

乐清湾水域纳潮量演变分析

王诚超^{1,2}, 潘国富¹, 许雪峰¹, 陈培雄¹

(1. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 舟山市港航管理局, 浙江 舟山 316000)

摘要: 基于 1965 年以来的不同时期水深地形数据和卫星遥感影像资料, 对乐清湾岸线和不同特征值水深所围水域面积的历史变化进行研究, 根据 GIS 技术计算乐清湾近 50 年的不同水域面积的演变特征。利用实测地形资料和水文数据建立乐清湾海域二维潮流数学模型分析乐清湾水域纳潮量的演变情况。结果表明: (1) 乐清湾海域纳潮量近 50 年减少 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2013 年较 1965 年减少 17.69%, 年均递减速率由 $0.06 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加至近年的 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; (2) 海湾不同区域围填海造成相应海区水域面积的缩减, 但纳潮量对水域面积改变的响应程度有显著差别。内湾滩涂围垦对乐清湾不同湾区纳潮量影响十分有限, 外湾围垦对纳潮量的影响由外湾向内湾明显递减。漩门湾二期工程显著改变乐清湾的潮流形态, 造成各个湾区纳潮量均出现大幅度的调整。本研究可以为海湾的生态环境保护和预测海湾的发展趋势提供量化的参考数据。

关键词: 乐清湾; 水域面积; 纳潮量; 演变分析

中图分类号: TV148.2; X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)08-0076-10

DOI: 10.11759/hyxx20161019001

乐清湾是一个与东海相通的半封闭型强潮海湾, 外湾地形相对开阔, 水深自西向东逐渐增大, 西部潮滩宽广, 东部潮流冲刷槽贯通南北^[1](如图 1)。中湾和内湾岛屿散落其中, 舌状潮滩和树枝状潮汐汉道交错分布^[2]。湾底地貌总趋势保持西北向东南倾斜, 由浅滩向深水槽渐变的格局。以乐清市的华秋洞和玉环县的连屿为分界线, 南北地形差异较大。此线以北(中湾, 内湾)岛屿众多、水道交错, 地形起伏大, 湾底潮汐汉道与舌状、连岛坝状滩地相间, 水深自南向北减小。此线以南(外湾)水域开阔, 水深自西向东逐渐增大, 西部为宽广的华岐潮滩, 东部发育有潮流冲刷槽。近 50 年为缓解乐清湾沿岸城市发展所需的土地资源紧缺问题, 对乐清湾宽广的潮滩实施了大规模的围海造地工程。这些围堤填海和港口建设工程改变了区域边界条件, 纳潮量可能会因潮流形态的改变产生不同程度的影响。

纳潮量是海湾环境评价的重要指标, 其大小直接影响海湾的水交换能力和污染物质的扩散输移, 直接制约着海湾的自净能力和环境容量, 对于维护海湾特别是半封闭海湾的生态环境至关重要^[3]。有关河口海湾纳潮量的研究和分析成果较多, 如乔贯宇等^[4]采用声学多普勒海流剖面方法对胶州湾口进行走航观测, 得到了胶州湾的纳潮量; 叶海桃等^[5]将滩

涂和水域分开, 计算了三沙湾的纳潮量和水体交换时间; 陈红霞等^[6]同时采用海图和 ADCP 测流计计算和分析了胶州湾的纳潮量; 杨世伦等^[7]通过考虑河口潮滩面积因围垦而变化的情况, 引进纳潮量计算的新公式, 对胶州湾的纳潮量进行了重现计算和分析; 吴隆业等^[8]采用遥感影像资料得到了海口港的水域面积进而计算了纳潮量的变化; 方神光等^[9]对伶仃洋水域面积和岸线的历史演变进行了分析和总结, 并利用遥感资料计算了过去近 30 年内伶仃洋水域面积的演变情况。

有关乐清湾的大多数研究成果集中在与乐清湾纳潮量变化密切相关的海湾水动力、水环境及水文地貌方面。20 世纪 90 年代以前的研究主要集中在乐清湾的潮流特性、水体交换、细颗粒泥沙沉积作用^[10-12], 在对乐清湾的动力环境与潮汐潮流、泥沙输移环境、海洋资源开发现状等方面的研究取得了一系列成

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2016-12-14

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY13D060003)

[Foundation: Provincial Natural Science Foundation of Zhejiang, No. LY13D060003]

作者简介: 王诚超(1990-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸过程及工程运用研究, 电话: 18258874206, E-mail: 1059453335@qq.com

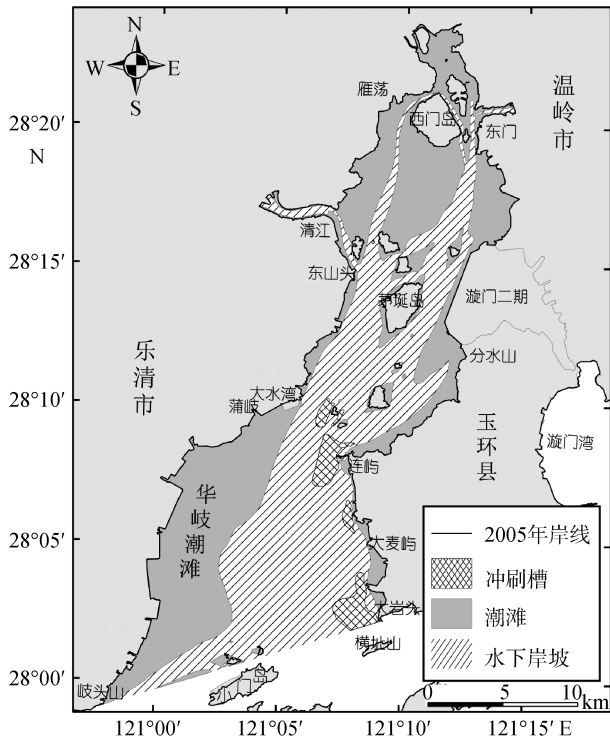


图1 乐清湾地貌图

Fig.1 Landscape map of the Yueqing Bay

果。随着技术进步和对生态环境、海洋资源的开发利用的重视,相关学者对乐清湾的生态、海洋动力环境进行了深入探讨。季小梅等^[13]利用3个年份的历史海图资料对比研究了乐清湾近期海岸变化,认为近期岸线由于围垦持续向海淤进,各等深线所围水域面积不断减小。李佳^[14]建立乐清湾的潮流数值模型系统研究了乐清湾的环境水力特性,通过分析断面的潮通量较准确地计算了海湾的纳潮量。单慧洁等^[15]利用海岸工程建设监测资料和数值模拟方法探讨围填海工程对海洋动力环境的叠加影响。杨晓东等^[16]运用机制分解法将悬沙净输移通量分解成多个动力项并讨论不同区域悬沙输移的时空分布特征。

前人对乐清湾纳潮量的专门研究成果相对较少,已有研究主要限于某一个特定年份海湾空间几何条件下的纳潮量统计,从近几十年较长时间尺度和较大空间范围系统研究乐清湾的纳潮量对多年海岸工程的响应鲜有报道。本文通过建立不同年份乐清湾水域二维水动力模型,探究乐清湾近50年纳潮量的演变规律。为区域海洋资源开发利用、港口规划和生态环境保护供科学依据。

1 数据与方法

利用GIS软件对1965、1988、2005年3个年份

的海图进行数字化,并与2013年实测地形数据进行坐标和参考基准面的统一校准,获取乐清湾近50年不同时期的水深地形数据。结合1988、2005、2013年卫星遥感影像资料,提取乐清湾历史岸线并计算乐清湾不同水深所围水域面积。根据获得的历史水深和围填海数据,构建4个年份的二维潮流数值模型,通过计算不同海区的纳潮量,系统地分析乐清湾不同时期纳潮量的变化过程,探究围填海活动对纳潮量演变的影响。

1.1 纳潮量计算方法

通常情况下,纳潮量是指平均潮差条件下一个海湾可以容纳的海水量。传统的纳潮量计算一般采用的公式为^[6, 17]:

$$P = \Delta H \Delta S$$

式中, P 为平均潮差条件下的纳潮量; ΔH 为平均潮差; ΔS 为平均水域面积(即平均高低潮位所对应水域面积的均值),平均潮差可根据验潮站的多年实测资料求得。该计算方法简单,计算结果较为一致。但是 ΔS 的计算比较复杂。海图上一般只标示0 m线(理论最低潮面)和岸线(相当于最大高潮线),位于两者之间的平均高潮线和平均低潮线需通过地形推算求出。

对于湾内岛屿交错、岸线曲折、潮滩宽广的海域由于地形变化较快,潮水漫滩归槽使潮差在海湾不同区域差别较明显,纳潮量变化的计算误差较大。本文基于乐清湾复杂的地貌特征,采用不同时期的地形数据和岸线资料,基于建立的乐清湾二维潮流数学模型,通过设置特征断面来统计乐清湾的纳潮量。对潮差随空间变幅明显、流态多变的海湾具有较强的适应性和准确性。因工程建设产生的纳潮量改变,用该方法的计算结果可以更好地对比因不同围填海等海岸工程对纳潮量的影响。

1.2 数学模型

运用二维潮波运动方程建立正交曲线坐标系下沿水深平均的水动力数学模型,根据 Boussinesq 假定、静水压强假定建立乐清湾水域的二维水动力模型如下^[18-19]:

沿水深积分的连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \tau_{bx} = A_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} \tau_{by} = A_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中, ζ 表示潮位, 即参照静水面 ($Z=0$) 以上的水位 (m); u, v 表示 x, y 方向上的垂线平均流速分量 (m/s); H 为水深 (m); t 表示时间 (s); f 表示柯氏力系数, $f = 2w \sin \phi$, w 为地转角速度, ϕ 为纬度; g 表示重力加速度 (m/s²); τ_{bx}, τ_{by} 表示 x, y 方向底床阻力, $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho g(u, v) \sqrt{u^2 + v^2} / c^2$; c 表示谢才系数, $c = (1/n) \sqrt{H}$, n 为糙率系数, $H = h + \zeta$, h 表示静水深; A_x, A_y 表示涡动黏滞系数 (m²/s)。

1.3 模型初始及边界条件

初始条件:

$$\begin{cases} \zeta(x, y, t)|_{t=0} = \zeta(x, y) = \zeta_0, \\ u(x, y, t)|_{t=0} = v(x, y, t)|_{t=0} = 0 \end{cases}$$

边界条件:

开边界: 边界上主要参考了石塘港、北麂、南麂和琵琶 4 个潮位站的长期观测资料, 站位如图 2 所示。采用水位控制, 即用潮位预报的方法得到开边界条件。

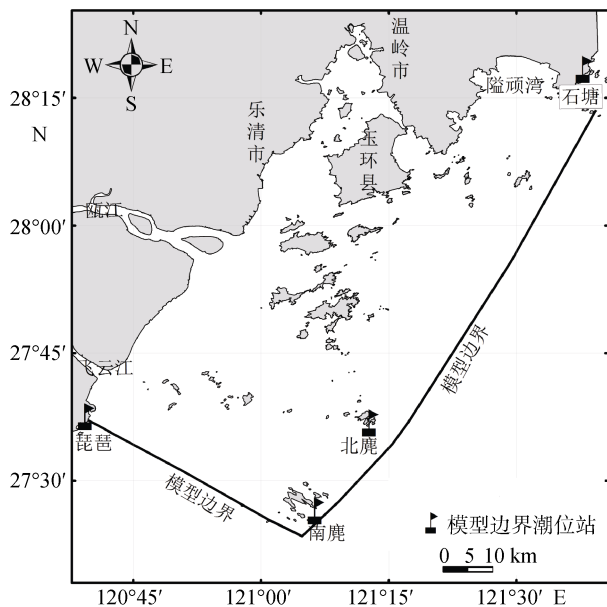


图 2 乐清湾模型网格边界

Fig. 2 Model grid boundary of the Yueqing Bay

开边界采用潮位预报边界条件:

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{11} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (v_0 + u)_i + g_i]$$

式中, A_0 为平均海面高程; $F_i, (v_0 + u)_i$ 为天文要素; H_i ,

g_i 为调和常数即振幅与迟角; σ_i 为分潮的角速率。

调和常数选用 11 个分潮, 其中日分潮 4 个 (Q_1, O_1, P_1, K_1), 半日分潮 4 个 (N_2, M_2, S_2, K_2), 浅水分潮 3 个 (M_4, MS_4, M_6)。分潮调和常数取自边界附近潮位站, 参考同潮图, 根据模型边界与长期验潮站的距离关系对调和常数进行适当调整后用于模型。

闭边界: 在闭边界取流速的法向导数为零, 在潮滩区采用漫滩边界处理。

2 乐清湾特征水深所围水域面积变化

2.1 纳潮水域面积演变

对 1965—2005 年的海图和 2013 年的实测地形数据及 1988、2005、2013 年卫星遥感影像资料综合分析, 显示: 近 50 年乐清湾各等深线所围水域面积持续减小。20 世纪 80 年代初至 21 世纪初期, 由于围塘造陆使岸线向海推进加速, 外湾西部的华岐潮滩岸线外推速率明显增大。

通过对乐清湾潮滩演变进行详细的分析, 得出不同水深围成水域面积的变化状况。结果如表 1、表 2 所示: (1) 1965—1988 年, 乐清湾 0 m 以上滩涂 (岸线至理论最低潮面) 的面积减小 45.11 km², 年均减速 1.96 km²/a。0~2 m 滩涂水域面积减小 0.76 km², 年均减速 0.03 km²/a。2~5 m 滩涂水域面积减小 1.94 km², 年均减速 0.08 km²/a。乐清湾 5 m 水深水道潮沟所围水域面积 23 年仅减小 0.89 km², 占总水域面积的 25%, 表明潮汐通道的动力沉积环境处于相对平衡状态, 漩门湾的堵港工程并未对潮汐主通道的沉积动力产生明显影响; 浅滩深槽水域面积在近 23 年减小幅度较小, 海湾平面形态和整体地形地貌除因个别工程影响产生局部调整外未现大范围变化。(2) 1988—2005 年, 乐清湾 0 m 以上滩涂 (岸线至理论最低潮面) 的面积减小了 23.28 km², 年均减速 1.37 km²/a。0~2 m 滩涂水域面积减小 6.11 km², 年均减速 0.36 km²/a。2~5 m 滩涂水域面积减小 7.87 km², 年均减速 0.46 km²/a。乐清湾 5 m 水以下水道潮沟所围水域面积 17 年减小 19.30 km², 占总水域面积的 24%; 不同水深所围水域面积均出现不同程度减小, 浅滩由于漩门二期筑堤蓄淡对中湾的动力环境产生显著改变而出现面积大幅消减; (3) 2005—2013 年乐清湾 0 m 以上滩涂 (岸线至理论最低潮面) 的面积减小了 32.31 km², 年均减速 4.04 km²/a。0~2 m 滩涂水域面积减小 0.09 km², 年均减速 0.01 km²/a。2~5 m 滩涂水域面积减小 4.79 km², 年均减速 0.59 km²/a。乐清湾 5 m 以下水道潮沟所围

水域面积 8 年增加 0.98 km², 占总水域面积的 26%。乐清湾外湾西北侧的华岐潮滩围海造陆使浅滩面积减小, 但 0 m 以下不同水深所围水域面积却因束水集流作用有扩大趋势, 深槽不同程度朝深宽方向发展, 深槽的泥沙输运能力提高。

表 1 不同特征值水深所围水域面积
Tab.1 Water areas enclosed by different depth of eigenvalues

年份	特征值水深(m)	面积(km ²)	占总面积比例(%)
1965	<0	265.38	51.53
	[0, 2)	55.65	10.81
	(2, 5]	76.48	14.85
	>5	117.49	22.81
1988	<0	220.27	47.24
	[0, 2)	54.88	11.77
	(2, 5]	74.54	15.99
	>5	116.60	25.01
2005	<0	196.99	48.08
	[0, 2)	48.78	11.90
	(2, 5]	66.67	16.27
	>5	97.30	23.75
2013	<0	164.68	44.09
	[0, 2)	48.69	13.03
	(2, 5]	61.88	16.57
	>5	98.29	26.31

注: “[”表示大于等于, “]”表示小于等于, “(”表示大于, “)”表示小于, 表 2 同

表 2 特征值水深所围水域面积变化
Tab.2 Change value of water areas enclosed by different depth of eigenvalue

时期	特征值水深(m)	面积变化量(km ²)	面积变化速率(km ² ·a ⁻¹)	面积变化比例(%)
1965—1988	<0	-45.12	-1.96	-17.00
	[0, 2)	-0.76	-0.03	-1.37
	(2, 5]	-1.94	-0.08	-2.54
	>5	-0.89	-0.04	-0.75
1988—2005	<0	-23.28	-1.37	-10.57
	[0, 2)	-6.11	-0.36	-11.13
	(2, 5]	-7.87	-0.46	-10.56
	>5	-19.30	-1.14	-16.55
2005—2013	<0	-32.3	-4.04	-16.40
	[0, 2)	-0.09	-0.01	-0.18
	(2, 5]	-4.79	-0.60	-7.18
	>5	0.97	0.12	1.00

2.2 乐清湾岸线演变

乐清湾绝大部分为基岩质岸线, 在内湾的东部、

顶部和外湾的北部分布有宽广的淤泥质潮滩。海湾近 50 年处于弱动力沉积环境中, 基岩海岸抗侵蚀性强, 泥沙在湾内的悬浮与落淤处于相对平衡状态, 岸线在自然条件下未现明显变化。但近几十年来, 人工围塘促淤、围海造陆工程显著改变了海湾的动力条件和岸线演变速率。根据历年海图和遥感影像资料做出了 1965—2013 年乐清湾海域的水域面积变化(图 3), 水域面积统计结果见表 3。分析表明: (1)由于近 50 年围海造地工程, 特别是漩门二期和华岐潮滩围垦, 整个乐清湾水域面积减小约 141.47 km², 年均减小速率 2.95 km²/a。(2)乐清湾围垦具有明显的阶段性特征, 1965—1988 年, 海湾开发处于低频率状态, 23 年水域面积减小 48.71 km², 占近 50 年总围垦面积的 34.43%, 水域面积年均减小速率 2.44 km²/a。1988 年后海洋开发速率加快, 围填海工程加速实施。1988—2005 年围垦面积 56.55 km², 水域面积年均减小速率 2.83 km²/a, 占总围垦面积的 39.97%, 漩门二期围堤的修建使海湾水域面积减小, 对海湾动力环境产生明显改变。2005 年后, 出于海湾保护的慎重考虑, 对乐清湾的围垦活动主要集中在外湾的西北部的华岐潮滩。2005—2013 年的 8 年围垦总面积 36.21 km², 水域面积年均减小速率 3.62 km²/a。(3)近

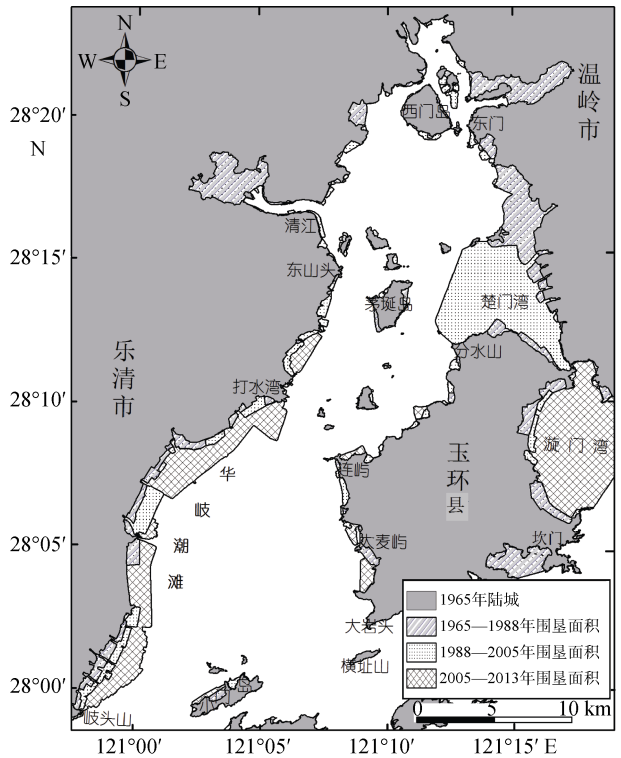


图 3 历年围垦面积变化
Fig.3 Reclamation changes over the years

表 3 乐清湾不同时期水域面积变化

Tab.3 Change of reclamation area of the Yueqing Bay in different periods

时期	面积变化量 (km ²)	面积年变化量 (km ² ·a ⁻¹)	面积变化率 (%)	面积年变化率 (%·a ⁻¹)	围垦量占总围垦量百分比 (%)
1965—1988	-48.71	-2.12	-9.46	-0.41	34.43
1988—2005	-56.55	-3.33	-12.13	-0.71	39.97
2005—2013	-36.21	-4.53	-8.84	-1.10	25.60
1965—2013	-141.47	-2.95	-27.47	-0.57	100.00

注：负号表示减少，下同

50 年，位于外湾西北侧的华岐潮滩围区的围垦总面积约 48.33 km²，占乐清湾总围垦水域面积的 34.08%；漩门二期的围垦面积约 36.32 km²，占乐清湾总围垦水域面积的 25.61%。位于乐清湾内湾宽广潮滩之上的围垦面积约为 43.52 km²，占乐清湾总围垦水域面积的 30.68%，且 1965—1988 年围垦面积占内湾总围垦面积的 86.83%。分析表明 1988—2013 年乐清湾的围垦区域主要集于外湾西北侧的华岐潮滩的近岸水域。

综合以上分析，乐清湾岸线在自然冲淤动力条件下相对较稳定，但近几十年人类岸线开发利用活动已对水域面积产生直接影响。近 50 年，乐清湾海域面积减小约 141 km²。1988 年前围垦集中于内湾；1988—2005 年主要有华岐潮滩围垦和漩门湾二期工程，仅漩门湾筑堤蓄淡工程就使乐清湾水域面积缩小 7%；2005 年后围垦区域集中在外湾西北部的近岸潮滩区域，这期间中湾、内湾围填海工程受到严格限制，只出现小规模围垦工程，湾内岛屿因处于较严格保护状态中而未有较大规模的围海扩建工程。

3 乐清湾数值模型

3.1 模型计算水域

乐清湾水域数值计算范围如图 2 所示，东西向距离约 45 km，南北距离约 125 km。整个计算水域包括乐清湾、隘顽湾、漩门湾、温州湾、瓯江口等。上边界至石塘镇，下边界分别为飞云江口南岸、南麂列岛。东边界达牛山岛、披山岛、洞头列岛、北麂列岛 20 m 水深水域。东边界始于瓯江、飞云江。采用局部加密的曲线正交网格划分研究区域，乐清湾区域网格尺度控制在 100 m 左右，最大网格步长达 1 000 m 左右。计算时间步长取 1 min。

3.2 模型验证

本文采用乐清湾水域同步的实测潮位和潮流观测资料对模型进行验证(站位如图 4)。本模型选取乐

清湾顶部的江夏验潮站 W1、茅埏岛验潮站 W2、中湾西部的悦海临时潮位站 W3、连屿验潮站 W4 和小门岛验潮站 W5 实测数据对模型潮位进行验证；选取 6 条水文测验垂线对乐清湾的大、中、小潮潮流进行验证。各点计算潮位与实测潮位拟合较好，高低潮位误差一般在±15 cm 以内，相对误差在 5%以内，计算潮位与实测潮位相位基本一致。计算流速与实测资料相位一致，涨落急流速和流速变化过程较为一致，相对误差控制在 10%以内，流向的拟合亦较好，无论涨潮还是落潮与实测值相比，差值一般在 10%以内。限于篇幅，本文仅列出 C3 站大潮向流速和 W2 站的潮位过程线验证结果(如图 5、图 6)。总体而言，潮位与潮流的计算结果较为满意，说明模型计算参数设置是准确、合理的，所构建的潮流模型是准确可靠的，可以用于乐清湾海区不同纳潮量演变的历史分析及预测。

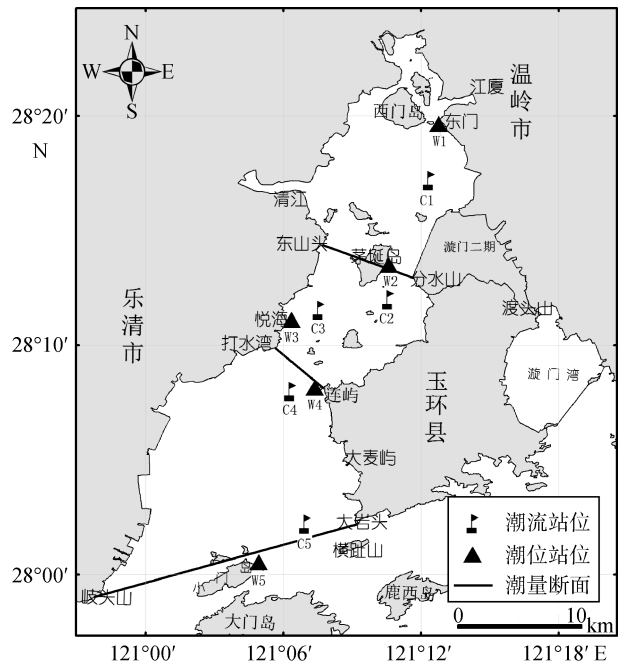


图 4 模型观测站位

Fig.4 Observation stations of the model

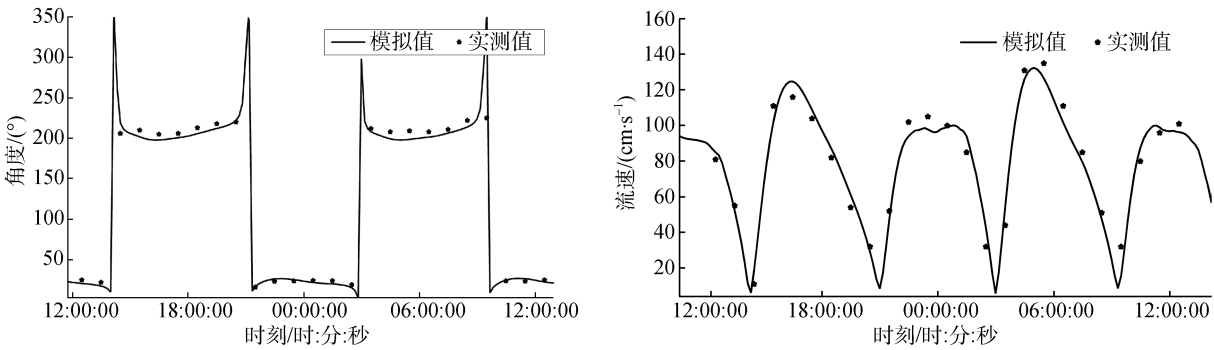


图 5 C3 站大潮流向、流速验证
Fig.5 Verification of tidal direction and flow speed in the C3 location

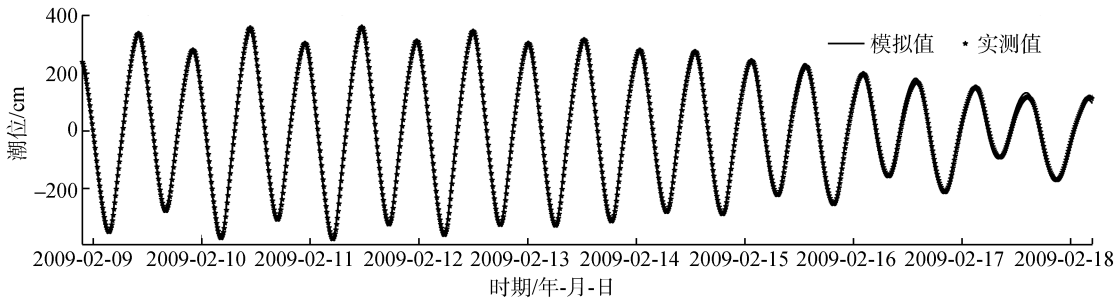


图 6 W4 站潮位过程验证
Fig.6 Verification of tidal level in the W4 location

4 乐清湾纳潮量演变分析

4.1 纳潮量断面布设

根据乐清湾地貌特征，在所建立的数学模型中设置特征观测断面，统计乐清湾不同水域的范围不同时刻的潮流量，分析该水域在一个潮周期内的纳潮量。因此，本研究在乐清湾全域分别布设了 4 个特征潮量观测断面，分别为乐清湾口门断面、外湾与中湾分界的打水湾-连屿断面、内湾与中湾分界的茅埴岛-分水山断面和东山头-茅埴岛断面(如图 4)。

4.2 不同时期纳潮量比较分析

通过建立的乐清湾二维潮流数学模型，对不同时期的的一个潮周期进行模拟计算。对乐清湾不同历史时期各个断面的纳潮量变化进行比较分析，特征值统计结果见表 4、表 5。

1) 乐清湾总纳潮量在近 50 年减小 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，减少了 17.69%。1965—1988 年间纳潮量减小 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，1988—2005 年间纳潮量减小 $1.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2005—2013 年纳潮量减小 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。纳潮量分别减少了 0.06%、6.79%、11.75%。三个时期的乐清湾水域面积分别减少了 9.46%、12.13%、8.8%。由此可见，纳潮量减少

比例与乐清湾水域面积同期减小比例并不具有一致性，而与围垦区域的布局密切相关。

表 4 乐清湾不同时期纳潮量
Tab.4 tide volume of the Yueqing Bay at different years

年份	水域	纳潮量($\times 10^8 \text{ m}^3$)		
		涨潮	落潮	平均
1965	内湾	5.36	5.51	5.43
	中湾	3.52	3.54	3.53
	外湾	8.78	9.01	8.90
	全湾	17.6	18.06	17.86
1988	内湾	5.48	5.59	5.54
	中湾	3.54	3.56	3.55
	外湾	8.66	8.90	8.78
	全湾	17.69	18.05	17.87
2005	内湾	4.26	4.52	4.39
	中湾	3.40	3.07	3.24
	外湾	8.80	9.26	9.03
	全湾	16.46	16.85	16.66
2013	内湾	4.27	4.53	4.40
	中湾	3.23	3.08	3.16
	外湾	7.02	7.26	7.14
	全湾	14.52	14.88	14.70

表 5 乐清湾不同时期纳潮量变化

Tab.5 Variation of the tide volume of the Yueqing Bay in different periods

时期	水域	纳潮量变化 量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	纳潮量 变化比例(%)	纳潮量年均 变化比例(%)
1965—1988 年	内湾	0.10	1.91	0.08
	中湾	0.02	0.54	0.02
	外湾	-0.11	-1.26	-0.05
	全湾	0.01	0.06	0.01
1988—2005 年	内湾	-1.14	-20.62	-1.21
	中湾	-0.32	-8.92	-0.52
	外湾	0.25	2.80	0.16
	全湾	-1.21	-6.79	-0.40
2005—2013 年	内湾	0.01	0.14	0.02
	中湾	-0.08	-2.37	-0.30
	外湾	-1.89	-20.91	-2.61
	全湾	-1.96	-11.75	-1.47
1965—2013 年	内湾	-1.03	-18.99	-0.40
	中湾	-0.37	-10.59	-0.22
	外湾	-1.75	-19.72	-0.41
	全湾	-3.16	-17.69	-0.37

2) 近 50 年由于海湾内各种海岸工程的修建,改变了海湾的边界条件。内、中、外海域的纳潮量分配比例有较大调整。内湾纳潮量由 1965 年的 $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少至 2013 年的 $4.40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少了 19.00%。除 1988—2005 年纳潮量减少 $1.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其他各个时期纳潮量有不到 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 微小幅度的增加, 这主要是由于 1999—2001 年漩门湾二期工程的围填海工程对乐清湾水动力产生非常明显的影响, 漩门湾二期围堤显著改变了经中湾上溯的潮流流态, 纳潮量由于内湾水域面积的大幅缩减而大幅度减少。其他时期内湾水域动力条件相对稳定。中湾纳潮量由 1965 年的 $3.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小至 2013 年的 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少了 10.59%, 仅 1988—2005 年纳潮量减少量占近 50 年总减少量的 85%, 模拟结果显示漩门湾二期围堤改变潮流流态。2005 年后中湾纳潮量处于相对稳定状态, 呈小幅度减少趋势。外湾水域开阔, 纳潮量受西北部近岸围垦工程影响呈现明显的阶段性。外湾纳潮量 1965—2013 年减小 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2013 年相较 1965 年减少 19.72%, 表现为先减小再增加最后又大幅度减小的变化过程。仅 2005—2013 年的 8 年减少幅值就达 $1.89 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而 1988—2005 年间由于漩门湾二期围堤阻滞潮流上溯, 外湾潮差增大, 导致纳潮量有 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的小量增加。

3) 各个时期乐清湾不同水域占整个湾区纳潮量的百分比也出现明显的阶段性改变(表 6 所示), 这主要是由于不同时期海湾内海岸工程的布局不同所致。内湾分配潮量基本维持在 31.37%~31.80%, 漩门湾二期工程导致 2005 年内湾潮量占比减少至 26.54%; 中湾则由 1965 年的 20.05%增加至 2013 年的 23.40%, 期间由于漩门湾二期工程缩窄水道造成 2005 年的潮量占比减少至 19.96%; 外湾分配纳潮的变化幅度明显大于其他湾区, 由 1965—1988 年的约 48.5%增加至 2005 年的 53.50%, 之后减少为 2013 年的 45.03%。上述结果表明漩门湾二期和华岐潮滩围涂工程显著改变了乐清湾的潮流动力和潮量分配状况。

表 6 不同海域潮量占总水域潮量的比例

Tab.6 The ratio of tide to tidal volume in different waters

年份	内湾占总湾 纳潮量(%)	中湾占总湾 纳潮量(%)	外湾占总湾 纳潮量(%)
1965	30.41	19.78	49.81
1988	30.98	19.88	49.15
2005	26.38	19.42	54.20
2013	29.93	21.49	48.58

4) 中湾通向内湾的茅埭岛东西两侧水道潮量分配比例有略微调整, 具体变化见表 7。东侧的茅埭岛-分水山水道分配的潮量由 1965 年 40.24%增加至 2013 年的 40.99%。期间东侧水道的潮通量呈小幅度减小, 之后由于漩门湾二期工程海堤有向北挑流作用及外湾西北部的围垦工程造成西侧潮流量减小, 潮流向东侧水道集中, 导致东侧水道分潮比由 40.24%持续增加至 40.99%。

5) 不同湾区围垦量对纳潮量的影响程度差异较大, 数据分析见表 8。1965—1988 年内湾围垦面积 37 km^2 , 占同时期全湾总围垦面积的 76%, 但内湾、中湾纳潮量却基本未变化, 外湾有少量减小。1988—2005 年间, 内湾区域由于漩门湾二期工程的显著影响, 造成内湾水域面积减少 41 km^2 , 占同期水域面积减少量的 73%, 内湾纳潮量的减少量也占同期纳潮量减少量的 67%。中湾也出现一定程度的减少, 但外湾却有 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的潮量增加, 占变化潮量的 14%。2005—2013 年, 围垦区域集中在外湾的西北部潮滩, 围垦面积占同期总围垦量的 89%, 外湾纳潮量减少量亦占同期变化量的 96%, 中湾有小幅度减少, 但内湾纳潮量基本未变。

表 7 茅埏岛东、西两侧水道潮通量

Tab.7 The tidal fluxes in the east and west of the Maoyan Island

年份	潮通量($\times 10^8 \text{ m}^3$)						东侧水道占内湾总潮量 百分比(%)
	东侧水道			西侧水道			
	涨潮	落潮	平均	涨潮	落潮	平均	
1965	2.76	2.34	2.55	2.59	3.17	2.88	40.24
1988	2.94	2.50	2.72	2.54	3.09	2.82	40.49
2005	1.90	1.69	1.79	2.37	2.84	2.60	40.79
2013	1.91	1.70	1.80	2.36	2.83	2.60	40.99

表 8 不同湾区围垦面积与纳潮量变化对比

Tab.8 Comparison of reclamation area and tide variation in different area

时期	湾区	围垦面积 (km^2)	占全湾围垦面积百分比 (%)	纳潮变化量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	占全湾纳潮变化量百分比 (%)
1965—1988	内湾	37.03	76.01	0.11	44.16
	中湾	1.77	3.64	0.02	8.18
	外湾	9.91	20.35	-0.11	-47.66
1988—2005	内湾	40.59	72.92	-1.14	-67.00
	中湾	4.56	8.20	-0.32	-18.59
	外湾	10.51	18.88	0.25	14.41
2005—2013	内湾	0.46	1.27	0.01	0.32
	中湾	3.43	9.42	-0.08	-3.89
	外湾	32.50	89.31	-1.89	-95.79

上述分析表明, 乐清湾近 50 年的海湾几何形态和地貌演变造成该海区纳潮量减小 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2013 年较 1965 年减少 17.69%。湾内不同海区分配的潮量比例在不同时期有较大调整, 不同海区潮量变化值和变化率差别明显。在整个乐清湾海域纳潮量显著减小的情况下, 中湾纳潮量总体变化不大。内湾和外湾由于大规模围垦工程造成相关海域水域面积出现大幅度变化而对纳潮量产生较大影响。内湾 1988 年前的潮滩大规模围垦对整个海湾的纳潮量影响并不显著。但之后漩门湾二期围堤对中湾、内湾的潮流场改变明显, 缩减了内湾水域面积, 减小内湾、中湾的纳潮量但却增加了外湾的纳潮量。2005—2013 年外湾西北部潮滩的大规模围填海工程对外湾纳潮量影响明显, 期间外湾纳潮量减小 $1.89 \times 10^8 \text{ m}^3$, 甚至大于近 50 年来的总减小幅度 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但对内湾影响较小, 内湾纳潮量基本未变。外湾围填海工程造成中湾纳潮量有 2.37% 的减少, 内湾纳潮量甚至有 0.14% 微小幅度的增加。位于内湾的漩门湾二期海堤的修建改变了潮流流路, 流向楚门湾海域的一股潮流通道直接被阻断, 从外湾上溯的潮流由于堤坝的挑流作用使中湾流速增加, 但流经茅埏岛东西两侧水道的潮量变

化只是发生微小调整, 东侧水道潮通量略有增加。

5 结论

乐清湾水域近 50 年来由于围海造地等海湾开发利用活动, 水文动力及地貌形态发生不同程度改变。为探究乐清湾海域纳潮量对海湾建设的响应, 本文基于实测水文资料、历史地形数据、卫星遥感影像, 采用数值模拟方法对乐清湾海区纳潮量演变情况进行分析和探讨。通过对不同年份的地貌形态与纳潮量变化的对比研究, 总结如下:

1) 数值模拟结果显示乐清湾海域纳潮量近 50 年减小 $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 纳潮量减少 17.69%。随着海湾开发建设活动加速, 乐清湾海域纳潮量减少速率加快, 变化速率由 $0.06 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 递增至近年的 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2) 乐清湾海域内、中、外湾三个湾区的纳潮量调整差别较大, 且具有较大的阶段性特征。内湾在 1988—2005 年纳潮量减少 20.62%, 其他时段潮量改变比例小于 2%, 特别在 2005—2013 年, 内湾纳潮量有微小幅度的增加; 中湾纳潮量经历了一个小幅增加—大幅减小—小幅减小的过程, 1988—2005 年纳潮量有 8.92% 的减小, 其他时段变化幅度小于 2.5%。外湾纳潮量很大程度受制于外湾西北部潮滩围垦状

况的影响, 2005 年前各时段纳潮量变化幅度控制在 3%以内, 2005—2013 年外湾纳潮量剧烈改变, 减少了 20.91%。

3) 内、中、外湾纳潮量约占总纳潮量的 30%、20%、50%左右, 不同水域纳潮量占比在不同时期有一定程度的调整。1988—2005 年潮量分配发生明显改变, 外湾调整幅度最大, 中湾最小, 内湾幅度次之。内湾潮滩围垦对乐清湾各个湾区纳潮量影响较小, 外湾围垦对内湾、中湾影响亦较小。

4) 由于漩门湾二期围堤的修建阻断了向楚门湾漫滩的潮量, 部分潮流由于堤坝的挑流作用进入茅埏岛东侧水道, 但茅埏岛东西两侧潮量分配比例并未出现明显调整, 东侧潮通量只是微小幅度改变, 分潮比由 40.24%增加至 40.99%。

参考文献:

- [1] 王颖, 吴小根. 浙闽港湾潮滩与沉积的组合特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 1991, 9(12): 1-9.
Wang Ying, Wu Xiaogen. Sedimentary characteristics or the muddy bays in the Zhejiang and Fujian provinces[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1991, 9(12): 1-9.
- [2] 谢钦春, 冯应俊, 陈则实, 等. 中国海湾志 (第六分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 110-157.
Xie Qinchun, Feng Yingjun, Chen Zeshi, et al. China Bay Album(sixth book)[M]. Beijing: Ocean Press, 1993: 110-157.
- [3] 熊学军, 胡筱敏, 王冠琳, 等. 半封闭海湾纳潮量的一种直接观测方法[J]. 海洋技术, 2007, 26(4): 17-19.
Xiong Xuejun, Hu Xiaomin, Wang Guanlin, et al. A kind of direct observation method of storage capacity for tidal water of semiclosed bays[J]. Ocean Technology, 2007, 26(4): 17-19.
- [4] 乔贯宇, 华锋, 范斌, 等. 基于 ADCP 湾口测流的纳潮量计算[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 285-291.
Qiao Guanyu, Hua Feng, Fan Bin, et al. Tidal water capacity computed from ADCP measurement at bay mouth[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(3): 285-291.
- [5] 叶海桃, 王义刚, 曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换[J]. 河海大学学报, 2007, 35(1): 96-98.
Ye Haitao, Wang Yigang, Cao Bing. Tidal prism of Sansha Bay and its water exchange with the open sea[J]. Journal of Hehai University, 2007, 35(1): 96-98.
- [6] 陈红霞, 华锋, 刘娜, 等. 不同方式的纳潮量计算比较—以胶州湾 2006 年秋季小潮为例[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 11-15.
Chen Hongxia, Hua Feng, Liu Na, et al. Comparison among different methods for tidal prism calculation-neap tide of jiaozhou bay in autumn 2006 as an expounded example[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 11-15.
- [7] 杨世伦, 陈启明, 朱骏, 等. 半封闭海湾潮间带部分围垦后纳潮量计算的商榷—以胶州湾为例[J]. 海洋科学, 2003, 27(8): 43-47.
Yang Shilun, Chen Qiming, Zhu Jun, et al. Computation of storage capacity for tidal water of semiclosed bays where the intertidal zone is partly embanked—taking Jiaozhou Bay as an example[J]. Marine Sciences, 2003, 27(8): 43-47.
- [8] 吴隆业, 孙玉星, 王振先. 海口港纳潮量及其变化遥感研究[J]. 海岸工程, 1997, 16(2): 1-5.
Wu Longye, Sun Yuxing, Wang Zhenxian. Remote sensing of the tidal influx in Haikou port[J]. Coastal Engineering, 1997, 16(2): 1-5.
- [9] 方神光, 陈文龙, 崔丽琴. 伶仃洋水域纳潮量计算及演变分析[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 76-98.
Fang Shengguang, Chen Wenlong, Cui Liqin. Analysis on evolvement of tidal prism of Lingdingyang Bay[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(1): 76-98.
- [10] 陈耕心, 李伯根, 许卫忆. 乐清湾潮汐特征及对潮滩沉积作用的影响[J]. 东海海洋, 1992, 10(1): 1-9.
Chen Gengxin, Li Bogen, Xu Weiyi, et al. The tidal features and their effects on the sedimentary process in Yueqing Bay[J]. Donghai Marine Science, 1992, 10(1): 1-9.
- [11] 李伯根, 许卫忆, 陈耕心. 乐清湾悬沙的浓度分布与运移[J]. 东海海洋, 1992, 10(1): 33-39.
Li Bogen, Xu Weiyi, Chen Gengxin. Distribution and transport of suspended sediment in the Yueqing Bay[J]. Donghai Marine Science, 1992, 10(1): 33-39.
- [12] 许卫忆, 陈耕心, 李伯根. 乐清湾的动力沉积过程[J]. 海洋与湖沼, 1992, 25(1): 20-29.
Xu Weiyi, Chen Gengxin, Li Bogen. The dynamical process of sedimentation in Leqing Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 25(1): 20-29.
- [13] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 乐清湾近期海岸演变研究[J]. 海洋通报, 2006, 25(1): 44-53.
Ji Xiaomei, Zhang Yongzhan, Zhu Dakui. Study on marine environment and recent coastal evolution of Yueqing Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(1): 44-53.
- [14] 李佳. 乐清湾环境水力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LI Jia. Study on the environmental hydraulic characteristics in the Yueqing Bay.[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [15] 单慧洁. 温州近海建设工程环境影响潮汐潮流数值模拟[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
Shan Huijie. The construction project's environmental

- impact of numerical simulation of tide and tidal current in Wenzhou offshore[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.
- [16] 杨晓东, 姚炎明, 蒋国俊, 等. 乐清湾悬沙输移机制分析[J]. 海洋通报, 2004, 30(1): 53-59.
Yang Xiaodong, Yao Yanmin, Jiang Guojun, et al. Study on the transport mechanism of suspended sediment in Yueqing Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 30(1): 53-59.
- [17] 乔贯宇, 高大鲁, 华锋, 等. 实测数据和数值模拟相结合的办法计算海湾纳潮量[J]. 港工技术, 2009, 46(4): 1-5.
Qiao Guanyu, Gao Dalu, Hua Feng, et al. Calculating storage capacity of tidal water of bay by combining observing data with numerical model [J]. Port Engineering Technology, 2009, 46(4): 1-5.
- [18] 周安国, 周大成, 姚炎明. 海湾围垦工程作用下的动力沉积响应[J]. 环境污染与防治, 2011, 26(4): 281-286.
Zhou Anguo, Zhou Dacheng, Yao Yanming. Response of dynamic sedimentation to a reclamation project in bays[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 26(4): 281-286.
- [19] 李志永, 倪勇强, 耿兆铨. 乐清湾泥沙运动数值研究[J]. 泥沙研究, 2004, 28(5): 77-81.
Li Zhiyong, Ni Yongqiang, Geng Zhaoshuan. Numerical study on sediment transportation in Yueqing Bay[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 28(5): 77-81.

Analysis of evolution of tidal prism of the Yueqing Bay

WANG Cheng-chao^{1, 2}, PAN Guo-fu¹, XU Xue-feng¹, CHEN Pei-xiong¹

(1. Key Laboratory of Engineering Oceanography, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Zhoushan Port Administration, Zhoushan 316000, China)

Received: Oct. 19, 2016

Key words: the Yueqing Bay; water area; tidal prism; evolution analysis

Abstract: In this study, we investigated the historical change conditions along the Yueqing coastline and the different characteristic water depths around the area. Based on the topographical data of different periods and satellite remote sensing image data since 1965, we accurately calculated the evolution characteristics of different water areas over these 50 years. Also, using actual measured topographical and hydrological data, we developed a two-dimensional tidal mathematical model of the Yueqing Bay to analyze the evolutionary changes in the tidal volume. The results reveal that: (1) The tidal volume in the Yueqing Bay has decreased by $3.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ over the past 50 years. Compared with the tidal volume in 1965, the tidal volume of 2013 shows it to have decreased by 17.69%. The average annual decline rate has changed from $0.06 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ to the current $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. (2) Enclosing and reclamation processes in different areas have shown some impact on the reduction of the sea water area, but the tidal volume impact is significant. The inner enclosing impact has been small whereas the outer enclosing impact has obviously diminished from inside the bay to the inner bay. The second phase of the Xuanmen Bay has had a great impact on changes in the Yueqing Bay's tidal status, and has greatly affected the tidal volumes in all bays in the area. As demonstrated in this study, it is possible to provide quantitative reference data for the ecological environment protection of the bay and to forecast the development trend of the gulf by exploring the mutual responses of the change in the tidal volume and the reclamation activity in the Yueqing Bay.

(本文编辑: 刘珊珊)