

## 近 100 年来长江与洞庭湖汇流河段水文特征演变\*

肖 潇<sup>1,2\*\*</sup>, 毛北平<sup>2</sup>, 吴时强<sup>1,3</sup>

(1: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(2: 长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 武汉 430012)

(3: 南京水利科学研究所, 南京 210029)

**摘要:** 洞悉长江洞庭湖汇流河段的水文关系及其变化规律对确保长江中下游的防洪安全至关重要。为了掌握汇流河段水文特征演变情况, 本文结合汇流河段处监利、城陵矶、螺山等国家重要水文控制断面的近百年水文资料, 通过 M-K 检验、Morlet 小波分析等方法研究了该河段逐日水位、流量等水文数据, 分析了汇流河段年内分配、年际变化、变化趋势、突变点及变化周期等水文特征, 并探讨了具体成因。研究结果表明: ①长江与洞庭湖汇流河段年最高水位一般出现在 7 月, 年最低水位一般出现在 1、2 月; ②汇流河段年径流量主要集中在 5—9 月, 占年径流总量的 63.64%—73.44%; ③近 50 年城陵矶水位高、中、低水分别约抬升 0.98、0.56、1.46 m; ④近 10 年城陵矶与监利年径流比降至 0.66。⑤在长江中下游水利开发历程中, 经突变检验表明, 下荆江裁弯取直和三峡蓄水 175 m 对江湖水文特征的影响较为明显。⑥城陵矶站和螺山站的年径流量、水位平均周期约为 16 a, 监利站的年径流量、水位平均周期约为 8 a。⑦1954—2017 年间, 汇流比最大值一直在降低, 其发生时间在逐渐提前。以上成果为深入研究流域复杂的江湖演变规律提供了科学参考。

**关键词:** 汇流河段; 水位; 流量; M-K 突变检验; 小波分析; 长江洞庭湖汇流河段

## Dynamics of hydrological characteristics in Changjiang River and Lake Dongting confluence reach in the past 100 years\*

Xiao Xiao<sup>1,2\*\*</sup>, Mao Beiping<sup>2</sup> & Wu Shiqiang<sup>1,3</sup>

(1: *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China*)

(2: *Middle Chanagjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430012, P.R.China*)

(3: *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China*)

**Abstract:** Understanding the hydrological relationship and its variation in the Changjiang River and Lake Dongting confluence reach is important for the flood control safety of the middle and lower reaches of Changjiang River. Using the M-K mutation test and Morlet wavelet transform methods, this paper analyses the hydrological data (daily water level and flow data) of Chenglingji, Luoshan and Jianli in the past 100 years. We examine the hydrological characteristics of the confluence reach, including annual distribution, interannual variation, variation trend, catastrophe characteristics and variation period, and the specific causes are also discussed. We find that: (1) the maximum water level of the confluence reach usually occurs in July, and the minimum water level occurs in January or February; (2) The annual runoff is mainly concentrated from May to September, with the proportion about 63.64%—73.44% of the whole year; (3) The Chenglingji water level rises as a whole in the recent 50 years (1968–2017), and the high, middle and low rise 0.98, 0.56 and 1.46 m, respectively; (4) The annual runoff ratio of Chenglingji and Jianli Stations decreased to 0.66 in the recent ten years; (5) The cutting and straightening in the 1970s and the impounding 175 m of the Three Gorges in 2008 has obvious influence on the hydrological characteristics over the years; (6) The annual runoff and water level's av-

\* 2019-10-08 收稿; 2020-03-21 收修改稿。

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2017491111)和三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放研究基金项目(KF2018-05)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: xxxtina@163.com.

erage period is about 16 a in the Chenglingji and Luoshan Stations, and Jianli Station is about 8 a; (7) From 1954 to 2017, the maximum value of discharge ratio has been decreasing, and its occurrence time is gradually advanced. The results provide a scientific reference for the further study of the complex river and lake evolution in the river basin.

**Keywords:** Confluence reach; water level; flow; M-K mutation test; wavelet transform; Changjiang River and Lake Dongting confluence reach

长江在荆江三口分流(调弦口 1958 年建闸控制)进入洞庭湖后,与湘、资、沅、澧来水经洞庭湖调蓄作用后在城陵矶与长江再度汇流,构成江湖分合、相互影响、相互制约的错综复杂的江湖关系<sup>[1]</sup>. 在长期的演变过程中,尤其在近百年来江湖整治等人类活动和气候变化影响下,江湖关系持续发生改变,长江洞庭湖的水文特征不断发生变化,影响着整个长江中下游的防洪、水资源利用等问题. 因而,长江洞庭湖的江湖关系一直是学者们研究的热点.

周柏林、付湘等<sup>[2-3]</sup>通过建立数学模型研究在三峡工程影响下城陵矶水域水位变化情况. 唐金武、丛振涛、王鸿翔等<sup>[4-6]</sup>认为城陵矶水位是洞庭湖水位的重要标志,城陵矶水位发生变化主要是三峡工程引起的. 而李景保等<sup>[7]</sup>通过对长江洞庭湖的水量交换研究认为江湖关系是互补过程,丰水期荆江三口对洞庭湖补给强,枯水期洞庭湖对长江的补给强;何征等<sup>[8]</sup>发现洞庭湖在枯水期湖泊出流减缓,丰水期三口分流减少,江湖关系复杂多变. 柯文莉等<sup>[9]</sup>试图通过研究洞庭湖水面面积与城陵矶水位的相关性,建立城陵矶水位在丰水期与洞庭湖水面面积的相关关系. Cheng 等<sup>[10]</sup>分析三峡工程对洞庭湖水文变化的影响,表明洞庭湖秋季水位下降 0.52~2.26 m,最低年水位日提前 5~35 d. Dai 等<sup>[11]</sup>建立 2009—2013 年三峡工程运行对洞庭湖与长江水体交换影响的水动力模型,得出三峡工程运行明显降低了洞庭湖和干流的洪峰流量和洪涝量的结论. 以上针对长江、洞庭湖江湖关系的研究虽然方法多种多样,但结合监利、城陵矶、螺山 3 个水文站历史实测水文资料,分析长江洞庭湖汇流河段水文特征演变及相互机理的较少.

鉴于此,本文主要以城陵矶 1904 年建站以来 100 多年的长系列水文资料,结合监利站、螺山站的长系列水文资料,系统分析汇流河段水文要素变化特征,进一步梳理河段年内分配、年际变化趋势、突变特征及变化周期等,深化对江湖关系的认识. 长江洞庭湖汇流河段经历的水利历史背景特殊,是人类积极改造自然、利用自然的发展史,系统地分析汇流河段水文要素变化特征进行深入分析,对今后进一步治理和改善江湖关系意义重大.

## 1 研究区和资料情况

### 1.1 研究区概况

长江洞庭湖汇流河段<sup>[12]</sup>,跨越湖北和湖南两省交界区域,位于长江中游,属于亚热带湿润季风气候,降水充足,但降水集中,降水量年际变化较大. 监利水文站位于长江下荆江河段,上距洞庭湖汇合口约 80 km,是下荆江河段重要水文控制站. 城陵矶水文站位于洞庭湖出口段,上距长江汇合口约 4 km<sup>[13]</sup>,是洞庭湖出口河段水文控制站. 而螺山水文站位于长江干流,下距洞庭湖与长江汇合口约 30 km<sup>[14]</sup>. 研究区具体位置见图 1.

### 1.2 资料来源与处理

本文依据的水文数据资料为长江水利委员会水文局提供的长江洞庭湖汇流河段 3 个水文站的实测资料,包括逐日水位数据:监利(1950—1969、1974—2017 年)、城陵矶(1904—1938、1945—2017 年)和螺山(1953—2017 年);以及逐日流量数据:监利(1950—1969、1975—2017 年)、城陵矶(1946—2017 年)、螺山(1953—2017 年). 资料的主要处理方法为:

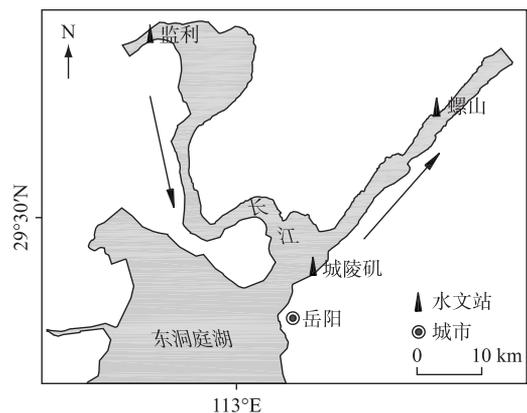


图 1 长江洞庭湖汇流河段示意图

Fig.1 Diagram of the Changjiang River and Lake Dongting confluence reach

1) 根据三站水位、流量逐日数据分析汇流河段年内水文分布特征及年际水文变化特征, 下文中水位的高程基准面均采用冻结基准面; 2) 利用 M-K 检验<sup>[15]</sup> 分析水文数据变化趋势及突变点; 3) 利用 Morlet 小波<sup>[16]</sup> 函数分析水文数据的周期性变化; 4) 分析时段主要是考虑 1966 年下荆江裁弯取直、1981 年葛洲坝运行和 2003 年三峡水库运行进行划分。

## 2 长江与洞庭湖汇流河段水文要素的分布特征

### 2.1 年内水文要素的分布特征

2.1.1 水位 根据长江洞庭湖汇流河段监利、城陵矶、螺山三站的水位年内变化规律发现, 3 个水文站的水位波动特征相似(图 2)。洞庭湖水位变化大致可分为 4 个阶段: 12 月至次年 3 月为枯水期, 4—6 月为涨水期, 7—9 月为丰水期, 10—11 月为退水期<sup>[16]</sup>。监利、城陵矶、螺山三站多年月均最大值均出现在 7 月, 分别为 33.18、29.95、29.24 m; 监利站多年月均最小值出现在 2 月, 为 24.47 m, 而城陵矶、螺山二站多年月均最小值出现在 1 月, 分别为 19.85、18.89 m。监利、城陵矶、螺山三站月均最大值与最小值的差值分别为 8.71、10.10、10.35 m。汇流河段的年内差值变化大, 而洞庭湖水位比下荆江河段年内变化大, 造成长江洞庭湖汇流后下游水位变化更明显。监利、城陵矶、螺山三站涨水期的上升速率分别为 2.00、2.24、2.22 m/月, 退水期的下降速率分别为 2.14、2.68、2.56 m/月, 退水期下降速率快于涨水期的上升速率, 涨水期和落水期的变化机理存在差异, 季节性变化对洞庭湖水位的影 响大于长江干流。

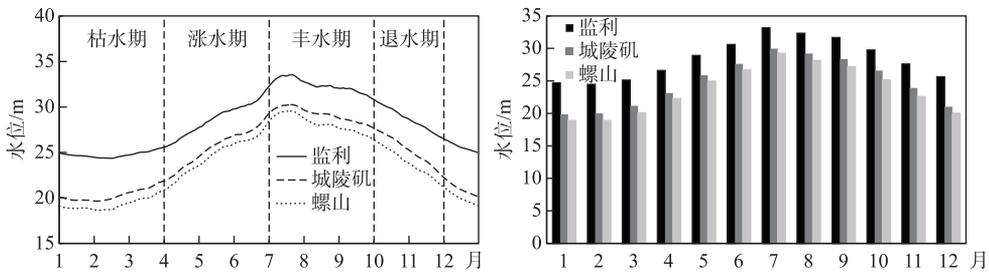


图 2 水位的年内变化

Fig.2 Annual variation of water level

长江洞庭湖汇流河段的水面比降季节性变化明显(图 3)。城陵矶站与螺山站的月均水面比降在 0.035‰~0.046‰之间, 最大比降发生在 2 月, 最小比降发生在 8 月; 监利站与螺山站的月均水面比降在 0.035‰~0.057‰之间, 最大比降发生在 1 月, 最小比降发生在 7 月; 监利站与城陵矶站的月均水面比降在 0.034‰~0.053‰之间, 最大比降发生在 1 月, 最小比降发生在 5 月。仅涨水期城陵矶—螺山河段的水面比降会大于监利—城陵矶河段, 丰枯水期及退水期均低于监利—城陵矶河段水面比降。年均相关系数显示, 城陵矶与螺山的年均相关系数  $R^2$  为 0.97, 监利与螺山的年均相关系数  $R^2$  为 0.96, 城陵矶与监利的年均相关系数  $R^2$  为 0.96。3 站相关性在涨水和退水期较稳定, 此期间相关性强, 在枯水期和丰水期, 相关性较弱。枯水期时, 城陵矶站与监利站、城陵矶站与螺山站的水位关联性较强, 但监利站与螺山站的水位关联性较弱, 表明长江干流水位在枯水期受洞庭湖影响明显; 丰水期时, 螺山站与监利站的水位关联性较强, 而螺山站与城陵矶站的水位关联性弱, 表明丰水期长江城陵矶下游干流水位受洞庭湖来流的影响减弱, 而受荆江来流影响增强。

2.1.2 流量 根据长江洞庭湖汇流河段三站年内流量变化规律(图 4), 将城陵矶出流与荆江来流即城陵矶站流量与监利站流量定义为汇流比, 以下简称汇流比。从图 4 可以看出, 3—6 月城陵矶站流量大于监利站, 期间洞庭湖出流对下游螺山河段流量的贡献率较大, 占 48.9%~54.6%, 汇流比在 1.04~1.28 之间。该时段处于涨水期, 洞庭湖出流对下游水位上涨驱动作用明显, 相关性强。从 7 月至次年 2 月监利站流量大于城陵矶站, 即荆江来流对下游螺山河段流量的贡献率较大, 占 58.2%~69.3%, 汇流比在 0.48~0.84 之间。尤其是枯水期荆江来流占的比重最大, 即汇流比最小。

汇流河段年径流量主要集中在 5—9 月(图 5), 监利站、城陵矶站、螺山站各占其年径流总量的 65.59%、

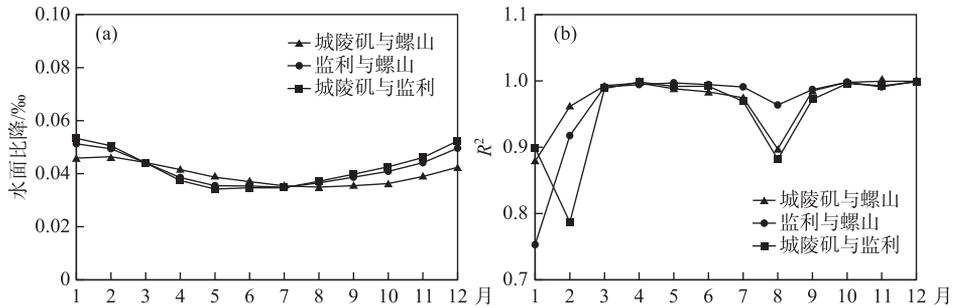


图 3 三站之间的水面比降及相关系数的年内变化

Fig.3 Annual variation of the water surface slope and correlation coefficient

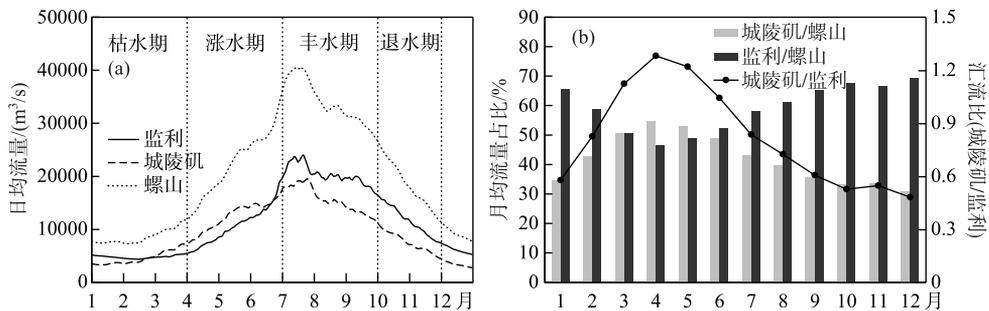


图 4 流量及其占比的年内变化

Fig.4 Annual variation of flow and its percentage

73.44%、63.64%。三站最大月径流量均出现在 7 月,各占年径流总量的 16.50%、16.34%、16.45%。城陵矶站最小月径流量一般出现在 1 月,占年径流总量的 2.57%;而螺山站、监利站一般出现在 2 月,各占年径流总量的 3.02%、3.06%。可见枯水期经城陵矶流入长江的流量较小,螺山站流量来自长江干流。

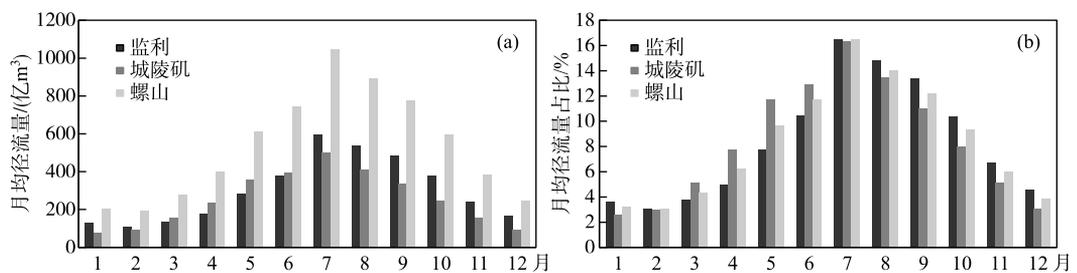


图 5 径流量及其占比的年内变化

Fig.5 Annual variation of runoff and its percentage

## 2.2 年际水文变化特征

2.2.1 水位 从长江洞庭湖汇流河段监利站、螺山站、城陵矶站历年水位时空分布变化(图 6)可知,城陵矶站和螺山站水位在高洪期间关联密切,而监利站高洪时由于洞庭湖调蓄使得下游螺山站洪水明显缓和。由于城陵矶站与螺山站之间距离较近,两者水位图谱关联性较强。随着年份的变化,城陵矶站与螺山站低水变化明显,分界点是 1980s,其整体上升显著。监利站的低水位也在上升,不过明显的分界点是 2003 年后。那么城陵矶站与螺山站低水位上升主要是由于地形的改变<sup>[17-18]</sup>,监利站的低水位上升则是由于三峡工程的调蓄作

用<sup>[11,19]</sup>. 高洪期,城陵矶站发生时期相比 1950s 明显提前,监利站发生时期则在逐年提前.

城陵矶站和螺山站的年平均水位、最高水位、最低水位整体呈上升趋势,而监利站水位变化整体稳定. 1951—1966 年相比 1904—1950 年,城陵矶站高、中、低水位均有所下降,变幅为 0.02~0.36 m. 1967—1980 年相比 1951—1966 年,监利站高水位上升,中、低水位下降,而城陵矶站、螺山站水位均呈上升趋势,变幅为 0.17~0.58 m. 1966—1969 年实施过下荆江裁弯取直工程,该工程应该是引起江湖汇流河段水位上升的主要因子. 1981—2002 年相比 1951—1966 年,监利站、城陵矶站、螺山站水位均上升明显,变幅在 0.23~0.97 m 之间. 很多学者都探讨过汇流河段水位上升的原因,大多数认为是河床形态改变引起的;2003—2017 年相比 1981—2002 年,监利站、城陵矶站、螺山站表现为低水位上升且波动幅度小,中、高水位下降,主要是三峡工程调蓄作用造成的. 从百年来看,1968—2017 年相比 1904—1967 年,城陵矶站水位整体抬升,高、中、低水位分别抬升 0.98、0.56、1.46 m,即汇流河段百年来水位特征变化明显.

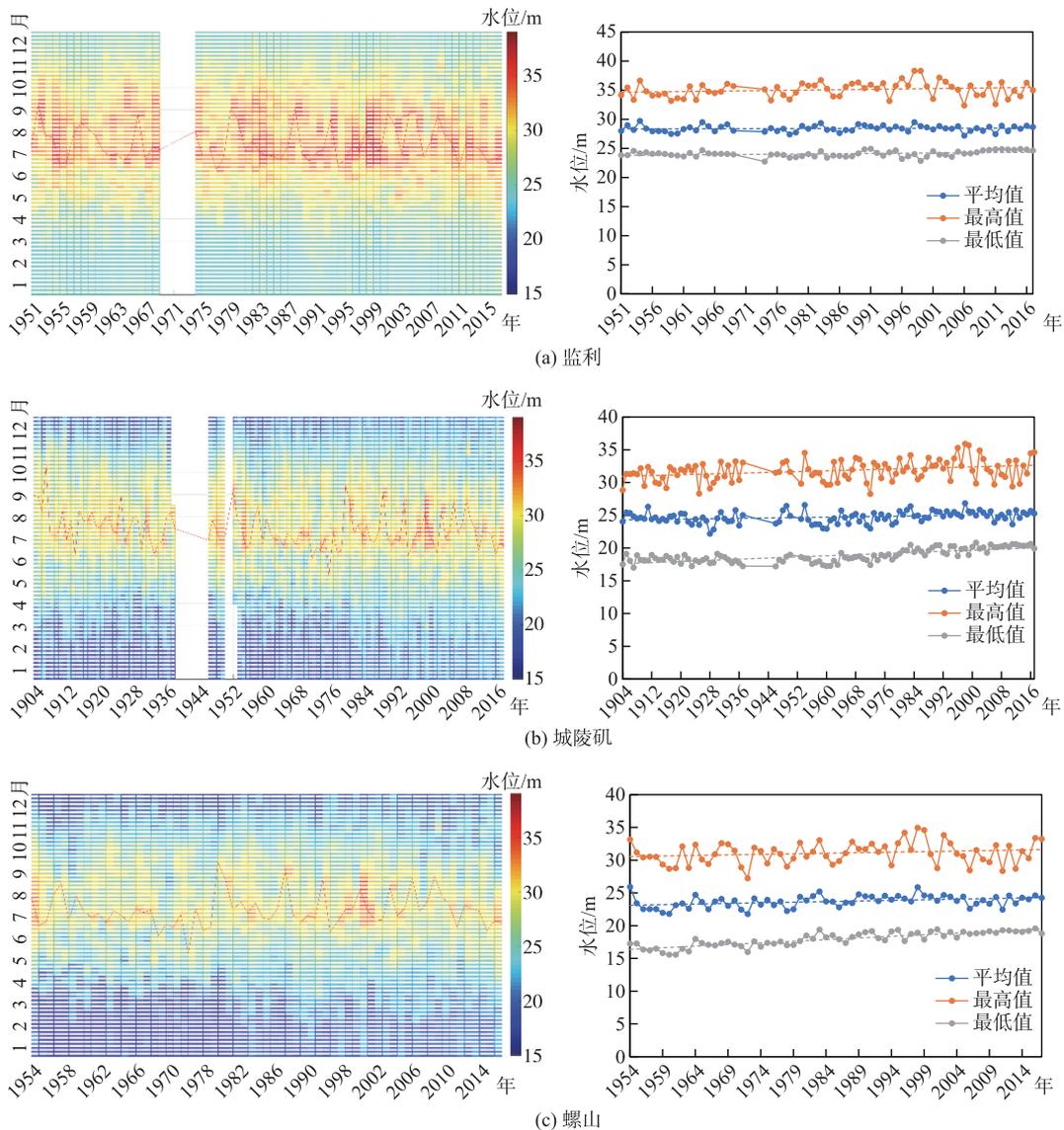


图 6 水位的年际变化

Fig.6 Interannual variation of water level

2.2.2 流量 从长江洞庭湖江湖汇流河段监利站、城陵矶站、螺山站的年径流量及特征流量年际变化(图 7)可以看出,监利站多年平均径流量、最小流量均逐渐增长,最大流量变化不明显.城陵矶站多年平均径流量及最大流量一直呈减小趋势,即洞庭湖出流整体减小;而其最小流量在 1951—1980 年间整体呈减小趋势,1981—2017 年间逐渐增大.螺山站多年平均径流量、最大流量基本稳定,而最小流量呈比较稳定的增长趋势.城陵矶站与监利站年径流量之比一直在减小,由 1951—1966 年的 1.26 已降低到 2003—2017 年的 0.66.

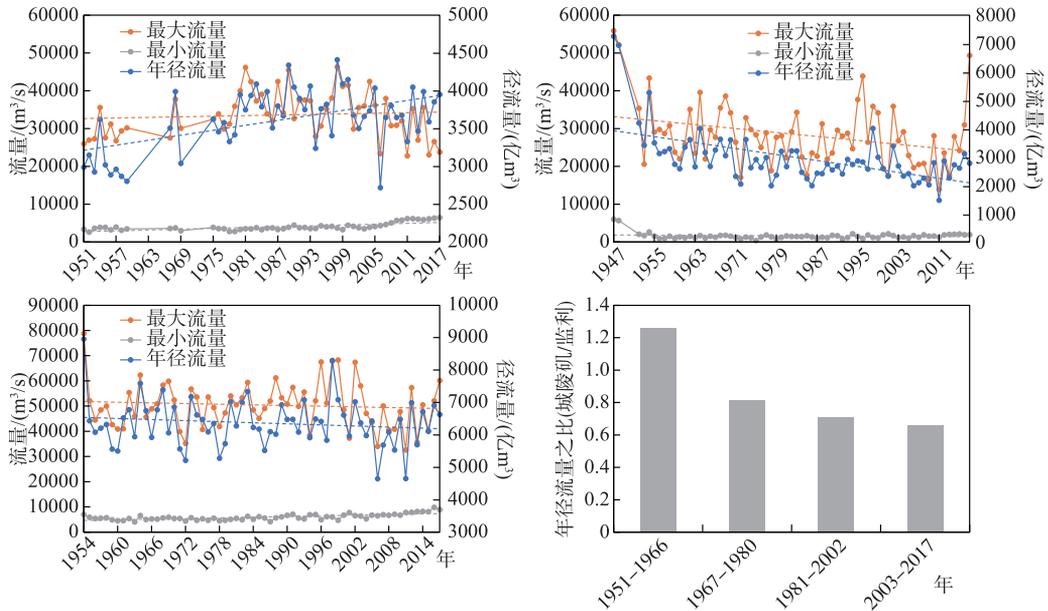


图 7 径流及特征流量的年际变化

Fig.7 Interannual variation of runoff and characteristic flow

长江洞庭湖江湖汇流河段监利、城陵矶、螺山三站径流年际极值比(为使数据具有可比性,径流年际极值比同乘 0.1)介于 1.29~2.80 之间,径流变差系数介于 0.076~0.366 之间(图 8).城陵矶站的径流年际极值比和变差系数变化较大,说明洞庭湖出流径流丰枯变化较剧烈,差异大;螺山站相对监利站而言变化较大.

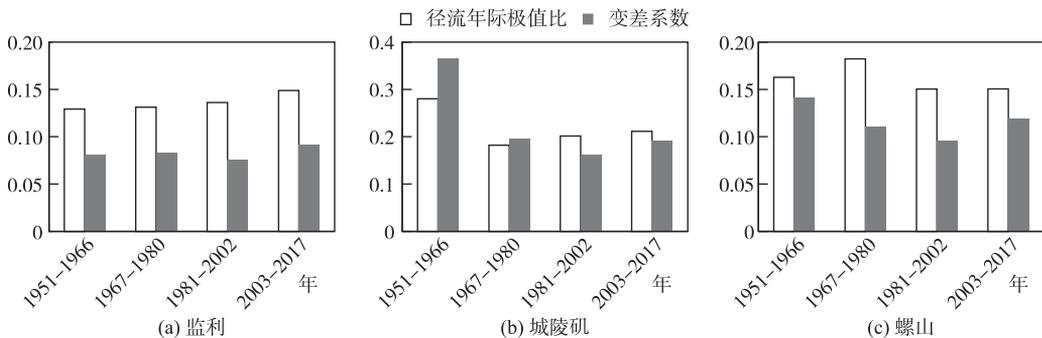


图 8 径流年际极值比和变差系数

Fig.8 Runoff variation extreme value ratio and coefficient

### 2.3 水文特征参数变化的趋势特征及突变点

对长江洞庭湖江湖汇流河段 3 个水文站的年径流量变化进行 M-K 突变点检验(图 9),其中 UK 统计量为正序列统计量,UB 为逆序列统计量,0.05 显著水平为 95% 置信区间.在 1954—2017 年时间段内,监利河段

年径流量变化呈先减小后增加的趋势,1970s 是分界点,平均水位变化基本呈先减小后增加的趋势,1960 年也出现突变点. 城陵矶站年径流量变化一直呈减小趋势,平均水位变化则呈先减小后增加的趋势,两者在 1960 和 1973 年均出现突变,年径流变化也在 2008 年出现明显突变. 螺山年径流量变化一直在波动,明显的突变点是 2008 年,平均水位变化与城陵矶站平均水位变化一致,两者也在 1960 年有一个突变点. 从 M-K 突变检验分析看出,城陵矶站与监利站的年径流量变化是相反的,也证实洞庭湖流出与下荆江来流相互影响、相互制约、此消彼涨. 两者相互改变的交界点是 1970s,即荆江裁弯取直后,证明裁弯取直是造成两者改变的主要原因. 另外,城陵矶站和螺山站在 2008 年也出现了一个突变点,其与三峡蓄水密切相关,三峡水库开始进行 175 m 实验性蓄水. 城陵矶站与螺山站的平均水位变化趋势基本一致,即两者之间关联密切. 三站年径流量、平均水位变化均在 1960 年出现突变点,考虑到当时大规模的围湖造田及兴建排涝工程,应该是湖水容减小及排涝引起的干流径流、水位增加.

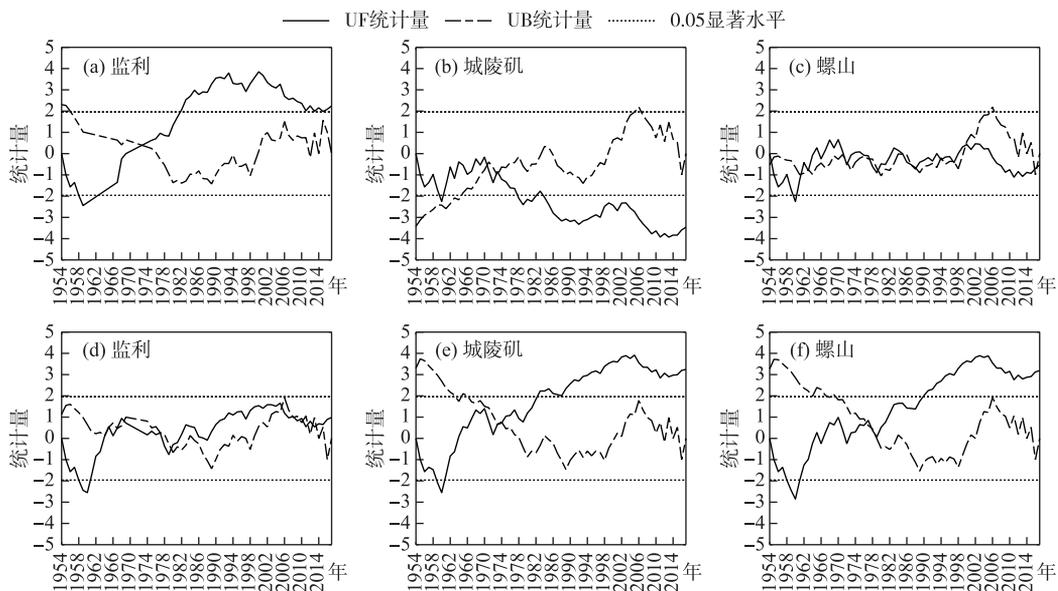


图9 M-K 趋势检验(a~c:年径流量;d~f:年平均水位)

Fig.9 M-K mutation test (a-c: annual runoff; d-f: annual water level)

## 2.4 水文要素变化的周期特征

图 10 为采用 Morlet 小波函数对长江洞庭湖汇流河段水文序列数据进行周期性变化特征分析的成果,从数据波动周期的等高线图可知:小波变换系数实部为正值,对应径流量、水位增大;小波变化系数实部为负值,对应年径流量、水位减小. 城陵矶站和螺山站径流、水位变化周期比较一致,尤其是水位变化周期较为吻合. 监利站与城陵矶站、螺山站的周期波动差别较大. 城陵矶站、螺山站年径流量序列 16、32 a 尺度上的波动比较明显,分别出现了 4、2 个高低径流交替震荡中心;城陵矶站、螺山站水位序列 16、64 a 尺度上波动较为明显,分别出现了 4、1 个高低水位交替震荡中心. 监利站年径流量序列 8~16、32 a 尺度上波动明显,水位序列 8、32 a 尺度上波动明显.

监利站年径流量、水位平均周期为 8 a,城陵矶站和螺山站的年径流量、水位平均周期为 16 a. 监利站在 32 a 尺度上水位呈“减小—增加—减小”的趋势;城陵矶站与螺山站水位关联密切,在 64 a 尺度上水位均呈“减小—增加”的趋势.

## 3 江湖汇流河段水文相互影响机理

### 3.1 长江洞庭湖汇流河段水文关系变化原因探讨

1954—2017 年,长江洞庭湖汇流河段受到几次较大的工程影响. 在 1960s 以前,洞庭湖区区内涝灾害严

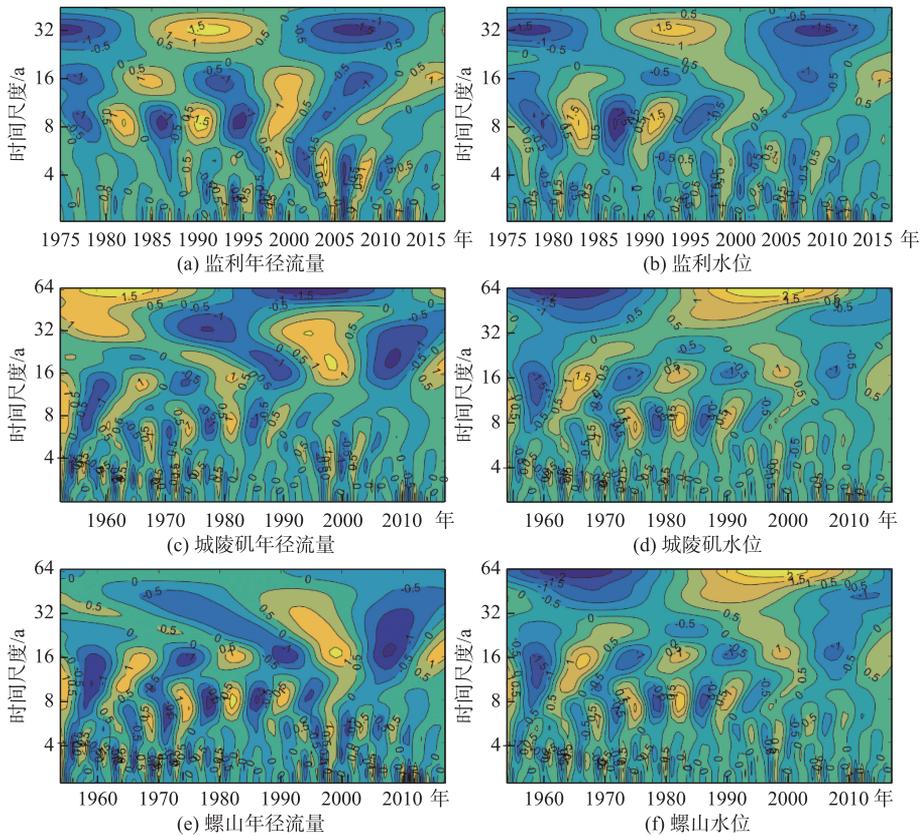


图 10 Morlet 小波变换系数实部时频分布

Fig.10 Real part time-frequently distribution from Morlet wavelet transform coefficients

重,造成湖区经济损失严重,为了改善内涝清空,1960s—1970s,修建了很多排涝工程,再加上此期间大规模的围湖造田,造成河道流量增加,引起汇流河段径流、水位的上涨。1967—1969年,为了加大长江干流下泄能力,下荆江河段实施人工裁弯取直工程,该工程对江湖关系影响较大,造成长江入荆江三口分流减小,江湖汇流河段洞庭湖出流与下荆江来流汇流比发生较大改变。1970s—1980s,撤洪渠工程的建设以及葛洲坝工程竣工通航,此期间汇流河段枯水期水位逐渐上升,众多学者<sup>[17]</sup>认为这是河段淤积引起的。1986—1996年,实施洞庭湖一期治理,11个重点堤垸堤防巩固达标,湖区防洪标准得到提高,但也是引起河道内水位上涨的原因之一。2003—2008年,三峡工程2003年开始蓄水,2008年完成175m试验性蓄水,众多学者<sup>[19]</sup>均以2003年三峡工程开始蓄水为分界点来研究三峡工程的影响,本文M-K检验表明2008年才是径流的突变点,也就是2008年三峡完成175m试验性蓄水对长江洞庭湖汇流河段的影响才更加明显。

### 3.2 长江洞庭湖汇流河段汇流比变化

汇流比为城陵矶站流量与监利站流量之比,图11a显示了1954—2017年4个时期汇流比此消彼涨的剧烈变化。为研究汇流比与3个测站之间的复杂关系,以螺山站流量为横坐标,以汇流比为纵坐标,对4个不同时期的汇流比进行点绘(图11b)。结果表明:汇流比在年内整体上呈先增大再减小的趋势,1954—2017年间,汇流比最大值一直在降低,其发生时间在逐渐提前。1967—1980年相比1954—1966年,汇流比最大值降低0.5左右。1981—2002年相比1967—1980年,汇流比最大值发生时间提前约2个月。即洞庭湖出流一直在减小,年内长江干流受洞庭湖出流影响明显的时间在不断缩短。根据时间节点来看,引起汇流比降低提前主要是下荆江裁弯取直、三峡蓄水等工程引起的,导致三口入洞庭湖的流量减小<sup>[20]</sup>,洞庭湖出流相应减小。

汇流比与螺山站流量的关系则越来越集中,1954—2017年来,螺山站高洪时期汇流比值逐渐变小,表明

近年来高洪时期洞庭湖出流对长江干流的影响减小;最大比值越来越集中在螺山流量为 15000~25000 m<sup>3</sup>/s 的区间,表明该流量下洞庭湖出流影响最大. 汇流比的变化表明洞庭湖出流对长江干流的影响越来越弱,尤其是高洪时期影响明显减小,年内影响时间也在不断缩短,仅在涨水期影响较大;相反,长江干流下荆江河段来流在不断增加,影响在加大,高洪时期影响明显加强,影响时间在不断增加. 洞庭湖出流与下荆江来流一直是此消彼涨、相互影响、相互制约的.

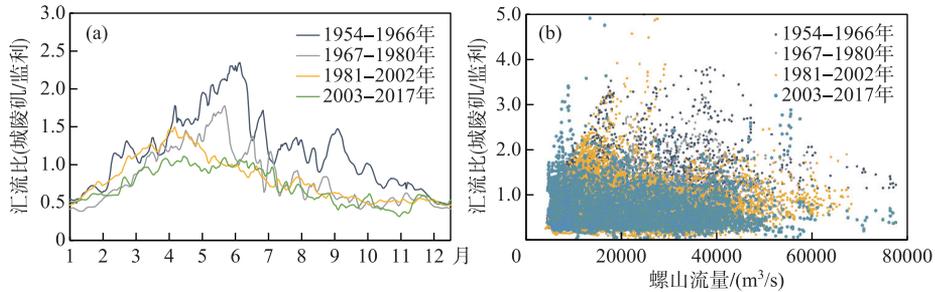


图 11 城陵矶与监利站汇流比的变化

Fig.11 The confluence ratio between Chenglingji and Jianli Stations

3.3 长江洞庭湖汇流河段水位流量关系变化

长江洞庭湖江湖汇流处水位流量关系的改变对长江中下游水文情势影响重大,研究水位流量关系的变化极为重要. 长江洞庭湖汇流河段监利、城陵矶、螺山 3 站水位与螺山站流量关系如图 12 所示,看出螺山站

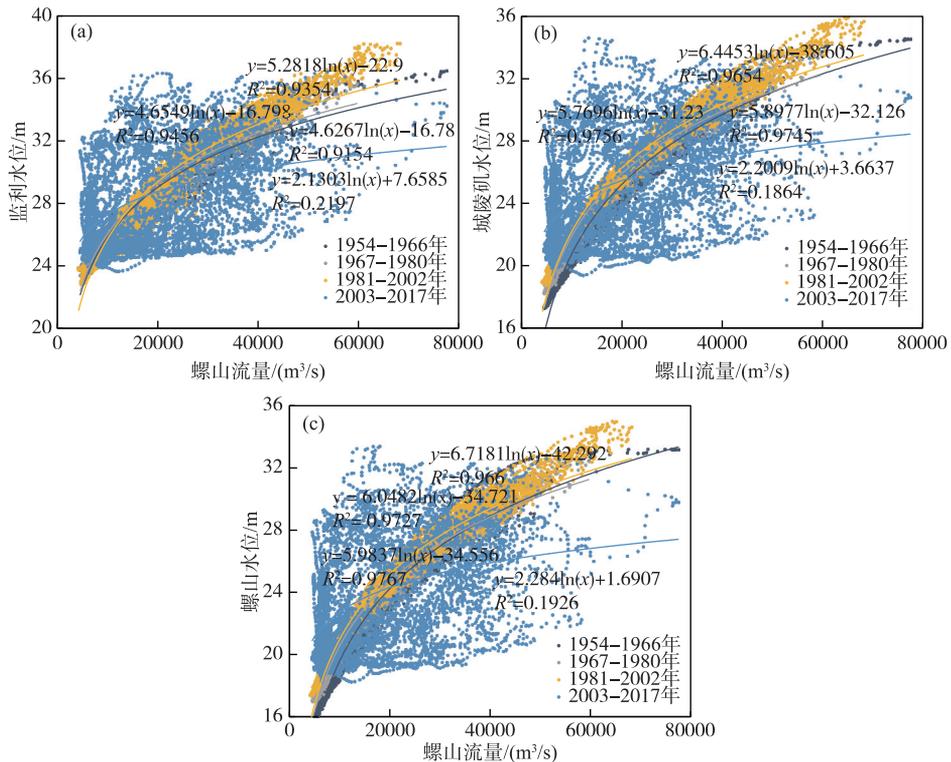


图 12 监利(a)、城陵矶(b)、螺山(c)各站水位与螺山流量的关系

Fig.12 Relationship between the water levels of Jianli (a), Chenglingji (b), Luoshan (c) Stations and discharges of Luoshan

流量与 3 站的水位关联性是密切相关的,可以用螺山站流量来推算长江洞庭湖汇流河段的水位. 1954—2017 年间,3 站的水位流量关系整体变化基本一致,1967—1980 年相比 1954—1966 年,40000 m<sup>3</sup>/s 以下流量级,对应城陵矶站、螺山站水位抬升,40000 m<sup>3</sup>/s 以上流量级,对应监利站水位抬升、螺山站水位下降;1981—2002 年相比 1967—1980 年,20000 m<sup>3</sup>/s 以上流量级,对应监利站、城陵矶站、螺山站水位均有所下降;2003—2017 年相比 1981—2002 年,3 站水位流量关系变化明显,且水位流量关系规律性不强、不集中,线性上看 20000 m<sup>3</sup>/s 以下流量级,对应水位抬升,20000 m<sup>3</sup>/s 以上流量级,对应水位下降. 相关数据表明:三峡工程对长江洞庭湖汇流河段水位流量关系有一定影响,改变了河道的自然流态,水位流量关系受调蓄影响较大.

## 4 结论

1) 长江洞庭湖汇流河段水文特征年内分配有较大差异性,季节性变化明显. 枯水期汇流段下游水位与洞庭湖水位关联性强;丰水期则与荆江水位关联性强. 3—6 月涨水期,洞庭湖出流较荆江来流大,其余时段下荆江来流比重大. 长江洞庭湖汇流河段水文特征年际变化表现为:城陵矶站和螺山站的年平均水位、最高水位、最低水位整体呈上升趋势,而监利站水位变化整体稳定. 监利站多年平均径流量、最小流量均逐渐增长,最大流量无明显变化;城陵矶站多年平均径流量及最大流量一直呈减小趋势,而最小流量在 1951—1980 年整体呈减小趋势,1981—2017 年逐渐增大;螺山站多年平均径流量、最大流量基本稳定,最小流量一直稳定增长.

2) 1954—2017 年,长江洞庭湖汇流河段受到几次较大工程的影响. 结合 M-K 突变检验表明下荆江裁弯取直和三峡蓄水 175 m 对江湖水文特征的影响较为显著. Morlet 小波分析长江洞庭湖汇流河段水文序列周期性变化特征表明:监利站年径流量、水位平均周期约为 8 a,城陵矶站和螺山站的年径流量、水位平均周期约为 16 a.

3) 汇流比在年内整体上呈先增大再减小的趋势,1954—2017 年间,汇流比的最大值一直在降低,其发生时间逐渐提前. 这些变化主要是下荆江裁弯取直、三峡蓄水等工程引起的,导致三口入洞庭湖的流量减小,洞庭湖出流相应减小.

本文从汇流河段 3 个水文站的相互关系结合汇流比等要素变化讨论了长江洞庭湖汇流河段的演变特性,深入研究了汇流河段水文演变特征. 但是,汇流河段水动力特性、泥沙输移等演变特征并未考虑,后期将引入相关研究分析,为江湖关系的研究提供更好的技术支持.

## 5 参考文献

- [ 1 ] Wan RR, Yang GS, Wang XL *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 1-8. DOI: 10.18307/2014.0101. [ 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 1-8. ]
- [ 2 ] Zhou BL, Luan ZY, Liu XQ *et al.* Study on high flood level of Qilishan Waters in changing environment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(4): 456-462. [ 周柏林, 栾震宇, 刘晓群等. 变化环境下七里山水域高洪水位研究. 水利学报, 2018, **49**(4): 456-462. ]
- [ 3 ] Fu X, Zhao QX, Sun ZH. Effects of 175 m experimental operation of the Three Gorges Reservoir on the storage capacity of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1713-1725. DOI: 10.18307/2019.0603. [ 付湘, 赵秋湘, 孙昭华. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1713-1725. ]
- [ 4 ] Tang JW, Li YT, Sun ZH *et al.* Preliminary study on the changes of water level at Chenglingji Station after the impoundment of the Three Gorges Project (TGP). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, **18**(2): 273-280. [ 唐金武, 李义天, 孙昭华等. 三峡蓄水后城陵矶水位变化初步研究. 应用基础与工程科学学报, 2010, **18**(2): 273-280. ]
- [ 5 ] Cong ZT, Xiao P, Zhang DW *et al.* Water stage at Chenglingji before and after the Three Gorges Project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(3): 23-28. [ 丛振涛, 肖鹏, 章诞武等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析. 水力发电学报, 2014, **33**(3): 23-28. ]
- [ 6 ] Wang HX, Zha HF, Li Y *et al.* Hydrological regime alternation of Dongting Lake after Three Gorges Reservoir impound-

- ment. *Water Resources and Power*, 2018, **36**(10): 31-33. [王鸿翔, 查胡飞, 李越等. 三峡水库蓄水后洞庭湖水文情势变化研究. 水电能源科学, 2018, **36**(10): 31-33.]
- [ 7 ] Li JB, Zhou YQ, Ou CM *et al.* Evolution of water exchange ability between Dongting Lake and Yangtze River and its response to the operation of the Three Gorges Reservoir. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(1): 108-117. [李景保, 周永强, 欧朝敏等. 洞庭湖与长江水体交换能力演变及对三峡水库运行的响应. 地理学报, 2013, **68**(1): 108-117.]
- [ 8 ] He Z, Wan RR, Dai X *et al.* Characteristics of the changing seasonal water regime in Lake Dongting and their response to the change of river-lake water exchange in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 991-996. DOI: 10.18307/2015.0601. [何征, 万荣荣, 戴雪等. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 991-996.]
- [ 9 ] Ke WL, Chen CZ, Ji HX *et al.* A loop-like relationship between water surface area of Lake Dongting and water level at Chenglingji, the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 753-764. DOI: 10.18307/2017.0325. [柯文莉, 陈成忠, 吉红霞等. 洞庭湖水面面积与城陵矶水位之间的绳套关系. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 753-764.]
- [10] Cheng JX, Xu LG, Wang XL *et al.* Assessment of hydrologic alteration induced by the Three Gorges dam in Dongting Lake, China. *River Research and Applications*, 2018, **34**(7): 686-696. DOI: 10.1002/rra.3297.
- [11] Dai ML, Wang J, Zhang MB *et al.* Impact of the Three Gorges Project operation on the water exchange between Dongting Lake and the Yangtze River. *International Journal of Sediment Research*, 2017, **32**(4): 506-514. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2017.02.006.
- [12] Mao BP, Wu ZM, Mei JY *et al.* Confluence relationship changes of Yangtze River and Dongting Lake since impoundment of Three Gorges project. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(5): 48-56. [毛北平, 吴忠明, 梅亚军等. 三峡工程蓄水以来长江与洞庭湖汇流关系变化. 水力发电学报, 2013, **32**(5): 48-56.]
- [13] Xu G, Huang YX, Li XC *et al.* Analysis on the causes of water level rising at Chenglingji Hydrological Station of Changjiang River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(8): 33-37, 45. [徐贵, 黄云仙, 黎昔春等. 城陵矶洪水水位抬高原因分析. 水利学报, 2004, **35**(8): 33-37, 45.]
- [14] Chai YF, Li YT, Xu WY *et al.* Analysis of variation characteristics of water level at Luoshan station and its contribution of influencing factors. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(7): 43-46. [柴元方, 李义天, 许炜阳等. 螺山站水位变化特征及其影响因素贡献率分析. 水电能源科学, 2017, **35**(7): 43-46.]
- [15] Sun P, Sun YY, Zhang Q *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of runoff processes and its causes in Huaihe Basin. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 497-508. DOI: 10.18307/2018.0221. [孙鹏, 孙玉燕, 张强等. 淮河流域径流过程变化时空特征及成因. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 497-508.]
- [16] Cheng JX, Xu LG, Wang Q *et al.* Temporal and spatial variations of water level and its driving forces in Lake Dongting over the last three decades. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 974-983. DOI: 10.18307/2017.0421. [程俊翔, 徐力刚, 王青等. 洞庭湖近 30 a 水位时空演变特征及驱动因素分析. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 974-983.]
- [17] Duan WZ, Zheng YH, Liu JJ. Causes of water level rising in Chenglingji-Luoshan reach of Changjiang River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, **32**(2): 29-34. [段文忠, 郑亚慧, 刘建军等. 长江城陵矶-螺山河段水位抬高及原因分析. 水利学报, 2001, **32**(2): 29-34.]
- [18] Chai YF, Li YT, Li SX *et al.* Analysis of variation characteristics of water level at Chenglingji and its contribution of influencing factors. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(8): 60-64. [柴元方, 李义天, 李思璇等. 不同因素对城陵矶水位变化贡献率的分析. 水电能源科学, 2017, **35**(8): 60-64.]
- [19] Han JQ, Sun ZH, Li YT *et al.* Changes and causes of lower water level in Yichang-Chenglingji reach after impounding of Three Gorges Reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, **44**(6): 685-690, 695. [韩剑桥, 孙昭华, 李义天等. 三峡水库蓄水后宜昌至城陵矶河段枯水位变化及成因. 武汉大学学报: 工学版, 2011, **44**(6): 685-690, 695.]
- [20] Zhu LL, Xu QX, Dai ML *et al.* Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Sciences*, 2016, **27**(6): 822-831. [朱玲玲, 许全喜, 戴明龙等. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响. 水科学进展, 2016, **27**(6): 822-831.]