

河川径流混沌特征及 预测理论与实践

李彦彬 黄强 徐建新 尤凤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

河川径流混沌特征及 预测理论与实践

李彦彬 黄强 徐建新 尤凤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书将混沌理论应用于河川径流演变规律的研究中,并通过和其他方法相结合,以黄河、长江为研究对象,对径流时间序列进行了混沌特征分析和预测。全书共分为13章,分别是:绪论,黄河、长江流域水文概况及径流变化基本特征,河川径流时间序列分析的理论基础,河川径流时间序列的相空间重构,河川径流时间序列的混沌特征识别,河川月径流预测的相空间近邻等距模型,河川月径流预测的混沌支持向量机模型,河川日径流预报的混沌神经网络模型,基于归一化径向基函数网络的径流预测,基于最近邻点法的河川径流混沌预测,河川径流演变的长程相关性诊断分析及趋势预测,河川径流变化的小波分析,结论与展望。

本书适合水利及相关专业院校教师及研究人员,相关领域科研机构、科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

河川径流混沌特征及预测理论与实践 / 李彦彬等著

— 北京:中国水利水电出版社,2011.4

ISBN 978-7-5084-8515-7

I. ①河… II. ①李… III. ①河川径流—研究—中国
IV. ①P333

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第060598号

书 名	河川径流混沌特征及预测理论与实践
作 者	李彦彬 黄强 徐建新 尤凤 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市沉淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	184mm×260mm 16开本 11.5印张 273千字
版 次	2011年4月第1版 2011年4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,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

对径流变化规律的研究是水资源合理开发利用的前提和基础。河川径流是一种复杂的非线性时间序列。长期以来,人们一直用传统的确定性方法或随机性方法,或将二者结合的方法来描述径流演变过程,揭示径流演变的规律。根据水文要素变化的非线性特点,本书将混沌理论应用于河川径流演变规律的研究中,并通过和其他方法相结合,以黄河、长江为研究对象,对径流时间序列进行了混沌特征分析和预测,取得的主要研究成果如下。

(1) 河川径流时间序列的相空间重构。对黄河干流兰州站、三门峡站、花园口站的月径流时间序列和三门峡站的日径流时间序列进行了相空间重构,得出:月径流时间序列相空间重构的时间延迟 τ 为 2,嵌入维数 m 达到 12 时,具有饱和关联维数;三门峡站日径流时间序列相空间重构的时间延迟 τ 为 12,嵌入维数 m 达到 10 时,具有饱和关联维数 3.5。同一水文站,天然月径流时间序列比实测序列的饱和关联维数要大,要恰当描述实测月径流序列的变化特征,进行动力系统建模,最少需要 4 个独立变量,即 4 种因素,最多需要 8 个独立变量,要描述天然径流序列则最少需要 5~6 个独立变量,最多需要 12 个独立变量。下游的饱和关联维数比上游要稍大,下游径流形成所受到的影响因素会更复杂。长江 3 站径流的混沌特性要更为复杂,不同时间延迟对应的饱和关联维数不同,总的来说,长江干流 3 站径流具有混沌特性,但程度不同,下游比上游要稍强。在上游描述月径流形成的因素需要 5~6 种因素,下游描述径流形成的因素需要 6~7 种因素。之所以长江与黄河的混沌特性有所差别,除了两个流域的气候差别以外,和人工干预程度的强弱不同也有关。

(2) 河川径流时间序列的混沌特征识别。通过引入饱和关联维数法、主分量分析法、最大 Lyapunov 指数等方法对黄河、长江干流主要水文站的月、日径流资料的混沌特征识别,得出:①黄河干流月、日径流序列具有混沌特征;②同一水文站、同一时期的实测月径流序列的混沌特征要强于天然序列;③黄河干流下游的混沌特征要强于上游;④从 20 世纪 50 年代到 21 世纪初黄河干流月径流序列的混沌特性,比 20 世纪 20 年代到 20 世纪 70 年代月径流序列的混沌特性要稍强(即现在要强于过去);⑤在同一尺度下,比如月径流,所采用径流时间序列的长、短对混沌特征的识别有影响,序列越长,所表现

的混沌特征就越强，序列越短，所表现的混沌特征就相对较弱。对于长江干流的宜昌站、大通站、七里山站的月径流序列均具有混沌特性，且下游会比上游的混沌特性强；日径流序列大通站、七里山站均表现为混沌特性，宜昌站日径流系统可能具有相对的稳定点。

(3) 河川径流时间序列的混沌预测。对相空间近邻等距预测模式进行改进，利用改进后的相空间近邻等距法对月平均流量时间序列进行预测时，由于满足 $T = \tau = s\delta t$ ，消除了相空间时滞 τ 的变化对提前预测时间尺度 T 的影响，所以无需考虑对 τ 的选择问题，不仅简化了预测模式，而且显著提高了预测正确率，延长了预测时效，可以进行提前 1 月、1 年甚至更长时间尺度的预测。

(4) 将混沌理论和支持向量机方法相结合，建立了基于混沌理论的最小二乘支持向量机模型 (C-LSSVM)，并对兰州站月径流序列进行了研究。C-LSSVM 模型采用结构风险最小化原则，解决了网络模型的过学习问题，在处理小样本预测问题上具有优越性，适合小样本情况的建模，能够取得较好的预测精度。

(5) 提出了克服 BP 神经网络易陷入局部极小点、避免过度训练、增加模型的外推能力的方法。将混沌理论和神经网络相结合，建立了基于混沌理论的神经网络预测模型，利用相空间重构技术充分显露日流量时间序列中蕴藏的信息，揭示了传统时间序列方法无法展示的变化规律，利用神经网络巨大的非线性模拟能力进行河川日流量的预测研究，取得了较好的模拟和预测结果。

(6) 将非趋势波动分析法引入水文系统，对河川径流的长程相关性进行研究。通过对黄河近 80 年月径流序列的非趋势波动分析，得出：黄河近 80 年月径流存在内在的负长程相关性；黄河近 80 年径流长程幂律相关的标度指数 $\alpha \leq 0.39$ ，标度区间为 11.3 年。因此，分析预测在未来十几年，黄河径流的变化可能会成下降趋势。宜昌站、大通站、七里山站 3 站标度指数均大于 0.5，表明长江干流月径流序列存在正长程相关性。从结果可以看出，长江、黄河月径流序列都存在长程相关性。但标度指数并不一致，除了两个流域的水文、气象、人工干预等特点不同外，跟径流序列的长短应该有关系。黄河径流序列近 80 年，而长江径流序列仅为 40 年。因此，初步认为径流序列比较长的黄河径流序列所得结果更为合理。

本书第 1 章由黄强编写；第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章由李彦彬编写；第 3 章由黄强、徐建新共同编写；第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 12 章由尤凤编写；第 13 章由徐建新编写。全书由黄强、徐建新、

李彦彬统稿完成。

本书在撰写过程中得到了众多人士的帮助和支持。感谢西安理工大学沈冰教授、李怀恩教授、费良军教授、谢建仓教授、畅建霞教授、王义民副教授、薛小杰副教授以及赵新宇博士、张泽中博士、原文林博士、燕爱玲博士，感谢他们在本书撰写过程中给予的指导和帮助。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感谢。

本书是结合华北水利水电学院引进人才科研启动项目进行的，得到华北水利水电学院重点学科建设基金和河南省高校青年骨干教师资助计划(2009GGJS—061)、河南省教育厅自然科学研究资助计划项目(2009A570002)基金的资助。

由于河川径流变化规律的研究非常复杂，涉及面广，且受理论水平及实践能力的制约，本书中理论、方法、结构安排、语言表述等方面定会存在些许问题，敬请国内外同行专家本着关心和爱护的态度，予以批评指正。此外，书中对于其他专家学者的论点和成果都尽量给予了引证，如有不慎遗漏引证的，恳请诸位专家谅解。

作者

2011年1月

前言

第1章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究背景和意义	2
1.3 国内外研究进展	3
1.4 相关研究存在的问题与展望.....	10
1.5 本书主要研究工作.....	12
第2章 黄河、长江流域水文概况及径流变化基本特征	16
2.1 黄河流域水文概况.....	16
2.2 黄河径流基本资料及变化特征.....	18
2.3 长江流域概况及水文特征.....	23
2.4 本章小结.....	28
第3章 河川径流时间序列分析的理论基础	29
3.1 河川径流时间序列的基本概念.....	29
3.2 河川径流时间序列分析的统计理论.....	29
3.3 径流时间序列的组成.....	33
3.4 河川径流时间序列的自回归模型.....	39
3.5 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.....	41
第4章 河川径流时间序列的相空间重构	44
4.1 径流序列相空间重构概论.....	44
4.2 径流序列相空间重构参数的确定.....	45
4.3 径流时间序列相空间重构.....	51
4.4 本章小结.....	65
第5章 河川径流时间序列的混沌特征识别	66
5.1 混沌的定义.....	66
5.2 混沌运动的特征及分类.....	67
5.3 混沌理论在径流系统应用的适应性分析.....	68
5.4 径流系统混沌特征的识别方法.....	69
5.5 径流混沌特征识别.....	73

5.6	本章小结	79
第6章	河川月径流预测的相空间近邻等距模型	81
6.1	引言	81
6.2	混沌预测方法简介	83
6.3	相空间模式及其在径流预测中的应用	85
6.4	本章小结	91
第7章	河川月径流预测的混沌支持向量机模型	92
7.1	概述	92
7.2	机器学习与统计学习理论	92
7.3	支持向量机	95
7.4	基于混沌理论的最小二乘支持向量机径流预测模型 (C-LSSVM)	101
7.5	模型应用	103
7.6	本章小结	112
第8章	河川日径流预报的混沌神经网络模型	113
8.1	概述	113
8.2	神经网络简介	114
8.3	BP神经网络	115
8.4	日径流预报的混沌神经网络模型	119
8.5	本章小结	121
第9章	基于归一化径向基函数网络的径流预测	122
9.1	RBF网络基本原理	122
9.2	基于归一化RBF网络的黄河上游径流预报：以兰州站为例	123
9.3	算例	125
9.4	本章小结	126
第10章	基于最近邻点法的河川径流混沌预测	127
10.1	概述	127
10.2	最近邻点法预测原理	128
10.3	相空间参数的确定	129
10.4	预测精度衡量准则	130
10.5	应用实例	131
10.6	本章小结	133
第11章	河川径流演变的长程相关性诊断分析及趋势预测	135
11.1	概述	135
11.2	长程相关性定义	136
11.3	非趋势波动分析方法	138
11.4	河川径流时间序列非趋势波动分析	139

11.5 本章小结.....	146
第 12 章 河川径流变化的小波分析	147
12.1 小波变换的基本原理.....	147
12.2 河川径流序列的小波变换分析.....	150
12.3 本章小结.....	163
第 13 章 结论与展望	164
13.1 结论.....	164
13.2 展望.....	165
参考文献	167

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

非线性现象是自然界的普遍现象,非线性系统具有超越不同学科领域的性质(相似性)。这种复杂系统的相似性,并非在于定性描述,而在于实际测验或理论细节,如孤生子、相干结构等。近年来,非线性科学取得了长足的进展,尤其是混沌理论的建立,为各个学科领域展现了新的视野。混沌是当今的前沿课题和学术热点,它揭示了自然界及人类社会普遍存在的复杂性、有序性与无序性的统一、确定性与随机性的统一,拓展了人们的视野,加深了对客观世界的认识。混沌涵盖了自然界及社会科学等各个领域,其研究的进展将有力地促进几乎所有学科和技术领域的发展^[1]。20 世纪 80 年代,混沌科学在得到广泛发展的同时,又与其他学科相互渗透,与时序分析的研究相交叉的结果是产生了“混沌时间序列分析”。混沌时间序列分析在水文系统中的应用研究是一项极有意义的开创性工作。对水文气象科学来讲,运用混沌理论中新的思想和方法,为水文科学的研究注入了新的活力,尤其是实验分析研究,可以说已经从过去的半经验理论和统计理论研究步入了系统动力学理论研究的阶段。

混沌是出于确定映射的似随机。物理学上,混沌通常被认为是确定的、耗散的非线性动力系统中无序的、不可预知的行为。这里应该强调的是:混沌不能被简单地等同于无序,更确切地说它是一种非线性的有序^[2]。

混沌学研究的是无序中的有序,许多现象即使遵循严格的确定性规则,但大体上仍是无法预测的,比如大气中的湍流、中长期天气等,混沌事件在不同的时间标度下表现出相似的模式,这与分形在空间标度下表现的相似性十分相像^[3]。

混沌主要讨论非线性动力系统的不稳定、发散的过程,但系统状态在相空间中总是收敛于一定的吸引子,这与分形的生成过程十分相像。

径流过程是一种复杂的水文现象,其表现为强烈的非线性特征。要完整而准确地描述这样一种复杂的非线性过程,传统的欧式几何显得力不从心,以混沌为核心的非线性科学,成了描述该类过程的有力工具。作为水文系统一个重要的分支,河川径流情势的时空变化,是一个十分复杂的非线性与不确定性干扰过程。从大尺度水文问题来看,河川径流变化受到全球气候变化影响,并且对气候有十分明显的非线性反馈作用。从中尺度水文问题来看,河川径流变化不仅与气候因子(降水、气温等)有关,而且受下垫面、地形、地貌以及人类活动影响。河道洪水波运动所表征的高度非线性,使得径流描述需要考虑不同来源的非线性动力学影响^[4]。随着现代科学技术的不断发展,高效率、大面积范围的收集水文信息已经成为可能。与此同时,水文非线性系统识别与参数估计理论的研究也极大地

丰富了系统水文学分析途径。正是由于径流系统内部因素相互作用的复杂性以及影响其演变过程的诸多外部因素的难以处理,使得径流系统的演变特征难以理解和刻画。同时,构成径流过程不同因素的相互作用产生的可观察结果——河川径流时间序列,就成为我们进行径流特性提取的有效研究对象^[5]。黄河是我国最大的河流之一,其径流序列较长,是我国北方河流的代表。因此,将其作为典型,研究河川径流的演变特性,对水文规律的探索、水资源合理开发利用具有重要的意义和实用价值。

本书基于国内同类研究成果,围绕一些具有广泛水文背景的多维非线性系统的演化模式及其相关非线性——混沌行为,展开讨论。借鉴非线性科学的动力学思想,对处理非线性问题的理论进行研究、推广和创新,从有限的资料信息中提取出尽可能多的、有效的河川径流演化模式及其相关的非线性特征,使水文水资源系统预测具有较强的可衡量性与可操作性。研究总体目标可从以下两个方面来实现。

(1) 引入混沌理论的有关概念与原理,从不同角度分析水文系统的混沌特性,找出水文系统在时间和空间上所构成的共同体的混沌特征,提取混沌特征指标,并从不同角度对其细化、完善与创新。

(2) 提出基于混沌理论的系统预测思想和方法,引入支持向量机算法、人工神经网络算法等,将支持向量机、人工神经网络与混沌理论相耦合,建立径流预测模型,并结合实例进行应用研究,为水库、水电站规划和运行管理以及流域水资源可持续发展提供依据。

1.2 研究背景和意义

从近代物理学的发展来看,存在着两种描述物质运动的体系:确定论和概率论。牛顿力学是确定论描述的典范,按照牛顿的定律可以将物体运动的规律用微分方程表示出来,其未来发展的状态可以通过方程和现在的状态完全确定出来,或者说未来事件是完全可以预测的。300年来,牛顿定律对于人类认识物质运动的规律起到了重要的作用,被视为近代科学的典范。18世纪法国数学家拉普拉斯宣称,如果已知宇宙中每一个粒子的位置及速度,他就可以预测宇宙在整个未来的状态。然而,随着科学的发展,人们进一步认识到牛顿力学的真理性受到一定的限制^[6]。首先,量子力学的兴起冲击了牛顿和拉普拉斯的确定论思想。量子力学的根本原理之一是海森堡的测不准关系,该理论指出,粒子的位置及速度的测量有着一个基本的限度,以至于无法获得其任意准确的信息,这说明了随机存在的必然性,于是人们采用概率论来描述具有随机性的现象。其次,混沌现象的发现同样冲击了确定论思想。20世纪60年代以来的大量研究表明,一些完全确定的非线性方程(映射或常微分方程)却在一定的参数范围内给出了非周期的类似随机的混乱输出,人们把确定性系统出现的这种特殊复杂现象称为混沌,其对应的运动演化形式称为混沌运动。Lorenz发现当Lorenz方程中的参数取适当值时,解是非周期的且具有随机性,即由确定性方程可得出随机性的结果^[7]。随后,Henon和Rossler等也得到类似结论^[8-9]。Ruelle, May, Feigenbaum等对这类随机运动的特性进行了进一步研究^[10-13],从而开创了混沌这一新的研究方向。混沌理论是继相对论和量子力学问世以来20世纪物理学的第三次科学革命,混沌现象表明,某些物质的运动特征既具有确定性的一面,又具有随机性的一面。

混沌理论消除了确定论和概率论两大对立体系间的鸿沟,将确定性和内在随机性统一于一体,准确描述了整体稳定、局部不稳定的复杂动力系统,深刻揭示了系统运动中有序与无序间相互转化的辩证关系。混沌学的发展给现代科学带来了深刻的影响,它的发现开启了简化复杂现象的可能性,拓展了人们对某些随机现象的认识和预测能力。通常人们认为是“无序”、“随机性”的信息,完全有可能存在一种确定性的法则解释它们,也就是说,随机的存在可能并不是外部干扰因素造成的,而是来自一个确定性的系统内部。混沌现象所固有的确定性将以往的不可预测变成了一种预测能力的局限性。特别是近二三十年来,近似方法、非线性微分方程的数值积分法,尤其是计算机技术的飞速发展,为人们对混沌的深入研究提供了可能,混沌理论研究取得的可喜成果也使人们能够更加全面透彻地认识、理解和应用混沌。

水文系统是一个开放的、复杂的巨系统,同时又是一个动态的非线性复合系统。一方面,它是地球大气圈环境内相互作用和依赖的若干水文要素组成的具有水文循环与演化功能的整体;另一方面,它又受地球及宇宙自然力的作用及来自人类的不同程度的生产活动的影响,从而形成了水文系统复杂的演化规律^[14]。然而,由于哲学观和科学技术方法论的限制,长期以来,人们一直用传统的确定性方法或随机性方法,或将二者结合的方法来描述水文过程,得以揭示的是水文系统的确定性规律。根据水文要素变化的非线性特点,引进新的分析途径是十分必要的。

混沌理论和水文科学的结合则产生了一个新的研究领域,混沌理论的引入可以丰富水文学的研究内容,推动水文科学的发展。混沌理论开启了探索水文现象变化的新途径,通过应用混沌理论中的相空间重构技术,把水文时间序列嵌入到重构的相空间中,便可以在相空间中揭示出水文动力系统的复杂运动特征,这样就可能从复杂水文系统运动中发现其内在的、有序的、确定性规律。由于该方面的研究尚处于初级阶段,认识还不够深入,需要研究和解决的问题很多。因此,开展混沌理论及其应用的研究,从混沌动力学的角度去认识水文系统的演变规律具有重要的现实意义和科学价值。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 水文时间序列的研究动态

对生产和科学研究过程中某一变量或一组变量 $x(t)$ 进行观察测量,在一系列时刻 $t_1, t_2, \dots, t_N$ (t 为自变量,且 $t_1 < t_2 < \dots < t_N$) 得到的离散有序集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 称为离散时间序列,简称为时间序列 (Time Series)^[15]。简而言之,时间序列是按时间顺序排列的观测数据的集合。时间序列是一种常见的数据形式,它是系统历史行为的客观记录,时间序列典型的一个本质特征就是相邻观测值的依赖性,时间序列观测值之间的这种相互依赖特征具有很大的实际意义,而时间序列分析理论所论及的就是对这种依赖性进行分析的技巧。因为它包含了系统结构特征及其运行规律,因此人们可以通过对系统所在的时间序列研究来认识和揭示系统隐含的某种特性,以此来达到预测和控制系统未来行为的目的^[16]。水文数据就是以时间序列的形式出现的,例如某一水文站的月径流时间序

列、降雨序列等。由于水文现象本身的复杂性,目前仍然很难用单纯的物理方法对水文现象进行完全描述,人们主要借助数理统计方法以及其他一些不确定性方法,通过深入研究水文时间序列来描述水文现象的不可知性。所以,时间序列的分析方法在揭示水文规律、模拟和预测水文现象中起着重要的作用。

水文时间序列的研究方法总体上可归纳为传统线性时间序列分析方法、不确定性分析方法及非线性时间序列分析方法。其中,线性时间序列分析方法主要指以随机理论为基础的传统时间序列分析方法,这种方法实际上是一种长期以来应用更为广泛的不确定性方法;不确定性分析方法有随机分析方法、模糊分析方法、灰色系统方法以及它们的耦合;非线性时间序列分析方法包括近些年来发展的人工神经网络方法、小波分析方法、混沌理论分析等。

1. 传统时间序列分析方法

早在1927年,数学家耶尔(Yule)^[20]建立了自回归(AR)模型来预测市场变化规律以及研究太阳黑子时间序列,由此掀开了时间序列分析方法的序幕。1931年数学家瓦格(Walker)^[17]在AR模型的启发下,建立了滑动平均(MA)模型和自回归滑动平均(ARMA)混合模型,初步奠定了时间序列分析方法的基础。20世纪60年代,时间序列分析理论和方法迈入了一个新阶段,伯格(Burg)在分析地震信号时最早提出最大熵谱(MES)估计理论,并被称为现代谱估计。它克服了传统傅立叶功率谱分析(又称经典谱分析)所带来的分辨率不高和频率泄露严重等一系列缺陷,从而使时间序列分析不仅在时域内得到应用,而且扩展到频域内,得到更加广泛的应用和推广。到20世纪70年代以后,随着信号处理技术的发展,时间序列分析方法不仅在理论上更趋完善,而且在参数估计、定阶方法及建模过程等方面都得到了许多改进,逐渐成为分析随机序列不可缺少的有效工具之一。传统的时间序列分析方法的特点就是本质上都体现为线性,它们都以简单的叠加原理为前提^[18-19]。在实际应用中,人们往往要经过从时间序列中提取趋势项、周期项和随机项,分别加以处理之后才进行分析并预测,然而这样做并没有改变方法固有的线性本质^[20-22]。1978年汤家豪提出了“门限自回归”(TAR)模型进行水文预测,开辟了借助非线性理论进行水文分析的新领域。

2. 多种不确定性方法及其耦合

水文现象受众多因素的影响,变化过程极其复杂,在计算和预测中存在着多种不确定性行为。周文德认为^[23],由于自然界中的水文现象非常复杂,要精确地说明它的变化规律,解释它的现象是相当困难的,最恰当的方法是将随机数学的理论与实际问题的物理过程联系起来进行综合考虑,这种方法就是所谓的随机水文学。陈守煜认为^[24],水文水资源系统中许多概念的外延存在不确定性,对立概念之间的划分具有中间过渡阶段,这些都是典型而客观存在的模糊现象。为此,他提出了“模糊水文学”的新概念。

近年来,随机水文学、模糊水文学、灰色系统水文学等新兴的水文分支学科在深入研究的基础上得到了发展,并形成了各自的特色。但是随机性、模糊性和灰色性往往共存于所研究的对象和问题之中。为了综合分析其存在的不确定性,提高计算、预测和决策的可靠性,在实际应用中,一般要将各种分析方法结合起来,即采用所谓的耦合途径,全面和客观地统一考虑多种不确定性。B. M. Ayyub^[25]将模糊和随机分析结合起来,利用熵原理

来解决随机描述的不确定性。陈守煜等^[26]将模糊集理论引入随机模型,提出模糊典型解集模型。冯宛平等^[27]将灰色分析引入统计回归,提出灰色回归分析。杨叔子等^[28]将灰色模型和随机模型有机地结合起来,成为一种新型结合模型,以用于水文预测。袁嘉祖^[29]考虑状态具有灰色性,提出灰色马尔柯夫预测模型。夏军^[30]将隶属度函数看做是灰色的,而将灰色集理论和模糊集理论结合起来分析。刘光吉^[31]等利用模糊数学和灰色系统理论对不严格具有无后效性的马尔柯夫过程进行描述,提出了模糊灰色马氏过程的新模式;在此基础上,丁晶等利用这一模式对山西省汾河水库的5日洪量进行预测,提高了预测精度。陈守煜^[32]将水文成因分析、统计分析、模糊集分析有机地结合起来,提出了中长期水文预测的综合分析理论模式与方法,模式中引入预测因子权向量,符合水文现象的实际情况,使模式的适应能力较强,可通过预测因子权向量的检验与调整,实现对预测因子筛选有效性的信息反馈,便于建立与实际情况相符的有效的预测模式及预测参量,为提高中长期水文预测的精度提出了一种新途径。

3. 熵

近20多年来,熵(entropy)成为研究水文水资源科学领域中不确定性的另一个有效工具。不少学者在这方面做了大量工作,并取得了瞩目成就。以熵为基础的模型有三类被用于预测:贝叶斯熵模型,它是最大熵原理与贝叶斯预测处理器的结合,该模型具有水文预测的普遍使用性。基于熵极小极大方法生成的模型,Eilbert等^[33]使用7个雨量站进行了长期干旱预测。基于谱分析的熵模型,可用于鉴别时间序列的显著性周期。由Burg^[34]引入的最大熵谱分析(MESA)是一种有效的方法,它具有分辨率高及适应短序列的优点。黄忠恕^[35]利用MESA分析了长江上游洪水的周期性问题,并比较了调和分析、功率谱分析及MESA三种方法,得出MESA在分辨率、谱偏移和对短序列的适应性等方面为最优。Rao等^[36]在将几种谱分析方法与MESA比较后,也得出了同样的结论。黄强等^[37]采用MESA对黄河上游河川径流进行了周期分析,指出了径流演变可能存在的几个周期及其成因。国外一些学者如Krstanovic与Singh^[38-40]将MESA分别用于流量长期预测以及实时洪水预测中。由于不确定性现象在水文系统中的客观存在以及水文资料短缺不全或质量不高等,使熵分析更能显示出其优越性^[41-44]。然而,截至目前熵理论只是一种技术方法,它还不够完善,无法自成体系。

4. 非线性系统理论

与传统统计方法不同,非线性系统理论引入了多尺度分析的思想,它在空间域与频率域同时具有良好的局部性,适用于非平稳信号的分析^[45-46]。常见方法有人工神经网络方法、小波分析以及近年来引起广泛关注的混沌和分形两大分支,它不但在确定性和随机性之间架起了桥梁,而且激起了非线性现象的广泛研究。

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是非线性系统理论模型的一个分支。20世纪80年代中期以来,人工神经网络再次掀起了研究热潮。近年来,人工神经网络技术在水科学有关的预测预报中得到了较广泛的应用,尤其以水文水资源方面为最多,主要用于降水预测、径流预测、洪水预测、水量预测、电力负荷需求预测等。李荣等^[47]将神经网络理论用于河道水情预测的研究,建立了洪水预测非线性动力学模型,能够识别水流运动变化过程与其影响因子之间的复杂非线性关系,为河道水情预测提供了一条新的

途径。马炼等^[48]以降雨量作为基本影响因子,建立了流域年径流量的神经网络预测模型,模型具有较好的适应性和预测精度。胡江林等^[49]使用人工神经网络建立的湖北省汛期(6~8月)总降水量的短期气候预测模式,为汛期降水的短期气候预测提供了一种具有明显统计预测正技巧的预测方法。蔡煌东等^[50]采用4个径流前期影响因子为网络输入,以径流等级为输出,进行了径流长期预测的尝试。钟登华等^[51]建立了单输出和多输出的水文预测时间序列BP模型,对时段径流量和洪水出流量进行了较好预估。K Y Lee^[52]采用不同结构的BP网络对电力负荷需求进行了预测。人工神经网络以其良好的非线性函数或泛函逼近能力以及自组织、自适应性能和容错性等优点为非线性水文系统的建模、识别和预测提供了一条崭新而有效的途径,但它却存在着网络结构难以确定、训练时间长、局部极小和初值依赖性等具体应用问题。

小波分析在水科学中取得的成果主要表现为:水文多时间尺度分析、水文时间序列变化特性分析、水文预测和随机模拟方面^[53]。Shoz, Tokinaga等^[54]将小波分析与分形结合构建了一种关于分形时间序列预测的模型。Cao Liangyue等^[55]将小波分析与混沌、ANN结合建立了小波网络模型,对具有混沌特征的时间序列进行了短期和长期预测并获得了成功。赵永龙等^[56]基于小波分析、混沌和ANN构造了混沌小波网络模型,用该模型对金沙江屏山站汛期日流量序列和长江宜昌站汛期日流量序列进行了长期预测研究。尤卫红等^[57]将小波分析与混沌耦合建立了不同时间尺度的气候预测模型,对滇中月降水距平值在月、季、年三种尺度上进行了预测。李贤彬等^[58]将ANN与小波耦合,提出了基于小波变换序列的ANN组合预测模型。金龙等^[59]基于ANN与小波的优点提出了多步预测的小波神经网络预测模型。赵永龙等^[60]将混沌重建相空间理论和小波网络模型相结合,用混沌小波网络模型对金沙江屏山站的汛期日流量序列的长期预测进行了研究,结果表明将混沌重建相空间理论用于水文序列,对揭示水文动力系统复杂的非线性结构是很有效的。黄强等^[61-62]提出了复值小波的连续小波变换理论用于径流时间序列分析,可获得径流在不同尺度下的主要周期特性,同时建立了基于小波分析的RBF神经网络模型、混合回归模型和基于遗传模拟退火算法的门限自回归模型,对年径流序列进行了中长期预测,得到了实用性较好的径流预测结果,为径流中长期预测提供了一种值得探讨和实践的新的可能途径。

近年来对分形理论在水文领域中的应用研究也较热。分形(Fractal)一词是由分形理论创始人Mandelbrot首先提出^[63]。Fractal有“不规则的”、“破碎的”、“断裂的”、“分数的”等含义。分形作为一门几何学,最初来源于数学中的反例。19世纪的一些数学家凭借想象创造出一些非光滑的、不规则的集合和函数,如Canter集、Weierstrass函数、Piano曲线、Sierpinski地毯等,曾经均被视为“病态结构”,而它们均具有自相似性,在分形理论中扮演着主要角色。1960年,Mandelbrot在研究棉花价格变化的长期形态时,发现了价格在大小时间尺度间的对称性即就是自相似性,在对尼罗河水位和英国海岸线的数学分析中发现了同样的规律^[64]。正是基于对这种自相似性的考虑,使他萌发了分形的思想。由于水文系统中普遍存在着自相似性现象,自相似性意味着标度不变性,分形理论将不同尺度下的水文变量通过标度变换联系起来,因此水文问题的研究可与分形理论结合起来。分形理论在水文水资源系统中的应用包括以下几个方面的内容:①水系河网结构和



流域地形地貌及其演变；②降雨时空分布；径流过程的分形特征；③暴雨时空分布；④洪水时空分布；⑤土壤水、下渗与地下水；⑥产汇流模型中的尺度问题等方面。其研究方法主要包括：①研究水文变量在时间上和空间上的分布，计算其分形维数或多重分形谱；②研究水文变量在不同尺度下的变化规律，以探求水文变量与尺度之间的相互关系；③根据水文变量的时空分布规律，建立随机模型，进行随机模拟；④应用时间序列方法进行预测；⑤将尺度思想引入具有物理基础的水文模型。

1.3.2 混沌理论研究进展

混沌学的研究热潮仅始于 20 世纪 70 年代初期，但这门新学科的渊源却可以追溯到 19 世纪。被公认为真正发现混沌的第一位学者，是法国数学家、物理学家 H. Poincare，他在研究天体力学，特别是在研究三体问题时发现了混沌。他以太阳系的三体运动为背景，证明了周期轨道的存在。他在详细研究了周期轨道附近流的结构后，发现在所谓双曲点附近存在着无限复杂精细的“栅栏结构”。他发现了三体引力相互作用能产生出惊人的复杂行为，确定性动力学方程的某些解有不可预见性，这就是我们现在讲的动力学混沌现象。

同时，H. Poincare 的科学哲学思想也为发现混沌清除了一大理论障碍。他明确地提出了偶然性的客观意义，他认为“偶然性并非是我们给我们的无知所取的名字”，“对于偶然发生的现象本身，通过概率运算给予我们的信息显然将是真实的”^[79]。从这一认识出发，他鲜明地批判了“绝对的决定论”，认为精确的定律并非决定一切，它们只是划出了偶然性可能起作用的界限^[80]。这些描述实际上已经蕴含了“确定性系统具有内在的随机性”这一混沌现象的重要特性^[81]。在 H. Poincare 之后，一大批数学家和物理学家在各自的研究领域所做的出色工作为混沌学的建立提供了宝贵的知识积累。

混沌学研究的第一个重大突破，发生在以保守系统为研究对象的天体力学领域，KAM 定理被公认为创建混沌学理论的历史性标记，是这一新学科的第一个开端。

混沌学研究的第二个重大突破，发生在遍布于现实世界的耗散系统。做出杰出贡献的学者是美国气象学家 E. N. Lorenz。Lorenz 揭示了一系列混沌运动的基本特征，如确定性非周期性、对初值的敏感依赖性、长期行为的不可预测性等，他还在混沌研究中发现了第一个奇怪吸引子——Lorenz 吸引子，他为混沌研究提供了一个重要模型，并最先在计算机上采用数值计算方法进行具体研究，为以后的混沌研究开辟了道路。

自 1975 年开始，“混沌”（chaos）作为一个新的科学名词在文献中出现，到 80 年代初，混沌研究已发展成为一个具有明确的研究对象和基础课题、独特的概念体系和方法论框架的新学科。如今，对混沌现象的认识，是非线性科学最重要的成就之一，混沌概念与分形、孤立子、元胞自动机等概念并行，成为探索复杂性的重要范畴^[82]。

混沌学研究具有重要的意义。其一，混沌学研究对现代科学发展产生的巨大影响，不仅限于自然科学，而且涉及经济学、社会学、哲学及诸多人文科学，可以说，几乎覆盖了一切学科领域。凡是涉及动力学过程的研究领域，大多都会发现混沌，都需要应用混沌动力学的研究成果。在传统的经典科学领域，若按混沌观点重新考察，就会发现新现象、提出新问题、建立新原理；而在一些非经典科学领域，运用混沌理论则可以解释以往无法解释的现象，可以处理历来无法处理的数据，甚至形成一批新的学科分支。

其二,混沌学研究革新了经典的科学观与方法论。混沌学研究表明,自然界虽然存在一类确定性动力系统,它们只有周期运动,但它们只是测度为零的罕见情形,绝大多数非线性动力学系统,既有周期运动,又是有混沌运动,虽然并非所有的非线性系统都有混沌运动,但事实表明混沌是非线性系统的普遍行为。混沌既包含无序又包含有序,混沌既不是具有周期性和其他明显对称性的有序态,也不是绝对的无序,而可以认为是必须用奇怪吸引子来刻画的复杂有序,是一种蕴涵在无序中的有序。混沌系统乃至客观世界应是有序和无序的统一体。

混沌研究还对传统方法论的变革有重大贡献,其中最突出的是从还原论到系统论的转变^[83]。经典的还原论认为,整体的或高层次的性质还可以还原为部分的或低层次性质。认识了部分或低层次,通过加和即可认识整体或高层次,此即为分析累加还原法。这是从伽利略、牛顿以来 300 多年间学术界的主体方法。随着近代科学的发展,包括对混沌现象的探索,还原论到处碰壁。20 世纪 50 年代,系统论思想开始形成,主张把研究的对象作为一个系统来处理。在此系统中,整体或高层次性质不可能还原为部分或低层次性质,研究这些整体性质必须用系统论方法。混沌是系统的一种整体行为,混沌学研究的成果成了系统论的有力佐证,混沌学创建人之一的 Feigenbaum 是批判还原论,宣扬整体观和系统论的重要代表。整体观和系统论正随着混沌学一起扩展到各现代学科领域,为现代科学的革命性变革做着方法论的准备。

应该指出,混沌作为当今举世瞩目的前沿课题及学术热点,不仅大大拓展了人们的视野并加深了对客观世界的认识,而且由于混沌的奇异特性,尤其是对初始条件极其微小的高度敏感性及不稳定性,还促使人们思考,混沌在现实生活中到底是有害还是有益?混沌是否可以控制?有何应用价值及发展前景?近 10 年间,科学界以极大的热情投入到了混沌理论与实验应用的研究中。20 世纪 90 年代以来,国际上混沌同步及混沌控制的研究,虽然步履维艰,但已取得了一些突破性进展,前景十分诱人。我们完全有理由相信,混沌学的进步不仅孕育着深刻的科学革命,而且一定会促进社会生产力的大发展。

1.3.3 混沌理论在水文学中的应用进展

水文学中混沌分析的研究始于 20 世纪 80 年代,最近 10 年有了明显的进展。混沌是一种主要的非线性现象,混沌理论为非线性动力系统的研究开创了新途径。混沌理论认为,客观事物的运动,除定常、周期、准周期运动外,还存在一种更具普遍意义的运动形式——混沌运动,即一种由确定性系统产生的、对初始条件具有敏感依赖性、永不重复的、回复性非周期运动。应用混沌理论,将能打破以往传统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法,使水文研究有所突破^[65]。要将混沌理论应用于水文预测中,需解决三个关键技术问题,即重建水文系统相空间、水文系统混沌性识别和水文混沌预测方法。对于水文系统混沌特性的研究已有不少成果,但仅限于“水文系统可能具有混沌特征”这一结论。

在最基本的水文现象中,洪水研究是极具代表性的,混沌自用于水文学以来,关于洪水的混沌特性研究就取得了迅速的进展。杨思全、陈亚宁利用天山北坡四棵树河冰湖突发洪水流量时间序列,从吸引子分维数和 Kolomogorov 熵等方面分析了洪峰流量变化的混沌性质。初步结果表明,河冰湖突发洪水时间序列具有分型特征,且洪峰流量的变化是一