

九龙江河口航道理论最低潮面与潮波传播关系分析

郑吉祥, 张国荣, 潘伟然*, 吴清松

(厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 根据 2006 年 3 月九龙江河口区 6 个潮位观测站的周月资料, 参考 2000 年 2 月的潮汐数据, 对比分析河口区潮汐特征的年变化, 并探讨了潮波衰减模数 μ 与底摩阻作用的关系. 分析表明九龙江河口区的潮汐性质属正规半日潮, 2006 年数据推算的理论最低潮面与 2000 年同期数据推算结果相比普遍偏低, 上游河段降低幅度大于下游, 沿程理论最低潮面变化幅度趋缓; 潮波振幅衰减模数 μ 值减小了 2.5~5.5 倍. 产生变化的原因是九龙江河口区平面自然状态和水深地形特征的改变, 为河床底高降低、底坡趋于平缓、底质的变化; 这些变化可能与上游河段采沙、造航、围垦等人类的开发活动有关.

关键词: 理论最低潮面; 衰减模数; 底摩阻; 九龙江河口

中图分类号: P 781.23

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)01-0145-04

九龙江是福建省内第二大河, 位于东经 $116^{\circ}46'55'' \sim 118^{\circ}02'17''$, 北纬 $24^{\circ}23'53'' \sim 24^{\circ}53'38''$ 之间. 九龙江河口区属于感潮河段, 外海潮波经厦门湾口传入九龙江河口区时, 主要表现为驻波为主、兼有前进波的传播特征. 潮汐性质属正规半日潮, 沿上游方向传播时, 潮差变小而落潮历时增大. 九龙江河口区潮流为往复流, 一般情况下涨潮流速小于落潮流速.

从九龙江下游的锦江大桥到一比疆河段, 是石码港区通往厦门湾天然航道. 由于近 10 年来人类开发活动的急剧增加, 造成九龙江河口区自然状态和水动力环境的变化, 也影响到航道、沿岸码头及堤岸防护等功能发挥, 因此有必要重新认识和把握九龙江河口区潮汐特征的变化及其产生的原因, 以指导今后的河口开发活动和生态、环境保护.

1 潮位观测和调和结果

2006 年 3 月在九龙江河口区段设置 6 个临时潮位观测站, 按上游至下游的顺序依次是: 福河、石码、海澄、锦埭、两佰两和一比疆潮位观测站. 观测整个九龙江河口航道的潮汐变化情况.

临时潮位观测站采用压力式自动潮位计, 其中挪威 SAIV 公司产 TD301 潮位仪 3 台, 加拿大 RBR 公司生产的 TG2050 温深仪 3 台. 在河道中布置锚系进行座底观测, 保证低潮时仪器不露出水面; 潮位取样间隔为 10 min, 观测精度为满量程的 0.005%; 观测历时

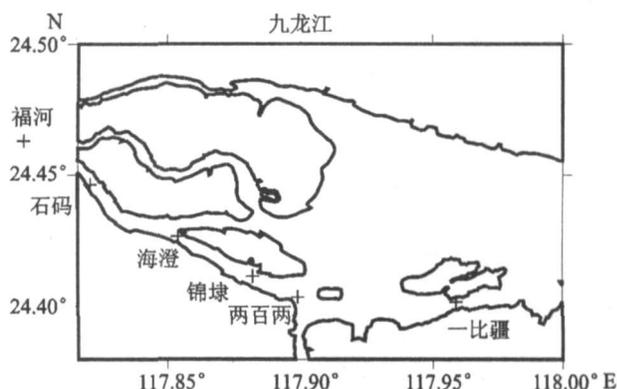


图 1 各观测站位

Fig. 1 The observation stations

为 2006 年 3 月 25 日至 2006 年 5 月 7 日, 摘取一个完整的月观测周期进行分析; 观测期间, 按国家四等水准测量要求进行潮位高程比对和订正.

由实测的周月潮位时序数据, 经低通滤波 ($A_0^2 A_7 / 252$) 处理后进行潮汐调和, 获得各分潮常数及平均海面高度. 根据计算, 各站潮汐形态系数在 0.28~0.34 之间, 潮汐性质为正规半日潮. 平均潮差沿上游方向逐渐减小, 平均海平面则逐渐抬升, 符合以前研究对该河口感潮区潮汐变化特征的认识.

2 理论最低潮面的变化

根据厦门海洋站 ($24^{\circ}27.0'N$, $118^{\circ}04.0'E$) 2000 年 7 月 1 日至 7 月 31 日和 2006 年 3 月 25 日至 5 月 7 日的验潮资料所算调和常数 (见表 2), 分析可知 2000 年的调和常数与 2006 年的调和常数相比变化很小, 可以认为近年来厦门湾总体潮汐特征变化很小.

收稿日期: 2007-05-16

* 通讯作者: panht12@public.xm.fj.cn

表 1 各观测站 M₂ 分潮及潮汐形态系数

Tab.1 M₂ tidal constituent and tidal form factor at 6 observation stations

| 站位 | M ₂ 分潮振幅 | |
|-----|---------------------|--------|
| | H 值/ m | 潮汐形态系数 |
| 福河 | 1.65 | 0.28 |
| 石码 | 1.69 | 0.29 |
| 海澄 | 1.71 | 0.31 |
| 锦埭 | 1.78 | 0.30 |
| 两百两 | 1.83 | 0.29 |
| 一比疆 | 1.89 | 0.34 |

表 2 厦门站 2000 年与 2006 年调和常数

Tab.2 Tidal constituents at Xiamen station in 2000 and 2006

| 潮汐调和常数 | 2000 年 | | 2006 年 | |
|----------------|--------|---------|--------|---------|
| | H / cm | G / (°) | H / cm | G / (°) |
| M ₂ | 186.7 | 352.7 | 182.6 | 352.1 |
| S ₂ | 54.6 | 46.4 | 53.6 | 42.3 |
| K ₁ | 32.6 | 280.4 | 34.7 | 284.9 |
| O ₁ | 28.3 | 238.7 | 28.0 | 235.3 |

周月逐时潮位数据订正到国家 85 高程基面后,按照《水运工程测量规范》^[3](JT J203-2001)推算出 2006 年九龙江河口的理论最低潮面同时收集 2000 年 3、4 月间九龙江河口的理论最低潮面^[5],对比如图 2 所示的曲线,可以得出:

(1) 2006 年各站理论最低潮面与 2000 年相比较:福河、石码、海澄、一比疆均有所的降低,降幅最大的是福河站,达 0.68 m;一比疆站降幅最小,为 0.08 m.锦埭和两百两均有不同程度的增加,两百两增加幅度较大,为 0.35 m.

(2) 从理论最低潮面高度值的变化分析,各站之间理论最低潮面的比降明显要比 2000 年小,变化率趋于平缓.福河与一比疆之间距离为 20.7 km,2000 年两站之间理论最低潮面相差达 1.69 m,即沿下游每延伸 1 km 下降 8.41 cm;2006 年两站之间理论最低潮面相差 1.08 m,比降为 5.22 cm/km,平均每年降低幅度约 0.53 cm/km.

理论最低潮面的变化与水域地形变化有直接的联系.依 2006 年数据算出的九龙江河口区理论最低潮面高度低于依 2000 年算出的,理论最低潮面高度沿河道的比降减缓幅度较大,表明九龙江河口区的地形自然状态发生了一定程度的变迁,主要可能是河床高度降低,河床坡度趋于平缓,尤其是上游河床地貌的变化程

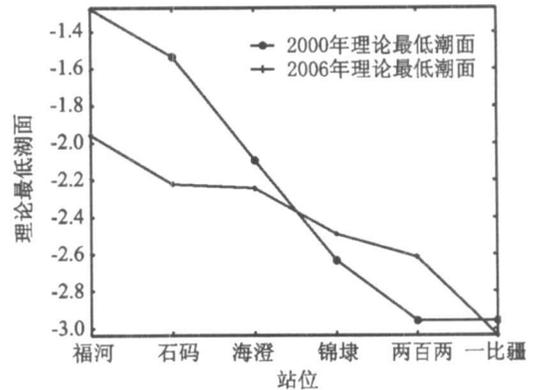


图 2 各观测站的理论最低潮面

Fig.2 Theoretical depth datum of the stations

度更为迅速.

3 潮波衰减模数 μ 的估算

3.1 有摩阻河道潮位的沿程关系

外海潮波进入河口区后,受海底地形、河口平面形态、径流、底摩阻和地转等因素作用,在河口的沿程传播过程中将发生变化,潮波能量损失,潮波振幅减小.振幅变化按指数衰减关系表示时,其波面的形式为

$$\eta = ae^{-kx} \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

其中 k 为波数

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{Tc} \quad (2)$$

a 为潮波振幅, ω 为潮波频率, T 为潮波周期, μ 为衰减模数, λ 为潮波波长, c 为潮波传播速度.

河口上游发生潮波反射,反射潮波与河口下游的入射潮波在河道中叠加后,总的潮波面关系式为

$$\eta = ae^{-kx} \cos(\omega t - kx) + ae^{kx} \cos(\omega t + kx) \quad (3)$$

极值水位发生的时间可由

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

求出,或将潮波面关系式改写成以下形式

$$\eta = 2a \sqrt{(\cos kx \cosh kx)^2 + (\sin kx \sinh kx)^2} \times \cos(\omega t - \theta)$$

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\sin kx \sinh kx}{\cos kx \cosh kx}\right)$$

振幅部分即为极值水位的绝对值,进一步整理成:

$$\eta = 2a \sqrt{\frac{1}{2}(\cos 2kx + \cosh 2kx)} \quad (5)$$

九龙江属正规半日潮,潮波的波长为 λ 假设理想反射点的位置与福河的距离 x₀,则 x₀ 相对于 λ 为无限小,则可以近似取福河站为 x = 0 处,极值水位绝对值 η_b 等于 2a,因而上式表示了下游各处极值水位与上游边界极值水位的比值关系,记为:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \sqrt{\frac{1}{2}(\cos 2kx + \cosh 2\mu x)} \quad (6)$$

考虑到九龙江河口区的正规半日潮性质, 取潮周期 T 为 12.42 h; 且河道水深普遍小于 20 m, 以浅水波速公式 $c = \sqrt{gh}$ 计算潮波波速, 式中 h 选取为平均海面下的水深。

3.2 下游各处潮波衰减模数 μ 的推算

由上面公式推导可知, η 为 Z 方向的水位, 由于实测潮位为各分潮的潮波组成, 为简略方便, 选取以 M_2 分潮为代表的潮波, 及潮汐振幅取平均海平面至理论最低潮面的潮差值, 潮汐周期为 12.42 h 的两种传播特征进行考虑, 也即取 η 为理论最低潮面高度值和 M_2 分潮 H 值, 推算出下游各潮位观测站所处河段的潮波振幅衰减模数 μ 值, 计算结果如表 3 和图 3 所示。

表 3 各观测站潮波衰减模数 μ 值

Tab.3 Attenuation coefficient μ at 5 stations

| 观测站 | 2006 年 $\mu \times 10^{-5}$ 值 | 2006 年(M_2 分潮) $\mu \times 10^{-5}$ 值 | 2000 年 $\mu \times 10^{-5}$ 值 |
|----------|----------------------------------|---|----------------------------------|
| 福河 ~ 石码 | 6.241 | 6.241 | 34.578 |
| 福河 ~ 海澄 | 3.767 | 3.767 | 19.717 |
| 福河 ~ 锦埭 | 3.936 | 4.877 | 16.093 |
| 福河 ~ 两百两 | 4.056 | 3.291 | 14.049 |
| 福河 ~ 一比疆 | 3.022 | 4.056 | 10.438 |

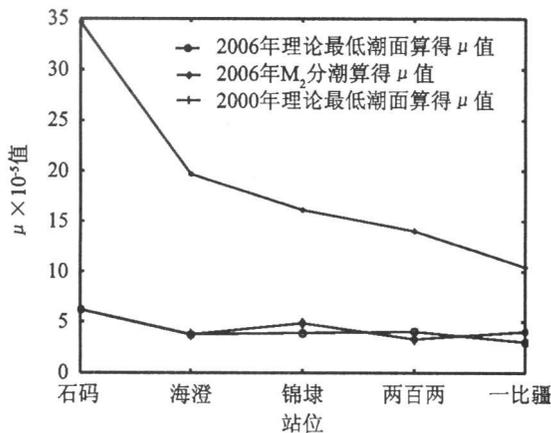


图 3 各观测站潮波衰减模数值

Fig.3 Attenuation coefficient at 5 stations

根据推算结果, 用 M_2 分潮 H 值算得的 μ 值与用理论最低潮面高度计算的 μ 值相差不大, 但同一站位相比, 2000 年的 μ 值要比 2006 年的 μ 值大 2.5 ~ 5.5 倍, 越靠近上游的站位 μ 值相差越大; 观测站之间比较, μ 值从上游(福河站)到下游(一比疆站)均逐渐变小, 但 2000 年的 μ 值上下游变化趋势较陡, 而 2006 年的 μ 值上下游变化就比较平缓。

3.3 潮波衰减模数 μ 与底摩擦阻力的关系

考虑有摩阻河道中的潮波运动, 将底部摩擦阻力表示成 $-\beta u$, 负号表示阻力方向与流向相反。

$$\beta = \frac{8f}{3\pi} \frac{u_{max}}{h} \quad (7)$$

β 为线性化摩擦系数, u_{max} 为最大潮流速度, f 为 D-W 阻力系数, 它与底床糙率有关, 考虑包括摩阻作用的波动方程, 可导出 μ 值与有摩阻波数 k 值之间的相互关系为

$$k^2 - \mu^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \quad (8)$$

$$2\mu k = \beta \frac{\omega}{c_0} \quad (9)$$

从以上两式消去 k , 并考虑到 μ 远小于 ω/c_0 , 可以得出近似关系式

$$\mu = \frac{\beta}{2c_0} \quad (10)$$

上式表明, 潮波衰减模数 μ 与底摩阻呈正比关系, 进一步导出 μ 值与 D-W 阻力系数 f 的关系式为:

$$\mu = \frac{4f}{3\pi} \frac{u_{max}}{hc_0} \quad (11)$$

根据实测的水位数据可用上式估算河口港湾潮波运动中底摩擦阻力的影响程度, 指导潮波运动的数模计算。

取 2006 年理论最低潮面高度值算得的 μ 值, 推算出各潮位观测站所处河段的线性化摩擦系数 β 值, 计算结果如表 4 所示。

表 4 各观测站潮波线性化摩擦系数 β 值

Tab.4 Linear friction coefficient β at 5 stations

| 观测站 | 2000 年 $\beta \times 10^{-3}$ 值 | 2006 年 $\beta \times 10^{-4}$ 值 |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 福河 ~ 石码 | 4.389 | 7.922 |
| 福河 ~ 海澄 | 2.533 | 4.839 |
| 福河 ~ 锦埭 | 1.891 | 4.624 |
| 福河 ~ 两百两 | 1.382 | 3.991 |
| 福河 ~ 一比疆 | 1.869 | 5.412 |

由此可利用沿程实测的水位数据, 估算河口港湾潮波运动中底摩擦阻力的影响作用, 并应用于潮波运动的数值计算。

4 结果与讨论

(1) 根据九龙江河口区 6 站周月潮位实测数据进行潮汐调和, 证实该河口区属正规半日潮, 推算和比较了理论最低潮面的经年变化, 说明河口区各站理

论最低潮面均有不同程度的降低,理论最低潮面的沿程变化趋于平缓.

(2) 推算河口区各站潮波振幅衰减模数的变化, μ 值减少 2.5~5.5 倍,各河段之间的 μ 值沿程变化也趋于平缓.

(3) 实测的水位数据可用于估算河口港湾潮波运动中底摩擦阻力的影响程度,指导潮波运动的数模计算.

(4) 可能导致上述变化的原因与九龙江口到石码河段采沙、码头、围垦等人类的开发活动有关.采沙造成低潮位降低,九龙江河口潮差加大,潮流动力作用增强,加上上游水利工程的拦蓄作用,上游来沙大大减少,从而导致河床降低.

(5) μ 值揭示了河口区潮差的沿程衰减程度.一般来说,河口潮差的沿程变化取决于 3 个因素:河口断面的陆向收缩(“喇叭”效应)、浅滩和河岸边界的反射和河床底部摩阻,前两者促使潮差沿程增大,第 3 个因素引起潮差沿程减小.从不同年份 μ 值的对比情况看,应是上述 3 种因素综合作用影响的结果. μ 值较大幅度的减小,表明近年来九龙江河口区平面状态、地形特征和河床底质成分等因素发生了较大的变化,港口码头的

修建和围垦,使河口断面缩小,浅滩和码头岸界的修筑造成了人为的刚性边界,疏浚和采沙活动使自然河床的形态发生变化,表现在河底标高降低、底坡趋于平缓 and 底质成分的改变,减小河床底部摩阻,促使九龙江河口区河道潮差有所增大,提高了河道的过水能力.

(6) 从水力学角度考虑,航道过水能力太强,并不利于航行.因此, μ 值较大幅度的减小是否对河道水力最佳断面造成不良影响,尚待进一步分析比较.

参考文献:

- [1] Charles B Officer. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal) [M]. USA: A Wiley Interscience Publication, 1976.
- [2] 朱俊雄. 九龙江南港河段低潮位变化影响因素初步分析 [J]. 水文, 2001(S1): 32-35.
- [3] 天津航道局. 水运工程测量规范 (JTJ203-2001) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志·十四分册(重要河口) [M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 712.
- [5] 国家海洋局厦门海洋工程勘察设计中, 福建省航道局勘察实验中心. 厦门湾港口总体布局规划报告(附件 2) 气象水文泥沙分析报告 [R]. 福建, 2001.

The Relationship Between Theoretical Depth Datum and Tidal Diffusion Analysis in Jiulongjiang Estuary

ZHENG Jixiang, ZHANG Guorong, PAN Weiran*, WU Qingsong
(Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on more than one month long observations at six tidal gauges in the Jiulongjiang Estuary in February 2000 and in March 2006, respectively, tidal changes in spring were compared and analyzed, and then the relationship between tidal attenuation coefficient μ and the bottom friction were discussed. Analysis indicates that tidal type in Jiulongjiang Estuary is characterized by informal semi diurnal tides. Compared with the theoretical depth datum in 2000, the theoretical depth datum in 2006 depressed, and the decrease in the upriver reach was more than that in the downriver reach. By comparison, it was also found that the tidal attenuation coefficient μ in 2006 was reduced by 60%~80% relative to that in 2000, which can be ascribed to the landform changes in the Jiulongjiang Estuary, including the riverbed lowering, the base slope smoothing, and the changes in sediment component. These changes may be related to human activities in the upstream such as sand excavation, reclamation, and so on.

Key words: theoretical depth datum; tidal attenuation coefficient; bottom friction; Jiulongjiang Estuary