

岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响

匡翠萍¹, 董智超¹, 顾杰², 李文斌¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要: 岬湾海岸内岬头后侧水动力条件较弱容易造成水体生态环境退化, 水环境改善可归结为控制污染物, 而水体交换能力的强弱反映了水体自净能力. 采用 MIKE 21 软件建立潮流和保守物质输运模型对人工岬湾内部进行分区研究, 引入时间尺度指标定量分析水体交换对海滩养护的响应. 由于海滩养护工程中沙坝与水流走向保持基本平行, 沙坝修建后使得岬头后侧环流减弱, 沙坝坝顶处流速增加, 两沙坝间通道流速减小. 滩肩前方海域流速减小, 两沙坝后侧的流速减少更多. 人工岬头与沙坝之间形成潮汐通道使得靠近岬头处流速有所增加, 工程后滞留时间缩短; 其中岬湾内近岬头的 2 个子区域滞留时间减少量较多, 岬湾内中部区域滞留时间变化不明显. 波浪和风场均会促进水体交换, 但由于波浪受到风场影响, 波浪和风场共同作用下滞留时间并不为单独条件的线性叠加关系.

关键词: 岬湾海岸; 水体交换; 海滩养护; 潮流; 保守物质输运模型

中图分类号: O352

文献标志码: A

Influence of Beach Nourishment Project on Water Exchange in Headland-bay Coast

KUANG Cuiping¹, DONG Zhichao¹, GU Jie², LI Wenbin¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The hydrodynamic conditions at the back of headlands in a headland-bay are relatively weak, which may be easy to cause deterioration of water ecological environment. The water environment can be improved by controlling the destination of pollutant, hence the capacity of water exchange reflects waterbody self-purification capacity. MIKE 21 is employed to establish tidal current and conservative mass transport model, in which the headland-bay coast is divided three sub-regions, and the time-scale quantitative measurement is introduced to discuss the responses of water

exchange to the beach nourishment project. Due to the orientation of sandbars in the beach nourishment project is basically parallel to the main direction of current, the circulations in the back of headland are weakened, and the velocity increases at the top of the sandbars while decreases between the two sandbars. The velocity decreases in front of the berm and decreases more in the back of sandbars. The increased current velocity in the tidal inlet between artificial headland and sandbar shortens the residence time after the beach nourishment project. The reductions of residence time in the two sub-regions around the headlands are much larger than that in the middle sub-region. Both wave and wind promote water exchange. However, because wave is also affected by wind, the residence time under both wave and wind conditions is not equal to the linear superposition of residence time under wave condition and wind condition respectively.

Key words: headland-bay coast; water exchange; beach nourishment; tidal current; conservative mass transport model

自然界砂质海岸岸线中有 50% 为岬湾型海岸, 岬湾海岸因其独特的地貌特征, 根据海滩稳定性特征, 可以分为静态平衡海滩、动态平衡海滩和不稳定海滩^[1]. 静态平衡海滩被当做一种稳定的岸线形式^[2], 在风暴侵蚀过后, 被搬运的沙仍会恢复到沙滩上, 形成一种天然自保机制^[3]. 所以通过人工岬湾布置岬头使岸线与静态平衡海湾岸线重合, 从而使海湾保持平衡和稳定^[4]. 人类活动正在成为塑造地球表生系统最重要的营力, 近岸海域受人类活动影响显著, 农业施肥、工业排污等使入海营养盐和污染物大幅上升, 导致近岸海域底质重金属、有机污染物严重超标, 水体出现富营养化^[5]. 岬湾海岸虽然有助于降低海滩和岸线受自然灾害侵蚀的风险, 但由于其

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(41776098); 中央海岛和海域保护资金项目(国海办字[2016]612 号)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通信作者: 顾杰(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海洋环境. E-mail: jgu@shou.edu.cn

两侧岬头对沿岸流的阻碍作用,使岬湾内动力条件减弱,降低了近岸水体的自净能力,河口排污稀释扩散能力下降^[6],近岸海域水质恶化^[7],藻华^[8]等现象频发。PAN 等^[9]认为在靠近岬头端部设计一定宽度的潮汐通道,以减弱可以接受程度的岸线保护效果为代价,可以有效加快岬湾海岸的水体交换能力,改善岬湾内水质状况。

在长期针对近岸海域水环境问题的探索过程中,人们发现海洋环境中污染物在水体中受到物理、化学和生物过程的共同影响^[10],水体环境的改善最终归结为对污染物归宿的控制^[11]。随着海域的涨落潮过程,海岸环境中污染物浓度可以与外界的水体发生交换并得到稀释^[12],通过量化水体输运过程和其规律,研究水体交换能力的强弱,可以有效反映水体的自净能力。采用数学模型研究海域水体交换能力是较为快速和有效的手段,主要分为拉格朗日法^[13]和欧拉法^[14]。拉格朗日法基于粒子追踪,可有效避免数值耗散产生的不稳定,但忽略了水体的对流扩散作用^[15]。欧拉法基于对流扩散方程求解,反映局地余流特征,对于运移轨迹和归宿问题存在局限性^[16]。

海滩养护工程是当前抵御海岸侵蚀灾害环境友好的对策,通过向海滩大量抛沙,使海岸平均高潮位以上海滩后滨的宽度迅速得以增加,辅以防堤促淤、外防波堤(或潜堤)掩护等措施,达到增宽和稳定海滩的目的。张宇等^[17]采用 DELFT3D 建立工程区海域潮流数学模型,模拟发现在海区岬角处修建突堤和修筑离岸潜堤工程将显著减小工程区内潮流流速,利于养滩的形成和稳定。刘会欣等^[18]采用数值模拟结合物理模型试验方式,研究了北戴河新区岸线在养滩工程后的稳定性,认为人工养滩工程同时辅以人工沙坝,能够较好保持北戴河新区岸线的稳定。杨燕雄等^[19]则应用了数值模拟和物理试验探讨了沙坝的养滩作用,并通过北戴河养滩工程证实了人工近岸沙坝在海滩养护工程中遮蔽功效。

针对岬湾海岸的海滩养护工程,诸多学者研究的视角多集中在海滩养护工程对水动力和工程稳定性的影响,而海滩养护工程对水环境的影响研究较少,本文以秦皇岛新开河口至南山人工岬湾海岸为例,基于水动力和保守物质输运模型,采用欧拉法计算滞留时间来定量分析水体交换能力,研究滩肩补沙和水上沙坝工程对近岸海域水动力和水体交换的影响,以期对工程的设计规划及岬湾海岸水环境的改善提供一定的参考依据。

1 研究区域及工程布置

河北省秦皇岛位于渤海湾与辽东湾交汇处,是河北省著名的沿海城市。海域潮流基本属于正规半日潮流,表现为顺岸往复流,涨潮流主要为西南偏西(WSW)向,落潮流为东北偏东(ENE)向,潮流方向与岸线、等深线基本平行。秦皇岛海域波浪主要为风浪和以风浪为主的混合浪,约占全年频率的 75%;涌浪及以涌浪为主的混合浪约占全年频率 22%。海域波高值总体较小,一般小于 0.5 m。

秦皇岛海港区新开河口至南山岸线海滩侵蚀不断加剧,滩面束窄、岸坡变陡、组成物质粗化,部分岸线沙滩滩肩已基本消失,区内东山浴场海滩生态功能和旅游休憩价值显著下降同时威胁近岸建筑。本次海滩修复工程为滩肩补沙与两座水下沙坝吹填,补沙岸线长 1.1 km,将人工沙滩的上限高程(即滩肩高程)设置为 2.0 m(85 国家高程基准),滩肩由陆向海为小于 1:100 的缓坡形式,设计高水位以下剖面坡度为 1:10,直至与自然海床相交,整体向海拓宽沙滩 30~50 m。吹填的两座水下人工沙坝离岸约 200 m,每段沙坝长 200 m,底宽 80 m,坝顶宽 60 m,坝顶高程 -0.9 m。海滩养护工程布置如图 1 所示。图中, Y_0 , Y_1 和 Y_2 为模型验证点位, NE, SE 和 SW 为模型外海开边界。

2 数学模型的建立和验证

MIKE 21 模型是丹麦水力学研究所(DHI)研发的通用数学模拟系统软件,主要模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及水环境。采用 MIKE 21 中水动力模块、波浪模块和物质输运模块分别建立秦皇岛海域潮流、波浪和保守物质输运模型。模型通过有限体积法进行离散,显式欧拉法进行求解,同时具备计算速度快和计算精度高的特点^[20]。

2.1 基本控制方程

2.1.1 潮流模型

潮流模型建立在 Navier-Stokes 方程的基础上。在笛卡尔坐标系下,通过对三维水平动量方程和连续方程沿水深积分得到二维浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = f_vh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} h T_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} h T_{xy} + h u_s S_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial h v}{\partial t} + \frac{\partial h u v^2}{\partial x} + \frac{\partial h v^2}{\partial y} = -f u h - g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} h T_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} h T_{yy} + h v_s S_f \quad (3)$$

式(1)~(3)中: t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标下纵、横坐标; h 为总水深, $h=\eta+d$, η 为水位, d 为静止水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的水深平均流速; S_f 为源汇项, f 为科氏力系数; ρ_0 为水的密度; s_{xx} 、 s_{yy} 、 s_{xy} 和 s_{yx} 为辐射应力分量; p_a 为大气压力; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为 x 、 y 方向上的表面风应力; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x 、 y 方向的底床切应力;侧应力 T_{ij} 包括黏性力和紊动力等,通过水深平均流速梯度由涡黏方程计算,公式如下:

$$T_{xx} = 2A \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$T_{yy} = 2A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (6)$$

亚网格尺度涡流黏度 A 由Samagorinsky公式(7)确定:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

式中: c_s 为常数,取0.28; l 为特征长度;变形率 S_{ij} 根据下式计算:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

2.1.2 波浪模型

MIKE 21 波浪模块采用的是非结构网格下的风成波浪谱模型,可以对近岸海域风成浪和涌浪的成长、消散与传播变形进行模拟.在笛卡尔坐标系下,模型的控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (vN) = \frac{S}{\sigma} \quad (9)$$

式中: $N(x, \sigma, \theta, t)$ 为波作用密度; σ 为相对角频率; θ 为波向; $v=(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 为波群的推进速度; c_x 、 c_y 为波浪在 x 、 y 方向上的传播速度分量; c_σ 、 c_θ 为波浪在 σ 、 θ 方向上的传播(变形)速度分量; S 是以谱密度表示的源函数; ∇ 为四维梯度算子.

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{\sigma k_x}{k^2} + u \quad (10)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{\sigma k_y}{k^2} + v \quad (11)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x h \right) - c_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (12)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right) \quad (13)$$

式(10)~(13)中: k_x 、 k_y 为波数矢量 \mathbf{k} 在 x 和 y 方向上的分量; s 为沿波浪方向 θ 上的空间坐标; m 为垂直于 s 的坐标; ∇_x 为 \mathbf{x} 空间的二维微分算子; c_g 为波群速度大小.

2.1.3 保守物质输运模型

保守物质输运方程为

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x} + \frac{\partial hvC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y}) \quad (14)$$

式中: C 为保守物质浓度; ϵ_x 和 ϵ_y 为对流扩散系数.

2.2 模型计算范围和网格

为保证计算精度同时考虑计算效率,建立渤海和秦皇岛海域的双重嵌套模型,为保证计算边界不受到新开河口至南山岸线海滩养护工程的影响,秦皇岛海域模型陆地岸线南起团林乡,北至甘家村(图1),模型向外海延伸大约46 km.模型采用非结构网格对研究区域进行剖分,网格节点数为4 888个,网格单元数为9 099个,网格从外海到岸线由疏到密,外海边界分辨率约为4 km,新开河口至南山岸线最大分辨率为5 m.

2.3 模型参数选取及边界条件

模型开边界包括NE(东北)、SE(东南)、SW(西南)三个开边界,NE和SW外海开边界的走向基本与主流方向垂直,从而增强模型的稳定性.采用流速和潮位控制的Flather边界条件,由渤海大模型^[21]提供.固边界采用不可滑移条件,即流速为0.涡粘性系数采用Samagorinsky亚网格尺度模型来计算水平涡粘系数,其中常数 C_s 取为0.28,涡粘系数 A 上下限分别取为 1.0×10^{10} 和 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.曼宁数根据底部泥沙粒径分布,区域均值为 $74 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$,时间步长取60 s.海岸边界采用动边界模拟滩肩和潮间带的干湿交换过程,取干点临界值 $h_{\text{dry}}=0.005 \text{ m}$,淹没临界值 $h_{\text{flood}}=0.05 \text{ m}$,湿点临界值 $h_{\text{wet}}=0.1 \text{ m}$.物质输运模型中初始条件设置计算区域为单位浓度示踪物质,其他区域为0,且外海边界条件均设置为0以模拟外海水体与研究水体的交换过程.

2.4 模型验证

秦皇岛潮流模型潮位选取了秦皇岛测站(Y_0)验证,时间为2013年5月16日0:00至5月17日24:00,同时对秦皇岛海域的9个测站进行流速、流

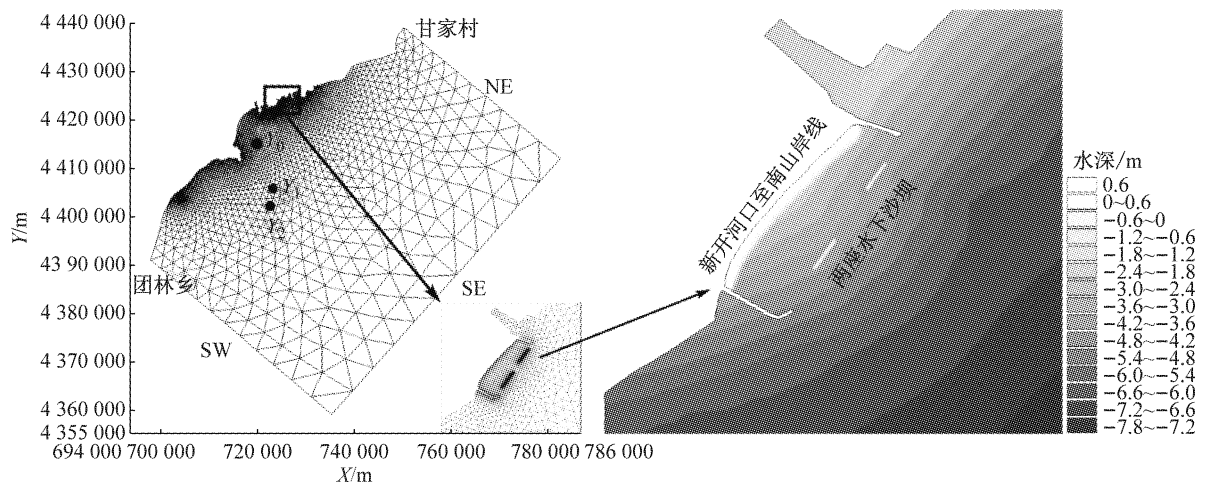


图 1 模型网格及海滩养护工程

Fig.1 Mesh of Model and Beach Nourishment Project

向多次验证,时间为 2013 年 5 月 16 日 08:00 至 5 月 17 日 08:00,其中具有代表性的 Y_1 、 Y_2 二个测站验证结果如图 2 所示,可以看出 Y_0 点计算的潮位过程

与实测潮位过程较为一致, Y_1 与 Y_2 点模拟流速、流向过程与实测数据在数值和相位上吻合较好。

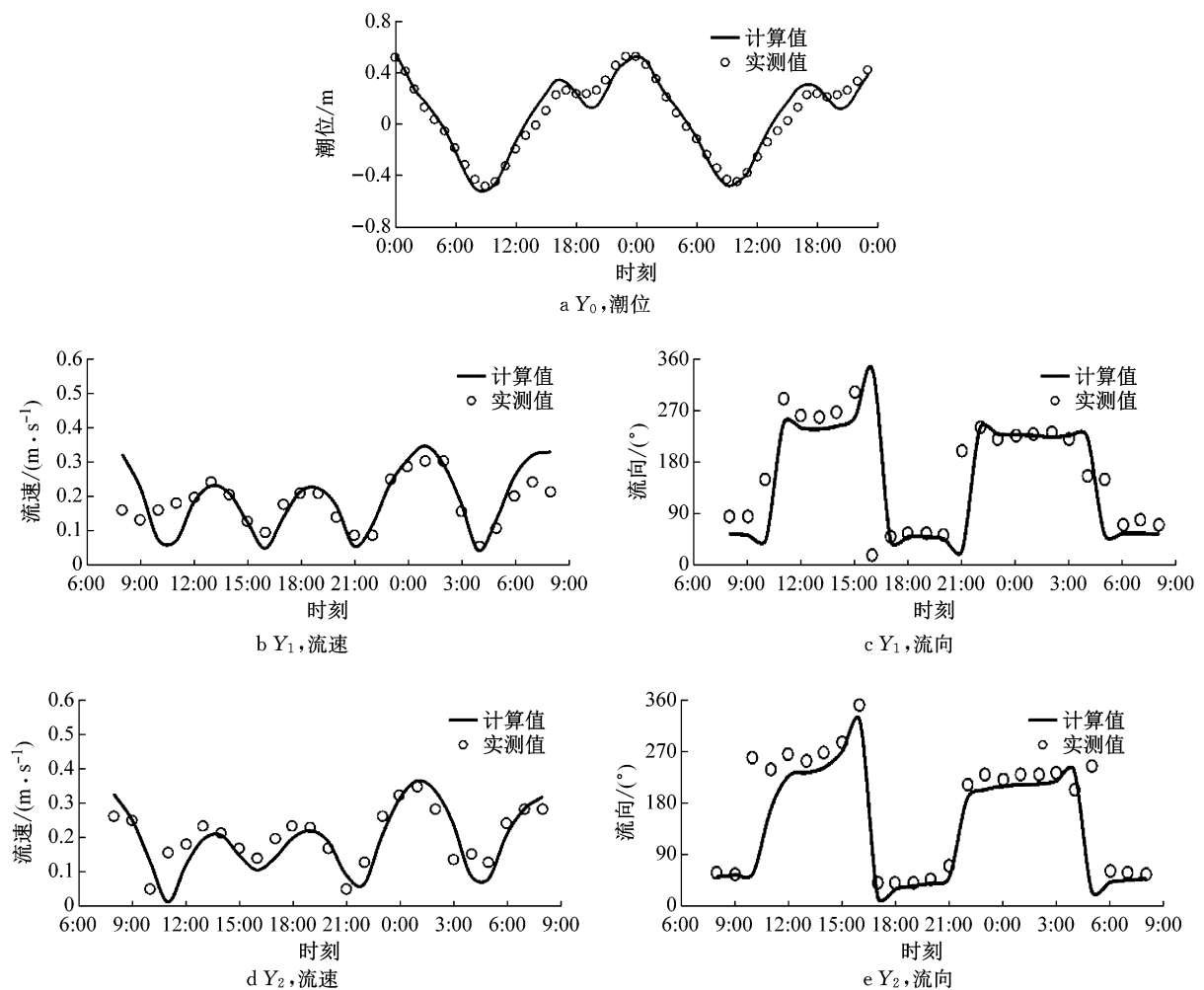


图 2 潮位和流速、流向验证

Fig.2 Verification of tidal level and current velocity magnitude and direction

根据百分比偏差法^[22]对模型进行评价,该方法主要是计算模型的计算值 M 和相应实测值 D 之间的

百分比偏差,方法为: $P_B = \frac{\sum_{i=1}^N |D-M|}{\sum_{i=1}^N |D|}$, 根据

所得的计算结果进行评价,当 $P_B \leq 10$, 认为拟合结果极好;当 $10 < P_B \leq 20$, 认为拟合非常好;当 $20 < P_B \leq 40$, 认为拟合好;当 $P_B > 40$, 认为拟合差。 Y_0 潮位验证 P_B 值为 32.7, 评价模拟结果为好;9 个测站流速验证 P_B 值为 23.5~37.8 之间, 评价模拟结果均为好, 流向验证 P_B 值在 18.5~34.0 之间, 评价模拟结果为好或以上。其中 Y_1 、 Y_2 测站流速验证 P_B 值为 17.7、21.8, 流向验证 P_B 值为 24.3、20.1, 评价模拟结果为好或者以上。因此潮流模型可用于水体交换对岷湾海岸海滩养护工程响应研究。

3 数学模型的建立和验证

3.1 滞留时间定义及研究分区

滞留时间定义为初始的单位浓度的示踪物质衰减(此处衰减为动力作用引起的浓度降低,非化学衰

减)到某一(如 e^{-1} 、50% 或 10%)初始质量所需要的时间,通过实验或数值模拟得到浓度变化过程,计算出相对质量变化过程,用最小二乘法进行曲线拟合,确定衰减系数后进而计算得到滞留时间。随时间变化的剩余示踪剂质量与初始示踪剂质量之比的衰减函数可表示为

$$M_t/M_0 = \beta e^{-kt} + Q \quad (15)$$

式中: M_t 和 M_0 分别为示踪剂在时刻 t 和初始时刻 t_0 的质量;参数 β 、 k 和 Q 利用最小二乘法拟合求得。

为研究海滩养护工程前后水体交换特性变化,将岷湾内部分为如图 3 所示的三个子区域:图 3a 为岷湾内部区域,图 3b 为将岷湾内部区域划分为三个子区域,其中 A 为西侧沙坝掩护子区域, B 区域为东侧沙坝掩护子区域, C 为两沙坝之间子区域。

3.2 工程前后流场分析

图 4 和图 5 分别为新开河口至南山近岸海域涨落急时刻海滩养护工程前和工程后的流场,图中的等值线为流速值。由于水下沙坝与水流走向保持基本平行,沙坝顶托水流且起到一定的导流作用,流速变化主要发生在滩肩、沙坝坝顶、沙坝后侧以及两个沙坝之间的水流通道。

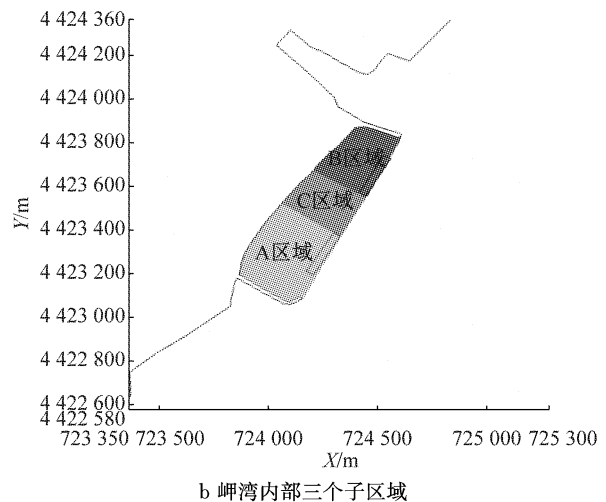
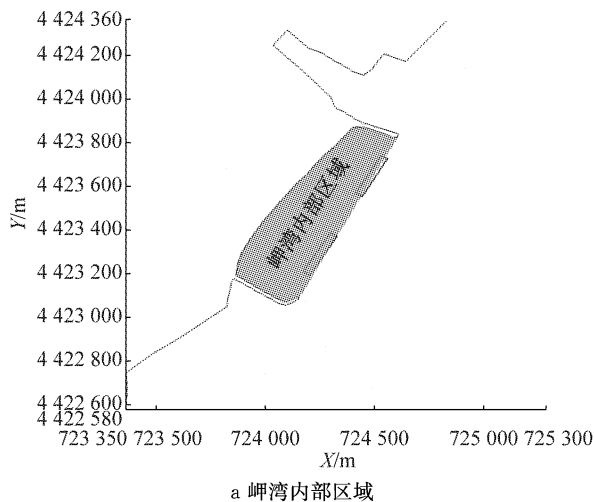


图 3 水体交换研究分区

Fig.3 Divisions of study area for water exchange

涨急时刻:沙坝坝顶处,由于顶托作用流速增加约 $0.02 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;两沙坝间流速减小约 $0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,沙坝与岷头间形成潮汐通道流速增加约 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,滩肩补沙使得岸滩前段向海前移,两沙坝后侧的滩肩处流速减小 $0.04 \sim 0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其余滩肩处流速减小较少约 $0.01 \sim 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。落急时刻:与涨急时刻流速变化区域分布相似,沙坝坝顶处流速增加约 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;两沙坝间流速减小约

$0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,沙坝与岷头间流速增加约 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两座沙坝后侧滩肩位置流速减少约 $0.05 \sim 0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其余滩肩处流速减小约 $0.01 \sim 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3 不同动力情景设置

由水体驱动动力来看,影响滞留时间的主要因素为潮流、波浪和风,波浪受风影响,为研究波浪和风对水体交换影响情况,设置纯潮流、潮流与波浪耦

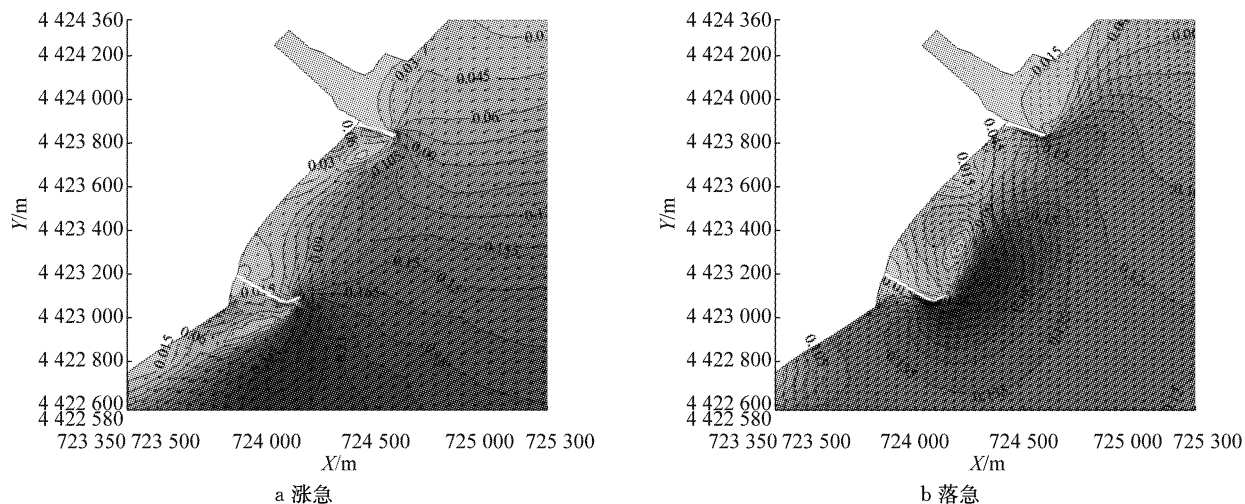


图 4 工程前流场

Fig.4 Flow Fields before the project

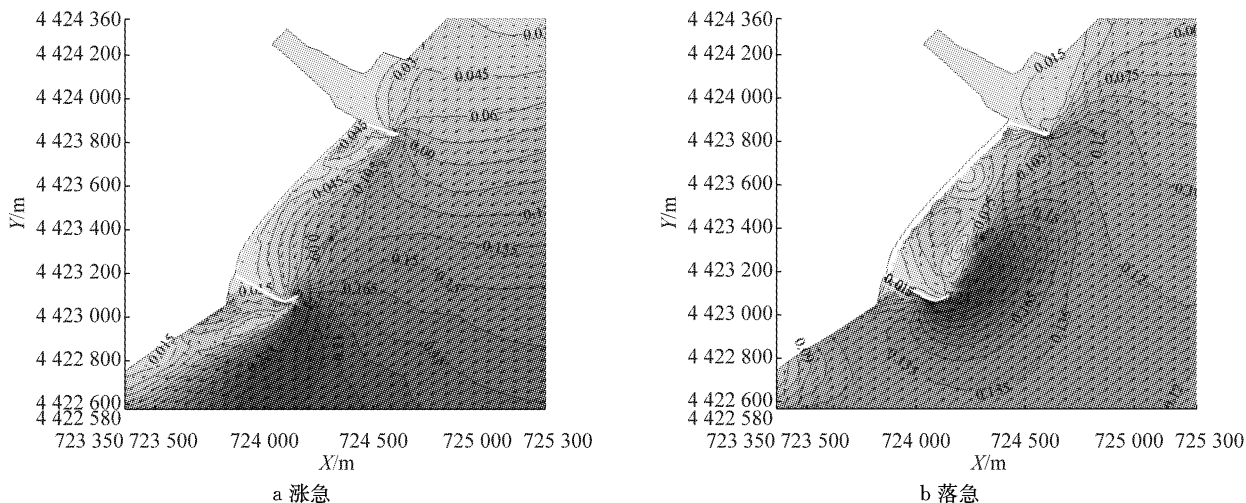


图 5 工程后流场

Fig.5 Flow Fields after the project

合、潮流与风场耦合、潮流、波浪与风场耦合 4 种不同动力条件的情景进行对比分析,设置 4 种情景如表 1 所示,风场条件参考所统计风况,风速 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向为北偏东 40° 。波浪场条件参考所统计出的具有代表性的常浪浪况:周期为 4.06 s ,波高为 0.30 m ,波向为 155.2° 。“√”和“×”号分别表示对应情景下该影响因素加入、不加入。

表 1 不同动力情景

Tab.1 Scenarios of different hydrodynamics

情景编号	潮流	波浪	风
1	√	×	×
2	√	√	×
3	√	×	√
4	√	√	√

3.4 滞留时间对工程的响应特征分析

不同情景工程前、后滞留时间如图 6 所示。不同

区域 4 种情景下,由于沙坝与人工岬头形成的潮汐通道使得靠近岬头处流速增加,流速增加约 $0.01 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,水动力条件增强,水体交换加快。A 区域和 B 区域由于沙坝顶托作用的影响,流速增加 $0.02 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在不同情景条件下滞留时间减少约 $6.6\% \sim 23.9\%$,而 C 区域由于未设置沙坝,与外海直接连通,和工程前条件接近,即使受到 A、B 区域的共同影响,滞留时间有所降低,但变化幅度很小。整体而言,由于工程进行了滩肩补沙,水深变浅,岬湾内部区域水体减少,水体更易于发生整体交换,滞留时间缩短,而且两座水下沙坝的吹填,虽然较工程前对水体有遮蔽作用,但是岬头与沙坝之间预留的潮汐通道及沙坝顶托的流速增加,加快了岬湾内部区域的水体交换,岬湾内部区域工程后较工程前的滞留时间缩短,减少约 $5.6\% \sim 16.0\%$ 。

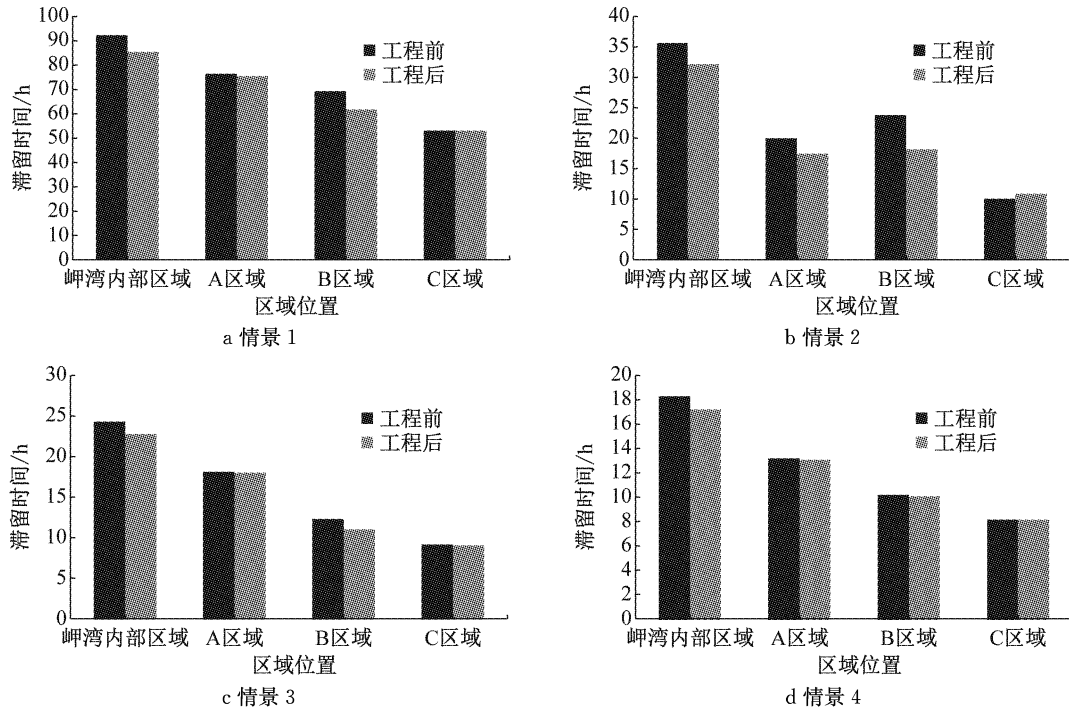


图6 不同区域4情景工程前后滞留时间比较

Fig.6 Comparison of residence time of different areas of 4 scenarios before and after project

3.5 滞留时间对动力因素响应分析

工程前岷湾内部区域、A、B、C子区域4种情景的滞留时间如图7所示。整体上,波浪、风场及波浪和风场同时作用均会促进水体交换,情景1滞留时

间最长,情景2、情景3滞留时间相对于情景1减少70.5%、78.7%,情景4,即潮流、波浪与风场同时驱动下,岷湾内部区域、A、B、C区域滞留时间最短,相对情景1滞留时间减少83.2%。

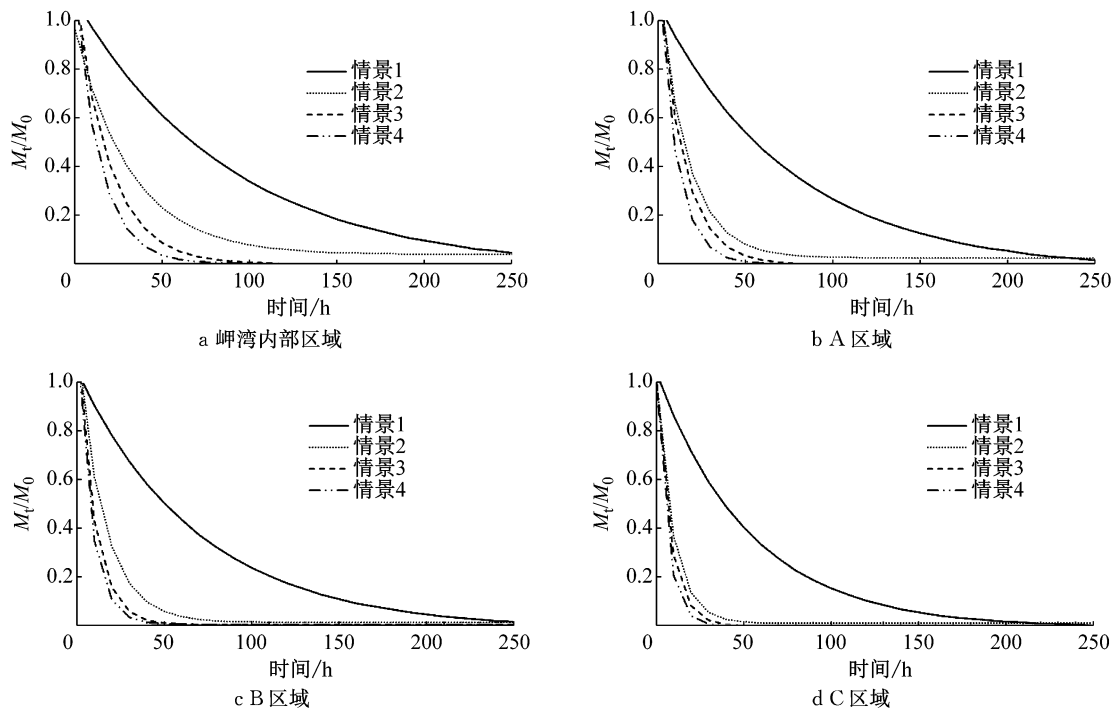


图7 工程前不同区域4情景下示踪物质质量变化过程

Fig.7 Change process of tracer mass of 4 scenarios in different areas before the project

工程后岷湾内部区域、A、B、C子区域4种情景的滞留时间如图8所示。工程后不同情景条件下滞

留时间及对滞留时间的削减率如表2所示,由于波浪受到风场影响,波浪和风场共同作用下的滞留时

间较波浪和风单独作用条件下的滞留时间更短,以岬湾内部区域为例,情景 2 对滞留时间的削减效果为 62%,情景 3 对滞留时间的削减效果为 73%,情景 4 对滞留时间的削减效果为 80%,削减效果越大即对水体交换的改善效果越好,情景 4 是情景 2 和情景 3 的叠加,而对滞留时间的影响不是线性叠加

关系,且不同区域水体的影响效果也不同,由于 C 区域位于两个离岸沙坝的开口处,与外海水体不存在遮挡,而 A、B 区域部分受到离岸沙坝的遮蔽作用,风和波浪及其单独作用对 C 区域的影响均大于 A 和 B 区域,这主要是由于不同区域水工结构和地形的不一致导致水动力条件存在差异。

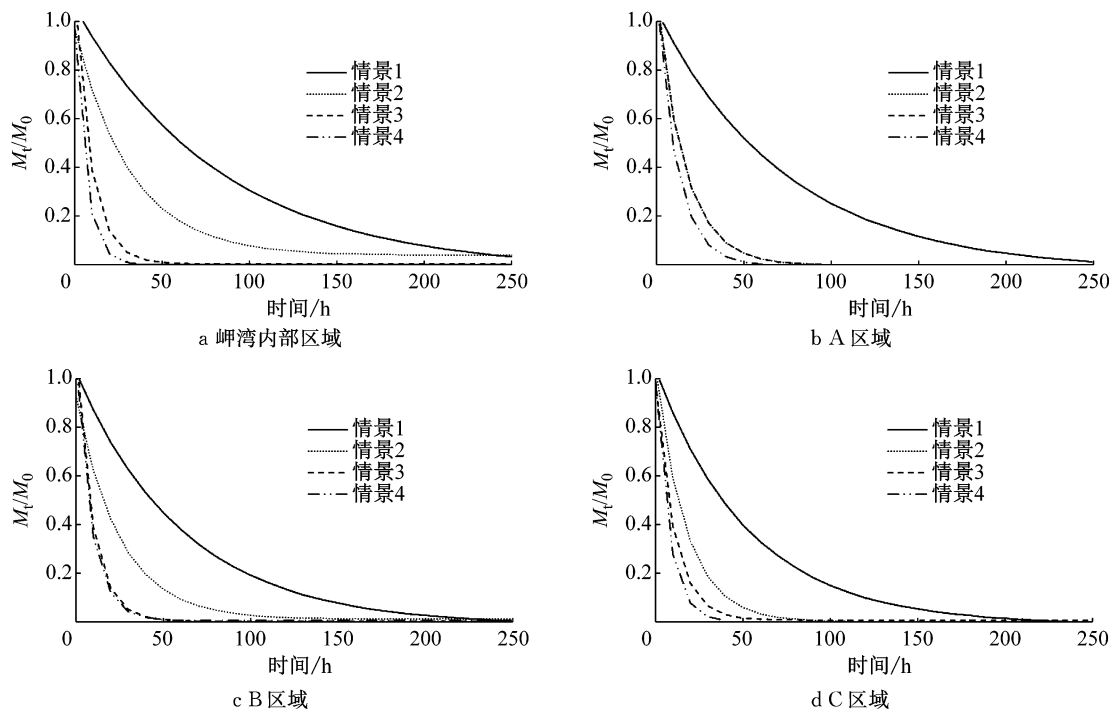


图 8 工程后不同区域 4 情景下示踪物质质量变化过程

Fig.8 Change process of tracer mass of 4 scenarios in different areas after the project

表 2 工程后滞留时间及对削减率

Tab.2 Residence time and reduction rate after the project

情景	岬湾内部区域		A 区域		B 区域		C 区域	
	滞留时间/h	削减率/%	滞留时间/h	削减率/%	滞留时间/h	削减率/%	滞留时间/h	削减率/%
1 潮流	85.3		75.3		61.5		53.1	
2 潮流+波浪	32.2	62	17.4	77	18.1	71	10.8	80
3 潮流+风	22.8	73	18.1	76	11.1	82	9.1	83
4 潮流+风+波浪	17.2	80	13.1	83	10.1	84	8.2	85

4 结论

基于 MIKE 21 软件建立了研究区域二维潮流和物质输运模型,利用率定和验证好的模型进行工程前后和不同动力情景的数值模拟,采用时间尺度指标定量衡量水体交换对海滩养护的响应,得到水体交换对岬湾内海滩养护的响应特征:

(1) 工程后,涨落急时刻,沙坝坝顶处由于顶托作用流速增加 $0.02 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;两沙坝间通道减小 $0.01 \sim 0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。岬头与沙坝形成潮汐通道使得靠近岬头处流速增加约 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;滩肩补沙

使得岸滩前段向海前移,滩肩前方海域整体流速减小,两沙坝后侧的流速减少更多。

(2) 沙坝与岬头间形成潮汐通道由于流速增加 $0.01 \sim 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,使得工程后内外水体交换速度加快,滞留时间相较于工程前缩短,水体交换能力增强。

(3) 工程后,岬湾内部区域和三个子三区滞留时间变化不同,岬湾内部区域滞留时间减少量较多,减少约 $5.6\% \sim 16.0\%$,A 区域与 B 区域为西、东两侧岬头掩护区域,滞留时间减少约 $6.6\% \sim 23.9\%$,C 区域滞留时间变化不明显。

(4) 波浪和风场加入后使得滞留时间减少约

83%,波浪加入后滞留时间减少约78%,风场加入后滞留时间减小约71%~72%。但由于波浪受到风场影响,波浪和风场共同作用下滞留时间不为单独条件下的线性叠加关系。

参考文献:

- [1] SILVESTER R, HSU J R C. Coastal stabilization: innovative concepts[M]. [S. l.]: Prentice Hall, 1993.
- [2] KUANG C, PAN Y, ZHANG Y, *et al.* Performance evaluation of a beach nourishment project at west beach in Beidaihe, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 27(4):769.
- [3] 杨燕雄, 张甲波. 静态平衡岬湾海岸理论及其在黄、渤海海岸的应用[J]. *海岸工程*, 2007, 26(2):38.
YANG Yanxiong, ZHANG Jiabo. Static equilibrium headland-bay coast theory and its application to coasts of the Yellow and Bohai seas[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 26(2):38.
- [4] 张简凡, 孙家文, 孙昭晨. 人工岬湾养滩方法在月亮湾浴场平面设计中的应用[J]. *中国水运*, 2016, 16(6):305.
ZHANG Jianfan, SUN Jiawen, SUN Zhaochen. Application of artificial headland bay beach nourishment method in the plane design of Yueliangwan bathing place [J]. *China Water Transport*, 2016, 16(6):305.
- [5] 中国科学院学部. 环渤海陆域和近岸海域持久性有机污染物污染现状调查与控制对策[J]. *中国科学院院刊*, 2010, 25(3):305.
CAS Academic division. Investigation of the present status of pollution by persistent organic pollutants in land area and offshore area around the Bohai sea and control countermeasures [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3):305.
- [6] 张伟. 威海湾岸滩整治工程的水动力及冲淤环境研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
ZHANG Wei. Study on the hydrodynamic environment and the erosion and deposition environment of the sand beach regulation projects in the south area of Weihai bay[D]. Qingdao: China Ocean University, 2008.
- [7] CROWTHER J, KAY D, WYER M D. Relationships between microbial water quality and environmental conditions in coastal recreational waters: the Fylde coast, UK [J]. *Water Research*, 2001, 35(17): 4029.
- [8] BARILE P J. Widespread sewage pollution of the Indian river lagoon system, Florida (USA) resolved by spatial analyses of macroalgal biogeochemistry [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 557.
- [9] PAN Y, KUANG C, GU J, *et al.* Assessment of a measure for water exchange strengthening of artificial headland bays based on shoreline change and flushing time[J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(3):615.
- [10] NTENGWE F W. Pollutant loads and water quality in streams of heavily populated and industrialized towns[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2006, 31(15):832.
- [11] SUFFET M. Fate of pollutants in the air and water environments, part 1: mechanism of interaction between environments and mathematical modeling and the physical fate of pollutants[J]. *Journal of Urban History*, 1977, 35(4):561.
- [12] 夏华永, 李绪录, 韩康. 大鹏湾环境容量研究 I: 自净能力模拟分析[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(12):2031.
XIA Huayong, LI Xulu, HAN Kang. Studies on the environmental capacity of the Dapeng bay, part I: numerical study of water self-purification capacity [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(12):2031.
- [13] 韩松林. 象山港物质运输特性的描述方法及相关问题研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
HAN Songlin. Studies on mass transport description method and relevant issues in Xiangshan bay [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [14] CUCCO A, UMGIESSER G, FERRARIN C, *et al.* Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(7):913.
- [15] 李小宝. 大型海湾水交换高效计算方法研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
LI Xiaobao. Study on efficient calculation method of water exchange in the large-scale bay [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [16] 李斐. 基于 FVM 的渤海潮流及潮余流特征分析[J]. *中国水运*, 2011, 11(11):154.
LI Fei. Analysis of characteristic of tide and residual current of Bohai based on FVM[J]. *China Water Transport*, 2011, 11(11):154.
- [17] 张宇, 刘曙光, 匡翠萍, 等. 北戴河西海岸养护工程海域潮流场数值研究[J]. *水运工程*, 2008(7): 7.
ZHANG Yu, LIU Shuguang, KUANG Cuiping, *et al.* Numerical study on flow field in nourishment area on west beach of Beidaihe[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2008(7): 7.
- [18] 刘会欣, 杨燕雄, 刘建涛, 等. 北戴河新区养滩工程岸线稳定性模拟[J]. *海洋地质前沿*, 2014(3): 38.
LIU Huixin, YANG Yanxiong, LIU Jiantao, *et al.* Shoreline stability simulation of the beach in New Beidaihe District after nourishment[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014(3): 38.
- [19] 杨燕雄, 杨雯, 邱若峰, 等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用——以北戴河养滩工程为例[J]. *海洋地质前沿*. 2013(2): 23.
YANG Yanxiong, YANG Wen, QIU Ruofeng, *et al.* Application of artificial submerged sandbars to beach nourishment—a case from Beidaihe beach[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013(2): 23.
- [20] DHI. MIKE 21 & MIKE 3 flow model hydrodynamics and transport module science documentation [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [21] 顾杰, 宋兹霖, 王佳元, 等. 近海人工岛及沙坝工程与潮流的响应特征研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2017, 32(2):182.
GU Jie, SONG Honglin, WANG Jiayuan, *et al.* Study on responses of tidal currents to artificial island and sandbars in coastal waters[J]. *Journal of Hydrodynamics(A)*, 2017, 32(2):182.
- [22] ALLEN J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem Models[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1-4): 3.