

# 向家坝水库典型出库流量对宜宾江段溢油扩散规律影响研究<sup>1</sup>

张青森<sup>1,2</sup> 戴凌全<sup>1,4\*</sup> 任玉峰<sup>3</sup> 汤正阳<sup>3</sup> 戴会超<sup>4</sup> 刘新波<sup>3</sup> 吴倩<sup>1,2</sup>

(1. 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 湖北宜昌 443002;

2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002;

3. 中国长江电力股份有限公司智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443133;

4. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038)

**【摘要】**:为应对金沙江向家坝水库下游可能发生的船舶溢油等突发水污染事件,以向家坝水库下游宜宾江段为研究区域,基于实测地形和水文等数据建立起宜宾江段二维溢油扩散模型,模拟向家坝水库典型出库流量下,坝下1km处船舶发生20t溢油事故后油膜的漂移路径和扩散面积。结果表明:(1)通航期向家坝水库出库流量由小到大的过程中,溢油抵达不同水域和通过不同位置的用时明显缩短,抵达普安水厂的用时在1.58~3.05h之间,通过普安水厂的用时在0.28~0.78h之间,抵达宜宾水文站的用时在3.45~8.62h之间,通过宜宾水文站的用时在0.33~1.62h之间;(2)随着向家坝出库流量的增大,溢油的扩散面积呈递减趋势,平均厚度呈递增趋势,抵达普安水厂的溢油扩散面积在0.141~0.224km<sup>2</sup>之间,平均厚度在0.351~0.491mm之间,抵达宜宾水文站的溢油扩散面积在0.229~0.423km<sup>2</sup>之间,平均厚度在0.205~0.328mm之间;(3)枯水期水域面积较小,溢油在向下游漂移扩散过程中易黏附在弯曲河道两岸的浅滩和湿地,当向家坝出库流量为1650m<sup>3</sup>/s时,黏附在河道两岸的油膜总面积最大为0.137km<sup>2</sup>,随着向家坝出库流量的增大,黏附在河道两岸的油膜面积越来越小。研究成果可为向家坝下游宜宾江段突发性水污染溢油事故应急抢险方案的优化提供科学依据。

**【关键词】**:向家坝水库;宜宾江段;溢油事故;数值模拟;扩散规律

**【中图分类号】**:X522 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0172- 11

<sup>1</sup> **【收稿日期】**:2022- 01- 17; **【修回日期】**:2022- 04- 11

**【基金项目】**:流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金(IWHR- SKL- KF202010);中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(202003251);国家自然科学基金青年基金项目(51809150)

**【作者简介】**:张青森(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水文学及水库优化调度.E-mail:zhang\_qingsen1@163.com

**【\* 通讯作者 E-mail】**:dailingquan@ctgu.edu.cn

根据 2020 年国际油轮船东防污染联合会发布的溢油事故统计数据,在 1970~2019 年期间有 50%的大型溢油事故发生在船舶航行于开阔水域,由于碰撞和搁浅导致的溢油事故占这些事故的 57%<sup>[1]</sup>。当船舶航行于内河或受限制水域时,上述相同原因造成的溢油事故比例更高,会对生态环境造成严重和持久的不利影响<sup>[2]</sup>。尽管沿海及河口的溢油事故受到了学者们的广泛关注,但是内陆水域的溢油事故通常发生的更为频繁,而关注度较少<sup>[3]</sup>。金沙江下游河段具有常年通航要求,航道等级为 V 级,素有“黄金水道”之称,自向家坝水利枢纽建成后上下游的航道条件得到极大改善。向家坝升船机按 VI 级航道设计,最大可通过 1 000 t 级单船,自 2018 年 5 月试运行以来,过闸船舶数量呈现快速增长的趋势,截至 2020 年 11 月,通过船舶 5 885 艘次,运送的货物超过 222 万 t<sup>[4]</sup>。金沙江下游宜宾江段暗礁、巨石密布<sup>[5]</sup>,船舶航行、停泊、作业频繁,存在较大的溢油风险。溢油事故一旦发生,一方面直接影响周围人民群众的饮用水安全,另一方面也将侵害水生动植物赖以生存和栖息的环境<sup>[6,7,8]</sup>。因此,科学预测溢油事故发生后油膜在河道中的漂移扩散过程对于提高该水域溢油应急能力水平显得尤为重要<sup>[9]</sup>。

在常见的预测溢油事故油膜漂移扩散方法中,按计算原理的不同可以分为欧拉法<sup>[10]</sup>、拉格朗日法<sup>[11]</sup>、欧拉-拉格朗日法<sup>[12]</sup>和格子玻尔兹曼法<sup>[13]</sup>,其中基于拉格朗日体系的油粒子模型因其高效率 and 稳定性高等特点得到广泛应用<sup>[14]</sup>。油粒子模型的主要原理是将油粒子定义为直径在 10~1 000  $\mu\text{m}$  的圆球,每个圆球都代表溢油的一部分。虽然该模型在油粒子特性模拟中需采用附加体积参数的方法<sup>[15]</sup>,但其解决了溢油在重力扩展停止后的扩散等问题,能够准确模拟复杂水文条件下油膜在环境动力作用下的剪变和破碎过程<sup>[16]</sup>。高建丰等<sup>[17]</sup>、袁春光等<sup>[18]</sup>、张海文等<sup>[19]</sup>基于该模型分别对岐头海域、大亚湾芒洲岛海域、宁福湾海域进行溢油数值模拟,分析了不同情况下发生溢油事故对周围海域的影响;董晓军等<sup>[20]</sup>基于该模型开展对内河溢油事故中不同油膜运动规律的研究,研究表明重质油黏附性更强,危害更大;熊海滨等<sup>[21]</sup>基于该模型开展了码头密度对长江中游典型河道内溢油漂移影响的研究,得出溢油事故发生后码头密度与油膜厚度和面积的关系。

已有成果对突发性水污染溢油事故的研究主要集中在海洋<sup>[22]</sup>、河口及码头河段<sup>[23,24,25]</sup>,而针对坝下河段不同出库流量下溢油事故发生后溢油漂移扩散规律的研究相对较少,刘韬等<sup>[26]</sup>、游立新等<sup>[27]</sup>仅对长江中游河段做过枯水期、丰水期两种流量条件下的溢油模拟。向家坝下游宜宾江段既是重要的居民饮用水水源地,又是珍稀特有鱼类国家级自然保护区的重要组成部分,然而针对向家坝坝下河段溢油事故的模拟却是鲜有涉及,因此建立一套完整的溢油模型分析向家坝典型出库流量下发生溢油事故后油膜的漂移扩散过程是必不可少的。本文针对船舶发生碰撞等突发性水污染溢油事故,以金沙江向家坝水库下游宜宾江段为研究区域,分别在向家坝水库典型出库流量下模拟事故发生后溢油漂移扩散过程,并考虑支流汇流影响,预测污染物油膜的变化规律。研究成果有助于提高宜宾江段的溢油应急能力,减少事故造成的财产损失和社会经济危害,保障附近城镇居民的饮用水安全和水生动植物的生存环境。

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区域

向家坝水电站位于云南省水富市与四川省宜宾市交界的金沙江下游河道上,是金沙江下游河段 4 级开发方案的第 4 级,上距溪洛渡水电站 157 km,电站左岸距宜宾市区 33 km,电站右岸距水富县城 1.5 km<sup>[28]</sup>。向家坝坝址与宜宾水文站之间的干流区域为宜宾江段,该区域不仅是“长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区”的重要组成部分<sup>[29]</sup>,也是宜宾市中心城区重要的饮用水水源地。保护区范围自向家坝水电站坝中轴线下 1.8 km 至重庆地维长江大桥江段,长度约 360 km,功能是尽可能最大程度上保护珍稀、特有鱼类及其特有的生存环境,使得珍稀、特有鱼类资源衰退趋势得以遏制,种群的数量有所增加。普安水厂坐落于宜宾市普安镇周坝村,上距向家坝坝址约 16 km,位于金沙江下游宜宾江段右岸(图 1)。普安水厂于 2018 年 10 月正式完工通水,占地面积约 13.33  $\text{hm}^2$ ,设计总规模 30 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,近期规模 20 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,取水点在距离江岸较远的江心。

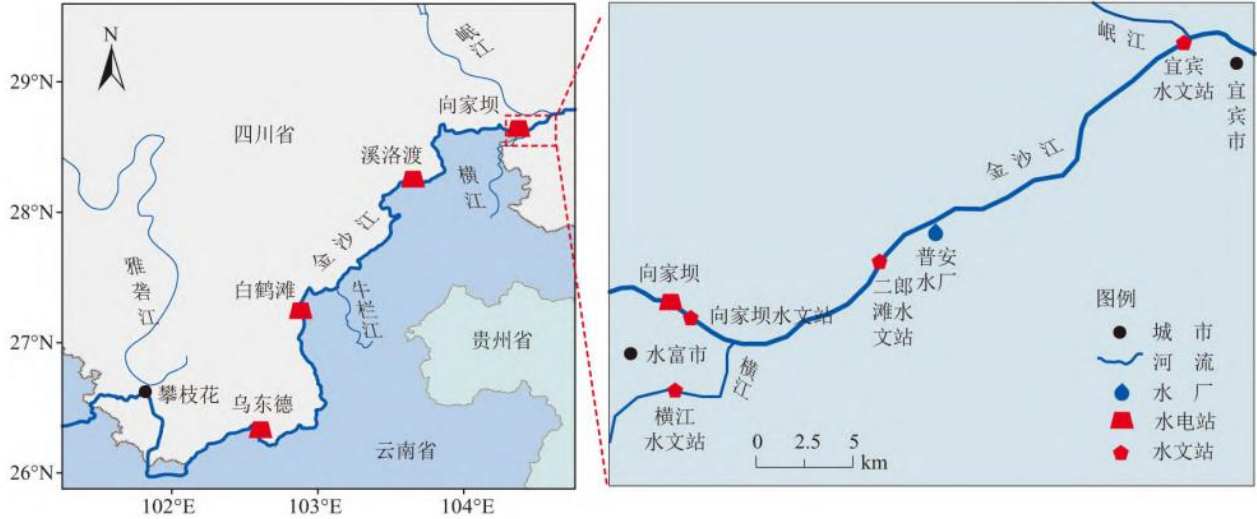


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Location of study area

## 1.2 研究方法

溢油在水中的漂移路径和扩散面积不仅受到溢油位置、总量、油品物理性质的影响，还受到流域内水流、温度、风速等的影响，是一个极其复杂的动态过程，溢油动态准确的模拟对于提高该地区溢油应急处置能力至关重要。基于拉格朗日体系的油粒子模型是把溢油离散为大量的油粒子，每个油粒子代表一定的油量，油膜就是由这些大量的油粒子所组成的“云团”<sup>[30]</sup>。

### 1.2.1 水动力模型(HD)

水动力模型用以模拟河道流场、流速、水位等水流运动的水力现象，是溢油模型计算的基础。该模型控制方程组以二维非恒定浅水方程组为基础，由水流连续性方程、笛卡尔坐标系 x 方向动量方程和 y 方向动量方程组成。

连续性方程具体计算公式如式(1)所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

x 方向动量方程具体计算公式如式(2)所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2) \end{aligned}$$

y 方向动量方程具体计算公式如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \\ \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + h\nu_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $x$ 、 $y$  为笛卡尔坐标系坐标;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的速度分量,  $m/s$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $\eta$  为水面高程,  $m$ ;  $d$  为静水深度,  $m$ ;  $h = \eta + d$  为总水深,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\rho$  为水流水体密度,  $kg/m^3$ ;  $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$ 、 $S_{yy}$  为辐射应力张量分量;  $P_a$  为大气压力,  $Pa$ ;  $\rho_0$  为水体参考密度,  $kg/m^3$ ;  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  分别表示深度方程沿  $x$  方向、 $y$  方向上的平均速度,  $m/s$ ;  $f$  为科氏力系数;  $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$ 、 $T_{yy}$  为水平黏滞应力,  $Pa$ ;  $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  为表面风应力,  $Pa$ ;  $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  为底部摩擦应力,  $Pa$ ;  $u_s$ 、 $v_s$  分别为源汇项水流速度分量,  $m/s$ ;  $S$  为源汇项。

### 1.2.2 溢油模型 (OS)

溢油模型主要用来预测海洋、河流中溢油的漂移扩散路径和化学组分的变化。该模型主要是基于拉格朗日油粒子理论可以对溢油在水中的扩展、漂移、紊动扩散、蒸发、乳化等过程进行模拟, 分析溢油漂移扩散运动轨迹、油膜面积、油膜厚度等的改变情况。

扩展过程采用修改后的 Fay 扩散方程分析油膜的扩展过程, 具体计算公式如式 (4) 所示:

$$\left( \frac{dA_{oil}}{dt} \right) = K_{\alpha} \cdot A_{oil}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{V_{oil}}{A_{oil}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

式中:  $A_{oil}$  为油膜面积,  $A_{oil} = \pi \cdot R_{oil}^2$ ,  $m^2$ ;  $R_{oil}$  为油膜半径,  $m$ ;  $K_{\alpha}$  为扩散系数, 取模型中的推荐值  $150/s$ ;  $V_{oil}$  为油粒子体积,  $V_{oil} = R_{oil}^2 \cdot \pi \cdot h_s$ ,  $m^3$ ;  $h_s$  为油膜的初始厚度,  $m$ 。

油膜的漂移速度是流速与表面风加速度的矢量和, 具体计算公式如式 (5)、(6) 所示:

$$U_{oil} = U_w + C_w \cdot W \cdot \sin(\theta - \pi + \theta_w) \quad (5)$$

$$V_{oil} = V_w + C_w \cdot W \cdot \cos(\theta - \pi + \theta_w) \quad (6)$$

式中： $U_{oil}$ 、 $V_{oil}$  分别为油粒子在 x、y 方向上的漂移速度，m/s； $U_w$ 、 $V_w$  为水流在 x、y 方向上的速度，可由上述二维水动力模型计算结果得出，m/s； $C_w$  为风漂移系数，取值为 0.035； $W$  为水面上 10 m 的风速，m/s； $\theta$ 、 $\theta_w$  分别为风向角和风偏转角，rad。

油粒子的紊动扩散源自水流，单位时间步长的紊动扩散距离具体计算公式如式(7)所示：

$$L = R \cdot \sqrt{6D_\alpha \Delta t} \quad (7)$$

式中： $R$  为-1 到 1 之间的随机数； $D_\alpha$  为  $\alpha$  方向上的布朗运动扩散系数； $\Delta t$  为扩散时间，s。

溢油蒸发是溢油由液态变为气态的过程，在溢油事故发生的初期溢油质量传输主要通过蒸发完成，蒸发与其本身的性质有关，通常通过溢油蒸发率表示，具体计算公式如式(8)所示：

$$F_v = \frac{T}{BT_G} \ln \left[ 1 + \theta_v \frac{BT_G}{T} e^{(A - \frac{BT_0}{T})} \right] \quad (8)$$

式中： $F_v$  为溢油蒸发率； $T$  为溢油温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_0$ 、 $T_G$  分别为修正蒸馏曲线的初始沸点和倾斜度，通常成品油  $T_0=654.45-4.658$  8API， $T_G=388.19 -3.872$  5API，API 为美国石油协会使用的相对密度； $\theta_v$  为蒸发暴露量； $A$ 、 $B$  为蒸馏曲线常数，取值为 6.3、10.3。

乳化过程是溢油与水混合形成油水乳化物的过程，会影响溢油的扩散和蒸发等，通常通过含水率来表征溢油乳化程度，具体计算公式如式(9)所示：

$$Y_W = \frac{K_A (1 - e^{-K_A K_B (1+W)^2 t})}{K_B} \quad (9)$$

式中： $Y_W$  为乳化含水率，%； $K_A$  为风影响系数，取值为  $4.5 \times 10^{-6}$ ； $K_B=1/YF_W$ ， $YF_W$  为最终水含量，取值为 0.8； $W$  为水面上 10 m 的风速，m/s； $t$  为时间，s。

油膜厚度是溢油事故发生后应急抢险分析的一个关键指标，具体计算公式如式(10)所示：

$$H_t = \frac{N \cdot M_{oil}}{A_w \cdot \rho_{oil}} \quad (10)$$

式中： $H_t$  为  $t$  时刻油膜的厚度，m； $N$  为水面油膜中包含的油粒子的个数； $M_{oil}$  为  $t$  时刻单个油粒子的质量，kg； $A_w$  为水面面积， $m^2$ ； $\rho_{oil}$  为油的密度， $kg/m^3$ 。

## 2 宜宾江段二维水动力模型的构建

### 2.1 模拟范围与模拟时段

宜宾江段的水动力分布特征采用平面二维水动力模型，该模型可模拟河流的水位变化和由于各种因素改变而产生的流速变化。模型计算范围上至向家坝坝址，下至宜宾水文站，全长 34 km，区间内支流为横江。基于实测地形资料，地形数据采用 1：2 000 河床地形图(吴淞高程)，模型采用非结构化不规则三角网格，网格大小根据地形的空间分布和计算效率确定。网格设置的最小角度为  $26^\circ$ ，节点总数 10 078 个，单元总数 18 559 个，最大面积  $1 099.9 m^2$ ，最小面积  $238.9 m^2$ (图 2)。本模型模拟时段设定为 2019 年 9 月 25 日~2019 年 11 月 25 日，在充分平衡模型计算稳定性和效率的基础上，经过多次调试和计算，最终确定模型的计算时间步长为 30 s。根据前人的研究成果表明，长江流域河床的糙率范围在 0.15~0.85 之间<sup>[31]</sup>，采用曼宁公式估算曼宁系数计算河床糙率，通过对比实测和模拟结果，选取不同的曼宁系数。

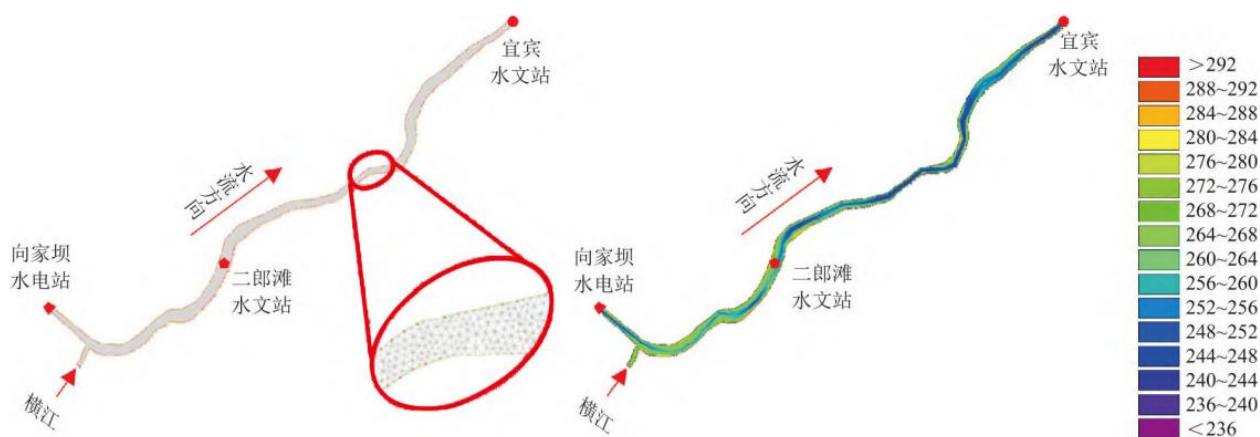


图 2 研究区域水动力模型网格和地形图

Fig. 2 Grid and topographic map of hydrodynamic model in study area

### 2.2 模型边界条件

水动力模型开边界分别为上游向家坝出库断面、横江入流断面，下游宜宾出流断面。上边界向家坝出库断面、横江入流断面分别选取 2019 年 9 月 25 日~11 月 25 日实测向家坝出库流量和横江水文站流量，下边界宜宾出流断面选取实测宜宾水文站水位(吴淞高程)。在模拟时段内，向家坝出库流量在  $1 720 \sim 10 100 m^3/s$  之间，宜宾水文站水位在  $260.56 \sim 267.02 m$  之间(图 3)，

横江水文站流量变化幅度较小在 133~465 m<sup>3</sup>/s 之间。

### 2.3 水动力模型验证

选取 2019 年 9 月 25 日~11 月 25 日实测水文数据进行水动力模型的验证，模型按照上述给定的边界条件和参数进行计算。验证站为向家坝水文站和二郎滩水文站，向家坝水文站上距向家坝坝址 2 km，二郎滩水文站上距向家坝坝址 11 km。水位方面，选取上述两个水文站 2019 年 9 月 25 日~11 月 25 日日平均水位 2 项验证指标。流速方面，9 月 28 日向家坝水库出库流量最大为 10 100 m<sup>3</sup>/s，因此选择 9 月 28 日上述两个断面的日平均流速 2 项验证指标。验证结果如图 4 所示，由图可知，向家坝水文站水位平均误差为 0.1 m，最大误差出现在 10 月 1 日，受出库流量变化幅度较大影响，误差为 0.23 m；二郎滩水文站水位平均误差为 0.06 m，最大误差为 0.15 m。流速方面，向家坝水文站流速平均误差为 0.06 m/s，最大误差为 0.14 m/s；二郎滩水文站流速平均误差为 0.04 m/s，最大误差为 0.13 m/s。由此可见，模型总体上能够较好的模拟出宜宾江段的水动力特征，并作为溢油模型的水动力基础数据。

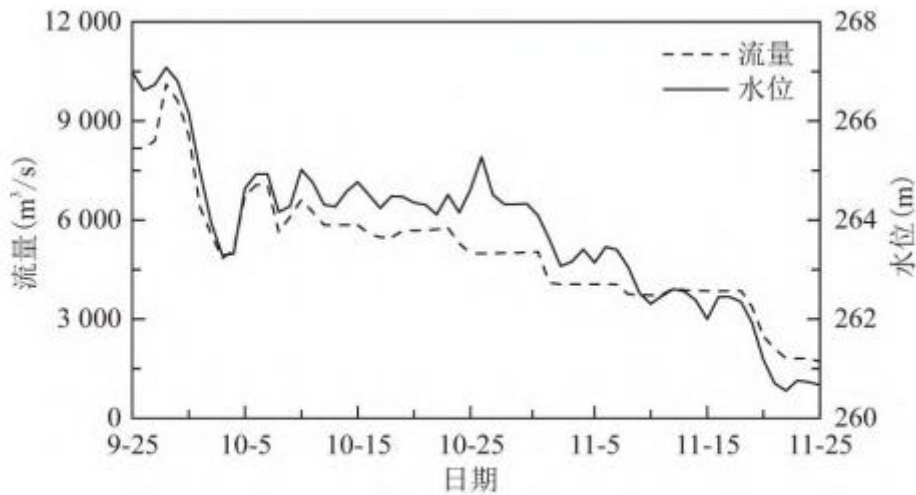


图 3 水动力模型的边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of hydrodynamic model

## 3 宜宾江段溢油事故数值模拟及结果分析

### 3.1 工况设置

宜宾江段船舶最小通航流量 1 650 m<sup>3</sup>/s，最大通航流量 12 000 m<sup>3</sup>/s，因此模型设定的上游边界流量范围为 1 650~12 000 m<sup>3</sup>/s，流量范围足以涵盖船舶通航期研究河段的实际流量情形。在上述范围内取向家坝水库出库流量分别为 1 650、3 000、6 000、9 000、12 000 m<sup>3</sup>/s 5 种典型工况作为模拟流量，横江流量取向家坝水库上述出库流量下对应的流量值。宜宾江段的二维溢油漂移扩散模型是在二维水动力模型的基础上耦合油粒子模型建立的，模型在输入水流场、溢油位置、溢油量、风场等数据后，通过粒子追踪、风化、乳化等内建的数学算法对溢油的漂移扩散过程进行模拟。该模型将溢油离散为大量赋予一定质量和体积的油粒子，这些油粒子在表面流的影响下，会随水流移动和分散。油粒子的平流过程具有拉格朗日性质，通常采用拉格朗日法进行模拟，油粒子的湍流扩散过程主要是由剪切流和湍流引起的，属于随机运动，通常采用随机走动法进行模拟。在使用随机走动法计算过程中，将湍流视为一种随机流场，每个油粒子在湍流场中的运动类似于流体分子的布朗运动，正是由于每个油粒子的随机运动从而导致了整个油粒子“云团”在水体中的扩散<sup>[32]</sup>。当油粒子在水体表面时表现为油膜，在水体中时则表现为油

滴，通过统计各个网格上的油粒子数和各组分含量可以模拟出溢油的漂移扩散过程<sup>[33]</sup>。

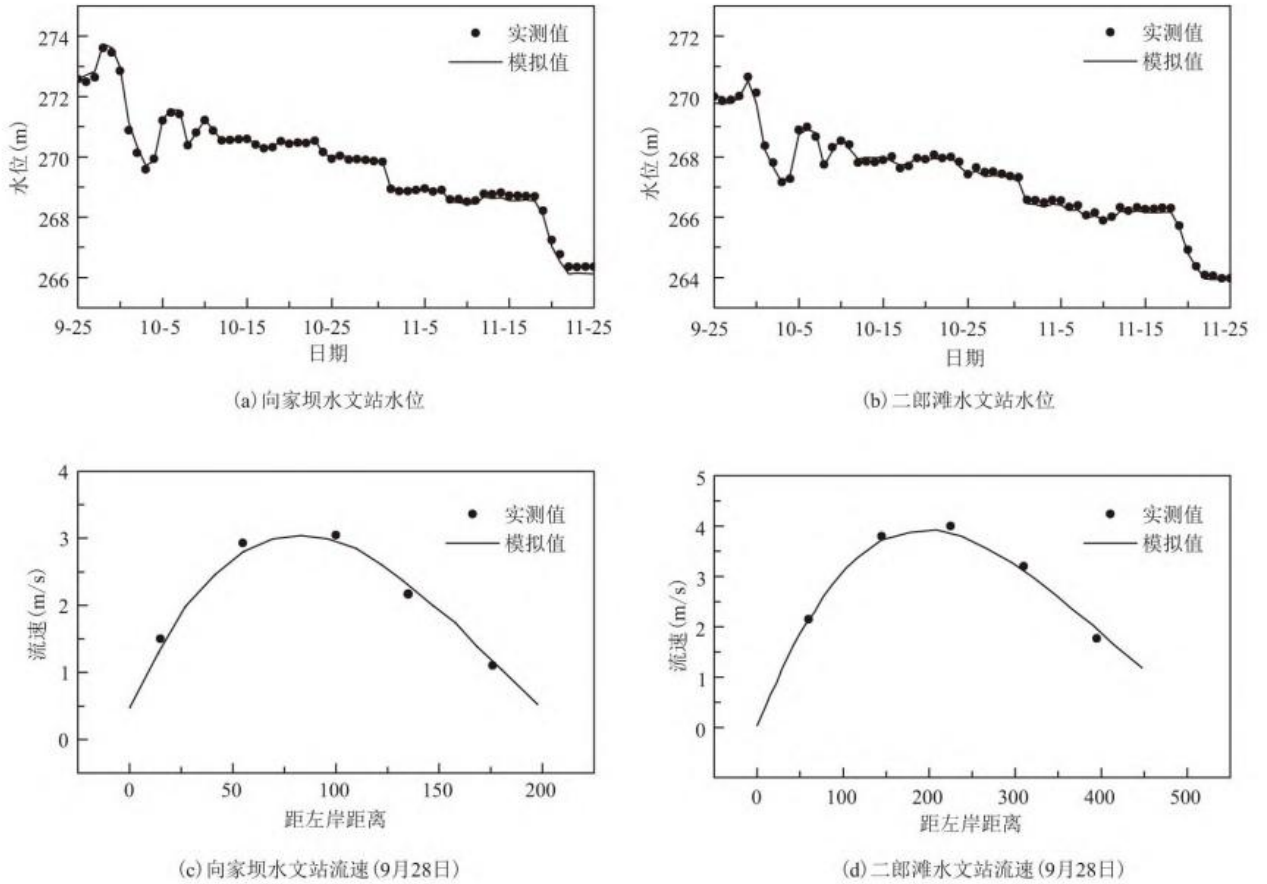


图 4 水动力模型水位和流速实测模拟对比

Fig. 4 Comparison of observed and simulated water level and velocity

溢油的初始位置是至关重要的，当溢油事故发生点靠近河岸时，大部分油粒子将会在短时间内抵岸黏附<sup>[34]</sup>，因此本文通过模拟较不利情况下，向家坝坝下 1 km 江心处船舶发生突发事故导致燃料油泄露。由于宜宾江段航道等级为 V，向家坝升船机最大可通过 1 000 t 级单船，同时基于内陆水域溢油事故燃料油泄露量一般不超过 20 t<sup>[35]</sup>，因此将本次模拟泄漏燃料油总重定为 20 t (密度 920 kg/m<sup>3</sup>)，设定溢油方式为突发性固定点源瞬时溢油，油粒子总数为 2 000<sup>[36]</sup>。风力和水温是溢油事故中影响较大的因素，应予以重视，基于宜宾站 2010~2019 年日平均气象数据，求得年平均风速为 1.26 m/s，选取最不利风向西南风 (顺水流方向) 作为研究区域的风向条件，取宜宾江段年平均水温 20℃ 为水温边界条件。模型中的部分重要参数具体取值如表 1 所示。本文作简化分析，当油粒子抵岸时只考虑完全吸收和完全反射 2 种情况，当油粒子触岸时会获得一个介于 0~1 之间的随机数，当该随机数小于设定的黏附概率时，油粒子被完全吸收。溢油时刻在第四小时，此时水动力模型的计算已经趋于稳定。

表 1 溢油模块相关参数取值

参数	最大含水率 (%)	乳化率常数 s/m <sup>2</sup>	热膨胀系数 (/°C)	蒸发常数 A	蒸发常数 B
取值	0.85	1×10 <sup>-6</sup>	7×10 <sup>-4</sup>	2.67	0.06

### 3.2 向家坝典型出库流量下溢油扩散数值模拟及分析

#### 3.2.1 溢油到达时间和通过时长

5种典型流量下溢油事故发生后油膜到达不同位置的时间和通过时长如图5所示。当向家坝出库流量分别为1 650、3 000、6 000、9 000、12 000 m<sup>3</sup>/s时，溢油事故发生后，油膜到达普安水厂所需时长分别为3.05、2.23、1.88、1.67、1.58 h，通过普安水厂的时长分别为0.78、0.57、0.38、0.32、0.28 h；油膜到达宜宾水文站的所需时长分别为8.62、5.88、4.34、3.75、3.45 h，通过宜宾水文站的时长分别为1.62、1.27、0.55、0.38、0.33 h。

与海洋、河口水域不同，内河溢油事故发生后河道的径流量大小是驱动溢油向下游漂移扩散的关键因素。以向家坝水文站断面为例，当向家坝出库流量为1 650 m<sup>3</sup>/s时，该断面河道中心点最大流速为0.81 m/s；当向家坝出库流量为12 000 m<sup>3</sup>/s时，该断面河道中心点最大流速高达3.62 m/s。分析上述模拟结果可知，向家坝水库出库流量由小变大过程中，河道的流速也逐渐增大，溢油向下游漂移的速度加快，抵达下游不同区域的时间明显缩短。抵达普安水厂最长与最短的时间差值为1.47 h，抵达宜宾站最长与最短的时间差值为5.17 h；溢油通过不同水域所需时长方面，由于溢油抵达普安水厂时扩散面积较小，故通过普安水厂的用时较短，不同出库流量下用时最长与最短的时间差值为0.51 h，通过普安水厂后面积增大，故通过宜宾站的用时较长，不同出库流量下用时最长与最短的时间差值为1.28 h。溢油事故发生后，应在第一时间对溢油进行拦截处理，枯水期流量较小溢油距取水口水域尚有一定距离时，可适当减小下泄流量便于给溢油的收集处理争取足够的时间；丰水期流量较大采取应急响应措施溢油已抵达取水口附近水域时，可适当增大下泄流量，在水厂下游对溢油进行收集处理，以减小溢油对取水口水质的影响。

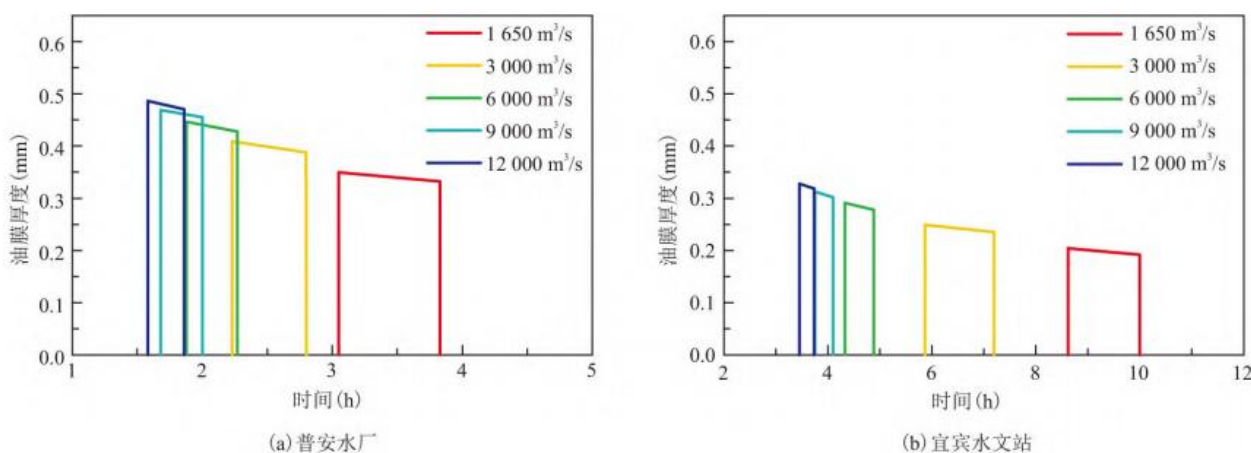


图5 典型流量下溢油到达不同位置的时间和通过该区域时长

Fig. 5 Time for oil film to reach different positions and pass through this area under different outflow

#### 3.2.2 溢油扩散面积和平均厚度

5种典型流量下溢油事故发生后溢油扩散面积和油膜厚度如图6所示。当向家坝出库流量分别为1 650、3 000、6 000、9 000、12 000 m<sup>3</sup>/s时，溢油抵达普安水厂的面积分别为0.224、0.195、0.171、0.164、0.141 km<sup>2</sup>，油膜平均厚度分别为0.351、0.411、0.448、0.474、0.491 mm；油膜抵达宜宾水文站的面积分别为0.423、0.371、0.304、0.258、0.229 km<sup>2</sup>，油膜平均厚度分别为0.205、0.251、0.292、0.314、0.328 mm。短时间内溢油的扩散面积和平均厚度分别与时间成正、负相关关系，即油膜到达下游所需时间越长，扩散污染面积越大，油膜的平均厚度越小。分析上述模拟结果可知，随着向家坝出库流量的增大，溢油在向

下游漂移扩散过程中油膜的扩散面积逐渐减小，平均厚度逐渐增大。

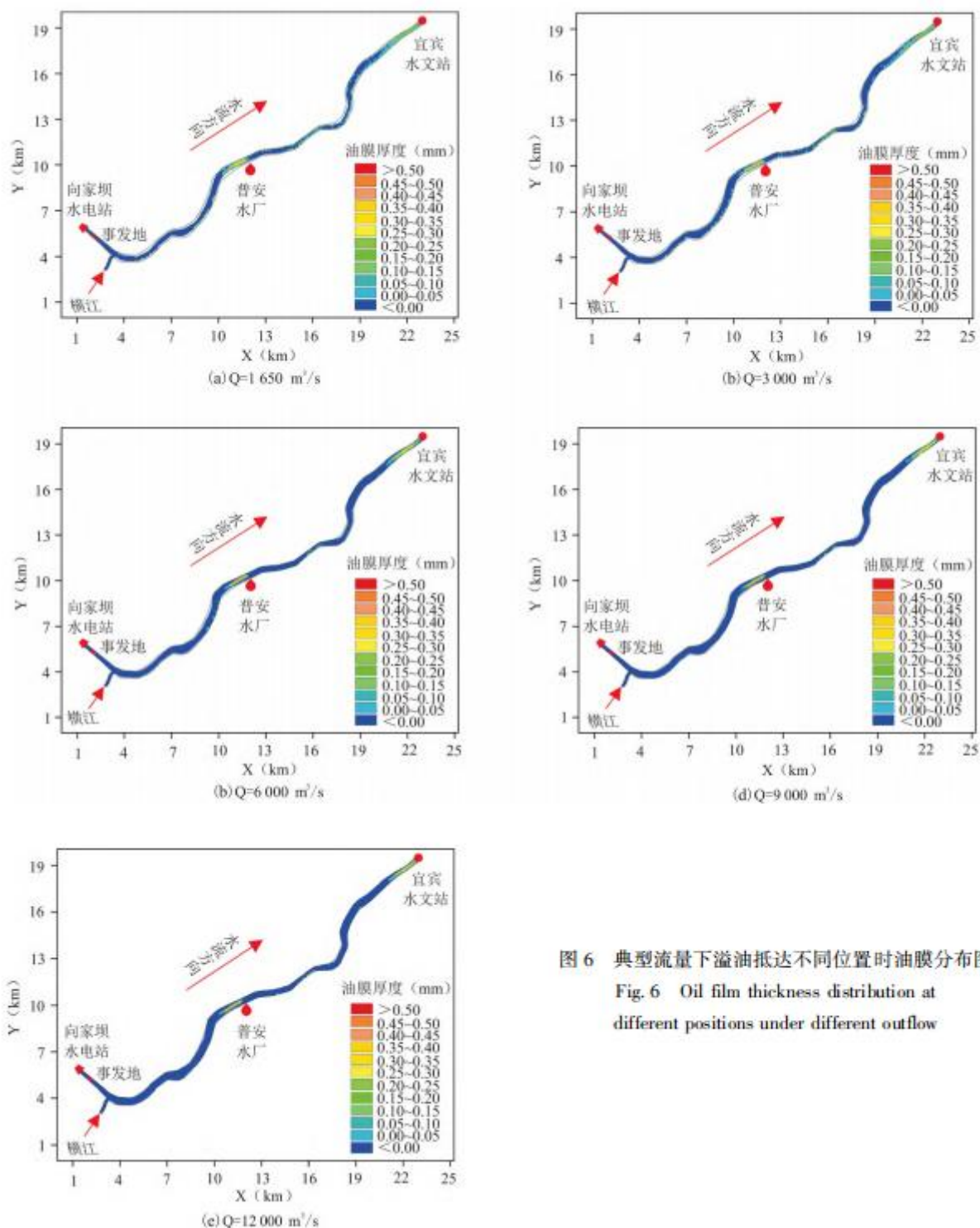


图 6 典型流量下溢油抵达不同位置时油膜分布图  
Fig. 6 Oil film thickness distribution at different positions under different outflow

溢油事故发生后油膜在向下游漂移扩散过程中，水流方向通常与岸线方向存在一定的夹角，油粒子极易触岸被两岸的浅滩和湿地吸附。枯水期由于向家坝出库流量较小，宜宾站水位较低，宜宾江段水域面积  $10.4 \text{ km}^2$ ，仅占丰水期水域面积的 69%，油膜向下游漂移扩散过程中易黏附在弯曲河道两岸的浅滩和湿地。当向家坝出库流量为  $1650 \text{ m}^3/\text{s}$  时，溢油向下游漂移过程中，在

通过横江入水口后受河道地形的影响,此时油膜主要在靠近右岸的一侧移动,在距离坝址约 4.7 km 和 9.5 km 弯道处易黏附在河道的右岸,黏附的岸线长度分别为 1、2.3 km;当油膜经过普安水厂后,在距离坝址约 18.1 km 处由于水面进一步变窄(水面宽度最小仅 173.6 m),而此时溢油面积进一步扩大,导致较多油膜黏附在该处河道的两岸,长度约 2.2 km,剩余油膜流入“U”型河段,部分黏附在河道的右岸;抵达宜宾水文站附近时,油膜的后端破裂,呈分散状,出现明显的“拖尾”现象,最终黏附在河道两岸的油膜总面积为 0.137 km<sup>2</sup>。当向家坝出库流量为 3 000 m<sup>3</sup>/s 时,溢油向下游漂移路径和黏附河岸的位置与流量为 1 650 m<sup>3</sup>/s 时大体相同,但黏附河岸的油膜总面积减少,抵达宜宾水文站附近时,后端的油膜部分破裂,最终黏附在河道两岸的油膜总面积为 0.045 km<sup>2</sup>。

当向家坝出库流量为 6 000 m<sup>3</sup>/s 时,溢油主要在靠近河道右岸的一侧向下游漂移扩散,油膜主要黏附在距离坝址约 10.1 和 18.1 km 处的河道右岸,溢油通过该江段时,黏附在河道两岸的油膜总面积为 0.018 km<sup>2</sup>;当向家坝出库流量为 9 000、12 000 m<sup>3</sup>/s 时,由于出库流量较大,流速较快,溢油向下游漂移扩散主要沿着河道的中泓线方向,油膜维持较为聚集的状态,呈狭长的条带状分布,通过该江段时,仅有少量油膜黏附在河道右岸。

通过分析发现,宜宾江段溢油事故发生在枯水期时,溢油向下游漂移的速度较小但黏附河岸的油膜较多,可采用单级围油栏围控,将围油栏布成 U 形、J 形等进行溢油应急处置。针对黏附在河岸上的油膜,可根据不同的河岸条件采取不同的处理措施,以鹅卵石、碎石等为主的河岸宜采用高压清洗装备,将其表面及缝隙里的溢油冲入水后进行收集处理,以沙滩、湿地等为主的河岸宜使用机械设备,将混有溢油的泥沙进行回收处理。当溢油事故发生在丰水期时,溢油呈条带状沿河道的中泓线向下游快速漂移扩散,由于水流速度较快、油膜较厚,为减小溢油发生逃逸的几率,可采用多级阶梯式布放围油栏,将溢油从水流较急的河流中间引导至河边流速较缓的地方回收处理。在短时间内无法布放围油栏或在围油栏失效的情况下,可以采用渔网封堵法,使用渔网对溢油进行拦截,在渔网的内部撒下大量吸油材料,有效阻止或延缓溢油向下游扩散。

## 4 结论

本文选择金沙江下游宜宾江段作为研究区域,构建了宜宾江段二维水动力模型,并耦合基于拉格朗日体系的油粒子模型,建立了适于向家坝下游的精细化溢油漂移扩散模型。基于该模型对向家坝坝下河段开展溢油事故数值模拟,探讨不同出库流量下发生溢油事故后对下游水源地及周围生态敏感区造成的影响,分析了溢油在向下游运动过程中的漂移扩散规律,研究成果可为宜宾江段预防溢油事故风险提供时间与工作量上的参考依据,为向家坝下游溢油污染事故的快速应急决策提供有效服务。

(1) 基于实测地形、水文等资料,建立起宜宾江段二维水动力模型,用向家坝水文站和二郎滩水文站水文数据对模型进行率定,从验证结果可以看出,模型总体上能够较好的模拟出宜宾江段的水动力特征,并作为溢油模型的水动力基础数据。

(2) 通航期向家坝水库出库流量由小变大的过程中,河道的流速也逐渐增大,溢油向下游漂移速度加快,抵达下游不同水域和通过不同区域的时间明显缩短,抵达普安水厂的用时在 1.58~3.05 h 之间,抵达宜宾水文站的用时在 3.45~8.62 h 之间,油膜通过普安水厂的用时在 0.28~0.78 h 之间,通过宜宾水文站的用时在 0.33~1.62 h 之间。

(3) 通过对 5 种典型工况下油膜扩散面积和平均厚度的分析可知:随着向家坝出库流量的增大,溢油在向下游漂移扩散过程中油膜的扩散面积逐渐减小,平均厚度逐渐增大。抵达普安水厂的油膜扩散面积在 0.141~0.224 km<sup>2</sup> 之间,平均厚度在 0.351~0.491 mm 之间,抵达宜宾站的油膜扩散面积在 0.229~0.423 km<sup>2</sup> 之间,平均厚度在 0.205~0.328 mm 之间。

(4) 枯水期流量较小时,溢油通过宜宾江段时,油膜后端破裂,出现明显的“拖尾”现象,黏附在河道两岸的油膜总面积最大为 0.137 km<sup>2</sup>;随着出库流量的增加,油膜维持较为聚集的状态,通过该江段时仅有少量油膜黏附在河道右岸。

## 参考文献

- 
- [1] YANG Y Q, LI Y, LI J, et al. The influence of Stokes drift on oil spills: Sanchi oil spill case[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(10):30-37.
- [2] NELSON J R, GRUBESIC T H. Oil spill modeling: Risk, spatial vulnerability, and impact assessment[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2018, 42(1):112-127.
- [3] KVOC ˇ KAD, ŽAGARD, BANOVECP. AC ˇ K AD, ŽAGARD, BA N O VEC P. A review of river oil spill modeling [J]. *Water*, 2021, 13(12):1620.
- [4] 但棣瑶. 向家坝水电站开启金沙江的“新黄金时代” [J]. *中国三峡*, 2021(1):62-71. 4. DAN D Y. Xiangjiaba hydropower station opens the “new golden age” of Jinsha River[J]. *China Three Gorges*, 2021(1):62-71, 4.
- [5] 钱俊. 金沙江航运发展前景初步分析[J]. *水利水电快报*, 2017, 38(3):7-9. QIAN J. Preliminary analysis on the development prospect of Jinsha River shipping[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2017, 38(3):7-9.
- [6] 宋协法, 毕研军, 董登攀, 等. 溢油事故中渔业资源损失的数值模拟评估模式[J]. *生态学报*, 2021, 41(3):1015-1020. SONG X F, BI Y J, DONG D P, et al. Numerical simulation evaluation model of fishery resources loss in oil spill[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3):1015-1020.
- [7] CHEN J H, DI Z J, SHI J, et al. Marine oil spill pollution causes and governance: A case study of Sanchi tanker collision and explosion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273:122978.
- [8] 杨红, 杭君. 上海海域溢油生态环境风险区划研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(1):106-113. YANG H, HANG J. Ecological environmental risk zoning of oil spills in Shanghai Ocean area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1):106-113.
- [9] MAGRI S, QUAGLIATI M, DE GAETANO P, et al. Fuel spill after ship collision: Accident scenario modelling for emergency response[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2019, 74:1363-1368.
- [10] HEYDARIHA J Z, GHIASSI R. Oil spill simulation in Mouth of Persian Gulf[J]. *Adv. Waste Manage*, 2010:56-60.
- [11] 王鹏, 申霞, 王船海, 等. 复杂河网水系油粒子模型开发及溢油污染模拟[J]. *水利学报*, 2021, 52(6):750-757. WANG P, SHEN X, WANG C H, et al. Development of the oil particle model for complex river network and numerical simulation of oil spill pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(6):750-757.
- [12] ATTARI MOGHADDAM A, DABIR. A 2-D hybrid particle tracking/eulerian-Lagrangian model for oil spill problems[J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2013, 42(1):42-49.
- [13] MASLO A, PANJAN J, ŽAGAR D. Large-scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 84(1/2):225-235.
- [14] SPAULDING M L. State of the art review and future directions in oil spill modeling[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1/2):7-19.

- 
- [15] 王琰, 程林, 陈奇良, 等. 考虑蒸发、溶解和生物降解效应的油粒子模型[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(9):118-121, 159. WANG Y, CHENG L, CHEN Q L, et al. An improved oil particle model based on effect of the evaporation, dissolution and biodegradation[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(9):118-121, 159.
- [16] 乔皎, 宋洋, 夏豪, 等. 河道型水库溢油费伊模型与油粒子模型的对比研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6):29-33. QIAO J, SONG Y, XIA H, et al. Research on comparison of FAY model and oil particle model for oil spill simulation in river-channel reservoirs[J]. Yangtze River, 2019, 50(6):29-33.
- [17] GAO J F, MEI Q L. Numerical simulation study on the effects of oil spill diffusion in the qitou sea area[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 233:01093.
- [18] 袁春光, 王义刚, 黄惠明, 等. 大亚湾芒洲岛海域移动溢油数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2014, 33(6):659-667. YUAN C G, WANG Y G, HUANG H M, et al. Oil spill numerical simulation on the wharf engineering of Mangzhou Island in the Daya Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6):659-667.
- [19] 张海文, 赵懿珺, 纪平. 福宁湾海域溢油扩散影响的数值模拟研究[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1):84-92. ZHANG H W, ZHAO Y J, JI P. Numerical modelling on the impact of oil spill in Funing Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(1):84-92.
- [20] 董晓军, 唐磊, 刘肖, 等. 内河溢油事故中不同油品油膜运动规律研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(S2):109-111, 113. DONG X J, TANG L, LIU X, et al. Study on oil film movement law of different oil products in inland river oil spill accident[J]. Yellow River, 2020, 42(S2):109-111, 113.
- [21] XIONG H B, CHEN L, SUN Z H. The impacts of piers on oil spill transport in a typical reach of the Middle Yangtze River[J]. Water Supply, 2021, 21(6):3114-3125.
- [22] 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.
- [23] 宋泽坤, 程和琴, 刘昌兴, 等. 长江口溢油数值模拟及对水源地影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(8):1055-1063. SONG Z K, CHENG H Q, LIU C X, et al. Numerical simulation of oil spill(incident) and its influence on water source area in Changjiang Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(8):1055-1063.
- [24] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 长江口南港水道溢油数值模拟[J]. 海洋通报, 2013, 32(3):345-351. YANG H, LIU C X, LI Y S, et al. Numerical simulation of oil-spill in the south channel of the stuary Yangtze River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(3):345-351.
- [25] 熊海滨, 孙昭华, 陈立, 等. 码头密度对长江中游典型河段内溢油运移影响数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5):2252-2261. XIONG H B, SUN Z H, CHEN L, et al. Numerical simulation of the impacts of piers densities on oil spill transport in typical reach of the middle Yangtze River [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5):2252-2261.

- 
- [26] 刘韬, 李涛, 林丽群. 长江中游鲤鱼山河段溢油事故模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2):155-159. LIU T, LI T, LIN L Q. Study on simulation of oil spills in liyushan channel of middle Yangtze River[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2):155-159.
- [27] 游立新, 龙艺晴, 尹倩瑜. 长江宜都港区溢油风险数值模拟[J]. 水道港口, 2021, 42(3):358-363. YOU L X, LONG Y Q, YIN Q Y. Numerical simulation of oil spill risk in Yidu Port of Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(3):358-363.
- [28] 叶华, 黄飞, 潘树林, 等. 清水冲刷对向家坝以下金沙江河床及岸线资源的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11):2763-2771. YE H, HUANG F, PAN S L, et al. Effect of clear water rush on the riverbed and shoreline resources of the Jinsha River below the xiangjiaba hydropower station[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11):2763-2771.
- [29] 李雷, 危起伟, 吴金明, 等. 长江宜宾江段渔业资源现状调查[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11):1449-1457. LI L, WEI Q W, WU J M, et al. Current status of fish assemblages in Yibin reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11):1449-1457.
- [30] 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(S1):374-377. FENG T H, WANG Y P, ZHENG B. The application of oil particle model in environmental risk prediction[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S1):374-377.
- [31] 李洋, 潘明祥, 陈燕. 数值模型在长江流域一级河网中的模拟应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2):531-534, 565. LI Y, PAN M X, CHEN Y. The simulation application of numerical model in the primary river network of the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S2):531-534, 565.
- [32] 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 L, ZOU H P, WU S Q, et al. Numerical model research on the ocean oil spill[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(4):473-480.
- [33] 陈秋良, 蔡学石, 姜倩, 等. 曹妃甸甸头海域溢油行为数值模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1):85-93. CHEN Q L, CAI X S, JIANG Q, et al. Study on numerical modeling for oil-spill at the front hayfield maritime space of Caofeidian[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(1):85-93.
- [34] 黄瑞, 韩龙喜, 张防修. 长江溢油事故中数值模型的研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6):9-13. HUANG R, HAN L X, ZHANG F X. Numerical modelling of oil spill accidents in the Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(6):9-13.
- [35] 齐庆辉, 东培华, 曲红玲, 等. 京杭运河苏北段溢油扩散数值模拟研究[J]. 水道港口, 2015, 36(3):253-257. QI Q H, DONG P H, QU H L, et al. Oil spill diffusion numerical simulation research in Subei canal section[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(3):253-257.
- [36] 林伟波, 陈晓燕, 李婧慧. 徐圩港区邻近海域溢油模拟分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(3):82-90. LIN W B, CHEN X Y, LI J H. The oil spill simulation around Xuwei Port Area[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(3):82-90.