

渤海滩涂沉积物中石油烃迁移特征

李海明^{1,2}, 郑西来¹, 刘宪斌²

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2 天津科学技术大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

关键词: 石油烃; 沉积物; 迁移; 渤海滩涂

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2006)01-0163-06

1 引言

渤海天津段滩涂蕴藏丰富的贝类生物资源, 但由于兼有海、陆两种不同属性的环境特征, 环境和生态十分脆弱^[1]. 进入 20 世纪 80 年代以来海岸带已受到石油类的严重污染, 在海水和沉积物中均检出石油烃, 而且有超标迹象^[2].

石油进入海洋环境后迁移、转化的过程十分复杂, 这一过程与水动力条件密切相关^[3,4], 海水中的石油烃吸附在悬浮物上随潮流迁移, 同时沉淀在海底和潮间带的沉积物上^[5,6]. 沉积在滩涂沉积物表层的石油烃在潮水作用下向滩涂沉积物深部迁移, 在迁移过程中被沉积物固体颗粒吸附, 残留于沉积物的一定深度内, 同时进入沉积物中的石油烃又受到沉积物中微生物的降解. 微生物降解速度与温度、盐度、pH, 营养盐等因素有关^[7-16]; 微生物对烃的降解作用从低分子量化合物开始, 首先降解低分子量的烷烃和芳烃, 然后降解大分子量的物质^[17], 在细砂质海滩上风浪的搅拌作用不足以提供微生物新陈代谢所消耗的氧气量^[18], 因此沉积物中的石油污染物质除一部分被需氧微生物降解外, 其余部分将长期滞留在海底. 这些残留物质多难以降解且有巨毒性、致癌性的多环芳烃(PAHs), 极大地影响海洋底栖生物的正常生长^[20,27]. 因此, 研究滩涂体内石油迁移转化特征, 对探讨石油污染对底

栖生物的影响是极其重要的, 但迄今为止, 有关该研究领域的报道尚不多见.

本文通过对渤海驴驹河滩涂海水和沉积物中石油烃、有机质、营养盐以及沉积物机械组成分析, 探讨了石油烃在沉积物中的迁移转化特征及其主要影响因素.

2 海洋水文特征

研究区处于渤海湾北部湾顶(38°54′02″~38°51′46″N, 117°39′40″~117°37′49″E), 是海陆因素相互作用最活跃的地带, 有近100 km²的宽阔平坦海岸滩涂(见图1). 此段潮间带位于高低潮线间, 上抵人工堤岸, 下界至0 m等深线, 高程为0.0~3.5 m, 平均宽度约为3 500 m; 坡度小, 坡降为1.06%~1.17%, 属于堆积型平原海岸, 即典型的粉砂、淤泥质海岸, 以岸线平直、潮滩宽阔平坦为特点. 地貌类型比较简单, 岸滩分带明显, 自岸向海可以划分为中潮滩面冲刷带和低潮滩面宽平带等次一级的地貌类型. 研究区高潮时被海水淹没, 低潮时出露为滩地, 是海岸带中水动力作用、沉积冲淤变化最活跃的地带, 是典型的粉砂淤泥质浅滩.

研究区所处水域属于不规则的半日潮, 每日发生高低潮位各两次, 有日潮不等现象, 低潮显著. 平均海平面为2.56 m, 平均潮差为2.47 m. 潮流运动方式为往复流形式, 涨潮指向岸边, 为北西向; 落潮

收稿日期: 2005-05-14; 修订日期: 2005-10-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2002AA648010); 博士后流动基金资助项目; 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20040709); 天津科学技术大学引进人才科研启动基金资助项目.

作者简介: 李海明(1971—), 男, 山西省临县人, 博士后, 从事海洋环境和水污染控制的教学和科研工作. E-mail: lhm99044@163.com

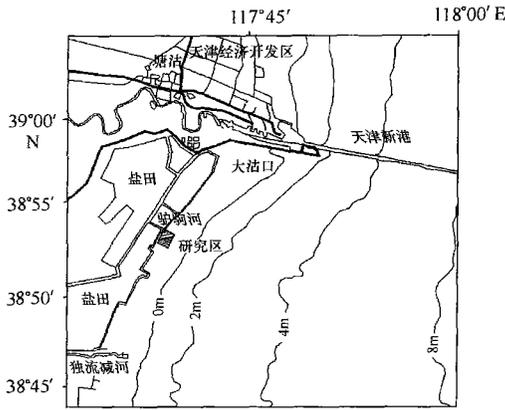


图 1 研究区位置图

相反,为南东向。

本区属温带大陆性季风气候,四季分明;区内年降水量为 590.1 mm,多集中在 7、8 月份;年蒸发量为 1 683 mm;年平均气温为 11℃;年相对湿度为 66%。

3 样品采集和分析方法

3.1 站点布设和样品采集

沉积物的监测站位采用“井”字型布设,监测断面走向大体与海岸线垂直,设 4 条断面共 16 个站点。对海水站点布设考虑高、中、低潮区,共 5 个站点。取样点平面分布图见图 2。

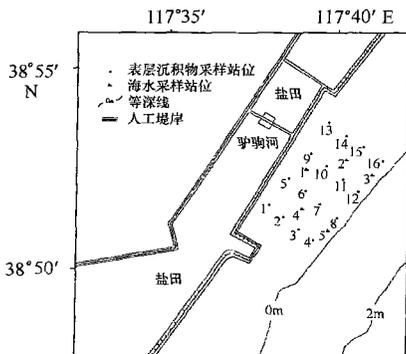


图 2 取样点平面布置图

采样时间为 2003 年 6 月,在退潮后采集沉积物土样,采样深度在表层为 0~30 cm,对水样和沉积物土样的预处理、制备及保存均参照《海洋监测规范 (GB17378.5-1998)》要求进行。

3.2 沉积物粒度分析

采用《海洋地质地球物理调查方法 (GB/

T 13909-92)》中“沉积物粒度分析法”的筛析法和沉析法(吸管法),即采用综合法分析了沉积物的机械组成。对粒径大于 0.063 mm 的沉积物采用筛析法分析,对粒径小于 0.063 mm 的物质用吸管法分析。

3.3 石油烃分析方法

采用紫外分光光度法测定石油烃总量,测定仪器为 WFZ 系列(752 型)紫外分光光度计。用正乙烷萃取海水和沉积物,用紫外分光光度法测定萃取液,用统一提供的标准油品作参考标准,计算海水和沉积物中石油烃的含量。本方法检出限为 3 μg/g。

试剂及其配制:正乙烷(C_6H_{14})、硫酸($\rho=1.84 g/cm^3$)、硫酸钠($30 g/dm^3$)、油标贮备液($5.00 mg/cm^3$)、油标使用液($200 \mu g/cm^3$)。

对沉积物中石油烃的萃取采用《海洋监测规范 (GB17378.4-1998)》的方法。

3.4 细菌总数

使用平板计数法测定细菌总数。

试剂配制:氢氧化钠溶液($160 g/dm^3$)、吐温溶液($1 mL+2000 mL$)。

2216E 培养基:蛋白胨(5 g)、酵母膏(1 g)、磷酸高铁(0.1 g)、琼脂(20 g)、陈海水(1000 mL,盐度为 30)。

3.5 化学分析

采用重铬酸钾氧化-还原容量法测定沉积物中的有机质;采用次溴酸盐氧化法测定沉积物中的总氮。

4 结果分析

4.1 沉积物特性

本区沉积物类型主要有细砂和黏土质粉砂。细砂分布于中、低潮滩内,呈带状分布,小于 0.25 mm 的优势粒级的含量占 84.98%~93.27%,含少量粉砂(见表 1)。黏土质粉砂主要分布于人工堤岸向海方向 200 m 范围内,以粉砂为主,含黏土 20%~50%。由于海洋动力学差异,该区沉积物的纵向由北到南呈粗到细的分布特征,横向分布自岸向海呈细到粗的分布规律。有机质含量为 0.0062%~0.4100%,平均为 0.1050%。

4.2 海水和沉积物中石油烃污染特征分析

4.2.1 海水石油烃污染特征

在 5 个海水样中石油烃的检出率为 100%,检出值为 98.27~168.4 μg/dm³,平均值为 134.93 μg/dm³,与我国海水水质标准(GB 3097-1997)的第一

表 1 滩涂沉积物的机械组成

站点	土样的机械组成(%)						有机质(%)	沉积物类型
	< 0.001 mm	0.001~ 0.005 mm	0.005~ 0.010 mm	0.010~ 0.050 mm	0.050~ 0.250 mm	> 0.250 mm		
1	13.96	19.61	8.69	28.55	24.99	0.07	0.41	砂-粉砂质黏土
2	2.18	1.44	1.37	2.27	88.48	0.07	0.28	细砂
3	0.27	2.26	0.69	0.69	92.42	0.18	0.24	细砂
4	0.97	2.04	0.33	3.02	89.39	0.16	0.09	细砂
5	7.87	6.38	5.15	24.98	52.18	0.15	0.09	粉砂质砂
6	1.54	1.56	1.20	4.88	87.23	0.06	0.07	细砂
7	2.01	1.32	0.66	0.66	90.15	0.14	0.11	细砂
8	0.97	0.93	0.78	0.21	92.10	0.14	0.05	细砂
9	4.43	0.94	0.22	16.28	74.06	0.22	0.03	细砂
10	1.27	1.71	1.17	0.91	90.69	0.33	0.07	细砂
11	3.32	1.51	0.16	0.91	89.76	0.25	0.01	细砂
12	1.94	0.22	1.38	1.78	90.20	0.13	0.01	细砂
13	2.25	1.38	1.43	7.29	84.98	0.17	0.05	细砂
14	2.64	0.72	0.36	2.51	90.61	0.24	0.05	细砂
15	2.67	0.59	0.31	1.43	92.30	0.12	0.08	细砂
16	1.35	0.37	0.14	2.08	93.28	0.10	0.05	细砂

注: 沉积物类型依据《海洋地质地球物理调查方法(GB/T 13909-92)》命名。

类水质标准 $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 相比, 超标率为 100%, 超标 1.96~3.36 倍。

4.2.2 沉积物石油烃污染特征

受石油烃影响的滩涂沉积物中石油烃的检出值高, 在 16 个沉积物样中石油烃的检出率为 100%, 检出值为 $55.8 \times 10^{-6} \sim 2563.4 \times 10^{-6}$, 平均值为 555.82×10^{-6} 。除站点 5 最大(2563.4×10^{-6}) 和站点 10 最小(55.8×10^{-6}) 外, 其余各点检出值为

$132.6 \times 10^{-6} \sim 887.2 \times 10^{-6}$; $200 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$ 的站位数占总站位数的 55.25%, 这个范围的检出值基本代表了本区石油烃的检出情况。与海洋沉积物质量标准(GB18668-2002) 中的 500×10^{-6} 相比, 有 8 个站位超标, 超标率为 50%, 超标 1.05~5.13 倍(表 2)。大于 0.5 的站位数占总站位数的 68.75%。

表 2 沉积物中石油烃、总氮含量、细菌总数

站点	石油烃含量 $c_i (\times 10^{-6})$	总氮 $(\times 10^{-6})$	细菌数/ $\times 10^6 \text{个} \cdot \text{g}^{-1}$	超标指数 $P = c_i / c_0$	站点	石油烃含量 $c_i (\times 10^{-6})$	总氮 $(\times 10^{-6})$	细菌数/ $\times 10^6 \text{个} \cdot \text{g}^{-1}$	超标指数 $P = c_i / c_0$
1	563.9	547.87	122.0	1.13	9	132.6	146.19	0.1	0.27
2	166.1	155.46	132.7	0.33	10	55.8	308.32	6.6	0.11
3	887.2	170.93	75.0	1.77	11	588.6	109.35	131.0	1.18
4	394.9	150.22	410.0	0.79	12	629.8	125.88	3.1	1.26
5	2563.4	324.11	3.8	5.13	13	137.5	89.92	487.0	0.28
6	400.1	163.74	4.3	0.80	14	168.2	0.00	0.7	0.34
7	463.3	72.41	117.0	0.93	15	533.9	115.37	3000.0	1.07
8	682.9	66.35	0.9	1.37	16	524.9	0.00	90	1.05

注: $c_0 = 500 \times 10^{-6}$, P 为超标指数。

4.2.3 沉积物中石油烃平面分布特征

对照图 2、3 和表 1 各站位石油烃分布特征可以看出, 石油烃的检出值与测点距人工堤岸距离和方位有密切关系。离人工堤岸越近, 石油烃的检出值越

低, 规律比较明显。如测点 13 的值(137.5×10^{-6}) 小于测点 16 的值(524.9×10^{-6}), 测点 9 的值(132.6×10^{-6}) 小于测点 12 的值(629.8×10^{-6})。从平面整体分布特征来看, 站点 5 属于局部污染严重的异常点。

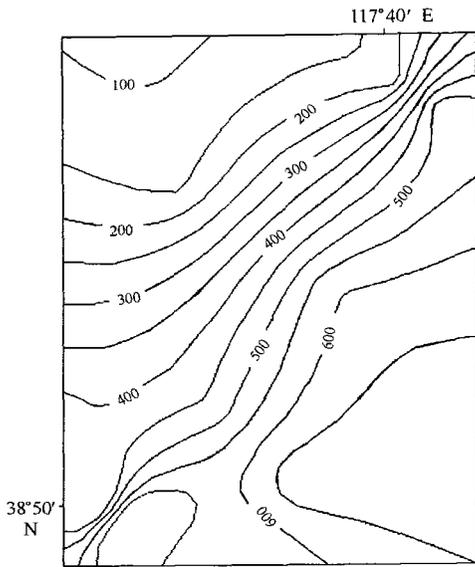


图3 沉积物中石油烃含量($\times 10^{-6}$)等值线图

总体看,研究区海水和沉积物中石油烃污染严重,这与天津港船舶的漏油、泄油有关,海上浮油随波浪、潮汐作用迁移至此造成污染。

4.3 细菌总数

沉积物样品中细菌密度的数量级为 $10^6 \sim 10^8$,其中有6个站位为 10^8 (见表2);细菌密度的差别很大,如15站位的细菌密度大于 3×10^9 个/g,而9站位则小于 1×10^5 个/g。细菌密度的差别主要与沉积物组成有关,砂土含量较大的沉积物与砂-粉砂质黏土相比具有较小的细菌附着面积。

4.4 总氮

沉积物中总氮的检出值为 $66.35 \times 10^{-6} \sim 547.87 \times 10^{-6}$,平均值为 183.35×10^{-6} 。在14和16站位的沉积物中未检出总氮,这与沉积物砂粒含量较大有关(见表2)。

5 滩涂体内石油烃迁移特征分析

溶解在海水中的石油烃在吸附、生物降解和氧化还原等地球化学过程影响下向滩涂体内迁移,这一过程与水动力条件和沉积环境密切相关^[7~34]。

5.1 吸附作用

海水中的可溶油随海水向滩涂沉积物中渗透而迁移^[21,22],在此过程中会被沉积物固体颗粒吸附,使其残留于滩涂体内一定深度。

沉积物的机械组成是影响沉积物对石油烃类物质吸附强度的因素之一,不同粒度的沉积物比表面

积不同,与油类物质的结合能力也不同^[20];细颗粒物质的比表面积较大,比粗颗粒物质更容易吸附石油烃,黏土对石油烃有显著的吸附作用^[23,24],但已有研究表明,石油烃主要吸附在沉积物的有机物颗粒表面上^[25,26],相比之下,颗粒含量的变化对可溶油吸附量比沉积物有机质含量的影响要小得多^[26]。可溶油在固相(有机质)与液相间的分配很快即可达到平衡,吸附是可逆的,其等温吸附是线性的。分配系数(k_d)遵循表达式:

$$k_d = f_{oc} k_{oc}$$

式中, k_d 为分配系数,即石油烃在固相(土壤有机质)与液相(海水)间的分配(L/kg); k_{oc} 为石油烃在水和有机碳(含100%的碳)间的分配系数(L/kg); f_{oc} 为沉积物中有机碳含量,无量纲。由于沉积物的有机质百分含量(f_{om})很容易测得,因此通常用 $f_{oc} = f_{om}/1.724$ 来确定沉积物中的有机碳含量。

吸附作用是引起石油烃在沉积物中相对于渗透流速来讲迁移滞后的主要原因,污染物被固相吸附得越多,迁移受到的阻滞就越大。研究表明,对于同一种有机物,介质的有机碳百分含量及小于 $125 \mu\text{m}$ 粒径含量越高,有机物迁移能力越小,反之则相反。对同一种介质来说,有机污染物的迁移能力决定于有机物本身。有机物的 k_{ow} 值反映有机污染物的疏水性, k_{ow} 值越小,则有机物越容易溶于水,越容易迁移^[23]。

本次测得研究区沉积物中有机质含量为0.0062%~0.4100%。用海水中石油烃含量的平均值和沉积物中石油烃含量的平均值计算石油烃在沉积物和海水中的分配系数为4.119 L/kg, $\lg k_{ow}$ 为4.837 L/kg,与苯并芘的 $\lg k_{ow}$ (6.5)^[25]很接近,这表明石油烃很容易吸附在滩涂沉积物有机碳上,不容易迁移。从另外一个角度看,沉积物中有机质吸附的石油烃组分主要是多环芳烃类,如苯并芘等^[27]。

5.2 生物降解

影响石油烃迁移转化的另一个主要因素是微生物降解。滩涂体内富集微生物,这些微生物在地球化学过程中起着很重要的能量传输作用^[29],已有资料表明,滩涂体内存在可降解石油烃的细菌,滩涂中的油类可以被微生物降解^[29~35]。

环境因素的变化在很大程度上能影响微生物降解的速率和程度。氧气是微生物进行一切生命活动所必需的。在细颗粒的滩涂中,沉积物的孔隙度、含水率和气体压力会影响沉积物中氧气的含量^[28];本

区滩涂体的沉积物主要是细砂和黏土质粉砂, 由于细颗粒有很高的持水性, 使滩涂体的沉积物内存在厌氧环境, 因此滩涂体内氧气不足以补充微生物新陈代谢所消耗的氧气量, 氧气成为石油烃生物降解的限制因素。

石油污染物中主要包括饱和烃、芳香烃、沥青和脂类四种成分。由于成分复杂, 而且不同的微生物降解石油的不同组分, 对不同组分的降解速率不同, 通常来说, 饱和烃的降解速率大于轻芳烃大于多环芳烃大于沥青大于脂类^[18]。从现场调查来看, 研究区石油烃主要来自海上漏油、泄油, 海水中的石油烃经过一系列的风化作用后, 饱和烃和轻芳烃类容易挥发和被微生物降解, 因此最终到达滩涂表面和向滩涂体内迁移的石油烃主要是生物难降解的多环芳烃类化合物。从表 2 结果看, 滩涂沉积物中石油烃的含量除个别站位外, 总体上与总氮、细菌总数成反比, 但相关性不是很好, 生物降解对石油烃迁移转化有一定的影响。

5.3 石油烃含量分布与水动力特征和沉积环境差异

滩涂水动力条件决定了滩涂的沉积环境, 形成了自岸向海由细到粗的分布特征。到达滩涂表层的石油的迁移、转化过程十分复杂, 这一过程与水动力条件密切相关^[3,4], 潮流和波浪的作用影响着滩涂体内微生物降解石油的速度^[36], 同时渗入到滩涂表层的石油烃在波浪和潮汐作用下被冲刷掉^[27]。石油烃在黏土沉积物中不容易下渗, 渗透深度相对于砂土来说很小, 大部分富集在沉积物表面, 很容易在波浪和潮汐作用下被冲刷走, 残留在滩涂体的石油烃数量相对于容易下渗的砂土来说就少多了。另一方

面, 在沉积物中黏土含量高的区段有机质、氮和磷等营养元素更容易富集, 容易吸附细菌, 有利于细菌的生长, 在此环境下石油烃容易被微生物降解。因此, 以上两方面原因导致石油烃的含量与砂土中黏粒的含量呈负相关, 相对来说, 黏土含量越高, 石油烃含量越低(见表 2), 这就形成越靠岸边石油烃含量越低、平行于海岸带方向石油烃含量变化很小的平面分布特征(见图 3), 因此潮流作用和沉积物的机械组成是控制滩涂体内石油烃平面分布的主要因素。

6 结论

(1) 石油烃经海水进入滩涂饱和水带的过程中, 对影响其迁移转化作用很难一一区分开, 它是一个综合作用的结果。

(2) 研究区以细颗粒物为主, 沉积物富含有机质, 有利于吸附石油烃; 另一方面, 细颗粒物结构密实, 孔隙度小, 石油烃在此环境中不易被氧化分解, 残留在沉积物中的石油烃是生物难降解的多环芳烃。

(3) 淤泥质海岸带沉积物中石油烃含量自岸向海呈低到高的分布特征, 决定此分布格局的是潮流冲刷作用和沉积物的机械组成。

(4) 影响石油烃迁移转化的机理极其复杂, 需进一步研究。

本文承“863”“02”专题副组长陈惠彬研究员审阅, 野外取样和室内测试是在参与课题的天津科学技术大学海洋学院的同事们共同协作下完成的, 其中刘文岭负责项目整体协调, 张福负责滩涂沉积物机械组成的测试, 张桂香负责石油烃和总氮的测试, 张波负责细菌的测试, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 赵叔松. 中国海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1991. 1—7.
- [2] 天津市人民政府. 天津渤海碧海行动计划——环境专项调查报告[R]. 天津: 天津市人民政府, 1999.
- [3] 张建乐, 张彦龙, 张淑萍, 等. 秦皇岛沿岸海域石油污染状况初探[J]. 海洋通报, 1996, 15(5): 74—79.
- [4] 张珞平, 曾继业, 吴瑜端. 河口港湾水体污染物迁移转化模式——厦门港石油烃有限水体迁移和风化混合模型. 海洋学报, 1994, 16(1): 44—50.
- [5] 尚龙生, 孙 茜, 徐恒振, 等. 海洋石油污染与测定[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 16—21.
- [6] 赵云英, 杨庆霄. 溢油在海洋环境中的风化过程[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 45—51.
- [7] 丁明宇, 黄 健, 李永祺. 海洋微生物降解石油的研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 84—88.
- [8] 卢 鸿. 海洋油污染的生物治理技术[J]. 海洋地质动态, 1999, 10: 4—6.
- [9] 林凤翔, 于占国, 李 洪, 等. 海洋丝状真菌降解原油研究. 1. 石油烃降解的实验室模拟. 海洋学报, 1997, 19(6): 68—76.
- [10] 林凤翔, 冯志权, 李 洪, 等. 海洋丝状真菌降解原油研究. 2. 砂砾中油污去除室内模拟试验. 海洋学报, 1999, 21(6): 116—123.
- [11] 庄栋法, 吴省三, 林 昱, 等. 化学分散原油在海洋围隔生态系统中迁移过程的研究. 海洋学报, 1997, 19(1): 43—49.
- [12] THOU AND G. Laboratory evaluation of crude oil biodegradation with commercial or natural microbial inocula[J]. Can J Microbial,

- 1999, 45(2): 106—115.
- [13] CHAPMAN P J. Fossil fuel biodegradation: laboratory studies[J]. *Environ Health Perspect*, 1995, 103(5): 79—83.
- [14] SHEITON M E. Degradation of weathered oil by mixed marine bacteria and the toxicity of accumulated water soluble material to two marine crustacea[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1999, 36(1): 13—20.
- [15] RUDD L E. Changes in mutagenicity during crude oil degradation by fungi[J]. *Biodegradation*, 1996, 7(4): 335—345.
- [16] LEAHY J G. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment[J]. *Microbiol Rev*, 1990, 54(3): 305—315.
- [17] 陈碧娥, 刘祖同. 湄洲湾海洋细菌降解石油烃研究[J]. *石油学报*, 2001, 17(5): 31—35.
- [18] 崔仙丹, 尹相淳, 王中柱. 海洋中的烃及其迁移和衰变[J]. *海岸工程*, 1995, 14(4): 25—32.
- [19] HEAD I M, SWANNELL R P J. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in marine habitats[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1999, 10: 234—239.
- [20] 王静芳, 韩庚辰, 韩建波. 近岸海洋沾污沉积物中石油烃类化合物释放过程的实验室研究. I. 实验室动态模拟研究[J]. *海洋环境科学*, 1998, 17(2): 29—34.
- [21] HAYES M O, MICHEL J. Factors determining the long-term persistence of Exxon Valdez oil in gravel beaches[J]. *Mar Pollut Bull*, 1999, (38): 92—101.
- [22] CHENG C J, LEE J G, NISHIJIMA W, et al. Seawater infiltration into tidal flat or sandy beach sediment by wave action in enclosed bay[J]. *J Jpn Soc Water Environ(in Japanese)*, 2000, (23): 619—623.
- [23] 潘建明, 扈传昱, 刘小涯. 等. 珠江河口沉积物中石油烃分布及其与河口环境的关系[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(2): 23—27.
- [24] 王东海, 李广贺, 贾道昌. 石油污染物在砂砾石层中的迁移与分布[J]. *环境科学*, 1998, 19(5): 18—21.
- [25] 沈照理, 朱宛华, 钟佐. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [26] 郑西来, 李永乐, 林国庆. 等. 土壤对可溶性油的吸附作用及其影响因素分析[J]. *地球科学*, 2003, 28(5): 563—567.
- [27] TOMOHIRO Kose, TETSUO Mukai, KAZU TO T, et al. Effect of non-aqueous phase liquid on biodegradation of PAHs in spilled oil on tidal flat[J]. *Water Research*, 2003, (37): 1 729—1 736.
- [28] ROWLAND A Pa, LINDLEY D K, HALL G H. Effects of beach sand properties, temperature and rainfall on the degradation rates of oil in buried oil/beach sand mixtures[J]. *Environmental Pollution*, 2000, (109): 109—118.
- [29] YOKO Katayama, TETSE Oura, MIHOKO Iizuka, et al. Effects of spilled oil on microbial communities in a tidal flat[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, (47): 85—90.
- [30] DEL' ARCO J P, FRANCA F P. Influence of oil contamination levels on hydrocarbon biodegradation in sandy sediment[J]. *Environmental Pollution*, 2001, (110): 515—519.
- [31] ALDRETT S, BONNER J S. Microbial degradation of crude oil in marine environments tested in a flask experiment[J]. *Water Research*, 1997, (31): 2 840—2 848.
- [32] DEL' ARCO J P, FRANCA F P. Biodegradation of crude oil in sandy sediment[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1999, (44): 87—92.
- [33] MACNAUGHTON S J, STEPHEN J R. Microbial population changes during bioremediation of an experimental oil spill[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1999, (65): 3 566—3 574.
- [34] ATLAS R. M., BARTHA R. Fate and effects of polluting petroleum in the marine environment[J]. *Residue Review*, 1973, (49): 49—83.
- [35] LEE J G, NISHIJIMA W, MUKAIT, et al. Factors to determine the functions and structures in natural and constructed tidal flats[J]. *Water Res*, 1998, (32): 2 601—2 606.
- [36] REGAS SANTAS, PHOTEINOS SANTAS. Effects of wave action on the bioremediation of crude oil saturated hydrocarbons[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(5): 434—439.

Characteristics of petroleum hydrocarbon migrated to sediment of Bohai's tidal flats

LI Hai-ming^{1,2}, ZHENG Xi-lai¹, LIU Xian-bin²

(1. School of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. School of Marine Science & Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tanggu 300457, China)

Key words: petroleum hydrocarbon; sediment; migration; Bohai's tidal flats