

# 中国南方流域水循环 与流域水文过程演变研究

张强 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 中国南方流域水循环 与流域水文过程演变研究

张强 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是作者近十年来对华南大河流域,尤其是关于长江流域与珠江流域水循环与水资源演变方面研究成果的总结。本书共分九章,系统总结了珠江流域与长江流域乃至整个中国区域的极端气象水文过程变化、珠江流域与黄河流域蒸发变化对比研究、珠江流域水文极值多变量概率分析、长江流域水沙变化及成因探讨、珠三角水位变化及成因分析以及历史洪旱序列模拟与长期记忆性研究等多项研究成果。本书涉及气象水文学、气象水文极值分析与多变量概率分析方法及应用、多尺度水沙突变分析、分形理论与方法等多学科的理论与方法的应用研究,一方面揭示了中国南方典型流域水文循环时空演变特征及机理,同时为多种统计方法及分形理论在气象水文现象研究中的应用提供典型研究案例,并为相关研究提供分析思路及参考。

本书可供水文水资源、水生态、水环境、水利工程、地理、资源及有关专业科技工作者和管理人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

中国南方流域水循环与流域水文过程演变研究 / 张强著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 12  
ISBN 978-7-5170-1632-8

I. ①中… II. ①张… III. ①流域—水循环—过程模拟—研究—中国 ②流域—陆面过程—过程模拟—研究—中国 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第320228号

审图号: GS (2004) 661 号

|      |                                                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 中国南方流域水循环与流域水文过程演变研究                                                                                                                                                                                              |
| 作 者  | 张强 著                                                                                                                                                                                                              |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                      |
| 排 版  | 北京三原色工作室                                                                                                                                                                                                          |
| 印 刷  | 北京纪元彩艺印刷有限公司                                                                                                                                                                                                      |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 15印张 368千字                                                                                                                                                                                       |
| 版 次  | 2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷                                                                                                                                                                                         |
| 印 数  | 0001—1000册                                                                                                                                                                                                        |
| 定 价  | 56.00元                                                                                                                                                                                                            |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换  
版权所有·侵权必究

## 序

当前,全球变暖及其对区域乃至全球水循环的影响,以及由此而导致的洪旱灾害时空变异与流域水资源管理问题,已引起国内外学术界的广泛关注。在全球变暖的大背景下,全球水循环加快,洪旱灾害和极端事件呈现增加和增强的趋势,洪旱灾害和极端事件演变规律以及发生发展机理成为当今重大科学研究的前沿问题之一。

我国关于气候变化对水循环和区域水资源方面的研究多集中于北方的流域,如黄河、淮河、河海、辽河、黑河、塔里木河等流域。相比较而言,华南诸河相关研究较为薄弱。张强博士自2003年起即师从我国著名地理学家、冰川学家施雅风院士,从事长江流域气候变化与洪水灾害方面的研究;2005—2006年,作为洪堡学者在德国继续从事华南流域水循环与水资源演变领域的研究工作;2007年开始,与挪威奥斯陆大学的许崇育教授、香港中文大学的陈永勤教授以及美国得克萨斯农工大学的Vijay P. Singh教授等国内外知名学者开展广泛合作,主要从事珠江流域气象水文学的研究。最近几年开始与新疆水科院、南京水利科学研究院、河海大学、大连理工大学等国内科研机构及高校在上述研究领域开展学术合作。本书是张强博士近十年来对华南大河流域,尤其是关于长江流域与珠江流域水循环与水资源演变方面研究成果的总结,涉及气候变化、气象水文极值、地表水文过程、水库等水利设施水文效应、水文变异等研究内容;研究解决了突变分析、分形理论在水文学领域应用研究中的基础理论问题,提出了多尺度突变检验方法、水文要素变异影响辨识因子;从理论上分析了不同去趋势方法对分形结果的影响,为分形理论在气象水文学领域的应用研究提供重要理论依据;揭示了中国南方典型流域水文循环时空演变特征及机理。

2013 年 11 月，在广州参加中国水论坛期间，张强博士向我较详细介绍了本书的框架及内容，并请我写序。后又发书样给我，浏览后感到本书内容全面、系统，理论基础扎实，数据和信息丰富。故欣然应允，作为对年轻学者的支持与鼓励。相信此书的出版，将进一步推动华南诸河流域水循环与水资源演变理论的研究。

是为序。



2013 年冬 于北京

（“全球变化国家重大基础研究：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”首席科学家、中国工程院院士、南京水利科学研究院院长）

# 前 言

2003 年我从南京大学毕业，在施雅风院士的指导与带领下，进入到气象水文学领域学习与工作，到目前已有近 10 余年头。这是一个古老而又全新的领域，随着全球性水问题的出现和对水资源问题认识的深入，世界各国已普遍承认，对水文气象现象及其机理的深入研究是未来水资源管理的重要科学支撑，也是当前国际水文学学术前沿领域的重大科学问题，其中有诸多现象尚待进一步解释，有诸多理论问题尚待进一步探讨，这将是我不在此领域不断前进的原动力。

流域气象水文学的研究在我国北方流域已有广泛开展，也较系统，有许多重大研究计划与重点科研项目是放在我国北方流域，如淮河、黄河、黑河等。而我国南方流域，尤其是珠江流域，相关研究尚处于起步阶段。我从 2007 年到香港中文大学，在许崇育教授与陈永勤教授的指导下，开始珠江流域气象水文现象的研究工作；2009 年进入中山大学工作，继续这一领域的研究，先后得到中山大学“百人计划”人才引进项目、中山大学青年教师重点培育项目、国家自然科学基金（41071020）、广东省科技厅对外合作项目等诸多科研项目的资助，对珠江流域地表水文过程、生态需水、气象水文极值、珠江三角洲地区水文变异、水库水文效应、流域水循环、ENSO 对珠江流域降水影响、降水结构等一系列科学问题开展系统研究，在国内外学术期刊发表一系列学术成果，在国内外学术界引起普遍关注。

最近几年来，有不少老师与朋友强烈建议我总结以往的成果，出一本专著，作为对以前工作的系统总结。一直以来，总感觉专著的撰写是一项较宏大的工程，需具有较深厚的经验积累与学术积淀，所以一直迟迟未能成行。在美国德克萨斯农工大学 Vijay P. Singh 教授的鼓励与督促下，终于完成此书，也算是对

关心过我、帮助过我的老师与朋友们的一个交待吧。在成稿过程中得到南京水利科学研究院院长张建云院士、中山大学地理科学与规划学院领导保继刚教授、柳林教授等的支持与帮助，得到主管科研副院长陈晓宏教授的大力支持。林凯荣副教授参加了本专著水文模型这一部分内容的撰写。我的研究生刘剑宇、孙鹏等对图中的部分插图做了进一步的完善与修订，在此一并表示衷心感谢！

我的爱人刘春玲博士在此书的撰写过程中，给予了我无私的支持与帮助，还有我的儿子张敖尊，给整个成书过程增加了不少乐趣，使我能坚持下来，最后完成书稿。

此书涉及气象与水文学、统计水文学、非线性水文学等内容，可供对此感兴趣的研究生与科研人员参考。由于时间紧，水平有限，甚至难免有疏漏及错误之处，恳请读者提出批评意见，使我接下来的工作能不断得到修正与提高，在气象水文学的研究之路上，坚定地走下去。

2013 年 12 月 12 日于中山大学南校区

## 摘 要

全球气候变化与水文水资源问题关系到人类的生存与发展,涉及国家政治与安全、社会经济发展、人类协调与合作等一系列问题。气候变化改变了水文循环过程,影响着水资源系统的结构与功能,对人类水资源的开发利用带来新的挑战,并深刻影响着人类社会水资源的开发、利用、规划、管理等诸多环节。探讨气候变化影响下的水资源及其相关科学问题成为全球共同关注和各国政府的重要议题之一。水循环及其变化特征与机理是水文水资源理论研究中最具根本性的科学问题,也是亟待解决的难题。从社会需求来看,其研究具有重大的实践意义;从结合应用的角度,全球水循环与全球变化的水资源和水文响应,特别是气候变化下水循环问题是其中最为重要的基础科学问题。近几年来,由于全球气候变化导致水循环发生显著变异,进一步导致极端水文气象事件(如暴雨、旱涝灾害、风灾等)频发,对人类社会、生态等产生重大影响,因而区域乃至全球尺度的水循环及其水资源与水文响应研究备受关注。气候变化必然引起水循环的变化,从而影响河川径流,进而导致流域地表水文过程的变异。除此之外,河川径流变化还受人类活动等方面的影响。人类活动使流域下垫面发生变化,如土地利用、水库大坝的兴建、水土保持生态工程的修建、城市化等都会改变水文循环,从而影响到河川径流。虽然人类活动的范围是局部的,但是影响强度在某些地区却是很显著的。定量界定气候变化和人类活动对河川径流的影响以及地表水文过程的变异对流域水生态与水环境的影响,不仅是气候变化影响研究领域中的科学问题,同时也是目前流域管理者所关心的重大科学问题。水文学发展的历史表明,社会需求是水文学发展最基本的动力,它决定了水文学发展的方向和进程。进入 20 世纪 90 年代以来,社会发展对水文学的需求主要表现在,为防灾减灾、水资源可持续利用、生态环境保护和社会与经济可持续发展等方面提供水文学依据。作者正是针对上述科学问题,以长江流域与珠江流域为主要研究区域,在气象水文学领域开展系统而深入的研究,逐步形成较为完整的理论体系。

目前,随着全球性水问题的出现和对水资源问题认识的深入,对水文气象现象及其机理的深入研究已被世界各国普遍承认是未来水资源管理的重要科学支撑,也是当前国际水文学学术前沿领域的重大科学问题,基于此,作者经过 10 余年的系统研究,揭示全球气候变化背景下中国南方大河流域区域水循环演变特征及其机理,研究水循环变化对区域降水与流域地表水文过程的影响方式及程度;探讨人类活动(如大型水利工程建设等)对流域水文过程(包括径流与输沙过程)的影响;变化环境下区域水文系统变异及其对流域生态影响的定量化研究,并在诸多研究成果基础上,形成该专著的主要内容。该专著总结了作者自 2003 年以来的研究成果,以流域水循环与水资源演变为主线,初步形成较为完整的科学认识体系。

本书共分九章:

第1章 系统阐述流域水循环与流域地表水文过程研究的进展、学科前沿等问题。

第2章 气候系统的输出—降水对水循环的影响是最为直接的。对某一特定的区域而言，一定程度上可以说降水是水循环的开始。作者通过对全国范围内乃至长江流域与珠江流域降水的系统分析，研究发现了中国6个降水一致性区域，在不同区域发生不同的降水特征。该章还总结了作者另外一项研究，发现中国南方大河流域，如珠江流域，降水强度与波动性增强明显，而低强度降水日数减少；降水总量变化甚微，但是降水波动变化增加显著，从而使旱涝灾害发生几率增大。

第3章 论述了蒸散发研究的意义及主要科学问题。总结了作者在蒸发方面研究的主要工作，即干旱区与湿润蒸散发过程对比研究以及中国蒸散发时空变化特征及影响因子。

第4章 讨论了当前全球气候变化研究所关注的重要科学问题之一，即气象与水文极值（如旱涝灾害、台风灾害、暴雨及风灾等）频发，对人类社会、经济发展以及社会稳定等造成重大影响。这既是当前的一个重大科学问题，也是国家保障经济社会可持续发展与社会稳定的重大科技需求。同时，总结了作者在这个领域做的主要工作，即对气象与水文极值时空演变规律与归因的研究以及物理机理解析。作者以长江流域（包括长江三角洲）与珠江流域（包括珠江三角洲）为研究区，将定性研究与定量分析相结合，全面辨析长江流域上、中、下游气象水文极值的变化规律与成因，包括长江流域水沙变化规律及成因研究。另外，基于 Copula 函数对珠江流域连续最大（最小）7d 流量进行多变量联合概率分布分析，深入探讨了最大流量与最小流量的相遇概率及珠江流域下游旱涝灾害发生概率，基于研究成果，对珠江流域下游水资源管理与水资源合理配置等重要应用问题提出建议。

第5章 历史气候记载有着记录时间准确、气候变化信息详细等诸多优点，而且在长期的研究中，人们已总结出利用历史气候记录研究气候变化的有效方法，历史气候记录已成为延长器测资料，从较长时段审视气候变化不可多得的珍贵数据，因而利用历史气候记录研究旱涝灾害也已引起国际学术界的高度重视。作者利用长江三角洲地区丰富的历史资料，与南京地理与湖泊研究所陈家其研究员合作，重建长江三角洲地区旱涝灾害序列，进行了一系列的分析与研究工作，得出了有意义的结果。该章总结了以历史文献记载为基础的主要研究工作，一个是研究了青藏高原气候变化对长江三角洲地区旱涝灾害影响研究；另一个是研究了长江三角洲地区旱涝灾害序列的可预测性与分形特征。该研究进一步从理论上论证了利用历史文献当中的旱涝灾害信息研究并预测未来旱涝灾害发生规律的可行性。

第6章 总结了作者在地表径流尺度演变特征研究方面的主要工作，研究了长江流域水文序列是非平稳序列，揭示了长江流域上、中、下游水文序列不同的自相关性特征。作者以东江流域为例，从多重分形特征的角度研究了水库对下游地表水文过程影响的动力学特征。另外一个重要工作是水文分形分析中一个理论问题，即如何消除水文序列的周期性对水文序列分形特征的影响研究。

第7章 总结了作者在水文变异研究中的工作，以长江流域与珠江流域为主要研究区，系统研究了中国南方大河流域水文要素变异特征、程度与成因。

第8章 珠江三角洲地区地势低平，河网密布，珠江三角洲地区水位变化受上游地表

水文过程、下游的海平面以及咸潮等变化的影响，水位变化复杂。同时，由于珠江三角洲地区水位变化受多种因素的综合影响，因而水位变化成因分析的复杂程度高。但是，该水位变化直接关系到该区域水资源管理与利用问题，如水位上升则有增加淹没损失的风险，而水位降低则有增加咸潮入侵，从而导致城市取用水困难的风险。因而，珠江三角洲地区水位变异及成因分析，有着重要的理论与科学意义，更具有重要的实际价值。作者根据研究区水位变化研究的特殊性 & 研究需求，创造性的改进了 RVA 与 IHA 方法，分析了珠江三角洲地区水位变异强度的时空演变特征。同时利用贝叶斯模型与 Lepage 突变分析方法分析珠江三角洲地区水位的变异特征。

第 9 章 水文模型是研究地表水文过程以及气候变化与人类活动对地表水文过程影响的一个强有力的工具。该章总结了作者目前为止做的主要工作。

## Abstract

Global climate changes and hydrological and water resources issues have considerable implications for human society and development, and also concerns social security, socio-economic development and international collaboration. Climate changes alter the hydrological cycle processes, influencing structure and functions of water resources system, posing new challenges for human exploitation of water resources and meaning too much for development, usage, planning and management of water resources. In this sense, hydrological cycle and related changing properties and possible mechanisms are the core issues in the hydrology and water resources and are also the scientific problems needing urgent attentions. In recent decades, the hydrological cycle was considerably altered by global changing climate, and hence the frequent occurrences of weather and hydrological extremes such as rain storms, floods and droughts and wind hazards etc., which have profound impacts on human society, inflicting tremendous losses on socio-economy. Hydrological alterations are one of the consequences of climate changes and which is the key factor resulting in alterations of fluvial hydrological alterations. Besides, fluvial hydrological variations are also heavily impacted by human activities. Human activities caused changes of underlying surfaces, such as land use and land cover changes, construction of water reservoirs, conservation of soil and land and urbanization, and all these factors tend to contribute to the alterations of fluvial hydrological processes. The influences of human activities on hydrological processes are sometimes local or regional, however the degree of intensity of human influences are usually significant and can not be ignored. In this sense, quantitative evaluation of impacts of climate changes and human activities on fluvial streamflow and ground-surface streamflow variations and related influences on eco-hydrological requirements are the relevant scientific issues and also the key issues the policy-makers concern much. Historical development of hydrology science tells the story that the social requirements are the fundamental impetus and the major driving factor for the improvement of the hydrology as a subject. Entering the 1990s, mitigations of natural hazards, sustainable usage of water resources, and conservation of ecological environment and sustainable development of the socio-economy continue to pose increasing and enhancing challenges for the development of hydrology. The research group focuses on the foregoing scientific problems and contributes great efforts to the study of hydrological phenomena by taking the Yangtze River and the Pearl River as case studies.

In recent years, increasing hydrological problems such as shortage of water resources in a wide sense and also the improving knowledge of water resources emphasize the study of

meteor-hydrological phenomena and related mechanisms. With this mind, the major objectives of this series of studies are: (1) to investigate the changing properties and related underlying causes of the hydrological cycle at a regional scale in the rivers of the south China, analyzing the way and the degree of the impacts of the hydrological cycle alterations on the regional precipitation processes and ground-surface hydrological processes; to probe into the impacts of human activities such as construction of hydraulic facilities on the fluvial streamflow processes including the sediment load and streamflow changes; to evaluate in a quantitative way the impacts of the alterations of regional water system on the fluvial ecological environment. This study is the integrated study involving interdisciplinary methods or techniques in terms of different spatial and temporal scales. The current report summarizes the research results of the research group since 2005 and the theoretical system is coming into being after the considerable efforts of study and analysis. The report is based on more than 60 publications in Chinese and English. Generally, the report involves nine chapters and the contents of the chapters will be introduced briefly in the following:

**Chapter 1** This chapter introduces the key scientific issues in terms of hydrological cycle, ground-surface streamflow variations and also related frontier scientific problems;

**Chapter 2** Precipitation is the key component of the hydrological cycle. Precipitation is sometimes regarded as the starting point of the hydrological cycle. The research group analyzed the precipitation changes in the Yangtze River, the Pearl River and also the entire China, showing six regions with homogeneous precipitation changes. Besides, different precipitation patterns have been identified for different regions. Besides, the study also obtained another important finding that hydrological alterations are reflected mainly by the altered precipitation structure such as decreasing rainfall days and increasing rainfall events. The precipitation total is in moderate changes but is characterized by larger-magnitude of changing variability which undoubtedly increases the probability of flood and drought hazards;

**Chapter 3** This chapter discusses the significance and the major scientific problems in terms of evapotranspiration. Our work in this field mainly focuses on the comparisons between the evapotranspiration changes in the arid and humid regions. The evaporation changes over China, changing properties and influences factors are also investigated;

**Chapter 4** This chapter summarizes the research results by the research group with respect to the weather and hydrological extremes. The research group studied and analyzed the changing characteristics and attributions. By taking the Yangtze River basin and the Pearl River basin as case studies, the research group analyzed the changes of hydrological extremes including sediment load and streamflow changes. Besides, hydrological extremes defined by consecutive 7 day high flow and consecutive 7 day low flow components are also analyzed by using the copula functions, probing into the joint probability behaviors of these two hydrological extremes;

**Chapter 5** Historical documented records of floods and droughts are invaluable for the

investigation of changes of natural hazards from the viewpoint of long time interval. The research group reconstructed and analyzed the changes of floods and droughts in a last 1000 years, exploring the impacts of the Tibet Plateau on the occurrences of floods and droughts in the Yangtze Delta region. In addition, the predictability and fractal properties of the flood and drought series are also anatomized by using IFS and RIFS models. These studies further clarified the feasibility of study on historical floods and droughts based on the historical documented records;

**Chapter 6** This chapter summarized the study in terms of scaling properties of streamflow series. The major findings are the invariant scaling properties of streamflow series and different correlation structures of streamflow series in the upper, the middle and the lower Yangtze River basin. Besides, the impacts of the water reservoirs on the downstream hydrological processes are analyzed by using multifractal detrended fluctuation analysis;

**Chapter 7** This chapter summarizes the work about the hydrological alterations, such as the features, degree and causes of hydrological alterations of the hydrological processes in the rivers of the south China, specifically the Yangtze River and the Pearl River;

**Chapter 8** Due to rapid urbanization and industrialization, the PRD region has witnessed environmental changes within only one to two decades and comparable changes in developed countries may have occurred only after up to one century of development. Human activities such as engineering constructions and other modifications of the Pearl River network in such a changing environment might cause hydrologic alterations in terms of river flows, stages, and flow partition at river bifurcations, channel cross-sections and hydraulic gradients. Changes in these hydrologic regimes may have crucial implications for almost all aspects of water resources management in the region, including flood protection, land use, water supply, channel navigation, and water pollution control. Abnormally high or low water level has the potential to give rise to the salinity intrusion, flood inundation and water logging, negatively influencing the economic development and human activities in the PRD. This chapter summarized the major findings by the research group in the Pearl River Delta region.

**Chapter 9** Hydrological model is the power tool in the simulations of the hydrological changes. This chapter summarizes the major findings in this field.

# 目 录

序

前言

摘要

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论                          | 1   |
| 1.1 流域水循环与水文过程研究的学科发展与前沿问题        | 3   |
| 1.2 流域水循环研究                       | 4   |
| 1.3 流域地表水文过程研究                    | 5   |
| 1.4 主要研究内容                        | 6   |
| 参考文献                              | 12  |
| 第 2 章 降水时空演变特征及其机理探讨              | 15  |
| 2.1 中国降水均值的年与季节变化                 | 15  |
| 2.2 中国极端降水时空变化特征及其成因              | 25  |
| 2.3 长江流域极端降水分析与原因研究               | 39  |
| 2.4 珠江流域极端降水分析与原因研究               | 46  |
| 参考文献                              | 53  |
| 第 3 章 蒸发时空变化特征及其影响因素解析            | 61  |
| 3.1 中国参照蒸发时空变化特征及影响因子分析           | 61  |
| 3.2 干旱区半干旱与湿润区蒸发变化比较研究            | 70  |
| 参考文献                              | 78  |
| 第 4 章 基于水文序列的水文极值研究               | 82  |
| 4.1 长江流域极端高流量与高水位变化规律研究           | 82  |
| 4.2 长江流域年最大流量与 ENSO 事件的遥相关关系研究    | 89  |
| 4.3 基于 Copula 函数的珠江流域水文极值概率特征研究   | 93  |
| 参考文献                              | 103 |
| 第 5 章 基于历史记载的旱涝灾害研究               | 111 |
| 5.1 长江三角洲地区历史旱涝灾害与青藏高原气候变化遥相关关系研究 | 111 |
| 5.2 长江三角洲地区历史旱涝灾害的分形特征及可预测性研究     | 119 |
| 参考文献                              | 124 |
| 第 6 章 地表径流尺度分形特征及成因               | 128 |
| 6.1 长江流域径流多尺度分形特征研究               | 128 |
| 6.2 东江流域径流分形特征及水利工程水文效应研究         | 132 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 6.3 多重分形分析中去趋势方法选择的理论探讨 .....               | 136 |
| 参考文献 .....                                  | 145 |
| 第7章 地表径流变异特征及其机理分析 .....                    | 150 |
| 7.1 长江流域多尺度水沙突变特征、成因及意义 .....               | 150 |
| 7.2 珠江流域水文过程多时间尺度的突变特征及其对珠江三角洲水文变异的影响 ..... | 160 |
| 参考文献 .....                                  | 171 |
| 第8章 变化环境下网河区水文变异特征 及成因——以珠江三角洲为例 .....      | 175 |
| 8.1 珠江三角洲地区水文变异程度时空分布特征及可能原因 .....          | 175 |
| 8.2 珠江三角洲地区水位突变特征及其可能成因 .....               | 186 |
| 参考文献 .....                                  | 198 |
| 第9章 基于 Copula-Glue 的水文模型参数不确定性 估计方法 .....   | 202 |
| 9.1 Copula 函数 .....                         | 203 |
| 9.2 基于 Copula-Glue 的不确定性估计方法 .....          | 204 |
| 9.3 应用实例和分析 .....                           | 205 |
| 9.4 结语 .....                                | 215 |
| 参考文献 .....                                  | 216 |
| 附件1 基金项目 .....                              | 219 |
| 附件2 主要论文论著 .....                            | 221 |

# 第 1 章 绪 论

陆地水文过程是联系地球表层系统水、土、气多种要素变化的纽带，它是由“土壤—植被—大气”界面过程、坡面水文过程、河流水动力学过程以及流域水循环过程等多个环节组成。由于全球气候变化对降水、径流和区域水循环系统的影响以及由此引起的地表水文过程演变对流域生态的影响，加上高强度人类活动对地表水文过程及流域水环境与水生生态的影响加剧，使地表水文过程演变及其可能影响逐渐成为地球系统科学中的重大科学问题，同时也是区域水资源安全评价、水生态与水环境可持续利用和风险管理重大需求的应用基础问题。全球气候暖化已得到诸多观测数据的证实，观测资料表明，全球平均气温在 20 世纪约升高  $0.6^{\circ}\text{C}$ ；另外，多气候模式多种排放情景预估模拟结果也表明，到 21 世纪末，全球地表平均增温  $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ 。气候变化将在很大程度上改变区域乃至全球水文循环的现状，导致降水时空演变格局的变异，从而进一步引起水资源在时空上的重新分配，并对降水、蒸发、径流等水循环诸多环节造成直接影响。全球气候变化及其对水文水资源、生态环境、水安全与粮食安全的影响等诸多问题业已成为各国政府和专家所关注的重大科学问题。气候变化对我国水文循环和水资源系统已经产生了不可低估的影响，随着人口增长和经济社会的发展，干旱和洪涝等灾害和日益突出的水资源供需矛盾将成为制约我国国民经济发展的一个重要因素。从此意义上来讲，深入研究气候变化对流域水文水资源的变化以及对流域地表水文过程的影响，可为流域水资源合理开发及可持续利用提供科学依据。

我国是受气候变化影响较大的国家之一，我国水资源现状是水资源少，时空分布不均。我国水资源总量为 28415 亿  $\text{m}^3$ 。人均水资源量  $2185\text{m}^3$ ，不足世界人均的  $1/4$ ，水资源短缺已成为制约我国社会经济发展的全局性问题。我国是农业大国，农业生产的发展直接决定中国粮食安全问题，但是长期以来缺水导致农业旱灾范围广、损失大。20 世纪 90 年代以来，干旱年均受害面积 4.07 亿亩 ( $0.27\text{亿 hm}^2$ )，因旱灾中国每年减少粮食 245 亿  $\text{kg}$ ，占粮食总产量的 5% 左右。全球气候变化进一步恶化了我国水资源短缺问题。特别是近 20 多年来，北方地区尤其是海河和辽河流域水资源短缺的形势最为突出。20 世纪 80 年代华北地区持续偏旱，京津地区、海滦河流域、山东半岛 10 年平均降水量偏少 10%~15%。进入 90 年代，干旱区继续向西南方向扩展。多种研究结果均表明，气候变化将可能增加中国洪涝和干旱灾害发生的几率。因而，在当前气候变化影响下，中国水资源问题不容乐观。但是，当前的研究多集中于中国北方地区，特别是黄河流域与西北诸河流域。如王浩等 (2005) 应用分布式流域水文模型 WEPL 模型分析了人类活动影响下的黄河水资源演化规律。周祖昊等 (2009) 基于水资源二元演化模型研究了渭河流域的水资源演变规律。仇亚琴等 (2006) 应用分布式水文模型研究了黄河流域人类活动影响下的水文水资源综合效应，取得了有价值的成果。李相虎等 (2007) 对石羊河流域的研究表明，其近几十年来的自然水循环系统平衡状态遭到破坏，人为因子在水资源变化过程中起主导负作用，其影响力占总

影响力的 58.48%，大大超过降水因子 22.35% 的正作用，气候因素远远低于人类活动的影响。但在华南大河流域（以长江与珠江流域为例）此类研究较少，相关研究无论从深度还是从广度，较与华北与西北地区相关研究相距甚远。

值得注意的是，长江流域与珠江流域均有其各自特殊的水文水资源科学问题。长江是中国第一大河，旱涝灾害发生率最高，危害最大，尤其是长江中下游的洪水灾害。据统计，1950—1999 年间，平均每年受灾人口达 1787 万人，死亡 2518 人，直接经济损失 17.74 亿元（当年价）。即使在灾害最小的 1966 年，受灾面积 41 万  $\text{hm}^2$ ，受灾人口 103.3 万人，死亡 540 人。近 150 年间发生的 1870 年、1931 年、1935 年、1954 年与 1998 年特大洪水灾害损失均极为严重。20 世纪 90 年代以来长江流域多次出现大洪水（1991 年，1995 年，1996 年，1998 年，1999 年和 2002 年），特别是 1998 年 7—8 月间的长江大洪水，不仅水位高、（累计）流量大，而且持续时间长，以及对沿岸人民的生命财产造成创纪录的 2550 亿元的损失（含抗洪救灾费用），曾一度引起国际社会的关注。然而，这次大洪水也不过是近两千年来长江流域有记载的二百余次规模较大的洪水之一。同时，由于降雨季节与耕种季节的不完全相应，降雨的年际变化和季节变化大，加上灌溉设施不足，故而旱灾也经常发生，如 1934 年大旱，流域内苏、皖、湘、鄂、赣等 5 省的受旱田达 1 亿亩，绝大部分减产 80% 左右。据统计，在 1949—1983 年，全流域平均每年受旱面积 5619 亩，成灾面积 2378 万亩。2006 年 7 月中旬以来，湖北西部、湖南西北部、贵州北部、云南北部、陕西南部、甘肃南部、宁夏、青海南部、西藏东部等地降水持续偏少、气温偏高，出现不同程度的旱情。据统计，鄂、湘、黔、滇、陕、甘、宁、青 8 省区因旱有 888.9 万人饮水困难，农作物受灾面积 429.7 万  $\text{hm}^2$ ，其中绝收 74.7 万  $\text{hm}^2$ ，直接经济损失 115.1 亿元人民币。20 世纪长江流域旱涝灾害发生频率均有上升趋势是自然气候变化的结果？还是气候变化与人类活动综合作用的结果？另外，自然因素与人类活动因素在旱涝灾害演化方面的作用如何？所有这些变化对该流域水资源管理有何指示意义？这些科学问题有待深入研究。另外，长江三峡大坝的建设一度使水利工程对下游地表水文过程以及流域生态环境等诸多方面的影响成为国内外水文学界研究的热点问题。

珠江流域是我国南方大河流域，是洪、涝、旱、咸、潮、风多种自然灾害频发的流域，随着珠江流域各省（自治区）社会经济的迅速发展，人民物质生活水平的日益提高，各种自然灾害，尤其以洪涝、干旱灾情所影响的范围之广和造成的经济损失之大，以及对生态与环境保护、修复的伤害，越加严重。据《七大河流中下游及沿海诸河洪水主要威胁范围社经调查报告》，珠江遭遇洪灾单位面积损失之大，列七大江河之首。珠江流域，特别是珠江三角洲地区，是中国经济最为发达的地区之一，高强度的人类活动导致水文过程显著变异，大型水利设施的建设对流域地表水文过程（包括径流变化与悬沙输移变化）产生重要影响。最近研究结果表明，受全球气候变化的影响，珠江流域区域水汽输送与水汽收支发生显著变化，从而导致降水集中度发生变异，降水强度增大；在降水季节性分配方面也有新的变化，主要表现在冬季降水增多，而夏季降水减少。珠江流域降水在时空演变特征上的变化无疑会对流域地表径流过程产生重大影响。同时，珠江流域由于高速发展的社会经济与剧烈的人类活动，珠江流域片的用水量越来越大，根据 1998 年与 2006 年《中国水资源公报》