

东江径流年内分配不均匀性的年际变异识别*

涂新军^{1,2}, 陈晓宏^{1,2}, 李 宁³, 张丽娟^{1,2}

(1. 中山大学地理科学与规划学院水资源与环境系, 广东 广州 510275;

2. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;

3. 广东省东江流域管理局, 广东 惠州 516003)

摘 要: 基于变异性识别原理, 采用均值变点识别的最大似然比法和方差变点的西沃兹信息准则法, 以广东省东江为例, 考虑流域内三大水库的影响, 构建径流年内分配不均匀系数年际变化的实测序列和还原序列, 研究径流年内分配的变化特征及其变异状况。结果显示: 与还原序列相比, 东江实测径流年内分配不均匀系数多年均值明显下降, 介于 0.47~0.63; 年际变差系数却明显增大, 介于 0.34~0.48。不均匀系数的参数变点普遍存在, 显著变点出现在 1968 年。与变点前相比, 不均匀系数的多年均值和年际变差系数均明显下降, 分别介于 0.40~0.54 和 0.25~0.32。还原序列的不均匀系数不存在变点, 但 1968 年仍为年序列的最大分割点。与分割点前相比, 不均匀系数的多年均值变化不大, 但年际变差系数均明显下降, 而且下降程度大于实测序列。径流年内分配不均匀系数的年际变异主要贡献来自于流域 3 大水库的径流调节, 同时也存在其他因素影响不均匀性的年际变化幅度。

关键词: 径流年内分配; 不均匀系数; 变异识别; 东江

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)06-0114-06

Variability Recognition of the Nonuniformity of Annual Streamflow Distribution in the Dongjiang River

TU Xinjun^{1,2}, CHEN Xiaohong^{1,2}, LI Ning³, ZHANG Lijuan^{1,2}

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of
Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China;

3. Dongjiang Basin Authority of Guangdong Province, Huizhou 516003, China)

Abstract: Based on the likelihood ratio method testing in the mean and the Schwarz Information Criterion testing in the variance, the variability of nonuniform coefficients of annual streamflow distribution in the gauging runoff series and reconstructed runoff series returning water regulation of three large reservoirs in the Dongjiang River is analyzed in this paper. Main conclusions are as follows: Compared to reconstructed series, annual mean values of the nonuniform coefficient of gauging series significantly decrease, being between 0.47-0.63, while annual variation coefficients remarkably increase, being between 0.34-0.48. The change-point of the nonuniform coefficients obviously occurred in 1968. Both annual mean values and variation coefficients decrease distinctly after the change point, with values between 0.40-0.54 and between 0.25-0.32 respectively. The segmentation point of the nonuniform coefficient of re-

* 收稿日期: 2011-02-28

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(09YJC910010); 国家自然科学基金重点资助项目(50839005); 广东省科技计划基金资助项目(2010B050300010)

作者简介: 涂新军(1972年生), 男, 讲师; E-mail: cestxj@mail.sysu.edu.cn

constructed series also occurred in 1968 regardless of no tested change point. Annual mean values after the segmentation point show little change, but annual variation coefficients greatly decrease. The variability of the nonuniform coefficients in annual streamflow distribution is mainly resulted from water regulation of three reservoirs in the Dongjiang River. Some other factors influence the annual variation range.

Key words: annual streamflow distribution; nonuniform coefficient; variability recognition; the Dongjiang River

河川径流年内分配是不均匀的, 这种径流分配特征不仅影响着河道及沿岸自然生态系统, 同时也影响着流域水资源开发利用。径流年内分配特征的定量化是水文水资源研究的重要研究内容, 常用方法有: 月径流百分比、连续4月最大径流百分比、完全年调节系数、年内分配不均匀系数、集中度和集中期、变化幅度等^[1-10]。其中, 年内分配不均匀系数得到广泛应用, 是体现径流年内分配不均匀程度的一个总体指标, 反映了对径流调控的难易程度。一般来说, 径流年内分配不均匀系数的年序列应是一个服从某一分布的随机过程, 但在全球气候变化和剧烈人类活动影响下, 不均匀系数的年序列有可能存在显著性变化即变异。

水文要素的变异识别研究近10年受到关注, 在河川径流量的变异性方面取得了一些成果^[11], 但对径流年内分配特征的变异性研究甚少。东江位于广东省东部, 是珠江3大水系之一, 地处华南湿润地区, 水资源较为丰富。由于区域经济社会迅猛发展, 剧烈的人类活动已经使得东江枯期径流年序列发生了变异^[12-13]。因此, 本文以东江为例, 考虑流域内控制性水利工程的影响, 构建东江干流主要水文站河川径流年内分配不均匀系数的实测序列和还原序列, 基于统计学中变异识别方法, 研究东江径流年内分配的变化特征及其变异状况, 开拓径流年内分配特征研究的新方法和水文要素变异性研究的新领域, 对于流域水资源的合理配置、水利工程设计等也具有重要意义。

1 研究方法

1.1 不均匀系数计算

不均匀系数是较为常用的衡量河川径流年内分配的定量指标, 并用其多年平均值和年际变差系数衡量径流年内分配的多年平均水平及年际变化状况^[2]。该指标可定义为年内各时段平均流量的均方差与年平均流量的比值, 与变差系数的内涵相当, 但反映的是年内分配特征。有径流序列 $\{R(t, \tau), t = 1, 2, \dots, n, \tau = 1, 2, \dots, m\}$

$$C_u(t) = \sigma(t)/\bar{R}(t) \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\sum_{\tau=1}^m [R(t, \tau) - \bar{R}(t)]^2 / m} \quad (2)$$

$$\bar{R}(t) = \sum_{\tau=1}^m R(t, \tau) / m \quad (3)$$

式中, $C_u(t)$ 为 t 年的径流年内分配不均匀系数; $\sigma(t)$ 为 t 年的年内时段平均流量的均方差, $\bar{R}(t)$ 为 t 年平均流量; $R(t, \tau)$ 为 t 年第 τ 时段的平均流量; t 为年份; n 为年数; τ 为年内某一时段, 通常为月份; m 为时段数。

1.2 变异识别原理

河川径流年内分配不均匀系数的年序列是一个服从某一分布的随机序列, 但受全球气候变化和人类活动的影响, 不均匀系数的年际变化特征可能发生变异, 即年序列可能存在变点。但变点是否存在, 是哪一种类型的变点, 需构建统计量通过假设检验来识别, 方法通常有参数识别法和非参数识别法。参数识别法是已知该时间序列的随机分布模型, 通过构建检验统计量识别参数变点, 其中均值变点和方差变点的识别方法已经在水文要素时序变点的研究中得到了较好地应用^[11, 14-15]。

不失一般性, 若 $\{X(t), t = 1, 2, \dots, n\}$ 是独立的正态分布随机变量序列, 假设至多只有一个时序变点, 有

$$\begin{cases} X(t) \sim N(\mu_1, \sigma_1^2) & 1 \leq t \leq r \\ X(t) \sim N(\mu_2, \sigma_2^2) & r < t \leq n \end{cases} \quad (4)$$

式中, $X(t)$ 为径流变量, t 为年份, r 为时序分割点, μ_1 、 σ_1^2 和 μ_2 、 σ_2^2 分别为分割点前后两段子序列的均值和方差, n 为时序总长度。

作原假设

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (5)$$

对应于备选假设

$$H_1: \sigma_1^2 = \sigma_2^2, \mu_1 \neq \mu_2 \quad (6)$$

$$H_2: \mu_1 = \mu_2, \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad (7)$$

通过构建均值变点的似然比统计量和方差变点的西沃兹信息统计量, 可检验原假设 H_0 是否成立, 否则接受 H_1 或 H_2 , $\{X(t), t = 1, 2, \dots, n\}$ 在 r 处存在均值变点或方差变点。

2 实例研究

2.1 东江流域概况

东江发源于江西省寻邬县的桎髻体，干流由东北向西南流经广东省东部，入狮子洋，博罗站以上流域面积 25 325 km²。20 世纪 50 年代起，东江流域大量修筑水库、塘坝等蓄水工程，截至 2006 年底，流域内建有蓄水工程 896 宗，总库容 190.20 亿 m³，其中新丰江、枫树坝、白盆珠 3 大水库为流域防洪的骨干水库，投入运行分别始于 1961、1974 和 1986 年，总库容累计 170.48 亿 m³，约占流域总库容的 90%。有东江干流龙川站、河源站、岭下站和博罗站，1954 - 2009 年实测的逐月平均流量资料，构建基于月的径流实测序列。若忽略其他人类活动的影响，利用 3 大水库的入流和出流的月径流量，还原东江天然河川径流，构建基于月的径流还原序列。如图 1。

2.2 径流年内分配不均匀性特征

根据式 (1) - (3)，可分别计算出东江径流年内分配不均匀系数的年序列及年际变化特征，如图 2 和表 1。龙川站、河源站、博罗站实测序列的不均匀系数多年均值分别为 0.63、0.47、0.55、0.62，年际变差系数分别为 0.36、0.48、0.42、0.35。还原后的多年均值分别为 0.75、0.79、

0.82、0.85，年际变差系数分别为 0.20、0.21、0.21、0.19。受 3 大水库径流调节作用的影响，与还原序列相比，实测序列不均匀系数的多年均值明显下降，4 站分别下降了 16%、41%、32%、27%；但变差系数却明显增大，4 站分别增大了 36%、81%、64%、58%。

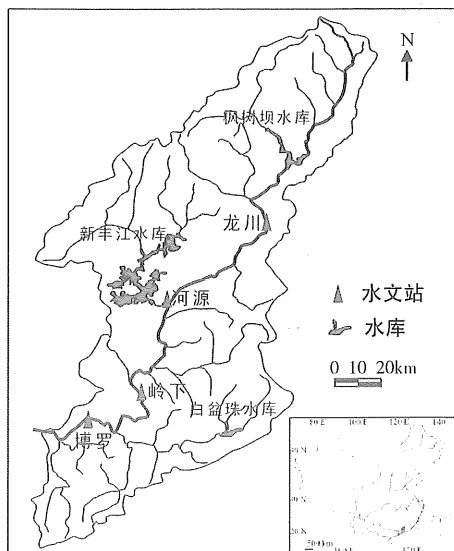


图 1 东江流域主要水文站及水库分布示意图
Fig. 1 Sketch of gauge stations and reservoirs in the Dongjiang Basin

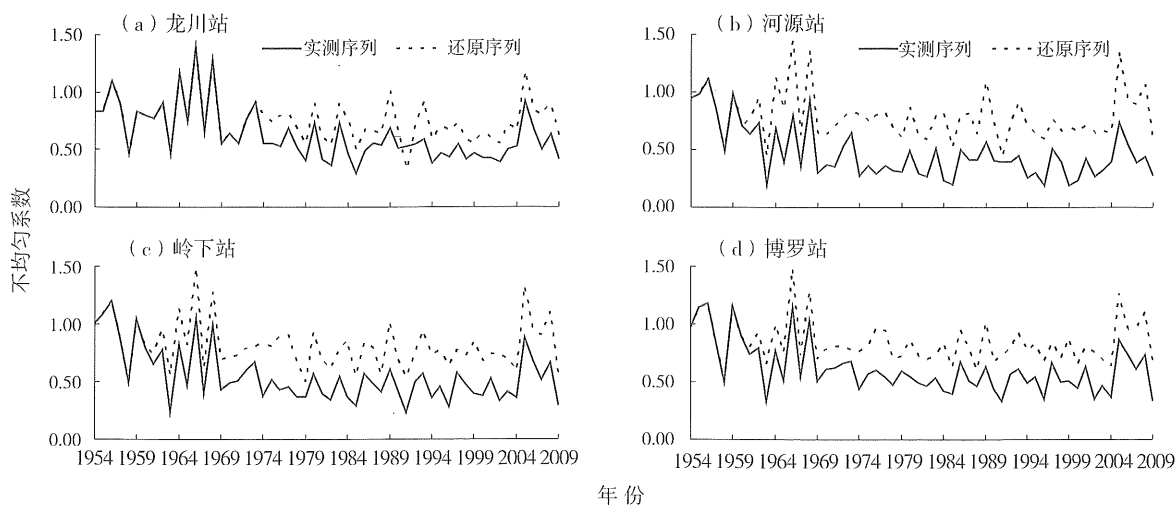


图 2 东江径流年内分配不均匀系数的年际变化

Fig. 2 Annual change of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

表 1 东江径流年内分配不均匀系数年序列统计特征

Table 1 Statistic characteristics of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

序号	站名	集水面积 km ²	多年平均值			年际变差系数		
			实测序列	还原序列	实测/还原	实测序列	还原序列	实测/还原
1	龙川	7 699	0.632	0.753	0.84	0.362	0.201	1.36
2	河源	15 750	0.470	0.792	0.59	0.482	0.211	1.81
3	岭下	20 577	0.555	0.818	0.68	0.415	0.207	1.64
4	博罗	25 325	0.618	0.845	0.73	0.348	0.186	1.58

2.3 不均匀系数年际变异特征

不失一般性，径流年内分配不均匀系数的年序列均变换为正态随机变量 $\{X(t), t = 1, 2, \dots, n\}$, $n = 56$ 为时间长度，以 $\{r_i, i = 1, 2, \dots, q\}, 1 < q < n$ 作为分割点，在时间序列上采取逐点分割的方式把原始序列分割成两部分， q 为时间序列分割点的个数，对应的为时间序列分割点的位置，通常可取 $r_i = 5, 6, \dots, n - 5$ 。参照似然比统计量^[11,14,16]和西沃兹信息统计量^[15,17]的计算方法，结果如图 3 - 4。若取显著性检验水平 $\alpha = 0.05$ ，对应的检验临界值分别为 3.090^[14]和 9.081^[17]，由此可判断存在变点的测站、序列及时间位置，并可对比被变点分割或最大检验统计量所在时间位置分割的两子序列特征值——均值和变差系数的变化状况，如表 2 - 表 4。

从均值变点识别结果来看（图 3），实测序列中龙川站 1964 - 1986 年、河源站 1958 - 1981 年、岭下站 1958 - 1981 年、博罗站 1958 - 1983 年的似然比统计量均超过检验临界值，表明东江径流不均匀系数存在均值变点的显著性。最大似然比统计量出现位置即时序均值变点位置，除河源站出现在

1962 年，其他 3 站均出现在 1968 年，且河源站 1968 年的似然比统计量也较大，仅次于 1962 年。变点前子序列的不均匀系数的多年均值介于 0.80 - 0.88，变点后的则明显下降，介于 0.40 - 0.54，与变点前相比 4 站分别下降了 38%、52%、41%、36%。还原序列则不存在均值变点，4 站最大似然比统计量也均出现在 1968 年，与分割点前相比 4 站分别下降了 19%、18%、18%、16%。

从方差变点识别结果来看（图 4），实测序列中龙川站 1968 - 1969 年、河源站 1959 - 1974 年、岭下站 1959 - 1972 年、博罗站 1959 - 1972 年的西沃兹信息统计量均超过检验临界值，表明东江径流不均匀系数的方差变点也同样显著。最大西沃兹信息量出现位置即方差变点位置均出现在 1968 年，变点前子序列的不均匀系数的年际变差系数介于 0.29 - 0.36，变点后则有所下降，介于 0.25 - 0.32，与变点前相比，分别下降了 14%、9%、22%、30%。还原序列同样均不存在方差变点，4 站的最大西沃兹信息统计量也均出现在 1968 年，但分割点后年际变差系数下降程度要大于实测序列，分别为 24%、28%、28%、32%。

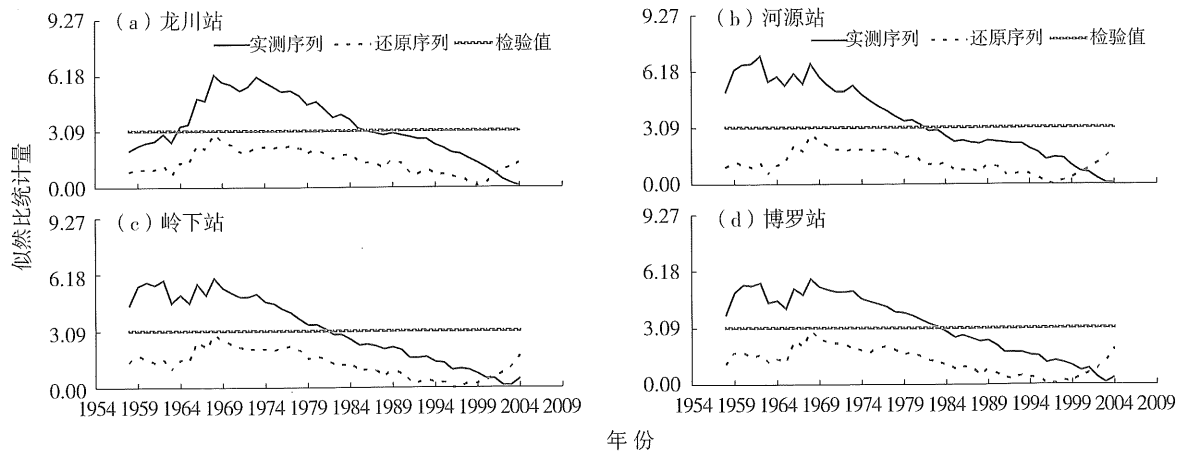


图 3 东江径流年内分配不均匀系数的似然比统计量变化

Fig. 3 Statistic change of the likelihood ratio of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

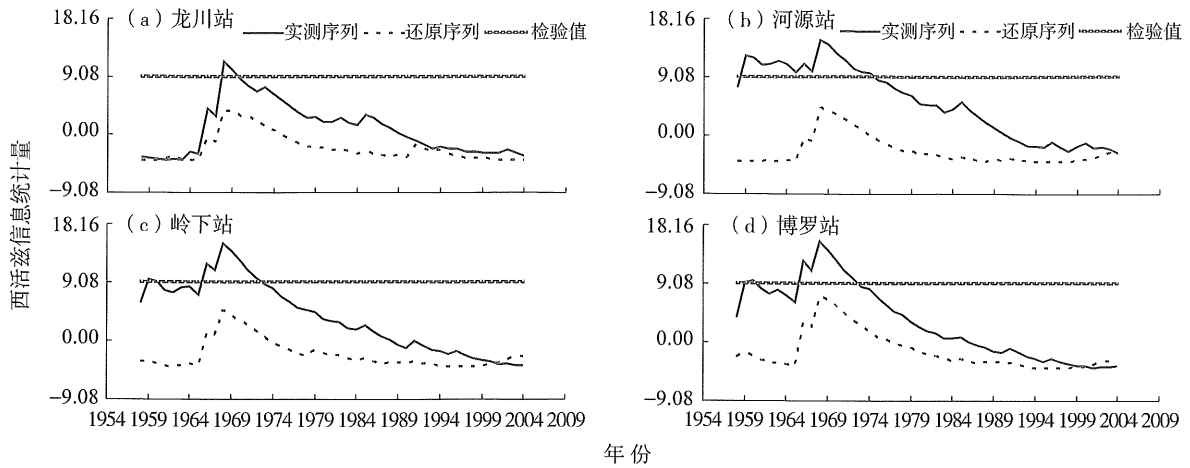


图 4 东江径流年内分配不均匀系数的西沃兹信息统计量变化

Fig. 4 Statistic change of the Schwarz information of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

表 2 东江径流年内分配不均匀系数的均值变点识别结果

Table 2 Time location of the change - point in the mean and characteristics comparison of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

序列	序号	站名	似然比统计量			多年均值对比		
			最大值	时序位置	有无变点	变点前	变点后	后/前
实测	1	龙川	6.229	1968	有	0.877	0.543	0.62
	2	河源	7.047	1962	有	0.828	0.401	0.48
	3	岭下	5.967	1968	有	0.795	0.467	0.59
	4	博罗	5.783	1968	有	0.838	0.537	0.64
还原	1	龙川	2.970	1968	无	0.877	0.707	0.81
	2	河源	2.685	1968	无	0.912	0.748	0.82
	3	岭下	2.866	1968	无	0.943	0.773	0.82
	4	博罗	2.847	1968	无	0.956	0.804	0.84

表 3 东江径流年内分配不均匀系数的方差变点识别结果

Table 3 Time location of the change-point in the variance and characteristics comparison of the nonuniform coefficient of annual streamflow distribution in the Dongjiang River

序列	序号	站名	西沃兹信息统计量			年际变差系数对比		
			最大值	时序位置	有无变点	变点前	变点后	后/前
实测	1	龙川	11.503	1968	有	0.289	0.248	0.86
	2	河源	14.778	1968	有	0.356	0.322	0.91
	3	岭下	15.191	1968	有	0.346	0.271	0.78
	4	博罗	15.626	1968	有	0.312	0.220	0.70
还原	1	龙川	3.807	1968	无	0.289	0.219	0.76
	2	河源	4.521	1968	无	0.301	0.216	0.72
	3	岭下	4.728	1968	无	0.284	0.204	0.72
	4	博罗	7.135	1968	无	0.262	0.168	0.64

3 结 论

采用参数变点识别方法, 不仅能够严格遵循统计假设检验来识别出河川径流年内分配特征年际变

异的时间位置, 而且能明确均值变点和方差变点两种类型及变点后的参数变化量。即使没有识别出变点, 也可根据最大检验统计量所处时间位置, 分析序列分布参数的最大分割点及变化特征。并通过构

建实测序列和还原序列,可分析导致河川径流年内分配特征变异的最主要贡献因素。研究表明:

3大水库还原后,东江径流年内分配不均匀系数,多年均值介于0.75~0.85,变差系数介于0.18~0.21。但受到3大水库径流调节作用,多年均值明显下降,介于0.47~0.63,下降了16%~41%;变差系数却明显增大,介于0.34~0.48,增大了36%~81%。

均值变点和方差变点的识别结果都显示,东江实测径流不均匀系数的参数变点普遍存在,显著变点出现在1968年。变点前(1954~1968年)的多年均值介于0.80~0.88,年际变差系数介于0.29~0.36。变点后(1969~2009年)的多年均值(0.40~0.54)和年际变差系数(0.25~0.32)均显著下降,分别下降了36%~52%和9%~30%。

3大水库径流还原后的不均匀系数均不存在变点,但最大检验统计量也均出现在1968年。一方面表明,导致东江河川径流年内分配不均匀系数的年际变异,主要贡献来自于3大水库的径流调节。另一方面也显示,还原3大水库径流调节作用后,1968年仍为不均匀系数年际变化特征的最大分割点。分割点后的多年均值下降,但下降程度(16%~19%)变小;年际变差系数下降,而且下降程度(24%~36%)甚至大于实测序列,表明存在其他因素显著影响着东江径流分配不均匀性的年际变化幅度,需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 汤奇成,程天文,李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. 地理学报,1982,37(4): 383-393.
- [2] 冯国章,李瑛,李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(2): 50-53.
- [3] 郑红星,刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展,2003,22(6): 585-590.
- [4] 李艳,陈晓宏,张鹏飞. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析[J]. 中山大学学报:自然科学版,2007,46(5): 113-116.
- [5] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6): 792-795.
- [6] 黄德治,谢平,陈广才,等. 北江下游三水站径流年内分配特征变化研究[J]. 水电能源科学,2008,36(4): 5-7.
- [7] 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.
- [8] 张运福,胡春丽,赵春雨,等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. 自然灾害学报,2009,18(2): 89-94.
- [9] 胡彩虹,王纪军. 汾河水库上游流域径流年内分配时程变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(6): 85-90.
- [10] 徐东霞,章光新. 嫩江径流年内变化特征分析[J]. 干旱地区资源与环境,2009,23(7): 48-51.
- [11] 涂新军,陈晓宏. 基于变点识别的区域河川径流量特征值变异研究[J]. 自然资源学报,2010,25(11): 1-8.
- [12] 涂新军,陈晓宏. 基于秩统计量枯水径流分布变点的非参数识别[J]. 水利学报,2009,40(5): 603-607.
- [13] 杨涛,陈永勤,陈喜,等. 复杂环境下华南东江中上游流域筑坝导致的水文变异[J]. 湖泊科学,2009,21(1): 135-142.
- [14] 杨喜寿,杨洪昌. 气候时间序列变点的推断[J]. 大气科学,1996,20(1): 47-53.
- [15] 涂新军,陈晓宏. 基于西沃兹信息准则的水文时序方差变点识别[J]. 水文,2008,165(3): 14-17.
- [16] MILLER L H. Table of percentage point of Kolmogorov statistics [J]. Journal of the American Statistical Association, 1956, (51): 11-21.
- [17] CHEN Jie, GUPTA A K. Testing and locating variance change point with application to stock price [J]. Journal of the American Statistical Association, 1997, 92: 739-747.