瓯江口内外潮汐不对称研究

李谊纯[1]，徐　群[2]
（1. 广西北部湾海洋研究中心，广西 南宁　530007；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京　210029）

摘要： 基于对瓯江口内外2005年6—7月多个潮位站15 d的实测潮位资料分析，利用3种方法研究了瓯江口潮汐不对称现象及其在时空上的变化特征与机理. 研究认为，在理论上传统地采用M2与M4分潮的相对振幅判断潮汐不对称的方法不完善，潮汐不对称不仅受到相对振幅的影响，而且受到其相对位相的影响，同时其他分潮的相互作用也是导致河口、近岸潮汐不对称的重要因素. 瓯江口潮汐属正规半日潮，潮汐不对称的产生主要是由于M2分潮及其倍潮M4的相互作用. 潮汐不对称的空间变化主要表现在沿河道的纵向上，即潮汐在纵向上由口外向上游不对称逐渐增强. 在横向上，口门外由于地形开阔，水深较大，潮汐不对称不明显且无明显变化趋势. 在时间上，潮汐不对称在大-小潮期间具有明显变化，表现为大潮期最为明显，远大于小潮期. 因此可以认为潮汐不对称在大-小潮期间的变化是低频分潮Msf分潮所致.

关　键　词： 瓯江口；潮汐不对称；倍潮波；调和分析
中图分类号： P731.23　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1009-640X(2013)05-0061-05

瓯江口是浙江省东南部的一个强潮河口，其沿岸经济发达，人口稠密. 近些年，伴随着经济的快速发展，人类活动对于瓯江口自然环境的干扰也越来越多，多个大规模沿海、沿岸工程已经或正在实施，诸多相关研究也取得了重要成果[1-6]. 潮波进入近海及河口，由于水深、地形等的影响而发生变形. 这种潮汐不对称对于泥沙运动、地形演变、长期物质输运都有着重要的影响[7-8]，是河口海岸演变研究中的重要内容. 近十多年来，潮汐不对称现象的研究越来越引起国内外学者的重视，并在理论、研究方法及应用研究上取得了重要进展[9-10]. 因此，开展瓯江口潮汐不对称研究对于瓯江口的河道演变、物质输运及水环境保护具有重要意义.

1　数据与分析方法

研究采用2005-06-20—07-04共13个测站（见图1）的实测潮位数据进行分析. 沿程选取梅岙-江心寺-杨府山-乌牛-龙湾-七里-黄华-乌仙头-洞头以研究潮汐不对称纵向变化；在口外选取连屿-小门岛-乌仙头-南山分析潮汐不对称现象在河口口外横向变化. 对每个潮位站的实测潮位数据进行调和分析，利用每个分潮调和分析的结果研究瓯江口潮汐不对称的产生与时空变化. 潮汐的调和分析采用T_TIDE进行[11]，振幅和迟角的计算精度分别控制为10^{-4} m和0.010. 采用15 d的数据调和分析得到的分潮为：低频分潮，Msf；全日分潮，K1和O1；半日分潮，M2，S2；以及其他，如M3，SK3，M4，MS4，S4，2MK5，2SK5，M6，2SM6，2MS6，3MK7，M8.

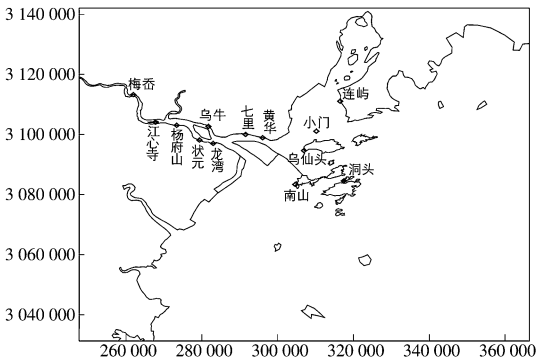

图1　瓯江口潮位测站
Fig. 1　Tidal stations in Oujiang estuary

收稿日期： 2013-04-02
基金项目： 广西自然科学基金北部湾重大基础专项(2011GXNSFE018002)
作者简介： 李谊纯(1977-)，男，河北乐亭人，工程师，博士，主要从事河口动力学研究. E-mail：ychli@vip.sina.com

2 瓯江口潮汐不对称分析

2.1 瓯江口主要分潮的基本特征

针对瓯江口的具体情况及问题,首先对主要分潮的基本分布特征进行分析. 表 1 给出了沿程潮位测站的主要分潮的调和常数. 可以看出,各分潮呈现出不同的空间分布特征:其中,M2 和 M6 分潮振幅在研究河段内呈“中间大、两头小”的形式,最大值分别出现在龙湾—七里河段和杨府山附近;Msf 分潮和 M4 分潮振幅呈现自上游向下游逐渐减小的趋势;O1,K1 和 S2 分潮均表现为自上游向下游逐渐增大,其中 K1 和 O1 变化幅度较小,上下游差异不超过 10 cm,而 S2 分潮的振幅变化较大,口外可超过梅岙的 3 倍. 经计算,$(H_{K1}+H_{O1})/H_{M2}\approx 0.3$,可知瓯江口潮汐类型为正规半日潮. 各分潮迟角除 Msf 分潮外,均表现为由上游向外海逐渐减小的趋势.

表 1 主要分潮调和常数

Tab. 1 Harmonic constants of the main tidal constituents

潮位站	振幅/ m								迟角/ (°)							
	Msf	O1	K1	M2	S2	M4	MS4	M6	Msf	O1	K1	M2	S2	M4	MS4	M6
梅 岙	0.72	0.19	0.32	1.87	0.13	0.36	0.09	0.08	31	212	244	320	340	200	226	349
江心寺	0.46	0.19	0.31	2	0.23	0.3	0.09	0.08	35	210	242	307	325	174	211	290
杨府山	0.36	0.21	0.34	2.17	0.28	0.27	0.08	0.11	35	206	236	293	314	140	185	250
乌 牛	0.26	0.22	0.35	2.25	0.34	0.23	0.08	0.09	39	201	232	285	308	117	168	220
龙 湾	0.2	0.23	0.37	2.32	0.39	0.18	0.07	0.08	41	197	229	279	302	97	150	200
七 里	0.16	0.24	0.39	2.34	0.41	0.09	0.04	0.05	40	195	226	274	299	71	122	194
黄 华	0.15	0.24	0.39	2.29	0.41	0.07	0.02	0.04	41	193	225	270	295	60	110	154
乌仙头	0.12	0.26	0.4	2.21	0.44	0.05	0.01	0.02	37	188	221	264	289	355(-5)	4	86
洞 头	0.1	0.27	0.41	2.1	0.42	0.05	0.02	0.01	27	189	220	263	288	305(-55)	317(-43)	50

2.2 基于 M2 分潮及其倍潮波的分析

在半日潮海域,已有研究多采用倍潮波 M4 及 M2 分潮的振幅比值 H_{M4}/H_{M2} 量化潮汐不对称的程度,用相对位相 $2g_{M2}-g_{M4}$ 判断潮汐不对称的方向[9-10,12]. 当 $0<2g_{M2}-g_{M4}<\pi$ 时,为涨潮主导型,涨潮历时小于落潮历时,涨潮最大流速大于落潮最大流速;当 $\pi<2g_{M2}-g_{M4}<2\pi$ 时,为落潮主导型,涨潮历时大于落潮历时,涨潮最大流速小于落潮最大流速. 也有研究利用类似的方法考虑 M6 和 M8 对于潮汐不对称的影响[13]. 瓯江口纵向和口外横向的相对振幅和相对位相见表 2.

表 2 瓯江口潮汐相对振幅和相对位相

Tab. 2 Relative amplitude and relative phases of tidal elevation in Oujiang estuary

		梅 岙	江心寺	杨府山	乌 牛	龙 湾	七 里	黄 华	乌仙头	洞 头
纵向	H_{M4}/H_{M2}	0.19	0.15	0.13	0.10	0.08	0.04	0.03	0.02	0.02
	H_{M6}/H_{M2}	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01
	$2g_{M2}-g_{M4}$	79	79	87	92	101	117	121	174	221
	$3g_{M2}-g_{M6}$	250	270	269	275	278	267	297	347	379
		连 屿	小 门	乌仙头	南 山					
横向	H_{M4}/H_{M2}	0.01	0.02	0.02	0.02					
	H_{M6}/H_{M2}	0.01	0	0.01	0.01					
	$2g_{M2}-g_{M4}$	220	209	174	273					
	$3g_{M2}-g_{M6}$	340	309	347	359					

可见,在纵向上,由梅岙至黄华 M4 分潮的相对振幅逐渐减小,黄华至乌仙头、洞头相对振幅变化不大,反映了由于河道向上游逐渐缩窄、水深变浅,导致了 M4 分潮逐渐增强的变化趋势,说明在瓯江口 M4 对潮汐

不对称的影响逐渐增大，潮波形态表现为越向上游潮汐变形越为明显. 在口外，水域开阔，水深较大，不利于 M4 分潮的产生. M6 分潮的相对振幅亦呈由上游向下游逐渐减小的变化趋势，但由于 M6 分潮的振幅较小，所以其相对振幅也很小，一般不超过 0.05. M4 分潮的相对位相由梅岙向下游逐渐增大，在北口口门以内，$0<2g_{M2}-g_{M4}<\pi$，说明该河段潮汐不对称表现为涨潮主导型. 在河口口门外的横向上 M4、M6 的相对振幅均较小，相对位相亦无明显变化趋势，可以认为，在口外深水区域，潮汐不对称现象很弱.

2.3　基于偏度的分析

利用偏度可以从统计学的角度对潮汐不对称进行定量研究[10]. 偏度定义为：

$$\gamma=\frac{\mu^3}{\sigma^3}=\frac{E\left|(\eta-\bar{\eta})^3\right|}{(E[(\eta-\bar{\eta})^2])^{3/2}} \tag{1}$$

式中：η 为某序列；若令 $\eta=\zeta'=\frac{\partial\zeta}{\partial t}$，$\zeta$ 为潮位；上标“-”表示时间平均，则可由 γ 量化潮汐不对称. 时间平均的时长可选择多个潮周期. 图 2 给出了瓯江口内沿程 4 个潮位站 15 d逐日计算的 γ 值. 可以看出，潮汐不对称具有明显的大-小潮的时间变化. 大潮期潮汐不对称最为显著，中潮次之，小潮期潮汐不对称最弱. 在空间上亦表现为上游测站比下游测站明显，大-小潮期间的变化幅度也呈现上游大、下游小的趋势. 对比表 2 可知，造成这一现象的原因为 Msf 分潮的作用.

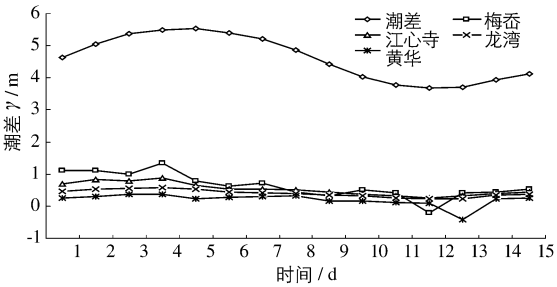

图 2　瓯江口沿程 15 d 逐日 γ 值

Fig. 2　Temporal and spatial variation of γ for 15 days in Oujiang estuary

2.4　基于分潮组合的分析

利用式(1)，并假设在足够长的时间内 $\bar{\eta}=0$ 和 $\zeta=\sum_{i=0}^{N}\zeta_i=\sum_{i=0}^{N}b_i\cos(\omega_i t-\theta_i)$，则通过计算有[7]：

$$\gamma'=\frac{1}{\left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(b_i^2\omega_i^2)\right]^{3/2}}\left[\sum_{\substack{\omega_i+\omega_j=\omega_k\\ i\neq j\neq k}}\frac{3}{2}b_ib_jb_k\omega_i\omega_j\omega_k\sin(\theta_i+\theta_j-\theta_k)+\sum_{\substack{2\omega_i=\omega_j\\ i\neq j}}\frac{3}{4}b_i^2b_j\omega_i^2\omega_j\sin(2\theta_i-\theta_j)\right] \tag{2}$$

由式(2)可以看出，在长时间内，分潮对于潮汐不对称的影响只限定在某些特定的分潮相互作用之中(如 M2\M4，K1\O1\M2 等)，而对于不满足一定关系的分潮组合，则长时间内不会导致潮汐不对称，所以在半日潮海区，不必考虑 M2\M6 的组合产生潮汐不对称. 此外，各分潮组合对潮汐不对称的影响不仅与分潮的振幅有关，同时也是分潮相对位相的函数，即相对位相不仅决定潮汐不对称的方向，也影响潮汐不对称的程度. 式(1)采用的是三阶中心矩进行潮汐不对称的量化，若基于更高阶的奇数阶中心矩进行计算，则可得到比式(2)更为复杂的分潮组合形式的潮汐不对称计算方程，其分潮组合包含了式(2)所给出两种组合形式. 由于这些组合涉及的分潮更多并包含了诸多振幅很小浅水分潮，在实际应用中可忽略. 限于篇幅，在此未给出更高阶的潮汐不对称计算方程.

表 3 给出了利用式(2)计算得到的瓯江口潮汐不对称的 γ' 值、各测站影响最大的 3 个分潮组合及其影响权重. 可见，自梅岙至黄华 γ' 为正值，表明在瓯江口潮汐不对称为涨潮主导型；γ' 值由梅岙的 0.694 向下游逐渐减小至黄华的 0.134，说明瓯江口潮汐不对称越向上游越明显. 乌仙头和洞头的 γ' 值较小，分别为 0.02 和-0.058，说明在瓯江口外潮汐不对称较弱. 洞头的 γ' 值为负，说明此处的潮汐不对称为弱落潮主导型，这与表 2 所述的结论一致. 从各测站影响最大的 3 个分潮组合及其影响权重可见，对潮汐不对称影响最重要的是 M2\M4，在口门内，M2\M4 组合的贡献一般超过了 80%，最多可达 96%；其次分别是 M2\S2\MS4 和 M2\M4\M6 或 K1\O1\M2，但各测站权重列第 2、3 的分潮组合对潮汐不对称的贡献很小，一般比影响最明显的 M2\M4 组合小一个量级或小更多，这是由于瓯江口潮汐属正规半日潮所致. 而在口外，由于潮汐不对称较弱，各分潮组合权重之间的差异相对河口内要小.

综合上述 3 种方法可见，基于 M2 分潮及其倍潮波的分析方法适合半日潮海区 M2 分潮占绝对优势并且

M4 分潮导致的潮汐不对称亦比较明显的情况. 在此基础上,若$|2g_{M2}-g_{M4}|$接近 $\pi/2$,则其对潮汐不对称的判断尤为可靠,否则需考虑其他分潮组合(如:K1\O1\M2,M2\M4\M6)对于潮汐不对称的贡献,即需要采用基于分潮组合的分析方法对潮汐不对称予以量化分析. 而在全日潮海区,基于 M2 分潮及其倍潮波的分析方法则完全失效. 对比可知,基于 M2 分潮及其倍潮波的分析方法本质上为基于分潮组合分析方法的特例,但是未考虑相对振幅和相对位相共同作用下对潮汐不对称的影响. 基于偏度的分析方法是基于分潮组合分析方法导出的出发点,与其他 2 个方法不同,是直接利用潮位资料对潮汐不对称量化分析的,因此只要在选择合适的时间窗口长度后即可任意应用于潮位过程不同时段,并可得到潮汐不对称在时间上的变化.

表 3 瓯江口 γ'值、分潮组合及权重

Tab. 3 Values of γ', tidal constituents combinations and weights in Oujiang estuary

潮位站	γ'	1		2		3	
		权重	组合	权重	组合	权重	组合
梅 岙	0.694	0.608	☆	0.026	★	0.023	⊕
江心寺	0.531	0.510	☆	0.034	⊕	-0.022	★
杨府山	0.468	0.441	☆	0.033	⊕	0.007	◇
状 元	0.383	0.339	☆	0.040	⊕	0.008	◇
乌 牛	0.411	0.371	☆	0.038	⊕	0.007	◇
龙 湾	0.333	0.287	☆	0.035	⊕	0.008	◇
七 里	0.179	0.134	☆	0.025	⊕	0.010	★
黄 华	0.134	0.108	☆	0.016	⊕	0.009	◇
乌仙头	0.020	0.012	◇	0.008	☆	-0.002	⊕
洞 头	-0.058	-0.059	☆	-0.014	⊕	0.014	◇

注:表中☆代表 M2\M4 组合;★代表 M2\M4\M6 组合;⊕代表 M2\S2\MS4 组合;◇代表 K1\O1\M2 组合.

3 结 语

瓯江口潮汐属正规半日潮型,潮汐不对称产生主要是由于 M2 分潮及其倍潮 M4 的相互作用. 潮汐不对称的空间变化主要表现在沿河道的纵向上,由河口口门向上游,潮汐不对称程度逐渐增大,在北口口门以内 $0<2g_{M2}-g_{M4}<\pi$,潮汐不对称表现为涨潮主导型. 口门外的横向上,潮汐不对称较弱且无明显变化趋势;由于 Msf 分潮的作用,潮汐不对称在大-小潮期间具有明显的变化,表现为潮汐不对称现象大潮期间最为明显,中潮期间次之、小潮期间最弱. 此外,各分潮组合对潮汐不对称的影响不仅与分潮的振幅有关,同时也是分潮相对位相的函数.

参 考 文 献:

[1] 王顺中, 李浩麟. 瓯江口航道治理工程模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2006(4): 28-33. (WANG Shun-zhong, LI Hao-lin. Model test of Oujiang estuary channel regulation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(4): 28-33. (in Chinese))

[2] 李孟国. 温州浅滩围涂促淤工程泥沙数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2005(5): 5-12. (LI Meng-guo. Numerical study on deposit-promoting schemes in the reclamation project of Wenzhou shoal[J]. Journal of Sediment Research, 2005(5): 5-12. (in Chinese))

[3] 陆永军, 李浩麟, 董壮, 等. 强潮河口围海工程对水动力环境的影响[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 17-25. (LU Yong-jun, LI Hao-lin, DONG Zhuang, et al. Effects of the reclamation projects on hydro-dynamic environment in a strong tide estuary[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(4): 17-25. (in Chinese))

[4] 陆永军, 李浩麟, 王红川, 等. 强潮河口拦门沙航道回淤及治理措施[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1450-1456. (LU Yong-jun, LI Hao-lin, WANG Hong-chuan, et al. Back silting and regulation of waterway with sand bar in strong tidal estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1450-1456. (in Chinese))

[5] 李孟国，时钟，范文静. 瓯江口外洞头岛北岙后涂围垦工程潮流数值模拟研究[J]. 海洋通报，2005，24(1)：1-7.（LI Meng-guo，SHI Zhong，FAN Wen-jing. Tidal flow numerical simulation study on the reclamation project of Beiao Houtu of Dongtou Island[J]. Marine Science Bulletin，2005，24(1)：1-7.（in Chinese））

[6] 王顺中，李浩麟. 瓯江口拦门沙航道回淤分析[J]. 水利水运工程学报，2006(3)：18-24.（WANG Shun-zhong，LI Hao-lin. Back silting analyses of sandbar-dotted waterway in Oujiang River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering，2006(3)：18-24.（in Chinese））

[7] 宋德海，鲍献文，张少锋，等. 基于 FVCOM 的廉州湾及周边海域三维潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋通报，2012，32(2)：136-145.（SONG De-hai，BAO Xian-wen，ZHANG Shao-feng，et al. Three-dimensional numerical simulation of tides and tidal currents in the Lianzhou Bay and adjacent areas on the basis of FVCOM[J]. Marine Science Bulletin，2012，32(2)：136-145.（in Chinese））

[8] BLANTON J O，ANDRADE F A. Distortion of tidal currents and the lateral transfer of salt in a shallow coastal plain estuary（O Estuario do Mira，Portugal)[J]. Estuaries，2001，24(3)：467-480.

[9] HUANG H，CHEN C，BLANTON J O，et al. A numerical study of tidal asymmetry in Okatee Creek，South Carolina [J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，2008，78(1)：190-202.

[10] NIDZIEKO N J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides[J]. J Geophys Res，2010，115，C08006，doi：10.1029/2009JC005864.

[11] PAWLOWICZ R，BEARDSLEY R C，LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers and Geosciences，2002，28(8)：929-937.

[12] MANOJ N T，UNNIKRISHNAN A S，SUNDAR D. Tidal asymmetry in the Mandovi and Zuari Estuaries，the West Coast of India[J]. Journal of Coastal Research，2009，25(6)：1187-1197.

[13] BLANTON J O，LIN G，ELSTON S A. Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks[J]. Cont Shelf Res，2002，22：1731-1743.

A study of tidal asymmetry in Oujiang estuary

LI Yi-chun[1]，XU Qun[2]

(1. *Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center*，*Nanning*　530007，*China*；2. *Nanjing Hydraulic Research Institute*，*Nanjing*　210029，*China*)

Abstract：Based on the fortnight measured tidal elevation in June-July 2005 in the Oujiang estuary，the tidal asymmetry，and its time-space variation are studied by three methods. The research results show that the traditional method of determining tidal asymmetry just by the relative amplitude of M4 and M2 is not perfect in theory. The relative amplitude and the relative phase as well as other constituents would affect tidal asymmetry in combination. Tides in the Oujiang estuary are the semidiurnal tides. M4 plays the most significant role in the tidal asymmetry. Longitudinal variation is more obvious than the lateral one. The tide distortion becomes greater from the river mouth towards upstream. It is relative weak and has no marked tendency to variation outside the month due to large spatial scale and water depth. Temporally，the tidal asymmetry is considerable during spring and neap tides and more remarkable during the spring tides than neap tides because of the Msf. And as it may be seen from the analysis above the tidal asymmetry variation during the spring and neap tids must be caused by the constituents of the Msf.

Key words：Oujiang estuary；tidal asymmetry；overtides；harmonic analysis