

流域中长期径流分类预报方法

李鸿雁¹, 薛丽君¹, 王红瑞², 王晓昕¹

(1. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 以水文循环基本原理为基础, 从流域径流水汽来源影响因素角度明确了中长期径流预报基本概念及分类, 即以气象(中期)、气候(长期)和天文因素(超长期)为预报因子, 针对流域出口断面(或典型断面)的旬、月、季(汛期)或年径流, 以及流域旱涝趋势进行预报。通过比较不同时间尺度下的水汽系统物理运动机理, 论证了“短期气候预测”作为中长期径流预报理论基础的合理性, 并将流域径流来源影响因素及其表现概括为三大规律: 天文因素表现出的周期性是主要规律, 反映了水文气候过程的基本状态; 大气环流表现出的随机性对水文气候基本状态存在干扰, 导致了波动; 流域特征性规律反映了各种因素综合作用结果, 具有流域的特殊性。最终, 将流域中长期径流预报分为正常年份的径流过程预报和异常灾变年份的大旱大涝预测, 其中前者的预报因子为水文气象与气候要素, 后者为天文因素; 在服务对象上, 前者为水利工程常规运行调度服务, 后者为防洪抗旱部门防灾减灾提供灾情预测; 在结果发布上, 前者提供定量的径流过程预报, 后者提供丰、平、枯等3级(或5级)定性预测, 并给出相似年份; 在预报方法上, 前者采用数理统计方法或物理成因相关分析法, 后者采用周期性、随机性和流域特殊性识别等综合预报方法。

关键词: 中长期径流预报; 径流预报; 径流分类预报; 径流过程预报; 大旱大涝预测

中图分类号: TV 121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 05-0817-06

Classification forecast method for mid- to long term runoff in river basin

LI Hong yan¹, XUE Li jun¹, WANG Hong rui², WANG Xiaoxin¹

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the basic principle of hydrologic cycle, the basic concept and classification of mid- to long term runoff forecast are defined from the perspective of impact factors of water vapor sources of river basin runoff, the meteorological factors (mid term), climate factors (long term), and astronomical factors (very long term) are selected as the predictors, and the ten day, monthly, seasonally (flood) or annual runoff targeting to the outlet section of river basin (or typical section) and drought and flood trend are forecasted. Through the comparison of the difference in the physical movement mechanism of water vapor system under different time scales, the rationality of “short term climate prediction” as the theoretical basis for mid- to long term runoff forecast is demonstrated. The impact factors for the runoff sources in river basin and their performance are summarized as three laws: the periodic law of astronomical factors is the main rule, which reflects the basic state of hydrological and climatic process; the random law of atmospheric circulation has interference on the basic state of hydrology and climate, which leads to fluctuation; and the characteristic law of river basin reflects the comprehensive effects from various factors, which has particularity. Finally, the mid- to long term runoff forecast can be divided into two categories: runoff process forecast in normal year and drought and flood forecast in abnormal calamity year. The former takes the hydrological and climatic elements as predictors whereas the latter takes the astronomical factors as predictors. In terms of service objects, the former serves for the regular operation and scheduling of water projects whereas the latter provides disaster forecast for disaster prevention and reduction in flood control and drought resistance departments. In terms of publication of results, the former provides the quantitative forecast of runoff process whereas the latter provides the qualitative forecast of level 3 (or level 5) and similar years. In terms of forecast methods, the former adopts mathematical statistics method or physical cause correlation analysis whereas the latter adopts comprehensive forecasting identification method of periodicity, randomness, and watershed particularity.

收稿日期: 2014-11-08 修回日期: 2015-06-18 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2036.017.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379088); 吉林省科技厅科技支撑项目(20130206088SF)

作者简介: 李鸿雁(1968-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源预测预报研究。E-mail: lihongyan@jlu.edu.cn

Key words: mid to long term runoff forecast; runoff forecast; runoff classification forecast; runoff process forecast; serious flood and drought forecast

中国位于气候环境变化最为激烈的季风区,在地理纬度、海陆位置和青藏高原等因素作用下形成的独特的东亚季风环流,导致区域(流域)降雨的时空分布不均匀,加之人口众多的社会因素,使得水资源短缺和旱涝灾害频发成为水文工作面对的严峻挑战。

河川径流是大气降水经过流域下垫面的分配与调蓄作用后汇入河槽的水量,是能够被人为直接调度的水资源,也是评价流域水资源状况的重要指标。一般而言,河川径流与降水量的时空分布规律大体一致^[1],但是由于受流域的地形地貌、地质条件、土壤类型、岩石性质、植被以及人类活动等多方面因素的影响,由降水转化为径流的过程比较复杂,导致河川径流的时空分布更为复杂,因此,流域的径流预报相对于降水预报更为复杂和困难。

中长期径流预报可以为解决天然来水与人为用水不协调的水资源调度和防洪抗旱的防灾减灾提供水文信息支持。流域中长期径流预报的研究对象属于多因素耦合作用的复杂开放巨系统,主要表现在以下几方面:(1)影响因素众多,有的难以进行专业化抽象与概括,乃至准确测量;(2)各影响因素之间,以及影响因素与径流之间的作用机理复杂,难以进行物理抽象,乃至数学表达;(3)环境变化导致系统状态的非平稳性^[2-3],如气候变化导致水文循环变化、人类活动导致的下垫面特征变化和跨流域调水直接改变径流的时空分布等,最终导致流域水文资料的非一致性。因此,流域中长期径流预报难以做出精确而可靠的定量预报。

本文从流域中长期径流分类预报基本概念、理论依据和预报方法等方面进行创新探索,拟在针对不同需求提供实用性预报方法。

1 中长期径流分类预报的基本概念

1.1 中长期径流预报

一般而言,水文预报^[4]按预见期的长短分为:(1)预见期为数小时或数天的称为短期水文预报,如河道洪水预报、流域降雨径流预报;(2)预见期较长的称为中长期水文预报,如旬、月、季或年的径流预报等,其中中期与长期的划分尚无统一界定,通常将预见期在 15 d 以上至 1 a 以内的称为长期预报;(3)预见期超过 1 a 称为超长期预报,如对大江大河或较大范围未来旱涝趋势的预测,有时亦称为水情展望。这里的预见期^[5]是指发布预报与预报要素出现的时间间距。黄忠恕^[6]认为不同流域其暴雨特征与汇流时间差异性非常大,严格来讲,不存在以预见期长短来划分预报过程长与短的界限。有关人们对短期天气预报和长期天气预报(实质应该为气候预测)的认识历史,下文还有更为详实的阐述。习惯上把根据水文要素做出的预报称为短期预报,把包括气象(或气候)要素在内的水文预报称为中长期预报。由此看来,短期预报和中长期预报的本质差异在于预报因子的不同。因此,本文根据径流来源的水汽形成机理与影响因素,把以气

象因素作为预报因子的称为中期径流预报,把以气候因素作为预报因子的称为长期径流预报,把以天文因素作为预报因子的称为超长期径流预报。预报项目为流域出口断面(或典型断面)的旬、月、季(汛期)或年径流,同时也包括对流域旱涝趋势的预测与估计。换言之,以落地雨为预报因子的称为短期水文预报,其他都称为中长期径流预报。

1.2 中长期径流分类预报

根据预报因子的不同,中长期径流预报分为正常年份的径流过程预报和异常灾变年份的大旱大涝预测,前者的预报因子为气象或气候因素,后者的为天文因素。两者在形成机理、预报方法和结果发布上都大不相同。

在径流形成机理方面,流域的气候特征主要受太阳活动、大气环流和自然地理环境等因素的综合作用。太阳辐射为来自水文循环系统之外的天文因素,对气候的影响呈周期性;大气环流是气候形势的主导因子,具有季节性变化规律,与此同时,各种影响因素都是通过影响大气环流来实现各自作用,即大气环流为各种尺度天气系统活动提供基础条件,呈现随机性规律;流域性的自然地理特征对大气环流有一致性的作用规律,反映流域响应的特殊性和一贯性。因此,流域的水文气候就是周期性规律和随机性规律的耦合叠加,在长时间尺度上呈现规律性,在短时间尺度上呈现随机性。研究表明^[7],流域径流异常的大旱大涝灾变年份有周期性规律,如嫩江和第二松花江的大旱大涝均存在 10 a 概周期性,且具有前后 1 a 的误差。

在预报方法方面,在长序列的观测数据中,径流异常年份的大旱大涝数据无疑是少数的,而正常年份的径流数据占绝大多数。任何一种数理统计方法或数学模型,所模拟的都是众数规律,大旱大涝这样小概率样本不会获得较好的模拟和预报结果。因此,数理统计和物理成因相关分析法适用于径流过程定量预报,而关注于灾害成因及演变规律识别的灾变理论适合径流异常灾变年份的大旱大涝预测。

在服务目的方面,流域径流异常的大旱大涝预报与正常年份的径流过程预报截然不同,前者旨在为决策部门提供是否发生大旱或大涝的灾变信息,丰、平、枯的定性预报足已保证减灾方案制定的方向性;后者主要为水库兴利运行服务,如为发电、灌溉、供水等部门制定较为详细的调度分配方案。

在预报成果发布形式上,径流异常年份的大旱大涝采用丰平枯分级定性预报,并提供洪水相似年,以借鉴历史洪水过程及灾情状况;而正常年份的径流过程要进行定量预报,才能使结合预报成果编制水库运行优化调度方案具有可操作性。

2 中长期径流预报的理论基础

中长期径流预报不仅仅局限于由流域落地雨到河槽径流的产汇流过程,更应探求径流来源的水汽形成原因、条件及其影响因素,而这些内容超出了水文学的研究范畴,已延

伸拓展到气象学和气候学的研究领域。因此,中长期径流预报的实质是气象预报和气候预测问题,水文气象学和水文气候学是其学科基础。

2.1 长期天气过程

天气预报按预见期的长短通常分为三种:短期天气预报(预见期为2~3 d)、中期天气预报(预见期为4~9 d)、长期天气预报(预见期为10~15 d以上),而预见期在1 a以上的预报称为超长期天气预报。一般而言,长期天气预报的准确率比短期天气预报低。

随着人们对长期天气过程及其物理因子研究的加深,已充分认识到长期天气过程和短期天气过程的重大差别:短期天气过程是一种绝热过程,可以凭借大气运动的初始状态做外延预报;长期天气过程是一种非绝热过程,它的变化取决于大气与下垫面的热量交换,而与大气的初始场关系并不重要。经过长期研究,人们逐步认识到长期天气过程存在三种类型和不同时间尺度变化,见表1。

表1 长期天气过程的主要类型和时间尺度⁶⁾

类型	时间尺度	可能的物理原因
地气环流低频振荡	2~6周	超长波振动、大气能量(指数)循环
天气气候季节变化	3~6个月、6~12个月	大气活动中心、地气相互作用、太阳辐射季节变化
	26个月	大气环流准两年振动
	3.5 a	海气相互作用(ENSO循环)
年代际气候变化	5~6 a	太阳活动双振动
	11 a	太阳黑子周期
	22 a	太阳活动海尔周期(磁周期)
	30~40 a	海气相互作用、气候干湿周期
	80~90 a	太阳活动世纪周期

短期气候振动是气候变化中最短的变化过程,通常包括月、季、年气候变化和年代际气候变化。在过去相当长一段时期内,月、季和年气候变化被称为长期天气预报;而1 a以上的气候变化,即年代际气候变化则被称为超长期天气预报。显然,长期天气预报和超长期天气预报概念的界定完全依据预见期的长短,并由短期和中期天气预报延伸而来。从直观认识的角度来看,因其逻辑清楚,便理所当然地被人们接受。但是,随着研究的不断深入,伴随社会生产生活对延长预见期的需求,天气概念也发生了质的变化,即短中期(1~10 d)大气环流状况及其变化是天气学问题,而长期(月、季和年)和超长期(1 a以上)变化则是气候学问题,同时长期天气预报和超长期天气预报主要研究对象和解决的问题而言,如月、季和年的平均环流状况和冷暖(气温)、干湿(降水量)统计特征值等,也完全属于气候学范畴。从20世纪60年代以来,长期和超长期天气预报中普遍采用的预报因子逐渐集中在影响大气环流季节变化的物理因素上,如海-气关系、地-气关系、日-地关系和地球物理因素等,这些物理因素是气候系统的重要组成部分,可称之为气候系统内部物理因素;而太阳活动、日蚀、月蚀和行星引潮力等称为气候系统的外部物理因素。

2.2 短期气候预测

20世纪70年代,随着“气候系统”概念的提出,以及世界气象组织开展的全球气候研究计划、国家减灾10 a(1990年-1999年)活动和关于全球气候变暖学术讨论等诸多因素的敦促下,使用长达百年的“长期天气预报”的概念终于被“短期气候预测”所取代。

短期气候预测是根据大气科学原理,采用现代气候动力学、统计学等方法和电子计算机、数据库、通讯技术等手段,在研究气候变化成因的基础上,对月、季、年际时间尺度的气候趋势和气候灾害进行科学预测。

3 中长期径流分类预报方法

3.1 径流过程定量预报方法

径流过程预报可以归纳为基于气象(气候)条件或其它因素的物理成因分析法和分析水文要素自身变化规律的时间序列分析法两大类¹⁷⁻⁸⁾。

(1)物理成因分析方法主要有以下几种。a.考虑的因素是在已经出现的天气形势下,影响本流域降水量的水汽条件与抬升作用,采用700 hPa或850 hPa形势图,在水汽输送通道上选择目标站的露点或比湿来反映降水量的水汽条件,并采用冷空气强度和地形条件来表征抬升变化,然后由统计方法得出预报结果。b.应用上一旬的平均环流、前期下垫面情况和前期水量等因素与预报对象建立回归方程,来预测下一旬的水量。c.在分析大气环流的超长波与长波活动的时空变化波谱特征及物理量谱特征的基础上,利用谐谱参数或其它环流因子与预报对象建立预报模型。d.根据大气环流前后期的演变规律,由前期环流预报后期的水文情势,概括出几种旱、涝年前期环流的模式,用判断相似的方法进行定性预测。e.以表征环流特征的各种环流指数与环流特征量和其它影响水文长期变化过程的因子,采用逐步回归或其它多元分析方法与预报对象建立定量联系,据此进行预报。物理成因分析法的难点在于如何将复杂的物理过程抽象为数学表达,半理论半经验的经验公式水平只能给出大尺度的定性预报。

(2)时间序列分析的实质是以水文过程要素的相关关系为预报依据,即相关系数越大,影响权重就越大,但客观上,相邻水文要素间并无因果关系(而与影响因素间存在因果关系)。20世纪60年代初,我国开始把平稳随机过程的理论应用于径流长期预测。考虑到水文序列一般不具有平稳性,而把水文序列分解成趋势项、周期项、随机项,分项预测后进行叠加,其中周期的识别一般用周期图、谱分析和方差分析来进行。20世纪70年代,自回归模型得到进一步的应用,ARMA(自回归移动平均)模型、ARIMA(自回归移动平均求和)模型、季节ARIMA模型,以及非线性门限自回归模型也已用于径流预报。随着数学理论不断发展,新的数学分支不断涌现,并在水文预报领域得以应用,为中长期径流预报开辟了新的思路和方法,如模糊数学法⁹⁾、人工神经网络方法¹⁰⁻¹³⁾、灰色系统理论¹⁴⁻¹⁵⁾、多层递阶预报方法¹⁶⁾、混沌动力学¹⁷⁻²⁰⁾及分形理论²¹⁾、最优组合预测方法²²⁾、小波分析²³⁻²⁵⁾和支持向量机²⁶⁻²⁸⁾等方法。这些方法考虑水文因素

和气象因素,同时采用非线性数学方法来模拟流域径流依这些影响因素的变化规律。

3.2 大旱大涝定性预测方法

国外对旱涝灾害的研究大多是针对水文现象不确定性规律的模拟^[29],例如, Porporato 等^[30-33]采用混沌理论分析径流序列的动力特性, Sivakum et al^[34]讨论了径流时间序列的噪声问题以及处理方法, Shozo^[35]采用小波变换和分形学方法预测时间序列等等,而针对流域水旱灾害的预测却不多见。由于地理环境、人口和社会发展状况的不同,国外侧重于旱涝灾害形成机理及表现规律的科学探索和防灾减灾的组织管理,而我国更加重视研究流域旱涝灾害的预测预报。

3.3 规律分析

分析前文,可以将流域径流影响水汽来源的因素及其表现规律概括如下。

- (1) 周期性规律,受周期性因素影响,主要是天文因素。
- (2) 随机性规律,受随机性因素影响,主要为大气环流。
- (3) 流域性规律,受流域性因素影响,主要为下垫面特征。

在三大规律中,周期性规律是主要规律,反映了水文气候过程的基本状态;随机性规律对水文气候基本状态存在干扰,导致了波动;流域性规律反映了各种规律的综合作用结果,具有流域的特殊性。流域水文气候过程受三大规律的共同作用并最终表现相应的状态。

3.3.1 周期性规律识别

研究实践表明,采用可公度性方法可以揭示流域径流的周期性规律。1984年翁文波院士创立了以信息预测为基础的预测理论^[36],他提出的可公度性预测方法具有计算简单、直观、有效、信息失真少等优点。可公度性可以看成是自然界的一种秩序,是一种信息系统,是周期性的扩张^[36-38]。

对于一个时间变量 $y(t)$, 如果有一个 P , 使

$$y(t+P) - y(t) = 0 \quad (1)$$

那么 P 就是一个周期。如果有一个时间区间 ϵ_0 , 使

$$|y(t+P) - y(t)| < \epsilon_0 \quad (2)$$

那么 P 就是一个概周期。如果概周期有物理意义, ϵ_0 必须小于一定置信水平, 以否定其偶然性。

如果时间变量 $y(t)$ 退化为它的一个离散型系列, 即时间序列 $y(i)$, 同时把一元关系扩张为多元多项式, 并有

$$|\sum a(i) \cdot y(i)| < \epsilon_0 \quad (3)$$

式中: $a(i)$ 是整数, 那么离散时间序列 $y(i)$ 有概周期; 如果 $\epsilon_0 = 0$, 则 $y(i)$ 有周期。

对于周期性时间序列, 各周期严格保持 P 的距离。周期性经退化和扩张后, 时间序列集合中各点的关系与周期性已有很大的变化。周期性仅是可公度性的一种极端情况。

关于水文灾变预测实际应用中, 如何检验可公度方法的适用性, 即可公度性, 以及采用可公度方法预测的一般步骤, 夏军^[39]都做了较为详细的阐述, 这里不再赘述。

3.3.2 随机性规律的推断

随机性规律的影响因素来源于水文气候系统内部, 各因素之间存在复杂的相互作用和反馈, 影响因素众多、作用机理复杂且各物理因素都不起控制作用是导致随机性的根本原因^[40]。实践研究表明, 在一个概周期内, 流域的年平均径

流存在丰枯交替、丰枯连续、丰水年段和枯水年段交替出现的规律, 尽管存在波动, 但波动趋势和幅度仍会表现出明显的规律性。在一个概周期中, 一个完整的波动称为“周”, 在周中的微小波动称为“浪”, 因此, 随机性规律的识别可采用“查周数浪”的方法。随机性预报方法可以进一步推断概周期内的大旱大涝趋势。

波浪分析要结合径流演变过程, 研究峰谷年年份、流量量级和持续时间。同时关注当年的大气环流特征, 如副高脊线位置与副高北界、极涡面积与极涡强度指数、东亚槽强度、海温(厄尔尼诺、拉尼娜现象)等。

3.3.3 流域性规律的分析

根据水文循环原理, 流域的大旱或大涝的直接原因是是否有大量的水汽凝聚, 而水汽的凝聚是要有水汽产生、输移和凝结过程的, 必然存在时间和量两方面的积累, 而这个累积过程是有前兆的。

以下垫面特征所表现的流域特征对各种物理影响因素直接产生响应, 最终表现出流域径流异常的大旱或大涝^[40]。尽管物理因素众多且作用机理复杂, 以及流域下垫面对影响因素及其机理的响应机制同样复杂, 但在不考虑水文循环系统内在随机解问题^[41]的情况下, 这种响应就遵循一贯性原则, 即输入与响应结果具有趋同性。

水汽凝聚前兆的表象是极其复杂的, 而经验往往是概括复杂规律的最实用的方法, 千百年流传于当地的民间谚语往往代表了这些经验。通过当年的前兆现象, 可以较准确判断当年是否发生大洪水, 预测当年径流量级。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 流域中长期径流预报是以气象(中期)、气候(长期)和天文因素(超长期)为预报因子, 针对流域出口断面(或典型断面)的旬、月、季(汛期)或年径流进行预报, 同时, 也包括对流域旱涝趋势的预测与估计。

(2) 中长期径流预报将气象要素乃至气候要素作为预报因子, 将预报系统空间延展到大气圈, 短期气候预测的理论与方法可以为中长期径流预报提供直接的借鉴和参考。影响流域径流演变的主要因素有天文因素、大气环流和下垫面特征, 各自呈现周期性、随机性和流域特殊性规律, 其中周期性是主要规律。

(3) 根据流域径流形成机理, 从预报因子和预报方法的不同, 将中长期径流预报分为正常年份的径流过程预报和异常灾变年份的大旱大涝预测。在服务对象上, 前者为水利工程常规运行调度服务, 后者为防洪抗旱部门防灾减灾提供灾情预测; 在成果发布上, 前者提供定量的径流过程预报, 后者提供丰平枯分级定性预测, 并给出相似年份; 在预报方法上, 前者采用数理统计方法或物理成因相关分析法, 后者采用周期性、随机性和流域特殊性识别等综合预报方法。

4.2 建议

在径流预报中构建高效运行的中长期径流预报机制十分必要。首先, 建立预报员制度, 设立专门预报岗位, 组织和培训有经验的专业预报人员进行统计、观察、预报和跟踪修

正预报结果。同时,流域机构建立专门组织负责推动完善和有效运行预报流程,每年汛前召开预报会商会议,提出预测依据及预测成果,形成会议纪要(成果),上报有关部门备案;每年汛后召开预报总结会议,总结经验教训,改进预报方法,形成会议纪要(成果)备案。其核心目的是如何根据预报及跟踪预报成果,及时编制并修正水库运行调度方案,更好为水利工程的兴利调度和防洪抗旱提供决策支持。

参考文献(References):

- [1] 缪韧. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (MIAO Ren. Principles of Hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] Xu, Chongyu, Hua Chen, and Shenglian Guo. Hydrological Modeling in a Changing Environment: Issues and Challenges [J]. Journal of Water Resources Research. (2013): 85-95.
- [3] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安, 等. 水文时间序列突变点分析的启发式分割方法[J]. 人民长江, 2009(09): 15-17+106. (WANG Lina, CHEN Xiaohong, LI Aoyan, et al. Heuristic segmentation method for change point analysis of hydrological time series [J]. Yangtze River, 2009(09): 15-17+106. (in Chinese))
- [4] 李慧珑. 水文预报[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (LI Huilong. Hydrologic Forecasting[M]. Beijing: Water Power Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 叶守泽, 詹道江. 工程水文学[M]. 第三版, 北京: 中国水利水电出版社, 1991. (YE Shouze, ZHAN Daojiang. Hydrology of Engineering[M]. (the third edition) Beijing: China Water Power Press, 1991. (in Chinese))
- [6] 黄忠恕, 金兴平. 水文气候预测基础理论与应用技术, 长江水利委员会大中型水利水电工程技术丛书[M], 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (HUANG Zhongshu, JIN Xingping. Hydrology and climate prediction theory and application technology, ed. The Yangtze river water commission of large and medium sized water power of engineering series[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [7] LI Hongyan, WANG Yuxin, LI Xiubin. Mechanism and Forecasting Methods for Severe Droughts and Floods in Songhua River Basin in China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(5): 531-542
- [8] 黄忠恕, 王钦梁, 匡奇. 北太平洋和青藏高原下垫面热状况与长江流域汛期旱涝关系初步探讨[A]. 水文预报论文选集(1981年全国水文预报学术讨论会)[C]. 北京, 1985: 180-187. (HUANG Zhongshu, WANG Qirliang, KUANG Qi. Preliminary researches on relations between lower boundary thermal conditions of North Pacific and Tibetan Plateau and droughts and floods in Yangtze River Basin in flood season[A]. Hydrological forecasting thesis collection (National Symposium on Hydrological Forecasting in 1981)[C]. Beijing, 1985: 180-187. (in Chinese))
- [9] 王本德. 水文中长期预报模糊数学方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992. (WANG Bende. Fuzzy Mathematics Method of Long term Hydrologic Forecasting[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1992. (in Chinese))
- [10] 胡铁松, 袁鹏, 丁晶. 人工神经网络在水文水资源中的应用[J]. 水科学进展, 1995, 6(1): 76-82. (HU Tiesong, YUAN Peng, DING Jing. Applications of artificial neural network in hydrology and water resources[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(1): 76-82. (in Chinese))
- [11] Hsu K, Gupta H V, Sorrosian S. Artificial neural network modeling of the rainfall runoff process[J]. Water Resource Research, 1995, 31(10): 2517-2530.
- [12] Huang W, Xu B, Char Hilton A. Forecasting flows in Apalachicola River using neural networks[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(13): 2545-2564.
- [13] 丁晶, 邓育仁, 安雪松. 人工神经网络(BP)网络模型用作过渡期径流预测的探索[J]. 水电站设计, 1997, 13(2): 69-74. (DING Jing, DENG Yuren, AN Xuesong. Researches of BP network in runoff forecasting in transition period[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1997, 13(2): 69-74. (in Chinese))
- [14] 夏军. 中长期径流预报的一种灰关联模式识别与预测方法[J]. 水科学进展, 1993, 4(3): 190-197. (XIA Jun. A grey correlative analysis and pattern recognition applied to mid-long term runoff forecasting[J]. Advances in Water Science, 1993, 4(3): 190-197. (in Chinese))
- [15] 陈意平, 李小牛. 灰色系统理论在水利中的应用及前景[J]. 广州: 人民珠江, 1996(1): 25-27. (CHEN Yiping; LI Xiaoniu. Application of grey system theory in water conservancy and its Prospect[J]. Guangzhou: Pearl River, 1996(1): 25-27. (in Chinese))
- [16] 王博, 马跃先, 贺北方. 月径流序列的多层递阶预报研究[J]. 系统工程理论与实践, 1999(7): 132-135. (WANG Bo, MA Yaoshan, HE Beifang. Research on the multi layer hierarchical forecast of monthly runoff series[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999(7): 132-135. (in Chinese))
- [17] Jayawardena A W, Feizhou L. Chaos in hydrological time series[J]. IAHS Publ, 1993, (213): 59-66.
- [18] Breaford P W, Seyfried M S, Matison T H. Searching for chaotic dynamic in snowmelt runoff[J]. Water Resources Research, 1991, 27(6): 1005-1010.
- [19] 丁涛, 周惠成. 混沌时间序列局域预测模型及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(3): 445-448. (DING Tao, ZHOU Huicheng. Local prediction model for chaotic time series and its applications[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(3): 445-448. (in Chinese))
- [20] Jayawardena A W, Feizhou L. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series[J]. Journal of Hydrology, 1994(753): 23-52.
- [21] Shozo, Tokinaga, et al. Forecasting of time series with fractal geometry by using scale transformations and parameters estimation obtained by the wavelet transform[R]. Electronics and Communications in Japan. (Parts 3), 1997, 80(8): 20-30.
- [22] 农吉夫, 金龙. 月平均降水量的二次规划最优组合预测方法研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(6): 704-712. (NONG Jifu, JIN Long. Study on methods forecasting monthly mean rainfall using the optimal combination of quadratic programming [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, 20(6): 704-712. (in Chinese))
- [23] Cao Liangyue, et al. Predicting chaotic time series with wavelet network[J]. Physical D, 1995, 85: 225-238.

- [24] 李贤彬, 丁晶, 李后强. 基于子波变换序列的人工神经网络组合预测[J]. 水利学报, 1999(2): F4. (LI Xiabin, DING Jing, LI Houqiang. The combination forecasting using artificial neural network based on wavelet transformed sequences[J]. Journal of hydraulic engineering, 1999(2): F4. (in Chinese))
- [25] 赵永龙, 丁晶, 邓育仁. 混沌小波网络模型及其在水文中长期预测中的应用[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 252-287. (ZHAO Yonglong, DING Jing, DENG Yuren. Chaotic wavelet network model and its application in hydrologic mid long term prediction[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(3): 252-287. (in Chinese))
- [26] 李亚伟, 陈守煜, 韩小军. 基于支持向量机 SVR 的黄河凌汛预报方法[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(2): 272-275. (LI Yawei, CHEN Shouyu, HAN Xiaojun. Yellow River ice flood prediction based on SVR[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(2): 272-275. (in Chinese))
- [27] 王亮, 张宏伟, 牛志广. 支持向量机在城市用水量短期预测中的应用[J]. 天津大学学报, 2005, 38(11): 1021-1025. (WANG Liang, ZHANG Hongwei, NIU Zhiguang. Application of support vector machines in short term prediction of urban water consumption[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(11): 1021-1025. (in Chinese))
- [28] 林剑艺, 程春田. 支持向量机在中长期径流预报中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 681-686. (LIN Jianyi, CHENG Chuntian. Application of support vector machine method to long term runoff forecast[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 681-686. (in Chinese))
- [29] 范垂仁, 夏军, 张利平, 等. 中国水旱灾害长期预报: 理论. 方法. 实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (FAN Chuiran, XIA Jun, ZHANG Liping, LI Xiabin. Long-term prediction of drought and floods in China: Theory. Method. Practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [30] Amilcare P, Luca R. Nonlinear analysis of river flow time sequences[J]. Water Resources Research, 1997, 33(6): 1353-1367.
- [31] Jayawardena A W, Feizhou L. Chaos in hydrological time series[J]. IAHS Publ, 1993, (213): 59-66.
- [32] Breaford P W, Seyfried M S, Matison T H. Searching for chaotic dynamic in snowmelt runoff[J]. Water Resources Research, 1991, 27(6): 1005-1010.
- [33] Jayawardena A W, Feizhou L. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series[J]. Journal of Hydrology, 1994, (753): 23-52.
- [34] Sivakumar B, Phoon K K, Liong S Y, Liaw C Y. Comment on "Nonlinear analysis of river flow time sequences" by Amilcare Porporato and Luca Ridolfi[J]. Water Resources Research, 1999, 35(3): 895-897.
- [35] Shozo, Tokinaga, et al. Forecasting of time series with fractal geometry by using scale transformations and parameters estimation obtained by the wavelet transform[R]. Electronics and Communications in Japan. Parts3, 1997, 80(8): 20-30.
- [36] 翁文波. 预测论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. (WENG Wenbo. Basis of Prediction Theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984. (in Chinese))
- [37] 翁文波, 吕牛顿, 张清. 预测学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. (WENG Wenbo, LV Niudun, ZHANG Qing. Prediction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [38] 徐道一, 翁文波. 可公度性预测方法及其意义[A]. 高建国. 灾害预测方法集成[C]. 北京: 气象出版社, 2010. (XU Daoyi, WENG Wenbo. Commensurability prediction method and significance of Academician. GAO Jianguo. Integrated of disaster prediction method[C]. Beijing: Meteorological Press, 2010. (in Chinese))
- [39] 夏军. 水文灾变事件的一种可公度信息预测方法初探[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, 2(3): 288-295. (XIA Jun. Study on a method of commensurable information forecasting of hydrologic disastrous events[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1991, 2(3): 288-295. (in Chinese))
- [40] LI Hongyan, WU Yanan, LI Xiubin. Analysis of mountain effect and differences in storm floods between northern and southern sources of the Songhua River Basin[J]. Journal of Mountain Science. 2012, 9(3): 431-440.
- [41] 韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (HAN Min. Prediction Theory and Method of Chaotic Time Series[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))