

# 波流对人工岬头和海滩养护工程的响应

匡翠萍<sup>1</sup>, 韩雪健<sup>1</sup>, 李文斌<sup>1</sup>, 张甲波<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北省地矿局 第八地质大队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 以新开河口至南山岸线为研究对象, 为减少海岸侵蚀, 在岸线两端修建人工岬头和包含水下沙坝的海滩养护工程。基于 MIKE 21 软件建立潮流和波浪耦合模型, 研究波流动力对人工岬头和海滩养护工程的响应变化。人工岬头的挑流作用使得东西岬头前流速增加, 但岬湾内部流速减小并在岬头后侧形成弱环流。海滩养护工程后沙坝坝顶有效波高略有增加, 但沙坝之间有效波高有所削减, 沙坝后侧海域波高明显减少; 滩肩前方海域有效波高减小, 涨潮期间波高减小量大于落潮期间波高减小量。人工岬头和海滩养护工程的共同作用可有效削减岬头和沙坝环抱海域特别是近岸的潮流和波浪, 减少海岸侵蚀。

**关键词:** 水动力; 人工岬头; 海滩养护; 潮流和波浪耦合模型

**中图分类号:** P753

**文献标志码:** A

## Responses of Wave and Current to Artificial Headlands and a Beach Nourishment Project

KUANG Cuiping<sup>1</sup>, HAN Xuejian<sup>1</sup>, LI Wenbin<sup>1</sup>, ZHANG Jiabo<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Eighth Geological Brigade, Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Taking the coast from the Xinkai estuary to Nanshan as a study object, the artificial headlands and a beach nourishment project including underwater sandbars will be constructed to reduce coastal erosion. MIKE 21 was employed to establish tidal current and wave model, hence the responses of current and wave to artificial headland and beach nourishment project can be obtained. The velocity in front of headlands can be increased due to jet-like-flow, however, the velocity inside of the headland-bay is decreased, and a weak circulation appears in the back of the headland. After the beach nourishment, wave height increases at the crest of sandbar, while it decreases between and behind sandbars with more decreasing behind sandbars. Wave height decreases in

front of the berm, and has more reduction during flood period than ebb period. The combined effect of artificial headland and beach nourishment project can effectively reduce the tidal currents and waves in the area encircled by headlands and sandbars, especially near shore, hence reduce coastal erosion.

**Key words:** hydrodynamics; artificial headland; beach nourishment; coupling model of tidal current and wave

海岸线演变是海洋水动力、海岸泥沙运动及海岸地貌之间平衡制约的动态变化过程, 随着全球海平面上升逐渐加剧、海洋水动力环境不断发生变化, 加之人类频繁的海岸工程活动, 造成了目前世界范围内近 70% 砂质海岸遭受不同程度侵蚀<sup>[1-2]</sup>。河北省秦皇岛作为著名沿海旅游城市, 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<sup>[3]</sup>。而岬湾海岸作为自然界一种稳定的海岸存在形式, 达到平衡的岬湾海滩可保持长时间的稳定, 人工岬湾设计可以在岸线两端布置硬防护结构, 使之形成弱动力区达到减少海滩侵蚀效果<sup>[4]</sup>。海滩养护作为环境友好亲近自然的对策, 通常是当海滩自然供沙相对不足时, 通过水力或机械搬运的方法将一定颗粒级配的沙子填到海滩受侵蚀严重的部分, 迅速地增加海岸平均高潮位以上海滩后滨的宽度<sup>[5-7]</sup>。由于沙坝以各种形式存在于天然的砂质海岸, 进行人工沙坝吹填可以消减波能的同时对后侧海滩进行喂养<sup>[8-9]</sup>。杨燕雄等<sup>[10]</sup>针对西海滩整治工程采用弧形突堤和离岸潜堤构成人工岬头, 形成三湾弧形稳定岸线形态, 对砂质海岸旅游海滩的治理具有一定的示范意义。张宇等<sup>[11]</sup>通过数值模拟发现, 在海区岬角处修建突堤和修筑离岸潜堤工程会显著减小工程区内潮流速度, 利于养滩的形成和稳

收稿日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(41776098); 中央海岛和海域保护资金(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, 主要研究方向为河口海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

定. Andrew 等<sup>[6]</sup>基于抛物线模型模拟岬湾间平衡海滩,并利用海滩平衡模拟工具 Mapbay 和海岸营力系统软件 SMC 模拟,对不同时段的养滩过程进行验证. Kuang 等<sup>[5]</sup>利用率定和验证的数学模型预测北戴河西海岸海滩养护工程后 2~3 年内仍需补沙,并提出了优化方案.

潮流是海水在月球和太阳的作用下周期水平流动<sup>[12]</sup>,波浪自深海传播至近岸海域受水深地形影响发生反射、折射、破碎等形成的沿岸流会引起泥沙运动和岸滩演变<sup>[13]</sup>,“波浪掀沙,潮流输沙”,波浪和水流是长期作用于海岸地区的主要水动力因素<sup>[14-16]</sup>. 以秦皇岛新开河口至南山岸线为例,研究人工岬头及海滩养护工程后的波流动力响应,分析波流动力变化特征及规律.

## 1 数学模型介绍

MIKE 21 模型是丹麦水力学研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)研发的通用数学模拟系统,主要模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化.

### 1.1 基本控制方程

#### 1.1.1 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,通过对三维动量方程和连续方程沿水深积分得到二维浅水方程<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS_f \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} &= f\bar{v}h - \\ gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S_f \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} &= -f\bar{u}h - \\ gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S_f \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $x, y$  为笛卡尔坐标下纵横坐标;  $h$  为总水深,  $h = \eta + d$ ,  $\eta$  为水位,  $d$  为静止水深;  $\bar{u}, \bar{v}$  分别

为  $x, y$  方向的水深平均流速;  $f$  为科氏力系数;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水的密度;  $\rho_0$  为水的参考密度;  $S_f$  为点源排放量大小;  $u_s, v_s$  分别为点源处笛卡尔坐标系  $x, y$  轴向排放速度分量;  $s_{xx}, s_{yy}, s_{xy}$  和  $s_{yx}$  为辐射应力分量;  $p_a$  为大气压力;  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  分别为  $x, y$  方向的表面风应力;  $\tau_{bx}, \tau_{by} = \rho g \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{M^2 h^{1/3}} \bar{u}, \tau_{by} = \rho g \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{M^2 h^{1/3}} \bar{v}$  分别为  $x, y$  方向的底床切应力,  $M$  为曼宁数; 侧应力  $T_{ij}$  (其中  $i, j$  代表  $x, y$ ) 包括黏性力和紊动力等, 通过对涡黏方程沿水深平均流速梯度方向计算如下:

$$\begin{cases} T_{xx} = 2A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \\ T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ T_{yy} = 2A \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (4)$$

亚网格尺度涡流黏度  $A$  由 Samagorinsky 公式(5)确定:

$$A = c_s l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $c_s$  为常数, 取 0.28;  $l$  为特征长度; 变形率  $S_{ij}$  根据式(6)计算:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

#### 1.1.2 波浪模型

MIKE 21 Spectral Wave(SW)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<sup>[18]</sup>

$$\frac{\partial N(x, \sigma, \theta, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}N(x, \sigma, \theta, t)) = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

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

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{\partial k_x}{k^2} + u \quad (8)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{\partial k_y}{k^2} + v \quad (9)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x h \right] - c_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (10)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \quad (11)$$

式中:  $k$  (标量) 为波数;  $k_x, k_y$  为波数矢量  $\mathbf{k}$  在  $x$  和  $y$  方向上的分量;  $s$  为沿波浪方向  $\theta$  上的空间坐标;  $m$  为垂直于  $s$  的坐标;  $\nabla_x$  为  $\mathbf{x}$  空间的二维微分算子;  $c_g$

为波群速度大小。

## 1.2 人工岬头及海滩养护设置

新开河口至南山岸线东西两端修建防波堤构成岬头,走向与岸滩基本垂直,东侧防波堤长约 200 m,西侧防波堤长约 300 m,为更好减弱潮流及波浪作用,西侧导堤前部 60 m 处向岬湾内弯曲约  $45^\circ$ 。具体为在 MIKE 21 软件中 structure 一项下中选择增加 dike 设置人工岬头条件。

海滩修复工程为滩肩补沙与 2 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)、滩肩由陆向海均为小于 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 2 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。具体为在 MIKE 21 软件中通过修改地形数据设置海滩养护工程中的人工沙坝和滩肩补砂。人工岬头及海滩养护工程如图 1 所示。

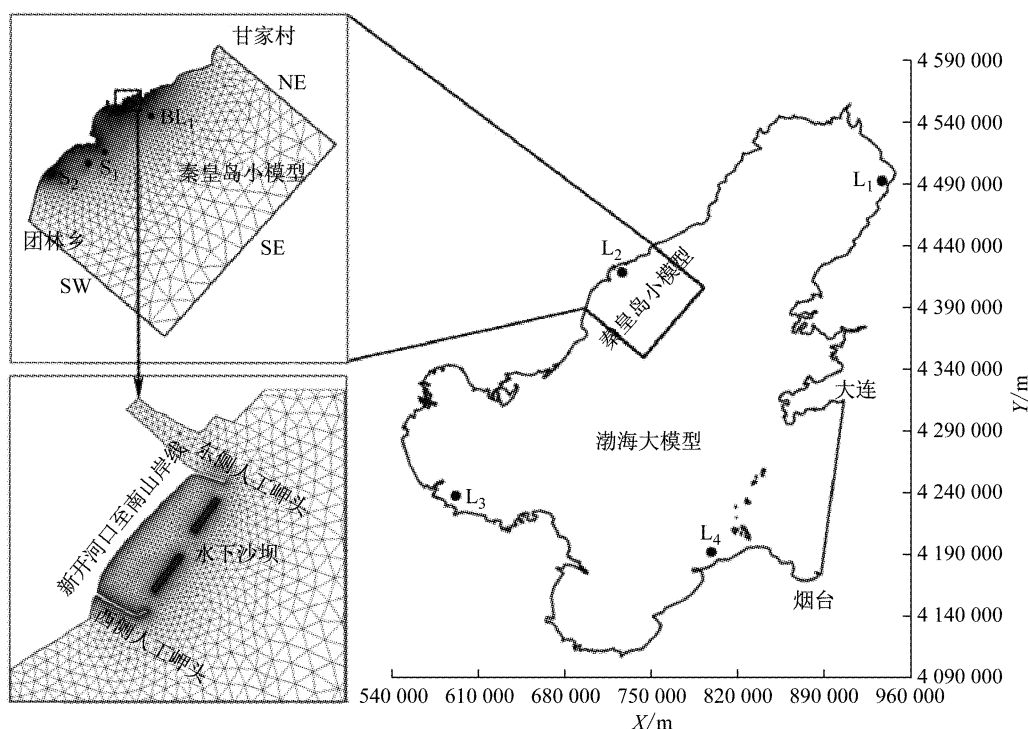


图1 大、小双重嵌套网格及观测点位置

Fig.1 Nested mesh of large and small model and observation stations

为了表述方便,定义无岬头无海滩养护为情况 1,仅有人工岬头工程为情况 2,同时有人工岬头和海滩养护工程为情况 3。

## 1.3 模型范围和计算网格

为保证计算精度同时考虑计算效率,利用 MIKE 21 软件建立大、小双重嵌套模型,大模型为小模型提供计算边界条件。渤海大模型区域为大连老虎滩至烟台 2 个潮位站连线为开边界的整个渤海;秦皇岛小模型区域陆地岸线南起团林乡,北至甘家村,模型向外海延伸大约 46 km,研究重点区域为新开河口至南山岸线海域。

渤海大模型<sup>[19]</sup>总面积约 84 000 km<sup>2</sup>,节点数为 14 183 个,网格单元数为 23 419 个,唯一开边界是大连和烟台 2 个潮位站连线。测站潮位数据来自

2015 年潮汐表<sup>[20]</sup>。为选择合适的秦皇岛小模型计算网格,比选了粗、中、细 3 种网格,网格数分别为 6 412、9 099、11 748,最小单元尺寸分别为 12 m、5 m、5 m,所需计算时间分别为 2.71 h、3.54 h、4.31 h;潮流计算粗网格下结果与中网格下结果的最大相对误差小于 9%,中网格下结果与细网格下结果的最大相对误差小于 4%;综合考虑计算精度与计算效率,最终选择中网格作为秦皇岛小模型计算网格。秦皇岛小模型网格节点数为 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。模型及网格如图 1,图中左下角为情况 3。

## 1.4 模型参数设置

小模型分为 NE、SE、SW 3 个开边界,采用流速

和潮位控制的 Flather 边界条件,由渤海大模型提供.固边界采用不可滑移条件,即流速为零.涡黏性系数采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型来计算水平涡黏系数,其中常数  $C_s$  取为 0.28,涡黏系数  $A$  上下限分别取为  $1.0 \times 10^{10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  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  $h_{\text{dry}}=0.005 \text{ m}$ ,  $h_{\text{flood}}=0.050 \text{ m}$ ,  $h_{\text{wet}}=0.100 \text{ m}$ .

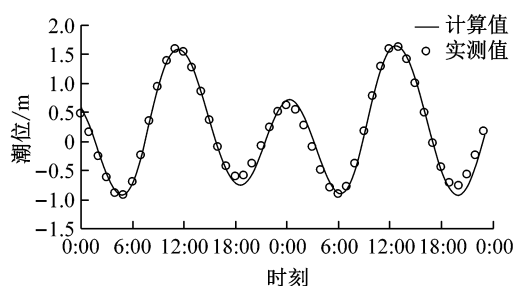
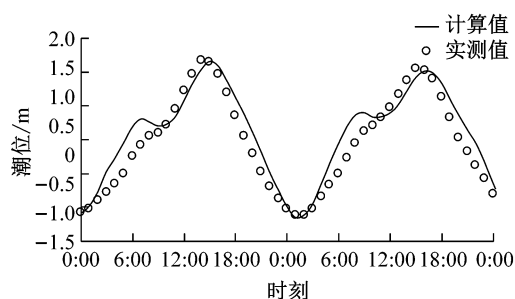
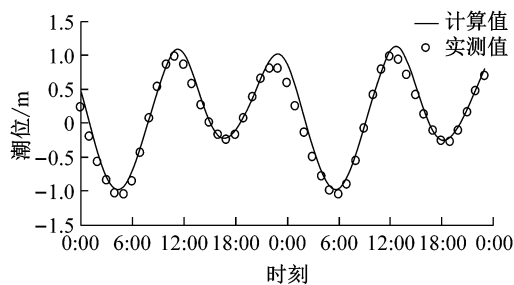
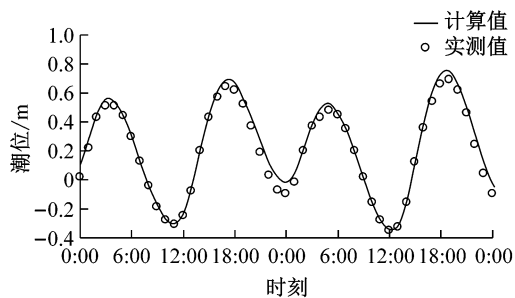
a L<sub>1</sub>b L<sub>2</sub>c L<sub>3</sub>d L<sub>4</sub>

图 2 渤海模型潮位过程验证

Fig.2 Verification of tidal level using model of the Bohai Sea

日 08:00 至 5 月 17 日 08:00,选取当中  $S_1$ 、 $S_2$  这 2 个测站验证,结果如图 3 所示.

## 2.2 潮流模型效率评价

数学模型在验证过程中存在误差,模型误差可能会受到网格大小、边界条件、模型参数等因素的影响,为了把误差控制在精度要求内,进行了多次率定.为了评价模型计算结果的拟合程度,比较计算值和实测值之间的差异程度,引入一个评价标准来进行衡量.采用百分比模型偏差法( $P_B$ )用来计算模型的模型计算值  $M$  和相应实测值  $D$  之间的偏差率,计算方法如下<sup>[21]</sup>:

$$P_B = \frac{\sum_{i=1}^N |D - M|}{\sum_{i=1}^N |D|} \times 100 \quad (12)$$

当  $P_B \leq 10$ ,认为拟合结果极好;当  $10 < P_B \leq 20$ ,

## 2 模型验证

### 2.1 潮流模型验证

渤海大模型潮位选取了包括秦皇岛测站在内的 11 个测站多次验证,时间为 2015 年 9 月 23 和 24 日,选取当中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  这 4 个代表测站验证,结果如图 2 所示.小模型选取了秦皇岛海域的 9 个测站进行流速、流向多次验证,时间为 2013 年 5 月 16

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.

渤海大模型 11 个测站验证的  $P_B$  在 10.1 ~ 32.7 之间,其中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  测站  $P_B$  为 10.1、32.7、19.5、12.6,评价为好或非常好;秦皇岛小模型 9 个测站流速验证  $P_B$  在 23.5 ~ 37.8 之间,流向验证  $P_B$  在 18.5 ~ 34.0 之间, $S_1$ 、 $S_2$  测站流速验证  $P_B$  为 28.5、26.1,流向验证  $P_B$  为 22.4、18.5,评价为好或非常好.综合以上评价,潮流模型验证较好.

### 2.3 波浪模型验证

根据 2016 年秦皇岛海洋波浪测站(图 1 中 BL<sub>1</sub>)的实测波浪统计资料,统计特征值和波浪模型数值模拟得到的计算结果见表 1,波浪模型验证较好.

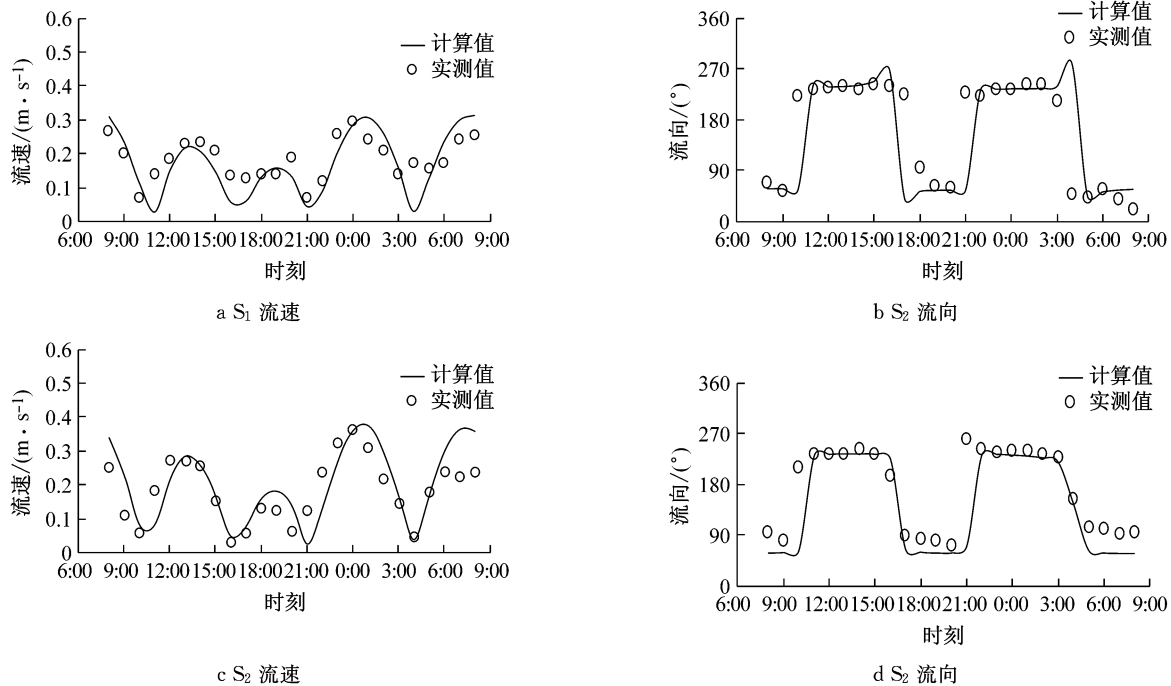


图 3 秦皇岛模型流速流向验证

Fig.3 Verification of flow velocity magnitude and direction using model of Qinhuangdao

表 1 波浪统计特征值和模拟值对比

Tab.1 Comparison of statistical eigenvalues and simulations of waves

物理量	统计特征值	计算结果	误差/%
周期	4.06 s	4.10 s	0.98
波高	0.30 m	0.35 m	16.70
波向	155.2°	157.0°	1.16

### 3 潮流的响应特征

图 4 为自然情况(无岬头无海滩养护的情况 1)下新开河口至南山近岸海域涨落急时刻潮流,基本属于正规半日潮流,总体表现为顺岸往复流,涨潮流

主要为 WSW 向,落潮流为 ENE 向,潮流方向与岸线、等深线基本平行。

#### 3.1 潮流对人工岬头的响应

图 5 为情况 2 下新开河口至南山近岸海域涨落急时刻的流场及情况 2 与情况 1 流速差值等值线。该区域无工程时流速  $0.090\sim0.165\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,人工岬头修建后岬湾内部流速  $0.015\sim0.090\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流速绝对减小约  $0.075\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,相对减小约  $45.5\%\sim83.3\%$ 。挑流作用使得岬头前局部流速增加,西侧岬头前部流速增加  $0.060\sim0.140\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,东侧岬头前部流速增加  $0.020\sim0.040\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。涨急时刻,岬湾

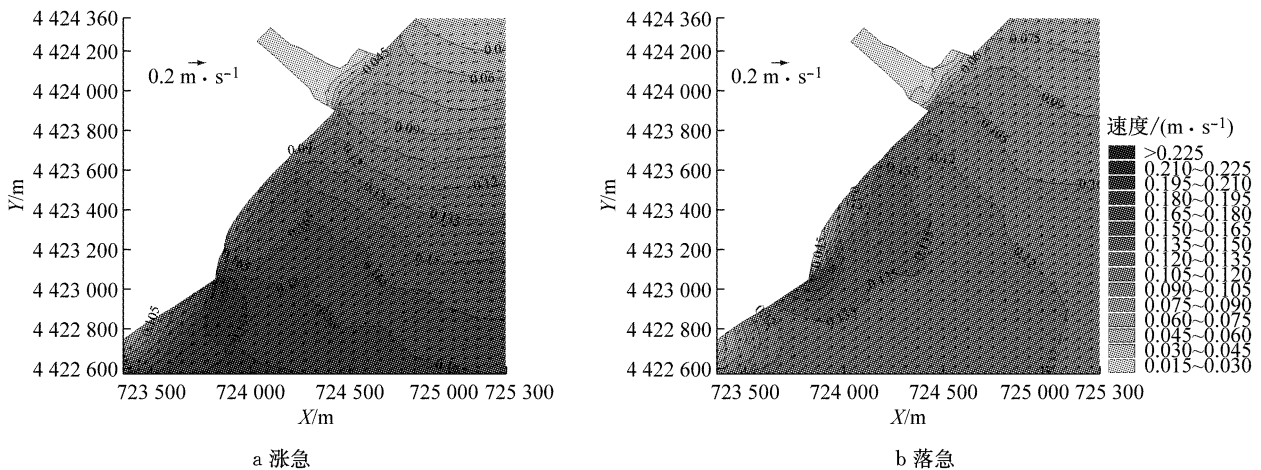


图 4 情况 1 下流场及流速等值线

Fig.4 Flow fields and velocity magnitude contours of scenario 1

内靠近东侧岬头处、西侧岬头外侧处形成弱的环流；落急时刻，岬湾内部靠近西侧岬头处、东侧岬头外侧

处形成弱的环流。即人工岬头修建后会在岬头后侧形成弱环流。

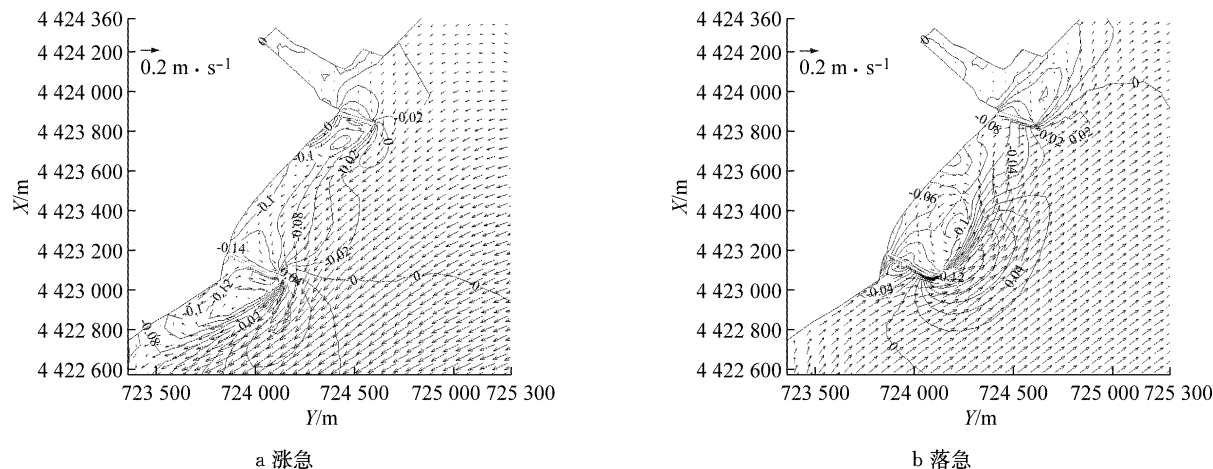


图 5 情况 2 下流场及流速差值图

Fig.5 Flow fields of scenario 2 and velocity change contours

### 3.2 潮流对海滩养护工程的响应

图 6 为情况 3 下新开河口至南山近岸海域涨落急时刻的流场及情况 3 与情况 2 流速差值等值线，即反映潮流对海滩养护工程的响应。由于水下沙坝

与水流走向保持基本平行，沙坝顶托水流起到一定的导流作用，整体上看流速的变化主要发生在滩肩、沙坝坝顶、沙坝后侧以及 2 个沙坝之间的水流通道。

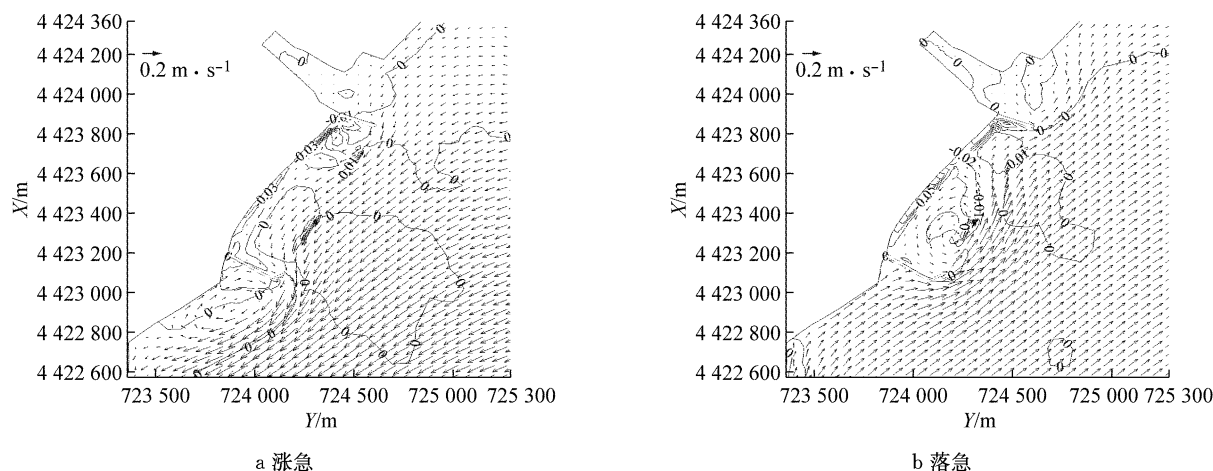


图 6 情况 3 下流场及流速差值图

Fig.6 Flow fields of scenario 3 and velocity change contours

涨急时刻在岬湾内靠近东侧岬头处流速减小  $0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，环流减弱；2 个沙坝坝顶处，由于顶托作用流速增加约  $0.020 \sim 0.030 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；两沙坝间流速减小约  $0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。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  $0.040 \sim 0.070 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其余滩肩处流速减小较少，约  $0.010 \sim 0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。落急时刻与涨急时刻流速变化区域分布相似：岬湾内靠近西侧岬头处流速减小  $0.010 \sim 0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，环流减弱；沙坝坝顶处流速增加约  $0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；两沙坝间流速减小约  $0.010$

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2 座沙坝后侧滩肩位置流速减少约  $0.050 \sim 0.060 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其余滩肩处流速减小约  $0.010 \sim 0.020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 4 波浪的响应特征

根据表 1 设置波浪入射条件，进行波流耦合作用下波浪模拟，得到工程前后涨落急时刻波高分布分别如图 7 和图 8 所示，工程海域涨急时刻有效波高大于落急时刻有效波高。

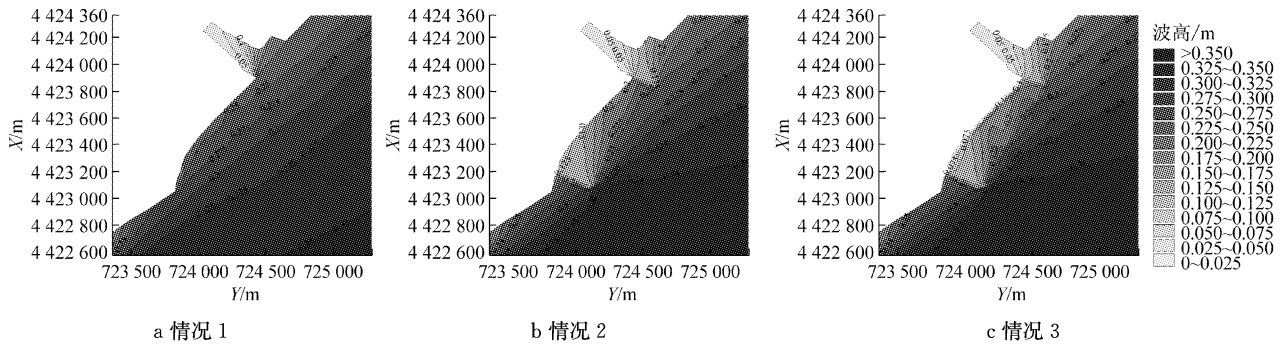


图7 涨急时刻有效波高分布

Fig.7 Significant wave height distributions at the maximum flood

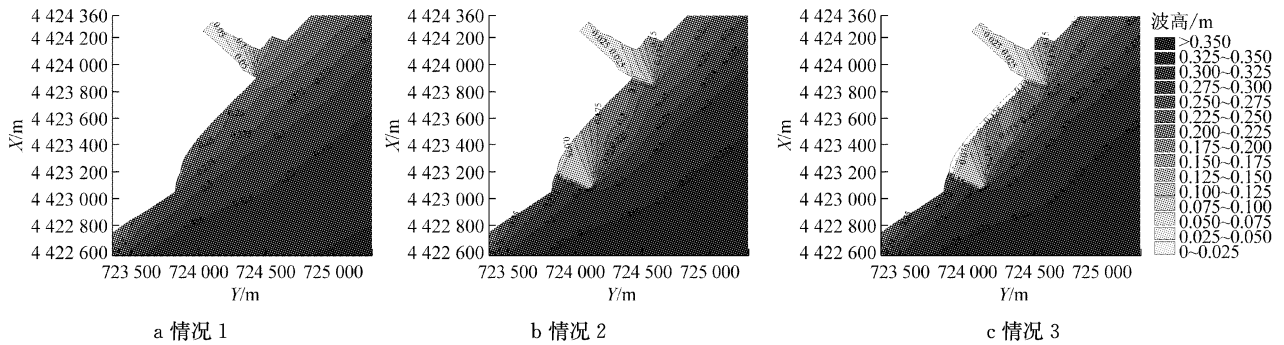


图8 落急时刻有效波高分布

Fig.8 Significant wave height distributions at the maximum ebb

#### 4.1 波浪对人工岬头的响应

情况1下近岸海域波高等值线基本与岸线平行,有效波高0.250~0.350 m.对比情况1和情况2下的有效波高分布,由于波浪的绕射作用,人工岬头后侧波浪消减较明显,涨急时刻消减0.125 m(50%),落急时刻消减0.150 m(60%),即人工岬头在落急时刻消减波浪更为明显.由于潮流对波浪的折射作用,靠近东侧岬头的岬湾内落急时刻的波高弱于涨急时刻的波高.

#### 4.2 波浪对海滩养护工程的响应

情况3下有效波高在涨、落急时刻有效波高变化范围相似:坝顶、沙坝后侧及沙坝间有效波高发生明显变化,相较于情况2,波浪在爬过坝顶时波高增加0.025 m,增加约10%;由于沙坝走向与波浪入射方向基本垂直,在2座沙坝后侧有效波高削减约0.050~0.100 m,减少约15.4%~30.8%.由于地形变化,两沙坝之间波高削减0.025 m,减少约10%.涨急时刻,滩肩前方海域有效波高减小0.050~0.100 m,减小约40%~50%;落急时刻滩肩前方海域有效波高减小约0.050 m,较涨急时刻减少小.

## 5 结论

基于MIKE 21软件建立了研究区域潮流和波浪耦合模型,利用率定和验证好的模型,设置无岬头无海滩养护工程、仅人工岬头工程、同时有人工岬头与海滩养护工程3种情况进行数值模拟,对新开河口至南山岸线海域典型时刻流场、波浪场进行对比分析,得到潮流流速和有效波高对人工岬头及海滩养护工程的响应特征如下:

(1) 新开河口至南山岸线海域流速0.090~0.165  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,整体流速较小;人工岬头修建后岬湾内部流速减小约0.075  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,挑流作用使得东西岬头前局部流速增加0.020~0.140  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .人工岬头修建后会在岬头后侧形成弱环流.

(2) 海滩养护工程中沙坝与潮流主流向基本平行,沙坝修建后使得岬头后侧环流减弱;沙坝坝顶处由于顶托作用流速增加0.020~0.030  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;两沙坝间通道减小0.010~0.015  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .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.

(3) 人工岬头对其后侧区域有较好的波浪消减作用,涨急时刻有效波高大于落急时刻有效波高.海

滩养护工程主要使得坝顶、沙坝后侧及两沙坝间有效波高发生改变:坝顶有效波高增加约 10%,沙坝后侧有效波高削减明显,达 15.4%~30.8%,沙坝之间有效波高削减约 10%。滩肩前方海域有效波高减小,涨潮波高减小量多于落潮波高减小量。

综上,侵蚀砂质海滩修复可在岸线两端修建人工岬头,形成人工岬湾,减弱岬湾内的海岸动力;同时进行滩肩补沙和修建水下涉坝,进一步减弱沙坝后侧水动力,沙坝也可对海滩提供长期喂养沙源,减少海岸侵蚀。

### 参考文献:

- [1] ADAM D G, ANDREW S C, KATIE M P, *et al.* Learning from the impacts of superstorm sand, chapter five: Hurricane sandy: Did beach nourishment save New Jersey[M]. [S. l.]: Academic Press of Elsevier, 2015.
- [2] 严恺,梁其荀. 海岸工程[M]. 北京:海洋出版社,2002.  
YAN Kai, LIANG Qixun. Coastal engineering[M]. Beijing: China Ocean Press,2002.
- [3] 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.
- [4] 张简凡. 岬湾人工沙滩设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
ZHANG Jianfan. Research of design method of artificial headland bay beaches [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [5] 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.
- [6] ANDREW J, COOPER G, PILKEY E A. Pitfalls of shoreline stabilization: Selected case studies [M]. [S. l.]: Springer, 2012.
- [7] 曹坤,拾兵,赵多苍,等. 人工沙坝喂养侵蚀海滩效果研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(4): 127.  
CAO Kun, SHI Bing, ZHAO Duocang, *et al.* Study of the effect of the artificial sandbark on the eroded beach nourishment[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(4): 127.
- [8] PRICE T, RUESSINK G. State dynamics of a double sandbar system[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(6): 659.
- [9] CASTELLE B, TURNER I L, BERTIN X, *et al.* Beach nourishments at Coolangatta Bay over the period 1987—2005: Impacts and lessons [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(9): 940.
- [10] 杨燕雄,贺鹏起,张甲波,等. 北戴河西海岸人工岬湾养滩规划研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 418.  
YANG Yanxiong, HE Pengqi, ZHANG Jiabo, *et al.* Artificial headland-bay beach trial research in Western Beach of Beidaihe [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 418.
- [11] 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]. Waterway Engineering, 2008(7): 7.
- [12] 匡翠萍,王佳元,马悦. 洋河-葡萄岛岸线整治与修复工程设计方案研究技术报告[R]. 秦皇岛:河北省地矿局秦皇岛矿产水文工程地质大队,2016.  
KUANG Cuiping, WANG Jiayuan, MA Yue. Report of shoreline evolution and hydrodynamic response to beach nourishment project at Yanghe River-Grape Island Region [R]. Qinhuangdao: Hebei geological and Mineral Bureau Qinhuangdao mineral hydrology and Engineering Geological Brigade, 2016.
- [13] 匡翠萍,冒小丹,顾杰,等. 海域水动力对老虎石海滩养护响应关系分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 689.  
KUANG Cuiping, MAO Xiaodan, GU Jie, *et al.* Analysis of hydrodynamic response to beach nourishment at Tiger-Rock Beach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 689.
- [14] 匡翠萍,王彬谕,顾杰,等. 福建海坛湾波流双向耦合下水动力特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(8): 1212.  
KUANG Cuiping, WANG Binyu, GU Jie, *et al.* Study of hydrodynamics using a bi-directional wave-current coupled model in Haitan Bay, Fujian Province[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(8): 1212.
- [15] 匡翠萍,戚健文,蒋茗韬,等. 泥沙输运与海床演变对曹妃甸港口工程的响应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1840.  
KUANG Cuiping, QI Jianwen, JIANG Mingtao, *et al.* Responses of sediment transport and bed evolution to Caofeidian Harbour Project[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1840.
- [16] 张雅卓,练继建. 基于水动力特性的河道景观设计方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2012, 45(1): 64.  
ZHANG Zhuoya, LIAN Jijian. Method of river landscape design based on the hydrodynamic characteristics [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2012, 45(1): 64.
- [17] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 & MIKE 3 flow model hydrodynamics and transport module science documentation [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [18] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 spectral wave module scientific documentation [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [19] 李文斌. 新开河口至南山岸线海滩修复工程水沙动力及水体交换响应特征研究[R]. 上海:同济大学,2018.  
LI Wenbin. A study on responses of hydrodynamic and sediment and water exchange to beach nourishment project on Xinkai River mouth-Nanshan Coast [R]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [20] 国家海洋信息中心. 2015 年潮汐表[M]. 北京:海洋出版社,2015.  
The National Marine Data and information Service. Tide tables of 2015[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [21] 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.