

河川径流时间序列 研究方法及应用

HECHUAN JINGLIU SHIJIAN XULIE
YANJIU FANGFA JI YINGYONG

赵雪花 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

河川径流时间序列 研究方法及应用

赵雪花 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了河川径流时间序列变化规律分析及预测的理论方法和应用方面的最新研究成果,对该领域国内外研究现状和进展进行了综述,总结了河川径流时间序列年内、年际分析指标和径流序列正态性、丰枯性、平稳性、趋势性及长程相关性的研究方法,应用多种方法研究了河川径流序列的突变特征和周期变化特性,提出了基于经验模态分解的多种耦合预测模型,并给出了大量实例说明理论方法的应用。书中以汾河流域为例介绍的理论方法具有一定的普遍性,可供其他流域径流变化规律分析或时间序列分析预测时参考。

本书可作为水文水资源、水生态、水环境、水利水电工程、农业水利及相关专业的研究生专业课教材和教学参考书,也可供相关专业技术人员、管理人员与高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

河川径流时间序列研究方法及应用 / 赵雪花著. --
北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-3992-1

I. ①河… II. ①赵… III. ①河川径流—时间序列分
析—研究方法 IV. ①P333

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321458号

书 名	河川径流时间序列研究方法及应用
作 者	赵雪花 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 190千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

全球气候变暖的背景下,国内大部分流域降水时空分布更加不均匀,极端天气频发,洪涝与干旱并存,加之社会经济用水的急剧增加,水资源问题日益突出,不但威胁到供水安全、粮食安全,而且引发一系列生态环境问题。这些严重的水问题给水文水资源学科提出了新挑战:一方面是水资源的短缺与时空分布不均带来不利影响(水源紧缺、旱涝灾害);另一方面是由于对水资源统筹规划、开发利用不合理造成浪费。如何解决诸多问题,这就要求我们必须做好水文情势的研究工作,不仅要求对目前的水文情势做出分析,还要积极开展水文情势的中长期预测。只有充分掌握径流变化的运动趋势,才能做好旱涝灾害的防范工作,统筹安排、合理利用宝贵的水资源,达到最佳的经济效益、社会效益和生态效益。

目前,中长期径流预测的模型很多,但还没有一种模型对所有的径流序列都是适用的。预测模型的适用性至今仍然是一个有待深入研究的问题。对一个具体径流序列的中长期预测问题,人们往往是通过分析、尝试、检验等步骤,最终找到合适的预测模型。中长期预测方法在传统上主要是根据河川径流的变化具有连续性、周期性、随机性等特点来开展研究的。因此,有必要全面系统地分析径流的变化规律及其各种特性,从区域径流序列存在的实际特点出发,提出适合该区域径流时间序列的预测方法。

作者多年来一直从事水文水资源方面的研究工作,近几年主持了国家青年科学基金项目“变化环境下的径流多时间尺度演变规律研究(批准号:40901018)”、山西省社会发展科技攻关项目(20140313023-4)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划项目、山西省高校“131”领军人才工程项目、山西省青年科技研究基

金项目“基于希尔伯特-黄 (Hilbert - Huang) 变换的径流变化规律研究 (2007021025)”和太原理工大学青年团队启动项目 (2013T039), 以及多项横向课题。本书是在总结上述研究成果的基础上完成的。

全书共分 9 章。第 1 章综述了当前国内外关于河川径流变化规律分析、预测等研究现状和发展趋势, 并简述了本书的主要目的及研究思路、研究内容。第 2 章介绍了河川径流时间序列的年内、年际变化指标与分析方法。第 3 章对河川径流时间序列的正态性、丰枯性、平稳性、趋势性及长程相关性进行了系统的分析。第 4 章介绍了有序聚类法、滑动 t 检验、克拉默 (Cramer) 法、山本 (Yamamoto) 法、曼-肯德尔 (Mann - Kendall) 法、佩蒂特 (Pettitt) 法、勒帕热 (Lepage) 法、启发式分割算法 (BG 算法) 等多种方法, 并运用这些方法对河川径流时间序列进行了突变特征分析。第 5 章采用经验模态分解 (EMD)、集合经验模态分解 (EEMD)、奇异谱法比较分析了径流序列的周期性。第 6~8 章提出了基于 EMD 的几种耦合预测模型, 先采用 EMD 对径流时间序列进行平稳化处理, 再分别结合均生函数、Nash NBGM (1, 1) 和混沌最小二乘支持向量机对径流时间序列进行预测, 并对预测结果进行误差评定。第 9 章采用了 EEMD 对径流时间序列进行平稳化处理, 然后与适用于平稳序列分析的自回归 (AR) 模型相结合对径流序列进行预测, 并与 EMD - AR 模型预测结果进行比较, 得出了 EEMD - AR 耦合模型的优越性。

在本书成稿过程中, 得到太原理工大学水利科学与工程学院诸多老师的支持和帮助; 在研究过程中得到了西安理工大学黄强教授的指导与关怀; 研究生袁旭琦、陈旭、李靖、张晶、申田田等在研究工作中给予了很大帮助。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, 在此一并向他们深表谢意。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目、山西省社会发展科技攻关项目、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划项目、山西省高校“131”领军人才工程项目和太原理工大学青年团队启动项目的资助, 特在此表示衷心的感谢。

本书是作者多年来从事径流变化规律及径流预测方面研究的成果总结，希望本书的出版有利于进一步推动径流变化科学在实际应用中的不断深化与发展。由于作者水平有限，书中不妥之处难免，恳请广大读者给予批评指正。

作 者

2015 年 8 月

于太原

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究现状与进展	2
1.3 存在的问题及发展趋势	9
1.4 本书的主要研究内容	9
第 2 章 河川径流时间序列基本特征分析	12
2.1 径流年内变化特征分析	12
2.2 径流年际变化特性分析	20
2.3 本章小结	24
第 3 章 河川径流时间序列变化特性分析	25
3.1 径流变化正态特性分析	25
3.2 径流变化丰枯特性分析	28
3.3 径流变化平稳特性分析	33
3.4 径流变化趋势特性分析	39
3.5 径流变化长程相关性分析	45
3.6 本章小结	52
第 4 章 河川径流时间序列突变分析	53
4.1 引言	53
4.2 突变分析的方法原理	54
4.3 结果分析	60
4.4 本章小结	71
第 5 章 河川径流时间序列周期性分析	72
5.1 基于 EMD 的径流时间序列周期分析	72
5.2 基于 EEMD 的径流时间序列周期分析	87
5.3 基于 SSA 的径流时间序列周期分析	92
5.4 本章小结	99

第 6 章 基于 EMD 的均生函数耦合模型的年径流序列预测	100
6.1 概述	100
6.2 径流序列 EMD 平稳化处理	101
6.3 均生函数模型	104
6.4 基于 EMD 的均生函数逐步回归耦合模型的年径流预测	105
6.5 基于 EMD 的均生函数最优子集耦合模型的年径流预测	108
6.6 本章小结	112
第 7 章 基于 EMD 与粒子群优化算法的 Nash NBGM (1, 1) 耦合模型 的年径流预测	114
7.1 理论方法	114
7.2 耦合模型的建立及预测	117
7.3 本章小结	120
第 8 章 基于 EMD 混沌-最小二乘支持向量机耦合模型的年径流预测 ...	121
8.1 径流序列的混沌特性分析	122
8.2 混沌-最小二乘支持向量机模型	123
8.3 径流序列相空间重构与混沌特性识别	125
8.4 模型建立及预测	132
8.5 本章小结	134
第 9 章 基于 EEMD 的 AR 耦合模型的年径流预测	135
9.1 自回归 (AR) 模型	135
9.2 模型建立与预测分析	135
9.3 本章小结	141
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 研究目的与意义

水是影响人类社会发展的最重要的自然资源之一，也是一切生物生存的基本条件，影响着社会的发展和生态环境的改善。随着世界人口的快速增长和各国经济的迅速发展，水资源问题渐渐引起了人们的关注，成为 21 世纪全球关注的热点之一，是各国政府和社会组织密切关注的焦点。众所周知，我国是一个严重干旱缺水的国家，人均水资源占有量只有 2300m^3 ，仅占世界平均水平的 $1/4$ 左右，是全球缺水较为严重的国家之一，且水资源时空分布极不均匀，东多西少，南多北少，雨季多旱季少。特别是近年来，城市人口剧增，生态环境恶化，工农业用水效率低下，浪费严重，水源污染等问题，使原本就匮乏的水资源变得更加紧张，现已成为制约国民经济可持续发展的瓶颈。由于上述诸多问题的存在，使人们越来越认识到所面临水资源问题的严峻性，同时也给水文学及水资源研究工作提出了挑战。一方面是水资源的匮乏以及其时空分布不均所带来的负面影响（如水源的紧缺、旱涝灾害等），另一方面由于对水资源统筹规划管理以及不合理的开发利用所造成的不必要浪费。要想解决上述问题，就需要我们必须做好对水文变化情况的分析与研究工作，不仅要求对当前的水文情势做出科学分析，还要积极开展水文情势的预测研究。只有掌握径流变化的特征和演变趋势，才能更好地防范旱涝灾害，对有限的水资源进行统筹规划、合理安排，使经济效益与社会效益最大化。

水资源主要包括地表水和地下水，地表水是水资源利用的主要部分，地表水是指河流、湖或淡水湿地。其中，与人类社会联系最为密切的是河川径流的水资源。河川径流是水循环的关键组成部分，它是对水资源进行合理优化调配和正确管理的理论基础。径流的大小及改变主要与气候条件、地形地貌、降水等自然因素和人类活动有关。由于影响径流变化的原因比较多，导致径流的变化充满不确定性，给人类对径流的开发利用带来了困难。因此，对河川径流变化特征及趋势预测的研究非常有必要。

鉴于此，科学合理的径流特性分析及准确预测能为流域水资源的合理调度与优化配置、水资源保护与规划、水资源有效管理等工作提供合理的水量时空



分布依据,进而使有限水资源的利用效率不断得到提高,为流域的经济发展和生态环境保护提供可靠保障。随着社会经济的不断发展,各生产部门(如水库调度、水利工程建设、防汛、抗旱、航运等)对径流分析预测精度的要求越来越高。如何对径流进行高效合理的预测,是目前亟待解决的问题。在气象、气候、下垫面和人类活动等诸多不确定性因素的综合影响下,河川径流的时空变化呈现出弱相依、高度复杂非线性、非平稳的特性,无法用确切的函数对其进行描述,以目前的科技水平也很难做到准确的分析预测,特别是径流中长期分析预测更加困难,一直以来都是备受国内外关注的热点。当前,关于径流预测的研究尚处于探索发展阶段,针对某个流域建立的任何一个模型都没有普适性,其预测精度也不完全满足当地的实际需要,限于当前的科学技术水平,国内外关于中长期径流预测,尚无较为成熟有效的方法可以借鉴,对该方面的研究工作仍处于积极探索与不断发展当中。当前传统预报模型和新技术、新理论预报模型共同面临着一个难题——预报精度不能满足实际的需要,预测结果很难在实践中得到推广应用。因此,不断地引入新的理论和方法,同时将不同的方法有机结合起来,研究流域径流演变规律并对其做出准确预测对流域的水资源合理开发、水利工程建设、水土保持规划、水库调度等具有非常重要的理论意义和现实意义。

1.2 国内外研究现状与进展

1.2.1 河川径流年内、年际特征分析状况

径流年内各月流量分配的不均匀程度取决于时间和空间的变化情况。径流年内变化情况影响着河流管理中的优化调度和合理配置,也决定了流域内水利工程建设规模。河流流量随时间变化的基本特征主要从两个方面分析,即年内变化和年际变化。其中,年内变化分析的主要内容是河流流量在一年内各月的分布特征,分析径流量随时间的变化特征。年际变化基本特征主要是对河流历年的流量变化特征进行分析,是进一步分析河流流量变化规律的基础。涂新军等分析了东江流域年内径流量不均匀性分配的年际变异特性,对多年的年内变化特征进行了对比分析;王双银等在冯家山水库河流流量特性研究中从全年各月的流量分配情况,集中度及集中期值计算等方面对流量的年内变化特征进行了分析;李艳等通过计算径流年内分配不均匀性、集中程度、变化幅度等指标对北江流域径流序列年内分配特性进行了分析;胡彩霞等提出了将基尼系数作为分析河流流量年内变化不均匀性特征的指标,以东江流域为例验证了其适用性;徐东霞等在分析嫩江的年内流量的变化情况时,分析的主要指标有流量



年内各月的分布情况、每年的完全调节系数、集中度、集中期、年内分配变化幅度等。目前分析河流年内各月流量变化特征的指标主要有变差系数 C_v 、年内完全调节系数 C_L 、年内分配变化幅度、集中度、集中期和基尼系数等。年径流变差系数 C_v 可用于衡量河川径流流量的年际变化,其值反映了河流多年流量的波动变化情况, C_v 值越大,河流多年的流量变化越剧烈,不利于流域内水资源的开发利用和防汛抗旱;反之,径流的年际变化平缓。

1.2.2 河川径流序列趋势分析和变异点检验状况

变量的演变主要存在两种形式:一种形式是连续性变化,另一种形式是不连续性变化。径流连续的演变形式是指河川径流的变化趋势,具体指河流的流量随时间的增加呈现连续性的变化,包括持续递减、持续递增和波动情况。马颖等在分析海河水系的径流时间序列的趋势变化时,采用了曼-肯德尔 (Mann-Kendall) 法;吕继强等采用累计均值法、滑动均值法等分析了新疆和田河流域的时域变化特征;杨帆等基于多种趋势分析方法的理论基础,提出了一种基于插值法的新的趋势分析方法;王生雄等以渭河华县站 1956—2000 年的多年流量资料为例,采用 Mann-Kendall 法和中值检验法对径流时间序列进行了趋势分析;刘建梅等在研究杂谷脑河径流变化情况时,引入了小波理论方法。趋势分析的常见方法有滑动平均、线性估计、二次滑动、累计距平和五点三次平滑等。

突变理论的数学基础知识是常微分方程中关于奇点的分析,其关键点是分析某一过程持续稳定状态的快速切换。基于统计学分析,突变的产生是从一个样本统计特征值到另一个样本统计特征值的快速切换。目前,对突变问题的分析还没有形成完善的理论体系,在处理常见的突变现象时,人们根据统计理论、概率理论等提出了一些比较准确的检验方法,这些方法分析数据的 3 个方面:数据的均值和方差有无突变改变;数据的回归系数是否存在突然改变;由数据资料统计出的事件的概率是否存在突然变化。在突变的研究中,引起广大学者关注的焦点问题是关于该理论在实际生产生活中的应用问题。由于理论的知识以及研究的局限性,到目前为止,突变现象的发生还不能给予非常明确的诠释,正是由于这种问题的存在,可能会得到错误的研究结论。针对该理论存在的问题可以采用以下 3 种途径进行完善:在检验时间序列的突变问题时,采用多种检验方法来检验,通过各种方法的检验结果对比,提高结果的准确率;对于检验出来的结论,再用多种严格的显著性水平的检验方法进行校核;结合实际,利用专业的水文学知识对突变现象进行判断,以使理论结果与实际现象相一致。在径流序列的突变现象检验中,现在常用的方法主要有:有序聚类法、Mann-Kendall 法、山本 (Yamamoto) 法、滑动 t 检验、勒帕热 (Lep-



age) 法、克拉默 (Cramer) 法、佩蒂特 (Pettitt) 法和启发式分割算法 (BG 算法) 等。

1.2.3 河川径流周期分析状况

水文时间序列一般含有概率意义上的周期成分, 如何有效地识别、判定水文时间序列的周期成分, 已经成为水文学者十分关注的一个研究课题。因为多种因素影响下的水文过程具有不确定性和复杂性, 所以, 对于水文时间序列的周期分析, 学者们分别经历了从傅里叶分析到小波分析, 再到希尔伯特-黄变换的研究历程。

(1) 以傅里叶变换为基础的传统谱分析。傅里叶变换于 1807 年由法国数学家傅里叶 (Fourier) 最早提出, 由此出现了与时域相对应的频域; 1965 年快速傅里叶变换的出现, 使频域分析走向实用并迅速拓展。例如, 方差谱估计是通过傅里叶变换将水文序列从时间域转为频率域进行周期分析的工具; 最大熵谱法 (maximum entropy method) 是在数据系列熵达到最大的基础上, 利用相关函数将假设存在的未知的那一部分数据通过迭代方法推算出来, 从而得到功率谱。

奇异谱分析 (singular spectrum analysis, SSA) 是从时间序列的动力结构出发, 并与经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 相联系的一种统计技术, 它已广泛应用于时间范围上的信号处理中。SSA 的优点主要表现在两方面: ①基于自身数据的一种趋势估计方法, 不需要其他指标数据, 也不存在过度拟合等问题, 十分适合于对非线性时间序列的变化进行分析; ②对嵌套空间维数的限定, 可以有效地对振荡的转换进行时间定位。SSA 非常善于识别隐藏在时间序列中的弱信号, 是近年来出现的研究周期振荡现象的一种新统计技术, 使得提取水文序列周期的技术有了新的飞跃。

(2) 小波分析。小波分析 (wavelet analysis) 由法国地质学家 J Morlet 最早于 1984 年提出, 核心是小波变换。之后 Grossman 和 Meyer 等对小波进行的一系列深入研究使小波分析有了坚实的数学基础。1993 年, Kumar 等运用正交小波 (Harr 小波) 变换分析了空间降水的尺度和振荡特征, 这是小波变换的概念首次应用于水文学领域; 自此之后, 对于小波变换在水文时间序列分析和预测的方面, 国内外的水文学者先后展开了研究。卢文喜等采用 Morlet 小波分析方法研究了吉林省大安地区年降水量序列的变化特征; 翟劭燧等采用 Morlet 小波研究了海河流域近 50 年来降水变化的多时间尺度特征; 李占玲等采用 Morlet 小波分析方法研究了雅鲁藏布江流域 6 个站点的径流序列; 傅朝和王毅荣采用 EOF 和小波变换对黄土高原 40 年的月降水变化特征进行了研究; 李远平和杨太保采用墨西哥帽小波函数研究了柴达木盆地近 50 年



的气温和降水时间序列；邵晓梅等采用墨西哥帽小波函数研究了黄河流域近40年来降水的季节变化和年际变化时间序列；王澄海和崔洋将小波变换和SSA两种分析方法相结合，研究了西北地区26个站近50年的降水周期随时间的变化。

(3) EMD-HHT及EEMD-HHT分析。希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 是由Huang等于1998年提出的一种新型的非线性、非平稳的时频分析方法，主要由经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 方法和希尔伯特 (Hilbert) 变换两部分组成。与傅里叶变换、小波变换等时频分析方法相比，EMD方法具有自适应的优点，因此它能很好地处理非线性、非平稳过程；然而，传统EMD具有模态混叠的问题。对此，Huang曾经提出了中断检验的方法，这种方法的原理是先直接对信号进行EMD，然后再对分解出来的结果进行观察，如果出现模态混叠现象则重新进行分解，可以看出这种方法需要人为后判检验；重庆大学的谭善文提出了多分辨的EMD思想，该方法的原理是对每一个IMF分量都规定一个尺度范围之后再行EMD，以此来解决模态混叠，可以看出这种方法牺牲了EMD方法良好的自适应性。最后，Huang等又提出了集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 方法，EEMD方法是在传统EMD方法的基础上进行的改进，它是将白噪声加入信号来补充一些缺失的尺度，在信号分解中具有良好的表现，EEMD方法不仅保留了EMD方法自适应的优点，还有效抑制了其模态混叠的问题。EEMD与Hilbert变换相结合的方法，已经被广泛应用到机电工程、应用力学、机械故障诊断及地震信号检测等领域。

(4) 其他分析方法。除了上述的分析方法之外，可以对水文时间序列进行周期分析的方法还有很多，如鲁棒PCA聚类分析法、连续功率谱分析法、R/S分析法、多因子逐步回归分析法以及模糊分析法、灰色系统法、混沌理论分析方法等。其中，主成分分析法 (principle component analysis, PCA) 对系统具有很高的线性依赖性，为此Xu Lei等提出了在目标函数中加入修正项来提高其鲁棒性的做法，邓红霞将这种改进的鲁棒PCA方法与聚类分析、模式识别等方法相结合，提出了一种特别应用于径流的周期特性研究的鲁棒PCA聚类分析法。

1.2.4 河川径流预测方法状况

国外对于径流预测研究起步较早，研究技术发展速度较快，已初步建立起了较完善的径流预测研究体系。受资料条件和科学技术水平的限制，在很长一段时间里，国内的预测研究一直处在一个与实践经验相关的发展水平上。一直以来，径流中长期预测都是难度比较大的研究课题之一，限于目前的科学技术



水平,国内外径流的中长期预测尚无比较成熟有效的方法可以借鉴,该方面的研究仍处于不断探索与发展之中。

中长期径流预测作为水文水资源科学研究的热点和难点之一。国外19世纪末、20世纪初开始对中长期水文预报进行研究。“世界天气法”最先将洪水预报应用于尼罗河下游流域,之后又将其推广到北美和欧洲的一些地区和国家。20世纪30年代,涂长望依据前期气候变化特征对后期长江流域水文情势进行了预报。20世纪50年代,内蒙古水文总站依据“历史演变法”对黄河流域的长期洪水预报进行了研究。张家诚等以东亚大气环流为基础,对长江流域的中长期预测进行了研究。20世纪60年代之后,随着先进探测手段的出现及海洋学、气象学等相关学科的发展,中长期水文预报得到了进一步发展。1992年,美国国家气象中心首先将组合预报的方法引进中长期水文预报领域。近年来,各国不仅注重预报模式分辨率的提高、预报技巧的创新,而且开始强调数值预报产品的综合开发利用。

虽然河川径流预报是一门复杂的非线性、非平稳动力学,但因其具有重要的地位和广阔的应用前景,很多专家学者对此进行了大量的探讨研究工作。当前国内外有关径流中长期预测方面的研究仍处在积极的探索与不断的发展阶段,常用的水文预报方法有基于传统预报技术的数理统计法和成因分析法,以及基于现代人工智能技术的模糊分析法、小波分析法、分形理论、混沌理论、灰色理论、人工神经网络、支持向量机等方法,随着计算机科学的不断发展,预报方法与思路日益增多。根据预报模式的不同,可将水文预报模型粗略地分为数理统计模型和物理成因分析模型两大类。这两大类预测模型各有其适用条件和优缺点。物理成因分析法主要是借助大气环流、天气、海温、太阳黑子等指标进行预报。其主要思路是通过建立后期水文要素(如径流)与前期大气环流特性及与这些特性有关的各种气象因子之间的定量分析关系,来进行水文预报。然而由于水文气象要素长期演变规律的复杂性及其不确定性,其物理机制尚未完全被识别,对物理成因还很难做到客观的定性或定量评价,再加上该方法对数据资料要求较高,因此利用物理成因分析法对径流进行预测难度仍较大,目前物理成因分析法在水文预报部门应用还较少。成因分析法有实际的物理基础作支撑,是今后水文中长期预报一个重要的发展方向之一。数理统计方法是在中长期水文预报中被广泛应用的一种方法,它借助数理统计的理论和方法,从大量的历史资料中识别水文要素自身统计演变的规律性或者寻找预报对象与预报因子之间的内在联系,通过建立预报模型来进行水文预报。数理统计法主要包括单因素预报(时间序列分析法)和多因素预报。时间序列分析法是揭示各种水文现象自身演变规律性的一种有效而可靠的预测方法。作为近代统计学重要分支,多因素分析法在中长期预报



中应用领域最多、范围最广。基于现代人工智能的预报技术是当前水文中长期预报研究的热点之一。

传统水文预报技术的逐步成熟和完善,以及理论、方法的不断创新,使上述预报方法的内容和手段不断得到充实,预报方法向多元化、多样化方向发展,从而出现了各种各样的组合预测方法。组合预测方法着眼于单项预测方法的近似性和局限性,通过将多个不同的水文预报方法进行适当组合(如线性加权组合、变化权重组合、熵值法、最优加权组合等),得到组合预报方法,其目的是尽量挖掘各个预测方法所提供的信息,充分发挥各个预测方法的最大优势,从而使预测精度得到提高、预测结果变得更加可靠。组合预报模型如小波分析与人工神经网络组合预报模型、模糊理论与人工神经网络组合预报模型、混沌理论与人工神经网络组合预报模型以及其他组合预报模型,这些组合模型的出现和发展,使径流预测精度得到了一定程度提高,但神经网络与混沌模型在提高模型的泛化能力上缺乏理论依据,在实际应用中受到限制;小波分析法需要事先人为地选择小波基函数以及分解尺度,由于其信息带有明显的主观性,并且这种主观性对分解结果会产生较大的影响,分解结果很难做到对序列自身特点的真实反映,因此,该方法在实际应用中同样有所限制。对于组合模型的研究目前还仅仅处于探索性研究阶段,组合预测的主要问题在于:当前在选择组合预测方法上,尚没有明确的指导原则;对于组合预测模型实际应用的实时性与有效性研究不够。所以,今后关于组合预测研究方面还需投入较大的精力,组合模型的探索研究将成为今后水文预报研究的热点之一。

1976年,Refsgaard和Hansen将AR模型与回归模型进行组合对径流进行预测,结果显示组合预测模型的预测精度明显高于单一模型的预测精度。1983年,Makridakis和Winkler对近10种不同的预测模型进行了研究,并针对不同的组合预测方法给出相应的评价,结果显示在4种组合预测模型中,时变误差平方和方法的预测效果最好,而包含误差协方差的组合方法的预测效果不甚理想。1987年,WcLeod将变换函数噪音模型、自回归模型和概念模型进行组合预测,结果显示组合预测的效果优于单独预测模型的预测效果。1996年,Donaldson和Kamstra将多种基于ANN的组合预测方法引入到经济学研究领域,结果表明组合方法比单项预测方法的预测更精确。1997年,Shamseldin等将ANN组合方法引入到水文学研究领域。1997年,Schreider等将概念性降雨-径流模型与自适应线性筛选方法加以耦合对墨累河的日径流进行了预测。2001年,Shamseldin和O'Commor从线性模型和非线性模型的角度对ANN模型进行了深入的研究,为人工神经网络在水文学中的应用打下了良好的基础。2006年,Kim等对均方差、常系数回归、简单平均和ANN组合预



测方法等进行了研究,通过对比各组合模型的预测效果,得出组合方法使预测精度得到了一定程度的提高。2009年,Jeong和Kim将水利经验和解析推导作为参考,对预测组合技术加以选择,在此基础上,从理论和实证角度对组合模型的预测效果做出了评价。

国内对径流预测组合方面的研究开始的比较晚。1996年,黄伟军等借助最优组合手段将门限自回归模型与分级退水模型进行耦合,并利用贝叶斯方法对预测结果做出了评价。2004年,段召辉等将时间序列模型与径流响应线性模型加以耦合对日径流量进行了预测,预测结果显示耦合预测模型对径流预测精度的提高是有效的。2008年,殷峻暹等以丹江口水库为研究对象,首先研究单一时间序列分析模型和ANN模型的预测效果,然后建立二者的组合预测模型并对径流进行预测,结果显示组合预测模型的预测效果明显优于单一预测模型。2009年,傅新忠等通过建立时间序列预测模型(ARIMA)与BP神经网络模型的组合预测模型对径流量进行了预测研究,结果显示组合预测模型具有较强的容错能力,其预测精度也有明显提高,该耦合预测模型对提高径流中长期预测精度是行之有效的。2009年,黄志强等研究了各种水文预测的组合模型,并将其应用到长潭水库流域的洪水预报中,结果显示组合模型的实际应用效果良好。2011年,孙惠子等将差分自回归移动平均模型、人工神经网络和多元线性回归进行简单平均组合及最优加权组合,对枯季径流进行了预测研究,并将组合预报结果与单独预报模型的结果进行了比较,结果显示:与简单平均组合模型相比,通过最优加权法建立的组合预测模型在提高预测精度方面具有明显的优势,并且最优加权组合模型精度不仅取决于各单项预测模型精度,而且与预报精度和各单项模型间的相关性有关。2012年,郭华等将灰色GM(1,1)模型、BP人工神经网络与马尔科夫链进行组合对入库径流量进行预测,结果显示组合模型的预测精度高于单独模型的预测精度。2014年,黄生志等将EMD与SVM进行组合对渭河月径流进行预测,并将预测结果与单一SVM模型的预测效果进行比较,结果证明了EMD与SVM组合模型的可靠性。

国内外对径流中长期预测已做了大量的研究,但对于径流观测数据的处理多数是在时间序列平稳的假定下完成的,这样会导致预测精度大大降低,因此对径流序列的平稳化处理显得尤为重要。1998年,Huang等提出了一种信号处理方法——EMD,本质上该方法是对信号序列进行平稳化处理,本书首先利用EMD或EEMD法对径流序列进行平稳化处理,然后结合各种时间序列预测模型对河川径流序列进行分析预测,提高预测精度,为流域的水资源合理规划与有效管理、水量优化调度等工作提供可靠的水量时空分布信息,进而通过不断提高水资源的利用效率,使有限的水资源社会经济与生态环境功能得到



充分的发挥。

1.3 存在的问题及发展趋势

目前,河川径流特征的研究是国内外学者关注的焦点问题。在自然因素和人类活动的影响下,河川径流随时间的变化也呈现出复杂多变的特征。因此,径流变化是一个非常复杂的问题,虽然近些年来在该领域的研究发展得很快,但是还存在很多问题需要研究和解决。

(1) 现在,河川径流特征的研究方法很多,包括以概率理论为基础的随机分析、以统计理论为基础的模糊分析、灰色理论和分形理论等。各种理论方法在径流方面的研究都有很大的发展,但没有将各种理论联系在一起,做系统的分析,以至于径流特征的研究结论繁杂,没有很好地进行系统整理,给河川径流研究在实际生产生活中的推广和应用带来了障碍。

(2) 重视水文资料的观测、收集和审查。资料数据不足、记录缺失、不准确以及资料代表性不好等问题严重影响了径流的研究。一方面,加强河川径流和流域内气温、降水等气象数据资料的收集;另一方面,研究人员应当拓展研究的视野,收集和径流量有着间接、不明显关系因素的数据资料,如天文现象等。

(3) 拓展研究的广度,重视向其他相关学科的学习、交流和应用。随着科学的迅速发展,单一领域的研究越来越受到限制,很多问题需要借助其他领域的知识来解决。同时,各领域的研究方法可以在一定程度上相互借鉴,相互学习。尤其是引进现代数学、物理等基础学科的前沿方法到径流特征及径流变化规律的研究中。

(4) 中长期水文预报方法和理论研究虽然已经很多,但是目前为止还不存在任何一种模型适用于所有变化特性的水文序列,对预报模型的普适性与有效性方面的研究不够,以至于得不到理想的预测效果,使当前发展比较成熟的经典预报方法很难在实际应用中得到推广。

(5) 在预报方法上,单一预报模型或简单的线性组合预报模型只是着眼于水文要素局部变化的规律性,其预测效果不甚理想,不能满足水利工程生产实践的要求,所以,为提高径流中长期预测精度必须在预测方法的改进和组合预测模型的建立上多做研究。

1.4 本书的主要研究内容

研究全球气候变化和人类活动影响下的河川径流的演变规律并对其做出