

# 渤海沉潜油运动规律的数值模拟分析

任律珍<sup>1</sup>, 杨金湘<sup>2</sup>, 王佳<sup>3\*</sup>

(1.集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门海洋预报台, 福建 厦门 361008; 3.集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于渤海三维温-盐-流动力学模型, 依据沉潜油的沉潜特性, 建立了基于拉格朗日追踪的渤海沉潜油模型, 对渤海不明油源沉潜油迁移运动规律进行模拟和分析。对模型模拟结果进行概率统计, 实现了对渤海沉潜油来源的定量分析, 进而探讨了季节尺度上秦皇岛沿岸沉潜油的局地与远程来源的关系, 以及春末夏初秦皇岛海域出现沉潜油上岸的机制, 为渤海不明来源沉潜油的监视和防控提供了参考依据。

**关键词:** 区域海洋模式系统; 油粒子模型; 来源; 路径

**中图分类号:** P 76      **文献标志码:** A

渤海是一个半封闭型的内海, 包括辽东湾、渤海湾、莱州湾, 也是我国重要的海洋石油生产基地, 主要油田分布在辽东、石岛坨、渤西、渤南、蓬莱。渤海的石油开采始于1965年<sup>[1]</sup>, 开采过程中发生的溢油事故造成大量原油泄露直接进入海洋水体中, 例如2011年美国康菲公司开发的蓬莱19-3油田。泄露的重油及形成的油基泥浆等比重较大的物质悬浮或沉积于海底, 形成了渤海的沉潜油。此外, 船舶碰撞、设施老化和一些未知来源的溢油都可能是渤海沉潜油的来源。渤海的水体交换能力差, 主要海湾水体半交换周期可长达数年<sup>[2]</sup>, 沉潜油将长期滞留于渤海, 且存在于海面以下, 遥感、巡航等观测手段难以发现其行踪, 因此沉潜油对渤海的海洋生态环境和沿岸的水产养殖等会产生持久而又难以防控的影响。近些年的调查发现沉潜油会周期性地环渤海沿岸出现上岸的现象, 例如每年的1—2月和4—6月沉潜油会分别出现在烟台和秦皇岛沿岸的海滩<sup>[3]</sup>, 表明这些不明来源的沉潜油在渤海的迁移运动具有一定的规律性。对沉潜油运动规律的研究可以为沉潜油的防治与有效捕获提供科学的参考依据。

现场调查和遥感手段难以进行大面积的水下溢油调查, 数值模拟技术已成为一种经济、有效的方法, 被应用于水面和水下溢油的迁移扩散研究。在水下溢油的模拟研究方面, 主

**收稿日期:** 2019-02-14    **录用日期:** 2019-08-05

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金 (41606004)

**\*通信作者:** wangjia2016@jmu.edu.cn

要是针对水下事故型喷发出的溢油，常采用喷射阶段的羽流动力模型和对流扩散模型结合的方法进行模拟<sup>[4-9]</sup>。本文的研究对象为被动的沉潜油，即已失去主动量的溢油，除了吸附沉积过程外，主要随海流迁移扩散。因此本文在三维水动力模型和油粒子模型<sup>[10-11]</sup>的基础上建立了渤海三维沉潜油模型，模型除了考虑油粒子在水体中对流扩散过程外，还加入了沉潜油的沉积与再悬浮作用。借助于模型结果，文章重点对沉潜油规律性上岸的来源和运动规律进行分析与讨论。

## 1 海洋动力模型

本文基于三维非线性、斜压的区域海洋模式（Regional Ocean Modeling Systems）<sup>[12]</sup>来建立渤海的三维水动力模型。模式采用自由表面、基于静力假设和 Boussinesq 近似条件下，求解雷诺平均的 Navier-Stokes 方程。在数值求解过程中，模式采用内、外模态分裂技术，将水位的求解过程从三维的控制方程中分离出来，在时间步长较小的垂向积分方程（外模态）中进行求解，而三维的流速和密度在时间步较长的内模态中计算，既保证了模型的稳定性又提高了模拟的速度<sup>[12]</sup>。模型底摩擦应力采用如下计算式（1）：

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v) \quad (1)$$

其中， $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ 为  $x$ 、 $y$  方向的底摩擦应力， $u$ 、 $v$  为  $x$  和  $y$  方向的流速，底摩擦系数  $C_d = \max\left(\frac{\kappa^2}{[\ln(\frac{z_b}{z_0})]^2}, 0.0025\right)$ ， $\kappa$  为卡曼常数 0.4， $z_b$  为底层网格厚度， $z_0$  为底部粗糙度 0.02。

模型计算区域及水深分布见图 1，水平方向上使用正交的 Arakawa C 网格，模拟区域为 117°~127.4° E 和 34°~42° N，水平分辨率为 1/30°。垂向上使用随地形的 S 坐标<sup>[13]</sup>，对表底层进行加密，分为 11 层。水深数据来自美国大气与海洋局提供的高分辨率 ETOPO1 水深数据集<sup>[14]</sup>和数字化海图。模拟时间从 2011 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日，其中 2012 年 4—6 月期间秦皇岛沿岸发生了多次不明来源的沉潜油上岸。

模型初始场由 WOA2013 的温盐数据 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/world-ocean-atlas-2013-woa13>) 插值得到。海表动量和热盐驱动数据来源于多平台交叉校正(CC MP)的风场<sup>[15]</sup> 和美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析产品(<http://www.opc.ncep.noaa.gov>) 提供的 6 h 间隔的风场和海表热及蒸发降水通量。模型开边界采用 10 个主要分潮作为驱动，包括 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、Mf、Mm，各分潮的调和常数提取自 TPXO7<sup>[16]</sup>。此外，模型开边界处还加入了 Wang 等<sup>[17]</sup> 中建立的西北太平洋模型的模拟结果，包括水位、流速和温度、盐度。

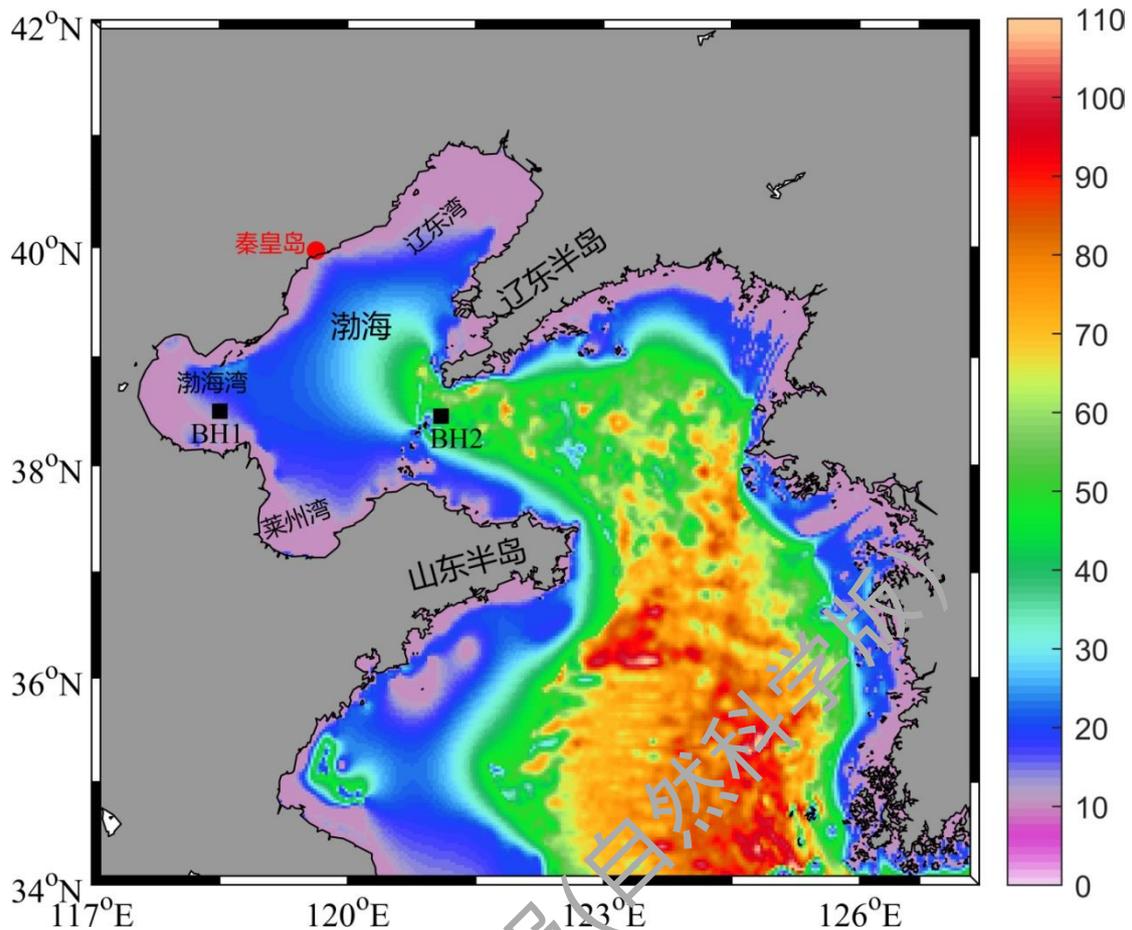
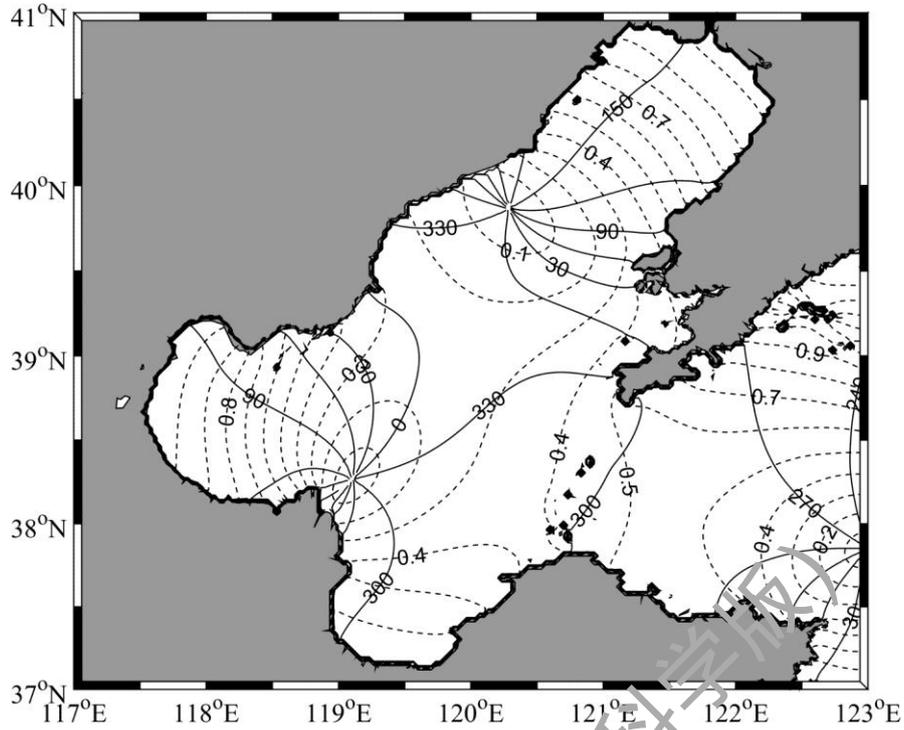


图 1 模型计算区域及水深分布 (单位: 米, BH1: #1 测点, BH2: #2 测点)

Fig. 1 Model domain and topography (Unit: meters, BH1: measuring point #1, BH2: measuring point #2)

## 1.1 潮位

虽然受到季风的作用,但由于渤海半封闭性质,渤海的动力过程仍然以潮汐作用为主导。本文通过对模型水位的调和与分析,对模型的模拟结果进行验证。图 2 为 M2 分潮的同潮图,可以看出由南边界传入的潮波分成两支向北传播:一支折向山东半岛并遭到山东半岛南岸的反射;另一支继续向北进入北黄海后遭到黄海北岸岸线的反射,入射波与反射波的相互干扰结果,在科氏力作用下分别形成了两个逆时针旋转的驻波系统,无潮点的位置分别位于山东半岛成山角外侧和海州湾外。进入北黄海潮波的一部分继续折向西并经过渤海海峡进入渤海,同样受到渤海西岸的阻挡,反射波作用下分别在辽东湾西侧和渤海湾南侧,形成了两个逆时针旋转的潮波系统,无潮点的位置分别位于秦皇岛和黄河口附近,渤海内的两个无潮点的位置非常接近陆地,表现为准退化的潮波系统。由于地形的作用,在辽东湾和渤海湾的顶部为渤海振幅最大的区域,最大振幅可达 1 m。模型的潮汐模拟结果与 Fang 等<sup>[18]</sup>基于 TOPEX/Poseidon 高度计观测结果一致,说明模型能够很好地模拟出渤海的潮汐动力过程。



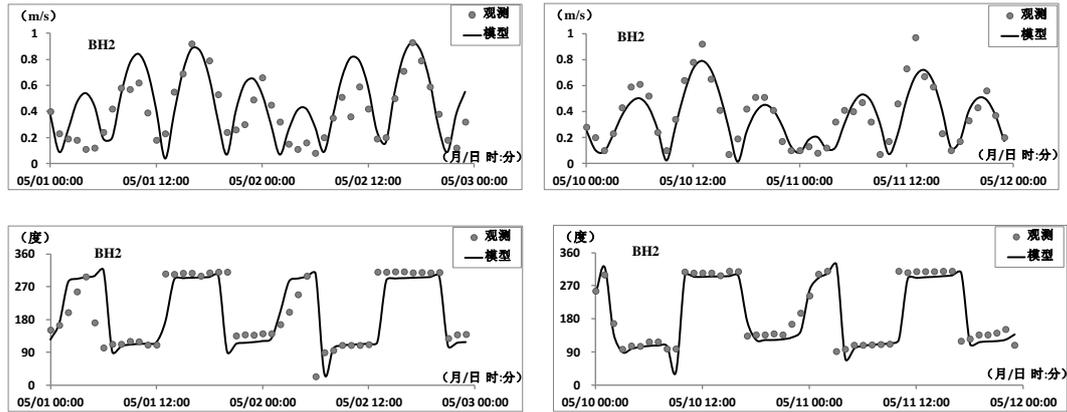


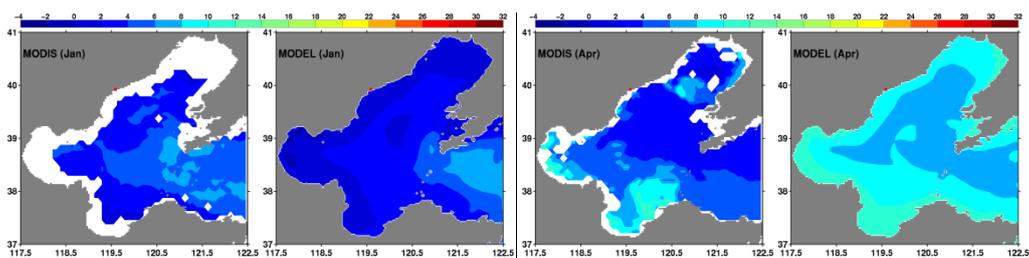
图 4 #2 测点模型与观测海流流速（上图）、流向（下图）比较

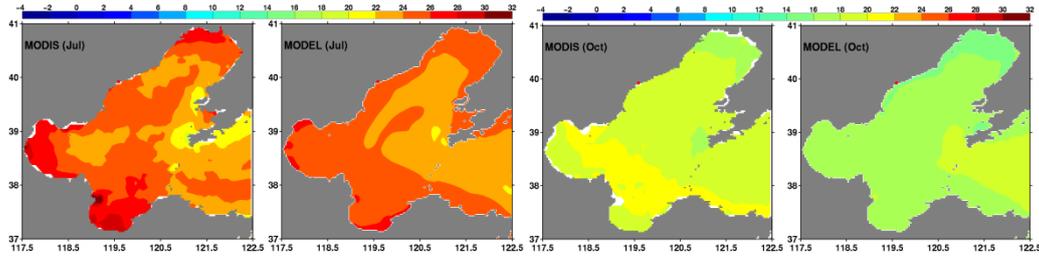
Fig. 4 Comparison of current speed (upper panel) and direction (lower panel) between model and observation at measuring point #2

### 1.3 海表温度

将模型模拟的海表温度与卫星遥感观测结果进行对比。卫星数据来源于 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (<https://modis.gsfc.nasa.gov>) 的三级产品，空间分辨率为 4 km。采用 MODIS 的 2012 年月平均海表温度与模型当月平均的结果进行比较，选取 1、4、7 和 10 月作为四季的典型月份进行对比，如图 5 所示。

结果显示，模型能够很好地模拟出渤海水温的季节性变化规律。1 月（冬季），整个渤海处于失热状态，渤海的最低温（ $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）出现在水深较浅的各湾区及渤海中部的浅滩，受到南部沿岸流的影响，其沿岸的低温水随着海流流出渤海，在鲁北沿岸出现了低温带，而在渤海中部，由于黄海暖水从渤海海峡的涌入，其水温相对略高（ $8\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。4 月（春季），随着热辐射的增强，渤海各海湾的温度回升至  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右，而渤海海峡及渤海中部的的水温变化较小，模型温度与遥感温度存在  $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的偏差。7 月（夏季），渤海大部水温超过  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，各大湾区的水温达到  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，黄河口等局地水温超过  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，渤海中部的的水温在  $22\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。10 月（秋季），渤海水温降至  $14\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其降温幅度由北部的辽东湾至南部的莱州湾逐渐减小，最低温出现在辽东湾顶为  $12\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此表明，模型能够较为准确地模拟出渤海温度的季节性变化规律和空间分布规律。





图中红色点标注位置为秦皇岛（下同）。

图 5 2012 年渤海 1、4、7 和 10 月平均表层海水温度（左：遥感观测；右：模型模拟）

Fig. 5 Monthly mean sea surface temperature of Bohai Sea on January, April, July and October in 2012 (left: remote sensing observation; right: model simulation)

## 1.4 环流结构

沉潜油在某些天气或海流条件下处于悬浮或漂浮状态时，不仅会随着潮流作往复运动，还受到海洋环流的作用，产生一定的净位移，使得沉潜油能够在渤海长距离的迁移运动。图 6 为模型模拟渤海 1、4、7、和 10 月表、底层的环流分布，分别对应为冬季、春季、夏季和秋季。

模型结果显示，由于半封闭的性质，除了河口和老铁山水道等局部海区外，渤海平均环流很弱，绝大部分的流速为厘米级。此外，在垂向上渤海环流表现为补偿流的特征，表层受到风的作用，表现为风海流，而底层为反向的补偿流，这与黄大吉等<sup>[19]</sup>模拟提出的表底反向的垂向环流结构一致。渤海各季环流具体分布为，冬季：渤海受到强烈的北风控制，表层为南向的海流，底层则表现为反向的补偿流。渤海西部、秦皇岛沿岸呈现西南向的沿岸流，由辽东湾流向渤海湾。春季：受到季风转向的作用，渤海表层为弱的东北向的海流，底层则同样表现为反向的补偿流。渤海西部、秦皇岛沿岸呈现连续的东北向的沿岸流，由渤海湾流向辽东湾。夏季：受到稳定的北向季风的控制，渤海表层的北向流加强，但渤海湾-辽东湾的东北向沿岸流减弱。秋季：渤海中部和辽东湾表现为顺时针的环流结构，老铁山水道表层水流出渤海，底层为流入渤海。

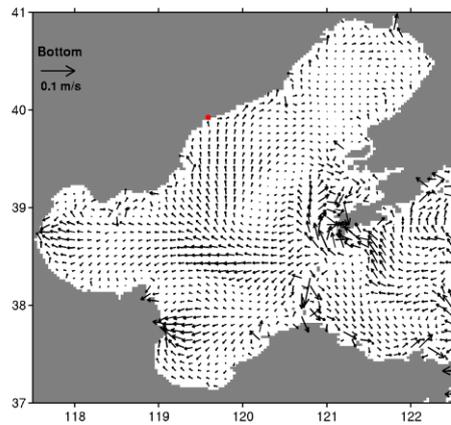
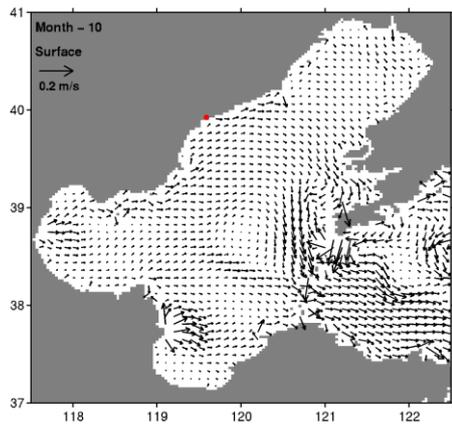
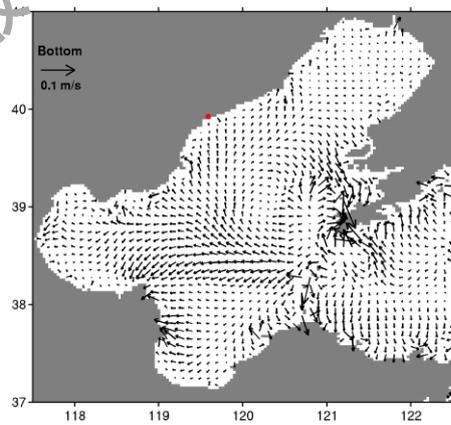
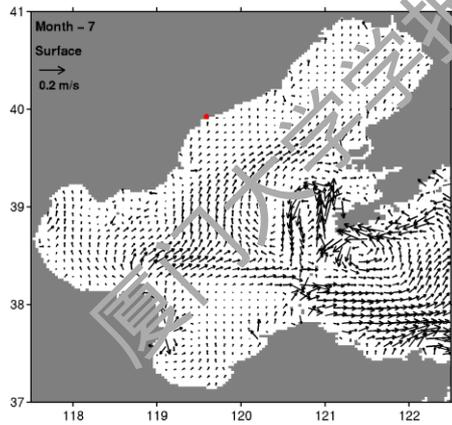
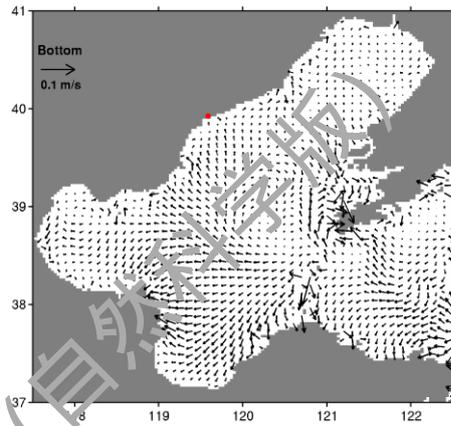
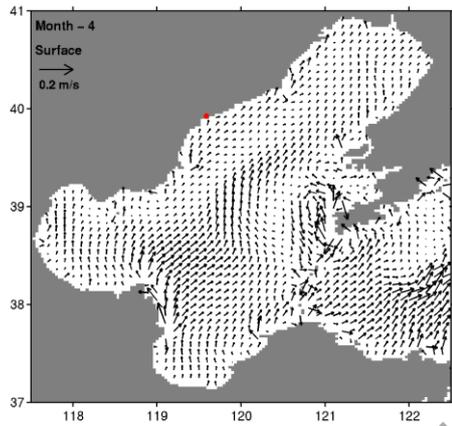
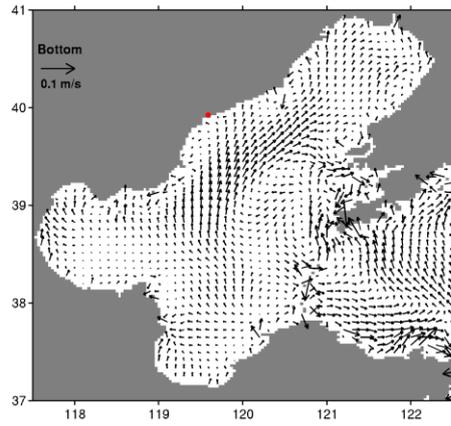
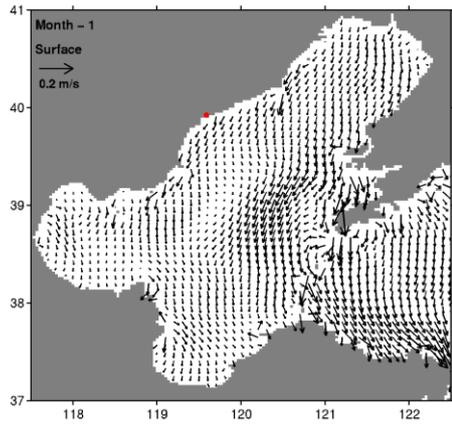


Fig.6 Modeling residual currents at surface and bottom on January, April, July and October in 2012

## 2 沉潜油模型及实验设置

对捕获的沉潜油性状分析发现，沉潜油颗粒呈黑色，平均粒径约 2 cm，最大可达 30 cm；属于尚未发生风化、乳化的油类，平均密度约 996 kg/m<sup>3</sup>，在海水中处于悬浮或漂浮状态。此外油粒具有很强的粘性，分析该沉潜油可能粘附于海底岩石等固体表面，由于某些特定的海况条件，如大潮、大风等过程，产生急流或强烈的水体混合，在水体底部产生了足够大的剪切应力，使得原本粘附于底部的沉潜油被搅动至水体中，在水体的混合作用大于其自身沉降作用的情况下，被不断地混合至上层水体，并随海流在水平方向迁移。2018 年台风“安比”经过，秦皇岛沿岸发生较大规模的沉潜油上岸现象。推测沉潜油的上岸是由海洋中强烈的混合引起“粘”底的沉潜油再悬浮后产生的。因此本文提出了基于三维油粒子模型和底部再悬浮过程的沉潜油模型。

文章采用经典的油粒子模型<sup>[20]</sup>，其主要思想是通过欧拉空间速度场的信息，计算粒子的拉格朗日空间位移变化，计算过程见式(2)。

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{v} + \vec{v}' + w_b \vec{k} \quad (2)$$

其中， $\vec{s}$ 表示油粒子的空间位移， $t$ 为时间， $\vec{v}$ 为粒子所在位置的时均流速（ $v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$ ）， $\vec{v}'$ 为脉冲流速或湍流速度， $w_b$ 为沉潜油自身受到浮力作用下垂向速度的大小。模块中，时均流速 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 的大小由海流模型的结果提供。由于沉潜油的密度与海水接近，在海水中处于悬浮或漂浮状态，其自身的浮力相对于海水的混合作用要小得多，因此浮力作用的沉降速度可以忽略。考虑沉潜油的吸附特性，将 $w_b$ 的值设为 0.01 m/d，使底层的油粒子在稳定的动力条件下能够吸附至海底。脉冲速度 $\vec{v}'$ 则根据 Hunter 等<sup>[21]</sup>提出的基于扩散系数的随机走动模型确定，其中扩散系数由三维动力模型确定。

此外沉潜油模型还包括底部再悬浮过程。该过程通过设置参数底部临界启动切应力（ $\tau_{bc}$ ），通过比较底部海流剪切应力（ $\tau_b$ ）与临界启动切应力的大小，控制沉潜油是否上浮。当 $\tau_b \leq \tau_{bc}$ 时，沉潜油处于粘附沉积状态；当 $\tau_b > \tau_{bc}$ 时，沉潜油粒子再悬浮进入底层海水后随海水流动，满足式(2)。

尽管将沉潜油模块进行简化，但由于模块中参数 $\tau_{bc}$ 和沉潜油的来源不明（包括空间位置和起始时间），不能类似于事故型溢油进行直接模拟。鉴于渤海沉潜油的来源不明，本

文在渤海底部的全部区域布放油粒子（图 7），粒子间隔为 2 km，作为油粒子的初始条件，在时间上积分模拟油粒子的迁移扩散过程。根据调查结果，秦皇岛沿岸的沉潜油主要发生在 2012 年 4—6 月，故分别将沉潜油的起始时间设为 1—6 月每月的 1 日，进行系列实验。参考蒋东辉和高抒<sup>[22]</sup>对渤海海峡底部沉积物临界启动应力的研究结果，渤海海底沉积物临界启动切应力的最大值在老铁山水道，为 0.9 N/m<sup>2</sup>，最小值在北黄海中部约为 0.3 N/m<sup>2</sup>，在渤海海峡及邻近海域临界启动应力分布不均。本文中 $\tau_{bc}$ 分别取 0.01、0.1 和 1.0 N/m<sup>2</sup>进行数值试验，各实验对应的时间及名称见表 1。

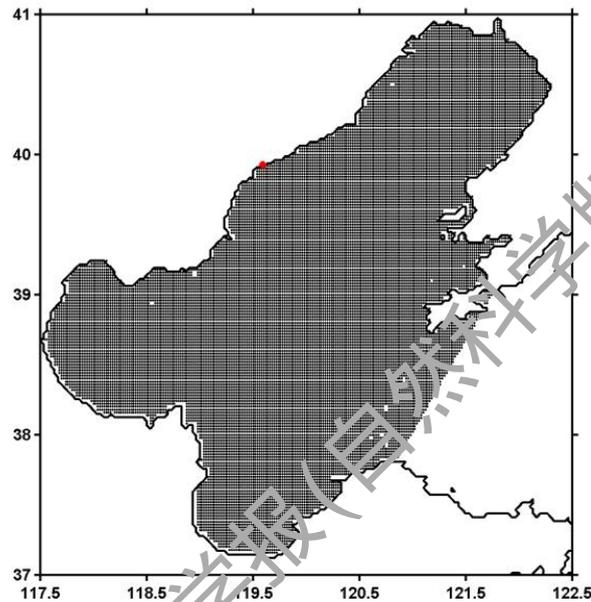


图 7 预设油粒子的初始位置（油粒子间隔：2 km）

Fig. 7 Preset initialization position of oil particles (spatial interval: 2 km)

表 1 数值实验

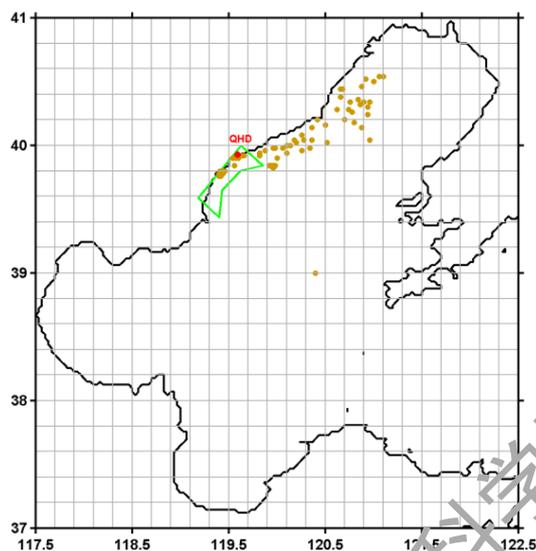
Tab 1 Numerical experiments

$\tau_{bc}$ (N/m <sup>2</sup> )	起始时间	1月1日	2月1日	3月1日	4月1日	5月1日	6月1日
0.01		实验 1a	实验 1b	实验 1c	实验 1d	实验 1e	实验 1f
0.1		实验 2a	实验 2b	实验 2c	实验 2d	实验 2e	实验 2f
1.0		实验 3a	实验 3b	实验 2c	实验 3d	实验 3e	实验 3f

### 3 沉潜油来源

#### 3.1 空间统计方法

为了减小随机效应和数值误差对结果的影响，可利用网格化统计的方法对零散分布的油粒子进行概率统计分析，统计网格的分辨率为  $0.2^\circ$ ，为初始油粒子间隔的 10 倍，如图 8 所示。



灰色实线为  $0.2^\circ$  的网格线；QHD：秦皇岛；绿色实线为秦皇岛沿岸 10 km 范围敏感区；棕色散点为油粒子的初始位置。

图 8 油粒子来源统计分析的网格化方案

Fig. 8 Gridding scheme for statistical analysis of oil particle sources

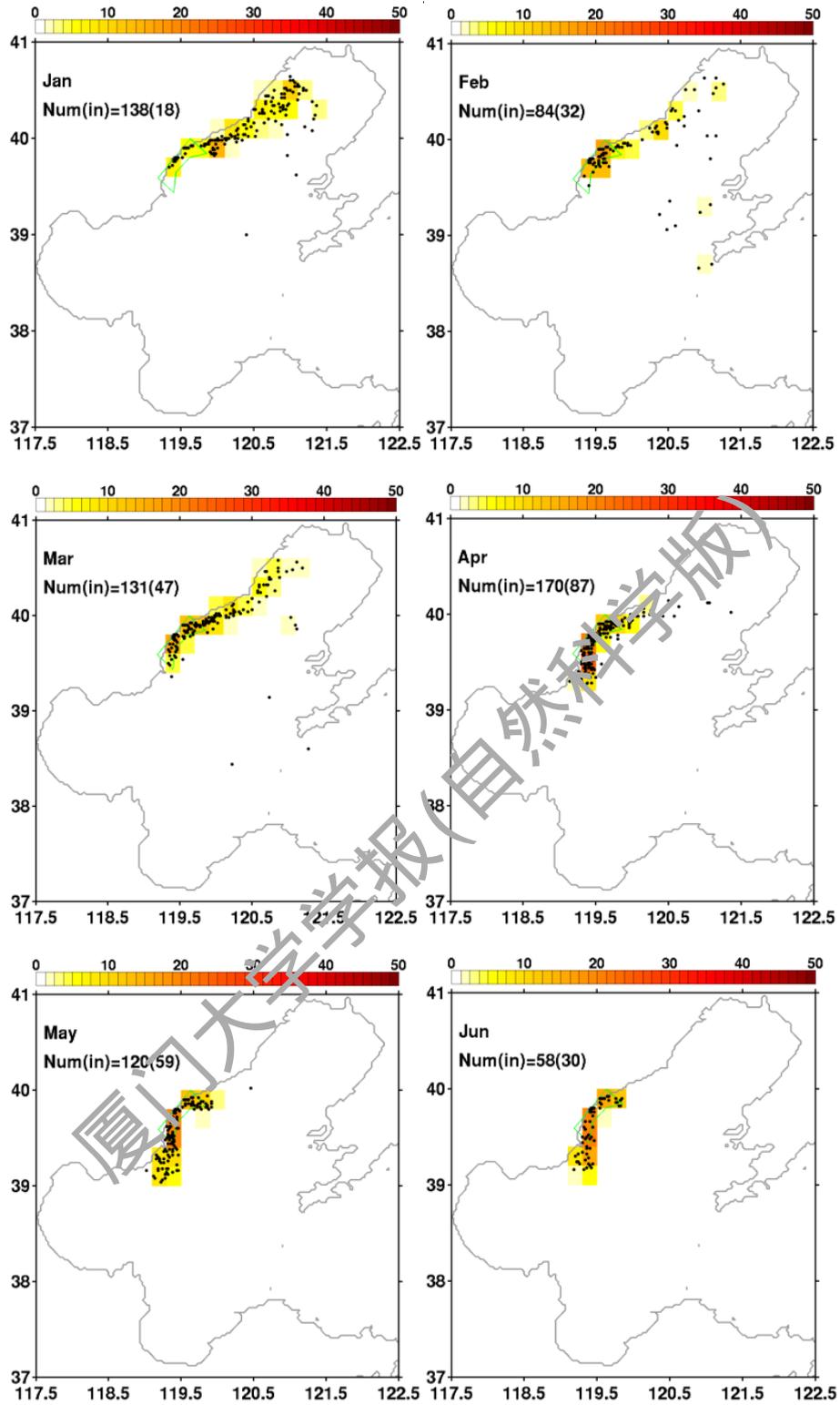
设秦皇岛沿岸 10 km 范围为敏感区，对 2012 年 4—6 月期间出现在敏感区表层的油粒子进行来源追踪。根据油粒子的来源位置，计算沉潜油来源的空间可能性 ( $p$ )，其计算方法如式(3)：

$$p = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100\% \quad (3)$$

其中， $n_i$ 为网格中油粒子的个数。

### 3.2 来源分析

图 9 为  $\tau_{bc} = 0.01 \text{ N/m}^2$  时，2012 年 4—6 月秦皇岛沿岸出现沉潜油的可能来源。根据油源距秦皇岛沿岸的距离，可以分为局地（10 km 敏感区）和远程来源。



1—6月：油粒子的起始时间；黑色点：沉潜油粒子起始位置；Num(in)：出现的总粒子数（源于局地的粒子数）。

图9 实验 1a~1f 沉潜油的来源空间可能性分布

Fig. 9 Possibility of submerged oil sources in experiments 1a~1f

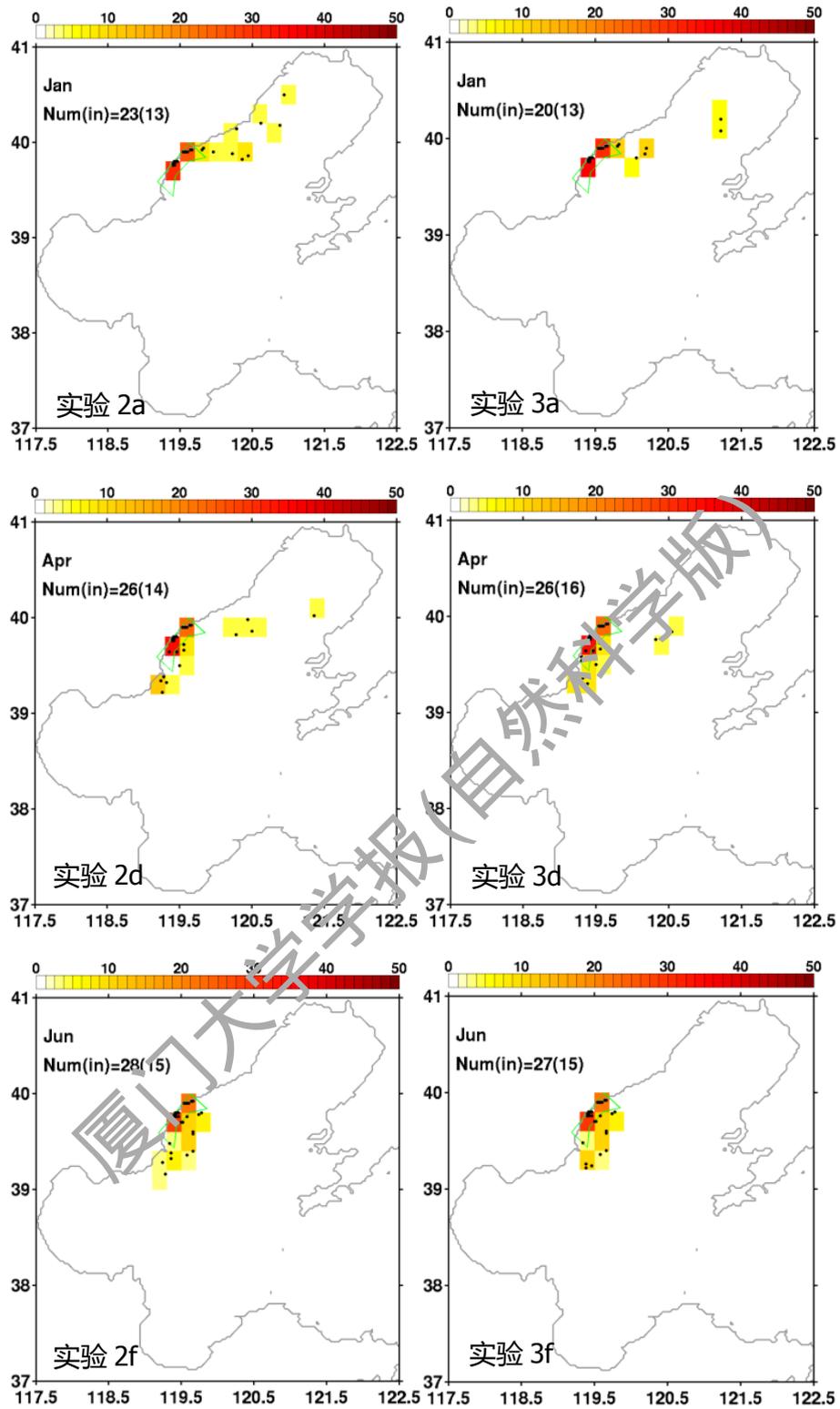
---

局地来源集中在敏感区内，且空间可能性  $p$  值较大，其中起始于 4 月的局地油粒子数最多。由于局地沉积的沉潜油会在潮流剪切和混合的作用下再悬浮，而 4 月为渤海的季风转变期，渤海的风生环流非常微弱，再悬浮的油粒子滞留在敏感区，随着混合的作用不断运动至上层水体。相比之下，起始于其他各月局地的油粒子发生再悬浮后，由于受到季风和风生环流的作用，随海流输运至敏感区外，因此其数目相对较小。

起始于 1—3 月的油粒子主要为远程来源，占总粒子数的 65%（2—3 月）~83%（1 月），但分散于秦皇岛东北部、辽东湾的西部海域 10~100 km，空间可能性  $p$  值仅为 5% ~ 10%；然而起始于 4—6 月份的远程与局地来源相当，分布于秦皇岛南部海域 10~50 km 范围，空间可能性  $p$  值约为 20%。该季节性的远程来源分布，与渤海风生环流的季节性特征一致。1—3 月为北风占主导，辽东湾西岸西南向的海流将受潮汐搅动后再悬浮的沉潜油向秦皇岛沿海输运。与之相应，5—6 月渤海南风占主，东北向的海流将秦皇岛西南部的沉潜油向秦皇岛沿海输送。5、6 月远程来源的距离较 4 月明显增加，可以延伸至秦皇岛沿海西南方约 50 km，与沿岸夏季北向环流的增强相关。此外，随着沉潜油起始时间与出现在敏感区的时间的间隔缩短（即沉潜油迁移扩散的时间），1—3 月的远程来源的可能性逐渐减小。

### 3.3 敏感性实验

为了检验临界启动切应力  $\tau_{bc}$  的取值对模拟结果的影响，进行调整  $\tau_{bc}$  的敏感性实验。实验结果表明（图 10），随着  $\tau_{bc}$  取值的增加，油粒的再悬浮量减少，秦皇岛沿岸出现的沉潜油数量也明显减小，但冬季（1 月）局地来源的油粒子比例大大增加（>50%）。远程来源的可能性减小的原因一方面是远程底部的沉潜油受动力干扰悬浮的可能性减小，另一方面是远程底部沉潜油受偶发性的动力扰动后未进入秦皇岛沿岸。尽管增加  $\tau_{bc}$  使得模拟的出现在秦皇岛沿岸沉潜油粒子的数量显著减少，但各月的油粒子来源分布与实验 1a~1f 基本一致。



1、4、6月：油粒子的起始时间；黑色点：沉潜油粒子起始位置；Num(in)：出现总粒子数（源于局地的粒子数）。

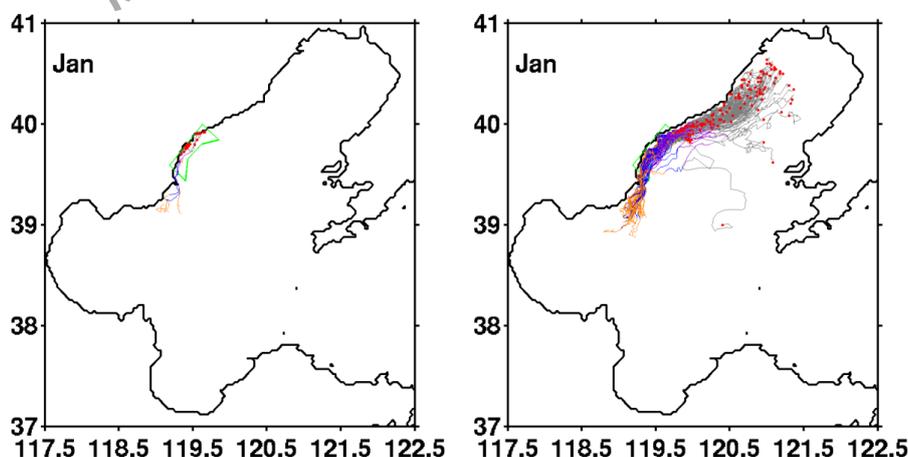
图 10 敏感性沉潜油的来源空间可能性

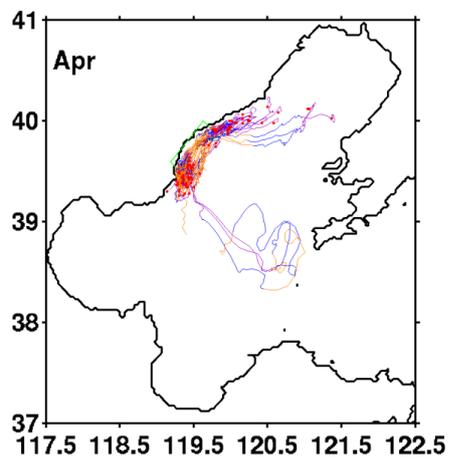
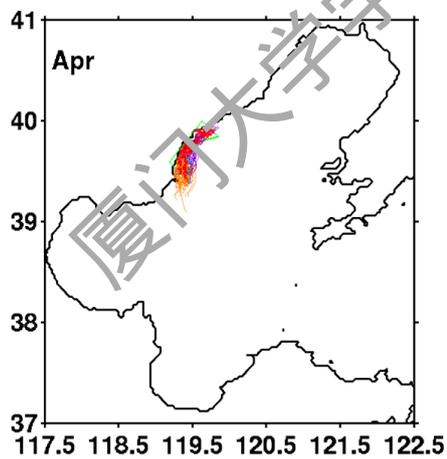
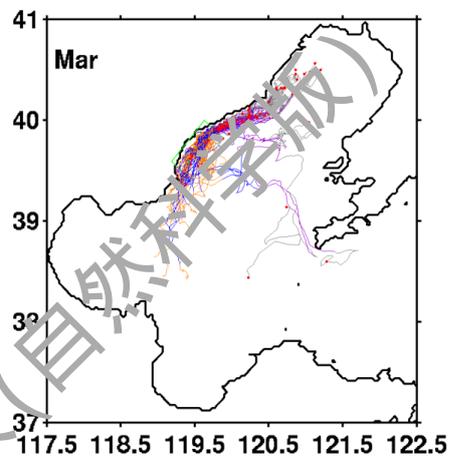
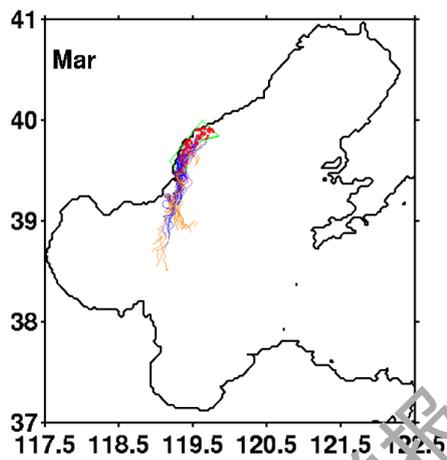
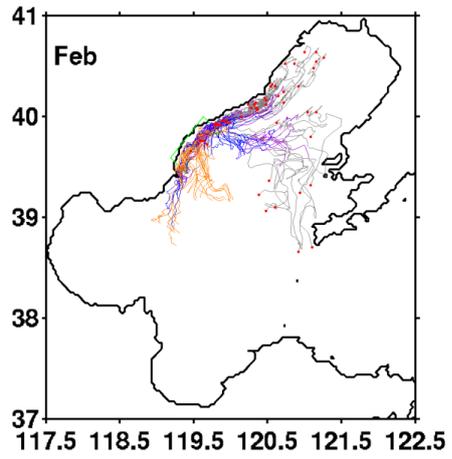
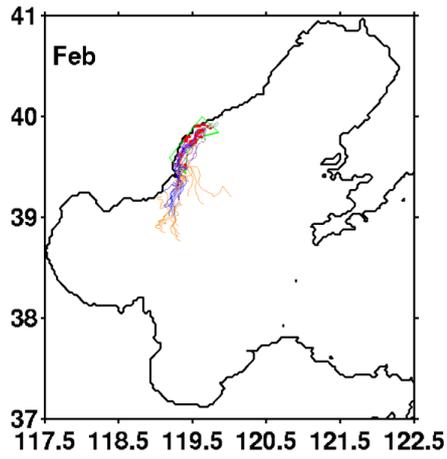
Fig. 10 Possibility of submerged oil sources in sensitivity experiments

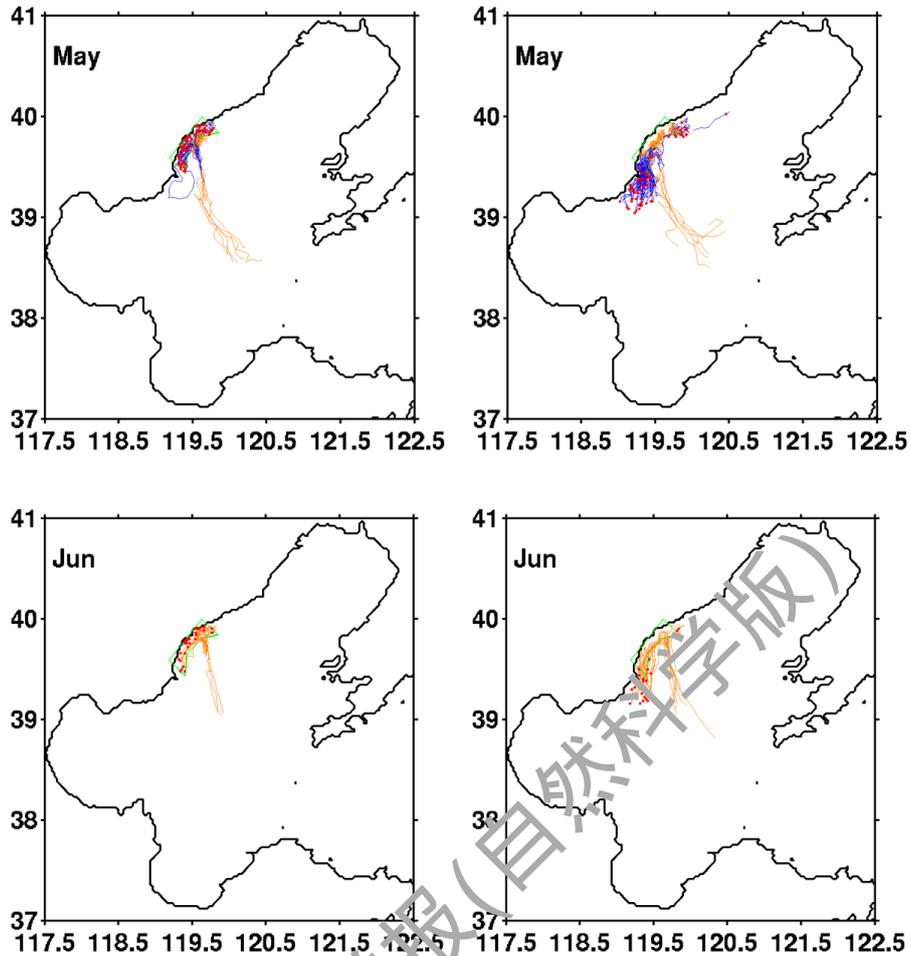
总的来看，秦皇岛沿岸表层 4—6 月出现的沉潜油中，起始于 1—3 月的主要来源为秦皇岛沿海及东北部邻近海域（约 20 km）的局地，少量分布于辽东湾西部海域的远程海区，最远可达 100 km；起始于 4 月的主要来源集中在局地和南北两侧的邻近海域；起始于 5—6 月的主要来源集中在局地和距离较远的西南部海域，可延伸至秦皇岛沿海西南方约 50 km。沉潜油受到潮汐等作用下，再悬浮于水体中后，随着渤海的季节性环流迁移扩散。冬季（12—2 月）渤海受到偏北季风的控制，秦皇岛沿岸表现为净的西南向环流，悬浮于水体中的沉潜油会随海流南下至秦皇岛附近海域，与起始于 1—3 月的沉潜油来源结果相符。春季（4 月）为季风交替季节，因此相应的沉潜油来源除了局地再悬浮产生外，在其邻近的南北两侧都有可能。春末夏初（5、6 月），南风开始加强，秦皇岛沿岸的北向环流也随着加强，沉潜油的来源可向上游追溯至秦皇岛沿岸南部约 50 km 处。

## 4 沉潜油上岸路径分析

在沉潜油来源分析的基础上，进一步对 2012 年 4—6 月期间出现在秦皇岛沿岸油粒子的上岸路径分析，并按照局地和远程来源进行分类，得到油粒子的轨迹图（图 11）。结果显示：起始于 1—3 月、局地再悬浮的沉潜油，部分会在 4—5 月随海流流出敏感区，流至秦皇岛西南海域；起始于 4—6 月、局地的沉潜油，只有少部分随海流流出，大多数会聚集在秦皇岛沿海，增加其上岸的可能性。相比之下，起始于 1—3 月、远程的油粒子，尽管会在 4—6 月进入秦皇岛沿岸 10 km 的敏感区，但基本未上岸并沿着海岸线方向迁移，其中部分粒子还会随海流南移至敏感区外的 100~150 km 西南-南部海域；起始于 4—6 月、远程的油粒子，随海流进入秦皇岛沿海敏感区并大量滞留于此，有少量会随强海流向东迁移至渤海海峡西侧海域。由此说明，起始于 4—6 月的沉潜油，无论是局地还是远程来源，均容易在秦皇岛沿海的敏感区域内聚集，造成沉潜油上岸现象的发生。







1—6 月：油粒子的起始时间；左：局地源；右：远程源；红色点：起始位置；紫色线：4 月轨迹；蓝色线：5 月轨迹；橙色线：6 月轨迹；灰色线：1—3 月轨迹。

图 11 实验 1a~1f 沉潜油的路径

Fig. 11 Trajectories of submerged oil in experiments 1a~1f

从油粒子沿径的运动深度来看（图 12），沉潜油粒子经过动力再悬浮后，垂直方向主要受到水体混合作用的控制。无论是局地还是远程来源的沉潜油，主要起始于沿岸浅水区域，油粒子再悬浮后，大多位于 5—10 m 层迁移，部分粒子在敏感区的沿岸出现在 5 m 以上或漂浮于海面。当粒子随海流迁移离开敏感区至较深的海域时，如大连西北部海域和秦皇岛西南部海域，受到天气和潮汐混合的作用，其运动深度会出现深、浅的交替现象。

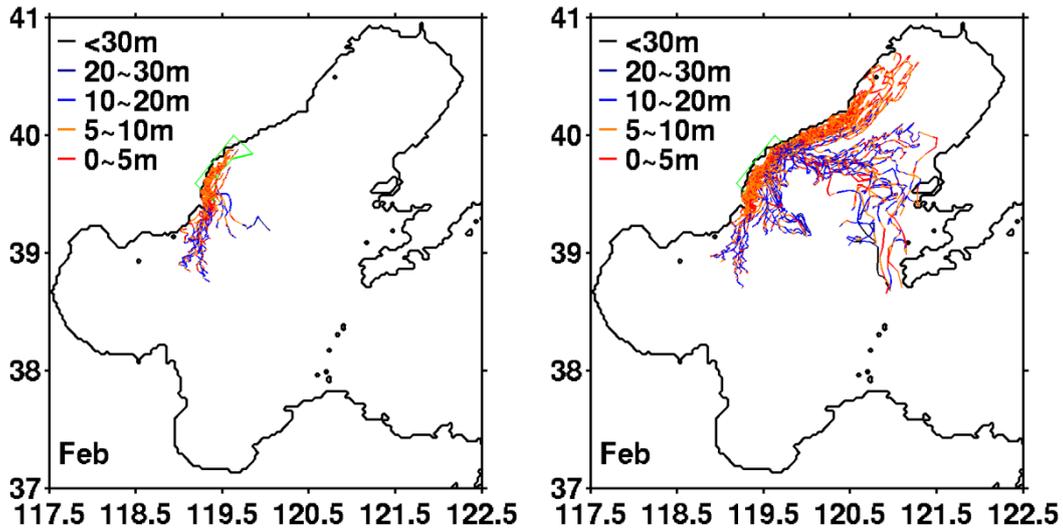


图 12 实验 1b 沉潜油的沿径深度变化 (2月: 油粒子的起始时间)

Fig. 12 Depths along submerged oil trajectories in experiments 1b (month 2, initial time)

## 5 结论

通过模拟研究,初步得出了渤海沉潜油在渤海沿岸出现季节性上岸现象的来源和路径。秦皇岛沿岸 4—6 月表层出现的沉潜油主要为起始于春季(4—6 月)、局地 and 西南部海域的远程来源,受到东北向海流的作用,该来源的沉潜油容易在秦皇岛沿海的敏感区域内聚集,增加了沉潜油上岸的几率。起始于冬季(1—3 月)、远程的油粒子,尽管会在 4—6 月进入秦皇岛沿岸 10 km 的敏感区,但部会随海流、沿海岸线方向南移至敏感区外的 100~150 km 西南部海域。而该海域的沉潜油又恰好是秦皇岛沿岸 4—6 月出现沉潜油的主要来源。因此可以推测冬季从辽东湾随海流南下的远程来源,在春季会随海流再次北流,聚集于秦皇岛沿海。从季节尺度上厘清了秦皇岛沿岸沉潜油的局地与远程来源的关系。该研究结果可以为秦皇岛沿岸沉潜油的预防和捕获提供科学的参考价值,建议 4—6 月探测及捕捞的重点为秦皇岛局部和西南部浅海海域。

## 参考文献:

- [1] 俞学礼.渤海油田开发的历程[J].中国海上油气(工程),1990,2(4):7-15.
- [2] 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.
- [3] 刘正江.沉潜油的成因及防治[M].大连:大连海事大学出版社,2014:1-224.

- 
- [4] YAPA D, ZHENG L. Simulation of oil spills from under water accidents I : model development[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997,35(5):673-687.
- [5] JOHANSEN Ø. Deepblow- A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000,6(2):103-111.
- [6] ZHENG L, YAPA P D, CHEN F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation[J]. Journal of Hydraulic Research,2002,41(4):339-351.
- [7] 汪守东, 沈永明.海底管线溢油数学模型研究[J]. 大连理工大学学报,2006,46(增):191-197.
- [8] 李怀明, 娄安刚, 王璟, 等.蓬莱 19-3 油田事故溢油数值模拟[J].海洋科学, 2014, 38(6):70-77.
- [9] 陈海波, 安伟, 杨勇, 等.水下溢油数值模拟研究[J].海洋工程, 2015,33(2):66-76.
- [10] WANG S D, SHEN Y M, GUO Y K, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas[J].Ocean Engineering, 2008, 35: 503-510.
- [11] GUO W J, WANG Y X. A numerical oil spill model based on a hybrid method[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009,58: 726-734.
- [12] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate Oceanic model[J]. Ocean Modelling 2005,9(4):347-404.
- [13] SONG Y H, HAIDVOGEL D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J.Comput. Phys.,1994,115(1): 228-244.
- [14] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum: NESDIS NGDC-24 [R]. NOAA, 2009.
- [15] ATLAS R, HOFFMAN R N, ARDIZZONE J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2011, 92: 157-174.
- [16] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2):183-204.
- [17] WANG J, HONG H S, JIANG Y W. A coupled physical-biological modeling study of the offshore phytoplankton bloom in the Taiwan Strait in winter[J]. Journal of Sea Research, 2016, 107: 12-24.
- [18] FANG G, WANG Y, WEI Z, et al. Empirical cotidal charts of the Bohai, Yellow, and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry[J].Journal of Geophysical Research,2004,109(C11):C11006.
- [19] 黄大吉, 苏纪兰, 张立人. 渤海冬夏季环流的数值研究[J]. 空气动力学学报,1998,16(1): 115-121.
- [20] JOHANSEN Ø. The halten bank experiment-observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment[C]// Proceeding of the 11th Arctic Marine Oil spill Program (AMOP) technical Seminar, Environment Canada. Edmonton: [s. n.], 1984: 18-36.
- [21] HUNTER J R, CRAIG P D, PHILLIPS H E. On the use of random walk models with spatially variable diffusivity[J]. Journal of Computational Physics, 1993, 106:366-376.
- [22] 蒋东辉, 高抒. 渤海海峡潮流底应力与沉积物分布的关系[J]. 沉积学报,2002,20(4):663-667.

## **Investigation of the submerged oil movement in the Bohai Sea by numerical modeling approach**

---

REN Lüzhen<sup>1</sup>, YANG Jinxiang<sup>2</sup>, WANG Jia<sup>3\*</sup>

(1. School of navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2.Xiamen Marine Forecaster Center, Xiamen 361008, China; 3.School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A Lagrange tracking submerged oil model was built based on the three dimensional thermo-saline-dynamic numerical model, which including the sink and suspending process of the submerged oil. The model was applied into the simulation of undetermined submerged oil movement in the Bohai Sea. In this paper, the source of the undetermined submerged oil is analyzed quantitatively by means of probability statistics. The relationship between local and remote sources of submerged oil along the Qinhuangdao coast was clarified on a seasonal scale, which helped to explain the mechanisms of the occurrence of submerged oil at the Qinhuangdao coast. The result provided a more objective reference for the monitoring and prevention and control of submerged oil from unknown sources in the Bohai Sea.

**Keywords:** regional ocean modeling systems; oil particle model; source; route

厦门大学学报(自然科学版)