

变化环境下 水资源评价方法不确定性研究

Uncertainty Study of Water Resources Assessment Methods
in the Changing Environment

许斌 谢平 陈广才 编著



长江出版社

中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目 (20150914091245)

国家自然科学基金委重大研究计划重点支持资助项目 (91547205)

国家自然科学基金资助项目 (51409014; 51579181)

变化环境下 水资源评价方法不确定性研究

Uncertainty Study of Water Resources Assessment Methods
in the Changing Environment

许斌 谢平 陈广才 编著

长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下水资源评价方法不确定性研究/许斌,
谢平,陈广才编著. —武汉:长江出版社,2016.11
ISBN 978-7-5492-4746-2

I. ①变… II. ①许… ②谢… ③陈… III. ①水资源—
资源评价—研究 IV. ①TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288085 号

变化环境下水资源评价方法不确定性研究

许斌 谢平 陈广才 编著

责任编辑:张蔓

装帧设计:蔡丹 谢芳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

网 址:<http://www.cjpress.com.cn>

电 话:(027)82926557(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

规 格:787mm×1092mm 1/16

12.25 印张

260 千字

版 次:2016 年 11 月第 1 版

2017 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-4746-2

定 价:36.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

前 言

人类一直依赖水文序列作为水文规律最主要和最直接的信息来源,并对水循环现象进行推理解释。但由于环境变化,包括气候变化和人类活动等的影响,水资源形成的过程发生了较大变化,引起水文变异的发生,使得用于水文频率分析的水文序列失去了“一致性”。如何从非一致性水资源序列中推求出水资源变异的规律、选择最适合某种水文变异形式的非一致性水文频率计算方法,并对所得到的结果进行不确定性分析,是目前区域水资源评价、管理中具有基础性和关键性的理论问题之一。

针对上述问题,本书主要从三个方面开展了相关的研究工作,分别是区域时空尺度的水资源变异规律研究、非一致性水文频率计算方法的不确定性研究、非一致性水文频率计算方法的择优研究。

区域时空尺度的水资源变异规律研究方面,本书在水文变异诊断系统对水资源序列进行综合诊断的基础上,依据变异结果,以变异形式及变异程度为纽带,分别考虑区域水资源在时间尺度、空间尺度以及年内分配方面的特点,提出了区域时间尺度、空间尺度水资源变异分析方法,进行了区域水资源变异规律分析。

非一致性水文频率计算方法的不确定性研究方面,本书基于非一致性水文频率计算原理及方法,分别开展了线性趋势成分、非线性趋势成分、跳跃成分影响下非一致性水文频率计算方法的不确定性分析研究。

非一致性水文频率计算方法的择优研究方面,本书依据线性趋势成分、非线性趋势成分、跳跃成分影响下非一致性水文频率计算方法的不确定性定量分析成果,提出基于 90% 置信区间上下限的择优度指标,并结合线性趋势成分、非线性趋势成分、跳跃成分的特征参数,进行了方法优劣程度的甄别。

本书的编写由许斌负责全面协调。提纲由许斌、谢平和陈广才经多次讨论后拟定。全书共分 9 章,其中第 1 章编写人员为许斌、陈广才、谢平;第 2、5 章编写人员为谢平、陈广才、许斌;第 3、4 章编写人员为许斌、谢平、陈广才;第 6 章至第 8 章由许斌、谢平编写完成;第

9 章由许斌、谢平、陈广才编写完成。

本书的出版感谢中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“变化环境下基于多特征变量的干旱重现期非一致性研究(任务书编号:20150914091245)”资助;感谢国家自然科学基金委“西南河流源区径流变化与适应性利用”重大研究计划重点支持项目“澜沧江非一致性径流演变规律及驱动机制研究(编号:91547205)”,国家自然科学基金项目“水文变异条件下湖泊流域水文干旱频率计算方法(编号:51409014)”、“变化环境下非一致性最低通航水位设计方法研究(编号:51579181)”的资助。感谢刘静君在统计试验方面给予的支持和宝贵意见建议。

本书虽力求完善,但由于变化环境下水文变异和非一致性水文频率计算问题的复杂性,加之作者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,恳请广大读者批评指正。同时,由于成稿仓促,书中引用的文献标注可能存在疏漏,敬请相关专家和学者谅解。

作 者

2016 年 12 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	3
1.3 研究思路及内容	5
1.4 小 结	7
参考文献	7
2 水文变异诊断系统	9
2.1 水文变异的定义	9
2.2 水文变异诊断系统	10
2.3 初步诊断	11
2.4 详细诊断	14
2.5 综合诊断	27
2.6 权重计算原理	28
2.7 诊断结论输出	33
2.8 小 结	34
参考文献	34
3 区域时间尺度水资源变异分析	36
3.1 时间尺度水资源变异分析方法	36
3.2 研究区域概况	39
3.3 区域水资源年际尺度变异规律	40
3.4 区域水资源年内分配变异规律	50
3.5 小 结	56
参考文献	57

4	区域空间尺度水资源变异分析	58
4.1	空间尺度水资源变异分析方法	58
4.2	研究区域概况	59
4.3	区域水资源空间尺度变异规律	60
4.4	小 结	67
5	非一致性水文频率计算原理及方法	69
5.1	非一致性水文频率计算的假设前提	69
5.2	非一致性水文频率计算的一般方法	70
5.3	非一致性水文频率计算的具体方法	73
5.4	小 结	77
	参考文献	77
6	线性趋势成分影响下IHFCM方法的不确定性	79
6.1	统计试验原理	79
6.2	IHFCM方法的不确定性分析	81
6.3	IHFCM方法的不确定性及择优	82
6.4	三级区永定河册田水库以上地表水资源评价	102
6.5	小 结	112
	参考文献	114
7	非线性趋势成分影响下IHFCM方法的不确定性	115
7.1	非一致性时间序列的生成	115
7.2	IHFCM方法的不确定性	115
7.3	IHFCM方法的择优	128
7.4	三级区永定河册田水库以上地表水资源评价	135
7.5	研究区域水资源评价结果对比	140
7.6	小 结	141
8	跳跃成分影响下IHFCM方法的不确定性	144
8.1	非一致性时间序列的生成	144
8.2	IHFCM方法的不确定性分析及参数设置	144

8.3 IHFCM方法的不确定性 145

8.4 IHFCM方法的择优 156

8.5 三级区吉木乃诸小河地表水资源评价 161

8.6 小 结 169

9 结论及展望 171

9.1 主要研究结论 171

9.2 研究中的不足 176

9.3 研究展望 177

附 表 178

1 绪 论

1.1 研究背景

水资源是自然资源的重要组成部分,是生态系统循环往复的基础性资源。作为地球万物生命之源,它是维持生物圈的血液和支撑人类社会持续发展的必要条件^[1]。“水资源”这一名词自 1894 年美国地质调查局(USGS)设立了水资源处(WRD)后,才正式被使用,随着时代的发展,其内涵也在不断地丰富和发展^[2]。

水资源按评价口径的不同,有广义和狭义之分^[3]。广义的水资源是指在地球的水循环中,可供生态环境和人类社会利用的淡水,它的赋存形式主要是地表水、地下水和土壤水,主要补给来源是大气降水^[4];本书中所指的水资源则是指狭义水资源,即能满足人类及其生存环境稳健发展需要的同时,又能不断补充更新的淡水资源,河川径流是其主要的赋存形式,同时兼有资源、社会、生态等多重属性^[5]。

长期以来,基于物理成因一致的水文观测序列,一直是人们用以研究水资源循环过程规律的重要资料来源。例如中国明代地理学家徐霞客,经过 28 年的野外考察,记录并分析了我国西南地区的岩溶地貌和水文地理;我国现行的《水利水电工程水文计算规范(SL 278—2002)》^[6](以下称为《规范》)也明确要求用于水文计算的水资源序列应具有可靠性、代表性和一致性。

1.1.1 区域水资源变异问题的出现

自地球诞生之日起,其环境就在不断地发生变化,但在较长的时期内,其变化程度并不明显。当人类出现以后,尤其是工业革命以来的 200 多年间,随着社会生产力的提高和科技的不断进步,人类在创造前所未有的财富、推进人类社会文明进步的同时,也使自身赖以生存的自然环境遭受到了极大的干扰和影响,且力度越来越大,手段也越来越丰富^[7]。早在 2002 年就有学者对受到人类活动影响而改变的地球表面积进行过统计,其结果显示当时已经有接近一半的地球表面受到了人类或多或少的影响^[8]。

受人类活动和自然变迁的综合影响,地球环境发生了一些非自然和不正常的变化,例如大气中二氧化碳浓度不断增加,极端天气、洪涝、干旱现象频繁发生,等等。水资源作为自然资源的重要组成部分和人类社会发展的基础性资源,其循环过程逐渐受到气候变化以及日

益加剧的人类活动等多种因素直接或间接的影响,例如人类修建水库以获得一定的防洪、发电、渔业、灌溉等效益,但是却使得区域蒸发量增大,水文过程也受到了水库调节的影响;再如人类通过改变土地覆被状况等极大地改变了流域的下垫面条件,从而影响局部水循环。这些影响导致水资源序列不再满足一致性的要求,谢平等^[9]将这种水资源序列的分布形式和(或)分布参数在统计尺度上出现的非一致性定义为水文变异或水资源变异,本书中对其不作区分。

由于水资源具有时间和空间的双重属性,对于不同区域的水资源而言,其受到环境变化的影响也不同,因此,水资源变异问题具有显著的区域性特征,即不同的地区不同时段,其变异情势不尽相同。

1.1.2 变化环境下的地表水资源评价

水资源虽然总量是有限的,但它在自然界中不断地进行着循环往复,且受到气候和地理条件的影响,不同地区的水资源量相差很大,即便是在同一地区,也存在年内和年际变化。如北非和中东很多国家(埃及、沙特阿拉伯等)降雨量少、蒸发量大,导致径流量很小,人均及单位面积土地的淡水资源占有量非常少;相反,冰岛、印度尼西亚等国家,以每公顷土地计的水资源量比贫水国高出 1000 倍以上^[10]。在我国,水资源分布的特点是南多北少,且降水大多集中在夏秋两季的三四个月里。由于水资源的不可替代性和用途的多样性,包括生态系统在内的各个用水环节,在利用水资源时往往会出现各种矛盾,比如不同地区、部门之间争夺水资源的使用权,单一用水部门的水资源需求与供给的矛盾,等等。为了妥善解决以上用水矛盾,协调人类社会不同用水地区、部门之间的水量分配,在促进人类社会发展的同时,为实现人与自然和谐发展的目标,就需要对有限的水资源进行评价、保护、规划和管理,使其尽可能满足各方面的要求,并发挥出较大的社会效益、经济效益和生态效益。在各种与水资源相关的工作中,具有基础性作用的是水资源评价工作,水资源保护、规划与管理等工作均要依托于水资源评价的结果。

水资源评价是对一个国家或地区的水资源数量、质量、时空分布特征和开发利用情况作出的分析和评估。它是保证水资源可持续利用的前提,是进行与水有关活动的基础,是为国民经济和社会发展提供供水决策的依据^[11]。由于地表水资源开发利用方便、更新速度快等原因,它往往在区域水资源利用中占有较大的比重。本书中所探讨的水资源评价主要针对与水文过程结合较为密切的地表水资源数量评价,它是区域合理开发利用地表水资源、科学管理地表水资源的基础和依据,也是实现地表水资源可持续利用、保障经济社会可持续发展的基础工作。地表水资源评价的实质是对年径流序列的频率计算^[12],因此,水资源实测时间序列具有非常重要的地位。在水资源相关工作中,也都要求水资源时间序列具有代表性、可靠性和一致性。

对于受到人类活动影响而出现非一致性的水资源时间序列,《规范》推荐采用还原、还现

计算的方法,对非一致性进行修正。而在还原、还现计算的过程中,由于水资源调查工作量大、调查时间滞后、调查精度不高等原因,所得出的水资源评价结果往往不能令人满意,也无法适应环境的变化。也有学者采用水文模型对时间序列进行模拟,进而进行水资源评价,但水文模型结构复杂、对资料要求较高,在推广过程中会出现比较多的问题。

1.1.3 非一致性水资源评价方法的选择

随着环境变化逐渐成为人们的共识,对于非一致水资源评价方法的研究也逐渐成为水文学科的新方向和新热点^[13],例如谢平等提出的基于跳跃分析^[14]、线性趋势分析^[15]、降雨-径流关系^[16]的非一致性地表水资源评价方法,XIONG 提出的两参数月水量平衡模型^[17],王浩等提出的基于二元水循环的评价模式^[18]等。这些不同的方法基于不同的理论基础,所得出的水资源评价结果也不尽相同;同时,水资源情势因时因地而异,对不同的地区而言,这些方法的适用性也有所不同。对于特定的水资源序列而言,不同方法所评价出的水资源量结果,其优劣程度如何判断,也是摆在水文工作者面前的难题。

1.2 研究意义

1.2.1 变化环境下的用水安全及水循环研究是国内外水问题研究的前沿

国际水文学在过去的几十年里研究十分活跃且发展迅速,尤其是 20 世纪 90 年代以后,国际水文学协会(IAHS)、联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)等国际组织实施了一系列国际水科学研究计划,例如全球能量和水循环试验项目(GEWEX)、国际水文计划(IHP)和国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球水系统计划(GWSP)等^[19]。

为了对全球气候变化以及大规模水电工程建设等人类活动对区域水安全及水循环造成的影响进行研究,2001 年以来,国际上实施了全球水系统计划^[20](GWSP)。GWSP 的主席 Vörösmarty 认为:“土地利用变化、农业灌溉、河道工程措施等因素,都会直接或间接地对区域和全球水循环产生重要影响。大量证据表明,人类活动在越来越多的领域影响了水循环的基本特性,并导致了很多人水安全和生态安全问题,且亟待研究,尤其是发展中国家。”我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》^[21]中指出,要把“人类活动对地球系统的影响机制”列为第 3 个国家重大战略需求的基础研究,主要包括“资源勘探与开发过程的灾害风险预测,重点流域大规模人类活动的生态影响、适应性和区域生态安全等”。

2007 年 IPCC 在出台的第四次评估报告《气候变化 2007》^[22]中指出,从 1900 年到 2005 年,许多大的地区实测降水量均存在趋势性成分。例如在南北美东部、欧洲北部、亚洲北部和中部,降水量呈现出显著增加的趋势;地中海、非洲南部和亚洲南部部分地区的降水量则减少幅度明显。大多数大气-海洋环流模式预估,在未来气候偏暖的条件下,北半球中、高纬度的大部分地区,冬季的潮湿及夏季的干燥的概率将增加。由于温度升高时,大气的持水能

力会随之上升,夏季干燥的气候条件会增大干旱的风险,同时,出现强降水和洪水的机遇也将增加,且这种预估已经被实测资料所证实,并有可能持续下去。为了降低或避免人类活动对自然环境的消极影响,将地球系统整体,即各圈层子系统之间的相互作用和反馈作为研究对象的全球变化科学在迅速发展^[23]。

综上所述可以看出,由于受到气候变化和人类活动的共同影响,变化环境下的区域水安全和水循环研究已经成为全球水系统研究的核心问题。该问题受到国内外学者的广泛关注,已经成为水科学研究的前沿领域,对其研究具有重要的理论意义和现实意义。

1.2.2 适应变化环境的水资源评价是区域水循环和水安全保护的基础,而非一致性频率计算方法及其择优研究是变化环境下水资源评价的核心

国家安全观念随着全球性的资源危机,已经发生了质的变化。水安全成为国家安全的一个重要组成内容,并与国防安全、经济安全、金融安全等具有同等重要的战略地位^[24]。水安全包含水资源安全、洪水安全和水环境安全三个方面内容^[25]。在变化环境的新命题下,区域水安全的基础,应建立在对水资源、洪水和水环境现状及未来演变态势准确评价的基础上。对水资源评价来说,水文频率计算方法是广为采用的基础方法。从统计学的观点来看,进行水文频率计算时,所采用的水资源序列必须满足独立同分布这个前提。对于独立性而言,通常采用年最大值选样等方法来满足其要求;同分布性则要求水资源序列形成的物理成因基本一致。然而,由于气候变化和人类活动的影响,水资源序列的某些统计特征值(均值、偏态系数等)发生了变化,导致水资源序列不再满足“一致性”的要求。若仍采用这些非一致性的水资源序列进行水资源评价,其结果和实际情况往往发生偏差,所得出的水资源变化规律必然失真,进而会对水资源相关工作造成不同程度的影响。例如造成防洪、供水、洪旱灾害预测、水资源开发利用、区域水资源安全以及水利工程设计施工等方面的决策及判断失误等。

我国将全国范围内的水系按照水文、气候、地理等因素划分为十个水资源一级区,结合各个一级区内的自然地理条件和水资源开发利用及水旱灾害状况,又将一级区划分为不同的二级区和三级区,其中三级区是按照流域尺度划分的最小区域。在变化环境的大背景下,除了应该关注一级区水资源情势的响应规律外,更具有基础性和关键性的是,作为其基本组成单元的三级区水资源情势将如何演变。

受到气候变化,尤其是人类剧烈活动的影响,流域水资源形成的条件发生了很大的变化,例如河川径流减少甚至断流、修建水库导致流域蒸发量加大等,都造成用于地表水资源评价的径流序列不再满足一致性的要求。我国1981年第一次水资源评价的结果显示,随着城市化的快速发展,水资源已经渐渐不能满足实际的需要。以华北地区海河流域为例^[26]:

1955—1984 年期间,官厅水库上游年平均来水量 11.3 亿 m^3 ;1985—1995 年期间,年平均来水量衰减到 2.7 亿 m^3 ,仅为前者的 1/4,然而两个时期流域内的平均降水量却相差无几;密云水库上游的年平均来水量也出现了相同的特点,与 1960—1979 年相比,1980—1997 年平均来水量减少了 4 亿 m^3 ,上述两个水库上游水资源序列的非一致性已非常明显。

除了《规范》推荐的处理非一致性水资源序列的还原、还现计算方法外,也有很多学者从统计、模型等角度开发了新的水资源评价方法。这些方法均具有自己的特点,其理论基础也各不相同,在不同的地区应用时也证明其具有较好的可行性。但由于水资源评价过程的差异,当不同的方法针对同一区域进行水资源评价时,所得到的结果往往并不一致,甚至相差较大。

如何从深受气候变化和人类活动影响而发生变异的水文要素中分析出区域水文特征的自然规律,不断丰富和完善针对非一致性水文序列的频率计算方法,并进行方法的优选,从而找出最适合特定地区的水资源评价结果,以反映过去、现在和未来各个时期的地表水资源量,是区域水循环和水安全保护亟待解决的关键理论问题。

1.3 研究思路及内容

鉴于变化环境下水资源评价在区域水资源利用中的重要作用,针对上述在研究中仍存在的主要问题,本书拟从三个方面开展研究,即区域水资源时空尺度变异分析方法研究,考虑确定性趋势、跳跃成分影响下非一致性地表水资源评价方法体系的不确定性及其研究。本书的章节内容安排如下。

第 1 章绪论。对当前由于环境变化而造成的水资源变异、水文频率计算方法、变化环境下的水资源评价等内容进行综述,阐述研究背景、研究意义、研究动态、主要的研究方法及其存在的问题,指出作者的研究思路及章节安排。

第 2 章水文变异诊断系统。详细介绍水文变异诊断系统的思路及诊断流程。该系统考虑了趋势和跳跃两种变异形式,由初步诊断、详细诊断和综合诊断三个部分组成。其基本思路是首先采用 Hurst 系数法等对序列进行初步检验,判断序列是否可能存在变异(如果可能存在变异,再利用多种变异检验方法对水文序列进行详细诊断);然后分别对趋势和跳跃两种诊断结论进行综合,并根据效率系数评价水文序列与跳跃成分或趋势成分的拟合程度,以效率系数较大者作为变异形式判断的结果;最后结合实际水文调查分析,对变异形式和结论进行确认,从而得到最终的变异诊断结果。

第 3 章区域时间尺度水资源变异分析。本章基于水文变异诊断系统的综合诊断结果,主要对变化环境下区域水资源时间尺度、年内分配变异分析方法进行阐述。时间尺度主要包括年、季度、丰/枯水期和月尺度水资源序列,而年内分配指标主要包括集中度、集中期、不均匀系数和基于基尼系数的均匀度。通过构建不同尺度之间的变异关系,在时间尺度和年

内分配上掌握区域水资源的变异规律。

第4章区域空间尺度水资源变异分析。本章同样基于水文变异诊断系统的综合诊断结果,主要对变化环境下区域空间尺度水资源变异分析方法进行阐述。空间尺度包括研究区域及其所包含的计算单元(四级区),通过构建不同尺度之间的变异关系,在空间尺度上掌握水资源的变异规律。

第5章非一致性水文频率计算原理及方法。该原理假设非一致性水文序列由相对一致的随机性成分和非一致的确定性成分两部分组成,采用统计分析法对确定性成分和随机性成分进行识别与检验,并对确定性成分进行拟合计算,对随机性成分进行频率计算;根据时间序列的分解与合成理论,将确定性的预测值和随机性的设计值进行合成,以得到过去、现状和未来不同时期合成序列的频率分布。在此原理的基础上,本书主要针对基于跳跃分析、线性趋势、非线性趋势、小波分析和希尔伯特-黄变换(HHT)的非一致性水文频率计算方法进行讨论。

第6章线性趋势成分影响下IHFCM方法的不确定性。虽然现有的非一致性水文频率计算方法(IHFCM)均是基于相同的非一致性水文频率计算原理发展起来的,但在对同一区域进行水资源评价时,得到的结果往往有所不同,甚至差别很大,这种计算结果的不确定性给评价结果的选取工作带来了一定的困扰。本章首先利用统计试验的方法对线性趋势成分影响下不同方法的不确定性 & 优劣程度进行评价,再结合所得到的研究成果,结合发生了趋势变异的三级区永定河册田水库以上的非一致性水资源序列,对其进行变化环境下水资源评价的实例研究。

第7章非线性趋势成分影响下IHFCM方法的不确定性。由于受气候、社会发展以及人类活动的综合影响,水资源序列的变化更多地表现出非平稳、非线性等特点。因此,本章主要针对非线性趋势成分影响下7种IHFCM方法的不确定性进行研究。由于非线性趋势成分多种多样,受时间条件的限制,本章选择了指数趋势成分作为研究对象,并给出了统计试验关于非线性趋势成分影响下7种IHFCM方法的不确定性 & 择优结论。最后同样以三级区永定河册田水库以上的非一致性水资源序列为例,对其进行变化环境下的水资源评价,并对两种评价结果进行比较和选择。

第8章跳跃成分影响下IHFCM方法的不确定性。本章主要是对跳跃成分影响下,7种IHFCM方法不确定性出现的新特点进行探讨。同样采用统计试验的方法,提出采用标准跳跃系数(SJC)分析跳跃成分影响下7种IHFCM方法的不确定度 & 优劣程度。结合所得到的研究成果,以发生了跳跃弱变异的三级区吉木乃诸小河水资源序列为实例,对其变化环境下水资源评价结果的不确定度进行研究。

第9章结论及展望。主要对本书的研究结论进行归纳,提出本书中的不足以及对研究内容进行展望。

本书的技术路线图如图1.1所示。

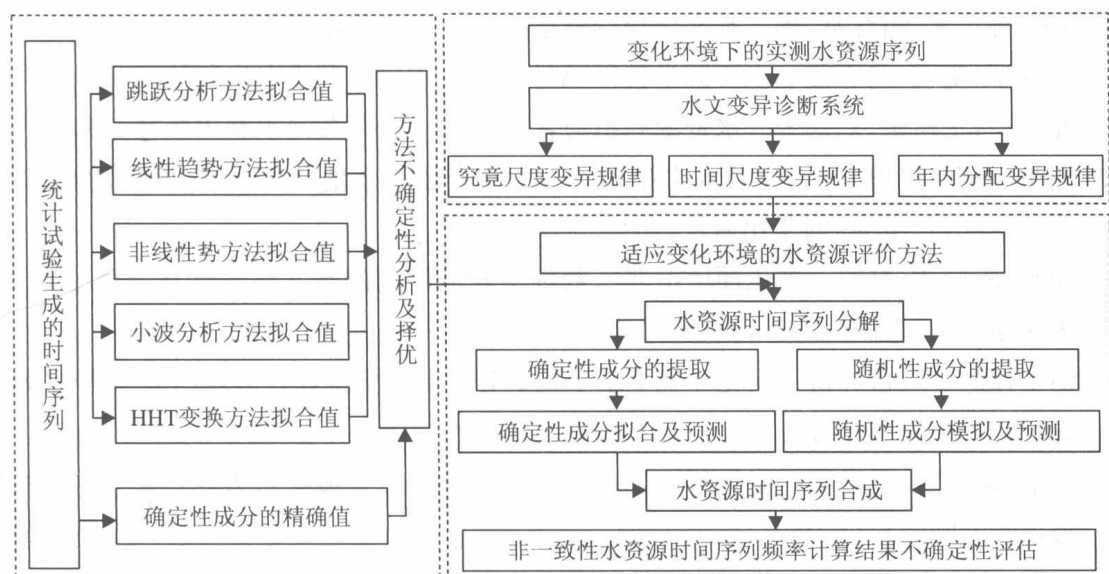


图 1.1 本书的技术路线图

1.4 小 结

本章主要介绍了变化环境下区域水资源评价问题的研究背景及研究意义,在对国内外研究进展进行综述的基础上,指出当前研究所存在的问题,提出作者的研究思路,并介绍本书的主要内容。

参考文献

- [1] 谢平,陈广才,雷红富,等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 王浩,王建华,秦大庸,等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究[J]. 地球科学进展,2002,17(1):12-17.
- [3] 陈家琦,钱正英. 关于水资源评价和人均水资源量指标的一些问题[J]. 中国水利,2003(11):42-44.
- [4] 梅亚东. 水资源评价与管理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
- [5] 陈家琦,王浩,杨小柳. 水资源学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程水文计算规范(SL 278-2002)[S]. 水利部长江水利委员会水文局,2002.
- [7] 李艳. 水文特征变异的尺度研究——理论、指标体系和评价方法[D]. 广州:中山大学出版社,2007.
- [8] 黑马. 科学家:人类已经改变了 47% 的地球表面[N]. 北京青年报,2002. 8. 29.

- [9] 谢平,陈广才,雷红富,等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报,2010(1):85-91.
- [10] 左其亭,窦明,马军霞. 水资源学教程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [11] 左其亭,王树谦,刘廷玺. 水资源利用与管理[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [12] 谢平,窦明,朱勇,等. 流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [13] 谢平,陈广才,夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(6):6-9.
- [14] 谢平,陈广才,雷红富. 变化环境下基于跳跃分析的水资源评价方法[J]. 干旱区地理,2008,31(4):588-593.
- [15] 谢平,陈广才,雷红富. 变化环境下基于趋势分析的水资源评价方法[J]. 水利发电学报,2009,28(2):14-19.
- [16] 谢平,陈广才,陈丽. 变化环境下基于降雨径流关系的水资源评价方法[J]. 资源科学,2009,31(1):69-74.
- [17] Xiong L H,Guo S L. A two-parameter monthly water balance model and its application[J]. Journal of Hydrology. 1999,216:111-123.
- [18] 王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报,2006,37(12):1496-1502.
- [19] 夏军. 现代水文学的发展与水文复杂性问题的研究[C]. 第二届中国水问题论坛学术研讨会论文集——水问题复杂性与不确定性研究与进展. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [20] Vörösmarty C,Lettenmaier D,Leveque C,et al. Humans Transforming the Global Water System[R]. Eos,Transactions,American Geophysical Union,2004.
- [21] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[R]. 2006.
- [22] Ippc. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007-The Scientific Basic. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. 2007.
- [23] 国家自然科学基金委员会地球科学部. 地球科学“十一五”发展战略[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [24] 陈家琦. 水安全保障问题浅议[J]. 自然资源学报,2002,17(3):276-279.
- [25] 陈广才. 变化环境下非一致性水文频率计算方法及应用[D]. 武汉:武汉大学出版社,2009.
- [26] 王志民,任宪韶,郭宏宇. 面向 21 世纪的海河水利[M]. 天津:天津科学技术出版社,2000.

2 水文变异诊断系统

长久以来,人们都是基于物理成因一致且观测样本时间较长的序列来认识水文规律的。然而,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高强度人类活动和流域下垫面的变化,使得流域水文循环和水资源形成过程的物理成因发生了变化。对于物理成因发生变化的水文时间序列,其统计规律不再满足一致性的要求。为了识别这种非一致性水文序列,常对其进行趋势或跳跃的变异识别与检验。目前关于趋势和跳跃成分的变异识别与检验方法有多种,但这些方法往往在形式上偏重于趋势或跳跃,在性质上侧重于均值或方差等某个统计参数,且计算精度不一,检验结果并不一致;更重要的是缺乏系统性,不能从整体上判断序列究竟是趋势变异,还是跳跃变异,即使判断是跳跃变异也不能给出唯一的跳跃点。为此,2009年谢平等提出了水文变异诊断系统^[1],以提高水文序列变异识别与检验的精度和可靠性,它是解决变化环境下区域水资源变异问题的主要工具之一。

2.1 水文变异的定义

水文序列是一定时期内气候条件、自然地理条件以及人类活动等综合作用的产物,资料本身就反映了这些因素对其影响的程度或造成资料发生变化的原因。水文现象的变化无论多么复杂,水文序列总可以分解成两种成分,即确定性成分和随机性成分。确定性成分具有一定的物理概念,包括周期、趋势和跳跃成分;随机成分由不规则的振荡和随机因素造成,不能严格地从物理上阐明,只能用随机序列理论来研究。一般来说,水文序列的随机性成分主要受气候、地质等因素的影响,其变化规律需要一个漫长的地质年代才能改变,因此水文序列中随机性成分的统计规律是相对一致的;而水文序列的确定性成分主要受人类活动的影响,但并不排除气候因素(如气候转型期)和下垫面自然因素(如火山爆发、地震等)的影响,其变化规律可以在较短的工程年代里发生缓慢的渐变或剧烈的突变,因此水文序列中确定性成分的变化规律往往是非一致的^[2]。如果水文序列与周期、趋势和跳跃成分无关,则它是平稳的时间序列,表明整个水文序列具有相同的物理成因,其统计规律满足一致性的独立同分布要求,即分布形式(如P-Ⅲ型)和分布参数(如均值、变差系数和偏态系数等)在整个时间尺度内均保持不变,这种情况下水文序列只在均值上下随机波动或变化,而无统计规律的差