

江南运河水文情势变化分析

吴娟, 林荷娟, 武剑, 季同德

(太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

摘要:随着太湖流域城镇化进程的加快,江南运河水文情势发生了明显变化。基于运河代表站水位资料、水利分区降雨资料、沿长江(江苏段)主要口门引排水量、出入太湖水量资料,采用 Mann-Kendall 趋势检验与突变检验法,对代表站水位进行了研究,并初步提出运河水文情势变化的可能原因。结果表明:(1)常州年最高水位及汛期5月、9月平均水位上升可能与湖西区四闸净引水量上升有关;而洛社与无锡(大)汛期5月、9月平均水位上升与武澄锡虞区沿长江(江苏段)口门净引水量显著上升有关,6月、7月、8月平均水位上升可能与地区涝水出路受阻导致原先入太湖的水量改为入运河有关;受张家港、十一圩闸、望虞闸引水及运河上游来水的共同影响,苏州(枫桥)亦出现水位同步上升的趋势。(2)运河代表站水位变异点主要发生在90年代中后期到21世纪初期,与太湖流域各省市陆续进入城镇化快速发展阶段的时间基本一致;同样的降雨,城镇化快速发展后的水位涨幅均明显高于城镇化快速发展前,以无锡(大)最明显。

关键词:江南运河; Mann-Kendall 检验法; 城镇化; 水文情势; 降雨径流关系

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2018)04-0078-05

1 引言

太湖流域地处长江三角洲核心区域,北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西以天目山、茅山为界,地跨江苏、浙江、上海和安徽三省一市,总面积 36 895 km²^[1]。太湖是流域内最大的湖泊,也是流域水资源滞蓄和调度的中枢^[2]。流域属亚热带季风气候区,受季风强弱变化的影响,年内雨量分配不均,汛期(5~9月)降水量占全年降水量的 59.5%,其中:梅雨期(6~7月)降水总量大、历时长、范围广,易形成流域性洪水;台风期(8~9月)降水强度较大,但历时较短,易造成严重的地区性洪涝灾害^[3],流域盆状的地形和平缓的地势导致洪水出路不足,太湖和地区河网水位易涨难消,进一步加重了洪涝的影响^[4]。

近年来,随着太湖流域城镇化进程的加快,不透水面积迅速增大,导致径流系数和径流量增加,洪涝灾害加剧日趋引起人们的关注^[5]。城镇化对河流水系、水循环以及水文过程的影响等研究已成为当前水文研究中的热点问题^[6-7]。江南运河是太湖流域内最长的河流,由镇江至杭州,全长 203 km^[8]。2000 年以后,江南运河

沿线城市防洪工程和圩区规模迅速扩大^[9]。江南运河沿线苏州、无锡、常州等城市排涝动力的增强加大了向运河的排水量^[10],江南运河防洪安全问题日益凸显^[11]。为此,本研究通过开展城镇化快速发展前后江南运河沿线代表站水位变化分析,初步提出江南运河水文情势变化的可能原因,可为流域防洪、水资源调度提供一定的技术支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究采用太湖流域综合规划选定的 106 个降雨代表站作为分区平均雨量的依据,资料均为整编资料,采用算术平均法计算 7 个分区降雨量、面积权重法计算流域面雨量。选取江南运河常州、洛社、无锡(大)、苏州(枫桥)为江南运河代表站,所选 4 个水位站位置分布在上、中、下游,且资料系列均超过 30 年,具有一定的代表性。考虑到 20 世纪 80 年代后期,苏南地区因过量超采地下水导致测站水位失真,为了进一步提高水位资料的一致性,基于分段改正法、基面

收稿日期:2017-07-10

基金项目:城镇化快速发展背景下太湖流域防洪关键问题研究项目(201501014)

作者简介:吴娟(1987-),女,江苏盐城人,硕士,主要从事水文水资源、分析评价及中长期水文预报研究。E-mail:wujuan3412@163.com

参证法、区域近似法等多种沉降改正法对4个代表站水位进行了沉降改正^[12]。本研究采用改正后的水位作为计算依据,代表站位置见图1。



图1 江南运河代表站位置图

Fig.1 The water level stations on the Jiangnan canal

2.2 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验^[13]是提取序列变化趋势最为有效的工具,被广泛应用于气候参数和水文序列变化趋势的分析中,利用下式计算:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

式中: x_j 和 x_k 分别为第 j 年和第 k 年的数值, $j > k$; n 为系列的记录长度(个数); $\text{sgn}(x_j - x_k)$ 为表征函数:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{当 } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{当 } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

假设变量独立同分布,则统计量 S 近似服从正态分布,均值为0,方差为 $n(n-1)(2n+5)/18$,计算 Z_s 为:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{当 } S > 0 \\ 0 & \text{当 } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{当 } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用 Z_s 的值进行趋势统计的显著性检验。 Z_s 值为正,表明上升趋势; Z_s 值为负,表明下降趋势,在双边趋势检验中,如果 $|Z_s| \leq Z_{1-\alpha/2}$,则接受零假设(无变化趋势),如果 $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$,拒绝零假设。 $Z_{1-\alpha/2}$ 从标准正态分布函数获得, α 为显著性水平。

2.3 Mann-Kendall 突变检验法

对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k=2,3,\dots,n \quad (4)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j, \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j, \end{cases} \quad j=1,2,\dots,i$$

可见,秩序列是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

式中: $UF_1=0$; $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 为累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们由下式算出:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \\ \text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}. \end{cases} \quad k=2,3,\dots,n \quad (6)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。同理,按照时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1=0$ 。

为保障突变检验的有效性,本研究也采用了滑动 t 检验法检验突变点,两种方法在统计学上具有一定程度的互补性^[14],有关该方法的介绍详见参考文献[15-16]。

3 水文情势变化分析

3.1 水位年际变化分析

对常州、洛社、无锡(大)、苏州(枫桥)年最高与汛期5~9月平均水位序列与所在水利分区同期降雨进行Mann-Kendall检验,分析结果见表1。

由表1分析可知,尽管四站5月、9月份降雨均呈下降趋势,但是对应的月平均水位却呈显著上升趋势,因此,需要从沿长江(江苏段)(以下简称“沿江”)汛期逐月净引水量开展分析,因此,对同期的沿江口门净水量进行Mann-Kendall检验。

湖西区沿江口门年净引水总量、汛期逐月净引水总量均呈显著上升趋势,且通过了 $\alpha=0.1$ 置信水平上的显著性检验。武澄锡虞区5月与9月的净引水量均呈显著上升趋势,且通过了 $\alpha=0.1$ 置信水平上的显著性检验。望虞闸年净引水量、汛期5~9月净引水总量均呈

表1 代表站水位特征值序列与其所在水利分区降雨量序列Mann-Kendall检验值
Table1 Mann-Kendall test for the water level and the precipitation of the Jiangnan canal

代表站	水位								降雨量					
	年最高	汛期平均	5月	6月	7月	8月	9月	年雨量	汛期雨量	5月	6月	7月	8月	9月
常州	1.87*	4.98*	2.63*	4.15*	4.12*	4.45*	3.70*	1.00	0.56	-0.83	1.42	1.36	0.53	-2.11*
洛社	2.30*	3.40*	4.83*	4.43*	2.76*	2.73*	2.51*	0.92	0.50	-0.24	0.45	0.68	1.31	-0.95
无锡(大)	2.65*	3.14*	2.76*	2.70*	2.56*	3.47*	3.10*	-0.53	-0.38	-1.41	-0.01	1.44	0.49	-2.07*
苏州(枫桥)	1.34	2.81*	3.39*	3.10*	2.33*	2.76*	2.02*	0.38	0.09	-1.48	0.99	0.14	1.22	-1.56

注:*表示在显著性水平 $\alpha=0.1$ 下趋势性显著,下同。

显著上升趋势,且通过了 $\alpha=0.1$ 置信水平上的显著性检验。由此可见,常州年最高水位与汛期5月、9月平均水位上升与湖西区四闸净引水量上升有关,而洛社与无锡(大)汛期5月、9月平均水位上升与武澄锡虞区沿江口门净引水量显著上升有关。

对洛社、无锡(大)所在的水利分区(武澄锡虞区)出入太湖水量进行Mann-Kendall检验可见,全年、汛期及6月、7月、8月净入湖水量均呈下降趋势。由此可见,地区涝水出路受阻,原先入湖的水量改为入运河,也成为了洛社、无锡(大)6月、7月、8月平均水位上升的重要原因。而苏州(枫桥)在常州、洛社与无锡(大)的下游,一方面,张家港、十一圩闸引水通过东青河进入锡北运河;另一方面,望虞闸引水又抬高了望虞河西岸的水位,原本通过伯渎港、九里河、锡北运河等河道入望虞河的水量反而倒流进入武澄锡虞区河网,与上游来水汇合共同进入了大运河,因此,苏州(枫桥)也出现了水位与运河上游代表站同步上升的趋势。常州、洛社、无锡(大)、苏州(枫桥)水位不断抬升的另一个重要原因与城防工程运行有关。以无锡城市大包围为例,当遭遇地区暴雨时,江尖水利枢纽与利民桥水利枢纽泵站将包围圈内水量向大运河抽排,这些水量直接进入或间接进入大运河,使得大运河代表站一直保持高水位行洪^[17]。

采用Mann-Kendall突变检验法和滑动t检验法分析江南运河各代表站水位序列的变异特征。表2统计了江南运河代表站水位突变诊断结果,可以看出,运

河代表站水位变异点主要发生在20世纪90年代中后期到21世纪初期,这与文献[18]的研究成果一致,即:90年代中后期,太湖流域各省市逐渐进入城镇化快速发展阶段。因此,本研究以2000年为界,分析城镇化快速发展阶段前后代表站水位变化情况。

3.2 城镇化对降雨径流关系影响

基于成因分析与统计相关法的降雨径流经验相关法是研究降雨径流关系常用方法,该方法采用场次降雨量、径流量以及主要影响因素建立降雨径流量相关图^[19]。其中前期影响雨量是决定降雨径流的重要条件,平原河网地区采用不同的起涨水位作为前期影响雨量,综合反映土壤含水量与河网调蓄能力^[20]。结合太湖流域雨水情特点,本次研究场次降雨筛选原则为:前三天降雨均低于2mm,筛选时段的降雨量不低于2.5mm,筛选时段的结束点为降雨量低于2mm。本研究以2000年为界,采用湖西区雨量与常州水位涨幅、武澄锡虞区雨量与洛社水位涨幅、武澄锡虞区雨量与无锡(大)水位涨幅、阳澄淀泖区雨量与苏州(枫桥)水位涨幅来反映城镇化快速发展前后降雨径流关系变化。

同样25mm的湖西区降雨,对于常州站3.20~3.50m起涨水位,城镇化快速发展后(下文简称“城镇化后”)的水位涨幅较城镇化快速发展前(下文简称“城镇化前”)偏高0.03m;3.50~3.80m起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高0.02m;3.80~4.30m起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高0.03m,见图2。

表2 代表站水位序列变异点诊断

Table2 The results of analyzed sudden points of the water stage series at the representative stations

代表站	年最高	汛期平均	5月	6月	7月	8月	9月
常州	1995	1995	1997	1996	1994	1994	1994
洛社	1993	2000	1997	1997	1999	1999	1999
无锡(大)	1994	1997	2002	2000	1997	1999	2002
苏州(枫桥)	1999	1997	1999	2000	1999	1998	2000

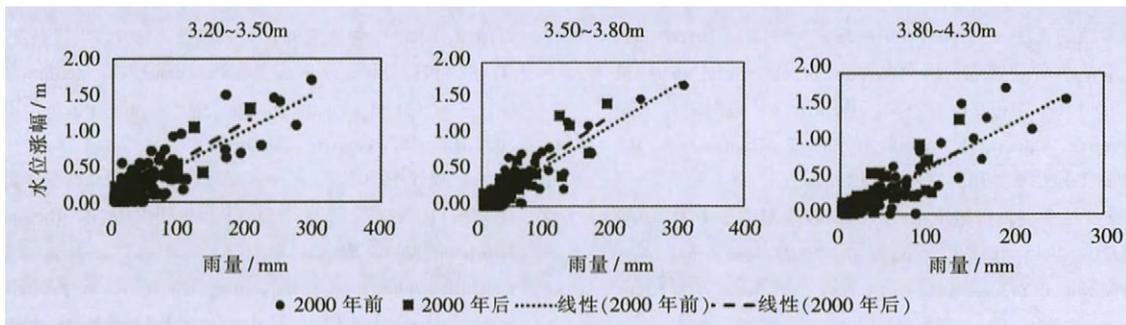


图2 城镇化快速发展前后常州站降雨径流相关图

Fig.2 The rainfall-runoff relationship for Changzhou before and after urbanization acceleration

同样 25mm 的武澄锡虞区降雨,对于洛社站 3.00~3.30m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.04m;3.30~3.60m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.02m;3.60~3.90m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.01m(图略)。

同样 25mm 的武澄锡虞区降雨,对于无锡(大)站 2.90~3.20m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.05m;3.20~3.50m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.03m;3.50~3.80m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.03m(图略)。

同样 25mm 的阳澄淀泖区降雨,对于苏州(枫桥)站 2.70~3.00m 起涨水位,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.02m;3.00~3.30m 起涨水位,同样的降雨,城镇化后的水位涨幅较城镇化前偏高 0.01m;3.30~3.60m 起涨水位,同样的降雨,城镇化后水位涨幅与城镇化前基本接近(图略)。

4 结论

对江南运河代表站(常州、洛社、无锡(大)、苏州(枫桥))水位,水利分区降雨、沿江口门净引水量,武澄锡虞区净入湖水量分析结果表明:

(1)常州、洛社、无锡(大)年最高水位与汛期 5~9 月平均水位,苏州(枫桥)汛期 5~9 月平均水位均呈显著上升趋势。而常州、洛社、苏州(枫桥)所在水利分区同期年雨量和汛期雨量均呈不显著上升趋势,其中 5 月与 9 月降雨量甚至呈减小趋势。湖西区沿江口门年净引水量与汛期 5~9 月净引水总量呈显著上升趋势,武澄锡虞区沿江口门与望虞闸年净引水量、汛期 5~9 月净引水量呈显著上升趋势。武澄锡虞区全年、汛期及 6 月、7 月、8 月净入湖水量均呈下降趋势。

(2)除了城防工程运行可能导致运河代表站水位抬升以外,常州年最高水位及汛期 5 月、9 月平均水位上

升可能与湖西区四闸净引水量上升有关,而洛社与无锡(大)汛期 5 月、9 月平均水位上升与武澄锡虞区沿江口门净引水量显著上升有关。洛社、无锡(大)6 月、7 月、8 月平均水位上升的另一个重要原因是地区涝水出路受阻,原先入太湖的水量改为入运河。受张家港、十一圩闸、望虞闸引水及上游来水的共同影响,苏州(枫桥)也出现了水位同步上升的趋势。

(3)运河代表站水位变异点主要发生在 20 世纪 90 年代中后期到 21 世纪初期,与太湖流域各省市陆续进入城镇化快速发展的时间基本一致。采用降雨径流经验相关法表明,同样的 25mm 的降雨,城镇化快速发展后的水位涨幅均明显高于城镇化快速发展前,其中常州偏高 0.02~0.03m,洛社偏高 0.01~0.04m,无锡(大)偏高 0.03~0.05m,苏州(枫桥)偏高 0.01~0.02m。

参考文献:

- [1] Liu L, Xu ZX, Reynard NS, et al. Hydrological analysis for water level projections in Taihu lake, China [J]. Journal of Flood Risk Management, 2013,6(1):14-22.
- [2] Wang L, Cai Y L, Chen H Q, et al. Flood disaster in Taihu basin, China: causal chain and policy option analyses [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,63(5):1119-1124.
- [3] 太湖流域管理局.太湖流域防洪规划[R].2013. (Taihu Basin Authority. Flood control planning for Taihu basin [R]. 2013. (in Chinese))
- [4] 刘浏,徐宗学. 太湖流域洪水过程水文——水力学耦合模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学报), 2012,48(5):530-536. (LIU Liu, XU Zongxue. Hydro-dynamical simulation of flood in the Taihu basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012,48(5):530-536. (in Chinese))
- [5] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016,27(4):485-491. (in Chinese))
- [6] 王艳君,姜彤,吕宏军. 快速城市化地区的土地利用时空动态变化研

- 究——以南京市为例[J].长江流域资源与环境, 2005,14(2):168-172. (WANG Yanjun, JIANG Tong, LV Hongjun, et al. Spatial-temporal changes in land use patterns in fast urbanization regions—a case study in Nanjing, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,14(2):168-172. (in Chinese))
- [7] 董增川. 对长江三角洲地区城市化进程水问题及对策思考[J]. 中国水利, 2004,(10):14-15. (DONG Zengchuan. Water issues and measures in urbanization process of the Yangtze delta area [J]. China Water Resources, 2004,(10):14-15. (in Chinese))
- [8] 吴浩云. 太湖流域洪涝灾害与减灾对策[J]. 中国减灾, 1999,9(1):15-18. (WU Haoyun. Flood disaster and mitigation approaches for Taihu basin [J]. Disaster Reduction in China, 1999,9(1):15-18. (in Chinese))
- [9] 诸发文,伍永年,姚淑君. 快速城镇化背景下太湖流域重大水利问题和科技需求 [J]. 中国水利, 2015,(8):18-21. (ZHU Fawen, WU Yongnian, YAO Shujun. Key issues of water conservancy in the Taihu lake basin and sci-tech demands under fast urbanization [J]. China Water Resources, 2015,(8):18-21. (in Chinese))
- [10] 张鑫,张振华,赵欢. 综合运用城市防洪工程改善水环境的实践与思考[J]. 江苏水利, 2009,(6):34-35. (ZHANG Li, ZHANG Zhenhua, ZHAO Huan. Practice and thoughts under comprehensive utilization of urban flood control projects on water environment improvement [J]. Jiangsu Water Resources, 2009,(6):34-35. (in Chinese))
- [11] 高俊峰,毛新伟. 太湖流域经济发展及其对洪涝的影响[J]. 湖泊科学, 2002,14(1):47-52. (GAO Junfeng, MAO Xinwei. Economic development and its impact to flood disaster in Taihu basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2002,14(1):47-52. (in Chinese))
- [12] 赵德友, 戈礼宾, 黄广勇. 沉降区水位改正方法探讨 [J]. 水文, 2015,35(4):72-76. (ZHAO Deyou, GE Libin, HUANG Guangyong. Research on water level correction for depressed area [J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(4):72-76. (in Chinese))
- [13] Mann, H. B. Non-parametric test against trend [J]. *Econometrika*, 1945,13:245-259.
- [14] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992,16(4):482-493. (FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of abrupt climate change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992,16(4):482-493. (in Chinese))
- [15] 张海荣,周建中,曾小凡,等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. 水文, 2015,35(6):90-96. (ZHANG Hairong, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(6):90-96. (in Chinese))
- [16] 张利茹,王兴泽,王国庆,等. 变化环境下水文资料序列的可靠性与一致性分析[J]. 水文, 2015,35(2):39-43. (ZHANG Liru, WANG Xingze, WANG Guoqing, et al. Consistency and reliability analysis of hydrological sequence in environment change [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(2):39-43. (in Chinese))
- [17] 陈寅达, 戈礼宾. 受水利工程控制下的锡澄地区水文情势分析[J]. 江苏水利, 2013,6:40-45. (CHEN Yinda, GE Libin. Analysis of hydrological regime in Xicheng area controlled by hydraulic projects [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2013,6:40-45. (in Chinese))
- [18] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响[M]. 科学出版社, 2012. (XU Youpeng. Impacts of Urbanization on River System and Hydrological Process in the Yangtze River Delta [J]. Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. 河海大学学报自然科学版, 2012,(6):597-604. (LIZHijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012,(6):597-604. (in Chinese))
- [20] 严雪华,陈培竹,毛鸿鹏,等. 嘉兴平原河网地区降雨径流关系探讨[J]. 浙江水利科技, 2009,4(164):20-22. (YAN Xuehua, CHEN Peizhu, MAO Hongpeng, et al. Discussing precipitation runoff relationship in river network regions of Jiaying plain [J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2009,4(164):20-22. (in Chinese))

Analysis of Hydrological Regime of Jiangnan Canal

WU Juan, LIN Hejuan, WU Jian, JI Tongde

(Bureau of Hydrology (Information Center), Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

Abstract: The acceleration of urbanization in the Taihu Basin leads to hydrological regime changing significantly in the Jiangnan Canal. Based on the precipitation, water stage, water diversion and drainage, as well as net inflow into the Taihu Lake, the water stage variation characteristics and causes were analyzed by using Mann-Kendall testing. The results show that: (1) The increasing trend of the annual highest water stage, monthly average water stage in May and September in Changzhou is resulted from the increase of the net transferred water from Huxi region. The increasing trend of the average water stage in May and September in Luoshe and Wuxi is resulted from the increase of net transferred water from Wuchengxiyu region, while the increasing trend of the average water stage in June, July and August may be resulted from floodway deficiency. The synchronous increasing trend of the water stage in Suzhou is influenced by the increasing amount of sluice water diversion as well as upstream water intake. (2) In accordance with the urbanization acceleration process over the Taihu Basin, the significant mutation points of water stage on the Jiangnan Canal occurred from the late 1990s to early 21st century. Under the same precipitation condition, the water stage rise more after urbanization acceleration, especially in Wuxi.

Key words: Jiangnan Canal; Mann-Kendall test; urbanization; hydrological regime; rainfall-runoff relationship