

河口湿地溢油事故 污染影响及 生态环境损害评估

HEKOU SHIDI YIYOU SHIGU
WURAN YINGXIANG JI
SHENGTAI HUANJING SUNHAI PINGGU

黄沈发 吴 健
王 敏 卢士强 吴建强 著

中国环境出版集团

河口湿地溢油事故 污染影响及 生态环境损害评估

HEKOU SHIDI YIYOU SHIGU
WURAN YINGXIANG JI
SHENGTAI HUANJING SUNHAI PINGGU

黄沈发 吴 健
王 敏 卢士强 吴建强 著



图书在版编目 (CIP) 数据

河口湿地溢油事故污染影响及生态环境损害评估/黄沈发
等著. —北京: 中国环境出版集团, 2018.6

ISBN 978-7-5111-3306-9

I. ①河… II. ①黄… III. ①漏油—河口湾污染—影响—沼泽化地—生态环境—评估—研究 IV. ①X522②
P941.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 200290 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 殷玉婷
责任校对 任 丽
封面设计 彭 杉

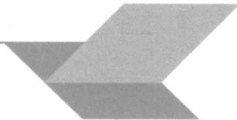
出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2018 年 6 月第 1 版
印 次 2018 年 6 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 10.25
字 数 200 千字
定 价 90.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

编写委员会



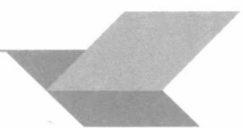
主 任：黄沈发

副 主 任：吴 健 王 敏 卢士强 吴建强

参与人员（按姓氏笔画排列）：

王 卿	王 旌	车 越	东 阳	由文辉
刘文亮	吉 敏	阮俊杰	齐晓宝	李忠元
李青青	杨 洁	沙晨燕	肖绍贻	苏敬华
邵一平	陈 力	陈义中	陈 昊	林 怡
胡冬雯	钟宝昌	唐 浩	徐志豪	郭加宏
顾笑迎	高 强	黄宇驰	黄波涛	鄢忠纯
廖水文	熊丽君	谭 娟		

内容简介



长江河口生境条件特殊，是具有全球意义的生物多样性保护区，也是全球重要生态敏感区，建有上海特大型城市集中式饮用水水源地。长江是我国最为重要的物资流通黄金水道，随着国家长江经济带发展战略、上海国际航运中心建设的推进实施，长江航运业快速发展，长江口突发大型溢油事故发生概率加大，对河口滩涂湿地生态系统和城市生态安全构成较大威胁。

本书以长江口白茆沙“12·30”典型河口溢油事故为例，基于近3年的野外实地观测，研究了事故发生后，河口滩涂湿地环境中沉积物和水体受到的污染影响，以及污染胁迫下滩涂大型底栖动物群落及典型物种的动态响应特征，开展了河口溢油事故生态损害评估和人体健康风险评估，提出了生态环境污染损害评估制度建议，研究构建了全过程的溢油事故相关研究框架体系，提出了多目标、多污染物的协同分析方法，拓展了溢油事故污染胁迫影响的研究尺度，弥补了长江口地区相关研究的不足，为进一步建立完善河口溢油事故的应急处置、调查评估与治理修复技术与管理体系，进而促进长江经济带生态环境保护，提供了科学依据和技术支撑。

前言



长江口地区生境条件特殊,兼具生态脆弱性和敏感性,是具有全球意义的生物多样性保护区。长江口拥有青草沙水库、东风西沙水库、陈行水库等水源地,为上海市70%以上人口供应饮用水,在上海市“两江并举、多源互补”的水源战略格局中有着举足轻重的地位。然而,随着长江和海洋运输的发展,长江口的航运越来越繁忙,各类重大河口、海洋工程陆续建设实施,对长江口区域生态环境造成了影响,尤其是航运和工程建设带来的突发性污染事故,风险危害程度和治理修复难度较大。其中,溢油污染事故在突发性污染事故中较为常见,发生频率高,扩散速度快,拦截、收集、处理难度大,极易在短期内向长江口上下游水体、滩涂等区域蔓延,对长江口水环境质量及水源地饮用水安全、滩涂沉积物环境质量、水生生态系统和滩涂湿地生态系统功能、生物资源和生物多样性造成不同程度的影响。

尽管长江口地区突发性溢油事故发生频率高、危害大,但以往对于突发溢油事故的快速响应模拟、应急处理处置、污染影响观测预测、生态环境损害评估,以及溢油污染的后续治理修复等方面尚缺乏科学、系统、规范的技术方法。本书依托上海市科技攻关项目——长江口溢油事故生态环境影响评估及治理修复技术方案研究(STCSM 13231203600),论述了从溢油事故发生后的模型快速响应、污染胁迫分析、生态环境损害评估、人体健康风险评估和管理制度建设等全过程研究,重点关注了特征污染物在沉积物、水体、生物等多介质中的组成与分布特征,开展了时间尺度上的动态追踪。

本书各章安排如下:第1章综述了国内外溢油相关研究进展;第2章介绍

了研究区域概况以及研究方法；第3章构建了溢油事故快速响应模型并开展模拟；第4章分析了溢油事故对滩涂沉积物和水体的污染影响；第5章研究了溢油事故对滩涂大型底栖动物的胁迫作用；第6章评估了河口地区溢油事故的生态环境损害和人体健康风险；第7章提出了长江口溢油事故生态环境损害评估制度建议；第8章凝练了总体结论及未来研究展望。

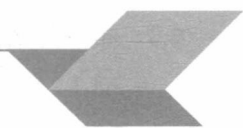
十八大以来，党和国家做出了大力推进生态文明建设的战略决策，发布了《生态环境损害赔偿制度改革方案》，在全国试行生态环境损害赔偿制度。本研究是响应党和国家号召，积极践行生态文明理念，在生态环境损害相关研究领域的探索和尝试，也是落实《长江经济带生态环境保护规划》的具体举措。本研究建立了长江口地区溢油事故快速预警预测模型，进一步探明了溢油污染胁迫下的河口滩涂生态系统的响应特征和机理，优化完善了生态环境损害评估技术方法，有助于填补长江口溢油事故相关研究工作空白，为保障长江口水源地安全和生态系统健康提供科学支撑。

本书在写作过程中，得到了许多专家学者的宝贵意见和大力支持，中国环境出版社的殷玉婷编辑也给予了专业指导，他们的无私奉献和细致工作使得本书能够顺利出版，在此一并表示感谢。由于本研究的新颖性以及作者水平的局限性，书中也难免存在疏漏之处，恳请广大读者与同仁批评指正。

黄四友

2018年5月

目 录



第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究进展	2
1.2.1	典型溢油事故特征分析	2
1.2.2	溢油相关研究热点	5
1.2.3	溢油对生态系统的胁迫	8
1.2.4	生态环境损害评估	16
1.3	研究目的与内容	18
1.3.1	研究目的	18
1.3.2	主要内容	19
1.3.3	总体技术路线	20
第 2 章	研究区域与研究方法	21
2.1	长江口生境条件	21
2.1.1	长江河口概貌	21
2.1.2	河口滩涂湿地	21
2.1.3	自然保护区	22
2.1.4	饮用水水源保护区	22
2.2	研究区域概况	23

2.2.1	地理位置	23
2.2.2	地质地貌	24
2.2.3	水文与气候	24
2.2.4	土壤与植被	25
2.3	布点与采样	26
2.3.1	溢油事故发生及处置	26
2.3.2	采样点位布设	28
2.3.3	样品采集处理	30
2.4	样品检测分析	31
2.4.1	多环芳烃测定	31
2.4.2	总石油烃测定	32
2.5	水槽实验设计	33
2.5.1	实验参数设置	33
2.5.2	实验材料与方法	35
2.5.3	沉积物采样测定	35
2.6	数据处理分析	36
第 3 章	河口地区溢油事故快速响应模型模拟	37
3.1	溢油模型系统构建	37
3.1.1	水动力主要控制方程	37
3.1.2	边界条件	40
3.1.3	模型率定与验证	42
3.1.4	溢油模型及风化过程	45
3.2	溢油事故快速模拟	51
3.2.1	主要数据本地化获取	51
3.2.2	模型模拟结果分析	53
3.3	本章小结	56

第 4 章 溢油事故对滩涂沉积物和水体的污染影响	57
4.1 滩涂沉积物中污染物组成分布特征	57
4.1.1 中低潮滩沉积物中污染物含量分布	57
4.1.2 高潮滩沉积物中污染物含量分布	58
4.1.3 沉积物中 TPH 和 PAHs 组成特征	60
4.2 滩涂水体中污染物释放特征与动态	62
4.2.1 滩涂水体中 PAHs 含量组成动态	62
4.2.2 潮汐作用下滩涂 TPH 向水体释放规律	66
4.3 本章小结	72
第 5 章 溢油事故对滩涂大型底栖动物的胁迫作用	74
5.1 溢油事故对大型底栖动物群落结构的影响	74
5.1.1 大型底栖动物种类组成变化特征	74
5.1.2 大型底栖动物数量及多样性变化特征	77
5.2 潮间带大型底栖动物体内总石油烃含量动态	80
5.2.1 生物体肌肉与内脏组织中 TPH 变化特征	80
5.2.2 生物体与沉积物中 TPH 含量相关性	82
5.2.3 相手蟹水产品的人体健康风险	84
5.3 本章小结	86
第 6 章 河口地区溢油事故的生态环境损害及人体健康 风险评估	87
6.1 溢油污染事故生态环境损害评估	87
6.1.1 溢油事故生态系统服务功能损害评估	87
6.1.2 污染清理/环境修复费用评估	96
6.1.3 溢油事故生态环境损害综合评估分析	97
6.2 溢油污染滩涂人体健康风险评估	100
6.2.1 暴露概念模型及其参数分析	100

6.2.2 溢油污染滩涂健康风险分析	106
6.3 本章小结	112
第 7 章 长江口溢油事故生态环境损害评估制度建议	113
7.1 长江口溢油事故生态环境损害评估的法规政策体系	113
7.1.1 生态环境损害评估的相关法律法规政策	113
7.1.2 长江口地区相关法规政策制定的思考	116
7.2 长江口溢油事故生态环境损害评估的技术规范体系	116
7.2.1 生态环境损害评估技术规范	116
7.2.2 生态环境损害评估技术导则	118
7.3 长江口溢油事故生态环境损害评估的工作流程体系	119
7.3.1 长江口溢油生态环境损害评估的工作流程	120
7.3.2 长江口溢油生态环境损害评估程序的启动主体	120
7.3.3 长江口溢油生态环境损害评估的期限	120
7.4 本章小结	121
第 8 章 结论与展望	122
8.1 主要结论	122
8.2 创新点与贡献	124
8.3 未来展望	125
参考文献	126

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

长江口地区生境条件特殊,分布有我国最重要的河口滩涂湿地,是具有全球意义的生物多样性保护区,也是全球重要的生态敏感区之一。长江口拥有青草沙水库、东风西沙水库、陈行水库等水源地,供应上海市70%以上人口的饮用水,在上海市“两江并举、多源互补”的水源地战略格局中有着举足轻重的地位。长江同时又是“黄金水道”,随着长江和海洋运输的发展,以及上海国际航运中心建设的推进,长江口的航运越来越繁忙,航运和工程建设带来的突发性污染事故,风险等级、危害程度和修复治理难度都逐渐增大。其中,溢油污染事故是河口较为常见的一种突发性污染事故,发生频率高,扩散速度快,油污拦截、收集、处理难度大,极易在短时间内向上下游水体、滩涂等区域蔓延,对河口滩涂环境状况、饮用水水源安全、湿地生态系统功能、生物资源和生物多样性等造成不同程度的损害,一直是国内外生态环境研究的热点。

2012年12月30日16:45,在长江口上游江苏常熟白茆沙水域,一艘装载有400 t重油的船只沉没,发生溢油事故。12月31日上午,在潮汐和风力的共同作用下,溢油开始影响崇明岛崇头至南鸽水闸一带,对滩涂、水域造成严重污染。经调查统计,崇明县仅滩涂污染面积就达150多 hm^2 (东西长约18 km),其中受污染最为严重的是崇西水闸至新建水闸一带滩涂湿地,长度超过8 km。针对此次典型河口突发溢油污染事故,本研究依托上海市科技攻关项目——长江口

溢油事故生态环境影响评估及治理修复技术方案研究 (STCSM 13231203600), 开展了溢油事故发生后的模型快速响应、污染胁迫分析、生态损害评估和管理制度建设等全过程研究, 重点关注了特征污染物在沉积物、水体、生物等多种介质中的组成与分布特征, 还开展了针对滩涂生态系统时间尺度上的动态追踪。本研究有助于填补长江口溢油事故相关研究工作不足, 进一步探明溢油污染胁迫下的河口滩涂生态系统的响应特征和机理, 优化完善生态环境损害评估技术方法, 为保障长江口水源地安全和生态系统健康提供科学依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 典型溢油事故特征分析

(1) 历年溢油事故变化特征

海洋石油的过度开发, 石油加工产品生产、使用及其无序排放, 尤其是频发的海上船舶溢油事故等, 使石油等物质成为污染海洋生态环境的主要因素。国际油轮船东防污染联合会 (International Tanker Owner Pollution Federation, ITOPF) 统计数据表明, 1970—2015 年, 全球共发生中大型船舶溢油事故 1 821 起 (溢油量 7 t 以上), 其中大型溢油事故 458 起 (溢油量 700 t 以上), 共有 5 732 kt 油类进入河口、海洋, 严重污染了海洋及海岸线生态环境, 并给沿海相关国家和人民造成了严重的经济损失 (彭陈, 2012)。随着人们对于溢油污染认识的加深及油船溢油防控措施的加强, 全球油轮船舶中大型溢油事故发生频次和溢油量均呈下降趋势。2010—2015 年中大型溢油事故发生频率平均在 6.70 起/a, 远低于 20 世纪 80 年代的 45.40 起/a; 年均溢油总量也由 20 世纪 80 年代的 1 174 kt/a 降至 2010—2015 年的 39 kt/a。

过去 30 年, 长江口及上海港附近海域船舶溢油年事故次数也呈逐年下降趋势, 然而随着长江航运发展和上海“国际航运中心”建设持续推进, 航运量增加、运输船舶大型化, 年溢油量缓慢增加 (图 1.1), 年单次平均溢油量与单次最大溢油量呈现逐年上升趋势。据统计 (潘灵芝等, 2016), 虽然区域内船舶溢

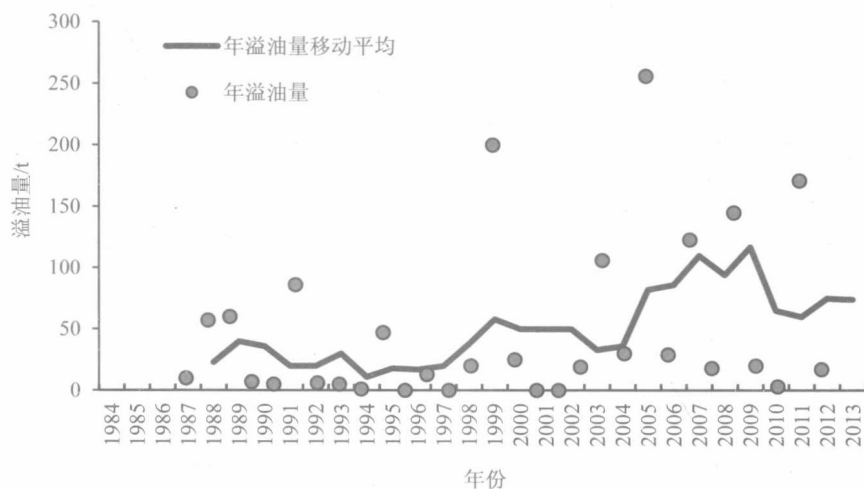


图 1.1 1984—2013 年长江口及上海港附近年溢油量变化

(改编自潘灵芝等, 2016)

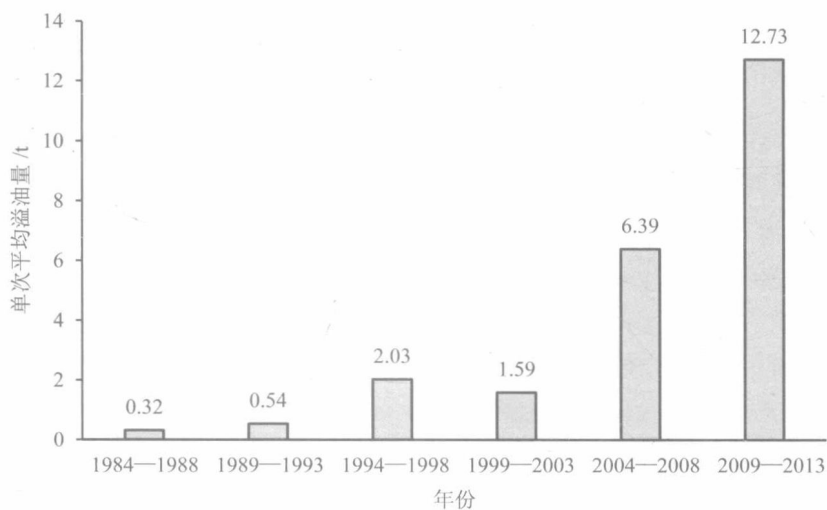


图 1.2 1984—2013 年长江口及上海港附近单次平均溢油量变化

(改编自潘灵芝等, 2016)

油事故频次由 1984 年的 96 起/a 减少至 2013 年的 6 起/a, 但溢油事故级别明显提高, 2009—2013 年, 年船舶溢油事故的单次平均溢油量高达 12.73 t, 远高于 1984—1988 年的 0.32 t (图 1.2)。由此可见, 为适应上海建设“国际航运中心”的当前形势, 应对长江口区域逐年增加的大型船舶溢油事故风险, 有必要加强长江口溢油事故相关科学研究和技术储备。

(2) 国际典型溢油污染事故

1967 年 3 月 18 日, “Torrey Canyon” 号邮轮失事导致至少 60 000 t 原油泄漏进入大海 (O’Sullivan and Richardson, 1967), 海洋溢油污染从此进入人们的视野, 备受关注。表 1.1 列举了自 1967 年以来 12 起重大溢油事故, 其中部分溢油事故由于事发地点远离海岸而不为人们所熟知。

表 1.1 1967 年以来 12 起典型重大溢油污染事故

事故地点	事故名称	事故时间	事故溢油量/ 100 万加仑	参考文献
科威特	The Gulf War	1991	240~336	Bu-Olayan and Subrahmanyam, 1997
美国墨西哥湾	Deepwater Horizon oil spill	2010	200	Goodbodygringley et al., 2013
墨西哥坎佩切湾	Ixtoc1 oil well spill	1979	140	Patton and Rigler, 1981
特立尼达和多巴哥	Atlantic Empress	1979	88.3	Horn and Neal, 1981
波斯湾	Nowruz oil spill	1983	80	Fayad, 1986
安哥拉海岸	ABT Summer	1991	80	Welch and Yando, 1993
北非	Castillo de Bellver	1983	78.5	Altwegg et al., 2008
法国	Amoco Cadiz	1978	68.7	Conan et al., 1982
加拿大	Odyssey Oil Spill	1988	43	Etkin, 1999
意大利	M/T Haven Tanker	1991	42	Bargiela et al., 2015
威廉王子湾	Exxon Valdez	1989	10.92	Piatt et al., 1990
西班牙	Prestige	2002	19.83	Crego-Prieto et al., 2014

1.2.2 溢油相关研究热点

为进一步把握相关研究领域总体情况,本研究基于美国科技信息所(Institute for Scientific Information, ISI)推出的目前提供引文回溯数据最深的Web of Science引文索引数据库开展了文献计量分析。采用“oil spill”作为主题词,时间跨度为1982—2017年,共获得关于环境领域中oil spill(溢油)的研究论文9 032篇。借助Van Eck和Waltman开发的VOS viewer软件来构建oil spill(溢油)研究热点主题的知识图谱,结合数学、图形学、信息可视化技术和传统文献计量学的共词、引文分析方法,形象地展示了溢油相关学科研究热点的结构与发展(Van Eck and Waltman, 2010; 宗乾进等, 2012)(图1.3)。利用Thomson Reuters的Thomson Data Analyzer(TDA)软件对热门关键词构建矩阵,探究其相互之间的关系。研究分析表明,溢油数值模拟及模型预测、溢油暴露毒性及风险评估、溢油源解析及生物降解和溢油污染特性及处理处置是溢油污染的主要研究热点。

(1) 溢油数值模拟及模型预测

在海洋这个大水域体系中,溢油的行为、分布与归宿都是极为复杂多变的过程,总体可分为受海风、海浪和洋流等环境动力因素影响的水平物理扩散过程,及受蒸发、溶解、乳化和生物降解等风化过程影响的垂向化学扩散过程(Stiver and Mackay, 1984; Delvigne and Sweeney, 1988; Al-Rabeh, 1994; Reed et al., 1994)。通过大量关于溢油行为、归宿的深入研究,许多学者先后提出了各种理论模型(Elliott et al., 1986; Flather et al., 1991; Price et al., 2006),模拟溢油空间扩散过程,并在传统数值计算的基础上结合遥感技术(Remote Sensing, RS)、地理信息系统(Geography Information System, GIS)、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等新技术,取得了丰硕的成果(Keramitsoglou et al., 2006; Shamshiri et al., 2013; Guo et al., 2015; Bulycheva et al., 2016; Lupidi et al., 2017)。溢油扩散受控于多种具有随机性的环境因素,部分学者针对模型预测中的诸多不确定性,进行了创新探索和研究(Nelson and Grubestic, 2017; Hou et al., 2017),以期完善和提升模型的可靠性。



图 1.3 关于“oil spill”研究热点主题的知识图谱

(2) 溢油暴露毒性及风险评估

暴露评价是通过污染物暴露类型和暴露量评价及污染物毒性评价来共同表征污染物对受体的暴露水平。通过对石油在介质中迁移转化和行为归宿 (Galt et al., 1991; Ke et al., 2002; Reddy et al., 2012) 及石油暴露方式的研究, 确定其暴露途径, 并结合污染物的风险识别、毒性分析和生态影响表征, 即为生态风险评价 (Ecological Risk Assessment, ERA)。该概念是由美国环保局 (U.S. Environmental Protection Agency) 提出, 用于评价暴露于环境压力下所可能产生的负面生态效应, 以支持环境决策 (Bartell et al., 1992)。针对墨西哥湾溢油事件、“Exxon Valdez” 号等重大溢油事故, 学者们对事故影响海域进行了大量短期或中长期的生态风险评价 (Maki, 1991; Palinkas et al., 1993; Jones et al., 1998; Peterson, 2001; Peterson et al., 2003; White et al., 2012; Lin and Mendelssohn,