

内会出现上下游往复运动；其次根据不同河段的差异，可以将黄浦江分为三段，上游河段为米氏渡到吴泾化工区段，中游河段为吴泾化工区到苏州河段，下游河段为苏州河至吴淞口段，从上游到下游，溢油受潮汐的影响越来越明显，最明显的特征是油膜往复漂移的时间间隔越来越段，首次出现漂移方向改变的时间分别为溢油后上游 6 小时、中游 4 小时和下游 2 小时，下游河段往复运动的次数也明显增多。

**关键词：**黄浦江，突发性溢油事故，溢油漂移扩散模型，Delft3D-PART 模型，  
水源地安全

# **Study and Application of the Huangpu River Accidental Oil Spill Simulation Model**

## **ABSTRACT**

Huangpu River is the so-called golden transportation waterway in Shanghai, and provides Shanghai with over 80% of the source drinking water to the resident. The materials transported on Huangpu River include a great amount of chemicals such as oil and hazardous chemicals. The source drinking water could be in danger when accidental chemical spills occur in the river.

Delft3D-PART modeling system is used for the Huangpu River accidental oil spill modeling study. In-situ measurements of flow, water level and flume study results of oil spills are used for the model calibration and verification. The main parameters calibrated in the model are dispersion coefficient( $a=0.07$ ,  $b=0.7$ ), roughness length( $0.02m$ ), wind drag coefficient( $C_{wd}=3\%$ ), and evaporation rate( $0.1/d$ ). The modeling result is in good coincide with both the lab findings and the in-situ measurements.

The modeling study of oil spill shows that if 1 ton oil spill release occurred anywhere upstream of the water intake on Huangpu River in Shanghai, the intake will be covered with spills. If oil spill of 1 ton is released within 5.5km downstream of the water intake, the oil spill will cover the intake in less than 24 hours. If oil spill of 100 tons is released within 8km downstream of the intake, the intake will be affected in 1 day, and if oil spill of 200 tons is released within 10km downstream of the intake, the intake will also be polluted by oil in less than 1 day. With consideration of source water protection, the reach upstream and the reach 10 km downstream is the most dangerous and thus most important water area. Oil spills in this range of river should be avoided to the best of management measures. Once an oil spill happens, it should be disposed of as immediately as possible to reduce its damage.

Huangpu River is a tidal influenced river, the transportation and dispersion of spilled oil show a different pattern. Spilled oil moves upstream and down stream following the tide in the river, and in consideration of the intake protection, Huangpu

River could be divided into three reaches as follows: upstream reach, from Mishidu to Wujing, middle reach, from Wujing to Suzhou Creek, and downstream reach, from Suzhou Creek to Wusongkou. From upstream to downstream, spilled oil is more and more obviously affected by tide. The most obvious characteristic is that the duration of up and down stream movement is shorter and shorter from upstream to downstream. The first change of direction at the three reaches happens 6 hours, 4 hours, and 2 hours after the spill respectively. And the times of reciprocator in downstream reach are much more than upstream reach.

Cong\_Cheng (Environmental Engineering)  
Supervised by professor Weiqing\_Lin

**Keywords:** Huangpu River, Accidental Oil Spills, Simulation Model,  
Delft3D-Part, Source water protection

## 东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：程聰

日期：2006 年 3 月 9 日

## 东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 \_\_\_\_ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：程聪

指导教师签名：杨青

日期：2006 年 3 月 9 日

日期：06 年 3 月 9 日

## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究背景

水是城市的生命，是城市居民生存和城市发展的最基本条件，而水源地则是为城市生存发展提供清洁、优质和充足水源的生态环境基础。长期以来，日益恶化的水污染始终是国内外大多数城市水源地安全的重要威胁。这些水污染既包括工业污水、生活废水、面源等常规污染，也包括船舶、码头的化学品和石油泄漏、工业事故排放等突发性水污染事件。统计资料显示，近年来世界各地因溢油、有毒化学品泄漏等造成的突发污染事故频现，损失巨大<sup>[1-7]</sup>。

黄浦江既是本市80%的用水来源地，又是交通航运的黄金水道。每天，从这里过往的船只不计其数，运输物品也门类繁多，其中包括大量油品、化学用品甚至危险品。一旦这些船只发生意外，就将威胁全市1000余万市民的用水安全。

黄浦江全长82公里，江面最宽处约750m，最窄处350m，航道宽200~350m，水深8~13m，江中设有一百多个系船浮筒。通航密度大，拖船小船不计其数，沿江约有二十条车客对江轮渡，情况极为复杂，容易发生船舶碰撞或翻沉溢油、有毒有害化学品和细菌病毒泄漏等突发性污染事故。2003年8月5日凌晨，停泊于吴泾热电厂码头的“长阳”轮船尾燃油舱受到撞击，造成油舱破损，溢油量85吨，受污染岸线长度约8公里，江面产生一条长200米宽20米的油带，黄浦江上游的几片湿地被燃料油污染，对水质起到净化作用的水草被全部破坏；2003年08月21日，上海黄浦江高桥石油码头附近，空载的284吨级“金浩”轮与装载350吨重油的“俞垛699”油船发生碰撞，共有十几公斤重油落江；2003年10月15日凌晨，一艘在黄浦江白猫洗涤剂码头卸货的“浙嘉善货00018”轮，在卸货过程中有119桶极度氢化油落入江中；2003年11月5日凌晨在黄浦江支流金汇港发生一起沉船事故，船上装载的80多吨硫酸造成附近300米水域被污染。这些频发的突发事故已经为人们敲响了警钟。

本课题研究内容是上海市科委2004年重大攻关项目“黄浦江突发性水污染事故预警预报技术研究”的一部分。本研究将主要针对黄浦江上游开放性水源地突

发性水污染事故预警预报和应急处置问题,重点研究突发性溢油污染事故排放的污染物在水体中的漂移和扩散规律,建立黄浦江溢油漂移和扩散数学模型,使黄浦江发生突发性溢油污染事故后,能迅速预测事故后果,确定最佳的处理方案,从而在最短的时间内以最小的代价将事故的危害控制在最低的程度,确保黄浦江水生态的安全。

一般地讲,溢油按其溢油量的多少分为三种类型<sup>[8]</sup>:即小型溢油(溢油量小于10吨)、中型溢油(溢油量大于10吨而小于100吨)、大型溢油(溢油量大于100吨)。有关资料表明,每年全世界发生1000吨级以上溢油事故有4.4次,百吨级事故约有近百次,而溢油量为几十吨的事故无法确切统计<sup>[9]</sup>。我国自1972年以来发生100吨以上的溢油污染事故22起,总溢油量22000吨。据统计,黄浦江水域于1984年至2003年间共发生突发性船舶污染事故818起,共计约1415吨污染物。其中中型溢油事故19起,100吨以上大型溢油事故5起,分别为1991年3月7日的200吨、1994年5月23日的200吨、1996年1月19日的159吨、1997年8月23日的100吨和1998年9月12日的182吨(详见表1-1)。

表1-1 1984-2003年黄浦江水域发生的10吨以上溢油污染事故统计

| 序号 | 时间                | 地点        | 溢油量(吨) |
|----|-------------------|-----------|--------|
| 1  | 1984年2月9日19:45时   | 吴泾附近      | 20     |
| 2  | 1984年6月14日上午      | 闵行附近      | 34     |
| 3  | 1985年7月12日06:43时  | B4/5      | 32.7   |
| 4  | 1985年11月14日14:15时 | B36附近     | 10     |
| 5  | 1986年8月12日20:23时  | 西渡市油脂公司码头 | 50     |
| 6  | 1989年8月14日12:15时  | 110灯浮附近   | 64     |
| 7  | 1989年8月22日16:56时  | 108灯浮附近   | 11     |
| 8  | 1989年11月17日       | 立丰船厂黄山船务  | 10     |
| 9  | 1989年11月17日19:45时 | 立丰船厂码头    | 10     |
| 10 | 1991年3月7日         | 沉5#灯浮     | 200    |
| 11 | 1992年4月27日        | 109灯浮     | 23     |
| 12 | 1993年3月1日17:25时   | 沪东船厂江面    | 35     |
| 13 | 1993年6月26日08:05时  | 张华浜2泊     | 15     |
| 14 | 1993年9月21日        | 上海耐火材料厂   | 10     |
| 15 | 1994年5月23日        | 黄浦码头      | 200    |

|    |                  |           |     |
|----|------------------|-----------|-----|
| 16 | 1996年6月10日       | 高桥石油码头    | 20  |
| 17 | 1996年7月19日       | 永怡/通油1002 | 159 |
| 18 | 1997年5月5日        | 开平码头      | 20  |
| 19 | 1997年8月23日22:00时 | 32灯浮      | 100 |
| 20 | 1998年9月12日       | 吴淞口水域     | 182 |
| 21 | 1999年6月10日       | 高桥石油站码头   | 20  |
| 22 | 2001年11月14日      | 崇明新华      | 14  |
| 23 | 2002年10月29日      | 农工商码头     | 14  |
| 24 | 2003年8月5日        | 吴泾热电厂六期码头 | 85  |

虽然突发性溢油污染事故已引起了人们的重视,然而这方面的研究工作在我国还处于起步阶段。突发性溢油污染事故本身所具有的性质复杂、形式多样、发生突然、危害严重、处理处置艰巨等特点,使得这一领域的研究有特殊的难度。但溢油污染的严峻形势要求我们必须重视这一领域的研究,以期取得突破性进展,保护水环境,促进经济可持续发展。

## 1.2 研究的意义

溢油预测模型是溢油应急反应系统的重要组成部分,它能预测溢油在扩散漂移过程中组份、性质、状态的变化及最终归宿,为应急决策的制定、清除手段的选择及溢油损害的评估提供依据<sup>[10][11]</sup>。

黄浦江作为上海的母亲河,为上海提供 80% 的饮用水;同时黄浦江上航运流量大,运输着大量化学品和油类,这些随时都威胁着水源地的安全和全市人民的饮水卫生,因此对黄浦江上游水源地的保护十分重要。

目前,国内针对海洋和内陆非感潮河流的有关研究工作比较多<sup>[12-17]</sup>,但对类似黄浦江这类感潮河流的研究仍很少,因此对黄浦江突发性油污染事故的模拟模型研究具有十分重要的学术价值和现实意义。

针对黄浦江上游开放性水源地突发性溢油事故预防和应急处置问题,建立黄浦江溢油污染事故模拟模型,可直接服务于城市水源地安全保障和突发性水污染事件的应急处理,也可促进感潮河流溢油污染事故模拟模型的研究和应用。



### 1.3 研究的主要内容

研究溢油在水体中的行为和归宿及其影响因素,为溢油模型的建立提供理论依据;研究溢油漂移扩散模拟的相关理论,对国内外的溢油模型进行综述;介绍所选模型的相关理论。

针对黄浦江上游开放性水源地突发性水污染事故预防和应急处置问题,利用 Delft3D 模型系统建立黄浦江水动力和溢油漂移扩散模型,研究溢油在水体中的迁移转化规律,为黄浦江突发性溢油水污染事故预报和应急处理提供技术支持。

## 参考文献

1. 近5年世界重大溢油事故.交通环保,1997,18(3):34,41
2. 曲维政,邓声贵.灾难性的海洋石油污染.自然灾害学报,2001,10(1):69~74
3. 刘天齐.环境保护概论.1997,高等教育出版社,北京:131
4. 杨良华.海上溢油的应急计划.中国海洋平台,1997,12(3):123~127
5. 林建,朱跃姿,蔡俊清等.海上溢油的回收及处理.福建能源开发与节约,2001(1):6~8
6. 张华.溢油事故带来灾难和损失.OA'2003 会议,2003(51):20~23
7. 田立杰,张瑞安.海洋油污染对海洋生态环境的影响.海洋湖沼通报,1999(2):65~69
8. 张铁铸,张凤坡.埕岛油田事故性溢油对海洋环境的影响及对策.海洋环保.2003,(3):22~24
9. 王长海.溢油漂移扩散计算模式初步研究.交通环保,2000,21(2):7~9
10. 严志宇,熊德琪,殷佩海.海上溢油风化模型评述.大连海事大学学报.2001,27(4):36~39
11. 李琼.海上溢油风化预测系统的研制.大连海事大学硕士学位论文,2002
12. Lou Angang, etc.Establishment of a 3D Model for Oil Spill Prediction. Journal of Ocean University of Qingdao.2001,31(4):473~479
13. 武周虎,尹海龙.水面有限长油膜下油滴输移扩散方程的解析解.交通环保,2000,21(3):10~12,44
14. 金梅兵.近岸溢油的全动力预测方法研究.海洋环境科学,1997,16(1):30~36
15. 侯国祥,郑文波,叶闽等.一种河流中突发污染事故的模拟模型.环境科学与技术,2003,26(1):9~10,15
16. 赵如箱.浅谈溢油模型的发展及其应用设想.交通环保,2000,21(4):15~17
17. 夏定武,徐继祖.有冰海域溢油运动数值模拟研究.海洋学报,1998,20(1):113~122

## 第二章 溢油在水体中的行为和归宿 及溢油污染处理技术

### 2.1 油品的组成和理化性质<sup>[1-4]</sup>

溢油是指排入海洋环境（或河流）的油。OPRC 公约对油的定义是指任何形式的石油，包括原油、燃料油、油泥、油渣和炼制产品。本文所说的溢油主要指原油及其炼制品，并不包括动物油和植物油。

#### 2.1.1 油品的组成

原油是一种含有上千种化合物的由黄色到黑色的复杂混合物液体，是古代动植物的遗骸在适宜的条件下经过长期的、复杂的生物、化学变化而逐渐形成的。石油中含有数百种化合物，主要由烷烃、芳香烃即环烷烃组成，约占石油含量的 50%~98%，简称为石油烃，其余为非烃类的含氧、含硫及含氮等化合物。石油烃类相对分子质量变化范围很大，从甲烷到相对分子质量为 1500~2000 的烃类，也曾发现相对分子质量为 1734 的  $C_{125}H_{234}$  的化合物。石油中的烃类化合物一般可分为以下四类：

##### 2.1.1.1 烷烃系碳氢化合物

在常温、常压下为链状碳氢化合物，少于 4 个碳原子为气体，5 个以上变为液体，16 个以上则变为固体。具有代表性的成份为甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷和己烷。

##### 2.1.1.2 烯烃系碳氢化合物

石油一经加热便产生有双键结构的易于反应的链状碳氢化合物，如乙烯和丙烯等。

##### 2.1.1.3 环烷烃碳氢化合物

石油中环烷烃带 5~6 个碳原子，环状排列，占石油含量的 30%~60%。除环戊烷和环己烷外，还有二环和多环烷烃。其中很重要的小量组分为甾烷、萜烷类，是异常生物标志物。环烷烃含量高时，油品粘度大。环烷烃是润滑油的主要成分，微生物几乎不能降解环烷烃。

### 2.1.1.4 芳香烃系碳氢化合物

芳香烃占石油含量的 2%~4%，有单环芳烃（如苯、甲苯、二甲苯），还含有双环（主要是萘）、三环芳烃（如蒽和菲）和三环以上多环烃（如苯并芘、苯并蒽多核芳烃）。自然界中有些微生物专门降解这些化合物。经生化实验证实，芳烃对生物的毒性最大，特别是多环芳烃<sup>[2]</sup>。

石油元素组成变化范围不大。在大部分石油中，碳含量（质量分数）83%~87%，氢含量 11%~14%，硫、氮、氧等元素一般在 1%~14%。除上述五种主要元素以外，石油中还含有砷、镍、铁、铜、铅、钙、钛、镁、钠、钴、锌等金属元素和氯、硅、磷、砷等非金属物质，但它们的含量都很少。石油不同程度的气味主要来源于少量硫化物。石油中胶质物质属于含氧化合物（脂肪酸类），它们的含量很少，但对石油加工过程却影响很大。尽管原油的基本组成元素都为碳和氢，但它们的物理化学性质相差很大。在溢油事故中，确定溢油类型及其理化性质是制定应急对策的重要因素。

### 2.1.2 油品的性质

不同类型的原油具有不同的特性，在溢油污染应急处理中，首先要了解原油属于哪一类。按照相对密度，原油可分为四类，如表 2-1 所示。

表 2-1 按相对密度对原油的分类表

| 分类   | 相对密度        | 典型油品  |
|------|-------------|-------|
| 轻质原油 | <0.830      | 阿尔及利亚 |
| 中质原油 | 0.830~0.904 | 中国大庆  |
| 重质原油 | 0.904~0.96  | 中国胜利  |
| 特重原油 | >0.966      | 委内瑞拉  |

原油经炼制加工后，又会形成不同的炼制品如液化石油气、汽油、石脑油、煤油、轻油、轻质润滑油、重油等，这些炼制油的理化性质也相差很大。通常根据石油在水中的滞留时间不同，将这些油分为持久性油和非持久性油。从水面上很快消失的油为非持久性油，如柴油、汽油、煤油和航空油。非持久性油溢出后会很快挥发掉，通常不需采取清除措施。从水面上消失得很慢的油为持久性油，如重质原油、重质精炼油。持久性油溢出后，只有部分轻组分挥发掉。持久性溢油会对水环境及沿岸水域造成危害，因此，溢出时应立即做出应急反应，采取相

应措施。为了使所采取的措施具有针对性,就要了解溢油的流动性、挥发性、可燃可爆性、毒性等理化特征,常见的溢油特征见表 2-2。

表 2-2 油的理化特征比较

|                           | 典型原油      | 汽油   | 柴油     | 重燃料油      |
|---------------------------|-----------|------|--------|-----------|
| 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )    | 0.85~0.90 | 0.75 | 0.80   | 0.95~0.98 |
| 运动粘度 (cSt)                | 10~50     | 1    | 1~5    | >5000     |
| 倾点 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | -40~-15   |      | -20    | -5~-15    |
| 闪点 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 差异很大      | <30  | 60~120 | >120      |

#### 2.1.2.1 密度

密度指在规定温度下,单位体积内含物质的质量。在标准温度 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 下的密度为标准密度,用符号  $\rho_{20}$  表示。日常还用到比重,即相对密度。比重是一定体积的试样油在  $15^{\circ}\text{C}$  时的质量与同体积的水在  $4^{\circ}\text{C}$  时的质量之比 ( $15^{\circ}\text{C}/4^{\circ}\text{C}$  比重)。

在美国,通常把  $60^{\circ}\text{F}$  ( $15.6^{\circ}\text{C}$ ) 的一定体积的试样油的质量与同温同体积的水的质量之比作为油品的比重。另外,美国石油协会 (API) 采用 API 比重。

密度这一参数决定着溢油在水中的漂浮能力。多数油的密度小于水,浮于水面;当油的密度大于水的密度时,油则下沉;当油的密度接近于水的密度时,油则悬浮于水中,随着波浪或沉在水面以下,或漂浮于水面上。油的密度与其组分有着密切的关系,对原油来说,石油烃含量多、沥青含量少时,密度就小;反之密度就大。当油溢到水面上,石油烃组分逐渐蒸发,油的密度就会增大,就有可能悬浮于水中,或沉到水面以下。表 2-3 为原油及石油产品的比重。

表 2-3 原油及石油产品的比重

| 油名     | 比重      | 油名    | 比重        |
|--------|---------|-------|-----------|
| 原油     | 790~960 | 轻柴油   | 800~840   |
| 液化石油气  | 500~600 | 重油    | 830~960   |
| 车用汽油   | 730~760 | 轻质润滑油 | 820~910   |
| 喷气机燃料油 | 760~800 | 重质润滑油 | 880~950   |
| 煤油     | 780~800 | 沥青    | 1020~1060 |

#### 2.1.2.2 粘度

粘度是评定油的流动性的指标,其本质是对液体流动的阻力,是油内分子之间摩擦的量度。粘度不仅影响油本身的运动特性,还直接影响油回收装置的性能。

油的粘度与其化学组成、各组分的分子量、温度和压力有关。一般说来，油组分的分子量越大，密度、粘度就越大。胶质和沥青质含量多的油粘度更大。原油的组成千差万别，其粘度的差异也相当大。温度对油的粘度影响较大，温度升高，粘度降低。石油在一定的温度下为遵守牛顿粘性法则的流动液体，其粘度与切变速度、切变应力成正比。当温度较低或达到分解高温时，则不遵守牛顿法则，变成非牛顿液体。当温度在 $-34\sim+7^{\circ}\text{C}$ 时，石油会凝固成块状。油品粘度与温度的关系如图 2-1 和图 2-2 所示。

油的粘度决定其在水中的行为，特别是决定油在水面的扩散速度。粘度越大，扩散速度越慢。随着油在水面的风化、轻组分的蒸发，油的粘度逐渐变大，扩散速度就越来越缓慢。

粘度影响溢油应急对策。在溢油应急反应中，对于低粘度的油，可以选用盘式、绳式及堰式撇油器回收，也可以使用溢油分散剂消除；对于高粘度的油，只能选用刷式、齿轮式及带式撇油器回收，分散剂的分散效能低。当油的动力粘度值高于 5000cP 时，分散剂对其基本无效。

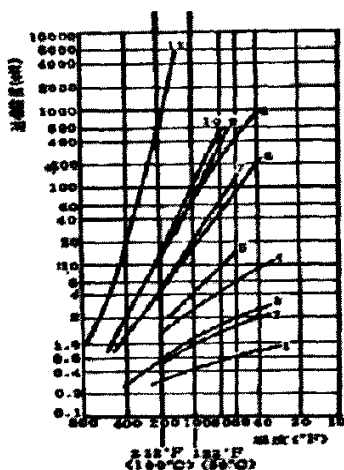


图 2-1 石油产品粘度与温度的关系

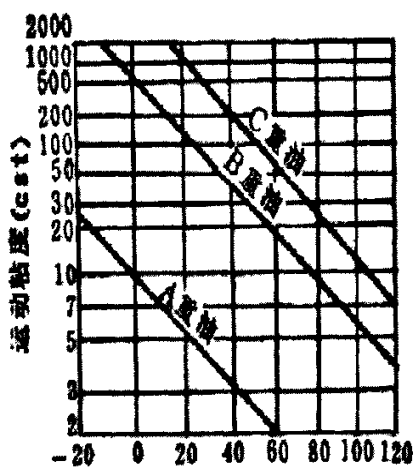


图 2-2 重油粘度与温度的关系

### 2.1.2.3 流动性

石油与许多流体一样，有“易流动”的性质。倾点和凝点是描述石油的流动性和泵送性的重要指标。倾点指油在测定容器中还能流动的最低温度，当环境温度高于这一温度时，液体就可以保持流动。凝点指油停止流动时的最高温度，当环境温度低于这一温度时，油就开始固化或冷凝。

凝点加  $2.8^{\circ}\text{C}$  约等于倾点。当油溢到水面上，环境温度低于油的倾点时，油不再流动，这种情况下就无法使用撇油器进行清除，溢油分散剂也对其无效，此

时可用收油网回收。

#### 2.1.2.4 溶解性

一般认为油不溶于水,实际上是油溶解度极低。国外对石油烷烃类成份的溶解度做过一些研究工作,发现其溶解度与烷烃的碳量有关。在 20℃时,  $C_{10} \sim C_{25}$  的烷烃在水中的溶解度为  $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{g/m}^3$ , 大于  $C_{37}$  时, 溶解度降为  $10^{-14} \text{g/m}^3$ 。由于油的溶解度很低, 一般情况下可不予考虑。

#### 2.1.2.5 挥发性

石油的挥发性较强。据估计, 水上溢油的 1/3~2/3 通过挥发进入了大气。油的低沸点组份比例越大, 挥发越快; 油的表面积越大, 轻组份挥发越快。一般较轻质油的起始挥发率较高, 如煤油和汽油等炼制品溢出后, 数小时内便可挥发尽; 轻质原油溢出后第一天可能挥发 40%。石油的挥发性取决于许多因素, 如油的组分、水温、风速与油的扩散特性。

溢油后, 由于油的挥发, 除了损失油量和污染大气外, 还会引起两方面的消极影响, 一是易挥发油溢于有限范围内时, 容易着火和爆炸, 二是挥发后的残油密度和粘度将明显增大, 给清除回收溢油造成一定困难。

#### 2.1.2.6 毒性

从原油挥发出来的石油气同汽油挥发出来的气体一样, 对人体有害, 一般人体的容许浓度为 500ppm。

实验表明, 在大多数情况下, 石油产品的毒性与其所含可溶性芳烃衍生物的数量呈正比关系。石油对生物的毒性影响可分为急性中毒和长期低浓度毒性效应。目前尚难定量分析水上溢油的毒性影响。

#### 2.1.2.7 表面张力

表面张力一般产生在两种介质的交界面。表面张力使液体表面拉紧收缩, 从而会对液体的运动状况产生影响。表面张力的大小可用液体表面上单位长度所受的张力, 即表面张力系数  $\delta_{ij}$  来表示( $i, j$  分别表示甲、乙两种介质), 单位是  $\text{N/m}$ 。

表面张力在水面溢油扩展后期是一种决定性的力。

以上介绍的几个石油的主要特性都与研究水上石油的扩展、扩散、离散、迁移和风化过程密切相关。

## 2.2 溢油在水体中的行为和归宿<sup>[5-16]</sup>

溢油进入水体后,受风、浪、流、光照、气温、水温和生物活动等因素的影响,无论在数量上、化学组成上、物理性质及化学性质方面都随着时间不断地发生变化,其行为通常分为三大类:扩散、漂移和风化。扩散过程是指水面油膜由于其自身的特性而导致的面积增大的过程。漂移过程是在水环境动力因素作用下溢油的迁移运动。而风化是指能够引起溢油组成性质改变的所有过程,包括蒸发、溶解、乳化、沉降、光氧化和生物降解等过程<sup>[5]</sup>。

### 2.2.1 溢油在水体中的迁移过程<sup>[5-10]</sup>

溢油在水体中的运动主要表现为两种过程:一是在平流作用下的整体位移即漂移,二是在剪切流和湍流作用下的扩散。溢油自身的表面扩展过程持续时间很短,而持续时间较长的运动形式主要表现为平流输运和湍流扩散。这两种运动机制分别受制于“平流”和“湍流”。实际上,这两种过程总是同时存在,通常称为“平流-扩散”问题。

#### 2.2.1.1 溢油漂移

漂移或称溢油平流,是指油膜团在风、表层和次表层流以及波浪的作用下的平移运动,是影响溢油运动的主要因素之一。越靠近岸漂移预测越显重要。漂移运动仅决定于平流条件。在油-水界面上,油膜漂移轨迹主要受风的切应力、表层/次表层流和余流(波生余流、潮余流)控制。实质上是油膜在上述合成环境动力作用下的漂移过程,依赖于水面风场和流场。

风场采用下述方法之一来表达: a.随机移动过程(Random Walk Process); b.马尔可夫链过程; c.气象模型; d.上述几种方法的联用。前两种方法一般依赖近岸气象台站的气象观测数据,这些数据要经过一定程序校正后方可使用;第三种是预测风场最精细复杂的方法,但往往受计算复杂性的限制和溢油区域的不定性的制约,因此,并未获得广泛的应用。一般预测可使用气象台提供的风力预报数据。

流场受风力、潮汐、密度及压力梯度导致的潮余流等因子的制约,可表示为这些因子的矢量和。从水流的影响来分,风水流是最重要的因素,它可以在溢油发生24小时内制约表面的油膜的漂移方向。处理风水流最简单的经验方法是,在



计算模拟中，建立风和流矢量图，风对油的影响按风速的3~4%来计算，流对油的影响按流速计算，用箭头表示风向和流向，用长度表示风速和流速，进行矢量合成。如果风和流两个矢量从同一个起点画出，以两个矢量为两边作平行四边形，则平行四边形对角线的方向为油膜的漂移方向，对角线的长度为油膜漂移距离。这是目前大多数模型采纳的方法，也是大家共同接受的概念（如图 2-3 所示）。可变漂流角（variable drift angle）随风速大小而变，一般位于 0~20° 区间内。但前提是溢油事故发生水域受沿岸流和深水流的影响不大。

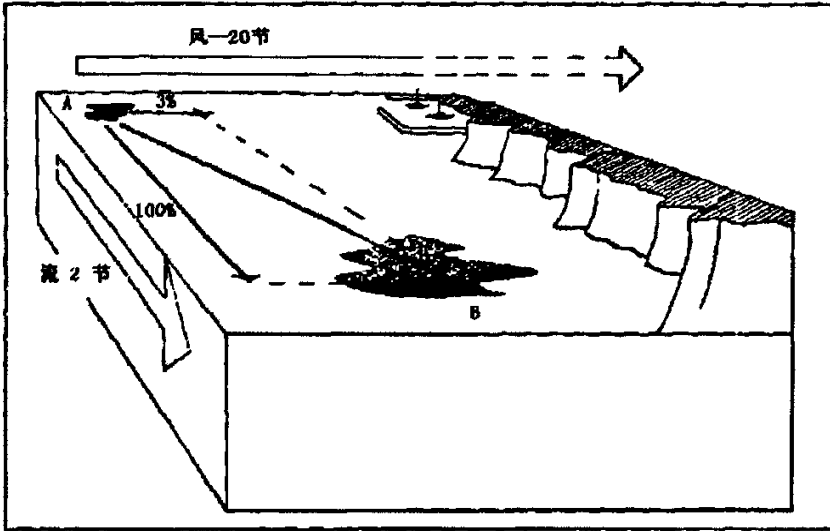


图 2-3 水流和风的矢量叠加

假设水流和风作用于油膜质心，其漂移速度：

$$V_{oil} = V_{water} + \alpha \times D \times V_{air} \quad (2-1)$$

其中：

$V_{oil}$  — 油膜质心的漂移速度；

$V_{water}$  — 流速（水流）；

$V_{air}$  — 海面以上 10 米高处的风速；

$\alpha$  — 风漂流因子（3~4%），一般取 3.15%；

$D$  — 风向转换矩阵：

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\theta = 40 - 8 \times \sqrt{V_{air}} \quad 0 \leq V_{air} \leq 25 \text{ m/s}$$

$$\theta = 0 \quad V_{air} > 25 \text{ m/s}$$

## 2.2.1.2 溢油扩散

扩散是水面溢油在某些水环境条件影响下, 扩散分散出去。它一方面决定了溢油扩散面积的大小; 另一方面, 由于表面积增大, 溢油的风化、挥发、溶解、分散和光氧化还原过程都会受到不同程度的影响, 是溢油模型中的重要组成部分。溢油自身扩散受地球引力、表面张力、惯性力和粘滞力四种因素的制约。一般认为, 油溢到水面上, 人们首先看到的就是油的扩散。它主要是在油的重力、粘度和表面张力联合作用下产生水平扩散。起初, 重力起主要作用, 所以油的扩散受油的溢出形式影响很大, 如果油的溢出形式是瞬间大量溢油, 则其扩散要比连续缓慢溢油快得多。油溢出几小时后, 油层厚度大大减小, 此时, 表面张力作用将超过重力作用, 成为导致溢油扩散的主要因素, 溢油在水面将形成界面似的薄膜, 它的中间部分比边缘部分厚。再扩散时, 油膜拖着一层水, 因而粘度成为扩散的阻力, 扩散速度显著降低。对于少量高粘度的原油和重燃料油, 它们不易扩散而以块状逗留在水面上, 这些高粘度油在环境温度低于其倾点温度时几乎不扩散。当溢油扩散在水面上形成薄膜后, 进一步的扩散主要是靠水面的紊流作用。

关于油膜自身的扩展, 较经典, 也是最常使用、最值得借鉴的扩散理论是Fay的三阶段(Three-Regime)扩散理论, 即: 静水中厚度均匀的圆形油膜的扩散过程, 可分为重力与惯性力阶段起主要作用的初始阶段、重力和粘性力起主要作用的中间阶段和表面张力与粘性力相平衡的最后阶段。

在实验观测中, Fay (1971) 发现, 风化改变了油的性质, 从而导致机械扩展过程最终停止, 这时油膜的最大半径为:

$$R_{\max} = (10^5 \times V^{0.75} / \pi)^{1/2} \quad (2-2)$$

但Fay理论只适用于静水或恒流条件下的油膜扩展。事实上, 水上总存在着水流、波浪和风力作用, 溢油自身的表面扩展过程持续时间很短, 而持续时间较长的运动形式主要表现为平流输运和湍流扩散。后来许多作者考虑了水上环境动力因素, 将油自身的扩展过程与水扰动因素作用下的分散过程结合起来, 在一些方面做了限定性改进, 如Murray的涡动扩散论、随机Fichian扩散方程、经验回归法、厚-薄油膜技术等, 但效果均不理想。近年来在溢油扩散理论方面作出杰出贡献的是Johansen, 他第一次把溢油的扩散过程逻辑化: 水面溢油发生后, 水和溢油相互接触, 油膜在水流的作用下, 开始扩散、破碎, 形成无数个微小的油

粒，这些小油粒一旦进入水中，在表面流的影响下，它们便会平行移动和分散。由于油粒总比水轻，且有一定的浮力，绝大部分的油粒最终会浮在水表面。也就是说，溢油的扩散过程不仅受油粒大小的影响，也受水表面流的控制。从计算结果来看，较厚的油层向外边界扩伸，油膜边界随风向扩散，结果与现场实验相吻合。因此，基于油粒子的概念模拟计算不同时间污染物在三维物理空间，包括在水面、沿岸、水体以及沉积物中的分布的溢油模式代表了当今溢油行为研究的新趋向。

该理论认为，油膜是由“油粒子”群组成的，通过被参混到水中的油粒子群的分布模拟来预测溢油的归宿。“油粒子”概念将溢油用许多粒子代表，反过来每一个粒子又代表一组同样大小和成分的油滴，当粒子在表面时表现为油膜，在水体中时粒子则表现为油滴，表面油膜的大小为表面粒子的叠加。溢油在水表面的漂移和风化过程采用表面扩散、平移、输送、乳化和挥发算法来模拟计算；而水体中油粒子与同水体一起运动，并伴有随机行为，因此可视作拉格朗日粒子，采用随机走动算法模拟水平和垂直方向的平移以及湍流扩散；利用线性平衡理论来划分粒子的吸附状态和溶解状态；由于吸附在固体颗粒上的污染物会与颗粒一起沉降，底部污染物与沉积物按照生物扰动方程进行混和，并会有一部分返回到水体中；污染物在水中和沉积层中的降解以一级降解方程表示。

与过去的二维算法相比，应用油粒子概念不但较好地解决了油膜在环境动力作用下的剪变和破碎过程，并能确切预报油膜边缘的扩展过程和油膜形状在风向上的明显拉伸现象，可以切合实际地模拟油膜的不规则形状和漂移轨迹，而且可以有效地消除数值发散问题。

要想获得油膜厚度和油量的实际准确数据，必须应用遥感分析仪器。但实际经验表明，通过现场直接观测仍可大致估计出油量的数量级。溢油（原油和燃油）因风化作用在外貌上会发生很大的变化。起始阶段，溢油的较厚部分通常呈黑色，但在乳化后则变为棕色、桔黄或黄色。稀薄的溢油则呈现出耀眼或闪银光的状态。因此，可以根据溢油表层的光泽色彩，粗略估计它的厚度及油量。表 2-4 给出了油的色彩与油膜厚度、油量之间的关系，为目测溢油量提供依据。

目测方法有一定的局限性，特别是目测者离污染点相当远的情况下更是如此，因此，有些石油公司的专家提出了一个经验公式（式 2-3）。该公式提出了溢油的厚度与溢油漂移时间的关系，据介绍，对多数的油品，可从该式求得满意的

结果。

表 2-4 油的色彩与油膜厚度、油量之间的关系

| 油膜外貌          | 油膜厚度 ( $10^{-3}\text{mm}$ ) | 油量 ( $\text{m}^3/\text{km}^2$ ) |
|---------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 在最好的阳光照射下隐约可见 | 0.05                        | 0.050                           |
| 在水面上可见到银灰色闪光  | 0.10                        | 0.100                           |
| 可观察到彩色的初始痕迹   | 0.15                        | 0.150                           |
| 明亮的彩带         | 0.30                        | 0.300                           |
| 色彩开始暗淡        | 1.00                        | 1.000                           |
| 非常暗的颜色        | 2.00                        | 2.000                           |
| 褐色或桔黄色“巧克力冻”  | >1000                       | >1000                           |

$$h_t = \left[ \frac{V}{t} \right]^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{\rho}{3\rho_0(\rho - \rho_0)K_t} \times t \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2-3)$$

式中：

$h_t$  —  $t$  时刻的油膜厚度 ( $\mu\text{m}$ )

$V$  — 油品体积 ( $\text{cm}^3$ )

$\rho_0$  — 油品密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho$  — 海水的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$K_t$  — 油品常数

$t$  — 溢油扩散时间 ( $s$ )

对于“巧克力冻”的推算，可先确定其含水量。一般可以认为，“巧克力冻”的含水量为 50~80%，其厚度约为 1mm 或 1mm 以上。这样，就可估算出大致的油量。

### 2.2.2 蒸发过程<sup>[11-14]</sup>

蒸发主要是水面溢油中的石油烃的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。它是溢油质量传输过程的主要部分，在几天内轻质原油蒸发损失达溢油总量的 75%，中质原油则损失达 40%。其中壬烷可在 1 小时内全部蒸发，小于  $\text{C}_{16}$  的烷烃在海面上两天内完全蒸发。相比之下，重质油在溢油后最初的几天里蒸发损失不超过总量的 10%。蒸发在改变溢油总量、影响油组成的同时，也改变着油的性质，使油密度、粘度、表面张力等增加，倾点

上升。此外，蒸发还影响着其它风化过程，如扩散、乳化、溶解等。影响蒸发的因素主要有：油的组分、油膜厚度、环境温度、风速及海况等。了解蒸发过程有助于水上溢油残留量的预报、应急决策的制定和环境损害的评估等。大部分模拟溢油行为的模型都将蒸发过程考虑在内。

尽管蒸发是溢油风化中一个相当重要的过程，但是相关的研究工作进行的并不多，这是因为油品是含有数百种化合物的混合物，而且不同产地的油品组分也差别很大，这给研究带来了非常大的困难。最初的油蒸发研究是以1934年Sutton提出的水蒸气速率方程为基础的。Mackay和同事（Mackay and Matsugu, 1973; Stiver and Mackay, 1984）用质量迁移系数作为风速和溢油面积的函数来描述原油的蒸发。Stiver and Mackay（1984）则进一步研究了蒸发量、质量迁移系数、蒸气压、气体常数和温度间的关系。

蒸发率的计算方法主要有两种<sup>[13][14]</sup>，即Audunson及其同事的准组分法（psedocomponent）和Mackay等及Blokker等的解析法（analytic approach）。目前许多油风化预测模型如OSIS、ADIOS、张存智的“三维溢油动态预报系统”等都选用Stiver和Mackay发展的方法计算蒸发速率：

$$dF/dT = (KE/h)\exp[6.3 - 10.3(C_1 - C_2)F/T] \quad (2-4)$$

式中：F是蒸发的体积分数；K<sub>E</sub>是质量迁移系数；h是油膜的厚度；T是周围温度；C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>为油的蒸馏常数。以后的许多工作都是对Mackay工作的改进，如Mackay、Patterson、Trudel等因油膜厚度的不均对模型提出过修正。对于粘稠油或蜡质油的非牛顿性和风化过程形成“皮”使其蒸发过程异常，Berger认为这是油相阻力过大使蒸发延迟。他和Mackay将一系列润滑油的液相阻力根据粘度予以定量化，使建立的模型与实验结果相吻合。在研究中Belore等发现常数6.3和10.3只对Stiver和Mackay分析的油非常符合，但却被许多模型建立者盲目地用于其它油中，Bokra给出了若干种油的不同参数值。

尽管蒸发模型已大体定型，但对溢油蒸发的基础性工作只是对水蒸发研究的延伸。Fingas等在气液相界面从动力学角度研究了十几种油蒸发过程后认为，纯液体（如水）和多组分系统（如油）在蒸发上有根本的不同：（1）纯液体的蒸发速率对时间来说是常数，而多组分的原油因大量挥发性组分随时间指数性损失，因而蒸发损失量与时间成对数关系；（2）主要控制过程不同。蒸发可看作两部分组成，基本蒸发和调节蒸发。水蒸发主要受水-气边界层的饱和程度（或相对湿

度)而并非水自身的基本蒸发所控制,因而水蒸发对风或湍流非常敏感。Fingas等通过加强湍流、增加风速、增加一定量油的表面积等实验考察油的蒸发,发现这些改变对油蒸发速率没有明显影响,这说明油蒸发不是严格地受边界层控制。这一事实意味着简化的蒸发方程将足以描述这一过程,不需要再考虑风速、湍流、面积、厚度和规模的影响,重要的因素只是时间和温度。Fingas提出了直接从蒸馏数据计算的蒸发方程:

$$\text{蒸发百分比} = [0.165 (\%D) + 0.045 (T-15)] \ln t \quad (2-5)$$

有少数油种如柴油、Bunker C light和FCC heavy cycle等符合 $t$ 为平方根形式的方程:

$$\text{蒸发百分率} = [0.254(\%D) + 0.01(T-15)] t^{1/2} \quad (2-6)$$

式中: %D — 180℃蒸馏的质量分数;

$t$  — 时间(分);

$T$  — 温度(℃)。

图 2-4 显示了由实验得到的几种油品的蒸发百分比。

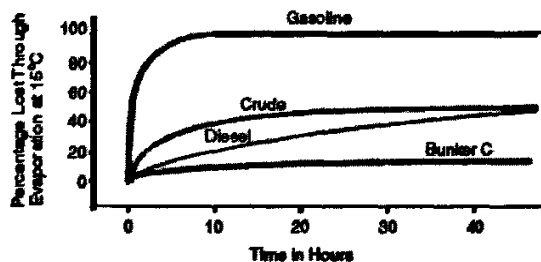


图2-4 15℃下几种油品的蒸发百分比(源自 Fingas, 2000)

严志宇等<sup>[13]</sup>通过实验得出:(1)由于控制步骤的不同,混合液体的蒸发有不同特点,风速、蒸发面积和液体厚度的影响情况不一样,速率方程也不会相同。如胜利原油蒸发由第一步控制,因此风速影响很小,建立速率方程时不必考虑风速,只需考虑液体本身的性质和状态(如厚度、表面积、粘度等),速率方程可写为  $dw/dt = kd^{-0.2} A \mu^r H^s / t$ 。(2)混合液体蒸发的控制步骤是有条件的,在不同条件下使得蒸发会有不同特点,各因素影响情况也不同。如轻柴油风速较小( $<1\text{m/s}$ )时,受第三步影响明显,而 $>1\text{m/s}$ 时,其影响的程度则减弱,当轻柴油油膜变得很薄时,其蒸发可由第一步控制变为第二步控制。相应建立的速率方程在不同条件下应有不同的形式:在无搅动的情况下,  $d > 1\text{mm}$ 时,

$dw/dt = kd^{-0.4} A \mu^r H^s U^{1/2} t^{-1/2}$ ,  $d < 1\text{mm}$ 时,  $dw/dt = kU^{1/2} t^{-1/2}$ 。实际溢油中海

面波浪的作用会促进第一步过程，也影响了蒸发的控制步骤。

### 2.2.3 溶解过程<sup>[12]</sup>

溶解是石油中的低分子烃向水体中分散的一个自然混合过程，是溢油在一定能量的搅动下，形成油粒均匀进入海水中的过程。这是飘浮或悬浮石油烃进入水体的质量传输过程，有效时间仅一小时左右。溶解速度取决于油分子构成、扩散程度、水温、紊流以及分散程度。相对于蒸发量，溶解量很小，因此一些溢油预报系统忽略此过程，但由于易溶解的多是有毒的芳烃，如BTEX等，所以在环境影响预测中溶解量的计算就很重要。原油溶解度依赖于组分和海水环境，模拟溶解过程方法或是用与蒸发过程相似的准组分法，或将溶解与蒸发一起考虑，按一级动力学过程进行，或将溶解与分散过程综合考虑，因为二者较难分。

Brookman (1985) 研究了油品及其组分在 25℃ 下蒸馏水中的溶解度，发现其溶解度随组成的不同差异很大。表 2-5 显示了原油中几种典型的芳香烃的溶解度 (Mackay, 1992)，溶解度随着碳原子数和取代基的增加而迅速下降。相比之下，脂肪族组分的溶解度就非常低而可以忽略了。

表 2-5 原油中几种典型的芳香烃的溶解度

| 物质    | 溶解度 (mg/L) | 物质           | 溶解度 (mg/L) |
|-------|------------|--------------|------------|
| 苯     | 1700       | 1, 3-二甲基萘    | 8          |
| 甲苯    | 530        | 1, 3, 6-三甲基萘 | 2          |
| 乙苯    | 170        | 菲            | 1          |
| 对二甲苯  | 150        | 蒽            | 2          |
| 萘     | 30         | 二苯并噻吩        | 1.1        |
| 1-甲基萘 | 28         | 屈            | 0.002      |

对溶解过程各学者从不同角度进行了深入考察。杨庆霄等考察了几种石油烃在不同盐度、温度、pH值和有腐殖酸存在下溶解度受影响的情况及组分的变化情况，通过各类烃的垂直扩散系统和溶解量对油浓度和溶解总量进行预报。

Bobra研究了几种石油烃混合物的水溶性，发现溶解组分和浓度都很相近。但溶解性强的可溶组分中苯、甲苯、乙苯、二甲苯含量高，而燃油中可溶组分由挥发性、溶解性较小的如三甲基苯、丙基苯、萘、烷基化萘等组成。

尽管一般认为原油的蒸发量比溶解量相差2~3个数量级，但在一些情况下蒸

发和溶解之间仍存在明显的竞争，尤其对有生物毒性的芳烃。Rye等将不含沥青烯的非乳化溢油中的烃进行分类，根据Harrison给出的蒸发和溶解的速率方程，考察了一定厚度的不同类型的烃完全蒸发或溶解所需的时间，发现在破碎波的作用下，芳烃含量高的小油滴溶解速率可能大于蒸发速率，这一结论对估计溢油对海洋生物带来的可能后果很有意义。

#### 2.2.4 乳化过程<sup>[12][15][16]</sup>

溢油的乳化是指水上溢油风化过程中石油和水混合在一起形成油水乳化物的过程，是石油进入水体后所发生的许多变化中的一个重要过程。

对溢油风化研究者来说，乳化过程通常是指形成油包水乳化物（俗称“巧克力油冻”或“奶油冻”）的过程。它是当油膜扩展到一定程度后，风浪的能量足以打碎油膜时，水滴被分散到油里形成的，呈黑褐色粘性泡沫乳油状漂浮于水面。长期漂浮的乳化物能包裹水生物的分泌物及其残骸，最终形成沥青球。这些乳状液显著地改变了溢油的理化性质。稳定的乳状液含 60%~85% 的水，体积增加 3~5 倍，密度从 0.80g/mL~0.95g/mL 增至 1.03g/mL，粘度也从几百个  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  增至几十万个  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，油变成了一种更重的半固体物质。

油的乳化程度依赖于沥青质的含量，沥青质含量大于 0.5% 的油，易形成稳定的乳状液；沥青质含量小于此值的油易于分散。油的乳化液在水环境中很难消除，如任其漂流，碰到固体物质或海滩就会粘附在上面，对环境的污染很难消除。乳化过程还使溢油清除工作更困难，乳化油不但难以人工分散、引燃，而且增加的粘度妨碍了大多数机械回收设备的有效操作，水的吸收极大地增加了被污染物质的体积因而增加了清除工作量及难度。乳化过程也很大程度地影响溢油的其它风化过程，蒸发、扩散都因此而减慢数个数量级，浮在水下面的乳化油也表现对风的不同的拖曳特征，另外，生物降解也受其影响。

由此可见，油水乳化物形成的速率、含水率及其性质决定溢油后来的行为、带来的影响的许多方面，因此需要揭示溢油随时间如何变化的机制，在各种环境条件下估计油形成稳定的油水乳化物的可能性，这对溢油归宿的预测、制定有效的溢油应急计划、决定和优化清除操作的决策都有重要意义。

随着分析手段的提高，人们不论在乳化物的形成机理还是其稳定性研究上都



有更深认识。目前大多数文献中关于乳化过程的研究偏重于化学组分的影响及作用方式,乳化物稳定性的化学因素等,而有关对油水乳化混合而乳化的动力学研究的报道较少,相应的过程模拟仍停留在80年代的水平<sup>[15]</sup>。Fingas通过对油包水乳化物稳定性有关的文献查询,发现乳化物的稳定性是由在油水界面处沥青烯和树脂形成的粘弹性膜产生的,其中沥青烯比树脂产生更硬的膜。所以可根据膜的粘弹性将乳化物进行分类,即稳定的乳化物具有弹性,不稳定的则不具有弹性;当然稳定的乳化物也表现出高的粘性。粘性的增加来自油水界面的沥青烯的增加。水含量与稳定性之间并不存在好的相关性,但非常低或非常高的水含量(<30%或>90%)通常认为不产生稳定的乳化物。水滴的大小对稳定性的影响尚不清楚。关于稳定性的测定,介电光谱(dielectric spectroscopy)可能是研究乳化物性质和稳定性的一个有用的工具,但该技术需要进一步的完善。其它如常用的相分离,及对乳化物的电导、粒径、表面张力的测定等方法用于乳化物稳定性的研究并不理想。

表 2-6 乳化物类型

| 项目        | 稳定乳化物   | 半稳定乳化物  | 不稳定乳化物   |
|-----------|---------|---------|----------|
| 寿命        | 无限      | <7d     | <1d      |
| 水含量       | 70%~75% | 30%~90% | 0%~50%   |
| 沥青烯含量     | >7%     | 3%~7%   | <3%      |
| 外观        | 红褐色     | 黑到褐色    | 可在黑油中看见水 |
| 和新鲜原油粘度比较 | ×1000   | ×100    | 相同或略高    |
| 粘弹性       | 有粘弹性    | 大多数有粘性  | 有粘性      |
| 零剪切粘度     | 高       | 略高      | 低        |

Fingas又根据自己多年的研究认为可通过观察颜色、测定粘度、弹性、零剪切速率粘度(zero shear viscosity)、水含量和导电性将乳化物分为稳定、半稳定和不稳定的几种类型(见表2-6)。他认为稳定的乳化物有足够的沥青烯(>7%)或可能和树脂一起产生强的粘弹性界面,使小水滴(1~20μm)保持在油中。半稳定的乳化物可能缺少足够的沥青烯(3%~7%)使其完全稳定或仍含有太多的破乳物质如较小的芳烃,但油的高粘性能使水滴稳定一定时间。通过风化,油将损失能溶解沥青烯的BTEX组分,然后形成稳定的乳化物。实际溢油中,普遍存在的是半稳定乳化物,不稳定乳化物的沥青烯的含量则少(<3%)。

乳化物形成的机理尚未很好地解决。有些文献认为当化学条件满足后,并有

一定的波和其它湍流能量时,会迅速形成乳化物。但由于缺乏足够的经验和理论,并不能精确确定形成乳化物时所需能量的阈值,文献中所报道的观测值是变化的,但不高。

对于溢油乳化过程的预测,通常采用由Mackay等首先提出的一级速率方程:

$$\Delta W = K_a(U+1)^2(1-K_bW)\Delta t \quad (2-7)$$

式中:  $\Delta W$  是水的吸收速率;  $W$  是水含量分数;  $K_a$  是经验常数;  $U$  是风速;  $K_b$  是近似为1.33的常数;  $t$  是时间。

后来的工作如1982年Mackay和Zagorski提出的两个关系式,1988年Kirstein和Redding用Mackay方程的变量来预测乳化物的形成及1989年Reed及其同事对Mackay方程常数的调整都是基于上述Mackay方程。由于Mackay方程是在对乳化物形成机理广泛研究之前建立的,它与实验或现场结果的相关性并不好。

现已知当沥青烯和树脂总分数超过3%和BTEX小于该值时,就会形成半稳定乳化物,而当沥青烯含量大于7%时形成稳定乳化物。由于蒸发使BTEX从油膜上迁移到大气,于是根据蒸发损失及沥青烯和树脂的质量分数可预测乳化物形成的化学条件是否满足。在实验室中提供的一定能量下,满足条件的油将在0.1~3h内完全乳化。Fingas提出的简化近似认为化学条件和最小能量满足后乳化物将迅速形成。

杨庆霄等<sup>[16]</sup>重点考察了形成乳化物的外因和在环境中的分布状态。通过模拟实验对溢油在破碎波下乳化物形成的研究表明,油膜厚度与乳化量成正比关系,乳化后油的浓度与停留时间成指数关系,在水体中的垂直分布呈指数变化,且变化梯度随粘度升高而增加,并得出:波高为0.38m破碎波将溢油分散成乳化物的的作用深度为0.35m;利用尼斯模式计算了5级海况、波高3.0m、波周期为7s情况下,0.4m水层的乳化率约为59%。

### 2.2.5 沉降过程<sup>[5][7][11]</sup>

由于一系列环境因素的影响,溢油附着在悬浮颗粒或自身絮凝沉入水底的过程,谓之沉降。它可以通过两种方法进行:随着溢油风化时间和程度的延续,溢油密度增加,发生沉降;溢油和悬浮颗粒物质吸附絮凝在一起,沉入水底。第一种情况只在温热带海区发生,一般不在寒冷水域发生。第二种情况比较普遍。

### 2.2.6 光氧化过程<sup>[5][7][11]</sup>

光氧化过程是溢油在阳光的照射下,发生自由基链式的氧化反应,产生一些极性的、水溶性的和氧化的碳氢化合物产物的过程。尽管光氧化产物浓度不高,短期效应不太明显,但光氧化的长期效应日益明显,对溢油的物理过程影响很大,并且对生物的毒性增大。由于风化过程的复杂性和测试手段的局限性,很难确定光氧化产物,对其机理及其对溶解和乳化的作用的研究只停留在对推测的定性描述上。Garrett等用GC/MS和X-射线吸收光谱测试了紫外光对原油中不同组分的影响,发现饱和组分对光氧化不敏感,而芳烃尤其是大的烷基取代芳烃则敏感,X-射线吸收光谱显示脂肪中的硫比噻吩中的硫更易氧化,硫以相等的量被氧化为亚砷、砷、磺酸盐和硫酸盐,发现光氧化的影响明显与生物降解的不同,对生物降解来说芳烃有大的取代基不利于降解。Garrett等工作使人们在光氧化对油的影响方面的认识加深,但在最近几年内还不可能对其进行数学模拟并用于预测模型中。

### 2.2.7 生物降解过程<sup>[9][11]</sup>

水中的油除蒸发、扩散、沉降等作用外,还会发生生物降解作用。生物降解是水环境中的油得以净化的最根本途径。影响生物降解的因素主要有温度、含氧量及营养物质氮和磷的含量。在15℃下,氧化速率为0.3mg油/(L·d);在25℃下则为10.3mg油/(L·d)<sup>[9]</sup>。生物降解速率除了与石油组分及分散程度有关外,还与微生物种类和数目有关,而这些又与环境条件(温度、盐度、pH值、营养盐)有关。实验室里能获得这些因素对微生物的线性影响,却很难模拟实际中各种因素对微生物种群和数目的非线性关系。和光氧化过程一样,生物降解在长期风化过程(几个月到几年)中是非常重要的。对长期风化的油的研究一般通过测定实际溢油的组分和状态来进行。由于目前的预测水平只在短期内(几小时到几周)有效,所以预测没有考虑生物降解过程。短期预测对溢油响应和经济损害评估有重要作用,但长期预测却对全球水环境影响评价意义重大。

如前所述,事故溢油进入水体后,溢油的行为和归宿受物理、化学、生物等过程的影响呈现复杂过程,为时间的函数。一般认为沸点低于37℃的石油分馏物几天之内就可以全部蒸发掉,新鲜原油在2~3天内可以蒸发掉25%~30%;

研究表明,在平静的海况下,溢油 48 小时内溶解量约为总油量的 0.52%;溢油的乳化作用十分复杂,但一般在溢油后几个小时后才开始;而吸附沉淀和光氧化过程更加缓慢。

在溢油事故发生后,短时间内油品在水中的主要行为应是扩散和漂移,而蒸发、沉降、生物降解等过程并不是主要过程。故在突发性溢油事故的预测中,若溢油点距保护目标距离较短,可只考虑溢油在水中的扩散和漂移,同时计算出水中油的浓度,即认为油膜到达保护目标时若浓度超标则将对保护目标产生影响,预测结果应是偏于安全的。

## 2.3 溢油污染处理技术<sup>[17-29]</sup>

水上溢油事故多数是突发性事件。溢油事故发生后能否迅速而有效的做出溢油事故应急响应并采取应急措施,对控制污染、减少污染损失以及清除污染等都起着关键性的作用。

目前处理溢油污染的主要方法有物理法、化学法和生物法。

### 2.3.1 物理处理法

利用物理方法和机械装置,消除水面和沿岸带的油污染是最有效的方法,但通常不适用于乳化油的清除。大致分为围栏法、吸油法和油回收器(船)处理。

#### 2.3.1.1 围栏法

围油栏的作用主要是阻止油的扩散,防止污染海域面积扩大,并使海面的浮油层加厚,以利于油的回收<sup>[17]</sup>。围油栏应具有滞油性强、随波性好、抗风浪能力强、使用方便、坚韧耐用、易于维修、海生物不易附着等性能。采用浮体漂浮于水面的围油栏,由浮体、水上部分、水下部分和压载部分组成。水上部分起围油的作用;水下部分是防止浮油从下部漏出;压载的目的是确保围油栏直立在水中;浮体提供浮力,使围油栏漂浮在水中<sup>[17]</sup>。围油栏除了可在发生溢油事故后使用外,还可在港口码头、污水排放口及海滨浴场附近使用,作为预防事故发生的一项措施<sup>[18]</sup>。

拦油栅有帘式、围墙式和沉浮式<sup>[19]</sup>。帘式拦油栅有一表面浮筒,浮筒在水面可作挡油屏障,对水面下的帘起支撑作用;围墙式拦油栅一般用于浪大的深水区

[20]; 沉浮式拦油栅是在橡胶制成的拦油栅两侧装有橡胶浮管, 用空压机向浮管送气, 利用浮力使栅上升, 排气则栅下沉, 这种拦油栅适应风浪, 恶劣气候时也能安全展开<sup>[17]</sup>。

### 2.3.1.2 吸油法<sup>[21][22]</sup>

可使用亲油性的吸油材料, 使溢油被粘在其表面而被吸附回收。纤维织物吸油拧干法回收溢油: 从船上放入许多条吸油力较强的纤维织物于溢油中, 然后用机械搅起拧干, 将溢油回收后再迅速放入溢油中, 如此反复进行。这是目前国内使用较多的一种方法。其主要缺点是回收速度太慢, 操作也比较麻烦, 处理成本偏高。制作吸油材料的原料有高分子材料(聚乙烯、聚丙烯、聚酯等), 无机材料(硅藻土、珍珠岩、浮石和膨润土等)和纤维(稻草、麦杆、木屑、草灰、芦苇等)。吸油船回收溢油: 用吸头将溢油吸入船舱内, 静置24 h 后, 使之明显分层, 然后用油水分离器回收溢油, 排出余水。尽管该处理方法简单、干净(二次污染小), 但由于吸头吸入溢油的比例太低(一般为10%左右), 加之分层速度太慢, 而且一旦溢油出现乳化现象就很难分层, 回收溢油的质量和效率得不到保证, 因此此法目前使用不多。

### 2.3.1.2 油回收器(船)<sup>[17][18]</sup>

油回收器(船)主要用来回收水面的浮油<sup>[18]</sup>, 其工作原理是利用油和水的密度差, 用泵吸取油水界面上的油。卓诚裕研制出一种抽汲式浮油回收装置(专利号N882174680), 利用油水分离器所配的泵, 通过浮油回收器, 将油、水混合液送入高效油水分离器进行分离。

除采用抽汲原理工作的浮油回收器外, 还有吸附式和漩涡式浮油回收装置。将浮油回收器配以动力装置就组成浮油回收船, 该船可以直接回收水面的浮油, 也可与围油栏配合使用。由于海况和气象条件不同, 油回收器(船)的能力变化很大, 有时能下降20%~90%, 因此, 它们一般在平静的水域内作业。

## 2.3.2 化学处理法

### 2.3.2.1 燃烧法<sup>[17][24]</sup>

需采用各种助燃剂, 使大量溢油能在短时间内燃烧完, 无需复杂装置, 处理费用低。但是考虑到燃烧产物对水生物的生长和繁殖的影响, 对附近船舶和沿岸

设施可能造成损害,而且燃烧时产生的浓烟也会污染大气,因此只能在离海岸相当远的公海才使用此法处理。

#### 2.3.2.2 油处理剂

使用化学药剂清除油污,通过改变溢油的物理性质,使之易降解或回收。回收厚度小于1mm的薄油膜,可直接使其乳化分散。这种药剂主要成份为表面活性剂,使溢油在水面乳化形成 o/w 型乳状液,使溢油微粒易于与海水中的化学物质反应,易于被能降解石油烃的微生物所降解,最终转化成 CO<sub>2</sub> 和其它水溶性物质,加速了海洋对石油的净化过程。油分散剂一般用量为溢油的 1~20%,它使用方便,效果不受天气、海况所影响,是在恶劣条件下处理溢油的首选方法。分散剂应具备以下条件<sup>[19]</sup>:对溢油的乳化性好;对水生生物的毒性低;对所使用的溶剂相容性好;生物降解性能良好。像其它溢油处理措施一样,化学分散也很难对重度风化的油奏效。因此,研究溢油的风化特性及其他影响化学分散效率的因素,对于决定溢油是否适用分散剂具有实际意义<sup>[25]</sup>。其次为凝油剂,它可使石油胶凝成粘稠物或坚硬的果冻状物。其优点是毒性低,不受风浪影响,能有效防止油扩散。对凝油剂的开发和应用,已引起各国的重视。

#### 2.3.3 生物处理法<sup>[17][26-29]</sup>

某些天然存在于水体或土壤中的微生物有较强的氧化分解石油的能力,可以利用微生物的这一特性来清除水上溢油。美国科学家在墨西哥湾海底的沉积物中发现了许多依靠吞噬石油来维持生命的细菌。美国亚特兰大大学发现某些酵母菌株天然存在于被石油污染的水中,其数量随油污染范围的扩大而增加,这表明它们是靠“吃”石油而繁殖的。酵母菌比细菌等微生物对紫外线和海水的渗透压具有更强的抵抗力。

用物理方法消油,很难去除水表面油膜和水中的溶解油;采用化学方法实际上是向水体中加入人工合成的化学物质,很有可能会造成二次污染。用细菌可以清除表面油膜和分解水中溶解的石油烃,同时具有化学方法不可比拟的优点。

总之,在水上发生溢油后,首先应撒布聚油剂,阻止溢油在水面进一步扩散,然后用围油栏将油拦截,再使用各种机械回收装置,如吸油装置、网袋回收装置、油拖把及各种吸油材料等。对厚度为 0.5~3.0mm 的浮油可用凝油剂使之固化、

再用网袋回收，油层厚度小于 0.5mm 的可使用乳化分散剂。外海的溢油可用燃烧法处理，深海区的溢油可用沉降型凝油剂使之沉入海底，由海底生物消化吸收和在底泥中降解、净化。

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了油品的组成和性质、溢油在水体中的漂移扩散规律及其影响因素和溢油污染处理技术，通过上面的介绍可以发现，溢油事故发生后，由于油品组成和性质以及环境条件的复杂性，使得溢油的处理处置存在很大难度，这就更加突出了溢油模型的重要性。如第一章所述，溢油预测模型是溢油应急反应系统的主要部分，其中溢油风化模型是其重要组成，它能预测油在风化中组成、性质、状态的变化及最终归宿，为应急决策的制定、清除手段的选择及溢油损害的评估提供依据。在下面一章里，着重介绍溢油漂移扩散模拟的理论。

## 参考文献

1. 任福安,殷佩海,耿晓辉.海上溢油事故等级的综合评定.交通环保,2000,21(6): 16~19
2. 曲维政,邓声贵.灾难性的海洋石油污染.自然灾害学报,2001,10(1): 69~74
3. 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.天津大学硕士学位论文,2004
4. 张国光,许乙烈.用油品的物理特性鉴别海面的溢油源.海洋环境科学,2002,21(2):60~64
5. 严志宇,殷佩海.溢油风化过程研究进展.海洋环境科学,2000,19(1):75~80
6. 张存智,窦振兴,韩康等.三维溢油动态预报模式.海洋环境科学,1997,16(1):22~29
7. Committee on Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects, National Research Council. Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Washington, D.C.,2003:89~118
8. 中华人民共和国海事局.溢油应急培训教程.人民交通出版社,2004
9. 严志宇.海上溢油风化过程的研究及模拟.大连海事大学发博士学位论文,2001
10. 武周虎.不平静海面溢油的扩展、离散和迁移模型.成都科技大学研究生毕业论文,1987
11. 李琼.海上溢油风化预测系统的研制.大连海事大学硕士学位论文,2002
12. 赵云英,杨庆霄.溢油在海洋环境中的风化过程.海洋环境科学, 1997, 16(1): 45~52
13. 严志宇,殷佩海.海上溢油蒸发过程的研究进展.海洋环境科学,2000,19(2):74~79
14. 严志宇,肖井坤,殷佩海.溢油蒸发过程的研究.大连海事大学学报,2000,26(4): 21~24
15. 严志宇,许海梁.溢油乳化过程的研究进展.交通环保,2002,23(2):1~6,26
16. 杨庆霄,赵云英,韩见波.海上溢油在破碎波作用下的乳化作用.海洋环境科学,1997,16(2):3~8
17. 夏文香,林海涛,张英等.海上溢油的污染控制技术.青岛建筑工程学院学



报.2004,25(1):54~57

18. 卓诚裕.海洋油污染防治技术.北京:国防工业出版社,1996
19. M. ROULIA, K. CHASSAPIS<sup>1</sup>, CH. FOTINOPOULOS<sup>2</sup>.Dispersion and Sorption of Oil Spillsby Emulsifier-Modified Expanded Perlite. Spill Science & Technology Bulletin,2003,8(5):425~431
20. 吴雯.海上溢油的处置.黄渤海海洋.1997,15 (3):57~62
21. 夏永明等.石油储运过程环境污染控制.北京:中国石化出版社,1992:146~177
22. 曾德芳,罗亚田,张科.高效快速溢油回收处理技术探讨.武汉理工大学学报, 2003,5(7):48~50
23. 邸锦疆.海上溢油回收装置的应用和发展.交通环保,2002,23(2):34~35
24. 赵如箱.溢油应急反应中的现场燃烧技术.交通环保,2002,23(3):39~42
25. 张秀芝,李筠,隋伊等.海上溢油风化特性及化学分散效果的影响因素研究.海洋环境科学,1997,16(3):40~45
26. 张育田.生物技术在海上溢油处理中的应用.海洋环境保护,2005,(2):14~16
27. 李永祺,黄健.用细菌清楚近岸海域油污染的研究.生物技术进展,1995,15(2): 14~18
28. 牛炳旭.细菌与石油污染的治理.生物学通报, 2004,39(4):13~14
29. 张景来,李正要,汪莉等.海水中原油生物的降解.北京科技大学学报,2003, 25(5):410~413

### 第三章 溢油漂移扩散模拟及研究现状

#### 3.1 溢油漂移扩散模拟理论

##### 3.1.1 溢油扩散模式<sup>[1]</sup>

###### 3.1.1.1 费伊 (Fay) 等人的计算公式

费伊 (Fay) 公式把扩散分为三个阶段。

惯性扩展阶段, 油膜直径为:

$$D_1 = K_1 (\beta g V)^{1/4} t^{1/2} \quad (3-1)$$

粘性扩展阶段, 油膜直径为:

$$D_2 = K_2 (\beta g V^2 / \sqrt{V_w})^{1/6} t^{1/4} \quad (3-2)$$

表面张力扩展阶段, 油膜直径为:

$$D_3 = K_3 (\delta / \rho_w / \sqrt{V_w})^{1/2} t^{1/4} \quad (3-3)$$

扩展结束后, 油膜直径为:

$$D = 356.8 V^{3/8} \quad (3-4)$$

式中:

$D$  — 油膜直径 (m);       $g$  — 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ );

$V$  — 溢油总体积 ( $\text{m}^3$ );     $t$  — 从溢油开始计算所经历的时间;

$\beta$  —  $\beta = 1 - \rho_o / \rho_w$ ;       $\rho_o$  — 油的密度 ( $\text{t/m}^3$ );

$\rho_w$  — 水的密度 ( $\text{t/m}^3$ );     $V_w$  — 水的运动粘滞系数;

$\delta$  —  $\delta = \delta_{aw} - \delta_{oa} - \delta_{ow}$

$\delta_{aw}$  — 空气与水之间的表面张力系数 (N/m);

$\delta_{oa}$  — 油与空气之间的表面张力系数 (N/m);

$\delta_{ow}$  — 油与水之间的表面张力系数 (N/m);

$K_1$  — 惯性扩展阶段的经验系数;

$K_2$  — 粘性扩展阶段的经验系数;

$K_3$  — 表面张力扩展阶段的经验系数。

## 3.1.1.2 元良公式

扩展半径微分方程为：

$$\frac{d_r}{d_t} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha r}}{2\alpha} \quad (3-5)$$

式中：

$$\alpha = \frac{\rho_0 V}{r} + \frac{4\rho_0 V^3}{\pi^2 r^2}, \beta = \frac{\pi^2 c^2 v_0 \rho_0 r^4}{2V}, r = -\left(\frac{\rho_0 g V^2}{\pi^3} + 2\pi\sigma\right);$$

$v_0$  为油的运动粘滞系数； $c$  为油的平均速度系数（假定为 0.1）。

## 3.1.1.3 布洛克尔公式

布洛克尔给出油膜扩展直径公式为：

$$D = \left[ D_0^3 + \frac{24k_r}{\pi} (d_w - d_o) \frac{d_o}{d_w} V t \right]^{1/3} \quad (3-6)$$

式中：

$D_0$  — 初始时刻油膜直径； $d_o$ 、 $d_w$  — 分别为油和水的比重；

$k_r$  — 布洛克尔常数，随油品种类而变化，一般可取  $k_r = 216$  (1/s)。

## 3.1.1.4 刘肖孔等人的公式

刘肖孔给出油膜扩展直径公式为：

$$D = 0.61 \left[ 1.3(\beta g V)^{1/2} t + 2.1 \left( \frac{\beta g V^2}{\sqrt{v_w}} \right)^{1/3} t^{1/2} + 5.29 \left( \frac{\sigma}{\rho_w \sqrt{v_w}} \right) t^{1/2} \right]^{1/2} \quad (3-7)$$

式中：

$\beta = 1 - \rho_o / \rho_w$ ； $\delta = \delta_{aw} - \delta_{oa} - \delta_{ow}$ 。

## 3.1.1.5 黄礼贤经验公式

黄礼贤等依据实验给出静水面点源瞬时溢油扩展尺度随油品种类和溢油量变化的经验公式，从而得出扩展半径  $r$  与溢油后经历时间  $t$  的统一关系为：

$$r = at^b \quad (3-8)$$

式中：

$a$ 、 $b$  — 实验常数，它们是油的性质和溢油量的函数。

## 3.1.1.6 奥库波公式

奥库波总结若干现场观测资料，认为海洋扩散导致油膜（或油膜碎片）质量

近似呈正态分布, 其均方差为:

$$\sigma = 0.001t^{1.17} \quad (3-9)$$

式中采用米—秒单位制。在各向同性条件下, 可观测到油膜周边界限保持圆形, 所以油膜范围采用油膜直径  $D$  来度量, 此时油膜直径与油膜质量分布的均方差成正比, 则:

$$D = w \cdot \sigma$$

式中:

$w$  — 比例系数, 可取  $12^{1/2}$ 。

奥库波公式只考虑了扩散作用。

### 3.1.1.7 赵文谦和武周虎提出的计算公式

赵文谦和武周虎提出应同时考虑油膜扩展和各向异性扩散作用, 以及油膜边缘的消失过程, 得到油膜扩延范围的计算公式。若以  $s$ 、 $n$  分别表示油膜的主要扩散方向和与之垂直的次要扩散方向, 则油膜在  $s$  方向的长轴尺度为:

$$D_s = K_{eq}(d_s + d_f) \quad (3-10)$$

油膜在  $n$  方向的短轴尺度为:

$$D_n = K_{eq}(d_n + d_f) \quad (3-11)$$

油膜等效圆的直径为:

$$D_{eq} = \sqrt{4A/\pi}$$

式中:

$A$  — 油膜直径;

$d_f$  — 按 (3-4) 式计算;

$d_s$ 、 $d_n$  —  $d_s = w\sigma_s$ ,  $d_n = w\sigma_n$ ;

$\sigma_s$ 、 $\sigma_n$  —  $\sigma_s = a_s t^{1.17}$ ,  $\sigma_n = a_n t^{1.17}$ , 可取  $a_s = 2.236 \times 10^{-3}$ , 及取  $a = a_s / a_n = 10^{1/2}$  或根据海况分析确定;

$K_{eq}$  — 比例因子或称折减系数, 它随时间的增加而减小, 反映油膜范围的减小和油膜最终消失时间, 当  $0 \leq K_{eq} \leq 1$  时, 按  $K_{eq} = d_s / [a + (d_s + d_f)]^{1/2}$  计算;

当  $K_{eq} > 1$  时, 取  $K_{eq} = 1.0$ ,  $d_s = 22^{1/2} a_s [\ln(Ve^{-kt} / 2\pi\sigma_s\sigma_n h_c)]^{1/2}$ ,

$k$  — 综合反映溢油挥发和溶解的油量衰减函数, 可取  $0.5$  ( $1/d$ ), 或根据油品种及海况确定,  $h_c$  为可观测到的油膜最小厚度, 一般取为  $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{mm}$ , 或

根据实际污染油膜厚度来确定。

### 3.1.2 溢油漂移

漂移速度可由下式合成：

$$\vec{u}_T = \vec{u}'_c + \vec{u}'_{10} \quad (3-12)$$

式中：

$\vec{u}_c$ 、 $\vec{u}_{10}$  分别为表面流速  $\vec{u}_c$  和风速  $\vec{u}_{10}$  引起的漂移速度矢量， $\vec{u}_T$  为表面油膜质量中心迁移矢量。

$$\vec{u}_c = k_1 \vec{u}_c, \quad \vec{u}_{10} = k_2 \vec{u}_{10}, \quad u_T = \sqrt{u_c'^2 + u_{10}'^2 + 2u_0 u_c' \cos \beta}$$

其中  $\vec{u}_{10}$  为水面上 10 米处风速， $\vec{u}_{10} = 1.39 Z_\alpha^{-1/7} \vec{u}_\alpha$ ； $Z_\alpha$  为观测点在水面以上的高度； $\vec{u}_\alpha$  为观测点风速； $K_1$ 、 $K_2$  分别为表面流和风的漂移系数， $K_1$  一般可取为 1.0，室内实验给出  $K_2 = (3.5 \pm 0.7) \%$ ，现场实验给出  $K_2 = (4.4 \pm 0.9) \%$ ，黄礼贤等在海南进行的实验给出  $K_2 = 3.5\%$ ； $\alpha$  是  $\vec{u}_{10}$  与  $\vec{u}'_{10}$  的夹角，一般采用 Ekman 解析式：

$$\alpha = \arctg \left\{ \frac{\operatorname{sh}(2\pi \frac{H}{D}) - \sin(2\pi \frac{H}{D})}{\operatorname{sh}(2\pi \frac{H}{D}) + \sin(2\pi \frac{H}{D})} \right\} \quad (3-13)$$

式中：

$D = \pi \sqrt{\nu_T / \Omega}$ ； $\nu_T$  为海洋上层垂直涡粘系数； $\Omega$  为上柯氏系数， $\Omega = w \sin \phi$ ； $w$  为地球自转角速度； $\Phi$  为纬度； $B$  为  $\vec{u}'_{10}$  与  $u'_c$ （或  $\vec{u}_c$ ）夹角； $\gamma$  为  $\vec{u}_T$  与  $u'_c$  夹角：

$$\gamma = \arctg \left( \frac{u_0 \sin \beta}{u'_c + u_0 \cos \beta} \right) \quad (3-14)$$

有文献指出能够从一些流体力学的解释中得到风力系数  $K_2$  估值，假如风应力持续地通过油面而在两种介质上的力系数相同，则能把应力方程  $\tau = \rho_a C_D u_{10}^2$  表示成  $\rho_a = \sqrt{\rho_a / \rho_{oi}}$ 。式中，空气密度  $\rho_a = 1.3 \text{ kg/m}^3$ ，阻力系数  $C_D \approx 1.4 \times 10^{-3}$ ，取决于油的成分，变化范围为  $700 \text{ kg/m}^3 \sim 980 \text{ kg/m}^3$ ，由此可见大约 4% 的风力系数控制着油膜运动。

#### 3.1.2.1 Navy 模型

Web 等人建立 Navy 模型，用来预测油轮溢油及其它情况溢油的漂移运动，

给出溢油质心经过时间  $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$  后的位移, 其计算公式为:

$$\bar{R}_s = \sum_{i=1}^n (\bar{D}_i + \bar{u}_p \Delta t_i + \bar{u}_g \Delta t_i + k_2 \bar{u}_{10} \Delta t_i) \quad (3-15)$$

式中:

$\Delta t_i$  为时段; 右边第一项代表潮流作用,  $\bar{D}_i = \bar{u}_e \Delta t_{ei} + \bar{u}_f \Delta t_{fi}$ ,  $\bar{u}_e$ 、 $\bar{u}_f$  分别为平均退潮流和平均涨潮流流速; 第二项代表河流入流的表面流作用; 第三项代表地球自转引起的表面流作用; 第四项表示风漂流作用,  $k_2$  为风漂流系数。该模型未考虑溢油的扩展和扩散情况, 只考虑了溢油的漂移运动。

### 3.1.2.2 SEADOCK 模型

Williams 等人建立油膜漂移运动模型用以预测油膜在风、海流作用下的漂移运动。在  $\Delta t_i$  时段油膜质心的位移

$$\Delta \bar{R}_i = [k_2 (a \bar{u}_{10Ni} + b \bar{u}_{10Fi}) + \bar{u}_{ci}] \quad (3-16)$$

式中:

$\bar{u}_{10Ni}$ 、 $\bar{u}_{10Fi}$  分别为  $\Delta t_i$  时段内近海和外海的风速矢量;  $a$ 、 $b$  分别为权重系数, ( $a+b=1.0$ );  $\bar{u}_{ci}$  为  $\Delta t_i$  时段内表面海流矢量。

该模型在计算油膜迁移时, 认为整个油膜在质心周围均匀地按圆形分布, 每计算一步, 都采用费伊扩展公式计算油膜的扩展直径并作为此时油膜的扩延范围, 且考虑蒸发和溶解引起的一阶衰减, 沉淀按油层体积的 1% 考虑, 风场按马而科夫模型模拟。

### 3.1.2.3 Delawane 模型

Wang 等人对潮流和风引起的油膜漂移运动 (并考虑了柯氏力的影响) 建立了油膜质心位移的计算公式:

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n (k_1 \bar{u}_c + k_3 k_2 \bar{u}_{10}) \Delta t_i \quad (3-17)$$

式中:

$\bar{u}_c$  为一表面流速, 可由潮流图表查出;  $k_1$  是漂流漂移系数;  $\bar{u}_{10}$  采用四阶自回归模型模拟;  $k_3$  是波浪对漂移的影响系数。

利用该模型计算油膜漂移时, 在惯性和粘性扩展阶段采用费伊公式计算油膜

的扩延直径，而在表面张力阶段采用奥库波公式计算。

#### 3.1.2.4 黄礼贤等人的计算模型

油膜在海流、风和重力表面张力作用下，油膜边缘上任意点在不同时间  $t$ 、不同方向  $\theta$  上的漂移速度  $\vec{u}_r(t, \theta)$  可表示为：

$$-\vec{u}_r(t, \theta) = \vec{u}_c + k_2 \vec{u}_{10} + \vec{u}_s \quad (3-18)$$

式中：

$\vec{u}_c$ 、 $\vec{u}_{10}$  含义同前； $\vec{u}_s$  为油膜的扩展速度矢量， $\vec{u}_s = d\vec{r}/dt$ ， $\vec{r}$  为油膜的扩展半径， $r = at^b$ ， $a$ 、 $b$  是溢油种类和体积的函数。

知道了油膜边缘上任意一点的速度，就可算出相应点在  $\Delta t_i$  时段的位移，从而预报油膜的漂移运动轨迹。油膜扩展半径采用口英昭等人的公式计算。

#### 3.1.2.5 Batteele 溢油模型

Batteele 将  $\Delta t_i$  时段油膜上任意一点在  $x$ 、 $y$  方向上的位移分量表示为：

$$x = \sum_{i=1}^n (k_2 u_{10xi} + u_{pxi} + \frac{r_i}{\Delta t_i} \cos \theta_i) \Delta t_i \quad (3-19)$$

$$y = \sum_{i=1}^n (k_2 u_{10yi} + u_{pyi} + u_{cxi} + \frac{r_i}{\Delta t_i} \cos \theta_i) \Delta t_i \quad (3-20)$$

式中：

$u_{px}$ 、 $u_{py}$  分别为永久流在  $x$ 、 $y$  方向上的流速分量， $\Delta t_i$  为计算时段。前三项为确定性部分，最后一项为随机部分，由紊动扩散的统计处理方法得出：

$$r_i = R \cdot \sqrt{12(E + E')\Delta t_i} \quad (3-21)$$

$$\theta_i = R \cdot 2\pi \quad (3-22)$$

式中：

$R$  是 0-1 的随机数， $E$  是均匀各向同性水体的紊流扩散系数， $E'$  是反映扩展作用的“等价扩散系数”， $\theta_i$  是随机飘移矢量  $r_i$  与  $x$  轴正向的夹角。

#### 3.1.2.6 赵文谦和武周虎瞬时溢油模型

当需要同时考虑溢油扩展和各向异性扩散作用来计算油膜扩延范围时，可采用欧拉-拉格朗日方法，求得油膜质心运动轨迹，再求油膜扩延尺度。从  $t_i$  到  $t_{i+1}$  时段油膜质心的位移矢量：

$$\Delta \vec{R}_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \vec{U}_T[x(t), y(t), t] dt \quad (3-23)$$

式中:

$$\vec{U}_T = \vec{U}'_c + \vec{U}_O, \text{ 位移矢量 } \Delta\vec{R}_i \text{ 与 } \vec{U}_T \text{ 方向一致。}$$

油膜在质心周围的分布近似为椭圆形。长轴与此时的漂移方向一致, 短轴与长轴垂直。也可计算漂移过程中边缘质点的轨迹, 以反映油膜的不规则形状和发展过程。

对油膜边界上任意点上的  $t_i$  到  $t_{i+1}$  时段的位移可分两部分计算, 第一部分为由  $\vec{U}_T$  产生的位移矢量  $\Delta\vec{R}_T$ , 其算法同质心计算方法; 第二部分为由油膜扩展及扩散引起的边界点位移  $\Delta\vec{R}_{sd}$  (沿油膜边界外法线方向), 共计算式为:

$$\Delta\vec{R}_{sd} = \Delta\vec{R}_{d_s} + \sqrt{\Delta R_{d_s}^2 \cos^2 \alpha + \Delta R_{d_n}^2 \sin^2 \alpha} \quad (3-24)$$

式中:

$$\Delta\vec{R}_{d_s} = \frac{k_{eq}}{2} \{d_s[t(i+1)] - d_s(t_i)\} \quad (3-25a)$$

$$\Delta\vec{R}_{d_n} = \frac{k_{eq}}{2} \{d_n[t(i+1)] - d_n(t_i)\} \quad (3-25b)$$

$$\Delta\vec{R}_{d_f} = \frac{k_{eq}}{2} \{d_f[t(i+1)] - d_f(t_i)\} \quad (3-25c)$$

式中:

$\alpha$  为油膜边界外法线方向与  $s$  方向的夹角。 $k_{eq}$ 、 $d_s$ 、 $d_n$ 、 $d_f$  计算公式同前。

通过矢量合成后求得油膜边界点的实际位移  $\Delta\vec{R}$  为:

$$|\Delta\vec{R}| = \Delta R = \sqrt{\Delta R_T^2 + \Delta R_{sd}^2 + 2\Delta R_T \Delta R_{sd} \cos \alpha} \quad (3-26)$$

及

$$\beta = \arctg\left(\frac{\Delta R_{sd} \sin \alpha}{\Delta R_T + \Delta R_{sd} \cos \alpha}\right) \quad (3-27)$$

### 3.1.2.7 溢油漂移模型的分析

分析上述有关溢油漂移的有关理论与模型, 不难发现, 主要存在以下两个问题:

(1) 这些理论都是基于海洋水环境研究油膜的漂移规律, 不受边界条件限制, 与河流的边界条件相差很大;

(2) 计算过程复杂, 考虑因素多, 参数多, 应用于工程实践尚有很大难度。



文献[1]认为,石油类进入水体后扩展形成油膜,在水流和风的作用下漂移,同时溢油本身扩散的等效圆油膜在不断地扩散增大。因此溢油污染范围就是这个不断扩大而在漂移的等效圆油膜所经过的水域面积。油膜在河道漂移过程中,沿水流方向的漂移是主要过程,它与溢油量无关,漂移大小可以用油膜等效圆中心位移来判断。该文献根据有关油膜漂移的模型和欧拉-兰格朗日理论,将油膜漂移模型作了如下简化:

如油膜中心在  $t_0$  时刻位于  $x_0$ , 则经过  $\Delta t$  时间后, 其位置为:

$$x = x_0 + \int_0^{\Delta t} v_0 dt \quad (3-28)$$

式中:

油膜中心漂移速度  $V_0$  是水流速度和风速的矢量和, 即:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \quad (3-29)$$

式中:

$V_1$  — 水流速度;

$V_2$  — 风速;

$$V_2 = K \cdot U_{10},$$

其中:  $U_{10}$  — 水面以上 10m 处的风速, m/s,

$K$  — 常数, 一般取为 3.5%。

## 3.2 溢油模型综述

近二、三十年来对海上石油运输的事故溢油的模拟研究可以分为两代, 第一代基本上是扩散模式, 主要分析溢油的有限寿命; 第二代模式由二维有限流体力学和油在溢出地的寿命分析组成, 是目前常用的溢油模拟方法。

### 3.2.1 国外模型<sup>[2-16]</sup>

#### 3.2.1.1 IKU风化模型

IKU石油研究部是挪威Trondheim的SNTEF的一部分, SNTEF是欧洲最大的独立研究组织之一。IKU油风化模型是以来自实验室的大量数据为基础的, 其输入部分包括实验数据(油的蒸馏曲线、新鲜油的性质、最大吸水能力及分散剂的

粘性限制等)和环境条件,模型的输出有蒸发损失、油的总质量平衡、物性变化、水含量、分散量及使用分散剂和现场焚烧的时间预测。新鲜油组分信息由蒸馏曲线给出。蒸发过程采用准组分法,公式如下:

$$dQ_i(t)/dt = -\alpha(t)Q_i(t)M(t)p_i(t)/\rho(t)h(t)RT \quad (3-30)$$

式中:

$Q_i(t)$ —单位残留面积中组分  $i$  的重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );

$\alpha(t)$ —与风速有关的质量迁移系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$M(t)$ —液体混合物的摩尔质量 ( $\text{kg}/\text{kmol}$ );

$p_i(t)$ —组分  $i$  的蒸气压 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$h(t)$ —油膜厚度 ( $\text{m}$ );

$R$ —气体常数 ( $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ );

$T$ —绝对温度 ( $\text{K}$ )。

分散过程用Delvigne & Sweeney<sup>[7]</sup>提出的经验方程计算,它结合理论分析和实验结果而建立,是目前计算分散过程中值得借鉴的方程:

$$Q_r(d_o) = C(o)D_{ba}^{0.57}SFd_o^{0.7}\Delta d \quad (3-31)$$

式中:

$Q_r$ —每单位表面面积在附近间隔为  $\Delta d$  的不同液滴大小的油液滴进入速率 ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ );

$C(o)$ —依赖于油种类和风化状态的经验进入常数;

$D_{ba}$ —单位表面面积破碎波的能量 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );

$S$ —油在海表面的覆盖率 ( $0 \leq S \leq 1$ );

$F$ —海面单位时间遭遇破碎波的分数 ( $/\text{s}$ );

$d_o$ —油颗粒直径 ( $\text{m}$ );

$\Delta d$ —油颗粒直径间隔 ( $\text{m}$ );

分散的破碎波能量由半经验关系给出:

$$D_{ba} = 0.034\rho_w g H_{rms}^2 \quad (3-32)$$

式中:

$H_{rms}$ —波场内波高的 r.s.m 值;

$\rho_w$ —海水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$g$  —重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

$w/o$  乳化物的粘度用Mackay<sup>[8]</sup>提出的公式进行计算:

$$\mu = \mu_0 \exp[2.5w/(1 - 0.654w)] \quad (3-33)$$

式中:

$\mu$ 、 $\mu_0$  —分别为风化油和初始油的粘度;

$w$  —含水率。

油的倾点、闪点和纯油粘度及吸水速率是以实验数据为基础,用非线性曲线拟合建立方程 $y=f(x)$ 来描述,其中 $y$ 是性质, $x$ 是蒸发百分数。

该模型有一大型数据库作为支撑,包括有200多种油的性质、蒸馏曲线和实验室风化数据。通过比较几种油的模拟结果和实验结果,发现对一些油用公式进行预测有一定的差异。该模型通过对原油性质的预测可估计如机械回收、用分散剂或破乳剂的化学处理及现场燃烧的有效时间。模型还可与漂流模型结合,同时跟踪几个油膜的性质。模型将来可能在以下几方面得以发展:添加清除设备数据库,为清除操作提供信息;与漂流模型如OILMAP结合,并连续计算;利用IKU中型实验数据校准分散过程的预测等。

显然,该模型是以强大的实验数据作为基础,通过由此拟和的经验方程和文献中的经验方程建立的模型既具有预测功能还具有决策功能,反映了目前建模的主流,其影响力很大。但以实验数据为主的经验预测方法虽有很大的可靠性,却不利于模型的推广和发展。

### 3.2.1.2 ADIOS<sup>[9]</sup>

ADIOS是美国NOAA/HMRAD发展的新的风化模型,它涉及三个油性质(密度、粘性和含水量)四个物理过程(扩展、蒸发、水包油分散、油包水乳化)。运算中,扩展过程用调整了的Fay公式计算,蒸发过程用Stiver & Mackay<sup>[10]</sup>式

$$df/d\Theta = \exp[6.3 - 10.3(T_o + T_g f)/T] \quad (3-34)$$

计算。分散过程用调整了的Delvigne & Sweeney (1988) 公式计算。乳化过程用Mackay<sup>[11]</sup>提出的一级速率定律计算,即:

$$d\gamma/dt = k(1 - \gamma/\gamma_f) \quad (3-35)$$

密度的计算是根据1983年Mackay等<sup>[12]</sup>模型中假设密度与蒸发分数及温度的变化成线性关系来计算的。粘度计算用Mooney公式,温度和蒸发的影响用指数

函数表述。模型有智能计算机数据库, 储存了几百种油及油产品的性质, 与油风化模型相结合。这样许多油性质是直接测量的结果, 其他的则设计成通过实验为公式提供参数。油的释放通过用户选择可以是瞬间的或一定期间连续的, 环境数据以图表形式输入。输出部分以图表来显示给定溢油的质量平衡(蒸发、分散和残留部分)及油的物性, 并显示有用的清除参考信息。与IKU相比, ADIOS是以经验方程为主体, 结合油性质数据库建立模型的。采用的方程都是被大多数建模者采用的公认的方程, 但这些方程如蒸发、乳化速率方程并未反映最新研究成果。

### 3.2.1.3 OSIS<sup>[13]</sup>

OSIS是英国的Warren Spring Laboratory (WSL) 和BMT Ceemaid Ltd (BMT) 合作制造的溢油信息系统, 其中对风化过程的模拟包括蒸发、乳化和分散对油残余量的影响及密度、粘度和闪点的变化。蒸发过程同ADIOS, 对45种油进行测验, 得出每种油的 $a$ 和 $b$ 值。乳化过程是通过随机走动跟踪模型允许油滴垂直移动来估计的。蒸发过程中油密度和粘度的变化用与蒸发体积分数成线性关系的公式来计算。乳化物的粘度用式(3-34)计算。由于实验表明不同油的参数不同, 故式中的该值用实际测试结果, 而沥青烯含量的平均值用于缺省的情况。可见, 除乳化过程外, OSIS采用的方程和ADIOS 基本相似, 但对方程的一些参数作了修正。

### 3.2.1.4 Sebastiao & Guedes-Soares的数学模型<sup>[14]</sup>

Sebastiao & Guedes-Soares于1996年提出新型的预测海上溢油风化过程的数学模型, 分别采用和OSIS相同的公式模拟溢油蒸发、乳化及粘度的变化等, 分散过程用Reed提出的公式<sup>[15]</sup>计算, 如下:

$$D = 0.11(U + 1)^2 (1 + 50\mu^{1/2} \delta S_1)^{-1} \quad (3-36)$$

式中:

$D$  — 分散使海面油每小时损失的分数;

$\delta$  — 油膜厚度 (cm);

$S_1$  — 油-水界面张力 (dyne cm<sup>-1</sup>);

$U$  — 风速 (m/s);

$\mu$  — 粘度 (cp)。

鉴于残留油量由表面蒸发和进入水体的分散产生而发生变化, 模型将各方程写成微分形式, 形成一个系统, 并用Runge-Kutta法求解, 这样使风化各过程互

相依赖,允许变量同时变化,也允许环境条件(如风速)改变,这种方式使预测更符合实际。通过与其他文献中的实验数据进行比较,发现该模型很好地预测了水的包含量、密度和粘度的变化,但可能高估了蒸发部分。模型还可以与其他的预测组件相结合,进行如溢油轨迹预测、水下输运预测等。显然该模型最大的改进是同时计算风化各过程,即将各方程联立成微分方程组来反映风化中各过程同时发生,且相互影响这一实际情况,但这种影响只表现在残留油体积同时受蒸发、分散、乳化等的影响,并未反映通过组分和状态的改变对内部的影响,这些需通过风化机理的研究找出其内在联系,而不能用数学方法简单地解决。

### 3.2.1.5 MIKE21&MIKE3-PASA模型软件<sup>[16]</sup>

丹麦水利研究所开发的MIKE21和MIKE3软件包中包含颗粒分析(PA)模块和溢油分析(SA)模块,可模拟溶解性或颗粒状污染物在水体中的对流、扩散、迁移、沉降和降解,可对各种化学品在水面、水中、水底的动态和分布进行模拟,预测污染物运动轨迹和浓度变化过程。MIKE21&MIKE3-PASA模块利用欧拉—拉格朗日理论体系计算漂移、扩散、蒸发和乳化等过程,预测溢油运动轨迹、扩散范围、影响区域。

### 3.2.1.6 Delft3D-PART模型

Delft3D模型系统由荷兰水环境研究所(delft hydraulics)开发。该模型可以对瞬间和连续排放的油等污染物进行详细的浓度分布模拟。其中溢油模块可以对漂浮并分散的油团进行模拟。Delft3D模型系统是国际上同类型软件中最先进的模拟工具之一,在世界各地已有许多成功应用的案例。

## 3.2.2 国内模型

### 3.2.2.1 张存智等的“三维溢油动态预报模式”<sup>[17]</sup>

该模型中对风化过程的模拟主要包括蒸发、乳化和由此引起的油密度和粘度。采用类似式(3-34)的Stiver & Mackay提出的公式计算蒸发率,用式(3-35)计算乳化物含水率。粘度和密度的计算同OSIS。该模型也不是以风化预测为主,而是溢油的扩散预测为主的模型,风化预测通过公开发表的经验方程来计算,没有自己的数据库作为支撑。

### 3.2.2.2 刘彦呈等的扩散漂移模型<sup>[18]</sup>

该模型主要考虑溢油的漂移、扩散、蒸发和乳化4个过程。模型运用“油粒子”的概念，每个油粒子代表一定的油量，在表层海流的作用下漂移；而油膜的扩展受到“油粒子”尺寸分布、剪切流和湍流过程的控制，通过油粒子的随机运动来实现；油的蒸发、消散过程则由“油粒子”的质量损失来体现；油膜厚度分布则通过一定海面面积内油粒子的个数、体积、质量来计算得到。油粒子模型是在 $\Delta t$ 时间内将溢油运动过程分成两个主要的部分，即平流过程和扩散过程，用确定性方法模拟平流过程，用随机走动法模拟扩散过程。在已知前一步油粒子位置的前提下，经过 $\Delta t$ 时间后，油粒子的空间位置可以表示为：

$$\begin{aligned} X_i^* &= X_i^n + (U_i^n + U_i^{n+1})\Delta t/2 \\ X_i^{n+1} &= X_i^* + \Delta X_i' \end{aligned} \quad (3-37)$$

其中向量 $X_i^*$ 代表第 $i$ 个粒子在 $n\Delta t$ 时刻的空间位置；向量 $U_i^n$ 代表在 $n\Delta t$ 时刻 $X_i^n$ 点的总速度，包括漂移即油滴的上浮速度；随机向量 $\Delta X_i'$ 代表第 $i$ 个粒子以 $X_i^*$ 点为起点随机走动的距离。

漂移速度主要包括潮流、风生流速度。潮流速度由三维潮流场模拟计算给出；风生流分两部分，一是风生海流，二是风导漂流。在具备了海面风场之后，可直接由如下经验公式计算风生海流速度：

$$U_w = \alpha \cdot D \cdot w_{10} \quad (3-38)$$

式中， $w_{10}$ 为海面以上10m高度处的风速； $\alpha$ 为风漂移因子，取值范围为0.03~0.035； $D$ 为风场转换矩阵。

风导漂流是风直接作用于油膜上的切应力使油膜产生的漂移，漂移速度约为风速的2%，风偏角约为15°。

油滴的上浮速度是由于入水油滴在浮力的作用下产生的。油滴的尺寸影响其上升速度，区分大油滴和小油滴的临界直径为：

$$d_c = \frac{9.52\nu^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{1}{3}} \cdot (1 - \frac{\rho_o}{\rho_w})^{\frac{1}{3}}} \quad (3-39)$$

式中， $\nu$ 为海水的运动粘性系数； $\rho_o$ 为油的密度； $\rho_w$ 为海水的密度。

对于小油滴（ $d_i < d_c$ ），其上升速度由Stokes定律给出，即：

$$u_{LS} = gd_i^2 (1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}) / (18 \cdot \nu) \quad (3-40)$$

对于大油滴，其上升速度由Reynolds定律给出，即：

$$u_{LR} = \sqrt{\frac{8}{3} \cdot gd_i^2 (1 - \frac{\rho_o}{\rho_w})} \quad (3-41)$$

对于三维情况，水平扩展随机走动的距离可写为：

$$\Delta\alpha = R \cdot \sqrt{6K_\alpha \Delta t} \quad (3-42)$$

式中， $\Delta\alpha$  为  $\alpha$  方向上的湍动扩散距离； $R$  为  $[-1, 1]$  之间的均匀分布随机数； $K_\alpha$  为  $\alpha$  方向上的湍流扩散系数； $\Delta t$  为时间步长。垂直向随机走动的距离为：

$$\Delta Z = \xi \sqrt{6K(z)\Delta t} \quad (3-43)$$

垂向涡动系数采用 Lchiye 的公式，即：

$$K_{wave} = 0.028 \left( \frac{H_s^2}{T} \right) e^{-2kz} \quad (3-44)$$

式中， $H_s$  为有效波高； $k$  是波数； $T$  是波周期； $z$  是深度。

蒸发系数定义为：

$$\theta' = \frac{k' A t}{V_0} = \frac{k' t}{\delta} \quad (3-45)$$

式中， $k' = 2.5 \times 10^{-3} u_w^{0.78}$ ； $u_w$  为海面以上 10m 处的风速； $A$  为油膜的面积； $V_0$  为溢油的初始体积； $t$  为时间。

蒸发率是蒸发系数、沸点温度等因素的函数，写为：

$$F_v = \ln[1 + B' \left( \frac{T_G}{T} \right) \theta' \cdot \exp(A' - B' \frac{T_0}{T})] \frac{T}{B' \cdot T_G} \quad (3-46)$$

式中， $F_v$  为蒸发率； $A' = 6.3$ ； $B' = 10.3$ ； $T_G$  为沸点曲线的梯度； $T$  为油的温度； $T_0$  为油（在  $F_v = 0$  时）的初始沸点温度。

用含水率表征乳化程度：

$$Y_w = \frac{1}{K_B} (1 - e^{-K_A K_B (1 + u_w)^2 t}) \quad (3-47)$$

其中， $Y_v$  为乳化物的含水量（%）； $K_A = 4.5 \times 10^{-6}$ ； $u_w$  为风速； $K_B = 1/Y_w^F \approx 1.25$ ， $Y_w^F$  为最终含水量； $t$  为时间。

### 3.2.2.3 王长海的扩散漂移计算模式<sup>[19]</sup>

假定海面上漂浮着有一定厚度的、较为稠密的油膜是由有限个彼此独立、互不干扰的油质点组成。它们分别受水流影响，独自漂移。即不会发生碰撞，也不会发生混合。油质点的数量是由绘图精度要求确定，要求能充分反映出油膜状态即可。在以上假定条件下，对任一油质点可采用拉格朗日法计算，公式如下：

$$x_i = x_{i0} + u\Delta t + E_x\Delta t + \alpha R(E_x + u)\Delta t \quad (3-48)$$

$$y_i = y_{i0} + v\Delta t + E_y\Delta t + \alpha R(E_y + v)\Delta t \quad (3-49)$$

式中：

$x_{i0}$ 、 $y_{i0}$ —分别是第*i*个油质点即时位置；

$x_i$ 、 $y_i$ —分别是第*i*个油质点经过 $\Delta t$ 时间后的位置；

$u$ 、 $v$ —分别是 $x$ 、 $y$ 方向流速，它是由潮流、风流、波流的合成值，流速数据由流场计算结果提供；

$\Delta t$ —时间步长；

$E_x$ 、 $E_y$ —分别是 $x$ 、 $y$ 方向的扩散系数，可由实测资料给定，或由下式计算：

$$E_x = 5.93\sqrt{g}|u|H|C| \quad (3-50)$$

$$E_y = 5.93\sqrt{g}|v|H|C| \quad (3-51)$$

式中：

$R$ —随机参数，取 $-1\sim 1$ 之间一随机数，这一参数主要用于修正风、浪、流的随机作用；

$\alpha$ —系数： $\alpha < 1$ 。

王常海的模型将欧拉法与拉格朗日法有机结合，是一种计算溢油漂移扩散的简便方法，最大特点是可操作性强，并且充分利用计算机的功能，将计算结果可视化，缩短人与计算机之间距离，实用价值较高。

### 3.3 本章小结

本章首先介绍了溢油模型的相关理论，然后对国内外已有模型做了概述，不难发现，国外的相关模型软件与国内的模型相比较为成熟，具有较高的实用价值，在实践中应用较广。本文拟选用Delft3D-PART模型软件开展黄浦江突发性溢油污染事故的模拟研究。



## 参考文献

1. 武周虎. 不平静海面溢油的扩展、离散和迁移模型. 成都科技大学研究生毕业论文, 1987
2. 严志宇, 熊德琪, 殷佩海. 海上溢油风化模型评述. 大连海事大学学报, 2001, 27(4): 36~39
3. 李琼. 海上溢油风化预测系统的研制. 大连海事大学硕士学位论文, 2002
4. 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. 天津大学硕士学位论文, 2004
5. 严志宇. 海上溢油风化过程的研究及模拟. 大连海事大学博士学位论文, 2001
6. Ole Morten Aamo, Mark Reed, Daling P S, et al. A Laboratory-Based Weathering Model of Version for Coupling to Transport Model. Proceedings of 16th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1993: 23~32
7. Delvigne G and Sweeney C. Natural Dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution, 1988(4): 281~310
8. Mackay D, Buist I, Mascarenhas R, et al. Oil Spill Processes and Models. Toronto: University of Toronto, 1980
9. Lehr W J, Overstreet R. ADIOS. Automated Dater Inquiry for Oil Spills. Proceedings of the Fifteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1992: 31~45
10. Stiver W, Mackay D. Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbons and Petroleum Mixtures. Environ Sci Tech, 1984, 18(11): 834~840
11. Mackay D. A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour. Environment Canada Manuscript Report, 1980
12. Mackay D, Stiver W and Teveau P. Testing of Crude Oils and Petroleum Products for Environmental Purposes. 1983 Oil Spill Conf, 1983: 331
13. Leech Martin, Walker Michael. OSIS: A Windows 3 Oil Spill Information System. Proceedings of 16th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1993: 549~572
14. Sevastial P, Guedes-Soares C. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. Spill Science & Technology Bulletin, 1995, 5(2/3): 121~131
15. Reed M. The Physical Fates Component of the Natural Resource Damage

- Assessment Model System. Oil Chem Pollut,1989,5(2,3):99~123
16. Danish Hydraulic Institute(DHI).MIKE21&MIKE3:Particle Analysis and Oil Spill Analysis Module Reference Manual.2000
17. 张存智,窦振兴,韩康等.三维溢油动态预报模式.海洋环境科学,1997,16(1):22~29
18. 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.大连海事大学学报,2002,28(3):41~44
19. 王长海.溢油漂移扩散计算模式初步研究.交通环保,2000,21(2):7~9

## 第四章 Delft3D-PART 模型理论

Delft3D-PART 是 Delft3D 模型软件系统的一个模块,是一个三维质点追踪模型。它可以通过跟踪大量的粒子随时间的变化来计算动态浓度分布。该模型可以对瞬间和连续排放的油、保守物质或一级衰减物质进行详细的浓度分布描述。其中溢油模块可以对漂浮并分散的油团进行模拟。

### 4.1 模型简介<sup>[1]</sup>

#### 4.1.1 物理系统

Delft3D-PART 模拟物质的迁移过程和简单的化学反应,可对废物斑的具体形状进行模拟。

该系统包括以下一些组成:

- 水系统

湖泊、河口、海港或河流,包括潮汐变化。该系统可能向其他水体有开放的边界。

- 人类活动产生的泄漏。
- 快速化学反应产生的化学物质,如若丹明 (thodamine)、盐、油、需氧量等。
- 物理量,如温度和密度。
- 风场。
- 溶解物质及/或颗粒物质。

#### 4.1.2 过程

Delft3D-PART 模拟的物理过程包括:

- 泄漏点附近油膜的动力学特征。
- 简单的一级衰减过程。许多油膜的衰减都是这种过程。
- 完全混合系统的垂直扩散。

- 紊流引起的水平扩散。根据紊流理论，该过程随时间增加。
- 随时间变化的风场对油膜的影响。
- 底部摩擦对油膜的影响。
- 在一个预测或实测半径基础上开始的模拟，在泄漏点处（点源除外）存在一个初始油斑。
- 颗粒的沉降和再悬浮。

## 4.2 模型原理

Delft3D-PART 是基于以下原理建立的随机走动颗粒追踪模型：水中溶解（或颗粒）物质的运动可以描述为服从水流所引起的对流的有限多数量的离散粒子及其水平和垂直扩散。因此油粒子的运动包括两项，对于每一个时间步长，第一项是水流（底部）和风（表面）的剪切压力引起的对流；第二项是一个随机走动步长，其运动的尺寸和方向是一个与水平和垂直扩散有关的随机过程。

### 4.2.1 扩散系数

扩散系数是随机扩散过程需要输入的参数。水平向和垂直向的扩散系数分别处理。

#### 4.2.1.1 水平扩散

颗粒追踪模拟中，水平扩散系数与时间有关。溢油初期，颗粒团相对较小，颗粒的混合仅由小范围的紊动引起；经过一段时间，颗粒团将充分扩展，此时大范围的漩涡和环流也将对混合发生作用。

扩散系数模拟的是水力中未考虑的紊动的作用。

#### 紊动模型

紊动扩散引起的速度与平均水力速度的偏差很小，且这些偏差之间存在一定程度的相关性，从而产生一个净额外偏差，这个净额外偏差的方向是随机的。因此，用弥散来模拟该作用是恰当的。

由于 Delft3D-PART 是三维动力学模型，扩散系数较小（ $1\text{m}^2/\text{s}$  级），此时紊动过程与时间有关。利用动力学气体理论，分子扩散  $E$  表示为：

$$E = \int_0^t \langle \vec{v}(0) \cdot \vec{v}(\tau) \rangle d\tau \quad (4-1)$$

其中  $\langle \vec{v}(0) \cdot \vec{v}(\tau) \rangle$  称为 Lagrangian 相关系数, 利用 Brownian 运动理论, 它可被替代为:

$$\langle \vec{v}(0) \cdot \vec{v}(t) \rangle = |\vec{v}_0|^2 e^{-t/t_L} \quad (4-2)$$

其中  $t_L$  是一个合适的时间范围。由此推出扩散系数的表达式:

$$E = v_0^2 t_L (1 - \exp(-t/t_L)) \quad (4-3)$$

该函数的两个限分别为大的  $t_L$  对应的  $E=at$  和小的  $t_L$  对应的  $E=a$ 。在 Delft3D 中, 假定扩散过程可用同样的方法描述, 而扩散系数是一个介于两个限 ( $0 < b < 1$ ) 之间的函数, 由此推出:

水平向扩散系数定义为:

$$D_{x,y} = at^b \quad (4-4)$$

其中参数  $a$  和  $b$  通过模型的校准得出。时间  $t$  从  $t=0$  开始, 即进行扩散计算所用的颗粒释放的时间。

底部剪切力

底部剪切力由下式计算:

$$\tau_b = \frac{\rho g \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} \quad (4-5)$$

式中:

$\tau_b$ —底部剪切力 (Pa);

$\rho$ —水的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$u$ —底层  $x$  向流速 ( $\text{m/s}$ );

$v$ —底层  $y$  向流速 ( $\text{m/s}$ );

$C$ —薛氏系数 ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ );

$g$ —重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

若底部剪切力小于沉淀所需的临界剪切力, 接触到底部的颗粒就会粘附在底部 (沉淀)。对于沉淀, Delft3D-PART 产生一个额外的沉淀层。

若底部剪切力大于沉淀所需的临界剪切力, 接触到底部的颗粒就会重新进入水体。

$t$  时刻的颗粒沉降速率用下式计算:

$$v_s = c^n \times \left[ A_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi(t+\phi)}{T}\right) \right] \quad (4-6)$$

式中:

$c$ —颗粒浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$n$ —用于调节与浓度相关的沉降速率的指数;

$A_0$ —非周期性沉降速率 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$A_1$ —振幅 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$T$ —周期 (hours);

$\phi$ —正弦变化的滞后时间 (hours)。

方括号前的因数可用来定义一个与浓度相关的沉降速率。如果指数  $n$  设为  $n=0$ , 那么沉降速率就是时间的一个简单正弦函数。

注意, 当  $v_s$  的值为负数, 颗粒将向着水面的方向向上移动。

#### 4.2.1.2 垂直扩散

垂直扩散系数可以定义为常数, 也可以由 Delft3D-PART 根据如下法则自动进行计算。

对于完全混合、水平均一的流场, 垂直扩散系数可以通过混合长度和紊动能进行估计:

$$D_z = \frac{c_\mu^{1/4} L \sqrt{k}}{\sigma_c} \quad (4-7)$$

式中:

$D_z$ —垂直扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$c_\mu$ —常数,  $\approx 0.09$ , 用于校准当地平衡剪切层;

$L$ —混合长度 ( $\text{m}$ );

$\sigma_c$ —Prandtl-Schmidt 数;

Bakmethev 混合长度可用下式估计:

$$L = \kappa(H-Z)(Z/H)^{1/2} \quad (4-8)$$

其中:

$\kappa$ —von Kármán 常数 ( $=0.41$ );

应该注意的是,  $Z$  坐标是向下的, 即,  $Z=0$  是在水面而  $Z=H$  是在水底 ( $H$

为水深)。

假定紊动动能是线形的:

$$k = k_b(Z/H) + k_s(1 - Z/H) \quad (4-9)$$

其中:

$k_b$ —底部附近的紊动动能;

$k_s$ —表面附近的紊动动能。

底部和表面紊动动能之间的经验关系从 Delft3D-FLOW 所用的 k-L 紊动模型获得, 即:

$$\begin{aligned} k_b &= \frac{\dot{u}_b^2}{\sqrt{C_\mu}} = \frac{\tau_b}{\sqrt{C_\mu} \rho_0} \\ k_s &= \frac{\dot{u}_s^2}{\sqrt{C_\mu}} = \frac{\tau_w}{\sqrt{C_\mu} \rho_0} \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中:

$\tau_b$ —底部剪切力 (Pa);

$\tau_w$ —风压 (Pa);

$\rho_0$ —水的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

剪切力由下式获得:

$$\begin{aligned} \tau_b &= \frac{g \rho_0 |v|^2}{C_{2D}} \\ \tau_w &= \rho_a C_d |w|^2 \end{aligned} \quad (4-11)$$

式中:

$g$ —重力常数 ( $=9.81\text{m/s}^2$ );

$\rho_a$ —空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$C_{2D}$ —二维公式的薛氏常数 (除非特别说明, 否则在沉淀/腐蚀模型中  $C_{2D} = 50\text{m}^{1/2}\text{s}$ );

$C_d$ —自由表面的风拖曳系数 ( $=0.0013$ );

$|v|$ —水平流速 (Delft3D-FLOW 算得);

$|w|$ —水面以上 10m 处风速。

垂直扩散模型 (即 k-L 模型) 是将上式带入垂直扩散系数表达式得到的:

$$D_z(z') = \frac{\kappa}{\sigma_c} H(1-z') \sqrt{z'} \sqrt{u_{*b}^2 z' + u_{*s}^2 (1-z')} \quad (4-12)$$

其中:  $z' = Z/H$ 。

Delft3D-PART 不用空间变化的扩散系数, 因为这样会引起多余的随机误差, 在三维模型中可以用垂向平均的垂直扩散系数。

$D_z$  的垂向平均关系由上式积分得到:

$$\begin{aligned} \bar{D}_z &= \frac{\kappa H}{\sigma_c} \int_{z'=0}^{z'=1} \sqrt{u_{*b}^2 z'^2 (1-z')^2 + u_{*s}^2 z' (1-z')^3} dz' \\ &\approx \frac{\kappa H}{\sigma_c} \left[ \int_{z'=0}^{z'=1} \sqrt{u_{*b}^2 z'^2 (1-z')^2} dz' + \int_{z'=0}^{z'=1} \sqrt{u_{*s}^2 z' (1-z')^3} dz' \right] \\ &= \frac{\kappa H}{\sigma_c} \left[ \frac{u_{*b}}{6} + \pi \frac{u_{*s}}{16} \right] \end{aligned} \quad (4-13)$$

#### 4.2.2 溢油模块

Delft3D-PART 模块计算油的输移、扩展、蒸发和分散。输移可以是二维或者三维的, 油可能漂浮在水面上或者被分散进入水体; 油的分散, 也称夹带, 是由破碎波 (由风引起) 产生的, 根据 Delvigne 等 (1986) 的公式计算; 蒸发是简单的一级衰减过程。

##### 4.2.2.1 油的溢出

油可以是瞬间溢出或连续溢出, 瞬间溢油的初始半径可以自己定义, 也可以由 Delft3D-PART 自动进行计算, 计算公式如下 (Fay 和 Hoult, 1971):

$$R_0 = \frac{k_2^2}{k_1^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{V_0^{\frac{1}{2}} g \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right)}{v_w^2} \right)^{1/12} \quad (4-14)$$

式中:

$V_0$ —溢油的初始体积 ( $\text{m}^3$ );

$\rho_o$ —油的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_w$ —水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$g$ —重力常数;

$v_w$ —水的运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );



$k_1, k_2$ —Fay 常数。

该公式描述的是重力扩展阶段后油膜的半径，此时油膜的厚度通常小于 1mm。在连续溢油模拟中不推荐用这种方法，而是根据已知信息来定义半径。

#### 4.2.2.2 风引起的表面油的漂移

表面油的平流输运是由风引起的，这已在文献中广泛发表<sup>[2-4]</sup>。风和浪引起的流通常用经验的与当地风向和风速相关的偏移因子和偏转角来表示。漂移速度通常为风速的 2.5~4.4%，均值为 3.5%；偏转角为风向北半球偏右、南半球偏左 0~25°，均值为 15°。对于表面漂浮的油，风对漂移的影响关系为：

$$C_{wd}(V_w - V_f) \quad (4-15)$$

式中： $C_{wd}$ 为风拖曳系数， $V_w$ 为风速， $V_f$ 为流速。

偏转角与风速无关，与纬度和风强度有关。

#### 4.2.2.3 油的蒸发

蒸发作为一级衰减过程考虑，衰减部分可以通过衰减常数（可以是时间序列）来定义，也可以定义每天衰减一定的量。

$$\frac{dm}{dt} = -k_E t \quad (4-16)$$

式中： $k_E$ 为蒸发率（1/d）； $t$ 为时间（d）。

#### 4.2.2.4 油的分散（夹带）

浮油的分散或水包油夹带作为零级衰减过程考虑，分散速率与油的浓度无关，只与油膜消耗的波能量和油品有关。

在 Delft3D-PART 中，分散速率可以通过两种方法计算，一是通过定义衰减常数  $k_D$ ：

$$\frac{dm}{dt} = -k_D t \quad (4-17)$$

式中： $k_D$ 为分散率（1/d）； $t$ 为时间（d）。

第二种方法是由 Delft3D-PART 直接计算。分散速率  $Q$ （kg/m<sup>2</sup>/s）由如下关系式（NOAA,1994；Delvigne 和 Sweeny,1988；Delvigne 和 Hulsen, 1994）获得：

$$\begin{aligned}
Q &= \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Q(d) dd \\
Q(d) &= C'' D_e^{0.57} F_{wc} N(d) d^3 \\
N(d) &= N_0 d^{-2.3} \\
D_e &= 0.0034 \rho_w g H_0 / \sqrt{2} \\
H_0 &= \frac{0.243 U_w^2}{g} \\
F_{wc} &= \frac{f_w}{t_p} \\
t_p &= 8.13 U_w / g \\
f_w &= \max(0.0; 0.032(U_w - 5.0))
\end{aligned} \tag{4-18}$$

式中:

- Q — 分散速率 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ );
- $Q(d)$  — 粒径为  $d$  的油滴单位粒径的分散速率 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ );
- $d$  — 油滴粒径 ( $\text{m}$ );
- $d_{\min}$  — 最小油滴粒径 ( $\text{m}$ );
- $d_{\max}$  — 最大油滴粒径 ( $\text{m}$ );
- $C''$  — 油常数 (校准系数, 与油品有关);
- $N(d)$  — 油粒子尺寸权重函数;
- $N_0$  — 标准化常数;
- $D_e$  — 单位表面积上消耗的波能量 ( $\text{J/m}^2$ );
- $F_{wc}$  — 单位波周期内破碎波的量;
- $t_p$  — 波周期峰值 ( $\text{s}$ );
- $U_w$  — 风速 ( $\text{m/s}$ );
- $f_w$  — 海上白帽浪覆盖的部分。

这里, 白帽浪的形成是根据 Holthuijsen 和 Herbers (1986) 的理论, 形成白帽浪的最低风速为  $5\text{m/s}$ , 最小油滴粒径  $d_{\min}$  可近似为 0; 又根据 NOAA(1994),  $d_{\max}$  可取 70 微米。

定义一个新的校准参数  $C_0$ , 得到  $Q$  的表达式如下:

$$Q = 5.08 \cdot 10^{-8} C_0 S_{\text{cov}} D_e^{0.57} F_{wc} \tag{4-19}$$

式中:

$Q$  — 分散速率 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ );

$C_o$  — 油常数 (校准参数);

$S_{\text{cov}}$  — 考察区域海面被油覆盖的比例;

$D_e$  — 单位面积上消耗的波能量 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );

$F_{\text{wc}}$  — 单位波周期内破碎波的量。

#### 4.2.2.5 油的粘附

油可能会粘附在岸上或水底。每个油粒子随机取一个介于 0 到 1 之间的数, 当这个数小于给定的数时, 该油粒子则粘附在岸上或水底。

#### 4.2.2.6 油的沉降

溢油可能会随水中的颗粒沉降或由于发生反应变成比水重的物质而沉降, 不过沉降的量通常可以忽略, 因为大部分的油和油制品都比水轻。

#### 4.2.2.7 油的风化

溢油的风化过程如乳化在模型重不做具体的计算, 风化过程造成的蒸发损失可以用一个时间序列的衰减常数来定义。

### 4.3 模型所需资料和参数

#### 4.3.1 水力资料: 水量和水流

这些资料是在 Delft3D-FLOW 模块运行后通过耦合产生的。决定溢油的平流输运和用于稀释污染物质的水量。

#### 4.3.2 风拖曳系数

在二维流场模拟中相当于在深度方向的风场; 在溢油模块中决定风对油漂移的影响。Delft Hydrolics 的经验表明在 Delft3D-PART 的应用中, 取 1%~4%较为合适。

#### 4.3.3 风场

包括水面以上 10m 处风速和风向 (与正北向的夹角)。在溢油模块中, 风场资料用于计算水包油分散率。

#### 4.3.4 偏转角

偏转角表示风向和由风引起的油的漂移方向之间的夹角, 跟纬度有关, 通常为风向北半球偏右、南半球偏左  $0\sim 25^\circ$ , 均值为  $15^\circ$ 。

#### 4.3.5 粗糙长度

描述三维速度场底部剪切力的对数分布。推荐值为 0.02m。

#### 4.3.6 扩散参数 a 和 b: 用于计算水平扩散系数

对于短期的模拟, 参数 a 最重要; 而对于长期的模拟, 参数 b 最重要。这两个参数应通过模型的校准确定或听从专家的建议。

#### 4.3.7 溢油量

瞬时溢油的溢油量; 连续溢油的溢油速度和浓度, 或质量流速。

#### 4.3.8 溢油的时间和位置

应精确定义溢油的时间和位置。

### 4.4 模型的输出文件

Delft3D-PART 的输出文件有两种, 即历史文件和图形文件。历史文件是各个观测点的计算结果时间序列; 图形文件包含模拟范围内每个单元格的计算结果, 是单元格平均浓度。

这些输出文件可以在 Delft3D-GPP(后处理)模块中看到, 并可以输出成其他类型的文件以便分析和讨论。

### 参考文献

1. Delft3D-PART User Manual.WL | Delft Hydraulics, the Netherlands, March, 2003: 6-1~6-14
2. 张秀芝,李筠,隋俨等.海上溢油风化特性及化学分散效果的影响因素研究.海洋环境科学,1997,16(3):40~45
3. 赵云英,杨庆霄.溢油在海洋环境中的风化过程.海洋环境科学,1997,16(1):45~52
4. Committee on Oil in the Sea. Inputs, Fates, and Effects, National Research Council. Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Washington, D.C.,2003:89~118

## 第五章 溢油事故模拟模型的建立及率定和验证

黄浦江是一条湖源感潮型河流。目前针对黄浦江开发的水环境数学模型，大多为一维模型，模型计算网格划分较粗。实际上黄浦江干流江面相对较宽，采用一维模型不能很好地模拟黄浦江干流的水环境状况。

本文针对黄浦江弯曲地形边界的特点，采用正交曲线网格数学模型，灵活地模拟复杂地形边界，较好地满足了研究需要。首先采用 Delft3D-FLOW 二维水动力模型模拟干流的水动力状况，在此基础上建立二维溢油漂移扩散模型，模拟分析黄浦江突发性溢油事故排放的漂移扩散影响。

### 5.1 水动力模型的建立和率定、验证

利用 Delft3D 模型软件的 Delft3D-FLOW 模块，建立流场模型。对黄浦江水动力及物质输运模拟计算，网格划分在平面上采用正交曲线网格，计算时应进行坐标变换使不规则区域转化为规则区域，见图 5-1。

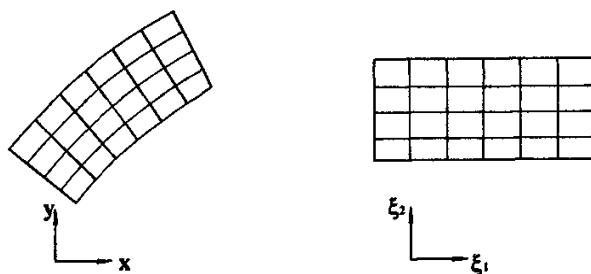


图 5-1 曲线坐标平面变换示意图

#### 5.1.1 水动力模型基本方程

直角坐标下二维水动力基本方程如下：

动量方程：

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial q_1}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial q_1^2}{\rho H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_1 q_2}{\rho H} \right) \right] + \rho g H \frac{\partial \eta}{\partial x} - \varepsilon \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial q_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial q_1}{\partial y} \right) \right] \\
& + \frac{g q_1 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{\rho C^2 H^2} - f q_2 = F_x \\
& \frac{\partial q_2}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial q_2^2}{\rho H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_1 q_2}{\rho H} \right) \right] + \rho g H \frac{\partial \eta}{\partial y} - \varepsilon \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial q_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial q_2}{\partial y} \right) \right] \\
& + \frac{g q_2 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{\rho C^2 H^2} - f q_1 = F_y
\end{aligned} \tag{5-1}$$

连续方程:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = 0 \tag{5-2}$$

式中:

$H$ —水体总深度;

$q_1$ 、 $q_2$ —分别为  $x$ 、 $y$  方向上的单宽流量;

$\varepsilon$ —涡动粘性系数;

$g$ —重力加速度;

$n$ —Manning 系数;

$c$ —Chezy 系数,  $c = \frac{1}{n}(H+h)^{\frac{1}{6}}$ ;

$F_x$ 、 $F_y$ —分别为  $x$ 、 $y$  方向上的风应力分量;

$f$ —科氏系数,  $f = 2\omega \sin \psi$ ,  $\omega$  为地球自转角速度,  $\psi$  为当地纬度。

在曲线坐标中, 上述方程式尚不能直接应用, 须经由曲线坐标转换后, 变成正交曲线坐标下基本方程式。采用 ADI 法离散方程求解。

### 5.1.2 计算区域确定和边界条件处理

#### 5.1.2.1 计算范围及河流概况

研究范围为黄浦江米市渡至吴淞口河段。该河段长约 80km, 江面一般宽 300~500m, 最宽处约 800m, 水深一般在 5~15m 之间, 最深可达 20m 左右。

黄浦江是上海市最大的河流, 自淀峰至吴淞口全长 114.5km, 流经全市 8 个区县, 是一条多功能河流。黄浦江是长江的最后一条支流, 其上游分为三支, 一

为斜塘（接太浦河），二为园泄泾（接浙江省的红旗塘），三是大泖港。三条支流在松江米市渡上游汇合。1991 年太浦河开通后汇入泖河，水量大增，成为主要水源。红旗塘—大蒸塘—园泄泾，主要承泄太湖及浙江杭嘉湖地区来水，两支汇合后成为横潦泾。大泖港主要承泄杭嘉湖地区的沪杭铁路以南及金山西南部地区来水，大泖港汇入横潦泾后为竖潦泾，东流至松江米市渡。

黄浦江多年平均流量约  $316\text{m}^3/\text{s}$ ，受长江潮汐影响，每天有两次涨落潮，属非正规半日潮。潮周期（两涨、两落）为 24.83 小时。吴淞口历年最大潮差达 4.5m。涨潮时长江水从吴淞口倒灌入黄浦江及其支流，上溯较远，最远可达淀山湖。黄浦江上游水体含沙量很少，河床相当稳定，但下游受长江来沙影响，含沙量稍高，河口有“洪淤枯冲”现象。

黄浦江承泄太湖 70%-80% 的来水。米市渡多年平均净泄流量为  $318\text{m}^3/\text{s}$ （1954-1983），但年际分配不均。丰水年（1954）年平均流量为  $755\text{m}^3/\text{s}$ ，枯水年（1979）年平均流量为  $153\text{m}^3/\text{s}$ 。由于受高潮顶托和上游农业用水的影响，黄浦江汛期 5~9 月份年平均流量为  $304\text{m}^3/\text{s}$ ，而非汛期 1~4 月、10~12 月平均流量为  $328\text{m}^3/\text{s}$ ，说明黄浦江汛期洪水下泄不畅，而非汛期则较容易排出。

#### 5.1.2.2 边界条件

米市渡边界水文资料由黄浦江水系河网一维水动力模型计算产生。吴淞口水文资料采用同期实测水位资料。地形资料采用 1992 年航道局实测水深。以吴淞基面作为计算基面。

模型边界水位、流量分别见图 5-2 和图 5-3。

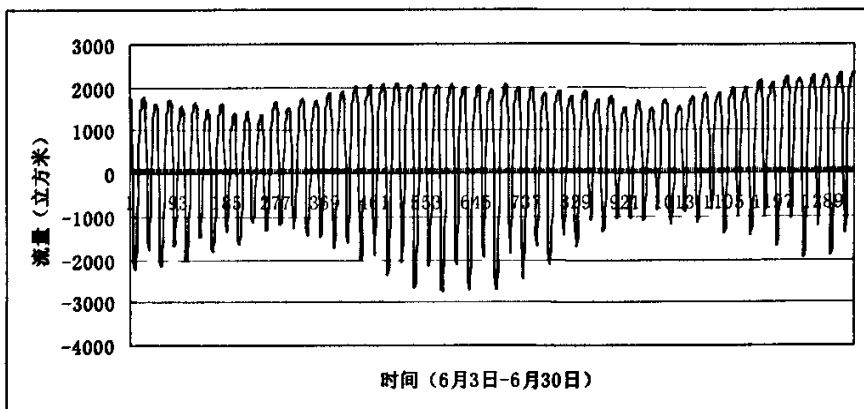


图 5-2 米市渡流量过程

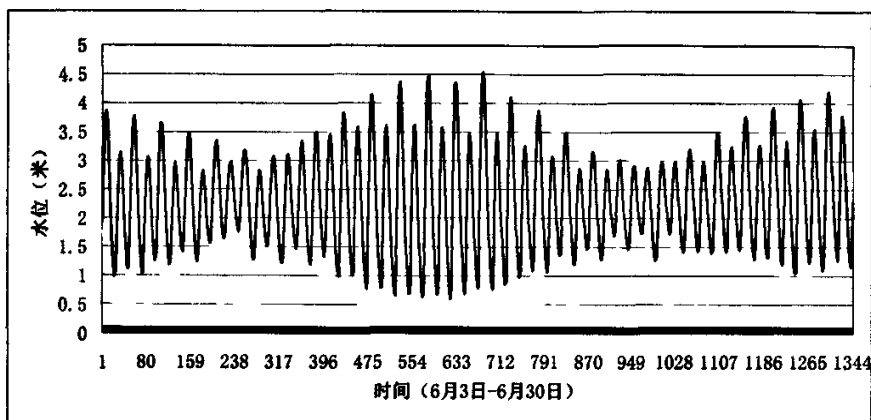


图 5-3 吴淞口水位过程

### 5.1.2.3 计算网格划分和边界条件确定

#### (1) 网格划分

根据计算区域岸线曲折这一特点, 本模型采用正交曲线计算网格。网格间距一般在  $50 \times 500\text{m}$ 。图 5-4 是黄浦江局部区域计算网格。

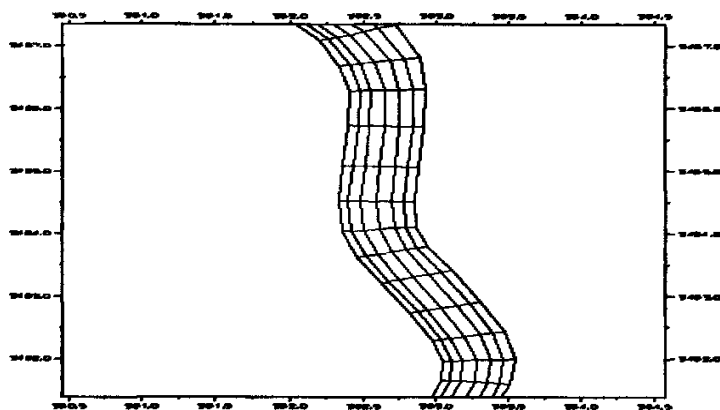


图 5-4 黄浦江 (局部) 曲线计算网格

#### (2) 时间步长

$$\Delta t < \frac{\Delta L}{\sqrt{gH_{\max}}}$$

计算中取  $\Delta t = 2$  分钟。

#### (3) 阻力系数

方程中的阻力项, 近似采用谢才公式:

$$C = \frac{1}{n} H^{1/6}$$



式中,  $n$  是曼宁阻力系数, 经过试算, 确定  $n=0.020\sim0.022$  之间。

### 5.1.3 黄浦江水动力模型验证计算

对前述建立的水动力模型, 利用 1999 年 5 月 26 日~8 月 31 日同步水文监测资料进行率定和验证, 上游边界取实测米市渡流量过程, 下游边界取吴淞口整点潮位 (其中部分日期有详细的以分钟计的流量和潮位资料), 输出控制断面的流量、水位计算值与实测值比较。计算结果如图 5-5 和图 5-6 所示, 计算时段内无论是水位还是流量的大小和方向都与实测值相当吻合, 误差非常小。上述水位及流量率定验证结果表明: 该二维模型参数选取合理, 能够反应黄浦江干流的实际情况, 说明水动力建模是成功的, 可以与溢油模型相衔接。

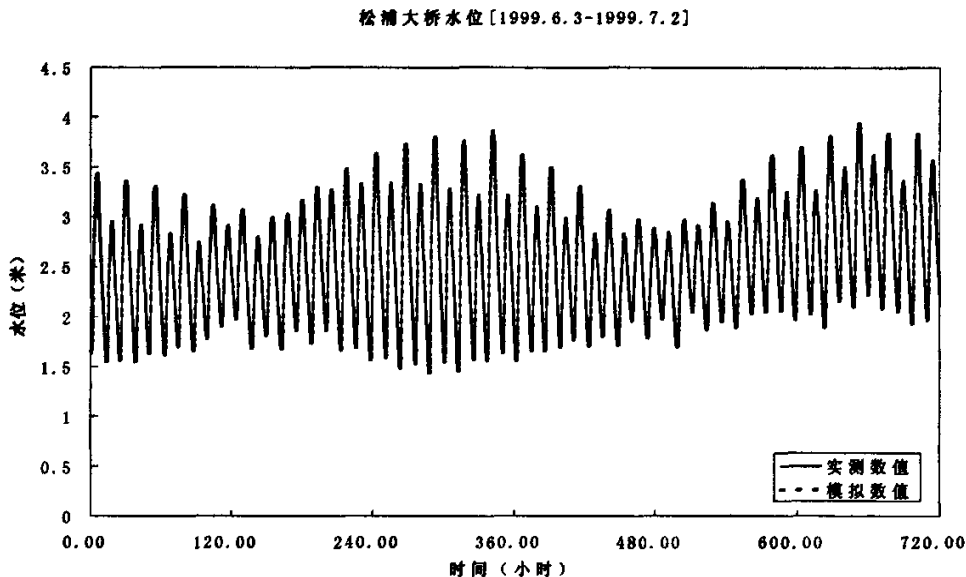


图 5-5 松浦大桥水位验证结果

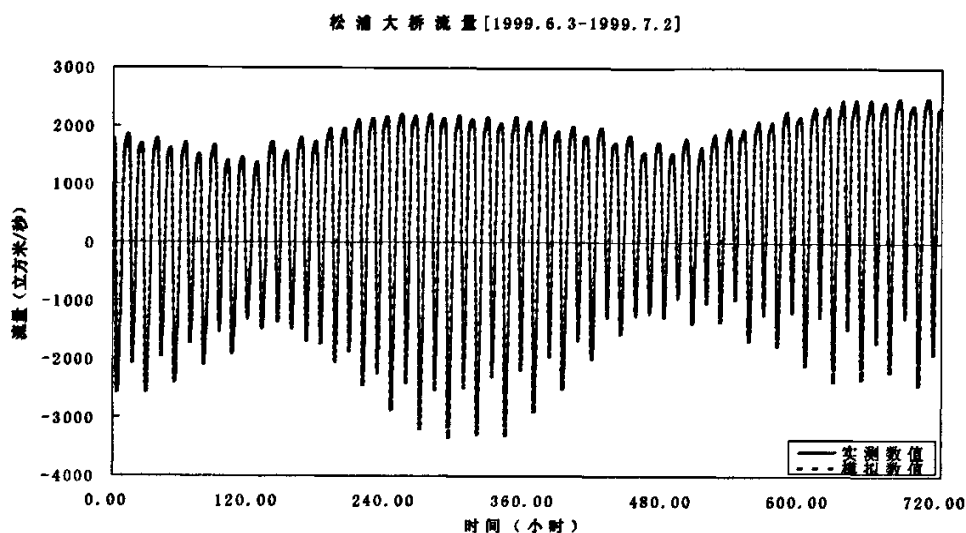


图 5-5 松浦大桥流量验证结果

## 5.2 溢油模型的建立

利用 Delft3D 模型软件的 Delft3D-PART 模块建立模型。

油常分为三部分，分别是：飘浮油、溶解油和粘附油。漂浮油是指漂浮在水面上的一个薄油层；溶解油是指水中的油（“溶解”的油滴）；粘附油是指可能粘附在岸上或水底的油，这部分油不再被水体输运。

为保证与课题实验部分的研究成果相互验证，本次模拟采用轻油（Ekofisk）。

### 5.2.1 时间框架

水质计算的开始时间只能与水力计算的开始时间相同，不能改变；为确保一致性，参考时间输入也不能改变；可以改变的有：停止时间、时间步长和参考时间输出。

### 5.2.2 数字参数

可以设置以下参数：

颗粒数、垂直扩散选项（决定垂直扩散系数是常数或垂向平均计算值）、垂直扩散比例因数。

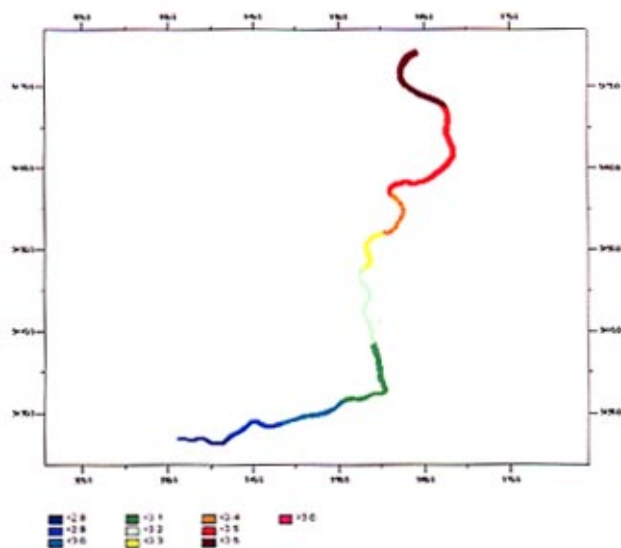
### 5.2.3 瞬时溢油

设置溢油量、溢油时间、位置、溢油的初始半径等参数。

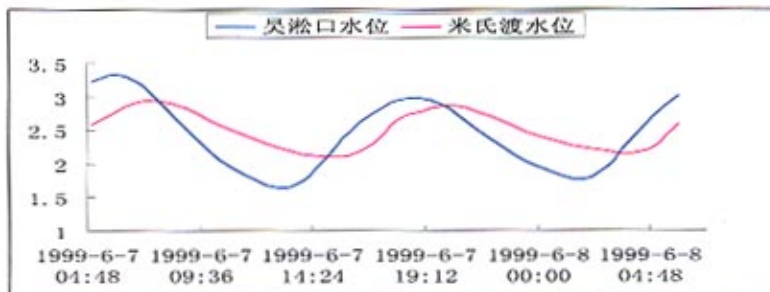
模拟中溢油的初始半径由 Delft3D-PART 计算得出，计算方法见第四章式（4-14）。

设置溢油量为 100 吨，溢油时间 1999 年 6 月 7 日 5 点 40 分。

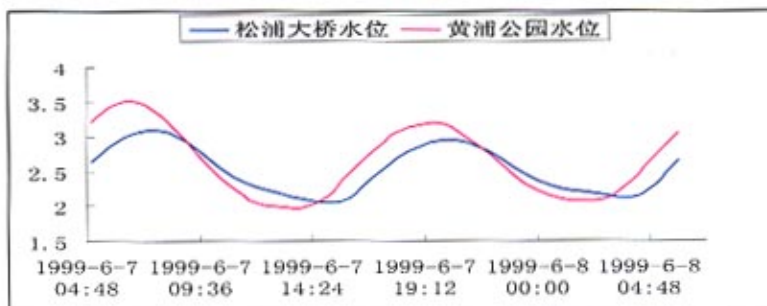
溢油时刻模拟区域的水位如图 5-4。



a. 溢油时刻模拟区域水位



b. 边界实测水位过程线



c. 模拟水位过程线

图 5-4 溢油时刻模拟区域水位

### 5.2.7 连续溢油

可以设置溢油速率、浓度、溢油时间、位置、溢油的初始半径等参数。

本文的模拟不考虑连续溢油。

### 5.2.8 过程参数

包括衰减速率、沉降系数、垂直扩散系数、风和模型详细说明，其中模型详细说明包括蒸发率、用于计算扩散系数的扩散选项、扩散参数  $C_0$ 、粘附可能性、用于计算溢油初始半径的密度和体积。

风场选用多年平均值，风速为 3m/s，风向为东北风（与正北方向夹角为  $135^\circ$ ）。

### 5.2.9 观测点

在溢油点上下游不同位置设置观测点，用于模拟结果分析。

### 5.2.10 输出选项

可以定义输出文件的时间范围和时间间隔，同时为了计算更加精确把溢油点附近一定范围设定为“放大的单元格”。

## 5.3 模拟结果分析与验证

利用 Delft3D-PART 的 GPP 模块，可以将模拟结果可视化，并对结果进行分析。

### 5.3.1 模型主要参数

本文主要目的是研究溢油的影响范围，为黄浦江水源地保护提供理论依据，为使结果偏于安全，又因为选用的油品是轻油，主要考虑溢油的短期影响，因此粘附、沉降和风化过程引起的衰减均不作考虑。

通过模型的率定和验证，确定模型中各主要参数值见表 5-1。

表 5-1 模型主要参数

| 参数                 | 取值   |
|--------------------|------|
| 扩散参数 a             | 0.07 |
| 扩散参数 b             | 0.7  |
| 粗糙长度 (m)           | 0.02 |
| 风速 (m/s)           | 3    |
| 风向 (°)             | 135  |
| 风拖曳系数 $C_{wd}(\%)$ | 3    |
| 蒸发率 $k_E(1/d)$     | 0.1  |
| 常数 $C_0$           | 2000 |
| 密度 ( $kg/m^3$ )    | 820  |

5.3.2 模拟结果及分析

溢油后不同时间油膜影响范围分别见图 5-5~5-11。

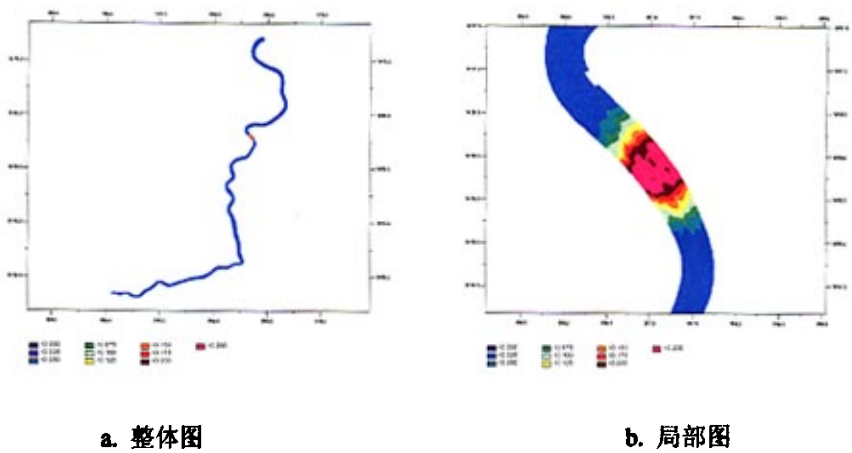


图 5-5 溢油 1 小时后油膜影响范围

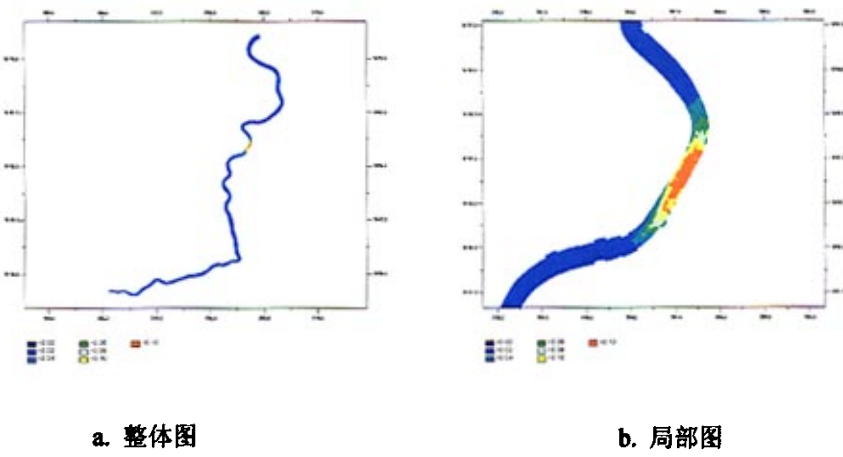


图 5-6 溢油 3 小时后油膜影响范围

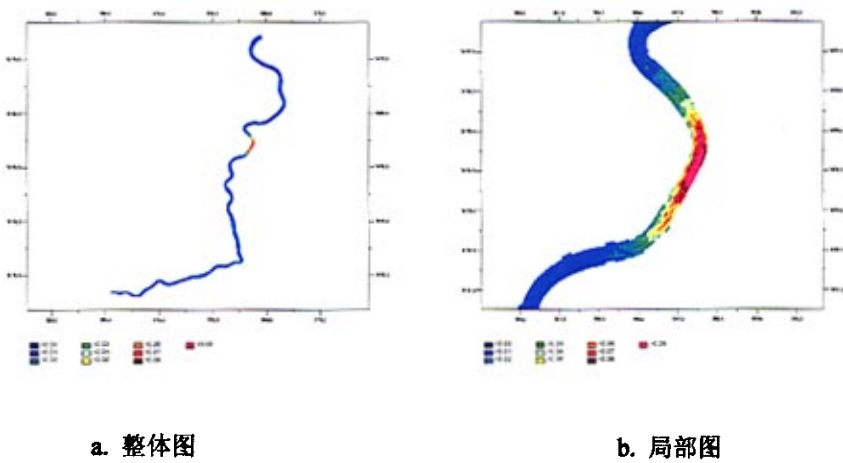


图 5-7 溢油 6 小时后油膜影响范围

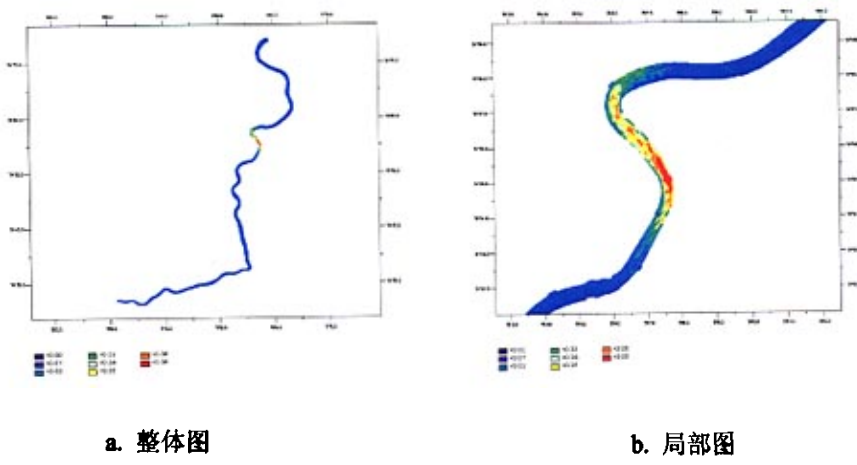


图 5-8 溢油 9 小时后油膜影响范围

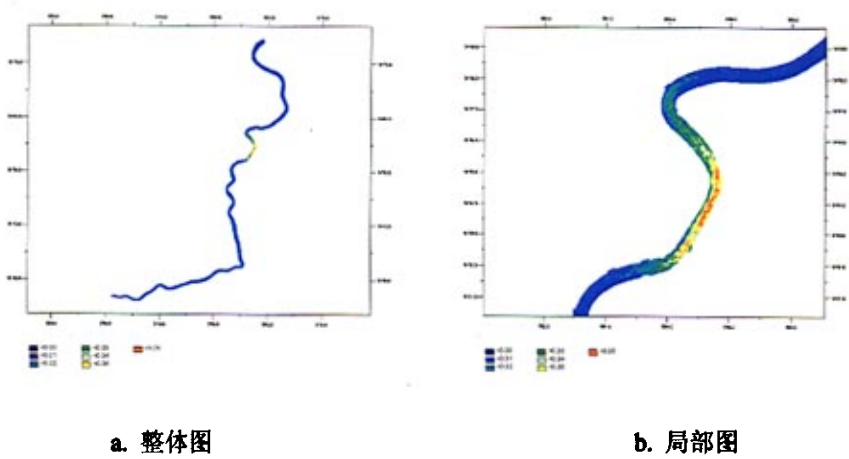


图 5-9 溢油 12 小时后油膜影响范围

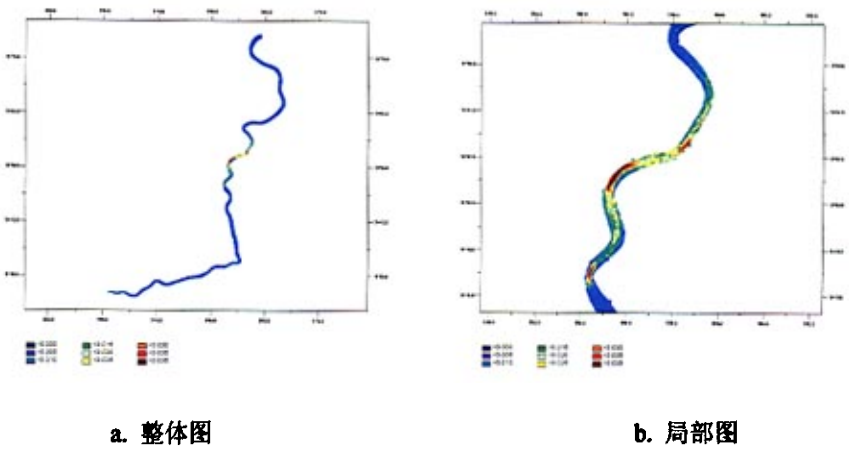


图 5-10 溢油 18 小时后油膜影响范围

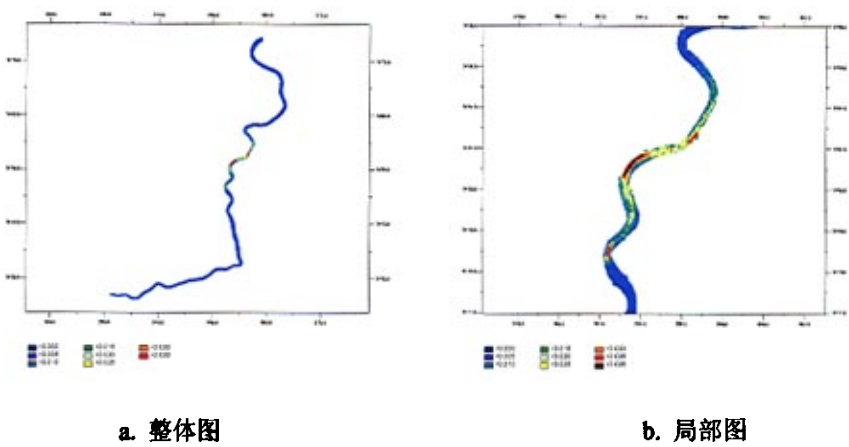


图 5-11 溢油 24 小时后油膜影响范围

分析模型结果可以看出,油膜受潮汐引起的往复水流影响在溢油点附近水面上来回漂移,油膜长度逐渐增加。溢油 1 小时后油膜大约影响到上游 1km 至 2km 的范围;溢油 3 小时后油膜主要影响到上游 3km 至 4km 的范围,上游 2km 到 4.5km 范围内漂浮有油膜;溢油 6 小时后油膜主要影响到上游 2km 至 4km 的范围,上游 1km 到 5.5km 范围内漂浮有油膜;溢油 9 小时后油膜影响到上游 4km 至下游 1.5km 的范围;溢油 12 小时后油膜影响到上游 5.5km 至下游 0.5km 的范围;溢油 18 小时后油膜影响到上游 2km 至 10km 的范围;溢油 24 小时后油膜影响到上游 2km 至 15km 的范围。

### 5.3.2 模型的验证

由于缺乏黄浦江实测溢油观测结果,本研究采用实验室模拟与数学模拟相结合的办法验证模拟结果。

水力实验部分由上海大学流体力学实验室在实验室的玻璃水槽中进行。玻璃水槽系统由水池、主泵、平水塔、玻璃水槽、回水渠、测流槽以及管道、闸阀和变坡机构构成。实验水流由主水泵从水池中抽取,Φ250 的主阀和 Φ150 旁通阀控制实验流量,水流通过压力钢管进入平水塔,然后经一电动闸阀进入玻璃水槽。玻璃水槽总长 60m,断面宽 0.5m,高 0.7m,水槽进口段设有三道整流网栅,出口处安装有隔栅式尾门,尾门开度由微机控制。整个玻璃水槽槽身安装在一个铰和 8 对蜗轮蜗杆组成的电动变坡机构上,槽底坡度调节范围为  $i = -0.01 \sim 0.01$ 。实验水流由尾门流出后,跌入回水渠,再经过测流槽或排弃或返回水池。水池总流量约  $30\text{m}^3$ ,能满足循环稳定和温升限制的要求。水槽装置最大实验流量  $0.12\text{m/s}$ ,最大断面平均流速  $2.0\text{m/s}$ 。水槽现场如图 5-12 所示<sup>[2]</sup>。





图 5-12 水槽实验室

根据上海大学流体力学实验室在实验室的玻璃水槽中的实验结果，若在 1999 年 6 月 7 日 5 点 35 分发生瞬时溢油事故，溢油油膜影响范围见图 5-13。

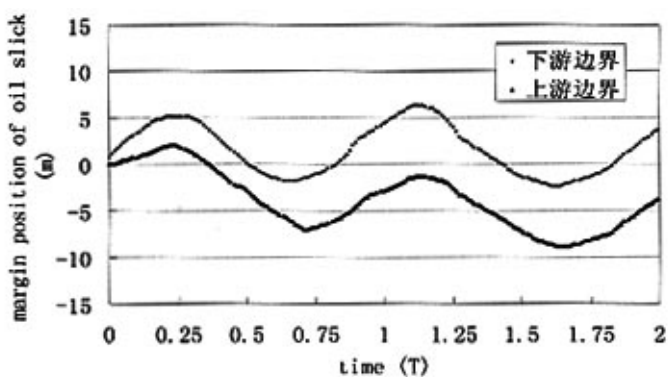


图 5-13 瞬时溢油油膜影响范围

注：模型长度比尺为 1000

实验结果表明，如果在陆家嘴附近水域发生溢油量为  $100\text{m}^3$  的瞬间溢油事故，那么在 24 小时内，从杨浦大桥至龙华港石化码头的 15km 水域可能有油膜侵袭，并且约有 5km 长的水面会漂浮有油污。

可见，模型模拟结果与实验结果基本吻合，因此该模型模拟结果可以较准确地反映实际情况，可信度较高。

## 参考文献

1. Delft3D-PART User Manual.WL | Delft Hydraulics, the Netherlands, March,2003:  
4-1~4-37,5-23~5-42,6-1~6-14
2. 上海市科委重点攻关项目“黄浦江突发性水污染事故预警预报技术研究”上海大学阶段报告

## 第六章 黄浦江溢油事故模拟模型的应用

### 6.1 模拟方案的确定

分析黄浦江历史上发生的溢油事故可知,由于黄浦江上货运繁忙,发生的主要是瞬时溢油事故,因此本次研究主要是针对黄浦江不同河段的瞬时溢油事故进行模拟。

利用第五章率定和验证过的模型,在黄浦江取水口上下游不同范围内设置不同溢油量的瞬时溢油事故,黄浦江历史上发生的溢油事故最大溢油量为 200 吨,因此共产生 1 吨、10 吨、100 吨和 200 吨四组方案。

### 6.2 黄浦江溢油事故的模拟及结果分析

#### 6.2.1 溢油量为 1 吨的模拟及结果分析

##### 6.2.1.1 取水口上游的模拟

由于本研究的目的主要是研究黄浦江各河段溢油事故对取水口的影响,因此在做上游的模拟时,应选择上游水位在整个河段内最高即易于溢油向下游漂移的时刻,得出的结论才是最安全的。根据第五章的模拟结果,选择 1999 年 8 月 2 日做为溢油事故模拟时间,分析该日各时段的黄浦江水位情况得出,0 点和早晨 7 点时米市渡水位为全流域最高,选择 0 点为溢油时间,此时模拟区域水位和溢油点水位过程线分别见图 6-1 和图 6-2。

模拟结果见附录一。

分析模拟结果可知:

(1) 溢油从长期的角度看是往下游漂移,但是在短时间内由于潮汐的作用会出现上下游往复运动的情况。

(2) 溢油后前 6 个小时,主要是油膜向下游漂移和油膜扩展;6 到 10 个小时时段内油膜后端向上游漂移;10 个小时以后又开始向下游漂移;14 个小时以后溢油基本上变成破碎的小油团逐渐扩散和减小。

(3) 溢油后约 12 个小时将会影响到下游 9km 处的取水口, 1 天内影响到下游约 15km 的范围; 2 天内影响到下游约 25km 的范围。因此若在黄浦江上游米市渡位置发生溢油量为 1 吨的瞬时溢油事故, 会对取水口产生影响。

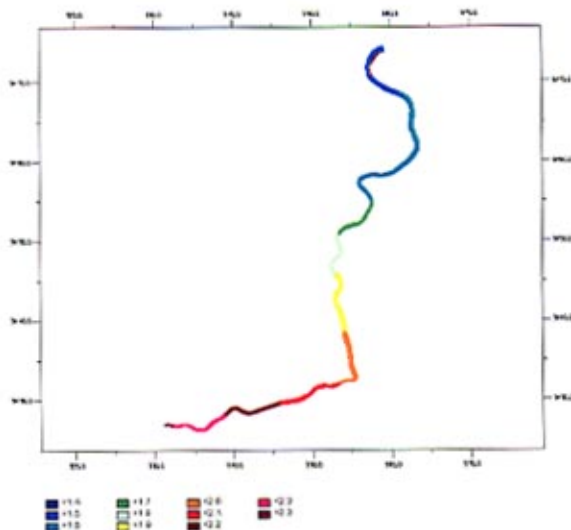


图 6-1 溢油时刻模拟区域水位（上游模拟）

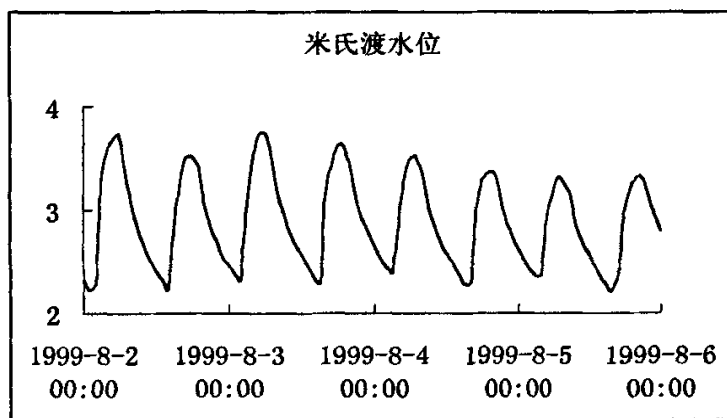


图 6-2 溢油点水位过程线（米市渡位置）

根据模拟结果, 若在米市渡位置发生溢油量为 1 吨的瞬时溢油事故, 对取水口会产生影响, 由此可以推断, 在同样的水力条件下, 在取水口上游任意位置发生溢油量为 1 吨以上的溢油事故都会对取水口产生影响。因此, 在以下的模拟中, 只需做取水口下游的模拟。

#### 6.2.1.2 取水口下游的模拟

如前所述, 在做下游的模拟时, 溢油时刻应选择下游水位高于上游水位的时

刻，模拟的结果才是偏于安全的。选择 8 月 2 日凌晨 4 点，此时模拟区域水位如图 6-3。

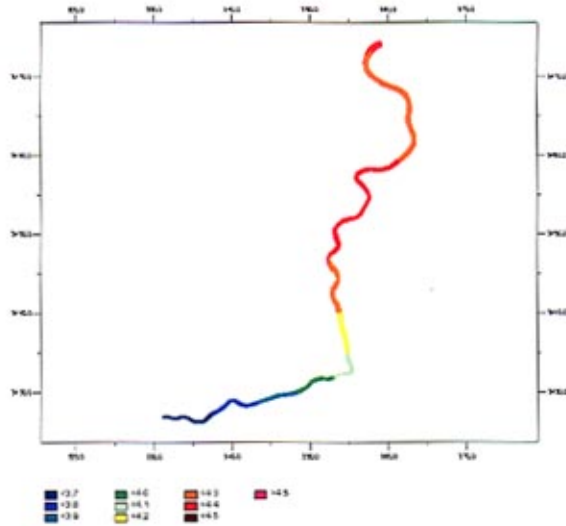


图 6-3 溢油时刻模拟区域水位（下游模拟）

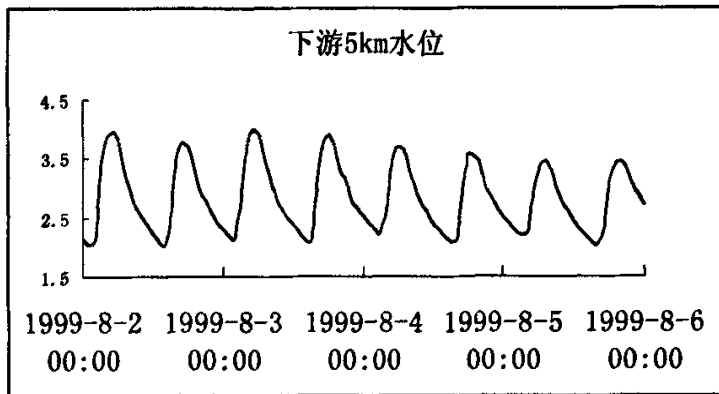


图 6-4 溢油点水位过程线（下游 5km 处）

分别做了取水口下游 5km、10km 和 20km 处溢油事故的模拟，经过分析发现，溢油事故在不同位置发生后，溢油的漂移扩散规律大致相同。下面对 5km 处的模拟结果进行讨论。

溢油点水位过程线如图 6-4，模拟结果见附录二。

溢油后 24 小时内油膜影响范围如图 6-5。

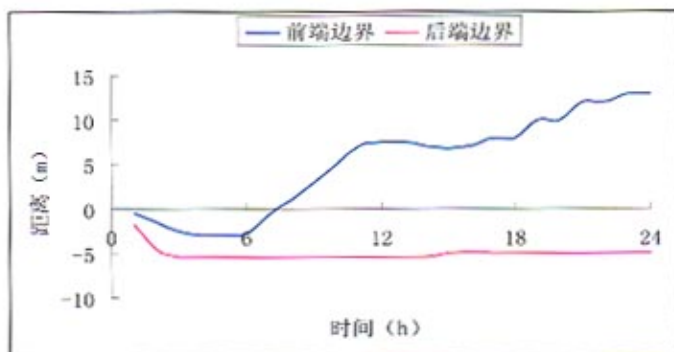


图 6-5 油膜影响范围（下游 5km 处 1 吨事故）

分析模拟结果可知：

(1) 溢油后前 3 个小时主要是油膜向上游漂移和油膜扩展的过程；3 到 6 个小时时段内油膜有所收缩；6 个小时以后油膜后端位置基本不变，前端开始向下游漂移，其中 14 到 16 个小时时段内油膜又有收缩，16 个小时以后基本上形成破碎的油团，之后就是油团前端逐渐向下游漂移扩散和油量减少的过程。

(2) 溢油后 1 天内，溢油点上游 5.5km 到下游 13km 范围内可能受到油膜污染；2 天内，溢油将可能影响到上游 5km 到下游 17km 的范围。因此，若在取水口下游 5.5km 范围内发生 1 吨瞬时溢油事故，在 1 天内会对取水口产生影响；若在取水口下游 6km 以外发生 1 吨溢油事故，基本上不会对取水口产生影响。

### 6.2.2 溢油量为 10 吨的模拟及结果分析

如上节所述，以下只做取水口下游溢油事故的模拟，模拟的溢油时间均选择 1999 年 8 月 2 日凌晨 4 点，此时模拟区域水位如图 6-3。

同样，在不同位置处设置溢油事故进行模拟后发现溢油漂移扩散规律大致相同。这里对取水口下游 10km 处的溢油事故模拟结果进行讨论（下同）。溢油点水位过程线如图 6-6。

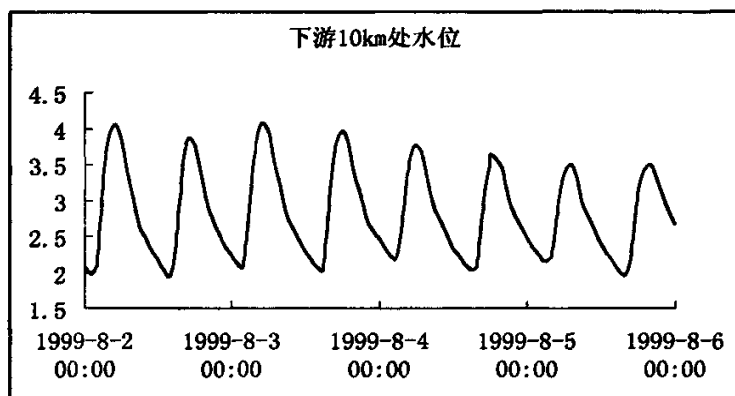


图 6-6 溢油点水位过程线（下游 10km 处）

模拟结果见附录三。

溢油后 24 小时内油膜影响范围如图 6-7。

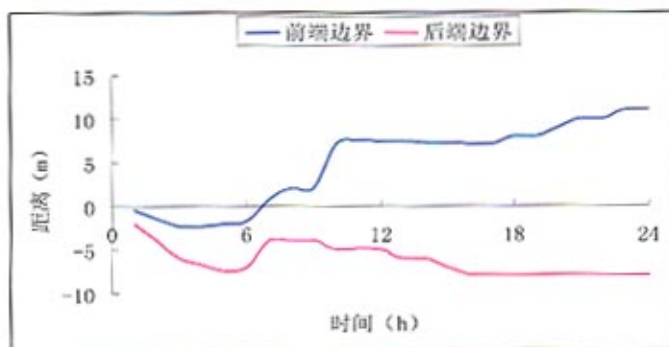


图 6-7 油膜影响范围（下游 10km 处 10 吨事故）

分析模拟结果可知：

（1）溢油后前 5 个小时，主要是油膜主体向上游漂移和油膜扩展的过程；5 到 11 个小时时段内，油膜向下游漂移；12 到 16 个小时时段油膜明显收缩；16 个小时以后成为破碎的油团逐渐漂移和减小。

（2）发生 10 吨瞬时溢油事故后，在 1 天时间内可能影响到上游 8km 到下游 11km 的范围，2 天时间内可能影响到上游 8km 到下游 17km 的范围。因此，若在取水口下游 8km 范围内发生 10 吨瞬时溢油事故，在 1 天内可能会对取水口产生影响。

### 6.2.3 溢油量为 100 吨的模拟及结果分析

取水口下游 10km 处溢油事故的模拟结果见附录四。

溢油后 24 小时内油膜影响范围如图 6-8。

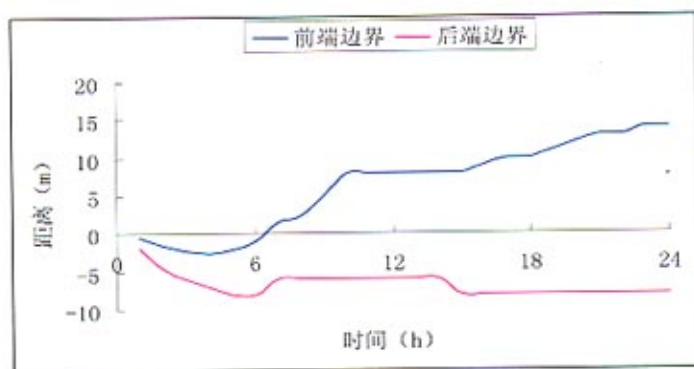


图 6-8 油膜影响范围（下游 10km 处 100 吨事故）

分析模拟结果可知：

(1) 溢油后前 6 个小时，油膜整体主要是向上游漂移；6 到 11 个小时时段内油膜后端基本不变，前端向下游漂移；12 到 14 个小时时段内油膜主体位置基本不变，油膜再次出现收缩；14 到 15 个小时以后油膜主体基本上破碎成小油团，不再有整体的漂移，而是各个小油团逐渐变小的过程。

(2) 发生 100 吨瞬时溢油事故后，在 1 天时间内可能影响到上游 8km 到下游 14km 的范围，2 天时间内可能影响到上游 8km 到下游 18km 的范围，对上游 8km 以外的范围几乎没有影响。因此，若在取水口下游 8km 范围内发生 100 吨瞬时溢油事故，在 1 天内可能会对取水口产生影响。

#### 6.2.4 溢油量为 200 吨的模拟及结果分析

下游 10km 处发生 200 吨溢油事故的模拟结果见附录五。

溢油后 24 小时内油膜影响范围如图 6-9。

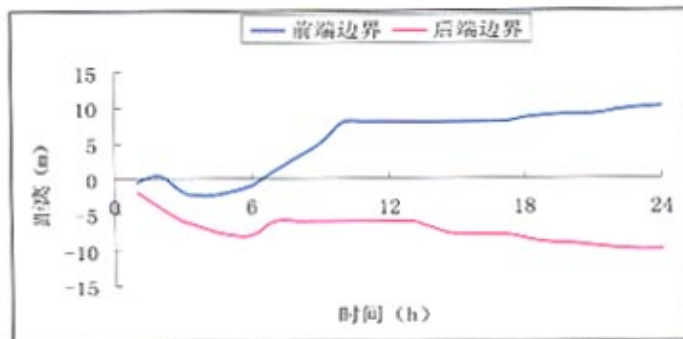




图 6-9 油膜影响范围（下游 10km 处 200 吨事故）

分析模拟结果可知：

- (1) 溢油后油膜漂移变化的主要规律与前面模拟的结果基本相同。
- (2) 发生 200 吨瞬时溢油事故后，在 1 天时间内可能影响到上游 10km 到下游 10km 的范围，2 天时间内可能影响到上游 10km 到下游 20km 的范围。因此，若在取水口下游 10km 范围内发生 200 吨瞬时溢油事故，在 1 天内可能会对取水口产生影响。

通过详细分析以上多次模拟的结果发现，取水口下游 10km 以外发生 200 吨以下的瞬时溢油事故基本上对取水口没有影响；溢油点下游 20km 范围内溢油事故发生后溢油的漂移扩散规律和油膜影响范围差别不大，这主要是因为这些溢油事故都发生在黄浦江上游，即米市渡到吴泾化工区河段。

为了研究黄浦江不同河段溢油漂移扩散规律是否有差别、有多大差别，笔者又在吴泾化工区以下河段不同位置做了多次模拟，结果发现，根据溢油漂移扩散规律的不同，可以把黄浦江分成三段，大致为米市渡到吴泾化工区段（上游河段）、吴泾化工区到苏州河段（中游河段）以及苏州河到吴淞口段（下游河段）。

下面对中游河段和下游河段分别取一个典型的模拟事例进行讨论。事故的溢油量均设置为最大溢油量（200 吨）。

#### 6.2.5 中游河段的模拟及结果分析

溢油点设在该段中间位置，即取水口下游 30km 处。溢油点的水位过程线如图 6-10。

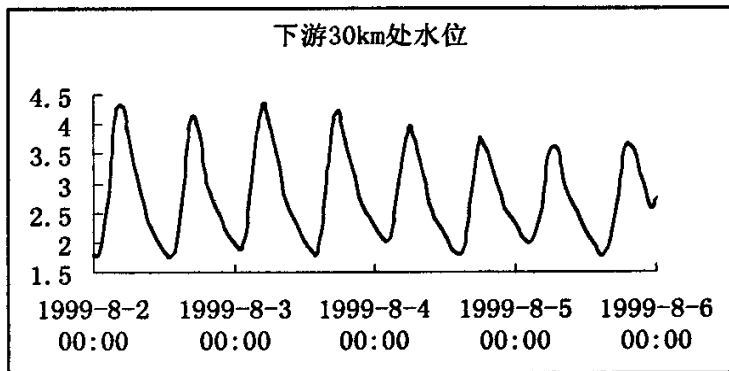


图 6-10 溢油点水位过程线（下游 30km 处）

模拟结果见附录六。

溢油后 24 小时内油膜影响范围如图 6-11。

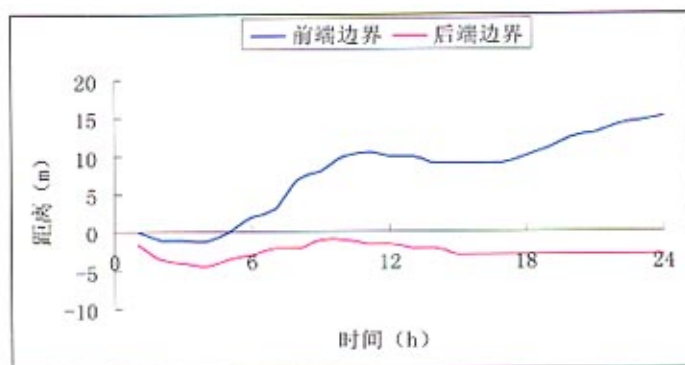


图 6-11 油膜影响范围（下游 30km 处 200 吨事故）

分析模拟结果可知：

(1) 溢油后前 4 个小时，油膜整体主要是向上游漂移和扩展；5 个小时以后向下游漂移；13 到 15 个小时时段内油膜主体位置基本不变，油膜出现收缩；15 个小时以后油膜主体基本上破碎成小油团漂移扩散。

(2) 发生 200 吨瞬时溢油事故后，在 1 天时间内可能影响到上游 4.5km 到下游 15km 的范围，2 天时间内可能影响到上游 8km 到下游 16km 的范围。

### 6.2.6 下游河段的模拟及结果分析

同样，溢油点设在该段中间位置，即取水口下游 60km 处。溢油点的水位过程线如图 6-12。

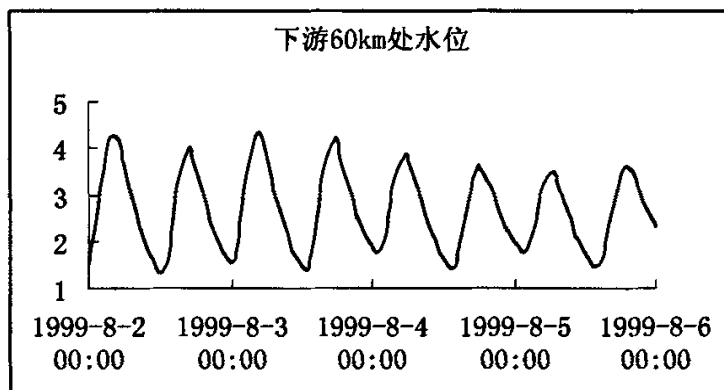


图 6-12 溢油点水位过程线（下游 60km 处）

模拟结果见附录七。

由于溢油点下游 12.5km 以外超出了模型的研究区域，而油膜前端在溢油 8

小时后就超出了次范围，因此本次模拟对油膜前端的影响范围不予考虑。溢油后 24 小时内油膜后端的影响范围如图 6-13。

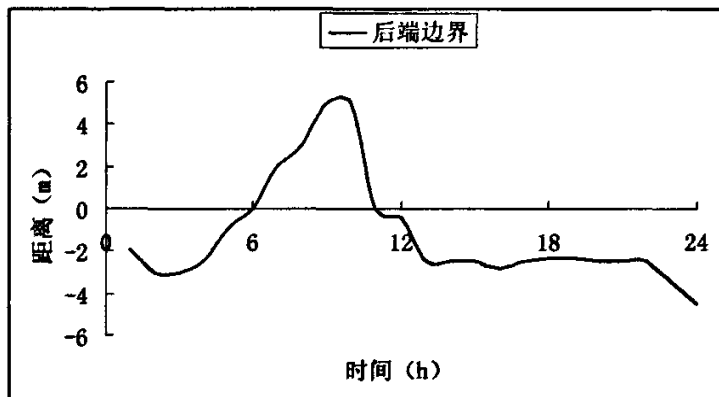


图 6-13 油膜后端边界变化趋势（下游 60km 处 200 吨事故）

分析模拟结果可知：

(1) 溢油后前 2 个小时，油膜略向上游漂移的同时主要是油膜的扩展；3 到 10 个小时时段内向下游漂移；11 到 16 个小时时段内油膜又向上游漂移，其中 13 到 15 个小时时段内油膜出现收缩；17 到 22 个小时时段内油膜又向下游漂移；22 到 25 个小时时段内油膜再次向上游回漂；25 个小时以后主要是各个破碎的小油团漂移扩散和逐渐减小。

(2) 发生 200 吨瞬时溢油事故后，在 1 天时间内可能影响到上游 4.5km 范围，2 天时间内可能影响到上游 6km 范围。

### 6.2.7 模拟结果比较分析

如前所述，通过黄浦江不同位置溢油事故的模拟结果比较，根据溢油漂移扩散规律不同，可将黄浦江大致分为三段。上游河段为米市渡到吴泾化工区段，该河段瞬时溢油事故发生后前 6 个小时，油膜主要是向上游漂移和扩展，6 个小时以后油膜向下游漂移，14 个小时左右油膜出现收缩之后破碎成小油团；中游河段为吴泾化工区到苏州河段，该河段瞬时溢油事故发生后前 4 个小时，油膜整体主要是向上游漂移和扩展，5 个小时以后向下游漂移，13 到 15 个小时时段内油膜主体位置基本不变，油膜出现收缩，15 个小时以后油膜主体基本上破碎成小油团漂移扩散；下游河段为苏州河至吴淞口河段，该河段溢油事故发生后溢油后前 2 个小时，油膜整体主要是向上游漂移和扩展，4 到 10 个小时时段内油膜向

下游漂移，11 到 15 个小时时段内油膜又向上游漂移，16 到 20 个小时时段内再次向上游漂移，20 个小时以后油膜主体基本上破碎成小油团漂移扩散。

由于黄浦江是感潮河流，溢油从长期的角度看是往下游漂移，但是在短时间内由于潮汐的作用会出现上下游往复运动的情况。从上游到下游，溢油受潮汐的影响越来越明显，最明显的特征是油膜往复漂移的时间间隔越来越段，首次出现漂移方向改变的时间分别为溢油后上游 6 小时、中游 4 小时和下游 2 小时，下游河段往复运动的次数也明显增多。

## 第七章 结论和研究展望

### 7.1 结论

1. 溢油预测模型是溢油应急反应系统的重要组成部分,本研究建立的黄浦江突发性溢油漂移扩散模型能预测溢油在黄浦江中扩散漂移过程及覆盖范围,可为应急决策的制定、清除手段的选择及溢油损害的评估提供技术支持。
2. 在黄浦江取水口上游任意位置若发生 1 吨以上瞬时溢油事故,将会对取水口产生影响;若在取水口下游 5.5km 范围内发生 1 吨瞬时溢油事故,在 1 天内会对取水口产生影响;若在取水口下游 8km 范围内发生 100 吨瞬时溢油事故,在 1 天内可能会对取水口产生影响;若在取水口下游 10km 范围内发生 200 吨瞬时溢油事故,在 1 天内可能会对取水口产生影响。

因此从黄浦江水源地保护的角度考虑,取水口上游河段和下游 10km 范围是最危险也是重要的河段,应尽量避免溢油事故的发生,一旦发生溢油事故,应尽快采取有效措施进行处理,使溢油污染及带来的损失降至最低。

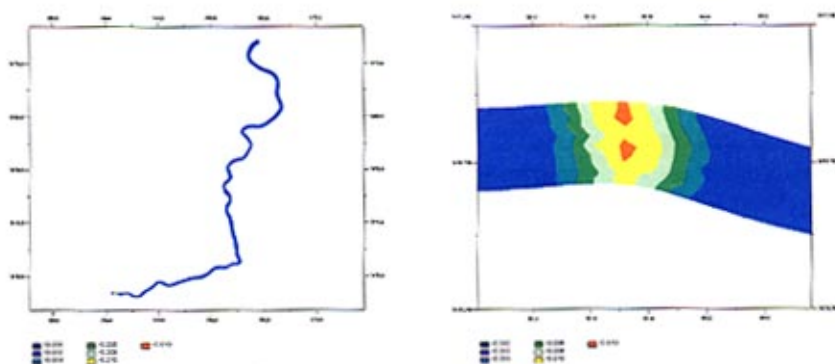
3. 作为典型的感潮河流,黄浦江溢油事故发生后,溢油的漂移扩散规律具有其特殊性。首先溢油受潮汐的影响在短时间内会出现上下游往复运动;其次根据不同河段的差异,可以将黄浦江分为三段,上游河段为米市渡到吴泾化工区段,中游河段为吴泾化工区到苏州河段,下游河段为苏州河至吴淞口河段,从上游到下游,溢油受潮汐的影响越来越明显,最明显的特征是油膜往复漂移的时间间隔越来越段,首次出现漂移方向改变的时间分别为溢油后上游 6 小时、中游 4 小时和下游 2 小时,下游河段往复运动的次数也明显增多。

### 7.2 研究展望

由于时间和精力有限,本文只针对黄浦江瞬时溢油事故的漂移扩散规律作了研究,并且溢油油品只选择了一种,即轻油,而实际上黄浦江上运输的油品和化学品种类繁多,因此,可以利用所建立的黄浦江溢油模型,对黄浦江各个位置不同时间、不同水力条件下发生的不同溢油量、不同油品的溢油事故进行模拟,建

立黄浦江溢油事故数据库，这样，未来一旦有溢油事故发生，即可利用该数据库作为参考，在获得现场环境条件、油品特征等资料后，迅速获得溢油可能的影响范围，为溢油应急处理措施的采取提供依据。

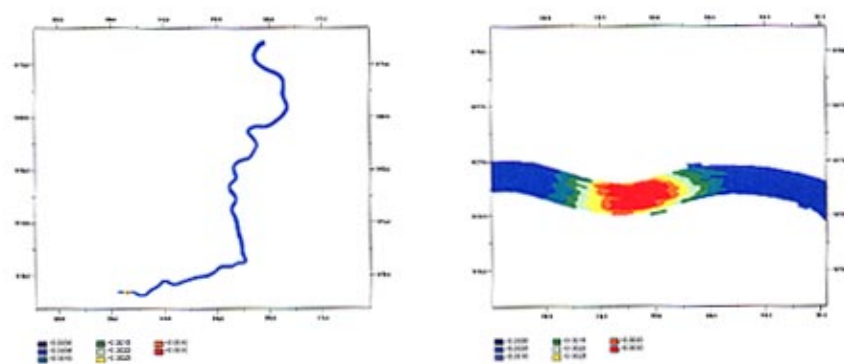
## 附录一 米市渡位置 1 吨溢油事故模拟结果



a. 整体图

b. 局部图

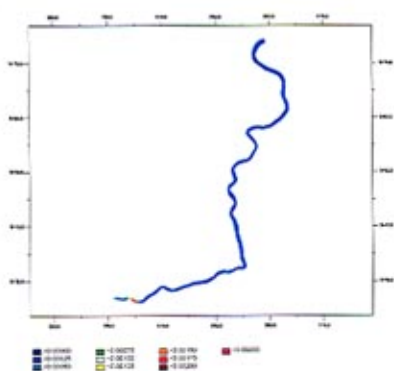
附图 1-1 溢油后 20 分钟



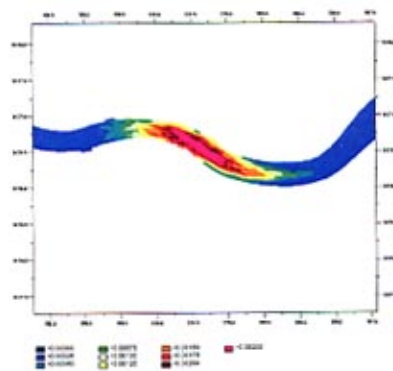
a. 整体图

b. 局部图

附图 1-2 溢油后 1 小时

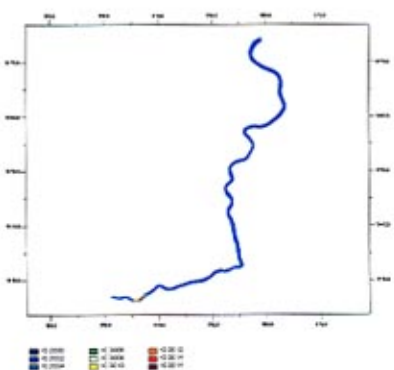


a. 整体图

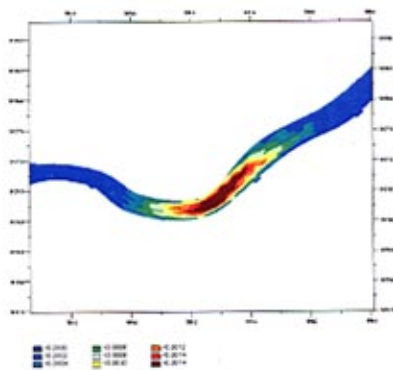


b. 局部图

附图 1-3 溢油后 2 小时

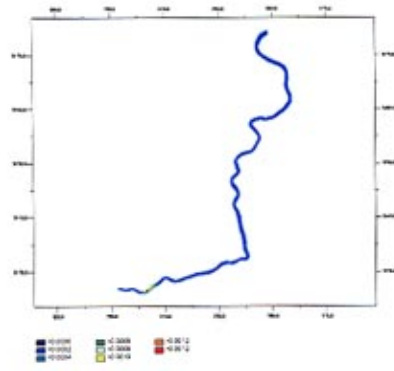


a. 整体图

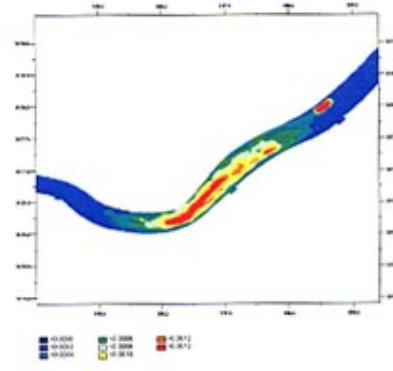


b. 局部图

附图 1-4 溢油后 3 小时



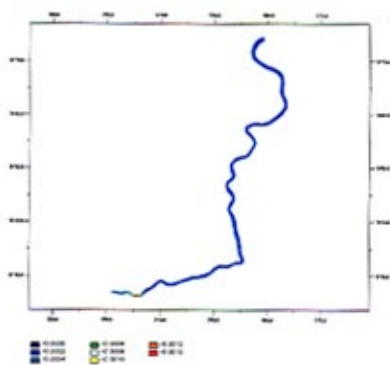
a. 整体图



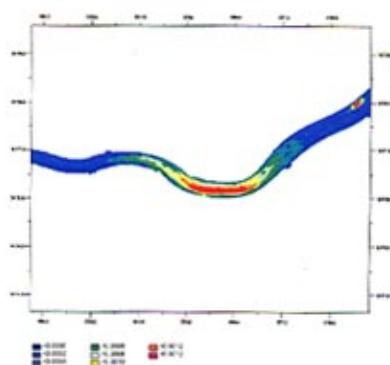
b. 局部图

附图 1-5 溢油后 4 小时



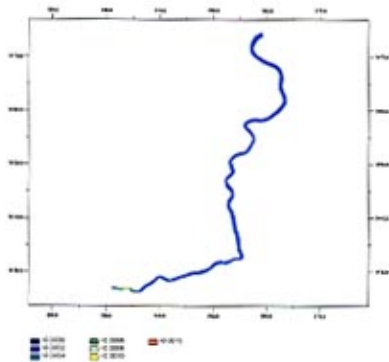


### a. 整体图

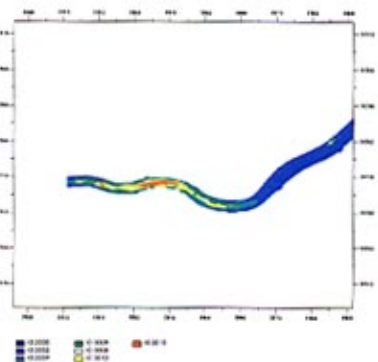


### b. 局部图

**附图 1-6 溢油后 5 小时**

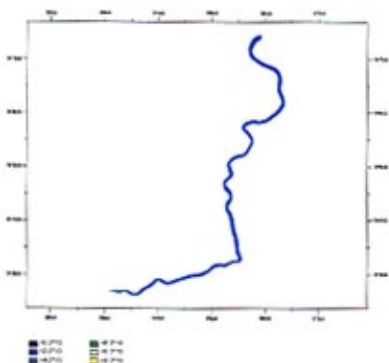


### a. 整体图

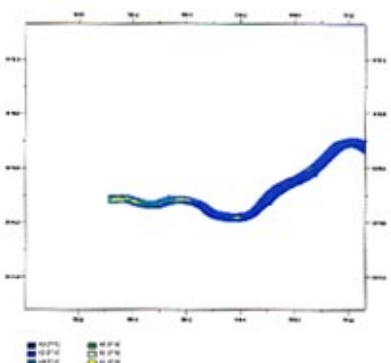


### b. 局部图

附图 1-7 溢油后 6 小时

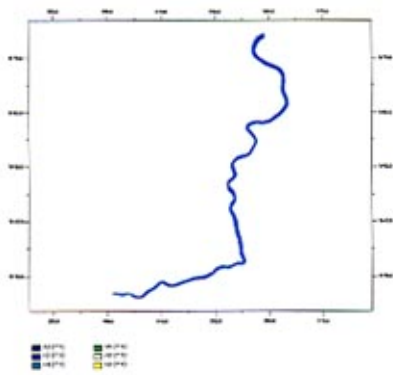


### a. 整体图

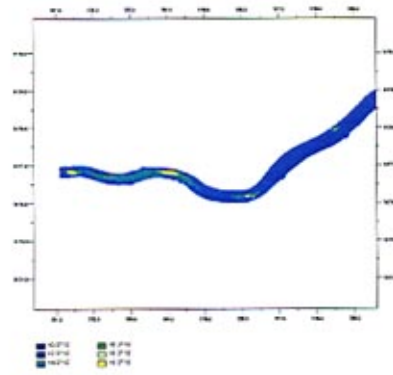


### b. 局部图

**附图 1-8 溢油后 8 小时**

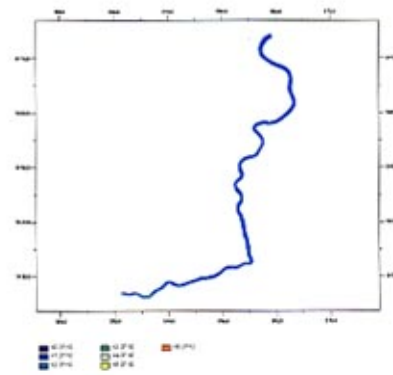


a. 整体图

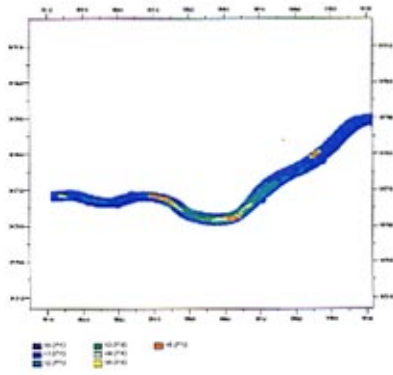


b. 局部图

附图 1-9 溢油后 10 小时

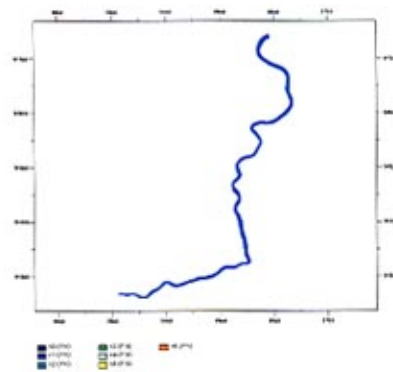


a. 整体图

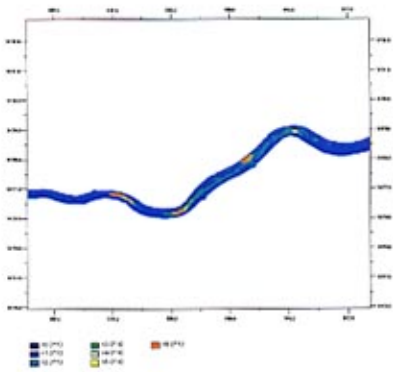


b. 局部图

附图 1-10 溢油后 12 小时

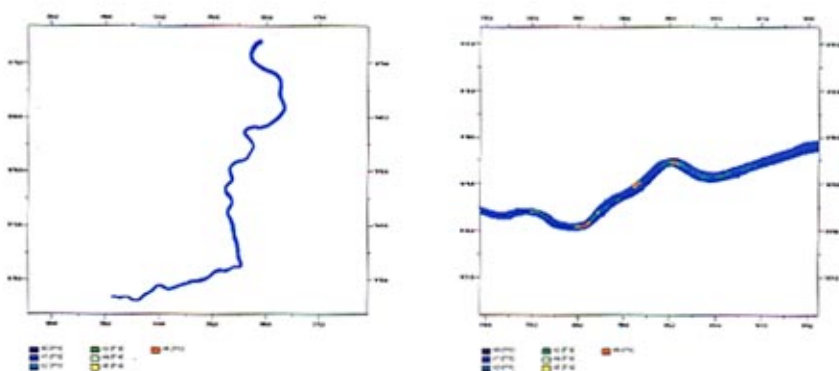


a. 整体图



b. 局部图

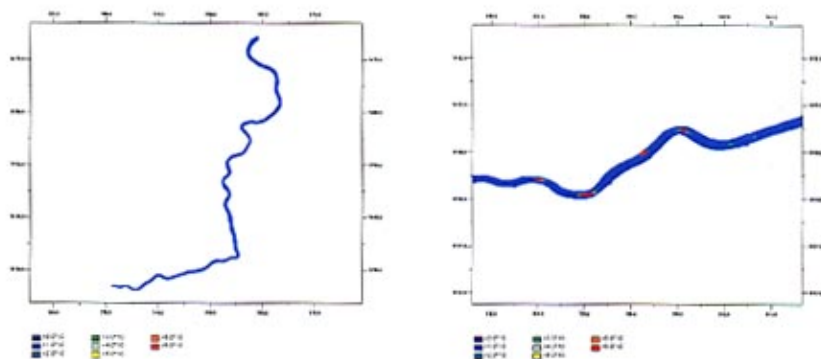
附图 1-11 溢油后 14 小时



a. 整体图

b. 局部图

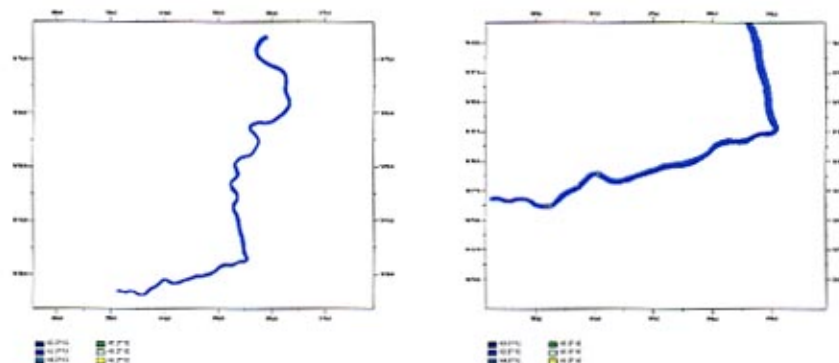
附图 1-12 溢油后 16 小时



a. 整体图

b. 局部图

附图 1-13 溢油后 24 小时

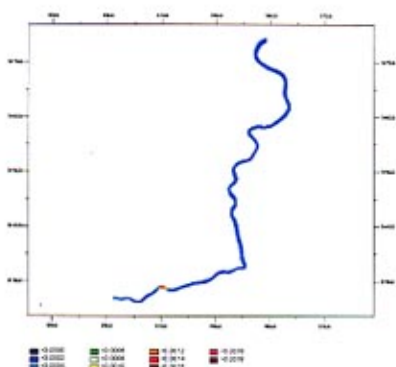


a. 整体图

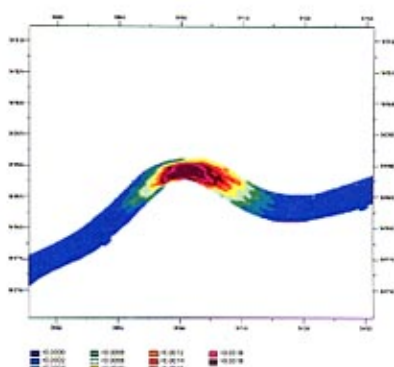
b. 局部图

附图 1-14 溢油后 48 小时



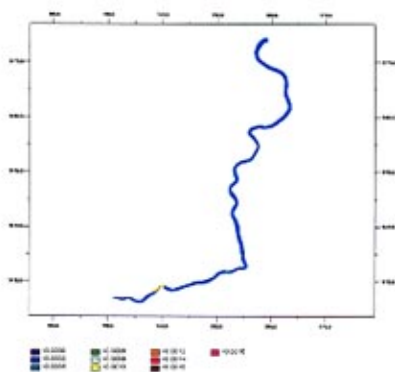


a. 整体图

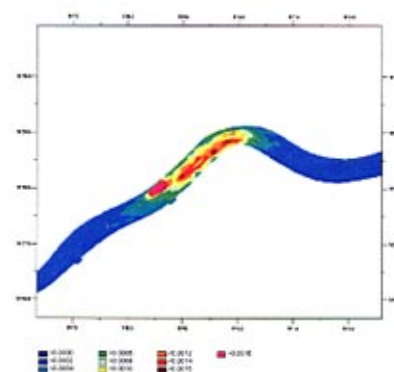


b. 局部图

附图 2-3 溢油后 2 小时

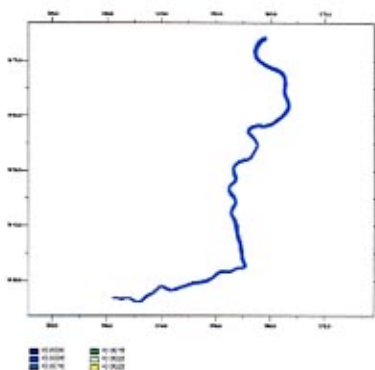


a. 整体图

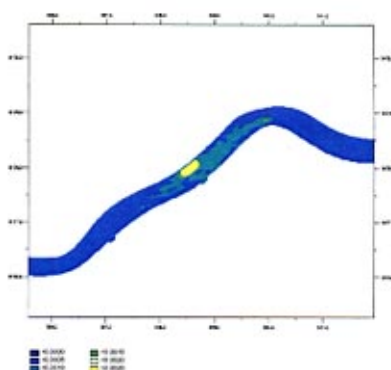


b. 局部图

附图 2-4 溢油后 3 小时

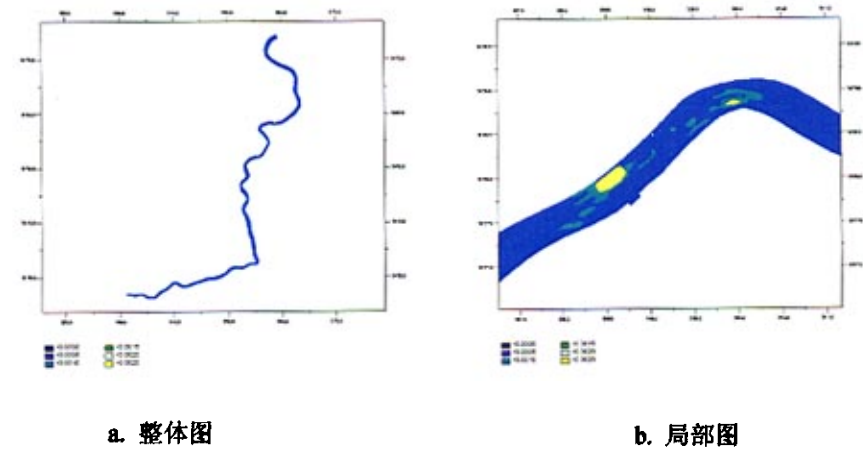


a. 整体图

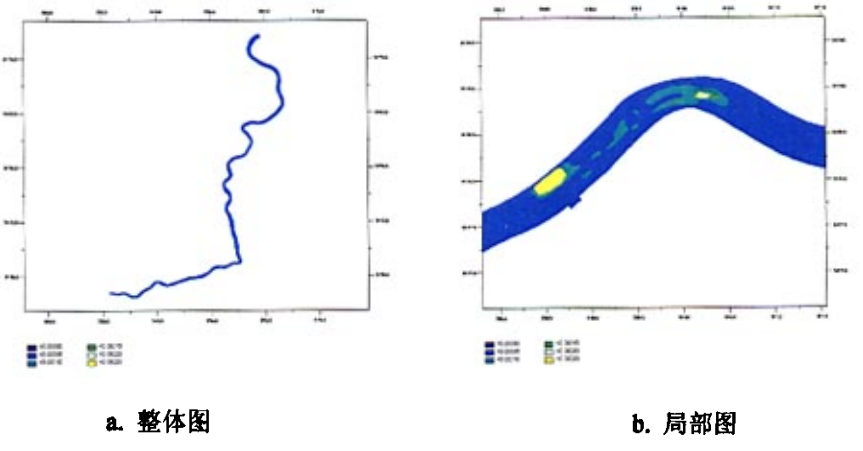


b. 局部图

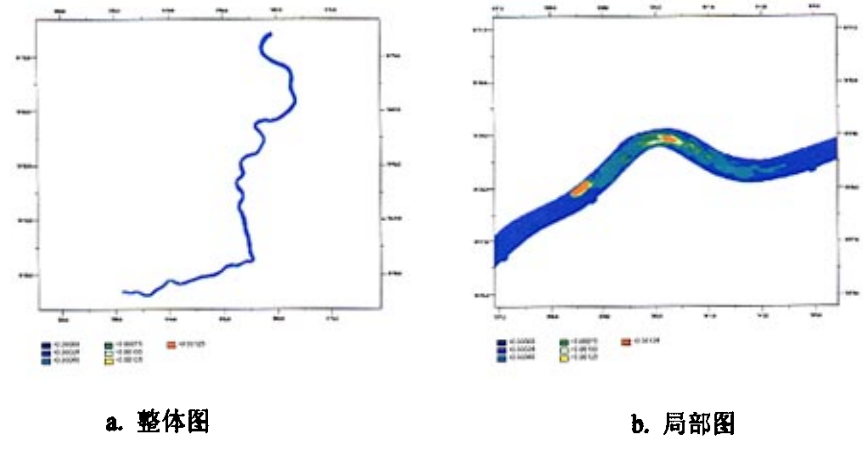
附图 2-5 溢油后 4 小时



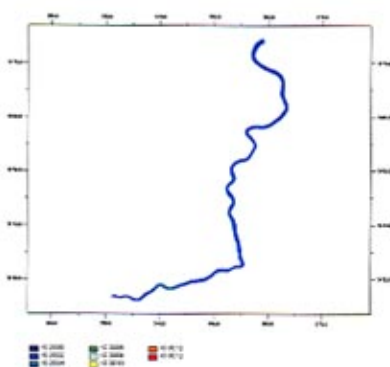
附图 2-6 溢油后 5 小时



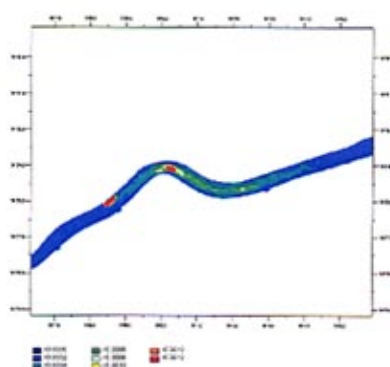
附图 2-7 溢油后 6 小时



附图 2-8 溢油后 7 小时

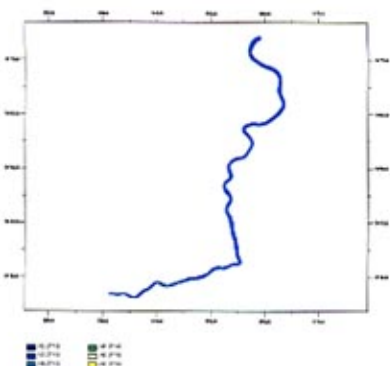


### a. 整体图

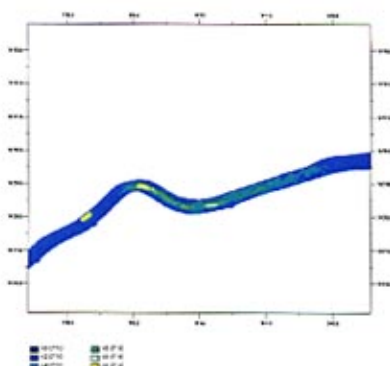


### b. 局部图

**附图 2-9 溢油后 8 小时**

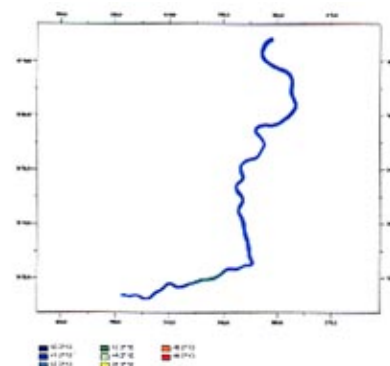


### a. 整体图

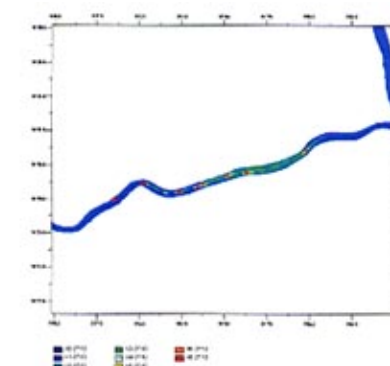


### b. 局部图

附图 2-10 溢油后 9 小时

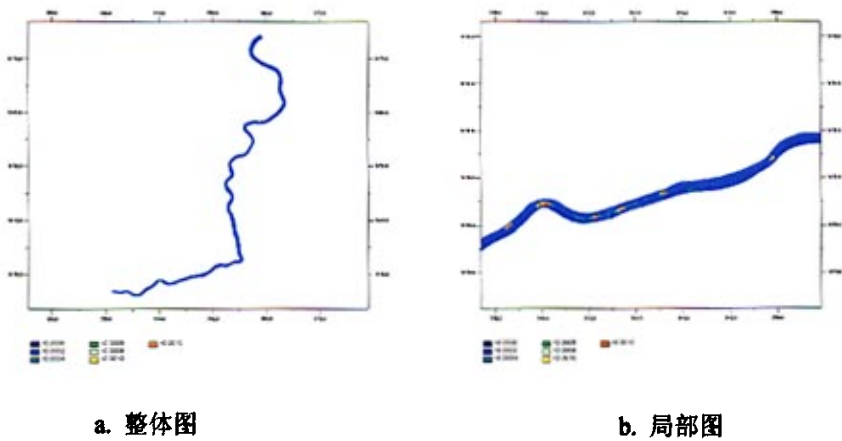


### a. 整体图

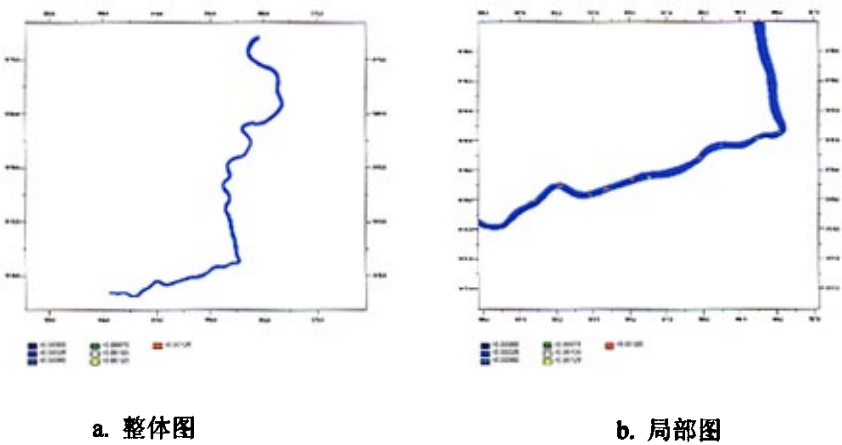


### b. 局部图

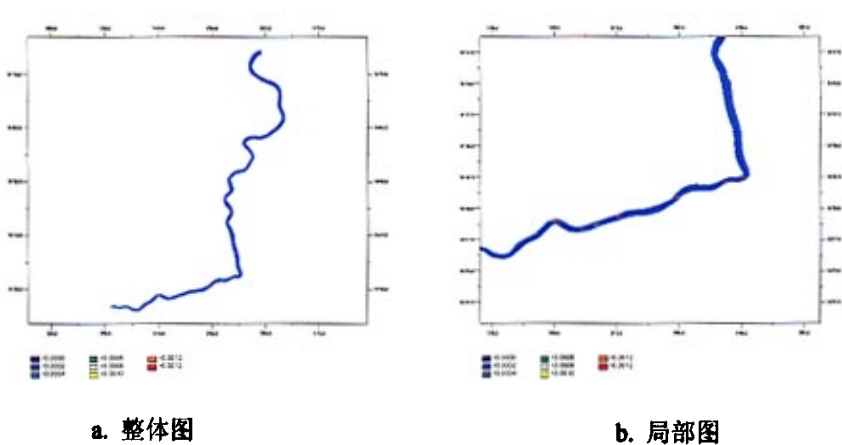
附图 2-11 溢油后 12 小时



附图 2-12 溢油后 16 小时



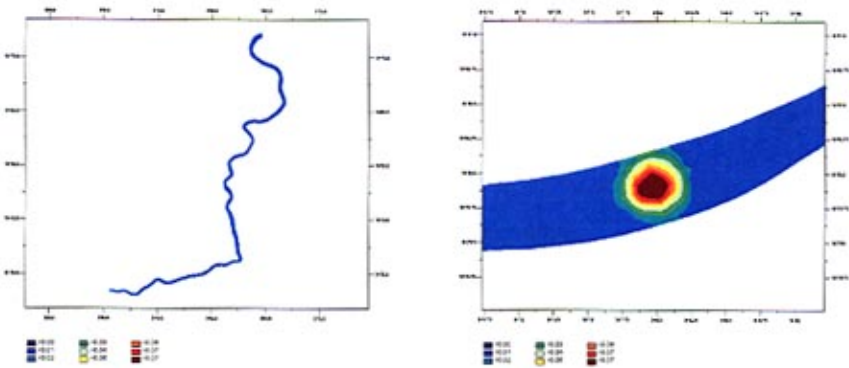
附图 2-13 溢油后 24 小时



附图 2-14 溢油后 48 小时



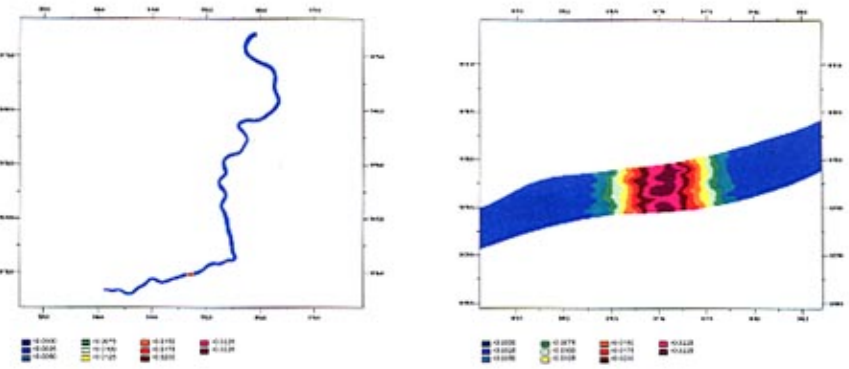
# 附录三 取水口下游 10km 处 10 吨溢油事故模拟结果



a. 整体图

b. 局部图

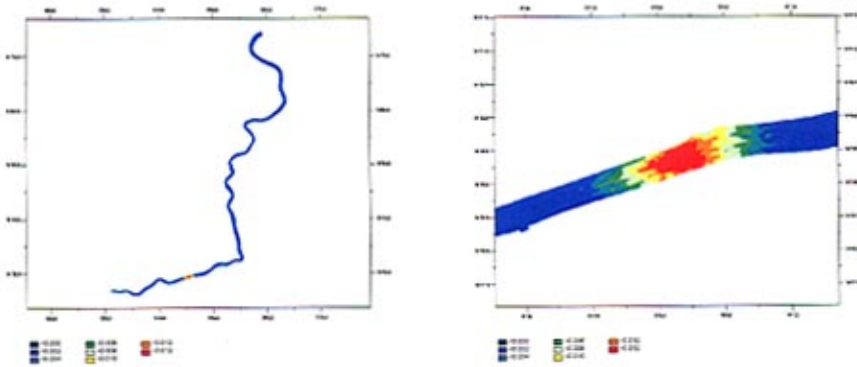
附图 3-1 溢油后 20 分钟



a. 整体图

b. 局部图

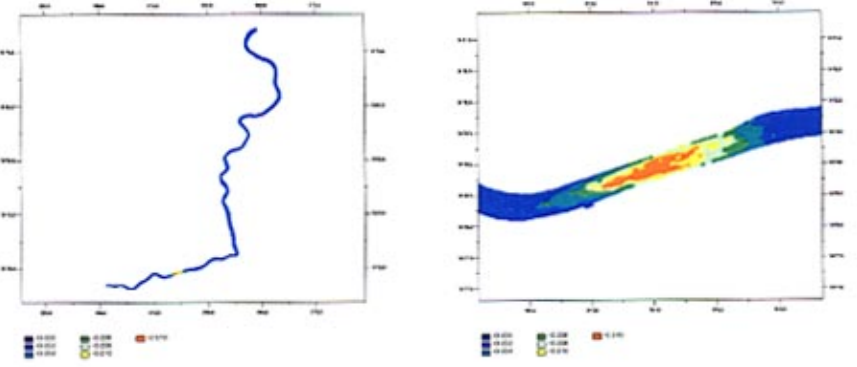
附图 3-2 溢油后 1 小时



a. 整体图

b. 局部图

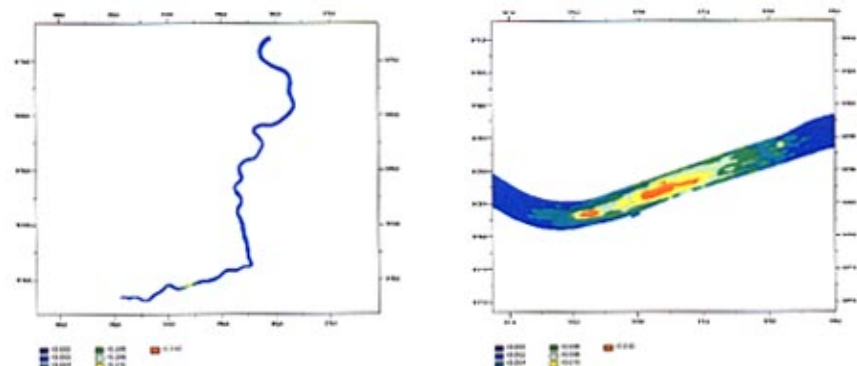
附图 3-3 溢油后 2 小时



a. 整体图

b. 局部图

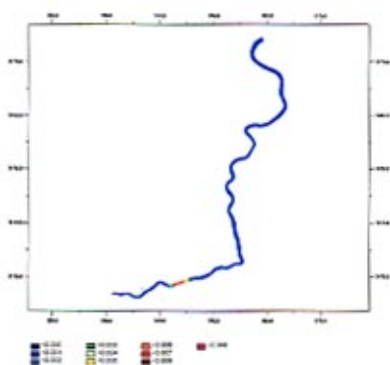
附图 3-4 溢油后 3 小时



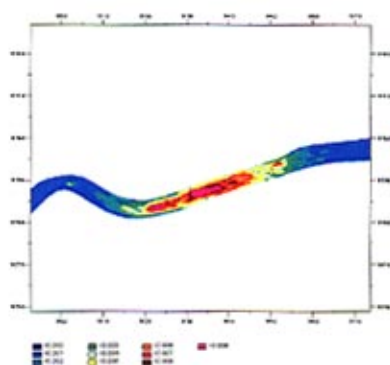
a. 整体图

b. 局部图

附图 3-5 溢油后 4 小时

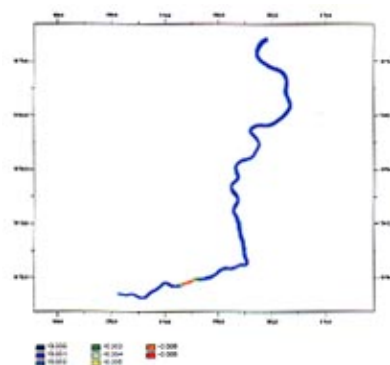


a. 整体图

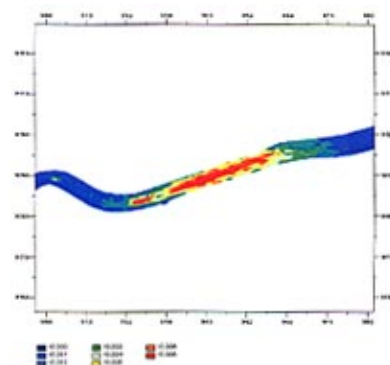


b. 局部图

附图 3-6 溢油后 5 小时

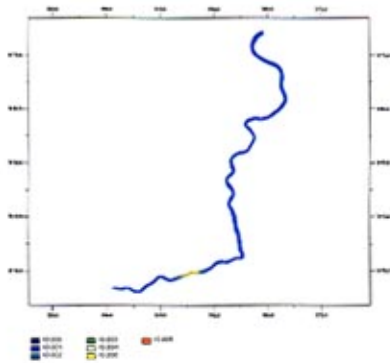


a. 整体图

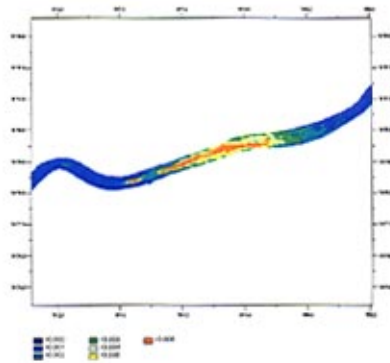


b. 局部图

附图 3-7 溢油后 6 小时

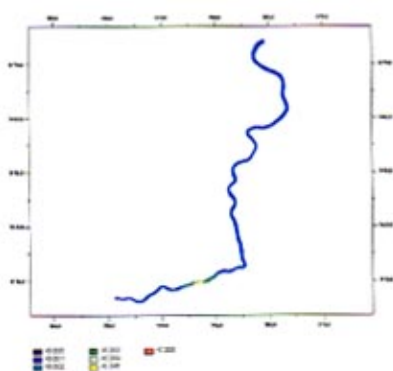


a. 整体图

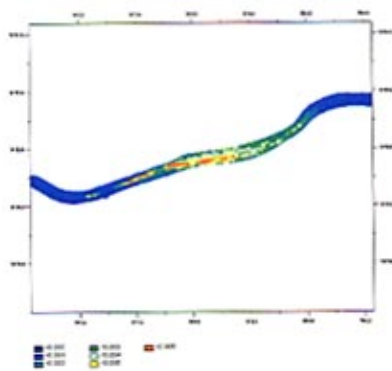


b. 局部图

附图 3-8 溢油后 7 小时

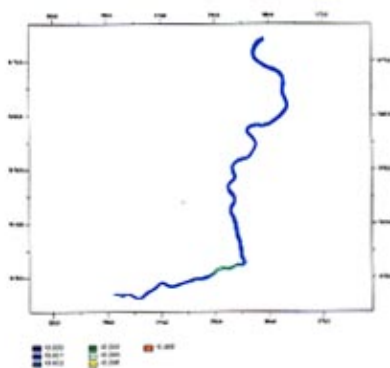


### a. 整体图

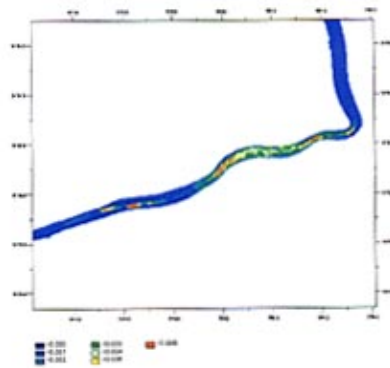


### b. 局部图

附图 3-9 溢油后 8 小时

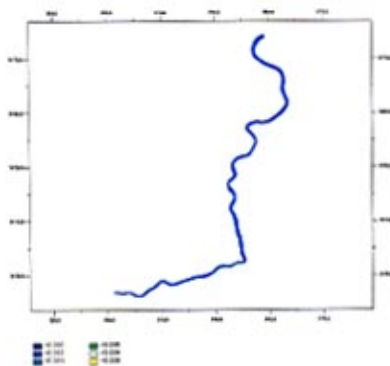


### a. 整体图

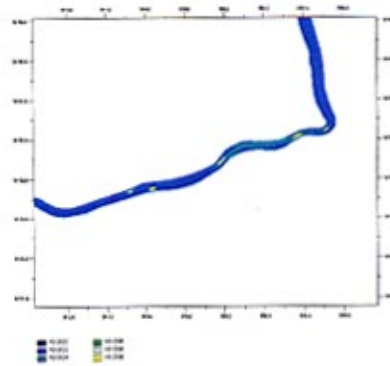


### b. 局部图

**附图 3-10 溢油后 11 小时**

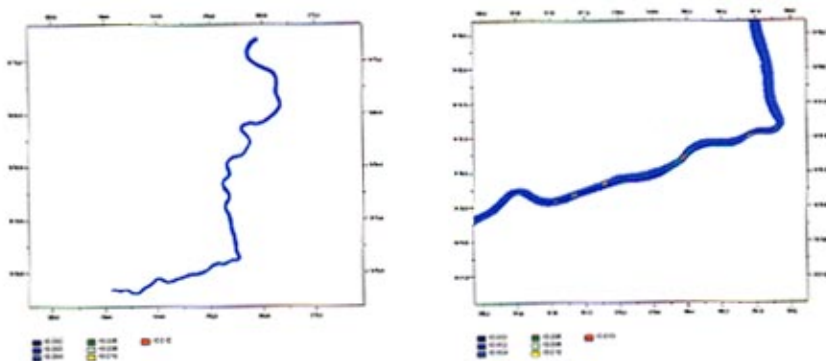


### a. 整体图



### b. 局部图

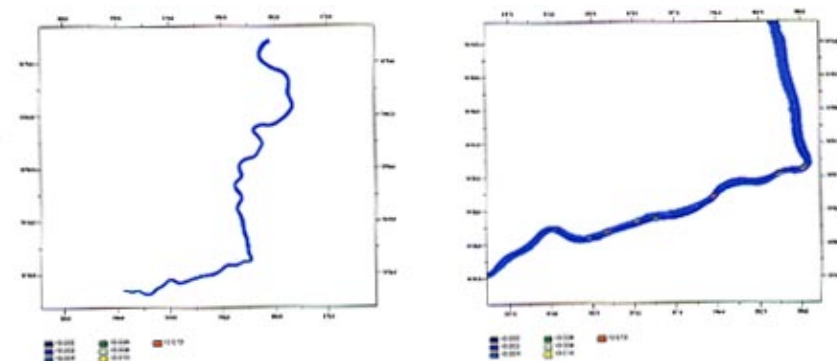
**附图 3-11 溢油后 12 小时**



a. 整体图

b. 局部图

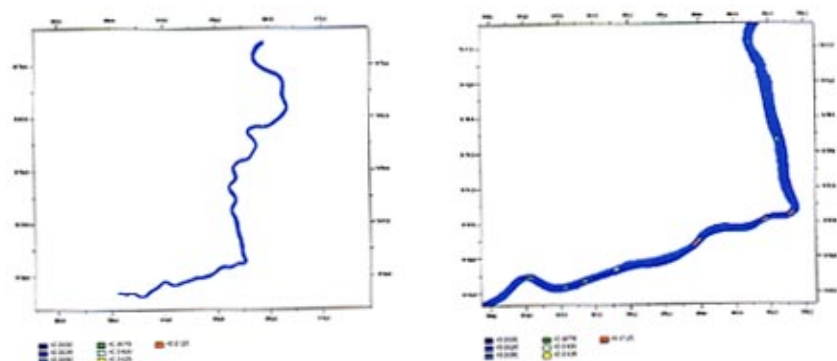
附图 3-12 溢油后 16 小时



a. 整体图

b. 局部图

附图 3-13 溢油后 24 小时

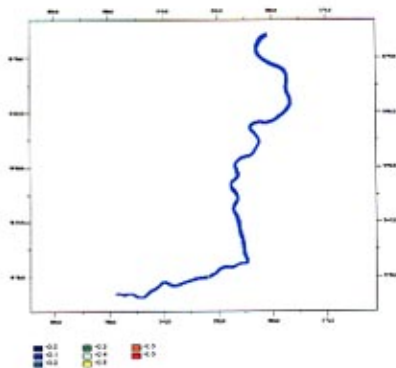


a. 整体图

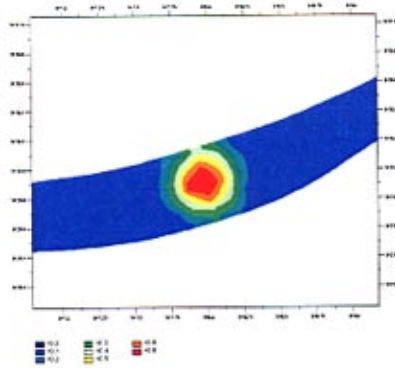
b. 局部图

附图 3-14 溢油后 48 小时

## 附录四 取水口下游 10km 处 100 吨溢油事故模拟结果

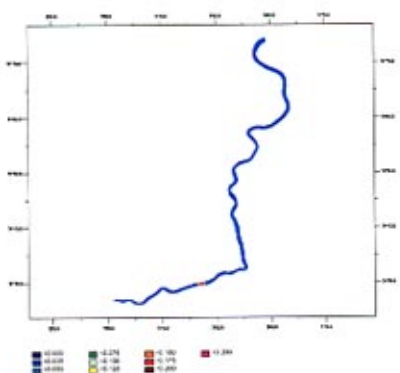


a. 整体图

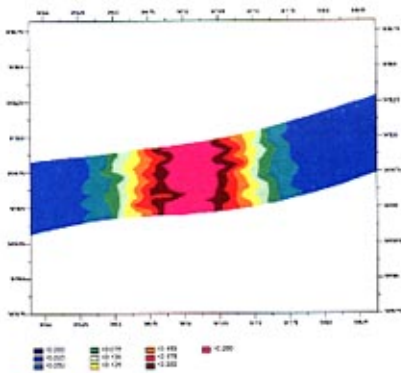


b. 局部图

附图 4-1 溢油后 20 分钟

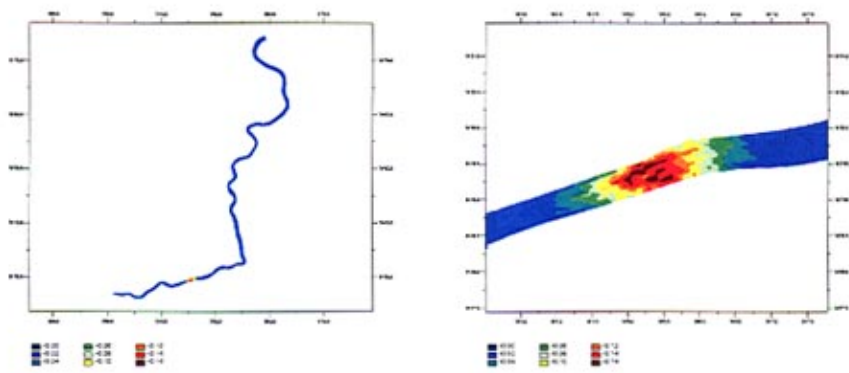


a. 整体图



b. 局部图

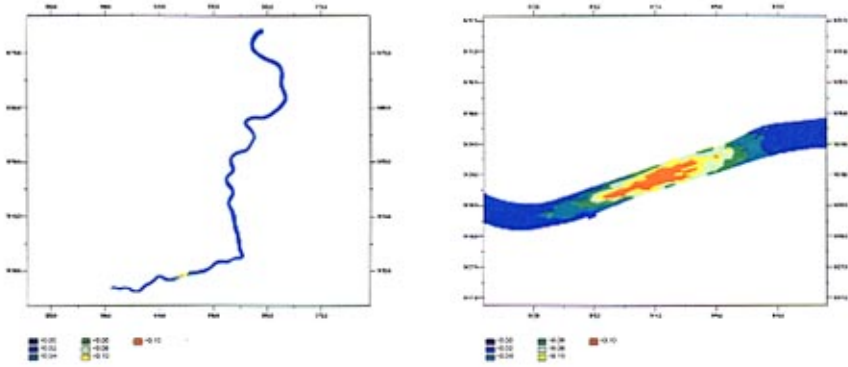
附图 4-2 溢油后 1 小时



a. 整体图

b. 局部图

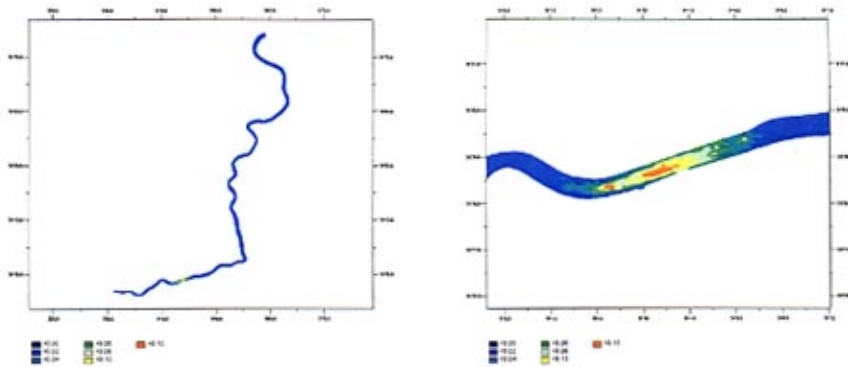
附图 4-3 溢油后 2 小时



a. 整体图

b. 局部图

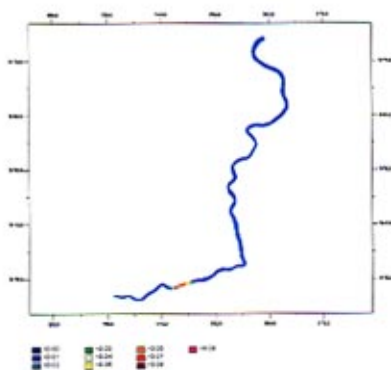
附图 4-4 溢油后 3 小时



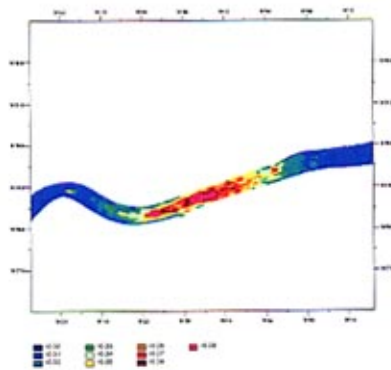
a. 整体图

b. 局部图

附图 4-5 溢油后 4 小时

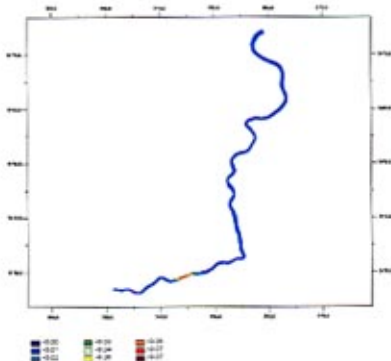


a. 整体图

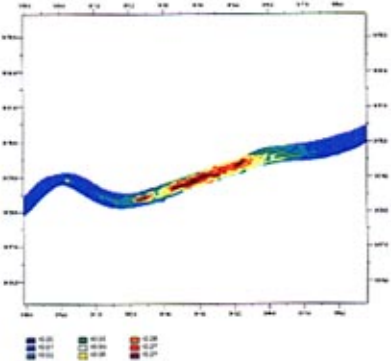


b. 局部图

附图 4-6 溢油后 5 小时

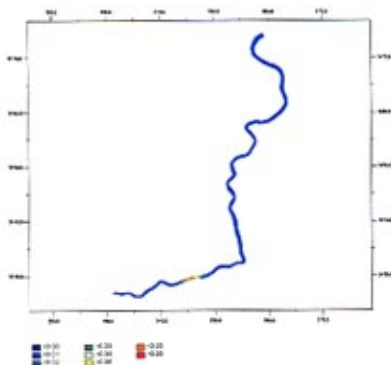


a. 整体图

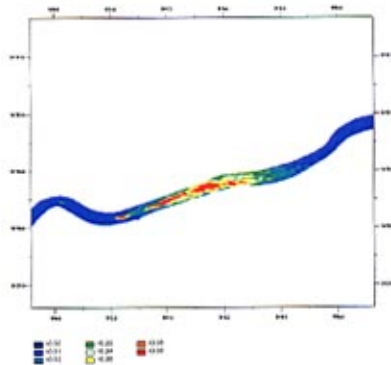


b. 局部图

附图 4-7 溢油后 6 小时



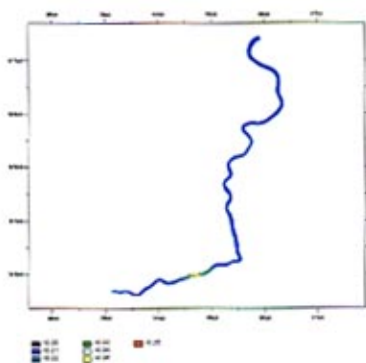
a. 整体图



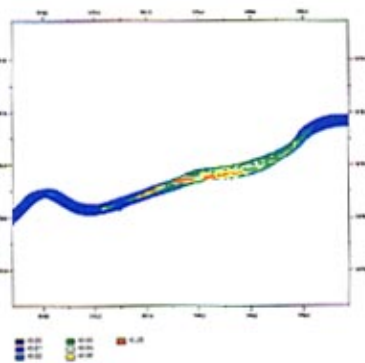
b. 局部图

附图 4-8 溢油后 7 小时



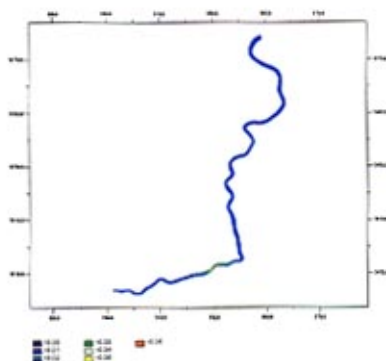


### a. 整体图

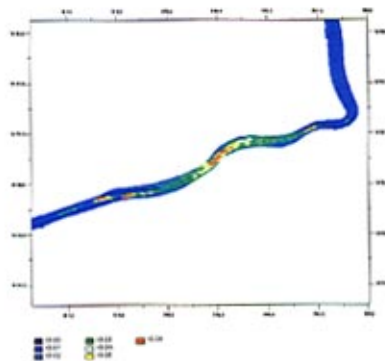


### b. 局部图

**附图 4-9 溢油后 8 小时**

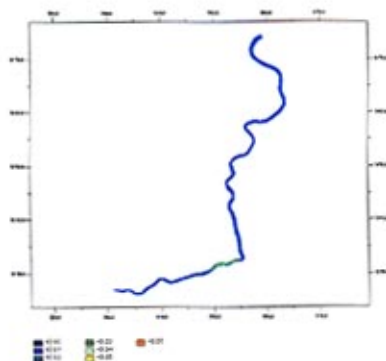


### a. 整体图

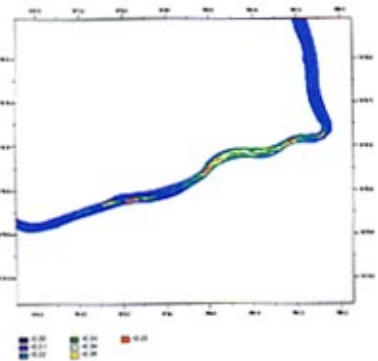


### b. 局部图

附图 4-10 溢油后 10 小时

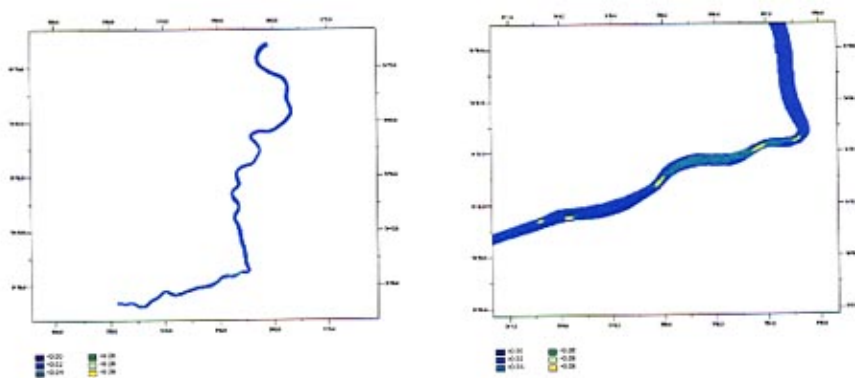


### a. 整体图



### b. 局部图

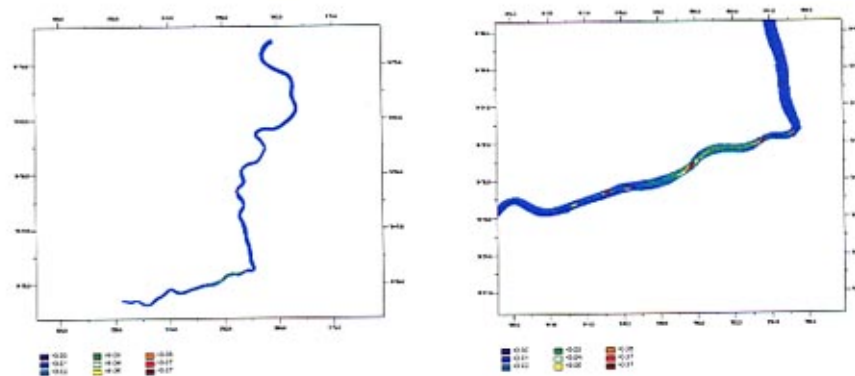
**附图 4-11 溢油后 11 小时**



a. 整体图

b. 局部图

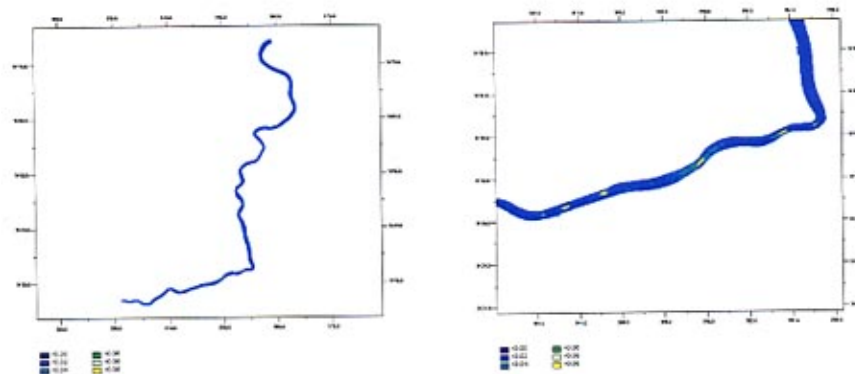
附图 4-12 溢油后 12 小时



a. 整体图

b. 局部图

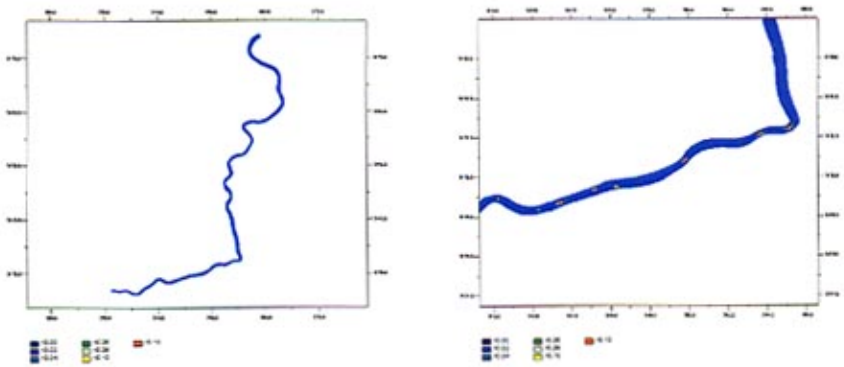
附图 4-13 溢油后 14 小时



a. 整体图

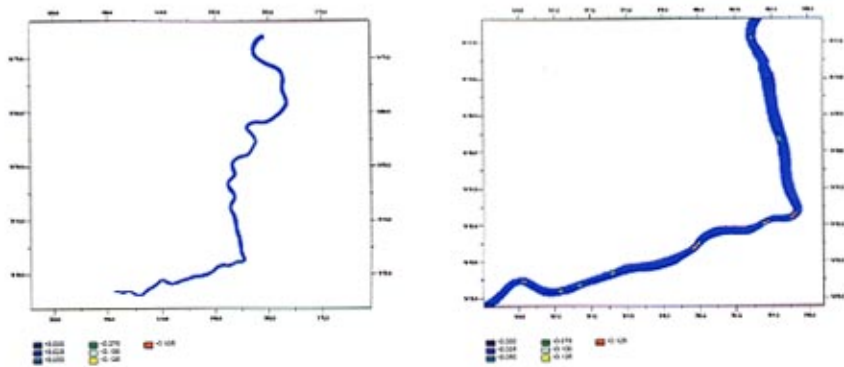
b. 局部图

附图 4-14 溢油后 15 小时



a. 整体图 b. 局部图

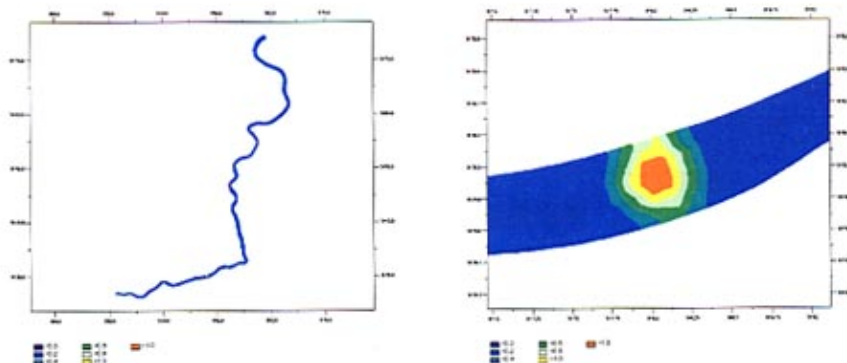
附图 4-15 溢油后 24 小时



a. 整体图 b. 局部图

附图 4-16 溢油后 48 小时

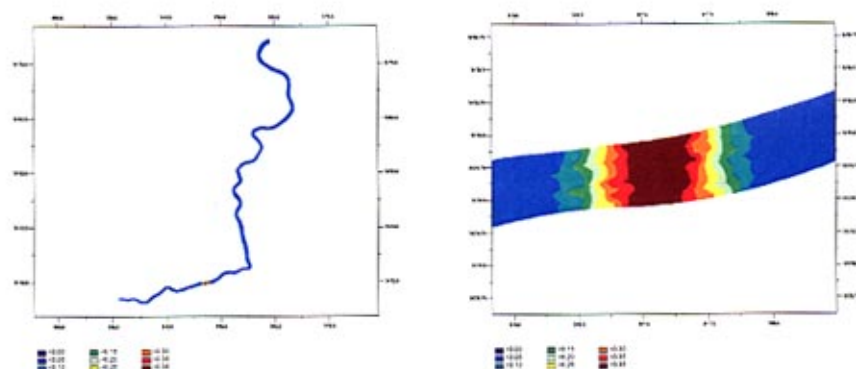
## 附录五 取水口下游 10km 处 200 吨溢油事故模拟结果



a. 整体图

b. 局部图

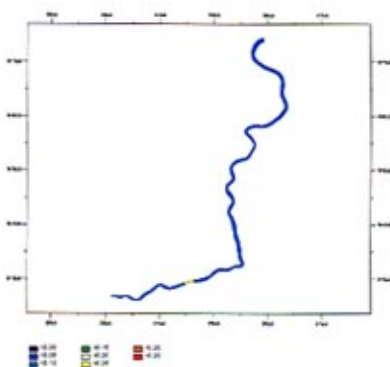
附图 5-1 溢油后 20 分钟



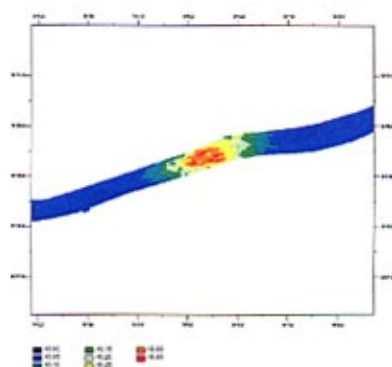
a. 整体图

b. 局部图

附图 5-2 溢油后 1 小时

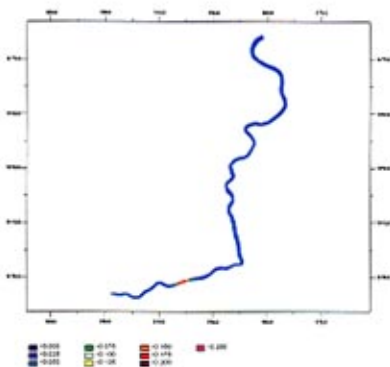


a. 整体图

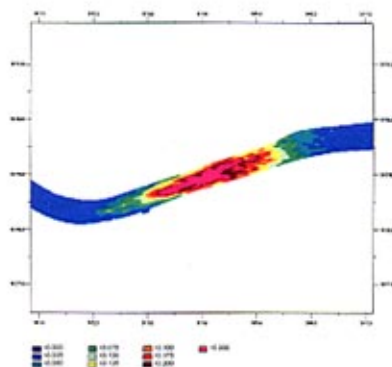


b. 局部图

附图 5-3 溢油后 2 小时

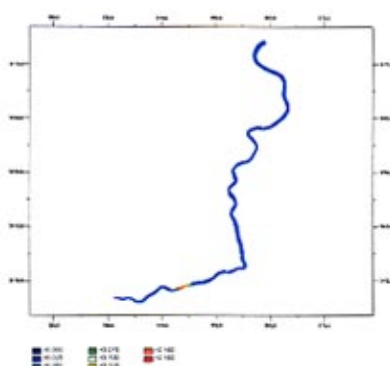


a. 整体图

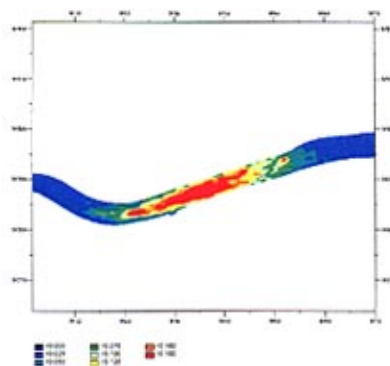


b. 局部图

附图 5-4 溢油后 3 小时

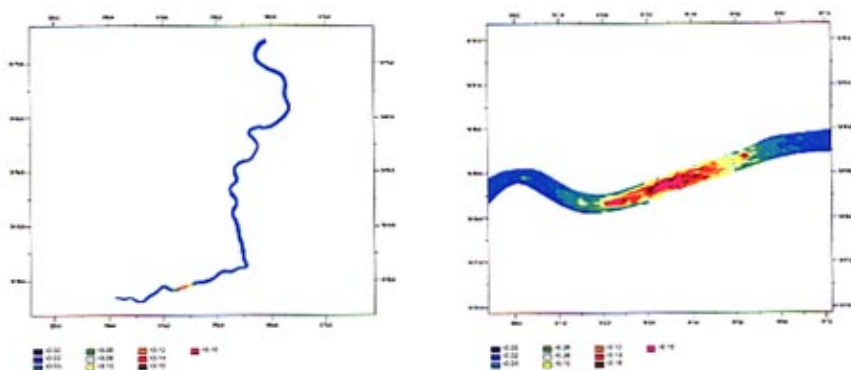


a. 整体图



b. 局部图

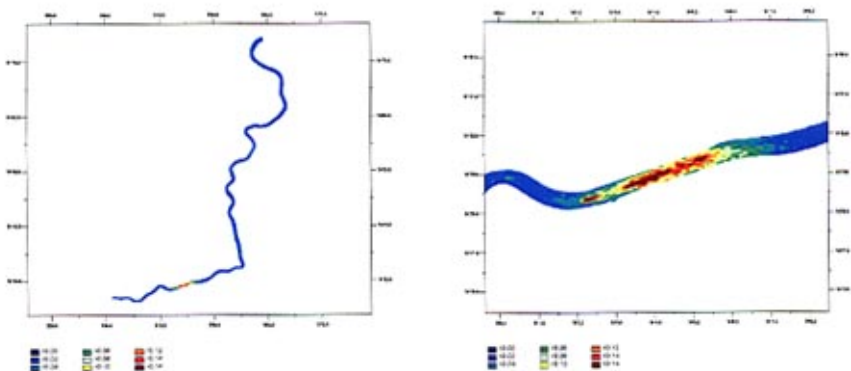
附图 5-5 溢油后 4 小时



a. 整体图

b. 局部图

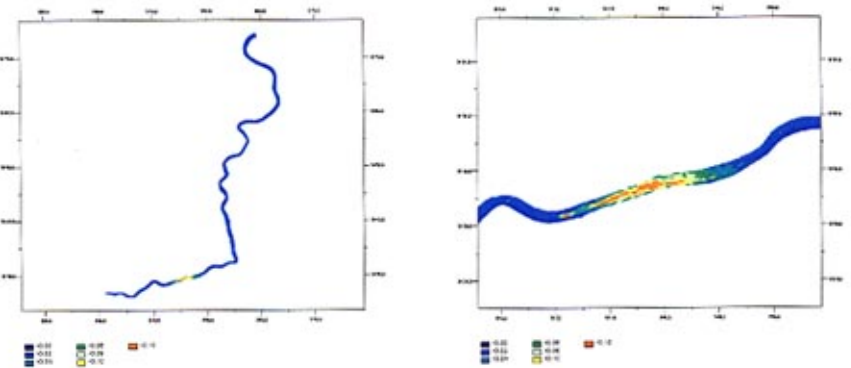
附图 5-6 溢油后 5 小时



a. 整体图

b. 局部图

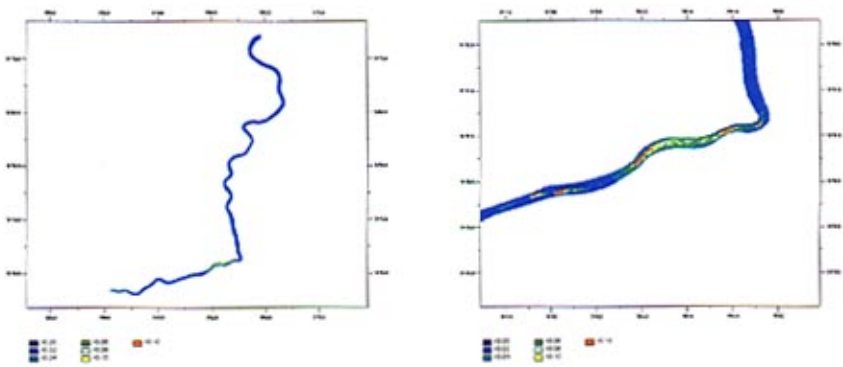
附图 5-7 溢油后 6 小时



a. 整体图

b. 局部图

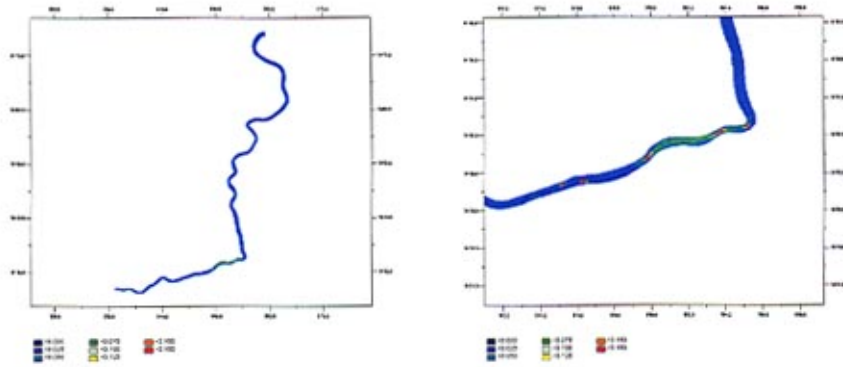
附图 5-8 溢油后 7 小时



a. 整体图

b. 局部图

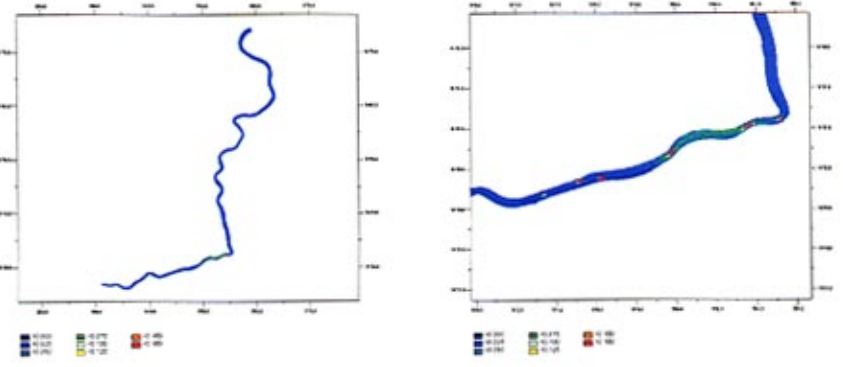
附图 5-9 溢油后 11 小时



a. 整体图

b. 局部图

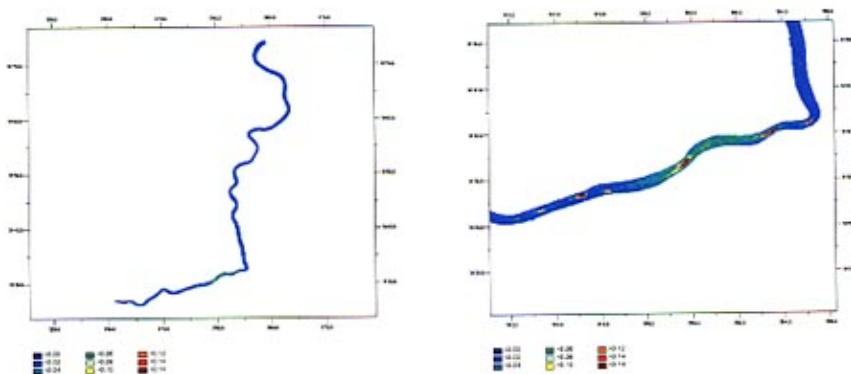
附图 5-10 溢油后 12 小时



a. 整体图

b. 局部图

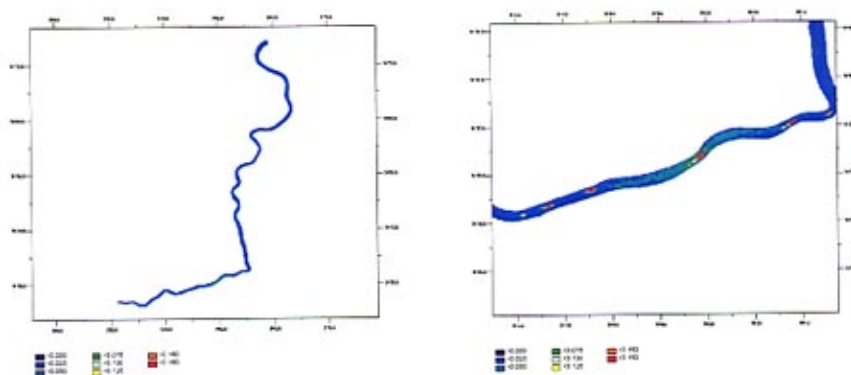
附图 5-11 溢油后 13 小时



a. 整体图

b. 局部图

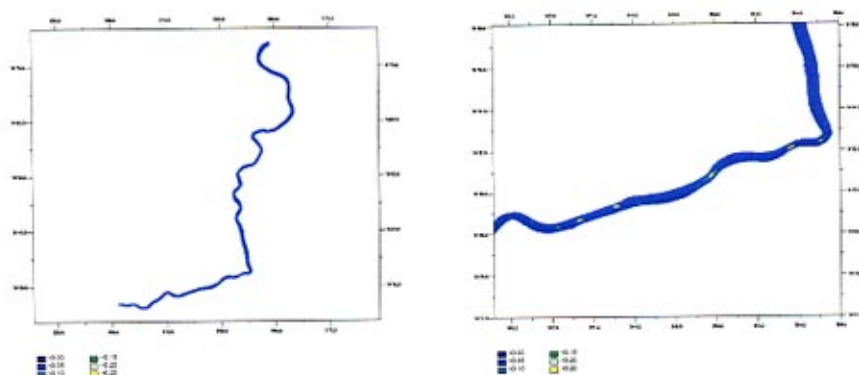
附图 5-12 溢油后 14 小时



a. 整体图

b. 局部图

附图 5-13 溢油后 15 小时

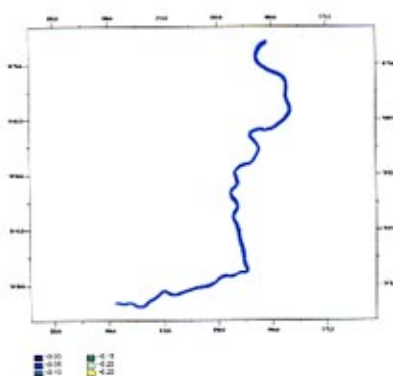


a. 整体图

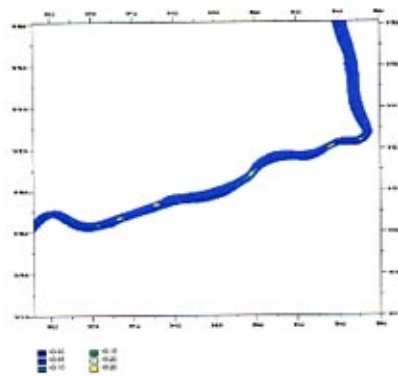
b. 局部图

附图 5-14 溢油后 16 小时



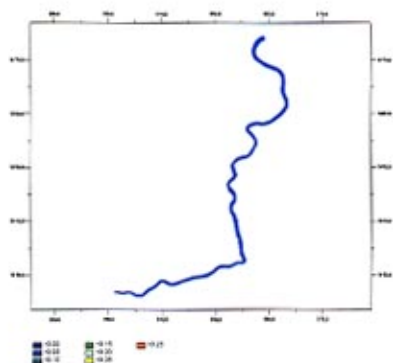


### a. 整体图

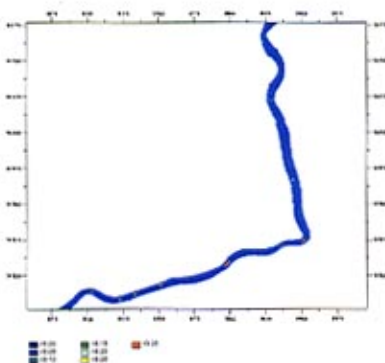


### b. 局部图

**附图 5-15 溢油后 24 小时**



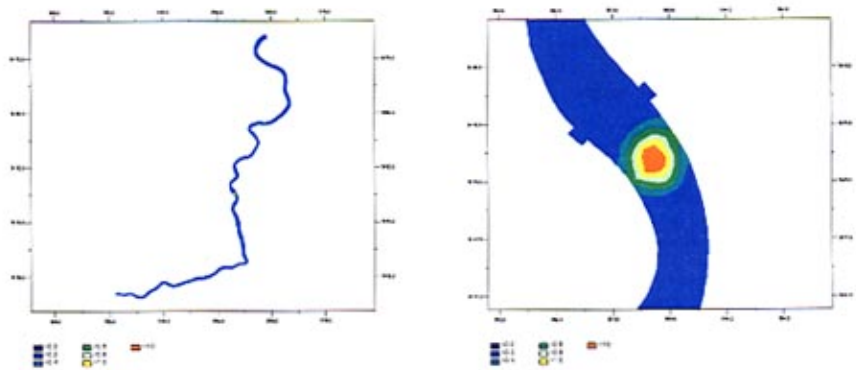
### a. 整体图



### b. 局部图

**附图 5-16 溢油后 48 小时**

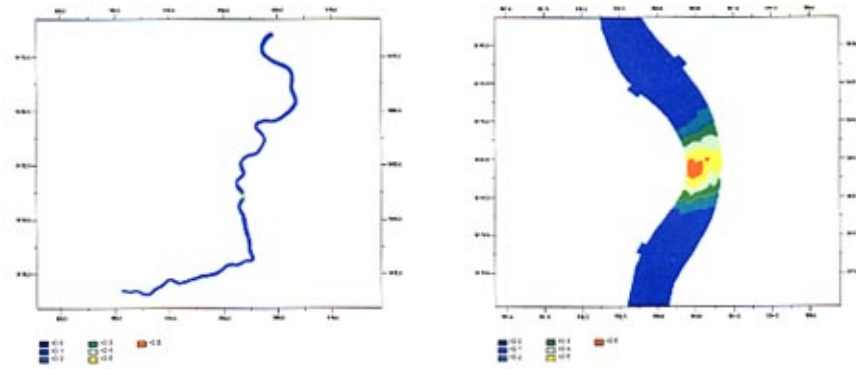
附录六 取水口下游 30km 处 200 吨溢油事故模拟结果



a. 整体图

b. 局部图

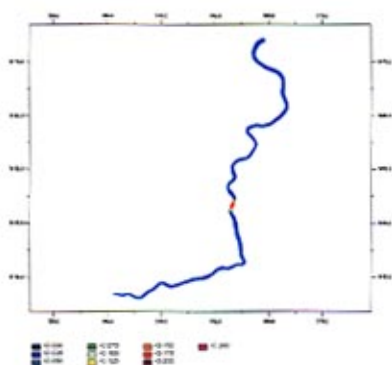
附图 6-1 溢油后 20 分钟



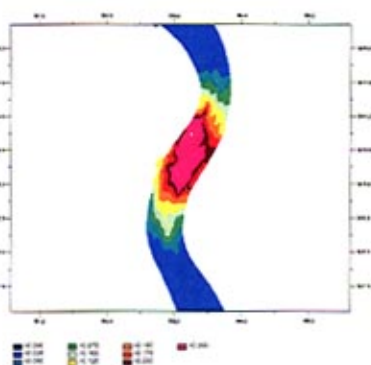
a. 整体图

b. 局部图

附图 6-2 溢油后 1 小时

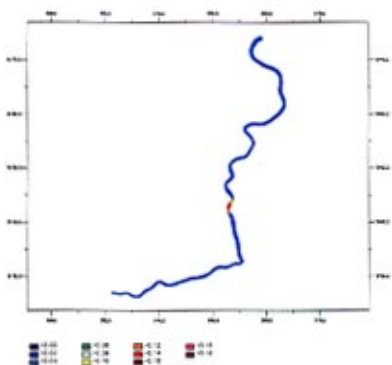


a. 整体图

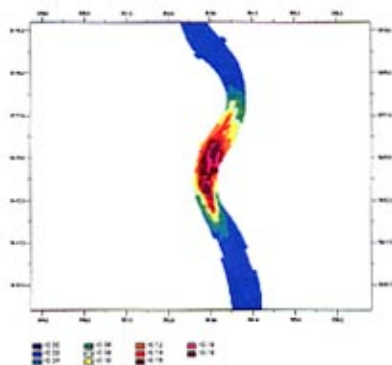


b. 局部图

附图 6-3 溢油后 2 小时

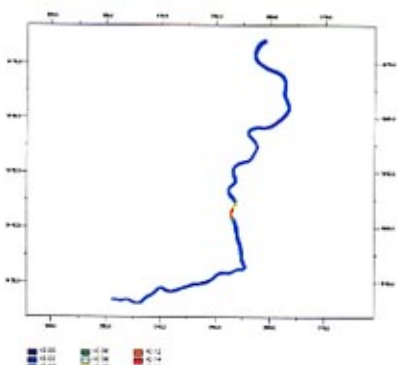


a. 整体图

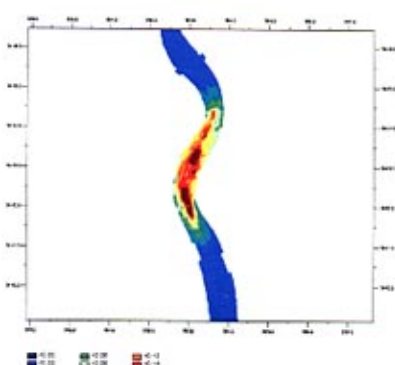


b. 局部图

附图 6-4 溢油后 3 小时

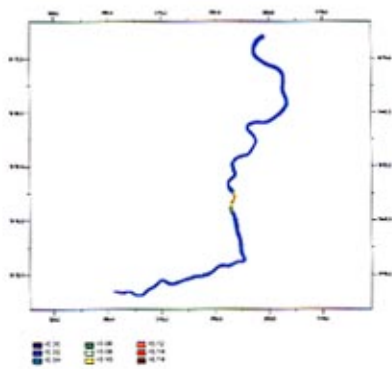


a. 整体图

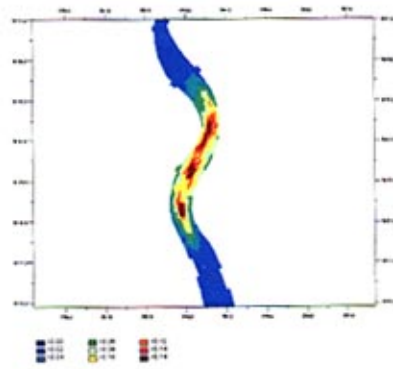


b. 局部图

附图 6-5 溢油后 4 小时

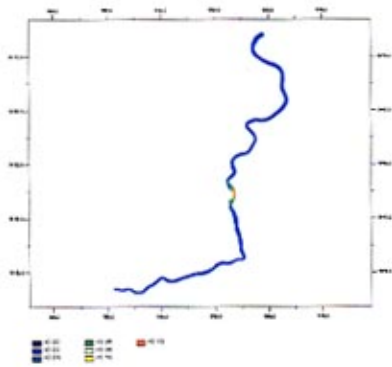


a. 整体图

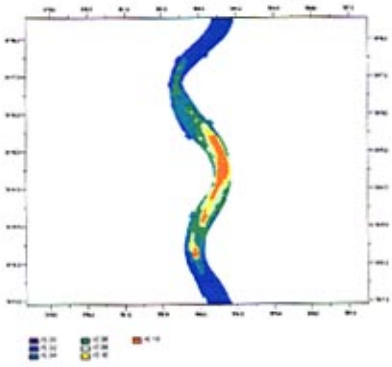


b. 局部图

附图 6-6 溢油后 5 小时

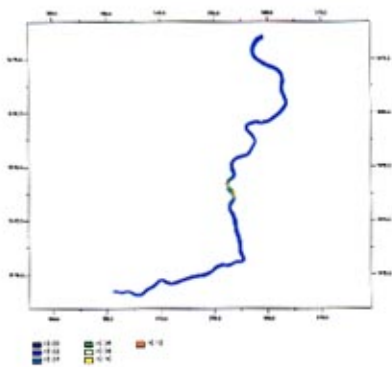


a. 整体图

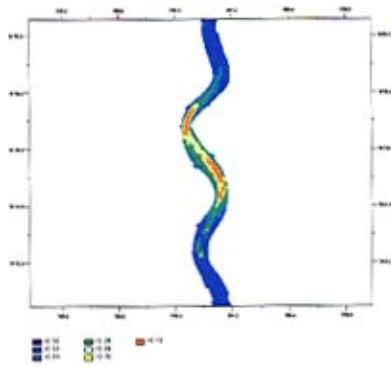


b. 局部图

附图 6-7 溢油后 6 小时

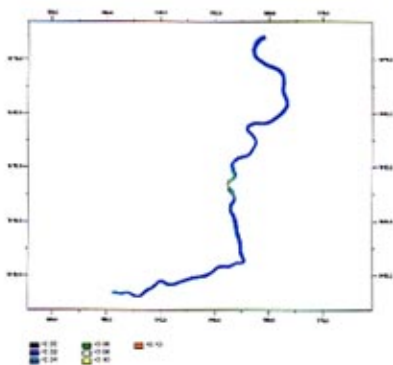


a. 整体图

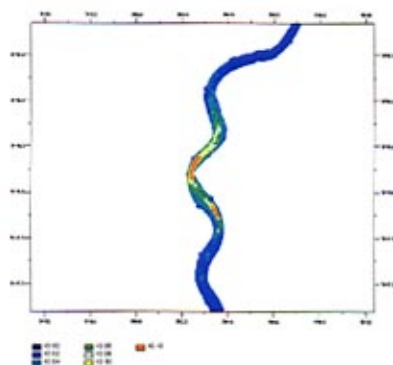


b. 局部图

附图 6-8 溢油后 7 小时

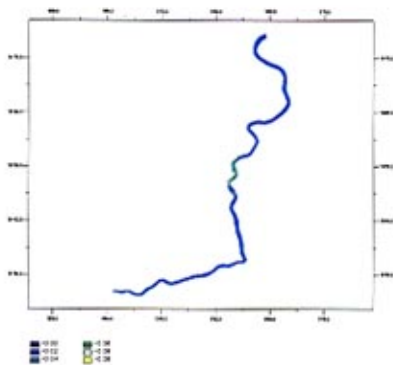


### a. 整体图

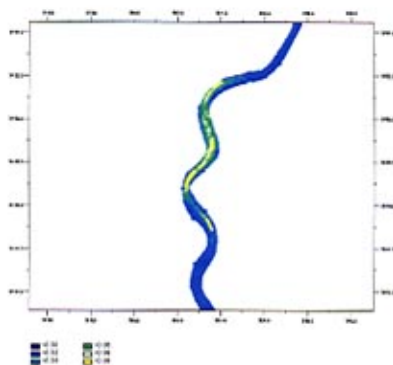


### b. 局部图

**附图 6-9 溢油后 8 小时**

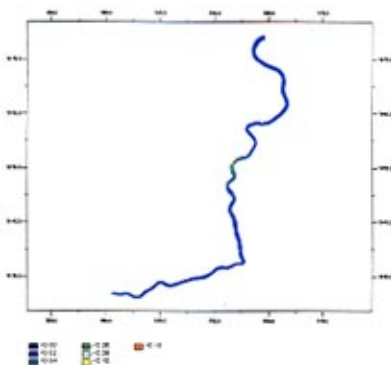


### a. 整体图

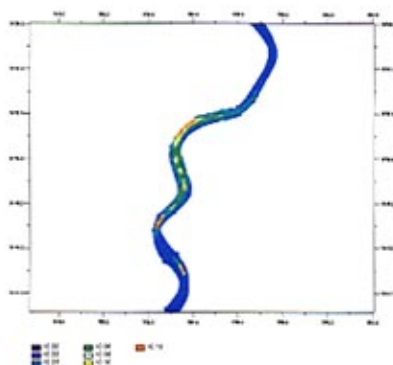


### b. 局部图

附图 6-10 溢油后 9 小时

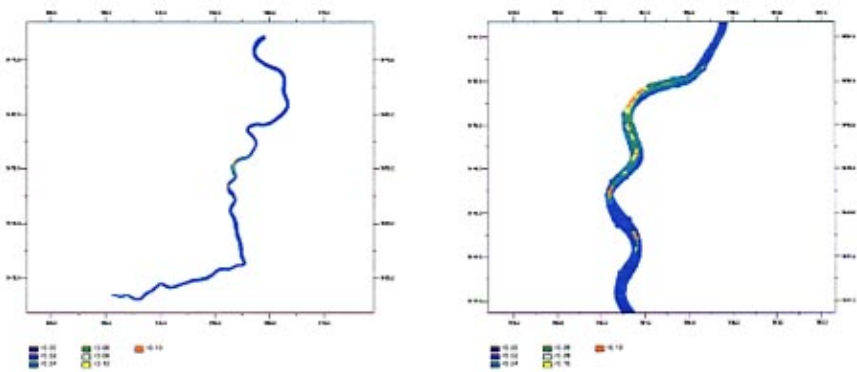


### 8. 整体图



### b. 局部图

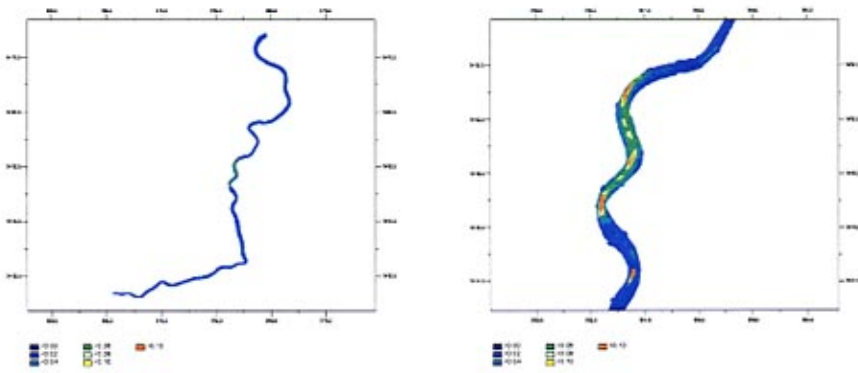
**附图 6-11 溢油后 10 小时**



a. 整体图

b. 局部图

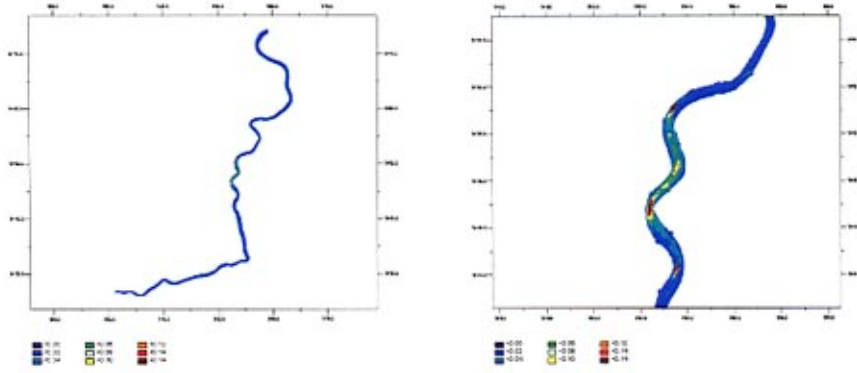
附图 6-12 溢油后 11 小时



a. 整体图

b. 局部图

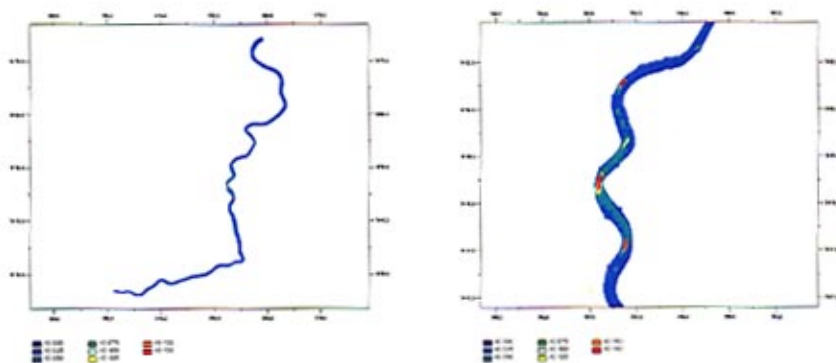
附图 6-13 溢油后 12 小时



a. 整体图

b. 局部图

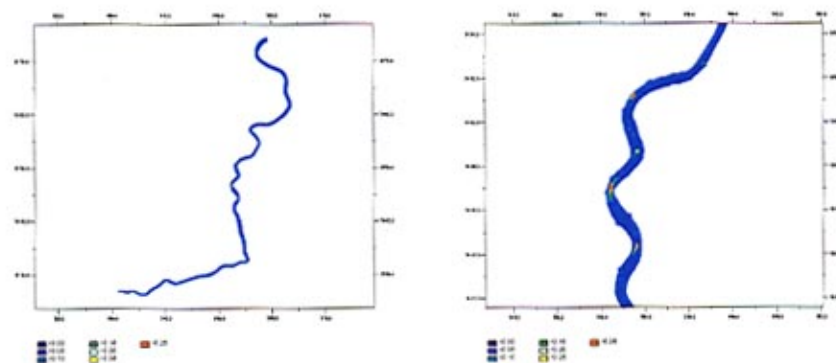
附图 6-14 溢油后 13 小时



a. 整体图

b. 局部图

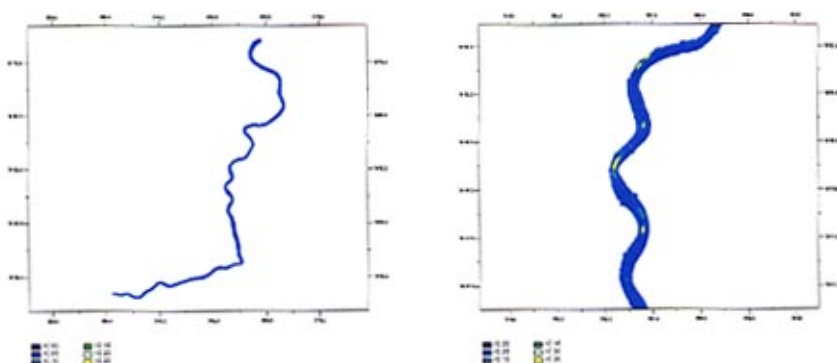
附图 6-15 溢油后 14 小时



a. 整体图

b. 局部图

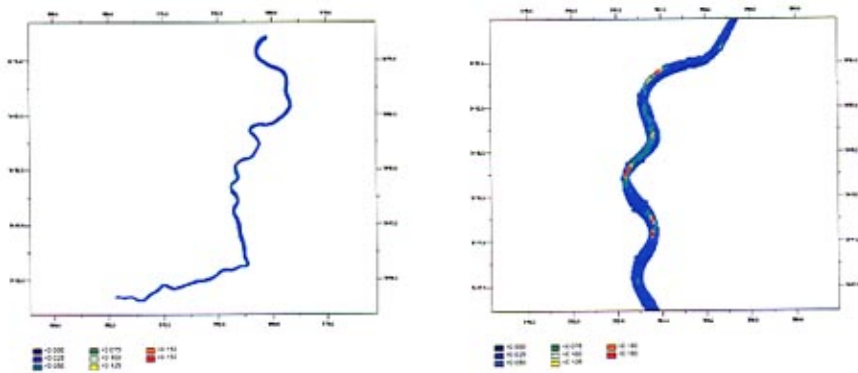
附图 6-16 溢油后 15 小时



a. 整体图

b. 局部图

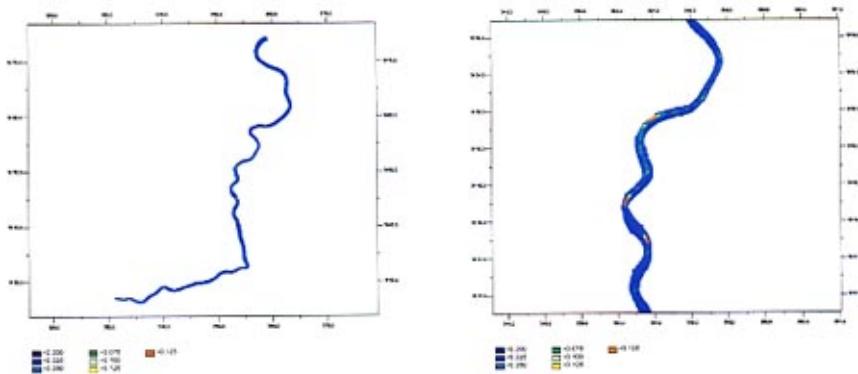
附图 6-17 溢油后 17 小时



a. 整体图

b. 局部图

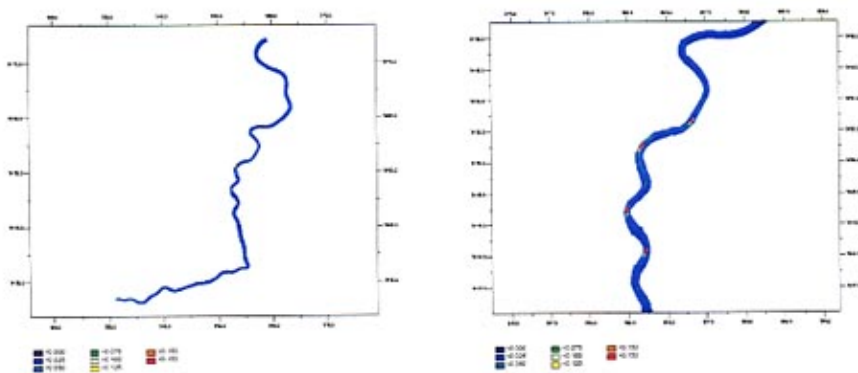
附图 6-18 溢油后 18 小时



a. 整体图

b. 局部图

附图 6-19 溢油后 20 小时

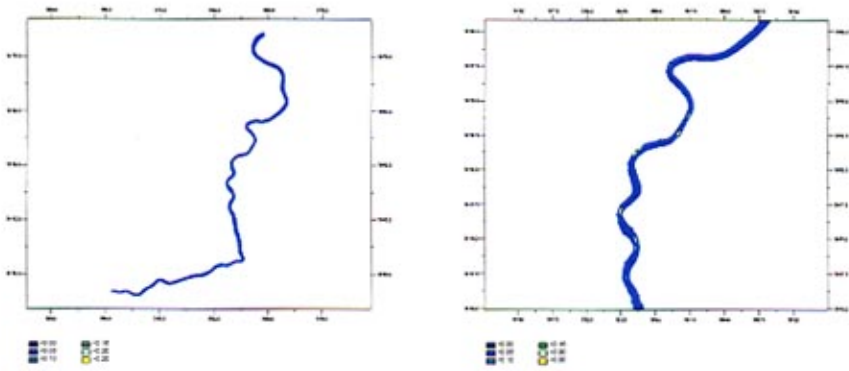


a. 整体图

b. 局部图

附图 6-20 溢油后 24 小时



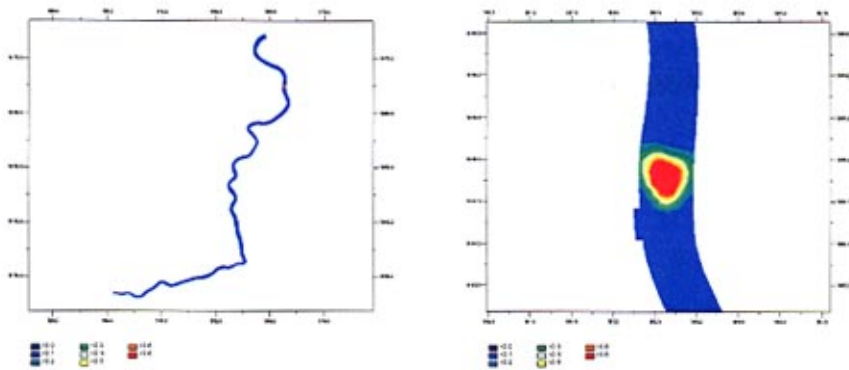


a. 整体图

b. 局部图

附图 6-21 溢油后 48 小时

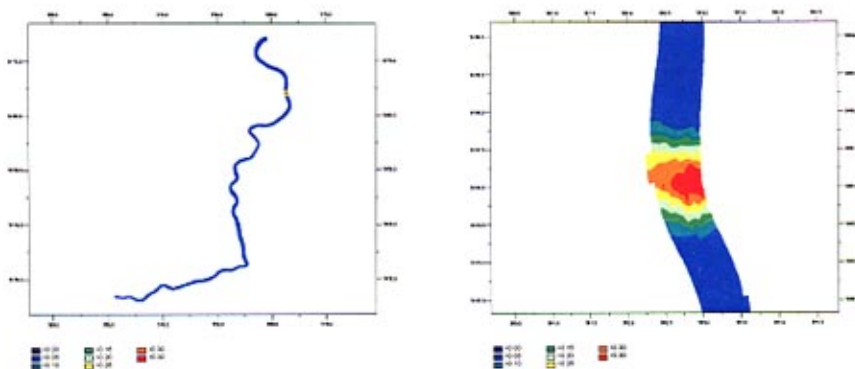
## 附录七 下游河段的模拟结果



a. 整体图

b. 局部图

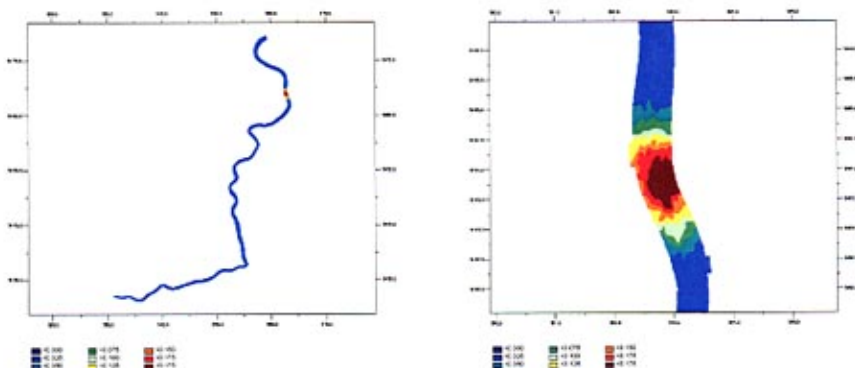
附图 7-1 溢油后 20 分钟



a. 整体图

b. 局部图

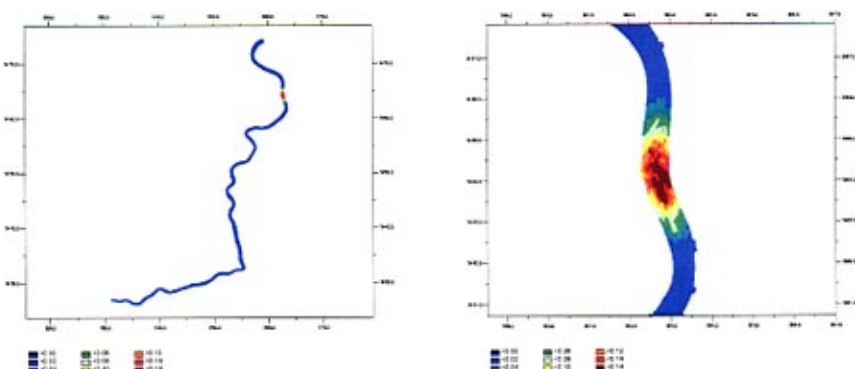
附图 7-2 溢油后 1 小时



a. 整体图

b. 局部图

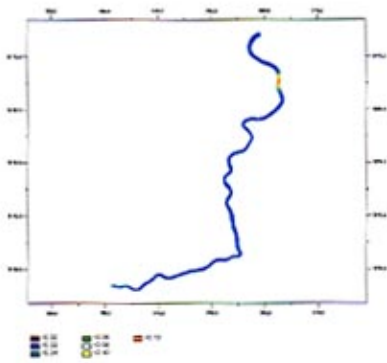
附图 7-3 溢油后 2 小时



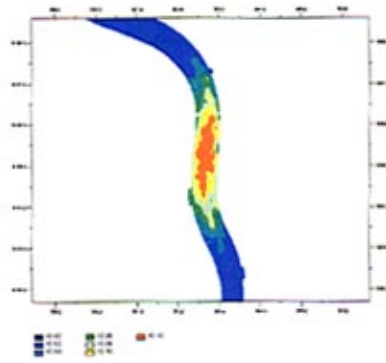
a. 整体图

b. 局部图

附图 7-4 溢油后 3 小时

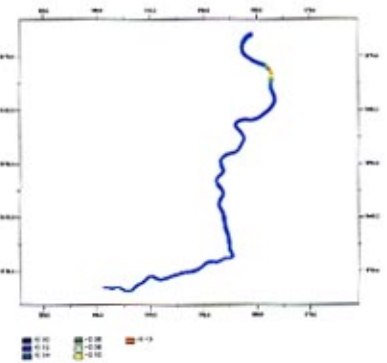


a. 整体图

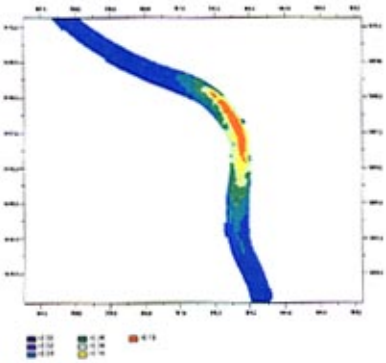


b. 局部图

附图 7-5 溢油后 4 小时

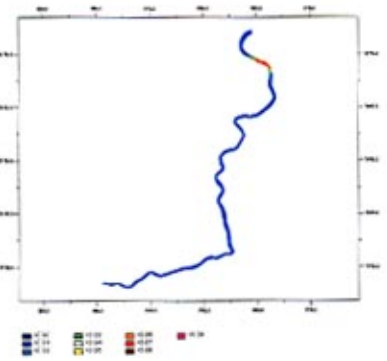


a. 整体图

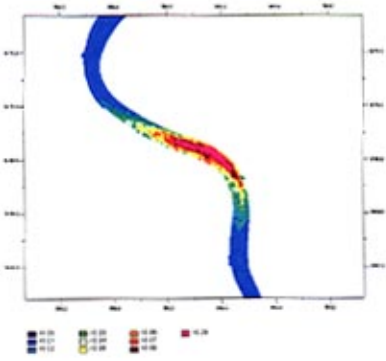


b. 局部图

附图 7-6 溢油后 5 小时

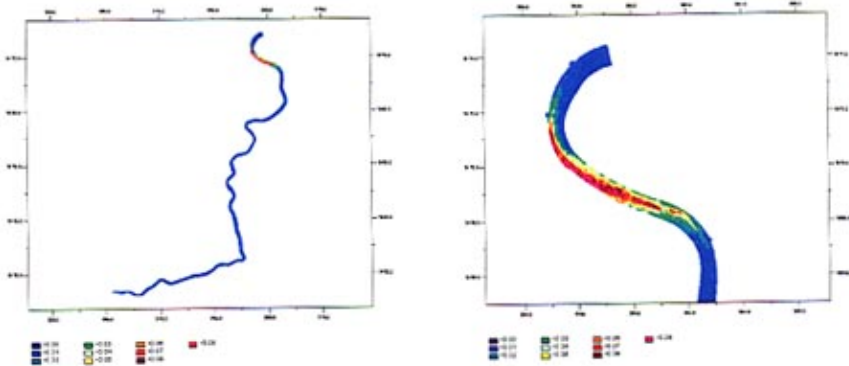


a. 整体图



b. 局部图

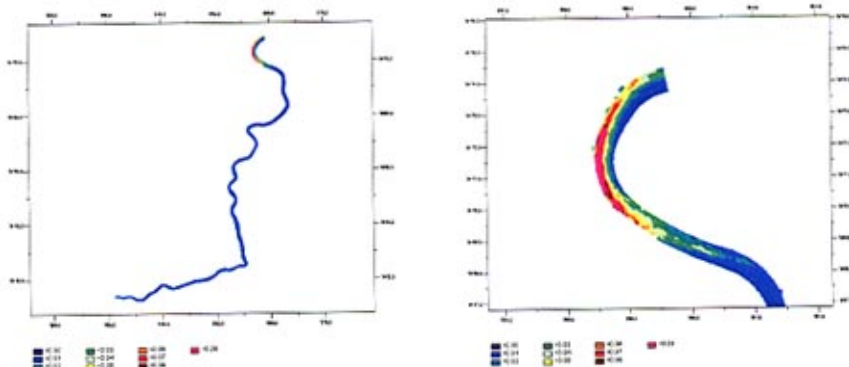
附图 7-7 溢油后 6 小时



a. 整体图

b. 局部图

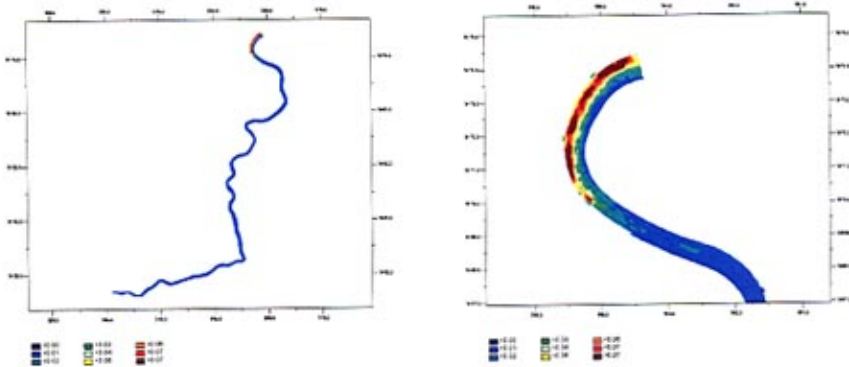
附图 7-8 溢油后 7 小时



a. 整体图

b. 局部图

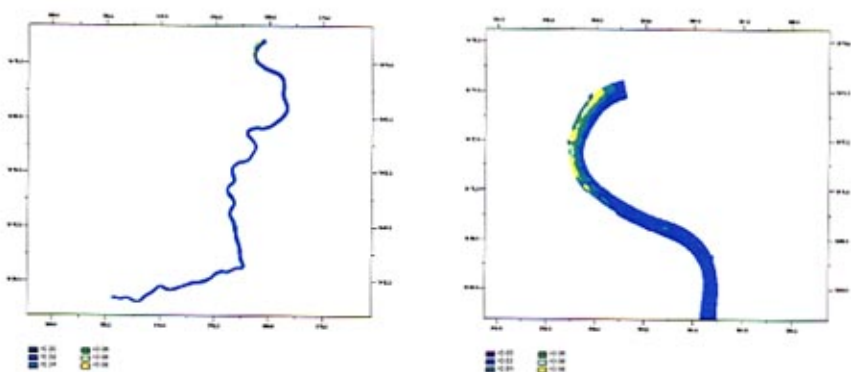
附图 7-9 溢油后 8 小时



a. 整体图

b. 局部图

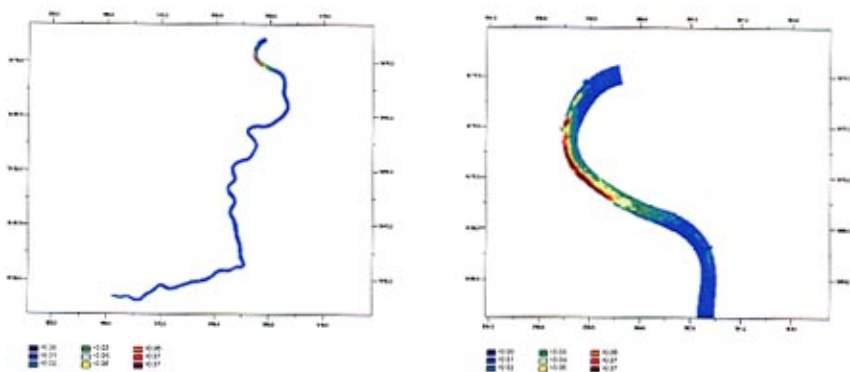
附图 7-10 溢油后 9 小时



a. 整体图

b. 局部图

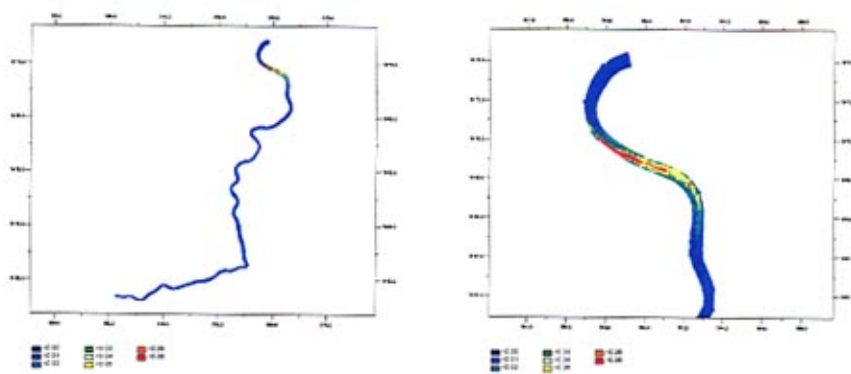
附图 7-11 溢油后 10 小时



a. 整体图

b. 局部图

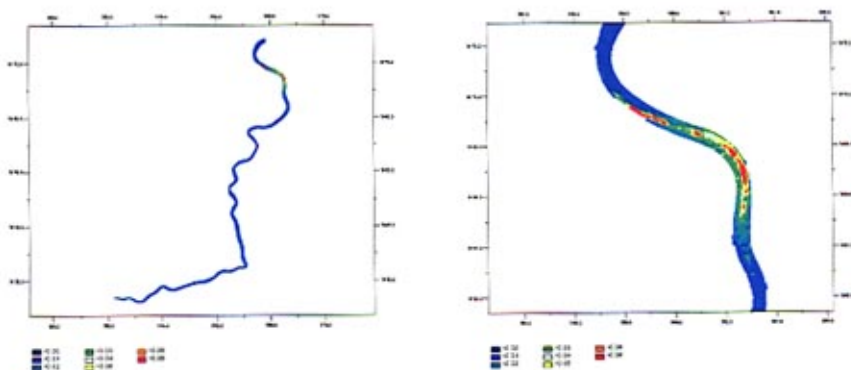
附图 7-12 溢油后 11 小时



a. 整体图

b. 局部图

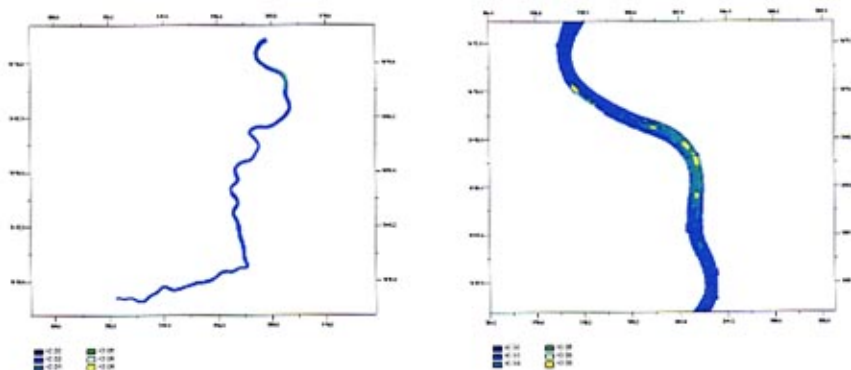
附图 7-13 溢油后 12 小时



a. 整体图

b. 局部图

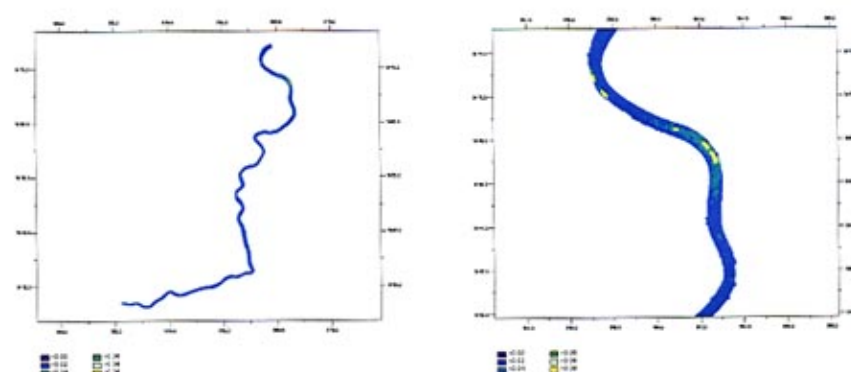
附图 7-14 溢油后 13 小时



a. 整体图

b. 局部图

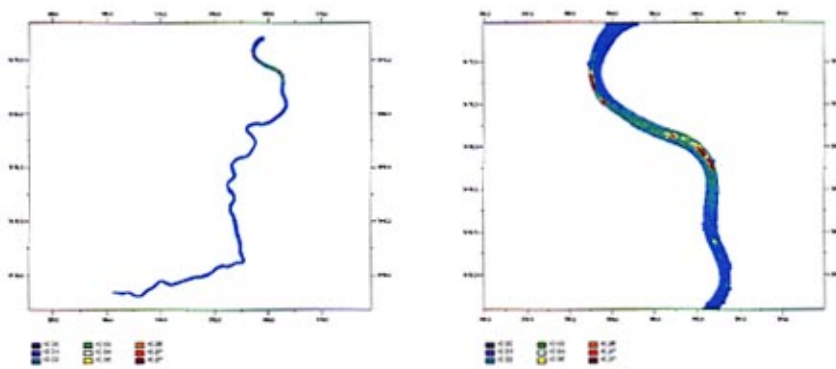
附图 7-15 溢油后 14 小时



a. 整体图

b. 局部图

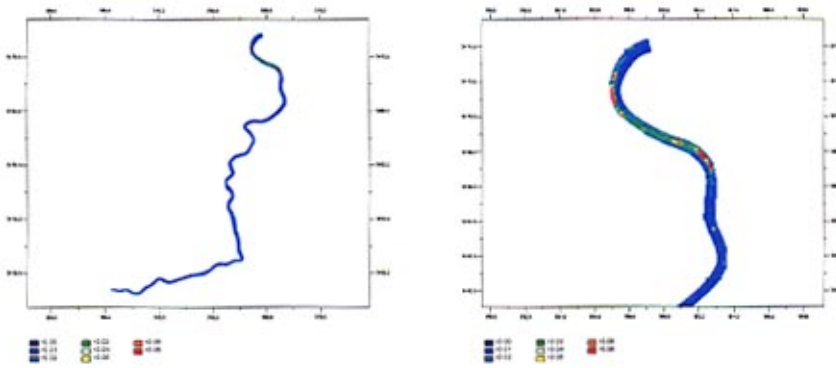
附图 7-16 溢油后 15 小时



a. 整体图

b. 局部图

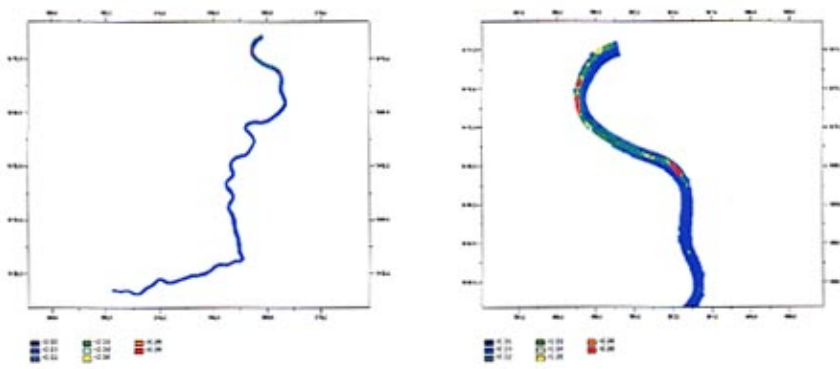
附图 7-17 溢油后 16 小时



a. 整体图

b. 局部图

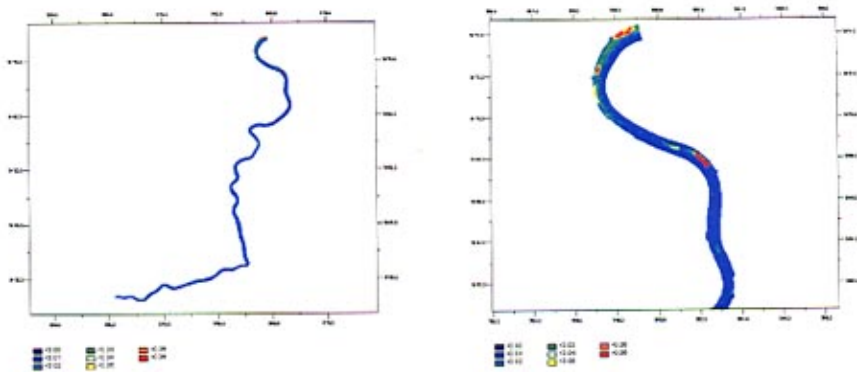
附图 7-18 溢油后 17 小时



a. 整体图

b. 局部图

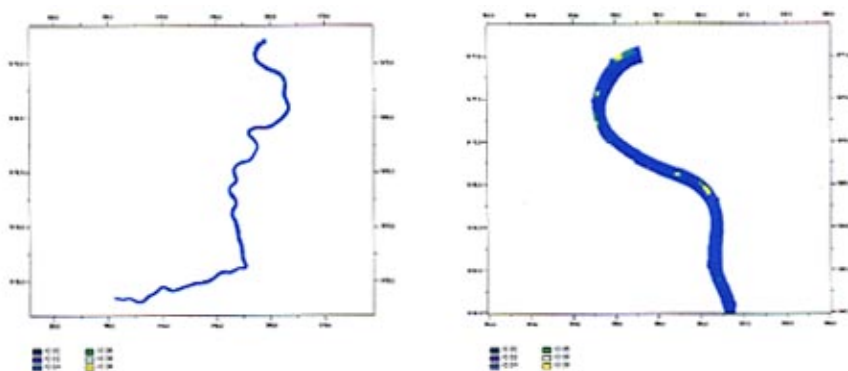
附图 7-19 溢油后 18 小时



a. 整体图

b. 局部图

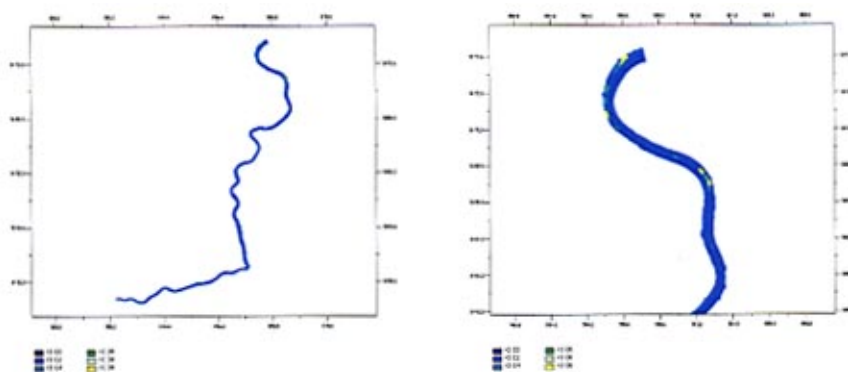
附图 7-20 溢油后 20 小时



a. 整体图

b. 局部图

附图 7-21 溢油后 21 小时

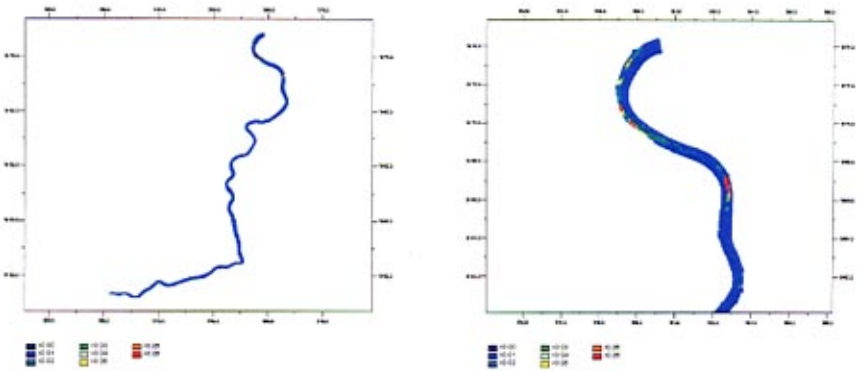


a. 整体图

b. 局部图

附图 7-22 溢油后 22 小时

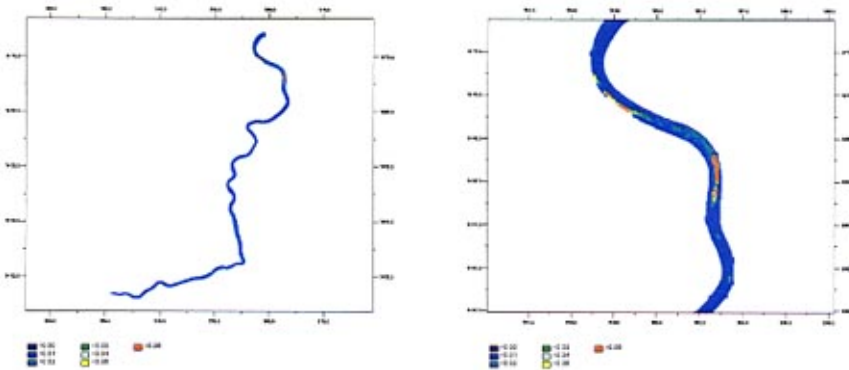




a. 整体图

b. 局部图

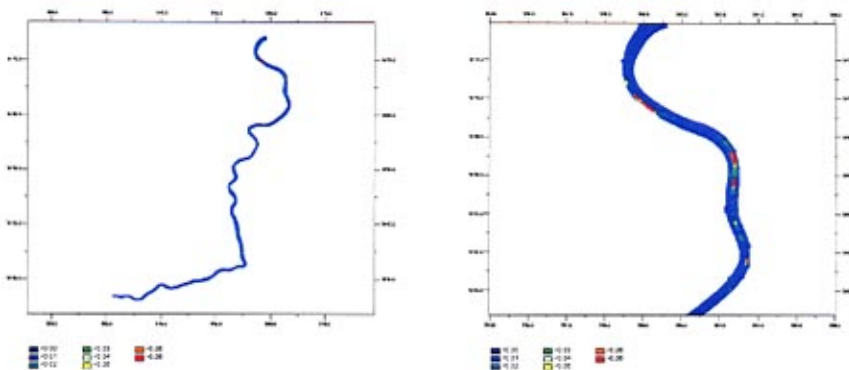
附图 7-23 溢油后 23 小时



a. 整体图

b. 局部图

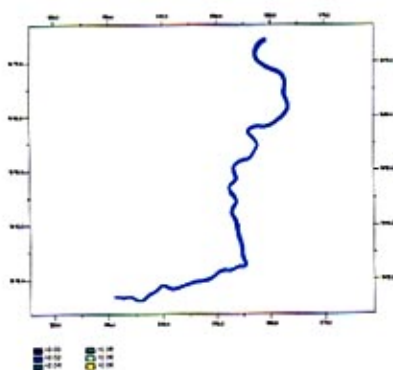
附图 7-24 溢油后 24 小时



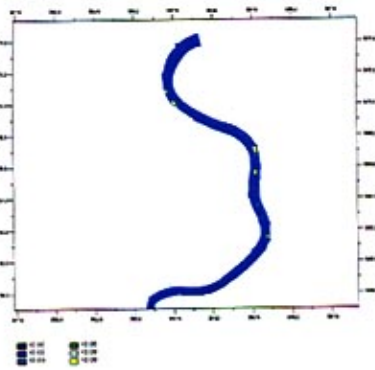
a. 整体图

b. 局部图

附图 7-25 溢油后 25 小时

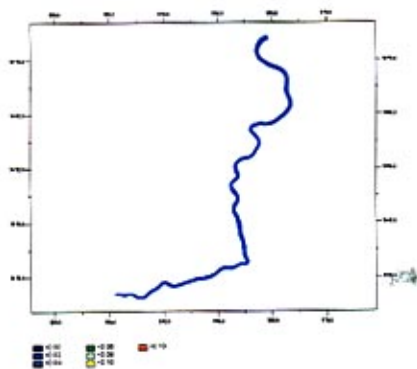


a. 整体图

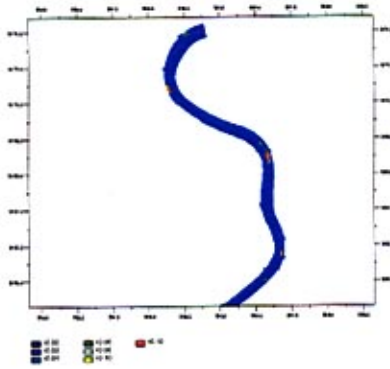


b. 局部图

附图 7-26 溢油后 26 小时



a. 整体图



b. 局部图

附图7-27 溢油后48小时

## 攻读学位期间发表的论文

- 1.应用 RECOVERY 模型研究底泥释放规律, 环境污染与防治, 2005, 27

## 致 谢

本论文是在恩师林卫青教授的悉心指导下完成的。

在两年多的学习中，从论文的选题、资料的查阅和整理、模型的运行直至最后的撰写工作，事无巨细都得到了林老师极大的关心和指导。林老师严谨的治学态度、平易近人的工作作风和关心他人的高尚品质给了我极大的帮助和教诲，是我获得的宝贵财富，将使我受益终生！

值此论文完成之际，谨向我的导师致以衷心的感谢和深深的敬意！

在日常的学习和研究工作中，上海市环境科学研究院标准与规划所的所有工作人员都给予了我大量的关心与帮助，在此向他们表示诚挚的谢意！

向东华大学环境科学与工程学院各位老师和同学表示诚挚的感谢，感谢他们对我的帮助和支持。

最后，还要向多年来给予我关心、爱护、理解和支持的父母、兄长及所有亲人表示深深的谢意！

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。我将会在未来的学习和研究过程中，以更加丰厚的成果来答谢曾经关心、帮助和支持过我的所有老师、同学和朋友。

程 聪

2006 年 1 月