

长江入海径流量突变性和趋势性分析

刘嘉琦¹, 龚政^{1,2}, 张长宽¹

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为研究气候变化和人为因素影响下长江入海口径流的变化趋势,采用长江大通水文站1950~2009年逐日平均流量资料,运用Pettitt突变点检验法,对年、枯季、洪季、汛后及逐月平均流量序列进行突变点分析。利用突变点对时段平均流量序列进行分段,并采用M-K趋势性检验法分析各段及整体序列的变化趋势。结果表明,长江年平均入海径流量序列在20世纪50年代中期、70年代末期、80年代末期和21世纪初,均发生了一定的突变,但突变趋势并不显著。

关键词:入海径流; 突变性; 趋势性; Pettitt检验; M-K趋势检验; 长江; 大通站

中图法分类号: TV121 **文献标志码:** A

1 研究背景

长江入海水沙通量巨大,对河口地貌、沉积体系、海岸带和大陆架的自然和生态环境有重要影响。长江流域位于亚热带地区,气候湿润,多年平均降水量约1 100 mm,其中约50%转换为径流入海。据不完全统计,长江流域兴建了46 000多座水坝,7 000多座涵闸,这些水利工程的修建在一定程度上改变了长江的径流特性^[1]。以往对于长江年径流量变化趋势的研究大致认为,上游宜昌站从20世纪70年代开始出现径流减少趋势;中游汉口站径流在1956~1998年间呈负增长趋势,从1999年开始出现正增长趋势;下游大通站径流在1956~1995年间呈负增长趋势,1998~2000年间出现了持续的正增长趋势^[2]。大通水文站距离河口段(徐六泾)近600 km,但大通-徐六泾河段内无大的支流汇入,大通出口断面控制着长江流域94%的汇水面积。因此,国内外都将大通水文站作为长江入海水沙通量的考察站^[3]。长江入海径流量巨大,大通站多年平均(1923~2004年)径流量为9 156

亿 m³。大通站流量年际波动大,年最大流量为43 100 m³/s,最小为21 400 m³/s,后者约为前者的1/2;年洪季最大流量为64 630 m³/s,最小为27 800 m³/s,后者约为前者的2/5;年枯季最大流量为24 430 m³/s,最小为12 150 m³/s,后者约为前者的1/2。受东亚季风的影响,长江入海径流量受气候变化影响,年内变化也十分明显^[4-6]。大通站月均流量6 800~84 200 m³/s,枯季径流只占全年总径流的29.11%。20世纪40年代中后期到50年代中期大通站流量较大,随后减小;到70年代中期出现极小值,而后又逐渐升高;到90年代末期出现极大值后又逐渐下降;至2009年流量仍较小^[7-8]。

以往关于长江径流变化的研究,主要基于长系列流量资料^[1],采用周期图法、最大熵谱法^[9]、Mann-Kendall趋势分析法^[10]等,对年、汛期、非汛期和月径流量变化过程^[1]、三峡工程建成运用后河口盐水入侵、感潮河段极值水位^[9],以及全球变暖后长江水灾形势、径流年内分配^[10]等问题进行分析。本文基于大通站1950~2009年逐日平均流量资料,运用Pettitt突

收稿日期:2012-12-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB429001);国家科技支撑计划课题(2012BAB03B02);新世纪优秀人才支持计划资助

作者简介:刘嘉琦,男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: flying@hhu.edu.cn

通讯作者:龚政,男,副教授,博士,主要从事河口海岸动力学、水环境及泥沙运动的研究。E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

变点检验法和 Mann - Kendall 趋势检验法(简称 M - K 法),对长江入海径流量的年际、年内变化进行突变性和趋势性分析,探讨气候变化与人类活动影响对径流变化的驱动性,为预测入海径流变化趋势提供依据。

2 突变点分析

2.1 Pettitt 突变点检验法^[11-13]

Pettitt 突变点检验法是基于非参数检查水文时间序列突变点的一种检测方法。该方法计算较简便,能够较好地识别水文时间序列的突变点,在突变点检验中应用较多,且物理意义清晰。该检验基于 Mann - Whitney 的统计函数 $U_{i,T}$,认为两个样本 x_1, \dots, x_i 和 x_{i+1}, \dots, x_T 均来自于同一序列分布,对于连续的序列, $U_{i,T}$ 和 $V_{i,T}$ 由下列公式计算:

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T}, \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (1)$$

其中:

$$U_{1,T} = V_{1,T} \quad (2)$$

$$V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

因此, $|U_{i,T}|$ 最大时,对应的 x_i 为可能的突变点(change - point)。当突变点的 $U_{i,T} > 0$ 时,该序列具有向下突变趋势,反之则具有向上突变趋势^[13]。可能突变点的显著性水平由下式计算:

$$P_{0A}(t) = 2\exp[-6U_{i,T}^2/(T^3 + T^2)] \quad (5)$$

当 $P_{0A}(t) < 0.5$ 时,该点为有效突变点。当判断出第一有效突变点后,对该突变点两侧的序列分别重复上述检验过程,相继判断第二有效突变点、第三有效突变点等^[14]。

2.2 各时段突变点分析

运用 Pettitt 突变点检验法,对大通站年、枯季、洪季、汛后及各月平均流量序列(1950 ~ 2009 年)分别进行了突变点分析。长江洪水主要由暴雨形成,洪水发生时间、地区分布与暴雨相应。长江流域地域辽阔、地形复杂,季风气候十分典型,年降水量和暴雨的时空分布很不均匀,洪水出现时间差异较大。本文以大通站流量作为基础资料,针对长江下游大通站所在区域的水文特点,按照枯季 1 ~ 3 月、洪季 6 ~ 8 月、汛后 10 ~ 11 月分别进行水文情势分析。

表 1 为大通站各时段平均流量系列的突变点分析成果。由表 1 可以看出,1,2,3 月及枯季(1 ~ 3 月)平均流量序列第一突变点主要发生在 1987,1988 年;5

月平均流量序列突变点发生在 1977 年;7 月平均流量序列第一、第二突变点分别发生在 2003 年和 1988 年;10,11 月及汛后(10 ~ 11 月)平均流量序列第一突变点发生在 1989 ~ 1990 年,第二突变点发生在 1998 ~ 1999 年;其余月份、年平均及洪季平均(6 ~ 8 月)流量系列无显著突变点。为了证明突变点检验的合理性,本文将典型时段平均流量序列 Pettitt 值($U_{i,T}$)曲线与时段平均流量序列二次拟合曲线进行了比较分析。

表 1 各时段平均流量序列(1950 ~ 2009 年)突变点

时段平均流量序列	第一突变点	第二突变点	第三突变点
1 月	1988	-	-
2 月	1988	-	-
3 月	1979	1961	-
4 月	-	-	-
5 月	1977	-	-
6 月	-	-	-
7 月	2003	1988	-
8 月	-	-	-
9 月	-	-	-
10 月	1989	1998	-
11 月	1990	1999	1954
12 月	-	-	-
年平均	-	-	-
枯季(1 ~ 3 月)	1987	1955	-
洪季(6 ~ 8 月)	-	-	-
汛后(10 ~ 11 月)	1989	1998	1955

注:“-”表示序列无有效突变点。

图 1 为大通站年平均流量序列 Pettitt 值曲线,以及年平均流量序列二次拟合曲线。从 Pettitt 曲线可以看出,在 20 世纪 50 年代中期和 21 世纪初,分别出现了 $U_{i,T}$ 极大值,表示该两个时段内呈现出一定的向下突变趋势^[7]。在 20 世纪 70 年代末期和 80 年代末期,分别出现了 $U_{i,T}$ 极小值,表示该两个时段内呈现出一定的向上突变趋势。上述变化趋势与图 1 中年平均流量序列的直观变化趋势是一致的。但是,显著性水平检验发现,上述突变并不显著,即近 60 a 来,大通站年平均流量序列没有显著的突变点。大通站年平均流量序列(1950 ~ 2009 年)二次拟合曲线表现出总体缓慢减小趋势。

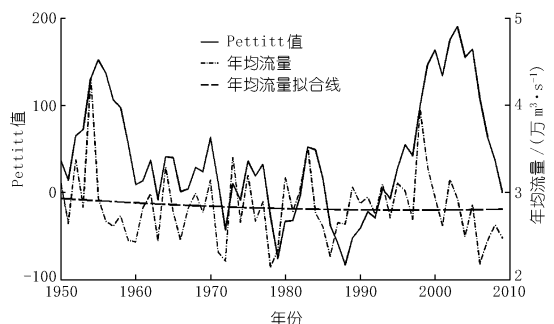


图 1 大通站年平均流量序列 Pettitt 值曲线及二次拟合曲线

图2为1,2,3月及枯季(1~3月)平均流量 Pettitt 值曲线及枯季平均流量序列二次拟合曲线。由图2可以看出,3月及枯季平均流量在20世纪50年代中后期发生了向下突变,80年代发生了向上突变,且向上突变表现得更为显著。枯季平均流量序列二次拟合曲线在以1988~1989年为第一突变点的两侧分别表现出缓慢变化趋势;在第二突变点(1955~1956年)之前也为缓慢变化趋势。

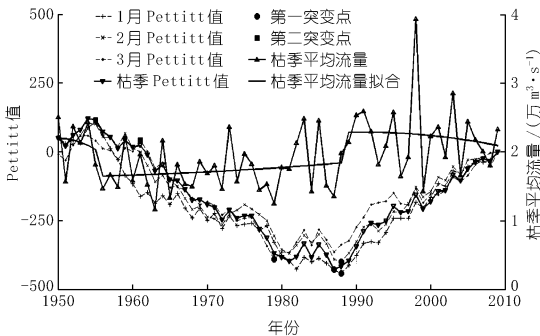


图2 大通站1,2,3月及枯季(1~3月)平均流量序列 Pettitt 值曲线及二次拟合曲线

图3为7月平均流量 Pettitt 值曲线及7月平均流量序列二次拟合曲线。7月平均流量序列的第一和第二有效突变点分别发生在2003年(向下突变)和1988年。1988年之前趋势表现平缓略带上升。1988~2003年表现为加速变化趋势。2003年之后为下降趋势。

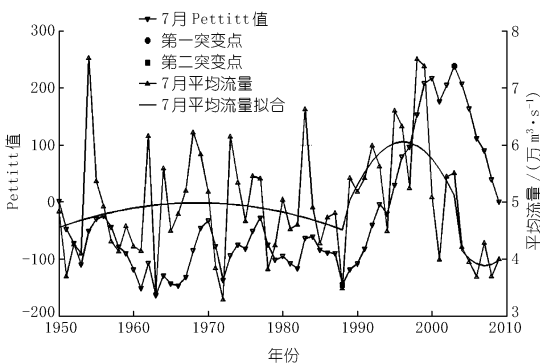


图3 大通站7月平均流量序列 Pettitt 值曲线及二次拟合曲线

图4为10,11月及汛后(10~11月)平均流量 Pettitt 值曲线及汛后平均流量序列二次拟合曲线。由图4可以看出,10,11月及汛后平均流量第一突变点发生在20世纪80年代末期,第二突变点发生在20世纪90年代末期,第三突变点发生在20世纪50年代中期,且均为向下突变。汛后平均流量序列二次拟合曲线在以1988~1989年为第一突变点的左右侧,分别表现出缓慢变化趋势,在1998年第二突变点之后表现为

快速下降趋势。

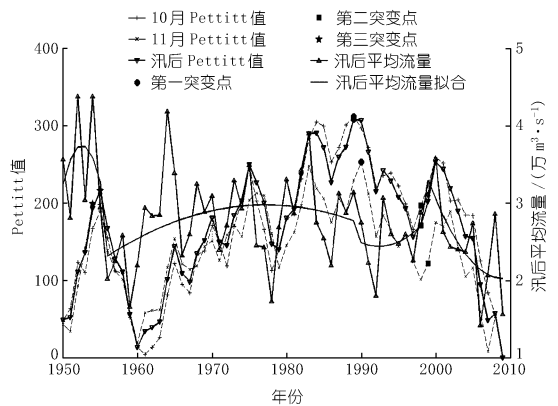


图4 大通站10,11月及汛后(10~11月)平均流量序列 Pettitt 值曲线及二次拟合曲线

3 趋势性分析

3.1 M-K 趋势检验法

假定样本容量为 n 的时间序列变量 x_1, x_2, \dots, x_n , 先确定其所有对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中 $x_i < x_j$ 的出现个数(设为 p), 顺序 (i, j) 的全集是: $(i = 1, j = 2, 3, 4, \dots, n), (i = 2, j = 3, 4, 5, \dots, n), \dots, (i = n - 1, j = 1)$ 。如果按顺序前进的值全部大于前一值, 即为一种上升趋势, $p = (n - 1) + (n - 2) + \dots + 1 = (n - 1)n/2$; 如果按顺序前进的值全部小于前一值, 则 $p = 0$, 即为下降趋势。由此可知, 对无趋势的序列, p 的数学期望 $E(p) = n(n - 1)/4$ 。

检验统计量:

$$U = \frac{\tau}{\{\text{Var}(\tau)\}^{1/2}} \quad (6)$$

其中:

$$\tau = \frac{4p}{n(n - 1)} - 1 \quad (7)$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n + 5)}{9n(n - 1)} \quad (8)$$

$\text{Var}(\tau)$ 表示方差。当 n 大于10时, 认为 U 收敛于标准正态分布。原假设为无趋势, 当给定显著水平 α (一般取0.1) 后, 在正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2}$ 。当 $|U| < |U_{\alpha/2}|$ 时, 接受原假设, 即趋势不显著; 当 $|U| \geq |U_{\alpha/2}|$ 时, 拒绝原假设, 即趋势显著。

3.2 各时段趋势性分析

在大通站入海径流量突变点分析结果的基础上, 对年、枯季、洪季、汛后及逐月平均流量序列用突变点进行分段, 采用 M-K 趋势性检验法分析各段及整体序列的变化趋势。由于 M-K 检验法要求最小序列长度为10, 因此, 当两突变点间序列长度小于10时, 以

其中一突变点向外延长至下一突变点或序列末。表 2 为长江大通站年、枯季、洪季、汛后及逐月平均流量序列(1950~2009 年)的 M-K 值统计结果,其中,显著水平 $\alpha = 0.1$,置信限 $U_{\alpha/2} = \pm 1.96$ 。

近 60 年来,长江入海年平均径流量呈缓慢下降趋势,但下降趋势不显著,这与图 1 中大通站年平均流量序列二次拟合线总体下降趋势是一致的。1,2,3 月和枯季表现为显著上升趋势(3 月 M-K 值接近置信限);5,10,11 月和汛后表现出显著下降趋势(5,11 月和汛后的 M-K 值接近置信限);除 7 月呈现不显著上升趋势外,其余时段均呈现不显著下降趋势。

突变点形成的分段序列的变化趋势与整体序列的变化趋势可能不一致,这与突变点类型有关。以 2 月份为例,1988 年的突变点将整体序列(1950~2009 年)划分成 1950~1988 年与 1988~2009 年两个分段序列,其均呈不显著下降趋势,而 1950~2009 年整体序列呈显著上升趋势。经分析,原因如下:在突变点分析中,一般把突变点分为 4 类:均值突变、变率突变、转折突变和翘翘板突变^[15]。2 月平均流量序列可能因气候突变或者人为因素影响,在 1988 年出现了翘翘板突变,1988~2009 年分段序列的 2 月平均径流量(2.23 万 m³/s)大于 1950~1988 年分段序列(1.78 万 m³/s),从而形成了向上突变。因此,尽管分段序列呈下降趋势,但向上突变点仍可能使整体序列呈上升趋势。除 2 月外,出现分段序列变化趋势与整体序列变化趋势不一致现象的还有 1,5 月等,可以初步推断,在其突变点发生年份附近,可能受到较大的气候变化或者人为因素的影响。

从表 2 中可以发现,趋势性检验的时段有些是重叠的^[12],如 7 月份第一突变点形成的 1988~2003 年与 1988~2009 年分段序列。这是由于 M-K 法要求最小序列长度为 10,无法检验 2003~2009 年分段序列的趋势性,因此分析 1988~2003 年与 1988~2009 年两个分段序列。结果表明,1988~2003 年与 1988~2009 年分段序列分别呈不显著的上升和下降趋势(后者较前者显著)。因此,可以判断,2003~2009 年分段序列应为相对显著的下降趋势,这与图 3 中 2003~2009 年分段序列 7 月份平均流量趋势性是一致的。类似的,可以判断,1950~1954 年间 11 月平均入海径流量呈下降趋势;1950~1955 年间枯季平均入海径流量呈下降趋势,这与图 2 中趋势线一致。1950~1955 年间汛后平均入海径流量呈下降趋势,这与图 4 中趋势线一致。

表 2 中,长江年平均入海径流量总体为 60 a 间无突变点缓慢下降。20 世纪初,长江上游区域降温、降

水减少是造成入海径流量缓慢下降的原因^[2],没有突变点的是因为在这 60 a 间,长江流域的气候并没有发生任何的突变。

表 2 长江大通站各时段平均流量序列 M-K 值统计结果

时段平均 流量序列	各时段		1950~2009 年			
	时间区间	M-K 值 趋势	是否 显著	M-K 值 趋势	是否 显著	
1 月	1950~1988	-0.06 降	-	2.65 升	显著	
	1988~2009	-0.08 降	-			
2 月	1950~1988	-0.74 降	-	2.00 升	显著	
	1988~2009	-0.31 降	-			
3 月	1950~1961	-0.63 降	-	1.84 升	-	
	1961~1979	-1.33 降	-			
	1979~2009	0.59 升	-			
4 月	无突变点			-0.42 降	-	
5 月	1950~1977	0.51 升	-	-1.90 降	-	
	1977~2009	0.09 升	-			
6 月	无突变点			-0.91 降	-	
7 月	1950~1988	0.25 升	-	0.55 升	-	
	1988~2003	0.90 升	-			
	1988~2009	-1.66 降	-			
8 月	无突变点			-0.29 降	-	
9 月	无突变点			-0.52 降	-	
10 月	1950~1989	-0.12 降	-	-2.31 降	显著	
	1989~1998	-0.27 降	-			
	1998~2009	-2.61 降	显著			
11 月	1950~1990	-0.22 降	-	-1.84 降	-	
	1954~1990	0.86 升	-			
	1990~1999	0.09 升	-			
	1999~2009	-1.79 降	-			
12 月	无突变点			-0.03 降	-	
	无突变点			-0.57 降	-	
枯季(1~3 月)	1950~1987	-0.79 降	-	1.84 升	-	
	1955~1987	0.09 升	-			
	1987~2009	0.18 升	-			
洪季(6~8 月)	无突变点			-0.29 降	-	
汛后(10~11 月)	1950~1989	-0.35 降	-	-1.84 降	-	
	1955~1989	1.26 升	-			
	1989~1998	-1.16 降	-			
	1998~2009	-1.51 降	-			

注: $\alpha = 0.1, U_{\alpha/2} = \pm 1.96$;时间区间为根据 Pettitt 法判断的突变点划分而成;表中“-”表示趋势不显著。

此外,从表 2 还可以看出,在 1988 年之后,1,2 月整体后 22 a 的年均径流量相对 1988 年之前的 38 a 有明显的抬升。在枯季的径流补给可能加剧枯季入海径流量上升趋势。20 世纪 80 年代以来,全球气候变暖,可能是导致 1,2 月的均值突变的原因之一,不过考虑到 1,2 月流量变化较为剧烈,同时上游水库群在枯季对长江的径流补给也可能加剧枯季入海径流量上升趋势。

总体来看:长江 1,2,3 月及枯季(1~3 月)平均入海径流量序列在 20 世纪 50 年代中后期和 80 年代发生了突变;在 1950~2009 年间表现为显著上升趋势,

可能与近 50 a 全球气候变暖有关,同时上游水库群在枯季对长江的径流补给也可能对该现象有加剧作用。长江 6,7,8 月及洪季(6~8 月)平均入海径流量序列中,仅 7 月平均流量系列分别在 2003 年和 1988 年发生了显著突变。在 1950~2009 年间,7 月平均入海径流量序列呈现不显著上升趋势,6,8 月及洪季平均入海径流量序列呈现不显著下降趋势,具体原因需进一步研究。长江 10,11 月及汛后(10~11 月)平均入海径流量分别在 20 世纪 80 年代末期和 90 年代末期发生了显著突变;在 1950~2009 年间表现为显著的下降趋势。考虑到 1998 年出现的大洪水,可以考虑是否由当时集中降雨所导致。

4 结 论

(1) 长江年平均入海径流量序列在 20 世纪 50 年代中期、70 年代末期、80 年代末期和 21 世纪初,均呈现出一定的突变,但该突变并不显著;在 1950~2009 年间呈不显著的缓慢下降趋势。

(2) 对于年内各时间段而言,长江入海径流枯季(1~3 月)序列为下降趋势,但由于气候和上游建筑物影响,20 世纪 80 年代后的枯季时期流量大于 80 年代之前,洪季(6~8 月)并无明显突变和统一趋势,其中 7 月份在 1988 年后有较显著下降趋势。汛后(10,11 月)序列或因气候变化而显著呈下降趋势。其他月份流量趋势介于以上时间段之间。

参 考 文 献:

- [1] 邹振华,李琼芳,夏自强,等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,(6):622-626.
- [2] 张瑞,汪亚平,潘少明. 近 50 年来长江入海径流量对太平洋年代

际震荡变化的响应[J]. 海洋通报,2011,(5):572-577.

- [3] 张瑞,汪亚平,潘少明. 长江大通水文站径流量的时间系列分析[J]. 南京大学学报:自然科学版,2006,(4):423-434.
- [4] Xu K, Milliman J D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3-4): 276-283.
- [5] Yang S, Zhao Q, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1-4): 56-71.
- [6] 张瑞,汪亚平,潘少明. 近 50 年来长江入河口区含沙量和输沙量的变化趋势[J]. 海洋通报,2008,(2):1-9.
- [7] 方娟娟,李义天,孙昭华,等. 长江大通站径流量变化特征分析[J]. 水电能源科学,2011,29(5):9-12.
- [8] Z Gong, K Zhang C, M Wan L. Tidal level response to sea-level rise in the Yangtze Estuary[J]. *China Ocean Engineering*, 2012, 26(1): 109-122.
- [9] 朱巧云,王珏,徐竣. 长江口河段近期水沙特性研究[J]. 人民长江,2011,42(13):79-82.
- [10] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,(5):589-594.
- [11] 蔺学东,张德铨,姚治君,等. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析[J]. 地理科学进展,2007,(3):58-67.
- [12] Xuedong L, Yili Z, Zhijun Y, et al. The trend on runoff variations in the Lhasa River Basin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, (1):95-106.
- [13] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, (2):126-135.
- [14] 樊辉,刘艳霞,黄海军. 1950~2007 年黄河入海水沙通量变化趋势及突变特征[J]. 泥沙研究,2009,(5):9-16.
- [15] 符滨斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,(4):482-493.

(编辑:李慧)

Mutability and variation trend of discharges into sea from Yangtze River

LIU Jiaqi¹, GONG Zheng^{1,2}, ZHANG Changkuan¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology - water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Jiangsu 210098, China)

Abstract: To study the variation of runoff trend in Yangtze River Estuary under the influence of climate change and human factors, based on the daily-averaged discharges of Datong Station on Yangtze River, Pettitt mutability point tests are employed to detect the mutability point of discharge series in a year, dry season, flood season, flood recession period and each month, respectively. The average discharge series are divided into several segments by mutability points. The tendency of discharges of each segment or as a whole is explored by Mann-Kendall method. The results show that the mutation point of annual discharge series into the sea appeared in middle 50s, late 70s and 80s of 20th Century, and early 21st Century; however, the mutation trend is not obvious.

Key words: discharge into the sea; mutability; trend; Pettitt mutation point test; Mann-Kendall trend test; Yangtze River; Datong Station