

变化环境下南方湿润区 水资源系统规划体系研究

陈晓宏 刘丙军 等 编著
涂新军 于海霞



科学出版社

国家自然科学基金项目 (51210013, 91547202, 51479216, 91547108)

国家科技支撑计划 (2012BAC21B0103)

水利部公益项目 (201301002-02, 201301071)

联合资助

广东省水利科技创新项目 (2011-11, 2014-20)

广东省水资源综合规划

变化环境下南方湿润区水资源 系统规划体系研究

陈晓宏 刘丙军 涂新军 于海霞 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要研究总结以广东省为典型的南方湿润区水资源演化特征以及水资源开发、利用、节约、保护、配置、布局、管理的基本方法和水资源综合规划体系成果。具体内容包括:提出了水资源规划体系的组成与任务,评价了广东省水资源数量、质量、开发利用情况及其演变的基本特征,提出了水文要素变异分析识别基本方法以及以珠江三角洲和东江流域为实例的水文要素变异识别分析结论,构建了水资源综合规划的五大体系:高效节约的节水型社会建设体系、科学合理的水资源动态需求预测体系、健康优美的水环境保护和生态建设体系、统一优化的水资源配置体系、健全完善的非工程保障体系,形成了一整套省级水资源综合规划的理论方法和具体实践。本书提出的理论方法和规划模式均在广东省得到实际应用,不仅具有南方湿润区高强度用水背景下水资源综合规划的突出特点,在先进的水资源开发利用、需求预测、节约保护、配置管理理论方法在变化环境下的实际应用方面也独具特色。本书可供大专院校水文水资源及相关专业高年级本科生、研究生教学科研使用,也可供水利、环保、市政等规划设计部门科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下南方湿润区水资源系统规划体系研究 / 陈晓宏等编著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048976-0

I. ①变… II. ①陈… III. ①湿润区-水资源管理-管理规划-研究-中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 140783 号

责任编辑: 孟美岑 胡晓春 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

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

*

2016年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张: 32

字数: 745 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源，是生态与环境的控制性要素，也是国民经济建设和生态环境保护的命脉。随着人口不断增长、经济快速发展、城市化进程加快和人民生活水平逐步提高，水资源更加深刻地影响着经济社会活动的各个方面，直接关系到国家经济安全、社会稳定和可持续发展。

气候变化和人类不合理的水资源开发利用，导致区域、流域乃至跨流域水资源短缺、洪涝干旱与水环境污染等问题更加突出，水安全问题已成为经济社会发展的制约因素。习近平总书记明确提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路；党的十八大报告强调“建设生态文明，是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计”，把生态文明建设摆在现代化建设全局的突出位置；中共中央、国务院在 2011 年《关于加快水利改革发展的决定》中明确提出将实施最严格水资源管理制度作为加快转变经济发展方式的战略举措。可见，面对水资源开发利用所面临的严峻新形势，需要在时空上合理调配水资源使之满足日益增长的用水需求，根据水资源承载能力合理调整产业结构布局，最终达到人口、资源、环境和经济的协调发展，对区域与流域水资源进行统一协调规划、标本兼治、综合治理、开源节流、治污并重，研制适应变化环境的水资源系统体系规划，以实现水资源的合理开发、高效利用、优化配置、全面节约、有效保护、综合治理和科学管理的目标。

近 10 年来，在国家自然科学基金项目（51210013，91547202，51479216，91547108）、国家科技支撑计划（2012BAC21B0103）、水利部公益项目（201301002-02，201301071）、广东省水利科技创新项目（2011-11，2014-20）、广东省水资源综合规划等多个课题支持下，综合运用交叉学科理论方法，统计分析与概念性模型相结合，形成了一整套完整的变化环境下南方湿润地区水资源系统规划理论体系与方法，解决了快速动态变化过程中水资源量、质双控制的关键科学技术难题：气候变化和人类活动双重作用下水文水资源过程全要素变异识别、变化环境下非一致性水文水资源序列特征量重现期计算及其重构、快速城市化与用水总量控制约束等多要素胁迫下的水资源需求预测和用水总量控制约束下多维度水资源优化配置。创新性地研制了一系列水文要素全过程变异识别、多边多维水资源需求预测以及水资源自适应协同配置等理论和模型；在理论、模型与方法体系运用上，结合南方典型湿润区——广东省经济社会发展的战略需求，顶层设计了广东省四大片区、七大流域、三个水资源分区层次嵌套 154 个行政区的开发、利用、治理、配置、节约、保护、管理的布局 and 方案，涵盖了水资源可持续开发、利用、保护和节约所有方面，是迄今广东省最全面深入的水资源领域研究成果，对于促进水资源可持续利用，建设广东省资源节约型、环境友好型和经济社会可持续发展的和谐社会，都具有战略意义。

本书是在多年的课题研究和规划成果基础上总结撰写的。陈晓宏、刘丙军负责全书的研究思路与架构设计、主体内容研究与统稿工作。陈晓宏、刘丙军、于海霞等负责第1章编写；黄红明、史栾生、张蕾等负责第2章的研究与撰写；王兆礼、刘丙军、陈晓宏等负责第3章的研究与撰写；邓良斌、孙秋戎、陈晓宏等负责第4章的研究与撰写；涂新军、杨杰、陈其新等负责第5章的研究与撰写；江涛、黎坤、黄凡、于海霞等负责第6章的研究与撰写；刘丙军、刘德地、刘霞、成忠理、陈晓宏等负责第7章的研究与撰写；刘祖发、于海霞等负责第8章的研究与撰写；刘丙军、陈晓宏负责第9章的撰写。广东省水利厅林旭钿、卢华友、邱德华、黄华、林进胜、李铁、罗益信、黄芳、宋立荣、黄锦荣等对本书研究成果做出了贡献。叶海霞、林岚、杨冰、龙伟丽、彭思涵等参加本书图件和文字核对工作。科学出版社孟美岑编辑对本书稿进行了精心编辑和大量文字修订工作。

在本书的研究和撰写过程中，引用了众多参考文献的作者们做出的卓越成果，得到了广东省水利厅、广东省水文局、广东省水利电力勘测设计研究院等单位的大力支持，在此一并表示诚挚的感谢。

由于时间和水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正！

著 者

2016年2月

于康乐园

目 录

前言

1 概述	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 南方湿润区水资源系统的基本特征	2
1.3 水资源规划体系的组成与任务	4
1.4 研究进展与发展趋势	5
1.5 水资源系统规划的指导思想、基本原则与目标	26
参考文献	28
2 研究区概况及水资源特征	39
2.1 广东省自然地理基本情况	39
2.2 水资源数量及其演变	44
2.3 水资源质量	49
2.4 水资源开发利用情况	51
2.5 现状水安全形势	56
3 环境变化下区域水文要素变异研究	58
3.1 水文要素变异分析识别方法	58
3.2 珠江三角洲水文要素变异分析	66
3.3 东江流域水文要素变异分析	132
3.4 小结	179
参考文献	182
4 高效节约的节水型社会建设体系	185
4.1 节水型社会建设的内涵与特征	185
4.2 广东省节水现状与潜力分析	188
4.3 广东省重点领域节水规划	197
4.4 广东省节水型社会建设重点项目	212
4.5 广东省节水型社会制度建设	219
参考文献	224
5 科学合理的水资源动态需求预测体系	226
5.1 发达国家用水变化一般规律	226
5.2 水资源需水预测理论研究	231
5.3 广东省社会经济发展趋势分析	245
5.4 广东省未来经济社会需水趋势分析	251

5.5	广东省水资源动态需求预测	263
5.6	基于用水胁迫下的广东省水资源需求预测	280
	参考文献	298
6	健康优美的水环境保护和生态建设体系	299
6.1	污染源与水环境质量现状评价	299
6.2	水环境保护规划	302
6.3	城市河流生态建设方案	343
	参考文献	374
7	统一优化的水资源配置体系	376
7.1	水资源优化配置的特征、形式与原则	376
7.2	基于复杂性理论的水资源优化配置模型	379
7.3	广东省水资源优化配置方案	404
7.4	广东省水资源工程布局 and 实施方案	425
7.5	特殊情况下水供求对策措施	440
	参考文献	459
8	健全完善的非工程保障体系	461
8.1	统一高效的水管理体制	461
8.2	科学合理的水权、水市场和水价体制	473
8.3	完善健全的水政策法规和执法体系	480
8.4	协作共享的科技与人才队伍体系	488
9	主要成果和结论	495
9.1	主要成果	495
9.2	主要结论	496

1 概 述

1.1 研究背景与意义

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源，是生态与环境的控制性要素，也是国民经济建设和生态环境保护的命脉。随着人口不断增长、经济快速发展、城市化进程加快和人民生活水平逐步提高，水资源更加深刻影响着经济社会活动的各个方面，直接关系到国家经济安全、社会稳定和可持续发展。

广东省是典型的华南湿润区域，社会经济发达、城市化程度高、人口密集，水资源可持续利用对保障经济社会可持续发展具有至关重要的作用。改革开放以来，广东各级水利部门在省委、省政府的领导下，认真贯彻落实科学发展观，积极践行可持续发展治水思路，以民生水利为重点，积极探索新形势下水资源开发利用与保护的新思路、新模式、新举措，为经济社会的发展起到保驾护航作用。然而，广东省人口和经济规模的迅速扩张，不仅导致对水资源量的需求剧增、防洪压力加大，而且导致污水排放大量增加、水环境恶化。广东省水资源本身及在开发利用过程中日益凸显出来的问题，正成为制约社会经济发展的瓶颈。这些问题包括以下几个方面：

1) 水资源总量丰沛，但分配不均衡。广东省是水资源大省，多年平均年降水量达 1771 mm，但降水年际年内分配不均，80% 左右的降水集中在汛期，受水汽来源、地形等因素的影响，地区之间降水量差异较大，存在明显的三个高值区和六个低值区；水资源总量丰沛，本地水资源量和过境水资源量分别达到 1830 亿 m^3 和 2361 亿 m^3 ，但全省人均占有本地水资源量为 1990 m^3 ，低于全国人均 2200 m^3 的水资源占有量；水土资源分配极不平衡，经济社会发展较快的东江秋香江口以下、东江三角洲、西北江三角洲和韩江白莲以下及粤东诸河区等区域，人均占有水资源量分别为 1603 m^3 、737 m^3 、930 m^3 和 1304 m^3 ，均低于人均 1700 m^3 的水资源紧张标准。

2) 水资源供需矛盾突出。自 1980 年以来，广东省用水人口约翻一番，GDP 增加 20 多倍，用水总量从 1980 年的 325 亿 m^3 增加到 2005 年 459 亿 m^3 ，已基本接近现状供水能力极限，经济社会快速发展对水资源的需求仍在增加，特别是珠江三角洲等经济发达地区用水需求量激增，但水污染未得到有效控制，水资源调蓄能力不足，水资源短缺问题严重，水资源配置能力亟待提高；另外，部分地区水资源可利用率较低，粤东、粤西诸小河源短流急，粤北石灰岩地区岩溶发育，水资源利用困难，存在资源型缺水的威胁。随着人们对生态环境质量的要求不断提高，生态、环境需水大量增加，水资源供需矛盾将日益突出。

3) 水质型缺水问题突出。广东省水污染未得到有效控制，废污水处理能力不足，

入河废污水量超过了全省废污水排放总量的 75%，流经城市的河段水体发黑发臭，部分水体丧失水源功能，珠江三角洲、潮汕平原片（包括韩江三角洲、榕江下游及练江）等局部地区水污染严重；近年来河床下切，海水倒灌，咸潮上溯的频率提高、范围扩大，已危及西江、北江、东江、韩江、鉴江等重要江河及珠江三角洲地区的水源水质。目前全省供水水源受到污染影响的水质型缺水人口达 1645 万人。

4) 水资源利用效率低，浪费严重。2005 年，广东省水资源已利用量占主要江河可利用量的 30%，但是，西江水资源利用率仅为 1.5%；工业用水重复利用率为 47%；农业灌溉水利用系数不足 0.5。全省人均年用水量为 499 m³，高于全国人均 427 m³ 用水量；城乡人均生活用水量分别为 227 L/d 和 147 L/d，分别高于全国城乡人均 212 L/d 和 68 L/d 的生活用水量。

5) 水资源管理体制有待完善。尽管全省各地级市已完成水务管理机构改革，但相关部门协调机制以及江河水库水资源统一调度机制需进一步完善，基层水资源管理组织和制度亟待健全，管理资金需要落实，水资源现代化管理和信息化建设需进一步加强。

6) 非传统水源的开发利用力度不够。目前，广东省水资源开发利用主要以地表水为主，地下水为辅，对于雨水、污水、土壤水、大气水及海水等非传统水源的利用还非常有限，尤其是对大气水、土壤水的利用更是近乎空白。本省非传统水资源的利用潜力很大，有效地利用这部分水源可以在一定程度上减少地表水和地下水的开发利用量，对水资源的可持续利用具有重要意义。

面对广东省水资源开发利用所面临的新形势，应在时空上合理调配水资源使之满足日益增长的用水需求、根据水资源承载能力合理调整产业结构布局，最终达到人口、资源、环境和经济的协调发展，迫切需要对广东省水资源统一协调规划、标本兼治、综合治理、开源节流、节水治污并重，研制适应变化环境的水资源系统体系规划，以实现水资源的合理开发、高效利用、优化配置、全面节约、有效保护、综合治理和科学管理的目标，为建设广东省资源节约型、环境友好型和经济可持续发展的和谐社会保驾护航。

1.2 南方湿润区水资源系统的基本特征

一般而言，年平均降水量超过 800 mm 的区域，被称为湿润区。从我国的地理分界来讲，秦岭既是我国南北气候（温带季风气候与亚热带季风气候）分界线，也是我国干湿地区（半湿润区与湿润区）分界线。秦岭以南地区终年温暖潮湿，尤其是我国长江以南地区气候湿润、降水充沛，一些区域年均降水量甚至超过 1600 mm（如广东省多年平均年降水量达 1777 mm，但地区变幅较大，变化范围为 1200 ~ 2800 mm）。与北方主要因资源性缺水而形成的水资源短缺问题不同，南方湿润区水资源问题主要是由水资源时空分布不均、水环境污染等复合因素产生的。其主要表现形式是：

1) 水资源总量相对丰富,但时空分布极不均匀。丰水期水量过多洪涝问题突出,枯水期与北方类似供水不足。80%左右的径流集中在汛期,以洪水形式出现,大部分水量直接泄入海成为不可支配的水资源,该问题基本上可以在本地区通过“以丰补枯”的合理配置解决。

2) 高强度人类活动,如快速城市化、流域内水库及河流梯级开发、河道挖沙等导致下垫面条件急剧变化,水循环要素发生重大变异,改变了水的输送规律,使得水资源时空分布和水生态系统发生巨大变化,如水文水资源要素特征值与极值偏离常规,同一断面水量频率与水位频率不对应,同一次水文事件中上下游水文要素频率不一致,等等。

3) 南方湿润区在早期社会经济发展水平低下阶段(需水少)养成了人们粗放用水习惯,如生活用水定额偏高,农业灌溉以水田漫灌为主等,但污水处理能力与水平相对滞后,形成了用水多—排污多—水质性缺水的恶性循环,水污染造成的水资源短缺是最突出的水安全问题之一,水环境生态修复显得尤为重要。

4) 经济社会发展与资源分布不匹配。南方湿润地区,尤其是流域下游的平原区或三角洲地区,经济社会高速发展,城市化程度高,人口密度大,用水强度大,但人均水资源量较低,如广东省深圳市人均水资源量仅为 300 m^3 左右,按照国际标准属严重缺水地区,而东莞、佛山、中山、广州的人均水资源量也都处于 1000 m^3 缺水线下,本地水资源十分有限。

5) 水资源系统受多重压力影响,形势十分严峻。南方湿润地区人口密集、工业发达,用水强度大,污染治理相对滞后,资源型缺水 and 水质型缺水并存。近年来,南方湿润地区河流水系水污染呈逐年加重趋势,尤其是城市河段污染较为严重,生态环境建设及生态恢复能力不足,部分水库水质呈现富营养化状态,水生生态受到不同程度影响;另外,沿海地区尤其是三角洲地区,随着海平面不断上升和河口地区挖沙、围垦等影响,咸潮上溯盐水入侵的影响程度和范围不断加大,加之三角洲下游地区地势平坦,调咸库容及能力有限,咸潮已对生产、生活供水造成很大影响,严重危及沿海城市的饮用水安全。

尽管如此,在南方湿润地区,水资源短缺问题似乎并未引起人们重视。因此,至今未有成体系的南方湿润区水资源问题研究成果。实际上,在丰水期,南方湿润地区洪涝威胁严重,特别是如广东省的一些区域经济发达、人口稠密,而近20年来的快速城市化、中上游地区堤围标准不断提高导致洪水归槽等剧烈人类活动以及气候变化影响导致区域“五十年一遇”、“百年一遇”洪水时常出现,城市暴雨内涝更加突出;在枯水期,特别是在快速城市化发展的情况下,由于用水强度大,更加剧了水资源供需矛盾,加之区域上游水库拦蓄等人类活动影响,下游河道采沙等致使部分河段河床异常下切,取水供水出现困难,水环境水生态问题日益突出。同时,南方地区用水普遍较粗放,形成取用水量—排污量大—水污染严重的恶性循环,水污染问题已成为华南湿润地区水安全的重要制约因素。总之,近些年来华南地区城市化速度加快,全球气候变化影响持续,导致该地区水循环要素显著变异,进而引起区域天然来水量、经济社会发展对水资源需求量均发生极大变化,区域洪水干旱频率及特征、水环境特征等都发生了明显变异。这些变化必然导致流域水资源供需关系显著变化,水资源规划

系统的相应要素也会发生变化。

1.3 水资源规划体系的组成与任务

水资源不仅是一种自然资源，更是一种社会资源，水资源已经成为具有政治和经济意义的战略性资源，是国家综合国力的组成部分之一。可见，区域水资源系统规划涉及经济、社会、资源与环境的各个领域，一般是在摸清区域水资源及其开发利用现状、分析评价水资源状况及其承载能力的基础上，提出适应区域社会主义市场经济水资源保障需要的水资源合理开发、高效利用、综合治理、优化配置、全面节约、有效保护、科学管理的布局 and 方案，涵盖区域水资源开发、利用、节约与保护等所有方面。以广东省为例，其水资源规划体系包含高效利用的节水型社会建设体系、科学合理的水资源动态需求预测体系、健康优美的水环境保护和生态建设体系、统一优化的水资源配置体系、健全完善的非工程保障体系五大部分。水资源规划体系组成如图 1.1 所示。

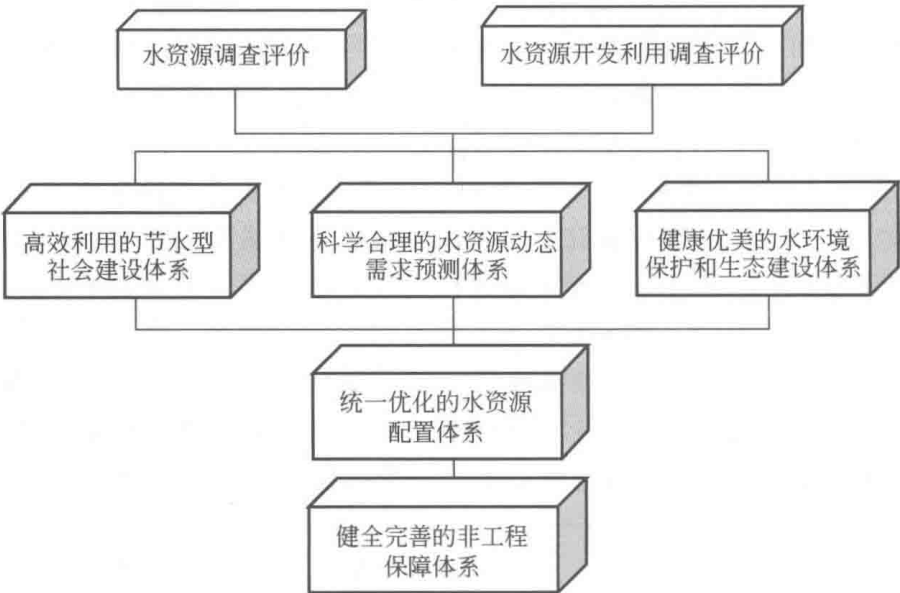


图 1.1 广东省水资源系统规划体系示意图

(1) 水资源及开发利用现状调查评价

根据近年来区域水资源条件的变化，全面系统地调查评价区域水资源的数量、质量、能量、可利用量及其时空分布特点与演变趋势，全面准确地评价区域水资源条件和特点，重点研究变化环境下水文要素的变异特征；全面调查评价现状水资源开发利用水平、用水结构与变化趋势，综合分析水资源开发利用与经济社会可持续发展之间的协调程度。

(2) 高效节约的节水型社会建设体系

在水资源开发利用现状调查评价基础上，以最严格水资源管理用水效率控制为前提，研究区域不同历史时期各行业用水指标的变化特征，综合分析用水指标与社会经济发展水平的相应关系，评估提高水资源利用效率和节水潜力，研究生产、生活与生

态各用水部门不同规划水平年的节水目标,制定节水型社会建设方案。

(3) 科学合理的水资源动态需求预测体系

深入分析经济社会领域各主要部门的用水规律及其阶段特征,按照最严格水资源管理制度的要求,综合考虑近、远期经济社会发展战略布局和水资源禀赋特征,编制与经济社会发展相适宜的水资源需求和生态环境水资源需求预测方案。

(4) 健康优美的水环境保护和生态建设体系

水资源规划体系要把对水生态环境的保护和改善放在突出位置,始终强调“优先控源、综合整治、整体保护”的理念,以水功能区划为基础,科学计算水体水环境容量和纳污能力,实施以源头和全过程控制为主的全区域水污染综合治理,重视结合生态环境修复的水文化和水景观建设,突出以水源区、水库库区为重点的水土保持生态治理和小流域综合治理,实现水源地一体化保护、水污染源一体化控制和全区域人-水-环境生态的健康和谐共处。

(5) 统一优化的水资源配置体系

根据经济社会发展和生态环境改善对水资源的要求及水资源的实际条件,运用复杂性理论构建水资源优化配置模型,科学提出协调上、中、下游,生活、生产和生态用水,流域和区域之间的水资源合理配置方案;统筹规划流域和区域水资源的开发利用和综合治理等措施,提出与生态建设和环境保护相协调,与经济社会发展相适应的水资源开发利用对策措施。

(6) 高效可持续的非工程保障体系

分析区域现状水资源开发利用与管理活动中存在和出现的问题,研究现行水管理体制、机制、法制等方面的合理性或缺陷,提出需要加强的水权、水市场和水价体制、水资源管理及其政策法规建设、水资源人才队伍建设等非工程措施方面的要求;通过研究由于经济社会发展、市场经济体制逐步完善以及管理体制变革等外界形势的变化对水资源开发利用与配置可能带来的新的要求和变化,制定适应社会主义市场经济体制的水资源管理制度、政策法规体系、水权水市场制度、科技与人才发展计划以及水资源应急方案。

1.4 研究进展与发展趋势

1.4.1 水文水资源要素变异研究

1.4.1.1 降水

(1) 降水周期研究

目前,国外有关降水周期的分析成果较多。早期采用的方法普遍为马尔可夫链、

功率谱分析等,后来小波分析的应用更为广泛。Schwanitz^[1]和 Mimikon^[2]分别将马尔可夫链运用到德国和希腊的日降水量周期分析中,并得出相应主周期;1989年,Maheras和 Vafiadis^[3]运用功率谱分析罗马年季降水变异,得出2~3 a和64 a等七个主要降水周期;1992年,Maheras等^[4]运用功率谱分析地中海月降水时得出13.6 a,3.5 a和2.2 a的显著周期;Gershunov等^[5]对热带降水进行了周期分析;Kafatos等^[6]、Gu等^[7]和 Hsu等^[8]分别研究了海洋降水、南非经向风与降水以及北美洲暖季降水的周期时间特征,并得出其主要周期;Wang等^[9]运用小波分析和小波神经网络研究黑河流域时发现莺落峡年径流量存在7 a和25 a的主周期,正义峡存在6 a和27 a的主周期;Becker等^[10]研究发现长江流域年降水具有2~3 a,7~9 a的确定周期;Beecham等^[11]研究了澳大利亚墨尔本降水时间和演变特征,发现3.6 h和12 h强度的降水存在0.25~1 a的周期尺度;Cengiz^[12]运用小波变换研究五大湖区水位特征,发现五大湖区水位存在1 a和43 a的周期成分,且密歇根湖表现出较明显的年际周期尺度特征;Partal^[13]运用连续变换小波分析爱琴海流域的径流和降水的多尺度时间特征,研究表明该流域降水和径流发生了相似的变异,均存在14 a和16 a的周期成分,且径流量在流域内各站点都有显著的减少。

国内早期对降水时间序列进行周期成分提取主要服务于气象预报,多以降水实测序列的周期等特征预测未来月份或年的降水过程。运用的周期分析方法大致有方差分析、逐步回归周期分析、功率谱分析等。1986年,李邦宪^[14]尝试用逐步回归周期分析对金华月、季气象要素作长期预报,运用逐步回归法对试验周期序列进行逐个引入和剔除,最后选入的因子作为时间序列的主要周期;1989年,林启明等^[15]基于APPLE-Z微型计算机和BASIN编译程序运用方差分析法计算了嫩江流域10个水文站1951~1983年降水资料的主周期,得出该流域降水以3 a和14 a的周期为主的结论,并据此预测了流域未来3年的汛期降水;杨松^[16]对我国不同雨区进行了谱分析,表明华南、西南地区以及长江流域存在明显的准双周期和单周期振荡,也具有21.3~25.6 d的周期;李强^[17]利用逐步回归周期分析法对太原汛期降水进行预测,指出用逐步回归方法预报降水误差较小,与实测资料拟合较好,该法在周期提取方面优于方差分析法;王建新等^[18]采用极大熵谱分析研究我国梅雨降水的周期振荡特征,表明梅雨降水存在较为明显且稳定的准七年振荡,而准两年振荡则不十分明显,且不稳定。

此后,专家学者们不只注重主周期成分提取和周期识别方法优劣等问题,而且将研究的重点转向降水周期的时空分布特征及其与太阳黑子、大气环流等的耦合。1995年,张起仁^[19]研究了北京地区年降水丰枯变换的周期特征,并进一步探索太阳黑子和年降水量变化的关系,得出太阳黑子处于高值时,正是年降水偏丰期的重要结论;刘广深等^[20]研究东北降水时指出长白山及东北季风气候区降水变化有准22 a的周期性波动,且东北季风气候区里,东南季风强弱变化具有准22 a的周期性振荡。随着频谱分析方法的不断更新,小波分析方法逐渐进入人们的视线,1997年,邓自旺等^[21]首次将小波分析运用到降水序列的多时间尺度分析中,发现西安市气候变化全时间域内20~40 a尺度范围的周期变化信号很强。其他时间尺度的周期变化在时间域中分布很不均匀,具有很强的局部化特征。此后纪忠萍等^[22,23]、孙卫国等^[24]和衡彤等^[25]运用小波

分析方法陆续对广东、河南、新安江流域黄山等地降水周期和气候变化在不同时间尺度上的演变特征进行了研究。2006年,王澄海等^[26]用小波分析和奇异谱分析两种方法相结合对西北地区降水周期进行分析,结果表明:西北地区降水周期随时间变化具有较强的区域性,降水普遍存在的准3 a左右的周期在20世纪70~80年代显著性下降,5~7 a的周期和9~14 a的长周期也随时间有着不同的变化;郝志新等^[27]采用小波变换方法研究黄河中下游地区降水周期,得出该区降水具有2~4 a、准22 a及70~80 a等年际与年代际的振荡周期。孙善磊等^[28]、刘兆飞等^[29]、吴昊旻等^[30]和刘扬等^[31]分别先后研究了淮海地区、太湖流域、浙江丽水市和中国北方等区域不同时间段降水趋势和周期变化特征。

(2) 降水趋势与突变研究

自20世纪中期起,人们就在探讨全球变暖与降水变化趋势的关系,依据实测数据变化规律预报未来一段时间内的降水趋势,其中研究极端降水、年降水和夏季降水的文献居多。1981年,Kellogg^[32]探讨了气候变暖情况下降水的变化趋势;1986年,Karl等^[33]分析了美国和加拿大月降水量趋势与温度的关系;1988年,Kozuchowski和Marciniak^[34]研究了欧洲月平均气温与半年降水总量的变异,并预测未来欧洲北部降水可能增加;1990年,Schönwiese等^[35]探讨了欧洲降水与温度的演变趋势及其与温室气体减少的潜在联系;Amanatidis等^[36]、Groisman等^[37]和Widmann等^[38]分别先后研究得出希腊马拉松地区年降水有显著下降趋势,美国和加拿大年降水有所减少和瑞士冬季降水增加等结论;Cullather等^[39]、Serrano等^[40]和Buffoni等^[41]分别对南极洲、伊比利亚半岛和意大利降水进行趋势分析,发现部分地区降水有下降趋势;2002年,Ventura等^[42]发现博洛尼亚年降水呈下降趋势,尤以冬季最为突出;2003年,Yue等^[43]研究日本年和月降水得出不同区域不同类型的降水空间分布各异的结论;Matsuyama等^[44]、Klein Tank和Können^[45]、Pal和Al-Tabbaa^[46]、Łupikasza等^[47]分别研究了热带南美洲、欧洲、印度以及波兰和德国不同区域不同降水特征指数时空演变趋势,结果表明热带南美洲北部降水缓慢减少,欧洲各极端降水指数均表现为上升趋势,印度冬季和秋季极端降水上升春季反而下降,德国中东部四季极端降水均呈上升趋势而波兰正好相反。Zhang等^[48]、Endo等^[49]和Gemmer等^[50]分别对中国某些时段降水量、降水日数和极端降水时空演变特征进行研究,结果表明降水变化趋势会随着流域和时段的不同而呈现不同的变化特征,中国大部分流域降水均发生了不同程度的变异。Becker等^[51]、Jiang等^[52]和Tian等^[53]分别研究了长江流域、环渤海地区和浙江省降水趋势特征,结果表明长江流域大部分地区夏季降水上升,环渤海地区夏季总降水量和极端降水频率、强度和比例均呈下降趋势,浙江省东部降水上升西部下降,大部分地区强降水和降水强度上升。

早期国内文献多为太阳黑子活动和环流特征与降水趋势关系的研究。1962年,刘世楷^[54]以太阳及日月行星的运行规律概推中国水旱趋势。1973年,中央气象局研究所一室^[55]分析太阳活动与环流和降水的关系,认为全国降水有普遍增多的趋势;赵汉光^[56]指出,夏季西太平洋高压是否稳定西伸与西北地区夏季降水的多少有密切联系。

施其仁等^[57]、徐群等^[58]分别讨论了冬半年西风带大型高值环流系统与降水趋势的关系、淮河洪泽湖以上流域汛期降水趋势与前期海-气系统的遥联关系。

此后,学者们开始用统计学的方法分析降水时间序列本身的趋势特征,同时注重分析降水在不同年代段里的增加或减少趋势。严济远等^[59]通过计算降水的总量、均方差及距平值等指标值分析长江三角洲各自然季节降水趋势;张继经^[60]分析了辽宁省春季降水在不同年代里的趋势变化特征,指出春季的降水量有阶段性和区域性变化规律,即由 50 年代全省大部地区降水偏少,到 80 年代已逐步转变成偏多的趋势;哈斯^[61]和范金松等^[62]采用 5 年滑动平均、正交多项式回归等方法分别研究了南京、坝上高原降水序列的统计特征,指出了降水在各年代的变化趋势。

随后,对降水趋势的描述不仅限于年降水,而且较详尽地研究月降水、季节降水或降水极值序列变化趋势的时空分布特征,并分析降水与径流序列变异的一致性、与季风等气象因子的相关关系。与此同时,趋势的识别方法也得到了发展。葛小清等^[63]采用线性拟合方法分析了浙江省月降水和年降水的变化趋势,指出该省在一年内呈现出一种时间上相对集中的变化趋势;翟盘茂等^[64]用线性拟合方法研究中国降水极值时指出,降水日数极端偏多的区域范围呈越来越小的变化趋势,平均降水强度极端偏高的区域范围表现为扩大的趋势;任国玉等^[65]和周丽英等^[66]分别研究了全国和上海市降水变化趋势的空间特征,并分析了其与已发生旱涝灾害(如黄河断流、长江洪水、内涝)的关系;姜逢清等^[67]和乔芬生^[68]分别运用 Mahn-Kendall 统计检验法和多元线性回归方法研究了新疆北部和贵州降水序列的趋势特征;邓自旺等^[69]指出江苏省平均降水量 1 月、3 月、6 月有显著的增多趋势,而 4 月、9 月两月有显著的减少趋势,年降水量南部增多而北部减少;李想等^[70]认为 2002 年后的 5~10 年松花江流域仍将处于少雨期,辽河流域少雨期维持时间可能会稍长一些;苏布达等^[71]研究表明,1986 年以来长江流域的极端强降水出现了显著增加的趋势;刘引鸽^[72]利用累积距平、线性趋势估计及 Mann-Kendall 检验等方法研究表明,陕北黄土高原地区年平均降水南多北少,近 51 年来降水总体上呈减少趋势;徐利岗等^[73]、段建军等^[74]和陈波等^[75]分别研究了中国北方荒漠区、黄土高原及周边地区和华东地区降水在时间空间上的变化趋势、10 年尺度降水量带动态变化以及不同级别强降水的时空变化趋势、突变和周期特征;邱临静等^[76]基于滑动平均法、Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen 斜率估计法的研究表明,20 世纪 50 年代至 90 年代,延河流域径流变化过程基本与降水过程一致,但到了 21 世纪初期,降水量呈先升后降的变化趋势,而径流量呈下降趋势;殷水清等^[77]指出,海河流域夏季总降水量和总降水小时数以及长、短历时降水量均呈减少趋势,但短历时降水量占总降水量的比重呈增加趋势。

1.4.1.2 径流

国内早期对于流域径流的研究主要采用资料分析方法,研究流域径流的基本特征。沈灿燊^[78]在 1958 年珠江流域调查的资料基础上,对珠江流域地表径流的基本特征做出了初步分析。徐在庸等^[79]通过资料分析及坡面径流试验,论证了坡面径流研究的重要性,并得出坡面流速公式。陈训深等^[80]从自然地理的观点出发,结合资料分析,对赣

江流域地表径流的特征作了初步分析,描绘出它的主要面貌,为后来的研究提供了重要参考。余泽忠^[81]分析了福建地表径流的年均流量、相对流量以及地表径流系数,研究了地表径流量的年际变化、地表径流和水位的季节变化以及河流含沙量和输沙量等的变化,得到了福建地表径流的初步情况和变化规律。

随后,国内学者进一步深入地研究径流的物理形成机理和计算方法,试图揭示径流形成过程中各个要素的基本规律,以及它们之间的相互作用,从而找出径流形成的物理成因规律,给出其数学物理描述和相应的计算方法。金栋梁^[82]阐述了根据资料条件和任务选择,使用“降雨径流变化趋势法”、“径流双累积法”、“流域蒸发差值法”以及“分项调查分析法”四种方法对径流资料进行还原估算的原理和步骤。汤奇成等^[83]估算和分析了西北和华北地区河川径流资源和农业最需水月的径流变化。杜玉平^[84]由等流时线概念出发,推导出流域径流成因公式,对流域出口断面流量的形成过程给予了新的解释,同时扩充和推广了 M. A. 维里加诺夫径流成因公式。

21 世纪初,国内学者逐渐关注于下垫面变化对径流的影响,研究森林、植被等的变化对流域径流的作用。李文华等^[85]综合国内外诸多研究,认为去除森林可以使径流量增加,但森林与水的关系极其复杂,森林对径流量的影响因地域、森林类型以及森林管理方式等因素的不同而存在差异。王礼先等^[86]对黄土高原以及北京土石山区就干旱地区森林对流域年总径流量、洪峰流量、枯水径流以及径流水质等方面的影响进行研究,认为在干旱地区随着森林植被覆盖率的增加,流域年总径流量减少,森林植被可以大幅度地减少小流域的暴雨洪峰流量,森林植被覆盖率越高,枯水径流量随之增加,森林可以很大程度上改善流域径流水质。石培礼等^[87]对我国森林植被变化水文效应进行了综合分析,深入研究了森林植被变化对水文过程和径流的影响效应。

之后,学者们对流域径流的研究重点转移到洪潮遭遇、丰枯遭遇、洪水遭遇、枯水遭遇等水文问题上。

(1) 洪水遭遇

Favre 等^[88]探讨了上游洪水和区间洪水的遭遇问题;崔殿河等^[89]利用黄河中游站点资料对“77.8.2”洪水中黄河与孤山川河之间的洪水遭遇情况进行了分析;高峰等^[90]对黄河、汶河洪峰遭遇和洪量遭遇情况分别进行了分析,并提出了相应的洪水调度措施;张修龙等^[91]以安康城区江北防洪堤设计为例,研究了小河沟与大河洪水遭遇分析方法;代斌^[92]利用同期的阳朔站年最高水位和久大水库降雨量以及阳朔站年最大降雨量和典型洪水,对田家河与漓江流域洪水遭遇情况进行了分析;黄云仙^[93]通过历年水文资料,利用统计分析方法,对长江和澧水在松澧地区出现洪峰遭遇和过程遭遇的情况进行了分析;戴明龙等^[94]利用水文学分析法,全面地分析了长江上游与汉江洪水遭遇规律;熊莹^[95]对长江上游洪水组成及遭遇规律进行了研究;范可旭等^[96]为满足乌江白马航电枢纽的勘测设计需求,对乌江洪水与长江三峡洪水遭遇问题进行了研究;黄胜烨^[97]为研究极端洪水遭遇状况下鄱阳湖的调蓄能力,对鄱阳湖流域和长江来水进行了洪水遭遇的研究分析;郭家力等^[98]对鄱阳湖流域洪水遭遇和洪峰遭遇情况进行了研究,并定量地评价了鄱阳湖流域洪水遭遇危险度。

(2) 丰枯遭遇

杜尚海等^[99]利用多维 P-III 联合分布概率计算与模糊数学中的隶属度函数结合的方法,对石家庄市和汉江流域降水量的丰枯遭遇进行了分析,并以此为基础,模拟了各种丰枯遭遇条件下滹沱河地下水库的人工补给效果;郑红星等^[100]采用经验频率法,按照年、季和月不同时间尺度降水系列,探讨了华北地区与长江中下游及汉江上游来水丰枯的遭遇情况;康玲等^[101]采用经验频率法,利用南水北调中线水源区和受水区 40 余站 45 年降水资料,分析了水源区和受水区的丰枯遭遇特征;费永法^[102]利用事件积方法研究了丰枯遭遇频率;王志良等^[103]利用天津市滦河中上游区、于桥水库上游区和长江中上游区 40 年降水资料,进行了丰枯遭遇分析;戴昌军^[104]分别用基于正态变换的 Morna 方法、理论导出的 TAN 方法、用于弱相关的经验公式 FGM 方法、将多维分布转化为一维分布计算的 FEI 方法、基于经验频率分析的 EFM 方法等多种多维联合分布计算方法对南水北调东线工程各水文区年径流丰枯遭遇情况进行了计算分析;韩宇平等^[105]对南水北调中线工程的水源区与受水区以及黄河进行了丰枯遭遇分析;杨晓玉^[106]利用丰枯划分方法对南水北调西线一期工程调水区雅砻江和大渡河分别进行了流域内及流域间径流丰枯遭遇分析,并制定了补偿调度方案。

(3) 洪潮遭遇

李松仕^[107]以闽江下游白岩潭潮位站的洪潮组合为例,提出了根据不同的统计相关性进行洪潮组合分析的理论;陈振丽^[108]对洪水过程线和潮位过程线进行了调洪演算,分析了南康江整治工程洪潮组合情况;张阿龙等^[109]利用分别以高潮位和高水位为主的遭遇方案,对湛江市洪潮遭遇情况进行了分析。

1.4.1.3 蒸发

蒸发是自然界水文循环过程中的主导因素之一,是水量平衡要素的重要组成部分,目前研究较为成熟的蒸发现象是水面蒸发,对于区域气候、旱涝变化趋势,水资源形成及变化规律,水资源评价等方面的研究有重要作用。随着科学的发展,高科技手段和方法在水面蒸发研究中的应用不断加强。如何把传统的研究理论与高科技手段有机地结合起来,并在实际中得到很好的应用,应是今后水面蒸发研究的重点^[110]。

水面蒸发研究的内容主要包括水面蒸发观测仪器的研究、水面蒸发折算系数的研究以及水面蒸发量变化趋势的研究^[110]。

(1) 水面蒸发观测仪器的研究

1687 年英国天文学家 Halley 使用蒸发器测定蒸发量揭开了水面蒸发观测的序幕,其后世界各国也相继采用不同形式,不同材料、形状、大小和安装方式的蒸发器来测定水面蒸发量。我国水文站观测水面蒸发始于 20 世纪 20 年代^[111],先后使用的观测仪器有 $\Phi 80$ cm 口径的套盆式蒸发器、 $\Phi 20$ cm 口径的小型蒸发皿和 E601 型蒸发器,此外部分蒸发实验站还分别设有 20 m^2 、 10 m^2 以及 100 m^2 的大型蒸发池和水面漂浮蒸发