

不同类型海岸的溢油清理方法

郑建中 王 静 王晓燕

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要 世界石油资源分布和需求的不均衡性, 促进了海上石油工业和石油运输业的快速发展, 同时也增加了溢油事故的几率。海上溢油污染问题日趋严重, 溢油污染对海洋环境、生态、资源、经济及人类生产生活等造成了巨大的影响, 日益引起社会各界的关注。海岸溢油污染清理实践表明, 正确的溢油清理方案的制定应综合考虑海岸的敏感性指数、溢油的类型、清理方法可能带来的危害以及实际可操作程度等。对包括盐沼地海岸和红树林海岸, 沉积海岸, 以及岩石海岸三类典型海岸的国内外现有海岸溢油污染清理技术进行了详细的综述, 以期为我国的海岸带管理和溢油应急计划的制订提供技术参考。

关键词 溢油污染 盐沼地 红树林 生物海岸 沉积海岸 岩石海岸 清理方法

中图分类号 X55 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2008)04-0557-07

Oil spill cleanup methods for different types of coasts

Zheng Jianzhong Wang Jing Wang Xiaoyan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Frequent oil spills are closely related to the imbalance between crude oil distribution and demand, and consequently the rapid development of offshore oil exploitation and transportation industries. Oil spills have great impact on the marine environment, ecology, resources, economy and human activities. Remediation practices indicate that several factors should be considered in selecting cleanup methods, including coastal environmental sensitivity index, spilled oil properties, potential damages due to specific cleanup methods and their maneuverability etc. The paper is a review on remediation technologies for three typical coasts contaminated by oil spills. Adopting adequate strategy in post oil spill remediation is crucial in coastal management and oil spill emergency plan design.

Key words oil spills; salt marsh; mangrove; biological coast; sedimentary coast; rocky coast; cleanup

世界石油资源分布和石油需求的不均衡性, 促进了海上石油运输业的快速发展, 同时也增加了溢油事故的几率。自 20 世纪 60 年代以来, 全球范围内已发生多起万吨以上的油轮溢油事故(部分溢油事件见表 1), 总溢油量近 500 万 t^[1~6]。我国虽尚未发生万 t 以上的重大溢油事故, 但各种溢油事故频发, 许多事故溢油量也已超过 500 t(部分溢油事件见表 2)^[7]。

为对海上溢油事故做出迅速有效的应急反应, 最大限度地减轻污染所造成的损失, 我国已于 1995 年开始实施《国际油污防备、反应与合作公约》(OPRC), 并于 1998 年正式加入国际海事组织(IMO)。当前我国对溢油的研究主要集中在建立溢油应急系统上, 从学习、借鉴发达国家的海洋污染防治与溢油反应体系出发, 开发和建立适合我国自身特点的溢油应急系统。截至目前, 国内已发表的文

献多集中在溢油应急系统的软件开发上^[9~14]。作为制订溢油应急系统的技术支持, 有一些文献报道了溢油的环境行为, 集中在溢油在海水中的风化过程上^[15~24]; 对溢油清理技术的研究尚限于海水环境^[25~29], 而对海岸溢油污染清理技术的报道相对较少。因此, 有必要对国内外现有的海岸溢油污染清理技术做一综述, 以期为我国的海岸带管理和溢油应急计划的制订提供技术参考。我国海岸线长达 18 000 km, 类型多种多样, 可以概括为平原海岸、山地丘陵海岸和生物海岸三大类^[30,31]。其中, 平原海岸由巨厚而松散的沉积物组成; 山地丘陵海岸, 也叫

基金项目 国家自然科学基金资助项目(20377021, 40473053)

收稿日期 2007-08-03; **修订日期** 2007-10-16

作者简介 郑建中(1964~), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境胶体化学, 地下水及土壤污染修复的研究。

E-mail: szheng@nju.edu.cn

基岩海岸,主要由比较坚硬的基岩组成;生物海岸体现了生物对海岸的附加作用,主要包括珊瑚礁海岸和红树林海岸两种。海岸类型对溢油的敏感性直接影响着溢油应急计划中的决策。Nansingh 等^[32]按照海岸带的地形、物理特性和生物种群提出了如图 1 所示的敏感性指数分类。一般说来,生物量较低,海浪和潮汐活动较强的海岸对溢油的敏感性指数较低;而生物量较大,掩蔽型的海岸对溢油的敏感性指数较高^[32~34]。溢油事故发生后,应优先保护敏感性指数较高的海岸。

海岸的敏感性指数为溢油应急计划的制定提供了参考。清理策略的制定和技术的选择与溢油的类型、海岸的地质特点和水流特性、海岸生态群落的类型及其对溢油的敏感性以及当地的社会和经济等因素密切相关。我国海岸类型众多,从最敏感的盐沼地海岸、红树林海岸,到沉积海岸,再到岩石断层海岸,均有广泛的分布。溢油清理技术的选择,直接影响着海岸带生态的恢复能力。

本文针对几类典型的海岸,对现有的海岸溢油污染清理技术做一综述。

表 1 部分国外发生的溢油量达万吨以上的溢油事件

Table 1 Some oil spill accidents over ten thousand tons overseas

时 间	事 件	溢油量(万 t)	后 果	参考文献
1967 年 3 月	“Torrey Canyon”号	12	污染英国 225 km 海岸线,导致 2.5 万只鸟死亡	[1,2]
1975 年 6 月	“昭和丸”号	23.7		[1]
1978 年 3 月	“Amoco Cadiz”号	22.5	覆盖 130 个海滩,导致无数鱼和海鸟死亡,海滨浴场全被污染	[1,2]
1989 年 3 月	“Exxon Valdez”号	3.7	污染约 2 100 km 海岸线,损失近 80 亿美元	[1~4]
1996 年 2 月	“Sea Empress”号	7.2	污染彭布鲁克 200 km 海岸线	[5]
2002 年 11 月	“Prestige”号	≥2	西班牙 500 km 海岸受到严重污染	[6]

表 2 近年来国内发生的一些溢油事件

Table 2 Some oil spill accidents in China in recent years

时 间	事 件	溢油量(t)	后 果	参考文献
1984 年 9 月	加翠号	757.7	损失 500 多万元	[1]
1999 年 3 月	闽燃供 2 号	589.7	海域及海岸线遭受严重污染,经济损失达 4 000 多万元	[1]
2002 年 11 月	“塔斯曼海”号	≥200	形成长 4.6 km、宽 2.6 km 的原油漂流带,索赔额达上亿元	[7]
2004 年 12 月	巴拿马籍和德国籍油轮碰撞	1 200	在水面形成长约 16.7 km、宽 200 m 的溢油带	[8]

敏感性指数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
海岸带类型	浪蚀阶地	暴露型中—粗颗粒沙滩	暴露型潮滩	暴露型岩石海滩	掩蔽型细—中颗粒沙滩	混合型砂砾海滩	掩蔽型潮滩	掩蔽型岩石海滩	珊瑚礁	红树林 / 盐沼地

图 1 海岸带敏感性指数^[32]

Fig.1 Coast classification by coastal environmental sensitivity index^[32]

1 盐沼地海岸和红树林海岸

盐沼地海岸和红树林海岸同属掩蔽型海岸,是

生产力很高的生态系统。这两类海岸上分别生长着众多的盐沼地植物和红树林以及其他许多动植物和微生物。由于盐沼地植物和红树林能滞留大量的溢油,溢油对生物的危害较大,且溢油的清除很困难,所以它们被列为最脆弱的海岸类型,也是溢油应急计划中应优先保护的区域^[32~34]。

溢油进入该类海岸后,一般会增大污染的程度和治理的难度。所以,在溢油发生后,必须在盐沼地和红树林海岸外采用机械回收、喷洒化学消油剂或布置围油栏等方法,以阻止油污进入海岸。溢油一旦进入海岸,则必须根据具体情形采取合适的清除方法。主要的清除方法见表 3。

表 3 所示的方法在清理受溢油污染的盐沼地和

表 3 盐沼地海岸和红树林海岸的溢油清除方法

Table 3 Oil cleanup methods for salt marsh and mangrove coasts

处理方法	适用范围	优点	缺点	参考文献
围堵、回收	溪流水面上,底土表面、凹地或冲水沟内的溢油	可除去大量溢油	使用重型机械可能会损害表土	[44]
低压水流冲洗	底土表面的油污	对植物的损害较低	对渗入地下的油污无效,可能对地表有侵蚀	[44]
铺放吸油材料	底土表面的油污	可减少油污渗入底土,将溢油转换为固体废物	需对处理后的吸油材料集中处理	[35~43]
割除被油污染的植物	生长草本类植物的盐沼地,在秋冬季发生溢油污染	可帮助被油污窒息而死的植被恢复	有可能造成植物的永久性损失和土壤侵蚀;割除作业中人为践踏等造成的物理损伤	[44, 49~51]
就地燃烧被油污染的植物	偏僻、底土软的浅水区;主要植被为草本植物,不在植物的非生长季节,如晚秋和冬季;有冰雪覆盖的寒冷地区;静风条件下;溢油为易燃的新鲜原油或轻质成品油	可快速去除大量溢油;防止溢油向敏感地区或更大区域扩散;减少最终油污废物总量;需要较少的人力和设备	减少植被,可能会带来侵蚀问题;改变优势物种	[44~47, 52, 53]
生物修复	污染不太严重的地方;或大部分溢油已通过其他方法被清除	损害较小	修复时间较长;营养物质的引入可能会使附近水体产生富营养化;菌种的引入有可能会产生负面影响	[44, 54]

红树林海岸中,均得到了较为广泛的应用。值得一提的是,铺放吸油材料是一种简单、有效、且广泛应用的溢油清理方法。在溢油发生后,快速铺放吸油材料可减少油污渗入盐沼地和红树林的底土,将溢油转换为固体废物,然后进行进一步的集中处理。

常用的吸油材料包括天然有机吸油材料、无机矿物材料和合成有机材料三大类。天然有机吸油材料和无机矿物吸油材料的来源较广;合成有机材料具有较强的吸油能力,是目前最常用的溢油吸油材料,但该类材料不易被生物降解^[35]。表 4 提供了一些代表性的吸油材料的集油能力。

表 4 部分吸油材料的集油能力

Table 4 Collection properties of some oil collection agents

吸油材料	油 品	集油能力(油重/吸油材料重) (倍)	参考文献
聚丙烯	轻质原油	10	[36]
膨胀珍珠岩	重油	3.25	[37]
片状石墨	原油	80	[38]
醋酸纤维素(中空纤维)	原油	9	[39]
含水硅酸钙	原油	6.3	[40]
纤维素聚合物	原油	18~22	[41]
乙酰化稻草	机油	16.8~24	[42]
日本雪松树皮	A 级燃料油	13.4	[43]

2 沉积海岸

沉积海岸包括三角洲与三角湾海岸、淤泥质海岸及砂质或砾质海岸等。该类海岸由厚且松散的沉积物组成,形成原因多为泥沙的沉积和潮流的冲蚀。前述敏感性指数分类(图 1)中的掩蔽型潮滩,混合型砂砾海滩,掩蔽型细-中颗粒沙滩,暴露型潮滩和暴露型中-粗颗粒沙滩,都属于沉积海岸的范畴。

沉积海岸受溢油污染的敏感性与沉积物的粒度及潮浪的作用密切相关。一般来说,暴露型海岸的敏感性指数较低,这是因为海岸表面的油污很容易通过自然过程(尤其是潮浪的作用)被清除;粘土-油的絮凝作用减少了油在卵石和砾石上的粘附,促进了自净作用^[55]。因此,对暴露型海岸,潮、浪作用就足以将油污清除,选择自然清除很合适。但如果油污随风或水的作用下,被沉积物掩埋,或深深地渗入沉积物底层,或大量油在沉积物表层固结,则它们将会存在相当长的时间,这时就需要选择合适的清除技术。此外,自然清除尤其适用于偏远地点。对比较隐蔽的海滩,尽管油污停留时间较长,但是如果其他清除方法会带来不可接受的损害时,也应选择自然清除^[56]。当自然清除不合适时,可以考虑采用表 5 所示的技术。但其前提是要考虑海岸的易接近程

度和沉积层可承受的最大载重,两者往往会限制设备的使用。清除的目的是将溢油对环境的影响降至最低,恢复生态功能和人类的使用。选择清除技术应综合考虑溢油的种类、数量,自然条件,以及受影响区域的环境和社会、经济的重要性等。

生物降解是海岸溢油的最主要的降解过程。生

物修复就是利用生物降解来修复受溢油污染的海岸,因其可就地处理,操作简便,成本较低,不产生二次污染等优点,在溢油清理方面得到了广泛的应用。一般来说,生物修复较适合于低浓度的溢油污染;当溢油浓度较高时,需采用其他常规措施将游离的、高浓度溢油清除后才能采用。

表 5 沉积海岸的溢油清除方法
Table 5 Oil cleanup methods for sedimentary coasts

处理方法	适用范围	优 点	缺 点	参考文献
低压水冲洗	坚固的缓坡沉积海岸	对沉积层的结构和生物的危害较小	可能会造成沉积层的侵蚀	[56,57]
铺放吸油材料	集中在沉积海岸凹地的小油潭	可减少油污渗入底土	需对处理后的吸油材料集中处理	[33~41]
人工清除	尚未渗入沉积层的小面积油污和油斑;难以进入或可能破坏海岸结构而限制了清除设备的使用的地点	对沉积层的结构损害较小	需对收集的油污废物集中处理;费时费力	[57]
机械清除	油污面积广但渗入浅的沙滩	相比于人工清除较省时省力	需对收集的油污废物集中处理	[57]
沉积物移位	溢油搁浅在正常或强潮作用线以上;溢油渗入到沉积层底部较深的地方;暴风雨或强浪即将来临前,将油污的沉积物暴露于高能区域;在废物的运输和处置成问题的偏僻地区或不能到达地区	不产生需集中处理的油污废物		[56,57]
混合(或耕作)	沉积物表层的油污发生固结;油污被掩埋或渗入到沉积物底层	不产生需集中处理的油污碎片		[56,57]
喷洒消油剂	粒径较大的砾石滩和沙滩	使用方便	消油剂可能有毒性;使油乳化并转运至沉积物底层	[58]
生物修复	低浓度污染;或采取常规措施将游离的、高浓度溢油清除后采用	可作为未回收油或燃烧残余油的最终处置方法	有时需补充营养物质或菌种,补充的营养物质和菌种有可能产生负面作用	[56,57]

影响生物降解的最重要的因素是溶解氧和以氮和磷形式存在的营养物质。在砂质海滩,如果背景营养物质浓度足够高,则生物降解速度较快,自然降解将会是最佳选择^[59,60]。而在营养物质有限的情况下,如阿拉斯加的威廉王子海峡溢油事件中,添加营养物质可使自然降解的速度增加 2~5 倍,且没有引起负面影响^[61]。加快生物降解的另一种方法是投加菌种。现代分子生物学中的基因工程为培育高效的基因工程菌,提高细菌的降解能力提供了美好

的前景,但目前还不能保证它们释放到环境中是否会带来不良影响。

3 岩石海岸

岩石海岸是以岩石为主体的海岸。该类海岸对溢油的敏感度因其地形、组成和位置不同而不同。对极端暴露型的岩石海岸,很难受溢油污染,一旦污染,由于海浪的作用,油污也不易长期留存。而掩蔽型的缓坡巨石海岸内却可积聚大量的油污,仅依靠

海浪的作用很难在短期内将积存在巨石下或冲水沟、隙缝中的油污带走,这些积存的油污渐渐释放会形成长期的、低浓度的污染^[62]。

在选择清理方法时,需综合考虑生态、经济和环境等各方面的因素,优先选择能去除大量油污却不会造成严重损害的技术,此外还应考虑其他许多实际因素,最重要的是进入油污地点的难易程度。一般来说,自然风化可以较快地从大部分岩石海岸上去除油污,恢复可在几年之内完成。人为介入清除工作必须以显著缩短复原时间或以重要的经济资源、宜人的旅游点或野生动物受到重大威胁为前提,同时必须谨慎选择清除技术及清除操作的程度。尽量避免使用过于剧烈的清除操作,如用大量毒性很强的化学试剂来分散油污,机械刮除巨石上的油污,

以及高压热水冲洗等^[63~65],以防对海滨生物造成巨大的影响,从而延长海岸的恢复时间。岩石海岸常用的溢油清除方法如表 6 所示。

4 小 结

综上所述,海岸溢油污染治理方案的确定和清理方法的选择受多种因素的影响。尽管不同海岸的溢油清理方案可能存在较大的差别,但在选择具体的清理方法时应遵循以下几个原则:(1) 如果在可接受的时间内溢油可以自然降解,就应该尽量避免人为的介入;(2) 如果必须进行人为干预清理,则应选择对海岸干扰较小的方法,尽可能保护受污染海岸的原有生态;(3) 优先保护敏感性指数较高的海岸和经济、社会价值较高的地点。

表 6 岩石海岸的溢油清除方法
Table 6 Oil cleanup methods for rocky coasts

处理方法	适用范围	优点	缺点	参考文献
人工或机械清除	清除在冲水沟、岩石池和巨石间汇聚的溢油	可用于小面积油污,去除大量溢油	会产生需集中处理的油污废物,且机械清除中重型机械会对地形造成物理损害	[57,62]
吸油材料	清除小面积(如岩石凹地)的液态油	操作简单	需对处理后的材料集中处理	[62]
低压水冲洗	潮位几乎与油污的岩石同高	物理损害较小,可去除大量溢油	需对冲出的油及时收集,以防污染附近海岸	[62]
高压水冲洗及蒸汽冲洗	在高潮位时进行	能将大量油污冲出	破坏性很大,且难以控制,需对产生的油污废物进行集中处置	[62,66]
喷洒消油剂或分散剂等	大面积油污	可应用于较苛刻的环境中;通过飞机喷洒可处理大面积区域;操作简单;物理损害较小	对含蜡量高、粘度大的油不起作用;可能对生物有毒性效应;使油乳化,污染附近水体	[58,62,66,67]
激光辐射	海港、码头、自然保护区、观光区或不可到达地区	不产生二次污染物,破坏性较小		[66]

参 考 文 献

- [1] <http://www.sop.cn/new/shiguanlidisp.asp?nid=113>, 中国溢油防治网
- [2] 蒲宝康. 船舶油污防治的 30 年. 交通环保, 2000, 21(5): 30~33
- [3] Irvine G. V., Mann D. H., Short J. W. Multi-year persistence of oil mousse on high energy beaches distant from the Exxon Valdez spill origin. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(7): 572~584
- [4] Rice S. D., Short J. W., Carls M. G., et al. The Exxon Valdez oil spill. Long-term Ecological Change in the Northern Gulf of Alaska, 2007, 419~520
- [5] Elliott A. J., Jones B. The need for operational forecasting during oil spill response. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(2): 110~121
- [6] 李树华. “威望”号油轮溢油事故及其在国际社会引起的强烈反响. 交通环保, 2003, 24(1): 36~42
- [7] 李树华, 田庆林. “塔斯曼海”溢油事故索赔案及其深远意义. 交通环保, 2004, 25(5): 45~48

- [8] 吕颂辉,陈翰林. 溢油对南海海洋生态系统的影响及珠江口溢油现状. 生态科学, **2006**, 25(4): 379~384
- [9] 殷佩海,任福安. 海上溢油应急反应专家系统. 交通环保, **1996**, (2): 14~17
- [10] 张波,吴冠,张砚峰,等. 中文 Windows 环境下的海上溢油预报系统. 海洋环境科学, **1997**, 16(1): 37~41
- [11] 刘彦呈,袁世春,林建国,等. 海上溢油应急系统地理信息系统的开发. 大连海事大学学报, **2001**, 27(2): 42~45
- [12] 白平,肖秋霞,曹晓东. 船舶防止海洋污染设施专家系统的研究. 电脑开发与应用, **2002**, 15(12): 21~22
- [13] 熊德淇,杜川,赵德祥,等. 大连海域溢油应急预报信息系统及其应用. 交通环保, **2002**, 23(3): 5~8
- [14] 施益强,陈玲. 海上溢油事故应急反应系统框架的研究. 海洋环境科学, **2003**, 22(2): 40~43
- [15] 杨庆霄,徐俊英,吴之庆,等. 溢油的物理性质在模拟风化过程中的变化. 海洋环境科学, **1989**, 8(3): 16~24
- [16] 杨庆霄,徐俊英,李文森. 海上溢油溶解过程的研究. 海洋环境科学, **1992**, 11(3): 20~24
- [17] 杨庆霄,徐俊英,李文森. 海上溢油溶解过程的研究. 海洋学报, **1994**, 16(3): 50~56
- [18] 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
- [19] 张修枝,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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 徐恒振,周传光,马永安,等. 溢油海水环境化学行为的研究. 交通环保, **2000**, 21(6): 7~11
- [23] 尹海龙,武周虎. 石油在水中悬浮物上的吸附研究. 海洋环境科学, **2001**, 20(3): 34~37
- [24] 严志宇,许海梁. 溢油乳化过程的研究进展. 交通环保, **2002**, 23(2): 1~7
- [25] 李世珍,侯正田. 沿海地区溢油污染防治技术研究. 海洋技术, **1995**, 14(3): 105~114
- [26] 吴雯. 海上溢油的处置. 黄渤海海洋, **1997**, 15(3): 57~62
- [27] 吴吉琨,钟海庆,赵云英,等. 海面溢油分散剂的研制. 海洋环境科学, **1998**, 17(3): 76~79
- [28] 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
- [29] 李志军,王鹏. 低温和结冰区溢油清理技术展望. 中国海洋平台, **2002**, 17(4): 1~6
- [30] 雷宗友主编. 中国海环境手册. 上海交通大学出版社, **1988**. 4~8
- [31] <http://www.cjk3d.net/old/cnestuary/knowledge/coastal.html> 中国河口海岸治理
- [32] Nansingh P., Jurawan S. Environmental sensitivity of a tropical coastline (Trinidad, West Indies) to oil spills. Spill Science & Technology Bulletin, **1999**, 5(2): 161~172
- [33] Gundlach E. R., Hayes M. O. Vulnerability of coastal environmental to oil spill impacts. Marine Technology Society Journal, **1978**, 12: 18~27
- [34] Rifaat G. M., Hanna. An approach to evaluate the application of the vulnerability index for oil spills in tropical red sea environments. Spill Science & Technology Bulletin, **1995**, 2(2/3): 171~186
- [35] Adebajo M. O., Frost R. L., Klopogge J. T., *et al.* Porous Material for oil spill cleanup: A review of synthesis and absorbing properties. Journal of Porous Materials, **2003**, 10(3): 159~170
- [36] Choi H. M., Cloud R. M. Natural sorbents in oil spill cleanup. Environmental Science and Technology, **1992**, 26(4): 772~776
- [37] Teas C., Kalligeros S., Zankos F., *et al.* Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up. Desalination, **2001**, 140(3): 259~264
- [38] Toyoda M., Aizawa J., Inagaki M. Sorption and recovery of heavy oil by using exfoliated graphite. Desalination, **1998**, 115(2): 199~201
- [39] Patterson J. A. Oil spill recovery articles and method. US Patent 5,971,659. **1999**
- [40] Houston B. J. Defense Technical Information Centre Report AEWES-MISC-PAPER-C-68-5. Defense Technical Information Centre, **1968**
- [41] Blaney C. A., Griesbach H. L. Oil-sorbing article and methods for making and using same. US Patent 5,834,385. **1998**
- [42] Sun X. F., Sun R., Sun J. X. Acetylation of rice straw with or without catalysts and its characterization as a natural sorbent in oil spill cleanup. Journal of Agricultural and Food Chemistry, **2002**, 50(22): 6428~6433
- [43] Masaki saito, Nobuyoshi ishii, Suguru ogura, *et al.* Development and water tank tests of sugi bark sorbent. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(5~6): 475~482
- [44] Pezeshki S. R., *et al.* The effects of oil spill and clean-up on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: A review.

- Environmental Pollution, **2000**, 108: 129 ~ 139
- [45] Zengel S. A. , Michel J. , Dahlin J. A. Environmental effects of in-situ burning of oil spills in inland and upland habitats. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(4): 373 ~ 377
- [46] Lin Q. , Mendelssohn I. A. , Carney K. , *et al.* Salt marsh recovery and oil spill remediation after in-situ burning: Effects of water depth and burn duration. Environmental Science and Technology, **2002**, 36: 576 ~ 581
- [47] Mallik A. U. , Wein R. W. Response of a typha marsh community to draining, flooding, and seasonal burning. Canadian Journal of Botany, **1986**, 64: 2136 ~ 2143
- [48] Zengel S. A. , Michel J. Vegetation cutting as a clean-up method for oil spills: A review and case history of the effects on plant recovery. Marine Pollution Bulletin, **1996**, 32(12): 876 ~ 885
- [49] Kiesling R. W. , Alexander S. K. , Webb J. W. Evaluation of alternative oil spill clean-up techniques in a spartina alterniflora salt marsh. Environmental Pollution, **1988**, 55: 221 ~ 238
- [50] Mattson C. P. , Vallario N. C. , Smith D. J. , *et al.* Hackensack estuary oil spill: Cutting oil-soaked marsh grass as an innovative damage control technique. In: Proceedings of the 1977 International Oil Spill Conference. API, Washington, DC, **1977**. 401 ~ 407
- [51] Levine E. A. , Princkney J. , Montello T. Follow-up study on oiled vegetation cutting along the Delaware River. In: Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference. API, Washington, DC, **1995**. 465 ~ 472
- [52] Lindau C. W. , Delaune R. D. , Jugsujinda A. Marsh sensitivity to burning of applied crude oil. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(4): 401 ~ 404
- [53] Lin Q. X. , *et al.* In-situ burning of oil in coastal marshes. 2. Oil spill cleanup efficiency as a function of oil type, marsh type, and water depth. Environmental Science & Technology, **2005**, 39: 1855 ~ 1860
- [54] Lin Q. , Mendelssohn I. A. The combined effects of phytoremediation and bioremediation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands. Ecological Engineering, **1998**, 10: 263 ~ 274
- [55] Lee K. , *et al.* Oil-mineral aggregate formation on oiled beaches: Natural attenuation and sediment relocation. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(3): 285 ~ 296
- [56] Owens E. H. , *et al.* The reduction of stranded oil by in situ shoreline treatment options. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(3): 257 ~ 272
- [57] Sergy G. A. , *et al.* In-situ treatment of oiled sediment shorelines. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(3): 237 ~ 244
- [58] Pereira M. G. , Mudge S. M. Cleaning oiled shores: Laboratory experiments testing the potential use of vegetable oil biodiesels. Chemosphere, **2004**, 54: 297 ~ 304
- [59] Venosa A. D. , Suidan M. T. , Wrenn B. A. , *et al.* Bioremediation of experimental oil spill on the shoreline of Delaware Bay. Environmental Science and Technology, **1996**, 30: 1764 ~ 1775
- [60] Venosa A. D. , Zhu X. Biodegradation of crude oil contaminating marine shorelines and freshwater wetlands. Spill Science & Technology Bulletin, **2003**, 8(2): 163 ~ 178
- [61] Venosa A. D. , Haines J. R. , Allen D. M. Efficacy of commercial inocula in enhancing biodegradation of crude oil contaminating a Prince William Sound beach. Journal of Industrial Microbiology, **1992**, 10: 1 ~ 11
- [62] IPIECA Report Series. Biological impacts of oil pollution: Rockyshores. , Volume 4, **1995**
- [63] IPIECA Report Series. Dispersants and their role in oil spill response. Volume 5, **1993**
- [64] Southward A. J. , Southward E. C. Recolonization of rocky shores in Cornwall after use of toxic dispersants to clean up the Torrey Canyon spill. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, **1978**, 35(5): 682 ~ 706
- [65] Houghton J. P. , Fukuyama A. K. , Lees D. C. , *et al.* Impacts on intertidal epibiota: Exxon Valdez spill and subsequent clean-up. In: Proceedings of the 1993 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, **1993**. 293 ~ 300
- [66] Mateo M. P. , *et al.* Laser cleaning of prestige tanker oil spill on coastal rocks controlled by spectrochemical analysis. Analytica Chimica Acta, **2004**, 524: 27 ~ 32
- [67] Lessard R. R. , Demarco G. The significance of oil spill dispersants. Spill Science & Technology Bulletin, **2000**, 6(1): 59 ~ 68