

# 三维质点追踪模型及其在胶南海域的应用

张学庆, 孙英兰

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 在已建立的变边界河口、陆架、海洋模型 (ECOM) 的基础上添加一个变边界质点追踪模块, 研究胶东半岛南海域的物质输运特征, 讨论了三维空间中, 水质点在潮流作用下的迁移特点。该模型在近海海洋环境管理上具有实用价值。

**关键词:** 三维; 变边界; 质点追踪模型; 胶南海域; 潮汐

**中图分类号:** X145      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2006)06-0873-04

随着沿海工业、近海工程以及海洋开发的发展, 近岸海域遭到较严重的污染, 致使海洋环境质量明显下降, 近岸海域的污染已经成为沿海国家关心的环境问题。数值模拟方法是当前研究污染物输运规律的重要方法。但是, 近岸海域地形复杂, 特别是潮滩的存在, 对研究物质输运规律带来困难, 因此, 近岸海域物质输运模型的研究具有重要的实际意义。

河口或浅海物质输运模型大多采用二维模型, 从动力学意义上来说, 陆架或浅海动力学采用三维模型是必须的<sup>[1]</sup>。建立模型的方法主要有 Euler 和 Euler-Lagrange 方法, 其中 Euler-Lagrange 方法可给出污染物质三维运动轨迹、滞留时间、影响范围等, 在海洋环境保护领域应用广泛。在正交曲线、坐标下, 三维质点运动轨迹的计算比较困难, 国内研究不多<sup>[2,3]</sup>。管卫兵等<sup>[3]</sup>在 POM 模型的基础上添加了质点追踪模型并应用在杭州湾, 但该模型是定边界模式, 用在有较大潮滩的河口海湾存在极大的限制。为此, 本文对定边界质点追踪模型进行改进, 适应具有较大潮滩的河口、海湾物质输运研究。通过在实际海域的应用检验, 该模型计算结果令人满意。

## 1 模型简介

变边界 ECOM 模型(河口、陆架、海洋模型)已成功应用在胶南海域、胶州湾及渤海湾<sup>[4-6]</sup>, 本文在该模型的基础上添加质点追踪模块研究污染物的迁移。潮流动力学模式文献<sup>[6]</sup>已有详述, 这里简要介绍质点追踪模型。

### 1.1 质点追踪模型

粒子的轨迹通过求解以下  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向的速度方程获得:

$$\frac{dx}{dt} = u \quad \frac{dy}{dt} = v \quad \frac{dz}{dt} = w + \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

式中  $u$ ,  $v$ ,  $w$  分别为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上粒子的速度。 $D = H + h$  为瞬时总水深;  $w$  和  $z$  坐标系下的垂向速度  $w$  有如下的关系:  $w = w_0 - (1 + \lambda) \frac{d}{dt} - \frac{dh}{dt}$ ,  $u$ ,  $v$  通过线性插值方法来获得, 因此在一个网格内粒子的速度分量只是相应方向的函数, 例如  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$ ,  $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ 。

### 1.2 求解方法

求解式(1)可用经典的数值积分格式, 例如龙格库塔方法或解析解。文献<sup>[7]</sup>给出的解析解为

收稿日期: 2005-07-25; 修订日期: 2006-01-04

作者简介: 张学庆(1974-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事海洋环境影响与预测研究。

E-mail: z-xq2004@163.com

$$x_T = \frac{u_0}{u} x \left( e^{\frac{t}{x}} - 1 \right) \quad y_T = \frac{v_0}{v} y \left( e^{\frac{t}{y}} - 1 \right) \quad z_T = \frac{w_0}{w} z \left( e^{\frac{t}{z}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中  $t$  为时间步长;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为经过一个时间步长后粒子在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的经过的距离;  $u_0$ 、 $v_0$ 、 $w_0$  分别为粒子在每一个时间步开始时的速度。

由于动力学模型采用水平正交曲线网格, 垂向坐标, 为了避免坐标来回转换插值造成的误差, 在坐标变换平面内进行追踪, 输出结果时再将粒子坐标变换到直角坐标系内。

### 1.3 边界条件

**动边界条件** 动力学模型采用变边界模式, 因此质点追踪模式也是变边界的。设质点的当前时刻为  $(n+1)t$ , 在  $(n+1)t$  时刻质点所在的网格点若为湿点, 追踪粒子新的位置; 若所处的网格点为潮滩, 即为干点, 存储质点的位置, 退出计算, 等到下个时刻计算时使用。

**开边界条件** 入流时没有质点进入, 出流时质点迁移出计算域, 该粒子不再参与计算, 退出计算程序。

## 2 实例研究

### 2.1 胶南海域潮致欧拉余流场

研究海域包括古镇口湾、龙湾、琅琊湾、棋子湾、黄家塘湾等较大海湾(图1)。文献[4]利用变边界 ECOM 模式模拟了该海域主要分潮  $M_2$ 。该海域岸线较为复杂, 由于岬角效应会形成欧拉余流涡。这些余流涡的存在对水质点的运动有重要影响。该海域余流场的特征为:

图2(a)为该海域表层余流场, 在古镇口湾口门存在一个较强的顺时针余流涡。在龙湾的西南方向有一个逆时针方向余流涡, 琅琊湾内有一个顺时针方向的余流涡, 在棋子湾和黄家塘湾之间有一个范围较大的顺时针余流涡。表层余流速度为  $8 \sim 15 \text{ cm/s}$ , 底层的余流场(图2(b))在结构和表层相似, 由于底摩擦的影响流速比表层小, 在  $5 \sim 10 \text{ cm/s}$  左右。

### 2.2 潮驱动下水质点输运轨迹

物质的长期输运过程不取决于欧拉余流, 而是依赖于在

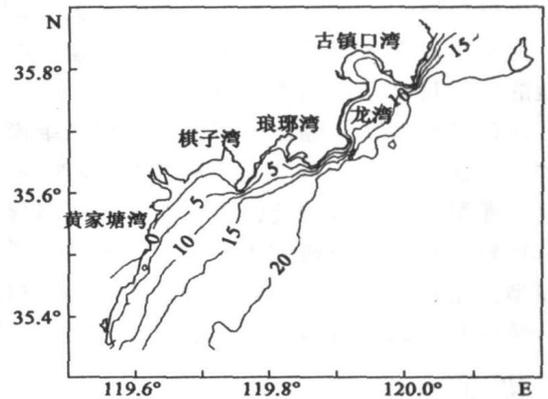


图1 计算域地形

Fig.1 Topography of the computation area

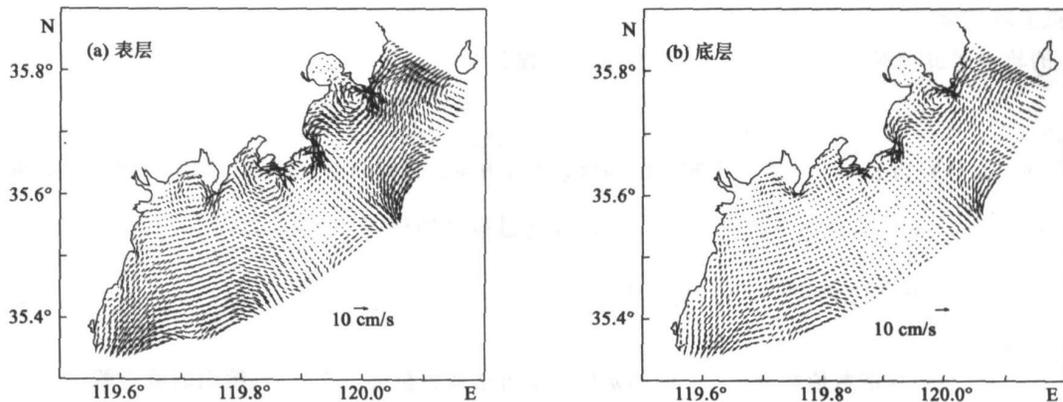


图2 欧拉余流场

Fig.2 Euler residual current field

流场中运动着的流体微团经过一个或多个潮周期后导致的净位移<sup>[1]</sup>。本文进行了一组数值试验，包括该海域水质点的迁移方向。海湾内的水质点迁移特点，潮滩在水质点输运过程中的作用。

(1) 胶南海域水质点迁移特征 在表层 A 点释放一个粒子，追踪 30 d，水质点轨迹如图 3 和图 4。水质点在随潮周期振荡的同时沿岸向西南漂移，30 d 后质点到达黄家塘湾以南。迁移方向是由东北向西南方向，这说明该海区的涨潮流大于落潮流。在垂向上，由于底地形的影响，水质点上升或下降，当水质点由深水区域向浅水区域运动时，由于水体的爬坡作用，水质点也向上运动；反之，水质点向下运动，浅海区域水质点垂向上的运动主要和地形相关。

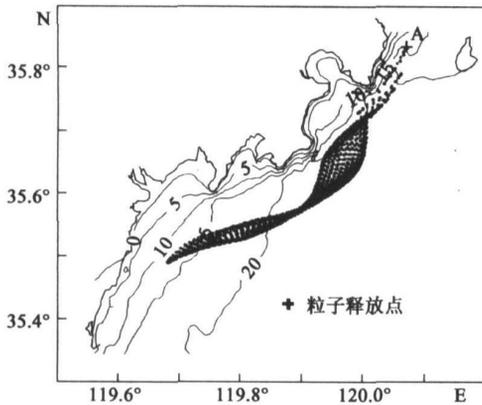


图3 水质点轨迹(二维视图)

Fig.3 2-D particle trajectory (2-Dview)

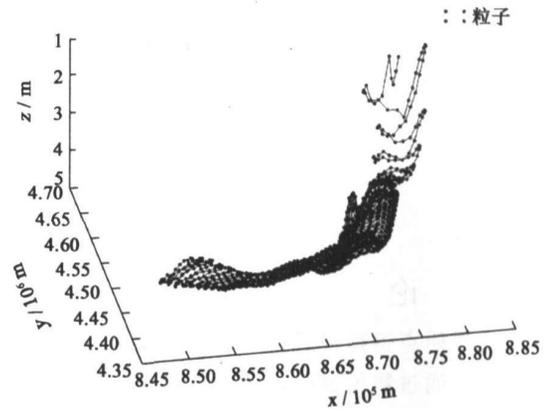


图4 水质点输运轨迹(三维视图)

Fig.4 Particle trajectory (3-D view)

(2) 海湾水质点输运特征 研究海域岸线曲折，多海湾，是胶南海域海珍品养殖基地，分别在古镇口湾、唐岛湾和琅琊湾释放一个粒子，追踪 5 d(图 5)。水质点的迁移和湾口余流密切相关，余流涡的存在阻滞或加速水质点的运动。古镇口湾内余流较小，质点向湾外的迁移速度比较缓慢，唐岛湾和琅琊湾内的水质点则迁移较快。因此湾口内排污时应充分考虑地形的影响和余流场的结构。

(3) 潮滩对水质点轨迹的影响 该海域唐岛湾潮滩面积较大，在该湾 0 m 等深线以深 C1, C2, C3, C4 点上释放粒子，进行追踪 5d，变边界(图 6(a))和定边界模式结果(图 6(b))如图所示，两者结果差别较大，考虑潮滩时，水质点漂移范围较大，这与实际更为符合，对比图 6(a)和图 6(b)，在一个潮周期内，采用变边界模型，质点由岸向外海迁移的距离要大于定边界模型的结果，这说明潮滩的存在利于污染物向外海的输运。另外考虑潮滩可以了解水质点在潮滩上的输运情况，定边界模型的结果不能描述潮滩附近水质点的运动趋势。因此发展一个变动边界模型对研究近岸海域物质输运是十分必要的。

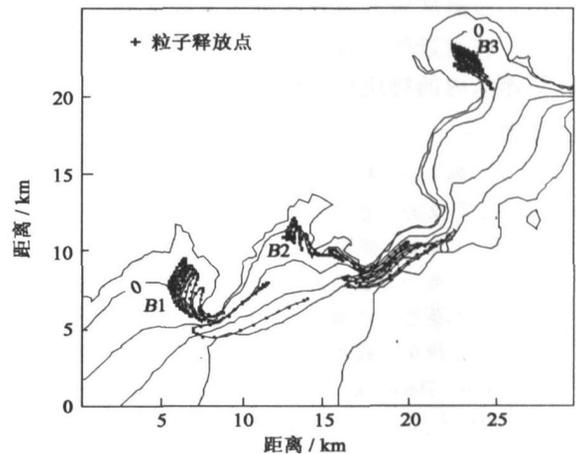


图5 海湾质点输运轨迹

Fig.5 Trajectory of particles in the bay

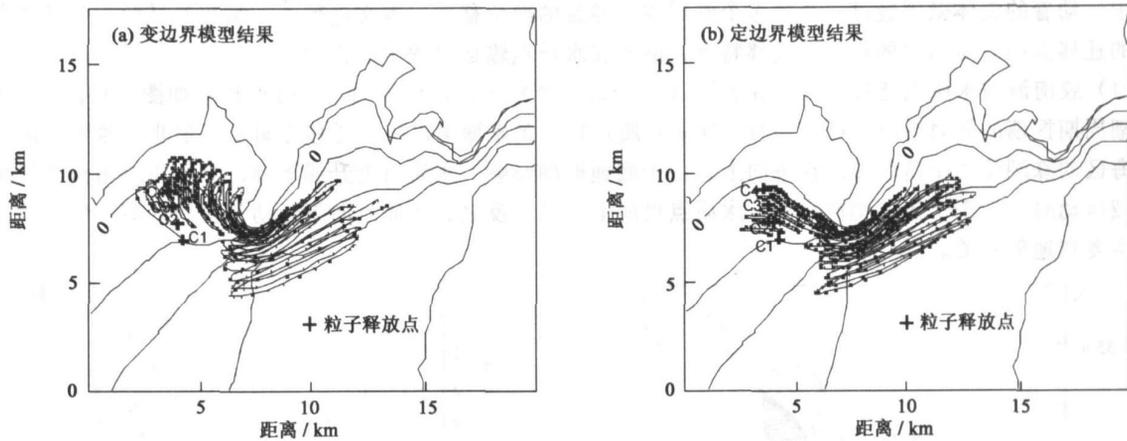


图 6 粒子轨迹

Fig. 6 Trajectory of the particles

### 3 结 论

变边界质点追踪模式可以很好模拟近岸海域物质输运过程, 在沿岸污水排海等海洋环境管理领域有较大的应用价值。通过数值试验得到如下结论:

- (1) 变边界质点追踪模型模拟河口海湾污染物输运轨迹效果良好, 可用在沿岸排污口的选址等海洋环境保护领域。
- (2) 潮滩的存在利于污染物向外海的输运, 海洋环境保护部门应该充分认识到潮间带存在的意义, 对滩涂围垦进行合理的规划和充分的论证。
- (3) 浅海区域水质点在垂向上的运动主要受其底地形的影响。
- (4) 胶南近岸海域涨潮流大于落潮流, 入海污染物沿岸由北向南迁移, 古镇口湾物质输运能力较弱, 唐岛湾和琅琊湾内的物质输运能力较强。

#### 参考文献:

- [1] 冯士筭, 孙文心. 物理海洋数值计算[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1990. 543 - 601.
- [2] 江文胜, 孙文心. 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式 - 模式[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6):682 - 688.
- [3] 管卫兵, 王丽娅, 潘建明, 等. POM模式在河口湾污染物质输运过程模拟中的应用[J]. 海洋学报, 2002, 24(3):9 - 17.
- [4] 张学庆, 孙英兰. 胶南近岸海域三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(4):579 - 582.
- [5] 张越美, 孙英兰. 渤海湾三维变动边界潮流数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 3(3):337 - 344.
- [6] 孙英兰, 张越美. 胶州湾三维变动边界的潮流数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4):355 - 362.
- [7] Frank Wolk. Three-dimensional Lagrangian Tracer Modeling in Wadden Sea Areas[D]. Diploma Thesis, Carl Von Ossietzky University Oldenburg, 2003.

## 3-D particle tracer model and its application in Jiaonan sea area

ZHANG Xue-qing, SUN Ying-lan

(Institute of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** Considering the intertidal belt in the estuary and coastal sea area, a variable boundary mass transport model is needed. In this paper, based on the established ECOM model, a variable boundary particle tracer model is developed, and is applied in Jiaonan sea area. This paper discusses the transfer character of the particle forced by M2 tide in 3-D space. This model can be applied to the management of the marine environment in the estuary and coastal sea area.

**Key words:** 3-D; variable boundary; particle tracer model; Jiaonan sea area; tide