

中长期水文预报方法研究综述

张俊^{1 2} 程春田² 林剑芝³ 廖胜利²

(1. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007; 2. 大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连 116024;
3. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361003)

摘要 对中长期水文预报研究中具有代表性的研究工作进行了回顾, 在此基础上对现有的预报方法进行分类和总结, 并对我国未来的中长期水文预报技术的发展趋势进行了展望。

关键词 中长期水文预报; 神经网络; 模糊; 灰色系统; 混沌; 小波

中图分类号 P338 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2010)S1-0170-07

我国拥有较为丰富的水资源, 随着经济的不断发展, 现代社会的生产和生活对中长期水文预报工作提出了更高的要求。及时、有效的中长期水文预报不仅能为预防规避旱涝灾害提供必要的预警, 而且还能充分利用水能资源、合理规划能源结构提供重要依据。同时, 水文系统具有确定性、随机性、非线性和模糊性等特点, 中长期水文预报作业涉及数学、水文水资源学、水动力学、气象学、统计学、计算机科学等众多学科, 属于高度交叉的研究领域。因此, 中长期水文预报技术一直是水文工作者的研究重点和难点。长期以来, 伴随着各个学科的发展, 特别是数学理论和计算机理论的高速发展, 中长期水文预报技术也获得了快速发展, 许多专家学者对该问题展开了深入的研究, 并取得了大量有意义的成果。然而, 目前还尚缺乏系统的归纳, 鉴于此, 笔者对现有的中长期水文预报方法进行了分类和归纳, 对其中有代表性的研究工作和成果进行了回顾, 并对今后我国的中长期水文预报技术发展前景进行了展望。

中长期水文预报通常是指根据水文现象的客观规律, 利用前期水文气象资料, 采用一定的数学方法, 对未来一段时期内的水文要素进行科学预测, 以径流预测为主。一般将预见期在 15 d 以内的预报称为中期预报, 预见期在 15 d 以上、1 d 以内的预报称为长期预报, 而预见期在 1 d 以上的预报称为超长期预报。由于具有较长的预见期, 中长期预报在方法上无法利用实测降水资料通过流域水文模型的产

流、汇流机制进行计算, 必须考虑影响中长期水文过程的各种因素或分析水文要素自身变化规律来进行预报^[1]。

1 物理成因分析方法

通常认为, 与水文要素中长期变化规律紧密相关的因素有大气环流、太阳活动、行星相对位置、地球自转速度变化规律、陆地海洋下垫面情况等。物理成因分析方法试图通过研究上述宏观因子的运动规律, 获得降水变化规律, 进而发现水文要素的中长期演变规律。国外许多学者开展了大量这方面的工作, 其中, Hamlet^[2], Wang^[3], Whitaker^[4], Piechota^[5]等分别研究了厄尔尼诺(El Nino)、拉尼娜(La Nina)、太平洋十年涛动现象(Pacific Decadal Oscillation, PDO)等大气现象与澳大利亚东部地区、北美地区(哥伦比亚河)、非洲东北部地区(尼罗河)、印度北部地区(恒河)河流的旱涝、洪水及流量的关系。范新岗^[6]研究了降雨与下垫面热力场背景之间的对应关系, 并指出夏季长江中、下游暴雨与下垫面地热场地热通量的具体数量联系。刘清仁^[7]以太阳活动为中心, 用数理统计分析方法分析了太阳黑子、厄尔尼诺事件对松花江区域水文影响特征及其水、旱灾害发生的基本规律。王富强等^[8]根据气象因素和旱涝灾害的关系, 引入了转移概率、太阳黑子相对数和厄尔尼诺方法, 导出了东北区旱涝灾害预报的方法和公式。章淹^[9]采用气象与水文结合的方法, 论述了大气环流、卫星云图、大气(超)长波、OLR 场分布特点等与

洪水的关系,并探索了中期预报方法。

2 数理统计方法

由于许多宏观因子资料难以获得并且分析困难,物理成因分析方法的研究和应用受到一定程度的限制。这种情况下,根据大量历史水文资料,利用概率论和数理统计原理,从水文要素与预报因子之间寻找其统计规律进行预报的方法成为长期以来中长期水文预报的重要手段。根据预报因子类别的不同,可分为2类:①单要素预报,即分析水文要素本身时序变化规律进行预报,如历史演变法、周期叠加、平稳时间序列、趋势分析及随机函数的典型分解等;②多因子综合预报,即分析要素与前期多因子之间的统计相关关系,然后用数理统计法加以综合,进行预报,如多元回归分析、逐步回归分析及多维时间序列等^[10-11]。时间序列分析模型^[12]从1970年提出以来已被广泛地应用到了中长期水文预报领域^[13-17]。夏学文^[13]使用基于ARMA的半参数预报方法对湘江水位进行预报,获得了较好的预报效果。许士国等^[14]建立了基于物理成因概念的多元线性回归预报模型,并利用该模型对洮儿河镇西站2005年的最大洪峰流量和峰现时间做了预报,获得了较高合格率。孟明星等^[15]利用自回归(AR)模型对葛洲坝月径流进行预报,并对应用AR模型时需要注意的问题进行了阐述。李崇浩等^[16]提出了最终余波概念和相应的分析方法,改进了周期叠加预报方法并应用于三峡明渠截流期的水文预报,提高了预报精度。纪昌明等^[17]尝试用模糊因果聚类与人工神经网络组合成复合的模式识别模型,提高了洪水预报精度。

3 现代水文预报方法

3.1 模糊数学方法

20世纪80年代中期,陈守煜基于水文科学中的随机性、确定性和模糊性,提出了水资源系统研究的模糊数学方法,将模糊方法与系统分析方法相结合,形成了新的模糊体系,并将该体系应用于中长期水文预报领域^[18-20]。杨百银^[21]将模糊聚类方法应用于龙羊峡电站下闸蓄水水情长期预报。雷录君^[22]提出模糊数学优先比的概念,并应用于水文预报中。闵骞等^[23]利用模糊数学方法对鄱阳湖年最高水位进行长期预报。程春田等^[24]提出考虑权重的模糊回归模型,并应用于刘家峡水库的年平均流量预测。林剑艺等^[25]阐述了自适应模糊推理系统ANFIS的原理结构及学习算法,并验证了模型在中长期水文预报中的有效性。朱之葵^[26]、冯国章^[27]、

白子岩^[28]、王振宇^[29]、惠军^[30]等也将模糊数学方法应用于中长期水文预报。1997年,陈守煜^[31]在多年研究的基础上提出了中长期水文预报综合分析理论模式与方法,该方法将水文成因分析、统计分析和模糊数学方法有机结合,为开展中长期水文预报提供了新的思路。

3.2 灰色系统方法

灰色系统理论是20世纪80年代,由邓聚龙教授首先提出并创立的一门新兴学科,该理论把部分信息已知、部分信息未知的系统称为“灰色系统”。水文系统中,已有的水文资料只是水文要素长序列中很少的一部分,如已有的流量、洪水记录等;更有大量未知部分,如未来的降雨、流量、洪水、干旱情况等;基于此,许多学者认为水文系统属于灰色系统,包含灰色信息和灰色响应,利用灰色系统理论对中长期水文预报展开了分析和研究。杜凤文^[32]根据灰色系统理论对汉江进行长期水位预报,提高了有限单元法的预报精度。夏军^[33]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,提出一种应用于水文中长期预报的方法,并应用于海河、黄河和长江流域若干水文站水情报,此外,还提出了一类显式的灰参数模型识别方法^[34],通过灰参数分析,获得了反映系统不确定度、过程模拟合格率与精确性之间的量化关系,并通过对黄河流域龙羊峡水库月径流的预报分析与检验,说明了这类方法的意义与实用性。袁秀娟等^[35]提出了全因果序列扩维的灰关联模式识别与预测方法,应用于海河流域潘家口水库月径流预报。蓝永超等^[36]建立了一个灰色残差序列周期修正径流预测模型,应用于河西地区和黄河上游长期径流预报。黄克明^[37]应用灰色系统的拓扑预测方法对湖北省沮漳河河溶站的年度最高洪水水位进行了预报,指出该方法预报效果优于自回归模型。张闻胜等^[38]结合灰色理论与时间序列方法对河北东武仕水库和河南唐岗水库的入库流量进行中长期预报,利用灰色系统分析分离时间序列里的趋势项,并应用反馈模拟校正技术对预报结果进行修正,获得了较好效果。邱进辉等^[39]利用灰色关联分析的方法对长江上游地区枯期径流特征进行了分析,确定了影响枯期径流演变的主导因素,在此基础上提出了两种预报方案。朱春江等^[40]结合灰色理论与人工神经网络方法对塔里木河径流量进行预报,利用灰色理论改善神经网络融合的不稳定性,并用实际来水量验证了模型的有效性。基于灰色系统方法的水文预报在国内已经形成了一定规模,但是,国外学者的相关研究和应用相对较少。

3.3 人工神经网络方法

现代人工神经网络的研究起源于 20 世纪 40 年代。McCulloch 和 Pitts 从原理上证明了人工神经网络可以计算任何算术和逻辑问题,并提出了第一个神经元数学模型。由于种种原因,人工神经网络的发展经历了一波三折,直到 20 世纪 80 年代,伴随着数字计算机性能的大幅度提高和广泛应用,才受到人们的足够重视,获得了空前的发展。90 年代以来,许多学者将人工神经网络技术应用到中长期水文预报中。国外学者作了大量的研究和应用,美国土木工程师协会工程委员会和许多学者对此进行了总结和评论^[41-43]。吴超羽等^[44]应用人工神经网络模型对广东省某控制水文站日均及逐时流量进行了预报,验证了该模型能有效地模拟实际水文系统的非线性特征。钟登华等^[45]提出了水文预报时间序列的神经网络模型并使用 C 语言开发了相应软件,对石泉水电站日径流进行了预报,指出神经网络在水文预报建模中具有广阔的应用前景。胡铁松等^[46]提出了用多层径向基函数网络进行水文时间序列预测的神经网络方法,并将预报结果与 BP 神经网络、AR 和 ARMA 等模型进行了对比分析,指出 MRBF 较 BP 神经网络具有全局最优、训练速度快等优点,较传统时间序列方法具有更强的非线性模拟能力,同时也指出了 MRBF 存在的问题。张利平等^[47]将成因分析、统计方法与人工神经网络相结合,并在模型中引入大气环流因子,对白山水库进行了中长期径流预报。李向阳等^[48]探索了神经网络与贝叶斯系统的耦合,在贝叶斯概率水文预报系统框架上,建立了流量先验分布及似然函数的 BP 神经网络模型,对湖南省双牌水库的历史洪水进行仿真预报,提高了预报精度。屈亚玲等^[49]提出一种改进的采用局部回归的 Elman 神经网络方法,并应用到凤滩水库优化调度的径流预报中,与回归分析法、BP 网络相比较,提高了算法效率和预报精度。张俊等^[50]针对常规 BP 算法收敛速度慢和难以获得全局最优的问题,将网络误差函数的改变量引入权值和偏移值的调整,采用自适应学习速率和自适应动量因子调整策略,建立了改进的神经网络 BP 预测模型,应用于湖南双牌水库的日径流预报,模拟结果表明,预报效果优于新安江模型。程春田等^[51]建立了多个不同结构的神经网络模型,应用于云南省漫湾水电站的月径流预报,并将预报结果与传统的时间序列模型进行了对比分析,此外,还提出一个基于多层自适应延时神经网络的模型^[52],获得了较高的预报精度。

3.4 小波分析方法

小波分析理论是当前数学中一个迅速发展的新领域,由 Morlet 于 1974 年首次提出。小波分析技术是一种强有力的信号分析处理手段,在傅立叶 (Fourier) 分析的基础上融合了样条分析、数值分析、泛函分析等技术。与 Fourier 变换、Gabor 变换相比,小波变换能够从时域(时间)和频域(频率)进行变化,能更有效地从信号中提取信息,因而日益受到关注。从时频分析的角度来看,水文序列含有多种频率成分,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,故可以利用小波分析理论分析水文序列。郑昱等^[53]利用小波变换探索了水文序列的近似周期,并利用 F 检验测试,指出基于小波变换获得的水文序列近似周期准确性较高。李贤彬等^[54]在水文时间序列分析中引入了子波变换法,通过对水文时间序列的离散子波变换,给出了计算水文过程变化特征的信息量系数的方法,并比较了表征水文过程变化特征的 3 种指标,即不均匀系数、信息量系数与分维。王文圣等^[55]应用小波分解技术将日流量过程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主周期(年)进行随机重构,从而获得各种不同的日流量过程,通过对屏山水文站日流量的模拟预报,验证了模型的有效性和可行性。欧阳永保等^[56]将小波分析应用于长江宜昌水文站的长期水文预报。周惠成等^[57]将小波变化与模糊模式识别结合,提出了中长期水文预报的新方法,此外,还提出了月径流序列的小波分解预测校正模型^[58],以长江宜昌站和寸滩站的月径流预报为例,验证了该模型较常规时间序列模型的优越性。王文圣等^[59]总结了小波分析理论在水文领域的研究应用情况,并对该方法的应用前景做了展望。

3.5 混沌理论方法

混沌理论起源于 20 世纪 60 年代初美国气象学家 Lorenz 在研究天气预报中大气流动问题时的思考^[60],由李天岩^[61]于 1975 年首次提出。该理论认为,客观事物的运动除定常、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。水文序列兼备了确定性和随机性,符合混沌理论的研究范畴,因而许多学者利用混沌理论开展对中长期水文预报的研究。Porporato 等^[62]较早地探索了河川径流的确定性混沌特性。他们的研究分两个阶段,分别是相空

间重构和关联积分计算以及非线性分析,指出如果径流序列的确定性混沌特性得以确认,将有利于加深对径流形成机制的理解,并提高水文预报水平。Liu 等^[63]通过对日径流过程的相空间分析认为径流过程覆盖了一个宽泛的范围,包含在确定性混沌状态和带有白噪声的周期性信号特征之间。Sannasiraj 等^[64]采用结合混沌理论的确定性模型进行潮汐水位预报,将混沌方法与线性逼近方法结合,进行误差修正,获得了较好的预报效果,一日预报准确率达到 83%,七日预报准确率达到 73%。Sivakumar 等^[65]利用确定性的混沌理论构造了二阶相空间重构模型,并应用于巴西 Araguari 流域的月径流预报,验证了该模型的可行性,同时探索了径流动力系统可能存在的低维混沌特性。此外,Sivakumar^[66]还深入探讨了非线性确定性理论在水文预报中的应用问题。温权等^[67]介绍了探求时间序列中的混沌特征数的常规方法,给出一种基于混沌理论的预测算法,并以葛洲坝、隔河岩水库的入库日径流序列为例验证了其有效性。张利平等^[68]基于相空间重构技术,建立了局域单点相似模型、局域多点相似模型、局域线性相似模型和三参数模型等 4 种相空间模型,并对白山水库月径流量和主汛期径流量进行了模拟预报,发现基于混沌理论的模型应用于中长期水文预报是可行的,有较好的精度和应用价值。丁涛等^[69]提出了混沌水文时间序列区间预测算法,利用关联积分法计算嵌入参数,重构水文时间序列的相空间,采用交叉迭代模糊聚类算法确定当前时刻相点的相似状态,并依据给定的不同区间风险度,动态得到未来某一时刻水文要素值的取值区间。强学民等^[70]讨论了基于混沌理论的相空间近邻等距模式及该理论中的预见期 T 、延迟时间 t 、相空间维数 d 等,提出了实际应用中根据 T 建立的新时间序列的方法,提高了月径流的预报精度。杨庆娥等^[71]利用傅立叶级数展开法分离出时间序列中的主要周期项,对时间序列与主要周期项的差值部分进行差分,再利用相空间重构理论对此差分序列进行混沌预测,并通过实例验证了改进算法的有效性。李红霞等^[72]在混沌动力系统相空间重构的基础上,利用关联维数法和最大 Lyapunov 指数法,对月径流时间序列进行混沌特性识别。于国荣等^[73]在林剑艺等^[74]研究的基础上,将支持向量机与混沌理论相结合,对长江宜昌站月径流进行了预报。张文鸽等^[75]建立了径流混沌时间序列加权一阶局域法多步预测模型,并将该模型应用于黄河上游贵德站长期径流预测。

4 基于数值天气预报的综合预报方法

数值天气预报(numerical weather prediction,

NWP)通常是对大气运动规律的流体力学方程和热力学方程组进行数值求解来预报气象要素。伴随着流体力学、动力气象学等学科的发展,人们在 20 世纪初就已经掌握了大气和海洋的大尺度运动规律,为开展 NWP 奠定了理论基础。到了 20 世纪 60 年代,以遥感技术和计算机技术为代表的新技术迅速发展,并被引入大气科学领域,由此,NWP 得到了实质性发展。美国早在 20 世纪 50 年代就开展了数值天气预报业务^[76]。1973 年,欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)正式成立,目前拥有成员国和合作单位(国家)31 个。该中心以研究中期天气预报的数值计算方法和开发各种中期预报产品为主要目标,并面向其成员国发布相关信息。20 世纪末期,NWP 的发展受到了水文工作者的肯定^[77-78],逐渐被引入水文预报领域。De Roo 等^[79]开发了一个利用 ECMWF 数值天气预报产品建立的 10 d 以内的洪水预报系统。Wood 等^[80]和 Tucci 等^[81]利用 NWP 联合流域水文模型,分别研究了美国 Ohio River 流域和巴西 Rio Uruguay 流域开展长期水文预报的情况。Habets 等^[82]分别利用 ARPEGE 和 ALADIN 两个 NWP 模型,对法国 Rhone 流域进行日径流预报,研究结果表明,数值天气预报信息的利用可以提高长预见期洪水的预报精度。Collischonn 等^[83]将区域 NWP 模型与分布式水文模型相结合,对巴西 River Uruguay 流域进行了 167 d 的连续径流预报,并建议在以后的水文预报中增加 NWP 信息的利用。并发现通过使用巴西天气预报中心(Brazilian Center for Weather Prediction, CPTEC)提供的 NWP 信息,相比 ARMA 等时间序列模型,流域水文模型所获得的预报结果精度可以大幅度提高。

我国是开展 NWP 研究较早的国家之一,于 20 世纪 70 年代后期逐步建立起数值预报业务系统^[84]。2002 年,在引进 ECMWF 全球谱模式的基础上,国家气象中心新一代中期 NWP 系统 T213L31 正式开展中期 NWP 业务,发布有限的数值预报产品。目前,国内将 NWP 引入水文预报领域的研究和应用还比较少见。张洪刚等^[85]将区间定量降水预报与区间洪水预报模型相耦合,研究了预见期降水对三峡库区洪水预报的影响。杨文发等^[86]通过三峡水库试验,探讨了将预报降雨信息用于中长期水文预报的可行性。李俊等^[87]尝试了将组合预报、定量降水预报(quantitative precipitation forecasting, QPF)与水文预报模型结合,用于湖南省 4 场典型山洪预报。张俊等^[88]将 QPF 信息引入人工神经网络模型,对福建多个流域的水库进行日径流中期预报,延长了预

见期,提高了预报精度。

5 结 语

a. 物理成因分析方法和数理统计方法属于传统预报方法。关于这 2 种方法的研究和应用还会存在,但已经不再是重点。物理成因分析方法虽然可信度较高,但实施难度较大。随着数值天气预报的发展,物理成因分析方法将会成为数值天气预报研究的一部分,共同服务于中长期水文预报。数理统计方法技术发展较为成熟,但由于模型有限、模型难以创新以及预报精度较低将限制该方法的应用。

b. 现代水文预报方法是当前和未来很长一段时间内重点研究和应用的预报技术。随着生物学、数学、计算机等学科的发展,将会有更多新颖的智能方法被应用于中长期水文预报领域。此外,各种智能算法的相互耦合和优化将是一个重要的研究方向。

c. 近年来,我国的数值天气预报发展较快,但是基于数值天气预报的综合水文预报方法目前在国外的研究和应用还十分有限。根据国外研究的经验,通过引入数值天气预报技术和成果,可有效提高预见期和预报精度。随着我国气象预报水平的不断提高和数值天气预报系统的不断完善,该方法将在我国未来的中长期水文预报中发挥重要作用。

参考文献:

[1] 汤成友, 官学文, 张世明, 等. 现代中长期水文预报方法及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[2] HAMLET A F, LETTENMAIER D P. Columbia River streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signal[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1999, 125(6): 333-341.

[3] WANG G L, ELTAHIR E A B. Use of ENSO information in medium and long-range forecasting of the Nile floods[J]. Journal of Climate, 1999, 12(6): 1726-1737.

[4] WHITAKER D W, WASIMI S A, ISLAM S. The El Nino-Southern Oscillation and long-range forecasting of flows in the Ganges[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(1): 77-87.

[5] PIECHOTA T C, CHIEW F H S, DRACUP J A, et al. Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Nino Southern Oscillation[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3035-3044.

[6] 范新岗. 长江中、下游暴雨与下垫面加热场的关系[J]. 高原气象, 1993, 12(3): 322-327.

[7] 刘清仁. 松花江流域水旱灾害发生规律及长期预报研究[J]. 水科学进展, 1994, 14(4): 319-327.

[8] 王富强, 许士国. 东北区旱涝灾害特征分析及趋势预测

[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(5): 735-739.

[9] 章淹. 致洪暴雨中期预报进展[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 162-168.

[10] 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, 1993.

[11] 杨旭, 栾继虹, 冯国章. 中长期水文预报研究评述与展望[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(6): 203-207.

[12] BOX G E P, JENKINS G. Time series analysis, forecasting and control[M]. Holden-Day, Incorporated, 1990.

[13] 夏学文. 半参数预报方法在水位预报中的应用[J]. 控制理论与应用, 1993, 10(3): 335-339.

[14] 许士国, 王富强, 李红霞, 等. 洮儿河镇西站径流长期预报研究[J]. 水文, 2007, 27(5): 86-89.

[15] 孟明星, 王金文, 黄真. 季节性 AR 模型在葛洲坝月径流预报中的应用[J]. 吉林水利, 2005, 26(1): 26-30.

[16] 李崇浩, 纪昌明, 陈森林, 等. 水文周期迭加预报模型的改进及应用[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(2): 17-20.

[17] 纪昌明, 周念来. 基于模式识别的水文预报模型[J]. 统计与决策, 2007, 23(6): 146-147.

[18] 陈守煜, 许士国. 径流长期预报的模糊数学方法[J]. 大连理工大学学报, 1984, 23(2): 18-18.

[19] 陈守煜, 周惠成. 径流长期预报的模糊推理模式[J]. 大连理工大学学报, 1985, 25(1): 109-114.

[20] 陈守煜, 许士国. 径流分级长期预报的模糊聚类分析法[J]. 水利学报, 1986(7): 43-49.

[21] 杨百银. 龙羊峡电站下闸蓄水水情长期预报的模糊聚类方法[J]. 水文, 1989, 9(2): 15-20.

[22] 雷录君. 模糊数学优先比在水文预报中的应用[J]. 水文, 1990, 10(2): 48-50.

[23] 闵騫, 汪泽培. 模糊数学在鄱阳湖年最高水位长期预报中的应用[J]. 水文, 1992, 12(4): 38-44.

[24] 程春田, 陈守煜. 考虑权重模糊回归模型[J]. 大连理工大学学报, 1993, 33(3): 356-362.

[25] 林剑艺, 程春田, 陈艳. 基于自适应模糊推理系统模型的径流中长期预报[J]. 水电能源科学, 2005, 23(6): 25-27.

[26] 朱之葵, 王峨生, 李慰如. 模糊数学法在水库长期径流预报中的应用[J]. 水力发电, 1993, 22(4): 15-19.

[27] 冯国章. 枯水径流预报的最优模糊划分自激励门限自回归模型[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(2): 21-26.

[28] 白子岩. 模糊模式识别法在中长期预报中的应用[J]. 水利水电技术, 1999, 30(2): 50-51.

[29] 王振宇, 梁汉华, 刘国华. 雨季段中长期预报模糊聚类模型及其应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 30-35.

[30] 惠军, 温华洋. 模糊时间序列方法在中长期年径流量预报中的应用[J]. 统计与决策, 2007, 25(15): 34-35.

[31] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报, 1997(8): 15-21.

[32] 杜凤文. 运用灰色模型模拟有限单元法预报水位的边界条件[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 1989, 19(2): 187-190.

- [33] 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 ,1(3) :190-197.
- [34] 夏军. 一类灰参数模型识别及其在水文预报中的应用[J]. 华中理工大学学报 ,1994 ,21(1) :55-60.
- [35] 袁秀娟, 夏军. 径流中长期预报的灰色系统方法研究[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1994 ,27(4) :367-375.
- [36] 蓝永超, 康尔泗, 杨文华. 黄河上游径流预报的灰色拓扑方法[J]. 冰川冻土 ,1997 ,19(4) :308-311.
- [37] 黄克明. 灰色系统的拓扑预测方法在水文中长期预报中的应用[J]. 数学杂志 ,1998 ,18(S1) :98-102.
- [38] 张闻胜, 王银堂. 时间序列分解模型在水文要素中长期预报中的应用[J]. 水文 ,2001 ,21(1) :21-24.
- [39] 邱进辉, 陈建勋. 长江上游地区枯期径流特征及其长期预报[J]. 人民长江 ,2003 ,34(10) :37-38.
- [40] 朱春江, 唐德善. 基于 GMBPDS 的塔里木河径流量预报研究[J]. 人民黄河 ,2006 ,28(10) :39-40.
- [41] COULIBALY P, ANCTIL F, BOBEE B. Hydrological forecasting with artificial neural networks :the state of the art [J]. Canadian Journal of Civil Engineering ,1999 ,26(3) :293-304.
- [42] ASCE TASK COMMITTEE. Artificial neural networks in hydrology. II : hydrologic applications [J]. Journal of Hydrologic Engineering ,2000 ,5(2) :124-137.
- [43] DAWSON C W, WILBY R L. Hydrological modelling using artificial neural networks[J]. Progress in Physical Geography ,2001 ,25(1) :80-108.
- [44] 吴超羽, 张文. 水文预报的人工神经网络方法[J]. 中山大学学报 :自然科学版 ,1994 ,33(1) :79-90.
- [45] 钟登华, 王仁超, 皮钧. 水文预报时间序列神经网络模型[J]. 水利学报 ,1995 ,26(2) :69-75.
- [46] 胡铁松, 郭元裕, 丁晶. 水文时间序列预测的径向基函数网络方法[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1996 ,29(6) :1-5.
- [47] 张利平, 王德智, 夏军. 白山水库径流中长期预报研究与应用[J]. 水电能源科学 ,2002 ,20(1) :18-20.
- [48] 李向阳, 程春田, 林剑艺. 基于 BP 神经网络的贝叶斯概率水文预报模型[J]. 水利学报 ,2006 ,37(3) :453-458.
- [49] 屈亚玲, 周建中, 刘芳, 等. 基于改进的 Elman 神经网络的中长期径流预报[J]. 水文 ,2006 ,26(1) :45-50.
- [50] 张俊, 程春田, 杨斌斌, 等. 基于改进 BP 网络的日径流预报模型研究[J]. 水电能源科学 ,2008 ,26(6) :14-16.
- [51] CHENG C T, CHAU K W, SUN Y G, et al. Long-term prediction of discharges in manwan reservoir using artificial neural network models[C]//2nd International Symposium on Neural Networks, Chongqing, Peoples R China :2005 :1040-1045.
- [52] CHENG C T, XIE J X, CHAU K W, et al. A new indirect multi-step-ahead prediction model for a long-term hydrologic prediction[J]. Journal of Hydrology ,2008 ,361(1/2) :118-130.
- [53] 郑昱, 张闻胜. 基于小波变换的水文序列的近似周期检测法[J]. 水文 ,1999 ,19(6) :22-25.
- [54] 李贤彬, 丁晶, 李后强. 水文时间序列的子波分析法[J]. 水科学进展 ,1999 ,10(2) :144-149.
- [55] 王文圣, 袁鹏, 丁晶. 小波分析及其在日流量过程随机模拟中的应用[J]. 水利学报 ,2000(11) :43-48.
- [56] 欧阳永保, 丁红瑞. 小波分析在水文预报中的应用[J]. 海河水利 ,2006 ,2006(6) :44-46.
- [57] ZHOU H C, WU L, GUO Y. Mid-and long term hydrologic forecasting for drainage area based on WNN and FRM[C]//6th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications(ISDA 2006), Jinan, Peoples R China :IEEE Computer Soc ,2006 :7-12.
- [58] 周惠成, 彭勇. 基于小波分解的月径流预测校正模型研究[J]. 系统仿真学报 ,2007 ,19(5) :1104-1108.
- [59] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展 ,2002 ,13(4) :515-520.
- [60] LORENZ E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric mode[J]. Tellus ,1965 ,17(3) :321-333.
- [61] LI T Y, YORKE J A. Period three implies chaos[J]. American Mathematical Monthly ,1975 ,82(10) :985-992.
- [62] PORPORATO A, RIDOLFI L. Nonlinear analysis of river flow time sequences[J]. Water Resources Research ,1997 ,33(6) :1353-1367.
- [63] LIU Q, ISLAM S, RODRIGUEZ-ITURBE I, et al. Phase-space analysis of daily streamflow :characterization and prediction [J]. Advances in Water Resources ,1998 ,21(6) :463-475.
- [64] SANNASIRAJ S A, ZHANG H, BABOVIC V, et al. Enhancing tidal prediction accuracy in a deterministic model using chaos theory[J]. Advances in Water Resources ,2004 ,27(7) :761-772.
- [65] SIVAKUMAR B, BERNDTSSON R, PERSSON M. Monthly runoff prediction using phase space reconstruction[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques ,2001 ,46(3) :377-387.
- [66] SIVAKUMAR B. Nonlinear determinism in river flow : prediction as a possible indicator[J]. Earth Surface Processes and Landforms ,2007 ,32(7) :969-979.
- [67] 温权, 张勇传, 张周胜. 基于混沌动力学的日径流时间序列预测[J]. 华中理工大学学报 ,1998 ,26(12) :62-64.
- [68] 张利平, 王德智, 夏军, 等. 混沌相空间相似模型在中长期水文预报中的应用[J]. 水力发电 ,2004 ,30(11) :5-11.
- [69] 丁涛, 周惠成, 黄建辉. 混沌水文时间序列区间预测研究[J]. 水利学报 ,2004 ,34(12) :15-21.
- [70] 强学民, 葛朝霞, 曹丽青. 改进的相空间模式及其在月流量预测中的试验研究[J]. 水电能源科学 ,2006 ,24(1) :72-77.
- [71] 杨庆娥, 丁光彬, 杨正瓴, 等. 一种改进的混沌水文时间序列预报方法[J]. 人民黄河 ,2007 ,29(7) :11-12.
- [72] 李红霞, 许士国. 月径流序列的混沌特征识别及 Volterra 自适应预测法的应用[J]. 水利学报 ,2007 ,38(6) :760-766.

[73] 于国荣 夏自强.支持向量机的混沌序列预测模型及在径流中应用[J].水利学报 2007(S1) 455-460.

[74] 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.

[75] 张文鸽 黄强 佟春生.径流混沌时间序列局域多步预测模型及其在黄河上游的应用[J].水力发电学报, 2007 26(4) :11-15.

[76] 李俊 纪飞 齐琳琳 等.集合数值天气预报的研究进展[J].气象 2005 31(2) 3-7.

[77] COLLIER C G , KZYYSZTOFOWICZ R. Quantitative precipitation forecasting[J]. Journal of Hydrology ,2000 ,239 (1/2/3/4) :1-2.

[78] KRZYSZTOFOWICZ R , COLLIER C G. Quantitative precipitation forecasting I[J]. Journal of Hydrology ,2004 ,288 (1/2) :1-1.

[79] De ROO A P J , BARTHOLMES J , BATES P D , et al. Development of a european flood forecasting system[J]. Intl J River Basin Management ,2003 ,1(1) :49-59.

[80] WOOD A W , MAURER E P , KUMAR A , et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres , 2002 ,107 :4429-4442.

[81] TUCCI C E M , CLARKE R T , COLLISCHONN W , et al. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling : Uruguay River basin[J]. Water Resources Research ,2003 ,39 (7) :1181-1191.

[82] HABETS F , LEMOIGNE P , NOILHAN J. On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting[J]. Journal of Hydrology ,2004 ,293(1/4) 270-288.

[83] COLLISCHONN W , HAAS R , ANDREOLLI I , et al. Forecasting river uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model[J]. Journal of Hydrology , 2005 ,305(1/4) 87-98.

[84] 薛纪善.新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究[J].应用气象学报 2006 ,17(5) 305-313.

[85] 张洪刚 郭生练 周芬 等.考虑预见期降水的三峡水库区间洪水预报模型研究[J].长江科学院院报 ,2005 ,22 (1) 9-12.

[86] 杨文发 周新春 段红.三峡水库中期水文气象耦合预报应用试验及探讨[J].水文 2007 27(3) 39-43.

[87] 李俊 廖移山 张兵 等.集合数值预报方法在山洪预报中的初步应用[J].高原气象 2007 26(4) 854-861.

[88] ZHANG J , CHENG C T , LIAO S L , et al. Daily reservoir inflow forecasting combining QPF into ANNs model[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions ,2009 ,1(1) :121-150.

(收稿日期 2010-03-14 编辑 方宇彤)

· 简讯 ·

“ 首届全国水利水电移民工程学术研讨会 ” 将在北京召开

为交流我国工程建设管理、设计、施工、科研部门在移民工程理论与实践方面的研究成果 ,建设有中国特色的移民工程理论体系和学科 构建移民工程学的学科建设、人才培养、科学研究、实践创新之平台 ,凝练我国移民工作实践之精华 ,促进中国水电可持续发展及和谐社会的建设 ,国家水电可持续发展研究中心、河海大学等单位 ,拟于 2010 年 11 月中旬在北京联合召开第 1 届全国水利水电移民工程学术研讨会。会议的主要议题有 :①移民科学理论与方法体系 ;②国内外移民政策与实践的比较 ;③移民系统分析 ;④移民工程规划与设计 ;⑤移民工程经济与管理 ;⑥移民社会心理分析 ;⑦移民社会风险与社会适应 ;⑧移民管理信息系统与数据库建设 ;⑨移民与高新技术应用(3S ,信息技术等) ;⑩移民工程典型案例。会议论文将结集正式出版。

移民学是一门涉及工程技术、人口、社会、经济、资源、生态、环境、政治、民族、宗教、文化、心理等多学科的交叉科学 ,是一门极为复杂、影响深远的系统工程。随着中西部地区水利水电工程的开发建设及其生态环境恢复与保护、灾害防治、公共安全保障的发展需要 ,大规模的工程性移民活动已经发生并且必然将继续发生。据估计 ,新中国成立以来 ,中国的工程移民已达 7000 万人 ,水库移民人数已经达到 2930 万人。移民已经成为各级政府和全社会高度重视的重大社会问题 ,如果移民问题处理不当 ,将会造成巨大的经济、社会、政治、文化、生态、环境损失甚至灾难 ,导致民族、宗教、文化和人群之间的冲突 ,产生次生贫困群体 ,严重时会引起社会失稳。移民学研究已经成为支撑国家社会经济可持续发展的重大科技需求。

(本刊编辑部供稿)