

突发事件泄漏石油类污染物在水环境中迁移转化研究进展

韩龙喜^{1,2}, 王晨芳², 蒋安祺²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:突发事件泄漏的石油类污染物在水体中的迁移转化规律一直是环境水力学研究的难点。根据石油类污染物的物理、化学特征,针对其在水体中不同阶段的运动动力学特征,分别从油膜在水体表层的扩展迁移过程、水体表层油膜的风化过程、油膜污染物向下层水体的扩散过程、水体中石油类污染物的迁移转化过程、石油类污染物的迁移转化过程物理试验、常用溢油模型6个方面归纳分析了国内外在动力学机制及数学模拟方面的研究进展,并分析了未来研究趋势。

关键词:突发事件;石油类污染物;水环境;迁移转化;物理试验;数学模拟;溢油模型

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0110-08

Research progress of migration and transformation of oil pollutants from emergency spills in water // HAN Longxi^{1,2}, WANG Chenfang², JIANG Anqi² (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The migration and transformation law of oil pollution in the sudden pollution accidents has always been a key problem in the field of environmental hydraulics. According to the physical and chemical characteristics of this pollutants, the research progress in dynamic mechanism and mathematical simulation at home and abroad is summarized from six aspects, namely, the spreading and migration process of oil slick in water surface, the weathering process of oil slick in water surface, the diffusion process of oil slick into the deep water, the migration and transformation process of oil pollutants in water, physical test for migration and transformation of oil pollutants, the common oil spill models according to the kinetic characteristics of oil pollutants at different stages in water, and the future research trend is analyzed.

Key words: sudden accidents; oil pollutants; water environment; migration and transformation; physical experiment; mathematical simulation; oil spill model

水体中的污染物按照其理化性质可以分为可溶性污染物和难溶性污染物。难溶性污染物按密度大小又可分为飘浮性污染物(密度小于水)和沉降性污染物(密度大于水)。包括石油类在内的不可溶、飘浮性液体化学品在开采、运输、装卸过程中都存在泄漏的风险,如2010年4月20日,在墨西哥湾深水地平线发生的钻井平台爆炸事件,虽采取了先以围油栏拦截再以“可控方式”点燃等应急方式处理,但事故产生的浮油带长达160 km,最宽处72 km,是美国历史上最严重的漏油事故;2010年我国大连新港

输油管道爆炸,原油泄漏造成约50 km²海域受到污染^[1]。此外,装载化学品的船舶在航行中碰撞、液体化学品码头发生装卸事故等造成化学品泄漏等突发性水污染事故也屡见报道^[2-5]。

发生水体污染事故后,开展应急水质预警工作,即在短时间内对事故排放的污染物在天然水体中的空间分布特征及其时间演变过程进行实时预报,可为污染物的应急处置给予技术保障。现有研究表明,影响污染物进入天然水体后迁移转化特征的两重大物理指标是水溶性和密度,目前的水质模拟

基金项目:国家自然科学基金(51979079)

作者简介:韩龙喜(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源和环境水力学研究。E-mail: hanlongxi999@163.com

预警理论技术大多针对可溶性污染物,而对于一些难溶于水的漂浮性石油类污染物在水体中迁移转化的物理机理及定量研究则相对不足^[6]。

突发事件产生的漂浮性憎水有机物进入水体后,由于密度小于水而漂浮于水面,在随环境水体漂移运动的同时,一方面由于表面张力的作用油膜不断扩展,另一方面油膜在水动力作用下持续向下层水体扩散从而造成下层水体的污染^[7]。关于溢油风险水质预报预警,除了关注表层油膜迁移过程外,通过油-水界面进入下层水体污染物数量及下层水体污染物浓度垂向分布是水质安全、生态系统安全预报预警所关注的不可或缺的技术参数。因此,如何计算污染物自水面向下层水体的释放强度,是开展突发事件状态下水环境质量预报、预警的重要前提,是影响水体水质预报可信度的决定因子。目前,研究污染物进入水体后的迁移、转化规律主要采用物理模型试验和数学模型模拟这两种方法。综合国内外现有研究成果,突发事件产生的石油类污染物在环境水体中的运动过程大致可概括为 4 个方面^[8-9]:油膜自身在水体表层的迁移扩展过程、油膜风化过程、油膜污染物向下层水体的扩散过程、环境水体中石油类污染物的迁移转化过程。

1 突发事件产生的石油类污染物在环境水体中的运动过程

1.1 油膜自身在水体表层的扩展迁移过程

泄漏产生的大量石油类污染物排入水体后,以一定厚度的油膜状漂浮于水面,在没有采取围油等控制措施的情况下,油膜将在随环境水体迁移的同时不断扩展。溢油在水体表层的扩展过程早期主要通过油膜直径描述,较少考虑风化作用的影响。

Blocker^[10]只考虑重力和溢油体积的影响,提出了油膜在重力作用下于水体表层扩展迁移的圆形模型,从油膜质量守恒出发,得出油膜直径 R 的表达式:

$$R = \left[R_0^3 + \frac{24k_r}{\pi} (\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{oil}}) \frac{\rho_{\text{oil}}}{\rho_{\text{water}}} V_0 t \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: V_0 为油膜总体积; R_0 为初始油团直径; ρ_{water} 、 ρ_{oil} 分别为水、油密度; t 为溢油发生的时间; k_r 为 Blocker 常数,随油种类而变化,一般取 216 s^{-1} 。

Fay 等^[11]研究了惯性力、重力、黏性力、表面张力对油膜的影响,完善了油膜扩展理论,并给出了油膜直径变化的 3 个阶段:①惯性力-重力的初始阶段,该阶段扩散时间较短,一般在数十分钟内,重力是该阶段的主要驱动力;②重力-黏滞力平衡阶段,该阶段扩散大约需 1 个到几个小时,黏性力在该阶

段起主要作用;③黏性力-表面张力平衡阶段,该阶段扩散大约需几个小时到几天时间,表面张力在该阶段起重要作用。3 个阶段油膜扩展尺度的计算公式分别为

$$r_1(t) = c_1 (\Delta g V t^2)^{1/4} \quad (2)$$

$$r_2(t) = c_2 \left(\frac{\Delta g V^2 t^{3/2}}{\nu^{1/2}} \right)^{1/6} \quad (3)$$

$$r_3(t) = c_3 \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho^2 \nu} \right)^{1/4} \quad (4)$$

其中 $\Delta g = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} g$ $\sigma = \sigma_{\text{wa}} - (\sigma_{\text{oa}} + \sigma_{\text{ow}})$

式中: $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$ 、 $r_3(t)$ 分别为 3 个阶段油膜扩展尺度; V 为油膜体积; g 为重力加速度; ρ 为海水密度; ρ_0 为油膜密度; ν 为运动黏性系数; σ 为表面净张力; σ_{wa} 、 σ_{oa} 、 σ_{ow} 分别为水-气、油-气和油-水之间的界面张力; c_1 、 c_2 、 c_3 分别为 3 个阶段经验常数; t 为时间。

对溢油量进行估算时油膜厚度是关键参数之一。Mackay 等^[12]考虑了动力作用和油膜厚度的因素,以及油膜扩展初始呈薄片式扩散,提出了 UOT 模型,在这个模型中,厚油膜的面积假定占总面积的大部分,但总量只占小部分,由此计算厚油膜和薄油膜的扩展。对于连续溢油,Lehr 等^[13]研究油膜扩展的椭圆模型,假定在风力方向上,风速的增加导致油膜的扩展系数增加,而两侧的扩展系数不变,但并未考虑扩展过程中油膜厚度的变化以及潮流的影响。基于上述研究,牟林等^[14]提出了溢油发生后一段时间的油膜分布平均厚度和扩展半径公式,以及点源连续扩散的计算公式,假定油膜扩展的过程中厚度保持均匀,并始终为圆筒形状且呈二维方向,忽略风的影响,假定溢油扩展过程将位能转变为表面张力和黏滞逸散能。

随着溢油扩展模型逐步引入油膜各向异性的扩散作用和风的影响^[12],以及油膜边缘的消失过程^[15],并加入了风化因素^[16],对溢油扩展过程的理论研究进一步得到了完善。

动水环境下溢油在水体表面扩展的同时,还随着水体漂移。Webbl 等^[17]考虑各个因素如河流入海、潮流、地球自转流以及风生流对溢油漂移的影响,但忽略油膜自身扩展的影响,建立了 Navy 模型,得出了溢油在环境水体中漂移的质心位移公式。

Webbl 等^[17]认为,经过时间 $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ 后,溢油质心的位移 R_s 计算公式为

$$R_s = \sum_{i=1}^n (D_i + u_p \Delta t_i + u_g \Delta t_i + k_2 u_{10} \Delta t_i) \quad (5)$$

其中

$$D_i = u_e \Delta t_{ei} + u_f \Delta t_{fi}$$

式中: Δt_i 为时段; u_e 、 u_f 分别为平均退潮流流速和平均涨潮流流速; Δt_{ei} 、 Δt_{fi} 分别为退潮和涨潮在 Δt_i 中所占的时间; u_p 为河流入流引起的表面流流速; u_g 为地球自转引起的表面流流速, u_p 与 u_g 呈线性相关关系; k_2 为风漂流系数; u_{10} 为风速。

Williams 等^[18]进一步引入权重系数,同时将海洋的表面海流矢量与风速矢量耦合,考虑了溢油蒸发和溶解引起的一阶衰减,建立 SEADOCK 漂移模型,该模型考虑蒸发和溶解引起的一阶衰减,在计算过程中假定油膜均匀分布且围绕质心,使用费伊扩展公式计算并将油膜的扩展直径作为其扩展范围,可以用于预测油膜在海流矢量与风速矢量耦合作用下的漂移运动。

Williams 等^[18]计算得到在 Δt 时段油膜质心的位移 ΔR_i , 计算公式为

$$\Delta R_i = [k_2(au_{10N_i} + bu_{10F_i}) + u_{ei}] \quad (6)$$

式中: u_{10N_i} 、 u_{10F_i} 分别为 Δt 时段内近海和外海的风速矢量; k_2 为常数,一般取 0.03; a 、 b 分别为权重系数, ($a + b = 1.0$); u_{ei} 为 Δt 时段内表面海流矢量。

随后,周群等^[19-20]对风和海流引起的油膜漂移进一步加入科氏力的影响,建立了 Delawane 模型。Stolzenbach 等^[21]重点考虑了风生流对溢油漂移的影响,联合求解风模型与水动力学模型,构建了 Coast Guard(II)模型预测油膜运动轨迹。Spaulding 等^[22]研究油膜漂移量时考虑风动力影响,定量得到油膜在水体表面漂移时偏移角约为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 漂移速度约为风速大小的 2% ~ 4%。Reed 等^[23]对无破碎波条件下风动力、潮流对油膜共同作用的影响关系进行了探讨,得出结论:乳化油膜开始漂移的速度为风速的 3.5%,随着风速逐渐变大,油膜将被分散于水中,主要作用力为优势潮流剪切力。而拉格朗日粒子追踪模型则将溢油视为若干运动质点,油粒子的运动过程分为扩散过程和平流过程,模拟油粒子的平流过程使用确定性方法,模拟扩散过程使用随机运动模型^[24-25]。有关溢油扩展漂移的理论模型研究主要都基于海洋环境,不受边界条件的限制,且计算过程复杂,需要考虑的参数和因素很多,如波浪扰动对溢油扩展迁移的影响,因此与工程实践的应用还有一段距离。

1.2 油膜的风化过程

溢油在水面经历的风化过程,分为物理变化和化学变化,包括蒸发、溶解、扩散、沉降、氧化、乳化、生物降解等过程。其中,对于蒸发过程主要通过蒸发率定量描述单位油膜的蒸发速率,研究认为其与油膜的厚度、环境温度有关^[26-27]。Fingas^[28]从动力学角度出发在气液相界面对十几种油蒸发过程进行

研究,对乳化物的形态分布及影响其形成的影响因素进行了分析,认为多组分系统与纯液体的蒸发过程不同,多组分的原油的蒸发损失量与时间呈对数关系,且通过改变实验条件证明油的蒸发不是严格受边界层控制,时间和温度是影响油蒸发的重要因素。石油类在水里的溶解过程中,溶解量相对于蒸发量很小,因此多数溢油预警预报系统忽略石油类溶解部分。石油类的组成和海水环境决定石油类溶解度,模拟其溶解方法或用准组分法,与蒸发过程类似,或同时考虑溶解与蒸发过程,或综合考虑溶解和分散过程;杨庆霄等^[29]对温度、盐度、pH 值和腐殖酸存在对石油烃溶解度的影响情况及组分变化情况进行了研究,并通过识别、累加组成石油类的各类烃的溶解量来预报油的溶解总量。另外,对环境水体中油膜的乳化过程^[30]、光氧化过程^[31]、生物降解过程^[32-33]都分别有一定的研究。但目前对于乳化过程的研究偏重化学组分的影响及作用方式、乳化物稳定性的化学因素等,而对于油水乳化混合的动力学研究较少。溢油的光氧化过程是较为长期且缓慢的过程,目前缺乏光氧化过程的定量研究。

1.3 油膜污染物向下层水体的扩散过程

突发事件泄漏于水体表面的石油类污染物形成一定厚度的油膜,伴随着扩展、迁移、蒸发、氧化、生物降解等物理化学转化过程,石油类污染物通过油-水界面以分子扩散、紊动扩散方式进入环境水体^[34-35]。基于自然水体的水质和生态系统安全,石油类污染物通过油-水界面进入下层水体的数量及由此引发下层水体石油类污染物浓度的空间分布与时间变化是水质风险预报预警亟待解决的技术难题^[36]。对此问题的研究大致归纳为以下 3 个方面: ①基于物理机理概念性模型的研究^[37],研究表明破碎波的作用为将部分油膜层离散形成油滴,油滴进一步向水下扩散是由于下层水流的紊动作用^[38]。将溢油在水体中的溶解量表示为海水中某烃类化合物的油膜面积、油浓度梯度与油膜扩散系数的乘积,但由于存在浓度梯度、扩散系数难以确定的问题,该模型难以实际应用。赵文谦等^[39]对大规模海洋溢油条件下石油类污染物扩散问题建立了垂向扩散微分方程,并给出了解析解,结果与实测资料吻合较好,但需要首先给出某一深度的油浓度作为定解问题的边界条件,难以在突发风险水质预报中得到实际应用。②由于求解扩散微分方程边界条件或源项难以确定,为了定量模拟溢油对下游水质的影响,相当多的研究者对输入油膜下层水体的污染源强(微分方程源项)采用了类比可溶性污染物的简化处理方法^[40],如刘冰等^[41]类比可溶性污染物建立石油

类一维对流扩散模型模拟分析了管道溢油对河流断面平均浓度的影响,潘红磊等^[42]类比可溶性污染物建立垂向平均二维溢油水质模型预测模拟了某采油厂事故状态石油类泄漏对某河石油类垂线平均浓度场的影响。梁平等^[43]通过对海面和海下的奥里油在恒定流情况下的稳态扩散进行三维数值模拟,分析了假定(设定边界浓度)情景下油浓度的垂向分布特征,仍然无法解决边界浓度或油-水界面释放通量的确定这一关键技术难题。③基于蒙特卡罗的随机运动的数学模拟方法,即基于欧拉-拉格朗日体系,认为油滴质点的运动轨迹是通过拉格朗日方法求得并叠加随机游走位置迁移项,此位移采用与紊动扩散系数相关的经验公式确定。油粒子模型主要用来预测模拟油膜扩展后期石油在水面的定量分布状况,如冯桃辉等^[44]以某航道整治工程为例,采用二维油粒子溢油模型,模拟不同气象条件下燃油泄漏的油膜漂移轨迹、溢油事故的影响范围、程度;胡旭等^[45]建立了二维溢油数学模型,模拟了长江宜昌江段溢油事故的影响范围和程度。也有研究者采用三维油粒子模型模拟石油类污染物在水体中的三维迁移扩散过程,如黄娟等^[46]结合油粒子模型与油膜扩展模型,建立了渤海三维溢油模型,模拟油滴扩展过程,但该类方法面临的主要难题仍然是如何确定油滴通过油-水界面以随机游走方式进入下层水体通量的边界条件确定问题。

1.4 水体中石油类污染物的迁移转化过程

溢油通过油水界面进入下层的环境水体后,将随水流运动,包括平流运动和湍流运动引起的粒子运动。一般采用拉格朗日法描述平流运动发生的平移,用随机游走法模拟紊流产生的随机位移,即模拟扩散过程时采用随机性方法。但石油类污染物不同于一般的可溶性污染物,其密度小于水,因此垂向运动必须同时考虑油粒子在水体内部随水质点的垂直运动及油滴本身浮力作用导致的运动过程,根据油粒子直径、油污密度、动力黏性系数等计算油滴上升速度,考虑由此引起的垂向迁移。

武周虎等^[47]在给定的边界条件下,考虑油滴的上升速度、油的降解、垂向扩散,通过数学推导,给出了油滴在有限长油膜下输移扩散方程在设定情景下的解析解。

文献[48]采用统计分析方法考虑垂向扩散,建立了三维油粒子对流扩散模型;晁晓波等^[49-50]采用泥沙作为吸附剂、柴油作为吸附质,对石油在不同温度、含沙量、盐度条件下的吸附特性以及不同油种的吸附特性、吸附机理进行了讨论;黄廷林等^[51]对石油类污染物与河流悬移质、推移质和底泥的相互作

用,河流的弥散作用对石油类迁移的影响进行综合考虑,建立了一维多沙河流中石油类污染物的吸附模型;夏星辉等^[52]采用模拟实验研究黄河水体中的石油类污染物的生物降解速率受到颗粒物的影响机制,发现泥沙的存在将影响石油类污染物在固-液两相的分配,也影响石油降解菌的增长速率。

2 石油类污染物的迁移转化过程物理试验

相关研究表明,石油类污染物的迁移转化过程受环境条件如油的化学组成、温度、盐度、风、水流、氧化还原环境、波浪、光照、悬浮物含量、微生物种群等诸因素的影响^[53-57]。当前,现场观测和实验室模拟是研究海上溢油风化的主要方法。现场观测通常分析事故溢油或人工溢油试验中油类样品的组成及变化,室内溢油风化试验装置由于研究方便而更多地被使用。室内试验装置包括容器和水槽两种,容器法操作简单,但模拟能力受限。水槽能更系统地综合模拟、研究水上溢油迁移实际情况。Payne等^[58]综合研究蒸发、溶解、乳化、光氧化等过程,较早使用 Prudhoe 湾原油在波浪槽水动力环境下进行风化实验;Riley 等^[59]利用波浪槽水动力条件模拟恶劣天气气象的溢油风化;杨庆霄等^[60]在波浪槽水动力条件下对若干原油的蒸发过程、蒸发特性及组分变化进行了研究。相关试验采用风扇造风,设置可移动的人工沙滩,研究不同类型海岸线沉积物层中风化油品的渗透,溢油在典型环境条件下的生态影响等。郭运武等^[61]利用研制的潮汐风作用水槽试验系统,忽略蒸发、乳化、溶解等因素,开展不同风、水流组合情况下河道溢油在水面扩展、漂移过程试验;邵志国^[62]在实验室采用循环环形水槽模拟预测了突发溢油污染在北方低温水域水体中油膜在水面风化和迁移扩散行为。

3 常用溢油模型

随着近几年溢油模型的发展以及溢油模型与 3S 技术的结合使用,用来描述溢油行为的油粒子模型逐渐得到广泛应用。表 1 列出了常用的溢油模型的具体情况。

4 结 语

总的来说,对水面溢油油膜自身的迁移、扩展、转化等过程的研究较多,但关于溢油表层油膜通过油-水界面向下层水体扩散过程的动力学机制研究则相对薄弱;溢油发生后石油类污染物通过油水面扩散进入下层水体的数量,是模拟预测油膜下水体石油类污染物浓度分布的最为重要的、必不可少

表 1 国内外代表性溢油模型

Table 1 Representative models of oil spill at home and abroad

模型	研发机构	耦合因子	化学过程	物理过程	是否考虑粒子垂向运动	特点
ADIOS 模型 ^[63]	美国 NOAA/HMRAD		蒸发、乳化、分散	扩散	否	以经验方程为主体,综合油性质数据库建立,但这些方程并未反映最新的研究成果
OSIS 模型 ^[27]	英国 WSL 和 BMT		蒸发、乳化、分散	扩散	否	除乳化过程外,OSIS 采用的方程与 ADIOS 基本相似,但对方程的一些参数作了修正
IKU 风化模型 ^[14]	挪威 SNTF		蒸发、乳化、分散	扩散	否	以强大实验数据作为基础,可对原油性质进行预测,但以实验数据为主的经验预测局限于一些应用场合
MOTHY 模型 ^[64]	法国气象局	风、流、波浪	蒸发、乳化	扩散漂移	否	三维模型,通过引入非线性涡黏性模型计算剪切流对油品性质的影响,适用范围广,不限地域和时间
PPTM 模型 ^[65]	希腊克里特岛海洋生物研究中心	流、波浪	蒸发、乳化、沉积	扩散漂移	是	三维模型,基于油粒子模型,可模型瞬时溢油和连续溢油,可进行短期研究与长期预报
SEATRACK WEB 模型 ^[66]	瑞典气象与水文研究所	风、流、波浪	沉降、分散	扩散漂移	是	三维模型,可实现溢油源点追踪,为溢油事故责任追究提供参考意见,通过 GIS 呈现模拟结果
Delft3D-PART 模型 ^[48]	荷兰水环境研究所	风、流、波浪	蒸发、乳化、分散	扩散漂移	是	三维模型,可对瞬间和连续排放的油等污染物进行详细的浓度分布模拟
三维溢油动态预报模型 ^[67]	中国国家海洋环境检测中心	风、流、波浪	蒸发、乳化	扩散漂移	是	三维模型,其风化预测通过公开发表的经验方程计算,没有自己的数据库作为支撑
扩散漂移模型 ^[68]	大连海事大学	风、流	蒸发、乳化	扩散漂移	是	三维模型,采用油粒子概念,在海上溢油应急响应 GIS 平台上模拟海上溢油行为动态,可在短时间内计算预测溢油轨迹以及溢油影响的敏感区

的输入条件,目前国内外对这一扩散过程的定量研究相对欠缺,成为溢油风险模拟预报理论方法发展的瓶颈,制约了溢油预测模拟方法的实际应用,是溢油水质预警预报有待解决的理论技术问题。

对于溢油通过油-水界面向下层水体的扩散过程的研究现状总体可以概括为以下几点:①溢油通过油水界面进入下层水体是一个十分复杂的物理过程,影响因素可分为两个方面:水动力特征和溢油自身的物理属性。而石油类污染物的物理性质(如密度、黏性等)差异较大,目前关于石油类污染物物理属性对油膜向下层水体扩散强度的影响缺少系统、定量的研究。②水流流速、紊动强度、波浪等水动力特征是影响溢油向下层水体扩散的重要因素,影响机制复杂,目前缺乏系统、深入的研究,特别是定量研究十分缺乏,因而造成溢油水质模型边界条件(或源项)难以量化,从而制约了河流、海洋环境中水质量化模拟理论技术的应用及发展。③溢油发生后由于风险处置措施不一,油膜在动水环境下的运动方式也不一样,如未采取防范措施,油膜随水流运动而运动;采取围油栏等防范措施情况下油膜所处平面位置则相对固定呈相对静止状态。动水环境中油膜静止、运动两种不同状态对石油类污染物向下层水体的扩散特征的影响机制研究缺失。④由于石油类污染物在环境水体中运动过程的综合影响因素复杂,石油种类和成分多样,目前对于运动过程的研究仍有许多不足,如忽略石油类污染物的运动过程、

蒸发过程、分散过程、乳化过程等的相互影响,且缺少机理性的研究。

参考文献:

[1] 彭小明,周后珍,谢翼飞,等. 石油类突发水污染事故应急处理技术研究进展[J]. 安全与环境学报,2011,11(5): 240-244. (PENG Xiaoming, ZHOU Houzhen, XIE Yifei, et al. On the emergency control technologies against the oil-refining polluted water treatment [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11 (5) : 240-244. (in Chinese))

[2] JILL E. J, ESTHER L, HANNAH R. Impact of upstream oil extraction and environmental public health; a review of the evidence[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657(1): 187-199.

[3] QU J, MENG X, YE X, et al. Characteristic variation and original analysis of emergent water source pollution accidents in China between 1985 and 2013 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (19) : 19675-19685.

[4] 常进,管桐. 东风西沙水库突发性溢油事故风险等级判定[J]. 水资源保护, 2016, 32 (1) : 172-175. (CHANG Jin, GUAN Tong. Risk level discrimination of sudden oil spill in Dongfengxisha Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1) : 172-175. (in Chinese))

[5] 黄轶康,李一平,邱利,等. 基于 EFDC 模型的长江下游码头溢油风险预测[J]. 水资源保护, 2015, 31 (1) : 91-98. (HUANG Yikang, LI Yiping, QIU Li, et al. Risk

- prediction on wharf oil spill in the lower reaches of Yangtze River based on EFDC [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1): 91-98. (in Chinese))
- [6] 蔡建元, 韩龙喜. 应急水污染预测分析技术研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2013.
- [7] 胡煜, 张文俊, 任华堂, 等. 污染物对流-扩散逆过程源项反演的伴随方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 7-11. (HU Yu, ZHANG Wenjun, REN Huatang, et al. Adjoint method for source term inversion in reverse process of pollutant convection-diffusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 7-11. (in Chinese))
- [8] 韩龙喜, 颜芬芬. 水体中不可溶沉降型污染物迁移规律研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 11-15. (HAN Longxi, YAN Fenfen. Advances of migration patterns of unsolvable sedimentation pollutants in water [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 11-15. (in Chinese))
- [9] 张昂, 周杰, 李云, 等. 溢油数值模拟方法的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 313-320. (ZHANG Ang, ZHOU Jie, LI Yun, et al. Review of numerical model research on oil spill [J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(2): 313-320. (in Chinese))
- [10] BLOCKER P C. Spreading and evaporation of petroleum products on water [C]//Proceedings of the 4th International Harbor Congress. Antwerp, the Netherlands: [s. n.], 1964: 911-919.
- [11] FAY J, HOULT D. Physical process in the spread of oil on a water surface [C]//Proceeding of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills. Washington, D. C.: API, 1979: 463-467.
- [12] MACKAY D, PATERSON S, TRUDEL K. A mathematical model of oil spill behavior [R]. Ottawa: Environment Canada Report EE-7, 1980.
- [13] LEHR W J, CEKIRGE H M, FRAGA R J. Empirical studies of the spreading of oil spills [J]. Oil and Petrochemical Pollution, 1984, 2(1): 7-11.
- [14] 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))
- [15] 杨红, 洪波, 陈莎. 海洋溢油模型及其应用研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2007, 24(2): 156-163. (YANG Hong, HONG Bo, CHEN Sha. Research and application progress of marine oil-spill models [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, 24(2): 156-163. (in Chinese))
- [16] 赵云英, 杨庆霄. 溢油在海洋环境中的风化过程[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 45-52. (ZHAO Yunying, YANG Qingxiao. Weathering progress of spilled oil in the marine environment [J]. Marine Environmental Science, 1997, 16(1): 45-52. (in Chinese))
- [17] WEBBL E, TARANTO R, HASHIMOTO E. Operational oil spill drift forecasting [C]//Proceedings of the 7th U. S. Navy Symposium of Military Oceanography. Annapolis, Maryland: Navy Ship Research and Development Laboratory, 1970: 114-119.
- [18] WILLIAMS G N, HANN R W. Simulation models for oil spill transport and diffusion [C]//Summer Computer Simulation Conference. San Francisco: Simulation Councils, 1975: 748-752.
- [19] 周群群, 何利民. 海上溢油数值模拟研究进展[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(1): 4-8. (ZHOU Qunqun, HE Limin. Research progress of numerical simulation study for marine oil spill [J]. Environmental Protection of Oil and Gas Fields, 2018, 28(1): 4-8. (in Chinese))
- [20] 姜厦, 刘曙光. 溢油模型理论及研究综述[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(10): 33-37. (LOU Sha, LIU Shuguang. Review in theory and study of oil spill models [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(10): 33-37. (in Chinese))
- [21] STOLZENBACH K D, MADSEN O S, ADAMS E E, et al. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks [R]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1977: 20-30.
- [22] SPAULDING G M L. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling [J]. Oil and Chemical Pollution, 1988, 4(1): 39-55.
- [23] REED M, TURNER C, ODULO A. The role of wind and emulsification in modeling oil spill and surface drifter trajectories [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1994, 1(2): 143-157.
- [24] KILESO A, CHUBARENKO B, ZEMLYS P, KUZMENKO I. Oil spill modeling methods: application to the south-eastern part of the Baltic Sea [J]. Baltica, 2014, 27 (Sup1): 15-22.
- [25] GUO W, HAO Y, ZHANG L, et al. Development and application of an oil spill model with wave-current interactions in coastal areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 84(1/2): 213-224.
- [26] 彭放英. 溢油模拟技术的发展水平[J]. 交通环保, 1996, 17(4): 35-40. (PENG Fangying. Development level of oil spill simulation technology [J]. Environmental Protection in Transportation, 1996, 17(4): 35-40. (in Chinese))
- [27] LEECH M, WALKER M, WILTSHIRE M, et al. OSIS: a windows oil spill information system [C]//Proceedings of 16th Arctic Marine Oil Spill Program. Calgary: Technical Seminar, 1993: 549-572.
- [28] FINGAS M F. The evaporation of oil pills: Development and implementation of new prediction methodology [J].

- International Oil Spill Conference Proceedings, 1999, 3 (1): 281-287.
- [29] 杨庆霄, 徐俊英, 李文森. 海上溢油溶解过程的研究[J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 50-56. (YANG Qingxiao, XU Junying, LI Wensen. Study on the dissolution process of offshore oil spill[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 50-56. (in Chinese))
- [30] 过杰, 孟俊敏, 何宜军. 基于二维激光观测的溢油及其乳化过程散射模式研究进展[J]. 海洋科学, 2016, 40(2): 159-164. (GUO Jie, MENG Junmin, HE Yijun. Scattering model research based on two-dimensional laser observation of spilled oil and emulsification processes[J]. Marine Science, 2016, 40(2): 159-164. (in Chinese))
- [31] 严志宇, 殷佩海. 溢油风化过程研究进展[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(1): 75-80. (YAN Zhiyu, YIN Peimei. Review of the studies on the weathering process of spilled oil[J]. Marine Environmental Science, 2000, 19(1): 75-80. (in Chinese))
- [32] 程千卉, 贾新苗. 海洋溢油的生物修复及其影响因素[J]. 海洋信息, 2017(4): 47-50. (CHENG Qianhui, JIA Xinmiao. Bioremediation of marine oil spill and its influencing factors[J]. Marine Information, 2017(4): 47-50. (in Chinese))
- [33] 高小鹏, 王平, 薛小龙, 等. 微生物法处理陕北采油污水[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 74-77. (GAO Xiaopeng, WANG Ping, XUE Xiaolong, et al. Microbial treatment of oil wastewater in Northern Shanxi[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 74-77. (in Chinese))
- [34] 范志杰, 文岩. 海洋溢油预测模型中几个问题的研讨[J]. 交通环保, 1993, 15(2): 12-17. (FAN Zhijie, WEN Yan. Discussion on several problems in the prediction model of marine oil spill[J]. Environmental Protection in Transportation, 1993, 15(2): 12-17. (in Chinese))
- [35] THORPE S. A. Langmuir circulation and the dispersion of oil spills in shallow seas[J]. Spill Science and Technology Bulletin, 2000(2): 213-223.
- [36] 陈凯琪, 江春波. 地表水环境影响评价数值模拟方法及应用[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [37] 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): 33-40. (WU Zhouhu, ZHAO Wenqian. A combined model of spread, dispersion and migration of offshore oil spills[J]. Marine Environmental Science, 1992, 11(3): 33-40. (in Chinese))
- [38] FORRESTER W D. Distribution of suspended oil particles following the grounding of the tanker arrow[J]. Journal of Marine Research, 1971, 29(2): 151-170.
- [39] 赵文谦, 江涌. 石油以油滴形式向水下扩散的研究[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 173-182. (ZHAO Wenqian, JIANG Wei. A study on the diffusion of droplet oil under water surface [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(2): 173-182. (in Chinese))
- [40] 徐丽丽, 肖文军, 石少华, 等. WaveWatch III 和 SWAN 模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中的应用及检验[J]. 海洋通报, 2015, 34(3): 283-294. (XU Lili, XIAO Wenjun, SHI Shaohua, et al. Application and validation of an operational wave forecast model system based on the nesting use of wave watch III and SWAN model [J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(3): 283-294. (in Chinese))
- [41] 刘冰, 陈忱, 杨婧晖, 等. 溢油对地表水体影响预测模型的搭建[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(3): 36-38. (LIU Bing, CHEN Chen, YANG Jinghui, et al. Establishment of prediction model of spilled oil on surface water body [J]. Environmental Protection of Oil and Gas Fields, 2017, 27(3): 36-38. (in Chinese))
- [42] 潘红磊, 张强斌, 曾勇. 事故状态下污染物排放对水环境影响的预测研究[J]. 油气田环境保护, 2010, 20(4): 6-10. (PAN Honglei, ZHANG Qiangbin, ZENG Yong. A predictive research on water environmental impact by pollutants discharge under accidental circumstances [J]. Environmental Protection of Oil and Gas Fields, 2010, 20(4): 6-10. (in Chinese))
- [43] 梁平, 张建华, 周磊. 海上溢油扩散的数值模拟[J]. 科技咨询导报, 2008(13): 161-162. (LIANG Ping, ZHANG Jianhua, ZHOU Lei. Numerical simulation of offshore oil spill diffusion [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(13): 161-162. (in Chinese))
- [44] 冯桃辉, 王一平, 郑波. 油粒子模型在环境风险预测的应用[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(增刊1): 374-378. (FENG Taohui, WANG Yiping, ZHENG Bo. The application of oil particle model in environmental risk prediction [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40(Sup1): 374-378. (in Chinese))
- [45] 胡旭, 辛小康, 尹炜. 长江宜昌段溢油事故影响数学模型分析研究[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(1): 53-57. (HU Xu, XIN Xiaokang, YIN Wei. Analysis of oil spill accident based on numerical model for Yichang section, Yangtze River [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(1): 53-57. (in Chinese))
- [46] 黄娟, 曹丛华, 赵鹏, 等. 渤海溢油三维漂移数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 110-117. (HUANG Juan, CAO Conghua, ZHAO Peng, et al. Development and application of a three-dimensional oil spill model for the Bohai Sea [J]. Marine Science, 2015, 39(2): 110-117. (in Chinese))
- [47] 武周虎, 尹海龙. 水面有限长油膜下油滴输移扩散方程的解析解[J]. 交通环保, 2000, 21(3): 10-15. (WU Zhouhu, YIN Hailong. The analytical solution of oil droplet's transport-diffusion equation under limited oil slick on water [J]. Environmental Protection in Transportation, 2000, 21(3): 10-15. (in Chinese))

- [48] WL Delft Hydraulics. Delft3D-FLOW user manual[M]. Netherlands;WL Delft Hydraulics,2003:1-14.
- [49] 晁晓波. 石油在含悬浮物水流中扩散输移特性的研究[D]. 成都:四川联合大学,1995.
- [50] 尹海龙,武周虎. 石油在水中悬浮物上的吸附研究[J]. 海洋环境科学,2001,20(3):34-38. (YIN Hailong, WU Zhouhu. Study on the property of oil adsorption by suspension in water[J]. Marine Environmental Science, 2001,20(3):34-38. (in Chinese))
- [51] 黄廷林,任磊. 多沙河流中石油类污染物迁移的一维数学模型 I—吸附模型[J]. 水利学报,2004,35(9):105-110. (HUANG Tinglin, REN Lei. One-dimension mathematical model for oil pollution transport in silt-laden stream(II): desorption model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(9):105-110. (in Chinese))
- [52] 夏星辉,周劲松,余晖,等. 黄河水体石油类污染物生物降解模拟实验研究[J]. 环境科学,2004,25(1):103-106. (XIA Xinghui, ZHOU Jinsong, YU Hui, et al. Simulation of biodegradation of petroleum contaminants in natural waters of the Yellow River[J]. Environmental Science,2004,25(1):103-106. (in Chinese))
- [53] 吴宣,乔冰,邹云飞. 国内外溢油风化模拟试验装置最新研究进展[J]. 船海工程,2018,47(2):9-14. (WU Xuan, QIAO Bing, ZOU Yunfei. Latest research progress of test equipment used for weathering simulation spilled oil[J]. Ship and Ocean Engineering,2018,47(2):9-14. (in Chinese))
- [54] HALLETT W L H, CLARK N A. A model for the evaporation of biomass pyrolysis oil droplets[J]. Fuel, 2006,85:532-544.
- [55] 吴兆春. 潮汐河道溢油扩展漂移的数值模拟[D]. 上海:上海大学,2010.
- [56] 乔冰,邹云飞,田玉军,等. 一种缩比仿真溢油风化对水质影响的实验装置:CN205263072U[P]. 2016-05-25.
- [57] 于英鹏,刘敏. 太湖流域水源多环芳烃分布、溯源与生态风险评估[J]. 水资源保护,2017,33(3):82-89. (YU Yingpeng, LIU Min. Distribution, pollution sources, and ecological risk assessment of PAHs in water source area of Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2017,33(3):82-89. (in Chinese))
- [58] PAYNE J R, KIRSTEIN B E, MCNABB G D, et al. Multivariate analysis of petroleum hydrocarbon weathering in the subarctic marine environment[C]//International Oil Spill Conference Proceedings. Washington, D. C. : API,1983:423-434.
- [59] RILEY R G, THOMAS B L, ANDERSON J W, et al. Changes in the volatile hydrocarbon content of prudhoe bay crude oil treated under different simulated weathering conditions[J]. Marine Environmental Research,1980,4(2):109-119.
- [60] 杨庆霄,徐俊英,李文森. 海上石油蒸发过程的研究[J]. 海洋学报,1990,12(2):187-193. (YANG Qingxiao, XU Junying, LI Wensen. Study on evaporation process of offshore oil[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990,12(2):187-193. (in Chinese))
- [61] 郭运武,刘栋,钟宝昌,等. 风对河道溢油扩展、漂移影响的实验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2008,23(4):446-452. (GUO Yunwu, LIU Dong, ZHONG Baochang, et al. Experimental investigations of wind effect on the oil spill spread and drift[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A,2008,23(4):446-452. (in Chinese))
- [62] 邵志国. 寒冷地区江河溢油污染团风化迁移规律与时空分布研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [63] LEHR W J, OVERSTREET R. ADIOS-automated data inquiry for oil spills[C]//Proceedings of 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Ottawa: Environment Canada,1992:31-35.
- [64] DANIEL P, MARTY F, JOSSE P, et al. Improvement of drift calculation in mothy operational oil spill prediction system[C]//International Oil Spill Conference. Washington D. C. : American Petroleum Institute,2003:1-6.
- [65] ANNIKA P, GEORGE T, GEORGE P, et al. The Poseidon operational tool for the prediction of floating pollutant transport[J]. Marine Pollution Bulletin,2001,43(7):270.
- [66] AMBJORN C. Seatrack web, forecasts of oil spills, a new version[C]//US/EU Baltic International Symposium. New York: IEEE,2008:1-9.
- [67] 张存智, 窦振兴, 韩康. 三维溢油动态预报模式[J]. 海洋环境科学,1997,16(1):22-29. (ZHANG Cunzhi, DOU Zhenxing, HAN Kang. A three dimensional model to predict the behavior of oil spills[J]. Marine Environmental Science,1997,16(1):22-29. (in Chinese))
- [68] 刘彦呈,殷佩海,林建国. 基于 GIS 的海上溢油扩散和漂移的预测研究[J]. 大连海事大学学报,2002,28(3):41-44. (LIU Yancheng, YIN Peihai, LIN Jianguo. Prediction of oil spill spreading and transport over the sea[J]. Journal of Dalian Maritime University,2002,28(3):41-44. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-15 编辑:彭桃英)

