

# Change-Point Detection and Analysis of Hydrological Time Series in Xitiaoqi River Basin\*

Linghua Qiu<sup>1</sup>, Dingzhi Peng<sup>1#</sup>, Hejuan Lin<sup>2</sup>, Mingyue Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing

<sup>2</sup>Bureau of Taihu Lake Basin, Shanghai

Email: #dzpeng@bnu.edu.cn

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2013; revised: Nov. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** The change-point analysis of hydrological time series would help to find the evolution of hydrological processes and provide the scientific guidance for sustainable utilization of water resources. As the crucial headwaters of Taihu Lake basin, Xitiaoqi River basin was chosen as the study case. Under the significance level 5%, Mann-Kendall, Pettitt, Moving T test, Yamamoto and the residual mass curve combined rank test methods were applied to compare and analyze the change-point of precipitation and streamflow from 1972 to 2010 in the basin. It is found that the change-point of precipitation and streamflow time series both happened at the year 1999 in Xitiaoqi River basin. The result would provide the basis for the further studies on identification for the impact of climate change and human activities on hydrological processes.

**Keywords:** Change-Point; Mann-Kendall; Pettitt; Yamamoto; Moving T Test

## 太湖西苕溪流域水文序列突变检测比较和分析研究\*

邱玲花<sup>1</sup>, 彭定志<sup>1#</sup>, 林荷娟<sup>2</sup>, 张明月<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京师范大学水科学研究院, 北京

<sup>2</sup>水利部太湖流域管理局, 上海

Email: #dzpeng@bnu.edu.cn

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:** 探索流域水文变点可发现其水文演变规律, 为水资源的可持续利用提供科学指导。本文以太湖流域的重要水源西苕溪流域为研究对象, 在5%显著性水平下, 采用 Mann-Kendall、Pettitt、滑动 T 检验、Yamamoto、差积曲线 - 秩检验联合识别法等分析和比较了 1972~2010 年流域降水和径流的变点。结果表明: 西苕溪流域降水和径流的变点均发生在 1999 年, 该结果为进一步甄别气候变化和人类活动的贡献率提供了研究基础。

**关键词:** 变点; Mann-Kendall; Pettitt; Yamamoto; 滑动 T 检验

### 1. 引言

随着社会经济的快速发展, 人类活动和气候变化对流域水资源产生了极大的影响, 水文序列的变化趋

势亦被改变<sup>[1]</sup>。区分气候变化与人类活动对水文过程的影响, 量化两种驱动因素的贡献率, 有助于探寻气候变化与人类活动影响下的水文演变规律, 合理开发利用水资源, 使水资源可持续发展。水文序列突变检测分析则是定量甄别气候变化与人类活动对水文过程影响的基础。水文序列变点检测分析的方法很多<sup>[2]</sup>,

\*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAC21B02)。

作者简介: 邱玲花(1989-), 女(汉), 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向为: 流域水文模拟研究。

#通讯作者。

各类方法均有其适应性及局限性<sup>[3]</sup>。在多种方法检测分析同一水文序列的变异点时, 可能会出现检测结果相异的情况<sup>[4]</sup>。但多种方法可达到相互验证的效果, 增强检验结果的可靠性。

太湖流域人口密集, 经济发展迅猛, 城市化进程快, 人类活动剧烈。西苕溪是太湖的主要水源地, 为太湖流域提供工农业用水和生活用水, 具有重要的地位。本文以太湖流域上游西苕溪流域为例, 采用多种变点检测方法分析和比较流域水文序列的变异特征, 为西苕溪流域气候变化与人类活动对水文过程影响的量化甄别提供研究基础, 进而为太湖流域水资源科学调控与管理提供科学依据与技术支持。

## 2. 研究区概况

西苕溪发源于天目山脉的龙王山, 地势西南高东北低。流域海拔在 1500 m 以内, 干流长 145 km, 流域面积 1355 km<sup>2</sup>, 占太湖流域总面积的 6%。流域属亚热带季风气候区, 多年平均降水量 1626 mm。

选取流域 1972~2010 年的降水和径流序列进行变点分析, 其中降水为流域面雨量数据, 主要由 27 个雨量站(分布如图 1)数据使用反距离权重(Inverse Distance Weighted, IDW)法<sup>[5]</sup>得到。径流序列为流域出口横塘村水文站的流量数据。

## 3. 变点检测方法

Mann-Kendall (MK)非参数检验法<sup>[6,7]</sup>是世界气象组织推荐的检验方法<sup>[8]</sup>, 已广泛应用于检测水文气象要素时间序列的趋势或变异。该方法构造了同一水文序列的两个统计变量, 若这两个统计变量的曲线出现交点且其交点位于临界线之内, 则该交点为突变发生的点。

Pettitt 非参数检验法是基于 Mann-Whitney 的统计函数<sup>[9]</sup>确定其统计量的最大值为最显著的突变点。该方法有一定的物理意义, 能判断变点位置、数量及其是否在统计意义上显著。

Yamamoto 法是人为设定基准年, 将序列分为前后两个子序列, 采用信噪比  $S/N$  来表征突变指数<sup>[10]</sup>。

$$S/N = \frac{|x_1 - x_2|}{S_1 + S_2}, \text{ 其中 } x_1, x_2, S_1, S_2 \text{ 分别为基准年 } n_1$$

年及基准年后  $n_2$  时间段内的平均值和标准偏差。对于水文序列的  $S/N$  时间序列, 当  $S/N > 1.0$  时则在该基准

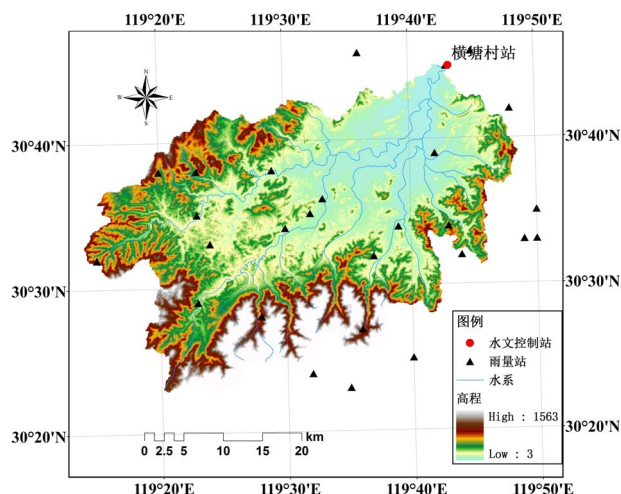


Figure 1. Topographic map of Xitiao River basin  
图 1. 西苕溪流域图

点发生突变。

滑动 T 检验法(Moving T Test, MTT)通过分析时间序列可能变异点前后两个样本的方差构造 T 统计量<sup>[11]</sup>。若统计量值通过置信水平检验, 则使统计量达到最大值的点为最可能的变异点。该方法主要用于检验两样本均值的显著性差异。

差积曲线-秩检验联合识别法首先通过序列的差积曲线初步识别变异点, 再使用秩检验法进行精确检验<sup>[12,13]</sup>。该方法假设少, 检验过程简单直观。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 降水变点检测与分析

由流域降水的差积曲线(图 2)初步选定 1999 年为变异点, 而其秩检验得到统计量  $|U| = 4.93 > 1.96$ , 因此, 差积曲线-秩检验联合识别法的结果表明流域降水在 1999 年变异显著。滑动 T 检验统计值在 1998、1999 和 2000 年均超出临界线(图 3), 滑动 T 检验的结果是在此三点上可能发生变异。而 Yamamoto 法发现流域降水在 1999、2000 和 2005 年可能发生变异(图 4)。滑动 T 检验和 Yamamoto 法统计值均在 1999 年出现最大值, 表明这两种方法检测在 1999 年出现突变的可能性最大。综合以上差积曲线-秩检验联合识别法、滑动 T 检验和 Yamamoto 法三种方法对降水的检测分析和比较, 可确定西苕溪流域降水的突变发生在 1999 年。

### 4.2. 径流变点检测与分析

根据径流的差积曲线(图 5)初步选定变异点为

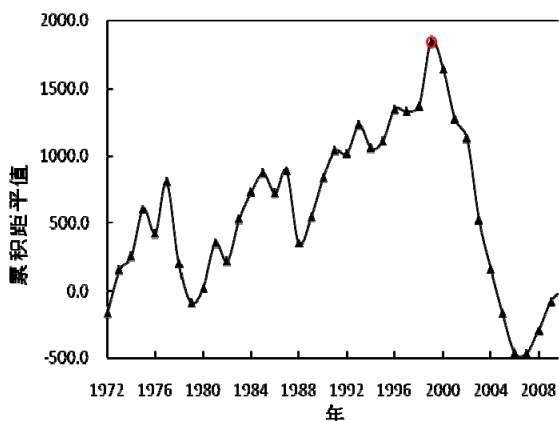


Figure 2. Residual mass curve of precipitation from 1972 to 2010 in Xitiao River basin  
图 2. 西苕溪流域 1972~2010 年降水差积曲线

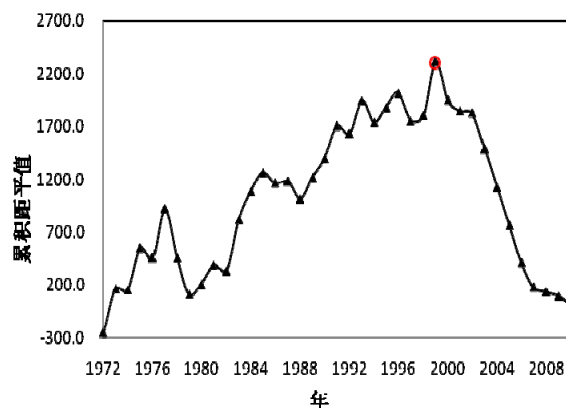


Figure 5. Residual mass curve of streamflow from 1972 to 2010 in Xitiao River basin  
图 5. 西苕溪流域 1972~2010 年径流差积曲线

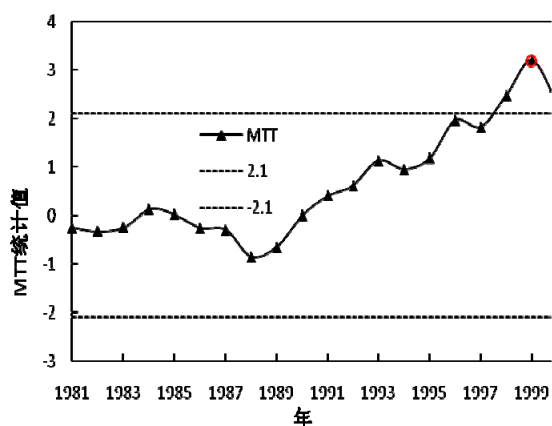


Figure 3. MTT statistical curve of precipitation from 1972 to 2010 in Xitiao River basin  
图 3. 西苕溪流域 1972~2010 年降水 MTT 统计曲线

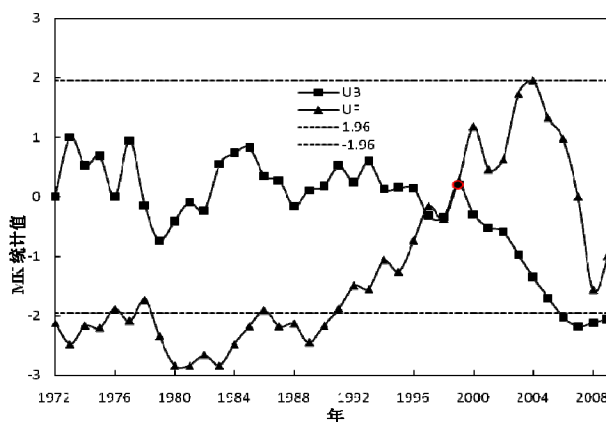


Figure 6. MK statistical curve of streamflow from 1972 to 2010 in Xitiao River basin  
图 6. 西苕溪流域 1972~2010 年径流 MK 统计曲线

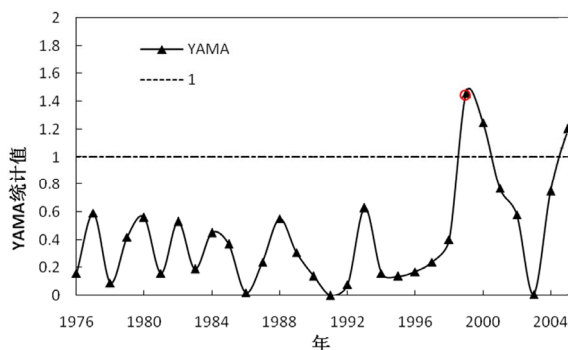


Figure 4. Yamamoto statistical curve of precipitation from 1972 to 2010 in Xitiao River basin  
图 4. 西苕溪流域 1972~2010 年降水 Yamamoto 统计曲线

1999 年, 该点的秩检验统计值  $|U| = 4.93 > 1.96$ , 即差积曲线-秩检验联合识别法检测出径流在 1999 年发生突变。Mann-Kendall 统计曲线(图 6)在临界线以内出现两个交点, 即可能在 1996 和 1999 年发生突变。

Pettitt 法(图 7)识别出径流在 1999 年可能发生变点, 且滑动 T 检验法(图 8)亦检测出在 1999 年可能发生突变。结合差积曲线-秩检验联合识别法、Mann-Kendall、Pettitt 和滑动 T 检验法四种方法检测结果, 可确定该流域径流在 1999 年发生突变, 这也与 Zhang 等<sup>[14]</sup>的研究成果较一致。

### 4.3. 西苕溪流域突变成因分析

通过以上多种变异检测方法分析比较结果可知西苕溪流域降水和径流序列均发生了突变, 一些学者也对其突变成因进行了分析。如高伟等<sup>[15]</sup>分析发现降雨量变化是造成西苕溪流域径流减少的主要因素, 人类活动影响相对较小。Zhang 等<sup>[14]</sup>通过定量评估气候变化与人类活动对西苕溪流域径流的影响发现人类活动影响强于气候变化。西苕溪虽处太湖流域上游,

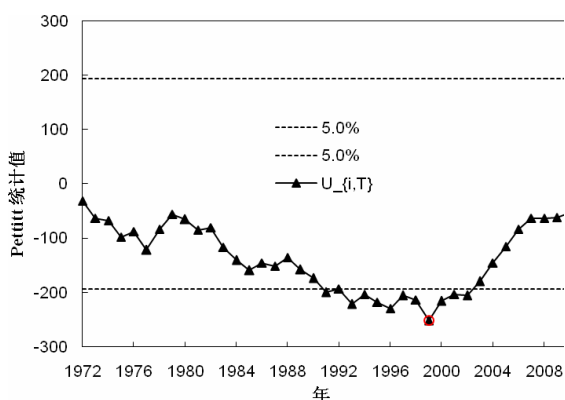


Figure 7. Pettitt statistical curve of streamflow from 1972 to 2010 in Xitiao River basin

图 7. 西苕溪流域 1972~2010 年径流 Pettitt 统计曲线

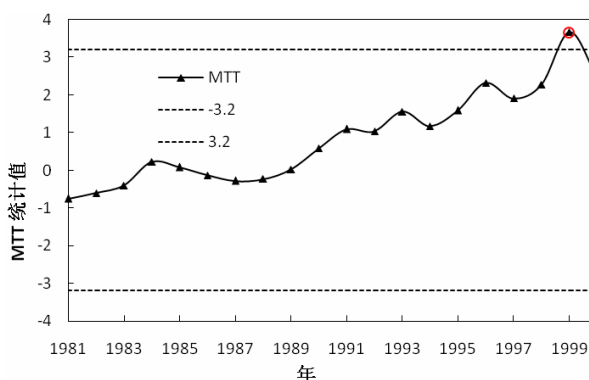


Figure 8. MTT statistical curve of streamflow from 1972 to 2010 in Xitiao River basin

图 8. 西苕溪流域 1972~2010 年径流 MTT 统计曲线

但流域内水利工程、水土保持等也使得径流减少<sup>[16]</sup>, 流域内城镇化使得土地利用类型、土壤类型的改变亦会对径流产生较大影响<sup>[17,18]</sup>。降水序列发生突变主要是受气候变化驱动, 其气候变化的导致因素可能是自然变率, 也可能是人类活动导致 CO<sub>2</sub> 等温室气体增加改变气候的结果。径流序列突变的发生则为气候变化和人类活动的双重影响。气候变化通过影响气温、降水、蒸散发等水循环要素的变化趋势或分布而影响水循环。人类活动改变流域下垫面直接对蒸散发、径流等水文要素产生影响<sup>[19]</sup>。本文采用多种检测分析方法对西苕溪流域降水和径流突变点的分析和比较结果, 为进一步甄别气候变化和人类活动的贡献率奠定了研究基础, 流域内水文要素变化的驱动因素及其影响的贡献率还有待进一步深入评价, 但流域内气候变化与人类活动的水文响应需引起水资源管理者足够的重视, 科学合理规划和利用水资源。

## 5. 结论

本文在 5% 显著性水平下, 采用 Mann-Kendall、Pettitt、滑动 T 检验、Yamamoto、差积曲线-秩检验联合识别法等分析和比较了西苕溪流域 1972~2010 年流域降水和径流的变点。近 40 年的流域降水和径流序列, 分析结果均表明在 1999 年发生了突变, 各种方法的结果交叉验证, 并对突变的成因进行了初步分析。该研究结果为进一步量化甄别气候变化和人类活动的各自贡献率奠定了基础。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈晓宏, 涂新军, 谢平等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811.  
CHEN Xiaohong, TUX injun, XIE Ping, et al. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8): 800-811. (in Chinese)
- [2] 周园园, 师长兴, 范小黎等. 国内水文序列变异点分析方法及各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1361-1369.  
ZHOU Yuanyuan, SHI Changxing, FAN Xiaoli, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China. *Advances in Geography*, 2011, 30(11): 1361-1369. (in Chinese)
- [3] 拜存有, 苏莹, 郭旭新. 流域水文过程变点分析研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 83-86.  
BAI Cunyou, SU Ying and GUO Xuxin. Research review on change-point analysis of watershed hydrological process. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(1): 83-86. (in Chinese)
- [4] 谢平, 陈广才, 李德等. 水文变异综合诊断方法及其应用研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(2): 11-14.  
XIE Ping, CHEN Guangcai and ZHU Yong. Comprehensive diagnosis method of hydrologic time series change-point analysis. *Water Resources and Power*, 2005, 23(2): 11-14. (in Chinese)
- [5] 朱求安, 张万昌. 流域水文模型中面雨量的空间插值[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 11-14.  
ZHU Qiu'an, ZHANG Wanchang. The interpolation of sub-basin-averaged precipitation in hydrological models. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(2): 11-14. (in Chinese)
- [6] MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [7] Kendall. Rank correlation measures. 2nd Edition, London: Charles Griffin, 1975.
- [8] 雷红富, 谢平, 陈广才等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 36-40.  
LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods. *Water Resources and Power*, 2007, 25(4): 36-40. (in Chinese)
- [9] PETTITT, A.N. A non-parametric approach to the chang-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [10] YAMAMOTO, R., IWASHINA, T. and SANGA, N.K. An analysis of climate jump. *Meteorological Society of Japan*, 1986, 64(2): 273-281.
- [11] 杨梅学, 姚檀栋. 气候突变及其研究进展[J]. 大自然探索, 1999, 18(2): 30-34.  
YAND Meixue, YAO Tandon. Climate abrupt change and the

- progress of its study. *Exploration of Nature*, 1999, 18(2): 30-34. (in Chinese)
- [12] 邹悦, 张勃, 戴声佩等. 黑河流域莺落峡站水文过程变异点的识别与分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(7): 1264-1271.  
ZOU Yue, ZHANG Bo, DAI Shengpei, et al. Identification and analysis of mutations of hydrological processes at the Yingluoxia Station in the Heihe River Bas. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1264-1271. (in Chinese)
- [13] 于延胜, 陈兴伟. 水文序列变异的差积曲线-秩检验法和识别法在闽江流域的应用——以竹岐站年径流序列为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(10): 1717-1721.  
YU Yansheng, CHEN Xingwei. Difference curve-rank test method for detecting the change point in hydrological time series. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1717-1721. (in Chinese)
- [14] ZHANG, C., ZHANG, B., LI, W., et al. Response of streamflow to climate change and human activity in Xitiaoxi river basin in China. *Hydrological Processes*, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9539>
- [15] 高伟, 王西琴, 曾勇. 太湖流域西苕溪 1972~2008 年径流量变化趋势与原因分析[J]. *中国农村水利水电*, 2010, 332(6): 33-37.  
GAO Wei, WANG Xiqin and ZENG Yong. A trend analysis of observations of runoff in the Xitiaoxi River in the Taihu Lake between 1972 and 2008. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, 332(6): 33-37. (in Chinese)
- [16] 蔡娟, 许有鹏, 石怡. 西苕溪径流变化特性及影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2011, 27(3): 16-19.  
CAI Juan, XU Youpeng and SHI Yi. Analysis of characteristics and influencing factors of runoff variations in Xitiaoxi Basin. *Water Resources Protection*, 2011, 27(3): 16-19. (in Chinese)
- [17] 李娜, 许有鹏, 郭怀成. 西苕溪流域城市化对径流长期影响分析研究(英文)[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(4): 668-676.  
LI Na, XU Youpeng and GUO Huaicheng. Long-term impacts of urbanization on surface runoff in the Xitiaoxi River watershed, Eastern China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4): 668-676. (in Chinese)
- [18] 吴银明, 李娜, 陆卫东等. 西苕溪流域城镇化对径流的长期影响研究[J]. *水文*, 2006, 26(4): 81-84.  
WU Yinming, LI Na, LU Weidong, et al. Long-term influence of urbanization on runoff in Xitiaoxi River basin. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(4): 81-84. (in Chinese)
- [19] 刘春葵, 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)