

中国近海海上溢油预测与应急决策支持系统研发

安 伟^{1,2}, 王永刚^{2,3}, 王新怡^{2,3}, 牛志刚^{1,2}, 赵宇鹏^{1,2}

(1. 中海石油环保服务有限公司, 天津 塘沽 300452; 2. 海洋石油安全环保技术研发中心, 山东 青岛 266061; 3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 开发了中国近海海上溢油预测与应急决策系统, 由三维水动力模型、溢油风化模型、环境敏感区图和决策支持模型组成。系统能够预测海面油膜的漂移-扩散行为和风化过程, 提供敏感区污染预警和资源优先保护次序、溢油应急优化方案以及溢油清污效果实时动态模拟。作为海上溢油应急响应决策平台, 系统能够通过网络提供服务。

关键词: 溢油预测; 油粒子模型; 应急决策支持; 环境敏感区图; 溢油清污优化方案

中图分类号: P713.3; TP319

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)11-0078-06

随着中国对石油及其制品日益增长的需求, 在海上开采、运输、装卸以及利用石油过程中溢油事故日渐增多, 油污已成为造成我国近海海域环境污染和生态损害的最大的因素^[1]。溢油事故发生后, 准确获得海面溢油的动态信息, 并进行迅速有效的应急响应, 对控制污染和清除油污起着关键性的作用。美国、加拿大以及欧洲的一些国家已经研制开发了溢油预测商业软件, 20 世纪 80 年代以来, 我国的专家学者从实验、理论以及数学模拟等方面对溢油在海面上的行为特征和运动变化规律做了大量的研究, 相继开发了特定海域的溢油预测系统^[2,3], 但系统覆盖海域范围小, 也比较分散, 同时存在基础数据欠缺、模型功能和信息处理容量有限、应急业务系统管理和更新的后续支撑不足等问题。

针对中国近海海域环境条件和溢油应急需求, 我们研制开发了“中国近海海上溢油预测与应急决策支持系统”, 能够对发生在我国近海海上溢油事故进行溢油动态预测并给出相应的应急决策方案, 极大地提高海上溢油应急快速反应能力。本文介绍该系统的组成、功能以及特点。

1 系统功能及结构

中国近海海上溢油预测与应急决策支持系统包括溢油预测预警、应急决策支持、数据库和系统运行保障 4 个功能模块, 见图 1。

在溢油应急过程中, 系统可提供海上溢油动态数值预测; 提供敏感区预警和优先保护次序; 提供溢油事故的处理及人员、设备的配备与调动方案; 提供溢油清污实时动态模拟效果; 作为指挥人员指挥

决策时的参考。

系统基于 C/S 模式构建, 通过互联网或专网提供客户服务, 用户使用客户端登录系统服务器提交指令, 运算结果返回到本地计算机显示和保存。采用 Microsoft Visual C++ 与面向对象技术开发, 基础数据库使用 Microsoft Office Access 库, 利用 Microsoft ADO 技术作为数据索引及快速读写, 外接数据文件使用 NetCDF 格式, 网络通信基于 TCP/IP 协议的 Socket 服务并包含数字加密。

2 溢油预测预警

溢油进入海面以后, 会在风、浪、流等作用下进行漂移和扩散, 因此准确获得海面油膜的动态信息对溢油污染预警起着关键性作用。本系统基于溢油漂移扩散模型、溢油风化模型和环境敏感资源图, 能够预测溢油在海面的漂移扩散轨迹和物理化学性质变化, 进行敏感资源污染预警, 还可以回推海面不明油膜的漂移路径, 追溯溢油污染源。

2.1 溢油漂移扩散模型

模型考虑风、流、浪等作用的影响, 采用“粒子法”模拟溢油在海面的漂移扩散行为。假定 (x_n, y_n) 为粒子在第 n 个计算步长开始时候的水平位置, 那么该计算步长结束时油粒子的水平位置可表示为^[4]:

收稿日期: 2010-05-31; 修回日期: 2010-08-24

基金项目: 中国海洋石油总公司科技项目(C/KJF JDCY 001-2007);

国家高技术产业发展项目(2008-311-000-033)

作者简介: 安伟(1979-), 男, 山东肥城人, 工程师, 博士, 主要从事海洋环境数值模拟研究, 电话: 0532-88962721, E-mail: anwei@coes.org.cn

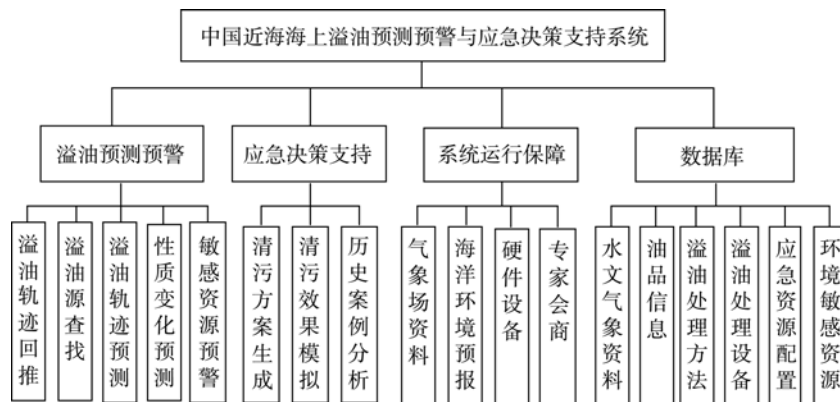


图1 海上溢油预测与应急决策支持系统框架图

Fig. 1 Framework of oil spill forecast and emergency decision support system

$$\begin{aligned} x'_n &= x_n + u\Delta t + \xi\sqrt{6K_H\Delta t} \\ y'_n &= y_n + v\Delta t + \xi\sqrt{6K_H\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

这里 u 和 v 分别为表层流速(含风海流)在 x 和 y 方向上的分量, 由水动力模型计算得到; Δt 为计算步长; ξ , K_H 分别代表 $[-1, 1]$ 区域上的均匀分布随机数和水平方向上的湍流涡动黏性系数。

基于 POM 模式建立了 σ 坐标系下的中国近海三维水动力模型^[5], 采用 K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , S_a , S_{sa} 这 10 个分潮来预报潮流和潮位(其中 S_a , S_{sa} 只用于预报潮位)。鉴于关注海域为整个中国近海, 通过大区域模式(覆盖整个中国近海海域, 水平网格分辨率 $5'$)和小区域模式(渤海、东海、南海东部和南海西部, 水平网格分辨率 $1'$)嵌套, 既实现全海域的预测, 又保证了重点关注海域的计算分辨率, 见图 2。

模型运算采用多源气象资料获取方案, 以美国国家环境预报中心(NCEP)风场资料为主, 还包括手工输入和历史资料。

在计算油膜扩散面积时, 将油粒子最大扩散面积投影叠加, 油膜叠加厚度大于 $0.05 \mu\text{m}$ 的范围即为油膜可视面积, 见图 3。

计算过程中考虑了油膜与海岸交互作用, 通过油粒子在每个计算步长开始时位置点与结束时的位置点的连线是否与海岸线相交的方法判断油粒子是否上岸。对于上岸的油粒子, 综合考虑岸线类型、风、流、海浪以及油品性质, 计算停留在岸上和重新回到海面的油粒子的数量。

2.2 溢油风化模型

由于溢油风化过程十分复杂, 基础研究的薄弱

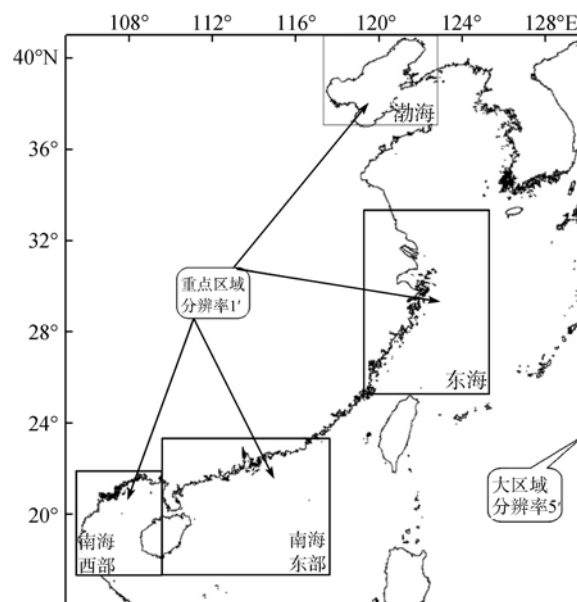


图2 模式计算区域及网格分辨率

Fig. 2 Model calculation domain and grid resolution

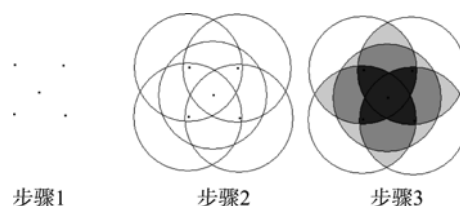


图3 油膜可视面积计算示意图

Fig. 3 Calculation diagram of the visual area of oil slick
步骤 1: 油粒子空间分布; 步骤 2: 最大扩散面积投影; 步骤 3: 投影面积叠加, 灰色部分即为可视面积, 灰度高表示油膜厚度大
step 1: spatial distribution of oil particles; step 2: projection of maximum diffusion area; step 3: superposition of projected areas, where gray part being the visual area and the higher gray-scale being the thicker oil slicks

性制约了模型的发展, 目前国内外应用的几种风化

模型都不完善。本系统风化模型主要考虑油膜蒸发、乳化过程和密度、黏度变化,模型建立基于前人研究成果,同时根据实验数据对蒸发模型参数进行校正以弥补模型准确性的不足。

2.2.1 蒸发

溢油蒸发模型应用较多的是 Stiver 和 Mackay 年提出的参数化公式^[6]:

$$F_v = \ln \left[1 + B \left(\frac{T_G}{T} \right) \theta e^{\left(A - B \frac{T_0}{T} \right)} \right] \frac{T}{B T_G} \quad (2)$$

在公式(2)中, T_0 为油(在 $F_v=0$ 时)的初始沸点温度, T_G 为蒸馏曲线的梯度,是在原油蒸馏过程得到的数据,而国内油品的属性中一般没有这两个量。传统的做法, T_0 和 T_G 是由油品在 15.5°C 时的相对密度 $\rho_{\text{相对}}$ 得到的^[7],对于原油:

$$\begin{aligned} T_0 &= 532.98 - 3.1295(141.5 / \rho_{\text{相对}} - 131.5) \\ T_G &= 985.62 - 13.597(141.5 / \rho_{\text{相对}} - 131.5) \end{aligned} \quad (3)$$

T_0 和 T_G 与油品组分有很大关系,公式(3)换算只考虑了原油密度,忽略了其他组分的影响,通过实验 T_0 和 T_G 进行修正,考虑了溢油黏度、蜡含量、沥青质等属性:

$$T_0' = 944.51 - 442.82 / \rho_{20} - 170 / \nu + 37 / (0.37w + 2a) \quad (4)$$

$$T_G' = 2103.31 - 1481.23 / \rho_{20} + 1.34w\nu \quad (5)$$

其中, a 为沥青质质量分数(%), w 为蜡质量分数(%), ρ_{20} 为 20°C 的密度, ν 为 15°C 动力黏度。

2.2.2 乳化

溢油乳化程度由含水率 Y_w 表示,依据 Mackay 公式^[8],

$$Y_w^F = \frac{1}{K_B} [1 - e^{-K_A K_B (1+W)^2 t}] \quad (6)$$

其中 Y_w 为乳化物含水量(%), K_A 取 4.5×10^{-6} , K_B 取 $1/Y_w^F$, Y_w^F 为最终含水量。

2.2.3 密度和黏度

综合挥发、乳化影响,油膜密度表达为^[9]:

$$\rho = (1 - Y_w)[(0.6\rho_0 - 0.34)F_v + \rho_0] + Y_w \rho_w \quad (7)$$

油膜黏度变化表示为^[8]:

$$\nu = \nu_0 10^{4F_v} \exp[2.5Y_w / (1 - 0.654Y_w)] \quad (8)$$

其中 ν_0 为初始时油膜的运动黏性系数。

2.3 环境敏感区图开发

环境敏感区图(简称敏感区图)通过标示出不同沿海资源所在地和环境敏感地区以及溢油应急对策

建议,可为溢油应急决策者提供重要信息^[10]。经过多年资料收集和实地调查,建立了中国近海环境敏感资源数据库,包括中国近海国家级和地方级海洋自然保护区、珍稀濒危动植物保护区、沿海盐场、渔场、捕捞渔获量或总生物量、沿岸现存的历史文化遗迹和海水养殖区、中国沿海的主要港口和沿海国家 4A 级旅游景区以及沿海 14 个省市海洋功能区划。

利用 GIS 技术制作了中国近海环境敏感资源图,分类定义和管理敏感资源的范围、敏感等级、优先保护次序和溢油清除策略等基础资料,实现了敏感资源图与溢油模型动态快速耦合,在溢油应急过程中,能够根据溢油漂移轨迹和扩散范围预测结果,对可能受到影响的敏感资源做出污染预警,同时给出相应的应急方案,见图 4。

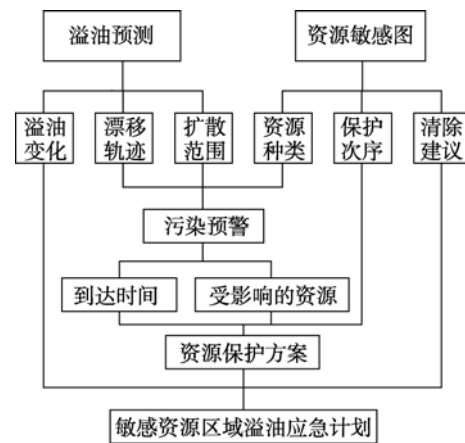


图4 系统敏感区图与溢油模型耦合框架图

Fig. 4 Coupling framework of sensitive resource map and oil spill model

3 应急决策支持

由于溢油种类的差异、海况和气象条件以及现场环境的不同,给应急人员制定应急决策带来很大的困难。本系统通过建立溢油清污技术优化方案生成模型、应急资源调用分析模型和溢油清污效果模型,量化海上溢油清理诸多影响因子及目标之间的关系,利用多种数据信息加以智能化的检索和融合,通过人机对话模式,能够给溢油应急优化方案,为应急决策提供全方位的信息支持。在操作过程中,指挥人员可以通过修改现场条件、任务目标及其他参数,来制定一套或多套应急方案。

3.1 溢油清污技术优化方案生成

选择清污技术时需要考虑多种因素,并对各相

关因素进行综合评判,影响清污技术选择的因素可以分为技术适用性 z_1 、环境适用性 z_2 两大类。因此本系统建立模糊多级综合评价模型,对各种清污技术进行综合评价打分,并依据得分值选择合理的清污技术。综合评价层次结构见图 5。

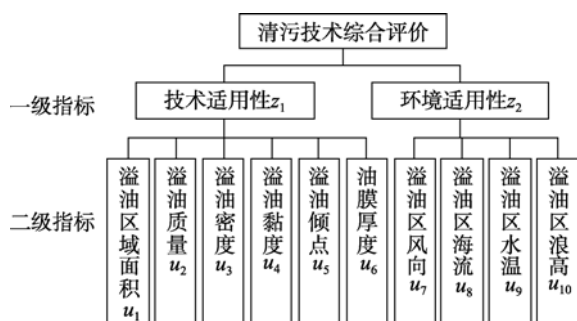


图 5 清污技术综合评价层次结构图

Fig. 5 Structural chart of comprehensive evaluation of clean-up technology

首先,将 z_1 做为被评判对象,将其对应的指标集 $\{u_1, u_2, \dots, u_6\}$ 做为评价指标集合,并对其指标赋予相应的权重进行模糊综合评价,得到 z_1 的模糊评价向量。同理对 z_2 也进行同样的模糊综合评价,得到 z_2 的模糊评价向量。最后以该清污技术作为被评价对象,以技术适应性和环境适应性作为评价指标,对它们赋予不同的权重,继续进行下一级的模糊综合评价,得到清污技术选择的模糊综合评价向量,对所有的清污技术都可利用上述的模糊多级综合评价方法计算综合得分,由高到低进行排序。

3.2 溢油应急资源调用分析

溢油清污技术确定以后,针对每一种清污技术选择合适的溢油清污设备和应急队员。本系统建立了多目标决策模型,针对每一种清污技术所对应的清污设备及其环境影响条件,建立应急资源调用方案,包括设备类型和数量、人员数量、从何处调用设备和人员等信息,同时对确定的调用方案从费用、时间、适用性等方面进行评价和排序。调用分析时遵循以下原则:

- (1) 根据 AIS 系统信息,事故周围海域的应急船舶全部调用;
- (2) 设备数量主要由指挥人员根据事故情况确定,操作人员手工输入,也可由系统根据溢油量自动选择;

(3) 人员数量根据操作设备所需的人员来确定,并考虑同一人员操作不同设备的可能性;

(4) 根据应急反应时间和应急费用,对调用方案进行评估,选择合适的方案。如果没有得到满意的方案,可修改相关条件,重新制定方案。

3.3 清污效果动态模拟

为更好地评价所选择的溢油清污方案和设备组合,系统可以对既定方案的清污效果进行模拟评价。模拟时充分考虑了作业过程中风、海流和油膜的动态变化,进行实时、动态模拟溢油清污效果,内容包括:

(1) 围油栏在不同位置布放时,拦截或者围控海面油污的效果模拟;

(2) 海面油污回收和处理的效果模拟,包括回收和处理油污量以及作业时间。

4 系统应用

本系统适用于整个中国近海海域,已为海上溢油事故应急、溢油应急计划编制、溢油应急演练和海洋工程环境影响预测与评价提供服务 30 余次。2009 年 9 月 14 日,10t 左右轻质原油在南海东部海域发生泄漏,应用本系统预测了未来 48 h 油污的动态变化,溢油漂移路径以油膜残迹显示,见图 6。系统预测过程中可提供以下信息:

- (1) 油膜动态:包括油粒子、油膜残迹、油膜路径、可视面积和面积残迹等显示方式;
- (2) 海况信息:包括即时风场和流场;
- (3) 油膜变化:包括残存油量、可视面积、扫还面积和漂移距离;
- (4) 油品信息:包括蒸发率、含水率、密度变化和黏度变化;
- (5) 计算记录:以计算步长为单位记录油膜中心点位置;
- (6) 预警信息:油膜影响到的敏感区信息。

5 总结

中国近海海上溢油预测与应急决策支持系统可以对海面油膜漂移、扩散轨迹和物理化学性质变化作出快速、准确预报,对可能受影响的敏感区进行预警,并综合溢油现场和预测信息给出合理、优化溢油清理方

案, 为海上溢油应急提供技术支持。该系统的建立和应用, 为保证国家建成全方位覆盖、全天候运行、快速反

应的现代化水上应急保障系统, 提升我国海上溢油应急快速反应的技术水平, 奠定了坚实的基础。

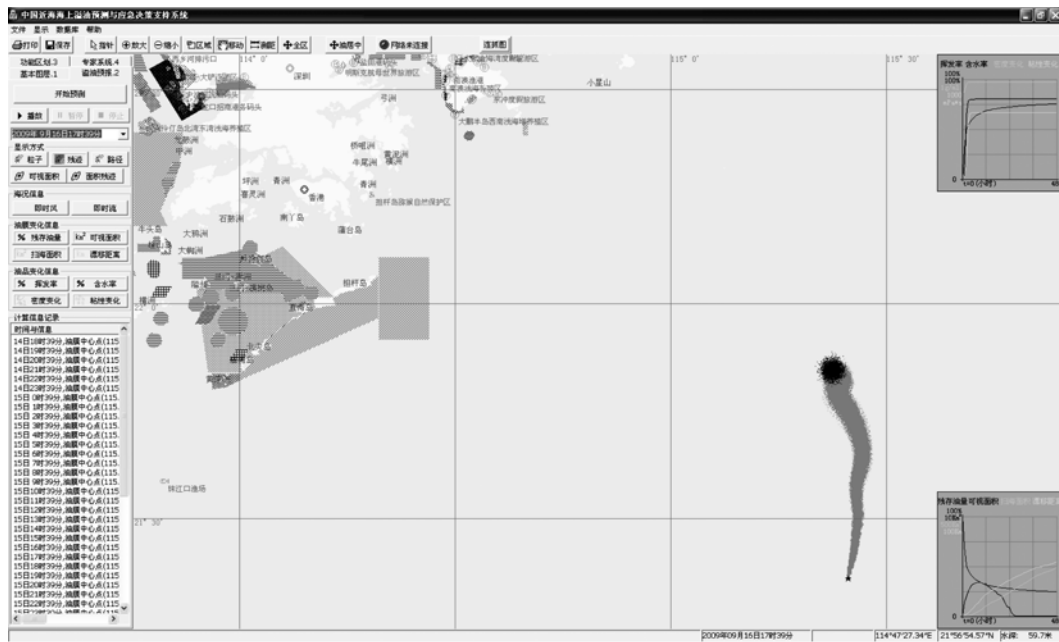


图6 溢油事故预测结果

Fig. 6 Simulation results of oil spill accident

参考文献:

- [1] 国家海洋局. 2005 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2006.
- [2] 熊德琪, 杜川, 赵德祥, 等. 大连湾溢油应急预报信息系统及其应用[J]. 交通环保, 2002, 23(3): 5-7.
- [3] 刘彦呈, 殷佩海, 林建国, 等. 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.
- [4] Al-Rabeh A H, Gunay N. On the application of a particle dispersion model[J]. *Coastal Engineering*, 1991, 17: 195-210.
- [5] 方国洪, 于克俊. 斜压海洋动力学的一种三维数值模式 I. 动力学方程数值格式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(3), 232-240.
- [6] Stiver W, Mackay D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixture[J]. *Environ Sci Tech*, 1984, 18(11): 834-840.
- [7] NOAA. ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills) User's Manual[M]. Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division, 1994. 50.
- [8] Mackay D, Buist I A, Mascarenhas R, et al. Oil Spill Processes and Models[M]. Toronto: University of Toronto, 1980. EE-8.
- [9] Buchanan I, Hurford N. Methods for predicting the physical changes of oil spilt at sea[J]. *Oil Chem Pollut*, 1988, 4: 311-328.
- [10] 中华人民共和国海事局. 溢油应急培训教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 117-124.

An oil spill forecast and emergency decision support system in China offshore

AN Wei^{1,2}, WANG Yong-gang^{2,3}, WANG Xin-yi^{2,3}, NIU Zhi-gang^{1,2}, ZHAO Yu-peng^{1,2}

(1. China Offshore Environmental Services Ltd., Tianjin Tanggu 300452, China; 2. Research and Development Center for Offshore Oil Safety and Environmental Technology, Qingdao 266061, China; 3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: May, 31, 2010

Key words: oil spill forecast; oil particle model; emergency decision support; environmental sensitive area maps; optimization project for oil clean-up

Abstract: A system was described for prediction of oil spill movement and responsive operations, which was composed of 3D hydrodynamic model, oil weathering model, environmental sensitive area maps, and decision support model. It can predict the drift-diffusion movement and weathering process of oil slicks, and also provide early warning for sensitive areas, sequence of preferential protection of sensitive resources, optimized projects of emergency, and real-time dynamic simulation of cleanup effect. In addition, the system is able to provide services through internet.

(本文编辑: 刘珊珊)

《海洋科学》杂志 2011 年征订启事

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性期刊,是中国自然科学核心期刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨,及时、快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等,对重大科研和应用性研究成果特别予以优先报道。主要刊载内容有:海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍(有偿刊登)等。

本刊为月刊,每月 9 日出版,大 16 开本,96 页,每期定价 30 元,全年定价 360 元。本刊国内外公开发行(国际刊号:ISSN1000-3096;国内刊号:CN37-1151/P;国内邮发代码:2-655;国外发行代号:M6666)。全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域研究的科技人员踊跃订阅。邮局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中名列前茅,订户遍及全国 20 多个省、市、自治区,影响面广,宣传力大,欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告,价格优惠。

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》编辑部地址:山东省青岛市南海路 7 号,266071

电话及传真:0532-82898755

E-mail: pxzhang@qdio.ac.cn