

Study on Water Resource Change of Dongjiang River over the Past 50 Years

Bo Zhang, Ping Xie, Binbin Li, Xinan Li

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: fmj1123@126.com

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Bo Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Bo Zhang et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Firstly, the hydrological variation diagnosis system (HVDS) was used to analyze the variation of the annual average flow series at four stations of Dongjiang trunk stream: Longchuan station, Heyuan station, Lingxia station and Boluo station. The results show that: the annual average flow series at Longchuan station, Heyuan station and Lingxia station were significantly inconsistent; the change-points were all in the year of 1972, and the interannual variation of water resource in Dongjiang River was analyzed. The main cause of these variations was frequent human activities. Secondly, the frequency distributions of annual average flow series before and after the change-point at Boluo station, Longchuan station, Heyuan station and Lingxia station were conducted based on the hydrological frequency calculation theory for inconsistent series (HFCT), and the differences of mean and various frequency characteristic values were analyzed. The results are valuable for the reasonable development and allocation of water resource and the planning and transformation of flood control engineering in Dongjiang River basin.

Keywords: Dongjiang River Basin; Water Resource; Variation Analysis; Frequency Analysis

近 50 年来东江流域水资源年际变化规律研究

张波, 谢平, 李彬彬, 李析男

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: fmj1123@126.com

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘要: 采用水文变异诊断系统对东江流域干流龙川站、河源站、岭下站、博罗站年平均流量序列进行变异分析。诊断发现龙川站、河源站和岭下站年平均流量序列呈现显著的跳跃变异, 且变异时间均在 1972 年, 分析了东江流域水资源年际变化规律。物理成因分析表明频繁的人类活动是导致序列变异的主要原因。根据变化环境下非一致性序列的水文频率计算原理, 计算了博罗站和龙川站、河源站、岭下站变异前后年平均流量的水文频率分布, 并比较了均值和不同频率特征值之间的差异, 该结果对东江流域水资源合理开发和配置、防洪工程设计规划和改造具有一定的参考价值。

关键词: 东江流域; 水资源; 变异分析; 频率计算

作者简介: 张波(1989-), 男, 山东人, 武汉大学水文水资源系, 硕士研究生, 主要从事变化环境下的水文水资源研究。

1. 研究背景

近百年来, 全球气候发生了以气温升高为主要特征的显著变化, 极端气候事件明显增多, 这都严重地影响了经济社会的可持续发展^[1]。气候变化对我国水资源产生了显著影响, 改变了自然状态下的河川径流情势, 与此同时, 大量的水电工程开发运行后, 使得河川径流的情势发生了新的变化, 传统的工程分析计算方法在新的河川径流特征下的适用性存在问题。因此, 有必要对水电工程开发运行后河川径流的演变情势进行分析和预测, 掌握其变化规律和特点, 对于科学、合理的开发和配置水资源, 提高水资源开发利用的综合效益, 建设节水型社会具有重要的意义^[2]。

东江是珠江三大水系之一, 连接赣澳港三地, 是香港特别行政区及广东省河源、惠州、东莞、深圳、广州等城市 4000 多万居民的主要饮用水源地, 关系着东江流域、珠江三角洲地区的经济发展和香港的繁荣稳定。谭莹莹等对东江流域不同时间尺度径流序列进行了变异分析, 发现径流变异主要受人类活动的影响^[3]。

王兆礼等应用 Mann-Kendall 趋势检验、小波分析以及 R/S 分析等多种方法, 探讨了东江流域径流年际变化特征, 发现径流序列变化趋势不明显, 但存在 4 类尺度的周期性变化规律^[4]。然而上述研究均侧重于对径流年际变化规律进行研究, 而忽视了对不同代表年(丰、平、枯)的径流变化规律进行分析。各国通常用多年平均河川径流量来表示水资源量, 本文采用年平均流量代表流域内水资源量, 以东江流域为例, 采用水文变异诊断系统^[5](谢平等, 2010)对东江干流龙川站、河源站、岭下站、博罗站年平均流量序列进行变异分析, 并在此基础上, 采用变化环境下非一致性水文频率计算方法^[6](谢平等, 2005)进行频率分析, 以进一步了解序列变异前后不同代表年(丰、平、枯)均值和不同频率特征值之间的差异, 东江三大水库及四个主要水文控制站位置如图 1 所示。通过研究东江流域近 50 年来水资源年际径流变化规律, 对于指导东江流域水资源开发利用、制定东江流域水资源配置方案等具有重要的意义。

2. 资料与研究方法

本文采用的资料为东江流域三大水库建成运行



Figure 1. Location diagram of three large reservoirs and four hydrological control stations at Dongjiang River

图 1. 东江三大水库及四个主要水文控制站位置示意图

前后干流自上游至下游的龙川、河源、岭下及博罗四个水文控制站 1954~2005 年的实测径流系列以及采用泰森多边形法对流域内雨量站加权求得的东江流域 1956~2000 年降雨量系列。

2.1. 水文变异诊断系统

由于受气候条件和人类活动的影响, 水文要素往往在时间和空间上发生变异, 以往采用统计检验方法, 对水文序列进行变异识别与检验, 但是各种方法各有优缺点、往往会得出不一致的结论。针对这一问题, 谢平等^[5](2010)在对各种检验方法的优缺点进行研究的基础上, 提出并构建了水文变异诊断系统, 该系统主要包括: 初步诊断、详细诊断和综合诊断三部分。其基本原理为: 首先采用过程线法、滑动平均法、Hurst 系统法对序列进行初步诊断, 判断序列是否存在变异; 如果存在变异, 再利用多种检验方法进行详细诊断; 然后对跳跃和趋势诊断结果综合, 以效率系数较大者作为最后的变异形式; 最后结合实际水文调查分析, 从物理成因上对变异形式和结论进行确认, 得到水文序列最终的变异诊断结果^[7-10]。

2.2. 变化环境下非一致性序列的水文频率计算方法

“非一致性”水文序列由确定性成分和随机性成分组成; 当水文序列的变化规律在一定时期内比较稳定时, 水文序列是一致的, 其随机性成分起主导作用;

当水文序列的变化规律在一定时期内发生突变或渐变, 即从一种稳定状态突变或渐变到另一种稳定状态时, 水文序列是非一致的, 这种突变或渐变造成水文序列变化规律的差异, 即为水文序列的确定性成分; 当水文序列经过突变或渐变后达到新的平衡或稳定状态时, 其随机性成分又将起主导作用。基于上述分析, 谢平等(2005)^[6]假设非一致性水文序列由相对一致的随机性成分和非一致性的确定性成分两部分组成, 其频率计算问题就可以归结为水文序列的分解与合成, 包括对水文序列的确定性成分进行模型预测和拟合计算、随机性成分进行频率计算以及合成成分的数值计算、参数和分布的推求等。本文采用非一致性水文序列的合成计算, 首先根据非一致性水文序列的确定性规律和随机性规律, 利用 Monte Carlo 法随机生成某个时间(刻)的样本序列; 然后采用现行的水文频率计算方法(如目估适线法、优化适线法、有约束加权适线法等), 求得该样本序列满足 P-III型频率分布的统计参数, 从而得到非一致性水文序列的合成分布规律; 最后根据合成分布规律, 就可以解决两类水文频率计算问题。用 Monte Carlo 法随机生成某个时间(刻)的合成样本序列可以分为三个步骤: 一是根据确定性规律预测某个具体时刻的确定性成分; 二是利用 Monte Carlo 法生成满足随机性规律(P-III 型分布)的纯随机序列; 最后将确定性成分与随机性成分进行数值合成, 得到合成后的样本序列, 据此可以推求合成分布及其参数^[7]。

3. 变异分析

3.1. 变异诊断

采用水文变异诊断系统^[5]对 1954~2005 共 52 年龙川站、河源站、岭下站、博罗站的年平均流量序列分别进行变异分析。变异诊断结果见表 1。

由表 1 中的诊断结果, 可以得出如下主要结论:

1) 龙川站、河源站、岭下站年平均流量序列均在 1972 年发生显著跳跃变异, 根据 Hurst 系数的大小, 确定上述三站的变异强度均为中变异。

2) 年降水量序列无变异, 年平均流量序列的变异受降水影响不显著。

3) 龙川站、河源站、岭下站的变异形式均为跳跃向上的中变异, 说明自 1972 年之后, 上述三站的

年径流量有所增加, 而位于东江干流下游的博罗站年平均流量序列并未发生变异, 表明, 虽上游来水量增大, 但下游同期取用水量也有较大的增长, 来水与用水综合作用, 削弱了来水的增量, 因而下游博罗站年平均流量序列并未发生变异。

4) 近 50 年来, 东江流域上、中游水资源总量增多, 下游水资源总量未发生明显变化。

3.2. 物理成因分析

东江年降雨量序列未发生变异, 由于径流对降雨的敏感性远大于对气温的敏感性^[11], 可以将降雨的变化代表气候变化的影响, 所以认为气候变化对径流变异的影响不显著。结合东江流域水电工程分析, 东江控制性三大水库: 新丰江水库、枫树坝水库、白盆珠水库, 其中东江干流龙川站上游枫树坝水库 1970 年 8 月动工兴建, 于 1973 年 10 月建成蓄水, 同年底第一台机组投入发电, 1974 年底第二台机组投入运行, 水库总库容为 19.32 亿 m^3 。龙川站、河源站、岭下站年平均流量序列的变异时间点均为 1972 年, 与枫树坝水库投入运行时间基本吻合, 说明上游枫树坝水库的修建, 改变了天然状态下东江干流的河川径流情势, 水库的调节作用增大了水库下游的水资源量。由此得出, 近 50 年来, 频繁的人类活动, 改变了东江流域水资源的年际变化规律。

4. 频率计算

变异分析表明东江干流上游、中游三个水文控制站年平均流量序列发生了不同程度的变异, 序列失去了一致性。本文采用变化环境下非一致性水文频率计算方法对东江干流上述四个水文控制站年平均流量序列分别进行频率计算和分析, 并比较序列变异前后不同代表年(丰、平、枯)均值和不同频率特征值之间的差异, 计算结果见表 2, 变异前后频率曲线见图 2, 表格中所列变幅是指变异后相对于变异前的百分比。

由表 2 可以看出:

1) 龙川站、河源站、岭下站年平均流量序列变异前后均值差异幅度分别为: 20.6%、22.2%、17.1%, 年径流有显著的增加。

2) 龙川站、河源站、岭下站三站 $P = 90\%$ 枯水年平均流量变异前后差异幅度分别为: 35.2%、37.5%、

Table 1. Variation diagnosis results of annual average flow at four Dongjiang trunk stream stations
表 1. 东江干流四站年平均流量变异诊断结果

诊断方法		东江流域年降水量	龙川站年平均流量	河源站年平均流量	岭下站年平均流量	博罗站年平均流量	
初步诊断	Hurst 系数	0.516	0.717	0.78	0.74	0.612	
	整体变异程度	无变异	中变异	中变异	中变异	无变异	
详细诊断	滑动 F 检验	1959(-)	1983(+)	1974(+)	1959(-)	1963(+)	
	滑动 T 检验	1961(-)	1972(+)	1972(+)	1972(+)	1956(-)	
	Lee-Heghinan 法	1956(0)	1972(0)	1972(0)	1956(0)	1956(0)	
	有序聚类法	1956(0)	1972(0)	1972(0)	1972(0)	1956(0)	
	极差/标准差 RS	1959(0)	1962(0)	1956(0)	1974(0)	1998(0)	
	跳跃	Brown-Forsythe	1961(-)	1972(-)	1972(+)	1956(+)	1956(-)
	滑动游程检验法	1958(-)	1956(+)	1972(-)	1955(+)	1987(-)	
	滑动秩和检验	1956(-)	1972(+)	1972(+)	1972(+)	1956(-)	
	最优信息二分割	1987(0)	1956(0)	1986(0)	1976(0)	1999(0)	
	Mann-Kendall	1974(+)	1974(+)	1970(+)	1960(+)	1972(+)	
	BAYES 方法	1956(-)	1972(+)	1972(+)	1972(+)	1956(-)	
	趋势	趋势变异程度	无趋势变异	无趋势变异	无趋势变异	无趋势变异	无趋势变异
	相关系数检验	-	-	-	-	-	
	Spearman 法	-	-	-	-	-	
	Kendall 法	-	-	-	-	-	
跳跃点	1956	1972	1972	1972	1956		
综合诊断	跳跃	跳跃综合权重	0.45	0.69	0.89	0.49	0.69
	跳跃综合显著性	2(-)	2(+)	3(+)	3(+)	4(-)	
	趋势	趋势综合显著性	3(-)	3(-)	3(-)	3(-)	3(-)
	选择	跳跃效率系数	4.88	7.18	11.15	7.02	7.52
	趋势效率系数	0.07	0.3	1.02	0.22	2.52	
诊断结论	-	1972(+) \uparrow	1972(+) \uparrow	1972(+) \uparrow	-		

注: 表中+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; 第一显著性水平 $\alpha = 0.1$, 第二显著性水平 $\beta = 0.02$; \uparrow \downarrow 分别表示跳跃/趋势上升、下降。

Table 2. Hydrologic frequency calculation parameters and results at four Dongjiang trunk stream stations
表 2. 东江干流四站水文频率计算参数及计算结果汇总

计算结果	计算序列	龙川站			河源站			岭下站			博罗站
		变异前	变异后	变幅%	变异前	变异后	变幅%	变异前	变异后	变幅%	
统计参数	均值	175	211	20.6	396	484	22.2	539	631	17.1	729
	Cv	0.369	0.308	-16.5	0.331	0.267	-19.3	0.308	0.267	-13.3	0.279
	Cs	0.738	0.742	0.5	0.661	0.650	-1.7	0.616	0.639	3.7	0.557
频率计算	P = 0.1%	444	481	8.3	925	1000	8.1	1200	1310	9.2	1520
	P = 1%	359	396	10.3	762	844	10.8	997	1100	10.3	1280
	P = 5%	293	329	12.3	633	718	13.4	837	935	11.7	1090
	P = 10%	261	297	13.8	570	656	15.1	759	855	12.6	999
	P = 50%	167	203	21.6	382	470	23.0	521	613	17.7	711
	P = 90%	99.1	134	35.2	240	330	37.5	340	430	26.5	484
	P = 95%	84.0	119	41.7	208	298	43.3	298	388	30.2	430
	P = 99%	60.2	95.3	58.3	156	246	57.7	229	320	39.7	341

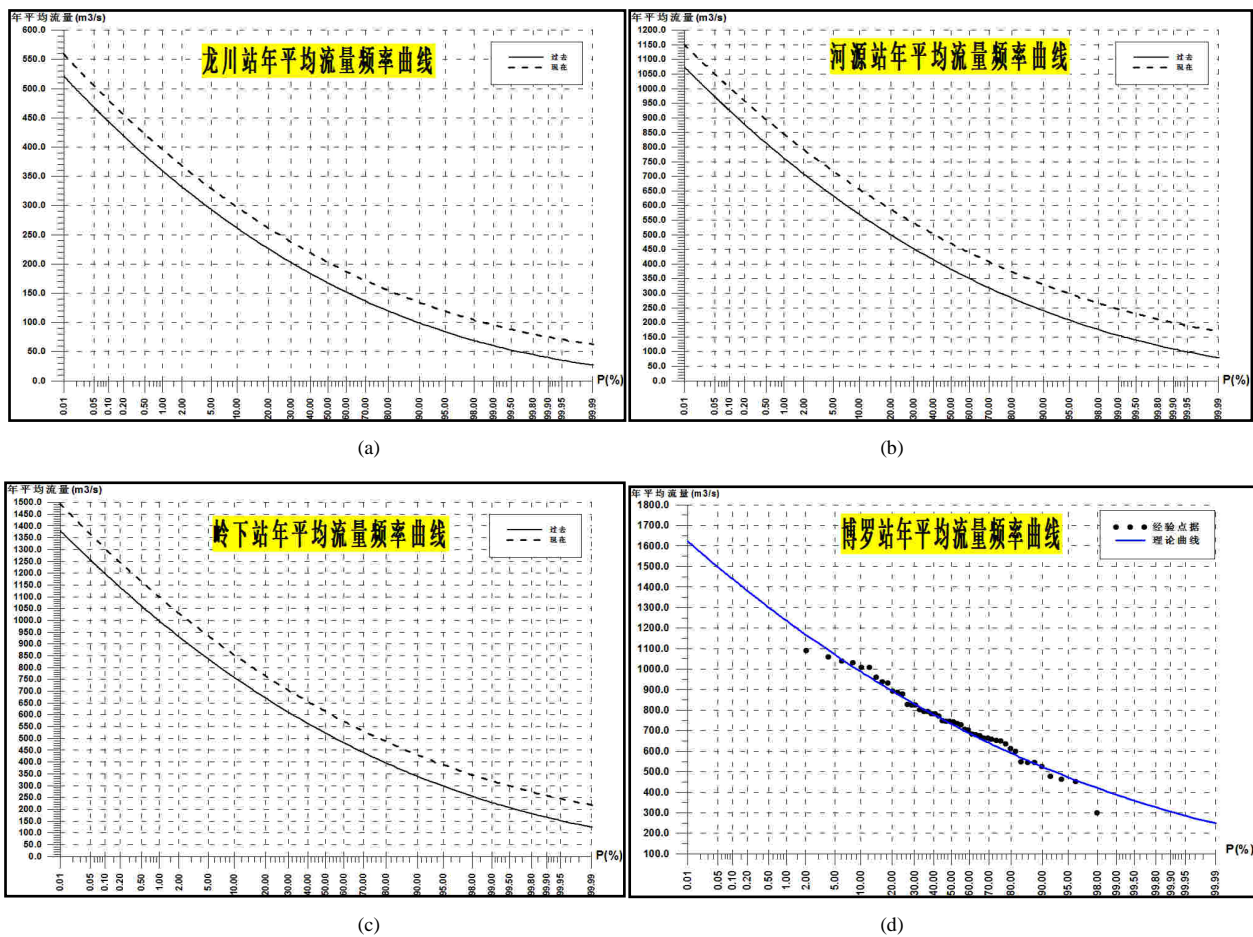


Figure 2. Frequency curve of annual average flow at four Dongjiang trunk stream stations; (a) Theoretical frequency curves of annual average flow before and after change-point at Longchuan station; (b) Theoretical frequency curves of annual average flow before and after change-point at Heyuan station; (c) Theoretical frequency curves of annual average flow before and after change-point at Lingxia station; (d) Theoretical frequency curves of annual average flow at Boluo station

图 2. 东江干流四站年平均流量频率曲线; (a) 龙川站年平均流量变异前后理论频率曲线; (b) 河源站年平均流量变异前后理论频率曲线; (c) 岭下站年平均流量变异前后理论频率曲线; (d) 博罗站年平均流量理论频率曲线

26.5%; $P = 95\%$ 枯水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 41.7%、43.3%、30.2%; $P = 99\%$ 枯水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 58.3%、57.7%、39.7%。枯水年径流增加显著, 且整体河源站增幅最大。

3) 龙川站、河源站、岭下站三站 $P = 50\%$ 平水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 21.6%、23.0%、17.7%。平水年增幅小于枯水年, 且河源站增幅最大。

4) 龙川站、河源站、岭下站三站 $P = 0.1\%$ 丰水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 8.3%、8.1%、9.2%; $P = 1\%$ 丰水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 10.3%、10.8%、10.3%; $P = 5\%$ 丰水年年平均流量变异前后差异幅度分别为: 12.3%、13.4%、11.7%; $P = 10\%$ 丰水年年平均流量变异前后差异幅度分别为:

13.8%、15.1%、12.6%。丰水年增幅小于枯水年、平均水平, 且整体河源站增幅最大。

5. 结论和讨论

1) 东江年降雨量序列未发生变异, 气候变化对水资源变化的影响不显著。

2) 龙川站、河源站、岭下站年平均流量序列均在 1972 年发生跳跃向上的变异, 且变异强度均为中变异。结合东江流域水电工程分析, 认为龙川上游枫树坝水库的修建, 显著地改变了东江河川径流的情势, 增加了水库下游的水资源量。

3) 频率计算结果表明龙川站、河源站、岭下站年平均流量变异后均有较大幅度增加, 且河源站总体变幅程度最大。枯水年水资源量增幅大于丰水年, 对于

$P = 99\%$ 的年平均流量, 上述三站变异后年平均流量增幅分别为: 58.3%、57.7%、39.7%, 枯水年水资源量有显著增加。

4) 年平均流量序列变异有利有弊。近 50 年来, 东江干流上、中游水资源量的增加, 对于缓解当地供水期水资源供需矛盾起到了一定作用; 但年径流量的增加, 降低了河道堤坝的防洪等级, 直接危及河道两岸城市人民的生命财产安全, 增加了汛期防洪的压力, 特别是岭下站下游惠州段, 惠州大堤堤围大部分防洪标准为 20 年一遇, 部分堤围防洪标准仅为 5 年一遇, 惠州上游年径流量的增大, 势必增大惠州段的防洪压力, 建议当地要加强惠州大堤的续建加固力度, 提高惠州大堤的防洪标准。

致谢

感谢国家自然科学基金项目的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

基金项目

国家自然科学基金项目(51179131; 51190094)。

参考文献 (References)

- [1] 王金星, 张建云, 李岩, 等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 656-661. WANG Jinxing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 656-661. (in Chinese)
- [2] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234. ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese)
- [3] 谭莹莹, 谢平, 陈丽, 等. 东江流域径流序列变异分析[A]. 中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集——变化环境下的水资源响应与可持续利用[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009: 98-104. TAN Yingying, XIE Ping, CHEN Li, et al. Variation analysis of Dongjiang River basin runoff series. *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: 98-104. (in Chinese)
- [4] 王兆礼, 陈晓宏, 杨涛. 近 50a 东江流域径流变化及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1365-1374. WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong and YANG Tao. Runoff variation and its impacting factors in the Dongjiang River basin during 1956-2005. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1365-1374. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 28(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, 28(6): 6-9. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统及其应用研究 I. 系统结构与诊断原理[A]. 第六届中国水论坛学术研讨会论文集——河流开发、保护与水资源可持续利用[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 15-19. XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system and its application research I. System structure and principle of diagnosis. *River development, protection and sustainable utilization of water resources: The Sixth Water Forum of China Academic Symposium*. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008: 15-19. (in Chinese)
- [9] 陈丽, 谢平, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统及其应用研究 II. 无定河流域水文变异分析[A]. 第六届中国水论坛学术研讨会论文集——河流开发、保护与水资源可持续利用[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 20-24. CHEN Li, XIE Ping, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system and its application research II. Hydrological variation analysis in Wudinghe basin. *River development, protection and sustainable utilization of water resources: The Sixth Water Forum of China Academic Symposium*. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008: 20-24. (in Chinese)
- [10] 谢平, 唐亚松, 陈广才, 等. 西北江三角洲水文泥沙序列变异分析——以马口站和三水站为例[J]. 泥沙研究, 2010, 5: 26-30. XIE Ping, TANG Yasong, CHEN Guangcai, et al. Variation analysis of hydrological and sediment series in North River and West River Delta: Case study of Makou Station and Sanshui Station. *Journal of Sediment Research*, 2010, 5: 26-30. (in Chinese)
- [11] 王渺林, 夏军. 土地利用变化和气候波动对东江流域水循环的影响[J]. 人民珠江, 2004, 2: 4-6. WANG Miaolin and XIA Jun. Influences of land use changes and climatic vibration on water circulation in the East River Vally. *Pearl River*, 2004, 2: 4-6. (in Chinese)