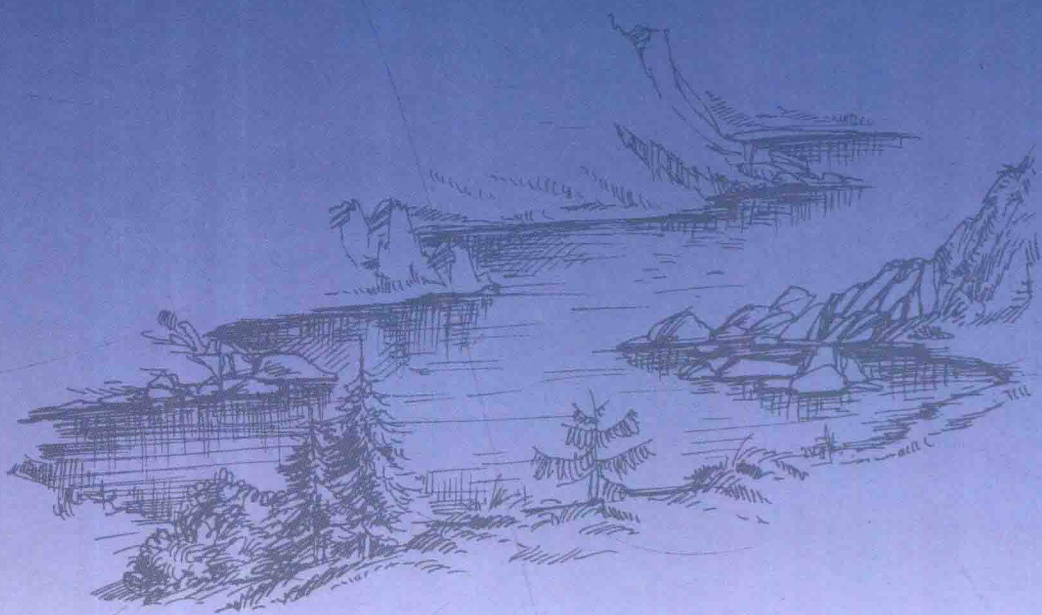


变化环境下复杂网河区 水资源系统 响应与安全调控

刘丙军 编著



科学出版社

国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (91547108)

国家重点研发计划项目专题项目 (2016YFC0401305)

联合资助

广东省水利科技计划项目 (2014-20)

变化环境下复杂网河区水资源 系统响应与安全调控

刘丙军 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统总结回顾了国内外网河区水资源系统分析的研究现状及其发展趋势,全面分析了变化环境下网河区水资源系统存在的问题及其面临的严峻形势,综合运用水文学、水力学、系统分析、复杂性理论等理论和方法,提出了变化环境下网河区水资源系统演变与响应的研究理论与方法;总结了网河区水文过程变异特征及其驱动机制,提出了水文过程全要素变异识别与特征量重构的理论与方法;构建了基于物理模型与数值模拟相结合的水盐动力模型,识别了海陆相多要素驱动作用下网河区盐水入侵基本规律;探讨了变化环境下网河区水资源系统脆弱性的概念、形式和内涵,基于“暴露度-敏感性-适应能力”三维度构建了水资源脆弱性评价指标体系与方法;研究了变化环境下网河区水资源优化配置的内涵与特征,提出了适应变化环境的水资源配置理论与适应性对策。研究成果丰富与发展了水资源系统分析理论,对变化环境下水资源系统综合管理具有重要参考意义与广泛应用前景。

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

变化环境下复杂网河区水资源系统响应与安全调控 / 刘丙军编著. —北京: 科学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-03-027823-4

I. ①变… II. ①刘… III. ①河流-水资源管理-研究-中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 030896 号

责任编辑: 孟美岑 陈姣姣 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世

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

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 460 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基，不仅关系到防洪安全、供水安全、粮食安全，而且关系到经济安全、生态安全、国家安全。水资源系统的结构是否合理，状态是否健康关系到人民的生命财产安全、经济的发展速度、生态环境的持续发展等重大问题。

网河区位于河流与海洋交汇过渡地区，其最根本的特点是受海洋（潮汐）和陆地（河流）的双向作用，面临脆弱胁迫因素较多，水资源系统面临着更大的挑战。近年来，伴随高频率、大规模、大范围人类剧烈活动及海平面上升双重作用影响，网河区下垫面的自然形态发生了显著改变，水文水资源特征变异显著，咸潮上溯影响范围和程度不断加大，导致水资源供需矛盾激化，水资源系统的脆弱性问题日益突出。日益加重的水资源问题，正成为限制该地区经济社会可持续发展的关键瓶颈之一。

网河区是我国经济发展的龙头地区，也是我国人口密度最高和单位面积 GDP 贡献最大的地区之一。以珠江三角洲网河区为例，该地区经济社会高速发展，河网纵横、人口密集、城镇集中，用 30 年的时间完成了发达国家近百年的发展进程，用占全国约 0.21% 的面积生产了约 20% 的 GDP。珠江三角洲网河区又是香港、澳门、广州、深圳等特大城市的唯一水源，其水资源开发利用保护面临剧烈人类活动、海平面上升等多重压力，正成为我国水资源问题最突出的区域之一：水资源总量丰沛但时空分布不均且水污染严重，加之近年来河口非法挖砂、海平面持续上升等导致盐水入侵的影响范围和程度不断加剧且规律异常复杂，区域性、季节性和水质性缺水并存；上游水利工程调度与河道采砂等人类活动影响下，河口区水循环变异显著，水文水资源极值和特征值偏离常规，同一断面水量频率与水位频率不对应，同一次水文事件上下游水文要素频率不一致，河口区水文过程中出现的新特征迫切需要重新认识和定义；上游来水逐年减少，加之海平面持续上升，河口区盐水入侵影响程度与范围不断增大，盐水入侵机制日趋复杂，盐水入侵的应对策略需要不断调整；持续高速的经济和人口增长致使珠江三角洲网河区水资源需求显著增大，社会水循环供用耗排水时空格局变化显著，供排水体系交错混乱，大部分城市河流水生态环境功能基本丧失，河口区水资源供需系统出现的新问题亟待解决，等等。珠江三角洲网河区正成为我国水资源问题最突出的地区之一。

近年来，我们一直从事水资源系统分析方面的研究工作，在国家重点研发计划项目“珠江流域水资源多目标调度技术与应用”（2017YFC0405905）与“国家水资源承载力评价与战略配置”（2017YFC0405905）、国家自然科学基金委重大研究计划重点项目“变化环境下西南河流源区来水-供水-发电-环境互馈博弈自适应协同调控”（91547202）、国家自然科学基金项目“变化环境下澜沧江流域径流适应性利用协同配

置模式研究”(91547108)与“剧烈人类活动下华南湿润地区水资源配置协同调控模式”(50909106)、广东省科技计划项目“珠江三角洲内河涌水环境治理水力调控关键技术研究”(2011B030800008)、广东省水利科技创新项目“珠江三角洲内河涌水环境治理水力调控研究”(2011-13)与“变化环境下珠江三角洲网河区水资源系统响应研究”(2014-20)等项目支持下,本书系统总结回顾了国内外网河区水文要素变异、咸潮上溯、水资源脆弱性和水资源配置方面的研究成果,综合运用水文学、水力学、系统分析、复杂性理论等理论和方法,探索性地提出变化环境下网河区水资源系统演变与响应的研究整体框架:全面总结了网河区水文过程变异特征及其驱动机制,初步提出了水文过程全要素变异识别与特征量重构的理论与方法;构建了基于物理模型与数值模拟相结合的水盐动力模型,识别了海陆相多要素驱动作用下网河区盐水入侵基本规律;探讨了变化环境下网河区水资源系统脆弱性的概念、形式和内涵,基于“暴露度-敏感性-适应能力”三维度构建了水资源脆弱性评价指标体系与方法;研究了变化环境下网河区水资源优化配置的内涵与特征,创新性地提出了适应变化环境的水资源配置理论与适应性对策。研究成果丰富与发展了水资源系统分析理论,对变化环境下水资源系统综合管理具有重要参考意义与广泛应用前景。

本书由刘丙军统稿编著;第1、第2、第9章由刘丙军、陈秀洪编写;第3章由陆鹏翔、刘丙军编写;第4章由邱凯华、廖叶颖、刘丙军编写;第5章由辛彦博、章文、严淑兰编写;第6章由高卫、杨裕桂、严恒恒编写;第7章由伍颖婷、高梦元、陈文静编写;第8章由何志伟、陈俊凡、柯华斌编写。同时,衷心感谢本书所引用参考文献的作者曾经做的大量工作。

在本书撰写过程中,得到了中山大学地理科学与规划学院领导与老师的大力支持,在此一并表示诚挚的感谢。

由于时间与水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请读者批评指正!

编 者

2017年12月于康乐园

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究进展与发展趋势	3
1.3 研究内容与方法	10
第2章 研究区基本概况及水资源特征	13
2.1 自然地理特征	13
2.2 社会经济	17
2.3 水资源及开发利用调查评价	19
第3章 珠江三角洲网河区水文要素变异分析	35
3.1 水文要素变异识别方法	35
3.2 水文要素变异特征分析	38
3.3 水文要素变异程度分析	41
3.4 小结	52
第4章 珠江三角洲网河区水文要素特征量重构	53
4.1 Copula 函数基本原理	53
4.2 水文单要素特征量重构	59
4.3 多要素特征量组合重构	74
4.4 小结	79
第5章 珠江三角洲河口区盐水入侵基本规律	81
5.1 资料与数据	81
5.2 盐水入侵空间特征分析	84
5.3 盐水入侵时间特征分析	86
5.4 多要素驱动的盐水入侵响应规律	96
5.5 小结	108
第6章 珠江三角洲河口区盐水入侵模拟与预测	110
6.1 基于水槽实验的珠江三角洲河口区盐水入侵物理模拟	110
6.2 基于1D-3D水盐动力数值模拟	146
6.3 珠江三角洲河口区盐水入侵预测	196
6.4 小结	214
第7章 珠江三角洲网河区水资源脆弱性评价	215
7.1 变化环境下的水资源系统脆弱性理论	215
7.2 珠江三角洲水资源脆弱性评价指标	218

7.3	珠江三角洲水资源脆弱性现状评价	228
7.4	水资源脆弱性演变及驱动因子分析	244
7.5	小结	258
第8章	珠江三角洲网河区水资源合理配置	259
8.1	水资源优化配置理论	259
8.2	水资源优化配置模型的构建	262
8.3	模型输入条件分析	271
8.4	西北江三角洲水资源优化配置	282
8.5	小结	291
第9章	结论与展望	292
9.1	主要结论	292
9.2	展望分析	294
参考文献		295

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

水是生命之源、生产之要、生态之基，不仅关系到防洪安全、供水安全、粮食安全，而且关系到经济安全、生态安全、国家安全。河口地区是我国经济发展的龙头地区，也是我国人口密度最高和单位面积 GDP（国内生产总值）贡献最大的地区之一。河口位于河流与海洋交汇的过渡地区，其最根本的特点是受海洋（潮汐）和陆地（河流）的双向作用，面临的脆弱胁迫因素较多，水资源系统面临着更大挑战。近年来，伴随高频率、大规模、大范围人类剧烈活动以及海平面上升双重作用的影响，网河区下垫面的自然形态发生了显著改变，水文水资源特征变异显著，咸潮上溯的影响范围和程度不断加大，导致水资源供需矛盾激化，水资源系统的脆弱性问题日益突出。水资源系统的结构是否合理、状态是否健康关系到人民的生命财产安全、经济的发展速度、生态环境的持续发展等重大问题。科学评价变化环境下网河区的水资源问题和水资源系统脆弱性，积极改善水资源系统结构和合理配置水资源，既是水利科技创新的热点课题，也是关系民生、亟待解决的重大难题。

盐水入侵是河口水环境中普遍存在的季节性水文现象，对城市工业布局及其发展、居民生活用水和农业灌溉用水都有着相当重要的影响。盐水入侵不仅破坏了水环境原有的格局，对土地盐碱化程度、河口物化及生物、生态特性会产生一定影响。同时，盐水入侵对河口区人类生活、生产的威胁也逐步显现，直接影响区域水资源的开发利用，严重制约着社会经济的发展。《Nature》最新研究表明，气候变化引起的海平面上升比早前设想的要快，将直接影响数亿人的生活和生产（Paul et al., 2009）；由国际科学理事会（ICSU）发起组织的当今最具影响力和广泛性的科学计划——国际地圈-生物圈计划（IGBP），明确将海岸带的陆海相互作用（LOICZ）研究列为七个核心计划之一，并将海岸生物地貌与全球变化、全球变化对海岸系统的经济与社会影响列入其仅有的四个核心研究内容；联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）所属三个工作组（科学分析、影响和响应对策）均将海平面上升引发的盐水入侵危害确定为 IPCC 优选的六个重点研究专题之一。

随着剧烈的人类活动和海平面的持续上升，当前河口地区应对变化环境的研究形势发生了深刻变化。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将“人类活动对地球系统的影响机制”和“全球变化与区域响应”分别作为第 3、第 4 个面向国家重大战略需求的基础研究；《中国应对气候变化方案》将“强化应对海平面升高的适应性对策”作为海岸带及沿海地区应对气候重点的研究领域；国家“十二五”科

技和技术发展规划将城市化的资源环境效应、近海环境及生态的关键过程等列为重大科学问题研究领域和方向；国家科学技术部将“人类活动对我国海湾生态环境的影响及生物资源效应”列为2014年国家重点基础研究发展计划之一。可见，变化环境下河口区水资源可持续利用研究正成为我国科技攻关的核心任务之一。国内外学者已经意识到变化环境下水资源问题的复杂性和重要性，提出了诸多创新性成果，并在我国长江以北地区进行了大量研究。但水资源特征差异明显且环境变化剧烈的南方湿润地区水资源研究成果尚不多见。一个雨量丰沛、水系纵横、高密度城市群却水资源问题突出的地区——珠江三角洲网河区，其严重的水资源问题及其对策研究才刚起步。

珠江三角洲网河区经济社会高速发展，河网纵横、人口密集、城镇集中，用占全国约0.21%的面积生产了约20%的GDP，是香港、澳门、广州、深圳等特大城市的唯一水源，其水资源开发利用保护面临剧烈人类活动、海平面上升等多重压力，正成为我国水资源问题最突出的区域之一：①水资源总量丰沛但时空分布不均，水污染严重，加之近年来河口非法挖砂、海平面持续上升等导致盐水入侵的影响范围和程度不断加剧且规律异常复杂，区域性、季节性和水质性缺水并存；②在上游水利工程调度与河道采砂等人类活动的影响下，河口区水循环变异显著，水文水资源极值和特征值偏离常规，同一断面水量频率与水位频率不对应，同一次水文事件上下游水文要素频率不一致，等等，河口区水文过程中出现的新特征迫切需要重新认识和定义；③上游来水逐年减少，加之海平面持续上升，河口区盐水入侵影响程度与范围不断增大，盐水入侵机制日趋复杂，盐水入侵的应对策略需要不断调整；④持续高速的经济和人口增长致使珠江三角洲网河区水资源需求显著增大，社会水循环供用耗排水时空格局变化显著，供排水体系交错混乱，大部分城市河流水生态环境功能基本丧失，河口区水资源供需系统出现的新问题亟待解决，等等。

在剧烈的人类活动和海平面持续上升的共同作用下，珠江三角洲网河区原本复杂的水文水资源问题更加突出，导致原有的研究基础已不能准确描述该地区现状和未来不断变化的水文水资源问题。根据中国国家海洋局《2011年中国海平面公报》，30年来中国沿海海平面平均上升速率为2.7 mm/a，明显高于全球平均水平。预计未来中国沿海海平面将继续上升，2050年将比常年升高145~200 mm，受影响的沿海地区达到1317个乡镇，约占全国陆地面积的3.0%，受影响的内陆水域面积达到6537 km²，约占全国内陆水域总面积的4.0%，受影响的河流总长度达到43400 km。建议在珠江口、长江口等地区进行海平面上升脆弱区划，合理调配区域水资源，保障高海平面期和枯水期供水安全。可见，珠江三角洲地区水资源可持续利用，正成为该地区经济社会可持续发展的重大战略需求之一。

综上所述，在海平面上升与人类剧烈活动的影响下，近年来珠江三角洲网河区水资源问题更加突出，严重威胁到珠江三角洲城市供水安全和河道生态环境健康。然而，当前相关珠江三角洲网河区水资源问题研究的理论与方法尚不成熟，尤其是剧烈人类活动与海平面上升对该地区水文过程、盐水入侵与水资源供需系统的作用机制尚不明晰，应对手段缺乏理论基础。鉴于此，本书针对珠江三角洲网河区湿润气候、河网纵横、人类活动剧烈、海平面上升显著的特点，充分利用现有研究基础，采用多学科交

叉理论与方法,系统识别剧烈人类活动与海平面上升对该地区水文过程、盐水入侵与水资源供需系统的作用机制,为珠江三角洲网河区防洪、供水与压咸调度提供关键技术指标。本书有助于丰富和完善变化环境下河口区水文水资源系统响应与应对理论,促进河口地区水资源可持续利用,具有重要的理论和实践意义。相关研究成果对我国长江三角洲、环渤海湾等沿海地区水资源战略开发也具有重要的借鉴作用。

1.2 研究进展与发展趋势

1.2.1 水文要素变异研究进展

在剧烈人类活动和全球气候持续变化的影响下,水文要素或水文特征正在不断地发生变化。水文要素变异直接导致水文特征的时空不对应及频率的不一致性,进而使水文水利计算及水资源分析计算产生偏差,分析出的结论及规律缺乏合理性,防洪供水决策判断出现失误,严重影响水文水利部门的正常运作。因此水文要素变异识别对水文研究尤为重要。目前国内在水文要素变异方面进行了大量研究并已经取得了较多成果。丁晶和邓育仁(1988)在《随机水文学》中较详细地介绍了水文时间序列模型中跳跃成分的分析方法,包括时序累计值相关曲线法、Lee-Heghinan法、有序聚类法。钮本良(2002)利用时间序列累计值相关曲线法分析了黄河干流天然年径流量序列的变异特征。项静恬和史久思(1997)详细介绍了Mann-Kendall法的原理,该法因简单直观,被大量用来检测水文、气象资料的突变特征。例如,刘敏和沈彦俊(2010)采用Mann-Kendall法和滑动检验方法分析和讨论了海河流域近50年水文要素的变化趋势及变异年份;陈晓宏和陈泽宏(2000)采用一种基于水文特征的累积序列差值方法,对洪水时间序列进行了可能分割点识别;熊立华等(2003)根据一定的假设建立一个贝叶斯变点分析模型,判断了长江宜昌站的年径流资料系列中可能存在的变点;刘攀等(2005)应用变点理论分别采用均值变点方法、概率变点方法对三峡水库洪水期的分期进行了计算与探讨;张一驰等(2005)根据统计学方差分析的原理,建立了基于Brown-Forsythe检验的水文序列变异点识别方法,并采用该方法对新疆开都河大山口站近50年年平均径流序列进行了变异点识别;胡彩霞等(2012)提出基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法,对东江流域龙川站多年逐月径流量序列进行了分析;陈广才和谢平(2006)提出滑动F识别与检验方法,对潮白河水资源分区年径流序列进行了分析。

针对水文要素变异的识别与检验方法,除了基于统计学的变异系数法等传统的时间序列变异求解方法,一系列新技术、新理论也在变异点检测中得到应用(陈晓宏等,2010):夏军等(2007)结合信息熵理论提出一种基于差异信息测度与GIS技术的时空变异分析方法,成功应用于海河流域,找出了降水、蒸发和气温等水文气象要素的时空变异规律;张丹和周惠成(2011)利用变标度极差(rescaled range analysis G/S)分析法揭示了大凌河流域上游的水资源变化趋势及降水和径流的变异点,该方法与传统的Mann-Kendall法结合可以弥补各自的不足,用于分析水文要素序列的未来变异趋势;欧阳永保和丁红瑞(2006)利用Morlet小波变换分析了长江流域宜昌站的年最大洪水

周期变化及突变特征;金菊良等(2005)针对常规变点分析方法计算复杂、识别全部变点困难等问题,提出了用遗传算法进行水文时间序列多变点分析的一套新方法(AGA-CPAM);谢平等(2005)在对多种方法进行检验研究的基础上,提出了一种水文时间变异的综合诊断方法,对潮白河流域水文序列的变异点进行了识别与检验,等等。

珠江三角洲网河区水多砂少,河势基本稳定,但近20年来的大规模采挖河床泥沙,在很大程度上改变了河床演变的过程,这种改变已远远超过和涵盖了同期河流自然演变的程度,尤其是大规模人工采砂引起河床普遍大幅度下切,从而引起网河区水文要素发生相应变化。刘佑华等(2002)利用差异信息熵理论发现20世纪60~70年代珠江三角洲地区水位过程发生异变与大规模的人类活动有关;李兴拼等(2009)运用R/S分析法诊断了东江流域河源段径流变异情况和径流变异带来的生态环境变异影响;周兵等(2012)结合动力诊断、小波分析等方法分析了珠江流域气候变化特征;Wong等(2006)提出了一种水文序列变点分析的灰关联法,并应用分析珠江三角洲顺德网河区的水位变化;陆永军等(2008)通过对比分析得出,珠江三角洲地区河床普遍大幅度下切,水位出现明显下降趋势;广东省水文局佛山分局(2008)发现西、北江及三角洲地区,河段断面冲深后同流量下流速增大,导致在一定条件下洪水后期主槽强烈冲刷;李远青(2010)发现,近年来同级水位下流量级增大,洪水位下降的原因,一是河道横断面扩宽,导致同级流量下水深增加,二是近年经济发展的需求,上游河道的大量采砂,导致河段的来砂量大大减少,使河床不断下切,断面面积不断增大,河道横断面冲深,水位降低;陈晓宏等(2004)研究了珠江三角洲网河区的水位空间变异性,给出了描述该网河区水位空间分布结构的半变异函数;等等。

总结国内外研究进展,各国学者对变化环境下的水文过程问题做了细致的探讨,并提出了诸多创新性研究成果。然而,当前水文要素变异识别的研究尚未体系化。相关问题如“水文要素时空变异与一般变化的区别即变异性的内涵是什么?”“在什么条件下(变多少?变多长时间?在多大范围内变化?)才是变异(即变异的时间、空间和特征尺度)?”“变异后水文要素如何重构?”等等,如何重构水文要素变异后的水文特征量(极值、频率/重现期/保证率等)?等等,仍有待深入研究。

1.2.2 咸潮上溯研究进展

河口区咸潮上溯是一个自然现象,伴随30年来珠江三角洲网河区高强度人类开发和频繁涉海工程建设,极大地改变了河口区水陆边界条件,加之枯水期上游来水逐年减少和海平面持续上升,河口区咸潮高频度、高强度、长时间、远距离上溯,咸潮上溯影响程度与范围不断加重。自21世纪来,已有6年(2003~2006年、2009年、2011年)珠江河口发生特大咸潮灾害。而本地区相关基础研究刚刚起步,这恰恰是现代三角洲网河区必须关注的一个重大科学问题。

国外河口咸潮上溯的研究始于20世纪30年代,美国陆军工程兵水道实验站(WES)和荷兰Delft水工实验所在这方面做了大量的基础工作。对河口咸潮上溯的认

识则大体始于 50 年代初,早期研究主要集中在咸潮上溯现象中咸潮上溯范围、盐淡水混合及水体盐度分布等方面。美国潮汐水力学委员会在 1954 年对哥伦比亚河口咸潮上溯及其现象进行了调查分析;Schijf 和 Schonfeld (1953) 基于一维稳态盐水楔的假设,导出了盐水楔入侵长度解析式;在淡水混合特征问题上,Simmons 和 Brown (1969) 依据潮周期内河流来水量与进潮量之比值,提出将咸潮上溯影响下的河口划分为弱混合(高度分层)、部分混合和强混合 3 种类型;Bowden (1967) 和 Pritchard (1967) 从河口环流形式差异出发提出将河口盐淡水混合分为盐水楔(高度分层)型、两层水流(中等分层)型和垂直均匀型;Blumberg (1978) 基于水体密度变化对水流运动影响的研究,提出河口环流的驱动力是压强梯度力。随着观察资料原型和基础理论的逐步积累,相关的数值模型也得到发展,Ippen 和 Harleman (1961) 将河口地形的沿程变化以一个简单的函数关系来表示,提出了一维盐度对流扩散方程的恒定解和一阶理论解;Savenije (1992) 基于对大量河口咸潮上溯曲线的研究,总结出“递降”型、“铃”型、“拱顶”型和“驼背”型 4 种类型,并发展了一系列咸潮上溯涨憩模型。至 20 世纪 90 年代,模拟咸潮上溯的数学模型已取得了丰硕的成果,类似的解析模型有落憩模型、潮期平均模型,它们均以流体力学方程为基础,以研究咸潮上溯上限及纵向扩散机制为主。进入 21 世纪后,相关研究逐步关注咸潮上溯对环境和生态的影响。Kasai 等 (2010) 利用 2006 年 4 月至 2008 年 3 月日本 Yura 河口区水文盐度资料和生物资料,分析了该区盐度、浮游植物的季节变化特征,以及与流量、潮汐的相互关系;Post 等 (2013) 研究了咸潮上溯影响下近海地区地下水储量的变化,从全球角度总结沿海地区海床下地下水的起源、储存及总量分布、开采等情况;Hines 和 Borrett (2014) 利用生态网络分析方法 (ENA) 分析了咸潮上溯对开普菲尔河口氮循环的影响,得出咸潮上溯可能会解耦河口生态系统的氮循环过程;Colón-Rivera 等 (2014) 采用同位素示踪方法研究了咸潮上溯对波多黎各紫檀草沼泽树木蒸腾作用的影响,发现紫檀草对淡水的响应比对咸水的响应更敏感;Nelson 等 (2015) 研究了咸潮上溯对澳大利亚南鳄鱼河洪泛平原土壤细菌群落的影响,发现经咸潮上溯后细菌群落对碳和氮的循环更具专一性;Arfib 和 Charlier (2016) 对法国南部沿海的喀斯特含水层的咸潮上溯现象进行了研究,分析了四年的降雨、径流和盐度数据,建立了完整的集中式模型,等等。

国内对咸潮上溯研究,相对国外起步较晚,到 20 世纪 80 年代才有较为系统的研究,成果主要集中在长江和珠江两大河口区,尤其是长江河口区。罗艺等 (2010) 对咸潮上溯作用下上海市水资源利用风险进行了极值分析;Qiu 和 Zhu (2013) 应用 ECOM-si 模型模拟了三峡水库的建成对河口咸潮上溯的影响,发现三峡水库的存在会造成丰水期咸潮上溯时间提前,但在枯水期会大大缩减咸潮上溯距离和持续时间;卢陈等 (2013) 通过物理模型实验研究了不同潮差驱动下咸潮上溯距离的变化,结果表明存在潮差临界值使咸水入侵距离最短;潘存鸿等 (2014) 建立了涌潮作用下二维高精度咸潮上溯数学模型,发现涌潮促使咸潮上溯加剧,是形成盐度锋的动力机制;Han 等 (2015) 对受咸潮上溯影响的中国东北部海岸线碳酸盐岩含水层进行了研究,探索其地下水盐碱化的过程和可逆性;李路和朱建荣 (2016) 利用长江口的现场观测资料,研究了长江口北港的淡水扩展规律及其动力机制;张舒羽等 (2016) 建立了考虑涌潮

作用的二维盐度数值模型,预测了千岛湖配水工程对钱塘江河口咸潮上溯的影响;等等。

在珠江河口地区,关于咸潮上溯的观察资料原型分析和数学模拟也取得了若干成果。陈荣力等(2011)利用磨刀门水道咸潮上溯实测资料,分析了枯水期咸潮上溯规律及上溯机制;胡溪和毛献忠(2012)根据2003~2008年枯水期含氯度实测资料,利用咸潮入侵系数研究了珠江口磨刀门水道咸水入侵规律;Cai等(2013)分析了古斯塔夫飓风引起的咸潮上溯现象对珠江河口造成的生态环境效应,分析了河道沉积悬浮物和营养盐浓度的变化情况;Gong等(2014)对珠江河口沉积物运输通量进行了研究,指出不同径流动力下营养物质的不同输运方式。在结合淡水资源利用应用方面,Zhang等(2010)基于取淡目标与流量过程控制,探索了合理的压咸流量;孔兰等(2010)建立了一维动态潮流-含氯度数学模型,研究了海平面上升对咸潮上溯界线的影响;程香菊等(2012)采用FVCOM模型模拟了2003~2006年3个半月周期的珠江西四门河口区的咸潮上溯现象,发现咸潮上溯界线变化周期和潮汐运动规律相似;诸裕良等(2013)提出了一种简单有效的珠江口咸潮上溯预测模式,利用磨刀门实测资料进行模拟和检验;陈文龙等(2014)研究了磨刀门水道咸潮上溯的动力特征,发现磨刀门水道咸潮上溯半月周期变化规律是径流、潮汐、地形的综合作用影响下的动态过程;等等。

尽管珠江河口区咸潮上溯研究取得了一些成果,但其机制研究尚不成熟,海陆相多要素驱动的水资源响应、河口类型与潮波变形对咸潮上溯的作用机制等问题研究尚处于初步认识阶段。珠江三角洲网河区具有三江汇流、河道交错的复杂河网地貌,在数学模型构建方面比长江河口区更具复杂性和不确定性,目前相关模型局限于河口等近海区域或对河网进行一维概化,无法整体模拟咸潮上溯在整个网河区的盐度时程分布特征。

1.2.3 水资源脆弱性评价研究进展

水资源脆弱性研究经历了一个由简单到复杂、由静态到动态、由单一学科到跨学科的逐步深入的过程。水资源脆弱性概念最早出自20世纪70年代,法国的Albinet和Margat(1970)在其发表的论文中,对地下水资源脆弱性进行了界定。此后,地下水资源脆弱性研究逐步成为学术热点;随着数据信息的增加和研究视角的扩大,地表水资源和水资源脆弱性的研究逐渐受到重视,研究对象也从单一水质研究发展成水质水量研究相结合(Nam et al., 2015);至20世纪末,气候变化和人类活动对水资源系统的冲击程度和影响范围不断加重,有关自然因素和人为因素相互作用下的水资源脆弱性研究成为学术前沿与热点。学者普遍认为,变化环境下水资源脆弱性是一种受自身和外因共同影响,而导致水资源系统失衡的特性和状态,与系统的暴露度、敏感性、适应能力等众多构成要素相关(Al-Saidi et al., 2016; Kanakoudis et al., 2016);近年来,随着脆弱性研究的拓展和相关学科的交融,各国学者越来越重视关注区域水资源系统与社会经济、资源环境系统耦合的整体性响应,水资源脆弱性概念也逐渐拓展为

包含社会、经济、环境、制度等多维度、多层次、跨学科的脆弱性概念。但是,由于不同专业领域对脆弱性的理解不同、研究视角和研究方法的不同,至今仍没有统一的水资源脆弱性概念(邹君等,2014;温晓金等,2016)。

水资源脆弱性评价指标体系是构建水资源脆弱性评价体系的重要组成部分。由于评价对象差异显著,评价指标庞杂,缺乏系统数据组织方法与理论模型统筹数据、指标和信息的差异特性,目前尚无统一的水资源脆弱性评价指标体系。近年来,常用的指标体系归纳为以下几种:①根据水资源脆弱性的本质,从水量脆弱性和水质脆弱性角度构建指标(董艳慧等,2013);②根据水资源供需过程的系统动力学模型,从供水和需水两个角度构建指标(Chang et al., 2013; Wu et al., 2013);③根据水资源脆弱性形成过程,从水资源自然禀赋、水资源开发利用程度和用水效率等角度构建指标(潘争伟等,2016);④根据水资源脆弱性的影响因素,从自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性等角度构建指标(Shabbir and Ahmad, 2015);⑤根据水资源脆弱性的表现形式,从水文系统的脆弱性、社会经济系统的脆弱性、生态环境系统的脆弱性、水利系统的脆弱性等角度构建指标(Wang et al., 2012);⑥根据水资源脆弱性的内涵,从“驱动力-压力-状态-影响-响应”五部分构建了水资源脆弱性评价模型(朱怡娟等,2015; Bär et al., 2015),形成水资源脆弱性“压力-状态-响应”的PSR评价模型(潘争伟等,2014;刘姝媛和王红旗,2016);⑦根据变化环境对水资源系统与社会经济系统的驱动效应,从暴露度、敏感性、适应能力三个维度,构建水资源脆弱性评价指标体系(Boori et al., 2015;陈佳等,2016)。

当前,国内外水资源脆弱性评价的定性分析方法比较成熟,但定量评价方法研究尚处于起步阶段。较为常用的方法包括综合指数法(姚雄等,2016)、函数模型法(夏军等,2015a, 2015b)、模糊数学方法(Xiang et al., 2016)、集对分析法(曾建军等,2014)、投影寻踪模型(钱龙霞等,2016)、BP神经网络模型法(刘倩倩和陈岩,2016)等。早期水资源脆弱性评价,通常采用单一评价方法进行研究,但传统单一的研究方法不能妥善解决水资源脆弱性评价的非线性和不确定性问题;近年来,许多学者采用多种方法(Neshat and Pradhan, 2015; Stevenazzi et al., 2015)对同一研究区域进行评价后,对评价结果进行比较。研究表明,多种方法的耦合所得结果能综合各方法的优点,确保评价结果更加全面、客观,具有较强的适用性;随着计算机技术、数学方法的不断成熟与运用,GIS和遥感技术结合的图层叠置法(Chenini et al., 2015; Sun et al., 2016; 奚旭等,2016)等新方法也被广泛应用于脆弱性评价中。总体而言,不同的评价方法在计算、解释和处理问题过程中各有利弊,需要根据具体研究进行适当选择。

水资源系统是复杂的非线性系统,具有明显的随机性和模糊性。随着自然和人为因素对水资源系统扰动程度与影响范围不断加剧,水资源脆弱性的特征和内涵将变得更加复杂,水资源脆弱性评价研究理论方法需要进一步研究和完善(夏军等,2015a, 2015b; 夏军和石卫,2016)。

(1) 缺乏统一的水资源脆弱性概念。当前,水资源脆弱性概念定义尚未统一,且随着变化环境对水资源系统的影响程度不断加大,水资源系统的自然属性与社会属性

范畴不断扩大,水资源脆弱性的概念和内涵需要进一步丰富与完善。

(2) 缺乏统一的水资源脆弱性指标体系。现有的评价指标体系难于反映研究对象的差异性与特殊性特征,且各个指标的阈值区间无法准确界定。如何建立具有一定物理机制、概念明晰、适应性强的指标体系框架,是当前水资源脆弱性评价亟待解决的问题。

(3) 缺乏有效的水资源脆弱性评价方法。现有的水资源脆弱性评价方法多采用单一数学方法和模型进行评价,忽略了水资源系统的非线性和不确定性,同时存在对不同研究区域适用性差、定量方法所获结果难以定性化等问题。此外,仍缺乏有关检验评价方法评价适用性的手段和标准。

(4) 变化环境下水资源脆弱性研究有待突破完善。现有的水资源脆弱性相关研究,主要考虑了气候变化对水资源脆弱性的影响,有关人为影响因素的分析相对较少,尤其缺乏气候变化与人类活动耦合的水资源脆弱性评价体系。

1.2.4 水资源配置研究进展

国际上水资源配置研究始于20世纪40年代,经历了一个由简单到复杂、由点到面逐步深入的过程。从研究方法上,水资源配置模型由单一的数学规划模型发展为数学规划与模拟技术、向量优化等几种方法的组合模型(Li et al., 2015; Chang et al., 2016; Davijani et al., 2016);对问题的描述由单目标发展为多目标,特别是大系统优化理论、复杂性理论、计算机技术和新优化方法的应用,使复杂的多水源、多用水部门优化配置问题变得可行(Zhang and Li, 2014; Zhou et al., 2015; Hu et al., 2016);从研究对象的空间规模上,由最初的灌区、水库等工程控制单元水量的优化配置研究,扩展到不同规模的区域、流域和跨流域水量优化配置研究(Abed-Elmdoust and Kerachian, 2012; Nian et al., 2014; Kotir et al., 2016);从研究的水资源属性上,由最初的单一水量优化配置,扩展到水量、水质耦合,以及有生态环境需水参与的统一优化配置研究(Xuan et al., 2012; Liu et al., 2014; Ling et al., 2016)。近年来,在剧烈人类活动和全球气候变化的持续影响下,变化环境下水资源配置研究正成为各国学者研究的热点前沿课题(Vaghefi et al., 2015; Chavez-Jimenez et al., 2015; Null and Prudencio, 2016)。

在国内,随着经济社会高速发展和严峻水资源形势的迫切需求,水资源配置理论体系与方法得到不断发展完善。20世纪80年代初,我国经济社会发展水平较低,此阶段水资源配置以水利工程调配为主,研究对象主要集中于防洪、灌溉、发电等水利工程,研究的目的是实现工程经济效益最大化。张勇传院士建立的调度函数和余留效益统计迭代算法,有效地解决了多库问题中维数灾难题,为我国制定长江上游水库群联合调度提供了应用基础;“八五”(1991~1995年)攻关项目“黄河治理与水资源开发利用”提出基于宏观经济的区域水资源合理配置理论和方法,主要从经济属性来研究水资源配置决策;90年代后期,针对干旱地区水资源过度开采而导致的一系列水环境、生态问题,提出了面向生态、基于水量水质联合调控的水资源配置研究(张守平等,

2014; 邱庆泰等, 2016); 国家“九五”(1996~2000年)攻关专题“西北地区水资源合理配置和承载能力研究”提出了面向生态的水资源配置和基于自然-人工二元循环的水资源配置理论方法, 进一步将水资源系统与社会经济系统、生态系统三者联系起来统一考虑, 将基于宏观经济的水资源配置理论进行了一系列的拓展(孙甜等, 2015; 王浩和刘家宏, 2016); 进入21世纪, 我国社会经济与生态环境之间用水不平衡的矛盾日益突出, 建立与流域水资源条件相适应的生态保护格局和高效经济结构体系, 实施统一调配流域水资源成为水资源可持续利用的根本出路(王宗志等, 2014; 左其亭等, 2016); “十五”(2001~2005年)科技攻关重大项目“水安全保障技术研究”提出了以宏观配置方案为总控的水资源实时调度体系, 将流域水资源调配分割为“模拟-配置-评价-调度”四层总控结构, 有效实现了流域水资源的基础模拟、宏观规划与实时调度的有机耦合和嵌套(姜珊等, 2016; 王本德等, 2016); “十一五”(2006~2010年)科技支撑计划完成了“东北地区水资源全要素优化配置与安全保障技术体系研究”, 突破解决了水资源分析与预报、全要素优化配置、实时监控, 初始水权分配等技术难题。伴随人类活动和气候变化对水文水资源系统的影响不断加重, 变化环境下流域水资源配置研究正成为学术前沿课题(严登华等, 2012; 黄强等, 2015)。

近年来网河区水资源系统面临剧烈人类活动、海平面上升等多重压力, 水资源产生条件及其特征值发生了明显变化, 最终导致网河区水资源供需系统格局发生显著变异。如何科学解决网河区水资源供需系统出现的新问题, 尚需进一步开展下述研究:

(1) 变化环境下的水资源配置研究(夏军等, 2015a, 2015b; 付强等, 2016)。网河区水资源系统自然属性的随机性和社会属性的不确定性, 使得网河区水循环机制、水动力与物质输送机制、水资源需求机制及水资源调配目标等均与实际发生的水资源情势和调配方案存在差异, 给水资源管理和决策带来了大量不确定性和脆弱性。

(2) 用水总量与用水效率双控制约束的水资源配置研究(吴泽宁等, 2013; 王义民等, 2015)。在国家最严格水资源管理制度社会命题下, 用水总量和用水效率控制对区域水资源供需结构与格局影响明显。需在传统水资源配置模型中耦合用水总量与效率双约束控制条件, 研究适宜于最严格水资源管理约束条件下的水资源配置理论。

(3) 水量水质联合优化配置模型研究(葛忆等, 2013; 王建华等, 2016)。伴随经济社会快速发展和咸潮上溯不断加剧, 网河区水污染日趋加重、水生态功能严重退化, 资源型和水质型缺水问题并存, 需在网河区水资源优化配置中考虑水量水质联合统一配置。

(4) 传统算法和新优化算法的有机结合(解建仓等, 2013; 黄草等, 2014; 纪昌明等, 2014; 冯仲凯等, 2015; 贾本有等, 2016)。水资源配置问题非常复杂, 在求解过程中, 现行的大系统理论及常规优化技术往往面临“维数灾”、无法求取最优解等难题。如何将遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索、免疫优化算法、神经网络、协同学、多智能体和混沌优化等智能优化方法引入水资源配置模型求解, 是水资源配置理论和方法的研究方向之一。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本书紧密围绕珠江三角洲网河区湿润气候、河网纵横、人类活动剧烈、海平面上升显著的特点,以揭示剧烈人类活动与海平面上升下珠江三角洲网河区水资源系统的响应机制为轴心,以实现珠江三角洲水资源可持续利用为目标,通过学科交叉、综合、创新和多领域联合攻关,力求在变化环境下珠江三角洲网河区水文要素变异、盐水入侵规律、水资源脆弱性评价等方面提出创新性成果,提出应对变化环境的水资源对策措施,丰富完善华南湿润地区水资源系统理论与方法,为有效保障珠江三角洲城市群水安全提供科学基础。研究内容主要包括以下4个方面的内容:

1) 剧烈的人类活动与海平面上升对珠江三角洲网河区水文过程的影响

珠江三角洲网河区水系在思贤滘位置分为西江干流水系和北江干流水系两支。近年来因河道挖砂导致两条水系河床下切严重,加之近年来海平面持续上升,上游水系的流量、水位、分流比及河口区潮汐过程等水文要素变异显著。本书重点抓住变化环境下珠江三角洲网河区水文水资源响应特征、变异尺度等关键,研究水文要素变异对海平面上升、剧烈人类活动(河道挖砂与上游水利工程调度)的响应关系,进一步完成径、潮流水文要素特征值,极值径、潮流组合的变异特征识别以及变异后水文要素特征值重构方法等方面的研究。

(1) 总结珠江三角洲网河区降水、蒸发、径流、水位、潮汐等水文要素的历史变化特征,探讨海平面变化、上游水利工程调度、河床形态等因素变化与水文要素特征值变化的响应关系;

(2) 构建珠江三角洲网河区水文要素变异测度的评价指标体系和方法,量化该网河区水文要素的时空变异特征;

(3) 重新定义变异后径、潮流组合的水文频率,重构水文要素(洪水、枯水、潮汐)特征值与极值。

2) 海平面上升对珠江三角洲网河区盐水入侵的影响

近年来,珠江三角洲网河区咸潮上溯影响的程度与范围逐年增大,产生的问题也日益突出。本书基于科学的高精度观测资料,增加部分典型河段咸潮上溯期同步高频观测,提高模型的可靠性,重点研究海平面变化、河道挖砂、上游水利工程调度等要素对盐水入侵驱动效应,以及未来不同径、潮流组合下盐水入侵的演变规律,并重点提出珠江三角洲网河区应对咸潮上溯的对策措施。本书不研究气候变化引发的海平面变化机制问题,仅考虑盐水入侵作为海平面变化与典型人类活动(河道挖砂和上游水利工程调度)的一个水文水资源响应。

(1) 开展典型河段盐水入侵同步水文、水质、盐度高频采样监测,总结珠江三角