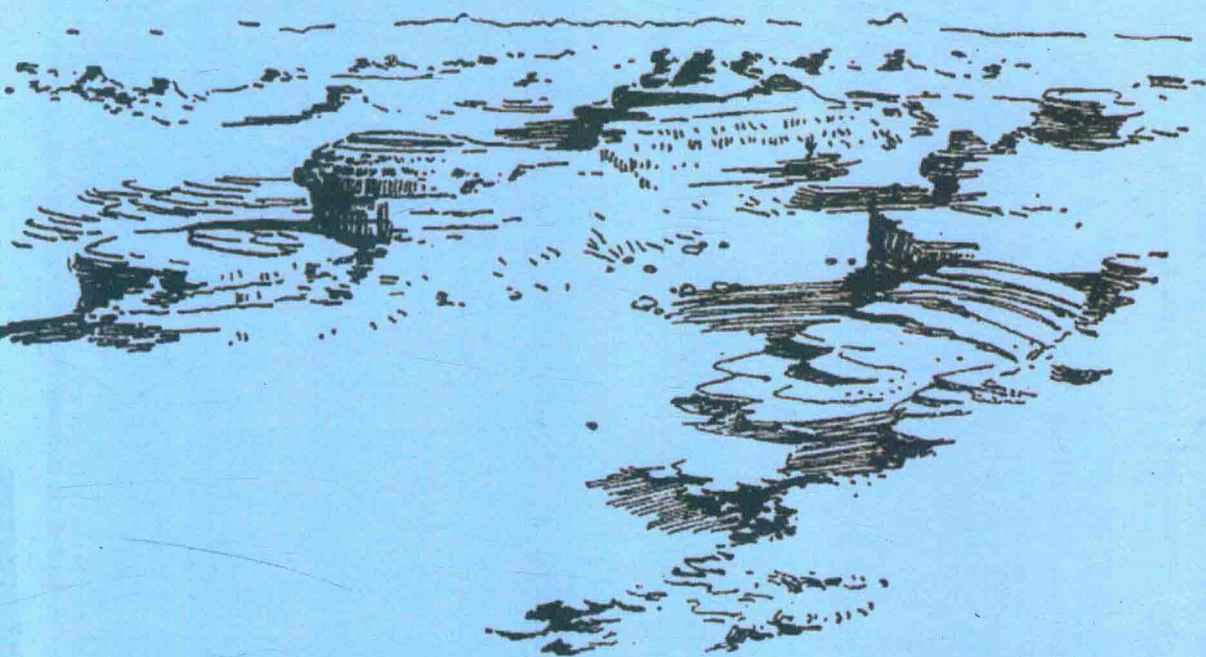


流域水循环与水资源演变丛书

华南区域

非平稳径流过程及 水生态效应

◎ 张 强 顾西辉 孙 鹏 史培军 著



科学出版社

流域水循环与水资源演变丛书

华南区域非平稳径流过程 及水生态效应

张 强 顾西辉 孙 鹏 史培军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水文过程的非平稳性及其模拟与生态水文效应已成为水文科学研究及水资源管理的热点与学术前沿。本书是在华南湿润区地表径流过程非平稳性时空特征及其水生态效应多年系统研究的基础上进行总结与提炼而形成的系统性学术成果,全面揭示了气候变化和人类活动影响下水文过程的时空规律,从全国尺度和流域尺度系统评价了水文过程变异可能对水生态系统及水生物多样性的影响。针对变化环境下极端水文过程的洪水量级和频率变化特征,初步构建了非平稳性识别、非平稳性洪水频率分析模型和非平稳性重现期计算方法等一套适应变化环境的水文频率分析理论体系。

本书可供从事水文学及水资源学、水文极值分析、水利工程防洪安全与管理及从事洪旱灾害管理与调控的科研与管理人员参考,希望本书的出版有助于进一步推动我国洪旱灾害风险评估、水利工程设计标准设定等方面的理论研究和技术研发。

审图号:GS(2018)3440号

图书在版编目(CIP)数据

华南区域非平稳径流过程及水生态效应/张强等著. —北京:科学出版社, 2017.12

(流域水循环与水资源演变丛书)

ISBN 978-7-03-056067-4

I. ①华… II. ①张… III. ①区域水文学-研究-中南地区
IV. ①P344.26

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第314957号

责任编辑:周 丹 夏 磊/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年12月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:225 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

珠江流域位于中国南方，濒临南海，河川纵横，水汽来源充足，雨量丰沛。受季风、热带气旋入侵和地形起伏影响，珠江流域雨量在时间和空间上分配不均匀，从而成为暴雨洪涝多发区。过去几十年，珠江流域相继发生了几次超 50 年一遇的灾难性大洪水。1994 年 6 月，北江和西江（珠江流域的主要支流）发生了 1950 年以来最大的一次洪水，造成 369 人死亡，直接经济损失达 174.74 亿元；1998 年 6 月，珠江流域发生了另一次全流域性大洪水，造成 175 人死亡，直接经济损失达 160.60 亿元；2005 年 6 月，西江中下游发生超 100 年一遇洪水，造成 131 人死亡，直接经济损失达 135.95 亿元。

作者及其研究团队多年来一直致力于洪旱灾害演变规律及其风险评估问题的研究，近年来在国家杰出青年科学基金项目“流域水循环与水资源演变”（51425903）及其他国家自然科学基金项目的资助下，围绕华南湿润区径流过程非平稳性时空特征及其水生态效应开展全面、系统的研究，取得了一系列创新成果。这些成果深入详细地呈现了华南湿润区径流过程的非平稳性时空规律及其对生态系统的影响，构建了一套洪水极值非平稳性识别、非平稳性洪水频率分析模型和非平稳性重现期计算方法等适应变化环境的水文频率分析理论体系。本书即是上述研究成果的系统总结。

全书共分为七章，分别介绍了本书研究开展的背景及国内外研究进展、洪水极值实测和历史时期时空变化特征、洪水极值与登陆热带气旋的联系、洪水极值受低频气候变化的影响、非平稳性洪水频率分析及防洪风险评估、水库调节对洪水频率分析的影响和径流过程非平稳性对水生态多样性的影响。书中引用了国内外多位专家学者的成果，已在每章的参考文献中列出。

径流过程非平稳性及其水生态效应涉及水文水资源学、工程水文学、生态学等多个学科，由于作者学识水平与工程实践经验有限，书中难免存在不足之处，恳请读者不吝赐教。

作 者

2017 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的和意义	2
1.3 国内外研究进展	3
1.3.1 洪水时空变化特征	3
1.3.2 登陆热带气旋及其对洪水的影响	4
1.3.3 海洋表面温度异常与地表径流过程的遥相关	5
1.3.4 人类活动对径流过程的影响及其水生态效应	6
1.3.5 非平稳性洪水频率分析理论与方法	7
1.4 当前研究存在的问题	10
1.5 研究内容及框架	11
1.5.1 研究内容	11
1.5.2 研究框架	12
参考文献	13
第 2 章 洪水极值时空特征及洪水频率分析	21
2.1 研究区域和数据	21
2.2 研究方法	23
2.2.1 多重趋势检测	23
2.2.2 广义极值分布	23
2.2.3 核估计技术	24
2.3 洪水量级多重趋势分析	25
2.4 洪水频率特征	25
2.5 历史时期洪水风险分析	29
2.6 讨论与小结	31
2.6.1 讨论	31
2.6.2 小结	33
参考文献	34

第3章 洪水极值时空特征及热带气旋影响	36
3.1 研究区域和数据	36
3.2 热带气旋导致的洪水事件识别	38
3.3 洪峰的混合分布特征	38
3.4 热带气旋对洪峰量级的影响	42
3.5 热带气旋对洪峰极值分布的影响	44
3.6 讨论与小结	46
3.6.1 讨论	46
3.6.2 小结	47
参考文献	47
第4章 洪水极值及平均流量时空特征受低频气候变化的影响	49
4.1 研究区域和数据	50
4.2 研究方法	52
4.2.1 年平均和洪峰流量序列空间分解及时间模态	52
4.2.2 气候指标和年平均及洪峰流量的遥相关关系	52
4.2.3 气候指标对年平均和洪峰流量影响的遥感性分析	53
4.3 气候指标对年平均和洪峰流量时空分解模态的影响	53
4.4 气候指标对年平均和洪峰流量影响的时间平稳性	57
4.5 不同事件/时期气候指标对年平均和洪峰流量的影响	59
4.6 气候指标对年平均和洪峰流量灵敏度影响	62
4.7 小结	66
参考文献	66
第5章 洪水极值非平稳性对洪水频率分析的影响及其防洪风险评估	70
5.1 研究区域和数据	70
5.2 研究方法	72
5.2.1 变异点检测	72
5.2.2 时间趋势检测	73
5.2.3 GAMLSS 模型	73
5.2.4 长期持续效应检测	75
5.2.5 累计距平曲线法	75
5.2.6 洪水极值频率分布拟合线型	76
5.2.7 指数趋势拟合模型	76
5.2.8 考虑时间趋势的洪水频率分析模型	77
5.2.9 非平稳性条件下重现期计算和防洪风险评估	77
5.3 非平稳性和尺度特征分析	79

5.3.1	变异点分析	79
5.3.2	变异前后趋势变化	81
5.3.3	GAMLSS 结果分析	84
5.3.4	长期持续效应分析	87
5.4	水文变异对洪水频率分析的影响	90
5.4.1	CSDMC 分析结果	90
5.4.2	变异前后概率极值分布函数变化	90
5.4.3	变异前后设计流量值变化	94
5.4.4	变异前后洪水重现期及频率变化	98
5.5	水文趋势对洪水频率分析的影响	101
5.5.1	正态性检验	101
5.5.2	趋势检验和分析	102
5.5.3	考虑时间趋势的洪水频率分析	105
5.5.4	基于非平稳性的洪水重现期和防洪风险评估	108
5.6	讨论与小结	111
5.6.1	讨论	111
5.6.2	小结	112
	参考文献	114
第 6 章	基于水库调节及低频气候变化的非平稳性洪水频率分析	117
6.1	研究区域和数据	117
6.2	研究方法	119
6.2.1	水库指标	119
6.2.2	GAMLSS	119
6.3	水库指标分析	121
6.4	GAMLSS 模型构建	121
6.5	非平稳性模型分析	124
6.6	非平稳性模型与平稳性模型模拟结果比较研究	127
6.7	基于非平稳性模型的水文过程模拟及预测	131
6.8	小结	132
	参考文献	133
第 7 章	径流过程时空特征及水利工程影响与水生态效应	135
7.1	研究区域和数据	136
7.1.1	区域尺度	136
7.1.2	典型小流域	137
7.2	研究方法	138

7.2.1	基于 Gini 系数的径流年内分配均匀度评价	138
7.2.2	基于 ANOSIM 径流空间均匀度评价	139
7.2.3	生态剩余和生态赤字	140
7.2.4	径流过程改变程度评价	141
7.2.5	生物多样性影响评价	141
7.3	中国地表径流过程时空均匀度评价	142
7.3.1	年内分配均匀度变化	142
7.3.2	空间均匀度变化	145
7.3.3	降水、径流特征变化	147
7.4	河流流态时空特征及其对水生物多样性的影响	155
7.4.1	生态径流指标	155
7.4.2	水文过程变异程度评价	158
7.4.3	生态径流变化及其对生物多样性的影响	161
7.4.4	生态径流指标与 IHA32 指标比较	164
7.5	讨论与小结	166
7.5.1	讨论	166
7.5.2	小结	167
	参考文献	168

第1章 绪 论

1.1 研究背景

陆地水文系统对全球变化的响应与适应性是当今全球变化、气象水文学研究的热点与学术前沿^[1-3]。观测和数值模拟结果均表明 20 世纪以来全球径流增加显著^[4]，但是由于气候、大气、土壤和植被的相互作用与联系同样能够导致水循环动态变化，因而难以确定 20 世纪以来径流增加是气候因子还是人类活动引起的。径流的长期趋势变化取决于降水和蒸发的平衡。蒸发不仅受到气候因子的影响，如温度、风速、地面湿度和太阳辐射等，还受到植被的生理成分（如气孔）与结构特征的影响（如叶面积指数）^[5]。因此 Gedney 等认为温室气体浓度增加导致植被气孔缩小，降低了植被的蒸腾作用，从而引起全球径流增加^[5]。然而 Piao 等认为气候和土地利用变化对全球径流的影响明显高于温室气体浓度上升带来的影响^[6]。

地表水文过程对人类健康、社会经济、生态系统功能及地球物理过程具有重要作用。在气候变化和人类活动影响下，世界上众多江河的水文过程也发生了显著变化。到 2050 年，非洲东部赤道区域、拉普拉塔河盆地与北美和欧亚大陆的高纬区域径流将增加 10%~40%；非洲南部、欧洲南部、中东和北美西部中纬度区域将降低 10%~30%^[7]。中国长江流域径流呈轻微的上升趋势，而黄河流域径流呈明显的下降趋势^[8]。

一方面，水文过程的改变对水生态系统的影响引发了越来越多的关注和重视^[9]。在非洲，降水减少 10%将导致流域面积减少 17%，这对水生态系统和人类生存是严峻的威胁^[10]。在美国，已建设的大量水利工程（如水库、大坝等）极大地改变了流域水文过程，造成流域间水文过程的差异性减小，越来越趋于均一化，不利于水生态系统的多样性发展^[11]。单个大型水利工程通过调蓄河道径流对下游生态需水产生明显影响^[12-14]，如三峡水利枢纽工程改变了下游河道生态需水过程，影响水生态系统的健康发展^[12]。

另一方面，全球变暖导致湿润区和干旱区极端降水强度增加，极端降水次数更频繁^[15,16]。随着全球持续变暖，极端降水也在持续加强^[15,16]。加强的极端降水引发洪涝灾害等极端水文事件的风险也随之上升^[17]。若不采取进一步行动，至 21 世纪末全球洪水造成的损失可能会比当前增加 20 倍，而且社会经济增长也加大了洪水造成的损失^[17]。就中国而言，洪水威胁也随着全球气候变化变得更加严

峻^[18,19]。陈晓宏等指出中国华南湿润区的一些河流几乎年年出现超过 20 年一遇甚至 50 年一遇的洪水^[18]；陈亚宁等发现位于中国西北干旱区的新疆洪水发生频率增加，洪峰流量增大^[19]。

Winsemius 等指出考虑到洪水发生风险在不断增加，因而需要持续进行水利工程等基础设施建设^[17]。基于传统频率分析方法计算的水利工程设计标准是确定水利工程建设规模和制定管理运行策略的重要依据。采用传统频率分析方法的潜在假设是洪峰序列满足平稳性要求。然而在变化环境下，由于洪峰序列发生了“突变”或具有“显著趋势”等特征^[20]，平稳性假设已经“死亡”^[20,21]。这意味着采用传统频率分析方法设计的水利工程可能无法满足未来防洪需求，将面临由变化环境带来的风险^[21]。叶长青等研究了珠江流域主要支流东江流域洪水风险的变化特征，发现基于传统频率分析方法得到的 100 年一遇洪水设计值，均表现出其重现期由水利工程建设前小于 100 年一遇到 2000 年后的大于 400 年一遇^[22]，用水文情势发生变化前估计的洪水重现期不能很好地描述变化后的洪水频率特征^[23]。因此，构建适应变化环境下的非平稳性洪水频率分析模型及重现期评估方法是工程水文学领域的关键科学问题，具有重要的现实意义。

1.2 研究目的和意义

珠江流域灾难性大洪水的频繁发生给防洪救灾带来了严峻的挑战^[24,25]。Hallegatte 等评估了全球 136 个主要沿海大城市的洪水灾害损失，位于珠江三角洲的广州市和深圳市由洪水造成的损失排在全球前 20 名^[26]。

水汽输送对珠江流域地表径流过程，尤其是对洪水等极端事件有重要影响。多样各异的气象、水文和气候学机制均影响着水汽输送，如热带气旋、对流、雷暴、锋区通道、海洋表面温度（sea surface temperature, SST）异常等。根据时间和空间尺度上的差异，这些机制可以分为两类：“直接的”因素（直接和立即起作用的气候因子）和“根本的”因素（在更大和更长的尺度上起作用的气候机制）^[27]。从 4 月开始，来自海上的暖湿气流经常成为控制珠江流域水文过程变化的主导因子，它与南下的冷空气遭遇形成冷锋和静止锋，常带来暴雨和大暴雨。5~6 月，强劲的西南季风暴发并控制华南地区，锋面类暴雨增多，雨量加大。7~10 月暴雨主要受到热带系统如热带气旋的影响。这些引发暴雨进一步诱发洪水的对流、雷暴和热带气旋等气候因子均可归为“直接的”因素。然而这些“直接的”因素又受到“根本的”因素的影响，如珠江流域锋面类暴雨又受到西太平洋副热带高压西伸北抬、印度洋孟加拉湾低槽不断向东扩展的影响^[28]。而且西南季风和热带气旋均与 SST 异常有密切联系^[29,30]。

人类活动（如水库、大坝、城市化等）对珠江流域地表水文过程包括洪水等

极端水文事件也有重要的影响。珠江流域各类蓄水工程的总调节库容为 256 亿 m^3 ，加上大型发电型水库，总调节库容达到 473 亿 m^3 。流域开发程度较高的区域主要位于西江干流红水河、北江干流中游和东江流域。大型水利枢纽一方面提高了流域的防洪标准和抵御洪水的能力，另一方面也改变了珠江流域的水文情势和水生生物环境。梯级水电水能开发通过改变水生生物生存环境、阻断鱼类洄游通道等使水生态结构和功能发生变化，影响水生物的多样性^[31]。

综上所述，在珠江流域面临严峻的洪水灾害威胁背景下，首先研究了珠江流域在近 60 年实测期与近 1000 年历史记录期中洪水量级和频率时空的变化特征，探讨科学问题 1（珠江流域实测和历史时期洪水量级和频率如何变化）。进一步调查了“直接的”气候因子（登陆热带气旋）和“根本的”气候因子（海洋表面温度异常）与洪水时空特征的联系，探讨了科学问题 2（珠江流域地表水文过程变化背后的气候成因机制）。接着修正了传统频率分析下的“极值理论”，包括 T 年一遇设计值、重现期等，探讨了科学问题 3（变化环境下非平稳性洪水频率分析理论与方法及其对水利工程防洪的影响）。为提高流域防洪标准，修建了大量的水利工程，这些工程虽然满足了抵御洪水的需求，但是不可避免地影响了流域生态系统健康。因此，本书最后关注了水利工程对珠江流域地表径流过程的影响，评价了水利工程影响下地表径流在时间和空间上的均一化特征及水生物多样性的变化，探讨了科学问题 4（人类活动对地表水文过程的影响及其水生态效应）。该项研究对于科学理解当前气候变化和人类活动双重影响下，珠江流域防洪救灾、水利工程采用合理设计标准及水生态环境演变有一定的科学与现实意义，为珠江流域防灾减灾、提高水利工程安全水平和水生态系统保护提供一定的依据。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 洪水时空变化特征

全球不同区域洪水特征对气候变化具有不同的响应特征。一般通过分析洪水量级、频率、历时与峰现时间等要素评价洪水时空特征。Kundzewicz 等研究了全球 195 个流域的实测洪水，发现在 20 世纪只有 27 个流域洪水量级增加，31 个流域洪水量级显著减少，剩余的 137 个流域洪水量级无趋势性变化^[32]。Zhang 等对 1847~1996 年加拿大南部天然流量的研究表明，气温升高，蒸发加大，而降水量不变导致年最大日流量减少 29%^[33]。Schmocker-Fackel 和 Naef 根据 1850 年以来瑞士发生的洪水事件，指出 1968 年以后洪水发生越来越频繁^[34]。Mallakpour 和 Villarini 则发现美国中部区域洪水量级没有显著趋势性变化而洪水频率显著增加^[35]。Yang 等指出气候变暖和城市化导致美国中西部上游区域洪水发生时间明显

提前^[36]。Villarini 分析了美国洪水发生的季节性特征, 并指出洪水发生的季节性没有明显的趋势性变化, 人类活动如兴建水库、城市化等倾向于导致洪水发生时间在分布上更广泛^[37]。与洪水量级、频率和峰现时间等特征相比, 以往有关洪水历时变化的研究较少。Kimberley 等分析了爱尔兰洪水历时的变化特征及其对地表土壤性质的影响^[38]。

国内学者对我国不同区域的洪水特征也开展了一系列研究。郝振纯等分析了三种典型气候模式排放情景下淮河流域洪水量级的变化特征^[39]。胡春宏和张治昊分析了黄河下游洪水水位在河道萎缩过程中的变化特征, 认为洪水水位与河道萎缩程度之间呈非线性关系^[40]。陈璐等构建了长江宜昌站洪水量级和发生时间的联合分布, 分析了干支流的洪水遭遇特征^[41]。陈亚宁等指出气候变化对新疆区域水循环有明显影响, 1990 年以来新疆大部分河流春汛提前, 夏汛推后, 洪峰量级增加, 洪水发生次数明显增多^[42]。就珠江流域来看, 吴志勇等发现 1980 年以来, 珠江流域极端洪水事件发生的频次明显增加, 尤其是自 1990 年以来增加趋势显著^[43]。肖恒等评估了 IPCC RCP4.5 情景下未来 30 年珠江流域洪水对气候变化的响应, 认为 2011~2040 年洪峰流量及洪水总量在西江及粤西桂南沿海诸河可能呈增加的趋势^[44]。

总体来看, 国内外学者对全球不同区域洪水特征及其趋势变化开展了充分的研究。全球气候变化研究的重要目标之一是提高对洪水特征变化趋势的理解^[45]。这对适应洪水变化, 了解其对公共政策、基础设施和生态系统带来的影响提供了基本信息。了解过去的洪水变化特征有助于评价现在使用的减轻洪灾损失和提高洪水适应性模型的有效性, 因此进一步开展珠江流域洪水量级和频率变化特征的检测, 有利于加强人们对珠江流域洪水灾害的了解, 扩展相应的洪水信息知识。

1.3.2 登陆热带气旋及其对洪水的影响

研究洪水变化特征及其背后成因机制有助于扩展人们对洪水变化特征的理解。登陆热带气旋往往带来暴雨, 是沿海乃至内陆区域洪水发生的气候成因之一。热带气旋是在热带海洋上生成, 绕着其中心强烈旋转, 同时又向前移动的空气涡旋, 一般在北半球做逆时针旋转, 在南半球做顺时针旋转。中国 1989 年以前把热带气旋分为热带低压 (中心附近最大风力 6~7 级)、台风 (最大风力 8~11 级)、强台风 (最大风力大于等于 12 级)。为了同国际接轨, 中国自 1989 年起将热带低压、台风、强台风等统称为热带气旋^[24]。

Knight 和 Davis 分析了热带气旋对美国东南部极端降水事件的影响, 发现热带气旋引发的极端降水量占总极端降水量的比例呈显著增加趋势, 大概每十年增加 5%~10%^[46]。Villarini 和 Denniston 分析了热带气旋对澳大利亚极端降水的影响, 发现澳大利亚西部地区极端降水的 60%~100%是由热带气旋引发的^[47]。Villarini

等则进一步分析了登陆热带气旋与洪水的联系,发现登陆热带气旋通过引发的降水对洪水时空特征具有明显的影响^[48]。而且登陆热带气旋引发的洪水具有明显的季节性特征,也是洪水混合产生机制之一,其对洪峰极值分布参数也有明显的影响^[49]。最近研究还表明登陆热带气旋引发的洪水事件不仅分布在沿海区域,还进一步深入到内陆区域^[50]。

国内学者更侧重热带气旋个例对极端降水和洪水事件的影响。申茜等基于台风影响指数分析了近海台风对中国东部夏季降水的贡献^[51]。王胜等分析了安徽省台风降水气候特征及其对农业的影响,发现安徽省台风降水南部多于北部,山区多于平原^[52]。丁德平和李英分析了台风影响北京降水的气候学特征,并以 8407 号和 0509 号台风为例对其影响的降水过程进行比较^[53]。在具体台风事件对降水过程的影响机理方面,陈镭等分析了台风“桑美”登陆前后距台风中心 111km 以内的降水结构及其时空演变特征^[54];黄新晴等分析了 2007 年台风“罗莎”能量频散的波动特征及其对浙江远距离降水的影响^[55]。相比于台风对降水影响的研究,我国学者对台风与洪水事件的联系研究较少。林荷娟等分析了 2013 年第 23 号台风“菲特”对太湖流域洪水运动的影响,发现在强风、暴雨、高潮及洪水遭遇下,太湖流域河网水位、沿江沿海潮位迅速上涨,洪涝灾害威胁扩大^[56]。胡四一等基于 Copula 函数分析了台风与梅雨的遭遇概率,以期对太湖流域设计暴雨调整、洪水资源利用方案与防洪实时调度决策提供依据^[57]。殷杰等在六种重现期情景下模拟台风引起的风暴潮对上海地区淹没范围的影响^[58]。

珠江流域处于西北太平洋热带气旋登陆亚洲大陆的主要出入口,海岸线(不包括岛屿)长达 3368km。热带气旋生成后受西太平洋副热带高压南缘偏东气流引导,从东向西和西北方向移动,多经巴士海峡进入南海后直逼广东省和海南省沿海。热带气旋从 5 月开始登陆广东省,随着时间推移,西太平洋副热带高压西伸和北抬,登陆位置有自东向西转移的趋势。在华南沿海登陆的热带气旋绝大多数都能带来暴雨,70%能造成大暴雨或特大暴雨^[21]。因此分析珠江流域洪水事件与登陆热带气旋的联系具有重要的意义。

1.3.3 海洋表面温度异常与地表径流过程的遥相关

热带气旋通过影响水汽输送从而影响地表径流,甚至影响极端水文事件,如洪水。海洋表面温度(SST)异常则在更大、更长的尺度上影响水汽输送,进而影响全球气象水文过程。大气和海洋组成了一个动态系统,耦合变化,从而控制着整个地球的气候^[59]。大气海洋在不同的时间尺度上耦合变化,如年内、年际、年代际等^[60]。与天气或季节性气候变率等高频相反,SST 异常称为低频气候变化。大气海洋系统中的低频气候变化影响着大气中的水汽输送,是气候变化的一个重要原因。气候变化能够影响和控制急流及风暴路径,从而生成极端水文事件,如

暴雨、洪涝等^[61]。

大尺度气候指标,如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)、北大西洋涛动(north Atlantic oscillation, NAO)、印度洋偶极子(Indian Ocean dipole, IOD)和太平洋年代际震荡(Pacific decadal oscillation, PDO)等,具有在一定程度上描述低频气候变化时空作用的潜能,能够反映出大西洋、太平洋和印度洋等 SST 异常对气候的影响。大量研究已经调查了低频气候变化与水文过程之间的关系。Ward 等认为 ENSO 是反映气候变率最有优势的年际信号,并对全球大部分区域气候具有强劲的影响,与全球的洪水灾害和洪水风险有紧密联系^[62,63]。Bouwer 等调查了 NAO 对欧洲径流的影响,发现年最大流量相比年平均流量对大气循环的变化更敏感^[64]。Niu 等基于小波相干和秩次相关的方法调查了 IOD 与中国南方径流和土壤湿度的关系,发现中国南方径流和土壤湿度的决定性变化基本上都与 IOD 相关^[65]。Ouyang 等分析了 ENSO、PDO 及二者联合对中国降水和径流的影响^[66]。低频气候变化还通过影响热带气旋作用于极端水文事件。Villarini 和 Denniston 发现热带气旋引发的极端降水更倾向于出现在 La Niña 年份(ENSO 冷事件)^[47]。Villarini 等进一步调查了登陆热带气旋引发的洪水事件与 ENSO 和 NAO 的关系^[48]。

国内学者也开展了低频气候变化对中国不同区域气候的影响,相关研究多集中在降水、温度等方面^[67-69]。相比之下,国内较少关注大尺度气候指标与地表水文过程的联系。黄强等分析了 ENSO 事件对渭河干流径流变异的影响^[70]。王根绪等认为 ENSO 暖事件倾向于减少黄河源区径流量,冷事件则相反^[71]。李红军等采用小波、交叉小波多尺度分析等方法调查了阿克苏河天然径流和 NAO 的关系,认为 NAO 以大气环流为介质,通过影响温度和降水来影响径流^[72]。张瑞等发现 PDO 与长江入海径流量有较高的相关性^[73]。可能由于数据的限制,国内学者往往较少开展全流域尺度上低频气候变化与地表径流过程关系的研究。

1.3.4 人类活动对径流过程的影响及其水生态效应

地表径流过程不仅受到气候变化的影响,还受到人类活动如大坝、水库、城市化等的干扰。Nilsson 等认为全球大流域河流系统中一半以上受到大坝影响;受到大坝影响的流域比大坝影响较小的流域有着更高的灌溉压力和大概 25 倍的经济活动程度^[74]。Oki 和 Kanae 则指出尽管自然和人工修建的水库储水能够为人类社会增加可利用水资源,但是因此带来的河流流态变化应该成为水资源评价中的重点关注问题^[75]。大坝、水库等人类活动对流域径流过程的改变已获得较广泛的研究。Matteau 等基于多元统计分析评价了加拿大魁北克地区大坝对水文过程的影响^[76]。Tomer 和 Schilling 基于水量平衡方程评价了气候变化和土地利用对流域水文过程的影响^[77]。Yang 等分析了城市化对流域洪水过程的影响^[36]。还有一些

学者关注由人类活动改变河流流态引发的水生态效应。Vogel 等研究了水库调度方式对河道流量的影响,并提出广义生态指标用来评价水库调度对水生态机制的影响^[78]。Shiau 和 Wu 探讨了满足河道生态需水的水库调度方式^[79]。Yang 等基于数据挖掘方法建立了河流水文指标与水生物多样性和丰富度的关系^[80]。Black 等基于 32 个水文变化指标 (IHA32) 构建了水库引起的河流水生态系统健康评价等级^[81]。

国内学者也广泛开展了人类活动对径流过程影响的研究。陆国宾等分析了汉江中下游径流受丹江口水库的影响^[82]。郭军庭等基于 SWAT 模型定量给出了土地利用和气候变化对潮河流域径流的贡献率^[83]。高晓薇和刘家宏基于 SCS 模型分析了深圳市城市化对河流水文过程的影响^[84]。在人类活动对径流改变引起的水生态效应方面,韩帅等分析了水库调度对大坝下游河道生态径流的影响^[85]。张正浩等基于 Copula 函数分析了丰枯遭遇条件下辽河流域水库调度对河道生态径流的影响^[86]。李剑锋等研究了水文变异对黄河干流河道内生态需水的干扰^[87]。孙艳伟等聚焦城市化影响下的生态水文效应,认为城市化通过改变径流特性,从而影响水生态系统的完整性和多样性,进而带来负面作用^[88]。

1.3.5 非平稳性洪水频率分析理论与方法

在气候变化和人类活动影响下,河道内径流过程发生了显著变化。然而过去几十年水利工程设计标准依赖于径流序列的平稳性假设:天然河流在严格的变化范围内正常波动。人类活动如水利工程设施、河道整治、土地利用和土地覆盖变化等影响洪水发生风险、河道供水和水体质量,干扰了水资源管理系统的平稳性假设。海洋和冰原的缓慢动态变化加剧了自然气候变化和低频气候变化^[89,90],这两个外在条件(有时难以进行区别)也对平稳性构成了挑战^[21]。

为此在 2010 年 1 月,水文学家、气候学家和工程学家等齐聚美国博尔德市商讨水文过程平稳性假设是否“死亡”及其对水资源设计和规划带来的影响^[91]。然而此次会议并没有达成是否用非平稳性假设代替平稳性假设的共识。一方面,水文学家对收集的数据显示河流呈显著性变化特征持怀疑态度。另一方面,气候学家指出气候变化和呈现的转折现象表明未来洪水和干旱等极端气候更加复杂和混乱。所以此次会议指出研究者需要付出更多的努力来探索水文水资源系统中平稳和非平稳性变化,并为水资源管理、规划、设计和运行提供更多可靠的信息。

1. 洪峰序列非平稳性识别

准确判断洪峰序列是否满足平稳性假设,是水资源系统设计和规划的基础。Salas 定义洪峰序列具有以下特征则满足平稳性假设:不存在显著趋势、变异和周期性^[92]。因此,目前很多研究者通过检测洪峰序列是否存在显著趋势或变异特征

来判别是否满足平稳性假设。Villarini 等检查了美国 50 个站点 100 年以上洪峰序列的趋势和变异特征来判别其平稳性假设^[93]。以同样的方式,他们又判別了奥地利洪峰序列的平稳性假设是否得到满足^[94]。国内学者以相似的方式也开展了大量的研究^[95,96]。然而洪峰序列的尺度特征使得上述平稳性定义变得极有争议。另一种观点认为广泛存在的长期持续性效应使得洪峰序列出现的显著趋势或变异特征在更长的时间尺度上可能是正常波动^[97,98]。由于实测洪峰序列往往只有几十年,最多不过上百年,因此仅仅检测趋势和变异特征对于判别平稳性假设是否合理是不够的,还需要进一步检测洪峰序列的长期持续效应。

洪峰序列趋势、变异和长期持续效应检测方法较为丰富。在时间趋势检测方面,由于非参数方法不用假设服从某一分布且对序列中异常值不敏感,因此被广泛应用,主要有 Mann-Kendall(MK)法^[99]、线性趋势相关系数检验法^[100]、Spearman 秩次相关系数检验法^[101]和 Kendall 秩次相关检验法^[102]等。变异点检测方法多达几十种,雷红富等采用数值模拟的方法对其中十种变异点检测方法的性能进行了比较^[103]。无论是趋势检测方法,还是变异点检测方法,由于不同方法的检测原理不同,并且受本身局限性等的影响,往往检测结果有差异,因此通常采用多种方法进行集成检测,综合判定洪峰序列的趋势和变异特征^[104]。长期持续效应的检测方法也多达十几种,Montanari 等也通过数值模拟的方法比较了不同方法的检测性能^[105]。

2. 传统洪水频率分析方法

传统频率分析方法又称经典频率分析,在过去几十年常用于水利工程等水文水资源系统的设计和规划。从统计上看,传统频率分析需要对满足独立同分布的数据进行拟合,来计算洪水重现期和设计流量^[106,107]。洪水频率分布线型超过 20 种,从参数数量上可分为:两参数极值分布、三参数极值分布和多参数极值分布(超过三个参数)。多参数极值分布由于参数较多,在拟合中不确定性较大,因此较少使用。常用的两参数极值分布函数有对数正态分布、Logistic 分布、Gumbel 分布、Weibull 分布等;常用的三参数极值分布有广义极值分布、Pearson-Ⅲ型分布、广义 Logistic 分布、广义 Pareto 分布等^[108]。从曲线类型上可分为:正态分布族、广义极值族、Pearson-Ⅲ分布族和广义 Pareto 分布族。世界上各个国家根据实际洪峰特征,分别推荐了最适合的分布线型,例如,美国和澳大利亚推荐采用对数 Pearson-Ⅲ型分布,中国则推荐采用 Pearson-Ⅲ型分布。实际上,同一国家不同地区河流的洪水特征也不尽相同,因此在具体研究中需要根据参数估计和分布选择准则选择最优拟合分布线型。

传统频率分析的参数估计主要采用矩法和最大似然估计法^[107]。近些年来,L-矩法由于其稳健性和无偏性,在极值分布参数估计中广泛使用^[109]。在完成极值

分布参数估计后, 需要采用一些准则判断最优极值分布函数。极值分布函数拟合优度检验方法有多种, 如 AIC(Akaike information criterion)、AICc(corrected AIC)、概率曲线相关系数(probability plot correlation coefficient, PPCC)、Kolmogorov-Smirnov 检验等^[110]。需要指出的是不同的检测方法对于同一洪峰序列选择的最优极值分布函数可能不同。

3. 非平稳性洪水频率分析

针对洪峰序列中由于显著趋势或变异带来的非平稳性特征, 一些学者提出了作为相应解决方案的非平稳性洪水频率分析方法。针对洪峰序列中存在的显著趋势特征, Vogel 等提出了一个两参数对数正态分布模型, 考虑了水文趋势对洪水频率分析的影响^[111]。叶长青等构建了四种趋势模型, 评价了洪峰序列水文统计特征变化对洪水频率分布参数的影响^[22]。针对洪峰序列中存在的显著突变特征, 多以突变点为时间序列分割点, 将洪峰序列分为突变前、突变后两个子序列, 并认为分割后的两个子序列均满足平稳性假设, 分别采用传统的频率分析方法进行分析^[98, 112]。此外, 冯平等则用考虑洪峰序列变异的混合分布进行洪水频率分析^[113]。谢平等综合考虑了洪峰序列中的水文统计特征, 将其分为相对一致的随机性成分和非一致的确定性成分, 采用分解-合成方法进行非平稳性洪水频率分析^[114]。洪水过程包含多种要素, 不仅包括洪峰, 还包含洪量、历时等要素, 考虑多变量的非平稳性洪水频率分析也得到了相应开展^[115, 116]。

国内学者主要关注洪峰序列的水文统计特征本身对洪水频率分析的影响, 包括非平稳性在洪峰极值分布参数估计中导致的不确定性^[117]。相比之下, 国外学者较为关注外部驱动机制对洪水过程的影响及如何构建考虑外部因素的非平稳性洪水频率分析模型。Polemio 和 Petrucci 将降水和温度因子纳入到非平稳洪水频率分析框架中, 并在意大利南部流域进行了应用^[118]。Villarini 等将低频气候变化如 NAO 等纳入非平稳性分析框架, 分析自然气候变率对洪水频率分析的影响^[94]。López 和 Francés 构建了反映水库对洪水过程影响的指标, 并分析了水库对西班牙洪水频率分析的影响^[119]。Villarini 等选择了受城市化主导影响的小流域, 采用人口数量反映城市化程度, 并分析了城市化对洪水频率的影响^[120]。Gilroy 和 McCuen 则构建了考虑气候变化和土地利用的非平稳性洪水频率分析模型^[121]。考虑外部驱动因子的洪水频率模型更具有物理机制, 从而对预测未来洪水频率变化特征, 调整水利工程设计标准, 增强水资源系统对未来气候变化和人类活动适应性提供一定的参考。