

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.021

长江口综合整治工程前后潮汐特征分析

严以新^{1 2}, 刘均卫^{1 2}, 吴德安^{1 2}, 童朝锋^{1 2}

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

2. 河海大学交通学院、海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用改进的 Godin 潮汐调和分析及预报程序, 对长江口北槽附近横沙和北槽中两验潮站的潮位资料进行调和, 得到不同年份不同时段 11 个分潮的振幅 H 、迟角 g 、平均海平面值 Z_0 以及各站的特征潮位。根据计算结果比较长江口综合整治工程前后横沙站和北槽中站各主要分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) 调和常数的变化, 分析综合整治工程前后特征潮位的变化趋势; 利用工程前的潮汐调和常数预报 2002 年、2003 年和 2006 年横沙和北槽中两验潮站的潮位过程, 对预报潮位过程和实测潮位过程进行比较。分析结果表明, 两站主要分潮的调和常数、特征潮位以及潮位过程, 在整治工程后特别是 2003 年和 2006 年发生了较明显的变化。

关键词: 长江口; 调和; 潮位特征; 综合整治工程; 潮位过程

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)01-0100-05

长江口属于三角洲型中等强度潮汐河口, 动力条件复杂。据大通站水文资料统计, 多年平均径流总量达 9250 亿 m^3 , 输沙总量为 4.86 亿 t ^[1]; 河口潮汐来自东中国海潮波, 属于浅海不规则半日潮, 而口外为正规半日潮, 平均周期 12.42 h; 河口外中浚站多年平均潮差 2.66 m, 纳潮量很大, 潮汐动力强劲^[1-2]。经过长期的历史演变, 长江口形成了目前“三级分汊, 四口入海”的地貌形态格局。自徐六泾以下平面呈喇叭形, 崇明岛将其分为南支和北支。北支现在处于衰竭之中, 长兴岛和横沙岛将南支分为南港和北港。九段沙又将南港分为南槽和北槽。长江口的北支、北港、北槽和南槽 4 条入海通道均存在拦门沙碍航浅滩, 其中南、北港分汊口问题已成为当今航运发展的主要障碍之一。目前北槽是长江口的主要进出航道, 因此, 长江口深水航道的整治主要就是对北槽的整治^[1]。北槽深水航道整治工程平面布置如图 1 所示。

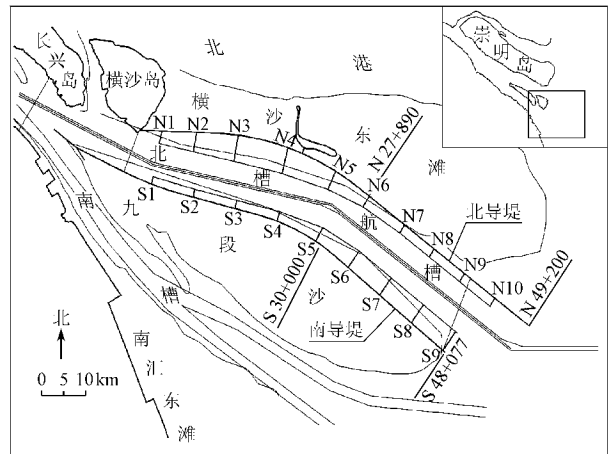


图 1 长江口北槽深水航道整治工程平面布置

Fig. 1 Layout of regulation works in deep channel of north branch of Yangtze River estuary

长江口深水航道工程已修建了 48.00 km 长的南导堤、49.20 km 长的北导堤, 并在南导堤修建了 9 座丁坝 ($S_1 \sim S_9$), 北导堤修建 10 座丁坝 ($N_1 \sim N_{10}$)。一期工程于 1998 年 1 月 27 日开工, 建成南、北导堤各 1 条, 共长 58.00 km, 丁坝 6 座, 共长 5.96 km, 疏浚航道 51.77 km, 航道水深从 7.00 m 增大到 8.50 m。2002 年 9 月, 一期工程通过了国家竣工验收。二期工程于 2002 年 4 月底开工, 2005 年完工, 工程总投资 63.77 亿元, 工期 3a, 建成北导堤 21.31 km、南导堤 18.08 km、丁坝总长 10 km, 形成底宽 350.00 ~ 400.00 m、水深 10.00 m 的航道 73.45 km^[3]。三期工程航道将达到终期目标水深 12.50 m。

天文分潮的调和常数一般是由海区的深度、底形、沿岸外形的自然条件决定的, 如果海区自然条件相对

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200701026)、国家自然科学基金(50339010)、国家科技支撑计划(2006BAG04B06)

作者简介: 严以新(1949—)男, 福建闽侯人, 教授, 主要从事河口、海岸与近海工程研究。

稳定 ,对不同时期的实测资料进行调和与分析得到的调和常数基本相同 .但由于海区自然条件不断变化 ,同时水利工程也会使河道、海区边界条件发生变化 ,分潮调和常数也会随之发生变化 ,特别是河口地区尤为显著 .长江口深水航道整治工程修建后 ,河道边界条件将发生变化 ,北槽航道河床也会有较大的调整 .鉴于此 ,本文对分别位于长江口北槽头部和中部的横沙站和北槽中站的实测潮位资料进行调和与分析 ,比较分析整治工程前后两测站主要分潮的调和常数、潮位特征值以及潮位过程的变化情况 ,并对可能的影响因素进行探讨 .

1 调和分析及资料选取

1.1 调和分析方法

本文采用经 Foreman 改进的 Godin 潮汐调和分析及预报程序、最小二乘法原理外加节点调制和推算的算法以及经 Barrodale 改进的 Gram-Schmidt 数值计算方法 ,对等时间间距(1 h)的潮位资料以及不规整的高、低潮潮位测量资料进行调和与分析 .调和分析及预报程序对短期潮位资料调和与分析结果进行预报的精度较高^[4-5] ,对于 11 个主要分潮 ,使用 1~3 个月的逐时实测潮位资料就能将其比较精确地分离出来^[6] .目前 ,该程序的可靠性已得到了验证^[6-7] .

1.2 资料选取

程序输入文件需已知潮位站的经纬度 ,本文选用长江口横沙和北槽中两站的潮位资料 ,其中横沙站位于东经 121° 51′、北纬 31°18′ ,北槽中站位于东经 122° 0.5′、北纬 31°14′ .调和与分析选用 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 MS_4 和 M_6 共 11 个主要分潮 .由于两潮位站缺 1998 年前实测潮位资料 ,且工程前河口相对稳定 ,可用潮汐表的潮位资料代替 ,本文选用潮位站对应潮汐表 1995 年 8 月和 4~6 月(考虑到主要分潮 M_2 为半日分潮 ,便于周期期间的比较 ,文中调和与分析时间均按农历计)3 个月的逐时潮位进行调和计算 .由于长江口航道整治工程分成 3 期 ,且 3 期工程将于 2009 年完工 ,本文主要对一、二期工程前后的潮汐特征进行探讨 .工程后采用 2002 年、2003 年和 2006 年 8 月和 4~6 月的逐时实测潮位资料 ,各年选用资料记录时间如表 1 所示 .

表 1 主要分潮调和常数比较

Table 1 Comparison among harmonic constants of main tidal constituents

潮位站	资料记录时间	平均海平面/m	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁		标准方差/cm
			H/m	g/(°)	H/m	g/(°)	H/m	g/(°)	H/m	g/(°)	
横沙站	* 1995-08	2.23	1.16	350	0.52	23	0.33	193	0.15	145	11.74
	* 1998-08	2.24	1.17	350	0.44	32	0.26	186	0.16	148	11.05
	* 1999-08	2.28	1.15	351	0.53	27	0.26	189	0.17	152	14.41
	2002-08	2.22	1.20	346	0.73	16	0.30	190	0.18	150	18.47
	2003-08	2.21	1.20	345	0.49	19	0.29	178	0.19	149	17.28
	* 1995-04~1995-06	2.20	1.18	350	0.46	33	0.28	194	0.14	161	14.22
	2002-04~2002-06	2.21	1.21	343	0.50	26	0.28	196	0.14	153	17.64
	2003-04~2003-06	2.10	1.22	346	0.49	31	0.27	194	0.15	153	15.91
	2006-04~2006-06	2.19	1.19	351	0.44	31	0.25	202	0.17	167	14.55
北槽中站	* 1995-08	2.27	1.24	335	0.62	2	0.36	179	0.16	136	8.81
	* 1999-08	2.31	1.24	336	0.55	10	0.27	178	0.17	144	7.98
	2002-08	2.38	1.27	333	0.75	3	0.30	185	0.18	142	20.71
	2003-08	2.43	1.25	332	0.53	10	0.31	175	0.19	141	15.68
	* 1995-04~1995-06	2.21	1.25	335	0.52	16	0.29	184	0.13	152	12.72
	2002-04~2002-06	2.40	1.29	331	0.57	13	0.28	189	0.14	144	17.47
	2003-04~2003-06	2.32	1.27	332	0.53	17	0.27	188	0.14	144	14.38
	2006-04~2006-06	2.34	1.23	338	0.46	17	0.28	193	0.15	153	14.30

注 :带 * 的年份采用潮汐表潮位资料 ,其余均采用逐时实测潮位资料 .

2 计算结果与分析

2.1 各主要分潮调和常数计算结果

表 1 为横沙站和北槽中站主要分潮调和常数计算结果 .调和计算误差 ,除个别年份外 ,都控制在 20 cm 以内 ,基本满足精度要求 .4 个主要分潮的迟角 g 无明显变化 ,因此主要分析各分潮振幅 H 的变化趋势 .横沙站 8 月计算结果表明 ,工程后各分潮振幅增大 ,其中 S_2 分潮变化最明显 ,较工程前增大 11.3 cm ,增幅达

22.87% , M_2 分潮振幅增大 4.1 cm.横沙站 4~6 月计算及统计结果表明 :2002 年和 2003 年 M_2 分潮振幅平均值较工程前增大 3.9 cm , S_2 分潮振幅增大 3.6 cm , K_1 分潮振幅减小 , O_1 分潮稍有增大 .2006 年 M_2 , S_2 和 K_1 分潮振幅较 2002 年和 2003 年减小 ,但 O_1 分潮振幅稍有增大 .由北槽中站 8 月调和结果可知 ,工程后 M_2 , S_2 和 O_1 分潮振幅增大 ,其中 S_2 分潮振幅增大 4.1 cm ,变化最明显 , M_2 和 O_1 分潮振幅均增大 1.4 cm 左右 , K_1 分潮振幅减小 3.5 cm.北槽中站 4~6 月计算统计结果表明 :2002 年和 2003 年除 K_1 分潮稍有减小外 ,其他分潮振幅都有所增大 , M_2 分潮振幅均值增大 4.2 cm ,增幅达 3.37% ,2006 年 M_2 和 S_2 分潮振幅较之前减小 ,而 K_1 和 O_1 分潮振幅有所增大 .

以上分析表明 :对相同潮位站不同时段而言 ,工程后各主要分潮振幅变化趋势相似 ;对同一计算时段不同潮位站而言 ,横沙和北槽中两潮位站 2002 年和 2003 年 4~6 月 M_2 和 S_2 分潮振幅都较工程前有所增大 ,2006 年两潮位站 M_2 和 S_2 分潮振幅均比 2002 年和 2003 年有所减小 ,且各主要分潮复合潮位过程的潮差也有所减小 .

2.2 特征潮位分析

由表 1 统计计算得到的各潮位站不同时间段的特征潮位如表 2 所示 .其中 :平均海平面是指从潮高起算面或海图深度基准面算起的多年平均海平面的高度 ,平均大(小)潮升是指大潮(小潮)期间的平均潮高^[8] .由表 2 可以看出 :横沙站 2002 年和 2006 年不同时段的海平面值与工程前基本一致 ,2003 年偏小 ,特别是 4~6 月计算的平均海平面值比 1995 年低 10 cm 左右 ;工程后北槽中站平均海平面值显著增大 ,北槽中站工程前 1995 年平均海平面值为 2.21 m ,工程后 2002 年、2003 年和 2006 年平均海平面值分别为 2.40 m、2.32 m 和 2.34 m ,增大 14 cm 左右 .横沙站 2002 年平均大潮升和平均高潮位值比工程前有所增大 ,平均小潮升和平均低潮位又略有下降 ,因此大潮平均潮差比工程前增大 15 cm 左右 ,2003 年虽然平均大小潮升和平均高低潮位都有所减小 ,但大潮平均潮差仍有所增大 .北槽中站工程后 2002 年和 2003 年大潮平均潮差较工程前有所增大 ,增大幅度最大的是 2002 年 8 月 ,达 40 cm ,2003 年又减小至工程前水平 .2006 年横沙和北槽中站大潮平均潮差都相应减小 ,减小幅度为 18~20 cm . M_4 分潮与 M_2 分潮振幅之比 H_{M_4}/H_{M_2} 反映了当地的浅水影响程度 ,横沙站 $H_{M_4}/H_{M_2} > 0.1$,说明潮汐受浅海分潮影响显著 ,2006 年影响加剧 .

表 2 特征潮位值统计

Table 2 Statistics of characteristic tidal levels										
潮位站	资料记录 时间	平均海 平面/m	平均大 潮升/m	平均小 潮升/m	平均高 潮位/m	平均低 潮位/m	大潮平 均潮差/m	$H_{M_4}/$ H_{M_2}	$(2g_{M_2} - g_{M_4})/$ (°)	潮汐性 质指标
横沙站	* 1995-08	2.23	3.91	2.87	3.39	1.07	3.36	0.12	74	0.41
	* 1998-08	2.24	3.85	2.97	3.41	1.08	3.21	0.12	71	0.36
	* 1999-08	2.28	3.95	2.90	3.43	1.12	3.35	0.12	73	0.37
	2002-08	2.22	4.15	2.69	3.42	1.02	3.86	0.12	72	0.40
	2003-08	2.21	3.83	2.86	3.34	0.94	3.37	0.12	68	0.41
	* 1995-04 ~ 1995-06	2.20	3.84	2.92	3.38	1.02	3.28	0.12	72	0.36
	2002-04 ~ 2002-06	2.21	3.92	2.92	3.42	1.00	3.42	0.11	73	0.35
	2003-04 ~ 2003-06	2.10	3.74	2.76	3.25	0.80	3.43	0.11	70	0.34
	2006-04 ~ 2006-06	2.19	3.82	2.94	3.38	1.01	3.25	0.14	78	0.35
北槽 中站	* 1995-08	2.27	4.13	2.89	3.51	1.03	3.72	0.07	79	0.42
	* 1999-08	2.31	4.09	3.00	3.55	1.07	3.57	0.07	75	0.35
	2002-08	2.38	4.40	2.90	3.65	1.11	4.04	0.08	81	0.38
	2003-08	2.43	4.22	3.15	3.68	1.18	3.57	0.07	78	0.40
	* 1995-04 ~ 1995-06	2.21	3.98	2.93	3.46	0.96	3.54	0.07	74	0.34
	2002-04 ~ 2002-06	2.40	4.25	3.12	3.67	1.11	3.71	0.06	84	0.33
	2003-04 ~ 2003-06	2.32	4.12	3.06	3.59	1.05	3.60	0.06	75	0.32
	2006-04 ~ 2006-06	2.34	4.03	3.11	3.57	1.11	3.37	0.10	82	0.35

注 :带 * 的年份采用潮汐表潮位资料 ,其余均采用逐时实测潮位资料 ; g_{M_2} 、 g_{M_4} 分别为 M_2 、 M_4 分潮迟角 ;潮汐性质指标由 $(H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$ 计算所得 .

2.3 工程前后潮位过程线比较

横沙站和北槽中站 72 h 潮位过程线实测值与预报值比较如图 2 所示 .预报潮位是对各测站 1995 年 4~6 月潮汐表资料进行调和 ,并将得到的分潮调和常数对 2002 年、2003 年和 2006 年 4 月潮位进行预报所得 .由图 2(a)和 2(b)可以看出 :横沙和北槽中站 2002 年实测潮位过程和预报潮位过程较为吻合 .由图 2(c)和

(d)可以看出 2003 年横沙站实测潮位整体潮位与预报潮位比较,呈下降趋势,但统计分析结果表明,潮差实测值较预报值增大 15 cm 左右,2003 年北槽中站实测高潮位和预报高潮位较一致,实测低潮位比预报低潮位小,实测潮差明显增大.由图 2(e)和(f)可以看出,2006 年两验潮站实测高潮位明显降低,潮差也有所减小;2006 年横沙、北槽中站平均大潮潮差实测值分别较预报值减小 3 cm 和 18 cm.由图 2 还可以看出,两潮位站实测潮位过程和预报潮位过程相位基本一致.

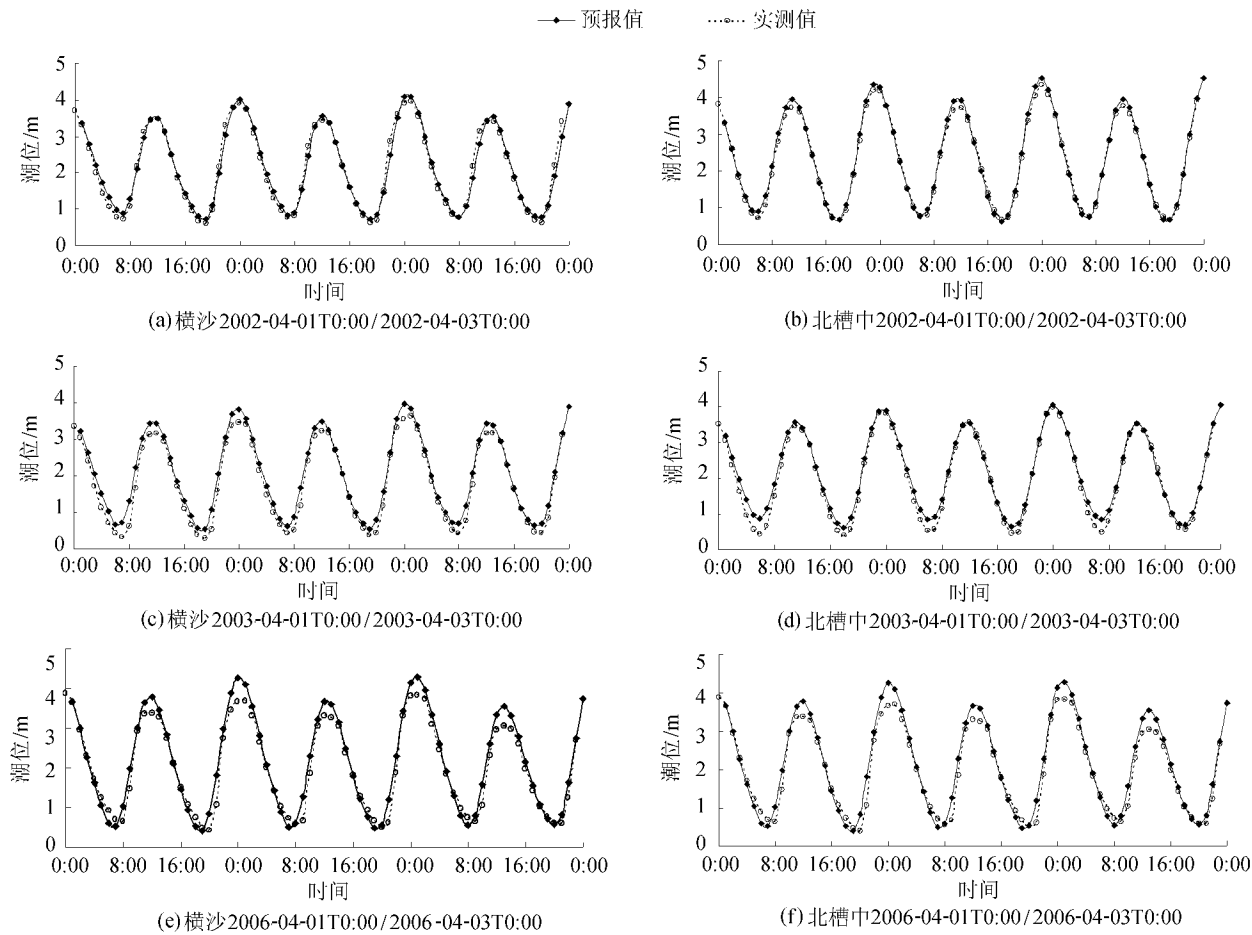


图 2 预报潮位过程和实测潮位过程比较

Fig. 2 Comparison between predicted and measured tidal levels

此外,还对 2002 年、2003 年和 2006 年其他时序的潮位进行了预报,所得潮位过程线变化趋势基本一致.

2.4 影响因素分析

长江口潮汐特征主要受沿岸地形、地貌以及水文气象因素的影响,大型水利工程的修建将改变河口地区的边界条件并导致河床淤冲,从而使河口区的潮汐特征发生变化.长江口综合整治工程修建后,北槽航道将束窄加深,河道冲刷会加剧^[9].这些边界条件的改变,将使长江口局部潮汐特征发生变化.

据水文资料统计,2002 年为大水年,该年入海流量偏大,但无其他异常水文现象.一期工程修建完工至 2002 年二期工程开工伊始,已建成 27.89 km 长的一期北导堤、30.00 km 长的一期南导堤以及总长 11.19 km 的 10 座丁坝,航深加深至 8.5 m,施工期间造成的局部河床冲刷已达到平衡,一期航道整治工程对长江口潮汐的影响不大.横沙和北槽中站潮位过程及其特征潮位变化也不明显.2003 年 4 月,二期工程正在施工,北导堤和南导堤不断延长,施工时沿堤流和绕堤流增强,造成导堤两侧局部滩地冲刷,一期工程被带到北槽中部深槽的泥沙继续下移^[10],河道在原有基础上刷深,在外海潮通量变化不大的情况下,北槽航道潮位整体偏低.施工时底部河床地形阻力的变化,可能会使航道内的潮差增大.2006 年 5 月,长江口航道整治建筑物的修建已基本完工,航深疏深到 12.50 m,航道已比较通畅.由 2006 年调和分析及统计结果可知,横沙和北槽中站大潮平均潮差明显减小.因为 2006 年为特枯年,长江口入海流量较小,所以北槽航道内潮差也相应减小.

3 结 论

- a. 采用经 Foreman 改进的 Godin 潮汐调和分析及预报程序,对长江口横沙站和北槽中站的潮位资料进行调和,得到两站不同时段平均海平面值和各主要分潮的调和常数,并比较了工程前后调和常数的变化情况.
- b. 对横沙站和北槽中站各时段的平均海平面值和特征潮位进行统计,并对工程前后两潮位站的平均海平面值和特征潮位进行了比较.结果表明:工程前后横沙站的平均海平面值变化不大;工程后 2002 年和 2003 年平均大潮升和平均高潮位值比工程前有所增大,平均小潮升和平均低潮位又稍有下降,大潮平均潮差比工程前有所增大,工程后北槽中站的平均海平面值则比工程前有所增大,2002 年和 2003 年大潮平均潮差都比工程前有所增大,2006 年横沙和北槽中站大潮平均潮差都明显减小,减小幅度为 18~20 cm.
- c. 利用 1995 年潮汐表逐时潮位资料进行调和和计算所得的分潮调和常数结果预报 2002 年、2003 年和 2006 年相应时段的潮位过程,并将预报潮位过程和实测潮位过程进行了比较.结果表明,两潮位站 2002 年实测潮位过程与预报潮位过程比较一致,2003 年和 2006 年变化较大.分析结果表明,长江口综合整治工程修建后,北槽航道潮位特征值及潮位过程发生了变化.
- d. 在综合考虑各种水文因素的基础上,对北槽航道特征潮位变化原因进行了分析.

参考文献:

- [1] 陈志昌,乐嘉钻.长江口深水航道整治原理[J].水利水运工程学报,2005(1):1-7.
- [2] 林琨,阎国年,宋志尧.东中国海潮波系统与海岸演变模拟研究[M].北京:科学出版社,2000:1-16.
- [3] 严恺.开辟长江口深水航道,建立上海国际航运中心[J].中国工程科学,1999,(2):30-33.
- [4] FOREMAN M G G. Manual for tidal heights analysis and prediction[R]. Patricia Bay Sidney, B. C., Canada: Institute of Ocean Sciences, 2004.
- [5] GODIN G. 潮汐分析[M]. 李身铎,译.北京:海洋出版社,1980.
- [6] 吴德安,张忍顺.江苏近岸高、低潮位变化规律探讨[J].海洋工程,2004,22(4):119-125.
- [7] 吴德安,严以新,童朝锋.江苏海岸港口特征潮位计算与分析[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):471-476.
- [8] 国家海洋信息中心.2001 年潮汐表[M].北京:海洋出版社,2000:480-481.
- [9] 王兆华,杜景龙.长江口深水航道一、二期工程建设以来北槽河段的冲淤演变[J].海洋通报,2006,25(6):55-62.
- [10] 刘杰,陈吉余,乐嘉海,等.长江口深水航道治理一期工程实施后北槽冲淤分析[J].泥沙研究,2004(5):15-22.

Analysis of tidal characteristics before and after construction of regulation projects in Yangtze River estuary

YAN Yi-xin^{1,2}, LIU Jun-wei^{1,2}, WU De-an^{1,2}, TONG Chao-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The data of tidal levels at Hengsha station and Middle North Branch station in Yangtze River estuary was calculated and analyzed by use of the modified Godin's tidal harmonic analysis and prediction programs. The harmonic constants H and g of 11 main tidal constituents, the values of mean sea level Z_0 and the characteristic tidal levels at different periods were obtained. According to the results, the harmonic constants of four main tidal constituents (M_2 , S_2 , K_1 and O_1) at the 2 stations before and after the construction of regulation projects in the deep channel of the north branch of Yangtze River estuary were compared, and the corresponding variation of characteristic tidal level was analyzed. The tidal levels at the 2 stations in 2002, 2003 and 2006 were predicted by means of the harmonic constants before the construction of regulation projects, and the predicted tidal levels were compared with the measured ones. The analytic results show that the harmonic constants of main tidal constituents, the characteristic tidal levels and tidal level processes at the 2 stations after the construction of regulation projects obviously change, especially in 2003 and 2006.

Key words: Yangtze River estuary; harmonic analysis; characteristic tidal level; comprehensive regulation project; tidal level process