

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221433

# 赣江尾间河段近 30 年汛期水位变化

游利君<sup>1</sup>, 洪云<sup>1</sup>, 屈一晗<sup>2</sup>, 唐立模<sup>2</sup>

(1. 南昌水投项目管理集团有限公司, 江西 南昌 330008; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 赣江尾间河段汛期受上游来水与鄱阳湖顶托的双重影响, 研究其汛期水位变化对河道防洪和航运有重要的指导意义。为此, 根据赣江尾间控制性水文站 1990~2019 年的实测水文资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 检验方法对赣江尾间河段汛期(河洪及湖洪)特征水位的趋势性及突变性进行分析。结果表明, 赣江尾间河段河洪期和湖洪期特征水位均呈显著下降趋势, 河洪期水位年际变化较为均匀, 湖洪期水位年际变化呈现出波动状, 两者的突变年份均为 2002 年左右。河洪期特征水位下降的主要原因是河床下切, 其下切趋势于 2013 年后明显减缓, 故河洪期水位在 2016 年之后趋于稳定。湖洪期特征水位主要受河床下切影响, 下游水位变化也会产生一定的影响。

**关键词:** 赣江尾间; 汛期水位; 河洪; 湖洪; Mann-Kendall 趋势检验

**中图分类号:** TV143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)07-0102-04

## 1 概况

赣江为鄱阳湖流域第一大河, 其自南昌以下进入尾间河段, 汛期受赣江上游来水(河洪)与鄱阳湖洪水顶托(湖洪)的双重影响, 防洪负担较重<sup>[1]</sup>。许世超等<sup>[2]</sup>分析了赣江中下游年最高水位的年际变化; 游海林等<sup>[3]</sup>分析了 1950~2016 年赣江下游径流的趋势性、突变性及周期性, 指出赣江径流发生突变的年份为 1991 年; 刘庆<sup>[4]</sup>分析了赣江下游实测水位, 发现赣江下游水位 2002 年之前保持动态稳定, 2002 年之后逐年下降; 唐立模等<sup>[5]</sup>利用数学模型, 从上游来水来沙、下游鄱阳湖水位降低及赣江南昌河段河床下切等三方面分析了赣江南昌河段水位下降的影响因素。同时, 根据实测地形资料分析了 2000 年以来赣江南昌河段河槽形态的变化过程, 将河槽形态演变划分为采砂期与整治期两个时段<sup>[6]</sup>。但上述研究多关注河洪时期外洲站的水位变化, 而对支流各站及湖洪期整个尾间河段的水位变化关注较少。为此, 本文根据赣江尾间河段干支流水文、水位站近 30 年实测水文资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验

和 Pettitt 检验分析了赣江尾间河段汛期(河洪期和湖洪期)特征水位变化情况, 并探讨了河道来流变化及河床变形等对赣江汛期特征水位的影响, 以期对赣江尾间河段的行洪及航运等问题提供技术借鉴。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

赣江尾间河段有外洲水文站(控制性水文站)、南昌(干流)、昌邑(西支)、蒋埠(北支)、楼前(中支)、滁槎(南支)等水位站, 见图 1。赣江尾间河段汛期受河洪与湖洪的双重影响, 河洪时期多为 4~6 月, 湖洪时期多为 7~9 月(长江汛期)。选取赣江尾间各站 1990~2019 年河洪期(4~6 月)及湖洪期(7~9 月)的水文资料进行分析, 资料来源于《中华人民共和国水文年鉴》。外洲站近 30 年来存在多个丰、枯水年的交替循环, 且年径流模比系数累积曲线随时间增长趋近于 1, 故外洲站资料代表性好。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验

对长度为  $n$  的时间序列  $\{X_i | i = 1, 2, \dots,$

**收稿日期:** 2022-07-13, **修回日期:** 2022-09-26

**基金项目:** 江西省水利厅科技项目(202325ZDKT04)

**作者简介:** 游利君(1986-), 男, 工程师, 研究方向为水利工程建设管理、水生态景观、滨水(河、湖)景观策划, E-mail: 553011885@qq.com

**通讯作者:** 唐立模(1977-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为河流动力学、泥沙运动力学, E-mail: tanglimo@hhu.edu.cn

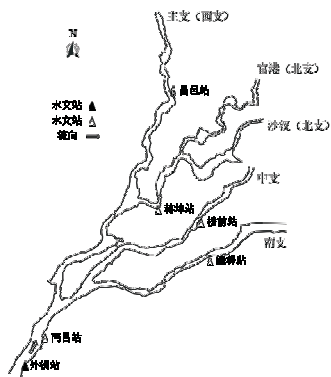


图 1 赣江尾间水系图

Fig. 1 River system of Ganjiang river trail channel

$n$ }, 构造统计量  $S$ :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

其中  $\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i = x_j \\ -1 & x_i < x_j \end{cases} \quad (3)$

$S$  是服从均值为 0、方差  $\text{Var}(S)$  的正态分布,其统计量  $Z$  为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

若  $Z$  为正值则表示该序列随时间呈增加趋势,若  $Z$  为负值则反之。当  $|Z| \geq 1.28, 1.64, 2.32$  时则认为其分别通过了置信度 90%、95%、99% 显著性检验。

### 2.2.2 Pettitt 突变点检验

对长度为  $n$  的时间序列  $\{X_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ , 构造统计量  $S_k$ :

$$S_k = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^k \text{sign}(x_i - x_j) \quad (5)$$

若  $t_0$  时刻  $k_{t_0} = \max |S_k|$ , 则点  $t_0$  处为突变点,其显著性水平  $P$  为:

$$P = 2\exp[-6k_{t_0}^2 / (n^3 + n^2)] \quad (6)$$

若检验数  $P < 0.5$ , 则表明该时间序列在点  $t_0$  处发生了较为明显的突变;若检验数  $P > 0.5$ , 则表明该时间序列未发生明显突变。

## 3 结果与分析

### 3.1 特征水位变化

外洲站历年河洪期和湖洪期的特征水位分别见图 2、3。由图 2 可知,外洲站河洪期最高水位的滑动平均曲线呈轻微下降趋势。其中 1990~

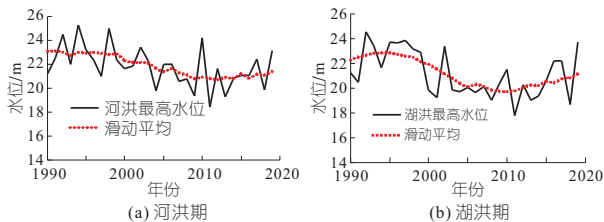


图 2 外洲站汛期最高水位及滑动平均曲线

Fig. 2 Highest water level and moving average curve in flood season at Waizhou Station

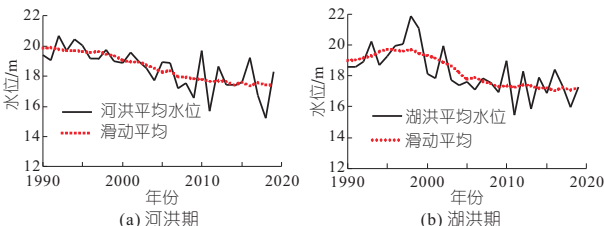


图 3 外洲站汛期平均水位及滑动平均曲线

Fig. 3 Average water level and moving average curve in flood season at Waizhou Station

2009 年的滑动平均曲线较平稳,2000~2009 年的年均降幅为 0.20 m,2010~2019 年较平稳。外洲站湖洪期最高水位的滑动平均曲线则呈波动趋势。其中 1990~1998 年的滑动平均曲线基本保持平稳,1999~2005 年的年均降幅达 0.25 m,2006~2015 年基本保持平稳,2016 年之后小幅上升。由图 3 可知,外洲站河洪期平均水位的滑动平均曲线呈持续下降趋势,1990~2019 年年均降幅为 0.08 m。外洲站湖洪期平均水位的滑动平均曲线呈波动下降趋势,其中 1990~1998 年基本保持平稳,1998~2005 年的年均降幅达 0.24 m,2006~2019 年基本保持平稳。整体来看,河洪期特征水位滑动平均曲线降幅较均匀,湖洪期则呈波动状的年际变化。

### 3.2 趋势性分析

赣江尾间河段各站河洪期和湖洪期特征水位的趋势检验结果见表 1。由表 1 可知,外洲站与南昌站河洪期最高水位呈显著下降趋势,通过了 95% 的置信度检验。位于支流上的四站河洪期最高水位的下降趋势不明显。各站湖洪期最高水位均呈显著下降趋势。其中外洲站和南昌站通过 95% 的置信度检验,其余各站则通过 90% 的置信度检验。外洲河洪期和湖洪期的最大流量均呈不显著上升趋势。各站河洪期平均水位均呈显著下降趋势。其中外洲站、南昌站、蒋埠站和滁溪站通过 99% 的置信度检验,昌邑站和楼前站分别通过 90% 和 95% 的置信度检验。各站湖洪期平均水位均呈显著下降趋势。除蒋埠站外,其余各站均通过 99% 的置信度检验,蒋埠站则通过 95% 的置

表 1 各站汛期特征水位趋势性检验

Tab. 1 Trend test of the highest water level during the flood season

站名	水文要素	最高水位				平均水位			
		河洪期		湖洪期		河洪期		湖洪期	
		检验数 Z	显著性	检验数 Z	显著性	检验数 Z	显著性	检验数 Z	显著性
外洲	水位	-2.28	显著下降	-2.12	显著下降	-4.39	显著下降	-3.60	显著下降
南昌	水位	-2.03	显著下降	-2.16	显著下降	-4.21	显著下降	-3.53	显著下降
昌邑	水位	-0.52	不显著下降	-1.43	显著下降	-2.32	显著下降	-2.60	显著下降
蒋埠	水位	-0.34	不显著下降	-1.53	显著下降	-1.78	显著下降	-2.28	显著下降
楼前	水位	-0.18	不显著下降	-1.23	不显著下降	-2.75	显著下降	-3.07	显著下降
滁槎	水位	-0.23	不显著下降	-1.34	显著下降	-1.96	显著下降	-2.57	显著下降
外洲	流量	0.54	不显著上升	0.02	不显著上升	-0.11	不显著下降	-0.46	不显著下降

信度检验。外洲河洪期和湖洪期的最大流量均呈不显著下降趋势。整体来看,外洲站和南昌站河洪期特征水位的显著性检验数明显大于湖洪期,而支流各站特征水位则是湖洪期大于河洪期。由此可见,河洪期和湖洪期对各站的水位变化影响各有侧重,湖洪期对支流水位的变化影响更大,河洪期则相反。

### 3.3 突变性分析

赣江尾闾河段各站河洪期和湖洪期特征水位的突变性分析结果见表 2。由表 2 可知,外洲站和南昌站河洪期最高水位在 2003 年发生突变,支

表 2 各站汛期最高/平均水位突变性检验

Tab. 2 Pettitt test of the highest/average water level during the flood season

站名	水文要素	河洪期				湖洪期			
		最高水位/流量		平均水位/流量		最高水位/流量		平均水位/流量	
		检验数 P	突变点	检验数 P	突变点	检验数 P	突变点	检验数 P	突变点
外洲	水位	0.030	2003	0.001	2002	0.011	1999	0.001	2002
南昌	水位	0.033	2003	0.001	2002	0.008	1999	0.001	2002
昌邑	水位	1.019	—	0.337	2006	0.028	1999	0.059	2003
蒋埠	水位	0.762	—	0.077	2006	0.026	1999	0.012	2003
楼前	水位	0.875	—	0.171	2002	0.023	1999	0.014	2002
滁槎	水位	1.269	—	0.050	2002	0.030	1999	0.003	2003
外洲	流量	1.369	—	1.418	—	0.378	1999	0.204	2002

流各站河洪期最高水位未发生突变。外洲站和南昌站河洪期平均水位在 2002 年发生突变,而昌邑、蒋埠、楼前、滁槎四站河洪期平均水位发生突变的年份分别为 2006、2002 年。其中,昌邑和蒋埠河洪期平均水位 Pettitt 检验的第一突变点为 2006 年、第二突变点为 2002 年。考虑到昌邑站(主支)与蒋埠站(北支)最先受鄱阳湖湖洪顶托的影响,并结合赣江尾闾河段整体水位的变化情况,可认为昌邑与蒋埠的汛期平均水位发生突变的年份应当为 2002 年。而湖洪期各站最高水位和平均水位发生突变的年份分别为 1999 年和 2002、2003 年。外洲站河洪期最大流量与平均流量均未发生突变,湖洪期最大流量、平均流量发生突变的年份分别为 1999、2002 年。综合来看,赣江尾

闾河段汛期特征水位的突变年份为 2002 年左右。

## 4 汛期水位变化成因分析

### 4.1 来水量影响

外洲站河洪期和湖洪期特征流量的年际变化分别见图 4、5。由图 4 可知,外洲站河洪期最大流量滑动平均曲线基本保持平稳,湖洪期最大流量滑动平均曲线存在明显波动趋势,先平稳(1990~1998 年)后下降(1999~2007 年)再上升(2008~2019 年)。由趋势性检验结果可知,河洪期和湖洪期最高水位均呈显著下降趋势,河洪期和湖洪期最大流量则呈不显著上升趋势。由图 5 可知,外洲站河洪期平均流量滑动平均曲线基本保持平稳,湖洪期则呈明显波动趋势,表现为先上升(1990~1998 年)后下降(1999~2007 年)再上升(2008~2019 年)。其趋势性检验结果表明,河洪期和湖洪期平均水位呈显著下降趋势,河洪期和湖洪期平均流量则呈不显著下降趋势。由此可知,外洲站汛期特征水位下降与河段上游来流量

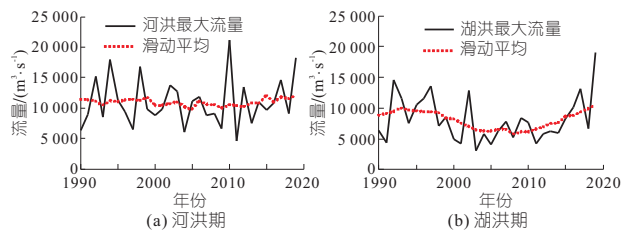


图 4 外洲站汛期最大流量及滑动平均曲线

Fig. 4 Highest discharge and moving average curve in flood season at Waizhou Station

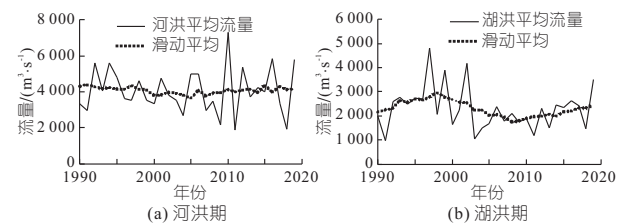


图 5 外洲站汛期平均流量及滑动平均曲线

Fig. 5 Average discharge and moving average curve in flood season at Waizhou Station

变化无关。

#### 4.2 河床下切影响

外洲站和南昌站历年河洪期高水流量( $Q \approx 9\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )条件对应的水位见图 6。由图 6 可知,1990~2016 年外洲站和南昌站在同一级流量下的水位基本呈逐年下降态势,2000 年之前水位降幅较小,年均降幅约为 0.06 m;2003~2006 年水位降幅较大,年均降幅约为 0.29 m。2006~2016 年水位降幅趋缓,年均降幅约为 0.10 m。2016 年以后,水位基本保持稳定。同流量条件下对应的水位变化可反映出河床下切的程度。

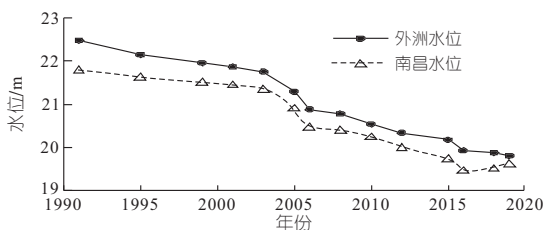


图 6 外洲站和南昌站同流量条件下历年水位变化

Fig. 6 Variation of water level over the years under the same flow conditions at Waizhou Station and Nanchang Station

根据 2003、2005、2013、2015、2018 年赣江尾间实测地形计算其河床变化情况,结果见表 3。由表 3 可知,2003~2005 年赣江尾间河段年均冲刷最大,可达 0.62 m;2005~2013 年,年均冲刷程度有所减缓,年均冲刷深度达 0.31 m;2013~2018 年,河段有冲有淤,整体变化不大,年均冲刷深度为 0.12 m。

表 3 外洲至南昌绕城高速河段冲淤变化

Tab. 3 Erosion and sedimentation in important areas

河段	时段	冲淤量	年均冲淤量	冲淤	年均
		$/10^4\ \text{m}^3$	$/10^4\ \text{m}^3$	厚度/m	厚度/m
外洲~裘家洲	2003~2005 年	390.40	195.20	0.44	0.22
	2005~2013 年	2 208.49	276.06	2.58	0.32
	2013~2015 年	-258.80	-129.40	-0.26	-0.13
	2015~2018 年	128.60	42.90	0.12	0.04
裘家洲~西 支绕城高速	2003~2005 年	2 299.29	1 149.65	1.47	0.73
	2005~2013 年	4 008.47	501.06	2.59	0.32
	2013~2015 年	1206.50	603.30	0.99	0.50
裘家洲~南 支绕城高速	2003~2005 年	-1958.20	-652.70	-1.54	-0.52
	2005~2013 年	1 836.92	918.46	1.51	0.76
	2013~2015 年	1 625.43	203.18	1.33	0.17
礁矶头~中 支绕城高速	2013~2015 年	591.43	295.71	0.49	0.25
	2015~2018 年	948.96	316.32	0.80	0.27
	2013~2018 年	2 146.01	429.20	1.85	0.37

注:“+”为冲刷,“-”为淤积。

外洲站<sup>[4]</sup>实测断面在 2003~2013 年下切明显,2013 年以后趋于稳定。其中,1990~2003 年河床平均高程下降了 4.04 m,年均下切深度为 0.31 m;2003~2005 年河床平均高程下降了 1.61 m,年均下切深度为 0.81 m;2005~2013 年

河床平均高程下降了 3.87 m,年均下切深度为 0.48 m;2013~2018 年河床平均高程下降了 0.79 m,年均下切深度为 0.16 m。

结合赣江尾间河段整体冲淤情况与外洲典型断面的变化情况可知,河床下切是赣江尾间河段河洪期水位下降的最直接原因。伴随着 1990~2003、2003~2013、2013~2019 年三个时间阶段的河床演变,河洪期特征水位也呈现出不同的下降幅度。2013 年赣江尾间河段进入整治期之后,河床下切趋势大大减缓。因此,河洪期特征水位下降趋势有所减缓,2016 年后趋于稳定。

#### 4.3 下游边界影响

赣江尾间河段河洪期各站水位差明显,湖洪期各站水位差相对较小。从年际变化来看,2008 年以后,河洪期和湖洪期各站水位差均较 2008 年以前有所减小。湖洪期由于鄱阳湖洪水顶托,支流水位抬升明显,其中昌邑站水位升高最明显,蒋埠站、楼前站次之,滁槎站水位升高幅度最小。趋势性分析结果表明,支流各站湖洪期特征水位的显著性检验数大于河洪期,由此可知,支流各站水位因为湖洪期下游水位的顶托而呈现出与河洪期不同的变化特征。下游水位边界的变化本质上是长江来水对鄱阳湖出流的顶托作用。长江来流量大,则顶托程度强,对赣江尾间河段水位影响大,反之亦然。因此,湖洪期的水位变化除了受到河床下切影响外,还需考虑下游水位变化对其产生的影响。近年来鄱阳湖流域洪季缩短、枯水期提前等问题频繁出现,下游边界水位降低必然会引发赣江尾间湖洪期的水位下降,对赣江尾间河段的通航保证率产生影响。

## 5 结论

a. 赣江尾间河段河洪期与湖洪期特征水位均呈显著下降趋势,突变年份为 2002 年。汛期特征水位的显著下降与上游来流量变化无明显关系。

b. 赣江尾间河洪期特征水位下降主要与河床下切有关,2013 年河床下切减缓,河洪期特征水位 2016 年后趋于稳定。湖洪期特征水位除受河床下切影响外,也受下游水位影响。

#### 参考文献:

- [1] 朱海虹,张本. 鄱阳湖[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1997.
- [2] 许世超,许新发,刘章君,等. 1957 年~2017 年赣江中下游洪水要素演变特征分析[J]. 水力发电,2019,45(10):28-32,43.

(下转第 88 页)

fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization; NSGA-II [C]// International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2000.

[3] KARMAKAR A, GHATAK R, MISHRA R K, et al. Sierpinski carpetfractal-based planar array optimization based on difficerential evolution algorithm [J]. Journal of electromagnetic waves & applications, 2015, 29(2): 247-260.

[4] 何江红, 李华军, 周日贵. 参考点自适应调整下评价指标驱动的高维多目标进化算法[J]. 自动化学报, 2021, 48(6): 1569-1589.

[5] 刘英华, 王敬, 王镜淋, 等. 基于协同进化粒子群算法的水库优化调度与应用[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 122-127, 139.

[6] 田旭杨, 陈泽军. 基于改进 NSGA-II 的列车运行多目标优化方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(增刊 1): 153-161.

[7] 肖宝秋, 刘洋, 戴光明. 改进的 NSGA-II 算法及在星座优化设计中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(10): 47-53.

[8] 耿志强, 毕帅, 王尊, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的乙烯裂解炉操作优化[J]. 化学学报, 2020, 71(3): 1088-1094.

[9] 吴梦烟, 杨侃, 吴云, 等. 基于改进烟花算法的汾河水库优化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 71-75.

[10] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.

## Optimization of Fenhe Reservoir Operation Rules Based on an Improved NSGA-II Algorithm

DONG Ling, ZHU Xue-ping, WANG Hong-chong, ZHAO Xue-hua

(College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to improve the search efficiency of the NSGA-II algorithm, this paper introduced an arithmetic crossover operator with stronger global search ability and faster convergence speed to replace the simulated binary crossover operator used in the original NSGA-II algorithm. Based on this, an improved NSGA-II algorithm was proposed, the  $G_D$  index was used to evaluate the convergence capability of the multi-objective Pareto solution set. The method was applied to the research of Fenhe Reservoir water supply and ecological collaborative optimal scheduling to verify its effectiveness. By comparing the Pareto solution sets generated by different algorithms and various indicators of reservoir operation, and compared with the traditional algorithm, the number of iterations to reach the convergence state after the improved algorithm was reduced by 100 generations and the convergence time is shortened by 7.76%. The water shortage rate of each department under the condition of non-optimization was decreased, of which the effect of agricultural water shortage rate is the most significant, decreasing by 13.20% to 14.52%, and the total water supply increased by 0.268 to 0.303 million cubic meters. This paper verified the effectiveness of the improved algorithm and optimized scheduling, and provides an optional new idea for multi-objective optimal scheduling of reservoirs.

**Key words:** NSGA-II; simulated binary crossover; arithmetic crossover operator; multi-objective optimization;  $G_D$  evaluation index

（上接第 105 页）

[3] 游海林, 吴永明, 杜冰雪, 等. 1950~2016 年赣江径流量变化特征及其影响因素分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 48-54.

[4] 刘庆. 赣江下游河道水文情势变化分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(10): 103-104, 137.

[5] 唐立模, 叶志恒, 杨家启, 等. 赣江南昌河段水位降低现状及影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 13-18, 85.

[6] 唐立模, 黄朋, 屈一晗. 赣江南昌河段近 20 年槽槽形态变化规律研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 104-110.

## Changes of High Water Level in the Flood Season in the Ganjiang River Trail Channel in the Past 30 Years

YOU Li-jun<sup>1</sup>, HONG Yun<sup>1</sup>, QU Yi-han<sup>2</sup>, TANG Li-mo<sup>2</sup>

(1. Nanchang Water Investment Project Management Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Ganjiang river trail channel is affected by both upstream water and the backwater effect of Poyang Lake during the flood season. The study of the water level changes has guiding significance for river flood control and shipping. Based on the measured data from 1990 to 2019 at the hydrological station in the Ganjiang river trail channel, this paper adopted the Mann-Kendall trend test and the Pettitt test to analyze the trend of the characteristic water level during the flood season(flood season and backwater of Poyang Lake season). The results show that the water level of the Ganjiang river trail channel had a significant downward trend. The interannual variation of the water level during the flood season was relatively uniform, while it showed a fluctuating shape during the backwater of Poyang Lake season. The mutation years were all around 2002. The main reason for the decline of the water level during the flood period is the erosion of the riverbed. The downward trend of the riverbed has slowed down significantly after 2013, so water level during the flood period stabilized after 2016. The water level during the backwater of Poyang Lake season is mainly affected by the erosion of the riverbed, and the change of the downstream water level will also have a certain impact.

**Key words:** Ganjiang river trail channel; high-water level; flood; backwater of Poyang Lake; Mann-Kendall trend test