

# 水文时间序列分析方法研究进展

桑燕芳<sup>1,2</sup>, 王中根<sup>1</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要:** 水文时间序列不仅组成复杂, 而且特性也复杂多变。目前认为水文时间序列主要表现出随机性、模糊性、非线性、非平稳性和多时间尺度变化等复杂特性。本文首先简要介绍了用于揭示水文过程复杂变化特性的时间序列分析方法的相关进展, 包括序列相关性分析方法、水文频率分析方法、模糊分析方法、混沌理论分析方法、信息熵分析方法和小波分析方法等6种。然后, 对各种分析方法存在的主要问题和有待解决的问题进行讨论, 指出了各种方法应用于水文时间序列分析时存在的主要缺陷和不足。最后指出, 不断改进和完善时间序列分析方法, 探讨各种方法的联合和耦合, 加强物理成因分析和数理统计分析相结合, 是提高水文时间序列分析结果精度和可靠性的有效手段, 也是研究和解决环境变化影响下水文水资源问题的有效途径。

**关 键 词:** 水文时间序列分析; 不确定性; 小波分析; 信息熵; 非线性; 混沌性; 耦合

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00020

## 1 引言

水文时间序列分析是揭示和认识水文过程变化特性的有效手段和重要途径。随机水文学认为: 水文过程既受确定性因素的影响, 又受许多随机和不确定性因素的影响。因此水文时间序列主要包含确定成分和随机成分(Yevjevich, 1972; 丁晶等, 1988)。确定成分基于一定的物理机制形成, 例如地球公转和自转使水文序列包含确定性(年、月和日)周期成分; 人类活动改变土地利用方式, 影响到流域产汇流模式, 使水文序列存在趋势和跳跃等暂态成分等。随机成分则是由许多随机和不确定性因素综合作用引起的不规则震荡, 往往很难从物理机制的角度加以解释和描述。

自 Thomas 等(1962)以及 Yevjevich (1963)揭示了水文现象在时域上客观存在着相依性, 并且应用马尔柯夫模型加以描述, 随机水文学得到了迅速和广泛的发展。国内, 丁晶和邓育仁较早对随机水文学理论和方法进行了研究, 并出版了相应的著作——《随机水文学》(丁晶等 1988)。目前, 随机水文学已经在水文水利计算、水文模拟、水文预报(包括预报误差分析、建立随机预报模型、卡尔曼滤波实

时预报等)、水资源规划、水文测验和水文站网布设等方面得到了广泛应用, 主要使用的模型有自回归滑动平均求和模型、解集模型等。此外, 为进一步改进和完善随机水文学理论, 大量新技术和新方法不断引入到随机水文学领域, 例如, 非线性理论、信息熵理论(Information Entropy)、混沌理论和小波分析理论(Wavelet Analysis, WA)。新技术和新方法的引入很大程度上提高了水文时间序列分析结果的精度和可靠性, 进而也促进了随机水文学理论和方法体系的发展。

水文时间序列不仅组成复杂, 而且特性也复杂多变。传统的时间序列分析方法主要将水文序列看作平稳和线性序列, 并应用序列相关性分析方法和傅里叶变换(Fourier Transform, FT)等进行分析和描述。随着新技术和新方法的不断引入, 对水文现象和水文过程的认识逐步加深。目前, 总体上认为水文系统主要体现出以下复杂特性: 随机性、模糊性、非线性、非平稳性(时变性)和多时间尺度变化特性等。本文简要介绍了用于研究上述不同特性的水文时间序列分析方法的相关进展, 并进一步讨论了各种方法的优缺点, 旨在为今后研究提供一定的参考。

收稿日期: 2012-04; 修订日期: 2012-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201036, 41271048), 中国科学院陆面过程与气候变化重点实验室开放基金项目(LPCC201203)。

作者简介: 桑燕芳(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: sunsangyf@gmail.com

## 2 水文时间序列分析方法研究现状

### 2.1 序列相关性分析方法

序列相关性分析方法始于20世纪初,Yule建立了自回归(Auto-Regressive, AR)模型(Yule, 1927)。1931年Walker建立了滑动平均(Moving Average, MA)模型和自回归滑动平均(Auto-Regressive and Moving Average Model, ARMA)模型,初步奠定了序列相关性分析方法的基础(Walker, 1931)。此后,国内外学者对该类方法进行了大量研究,并建立了许多复杂程度不同但都已十分成熟的模型(Yevjevich, 1972; 丁晶等, 1988)。20世纪70年代后,随着信号处理技术的发展,序列相关性分析方法不仅在理论上更趋完善,而且在参数估计、定阶以及建模等方面得到了改进,逐渐成为时间序列分析的有效工具(李荣峰等, 2005; 杨旭等, 2000)。

序列相关性分析方法将水文序列看作由暂态成分(趋势、突变等)、周期成分、随机成分等项组成,对这些成分分别进行识别和描述(丁晶等, 1988)。回归分析方法也是传统的水文序列模拟预报方法,它从时域上揭示水文序列的组成,即通过计算各阶自相关系数判断序列的时域相依性,然后选择合理的模型进行预报。Thomas等(1962)以及Yevjevich(1963)最早将AR模型用于河流流量预报。随后,一些学者在明确时间序列分析方法的相关概念、模型改进等方面开展了大量的研究。例如,Yevjevich(1975)以Michigan-Huron湖地区69年月径流序列为例改进了AR模型;Carlson等(1970)改进了ARMA模型;McKerchar等(1974)将ARIMA模型应用于Indiana、Illinois和Kentucky 3个州的16个流域作径流预报;Kalman(1960)提出的改进模型具有自适应能力,即引入卡尔曼滤波器处理机制,可利用最新信息自动更新模型的参数估计结果,因此可实现预报结果误差最小化;此外,还有大量的相关研究成果(Bolzern et al, 1980; Lettenmaier, 1984; Burn et al, 1985; Bender et al, 1992; Awwad et al, 1994)。20世纪70年代后,Box等(1994)提出的ARMA类模型得到了广泛应用,并发展出AR、MA、ARIMA(Auto-Regressive Integrated Moving Average)等模型。同时,具有非线性特点的模型,如TAR(Threshold Auto-Regressive)模型、双线性模型、指数回归模型等,也开始应用于水文时间序

列分析和预报(杨旭等, 2000)。国内,丁晶等(1988)综述了随机水文学的基本理论和研究方法,以及相应的研究成果。

### 2.2 水文频率分析方法

水文频率分析方法始于19世纪末,它是研究某随机水文变量出现不同数值可能性的大小,进而为水利水电工程建设、水资源评价管理和综合规划等水文水资源工作提供具有概率意义的水文设计数据。水文频率分析基于数理统计学原理和概率论,求解过程涉及两个关键和难点问题:线型选择和参数估计(刘光文, 1986; 金光炎, 1999)。针对水文频率分析方法,目前在理论研究、方法探索 and 实际应用等方面已取得大量的研究成果,主要有参数估计方法(刘光文, 1990a, 1990b)、分析不同线型的适用性(孙济良等, 1989)、利用可靠的历史洪水延长序列长度以减少抽样误差等(金光炎, 1999; Sang et al, 2010c)。水文频率分析方法已在实际生产中得到广泛应用,特别在水资源综合规划时,为掌握未来水文情势,常常应用水文频率分析方法求解某流域或地区内不同水平年的降雨量和径流量等水文水资源设计值。

针对线型选择问题,目前国内外采用的理论线型达10多种(金光炎, 1999; 孙济良等, 1989; 马秀峰, 2005),但水文现象复杂多变,水文随机变量究竟服从何种概率分布,还没有定论(刘光文, 1986)。对于参数估计问题,目前参数估计有多种方法(刘光文, 1990a, 1990b; Sang et al, 2010c; 孙济良等, 1989),主要有:①矩法;②权函数法,包括单权函数法和双权函数法;③优化适线法,包括最小二乘和最小一乘估计方法,每个方法中又有两参数和三参数搜索法;④极大似然法,等。此外,还有近年来兴起的基于最大熵原理(Principle of Maximum Entropy, POME)的参数估计方法。不同方法的参数估计效果不同,有研究中对各种方法的优劣进行了对比研究(桑燕芳等, 2009c),得到的结论如下:POME与极大似然法效果相当,优于其他方法;相比于极大似然法,POME参数估计的计算相对简便。对比分析可以看出,常用的参数估计方法主要存在以下问题:①除矩法外,几乎所有方法在求解参数时都受线型类型的影响,即对于不同线型需要分别推导参数求解表达式和(或)方程(组)。虽然应用矩法求解参数较为直观和方便,不因分布线型而异,但其结果存在很大误差(特别是求解偏态系数 $C_s$ 时),实际

中一般用于初估参数值;②各种方法参数求解过程较为复杂困难。即使是相对较优的POME和极大似然法,一般情况下也需要解一非线性方程组,且方程中含有Digamma函数等非显式函数,导致求解困难;③各种方法参数求解的难易程度受参数个数影响很大;④虽然理论上讲,极大似然法的参数估计效果好且精度高,但由于常规做法是通过求偏导数估计参数,实际应用中存在许多缺陷,例如求解过程困难、 $C_p > 2$ 时该方法无效、参数结果不灵敏等(金光炎, 1999)。因此,极大似然法在实际中较少应用。桑燕芳等(2009c)基于遗传算法改进了极大似然法,提高了该方法的适用性和实用性。

### 2.3 模糊分析方法

模糊不确定性也是水文水资源系统的客观存在。模糊数学的出现,使人们对自然现象不确定性的理解和认识有了拓展与深化。陈守煜(2005)认为:水文水资源系统许多概念的外延存在不确定性,对立概念之间的划分具有中间过渡阶段,这些都是典型、客观的模糊现象,为此经过系统地分析和概括,提出了“模糊水文学”的概念(陈守煜, 1988)。

20世纪80年代初,陈守煜等应用模糊集理论研究了水利、水文、水资源与环境科学等领域的一系列问题,同时将模糊集分析与系统分析结合起来,形成一个新的模糊随机系统分析体系(陈守煜, 2005)。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,该方法将成因分析、水文统计分析、模糊集分析有机结合,为提高中长期水文预报的合理性和精度提供了一条新的技术途径(陈守煜, 1997; 陈守煜等, 2006)。此外,蔡华等(2000)运用模糊集理论,提出了一种既具有传统系统功能,又在预报结果综合分析中引入了模糊综合判断概念的新专家系统;周念来等(2000)利用模糊因果聚类分析法克服了预测因子的随机性和模糊性带来的困难等。

### 2.4 混沌理论分析方法

自然界中许多现象表现为非随机却貌似随机的特征,即混沌特性(曹鸿兴, 2003)。水文水资源系统是一个复杂的非线性系统,具有产生混沌的基本条件:对初始条件的敏感性和内在随机性(丁晶等, 1995)。复杂动力系统理论指出,单变量时间序列不只是系统的简单输出,而且包括了系统所有其他变量的过去信息,同时也蕴含大量关于系统未来演

化的信息(李荣峰等, 2006)。因此,分析水文序列的混沌特性,可以了解和掌握水文水资源系统的混沌特性。应用混沌理论解决水文分析和模拟等问题时,需要解决3个关键问题:水文系统混沌特性识别或性质判断、重建水文系统相空间结构、水文系统混沌动力学模拟预报(冯国章等, 1997)。

国外,Hense等(1987)最早将混沌动力学方法引入水文学领域,开辟了水文学应用的先河。之后有一系列的研究成果(曹永强等, 2005; Liu et al, 1998; Ng et al, 2007; Sogoyomi et al, 1996)。国内,丁晶(1992)最先论述了将混沌理论用于洪水分析的可能性,探索了洪水系统的混沌识别和预测方法,并指出洪水过程可能存在混沌特性。目前混沌理论在水文学领域的应用主要是对水文系统的混沌特性进行定量分析。傅军(1994)探讨了洪水的混沌特性,并总结了目前的模拟预报模型,主要有局域线性模型、局域非线性模型和全域非线性模型等;丁晶等(1995)采用相空间多点相似法对金沙江屏山站日流量进行了模拟预测;权先璋等(1999)对葛洲坝和隔河岩电站不同的径流序列分别应用局部预测方法和全局预测方法进行了预测,对降雨—径流时间序列进行了混沌分析和预报;周寅康等(1999a, 1999b, 2000, 2002)对淮河流域洪涝变化序列的混沌特征、耗散性及可预报时间进行了研究,依据混沌理论和微分方程反演建模原理,建立了三维二阶微分方程组来描述淮河洪涝序列的混沌动力系统。这些混沌分析方法都基于统计理论。之后,丁晶等(2002)又探索了通过分析系统的动力行为及演变机制进行预测的方法,并尝试利用水文观测资料反演水文动力模型进行水文预测,结果表明反演水文动力模型是一条可行的建模新途径;丁涛等(2004)利用混沌理论对水文序列区间预测方法进行了研究;李荣峰等(2006)建立了基于相空间重构的水文自记忆预测模型,林振山(1993)基于混沌理论研究了长期预报的相空间理论和技术途径等。

### 2.5 信息熵分析方法

不确定性现象是水文系统不可否认的客观存在。引入信息熵理论为合理分析和描述水文系统的不确定性提供了有效工具(Singh, 1997)。信息熵以整体的观念去度量水文要素含有的不确定性,而不拘泥于孤立点,因此是一种对不确定性更高层次的刻画。

由于许多随机和不确定性因素的影响,水文学



的许多问题都是不适定性问题,最大熵原理(POME)是解决此类问题的有效方法。POME的基本原理是:当满足一定约束条件时,所有可行解中应该选择熵最大的一个(Singh et al, 1992)。从熵作为不确定性和不规则程度度量的角度看,熵最大意味着因为数据不足而作的主观假定最小,因而所得的解最客观、最为超然和偏差最小(Singh, 1998; 王栋等, 2001)。自Jaynes(1957)首次明确提出POME以来,国内外不少学者致力于最大熵原理的应用研究,试图建立起测度水信息不确定性的理论基础,以此探求水信息处理、分析和研究的新方法。近30多年来,熵已成为研究水文水资源系统不确定性的一个有效工具,且取得了大量的研究成果(Singh, 1998; 王栋等, 2001),包括依据信息熵进行线型参数估计(Singh et al, 1987; Li et al, 1987; Sonuga, 1972)、降雨—径流过程分析(Sonuga, 1976)、水环境评价(王栋等, 2003)、以及水文序列消噪和复杂性定量描述等(Sang et al, 2009f, 2010a, 2010d, 2011; 桑燕芳等, 2010b)。其中, Singh教授对信息熵理论在水文学的应用作了较为系统的研究。目前最大熵原理在水文频率分析、水文序列谱分析、水文水质观测站网布设与评估、水文模型研建和评价、水文模拟与预报、水利风险分析及水环境工程等方面具有广泛的应用(Singh, 1997, 1998; Singh et al, 1992),其中在水文频率分析和水文序列谱分析中的应用较为成熟。

## 2.6 小波分析方法

水文水资源系统具有时变性,因此水文序列表现出非平稳性。20世纪80年代初在傅里叶变换基础上发展起来的小波分析技术(WA)很好地克服了传统谱分析方法的缺点,它采用一种窗口大小可变、位置可动的变窗进行频谱分析,从而满足了信号时、频局部化的要求(Torrence et al, 1998; Percival et al, 2000)。近30多年来小波分析发展迅速,并广泛应用于各自然科学和工程技术领域的时间序列分析,包括物理学、化学、生物学、医学、地球科学、金融学、电子信息科学等。

小波分析方法能够同时从时域和频域揭示时间序列的局部特性,因此适合于研究具有多时间尺度特性和非平稳特性的水文时间序列(Foufoula-Georgiou et al, 1994; Kumar et al, 1997)。将小波分析方法引入水文学,为水文时间序列变化特性研究开创了一条新途径。小波分析在水文序列分析

的应用主要包括两方面:一是多时间尺度特性分析(MSA, Multi-temporal Scale Analysis),即把水文序列分解为不同尺度(低频和低频成分)的小波系数和尺度系数,再根据水文序列低频和高频成分研究序列的变化趋势和周期组成等;二是将不同尺度的小波系数和尺度系数按不同方法进行处理,达到水文序列模拟预报的目的。

小波分析理论的引入对随机水文学的发展起到了极大推动作用。Foufoula-Georgiou等(1994)和Kumar等(1997)较早研究了小波分析方法在水文学的应用之后,Labat等(Labat, 2005, 2006, 2008; Labat et al, 2000, 2005)、Schaeffli(2007)、Coulibaly等(2000, 2004)对水文小波分析方法进行了大量研究。此外, Gauchere(2002)利用小波变换的时、频局部特性并结合其他径流时间变异参数对法国Guyana地区9个流域进行分类,为偏远流域特征描述提供了一种新方法; Nakken(1999)将小波变换应用于降水、径流以及降水—径流关系的时间变异研究。国内,王文圣等(2002)对小波分析在水文学的应用现状作了综述,并展望了未来的研究趋势和方向;姜世中等(2006)选用“Morlet”小波分析了黄河上游高寒地区水文序列的小波特征;王文圣等(2004)选用“Mexican-hat”小波通过仿真试验对水文序列变化特征进行了研究;李贤彬等(1999)应用“db4”小波探讨了水文序列子波分析方法;郑泽权等(2001)应用“db4”小波对非平稳水文序列进行了研究;林勇等(2005)应用“dmey”小波对岷江上游杂古脑流域的径流序列进行了分析;万星等(2005)研究了基于“db4”小波的小波神经网络在径流模拟和预报中的应用;桑燕芳等分别对小波函数选择(桑燕芳等, 2008a)、小波阈值消噪(桑燕芳等, 2009d; Sang et al, 2010a, 2010b)、小波互相关分析(桑燕芳等, 2010c)等问题进行了研究,并应用小波方法揭示了不同噪声成分的复杂小波特性(桑燕芳等, 2010a),讨论了水文序列主周期变化(桑燕芳等, 2010b);此外,还应用小波分析方法揭示了黄河下游径流变化特性(桑燕芳等, 2007; Sang et al, 2009a, 2009b),预报了韩桥煤矿矿井涌水量(Sang et al, 2009c)。2005年,国内第一部水文学领域的小波分析著作——《水文小波分析》出版(王文圣等, 2005)。

### 3 水文时间序列分析方法研究展望

综合目前的研究和应用现状可以看出,新技术和新方法的引入可以有效地提高水文序列分析结果的精度。但随着对水文现象和水文过程复杂特性的认识不断提高,目前的分析方法有时无法满足实际水文分析和计算的需求。今后的研究中,一方面需要探讨多方法耦合,克服单个分析方法的缺陷,进一步提高水文序列分析结果的可靠性;另一方面,需要探讨数理统计分析和物理成因分析相结合,更好地分析和研究变化环境(主要指气候变化和人类活动影响)下的水文水资源问题。

#### 3.1 多方法耦合

由于每个分析方法都是针对水文过程的某一特性进行研究,因此无法有效地综合考虑水文过程的复杂特性。此外,不同方法自身也存在一定的缺陷和不足,直接影响了水文问题分析结果的精度和可靠性。不同方法的主要问题和缺陷介绍如下:

(1) 对于序列相关性分析方法,应用其进行水文序列分析时主要存在以下问题:①水文序列组成复杂,但目前广泛应用的ARMA类模型仅是从时间域上揭示水文序列的相依性来掌握其变化特性,这种做法不合实际且较片面;②水文序列具有非线性、非平稳性以及多时间尺度变化特性,但序列相关性分析方法多为线性模型,不能很好地模拟水文序列的复杂特性,即使部分具有非线性的模型,其非线性程度也不足以满足实际需求;③序列相关性分析方法描述序列的组成时,进行了许多概化和假设,存在一定的不合理性。因此,序列相关性分析方法的结果精度常常不能满足实际需求。

(2) 对于水文频率分析方法,实际应用过程中主要存在以下难点问题:①方法有效性问题。例如线型选择的合理性、参数估计方法的准确性和可靠性等(桑燕芳等, 2009b),都会影响最终水文设计值的准确性和有效性;②方法适用性问题。水文频率分析方法基于数理统计原理,主要用于分析随机水文事件和独立随机水文变量。若所研究的水文序列是独立随机序列,应用水文频率分析方法尚可;但实际多数实测水文序列(如月和年水文序列)常常具有良好的自相关特性,且某些序列自相关特性十分明显,说明在时域上具有明显的变化规律,若此时仍应用水文频率分析方法,就忽略了序列的相依变化特性,由此得到的结论也不合理,因此该做法

值得商榷(马秀峰, 2005)。

(3) 对于模糊分析方法,其在实际水文分析和模拟预报中主要包括两方面应用:利用模糊聚类理论选择物理因子并建立预报模型;依据模糊模式识别理论作出预报决策。由于需要定量描述和刻画相关概念的中间过渡状态,信息模糊化过程带有一定的主观性和难度,因此为得到较为准确合理的水文分析和模拟预报结果,要求使用者具有一定的实践经验。

(4) 对于混沌理论分析方法,其应用于水文系统演化、混沌性规律识别的研究属于起步阶段,许多问题还有待深入研究。例如,水文序列混沌特性识别方法的研究、水文序列长度和噪声对混沌分析结果影响的研究、针对不同问题建立非线性动力模型等(林振山, 1993)。

(5) 对于信息熵分析方法,应用该方法分析水文水资源问题时,关键是建立信息熵与水文水资源过程之间的联系,以便充分发挥熵与POME的作用,更好地揭示水文水资源的变化规律。此外,信息熵尚有不少理论问题和实际计算问题需要研究和解决,例如信息熵指标求解的困难,以及不同信息熵指标性能的差异问题。

(6) 对于小波分析方法,虽然该方法在水文时间序列分析和模拟预报中得到了广泛应用,也取得了较好的效果,但由于水文序列组成和特性复杂多变,应用小波分析时仍存在一系列的关键和难点,例如小波函数选择、尺度水平选择、小波阈值消噪、小波分解、小波模拟预报等。

为克服单个方法的缺陷,目前许多研究探讨了不同方法的联合使用,取长补短,从而提高水文序列分析结果的精度。这种耦合途径在水文序列模拟预报方面成效更为显著。例如陈守煜(1997)将成因分析方法、统计分析和模糊集方法结合,此外还有随机与模糊相互结合、随机与神经网络结合、模糊与神经网络相互结合、混沌理论与神经网络相互结合、小波分析与神经网络结合、混沌和小波分析以及神经网络结合等。桑燕芳等将小波阈值消噪方法与熵谱分析方法联合使用,改进了水文序列周期识别结果(Sang et al, 2009d; 桑燕芳等, 2008b),之后进一步研究了MESA与EMD(empirical mode decomposition)方法联合使用进行水文序列周期识别(Sang et al, 2012);此外,桑燕芳等还将小波分析方法、水文频率分析方法和人工神经网络联合使用,



以提高水文序列预报结果的精度(桑燕芳等, 2009a),并进一步对比分析了多个小波模型性能之间的差异(Sang et al, 2009e)。

今后,应进一步深入研究不同水文时间序列分析方法之间的联合和耦合,充分发挥不同方法的优势,提高对水文过程复杂变化特性的认识。但应该认识到,多方法联合和耦合过程中仍不可避免单个方法缺陷对分析结果可靠性的影响。因此,一方面需要加强单个方法的研究和改进,另一方面也需要从多个途径进行分析,通过多方法对比和综合分析提高分析结果的可靠性。

### 3.2 数理统计分析和物理成因分析结合

水文时间序列分析方法主要是从数理统计的角度揭示和认识水文过程的复杂特性,但有些情况下无法对揭示出的一些水文现象进行合理的物理解释。特别是近30多年来,气候变化和人类活动(主要是土地利用方式的改变)为主的变化环境影响下的流域径流过程发生了明显改变,而水文时间序列分析方法往往无法有效地分析和研究环境变化对水文过程的影响,也无法有效地研究变化环境下的水文模拟和预报问题。例如,序列相关性分析方法无法有效地揭示环境变化与水文过程变化之间的复杂关系;环境变化导致实测水文序列的一致性较差,目前的“还原”和“反演”方法已无法有效地进行序列还原,导致水文频率分析方法无法有效地估计水文设计值等。

为克服水文时间序列分析方法基于数理统计分析的缺陷,今后的研究中需要加强数理统计分析和物理成因分析相结合的研究。应用水文时间序列分析方法可以揭示水文过程的突变、趋势和周期等变化特性,通过互相关分析可以初步揭示不同水文气象要素之间的相互关系,进而可为水文物理建模和水文模拟预报等提供依据。同时,基于水文物理模型的模拟和预报结果,也可以应用水文时间序列分析方法有效地揭示未来水文情势的演变趋势和特点。因此,今后应加强物理成因分析和数理统计分析相结合的研究和应用,可以综合发挥水文物理模型和数理统计方法的优势和长处,提高对水文过程复杂变化特性的认识,为实际水文水资源工作提供更好的科学依据和技术支撑。

在物理成因分析和数理统计分析结合过程中需要注意的是,一方面应充分依据对水文循环过程

的认识,真正发挥物理成因分析方法和数理统计分析方法的作用,另一方面也需要注重数理统计分析方法选择的合理性和有效性;此外,还需要注意不同方法本身缺陷对最终分析结果的影响。

## 4 结语

水文时间序列分析是认识和揭示水文过程复杂变化特性的有效手段。随着新技术和新方法不断引入到水文学中,必将促进对复杂水文循环过程的理解和认识,进而可为实际水文水资源工作提供指导和依据。

不同方法联合和耦合的方式是提高水文时间序列分析结果精度和可靠性的有效途径,今后应加强这方面的研究和应用,但需要注意到单个方法的缺陷仍会对分析过程和结果产生影响,因此仍需要进一步改进和完善各种时间序列分析方法。

探讨物理成因分析和数理统计分析相结合是研究和解决环境变化影响下的水文水资源问题的有效途径,今后也需要加强这方面的研究工作。

## 参考文献(References)

- Awwad H, Valdes J, Restrepo P. 1994. Streamflow forecasting for Han River basin Korea. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5): 651-673.
- Bender M, Simonovic S. 1992. Time series modeling for long-range streamflow forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(6): 857-869.
- Bolzern P M, Ferrario G, Fronza G. 1980. Adaptive real-time forecast of river flow rates from rainfall data. *Journal of Hydrology*, 47(3-4): 251-267.
- Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. 1994. *Time series analysis, forecasting and control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Burn D H, McBean E A. 1985. River flow forecasting model for Sturgeon River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2): 316-333.
- Cai H, Liang N S, Shu C. 2000. Comprehensive analysis expert system for flood forecasting of hydropower station. *Central China Electric Power*, 13(1): 5-6. [蔡华, 梁年生, 舒畅. 2000. 水电站洪水预报综合分析专家系统. *华中电力*, 13(1): 5-6.]
- Cao H X. 2003. *Dynamical System Self-memory Theories, Forecasting and Applications*. Beijing: Geology Press. [曹

- 鸿兴. 2003. 动力系统自记忆原理: 预报和计算应用. 北京: 地质出版社.]
- Cao Y Q, Hou W P. 2005. Application research of non-linear theory in hydrology and its prospect. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 31(4): 14-17. [曹永强, 侯文萍. 2005. 非线性理论在水文学中的应用研究及展望. 水力发电学报, 31(4): 14-17.]
- Carlson R F, MacCormick A J A, Watts D G. 1970. Application of linear models to four annual streamflow series. *Water Resources Research*, 6(4): 1070-1078.
- Chen S Y. 1988. Fuzzy hydrology. *Journal of Dalian University of Technology*, 28(1): 93-97. [陈守煜. 1988. 模糊水文学. 大连理工大学学报, 28(1): 93-97.]
- Chen S Y. 1997. Theories and methods for mid-to-long-term hydrologic forecasting. *Journal of Hydraulic Engineering*, 28(8): 15-21. [陈守煜. 1997. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法. 水利学报, 28(8): 15-21.]
- Chen S Y. 2005. Variable fuzzy theories and methods for water resources and flood control systems. Dalian, China: The Press of Dalian University of Technology. [陈守煜. 2005. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法. 大连: 大连理工大学出版社.]
- Chen S Y, Guo Y, Wang D G. 2006. Intelligent forecasting mode and approach of mid and long term intelligent hydrological forecasting. *Engineering science*, 8(7): 30-35. [陈守煜, 郭瑜, 王大刚. 2006. 智能预报模式与水文中长期智能预报方法. 中国工程科学, 8(7): 30-35.]
- Coulbaly P, Anctil F, Bobee B. 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology*, 230(3-4): 244-257.
- Coulbaly P, Burn D H. 2004. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40(3), DOI: 10.1029/2003WR002667.
- Ding J, Deng Y R. 1988. *Stochastic Hydrology*. Chengdu, China: The publisher of the Science and Technology University of Chengdu. [丁晶, 邓育仁. 1988. 随机水文学. 成都: 成都科技大学出版社.]
- Ding J. 1992. Chaotic analysis of floods. *Water Resources Research*, 13(3): 14-18. [丁晶. 1992. 洪水混沌分析. 水资源研究, 13(3): 14-18.]
- Ding J, Deng Y R, Fu J. 1995. The Approach to Flood Prediction Based on A Phase Space of Flood Time Sequence. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 27(4): 7-11. [丁晶, 邓育仁, 傅军. 1995. 洪水相空间预测. 成都科技大学学报, 27(4): 7-11.]
- Ding J, Wang W S, Zhao Y L. 2002. The exploration on inversion of model for hydrologic dynamic system. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 21(3): 7-11. [丁晶, 王文圣, 赵永龙. 2002. 反演水文动力模型的探讨. 水力发电学报, 21(3): 7-11.]
- Ding T, Zhou H C, Huang J H. 2004. Interval prediction of chaotic hydrological time series. *Journal of Hydraulic Engineering*, 35(12): 15-20. [丁涛, 周惠成, 黄键辉. 2004. 混沌水文时间序列区间预测研究. 水利学报, 35(12): 15-20.]
- Feng G Z, Li P C. 1997. On the study of chaotic characteristics in hydrological systems. *Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 25(4): 97-101. [冯国章, 李佩成. 1997. 论水文系统混沌特征的研究方向. 西北农业大学学报, 25(4): 97-101.]
- Foufoula-Georgiou E, Kumar P. 1994. *Wavelets in geophysics*. San Diego: Academic Press.
- Fu J. 1994. Research on the chaotic characters of floods and nonlinear forecasting methods [D]. Chengdu, Sichuan Union University. [傅军. 1994. 洪水混沌分析及其非线性预测方法研究[D]. 成都: 四川联合大学.]
- Gaucherel C. 2002. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds. *Journal of Hydrology*, 269(3-4): 101-121.
- Hense A. 1987. On the possible existence of a strange attractor for the Southern Oscillation. *Beiträge zur Atmosphärenphysik*, 60(1): 34-47.
- Jaynes E T. 1957. Information theory and statistical mechanics. *Physical Review Letters*, 106(4): 620-630.
- Jiang S Z, Zhang H. 2006. Wavelet characteristics of hydrologic time series in the upper basin of the Yellow River. *Yellow River*, 28(4): 26-27. [姜世中, 张宏. 2006. 黄河上游高寒地区水文时间序列的小波特征. 人民黄河, 28(4): 26-27.]
- Jin G Y. 1999. A review of hydrological frequency analysis. *Advance in Water Sciences*, 10(3): 319-327. [金光炎. 1999. 水文频率分析述评. 水科学进展, 10(3): 319-327.]
- Kalman R E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(2): 35-45.
- Kumar P, Foufoula-Georgiou E. 1997. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*, 35(4): 385-412.
- Labat D. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology*, 314(1-4): 275-288.
- Labat D. 2006. Oscillations in land surface hydrological cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1-2): 143-154.

- Labat D. 2008. Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources*, 31(1): 109-117.
- Labat D, Ababou R, Mangin A. 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, 238(3-4): 149-178.
- Labat D, Josyane R, Jean L G. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 2-Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology*, 314(1-4): 289-311.
- Lettenmaier D P. 1984. Synthetic streamflow forecast generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3): 277-289.
- Li R F, Ji Y Z. 2005. Research Progress And Prospect on Computation Method of Hydrological Time Series. *Shanxi Hydrotechnics*, (4): 4-6. [李荣峰, 冀雅珍. 2005. 水文时间序列分析计算方法的研究进展与展望. *山西水利科技*, (4): 4-6.]
- Li R F, Shen B, Zhang J K. 2006. Self-memory hydrologic prediction model based on phase-space reconstitution. *Journal of Hydraulic Engineering*, 37(5): 583-587. [李荣峰, 沈冰, 张金凯. 2006. 基于相空间重构的水文自记忆预测模型. *水利学报*, 37(5): 583-587.]
- Li X B, Ding J, Li H Q. 1999. Wavelet analysis of hydrological time series. *Advance in Water Sciences*, 10(2): 144-149. [李贤彬, 丁晶, 李后强. 1999. 水文时间序列的子波分析法. *水科学进展*, 10(2): 144-149.]
- Li Y, Singh V P, Cong S. 1987. Entropy and probability distribution//Singh V P. *Hydrologic Frequency Modeling*. Dordrecht: Publishing Company: 367-382.
- Lin Y, Liu S R, Li C W, et al. 2005. Application of wavelet transform to monthly runoff time serial analysis in Zagunao watershed, the upper Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(9): 1645-1649. [林勇, 刘世荣, 李崇巍, 等. 2005. 小波变换在岷江上游杂古脑流域的径流时间序列分析中的应用. *应用生态学报*, 16(9): 1645-1649.]
- Lin Z S. 1993. Theories and modes of phase space for long-term forecasting. Beijing: Climatic Press. [林振山. 1993. 长期预报的相空间理论和模式. 北京: 气象出版社.]
- Liu G W. 1986. Review on the hydrological frequency computation. *Journal of China Hydrology*, (3): 10-18. [刘光文. 1986. 水文频率计算评议. *水文*, (3): 10-18.]
- Liu G W. 1990a. Parameter estimation of Pearson-III distribution. *Journal of China Hydrology*, 10(4): 1-15. [刘光文. 1990a. 皮尔逊 III 型分布参数估计. *水文*, 10(4): 1-15.]
- Liu G W. 1990b. Parameter estimation of Pearson-III distribution. *Journal of China Hydrology*, 10(5): 1-14. [刘光文. 1990b. 皮尔逊 III 型分布参数估计(续完). *水文*, 10(5): 1-14.]
- Liu Q, Islam S, IRodriguez-Iturbe I, et al. 1998. Phase-space analysis of daily stream flow: Characterization and prediction. *Advances in Water Resources*, 21(6): 463-475.
- Ma X F. 2005. Discussion on the limitation of hydrological frequency analysis and the meaning of process analysis//Zhou X D, Shen B. *The relationship between water and social development*. Beijing: China Hydropower Press. [马秀峰. 2005. 论现行水文频率计算的局限性和游程分析的实践意义//周孝德, 沈冰. *水与社会经济发展的相互影响及作用*. 北京: 水利水电出版社.]
- McKerchar A I, Delleurm J W. 1974. Application of seasonal parametric stochastic models for monthly flow data. *Water Resources Research*, 10(2): 246-255.
- Nakken M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modeling & Software*, 14(4): 283-295.
- Ng W W, Panu U S, Lennox W C. 2007. Chaos based analytical techniques for daily extreme hydrological observations. *Journal of Hydrology*, 342(1-2): 17-41.
- Percival D B, Walden A T. 2000. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Quan X Z, Wen Q, Zhang Y C. 1999. The application of chaotic prediction technique in runoff forecast. *Journal Of Huazhong University of Science and Technology*, 27(12): 41-43. [权先璋, 温权, 张勇传. 1999. 混沌预测技术在径流预报中的应用. *华中理工大学学报*, 27(12): 41-43.]
- Sang Y F, Wang D, Liu C. 2007. Application of continuous wavelet analysis in hydrological analysis of estuary region of the Yellow River//Ren L L, Chen X, Zhang S A. *Environmental Change and Water Safety*. Beijing: Chinese Hydropower Press, 766-770. [桑燕芳, 王栋, 刘畅. 2007. 连续小波变换在黄河河口地区水文特性分析中的应用研究//任立良, 陈喜, 章树安. *环境变化与水资源*. 北京: 中国水利水电出版社, 766-770.]
- Sang Y F, Wang D. 2008a. Wavelets selection method in hydrologic series wavelet analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(3): 296-300, 306. [桑燕芳, 王栋. 2008a. 水文序列小波分析小波函数选择方法. *水利学报*, 39(3): 296-300, 306.]
- Sang Y F, Wang D. 2008b. New idea and two new methods for identifying periodicities of hydrological time series. *Advance in Water Sciences*, 19(3): 412-417. [桑燕芳, 王栋. 2008b. 水文时间序列周期识别的新思路与两种新方法]



- 法. 水科学进展, 19(3): 412-417.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009a. Research on runoff variation in the middle and lower Yellow River during the last 50 years based on wavelet analysis//Li G Y. Proceeding of 4st International Yellow River Forum (IYRF) on Ecological Civilization and River Ethics, 5. Zhengzhou, China: Yellow River Conservancy Press: 229-237.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009b. Variation characters of runoff and sediments and rule of sedimentation in the lower Yellow River during the last 50 years//Li G Y. Proceeding of 4st International Yellow River Forum (IYRF) on Ecological Civilization and River Ethics, 5. Zhengzhou, China: Yellow River Conservancy Press: 150-158.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009c. New Model of Groundwater Simulation and Prediction Based on Wavelet De-noising//Wang Y X. Managing Groundwater and the Environment. Wuhan: China University of Geosciences Press: 55-58.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009d. The relation between periods' identification and noises in hydrologic series data. Journal of Hydrology, 368(1-4): 165-177.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2009e. Comparative study of some improved ANN-models for hydrologic time series forecast. Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems (Vol. 4), Xiamen, China: 63-67.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009f. Entropy-Based Wavelet De-noising Method for Time Series Analysis. Entropy, 11(4): 1123-1147.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2010a. Entropy-Based Method of Choosing the Decomposition Level in Wavelet Threshold De-noising. Entropy, 12(6): 1149-1513.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2010b. Hydrologic Series De-noising Based on Noise's Energy Distribution//Huang C F. Chinese Perspective on Risk Analysis and Crisis Response. France: Atlantis Press, 537-543.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2010c. Probabilistic Forecast and Uncertainty Assessment of Hydrologic Design Values Using Bayesian Theories. Human and Ecological Risk Assessment, 16(5): 1184-1207.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2010d. Uncertainty Analysis of Decomposition Level Choice in Wavelet Threshold De-Noising. Entropy, 12(12): 2386-2396.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2011. Wavelet-Based Analysis on the Complexity of Hydrologic Series Data under Multi-Temporal Scales. Entropy, 13(1): 195-210.
- Sang Y F, Wang Z G, Liu C M. 2012. Period identification in hydrologic time series using empirical mode decomposition and maximum entropy spectral analysis. Journal of Hydrology, 424-425: 154-164.
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009a. Research on stochastic medium-and long-term hydrologic forecasting model based on WA, ANN and hydrologic frequency analysis. Journal of China Hydrology, 39(3): 10-15. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 2009a. 基于WA、ANN和水文频率分析法相结合的中长期水文预报模型的研究. 水文, 39(3): 10-15.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2009b. Parameter uncertainty analysis on hydrologic frequency models based on Bayesian theory. Water Resources and Power, 27(6): 15-19. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春. 2009b. 基于贝叶斯理论的水文线型参数不确定性分析. 水电能源科学, 27(6): 15-19.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2009c. Research on SAGA-ML method for parameter optimization in hydrologic frequency analysis. Journal of China Hydrology, 29(5): 23-29. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春. 2009c. 水文频率分析中参数估计SAGA-ML方法的研究. 水文, 29(5): 23-29.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2009d. Information entropy theory based noise reduction method for hydrologic series data analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 40(8): 919-926. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 2009d. 水文序列分析中基于信息熵理论的消噪方法. 水利学报, 40(8): 919-926.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C. 2010a. Description of the wavelet characters of noises in hydrologic series. Journal of Nanjing University, 46(6): 643-653. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春. 2010a. 水文序列噪声成分小波特性的揭示与描述. 南京大学学报, 46(6): 643-653.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2010b. Quantitative characterization of complicated characteristics of hydrologic series. Journal of China Hydrology, 30(5): 1-7. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 2010b. 水文时间序列复杂变化特性的研究与定量表征. 水文, 30(5): 1-7.]
- Sang Y F, Wang D, Wu J C, et al. 2010c. Wavelet cross-correlation method for hydrologic time series analysis. Journal of Hydraulic Engineering, 41(11): 1172-1179. [桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 2010c. 水文时间序列小波互相关分析方法. 水利学报, 41(11): 1172-1179.]
- Schaeffli B, Maraun D, Holschneider M. 2007. What drives high flow events in the Swiss Alps: Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrology. Advances in Water Resources, 30(12): 2511-2525.
- Singh V P, Rajagopal A K. 1987. A New method of parameter

- estimation for hydrologic frequency analysis. *Hydrological Sciences and Technology*, 2(3): 33-40.
- Singh V P, Fiorentino M. 1992. A historical perspective of entropy applications in water resources//Singh V P, Fiorentino M. *Entropy and Energy Dissipation in water resources*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers: 21-61.
- Singh V P. 1997. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Processes*, 11(6): 587-626.
- Singh V P. 1998. *Entropy-based parameter estimation in Hydrology*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Sogoyomi T B, Ali U I, Abarbanel H D I. 1996. Non-linear dynamics of the Great Salt Lake: Dimension estimation. *Water Resources Research*, 32(1): 149-159.
- Sonuga J O. 1972. Principle of maximum entropy in hydrologic frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 17(3): 177-191.
- Sonuga J O. 1976. Entropy principle applied to the rainfall-runoff process. *Journal of Hydrology*, 30(1-2): 81-94.
- Sun J L, Qin D Y. 1989. Study on the general model of hydrological frequency analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 20(4): 1-10. [孙济良, 秦大庸. 1989. 水文频率分析通用模型研究. *水利学报*, 20(4): 1-10.]
- Thomas H A, Fiering M B. 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basin by simulation//Purcell P J. *Design of Water Resources Systems*. Cambridge: Harvard University Press: 459-493.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1): 61-78.
- Walker G. 1931. On periodicity in series of related terms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 131: 518-532.
- Wan X, Ding J, Zhang X L. 2005. Application of wavelet neural network in runoff forecasting. *Yellow River*, 27(10): 33-36. [万星, 丁晶, 张晓丽. 2005. 小波神经网络在径流预测中的研究应用研究. *人民黄河*, 27(10): 33-36.]
- Wang D, Zhu Y S. 2001. Principle of Maximum Entropy and Its Application in Hydrology and Water Resources. *Advances in Water Sciences*, 12(3): 424-430. [王栋, 朱元牲. 2001. 最大熵原理在水文水资源科学中的应用. *水科学进展*, 12(3): 424-430.]
- Wang D, Zhu Y S. 2003. Influence of stochastic observation error on water environment evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 34(10): 1-5. [王栋, 朱元牲. 2003. 随机观测误差对水环境评价的影响. *水利学报*, 34(10): 1-5.]
- Wang W S, Ding J, Xiang H L. 2002. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology. *Advances in Water Sciences*, 13(4): 515-520. [王文圣, 丁晶, 向红莲. 2002. 小波分析在水文学中的应用研究及展望. *水科学进展*, 13(4): 515-520.]
- Wang W S, Zhao T X, Ding J. 2004. Study on Change Characteristics of Hydrological Time Series with Continuous Wavelet Transform. *Journal of Sichuan University*, 36(4): 6-9. [王文圣, 赵太想, 丁晶. 2004. 基于连续小波变换的水文时间序列变化特征研究. *四川大学学报*, 36(4): 6-9.]
- Wang W S, Ding J, Li Y Q. 2005. *Hydrological Wavelet Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press. [王文圣, 丁晶, 李跃清. 2005. 水文小波分析. 北京: 化学工业出版社.]
- Yang X, Luan J H, Feng G Z. 2000. Discussion and prospect on mid-to-long-term hydrological forecasting. *The Journal of Northwest Agricultural University*, 28(6): 203-207. [杨旭, 栾继虹, 冯国章. 2000. 中长期水文预报研究评述与展望. *西北农业大学学报*, 28(6): 203-207.]
- Yevjevich V. 1963. *Fluctuations of Wet and Dry Years (Hydrology Paper 1)*. Fort Collins: Colorado State University.
- Yevjevich V. 1972. *Stochastic Process in Hydrology*. Colorado: Water Resources Publications.
- Yevjevich V. 1975. *Generation of Hydrologic Samples: Case Study of the Great Lakes (Hydrology Paper 72)*. Fort Collins: Colorado State University.
- Yule G U. 1927. On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to Wofer's sun-spot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 127(226): 267-298.
- Zheng Z Q, Xie P, Cai W. 2001. Primary Application of Wavelet Analysis on Non-steady Hydrological Times Series. *Water Resources and Power*, 19(3): 49-51. [郑泽权, 谢平, 蔡伟. 2001. 小波变换在非平稳水文时间序列分析中的初步应用. *水电能源科学*, 19(3): 49-51.]
- Zhou N L, Wu Z Y. 2000. Hydrological forecasting based on fuzzy causal classification and its application. *Journal of Zhengzhou University of Technology*, 21(1): 58-61. [周念来, 吴泽宇. 2000. 水文要素模糊因果聚类预报及其应用. *郑州工业大学学报*, 21(1): 58-61.]
- Zhou Y K, Wang L C, Zhang J. 1999a. Some chaotic characteristics of the flood series in Huaihe river basin. *Journal of Natural Disasters*, 8(1): 42-47. [周寅康, 王腊春, 张捷. 1999a. 淮河流域洪涝变化的混沌特征. *自然灾害学报*, 8(1): 42-47.]
- Zhou Y K, Fu C L, Wang L C, et al. 1999b. The predictable period of the flood series in huaihe river basin. *Journal of Natural Disasters*, 8(4): 42-47. [周寅康, 付重林, 王腊春,

- 等. 1999b. 淮河流域洪涝变化可预报时间研究. 自然灾害学报, 8(4): 42-47.]
- Zhou Y K, Wang L C, Xu Y P, et al. 2000. Dissipation of the flood series in the Huaihe River basin. *Geographical Research*, 19(3): 276-282. [周寅康, 王腊春, 许有鹏, 等. 2000. 淮河流域洪涝变化的耗散性. *地理研究*, 19(3): 276-282.]
- Zhou Y K, Ma Z Y, Wang L C. 2002. Chaotic dynamics of the flood series in the Huaihe River Basin for the last 500 years. *Journal of Hydrology*, 258(1-4): 100-110.

## Research progress on the time series analysis methods in hydrology

SANG Yanfang<sup>1,2</sup>, WANG Zhonggen<sup>1</sup>, LIU Changming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Hydrological time series are usually composed of various components with complicated characteristics. At present it is generally thought that hydrological time series mainly show stochastic, fuzzy, nonlinear, non-stationary, and multi-temporal scale characteristics. In this paper, research progresses on the time series analysis methods to study the characteristics of hydrological processes and their applications are summarized, including serial correlation analysis methods, hydrological frequency analysis methods, fuzzy analysis methods, chaos theories and methods, information entropy theories, and wavelet analysis methods. The main issues and the problems to be solved with regard to the methods mentioned above are discussed, namely, the disadvantages and limitations in their applications to hydrological time series analysis. Finally, it is pointed out that further improvement and optimization of the methods, combination and coupling between the methods, emphasis on the combination of the analyses of physical mechanisms and mathematical statistics, are the key not only to improving the results of hydrological time series analysis, but also to studying and solving the hydrology and water resources issues caused by environmental change.

**Key words:** hydrological time series analysis; uncertainty; wavelet analysis; information entropy; nonlinearity; chaos; coupling