

芮孝芳 著

水文学

RESEARCH
ADVANCES
IN HYDROLOGY
研究进展

河海大学出版社

RESEARCH
ADVANCES
IN HYDROLOGY

水文学 研究进展

芮孝芳 著

河海大学出版社

内 容 提 要

本书是作者从事水文学科学研究 44 个春秋所取得的主要成果的汇编,共分为五篇,内容包括:水文学的发展、机遇、前沿科学问题;水文学的研究方法;新兴的水文学分支学科;产汇流理论;流域水文模型;水文分析与计算;水文预报;水质模型;人类活动对水文水资源的影响等。本书贯穿着创新思维,给人以启迪,可供从事水文学及水资源、水利工程科学、地球、地理科学、环境科学等的科学研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校水文学及水资源专业和其他相关专业的本科生、硕士研究生和博士研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水文学研究进展 / 芮孝芳著. —南京: 河海大学出版社, 2007. 6

ISBN 978-7-5630-2389-9

I. 水... II. 芮... III. 水文学—文集 IV. P33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007) 第 098808 号

书 名 水文学研究进展

书 号 ISBN 978-7-5630-2389-9/TV · 289

责任编辑 马文潭

特约编辑 陈秋莎 马 黎 王晓华

责任校对 江 南 吴 兵 陈文礼

装帧设计 书衣坊

出 版 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 江苏省新华书店

印 刷 南京工大印务有限公司

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 24.75 印张 618 千字

版 次 2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

定 价 100.00 元

前言

大体上形成于17世纪中叶的水文学已不算年轻,但在很长的时间里,它却没有一个公认的学科定义,直到1964年,才由著名水文学家 Ven Te Chow 在其所著《应用水文学手册》一书中给出了世界上第一个公认的水文学定义:“水文学是一门论述地球上水的来源、循环和分布,水的化学和物理性质,以及水与包括生命在内的环境之间的相互作用的科学。”由此定义可以看出,在当时的经济、社会背景和科技发展水平下,水文学主要涉及自然科学领域,这可称为水文学的“一元论”定义。从20世纪70年代起,由于世界范围内洪涝、干旱灾害频发,水资源紧缺和水环境恶化逐渐显现出来,故水文学的重要性随之提升,内涵不断延伸,于是水文学家就在前述水文学定义之后加上了“为洪涝、干旱灾害的防治,水资源的合理开发利用和水环境保护提供科学依据”一段话。这就表明,水文学这时已成为一门不仅涉及自然科学领域,而且涉及技术科学和应用科学领域的学科,这是水文学的“二元论”定义。当人们试图用可持续发展的发展观来审视水文学时,发现作为水文学研究的“水”,不仅具有自然属性,而且具有社会属性。因此,到了20世纪90年代,水文学的定义就进一步表述为:“水文学是一门论述地球系统中水的来源、运动、循环,水的时空分布,水的社会属性,水与生态和环境的相互作用,为洪涝、干旱灾害的防治,水资源的合理开发利用,生态系统和水环境保护、修复提供科学依据的学科。”认为水文学是经济社会可持续发展的重要支撑学科之一。至此,人们有理由认为现代水文学已经发展成为一门既属于自然科学范畴——地球科学的一个分支,又属于技术科学范畴——水利科学的一个分支,同时又与社会科学中经济、法律和管理科学有着密切关系的学科,即水文学已有了“三元论”定义。水利科学家和工程师要研究水文学,地理、资源和环境科学家也要研究水文学,与水资源开发利用和水环境保护有关的经济、法律工作者和管理科学工作者也需要熟悉水文学。

现在呈现在读者面前的这本《水文学研究进展》,是我44年来从事水文学研究的主要记录。由前述可知,现代水文学是博大精深的,它像浩瀚的大海,虽然曾经努力拼搏,但我十分清楚,我对水文学所作的研究仅仅是沧海一粟!本书

由既独立成篇、又相互联系的 50 篇论文组成,其中一些在收入本书时作了修改与补充,还有一些反映作者新近研究成果的论文是第一次与读者见面。本书对水文学的前沿科学问题、水文学的研究方法、水文学的新的分支学科、水文分析与计算、水文预报、水质模型和人类活动的水文效应等虽均有所涉及,但重点部分是我对水文学核心内容之一的产汇流理论和流域水文模型的研究心得。

在产流理论方面,本书用“界面超渗”或“微分厚度土层水量平衡”统一了 Horton 产流理论和 Dunne 产流理论,指出在一定的下垫面条件下产生什么样的径流成分将随降雨强度和历时而相互转化。界定了流域产流量的概念,指出它是在产流物理条件支配下产生的超渗地面径流、地下水径流、壤中水径流和饱和地面径流中从流域出口断面流出并可测得的那部分降雨产流量。通过包气带水量平衡分析得知流域产流量的形成只有两种情况:一种情况是与降雨强度无关,另一种情况是与降雨强度有关。蓄满产流可以是“三水源”和“二水源”,也可以是“一水源”;超渗产流可以是“一水源”,也可以是“二水源”。流域蓄水容量曲线和下渗容量面积分配曲线只适用于降雨空间分布均匀时的流域产流量计算。采用数字高程模型(DEM)、遥感和雷达测雨等技术支撑下的网格法才能直接、有效地处理降雨和下垫面条件空间分布不均对流域产流量的影响。

在洪水演算理论方面,本书探讨了水文学途径和水力学途径的物理联系和各自的适用条件。完善了扩散波洪水演算法。深入研究了运动波方程差分分解的数值扩散问题,深化了对 Muskingum 法的理论理解,采用与以往不同的方法给出了该法参数 X 与特征河长的理论关系,推导出了新的连续演算汇流系数公式,从物理意义和数值计算稳定性两方面论述了参数 X 应满足的条件。基于运动波方程差分分解的数值扩散原理研制了两个具有一定预见期的洪水演算方法。将时间序列最优化控制理论引入洪水演算,建立了可以考虑回水顶托和直接对水位进行演算的洪水演算方法。采用水文学与河流动力学相结合的方法使冲淤变化河道的洪水演算精度有所提高。

在流域汇流理论方面,本书通过对流域汇流现象的微观观察,将流域上承受的一场降雨视作为无数“水滴”的随机降落,然后基于概率论建立了不同于由连续介质力学描述的流域汇流理论。证明了平均流域汇流时间就是流域滞时。基于 DEM 提出了“网格水滴”和“几何路径”的概念,从而建立了不同于 Rodriguez-Iturbe 以“无网格水滴”和“状态路径”为基础的地貌瞬时单位线理论。构建的由概率组合、地貌扩散和水动力扩散卷积和“网格水滴”汇集得出地貌单

位线的方法,促进了缺乏水文资料 and 人类活动影响情况下流域汇流计算方法的发展,此外,指出了传统的单位线法和等流时线法均为“网格水滴”法在一定条件下的特例,还对基于“网格水滴”可以回避单位线的流域汇流计算方法进行了探索。通过对流域汇流现象的宏观考量,得到了概念性流域汇流计算方法的理论体系,给出了推导概念性流域汇流模型瞬时单位线的普适性方法。指出在 Rodriguez-Iturbe 地貌瞬时单位线理论中,当采用单参数指数函数作为等待时间概念密度时,其效果是与概念性流域汇流计算方法等价的。用随机系统理论考察流域汇流是一种新的视角,当降雨为白噪声和 Markov 过程时,导出了流域瞬时单位线与流域出口断面流量过程线统计特征值之间的理论关系,针对 Nash 模型给出了仅根据流域出口断面流量资料确定其参数的方法。基于地下水动力理论,构建了地下水的流域汇流模型,证明了它是由一系列蓄量常数呈等比级数递减且具有不同输入的线性水库并联而成,现行用一个线性水库来模拟地下水的流域汇流只是一种近似。为适应地下水流域汇流计算通常以日平均流量作为输出结果,建立了时均单位线的概念,导出了地下水流域汇流的时均单位线表达式。

在流域水文模型方面,本文通过引入河网水力学原理,将新安江模型用于感潮流域的降雨径流模拟。指出按实测资料采用率定方法反求模型参数的做法,由于参数之间存在互补性或目标函数可能具有多极值,将导致“异参同效”现象的出现,并且提出了一些避免“异参同效”的思路和方法。基于概念性集总式流域水文模型难以适应降雨、蒸散发和下垫面条件空间分布不均对产汇流影响的事实,在认识到 DEM 重要作用的前提下,建议建立基于水文学理论的网格型结构的分布式流域水文模型,并且在所指导的博士生学位论文中得到初步实现。

出版本书旨在汇报研究心得,活跃学术气氛,接受各方指教。

芮孝芳

2007 年春节于南京

目 录

前 言

第一篇 水文学的发展与研究方法

水文学的发展及其所面临的若干前沿科学问题·····	3
中国的主要水问题及水文学的机遇·····	11
河流水文学若干研究领域的回顾与展望·····	18
环境水文学的产生与发展前景·····	23
数字水文学的萌芽及前景·····	28
水文学的研究方法与理论创新·····	35

第二篇 产汇流理论

降雨产流机制几个问题的讨论·····	45
流域产流量的形成及计算·····	51
国外汇流理论研究进展·····	59
线性时不变汇流系统的初步研究·····	80
扩散波和线性扩散波方程解析解的应用·····	90
线性扩散波方程的级数解及其应用·····	98
运动波数值扩散与洪水演算方法·····	105
Muskingum 法及其分段连续演算的理论探讨·····	113
再论 Muskingum 法·····	120
具有预见期的洪水演算方法·····	127
考虑汉道串联和支流汇入的感潮河段的洪水演算·····	133
多支流河道洪水演算方法的探讨·····	140
基于时间序列分析最优控制理论的洪水演算方法·····	149
地貌瞬时单位线研究进展·····	156
对地貌瞬时单位线理论的若干评论·····	163
流域汇流的概率论体系探讨·····	169
由流路长度分布律和坡度分布律确定地貌单位线·····	175

基于地貌扩散和水动力扩散的流域瞬时单位线·····	181
由 SSNs 构建流域地貌瞬时单位线的研究·····	187
基于网格水滴的流域汇流计算方法·····	193
利用地形地貌资料确定 Nash 模型的参数·····	201
确定 Nash 模型参数的地貌学与最优化原理相结合的方法·····	206
仅依据汇流系统出流资料确定 Nash 模型的参数·····	211
按随机系统理论确定 Nash 模型参数的研究·····	217
地下汇流模型及其应用·····	223

第三篇 流域水文模型

流域水文模型研究中的若干问题·····	231
流域水文模型精度验证及进一步发展模型的建议·····	236
滁河流域洪水模型·····	248
感潮流域水文模型·····	255
流域水文模型的发展·····	262
分布式水文模型的现状与未来·····	268

第四篇 水文计算与水文预报

中国大坝建设的水文水利计算综述·····	277
长江下游感潮河段大洪水和特大洪水的形成及趋势·····	313
预估水文要素长期变化的分解式模型适用性初探·····	318
关于设计洪水频率分析中几个问题的讨论·····	323
平原感潮河网区城市设计洪水位的确定方法·····	333
感潮河段设计洪水位的推求·····	340
洪水预报理论的进展及现行方法的适用性·····	345
考虑回水顶托影响的水位预报方法·····	352
冲淤河道水位预报方法·····	357

第五篇 水质模型及其他

官厅水库水质模型·····	367
完全混合水体总磷的随机模型·····	372
论人类活动对水资源的影响·····	378
略论现代治黄中需要研究的几个问题·····	384
后记·····	386

Contents

Preface

Part I Development and Research Methods of hydrology

Advances in hydrology and some frontier problems	3
Major water-related problems in China and opportunities for hydrology	11
Retrospect and prospect for some research fields of river hydrology	18
Formation and prospect of environment hydrology	23
Seeds and prospects of digital hydrology	28
Research methodology and theory innovation of hydrology	35

Part II Theories of Runoff Yield and Concentration

Discussion of some problems on mechanism of runoff yield	45
Formation and calculation of watershed runoff yield	51
Research advances of runoff concentration theory	59
Elementary study of linear time-invariant runoff concentration system	80
Diffusive wave and application of analytical solution for linear diffusive wave equation	90
Progression solution for linear diffusive wave equation and its application	98
Numerical diffuseness of kinematic wave and flood routing method	105
Some theoretical studies on the Muskingum method and its successive routing in subreaches	113
More discussion on Muskingum method	120
A study of flood routing method with forecast period	127
Flood routing of tidal river reach with branching channels and lateral inflow	133
Investigation on flood routing method for multi-branch rivers	140
Flood routing method based on time series analysis and optical-control theory	149
Some advances in geomorphologic instantaneous unit hydrograph theory	156
Some reviews on theory of geomorphologic instantaneous unit hydrograph	163
Study of mechanism of watershed concentration flow based on probability theory	169
Study of determining geomorphologic unit hydrograph by means of probability density functions of path length and slop	175
Watershed geomorphologic instantaneous unit hydrology (WGIUH) by means of geomorphologic and hydrodynamic dispersion	181

Construction of the basin geomorphologic unit hydrograph from self-similar networks(SSNs)	187
Theory of watershed flow concentration based on "Grid Drip"	193
A study on determining the parameters of the Nash model using geomorphologic data	201
Application of approach to geomorphology combined with optimal principle in determining parameters of Nash model	206
Determining parameters of Nash model only according to outflow data of the concentration flow system	211
Determining parameters of Nash model based on stochastic system theory	217
Groundwater flow concentration model and its application	223

Part III Watershed Hydrologic Models

Some problems in research of watershed hydrological model	231
Verification of accuracy of watershed hydrological models and suggestions of further developing models	236
Rainfall-runoff flood routing model of Chu river basin	248
A hydrology model of tidal watershed	255
Development of watershed hydrologic models	262
Today and future of distributed hydrologic models	268

Part IV Hydrologic Calculation and Forecasting

Reviews on hydrologic calculation of building dams in China	277
Formation and change trend of large flood in the lower tidal reach of Yangtze River	313
On suitability of division models for long-term prediction of hydrologic elements	318
Discussions of some problems on frequency analysis in design flood	323
A method for determining design flood level for cities in tidal stream crisscrossed area in plain	333
Estimation of design flood level of tidal river reach	340
Advances in theories of flood prediction and suitability of existing methods	345
Study of water level forecasting model with backwater effect	352
A model of stage forecast for scouring and silting channel	357

Part V Water Quality Models and Some Other Problems

Water quality simulation for the Guanting reservoir	367
Research on stochastic model of total phosphorus in uniformly mixed system	372
On the impact of human activities to water resources	378
Some problems on water resources management of Yellow River watershed	384

Postscript	386
------------------	-----



第 一 篇

水文学的发展与研究方法

DEVELOPMENT AND RESEARCH METHODS OF HYDROLOGY

水文学的发展及其所面临的 若干前沿科学问题

摘要:通过回顾水文学的发展史,指出客观上总是存在着两条相辅相成、互相促进、不断提高的水文学发展轨迹。通过归纳水文学至今取得的主要学术成就,认为物理学的渗透和本构关系的揭示是水文学理论进步的重要条件。当今水文学面临的若干困惑,主要来自对其本构关系的研究相对薄弱,由此凝炼出水文学的前沿科学问题主要是:非线性问题、尺度转换问题、空间变异性问题、坡面流速问题、确定性与随机性互补问题、水文时间序列长期演变规律问题、“异参同效”问题、预测模型问题、时空探源问题和误差问题等。加强或重视对这些前沿科学问题的研究,将会有力地促进水文学的理论和应用水平的不断提高。

关键词:水文学;本构关系;非线性;尺度转换;空间变异性;确定性;随机性;异参同效

水文学的现状如何?它正处在什么发展阶段?是什么阻碍着它的进一步发展?如何减少水文学方法对资料的依赖程度,即在资料短缺情况下如何使用水文计算方法或水文模型?突破点在哪里?换言之,水文学的前沿科学问题是哪些?这不仅关系到对水文现象规律性的进一步探索揭示,而且也影响到对实际生产中所遇到的难题的进一步解决。这显然是科学家和工程师们都十分关注的问题。

1 水文学的发展轨迹

水文学的发展与人类对水的认识和需求密切相关。人类对水的认识的不断加深,以及对水的需求方式的不断拓展,使得水文学的研究领域不断延伸与丰富^[1]。在人类社会发展的早期,人们试图通过建造水利工程来防治水害,获取水利,因而工程水文方面的内容得到了发展,并于20世纪30年代至60年代得到快速发展,形成了分支学科“工程水文学”。当人类社会进入20世纪70年代以后,由于经济迅猛发展和人口快速增长,各种自然资源出现了不同程度的紧张局面,水资源的供需矛盾显得更加突出,于是一个专事水资源供需预测、合理开发、优化配置和有效管理的水资源水文研究方向因此而迅速发展起来。与此同时,由于经济发展模式上的不合理,出现了严重的环境污染问题,水环境污染首当其冲。这不仅进一步加深了水资源的紧缺程度,而且危及到经济社会的可持续发展。在此背景下,旨在为水环境保护和修复寻找良策的环境水文研究方向应运而生。水文学的分支学科“水资源水文

学”和“环境水文学”几乎在 20 世纪 70 年代同时形成。长期以来,由于呈加剧趋势的水污染和水资源紧缺程度,已越来越明显地影响到一些地方的生态系统和安全,保护生态系统安全和生物多样性已成为人类面临的重要任务。与之相应,近 10 年来,生态水文学^[2]得到较快发展,成为水文学新的分支学科。

如果说人类对水的认识和需求支撑着上述应用水文学的发展轨迹,那么科学和技术的发展为人们探索、揭示自然界水文现象的规律性和解决应用水文学中各种实际问题提供了理论和方法。事实必然是,人们欲通过上述应用水文学认识自然、改造自然,达到与自然和谐共处的目的,就必须借助于科学理论和技术来探索、揭示水文现象的规律性。因此,在水文学的发展过程中,必定存在着与上述应用水文学发展轨迹相辅相成、互相促进的另一条理论水文学的发展轨迹。19 世纪,牛顿力学体系的确立为水文学奠定了力学基础^[4]。此后,科学和技术的进步都会对水文学的发展产生影响。动力水文学^[3]是应用水动力学和热力学揭示水文规律的水文学分支学科。系统水文学^[4]是借助于系统论和控制论处理水文问题的水文学分支学科。随机水文学^[5]是依赖概率论、随机过程论和时间分析技术探讨水文规律的水文学分支学科。数字水文学^[6]是基于数字化技术分析水文规律和进行水文模拟的水文学分支学科。实验水文学^[7]是应用科学实验方法揭示水文规律的水文学分支学科。尤其值得一提的是,物理学对水文学的渗透是近 30 年来水文学发展的一个亮点。物理学对水文学的每次渗透都会对水文学理论创新产生重要影响,典型的例子有:1979 年 Rodriguez-Iturbe 等人^[8]借助于统计物理学理论建立了地貌瞬时单位线理论;1986 年 Abbott 等人^[9]应用连续介质力学理论建立了一个具有物理基础的分布式水文模型,即 SHE 模型;1991 年 Rinaldo 等人^[10]基于扩散理论构建了新的地貌瞬时单位线表达式。1998 年 Reggiani^[11]将热力学系统理论引入水文学,建立了基于代表性单元流域(REW)的水文模型,强调了物理定律和流域水文本构关系在水文建模中各自的重要作用。

水文学始终沿着上述两条相互关联的轨迹处于不断的发展之中,其总和就是一部水文学的发展史。

2 现行水文学的理论支撑

水文学作为一门独立的学科,旨在探索和揭示自然界水文现象的规律性,即水文循环各子过程及其相互关联、陆地水体中水的运动和变化、水文要素的长期演变,以及水文过程与生态环境、人类活动之间的相互作用等,通过认识自然界水文规律,为人类控制洪水与干旱、开发利用水资源和保护生态与环境提供科学基础和技术方法,达到人与自然和谐之目的。经过 300 余年的发展,水文学无论在理论上,还是在应用上均有了长足的进步。是什么理论支撑着水文学发展到今天这样的水平呢?或者说,现有的水文学理论是建立在什么样的基础上的呢?现初步归纳如下^{[1],[12]}:

(1) 质量守恒定律——水量平衡和其他物质,如泥沙、氮、磷、碳等平衡的基础。这种平衡关系既可表达成微分方程式,也可针对有限空间和时间来建立。

(2) 能量守恒定律——能量平衡和热量平衡的基础。这种平衡关系既可表达成微分方程式,也可针对有限的空间和时间来建立。

(3) 牛顿三大定律——描述和分析不同介质中水流运动的基础。

(4) 叠加性和均匀性原理——线性系统输入与输出之间定量表述的基础。

(5) “门槛”效应——分析下渗、蒸散发和产流等水文现象,寻求其定量计算方法的基础。

(6) 统计综合——定量分析各种因果关系最初等的方法,直观、简单而常用。

(7) 随机独立性假设——现行水文频率分析和地貌瞬时单位线理论的前提,也是使用统计试验法分析本构关系的前提。

(8) 平稳性假设——利用水文时间序列自身演变规律推测其未来变化的基础。

(9) 重现性假设——以历史上发生的大洪水作为设计标准和以长系列操作结果作为设计依据的基础。

(10) 空间分布均匀性假设——将流域作为整体研究,即不考虑气象条件和下垫面条件空间分布不均匀影响的基础,也是由“点”水文要素通过简单方法换算成“面”水文要素的依据。

(11) 相似性假设——假设气候条件相似和几何相似,即水文过程相似。这是将一个流域的水文规律如何移用至另一个流域的基础。

上述所列之前三项,属于已经证明的物理学规律,表明了物理学对水文学的深刻影响。可以预示,随着科学的发展,物理学必然会更加广泛而深刻地影响着水文学。其余各项则属于目前对水文本构关系的认识。从哲学观点看,这些项几乎都是线性思维的产物。事实反复证明,它们只有在一定条件下才是正确的,而对于其他情况则是近似的,甚至是必须有所突破才能使水文学获得进一步的发展。这些有待突破的方面就应是水文学的前沿科学问题。

3 水文学的前沿科学问题

3.1 非线性问题

科学发展到今天,非线性至少有三种含义:

(1) 数学上的含义。在代数学中称变量之间的直线函数关系为线性关系,对这种关系的偏离称为非线性。在数学物理方程中,称未知变量及其导数为一次方且其系数与未知变量无关的微分方程为线性微分方程,否则为非线性微分方程。在概率论中,若随机变量之间相互独立,则表现为线性关系,否则表现为非线性关系。

(2) 系统论中的含义。凡既满足均匀性又满足叠加性的系统称为线性系统,否则为非线性系统,其中不满足均匀性但满足叠加性的称为第一类非线性系统;两者均不满足的成为第二类非线性系统。

(3) 非线性科学中的含义。相互联系的事物之间不只是存在着一方受到来自其他方的影响,而是相互影响、相互制约、相互依存,这就是非线性科学的实质。非线性科学是一个正在发展的科学体系,目前主要包括:研究自相似性的分形理论,研究内随机性的混沌理论和研究耗散结构的熵原理等。

从非线性如此多的含义足见其极端的复杂性。在现代科学中,非线性似乎已成为复杂性的同义词。

水文过程存在非线性的根源之一是其内部的相互作用,包括发生在同一介质中和不同介质中各种现象之间的相互作用;根源之二是外部条件如流域水系、地形地貌、地表覆盖、气候要素和人类活动等的复杂影响,至于其余的根源还有待人们进一步去解释。

3.2 尺度转换问题

这个问题的实质是如何揭示不同尺度条件下发生的同一水文现象之间的相互关系,诸如数学关系、统计关系或物理关系等^[13]。

(1) 流域面积及其他流域地形地貌参数有真值吗?这个问题的起因类似于“英国的海岸线有多长?”这样一个问题。由于对同一比例尺的地形图,采用不同分划单位,所得的结果不一样,对相同的分划单位,采用不同比例尺的地形图,所得结果也不一样,这样就会提出一个问题:在推求流域面积和其他流域地貌参数时应拟定一个作为基准的地形图比例尺,并应给出由其他比例尺地形图得到的数值订正到该基准的方法。

(2) 在相同气候条件下,同一水文要素在不同流域上的表现是否存在转换关系呢?例如,两个形状、水系、坡度分布、覆盖情况完全相同、仅面积大小不相同的流域,它们的瞬间单位线或时段单位线可以相互转换吗?一个流域的点产流量对流域面积的积分能等于该流域的总产流量吗?它们之间存在何种定量关系呢?

(3) 即使对均匀介质,由不同尺度得到的同一水文参数相同吗?相互之间可以转换吗?例如:实践已揭示,即使对于均质土壤,由小尺度土块测得的水力传导度与由大尺度土块测得的水力传导度并不相同,在相同的土湿条件下,前者则远大于后者。

上述列举的尺度转换问题对水文学是一种严重挑战。由于我们解释水文规律总是首先针对一定尺度的流域的,而不可能对地球上所有的大小流域都设站进行水文观测,因此,这种挑战必然给我们探求无资料流域的水文规律和计算方法带来极大的困难。

3.3 空间变异性问题

“点”与“面”水文过程之间之所以存在差异,除了上述尺度转换这一原因外,还由于降雨和下垫面特征的空间分布不均匀^[14]。例如,产流面积的变化就是由于存在降雨和下垫面特征的空间分布不均匀;一个流域的流域单位线不惟一,除了非线性作用外,由流域单位线的定义可知,还与净雨的空间变异性有关。

水文要素或特征值或参数的空间变异性通常表现为分区性、非分区性和空间随机性。分区性是指区域性或地带性,区域与区域或地带与地带之间的变化是不连续的。非分区性是指随空间位置呈连续变化的特性。空间随机性是指空间分布具有随机性。不同表现形式的空间变异性,应该使用不同的处理方法。

遥感、雷达和GIS等新技术虽为探测降雨、地形、地貌、土壤和地面覆盖等空间变异性提供了有效工具,但仍有许多具体问题有待解决。例如,如何使这些新技术所测与直接测定法所测精度相同就是一个值得探讨的问题。

3.4 坡面流速问题

核心问题是如何确定流速公式的形式。对于明渠水流,如河流、湖泊和水库中的水流,其运动主要受来自其内部的相互作用的支配,现已建立了一套可用于解决实际问题的理论

和方法,例如 Chezy 公式或 Manning 公式。对于多孔介质水流,例如土壤孔隙中的水流,其运动主要不是受来自其内部的相互作用的支配,而是受其周围固体边界之影响。Darcy 的试验证明,在这种情况下, Chezy 公式或 Manning 公式不再适用,而必须采用 Darcy 公式。坡面水流则具有特殊性。由于微地形和地面覆盖的复杂性,坡面好似不平整的“地毯”,一定坡面水深以下的水流与多孔介质水流相似,而一定坡面水深以上的水流则表现为明渠水流。坡面水流的这种复杂性使得坡面流速的问题至今悬而未决,以致一定程度的阻碍了流域汇流理论的发展与实用化。

此外,多孔介质水流扩散机理与明渠水流扩散机理的区别,也是值得探讨的问题。

3.5 确定性与随机性互补问题

在过去相当长的时期内,人们总是将确定性与随机性看作是对立的。统计力学的出现第一次对此提出了挑战!通过物理实验得出的气体状态方程是一个确定性定律,统计力学则在考察气体分子的独立随机运动的基础上,借助于概率论中的大数定律也导出了这一气体状态方程。这一事实说明了一个现象,它所表现出的确定性一面和随机性一面不是对立的,而是互补的。

半个世纪以来,水文学中出现了三件值得重视的事件:一是根据流域水系形成的随机模型证明了从实践中总结出的 Horton 地貌定律;二是地貌瞬时单位线理论的出现^[8];三是“参数水文学”与“随机水文学”关系的揭示^[16]。这三件事改变了人们认为水文确定性和水文随机性是对立的看法。

研究表明,水文确定性与随机性的互补至少可以体现在下列几个方面:

- (1) 从微观上考虑表现出随机性,但从宏观上考量却表现出确定性。
- (2) 确定性现象也包含着内随机性,即具有“蝴蝶效应”的混沌性。
- (3) 大量随机性之总和可表现出确定性,这就是大数定律所揭示的。

随机微分方程理论、随机系统理论和贝叶斯理论的出现^{[18],[19]},为人们处理确定性与随机性的互补关系,或者说统一处理一个事物在发展过程中所表现的确定性一面和随机性一面,提供了有力的工具。

由此还不难看出,所谓误差实时校正技术在理论上存在的缺陷,随着研究的深入,对这一“过渡性”的技术将可能与上述理论归于统一。

3.6 水文时间序列的长期演变规律问题

支配水文时间序列的长期演变的原因或者说驱动力是什么?这是水文学家长期不得而知的一个问题,也是中长期水文预报理论和方法长期没有实质性进展的根本原因。

虽然人们早就认识到水文要素是气候条件和下垫面条件的综合产物,但由于这两个条件既存在自然演化过程,又存在受到人类活动影响的一面,尤其是下垫面条件极易受到人类活动的影响。因此,解释水文时间序列演变必须从探索其自然演化规律和人类活动影响两方面入手。

遗憾的是,人们至今不但还不能掌握水文时间序列的自然演化的驱动因子或其演化规律,就连人类自身引起的问题,也因为其相当无序而无法确切地掌握。例如,人们在地球上许多地方不约而同地发现,近 10 多年来,气温虽有所上升,但水面蒸发却在减少,这一“蒸发