第33卷第5期 水资源与水工程学报 Vol. 33 No. 5
2022年 10月 Journal of Water Resources & Water Engineering Oct. ,2022

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.09

水利工程群对洞庭湖城陵矶特征水位的综合影响

钟小敏[1,2]，帅 红[1]，李景保[1]，李煜连[1]，王雨欣[1]，张憬怡[1]

(1.湖南师范大学 地理科学学院，湖南 长沙 410081；2.湖南师范大学 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室，湖南 长沙 410081)

摘 要：基于1956-2020年洞庭湖城陵矶水文站的实测水文数据，运用Mann-Kendall检验法分析水利工程群影响下洞庭湖湖口城陵矶特征水位的时序演变特征。结果表明：城陵矶年特征水位呈显著上升趋势($P<0.05$)。与时段1相比，时段2、3、4的年均水位分别抬升了0.68、1.04、1.61 m，年最高水位分别抬升了0.35、1.14、1.78 m，时段5的年均水位、年最高水位分别下降至24.97、30.50 m，年最低水位逐期抬升(18.09、18.84、19.32、20.26、20.87 m)；城陵矶水位存在"涨-丰-退-枯"4个水文期，涨水期最高水位抬升了2 m以上，丰水期平均水位和最高水位在前4个时段抬升后，于第5时段分别回落至28.69、30.42 m，退水期平均水位和最高水位呈波动变化，最低水位在后4个时段逐期下降，枯水期平均水位和最低水位逐期抬升，时段5的特征水位抬升了2 m以上；水利工程群对城陵矶特征水位的影响在各典型年表现出不同的特征，三峡水库蓄水后，城陵矶特征水位在丰水年丰、枯水期下降，在平水年丰水期抬升、枯水期下降，而在枯水年丰水期下降、枯水期抬升。

关键词：水利工程群；特征水位；平均水位；最高水位；最低水位；城陵矶；洞庭湖

中图分类号：TV697；TV11 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-643X(2022)05-0072-09

Comprehensive effect of group hydrological projects on characteristic water level of Chenglingji in Dongting Lake

ZHONG Xiaomin[1,2], SHUAI Hong[1], LI Jingbao[1], LI Yulian[1], WANG Yuxin[1], ZHANG Jingyi[1]

(1. *School of Geographical Sciences*, *Hunan Normal University*, *Changsha* 410081, *China*; 2. *Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application*, *Hunan Normal University*, *Changsha* 410081, *China*)

Abstract: Temporal evolution characteristics of characteristic water level of Chenglingji under the effect of group hydrological projects were analyzed based on the monitored hydrological data of Chenglingji Station in Dongting Lake from 1956 to 2020 using Mann-Kendall test. The results showed that the annual characteristic water level of Chenglingji showed a significant upward trend ($P<0.05$). Compared with the first stage, the annual average water level of the second, third and fourth stage increased by 0.68, 1.04 and 1.61 m, respectively, the annual highest water level increased by 0.35, 1.14 and 1.78 m, respectively; while the annual average water level and the annual highest water level decreased to 20.87 and 30.50 m, respectively at the fifth stage, and the annual lowest water level increased by stages (18.09, 18.84, 19.32, 20.26, and 20.87 m). There were four hydrological seasons in Chenglingji water level, which were water-rising season, wet season, water-falling season and dry season. The highest water level in water-rising season increased by more than 2 m; the average water level and the highest water level in wet season fell back to 28.69 and 30.42 m at the fifth stage after increased at the first four stages; the average water level and the highest water level fluctuated in water-falling season, and the lowest water level gradually decreased at the last four stages; in dry season, the average water level and the lowest water level increased gradually, and the characteristic water level at the fifth stage increased by more than 2 m. The effect of group hydrological projects on the characteristic water level of Chenglingji presented different states in each typical year.

收稿日期:2022-03-18； **修回日期**:2022-07-04
基金项目:国家自然科学基金项目(41571100)
作者简介:钟小敏(1996-),女,江西新余人,硕士研究生,研究方向为流域水文与水资源。
通讯作者:帅 红(1975-),女,湖南益阳人,博士,教授,研究方向为生态系统健康和生态安全。

After the operation of Three Gorges Reservoir, the characteristic water level of Chenglingji decreased in the wet season and dry season of the wet year, but increased in wet season and decreased in dry season of the usual year, and increased in dry season and decreased in wet season of the dry year.

Key words: group hydrological projects; characteristic water level; average water level; highest water level; lowest water level; Chenglingji; Dongting Lake

1　研究背景

近数十年来,长江中上游、湖南“四水”修建了众多大型水库,在水利工程群的共同影响下,洞庭湖水文情势发生了巨大变化[1-5]。特别是 2003 年三峡水库蓄水以来,其强大的调节作用改变了长江中下游天然的水文循环和泥沙输移过程[6-10],使洞庭湖与长江的关系进入了一个新的调整阶段。城陵矶作为扼守洞庭湖的出口,其水位变化是反映江湖关系演变的重要标志[11],因此,剖析其在水利工程群影响下的水情时序变化具有重要意义。近数十年来,国内学者从不同角度就水利工程影响下城陵矶水位变化做了较多研究[12-15],其中,20 世纪 80 年代以来,有许多学者对水利工程运行下的城陵矶水位进行了探讨[16-19]。进入 21 世纪以来,有许多学者对三峡水库影响下的城陵矶水位展开了研究[20-28],其中,周蕾等[29]、肖潇等[30]研究了城陵矶平均水位的演变特征。然而这些研究的时间尺度不够长,或单一分析长江干流一个或多个水利工程运行导致的变化,没有考虑到城陵矶特征水位受到湖南“四水”和长江水利工程群的综合影响。

鉴于此,本文从长时间尺度角度出发分析了长江干流和湖南“四水”水利工程群影响下的洞庭湖湖口城陵矶特征水位的时序演变特征,以期为优化该水利工程群运行方案、制定江湖地区防洪抗旱应急预案以及设计标准化防洪抗旱工程提供理论参考。

2　数据来源与研究方法

2.1　研究区概况

洞庭湖为我国第二大淡水湖,位于湖南省北部、长江荆江段南岸,东南部汇集了湘、资、沅、澧 4 条江河(简称“四水”)及环湖中小河流来水,北接松滋、太平、藕池三口(调弦口于 1958 年冬封堵)来水来沙,经洞庭湖调蓄后,由湖口城陵矶泄入长江[15]。因此,城陵矶特征水位既受到长江上游水库群的影响,又受到湖南“四水”水库群的影响。洞庭湖及长江干流主要水文控制站分布见图 1。

2.2　数据来源

为揭示水利工程群对城陵矶特征水位的影响,选用 1956－2020 年城陵矶站水文数据作为分析的基础数据,该数据来源于长江水利委员会(http://www.cjw.gov.cn/)、湖南省水利水电勘测设计研究总院(http://www.hhpdi.com/)、湖北省水利厅(http://slt.hubei.gov.cn/)以及湖南省水情日报表。水利工程数据来自《水利统计公报》《水利部公报》《湖南省水库名录》以及中国水利工程数据库等。长江流域中上游和“四水”流域主要水利工程见表 1。

图 1　洞庭湖及长江干流主要水文控制站分布

2.3　研究方法

本文采用 Mann－Kendall 趋势和突变检验法[31-34]分析城陵矶特征水位的时序演变特征,运用相关分析法和线性趋势法来分析各时段的水位变化。同时,按照国家水利部信息中心水文预报规范及径流丰枯状况的划分标准,对水库群运行前后的典型年进行界定[26],即:

$$P = \frac{\text{某年径流量} - \text{多年平均值}}{\text{多年平均值}} \times 100\% \qquad (1)$$

式中:P 为径流距平百分比,$P > 20\%$ 为丰水年;$-10\% \leqslant P \leqslant 10\%$ 为平水年;$P < -20\%$ 为枯水年。

3 结果与分析

一般而言,水库蓄水后,汛期调洪削峰,对最高水位产生影响;汛末蓄水,对9–10月水位产生影响;枯水期补水调度,对枯水期平均水位和最低水位产生影响。为便于分析多时间尺度下城陵矶特征水位演变规律,分别对1956–2020年城陵矶的年均水位、年最高水位、年最低水位、汛末水位(9–10月)以及枯水期水位(12月–次年3月)进行Mann–Kendall秩次相关检验,取可信度$\alpha=0.05$,其对应的M临界值为1.96,若$|M|>1.96$,表示序列的趋势显著。5个水位序列的统计量M变化趋势见图2。

表1 长江流域中上游和"四水"流域主要水利工程

河流	序号	水库(工程)名	总库容/10^8 m^3	建成年份	河流	序号	水库(工程)名	总库容/10^8 m^3	建成年份
金沙江	1	溪洛渡	126.70	2014	湘江	24	欧阳海水库	4.24	1970
	2	向家坝	51.63	2013		25	白云水库	4.24	1996
雅砻江	3	锦屏一级	77.60	2014		26	酒埠江水库	2.95	1965
	4	二滩	61.37	1998		27	株树桥水库	2.78	1992
大渡河	5	瀑布沟	53.32	2008		28	黄材水库	1.65	1953
岷江	6	紫平铺	11.12	2006		29	青山垅水库	1.23	1974
龙溪河	7	狮子滩	10.27	1956		30	官庄水库	1.21	1960
嘉陵江	8	宝珠寺	25.50	1998		31	涔天河水库	1.05	2017
	9	亭子口	40.67	2014	资水	32	柘溪水库	35.65	1963
乌江	10	洪家渡	49.47	2006		33	六都寨水库	1.21	1984
	11	乌江渡	23.00	1983	沅江	34	五强溪水库	42.90	1994
	12	构皮滩	55.62	2011		35	凤滩水库	16.76	1978
	13	彭水		2009		36	凌津滩水库	6.34	1999
长江干流	14	三峡	393.00	2009		37	黄石水库	6.02	1967
	15	葛洲坝	15.80	1988		38	碗米坡水库	3.78	2003
	16	中州子人工裁弯		1967		39	洪江水库	3.20	2002
	17	上车湾人工裁弯		1972		40	蟒塘溪水库	1.53	2000
	18	沙滩子自然裁弯		1972		41	竹园水库	1.32	1988
湘江	19	东江水库	91.48	1992	澧水	42	江垭水库	17.41	1998
	20	双牌水库	6.90	1962		43	皂市水库	14.40	2007
	21	水府庙水库	5.60	1960		44	王家厂水库	3.05	1963
	22	近尾洲水库	4.60	2002		45	鱼潭水库	1.22	1995
	23	大源渡水库	4.51	2000					

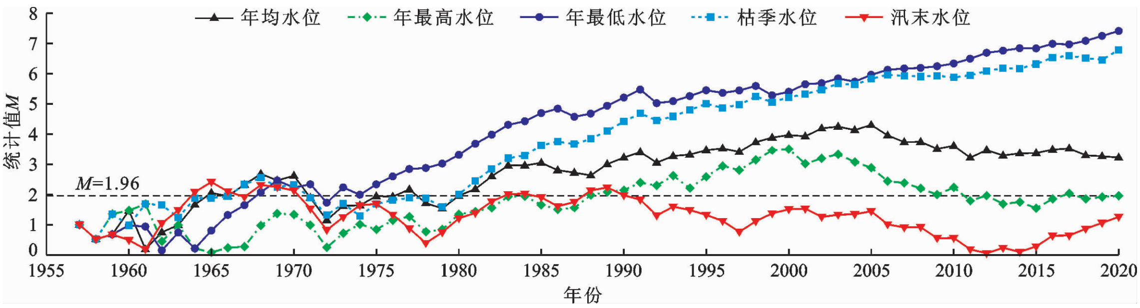

图2 1956–2020年城陵矶特征水位序列M–K检验统计值变化趋势

由图 2 可知,城陵矶年均水位、年最高水位、年最低水位以及枯季水位均发生显著变化,汛末水位呈不显著上升趋势。其中,年均水位自 1965 年起发生显著变化,1980 年后呈稳定的显著上升趋势,2003 年后上升趋势有所减缓;年最高水位自 1988 年起发生显著变化;年最低水位自 1968 年起发生显著变化;枯季水位自 1967 年起发生显著变化,1980 年后呈稳定的显著上升趋势。考虑到柘溪水库(总库容为 $35.65 \times 10^8\ m^3$)1963 年全面投产,而城陵矶平均水位在 1965 年发生显著变化,表明城陵矶平均水位可能受到了柘溪水库调蓄的影响。因此,以 1963 年为分界点,将 1956 – 1962 年城陵矶水位序列作为水库建设前的天然水位,1963 – 2020 年水位序列作为水利工程群建设后的来水序列。1963 – 1972 年下荆江系统裁弯期除年最高水位外,其余 4 个水位序列的统计值 M 在 1.96 上下波动,情况复杂,故将 1963 – 1972 年作为一个单独时间段分析。1980 年后平均水位和枯季水位呈稳定的显著上升趋势,2003 年后平均水位的显著上升趋势有所减缓,而 1981 年 1 月葛洲坝开始截流,2003 年长江中上游最大的水库——三峡水库开始试验性蓄水,这两个水库对城陵矶水位产生了明显影响[19,26],故将 1973 – 1980、1981 – 2002 及 2003 – 2020 年分别作为单独的时间段来分析。据此,将 1956 – 2020 年的水文序列划分为 5 个时段,即第 1 时段 1956 – 1962 年(基准期)、第 2 时段 1963 – 1972 年(下荆江系统裁弯期)、第 3 时段 1973 – 1980 年(下荆江裁弯后至葛洲坝截流前)、第 4 时段 1981 – 2002 年(葛洲坝截流后)、第 5 时段 2003 – 2020 年(三峡水库蓄水后)。

3.1　水利工程群运行下城陵矶特征水位时序变化

由于城陵矶处于江湖交汇区,其水情具有随机性和不确定性,本文从长时间尺度对比分析城陵矶特征水位的变化规律,尤其是三峡工程运行后特征水位的变化特点。

3.1.1　水利工程群运行下城陵矶年特征水位变化规律　将 1956 – 2020 年城陵矶的年均水位、年最高水位和年最低水位以年份为自变量进行线性拟合,结果如表 2 所示。

表 2　1956 – 2020 年城陵矶年特征水位线性拟合结果

特征水位	线性回归方程	R^2
年均水位	$y = 0.0207x + 24.095$	0.2180
年最高水位	$y = 0.0217x + 29.824$	0.0709
年最低水位	$y = 0.0479x + 18.279$	0.6913

注:x 为年份;y 为水位,单位为 m。

由表 2 可知,城陵矶年均水位、年最低水位上升趋势明显。1956 – 2020 年年均水位、年最高水位和年最低水位均值分别为 24.78、30.54 和 19.86 m,波动范围分别为 22.93 ~ 26.83、26.91 ~ 35.44、17.56 ~ 21.38 m,其中年最高水位变化范围最大。

各时段城陵矶年特征水位的变化(表 3)表明,时段 1 的年均水位为 23.63 m,相较于时段 1,时段 2、3、4、5 分别抬升了 0.68、1.04、1.61、1.34 m,与时段 4 相比,时段 5 的年均水位有所下降(24.97 m)。年最高水位在第 1 ~ 第 4 时段逐时段抬升,与时段 4 相比,时段 5 的年最高水位有所下降(30.50 m),该变化规律与年均水位基本一致。年最低水位逐时段抬升,相较于时段 1,时段 2、3、4、5 分别抬升了 0.75、1.23、2.17、2.78 m。表明近几十年来城陵矶年均水位明显抬高,三峡工程运行后降低了城陵矶年均水位、年最高水位,抬高了城陵矶年最低水位。

表 3　1956 – 2020 年各时段城陵矶年特征水位变化　m

时间段	年均水位	年最高水位	年最低水位
1956 – 1962 年	23.63	29.45	18.09
1963 – 1972 年	24.31	29.80	18.84
1973 – 1980 年	24.67	30.59	19.32
1981 – 2002 年	25.24	31.23	20.26
2003 – 2020 年	24.97	30.50	20.87

综上所述,城陵矶年均水位和年最高水位先上升后下降,具有明显的阶段性变化特征[28],年最低水位逐时段抬升,三峡工程运行是导致时段 5 年均水位和年最高水位相对下降的主要因素,三峡工程的补水调蓄作用是年最低水位抬升的主导因素。

3.1.2　水利工程群运行下城陵矶年特征水位变化趋势　利用 Mann – Kendall 检验法分析城陵矶年特征水位变化趋势,结果见表 4。表 4 表明,1956 – 2020 年年均水位、年最高水位、年最低水位的 Z 值分别为 3.227、1.970、7.419,说明城陵矶年特征水位呈显著上升趋势。

对比分析表 4 中各时段城陵矶年特征水位变化趋势可知,时段 1 年均水位和年最高水位的 Z 值分别为 0.751、0.451,为不显著的上升趋势,而年最低水位的 Z 值为 –0.151,为不显著的下降趋势。时段 2 的年特征水位呈下降趋势,其中,年均水位呈显著下降趋势,这是因为 1963 年柘溪水库全面投产以及 1967 – 1972 年下荆江系统裁弯的影响。时段 3 城陵矶年均水位和年最低水位均呈下降趋势,其 Z 值

分别为 -0.991、-0.741，而年最高水位呈上升趋势（Z =0.991）。时段 4 年特征水位呈上升趋势，其中年均水位和年最低水位呈显著上升趋势（Z = 2.169、2.846）。时段 5 年最低水位、年均水位、年最高水位的 Z 值分别为 2.237、1.629、0.719，年最低水位的变化在时段 4、5 均具有显著性。结果表明下荆江系统裁弯降低了城陵矶特征水位，1981 年葛洲坝截流以来城陵矶年特征水位呈上升趋势，2003 年三峡工程运行后，由于三峡大坝巨大的拦水拦沙功能，其上升趋势有所减缓。

采用 Mann - Kendall 检验法分析城陵矶特征水位的突变年份，绘制出的统计量序列图见图 3。由图 3 可以看出，城陵矶年均水位在 1964 年发生突变，这与 1963 年柘溪水库建成蓄水有一定联系，1981 年突破临界值上限，呈显著上升趋势；年最高水位在 1967 年发生突变，而 1967 - 1972 年实施了下荆江系统裁弯工程，可见下荆江裁弯对年最高水位产生了影响；年最低水位在 1981 年发生突变，1981 年葛洲坝截流，因此该突变年份的发生与葛洲坝水库建设有关。

表 4 1956 - 2020 年不同时段城陵矶特征水位 M - K 趋势变化

时段	年均水位	年最高水位	年最低水位
1956 - 1962 年	0.751	0.451	-0.151
1963 - 1972 年	-2.057	-0.089	-0805
1973 - 1980 年	-0.991	0.991	-0.741
1981 - 2002 年	2.169	0.768	2.846
2003 - 2020 年	1.629	0.719	2.237
1956 - 2020 年	3.227	1.970	7.419

3.1.3 水利工程群运行下城陵矶特征水位季节变化规律 受湖南“四水”入湖来水、长江干流洪水顶托等因素的影响，城陵矶存在涨水期（4 - 5 月）、丰水期（6 - 9 月）、退水期（10 - 11 月）和枯水期（12 月 - 次年 3 月）4 个水文期[3]。本文通过统计与计算 1956 - 2020 年不同时段水利工程群影响下的城陵矶涨、丰、退、枯水期特征水位，以分析城陵矶特征水位的季节变化规律。表 5 为 1956 - 2020 年各时段不同水文期城陵矶特征水位。

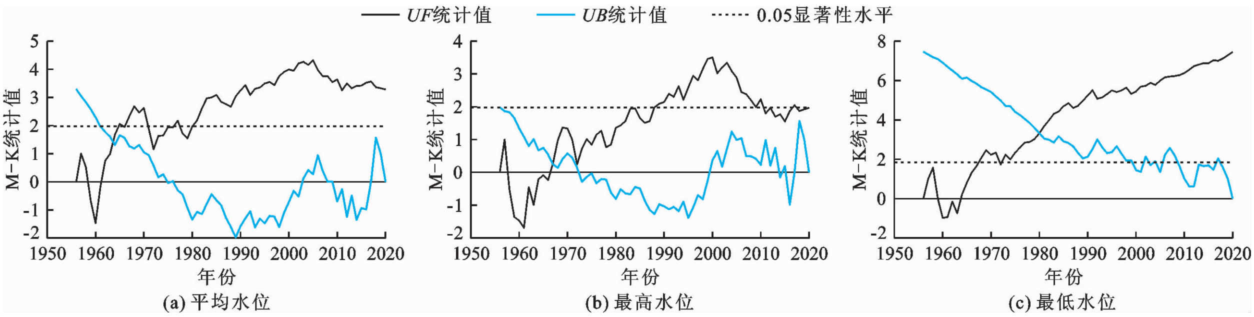

图 3 1956 - 2020 年城陵矶特征水位 M - K 统计量序列

表 5 1956 - 2020 年各时段不同水文期城陵矶特征水位 m

水文期	特征水位	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5
涨水期	月平均水位	23.84	24.47	24.79	24.89	24.98
	月均最高水位	24.41	26.65	26.77	26.83	26.70
	月均最低水位	22.24	22.68	22.35	23.34	22.41
丰水期	月平均水位	27.87	28.14	28.89	29.25	28.69
	月均最高水位	29.66	29.69	30.34	32.64	30.42
	月均最低水位	26.32	25.35	27.47	26.97	26.19
退水期	月平均水位	23.48	25.46	25.33	25.46	24.15
	月均最高水位	25.67	27.83	26.67	27.12	26.09
	月均最低水位	21.64	24.24	23.60	22.50	21.81
枯水期	月平均水位	19.34	19.84	20.05	21.29	21.70
	月均最高水位	20.16	20.75	20.73	22.82	22.45
	月均最低水位	18.55	19.11	19.41	20.01	20.81

对表 5 中的特征水位按不同水文期分析如下:

(1)涨水期。时段 1 的城陵矶水位在 22.24 ~ 24.41 m 之间波动,水位均值为 23.84 m。相较于时段 1,时段 2、3、4 的月平均水位分别上升 0.63、0.95、1.05 m,月均最高水位分别上升 2.24、2.36、2.42 m。时段 5 月平均水位继续抬升(24.98 m),月均最高水位有所下降(26.70 m)。月均最低水位在柘溪水库蓄水后和下荆江裁弯期间抬升,之后有所下降,葛洲坝截流后,月均最低水位抬升至 23.34 m,三峡工程蓄水后又回落至 22.41 m。上述结果表明,涨水期水利工程群对最高水位影响较大,柘溪水库蓄水后,城陵矶最高水位抬升 2 m 以上,下荆江系统裁弯提高了城陵矶最低水位。

(2)丰水期。城陵矶月平均水位和月均最高水位在时段 1 ~ 时段 4 逐时段抬升,月平均水位分别为 27.87、28.14、28.89、29.25 m,月均最高水位分别为 29.66、29.69、30.34、32.64 m,三峡水库蓄水后,则呈同步下降趋势,与时段 4 相比,分别下降了 0.56、2.22 m。月均最低水位由时段 1 的 26.32 m 下降至时段 2 的 25.35 m,时段 3 有所抬升,时段 4、5 又有所下降。上述结果表明,丰水期三峡工程运行对最高水位影响较大,这主要是受三峡水库调洪削峰运行期(7 月 1 日 – 8 月 31 日)的影响,长江荆江段泄洪量减少,湖南“四水”主汛期已过,此调度方式有利于降低洞庭湖洪水位,减轻了抗洪抢险压力;受水利工程群影响,丰水期月均最低水位有增有减,情况复杂。

(3)退水期。时段 1 的城陵矶水位在 21.64 ~ 25.67 m 之间波动,水位均值为 23.48 m。相较于时段 1,时段 2 的月平均水位以及月均最高、最低水位分别抬升了 1.98、2.16、2.60 m。与时段 2 相比,时段 3 的月平均水位以及月均最高、最低水位分别下降了 0.13、1.16、0.64 m。时段 4、5 月均最低水位继续下降,分别为 22.50、21.81 m,而月平均水位和月均最高水位在时段 4 上升、时段 5 下降。退水期城陵矶特征水位自柘溪水库蓄水后抬升,而期间水位总体上降低,三峡水库蓄水后特征水位下降,这是因为长江下泄量减少,湖南“四水”(进入枯水期)和荆南“三口”同期入湖水量减少,受水库正常蓄水运行期调控的影响,长江上游或“四水”流域如不发生较大洪水,则洞庭湖区水位呈下降趋势,进而导致特征水位的下降,表明水利工程群对城陵矶退水期特征水位产生了明显影响。

(4)枯水期。相较于时段 1,时段 2、3、4 的月平均水位分别抬升了 0.50、0.71、1.95 m,最高水位分别抬升了 0.59、0.57、2.66 m,最低水位分别抬升了 0.56、0.86、1.46 m。时段 5 的城陵矶月平均水位和月均最低水位分别抬升至 21.70、20.81 m,月均最高水位下降至 22.45 m。自 1963 年以来城陵矶平均水位和最低水位逐期抬升,1980 年后,最高水位壅高明显,三峡水库蓄水后,上升趋势减缓,这主要是受葛洲坝截流与三峡水库在该时段的补水调度影响[26,35],葛洲坝水库于 1981 年开始截流,三峡水库枯水期补水调度抬高了长江干流枯季最低水位,但补水能力有限,加之长江荆江段清水下泄,使河道受到冲刷,造成河床下切、水位降低,导致最高水位下降,最低水位和平均水位抬升。表明枯水期水利工程群的运行对城陵矶水位产生了明显影响。

综上所述,城陵矶特征水位对水利工程群产生了不同的响应,其中三峡工程的运行降低了城陵矶丰水期、退水期的特征水位,抬高了枯水期的平均水位、最低水位以及涨水期的平均水位,20 世纪 80 年代以来,城陵矶枯水期特征水位明显抬高,说明以葛洲坝和三峡工程等为代表的水利工程群在汛末蓄水对最高水位有影响,补水调度对枯水期平均水位和最低水位有影响。

3.2　水利工程群运行下典型年城陵矶特征水位变化

由 3.1 节可知,城陵矶水位受葛洲坝截流和三峡工程运行的影响较大,就不同水文期而言,丰水期和枯水期的变化更明显。因此,本文通过分析 1980 年后城陵矶丰水期和枯水期典型年的特征水位变化,揭示以葛洲坝和三峡工程为代表的水利工程群对城陵矶特征水位的影响。按照标准将第 4 时段的 1998、2001、1994 年和第 5 时段的 2017、2004、2006 年依次界定为丰水年、平水年和枯水年,在水利工程群运行影响下,第 4、5 时段各典型水文年的城陵矶特征水位如表 6 所示。

3.2.1　*水利工程群运行下丰水年城陵矶特征水位的变化*　对比分析表 6 中丰水年城陵矶特征水位演变特点可知,丰水期和枯水期的特征水位随时段呈下降趋势,相较于时段 4,时段 5 丰水期的平均水位、最高水位和最低水位分别下降了 4.10、3.61、1.68 m,枯水期分别下降了 1.14、0.75、0.12 m,平均水位变化最大,最低水位变化最小。由此说明,三峡工程的运行降低了城陵矶丰水年丰水期和枯水期的特征水位,该变化有利于削减长江中游洪峰,减轻洪水灾害的影响程度,但同时也要预防丰水年枯水期发生干旱。

表 6 水利工程群运行下城陵矶典型水文年特征水位

时段	典型水文年	年份	水文期	城陵矶水位/m		
				平均	最高	最低
时段 4 (1981 – 2002 年)	丰水年	1998	丰水期	32.64	35.44	28.41
			枯水期	22.82	24.44	20.74
	平水年	2001	丰水期	27.97	28.58	26.99
			枯水期	21.62	21.81	21.38
	枯水年	1994	丰水期	28.09	28.97	27.15
			枯水期	21.66	23.16	20.72
时段 5 (2003 – 2020 年)	丰水年	2017	丰水期	28.54	31.83	26.73
			枯水期	21.68	23.69	20.62
	平水年	2004	丰水期	29.08	29.87	28.37
			枯水期	20.81	21.74	19.71
	枯水年	2006	丰水期	26.19	28.42	23.78
			枯水期	21.84	23.90	21.05

3.2.2 水利工程群运行下平水年城陵矶特征水位的变化 对比分析表 6 中平水年城陵矶特征水位演变特点可知,枯水期特征水位下降,而丰水期上升,相较于时段 4,时段 5 枯水期的平均水位、最高水位和最低水位分别下降了 0.81、0.07、1.67 m,丰水期分别上升了 1.11、1.29、1.38 m,最低水位变化最大。这表明三峡工程的运行降低了平水年城陵矶枯水期特征水位,抬高了丰水期特征水位。

3.2.3 水利工程群运行下枯水年城陵矶特征水位的变化 对比分析表 6 中枯水年城陵矶特征水位演变特点可知,枯水期特征水位上升,而丰水期下降,相较于时段 4,时段 5 枯水期的平均水位、最高水位和最低水位分别上升了 0.18、0.74、0.33 m,丰水期分别下降了 1.90、0.55、3.37 m,丰水期最低水位变化最大。这表明三峡工程的运行使得城陵矶枯水年丰水期特征水位下降,枯水期特征水位上升,该变化有利于缓解城陵矶枯水年枯水期的旱情,同时也要预防枯水年水利工程运行导致的突发情况。

总体而言,城陵矶丰、平、枯水年的特征水位对三峡工程的运行产生了不同的响应。三峡水库运行有利于稳定枯水期水位,在一定程度上可以缓解长江中下游旱灾程度。

4 讨 论

洞庭湖水情受到长江干流和湖南“四水”水利工程群的综合影响而发生变化,该变化必将对洞庭湖湖口城陵矶的特征水位产生影响。研究表明各水利工程对特征水位的影响不一致,使城陵矶水位在不同阶段表现出不同的特点。

4.1 城陵矶特征水位时序变化分析

经分析,近几十年来城陵矶年特征水位总体呈显著上升趋势。从各时段年特征水位的变化来看,受柘溪水库全面投产和下荆江系统裁弯的影响,1963 – 1972 年城陵矶年特征水位呈下降趋势,这与段文忠[13]、肖潇等[30]的研究结论一致;三峡工程运行后降低了城陵矶的平均水位和最高水位,丛振涛等[20]、赖锡军等[22]、黄群等[25]在对城陵矶水位的研究中也得出了类似的结论;总体上自 20 世纪 80 年代以来,受葛洲坝和三峡工程等水利工程群的影响,城陵矶年均水位和年最高水位壅高,年最低水位显著抬升,段文忠等[14]在对城陵矶水位的研究中也得出了类似的结论。柴元方等[18]在对城陵矶水位的研究中发现,1967 年发生的突变与中州子裁弯有一定联系,本文对城陵矶水位进行 Mann – Kendall 突变检验分析时,也发现年最高水位在 1967 年发生突变,该突变年的发生与中州子裁弯密切相关。此外,本研究还发现年均水位在 1964 年发生的突变与柘溪水库建成蓄水有关,年最低水位在 1981 年发生的突变与葛洲坝截流有关。在特征水位季节变化上,城陵矶水位存在“涨 – 丰 – 退 – 枯”的变化特征,丰水期平均水位在葛洲坝截流后抬升,三峡工程运行后,枯水期平均水位和最低水位抬升,最高水位下降,这与周蕾等[29]的研究结论类似。

4.2 城陵矶典型年特征水位变化分析

各典型年城陵矶特征水位对三峡工程的运行产

生了不同的响应，三峡水库运行降低了城陵矶丰水年丰水期和枯水期、平水年枯水期、枯水年丰水期的特征水位，抬高了平水年丰水期、枯水年枯水期的特征水位，这与李景保等[26]的研究结论一致。从总体上看，该变化有利于缓解城陵矶枯水年枯水期的旱情、削弱长江中游洪峰、降低水灾影响。

5 结 论

本文采用 Mann－Kendall 趋势和突变检验法从不同时间尺度分析了长江干流和湖南“四水”水利工程群影响下洞庭湖湖口城陵矶特征水位的时序演变特征，得出以下主要结论：

（1）总体上城陵矶特征水位呈显著上升趋势，特征水位阶段性变化明显。其中，城陵矶年均水位、年最高水位在三峡水库蓄水运行的影响下，呈时段1～时段4逐期抬升而时段5下降的变化趋势，受水利工程群调蓄作用的影响，年最低水位逐时段抬升。

（2）柘溪水库蓄水以来，城陵矶涨、丰、退、枯水期特征水位产生了不同的响应。城陵矶枯水期特征水位自葛洲坝截流以来明显抬升，丰水期、退水期特征水位受三峡水库蓄水影响明显下降。

（3）水利工程群对城陵矶典型年丰水期和枯水期特征水位产生了不同的影响。三峡水库蓄水后，城陵矶丰水年丰水期和枯水期、平水年枯水期、枯水年丰水期特征水位下降，平水年丰水期、枯水年枯水期特征水位抬升。

（4）洞庭湖湖口城陵矶特征水位时序演变特征是人类活动与自然因素叠加作用的结果。本文在分析特征水位时序演变特征过程中仅考虑了人类活动（水利工程群）的影响作用，未考虑气候因素及工农业生产及生活用水的影响，同时在洪水期城陵矶水位受监利和螺山河段洪水的顶托概率也较大，也未考虑其对城陵矶特征水位的影响，这些问题有待今后探讨。

参考文献：

[1] 段蕴歆，李景保，吕殿青，等．三峡水库运行下长江与洞庭湖交汇区水情态势及相互顶托作用[J]．长江流域资源与环境，2019，28（10）：2471－2483.

[2] 高 耶，谢永宏，邹冬生．三峡工程运行前后荆江三口水文情势的变化[J]．长江流域资源与环境，2020，29（2）：479－487.

[3] 汪雁佳，李景保，李雅妮，等．长江荆南三口河系水位演变规律及对江湖水量交换关系的响应[J]．地理研究，2019，38（9）：2302－2313.

[4] 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[J]．湖泊科学，2015，27（6）：991－996.

[5] 程海云，香天元，唐 聪．长江中游城陵矶河段2016－2020年汛期水位非正常波动：影响因子及滤波修正[J]．湖泊科学，2022，34（1）：286－295.

[6] 张 明，冯小香，刘 哲，等．三峡蓄水后洞庭湖水沙环境变化对湖区航道的影响[J]．水科学进展，2015，26（3）：423－431.

[7] 傅开道，黄河清，钟荣华，等．水库下游水沙变化与河床演变研究综述[J]．地理学报，2011，66（9）：1239－1250.

[8] 董林垚，许文盛，胡 波，等．三峡蓄水前后宜昌－城陵矶水情多尺度变化特征分析[J]．长江流域资源与环境，2016，25（12）：1870－1878.

[9] 朱玲玲，杨 霞，许全喜．上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应[J]．地理学报，2017，72（7）：1184－1194.

[10] 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[J]．湖泊科学，2014，26（1）：1－8.

[11] 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[J]．应用基础与工程科学学报，2010，18（2）：273－280.

[12] 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[J]．水利学报，2018，49（4）：456－463.

[13] 段文忠．下荆江裁弯与城陵矶水位抬高的关系[J]．泥沙研究，1993（1）：39－50.

[14] 段文忠，郑亚慧，刘建军．长江城陵矶－螺山河段水位抬高及原因分析[J]．水利学报，2001（2）：29－34.

[15] 孟 熊，廖小红，黎昔春．洞庭湖水位变化特性及影响研究[J]．人民长江，2014，45（13）：17－21.

[16] 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[J]．湖泊科学，2017，29（3）：753－764.

[17] 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[J]．湖泊科学，2017，29（4）：974－983.

[18] 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[J]．水电能源科学，2017，35（8）：60－64.

[19] 柴元方，李义天，吕宜卫，等．各时段城陵矶水位变化特征及其成因分析[J]．水电能源科学，2017，35（5）：25－28＋152.

[20] 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[J]．水力发电学报，2014，33（3）：23－28.

[21] 赖锡军，姜加虎，黄 群．三峡水库调节典型时段对洞庭湖湿地水情特征的影响[J]．长江流域资源与环境，2011，20（2）：167－172.

[22] 赖锡军，姜加虎，黄 群．三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]．湖泊科学，2012，24（2）：178－184.

[23] 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[J]．湖泊科学，2019，31（6）：1713－1725.

[24] 孙思瑞,谢 平,陈柯兵,等. 三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(8):1819 - 1826.

[25] 黄 群,孙占东,姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. 湖泊科学,2011,23(3):424 - 428.

[26] 李景保,张照庆,欧朝敏,等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应[J]. 地理学报,2011,66(9):1251 - 1260.

[27] 徐长江,徐高洪,戴明龙,等. 三峡水库蓄水期洞庭湖区水文情势变化研究[J]. 人民长江,2019,50(2):6 - 12.

[28] 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[J]. 水电能源科学,2018,36(10):31 - 33 + 48.

[29] 周 蕾,李景保,汤祥明,等. 近 60 a 来洞庭湖水位演变特征及其影响因素[J]. 冰川冻土,2017,39(3):660 - 671.

[30] 肖 潇,毛北平,吴时强. 近 100 年来长江与洞庭湖汇流河段水文特征演变[J]. 湖泊科学,2021,33(1):266 - 276.

[31] 胡光伟,毛德华,李正最,等. 荆江三口 60a 来入湖水沙变化规律及其驱动力分析[J]. 自然资源学报,2014,29(1):129 - 142.

[32] 刘登峰,雷江群,黄 强,等. 具有近百年观测数据的径流演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(3):24 - 28.

[33] 张跃华,徐 刚,张忠训,等. 嘉陵江年径流量时间序列趋势分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2011,28(5):33 - 36.

[34] 姚治君,管彦平,高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展,2003,22(6):599 - 606.

[35] 周永强,李景保,张运林,等. 三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值[J]. 地理学报,2014,69(3):409 - 421.

(上接第 71 页)

[18] 马涵玉,黄川友,殷 彤,等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):101 - 110.

[19] 宗 鑫. 基于 SD 模型的甘肃省水资源承载力及结构性需水预测[J]. 中国农村水利水电,2021(12):83 - 90 + 98.

[20] 杨光明,时岩钧,杨 航,等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估——以重庆市为例[J]. 人民长江,2019,50(8):6 - 13 + 51.

[21] 高 亚,章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):103 - 109.

[22] 杨海燕,孙晓博,周广宇,等. 基于系统动力学模型的泰安市水资源与水环境系统模拟分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(35):348 - 355.

[23] 贾建辉,龙晓君. 水资源承载力预测模型研究[J]. 水利水电技术,2018,49(10):21 - 27.

[24] 李 玲,潘雪倩,夏威夷,等. 基于 SD 模型的重庆市水资源承载力模拟分析[J]. 中国农村水利水电,2018(5):128 - 133.

[25] 王宵君,杨 欢,李桢萍,等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展研究——以赣州市为例[J]. 人民珠江,2022,43(4):9 - 16 + 62.

[26] 吴向东,许新发,成静清,等. 江西省水资源利用效率时空演变及其影响因素[J]. 人民长江,2021,52(12):92 - 98 + 121.

[27] 危文广,黎良辉,赖敬飞,等. 基于理想点法的江西省水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):25 - 30.