

中国水科学青年英才
专著系列



水文过程复杂非平稳 变化特性识别研究

桑燕芳 著



借外流



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水科学青年英才专著系列

水文过程复杂非平稳 变化特性识别研究

桑燕芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了水文过程非平稳变化等复杂特性研究方面新的基础理论与技术方法。基础理论方面,通过研究解决小波分析的两个基本问题和三个关键问题,改进和完善了小波分析方法体系,提供了其在水文学应用的理论依据。技术方法方面,梳理了水文过程非平稳变化特性研究的若干关键问题,在此基础上,进一步完善了水文气候系统变异与非平稳性诊断方法,实现了水文过程演变复杂程度定量判别、水文过程周期和趋势变化等准确识别、水文要素多时间尺度响应关系定量描述,并发展了中长期水文气候概率预测预报的技术途径。

本书注重基础理论方法研究与实际水文问题分析相结合,在水文过程非平稳变化等复杂特性识别研究方面,具有很好的指导和示范作用,可作为高等学校水文水资源等相关领域的教学参考书,也可供相关科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水文过程复杂非平稳变化特性识别研究 / 桑燕芳著
— 北京:中国水利水电出版社,2017.11
(中国水科学青年英才专著系列)
ISBN 978-7-5170-4845-9

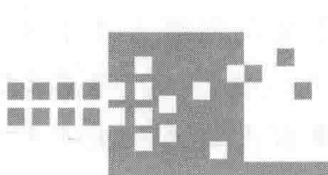
I. ①水… II. ①桑… III. ①水文学—研究 IV.
①P33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第250688号

书 名	中国水科学青年英才专著系列 水文过程复杂非平稳变化特性识别研究 SHUIWEN GUOCHENG FUZA FEIPINGWEN BIANHUA TEXING SHIBIE YANJIU
作 者	桑燕芳 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 (营销中心)
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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12.25印张 234千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
定 价	49.00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



总 序 一

水是生命之源、生产之要、生态之基。兴水利、除水害，事关人类生存、社会进步，历来是治国安邦的大事。我国是一个长期面临水资源短缺、水旱灾害、水污染和水生态等多方面水问题的发展中国家。随着经济社会的飞速发展，科学技术日新月异，人类需要解决的水问题越来越迫切、越来越复杂，水科学研究既面临着很好的发展机遇，也面临着前所未有的挑战。未来总是属于年轻人的，水科学青年科技工作者是最具创造活力的群体，拥有一大批创新型青年人才，是中国水科学创新活力之所在，也是解决中国水问题希望之所在。

水科学领域青年科技工作者知识层次高、年富力强，处于思维创新的巅峰时期，是水科学领域学术研究的“新生代”。他们的著作在理论研究方面不仅有一定的深度，而且不乏创新之处，是一批值得开发的学术资源，具有较高的学术水平和出版价值。中国水论坛组委会和中国水利水电出版社也正是基于此联合推出了“中国水科学青年英才专著系列”，旨在鼓励水科学领域青年英才立足中国水问题，持续推出高质量学术成果，为水科学事业集聚起一支高水平的学术理论队伍。从另一方面来讲，“中国水科学青年英才专著系列”中的著作可能是青年科技工作者的第一部著作，是他们学术生涯的一个重要里程碑，通过写作实践，可进一步掌握科技著作的写作方法，进一步提高写作水平，熟悉出版社对文稿质量与出版规范的要求以及国家有关的标准和规定，也将对今后科研报告等日常工作报告的编写起到很大帮助，为他们在本专业领域崭露头角，甚至成为名家奠定基础。“中国水科学青年英才专著系列”可谓意义深远。

“我劝天公重抖擞，不拘一格降人才。”老一辈水科学工作者不仅要去做科技创新的开拓者，更要去做提携后学的领路人。希望专家委

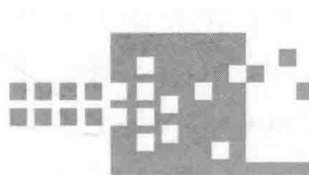
员会的同仁们肩负起培养青年科技人才的责任，甘为人梯，言传身教，慧眼识才，不断发现、培养、举荐人才，为拔尖创新人才脱颖而出铺路搭桥。广大水科学青年科技人才要树立科学精神，培养创新思维，挖掘创新潜能，提高创新能力，在继承前人的基础上不断超越。

中国水论坛是我国最具特色、最具影响力的水科学学术交流平台，中国水利水电出版社是水利部直属的中央级专业科技出版社，是我国最具实力的水利水电专业出版机构。我相信，在两家团体的通力合作下，“中国水科学青年英才专著系列”必将成为水科学领域的学术出版品牌。

中国科学院院士



2017年6月



总 序 二

我国是一个洪旱灾害频发的国家，治水是治国理政的重要内容，与综合国力的支撑紧密相关。新中国成立以来特别是改革开放以来，我国的水资源开发、利用、配置、节约、保护和管理取得了显著成就，为经济社会发展、人民安居乐业作出了突出贡献。进入 21 世纪后，在经济社会快速发展的同时高度重视生态环境保护，我国治水思路和水利发展方式加快转变，新老水问题加快破解，水治理体系和治理能力现代化加快推进，水安全保障水平得到明显提升，这些都为经济社会持续健康发展提供了有力的支撑。但必须清醒地看到，人多水少、水资源时空分布不均是我国的基本国情和水情，水资源短缺、水污染严重、水生态恶化等问题十分突出，已成为制约经济社会可持续发展的主要瓶颈。

面对更为复杂的水科学问题，我国需要一大批青年水科学工作者快速成长起来，实现人才的衔接，担负起为实现中华民族伟大复兴水科学保障的重任，任重而道远。小心求证、大胆创新也因此成为每位水科学工作者应当恪守的科研准则。“青春须早为，岂能长少年。”青年水科学工作者富有朝气与活力，思维活跃，在方式方法上常生新见，是我国水科学最前沿领域的学术创新“新生代”。他们秉承着严谨的科研精神，吃苦耐劳，甘于奉献，勇于实践，是我国水利事业大发展的重要力量和接班人。

党的十八大提出实施创新驱动发展战略，强调科技创新是提升社会生产力和综合国力的战略支撑。激发青年水科学工作者的创新活力，需要进一步营造尊重人才、鼓励创新的氛围，树立一批青年水科学工作者榜样，带动更多的青年工作者增强信心和动力，全身心投入到创新驱动发展战略实践中来。为此，中国水利水电出版社联合中国水论坛组委会，组织策划了“中国水科学青年英才专著系

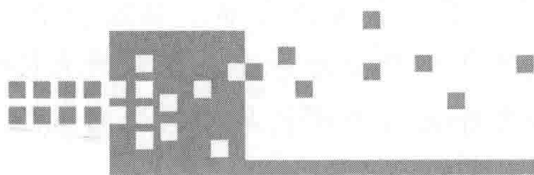
列”出版项目，涵盖水文学、水资源、水环境、水安全、水工程、水经济等诸多方面，旨在充分挖掘行业内学术资源，举荐拔尖创新人才，挖掘青年水科学工作者科研成果，带动水科学更快发展，为实现中华民族伟大复兴作出更大贡献。“普下利物沐群生，智者惟乐水。”我相信，“中国水科学青年英才专著系列”是一项意义深远的大型文化出版工程，功在当代，利在千秋，不仅对于激发青年水科学工作者的科研热情，推动我国水利事业的发展大有裨益，对于芸芸读者来说，也是不可多得的饕餮盛宴。

欢迎更多的水科学工作者加入到“中国水科学青年英才专著系列”的专家队伍中来，推荐有作为的青年科技工作者，为拔尖创新人才脱颖而出铺路搭桥。欢迎广大水科学青年工作者加入到“中国水科学青年英才专著系列”的作者队伍中来，把你们人生第一本自己的学术专著出版出来，为水科学事业作出贡献，为自己的发展甚至成为名家奠定基础。

中国科学院院士



2017年6月



序

水文过程非平稳性是当前全球变化下水文学研究的前沿和热点科学问题。全球变化导致水文过程的稳态性被打破,其确定性变化规律和随机性统计规律均发生了明显改变。许多流域天然水循环过程受到破坏,呈现出剧烈的时空变异性,导致水资源匮乏、极端旱涝灾害频发等一系列严重的水问题。未来也势必会影响我国南水北调工程调度、河湖水系连通、区域供水安全、水生态文明建设等国家重大工程和战略规划的预期效果。其中,如何对水文系统变异与非平稳性进行准确检测和归因是研究解决水循环时空变异问题的关键与核心,但也是难点问题。长期以来,传统水文分析与计算方法主要基于水文资料序列的平稳性和一致性假设,无法满足水文系统变异研究的特殊需求,给实际水文水资源工作带来了极大的挑战和难度。因此,迫切需要对基础理论方法进行突破和创新,以提升对水文系统变异的理解和认识。

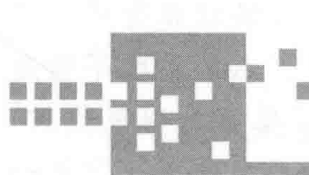
本书作者长期从事水文系统变异与非平稳性研究。近年来,围绕水文系统变异诊断与评估、物理成因分析与模拟等科学问题,开展了系统性的基础理论方法及应用研究工作。令人欣喜的是,在水文小波分析基础理论方法、水文系统变异与非平稳性检测方法、水文变异物理成因解析方法等方面有突出的创新性研究成果:发展和完善了小波分析方法体系,奠定了其水文应用的理论依据;在此基础上提出了一套较完整的水文系统变异与非平稳性诊断方法,实现了水文过程变异及程度分级的准确检测;提出了水文气候要素间多时间尺度响应关系的定量描述方法,合理解析了水文系统变异的物理成因。研究成果可以为准确揭示全球变化下区域水循环变化规律和认识水文系统变异的事实、程度、成因及潜在影响提供可靠的基础方法支撑。

我很高兴为此书作序，并推荐入选“中国水科学青年英才专著系列”。相信此书的出版将能够推动水文系统变异与非平稳性诊断、水文中长期模拟预测、极端旱涝灾害评估与防治等相关领域研究的发展，且对我国实际水文水资源问题研究解决也将具有很好的借鉴意义和参考价值。

中国科学院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of the characters '马' and '军' joined together.

2017年4月于武汉



前 言

揭示水循环过程的变化特性、掌握水文情势及其演变规律，是研究解决实际水文水资源问题的基本依据和必要前提，因此一直是水文学的核心研究课题。然而，由于受许多复杂因素的干扰和影响，且这些因素相互作用、相互制约，加之自然界水循环过程复杂多变，欲准确认识其变化特性和演变规律十分困难。特别是近几十年受全球变化（主要包括气候变化和人类活动）影响的日益加剧，水循环过程更加复杂多变，许多流域天然水循环过程受到破坏，水文气候要素的周期和趋势等特性发生变异，降雨-径流响应关系明显改变，加剧了我国水资源短缺和匮乏局面，水安全形势十分严峻；此外，旱涝灾害等极端水文事件频发，未来旱涝灾害发生的不确定性和风险也会越来越大。大量观测结果显示，许多流域实测水文资料呈现明显的非平稳性和时空变异性，给水利工程设计、水文模拟计算、水资源评价规划等一系列涉水工作带来很大困难。未来全球变化将极有可能对我国水资源区域分布产生更为显著的影响，并对供水安全、粮食安全、南水北调工程、水利现代化建设、河湖水系连通等国家重大工程和战略规划的预期效果产生不利影响。

基于随机过程理论的水文时间序列分析是揭示水循环过程复杂变化特性和解决实际水文水资源问题的有效手段和技术途径，尤其在研究水循环过程长期演变规律方面具有明显的优势。目前，随机水文学理论和技术已得到了长足发展和广泛应用。但由于对水循环过程的认识不足，欲得到准确的水文时间序列分析结果并非易事，其结果存在不确定性。目前，大量时间序列分析方法分别从不同角度揭示和描述复杂的水文过程，但不同方法都有一定的适用条件和局限性，在识别和描述水文过程复杂非平稳变化特性方面尤显不足。因此，迫切需要丰富和完善研究水文过程复杂变化特性及时空变异

等问题的理论方法。

本书作者长期从事全球气候变化背景下水文气候过程变异及随机性研究,在水文过程复杂特性识别与定量测度、水文过程不确定性定量描述、中长期水文概率预报等方面积累了丰富的研究成果。本书主要内容是作者近十年来关于水文过程复杂非平稳变化特性研究的阶段性总结,旨在丰富和发展随机水文学及水文过程变异研究的相关理论与方法。

全书共分为8章。第1章重点探讨了水文过程非平稳性研究的若干关键问题。第2章介绍了水文时间序列分析方法的研究进展。第3章重点对目前广泛应用的小波分析方法的研究进展进行了介绍。第4章重点研究了小波分析的两个基本问题:小波函数选择和小波分解水平选择。第5章研究了与水文过程非平稳性识别密切相关的小波分析的3个关键和难点问题,即小波阈值消噪、小波分解和小波互相关分析,提出了相应的解决方法。第6章和第7章分别针对水文过程周期识别和趋势识别两个重要问题进行了研究,提出了新的理论认识和新的技术方法。第8章介绍了水文时间序列概率预报研究的成果,提出了中长期水文序列概率预报的建模框架。

本书撰写过程中,参引了国内外大量的研究成果,在此谨向这些专家和学者表示感谢。本书的相关研究得到了中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室、南京大学水科学系、武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室等单位同事和同行的大力支持,特此表示感谢。

本书研究工作同时得到了国家自然科学基金(91647110)、国家重点研发计划(2017YFA0603702)、中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀人才培养项目的资助,特此表示感谢。

限于水平,本书错漏之处在所难免,一些学术观点和技术方法还有待完善,敬请读者批评指正(电子邮箱:sangyf@igsnr.ac.cn)。

桑燕芳

2017年10月

目 录



总序一

总序二

序

前言

第 1 章 水文过程非平稳性研究若干问题探讨	1
1.1 引言	1
1.2 水文系统稳定性与水文过程非平稳性研究差异	2
1.3 水文过程非平稳性研究关键问题探讨	5
1.4 结语	8
参考文献	9
第 2 章 水文时间序列分析方法研究进展	11
2.1 引言	11
2.2 水文时间序列方法研究现状	12
2.3 水文时间序列分析方法研究评述	17
2.4 结语	20
参考文献	20
第 3 章 水文小波分析方法研究进展	26
3.1 小波分析方法	26
3.2 水文小波分析的研究应用现状	30
3.3 结语	35
参考文献	37
第 4 章 小波分析两个基本问题的研究	41
4.1 噪声小波特性的研究	41
4.2 小波函数选择	56
4.3 小波分解水平选择	66
4.4 连续小波变换分析思路	74
4.5 结语	75

参考文献	75
第 5 章 小波分析若干关键问题的研究	77
5.1 小波阈值消噪	77
5.2 小波分解	88
5.3 小波互相关分析	92
5.4 结语	100
参考文献	100
第 6 章 水文过程周期识别研究	102
6.1 传统周期识别方法评述	102
6.2 周期识别新方法	103
6.3 水文序列周期变化原因分析	120
6.4 结语	129
参考文献	130
第 7 章 水文过程趋势识别研究	132
7.1 水文序列趋势识别方法评述	132
7.2 趋势定义讨论	134
7.3 改进的基于小波分析的趋势识别方法	135
7.4 MK 方法和 EMD 方法趋势识别性能对比研究	144
7.5 结语	150
参考文献	150
第 8 章 水文时间序列概率预报研究	152
8.1 水文序列预报方法综述	152
8.2 水文序列预测的若干难点问题	155
8.3 基于小波分析的建模框架	156
8.4 实例分析	160
8.5 结语	173
参考文献	175

第1章 水文过程非平稳性研究 若干问题探讨

本章针对水文过程非平稳性和全球变化水文响应等热点问题进行了探讨。首先,明确了水文系统稳定性与水文过程非平稳性的研究对象的差异。水文系统稳定性改变主要指环境变化影响下水文物理系统发生变化,即水文过程确定成分和确定性变化规律改变;而水文过程非平稳性主要指水文过程随机成分的统计特征发生变化。其次,系统研究了水文过程非平稳性若干关键问题,包括水文过程非平稳性的研究对象、表现方式、判别方法和依据、描述方法等。最后,指出水文过程非平稳性研究应重点关注水文过程中的随机成分,应使用三阶宽平稳对水文平稳性进行判别,以满足工程水文设计、水资源评价等需求;同时也指出,利用随机水文学方法判别水文过程非平稳性,可对水文过程周期和趋势等特性进行识别,再对随机成分的平稳性进行判断。上述水文过程非平稳性若干关键问题的界定和明确,有望为研究环境变化下的水文响应的关键科学问题提供借鉴和参考。

1.1 引言

受众多复杂因素的综合作用和影响,自然界水循环过程是一个十分复杂的巨系统(丁晶等,1988;谢平等,2012)。揭示水循环过程的变化特性和演变规律是解决水资源短缺、水资源污染、水生态、水灾害、水管理等复杂交叉水问题的重要基础,因此一直是水文学的核心研究课题(刘昌明等,2014)。在实际中,欲准确揭示和认识水循环过程的复杂变化特性是十分困难的科学问题(王文圣等,2005;陈晓宏等,2010)。特别是近几十年受全球变化(主要指全球气候变化和人类活动,一般也称为环境变化)的持续影响(Parry,2007),许多流域的天然水循环过程受到破坏,各主要水文要素的周期和趋势等特性发生变异(谢平等,2010),降雨-径流响应关系明显改变,旱涝灾害等极端水文事件频发(梁忠民,2016),且未来旱涝灾害发生的不确定性和风险会越来越大(张建云等,2007;夏军等,2011;徐宗学等,2009;张强等,2013)。大量观测结果显示,许多流域实测水文资料呈现出明显的非平稳变化特性,给水利工程设计、水文模拟计算、水资源评价规划等一系列涉水工作带来很大困难(Koutsoyiannis,2006,2007;Milly et





al., 2008; Milly et al., 2015)。

依据数理统计学理论,数据非平稳性主要是指大样本的统计推断基础——数据一致性要求遭到破坏。特别是2008年Milly等人发表论文《Stationarity Is Dead: Whither Water Management?》以来,水文过程非平稳性正逐渐成为国际水文学界的研究热点,尤其是全球变化研究领域重点关注的科学问题之一(Barbosa, 2011; Tan et al., 2015; Sadri et al., 2015; Razavi et al., 2015; Lima et al., 2015; Cheng et al., 2014; Ishak et al., 2013; Bayazit et al., 2015)。判别水文过程是否具有平稳性具有十分重要的意义。水文过程平稳性可以简化水文分析与计算的难度,提高序列统计特征量的估计精度。从随机水文学角度看,常用的水文时间序列模型是以通过揭示序列自身变化规律为核心发展起来的方法(丁晶等, 1988)。由于经典回归分析的一个重要假设前提是数据的平稳性,因此识别水文过程的平稳性也是开展回归分析和序列模拟预测的前提。如果水文序列表现出明显的非平稳性,经典回归分析的基础已不适用(Hamilton, 1994; 王文圣等, 2007),用样本均值和方差等统计指标推断随机变量的分布特征无效,会造成“伪回归”等严重后果。

虽然非平稳性在数学上有严格的定义和界定,在其他领域有较多的研究应用成果,但在水文学领域关于水文非平稳性问题缺乏系统性研究,对若干基础和关键问题缺乏统一认识。结合全球变化水文响应研究来看,全球气候变化和人类活动导致的环境变化对水循环过程的复杂影响是目前重点关注的科学问题,但与水文过程非平稳性研究的对象和内容并不一致,因此需要理清二者之间的关系。本章旨在探讨和明确全球变化水文响应与水文过程非平稳性研究对象的差异,并进一步梳理关于水文过程非平稳性研究的若干关键问题,进而为相关研究提供参考和借鉴。

1.2 水文系统稳定性与水文过程非平稳性研究差异

环境变化导致许多流域水循环过程发生明显变化是目前水文学界的共识,许多研究中将这种现象简单解释为非平稳性。然笔者认为,环境变化导致水循环过程发生变化应该包括两部分:水文系统稳定性的改变、水文过程平稳性的改变。关于环境变化影响下的水文过程非平稳性研究在认识上的最大误区是将非平稳性与趋势等特性联系起来,即认为环境变化影响下某水文变量无趋势变化时属于平稳过程,当发生趋势变化时则是非平稳过程。然而依据平稳性的严格定义可知,即使在无趋势情况下水文过程也可能会存在周期变化、突变等特性,或者随机过程的统计特性(包括统计分布类型和统计特征参数)发生变化,因此并不完全属于平稳过程。在实际研究过程中,需要准确表述环境变化





影响下的水文系统稳定性变化与水文过程非平稳性变化二者研究对象的差异。

实际水文过程既受到确定性因素影响，也受随机因素的影响，因此水文过程是以确定性变化中伴随着随机变化出现的。它是一个十分复杂的随机过程，总体上包含两部分：确定成分和随机成分（见图 1.1）。确定成分基于一定的物理机制形成，例如地球公转和自转使水文序列包含确定性周期（年、月和日）成分；人类活动通过改变土地利用方式，影响到流域产汇流模式，使水文序列存在趋势和跳跃等暂态成分。随机成分是由许多随机和不确定性因素综合作用引起的不规则振荡，往往很难从物理机制的角度进行解释和描述（谢平等，2012；Yevjevich，1972）。确定性水文学（系统水文学）认为，水文现象随时间的变化可由其他确定性变量完全加以说明；统计水文学则认为，研究对象和问题不牵涉时间概念，而只涉及某一事件的概率。随机水文学（Stochastic Hydrology）填补了确定性水文学（研究确定性过程）和统计水文学（研究纯随机过程）之间的缺口。随机水文学研究重点关注与时间密切相关的随机水文过程及其演变规律，以及由随机成分导致的不确定性，例如某流域

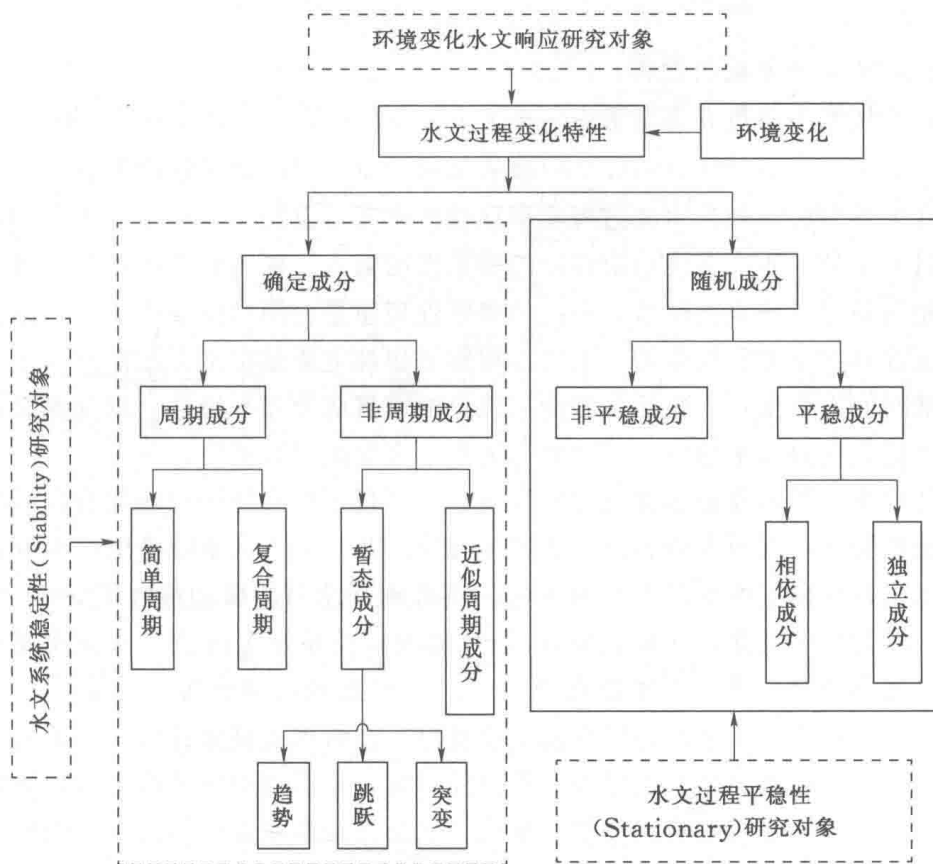


图 1.1 环境变化下水文响应、水文系统稳定性、水文过程平稳性的研究对象框图





径流的变化可以表示为

$$Q = f(A | P, T) + \omega \quad (1.1)$$

式中: Q 为径流; P 为降雨; T 为气温; A 为流域特性; ω 为随机因素的影响。对于确定性变化规律 f , 常通过水文模拟技术对其进行适当概化和描述后进行预测, 是确定性水文学的研究对象; 纯随机成分 ω 的变化规律是统计水文学的研究对象, 随机成分 Q 则是随机水文学的研究对象。

根据数理统计理论和待研究问题精细程度的差异, 平稳时间序列可分为严平稳和宽平稳 (黄振平, 2003)。严平稳定义为只有当样本所有的统计性质都不随时间推移发生变化时, 该序列才被认为具有平稳性 [见式 (1.2)]。实际中由于受样本大小等因素的影响, 很难有完全符合严平稳条件的样本序列。宽平稳主要是采用样本的特征统计量来定义的一种平稳性, 一般认为只要保证序列低阶矩平稳 (二阶), 就能保证样本的主要性质近似平稳, 即式 (1.2) 中 n 等于 1 和 2 即可。

$$f_n(x_1, x_2 \cdots x_n; t_1, t_2 \cdots t_n) = f_n(x_1, x_2 \cdots x_n; t_1 + k, t_2 + k \cdots t_n + k) \\ (n = 1, 2, \cdots) \quad (1.2)$$

式中: $x(t)$ 为某随机过程; t 为时序。

对于任意正整数 n 和常数 k , 若 $f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n; t_1, t_2, \cdots, t_n)$ 和 $f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n; t_1 + k, t_2 + k, \cdots, t_n + k)$ 服从相同分布, 则称此过程严平稳。

由上述分析可知, 水文过程非平稳性的研究对象明显区别于水文系统稳定性的研究对象。水文系统稳定性指的是系统的输入、输出和系统作用 (水文响应) 是否稳定, 重点关注水文系统的确定性规律是否随时间发生变化, 因此属于确定性水文学的研究范畴。水文过程非平稳性主要是指水文过程的统计特征是否随时间发生变化, 包括不含确定成分的随机成分非平稳性, 以及含有确定成分的随机成分非平稳性, 因此属于随机水文学的研究范畴。

环境变化导致流域水文过程发生变化, 体现了水文过程对环境变化的响应和适应性变化, 其研究内容应包含两个部分。其一是水文系统稳定性研究, 主要指水文过程确定性规律发生的变化, 即流域特性 A 、模型输入 P 和 T 中的任意一项发生了变化, 导致流域降雨-径流响应关系发生改变; 从时间变化上看, 水文系统稳定性主要体现在周期 (时间尺度和波动强度) 变化、趋势变化、突变等, 当水文系统稳定性发生改变时, 会给水文模拟计算等一系列工作带来很大困难; 其二是水文过程非平稳性研究, 重点针对的是水文过程的随机变化规律, 包括随机过程相依性的变化、水文极端事件发生的频率和强度等特征指标的变化, 以及水文过程形状特征指标的变化, 直接影响到工程水文设计、水资源评价、水安全与风险分析等实际工作 (谢平等, 2012)。

