

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.005

基于油粒子模型的水库水质应急预案

韩龙喜¹, 张琳¹, 金文龙¹, 黄瑞^{1,2}, 张巧玲¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 扬州环境资源职业技术学院资源系, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为了有效地预防和控制溢油污染, 以大伙房水库为典型案例, 针对事故风险瞬时源的岸边排放和离岸排放2种方式, 将溢油离散化为若干数量的油粒子, 通过三维水动力数值模拟, 提取水库表层流场, 基于油粒子模型, 综合考虑油粒子的随流输运、风导漂移和随机游走, 并对上岸油粒子的迁移路径进行修正, 模拟、分析溢油随时间迁移及其空间分布特征。该模型的建立, 旨在完善水库溢油应急反应体系, 减少溢油事故应急处理的盲目性。

关键词: 大伙房水库; 突发性事故; 溢油; 油粒子模型; 水质应急预案

中图分类号: X24; TV697 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2013)02-0120-05

Water quality emergency warning in reservoirs based on oil particle model

HAN Longxi¹, ZHANG Lin¹, JIN Wenlong¹, HUANG Rui^{1,2}, ZHANG Qiaoling¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Resource Department of Yangzhou Vocational College of Environment and Resources, Yangzhou 225000, China)

Abstract: In order to effectively control and prevent the pollution of spilled oil, a large reservoir in the northeastern area of China was taken as the study site with two scenarios: onshore discharge and offshore discharge of an accidental instant pollutant source. The spilled oil was treated as a large number of oil particles. Taking into account the factors including advection, wind driven drift, and random walk of the particles, a three-dimensional oil particle model was built to simulate the temporal and spatial distribution, and the characteristics of the oil particles. Furthermore, the pathway of those landing particles was revised. The model can improve the emergency response system of spilled oil in reservoirs and reduce blindness in emergency treatment of oil spill accidents.

Key words: Dahuofang Reservoir; emergency incident; oil spill; oil particle model; water quality emergency warning

随着我国社会经济的快速发展,石油运输需求量急速增长,导致突发性水污染事故频繁发生。为了预防和控制潜在的水环境风险,准确预测水体中污染物的迁移和扩散情况很必要。随着水质模型研究的深入,国际上已经有很多成熟的水质模型软件,然而这些模型输入参数多、分析工作量大,对突发性水污染事故风险预测具有一定难度。基于油粒子模型的典型水域溢油应急预案预报系统,能够快速获取数据、模拟污染团的迁移轨迹和空间分布,实时预报校正,为有关部门制定与实施应急预案提供科学依据,对于制定切实可行的应急措施、实施对事故危害的有效控制具有重要的技术支撑作用。

油粒子模型建立的主要思路是将溢油离散化为大量油粒子,每个粒子代表一定的油量^[1]。在流场中追踪其运动轨迹,得到每一时刻各个油粒子所处的空间位置,统计各时刻油粒子的位置可得到各时刻溢油的空间分布^[2]。目前,针对事故性溢油预报工作,国内外取得了一系列研究成果。娄安刚等^[3]根据胶州湾湾口两侧团岛和薛家岛的潮位观测资料,同时考虑风场对海面溢油的影响,建立预测胶州湾溢油飘移轨迹的数值

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101031)

作者简介: 韩龙喜(1964—),男,江苏扬州人,教授,博士,主要从事水环境保护研究。E-mail: hanlongxi@sina.com

模型;沈永明等^[4]建立了统一考虑物理、化学和生物过程综合作用的近岸海域多组分三维水质动力学模型;熊德琪等^[5]以风场和流场数据库为强迫条件,建立了大连港溢油应急预报系统,利用 HAMSOM 三维海洋模式进行潮流调和分析,用于流场预报,模拟珠江口水域的溢油;汪守东等^[6-7]将溢油输运和归宿模型由二维扩展到三维,用 POM 模式作为水动力模型,研究溢油粒子在流、风、浪多要素诱导情况下的迁移过程;Manuel 等^[8]采用区域海洋模式 ROMS 模拟的流场、NCEP 每 6 h 一次的风场作为驱动,结合拉格朗日油粒子模型 (LPTM) 对“威望号”船舶溢油事件进行了模拟。

总体而言,目前相关研究成果主要集中于开敞海域,鲜见关于油粒子模型在水库应急预案中的研究报道;基于油粒子模型的研究主要集中在溢油的漂移扩散过程,对于扩展过程,则主要采用 FAY 提出的三阶段扩展理论^[9]。FAY 模型假设油膜在自身扩展阶段不会碰到水陆边界,该假设在开敞海域上基本适用,但由于河流和水库比较狭窄,实际情况下溢油在自身扩展阶段可能接触到水陆边界,因此将该假设用于河道和水库溢油模拟会出现比较多的问题^[10]。笔者以辽宁省大伙房水库为典型案例,依据枯水期三维水动力数值模拟的表层流场,在溢油的自身扩展阶段采用油粒子模型,并对近岸水域油粒子的迁移轨迹进行修正,模拟、分析溢油随时间的迁移及其空间分布特征,有效解决了水库溢油在自身扩展阶段可能碰到水陆边界的问题。

1 油粒子模型数学描述

油粒子模型建立的主要思路是将溢油离散化为大量油粒子,以每个油粒子代表一定的油量。 Δt 时间内将油粒子的运动过程分成 3 个组成部分,即随流过程、风导漂移和随机游走过程。单个油粒子在 $(n+1)\Delta t$ 时刻的空间位置为

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n + \Delta\mathbf{X}_C + \Delta\mathbf{X}_W + \Delta\mathbf{X}_D \tag{1}$$

式中: $\mathbf{X}_{n+1}$ ——某油粒子在 $(n+1)\Delta t$ 时刻空间位置的列向量; $\mathbf{X}_n$ ——油粒子在 $n\Delta t$ 时刻空间位置的列向量; $\Delta\mathbf{X}_C$ ——因表层水流随流运动而产生的油粒子空间位置变化的列向量; $\Delta\mathbf{X}_W$ ——因风应力而产生的油粒子空间位置变化的列向量; $\Delta\mathbf{X}_D$ ——因水体紊动扩散产生的油粒子空间位置变化的列向量(又叫随机游走距离)。

1.1 溢油随流运动

用确定性方法模拟溢油油粒子的随流过程。 Δt 时段后,因表层水流随流运动而产生的油粒子空间位置变化的列向量为

$$\Delta\mathbf{X}_C = \frac{u_n + u_{n+1}}{2}\Delta t \tag{2}$$

式中: u_n ——某粒子在 $n\Delta t$ 时刻空间位置的水流流速; u_{n+1} ——某粒子在 $(n+1)\Delta t$ 时刻空间位置的水流流速。

1.2 溢油的风导(应力)漂移运动

风导漂移是指风直接作用于油膜上的切应力使油膜产生的漂移。用确定性方法^[1]模拟溢油风导(应力)漂移过程:

$$\Delta\mathbf{X}_W = \alpha D \mathbf{W}_{10} \Delta t \tag{3}$$

其中

$$D = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

式中: α ——风漂移因子,取值范围为 0.03 ~ 0.04^[11]; $\mathbf{W}_{10}$ ——水面以上 10 m 高的风速向量; D ——考虑风向偏转角的转换矩阵; θ ——风向偏转角度,取值与 $\mathbf{W}_{10}$ 有关。

1.3 溢油的随机游走运动

溢油粒子的随机游走距离列向量表示为

$$\Delta\mathbf{X}_D = \begin{pmatrix} a\sqrt{6K_x\Delta t} \\ b\sqrt{6K_y\Delta t} \end{pmatrix} \tag{4}$$

其中

$$a = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad b = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

式中: A, B, C ——位于 $(-0.5, 0.5)$ 之间均匀分布的随机数; K_x, K_y —— x, y 方向上的紊动扩散系数,根据文献^[12],取 $K_y = 0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $K_x = 0.10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

1.4 近岸水域油粒子迁移轨迹修正

近岸水域水流总体表现为顺岸流特征,但临近岸边网格节点的流速与岸线可能存在一定的夹角。当油粒子迁移至近岸水域时,按随流、风导漂移及随机游走计算其迁移路径,可能导致油粒子落在岸上这一不合理现象。笔者按照距离最近规则,将上岸油粒子时段末坐标修正为距落岸点最近水域的计算网格节点坐标。

2 油粒子模型验证

由于缺少实测资料,取水面不存在边界的情况,将模型计算结果与改进的FAY模型^[13]计算结果相比较,进行模型验证,结果见表1。由表1可知,在水面不存在边界的情况下,油粒子模型计算结果与改进的FAY模型结果吻合较好,因此认为油粒子模型计算结果合理、可信。

表1 溢油油膜尺寸
Table 1 Sizes of oil slicks km

距事故发生 时间/h	宽度			长度		
	FAY 模型	油粒子模型	误差	FAY 模型	油粒子模型	误差
1	68.62	70.69	2.07	72.06	75.39	3.33
4	137.25	142.31	5.06	146.97	153.34	6.37
8	194.10	200.68	6.58	210.45	217.47	7.02
12	237.72	244.95	7.23	259.86	267.70	7.84

3 基于油粒子模型的大伙房水库水质应急预报

大伙房水库位于辽宁省东北部,是中国第一个五年计划时期(1953—1957年)的第一个大型水库,是沈阳、抚顺两市居民的重要饮用水水源地。S202国道和G1212吉沈高速公路从大伙房水库浑河入库区域北侧经过,最近点距大伙房水库83 m,车辆泄漏的危险载运物品和燃油有可能流入大伙房水库,因此选取附近水域为突发性溢油风险源研究水域,其位置如图1所示。

研究区域突发性溢油主要以岸边排放方式进入水库,考虑研究方案的代表性,选取岸边排放和离岸排放2种方式进行研究。在保持水库稳定出、入库流量的基础上,以1月平均风速2.3 m/s和主导风向(NE)作为自由表面条件,模拟水库枯水期三维风生流流场,在大伙房水库三维水动力数值模拟结果的基础上提取表层流场。参照货车载质量及油箱容量,源强取为200 kg,污染物瞬时排放进入水库,划分为5 000个质点。根据石油类污染物随时间迁移及空间分布的特征,选取风险预警时段长为24 h,时间步长为200 s,共432个时段。

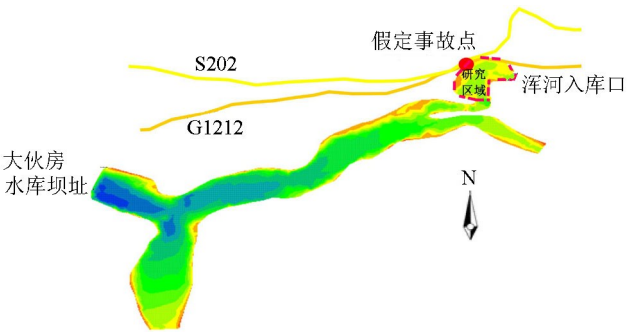


图1 大伙房水库假设突发性溢油污染研究区域
Fig. 1 Research area of hypothetically accidental oil spill pollution in Dahuofang Reservoir

3.1 岸边排放污染物迁移特征

大伙房水库枯水期表层水体流向基本为自浑河入库口向坝址处流动,排放点附近岸边水深较浅处水流运动表现出良好的顺岸流特征。如图2(a)所示,从不同时刻油膜的空间分布可以看出,溢油进入水库后,主要以随流过程和风导漂移过程为主,在东北向顺岸水流的影响下自事故点沿东北岸线向研究区域南面库湾处运动;由于溢油的随机游走运动,在迁移过程中油膜的形状发生变化,并且面积逐渐增大。排放点附近由于水深较浅,流速相对较大,因而污染物质运动快,如图3(a)(b)所示。当 $t=5\text{ h}$ 时污染团中心位于排放点下游541 m处,当 $t=10\text{ h}$ 时污染团中心位于排放点下游922 m处;当污染团中心位于排放点下游1 000 m处时水域较封闭,表层水体流速相对较小,因而油膜迁移较慢,污染团滞留于库湾,如图3(c)所示。当 $t=20\text{ h}$ 时污染团中心位于排放点下游1 112 m处,相对于 $t=10\text{ h}$ 时刻,仅向下游运动了190 m。

3.2 离岸排放污染物迁移特征

从不同时刻油膜的空间分布(图2(b)、图4)可以看出,溢油主要以随流过程和风导漂移过程为主。受地形和风力的共同作用,研究区域表层水体出现2个明显环流,环流方向分别为逆时针方向和顺时针方向。

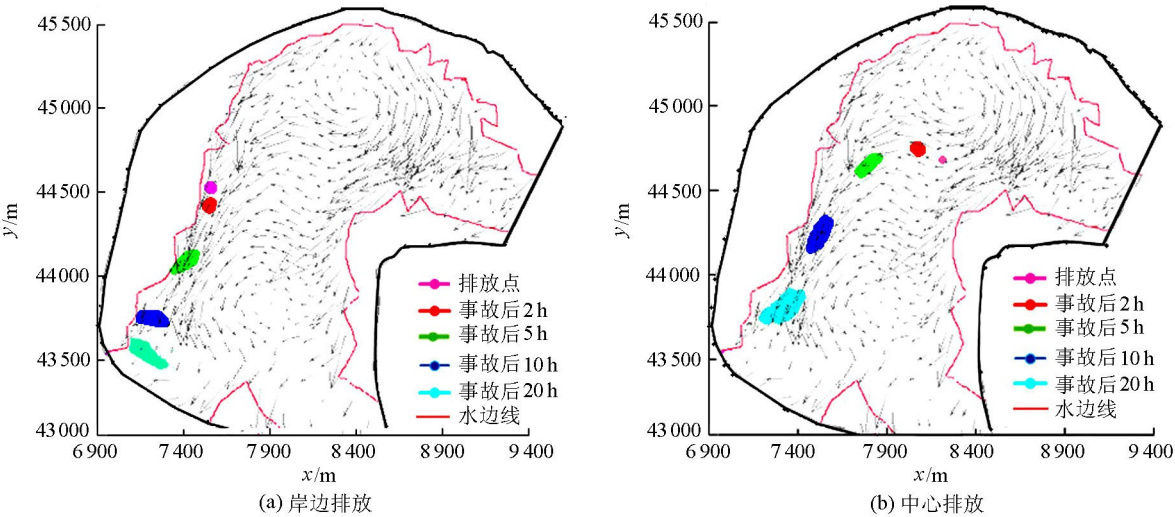


图2 油膜迁移轨迹
Fig. 2 Pathway of oil slick

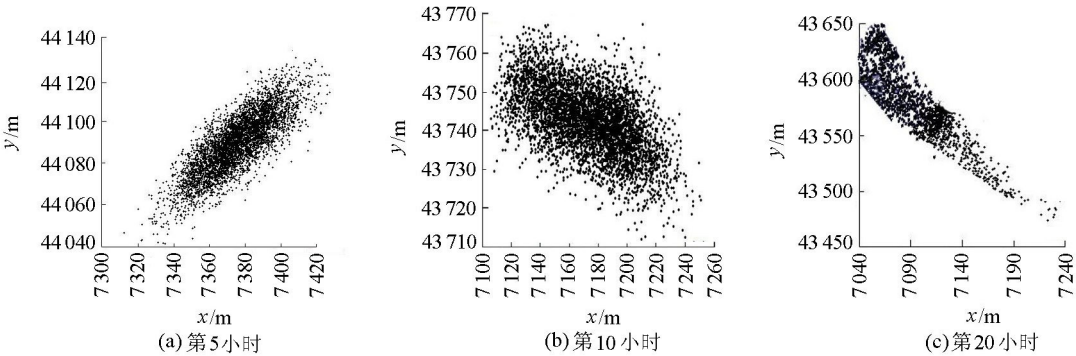


图3 岸边排放各时刻油粒子空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of oil particles at different times under onshore discharge conditions

溢油离岸排放进入水体后受环流的影响,随西北向水流自事故点向水库西岸迁移,随后,在东北向顺岸水流的影响下污染团沿东北岸线向研究区域南面库湾处运动。由于溢油的随机游走运动,在迁移过程中油膜的形状发生变化,并且面积逐渐增大。排放点附近由于水深较深,表层水体流速相对较小,因而污染物运动较慢(如图3(a)所示),当 $t=5\text{ h}$ 时污染团中心距排放点仅163 m;当 $t=10\text{ h}$ 时污染团中心位于库区岸边,由于岸边水深较浅,流速相对较大,因而污染物运动快,如图4(c)所示;当 $t=20\text{ h}$ 时,污染团中心位于排放点下游1 317 m处,相对于 $t=10\text{ h}$ 时刻,其向下游运动了876 m。

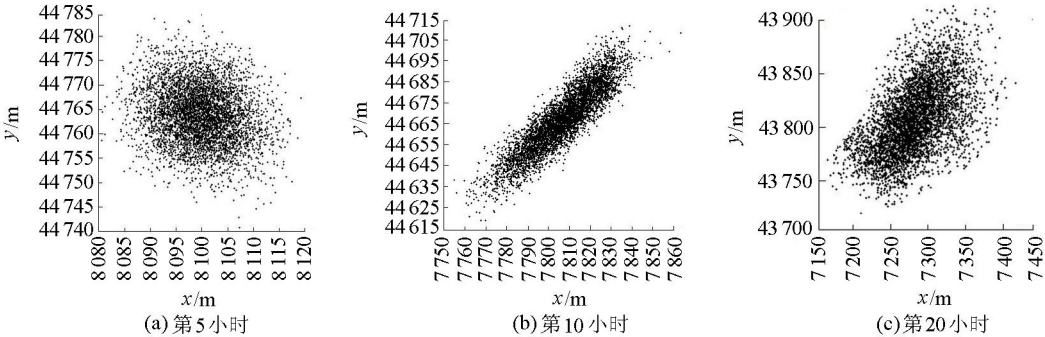


图4 离岸排放各时刻油粒子空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of oil particles at different times under offshore discharge conditions

4 结 语

根据水体溢油的行为,对近岸水域油粒子的迁移轨迹进行修正,建立油粒子数学模型。以大伙房水库为典型研究区域,运用该模型模拟了大伙房水库枯水期突发性溢油事故发生后油膜的迁移特征。模拟结果表明,受枯水期主导风向(NE)的影响,事故风险瞬时源的中心排放和岸边排放2种状况时,总体上其溢油随表层水流自排放点向坝址方向迁移,由于库湾的特殊水动力特征,最终滞留于研究区域南端库湾处。该模型的建立旨在完善水库溢油应急反应体系,为建立水库突发性溢油事故风险评估与决策管理系统提供关键技术支撑,在一定程度上间接提高溢油事故的应急反应水平。

参考文献:

[1] 蔡忠清. 海上船舶溢油粒子化及适应性数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

[2] 陈丽娜. 可降解地表水污染物随机游走改进模式研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

[3] 娄安刚, 王学昌, 孙长青, 等. 胶州湾海面溢油轨迹的数值模拟[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(1): 1-8. (LOU Angang, WANG Xuechang, SUN Changqing, et al. Numerical simulation of oil spill trajectory in Jiaozhou Bay [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001, 19(1): 1-8. (in Chinese))

[4] 沈永明, 郑永红, 吴修广. 近岸海域污染物迁移转化的三维水质水动力学模型[J]. 自然科学进展, 2000, 14(6): 694-670. (SHEN Yongming, ZHENG Yonghong, WU Xiuguang. 3-D water quality water dynamics model into nearshore pollutant migration[J]. Progress in Natural Science, 2000, 14(6): 694-670. (in Chinese))

[5] 熊德琪, 杨建立, 严世强. 珠江口区域海上溢油应急预报信息系统的开发研究[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(5): 63-66. (XIONG Deqi, YANG Jianli, YAN Shiqiang. Researches of information system of forecasting emergency oil spill in Pearl River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2005, 24(5): 63-66. (in Chinese))

[6] 汪守东, 沈永明, 郑永红. 海上溢油迁移转化的双层数学模型[J]. 力学学报, 2006, 38(4): 452-461. (WANG Shoudong, SHEN Yongming, ZHENG Yonghong. Double mathematical model of oil spil transformation on marine[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 38(4): 452-461. (in Chinese))

[7] 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.

[8] MANUEL G, LUIS F, ADOLFO U, et al. Operational oceano graphy system applied to the prestige oil-spillage event[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 72(1/4): 178-188.

[9] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[R]. New York: Oil on the Sea Plenum, 1969.

[10] 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运用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1): 128-131. (ZHANG Yanjun, LOU Wensheng, LEI Alin, et al. Study and application of river oil spill model in the Three Gorges water quality early warning system[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(1): 128-131. (in Chinese))

[11] 牟林, 邹和平, 宋军, 等. 海上溢油数值模拟研究进展[J]. 海洋通报, 2011, 30(4): 473-480. (MOU Lin, ZOU Heping, SONG Jun, et al. Progress of marine oil spill numerical simulation research[J]. Applied Ocean Bulletin, 2011, 30(4): 473-480. (in Chinese))

[12] 姜卫星. 黄浦江溢油事故的数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[13] SHEN H T, YAPA P D. Oil slick transport in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(5): 529-543.