

丰满流域

极端来水超长期预报技术

路振刚 张丽丽 李文龙 殷峻暹 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

责任编辑 魏素洁

微信号: Waterpub-Pro



唯一官方微信服务平台

销售分类: 水利水电

ISBN 978-7-5170-8022-0



9 787517 080220 >

定价: 68.00 元

丰满流域 极端来水超长期预报技术

路振刚 张丽丽 李文龙 殷峻暹 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书系统总结了国内外超长期水文预报方法,根据实践经验和项目研究成果的凝练和升华,对流域极端来水超长期规律进行挖掘,构建了基于流域尺度、全球尺度、天文尺度等相关影响因子为基础的丰满流域极端来水超长期预报技术体系。

本书可以作为一线水文预报技术人员进行超长期水文预报的参考用书,也可以作为水文预报相关专业研究者或学习者研习中长期水文预报技术方法的指导用书。

图书在版编目(CIP)数据

丰满流域极端来水超长期预报技术 / 路振刚等著

. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019.9

ISBN 978-7-5170-8022-0

I. ①丰… II. ①路… III. ①径流预报—长期预报
IV. ①P338

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第207958号

书 名	丰满流域极端来水超长期预报技术 FENGMAN LIUYU JIDUAN LAISHUI CHAOCHANGQI YUBAO JISHU
作 者	路振刚 张丽丽 李文龙 殷峻暹 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.75印张 341千字
版 次	2019年9月第1版 2019年9月第1次印刷
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序



水在自然界的循环过程中受多种因素的影响而形成一定的时空分布、变化规律。根据水文要素或者其影响因素的过去或现时状态对未来水文情况做出定性或定量的科学预报，可以有效降低灾害风险，提高风险抵御能力，因此水文预报对防洪、抗旱、水资源合理利用和国防事业具有重要意义。

近几十年来，由于气候变化和人类活动的影响，极端事件如洪水、干旱等灾害事件频发，对社会经济以及居民的人身安全造成极大影响。通过超长期水文预报对极端来水的变化趋势进行预测，有效掌控流域来水规律，是保证流域水安全的重要环节。传统的超长期水文预报方法是数理统计，但水文系统的复杂性及水文要素变化的不确定性决定了单一的数理统计方法无法全面提高中长期水文预报计算、预测和决策的可靠性。基于传统水文预报方法，引进新的分析手段和推动多学科的共同协作，将会成为中长期水文预报发展的趋势。

《丰满流域极端来水超长期预报技术》一书系统总结了国内外超长期水文预报方法，综合多年水文预报实践经验，系统分析丰满流域极端来水的超长期预报技术方法，形成了较为完备的流域或区域极端来水超长期预报技术体系。该书作者长期工作在水库调度一线，该书内容是极端来水超长期预报工作经验方法的高度集成，相信对今后相关的研究工作以及未来水文预报的发展具有一定的帮助。

水文预报是水文学服务于生产实践的综合应用，流域或区域极端来水超长期预报是水文预报的重要研究方向。超长期水文预报有助于降低水文风险，提早统筹安排措施，是保证综合效益最大化的重要手段。目前超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。期待更多的有识之士在超长期水文预报方面继续不懈努力，取得更多成果。希望该书的出版能对相关研究和技术工作提供有益的参考，推动超长期水文预报的进一步发展。

中国工程院院士 王浩

2019年6月

前 言



水文预报是指根据水文要素或者其影响因素的过去或现时状态，对其未来状态做出预报，按其预见期可分为短期水文预报、中长期水文预报和超长期水文预报。超长期水文预报具有较长的预见期，能够使人们在解决防洪和抗旱、蓄水和弃水，以及发电、航运等各部门用水矛盾时，及早采取措施进行统筹安排，以获得综合效益的最大化。因此，开展超长期水文预报研究意义重大。

丰满水库位于吉林市上游 16km 处的松花江上游，控制流域面积 42500km²，约占松花江上游流域面积的 55%。丰满水电站始建于伪满时期，1943 年蓄水发电。丰满水库正常蓄水位 263.50m，汛限水位 260.50m，死水位 242.00m，校核洪水位 267.70m。丰满水库是一座以发电为主，兼有防洪、灌溉、工农业及城市供水、航运、养殖及旅游等综合利用功能的大型水库，具有多年调节性能。

丰满大坝于 1937 年日本侵占东北时期开工兴建，限于战争原因，存在诸多先天性病患，2007 年底国家电监会将丰满大坝定检为“病坝”，为“彻底解决、不留后患、技术可行、经济合理”，丰满水电站全面治理（重建）工程于 2012 年 10 月 29 日动工。工程施工期，为保证干地施工的条件，减少原坝溢洪道开启概率、避免基坑过水、确保重建工程按期完工，提高施工度汛标准势必降低预控水位，但降低水位运行，将对水库下游供水造成影响；防洪与下游供水的矛盾突出。因此，面向丰满水电站全面治理（重建）工程施工期对水库调度的要求，确保在遭遇百年一遇洪水时原坝闸门不开启、避免基坑过水、确保干地施工；确保在发生特枯水年和连续枯水年时，对水库下游供水不破坏，需要预报施工期丰满水库流域下一年来水情况，尤

其是对特丰水年、特枯水年及特大洪水进行超长期预报，开展了“丰满水电站全面治理（重建）工程施工期极端来水预测研究”项目研究。

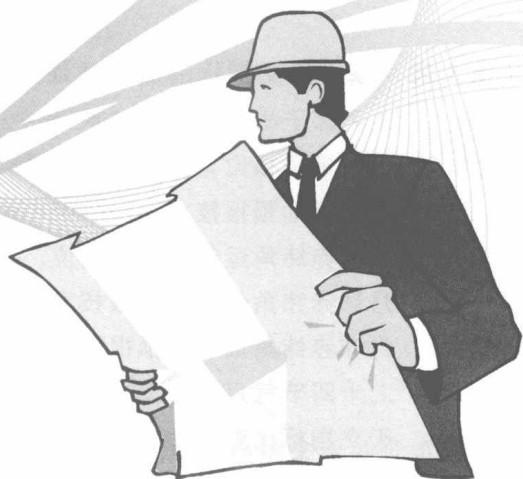
本书综合多年水文预报实践经验和上述项目研究成果的凝练和升华，对流域极端来水超长期规律进行挖掘，构建了基于流域尺度、全球尺度、天文尺度等相关影响因子的丰满流域极端来水超长期预报技术体系。全书由前言和7章内容构成。第1章由王永峰、李文龙、张丽丽、雷冠军、李秀斌、殷峻暹撰写，介绍了研究背景、国内外研究进展、超长期预报理论和技术方法；第2章由路振刚、王永峰、李文龙撰写，介绍了丰满流域及工程概况；第3章由李文龙、王永峰、李秀斌、张丽丽、彭卓越撰写，介绍了基于流域尺度信息的极端来水超长期预报技术；第4章由李文龙、王永峰、张丽丽、梁云撰写，介绍了基于地球物理指标的流域极端来水超长期预报技术；第5章由李文龙、王永峰、李秀斌、梁云、彭卓越撰写，介绍了基于天文指标的流域极端来水超长期预报技术；第6章由雷冠军、张丽丽、李秀斌、李文龙撰写，介绍了基于深度挖掘技术的流域极端来水超长期预报技术；第7章由雷冠军、郭希海、王进、张丽丽撰写，介绍了流域极端来水超长期预报综合辨识。最后，由殷峻暹、张丽丽、雷冠军、梁云、付敏、洪樱珉对全书进行统稿。

本书在编写过程中，参考了大量的文献资料，这些成果是前人辛勤工作的结晶，在引用时尽量注明出处，如有遗漏，请原谅我们的疏忽。另外，受时间和作者水平所限，本书很多内容还有待完善和深入研究，书中错误和不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2019年6月于北京

目 录



序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 目的与意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.3 超长期预报研究的理论与方法	10
1.4 超长期预报研究原则和思路	16
第 2 章 丰满流域及工程概况	19
2.1 丰满流域概况	19
2.2 丰满水库概况	20
2.3 白山水库概况	21
2.4 丰满水库来水样本及分型划分	22
第 3 章 基于流域尺度信息的极端来水超长期预报技术	25
3.1 可公度信息预报理论与技术	25
3.2 基于可公度的点面结合的洪灾预报技术	29
3.3 峰谷定位预报技术	42
3.4 有序结构预报技术	50
3.5 极丰来水后的特征比对预报技术	57
3.6 基于投影寻踪的预报技术	61
第 4 章 基于地球物理指标的流域极端来水超长期预报技术	68
4.1 基于厄尔尼诺事件极端来水预报技术	68
4.2 水汽通道上的大地震与东北地区洪水统计分析技术	74

第 5 章 基于天文指标的流域极端来水超长期预报技术	77
5.1 太阳黑子相对数预报技术	77
5.2 太阳黑子相位与分期预报技术	85
5.3 太阳运动预报技术	91
5.4 月球赤纬角运行轨迹、相位、角度综合分析预报技术	103
5.5 月球赤纬角分布图预报技术	114
5.6 月球赤纬角最小年预报技术	122
5.7 二十四节气月相图预报技术	123
5.8 天文指标比对预报技术	152
第 6 章 基于深度挖掘技术的流域极端来水超长期预报技术	162
6.1 预报因子的选取与处理	162
6.2 基于 BP 神经网络模型的预报技术	164
6.3 基于支持向量机的预报技术	169
6.4 基于宏观前兆信息的流域极端来水超长期预报技术	177
第 7 章 流域极端来水超长期预报综合辨识	185
7.1 多尺度信息融合技术	185
7.2 松花江丰满流域极端来水超长期预报案例分析	202
7.3 松花江丰满流域极端来水超长期预报的综合效益	217
7.4 巨大的推广应用价值	219
7.5 极端来水预报的发展方向	220
参考文献	221

第 1 章

绪 论

本章首先对流域极端来水超长期预报的定义进行介绍,总结了极端来水的危害和极端来水超长期预报的意义,然后对国内外极端来水超长期预报的技术从天文因子、地球物理因子、流域因子和综合因子方面进行系统的总结和分析,并对目前的超长期预报的理论与方法进行研究、最后对本书的预报原则和思路进行了系统介绍。

1.1 目的与意义

1.1.1 基本定义

极端来水:从洪水角度是指达到 20 年一遇及以上的大洪水、特大洪水;从径流角度是指年来水量为多年均值 1.4 倍以上的特丰水年的来水;来水量为多年均值 0.6 倍及以下的特枯水年的来水。

极端来水预报:是指对特丰水年来水的预报、特枯水年来水的预报、大洪水及特大洪水的预报。

极端来水超长期预报:是指预见期为一年以上的极端来水预报。

1.1.2 极端来水的灾害

据资料记载^[1],从公元前 180 年到 1949 年,由于风、涝、疫、寒、旱、饥等 6 种灾害造成的全国范围内死亡人数约为 3000 万人,其中洪灾造成的死亡人数大约占 29.4%。1947—1980 年全球的 10 大自然灾害中洪涝灾害比例高达 40%,居十大灾害之首。我国 1949 年洪灾涉及 16 个省,共有 4555 万人受灾,广东、福建因洪灾造成 12.7 万人死亡,黄河中上游连续降水使得数十万人受灾,上海地区风暴潮摧毁 6.3 万余间房屋,死亡 647 人。1996 年全国洪涝面积 0.25 亿 hm^2 ,成灾 0.12 亿 hm^2 ,受灾人口 2.8 亿人,死亡 4827 人,倒塌房屋 542 万间,直接经济损失 2200 亿元。1998 年全国农田受到洪水灾害影响的面积为 2229.2 万 hm^2 ,成灾面积为 1378.5 万 hm^2 ,成灾率达到 60%以上,洪水灾害造成房屋 685.03 万间倒塌,4150 人死亡,导致的直接经济损失高达 2550.90 亿元,水利方面的损失占 11.25%,损失价值居 1991 年至今有洪灾统计资料以来的首位;长江、松花江、珠江流域多个水文站突破了新中国成立以来洪峰流量的上限值。2003 年 6 月 20 日—7 月 10 日淮河流域的安徽、江苏、河南等省的部分地区降



大暴雨，长时间持续强降雨导致淮河安徽段出现1991年以来最大洪水，安徽、河南、江苏三省受灾人口高达4751.8万人，农作物受灾面积390.5万 hm^2 ，成灾244.9万 hm^2 ，直接导致79.8万 hm^2 农田绝收。

流域来水过少会造成旱灾。近代以来，旱灾频发给国家也造成巨大的灾难^[2]。如近代中国的大旱荒——“丁戊奇荒”，涉及辽宁、陕甘、川北和苏皖等地，总面积超过百余万平方公里，受灾人数估计为1.6亿~2亿人；直接死于饥荒和瘟疫的人数在1000万左右。1920—1921年的华北大旱涉及今河北、山东、河南、山西、陕西等省的广大地区，受灾县份320余个，灾区面积约272万 km^2 ，受灾人数在3000万人左右，死亡人数约50万人。起于1928年、持续至1930年的遍及华北、西北、西南10余省的大旱荒，加之各地蝗、风、雪、雹、水、疫并发的情况，全国受灾总计近1.2亿人，死亡1000余万人。1942—1943年的大旱涉及湖南、京津、甘肃等地，部分地区旱荒持续至1945年，河南一省饥民达1000万人，近300万人死亡。进入20世纪90年代以后，全国平均受旱面积达4.5亿亩，每年因旱灾减产粮食100亿~200亿 kg ，直接经济损失100亿~200亿元。1998年，陕西省遭旱灾，夏田作物受灾面积达124.5万 hm^2 ，干旱造成150万人、47.4万头大牲畜发生饮水困难。2000年我国又发生了新中国成立以来最严重干旱，春夏连旱使我国364座县级以上城市缺水，2198万人的正常生活受到影响，另外造成4054.1万 hm^2 农田受灾，2678.3万 hm^2 农田成灾，成灾率高达66.1%，造成损失粮食量高达5996万 t 。

1.1.3 极端来水超长期预报的意义

极端来水超长期水文预报的研究对国民经济的发展具有重大的意义和价值。以水定地、以水定产是以灌溉农业为主地区的主要特征，如新疆北疆天山一带地区，对每年4—6月播种前后的灌溉用水量的预估，与农业产量高低的关系十分密切。位于中朝界河的鸭绿江属于暴涨暴落的山溪性河流，由于朝鲜通信线路常常中断，使得其降雨情况难以掌握，给短期洪水预报、下游云峰水库防洪调度指挥及分蓄洪时机、分蓄洪量及停止分洪时间的决策等带来极大困难，极大程度影响到大坝的安全和下游人员的安全转移。位于福建闽江干流的水口水电站，水库一年的首末两场洪水的准确预报，对于水电厂制定发电计划、防汛抗旱、水资源的规划管理和综合利用都有着十分重要的意义，成功地预报一场洪水并能够作出合理的调度，不仅对防洪抗旱具有重要意义，而且其增加的发电量往往可达5%以上。为充分利用现有库容和设备，合理发挥水库调节能力，进行科学调度，合理利用水资源，既能保证汛期大坝水库安全，又要多发多蓄水，需要在年初掌握流域年来水量规模。历史的经验告诉我们，必须做好全年各时期的洪水、枯水、春汛预报。由于北方地区河流的来水多集中于汛期，历时短、水量大，为了防洪安全，水库等水利工程在涨水阶段不能启用，汛期过后来水变小使得水库蓄水量难以达到正常蓄水位，这就使得水利工程的效用得不到正常的发挥。因而对全年来水量的丰枯状态进行较准确的预报是非常必要的，而且对水资源的综合利用具有重要的意义和价值。



开展水库大洪水、特丰水年预报研究，优化调度并合理安排发（电）蓄（水），增发水电、减少弃水，为防洪、发电及梯级水库联合调度等提供决策支持，协调防洪与发电关系，不仅能提高防汛安全，还能大幅提高水电经济运行水平。特丰水年、大洪水的科学预报，尤其是大洪水来水时间的预报，可帮助准确实施拦蓄洪尾、增发电量，创造巨大发电效益。近几十年来，由于气候变化和人类活动的影响，极端事件如洪水、干旱等发生频繁，导致了严重的财产和生命损失。对极端来水的变化趋势进行研究，有效掌控流域的来水规律，对制定水利规划、综合利用水资源、提高水资源利用效率具有重要意义。

1.2 国内外研究进展

极端来水预报精度的提高，归根结底决定于如何从天文、地理、流域等方面阐明来水成因的物理本质，在对前兆进行周密分析的基础上，建立定性、定量的预报模型。流域径流等水文要素的变化遵循特定的物理机制，水文预报因子的选择应该综合考虑预报因子对预报要素物理成因上的合理性。在分析水文现象形成的物理机制和物理成因的基础上建立预报模型。中长期及超长期水文预报应该注重天文、气象、流域尺度的相关因子的变化，充分挖掘并掌握其变化规律，再进一步明晰其对来水大小的控制机理，从根本上提高中长期水文预报的精度和准确性。

如何从众多的信息中将有用的部分提取出来，并按照长期预报的要求进行组织是需要解决的又一个问题^[3]。传统的水文中长期预报模式已经不能适应海量数据的需要，同时从信息处理角度，我们更希望计算机帮助我们分析数据、理解数据，帮助我们基于丰富的数据做出决策，做人力所不能及的事情。数据挖掘就是一种从大量、有噪声的数据中提取隐含在其中、事先未知，但又是潜在有用的信息和知识的有效分析技术^[4]。

旱涝的形成是多种因素综合作用的结果，因此对其发生的预测单单依靠水利学科的知识是无法做到的，只有通过天文、气象、水文、地学、灾害学以及水利学的跨学科运用，并结合现时和历史的洪水暴雨灾害等相关资料，从不同角度、采用不同方法进行探索，同时不断采用当下先进的科学技术，才能创造发现出精度高、适应性强的长期洪水灾害分析预报方法。预报因子的选择应该能反映预报目标的物理成因，针对预报目的做特定的分析，在充分考虑预报对象物理成因的基础上对来水数据进行挖掘，充分利用数据挖掘的功能以获得合理可靠的预报结果。

影响年来水量的因素很多，如每年降水量的变化，使得流域来水年际变化频繁、年内波动大。旱涝主要受五大因素的影响，特定的地理环境气候、太阳辐射（太阳黑子、日月食、近远日点时间）、海温、大气环流和宏观异常等。基于预报因子的尺度不同，对极端来水超长期预报从天文尺度、全球尺度、流域尺度以及综合研究方面进行总结归纳。天文尺度主要指天体运动如太阳、月亮、地球等的运动。全球尺度主要指洋流循环、地震等地球上大尺度的物质运动等。流域尺度主要指天气状况、下垫面状况、人类



活动等流域上的状况。

1.2.1 天文因子在预报中的运用

太阳辐射是水文循环的能量来源，太阳通过热力和引力（包括其他行星的引力）深刻地影响着水文循环过程。李文龙等^[5]从日、地、月三球运动关系中寻找影响2010年大洪水的因素，研究得出丰满流域2010年特大洪水、特丰水年与太阳黑子相对数、月球赤纬角等存在良好的对应关系；系列研究得出丰满流域2010年特丰水年、特大洪水与1954年特丰水年、特大洪水的形成存在相似的天文条件。彭卓越等^[6]将表征日、地、月运行轨迹和相互关系的天文指标综合考虑，甄选出与预报年份相似的年份进行径流预报，研究发现1976—1991年与1995—2010年两组指标最为相似，由前者预报后者，结果准确率为75%，并对大渡河流域2015—2017年来水进行预报。金朝辉等^[7]深入研究月球赤纬角与水库年来水的关系，通过月球赤纬角运行轨迹、相位、角度综合分析预报法，研究月球赤纬角与水库年来水的规律，得出2013年丰满水库发生相似1957年特大洪水、丰水年的预报结论。刘清仁^[8]以太阳活动为中心，用数理统计分析方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。李秀斌等^[9]从太阳黑子活动与白山水库来水的关系角度，研究得出白山水库丰水年主要发生在太阳黑子活动单周峰期和双周谷期的结论，对丰水年的预报起指导作用。

1.2.2 地球物理因子在预报中的运用

大气环流是世界规模大范围的空气运动，它不仅制约着大范围的天气变化，同时也制约着水文要素的变化。大气环流的异常发展，势必造成天气、气候的异常，从而导致旱涝灾害的发生。发生在夏季的洪涝，跟我国的季风有很大关系，夏季风把海洋水汽输送到陆地，潮湿空气是暴雨洪水的必要条件。李文龙等^[10]利用PDO冷暖位相下厄尔尼诺和拉尼娜事件发生年份表，结合丰满水库流域来水实际，得出PDO冷位相期厄尔尼诺发生年份丰满水库一般为枯水，PDO暖位相期厄尔尼诺发生年份丰满水库一般为丰水，丰满水库特丰水及大洪水多发生于PDO冷位相期拉尼娜事件发生年份，基于2015年为PDO冷位相期厄尔尼诺（El Nino）高峰年，成功预报2015年丰满水库来水为特枯水年。李秀斌^[11]提出要有效地提高灾害预报水平，必须对“两风一雨”（即为台风、季风和暴雨）进行系统而深入的研究，极地是大气冷源，北方冷空气扩散南下，与南方暖空气交汇，冷空气提供了动力条件；暖空气提供了水汽条件，从而产生大规模降水。所以，冷空气的频率、强弱，对我国降水具有重要影响。阻塞高压的存在，阻挡了降雨天气系统的移动，使降雨时间延长，降雨量增多，从而造成了洪涝的加重。李超^[12]的研究表明赤道东太平洋海温异常与我国黄河流域、长江下游及以南地区的降水有明显正相关关系；孙力等^[13]研究分析了北太平洋海温异常对我国东北地区旱涝的影响；黄荣辉^[14]的研究发现菲律宾周围对流活动强弱引起的东亚大气环流异常的遥相关，对我国东部地区的降水有较大影响。李永康等^[15]对大涝（旱）和特大涝（旱）年前期大气环流



的因子特征进行分析, 寻找出相关性较好可供长江中下游预报旱涝趋势的环流因子, 并对大旱年和大涝年的前期环流特征量进行分析, 选择出较好的预报因子, 在此基础上建立了长江中下游夏季特大(大)旱涝的概念模型。

1.2.3 流域因子在预报中的运用

流域来水系列的变化规律、流域的下垫面状况、气候状况等都从不同角度反映了流域来水的变化。李文龙等^[16-18]在2010年以长江流域23次大洪水为基础, 运用可公度理论, 在三元、五元预报模型基础上, 预报2010年长江会发生大洪水; 在2012年对东北地区1856年以来成灾特大洪水, 基于可公度预报理论, 应用三元、五元、七元可公度预报模型, 成功拟合预报1985年8月辽河特大洪水、2010年松花江上游特丰来水, 并做出2013年辽河、松花江上游特大洪水发生类似1953年洪灾的超长期预报结论; 在2010年基于可公度方法, 提出点面结合的预报技术, 从时间、地点、量级三要素成功拟合出1996年7月的长江大洪水。黄焯元^[19]选用气象因子, 基于统计学的方法建立多元回归方程, 对新疆天山河流5月的径流进行长期预报, 为农业灌溉提供支持。范垂仁^[20]通过构建三峡水库、淮河蚌埠站大旱大涝可公度网络结构图, 得出大涝年存在平均53年周期、大旱年存在平均33年周期的结论, 用以指导大旱大涝的预报。李秀斌^[21]在研究我国大洪水规律的过程中发现, 一条河流或一个地区的早汛(12月一次年5月)洪水是这一河流或地区夏秋汛(6—11月)大洪水的重要前兆, 早汛是夏秋汛大洪水的“晴雨表”; 通过研究水旱灾害中长期预报方法, 提出从统计预报、经验预报、信息预报向物理预报、数值预报方向发展, 并走向综合预报, 其中物理预报的理论依据是水循环原理。

人工神经网络、支持向量机等广泛用于大数据挖掘, 基于相关性强的预报因子, 运用机器学习等方法挖掘流域来水规律, 寻找预报因子与来水的非线性对应关系, 目前国内外已经对人工神经网络、支持向量机的运用和改进展开了大量的研究。

1.2.3.1 人工神经网络在来水预报的应用

1943年, 心理学家 W. S. McCulloch 和数理逻辑学家 W. Pitts 建立了神经网络和数学模型, 称为 MP 模型。他们通过 MP 模型提出了神经元的形式化数学描述和网络结构方法, 证明了单个神经元能执行逻辑功能, 从而开创了人工神经网络研究的时代^[22]。人工神经网络是一种应用于大脑神经突触联结的结构进行信息处理的数学模型。在工程与学术界也常简称为神经网络或类神经网络。由于人工神经网络具有分布并行处理、非线性映射、自适应学习和较强的鲁棒容错等特性, 使其在中长期径流预报中得到了广泛的应用。S. K. Jain 等^[23]将人工神经网络方法应用在水库入库流量预报及水库运行方面, 并将人工神经网络模型和自回归滑动平均模型进行了比较, 在预报方面这两种方法各有优缺点, 人工神经网络方法对峰值流量的预报较好, 而自回归滑动平均模型对较小流量的预报较好, 表明人工神经网络可以用水库入库流量预报上。Huang 等^[24]将神经网络模型预报结果和 ARIMA 模型的预报结果做了全面的比较分析, 结果表明, 以预报值与实际值的相关系数及均方误差作为评价标



准,神经网络模型表现了比 ARIMA 模型更好的效果。B. Sivakumar 等^[25]研究了运用阶段空间重建 (PSR) 和人工神经网络 (ANN) 两种非线性黑箱方法来预报河流向前一天和向前七天的日流量预报,结果表明两种方法得到的结果都很好,但是运用 ANN 的一致性性能不如 PSR 方法,并分析了原因。Ozgun^[26]运用人工神经网络和自回归模型进行了河流的流量估计,研究了人工神经网络结构的参数,包括隐含层数目和节点数,选择了 3 种结构和自回归模型进行比较,运用方差之和和相关系数来评价模型的性能,结果表明,在相同数据输入的情况下,人工神经网络可给出比自回归模型更好的结果。周惠成等^[27]建立季节性自回归模型和人工神经网络模型对二滩水电站的月径流、汛期分段和年径流预报进行研究,发现预报结果均达到了一定精度,AR(P) 模型的非汛期月径流预报和 BP 模型年径流预报结果均可在实际中应用。金菊良等^[28]建立了年径流预报的神经网络模型,并使用新疆伊犁河的雅马渡站 23 年的实测年径流资料与相应的 4 个前期影响因子实测数据对该 ANN 模型进行预报检验达到理想效果。张素琼等^[29]以长江流域上游的寸滩站和宜昌站、中游的螺山站和汉口站以及下游的大通站的年流量资料为基础,采用人工神经网络方法,对 5 个水文站的径流进行模拟和预报,研究结果对实际径流预报工作具有一定的指导意义。杨荣富、丁晶等^[30]克服了利用 BP 型人工神经网络进行连续的降雨-径流模拟的困难,提出将模型的每个隐层节点模拟为一个水库,从而赋予网络节点一定的实际意义,提出了基于水量平衡和非线性水库的水文模拟网络。

人工神经网络具有较好的预报性能,为了进一步提高该模型的预报精度,神经网络与其他模型耦合,改进后的神经网络模型取得了较好的预报效果。M. P. Rajurkara^[31]等运用 ANN 建立汛期日流量和降雨关系的模型,将线性模型估计得到的径流代表值代替前面几天径流作为 ANN 的输入,取得了较好的预报效果。Ancil 等^[32]分别就运用人工神经网络模型、人工神经网络和小波分析相结合方法对河流流量进行预报,结果表明两种方法得到的结果相似,而将二者结合起来进行计算的长处在于可以更好地应用于蒸发时间序列。P. C. Nayak 等^[33]将人工神经网络和模糊数学方法结合起来进行时间序列水文模型研究,并将这种方法应用在印度的 Baitarani 河,结果证明 ANFIS 法(自适应神经模糊推断法)预报流量时间序列保持了原有时间序列的统计特性,和其他传统的方法相比较,这种方法在计算速度、预报误差、效率、峰值流量预报方面都较为理想。Sudheer 等^[34]采用相关分析法(自相关、偏自相关和交叉相关分析),确定 ANN 降雨-径流模型输入向量,并证实该方法能够获得较好的预报精度,同时极大地提高了模型参数率定效率。Cheng 等^[35]将动态样条插值与多层自适应时延神经网络相结合,提出了直接多步预报模型,并以太阳黑子时间序列和漫湾水库的月径流预报为例,验证了方法的可行性与有效性。王胜刚等^[36]针对 BP 神经网络比较容易陷入局部最优、收敛速度比较慢的缺陷,提出了一种新的洪水预报的方法——全局优化打洞函数法,以此来提高了洪水预报的精度等级。赵庆绪等^[37]建立了寸滩站洪水预报系统的人工神经网络流量预报模型,并且还把洪水地区的组成因素引入进来,这样就可以使所建立的洪水预报模型能够自动地识别不同种类型的洪水,该预报模型的洪水预报精度比较高,且对各种来水



类型的预报效果都比较好。

1.2.3.2 支持向量机在来水预报的应用

支持向量机 (SVM) 是监督式学习的方法, 可广泛用于统计分类以及回归分析。它是 Vapnik^[38] 于 1995 年首先提出来的, 由 Vapnik 领导的 AT&TBell 实验室研究小组将它主要应用于模式识别领域。支持向量机方法是建立在统计学习理论的 VC 维理论和结构风险最小原理基础上的, 根据有限的样本信息在模型的复杂性 (即对特定训练样本的学习精度) 和学习能力 (即无错误地识别任意样本的能力) 之间寻求最佳折中, 以求获得最好的推广能力。

石月珍等^[39] 运用支持向量机模型对湘江湘潭站年最小 7d 平均流量进行预报, 预报结果与投影寻踪模型、人工神经网络模型的预报结果相比较, 表明支持向量机模型的误差合格率最高, 预报精度也最高。胡彩虹等^[40] 采用基于支持向量机进行径流预报模型, 对半干旱半湿润地区汾河水库上游流域进行预报, 并与 BP 神经网络预报结果进行比较, 结果表明支持向量机预报模型的精度比 BP 神经网络模型高。李彦彬等^[41] 基于支持向量机 (SVM) 方法建立河川径流中长期预报模型, 通过实例验证发现 SVM 模型的预报结果比 RBF 网络模型、BP 神经网络模型预报结果的预报精度更高、效果更好。

邵骏等^[42] 为解决最小二乘支持向量机模型的参数耗时较长的问题, 将贝叶斯证据框架理论用于最小二乘支持向量机模型参数的优选, 采用岷江紫坪铺水文站的年径流资料进行模型的预报和检验, 与原来的最小二乘支持向量机模型及 BP 神经网络模型进行比较, 结果表明, 改进后的径流预报模型具有较好的预报精度。王峰等^[43] 利用最近邻抽样回归 (NNBR) 与支持向量机 (SVM) 模型的优势, 建立耦合预报模型, 用于柘溪水库汛期径流预报, 比单一的 SVM 和 NNBR 模型提高了预报精度, 预报可行有效。黄强等^[44] 基于支持量向机理论建立多元变量径流预报的最小二乘支持向量机模型, 通过与 BP 神经网络模型预报结果进行对比, 表明多元变量 LSSVM 模型的预报精度更高、效果更好。林剑艺和程春田^[45] 通过与神经网络的预报结果比较发现基于 SCE-UA 算法辨识 SVM 的预报模型精度有所提高, 可应用于中长期径流预报中。赵红标等^[46] 采用基于支持向量机的预报模型对水库中长期入库径流进行预报, 建立径流预报的 SVM 模型并采用模糊优选法对预报因子进行优选, 进行预报因子优化后的 SVM 模型明显提高了径流的预报精度, 具有更高的应用价值。郭俊等^[47] 提出了一种改进的 SVM 模型, 并以三峡水库日入库流量预报为实例, 表明该模型预报精度明显优于 BP 网络, 尤其对于变化剧烈的径流序列模型优越性更为明显, 是一种可靠有效的方法。高雷阜等^[48] 提出了基于人工鱼群优化的 SVM 算法, 张俊等^[49] 建立了基于蚁群算法参数优化的 SVM 模型, 分别应用鱼群算法和蚁群算法来对 SVM 的参数进行识别和优化。魏光辉^[50] 基于特征点分段时间弯曲距离算法对实时采集的时间序列数据进行分段与相似度计算, 目的是为了缩减规模的子序列数据集对 LSSVR 模型进行训练优化, 实现多个 LSSVR 子模型建模, 将预报数据序列与 LSSVR 子模型的相似度匹配, 自适应地选取最佳的子模型作为预报模型。该模型具有较好的预报性能, 能够满足河道径流量预报的实际需求。张