

象山港水交换数值研究*

II. 模型应用和水交换研究

董礼先 苏纪兰

(国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 使用水平二维对流-扩散型水交换模式模拟研究了象山港的水交换,对不同区域的水交换控制机理作了初步探讨。象山港水交换状况与其控制机制的区域性变化很大。牛鼻水道至佛渡水道是一个潮流较强的潮通道,90%水交换周期为5天左右。象山港狭湾内水交换周期较长,湾顶处90%水交换的周期约为80天左右。

关键词 水交换 数值模拟 象山港

学科分类号 P731.26

象山港是浙江省三大养殖基地之一。由于象山港的地形和水动力特点,进入狭湾的陆源污染物质可能长期滞留湾内,对狭湾内的生态和水产养殖业造成威胁(Gao *et al.*, 1990)。高抒等(1991)建立了象山港水交换的物理模式,计算了湾内各处不同百分比水交换所需时间。该模式主要考虑了余流的交换作用,但实测资料的分析说明象山港狭湾中余流的交换作用并不占主导作用(董礼先等)¹⁾,其模拟得出的象山港水交换周期可能过长。本文首先建立象山港水域高分辨率的对流-扩散型水交换数值模式,然后数值模拟象山港的水交换过程,并探讨湾内不同水域的水交换特点和控制机理。

1 象山港地形特点和水动力环境

象山港水域面积为563km²,平均水深约为10m,是一个纵长约为70km的半封闭海湾(图1)。象山港水域由象山港狭湾、牛鼻水道和佛渡水道三大部分组成。象山港狭湾长约50km,湾口宽约9.5km。座落在湾口的六横岛把象山港狭湾以外区域分成了东南侧的牛鼻水道和西北侧的佛渡水道。牛鼻水道宽约9km,是连接象山港与东海的重要通道。佛渡水道通过其外侧的条帚门、虾峙门等众多的潮通道将象山港同东海相连。象山港水域主要通过这两个水道同外海进行水交换。

象山港属强潮浅水半日潮海湾。狭海口附近多年平均潮差为3.16m,最大潮差为5.65m,实测最大流速达1.8m/s。湾内盐度变化受口外浙江沿岸水影响较大。湾口夏季的盐度值可达31以上,冬季则由于长江冲淡水南下,湾内盐度只有24左右。注入湾内淡水的年均径流量约为 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中60%集中在6—9月份。由于径流量减小和偏北风的混合作用,冬季湾内水体垂向较为均匀,表、底盐度差只有0.5左右。夏季表、底盐差最大可超过2.5,但

* 国家自然科学基金资助项目,48907026号。董礼先,男,出生于1948年12月,副研究员,Fax: 0086-0571-8054213

1) 董礼先,苏纪兰.象山港盐度分布与混合分析.海洋与湖沼,待发表

收稿日期:1996-08-26,收修改稿日期:1998-01-05

并无明显盐跃层出现。象山港狭湾内的重力余环流上层向海而下层向湾顶流动，流速在0.05—0.1m/s左右。狭湾内重力环流与潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和与潮混合作用是水体输运和混合的主要动力，三者都比紊流扩散大许多(董礼先等, 1999)¹⁾。

2 象山港水交换数值模型

以溶解态的保守性物质作为湾内水的示踪剂，建立象山港海域对流-扩散型的水交换数值模式(董礼先等, 1999)。湾内水示踪剂的控制方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_i) \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad i = 1, 2 \tag{1}$$

其中， (u_1, u_2) 深度平均流速在笛卡尔坐标 (x_1, x_2) 方向的分量； c 保守性溶解态湾内水的示踪剂浓度； $k_i = k_{i,r} + k_{i,s} + k_{i,t}$ 扩散系数， $k_{i,r}$ 垂向结构的余环流引起的水平输运的扩散系数， $k_{i,s}$ 垂向剪切引起的水平输运的扩散系数， $k_{i,t}$ 紊流扩散系数。

象山港狭湾内地形复杂，许多重要的潮通道不足1km宽。为了能模拟好潮流场，取空间网距 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 250\text{m}$ 和时间积分步长 $\Delta t = 12\text{s}$ 。开边界分别取在牛鼻水道东口和佛渡水道中六横岛的西北角垂直于水道主轴的K1—K2和K3—K4处(图1)。数值模型的空间分辨率是较高的，可以直接模拟较小尺度的潮流结构。但受水平二维的限制，模式对重

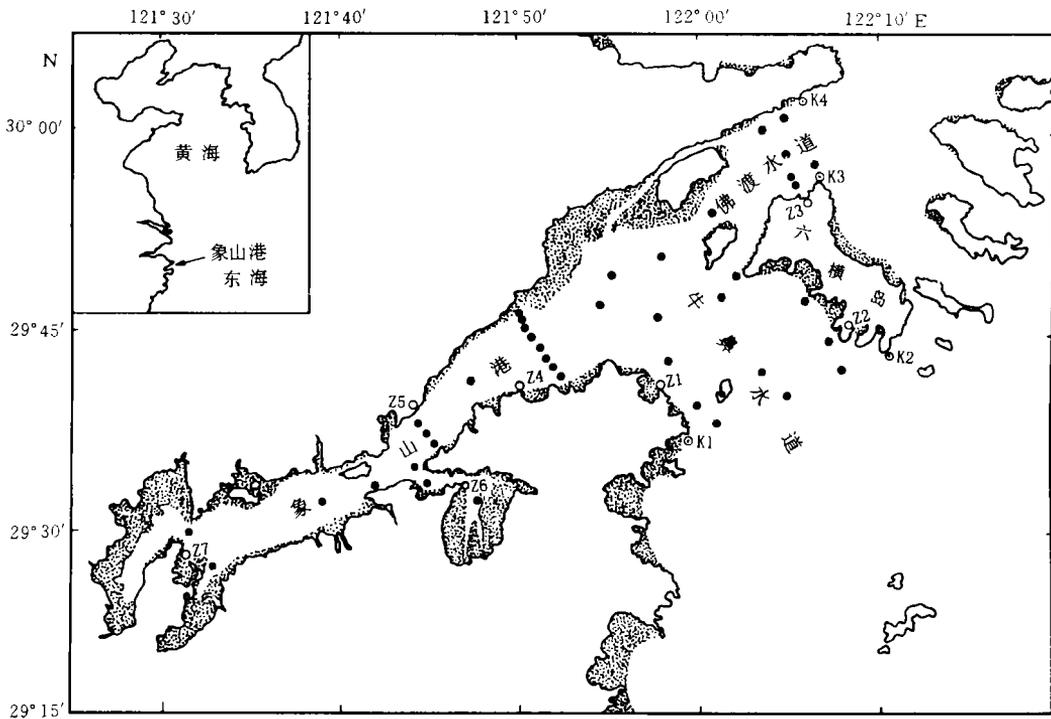


图1 象山港地形和站位图

Fig.1 Topography and location of the stations in xiangshangang Bay

● 潮流检验站点；○ Z潮位检验站点；⊙ K1—K4数值模型开边界

1) 董礼先, 苏纪兰. 象山港盐度分布与混合分析. 海洋与湖沼, 待发表

力余环流和潮振荡的垂向剪切对湾内、外水体交换的影响必须使用参数化方法包含在示踪剂扩散系数中。根据象山港实测断面资料的通量分析结果,取湾内水示踪剂对流-扩散方程总的扩散系数 $k_t = k_{ir} + k_{is} + k_{ii} = 200\text{m}^2 / \text{s}$ (董礼先等,1999)

溶解态保守性湾内水示踪剂在湾内的初始浓度为 $1.0 \text{ g} / \text{m}^3$ 。当开边界入流时给定这种物质在开边界的浓度为 $0 \text{ g} / \text{m}^3$ 。在开边界处输入水位并首先运行潮波运动模式,在潮波模拟稳定后启动溶解态的保守性示踪物质的对流-扩散模式,并通过湾内水示踪剂浓度 $c(t)$ 计算湾内各点水体被外海水置换比率。

3 模式检验

从象山港水域选出有代表性的 40 个连续水文站点和 7 个水位观测站点上的观测资料检验模拟结果(检验点站位见图 1)。在所有比较的站点上, M_2 潮振幅最大相对误差为 5%, 位相最大误差为 6min, M_2 分潮流的椭圆长轴长度最大误差为 $0.1\text{m} / \text{s}$, 长轴方向最大误差为 13° , 圆长轴出现时刻最大误差为 30min, 椭圆旋转率最大误差 0.08。其中, 80% 以上站点上的模拟和实测椭圆长轴差值小于 $0.05\text{m} / \text{s}$, 椭圆长轴方向小于 5° 。

4 模拟结果讨论

4.1 水交换的基本特征

水交换模拟结果显示沿牛鼻水道至佛肚水道的潮通道中的水交换速度最快, 90% 的水体被外海水置换掉所需时间不足 5 天。而狭湾内的水交换速度要慢得多, 湾顶 90% 的湾内水被置换掉需 80 天(图 2)。狭湾口外 5km 至只内 15km 处是水交换速度变化最为激烈的区段。在象山港狭湾口附近, 90% 的湾内水被置换掉只需 15 天, 而口内 15km 处则需 65 天之久。两处相距仅 20km, 而 90% 水交换周期相差 50 天。随着水交换的进行, 原湾内水体被外海水置换的速度越来越慢。湾顶处湾内水由 5% 被置换到 25% 被置换需 10 天, 而 85% 到 90% 被置换也需要 10 天以上时间(图 2)。

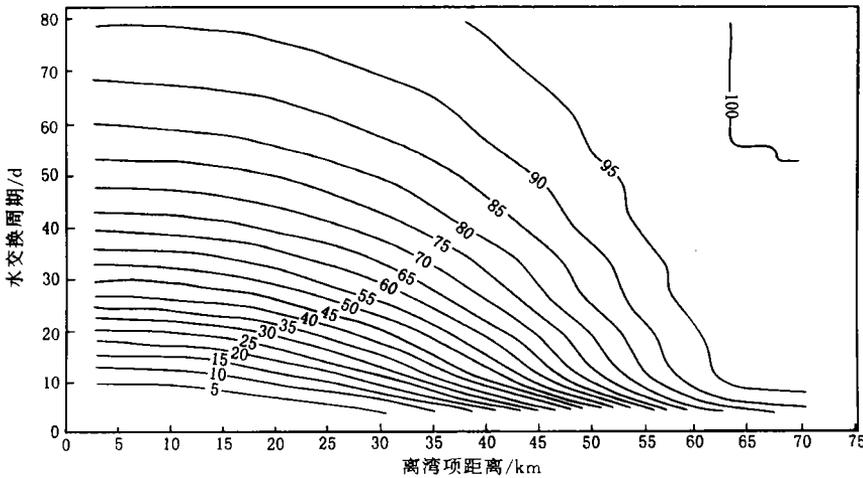


图2 象山港水交换周期图

Fig.2 Diagram showing the water exchange period in Xiangshangang Bay

等值线表示湾内水被外海水置换的百分比

造成象山港水域内区域性水交换周期变化较大的原因是狭湾内、外水交换控制机制的区域性变化较大。牛鼻水道至佛渡水道是一个潮流较强的潮通道,大潮流速一般在 1.0m/s 以上,夏季最大余流速度可达 0.3m/s 。在一个涨、落潮过程中,由潮通道中部发出的水质点可以分别在涨末和落末低达佛渡水道和牛鼻水道。潮通道内水体与口外新鲜海水平流混合和潮弥散都较激烈,水交换速度较快。

自象山港狭湾北口外 5km 至口内 15km 是该海域的强潮流区域,Z4断面最大实测流速为 1.81m/s 。在这个区段中靠近狭湾口的大部分水体均可随落潮流流出狭湾口,在与口外水体进行混合后,又随涨潮流回到口内。在涨、落潮过程中,越靠近口门的水体在狭湾口外的行程越长,与外海水混合的机率越大。因而在狭湾口门附近水交换速度变化激烈。

象山港狭湾内水域的横向尺度较小,最小横向宽度仅 2.2km 左右。虽然重力环流和潮振荡在水体的纵向弥散中作用显著,但水体在随潮流的往复运动中纵向混合无法充分开展,潮混合能力较狭湾外小得多(董礼先,1999)¹⁾。因此,狭道内的水交换周期比狭湾外长得多,而且越向湾顶越长。狭湾内Z5断面以里水面稍微开阔,岛屿众多,潮流空间变化较大,水体混合能力相对较强。因而象山港中段以里区域水交换速度均较慢,且靠近湾内 20km 范围内水域的水交换速度和无太激烈变化。

4.2 扩散系数讨论

根据实测断面资料的通量分析结果,取湾内水示踪剂的对流-扩散系数 $k_i = k_r + k_{is} + k_{ir} = 200\text{m}^2/\text{s}$ 。这一扩散系数取法包括了重力环流和潮振荡的垂向剪切引起的水体弥散效应,较为合理的模拟出象山港的水交换状况。当然,这只是一种近似处理方法,对狭湾外的区域和对狭湾内的侧向弥散可能是有偏差的。但象山港狭湾内的水交换主要取决于湾内的纵向混合,侧向扩散并不重要。而狭湾外区域的水交换主要由平流混合和潮弥散控制,取 $k_l = 10\text{m}^2/\text{s}$ 或 $k_l = 200\text{m}^2/\text{s}$ 两种扩散系数所模拟出的狭湾外90%水交换周期相差不足5天。因此,扩散系数在狭湾内侧向和狭湾外水域的误差不会对象山港水交换的模拟结果带来太大的影响。

另外,使用断面观测资料的通量分析结果估算潮振荡垂向剪切弥散系数 k_{is} ,给出的是潮均值,不随潮时而变。理论上说,垂向剪切随潮流的垂向分布变化, k_{is} 应随潮时变化。但因水交换的周期远远长于潮周期,而周期短于水交换周期的波动量不会影响水交换结果(Takeoka,1984)。因此,取 k_{is} 为常数虽然是一种简化的处理方法,但不会给模拟结果带来太大的误差。

5 结语

5.1 使用水平二维对流-扩散型的水交换模型建立了象山港的水交换数值模型,根据实测资料的通量分析结果给出了重力余环流和潮振荡垂向剪切两个扩散系数,较好地模拟研究了象山港水域的水交换状况。

5.2 象山港水交换速率和控制机理的区域性变化较大。狭湾口外靠近外海,平流和潮交换强烈,90%水交换周期只有5天左右。狭湾内则虽然垂向环流和垂向剪切的作用显著,

1) 董礼先,苏纪兰.象山港盐度分布和水体混合.海洋与湖沼(待发表)

但由于狭湾狭长的地形特点而交换速度较慢,且越靠近湾顶越慢,湾顶附近 90% 水交换周期可达 80 天左右。

5.3 象山港狭湾口门附近水交换速率变化激烈。这一变化说明狭湾口外的平流和潮交换作用比狭湾内的重力环流和潮振荡垂向剪切的弥散作用更有效。

参 考 文 献

高 抒,谢钦春,1991. 狭长形海湾与外海水交换的一个物理模型. 海洋通报, 10(3):1—9

蔡伟章,陈耕心,丁锦仁, 1985. 象山港潮汐潮流特征及成因探讨. 海洋通报,4(3):8—11

董礼先,苏纪兰,1999. 象山港水交换数值研究 I. 对流-扩散型的水交换模式. 海洋与湖沼, 30(4):410—415

Gao S, Xie Q-C, Feng Y-J, 1990. Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay Zhejiang, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 31:397—409

Takeoka H, 1984. Exchange and transport time scale in the Seto Inland Sea. Continental Shelf Res, 3(4):327—341

NUMERICAL STUDY OF WATER EXCHANGE IN XIANGSHANGANG BAY II. MODEL APPLICATION AND WATER EXCHANGE STUDY

DONG Li-xian, SU Ji-lan

(Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

Abstract The Xiangshangang Bay is narrow and semi-enclosed, with a mean depth of around 10 m and a water area about 563km². The bay consists of Niu Bi Channel, Fodu Channel and Xiangshangang Inlet. The water exchange in Xiangshangang Bay is studied with the advection-diffusion numerical model. The spatial grid size is 250m, and the measured sea surface elevation is assigned on the open boundary. The initial tracer concentration in the bay is set to 1 in the modeling domain, and the concentration value is set to 0 on the open boundary when there is inflow. The dispersion coefficients caused by the gravity circulation and the vertical shear effect in the advection-diffusion tracer model are determined by the flux analysis result of measurement data. The modeling currents are compared with the measured data at 40 stations. The difference between the calculated and observed longer axis of M2 tidal current ellipses is less than 0.05m / s, with the largest phase difference less than 5° at 80 percent of the stations.

The result shows that the water exchange rate and its mechanism differ from place to place in the Xiangshangang Bay. The area from Fodu Channel to Niu Bi Channel is a tidal passage near the open boundary with strong currents. The water in the passage is well mixed with the sea water by advection. The period of 90 percent water exchange is only about 5d.

The tidal currents are the strongest in the outer part of the Xiangshangang Inlet. The water near the mouth of Xiangshangang Inlet can flows to the outside of the Inlet during the ebb tide.

The closer the mouth of the Xiangshangang Inlet, the larger of the rate of water mixing with the water outside the Inlet. There is a sharp water exchange rate gradient near the mouth of Xiangshangang Inlet.

The inner part of Xiangshangang Inlet is narrow with weak tidal currents. Although the longitudinal mixing effects caused by the gravitational circulation and the vertical shear effect are evident, the longitudinal mixing is weak in the area. The period of water exchange is much longer than outside of the Inlet. Towards the Inlet, the water exchange period increases. The period of 90 percent water exchange is about 80d near the bayhead areas of the Inlet.

Key words Water exchange Numerical modeling Xiangshangang Bay

Subject classification number P731.26

* * * * *

2000 年度《水产学报》征订启事

《水产学报》是中国水产学会主办的水产科学技术的学术性刊物。主要刊载渔业资源、水产养殖和增殖、水产捕捞、水产品保鲜与综合利用、渔业水域环境保护、渔船、渔业机械与仪器以及水产基础研究等论文、调查报告、研究简报、评述与综述。并酌登学术动态和重要书刊的评介。

本刊为双月刊,国内外公开发行。每期单价 15.00 元,全年共 90 元。国内统一刊号: CN31-1283/S。邮发代号 4-297。读者可在当地邮局订阅,也可直接汇款到编辑部订阅。编辑部地址:上海市军工路 334 号,上海水产大学 48 号信箱。邮编 200090。

联系电话: (021)65710232

E-mail:scxuebao@online.sh.cn 传真: (021)65680965