

张智伟,蒋陈娟,李闪闪. 长江近口段水动力特征对来水变异的响应[J]. 海洋学研究, 2017, 35(1): 25-32, doi:10.3969/j.issn.1001-909X. 2017. 01. 003.

ZHANG Zhi-wei, JIANG Chen-juan, LI Shan-shan. Response of hydrodynamics in tidal reach of the Yangtze River to variation in runoff[J]. Journal of Marine Sciences, 2017, 35(1): 25-32, doi:10.3969/j.issn.1001-909X. 2017. 01. 003.

长江近口段水动力特征对来水变异的响应

张智伟,蒋陈娟*,李闪闪

(扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:三峡水库的调蓄作用使长江中下游的径流动力发生异变,并诱使长江近口段的潮汐动力发生变化。本文基于长江近口段近20 a的流量和潮位资料,运用水文学、统计学和调和分析的方法研究长江近口段的水动力特征对三峡水库调蓄作用产生的来水变异的响应。研究表明:三峡水库的调蓄作用使长江近口段的径流动力发生变化,泄水期1—3月多年月平均流量增幅达20%以上;蓄水期9—11月多年月平均流量减少,10月的多年平均流量减少8 488 m³/s。长江近口段径流动力的变化使潮汐动力发生相应调整,大通—江阴段保证率为10%~70%的高、低潮位显著下降,而保证率为80%~100%的高、低潮位则小幅上升。泄水期1—3月平均潮差和M₂分潮振幅减小,近口段的潮汐动力减弱;蓄水期9—11月平均潮差和M₂分潮振幅增加,尤其是10月份潮差增加最为显著,近口段潮汐作用显著增强。

关键词:三峡水库;长江近口段;径流动力;潮汐动力;来水变异

中图分类号:TV148

文献标识码:A

文章编号:1001-909X(2017)01-0025-08

Doi:10.3969/j.issn.1001-909X. 2017. 01. 003

0 引言

长江是世界第三大河流,全长约6 300 km,流域面积约180万 km²。大通水文站是长江干流上的综合性水文站,其出口断面控制着长江流域约94%的汇水面积,故国内外学者大多将大通站作为长江入海水沙通量的考察站^[1]。大通站1950—2010年的多年平均流量为28 300 m³/s,1956—2009年的多年平均输沙量为3.9亿 t,2010年后下降至1亿 t左右。长江巨大的人海水沙通量,对河口地区的地貌形成、沉积过程、海岸带以及大陆架的生态环境有着重要的影响。大通站近20 a的水文资料显示:长江下游河段的年径流量变化不大,但径流量的季节性变化显著,夏秋季雨水较多、径流量大,冬春季雨水较少、径流量小,洪季的径流量占全年径流量的70.8%^[2]。

长江河口属于中潮河口,潮汐作用显著,其中南支口门中浚站多年平均潮差为2.67 m,最大潮差为4.62 m^[3]。长江河口的潮汐类型为不规则半日潮,半日分潮占绝对优势,尤其以M₂分潮为主^[4]。对于潮区界和潮流界的划分,学界一般认为枯季潮区界在大通,而洪季潮区界则下移至芜湖;枯季潮流界在镇江,而洪季潮流界则下移至江阴^[5]。长江近口段为大通至徐六泾之间的河段,近口段作为河流和河口的过渡段,以强烈的径潮相互作用为主要特征,对流域径流动力和河口潮汐动力的变化极其敏感。

据不完全统计,长江流域已经兴建了46 000多座水坝,7 000多座涵闸,这些水利工程的修建改变了长江的径流动力特征^[6]。其中尤以2003年开始蓄水,2010年首次按175 m设计水位蓄水,水库总库容约430

收稿日期:2016-10-20

修回日期:2016-12-13

基金项目:江苏省水利动力工程重点实验室开放基金项目资助(K12017);江苏省高校优势学科建设工程项目资助

作者简介:张智伟(1995—),男,江苏南京市人,主要从事港口航道与海岸工程方面的研究。E-mail:zzwzane@163.com

*通讯作者:蒋陈娟(1984—),女,讲师,主要从事河口海岸动力、沉积、地貌过程研究。E-mail:jiangchenjuan001@163.com

亿 m^3 的三峡水库影响最大,将大幅改变长江中下游来水来沙环境^[7-8]。随着长江上游三峡水库等大型水利工程的运行,在水库的调蓄作用下,径流的年内分配出现显著变化,长江下游的枯水期将延长、最小流量增加,这势必对长江近口段的水动力特征产生影响^[9-11]。

对三峡水库蓄水前后水动力特征变化的研究,有助于预测河口的演变趋势,为河口合理的整治规划、河口资源开发利用、河口生态环境维护等提供科学依据,同时也为南京以下河段 12.5 m 深水航道的疏浚提供参考,具有重要的现实意义。虽然已有不少学者对长江河口的潮汐潮流特征进行研究^[12],但对于近口段水动力特征对三峡水库调蓄作用的响应研究成果甚少,且已有研究采用一维河网数学模型作为研究手段^[13],故本文将基于近 20 a 近口段各水文站的实测资料,着重研究三峡水库蓄水前后,长江近口段的水动力特征变化。

1 数据和研究方法

本文共收集三峡工程施工前 1978—1987 年,工程建成后 2003—2012 年近 20 a 的大通站日均流量资料,以及芜湖、马鞍山、南京、镇江、江阴和天生港 6 个水文站的逐潮高低潮位和潮时数据,资料来源于长江流域水文年鉴^[14]。1978—1987 年和 2003—2012 年两个时段的多年平均流量分别为 $27\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $27\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$,变化幅度仅为 2%,两个时段均包含典型枯水年和丰水年,故认为这两个时段的径潮动力具有可比性。

通过对大通站流量数据进行统计分析,研究长江近口段的上游来水量变化,以探讨径流动力的变化。通过对芜湖、马鞍山、南京、镇江、江阴和天生港 6 个水文站(图 1)的潮位和潮时数据进行统计分析,对比工程前后各站的潮位和潮差,分析潮汐动力对流量变化的响应。根据三峡水库的调蓄情况,选取典型年典型月的高低潮位数据进行调和,研究主要潮汐分潮对工程的响应。

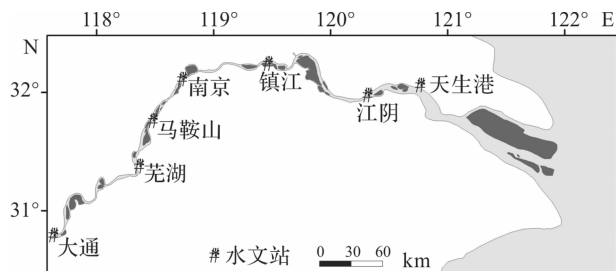


图 1 长江河口概图

Fig. 1 Estuary of Yangtze River

2 水动力特征变化

三峡水库的调蓄作用直接改变长江下游的径流动力特征,在径潮相互作用下,潮汐动力也会出现相应的调整。本研究主要从径流动力和潮汐动力两方面来研究近口段水动力特征对三峡水库调蓄作用的响应。

2.1 径流动力变化

主要从调蓄前(1978—1987 年)和调蓄后(2003—2012 年)两个时段的大通站多年月均流量的变化来分析调蓄对径流年内分配的影响,并选取调蓄前后典型枯水年和丰水年来对比分析径流年内分配的变化。

2.1.1 多年月平均流量变化

三峡工程建成按正常运行方式蓄水后,1—3 月长江下游河段平均流量增加,各月增幅分别为 27.17%、34.02% 和 24.04%;5 月和 6 月为应对汛期,清空防洪库容,下游流量略有增加,增幅在 5% 左右;7 月和 8 月基本敞开下泄,水库调节作用小;9—11 月水库蓄水,长江下游流量大幅下降,各月降幅分别达 8.87%、24.88% 和 15.53%,尤以 10 月为最,下游流量下降 $8\ 488\ \text{m}^3/\text{s}$;12 月基本无变化(图 2 和表 1)。

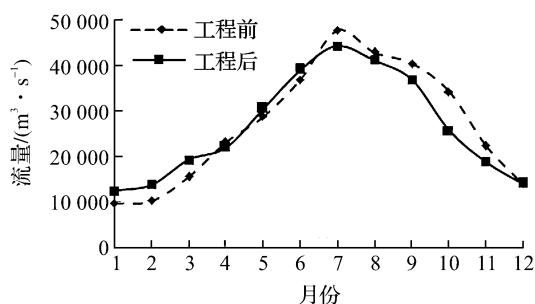


图 2 调蓄前后多年月平均流量变化

Fig. 2 Variation of multi-year monthly mean discharge before and after regulation

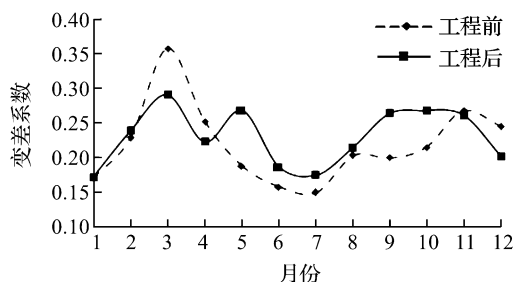


图 3 调蓄前后多年月平均流量变差系数

Fig. 3 Variation coefficient of multi-year monthly mean discharge before and after regulation

表 1 调蓄前后多年月平均流量对比

Tab. 1 Comparison of multi-year monthly mean discharge before and after regulation m³/s

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
调蓄前	9 833	10 310	15 522	23 210	28 770	36 850	47 570	42 796	40 340	34 120	22 290	14 026
调蓄后	12 505	13 817	19 253	21 939	30 445	38 980	44 183	41 086	36 760	25 632	18 827	14 070
变化量	2 672	3 507	3 731	-1 271	1 675	2 130	-3 387	-1 710	-3 580	-8 488	-3 463	44

从各月流量的变差系数来看,3月份的变差系数明显减小,由调蓄前的0.35降至调蓄后的0.29;5月份变差系数则明显增大;蓄水期9月和10月的变差系数明显增大,增幅均为0.06(图3)。因此,枯季由于水库补水调蓄作用,流量的年际变化减小;蓄水期水库蓄水的运行调节使流量的年际变化增大。

2.1.2 典型水文年流量变化

由于长江下游水系错综复杂,天然年份来水量变化随机性大,影响因素复杂,因此选择典型水文年份作对比分析。因1979年和2011年月平均流量均在22 000 m³/s左右且均为同时期较小值;而1980年和2012年的月平均流量均在31 500 m³/s左右且均为同时期较大值,各年份的年内变化趋势相似,故以1979年和1980年作为调蓄前典型枯水年和丰水年,以2011年和2012年作为调蓄后典型枯水年和丰水年。

枯水年,1—3月流量明显增大,增幅分别为112%、81%和38%;9月和10月流量明显减小,降幅均为45%左右(表2)。丰水年,1—6月流量均有不同程度的增大,尤其以1—3月增幅最为明显,增幅分别达67%、90%和34%;9—11月流量明显减小,降幅分别达30%、29%和19%(表2)。

在三峡水库的调蓄作用下,丰枯水年1—3月大通站流量均有不同程度增加,增加量均在4 000 m³/s以上。汛后9—10月,大通站流量均有不同程度的减少。而在11月,大通站枯水年流量较调蓄前增加18%,丰水年流量则较调蓄前减少19%。总体而言,枯水年的年内径流量变化幅度大于同时期的丰水年年内径流量变幅。

因此,在三峡工程建成后,水库对径流的调蓄作用对长江下游来水量有明显影响,中枯水期延长,最小流量增加。

表 2 调蓄前后典型水文年大通站流量对比

Tab. 2 Comparison of discharge at Datong Station before and after regulation in typical hydrological years m³/s

月份	枯水年				丰水年			
	1979年	2011年	变化量	变化幅度(%)	1980年	2012年	变化量	变化幅度(%)
1月	7 220	15 300	8 080	112	8 150	13 600	5 450	67
2月	7 670	13 900	6 230	81	8 190	15 600	7 410	90
3月	10 400	14 400	4 000	38	19 100	25 500	6 400	34
4月	14 800	15 800	1 000	7	23 000	23 300	300	1
5月	24 300	16 500	-7 800	-32	38 600	42 500	3 900	10
6月	29 200	33 400	4 200	14	38 400	48 600	10 200	27
7月	42 400	36 900	-5 500	-13	50 400	50 700	300	1
8月	36 800	30 100	-6 700	-18	57 500	52 700	-4 800	-8
9月	43 800	23 600	-20 200	-46	54 800	38 200	-16 600	-30
10月	37 200	20 500	-16 700	-45	39 000	27 500	-11 500	-29
11月	16 200	19 100	2 900	18	26 900	21 900	-5 000	-19
12月	9 560	13 700	4 140	43	13 300	19 100	5 800	44

2.2 潮汐动力的变化

潮汐动力特征的变化主要通过潮汐特征参数的变化进行分析,包括:潮位、潮差和潮汐分潮振幅。

2.2.1 潮位变化

从三峡水库运行前后芜湖、南京和江阴三站高潮位和低潮位的保证率曲线来看,保证率为10%~

70%的高、低潮位均出现明显的下降(江阴站除外),而保证率为80%~100%的高、低潮位则出现小幅的上升(图4和图5)。这是由三峡水库的调蓄使下游河段的中枯水期延长、最低水位提高所引起的。而江阴站的变化较小是因为其所受的潮汐作用较强,径流变化对其影响不显著。

径流变化对潮位的影响程度自江阴向上游逐渐增强,但江阴以下河段受潮汐动力影响显著,因而其潮位变化对径流变化的响应不敏感。对于航道工程关心的设计高潮位(保证率为 90%),芜湖、南京和江阴三站的降幅分别为 0.6、0.27 和 0.01 m;而对于设计低潮位(保证率为 10%),芜湖、南京和江阴三站的增幅分别为 0.17、0.17 和 0.04 m。因此,三峡水库的调蓄作用对大通—江阴段的潮位有较大影响,最低水位的提高使航道的设计低潮位提高,有利于通航能力的提升。

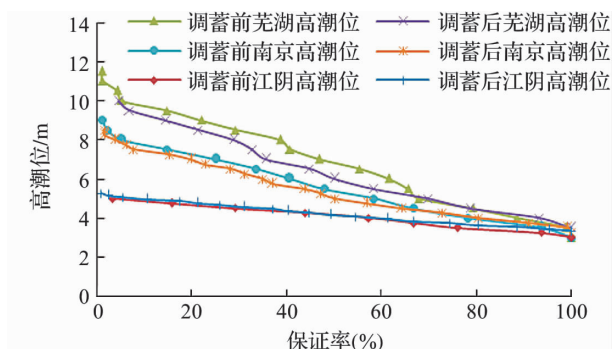


图 4 调蓄前后各水文站高潮位保证率曲线

Fig. 4 Cumulative frequency curve of high tide level in different hydrological stations before and after regulation

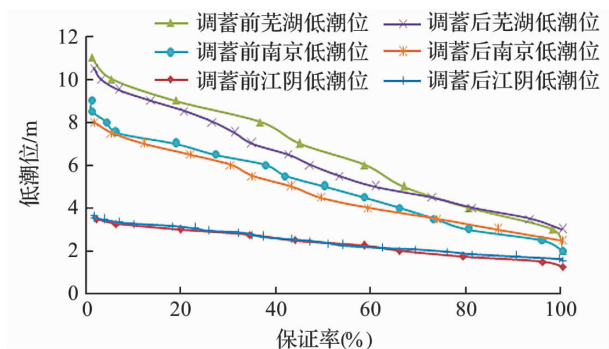


图 5 调蓄前后各水文站低潮位保证率曲线

Fig. 5 Cumulative frequency curve of low tide level in different hydrological stations before and after regulation

从各月平均潮位在蓄水前后的变化来看(图 6), 1—3 月沿程各站的平均潮位均有不同程度的增加, 其中芜湖站增幅最大, 其 1—3 月增幅分别为 0.21、0.38 和 0.41 m。4 月, 沿程各站平均潮位出现下降, 且自口门向上游下降幅度逐渐增加, 尤其以芜湖为甚, 下降 0.55 m, 这应该与三峡水库对春汛的削峰作

用有关。5—6 月, 下游各站的平均潮位略有增加。以南京为例, 5 月和 6 月平均潮位分别增加 0.05 和 0.06 m, 这与三峡水库为应对汛期清空防洪库容有关。汛后 9—11 月, 沿程各站的平均潮位均出现下降, 下降幅度自口门向上游增加, 芜湖下降幅度最大, 其 9、10、11 月平均潮位分别下降 0.87、1.85 和 1.14 m; 3 个月中, 尤以 10 月的下降幅度最大, 这和三峡水库汛后蓄水的运行状态密切相关。

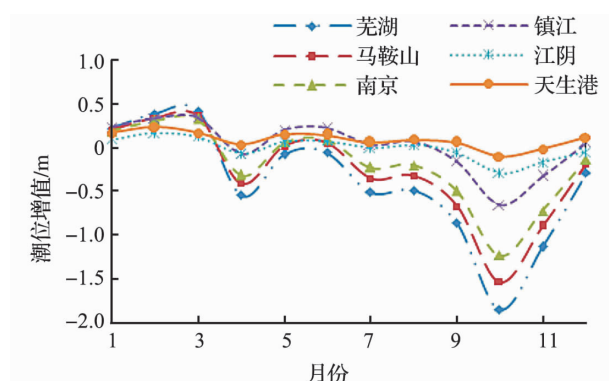


图 6 调蓄前后各水文站月平均潮位变幅

Fig. 6 Variation of monthly mean tide level in different hydrological stations before and after regulation

2.2.2 潮差变化

从各月平均潮差在蓄水前后的变化来看(图 7), 除镇江段多数月份潮差减小外, 其余河段的各月平均潮差基本上均增大, 仅 3 月南京及以上河段出现潮差减小的情况(图 7)。1—2 月, 各河段平均潮差略有增加, 且越往下游潮差增加越明显。4—8 月平均潮差增幅并不大, 多在 0.05 m 左右。9—11 月, 平均潮差

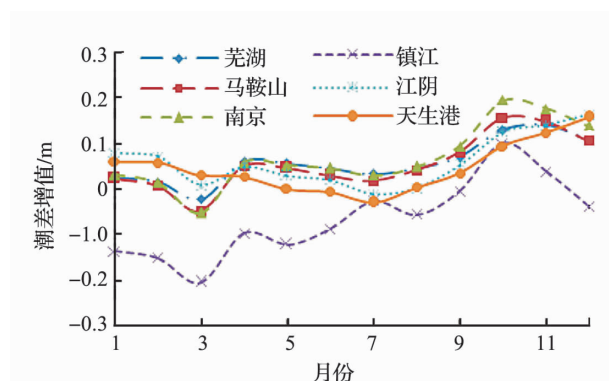


图 7 调蓄前后各水文站月平均潮差变幅

Fig. 7 Variation of monthly mean tide range in different hydrological stations before and after regulation

有较大的增幅,尤其是南京以上河段,南京站 9—11 月份潮差分别增加 0.09、0.19 和 0.18 m。三峡水库蓄水期的蓄水致使下游的径流作用减弱,潮汐动力增强,潮差增大。

除镇江站外,调蓄后时段 2003—2012 年的多年平均潮差明显大于调蓄前时段 1978—1987 年的多年平均潮差,增幅为 0.05~0.07 m(表 3)。因此,近 10 a 长江近口段的潮汐动力有增强的趋势。为更好地探讨三峡水库的调蓄作用对潮差的影响,在下游各水文站的多年月平均潮差变幅中减去由潮汐动力增强而引起的潮差增量,得到调整后的各月平均潮差增值(图 8)。在三峡水库泄水期 1—3 月,镇江以上河段潮差均有不同程度的减小,其中 3 月各水文站的潮差均减小,天生港、江阴、镇江、南京、马鞍山和芜湖各站潮差分别减小 0.02、0.05、0.14、0.12、0.10 和 0.08 m(图 8)。在三峡水库蓄水期 9—11 月,各水文站潮差均有所增加,且 10 月和 11 月增幅最大,以南京站为例,9—11 月潮差增幅分别为 0.02、0.12 和 0.11 m,这与三峡水库蓄水使径流动力减弱,潮汐动力相对增强有关。

表 3 调蓄前后各水文站多年平均潮差变化

Tab. 3 Variation of multi-year mean tide range in different hydrological stations before and after regulation m

站位	芜湖	马鞍山	南京	镇江	江阴	天生港
调蓄前	0.23	0.37	0.50	0.99	1.68	1.93
调蓄后	0.28	0.42	0.57	0.92	1.74	1.97
变化值	0.06	0.05	0.07	-0.07	0.06	0.05

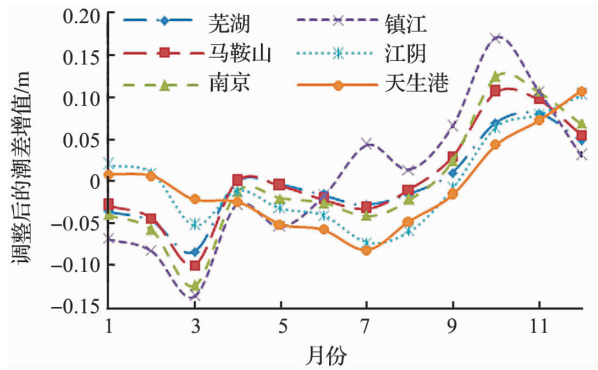


图 8 调整后的调蓄前后月平均潮差变幅

Fig. 8 Variation of monthly mean tide range before and after regulation after adjustment

从月平均潮差多年的变差系数来看(图 9),泄水期 1—3 月南京以上各站变差系数有减小的趋势,即各月平均潮差的变幅减少。5 月变差系数明显增大,即 5 月近口段的平均潮差的变幅较调蓄前增大,增大幅度沿程自口门向上游递增。7—9 月除镇江段外,沿程各站潮位变差系数有小幅增加,以上游芜湖段增加幅度最为明显。汛后 10—12 月,镇江以上河段,变差系数均有所下降。江阴以下河段全年基本没有变化,这与江阴以下河段受潮汐作用影响显著有关。总体来看,水库的调蓄使泄水期和蓄水期的月平均潮差变差系数减小,即各月平均潮差的年际变化减小。

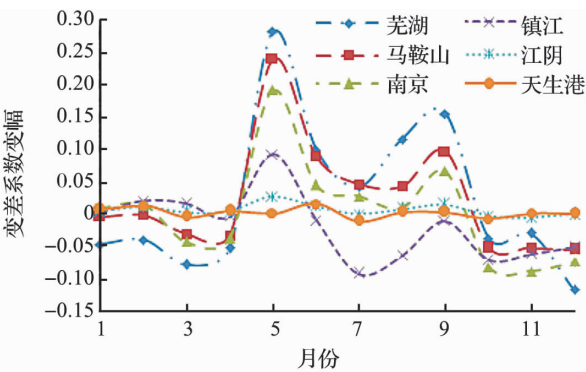


图 9 调蓄前后各水文站月平均潮差变差系数变幅

Fig. 9 Variation of variation coefficient of mean tide range in different hydrological stations before and after regulation

2.2.3 分潮振幅变化

为了进一步分析长江近口段在三峡水库建成后的潮汐特征变化,选取典型枯水年 1979 年、2011 年和典型丰水年 1980 年、2012 年的高低潮位数据进行调和。由于长江近口段以半日分潮为主,又以 M_2 分潮占主导地位,所以主要分析 M_2 分潮振幅的变化情况。

泄水期 1—3 月,枯水年,各水文站(除江阴站外) M_2 分潮振幅均减小(图 10),各站如去除全年潮汐动力整体变化的影响,芜湖、马鞍山和南京三站的 M_2 分潮振幅显著减小,镇江、江阴和天生港站变化较小(表 4);丰水年, M_2 分潮振幅沿程各站(除芜湖和镇江站外)均增大,但去除全年潮汐动力整体变化的影响,各站 M_2 分潮振幅均明显减小,减幅均大于 5 cm。因此,三峡水库泄水期长江下游径流动力增强,近口段 M_2 分潮振幅减小,这也和潮差的变化规律相符合。

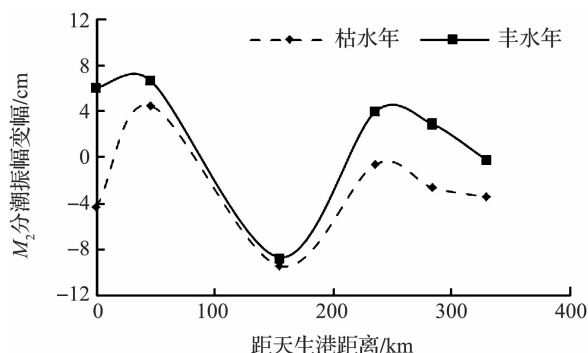


图 10 调蓄前后 1—3 月各水文站 M_2 分潮振幅变幅
Fig. 10 Variation of M_2 constituent amplitude
in different hydrological stations from Jan.
to Mar. before and after regulation

蓄水期 9—11 月,南京以上河段径流动力占主导作用,地形的非线性作用和径流作用下的潮波变形显著,调和分析的精度较低,故仅讨论南京站及其以下河段的 M_2 分潮振幅变化。在枯水年和丰水年,南京以下各站 M_2 分潮振幅均有不同程度的增加,以江阴

站为例, M_2 分潮振幅分别增加 9.6 和 13.7 cm。如果去除全年潮汐动力整体变化的影响, M_2 分潮振幅仍明显增大。因此,三峡水库蓄水期长江下游径流动力减弱,近口段 M_2 分潮振幅显著增强,这也和潮差的变化规律相符合。

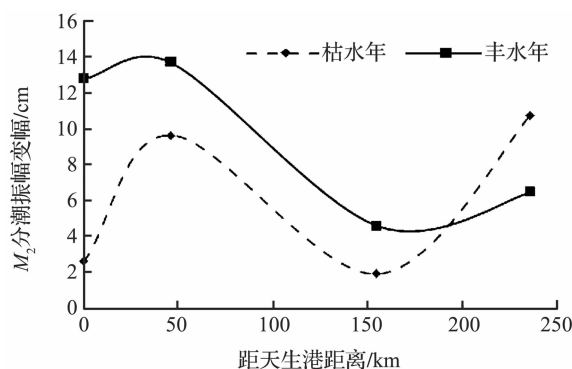


图 11 调蓄前后 9—11 月各水文站 M_2 振幅变幅
Fig. 11 Variation of M_2 constituent amplitude
in different hydrological stations from Sep.
to Nov. before and after regulation

表 4 调蓄前后典型年年均潮差和 M_2 分潮振幅变化

Tab. 4 Variation of M_2 constituent amplitude and annual mean tide range before and after regulation in typical years

站 位	枯水年			丰水年		
	年均潮差 增量/cm	M_2 分潮振幅增量/cm		年均潮差 增量/cm	M_2 分潮振幅增量/cm	
		1—3 月	9—11 月		1—3 月	9—11 月
芜湖	7	-3.4		6	-0.2	
马鞍山	9	-2.6		8	2.9	
南京	13	-0.6	10.8	14	4.0	6.5
镇江	-4	-9.4	1.9	-3	-8.7	4.6
江阴	9	4.5	9.6	12	6.7	13.7
天生港	-6	-4.3	2.6	13	6.1	12.8

3 结论

三峡水库的调蓄作用使长江近口段的径流动力发生变化,并以中枯水期延长、最小流量增加为显著特征。泄水期 1—3 月,长江近口段多年月平均流量显著增加,增幅达 20% 以上;蓄水期 9—11 月,长江近口段多年月平均流量减小,尤其是 10 月份的多年月平均流量减少 8 488 m^3/s 。

长江近口段径流动力的变化使潮汐动力发生相应调整,并以泄水期潮汐动力减弱、蓄水期潮汐动力增强为特征。三峡水库的调蓄作用对大通—江阴段的潮位有较大影响,保证率为 10%~70% 的高、低潮

位出现明显的下降,而保证率为 80%~100% 的高、低潮位则出现小幅上升,有利于通航能力的提升。在三峡水库的调蓄作用下,1—3 月平均潮差和 M_2 分潮振幅减小,尤其是 3 月潮差减小明显,说明三峡水库在此期间的泄水显著削弱了近口段的潮汐作用。9—11 月平均潮差和 M_2 分潮振幅增加,尤其是 10 月潮差增加最为显著,说明三峡水库在此期间的蓄水使近口段的潮汐作用显著增强。

参考文献 (References):

[1] ZHANG Er-feng, CHEN Xi-qing. Changes of water discharge between Datong and the Changjiang estuary during the dry season

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(2): 231-238.
- 张二凤, 陈西庆. 长江大通河口段枯季的径流量变化[J]. *地理学报*, 2003, **58**(2): 231-238.
- [2] LI Jia. Tidal limit and tidal current limit & response to major engineering in Yangtze River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004.
- 李佳. 长江河口湖区界和潮流界对重大工程的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [3] CHEN Ji-yu, ZHANG Chong-le. Nature environment of the Yangtze River estuary and its adjacent sea[J]. *Journal of East China Normal University: Nature Science*, 1987(2): 86-94.
- 陈吉余, 张重乐. 长江河口及其邻近海域的自然环境[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1987(2): 86-94.
- [4] YANG Zheng-dong. Analysis of tidal characteristics of the tide gauges in the Changjiang estuary[J]. *Journal of East China Normal University: Nature Science*, 2012(3): 111-118.
- 杨正东. 长江河口潮位站潮汐特征分析[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2012(3): 111-118.
- [5] ZUO Shu-hua. Difference of hydrodynamics and sediment characters at typical reaches & analysis to factors in the Yangtze River [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- 左书华. 长江河口典型河段水动力、泥沙特征及影响因素分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [6] ZOU Zhen-hua, LI Qiong-fang, XIA Zi-qiang, et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, **35**(6): 622-626.
- 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, **35**(6): 622-626.
- [7] MEI X, DAI Z, GELDER P H A J M, et al. Linking Three Gorges Dam and downstream hydrological regimes along the Yangtze River, China[J]. *Earth & Space Science*, 2015, **2**(4): 94-106.
- [8] HU Xiang-yang, ZHANG Xi-bing, HUANG Yue. Research on change of coming sediment and coming water of middle-lower Yangtze River after TGP early operation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, **27**(6): 4-9.
- 胡向阳, 张细兵, 黄悦. 三峡工程蓄水后长江中下游来水来沙变化规律研究[J]. *长江科学院院报*, 2010, **27**(6): 4-9.
- [9] CHEN J, FINLAYSON B L, WEI T, et al. Changes in monthly flows in the Yangtze River, China-With special reference to the Three Gorges Dam[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **536**(5): 293-301.
- [10] GUO H, HU Q, ZHANG Q, et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **416-417**(2): 19-27.
- [11] QIANG A, WU Y Q, TAYLOR S, et al. Influence of the Three Gorges Project on saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. *Environmental Geology*, 2009, **56**(8): 1 679-1 686.
- [12] LEI Z, ZHANG J, KONG J. Numerical simulation of water level under interaction between runoff and estuarine dynamics in tidal reach of the Yangtze River[J]. *China Ocean Engineering*, 2009, **23**(3): 543-552.
- [13] CAO Qi-xin, SUN Zhao-hua, FENG Qiu-fen. Effects of the Three Gorges Reservoir on hydrodynamics in tidal reach of the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(6): 844-850.
- 曹绮欣, 孙昭华, 冯秋芬. 三峡水库调节作用对长江近口段水文水动力特性影响[J]. *水科学进展*, 2012, **23**(6): 844-850.
- [14] Changjiang Water Resources Commission. Hydrological year book of the Yangtze river basin of the People's Republic of China(the lower reaches of the Yangtze River Region)[M]. Beijing: The Hydrographic Office of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1978—1987, 2003—2012.
- 长江水利委员会. 中华人民共和国水文年鉴长江流域水文资料(长江下游干流区)[M]. 北京: 中华人民共和国水利部水文局, 1978—1987, 2003—2012.

Response of hydrodynamics in tidal reach of the Yangtze River to variation in runoff

ZHANG Zhi-wei, JIANG Chen-juan*, LI Shan-shan

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The operation of Three Gorges Reservoir causes the variation of runoff in the middle and lower reaches of the Yangtze River, inevitably resulting in the changes in tidal dynamics. Based on the data of river discharge and tidal level in recent 20 years, the response of hydrodynamics in tidal reach of the Yangtze River to variation in runoff was investigated by statistical analysis and tidal harmonic analysis. The results show that the operation of Three Gorges Reservoir causes the significant change in interannual distribution of runoff, with river discharge increase by more than 20% percent in discharging period and decrease during storage period. Besides, in river reach between Datong and Jiangyin, the tidal level with guarantee ratio of 10%~70% is significantly decreased, but the tidal level with guarantee ratio of 80%~100% is slightly increased. Furthermore, the tidal range and amplitude of M_2 tidal constitute is decreased during discharging period, indicating a decrease in tidal dynamics, while the tidal range and amplitude of M_2 tidal constitute is increased during storage period, indicating a increase in tidal dynamics.

Key words: Three Gorges Reservoir; tidal reach of the Yangtze River; river dynamics; tidal dynamics; variation in runoff