

LUO HE LIUYU
SHUIWEN TEXING FENXI
JI ZHONGCHANGQI JINGLIU YUBAO YANJIU

洛河流域水文特性分析 及中长期径流预报研究

王文川 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

洛河流域水文特性分析 及中长期径流预报研究

王文川 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书就洛河流域水文要素特性及中长期径流预报开展了相关研究,系统分析了洛河流域的水文要素特性、水文要素序列重构方法、非一致性水文干旱评估方法和基于多元线性回归与人工智能技术的中长期径流预报方法及比较,具有系统性、新颖性和实践性的特点。

本书可作为高校水文与水资源工程、水利水电工程、农业水利工程等专业的高年级本科生和研究生的教学和科研参考书,可供相关专业的科研人员及关心水利行业发展的读者使用,同时也可供水利管理部门的科技工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

洛河流域水文特性分析及中长期径流预报研究 / 王文川著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020. 12
ISBN 978-7-5170-9302-2

I. ①洛… II. ①王… III. ①洛河流域—水文预报—中长期预测—研究 IV. ①P338

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第269281号

书 名	洛河流域水文特性分析及中长期径流预报研究 LUO HE LIUYU SHUIWEN TEXING FENXI JI ZHONGCHANGQI JINGLIU YUBAO YANJIU
作 者	王文川 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	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.5印张 165千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
定 价	52.00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

前言

随着科技的发展和人类的进步，水资源安全问题备受关注。开展流域水文特性分析及中长期径流预报不仅能够在水库调度、抗旱、供水、发电及灌溉等方面发挥重要作用，而且可以为各部门用水规划决策提供技术支撑，使有限水资源发挥最大的综合效益。因此，本书开展了洛河流域水文特性分析及中长期径流预报研究，以洛河流域长水水文站 1960—2016 年径流资料、年降水资料和气象资料为基础，通过线性趋势相关检验法、Mann-Kendall 趋势检验法、Spearman 秩次相关检验法等方法对长水水文站径流量、降水量、平均气温的年际变化进行分析，结果显示径流量和降水量呈明显下降趋势，平均气温呈明显上升趋势；通过 Mann-Kendall 突变检验法和 Pettitt 检验法分析，发现长水水文站径流、降水和平均气温在 1985 年均发生了突变；通过小波分析法进行周期性分析，说明控制洛河流域径流、降水、气温变化的周期存在一定程度的相似。

本书检验了水文序列的一致性，确定了序列变异趋势以及变异发生时间。使用序列重构的方法对水文序列的非一致性进行修正，根据修正后的流量序列选用不同的概率分布线型进行拟合，构建水文干旱指标（标准化流量指数，SFI），对干旱评估结果进行识别分析并确定最为合适的分布线型。最后，提出基于 Bootstrap 抽样的 SFI 不确定性分析，定量识别了水文干旱的不确定性影响因素。为消除分布线型对干旱评估的影响，分别以伽马分布、对数正态分布、正态分布拟合流量序列，构建水文干旱评估指数 SFI，基于游程理论将三种 SFI 与历史干旱事件进行对比，结果显示伽马分布和对数正态分布拟合结果吻合度高，对数正态分布计算的 SFI 在干旱烈度和干旱历时识别中呈现偏小差异。由此可以得出 SFI 的计算可选用伽马分布拟合流量序列。给定置信水平 $\alpha=5\%$ ，通过置信区间范围，定量地描述了分布参数、样本容量、抽样方法

对水文干旱指数的不确定性影响。结果显示：样本容量越大，置信区间宽越小，抽样方法中以百分位数 Bootstrap 抽样方法对参数值的估计精确度最高，由此可减小水文干旱评估的不确定性。

本书结合长水水文站径流资料和洛河流域 3 个气象站的气象资料特点，选取最低气压、降水量、平均气压、平均 2min 风速、平均气温、平均最高气温、日降水量大于等于 0.1mm 日数、最大风速、日照百分率、极大风速、最高气压等 18 个影响因子，利用相关系数法和主成分分析法对影响因子进行筛选，得到 11 个相关性大的预报因子，并以此作为方案一和方案二。在水文要素特性分析基础上分别建立基于方案一和方案二的多元线性回归模型、BP 神经网络模型和 ELM 模型，并进行年径流总量预报。根据预报结果对两种方案和多元线性回归模型、BP 神经网络模型、ELM 模型三种预报模型进行等级评定，整体显示方案一优于方案二，多元线性回归模型、BP 神经网络模型和 ELM 模型的合格率分别为 60%、70% 和 90%，其中，BP 神经网络模型和 ELM 模型预报结果相对更能够适应该流域径流特点。同时，ELM 径流预测模型改善了 BP 神经网络训练时间长和易陷入局部极小值的问题。因此，ELM 模型在训练速度和预测精度方面都优于 BP 神经网络模型。近几年，组合模型逐渐成为研究的热点，通过模型之间的相互组合，可突破单一模型的局限性，提高模型预测结果精度。因此本书选择 1960—2016 年长水水文站的年径流数据，分别通过 R/S 灰色组合模型和基于小波包分解的 LS-SVM-ARIMA 组合模型对长水水文站的年径流进行了预报分析。结果表明，组合模型在很大程度上改进了单一模型的缺点，可以有效地提高预报精度。无论是 R/S 灰色组合模型还是基于小波包分解的 LS-SVM-ARIMA 组合模型，均优于单一的 BP 神经网络模型和 ELM 模型。其中，基于小波包分解的 LS-SVM-ARIMA 组合模型在相对平均误差、合格率、确定性系数等方面都有明显的提高，将年径流预报误差控制在了尽可能小的范围内。最终，对比分析各个模型预测结果发现，基于小波包分解的 LS-SVM-ARIAM 模型表现最优，R/S 灰色组合模型次之，而单一预测模型中 ELM 模型表现最好。研究成果对洛河流域水资源管理具有一定的参考价值。

本书的编写得到了河南省高校科技创新团队（18IRTSTHN009）、河南省科技攻关（202102310259、202102310588）、水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心及华北水利水电大学水利工程特色优势学科建设经费的资助。

在此要特别感谢我的几个研究生——李磊、张洁铭、李文锦、韩东阳、刘

献、李庆敏等，他们为本书的程序编写、资料和成果整理进行了很多辛苦的工作。同时，要感谢中国水利水电出版社的同志为本书出版所付出的心血，没有他们的辛勤工作，本书就难于面世。

由于作者水平有限，且部分成果还有待进一步深入研究，书中难免有疏漏甚或错误之处，恳请读者多提宝贵意见！

作者

2020年9月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究进展	3
1.2.1 水文要素特性分析研究进展	4
1.2.2 中长期径流预报研究进展	6
1.2.3 干旱的定义	8
1.2.4 干旱指标	9
1.2.5 水文序列变异性检验研究	10
1.3 主要研究内容	11
第 2 章 研究区域概况	14
2.1 自然地理	14
2.1.1 地理位置	14
2.1.2 河流水系	15
2.1.3 水文气象	16
2.2 社会经济	17
2.3 水文站概况	18
2.4 数据来源	18
2.5 本章小结	20

第 3 章 水文要素特性分析	21
3.1 趋势分析	21
3.1.1 线性趋势相关检验法	21
3.1.2 Mann - Kendall 趋势检验法	22
3.1.3 Spearman 秩次相关检验法	23
3.1.4 Hurst 指数法	24
3.1.5 应用实例	25
3.2 变异分析	30
3.2.1 Mann - Kendall 突变检验法	30
3.2.2 Pettitt 检验法	31
3.2.3 应用实例	32
3.3 周期性分析	35
3.3.1 小波分析法	35
3.3.2 应用实例	36
3.4 本章小结	41
第 4 章 水文要素序列重构方法与应用	42
4.1 概述	42
4.2 分解合成法的基本原理	43
4.3 基于分解合成法的水文序列重构	44
4.3.1 水文要素序列分解	44
4.3.2 水文要素序列的合成	47
4.4 本章小结	49
第 5 章 非一致水文干旱评估方法	50
5.1 概述	50
5.2 标准化流量指数构建	51
5.3 理论分布线型优选	52
5.4 干旱事件识别	53
5.5 合理性验证	54

5.6	本章小结	57
第6章	基于 Bootstrap 方法的水文干旱不确定性分析	59
6.1	Bootstrap 方法	60
6.2	估计参数不确定性分析	61
6.3	基于样本抽样的水文干旱不确定性分析	63
6.4	本章小结	65
第7章	预报因子的选取	66
7.1	相关系数法	66
7.2	主成分分析法	69
7.3	本章小结	74
第8章	基于多元线性回归的径流预报模型	75
8.1	多元线性回归模型原理	75
8.2	多元线性回归模型的应用	76
8.3	多元线性回归模型检验与预测	79
8.4	本章小结	80
第9章	基于 BP 神经网络的径流预报模型	82
9.1	BP 神经网络的基本原理	82
9.2	基于 BP 神经网络预报模型的建立	83
9.2.1	数据预处理	83
9.2.2	网络的构建与训练	83
9.2.3	网络仿真模拟	84
9.2.4	模型评定	84
9.2.5	预报与检验	84
9.2.6	三层 BP 神经网络算法流程	84
9.3	模型应用与评价	85
9.4	本章小结	89

第 10 章 基于 ELM 算法的径流预报模型	90
10.1 ELM 算法概述	90
10.2 ELM 算法原理	91
10.3 ELM 算法训练步骤	91
10.4 ELM 算法的特点	92
10.5 模型应用与评价	92
10.6 本章小结	95
第 11 章 基于马尔可夫链校正模型的径流预测	96
11.1 马尔可夫链校正模型	96
11.2 应用实例	97
11.2.1 基于马尔可夫链校正的多元线性回归预测	97
11.2.2 基于马尔可夫链的 BP 神经网络预测	101
11.3 本章小结	104
第 12 章 基于 R/S 灰色组合模型的中长期径流预报	106
12.1 R/S 灰色预测模型原理	107
12.1.1 R/S 分析法	107
12.1.2 平均循环周期	107
12.1.3 基本灰色 GM (1, 1) 模型	108
12.1.4 模型精度检验	108
12.1.5 R/S 灰色组合模型预测步骤	109
12.2 实例应用	110
12.2.1 径流序列的 R/S 分析	110
12.2.2 平均循环周期	110
12.2.3 R/S 灰色组合模型预测分析	111
12.3 本章小结	112
第 13 章 基于小波包分解的 LS - SVM - ARIMA 组合径流预测	113
13.1 小波包分解的 LS - SVM - ARIMA 组合模型原理	113
13.1.1 小波包分解	113

13.1.2	LS-SVM 模型	113
13.1.3	PSO 算法	115
13.1.4	ARIMA 模型	115
13.2	实例应用与评价	116
13.2.1	实例应用	116
13.2.2	评价	118
13.3	本章小结	118
第 14 章	各水文模型适用性对比分析	119
14.1	各水文模型预报结果对比分析	119
14.2	各水文模型预测结果评价指标对比分析	120
第 15 章	结论与展望	123
15.1	研究结论	123
15.2	不足与展望	125
	参考文献	128

1.1 研究背景及意义

水是生命之源，生产之要，生态之基^[1]。水资源对地球上一切生命体来说都是非常重要的。人类生活在被水包围的地球上，水养活了人类，使人类文明得以延续。水资源既是生活资料，同时也是生产资料，在国计民生中用途广泛，各行各业都离不开水。一个区域的水资源总量指当地降水形成的地表、地下产水量。我国水资源总量很大，位居全球前列。但是我国人口众多，人均河川径流量大大低于世界平均水平，仅为世界平均水平的 1/4，是全球人均水资源最贫乏的国家之一。另外，我国水资源因受海陆位置、水汽来源、地形地貌等因素的影响，在地区上分布极其不均匀。南部地区降水多，水资源丰富，北方地区降水少蒸发大，极度缺水。许多河流都有径流年际变化大的现象，洪水和干旱经常威胁人们的生产和生活。因此，分析流域的水文特性并开展中长期径流预报对于水资源管理决策具有有效的参考价值。降雨径流的精确预报有助于指导用水管理工作，能有效避免意外事故造成的生命安全、经济损失^[2]。

目前，径流受气象、水文、地理、人类活动等多方面的影响^[4]，而且影响机理十分复杂，既存在确定性规律，又存在随机性特点，难以做出准确、可靠的径流预报^[5]。因此，探索中长期径流预报新方法、新技术，不断提高预报精度和可靠性，实现中长期径流预报适用性的提升，具有重要的理论意义和应用价值^[7]。本书选取洛河流域为研究对象，收集了长水水文站的径流资料，采用

适当的方法对洛河流域的年径流变化规律进行分析,在利用相关系数法和主成分分析法筛选预报因子的基础上,对洛河流域的水文要素变化规律进行分析,构建洛河流域径流预报模型。

我国的主要灾害类型旱灾严重影响着人类赖以生存的自然环境。据历史文献记载,自公元 1000 年来,我国发生的重大干旱事件就有 14 起。其中比较有代表性的是 1637—1643 年明崇祯年间持续长达 6 年的大旱,我国南北方 23 个省相继遭受严重灾害。1876—1878 年清光绪年间更是发生了持续 3 年的典型干旱,在旱区中心的山西南部的无效降雨长达 200 余天,陕西的华阴县全年无降雨日更是达到 290 天以上。近年来,暴雨成灾、久旱无雨等异常气候事件频繁地出现在世界各地。2013 年 9 月 27 日,联合国政府间气候变化专门委员会第一工作组发布的第五次评估报告中指出,全球大部分地区都出现了升温、变暖现象。1880—2012 年过去的 130 多年里,全球地表平均气温大约上升了 0.85°C ,且每 10 年升温幅度达到 1850 年以来的最大值^[8-9]。随着社会经济的发展以及气候在人类活动影响下的不断变化,土地荒漠化、生态系统脆弱、水资源短缺等干旱问题逐渐凸显出来。

全球约 1/3 的陆地面积都不同程度地遭受着干旱威胁,由此造成 60 亿~80 亿美元/年的经济损失。据我国学者对历史上干旱灾害造成的损失数据研究表明,干旱灾害导致的死亡人数占全部自然灾害造成死亡人数的 40%左右^[10]。另外,国家气象局对近几年气象资料统计表明,气象灾害在自然灾害中的比重高达 71%。而在气象灾害中,旱灾就占 53%,位居首位。《中国水旱灾害公报》中关于干旱灾害的统计数据表明,2000—2016 年全国作物因旱受灾面积平均约为 1.96 千万 hm^2 /年,平均粮食损失约为 279.44 亿 kg,饮水困难人口平均约为 2206.42 万人,造成的直接经济损失占当年 GDP 的比重平均约为 0.24%。由此可见,干旱成为关系到全国人畜饮水安全、作物粮食安全、国民经济发展的重大问题,全社会需高度重视这一问题,科研人员和学者也应对此做更深的研究。

随着我国社会的不断发展和经济的不断增长,人们对水资源的需求量也日渐增长,虽然我国淡水资源总量丰富,但人口基数大,且人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4,是全球人均水资源量最匮乏的国家之一。水资源每天都在消耗,主要靠降水补充消耗量。而降水受地形和气候的影响,年内分布很不均匀,且夏季多冬季少,年内变化剧烈,为防洪和抗旱带来很大的困难,有限的

水资源难以被充分利用。在人类活动和环境变化的日益影响下,我国的水资源量发生了一定的变化,北方地区的水资源量显著减少,而我国正处于经济超高速增长时期,对水资源的需求量迅速增大。由于水资源用途的多样性和不可替代性,各个用水部门之间会因水资源供给不足出现水资源使用权争夺等各种各样的矛盾。为实现社会和谐、快速发展,就需要对有限的水资源进行最大化合理利用,引黄工程、南水北调工程等重大民生超级工程可暂时缓解部分城市居民用水压力,缓解当地水资源需求压力,克服由于干旱带来的水资源问题。

近年来,由于气候变化和人类高强度活动,几十年一遇的高温天气、历史性大范围地区严重干旱、长达数十天未发生降雨等异常现象频繁发生,导致灾害地区或流域内降雨径流形成机制和流域水文循环发生了一系列的改变,长时间和大范围的干旱灾害,使得用于旱灾风险评估的水文序列发生了变异。因此,针对非一致性水文序列进行干旱分析时,应先分析其变异趋势及变异点,对非一致性水文序列进行还原修正后再进行干旱分析^[11]。水文序列一致性要求组成该系列的流量资料是在同样的气候条件、同样的下垫面条件和同一观测断面上获得的^[12],属同分布、同总体。但影响水文序列一致性的因素众多,气候(如降雨和气温)的变化、大型水利枢纽工程的建设、水库调节、跨流域引水、河道治理以及流域地形地貌、土壤植被的改变等都会对水文序列产生一定的影响。因此,在非一致性序列的前提下,应用数理统计的方法对现有的水文长序列进行频率分析和设计推求,便失去了传统意义上设计分析的主要目的。其中气候变化较为缓慢,可不考虑其对水文循环的影响,但是人类活动的影响,却极为显著,是影响水文资料一致性的主要因素之一。

1.2 研究进展

目前国内外关于中长期径流预报模型的研究有很多。由于水文要素变化规律错综复杂,径流变化具有一定的不确定性。通常在开展中长期径流预报工作之前要进行径流变化规律的特性分析,包括趋势特性分析、突变特性分析、周期特性分析等^[13-14],然后运用恰当的径流预报模型进行径流模拟预测。因此本书主要从水文要素特性分析和径流预报模型两方面对国内外研究进展进行介绍。

1.2.1 水文要素特性分析研究进展

随着水资源短缺问题的日益加剧,气象水文要素变化规律的研究受到国内外学者的广泛关注^[15]。综合国内外研究方法,研究水文要素演变的趋势性、突变性及周期性主要是采用数理统计的方法。国外许多研究人员对此进行了大量研究:Lettenmaier et al.^[16]使用 Mann-Kendall 趋势分析法、单变量趋势分析法和多变量趋势分析法分析了美国大陆的月降水量、温度和流量的趋势,发现 11 月至次年 4 月期间,几乎一半台站的流量都在大幅增加,其中北部各州的流量最大;Gan et al.^[17]使用 Kendall 的测试来确定加拿大大草原的水文气候趋势和可能的气候变暖,发现该地区的气候趋于变暖和干燥,但干旱的严重程度和持续时间没有明显的变化;Buffoni et al.^[18]运用 Mann-Kendall 检验研究了 1833—1996 年间意大利 32 个观测站的一系列年降水量和季节降水量,研究结果显示,整个意大利的年度序列呈下降趋势,但只有在中南部才有统计意义;Zhang et al.^[19]从加拿大参考水文流域网络数据库中获得了过去 30~50 年中 11 个水文气候变量,研究其变化趋势;Tabari et al.^[20]采用 Mann-Kendall 检验、Sen 斜率估计和线性回归分析了 1966—2005 年伊朗 41 个台站的年降水量和季节降水量趋势。Ehsanzadeh et al.^[21]分析了阿西尼博因河和红河两条主要支流的年总流量、降水量、径流量和日最大流量,分析了它们的一系列非平稳特性,所使用的方法包括非参数 Mann-Kendall 检验,用于解释不同的记忆特性(即短期与长期),同时运用了贝叶斯变化点检测模型,以识别具有不一致非平稳行为的时间序列的可能片段;Palizdan et al.^[22]利用离散小波变换在马来西亚雪兰莪州加特河流域进行了降水趋势分析,结果显示区域 SC₁ 的原始降水序列呈现不显著的正趋势,相反,SC₂ 区域(盆地的大部分区域)呈现微小的负趋势;Partal et al.^[23]使用非参数方法(即 Mann-Kendall 和 Sen's T 检验)确定土耳其全国 96 个降水站年平均和每月总降水量序列的长期趋势;Mauget^[24]运用 Mann-Whitney U 统计检验的方法对 10 年至几十年之间的年平均气温和总降水量的时间序列进行分析计算,发现美国大陆在 1932—1999 年出现了三个这样的时期:20 世纪 30—50 年代的干旱,1964—1979 年的凉爽时期,以及 20 世纪末的湿热时段;Praveen Kumar^[25]采

用小波分析法对降雨的周期性进行了小波变换,发现降雨量存在多时间多尺度性和标度的自相似性。

国内学者也对水文要素变化研究做了大量工作:徐宗学等^[26]利用北京地区 20 个气象站点的数据,运用非参数检验方法 Mann-Kendall 法分析了北京地区降水量的时空分布特征;束美珍等^[27]利用线性回归法、累积距平法分析了海河流域年际降水特征,认为海河流域降水量呈微弱下降趋势,且在空间上由南向北逐渐递减;张东艳等^[28]利用 Mann-Kendall 检验方法对尼洋河流域气象水文数据进行分析,结果显示近 30 年尼洋河流域降水量年际变化不大,但年内分配极不均匀,在汛期,降水量大且集中,非汛期降水不太稳定,且冬季降水整体表现出减少趋势,气温呈上升趋势;张平等^[29]利用 1956—2010 年淮河蚌埠以上流域内 112 个雨量站的逐日降水资料,采用 Mann-Kendall 趋势分析法和小波分析法分析了蚌埠以上流域三级水资源分区近 50 年降水的时空分布特征,结果表明淮河蚌埠以上流域多年平均降水空间分布不均匀;Fan et al.^[30]利用山西省 61 个气象站在 1959—2008 年的气温和降水时间序列数据,对山西省气候变化进行了分析,采用 Mann-Kendall 检验和 Mann-Whitney 检验分别检验了年平均气温和总降水量序列的单调趋势和阶跃(突变)趋势;丁勇等^[31]运用 ArcGIS 软件与 Mann-Kendall 检验法,以内蒙古为研究区域,分析了 1969—2008 年间区域温度和降水量的年值和季节值变化趋势及时空格局;毕远杰^[32]利用非参数 Mann-Kendall 突变检验方法,系统地对汾河水库径流序列的趋势及突变性进行了检验,结果表明 1960—2016 年,汾河水库年径流量呈下降的趋势,径流量发生突变的年份分别为 1964 年、1967 年和 1970 年;许晓艳^[33]通过线性趋势法、滑动平均法、滑动 t 检验等方法,对辽河流域的降雨、径流、泥沙和洪水等进行了分析研究,分析出辽河的降雨、径流、泥沙、洪水整体呈下降趋势,且径流突变点为 1975 年;王文圣等^[34]运用 Marr 小波和 Morlet 小波变换对长江宜昌站近 100 年平均流量的演变特性进行了分析;王麒翔等^[35]根据黄土高原地区 214 个地面气象站最近 50 年(1961—2010 年)的逐日降水量数据,采用非参数 Mann-Kendall 法和 Mann-Whitney 法,从黄土高原地区、典型黄土高原和综合治理分区 3 个层面,对本地区年降水量(PTOT)、侵蚀性降水量(R12mm)、汛期降水量(RJJAS)和暴雨量(R50mm)的时空变化特点进行了研究;张应华等^[36]针对当今普遍采用的参数统计、非参数秩检验和小波分析方法及其本质原理,在分类阐述的基础上,

系统归纳总结了各个方法在应用过程中存在的问题及解决方案，并以黑河流域托勒气象站年平均气温为实例，对比分析各方法计算结果的差异性，凝练出水文气象序列趋势分析与变异诊断的理论与方法系统体系。

1.2.2 中长期径流预报研究进展

随着科学的发展和水文预报研究人员的增加，径流预报方法也在不断更新。径流预报按照时间分为两大类，即传统中长期的径流预报与现代中长期的径流预报^[37-38]。传统中长期径流预报方法包括水文统计法和成因分析法；现代中长期水文预报方法是随着数学理论和计算机技术的发展而兴起的径流预报方法^[39]，例如灰色系统分析法、人工神经网络模型、模糊分析、支持向量机、小波分析、马尔科夫模型等。这些模型和技术的发展为中长期径流预报研究提供了新的思路，但每种模型和技术都有其各自的优缺点。为了满足社会对径流预报精度的要求，应结合现代预测技术发展，探索更有效的预测模型和方法。

1.2.2.1 传统中长期径流预报方法

传统中长期径流预报方法中，应用较为广泛的主要有水文统计法和成因分析法，具体介绍如下。

1. 水文统计法

水文统计法是用概率论和数理统计学的原理和方法，通过大量历史水文资料探索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^[40]，可分为多元回归分析法和时间序列分析法。王琪等^[41]利用主成分分析和 Logistic 方程多元回归分析方法，建立了大伙房水库径流中长期预报模型，研究结果表明模型预报效果较好，可用于进行初步预测；曹永强等^[42]利用主成分分析法提取影响径流变化的综合因子，然后对综合因子进行 Logistic 方程拟合，最后利用多元回归方法建立水库中长期径流预报模型，结果显示模拟精度较高。靳晟等^[43]分别建立了时间序列模型和多元回归模型，并进行了预报拟合及精度检验，结果显示玛纳斯河时间序列模型虽预报精度较低，但有较好的适应性；而多元回归模型精度较