

# 胶莱人工河道水质点输运轨迹的数值模拟

吴相忠, 张庆河

(天津大学 建筑工程学院暨港口与海洋工程教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 利用二维水动力数学模型模拟胶莱人工河道潮流运动, 并分析了胶州湾湾口设置潜堤前后胶莱人工河道水质点的运动轨迹和水位变化过程。结果表明, 开通胶莱人工河道能够使黄海的胶东湾海水向渤海的莱州湾输运, 但不设置潜堤时从胶州湾到莱州湾的海水输运平均流速较小; 设置潜堤后胶州湾水位高于莱州湾水位的时间变长, 从黄海到渤海之间的水体输运能够得到加速。计算结果还表明, 潜堤顶部与平均水面距离较小时, 黄、渤海之间水体输运较快。

**关键词:** 胶莱人工河道; 潜堤; 水体输运; 二维水动力模型

中图分类号: TV91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)07-0059-07

渤海是中国唯一的半封闭内海, 海域面积达 77 284 km<sup>2</sup>, 具有独特的资源优势和地缘优势, 是环渤海经济圈的重要支持系统。然而, 随着中国经济建设的快速发展, 近年来渤海的环境污染也在不断加重, 生态环境急剧恶化<sup>[1,2]</sup>, 急需采取各种保护措施以恢复渤海生态环境。莱州湾是渤海的一部分, 也是一个半封闭的海湾, 湾内外的水体交换缓慢, 湾顶入海污染物质不能很快得到稀释扩散, 生态环境持续恶化。虽然胶州湾属于黄海, 但也因为其半封闭性质而遭遇环境恶化的困扰<sup>[3,4]</sup>。为此, 一些研究者提出了开凿胶莱人工河道来联通胶莱两湾, 依靠黄渤海的潮位差使海水由胶州湾向莱州湾流动, 以加快黄渤海的水体交换, 缓解渤海的污染问题<sup>[5]</sup>。胶莱人工河道是一个重大工程, 涉及社会、经济、技术、生态环境等多方面因素<sup>[6-8]</sup>, 其工程究竟是否可行, 需要从多学科多角度综合研究, 作者将主要从水动力学的角度来探究胶莱人工河道是否能够有效实现从黄海到渤海的水体交换。

海域的水体交换对于海域环境有重要影响, 不少学者应用不同的水体交换数学模型对不同海域的水体交换进行了一系列研究<sup>[9-20]</sup>。匡国瑞等<sup>[9]</sup>基于箱式模型的水交换方法给出了乳山湾一个潮周期内的水交换率, 但该方法往往过高估计海域的水交换能力。Signell 等<sup>[10]</sup>采用水质点追踪法研究了波士顿港区与马萨诸塞湾的水交换。董礼先等<sup>[11,12]</sup>建立了二维对流-扩散型的海湾水交换数值模型, 对象山港的不同区域水交换控制机理作了初步探讨。赵亮等<sup>[13]</sup>利用 ECOM 三维水动力模型对胶州湾潮波系统进行

数值模拟, 并提出水体交换新概念, 采用标识质点追踪方法研究了标识质点的运移规律。魏皓等<sup>[14]</sup>采用三维浅水斜压水动力模型和物质浓度输运的水质模型, 并引入半交换时间方法研究了渤海海域的水交换能力。Liu<sup>[15]</sup>等通过 POM 三维水动力模型耦合扩散模型采用平均存留时间方法估计了胶州湾内水体的平均存留时间。娄海峰等<sup>[16]</sup>通过 MIKE21 软件中的二维数值模型和示踪浓度对流-扩散方程研究象山港狭湾内、外水体交换问题, 并采用标志质点追踪方法研究了水体交换率。Oliver 与 Claus<sup>[17]</sup>采用三维非静压 N-S 方程的数值模型研究了潮汐、密度、水流及不同港口结构对水交换的影响。王聪等<sup>[18]</sup>采用三维 ECOM 数值模型对大亚湾的潮流场进行了数值模拟, 并分别用 Lagrange 质点追踪法和物质输运扩散两种方法研究了大亚湾的水交换能力。王宏等<sup>[19]</sup>对国内外海水交换的研究进展进行了总结。

总体来看, 海域水交换的研究一般采用箱式模型、标识质点的拉格朗日数值跟踪以及求解对流-扩散方程等方法; 从空间维数上看, 也分为二维和三维模型。质点追踪模型能够刻画出海域内水交换的不均匀性, 以及由水体流动引起的对流输送作用, 因此采用拉格朗日数值跟踪方法来研究胶莱人工河道是否能够有效实现胶州湾到莱州湾的水体交换是合理的。另外, 由于胶莱运河模拟涉及到黄海与渤海

收稿日期: 2009-03-09; 修回日期: 2009-05-07

作者简介: 吴相忠(1980-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 主要从事海岸水动力研究, 电话: 15133109651, E-mail: wxzjinan@163.com; 张庆河, 通信作者, 主要从事港口与海岸工程研究, E-mail: qhzhang@tju.edu.cn

的广阔区域,而胶莱人工河道等局部区域又需要有较细的计算网格,三维模型计算量较大,且计算区域中需要考虑潜堤影响,因此,采用可以合理模拟潜堤情况下的二维模型是一种较好的选择。为此,作者将采用 ADCIRC 二维水动力数学模型模拟胶莱人工河道开通后的水流流动规律,并结合拉格朗日数值跟踪方法给出水质点输运轨迹,分析胶莱人工河道对胶州湾到莱州湾水体输运的影响。

## 1 二维水动力数学模型

### 1.1 ADCIRC 模型简介

ADCIRC 二维水动力计算模型可以应用于海洋、海岸、河口区域的二维水动力计算,在处理潮流动边界、复杂工程建筑物(包括潜堤)边界等方面具有强大的功能<sup>[20-22]</sup>。该模型控制方程的原始形式是二维浅水方程:

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (3)$$

其中,  $x$  和  $y$  分别表示水平横轴和纵轴坐标,  $t$  为时间,  $U$  和  $V$  分别为沿  $x$  和  $y$  方向的深度平均流速,  $\zeta$  为平均水面之上的高度,  $H$  为总水深,  $f$  为柯氏力系数,  $p_s$  为表面大气压,  $\rho_0$  为水密度,  $\tau_{sx}$  与  $\tau_{sy}$  为表面切应力(如风应力),  $\tau_{bx}$  与  $\tau_{by}$  为底部摩擦力,  $D_x$  与  $D_y$  为扩散项,  $B_x$  与  $B_y$  为斜压梯度项,  $(\eta + \gamma)$  表示牛顿潮势、地球潮等作用,  $g$  为重力加速度。

ADCIRC 采用空间有限元法和时间有限差分法相结合的方法求解上述方程。为了减小有限元模拟出现的振荡和不守恒等数值问题, ADCIRC 模型在求解时将连续性方程变为通用波动连续性方程求解,具体的表达式可参看文献[20]和[21]。

原始的 ADCIRC 模型采用常涡黏系数模型,为了更好地描述网格局部加密的影响,本文采用 Samagorinsky 亚网格模型计算水平涡黏系数<sup>[21]</sup>,即

$$A_M = c\Delta x\Delta y \left[ \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right]^2 + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中  $A_M$  为水平涡黏系数,  $u, v$  为水平流速,  $\Delta x, \Delta y$  为空间步长,  $c$  为常数。

### 1.2 质点输运轨迹的计算方法

作者采用拉格朗日数值跟踪方法模拟胶莱人工河道质点输运轨迹,进而研究胶莱人工河道对胶州湾到莱州湾水体交换的影响。其计算方法是,首先用水动力模型计算流场,待流场稳定后,在海域内布放标识质点,利用计算得到的欧拉流场,计算标识质点每一时刻的拉格朗日流速,进而得到下一时刻质点的位置,连续计算最终得到质点运动轨迹。

质点运动轨迹的计算过程为:首先待流场稳定后确定初始时刻  $t_0$  和质点初始位置  $X_0(x_0, y_0, t_0)$ , 然后根据流场计算结果得到质点所在三角形单元三结点上的欧拉流速,通过插值法得到初始时刻的质点瞬时流速  $u(x_0, y_0, t_0)$ , 假定质点开始运动  $t$  时段内的平均流速可用初始时刻  $t_0$  的流速近似,则经过  $t$  后,  $t_1 = t_0 + t$  时刻质点的位置近似为:

$$X_1(x_1, y_1, t_1) = X_0(x_0, y_0, t_0) + u(x_0, y_0, t_0)\Delta t \quad (5)$$

重复上述计算步骤,便可以得到质点运动轨迹,即标识质点在  $t_N = t_0 + N t$  时刻的位置为:

$$X_N = X_0(x_0, y_0, t_0) + \sum_{i=0}^{N-1} u(x_i, y_i, t_i)\Delta t \quad (6)$$

### 1.3 模型设置

采用 ADCIRC 二维水动力计算模型对胶莱人工河道条件下的水动力过程进行数值模拟,为深入研究人工河道对胶州湾和莱州湾之间水体交换的影响,在胶州湾湾口设置了潜堤(图 1),对设置潜堤后的情况进行数值模拟。表 1 列出了 5 个计算工况,其中“无”表示不设潜堤,潜堤顶高程表示潜堤顶部与平均海平面的距离,负值表示在海平面以下。

模型开边界采用中国海域潮汐预报软件 Chinatide<sup>[23]</sup>计算水位值确定,计算过程暂未考虑风、浪作用。计算时间步长为 0.5 s,摩阻系数取为 0.000 5。采用 Chinatide 预报的潮汐作为开边界,从 2003 年 11 月 7 日开始连续模拟 30 d 潮波运动。从静止流场起算,模拟 3 d 后潮波达到稳定。

计算时采用三角形网格,图 2 给出了胶莱人工河道模型计算的网格剖分,胶州湾和莱州湾附近区

域以及胶莱人工河道均进行了网格加密,其中胶莱人工河道水深取为 12 m, 宽度为 1 000 m<sup>[24]</sup>。

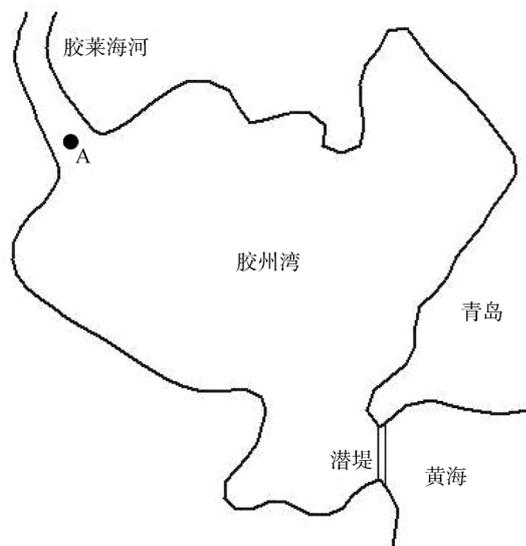


图 1 胶州湾口潜堤位置示意

Fig. 1 Location of submerged dike in the entrance of the Jiaozhou Bay

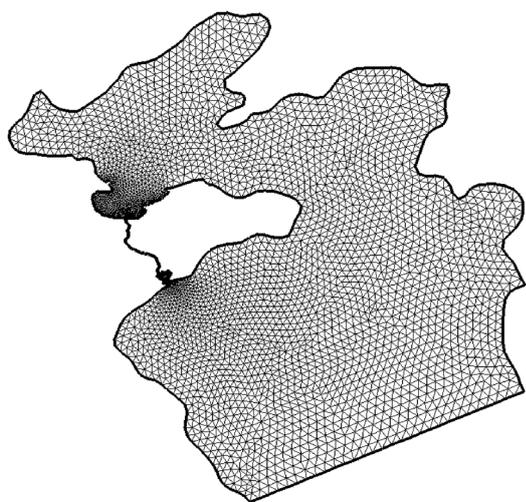


图 2 胶莱人工河道水动力计算网格

Fig. 2 Computational grid of hydrodynamic simulation for the artificial Jiaolai Canal

表 1 胶莱人工河道各工况潜堤顶高程

Tab. 1 Elevations on top of submerged dike in the artificial Jiaolai Canal for different cases

工况	潜堤顶高程(m)
1	无
2	-0.1
3	-0.3
4	-0.5
5	-0.7

## 2 胶莱人工河道模型的计算结果及分析

### 2.1 潮位与流场

图 3 显示了设置潜堤前后胶莱人工河道胶州湾入口处的水位、流速和流向变化过程,图 4 则显示了设置潜堤前、后胶莱人工河道两端胶州湾与莱州湾入口处的水位差变化过程。由图 3 与图 4 可知,胶州湾湾口设置潜堤前后海域潮位过程发生明显变化。设置潜堤前,胶莱人工河道胶州湾入口处最低潮位为-1.5 m,最高潮位为 2 m,最大潮差约 3.5 m;在数值模拟的 27 d 时间内,胶莱人工河道两端最大水位差约为 4.5 m,而胶州湾水位高于莱州湾水位的时间约为 13.6 d,莱州湾水位高于胶州湾水位的时间约为 13.4 d,胶、莱两湾在模拟时段内的平均水位差仅为 0.01 m。设置潜堤后(以工况 2 为例),胶莱人工河道胶州湾入口处高潮位降低、低潮位抬高,潮差明显变小,其最低潮位为-0.45 m,最高潮位为 0.75 m,最大潮差仅有 1.2 m。胶莱人工河道两端最大水位差也明显变小,仅为 3 m 左右,但胶州湾水位高于莱州湾水位的时间变长,达 14.0 d,胶、莱两湾在模拟时段内的平均水位差有所增大,变为 0.05 m。从上述潮位变化的结果看,设置潜堤是有利于增强从胶州湾到莱州湾的净流动的。

图 5 和图 6 显示了设置潜堤前后胶莱人工河道不同位置处涨急时的流场。图 7 显示了设置潜堤前后(以工况 1 和工况 2 为例)胶莱人工河道胶州湾入口处、莱州湾入口处、胶莱人工河道中部(从胶州湾到莱州湾全部里程约 5/8 处)流速变化过程(为节省篇幅,仅选取了部分代表时段)。从流场角度看,人工河道内的流动存在较大的相位差。设置潜堤前,当胶州湾入口处为涨急时(图 5a),莱州湾入口处水流也流向运河(图 5c),由于两端水流的顶托作用,人工河道中部(5/8 里程处)水流流速接近为 0(图 5b)。设置潜堤后,当胶州湾入口处为涨急时(图 6a),人工河道的流向未发生变化,在河道内不存在流速接近为 0 的位置(图 6b),莱州湾入口处流动也是从胶州湾流向莱州湾(图 6c)。为节省篇幅,设置潜堤前后胶莱人工河道不同位置处落急时的流场未列出。

设置潜堤前后流场均为双向往复流动,流动的周期性没有改变,但设置潜堤前后的流速有较明显变化。设置潜堤前,胶莱人工河道胶州湾入口处涨潮最大流速为 0.33 m/s,落潮最大流速为 0.38 m/s;莱

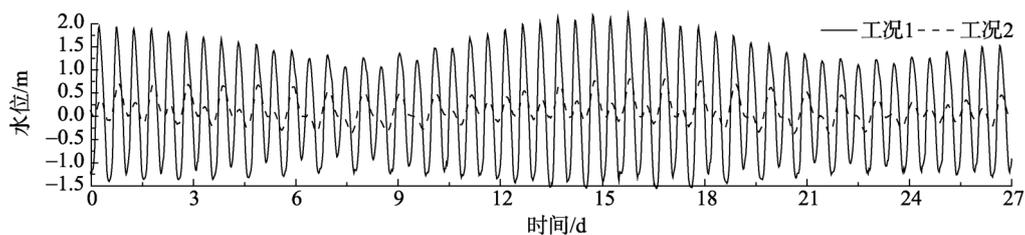


图 3 工况 1, 2 胶莱人工河道胶州湾入口处水位过程

Fig. 3 Water level processes at the entrance of the Jiaozhou Bay in the artificial Jiaolai Canal for case 1 and 2

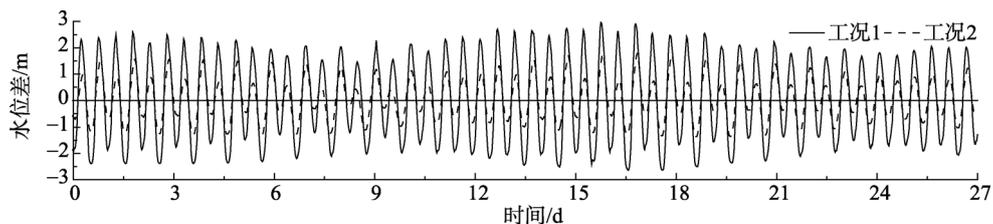
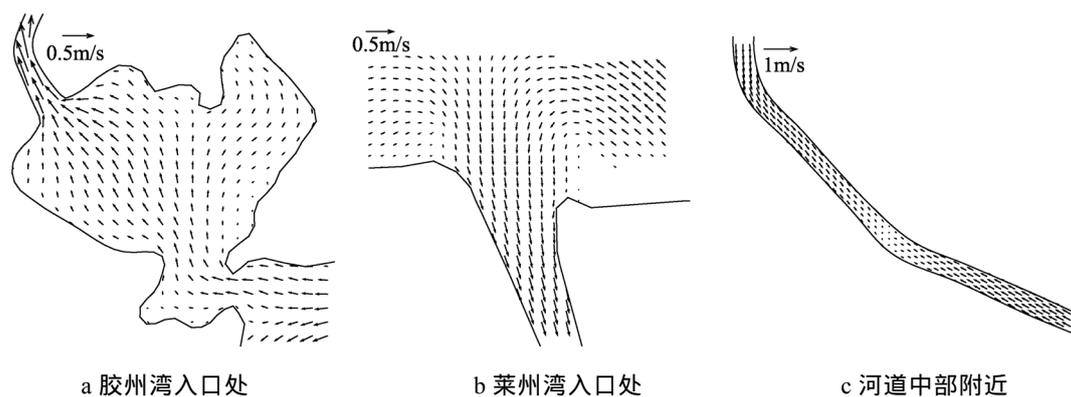


图 4 工况 1, 2 胶州湾与莱州湾入口处的水位差过程

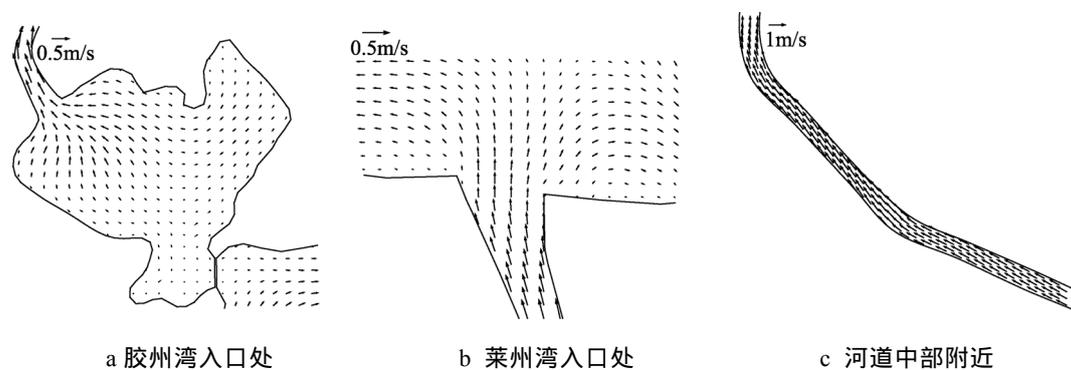
Fig. 4 Water level difference processes at the entrance of the Jiaozhou Bay and the Laizhou Bay for case 1 and 2



a 胶州湾入口处                      b 莱州湾入口处                      c 河道中部附近

图 5 工况 1 胶州湾入口处(涨急状态)、莱州湾入口处、胶莱人工河道中部同步流场

Fig. 5 Flow field at the entrance of the Jiaozhou Bay (at time of maximum flood velocity), the Laizhou Bay and the middle of the artificial Jiaolai Canal for case 1



a 胶州湾入口处                      b 莱州湾入口处                      c 河道中部附近

图 6 工况 2 胶州湾入口处(涨急状态)、莱州湾入口处、胶莱人工河道中部同步流场

Fig. 6 Flow field at the entrance of the Jiaozhou Bay (at time of maximum flood velocity), the Laizhou Bay and the middle of the artificial Jiaolai Canal for case 2

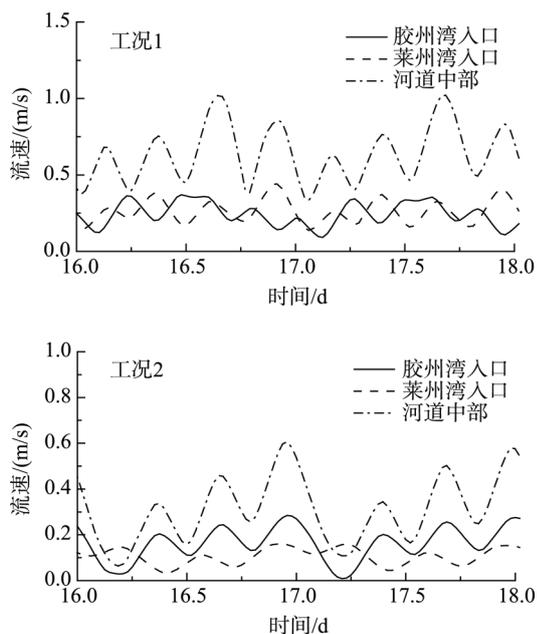


图 7 工况 1, 2 胶州湾入口处、莱州湾入口处、胶莱人工河道中部流速变化过程

Fig. 7 Flow velocity processes at the entrance of the Jiaozhou Bay, the Laizhou Bay and the middle of the artificial Jiaolai Canal for case 1 and 2

州湾入口处涨潮最大流速为 0.46 m/s, 落潮最大流速为 0.33 m/s; 胶莱人工河道中部涨潮(胶州湾至莱州湾方向)最大流速为 0.83 m/s, 落潮最大流速为 1.02 m/s。设置潜堤后(以工况 2 为例), 胶莱人工河道胶州湾入口处涨潮最大流速为 0.28 m/s, 落潮最大流速为 0.24 m/s; 莱州湾入口处涨潮最大流速为 0.18 m/s, 落潮最大流速为 0.14 m/s; 胶莱人工河道中部涨潮最大流速为 0.60 m/s, 落潮最大流速为 0.46 m/s。设置潜堤后胶州湾入口处、胶莱人工河道、莱州湾入口附近流速均有不同程度的减小, 但流速变化使得从胶州湾向莱州湾的相对流动增强, 说明设置潜堤有利于加快胶州湾到莱州湾的水体净输送。

## 2.2 水质点输运轨迹的计算结果及分析

流场计算稳定后, 在胶莱人工河道胶州湾入口处布放标识水质点 A(图 1), 采用质点输运轨迹数值计算方法, 计算得到质点 A 的运动轨迹。设置潜堤前后水质点 A 在模拟时段内的运动轨迹分别如图 8, 9 所示。由于流场分布的不均匀性和潮流运动的非恒定性, 不同时刻投放质点的运动轨迹并不完全一样, 本文仅以涨急时刻投放标识质点为例进行计算。图 10 显示了各工况水质点 A 随时间向莱州湾方向运动的距离, 表 2 列出了各工况水质点 A 平均每天运动

距离、沿胶莱人工河道从胶州湾运动到莱州湾所需要的时间以及通过胶莱人工河道的日均流量。

由图 8, 9, 10, 表 2 所显示的计算结果可知, 胶莱人工河道开通后, 的确会产生由胶州湾通过胶莱人工河道向莱州湾运动的余流, 但余流速度较小, 在模拟的 27 d 时间内水质点 A 未能到达莱州湾。估算水质点的平均运动速度为 2.1 km/d, 通过胶莱人工河道的平均日流量约为 2.6 万 m<sup>3</sup>/d, 水质点通过胶莱人工河道大约需要 57 d。从计算结果看, 单纯开通胶莱人工河道而不采取其他工程措施时, 从胶州湾到莱州湾的水体输运速度很低, 较难实现黄、渤海之间的充分水体交换。

设置潜堤后, 水质点平均余流速度明显增大。工况 2 标示水质点 A 的平均输送速度变为 8.6 km/d, 经过胶莱人工河道的平均日流量约为 10.6 万 m<sup>3</sup>/d, 水质点从胶州湾输运到莱州湾只需约 14 d。由图 9 和表 2 也可得知, 潜堤顶高程对莱州湾与胶州湾之间的水体输运有明显影响。就计算的几种工况看, 潜堤顶部距平均海面越近, 对水体输运所起的作用越大, 经过胶莱人工河道进入渤海的水体越多。

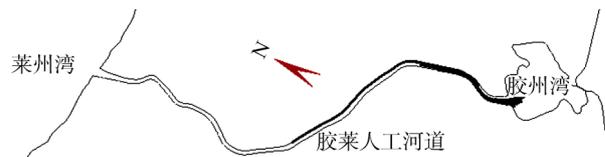


图 8 工况 1 标识水质点 A 运动轨迹  
Fig. 8 Trajectory of water particle A for case 1



图 9 工况 2 标识水质点 A 运动轨迹  
Fig. 9 Trajectory of water particle A for case 2

## 3 结语

通过二维水动力数学模型模拟了胶莱人工河道设置潜堤前后的潮流运动, 分析了标识水质点的运动轨迹和潜堤顶高程对黄渤海水体交换的影响, 得到以下主要结论:

1) 开通胶莱人工河道而不采取其他工程措施时, 存在胶州湾向莱州湾的水体余流, 但水体运动速度较为缓慢, 较难实现黄海到渤海水体的充分输送。

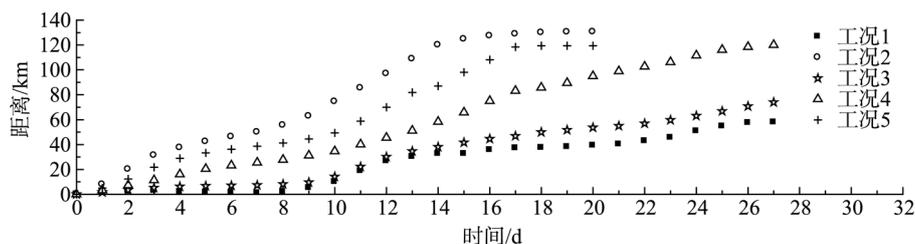


图 10 不同工况标识水质点 A 的运动距离  
Fig. 10 Transport distance of water particle A for 5 cases

表 2 不同工况水质点输运计算结果比较

Tab. 2 Comparison of computational results of water particle transport for 5 cases

工况	标识水质点 平均运动距离(km/d)	通过人工河道大约需要时间(d)	人工河道平均日流量 (万 m <sup>3</sup> /d)
1	2.1	57	2.6
2	8.6	14	10.7
3	6.6	18	8.2
4	4.4	27	5.5
5	2.7	44	3.3

2)开通胶莱人工河道并在胶州湾湾口设置潜堤后,胶州湾水位发生明显变化,潮差减小但平均潮位提高,胶州湾水位高于莱州湾水位的时间变长,胶、莱两湾平均水位差增大;另外,除胶州湾入口处涨潮流速有所增大外,胶莱人工河道流速均有所减小,特别是莱州湾入口附近涨、落潮流速降幅明显。这些结果表明设置潜堤后黄海到渤海之间的水体输运速度加快。

3)不同潜堤顶高程的计算结果表明,潜堤顶高程对水体输运存在明显影响,保持较高的潜堤顶高程,对加速黄海到渤海的水体输运有明显作用。

需要指出的是,在实际工程中,除了潜堤可加速黄渤海水体输运外,在胶州湾湾口建立大坝和闸门并通过控制闸门的开闭时间也可以影响胶州湾潮位变化过程,从而可能达到更为理想的加速水体交换的效果。建立大坝还可以通过船闸来保持胶州湾内的船舶航行乃至实现胶州湾到莱州湾的直航,缩短船舶绕行山东半岛的航程。如何通过控制闸门实现水体从胶州湾向莱州湾的加速流动有待进一步研究。

最后需要再次强调,开通胶莱人工河道是非常复杂的系统工程,涉及到社会、经济、环境各个层面,本文只是从水动力角度说明了实现水体输运和交换的可能性,并不能说明整个工程的可行性。

参考文献:

[1] 张玉珍,张丽玉,曾悦,等. 我国近岸海域环境现状

及保护对策[J]. 山东环境, 2003, 2: 32-34.

[2] 蒋文婷. 浅谈胶莱两湾污染区的综合治理[J]. 海岸工程, 2007, 26(3): 28-35.

[3] 印萍, 路应贤. 胶州湾的环境演变及可持续利用[J]. 海岸工程, 2000, 19(3): 14-22.

[4] 孙英兰, 陈时俊, 俞光耀. 海湾物理自净能力分析和水质预测——胶州湾[J]. 山东海洋学院学报, 1988, 18(2): 60-66.

[5] 王诗成. 黄渤海区域生态协调发展的新思维——建设胶莱人工河道战略工程[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 280-284.

[6] 王娜, 王诗成. 修建胶莱人工河道对海洋渔业及生物多样性保护的影响预测[J]. 齐鲁渔业, 2007, 24(12): 51-54.

[7] 雷仲敏, 金懿, 吴蕾. 胶莱人工河道开通运行的技术经济分析[J]. 青岛科技大学学报(社会科学版), 2007, 23(4): 50-54.

[8] 霍有光. 评开凿胶莱海洋运河的必要性与可行性[J]. 水利经济, 2007, 9: 1-4.

[9] 匡国瑞, 杨殿荣, 喻祖祥, 等. 海湾水交换的研究——乳山东湾环境容量初步探讨[J]. 海洋环境科学, 1987, 6(1): 13-23.

[10] Signell R P, Butman B. Modeling tidal exchange and dispersion in Boston Harbor[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C10): 15 591-15 606.

[11] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水体交换数值研究. 对流

- 扩散型的水交换模式[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(4): 410-415.
- [12] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水体交换数值研究 . 模型的应用和水交换研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(5): 465-470.
- [13] 赵亮, 魏皓, 赵建中. 胶州湾水交换的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 23-29.
- [14] 魏皓, 田恬, 周锋, 等. 渤海水交换的数值研究——水质模型对半交换时间的模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 519-525.
- [15] Liu Zhe, Wei Hao, Liu Guang Shan, *et al.* Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(1): 25-35.
- [16] 娄海峰, 黄世昌, 谢亚力. 象山港内水体交换数值研究[J]. 浙江水利科技, 2005, 4: 8-12.
- [17] Oliver S, Claus Z. Water exchange and sedimentation in an estuarine tidal harbor using three-dimensional simulation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(5): 410-414.
- [18] 王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. 南方水产, 2008, 4(4): 8-15.
- [19] 王宏, 陈丕茂, 贾晓平, 等. 海水交换能力的研究进展[J]. 南方水产, 2008, 4(2): 75-80.
- [20] Luettich R A, Westerrink J J. ADCIRC User Manual: a (paralle1) advanced circulation model for oceanic, Coastal and Estuarine Waters[EB/OL]. <http://www.marine.unc.edu/CCATS>, 2000-12-27.
- [21] 曹永华, 张庆河. 黄骅港海域二维流场分析[J]. 中国港湾建设, 2005, 3: 1-4.
- [22] Westerink J J, Luettich R A, Militello A. Leaky internal-barrier normal-flow boundaries in the ADCIRC coastal hydrodynamics code[R]. Vicksburg, MS:U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2001.
- [23] 李孟国, 郑敬云. 中国海域潮汐预报软件 Chinatide的应用[J]. 水道港口, 2007, 28(1): 65-68.
- [24] 王诗成. 建造人工河道, 贯通胶莱两湾[EB/OL]. <http://www.hycflt.com.cn/JLCanal/ShowArticle.asp?ArticleID=4475>, 2007-09-05.

## Numerical simulation of water particle transport trajectory in the artificial Jiaolai Canal

WU Xiang-zhong, ZHANG Qing-he

(School of Civil Engineering, Tianjin University & Key Laboratory of Harbor and Ocean Engineering, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Received: Mar., 9, 2009

**Key words:** the artificial Jiaolai Canal; submerged dike; water transport; 2D hydrodynamic model

**Abstract:** Tidal flow of the artificial Jiaolai Canal was simulated by a two-dimensional hydrodynamic model. Lagrangian trajectories of water particles and the variation of water elevation were analyzed with or without consideration of a submerged dike at the entrance of the Jiaozhou Bay. It was shown that the artificial Jiaolai Canal could promote the sea water transport from the Jiaozhou Bay of the Yellow Sea to the Laizhou Bay of the Bohai Sea, but the mean flow velocity was small before submerged dike being built. Had a submerged dike been built, the duration, during which the water level of the Jiaozhou Bay was higher than that of the Laizhou Bay, would become longer and thus speed up the water transport from the Yellow Sea to the Bohai Sea. In addition, if the distance between the top of the submerged dike to the mean water level were small. The water transport from the Yellow Sea to the Bohai Sea would be faster.

(本文编辑: 刘珊珊)