

大亚湾石化排污区海域冬季生态环境质量评价

徐娇娇^{1,2}, 徐姗姗¹, 李纯厚^{1*}, 刘永¹, 林琳¹

(1.中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300; 2.上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要:根据 2012 年 1 月的海洋生态调查数据,从海水环境质量(包括海水营养结构与营养水平)、沉积环境质量、初级生产力和饵料生物水平 4 个指标评价了大亚湾石化排污区海域生态环境质量现状,并利用综合指数法对海域生态环境质量进行了综合评价。结果表明:海域水质因子 DO、BOD₅、COD_{Mn}、硫化物、PO₄³⁻-P、DIN、Cu、Pb、Cd 含量均符合第二类海水水质标准,66.7%站位的石油类污染物、91.7%站位的 pH 和个别站位的 Zn 含量超过第二类海水水质标准,水质综合污染指数均值为 1.215,海水水质总体处于轻度污染状态,有机污染状况属于优良等级,尚未受明显有机污染;海水营养水平属于中高营养等级,沉积物各指标均符合第一类沉积物质量标准,沉积物质量综合污染指数均值为 0.478,表明沉积环境质量良好;初级生产力属中等水平,浮游植物、浮游动物和底栖生物生物量丰度很高。海洋生态环境综合质量指数为 1.129,属轻度污染。结合生物体残毒(总 TPHs)等历史调查数据分析结果表明,调查海域生态环境质量现状属于轻度污染,主要污染物为石油类污染物。今后应加强对该海域生态环境的监测,尤其是对石油类污染物的优先控制。

关键词:石化排污;海洋生态环境;环境评价;大亚湾

中图分类号:820.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)07-1456-11 doi:10.11654/jaes.2013.07.025

Ecological Environment Quality Assessment on Petrochemical Sewage Discharge Waters of Daya Bay in Winter

XU Jiao-jiao^{1,2}, XU Shan-nan¹, LI Chun-hou^{1*}, LIU Yong¹, LIN Lin¹

(1.Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Daya bay, a typical subtropical marine genetic resource pool in the South China Sea, is one of the most important inshore fisheries areas in Guangdong province. However, the marine environments has been threatened and effected by rapid developments of the petrochemical industry in recent years. In current study, the ecological environment quality has been assessed. Based on the ecological and environmental investigation in January 2012, the states of ecological environment quality of the Daya Bay petrochemical sewage discharge waters was assessed with four factors, including sea water quality, nutrient structure and level, sediment quality, primary productivity and food organism level. The comprehensive index method was used for integrated assessment, as well. The results show that most of the water quality factors, including dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, sulfide, phosphorus, dissolved inorganic nitrogen and heavy metals of Cu, Pb and Cd, were all conforming to Grade II of the National Sea Water Quality Standard of China. However, some factors, including petroleum hydrocarbon of 66.7% sites, pH of 91.7% sites, and Zn of several sites, exceed the Grade II of the National Standard with the average value of water quality comprehensive index at 1.215. The status of above factors consequently reached a low-level pollution without any pollution caused by organic pollutants. What makes unoptimistic is the concentration of nutrients in sea water is relatively high. Fortunately, the quality of sediment is very good and conforming to the Grade I of National Marine Sediment Quality Standard, with the com-

收稿日期:2012-09-21

基金项目:国家自然科学基金项目(31100362);广东省科技计划项目(2009B030600002);热带海洋环境国家重点实验室开放课题(中国科学院南海海洋研究所,LT01106);广东省低碳发展专项资金项目(2012-007)

作者简介:徐娇娇(1987—),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事海洋生态环境保护研究。E-mail:jiaojiaosk3@163.com

* 通信作者:李纯厚 E-mail:scslch@vip.163.com

prehensive pollution index at 0.478. Furthermore, the status of primary productivity reached the level of medium because of the high abundance of phytoplankton, zooplankton and benthic. According to the references and data of this study, the investigated petrochemical sewage discharge waters of Daya Bay was slight polluted by total petroleum hydrocarbons (TPHs), with the ecological environment comprehensive quality index of 1.129.

Keywords: petrochemical sewage discharge; marine ecological environment; environment assessment; Daya Bay

大亚湾是南海区重要的亚热带物种种质资源库,也是广东省最重要的渔业水域之一。由于经济发展的需要,中海壳牌石油化工有限公司于 2000 年在广东省惠州市大亚湾经济技术开发区建设并运营其石化联合工厂,石化区污水实行管道深海排放,排污口距惠东国家海龟自然保护区约 6 km,排污管道在 2006 年中海壳牌投产前已建成,一直使用至今。石油化工工业生产过程中产生的废水有机污染物浓度高,废水水量大,成分复杂,有毒有害物质多,对环境造成很大危害。另外,当水体中含有一定量的石油类物质,会在表面形成厚度不一的油膜,破坏水体复氧过程,从而影响水质和水中动、植物的生存^[1]。因此,对石化排污区海域生态环境质量状况进行综合评价,具有十分重要的意义。在大亚湾海域,林琳等^[2]对其进行了生态环境质量综合评价,也有学者从重金属^[3-5]、多环芳烃^[6]、养殖区海域营养盐^[7]、工程建设对生态环境的影响^[8-9]等角度开展过一些单因子和局部评价研究,但针对大亚湾石化排污区海域生态环境质量状况的研究尚未见报道。本文根据

2012 年 1 月对大亚湾石化排污区及附近海域的生态调查数据,结合该海域生态环境特点,从海水环境、沉积环境、初级生产力和饵料生物 4 个方面首次评价了大亚湾石化排污区海域生态环境质量现状,并利用综合指数法对其生态环境质量进行综合评价。

1 材料与方法

1.1 调查与分析方法

采用 2012 年 1 月在大亚湾石化排污区及附近海域进行的生态调查资料。评价海域布设 12 个站位,其中 S9 位于排污口中心区,S1~S4、S5~S8 是以排污口为中心,分别以 2000 m、1000 m 为半径,与东南西北 4 个方位的交点,其中半径 1000 m 是根据排污点和非自然保护区的相关位置确定。水质采集 12 个站位的表、底层水样,沉积物采集 S1~S4、S9~S12 站位海底表层沉积物样品,浮游植物和浮游动物采集 12 个站位的样品,底栖生物采集 S1~S4、S9~S12 站位的样品,生物测站为 S3 和 S11(图 1)。现状数据来源于 2012 年

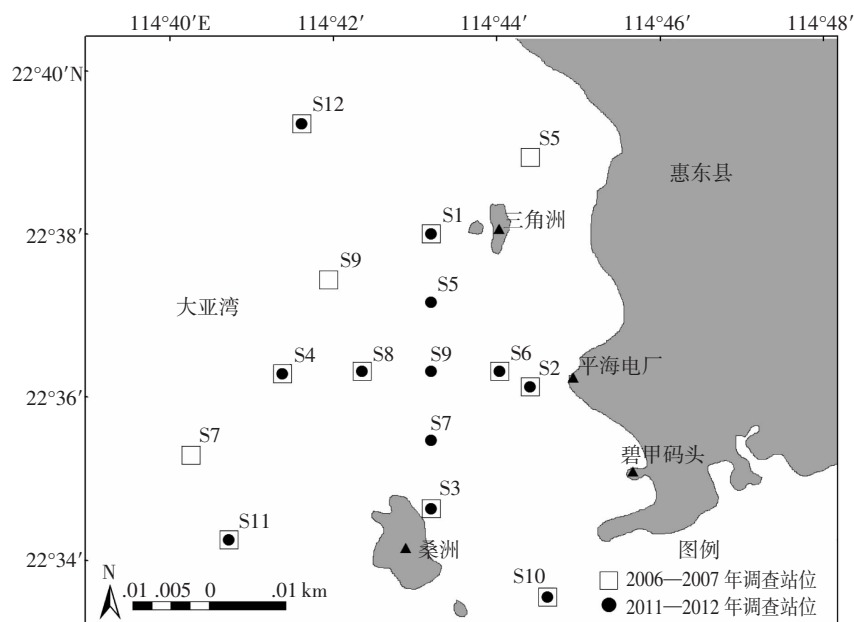


图 1 大亚湾石化排污区海域生态环境调查站位

Figure 1 Ecological environment survey stations of the Daya Bay petrochemical sewage waters

1 月的调查监测数据,历史数据分别源于 2006 年 12 月、2007 年 12 月和 2011 年 1 月在大亚湾石化排污区海域的调查监测数据。各测站水环境因子的含量均采用表、底层平均值,样品的采集、运输、保存和分析均参照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[10]和《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)^[11]中有关规定。

1.2 生态环境质量评价方法

1.2.1 海水环境质量

海水水质采用单因子标准指数法^[12](其中,pH 单因子评价方法与其他单因子评价方法不同)评价单项因子对环境产生的等效影响程度,评价标准采用《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[13]第二类标准,标准指数>1 表明该水质参数已经不能满足二类水质标准的要求。海水重金属和石油类(TPHs)标准指数分级^[14]见表 1。水质综合评价采用分指数平均值和最大值的二次方和的尼梅罗法^[15-16],既考虑了平均分指数的影响,也照顾到最大分指数的影响。海水有机污染状况和营养水平分别采用有机污染指数(A)法^[14]和营养指数(E)法^[14]进行评价,其水平等级的划分见表 2^[14,17]。

pH 的标准指数为:

$$S_{\text{pH}} = \frac{|pH - pH_{\text{su}}|}{DS} \quad (1)$$

$$pH_{\text{su}} = \frac{pH_{\text{su}} + pH_{\text{sd}}}{2}, DS = \frac{pH_{\text{su}} - pH_{\text{sd}}}{2}$$

式中: S_{pH} 为 pH 的标准指数; pH 为 pH 的实测值; pH_{sd} 为水质标准中的下限值; pH_{su} 为水质标准中的上限值。

表 1 海水石油类和重金属污染水平分级^[14]

Table 1 Pollution grade of seawater TPHs and heavy metal^[14]

石油类与重金属污染	等级	质量评价
<0.4	1	自然本底
0.4~0.6	2	清洁
0.6~0.8	3	较清洁
0.8~1.0	4	轻度污染
1.0~2.0	5	污染
>2.0	6	严重污染

表 2 海水有机污染与海水营养水平分级^[14,17]

Table 2 Grade for organic pollution and nutrient level of sea water^[14,17]

项目	等级					
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
有机污染指数(A)	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	>4
污染状况	优良	清洁	较清洁	轻度污染	中度污染	严重污染
营养水平指数(E)	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1.0	1.0~2.0	>2.0
营养水平	低贫营养	贫营养	中营养	中高营养	富营养	高富营养

水质综合评价公式为:

$$WQI = \sqrt{\frac{S_{\text{max}}^2 + S_j^2}{2}}, S_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{i,j} \quad (2)$$

式中: WQI 为多项污染的综合污染指数; S_{max} 为各项污染物中的最大分指数; S_j 为 j 站位各项污染物的分指数之平均值; n 为评价因子种类数量。

水环境质量等级的分级:综合质量指数小于 1 为环境良好,大于或等于 1 且小于 2 为轻度污染,大于或等于 2 且小于 3 为污染,大于或等于 3 且小于 5 为重污染,大于或等于 5 为恶性污染^[15-16]。

1.2.2 沉积环境质量

采用单因子标准指数法^[12]评价单项因子对环境产生的等效影响程度。调查海域沉积物质量评价标准采用《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[18]第一类标准,标准指数>1 表明该评价因子已经不能满足一类沉积物质量标准的要求。采用尼梅罗法^[15-16]对沉积环境质量进行综合评价。按照公式(2)计算沉积环境综合污染指数。沉积环境质量等级的划分:综合质量指数小于 1 为环境良好,大于或等于 1 且小于 2 为轻度污染,大于或等于 2 且小于 3 为污染,大于或等于 3 且小于 5 为重污染,大于或等于 5 为恶性污染^[15-16]。

1.2.3 初级生产力水平

按水平分级进行评价^[14,17],分级标准见表 3。

1.2.4 饵料生物现存生物量水平

按水平分级进行评价^[14,17],分级标准见表 3。

1.3 生态环境质量综合评价方法

$$WQI_E = \sqrt{\frac{S_{\text{max}}^2 + S^2}{2}}, S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (3)$$

式中: WQI_E 为生态环境综合质量指数; S_{max} 为各项评价因子的最大分指数; S 为各项评价因子的分指数之平均值; n 为评价因子的种类数量; S_i 为所有站位 i 因子标准指数之平均值。

各项评价因子的分指数取所有站位该评价因子标准指数均值参与综合质量指数的计算,参评的有海水水质 12 个评价因子分指数和沉积物 7 个评价因子

表 3 初级生产力和现存生物量水平分级^[14,17]
Table 3 Grade for level of primary productivity and food organism^[14,17]

项目	等级					
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
水平状况	很高	高	较高	中等	低	很低
水平指数范围	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	>1.0
初级生产力/mgC·m ⁻² ·d ⁻¹	>600	600~500	500~400	400~300	300~200	<200
浮游植物/×10 ⁴ ind·m ⁻³	>200	200~100	100~75	75~50	50~20	<20
浮游动物/mg·m ⁻³	>100	100~75	75~50	50~30	30~10	<10
底栖生物/g·m ⁻²	>100	100~50	50~25	25~10	10~5	<5

分指数。

综合评价分级标准为: 指数 $WQI_E < 1$ 环境良好区; $WQI_E = 1 \sim 2$ 为轻度污染区; $WQI_E = 2 \sim 5$ 为中度污染区; $WQI_E = 5 \sim 10$ 为重度污染区; $WQI_E > 10$ 为严重污染区^[12,19]。

1.4 数据处理

调查数据用 SPSS18.0 软件进行统计分析, 采用 Spearman 方法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水环境质量评价

2.1.1 海水水质单因子评价结果

2.1.1.1 氮磷营养盐

大亚湾石化排污区海域无机氮含量变化范围为 0.104~0.265 mg·L⁻¹, 均值为 0.168 mg·L⁻¹; 标准指数变化范围为 0.346~0.882, 均值为 0.560(表 4)。所有站位的无机氮都符合第二类海水水质标准, 高值区出现在调查海域西南部离湾口较近的 S3、S4、S10、S11 等站位, 其他测站分布较为均匀。磷酸盐含量变化范围为 0.004~0.020 mg·L⁻¹, 均值为 0.012 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.124~0.671, 均值为 0.388。所有站位的磷酸盐都符合第二类海水水质标准, 高值区出现在调查海域的东南部离岸较近的 S10、S9、S6、S2 等站位, 低值区出现在 S1、S11、S12 等站位。

2.1.1.2 重金属

调查海域各测站 Cu、Pb、Cd 含量均符合第二类海水水质标准, 单因子标准指数均小于 0.4, 处于评价等级 1 级, 属自然本底状态。Zn 的含量范围为 6.68~65.50 μg·L⁻¹, 均值为 20.89 μg·L⁻¹; 单因子标准指数范围为 0.134~1.310, 均值为 0.418(表 4)。S10 站 Zn 含量超出第二类海水水质标准, 其他测站 Zn 含量均未超标。重金属 Zn 含量最高值出现在 S10 测站, 另外在 S9、S11、S12 监测区域 Zn 含量也较高。

2.1.1.3 石油类

调查海域石油类含量变化范围为 0.048~0.089 mg·L⁻¹, 均值为 0.065 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.952~1.774, 均值为 1.297(表 4)。66.7% 的站位超过第二类海水水质标准, 处于评价等级 5 级, 属于污染状态, 其他站位处于评价等级 4 级, 属于轻度污染, 说明调查海域已经受到石油类污染物的污染。值得注意的是, 排污口中心区调查站 S9 并不是石油类含量高值区, 属轻度污染; 排污口的西南部是相对低值区, 属轻度污染; 排污口东部、北部以及对照站位是相对高值区, 分布较广, 属污染状态。说明该排污口设置的位置良好, 在潮流、沿岸流、欧拉余流以及各种因素共同作用下, 污染物的稀释良好, 但总体还是受到石油类污染物的污染。

2.1.1.4 其他指标

调查海域海水 pH 范围为 7.49~7.81, 均值为 7.61; 标准指数范围为 0.971~1.876, 均值为 1.539(表 4)。除 S1 站 pH 符合第二类海水水质标准外, 其余站位 pH 均超标, 超标率高达 91.7%。DO 含量变化范围为 9.37~13.35 mg·L⁻¹, 均值为 10.50 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.946~0.961, 均值为 0.956(表 4), 所有测站的 DO 均符合第二类海水水质标准。BOD₅ 含量变化范围为 0.512~1.394 mg·L⁻¹, 均值为 0.956 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.171~0.465, 均值为 0.319(表 4), 所有测站的 BOD₅ 均符合第二类海水水质标准。COD_{Mn} 含量变化范围为 0.428~0.916 mg·L⁻¹, 均值为 0.641 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.143~0.305, 均值为 0.214(表 4), 所有测站 COD_{Mn} 均符合第二类海水水质标准。硫化物含量范围为 0.013~0.015 mg·L⁻¹, 均值为 0.014 mg·L⁻¹; 标准指数范围为 0.269~0.304, 均值为 0.284(表 4), 所有测站硫化物均符合第二类海水水质标准。

2.1.2 水质综合评价结果

从表 4 可知, 排污区海域水质综合污染指数

WQI 平均值为 1.215, 属轻度污染海域。水质除 S8 测站属良好外, 其他站位水质均处于轻度污染状态。综合污染指数高值区位于调查海域的东部和南部 (S6、S3、S10、S7、S2 测站), 最高值出现在 S6 测站, 为 1.378, 可能因为 S6 距离 S9 较近, 且距离平海电厂较近, 因此在综合因素的作用下受到的污染也最严重。最低值出现在 S8 监测站, 为 0.902, 水质属清洁状态。

2.1.3 有机污染状况

各测站有机污染指数 (A) 值见表 5。调查海域有机污染指数 (A) 范围为 -1.591~-0.160, 均值为 -0.938。所有站位的有机污染指数 (A) 都是负值, 水质总体上为优良等级。

2.1.4 海水营养结构和营养水平

各测站 N/P 范围为 17.91~80.86, 平均值为 38.63 (表 5)。有关研究表明, N/P 的正常范围大体为 16:1; N/P 在 20:1 以上时, 表现为磷不足, 将限制藻类增长; N/P 小于 13:1 时, 表现为氮不足, 可认为氮是藻类增长的限制因素^[12]。调查结果显示: 此次调查的 12 个测站, N/P 最大值 (80.86) 出现在 S1 测站, 最小值 (17.91) 出现在 S8 测站; 除 S8 测站外其他 11 个测站的 N/P 均大于 20:1, 表现为磷不足。

各测站的营养指数 E 值范围为 0.276~1.718, 均值为 0.831, 海水营养水平属于中高营养状态。S1、S5、S8、S12 测站海水营养水平为贫营养状态, S11 测站海水营养水平为中营养状态, S2、S4、S7 测站海水营养水平为中海营养状态, S3、S6、S9、S10 测站海水

营养水平为富营养状态。这可能是因为石化排污口外排污水在冬季潮流和顺时针欧拉余流的共同作用下, 向排污口东南部扩散较好, 加上平海电厂与碧甲码头的生活污水及工业废水随着沿岸流汇入大亚湾湾口的东侧, 使得调查海域的东南部处于中高营养乃至富营养状态。

2.2 沉积环境质量评价

沉积物单因子标准指数和综合质量指数见表 6。沉积物硫化物、有机碳、石油类、Cu、Pb、总 Cr、Zn 的含量均未超过第一类沉积物质量标准, 单因子标准指数都小于 1, 说明此次调查中各项指标均符合第一类沉积物质量标准的求。从沉积物环境质量综合评价的结果来看, 调查海域沉积物环境质量综合污染指数 WQI 的范围是 0.271~0.746, 均值为 0.478, 说明调查海域沉积物环境质量属于良好状态。从各测站综合污染指数来看, 最高值出现在 S2 测站, 为 0.746, 可能在潮流及沿岸流共同作用下, 使得排污口的污染物质和近岸生活污水、工业废水的污染物在此站长期沉积所致。另外距离排污口较远的 S12、S10 测站的沉积物环境质量综合污染指数反而比 S1、S3、S9 测站的综合污染指数相对要大, 这是因为污水由扩散器喷出后, 由湍流和剪流引起的被动扩散和海流输移是形成污染物时空分布的决定因素, 而与初始排放条件无关^[20]。最低值出现在位于湾口且距离排污口较远的 S11 测站, 可能是因为海流的流速具有从湾顶向湾口逐渐增大的趋势, 流速的大小决定了污染物输移的快慢^[20], 使得污染物无法在此处轻易的沉淀积累。

表 4 水质单因子标准指数和综合污染指数

Table 4 Single parameter standard index and comprehensive pollution index of water quality

站位	单因子标准指数												S_j	WQI
	pH	DO	BOD ₅	COD _{Mn}	石油类	硫化物	PO ₄ ³⁻ -P	DIN	Zn	Cu	Pb	Cd		
S1	0.971	0.957	0.398	0.273	1.357	0.272	0.124	0.453	0.246	0.238	0.219	0.022	0.461	1.014
S2	1.743	0.956	0.328	0.197	1.736	0.275	0.464	0.468	0.227	0.048	0.218	0.124	0.565	1.296
S3	1.876	0.959	0.189	0.305	1.013	0.269	0.355	0.632	0.177	0.032	0.091	0.067	0.497	1.373
S4	1.700	0.956	0.288	0.201	0.970	0.272	0.428	0.627	0.287	0.056	0.099	0.134	0.501	1.253
S5	1.371	0.955	0.345	0.143	1.718	0.295	0.319	0.522	0.178	0.082	0.320	0.026	0.523	1.270
S6	1.862	0.955	0.327	0.176	1.698	0.282	0.586	0.541	0.162	0.057	0.139	0.135	0.577	1.378
S7	1.361	0.960	0.465	0.276	1.774	0.283	0.367	0.545	0.274	0.065	0.082	0.095	0.546	1.313
S8	1.200	0.954	0.440	0.175	0.952	0.299	0.428	0.346	0.134	0.078	0.161	0.039	0.434	0.902
S9	1.529	0.953	0.291	0.211	0.973	0.300	0.531	0.619	0.405	0.124	0.185	0.024	0.512	1.140
S10	1.788	0.961	0.171	0.161	1.073	0.304	0.671	0.882	1.310	0.219	0.262	0.066	0.656	1.347
S11	1.671	0.946	0.225	0.235	0.965	0.280	0.221	0.622	0.869	0.274	0.122	0.090	0.543	1.243
S12	1.400	0.957	0.360	0.209	1.334	0.276	0.160	0.463	0.744	0.218	0.116	0.102	0.528	1.058
平均	1.539	0.956	0.319	0.214	1.297	0.284	0.388	0.560	0.418	0.124	0.168	0.077	0.529	1.215

2.3 初级生产力水平

调查海域初级生产力水平范围为 55.68~852.81 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,均值 391.58 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;水平指数范围为 0.083~1.067,平均值为 0.643(表 7),初级生产力水平为 4 级,属中等水平。最高值出现在 S4 站,初级生产力水平为 1 级,初级生产力水平很高,水平等级同为 1 级的还有 S12 测站;S11、S8 站的初级生产力水平为 2 级,属高初级生产力水平;S1 站初级生产力水平为 3 级,属较高初级生产力水平;S5 站初级生产力水平为 4 级,属中等初级生产力水平;S2、S3、S7、S9 站初级生产力水平为 5 级,属低初级生产力水平;最低值出现在 S10 测站,初级生产力水平很低,水平等级为 6 级,水平等级同为 6 级的还有 S6 测站。初级生产力水平的高低是由水环境和沉积环境各方面因素共同作用决定的,此次调查中,调查海域的初级生产力水平高低的分布和环境质量优劣的分布基本一致,排污口北部和西部海域的环境质量优于东部和南部海域,初级生产力水平也是在排污口的北部和西部海域高于东部和南部海域。

2.4 饵料生物水平

大亚湾石化排污区海域浮游植物生物量范围为 $(308.10\sim11\ 179.09)\times10^4\ \text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $3\ 713.30\times10^4\ \text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$;浮游植物生物量水平指数范围为 0.004~0.130,均值为 0.024(表 7),浮游植物生物量水平为 1 级,属于浮游植物生物量水平很高的海域。12 个测站的浮游植物生物量水平都很高,水平等级均为 1 级。最大值出现在 S4 站,最小值出现在 S10 站,这与初级生产力水平的调查结果一致。

调查海域浮游动物生物量范围为 66.66~2 066.67 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 564.57 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$;水平指数范围为

表 5 海水有机污染状况和营养状况评价

Table 5 Assessment of organic pollution and nutritional status

站位	有机污染状况			营养结构和营养水平			
	A 值	等级	质量状况	N/P	E 值	等级	营养级
S1	-1.194	1	优良	80.86	0.276	2	贫营养
S2	-0.904	1	优良	22.30	0.771	4	中高营养
S3	-0.680	1	优良	39.43	1.233	5	富营养
S4	-0.800	1	优良	32.42	0.972	4	中高营养
S5	-1.102	1	优良	36.29	0.427	2	贫营养
S6	-0.814	1	优良	20.46	1.005	5	富营养
S7	-0.873	1	优良	32.85	0.993	4	中高营养
S8	-1.223	1	优良	17.91	0.466	2	贫营养
S9	-0.699	1	优良	25.80	1.251	5	富营养
S10	-0.160	1	优良	29.09	1.718	5	富营养
S11	-1.591	1	优良	62.27	0.581	3	中营养
S12	-1.217	1	优良	63.93	0.280	2	贫营养
平均	-0.938	1	优良	38.63	0.831	4	中高营养

0.010~0.467,均值为 0.184(表 7),生物量水平为 1 级,属于浮游动物生物量水平很高的海域。其中:有 58.3%的测站(S1、S3、S4、S5、S6、S8、S12)生物量水平为 1 级,浮游动物生物量水平很高;有 25%的测站(S2、S7、S11)生物量水平为 2 级,属于高生物量水平的海域;有 16.7%的测站(S9、S10)生物量水平为 3 级,属于生物量较高的水平。

调查海域底栖生物生物量范围为 16.50~1 143.90 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,均值为 208.70 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$;水平指数范围为 0.017~0.713,均值为 0.357(表 7),生物量水平为 2 级,属于高生物量水平的海域,与调查海域良好的沉积环境给底栖生物提供很好的生存环境密切相关。在调查底栖生物的 8 个测站中,S10、S12、S9 站的底栖生物生物量水平为 1 级,生物量水平很高;S4 站底栖生物生物

表 6 沉积环境单因子标准指数和综合污染指数

Table 6 Single parameter standard index and comprehensive pollution index of sed-environment

站位	单因子标准指数							S_j	WQI
	硫化物	有机碳	石油类	Cu	Pb	总 Cr	Zn		
S1	0.002	0.547	0.074	0.086	0.167	0.150	0.180	0.172	0.405
S2	0.212	0.992	0.278	0.207	0.292	0.253	0.280	0.359	0.746
S3	0.002	0.506	0.219	0.143	0.175	0.134	0.190	0.196	0.384
S4	0.046	0.602	0.180	0.107	0.158	0.159	0.187	0.206	0.450
S9	0.003	0.521	0.083	0.086	0.167	0.056	0.242	0.165	0.387
S10	0.098	0.720	0.257	0.129	0.158	0.125	0.312	0.257	0.541
S11	0.030	0.347	0.129	0.107	0.163	0.066	0.292	0.162	0.271
S12	0.803	0.628	0.427	0.200	0.275	0.278	0.327	0.420	0.641
平均	0.150	0.608	0.206	0.133	0.194	0.153	0.251	0.242	0.478

表 7 初级生产力和饵料生物水平评价

Table 7 Assessment of primary productivity and level of food organism

项目	水平范围	水平等级	水平指数
初级生产力/ $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	55.68~852.81(391.58)	6~1(4)	0.083~1.067(0.643)
浮游植物/ $\times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$	308.10~11 179.09(3 713.30)	1(1)	0.004~0.130(0.024)
浮游动物/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	66.66~2 066.67(564.57)	3~1(1)	0.010~0.467(0.184)
底栖生物/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	16.50~1 143.90(208.70)	4~1(1)	0.017~0.713(0.357)

表 8 生物体内总 TPHs 含量($\times 10^{-6}$)Table 8 Content of total TPHs in organism($\times 10^{-6}$)

项目	S3			S11			均值
	大黄鱼	白姑鱼	截尾白姑鱼	龙头鱼	白姑鱼	长蛇鲭	
总 TPHs	8.00	5.20	12.90	8.20	7.60	8.20	8.35
标准指数	0.40	0.26	0.65	0.41	0.38	0.41	0.42

量水平为 2 级,属高生物量水平;S1、S2 站底栖生物生物量水平为 3 级,属较高生物量水平;S3、S11 站底栖生物生物量水平为 4 级,属中等生物量水平。

2.5 生物体残毒(总 TPHs)

生物体内总 TPHs 的含量(表 8)变化范围为 $5.20 \times 10^{-6} \sim 12.90 \times 10^{-6}$,平均值为 8.35×10^{-6} ;标准指数范围为 0.26~0.65,均值为 0.42。按照《第二次全国海洋污染基线调查技术规程》(2001,石油烃部分)的第二类标准(20×10^{-6}),本次调查的 2 个站位 6 种鱼体内总 TPHs 均未超标。

2.6 生态环境质量综合评价

根据公式(3)计算结果,大亚湾石化排污区海域冬季生态环境综合质量指数为 1.129,属轻度污染。

3 讨论

3.1 大亚湾石化排污区海域生态环境质量与其他海域比较分析

李永霞对埕岛油田海域生态环境质量进行了评价,结果显示该海域海水质量整体上为清洁水平,表层沉积物为较清洁水平,后者污染程度较前者偏重^[21]。李淑媛对大连长兴岛及毗邻海域环境质量进行评价,结果表明该海域环境质量总体良好,介于清洁与较清洁之间,处于贫营养状态^[22]。罗冬莲的研究结果显示,福建南日群岛秋季海洋生态环境总体处于良好水平,海水水质总体属于较好等级,营养结构表现为磷限制,大部分海域处于富营养化状态^[12]。北部湾渔场水质符合一类海水水质标准,水体未受明显有机污染,处于贫营养状态,该海域环境综合质量总体上

处于良好水平^[14]。南海北部海域渔业生态环境总体处于良好水平^[17]。福建诏安湾贝类产区海水质量处于较好水平,底质处于一般水平,生态环境质量总体处于较好水平^[23]。胶州湾海域 20 世纪 90 年代以来生态环境质量基本维持在“良/中”级水平,且逐渐趋于好转^[24]。河北省海域贝类养殖区生态环境质量总体处于一般水平,海水和沉积物质量分别处于较好和差的状态^[25]。蒋奕雄研究了福建松下腿口工业区污水排放对近岸海域环境的影响,结果表明近岸海域由于水动力作用强,受污染程度较轻,海底表层沉积物各监测指标均达到一类海洋沉积物质量标准^[26]。河北省近岸海域整个海域属于轻度污染区,呈现富营养化趋势,主要污染物为石油类^[27]。广州海域大部分属于重度污染,且严重富营养化^[19]。

在大亚湾海域生态环境质量方面,林琳做了基于 GIS 的大亚湾海域生态环境质量综合评价,结果表明该海域环境质量处于“较好”水平,水体营养水平偏高、浮游植物生物量偏高、生物多样性偏低^[2]。本研究中,大亚湾石化排污区海域生态环境质量已经受到轻度污染,与林琳 2007 年的研究结果相比,石化排污区海域比整个大亚湾海域生态环境质量差,可能与该海区为石化排污区以及处在碧甲码头和平海电厂附近有关。与上述其他海域比较结果显示,大亚湾石化排污区海域生态环境质量目前处于中等水平,与河北省近岸海域相当,较广州海域要好,较其他海域差。

3.2 大亚湾石化排污区海域生态环境质量的时间变化趋势

将以往大亚湾石化排污区海域的历史调查数据(2006 年 12 月、2007 年 12 月、2011 年 1 月),与本次调查监测数据进行比较(表 9)可看出,2006 年 12 月调查监测的 10 项水质因子除海水石油类含量($0.058 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)超出第二类海水水质标准限值($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)外,其他各因子含量均符合第二类海水水质标准。海水石油类标准指数为 1.16,处于评价等级 5 级,属于污染水平。Cu、Pb、Cd、Zn 4 种重金属的单因子标准指

数均未超过0.4,处于评价等级1级,属于自然本底状态。2007年12月调查监测的各水质因子符合第二类海水水质标准,沉积物石油类和有机碳符合第一类沉积物质量标准。2011年1月调查监测的各项水质因子除石油类($0.062\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和pH(7.45)外都符合第二类海水水质标准,沉积物石油类和有机碳符合第一类沉积物质量标准。

本次调查(2012年1月)中,pH(7.53)超出第二类海水水质标准(7.8~8.5),这与2011年1月调查结果一致;石油类含量($0.065\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)超出第二类海水水质标准,处于评价等级5级,属于污染水平,这与2006年12月和2011年1月调查结果一致,石油类污染物的含量都超出标准,是主要污染物,且其含量呈逐年增高的趋势,说明石油化工污水排放对调查海域部分站点的水质产生了影响;Cu、Pb、Cd处于自然本底状态,这与2006年12月和2011年1月的调查结果一致,Zn的含量除了S10站位超出第二类海水水质标准外,其他各站的含量均满足二类海水水质标准的要求,可能是由于位于湾口的S10站所处的位置比较特殊,污染物从排污口排出后受潮流、海流及顺时针欧拉余流的作用向东南方向扩散较好,再加上S10站距离碧甲码头较近,受陆源排污影响所致;DO($10.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于前3次的调查结果,满足二类水质标准的要求; COD_{Mn} ($0.641\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 BOD_5 ($0.956\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的含量符合第二类海水水质标准,与前3次调查结果比较,存在一定波动,变化趋势不明显;沉积物石油类和有机碳符合一类沉积物质量标准,这与2007年12月和2011年1月调查结果一致,但含量却有逐渐增加的趋势。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($0.012\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和DIN ($0.168\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的含量符合第二类海水水质标准,与前3次调查结果比较, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量有逐渐减小的趋势,而DIN含量却有逐渐增大的趋势,这与近年来许多学者对大亚湾营养盐变化趋势的研究结果一致^[28-29]。

20世纪80年代初,大亚湾海域生态系统特征是贫营养,主要是贫氮。大亚湾的硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)与活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)之比为0.54,远小于Redfield比,因此认为大亚湾的限制因子是氮^[30]。20世纪80年代后期,随着无机三氮($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)不断升高,而活性磷酸盐则不断降低,导致1999年 $\text{TIN}/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比率平均值 >50 ,远高于Redfield比。王肇鼎等^[29]认为,在人类活动的干扰下,大亚湾生态系统已从20世纪80年代的N限制转变为目前的P限制。近年来的调查结果显示,2012年冬季N/P最高

(31:1),2007年冬季的N/P最低(9.96:1),但初级生产力以2006年冬季最高,2007年冬季最低,之后逐年升高,显示大亚湾海域的N:P比与初级生产力的相关性不显著($P>0.05$)。但对大亚湾生态系统来说,这表明该湾的营养基础已经发生了变化,目前海水营养水平属于中高营养等级状态。从大亚湾石化污水输入大亚湾黄毛山—三角洲海域的年通量变化来看,2007年废水排放量为 $583.6\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,2011年输入调查海域的废水量已达 $1\,007.4\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,而石化废水中含有大量的油类、COD、氨氮、重金属盐类,还有一些石化工业产生大量含酸废水^[1],加上全球酸化的影响,导致2011—2012年监测结果与5年前(2006—2007年)比较,海水pH呈现明显降低趋势,DIN、Cd以及水体和沉积物中石油烃含量均呈升高趋势。

初级生产力和饵料生物现存生物量的比较结果表明,2006年12月初级生产力($451.53\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)处于评价等级3级,属于较高初级生产力水平,2007年12月初级生产力($202.96\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)处于评价等级的5级,属低初级生产力水平,2011年1月的初级生产力($236.62\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)处于评价等级5级,属低初级生产力水平,2012年1月的初级生产力($391.58\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)处于评价等级4级,属中等初级生产力水平,表明调查海域初级生产力水平存在一定的波动。2012年1月调查显示浮游植物生物量很高,这与林琳等^[2]的研究结果一致,4次调查中浮游植物生物量逐渐升高与海水呈高营养水平密切相关。浮游动物是以浮游植物为食,浮游植物生物量的高低直接影响着浮游动物的生物量水平,4个航次调查中浮游动物生物量的变化趋势与浮游植物生物量一致,呈逐渐增加的趋势。值得注意的是2012年1月调查中底栖生物生物量明显高于前3次调查结果,由于石化排污区海域影响因素的复杂性,原因有待进一步查明。

从大亚湾石化排污区海域历年生态环境综合质量指数看(表9),2006年、2007年、2011年和2012年冬季调查海域生态环境综合质量指数分别为0.798、0.818、1.073和1.129,呈逐年升高趋势,表明海洋生态环境质量有逐年变差的趋势。2006年和2007年大亚湾石化排污区海域的生态环境质量尚处于良好水平,近两年的生态环境质量却显示出受到轻度污染,单项环境因子分析也得出自2006年以来海水石油类污染物超二类海水标准,呈逐年增高趋势,说明石化污水的排放对调查海域的生态环境质量有一定的影响,应该引起环保部门和科研工作者重视,长期对其

表 9 调查海域生态环境质量的历史变化情况

Table 9 Historical change situation of ecological environment quality of the survey waters

项目	2006 年	2007 年	2011 年	2012 年
pH	8.10	8.16	7.45	7.53
DO/mg·L ⁻¹	7.50	7.53	7.94	10.50
COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	0.339	1.110	0.610	0.641
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	—	1.211	0.880	0.956
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0.004	0.020	0.015	0.012
DIN/mg·L ⁻¹	0.052	0.090	0.181	0.168
石油类/mg·L ⁻¹	0.058	—	0.062	0.065
Zn/mg·L ⁻¹	0.010	—	0.009 4	0.021
Cu/mg·L ⁻¹	0.002	—	0.001	0.001
Pb/mg·L ⁻¹	0.001 4	—	0.000 4	0.000 8
Cd/mg·L ⁻¹	0.000 04	—	0.000 20	0.000 39
沉积物石油类/(×10 ⁻⁶)	—	90.68	104.6	106.93
沉积物有机碳/(×10 ⁻²)	—	1.18	1.27	1.39
初级生产力/(mg C·m ⁻² ·d ⁻¹)	451.53	202.96	236.62	391.58
浮游植物生物量/(×10 ⁴ ind·m ⁻³)	437.94	753.50	1 222.36	3 713.30
浮游动物生物量/mg·m ⁻³	165.93	321.34	208.29	564.57
底栖生物生物量/g·m ⁻²	16.10	21.70	14.83	208.70
综合质量指数	0.798	0.818	1.073	1.129

注:“—”表示未监测,表中数据均采取均值。

监测分析及评价研究。

3.3 石油类污染物对海湾生态环境的影响

由前面的结果与分析可知,本次调查中 66.7%的站位海水石油类超出第二类海水水质标准,处于评价等级 5 级,属于污染状态,其余站位处于评价等级 4 级,属于轻度污染,说明海水石油类污染物已经对大亚湾石化排污区海域的水质造成污染。沉积物石油类符合第一类沉积物质量标准,沉积环境尚未受到石油类污染物的影响。海洋生物体残毒方面,因本次调查中未捕到贝类,故对历次调查中鱼类体内总 TPHs 残留量的变化(图 2)进行分析:按照《第二次全国海洋污染基线调查技术规程》(2001,石油烃部分)中的二类标准(20×10^{-6}),4 次调查中鱼类体内总 TPHs 残留量均未超标。2007 年 12 月与 2006 年 12 月调查结果相比,鱼类体内总 TPHs 残留量稍有下降,然而近两年却呈现大幅增加的趋势。本次调查中鱼类体内总 TPHs 的残留量高达 8.35×10^{-6} ,分别是 2011 年 1 月调查结果(4.7×10^{-6})、2007 年 12 月调查结果(0.27×10^{-6})和 2006 年 12 月调查结果(0.59×10^{-6})的 1.78、30.93 和 14.15 倍。随着时间的推移,石油类污染物已经在生物体内累积,充分说明调查海域的生态环境已经受到石化排污的影响。本次调查大亚湾石化排污区海域冬季生态环境综合质量指数为 1.129,属轻度污染。与

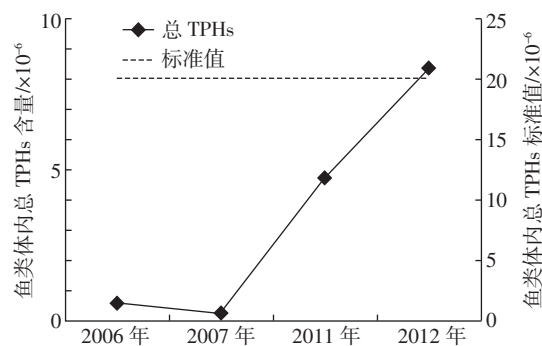


图 2 鱼类体内总 TPHs 残留量变化趋势

Figure 2 The trends of TPHs residues in fish

林琳等^[2]对大亚湾海域的环境质量综合评价结果为“较好”不同,本次调查显示石化排污区海域已经受到石化污水排放的影响,生态环境处于轻度污染状态。

4 结论

大亚湾石化排污区海域的水质属轻度污染状态,主要污染物为石油烃、pH,其他指标均符合第二类海水水质标准,水质综合污染指数范围为 0.902~1.378,均值为 1.215,海水水质总体处于轻度污染状态;海水有机污染状况属于优良等级,未受明显有机污染。营养结构 N/P 大都大于 20:1,表现出明显的磷限制,营养指数波动较大,水质总体上属于中高营养水平。沉

积物各指标均符合第一类沉积物质量标准,沉积物质量综合污染指数范围是 0.271~0.746,均值为 0.478,沉积环境质量良好。初级生产力属中等水平级,浮游植物生物量、浮游动物生物量水平很高,底栖生物生物量属于高生物量水平。鱼类体内总 TPHs 残留量虽未超标,但近两年却呈大幅增加的 trend。大亚湾石化排污区海域冬季生态环境综合质量指数为 1.129,属轻度污染,但与历史数据比较结果显示,大亚湾石化排污区海域生态环境质量逐年变差,应引起环保部门以及更多科研工作者的重视。

参考文献:

- [1] 杨波,戴兵. 石油化工行业产业政策与污染物排放特征探析[J]. 化工进展, 2009, 28(增刊): 505-507.
YANG Bo, DAI Bing. Exploration on the industrial policy and pollutant emission characteristics of petrochemical industry[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 28(Suppl): 505-507.
- [2] 林琳,李纯厚,杜飞雁,等. 基于 GIS 的大亚湾海域生态环境质量综合评价[J]. 南方水产, 2007, 3(5): 19-25.
LIN Lin, LI Chun-hou, DU Fei-yan, et al. GIS-based comprehensive assessment of marine ecological environment quality in Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 3(5): 19-25.
- [3] 李学杰. 广东大亚湾底质重金属分布特征与环境质量评价[J]. 中国地质, 2003, 30(4): 429-435.
LI Xue-jie. Distribution of heavy metals in substrate of the Daya Bay, Guangdong, and assessment of the quality of the seafloor environment[J]. *Chinese Geology*, 2003, 30(4): 429-435.
- [4] 杨美兰,林燕棠. 大亚湾海洋生物重金属分析与评价[J]. 海洋环境科学, 1990, 9(3): 41-47.
YANG Mei-lan, LIN Yan-tang. Analysis and assessment of heavy metal in the marine life in Daya Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 1990, 9(3): 41-47.
- [5] 何雪琴,张观希,郑庆华,等. 大亚湾底栖生物体中 4 种重金属残留量分析与评价[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 282-285.
HE Xue-qin, ZHANG Guan-xi, ZHENG Qing-hua, et al. Analysis and assessment of the content of four heavy metals in the benthons in Daya Bay[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(3): 282-285.
- [6] 丘耀文,周俊良,Maskaoui K,等. 大亚湾海域水体和沉积物中多环芳烃分布及其生态危害评价[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 72-80.
QIU Yao-wen, ZHOU Jun-liang, Maskauoi K, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments from Daya Bay and their ecological hazard Assessment[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(4): 72-80.
- [7] 王朝晖,齐雨藻,李锦蓉,等. 大亚湾养殖区营养盐状况分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 25-28.
WANG Chao-hui, QI Yu-zao, LI Jin-rong, et al. Analysis and evaluation trophic status in aquaculture areas of Daya Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(2): 25-28.
- [8] 王学锋,李纯厚,贾晓平,等. 海上施工对大亚湾海域水质的影响评价[J]. 湛江海洋大学学报, 2006, 26(1): 80-83.
WANG Xue-feng, LI Chun-hou, JIA Xiao-ping, et al. Assessment for the impact of offshore construction on the water quality in Daya Bay[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2006, 26(1): 80-83.
- [9] 贾晓平,林钦,蔡文贵. 大亚湾马鞭洲大型爆破对周围水域环境与海洋生物影响的评估[J]. 水产学报, 2002, 26(4): 313-320.
JIA Xiao-ping, LIN Qin, CAI Wen-gui. Evaluation for the impact of large explosion at Mabianzhou Island on the neighboring aquatic environment and marine organism in Daya Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(4): 313-320.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 17378—2007 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of China. GB 17378—2007 The specification for marine monitoring [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763—2007 海洋调查规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of China. GB/T 12763—2007 The specifications for oceanographic survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [12] 罗冬莲. 福建南日群岛秋季海洋生态环境诊断与评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 495-502.
LUO Dong-lian. Marine environment of Nanri Archipelago, Fujian Province in summer: Diagnosis and assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 495-502.
- [13] 国家环境保护局. GB 3097—1997 海水水质标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1998.
State Environmental Protection Administration. GB 3097—1997 Sea water quality standard[S]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [14] 贾晓平,杜飞雁,林钦,等. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨[J]. 中国水产科学, 2003, 10(2): 160-164.
JIA Xiao-ping, DU Fei-yan, LIN Qin, et al. A study on comprehensive assessment method of ecological environment quality of marine fishing ground[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(2): 160-164.
- [15] 卢芳,高振会,贾永刚,等. 锦州 9-3 油田海域环境现状及其评价[J]. 海洋学报, 2010, 32(1): 161-169.
LU Fang, GAO Zhen-hui, JIA Yong-gang, et al. Present environmental status and assessment of Jinzhou 9-3 Oil Field[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(1): 161-169.
- [16] 李建军,冯慕华,喻龙. 辽东湾浅水区水环境质量现状评价[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(3): 42-45.
LI Jian-jun, FENG Mu-hua, YU Long. Assessment on the situation of water quality in Liaodong Bay shallow waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(3): 42-45.
- [17] 贾晓平,李纯厚,甘居利,等. 南海北部海域渔业生态环境健康状况诊断与质量评价[J]. 中国水产科学, 2005, 12(6): 757-765.

- JIA Xiao-ping, LI Chun-hou, GAN Ju-li, et al. Diagnosis and assessment on the health status and quality of the fishery eco-environment of the northern South China Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(6): 757-765.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. GB 18668—2002 Marine sediment quality[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [19] 姜 胜, 顾继光, 冯佳和, 等. 广州海域环境质量评价[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 894-898.
- JIANG Sheng, GU Ji-guang, FENG Jia-he, et al. Environmental quality of Guangzhou sea area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 894-898.
- [20] 黄小平, 温伟英. 大亚湾污水排海工程研究 [J]. 海洋通报, 1995, 14(2): 57-64.
- HUANG Xiao-ping, WEN Wei-ying. On submarine discharge of sewage into Daya Bay: optimum seeking sites[J]. *Marine Science Bulletin*, 1995, 14(2): 57-64.
- [21] 李永霞, 郑西来, 孙 娟. 埕岛油田海域重金属含量分布与生态环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 190-194.
- LI Yong-xia, ZHENG Xi-lai, SUN Juan. Distributions and ecological assessment of heavy metals of Chengdao Oilfield sea areas[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(2): 190-194.
- [22] 李淑媛, 苗丰民, 张永华, 等. 大连长兴岛及毗邻海域环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 44-46.
- LI Shu-yuan, MIAO feng-min, ZHANG Yong-hua, et al. Assessment on environmental quality of Changxing Island in Dalian[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(3): 44-46.
- [23] 钟硕良, 阮金山, 席英玉, 等. 福建诏安湾贝类产区生态环境质量评价与划型研究[J]. 福建水产, 2012, 34(4): 268-277.
- GU Shuo-liang, RUAN Jin-shan, XI Ying-yu, et al. Study on assessment and categorization for the eco-environmental quality of shellfish-culture regions in Zhao'an Bay, Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2012, 34(4): 268-277.
- [24] 王保栋, 韩 彬. 近岸生态环境质量综合评价方法及其应用 [J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 400-404.
- WANG Bao -dong, HAN Bin. Method for integrated assessment of near -shore ecological environment quality and its application to Jiaozhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(3): 400-404.
- [25] 崔力拓. 河北省海域贝类养殖区生态环境质量评价研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 6004-6006.
- CUI Li-tuo. Study on assessment of the environmental quality of marine shellfish culture areas in Hebei Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(10): 6004-6006.
- [26] 蒋奕雄. 福建松下腿口工业区污水排放对近岸海域环境的影响[J]. 齐鲁渔业, 2009(10): 6-9.
- JIANG Yi-xiong. Influence of sewage discharge on the coastal environment in Songxiatuikou industrial area of Fujian Province[J]. *Shandong Fisheries*, 2009(10): 6-9.
- [27] 李志伟, 崔力拓, 林振景, 等. 河北省近岸海域环境质量评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 143-147.
- LI Zhi-wei, CUI Li-tuo, LIN Zhen-jing, et al. Assessment of water quality in the sea offshore of Hebei Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(6): 143-147.
- [28] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 85-95.
- WANG You-shao, WANG Zhao-ding, HUANG Liang-min. Environment changes and trends in Daya Bay in recent 20 years[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(5): 85-95.
- [29] 王肇鼎, 练建生, 胡建兴, 等. 大亚湾生态环境的退化现状与特征[J]. 生态科学, 2003, 22(4): 313-320.
- WANG Zhao-ding, LIAN Jian-sheng, HU Jian-xing, et al. Characteristics of degraded ecosystem in Daya Bay China[J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(4): 313-320.
- [30] 徐恭昭. 大亚湾环境与资源[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989: 373.
- XU Gong-zhao. Environments and resources of Daya Bay[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1989: 373.