

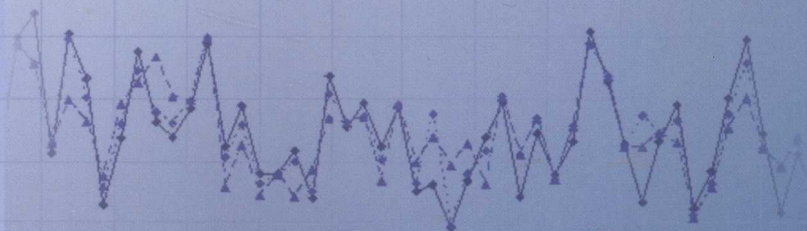
The Cause Analysis Methods for Mid-long Term
Hydrological Forecasting and Its Application

中长期水文预报成因分析 方法及其应用

The Cause Analysis Methods for Mid-long Term

Hydrological Forecasting and Its Application

王富强 著



黄河水利出版社

中长期水文预报成因分析 方法及其应用

王富强 著

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

中长期水文预报不仅对水库调度、防洪减灾等有重要的作用,而且在洪水资源利用、水权管理等方面也有很重要的意义,因此中长期水文预报一直是水文工作者深入探讨的课题。本书在继承和发展已有研究成果的基础上,综合运用水文学及水资源、水文气象学、系统工程、概率论、模糊数学、计算数学等相关专业知识,对中长期水文预报成因分析方法进行了系统研究。本书特色在于对中长期水文预报成因分析方法的系统化、实用化和理论联系实际方面做出了有益的尝试。

本书可供从事中长期水文预报的工程技术人员和研究人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

中长期水文预报成因分析方法及其应用/王富强著.
郑州:黄河水利出版社,2010.7
ISBN 978-7-80734-865-8

I. ①中… II. ①王… III. ①水文预报:中期预报-研究②水文预报:长期预报-研究 IV. ①P338

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 139175 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hshlcbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:10.25

字数:250千字

印数:1—1 000

版次:2010年7月第1版

印次:2010年7月第1次印刷

定价:28.00元

前言

中长期水文预报不仅对水库调度、防洪减灾等有重要的作用,而且在洪水资源利用、水权管理等方面也有很重要的意义,因此中长期水文预报一直是水文工作者深入探讨的课题之一。近年来,随着计算机技术的发展和新的数学方法的不断涌现,中长期水文预报得到了较快的发展。但是,由于受其复杂性和数据资料等因素的制约,中长期水文预报研究仍处在发展阶段,相对于短期水文预报来说,滞后于生产实际的要求。在预报理论研究上,更注重的是水文系列的统计相关特性,而对物理成因关系关注的相对较少;在预报方法上,对各种方法的有效性研究不够,使现有的方法很难在实践中推广应用;在预报结果的实际应用上,中长期水文预报目前主要是对水资源的宏观调控起一些参考性作用。基于此,本书重点探讨了基于物理因子分析的中长期水文预报方法,并将预报成果用于指导平原地区河流洪水资源利用工作,主要研究内容和成果概述如下。

(1)从水文循环的机制出发,综合分析影响区域长期水文情势的物理因素,主要包括天文因素、海表温度以及大气环流等。详细分析了太阳黑子活动情况、日月地三球位置关系、北太平洋海温冷暖变化、ENSO 事件以及大气环流因子等物理因素对区域长期水文情势的影响机制,旨在为进行基于物理因子分析的中长期水文预报方法研究提供资料准备和理论支持。

(2)大气因子分析法是以天气学和水文学为基础的,从水文要素形成的原因中寻求预报方法,即根据大气因子与待预报水文要素的因果关系进行预报。本书介绍了几种简单的方法,如天气型分析基础上的指标相关法,环流型天数、环流指数、关键地区要素场的特征指标法等。

(3)非大气因子严格地说是指大气圈以外的因子,现指太阳活动、日月运行、星际运动和地球转动等。非大气因子分析法是指分析上述因子长期变化引起水文要素变化规律,并进行预报的方法。这种方法在大流域、灾害性天气趋势预报方面取得了不少成效。由于目前该研究尚处于探讨阶段,因此本书只介绍了一些基本概念和简单的方法。

(4)定量预报和定性预报各有其优点,在进行预报工作时,要正确把握定性和定量的辩证关系。定性分析可以作为定量分析的准备,是定量预报的基础和依据,而定量预报是定性分析的深化和具体化,做到定性分析定量化、定量方法定性分析有助于提高预报的准确性、可靠性、经济性和及时性,这也是预报科学未来的研究方向。本书第5章主要探讨了回归分析和可公度网络结构图等中长期水文预报系统分析方法。

(5)针对水文中长期预报中单一的定量预报方法精度偏低、稳定性差,不能满足实际生产活动的要求这一情况,提出了定性定量嵌套的多因子神经网络预报模型。利用人工神经网络灵活多变的拓扑结构和强大的非线性逼近能力,基于前期物理影响因子分析作为输入量,通过改变输出节点的个数,建立定性预报模型,在定性预报的基础上建立定量预报模型,最后综合定性预报和定量预报的结果得出结论。实例分析证明,定性定量嵌套的多因子神经网络预报模型不但有一定的物理成因基础,而且可以较好地克服传统使用单一定量预报模型进行预报的盲目性,提高了预报的精度和可靠性。

(6) 针对现有水旱灾害趋势预测方法无法体现未来洪水发生可能性和量级的缺陷,根据气象因素与水旱灾害的关系,引入随机过程的概念,提出了区域水旱趋势预测的转移概率、太阳活动相位、厄尔尼诺事件等三种方法,推导了相应的计算公式,综合三种方法预测结果得出最终结论。结合东北区水旱灾害实例进行了预测研究,不仅为水旱灾害时域特性的研究探索了一条新的途径,也可在一定程度上为区域洪水资源利用长期规划的制定、洪水风险管理等工作提供了有益参考。

(7) 针对中长期水文预报数据资料的数量和种类繁多,数据间关系复杂,难以检索有用信息并组织用于预报的问题,将关联规则数据挖掘分析方法引入到中长期水文预报研究中,研究了中长期径流关联规则模式的提取及预测方法。实例分析证明,该方法在保证一定精度的情况下大大减小了工作量,有助于从海量数据中提取对预报目标有意义的关联规则和模式。

(8) 针对前期物理影响因子中既有定性因子又有定量因子的情况,同时考虑到中长期水文预报中存在的诸多随机性、不确定性和模糊性,将定量分析与定性评价有机结合起来,建立了基于物理因子分析的可拓聚类预测模型。模型以物元理论和可拓数学为基础,以物元交换为定性工具,关联函数为定量工具采取定性和定量相结合的方法进行预报。实例分析证明了可拓聚类预测方法在中长期水文预报中应用的可行性。

(9) 在洪水资源利用中,存在的各种未来信息的不确定性是风险的重要来源。中长期水文预报可以在不同程度上对洪水资源利用系统中各类因素的未来状态进行界定,从而确定面向整个时期引蓄洪水的时机及其后期安全性。本书以吉林省白城地区为例,研究了中长期水文预报在平原河流洪水资源利用中的应用。实例证明,较高精度的中长期预报成果对该地区洪水资源利用预案的制定和实施起到了积极的作用,可最大限度地削减洪水资源利用中的风险和损失,实现最大效益。

在本书的研究过程中,得到了众多人士的帮助和支持。本书首先凝结了作者的博士生导师大连理工大学许士国教授的大量心血,在此向他致以深切的谢意和崇高的敬意!同时衷心地感谢吉林长春自然灾害研究所范垂仁高级工程师在本书编撰过程中提供的帮助和支持。感谢华北水利水电学院韩宇平教授对本书撰写给予的支持和帮助,为本书的完成做出了重要贡献。研究期间,作者还得到了大连理工大学陈守煜教授、王本德教授、周惠成教授、程春田教授等前辈的帮助和指点,在此表示由衷的感谢!最后,向所有关心和帮助过我的同志们,表示诚挚的感谢!

感谢华北水利水电学院引进人才科研启动项目(编号:2008023)和水利部公益性行业科研专项项目(编号:200801015)对本书研究及出版的资助!

由于中长期水文过程的复杂性以及人类认知水文预报机制的有限性,本书的出版只能起到“抛砖引玉”的作用。受专业素养、理论水平及可操作性能力的制约,本书研究中的理论、方法、结构安排、文字表达等方面定会有问题,敬请诸位同行专家本着关心和爱护的态度,予以批评指正。此外,书中对于其他专家学者的论点和成果都尽量给予了引证,如有不慎遗漏引证的,恳请诸位专家谅解。

作者

2010年5月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 中长期水文预报概述	(4)
1.3 中长期水文预报的研究现状及发展趋势	(7)
1.4 洪水资源利用研究进展	(12)
1.5 本书的研究框架	(19)
1.6 本章小结	(19)
第2章 影响区域水文情势的物理因素分析	(20)
2.1 水文循环及其意义	(20)
2.2 影响长期水文过程的因素	(22)
2.3 天文因素对区域水文情势的影响机制分析	(26)
2.4 大气环流对区域水文情势的影响机制分析	(30)
2.5 下垫面状况对区域水文情势的影响机制分析	(32)
2.6 本书研究所用数据资料来源及其说明	(37)
2.7 挑选预报因子的统计考察	(37)
2.8 本章小结	(40)
第3章 大气因子分析法	(41)
3.1 概 述	(41)
3.2 天气型分析基础上的指标相关法	(42)
3.3 大气环流特征指标相关法	(43)
3.4 海温与青藏高原热源分析法	(45)
3.5 本章小结	(46)
第4章 非大气因子分析法	(47)
4.1 概 述	(47)
4.2 考虑太阳活动规律的方法	(47)
4.3 考虑地球运动规律的方法	(51)
4.4 考虑星际引力的方法	(57)
4.5 本章小结	(58)
第5章 中长期水文预报的系统分析方法	(59)
5.1 概 述	(59)
5.2 回归分析法	(60)
5.3 可公度网络结构图法	(69)
5.4 本章小结	(75)

第6章	定性定量嵌套的神经网络综合预报方法	(76)
6.1	概 述	(76)
6.2	前馈神经网络预测模型	(76)
6.3	定性定量嵌套的多因子神经网络预报模型	(80)
6.4	应用实例	(81)
6.5	本章小结	(87)
第7章	区域旱涝灾害趋势预测方法	(88)
7.1	概 述	(88)
7.2	转移概率预测方法	(88)
7.3	太阳活动相位预测方法	(91)
7.4	厄尔尼诺事件预测方法	(92)
7.5	实例分析——东北区水旱灾害特征分析及趋势预测	(93)
7.6	本章小结	(99)
第8章	基于关联规则挖掘的中长期水文预报方法	(100)
8.1	概 述	(100)
8.2	数据挖掘的相关知识	(100)
8.3	关联规则挖掘方法	(103)
8.4	中长期径流关联规则模式的提取及预测模型构建	(106)
8.5	应用实例	(108)
8.6	本章小结	(115)
第9章	基于物元模型的可拓聚类预测方法	(116)
9.1	概 述	(116)
9.2	可拓聚类预测方法	(116)
9.3	基于物元模型的可拓聚类预测方法概述	(122)
9.4	实例分析	(124)
9.5	本章小结	(127)
第10章	中长期水文预报在平原地区洪水资源利用中的应用	(128)
10.1	概 述	(128)
10.2	平原洪水资源利用的特点及水文预报的作用	(128)
10.3	白城地区洪水资源利用的特点	(130)
10.4	中长期水文预报在白城洪水资源利用中的应用	(132)
10.5	白城地区洪水资源利用风险效益分析	(138)
10.6	本章小结	(147)
第11章	结 语	(148)
11.1	主要结论	(148)
11.2	展 望	(150)
参考文献		(151)

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

1.1.1 我国的水资源现状

水是人类赖以生存和发展的珍贵资源。地球上虽然“三分陆地七分水”,水资源总量达 14 亿 km^3 ,但海洋咸水占 97.2%,淡水仅占 2.8%,其中绝大部分蕴藏在南极冰原和北极冰山中,人类生产和生活能利用的地表淡水仅为 105 万亿 m^3 (王烨,2005)。20 世纪 90 年代以来,世界淡水资源日渐短缺,污染日益严重,水、旱灾害愈演愈烈,使地球生态系统的平衡和稳定遭到破坏,并直接威胁着人类的生存和发展。随着人口的增长和经济的发展,人类对水的需求增长越来越快,许多国家陷入缺水困境,经济发展也受到制约。至 1994 年 3 月,大约有 10 亿人得不到充足的洁净饮用水供应。在全世界范围内,每天有 6 000 到 3.5 万名儿童因缺水造成的后果而死亡,其中非洲的形势最严重。

为推动对水资源进行综合性统筹规划和管理,加强对水资源的保护,解决日益严重的水问题,不仅要有技术上的措施,而且必须要注重社会宣传教育。除在政策、法律、管理体制方面加强对水资源管理外,还要开展宣传教育以提高公众的节水意识。正是出于上述原因,联合国第 47 届大会确定了旨在使全世界都来关心并解决水资源问题的“世界水日”决议。人们必须清醒地认识到,水危机很可能会比粮食危机或石油危机更早到来。

从当前和 21 世纪的发展看,洪涝灾害、干旱缺水、水生态环境恶化三大问题,特别是水资源短缺问题,将越来越成为制约我国农业、经济和社会发展的的重要因素。我国水资源总量为 28 000 多亿 m^3 ,居世界第 6 位,但人均水资源占有量只有 2 300 m^3 ,约为世界人均水平的 1/4。干旱缺水成为我国尤其是北方地区的主要自然灾害(谷兆祺,1999)。

我国城市供水不足的现象始于 20 世纪 70 年代,以后逐年扩大,并且愈来愈严重。20 世纪 70 年代,全国农田年均受旱面积为 1.7 亿亩(1 亩 = 1/15 hm^2 ,下同),到 90 年代增加到 4 亿亩,增加了 1.3 倍。1998 年冬至 1999 年 1 月,我国越冬作物受旱面积为 1.42 亿亩,受旱面积是 90 年代以来同期最大的一年。目前,全国仅灌区每年就缺水 300 亿 m^3 左右。干旱缺水已成为我国农业稳定发展和粮食安全供给的主要制约因素。据统计,全国 666 个城市中,有 400 多个城市供水不足,日缺水量达 1 600 万 m^3 ,年缺水量约 60 亿 m^3 ,平均每年因缺水影响工业产值 2 000 多亿元。当前全国农村还有 3 000 多万人和数千万头牲畜饮水困难。全国有 1/4 的人口饮用不符合卫生标准的水,这直接影响到人民的健康水平(钱正英,2001)。在水资源本已短缺的情况下,我国水环境也日益恶化,其主要表现在以下几方面。

(1) 水体污染十分严重。据统计,1997 年全国工业、城市污水总排放量为 584 亿 t,经过集中处理后达标的只占 23%,处理后的回用率更低,其余的大多未经处理或处理尚未达标就排入江河或用于农业灌溉。在全国水资源质量评价的约 10 万 km 河长中,受污染的河长

占 46.5%,其中海河达 62.3%。据 1997 年中国环境状况公报,我国大淡水湖和城市湖泊均为中度污染,全国 90% 以上的城市水域受到不同程度的污染。

(2) 北方河流断流情况加剧,尤以黄河下游为甚。黄河下游在 1972 ~ 1998 年的 27 年中,利津站断流 21 年,共计 1 050 d;其中 20 世纪 90 年代就有 8 年连续断流,共计 859 d,黄河断流的频繁发生加剧了主河槽的淤积,导致了河道排洪能力下降;使工农业生产遭受损失,城乡居民饮水困难,严重破坏了生态平衡,恶化了河口地区的生态与环境。

(3) 局部地区地下水大量超采。据不完全统计,全国已形成地下水区域性降落漏斗 56 个,漏斗面积 87 000 km²,有的漏斗中心水位埋深已达 60 ~ 80 m,辽宁、山东、河北等沿海省份的一些城市与地区,地下水含水层受海水入侵面积在 1 500 km² 以上;天津、上海、常州、西安等 20 多个城市出现地面沉陷、地面塌陷、地裂缝。

21 世纪我国水资源仍将面临严峻挑战。当前低水平的人均供水量潜在危害可能波及下个世纪。据分析,1980 年全国人均供水量为 450 m³,1997 年为 458 m³,近 20 年基本没有变化;1980 年全国缺水近 400 亿 m³,1998 年缺水也近 400 亿 m³,近十几年总体缺水形势几乎也未变化。1980 年至今,我国社会经济得到了长足的发展,可一直是在很低的供水能力支持下实现的。人均用水量低且供水总量增长滞后,严重制约了国民经济的发展,其潜在的影响将可能波及下个世纪。今后随着人口增加、经济发展,供水需求大幅增加,供需形势严峻。据分析,在充分考虑节约用水的前提下,2010 年全国总需水量为 6 988 亿 m³,2030 年为 8 000 亿 m³ 左右,2050 年至少为 8 500 亿 m³,分别需要比现有供水能力 5 500 亿 m³ 增加 1 488 亿 m³、2 500 亿 m³ 及 3 000 亿 m³。而且根据可能的供水工程布局,2010 年供水增加到 6 670 亿 m³,仍可能由于地区不平衡出现缺水 318 亿 m³,其中,黄淮海流域水资源紧缺状况有可能进一步恶化(汪恕诚,2006;王浩,2006)。水污染形势不容乐观。据分析,随着人口的不断增长、经济的高速发展和城市化进程的加快,我国废污水的排放量将急剧增长。

1.1.2 我国的洪涝灾害和干旱灾害

洪涝灾害是当今世界上给人类带来损失最严重的自然灾害(高吉喜,2004;蒋维,1992;张行南,2000)。特有的自然条件和地理因素决定了我国洪涝灾害十分频繁。1840 ~ 1949 年间,七大江河相继发生了 17 次特大洪涝灾害,57 次大洪涝,全国受灾县数平均每年 250 个。1931 年长江、淮河洪水,淹没农田 973 万 km²,受灾人口 5 217 万人,共死亡 40 万人(彭广,2003;水利电力部,1988;吴庆洲,2002)。据统计,20 世纪我国主要江河 100 年间平均每年发生超过两次频率 10% ~ 20% 以上的洪水,且每两年至少发生一次频率 5% ~ 10% 的洪水,每三年左右就可能发生一次频率 5% 以上的较大洪水或大洪水,可见洪水发生的频繁程度。

新中国成立以来,党和政府十分重视水利建设和防灾减灾工作。经过 50 多年的努力,主要江河的一般性洪涝灾害基本得到控制,“大雨大灾,小雨小灾,无雨旱灾”的局面已有明显改观。但是,一方面由于暴雨洪水不可能完全被消除,只能防御尽量减少灾害;另一方面,由于国民经济的快速发展,人口激增使自然环境遭到破坏,带来负面影响,因此当遭遇特大洪水时,灾情和损失仍然十分严重。如 1954 年,长江特大洪水造成直接经济损失 100 亿元;1975 年 8 月,淮河上游出现内陆罕见的特大暴雨,位于暴雨中心的板桥水库和石漫滩水库失事,数万人丧生。进入 90 年代,我国洪涝灾害更有加重的趋势,平均每年直接经济损失超千亿元,其中 1991 年,华东地区大面积水灾,直接经济损失 779.4 亿元;1994 年我国洪灾损

失1 796.6 亿元;1998 年,长江、嫩江、松花江流域的特大洪水,直接经济损失超2 000 亿元(鄂竟平,2004)。

我国不仅洪涝灾害严重,干旱灾害也十分突出。1949 年以前,平均每2 年发生一次较大干旱灾害。近50 年来,全国平均受旱面积达2 140 万 hm^2 ,因旱灾损失粮食142 亿 kg ,占各种自然灾害损失粮食量的60%以上。1949 ~ 1990 年因干旱平均造成农业、工业和牧业三项直接经济损失204 亿元。进入90 年代以后旱灾有明显增加的趋势。受旱区域也由传统的北方和西部地区向南方和东部一些多雨区扩展。2001 年长江流域发生了春夏秋连旱。2003 年江南及华南地区发生了1991 年以来最严重的夏伏旱。旱灾对经济、社会的影响越来越大,防洪抗旱的任务也越来越艰巨(李坤刚,2006)。

由于上述问题的存在,使人们愈来愈认识到洪涝和干旱等水问题的严重性,同时也给水文学提出了新的挑战。一方面是水资源的短缺与时空分布不均带来不利影响(水源紧缺、旱涝灾害),另一方面是由于对水资源统筹规划、开发利用不合理造成浪费。如何解决诸多问题,这就要求我们必须做好水文情势的研究工作,不仅要求对目前的水文情势作出分析,还要积极开展水文情势的中长期预测。充分掌握径流变化的运动趋势,才能做好旱涝灾害的防范工作,统筹安排、合理利用宝贵的水资源,达到最佳的经济效益。

1.1.3 中长期水文预报研究的意义

中长期水文预报具有较长的预见期,能够使人们在解决防洪与抗旱、蓄水与弃水及各部门用水之间矛盾时,及早采取措施,进行统筹安排,以获取最大的效益。随着社会的不断发展,国民经济各个部门对水文预报提出的要求越来越高,如防汛抗旱的指挥和大中小型水利、水电、水运工程的兴建及运行管理等,都要求水文部门能提供预见期长、准确性高的中长期预报。中长期水文预报对于水库调度、洪水控制、发电、灌溉等水资源相关工作是至关重要的。总的来说,洪水灾害与水资源紧缺问题的日益加剧使得提高水文预报精度显得越来越重要。

正确和及时的中长期水文预报,不仅对区域水资源统一规划管理、水资源合理配置等有着现实意义,而且对防汛、抗旱及发挥水利设施的经济效益有重要作用。对水利水电部门来说,如果仅仅依靠气象部门发布的中长期天气预报来进行工作是不够的,因为气象部门发布的中长期天气预报在预报的时间上和地区分布上尺度更大,它不可能只对一条河流,一个水库流域做出专门的预报,即使预报出某地区的降雨量的大小,也难以估计出一条河流或一个水库的丰枯情况。这也表明,完全移用气象部门中长期天气预报的方法和思路,不能满足水利水电部门对预报的特殊要求。因此,从水文学与气象学相结合的角度,对降雨和径流进行中长期预报具有重要的意义。

目前,中长期水文预报的模型很多,但是还没有一种模型对所有的水文序列都是适用的。预报模型的适用性至今仍然是一个有待深入研究的问题。对一个具体水文序列的中长期预报问题,人们往往是通过分析、尝试、检验等步骤,最终找到合适的预报模型。相对于短期水文预报,中长期水文预报研究仍处在发展阶段,滞后于生产实际的要求。归纳起来主要存在以下几个问题。

(1)在预报理论研究上,更多注重的是水文系列的统计相关特性,而对物理成因关系关注的相对较少,缺乏系统有效的预测方法。

(2)在预报方法上,对各种方法的有效性研究不够,使现有的方法很难在实践中推广应用。

(3)在预报结果的实际应用上,中长期水文预报目前主要是对水资源的宏观调控起一些参考性作用。同时,《水文情报预报规范》(SL 250—2000)(中华人民共和国水利部,2000)指出:中长期预报方法目前尚不够成熟,应积极开展研究,为了适应生产发展需要,有条件的水情单位可以发布中长期水情展望,只提供给领导掌握参考,不作为采取具体措施的依据,并注意结合实际变化,随时对展望进行补充修正。造成这种状况的根本原因是对于中长期水文预报认识不足,重视程度也不够。随着国民经济的快速发展,对自然资源开发与环境保护意识的增强,流域内各部门对防洪和供水预见期的要求越来越高。生产的需求必然会推动科技的发展,所以中长期水文预报的研究将会愈来愈受到科研人员的重视。

总之,一切水文要素的变化都有其特定的物理机制,从物理成因上解释预报因子的合理性,从形成水文现象的物理机制分析入手,使预报模型建立在严格的物理成因基础上,是中长期水文预报及其他水文预报应遵循的基本原则。中长期水文变化趋势受大尺度水文气象要素变化的影响很大,因此注重天气气象要素变化,掌握它们的变化规律及其对大陆水文现象的控制机制才能从根本上提高中长期水文预报的准确性。基于此,本书从影响区域水文情势的物理因素出发,研究和探讨中长期水文预报成因分析方法,并将其应用于生产实践,旨在为中长期水文预报研究提供新的思路和方法。

1.2 中长期水文预报概述

1.2.1 水文预报的概念与分类

水文预报是指根据水文要素或其影响因素的过去或现时状态,对其未来状态做出回答(王燕生,1991)。水文预报有不同的分类方法,按预见期可分为短期水文预报和中长期水文预报,一般以流域汇流时间为界,凡预报的预见期小于或等于流域汇流时间的称为短期水文预报,否则称为中长期水文预报。也有人将中长期预报定义为预见期超过流域最大汇流时间,且在3 d以上、一年以内的水文预报(陈金荣,1985;水利电力部水文水利调度中心,1985)。中长期水文预报包括径流、江河湖海的水位、旱涝趋势、冰情及泥沙等预报项目。其中,短期水文预报精度较高,对水库的洪水调度和河道防洪十分重要,但是短期洪水预报的预见期太短,往往满足不了防洪抗旱、水库调度、水电站运行以及水利其他功能的管理要求。而中长期水文预报具有较长的预见期,能够使人们在解决防洪与抗旱、蓄水与弃水及各用水部门矛盾时及早采取措施进行统筹安排,以获取最大的效益。比如,有了中长期预报,在防汛工作中,结合短期洪水预报,就可在一定程度上掌握整个防汛斗争的主动权。对于以发电为主的水库来说,也须以预报的入库流量为依据来编制年度及各个时期的发电计划。所以,做好中长期水文预报是水利水电、交通运输部门非常重要的一项工作。

1.2.2 中长期水文预报发展的历史

中国古代已有关于水文情势长期变化的记载。如《史记·货殖列传》记有:“六岁穰,六岁旱,十二岁一大饥。”反映了当时黄河流域一带旱涝年景交替出现的多年变化。11世纪,

出现了应用前期水文情况对后期水文情况进行估计的记载。《宋史·河渠志》有“立春之后,东风解冻,河边人候水初至,如涨一寸,至夏秋大汛定涨一尺,历有信验”之语。虽是带有某种臆测性质的直观经验,但已含有长期水文预报的萌芽,属于古代科学的范畴。

近代的中长期水文预报到19世纪末、20世纪初才开始出现。“地方天气法”与“世界天气法”首先应用于非洲尼罗河下游的春汛洪水预报,后来广泛地应用于欧洲和北美一些国家。B. H. 列别捷夫于1922年研究并作出了苏联欧洲河流的春汛长期预报。中国的近代长期预报是由气象学家涂长望于1935年创始的,他根据瓦克的理论与方法,研究冷暖和旱涝同世界各地天气,特别同三大涛动的关系,提出了预报方程。1951年,我国的杨鉴初提出了历史演变法,全面总结应用气象要素历史规律性的五个重要方面,制作长期天气预报。1956年,H. A. 卡特维里施维尔提出了“径流过程是连续随机过程”的著名论点,随机过程论在长期水文预报中获得应用。1958年,内蒙古水文总站应用此法试作长期洪水预报。20世纪50年代末,普遍应用环流分型、气象要素等方法研究洪水与年径流的长期预报。1959年,水利电力部水文局利用高空气象因素研制了华北地区中小河流的中期洪水预报系统。1960年长江流域规划办公室进行东亚大气环流的韵律及其在长期降水与水文预报上应用的研究。60年代以后,由于气象学、海洋学等其他相关学科的发展以及新的探测手段的出现,进一步发现了一些影响江河水量变化的因素。概率统计的发展则为揭示水文要素自身演变规律、辨别各种影响因素的显著性以及影响因素之间的相互关系等方面提供了有力的工具,这使中长期水文预报获得了进一步的发展。70年代中期以后,由于气象学、海洋学、统计学与计算数学等学科的发展,以及对日地关系与海气关系的深入研究,尤其是大量新的探测手段的出现和电子计算机的广泛应用,中长期水文预报的研究在影响因素的探讨、长期演变规律的研究和预报方法方面都得到新的进展。

随着我国现代化建设事业的不断发展,国民经济各部门对水文预报提出的要求越来越高,不仅要求有正确的短期预报,而且要求有预见期更长的中长期预报;不仅要求定性预报,而且要求定量预报。实际上,从防洪抗旱的指挥,大中小型水利、水电、水运工程的兴建,管理运行直至国防建设,都要求水文部门能提供预见期长、准确性高的中长期预报。为了满足这些要求,我国自1958年以来已有十多个流域机构,省(自治区、直辖市)水文局以及为数更多的地区水文分局、水库管理单位以至基层水文测站都逐步开展了这一工作,并在防洪抗旱斗争中取得了一定的成绩。

长江水利委员会1958年在长江流域建立了短期水文气象预报业务,1962年尝试开展了中长期水文气象预报业务,1972年正式组建了专门负责中长期水文气象预报业务和科研的机构。进入20世纪80年代中期,长江流域的长期水文气象预报在70年代开始开展北太平洋海温、青藏高原热状况、太阳活动和大气环流季节变化与长江流域水旱关系研究与预报应用的基础上,进入物理统计分析的新阶段,注重分析和研究预报因子与长江旱涝的物理关系以及旱涝气候的历史变化规律。与此同时,我国其他流域机构和省(自治区、直辖市)水利部门也进行了本流域和本省(市)的长期水文气象预报物理统计分析研究,而不再是单纯的数理统计方法的应用。

但是,随着预见期的增加,许多影响因素变化的不确定性以及目前科学技术水平的限制,中长期水文预报仍然处于探索、发展阶段,预报精度还不能满足各生产部门的需要。一般来讲,大面积旱涝趋势的定性预报有一定的参考价值,而定量预报的误差还较大,特别是

对特大的洪涝、干旱还缺乏有效的预报方法,需要多学科共同协作,进一步研究影响水文过程各种因素的物理本质和它们的相互作用,特别是引起大旱大涝的环流异常状态及其演变规律,加强多模型比较研究和适用性研究,是提高中长期水文预报的关键。

1.2.3 中长期水文预报的方法和途径

中长期水文预报的模型有很多,已在水文水资源研究中得到了广泛的应用,对解决水文水资源科学问题起到了非常重要的作用。但是,目前就国内外的研究现状及其复杂性而言,仍然处于探索阶段。存在的主要问题是预报精度较低,在实际工作中难以有效地指导生产实践(陈守煜,1997)。中长期预报方法在传统上主要是根据河川径流的变化具有的连续性、周期性、地区性和随机性等特点来开展研究的,主要有成因分析法和水文统计法。近年来,计算机技术的发展和新的数学方法的不断涌现也为中长期水文预报拓展了新的途径,主要包括模糊数学、人工神经网络、灰色系统分析、小波分析、混沌理论、多层递阶方法、支持向量机以及这些方法的相互耦合,如模糊神经网络、小波神经网络、混沌神经网络、小波混沌神经网络等。但每种方法都有其各自的适用条件,或存在有待深入研究的问题,即没有一种既理想又实用的方法。究其基本原因,水文水资源系统预测的对象通常是由相互之间非线性作用的多因素组成的开放复杂巨系统,简单、线性、封闭只是极少数的特例;水文水资源系统的行为大多是动态、不稳定、非平衡的,稳定、平衡只是少数的,暂时的现象。因此,在现有的科学技术条件下,难以作出准确、可靠的中长期水文预报。但是从水文情势变化的物理机制分析入手,结合现代预报方法进行预测,实现物理成因分析与现代数学预测方法的耦合可能成为一条新的重要途径,也应该是今后中长期水文预报的发展方向。

1.2.3.1 长期水文预报方法

1) 天气学方法

径流的变化主要取决于降水,而降水又是由一定的环流特征与天气过程决定的。因此,径流的长期变化应与大型天气过程的演变有密切关系。天气学方法就是根据前期大气环流特征以及表示这些特征的各种高空气象要素,直接与后期的水文要素建立起定量的关系进行预报的一种方法。大气环流有全球性的特点,因此主要采用北半球 500 hPa 月平均形势图或能反映主要环流特征的各种环流指数和环流特征量作为依据。根据水文情况的定性预报;或在月平均形势图上找出与预报对象关系显著的地区和时段,从中挑选物理意义明确、统计贡献显著的因子,用逐步回归或其他多元分析方法与预报对象建立方程,据此作出定量预估。

2) 天文地理物理因素方法

近代研究结果表明:地球自转速度的变化、海温状况、火山爆发、臭氧的多少以及行星运动位置、太阳活动等大气运动对水文过程都有一定的影响。分析这些因素与水文过程的对应关系后,就可以对后期水文要素可能发生的变化情况作出预测。海温的异常分布具有范围广、厚度大、持续时间长等特点,它往往是大气环流异常的先兆,能为长期水文预报提供信息。根据历史资料概括出旱涝年前期海温分布的模式后,可由前期海温分布特征对后期水文状况作出定性预估;或考虑时间上与空间上的连续性,在关键海域和关键时段内挑选若干地点的海温作为预报因子,并与预报对象建立回归方程,进行定量预报。太阳黑子相对数能够反映太阳活动的强弱。根据太阳黑子数年周期的位相或分析黑子数的变化与江河水量变化之间的对应关系,定性预报后期可能发生的旱涝。

3) 统计学方法

从大量历史资料中应用数理统计方法去寻找、分析水文要素与预报因子之间的统计规律和关系,然后应用这些规律来进行预报。按照预报时考虑因子的方法特点,统计学方法可分为两大类:一类是多元分析,即把江河水量等预报对象作为随机变量,把分析得出的各个影响因素作为预报因子,然后应用回归分析或判别分析的方法对预报因子进行筛选,建立预报方程进行预测。此外,为了客观分析、浓缩信息、简化计算等,还经常应用聚类分析、主分量分析、典型相关等方法作为数据处理的手段;另一类是时间序列分析,其原理是把预报对象作为一个离散化的平稳随机过程,应用自回归等模型进行预测。考虑到水文序列的非平稳性,20 世纪 60 年代前后主要采用的方法是把水文序列分解成趋势项、周期项、平稳项,然后分项预测,叠加后得到预报结果。

1.2.3.2 中期水文预报方法

中期水文预报与水利水电工程的施工、水库调度及防洪工作有着直接的关系,是当前生产上急需解决的一个课题。由于问题的复杂性,至今在这方面进行的工作还不多,目前主要方法有以下几种。

(1)高空气象因素法。即当影响预报流域的暴雨天气形势出现时,在 700 hPa 形势图上分析水汽输送和垂直上升运动等条件,选择能够反映这些条件的高空气象因素与后期发生的洪水建立合轴相关图或预报方程,据此作出中期洪水预报。

(2)统计方法。根据上一旬的平均环流、前期水量和下垫面情况等因素与下一旬的水量建立回归方程,作出下一旬的水量预报。

(3)水文气象结合法。目前,很多专业气象部门都能作出某流域未来 1~7 d(甚至更长)的日降水量预报。建立流域降雨径流日模型。应用流域的汇流时间及未来降雨预报,采用短期水文预报的方法实现流域中期水情趋势预报。

1.3 中长期水文预报的研究现状及发展趋势

1.3.1 传统中长期水文预报方法

传统的中长期水文预报方法主要有成因分析法和水文统计法。水文统计法通过对水文资料的统计分析进行概率预测,又包括两大类:一类是分析水文要素自身随时间变化的统计规律,并以此预测,如历史演变法、时间序列分析法等;另一类是用多元线性回归法或逐步线性回归法,建立预报模型进行预报。目前,应用较广的主要是时间序列分析法和多元线性回归法两种。

1.3.1.1 成因分析法

河川径流主要来源于大气降水,与大气环流有密切关系。一个流域或地区发生旱涝是与环流联系在一起的。分析研究大气环流与水文要素之间的关系一直是水文气象工作者深入探讨的课题。黄忠恕等(1985)分析了北太平洋和青藏高原下垫面热状况变化与长江流域汛期旱涝之间的关系,初步揭示出一些相关性。刘清仁(1994)以太阳活动为中心,以长期和超长期水文预报为目标,用数理统计分析法,分析了太阳黑子和厄尔尼诺事件对松花江流域水文影响特征及其水、旱灾害发生的基本规律。李永康等(2000)分析了长江中下游梅

雨期和夏季旱涝的一般特征,在此基础上着重研究了大涝(旱)和特大涝(旱)年前期大气环流的各种因子的特征,进而确定了可供预测旱涝趋势的若干环流因子。章淹(1995)从水文气象学角度论述了近年国内在暴雨中期预报研究方面的若干新进展,探索了中期预报的成因分析法等。归纳起来有以下几种方法。

(1)应用前期环流进行预报,这种方法也可称为天气学方法。其主要是对大量的历史气候资料,主要是高空环流的逐月平均形势与水文要素进行分析综合,概括出旱涝前期的环流模式,然后再由前期特征作出对后期水文情况的定性预报;或在前期月平均环流形势图上分析与预报对象关系密切的地区与时段,从中挑选出物理意义明确、统计贡献显著的预报因子,然后用逐步线性回归法或其他多元回归分析方法与预报对象建立方程,并据此进行定量预报。

(2)应用前期海温特征进行预报。即分析历史海温资料与预报对象的关系,概括出旱涝年前期海温分布的定性模式,或考虑海温在时间上与空间上的连续性,在关键时段内挑选若干个点的海温作为预报因子,与预报对象建立回归方程并进行定量预报。

(3)由太阳活动进行预测。主要是根据黑子相对数 n 年周期中的相位或分析黑子数与江河水量变化之间的关系对后期可能发生的旱涝进行定性预报。

(4)由其他天文地球物理因素进行预报。一些研究结果表明地球自转速度的变化、行星运动的位置、火山爆发、臭氧的多少等对大气运动与水文过程都有一定的影响,分析这些因素与水文过程的对应关系后,也可由此对后期可能发生的水文情况作出定性预估。

(5)概率统计预报,简称统计预报。即从大量历史资料中应用数理统计方法去寻找分析水文要素历史变化的统计规律以及与其他因素的关系,然后运用这些规律来进行预报。

总之,联系大气环流的长期演变以及前后承替规律来进行水文要素的中长期预报是一条具有物理基础的重要途径,也是中长期水文预报今后的发展方向。

1.3.1.2 水文统计法

水文统计法是应用数理统计的理论和方法,从大量历史水文资料中,寻找预报对象和预报因子之间的统计关系或水文要素自身历史变化的统计规律,建立预报模型进行预报。它主要分为单因素预报和多因素综合预报两大类。单因素预报是利用水文要素自身历史演变规律,预报该要素未来可能出现的数值,常用的有历史演变法、周期分析法和平稳时间序列法等(王本德,1993)。多因素综合预报方法主要有逐步回归、聚类分析、主成分分析等。这种方法的主要问题有如何合理选择因子个数,解决拟合效果与预报效果不一致的矛盾;同时,由于预报值是取各个因子数据的均值,难以预报出极大值或极小值的水文现象。时间序列分析是应用水文要素的观测记录,寻找其自身的演变规律来进行预报。常用的有平稳时间序列中的自回归模型、周期均值叠加、马尔可夫链等。20世纪60年代以前主要采取把序列分解成趋势、周期、平稳等项,然后再分项预测后进行叠加而得到预报结果。20世纪70年代后,Box等(1970)提出的ARMA类模型逐步应用于中长期水文预报。同时,具有非线性特点的TAR模型也开始用于中长期水文预报(冯国章,1997;金菊良,1999)。水文统计方法由于模型简单、实现方便,在实际中获得了广泛的应用。

1.3.2 现代中长期水文预报方法

近年来,计算机技术的发展和新的数学方法不断涌现,为中长期水文预报拓展了新的途径。现代的中长期水文预报方法主要包括模糊数学方法、人工神经网络方法、灰色系统方

法、小波分析方法、混沌理论方法、多层递阶方法、支持向量机方法以及这些方法的相互耦合,如模糊神经网络、小波神经网络、混沌神经网络、小波混沌神经网络等。

1.3.2.1 模糊数学方法

模糊数学方法是从 20 世纪 80 年代开始发展起来的新方法。陈守煜等(1988,1990)在水利、水文、水资源与环境科学领域中进行了模糊集的应用研究,并将模糊集分析与系统分析结合起来,形成了一个新的模糊随机系统分析体系。他们在研究中注意到:水文气象要素受到形成机制复杂性的制约,采用传统的精确性描述方法的能力很低;水文水资源管理领域存在大量的模糊性概念,是系统的真实体现,如“旱、涝”,“丰、平、枯”等;在水文要素预报领域,经验丰富的预报员能够作出令人满意的预报,而传统的数理统计方法难以容纳和描述人的经验,模糊数学则能够很方便地描述人的经验。1985 年,陈守煜、周惠成根据模糊控制的基本原理,以大伙房水库汛期入库流量为检验资料,提出了径流长期预报模糊推理模式。1991 年,陈守煜(1992)提出了模糊模式识别模型、模糊聚类模型,并在此基础上建立了模糊模式识别预测模型。1992 年,王本德提出了农谚提示的前后期水文气象要素之间的模糊相关关系长期水文预报方法和模糊综合评判径流预报方法。1997 年,陈守煜又提出了中长期水文预报的综合分析理论模式与方法,该方法将水文成因分析、统计分析、模糊集分析有机地结合起来,为提高中长期水文预报精度提供了一条新的途径。模糊分析方法的引进丰富了中长期水文预报理论,但由于信息带有明显的主观性,使其应用受到了一定的限制。

1.3.2.2 人工神经网络方法

起源于 20 世纪 40 年代的人工神经网络方法,由于其所具有的自适应学习和非线性映射能力,90 年代以来,在水文预报中得到了广泛的应用。吴超羽等(1994)认为人工神经网络模型是高度非线性模型,能够有效地模拟本质为非线性的实际水文系统。钟登华等(1995)提出了水文预报的时间序列神经网络模型,并提出探索利用输入输出数据进行建模的方法是十分必要的。胡铁松等(1995)对人工神经网络在水文水资源中的应用现状作了全面的介绍,并认为人工神经网络为一些复杂水文水资源问题的研究提供了一条有效的途径。Hsu 等(1995)提出了确定三层 BP 网络模型结构和参数的线性最小二乘单纯形法,并认为三层结构的 BP 网络就能满足水文预报的一般需要。丁晶等(1997)尝试应用人工神经网络模型预报兰州站过渡期的月径流量,结果表明,人工神经网络模型用做过渡期径流预报可行,且效果优于多元回归方法。胡铁松等(1997)提出了径流长期分级预报的 Kohonen 网络方法,有效地克服了人为给定监督信号进行径流分级预报存在的不确定性给预报精度带来的影响。冯国章等(1998)提出了基于径流形成机制的以时段降雨量与前期径流量为预报因子的前向多层人工神经网络径流预报模型,分析了网络结构对预报精度的影响。刘国东等(1999)从确定网络隐层单元数、选择收敛准则、加快训练速度和网络预测精度等几个不同的方面探讨了人工神经网络应用于水文预测方面的问题。Huang 等(2004)将人工神经网络模型预测结果和 ARIMA 模型的预测结果作了全面的比较分析,结果表明,以预测值与实际值的相关系数及均方误差作为评价标准,人工神经网络模型表现了比 ARIMA 模型更好的效果。徐留兴等(2006)采用改进的 Elman 递归神经网络对岷江紫坪铺水文站的天然月径流进行预测分析,结果表明,该模型应用在紫坪铺水文站的月径流预测中是合理、可行的。同时,屈亚玲等(2006)提出了改进的采用局部回归的 Elman 神经网络应用于凤滩水库的中长期水文预报。影响人工神经网络拓扑结构的因素众多,且参数优选理论发展不甚完善也

制约了人工神经网络模型优势的发挥,使之在应用推广方面遇到了一定的困难。

1.3.2.3 灰色系统方法

自1982年邓聚龙创立灰色系统理论以来,灰色预测得到了很大发展。灰色系统方法认为“预测未来”本质上是个灰色问题,因为一个未出现的没有诞生的未来系统必然既有已知信息又有未知信息,且处于连续变化的动态之中。它把观测数据序列看做随时间变化的灰色量或灰色过程,通过累积生成或累减生成逐步使灰色量白化,从而建立相应于微分方程的模型并作出预报。李正最(1990)认为灰色静态模型 $GM(0, h)$ 与多元线性回归模型在模型形式与参数辨识、方法处理等方面是相同的,因此两种模型用于水文变量相关分析所得结果一致。谢科范(1991)认为灰色系统理论在某些方面存在不少缺陷,与回归分析相比短期预测效果较好,长期预测效果欠佳。夏军(1993)基于时间序列多重信息利用的扩维原理和灰色系统理论的关联分析思想,提出一种适合于缺乏输入因子资料或选择影响因子有困难条件下的中长期水文预报方法。冯平等(1992)采用灰色系统理论中灰关联度分析方法,对枯水期径流量的预估模式进行了探讨。陈意平等(1996)认为 $GM(1, 1)$ 模型为水利系统的中长期水文预报提供了一种新方法。钟桂芳(1996)尝试应用灰色变基模型进行水库的长期水文预报。灰色系统由于其模型特点比较适合具有指数增长趋势的问题,对于其他变化趋势会出现拟合灰度较大而导致精度难以提高的现象。而且灰色系统理论体系尚不完善,正处于发展阶段,它在中长期水文预报中的应用多属于尝试和探索性质。

1.3.2.4 小波分析方法

小波分析源于傅立叶(Fourier)分析,是Fourier分析的新发展。从时频分析的角度出发,任一水文序列均含有多种频率成分,每一频率成分都有其自身的制约因素和发展规律,因此仅从水文序列本身出发构造模型,将难以把握水文序列的内在机制,有必要对水文序列进行分频率研究。而小波分析方法正好提供了一种便利的时频分析技术。从实际应用中看,小波分析在中长期水文预报研究中的应用主要体现在以下两点(牛东晓,1999;王文圣,2000):一是用于分析水文序列的变化特性,检测水文序列的周期。由于存在不确定因素引起的随机波动的干扰,水文序列所具有的周期性成分一般很难直观地从水文序列中检测出来。通过小波变换,可以滤去部分随机波动的干扰,就有可能测定水文序列的周期,这将比利用方差分析确定的周期更加可靠。二是对水文序列的各种成分进行分解并通过重构随机模拟序列过程,从而进行有效的预测。小波分析能将交织在一起的不同频率成分组成的复杂时间序列分解成频率不相同的子序列。基于小波分解和重构思想,将原序列分解成不同尺度下的小波系数和尺度系数,对分解所得的系数按实测资料显示的周期进行随机重构,就可以获得各种各样的水文序列。需要指出的是,小波分析理论和方法还处于发展阶段,远未成熟,其在水文水资源中的应用才刚刚开始,还有许多工作有待于深入研究(王文圣,2000)。

1.3.2.5 混沌理论方法

混沌理论认为,客观事物的运动除平衡态、周期、准周期运动外,还存在着一种更加普遍的运动形式——混沌运动,即一种由确定性系统产生的、对初始条件具有敏感依赖性、永不重复的、回复性周期运动。大多数水文现象的运动特征都既具有确定性的一面又具有随机性的一面,应用混沌理论,将打破以往传统分析中单一的确定性分析和随机性分析,建立将两者统一起来的混沌分析法,使水文工作有所突破。Breaford等(1991)首次将混沌理论应