

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.016

基于 EFDC 模型的感潮江段溢油事故风险预测

田威¹, 邱利², 李一平²

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为了在溢油事故发生后能够立即采取有效措施控制和减轻油污染,降低事故危害,采用环境流体动力学模型(EFDC)对长江下游靖江段某码头进行溢油事故风险影响预测。通过EFDC准确地模拟出该江段的二维流场,在流场、风场以及复杂地形等综合条件下,采用拉格朗日质点追踪法计算油品入江后油膜漂移轨迹以及到达、离开下游保护区的时间。结果表明:油膜沿水流方向逐渐被拉伸,覆盖面积逐渐增大,且受长江地形条件影响;在感潮江段,潮流场对油膜漂移行为的影响占主导作用,同时风场也会影响油膜的漂移行为。受涨落潮的影响,油膜向下游来回震荡漂移;溢油事故发生时刻的流场不同,油膜往下游漂移的速度也不同,当溢油事故发生在落潮时,油膜往下游漂移速度更快;不利风向时风速越大,油膜往下游漂移的速度越快。

关键词:感潮江段;溢油事故;环境流体动力学模型;油膜;油污染;漂移轨迹;风险预测

中图分类号:X143 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0098-05

Prediction of oil spill risk on tide sect of Yangtze River based on EFDC model

TIAN Wei¹, QIU Li², LI Yiping²

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to take effective measures in time to alleviate and control the oil pollution and minimize the damage after the accidents, Environmental Fluid Dynamic Code (EFDC) was applied to simulate the oil spill risk occurred in Jingjiang section in the downstream area of Yangtze River. Through EFDC, two-dimensional hydrodynamic of this section was accurately simulated. Considering the flow fields, wind fields and complex topographic conditions, Lagrange tracking method was used to calculate the oil film trajectory after oil spilling into the river, as well as the arrival and leave time to the Reserve in the downstream. The results showed that the oil film was stretched gradually along the flow direction, whose coverage area increased gradually, which was influenced by the terrain condition of Yangtze River. In the tide sect of the Yangtze River, flow fields played a dominant role in oil pollution diffusion, and wind fields also had an impact on oil pollution diffusion. The oil film moved downstream in terms of drift oscillation due to the alternative flood tide and ebb tide. When oil spill accident occurred in different flow field, the drift velocity of oil film was different. The oil film spread downstream faster when oil spill accident occurred at ebb tide. The larger the wind speed in the worst wind direction, the faster the oil film drifted downstream.

Key words: tide sect of Yangtze River; oil spill risk; Environmental Fluid Dynamic Code (EFDC); oil film; oil pollution; drift trajectory; risk prediction

长江是我国最重要的水源地,其水质安全至关重要。作为我国第一大河,长江中下游的航道水运条件极为优越,尤其是南京以下江段能够通行万吨

级的船舶。随着社会经济的迅猛发展,船舶运输量大幅增长,同时溢油事故风险也相应增加。油品泄漏进入水体形成油膜,严重破坏了水生生态平衡,主要

表现为影响水生生物光合作用、消耗水中溶解氧等,其所含的毒稠环芳烃和有毒重金属甚至能通过生物富集和食物链传递危害人体健康等^[1]。因此,溢油事故的控制和避免面临挑战,研究溢油在水体中的迁移变化成为备受关注的热点问题。

了解油膜的漂移轨迹,对及时采取有效的控制措施和消减油污染具有重要意义。目前,针对事故性溢油的预测,国内外都取得了一系列研究成果^[2-6]。然而,目前对溢油的研究主要集中于开阔的海域,很少有对长江等浅窄江道领域溢油的研究,且对于油膜扩展过程,更多地集中在 Fay^[7]提出的三阶段扩展理论。笔者采用 EFDC 模拟出感潮江段的二维流场,在建立流场的基础上采用拉格朗日质点追踪法计算溢油入江后油膜的漂移轨迹以及到达、离开水源保护区的时间;比较不同工况下的预测结果,分析流场和风场以及地形条件对油膜漂移轨迹的影响。

1 研究区域概况

长江南京段以下的长江三角洲地区,以分汊河型为主,绵延曲折,洲滩众多,河道宽阔,除局部水面较窄外,宽度一般在 1 km 以上^[8]。本次研究区域为长江下游从江阴长江大桥(鹅鼻嘴)至南通天生港的福姜沙河段,如图 1 所示,呈“两级分汊、三汊并存”的格局^[8]。该江段为非正规半日浅海潮,水位受下游潮汐和上游下泻径流的双重作用,水位呈潮汐周期变化,一天内两涨两落。长江从入江口开始自下而上潮波变形逐渐明显,涨潮历时变短,落潮历时变长,潮差沿程递减,天生港年潮差平均达 1.72 m,而上游南京仅为 0.5 m^[9-10]。根据区域常规气象资料,常年主导风向为东南偏东风,平均风速为 2.4 m/s。本研究溢油事故发生地为靖江段某码头附近,码头周围有以下保护区:上游 6 km 为雅桥取水口,下游 5 km 处为工业取水口,下游 7 km 处为夏仕港清水通道维护区,下游 16.6 km 为江心洲重要湿地,下游 23 km 处为如皋长青沙取水口,具体位置如图 1 所示。

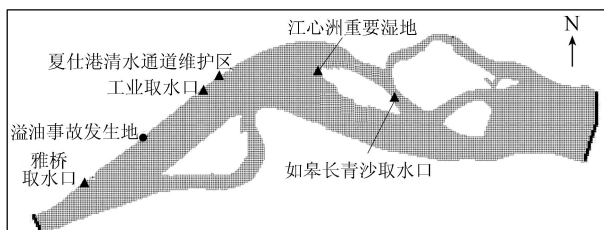


图 1 研究区域及各保护区位置图

2 研究方法

2.1 预测模型简介

本研究采用 EFDC 对长江下游靖江段某码头溢

油事故进行风险预测。EFDC 是在美国国家环保署资助下由维吉尼亚海洋研究所(Virginia Institute of Marine Science at the College of William and Mary, VIMS)的 John Hamrick 等根据多个数学模型集成开发研制的综合模型,被用于模拟水系统一维、二维和三维流场,物质输运(包括温度、盐度和泥沙的输运),生态过程以及淡水入流等。EFDC 的优势为:具有灵活的变边界处理技术和通用的文件输入格式,能快速耦合水动力、泥沙和水质模块,省略了不同模型接口程序的研发过程。同时 EFDC 有完整的前、后处理软件 EFDC-Explorer,采用可视化的界面操作,能快速生成网格数据和处理图像文件。此外,EFDC 模型的计算效率也较高。综上所述,选取 EFDC 模拟码头溢油风险事故对长江水环境影响。

2.2 研究区域网格建立

根据长江段的实际地形情况,预测区域采用笛卡尔直角坐标网格,网格尺寸为 150 m×150 m,研究区域全程 50 km,共概化出 10 430 个网格单元。根据研究区域长江地形实际情况,配合数字高程模型(DEM)进行单元高程插值,并设置初始水位、上下游水位、风场等边界条件。由于该江段的水深较浅(水深远小于河宽),可忽略流速垂向变化,因此不对垂向网格进行分层,建立该江段的二维水动力模型,模拟区域水力要素(流速、水位)随时间的变化过程。在建立的流场基础上,采用拉格朗日质点追踪法计算油品入江后油膜漂移轨迹。

2.3 模型计算条件及参数设置

长江下游江阴至南通段是感潮河段,水流既受上游下泄径流的影响,又受下游潮汐的影响,水流流态极为复杂,在确定设计水文条件时要同时考虑上游下泄径流和下游潮汐的影响。大通水文站是长江下游河段不受潮汐作用影响的水文站,其流量频率分析结果可代表长江下游河道的设计流量;下游的江阴水文站位于长江口,其潮位代表潮汐作用的影响。因此,以大通站的设计流量和江阴站相应的潮位过程为边界条件,应用一维感潮河段的水量模型计算得到本项目计算范围的上、下游边界的设计潮位过程。

根据国家相应规范、规程要求,从偏安全的角度,应采用 90% 保证率最枯月平均流量作为设计流量。统计大通水文站 1950—2003 年连续 54 a 逐月平均流量资料,经频率计算得到 90% 保证率的最枯月平均流量约为 7 670 m³/s。为安全起见,典型月的月平均流量应该小于并接近 7 670 m³/s。大通水文站 1979 年 1 月的平均流量为 7 220 m³/s,该流量已达到 97% 保证率,更符合安全与接近的条件,因此确定

以 1979 年 1 月为典型月,平均流量为 $7220 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模型中各参数取值见表 1。

表 1 预测模型主要参数取值

参数	描述	单位	取值
ΔT	时间步长	s	10
A_{H0}	水平动能或物质扩散系数	m^2/s	1.0
A_{HD}	无量纲水平扩散系数	无量纲	0.2
A_{V0}	运动黏性系数背景值	m^2/s	0.001
A_{B0}	分子扩散系数背景值	m^2/s	10^{-8}
A_{VMN}	最小动能黏性系数	m^2/s	0.001
Z_0	江底粗糙度	m	0.02
V_{ot}	油膜扩散速度	m/s	0
b	风对油膜运动的作用系数	无量纲	0.02
k	石油类的衰减系数	d^{-1}	0

2.4 模型率定验证

采用总体一维水流配合局部二维水流水质模型,先用一维水流模型对整个长江江苏段区域进行模拟,后根据二维模拟计算区域的划分,由一维模型为二维模型提供相应的水流边界条件,然后进行二维区域水流水质耦合数值模拟。

以具有实测资料的南京、镇江、江阴、天生港和徐六泾作为检验断面,使用 1996 年 7 月 1 日 1:00 至 7 月 9 日 2:00(共 193 h)、1997 年 7 月 19 日 0:00 至 7 月 26 日 11:00(共 179 h)、1998 年 6 月 26 日 6:00 至 7 月 4 日 3:00(共计 189 h)的资料进行模型率定,分别比较实测水位与模拟计算水位。结果表明,沿程水面线与实测水面线基本一致,潮位率定误差不超过 20 cm 的时段占总率定时段的百分比在 80% ~ 98% 之间。以天生港站 1996 年 7 月 1 日 1:00 至 7 月 9 日 2:00 的时段为例,水位误差不超过 20 cm 的时段占总验证时段的 80% ~ 90%,如图 2 所示。总体而言,一维水流模型对区域的概化处理基本合理,选用的参数基本反映了河道的水力特性。

为检验二维水流水质耦合模型模拟污染带的合理性,分别对南京八卦洲江段(南京长江大桥至石埠桥)和靖江江段(新潜洲至江阴大桥)进行模型的检验率定。为了能较准确地反映江段岸边形状及水下地形,采用无结构网格对计算域进行剖分,应用程序自动生成。网格单元中心点的高程从数字高程模型(DEM)中获取。由率定验证结果可知,EFDC 具有较好的匹配性,能够较真实地模拟出水体的水动力和水质的变化情况^[11]。

2.5 预测源强及方案

事故溢油主要为船舶自身的燃料油,一般千吨级以上船载储油量可达到 10 t 以上,根据设计码头的实际情况,以 1 个泊位停靠最大设计船型出现漏油事件考虑。按照一次最大溢油量计算,则千吨级轮船出现撞船等事故导致的溢油量为 10 t,即单次

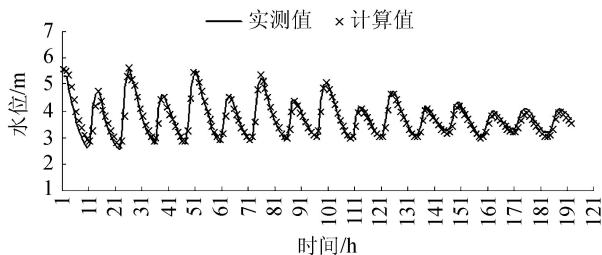


图 2 天生港站计算断面水位的实测值与计算值比较

事故流入长江的燃料油量最大为 10 t。

本次研究预测江段水质执行 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水标准,石油类质量浓度应小于或等于 0.05 mg/L ,模型中根据最不利条件可设石油类的本底质量浓度为 0.05 mg/L 。因此预测结果中石油类质量浓度超过 0.05 mg/L 的区域即认为是溢油造成了不利影响。

从偏安全角度考虑,根据设计码头所在地的靖江市市常规气象资料,选取其常年主导风向(东南偏东)风速 2.4 m/s 和不利风向(西风)瞬时最大风速 14 m/s 时,溢油事故分别发生在涨潮和落潮时刻作为设计工况,分析码头溢油事故发生后对下游各保护区的影响并假设溢油事故为非持续性溢油。设计工况见表 2。

表 2 溢油事故发生时的设计工况

工况	流场状况	风向/(°)	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	涨潮	292.5 (ESE, 主导风向)	2.4
2	涨潮	90 (W, 不利风向)	14
3	落潮	292.5 (ESE, 主导风向)	2.4
4	落潮	90 (W, 不利风向)	14
5	涨潮	90 (W, 不利风向)	2.4

注:南风为 0° , 西风为 90° , 北风为 180° , 东风为 270° 。

3 结果与讨论

3.1 油膜的漂移轨迹及其对各保护区的影响

溢油事故发生后油膜主要沿长江北岸漂移扩散,受涨落潮影响,油膜呈来回震荡并往下游漂移。不同流场和风场情况下,油膜的漂移趋势大致相同。研究江段分汊较多,油膜遇到浅滩或岛屿会被分割,然后又合会,最终紧邻北岸扩散。由于受到江段方向上往复流场的影响,油膜在往下游漂移扩散过程中沿流速方向逐渐被拉伸,油膜面积逐渐增大。以工况 3 为例模拟油膜的漂移轨迹及形态,结果如图 3 所示。

当油膜漂移扩散到保护区边界时,会对保护区造成污染。由于溢油发生时刻的流场、风场条件不同,油膜漂移扩散至各保护区的时间也不同。根据以上 5 个工况的模型预测结果,得出油膜漂移到达和离开各保护区的时间(表 3)。

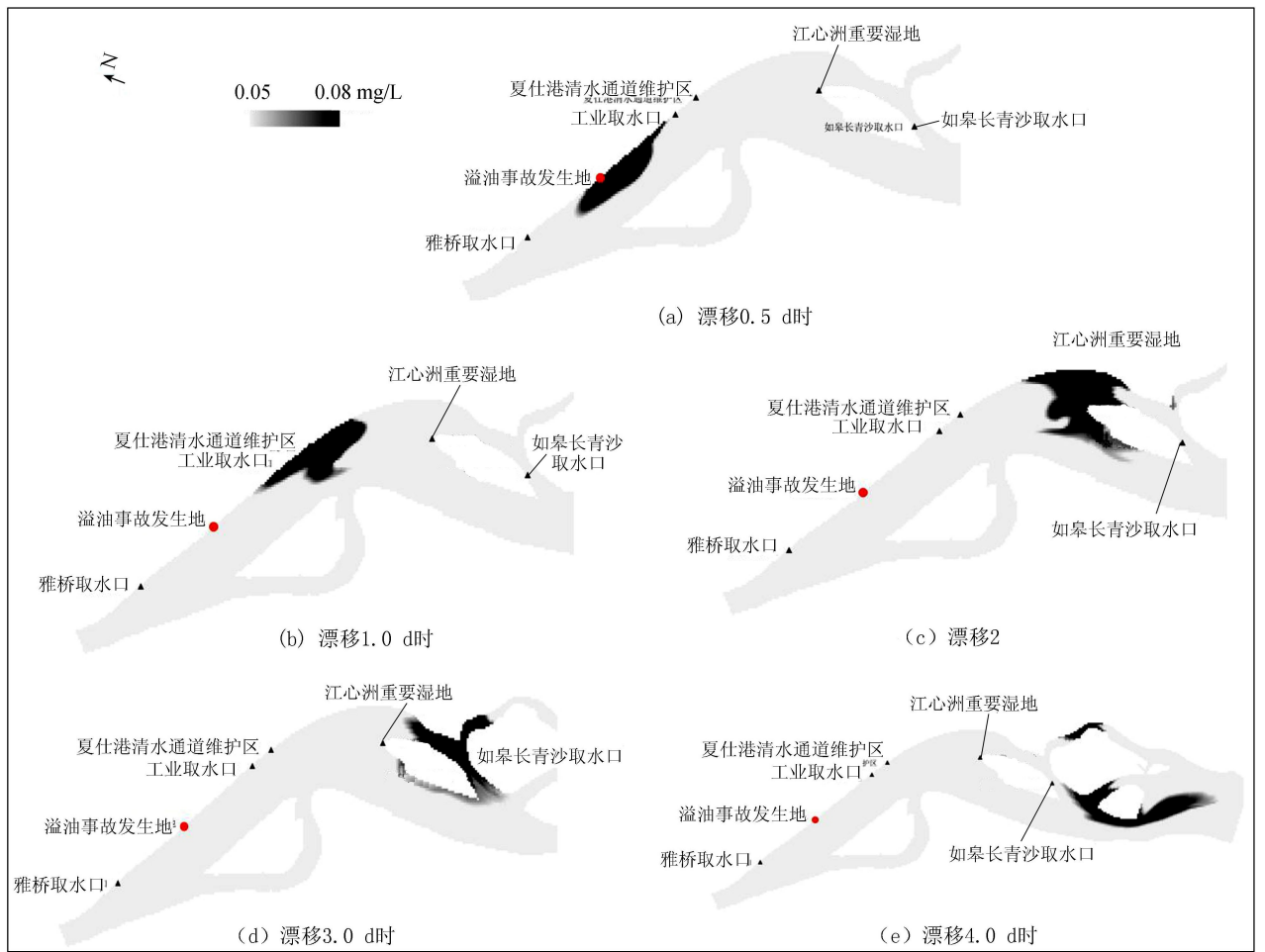


图3 设计工况3下油膜的漂移轨迹和形态

表3 溢油到达和离开保护区的时间

工况	环境保护目标	到达时间/d		离开时间/d	
		落潮	涨潮	落潮	涨潮
1,3	工业取水口	0.19	0.54	1.10	1.52
	夏仕港清水通道维护区	0.44	0.93	1.17	1.93
	江心洲重要湿地	1.20	2.00	2.58	3.41
	如皋长青沙取水口	2.20	3.00	3.66	4.85
2,4	工业取水口	0.17	0.47	0.90	1.41
	夏仕港清水通道维护区	0.21	0.53	0.77	1.45
	江心洲重要湿地	0.92	1.49	1.16	2.24
	如皋长青沙取水口	1.19	2.40	2.09	3.40
5	工业取水口		0.53		1.51
	夏仕港清水通道维护区		0.91		1.91
	江心洲重要湿地		1.98		3.39
	如皋长青沙取水口		2.97		4.81

3.2 流场对油膜漂移扩散的影响

工况1、3两种情况下,油膜漂移扩散到达和离开各保护区的时间如图4所示。预测结果表明,当事故发生在落潮时,油膜往下游的漂移速度更快,到达和离开各保护区的时间都早于事故发生在涨潮时。具体为:油膜到达工业取水口的时间差为0.35d,离开的时间差为0.42d;到达如皋长青沙取水口的时间差为0.8d,离开的时间差为1.19d。从图4可见,油膜越往下游漂移扩散,到达同一个保护区的时

间差越大。由此可以看出,流场对油膜漂移扩散的速度影响较大,且当溢油事故发生在落潮时,油膜对下游保护区的影响时间更早。

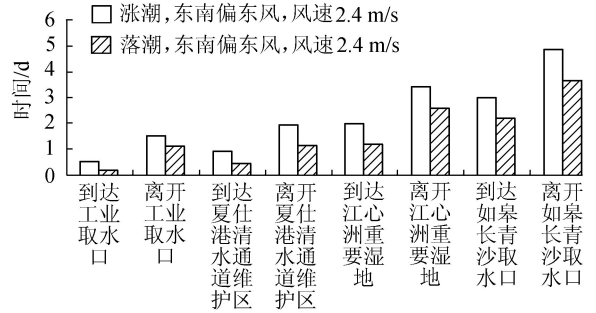


图4 不同流场时油膜漂移扩散到达和离开各保护区的时间

3.3 风场对油膜漂移扩散的影响

因为油膜漂移过程主要依赖于风场和流场的作用,因此有必要研究风场对油膜漂移轨迹的影响。当溢油事故发生在涨潮时,比较工况1、2、5的预测结果,分析风向和风速对油膜漂移扩散的影响。

比较工况1、5的预测结果,油膜到达和离开同一个保护区的时间不同,但时间差很小,详见表3。具体为:西风条件下,油膜到达和离开工业取水口的

时间比东南偏东风情况下均提前了 0.01 d; 西风条件下, 油膜到达和离开如皋长青沙取水口的时间比东南偏东风情况下分别提前了 0.03 d 和 0.04 d。由此可以看出, 当溢油事故发生在相同流场、相同风速的情况下, 风向对油膜漂移扩散的速度影响较小。

比较工况 2、5 的预测结果, 油膜到达和离开同一个保护区的时间明显不同(图 5)。由此可以看出, 当溢油事故发生在相同流场、相同风向的情况下, 风速对油膜漂移扩散的速度影响较大。

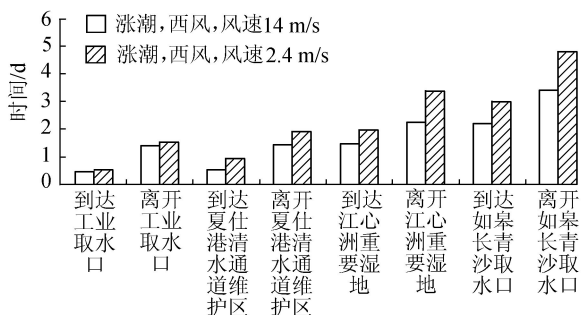


图 5 相同流场、相同风向、不同风速情况下, 油膜漂移扩散到达和离开各保护区的时间

4 结论

a. 基于 EFDC 构建的长江下游感潮江段二维水动力模型能够较为准确地反映该江段的水动力情况, 尤其是感潮江段的涨潮和落潮变化。

b. 油膜在漂移扩散过程中, 沿水流方向逐渐被拉伸, 覆盖面积逐渐增大。长江地形条件是影响油膜漂移轨迹的关键因素, 油膜紧邻岸边漂移扩散, 遇到浅滩或岛屿会被分割。

c. 除了地形条件, 流场是影响油膜漂移行为的主要因素。在感潮江段, 油膜受涨落潮的影响往下游来回震荡漂移。溢油事故发生时的流场不同, 油膜往下游漂移扩散的速度也不同, 当溢油事故发生在落潮时, 油膜往下游漂移速度更快, 会更早地影响下游保护区。

d. 风场也会对油膜漂移行为产生影响, 尤其是风速的变化会明显改变油膜的漂移速度。但风场对油膜漂移轨迹的影响程度要小于流场的影响。

e. EFDC 能够很好地模拟预测感潮江段溢油事故风险影响, 其预测结果能够以图形和动画的方式直观地展现出油膜的漂移轨迹和扩散范围, 以及到达和离开周围各保护区的时间和油膜形态, 该模型应用可以为长江下游感潮江段码头溢油事故风险的预警和应急提供决策依据。

参考文献:

[1] 巫丽俊. 感潮江段事故溢油二维数值模拟[D]. 南京:

2006.

- [2] 武周虎, 赵文谦. 海面溢油扩展、离散和迁移的组合模型[J]. 海洋环境科学, 1992, 11(3): 35-42. (WU Zhouhu, ZHAO Wenqian. A model of spreading, dispersion and advection caused by an oil slick on the unstable sea surface[J]. Marine Environmental Science, 1992, 11(3): 35-42. (in Chinese))
- [3] MANUEL G, LUIS F, ADOLFO U, et al. Operational oceanography system applied to the prestige oil-spillage event[J]. Journal of Marine System, 2008, 72(1/4): 178-188.
- [4] 张艳军, 雒文生, 雷阿林, 等. 河道溢油模型在三峡水质预警系统中的研究与应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 128-131. (ZHANG Yanjun, LUO Wensheng, LEI Alin, et al. Research and application of river oil spill model in advance warning system of water quality of Three Gorges[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(1): 128-131. (in Chinese))
- [5] 李大鸣, 刘江川, 吴丹, 等. 渤海海洋溢油的数学模型[J]. 天津大学学报, 2012, 45(1): 50-57. (LI Daming, LIU Jiangchuan, WU Dan, et al. Mathematical model of marine oil spill in Bohai [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(1): 50-57. (in Chinese))
- [6] 韩龙喜, 张琳, 金文龙, 等. 基于油粒子模型的水库水质应急预警[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 120-124. (HAN Longxi, ZHANG Lin, JIN Wenlong, et al. Water quality emergency warning in reservoirs based on oil particle model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41(2): 120-124. (in Chinese))
- [7] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[R]. New York: Oil on the Sea Plenum, 1969.
- [8] 闻云呈, 夏云峰, 张世钊, 等. 长江下游南京至浏河口河段沿程设计最低通航水位分析[J]. 水运工程, 2012(3): 100-103. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, ZHANG Shizhao, et al. Design lowest navigation water level of river from Nanjing to Liu river estuary on lower Yangtze River [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(3): 100-103. (in Chinese))
- [9] 徐元, 黄志扬. 长江下游南通至南京段深水航道设计通航标准研究[J]. 水运工程, 2014(1): 1-9. (XU Yuan, HUANG Zhiyang. Designed navigational standards for deepwater channel in the lower stretch of the Changjiang River between Nantong and Nanjing[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(1): 1-9. (in Chinese))
- [10] 蒋艳. 长江江苏段主要地区水流数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [11] 牟林, 邹和平, 武双全, 等. 海上溢油数值模型研究进展[J]. 海洋通报, 2011, 30(4): 473-480. (MU Lin, ZOU Heping, WU Shuangquan, et al. Numerical model research on the ocean oil spill [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(4): 473-480. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-03-11 编辑: 徐娟)