

水电站水库运行调度科学进展 (第3卷)

第届 全国水电站水库 运行调度研讨会 论文集

陈洋波 主编

2005年9月17~19日 · 中山大学 · 广州



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电站水库运行调度科学进展（第3卷）

**第三届
全国水电站水库
运行调度研讨会
论文集**

陈洋波 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书收入第3届全国水电站水库运行调度研讨会论文54篇,分为邀请论文、洪水预报与洪水调度、电力调度与联合运行、水电站运行与管理、流域管理与开发、大坝开发与生态环境影响、水情测报与调度自动化7个部分,全面反映我国近年来在水电站水库运行调度方面取得的最新成果。

本书适于从事水电站水库运行调度管理和实际操作的工程技术人员使用,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

第三届全国水电站水库运行调度研讨会论文集 / 陈洋波主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2005
(水电站水库运行调度科学进展; 第3)
ISBN 7-5084-3244-4

I. 第... II. 陈... III. 水力发电站—水库调度—学术会议—文集 IV. TV737-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第103287号

书 名	水电站水库运行调度科学进展(第3卷) 第三届全国水电站水库运行调度研讨会论文集
作 者	陈洋波 主编
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	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 19.75印张 468千字
版 次	2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	52.00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

序

我国目前大约有 22000 多座大坝水库在运行, 其中大部分水库都设有水电站, 我国水电站水库的数量已跃居世界前列。随着西部大开发的不断深入, 我国一批大型水电站水库相继开工建设, 使得我国成为了世界上最大的水电站水库建设工地。可以毫不夸张地说, 世界水电站水库建设及管理的主战场已转移到中国。

自改革开放以来, 我国在水电站水库运行调度领域已取得了很大的进展, 水电站水库运行调度领域的科学及技术水平已跃居世界前列。为了为我国水电站水库运行调度人员提供一个科学论坛, 报告和交流他们在水电站水库运行调度研究与应用中取得的最新进展, 推广新方法和新技术, 提高我国在这一领域的理论和技术水平, 由我与袁杰等同志共同发起, 于 1996 年 12 月在三峡工程所在地湖北省宜昌市召开了“第一届全国水电站水库运行调度研讨会”, 会前由中国三峡出版社出版了会议论文集《水电站水库运行调度科学进展》(第 1 卷), 收入论文 63 篇。“第二届全国水电站水库运行调度研讨会”于 1999 年在湖北省宜昌市召开, 会议论文集由《人民长江》杂志以增刊形式出版, 为《水电站水库运行调度科学进展》(第 2 卷)。受篇幅的限制, 第 2 卷只收入论文 34 篇。我国一批从事水电站水库运行调度科研、生产和运行管理的领导和技术人员参加了前两届会议, 交流了经验和成果, 对推动水电站水库运行调度的理论发展与新技术应用起到了较大作用, 与会代表们希望将会议办成一个系列会议, 定期在全国各地轮流召开。

自上届会议举办以来的近 6 年时间里, 我国在水电站水库运行调度领域取得了很大进展, 水库水电站在防洪、发电、抗旱、生态环境保护及流域综合管理方面发挥了巨大的作用。为了交流近年来取得的科研、生产、运行管理等方面的成果, “第三届全国水电站水库运行调度研讨会”定于 2005 年 9 月 17~19 日在中山大学举行。为了扩大我国在该领域的国际影响, 加强与国外同行的交流, 决定同时举办“水库调度及流域管理国际会议”。

会议征文通知发出以来, 得到全国相关领域技术及管理人员的积极响应,

会议共收到国内外作者发来的摘要 200 多篇，其中国内代表 100 余篇。经评审，国内代表提交的 70 多篇论文摘要被“第三届全国水电站水库运行调度研讨会”接受，另有部分论文被推荐参加水库调度及流域管理国际会议，用英文撰写，收入国际会议论文集。“第三届全国水电站水库运行调度研讨会”最终收到论文全文 60 多篇，经评审，有 54 篇论文被大会接受，并汇编成论文集，作为《水电站水库运行调度科学进展》（第 3 卷），由中国水利水电出版社出版。另有部分论文，特别是部分特邀报告，因受出版周期的限制未能收入本论文集，将安排在大会上报告。本论文集论文共分为邀请论文、洪水预报与洪水调度、电力调度与联合运行、水电站运行与管理、流域管理与开发、大坝开发与生态环境影响、水情测报与调度自动化 7 个部分，基本上反映了我国近年来在水电站水库运行调度方面的最新成果。

本论文集的出版及本次会议的成功召开是与各主办单位、协办单位及支持单位领导及技术人员的支持分不开的，部分单位还为本次会议提供了经费资助。特别要提及的是组委会秘书处工作人员大部分是在校研究生，为论文集的编辑及本次会议的筹备做了大量工作。中国水利水电出版社的编辑在出版周期非常紧的情况下，为保证论文集在会前出版，放弃了大量休息时间，在此一并表示感谢！

陈洋波

2005 年 8 月 18 日

目 录

序

第一部分 邀请论文

基于 GIS / RS 的分布式入库洪水预报新方法	陈洋波	3
乌江公司流域梯级水电站集中监控体系		16
清江流域梯级水电站调度自动化的实现背景及其意义	谭少华 熊华康	20
水库洪水调度新理论的探索与实践	万海斌 黄金池 何晓燕	25
龚嘴水库运行方式浅析	张祥金	31
飞来峡水利枢纽管理实践	黄善和	36
广州蓄能水电厂在电网中的运行	汪开斌	39

第二部分 洪水预报与洪水调度

实时洪水预报模型在东风水库调度中的应用	王敏 田毛	47
二滩水库防洪调度图的研究与探讨		
..... 程时宏 路效兴 王旭东 胡本健 张敏 谢湘军		53
飞来峡水库预报调度工作探索	虞云飞	59
多普勒雷达及其在广州市三防决策中的应用分析	黎清霞	65
黄柏河流域防洪调度研究	滕燕 高仕春 陶自成	70
浅析富春江水电厂洪水调度特色和防洪效益	黄连成	75
抚河流域洪水预报与水库联合调度系统研究		
..... 黄国如 刘贡 谭国良 万晓明 刘爱樟 尧俊辉 陈耀庭 蒋燕		80
水口水库拦蓄洪尾调度方案	刘会炳	86

第三部分 电力调度与联合运行

清江与三峡梯级水电站联合调度的补偿效益分析	熊华康	93
安康水电站双线性调度规则研究	朱教新	100
乌江流域梯级水电站水库群优化调度探讨	郑惠清 高英	107
基于水资源调控模型的黄河干流梯级水库补偿调度研究		

..... 刘涵 黄强 夏忠 杨建霞	111
综合利用梯级水库群联合调度系统开发	
..... 艾学山 陈森林 梅亚东 朱教新 薛金淮 冉本银	116
水调自动化系统在乌江流域梯级水库优化调度中的应用..... 杜泽新	121
厂内经济运行理论在小水电站应用的研究..... 徐伟 林凝	125
市场环境下水电站中长期风险调度问题研究	
..... 李继清 张玉山 王丽萍 纪昌明	129
浅谈广州蓄能水电厂的水库调度..... 梁莉雪 汪开斌 华丕龙	136

第四部分 水电站运行与管理

具有复杂水流联系的梯级水电站日运行方式研究..... 高仕春 梅亚东 王荣华	143
飞来峡水利枢纽建筑物安全管理..... 黄善和 彭海波 朱劭宇	147
龚嘴水电站 10 号冲砂底孔检修门段修复工程新技术 沈定斌 杨志明	151
飞来峡水库大坝溃坝洪水过程初步分析..... 杨中浦 陈洋波	156
黄河上游梯级水电站综合利用优化调度..... 熊莹 鲍正凤 赵梁明 梅亚东	160
广州多普勒雷达遥测降雨数据同化方法的初步研究..... 徐会军 陈洋波	165
梯级水电站的大规模远程集中控制..... 李泽宏	169
新型简易型水轮机控制设备——TC 型弹簧储能操作器 徐伟 李永国	175

第五部分 流域管理与开发

市场经济下水电调度思考..... 张祥金	183
关于洪水资源化的思考及探讨..... 陶自成 高仕春 滕燕 何彦舫	188
电价对水电流域梯级开发的影响..... 邹光涛	193
天堂山水库调蓄下龙门水资源优化配置研究..... 刘涌辉	199
基于动态前沿生产函数的工业用水边际效益研究..... 武靖源 刘广洲 李建芹	203
水价机制研究及我国水价机制存在的问题分析..... 范群芳 董增川 陈瑜	209
黄河岔巴沟流域数字水文模型研制与应用..... 何姗	214

第六部分 大坝开发与生态环境影响

沮漳河洪水资源化的思考..... 陈崇德 陈志明 陈祖梅 赵华安	221
基于熵模糊模式识别与 FAHP 的区域水污染负荷分配模型	
..... 全菊良 张明 魏一鸣 程吉林	225
考虑下游生态需水要求下的水库优化调度..... 肖益民	230
水库生态调度准则研究..... 殷峻暹 黄德刚	233
水环境污染控制系统模糊规划决策模型..... 郭瑜 陈守煜	239

北大港水库水质咸化机理模拟试验研究
..... 赵文玉 王启山 张国立 吴立波 王秀艳 245
消除北洛河泥沙危害渭河的技术方案分析..... 牛贺道 吴海亮 张有山 250

第七部分 水情测报与调度自动化

乌江流域梯级水电站水库调度和发电运行集中管控模式的实现..... 左天才 257
水调自动化系统的软件构件分析与设计研究..... 李崇浩 纪昌明 缪益平 265
水调自动化系统在长湖水电厂的应用..... 赖广洪 269
自动水务计算在乌江梯级水库调度中的应用..... 肖燕 274
中国水信息网建设现状及设计开发..... 庄承彬 蓝忠华 余杰 280
富春江水电厂水情自动测报系统概况和运用..... 黄连成 285
Visual Basic 6.0 实现天生桥水情自动测报系统水位定时提醒软件简介
..... 刘甯 292
基于 ArcObject 的水源地保护 GIS 系统设计与实现
..... 信昆仑 贾海峰 程声通 297

基于 GIS/RS 的分布式入库 洪水预报新方法*

陈洋波

(中山大学水资源与环境系, 广东广州 510275)

摘 要 本文介绍了应用 GIS 及 RS 技术进行入库洪水预报的新方法。首先介绍了应用 GIS 技术, 根据 DEM 进行流域空间信息处理的方法, 包括流向的计算、子流域的划分、坡度和坡向的计算、流域三维可视化等。紧接着介绍了多普勒雷达在流域洪水预报中的作用及其优势, 包括通过多普勒雷达遥测的降雨回波率进行流域降雨及短历时定量预报等, 然后介绍了分布式物理水文模型的主要特征及方法和国内外代表性的模型。最后, 以流溪河流域为例介绍了应用基于 GIS/RS 的分布式物理水文模型进行入库洪水预报的方法, 计算结果证明该方法是可行的, 计算效果较好。

关键词 入库洪水预报; GIS; RS; 分布式模型; 气象雷达

1 前言

入库洪水预报是水库洪水调度方案制定的重要依据, 入库洪水预报结果的准确与否, 不仅关系到水库洪水调度方案制定的好坏, 从而直接影响到水库本身及上下游的洪水安全; 同时也严重影响到水库汛期发电调度计划的实现, 特别是由于汛期来水量大, 汛期发电量占水库全年发行量的比重一般也较高, 更加准确的入库洪水预报将为水库预报预泄调度的实现、增加发电提供可靠的依据。因此, 入库洪水预报也是关系到水库发电效益的一个重要因素。

目前应用的洪水预报模型主要是集总型模型, 如爱尔兰的 SLM 模型 [1] 和 SMAR [2] 模型, 意大利的 CLS 模型 [3] 和 ARNO [4] 模型, 美国的斯坦福 4 号模型 [5] 和 HEC 模型 [6], 日本的水箱模型 [7] 和我国的新安江模型 [8] 等。

集总型模型由于不能有效处理降雨及流域特性的空间变化, 在洪水预报中存在着一些不可逾越的障碍。一个流域的面积从几百平方公里到几万平方公里不等, 流域的物理特性及降雨量在不同的空间区域上是不同的, 集总型模型将模型参数及流域降雨量在整个流域上进行均化, 因而影响了洪水预报的精度。

另外, 集总型模型均采用一组实测历史洪水过程来率定模型参数, 当采用不同的洪水

* 国家自然科学基金项目“耦合水文气象遥感技术的新一代流域洪水预报方法 (50479033)”, “985 工程”GIS 与遥感的地学应用科技创新平台 (105203200400006) 研究成果。

过程时就会率定出不同的模型参数，给实际使用带来了一定困难。特别是由于人类活动的加剧，流域水文特性发生了一定的变化，用实测历史洪水资料率定的模型参数可能不能代表现在和将来的洪水特性，从而使得模型的预报精度受到影响。

20 世纪 90 年代中期以来，随着气象数字雷达和卫星遥测技术，GIS 技术及互联网技术的完善和高速发展并进入民用科技领域，以及分布式物理水文模型的提出和应用，新型的洪水预报模型应运而生，国外也将这一方法称为新一代洪水预报方法。该方法的特点是以 GIS 技术作为空间信息处理技术，以数字气象雷达测（预）报的降雨作为模型的主要输入量，以分布式物理水文模型作为预报模型进行洪水预报，且分布式物理水文模型的参数不再用实测历史洪水资料进行率定，而直接通过流域物理特性推求。

本文对应用新一代洪水预报方法进行入库洪水预报的方法进行了系统介绍，包括基于 GIS 技术的流域空间信息处理，多普勒雷达测雨技术及其数据同化，分布式物理水文模型的结构及其技术支撑，并介绍了几种国际上较有代表性的分布式物理水文模型。最后，结合流溪河水库，介绍了应用该方法进行入库洪水预报的结果。

2 基于 GIS 技术的流域空间信息处理

GIS（地理信息系统）技术，是一种专门处理空间信息的信息处理技术，该技术的出现，使得流域空间信息的处理变得越来越容易。在流域洪水预报中，GIS 技术主要用于对流域地形地貌、汇流路径、三维可视化等的处理，而所有这些分析计算均是基于流域数字地形高程模型。

2.1 数字地形高程模型

数字地形高程模型（DEM）是描述地面高程空间分布的数学模型，主要有正方形网格模型、非正规三角形模型和等高线模型。

正方形网格模型（Square-grid network）将地表面划分成若干个正方形，以正方形网格的平均高程或中心点高程代表网格的高程。网格模型的优点在于描述简单、计算快捷，便于实际应用，是目前应用最为广泛的数字地形高程模型。图 1 为正方形网格模型示意图，图 2 为在 ArcGIS 中显示的某流域的 DEM。

在流域水文研究中，主要应用的就是基于正方形网格的 DEM，其他类型的 DEM 则应用较少，故在本文中不作介绍。

2.2 流域空间特征分析

在 GIS 技术的支持下，根据 DEM 可以对流域空间特征进行一系列的分析，主要包括流向的计算、子流域的划分、坡度和坡向的计算、流域三维可视化等。

2.2.1 流向的计算

流向的定义为水流从一个单元网格向其相邻网格流动的方向。在正方形网格模型中，

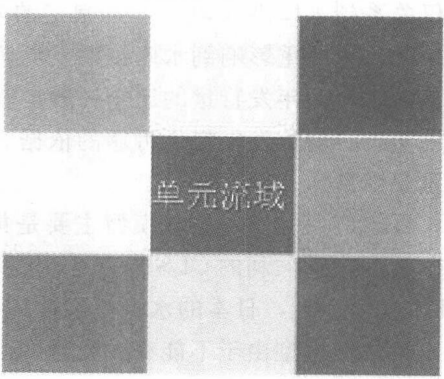


图 1 正方形网格模型示意图

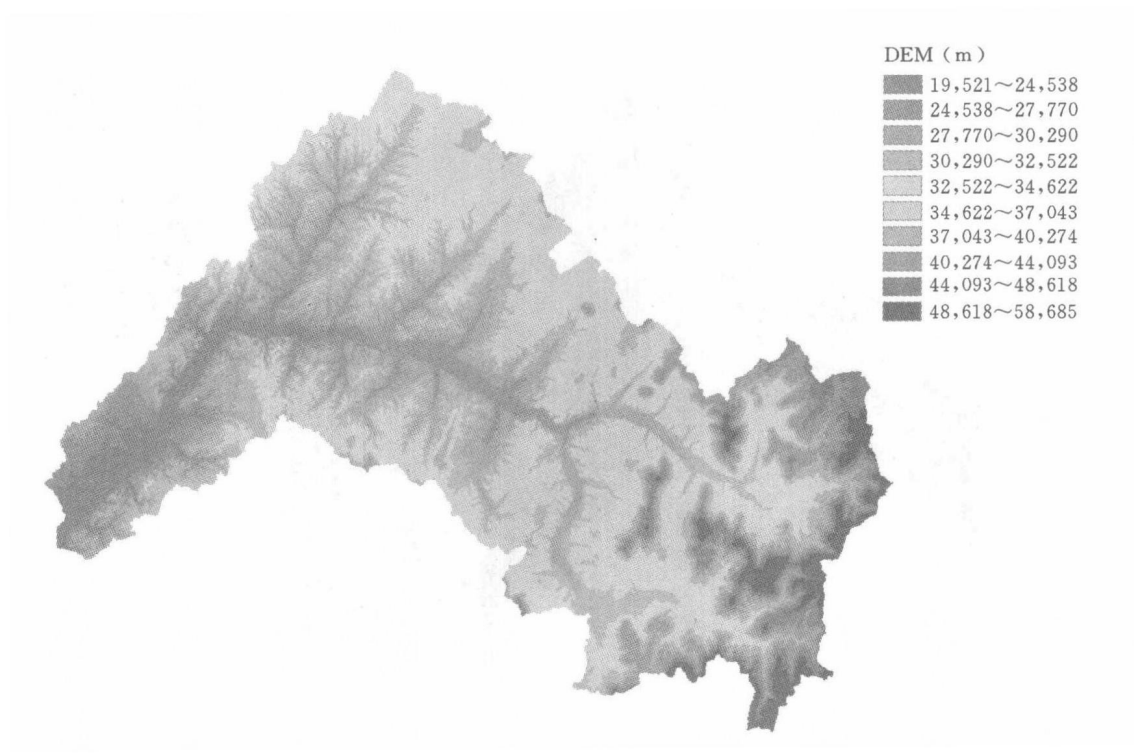


图 2 ArcGIS 中显示的某流域 DEM

水流有 8 种不同的流向，分别用 8 个不同的整数表示，如图 3 所示。流向根据数字地形高程确定，原则是水流向其 8 个相邻网格中高程最低的网格中流去。图 4 为在 ArcGIS 中显示的某流域的流向。

2.2.2 子流域的划分

一个流域上所有单元的流向若用方向线连接起来，即代表了一个流域上所有的水流方向，即通常意义上的河流。但是，这样表示的河网太密，也与实际的河流相去甚远。因此在实际应用中，一般仅将具有一定数量水流的流向作为河流线，与天然河道接近。根据研究工作需要，有时还需将一个流域划分成更小的子流域并确定子流域边界线。

根据流向提取河流线，首先需确定一个子流域面积的边际值 S 或累积流边际值 N ，即只有累积流值大于 N 的流向才标记为河流线，其余的流向则删除，从而得到河网。子流域的划分与 N 值有关， N 值越小，划分的子流域越多。子流域的划分和边界线绘制可根据流向和累积流进行，具体方法可参阅相关文献，图 5、图 6 分别为某流域的子流域和河流线，但两者的 N 值不同。

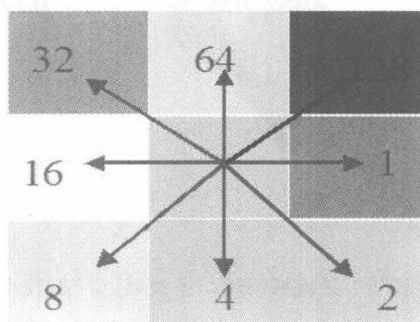


图 3 D8 法流向示意图

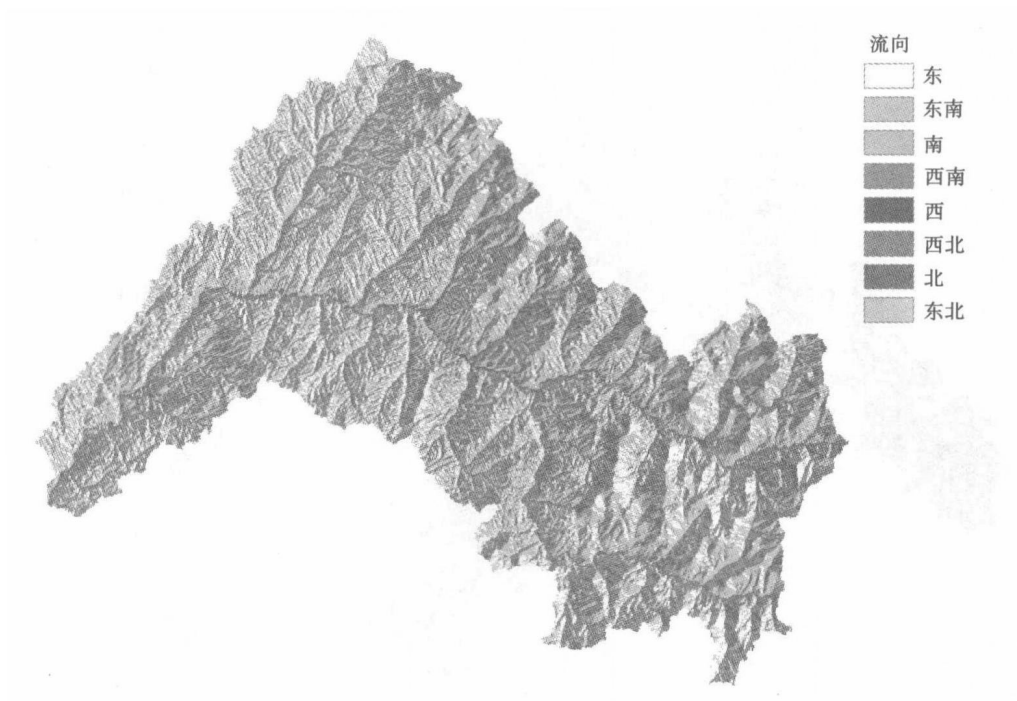


图 4 某流域流向

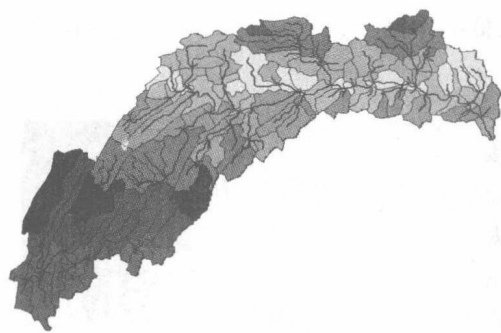


图 5 某流域河网与子流域 (N 值较小)

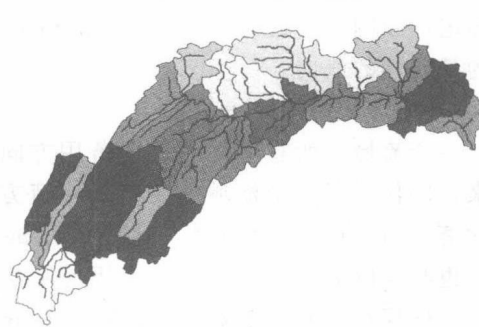


图 6 某流域河网与子流域 (N 值较大)

2.2.3 坡度的计算

坡度为单元网格与其相邻 8 个单元网格中地形变化最大的网格之坡度，即沿流向的坡度，用 0~90 之间的整数表示。坡度在研究水流运动时是一个很重要的参数，不仅影响水流运动的速度，也影响水流运动的长度，图 7 为某流域的坡度。

2.2.4 流域三维可视化

根据 DEM，采用 GIS 技术，可以对流域进行三维可视化及从多方向、多角度对流域进行三维显示。图 8 为某流域三维可视化图。

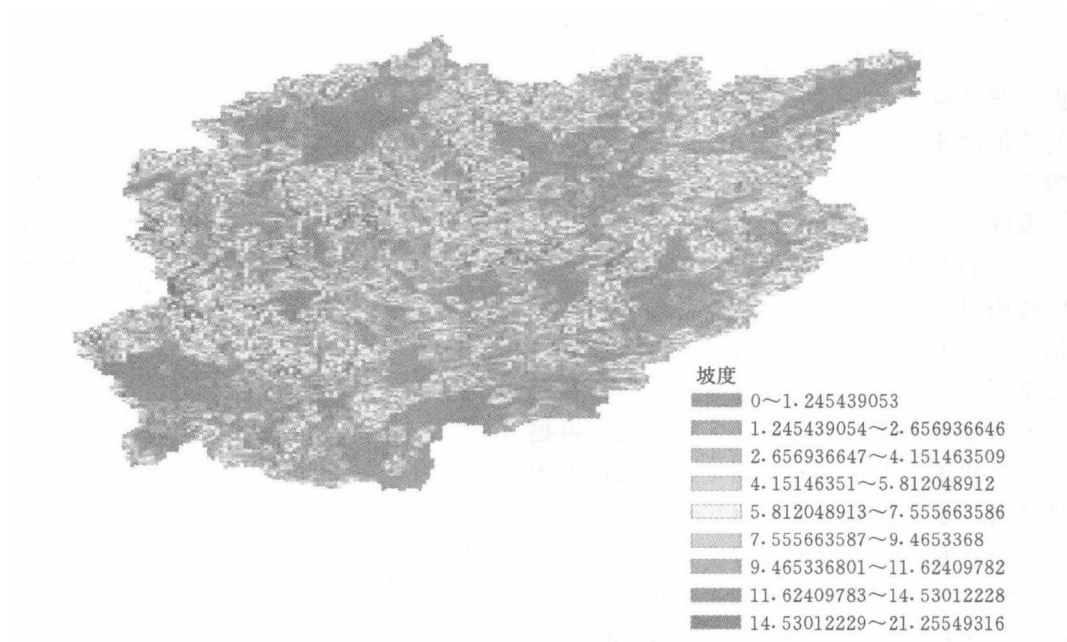


图 7 某流域的坡度

3 基于气象雷达的数值降雨测(预)报

多普勒数字气象雷达 (Weather Surveillance Radar—88Doppler, 简称为 WSR—88D) 是由美国大气及海洋管理局 (NOAA) 所属的国家气象局 (NWS) 研究开发的新一代数字气象雷达, 可以在任何气象条件下以 1km^2 的空间分辨率进行气象参数遥测, 其覆盖范围以雷达为中心、半径为 230km 的圆形区域, 测报的时间间隔为 $5\sim 6\text{min}$ 。根据《我国新一代天气雷达监测网站点布局方案》, 我国将在全国建设 126 部多普勒天气雷达, 构成我国新

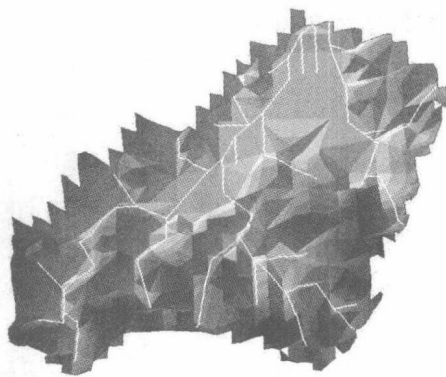


图 8 某流域三维可视化图

一代天气雷达探测网。这些站点的探测范围基本上覆盖了我国沿海、沿江、沿河等地区。图 9 为广州新一代多普勒雷达某时刻的测雨回波图。

通过多普勒雷达遥测的降雨回波率可以估算流域的降雨量及进行短历时的降雨量预报, 详细方法可参阅有关文献, 图 10 为通过多普勒雷达降雨回波率估算的某流域降雨量。

与常规的地面雨量站测雨相比, 多普勒雷达测雨的主要优点包括如下 4 个方面。

(1) 多普勒雷达可测报高分辨率的降雨量。地面雨量站的架设受到流域自然条件及成本的限制, 不可能建设得太多, 因而其测报的雨量分辨率往往在几百平方公里。对于人烟稀少的高山地区, 分辨率甚至达到上千平方公里, 即在上千平方公里范围内只有一个雨量站。而多普勒雷达可测报 1km^2 的降雨量, 相当于 1km^2 就有 1 个雨量站。由于降雨精度

的提高，相应洪水预报的精度也将大大提高。

(2) 可进行中小尺度的数值降雨预报。可根据多普勒雷达测报的气象要素，进行中小尺度的数值降雨预报，分辨率达到 1km^2 ，预见期增加 3~5h。精度和分辨率较基于气象卫星的数值降雨预报结果有明显提高。

(3) 多普勒雷达可提供恶劣气象条件下可靠的降雨量。在恶劣气象条件下，尤其是大暴雨情况下，地面雨量站容易受到干扰和破坏，往往难以提供可靠的降雨量测报数据，给暴雨洪水的预报带来极大的困难。多普勒雷达可提供恶劣气象条件下可靠的降雨量，因而可大大提高暴雨洪水预报的精度和可靠性。

(4) 可对中小尺度的灾害性天气系统进行监测。对台风、暴雨等大范围强降水天气的监测距离可超过 400km，能够明显改善对热带气旋或台风登陆位置及强度预报的准确性，尤其对中小尺度的灾害性天气（局地强暴雨、冰雹龙卷、雷暴大风等）能进行有效监测，如对龙卷气旋的提前预警平均时间可由 2min 提高到 18min，对小尺度强对流天气如冰雹云的有效监测和识别距离大于 150km，并显著提高短期和短时天气预报的能力。

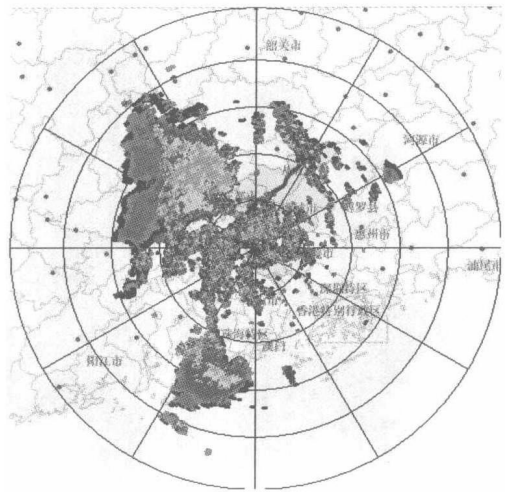


图 9 广州多普勒雷达某时刻的测雨回波图

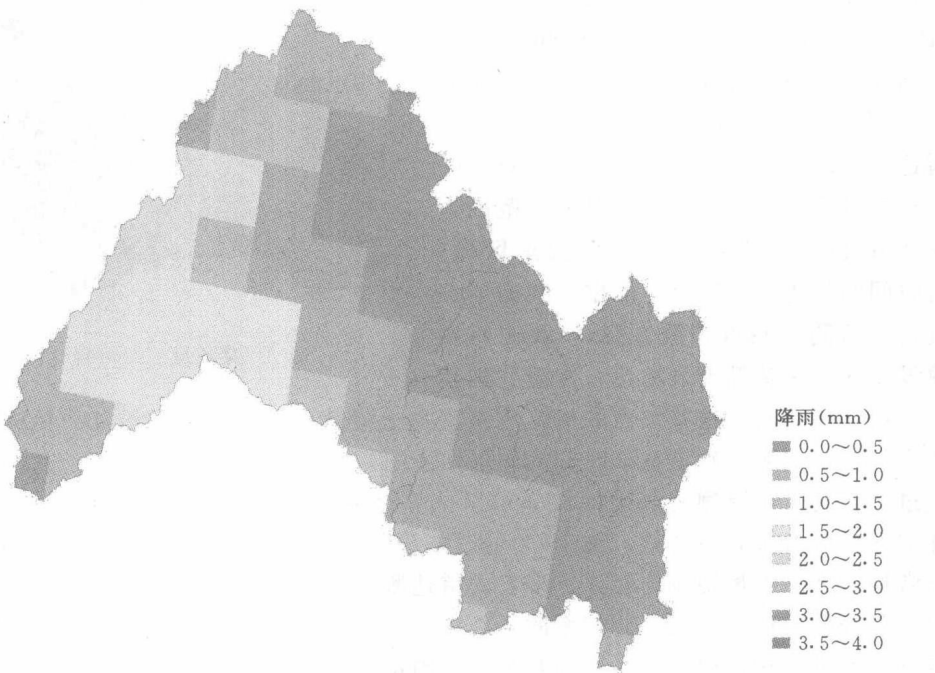


图 10 某流域多普勒雷达估算降雨量

4 分布式物理水文模型

4.1 分布式物理水文模型的一般结构

分布式物理水文模型的基本特征是，沿水平方向将流域按 DEM 划分为很多个单元，每个单元被认为是一个独立的“子流域”，称为单元流域。径流首先在单元流域上产生，然后通过汇流网络汇流到流域出口，单元流域通过汇流网络相联结，汇流网络由流向确定，如图 11 和图 12 所示。

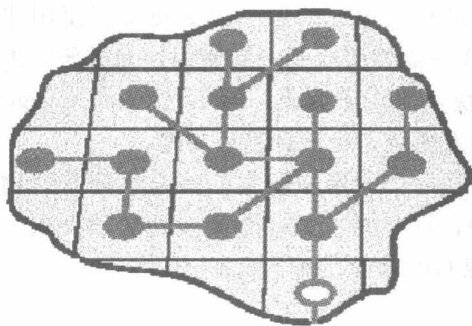


图 11 流域沿水平方向划分

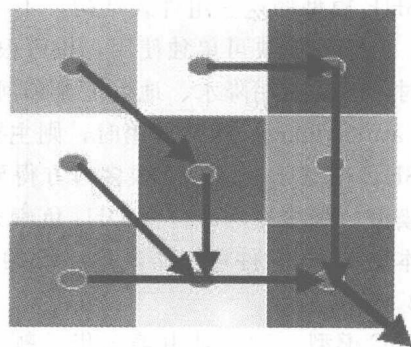


图 12 单元流域通过汇流网络联结

每个单元的物理特性可以各不相同，可以通过遥感遥测得到流域的物理特性数据，如降雨、植被（土地利用）、土壤类型、树叶面积等。

对流域的每个单元流域沿垂直方向分成若干层，多数分为 3 层，主要包括冠层、不饱和层和饱和层。不同模型分层不同。

在分布式物理水文模型中，参数主要是通过单元流域的物理特性推求，不是通过历史洪水数据率定，不同的模型参数推求方法不同。

分布式物理水文模型的主要特点是基于格网的流域划分，可以充分考虑流域物理特性空间分布的不均匀性。采用基于格网的多普勒雷达测雨作为模型输入量，可充分考虑降雨在流域空间分布上的不均匀性。可模拟水流在流域各网格上的运动，实现完全透明的洪水模拟。

分布式物理水文模型由于可以充分考虑流域物理特性空间分布的不均匀性和降雨的时空分布，在进行洪水预报时，可以提高洪水预报的精度，增加洪水预报的预见期，还可以预测洪水在整个流域内的发生、发展过程，从而可以提供流域内更加准确的洪灾信息，为防洪救灾方案的制定、防洪救灾物资的输送提供依据。这是集总型模型无法做到的。

4.2 国外代表性的分布式物理水文模型

4.2.1 SHE 模型

世界上第一个完整的分布式物理水文模型——SHE（Systeme Hydrologique Europeen）模型 [9, 10]，于 1986 年正式发表，是由丹麦水利研究所（Danish Hydraulic Institute, DHI）、英国水文研究所（Institute of Hydrology）和法国 SOGREAH 咨询公司联