

变化环境下宣恩城区洪水变异及其成因分析

李庆平¹, 李彬彬^{2,3}, 向廷清⁴, 谢平^{2,3}

(1. 恩施州水文水资源勘测局, 湖北 恩施 445000; 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. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072; 4. 湖北省水文水资源局, 武汉 430072)

摘要: 作为调蓄城市洪水的主要工程手段, 城市上游水库和城市河道整治工程在保护沿岸居民不受侵害的同时, 也改变了天然河道洪水槽蓄关系, 再加上气候变化的影响, 导致城市洪水的形成、演变及时空分布规律发生了变异。利用水文变异诊断系统和谢才-曼宁公式, 分析了宣恩城区变化环境下洪水的变异形式、程度及其成因。结果发现: 1956年-2010年面平均年最大月雨量序列在1998年发生了跳跃向下的中变异, 说明气候变化影响下降雨呈减少趋势; 宣恩站实测年最大日流量序列在1999年发生了跳跃向下的中变异, 其洪峰流量呈减少趋势; 流域洪水变异是气候变化和人类活动双重影响的结果, 但前者影响仅为后者的41%; 渠化改造导致宣恩站洪水流量减少, 加剧了洪水变异, 因此其防洪预警预案需要适应环境变化而进行调整。

关键词: 变异诊断系统; 变化环境; 洪水变异; 宣恩; 变异点; 谢才-曼宁公式; 变异分级

中图分类号: TV87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0630-05

Flood variation and its cause analysis of Xuanen district under changing environment

LI Qing ping¹, LI Bin bin^{2,3}, XIANG Yan qing⁴, XIE Ping^{2,3}

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Enshi, Enshi 445000, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China; 4. Hydrology and Water Resources Bureau of Hubei Province, Wuhan 430072, China)

Abstract: As the main engineering means of controlling urban flood, river and upstream reservoir regulations which protect people against flood disasters can change river channel storage and lead to the variations of the formation, evolution, and spatial and temporal distribution of urban flood due to climate change. In this study, hydrological variation diagnosis system and the formula of Chzy-manning were used to determine the flood variation form, degree, and causes of Xuanen district under the changing environment. The results showed that (1) the average annual maximum monthly rainfall series from 1956 to 2010 have a moderate variation with downward jump in 1998, which indicates that rainfall decreases under the changing environment; (2) the annual maximum daily flow series from 1962 to 2013 have a moderate variation with downward jump in 1999, which indicates that peak flow decreases; (3) The dual effects of climate change and human activities cause the flood variation, but the former effects are only 41% of the latter; and (4) river canalization results in the decreasing of the flood flow and exacerbation of flood variation, therefore the flood warning plan needs to adapt to the changing environment.

Key words: hydrological variation diagnosis system; changing environment; flood variation; Xuanen district; changing point; Formula of Chzy-manning; classification of variation

洪水一直以来都是影响人类经济发展、生态环境、社会生活和国家事务的重大自然灾害之一^[1]。因此, 人们通过工程和非工程手段对洪水进行控制和调蓄, 其中修建堤防、水库以及河道整治、岸坡渠化等防洪工程措施在保护沿岸居民

不受洪水侵害的同时, 也改变了原天然河道的洪水槽蓄关系, 在气候变化影响下, 城市洪水的形成、演变及时空分布规律均发生了变异^[2]。

近年来, 宣恩城区强降雨、洪涝灾害事件发生频繁^[3]。

收稿日期: 2014-08-15 修回日期: 2015-01-28 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2030.023.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51190094; 50979075; 51179131); 广东省水利科技创新项目成果(201F01)

作者简介: 李庆平(1963-), 女, 湖北恩施人, 高级工程师, 主要从事水文预报与水资源分析研究工作。E-mail: 416926653@qq.com

通讯作者: 李彬彬(1987-), 男, 湖北潜江人, 博士研究生, 主要从事变化环境下的水文水资源研究。E-mail: reben_1987@163.com

为此,宣恩城区从2005年开始进行河道整治工程,并在2009年完成左岸河堤修建,2012年两岸河堤全部完工,最终将忠建河城区段天然河道改造成两岸近乎平行、较为规则的渠道,但河道渠化前后河流的走向基本保持不变。

防洪规划是防洪建设和洪水管理的基础,首要工作是洪水的变异性分析。宣恩城区受上游水库调节工程和城市河道整治工程的共同影响,洪水形成条件的一致性已经不再满足要求。变化环境包括气候变化和人类活动,其水文要素的响应可以归结为降雨变化和径流变化,其中降雨主要反映了气候变化的响应,径流主要反映了人类活动的响应。用于诊断降水序列和径流序列变异的方法较多,例如诊断跳跃变异的有序聚类法、秩和检验、滑动 T 检验法等和诊断趋势变异的斯皮尔曼秩相关检验法、肯达尔秩相关检验法等^[4-6]。在实际检验水文变异中,通常会使用其中的一种或两种方法^[7-8]。然而,水文序列特别是洪水序列变异形式比较复杂,以上方法均无法给出变异程度^[9]。Machiwal和Jayawardena^[10,11]认为,要得到一个可靠的水文序列的变异形式及变异程度,必须要有足够多的统计方法综合起来加以分析。为此,谢平等^[12]提出了水文变异诊断系统,以提高水文序列变异识别与分级的精度与可靠性,它是解决变化环境下水文变异问题的主要工具之一。

为了更好地从统计意义和物理意义上揭示宣恩城区洪水变异的规律,本文将采用水文变异诊断系统^[12],根据湖北省宣恩县城区宣恩(二)站1962年-2013年的实测年最大流量序列和1956年-2010年面年平均年最大月雨量数据,推求该站在变化环境下的洪水变异形式及程度,并利用谢才-曼宁公式分析其变异成因。研究结果不仅对当地洪水变异应对策略的制定和水资源利用有指导作用,而且对忠建河流域水利工程建设和防洪减灾规划的制定具有实际参考价值。

1 研究区概况

忠建河发源于湖北省咸丰县西北的柿子坪,是清江中游右岸的最大支流,河长121 km,流域面积1 627 km²。上游山高坡陡,汇流快,沿途有多条河流汇入,稍遇大暴雨,干支流河水就会猛涨,且峰高量大,属典型山区性河流。宣恩县城区坐落于忠建河干流两岸的河谷地带,城区河段长6.99 km;城区段左岸有黄河沟、三河沟(又名龙潭河)加入,右岸有七里桥河加入。

宣恩县城区上游建有桐子营、龙洞两座中型水库,分别距离县城20 km和2 km,桐子营水库于2011年建成,龙洞水库于1995年建成,对城区上游洪水具有一定的调蓄作用;下游洞坪大(Ⅱ)型水库,于2006年建成,对城区中下游河段有一定影响。城区河道治理工程从2005年开始进行,2009年完成左岸河堤修建,2012年两岸河堤全部完工,4级水力自动翻板坝于2010年完成,建成后在城区段形成宽60~80 m、水深0.9~4 m的人造渠道。

2 数据与方法

2.1 研究数据

年最大流量数据:采用宣恩(二)水文站1962年-2013

年的年最大流量,其中1989年宣恩站由上湖堂下迁约1 km,流域面积由739 km²变为740 km²。

年最大月雨量序列:采用咸丰站(1956年-2010年)、晓关站(1956年-2010年)、宣恩(二)站(1956年-2010年)、龙坪站(1980年-2010年)、洗草坝站(1975年-2010年)和桐子营站(1975年-2010年)的年最大月降雨量数据。

2.2 研究方法

2.2.1 水文变异诊断系统

洪水序列包括确定性成分和随机性成分,而确定性成分则包括周期、趋势和跳跃成分。如果水文序列与周期、趋势和跳跃成分无关,则它是平稳的时间序列,表明整个水文序列具有相同的物理成因,其统计规律满足一致性,序列只在均值上下随机波动,而无统计规律的变化;否则,水文序列就是非平稳的,表明影响水文序列的物理成因发生了变化,其统计规律是非一致的。因此,从统计学的角度,洪水序列变异主要是指洪水序列的分布形式或(和)分布参数在整个序列时间范围内发生了显著变化^[13]。

2010年,谢平提出了水文变异诊断系统^[12],该系统主要考虑了趋势和跳跃两种变异形式,不仅可以从整体上识别与检验时间序列变异及其变异程度(无变异、弱变异、中变异、强变异、巨变异),而且可以识别非一致性序列发生变异的形式(趋势、跳跃变异点),检验指标全面,权重赋值客观,诊断结果可信度高。水文变异诊断系统由初步诊断、详细诊断和综合诊断三个部分组成。

初步诊断部分采用过程线法、滑动平均法、Hurst系数法对序列变异进行检验,判断序列是否存在变异,如果不存在变异,则转入成因调查分析;如存在变异,则转入详细诊断部分。

详细诊断部分采用多种变异检验方法对序列进行变异判断,分别对序列的趋势变异、跳跃变异情况进行判断分析。对于趋势变异,采用基于线性趋势相关系数的趋势变异分级法和检验法、Spearman秩次相关检验法和Kendall秩次相关检验法对其进行判断;对于跳跃变异,采用有序聚类法、Lee Heghinan法、秩和检验法、滑动 F 检验法、滑动 T 检验法、游程检验法、最优信息二分割模型、R/S法、Browir Forsythe、Manr Kendall、Bayesian方法进行判断,然后进入综合诊断部分。

在综合诊断部分,根据详细诊断结果对趋势诊断结论进行趋势综合,对跳跃诊断结论进行跳跃综合;根据效率系数评价水文序列与趋势成分或跳跃成分的拟合程度,以效率系数较大者作为变异形式判断的结果。

最后结合实际水文调查分析,对变异形式和结论进行确认,从而得到最可能的变异诊断结果。

2.2.2 谢才-曼宁公式

根据水力学中的谢才-曼宁公式,宣恩城区河道的洪水流量可用下式表示^[14]:

$$Q = \frac{1}{n} \omega R^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

式中: Q 为流量(m³/s); ω 为过水断面面积(m²); R 为水力半径/近似为水深(m); n 为糙率; I 为水面比降。

3 变化环境下的洪水序列变异诊断分析

采用水文变异诊断系统,对宣恩(二)水文站 1962 年-2013 年的实测年最大流量序列、1956 年-2010 年面平均年最大月雨量(由咸丰站、晓关站、宣恩(二)站、龙坪站、洗草坝站和桐子营站的最大月雨量算术平均求得)进行诊断。在第一信度水平 $\alpha=0.05$ 、第二信度水平 $\beta=0.01$ 的条件下,其变异诊断结果见表 1。

表 1 宣恩(二)站年最大流量与面平均年最大月雨量序列变异诊断结果

Tab. 1 The variation diagnosis results of annual maximum flow and average annual maximum monthly rainfall at Xuanen 2 station

站点	宣恩(二)水文站年最大流量 / (m ³ · s ⁻¹)	面平均年最大月雨量 / mm	
初步诊断	Hurst 系数	0.749	
	变异程度	中变异	
详细诊断	滑动 F 检验	1999(+)	
	滑动 T 检验	1999(+)	
	Lee Heghinan 法	1999(0)	
	有序聚类法	1999(0)	
	跳跃诊断	标准差 R/S	1991(0)
		Browir Forsvthe	1999(+)
		滑动游程检验法	2004(+)
	滑动秩和检验	1999(+)	
	最优信息二分割法	1968(0)	
	Manir kendall	1999(+)	
BSYES 方法	1999(+)		
趋势诊断	相关系数法	+	
	Spearm an 法	+	
	Kendall 法	+	
跳跃综合	跳跃点	1999	
	综合权重	0.78	
	综合显著性	6(+)	
趋势综合	综合权重	0.78	
	选择	效率系数 跳跃 22.82 (%) 趋势 12.68	
诊断结论	1999(+)	↓	
		1998(+)	↓

注:表格中“+”表示跳跃或趋势显著;“-”表示跳跃或趋势不显著;0 表示不能进行显著性检验;“↓”表示下降。

从表 1 的诊断结果可以看出,宣恩(二)站年最大流量序列的 Hurst 系数值 $h=0.749$,第一、第二 Hurst 系数值置信限 $h_{\alpha}=0.676$, $h_{\beta}=0.720$, $h>h_{\beta}$,初步诊断其为中变异,不满足一致性的要求。从详细诊断可以发现,宣恩(二)站年最大流量序列跳跃和趋势皆显著;进一步进行综合诊断,通过跳跃综合和趋势综合,选取效率系数最大者(跳跃 22.82%)为最终的变异形式。诊断结果为宣恩(二)站年最大流量序列在 1999 年发生了跳跃向下的中变异,其跳跃变化见图 1。流量序列均值从跳跃前的 988.45 m³/s 下降至跳跃后的 462.00 m³/s,绝对减少量为 536.45 m³/s,相对减少 53.26%。

面平均年最大月雨量序列的 Hurst 系数值 $h=0.759$,第

一、第二 Hurst 系数值置信限 $h_{\alpha}=0.676$, $h_{\beta}=0.720$, $h>h_{\beta}$,初步诊断其为中变异,不满足一致性的要求。从详细诊断可以发现,面平均年最大月雨量序列跳跃显著,而趋势不显著;进一步进行综合诊断,其跳跃综合,诊断结果为面平均年最大月雨量序列在 1998 年发生了跳跃向下的中变异,其跳跃变化见图 2。降水序列均值从跳跃前的 331.45 mm 下降至跳跃后的 259.57 mm,绝对减少量为 71.88 mm,相对减少 21.68%。

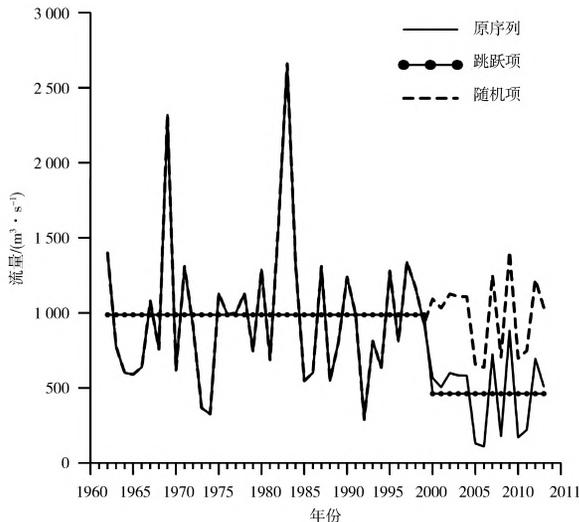


图 1 宣恩(二)站年最大流量序列跳跃变化

Fig. 1 Jump alteration of annual maximum runoff series at Xuanen 2 station

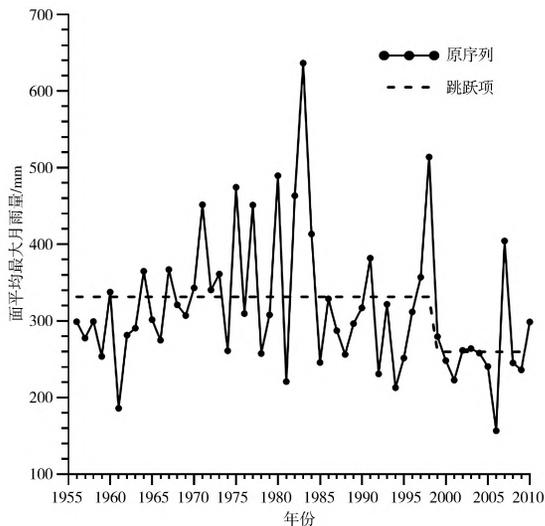


图 2 面年平均最大月雨量序列跳跃变化

Fig. 2 Jump alteration of average annual maximum monthly rainfall series in the studying area

4 渠化工程影响下河道水文特性变化分析

河道整治,岸坡渠化,人为改变了天然岸坡质地和形态,必然引起河流水力特性的改变,进而引起河道水文特性的变化。以下将分析影响河道水位流量关系的主要因素,如过水断面面积和反映阻力大小的糙率,并结合谢才-曼宁公式^[14]对宣恩站年最大流量序列变异情势进行分析。

4.1 河段断面变化分析

位于城区的宣恩水文站始建于 1958 年 5 月,距龙洞水

库下游 1.5 km,为国家基本水文站。该站多年水位流量关系为单一曲线,反映该河段控制条件较好,断面稳定。本文选取宣恩水文站河道渠化前的 1990 年和渠化后的 2013 年的测流断面资料作对比分析(图 3),从断面形状上看,渠化前后发生了较大变化。

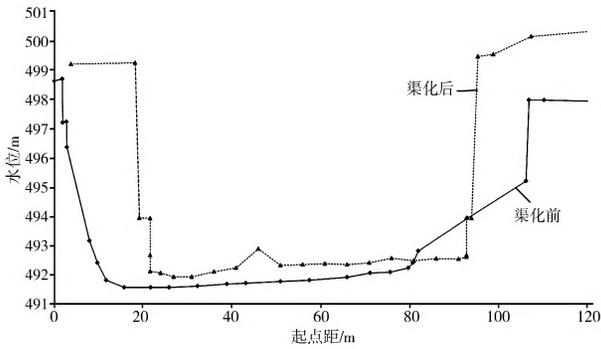


图 3 宣恩城区河段渠化前后断面变化对比
Fig. 3 Comparison of river cross section before and after urban river canalization of Xuanen district

从渠化前后断面水位面积关系(图 4)可以看出,同水位下断面面积渠化后比渠化前有所减少,经计算断面面积相对值平均减少了 37.3%,具体计算结果见表 2。可以看出,水位越高(越靠近岸边),渠化前后面积相差越大,但面积减少相对值反而下降。

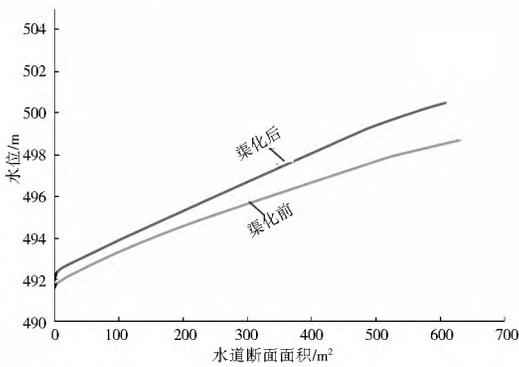


图 4 渠化前后水位面积关系

Fig. 4 Relationship between river water level and cross-sectional area before and after Urban river canalization of Xuanen district

4.2 河段糙率影响分析

河道整治工程对河段两岸采用浆砌块石护坡,局部裁弯取直,使原天然河道的河流形态和自然岸坡硬化、渠化。通过对宣恩水文站实测流量资料分析可知,河道渠化前后糙率形成了明显的两个分布带,且糙率减小,导致渠化后流速增大。具体如下:河道渠化前(1990年),糙率均值为 0.033,点据分布在 0.027~0.042 之间;渠化后(2013年)糙率(n)与宽深比(B/h)的关系总趋势不变,但均值减少为 0.029,点据分布在 0.025~0.035 之间(图 5)。

从图 6 中还可以看出,渠化前后糙率变化最大点在宽深比较小(远离岸边)的区域,由 0.045 减至 0.03 左右,减小幅度约为 50%;随着宽深比增大(靠近岸边),糙率变化逐渐减小,在宽深比大于 50 以后,糙率变化趋于稳定,由 0.03 减至 0.025 左右,减小幅度约为 20%。

表 2 河道渠化前后断面面积变化计算结果

Tab. 2 Variations of river cross sectional area before and after urban river canalization of Xuanen district

水位/m	面积/m ²		面积减少	
	渠化后 (2013年)	渠化前 (1990年)	绝对值 /m ²	相对值 (%)
492.00	0.1	13.1	-13.0	-99.2
492.50	9.2	43.7	-34.5	-78.9
493.00	40.5	77.2	-36.7	-47.5
493.50	74.1	113.3	-39.2	-34.6
494.00	107.8	152.3	-44.5	-29.2
494.50	143.3	194.2	-50.9	-26.2
495.00	178.9	239.2	-60.3	-25.2
495.50	214.5	286.7	-72.2	-25.2
496.00	250.3	334.9	-84.6	-25.3
496.50	286.2	383.6	-97.4	-25.4
497.00	322.2	432.4	-110.2	-25.5
497.50	358.3	481.6	-123.3	-25.6
498.00	394.5	533.8	-139.3	-26.1
498.50	430.8	601.7	-170.9	-28.4
平均			-76.9	-37.3

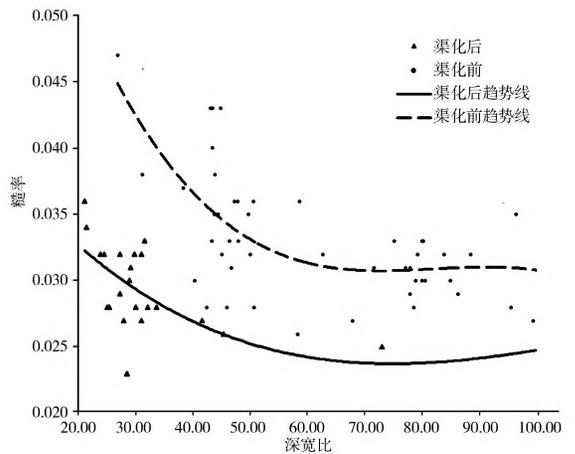


图 5 渠化前后糙率关系曲线

Fig. 5 Relationship between roughness factor and width/depth ratio before and after urban river canalization of Xuanen district

4.3 河段洪水流量变化分析

渠化后,忠建河城区段天然河道已改造成两岸近乎平行、较为规则的渠道,河道渠化前后河流的走向基本保持不变,所以可以认为渠化前后水面比降变化不大。同一水位下,由图 4 可以看出河床基面有小幅抬升不超过 0.5 m,与洪水至少 5 m 水深相比相差较大,也可认为变化可以忽略。由表 2 可以看出,当洪水水位达到 495.0 m 以后,过水断面面积相对减少 25%~28%;由图 6 可以看出,当达到一定的洪水位(宽深比大于 50)以后,糙率相对减少 20%。式(1)的分子相对减少量要大于分母,因此可以推断得出“经过渠化改造后河道洪水流量减少”的结论。这与变异诊断系统得到洪水序列发生了跳跃向下的中变异一致,说明渠化改造在一定程度上加剧了洪水变异。

忠建河流域上龙洞水库于 1995 年建成,对天然洪水具有一定的削峰调洪作用,从年最大流量和面平均年最大月降

雨序列的变异诊断可以发现,流量序列在1999年发生中变异,降雨序列在1998年发生中变异,时间点比较接近且都在龙洞水库建成之后,说明该流域受气候变化和人类活动双重影响。而流量序列在变异点前后减少53.26%,降水序列在变异点前后减少21.86%,说明该流域主要受人类活动即龙洞水库修建的影响较大,而受气候变化影响较小,仅为前者的41%左右。与此同时,城区河道治理工程从2005年开始,进一步加剧了人类活动的影响,对其城区防洪预警预案的修编提出了新的要求^[15]。

5 结语

本文对1956年-2010年面平均年最大月雨量序列和宣恩(二)站1962年-2013年的实测年最大流量序列进行了水文变异诊断,并利用谢才-曼宁公式,揭示了宣恩城区河道改造对洪水变异的影响,发现该流域洪水变异主要受人类活动的影响,气候变化对洪水变异的影响仅为前者的41%左右,渠化改造在一定程度上加剧了洪水变异。因此,需要科学合理地修编洪水预警预报方案,以适应环境的变化,使城市防洪抢险决策更加科学可行,抢险措施更加得力有效。

参考文献(References):

- [1] 方国华,钟林涓,苗苗.我国城市防洪排涝安全研究[J].灾害学,2008,23(3):119-123.(FANG Guo hua,ZHONG Lin juan,MIAO Miao.Research on urban flood control and waterlogged drainage safety of our country[J].Journal of Catastrophology,2008,23(3):119-123.(in Chinese))
- [2] 许斌,谢平,谭莹莹,等.洪水归槽影响下西江中游防洪能力分析[J].水力发电学报,2014,33(2):65-72.(XU Bin,XIE Ping,TANG Ying ying,et al.Analysis of flood returning to main channel influence on the flood control ability of Xijiang River[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(2):65-72.(in Chinese))
- [3] 孙又欣.湖北省2013年应对梅雨期暴雨洪水工作纪实[J].中国防汛抗旱,2013,23(4):75-79.(SUN You xin.The documentary of preparedness work for storm floods during the Meiyu period in Hubei province in 2013[J].China's flood control and drought relief,2013,23(4):75-79.(in Chinese))
- [4] ZHANG Qiang, GU Xi hui, SINGH Vijay P, et al. Flood frequency analysis with consideration of hydrological alterations: Changing properties, causes and implications[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 803-813.
- [5] SANG Yan fang, WANG Zhong gen, LIU Chang ming. Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 293-298.
- [6] JIANG Lir zhi, BAN Xuan, WANG Xue lei, et al. Assessment of Hydrologic Alterations Caused by the Three Gorges Dam in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China[J]. Water, 2014, 6: 1419-1434.
- [7] XU Guang lai, XU You peng, LUO Xian, et al. Temporal and spatial variation of water level in urbanizing plain river network region[J]. Water Science and Technology, 2014, 69: 219F-2199.
- [8] DU Hong, XIA Jun, ZENG Si dong, et al. Variations and statistical probability characteristic analysis of extreme precipitation events under climate change in Haihe River Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28: 913-925.
- [9] WORRAL L T. P., DUNBAR M. J., EXTENCE CA, et al. The identification of hydrological indices for the characterization of macroinvertebrate community response to flow regime variability[J]. Hydrological Sciences Journal Journal Des Sciences Hydrologiques, 2014, 59: 645-658.
- [10] MACHI WAL D, JHA M K. Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice[M]. Berlin: Springer Verlag, 2012.
- [11] JAYAWARDENA A W, LAU W H. Homogeneity tests for rainfall data[J]. Journal of the Hong Kong Institution of Engineers, 1990: 22-25.
- [12] 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 Guang cai, LEI Hong fu, et al. Hydrological alteration diagnosis system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010(1): 85-91. (in Chinese))
- [13] 丁晶,邓育仁.随机水文学[M].成都:成都科技大学出版社,1988.(DING Jing, DENG Yu ren. Random hydrology[M]. Chengdu: Press of Chengdu technology university, 1988. (in Chinese))
- [14] 叶守泽.水文水利计算[M].北京:中国水利水电出版社,2005.(YE Shou ze. Hydrological and hydraulic calculation[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 恩施州水文水资源勘测局.宣恩县城区现状防洪能力分析评价报告[R].2014.(Hydrology and water resources survey bureau of Enshi. The report of Xuanen urban area flood control ability at present[R]. 2014. (in Chinese))