

海上溢油数值预报技术研究综述

李燕, 杨逸秋, 潘青青

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 介绍溢油事故国际国内背景及海上溢油行为和归宿研究情况, 综述了溢油数值预报技术的历史发展过程, 对主要的3类溢油数值模型的优缺点进行了分析比较, 介绍了国内外溢油研究现状, 探讨研究中存在的问题, 指出溢油数值预报技术研究未来的发展趋势。

关键词: 溢油; 数值预报技术; 垂向扩散模拟; 误差分析; 同化技术

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)05-0089-10

1 引言

随着我国海洋运输、海上资源开发的快速发展, 海上船舶和油气田溢油等海洋污染事件已成为影响我国海洋环境的重要因素。从1976—2002年, 我国沿海平均每4 d发生一起溢油事故。其中, 溢油量在50 t以上的重大溢油事故53起, 总溢油量达29 754 t^[1]。仅1998—2008年间, 中国管辖海域就发生了733起船舶污染事故, 其中发生重大溢油事故共69起(按照国际海事组织(IMO)MARPOL 73/78附则I的1991年修订案规定的标准:“溢油量50 t及其以上为重大污染事故”), 总溢油量37 077 t, 平均每年发生67起, 平均每起污染事故溢油量537 t。1999年3月发生在珠江口的“闽燃供2”号油轮与“东海209”号油轮的碰撞事故, 造成“闽燃供2”号油轮溢出重油超过580 t, 使珠海市养殖场、风景旅游区、红树林等环境资源遭受严重损害, 受污染的海域面积超过300 km²。2004年12月7日, 巴拿马籍集装箱船“现代促进”轮与德国“MSC伊伦娜”在珠江口附近海域碰撞, 数百吨燃油溢出。2010年7月16日中石油大连大孤山新港码头一储油罐输油管线发生起火爆炸事故, 约1500 t原油进入海洋, 至19日13时30分, 受污染海域约430 km², 其中重度污染

海域约为12 km², 一般污染海域约为52 km²。2011年6月4日, 康菲石油公司蓬莱19-3油田发生溢油泄漏, 至7月5日, 蓬莱19-3油田溢油事故形成劣四类海水面积840 km², 此次溢油事故给渤海生态系统造成了长期严重影响。

国外的溢油事故也时有发生。2002年11月13日, 装载有 7.7×10^4 t燃料油的巴哈马籍单壳油轮“威望号”遭遇强风暴与不明物体发生碰撞, 船体损坏导致超过17 000 t货油泄漏, 船舶搁浅又导致近4 000 t燃油泄漏, 之后被政府下令拖至深海进行抢险却因风浪冲击沉于3 600 m海底的“威望号”仍存有数万吨货油。该事故导致西班牙、葡萄牙、法国海域生态环境遭到严重污染, 沿西班牙近400 km海岸线的许多著名旅游度假圣地、近岸河流、小溪和沼泽地带、渔业与水产养殖业受污严重, 一些野生动物也受到不同程度污染。2010年美国墨西哥湾的“深水地平线”钻井平台于4月20日夜间接爆炸, 引发大火, 大约36 h后沉没。钻井平台底部油井自24日起持续漏油, 每天大约15万桶原油流入墨西哥湾。根据卫星反演图像显示, 溢油严重时墨西哥湾浮油面积以一天两倍的速度扩展, 4月29日浮油面积接近8 000 km², 而到30日已达约9 900 km², 原油泄漏的速度远超出预期。

收稿日期: 2016-08-18; 修回日期: 2017-02-23。

基金项目: 2017年国家重点研发计划海洋环境安全保障重点专项(2017YFC1405001); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室基金(201402)。

作者简介: 李燕(1976-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事溢油数值模拟预报研究。E-mail: liy@nmefc.gov.cn

研究溢油在海上的漂移扩散过程,预测其影响区域范围和最终归宿,对有针对性的布放围油栏和派遣飞机、船舶到达现场进行应急处理等工作可以起到重要技术支撑作用;同时对评估沿岸海域的海洋环境灾害对海洋生态环境影响,保护海洋生态环境和海水水质及沿岸养殖业,实施可持续发展战略具有重要意义;对海洋生态防灾减灾科学研究和对管理部门应急反应系统的设计等也具有重要实用价值。

2 溢油主要过程

海上溢油的行为和归宿受油品特性和多种环境因素支配,经历着扩展、漂移、分散、蒸发、乳化、溶解、光氧化、生物降解及其相互作用的复杂过程。分别研究这些过程和相互作用,是模拟溢油行为和归宿的基础^[2]。

油在静水中的扩展过程受到重力、表面张力、惯性阻力和粘性(摩擦力)的共同作用,但这些作用在不同的扩展阶段驱动油膜扩展的作用程度并不相同。在海水表面的扩展过程决定溢油的范围,并且通过扩展面积又影响溢油的风化过程(蒸发、溶解、分散、光氧化等)。

油漂移指油膜团在风、表层和次表层海流、以及波浪的作用下的平移运动。油膜漂移实质上是油膜在上述环境动力共同作用下的拉格朗日漂移过程,主要依赖于海面风场和流场。

垂直湍流分散过程是由风浪产生的破碎波将溢油以 5 μm 到若干 mm 的微粒混合体系形式分散到水体中去的过程,油排放 10 h 左右时分散作用最大。破碎波形成的湍流在分散过程中起主要作用。

蒸发是海面溢油中的石油烃较轻组分从液态变为气态向大气的质量传输,是溢油风化的主要过程。环境条件(主要是风)是蒸发过程的控制因素。多组分蒸发模式较少依赖经验常数并能给出较好的结果而被广泛采用。蒸发是溢油初期降解最重要和最快的过程,且油蒸发率对不同油品和环境条件的依赖差别很大,比如精炼油品(汽油、煤油)可在一日内完全挥发掉。

溶解作用是漂浮或悬浮石油烃进入水体的质量传输过程,是溢油发生后作用时间最短的一个过

程,有效时间仅 1 h 左右。溶解的速率和强度取决于油的成分、物理性质、油膜面积、水温、湍流和垂直分散作用。溶解过程的控制因素中,风速和海况比水温更为重要。

乳化是溢油的风化过程之一。在破碎波产生的湍流过程中,水滴被分散到油里形成油包水乳液,呈黑褐色粘性泡沫状乳油漂浮于海面,即所谓“巧克力奶油冻”(mousee)。乳化过程使油的粘性和容积逐渐增大。虽然这一过程的机制尚不太清楚,但已确知乳化与湍流、油成分及温度有关。

海洋中到处存在着分解烃类的微生物,多达上百种,它们的代谢以分解石油作为碳素的主要来源,因此成为溢油降解的重要因素之一。关于生物降解目前所知不多,至今还没有可计算海洋环境中原油生物降解率的实用公式。由于该过程的复杂性,大多数微生物-烃类相互作用研究都是在实验室里进行的,其结果在海洋溢油应急和海洋环境影响评估业务中进行实际应用还较为困难。

光氧化是溢油在太阳光作用下,经历氧化、磁化、水解并产生氧化物的降解过程。由于实际海洋环境存在各种控制条件和多种渠道的降解作用,要计算氧化速率是十分复杂的。在溢油应急预报中,光氧化远不及其他物理过程重要,一般不予考虑。

油密度随风化而增大,当超过海水密度时便开始下沉。目前,油下沉过程尚不能准确预测。在溢油行为应急预测中,通常也不予考虑。

3 溢油数值模拟预报技术研究的历史发展及现状

国外自 20 世纪 60 年代已开始了溢油输运扩散数值模拟预报方法研究。Reed 等^[3]对 20 世纪溢油模型研究和发展进行了回顾,溢油模型研究可分为 3 大模拟类别和研究阶段:Fay 模式、基于欧拉观点求解对流-扩散方程、基于拉格朗日观点的“油粒子”模式。进入 21 世纪后,基于各种模拟方法都有其各自的优势和劣势,一部分学者提出针对溢油不同阶段采用不同模拟方法进行优势互补^[4]。同时,各国基于溢油模型相继建立并完善溢油业务化预测系统。

3.1 Fay模式及其修订模式

早期的经典理论是Fay静水或恒流环境下油膜扩散的三阶段模式^[5]。在此基础上,许多学者考虑实际海洋动力环境的影响,提出一系列的改进模式^[5-24],如Liu等^[13]、Lehr等^[23]的有关溢油行为和性质的预报模式。其中Liu等^[13]在该理论上总结了油膜扩展尺度随时间变化的统一公式。Mackay模式在Fay模式的第二阶段公式中加上风的影响,分别建立了厚油膜和薄油膜的计算模式。而Wang的模式则是对Fay模式第三阶段的改进。Scory则在全面改进Fay模式的基础上,建立了连续油膜环境行为和性质的预报方法(Mu-slick模式)。上述几种模式的测试结果表明,Machay模式计算值偏低,而Leker模式预测值偏高。武周虎等^[16-18]同时考虑了油膜扩展和各向异性扩散作用,以及油膜边缘消失的过程,建立了扩散范围的数学模型。Fay理论的修正模型在一定程度上取得了较好的计算结果,对溢油漂移轨迹的计算也比较准确,早期得到了广泛的应用,但对油膜扩散面积估算的可靠性仍有不足。同时,上述油膜行为模式都是以油膜连续性为前提的,因而不能重现实际存在的油膜破裂过程。而在自然条件下,油膜在波浪和海流剪切作用下会破裂成碎片,并在海洋湍流的作用下进一步扩散。Lehr等^[21-23]指出,大部分Fay理论的扩散求解都是假设在开阔海域的瞬时释放情况下,而真实的溢油过程通常是连续几小时甚至几天的溢油。对于连续溢油,油膜随风和流运动,离溢油源一定距离后,侧向扩散将占主导作用,而Fay模式忽略了这一作用。而且,对于海底或者水下溢油,浮力作用将成为一个重要的考虑因素,众多关于水下溢油的理论和实验研究表明,Fay模式并不适用于水下溢油的模拟^[25-30]。

3.2 基于欧拉观点求解对流-扩散方程

另一种模拟方法基于欧拉观点求解对流-扩散方程^[31-34]。该数值方法由二维有限流体动力学和油在溢出地的寿命分析所组成,将海上已知的溢油量或者根据环境影响评估得到的一个浓度作为源项,加入动力学方程,然后数值求解对流-扩散方程。该方法的主要困难在于稳定性问题,即数值离散化过

程中可能会引进与物理扩散无关的数值扩散,破坏了油源附近的高浓度梯度区质量守恒条件,并可能导致负浓度的出现,使得结果失真,不能描述真实的物理过程。已有的研究已经表明在非均一流场下,该方法将导致不正确的输运扩散分布^[35]。在这方面模拟中较为有代表性的是Horiguchi采用该方法模拟了海湾战争期间阿拉伯湾的溢油^[36],虽然结果给出了表面油膜和进入水体中油的分布,但其结果与实测结果相比较误差较大。另外,还有一些溢油过程难以利用对流-扩散方程来模拟,如比较典型的非Fick扩散问题,而且此方法的三维溢油平流扩散数值模拟运行所需时间很长,不能满足溢油应急预报的时效要求。

3.3 基于拉格朗日观点的“油粒子”模式

溢油输运扩散模式一个新的发展,是Johanseen等以及Elliott等提出的“油粒子”模式(Parcel model)^[37-45]。在该理论中,油作为被破碎后掺混到水中的“油微粒”来模拟溢油的归宿。在水体中,油滴受表面流驱动而产生平流和分散,其中大多数油滴可以靠自身的浮力回升到海面。油扩展受到油滴尺寸分布、剪流和湍流过程的控制。此类模式较好地解决了油膜在环境动力作用下的剪变和破碎过程,并能确切地预测油膜边缘扩展过程和油膜形状在风向上的明显拉伸过程。该方法正确解释了溢油在重力扩展停止以后的扩散现象问题,突破了采用对流-扩散方程模拟溢油的缺陷,不仅避免了对流扩散模式本身带来的数值扩散问题,同时还可以正确重现海上油膜的破碎分离现象,更确切地表述溢油对各种海洋动力因素的响应,准确描述溢油的真实扩散过程。因此,“油粒子”模式在溢油模拟发展过程中具有划时代的意义,也成为了当今主流的溢油模式。最近很多室内和现场实验都支持该方法,国内外很多学者对其进行了应用和发展,并得到了较理想的结果^[46-66]。Shen等^[46]、杨小庆等^[47]、Yapa等^[48]分别建立的河流溢油传输数学模型,但他们的模拟所基于的水动力模型较差;Zhang等^[49]建立了一种海上溢油行为预报模式(SURF模式),考虑了油膜的输运和风化过程;张存智等^[50]建立了三维溢油动态预报模型并应用于渤海湾,模型结果与卫星资料较吻合;Lou等^[51]对三维溢油的扩散过程做

了理论推导。国内这方面的研究还有刘文通等在实验室中研究了风与流方向相同情况下胜利油田液态原油的漂移模式^[52];季荣等^[53]在实验室研究了流-风-波共同作用下溢油漂移的模拟等;赵文谦^[54]从油滴的成因及扩散机理出发,建立了油滴的紊动扩散方程,并对海面发生溢油事故后的油浓度进行了求解;沈永明^[55]等基于 $k-\varepsilon$ 紊流模型,建立了油水两相双流体模型,用于计算水下石油浓度分布;徐洪磊^[56]、李冰绯^[57]、汪守东等^[58-59]均运用“油粒子”方法实现了对溢油漂移扩散过程的数值模拟。基于“油粒子”概念的溢油模型代表了当今油膜行为研究的新趋向,但这一理论也有不足之处,特别是由于计算机能力限制,为满足预报时效要求,采用该方法必须对粒子数进行限定。溢油事故中“油粒子”半径通常在 $10\sim 1\,000\,\mu\text{m}$,因此采用该方法要假设的“油粒子”数目非常之庞大,如果“油粒子”半径为 $1\,000\,\mu\text{m}$,那么 $1\,\text{m}^3$ 的油量需要 1.91×10^9 个“油粒子”来代表,目前来看对于个人电脑而言计算时间显然无法满足预报时效的要求。另外,虽然该方法能够准确地模拟出溢油在重力扩展停止以后的扩散现象,但忽略了溢油初期重力和惯性力作用下的自身扩展过程。对于小规模溢油,油膜的自身扩展过程较短,初期扩展面积较小,对其作忽略处理而直接模拟溢油的湍流扩散过程对计算结果影响不大,但对于大规模瞬时溢油,油品泄漏时间很短的情况,油膜面积将在短时间内急剧扩大,随后扩延速度变慢,溢油初期的自身扩展效应显著大于湍流扩散效应,而该方法采用湍流扩散来模拟油膜的自身扩展过程就显得不够合理^[67]。

3.4 优势互补型混合模拟方法

基于各种模拟方法都有其各自的优势和劣势,近几年,Guo等^[4]提出采用混合方法模拟溢油漂移扩散过程,针对不同的预报要素采取不同的模拟方法。比如,对于海面溢油,初期的溢油扩展可以采用改进的Fay模式进行模拟,在油膜厚度变化到达最终厚度后,采用“油粒子”拉格朗日随机游走方法模拟预报溢油输运路径和影响范围。“油粒子”垂向扩散比例及入水深度则采用实验获取的经验概率公式进行计算。油膜厚度的模拟采用油膜动力学模型求解^[34]。进入水体后的溢油,则在考虑海流的

垂向湍流作用下采用“油粒子”拉格朗日随机游走方法进行模拟。溢油浓度的模拟则通过求解溢油浓度输运方程来获得。

3.5 溢油业务化预测系统建立及现状

世界各国(特别是石油生产国)在对溢油行为和归宿的理论研究基础上,采用上述不同的模拟方法,相继建立了溢油应急响应计划及溢油漂移轨迹预测系统等,如美国的OILMAP(美国ASA公司研究发展起来的溢油商业软件)和GNOME(美国NOAA研究发展的开源溢油模型)、英国的OSIS系统、挪威的OILPILL/STAT系统及得到广泛认可和应用的OSCAR溢油软件(商业软件)、意大利的MEDSLIK、比利时的MU-SLICK系统、荷兰SM4系统和日本溢油灾害对策系统等。我国的溢油预报模型研究始于20世纪80年代初,大多数预测模型属于Fay理论的改进型。如吴永成等^[68]的胶州湾溢油范围预测模型,姜安刚等^[69]的海面溢油轨迹的分析预报模型。袁业立^[34]用动力学方法建立了连续性油膜的全动力油膜模型。国家海洋局海洋环境保护研究所在与比利时北海数学模型管理署的“油污污染:环境风险评价”合作研究(1989—1991年)(OPERA)中,对溢油预报模型进行了全面研究,建立了基于“油粒子”概念的二维溢油软件包和三维溢油软件包。其中二维溢油软件包在辽河油田浅海开发区推广应用,建立了“溢油动态可视系统OILSYS”并纳入辽河油田滩海开发区溢油应急计划。在“八五”期间(1990—1995年),溢油预测模型研究被列入国家重点攻关计划。青岛海洋大学(1990—1995年)“溢油污染对海洋环境影响及预测研究”,运用蒙特卡罗方法预测溢油输移和湍流扩散,较好地重现了溢油的环境行为。国家海洋局海洋环境保护研究所张存智等^[50]的“渤海溢油数值预报体系”是基于油粒子群的随机运动建立的以三维溢油综合预报模型为核心,以微机为支持硬件的溢油微机化预报体系。“十五”期间国家海洋局、“十一五”期间国家交通部和国家海洋局均有关于溢油漂移预测模型的国家支撑计划研究专题,并取得了一定的成果,现已实现了三维溢油漂移数值预报模型的建立和业务化预报,初步开展了海浪对溢油漂移扩散的影响分析和模拟。

4 溢油数值预报技术发展趋势

4.1 考虑波浪作用下的三维溢油数值模拟预报技术研究

在已有溢油输运扩散模拟的研究中,海面溢油的输运扩散主要受到海面风场、海流、波浪及湍流的作用,水下溢油的输运扩散则主要受海流和湍流的作用^[70-82]。Reed等^[83]建议,在没有破碎波且微风情况下,可不考虑海浪对油膜的破碎作用,但是当风速增加的时候,溢油将被卷入水,海流的剪切和波浪的破碎作用不可忽略。Johansen^[37]、Elliot等^[44]、Reed等^[83]、Delvigne等^[84]的各类现场、实验室或者数值模拟结果均显示了溢油垂向运动的重要性,溢油的自然卷夹过程在溢油归宿模拟中起着重要作用,同时也决定着溢油在海面上的时空分布情况。因此考虑波浪影响下溢油的垂向扩散运动成为目前三维溢油数值模拟研究的前沿。已有的拉格朗日随机游走溢油模拟研究中出现了4种垂向扩散模拟方法,如Coppini等^[85]、Wang等^[58]、Vetha-mony等^[86]、Mellor等^[87]、Li^[88]等的模拟研究均采用不同的垂向扩散方案,但较少有人开展4种垂向扩散方案对溢油输运在时间和空间上敏感性的对比分析。Li等^[89]对4种垂向方案进行了对比研究,分析了理想试验结果并开展实际案例应用,充分对比分析讨论了4种垂向扩散方案对溢油输运产生的不同影响。

4.2 溢油漂移轨迹及扩散范围的精准预报技术研究

溢油漂移轨迹的预报结果是现场溢油应急处置工作中最重要的科学技术支撑信息,漂移轨迹的精准预报是溢油应急实际应用中的迫切需求,是所有应急预报工作者一直以来重点关注的研究内容。溢油数值模拟的准确性以及漂移轨迹预报精度依赖于模式本身物理过程的数值模型化是否合理,如数值模拟方法中对湍流部分的求解处理、溢油在风化乳化过程中密度和粘性变化过程的模拟、采用“油粒子”方法模拟中粒子谱分布的设计对其漂移轨迹的影响等等,同时也依赖于外界输入数据信息的准确性(比如风、流、溢油源的信息等),最后还取决于模拟结果的释用。很多研究人员开展

了溢油输运扩散模型中各种参数的敏感性试验^[90-99],一些研究人员利用表层漂流浮标实验数据开展对溢油模型中的参数率定优化工作^[92-94],其中Abascal等^[94]还利用表层漂流浮标观测数据对湍流扩散系数参数进行了率定。很多学者对模式计算时间步长、模式积分方法和模式分辨率等因素对溢油输运模拟预报结果的影响也开展了一系列的研究工作^[95-100]。这些研究工作揭示了影响溢油漂移轨迹及扩散分布模拟准确性的因素很多,面对如此多的溢油输运模拟预报精度影响因子,为了提高预报精度以满足实际需求,我们应该从哪些方面来规避或者减小各种误差来源,从而达到提高模拟精度的目的呢?不同的学者针对不同误差来源,开展了各方面的研究工作。比如Mariano等^[100]通过集合预报减小海流预报误差,从而提高溢油输运扩散预报精确度,并且应用到NOAA在墨西哥湾溢油事件的预报中。Liu等^[101]在对墨西哥溢油事件的模拟中认为海流的准确模拟是对溢油漂移轨迹进行准确预报的最关键因素,因此采用多套全球成熟的业务化海流预报产品驱动溢油模型并开展模拟结果对比研究,同时还利用卫星遥感资料优化海流模拟结果^[102],从而提高溢油漂移轨迹模拟准确率。Sebastião等^[103-104]分别针对沿岸和开阔海域,发展了一些方法来确定溢油预报中的不确定部分,从而提高模型对不确定性部分的描述,提高模拟准确率。针对2011年中国蓬莱“19-3”油田泄露事故开展溢油模拟研究的各文献也显示了从不同角度分析模拟准确性的影响要素,如Wang等^[105]通过对海洋模式温盐设置导致的漂移模拟结果的不同进行对比分析,认为温盐模拟过程中密度流对溢油漂移轨迹会有显著的影响。Liu等^[106]模拟结果分析认为,在风速小于3 m/s的情况下,海面风对溢油漂移的影响相对较小,但在大风过程中建议同化入各气象观测站点数据,提高气象数值模拟准确率从而保证溢油模拟的准确性。Li等^[107]利用2011年蓬莱“19-3”油田泄露事故收集到的观测资料开展已建立的渤海业务化溢油应急预报系统误差分析工作,通过一系列的试验,寻找出了该系统的主要误差来源,大大提高了预报准确率,并指出对模型误差来源进行分析,减少误差引入模型方法研究将成为提高溢油预报技术的重要研究方向。

随着现场观测技术和监测水平的提高,以及卫

星技术的发展和处理该类事故的力量增强,使我们逐渐积累了大量的海上油井平台处的风场观测资料。同时,在事故发生后,应急部门将会启用卫星、航空遥感以及船舶现场观测来监视溢油漂移情况和附近海流情况。可以预见,海上风、流以及现场事故观测数据将越来越多,那么如何利用这些观测资料来提高溢油输运扩散预报的准确度成为溢油数值预报模型研究的新方向,成为被提到日程上的新课题。李燕等^[108]采用了最为简单的OI方法应用到溢油业务化应急预报的风场订正中,但却明显提高了预报精度,这为如何进一步利用同化方法提高溢油应急预报精度研究提供了参考,是对如何利用同化方法提高溢油预报精度作出的很好的探索性工作。

4.3 充分考虑现场处置手段的作用,开展溢油事件过程全方位模拟预报技术研究

随着处理溢油事故能力的加强,人工清理、机械回收(围堰、撇油、吸附等)、化学处理(辅助分散剂、破乳乳化、生物降解等)以及现场控制燃烧等技术方法的使用将对溢油漂移扩散过程产生更为重要影响,如何将这些人为作用考虑进溢油漂移扩散模拟过程,从而对溢油漂移轨迹及扩散范围做出更为准确的预测评估也成为各国研究人员越来越关注的预报技术问题^[109-110]。

参考文献:

- [1] 谈杰. 船舶油污损害赔偿法律问题研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2004.
- [2] 赵冬至, 张存智, 徐恒振. 海洋溢油灾害应急响应技术研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [3] Reed M, Johansen Ø, Brandvik P J, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1999, 5(1): 3-16.
- [4] Guo W J, Wang Y X. A numerical oil spill model based on a hybrid method[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(5): 726-734.
- [5] Fay J A. The spread of oil slicks on a calm sea[M]//Hoult D P. *Oil on the Sea*. New York: Plenum Press, 1969: 53-63.
- [6] Fay J A. Physical processes in the spread of oil on a water surface [C]//*Proceedings of the Joint Conference on the Prevention and Control of Oil Spills*. Washington, DC: API, 1971: 463-467.
- [7] Hoult D P. Oil Spreading on the sea: annual review of fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1972, 4: 341-368.
- [8] Blokker P C. Spreading and evaporation of petroleum products on water[C]//*Proceedings of the 4th International Harbour Conference*. Antwerp, the Netherlands: [s.n.], 1964: 911-919.
- [9] Waldman G A, Johnson R A, Smith P C. The spreading and transport of oil slicks on the open ocean in the presence of wind, wave, and currents[R]. Washington, DC: US Coast Guard, 1973: 77.
- [10] Mehmet A, Tayfun A, Wang H. Monte carlo simulation of oil slick movements[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1973, 99(3): 309-324.
- [11] Williams G N, Hann R, James W P. Predicting the fate of oil in the marine environment[C]//*Proceedings of the Joint Conference on the Prevention and Control of Oil Spills*. New York: American Petroleum Institute, 1974: 567-572.
- [12] 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]. USA: MIT, Department of Civil Engineering, 1977.
- [13] Liu S K, Leendertse J J. A 3-D Oil spill model with and without ice cover[C]//*Proceeding of Mechanics of Oil Slicks*. Paris, France: Association Amical des Ingenieurs, 1981.
- [14] Aravamudan K S. 预报不平静海面溢油扩散的简化数学模型[J]. 李曼猗, 译. *交通环保*, 1984, (6): 15-22.
- [15] Zhao W Q, Wu Z H. A model of spreading, dispersion and advection caused by an oil slick on the unstable sea surface[C]//*Proceedings of 6th APD-IAHR Congress*. Kyoto, Japan, 1988.
- [16] 武周虎. 不平静海面溢油的扩展、离散和迁移模型[D]. 成都: 成都科技大学, 1987.
- [17] 武周虎, 赵文谦. 伶仃洋溢油污染风险区划及防污染对策[J]. *水利学报*, 1992, (10): 42-47.
- [18] 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.
- [19] 口英昭, 山崎宗广, 司月玲. 海上连续溢油的扩散[J]. *交通环保*, 1985, (2): 18-23.
- [20] 张永良, 褚绍喜, 富国, 等. 溢油污染数学模型及其应用研究[J]. *环境科学研究*, 1991, 4(3): 7-17.
- [21] Lehr W J, Cekirge H M, Fraga R J, et al. Empirical studies of the spreading of oil spills[J]. *Oil and Petrochemical Pollution*, 1984, 2 (1): 7-11.
- [22] Lehr W J. Progress in oil spread modeling[C]//*Proceedings of the 19th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar*. Ottawa, Canada: Environment Canada, 1996: 889-894.
- [23] Lehr W J, Fraga R J, Belen M S, et al. A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1984, 15(9): 326-329.
- [24] Hoult D P, Fay J A, Milgram J H, et al. The spreading and containment of oil slicks[C]//*Proceedings of the 3rd Fluid and Plasma Dynamics Conference*. Los Angeles, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1970.

- [25] Fanneløp T K, Sjøen K. Hydrodynamics of underwater blowouts [C]//18th Aerospace Sciences Meeting. Pasadena, California: AIAA, 1980: 17-33.
- [26] Milgram J H. Mean flow in round bubble plumes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133: 345-376.
- [27] Milgram J H, Burgess J J. Measurements of the surface flow above round bubble plumes[J]. Applied Ocean Research, 1984, 6 (1): 40-44.
- [28] Swan C, Moros A. The hydrodynamics of a subsea blowout[J]. Applied Ocean Research, 1993, 15(5): 269-280.
- [29] Zheng L, Yapa P D. A numerical model for buoyant oil jets and smoke plumes[C]//Proceedings of the 20th Arctic Marine Oil Spill Program. Vancouver, BC, Canada: Environment Canada, 1997: 963-979.
- [30] Rye H, Brandvik P J. Verification of subsurface oil spill models [C]//Proceedings of the 1997 International Oil Spill Conference. Washington DC: API Publication, 1997: 551-557.
- [31] 金梅兵. 近岸溢油的全动力预测方法研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 30-36.
- [32] 刘浩, 尹宝树, 林建国. 海面溢油对流扩散的反向计算[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 16-19.
- [33] 孙文心, 江文胜, 李磊. 近海环境流体动力学数值模型[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 358-365.
- [34] 袁业立. 全动力油膜运动数值模式[M]//冯士筭, 孙文心. 物理海洋数值计算. 郑州: 河南科学技术出版社, 1992.
- [35] Bennett J R, Clites A H. Accuracy of trajectory calculation in a finite-difference circulation model[J]. Journal of Computational Physics, 1987, 68(2): 272-282.
- [36] Horiguchi F. Fate of oil spill in the Persian Gulf[R]. UDC: 551.463.8. 1991, 26(4): 39-62.
- [37] Johansen O. The Halten Bank experiment observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment[C]//Proceedings of the 11th Arctic Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. Ottawa, Canada: Environment Canada, 1984: 18-36.
- [38] Johansen Ø. DOOSIM-a new simulation model for oil spill management[C]//Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference. Washington DC: API Publication, 1987: 529-532.
- [39] Johansen Ø, Skognes K. Statistical simulations of oil drift for environmental risk assessments and consequence studies[C]//Proceedings of the 7th Arctic Marine Oil Spill Program. AMOP. Technical Seminar. Ottawa, Canada: Environment Canada, 1988: 355-366.
- [40] Johansen Ø, Skognes K. Oil drift in ice model[R]. Stavanger, Norway: Offshore Operators Committee, 1995: 23.
- [41] Johns H O, Bragg J R, Dash L C, et al. Natural cleaning of shorelines following the Exxon Valdez spill[C]//Proceedings of the 1991 Oil Spill Conference, Seattle, Washington: Production Research Company, 1991: 167-176.
- [42] Jones R K. A simplified pseudo-component oil evaporation model [C]//Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP). Technical Seminar. Ottawa, Canada: Environment Canada, 1997: 43-61.
- [43] Elliot A J. EUROSPILL: oceanographic processes and NW European shelf databases[J]. Marine Pollution Bulletin, 1991, 22 (11): 548-553.
- [44] Elliott A J, Hurford N, Penn C J. Shear diffusion and the spreading of oil slicks[J]. Marine Pollution Bulletin, 1986, 17(7): 308-313.
- [45] Elliott A J, Dale A, Proctor R. Modelling the movement of pollutants in the UK shelf seas[J]. Marine Pollution Bulletin, 1992, 24(12): 614-619.
- [46] Shen H T, Yapa P D. Oil slick transport in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(5): 529-543.
- [47] 杨小庆, 沈洪道, 汪德胜. 油在河流中传输的双层数学模型[J]. 水利学报, 1997, (8): 71-76.
- [48] Yapa P D, Shen H T, Angammana K S. Modeling oil spills in a river-lake system[J]. Journal of Marine Systems, 1994, 4(6): 453-471.
- [49] Zhang B, Zhang C Z, Ozer J. Surf-a simulation model for the behavior of oil slicks at sea[C]//Ozer J. Oil Pollution: Environmental Risk Assessment (OPERA). Belgium: Caligrafic Dewarichet, 1991: 61-85.
- [50] 张存智, 窦振兴, 韩康, 等. 三维溢油动态预报模式[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 22-29.
- [51] Lou A G, Wu D X, Wang X C, et al. Establishment of a 3D model for oil spill prediction[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(4): 473-479.
- [52] 刘文通, 张洪芹. 漂流卡与原油膜漂移速度的实验研究[J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 13-17.
- [53] 季荣, 陈国华, 胡雅蓓, 等. 流-风-波共存下溢油漂移的实验室模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(3): 353-360.
- [54] 赵文谦, 江洧. 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.
- [55] 沈永明, 倪浩清, 赵文谦, 等. 油-水两相湍浮力回流双流体模型[J]. 力学学报, 1992, 24(5): 546-555.
- [56] 徐洪磊. 海上溢油动态数值模拟的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
- [57] 李冰绯. 海上溢油的行为和归宿数学模型基本理论与建立方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [58] Wang S D, Shen Y M, Zheng Y H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(13): 1556-1571.
- [59] 汪守东. 基于 Lagrange 追踪的海上溢油预报模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [60] Gu G W, Wei H P, Cai B T. Model and numerical studies on buoyant jets in crossflows: Yantai marine outfall system[J]. Water Science and Technology, 1991, 24(5): 175-181.

- [61] Zheng L, Yapa P D. A numerical model for buoyant oil jets and smoke plumes[C]//Proceedings of the 20th Arctic Marine Oil Spills Technical Program, Vancouver, B.C., Canada: Environment Canada, 1997, 2: 963-980.
- [62] Yapa P D, Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: model development[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 35(5): 673-687.
- [63] Zheng L, Yapa P D. Simulation of oil spills from underwater accidents II: model verification[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(1): 117-134.
- [64] Zhang D F, Easton A K, Steiner J M. Simulation of coastal oil spills using the random walk particle method with Gaussian kernel weighting[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1997, 4(2): 71-88.
- [65] Korotenko K A, Mamedov R M, Mooers C N K. Prediction of the dispersal of oil transport in the Caspian Sea resulting from a continuous release[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000, 6(5-6): 323-339.
- [66] Lonin S A. Lagrangian model for oil spill diffusion at Sea[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(5-6): 331-336.
- [67] 刘伟峰, 孙英兰. 海上溢油运动数值模拟方法的探讨与改进[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009, (3): 90-97.
- [68] 吴永成, 翁学传, 杨玉玲, 等. 胶州湾溢油污染研究[J]. 海洋科学集刊, 1996, (37): 25-31.
- [69] 娄安刚, 奚盘根, 黄祖珂, 等. 海面溢油轨迹的分析与预报[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(4): 477-484.
- [70] Youssef M, Spaulding M L. Drift current under the action of wind waves[C]//Proceedings of the 6th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Ottawa, ON, Canada: Environment Canada, 1993: 587-615.
- [71] Delvigne G A L, Hulslen L J M. Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficient application in computations of natural oil dispersion[C]//Proceedings of the 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. Ottawa, ON, Canada: Environment Canada, 1994: 173-187.
- [72] Mackay D, Paterson S, Trudel K. A mathematical model of oil spill behavior[R]. Toronto, Canada: University of Toronto, 1980: EE-7.
- [73] Mackay D, Buist I, Mascarenhas R, et al. Oil spill processes and models[R]. Ottawa: Environment Canada, 1980: EE-8.
- [74] Spaulding M L, Odulo A, Kolluru V S. A hybrid model to predict the entrainment and subsurface transport of oil[C]//Proceedings of the 15th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Ottawa, ON, Canada: Environment Canada, 1992: 67-92.
- [75] Reed M, French D, Rines H, et al. A three dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment[C]//Proceedings of 1995 International Oil Spill Conference. Long Beach, California, 1995: 61.
- [76] Reed M, Turner C, Odulo A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1994, 1(2): 143-157.
- [77] Spaulding M L, Kolluru V S, Anderson E, et al. Application of three-dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to hindcast the Braer spill[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1994, 1(1): 23-35.
- [78] Pacanowski R C, Philander S G H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(11): 1443-1451.
- [79] Chen H Z, Li D M, Li X. Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay[J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2007, 19(3): 282-291.
- [80] D'Asaro E. Simple suggestions for including vertical physics in oil spill models[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000, 6(3-4): 209-211.
- [81] Tkalic P, Chan E S. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(11): 1219-1229.
- [82] Rye H. Probable effects of Langmuir circulation observed on oil slicks in the field[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000, 6(3-4): 263-271.
- [83] Reed M, Daling P S, Brandvik P J, et al. Laboratory tests, experimental oil spills, models and reality: the Braer oil spill[C]//Proceedings of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Ottawa, ON, Canada: Environment Canada, 1993: 203-209.
- [84] Delvigne G A L, Sweeney C E. Natural dispersion of oil[J]. Oil and Chemical Pollution, 1988, 4(4): 281-310.
- [85] Coppini G, De Dominicis M, Zodiatis George, et al. Hindcast of oil-spill pollution during the Lebanon crisis in the eastern Mediterranean, July-August 2006[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(1): 140-153.
- [86] Vethamony P, Sudheesh K, Babu M T, et al. Trajectory of an oil spill off Goa, eastern Arabian Sea: field observations and simulations[J]. Environmental Pollution, 2007, 148(2): 438-444.
- [87] Mellor G, Blumberg A. Wave breaking and ocean surface layer thermal response[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(3): 693-698.
- [88] Li M. Representing turbulent dispersion in oil spill models[C]//Proceedings of the 1996 AMOP Seminar. Calgary, Canada: AMOP, 1996: 671-684.
- [89] Li Y, Zhu J, Wang H. The impact of different vertical diffusion schemes in a three-dimensional oil spill model in the Bohai Sea [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(6): 1569-1586.
- [90] Abascal A J, Castaneda S, Medina R, et al. Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(11): 2099-2110.
- [91] Fingas M F. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 42(2): 157-175.

- [92] Cucco A, Sinerchia M, Ribotti A, et al. A high-resolution real-time Forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(6): 1186-1200.
- [93] De Dominicis M, Pinardi N, Zodiatis G, et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting-part2: numerical simulations and validations[J]. *Geoscientific Model Development*, 2013, 6(6): 1871-1888.
- [94] Abascal A J, Castanedo S, Núñez P, et al. A high-resolution operational forecast system for oil spill response in Belfast Lough [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 302-314.
- [95] García-Martínez R, Flores-Tovar H. Computer modeling of oil spill trajectories with a high accuracy method[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1999, 5(5-6): 323-330.
- [96] Elliott A J, Jones B. The need for operational forecasting during oil spill response[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(2): 110-121.
- [97] Elliott A J. A probabilistic description of the wind over Liverpool Bay with application to oil spill simulations[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(4): 569-581.
- [98] Price J M, Johnson W R, Ji Z G, et al. Sensitivity testing for improved efficiency of a statistical oil-spill risk analysis model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(7-8): 671-679.
- [99] Jorda G, Comerma E, Bolaños R, et al. Impact of forcing errors in the CAMCAT oil spill forecasting system. A sensitivity study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 65(1-4): 134-157.
- [100] Mariano A J, Kourafalou V H, Srinivasan A, et al. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2011, 52(1-2): 322-340.
- [101] Liu Y G, Macfadyen A, Ji Z G, et al. Trajectory forecast as a rapid response to the Deepwater Horizon oil spill[M]//Liu Y G, Weisberg R H R H, Hu C C, et al. *Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise*. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2011, 195: 91-101.
- [102] Liu Y, Weisberg R H, Hu C, et al. Combining numerical ocean circulation models with satellite observations in a trajectory forecast system: a rapid response to the Deepwater horizon oil spill[C]//*Proceedings of the SPIE Volume 8030, Ocean Sensing and Monitoring III*. Orlando, Florida, United States: SPIE, 2011, 8030: 80300K, doi: 10.1117/12.887983.
- [103] Sebastião P, Soares C G. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in a coastal zone[J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 63(3-4): 257-269.
- [104] Sebastião P, Soares C G. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(3-4): 576-584.
- [105] Wang Y B, Zheng X Y, Yu X, et al. Temperature and salinity effects in modeling the trajectory of the 2011 Penglai 19-3 oil spill[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(7): 946-953, doi: 10.1080/1064119X.2016.1261971.
- [106] Liu X, Guo J, Guo M X, et al. Modelling of oil spill trajectory for 2011 Penglai 19-3 coastal drilling field, China[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(18): 5331-5340.
- [107] Li Y, Zhu J, Wang H, et al. The error source analysis of oil spill transport modeling: a case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(10): 41-47.
- [108] 李燕, 朱江, 王辉, 等. 同化技术在渤海溢油应急预报系统中的应用[J]. *海洋学报*, 2014, 36(3): 113-120.
- [109] Liao G X, Yang J Q, Gao Z H, et al. Numerical prediction of oil spill trajectory after dispersant application in deepwater environment[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2013, 39(2): 103-107.
- [110] Cai Z Q, Fu J, Liu W, et al. Effects of oil dispersants on settling of marine sediment particles and particle-facilitated distribution and transport of oil components[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 408-418.

Review on the oil spill numerical forecasting technology

LI Yan, YANG Yi-qiu, PAN Qing-qing

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: The paper introduces the international and domestic background of oil spill accidents and the main process of oil transport and fate in ocean. We review the developing history of oil spill numerical forecasting technology, compare three main oil spill models and point out the advantages and disadvantages of every kind of oil spill model. We introduce the present research situation of international and domestic oil spill numerical forecasting technology, discuss some questions in these studies and point out the future trend.

Key words: oil spill; numerical forecasting technology; vertical diffusion simulation; error analysis; assimilation technology