水文过程非平稳性研究若干问题探讨

桑燕芳^{1*}, 谢平², 顾海挺², 李鑫鑫^{1,3}

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. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: sangyf@igsnrr.ac.cn

2016-08-18 收稿, 2016-10-22 修回, 2016-10-24 接受, 2016-12-29 网络版发表

国家自然科学基金(91647110, 91547205, 51579181, 41330529)、中国科学院地理科学与资源研究所兼维优秀青年人才计划和中国科学院青年创新促进会资助

摘要 探讨了水文过程非平稳性和全球变化水文响应等热点问题. 首先明确了水文系统稳定性与水文过程非平稳性研究对象的差异: 水文系统稳定性改变主要指环境变化影响下水文物理系统发生变化, 即水文过程确定成分和确定性规律改变, 而水文过程非平稳性主要指水文过程随机成分的统计特征发生变化. 系统梳理了水文过程非平稳特性研究的若干关键问题, 包括水文非平稳性的研究对象、表现方式、判别依据和方法、描述方法等. 指出水文过程非平稳性研究应重点关注水文过程的随机成分, 应使用三阶宽平稳对水文平稳性进行判别, 以满足工程水文设计、水资源评价等需求; 可利用随机水文学理论方法判别水文过程非平稳性, 对水文过程周期和趋势等特性进行识别, 再对随机成分的平稳性进行判断, 为随机模拟和水文预报等奠定基础. 上述水文过程非平稳性若干关键问题的界定和明确, 有望为研究环境变化水文响应的关键科学问题提供借鉴和参考.

关键词 非平稳性, 全球变化, 随机水文过程, 水文模拟

受众多复杂因素的综合作用和影响, 自然界水循环过程是一个十分复杂的巨系统^[1,2]. 揭示水循环过程的变化特性和演变规律是解决水短缺、水污染、水灾害等复杂交叉水问题的重要基础, 因此一直是水文学的核心研究课题^[3]. 实际中, 欲准确揭示和认识水循环过程的复杂变化特性是十分困难的科学问题^[4,5]. 特别是近几十年受全球气候变化和人类活动的持续影响^[6], 许多流域天然水循环过程受到破坏, 各主要水文要素的周期和趋势等特性发生变异^[7], 降水-径流响应关系明显改变, 旱涝灾害等极端水文事件频发^[8], 且未来旱涝灾害发生的不确定性和风险愈来愈大^[9~12]. 大量观测结果显示, 许多流域实测水文资料呈现明显的非平稳变化特性, 给水利工程设计、

水文模拟计算、水资源评价规划等一系列涉水工作带来很大困难^[13~16].

依据数理统计学理论, 数据非平稳性主要指大样本的统计推断基础——数据一致性要求遭到破坏. 特别是Milly等人^[15]发表论文“Stationarity is dead: Whither water management?”以来, 水文过程非平稳性正逐渐成为国际水文学界的研究热点, 尤其是全球变化研究领域重点关注的科学问题之一^[17~24]. 判别水文过程是否保持平稳性具有十分重要的意义. 水文过程平稳性可以简化水文分析与计算的难度, 提高序列统计特征量的估计精度. 从随机水文学角度看, 常用的水文时间序列模型是以通过揭示序列自身变化规律为核心发展起来的方法论^[1]. 经典回归

引用格式: 桑燕芳, 谢平, 顾海挺, 等. 水文过程非平稳性研究若干问题探讨. 科学通报, 2017, 62: 254–261

San Y F, Xie P, Gu H T, et al. Discussion on several major issues in the studies of hydrological nonstationarity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 254–261, doi: 10.1360/N972016-00736

分析的一个重要假设前提是数据平稳性,因此识别水文过程平稳性也是开展回归分析和序列模拟预测的前提。如果水文序列表现出明显的非平稳性,经典回归分析的基础已不适用^[25,26],用样本均值和方差等统计指标推断随机变量的分布特征已无效,且会造成“伪回归”等严重后果。

虽然平稳性在数学上有严格定义和界定,在其他领域有较多研究应用成果,但在水文学领域关于水文非平稳性问题缺乏系统性研究,对若干基础和关键问题缺乏统一认识。结合全球变化研究看,环境变化对水循环过程的复杂影响是目前重点关注的科学问题,但与全球变化背景下水文过程非平稳性研究的对象和内容并不一致,因此需要理清二者的关系。本文旨在探讨和明确环境变化下的水文响应与水文过程非平稳性研究对象的差异,并进一步梳理关于水文过程非平稳性研究的若干关键问题,为相关研究提供参考和借鉴。

1 水文系统稳定性与水文过程平稳性研究差异

环境变化导致许多流域水循环过程发生明显变化是目前水文学界的共识^[27,28],许多研究将此现象简单解释为非平稳性。笔者认为,环境变化导致水循环过程发生变化应包括两部分:水文系统稳定性改变和水文过程平稳性改变。关于全球变化背景下水文过程非平稳性研究,在认识上的最大误区是将非平稳性与趋势等特性联系起来,即认为环境变化影响下某水文变量无趋势变化时属于平稳过程,当发生趋势变化时认为是非平稳过程。然而依据平稳性的严格定义可知,即使无趋势情况下水文过程也可能存在周期变化、突变等特性,或者随机过程统计特性(包括统计分布类型和统计特征参数)发生变化^[20,29],因此并不完全属于平稳过程。实际研究过程中,需要准确表述环境变化影响下水文系统稳定性变化与水文过程非平稳性变化二者研究对象的差异。

水文过程既受到确定性因素影响,也受随机因素影响,因此水文过程是以确定性变化中伴随着随机变化出现的,是一个十分复杂的随机过程^[30],总体上包含两部分:确定成分和随机成分(图1)。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周期(年、月和日)成分;人

类活动通过改变土地利用方式,影响流域产汇流模式,使水文序列存在趋势和跳跃等暂态成分。随机成分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进行解释和描述^[2,31]。确定性水文学(系统水文学)认为,水文现象随时间的变化可由其他确定性变量完全解释;统计水文学则认为,所研究对象和问题不牵涉时间概念,而只涉及某一事件的概率。随机水文学(stochastic hydrology)填补了确定性水文学(研究确定性过程)和统计水文学(研究纯随机过程)之间的缺口。随机水文学重点关注与时间密切相关的随机水文过程及其演变规律,以及由随机成分导致的不确定性,例如某流域径流变化可以表示为

$$Q = f(A|P, T) + \omega, \quad (1)$$

式中, Q 表示径流, P 表示降水, T 表示气温, A 表示流域特性, ω 表示随机因素的影响。对于确定性变化规律 f ,常通过水文模拟技术对其进行适当概化和描述后进行预测,是确定性水文学的研究对象;纯随机成分 ω 的变化规律是统计水文学的研究对象,随机成分 Q 则是随机水文学的研究对象。

根据数理统计理论和待研究问题精细程度的差异,平稳时间序列可分为严平稳和宽平稳^[32]。严平稳定义为只有当样本所有统计特征都不随时间推移发生变化时,才认为具有平稳性(式(2))。实际中由于受样本大小等因素影响,很难有完全符合严平稳条件的样本序列。宽平稳主要是采用样本特征统计量来定义的一种平稳性,一般认为只要保证序列低阶矩平稳(二阶),就能保证样本主要性质近似平稳,即下式中 n 等于1和2即可。

$$\begin{aligned} f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) \\ = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1 + k, t_2 + k, \dots, t_n + k), n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

由上述分析可知,水文过程平稳性的研究对象明显区别于水文系统稳定性的研究对象。水文系统稳定性指的是系统输入、输出和系统作用(水文响应)是否稳定,重点关注水文系统的确定性规律是否随时间发生变化,因此属于确定性水文学的研究范畴。水文过程非平稳性主要是指水文过程的统计特征是否随时间发生变化,包括不含确定成分的随机成分非平稳性,以及含有确定成分的随机成分非平稳性,因此属于随机水文学的研究范畴。

环境变化导致流域水文过程发生变化,体现了

图1 环境变化水文响应、水文系统稳定性、水文过程平稳性的研究对象

Figure 1 Differences among the researches of the hydrological response to environmental change, stability of hydrological system, and stationarity of hydrological process

水文过程对环境变化的响应和适应性变化,其研究内容应包含两个部分.其一是水文系统稳定性研究,主要指水文过程确定性规律发生的变化,即流域特性 A 、模型输入 P 和 T 中的任意一项发生变化,导致流域降水-径流响应关系发生改变;从时间变化看,水文系统稳定性主要体现在周期(时间尺度和波动强度)变化、趋势变化、突变等,当水文系统稳定性发生改变时,会给水文模拟计算等一系列工作带来很大困难.其二是水文过程非平稳性研究,重点针对水文过程的随机变化规律,包括随机过程相依性变化、水文极端事件发生的频率和强度等特征指标变化,以及水文过程形状特征指标变化,直接影响到工程水文设计、水资源评价、水安全与风险分析等实际工作^[2].

2 水文过程非平稳特性研究关键问题探讨

目前已有大量成熟的随机水文学方法和水文模拟预报技术,可针对水文过程的演变规律开展定量研究.下述内容重点针对水文过程非平稳性的若干基础和关键问题进行梳理和讨论,包括明确水文过程非平稳性研究的对象、水文过程非平稳现象的表现方式、准确划定水文非平稳过程、水文过程非平稳性

的识别和表述方法等.

2.1 水文过程非平稳性研究对象

水文过程一般存在趋势和周期等变化特性,属于非平稳过程,因此随机水文学关注的对象属于水文平稳性研究的对象.水文过程平稳性研究对象主要包括两个:一是随机水文过程中除确定成分之外的随机成分(包括随机相依成分和纯随机成分),另一个是水文极值变量序列(极端暴雨、洪水等水文变量).此外,需要明确说明水文平稳过程与随机过程、纯随机过程之间的关系与区别:水文平稳过程必然是随机过程,但随机过程不全是平稳过程;纯随机过程是平稳过程,但平稳过程不全是纯随机过程,还包含平稳随机相依过程.

认识非平稳性的主要表现方式,对识别和定量描述水文过程非平稳性十分重要.依据水文非平稳性研究的两个主要对象,非平稳主要表现方式可以从统计水文学和随机水文学两个角度进行剖析.从统计水文学角度看,水文非平稳性主要表现为水文变量的概率分布特性发生改变,具体可通过均值、变差系数、偏态系数、峰度系数等的变化进行判断.从随机水文学角度看,水文非平稳性主要表现为显著趋势变化、周期变化、突变、主周期变化、自(偏)相关特性发生变化等,即部分随机平稳成分转换成确定性暂态成分(图1).

2.2 水文过程平稳性条件界定

水文过程非平稳的判别和界定需要考虑水问题研究的实际需求,主要包括以下方面:(1)从水文模拟预报角度看,模型预报误差一般认为服从正态分布,因此需要考虑二阶矩平稳性;(2)从水文数据资料分析处理角度看,与其他信号处理噪声的方式不同,将水文时间序列中噪声成分看作水文随机变量时,一般认为服从偏态分布,因此需要考虑高于二阶矩的平稳性;(3)从水文随机模拟研究角度看,一般认为随机水文变量服从偏态分布,利用偏态-正态转换技术方法进行随机模拟,因此也需要考虑高于二阶矩的平稳性;(4)从工程水文设计角度看,水文变量一般服从偏态分布,常用到均值、方差(变差系数)、偏态系数等特征值,且是工程水文设计工作的基础,例如我国现行规范使用的Pearson-III(P-III)型分布线型就是如此^[33],其他常用于水文频率计算的分布线

型也基本服从偏态分布,同样需要考虑高于二阶矩的平稳性。

综上,区别于其他领域研究常用的二阶矩宽平稳性判别标准,水文过程平稳性判别的标准和依据应该至少定为三阶矩宽平稳。如果所分析随机水文变量的样本满足三阶矩平稳,即可认为该样本具有平稳特性,否则认为是非平稳特性。此外,一些特殊情况下需要针对所研究水文问题的特点,确定具体的矩级。

2.3 水文过程非平稳性判别主要技术方法

数理统计方法是检验时间序列是否具有平稳特性的常用方法。检验序列平稳性主要有两种方法:一种是利用时序图和相关性曲线图(自相关图和偏相关图)显示的特征进行判断的图示检验方法;另一种是构造检验统计量进行假设检验的方法。图示检验方法简单,但在判别时需要有足够经验。最常用的是通过相关性分析判断序列的平稳性:平稳时间序列的自相关函数具有截尾特点,但非平稳时间序列的自相关函数具有拖尾特点。一般情况下,可以通过分析时间序列的一阶自回归系数绝对值是否小于1初步判断该序列是否具有平稳性^[1,31]。如果序列零均值化后自相关函数出现缓慢衰减或者周期性衰减情况,说明序列可能存在某种趋势或周期波动特性(季节性变化和多年波动变化),即表现出非平稳性。

此外,可以利用Barlett定理判断水文过程的平稳性。Barlett定理是指:如果一个长度为 n 的时间序列具有纯随机性,那么该序列的延迟非零期的样本自相关系数将近似服从均值为零、方差为序列长度倒数的正态分布^[34,35]。根据Barlett定理,可以构造检验统计

量,并使用卡方检验识别序列的纯随机性。由于平稳序列具有短期相关性,因此检验时在短时间延迟范围内进行分析即可。单位根检验方法(unit root test)也是判断时间序列平稳性常用的方法,最常用的方法有迪基-富勒检验方法(Dickey-Fuller Test, DF)和扩展迪基-富勒检验方法(ADF)等,具体分析过程中需要用到检验临界值表^[36]。单位根检验方法在气象过程、气候变化、海洋学等领域已得到较好的应用^[17],在揭示主要气候要素和海洋要素的时空变异性、非线性趋势变化、长期记忆性以及随机特性显著性等方面取得了很好的效果^[37-41]。然而,该方法目前在水文学领域的研究与应用很少,需要探讨其用于研究水文过程分析时的适用性与方法改进等问题。

除常规的统计水文学方法之外,也可以利用随机过程理论方法判别水文过程是否具有平稳性,即对水文时间序列的变化特性(周期、趋势和突变等)和组成成分进行分析判断,对随机成分的平稳性再进行分析判断,为随机模拟和水文预报等工作奠定基础。目前较成熟的周期和趋势识别方法见表1。如果某水文变量的时间序列呈现出明显的周期变化或趋势变化,则认为该水文过程具有非平稳特性,反之可以进一步作平稳性检验。由于不同方法在处理序列非平稳性与非线性、抗噪性、适应性、显著性判别等方面存在较大差别,因此实际进行水文时间序列周期和趋势识别时,需要慎重选择相应的方法,且需要选择多方法进行综合分析判断,具体可参见文献[42-44]。

2.4 水文过程非平稳性的主要描述方法

目前最常用的处理水文过程非平稳成分的方法

表1 水文时间序列分析中常用的周期和趋势识别方法

Table 1 Methods commonly used for the identification of periodicities and trend in hydrological time series

分析项	分类	分析方法
周期识别	单一方法	周期图法、快速傅立叶变换法、最大熵谱分析法(maximum entropy spectrum analysis, MESA)、小波分析方法(wavelet analysis method, WA)、经验模态分解方法(empirical mode decomposition method, EMD)等
	组合方法	主序谱分析方法、EMD-MESA方法
趋势识别	数据拟合法	最小二乘法、最大似然法、指数拟合法、双曲线拟合法、幂函数拟合法
	时域分析法	MK检验方法、Spearman秩次检验法、线性回归法、Sen's斜率估计法
	频域分析法	滑动平均法、傅里叶变换法(Fourier transformed method, FT)、快速傅里叶变换法(fast Fourier transform method, FFT)、方差谱密度分析法
	时频域分析法	小波分析方法、经验模态分解—希尔伯特变换法等

是进行差分计算. 一般而言, 通过足够多次的差分运算可以提取原序列中的非平稳成分, 但过度差分会造成有用信息的浪费. 差分处理技术由于缺乏物理基础, 因此不能够完全去除水文时间序列中的确定性成分. 描述水文序列平稳成分的较优方法是利用随机水文学方法对周期和趋势等确定成分进行识别和分离, 对剩余成分再依据图2流程进行分析. 如果剩余成分属于随机相依成分, 可利用常规的回归滑动平均模型进行研究; 如果剩余成分属于纯随机成分, 可使用统计水文学方法进行研究, 例如水文频率计算等方法.

利用自回归滑动平均模型(autoressive moving average, ARMA)对随机平稳过程进行模拟预测时, 需要判别序列的自相关特性和偏相关特性, 进而构建合适的模型结构进行模型优化和分析预测. 模型结构选择依据如表2所示^[31].

3 结语

全球变化背景下水循环过程发生的非平稳变化是当前国际水文学界重点研究关注的科学问题之一. 本文针对水文非平稳性研究的关键问题进行了梳理和讨论. 首先针对环境变化水文响应、水文系统稳定性改变、水文过程非平稳性三者研究对象的差异进行了探讨, 然后对水文过程非平稳特性的若干关键问题进行了明晰和界定, 包括水文非平稳性的研究对象、表现方式、判别依据和方法、描述方法等. 指出水文非平稳性研究应重点关注水文过程的随机成分, 以满足工程水文设计、水资源评价等实际水文工作的需求. 上述水文非平稳性若干关键问题的界定, 对研究全球变化背景下水循环过程的关键科学问题具有重要的意义.

参考文献

- Ding J, Deng Y R. Stochastic Hydrology (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1988 [丁晶, 邓育仁. 随机水文学. 成都: 成都科技大学出版社, 1988]
- Xie P, Xu B, Zhang S A, et al. The Research on Variability of Regional Water Resources under Changing Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [谢平, 许斌, 章树安, 等. 变化环境下区域水资源变异问题研究. 北京: 科学出版社, 2012]
- Liu C M, Wang Z G, Sang Y F, et al. Hydro-Informatic Modeling System: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2014, 69: 1–9 [刘昌明, 王中根, 桑燕芳, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. 地理学报, 2014, 69: 1–9]
- Wang W S, Ding J, Li Y Q. Hydrological Wavelet Analysis (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2005 [王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析. 北京: 化学工业出版社, 2005]

图2 时间序列平稳性判别和建模流程

Figure 2 Flow diagram of the stationary identification and modelling of time series

表2 时间序列ARMA建模的阶数选择依据

Table 2 Criterion for the time order choice in auto-regressive moving average (ARMA) models

自相关系数	偏相关系数	模型选择
拖尾	p 阶截尾	AR(p)模型
q 阶截尾	拖尾	MA(q)模型
拖尾	拖尾	ARMA(p, q)模型

综合本文讨论可以看出, 全球变化背景下水文过程改变和水文过程非平稳性等热点问题归根结底都是针对水文过程的复杂变化特性进行研究, 关键科学问题都是要揭示和认识水文过程的确定性变化规律以及不确定性问题. 因此, 一方面需要发展有效的水文时间序列分析方法和水文模拟预报技术, 为揭示水循环过程的确定性演变规律提供技术方法支撑, 利用水文模拟技术手段分析流域产汇流过程发生的变化, 可以很好地认识水文过程非平稳性的形成机制和物理机理; 另一方面, 需要发展随机水文学和统计水文学理论方法, 为揭示水文过程的非平稳特性和统计规律奠定基础, 最终才能有效地应对水文过程非平稳性等全球变化下的复杂水问题.

- 5 Chen X H, Tu X J, Xie P, et al. Process in the research of human induced variability of hydrological elements (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 800–811 [陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展. *地球科学进展*, 2010, 25: 800–811]
- 6 Parry M L. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 7 Xie P, Chen G C, Lei H F, et al. Hydrological alteration diagnosis system (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2010, 9: 85–91 [谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统. *水利发电学报*, 2010, 9: 85–91]
- 8 Liang Z M, Hu Y M, Huang H P, et al. Study on the estimation of design value under non-stationary environment (in Chinese). *South-to-North Water Transfers Water Sci Tech*, 2016, 14: 50–53 [梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨. *南水北调与水利科技*, 2016, 14: 50–53]
- 9 Zhang J Y, Wang G Q. *Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007 [张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学出版社, 2007]
- 10 Xia J, Liu C M, Ding Y J, et al. *Water Issues Vision in China (Vol 1). Impact of Climate Change on Typical Area Water Resources in North China and the Counter Measures* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [夏军, 刘昌明, 丁永建, 等. 中国水问题观察(第1卷). 气候变化对我国北方典型区域水资源影响及适应对策. 北京: 科学出版社, 2011]
- 11 Xu Z X. *Hydrologic Model* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [徐宗学. 水文模型. 北京: 科学出版社, 2009]
- 12 Zhang Q. *The Research on Evolution of Water Recycle and Regional Hydrological Process in Southern China* (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2013 [张强. 中国南方流域水循环与流域水文过程演变研究. 北京: 中国水利水电科学出版社, 2013]
- 13 Koutsoyiannis D. Nonstationarity versus scaling in hydrology. *J Hydrol*, 2006, 324: 239–254
- 14 Koutsoyiannis D, Montanari A. Statistical analysis of hydroclimatic time series: Uncertainty and insights. *Water Resour Res*, 2007, 43: 245–252
- 15 Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, 319: 573–574
- 16 Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. On Critiques of “Stationarity is Dead: Whither Water Management?”. *Water Resour Res*, 2015, 51: 7785–7789
- 17 Barbosa S M. Testing for deterministic trends in global sea surface temperature. *J Clim*, 2011, 24: 2516–2522
- 18 Tan X, Gan T Y. Nonstationary analysis of annual maximum streamflow of Canada. *J Clim*, 2015, 28: 1788–1805
- 19 Sadri S, Kam J, Sheffield J. Nonstationarity of low flows and their timing in the eastern United States. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2015, 12: 2761–2798
- 20 Razavi S, Elshorbagy A, Wheeler H, et al. Towards understanding non-stationarity in climate and hydrology through tree-ring proxy records. *Water Resour Res*, 2015, 51: 1813–1830
- 21 Lima C H R, Lall U, Troy T J, et al. A climate informed model for nonstationary flood risk prediction: Application to Negro River at Manaus, Amazonia. *J Hydrol*, 2015, 522: 594–602
- 22 Cheng L, AghaKouchak A, Gilleland E, et al. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Clim Change*, 2014, 127: 353–369
- 23 Ishak E H, Rahman A, Westra S, et al. Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. *J Hydrol*, 2013, 494: 134–145
- 24 Bayazit M. Nonstationarity of hydrological records and recent trends in trend analysis: A state-of-the-art review. *Environ Proc*, 2015, 2: 527–542
- 25 Hamilton D J. *Time Series Analysis*. New Jersey: Princeton University Press, 1994
- 26 Wang W S, Jin J L, Li Y Q, et al. *Technology of Stochastic Simulation in Water Resources and Hydrology* (in Chinese). Chengdu: The Press of Sichuan University, 2007 [王文圣, 金菊良, 李跃清, 等. 水文水资源随机模拟技术. 成都: 四川大学出版社, 2007]
- 27 Schewe J, Heinke J, Gerten D, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 3245–3250
- 28 Prudhomme C, Giuntoli I, Robinson E L, et al. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 3262–3267
- 29 Westra S, Thyer M, Leonard M, et al. A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity. *Water Resour Res*, 2014, 50: 5090–5113
- 30 Sang Y F, Singh V P, Wen J, et al. Gradation of complexity and predictability of hydrological processes. *J Geophys Res*, 2015, 120: 5334–5343
- 31 Yevjevich V. *Stochastic Process in Hydrology*. Colorado: Water Resources, 1972. 276
- 32 Huang Z P. *Hydrological Statistics* (in Chinese). Nanjing: The Press of Hohai University, 2003 [黄振平. 水文统计学. 南京: 河海大学出版社, 2003]
- 33 Hall M J. *Hydrology for Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1975

- 34 Iacone F, Leybourne S J, Taylor A M R. A fixed-B test for a break in level at an unknown time under fractional integration. *J Time Ser Anal*, 2014, 35: 40–54
- 35 Said S E, Dickey D A. Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order. *Biometrika*, 1984, 71: 599–607
- 36 Dickey D A, Fuller W A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J Am Stat Assoc*, 1979, 74: 427–431
- 37 Franzke C. Nonlinear trends, long-range dependence, and climate noise properties of surface temperature. *J Clim*, 2012, 25: 4172–4183
- 38 Capparelli V, Franzke C, Vecchio A, et al. A spatiotemporal analysis of US station temperature trends over the last century. *J Geophys Res*, 2013, 118: 7427–7434
- 39 Franzke C. On the statistical significance of surface air temperature trends in the Eurasian Arctic region. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L23705, doi: 10.1029/2012GL054244
- 40 Maugé S A, Cordero E C. Optimal ranking regime analysis of intra-to multidecadal US climate variability. Part II: Precipitation and streamflow. *J Clim*, 2014, 27: 9027–9049
- 41 Ocaña V, Zorita E, Heimbach P. Stochastic secular trends in sea level rise. *J Geophys Res*, 2016, 121: 2183–2202
- 42 Kallache M, Rust H W, Kroop J. Trend assesement: Applications for hydrology and climate research. *Nonlinear Proc Geophys*, 2005, 12: 201–210
- 43 Sang Y F, Wang Z G, Liu C M. Period identification in hydrologic time series using empirical mode decomposition and maximum entropy spectral analysis. *J Hydrol*, 2012, 424–425: 154–164
- 44 Sang Y F, Wang Z G, Liu C M. Discrete wavelet-based trend identification in hydrologic time series. *Hydrol Process*, 2013, 27: 2021–2031

Summary for “水文过程非平稳性研究若干问题探讨”

Discussion on several major issues in the studies of hydrological nonstationarity

SANG YanFang^{1*}, XIE Ping², GU HaiTing² & LI XinXin^{1,3}

¹ Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: sangyf@igsnr.ac.cn

Due to the great influence of both global climate change and human activities, climatic and hydrological processes in many basins and regions worldwide show obviously nonstationary variability, which has obvious impact on diverse practical water activities such as the hydrological simulation and forecasting, hydrological and hydraulic designs, hydrological risk evaluation and adaption, and water resources planning and management, and also affect the socioeconomic developments as well as people's lives. Over the last decade, nonstationarity in hydrological process has been becoming a hot and frontier topic in the studies of hydrology and global climate change. However, those basic and major issues on the scientific topic have not been systemically studied, and some understandings about it are limited. In this article, we mainly focused on several major issues about the studies of hydrological nonstationarity. First, we discussed and clarified the difference between the stability of hydrological system and the hydrological nonstationarity. It is pointed out that the former is mainly to study whether the physical hydrological system in a basin keeps its stability under the impacts of both climate change and human activities, which is usually quantified by the deterministic characteristics of hydrological processes, and then simulated by proper physical hydrological models. However, the hydrological nonstationarity is mainly to study whether the statistical characteristics of stochastic hydrological process is changed, including not only the nonstationarity in stochastic components, but also the nonstationarity in deterministic components of hydrological process. Then, we further discussed some key issues about the topic of hydrological nonstationarity, mainly including the research objects, expressing ways, determining criteria, and identification and description methods. We finally pointed out that the studies of hydrological nonstationarity should focus on the stochastic components of hydrological process and the hydrological extremes (droughts, rainstorms, floods, waterlogs and others), but not the deterministic characteristics of hydrological process. All the first, second and third statistical moments (i.e., the mathematical mean, variance, and coefficient of skewness) of hydrological process should at least be carefully evaluated to judge its stationary characters. In practice, both the statistical methods (unit root test, etc.) and stochastic methods can be used for the study of hydrological nonstationarity, that is, we can first identify and remove those periodic and trend components of hydrological time series using proper stochastic methods, and then judge the nonstationary characteristics of stochastic components in series using statistical test methods. Those methods used for the identification of periodicities in hydrological time series usually include the Fourier transform, variance spectral density analysis, and the maximum entropy spectral analysis. Those methods for the trend analysis of hydrological time series mainly include the Mann-Kendall test, Spearman rank correlation test, linear regress test, moving-average test, and the wavelet-based test. The results can be a basis of stochastic simulation and hydrological forecasting. However, during the analysis process the uncertainty in these results should be carefully taken into consideration. As a result, we gave several suggestions and opinions on the future researches of hydrological nonstationarity. It is emphasized that more studies should be conducted to improve the techniques and methods for hydrological modelling, as a reliable basis of revealing the changes in physical hydrological process; further, more studies should also be done to develop the stochastic and statistical methods, mainly for more accurately describing and evaluating the nonstationary characters of hydrological process and their changes. The practice can also be helpful for studying the difficult hydrological and water resources problems under the changing environmental systems.

nonstationarity, global change, stochastic hydrological process, hydrological simulation

doi: 10.1360/N972016-00736