

区域水资源

QYU SHUIZIYUAN
YUANLI YU FANGFA

原理与方法

刘美南 陈晓宏 编著
陈俊合 林少礼

福建省地图出版社

75
TV211.1
L73

区域水资源原理与方法

刘美南 陈晓宏 陈俊合 林少礼 编著



福建省地图出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

区域水资源原理与方法/刘美南等编著.

—福州:福建省地图出版社,2001.8

ISBN 7-80516-565-3

I. 区…

II. 刘…

III. 城市用水—水资源—研究

IV. TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 051839 号

区域水资源原理与方法

作 者 / 刘美南 陈晓宏 陈俊合 林少礼

责任编辑 / 王秀斌 杨祥麟

封面设计 / 张素霞

出版发行 / 福建省地图出版社

地 址 / 福州市华林路 205 号

印 刷 / 福建省地图出版社

开 本 / 787×1092 毫米/16 开本

字 数 / 398 千字

印 张 / 17 印张

印 数 / 1—1000 册

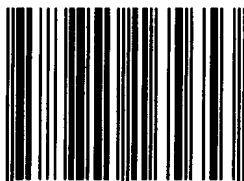
版 别 / 2001 年 8 月第 1 版

版 次 / 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 7-80516-565-3/K·537

定 价 / 38.00 元

ISBN 7-80516-565-3



9 787805 165653 >

前 言

水资源短缺和环境恶化是人类社会发展面临的最严峻问题之一。大陆上的水分状况虽有明显的年际变化及长期波动,但多年来平均值的变幅十分有限。而人类社会从原始生活方式到工业化时代直至目前正在形成中的信息化时代,人口剧烈增加,社会发展和变革迅速,导致自然环境系统的扭曲及水资源供需矛盾日益突出。

“水可载舟,也可覆舟”。洪涝灾害也是人类社会发展的巨大威胁。特别是气候变化和人类活动导致下垫面条件的改变,使得一些地区水文特征发生变异,进一步增加人们防灾减灾的难度。同时,随着社会经济的发展,城市化规模的加大,人类对洪涝灾害的承受能力日趋脆弱。

水环境污染不仅直接造成人类生存环境的恶化并影响人的健康,而且导致水质性缺水,进一步加剧人类社会发展过程中的水资源供需矛盾。“保护环境就是保护我们人类自己”已为越来越多的人所认识。控制污染要从源头做起,而难点在于面污染源分布广、成分复杂,其控制、收集、处理均不容易。

总体而言,水的问题可归结为“水多——洪涝”、“水少——缺水”和“水脏——污染”的问题。当今和未来人类社会所面临的水文水资源问题不再仅仅局限于水利学科的范畴,而是与人口及人文社会、以城市化进程为主的一切人类活动、自然生态环境以及全球气候的变化紧密相关。人类必须正视面临的水危机,采取紧急而有效的行动促使我们赖以生存的水资源在安全、优质、保障的前提下可持续利用。

本书希望在“水少”、“水多”及“水脏”三个方面为读者提供一些理论和方法基础。书中尽可能地介绍了作者近期完成的一些实际工作成果,并引用了一些研究者出版和发表的精辟论著,以使该书内容具有系统性、生动性、实用性、前瞻性。我们对引用的有关论著的作者表示深切的感谢!

本书由刘美南、陈晓宏、陈俊合、林少礼共同编写,陈俊合编写第八章,其余章节由刘美南、陈晓宏和林少礼编写,全书由陈晓宏统稿。本书为中山大学水资源与环境专业本科生秋季“城市水资源评价规划与管理”课程教学用书,由于编写时间仓促,加之编著者水平有限,缺陷和错漏在所难免,敬请读者批评指正。

陈晓宏

2001年4月于中山大学(广州)

目 录

第一章 绪论	1
第二章 区域水资源资料处理	6
§2-1 基本资料的收集与分析	6
§2-2 计算分析代表站的选择	7
§2-3 水文特征时间变异性识别	8
§2-4 径流还原计算	12
§2-5 资料的插补延长及代表性分析	18
第三章 区域水资源量分析计算	22
§3-1 降雨量和蒸发量计算	22
§3-2 地表水资源量计算	33
§3-3 地下水资源量计算	51
§3-4 水资源总量计算与水量平衡分析	81
§3-5 城市水资源量计算实例	90
第四章 区域水资源评价	92
§4-1 概述	92
§4-2 地表水资源可利用量和可供水量	93
§4-3 水资源可利用量计算	94
§4-4 可供水量的计算	96
§4-5 地下水可开采资源量	102
§4-6 入境与出境水量的计算	107
§4-7 水资源供需分析	109
§4-8 区域水资源量模糊评价实例	123
第五章 区域水源水质分析评价	128
§5-1 地表水水质评价	128
§5-2 地下水水质评价	133
§5-3 应用模糊数学法进行区域水质综合评价	135
第六章 水资源合理调配及其决策支持系统	141
§6-1 河川径流调节	141
§6-2 地表水和地下水的联合应用	143
§6-3 灌溉用水优化调配	153

§6-4 不同部门用水合理分配·····	157
§6-5 东江水资源优化配置·····	160
§6-6 东江水资源决策支持系统·····	169
第七章 城市水文气候效应·····	184
§7-1 城市气候概述·····	184
§7-2 城市热状况·····	186
§7-3 城市化对降雨的影响·····	189
第八章 城市雨洪计算·····	194
§8-1 城市设计暴雨的计算·····	194
§8-2 设计暴雨过程的推求·····	198
§8-3 城市流域的产流计算·····	205
§8-4 城市雨洪过程汇流计算·····	208
第九章 城市面污染分析计算·····	222
§9-1 面源污染的来源和种类·····	224
§9-2 地表污染物的集聚、冲洗和输送·····	225
§9-3 城市径流污染物负荷量的计算方法·····	227
第十章 水资源与环境信息系统简介·····	236
§10-1 流域及其水系识别的 DEM·····	237
§10-2 水文模拟 GIS 处理模块简介·····	239
§10-3 典型的 GIS 水文模拟系统介绍·····	241
§10-4 洪泛区模拟及防洪决策支持系统·····	244
§10-5 用 GIS 进行供水管网优化设计·····	246
§10-6 GIS 在水资源及水环境评价规划管理中的应用·····	251
§10-7 其它应用·····	258

第一章 绪 论

水资源短缺和环境恶化同是人类生存与发展面临的严峻问题。大陆上的水分状况虽有明显的年际变化及长期波动,但多年来平均值的变幅十分有限。而人类社会从原始生活方式到工业化时代直至目前正在形成中的信息化时代,人口剧烈增加,社会发展和变革迅速,导致自然环境系统的扭曲及水资源供需矛盾日益突出。我国北方地区长期缺水,黄河断流十分频繁,长江流域洪水范围广、灾情重;南方特别是华南地区,直观上雨水丰沛,但降水的时空分布极不均匀。丰水期受台风暴潮和洪水威胁,而枯水期则干旱缺水,沿海地区还受咸潮的影响。特别是珠江三角洲等发达地区,经济发展迅速,城市化规模越来越大,水质性缺水日益严重。合理解决城市水资源问题,是城市社会经济可持续发展的关键因素之一。

一、城市化与水资源

城市化可广义地定义为都市影响向外扩张的过程。这一过程实际上在人类历史上已存在 6000 多年了,自 19 世纪以来,其步伐已大踏步向市场迈进。早期的都市居住规模很小,而且其功能主要是作为一个服务于周边乡村的集市;同时,都市则依赖于乡村的粮食及其它生活供应。由于农民白天需要将粮食运往都市销售,晚上则返回其住所,每个城镇的影响半径是极其有限的。

世界范围的都市膨胀始于 19 世纪的工业革命。随着制造业的发展,城镇规模大大增加以容纳大量的劳动力,而农业的机械化也使少量的农民生产更多的粮食成为可能。19 世纪下半叶,火车及机动船的出现使交通大大改善,并在都市对乡村的粮食需求中发挥作用,这样也进一步增加了都市对乡村依赖的比重。

交通运输系统的改善同时引起了居住习惯的变化,从而导致街道及房屋建筑与都市人口成比例的增長。都市工人再也不需要全部居住于工作场所了,而是可以居住于远离工厂的宿舍区,这种一个工人占据二个空间单元的社区化又影响着郊区发展的规模。当大多数工人都依赖于公共交通以后,都市就逐渐形成了围绕交通干道呈线性发展的景状。在 20 世纪上半叶,这种对道路交通的依赖性的增加导致了都市的进一步扩散。城市向多中心化发展。二战后,英国试图通过立法阻止这种城市的无限扩张,在伦敦周围建设的环绕绿色植物带就是一个围栏的例子。但是,在这一围栏外的卫星城镇的发展又迅速崛起,如美国波士顿~纽约的城市带,日本的东京~大阪~神户城市带,我国广州至深圳的城镇带等。

尽管城镇体系的不断向外扩张,但许多国家特别是发展中国家城市区域所占土地面积仍小于总土地面积的 6%,显示了城市社区的高度集中性。而城市活动的这种高度集中性强化了城市对各类资源需求的竞争。其中最重要的无疑是水资源。

从早期的人类部落到现代的国际化大都市,大多紧靠或邻近于河流、湖泊或其它水体,表明水对于人类的生存和发展的不可替代性。水不仅是生活饮用所必不可少的,而且也是工业生产的决定性因素。但水有利也有害,由于降水时空分布不均及水资源的大量开发利用,都市洪水、都市水污染、都市排水、侵蚀与泥沙等都可能造成城市发展和居民生活的极大危害。

二、城市化发展带来的城市水文水资源问题

都市化使得原有的下垫面条件大大改变；同时，人口高度集中、建筑物密度加大，导致当地产汇流特性以及局地气候的变化，主要造成城市水资源短缺、都市洪涝及水环境污染等 3 方面的水文水资源问题，都市化的水文水资源效应如图 1-1。

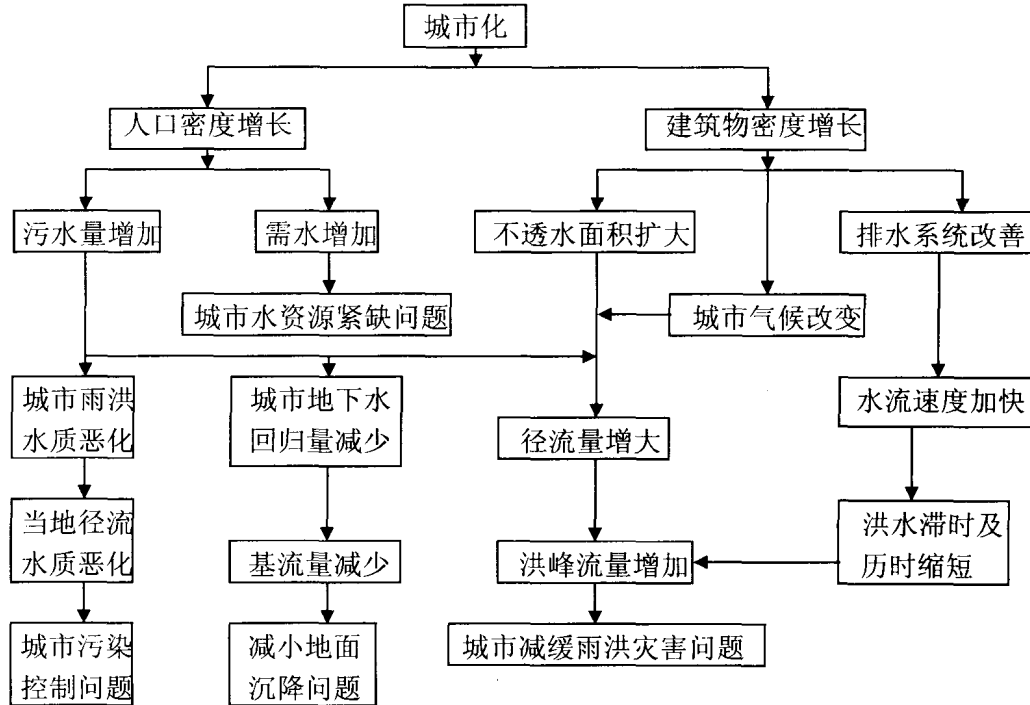


图 1-1 都市化的水文水资源效应

三、城市水资源的基本概念

1. 水资源定义

水作为资源来看，必须有经济价值和使用价值，包含质和量双重含义。目前有关水资源的定义有不同的看法，有人认为海水不能算做水资源（因为目前海水淡化十分昂贵），但有人认为水深、水体都是水资源（如航运、码头等离不开这种资源）。这里作者更倾向于一个广义的水资源概念，即水的一切有用功能都是资源，如可提供饮用、灌溉、生态、环境、冷却、市政卫生、发电、纳污、航运、旅游、压咸、冲碱及所有工业使用的水都被认为是水资源。水资源可定义为“地球上目前和将来人类可直接或间接利用的水体和水量，它应包括如下几种要素：水量、水质、水深、体积及储藏等。水资源是自然资源的一个重要组成部分，是人类生产和生活中不可缺少的一种资源”。

城市水资源则是可满足城市各种需要的水量。

2. 水资源的特点

水是自然界中一种独特的资源，它具有以下特点。

①再生性——可重复使用；②储存形式和运动过程受自然地理和人类活动的影响；

③年内变化的周期性，不重复性；④不可替代性；⑤不同水源成分相互转化性。

四、城市水资源的研究内容和目的

1. 研究内容

- (1) 都市化对水文水资源及水环境的影响；
- (2) 与城市发展相应的水资源需求动态预测；
- (3) 城市水资源供需平衡计算及城市水资源评价；
- (4) 城市雨洪管理；
- (5) 城市防洪排涝；
- (6) 城市水污染；
- (7) 城市水资源规划、管理及保护。

2. 研究目的

城市水资源研究的目的，是通过对城市水资源的形成及变化机理的研究，从科学、经济、社会、生态环境等各种因素出发提出合理开发利用水资源的方案，为制定城市总体规划、指导工农业生产、促进社会经济可持续发展提供决策依据。

3. 城市水资源系统结构

城市水资源系统由于受到都市化等等人为因素的影响，而较天然水资源系统显得更为复杂，如存在储水、供水、配水、及排水等诸环节，就水质而言，天然河流中只需一次性分析水的化学成分；而在城市中，水质问题显现出多环节性，如供水水质、污水前后水质、排水水质等，都是城市水环境的重要组成部分。

城市水资源系统如图 1-2。

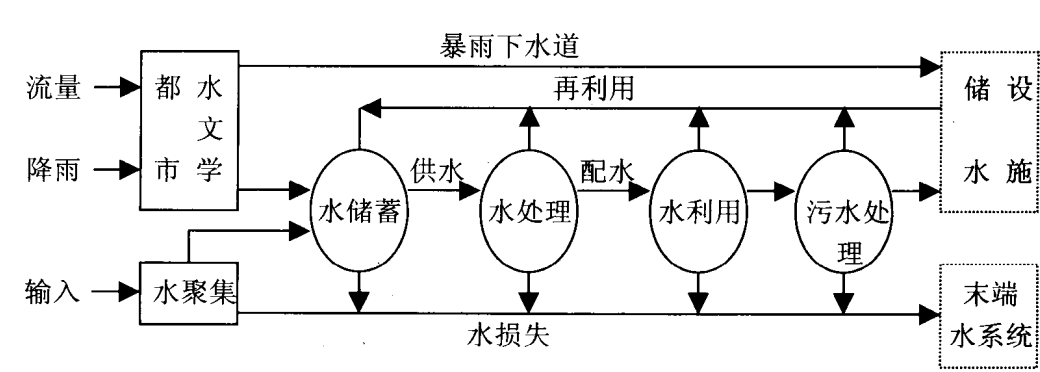


图 1-2 城市水资源系统

五、城市水资源研究概况与展望

城市水资源的研究就是针对城市发展过程中的水资源开发利用的问题，它包括防洪、兴利、生态、环境等各个方面，是一个跨学科的综合性研究课题。

目前，随着人类社会的发展，城市数量和规模的扩张，城市水资源问题日益突出，已经受到广泛关注。一些研究者在城市水文、水资源及城市生态环境等方面进行了大量的研究，提出了许多成果，研究内容大致包括以下方面：城市骤发暴雨洪水与城市防洪排涝；

城市给水排水及其系统管理；城市水质与水量分析；与城市规划因素有关的城市水资源问题；城市水源的管理、监测与保护；城市污水处理；城市生态环境；城市水资源的法规与水经济政策；城市供水与水资源的开源节流等。

城市水资源的研究与开发利用过程随城市的发展阶段和水平、以及人的认识实践能力而变化。中华人民共和国建国初期，由于城市发展和工农业生产水平都很低，供水及环境矛盾并不十分突出；但鉴于历史上曾发生的严重洪涝灾害，而将城市水资源的开发利用重点放在防洪除涝方面。随着城市建设和工业的不断发展，人民生活水平的提高，环境污染不断加剧，水资源日益短缺，成为制约城市与经济持续发展的主要因素，城市水资源的研究已由开发为主转为“节水”、“污水资源化”、“海水淡化”、“跨流域调水”，以及“城市水环境控制及整治”等研究阶段；同时，由都市化及其他人类活动的影响，城市洪水威胁也越来越大，“城市防洪排涝”也是近 20 年来的主要研究课题之一。

1987 年世界环境与发展委员会提出“可持续性发展”的概念，随后“可持续发展”问题引起世界各国广泛关注并逐步开始制定各自的可持续发展战略与对策。可持续概念下的社会发展有 3 个基本要求：（1）发展不允许破坏地球上的基本生命支撑系统即空气、水、土壤和生态系统；（2）发展必须在经济上可持续，以期从地球自然资源中不断地获得食物和生态必要条件与环境；（3）要求建立在国际间各地区直至家庭单元等各种尺度上的可持续社会系统，以确保可持续生命支持系统的合理配置。由于水是支撑社会经济和自然生态系统不可替代的重要资源和关键因素，水资源的开发利用和管理都应满足可持续发展的要求。

1996 年联合国教科文组织国际水文计划工作组提出了“可持续水资源管理”的问题，即“支撑从现在到未来社会及其福利而不破坏它们赖以生存的水文循环及生态系统完整性的水的管理与使用”。1998 年在我国武汉召开了《'98 国际水资源量与质可持续管理问题研讨会》，会议主题是水资源可持续开发利用中的障碍及途径；1996 年在日本京都召开的“国际水资源及环境研究·面向 21 世纪新的挑战”会议上，提出了 4 个基本准则：（1）可持续发展；（2）生态质量；（3）考虑宏观尺度系统的影响；（4）考虑变化了的自然和社会系统。

可持续性水问题是当今世界水问题研究的热点之一，也是我国可持续发展《21 世纪议程》中的重要内容。但是目前可持续发展中的水问题研究大多还停留在概念的提法和定性分析上，缺乏量化和针对新的可持续水的管理科学准则的规范技术和工具，不少问题的研究仍是“头痛医头，脚痛医脚”，研究的范围窄、尺度小、学科领域单一，未能从根源上、宏观范围和多因素综合性方面解决问题。

由于降水的时空分布不均，洪水问题是水资源开发利用中的极大障碍。我国 1998 年长江、松花江流域大洪水更加警示我们，水的问题对我国社会经济持续发展的影响之巨大，水灾的形成不单是水自身的量变结果。追根溯源，水旱灾害的形成与人类活动影响及环境生态系统破坏紧密相关，而这也是制约我国社会经济可持续发展的最大障碍之一。

随着气候的变化及人类活动影响，降雨时空变异性加大；海平面上升，潮水上溯；生态环境破坏，下垫面持水能力减弱，水土流失加重。这些都导致水资源开发利用的困难。从社会经济可持续发展出发，水资源合理开发利用及其开发过程中的环境问题仍是我们需要研究的重点。近期和将来可能的城市水资源相关研究课题主要有：

- 水资源系统中的水分循环和污染物迁移变化机理;
- 从宏观和量化的角度揭示多年来城市化进程与水资源及环境变化的相互作用规律和机制;
- 人类活动、气候变化、海平面上升等多因素作用下水资源（干旱、洪水）的时空变异性识别;
- 城市化导致生态系统变化对局地气候的影响并由此导致降雨径流变化的基本机理;
- 以生态系统变化为输入的大尺度宏观城市防洪减灾模式;
- 城市水资源与旱涝风险识别及其保险体系的建立;
- 可持续发展目标下城市建构对水资源与环境的适应模式;
- 与社会经济可持续发展相适应的城市灾害减缓措施;
- 各种水体（河流、水库湖泊、河口海洋）水资源开发过程中的环境效应;
- 环境变异下的城市水资源开发利用和保护;
- 可持续发展目标下城市水资源开发过程中的环境影响纾缓措施;
- 城市水资源与环境管理决策信息系统等。

第二章 区域水资源资料处理

区域水资源开发、利用、管理、评价及规划的科学性及合理性依赖于有关资料的详实程度以及资料的一致性、代表性和可靠性。水资源相关资料的收集处理是保证水资源分析计算精度的关键。

第一节 基本资料的收集与分析

一、资料的收集

区域水资源计算中需要收集研究区域及其水源流域有关资料, 主要包括:

- 1) 水源流域和邻近区域有关水文、气象资料。包括: 降水、蒸发、径流、冰情、水温、泥沙、气温、风况、日照、云量等资料。
- 2) 水源流域的流域特性资料。包括流域面积、地形、地貌、土壤、植被以及河流水系、湖泊、沼泽特性等资料。沿海河流还应有咸淡水分界线资料。
- 3) 水源流域内水利工程概况。包括历年各级水库的特征库容、特征水位、水位库容曲线、水电装机容量、不同功能供水量、灌溉面积、供水人口、工业供水产值, 历年各类引、提水工程的引、提水量及其灌溉面积, 供水人口、工业供水产值。并要收集城乡居民用水定额、工业单位产值用水量、灌溉定额、渠系水有效利用系数、田间回归系数等资料。
- 4) 水源流域水文地质特性资料。包括岩性分布, 地下水平均埋深及其补给、径流、排泄特性, 地下水开采情况, 地下水动态观测资料与分析成果。
- 5) 区域社会经济资料。包括区域发展规划、社会经济发展规划, 区域居民人口、产业结构、国民生产总值、三大产业生产总值、建城区面积, 耕地、林地、草牧场、荒地的面积与分布特点, 总人口、农业人口、经济增长率、人口增长率等。
- 6) 区域及其水源流域的水质监测资料。包括区域及其水源流域的污染控制规划, 污水处理设施, 区域内主要城镇和工矿企业的排污量、排放毒物、排放途径及影响范围, 区域内水系各水体水环境质量现状, 近年来因水质污染起的人畜中毒、工农业减产、水生物死亡等事故资料。
- 7) 历史上发生的水、旱灾害年份及成灾面积, 水利设施的供水、防洪、排涝、抗旱能力等资料。
- 8) 有关水文、水资源分析计算成果。

二、资料的合理性分析

通常社会经济资料可从政府部门有关统计年鉴上查得或实际调查收集, 可靠性及准确性都较好。但水文气象资料往往比较难获取或不易完全获得, 且受观测手段和设备经费等限制, 存在一定的观测误差, 在收集这种资料的同时应对资料的合理性进行初步分析检查, 一般可从以下几方面进行:

1) 历年降水量资料要着重分析年、月降水量的特大、特小值及其成因。对区域内个别站降水量偏大或偏小的资料要认真分析,既要注意降水量在地区分布上的规律性,又要考虑局部暴雨造成的特殊性,不能轻易舍弃实测资料。降水量资料的审查重点是 1949 年以前和委托雨量站资料。

2) 年径流资料要注意审查各站集水面积变动情况及变动原因,分清是断面迁移还是计量错误,按准确的面积核对后再计算逐年径流量。

当监测断面迁移或更改站名时,一般要采用最新站名。但当监测断面迁移较远时(如集水面积相差 5%以上),则不能简单地当作一个站处理。

对偏大、偏小的年径流资料,应当通过上下游或相邻流域径流过程线的对比、水量平衡分析、极值的对比、年降水与年径流关系的对比等各种途径分析其合理性。

3) 水面蒸发观测资料既受气象因素影响,又受观测场周围的地形、地物、蒸发器结构、安装形式和材料等因素的影响。在搜集资料时,要做认真细致的考证工作(如哪年开始采用 20cm 口径蒸发器或 E601 型蒸发器等),对有关情况应予说明,以便在分析统计和绘制等值线图时考虑资料的代表性与一致性。

4) 泥沙资料应重点核对输沙量的特大值、特小值,对输沙量较大的年份,要从上下游沙量平衡、年径流量与年输沙量的关系上检查其合理性。对明显偏大或偏小的数据,要通过区域内不同时期植被和降雨强度的变化情况,分析判断其偏大、偏小的原因,并决定对资料的取舍与修正。

5) 对所搜集的水质监测资料,当出现特大值、特小值等突出点据时,应在分析其可靠程度后再参加计算和评价。对水质监测资料的取样次数、取样时间则须分析是否有代表性。

6) 对以往编印的水文图集、水文特征值统计以及有关分析计算结论等成果应当进行必要的核对,如那些以往虽然做过合理性检查,但注明资料仅供参考者,则不能直接引用。对插补延长幅度较大的资料一般也只能作为参考。

第二节 计算分析代表站的选择

水源流域降雨径流分析计算需要选择恰当的分析代表站的资料进行,选择原则是:

1) 雨量站。应选择资料质量好、实测年限较长、面上分布均匀和不同高程的测站作为代表站。站网密度较大的区域,要优先选择实测年限较长并有代表性的测站,实测年限较短的站点只能作为补充或参考。边远地区缺少雨量站,具有较短观测资料的测站也可选为参考站。

2) 流量站。选择中等流域面积($300 \sim 5000 \text{ km}^2$)、资料质量好、实测年限较长的测站作为主要分析代表站。为了补充站点不足,也可选择区域内小面积站或资料系列较短的站,必要时尚可利用上、下游站径流量之差作为区间站,但它们只能作分析计算的参考。

当计算区域内无流量站、必须借用区域外的实测径流资料时,应当考虑流域自然地理

条件是否接近,若二者差别过大,则不能随意移用。

3) 蒸发站与泥沙站。尽量选取面上分布均匀、资料质量较好的测站作为分析代表站。但是,蒸发站及泥沙站站点一般较少,资料系列不长,故资料系列较短的蒸发站也要充分加以利用。选择泥沙站时,一般应选中等流域面积的测站,在站点比较稀少的地区,面积较大的站也可适当选用。

4) 当区域内基本雨量站、径流站比较少时,应充分选用专用站或汛期雨量站、流量站资料,但必须进行必要的精度考证、插补延长,并要充分论证其合理性。

第三节 水文特征时间变异性识别

一、水文特征时间变异性及其影响

水文特征如水位和流量是一种典型的包含确定成分和随机成分的变量,具有明显的随机变化性质。随着人类活动的加剧,气候和下垫面条件的改变,水文要素在时空上的非随机变化越来越突出,水文序列“暂态成分”的因素影响增大。上下游河道在同一频率的流量下,水位频率却不相同;一些河段在相同的上游来水情况下,水位明显高于或低于往年;同一断面位置同一水位值,过去出现的几率与现在出现的几率可能大不相同。如徐海亮和夏军等^①发现珠江三角洲顺德水道上下游洪峰水位频率极不对应;何以昭等^②在研制西江水文预报方案时也发现,近几年来西江的梧州—高要河段水文情势发生了明显变化,致使高要站洪峰水位按照原有方案预报出现较大误差,对指挥抗洪十分不利。1998年长江流域大洪水(流量并不大)造成不少河段超历史最高水位,而且象这样“小雨量,高水位”和“小流量,高水位”的现象在黄河、淮河、汾河、渭河等均有出现。’98长江大水究竟多大,水文学家仍有不同看法,主要原因是’98洪水的基本特征发生了较大变化。这种变化除纯随机变化外,“暂态成分”的有偏变化比重较大,是一种相对一般纯随机变化的异化。

“水文特征时间变异性”可定义为水文要素除去纯随机变化以外,受诸如人类活动或气候等单因素影响或在多因素综合作用下在时间上出现的稳定而异常的变化。

目前,水文预报仍是防洪减灾的重要非工程措施,可供水量计算是水资源开发利用的重要内容。水文特征数据的可靠性是保证水文预报和水资源分析计算精度的关键。而水文特征时间变异的直接后果是水文特征的时间不对应及其频率的不一致性,从而导致水文分析计算的困难或计算结果的误差、防洪决策和判断失误并影响水资源合理调配及水利工程的设计施工。水文时间变异性的研究将为洪水分析计算、防洪决策、水资源开发利用及有关工程设计施工提供可靠的基础资料和依据。

水文特征变化的影响因素很多,既有气候异常和地质地貌等自然因素的影响,又有

① 夏军等,变化环境下顺德河网水文频率分析与防洪对策的研究(摘要),项目报告,1998年。

② 何以昭、韩天槐、潘剑中。西江梧州—高要水面线变化和高要站洪峰水位预报方案的探讨,研究报告,1997年。

人为因素的作用,而人为因素又包括工程技术问题和生态环境的破坏后果。这些因素是共同影响的,不能简单断定其中某一个因素起决定作用。气候变化将改变水文循环现状,引起水文要素的变化,其研究已成为世界地球科学界的迫切任务之一,并取得大量成果。

近十多年来,国内频繁发生大洪水;同时,黄河断流十分频繁。一些水文工作者在洪水预报、防洪决策、水资源调配中逐渐发现水文特征出现了系统的变异,但对这种变异性的研究缺乏理论上的描述,对变异性的识别及其影响分析也不成熟。

二、水文特征时间变异性标度与识别

水文要素时间变异性越大,表明该要素在时间上的不一致性越显著。对水文要素时间变异程度的度量和识别是水文变异性研究的基本问题。根据前面的定义,水文特征时间变异性是相对其长系列纯随机变化而言的。因此,这里直接采用水文特征变化时间序列来研究其时间变异性的标度。目前在水文要素变化的趋势分析方面主要有 Kendall 秩次相关检验、Spearman 秩次相关检验、线性趋势回归检验以及滑动平均检验等方法,这些方法主要用于整个序列的总体趋势分析,而不能直接判断序列中的某一个阶段发生了变异。现有的几种判别序列中跳跃成分的方法中,如时序累计值相关曲线法、Lee 和 Heghinan 法、有序聚类分析法等,第一种方法需要有无暂态成分的参证序列,第二、三种方法对于跳跃点出现在序列的两端时的可靠性都较差。对水文特征序列本节给出一种洪水时间序列变异性的识别方法及其变异性标度。

为了识别水文时间序列在某一个阶段发生了变异,首先应寻找序列变异前后两个阶段的分割点,然后通过分析分割点两边序列的统计特征,从而识别出该水文序列是否在某一阶段发生了变异。

1. 水文时间序列变异性可能分割点识别

设 A^s 是由长度为 $S(S \neq 0)$ 的水文特征时间序列的集合, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\} \in A^s$, 为一个等时间距采样序列, $J = \{1, 2, \dots, S\}$ 为序列的指标集。则 $x_i^{(1)} = \sum_{k=1}^i x_k$, $i \in J$, 为水文时间序列的累加序列(在 i 时刻以前); $y_i = x_1^{(1)} + (x_s^{(1)} - x_1^{(1)})(i-1)/(S-1)$, $i \in J$, 为水文累加序列起讫点之间的直线段。若存在 t 使得 $\Delta y_t = \max\{\text{abs}(x_i^{(1)} - y_i)\}$, $i, t \in J$, 成立, 则时刻 t 即为水文时间序列变异性的可能分割点。对于存在多个可能分割点的情况, 可通过分阶段比较 t 邻近两侧的 $|x_i^{(1)} - y_i|$ 值大小, 对应的最大值时刻即为该阶段可能分割点。

可能分割点并非一定就是时间序列变异性的分割点, 因为序列是否存在变异性还要由变异性的标度来确定。当且仅当可能分割点两侧序列的统计特征值差异大于某一临界值(标度)时, 可能分割点才是真正的变异性分割点, 此时, 可以识别其两侧的时间序列发生了变异。

2. 水文时间序列变异性识别

对于上述水文特征时间序列的集合 A^s 、某个等时间距采样序列 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ $\in A^s$ 以及序列的指标集 $J=\{1, 2, \dots, S\}$ 。已经识别得序列变异性可能分割点 t ，则 $\bar{x}_1 = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t x_k$ ， $\bar{x}_2 = \frac{1}{S-t} \sum_{k=t+1}^S x_k$ ，分别为水文特征时间序列在可能分割点 t 两侧的序列均值。水文时间序列的最大变幅为 V ，若存在 $|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|/V \geq \varepsilon$ 对于一定量级的正常数 ε 成立，则可认为 t 即为序列变异性分割点，原水文特征时间序列在分割点 t 以后发生了时间变异。这里 ε 称为水文特征序列的时间变异性标度。

对于存在多个可能分割点的情况，可依照上述方法逐个进行可能分割点两侧的阶段序列均值比较，从而由标度 ε 识别序列的各个变异性分割点和各个阶段序列的变异性。

三、实例研究——珠江三角洲容奇站月均水位时间变异性分析

珠江三角洲网河区通过 20 世纪五六十年代的大规模联围筑闸后，强干控支，水量进一步集中；80 年代以来，随着经济发展，人类活动过于频繁，造成珠江三角洲区域地理和水文环境的显著改变，从而使本地区河网水文特征也发生了明显的变化。特别是 90 年代以来，珠江三角洲发生了“94.6”、“94.7”、“97.7”和“98.6”四场大水，洪潮水位变异趋势加大。一些河段如顺德水道等在流量变化不大的情况下水位异常升高；而另一些河段如高要、三水等则因人工挖沙等活动，造成河床下切，过水断面加大，近年来水位明显降低，造成取水困难。

为了说明本节提出的方法的有效性，这里根据珠江三角洲容奇站丰（7 月）、平（10 月）、枯水期（3 月）1960 年至 1997 年共 38 年逐月月均水位变化资料，分析其历年来水位的时间变异性。

首先，计算容奇站丰、平、枯三个水期逐月月均水位累积序列，再计算该累加序列与其起讫点之间的直线段之间的差值序列并取绝对值，如图 2-1 至图 2-3；然后识别水位时间序列变异性可能分割点，枯水期（3 月）有 1982 年一个可能变异性分割点、丰水期（7 月）有 1991 年一个可能变异性分割点、平水期（10 月）有 1969 年和 1992 年两个可能变异性分割点。各可能分割点两侧原水位序列均值计算结果如表 2-1。同时，采用 Spearman 秩相关系数法对各个水期月均水位序列进行趋势分析，计算的秩相关系数也列于表 2-1 中。

表 2-1 容奇站月均水位变异性分析

季节	枯水期		丰水期			平水期			
阶段 (年份)	1960~ 1981	1984~ 1997	1960~ 1981	1982~ 1990	1991~ 1997	1960~ 1969	1970~ 1985	1986~ 1991	1992~ 1997
水位均值(m)	0.01	0.08	0.97	0.59	1.28	0.40	0.43	0.36	0.49
秩相关系数	0.33		0.11			-0.03			
最高水位(m)	1.02		2.31			0.81			
最低水位(m)	-0.1		0.29			0.24			
最大变幅(m)	1.12		2.02			0.57			

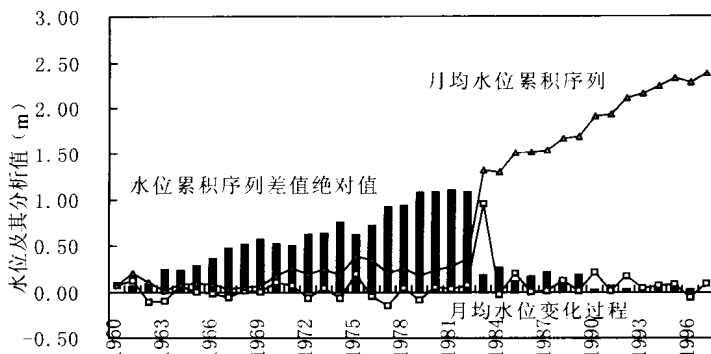


图 2-1 容奇站枯水期 (3 月) 月均水位变化分析

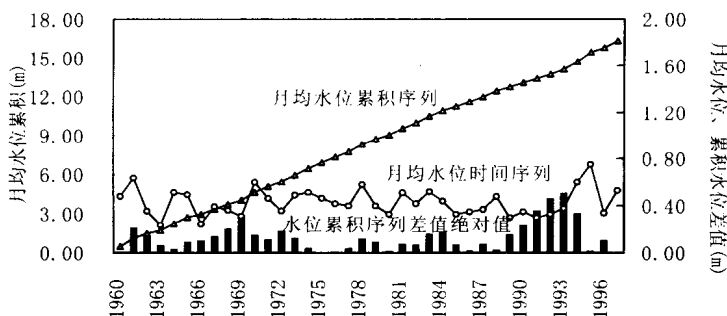


图 2-2 容奇站丰水期 (7 月) 月均水位变化分析

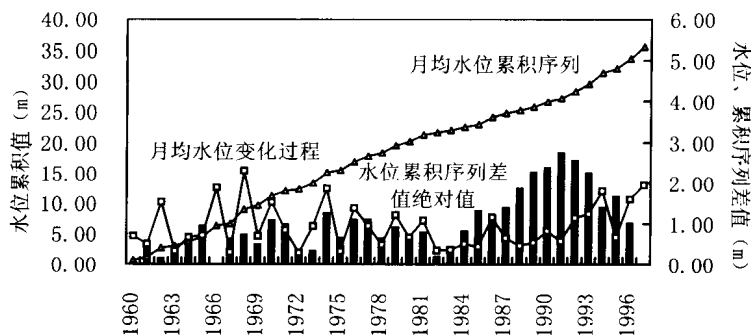


图 2-3 容奇站平水期 (10 月) 月均水位变化分析

从表 2-1 的结果可看出,就总体趋势而言,容奇站枯水期 (3 月) 水位自 1960 以来有较明显上升趋势,而丰水期 (7 月) 和平水期 (10 月) 变化趋势则不明显。

但按照本文提出的识别方法,可能变异性分割点两侧的水位均值变幅一目了然。枯水期可能变异性分割点两侧序列均值都较低,计算标度值 $\hat{\varepsilon} = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| / V = 6.25\%$,说明两侧