

DOI: 10.5846/stxb201407041379

徐姗楠,陈作志,林琳,徐娇娇,李纯厚.大亚湾石化排污海域生态系统健康评价.生态学报,2016,36(5): - .

Xu S N, Chen Z Z, Lin L, Xu J J, Li C H. Ecosystem health assessment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (5): - .

大亚湾石化排污海域生态系统健康评价

徐姗楠, 陈作志, 林琳, 徐娇娇, 李纯厚*

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

摘要:基于近海生态系统健康评价模型,以 2011—2012 年间海洋生态环境调查数据为基础,对大亚湾石化排污海域的生态系统健康状态进行了综合评价。结果表明:丰水期(2011 年 8 月),大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数为 0.808,健康状态为“好”,空间分布为近岸海域健康状况好于远岸海域,其中底栖生物多样性综合指数是影响该海域生态系统健康的主要负面因子。枯水期(2012 年 1 月),石化排污海域生态系统健康综合指数为 0.767,健康状态为“一般”,远岸海域健康状况好于近岸海域,浮游植物多样性综合指数和底栖生物多样性综合指数是影响该海域生态系统健康的主要负面因子。与 2006—2007 年相比,大亚湾石化排污海域生态系统的健康状况正向“一般”状态退化。

关键词:海湾生态系统;健康评价;指标体系;石化排污海域;大亚湾

Ecosystem health assessment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

XU Shannan, CHEN Zuozhi, LIN Lin, XU Jiaojiao, LI Chunhou*

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

Abstract: Using the model of health assessment of a marine coastal ecosystem, we assessed the petrochemical sewage waters in Daya Bay using the ecological survey data of 2011 and 2012. The results showed that the ecosystem health comprehensive index (EHCI) of the petrochemical sewage waters of Daya Bay during the flood season (August 2011) was 0.808, suggesting that the ecosystem health was at a “good” level. Spatial distribution of EHCIs of inshore waters was higher than that of offshore waters, and the comprehensive biodiversity index of benthos was found to be the primary factor that negatively affected ecosystem health. The EHCI of the petrochemical sewage waters in the dry season (January 2012) was 0.767, suggesting that ecosystem health was at a “moderate” level. Spatial distribution of EHCIs of offshore waters was higher than that of inshore waters, and the comprehensive biodiversity indices of phytoplankton and benthos were found to be the primary factors that negatively affected ecosystem health. Compared to 2006 and 2007, health status of the petrochemical sewage waters in Daya Bay was deteriorating and changed from “good” to “moderate”.

Key Words: bay ecosystem; health assessment; indicator system; petrochemical sewage waters; Daya Bay

海湾是陆、海相互作用以及人类干扰活动的强烈承受区域,是环境变化的敏感带和生态系统的脆弱带^[1]。全球约 41% 的海域尤其是河口、海湾已经受到人类活动的严重干扰^[2]。海湾生态环境的严重恶化目前已成为世界海岸带面临的重要灾害,对海岸地区的环境与生态亦带来严峻挑战。海湾生态系统健康评价与

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2015CB452904);公益性行业(农业)科研专项(201403008);国家自然科学基金项目(31100362);广州市科技计划项目(2014J2200020)

收稿日期:2014-07-04; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scslch@vip.163.com

恢复正受到国内外的广泛关注,并成为海洋生态学及海洋管理研究的热点问题之一^[3]。

大亚湾是受高强度人类活动影响的典型海湾,也是我国亚热带海洋生物种质资源库和华南沿海重要的渔业水域^[4-6]。上世纪 80 年代后期,大亚湾进入了经济发展的开发期,人类活动变得异常频繁,特别是 90 年代以来的核电工业建设以及近年来以中海壳牌石化项目为龙头的大亚湾石化工业区建设等。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,排污口距离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,排海石化污水的污染物主要有:COD、石油类、重金属、硫化物、氨氮等^[7]。整个石化区废水实际排海量约为 $920 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 。随着中海油二期等项目的建成投产,可以预见其巨大的排污量必将对区域生态系统造成巨大压力,严重影响生态系统服务功能。因此,对石化排污海域生态系统进行健康评价,具有十分重要的意义。以 2011—2012 年海洋生态调查数据为基础,构建了符合石化排污自身特征的指标体系,并利用生态系统健康模型对大亚湾石化排污海域进行初步定量评价,以期真实、客观的反映该海域生态系统的现状及变化趋势,从而为我国石化排污海域的科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 站位与样品采集

2011 年 8 月(丰水期)和 2012 年 1 月(枯水期)分别对大亚湾石化排污区海域进行了 2 个航次的生态调查,站位的布设见图 1。调查海域布设 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 2 000 m、1 000 m 为半径,与东南西北 4 个方位的交点,其中半径 1 000 m 是根据排污点和非自然保护区的相关位置确定。两个航次调查均采集 12 个站位的表、底层水样、浮游植物和浮游动物样品,2011 年 8 月采集 S1、S3、S4、S8—S12 站位海底表层沉积物样品、底栖生物和游泳生物样品,2012 年 1 月采集 S1—S4、S9—S12 站位海底表层沉积物样品、底栖生物和游泳生物样品。其中,底栖生物生物量和多样性是由大型底栖生物构成。历史数据来源中国水产科学研究院南海水产研究所于 2006 年 12 月、2007 年 12 月、2010 年 7 月、2011 年 1 月在大亚湾石化排污海域的调查监测数据^[8]。样品的采集、运输、保存和分析均参照《海洋监测规范》(GB 17378-2007)和《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)所规定的方法进行。

1.2 评价指标体系的构建

根据石化排污海域生态系统的特点,参考 Xu 等^[9-10]建立的近海生态系统健康评价模型,构建石化排污海域生态系统健康评价指标体系。该体系主要从理化环境、生物群落结构、生态系统功能 3 大类 26 个指标构成,分为 5 个层次,其中 A 层为目标层,B 层为准则层,C—E 为指标层(表 1)。其中部分指标的计算方法如下:

D2 有机污染指数:反映水体受有机污染物污染的程度^[11-12]。

$$A = \frac{C_{\text{COD}}}{C'_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{IN}}}{C'_{\text{IN}}} + \frac{C_{\text{IP}}}{C'_{\text{IP}}} - \frac{C_{\text{DO}}}{C'_{\text{DO}}}$$

式中:A 为有机污染指数; C_{COD} 、 C_{IN} 、 C_{IP} 、 C_{DO} 分别为化学耗氧量(mg/L)、无机氮(mg/L)、活性磷酸盐(mg/L)、溶解氧(mg/L)的实际测量值; C'_{COD} 、 C'_{IN} 、 C'_{IP} 、 C'_{DO} 分别各因子相应的一类海水水质标准值(GB3097-1997)。

D3 营养水平指数:反映水体的营养水平^[12]。

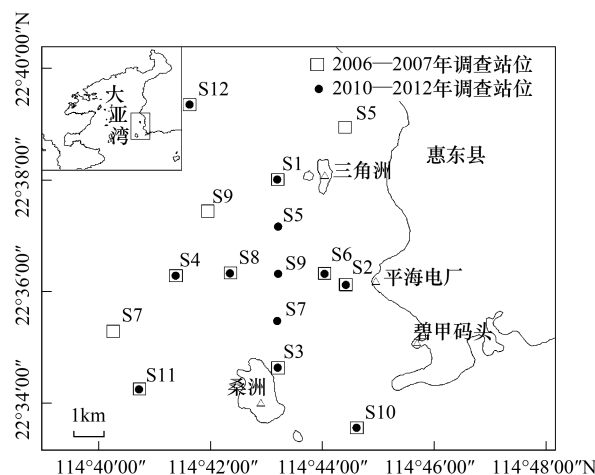


图 1 大亚湾石化排污区海域生态环境调查站位示意

Fig. 1 Ecological environment survey stations of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

表 1 大亚湾石化排污海域生态系统健康评价指标体系及权重系数

Table 1 The ecological health assessment index system of the petrochemical sewage waters and its weighting factors in Daya Bay

目标层 A Object layer A	准则层 B Criterion layer B	一级指标层 C First-class index layer C	二级指标层 D Second-class index layer D	三级指标层 E Third-class index layer E
大亚湾石化排污区海 域生态系统健康综合 指数 A Ecosystem health comprehensive index of the petrochemical sewage waters of Daya Bay A	理化环境状况 B1 (0.6144)	水质表层指标 C1 (0.3333)	pH D1(0.0342)	E1—E7 (0.1429)
			有机污染指数 D2(0.0846)	
			营养水平指数 D3(0.0846)	
			BOD5 D4(0.0846)	
			硫化物 D5(0.0846)	
			石油烃 D6(0.4127)	
			重金属 D7(0.2146)	
			pH D8(0.0342)	
			有机污染指数 D9(0.0846)	
			营养水平指数 D10(0.0846)	
	生态系统功能状况 B2(0.1172) 生物群落结构状况 B3(0.2684)	水质底层指标 C2 (0.3333)	BOD5 D11(0.0846)	E8—E14 (0.1429)
			硫化物 D12(0.0846)	
			石油烃 D13(0.4127)	
			重金属 D14(0.2146)	
			有机碳 D15(0.0963)	
			石油烃 D16(0.5579)	
			硫化物 D17(0.0963)	
			重金属 D18(0.2495)	
			浮游植物生物量 D19(0.1667)	
			浮游植物生物多样性综合指数 D20(0.8333)	
	初级生产力 C4(1.0)	浮游植物 C5(0.4)	浮游动物生物量 D21(0.1667)	E15—E21 (0.1429)
			浮游动物生物多样性综合指数 D22(0.8333)	
		浮游动物 C6(0.2)	底栖生物生物量 D23(0.1667)	
			底栖生物生物多样性综合指数 D24(0.8333)	
		底栖生物 C7(0.2)	渔获物营养级 D25(0.1667)	
			游泳生物生物多样性综合指数 D26(0.8333)	
	游泳生物 C8(0.2)			

E1—E7、E8—E14、E15—E21 分别代表重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As。

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{IN}} \times C_{\text{IP}}}{1500}$$

式中: E 为营养水平指数; C_{COD} (mg/L)、 C_{IN} (μg/L)、 C_{IP} (μg/L) 分别为化学耗氧量、溶解态无机氮、活性磷酸盐的实际测量值。

生物多样性综合指数 D_v : 反映生态系统的复杂性和稳定性^[13]。

$$D_v = H' \times J$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中: H' 为 Shannon-Weaver 多样性指数, J 为均匀度, S 为种类总数, P_i 为第 i 种的个体数量 (n_i) 与总个体数

(N)的比值。对于底栖生物和游泳生物来说,因每个种的个体相差可能很大,故用生物量(w)来代替个体数^[14]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (W_i/W) \log_2(W_i/W)$$

渔获物营养级 TLC :表征海洋食物网结构变化特征^[15]。

$$TLC = [1/C_t] \times \sum (C_i \times TL_i)$$

其中, $\sum C_i = C_t$, C_t 为总渔获量,而 C_i 是 i 种类的渔获量, TL_i 为 i 种鱼类的营养级。

1.3 管理目标的确定

通过管理目标,将海湾生态系统健康评价与生态系统管理的实际紧密结合起来,使健康评价的结果更贴近生态系统管理的实际需要^[16]。根据整体性、科学性、简明性和可操作性原则,确定大亚湾石化排污海域生态系统健康评价指标体系中每一个单项指标因子的管理目标(表2)。管理目标的参照标准值用 S_{ij} 来表示,即为第 i 个指标在 j 点位的参照标准。其中,有机污染指数和营养水平指数标准的确定参考贾晓平等^[11-12] 的分级标准,水质指标标准的确定依据《海水水质标准》(GB 3097—1997)第一类标准,沉积物指标标准的确定依据《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)第一类标准,饵料生物和初级生产力指标标准的确定参考贾晓平等^[12, 17]、陈清潮等^[13] 的分级标准。

1.4 生态系统健康分指数计算

通过将生态调查数据与参比值(或背景值)相比较,健康评价指标体系的指标层(D层)中各单指标分值通过下述公式计算:

(1)正向指标,即指标的生态效应随着数值升高而升高,包括浮游植物多样性综合指数、浮游动物生物量及其多样性综合指数、底栖生物生物量及其多样性综合指数、初级生产力。

$$EHI_{ij} = \begin{cases} 1, X_{ij} \geq S_{ij} \\ X_{ij}/S_{ij}, X_{ij} < S_{ij} \end{cases}$$

(2)逆向指标,即指标的生态效应随着数值的升高而降低,包括有机污染指数、营养水平指数、 BOD_5 、硫化物、石油烃、水体重金属、沉积物有机碳、沉积物硫化物、沉积物石油烃、沉积物重金属。

$$EHI_{ij} = \begin{cases} 1, X_{ij} \leq S_{ij} \\ S_{ij}/X_{ij}, X_{ij} > S_{ij} \end{cases}$$

(3)其他指标,即超过一定范围,指标的生态效应均降低,包括 pH 和浮游植物生物量。

$$\text{对于 pH, } EHI_{ij} = \begin{cases} 1, X_{ij} \in [7.8, 8.5] \\ (8.5 - 8.15) / |X_{ij} - 8.15|, X_{ij} < 7.8 \text{ 或 } X_{ij} > 8.5 \end{cases}$$

$$\text{对于浮游植物生物量, } EHI_{ij} = \begin{cases} 1, X_{ij} \in [200, 5000] \\ X_{ij}/200, X_{ij} < 200 \\ 5000/X_{ij}, X_{ij} > 5000 \end{cases}$$

式中, EHI_{ij} 为第 i 个指标在 j 点位的生态系统健康分指数, X_{ij} 为第 i 个指标在 j 点位的实测值, S_{ij} 为第 i 个指标在 j 点位的参照标准。

1.5 评价指标权重的确定

通过专家对选取的指标进行判断,明确各层评价因子的相对重要性及其标度,然后利用层次分析法构造两两比较矩阵,再通过 Matlab7.0 计算确定各个层次评价指标的权重值,并通过一致性检验($C.R. < 0.1$)。各因子相对于上层的权重如表1所示。将各指标因子相对于上一层的权重进行乘积计算即可得到各指标因子相对于 A 层的权重 w_i (表2)。

1.6 生态系统健康评价综合指数的计算

$$EHCI_j = \sum_{i=1}^n w_i \times EHI_{ij}$$

$$EHCI = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^n EHCI_j$$

式中, EHCI 为大亚湾石化排污区海域生态系统健康综合指数; $EHCI_j$ 为 j 点位的生态系统健康综合指数; EHI_{ij} 为第 i 个指标在 j 点位的生态系统健康分指数; w_i 为第 i 个指标通过层次分析法获得的相对 A 层的权重。

表 2 大亚湾石化排污海域生态系统健康评价管理目标及其权重

指标因子 Indicators	参照标准 S_{ij} Reference standard S_{ij}	w_i	指标因子 Indicators	参照标准 S_{ij} Reference standard S_{ij}	w_i
有机污染指数 Organic pollutant index	≤ 1	0.0173	沉积物 As (ug/Kg) As of sediment	≤ 20000	0.0073
营养水平指数 Eutrophic level index	≤ 0.5	0.0173	沉积物 Hg (ug/Kg) Hg of sediment	≤ 200	0.0073
pH	7.8—8.5	0.0070	沉积物 Cd (mg/Kg) Cd of sediment	≤ 0.5	0.0073
BOD ₅ (mg/L)	≤ 1	0.0173	沉积物 Cu (mg/Kg) Cu of sediment	≤ 35	0.0073
硫化物 (mg/L) Sulfides	≤ 0.02	0.0173	沉积物 Pb (mg/Kg) Pb of sediment	≤ 60	0.0073
石油烃 (mg/L) Petroleum hydrocarbons	≤ 0.05	0.0845	沉积物 Cr (mg/Kg) Cr of sediment	≤ 80	0.0073
Zn (ug/L)	≤ 20	0.0063	沉积物 Zn (mg/Kg) Zn of sediment	≤ 150	0.0073
Pb (ug/L)	≤ 1	0.0063	初级生产力 (mg · C/m ² · d) Primary productivity	≥ 600	0.1172
Cu (ug/L)	≤ 5	0.0063	浮游植物生物量 (×10 ⁴ ind/m ³) Phytoplankton biomass	200—5000	0.0179
Cd (ug/L)	≤ 1	0.0063	浮游植物多样性综合指数 Dv Biodiversity comprehensive index of phytoplankton	> 3.5	0.0895
总 Cr (ug/L) Total Cr	≤ 5	0.0063	浮游动物生物量 (mg/m ³) Zooplankton biomass	> 100	0.0089
Hg (ug/L)	≤ 0.05	0.0063	浮游动物多样性综合指数 Dv Biodiversity comprehensive index of zooplankton	> 3.5	0.0447
As (ug/L)	≤ 20	0.0063	底栖生物生物量 (g/m ²) Zoobenthos biomass	> 100	0.0089
沉积物有机碳 (%) Organic carbon of sediment	≤ 2	0.0197	底栖生物多样性综合指数 Dv Biodiversity comprehensive index of zoobenthos	> 3.5	0.0447
沉积物石油烃 (×10 ⁻⁶) Petroleum hydrocarbons of sediment	≤ 500	0.1143	渔获物营养级 Mean trophic level of capture species	> 2.9	0.0089
沉积物硫化物 (×10 ⁻⁶) Sulfides of sediment	≤ 300	0.0197	游泳生物多样性综合指数 Dv Biodiversity comprehensive index of nekton organisms	> 3.5	0.0447

由于采样点水深较浅,表、底层海水指标的权重取相同值。

计算得到的生态系统健康综合指数和分指数,都位于[0,1]区间内。指数值为 1 说明已达到或优于管理目标,越接近 1,表示越接近管理目标,越接近 0,表示距离管理目标越远。根据生态系统健康综合指数的数值大小,参考李纯厚等^[3]构建的海湾生态系统健康水平分级评价标准,将石化排污海域生态系统的健康状态划

分为 6 个等级(表 3)。

表 3 大亚湾石化排污海域生态系统健康水平分级评价标准

Table 3 The evaluation standard for the level of ecosystem health state of the petrochemical sewage waters in Daya Bay						
指数范围 Range of indices	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0)	1
健康状态 Health status	很差	较差	临界	一般	好	最好

2 结果与讨论

2.1 大亚湾石化排污海域生态系统健康状况

根据 2011 年 8 月(丰水期)和 2012 年 1 月(枯水期)在大亚湾石化排污海域进行生态调查数据(表 4),应用上述方法计算生态系统健康分指数和生态系统健康综合指数。

表 4 2011—2012 年大亚湾石化排污海域生态环境状况

Table 4 Ecological environment conditions on petrochemical sewage discharge waters of Daya Bay during 2011—2012							
序号 No.	指标因子 Indicators	丰水期 Flood season	枯水期 Dry season	序号 No.	指标因子 Indicators	丰水期 Flood season	枯水期 Dry season
1	有机污染指数	-14.994	0.050	24	总 Cr (ug/L)	0.585	0.010
2	营养水平指数	0.109	0.900	25	Hg (ug/L)	0.005	0.001
3	pH	8.553	7.428	26	As (ug/L)	2.276	2.447
4	BOD ₅ (mg/L)	1.075	0.839	27	沉积物有机碳(%)	1.010	1.205
5	硫化物(mg/L)	0.013	0.014	28	沉积物石油烃(×10 ⁻⁶)	29.621	91.182
6	石油烃(mg/L)	0.091	0.068	29	沉积物硫化物(×10 ⁻⁶)	22.076	33.347
7	Zn (ug/L)	44.211	20.538	30	沉积物 As (ug/Kg)	463.677	4993.381
8	Pb (ug/L)	1.348	0.814	31	沉积物 Hg (ug/Kg)	21.127	24.728
9	Cu (ug/L)	1.711	1.194	32	沉积物 Cd (mg/Kg)	0.025	0.025
10	Cd (ug/L)	0.073	0.277	33	沉积物 Cu (mg/Kg)	4.658	4.396
11	总 Cr (ug/L)	0.774	0.010	34	沉积物 Pb (mg/Kg)	10.919	11.417
12	Hg (ug/L)	0.003	0.002	35	沉积物 Cr (mg/Kg)	13.462	11.219
13	As (ug/L)	1.886	2.383	36	沉积物 Zn (mg/Kg)	28.665	36.375
14	有机污染指数	-10.969	0.323	37	初级生产力(mg·C/m ² ·d)	514.664	391.579
15	营养水平指数	0.146	0.789	38	浮游植物生物量(×10 ⁴ ind/m ³)	187.711	3713.304
16	pH	8.511	7.637	39	浮游植物多样性综合指数 Dv	2.626	1.247
17	BOD ₅ (mg/L)	0.885	1.074	40	浮游动物生物量(mg/m ³)	77.418	564.572
18	硫化物(mg/L)	0.012	0.014	41	浮游动物多样性综合指数 Dv	2.477	1.633
19	石油烃(mg/L)	0.086	0.062	42	底栖生物生物量(g/m ²)	170.511	171.513
20	Zn (ug/L)	57.645	21.235	43	底栖生物多样性综合指数 Dv	1.097	1.373
21	Pb (ug/L)	2.058	0.865	44	渔获物营养级	2.732	2.745
22	Cu (ug/L)	2.034	1.291	45	游泳生物多样性综合指数 Dv	2.502	2.164
23	Cd (ug/L)	0.069	0.493				

表中序号 1—13 为表层海水指标,14—26 为底层海水指标。

丰水期,大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数为 0.808,健康状态为“好”。调查的 12 个站位中,有 5 个站位的生态系统健康状况为“一般”,其他 7 个站位的生态系统健康状况为“好”。根据该海域生态系统健康状况的空间分布(图 2)可知,近岸海域健康状况要好于远岸海域。若健康分指数平均值低于 0.4,则它对应的健康等级将低于“临界”水平,会对生态系统的健康造成直接的负面影响,因此将健康分指数平均值低于 0.4 的指标,确定为影响生态系统健康的主要负面因子。因此,丰水期,影响大亚湾石化排污海域生态系统

健康的主要负面因子是底栖生物多样性综合指数(D24),其生态系统健康分指数为 0.313。此外,底层海水重金属 Zn(E10)、浮游动物生物量 D21 和表层海水重金属 Zn(E3)也对该海域生态系统健康存在负面影响,其对应的生态系统健康分指数分别为 0.447、0.517 和 0.558,健康状态处于“临界状态”。

表 5 大亚湾石化排污海域生态系统各指标的健康分指数

Table 5 Health fractional indicators of the petrochemical sewage waters in Daya Bay ecosystem

序号 No.	指标因子 Indicators	丰水期 Flood season	枯水期 Dry season	序号 No.	指标因子 Indicators	丰水期 Flood season	枯水期 Dry season
1	有机污染指数	1	1	24	总 Cr (ug/L)	1	1
2	营养水平指数	0.983	0.655	25	Hg (ug/L)	1	1
3	pH	0.868	0.505	26	As (ug/L)	1	1
4	BOD ₅ (mg/L)	0.930	0.992	27	沉积物有机碳(%)	0.998	0.996
5	硫化物(mg/L)	0.995	0.998	28	沉积物石油烃($\times 10^{-6}$)	1	1
6	石油烃(mg/L)	0.649	0.735	29	沉积物硫化物($\times 10^{-6}$)	1	1
7	Zn (ug/L)	0.558	0.878	30	沉积物 As (ug/Kg)	1	1
8	Pb (ug/L)	0.742	0.987	31	沉积物 Hg (ug/Kg)	1	1
9	Cu (ug/L)	1	1	32	沉积物 Cd (mg/Kg)	1	1
10	Cd (ug/L)	1	1	33	沉积物 Cu (mg/Kg)	1	1
11	总 Cr (ug/L)	1	1	34	沉积物 Pb (mg/Kg)	1	1
12	Hg (ug/L)	1	1	35	沉积物 Cr (mg/Kg)	1	1
13	As (ug/L)	1	1	36	沉积物 Zn (mg/Kg)	1	1
14	有机污染指数	1	1	37	初级生产力($\text{mg} \cdot \text{C}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	0.858	0.598
15	营养水平指数	0.952	0.634	38	浮游植物生物量($\times 10^4 \text{ ind}/\text{m}^3$)	0.938	0.996
16	pH	0.969	0.682	39	浮游植物多样性综合指数 Dv	0.750	0.356
17	BOD ₅ (mg/L)	0.946	0.931	40	浮游动物生物量(mg/m^3)	0.517	0.968
18	硫化物(mg/L)	0.994	0.998	41	浮游动物多样性综合指数 Dv	0.708	0.467
19	石油烃(mg/L)	0.681	0.806	42	底栖生物量(g/m^2)	0.886	0.947
20	Zn (ug/L)	0.447	0.942	43	底栖生物多样性综合指数 Dv	0.313	0.392
21	Pb (ug/L)	0.686	0.730	44	渔获物营养级	0.942	0.946
22	Cu (ug/L)	1	1	45	游泳生物多样性综合指数 Dv	0.715	0.618
23	Cd (ug/L)	1	1				

表中序号 1—13 为表层海水指标,14—26 为底层海水指标。

枯水期,大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数为 0.767,健康状态为“一般”。12 个调查站位中有 8 个测站的生态系统健康状态为“一般”,其他 4 个站的生态系统健康状态为“好”。该海域生态系统健康状况的空间分布如图 3 所示,远岸海域生态系统的健康状况优于近岸海域,其中西部和西北部海域健康状况较好,东南部海域健康状况较差。枯水期,影响大亚湾石化排污海域生态系统健康的主要负面因子是浮游植物多样性综合指数(D20)与和底栖生物多样性综合指数(D24),其生态系统健康分指数分别为 0.356 和 0.392,均属“较差”等级。而浮游动物多样性综合指数(D22)、表层海水 pH(D1)及初级生产力(C4)属于“临界”状态,对应的生态系统健康分指数分别为 0.467、0.505 和 0.598。

石化排污管道的排污是影响调查海域海水水质的主要污染源^[8]。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^[18]。丰水期降雨量大,有利于污染物的输移与扩散,因此,近岸海域健康状况好于远岸海域(图 2)。水环境的变化必然会导致生物群落的变化,丰水期强烈的降雨对底栖动物的群落多样性影响较大。小鳞帘蛤(*Veremolpa micra*)和粗帝汶蛤(*Timoclea scabra*)是评价海域的优势种,丰水期间水温的升高促进了这两个物种的生长,使其数量大幅上升,优势地位迅速提升,从而导致评价海域的多样性水平大大降低^[19-20]。枯水期降雨量少,加上大亚湾是半封闭的海湾,海水交换能力差,不利于污染物的输移与扩散,阻断了枯水期的上下水层的交换运输通道,使得

菱软几内亚藻 (*Guinardia flaccida*) 和柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*) 等优势度进一步增加,降低了浮游植物的生物多样性,从而影响了生态系统的健康^[21-22]。同时,在冬季顺时针欧拉余流的作用下^[18],排污口污水向东南输移,故东南部海域健康状况较差,而西部海域生态系统健康状况较好(图3)。

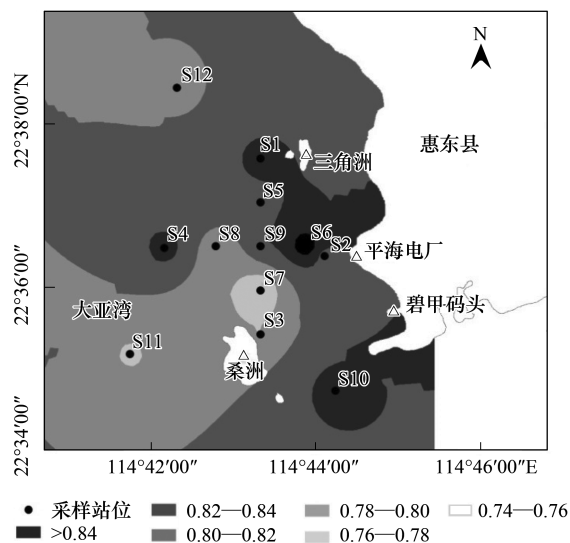


图2 丰水期大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数空间分布

Fig. 2 The spatial distribution for ecosystem health comprehensive index (EHCI) of the petrochemical sewage waters of Daya Bay in flood season

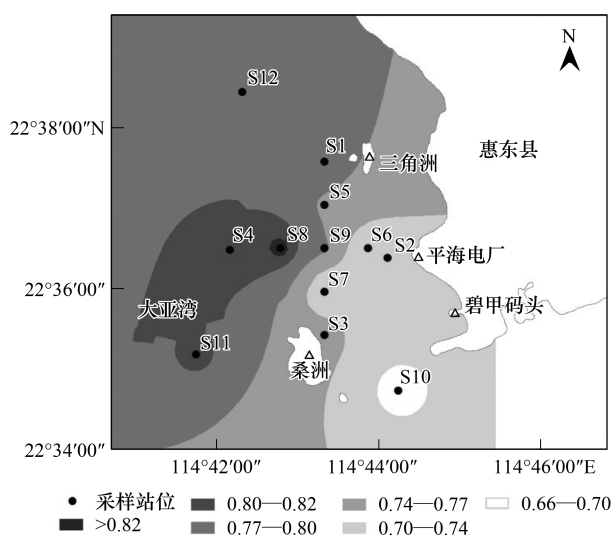


图3 枯水期大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数空间分布

Fig. 3 The spatial distribution for ecosystem health comprehensive index (EHCI) of the petrochemical sewage waters of Daya Bay in dry season

2.2 大亚湾石化排污海域生态系统健康状况的变化趋势

根据评价结果(图4),大亚湾石化排污管道运营初期(2006年12月),该海域生态系统健康综合指数(EHCI)为0.948,健康状态为“好”,至2012年1月健康状态为“一般”,大亚湾石化排污海域的生态系统综合健康指数总体上为递降趋势,表明其生态系统健康状况整体呈下降趋势,影响其生态系统健康的主要负面因子是底栖生物多样性综合指数和浮游植物多样性综合指数。

生物多样性特征对于维持生态系统健康至关重要,它是生态系统抗干扰能力、恢复能力及适应环境变化能力的物质基础^[23-24]。由于大亚湾是一个半封闭的大型

海湾,与外海的水交换较弱,石化排放的污染物更容易对生态系统造成了强烈的冲击。从石化排放的主要特征污染物来看,石油类、硫化物等均可通过影响光合作用效率、参与DMS的产生和循环的过程等对浮游植物生长、分布和群落结构产生直接效应^[25],尤其是在石化排污集中区域会出现浮游植物多样性降低,群落趋向小型化^[26]。此外,COD、石油类、重金属、硫化物等污染物对底栖动物的生物多样性也有明显的影响^[27-29]。Schlacher等^[30]研究表明,原油泄漏对澳大利亚昆士兰东南部海域底栖动物群落结构产生了严重的负面影响。申宝忠等^[31]发现黄河三角洲地区的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、石油类和挥发酚等污染物造成底栖动物多样性降低和个体密度减少。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583.6万 t/a ,2011年输入调查海域的废水量已达1007.4万 t/a ,占大亚湾区废水总量的58.44%,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,加上全球酸化的影响,导

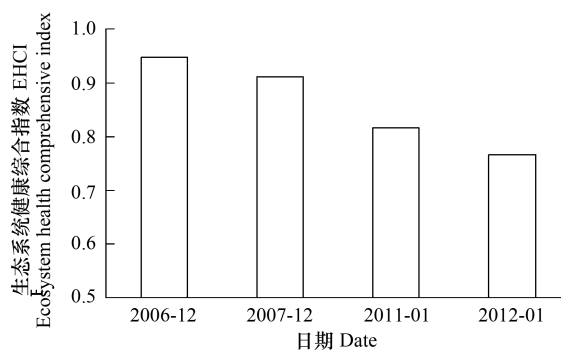


图4 大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数变化趋势
Fig. 4 Status of ecosystem health of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

致 2011—2012 年的监测结果,与 2006—2007 年排污管道运营初期相比,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^[7],因而对浮游植物和底栖生物多样性的胁迫也逐年增加,从而影响了该区域生态系统的健康状态。本文健康评价也证实了与 2006—2007 年相比,大亚湾石化排污海域生态系统的健康状况正向“一般”状态退化。

3 结论

1) 构建了大亚湾石化排污海域生态系统健康评价模型。该模型由理化环境、生物群落结构、生态系统功能等 3 大类 26 个指标构成,并首次将游泳生物指标包括在内,完全涵盖了该区域生态系统的功能组份,其评价结果较以往评价更加全面与准确。

2) 通过综合健康指数法评估并客观反映了大亚湾石化排污海域生态系统健康状况及变化趋势。结果表明,2011—2012 年,大亚湾石化排污海域生态系统健康综合指数,整体表现为丰水期(0.808)高于枯水期(0.767),底栖生物和浮游植物多样性综合指数是影响该海域生态系统健康的主要负面因子。

3) 通过对比发现,从 2006 年石化排污管道运营至今,大亚湾石化排污海域的生态系统综合健康指数总体上为递降趋势,表明其生态系统健康状况整体呈下降趋势。

4) 海洋生态系统健康是一个理论性与实践性相结合的复杂概念,目前国内外关于石化排污海域生态系统健康评价的研究尚不多见。因此,在今后的健康评价研究中,应该进一步完善生态系统健康评价指标体系,确保指标体系的全面性和评价标准的客观性,并开展长期定位监测。

参考文献(References):

- [1] 焦念志. 海湾生态过程与持续发展. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R, Watson R. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 2008, 319(5865): 948-952.
- [3] 李纯厚, 林琳, 徐姗楠, 戴明, 黄洪辉, 杜飞雁, 刘永, 齐占会. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用. *生态学报*, 2013, 33(6): 1798-1810.
- [4] 陈丕茂, 袁华荣, 贾晓平, 秦传新, 蔡文贵, 余景, 舒黎明, 黎小国, 周艳波. 大亚湾杨梅坑人工鱼礁区渔业资源变动初步研究. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 100-108.
- [5] 廖秀丽, 陈丕茂, 马胜伟, 陈海刚. 大亚湾杨梅坑海域投礁前后浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 109-119.
- [6] Wu M L, Wang Y S, Sun C C, Wang H L, Dong J D, Yin J P, Han S H. Identification of coastal water quality by statistical analysis methods in Daya Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(6): 852-860.
- [7] 徐姗楠, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平. 大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价. *环境科学*, 2014, 35(6): 2075-2084.
- [8] 徐娇娇, 徐姗楠, 李纯厚, 刘永, 林琳. 大亚湾石化排污区海域冬季生态环境质量评价. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1456-1466.
- [9] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, Zhan W, David C Y, Tao S. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355-370.
- [10] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li P G, Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [11] 贾晓平, 林钦, 甘居利, 蔡文贵, 李纯厚, 王小平, 王增焕, 贾颀. 红海湾水产养殖示范区水质综合评价. *湛江海洋大学学报*, 2002, 22(4): 37-43.
- [12] 贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 李纯厚, 蔡文贵. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 160-164.
- [13] 陈清潮, 黄良民, 尹建强, 张谷贤. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究 // 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 I. 北京: 海洋出版社, 1994: 42-50.
- [14] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula. *Ecology*, 1968, 49(1): 153-156.
- [15] 陈作志, 邱永松, 贾晓平. 基于生态通道模型的北部湾渔业管理策略的评价. *生态学报*, 2007, 27(6): 2334-2341.

- [16] Zhang J J, Gurkan Z, Jørgensen S E. Application of eco-exergy for assessment of ecosystem health and development of structurally dynamic models. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 693-702.
- [17] 贾晓平, 李纯厚, 甘居利, 林钦, 蔡文贵, 王增焕. 南海北部海域渔业生态环境健康状况诊断与质量评价. *中国水产科学*, 2005, 12(6): 757-765.
- [18] 吴玲玲, 易斌, 林端, 许战洲, 兰圣迎. 大亚湾生态监控区生态环境问题及管理对策研究. *海洋开发与管理*, 2009, 26(1): 14-20.
- [19] 杜飞雁, 王雪辉, 李纯厚, 张汉华, 贾晓平. 大亚湾大型底栖动物的群落结构. *生态学报*, 2009, 29(3): 1091-1098.
- [20] 杜飞雁, 王雪辉, 李纯厚, 张汉华, 贾晓平. 大亚湾大型底栖动物物种多样性现状. *南方水产*, 2008, 4(6): 33-41.
- [21] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 张凤琴. 大亚湾浮游植物群落特征. *生态学报*, 2006, 26(12): 3948-3958.
- [22] 王雨, 林茂, 林更铭, 王春光, 项鹏. 大亚湾生态监控区的浮游植物年际变化. *海洋科学*, 2012, 36(4): 86-94.
- [23] Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, Lawton J H, Woodfin R M. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 1994, 368(6473): 734-737.
- [24] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [25] 沈南南, 李纯厚, 王晓伟. 石油污染对海洋浮游生物的影响. *生物技术通报*, 2006, (增刊): 95-99.
- [26] 黄逸君, 江志兵, 曾江宁, 陈全震. 石油烃污染对海洋浮游植物群落的短期毒性效应. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1095-1106.
- [27] 王增焕, 林钦, 李刘冬, 王许诺. 不同海域鲍体镉分布特征与健康风险评价. *南方水产科学*, 2013, 9(1): 22-27.
- [28] 林钦, 石凤琼, 柯常亮, 孙闰霞, 于紫玲. 水产品中邻苯二甲酸酯残留与健康风险评价研究进展. *南方水产科学*, 2014, 10(1): 92-99.
- [29] 孙闰霞, 林钦, 柯常亮, 卢腾腾. 海洋生物体多环芳烃污染残留及其健康风险评价研究. *南方水产科学*, 2012, 8(3): 71-78.
- [30] Schlacher T A, Holzheimer A, Stevens T, Rissik D. Impacts of the 'Pacific Adventurer' oil spill on the macrobenthos of subtropical sandy beaches. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34(5): 937-949.
- [31] 申保忠, 田家怡. 黄河三角洲水质污染对淡水底栖动物多样性的影响. *滨州学院学报*, 2005, 21(6): 43-46.