



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

流域水资源演变的 生态水文响应机制

Water Resources Evolution and Ecohydrology Response in Watershed

薛联青 王加虎 刘晓群◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

流域水资源演变的 生态水文响应机制

Water Resources Evolution and Ecohydrology Response in Watershed

薛联青 王加虎 刘晓群◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书内容主要涉及湖泊生态环境演变的驱动因子及水文生态对主驱动因子变化的响应关系、洞庭湖演变规律、变化条件下湖泊湿地水文情势和外界胁迫对生态水文格局的影响,洞庭湖区洪水过程模拟和蓄洪垸调度模拟等理论方法,对洞庭湖区生态水文环境的综合治理,深入研究人类利用模式下的流域水资源保护与湖泊湿地修复保护具有重要的借鉴意义,为流域水资源规划、湿地防洪及生态—环境—经济的可持续发展提供了参考。

本书可供水文水资源学科、环境科学、资源科学、农业工程及水利工程等学科的科研人员、大学教师和相关专业的研究生和本科生,以及从事水资源管理领域、水土保持工程及环境保护方面的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域水资源演变的生态水文响应机制 / 薛联青,
王加虎,刘晓群著. —南京:河海大学出版社,2012. 11
ISBN 978-7-5630-3234-1

I. ①流… II. ①薛…②王…③刘… III. ①流域—
水资源—演变—研究 IV. ①TV211. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 290441 号

书 名 / 流域水资源演变的生态水文响应机制

书 号 / ISBN 978-7-5630-3234-1/TV·340

责任编辑 / 魏 连

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

网 址 / <http://www.hhup.com>

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 / 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 / 南京溧水秦源印务有限公司

开 本 / 720×1000 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 274 千字

版 次 / 2012 年 11 月第 1 版

印 次 / 2012 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 28.00 元

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基。随着经济的持续发展、人口密度的增加以及土地利用类型多元化,气候变化和高强度的人类活动对流域环境产生了较大影响,流域旱涝灾害频繁发生、湖泊湿地萎缩、水源地引水安全以及水土流失加剧等流域性水问题日益突出,水资源危机突出,流域环境持续恶化,严重影响了流域发展的协调性和可持续性,进行流域水资源持续利用对流域可持续发展至关重要。

近年来,随着极端气候事件(如洪涝、干旱、暴雨、高温等)的频繁发生,流域水资源问题已异常突出,流域水循环的变化,已进一步导致水资源在时空上的重新分配和水资源数量的改变,流域水资源严重短缺、极端旱涝灾害频繁发生以及生态环境的急剧恶化已成为人类生存和发展备受关注的焦点问题,尤其是在众多复杂的不确定外界因素的影响下,流域水生态退化严重,流域水生态、饮水安全等都处于临危状态,已直接和间接地阻碍了社会经济发展并且威胁着人类的生存,成为制约我国社会经济可持续发展的严重问题,人类已深切感受到流域资源开发利用与环境保护相协调对维系整个流域和谐发展的重要性所在。水资源演变规律和生态响应特征分析是水文学、环境水文与生态水文等学科研究的重要内容,受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的共同作用,流域水资源演变和湖泊湿地演变过程中的确定性规律及外界变化条件影响其产生的随机特征,因此,研究流域水资源演变特征,认识其演化规律和趋势,不仅有助于深入了解流域水循环与水平衡以及流域的结构和功能,而且对流域水资源合理开发与利用等都具有重要意义。

本书针对变化环境下流域水资源水安全问题,研究建立变化条件下流域水资源演变规律分析方法,进行极端洪涝干旱灾害特征诊断,揭示极端事件在不同时期发生的概率、特征及未来趋势。以此为基础,分析人为胁迫和自然变异对湖泊演变的影响方式,确立人类活动驱动的上游特大型水利枢纽调蓄、水沙演变以及频繁发生的洪旱事件对典型流域水安全的影响,预测未来典型流域的水资源演变规律及生态水文响应过程,从而为流域或区域水资源利用、工农业生产布局、防洪规划、生态和谐及经济发展提供参考,对流域防灾减灾和流域生态环境保护也将具有积极作用。

作者在总结以往研究成果的基础上,系统结合并采用流域水文模拟、水动力学方法、随机理论、生态动力学机理、不确定性分析方法以及环境水利工程等措施,进

行流域水资源演变规律分析、流域生态水文模拟及防蓄洪调度分析研究,研究构建了典型流域生态调蓄及水安全情景模拟平台,对流域管理的定量化提供了参考。全书包含5个方面内容,分为10章。第1章主要分析讨论了流域水安全及洪旱基本问题;第2、3、4章介绍了流域洪旱特征分析理论及水资源演变分析方法;第5、6章重点探讨了变化条件下的流域洪旱风险、极端洪旱响应特征和典型流域的水资源演变规律;第7、8章以流域防洪—蓄洪—调洪为出发点,研究建立典型流域水文—水动力学耦合模型,进行流域防蓄洪调度规划,以满足区域生态水文响应特点及水资源利用需求,第9章、第10章建立了典型流域水安全及生态安全模拟平台,并对洞庭湖流域的水资源保护策略进行了初步探讨。

本书主要是作者对水资源演变规律分析、流域水文模拟和生态保护领域长期研究成果的总结,也包括了作者培养的研究生参与科研项目的一部分科研成果和论文。在本书撰写过程中,宋佳佳、张竞楠、李永坤、杨会刚等参与了部分章节的编写工作以及本书的整编及校验,在此表示感谢。感谢湖南省水利厅张振全总工、卢承志总工、湖南省水利勘测设计院黎昔春教授级高工、河海大学李杰友教授、郝振纯教授、李丽副教授、罗健副教授以及东南大学程光教授等的帮助和支持。李新红、颜亦琪、贺玉琼、贾小网、刘文斌、毛新伟、傅国圣、朱敏、景卫华、李国新等在本书的撰写中给予了大力支持。全书由薛联青、王加虎、宋佳佳统稿。

本书出版得到国家自然科学基金(50979027, 41271042),水利部公益性行业科研专项(201001057, 201001066),水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费(2011585512, 2009585512),中央高校基本科研业务费专项资金资助(B1020068, 2010B00914, 2010B01014)以及江苏高校优势学科建设工程的资助,在此表示感谢!同时,感谢江苏省“青蓝工程”优秀骨干教师及“河海大学新世纪创新人才计划”的支持。

在本书的撰写过程中,得到了水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、河海大学水文水资源学院、河海大学出版社等单位领导和专家的大力支持,在此深表谢意!

同时,对作者所引用的参考文献的作者及不慎疏漏的引文作者也一并致谢!

由于作者水平有限,编写过程中难免存在很多不足及顾此失彼之处,敬请读者给予批评指正!

作者

2012年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 变化条件下水资源演变趋势影响研究	1
1.2 基于生态水文响应的流域径流演变分析	3
1.3 流域极端水文气象特征分析	4
1.4 流域洪旱时空特征及风险分析	7
第 2 章 流域水资源演变规律分析	10
2.1 理论与方法	10
2.1.1 时间序列特征识别方法	10
2.1.2 Mann-Kendall 非参数检验法	11
2.1.3 滑动 t 检验法	13
2.1.4 有序聚类分析法	13
2.2 洞庭湖流域概况	14
2.2.1 地理位置	14
2.2.2 气象特征	15
2.2.3 水文特征	17
2.2.4 洞庭湖区水位特征	21
2.3 洞庭湖流域水资源演变特征	22
2.3.1 气象变化特征分析	22
2.3.2 径流演变规律分析	26
2.3.3 突变分析	26
第 3 章 流域洪旱指标体系建立及评价	29
3.1 洪旱指标的建立	29
3.1.1 SPI 指标	29
3.1.2 Z 指标的建立	30
3.1.3 传统的 CI 指标	31
3.1.4 NCC2CI 指标	32
3.1.5 CI_{new} 指标	32

3.1.6 TCI 指标的建立..... 32

3.2 基于 SPI 的洪旱评价 33

3.2.1 洞庭湖流域洪旱评价..... 33

3.2.2 不同时间尺度的 SPI 空间分布 33

3.2.3 季节性洪旱评估分析..... 35

3.2.4 流域洪旱变化特征分析..... 36

3.2.5 季节性洪旱变化趋势..... 38

3.3 基于 CI, NCC2CI 和 CI_{new} 的洪旱特征分析 42

3.4 洞庭湖流域水文气象相关性研究..... 45

第 4 章 洞庭湖流域极端洪旱识别 47

4.1 极端洪旱识别方法..... 47

4.1.1 阈值法..... 47

4.1.2 极端指数法..... 47

4.2 流域极端洪旱识别..... 49

4.2.1 阈值法识别极端洪旱..... 49

4.2.2 极端指数识别洪旱..... 51

第 5 章 流域洪旱风险识别方法 56

5.1 洪旱风险识别方法..... 56

5.2 洪旱频率空间分布..... 56

5.3 洪旱风险识别..... 58

5.4 流域干旱识别..... 59

5.4.1 干旱覆盖范围的年际变化..... 59

5.4.2 干旱发生频率和日数的空间分布..... 61

5.4.3 干旱诱因分析..... 64

第 6 章 洞庭湖流域水资源演变规律与机制研究 65

6.1 洞庭湖径流演变趋势研究..... 65

6.1.1 长江中游干流径流演变趋势..... 65

6.1.2 四口河系径流衰减特性..... 66

6.1.3 四水径流演变趋势分析..... 67

6.1.4 区间径流变化规律..... 68

6.1.5 洞庭湖出流演变趋势分析..... 68

6.2 洞庭湖径流序列变异点及小波特征研究..... 69

6.2.1 基于 Mann-Kendall 非参数统计方法对径流序列变异点的分析研究	69
6.2.2 洞庭湖区降水径流的小波分析	73
6.2.3 基于 M-K 和小波分析的系列特征	77
6.3 四口河系演变趋势研究	77
6.3.1 2008 年对四口河系的现状调查	77
6.3.2 河道分流与区域水文条件分析	78
6.3.3 四口河道径流演变趋势研究	80
6.4 三峡工程对洞庭湖水资源影响程度	82
6.5 湖泊围垦对城陵矶水位抬升作用模拟分析	83
6.5.1 基本概况	83
6.5.2 基本原理与模拟	83
6.5.3 典型洪水情景模拟	85
6.5.4 洞庭湖围垦作用分析	86
第 7 章 流域洪水演进及生态调蓄模拟研究	88
7.1 长江中游洪水演进水文学模拟及蓄洪模拟	89
7.2 洞庭湖水力学模型	92
7.2.1 一维河网模拟简述	93
7.2.2 二维湖泊水力模型简述	94
7.2.3 一二维耦合与边界条件	95
7.2.4 模型率定	95
7.2.5 实测模拟验证	96
7.3 城陵矶附近蓄洪区布局调整研究	101
7.3.1 蓄洪区基本情况	101
7.3.2 城陵矶附近超额洪量布局调整研究	103
7.3.3 蓄洪模拟与布局调整	104
7.4 抬高洞庭湖控制水位研究	108
7.4.1 现状控制水位问题	108
7.4.2 抬高控制水位的影响研究	109
7.5 分洪口空间分布影响研究	112
7.5.1 分洪口空间布置与调整	112
7.5.2 效果模拟	113
7.6 控制水位浅析	115

第 8 章 洞庭湖流域水安全情景模拟研究	116
8.1 情景模拟平台	116
8.2 洞庭湖流域生态水文情景模拟基本原理	117
8.2.1 设计思路	117
8.2.2 水动力学模型基本控制方程	117
8.2.3 水动力学模型数值方法	118
8.2.4 水文模型降雨产流模拟	120
8.2.5 水文模型汇流模块	120
8.2.6 耦合设计	122
8.3 系统建立	122
8.3.1 空间地形数据合成	122
8.3.2 计算区域	122
8.3.3 边界条件	123
8.3.4 蓄洪垸的处理	123
8.4 参数选取及率定	127
8.4.1 SCE 自动优选算法	127
8.4.2 三口分流参数优选	128
8.4.3 区间产汇流参数优选	132
8.4.4 枯水年径流计算参数优选	134
8.4.5 洪水年径流计算参数优选	136
8.5 系统检验	138
8.5.1 贯通测试	138
8.5.2 无分洪稳定性检验	139
8.5.3 分洪模拟能力检验	140
8.5.4 分洪流场定性检验	140
第 9 章 基于二维水流泥沙模拟的虚拟工程研究	142
9.1 泥沙数值模拟方法	142
9.2 正交曲线网格的实时生成	145
9.2.1 边界处理	145
9.2.2 边界拟合坐标原理	146
9.2.3 调节因子 P, Q 的选择	148
9.2.4 坐标变换方程的求解	151
9.2.5 人机交互定制正交网格	152
9.3 二维紊流工程泥沙数学模型的建立	156

9.3.1 平面直角坐标系下水流基本方程	156
9.3.2 拟合坐标系下水流泥沙方程	157
9.3.3 二维水沙通用微分方程的数值离散	159
9.3.4 基本问题处理	162
9.4 管理系统的构建	170
9.4.1 构建管理系统	170
9.4.2 系统结构	175
9.4.3 系统对工程的适时响应	177
9.4.4 系统整体性能的验证	178
9.5 流场仿真研究	183
9.5.1 水流泥沙动态演示现状	183
9.5.2 跟踪质点的运动轨迹	183
9.5.3 质点运动轨迹的动态表达	186
第 10 章 洪旱灾害防治及流域水资源保护布局	188
10.1 基于层次蓄洪的洞庭湖防洪布局	188
10.1.1 防洪蓄洪与区域经济发展	188
10.1.2 三峡工程运行后的江湖关系	188
10.1.3 多层次蓄洪布局与重点保护区域	189
10.2 基于调水蓄水的湖区水资源保护布局	191
10.2.1 三口分流格局与河流保护	191
10.2.2 松滋河新江口分流长期维持的可能性分析	192
10.2.3 四口河系调水方案与布局	193
10.2.4 洞庭湖出口控制的可能性分析	194
10.3 洞庭湖流域水资源保护复合布局研究	195
10.3.1 防洪分析	195
10.3.2 径流及河道冲淤影响分析	197
参考文献	200

第1章 绪 论

1.1 变化条件下水资源演变趋势影响研究

美国国家研究协会(USNA)早在1977年就组织会议讨论了气候、气候变化和供水之间的相互关系和影响。在20世纪80年代中期,气候变化对水文水资源的研究才引起国际水文界的高度重视,此后,研究温室效应对区域水文影响的工作明显增加,世界气象组织(WMO)在1985年出版了气候变化对水文水资源影响的综述报告,并推荐了一些检验和评价方法,之后又出版了水文水资源系统对气候变化的敏感性分析报告。为加快研究步伐,WMO和联合国环境规划署(UNEP)在1988年共同组建成立了政府间气候变化专业委员会(IPCC),专门从事气候变化的科学评估,并定期总结最新的科学成果,提供具有权威性的气候评估报告。《气候变化与美国水资源》(1990年)一书总结了当时气候变化下水文水资源影响研究的方法、内容和成果。1991年在维也纳举行的第二十届国际大地测量与国际地理联合(IUGG)大会,为配合国际地圈和生物圈计划(IGBP),便把水文科学组的主题定为探讨土壤—大气之间相互作用的水文过程。1993年,在日本召开了第六届国际气象和大气物理科学、第四届水文科学(IAMAP—IAHS)联合大会。IGBP等国际性合作计划的实施使水文学家开始注意环境变化中土壤—植物—水的全球性研究。

一般流域或区域的径流演变及变化研究多从气候变化开始。关于气候变化的研究起步于20世纪70年代末期。1979年召开的世界气候大会(FWCC),揭开了全球气候研究的序幕。随之制定了世界气候计划(WCP)及其4个子计划:世界气候研究计划(WCRP)、世界气候影响计划(WCIP)、世界气候应用计划(WCAP)及世界气候资料计划(WCDP)。这些计划由世界气象组织(WMO)、联合国环境署(UNEP)和国际水文科学协会(IAHS)等国际组织联合开展与实施。美国国家研究协会于1977年较早地组织讨论气候、气候变化和供水之间的相互关系和影响。20世纪80年代中期,气候变化对水资源影响的研究在国际水文界引起高度重视,进而开展了大量的研究工作。1988年11月,由联合国环境计划署及世界气象组织共同组建政府间气候变化专门委员会(IPCC),其主要任务是定期对气候变化的科学事实、气候变化对社会和经济的潜在影响以及适应和减缓气候变化的可能对

策进行评估,为各国政府和国际社会提供权威的科学信息。IPCC 至今已在国际范围内组织数以千计的不同领域的科学家,完成了 4 次评估报告及一系列特别报告、技术报告和方法学报告。进入 21 世纪,气候变化成为各种国际会议的主要议题。2004 年在巴西召开的 IAHS 大会中就包括了气候变化对水文水资源的影响讨论专题。2006 年在北京召开了地球系统科学联盟(ESSP)和全球水系统计划(GWSP)联合会议,其中第 4 主题讨论的就是气候变化对海岸带、陆地河流的影响。在墨西哥举办的第四届世界水论坛和 2007 年在意大利召开的 IUGG 国际大会中都讨论了气候变化对水文水资源的影响研究的科学问题。2008 年 8 月在挪威首都奥斯陆举行的第 33 届国际地质大会也包括“气候变化”这一主题,该问题给地学界甚至是整个科学界都带来了极大的震动。

在 1985 年的 Vlllach 会议后,我国加速了气候变化方面的研究,1988 年在中国科学院及中国自然科学基金委员会支持下,开展了“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”。国家科委、水利部水文局和南京水利科学研究院共同组织了国家“八五”科技攻关项目(85-913-03-03 专题)“气候变化对水文水资源的影响及适应对策研究”。该项目之后,与气候变化及其影响相关的课题成为“九五”、“十五”国家重大科技攻关项目的重要组成部分:“九五”期间的重中之重科技攻关项目(编号:96-908-03-02)“气候异常对我国水资源及水分循环的影响评估模型研究”;“十五”科技攻关项目(编号:2001-BA61IB-02-04)“气候异常对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”;以及国家 973 重点基础研究发展规划项目(项目编号:G19990434)“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”。近几年,国家越来越重视气候变化及其影响的研究。2008 年“气候变化对我国水安全影响及适应性对策研究”被列为水利行业重大研究专项,开展了气候变化与相关水问题的广泛研究。该项目包括 9 个专题,是我国气候变化与水领域迄今研究内容最全面、资助经费最大、参加研究人员最多的科研项目。

中国在温度变化的研究领域取得了重要的成果:张先恭、李小泉首先对中国百年温度和降水等级进行了研究;丁一汇、戴晓苏对中国近百年来温度变化的研究结果进行了综述,王绍武等给出了中国近百年温度序列;唐国利等建立了我国近 100 a 的地表气温序列,并对气温变化趋势进行了再分析。他们得到的较一致的结论是:从总体上讲,中国在 20 世纪的年平均气温变化趋势与同期北半球的年平均气温变化趋势基本一致。即从 19 世纪 80 年代到 20 世纪 10 年代,为持续低温期,20—40 年代为持续高温期,50—70 年代中期为又一低温期,而 70 年代末到现在为第二个高温期,增温主要发生在冬季和春季,夏季气温变化不明显;但是中国在 40 年代到五六十年代的降温比北半球明显;中国 80 年代增温则不如北半球快。因此,北半球百年最暖期在 80 年代,而中国百年最暖期出现在 40 年代。1950 年以后,在资料质量大大提高的基础上,陈隆勋和于淑秋等众多学者对中国近 50 a

的气候变化做了更细致的研究。这些研究表明:近 50 a 来,中国温度变化趋势和全球变暖不完全同步,中国北部普遍增暖,被认为是北半球增温型的一部分,而在西南某些地区出现变冷趋势;冬季增暖是四季中最明显的。

在降水研究方面:Jones 以及 Hulme 研究表明:20 世纪以来,全球陆面降水增加了大约 1%,在北半球 $30^{\circ}\text{N}\sim 85^{\circ}\text{N}$ 年降水量增长了 7%~12%,在南半球 $5^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$ 增长了 2%~3%,北半球中高纬度降水的增长主要发生在秋冬季;相反,在北半球的副热带地区在 80 年代中期到 90 年代中期降水明显偏少。Chen L.-X 等研究了近 70a 的中国气温和降水变化。王绍武等曾给出东部 35 个站百年降水序列;而丁一汇等和孙国武用各种代用资料研究了西部的降水情况;周连童等分析了我国夏季风降水年代际变化特征;陈隆勋等和翟盘茂对近 40~50 a 的中国降水进行研究。一般而言,我国夏季降水有明显的年代际变化,在 1976 年前后发生了一次明显的气候跃变;全国年降水量呈减少趋势,但西部降水量增长趋势明显,其中西北最为明显,而西南一些地区有减少趋势。同时,冬季降水普遍增多;秋季大部分地区降水量趋于减少。

洞庭湖水资源短缺问题异常突出,2003 年以前,洞庭湖年均径流量 2 943 亿 m^3 ,人均 2 920 m^3 ,很少有缺水问题;三峡水利工程运行后,洞庭湖年均径流量 2 303 亿 m^3 ,人均 2 280 m^3 ,其中经过三口河系分流量有 494 亿 m^3 ,如果这部分自长江分流的水量继续衰减,洞庭湖仅汇集四水及区间汇流,则人均水量为 1 790 m^3 ,已接近世界气象组织及联合国教科文组织等机构判别是否缺水的人均 1 700 m^3 的临界指标,更低于我国人均 2 167 m^3 的平均水平。就现象分析,三峡蓄水运行以来,维持长江和洞庭湖水力联系的四口河系河道断流时间明显延长,分流时机和分流流量急剧减少,使洞庭湖区水量急剧减少,由缺水带来的各类问题不断出现。

研究分析四口河道及洞庭湖径流演变趋势;通过突变点分析研究三峡对洞庭湖径流的影响以及三峡工程运行以后对洞庭湖水资源变化影响以及未来趋势;基于生态水文模拟及分蓄洪、径流演变趋势,提出洞庭湖未来洪旱治理对策,确定洞庭湖未来治理的方向尤为重要。

1.2 基于生态水文响应的流域径流演变分析

应用水文模型评价气候变化对各种水文特性的影响有许多优点,如现有的多种水文模型,模拟技术较为成熟,可以充分利用现有的水文资料来率定模型参数,流域水文模型可输出土壤湿度、径流量等水文要素的变化过程,流域水文模型可用来评价水文要素对气候变化的敏感度,尤其是近几年来国际上广泛开展了气候变化对水文变量影响的研究。这些研究大都以精度较高、综合性强的区域水量平衡模型为基础,结合 GCMs 输出结果或假定的气候变化情景,探讨未来水文因子的

变化情况和趋势。

Nash 用修正后的水平衡模型研究了科罗拉多河水文系统的响应并与前期统计模型的研究结果相比较,结果表明前期的研究过高估计了各种情景(包括气温增加)下径流的减少。此外,作者认为在选择温度变化范围内($\pm 4^{\circ}\text{C}$)期望的径流量变化与历史记录并无统计意义上的差异,除非降雨变化在 $\pm 10\%$ 以上。Gleik 针对美国加州萨克拉门托流域,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了气候变化对该流域水文情势的影响。 CO_2 加倍将导致流域的夏季径流减少 $30\%\sim 60\%$,冬季径流量增加 $16\%\sim 81\%$;夏季土壤湿度减低 $14\%\sim 36\%$ 。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。Mooabe 根据 Thornthwaite 水量平衡模型和气候变化情况估计了美国特拉华流域的季节径流和土壤含水量。发现冬季升温导致大部分降水以雨水形式降落,使冬季径流增加,春夏两季径流减少。流域北部积雪的减少和蒸散发的增加,将改变径流的年内分配规律并减少现有的可用水资源。Mimikou 等用矫正后的月水量平衡模型估算了位于希腊北部地区的 Aliakmon 流域的各个小流域出水口在不同气候情景下的径流值。Arnell 用大尺度的水量平衡模型(时间步长为 1 d),分析了欧洲河流的水文特性在四种气候情景下的响应。Yu 等用一个非参数化的统计方法检验了台湾南部高屏溪的历史气象数据的动态趋势,然后根据这种趋势,用持续的降雨—径流模型预测了在未来气候条件下的径流。在欧洲国家流域的研究工作中,有关温带地区的研究内容广泛,在这些地区年径流量主要是由春季融雪形成,在湿润的热带地区,全球变暖对水资源的影响也有过评价。用于估算气候变化对我国径流影响的水文模型主要有水量平衡模型、新安江模型、统计经验模型和比利时模型。王国庆等根据水量平衡原理建立了黄河月水文模型。此外,我国还研究了气候变化对水资源综合影响的评价模型,模型由供水系统和需水系统组成,供水系统由水库调度模型和地下水均衡模型描述,需水系统由生活、工业和农业灌溉用水组成,通过流域或地区的供水系统、供水工程和用水部门将气候变化对天然径流的影响转化为对供水和需水的影响。以上的研究工作反映了这一领域的科学工作者探讨的方法和思路,主要包括利用 GCMs 获得气候和水文特征的估计值、水量平衡模型、长期资料的统计分析等方法。

1.3 流域极端水文气象特征分析

近年来,极端气候事件(如洪涝、干旱、暴雨、高温等)的频繁突发和加剧,已经成为当今社会和科学界愈发关注的焦点问题。据不完全统计,近 10 a 来,由极端气候事件造成的直接经济损失呈指数上升趋势,由此引发的人类死亡率也在不断上升。世界气象组织认为,全球变暖引起的气候变化可能会使极端气候的出现

频率和强度不断增加。极端气候事件的频繁发生,引起了国际机构、各国政府和科学家的高度重视。极端气候的变化必然引起水循环的变化,并进一步导致水资源在时空上的重新分配和水资源数量的改变。理论上,随着全球气候变暖,大气的持水能力增加,地面蒸发能力增强,易导致高温干旱事件的发生。事实上,极端气候变化对区域水资源的影响已经显现:一方面热带气旋、暴雨、高温、干旱等极端气候事件在世界各地频繁发生;另一方面,世界上许多大河流域都出现极端洪旱事件频频发生的趋势。虽然气候变化对水资源的影响存在明显的地区差异,但总的特征是极端气候对水资源的影响比平均气候更加突出。

频繁发生的极端洪涝(干旱)事件是一个世界范围重大灾害性气候问题,已直接和间接地阻碍了社会经济发展并且威胁着人类的生存,成为制约我国经济社会可持续发展的严重问题,极端洪涝(干旱)事件造成的灾害性损失也呈加重趋势。然而,目前出现的新情况却更加令人忧虑:以往旱灾多以华北、西北为主,而现在长江流域等传统多雨湿润地区也频繁发生严重旱情,旱灾的影响范围也由农业向工业、生态等领域扩展。长江流域人口众多,是我国经济发展最重要的核心区域,其工农业总产值和财税上交额已分别达到全国的40%和50%左右,流域的水资源状况直接关系到国家的经济安全。近40 a来,长江流域降水的时空分布更加不均匀,突出表现在夏季降水显著增加,而秋季降水显著下降;长江中下游降水明显增加,上游降水则有所下降,径流也有明显的响应,导致长江流域极易出现非涝即旱、旱涝交替的局面。

在全球变暖的大背景下,极端事件出现的频率和强度都有所增加:全球台风、飓风的发生数量增多,强度增大;全球洪涝、暴雨和干旱等灾害频发。这些频繁发生的气象灾害迫切要求对极端事件进行研究。据统计,对于极端气候事件,在全球许多地区,例如南美、欧洲、东亚等地人们都进行了研究。我国处于东亚地区,在最近的几十年里,形成南涝北旱的降水分布模式,2006年9月发生在中国日最高温度高于35℃的高温天气,2010年海南遭遇强降水袭击,2011年成都、北京等地又遭强降水袭击,2011年长江中下游地区还发生了特大干旱事件。因此,我国对极端气候事件的研究迫在眉睫。

目前,国际上提出了研究极端气候变化的统一标准,即极端气候指数。由世界气象组织气候委员会(WMO-CCI),气候变率与可预报性研究计划(CLIVAR)和海洋学与海洋气象学联合技术委员会(JCOMM)共同资助的气候变化探测和指标联合专家组(ETCCDI)公布的27个最常用的核心极端气候变化指标中,包括16个极端温度指标和11个极端降水指标,分别根据日温度和日降水量资料计算所得。这些指标问世以来,已在许多区域得到应用。Indrani Pal等采用极端气候指数模拟印度南部喀拉拉邦6个网格面积区域季节性极端事件变化;Min-Hee Leep等将极端气候指数分为干旱、潮湿、寒冷和炎热四类分析东亚极端气候变化;Car-

los A. C. dos Santos 等采用极端气候指数研究南美犹他州极端温度和极端降水事件的变化趋势;另外,在爱尔兰、中东等地区也采用了极端气候指数分析极端事件的方法,为爱尔兰、中东应对极端事件提供参考依据。在国外,运用极端指数分析极端事件已有很多研究,但国内研究尚少,仅在黑龙江省、淮河、长江中下游等地区采用该方法进行极端事件预测研究。

围绕洪旱的形成条件和机理,国内外众多学者开展了大量的卓有成效的研究,取得了令人鼓舞的成果。指标分析法在洪旱分析中应用广泛。根据流域地理位置、气候条件建立相应的洪旱指标体系。

由于气象资料便于收集,气象洪旱研究进展较快也较成熟。Palmer 利用降水与气温资料,通过 Thornthwaite 方法估算的蒸散发能力和基于双层土壤模型的假设进行简单的水量平衡计算,提出了“当前条件下达到气候上适宜”的概念,即 Climatically Appropriate For Existing Condition(CAFEC),认为当某地区实际水分供给持续少于当地气候适宜水分供应时,由水分亏缺导致的干旱将会出现。Palmer 干旱强度指标(Palmer Drought Severity Index,简称 PDSI)是经过权重修正的无量纲指标,在时间和空间上都具有可比性,因此得到了广泛应用。在此基础上,Karl 对 PDSI 加以改进,设计出具有更为严格的干湿结束时间的 Palmer 水文干旱强度指标(Palmer Hydrological Drought Index,简称 PHDI),用以描述水文干旱,之后也出现了用于服务目的的实时版本 PDSI,即 Palmer Drought Index,简称 PDI。另外,由 PDSI 衍生出来的作物水分指标(Crop Moisture Index,CMI)利用 PDSI 的参数进行逐周计算,可以对影响作物生长的水分条件实施短期监测;Karl 还利用 PDSI 计算过程的中间项水分异常指标(Palmer Moisture Anomaly Index,Z index)对土壤水分变化响应较快的特点,用以追踪农业干旱的发展。与 PDSI 这种简单机理性的干旱指标不同,标准化降水指标(Standardized Precipitation Index,简称 SPI)则是完全基于数理统计的概念。其基本原理就是通过将长期的降雨记录拟合为某种概率分布,再转换为正态分布进而得到指标值。SPI 的优势在于其多时间尺度分析的特点,既可用来评估对降雨反应较快的土壤水分以监测农业生产,亦可用来评估对降雨响应相对较慢的径流、湖泊水库水位及地下水补给,因此,SPI 也广泛应用于区域洪旱的时空分析。近年来,人们基于 SPI 的思想设计了侦察干旱指标(Reconnaissance Drought Index,简称 RDI),加入了蒸散发能力对干旱评估的影响;另外考虑水文过程的标准化径流指标(Standardized Run-off Index,简称 SRI),作为 SPI 的补充以描述洪旱对水文方面的影响,确定洪旱导致径流的季节性损失。

水文洪涝(干旱)以河道径流、湖泊水库水位或地下水位等水文要素作为主要对象,从人类可利用水资源量的角度评价洪旱的影响。基于截断水平原则的游程理论是用以识别水文洪旱的历时、程度及强度等主要特征的最常用方法,其后学者

们在洪旱事件整合方面对游程理论进行了完善。标准化径流指标(Standardized Runoff Index, 简称 SRI)和径流干旱指标(Streamflow Drought Index, 简称 SDI)采用与 SPI 相似的计算原理,确定洪旱导致径流的季节性损失,它们和 SPI 一样具有多时间尺度的特点,因此能联合 SPI 分析气象洪旱和水文洪旱的内在关系。作为多指标综合运用的代表,地表水供给指标(Surface Water Supply Index, 简称 SWSI)根据逐月历史资料得出的不超标概率对水库蓄水、河道径流、积雪和降水进行加权平均,较为全面地反映水文洪旱对城市和工业用水、农业灌溉和水库发电等的影响。但不少学者指出,由水文气象要素在不同时空尺度下变率的差异导致 SWSI 不同时间尺度下的统计特征存在不一致的问题,仍然有待解决。

农业洪旱以土壤水分含量,即土壤墒情作为评价对象。土壤墒情不但受气象条件、地形地貌、土壤类型等自然因素限制,同时还受农业布局 and 作物生长情况以及灌溉情况等人为因素影响,因此农业洪旱的发生机理比气象洪旱和水文洪旱复杂得多。根据实时监测的土壤水分含量或者作物形态和生理指标等应该是评价农业洪旱最客观的手段,但这些方法需要采集的参数较多,在我国特别是西北地区,以现时的条件难以在大范围进行监测。

在不考虑或者无灌溉条件的情况下,借用气象数据来评价农业洪旱的程度是较普遍和有效的途径,由 PDSI 衍生出来的作物水分指标(Crop Moisture Index, 简称 CMI)利用 PDSI 的参数进行逐周计算,可以对影响作物生长的水分条件实施短期监测;Karl 利用 PDSI 计算过程的中间项水分异常指标(Palmer Moisture Anomaly Index, 简称 Z index)对土壤水分变化响应较快的特点,用以追踪农业干旱的发展。近年来,许多学者以分布式水文模型模拟的土壤水分含量和蒸散发量作为重要参数,提出了很多用于监测农业干旱的指标。这些指标利用了分布式水文模型具有物理基础、充分考虑水文循环不同过程和流域下垫面不均匀性等特点,比一些简单机理性指标考虑得更全面和更有说服力,因此也代表了今后发展的方向。

1.4 流域洪旱时空特征及风险分析

洪旱指标在现时的洪旱评价和监测中得到了广泛应用,但由于它们最初都是基于站点观测资料而设计的,空间分辨率低且可比性差,仅凭这种“点洪涝(干旱)”不足以描述区域洪旱的时空变化特征。为此,国内外许多专家学者分别从确定性和不确定性的角度,提出许多方法分析洪旱时空特征以及不同洪旱类型之间的关系。根据流域水循环理论构建的水文模型,特别是其中的分布式水文模型能够在充分利用流域下垫面信息的前提下,描述植被蒸散发、土壤下渗、流域汇流过程等在不同气象条件下的响应方式。采用确定性方法的学者正是利用水文模型的这一优势,探讨不同水文气象要素在洪涝(干旱)异常条件下的变化规律,进而全面分析