

水问题的复杂性与 不确定性研究与进展

● 夏军 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水问题的复杂性与 不确定性研究与进展

主 编 夏 军



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水问题的复杂性与不确定性研究与进展/夏军主编.
北京:中国水利水电出版社,2004
ISBN 7-5084-2575-8
I. 水... II. 夏... III. 水文学—研究 IV. P33
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 129475 号

书 名	水问题的复杂性与不确定性研究与进展
作 者	夏军 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) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
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 29.75 印张 705 千字
版 次	2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷
定 价	80.00 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

编 委 会

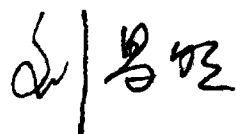
顾 问	刘昌明	汪集旸	张勇传	
主 编	夏 军			
副主编	张 翔	宋献方		
委 员	吴运卿	陈晓宏	刘苏峡	雒文生
	张文华	郑红星	梅亚东	谢 平
	宋星原	王中根	张士锋	于静洁
	高彦春	姚治君	李 兰	陈庆美

序

水文水资源与水环境模拟、预测和管理中的复杂性与不确定性是水问题研究中众所周知的科学难点问题。当今国际水文科学发展较快且研究十分活跃。20世纪90年代后期，国际水文科学协会（IAHS）召开了一系列强调水文变化的不确定性概念的学术研讨会。面对21世纪新的水问题需求，IAHS倡导并成立了十年科学计划（2003~2012年）——短缺资料地区的水文预报研究（PUBs）。在中国，由于地域广阔，七大江河及中国内陆地区的水文循环机理比较复杂，土地利用和土地覆被等人类活动进一步影响了水循环的空间格局，洪水、干旱、水资源安全和与水相关的生态环境保护与恢复等问题也面临不确定性等难题。

长期以来，中国水文水资源学者坚持对水科学不确定性问题的研究。河海大学、四川大学、西安理工大学、武汉大学等单位在随机水文学、模糊水文学与灰色系统水文学等理论与方法的探索，为现代水科学不确定性研究开拓了新的思路和途径。面对水文科学研究和国家“水问题”需求所提出的一系列新的机遇和挑战，需要进一步完善和发展水文学的理论和方法，深入认识变化环境中的水问题的复杂性，减少水文不确定性。2004年12月18~19日，由中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室、武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室、中国自然资源学会水资源专业委员会等主办的中国水问题研究论坛第二届学术研讨会，以探索水问题的复杂性与不确定性为主题，追踪国际PUBs研究前沿，广泛探讨水文水资源与水环境模拟、预测、评价与管理中的不确定性，反映了中国科技人员近期在水问题复杂性和不确定性研究领域的最新研究成果，对推动水科学不确定性问题研究理论与方法的革新、解决水问题和水资源可持续发展具有重要的

科学意义和实用价值，特此为序。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized characters followed by a vertical line and the characters '昌明'.

中国科学院院士
国际地理联合会 (IGU) 副主席
中国地理学会副理事长

2004 年 11 月

前 言

武汉大学和中国科学院于 2002 年共同发起了中国水问题研究学术论坛的建议后，全国首届水问题研究学术研讨会于 2003 年 11 月 20~22 日在湖北武汉举办，会议取得圆满成功。其目的和宗旨是：结合国际水科学发展前沿、中国社会经济发展的迫切需要，开展水问题及其相关领域的基础理论研究、应用基础研究以及新技术、新产品的开发应用研究学术交流，为我国水科学领域的科研人员、大专院校师生、决策和管理人员提供一个专业论坛平台。中国水问题研究论坛将邀请国内外知名专家学者作专题学术报告，定期举办国内或国际学术研讨会。

2004 年 12 月 18~19 日，由中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室、武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室、中国自然资源学会水资源专业委员会、武汉大学水问题联合研究中心组织，在北京举行了以探索水问题复杂性与不确定性为主题的第二届全国水问题研究学术研讨会。会议收到了来自国内有关高等院校、科研机构、管理机构论文 100 余篇，经过审稿，本书收录了 60 多篇学术论文，其内容涉及到国际水文科学协会（IAHS）十年科学计划（2003~2012 年）——短缺资料地区的水文预报研究（PUBs）、水文水资源与水环境模拟、预测、评价与管理中的复杂性与不确定性、实践与应用等各个领域。

本次全国水问题研究学术研讨会追踪现代水文水资源与水环境理论发展的领域前沿，以探索水问题的复杂性与不确定性为主题，旨在反映我国科技人员近期在水问题复杂性和不确定性研究领域的最新研究成果，推动水科学不确定性问题研究理论与方法的创新，为认识我国旱涝灾害规律、保障水资源安全，实现水资源可持续发展贡献力量。

本论文集的出版得到了中国科学院地理科学与资源研究所、武汉大学等单位的支持。国内一批专家参加了论文的审稿。中国水利水电出版社邓群、张洁等同志为论文集的出版付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢。

由于时间有限，特别是水平所限，书中难免存在错误。欢迎作者和读者不吝赐教。

编者

2004 年 11 月

目 录

序 前言

第一部分 水科学不确定性研究的回顾与展望

现代水文学的发展与水文复杂性问题的研究	夏 军 (3)
相对模糊集理论、模型与方法——模糊水文水资源学数学基础	陈守煜 (19)
游程数目的统计分析原理	马秀峰 (27)
大尺度下水安全问题探索	丁 晶 王文圣 黄伟军 朱 兵 (36)
水文学研究：数学方法应与水文物理实际相结合 ——对刘光文教授临终遗言的体会	王国安 (42)
中国 PUB 研究与发展	杨大文 夏 军 张建云 (47)
华南地区枯水径流时空变异性研究的不确定性方法初探	陈晓宏 涂新军 (55)
黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析	牛玉国 张学成 (63)
基于灰色微分动力系统的年径流数值预报研究	沈 冰 李荣峰 (71)
松辽流域水文生态分区评价及生态需水类型分析	陈敏建 丰华丽 王培英 戴向前 王立群 郭 方 (76)
长江流域雨水资源利用问题	陈 进 黄 薇 (84)
水文频率分析研究的若干进展与展望	陈元芳 陈其幸 李国芳 (90)

第二部分 国际水文科学协会 (IAHS) 十年科学计划 (2003~2012 年) ——缺乏资料地区水文预报的不确定性研究 (PUBs)

无资料地区水文研究的途径探讨	夏 军 谈 戈 (101)
分布式水文模型用于黄河流域水资源评估中的 不确定性分析	杨大文 李 翀 倪广恒 胡和平 (108)
变化环境下非一致性年径流序列的通用水文频率计算方法	谢 平 夏 军 (117)
分布式水文物理模型研究中的参数确定和模型验证	刘志雨 (124)
黄河源区 PUBs 问题研究	李丹颖 刘昌明 牛存稳 (132)
GLUE 方法及其在水文不确定性分析中的应用	莫兴国 刘苏峡 (143)

三水源新安江模型异参同效现象的研究	熊立华	郭生练	(151)
数值预报降雨的不确定性定量研究初探	沈铁元		(156)
智能水文模拟研究现状与展望	张翔		(162)
温榆河上游流域的洪水模拟及不确定性分析	唐莉华	张思聪	吕贤弼 (168)

第三部分 水文水资源评价、模拟与预报中的不确定性研究

探索水资源不确定性问题的新途径——网格平台	程春田		(177)
小波分析在水文水资源中的应用研究	王文圣	熊华康	丁晶 (182)
水库功能复核和不确定性分析	易松松	郭生练	田向荣 刘攀 (190)
复合信息提取流域特征及其应用	李丽	郝振纯	王加虎 (196)
海河流域多年持续干旱特征分析	尹雄锐	张翔	王晓妮 (206)
降雨和蒸发序列的联合随机模拟方法研究	李德	谢平	尹雄锐 (212)
博斯腾湖防洪工程设计水文风险分析			左其亭 (219)
晋江流域年径流统计特性分析与预测	马富明	陈元芳	(226)
嘉陵江流域长期水文定性预报研究			王渺林 (230)
水文序列时间变异综合诊断方法研究			
——以潮白河流域为例	陈广才	谢平	李德 朱勇 (235)
洞庭湖区洪涝灾害时空变化规律研究			毛德华 (243)
SCE-UA 算法在 TOPMODEL 参数优化中的			
应用研究	马海波	张文明	董增川 梁忠民 (254)
概率统计在确定城市居民生活用水定额中的应用			边际 (262)
北京市历史时期旱涝灾害的特点与规律分析	张利平		牛存稳 (270)
北山修建核废物库对额济纳旗地下水资源安全运行			
的潜在危害	陈建生	汪集旻	赵霞 盛雪芬 顾慰祖 苏治国 (277)

第四部分 水环境模拟、预测与评价中的不确定性研究

三峡库区二维随机水质模型研究	徐敏	曾光明	刘鸿亮	许其功 (289)
季节调整在水质不确定性分析中的应用	熊樱	曾光明		黄国和 (299)
香溪河流域污染负荷预测模型研究及应用	王祥三			李重荣 (304)
三峡水库调度对洞庭湖氮沉降临界负荷及其可能性风险的影响				
.....	李倩	曾光明	张硕辅	焦胜 朱华 王玲玲 熊樱 (310)
湖泊富营养化随机评价方法研究	谢平	朱勇	陈广才	李德 叶爱中 (316)
区域旅游开发中生态环境保护的				
不确定性研究	杨馥	曾光明	焦胜	刘鸿亮 (322)
非点源污染数学模型的研究现状和展望	张永勇	张广义		张翔 (327)

武汉市桃花岛分布式降雨非点源

污染研究	刘华祥	张万顺	叶 闽	杨国胜	肖 彩	(333)
基于 GIS 的水质预警预报系统						
研究与应用	张艳军	彭 虹	张万顺	肖 彩	黄燕华	(338)

第五部分 实践与应用

水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术	葛守西	程海云	李玉荣	(347)
延河流域雨洪特性及洪水预报				
方案研制	何娟娟	李怀恩	秦 毅	刘宏勤 张 强 (356)
TOPMODEL 模型及其应用	张成才	陈秀万	郭长松	(363)
基于改进 BP 网络的洪水预测模型研究		刘冬英	宋星原	(371)
感潮河段多时段水位预测的线性神经网络方法		艾学山	王先甲	(378)
中长期水文预报的相空间相似法	张利平	王德智	牛存稳	(384)
时间序列分析法在中长期水文预报中的应用		万东辉	张利平	(390)
水文中长期预报理论		李秀斌	范垂仁	(395)
水资源经济学研究进展与展望		黄 浩	邓 群	(399)
产权约束下的水资源系统分析			黄伟军	(406)
土壤水研究进展		孟春红	夏 军	(412)
小流域地下裂隙潜流对降雨入渗补给的响应特性研究 ..	曹建生	刘昌明	张万军	(418)
华北平原浅层地下水位下降因素分析			费宇红	(426)
三工河流域生态需水与水资源配置	占车生	丰华丽	陈 嘻	刘苏峡 (433)
流域水资源评价广义指标体系研究		黄 薇	陈 进	(440)
黄河流域水资源量特点			张学成	(447)
太行山低山区刺槐林土壤水分动态变化规律研究	杨 帆	马中秋	张万军	(453)
后记				(461)

水问题的复杂性与不确定性研究与进展

第一部分

水科学不确定性研究 的回顾与展望

现代水文学的发展与水文 复杂性问题的研究*

夏 军^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室)

1 现代水文科学的发展

水文学是地球科学的一个重要分支,它是一门研究地球上水的起源、存在、分布、循环和运动等变化规律,并运用这些规律为人类服务的知识体系。从水文学服务和应用的实际问题看,它关系到与社会经济发展和人类生存密切相关的水多了(洪水灾害)、水少了(干旱缺水)、水脏了(水环境及生态环境)和水资源是否可持续利用的水文学基础和对策管理问题。水文学覆盖面之广、联系领域之多,说明了它的重要性和应用价值。

从国际水文科学研究与进展而言,特别是20世纪90年代以后,联合国教科文组织(UNESCO)、国际科学联盟理事会(ICSU)、国际水文学协会(IAHS)和世界气象组织(WMO)等实施了一系列国际水科学计划,如国际水文十年(IHD)、国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、全球能量和水循环试验项目(GEWEX)、国际地圈生物圈计划(IGBP)。IGBP是国际地球科学交叉研究重大的科学计划之一,代表世界地球科学发展的前沿与趋势,其核心项目“水文循环的生物圈方面(IGBP-BAHC)”是专门研究水与生态作用规律的科学计划,受到国际地球学科、水文学科、生态学科广泛的注目与国际性的参与。当今,IGBP的前沿问题更加突出了与人类生存与发展密切联系的基础科学与需求问题,即“碳循环、水循环和食物纤维”问题。水科学发展前沿问题突出反映在:水文循环的生物圈方面,自然变化和人类活动影响下的水资源演变规律,水与生态环境、社会经济相互作用影响,水资源可持续利用的水文科学基础问题等。

1.1 国际地圈生物圈计划(IGBP)

水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带。一个区域的水文循环规律及其变化决定了该地区水资源的多少。因此,水文循环科学研究是水资源评价、水资源持续

* 基金项目:本文研究成果得到中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-317/CX10G-E01-08),国家自然科学基金项目(50279049, 50239050)资助,一并感谢。

作者简介:夏军(1954.9~),男,1991年被评为武汉大学教授,2000年入选中国科学院“百人计划”,兼任国际水文学协会(IAHS)副主席等职。主要研究方向:水文水资源、系统水文学。

利用的重要科学基础。传统的水文循环只要考虑水量的自然变化,现代水文循环需要考虑地球生物圈、全球变化以及人类活动等方面的影响。国际地圈生物圈计划(IGBP)代表国际地球学科发展前沿,而水文循环的生物圈方面(Biospheric Aspects of Hydrological Cycle,简称BAHC)是国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心项目之一。BAHC是一项水文科学与生态环境科学交叉研究的国际重大前沿项目,受到国际地球科学、水文科学和环境科学的高度重视。BACH研究水文循环与地圈、生物圈和全球变化交互作用基础问题,注重陆面生态—水文过程与空间格局的变化规律和受人类活动影响的关键问题,着眼于科学地解释:植被是如何与水文循环的物理过程相互作用的?改变陆面生态过程的直接原因是什么?是大尺度人类活动改变了陆面覆盖,还是大气中二氧化碳浓度增加的缘故?这些影响变化的水文后果是什么?通过BAHC研究,为评估自然变化和人类活动对水文循环及水资源的影响,人类对生物圈的影响,保护环境和资源可持续利用提供科学的基础依据。进入21世纪,水资源短缺已成为影响国家食物安全、社会稳定的重要因素之一。全球碳循环、水循环、食物—纤维成为国际IGBP即将启动的3个关键联合项目。国际水循环—食物—纤维和中国西部开发问题被列入了2001年CNC-IGBP国家报告的核心内容。根据21世纪IGBP发展方向,BAHC也相应地进行了调整,主要有以下8个专题:①小尺度水、热、碳通量研究;②地下过程作用的评价;③陆地—大气相互作用的参数化;④区域尺度土地利用与气候的相互作用;⑤全球尺度植被与气候的相互作用;⑥气候变化和人类活动对流域系统稳定与传输的影响;⑦山区水文学与生态学;⑧开发全球数据集。两个交叉专题:①设计、优选和实施综合的陆地系统实验;②情景发展与风险/脆弱性分析。2002年以后,IGBP-BACH进入新的调整,开展面向全球水系统的研究。提出了“全球水系统项目”(GLOBAL WATER SYSTEM PROJECT,简称GWSP)研究计划。2003年召开了GWSP科学大会。它有5个核心主题,即:①入海径流变化趋势(Trends of Runoff to the Oceans);②影响全球不同尺度河流情势变化的关键因素(Key Factors Defining the State of Drainage Basins across the Global);③全球尺度水系统评价的工具与数据集(Tools and Data Sets for Global-Scale Assessment);④全球水系统变化的主要影响与反馈(Major Impacts and Feedbacks of GWSP Changes);⑤变化环境的全球水系统主要弹性与适应性(Major Resilience and Adaptability of the GWSP to Change)。

1.2 国际水文计划(IHP)

联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)是由世界各国政府组织参加、在国际上有重要影响的水科学及其相关的水资源和环境科学的大型国际研究计划。从1965~1974年联合国科教文组织实施国际水文十年(IHD)计划后,IHP已经执行了5个阶段:第一阶段(1976~1980年)着重人类活动影响,水资源与自然环境之间关系的研究;第二阶段(1981~1985年)着重于把研究领域扩大到各个特定的地理、气候区域,并向着综合利用水资源的水问题方向发展;第三阶段(1986~1990年)定名为“为经济、社会发展合理管理水资源的水文学和科学基础”,除继续把水文科学作为重点外,把计划内容扩大到合理管理水资源;第四阶段(1991~1995年)研究计划重点是“大气—土壤—植被”之间的水循环关系,全球气候变化对陆地水文过程的影响;第五阶段(1996~

2001 年) 方向是“脆弱环境中的水文水资源开发”。第五阶段由 3 个模块、8 个主题和 31 个计划项目组成。模块一是资源过程与管理研究, 包括: 主题 1-全球水文和生物化学过程, 主题 2-地表生态过程, 主题 3-有风险的地下水资源, 主题 4-水危机与冲突地区的水资源管理战略; 模块二是区域研究, 包括: 主题 5-干旱、半干旱地区的水资源综合管理, 主题 6-热带地区水文学与水管理, 主题 7-都市地区水的综合管理; 模块三是知识、信息和技术的转化, 它包括主题 8-知识、信息和技术的转化 (KIT)。进入 21 世纪 IHP 新的第 6 阶段 (2002~2007 年) 方向确定为“水的相互作用: 来自风险和社会挑战的体系”。主要的不同点是需要考虑下面若干方面新的研究与挑战的问题, 即: 地表水与地下水、水文循环的大气与陆地部分、淡水与咸水、全球化的流域与河流尺度、质与量、水体和生态系统、科学与政治、水与文化。它由 5 个主题组成: 主题 1-全球变化与水资源; 主题 2-流域地表水与地下水动力学集成; 主题 3-陆地生境水文学; 主题 4-水与社会; 主题 5-水教育与培训。2004 年 9 月 20~25 日在法国巴黎召开了国际水文计划 (IHP) 第 16 届政府间理事会。大会讨论了的国际水文计划 (UNESCO-IHP) 第七阶段 (IHP-VII, 2008~2013 年) 的研究方向“水的相互依赖与作用: 来自各方面压力的系统和社会响应”。UNESCO-IHP 第 7 阶段的主题分别是: 主题 1-全球变化、流域与浅层地下水; 主题 2-管理和社会经济; 主题 3-生态水文学与环境可持续性; 主题 4-水质、人类健康和食物安全。全球变化、流域水循环、生态水文和与环境、健康和食物安全联系的水资源研究, 再次成为未来水科学研究的热点问题。

1.3 国际水文科学协会 (IAHS) 的 PUB 计划

国际水文科学协会 (IAHS) 是国际上十分有影响的水文科学学术组织, 有 9 个下属委员会, 涉及地表水、地下水、陆地侵蚀与泥沙、冰雪、水质、水资源系统、水文遥感及资料传输、大气—土壤—植被关系和水文示踪等各方面。20 世纪 90 年代后, 国际水文科学协 (IAHS) 召开了一系列探索水文复杂性的应用基础研究学术研讨会。例如, 国际上探讨提出“水文水资源中新的不确定性概念”包括水文变化的随机性、概念划分非惟一的模糊性和信息不完全的“灰色”系统等。在“变化世界中的水资源规划”专题中, 强调了水资源开发中“风险”问题的不确定性定量描述和水文学研究与水资源管理在可持续发展研究的内在联系。进入 21 世纪后 IAHS 提出了未来 10 年研究的“无资料地区水文学研究”, 即所谓的 PUB 计划 (Predictions in Ungaged Basins)。该计划以减少水文预报中的不确定性为核心, 旨在探索水文模拟的新方法、实现水文理论的重大突破, 并极大地满足特别是发展中国家的生产和社会的需要。PUB 计划的目标不是仅仅提出解决无资料或者水文信息不完全地区的水文分析与预测问题, 而是促进水文科学理论与技术在解决实际问题的应用, 发展新的解决水文复杂性和不确定性的途径。

1.4 变化环境的水文复杂性与不确定性研究

变化环境下的水文循环及其时空演化规律研究, 是国际、国内地学领域积极鼓励的创新研究课题。结合土地利用/土地覆被变化与陆地水循环研究是一个新的交叉方向。研究的热点问题有以下几个。

1.4.1 全球变化与水文循环问题

它需要研究回答：全球变化下区域水循环规律是什么？过去对气圈—水圈—生物圈的相互联系/作用是如何认识？现在又是如何认识水资源的演变？其规律是什么？全球变化对水文水资源的影响是 21 世纪水文科学研究的前沿问题之一。因此，特别需要大力加强水文学家与大气物理学家的联系与合作，积极开展“全球—陆地—区域—流域尺度水文循环”科学基础的研究。

1.4.2 人类活动对水循环水资源的影响

它需要研究回答：人类活动对水循环及水资源有哪些主要影响？人类活动如何对水的变化规律产生影响？有什么地区、区域特征规律？如何量化人类活动对水循环水资源的变化及影响？这是近代水科学面临的主要科学问题。

1.4.3 水文复杂性理论与方法研究

水文学理论与方法实践中有两个重要的科学难点问题，即系统的复杂性和不确定性。它们通常反映在水文循环过程及其空间变化的复杂关系和作用关系的非惟一性。非线性科学不仅是揭示全球变化环境下地球系统复杂性的一门基础科学，也是国际现代水文学理论发展和变化环境下水资源安全等应用问题研究十分重要领域前沿。研究水文系统非线性与不确定性问题不仅有重要的学术理论价值，而且也有十分明显的实际应用意义。

2 水文系统非线性问题与研究

水文循环中水流运动的非线性特征促使人们注意研究水文系统的非线性问题。采用系统描述和非线性系统识别的方法，是建立水文非线性模型的有效途径之一。

基于系统分析的观点，如果系统的输入与输出关系或者与内部状态变量的联系不满足线性叠加原理，这个系统就是一个非线性系统。对水文循环而言，由于天然流域的下垫面十分复杂，坡面、沟道交错相间，加之降雨时空变化与流域上洪水非恒定流动特性，使得水文过程的非线性现象比较普遍。

2.1 水文非线性问题的认识

早在 20 世纪 30 年代一些水文学者就认识到雨洪的非线性问题。如 R.E. 霍顿 (Horton)、C.F. 伊泽德 (Izzard) 等曾指出，地表径流的涨洪段依赖于有效降雨强度。20 世纪 50 年代中期，我国水文工作者在生产实践中已发现雨强不同引起单位线非线性变化的现象，并提出利用雨强与暴雨中心为参量的单位线改正方法。1958 年，水利电力部淮河水利委员会在治淮工作中直接建立了单位线峰顶 q_m 以及洪峰滞时 t_p 。与净雨 R_i 的非线性的经验公式。1960 年，N.E. 明歇尔 (Minshall) 在一个 $1.093 \times 10^5 \text{m}^2$ 的天然实验流域上利用观测资料，详细地推求了 5 次雨强不同的洪水单位线明显变化规律。以后 J. 阿莫若契 (Amorocho) (1961) 和 D.E. 奥弗顿 (Overton) (1967) 用多种途径作了检查。R.E. 明歇尔的资料已成为说明天然流域存在非线性汇流现象的有力证据之一，并引起国内外水文学者对水文非线性问题的注意。例如我国在 1980 年后开展了一项规模较大的编制全国《暴雨径流查算图表》技术工作。全国绝大多数省份实测雨洪资料分析说明：暴雨

洪水的非线性问题比较突出。1963 年, J. 阿莫若契为了认识单位线理论固有的误差和适用范围, 基于沃尔特拉非线性系统方程, 定义了一个流域系统的线性度量函数, 即:

$$\lambda(t) = \frac{\int_{-\infty}^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau}{\sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^t \Delta \int_{-\infty}^t h_n(\tau_1, \Delta, \tau_n) \prod_{j=1}^n x(t-\tau_j) d\tau_1 \Delta d\tau_n} \quad (1)$$

并利用实验室人工降雨设备, 研究了入流 $x(t)$ 分别为阶跃函数、矩形输入和矩形序列输入三种情况下的流量过程。实验表明, 除洪水过程退水段尚符合线性关系之外, 净雨与直接径流之间存在不可忽略的非线性问题。1975 年, V.P. 辛格 (Singh) 在室内具有辐合表面的实验流域上, 对非线性的运动波模型和线性的纳希模型作了实验分析。他在对 210 次试验资料作了分析后指出: 地表径流过程具有高度的非线性, 它可以用运动波理论加以描述, 而线性理论只能给出它的近似解。在预测径流过程线的比较中, 非线性模型优于纳希线性模型。1980 年, 中国科学院地理所利用室内人工降雨设备, 在 $2.77\text{m} \times 7.63\text{m}$ 不透水单坡和河槽上, 进行了均匀条件下的降雨径流关系试验。结果表明流域的径流调节特征是非线性的, 降雨径流关系也是非线性的。同年, 王广德在探讨单位线及最大流量计算问题时, 利用试验资料得到单位线滞时 m 与雨强 i 的非线性关系。1981 年, 铁道部科学研究院西南研究所的峨嵋径流实验站吴学鹏等利用 170m^2 自动调节人工降雨试验设备, 做了不同概化流域形状和不同雨强的 800 多场径流试验。观测与分析表明, 线性系统汇流曲线的 3 条基本假定与实际情况出入较大; 流域汇流曲线不仅因雨强而变, 而且随下垫面条件、水力因素的变化而改变。实验数据证实, 降雨径流关系既不满足比例性, 也不满足线性叠加性。另外, 流域的蓄泄关系均不是线性的, 涨水与落水的规律也不一样。1987 年, 陕西机械学院李长兴、沈冰等分别对西北地区土壤下渗和坡面汇流物理过程作了较细致的实验观测。他们在透水坡面上不同土质的自动人工降雨实验中发现, 流域下渗是明显依赖于雨强的, 坡面汇流的非线性关系十分突出。干旱、半干旱地区的雨洪非线性问题不容忽略。2003 年中国科学院张士峰、夏军、谈戈等利用室内人工降雨设备再次实验均匀和不均匀覆被下的水文非线性过程。水文实验表明: 水文过程的非线性是客观存在的, 其变化机理比较复杂 (像流域的调蓄关系、洪水波速的变化等), 它们在整体上表现为降雨—径流的关系不满足线性叠加原理这一特点, 即水文系统的非线性。

对流域水文学问题, 霍顿 (Horton) 最早提出地貌特征的几何理论 (亦称 Horton 地貌律)。以后, 基于这一理论和 Strahler 河流分级原则的各种地貌气候单位线方法得到一定发展。20 世纪 90 年代后, 由于水文观测手段的提高和高速计算机技术的发展, 流域水文模型得到较快的发展。水文系统的非线性研究开始转移到流域水循环系统地貌等下垫面尺度变化和水循环动力学过程特性的研究, 水文尺度问题以及联系的水文非线性理论是其中非常重要的方面与难点问题。

1993 年 Rinaldo 和 Rodriguez - Iturbe 等比较早提出“河网自组织分形”的概念和非线性理论问题。1994 年 Famiglietti 和 Wood 在美国“水资源研究”杂志上发表了“空间变异的水与能量平衡过程中的多尺度模拟”论文。他们从流域水循环动力学方面, 探讨水文系统的非线性问题。1996 年 Maritan 等发表了“河网尺度律”的文章, 探讨了水文地貌的霍