

Advance in Inconsistent Water Problems in Changing Environment

Ping Xie^{1,2}, Binbin Li^{1,2}, Xi'nan Li³, Guangcai Chen⁴

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan

³Guizhou Survey & Design Research Institute for Resources and Hydropower, Guiyang

⁴Water Resources Department of Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan

Email: reben_1987@163.com

Received: Sep. 30th, 2014; revised: Oct. 24th, 2014; accepted: Nov. 6th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A series of water problems was caused by the exploitation and utilization of water resources in recent years. The changing environment, the impact of climate change and intensive human activities made the physical conditions for the forming hydrological series have changed a lot and the hydrological series have lost their consistency, thereby leading to the distortion of water resources evaluation and decision-making of flood control and drought judgment error, which seriously affected the social stability and economic progress. In this paper, inconsistent water problems were divided into three categories: inconsistent water resources problem, inconsistent flood problem and inconsistent drought problem, and the inconsistent water problem in changing environment was studied and discussed from the perspective of the water resources, flood and drought. Based on the domestic and abroad research progresses, the unresolved problems and the future research work were put forward.

Keywords

Changing Environment, Inconsistency, Water Resources, Flood, Drought

变化环境下非一致性水问题研究进展

谢平^{1,2}, 李彬彬^{1,2}, 李析男³, 陈广才⁴

作者简介: 谢平(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为变化环境下的水文水资源。

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

³贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵阳

⁴长江科学院水资源综合利用研究所, 武汉

Email: reben_1987@163.com

收稿日期: 2014年9月30日; 修回日期: 2014年10月24日; 录用日期: 2014年11月6日

摘要

近年来随着气候变化和剧烈人类活动等变化环境的影响, 水文序列形成的物理条件发生了较大的变化, 使得水文序列失去了“一致性”, 并引发了水资源评价失真、防洪与抗旱决策失误等一系列“非一致性”水问题, 严重影响了社会稳定与经济进步。本文将非一致性水问题分为非一致性水资源问题、非一致性洪水问题和非一致性干旱问题, 分别从水资源、洪水、干旱三个角度对非一致性水问题进行研究和探讨。在总结国内外研究进展的基础上, 指出目前仍需解决的问题及需要开展的研究工作。

关键词

变化环境, 非一致性, 水资源, 洪水, 干旱

1. 引言

水, 乃生命之源, 是人类文明赖以生存和发展的基础。随着社会经济的发展, 由水而引发的问题越来越被人们所重视[1]。水问题, 是指自然界存在的对人类社会产生不利影响的水现象, 包括人类活动对水的开发、治理、控制和利用, 以及气候变化对水现象产生的不利影响等。水问题主要反映在与水有关的洪水、干旱和水资源等领域, 而随着全球的气候变化和人类活动对水循环的影响日益加剧, 水问题也日益尖锐。在气候变化和人类活动的双重影响下, 洪水、干旱、水资源情势将如何演变? 在这种变化环境下, 气候变化和人类活动对洪水、干旱、水资源的影响及其贡献程度如何? 这些问题亟待解决。

2. 洪水、干旱、水资源分配的变异问题

水文系统是由不同等级的时空耦合子系统构成的复杂系统, 水文现象、水文过程、水文模拟等皆包含了时间和空间两方面的性质, 系统内不同层次和不同运行周期上存在着明显的时空尺度。在不同的时空尺度范围内, 水文运动物理机制不同, 其运动规律通常有很大的差异, 从而对水资源评价、保护、规划与管理等工作产生不同程度的影响。自地球诞生以来, 其环境就在不断地变化, 但在较长的时间尺度下, 其变化程度并不明显; 当人类出现以后, 尤其是工业革命以来, 随着社会经济生产力的提高和科技的不断进步, 人类创造了前所未有的财富, 并推进了人类社会的进步, 但同时人们赖以生存的自然环境也遭遇了极大的干扰和破坏。2002年, 有学者曾对受到人类活动影响而改变的地球表面积进行统计, 结果显示, 约47%的地球表面积或多或少受到人类活动的影响[2]。在气候变化和人类活动的共同影响下, 地球环境发生了一系列非自然或异常的变化, 例如: CO₂等温室气体浓度不断增加、极端水文气象事件(极端气温、洪水、干旱)的频繁发生等等[3]。由于全球气候变化以及高强度人类活动和流域下垫面变化等变化环境的影响, 流域水循环和径流形成的物理条件发生了较大的变化, 使得用于水资源评价和水电工程规划与设计的径流量发生了变异, 使得用于防洪规划和洪水灾害风险评估的洪峰流量发生了变异, 使得

用于抗旱规划和干旱灾害风险评估的干旱序列发生了变异, 这些变化环境下产生的非一致性水问题越来越受到人们的关注。

2.1. 水资源(年径流)变异问题

长久以来, 人们都是基于物理成因一致且观测样本相互独立的“一致性”水文序列, 来认识水文系统分布规律的, 这种基于“独立同分布”的“一致性”假设是传统工程水文频率计算方法的前提条件, 但变化环境导致的水文变异破坏了传统工程水文分析计算的假设条件[4]。Milly [5]等在《Science》杂志上指出, 在气候变化和人类活动的影响下, 基于一致性假设的水文频率计算理论和方法已经无法帮助人们正确揭示变化环境下水资源演变的长期规律。采用传统的工程水文分析方法制定的流域水资源开发利用工程、防洪和抗旱工程的运行调度等, 将面临由变化环境带来的风险[6]。

非一致性年径流过程的出现是由于变化环境导致的径流量变异作用的结果, 将直接影响水电工程的设计、施工和运行, 并严重威胁水资源的安全。“变化环境”与“水安全”一直是国际与国内诸多计划或规划的重点研究领域。2001年以来, 国际上实施了全球水系统计划[7](GWSP), 其中全球变化和大规模水电工程建设等剧烈人类活动对区域水循环与水安全影响, 是GWSP重点研究的问题之一。联合国国际水文计划 IHP-VII(2008-2013)的第一主题[8]也是关注人类活动和环境变化对水资源的可能影响。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》中把“人类活动对地球系统的影响机制”作为第3个国家重大战略需求的基础研究[9], 即“重点研究资源勘探与开发过程的灾害风险预测, 重点流域大规模人类活动的生态影响、适应性和区域生态安全等”。《国家自然科学基金“十二五”发展规划》强调未来五年, 将重点支持“水资源保护与高效开发利用”等方面的基础研究, 而且“变化环境下水资源高效利用”是跨科学部的优先发展领域, 其核心科学问题之一是“变化环境下流域水文过程与洪旱预测”[10]。由此可以看出, 变化环境下(气候变化与剧烈人类活动影响)的水循环及水安全研究既是全球水系统研究的核心科学问题和发展前沿, 又是区域水安全评价和风险管理重大需求的应用基础问题。

2.2. 洪水变异问题

洪水是影响人类社会经济生活、生态环境以及国家安全的自然灾害之一。在同洪水斗争的岁月中, 人类总结出来无数的经验教训来抵御洪水带来的危害, 近年来, 随着气候的剧烈变化、人口剧增、人力物资等生产力的集中以及违规土地利用等, 洪水灾害也日益频繁, 由洪水所造成的损失有增无减。尽管世界各国对防洪减灾方面的投入逐步增加, 人们对洪水预报、洪水调控等方面的能力显著提高, 但是洪水灾害损失不仅没有得到有效控制, 反而增加, 日益严重的洪水问题引起了广大国际社会和各国政府的高度关注[11]。

受气候变化和人类活动等变化环境的影响, 气候和下垫面因素成为了洪水形成的主要影响因子[12], 因而考虑气候变化和人类活动两方面的影响对洪水研究具有重要意义。近年来, 全球气候变化和人类活动的加剧, 改变了水文水资源的演变规律, 进而导致了洪水规律也发生了显著变化, 且洪水是一个高度复杂的非线性、非平稳过程, 一般研究非一致性年径流的方法并不适用于非一致性洪水问题; 因此, 研究变化环境下的洪水演变规律, 并在此基础上对未来洪水变化规律进行科学合理预测, 对流域防洪规划和洪水灾害风险评估具有重要的应用价值。

2.3. 干旱变异问题

旱灾是主要的自然灾害之一, 具有发生频率高、持续时间长、波及范围广的特点。干旱的频繁发生和长期持续不但给国民经济带来了巨大的损失, 还会造成水资源短缺、沙尘暴增加、荒漠化加剧、生态

与环境恶化等不利影响。近几十年来随着全球气候变暖的不断加剧,以及社会经济的快速发展对水资源需求的不断加大,造成干旱事件出现的频率呈现明显的上升趋势[13]。相同等级干旱发生的频率增加、重现期缩小,说明用于干旱灾害评估的干旱序列发生了变异[14],其统计分布规律也随着物理成因的改变而发生了变化。近年来,全球变化以及人类的剧烈活动对水文水资源的影响十分显著,改变了许多地区的干旱发生规律。研究变化环境(气候变化和剧烈的人类活动)影响下的干旱演变规律,并对未来的干旱进行预测,是目前干旱研究领域的重要课题,对流域抗旱规划和干旱灾害风险评估等具有重要的现实意义和实际应用价值。

综上所述,研究变化环境下水资源问题、洪水问题、干旱问题,是流域水循环和水安全的主要发展方向,也是变化环境下研究非一致性水问题的基础内容。

3. 非一致性水问题研究进展

在变化环境下,水文水资源序列的变化程度超出了自然规律的变动,这种变异的产生一直是气候学者和水文工作者十分关注的问题[15]。气候变化和剧烈的人类活动对下垫面条件的改变,也直接或间接地改变了水循环的模式,使得水文响应发生了规律性变化,一系列的水问题随之而生,造成了社会经济发展阻滞。因此,变化环境下的水文响应研究成为了当前的热点,而适应变化环境下的水问题研究的核心是非一致性水文(径流、洪水、干旱)变异分析与频率计算。

3.1. 非一致性水资源、洪水问题研究进展

水资源问题的研究对象一般为年径流序列,洪水问题的研究对象是洪峰流量和不同时段洪量,二者的研究方法相类似,但也有差异,在此总结非一致性水文(径流、洪水)问题的研究进展。目前,非一致性水文(径流、洪水)频率计算研究方面,主要包括以下6个方法(或途径):

1) 径流的还原/还现。陆中央[16]对年径流序列的还原问题进行了深入研究;王巧平[17]改进了天然年径流量序列的一致性修正方法;乔云峰[18]利用投影寻踪法对径流进行了还原计算。但是无论是“还原”还是“还现”,所推求的年径流频率分布只能反映过去或者现状径流的形成条件,而无法反映不同时期变化环境下某一水平年的径流状况。

2) 时间序列的分解与合成[19]。首先采用统计分析法或成因分析法对非一致性水文序列的确定性成分和随机性成分进行识别与检验;然后根据时间序列分析的分解与合成理论,将非一致性水文序列分解成确定性成分和随机性成分,并分别对水文序列的确定性成分进行拟合计算,对水文序列的随机性成分进行频率计算;最后将确定性的预测值和随机性的设计值进行合成,并得到过去、现状和未来合成序列的频率分布。目前基于该途径发展的计算方法较多,从分解方式上可分为直接分解和间接分解两类,从确定性成分的性质上可分为线性和非线性两类。

3) 水文模型法。通过建立不同时期下垫面条件与水文模型参数之间的定量关系,用模型参数的变化反映下垫面变异;将不同时期的降雨资料与某一时期的水文模型参数结合,从而达到径流或洪水系列还原/还现的目的。王国庆[20]等采用SIMHYD降水径流模型分析了气候变化和人类活动对河川径流的定量影响;谢平[21]等利用流域水文模型对无定河流域的水文水资源效应进行了模拟分析。

4) 混合分布途径。通过分析年内径流洪水或径流的形成原因(如梅雨或台风雨、融雪径流或降雨径流等),将水文极值系列划分为若干子系列,并使其服从相应的子分布;假设非一致性极值样本系列是有由若干个子分布通过加权混合而成,直接基于非一致性极值样本系列进行频率分析。Singh K P [22]早在1972年就提出洪水分析的两分布法;Alila Y [23]利用混合洪水频率分布来对极端洪水进行分析,成静清[24]对非一致性年径流序列混合分布的参数进行了计算。

5) 全概率公式途径。依径流洪水或径流形成机理的差异性将年内水文极值划分成若干个时期,且各个时期之间不重叠;假设同一分期内的极值样本系列是同分布的,而不同分期的极值样本系列是相互独立的异分布,且年最大值以不同的条件概率发生在不同的分期内;根据全概率公式计算水文极值出现在任一时期的概率。Sing V P [25]等利用概率公式分析了非一致洪水频率分布;宋松柏[26]等利用全概率法分析了具有跳跃变异的非一致水文序列频率分布。

6) 时变参数法。通过线性或者非线性趋势来表征水文频率分布的参数(均值、方差等)随时间的变化过程,进而进行非一致性水文频率分析计算[27]。但由于水文频率分布形式的复杂性,推导高阶非线性时变趋势的参数解析式还比较困难,且此类方法在参数函数形式及阶数的选取上也具有一定的主观性。

3.2. 非一致性干旱问题研究进展

干旱的发生是一个很复杂的过程,它不仅受自然因素的制约,也与社会、经济条件有关。目前,干旱研究的焦点在于干旱发生的可能性,研究不同干旱发生的概率即是干旱的频率分析。基于统计途径的干旱频率分析与计算主要涉及两个方面的内容,一是根据历史干旱资料,对干旱的经验频率进行分析[28]-[30],并统计不同等级干旱事件发生的频率,但主要是人为划分时间段,对干旱发生变异的时间、形式、程度考虑不足,且无法预测未来干旱发生的频率;另一个是假设干旱序列服从单变量或多变量统计分布,通过参数估计推求其理论频率分布,并据此计算某一干旱事件发生的频率,或推求某一设计频率下的干旱设计值。关于这两个方面的研究成果较多,例如, Raynal-Villasenor Jose 将一般极值分布(GEV)用于干旱频率分析[31],并给出了参数估计的计算过程;Nadarajah 采用了二维伽马分布建立了干旱变量之间的联合分布[32];刘燕等[33]根据干旱与不同干旱变量的紧密关系,利用频率组合法将降雨和径流两种干旱随机变量组合在一起,进行干旱频率分析;冯国章等[34]分别采用解析法和模拟法对极限水文干旱历时的概率分布进行了研究;袁超[35]研究了数学期望、偏态系数、一阶自相关系数等参数对极限水文干旱历时概率分布的影响;周祥林[36]建立了非参数统计模型,对太湖流域的干旱频率进行了分析;闫宝伟[37]等建立了干旱历时和干旱程度的联合 Copula 分布,与此同时,国外许多学者亦对干旱历时和干旱强度进行联合概率分布的研究[38][39]。上述研究主要针对的是一致性干旱序列,其统计途径和成因途径的研究比较成熟[40][41],而对不同环境条件下形成的非一致性干旱序列的频率计算方法研究较少[42],特别是基于成因途径的非一致性干旱序列的频率计算方法研究[43],目前尚处于探索阶段。

4. 存在的问题及研究展望

非一致性水问题包含非一致性水资源问题、非一致性洪水问题、非一致性干旱问题,研究的核心内容是其频率计算。总结现有的研究进展,主要存在以下几方面的不足。

1) 非一致性径流、洪水频率计算方面

①基于归因途径的非一致性水文频率计算方法还未开展。近几年针对非一致性水文频率计算的研究已经被广泛地开展,众多学者的研究各有特色,其中以还原/还现途径、时间序列的分解与合成途径、混合分布途径、时变参数途径和全概率公式途径为代表,上述方法只是直接地对非一致性水文时间序列进行研究,即先探究非一致性频率分布规律,再探讨其规律的演变,而没有先考虑其为何发生了变异,非一致性从何而来?即先分析其变异的归因问题,进而针对其归因分析的结果进行非一致性频率分布的研究。因此,基于归因分析的非一致性水文频率计算方法的研究就显得非常重要。

②基于单站点的非一致性水文频率计算方法,在应用于非一致性洪水频率计算时具有明显的片面性。洪水与年径流相比,其具有尺度短、高度复杂的非线性、非平稳等特点,一般的水文频率计算方法并不适合洪水频率计算。目前在非一致性洪水频率计算方法的研究中,主要是选取某一个站点的洪水特征值,

进行非一致性洪水序列的研究,但是这种基于单站点的方法割裂了流域空间关系,而事实上,洪水的影响因素众多,基于单站点的非一致性水文频率计算方法无疑是不够全面的。因此,考虑多站点之间的关系,模拟洪水发生的过程,并研究非一致性洪水分布规律,无疑更加科学合理。

2) 非一致性干旱频率分析存在的问题

①指标选择往往片面。干旱指标种类繁多,在干旱指标的选取和建立方面,众说纷纭,在研究区域和研究目标不同的情况下,都有一定的合理性。不同指标对同一地区的干旱研究,得到的结果甚至是相反的亦有可能。多数指标只能表征干旱的某一方面,不能全面反映干旱对农业、生态、社会经济的影响;有些指标虽然较为全面地反映干旱的影响,但其参数多,难以确定且不通用,因而没有得到广泛的使用。

②基于成因途径的干旱频率分析亟待开展。干旱发生具有随机性,由于环境的变化导致干旱序列不再是纯随机序列,以往的研究多从统计途径研究非一致性干旱频率分布,统计不同时间尺度的干旱指数序列,推求该环境条件下的干旱频率分布;与统计途径相比,成因途径更有利于分析气候变化与土地利用/覆被变化的干旱效应。

致 谢

本文获得国家自然基金面上项目(51179131; 51190094; 51409014)、广东省水利科技创新项目成果(2011-01)资助,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 王毅. 中国的水问题、治理转型与体制创新[J]. 中国水利, 2007, 22: 22-26.
WANG Yi. Water issue, management transition and system innovation in China. *China Water Resources*, 2007, 22: 22-26. (in Chinese)
- [2] 黑马. 科学家: 人类已经改变了 47% 的地球表面[N]. 北京青年报, 2002.8.9.
Heima. Scientist: Humans have changed the 47% of the earth's surface. *Beijing Youth Daily*, 2002.8.9. (in Chinese)
- [3] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.
REN Guoyu, FENG Guolin and YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese)
- [4] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. *Surface water resources evaluation methods on changing environment*. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [5] MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., et al. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, 319(5863): 573-574.
- [6] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. *Climate change impact on hydrology and water resources research*. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [7] VÖRÖSMARTY, C., LETTENMAIER, D., LEVEQUE, C., et al. Humans transforming the global water system. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2004, 85(48): 509-514.
- [8] UNESCO. IHP-VII water dependences-systems under stress and societal responses [2008-2013], 2008.
- [9] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年), 2006.
State Council of the People's Republic of China. *National medium and long-term plan for science and technology development (2006-2020)*, 2006. (in Chinese)
- [10] 国家自然科学基金会. 国家自然科学基金“十二五”发展规划[R], 2011.
The National Natural Science Foundation. *The national natural science foundation of China twelfth five-year development plan*, 2011. (in Chinese)
- [11] 王义成. 世界洪水管理理念与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
WANG Yicheng. *The concept and practice of flood management of the world*. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 289-297.

- SHI Yafeng, JIANG Tong, SU Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 289-297. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20481-2006. 气象干旱等级[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Standard of People's Republic of China GB/T 20481-2006. The grade of meteorological drought. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(1): 85-91. (in Chinese)
- [15] 刘春蓁, 夏军. 气候变暖条件下水文循环变化检测与归因研究的几点认识[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 313-318.
LIU Chunzhen, XIA Jun. Some points of view on detection and attribution of observed changes in hydrological cycle under global warming. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(5): 313-318. (in Chinese)
- [16] 陆中央. 关于年径流量系列的还原计算问题[J]. 水文, 2000, 20(6): 9-12.
LU Zhongyang. Restore estimation of annual runoff series. *Journal of Hydrology*, 2000, 20(6): 9-12. (in Chinese)
- [17] 王巧平. 天然年径流量系列一致性修正方法的改进[J]. 水利规划与设计, 2003, 2: 38-40.
WANG Qiaoping. Natural annual runoff series consistency correction method improvement. *Water Conservancy Planning and Design*, 2003, 2: 38-40. (in Chinese)
- [18] 乔云峰, 夏军, 王晓红, 等. 投影寻踪法在径流还原计算中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 6-10.
QIAO Yunfeng, XIA Jun, WANG Xiaohong, et al. Estimation of restoration of annual runoff series by using projection pursuit method. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(1): 6-10. (in Chinese)
- [19] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 6-9.
XIE Ping, CHEN Guangcai and XIA Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(6): 6-9. (in Chinese)
- [20] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008, 2: 55-58.
WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff. *China Water Resources*, 2008, 2: 55-58. (in Chinese)
- [21] 谢平, 窦明, 朱勇, 等. 流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XIE Ping, DOU Ming, ZHU Yong, et al. Watershed hydrological model: Hydrology and water resources effect of climate change and land use and land cover changes (LUCC). Beijing: Science Express, 2010. (in Chinese)
- [22] SINGH, K. P., SINCLAIR, R. A. Two-distribution method for flood frequency analysis. *Journal of Hydraulics Division*, 1972, 98(1): 29-44.
- [23] ALILA, Y., MTIRAOU, A. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques. *Hydrological Processes*, 2002, 16(5): 1065-1084.
- [24] 成静清, 宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流序列频率参数的计算[J]. 西北农林科技大学(自然科学版), 2010, 38(2): 229-234.
CHENG Jingqing, SONG Songbai. Calculation of hydrological frequency parameters of inconsistent annual runoff series based on mixed distribution. *Journal of Northwest A&F University*, 2010, 38(2): 229-234. (in Chinese)
- [25] SINGH, V. P., WANG, S. X. and ZHANG, L. Frequency analysis of non-identically distributed hydrologic flood data. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1/4): 175-195.
- [26] 宋松柏, 李扬, 蔡明科. 具有跳跃变异的非一致分布水文序列频率计算方法[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 734-748.
SONG Songbai, LI Yang and CAI Mingke. Methods of frequency analysis for hydrologic data with jump up components. *Journal of Water Conservancy*, 2012, 43(6): 734-748. (in Chinese)
- [27] GABRIELE, V., JAMES, A. S., FRANCESCO, S., et al. Flood frequency analysis for non-stationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(8): 1255-1266.
- [28] HALLACK-ALEGRIA, M., WATKINS Jr., D. W. Drought frequency analysis and prediction in Sonora, Mexico. Anchorage: American Society of Civil Engineers, 2005, 501.
- [29] 魏凤英, 张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 1-7.
WEI Fengying, ZHANG Ting. Frequency distribution of drought intensity in Northeast China and relevant circulation background. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(3): 1-7. (in Chinese)
- [30] 杨成芳, 薛德强, 孙即霖. 山东省近 531 年旱涝变化气候诊断分析[J]. 山东气象, 2003, 23(4): 5-8.

- YANG Chenfang, XUE Deqiang and SUN Jilin. Diagnostic analysis on drought and flood variance in Shandong province in the past 531 years. *Journal of Shandong Meteorology*, 2003, 23(4): 5-8. (in Chinese)
- [31] RAYNAL-VILLASENOR, J. A., DOURIET-CARDENAS, J. C. GEV distribution in drought frequency analysis. Williamsburg: ASCE, 1987, 532-537.
- [32] NADARAJAH, S. A bivariate gamma model for drought. *Water Resources Research*, 2007, 43(8): 1-6.
- [33] 刘燕, 杜学挺, 高博平, 等. 频率组合法及其在干旱频率分析中的应用——以泾河流域干旱频率分析为例[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 195-199.
LIU Yan, DU Xueting, GAO Boping, et al. Frequency combination method and its application in drought frequency analysis. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 195-199. (in Chinese)
- [34] 冯国章. 极限水文干旱历时概率分布的解析与模拟研究[J]. 地理学报, 1994, 49(5): 457-466.
FENG Guozhang. A study on probability distribution of critical hydrologic drought duration using the methods of analytics and simulation. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(5): 457-466. (in Chinese)
- [35] 袁超, 宋松柏, 荆萍. 极限水文干旱历时概率分布解析法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 212-218.
YUAN Chao, SONG Songbai and JING Ping. Analytical study on probability distribution of critical hydrological drought duration. *Journal of Northwest A&F University*, 2008, 36(7): 212-218. (in Chinese)
- [36] 周祥林, 陆宝宏, 戴甦, 等. 基于响应单元的太湖流域干旱分析方法研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(2): 6-10.
ZHOU Xianglin, LU Baohong, DAI Su, et al. Research on the drought features of Taihu basin using the non-parameter statistical method. *Water Resource Protection*, 2006, 22(2): 6-10. (in Chinese)
- [37] 闫宝伟, 郭生练, 肖义, 等. 基于两变量联合分布的干旱特征分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 537-542.
YAN Baowei, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Analysis on drought characteristics based on bivariate joint distribution. *Arid Zone Research*, 2007, 24(4): 537-542. (in Chinese)
- [38] GONZELEZ, J., VALDES, J. Bivariate drought recurrence analysis using tree ring reconstructions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2003, 8(5): 247-258.
- [39] SHIAU, J. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 2006, 20(5): 795-815.
- [40] 程亮, 金菊良, 酃建强, 等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296-302.
CHENG Liang, JIN Juliang, LI Jianqiang, et al. Advance in the study of drought frequency analysis. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 296-302. (in Chinese)
- [41] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 449-456.
PEI Yuansheng, JIANG Guiqin and ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems. *Advance in Water Science*, 2013, 24(3): 449-456. (in Chinese)
- [42] 谢平, 陈丽, 唐亚松, 等. 变化环境下基于非线性趋势分析的干旱评价方法[A]. 变化环境下的水资源响应与可持续利用: 中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009, 11: 18-25.
XIE Ping, CHEN Li, TANG Yasong, et al. The assessment method of drought based on nonlinearity trend analysis of changing environments. *Water Sustainable Utilization and Resources Response in a Changing Environment: Symposium of China Water Conservancy Conference in 2009*. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009, 11: 18-25. (in Chinese)
- [43] 李析男, 谢平, 李彬彬, 等. 变化环境下不同等级干旱事件发生概率的计算方法——以无定河流域为例[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 585-594.
LI Xinan, XIE Ping, LI Binbin, et al. A probability calculation method for different grade drought event under changing environment—Taking Wuding River basin as an example. *Journal of Water Conservancy*, 2014, 45(5): 585-594. (in Chinese)