发展阶段:一是 20 世纪二三十年代霍尔顿产流理论和谢尔曼经验单位线;二是西方国家 20 世纪六七十年代以来开展的野外山坡水文机理实验,揭示了非饱和侧向流、壤中流和饱和地面径流多种产流机制的存在^[1-6]。第一个发展阶段诞生了用于洪水预报的概念性水文模型;第二个发展阶段则不但促进了概念性水文模型发展和研究深化,也诞生了基于物理基础的分布式水文模型。

20 世纪 60 年代起开发了很多水文模型。第一类是研制的用于洪水预报的概念性模型,如美国的萨克拉门特模型(简称为 SAC 模型)、日本的水箱模型、中国的新安江模型、瑞典的包夫顿模型和 MIKE 系列中的 NAM 模型以及 20 世纪 80 年代初期英国为研究产流机制的 TOPMODEL^[1,7]。第二类是根据山坡水文学构造的基于物理基础的分布式水文模型^[5-7]。英国水文学家 Freeze 和 Harlan 在 1969 年提出了分布式水文模型的构造框架:考虑各向异性土壤一、二维产流和三维的地下水及一维具有侧向和下渗的明渠非恒定流模型^[6]。这个框架的实质就是对壤中流采用达西定律和微分形式质量和能量守恒方程。MIKE SHE 就是按照这个框架构造的。

在用于洪水预报的降雨-径流水文模型研究方面,国际上进行了三个比较研究:第一个比较研究是在 1974 年,世界气象组织(WMO)曾对当时有代表性的十个模型进行验证对比,参与对比的模型有概念性模型和黑箱模型,如萨克拉门托(SAC)、坦克、包夫顿以及 CLS 模型等^[1]。20 世纪 90 年代中期,从实时洪水预报的角度对水文模型进行了比较研究。21 世纪,随着计算机与遥感科学的飞速发展,分布式水文模型成为水文学研究的热点,研究出了很多分布式水文模型。如何评价分布式水文模型在水文预报和洪水预报中的应用,是一个需要研究的问题。为此,2002—2004 年,美国天气局水文办公室(National Weather Service, Office of Hydrologic Development, NOAA)组织了该比较研究工作即 DMIP^[8]。参加该比较的分布式水文模型有 13 个,用于洪水预报的有 8 个。

1.2 水文模型分类

有很多为了不同目的而设计的流域水文模型,它们结构相似,因为其基本的假设是相同的,但也有些模型有明显的区别^[9]。流域水文模型可以根据不同的标准分类:按过程分类、按尺度分类和按求解分类,见图 1.2-1~图 1.2-3。

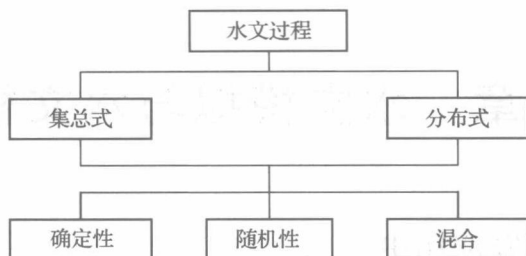


图 1.2-1 水文模型按过程分类

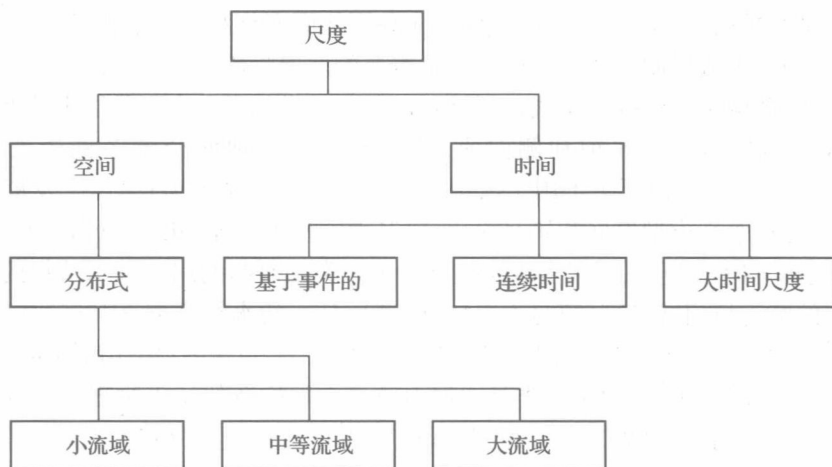


图 1.2-2 水文模型按尺度分类

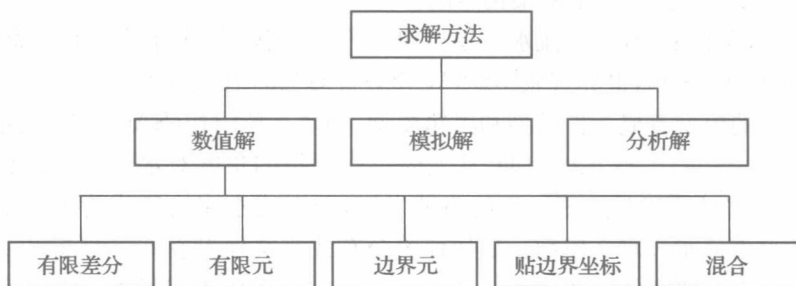


图 1.2-3 水文模型按求解分类

1.2.1 以过程为基础的分类

一个水文模型包括五个部分:流域几何特性、模型输入、控制方程、初始及边界条件和模型的输出。根据模型的类型,这几个部分可以选择性地结合。根据对水文过程的描述,结合流域的特征,模型可分为集总式模型和分布式模型,以及确定性模型、随机性模型与混合模型。

集总式模型可由普通的微分方程表达,但它没有考虑水文过程、输入、边界条件及流

域几何特征的空间变化(见表 1.2-1)。对于大多数的集总式模型,水文过程一些可由基于简化的水力学公式的微分方程描述,另一些则由经验的代数公式描述,如 HEC-1、RORB、SSARR 和 TANK 模型等。

表 1.2-1 集总式和分布式水文模型

输入	系统特征	水文过程	控制方程	输出	模型类型
集总式	集总式	集总式	常微分方程	集总式	集总式
集总式	集总式	分布式	微分方程	分布式	分布式
分布式	分布式	分布式	微分方程	分布式	分布式
分布式	集总式	分布式	微分方程	分布式	分布式

分布式模型的特征是考虑了过程、输入、边界条件及流域几何特征的空间变异性。实际中,由于实测或者实验资料的缺乏,妨碍了分布式模型的使用。在一些情况下,系统特征是集总的,部分过程是集总的,输入及部分边界条件也是集总的,但一些直接联系到输出的环节则是分布的,如降雨-径流过程,该类模型可称为半分布式水文模型。半分布式水文模型是介于集总式模型和分布式模型之间的一种模型,其典型代表是以地形为水文过程空间变异性基础的 TOPMODEL。分布式模型有 SHE、IHM、SWMM 和 NWSRFS 模型。

根据模型的结构,过程描述的模型同样可分为确定性模型、随机性模型和混合模型。

1.2.2 以时间尺度为基础的分类

流域水文模型可以时间尺度为基础进行分类。根据时间尺度,模型可分为:连续时间或事件模型、日模型、月模型和年模型。分类是基于计算的时间段。如果模型结构需要短时间段,如一个小时或更短,便可称为短历时模型。当然,时段的选择是基于模型的需要。

1.2.3 基于空间尺度的分类

基于空间尺度流域水文模型可分为小流域模型、中等流域模型和大流域模型。但对小流域的定义还有些模糊。通常,流域的面积在 100km² 或更小范围内的称为小流域,在 100~1 000km² 的称为中等流域,大于 1 000km² 的称为大流域。这样的定义有时过于概念性和武断,缺乏物理意义。重要的是概念的一致性和水文过程平衡。流域的产流分两个阶段:坡面漫流及河道汇流。每个阶段都有它自己的特点,大流域河网发达,蓄水主要集中在河道,这样的流域对短历时或大强度的降雨不很敏感。相反,小流域主要是坡面漫流,河道调蓄作用小,对大强度、短历时降雨很敏感。

如果认为基于空间尺度的三种类型的流域在空间上相同,就会有相似的水文特性,那么流域的分类就没有实际意义了。在实际中流域很少是各向同性的,所以土壤和土地使用特性很重要,从这个意义上说没有一个流域是小流域。

1.2.4 以求解方法为基础的分类

流域水文模型可根据不同的求解方法和技术分为数值解模型、模拟解模型和分析解模型。其中数值解模型又可根据数学求解方法分为:有限差分模型、有限元模型、边界元模型、贴边界坐标模型和混合模型。

1.2.5 其他分类

1. 基于土地使用类型的分类

基于土地的使用类型,流域水文模型可分为农业地区模型、城市模型、森林及山地模型、沙漠模型、山区模型、沿海模型、沼泽模型与混合模型。很多时候,大流域甚至一些中等流域混合了多种土地使用类型,而这些不同的土地使用情况在水文特性上差别很大。例如,对农业地区的研究就有专门的农业水文学,同样在城市流域有城市水文学,等等。由于每个流域土壤、地质及植被的不同,使水文过程产生很大差异,因此不同土地使用情况的流域模型便有了很大区别。

2. 基于模型使用的分类

流域水文模型基于不同的使用目的可分为规划模型、管理模型和预报模型。一个完备的流域水文模型可以完成规划、管理水资源等多方面的任务,一方面它为管理决策提供系统的分析;另一方面,它提供可靠的流域预报资料来支撑管理决策。规划模型对地理及空间的定义不是十分精确,因此规划模型主要用于分析河网系统的管理策略。规划模型和管理模型最大的特点,是能够为规划者和管理者提供以改善经济为目的再次审视过去的决策而做出的新的决策。

1.3 尺度及其影响^[9]

在水文模拟中一般有五种尺度:实验室尺度、坡面尺度、集水区尺度、流域尺度和大陆及全球尺度。实验室尺度模型使用的流体动力学方程往往是一维的。坡面尺度模型包含了地表径流和壤中流,有时还包含了土壤孔隙中某个方向上的水流,这时需要二维甚至三维的模型。集水区尺度模型在地表径流模拟中加入了地形,在基流模拟中加入了地质特性,通常把集水区划分为各向同性的一个个小部分。流域尺度模型把调蓄和平移机制应用于流域汇流。大陆及全球尺度模型多关注大气过程及其与陆面过程间的相互关系。

尺度及其影响与流域各向异性有关。在小尺度下各向异性比较小,在大尺度下各向异性较大。显然,在大陆及全球尺度下各向异性最大,在实验室尺度下各向异性最小。各向异性由三方面组成。首先,各向异性最主要的来源面是天气、气候、地形、土壤和地质,一个流域响应就是这些因素的组合。其次是不同土壤类型分界、地质上不连续的边界或不同植被的分界。水文因素的不同,如降水、植物截流、蒸发、下渗、基流和径流,加剧了各向差异性。这些因素还包括一些物理特性,如树木、地面的山脊、土壤层表面的凸起、土层的几何特征,等等。

水文模型是用参数描述整个流域过程的,而反映流域特征的数据是在一些点收集到

的,点的数据很难转化成面的数据。由此引起的问题是:什么样的尺度最适合于水文模拟。随着空间尺度由小到大,流域的响应会变得越来越不敏感。一方面,如流域具有较大的各向异性,模型的尺度最好要小。模型的空间尺度由引起水文响应变化的流域的物理、植被和地形特征的变异决定。这样,就可定义一个流域的尺度:一个单元流域或者一个子流域。这个单元流域或者子流域内看做是均匀的。这个尺度不能太小,否则局部的物理特征将控制水文过程;也不能太大,否则将忽略各向异性导致的流域特征的空间变化。最好的流域尺度取决于水文响应过程及可得到的水文数据。

参考文献

- [1] 赵人俊. 流域水文模型:——新安江模型与陕北模型. 北京:水利电力出版社,1983.
- [2] 赵人俊. 水文预报文集. 北京:水利电力出版社,1994.
- [3] 芮孝芳著. 水文学原理. 北京:水利水电出版社,2004.
- [4] 芮孝芳,陈界仁. 河流水文学. 南京:河海大学出版社,2003.
- [5] 芮孝芳. 水文学研究进展. 南京:河海大学出版社,2007.
- [6] 刘新仁,王炳程. 山坡水文学. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.
- [7] KIRKBYM. J. Hillslope hydrology. Chichester: John Wiley & Sons,1978.
- [8] SEANN REED, VICTOR KOREN, MICHAEL SMITH. Overall distributed model intercomparsion project results. Journal of Hydrology, 2004, 298: 1-4, 27-60.
- [9] SINGH V P. Computer Model of Watershed Hydrology. Littleton and Colorado: water Resources Publications, USA, 1996.

第2章 数字流域

流域信息是进行水文模拟的必要信息,提取流域信息是构建现代分布式水文模型、进行水文模拟以及其他相关研究的前提。本章详细介绍基于 DEM 的流域数字化相关算法以及提取流域地貌特征的处理过程,并以此为基础开发流域数字化及地貌特征提取系统,并对算法进行实例验证。

2.1 数字高程模型(DEM)简介

高程常常用来描述地形表面的起伏形态。传统的高程模型是等高线,其数学意义是定义在二维地理空间上的连续曲面函数,当此高程模型用计算机来表达时,称为数字高程模型。数字高程模型是通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟,或者说是地形表面形态的数字化表示,英文为 Digital Elevation Model,简称 DEM^[1]。

2.1.1 DEM 数据类型

20 世纪中叶,随着计算机科学、现代数学和计算机图形学等的发展,出现了数字地形模型 DTM(Digital Terrain Model)。DTM 是利用一个任意坐标场中的大量选择的已知 X、Y、Z 的坐标点对连续地面的一个简单的统计表示,或者说,DTM 就是地形表面简单的数字表示,其本质属性是二维地理空间的定位和数字表达。

DEM 是构成 DTM 的基础,是对地球表面地形地貌的一种离散的数字表示。DEM 由美国麻省理工学院 Miller 和 La Flamme 教授于 1956 年提出,其目的是用摄影测量或其他技术手段获得地形数据,在满足一定精度的条件下,用离散数字的形式在计算机中汇总表示,并用数字计算的方式进行各种分析^[2]。DEM 作为地理信息系统的基础数据,已经在测绘、地质、土木工程、水利、建筑等许多领域得到广泛应用。

显然,DEM 是 DTM 的一个子集,用函数的形式描述为:

$$V_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.1-1)$$

式中, X_i, Y_i 是平面坐标, Z_i 是 (X_i, Y_i) 对应的高程。当该序列中各平面向量的平面位置呈规则格网排列时,其平面坐标可省略,此时 DEM 就简化为一维向量序列 $\{Z_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 。

由于用数字形式表达地形表面,DEM 具有如下显著特点:①容易以多种形式显示地形信息,产生多种比例尺的地形图、纵横断面图和立体图;②精度不会损失;③容易实现自动化和实时化。总之,DEM 具有便于存储、更新、传播、自动化和多比例尺的特性,特别适合于各种定量分析与三维建模^[2]。

DEM 的数据类型一般有 3 种:矢量型、栅格型(Grid)和不规则三角网(Triangulated

Irregular Network, 简称 TIN)。

1. 矢量型

矢量型数据多以地形等高线为主, Moore^[3]认为等值线图(Digital Line Graph)有很大的优势, 因为水流方向垂直于等值线, 故水流方向可简化为一维方程, 它能很好地反映水流方向, 有较高的精度。但矢量型数据比较复杂, 用矢量数据结构许多操作难以实现。

2. 栅格型

栅格型又称正交规则网。栅格型 DEM 数据结构类型具有“属性明显、位置隐含”的特点, 它易于实现, 存储方便直观, 且操作简单, 有利于基于栅格的空间信息模型的运行分析, 但它的表达精度不高, 不容易处理高程的突变, 地形的代表性差, 工作效率较低。要提高表达精度, 就需要更多的栅格单元数据, 这就容易造成栅格数据的冗余, 从而降低基于栅格数据的工作效率, 而要提高工作效率, 又必须减少数据冗余, 因此, 栅格数据结构的应用, 需要根据实际应用采用恰当的精度来平衡栅格数据的表达精度和工作效率两者之间的关系。

3. 不规则三角网

不规则三角网模型能较好地拟合曲面, 插值精度高, 但存储和操作数据不便。

在实际应用中, 这三种描述高程空间数据的类型可通过相关的 GIS 软件相互转换。大部分 DEM 数据都是规则格网 DEM, 但由于规则格网 DEM 的数据量大而不便存储, 也可能由于某些分析计算需要使用 TIN 模型的 DEM, 如进行通视分析等。此时需要将规则格网 DEM 转成 TIN 模型的 DEM。反之, 如果已有 TIN 模型的 DEM 数据, 为满足某种应用的需要, 也需要转成规则格网的 DEM^[4]。

1. 规则格网 DEM 转成 TIN

规则格网 DEM 转成 TIN, 可以看做是一种规则分布的采样点生成 TIN 的特例, 其目的是尽量减少 TIN 的顶点数目, 同时尽可能多地保留地形信息, 如山峰、山脊、谷底和坡度突变处。规则格网 DEM 可以简单地生成一个精细的规则三角网, 针对它有许多算法, 绝大多数算法都有两个重要的特征: ①筛选要保留或丢弃的格网点; ②判断停止筛选的条件。

其中两个代表性的方法算法是保留重要点法和启发丢弃法。保留重要点法是一种保留规则格网 DEM 中的重要点来构造 TIN 的方法。它是通过比较计算格网点的重要性, 保留重要的格网点。重要点(VIP, Very Important Point)是通过 3×3 的模板来确定的, 根据 8 邻点的高程值决定模板中心是否为重要点。格网点的重要性是通过它的高程值与 8 邻点高程的内插值进行比较, 把差分超过某个阈值的格网点保留下来。被保留的点作为三角网顶点生成 Delaunay 三角网。如图 2.1-1 所示, 由 3×3 的模板得到中心点 P 和 8 邻点的高程值, 计算中心点 P 到直线 AE, CG, BF, DH 的距离, 如右图表示, 再计算 4 个距离的平均值。如果平均值超过阈值, P 点为重要点, 则保留, 否则去除 P 点。

启发丢弃法(DH-Drop Heuristic)将重要点的选择作为一个优化问题进行处理。算法是给定一个规则格网 DEM 和转换后 TIN 中节点的数量限制, 寻求一个 TIN 与规则格网 DEM 的最佳拟合。首先输入整个规则格网 DEM, 迭代进行计算, 逐渐将那些不太重要的点删除, 处理直到满足数量限制条件或满足一定精度为止。

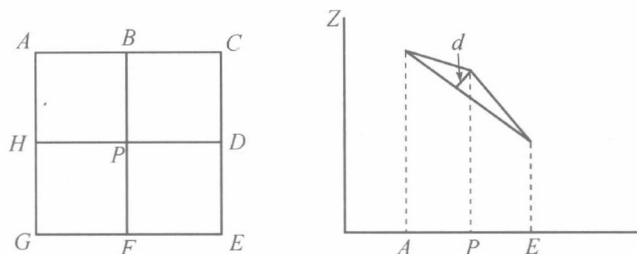


图 2.1-1 VIP 方法示意图

2. 等高线转成规则格网 DEM

表示地形的最常见的矢量模式是一系列描述高程曲线的等高线。由于现有地图大多数都会绘有等高线,这些地图便是数字高程模型的现成数据源,可以将纸面等高线图扫描后,自动获取 DEM 数据。由于数字化的等高线不适合于计算坡度或制作地貌渲染图等地形分析,因此,必须要把数字化等高线转为格网高程矩阵。

使用局部插值算法,如距离倒数加权平均或克里金插值算法,可以将数字化等高线数据转为规则格网的 DEM 数据,但插值的结果往往会出现许多令人不满意的结果,而且转换数字化等高线时越小心,采样点越多,问题越严重。问题不在于计算插值权重系数的理论假设,也不在于平滑等高线是真实地形反映的假设,而在于估计未知格网点的高程要在一个半径范围内搜索落在其中的已知点数据,再计算它的加权平均值。如果搜索到的点都具有相同的高程,那待插值点的高程也同为此高程值。结果导致在每条等高线周围的狭长区域内都具有与等高线相同的高程,出现了“阶梯”地形。当低海拔平原地区等高线距离更远时,搜索到一条等高线上的数据的可能性就越大,问题更严重。以带“阶梯”地形的 DEM 为基础,计算坡度往往会出现不自然的条斑状分布模式(图 2.1-2)。

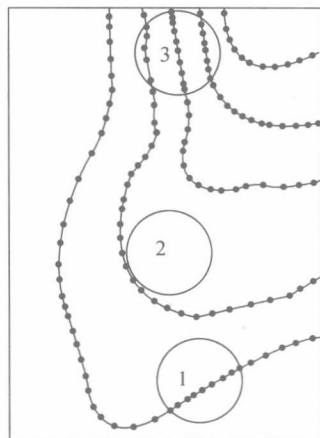


图 2.1-2 等值线插值造成“阶梯”地形

3. 利用规则格网 DEM 提取等高线

在利用规则格网 DEM 生成等高线时,需要将其中的每个点视为一个几何点,而不是一个矩形区域,这样可以根据规则格网 DEM 中相邻四个点组成四边形进行等高线跟踪。其方法类似于后面描述的利用 TIN 提取等高线。实际上,也可以将每个矩形分割成两个三角形,并应用 TIN 提取等高线,但是由于矩形有两种划分三角形的方法,在某些情况下会生成不同的等高线(图 2.1-3),这时需要根据周围的情况进行判断并决定取舍。

在利用规则格网 DEM 提取等高线中,除了划分三角形之外,也可以直接使用四边形跟踪等高线。但是在图 2.1-3 所示的情形中,仍会出现等高线跟踪的二义性,即对于每个四边形,有两条等高线的离去边。进行取舍判断的方法一般是计算距离,距离近的连线方式优于距离远的连线方式。在图 2.1-3 中,就要采用(b)图所示的跟踪方式。

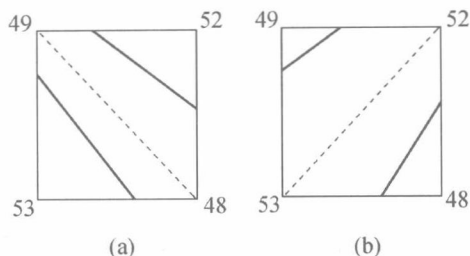


图 2.1-3 由于三角形划分不同造成等高线的不同

利用规则格网 DEM 提取等高线中另一个值得注意的问题是,如果一些网格点的数值恰好等于要提取的等高线的数值,会使判断过程变得复杂,并且生成不闭合的等高线。一般的解决办法是将这些网格点的数值增加一个小的偏移量。

4. TIN 转成规则格网 DEM

TIN 转成规则格网 DEM 可以看做普通的不规则点生成规则格网 DEM 的过程。方法是按要求的分辨率大小和方向生成规则格网,对每一个规则格网搜索最近的 TIN 数据点,按线性或非线性插值函数计算格网点高程。

2.1.2 DEM 数据的生成

为了建立 DEM,必须获得一些点的三维坐标,这就是 DEM 数据的采集。在所有生产 DEM 数据的采集中,最常用的方法目前有两种:插值法和立体影像校正直接生成法。

1. 插值法

插值法主要有两种:等高线插值和点源插值。等高线是数字高程模型的表达方式之一,借助地图输入等高线,插值成不规则三角网,并转换成常用的栅格形式。在插值过程中,当等高线分辨率大于栅格分辨率时,就会让地形产生平滑,极易形成洼地;点源插值是借助 GPS 等设备由测点直接插值成不规则三角网形式的 DEM,并转换成常用的栅格形式。

2. 立体影像校正直接生成法

自动影像校正设备和 Gestalt Photomapper(GPM II)都是非常重要的数字高程模型的生产设备和方法。首先将航空照片以每像素 182mm 扫描,每一点的高程通过视差计算获得。然后重新采样得到所需大小的栅格的墨卡托投影数据。美国国家地质调查局(USGS)用 GPM II 方法来生产空间分辨率为 30m 的 DEM 数据,并以整数的形式发布和存储。这种方法得到的 DEM 数据,在植被覆盖较好地区,常常会产生很多洼地,这些洼地通常出现在相对较平坦的地区,如山谷的底部、平原等^[5]。

2.1.3 DEM 数据的获取

随着网络的普及,当研究区没有现成的地形图和立体图像时,可以从网上方便地下载到各种不同精度的 DEM 数据。

在精度要求不高的情况下,可以从 Internet 下载美国国家地球物理数据中心 NGDC(National Geophysical Data Center)的空间分辨率为 1km 的 DEM 数据(<http://www.>

ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html)。美国联邦地质调查局(USGS, <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/>)提供精度 1km 的 DEM 数据,另外,该网站还提供了 1km 精度的 DEM 相应的流向、坡度、河系等数据,虽然精度相对较低,但是数据获得方便,而且能够满足许多应用需求。

美国联邦地质调查局(USGS)的 DEM 为 ASCII 文件格式,网上下载的数据集为栅格数据文件(.bil)、头文件(.hdr)、坐标系文件(.blw)和统计信息文件(.sta)。地形高程数据以栅格形式、双字节整数和二进制形式存储在 .bil 文件中,.hdr 头文件中有数据行数、列数、空间精度等相关信息,.blw 文件是数据采用的地理坐标信息,.sta 文件中有数据最大、最小、均值等相关统计信息。

在 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)的官方网站(<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>)上可以通过 FTP 免费获取中国境内的 SRTM 文件,其空间分辨率为 90m。

SRTM 以航天飞机为平台对全球进行了同轨干涉(InSAR)雷达立体测绘。下载后的 SRTM 文件有部分点没有高程值,使用前要用 SRTMFill 或者 Matlab 修复空洞,给他们赋值。原始文件是 .flt 格式的,要先用 Global mapper 把它转换成 .dem 格式。SRTM 数据现实性强,精度好,数据质量有了很大的提高。

2.1.4 DEM 在水文上的应用^[5]

DEM 数据的应用可以分为两类,第一类是直接应用,即将 DEM 本身作为测图自动化的重要组成部分和地理信息数据库的基础;第二类是将 DEM 经过某种变换,产生满足专业应用需求的各种派生产品,这是面向用户的间接应用。实际上,第一类应用也是为第二类应用服务的。长期以来,人们已习惯于用等高线、坡度与坡向、剖面、汇水面积和三维透视等派生图形或数据来表达实际地形的各种特征,而产生这些派生产品的过程称为地形分析。地形分析是地形环境认知的一种重要手段,又可分为两大部分:一部分是基本地形因子(包括坡度、坡向、粗糙度等)的计算;另一部分是复杂的地形分析(包括地形特征提取、水系特征分析、道路分析等)。

DEM 特征提取中最重要的有两部分:一是地形特征的提取,二是水系特征的提取。地形特征是指对于描述地形形态有着特别意义的地形表面上的点、线、面,它们构成了地形变化起伏的骨架。地形特征与地形表面的局部特性密切相关,曲线上的点属于哪个特征类,依赖于它周围的曲面结构。地形特征点包括山峰点、谷底点、鞍部点等,地形特征线包括山脊线、山谷线等。地形面状特征包括地面的凹凸性,一般与两个垂直方向的曲率有关。实际上,水系特征与地形特征的提取内容大致相同,因为从物理意义上来讲,山脊线具有分水性,山谷具有合水性,因此提取分水线与合水线的实质就是提取山脊线与山谷线。水系特征分析与地形特征分析的最大不同点之一,就是许多应用中需要分析水系的流域范围,如汇水流域等。

如何从数字化等高线数据和数字高程模型中自动提取其中所隐含的地形特征线来进行地形分析,建立高逼真度的 DEM 和为应用部门提供有关地形特征线的数据,一直是地学工作者面临的一个课题。特别是近年来,随着 GIS 技术的应用与发展,自动从数字化等高线数据和数字高程模型数据中提取地形特征线的方法和技术对于扩充 GIS 系统的