

水 科 学 前 沿 丛 书

河川径流变化 及归因定量识别

张建云 王国庆 等 著



科学出版社

水科学前沿丛书

河川径流变化及归因定量识别

张建云 王国庆 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

在气候变化和人类活动的共同影响下,20 世纪 80 年代以来,中国主要江河的径流量总体上呈现减少趋势,进一步加剧了水资源的供需矛盾,影响到国家经济社会的可持续发展。本书重点介绍河川径流变化特征提取方法、流域水文模拟技术以及径流变化归因识别方法。分析不同气候区典型流域近 50 年实测径流的变化特征,研究不同水文模型的区域适应性,定量评估河川径流的变化归因及其对气候变化的响应,最后提出需要进一步研究的科学问题。

本书可供从事水文水资源及水利工程、气候及气象、生态及环境资源、农业及地理等专业的研究人员,高等院校教师,研究生及本科生,政府决策部门的行政管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

河川径流变化及归因定量识别/张建云等著. —北京:科学出版社,2014.2
(水科学前沿丛书)
ISBN 978-7-03-039436-1

I. ①河… II. ①张… III. ①河川径流-研究 IV. ①P333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311368 号

责任编辑:杨帅英 朱海燕 / 责任校对:鲁 素

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张:11

字数:242 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		茆智	孟伟	王超	王浩
		王光谦	薛禹群	张建云	张勇传

主 编 刘昌明

常务副主编 徐宗学

编	委	蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

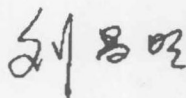
随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化,实现人与自然和谐相处的压力与日俱增,水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响,与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国,水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力,我国在水科学研究方面取得了重大进展,并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展,迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此,科学出版社与北京师范大学共同发起,联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队,策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题,对相关研究成果加以凝练与集成,力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说,工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果,对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平,经得起同行和时间检验,组织了国内多位知名专家组成丛书编委会,他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物,对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信,通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作,会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世,为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用,为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。



2012年9月

前 言

随着社会经济的快速发展,许多流域内修建了大量水利工程、交通工程等,同时城镇化率不断提高,下垫面状况发生了显著变化,直接影响了流域的产汇流规律,以及蓄水、用水和耗水条件。同时,在全球变暖背景下,中国气温明显升高,不同地区的降水也呈现出或增或减的趋势性变化。受气候变化和陆面环境变化等多种因素的影响,自 20 世纪 80 年代以来,中国多数河流实测径流呈现出减少趋势,特别是北方河流,减少更为显著。环境变化对中国水资源的可持续开发利用造成巨大压力,正确认识主要江河径流变化趋势和原因,是实现变化环境下水资源管理、水资源优化配置和水资源可持续性开发利用,保障社会经济快速稳定发展等方面的重要基础工作。

在全球变化研究国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”(项目编号:2010CB951100)、国家自然科学基金重点项目“变化环境下不同气候区河川径流变化归因定量识别研究”(项目编号:41330854)、水利部公益性行业科研专项经费项目“气候变化对我国水安全影响及对策研究”(项目编号:200801001)、“变化环境条件下海河流域水资源评价技术研究”(项目编号:201101015)、2012 年度江苏省第四期“333 工程”科研项目(项目编号:BRA2012203)的支持下,本书对河川径流变化归因及定量评估的相关关键技术进行了深入研究。同时,本书还得到南京水利科学研究院出版基金的资助。

全书共分 9 章,第 1 章绪论,主要介绍研究的科学意义、国内外相关研究进展和本书的主要内容;第 2 章介绍水文气候要素变化特征的诊断方法,并给出典型流域降水、径流历史变化趋势、周期、变异的具体诊断分析结果;第 3 章介绍集总式降水径流模型及其应用,包括应用较为广泛的新安江模型、水量平衡模型和 SIMHYD 降水径流模型等,同时,介绍在水文模拟中较为常用的 3 种参数优化方法及其改进,最后给出 3 个降水径流模型在中国 8 个典型流域的应用情况;第 4、第 5 章分别给出半分布式 TOPMODEL 模型和基于正交网格的 VIC 模型在我国典型流域的应用情况;第 6 章介绍河川径流对气候变化的敏感性分析方法及不同气候区典型流域对气候变化敏感性的分析结果;第 7 章介绍河川径流变化归因分析方法和 3 个典型流域的径流变化归因定量分析;第 8 章侧重介绍评价模拟中的不确定性,包括不确定性的影响因素、不确定性的评估方法等;第 9 章系统概括主要研究结论,并提出未来需要进一步研究的科学问题。

本书由张建云院士设计并统稿,由王国庆教授与张建云院士执笔,各章节内容由相关项目研究的核心专家参与撰写:刘翠善博士、严小林博士参与了第 2 章的撰写和分析计算工作;刘艳丽博士、贺瑞敏博士参与第 4、8 章的撰写和分析计算工作;张利茹博士、金君良博士、鲍振鑫博士和王小军博士分别参与第 3、5、6、7 章的撰写和分析计算工作。鲍振鑫博士和贺瑞敏博士对全书进行了校对。全书由刘九夫教授审查,笔者对所有为本书出版作出贡献的同事和朋友致以衷心的感谢。

在上述项目的执行和本书的编写过程中,自始至终得到了南京水利科学研究院刘九

夫教授、吴永祥教授、陆善萍所长、谢自银教授，水利部水文局王金星博士、李岩博士，辽阳水文局王兴泽教授，河南水文局王鸿杰教授，四川大学王文圣教授，黄河水利科学研究院荆新爱高工等专家、同事的大力帮助，在此一并表示感谢！

河川径流变化涉及水资源安全和国家经济社会可持续发展，但限于目前对全球变化影响的认识水平以及资料短缺问题，该领域的许多科学技术问题仍是较长时期内研究的热点和难点，需要进一步深入研究。限于作者水平，书中难免存在不足和局限之处，敬请广大读者批评指正。

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献资料，特别是水利部水文局王金星博士、李岩博士、辽阳水文局王兴泽教授、河南水文局王鸿杰教授、四川大学王文圣教授、黄河水利科学研究院荆新爱高工等专家、同事的大力帮助，在此一并表示感谢！

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献资料，特别是水利部水文局王金星博士、李岩博士、辽阳水文局王兴泽教授、河南水文局王鸿杰教授、四川大学王文圣教授、黄河水利科学研究院荆新爱高工等专家、同事的大力帮助，在此一并表示感谢！

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献资料，特别是水利部水文局王金星博士、李岩博士、辽阳水文局王兴泽教授、河南水文局王鸿杰教授、四川大学王文圣教授、黄河水利科学研究院荆新爱高工等专家、同事的大力帮助，在此一并表示感谢！

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献资料，特别是水利部水文局王金星博士、李岩博士、辽阳水文局王兴泽教授、河南水文局王鸿杰教授、四川大学王文圣教授、黄河水利科学研究院荆新爱高工等专家、同事的大力帮助，在此一并表示感谢！

目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与科学意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 水文序列分析方法	2
1.2.2 气候变化对水文水资源的影响研究	4
1.2.3 人类活动对水文循环及区域水资源的影响研究	6
1.2.4 影响评价中的不确定性	8
1.3 研究流域概况	11
1.3.1 北方干旱半干旱气候区	12
1.3.2 南北气候过渡区	14
1.3.3 西部高原气候区	14
1.3.4 南方湿润气候区	16
1.4 本书的主要研究内容	18
第 2 章 典型流域的河川径流演变特征	19
2.1 河川径流演变特征分析方法	19
2.1.1 趋势分析方法	19
2.1.2 变异点诊断方法	20
2.1.3 周期性分析方法	21
2.2 典型流域河川径流变化特征	23
2.2.1 径流变化的趋势	24
2.2.2 径流序列的变异点诊断	29
2.2.3 径流变化的周期性	32
2.3 典型流域降水径流关系变化	38
2.3.1 降水的年际变化特征	38
2.3.2 典型流域降水及径流的年内分配过程	41
2.3.3 降水径流关系变化	44
2.4 小结	46
第 3 章 集总式降水径流模型及其应用	48
3.1 集总式降水径流模型	48
3.1.1 新安江模型	48
3.1.2 考虑融雪过程的水量平衡模型	53
3.1.3 SIMHYD 降水径流模型	54

3.2	参数优化方法	56
3.2.1	Rosenbrock 方法	57
3.2.2	SCE-UA 算法	58
3.2.3	Simplex 方法	59
3.3	目标函数	60
3.4	集总式模型在典型流域的应用	61
3.4.1	新安江模型的应用	62
3.4.2	水量平衡模型的应用	65
3.4.3	SIMHYD 降水径流模型的应用	71
3.5	小结	74
第 4 章	半分布式 TOPMODEL 模型及其应用	75
4.1	模型结构与计算原理	75
4.1.1	模型产流理论	75
4.1.2	主要控制方程	78
4.1.3	模型参数	80
4.2	地形指数及汇流累积曲线计算	81
4.2.1	地形指数的计算	81
4.2.2	地形指数及汇流曲线的提取	81
4.3	TOPMODEL 模型在典型流域的水文模拟应用	85
4.4	小结	89
第 5 章	分布式 VIC 模型及其应用	90
5.1	可变下渗容量(VIC)模型	90
5.1.1	蒸散发计算	91
5.1.2	融雪计算	91
5.1.3	产流计算	92
5.1.4	汇流计算	92
5.2	VIC 模型的参数	94
5.2.1	气候强迫和地理参数	94
5.2.2	植被参数	95
5.2.3	土壤参数	101
5.2.4	水文参数	105
5.3	VIC 模型在典型流域的应用	106
5.3.1	河网概化	106
5.3.2	径流模拟	111
5.4	小结	114
第 6 章	区域水文要素对气候变化的敏感性	115
6.1	敏感性分析方法	115
6.1.1	径流变化敏感性	115
6.1.2	敏感性强度指标	116

6.2	蒸发能力模拟及其对气温变化的响应	117
6.2.1	蒸发能力模拟方法及验证	117
6.2.2	水面蒸发能力对气温变化的响应	120
6.3	河川径流对气候变化的敏感性	121
6.4	土壤含水量对气候变化的敏感性	123
6.5	流域蒸散发对气候变化的敏感性	125
6.6	小结	128
第7章	典型流域河川径流变化归因	129
7.1	不同下垫面覆被类型的减水作用	129
7.1.1	梯田的减水作用	129
7.1.2	林地的减水作用	130
7.1.3	草地的减水作用	130
7.2	大型水利工程对河川径流的影响	131
7.3	下垫面变化对小尺度流域水文的影响	133
7.3.1	试验流域概况	133
7.3.2	水土保持对年径流量的影响	133
7.3.3	水土保持措施对水文过程及特征的影响	134
7.4	水土保持对中大尺度流域水文过程的影响	135
7.4.1	流域概况	135
7.4.2	暴雨洪水过程变化特征	137
7.4.3	不同年代径流组成变化	138
7.5	基于水文模拟的径流变化归因分析方法	139
7.6	典型流域径流变化归因	140
7.6.1	辽河流域径流变化归因	140
7.6.2	昕水河流域径流变化归因	142
7.6.3	淮河上游周口站径流量变化归因	144
7.7	小结	146
第8章	水资源模拟中的不确定性	147
8.1	评价模型的不确定性	147
8.2	不确定性分析方法	148
8.2.1	马尔可夫链蒙特卡罗方法	148
8.2.2	拉丁超立方体抽样方法	148
8.2.3	普适似然不确定性估计方法	149
8.3	流域水文模拟中的不确定性	150
8.4	小结	153
第9章	结论与展望	155
9.1	主要研究结论	155
9.2	需要加强研究的科学问题	156
参考文献		157

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的与科学意义

“水是生命之源、生产之要、生态之基”，作为一种基础的自然资源，水不仅是生态环境的控制性因素之一，同时又是战略性的经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。展望未来，水资源正日益影响全球的环境与发展，甚至可能导致国家之间的冲突。21 世纪，水资源的国家战略及其相关科学问题，已经成为全球共同关注和各国政府的重要议题之一。河川径流作为水循环的重要环节，是水资源的重要表征指标，也是水资源优化配置、合理开发利用和保护的重要依据，它的形成与演变越来越显著地受到气候要素变化和人类活动等多种因素的影响。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组的第四次评估报告《气候变化 2007：自然科学基础》指出：近 100 年(1906~2005 年)地球表面气温上升了 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ，全球气候呈现出以变暖为主要特征的显著变化。近 50 年的平均线性增暖速率为 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，几乎是近 100 年的 2 倍，而最近 12 年中有 11 年位列 1850 年以来最暖的 12 个年份之中。在全球变暖的大背景下，1900~2005 年，一些地区的降水呈现显著增加趋势，如南美洲及北美洲的东部、欧洲北部及亚洲的中部和北部；而撒哈拉沙漠、地中海地区、南非和南亚等地区则呈干旱化趋势(IPCC, 2007, 2008)。

1880 年以来，中国的变暖速率为 $0.5 \sim 0.8^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ，其中，20 世纪 20~40 年代我国平均气温持续偏高，50 年代至 80 年代初气温有所下降，80 年代中期又开始持续增温；1951~2009 年中国平均温度上升 1.38°C ，每 10 年的变暖速率达到 0.23°C 。气温变化在区域分布上，全国范围内除局部地区有较小的气温下降趋势外，其他地区均呈现上升趋势。我国北方(秦岭、淮河以北地区)和青藏高原的部分地区年均气温升高显著，但西南地区北部，包括四川盆地东部和云贵高原北部年均气温呈下降趋势。我国近百年的年降水呈现出明显的年际振荡。其中，20 世纪头 10 年、30~40 年代和 80~90 年代降水偏多，其他年代偏少。近 50 年中国年平均降水量呈微弱减少趋势，平均减少 $2.9\text{mm}/10\text{a}$ ，全国年降水量增加主要集中在华东、华南(长江中下游、淮河流域和珠江流域)和我国西部(103°E 以西)地区，其中以华东、华南为最大，为 $5 \sim 40\text{mm}/10\text{a}$ ，部分地区达到 $120\text{mm}/10\text{a}$ ；华北地区、东北东南部以及陕西、四川、甘肃南部年降水量则表现出普遍性的减少趋势(《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会，2011)。

随着工农业和社会经济的快速发展，都市化进程不断推进，水利工程、水土保持生态工程建设逐步加强，人类越来越快地改变着陆面环境和水资源情势。截至 2011 年，全国已建成大中小型水库 9.8 万多座、塘坝等工程 456 万座，蓄水工程总库容达 6067 亿 m^3 、兴利库容 3134 亿 m^3 ，分别为多年平均年径流量的 23% 和 12%。从整体上看，中国蓄水工程对天然径流的调蓄控制能力在北方地区较强，海河、黄河和辽河 3 个水资源一级区蓄

水利工程总库容均大于多年平均年径流量,兴利库容占多年平均年径流量的 55%~70%。全国已建成引水工程近 84 万处,现状情况下年引水能力 1936 亿 m^3 ,其中大型引水工程引水能力占总引水能力的 37%,主要分布在黄河、淮河、长江和西北诸河区。提水工程 30 余万处,现状情况下年提水能力 1451 亿 m^3 ,其中大型提水工程提水能力占总提水能力的 16%,主要分布在淮河、长江和珠江区。跨水资源一级区的调水工程 88 处,现状情况下年调水能力 227 亿 m^3 。此外,全国有地下水生产井约 494 万眼,其中配套机电井约 429 万眼,主要分布在黄淮海平原。

20 世纪 80 年代以来,中国加快了城市化进程。80 年代,城镇人口平均每年增加 1000 万人以上,90 年代每年增长 1500 万人以上。进入 21 世纪,城镇人口平均每年增长接近 2000 万人,规模进一步扩大。同时,在 20 世纪 90 年代(1990~2000 年),全国城市建成区面积平均每年扩大 938 km^2 ,进入 21 世纪后则平均每年扩大 1861 km^2 ,几乎加快了 1 倍(沈建法,2005)。

水土保持是防治水土流失、改善生态环境的重要措施。截至 2002 年,全国累计治理水土流失面积 86 万 km^2 ,其中,修建基本农田 1300 万 hm^2 ,营造水土保持林 4300 万 hm^2 、经济林和果树林 470 万 hm^2 ,种草 430 万 hm^2 ,建成数百万座小型水利水保工程。近些年来,我国水土保持工作稳步推进,2009 年内,全国共完成水土流失综合防治面积 7.5 万 km^2 ,其中,综合治理面积 4.8 万 km^2 ,实施封育保护面积 2.7 万 km^2 ,治理小流域 3200 条,新建淤地坝 208 座。水土保持以梯田、林草、坝地等为主要治理措施,这些措施不仅有就地拦蓄降水、增加入渗、增大土壤含水量和基流量,改善当地生态环境的作用,而且还可以在汛期有效地削峰调洪,起到防洪的作用。但也不难看出,这些水土保持措施在某种程度上改变径流的时空分布,增大流域的蒸散发量,在一定程度上加剧区域水资源危机。

受气候变化和人类活动等多种因素的影响,中国主要江河重点控制站实测径流量总体呈现减少趋势,其中海河流域、黄河流域和辽河流域减少显著,海河流域自 1980 年以来的径流量与 1980 年以前相比减少 4~7 成;淮河流域、松花江流域、珠江和长江上游实测径流量为弱减少趋势;受近些年极端气候的影响,长江中下游流域、淮河上游和嫩江流域实测径流呈现略微增加趋势,主要表现为区域性洪水强度和频次增加(张建业等,2007)。

气候变化、都市化进程加剧等环境变化给水资源的可持续开发利用带来巨大压力,正确认识江河径流变化趋势和原因,对实现变化环境下水资源管理、水资源优化配置和水资源可持续性开发利用、保障社会经济快速稳定发展等方面具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水文序列分析方法

水文现象是一种自然现象,具有确定性变化规律和随机性变化规律,水文现象随时间变化而变化的过程称为水文过程或水文时间序列。时间序列分析的一个重要内容就是分析序列的变化特性,包括趋势性、周期性、突变性等。

河川径流过程是水文学中最常见的时间序列,径流的变化通常包含“量”和“结构”的变化。前者通常是指径流总量、流量等数值上的变化,而后者则注重从径流过程线的“形

状”上进行分析,它反映不同时段内径流的比例。在气候变化以及人类活动的影响下,河川径流不仅年总量发生变化,其年内分配特征也发生着相应的变化。用于体现径流年内分配特征的指标有各月、季径流占年径流的百分数,汛期、非汛期占年径流的百分数等。在 20 世纪 80 年代,汤奇成等(1982)从河川年径流的角度,提出不均匀系数的概念,讨论了年径流不均匀系数的计算方法和一些性质,并指出不均匀系数不仅可用于径流,而且可用于年降水或其他要素的年内分配分析。郑红星和刘昌明(2003)根据黄河源区主要测站 1952~1997 年的月天然径流资料,分析年内分配不均匀系数、集中度和集中期、变化幅度等特性,认为 20 世纪 90 年代的径流年内分配特征较前期出现较大的变化,突出表现在汛期径流量的减少。王金星等(2008)采用年内不均匀系数(完全调节系数)和集中度(期)等指标,从多个角度分析中国六大江河 19 个重点水文站实测径流年内分配特征的变化规律。

随着时间的增长,对水文序列的各值平均而言,或是增加或是减少,形成序列在相当长时期内向上或向下缓慢地变动,这种有一定规则的变化称为趋势。时间序列的趋势性变化可能是线性的,也可能是非线性的。目前常用的趋势检验方法主要包括:滑动平均法、线性回归法、累积距平法、二次平滑法、三次样条函数法、Mann-Kendall 秩次相关检验法及 Spearman 秩次相关检验法、小波分析法等。线性回归法和滑动平均法简单明了,可以直观地给出时间序列是否具有递增或递减的趋势,并且线性方程的斜率定量表征了时间序列的平均趋势变化率;然而,这两种方法只能给出序列的演变趋势,很难定量判别趋势变化是否显著。Mann-Kendall 秩次相关检验法及 Spearman 秩次相关检验法则通过相关统计量的计算,可以定量地判别序列变化趋势是否显著,其中,Mann-Kendall 秩次相关检验法是一种非参数统计检验方法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的统计分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算也比较简单,是目前比较常用的趋势诊断方法。叶茂等(2006)采用线性回归、Mann-Kendall 秩次相关检验方法,分析塔里木河水资源利用及趋势,认为 1995 年以来,塔里木河水资源增加趋势明显,这种现象与全球变暖不无关系。徐宗学等(2006)分析了北京地区降水的时空分布规律和黄河流域近 50 年降水的变化趋势。曹建廷等(2007)采用类似的方法,分析长江源区 1956~2000 年径流量变化,认为长江源区年径流量在 1956~2000 年呈微弱的减少趋势,该时段流域内升温明显,降水也呈微弱减少趋势,降水量减少是该时段径流量减少的直接原因。张建云等(2009)分析 1951~2005 年黄河中游径流的变化趋势,指出,在全球变暖背景下,黄河中游花园口站实测径流量的平均年线性递减率为 6.05 亿 m^3 ,M-K 统计量明显超过信度为 0.05 水平的临界值,序列呈现显著性减少趋势,径流量的减少是气候变化和人类活动等多种因素综合作用的结果。趋势性分析为探讨其变化原因(气候因素、人类活动)奠定了基础。

水文时间序列也会发生从一种状态过渡到另外一种状态的变化特性,即表现出变异性(也称为跳跃)。突变是跳跃的一种特殊形式,是瞬间行为。突变发生后,水文序列一般又保持原来的特性。水文序列中的跳跃一般是人为的或自然的原因引起的。例如,修筑水库前坝下最大流量序列与修建水库后经水库调节的年最大流量序列,就是人为的原因引起的跳跃;又如,一个流域若突发大面积的森林火灾,则径流会突然变化,形成由自然引起的跳跃成分。在洪水频率分析中,通常以洪水时间序列的平稳性为基础,要求资料具有

一致性。但是流域系统一旦受到干扰(如人类活动的影响),则其平稳性遭受破坏,发生突变而演变为非平稳性序列。对于受到干扰影响的水文序列,推估分析突变的时刻即突变点,在洪水和水资源分析中具有实际的意义。目前水文变异分析中,应用较多的方法包括:有序聚类分析法、游程检验法、秩和检验法、Mann-Kendall 突变检验法、R/S 法以及逐时段滑动分割模型等。杨莲梅(2003)分析 40 年来新疆极端降水的气候变化、发展趋势和空间分布差异,并用 Mann-Kendall 突变检验法对年极端降水量进行突变检验。杨志峰和李春晖(2004)采用 EOF 技术分析黄河上游降水的时空结构特征与变化,并用 Mann-Kendall 突变检验法检验了降水序列的突变现象。王国庆等(2001, 2006)以黄河中游无定河为研究对象,采用有序聚类分析方法,分析了由于水土保持等人类活动引起的水文序列的突变年份;以汾河流域为研究对象,在诊断实测径流发生突变的基础上,分析气候变化和人类活动对河川径流的影响。

年径流的多年变化,主要取决于气候因素的变化,而气候因素则取决于大气环流的特点,大气环流的变化受太阳活动制约,太阳活动具有一定的循环周期,因而年径流也可能存在一定周期性。由于影响周期因素变化的复杂性,往往周期之间并不可通约,所以隐含在年径流序列中的这种周期一般被称为近似周期。识别周期成分的常用方法很多,有方差分析、功率谱分析、谐波分析、小波分析等方法。波谱分析方法很早就被应用到研究水文气象要素变化的周期性,其分析原理是利用傅里叶级数能够将周期函数展开为无穷多个频率为基频整数倍的谐振动之和。黄忠恕(1983)较早地出版了《波谱分析方法及其在水文气象学中的应用》,李栋梁等(1997)利用中国西北 5 省(自治区)90 个测站,1960~1990 年历年 6~8 月降水量资料,采用波谱分析及大气环流模式,对夏季降水量的空间异常特征、时间变化规律以及降水异常的主要成因进行诊断研究,王栋和朱元铎(2001)系统总结了最大熵原理在水文水资源学中的应用,Dalva 等对 4 种波谱分析方法进行系统比较,张明(2009)在对最大熵谱求解方法改进的基础上,提取了三川河流域实测径流量的周期特性。

目前,关于时间序列变异点的推求、周期特征的提取、变化趋势显著性的诊断有很多方法,然而不同方法分析的结果可能存在差异,如何选取有效的诊断分析方法、如何利用多种评估结果对时间序列变化特征给出比较科学的综合评估是亟需解决的科学问题。

1.2.2 气候变化对水文水资源的影响研究

气候变化通过大气环流、冰川和积雪等条件变化引起降水、蒸发、入渗、土壤湿度、河川径流、地下水流等一系列的变化,进而改变全球水循环的现状,引起水资源在时空上的重新分配,并进一步影响到水资源管理系统及经济社会系统(张建云等,2007;Mimikou, 1996)。

气候变化与水循环及其相互作用是当前全球变化研究的热点和前沿问题。为了推动全球变化及其对水循环的可能影响的研究,世界气象组织(WMO)与联合国教育、科学及文化组织(UNESCO)和联合国环境规划署(UNEP)、联合国开发计划署(UNDP)、国际水文科学协会(IAHS)等一些国际组织积极发起并推动开展国际合作研究,制订实施了一些相应的研究计划,如世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际水

文计划(UNESCO-IHP)等^{①②③}。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)是1988年由联合国环境规划署与世界气象组织共同组建的政府间气候变化专门委员会,其主要任务是为政府决策者提供气候变化的事实和对未来气候的可能变化进行预测,使决策者认识人类对气候系统造成的危害并采取对策(IPCC,1990,1995,2001,2007)。最新的IPCC技术报告专门论述了“气候变化与水”的问题,总结了气候变化对水影响的最新认知,指出:观测记录和气候预估提供的大量证据表明,地球上淡水资源是脆弱的,且可能受到气候变化的强烈影响,同时给人类社会和生态系统带来一系列后果(Bates et al., 2008)。

利用气候情景驱动水文模型评价气候变化对水资源的影响时,采用的气候情景包括两种类型:一是根据气候变化趋势假定的气候变化情景,利用该情景主要分析水资源对气候变化的敏感性;二是全球气候模式预测的情景,分析未来气候变化对水资源的可能影响,进而评价水资源系统对气候变化的脆弱性(张建云等,2007)。

Schwarz(1977)分析美国东北部的水文条件,试图评价气候对供水的影响,研究结果表明,河川径流对气候变化十分敏感。Gleick(1986)针对美国加利福尼亚州萨克拉门托河流域,根据8种不同的GCMs模型输出的气温和降水结果,应用水量平衡模型研究气候变化对该流域水文情势的影响,结果表明,CO₂含量加倍将导致流域的夏季径流减少30%~60%,冬季径流量增加16%~81%;夏季土壤湿度减少14%~36%。引起这些水文响应最主要的内在机制是降雪和融雪的条件发生了显著变化。Nash和Gleick(1990)用一个修正的水平衡模型研究了科罗拉多河水文系统的响应并与之前统计模型的研究结果进行比较,结果表明,以前采用统计模型过高地估计了各种情景(包括气温增加)下径流的减少量,并认为在选择温度变化范围内(±4℃),预期的径流量变化与历史记录并无统计意义上的差异,降水是影响径流变化的主要因素。美国国家环境保护局根据GCMs的输出结果,评估了美国未来水资源情势,认为在CO₂含量倍增情景下,西北部径流将增加20%~60%,中部则减少26%;西北太平洋地区的年径流和洪水都将进一步加剧;根据假定的暖干(气温升高2℃,降水减少10%)和冷湿(气温降低2℃,降水增加10%)情景分析结果表明:在美国的大多数地区暖干情景下的水资源量只是冷湿情景下的50%~70%。

中国幅员辽阔,南北气候差异大,水资源对气候变化的响应具有明显的区域性。中国学者以典型流域为研究对象,采用不同的水文模型,分析不同气候区域典型流域水资源系统对气候变化的敏感性。假定不同的降水变化和气温变幅,采用考虑融雪的水量平衡模型、简化的新安江模型和两参数水量平衡模型分析黄河中下游(王国庆等,2000)、海河流域(刘九夫和郭方,2000)、淮河流域(郝振纯和苏凤阁,2000)、汉江和赣江(郭生练等,2000)径流对气候变化的敏感性。叶柏生等(1997)、康尔泗等(1999)采用冰川动力模型分析西部高寒内陆河伊犁河和黑河出山径流对气候变化的响应;英爱文和姜广斌(1996)、邓慧平和唐来华(1998)分别采用WatBal模型和类似于abcd水量平衡模型的模拟技术分析

① International GEWEX Project Office. About GEWEX. 2004. http://www.gewex.org/gewex_overview.html

② Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle. Highlights of the research synthesis conducted under the umbrella of IGBP-BAHC and WCRP-GEWEX/ISLSCP international projects. 2002. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change RIVM Report

③ International Hydrological Programme[EB/OL]. 2008. <http://www.unesco.org/water/ihp>

东北地区辽河流域和西南地区沱江流域水文对全球气候变化的敏感性。以上研究结果表明:径流对降水的敏感性大于对气温的敏感性;相同变化幅度时,径流对降水增加比对减少敏感;气候过渡区的径流敏感性小于干旱区,湿润地区最弱;气温升高使得冰川对年径流的调节作用减小,可以明显增加春季径流,减少其他季节径流(张建云等,2009)。

利用径流对降水变化响应的敏感程度或弹性系数结合全球气候模式的模拟结果,预计 21 世纪中期和后期,在人类活动引起的全球气候继续变暖情况下,长江、黄河、松花江和珠江 4 条河流的径流量都可能呈增加趋势,其中,长江和黄河增幅可能略小(任国玉等,2008)。黄艳等(2009)以 3 种排放情景(A1B、A2、B1)下气候模式输出成果作为径流模型的输入,模拟长江流域径流量的可能变化趋势,认为未来 10~30 年长江流域径流量将以减小为主,2060 年以后将转变为显著增大的变化趋势。张建云等(2007)根据 SRES 情景下的未来可能气候变化,采用 VIC 模型模拟 4 种气候情景下全国径流量的可能变化,认为,全国径流量以增加趋势为主,个别地区存在减少可能,其中,华北和东北的个别省份减幅可能较大。值得强调的是,对未来水资源变化的评价结果在很大程度上依赖于未来的气候变化情景。限于目前对大气过程的认知水平,对未来气候变化预估存在较大的不确定性;同时,由于对水文过程认知的不足,评价模型本身也存在一定程度的不确定性,因此,对未来水资源变化预估也存在较大不确定性(贺瑞敏等,2008)。

1.2.3 人类活动对水文循环及区域水资源的影响研究

人类生产的发展,越来越快地改变着自然环境,从而在一定条件下改变着水文循环状况和流域的产汇流条件。目前,迅速的经济发展和人口增长对水文循环已经产生了巨大的影响,致使人们在水文计算、流域规划、水资源评价等各个方面都不可避免地考虑这种影响。

从水文循环角度出发,人类活动对水文水资源影响的主要因素包括:①引起流域水文特性变化的土地利用等下垫面变化。包括农田开垦、放牧、森林砍伐、围湖造田以及大规模城镇化建设等人类活动造成流域下垫面变化,从而改变流域蒸散发、土壤下渗、地表糙率和包气带水力传导度等天然状态下的水循环机制。②通过拦截蓄水等直接改变原有径流方式的水利工程的建设。我国洪涝干旱灾害严重、能源紧张等造成了对水利工程建设强有力的社会发展需求,在社会经济发展的推动下,修建了一系列具有防洪、发电、灌溉以及供水等功能的水利设施。这些水利设施直接影响了河川径流、造成河道形态改变甚至是流域水系的结构变化,对自然水循环造成直接影响。③人类直接取用水影响,包括生活用水和生产用水等。随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,形成了生产生活用水的强大需求,人们对地表地下水大量开发开采,造成天然水资源时空上的重新分配,进而直接影响自然水循环的空间分布状况。

如何科学地评估人类活动对水文情势的影响已成为国内外专家学者的研究热点。国际水文十年(IHD)和国际水文计划(IHP)自 20 世纪 60 年代就将此作为重要课题,组织各国的水文学者开展相关研究。IHP 第 6 阶段计划的第 1 个主题就是全球变化与水资源,将气候变化和土地利用对水文的影响作为重要课题研究。国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心项目(GAIM/BAHC/GCTE/LUCC)也将水文模拟和土地利用变化的水

文响应作为核心内容,土地利用变化不仅直接影响到流域水资源的分布、洪涝灾害、流域管理,而且关系到社会经济的可持续发展。人类活动的水文效应也逐步引起我国科学家的重视,1980年10月在武汉召开了“人类对水文要素影响的研究”学术交流会,拟定了展开研究的主要专题,包括水利工程、农业措施对水文要素的影响,森林的水文效应和城市化的水文效应。

对比试验是研究土地利用变化等人类活动对区域水文影响、认识水文循环规律的基本途径。1889年,在瑞士 Emmental 试验区就开始了森林流域与牧场流域水文特性差异的对比分析研究,并得出森林流域的洪水及径流均比牧场流域小的结论;1902年,在阿尔卑斯建立的 Sperbelgraben 和 Rappengraben 试验流域是较早研究森林水文效应的试验流域;1909年,在科罗拉多的 Wagon Wheel 峡谷设立了试验径流站,首先采用“控制流域法”研究森林的水文效应,并提出选择试验流域的准则;1935年,南非的 Jonkershoek 森林水文研究站设立了6个对比流域系统深入地分析了森林对水文要素的影响,同一时期,苏联设立的 Valday 水文试验流域也系统分析了流域水平衡要素的变化规律和各种农业、森林的水文效应,此后,北卡罗来纳的 Coweeta、东非的 Mokobulaan、英国的 Plynlimon、印度的 Niligris 和澳大利亚的 Perth 供水区也开展了类似研究(Maidment, 2002)。Bosch 和 Hewlett(1982)通过对比分析世界94个流域的试验结果认为,对草地覆盖的流域而言,当10%的面积改为松树时,年径流量将减少40mm;当10%的面积改为灌木或者落叶林时,相应的年径流量将减少10~25mm。Bavaria 的研究结果表明,造林后,随着树木的生长,洪峰流量也随着削减,大部分削减出现在最初的10年,而且对于较小的暴雨削减的比例较大。Douglas(1981)对美国 Coweeta 流域的研究结果认为,森林砍伐对雨洪过程的影响是渐增的,一般是洪量和雨洪历时增加,这种影响随着树林的恢复呈现对数减小。Buytaert 等(2006)利用对比试验的方法研究了放牧、耕种、种植松树等人类活动对 Andean 地区的水文影响;Alvarez-Rogel 等(2007)基于对比观测数据(1991~1993年和2002~2004年数据),分析了地中海湿地人类活动引起的植被和土壤变化。

我国对人类活动影响的试验研究起始于20世纪50年代,在1958年前后,先后设立了一大批径流实验站,其中比较著名的有:安徽省青沟、湖北省的石桥铺、浙江省的姜湾、辽宁省的叶柏寿、湖南省的宝盖洞、黄河水利委员会在陕西省设立的子洲、长江水利委员会在四川省设立的凯江实验站等。郝建忠(1985)分析黄河流域韭园沟流域综合治理对年径流泥沙的影响,认为治理后的径流较治理前减少44.9%~94.9%,尽管其中包含了降水变化的影响,但流域治理的影响也是非常明显的。周圣杰和张俊(1985)采用相邻相似流域对比分析方法研究水土保持措施对水文的影响,结果表明:在同一降水条件下,治理流域的平均入渗率较未治理流域增大20%~40%,同一径流深下,未治理沟的洪峰模数平均削减59%左右;洪水越小,径流深减少的比例越大,洪水越大,径流深减少的比例越少,但到一定大水时,径流深的减少量不再增加,而是趋于一定值,减少范围为8%~50%。扈祥来(2000)分析黄土丘陵地森林植被对水资源的影响,对比分析结果表明,森林地区的年径流系数明显高于植被较差的流域,这点除了受流域岩性的影响外,森林植被在涵养水分和保蓄径流方面有明显的作用,对于植被好的流域,径流的年内分配也相对均匀。对于暴雨洪水而言,森林植被区的暴雨洪水径流系数明显小于植被稀少地区,说明森林植被区的下渗能力和调蓄能力较强,从而可以有效地削减洪峰,延长洪水历时,减缓洪