

三亚湾海岸动力演变的数值模拟研究

严珍珍^{1,2}, 杜小平^{1,2*}, 范湘涛^{1,2}

(1. 三亚中科遥感研究所, 海南省地球观测重点实验室, 海南 三亚 572029;

2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要:近年来,海岸侵蚀呈现不断加剧的趋势,给沿海地区经济社会的发展造成了极大危害。关于三亚湾海岸侵蚀过程及其动力学研究多停留在定性或半定量阶段。从海岸动力地貌学角度出发,基于沉积物迁移理论,利用数值模拟方法,定量研究了三亚湾海岸在波浪和潮流作用下的动力演变过程。计算结果重现了海水波浪的传播形态及动态特征:涨潮时,波高极值相对较大,水位随之升高,波动现象明显,波动形态复杂;落潮时,波高极值相对减小,水位也随之降低,海面相对较平静,波形态在离岸区域较单一,仅在近岸区域相对多样化。同时,数值模拟结果也很好地显示了三亚湾岸线附近的沉积或侵蚀过程特征:三亚湾西段海洋动力条件较强,沉积或侵蚀现象明显,沉积/侵蚀能力由三亚湾西段逐渐向东段减小。此外,以海洋动力学机制为基础,定量模拟了三亚湾海岸侵蚀与演变物理过程,为该地区海岸开发利用、海岸环境保护提供科学依据。

关键词:三亚湾;海岸侵蚀;动力演变;数值模拟

中图分类号:P737

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)03-0176-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.002

引用格式:YAN Z Z, DU X P, FAN X T. Numerical simulation of coastal dynamic evolution of Sanya Bay[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 176-186. 严珍珍, 杜小平, 范湘涛. 三亚湾海岸动力演变的数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 176-186.

海岸带是陆地与海洋交界的地带,因受海洋动力条件作用,在不同时空尺度下,发生着许多不同类型的动态变化过程,从而塑造和改变着海岸带的形态。海岸带是地球表面动态变化最频繁也是地理环境最脆弱的区域之一,由于区域地质地理条件及环境的不同,海岸侵蚀的影响因素及原因机制十分复杂。全球气候变化影响,海平面上升以及由此引起的风暴、台风等自然灾害频率增加,人类活动频繁,海岸过量开采,海岸侵蚀问题日益加重,使得海岸侵蚀变成最严重的海洋灾害之一^[1-2]。

随着我国海岸侵蚀日益加剧,许多研究学者对海岸侵蚀进行了系统且深入的研究,主要集中在全国海岸侵蚀现状及影响因素的综合分析与调查研究^[3-5],以及海岸侵蚀原因、过程、机理及模式模型与预测研究^[6-9]等各方面,取得了丰硕成果。与此同时,在海岸侵蚀风险性评价及海岸带环境保护与防灾减灾等方面也取得了阶段性进展^[10-14]。海平面上升对海岸侵蚀的影响主要表现在长时间尺度上^[7],而风暴潮对海岸侵蚀的影响则会在短时间内造成岸线的大幅后退^[15]。海岸地貌演变是海滩地形、沉积物迁移及水动力条件之间的在复杂相互作用下的产物,是对全球变化、风暴潮、人类活动等影响因子的忠实记录。水动力条件影响着海滩的地形变化,地形反馈则是通过沉积物剥蚀、迁移、输运来完成的。沉积物迁移理论是海岸地貌演变的基础,基于此,数值模拟方法已被广泛应用于海洋地球科学研究中^[16-18],已成为研究海岸侵蚀演变过程及敏感性因子的有效方法^[1,19-21]。

三亚湾海岸属砂质性海岸,海平面上升、台风风暴潮及人类活动等都对海岸演变带来重要影响,致使海

收稿日期:2019-04-25

资助项目:海南省财政科技计划资助项目——三亚湾海岸演变动力学的遥感分析与并行数值模拟(417214);中国科学院战略性先导科技专项(A项)资助项目——地球大数据综合分析与展示系统(XDA19080103)

作者简介:严珍珍(1981-),女,副研究员,博士,主要从事地貌动力演化数值模拟方面研究. E-mail: yanzzz@radi.ac.cn

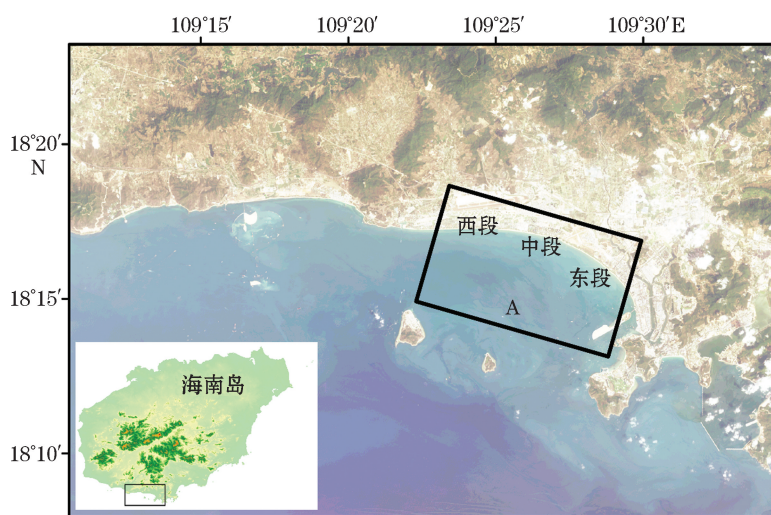
*** 通讯作者:**杜小平(1978-),男,副研究员,博士,主要从事全球变化与海岸带灾害评估方面研究. E-mail: duxp@radi.ac.cn

(王佳实 编辑)

岸侵蚀现象愈演愈烈。目前,对三亚湾海岸侵蚀研究总体上以传统地质监测、野外地貌沉积调查等为基础,结合站点观测及遥感影像资料,利用对地观测技术进行定性或半定量的研究,多为定性描述及成因初探,鲜见海岸侵蚀动力学过程的模拟研究^[9,15,22-23]。本研究将从海岸动力地貌学角度出发,基于沉积物迁移理论,利用数值模拟方法,定量地展现了三亚湾海岸侵蚀动力演化过程,以期探究三亚湾海岸侵蚀的时空动态演变模式及发展趋势。本研究将有助于认识三亚湾海岸变化动态及发展规律,对于保护三亚海岸资源与环境,打造国家首个“双城、双修”试点城市具有重要意义。

1 研究区概况

三亚海岸位于海南岛南端、三亚市中心区的南侧。三亚海湾为一大型的较开阔港湾海岸,东起鹿回头半岛南端(109°28'48"E,18°11'24"N),西至马铃市东角岭角(109°20'24"E,18°17'24"N),海湾岸线东西走向,略呈弧形,湾口朝南偏西向敞开,海岸线绵延 22 km,海底平坦,坡度较缓且均一,海滩坡度约 4°~7°^[15,23-24],上部坡度较大,下部坡度变缓。由图 1 可见三亚湾的区域地理位置,影像数据来源于 2017-03-11 获取的 Landsat8 影像 432 波段。



注:黑色矩形 A 为西段、中段及东段跨岸剖面研究区域,面积为 12 km(长)×8 km(宽)

图 1 三亚湾区域位置

Fig.1 Location of the area studied in the Sanya Bay

三亚湾近岸海区的风力主要以西风与西南风为主,风速较大,可达 10~20 m/s,对海岸带影响较大^[25-26]。本区潮汐为不正规日潮混合潮型:1)日潮为主,每月约 14 d 为日潮,其余为不正规混合潮,潮差 2.13 m;2)半日潮天数每月平均为 11 d。日潮时一天内涨潮时间较长,为 16~17 h,落潮时间较短,仅为 7~8 h,涨潮周期约为落潮周期的两倍,平均涨、落潮流速分别为 11.2 cm/s 和 19.4 cm/s,为弱潮海区^[15,22,25-26]。

三亚湾沙滩属砂质海岸,质地以中细砂为主,易受海水的冲刷,因此侵蚀和沉积更易发生在砂质海岸附近^[9,15,27]。由于三亚湾潮差不算特别大,沉积物运移能力较弱,海水不断的冲刷侵蚀,致使大量沉积物堆积于近岸带海滩,导致海湾内砂质沉积物丰富,形成滩脊式或背叠式砂质海滩^[23]。在以波浪为主的作用下,外加潮流的辅助作用,湾内泥沙不断调整,海岸总体处于相对平衡发展阶段^[24]。

2 方法及模型

本研究利用了 XBEACH 海岸地貌动力模型^[28],该模型融合了波浪、潮流、沉积物运移、水深变化、植被效应等与时间相关的二维理论方程,能够有效地模拟不同风暴状态,如海水拍岸状态、碰撞状态、过岸状态及淹没状态,用于评估浪潮和风暴条件下的自然海岸地貌响应,已被广泛地应用于海岸侵蚀演变的数值模拟研究^[1,20,29-31]。

Roelvink 等对 XBEACH 模型的理论方程与过程给出了详细完整的描述^[28],该模型是基于波作用量守恒的频域模型,描述了波作用量演变。本研究中,我们暂不考虑植被效应对三亚湾岸线演变的影响,则波作用平衡可以表述为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f}{\sigma}, \quad (1)$$

式中, A 为波作用项,可以进一步表述为

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}, \quad (2)$$

其中, θ 为相对于 x 轴方向上的波入射角; S_w 为每个方向元上的波能量密度,本研究中,此方向元由最小(-90°)和最大角度(90°)以及向元宽度(180°)三个参数来限定; σ 为本证波频率, $\sigma = \sqrt{gk \tan kh}$, g 为重力加速度(9.81 m/s^2), k 为波数,由沿岸和跨岸波数来决定, h 为水深。式(1)中, D_w 和 D_f 分别为波浪及海底底部摩擦的耗散项; t 为时间项; c_x 和 c_y 分别为 x 和 y 方向上的波作用传播速度, c_θ 为折射向上的波作用传播速度,它们可以进一步的表述为

$$\begin{aligned} c_x(x, y, t, \theta) &= c_g \cos \theta, \\ c_y(x, y, t, \theta) &= c_g \sin \theta, \\ c_\theta(x, y, t, \theta) &= \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, c_g 为波群速度,由线性波理论计算得到。

基于浅水波理论方程模拟长周期波浪及水流运动特征。浅水波理论方程可以表述为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v - v_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u - v_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u}{\partial x} + \frac{\partial h v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, η 为水位, $\eta = z_b + h$, z_b 为海底床面高程; u, v 分别为 x, y 方向上的拉格朗日速度分量; f 为科里奥利系数; ρ 为水体密度(1025 kg/m^3); v_h 为水平黏滞系数,由相关理论模型计算得到; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为风对海面的剪切应力 τ_s 在 x, y 方向上的分量; τ_{bx}, τ_{by} 分别为海底床面剪切应力 τ_b 在 x, y 方向上的分量,由摩擦系数(Chezy 系数)及物性参数(颗粒尺寸)等决定,摩擦系数越大,颗粒粒径越小,越容易被侵蚀; F_x, F_y 为波浪辐射应力在 x, y 方向上的分量。本研究中, Chezy 系数取值为 $55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, 中值粒径 D_{50} 取值为 0.2 mm , 为中细砂质^[23,27]。

基于沿积物运移理论计算水体中沉积物浓度场。海底沉积物运移可以表述为沿深度平均的对流扩散方程:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC u^E}{\partial x} + \frac{\partial hC v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}, \quad (5)$$

式中, u^E, v^E 分别为 x, y 方向上的欧拉速度分量, $u^E = u - u^S, v^E = v - v^S$, 其中, u^S, v^S 分别为 x, y 方向

上的斯托克斯漂移分量; C 为随波群时间尺度变化的深度平均含沙量; D_h 为沉积物扩散系数; C_{eq} 为平衡泥沙浓度; T_s 为泥沙挟带适应时间,可以由水深及沉积物下沉速度近似确定。

基于沉积物运移理论计算三亚湾岸线和海床的演变过程。海底床面高程 z_b 的变化可以表述为

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (6)$$

其中, p 为孔隙系数, $p=0.4$; f_{mor} 为地貌加速度系数, $f_{mor}=1$; q_x, q_y 分别为 x, y 方向上沉积物运移速度。

式(1)和式(4)~(6)采用二阶迎风差分、高阶 Lax-Wendroff 差分及显稳式差分相结合的方法离散化偏微分方程,以保证波群传播并尽可能减小数值扩散与振荡,时间离散格式采用直接显式差分及显式蛙跳格式的方法,以保证较高计算精度^[28]。

几何模型的初始陆表地形数据来源于 30 m 分辨率的 ASTER-GDEM2 数字高程模型(<http://www.jspace-systems.or.jp/ersdac/GDEM/4.html>),海底地形数据来源于全球 30 弧秒高分辨率海洋水深数据(<https://www.gebco.net/>)。对 2 种地形数据进行裁剪、重采样、镶嵌、融合等处理,得到研究区域水平分辨率为 30 m 的海陆地形数据,作为数值模型的地形参数。

网格采用交错式的四边形网格。网格密度是影响计算精度的重要因素,网格密度越大,计算精度越高,但花费的计算时间及占用的计算内存会越大。数值模拟中为了提高计算精度,往往尽可能的加密网格,从而增加了计算规模,导致计算效率低下。网格大小及数值计算精度会受到计算规模的限制而对数值模拟结果存在影响。权衡本研究问题的实际情况,在确保计算精度的情况下,本研究对得到的原始地形数据进行了适当的重采样。由于海岸线演变主要表现在垂直岸线方向上(x 向),插值得到最小网格单元尺寸为 15 m,保证了在海陆交界附近的网格最密。顺岸方向(y 向)插值得到最小网格单元尺寸为 20 m。实际计算区域大小为 8 km(水平 x 向)×12 km(水平 y 向),插值得到的总单元数为 201 228 个,总节点数为 202 130 个。由图 2 可见数值模拟中的初始海底地形特征及网格中特征:网格单元大小随区域位置变化特征。

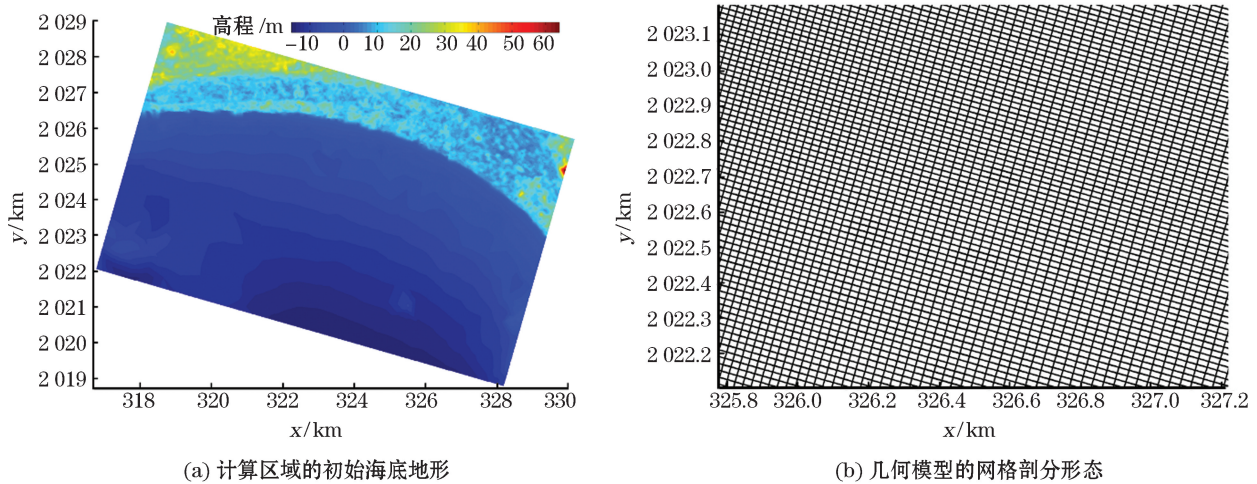


图 2 数值模拟中的初始海底地形及网格特征

Fig.2 The initial bathymetry and meshing features for the simulation

波浪入射边界条件为谱波边界条件,由入射波谱高度(H_{m0})和波谱峰值频率(f_p)等参数决定,本研究使用的数值模型,对上述参数的取值范围进行了限定,其中, $0 \leq H_{m0} \leq 5.0$ m, $0.0625 \text{ s}^{-1} \leq f_p \leq 0.4 \text{ s}^{-1}$ 。 H_{m0} 和 f_p 参数值均采用了计算模型的默认经验值,分别为 1.5 m 和 0.0625 s^{-1} ^[28]。海上边界为吸收边界条件,以解决波浪向深海传播时的反射效应;陆上边界为闭边界条件,设定水质点的法向流速为 0 m/s;水平边界条件为 Neumann 边界条件,设定沿岸水位梯度为 0。图 3a 显示了数值模拟过程中的初始水位条件,图 3b 显示了初始地形及水位条件在中段跨岸处(具体位置见图 1)纵剖面特征的对比结果,其中,纵坐标为初始地形及水位的高

程特征,横坐标为中段跨岸沿水平 x 向上的距离长度。

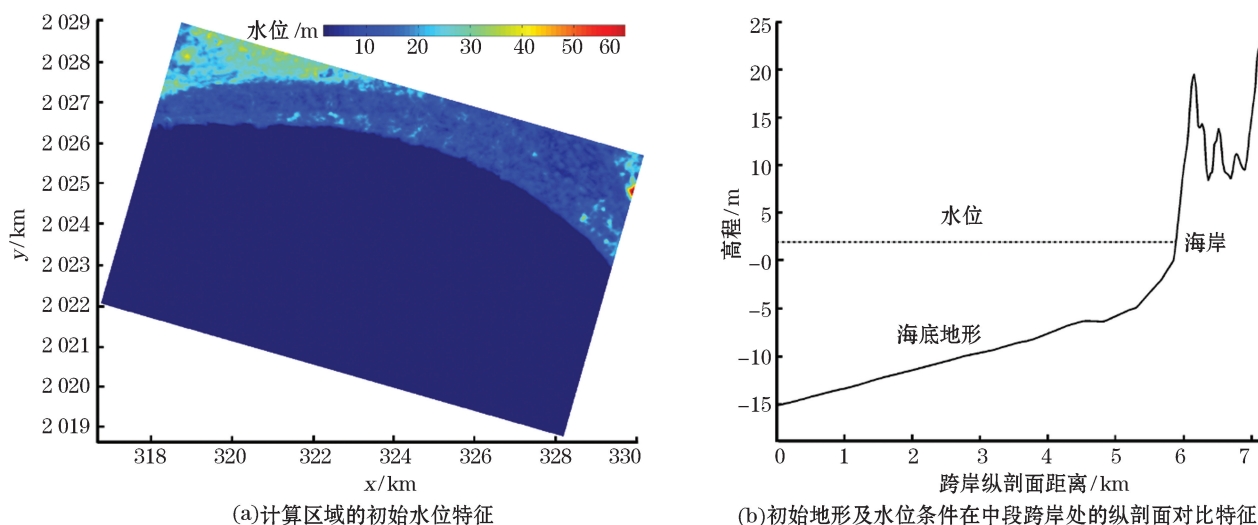


图3 数值模拟中的初始水位条件及纵剖面特征

Fig.3 Characteristics of the initial water level and its longitudinal profile for the simulation

计算时间长度为 24 h,即模拟 1 d 的涨、落潮周期内,海岸侵蚀演变过程,模拟的平均时间步长为 0.380 s。潮汐一般在农历每月初一、十五附近会各发生 1 次大潮,潮差较大,而在农历每月初八、二十三附近会各发生 1 次小潮,潮差较小。不同潮差的潮汐输入条件,不可避免的对数值计算结果特别是侵蚀/沉积结果等存在一定的误差影响。为了验证本研究中采用数值模型的可行性,减小由于潮差太大对数值模拟结果可能带来的误差等不确定性影响,选取了较有代表性、能完整反映一天潮汐规律且潮差变化较小(农历九月二十二)的 24 h 潮位过程数据^[15],最大潮差仅为 97 cm,据此,得到本研究数值模拟过程中的潮位条件(图 4)。

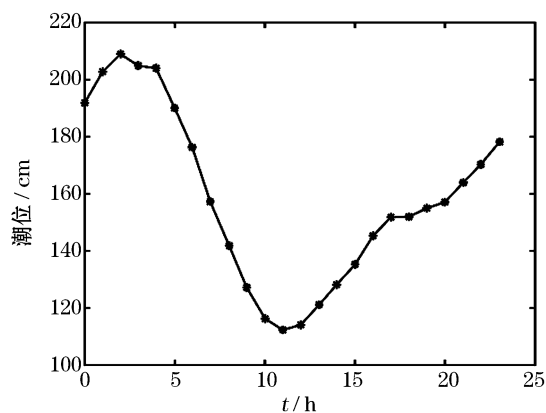


图4 三亚站 2013-10-26 全天的潮位变化特征^[15]

Fig.4 Characteristics of the 24-hour tide level observed at Sanya station on October 26, 2013^[15]

3 结 果

三亚湾在波浪及潮流作用下动力学演变过程的数值模拟结果如图 5~图 8 所示。为了验证数值模型的可靠性与合理性,依据模型中使用的潮汐观测数据的潮涨、潮落时间特征,选取了整个潮汐变化周期内的 4 个典型时刻,得到了均方根波高(H_{rms})在整个模拟周期内(24 h)随潮涨和潮落的变化特征(图 5)。从图中的对比结果可以很清晰看出,波高极值出现在 2 h 左右,最大值可达 3.0~3.5 m(图 5a),到 11 h 时,波高极值在 1 d 内最小(图 5b),与潮位输入特征(图 4)吻合很好。同时,计算结果也显示,仅在波浪和潮流的共同作用下,海浪传播频率较小,周期较大,在浅水区波高变化较缓,这可能与波动能量传播较均匀,消耗较慢有关。

根据图 5 中潮汐变化周期内的 4 个典型时刻,对数值计算得到的水位结果也进行了可视化的对比分析。图 6 显示了水位在整个模拟周期内(24 h)随潮涨、潮落变化的演变过程特征,由于陆表地形高程值远大于水

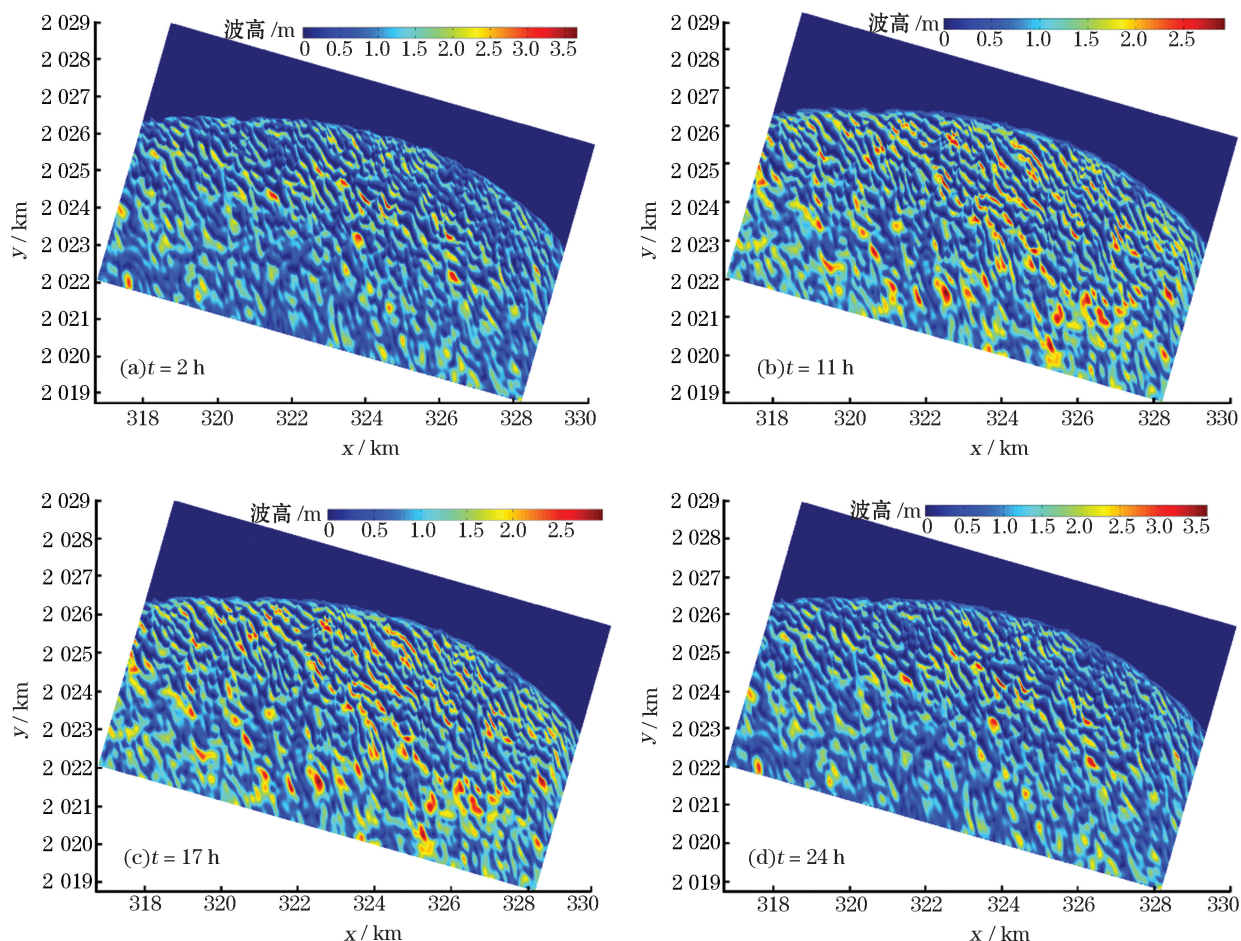


图5 数值计算得到的均方根波高随时间变化的结果

Fig.5 Changes of the root-mean-square wave height (H_{rms}) with time obtained by numerical calculation

位值,将水位值的颜色条带限定在1~3 m,用以消除地表地形对水位可视化结果的影响。从图6中可见, $t=2$ h时,水位最高,约2.0 m; $t=11$ h时,水位最低,约在1.2 m,随着涨潮的再一次发生,水位又随之开始上涨; $t=17$ h时,水位涨至约1.6 m; $t=24$ h时,水位继续上涨至1.8 m以上。总体上讲,涨潮时,水位随之升高,高低起伏,波动现象明显,波形态复杂(图6a,6c和6d),落潮时,水位随之降低,海面相对较平静,波形态在离岸区域较单一,仅在岸滩区域相对多样化(图6b)。

从图5和图6中还可以看出,由于海波在浅水区域受到海岸地形及海底摩擦等的影响,波浪传播到岸滩附近,其传播尺度和形态变化复杂,发生破碎现象较明显,浅水区海浪传播现象及特征较深水区的复杂^[32]。

图7展示了三亚湾岸线在波浪和潮流作用下的累计沉积或侵蚀量,可以明显看到,沉积或侵蚀过程特征沿海岸线呈明显区域性差异。由于三亚湾西段海洋动力条件较强,沉积或侵蚀最先发生在三亚湾海岸西段,随着时间的推移,慢慢向海岸东段延伸,整个演变过程中,海岸西段和中段沉积或侵蚀较明显,东段沉积或侵蚀相对较小,表明三亚湾内朝向等地理条件的不同,受常浪的强度和频率不同,从而导致海岸线形态特征亦不尽相同。

西段、中段及东段跨岸剖面(图1)海底地形随时间变化的数值模拟结果如图8所示,较清晰地显示了三亚湾海岸线不同地理位置处的动态变化过程及侵蚀能力。由于湾内地理条件差异如湾口朝向等的不同,受外海动力侵蚀程度亦不相同,从而形成了形态结构各异的海滩。三亚湾西段,随着时间的推移,侵蚀总量和相应的沉积总量最大(图8a);三亚湾中段,在演化过程中,侵蚀总量相对较小(图8b,8c),相应的沉积总量

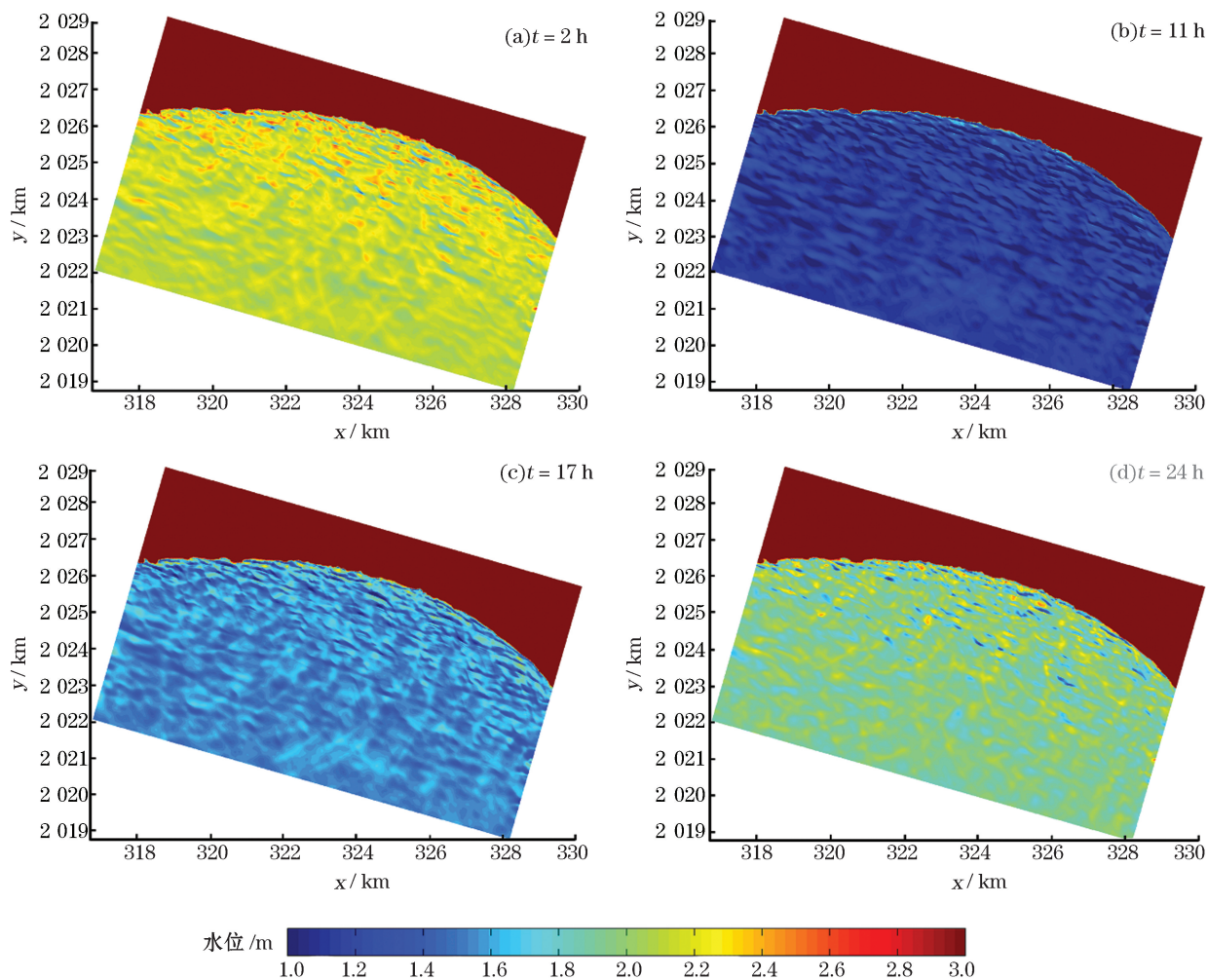


图6 数值计算得到的水位随时间变化的结果

Fig.6 Changes of the water level with time obtained by numerical calculation

也比较小(图 8b 和 8c 的左段部分)。对比结果显示,三亚湾自西段向东段,侵蚀强度逐渐降低,但由于人为修建的影响,破坏了海滩的整体结构,阻断了供沙来源,三亚湾东段滩面坡度相对较大,呈侵蚀状态^[23]。

三亚湾地貌类型丰富,地层岩性多样。三亚湾海岸是在早期的基岩海岸地貌基础上,受海洋动力环境作用,形成的沙坝堆积岸,海底砂源丰富,沉积物堆积在水下 10~20 m 的水域^[24,27]。初始的数值模拟研究中,几何模型仅为匀质的半无限空间式模型,在空间上为均一的中细砂质,均为可侵蚀层,缺乏差异性分层物性的考虑,即没有设定不可侵蚀层,一般基岩岩性硬度高粒径大,较难被侵蚀。此外,由于前人关于三亚湾海岸侵蚀的研究中,缺乏对海底摩擦系统的讨论,数值模拟中采用了经验值,摩擦系数设定为 $55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ 。这些因素以及地貌加速因子的设定等可能均导致了数值模拟得到的沉积或侵蚀速率相对实际的稍大。然而,数值模拟结果依然在一定程度宏观地反映了如果没有现代的人工护岸作用,三亚湾海岸区域易受长期的海洋动力因子作用存在较严重且缓慢的侵蚀过程。

考虑区域水平向和垂向各向异性介质的几何模型,如分层的软硬岩性以及水平上的差异性岩性,无疑将会更贴近真实的三亚湾海岸及海底岩性特征。基于现有的研究基础,我们将改进现有的理论和几何模型以及输入参数条件,对三亚湾海岸演变过程特征开展进一步深入研究。

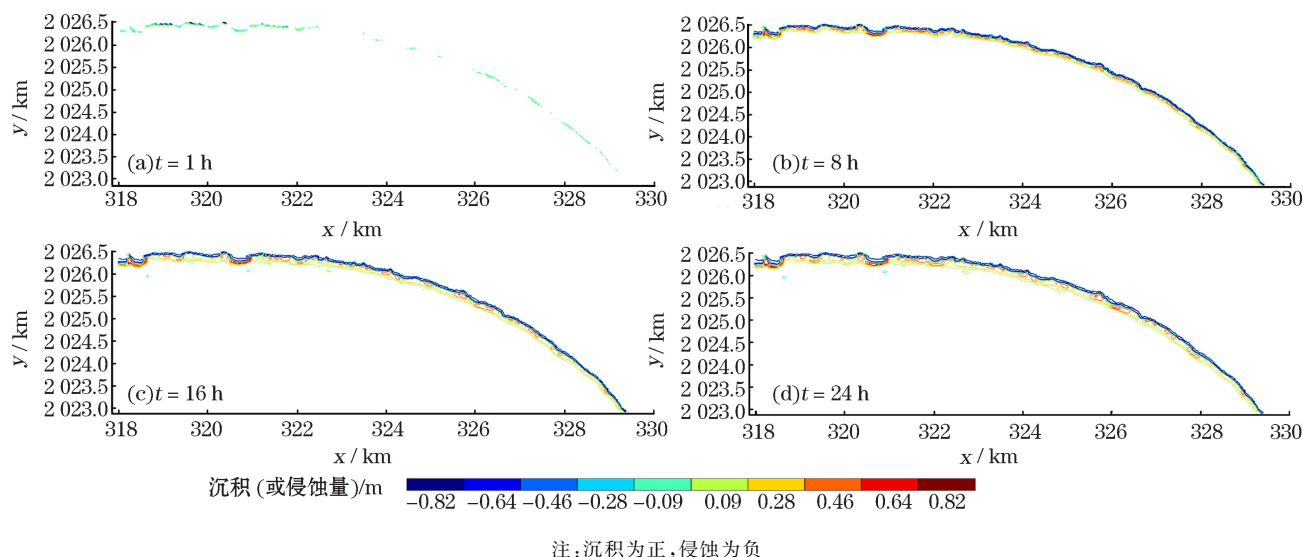


图7 数值计算得到的累计沉积/侵蚀量随时间变化的结果

Fig.7 Changes of the cumulative deposition/erosion amount with time obtained by numerical calculation

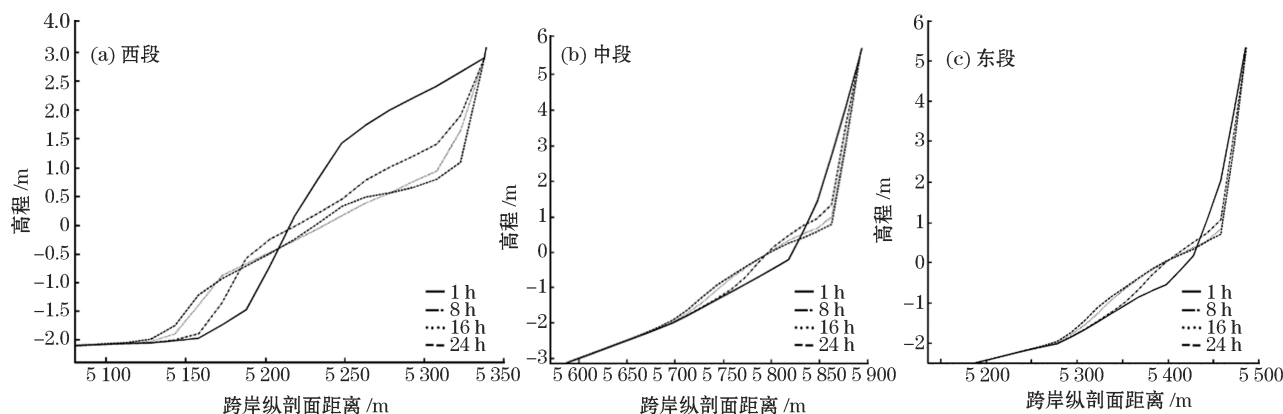


图8 西段、中段及东段跨岸剖面海底地形随时间演变的数值计算结果

Fig.8 Changes of the seafloor topography with time obtained by numerical calculation at the western segment of the coast, the middle segment of the coast and the eastern segment of the coast

4 讨论及结论

海岸带是地球表面动态变化最频繁也是地理环境最脆弱的区域之一。由于海平面上升以及由此引起的风暴、台风等自然灾害频率的增加,伴随经济的迅速发展以及用海活动的愈加频繁,使得沿海地区承受了巨大的环境压力,海岸侵蚀现象日益加剧。三亚市作为国家城市修补生态修复、海绵城市和综合管廊建设综合试点城市,地处海南岛最南端,环三亚湾展布,其海岸环境的变化及海岸侵蚀演变已引起政府的高度重视和研究学者的广泛关注。本研究从海岸动力地貌学角度出发,基于沉积物迁移理论,利用数值模拟方法,定量地展现了三亚湾海岸在波浪和潮流作用下演变的动力学过程。

计算结果显示了三亚湾海岸受常浪如潮汐作用下的动力学演变过程:潮位最高时,波高极值相对较大,水位随之升高,波动现象明显,波动形态复杂;反之,落潮时,波高极值相对减小,水位也随之降低,海面相对

较平静,波形态在离岸区域较单一,仅在近岸区域相对多样化。同时,数值模拟结果也很好地再现了三亚湾岸线附近的沉积或侵蚀过程特征;三亚湾西段海洋动力条件较强,沉积或侵蚀现象明显,沉积或侵蚀能力由三亚湾西段逐渐向东段减小。计算结果也进一步表明,海岸侵蚀不仅易受海洋动力条件等自然环境影响,也受到人类活动影响。人类活动对海岸侵蚀带来的影响不容忽视,我们需要重视对海岸环境的保护。

海岸侵蚀受诸多因素控制,沿岸建设对原始植被的破坏等人为活动因素是导致海岸侵蚀的重要原因之一,三亚湾岸线近几十年来的经济发展,原生植被的不断破坏,致使海岸失去天然屏障,导致侵蚀现象的发生。本研究为了验证该数值模拟方法的可行性与可靠性,初始的数值模型设计得相对理想化,仅考虑了波浪和潮流的作用,植被效应、人类活动以及台风作用等对海岸带形态演变的影响等需要今后更进一步的探讨研究。

此外,由于数值计算本身条件限制,网格大小、计算时间步长等的限制,都可能对数值模拟结果产生影响,以及边界条件等参数的选取等都必然会对计算结果带来偏差。但总体上讲,计算结果已较好地反映了三亚湾波浪和潮流对海岸的共同作用过程,这是一个合理的结果,表明本研究方法用于三亚湾海岸侵蚀演化过程的科学思路是可行的。随着数值模拟精度的不断提高,考虑几何模型中物性的各向异性特征,基于更加真实的数值模型,数值模拟方法将会更有效地应用于三亚湾海岸侵蚀的定量化研究中,以更有效地揭示海岸线演化的动力学过程特征。

参考文献(References):

- [1] DE VET P L M. Modeling sediment transport and morphology during overwash and breaching events[D]. Delft: the Delft University of Technology, 2014: 55-167.
- [2] QUATAERT E, STORLAZZI C, VAN ROOIJEN A, et al. The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(15): 6407-6415.
- [3] TANG X N, WANG L Q, YANG J L. Revetmen construction and beach erosion[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(2): 33-39. 唐筱宁, 王绿卿, 杨锦凌. 护岸工程与沙滩流失[J]. 海岸工程, 2015, 34(2): 33-39.
- [4] LI P, GU D Q, DU J, et al. Progress in coastal-zone survey and technology[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(1): 32-39. 李平, 谷东起, 杜军, 等. 海岸带及其调查技术进展[J]. 海岸工程, 2019, 38(1): 32-39.
- [5] CHENG L, WANG W W, FU Y B, et al. Morphology stability analysis of sandy beaches in different-type islands——case studies in the Changxing Island of Dalian and Dawanggang Island of Tangshan[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(3): 313-323. 程林, 王伟伟, 付元宾, 等. 不同类型海岛的海滩稳定性分析——以大连长兴岛和唐山打网岗岛为例[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(3): 313-323.
- [6] LI M G, CAO Z D. A review on tidal current numerical modeling in coastal and estuarine waters[J]. Haiyang Xuebao, 1999, 21(1): 111-125. 李孟国, 曹祖德. 海岸河口潮流数值模拟的研究与进展[J]. 海洋学报, 1999, 21(1): 111-125.
- [7] WANG Y, WU X G. Sea level rise and beach response[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(2): 118-127. 王颖, 吴小根. 海平面上升与海滩侵蚀[J]. 地理学报, 1995, 50(2): 118-127.
- [8] GAO F, TANG Y G, PENG C, et al. Hydrodynamic experimental study on stability protection of nearshore beach under influence of port expansion[J]. Coastal Engineering, 2018, 37(3): 14-24. 高峰, 唐友刚, 彭程, 等. 港口扩建影响下近岸沙滩稳定防护三维水动力模型试验研究[J]. 海岸工程, 2018, 37(3): 14-24.
- [9] ZHANG X H, HUANG H M, WU Q S, et al. Quantitative analysis of coastal erosion and deposition on Wuzhizhou Island of Sanya City [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2015, 34(5): 51-56. 张晓浩, 黄华梅, 吴秋生, 等. 三亚市蜈支洲岛海岸侵蚀与沉积的定量分析[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(5): 51-56.
- [10] LUO S L, CAI F, WANG H J. Development of coastal erosion and management[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(11): 239-247. 罗时龙, 蔡锋, 王厚杰. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 239-247.
- [11] BAO C X, WEN S Y, XU L F, et al. The Suizhong coastal erosion risk assessment based on sea level rise[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 205-210. 包春霞, 文世勇, 徐丽芬, 等. 基于海平面上升的辽东湾绥中海岸侵蚀危险度评估[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 205-210.
- [12] LIU M L, ZHENG X L, HAN L M, et al. The status, reasons and countermeasures for the coastal erosion of the important coasts in the South China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(4): 80-84. 刘孟兰, 郑西来, 韩联民, 等. 南海区重点岸段海岸侵蚀现状成

- 因分析与防治对策[J]. 海洋通报, 2007, 26(4): 80-84.
- [13] HUANG L M, TAN Y H, SONG X Y, et al. The status of the ecological environment and a proposed protection strategy in Sanya Bay, Hainan Island, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47(1-6): 180-186.
- [14] DONG J D, ZHANG Y Y, Z S, et al. Identification of temporal and spatial variations of water quality in Sanya Bay, China by three-way principal component analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(8): 1673-1682.
- [15] DUAN Y N, TENG J H, CAI W B. Extraction and analysis of coastal erosion of Sanya Bay using remote sensing imagery and tide level data[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(3): 57-64. 段依妮, 滕骏华, 蔡文博. 基于潮位观测的三亚湾海岸侵蚀遥感提取与分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 57-64.
- [16] CUI C, XIAO H, ZUO S H, et al. Numerical study on the effects of non-flat bottom topography on the energy structure of freak waves [J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(3): 377-387. 崔成, 肖辉, 左书华, 等. 数值研究非平底地形对畸形波能量结构的影响[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 377-387.
- [17] FANG H Y, YANG C Z, MA H M, et al. Numerical simulation of fluid-structure interaction characteristics between wave and Bohai fixed offshore sea ice[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(1): 44-54. 房河宇, 杨春忠, 马慧敏, 等. 波浪与渤海近岸海冰流固耦合特性的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 44-54.
- [18] NIE Y, LI X Q, ZHU S X, et al. Numerical simulation of surf shoaling and breaking on reefs[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(3): 329-336. 聂屿, 李训强, 朱首贤, 等. 岛礁地形上拍岸浪的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(3): 329-336.
- [19] VAN DONGEREN A, LOWE R, POMEROY A, et al. Numerical modeling of low-frequency wave dynamics over a fringing coral reef[J]. Coastal Engineering, 2013, 73: 178-190.
- [20] NEDERHOFF C M. Modeling the effects of hard structures on dune erosion and overwash[D]. Delft: the Delft University of Technology, 2014: 10-150.
- [21] VAN ROOIJEN A A, MCCALL R T, VAN THIEL DE VRIES J S M, et al. Modeling the effect of wave-vegetation interaction on wave setup[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(6): 4341-4359.
- [22] JI X M, ZHANG Y Z, ZHU D K. Evolution of Sanya coast and artificial beach design[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 853-860. 季小梅, 张永战, 朱大奎. 三亚海岸演变与人工海滩设计研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 853-860.
- [23] MAO L J, ZHANG Y Z, WEI L, et al. Study on beach characteristics in Sanya area of Hainan Island[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 477-484. 毛龙江, 张永战, 魏灵, 等. 海南岛三亚湾海滩研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 477-484.
- [24] LI L, LI Z Z. Research progress on coastal geomorphology and sedimentary[J]. Journal of Nature Science, 2016, 4(4): 392-400. 李力, 李占钊. 海南三亚湾海岸地貌与沉积环境研究进展[J]. 自然科学, 2016, 4(4): 392-400.
- [25] WANG Y, CHEN W L. The problems on the coastal geomorphology of Sanya Bay[J]. Haiyang Tongbao, 1982, 1(3): 37-45. 王颖, 陈万里. 三亚湾海岸地貌的几个问题[J]. 海洋通报, 1982, 1(3): 37-45.
- [26] "China State Oceanic" Administration ED. China's coastal embayments (Vol. 11: Bay of Hainan Province) [M]. Beijing: China Ocean Press, 1999: 183-223. 《中国海湾志》编纂委员会编. 中国海湾志第十一分册(海南省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 183-223.
- [27] MAO L J, ZHANG Y Z, ZHANG Z K, et al. Characteristics of sedimentary environments in Sanya Bay of Hainan Island[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(4): 17-22. 毛龙江, 张永战, 张振克, 等. 海南岛三亚湾现代沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 17-22.
- [28] ROELVINK D, RENIERS A, VAN DONGEREN A, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands[J]. Coastal Engineering 2008, 56(11-12): 1133-1152.
- [29] VAN DONGEREN A, STORLAZZI C, QUATAERT E, et al. Wave dynamics and flooding on low-lying tropical reef-lined coasts[J]. Coastal Dynamics, 2017, 21: 654-664.
- [30] WONG A L Z. Wave hydrodynamics in ports-numerical model assessment of XBeach[D]. Delft: the Delft University of Technology, 2016: 34-129.
- [31] MCCALL R T, MASSELINK G, POATE T G, et al. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G[J]. Coastal Engineering, 2014, 91: 231-250.
- [32] ZHENG J X. The numerical simulation of wind waves in Xiamen Bay[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008: 4-60. 郑吉祥. 厦门湾常风浪场数值模拟研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008: 4-60.

Numerical Simulation of Coastal Dynamic Evolution of the Sanya Bay

YAN Zhen-zhen^{1,2}, DU Xiao-ping^{1,2}, FAN Xiang-tao^{1,2}

(1. *Key Laboratory for Earth Observation of Hainan Province, Sanya Institute of Remote Sensing, Sanya 572029, China;*

2. *The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

Abstract: In recent years, coastal erosion tends to be intensified continuously and has caused serious damage on the economic and social development in the coastal regions. Previous studies on the coastal erosion process and dynamic evolution of the Sanya Bay stayed mostly in a qualitative or semi-quantitative stage. In the present paper, the coastal dynamic evolution process of the Sanya Bay under the actions of waves and tide currents is studied quantitatively based on the theories of coastal dynamic geomorphology and sediment transportation and by means of numerical simulation. The propagation forms and dynamic characters of the waves in the bay are reproduced by numerical calculations. During the high tide the extreme of wave height is relatively larger, with which the water level rises and the fluctuation of the sea surface is obvious and complex in forms, whereas during the ebb tide the extreme of wave height decreases relatively, with which the water level goes down, the sea becomes relatively calm and the wave form is simplified in the offshore area and relatively diversified only in the coastal waters. The simulated results also display well the deposition/erosion process in the area near the coastline of the Sanya Bay. At the western coastal segment of the bay the deposition/erosion phenomenon is obvious due to strong ocean dynamic condition and toward the eastern segment of the coast the deposition/erosion ability decreases gradually. Moreover, the physical process of coastal erosion and evolution of the Sanya Bay is quantitatively simulated based on ocean dynamic mechanism, which would provide a scientific base for the coastal development and utilization and the coastal environment protection in the area studied.

Key words: Sanya Bay; coastal erosion; dynamic evolution; numerical simulation

Received: April 25, 2019