

不可溶漂浮性液态污染物 向下层水体释放研究

韩龙喜^{1,2}, 王 杰², 王晨芳², 蒋安祺², 张 奕²

(1. 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: 漂浮于水面的不可溶液态污染物的物理性质是影响其向下层水体释放强度的重要因素。根据有机污染物物理性质及相关参数的分布范围, 筛选出 8 种代表性不可溶漂浮性液态污染物, 按不同比例配制 32 种混合样品, 共计 40 种样品。其中 39 种典型研究样品的密度、运动黏度、表面张力范围分别为 $0.621\sim 0.995\text{ g/cm}^3$ 、 $1.81\times 10^{-6}\sim 1.00\times 10^5\text{ mm}^2/\text{s}$ 、 $0.024\sim 36.200\text{ mN/m}$ 。在 39 种典型样品中选择 34 种进行实验室动水环境物理试验, 分别研究了污染物密度、运动黏度、表面张力对释放强度的影响。采用偏相关分析方法识别了影响释放强度的关键物理因素, 结果表明密度、运动黏度是影响释放强度的决定性因素, 表面张力对释放强度无显著影响。采用回归分析方法构建释放强度与密度、运动黏度间的多元非线性回归模型($R^2=0.987$)。用 39 种典型样品中余下 5 种样品独立试验数据对模型进行的验证表明平均相对误差为 14.9%。

关键词: 不可溶漂浮性液态污染物; 密度; 运动黏度; 表面张力; 释放强度

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2023)01-0100-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20211102001

引用格式: 韩龙喜, 王杰, 王晨芳, 等. 不可溶漂浮性液态污染物向下层水体释放研究[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(1): 100-108. HAN L X, WANG J, WANG C F, et al. Study on the release of insoluble floating liquid pollutants to the subjacent waterbody[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(1): 100-108.

泄漏事件产生的不可溶漂浮性液态污染物进入环境水体后, 在随水流漂移扩散的同时, 一方面以薄膜形式向四周扩展, 另一方面在水动力作用下不断向下层水体释放, 造成水质污染。污染物自水面进入下层水体的过程及定量化表述是水质模拟预测关注的重点。

大量研究表明^[1-3]在拉格朗日方法求得油滴对流运动轨迹基础上, 叠加随机游走迁移项可得到各个油滴运动轨迹, 但该类方法难以确定油滴通过油-水界面以“随机游走方式”进入下层水体通量的边界条件。关于不可溶漂浮性液态污染物向下层水体的释放过程, 国内外学者进行了相关研究。Forrester^[4]研究表明部分油膜层在破碎波的作用下离散成油滴, 在下层水流的紊动作用下油滴进一步向下层水体扩散, 对油滴粒径测量发现向水中扩散的大都是粒径小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的油滴。丁大星^[5]指出水越深, 化学品在水中分散液滴的粒径越小。Zeinstra-Helfrich 等^[6]研究发现多数情况下, 夹带油量随油膜厚度呈线性增加, 并且高黏度油会阻碍夹带过程, 产生临时浸没在水体中的“油片”。李闻欣^[7]通过物理试验研究发现油品运动黏度、油水界面张力是影响悬浮在水体中的“油-颗粒物聚集体”形成及沉潜的关键因素。Li 等^[8]给出了基于无量纲数的表面油夹带模型来估算破碎波下的油夹带通量。赵文谦和江洧^[9]根据油滴紊动扩散微分方程得到溢油质量浓度沿水深变化的解析式, 但需先给出某一水深处的溢油质量浓度作为求解的边界条件。总之, 目前针对该类污染物向下层水体释放的研究已经开展了许多, 但关于污染物物理性质对释放强度的影响机制及定量研究相对不足, 制约了不可溶漂浮性液态污染物水质预警预报的发展。我们通过动水环境物理模型试验模拟不可

收稿日期: 2021-11-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(51979079)

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

(高 峻 编辑)

溶漂浮性液态污染物采取围油措施后, 在水流剪切应力、水流紊动效应作用下向下层水体的释放过程, 定量研究污染物密度、运动黏度、表面张力对释放强度的影响。研究旨在为水质模拟分析的源强确定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与仪器

参照 Sørensen 等的试验方法^[10], 将装有一定纯水的圆形容器置于恒温磁力搅拌器上, 利用铁架台固定围油装置使其与水体接触模拟围油栏, 通过磁力搅拌子的转动带动水体从而模拟动水环境。将试验水体的能量耗散率与天然水体的能量耗散率相对比, 试验条件下的能量耗散率在天然水体能量耗散率范围内, 确保该试验方法能达到污染物释放条件。试验所用圆形容器和围油装置均由透明玻璃制成且在垂向上标有刻度, 以便直观、精确地观察样品释放过程。搅拌子选用六角磁力搅拌子, 易形成稳定水动力。试验装置示意图见图 1, 实物图见图 2。装置包括圆形容器(高 15 cm、内径 30 cm)、围油栏(高 3 cm、内径 4.7 cm、外径 5 cm)、六角磁力搅拌子(直径 4 cm、齿轮宽度 0.7 cm)、恒温磁力搅拌器(中国上海沪析实业有限公司生产 85-2WS 型)、铁架台。样品物理性质测定所用仪器及对应测量方法如表 1 所示。

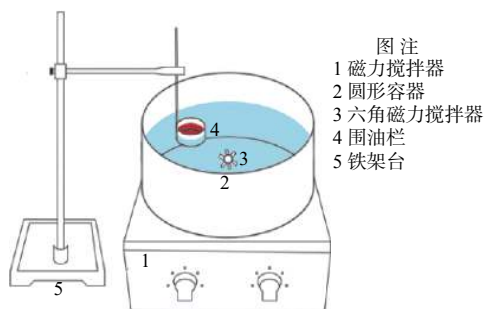


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device



图 2 试验装置实物

Fig. 2 Physical experimental device

表 1 物理性质测定方法及仪器

Table 1 Methods and instruments for measuring physical properties

测定项目	测定方法的标准	仪器
密度	GB/T 13377—2010《原油和液体或固体石油产品密度或相对密度测定法(毛细管塞比重瓶和带刻度双毛细管比重瓶法)》 ^[11]	比重瓶(中国沪可玻璃制品有限公司生产给氏比重瓶)
运动黏度	GB/T 265—1988《石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法》 ^[12]	运动黏度测定仪(中国凯能仪器有限公司生产 KN-03C 型)
表面张力	GB/T 6541—1986《石油产品油对水界面张力测定法(圆环法)》 ^[13]	表面张力仪(中国上海方瑞仪器有限公司生产 BZY-102 型)

1.2 试验样品

从常见有机污染物中筛选出的不可溶漂浮性液态污染物的密度、运动黏度、表面张力分布范围分别为 $0.621 \sim 0.995 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.81 \times 10^{-6} \sim 1.00 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、 $0.024 \sim 36.200 \text{ mN/m}$ ^[14]。由于低密度的污染物挥发性较大, 高运动黏度污染物释放强度极小不易检出, 两者均易造成较大试验误差。因此, 基于常见不可溶漂浮性液态污染物筛选出 8 种不易挥发、运动黏度相对较低的污染物, 并根据“相似相溶”原理, 按不同比例配制了 32 种不同物理性质的混合样品。因硅油 6 000 cst 运动黏度较大, 故选择其余 39 种样品作为典型研究对象, 其密度、运动黏度、表面张力范围分别为 $0.837 \sim 0.975 \text{ g/cm}^3$ 、 $5.29 \sim 4\,911.89 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、 $19.5 \sim 30.7 \text{ mN/m}$, 不可溶漂浮性液态污染物配比信息见表 2。

表 2 样品编号及其物理参数

Table 2 Samples and their physical parameters

样品编号	组 分	密 度/(g·cm ⁻³)	运 动 黏 度/(mm ² ·s ⁻¹)	表 面 张 力/(mN·m ⁻¹)
代 表 性 污 染 物	1 蓖麻油	0.961 1	1 184.14	29.9
	2 花生油	0.915 2	91.87	30.7
	3 菜油	0.918 3	81.86	25.5
	4 柴油	0.837 3	5.29	24.3
	5 硅油 0.65 cst	0.940 0	11.57	19.7
	6 硅油 2 000 cst	0.971 8	1 660.54	21.1
	7 硅油 5 000 cst	0.974 3	4 099.09	21.0
	8 硅油 6 000 cst	0.975 3	5 329.19	21.1
混 合 样 品 配 比 信 息	9 菜油：柴油=2：1	0.890 7	28.47	25.7
	10 菜油：柴油=1：4	0.850 8	7.83	23.0
	11 菜油：柴油=1：3	0.854 3	9.20	23.5
	12 菜油：柴油=2：5	0.861 0	9.84	23.1
	13 菜油：柴油=1：1	0.875 5	17.99	25.7
	14 花生油：蓖麻油=1：1	0.943 4	190.99	26.9
	15 柴油：蓖麻油=1：18	0.931 2	721.03	27.1
	16 柴油：蓖麻油=1：15	0.924 7	547.49	25.2
	17 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=1：1：2	0.964 1	849.60	20.6
	18 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=5：5：46	0.970 3	1 413.78	20.8
	19 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst=3：1	0.941 8	99.26	19.8
	20 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst=2：1	0.946 7	159.45	20.0
	21 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=1：1：7	0.969 5	1 283.54	20.7
	22 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：2 000 cst=41：41：14	0.954 1	439.19	20.2
	23 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst=5：1	0.941 0	47.63	19.5
	24 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst：硅油 6 000 cst=41：41：14：144	0.960 1	3 109.89	21.2
	25 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=3：1	0.972 0	2 196.92	21.0
	26 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=1：3	0.974 2	3 917.14	21.2
	27 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=5：3	0.971 8	2 582.13	21.2
	28 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=3：5	0.971 6	3 362.21	21.1
	29 硅油 6 000 cst：硅油 5 000 cst=1：1	0.974 3	4 647.46	21.2
	30 硅油 6 000 cst：硅油 5 000 cst=3：1	0.975 0	4 911.89	21.3
	31 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=1：2	0.971 8	3 597.43	21.1
	32 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=2：3	0.974 4	3 016.48	20.9
	33 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=41：185：14	0.956 0	2 384.32	22.3
	34 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=1：1：4	0.964 3	1 063.51	20.6
	35 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst=1：1	0.954 0	394.78	20.5
	36 硅油 2 000 cst：硅油 5 000 cst=1：1	0.972 6	2 899.52	21.1
	37 柴油：菜油=2：1	0.865 2	12.12	26.0
	38 花生油：蓖麻油=1：3	0.950 0	396.55	29.3
	39 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=17：17：14	0.960 7	659.85	20.7
	40 硅油 0.65 cst：硅油 5 000 cst：硅油 2 000 cst=1：1：20	0.970 3	1 504.60	21.0

图 3a 和图 3b 分别给出了常见不可溶漂浮性液态污染物和试验样品 20 ℃ 时的物理参数分布情况。可看出两者的分布特点基本一致, 表明配制的试验样品具有代表性。

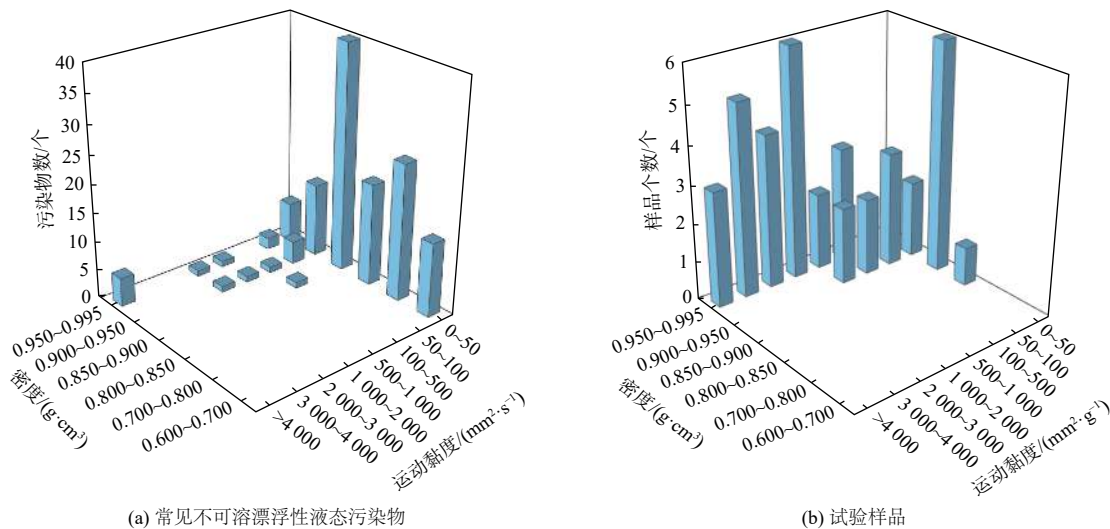


图 3 物理参数分布

Fig. 3 Physical parameters of the samples

1.3 试验方法

1) 试验时长选择: 因硅油 6 000 cst 的运动黏度较大, 故我们用其他 7 种代表性不可溶漂浮性液态污染物分别进行试验时间为 30、120、240、360 min 的预试验。结果表明试验时间 $t > 120$ min 每种污染物的释放强度趋于稳定, 故设定 t 为 120 min。

2) 转速选择: 能量耗散率已被不少学者用来验证并表征试验装置的水动力环境与天然水体的相似性^[15-16]。其计算公式为

$$\varepsilon = \frac{P \cdot 10^{-3}}{\rho_m V}, \quad (1)$$

$$P = N_p \rho_m n^3 d^5, \quad (2)$$

式中: P 为搅拌输入功率, W; ρ_m 为搅拌液密度, g/cm³; V 为搅拌液体积, m³; N_p 为功率准数; n 为搅拌转速, r/s; d 为搅拌转子直径, m。根据 Rushton 算图, 确定功率准数取值 1.57, 计算得到转速 700 r/min, 能量耗散率 $\varepsilon = 3.8 \times 10^{-2}$ W/kg, 属于天然水体能量耗散率 $10^{-10} \sim 10^{-1}$ W/kg^[17] 范围, 具有代表性意义。

3) 试验过程: 试验过程中使用恒温磁力搅拌器保持水体 20 ℃ 恒温。具体试验步骤分 3 步。

① 向圆形容器中注入纯水, 使水深达到 9.5 cm。将围油栏固定在距中心 6.2 cm、吃水深度为 1.5 cm 处, 磁力搅拌子置于容器中心。试验过程中保持每组试验水动力强度一致, 每组平行试验吃水深度一致。该试验条件下样品释放速率适中, 便于试验观察。

② 向围油栏中加入一定体积样品, 调整搅拌子转速为 700 r/min, 实测结果表明围栏所处区域水动力条件稳定, 平均流速约为 0.077 m/s。试验过程中, 随着样品向下层水体的释放, 不断向围油栏中添加样品以确保油膜厚度及下缘位置稳定。围油栏中污染物在水动力作用下的释放过程见图 4。刚开始投放污染物时, “污染物-水”界面受到水体扰动发生紊动; 在水动力持续作用下, 液滴不断从界面剥离并在水体紊动作用下进一步向下层水体扩散; 投放污染物结束即试验结束时, “污染物-水”界面不再剥离出液滴, 逐渐恢复平稳。

③ 达到试验设定时间 t 后, 将围油栏中剩余样品通过注射器收集到容量瓶中, 注入蒸馏水定容并称重, 并利用吸油毡只吸附油类的特性擦拭黏附在围油栏内壁上的残留样品进行称重, 利用差重法确定围油栏中未释放样品质量 m_1 、内壁上样品质量 m_2 。由试验过程样品总添加量与根据 m_1 、 m_2 换算后体积数的差值得到样品释放体积。重复上述试验步骤 3 次并取其平均值为样品总释放体积 V' 。

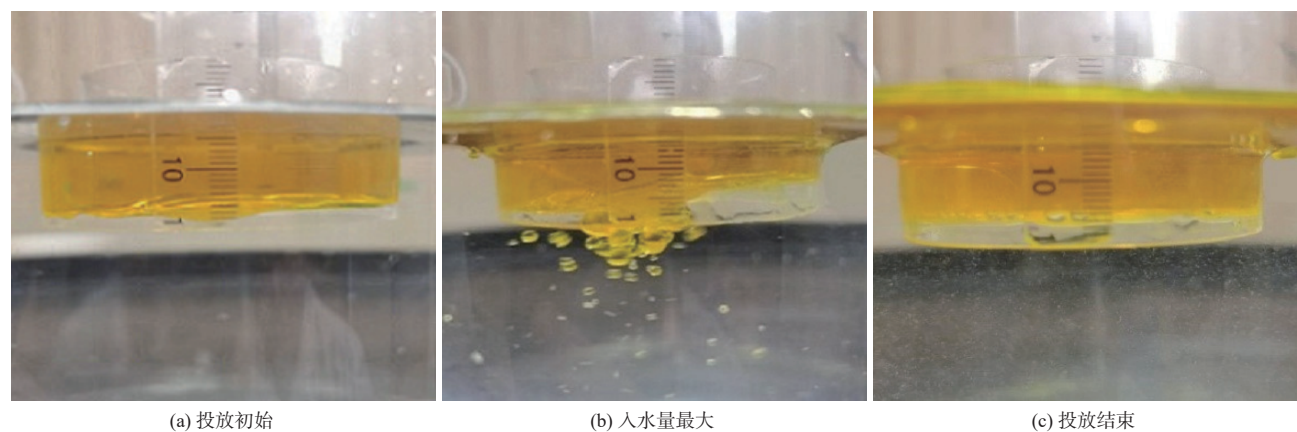


图 4 污染物释放过程
Fig. 4 Pollutant release process

1.4 数据分析

释放强度指单位时间内，样品通过单位面积“样品-水”界面进入下层水体的体积，计算公式为

$$\Phi = \frac{V'}{t \cdot S}, \quad (3)$$

式中： V' 为 3 次平均值后的样品总释放体积，mL； t 为试验时间，min； S 为样品与水接触面积， cm^2 。

从 39 种样品(表 2)中选择 34 种样品(涵盖 39 种样品密度、运动黏度和表面张力的最小值、最大值)作为模型构建样品，其释放强度试验结果如表 3 所示，余下 5 种样品用于模型验证试验。

表 3 34 种样品释放强度
Table 3 Release intensity of 34 samples

样品编号	释放强度/(mm·min ⁻¹)	样品编号	释放强度/(mm·min ⁻¹)	样品编号	释放强度/(mm·min ⁻¹)	样品编号	释放强度/(mm·min ⁻¹)
1	0.093 8	12	0.334 7	21	0.088 9	30	0.001 5
2	0.249 9	13	0.313 7	22	0.156 6	31	0.005 1
3	0.285 0	14	0.201 7	23	0.295 1	32	0.007 3
4	0.355 9	15	0.129 5	24	0.007 0	33	0.018 0
5	0.309 1	16	0.148 9	25	0.023 8	34	0.098 6
6	0.054 7	17	0.120 1	26	0.004 7	35	0.156 3
9	0.300 3	18	0.069 7	27	0.017 7	36	0.008 2
10	0.339 5	19	0.244 3	28	0.005 4		
11	0.333 2	20	0.230 0	29	0.002 2		

2 结果与讨论

2.1 关键物理因素识别

采用偏相关分析方法识别释放强度与密度、运动黏度、表面张力间的净相关关系。偏相关分析法能在剔除其他变量影响的情况下分析两个变量之间的相关程度。对 34 种样品数据进行偏相关分析，得到释放强度与密度、运动黏度间的偏相关系数 r 分别为 -0.801 、 -0.812 ，显著度 p 分别为 3.63×10^{-8} 、 1.69×10^{-8} ，表明释放强度与密度、运动黏度均呈高度负相关关系；释放强度与表面张力间 $p=0.113 > 0.05$ ，表明样品表面张

力对释放强度无显著影响。故不可溶漂浮性液态污染物的密度、运动黏度是影响释放强度的 2 个关键因素, 表面张力则对释放强度无直接影响。

2.2 释放强度的多元线性回归模型

多元线性逐步回归分析是按各个自变量对因变量作用的大小, 从大到小逐个引入回归方程。每引入一个变量后, 对已选入方程的每个变量进行检验, 当不显著变量被引入方程后, 立即自行剔除, 每剔除一个变量后, 还要对仍留在方程中的变量进行检验, 直至没有变量被引入方程, 也没有变量从方程中剔除, 以此得到较理想的线性回归方程。

试验结果表明, 样品表面张力对释放强度无显著影响, 剔除表面张力后对 34 种样品数据进行逐步回归分析得到释放强度与密度、运动黏度间的回归方程为

$$\Phi = -1.583 \cdot \rho - 4.491 \cdot 10^{-5} \cdot \mu + 1.6972, \quad (4)$$

式中: ρ 为密度, g/cm^3 ; μ 为运动黏度, mm^2/s 。相应的 $R^2=0.905$, 回归模型以及各回归系数的显著性检验均 <0.01 , 表明该多元线性回归模型具有统计学意义。模型计算值与实测值对比结果如图 5 所示, 平均相对误差为 18.1%。

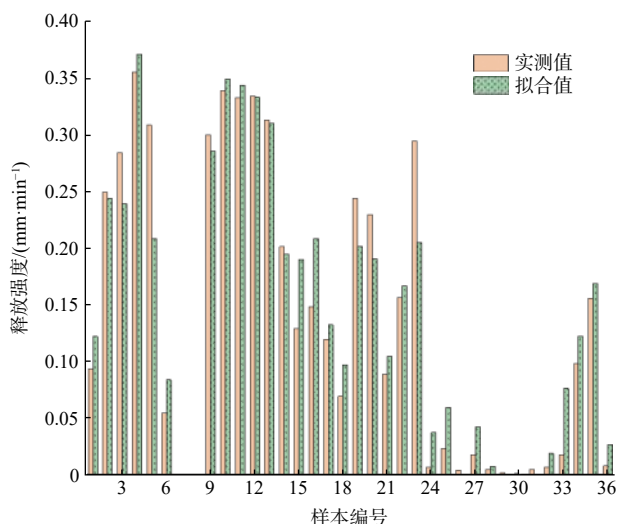


图 5 34 种样品多元线性回归模型拟合效果对比

Fig. 5 Comparison between the fitting effects of multivariate linear regression model and the experiment measurements of the 34 samples

2.3 释放强度的多元非线性回归模型

多元非线性回归分析常用于研究多个自变量与一个因变量间的非线性函数关系, 采用先构建目标函数模型, 再根据非线性迭代算法理论进行迭代运算的方法来确定函数关系。

我们根据典型函数模型如对数函数、指数函数等进行反复尝试后, 构建了目标函数为

$$\Phi = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho + \beta_2 \cdot e^{\beta_3 \cdot \mu}, \quad (5)$$

式中 β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 均为待确定的表达式参数。

对 34 种样品数据进行拟合确定多元非线性回归模型为

$$\Phi = 0.5658 - 0.5780 \cdot \rho + 0.2631 \cdot e^{-0.0012 \cdot \mu}. \quad (6)$$

模型 $R^2=0.987$, 计算值及实测值对比结果如图 6 所示, 平均相对误差为 10.1%。

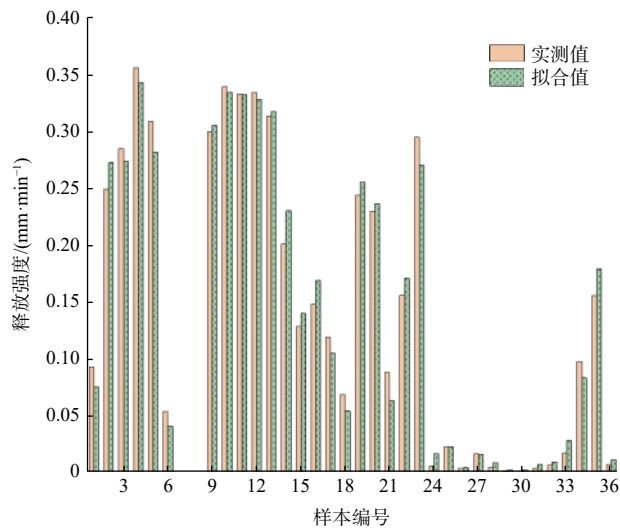


图 6 34 种样品多元非线性回归模型拟合效果对比

Fig. 6 Comparison between the fitting effects of multivariate nonlinear regression model and the experiment measurements of the 34 samples

2.4 多元线性与非线性模型对比

由上述分析可知线性回归模型和非线性回归模型 R^2 分别为 0.905、0.987，平均相对误差分别为 18.1%、10.1%，表明多元非线性回归模型拟合效果更优。非线性回归模型释放强度计算值与密度、运动黏度间的三维曲面图见图 7。

2.5 多元非线性回归模型验证

为了验证多元非线性回归模型的可靠性，进行了剩余 5 种未做数据分析的样品的独立试验，对应的模型计算值与实测值对比如表 4 所示。

模型预测值与实测值的相对误差分布范围为 3.7%~30.8%，平均相对误差为 14.9%，表明多元非线性回归模型整体误差较小，具有较高的精度。在实际水环境中，该回归模型可用于计算常见的不可溶漂浮性液态污染物向下层水体的释放强度，为水质预测源强分析提供依据。

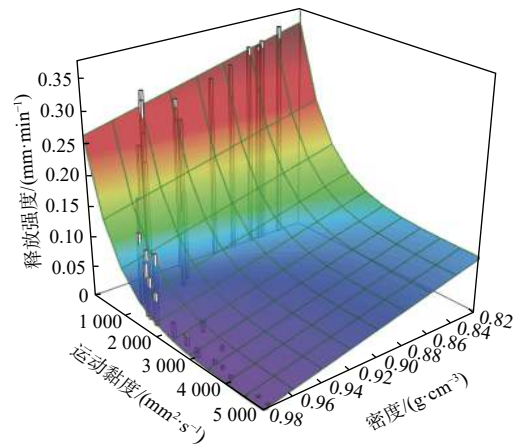


图 7 释放强度与密度、运动黏度关系

Fig. 7 Relationship between release intensity with density and kinematic viscosity

表 4 多元非线性回归模型计算值与实测值比较

Table 4 Comparison between the measurements and the calculated values of multivariate nonlinear regression model

样品编号	实测值/(mm·min ⁻¹)	模型计算值/(mm·min ⁻¹)	相对误差/%
7	0.003 5	0.004 6	30.8
37	0.337 4	0.325 0	3.7
38	0.157 0	0.180 2	14.8
39	0.136 5	0.129 7	5.0
40	0.060 3	0.048 2	20.0

3 结 论

通过动水环境物理模型试验, 定量分析不可溶漂浮性液态污染物在采取围油措施下, 污染物密度、运动黏度、表面张力对其向下层水体释放强度的影响, 得出 3 点结论。

1) 试验设定条件下, 不可溶漂浮性液态污染物密度、运动黏度分布范围分别为 $0.837\ 3\sim 0.975\ 0\ \text{g/cm}^3$ 、 $5.29\sim 4\ 911.89\ \text{mm}^2/\text{s}$ 时, 其向下层水体的释放强度在 $0.001\ 5\sim 0.355\ 9\ \text{mm/min}$ 。污染物释放强度与其密度、运动黏度均呈高度负相关关系, 表面张力对释放强度无显著影响。

2) 多元线性回归模型和多元非线性回归模型 R^2 分别为 0.905、0.987, 平均相对误差分别为 18.1%、10.1%, 对比表明非线性模型拟合效果更优。用于模型验证的独立试验平均相对误差为 14.9%, 准确度较高。

3) 实际水环境中的波浪作用、水体理化性质等也是影响不可溶漂浮性液态污染物向下层水体释放强度的关键因素, 目前针对这类因素的定量化研究相对欠缺。希望我们提供的这种定量化研究释放强度的思路, 有助于获得不同水体理化性质、不同水动力条件下的释放强度。

参考文献 (References):

- [1] 王昆, 林金波, 杜静. 海上溢油漂移扩散的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(2): 213-219. WANG K, LIN J B, DU J. Numerical simulation of oil spill drift-diffusion in the sea[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(2): 213-219.
- [2] LI Y, YU H, WANG Z Y, et al. The forecasting and analysis of oil spill drift trajectory during the Sanchi collision accident, East China Sea[J]. Ocean Engineering, 2019, 187(C): 106231.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 丁大星. 化学品水域泄漏三维浓度场研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014. DING D X. Numerical simulation of 3D concentration field concerning chemicals leakage in waters[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [6] ZEINSTRAL-HELFRICH M, KOOPS W, MURK A J. How oil properties and layer thickness determine the entrainment of spilled surface oil[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 184-193.
- [7] 李闻欣. 油品与悬浮泥沙特性对油-颗粒物聚合体形成的影响研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020. LI W X. Effects of oil and suspended sediment characteristics on the formation of oil-particle aggregates[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [8] LI Z K, SPAULDING M L, FRENCH-MCCAY D. An algorithm for modeling entrainment and naturally and chemically dispersed oil droplet size distribution under surface breaking wave conditions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119(1): 145-152.
- [9] 赵文谦, 江涓. 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 W Q, JIANG W. A study on the diffusion of droplet oil under water surface[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(2): 173-182.
- [10] SØRENSEN L, MELBYE A G, BOOTH A M. Oil droplet interaction with suspended sediment in the seawater column: influence of physical parameters and chemical dispersants[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1/2): 146-152.
- [11] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会石油静态和轻烃计量分技术委员. 原油和液体或固体石油产品密度或相对密度的测定 毛细管塞比重瓶和带刻度双毛细管比重瓶法: GB/T 13377—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. Static Petroleum and Light Hydrocarbon Fluids Measurement. Crude petroleum and liquid or solid petroleum products-determination of density or relative density-capillary stoppered pycnometer and graduated bicapillary pycnometer methods: GB/T 13377—2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [12] 石油化工科学研究院. 石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法: GB/T 265—1988[S]. 北京: 国家标准局, 1988. Sinopec Research Institute of Petroleum Processing. Petroleum products-determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity: GB/T 265—1988[S]. Beijing: National Bureau of Standards, 1988.
- [13] 石油化工科学研究院. 石油产品油对水界面张力测定法(圆环法): GB/T 6541—1986[S]. 北京: 国家标准局, 1986. Sinopec Research Institute of Petroleum Processing. Petroleum products-mineral oils-determination of interfacial tension of oil against water-ring method: GB/T 6541—1986[S]. Beijing: National Bureau of Standards, 1986.
- [14] 程能林. 溶剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. CHEN N L. Solvents handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

- [15] LIN Z, BOUFADEL M C, GENG X L, et al. A-DROP: a predictive model for the formation of oil particle aggregates (OPAs)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 106(1/2): 245-249.
- [16] PETERS F, MARRASE C. Effects of turbulence on plankton: an overview of experimental evidence and some theoretical considerations[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 205: 291-306.
- [17] THORPE S A. An introduction to ocean turbulence[M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 43-54.

Study on the Release of Insoluble Floating Liquid Pollutants to the Subjacent Waterbody

HAN Long-xi^{1,2}, WANG Jie², WANG Chen-fang², JIANG An-qi², ZHANG Yi²

(1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake*,

Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. *College of Environment, Hohai University*, Nanjing 210098, China)

Abstract: The physical properties of insoluble liquid pollutants floating on water surface are important factors affecting the release intensity to subjacent waterbody. According to the physical properties and the range of related parameters of organic pollutants, 8 representative insoluble floating liquid pollutants were selected, and 32 mixed samples were prepared with them in different proportions. The density, kinematic viscosity, and surface tension of 39 typical samples are ranged from 0.621 to 0.995 g/cm³, 1.81×10^{-6} to 1.00×10^5 mm²/s and 0.024 to 36.200 mN/m, respectively. The effects of pollutant density, kinematic viscosity, and surface tension on release intensity of the 34 samples from the 39 typical samples are studied through laboratory flowing water physical experiments, and the key physical factors affecting the release intensity were identified by partial correlation analysis. The results showed that the decisive factors affecting the release intensity are density and kinematic viscosity, while the surface tension has no significant effect on release intensity. The multivariate nonlinear regression model between release intensity, density and kinematic viscosity was established with regression analysis ($R^2=0.987$). The model was verified through experiments with remaining 5 independent experimental data from the 39 typical samples, and the average relative error is 14.9%.

Key words: insoluble floating liquid pollutants; density; kinematic viscosity; surface tension; release intensity

Received: November 2, 2021