

HECHUAN JINGLIU SHIJIAN XULIE FENXI YUCE
LILUN YU FANGFA

河川径流时间序列分析预测

理论与方法

■ 黄 强 赵雪花 等 编著



黄河水利出版社

国家自然科学基金项目
国家“九五”科技攻关项目
国家重点基础研究发展规划“973”项目

河川径流时间序列分析预测 理论与方法

黄 强 赵雪花 等编著

黄 河 水 利 出 版 社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

人类活动和全球气候变化对河川径流的影响已经成为近年来水科学研究的热点之一。本书介绍了这一学科领域的部分最新研究成果,应用多种方法分析了人类活动和全球气候变化对河川径流的影响,分析了河川径流统计特征及其演变规律的理论和方法,论述了河川径流中长期预测的新理论、新方法,并给出了大量实例说明理论方法的应用。书中介绍的研究思路、理论、模型和方法具有一定的普遍性,可供大江大河径流变化规律分析研究时参考和应用。

本书可作为水文水资源、水利水电工程及相关专业水资源规划及利用、水文预报等研究方向的研究生专业课教材、教学参考书,也可供从事水利、水电、水文、水资源系统规划、设计部门的工程技术人员以及高等院校相关专业的师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

河川径流时间序列分析预测理论与方法/黄强等编著.
郑州:黄河水利出版社,2008.5

ISBN 978-7-80734-464-3

I. 河… II. 黄… III. 河川径流-时间序列分析-高等学校-教材 IV. P333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 105929 号

策划组稿:马广州 电话:13849108008 E-mail: magz@yahoo. cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhslebs@126. com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1 092 mm 1/16

印张:16. 25

字数:375 千字

版次:2008 年 5 月第 1 版

印数:1—1 700

印次:2008 年 5 月第 1 次印刷

定价:45. 00 元

序 一

水是人类及其他生物繁衍生存的基本条件,是人们生活不可替代的重要资源,是生态环境中最活跃、影响最广泛的因素,具有许多其他资源所没有的独特性能和重多的使用功能,是工农业生产的重要资源,是人类社会可持续发展的制约因素。随着人口的不断增长,人民物质生活和文化生活水平的提高,工农业生产的发展,对水的需求不断增长,加之水质的污染不断加重,水资源已成为当代人们共同关心的一个重大问题。大凡水利工程如发电、灌溉、防洪、城市供水等均莫不与径流有关。因此,充分了解径流变化规律,研究它们的时空分布情况,是合理调控水资源,保障流域经济、社会、生态与环境可持续发展的基础性工作之一。

近年来,水文水资源科学的发展非常迅速。西安理工大学以黄强教授为学术带头人的水资源系统工程学术团队长期从事水资源系统研究,他们大胆地将大量新兴的数学方法引入水文水资源研究领域,极大地推进了这一学科领域的研究与发展。他们在水库优化调度、水资源多维临界调控、河川径流演变分析与预测等方面的研究形成了自己的特色,是一个充满活力和善于创新的团队,为国家培养硕士、博士和博士后高层次人才近100名。近年来,该团队先后完成了国家级、省部级等纵横向科研项目60余项,获国家、省部级科技进步奖10余项,发表学术论文400多篇,被SCI、EI和ISTP收录的论文150余篇。

《河川径流时间序列分析预测理论与方法》专著中应用多种方法分析了人类活动和全球气候变化对河川径流的影响,分析了河川径流统计特征及其演变规律的理论和方法,论述了河川径流中长期预测的新理论与方法,凝聚了作者多年来积累的科研成果,是他们完成国家自然科学基金项目“自然-人工二元模式下的河川径流变化规律及合理描述方法研究”、“河川径流演变规律对人类活动和全球变化的响应”和“河川径流时间序列解耦方法研究”创新成果的结晶,反映了作者在水资源领域多年实践和研究所取得的进展,也体现了他们对水资源学科发展所作出的贡献;同时,对水资源系统的规划、运行、设计和管理具有一定参考价值。

西安理工大学教授



2007年11月5日

序 二

水是人类生存的生命线,是实现可持续发展最基础也是最重要的战略性自然资源。河川径流作为水循环主要水文要素之一,是水资源最重要的存在形式之一。一方面,由于对河流的管理不畅、开发不当、污染严重等原因,近年来我国的水资源问题已变得十分突出,水资源可持续利用正面临着严峻的挑战。另一方面,随着人类社会活动的逐渐加剧,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,受此影响,河川径流演变也可能发生了一些新的变化。由于径流影响因素十分复杂,如何合理描述上述背景下河川径流的演变规律,并对未来径流做出尽可能准确合理的预测,是水文水资源领域面临的一个重大课题。

党的十七大全面阐述了以人为本,全面、协调和可持续发展的科学发展观,并提出“加强能源资源节约和生态环境保护,增强可持续发展能力”、“建设科学合理的能源资源利用体系,提高能源资源利用效率”、“加强应对气候变化能力建设,为保护全球气候作出新贡献”。《河川径流时间序列分析预测理论与方法》一书正是在这样的背景之下,在作者主持和参加了多项国家级、省部级科研课题的基础上,根据多年来所取得的研究成果而编著完成的。书中将近年来出现的多种数学手段、方法运用到河川径流的分析与预测当中,为我们提供了水文水资源及信息论、控制论、系统论等领域的大量新理论、新技术,总结了作者研究过程中的丰富经验,形成了一些具有较高理论意义和应用价值的研究成果。

《河川径流时间序列分析预测理论与方法》全面介绍了国内外河川径流演变规律分析、预测的研究现状和未来发展趋势,讨论了影响河川径流演变的一些因素,详细介绍了分析、预测河川径流演变规律的一些新方法、新模型,并结合实例给予了具体说明。全书内容翔实、层次分明、论述深刻、体系合理,是一部理论性、实践性都很强的优秀专著。

该书的问世和出版,不仅为广大水文水资源工作者开阔了视野,也为大家推荐了新的理论与方法,为广大水资源工作者的实践提供了很好的借鉴,必将对河川径流演变分析预测理论的发展与完善起到巨大的推动作用,有力地促进我国水文水资源学向更高、更新的方向发展。

中国工程院院士



2007 年 11 月 16 日

前 言

河川径流作为水资源最主要的来源,是支撑社会、经济、生态环境和人类社会可持续发展的基础。但自 20 世纪以来,由于全球气候变化和人类活动等多种因素,特别是经济发展、认识能力、科学技术水平等诸多因素的影响,河川径流已经发生了很大的变化,目前包括河川径流在内的水资源安全受到了极大的威胁。因此,加强对人类活动影响下河川径流演变规律的认识、研究,较为准确地对未来河川径流的变化进行中长期预测,进而为合理开发、利用和保护水资源提供依据,是水科学工作者的重要课题。

由于导致河川径流发生变化的因素(如降雨、气候、气温、蒸发、下垫面、植被覆盖、人类活动等)具有大量的不确定性和复杂性。常规的分析、预测方法很难对它们的变化规律、变化特征有一个清晰的了解和准确的把握。因此,河川径流分析、预测研究中需要引入大量的新理论、新方法。近年来,随着科学技术的发展,特别是控制、计算机、信息、气象等学科的发展,各学科领域出现了大量的新理论、新方法,这些理论、方法对水科学的研究同样具有十分重要的参考价值,能够从多方面揭示河川径流的变化规律,从而为水资源的合理开发和利用提供更可靠的依据。同时,这些理论、方法与河川径流分析、预测研究的结合,也能够拓宽理论本身的应用范围,推动理论研究的深入发展。

多年来,我们一直从事水资源系统分析方面的研究工作,承担了国家自然科学基金项目“自然-人工二元模式下的河川径流变化规律及合理描述方法研究”、“河川径流演变规律对人类活动和全球变化的响应”和“河川径流时间序列解耦方法研究”;国家“九五”科技攻关项目“黄河干流非汛期水量调度研究”;国家重点基础研究发展规划 973 项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”;中华电力教育基金项目“水电站厂内经济运行研究”;青海省科技厅项目“黄河干流水电站补偿效益分配方案与实施对策初步研究”等 60 多项纵横向科研项目。获得国家级奖 1 项,省部级奖 8 项,培养了 45 位博士研究生和 60 多位硕士研究生。本书是在总结上述研究成果的基础上完成的。

本书共分 14 章:第 1 章分析、综述了当前国内外关于河川径流变化分析、预测研究的动态和发展趋势,并简述了本书的研究思路及主要目的、内容;第 2 章介绍了河川径流变化规律分析的一些基础理论;第 3 章对影响河川径流变化的因素进行了分析;第 4~9 章分别介绍了协整理论、复杂性理论、分形理论、极大熵、灰谱理论、小波变换、信息密码解读理论等多种方法,并运用这些方法对河川径流时间序列进行了相依性、周期性、复杂性等方面的分析;第 10~14 章分析了采用基于小波分析的径向基神经网络、混合回归、遗传模拟退火门限自回归、支持向量机、翁氏旋回等模型对河川径流进行的预测。

本书第 1 章由黄强编写;第 2、3、14 章由赵雪花编写;第 4、8、9 章由刘俊萍、赵雪花、黄强共同编写;第 5、13 章由佟春生、黄强共同编写;第 6、7 章由燕爱玲、黄强共同编写;第 10~12 章由蒋晓辉、黄强共同编写。全书由黄强、赵雪花统稿完成。

在本书编写过程中,得到了刘昌明、王浩、李佩成院士,以及黄河水利委员会原总工程

师陈效国、黄河水利委员会原副主任石春先的指导与关怀;还得到了张会言、侯传河等教授级高工以及吴泽宁、徐建新、邱林、梅亚东等教授和畅建霞、王义民、薛小杰、王增发、李会安、赵麦换、徐晨光、夏忠、畅明琦、吴新、张双虎、刘涵、王煜、谢小平、陈南祥、席秋义等博士的帮助。本书在撰写过程中,参考和引用了许多国内外专家和学者的研究成果,在此一并向他们表示谢意!

本书的研究工作得到了国家自然科学基金的资助,特在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 10 月于西安

目 录

序 一	沈 晋
序 二	王 浩
前 言	
第1章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 国内外研究进展	(2)
1.3 研究发展趋势	(8)
1.4 本书的目的和内容	(9)
参考文献	(10)
第2章 河川径流时间序列分析的理论基础	(12)
2.1 河川径流时间序列的基本概念	(12)
2.2 河川径流时间序列分析的统计理论	(13)
2.3 径流时间序列的组成	(17)
2.4 河川径流时间序列的自回归模型	(23)
2.5 河川径流时间序列的滑动平均模型与自回归滑动平均模型	(25)
参考文献	(27)
第3章 河川径流时间序列的影响因素分析	(28)
3.1 降水对径流的影响	(28)
3.2 气温对径流的影响	(29)
3.3 太阳活动对径流的影响	(30)
3.4 恩索(ENSO)循环对径流的影响	(31)
3.5 人类活动对径流的影响	(33)
3.6 下垫面变化对径流的影响	(37)
3.7 自然和人类活动作用下流域二元水循环模式	(37)
参考文献	(38)
第4章 协整理论与河川径流时间序列分析	(40)
4.1 协整理论	(40)
4.2 协整检验	(41)
4.3 误差修正模型	(45)
4.4 河川径流序列的协整分析	(47)
参考文献	(53)
第5章 复杂性理论与河川径流时间序列	(54)
5.1 复杂性理论简介	(54)

5.2	复杂性测度的数学基础	(55)
5.3	几种复杂性测度	(58)
5.4	河川径流时间序列的复杂性识别	(64)
5.5	小 结	(77)
	参考文献	(78)
第 6 章	河川径流时间序列的分形特征分析	(80)
6.1	分形理论基础	(80)
6.2	河川径流演变的长程相关性分析	(80)
6.3	河川径流分形维数分析	(86)
6.4	河川径流演变的长记忆性分析	(86)
6.5	小 结	(95)
	参考文献	(96)
第 7 章	河川径流多重分形特性分析	(98)
7.1	多重分形的信息特征	(98)
7.2	MF - DFA 方法	(99)
7.3	权重因子 q 的选择范围	(101)
7.4	河川径流演变的多重分形分析	(101)
7.5	河川径流演变的多重分形行为探讨	(106)
7.6	小 结	(111)
	参考文献	(111)
第 8 章	河川径流时间序列的周期性识别方法	(112)
8.1	极大熵周期分析	(112)
8.2	灰谱理论与周期分析	(119)
8.3	径流序列的小波变换与周期分析	(127)
8.4	小 结	(142)
	参考文献	(144)
第 9 章	河川径流信息密码解读理论及峰谷位识别	(146)
9.1	河川径流信息密码解读理论	(146)
9.2	径流变化密码图谱分析	(156)
9.3	河川径流信息密码解读原理	(170)
9.4	河川径流峰谷位密码识别方法	(173)
9.5	河川径流信息密码解读理论的应用	(183)
9.6	小 结	(189)
	参考文献	(189)
第 10 章	基于小波分析的径向基神经网络预测模型	(190)
10.1	径向基(RBF)神经网络	(190)
10.2	径向基神经网络的建立	(192)
10.3	AR 模型预测方法	(193)

10.4	径流序列预测效果分析	(193)
10.5	小 结	(197)
	参考文献	(197)
第 11 章	混合回归预测模型	(199)
11.1	流域年径流的形成过程	(199)
11.2	混合回归系统水文模型的结构和算法	(200)
11.3	黄河下游三门峡站年径流量多维混合回归预测效果分析	(202)
11.4	三门峡站年径流量多年预测结果	(203)
11.5	小 结	(204)
	参考文献	(204)
第 12 章	遗传模拟退火门限自回归预测模型	(205)
12.1	门限自回归模型	(205)
12.2	遗传模拟退火算法	(206)
12.3	基于遗传模拟退火算法的门限自回归模型的求解步骤	(209)
12.4	黄河三门峡站年径流预测	(210)
12.5	小 结	(214)
	参考文献	(214)
第 13 章	基于支持向量机的径流预测模型研究	(215)
13.1	小样本机器学习理论:统计学习理论	(215)
13.2	支持向量机理论	(218)
13.3	改进的最小二乘支持向量机	(224)
13.4	混沌优化算法	(225)
13.5	基于混沌优化的最小二乘支持向量机径流预测模型	(227)
13.6	$C - \lambda_i v_i - \text{SVM}$ 预测模型的应用	(228)
	参考文献	(241)
第 14 章	翁氏旋回预测模型	(243)
14.1	生命旋回	(243)
14.2	模型的建立	(244)
14.3	模型参数的率定	(244)
14.4	生命旋回在径流预测中的应用	(245)
14.5	小 结	(246)
	参考文献	(246)

第1章 绪论

1.1 引言

河川径流作为水循环的重要环节,是水资源综合开发利用、科学管理、优化调度最重要的依据,它的形成越来越多地受到人类活动和全球气候变化的影响:一方面,全球气候变化、太阳活动和海—气相互作用等改变了原有的气温、降水等与水循环密切相关的气候因子;另一方面,人类活动不仅改变了流域地表状况,影响了蒸发、入渗、产流、汇流特性,而且由于人类大规模的开发利用水资源,在原有的天然水循环内产生了人工侧支循环,这一趋势还在不断发展。因此,在现有资料的基础上,充分挖掘和识别人类活动影响因素下河川径流的演化规律将有着十分重要的理论意义和现实意义。

各种类型的水利工程,如水库、水力发电站、抽水站、航道工程等,在确定工程的规模和建筑物的尺寸、选择合适的设备以及制订工程的运行方案与设备的操作规程时,都将河川径流量年内、年际分配过程的分析计算、长期演化规律作为最重要的依据之一。现有的水利工程都是以历史实测的水文系列资料为依据,并假定未来的水文变量特征值和过去一样(从统计意义上),缺乏对河川径流变化机理研究,导致有些工程规划不尽科学、合理,造成投资过大或过小等重大决策失误,这不仅造成巨大经济损失,也浪费了宝贵的水资源。有关河川径流变化机理认识的不足及预测的偏差,历史上有过许多深刻教训。近几十年来,我国众多已建成水电站中有一部分的多年平均发电量都达不到其设计值(见表1-1)。这充分说明设计径流系列与未来径流变化是不同的,其将导致水库不能蓄满、电站不能正常发挥效益。如,黄河上游蕴藏着巨大的水能资源,特别是龙羊峡至青铜峡河段1 023 km的上游干流区域是整个黄河水能资源最为集中的地段,有我国“水电富矿”之誉。然而,盐锅峡水库、八盘峡水库和青铜峡水库自投入运行以来,原设计为日调节的盐锅峡水库、八盘峡水库现已成为径流电厂,周调节的青铜峡水库现只能进行日调节,严重影响了工程的经济效益。其原因有很多,但很大一部分都与工程设计规划时所依据的径流量数据有关。因此,只有充分搞清黄河上游径流变化规律,较准确地预测出黄河上游中长期干流径流量才能为合理开发和利用黄河上游水资源提供科学的决策依据。

就我国黄河而言,1919年以前,黄河多年平均天然径流量为570亿 m^3 ,1957年河口实测年径流量为480亿 m^3 ,70年代锐减至313亿 m^3 ,80年代为284亿 m^3 ;70年代初黄河出现断流,80年代黄河连年断流,90年代国家将黄河断流作为长期现象得到确认;1995年黄河断流历时122天,1996年断流历时136天,1997年断流历时226天。沿黄地区人口、工业众多,大、中、小型水库2 571座,其径流量锐减造成的经济损失和生态环境的恶化尚难预料。长时间持续枯水给黄河上游梯级水库的运行带来极大的影响,按照已有水文资料编制的水库调度计划以及在此基础上制订的年度水电计划与实际情况偏差较大,

给电力系统的年度经营计划造成较大影响。目前,我国正处在电力市场发展的初期,水电应优先安排上网,但需按照发电调度计划运行。因此,在电力市场条件下更加需要掌握流域水情和水库运行情况,以便根据较可靠的水情制订电网计划及电量销售策略。

表 1-1 部分水电站多年平均发电量设计与实际值比较 (单位:亿 kW·h)

电站	设计多年平均发电量	实际多年平均发电量
龙羊峡	59.42	43.13(1989~2001 年共 13 年平均)
刘家峡	57.00	45.62(1974~2001 年共 28 年平均)
盐锅峡	22.80	16.56(1966~2001 年共 36 年平均)
八盘峡	9.50	8.12(1980~2001 年共 22 年平均)
青铜峡	12.85	8.95(1976~2001 年共 26 年平均)
安康	28.00	15.27(1991~2001 年共 11 年平均)
碧口	16.43	10.96(1977~2001 年共 25 年平均)
石泉	6.34	5.99(1976~2001 年共 26 年平均)

注:表中的实际多年平均发电量均为该电站完全竣工后的平均值。

多年来,水库调度部门及有关技术人员对径流变化的复杂感受强烈,一些研究人员不同程度地对径流演变的规律及其影响因素进行了研究,期望从各流域的水文、气象要素的收集和统计分析以及对流域下垫面生态环境的考察、分析入手,探求新的状态下的水文特征参数,对中长期径流预报方法进行研究,得出可用于生产实际的预报方案,为规划和科学管理水利工程提供依据。但从总体上来看,还缺乏系统、深入的研究。

由于影响径流变化的因素十分复杂,长期径流预报一直是一个世界性难题,而不同流域的水文、气候特性不同,相应的研究方法也各有特点。20 世纪 90 年代以来,全球气候变化复杂,人类活动影响增加,生态环境不断恶化,对气候及生态环境变化给出定量或定性描述具有较高的学术价值和实用价值。本书对径流变化的研究内容涉及流域水文、气象、环境等研究领域,具有一定的综合性和科研价值。

因此,有必要对自然-人工二元模式下的河川径流变化规律进行深入研究,分析其影响机制,描述未来河川径流变化,更好地为各种水利工程和国民经济建设提供可靠的水文设计数据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 全球气候变化和人类活动对河川径流变化影响的研究进展

全球气候变化和人类活动对河川径流的影响是全球变化区域响应研究的主要内容之一。早期有关气候变化的文献主要集中在人类活动如何改变局部气候条件,如大型水库对库区局地气候的影响,而不是气候对人类和社会的影响。美国国家研究协会于 1977 年较早地组织讨论了气候、气候变化和供水之间的相互关系和影响。1979 年在瑞士召开的

“世界气候大会”上,尽管有些学者呼吁应开展气候对人类和社会的影响方面的研究,但并没引起足够的重视。直到20世纪80年代中期,国际水文界才开始重视和讨论“温室效应”对水文水资源系统的影响。世界气象组织(WMO,1985)出版了《气候变化对水文水资源影响的综述报告》,并推荐了一些检验和评价的方法,随后又给出了《水文水资源系统对气候变化的敏感性分析报告》(WMO,1987)。国际水文协会(IAHS,1987)在第十九届国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)大会中举办了“气候变化和气候波动对水文水资源的影响”的专题学术讨论会。由WMO(1988、1989)组织多机构协作参与的“世界气候计划(WCP)”中,包括一个与水有关的专题,简记为WCP-Water计划。Pearman(1988)主编了一本《温室效应对澳大利亚水文水资源的影响》的专题性论著。美国科学进步协会于1989年组织一些专家学者编著了《气候变化和波动对美国水文水资源的影响》。欧洲各国也先后提出“温室效应”对本国水文水资源影响的报告或论著。1989年在美国召开的第三届国际水文科学大会的主题已经注意到环境变化对水文学的影响,以及有关的大尺度过程问题。但这些只是一些初步性的研究成果,许多关键问题,如“温室效应”如何影响区域降水的形式、水量和水质等,都尚未解决。20世纪80年代末,由国际科学联合会发起组织的一项全球变化研究计划,即国际地圈生物圈计划(IGBP)已着手进行影响河川径流机理的大区域试验研究。例如,围绕IGBP核心项目之一的“水文循环的生物圈方面”(BAHC计划)、“全球能量和水循环试验项目”(GEWEX项目)以及在美国等发达国家开展的全球尺度通用环流模型(GCMS)等,都相继在国际水文科学协会与世界气象组织下实施。从1990年开始,国际上许多科学机构和科学家参与的国际地圈生物圈计划(IGBP)以及全球能量和水循环试验项目(GEWEX项目);联合国教科文组织主持进行的国际水文计划第四期计划(IHP-IV)(1990~1995年)“在变化的环境中的水文学与水资源持续开发”等。这些国际科学计划相对独立又相辅相成,其主要目标是研究全球气候变化(含人类活动)对水文水资源的影响。

我国关于气候变化和人类活动对水文水资源影响的研究亦已起步。从1988年开始,在中国科学院及中国自然科学基金支持下,我国开展了“中国气候与海平面变化及其趋势和影响的初步研究”。其中,第4课题为气候变化对西北、华北水资源的影响及趋势预测。西北研究区的范围为昆仑山系以北、贺兰山系以西的西北干旱区;华北研究区为海河及滦河流域。在西北课题方面,通过对祁连山敦德冰帽的冰蕊研究,揭示了:我国西部高山区1万年来的气候波动变化和近500年的冰川变化;西北干旱地区湖泊水位变化;对51条河流出口径流量、山区夏季气温及年降水量的变化。在华北课题方面,对近500年旱涝指标资料以及近百年的降水、气温实测资料进行统计分析,研究了华北地区降水与气温的时空组合规律;针对近40年降水、气温和径流资料计算并分析了陆地-大气系统水量平衡的变化;针对20世纪80年代暖干期,即近250年最干的10年,计算了华北上空水汽输送,研究了水文循环各分量,如降水、蒸发、地表水、土壤水及地下水埋深,典型水库来水量、蓄水量以及入海径流的变化;针对山区及平原典型流域计算年水资源总量与陆地-大气间水量、热量交换的关系;利用流域水文概念模型——河川径流模型、平原模型、地下水水量平衡模型等研究假设的气候情景对多年平均水文情势的影响,如河川径流的平均变化、地下水位埋深变化、土壤水年均变化及蒸发量年均变化等。最后初步给出了西

北、华北水资源的趋势预测。中国科学院沈阳应用生态研究所研究了黄河上中游坡地改梯田对径流及生态环境的影响。中国科学院水土保持研究所分析了黄河中游小流域水土保持对干支流汛期、非汛期径流的影响,得出水土保持措施对径流具有减水作用,但主要表现为削洪作用,对枯水期的减水作用较小,且减水效应在干流不如支流显著。同时还分析了下游河床的渗漏量变化,说明水土流失带来的泥沙淤积会减少河川径流量。马全杰等分析研究了黄河兰州以上天然径流特征对青藏高原大气环流的响应。彭梅香等则着重从海温与黄河上游年径流量的关系,通过相关计算、典型丰枯年海温场分析,探讨了海温场(SST)与径流量的关系以及对径流量的影响。王根绪等根据40多年来所发生的20次ENSO事件,分析了降水与径流过程对ENSO事件响应的统计规律,并指出ENSO事件与黄河源区降水及径流年际波动变化有较好的相关性;张国胜等研究分析了1961~1999年38年间黄河上游径流量及其与流域降水、气温的关系,着重分析了干旱气候对黄河水资源的影响。李栋梁等从气候学的角度对黄河上游径流量演变特征进行了研究,结果表明夏秋季高原降水量对同期及落后半年之内的径流有显著贡献,前期青藏高原热力作用及大气环流特征对夏秋流量预测具有一定的指示性。包为民根据黄河上游地理、气候特征,提出了一个考虑封冻、融雪、变径流系数的大尺度流域水流模拟模型,并采用了全球尺度通用环流模型(GCMS)中的7个子模型,进而分析了2030年“温室效应”将对黄河上游河川径流资源的影响。丁永建在山区流域资料有限的情况下,采用多元线性回归月径流模型,用径流因子方法对山区流域冰川、积雪、冻土等特殊水文要素以及降水和气温在各月对径流影响的主次程度进行了判断,从而确定出影响径流的主要因子。赖祖铭采用水量平衡模型对黄河唐乃亥水文站以上流域的模拟结果表明,在同等气候条件下,当气温升高4℃,即便降水量不变,该流域的年径流量也将减少30%左右。在国家“八五”、“九五”、“十五”科技攻关项目研究的基础上,“气候变化对水文水资源影响”研究继续扩展至全国主要江河流域,在研究方法上进一步考虑降水、气温在年内分配的变化以及陆面与大气两种过程的相互作用;在研究内容上包括水文循环的变化对农业灌溉、城镇生活和工业用水等社会经济的影响以及适应性对策和效益分析。2007年6月,我国正式公布了《中国应对气候变化国家方案》(以下简称《国家方案》),明确了到2010年中国应对气候变化的具体目标、基本原则、重点领域及政策措施。《国家方案》中明确指出:“近百年来,许多观测资料表明,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,中国的气候变化趋势与全球的总趋势基本一致。”“有关中国气候变化的主要观测事实包括:一是近百年来,中国年平均气温升高了0.5~0.8℃,略高于同期全球增温平均值,近50年变暖尤其明显。从地域分布看,西北、华北和东北地区气候变暖明显,长江以南地区变暖趋势不显著;从季节分布看,冬季增温最明显。从1986年到2005年,中国连续出现了20个全国性暖冬。二是近百年来,中国年均降水量变化趋势不显著,但区域降水变化波动较大。中国年平均降水量在20世纪50年代以后开始逐渐减少,平均每10年减少2.9mm,但1991年到2000年略有增加。以地域分布看,华北大部分地区、西北东部和东北地区降水量明显减少,平均每10年减少20~40mm。其中,华北地区最为明显;华南与西南地区降水明显增加,平均每10年增加20~60mm。三是近50年来,中国主要极端天气与气候事件的频率和强度出现了明显变化。华北和东北地区干旱趋重,长江中下游地区和东南地区洪涝加

重。1990年以来,多数年份全国年降水量高于常年,出现南涝北旱的雨型,干旱和洪水灾害频繁发生。四是近50年来,中国沿海海平面年平均上升速率为2.5 mm,略高于全球平均水平。五是“中国山地冰川快速退缩,并有加速趋势。”“气候变化已经引起了中国水资源分布的变化,主要表现为近40年来中国海河、淮河、黄河、松花江、长江、珠江等六大江河的实测径流量多呈下降趋势,北方干旱、南方洪涝等极端水文事件频繁发生。中国水资源对气候变化响应最明显的地区为海河、滦河流域,其次为淮河、黄河流域,而整个内陆河地区由于干旱少雨非常脆弱。未来气候变化将对中国水资源产生较大的影响:一是未来50~100年,全国多年平均径流量在北方的宁夏、甘肃等部分省(区)可能明显减少,在南方的湖北、湖南等部分省份可能显著增加,这表明气候变化将可能增加中国洪涝和干旱灾害发生的概率。二是未来50~100年,中国北方地区水资源短缺形势不容乐观,特别是宁夏、甘肃等省(区)的人均水资源短缺矛盾可能加剧。三是在水资源可持续开发利用的情况下,未来50~100年,全国大部分省份水资源供需基本平衡,但内蒙古、新疆、甘肃、宁夏等省(区)水资源供需矛盾可能进一步加大。”

以上国内外有关影响河川径流变化诸多因素的研究表明,全球气候变化和人类活动对河川径流已产生了深刻的影响,为了准确探索河川径流的变化机理,对河川径流的影响因素分析研究已刻不容缓。

1.2.2 径流时间序列分析国内外研究进展

径流分析对合理开发和优化配置水资源、更好地制订区域社会经济规划具有十分重要的指导意义。受降雨天气系统和流域下垫面系统综合作用的影响,径流过程是一弱相依、高度复杂的非线性动力系统,尽管河川径流分析是一门非常复杂的非线性动力学,但是由于其具有十分重要的地位、作用及广阔的应用前景,不少专家学者对此都进行了大量的研究、探讨工作。目前,国内外的中长期径流预测研究仍处于探索阶段,常用的水文预报方法有成因分析法、统计分析法、灰色系统分析法、模糊算法、人工神经网络、小波分析法以及这些方法的组合等,另外分形理论、混沌理论等方法也引用到了水文预报领域。应当说,这些预报方法各有其优缺点和适用条件。成因分析法是基于研究大气环流、天气过程的演变规律和下垫面物理状况的成因动力模型的,是中长期径流预测研究的一个重要发展方向。但由于径流具有时间上和空间上复杂的统计特性,目前成因动力预测仍极为困难,统计分析法主要包括时间序列分析法、多元统计法和相似预测法。水文统计法对分析与揭示各种水文现象变化的统计规律是一种有效的手段。其中,多元分析法是近代统计学中的重要分支,也是中长期水文预报应用的最多的方法之一。人工智能的一些方法和非线性理论则是当前研究的热点之一。

1.2.2.1 时间序列分析法

1927年,Yule首先提出AR(自回归模型),并用于研究太阳黑子的时间序列,后来又进一步发展到ARMA(自回归滑动平均模型)、ARIMA(非平稳时间序列)等方法,获得了广泛的应用。这类方法将时间序列看成是一个随机过程,应用概率统计进行分析。

水文过程显示着水文现象随时间变化的特性。受众多因素的影响,水文过程呈现出随机性,称为随机水文过程。随着各种随机过程理论和时间序列分析技术不断被引入水

文学中,研究随机水文过程逐渐形成了一门新的学科,即随机水文学。随机水文学的基本概念在 20 世纪初被引入水文学中,随机水文学作为一门比较完整的学科出现,是在最近 30 多年。20 世纪 50 年代初期,赫斯特(Hurst)研究了径流和其他地球物理现象和长期实测序列,他的研究对随机水文学的发展产生了很大的影响。

在我国,数理统计理论很早就被引入水文学中,但以随机过程理论和时间序列分析技术探索水文过程的变化规律和随机模拟水文现象是在近 20 多年才开始的。对随机水文学做系统的研究并在生产单位尝试应用模拟序列始于 20 世纪 80 年代初,四川大学的丁晶在此方面有较深的研究;80 年代中后期,有关三峡工程洪水随机模拟的研究大大地促进了我国随机水文学的发展,覃爱基等应用时间序列理论和方法对宜昌年径流序列进行了全面的分析,揭示了宜昌年径流序列的统计规律。

1.2.2.2 灰色系统分析法

邓聚龙教授创立了灰色系统理论,灰色系统是按颜色来命名的,因为颜色的深浅在控制理论中常用来形容信息的多少。黑箱表示系统内部结构、参数、特征等一无所知,只能从系统的外部表象来研究的一类系统,“黑”即表示信息缺乏。相反,一个系统的内部特性全部确知,则称这系统是明明白白的,“白”表示信息充足。而介于白与黑之间,或者说部分信息已知、部分信息未知的这类系统,邓聚龙便命名其为灰色系统。

影响水文中长期预报的不确定因素很多,并且各种因素的作用机理又难以严格区别,灰色系统就是将各因素的总和视为灰色特性,通过挖掘系统信息,逐步将其灰色特性淡化、白化、量化、模型化,最后达到认识其变化规律,从中获取预测信息。目前,对河川径流演变的物理机制尚未充分认识,对众多的影响因素及人类活动信息难以完全掌握,特别是中长期径流预测更是受到各种不确定性因素的制约,预测结果的不确定性十分明显。而灰色理论主要是处理由于研究对象信息量不充分而出现的不确定性,武汉大学夏军教授建立了灰色系统水文学,探讨了灰色系统水文学的一些理论。

1.2.2.3 模糊算法

以模糊集为基础的模糊数学,可用以表达和处理客观存在的模糊信息,研究具有模糊信息的时间序列。根据水量平衡原理以及地理、地貌和气象因素与径流存在的因果关系,提出由因及果的预报模式,但由于各影响因素的不确定性——随机性和模糊性,使得直接在预测因子与预测对象之间建立对应关系并求其结构变得较为困难。为了克服此困难,周念来等尝试利用模糊因果聚类分析的方法来解决,用实例验证了该方法的可行性。大连理工大学的陈守煜根据模糊水文的成因分析、统计分析与模糊集分析相结合的研究方法论,提出成因、统计、模糊集分析结合的中长期水文预报综合分析理论模式与方法,并且创立了模糊水文水资源学,是径流时间序列分析的有力工具之一。

1.2.2.4 人工神经网络

人工神经网络方法是目前国内外运用比较多的一种方法,很多学科领域都给予了高度的重视,实际应用较多的有 BP 网络和基于径向基函数的神经元网络等几种。但对于网络拓扑结构的确定现在还没有一个较好的方法。值得指出的是,人工神经与很多其他的分析方法都可以有较好的结合。例如,灰色系统理论、遗传算法、小波分析、模糊集等都有与其结合后提高计算精度或效率的报告。

1.2.2.5 小波分析法

1990年,迈耶(Y. Meyer)初步建立了小波分析的系统理论。实测径流序列属离散等间距序列,具有一切时间序列的共性——长程相依性。这表明径流序列存在着谐振因子,具有一定的周期性。传统的傅里叶分析正是基于水文、气象现象的周期性,利用正交变换对时间序列进行分析和预测。小波分析也是采用正交、复正交变换等,并应用滤波器对时间序列进行分析的一种新兴技术,但它是一种窗口大小固定不变而时域和频域不断变化的局部优化方法,因为其具有良好的局部化性质,有人形象地将其称为“数字放大镜”,并说它将有替代传统谱分析的可能。通过小波分析研究出径流周期变化规律,然后进行周期外延就可以达到预测的目的。小波分析在水文水资源中的研究和应用刚刚起步,近几年这方面的文献在不断增加,表明小波分析用于水文时间序列的研究具有巨大的潜力。

1.2.2.6 分形理论

分形几何是由法国数学家 B. B. Mandelbrot 建立并发展起来的一门学科,它研究自然界的不规则现象及其内在的规律。其主要概念是分形维数,最早由 Hausdorff 提出。一般常用三种维数来描述分形结构,即豪斯道夫维数 D、信息维数和关联维数。李华晔等论述了河流水系分形特征,以黄河水系为例,求出分形维数,把分形理论应用于河流水系研究,为这一理论的研究提供了应用实例,通过计算分形维数可对河流随时间演化过程进行预测。

1.2.2.7 混沌理论

河川径流演变问题,均是由诸如气象、地理、人类活动等客观因素支配的,其运动特征既具有确定性,又具有随机性。因而,应用混沌理论将打破以往传统水文分析中单一的确定性分析或随机性分析,建立将两者统一起来的混沌分析方法。决定径流序列行为的因素很多,如果用方程来描述其演变的过程,所需的变量个数应很多。但实际中一般只测得一个变量即径流量,由 Packard 和 Takens 提出的理论,可根据一个变量的时间序列重构动力系统的相空间。Sivakumar 等于 2000 年对水文混沌分析方法做了较为系统深入的研究,得出了一些重要结论。温权等以葛洲坝等电站的径流时间序列为例,通过计算 Lyapunov 指数及其关联维数来判断径流时间序列的混沌性,并利用局部水文相空间模式,采用最小二乘法来拟合函数,对葛洲坝和隔河岩的入库日径流序列进行了预测。权先璋等介绍了重构径流相空间技术、径流的混沌识别方法,利用径向基函数神经网络,对葛洲坝水库的日径流过程进行预报。

1.2.2.8 其他方法

为了提高预测精度,在实际研究中通常把几种方法结合起来进行预测。陈继光介绍了基于模糊集与神经网络相结合的自适应神经模糊推理网络对具有混沌特性的时间序列进行预测的方法。Fi - John 等将成因分析、统计分析以及模糊集理论同神经网络系统有机地结合起来,建立了基于神经网络的模糊系统径流预测模型,用于径流的预测。四川大学的金菊良、丁晶在径流的最优组合预测模型以及门限回归模型方面做了较多的研究工作,最优组合预测方法的优点在于能利用各个预测模型中有用的独立信息,对它们进行组合将产生较好的效果。Elena M. 等根据全球变化、大气环流和气候变化对降雨和径流预