

文章编号: 1674-5566(2018)04-0543-10

DOI:10.12024/jsou.20171002158

## 基于 FVCOM 的宁波-舟山海域溶解型危化品泄漏扩散模拟

徐国怀<sup>1</sup>, 潘增弟<sup>2</sup>, 张昊飞<sup>3</sup>, 许 鹏<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局东海分局, 上海 200137; 3. 国家海洋局东海环境监测中心, 上海 201206)

**摘 要:** 基于 FVCOM 数值模型, 以宁波-舟山海域相关实测资料为支撑, 选取环氧氯丙烷为典型溶解型危化品, 模拟该海域突发溶解型危化品泄漏后的扩散行为。模拟结果表明, 从不同事故等级来看, 一般事故和较大事故危化品泄漏 24 h 后, 环氧氯丙烷浓度基本扩散至安全浓度(0.02 mg/L)以下, 重大事故泄漏 24 h 后仍存在较大(30~190 km<sup>2</sup>)超安全浓度污染水域; 从不同扩散潮时来看, 落潮时刻扩散快于涨潮时刻, 落潮时刻扩散至安全浓度以下较涨潮时刻快 2~6 h; 从不同泄漏点来看, 册子水道扩散快于镇海码头, 其中在册子水道泄漏时, 基本沿水道扩散, 在镇海码头泄漏时, 易在北仑区沿岸、北仑和大榭岛之间滞留。

**关键词:** 宁波-舟山海域; 溶解型危化品; FVCOM; 扩散模拟

**中图分类号:** X 522 **文献标志码:** A

近年来随着我国沿海经济的迅猛发展, 国内对危险化学品的需求及产量每年大约以 10% 的幅度增加<sup>[1]</sup>, 沿海石化区等以化学工业为主导的工业园区建设正在加快。但是同时, 近岸临海化工产业逐渐成为危险化学品事故高发区, 海上化学品泄漏的环境风险问题已经成为威胁我国海洋生态安全的重要因素之一。危险化学品泄漏等事故的发生往往会导致重大的人身伤亡和财产损失, 对周围环境造成严重的破坏, 如造成大气污染、水质污染等, 不仅直接威胁当地生态安全, 也会对周围群众的生活生产带来严重威胁<sup>[2]</sup>。

宁波-舟山沿海建设有国家石油战略储备基地以及一系列下游化工企业集群, 重点发展石油化工和能源等工业, 环境风险形势极其严峻。在我国已有学者模拟了宁波-舟山内海域的潮流, 预测分析了含油污染物、COD、无机氮、活性磷酸盐等随海流的输运特征<sup>[3-5]</sup>, 但对宁波-舟山海域突发性危化品泄漏扩散模拟的研究尚不多见。本研究建立了该海域的溶解型危化品泄漏扩散模

型、分析了危化品泄漏后 24 h 内的扩散行为, 为危化品泄漏后的应急措施提供科学依据, 具有较大的学术价值和现实意义。

### 1 宁波-舟山海域水动力数值模拟

#### 1.1 模型设置

FVCOM(Finite Volume Community Ocean Model)模型由 CHEN 等<sup>[6-7]</sup>发展起来, 是三角网格、自由表面、原始方程、有限体积的海岸大洋数值模型, 主要包括水质模块、生态模块、泥沙输运模块、流场-波浪-泥沙耦合模块等等。该模型结合了有限元法和有限差分法的优点, 适合模拟浅海复杂边界<sup>[8]</sup>。模型水平方向上采用非结构化的三角形网格, 可对地形复杂的区域局部加密, 以更好的模拟复杂的岸线; 垂向采用  $\sigma$  坐标, 有助于处理不规则的海底地形。在潮间带, 模型采用干湿网格技术考虑了潮滩对潮流的影响。因此, 利用 FVCOM 模型非常有利于模拟具有复杂岸线和地形的宁波-舟山海域<sup>[9]</sup>。FVCOM 模式在模拟近岸浅海复杂边界以及数值处理方法上的优势, 已在

收稿日期: 2017-10-30 修回日期: 2018-03-29

基金项目: 国家海洋局重点实验室开放研究基金(MATHAB201602); 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项 2016 年度项目(2016YFC1402400)

作者简介: 徐国怀(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上危化品扩散模拟。E-mail: xgh0717@163.com

通信作者: 潘增弟, E-mail: zdpan@263.net

国外多个河口、港湾以及中国渤海、长江口等多处海域得到验证<sup>[10-14]</sup>。此次研究区域为宁波-舟山海域,计算范围包括了长江口、杭州湾以及邻近海域。地形资料采用中国人民解放军海军司令部航海保证部 2013 年东海海图数字化结果,计算基准面为 1985 国家高程基准,深度为理论最低潮面。模型采用 SMS 软件生成三角网格(图 1),并对宁波-舟山海域进行了加密,共有 50 098 个网格点,94 345 个三角单元,最小分辨率为 200 m。开边界共有 104 个网格点,由潮位驱动,本次计算考虑  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $P_1$  以及  $Q_1$  八个分潮。上游径流数据采用长江水文网(<http://www.cjh.com.cn/>)发布的大通水文站资料。风场数据从欧洲中期天气预报中心(ECMWF)官网(<https://www.ecmwf.int/>)下载获得,周期为 6 h,该风场数据可靠性已经被众多学者所验证。

模型采用 sigma 坐标,垂向分为 20 个  $\sigma$  层,计算所用的初始场由东海海图图集上的月平均数据进行数字化并插值得到,为了更好得模拟近岸垂向混合,采用 Mellor-Yamada2.5 阶湍流闭合模型,计算时间为 2016 年 8 月 1 日到 2016 年 8 月 31 日,计算结果每 10 min 输出 1 次,计算外模态时间步长为 1 s,内模态时间步长 10 s,模型采用冷启动,设定初始为 0 的水位和流速。

### 1.2 模型率定和验证

潮位数据采用北仑港站(29°54'N, 122°07'E)、镇海站(29°59'N, 121°44'E) 2016 年 8 月 26 日至 8 月 28 日(48 h)数据,验证结果如图 2 所示,其中实线为计算值,黑点为观测值。从结果来看,潮位模拟结果吻合良好,趋势一致,误差均

小于 10%,可以认为模拟比较准确。

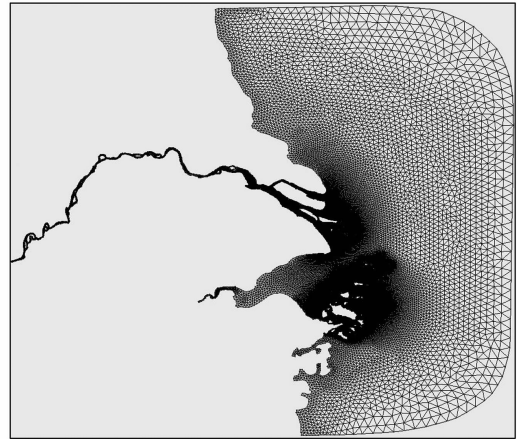


图 1 SMS 生成计算网格图  
Fig. 1 Grid chart created by SMS

海流数据采用宁波中心站 2016 年在 A~D 4 个站点(A:30°01'24"N, 121°46'13"E; B:29°59'00"N, 121°46'38"E; C:29°58'30"N, 122°11'5"E; D:29°58'17"N, 122°12'56"E)测得的数据。验证时间为 2016 年 8 月 26 日至 8 月 28 日,将实测流速和流向的资料与计算值作对比,对比结果如图 4 所示,通过验证,计算结果与实测结果吻合较好,流速大小、趋势符合实际情况,流向误差基本在 15°以内,可以认为计算结果精确可靠,可用于该区域流场的模拟,满足危化品污染扩散计算的需求。

### 1.3 水动力场数值模拟

在对潮位、海流流速、流向充分验证的基础上,对宁波-舟山海域的潮流进行了模拟计算,其特征如下:宁波-舟山海域水流基本为往复流,涨

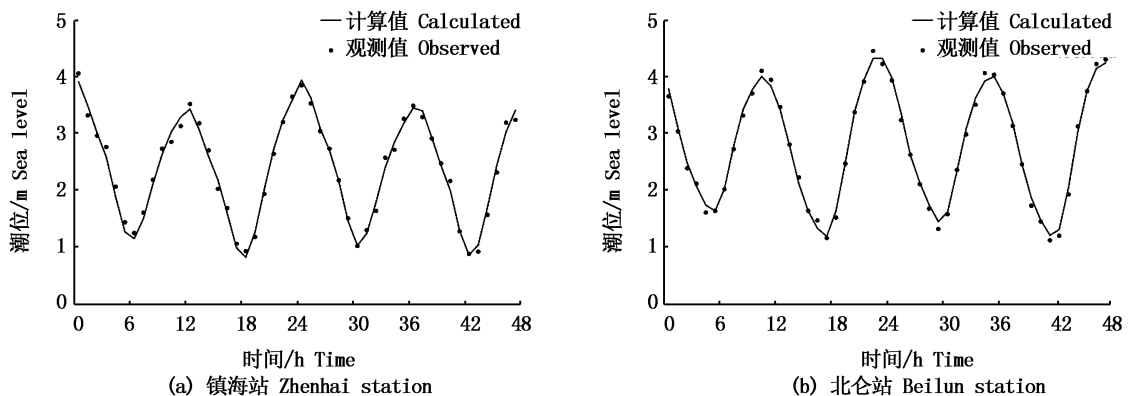


图 2 宁波-舟山海域潮位数据验证图  
Fig. 2 Ningbo-Zhoushan waters tide level data verification

潮时,水流从穿山半岛东侧,舟山岛南侧进入,沿着册子水道到达金塘岛,被金塘岛和册子岛分为 3 股具有较大流速的水流,位于舟山岛、册子岛、金塘岛以及宁波北仑区之间,大潮涨急时刻其流速可达 2.5~3.0 m/s(图 5)。落潮时,水流由宁波-舟山西北侧灰鳖洋海域进入,到达金塘岛和册子岛同样被分为 3 股水流,并在大榭岛北面册子水道交汇,速度可达 2.0~2.5 m/s,方向与涨潮时刻相反(图 6)。从整体上看,两个时刻都能明显看出册子水道上形成了一股较强水流,其流速比镇海码头大 0.5~1.5 m/s。大潮期涨憩时刻和落憩时刻流速均在 0.5 m/s 左右。涨憩时刻流速略小于落憩时刻流速。

小潮期间流速明显小于大潮期,最大流速只有 2 m/s 左右。篇幅限制,本文只给出了大潮期间涨急、落急的流场图。

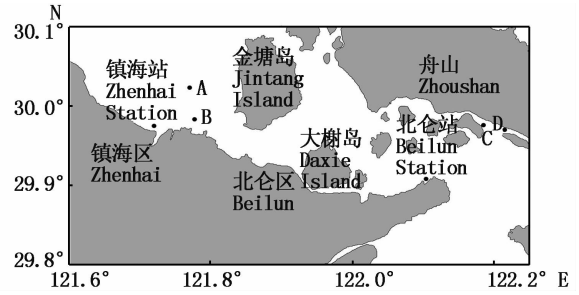


图 3 观测站点位置图

Fig. 3 Site location of observation station

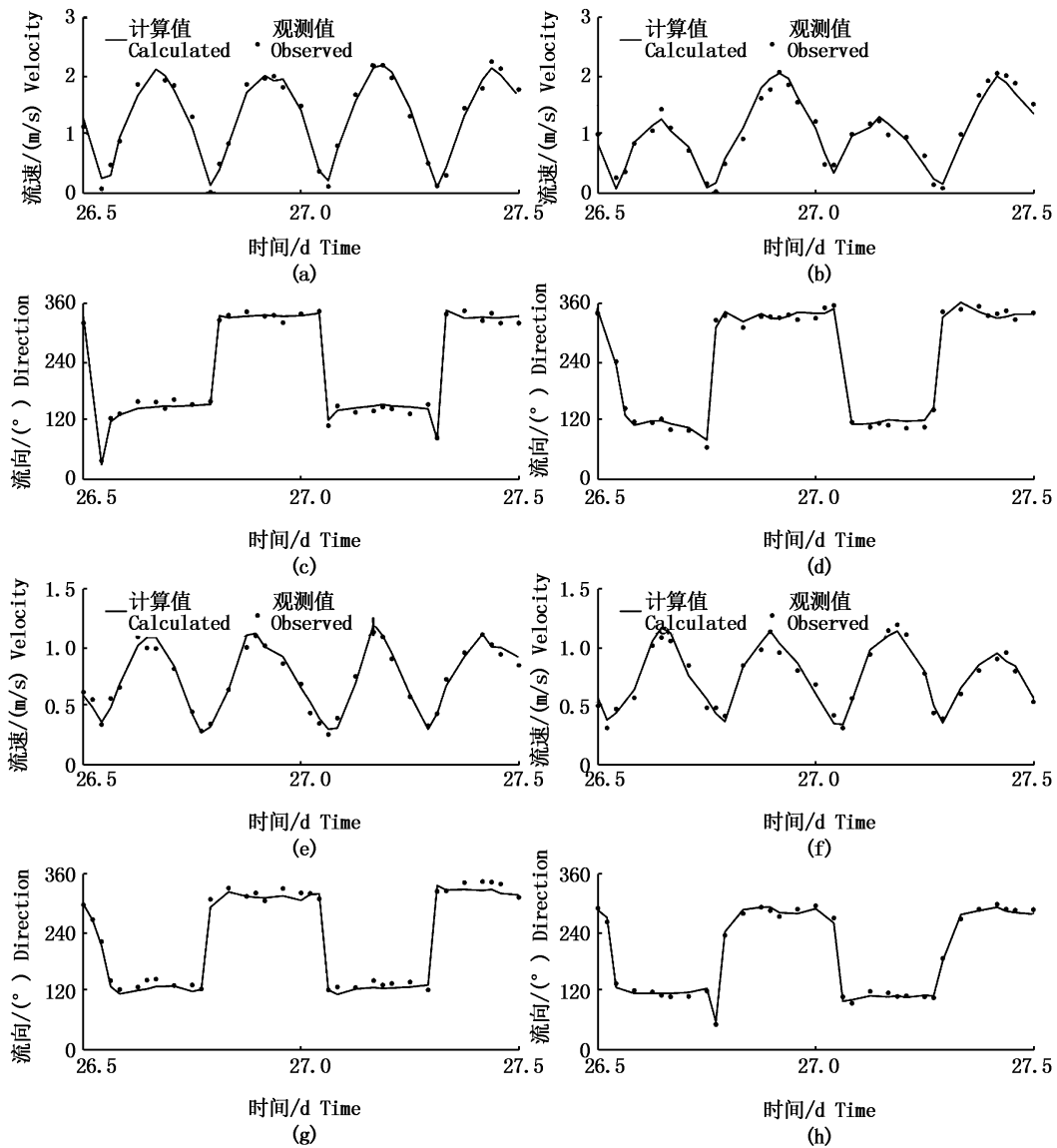


图 4 宁波-舟山海域流速流向数据验证图

Fig. 4 Ningbo-Zhoushan waters flow velocity and direction data verification

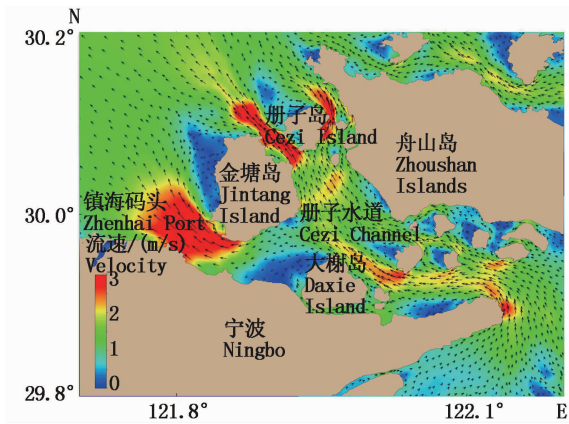


图5 大潮期间宁波-舟山海域涨急时刻流场图

Fig. 5 Flow diagram of Ningbo-Zhoushan sea area of flood tide during the spring tide

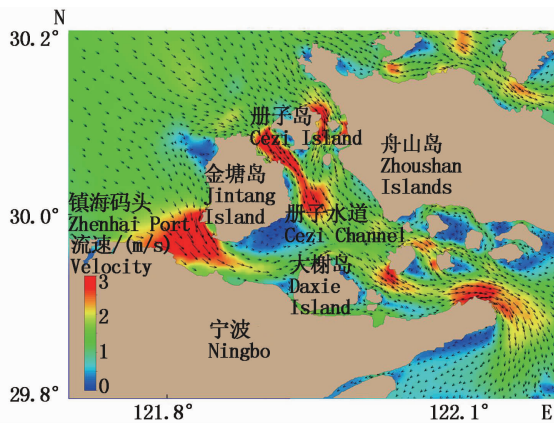


图6 大潮期间宁波-舟山海域落急时刻流场图

Fig. 6 Flow diagram of Ningbo-Zhoushan sea area of ebb tide during the spring tide

## 2 宁波-舟山海域溶解型危化品扩散模拟

### 2.1 研究区域概况

宁波主要的化工品和油品生产企业、企业仓储、码头和输送管道主要集中在镇海、北仑和大榭3个区域,大型港口航道等运输路线也集中在宁波舟山港,因此,风险源调查主要选取镇海、北仑和大榭3个区域。根据统计镇海区共调查到主要的化工品码头企业4家,4个码头,11个泊位,码头的化工品和油品的年接卸量有4 991 548.43万吨,化工品和油品的品种主要有64种。北仑区共调查到主要的化工品和油品码头企业7家,7个码头,20个泊位,码头化工品和油品的年接卸量有4 544.87万吨,化工品和油品的品种主要有29种。大榭开发区共调查到主要的

化工品和油品码头企业11家,14个码头,16个泊位,码头化工品和油品的年接卸量有126 723.92万吨,化工品和油品的品种主要有30种<sup>[15]</sup>。

由于条件限制,无法对所有溶解型危化品进行模拟,因此此次研究选取了烷烃中的环氧氯丙烷作为溶解型化学品。环氧氯丙烷为无色液体,其在25℃环境下的理化性质如表1所示,密度略大于水,中等毒性,能溶于水,其液态在常温下挥发性较强<sup>[16]</sup>,环氧氯丙烷辛醇-水分配系数小,在水和悬浮物间分配过程不明显,不易沉积在底质上。《海水水质标准》中无环氧氯丙烷标准,在地表水环境质量标准中环氧氯丙烷限值为0.02 mg/L,取该限值作为环氧氯丙烷阈值,作为安全浓度。

表1 环氧氯丙烷理化性质表

Tab. 1 Physico-chemical properties of Epoxy Chloropropane

理化性质 Physico-chemical properties	数值 Numerical value
密度/(g/cm <sup>3</sup> ) Density	1.18
饱和溶解量/(mg/L) Saturated dissolved amount	65 800
饱和蒸气压/(atm) Saturated vapor pressure	$2.368 \times 10^{-2}$
辛醇-水分配系数的对数值/(lgKow) Logarithmic value of Octanol-water partition coefficient	0.30
水中降解速率/d Degradation rate in water	0.047

### 2.2 溶解型危化品扩散模拟

#### 2.2.1 危化品泄漏计算

此次溶解型危化品扩散模拟采用FVCOM的DYE(染色追踪模块)模块计算,该模块可用于溶于水的保守型危化品扩散模拟。危化品泄漏地点选取在较具代表性的镇海码头以及册子水道,泄漏层为表层,泄漏持续时间10 min,具体位置见图7。

由于每个时刻潮流情况各不相同,因此本次研究选取影响范围最大情况,将泄漏时间设置在大潮期涨潮时刻以及大潮期落潮时刻,其他情况影响范围均小于此。源强采用《上海港船舶污染事故风险评估研究》给出的界定,把海上船舶污染事故分为4级,即一般(Ⅳ级)、较大(Ⅲ级)、重大(Ⅱ级)、特别重大(Ⅰ级),具体污染物溢出量的界定如下:一般事故(Ⅳ级):污染物溢出量在

100 t 以下;较大事故(Ⅲ级):污染物溢出量在 100 t 以上 500 t 以下;重大事故(Ⅱ级):污染物溢出量在 500 t 以上 1 000 t 以下;特别重大事故(Ⅰ级):污染物溢出量在 1 000 t 以上<sup>[17]</sup>。

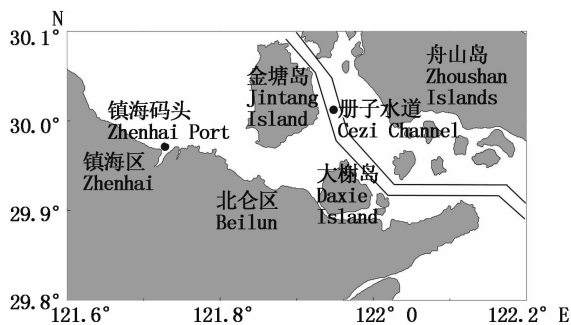


图 7 危化品泄漏点

Fig. 7 Hazardous chemicals leakage point

从分类来看,100 t 和 500 t 正好是一般事故、较大事故和重大事故溢出量的分界线,可见该源强大小的选择具有合理性;此外 1 000 t 为特别重大事故分界线,因此也选择 1 000 t 严重情况作为本研究中泄漏事故源强之一。

根据上述的泄漏时间、泄漏地点,泄漏源 3 个因素,制定具体计算方案如下表 2 所示。

### 2.2.2 模拟结果分析和讨论

按照上述方案组进行模拟计算,由于表层以下的环氧氯丙烷浓度要低于表层,因此本文只给出表层扩散情况并加以分析。环氧氯丙烷泄漏 24 h 后得到以下结果,如表 3 所示。由表可知,100 t 环氧氯丙烷泄漏 24 h 后,海域中已经不存在超安全浓度(0.02 ml/L)的区域;500 t 环氧氯丙烷泄漏 24 h 后,除涨潮时刻泄漏的情况依旧存在 10 km<sup>2</sup> 左右的超安全浓度水域,其他情况环氧氯丙烷也已扩散至 0.02 mg/L 以下;1 000 t 泄漏 24 h 后,所有泄漏方案海域中均存在较大面积的超安全浓度水域;为研究影响相对较大的情况,选取泄漏量为 1 000 t 作为典型,其余计算方案影响范围均小于此。1 000 t 泄漏后海域环氧异丙烷最高浓度下降趋势如图 8 所示,扩散情况如图 9 至 12 所示,图中包裹着扩散区域的实线为 0.02 mg/L 包络线。

表 2 扩散模拟计算方案

Tab. 2 Scheme of diffusion simulation

方案 Scheme	泄漏量/t Spillage	泄漏点 Leakage point	泄漏时间 Leakage time
方案 1 Scheme 1	100	镇海码头 Zhenhai Port 册子水道 Cezi Channel	大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide) 大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide)
方案 2 Scheme 2	500	镇海码头 Zhenhai Port 册子水道 Cezi Channel	大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide) 大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide)
方案 3 Scheme 3	1000	镇海码头 Zhenhai Port 册子水道 Cezi Channel	大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide) 大潮(涨落) Spring tide(flood,ebb tide)

表 3 扩散影响范围统计(泄漏 24 h)

Tab. 3 The statistics of impacted range( After 24 h)

泄漏量/t Spillage	泄漏点 Leakage point	潮时 Time of tide	超安全浓度面积/km <sup>2</sup> Over-safe concentration area	最大影响距离/km Max impact distance
100	镇海码头 Zhenhai Port	涨潮 Flood tide	0	-
		落潮 Ebb tide	0	-
	册子水道 Cezi Channel	涨潮 Flood tide	0	-
		落潮 Ebb tide	0	-
500	镇海码头 Zhenhai Port	涨潮 Flood tide	12	28
		落潮 Ebb tide	0	-
	册子水道 Cezi Channel	涨潮 Flood tide	10	16
		落潮 Ebb tide	0	-
1000	镇海码头 Zhenhai Port	涨潮 Flood tide	190	40
		落潮 Ebb tide	140	35
	册子水道 Cezi Channel	涨潮 Flood tide	100	20
		落潮 Ebb tide	30	22

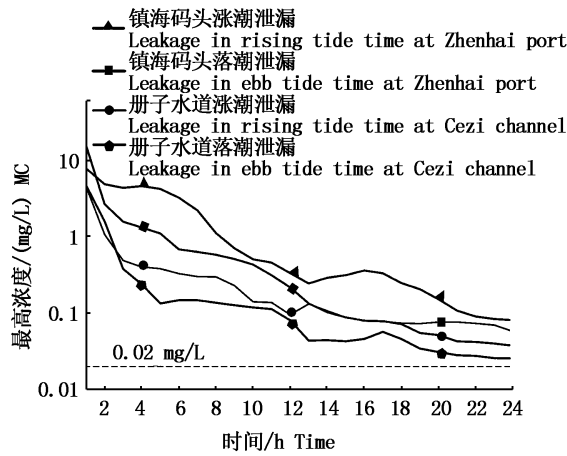


图8 最高浓度下降趋势图(1 000 t)  
 Fig.8 The downtrend chart of maximum concentration(1 000 t)

当泄漏事故发生在镇海码头,泄漏时间为涨潮时刻,前6 h,环氧氯丙烷以镇海码头为中心均匀向四周扩散,且0.02 mg/L 包络线包裹区域内浓度呈现较高水平,随着扩散稀释,包络线逐渐扩大,但在大榭岛北仑区之间依旧存在污染浓度较高的水域,如图中的12 h 和18 h 时刻。泄漏24 h 后,环氧氯丙烷已遍布北仑区至舟山岛之间,

0.02 mg/L 包络线出现分离,分别位于北仑区北侧以及穿山半岛东侧,总面积达到190 km<sup>2</sup> 左右(图9)。落潮时刻泄漏扩散较涨潮时刻快2~6 h(图8),泄漏6 h 内,环氧氯丙烷沿着镇海沿岸迅速移动到大榭岛,在大榭岛与北仑区之间形成较高浓度水域,随后随着涨落潮水流来回移动,0.02 mg/L 包络线向四周展开,到18 h 左右,包络线出现分离的情况,分为3 块,分别位于北仑沿岸一带,大猫岛东侧以及北仑区南侧,24 h 后,0.02 mg/L 包络线包裹着大榭岛周围海域,面积为140 km<sup>2</sup> 左右(图10)。

图11 和图12 分别是册子水道上涨落潮时刻发生泄漏的扩散情况。涨潮时刻,泄漏的环氧氯丙烷立即沿着金塘岛和册子岛之间的大流速水流扩散到金塘岛西北侧灰鳖样水域,并随着涨落潮的水流,沿着册子水道来回移动,最远到达30.03°N 左右,距泄漏点20 km 左右处,在泄漏24 h 后,0.02 mg/L 包络线位于金塘岛、册子岛以及舟山岛之间,覆盖面积达100 km<sup>2</sup> 左右。与镇海码头泄漏相同,落潮时刻泄漏明显快于涨潮时刻(图8),当泄漏发生时,环氧氯丙烷沿着册子水道的水流,迅速向南迁移至大榭岛东侧,随着污染

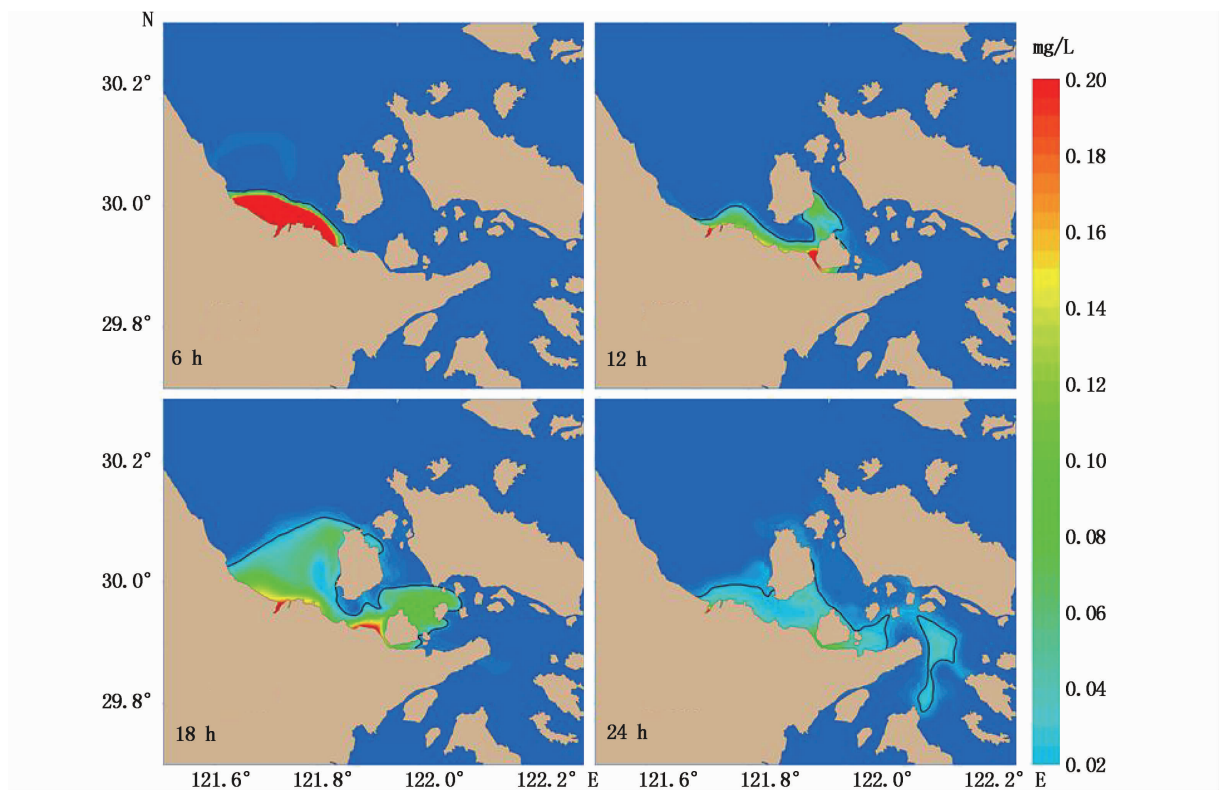


图9 镇海码头1 000 t 事故涨潮时刻泄漏扩散图  
 Fig.9 The diffusion diagram of 1 000 tons leakage at flood tide time at Zhenhai port



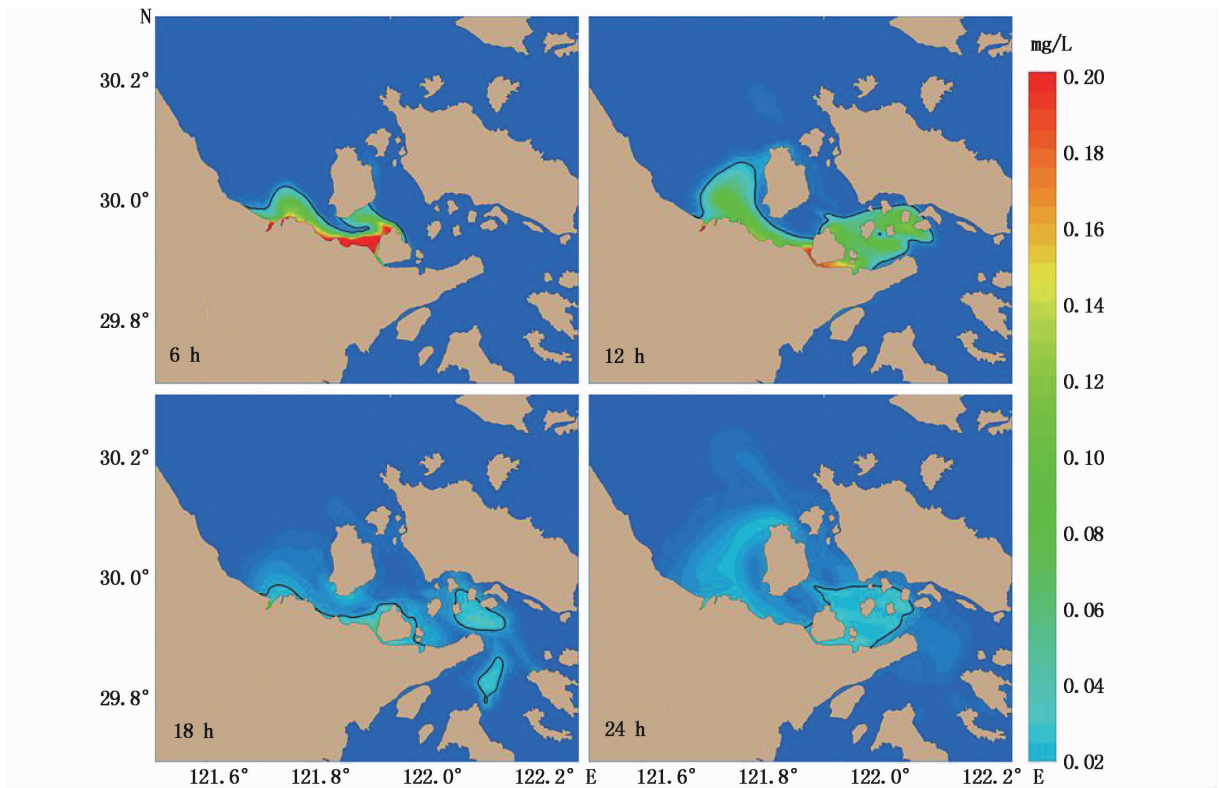


图 10 镇海码头 1 000 t 事故落潮时刻泄漏扩散图

Fig. 10 The diffusion diagram of 1 000 tons leakage at ebb tide time at Zhenhai port

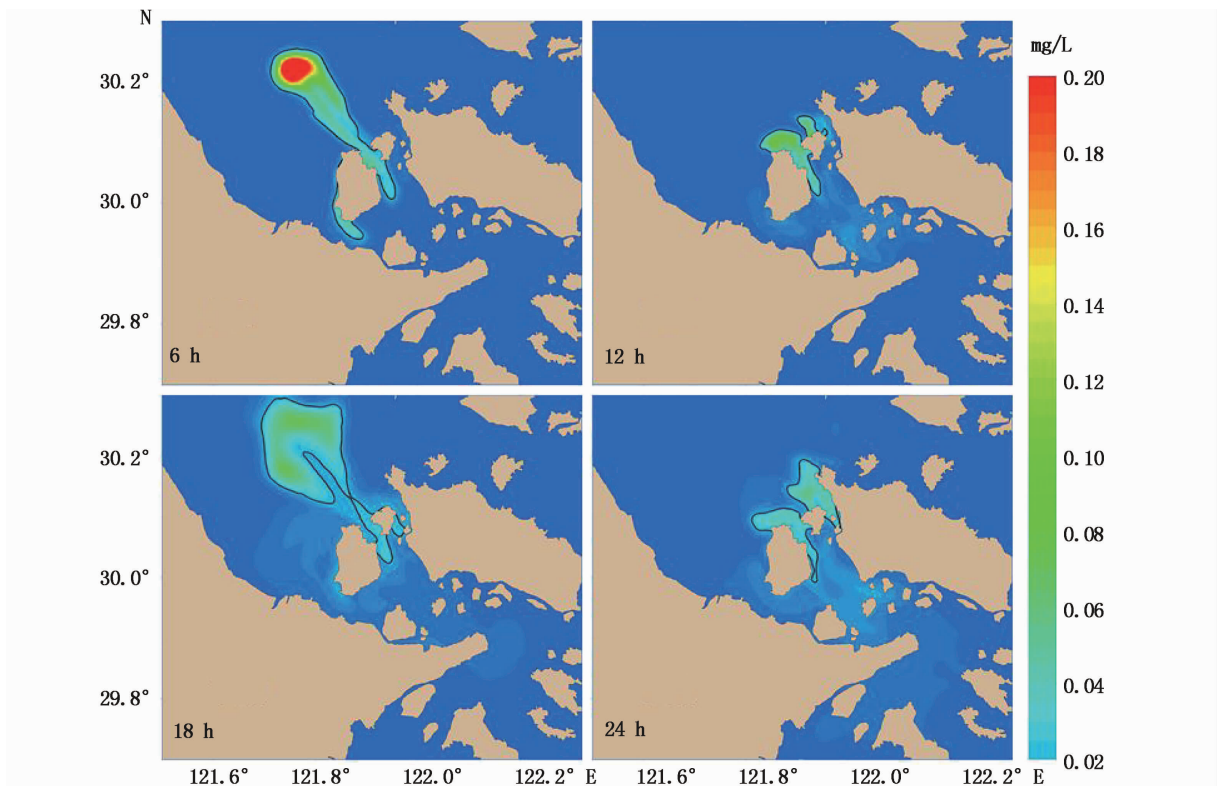


图 11 册子水道 1 000 t 事故涨潮时刻泄漏扩散图

Fig. 11 The diffusion figure of 1 000 tons leakage at flood tide time at Cezi channels

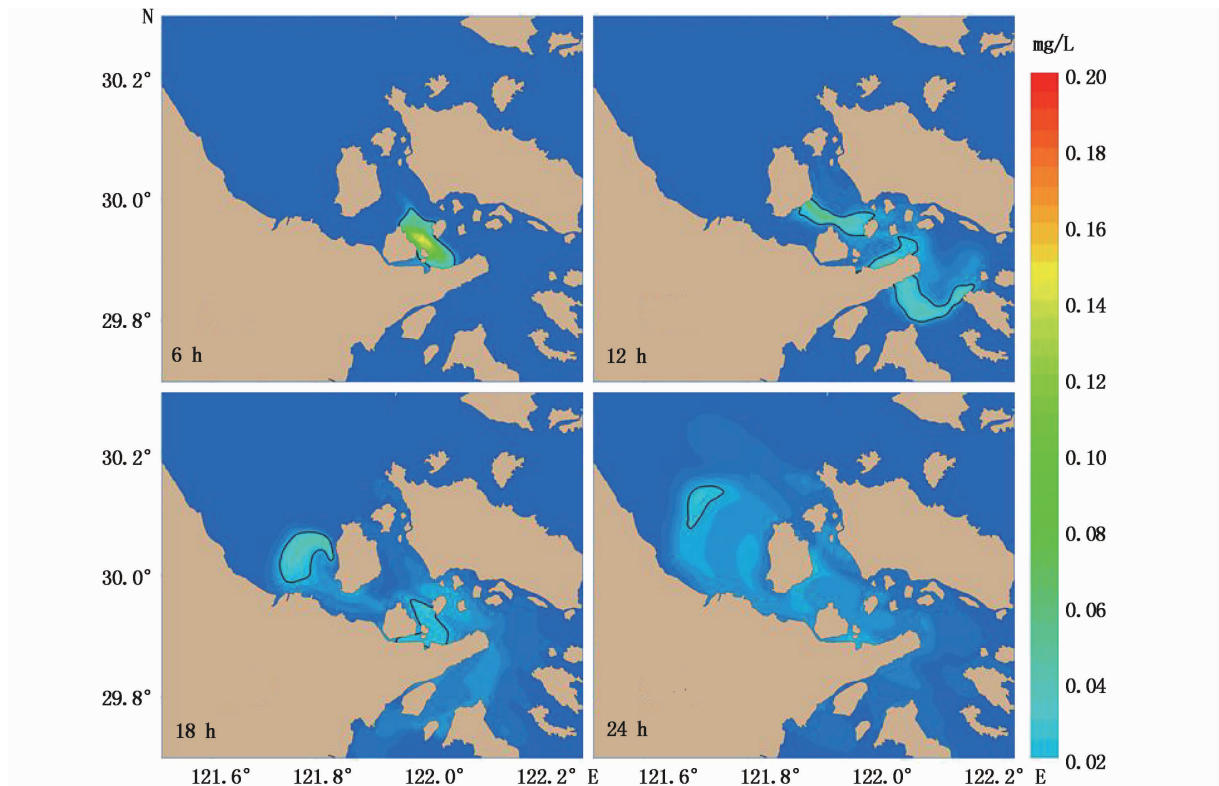


图 12 册子水道 1 000 t 事故落潮时刻泄漏扩散图

Fig. 12 The diffusion diagram of 1000 tons leakage at ebb tide time at Cezi channels

继续扩散, 0.02 mg/L 包络线发生变形、分离, 在 18 h 左右, 包络线出现在两处, 分别位于金塘岛与镇海区之间, 以及大榭岛东侧, 扩散 24 h 后, 除了在金塘岛西北侧存在一块约 30 km<sup>2</sup> 的超安全浓度水域, 其他水域内环氧氯丙烷浓度基本在 0.02 mg/L 以下。

此外, 对比两个不同的泄漏地点, 册子水道由于具有比镇海码头大 0.5 ~ 1.5 m/s 的流速, 环氧氯丙烷泄漏扩散速度快于镇海码头, 如图 8 所示, 扩散 12 h 内, 表示册子水道泄漏的两条实线下降速度明显快于镇海码头, 12 h 后, 4 种泄漏情况最高污染浓度的下降趋势均趋于稳定。

### 3 结论

对宁波-舟山海域的水动力情况进行了模拟。结果与实测资料对比, 误差较小, 模拟比较准确。在充分率定检验的基础上, 选取环氧氯丙烷为典型, 利用 FVCOM 数值模型对宁波-舟山海域溶解型危化品泄漏行为进行了模拟。

模拟结果表明: 从不同事故等级来看, 一般事故 (100 t) 和较大事故 (500 t) 危化品泄漏 24 h

后, 环氧氯丙烷浓度基本扩散至安全浓度 (0.02 mg/L) 以下, 重大事故泄漏 24 h 后仍存在较大 (30 ~ 190 km<sup>2</sup>) 超安全浓度污染水域; 从不同扩散潮时来看, 无论在哪个地点泄漏, 落潮时刻危化品扩散均快于涨潮时刻, 落潮时刻扩散至安全浓度以下较涨潮时刻快 2 ~ 6 h; 从不同泄漏点来看, 册子水道由于具有比镇海码头大 0.5 ~ 1.5 m/s 的流速, 扩散明显快于镇海码头, 其中在册子水道泄漏时, 危化品基本沿水道扩散, 在镇海码头泄漏时, 危化品沿着宁波沿岸扩散, 且易在北仑区沿岸、北仑和大榭岛之间滞留。

以上, 对于宁波-舟山海域溶解型危化品泄漏事故, 本文建立的该海域溶解型危化品泄漏扩散模拟能为危化品泄漏后的应急措施提供科学依据, 应急监测的单位可根据不同情况的预测模拟迅速作出响应, 在泄露最初的一个潮周期内采取相应措施。

### 参考文献:

- [1] 虞志娟, 沈家. 基于 GIS 技术的危险化学品物流系统的风险管理[J]. 物流技术, 2008, 27(4): 55-58.  
YU Z J, SHEN J. Risk management of the dangerous



- chemicals logistics system based in GIS technology [J]. Logistics Technology, 2008, 27(4): 55-58.
- [2] 胡艳菊,李彦海,胡忆勃. 危险化学品突发泄漏事故应急决策系统的开发与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 109-113.  
HU Y J, LI Y H, HU Y W. Development and application of the emergency decision system for dangerous chemicals burst leaking accident [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(04): 109-113.
- [3] 耿兆铨,倪勇强,程杭平. 溢油和含油污水对舟山海域水质影响的数值分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1991, 6: 46-54.  
GENG Z Q, NI Y Q, CHENG H P. Numerical Study of Oil Pollution on Sea Region [J]. Journal of Hydrodynamics, 1991, 6: 46-54.
- [4] 曹欣中,唐龙妹. 宁波、舟山海域实测海流分析及潮流场的数值模拟[J]. 东海海洋, 1996, 41(2): 1-9.  
CAO X Z, TANG L M. The analysis of the observed sea current and the numerical model of the tidal current field for the inner sea area if Ningbo and Zhoushan [J]. Donghai Marine Science, 1996, 41(2): 1-9.
- [5] 蔡惠文,孙英兰,张越美,等. 宁波-舟山海域污染物扩散的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006(6): 975-980.  
CAI H W, SUN Y L, ZHANG Y M, et al. Numerical Simulation of Pollutant Diffusion in the Ningbo-Zhoushan Sea Area [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006(6): 975-980.
- [6] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [7] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system [J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [8] XIU G W, HAN S T. Coupling of CFD model and FVCOM to predict small-scale coastal flows [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5): 284-289.
- [9] 韩松林,梁书秀,孙昭晨. 基于 FVCOM 的象山港海域潮汐潮流与温盐结构特征数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(5): 481-488.  
HAN S L, LIANG S X, SUN Z C. Numerical simulation of tides, tidal currents and temperature-salinity structures in Xiangshan Bay based on FVCOM [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(5): 481-488.
- [10] YU Z, CHEN C S, ROBERT C, et al. Studies of the Canadian Arctic Archipelago water transport and its relationship to basin-local forcings; Results from AO - FVCOM [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(6): 4392-4415.
- [11] MILES C, JENNIFER A, YERUBANDI R. Sensitivity of the Simulated Kingston Basin—Lake Ontario Summer Temperature Profile using FVCOM [J]. Atmosphere-Ocean, 2013, 51(3): 319-331.
- [12] XUE P F, CHEN C S, QI J H, et al. Mechanism studies of seasonal variability of dissolved oxygen in Mass Bay: A multi-scale FVCOM/UG-RCA application [J]. Journal of Marine Systems, 2014, 131: 102-119.
- [13] LI B, KISEI R, CHEN Y, et al. Assessing the quality of bottom water temperatures from the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) in the Northwest Atlantic Shelf region [J]. Journal of Marine Systems, 2017, 173: 21-30.
- [14] WAN Z H, REN Z F, WANG X C, et al. Application of unstructured grid finite volume coastal ocean model (FVCOM) to the Yangtze River hypoxic zone [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2016, 26(8): 2410-2418.
- [15] 杨耀芳,叶然,周巳颖,等. 宁波海域环境风险源识别与分级研究[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(7): 119-124.  
YANG Y F, YE R, ZHOU S Y, et al. Ningbo Marine environment risk source recognition and classification research [J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(7): 119-124.
- [16] 北京化工研究院. 化学品毒性、法规、环境数据手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 59-62.  
BEIJING RESEARCH INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY. Handbook of Chemical Toxicity, Legislation, Environmental Data [M]. BEIJING: China Environmental Science Press, 1992: 59-62.
- [17] 陈维. 上海港船舶溢漏油污染事故风险评估研究[J]. 航海技术, 2010(6): 75-77.  
CHEN W. Study on Risk Assessment of Ship Spill Oil Pollution Accident in Shanghai Port [J]. Navigation Technology, 2010(6): 75-77.

## Diffusion simulation of leakage of dissolved hazardous chemicals in Ningbo-Zhoushan waters based on FVCOM

XU Guohuai<sup>1</sup>, PAN Zengdi<sup>2</sup>, ZHANG Haofei<sup>3</sup>, XU Peng<sup>3</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. East China Sea Branch Of State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China; 3. East China Sea Environmental Monitoring Center, S. O. A., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Based on FVCOM numerical model and with the support of relevant measurement materials at Ningbo-Zhoushan waters, the Epoxy Chloropropane has been selected as typical dissolved hazardous chemical substance to simulate the diffusion after the emergent leakage of hazardous chemical substance in the waters. According to different grades of the accidents, as is indicated by the simulation result, the concentration of epoxy chloropropane will be diffused to below safe concentration (0.02 mg/L) after 24 hours of leakage for ordinary and relatively big accidents. As to major accidents, however, there are still large areas of waters (30 ~ 190 km<sup>2</sup>) which have been polluted with concentration exceeding the safe limit after 24 hours of leakage. From the aspect of different tides time at diffusion, the diffusion is faster at ebb tide than at flood tide, and the diffusion process to below safe concentration at ebb tide is 2 to 6 hours faster than at flood tide. From the aspect of different regions of leakage, the diffusion at Cezi channel is faster than at Zhenhai port. The pollutants are basically diffused along the water channels when the leakage occurs at Cezi channel, and they will be detained along the bank of Beilun district and at Beilun and Daxie Island when the leakage occurs at Zhenahi port.

**Key words:** Ningbo-Zhoushan waters; soluble hazardous chemicals; FVCOM; diffusion simulation