

基于 MCI 的厦门湾大型底栖动物群落健康状况评价*

Assessment on the Macrozoobenthos Community Health in Xiamen Bay Using Macrozoobenthos Community Index

朱延忠, 周娟, 林焜璇, 刘静, 蔡文倩**, 刘录三

ZHU Yan-zhong, ZHOU Juan, LIN Kui-xuan, LIU Jing, CAI Wen-qian, LIU Lu-san

(中国环境科学研究院 国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

(State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China)

摘要:【目的】对厦门湾的底栖动物群落健康状况进行调查分析, 初步构建合适的评价方法, 并据此判断厦门湾的底栖生态质量状况。【方法】以 2011 年 3 月、6 月调查数据为基础, 采用 Shannon-Wiener 生物多样性指数、Margalef 丰富度指数以及 M-AMBI (Multivariate-AZTI's Marine Biotic Index) 作为构建大型底栖动物群落指数 (macrozoobenthos community index, MCI) 的指标, 在等权重加和的基础上获得 MCI 值。【结果】3 月份厦门湾大型底栖动物群落质量差于 6 月份, 且以同安湾的质量最差, 东部和西部海域的则最好; 九龙江河口口区的群落质量状况呈现明显的空间梯度, 沿河口向外、向北部逐渐变好。【结论】厦门湾底栖动物群落之间的时空差异与多种环境因素的联合作用有关, 而 MCI 能够较为敏感地响应这种时空变化, 适用于评价厦门湾大型底栖动物群落质量状况。

关键词: 大型底栖动物群落 Shannon-Wiener 生物多样性指数 Margalef 丰富度指数 M-AMBI MCI 厦门湾

中图分类号: X82 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)05-0549-09

Abstract: 【Objective】The benthic animal community health in Xiamen bay was investigated, and a suitable evaluation method was preliminarily built, by which the quality condition of benthic ecology in Xiamen bay was estimated. 【Methods】Based on the materials collected from Xiamen Bay in March and June 2011, the Shannon-Weiner diversity index, Margalef richness index and M-AMBI were selected to set macrozoobenthos community index (MCI) to assess the macrozoobenthos community health status. Furthermore, each index was given a suitable score and weighted average to count the MCI value. 【Results】The macrozoobenthos community health in March was worse than that in June in Xiamen Bay. And, Tong'an Bay was presented as the worst health of macrozoobenthos community, while the eastern and western areas were presented as the best in our studied areas of Xiamen Bay. A clear spatial gradient of changing community quality was found along the Jiulongjiang estuary to off shore and northern-wards areas, indicating that the quality status became gradually better off estuary and forward northern part.

【Conclusion】The characters of spatial and temporal distribution patterns of macrobenthic assemblages in Xiamen Bay were closely related to the combined effects of several environmental factors. It is demonstrated here that the MCI could be used to assess the health status of macrobenthic assemblages in Xiamen Bay.

Key words: macrozoobenthos community, Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, M-AMBI, MCI, Xiamen Bay

收稿日期: 2015-07-10

修回日期: 2015-09-13

作者简介: 朱延忠 (1981-), 男, 工程师, 主要从事海洋生态学

研究。
* 国家自然科学基金项目 (41406160) 和环保部公益专项项目 (201309007) 资助。

** 通讯作者: 蔡文倩 (1986-), 女, 助理研究员, 主要从事海洋生态学

研究, E-mail: cwqpop0308@163.com。

【研究意义】底栖生物是指生活在海洋沉积物底内、底表以及以水中生物和非生物体为依托而栖息的生物生态类群^[1]。其中大型底栖动物是指能被 0.5 mm 孔径网筛所截留的底栖动物,它们一般运动迟缓,对环境污染或变化不能及时回避,而且一旦群落被破坏,恢复或重建就需要较长的时间^[2]。任何对底栖生物栖息地的破坏,都可从底栖动物的群落结构中得到响应^[3~5]。因此,大型底栖动物群落被广泛地用于指示其栖居环境质量状况^[6]。**【前人研究进展】**20 世纪初发达国家相继开展海洋底栖生物群落的基础性研究,尤其是 1913 年 Peterson's 采泥器的使用,极大地方便了底栖动物样品的采集。在利用底栖动物进行生境质量评价方面,20 世纪 60 年代,主要集中在以丰度和生物量为评价指标来判定生境质量状况上;至 20 世纪 70 年代,生物评价指数得以迅速发展,常用的指数有 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、均匀度指数、优势度指数等^[7~9]。近些年,随着研究手段的多样化及计算机的广泛应用,污染评价指数逐渐成为研究焦点,如底栖生物栖息地质量指数(RPA)、底栖生物完整性指数(B-IBI)等,这类指数将生物资料与相应的环境资料相结合,定量地反映研究区的污染水平^[10]。与国外相比,我国的底栖生物海洋调查以及对群落结构的深层次研究均起步较晚。20 世纪 50 年代,我国才开始对全国海洋环境及资源进行普查。而直到 Shannon-Wiener 多样性指数的引入,我国生物群落评价才有定量的指标^[11]。近些年,我国相继引入国外广泛应用的生物指数评价底栖生态环境质量,如单变量指数 AMBI^[12~14]、多变量指数 MPI^[15]、丰度生物量比较曲线(ABC 曲线)^[16~18]、多变量 AMBI 指数(M-AMBI, 多变量 AZTI 海洋生物指数)^[19,20]及 B-IBI 等^[21],极大地丰富了我国底栖动物群落的研究手段,促进底栖生态环境质量评价研究的发展。**【本研究切入点】**然而,国外引入的指数在我国海湾应用的过程中都存在一定的局限^[22]。鉴于此,孟伟^[23]筛选出底栖生物多样性指数、丰富度指数及线虫/桡足类数值比,将其指标分数等权重加和获得大型底栖动物群落指数即 MCI,并用于评价渤海湾底栖动物群落健康状况,评价结果符合预期。**【拟解决的关键问题】**本研究尝试将 MCI 法应用于厦门湾大型底栖动物群落评价,目的在于解决该指数应用中存在的问题,探讨其适用程度并据此判断厦门湾的底栖生境质量状况,以期为近海生态环境管理提供科学依据。

1.1 研究区域与采样设计

厦门湾位于福建省南部、台湾海峡西南,为半封闭型海湾,由同安湾、马銮湾、西部海域、九龙江口海域、东部海域、南部海域等部分组成^[24]。近些年,厦门湾沿岸城市经济迅速发展,大量的城市生活废水、工业废水、畜禽养殖废水等排放入海,导致该海域污染日趋严重;尤其是 1950s 以来围海造陆工程的实施导致厦门湾的地貌发生较大改变^[25~28],底栖生物栖息地被破坏,大型底栖动物群落结构发生改变^[26]。

为评价厦门湾的底栖生态环境质量,于 2011 年 3 月和 6 月在厦门湾附近海域进行大型底栖动物调查(图 1)。采用 0.05 m² 的抓斗式采泥器采集大型底栖生物样品,每站成功采样 2 次合计为一个样品。泥样用孔径为 0.5 mm 的筛网冲洗,标本用 10% 福尔马林现场固定,回实验室后进行分类鉴定、个体计数以及称重(湿重)等工作^[29]。样品的处理、保存、计数、称重均按照《海洋调查规范》(GB/T 12763. 6—2007)进行。

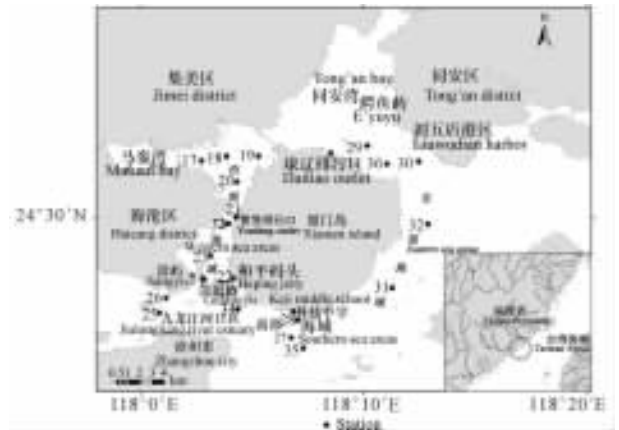


图 1 研究海域及采样站点

Fig. 1 Study areas and sampling stations

1.2 数据处理

采用 SPSS13.0 软件 Pearson 相关性分析来分析环境参数与生物指数的关系,所有站位图、平面图均采用 ArcGIS9.0 绘制,并采用逆距离加权法进行插值。

1.3 评价方法

1.3.1 评价思路

借鉴孟伟^[23]提出的 MCI 法,筛选出合适的群落结构指标,建立适合于厦门湾大型底栖动物群落健康状况评价的指数。

1.3.2 评价指标的选取

在参考国内外相关研究的基础上^[15,23,30,31],从多

样性、丰富度、生物环境敏感度等方面出发,选取 3 个评价指数,即 Shannon-Wiener 生物多样性指标、Margalef 丰富度指数以及 M-AMBI。

(1) Shannon-Wiener 生物多样性指数 (H)

Shannon-Wiener 生物多样性指数是衡量生态系统物种多样性的一个经典指标,它与生物群落的丰富程度密切相关,同时对稀疏种更为敏感^[8]。计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i,$$

式中, S 为样品中的总种数, P_i 为样品中第 i 种的个数同总个数的比值。 H 值越大,多样性就越高,反之亦然。

(2) Margalef 丰富度指数 (d)

Margalef 丰富度指数即一定生物密度中的物种种类数,综合了样品中物种数和栖息密度的信息^[7]。计算公式如下:

$$d = (S - 1) / \ln N,$$

式中, N 为大型底栖动物的栖息密度 (inds · m⁻²)。

(3) M-AMBI

M-AMBI 为多变量 AMBI 指数,可以有效地评价河口和近岸海域软底质底栖生态质量状况,现已成功用于评价世界各地的底栖生境质量^[30]。M-AMBI 计算软件可免费使用 (<http://www.azti.es>),各底栖动物可以通过最新的物种生态分组名录(2012 年 5 月)查到其生态组^[31],数据的输入和计算根据 Borja 等^[32]的要求进行。当数据库中未查到相应的生态组

表 1 大型底栖动物群落评价指标的赋值标准

Table 1 Evaluation criteria for the indicators of macrozoobenthos community

Item	I [100,75)	II [75,50)	III [50,25)	IV [25,0)	V [0,0]
H	>4	3~4	2~3	1~2	<1
d	>6	4~6	2~4	1~2	<1
M-AMBI	>0.77	0.53~0.77	0.38~0.53	0.20~0.38	<0.20

表 2 大型底栖动物群落健康状况分级

Table 2 Classification of the macrozoobenthos community quality status

群落质量状况分级 Levels for the community quality status	MCI	大型底栖动物生物群落健康状况 The health of the macrozoobenthos community quality status
极差 (I 级) Bad	0	无大型底栖动物,生境受到极度破坏 No macrozoobenthos; the habitat was extremely disturbed
差 (II 级) Poor	[25,0)	大型底栖动物群落质量差,物种数匮乏,生境受到严重破坏 Poor macrozoobenthos community status and species richness; the habitat was heavily disturbed
中等 (III 级) Moderate	[50,25)	大型底栖动物群落质量一般,物种数丰度一般,生境受到中等破坏 Moderate macrozoobenthos community status and species richness; the habitat was moderately disturbed
轻度 (IV 级) Unbalanced	[75,50)	大型底栖动物群落质量较好,物种数丰度较为丰富,生境破坏程度较轻 Good macrozoobenthos community status and species richness; the habitat was slightly disturbed
好 (V 级) Good	[100,75)	大型底栖动物生物群落退化程度低或近似为零,物种数极为丰富,生境基本未受破坏 High macrozoobenthos community status and species richness; the habitat was undisturbed

时,应该将该物种与物种表中同一属的物种归到同一组^[33],必要时参照生物生存的生境质量。

1.3.3 评价标准及赋值

参照孟伟^[23]对多样性指数和丰富度指数以及 Muxika 等^[30]对 M-AMBI 的赋值标准,将每个指标均划分成 5 个等级,并赋予相应的分值(表 1)。

1.3.4 MCI 的建立

(1) MCI 的指标赋值

各指标的赋值采用统计学中拉格朗日线性插值法^[34],计算公式如下:

$$M = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}(X - B_{\min}) + F_{\min},$$

式中, M 为待定指标的对应 MCI 分数, X 为待定指标的值, B_{\max} 和 B_{\min} 分别为待定指标标准的最大值和最小值, F_{\max} 和 F_{\min} 为相应分值的最大值和最小值。

(2) MCI 的评价标准分级

参考孟伟^[23]的分级方法,将 3 个指标的得分相加平均,获得大型底栖动物群落指数即 MCI,公式如下:

$$MCI = \frac{1}{3}(M_H + M_d + M_M),$$

式中, M_H 、 M_d 、 M_M 分别代表多样性、丰富度和 M-AMBI 指标的得分。针对计算结果,参考孟伟^[23]及 Muxika 等^[30]的分级标准,将大型底栖动物群落健康状况分为 5 个等级,如表 2 所示。

2 结果与分析

2.1 MCI 值的时空分布

3 月份 MCI 取值为 0~54.48, 平均值为 31.81±19.25。最大值为西部海域的 S24 站, 大型底栖动物群落健康状况等级为轻度, 另外, 位于西部海域的 S18 和 S21 站、东部海域的 S31 站及同安湾口的 S36 站的群落等级也为轻度; MCI 最小值位于厦鼓航道的 S22 站、海沧航道附近的 S23 站及刘五店港区南部近海的 S30 站(S23 站附近发现一种底栖动物, 其它两站均未采集到大型底栖动物), MCI 值为 0, 说明这些海域的大型底栖动物群落健康状况极差; 而处于差状态的站位有 4 个, 分别为位于杏林大桥附近的 S19 站、嵩屿集装箱码头南部水域的 S26 站、同安湾口的 S29 站及东部海域的 S32 站。除上述外, 余下 8 个站位的大型底栖动物群落则处于中等状态(表 3)。

6 月份 MCI 取值为 0~71.95, 平均值为 51.63±19.20。最大值为西部海域的 S19 站, 大型底栖动物群落等级为轻度, 而同样处于轻度状态的还有 14 个站位, 其中分值较高的站位主要集中在西部、南部和东部海域。MCI 最小值位于 S22 和 S26 站, 未采集到大型底栖动物, MCI 值为 0, 说明大型底栖动物群落健康状况极差。除上述外, 余下的 3 个站位则处于中等状态, 其中 MCI 最小值位于九龙江口海域的 S25 站(表 3)。

由图 2 可知, 3 月份厦门湾 MCI 值呈斑块状分

布, 但高值区却多分布在西部及东部海域, 而低值区则集中在同安湾及九龙江口海域。值得注意的是, MCI 值有沿九龙江口向外、向北增大的趋势。6 月份厦门湾 MCI 的空间分布模式与 3 月份的类似, 明显不同的是 S23、S26 及 S30 站。总体上来看, 6 月份厦门湾大型底栖动物群落健康结构状况好于 3 月份。

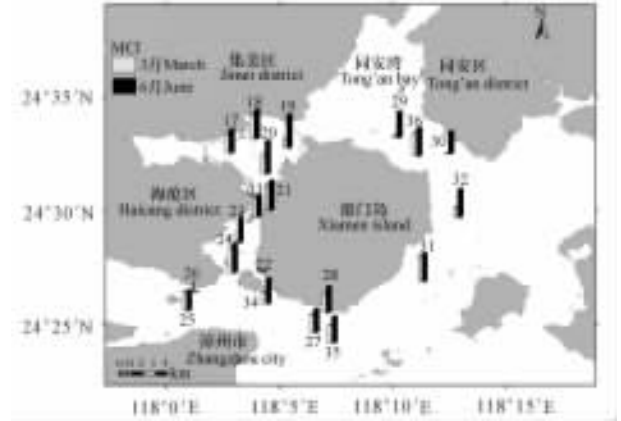


图 2 厦门湾大型底栖动物群落指数(MCI)分值的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the macrozoobenthos community index (MCI) in Xiamen Bay

2.2 MCI 值与环境因子的关系

各环境因子的取值范围、均值及偏差见表 4。Pearson 相关分析表明 9 个环境参数中, 仅 6 月份航次的亚硝酸盐与 MCI 值存在显著的负相关关系 ($R = -0.505, P < 0.05$)。

表 3 厦门湾各站位大型底栖动物群落指标及指数值

Table 3 Values of indicators and MCI for sampling stations in Xiamen Bay

Station	3 月份 March				6 月份 June			
	H	d	M-AMBI	MCI	H	d	M-AMBI	MCI
S17	40.86	20.58	60.00	40.48	62.06	26.30	67.50	51.95
S18	47.89	29.58	77.50	51.66	68.93	39.80	80.08	62.94
S19	20.79	6.68	27.78	18.42	72.59	63.12	80.13	71.95
S20	37.27	24.69	64.17	42.04	73.54	61.07	80.14	71.58
S21	48.43	36.51	76.67	53.87	70.30	38.05	80.11	62.82
S22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S23	0.00	0.00	0.00	0.00	60.59	25.93	72.50	53.00
S24	50.14	34.95	78.33	54.48	72.37	36.46	80.02	62.95
S25	39.54	21.69	61.67	40.96	27.33	34.24	68.33	43.30
S26	12.73	3.51	42.67	19.63	0.00	0.00	0.00	0.00
S27	37.78	17.64	60.83	38.75	62.13	22.44	67.50	50.69
S28	34.58	20.56	64.17	39.77	65.01	28.78	74.17	55.98
S29	3.95	10.20	0.00	4.72	62.19	29.4	79.17	56.92
S30	0.00	0.00	0.00	0.00	30.61	34.69	75.83	47.04
S31	49.60	32.53	80.01	54.05	68.94	35.01	80.01	61.32
S32	12.73	3.51	44.00	20.08	66.36	36.87	80.03	61.09
S33	39.40	19.33	65.83	41.52	39.88	24.31	74.17	46.11
S34	21.74	21.46	37.33	26.84	63.89	28.01	73.33	55.07
S35	35.84	15.63	60.00	37.16	65.35	27.42	79.17	57.31
S36	46.04	29.14	80.04	51.74	65.62	35.87	80.09	60.53

表 4 厦门湾各站位环境因子的取值范围、均值及偏差

Table 4 The value range, average value and standard error of environmental variables and MCI values of all sampling stations in Xiamen Bay

环境因子 Environmental factors	3 月份 March		6 月份 June	
	取值范围 Range of values	均值及偏差 Average and deviation	取值范围 Range of values	均值及偏差 Average and deviation
水温 Temperature(°C)	13.50~13.85	13.65±0.10	17.80~21.70	19.69±1.51
盐度 Salinity(‰)	25.45~28.01	26.69±0.74	23.48~27.00	24.86±0.84
溶解氧 Dissolved oxygen(mg/L)	6.88~8.03	7.38±0.35	6.18~6.96	6.74±0.20
活性磷酸盐 Active phosphate(mg/L)	0.03~0.57	0.09±0.12	0.03~0.06	0.04±0.008
高锰酸盐 Permanganate(mg/L)	0.92~2.08	1.53±0.29	0.45~2.28	1.24±0.55
亚硝酸盐 Nitrite(mg/L)	0.02~0.04	0.03±0.005	0.04~0.06	0.05±0.003
硝酸盐 Nitrate(mg/L)	0.60~0.82	0.73±0.06	0.46~0.72	0.57±0.05
氨盐 Ammonia(mg/L)	0.12~0.26	0.19±0.06	0.14~0.25	0.19±0.03
深度 Depth(m)	4.00~18.00	12.70±4.86	5.00~23.00	13.56±4.28

2.3 MCI 指标与各评价指标的比较

3 月份厦门湾香浓-维纳多样性指标分值为 0~49.6, 平均值为 28.97±18.18, 而 6 月份的则明显升高, 与 MCI 值的变化趋势基本一致。3 月份厦门湾 Margalef 丰富度指标分值不高, 为 0~36.51, 平均值为 17.41±12.06。同样地, 6 月份的丰富度也有所升高。与上述两个指数相比, M-AMBI 分值较高, 3 月份为 0~80.04, 平均值为 49.05±28.93; 6 月份则为 0~80.14, 平均值为 68.61±23.89。由表 3 也可以看出, 6 月份的 M-AMBI 分值也普遍高于春季。总之, 3 个指标的季节差异明显, 且均是 6 月份高于 3 月份, 这与 MCI 的变化趋势一致。从空间分布上来看, 尽管各个站位上具体数值不同, 但上述 3 个指标的空间分布模式与 MCI 基本一致, 即低值区均聚集在同安湾、九龙江口海域, 高值区聚集在西部及南部海域, 且呈现沿九龙江口向外、向北逐渐升高的趋势(图 3)。此外, Pearson 相关分析(双尾检验)也表明 MCI 与香浓-维纳多样性指数 ($R = 0.97, P < 0.01$)、Margalef 丰富度指数 ($R = 0.92, P < 0.01$) 及 M-AMBI ($R = 0.97, P < 0.01$) 之间存在极显著的相关关系。

3 讨论

3.1 MCI 的时空分布

研究证明, 20 世纪 80 年代厦门西港海域的大型底栖动物群落结构已受到一定程度的扰动^[35]。此后, 随着人类活动的影响加剧以及自然环境的复杂多变, 厦门湾整个海域底栖生物的多样性呈下降趋势, 局部海域的种类组成变化明显, 具体表现为寿命长、竞争力强的敏感种被寿命短、适应范围广、繁殖力高的耐污种代替^[36]。这在一定程度上说明厦门湾底栖生态环境退化较为严重, 与本研究 MCI 指示的大多数调查区域底栖生态环境处于中度退化状态一致。

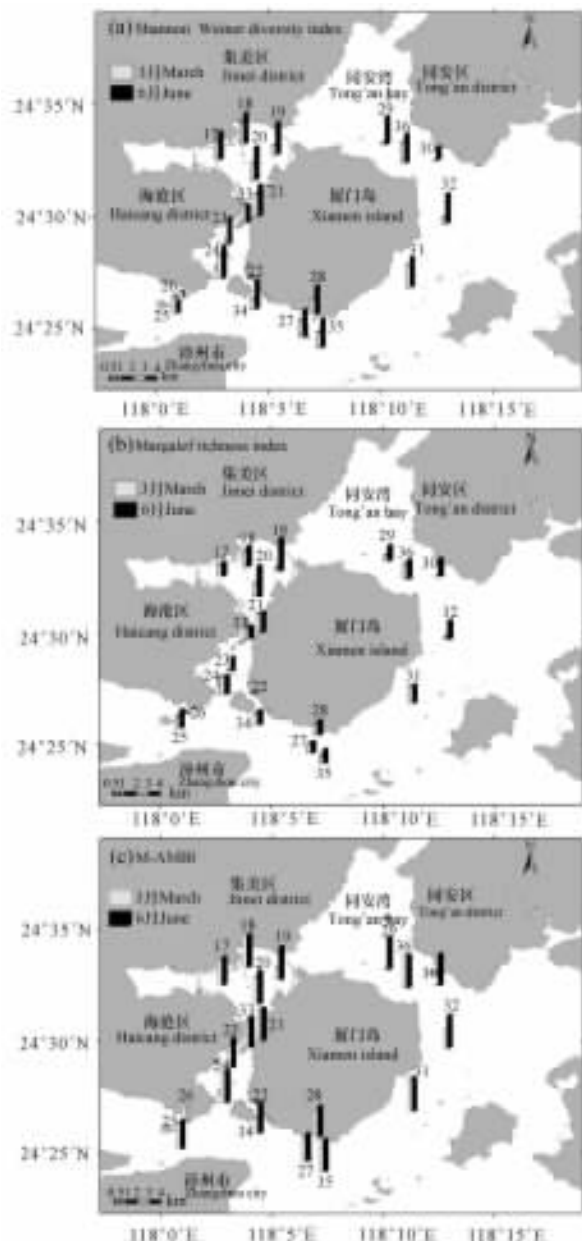


图 3 厦门湾大型底栖动物群落指标分值空间分布
Fig. 3 Spatial distributions of the indicators' values for the macrozoobenthos community in Xiamen Bay

盐度是影响九龙江口底栖动物最主要的环境因素,该海域底栖动物物种数目随盐度的增高而增多^[37]。陆源排污如生活污水、农业化肥污染和工业废水排放等已成为九龙江河口区污染的主要来源^[38],并沿九龙江口向外海呈现逐渐递减的变化趋势^[39],本研究中MCI沿九龙江河口区向外逐渐增大的趋势也验证了上述结论。此外,除九龙江携带入海的污染物,厦门市多个排污口也破坏着厦门湾的生物栖息地(图1),而在远离排污口的水域,生物群落结构相对稳定^[40]。本研究中东部海域的S31和S32站离排污口较远,加上强大的水动力对污染物快速的稀释作用,使得它们的底栖动物群落受到的干扰较小,群落质量较好。而S22站靠近筓筓排污口一侧,且紧挨着和平码头排污口,退潮时受潮水带来的污染物和码头污染物的影响,底栖动物群落受较大的干扰^[41],质量较差。此外,S28和S29站分别靠近科技中学和埭辽排污口,可能也造成这两个站的MCI值较低。

MCI值在同安湾较低,可能与湾内大量围海造陆工程的实施^[27]对湾内底栖动物群落结构造成干扰有关^[42]。此外,2011年厦门启动海沧湾整治工程包括清淤、扩水、造湿地等项目,涉及大部分西部海域,共完成清淤量约800多万立方米。同时,海沧湾岸线及岛屿整治工程的前期工作也在稳步推进^[43]。这些大规模的工程对海底的疏浚和清淤活动直接影响底栖生物的生存环境并导致附近海域的底栖生物几乎灭绝^[44],如3月份的S23站仅发现1种多毛类。同样地,同安区刘五店港区航道扩建导致S30站的底栖动物群落几近灭绝,群落退化程度极高。而位于厦鼓航道上的S22站,未发现底栖生物可能是因为厦门岛与鼓浪屿在3月份至6月份为旅游旺季,游客的增多使得游轮往返次数增加,沉积环境的扰动较大,底栖动物很难在此生存。而位于厦门西港潮流进出通道的S24号站,20世纪80年代由于受水流和船只的扰动较大导致沉积物表层不稳定,底栖生物的许多种类难以在此生存^[35],但近些年的工程建设导致该海域水流速度变缓,使得本站的底栖动物的多样性和丰富度增大,MCI值较高。

本研究中,6月份大型底栖动物群落质量状况普遍好于3月份,说明6月份降雨丰富,入海河流径流量大,携带大量的营养盐入海,使得海域的初级生产力高,故而更多的大型底栖动物栖息于此。此外,根据2011年8月份的监测数据,厦门湾水质基本处于清洁状态,沉积环境质量总体良好。除马銮湾外,其他海域均处于轻度污染或清洁状态(东部海域)^[43]。本研究中,6月份大型底栖动物退化程度与水质污染

状况的空间分布基本一致,而退化程度的差异则可能是与不同的评价标准有关。最后,由于缺乏必要的历史数据,无法作时间序列上的纵向比较,难以定量判断厦门湾底栖生物群落健康状况的退化与改善程度。不过,根据2011年两个航次的调查数据显示,大多数点位采集不到底栖生物,且随着背蚓虫、丝异蚓虫等耐污种的出现,一定程度上也表明厦门湾调查区域的污染较为严重,这与MCI指示的状况基本符合。

3.2 MCI与环境因子的关系

水体富营养化会影响底栖动物的群落结构^[45]。同安湾和西部海域北部为MCI低值区,可能与同安湾和马銮湾的陆源污染较为严重,富营养化程度较高有关^[46,47],这也被MCI与亚硝酸盐的显著负相关关系证实。在同安湾,每年大量的农业和市政污水随东、西溪河排入其中(2011年两条河流入海污染物总量为 1.54×10^7 kg),严重污染该海域的水体环境^[48];此外,该海湾鳄鱼屿附近的高密度围网和网箱养鱼,大量有机废水的排放,导致其富营养化程度上升^[49],水体的溶解氧含量降低,使得该海域成为低丰度生物量区^[43],底栖群落质量较差,如3月份S29站的MCI值所示。但自2006年起,厦门市东部海域综合整治工程开始实施,同安湾也采取了水产养殖退出、清淤、岸线整治等一系列的整治工程,其水环境质量有所好转^[46],大型底栖动物群落受干扰程度降低,湾口区尤为明显,如S36站的MCI值所示。

3.3 MCI与各评价指标的比较

香浓-维纳生物多样性指数在国内外常被用来描述生物群落的生态学特征,也常用来监测淡水、海水底栖生物群落结构的变化,被认为能较好的评价水体的污染程度^[16],在厦门湾也有较多应用^[50]。本研究中,多样性指数能较好地响应同安湾、九龙江口海域较差的生态环境质量以及西部及南部海域较好的生态环境质量。然而,该指数无法区分自然干扰和人为污染,不利于环境的科学管理。物种丰富度作为一个指标在一定程度上可以反应生物群落结构状况,但并未用来评价生态环境质量。M-AMBI充分考虑到群落结构状况的好坏以及各个物种的环境敏感程度,可以有效地评价河口和近岸海域软底质底栖生态质量状况^[30],但在厦门湾应用较少。本研究尝试将三者融合起来构建MCI,该指数强化群落结构指标在生态环境质量评价中的作用。研究结果证实MCI可较为敏感地响应厦门湾海域底栖生物扰动状况,且与其它3个指标之间又呈极显著相关,指示的底栖生态质量状况也基本一致,说明该指数具备用来评价厦门湾底栖生态环境质量的潜质。

3.4 厦门湾生物评价方法的历史演变趋势

厦门湾底栖生态质量状况研究起步于 20 世纪 80 年代,基本是通过分析厦门湾各海域的底栖生物群落结构特征来评价其生态质量状况^[36,37]。90 年代以后,学者们开始从国外引入较为成熟的指数如多样性指数^[50]、丰度/生物量曲线^[17]、AZTI 海洋生物指数(AMBI)及底栖生物完整性指数(B-IBI)等^[16],或在此基础上尝试创立个别指数如 MPI 指数^[51],并对上述指数在厦门湾的评价效果及其优缺点进行详细比较和描述^[16]。近年也有学者采用河口生态系统健康状况综合指数(Comprehensive Health Index, I_{CH})对九龙江河口的生态系统进行评价^[52],然而由于数据缺乏、评价标准并不成熟而导致该指数并未被其它学者采用。目前来看,厦门湾底栖生态质量评价基本以上述成熟的指数为主,而本研究采用的 MCI 法可为厦门湾底栖生态质量状况评价方法研究提供一种初步的探索。

4 结论

采用 Shannon-Wiener 生物多样性指数、Margalef 丰富度指数以及 M-AMBI 作为构建 MCI 的指标,在等权重加和的基础上获得 MCI 值以评价厦门湾的底栖动物群落质量状况。评价结果表明,3 月份的大型底栖动物群落退化程度比 6 月份的高。从空间分布上来说,同安湾的大型底栖动物群落质量最差,东部和西部海域的最好;九龙江口海域群落质量状况具有明显的空间梯度,呈现由沿河口向外、向北部逐渐变好的趋势。这种分布模式可能与厦门湾多种环境因素的联合作用有关。总的来说,MCI 能够反映厦门湾大型底栖动物群落质量状况的时空差异,适用于评价厦门湾大型底栖动物群落质量状况。然而,考虑到厦门湾自然条件的复杂性及日益剧烈的人类活动,需不断完善目前的河口海湾生物评价指标体系,并对目前的生物评价指数进行必要的验证,从而有助于规范海域开发活动,保护海洋资源,改善区域生态环境。

参考文献:

[1] Haeckel E. Anthropogenic oder Entwickelungsgeschichte des Menschen [M]. 4th ed. Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1891.

[2] 斯广杰,陈丕茂,陈勇,等. 海洋底栖生物生态学的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 9026-9305.

Si G J, Chen P M, Chen Y, et al. Research progress of marine benthos ecology[J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2009, 37(19): 9026-9305.

[3] Lim H S, Hong J S. An environmental impact assess-

广西科学 2015 年 10 月 第 22 卷第 5 期

ment based on benthic macrofauna in Chinhae Bay, Korea[J]. Bulletin of Korean Fisheries Society, 1994, 27(5): 659-674.

[4] Nipper M. Current approaches and future directions for contaminant-related impact assessments in coastal environments; Brazilian perspective[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2000, 3(4): 433-447.

[5] Shin P K S, Huang Z G, Wu R S S. An updated baseline of subtropical macrobenthic communities in Hong Kong [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(1-2): 128-135.

[6] Smith R W, Bergen M, Weisberg S B, et al. Benthic response index for assessing infaunal communities on the southern California Coastal Shelf[J]. Ecological Applications, 2001, 11(3): 1073-1087.

[7] Margalef R. Information theory in ecology[J]. General Systems, 1958, 3: 36-71.

[8] Shannon E R, Weiner W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.

[9] Pielou E C. The use of information theory in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10: 370-383.

[10] Pinto R, Patrício J, Baeta A, et al. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(1): 1-25.

[11] 李新正,刘录三,李宝泉,等. 中国海洋大型底栖动物: 研究与实践[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.

Li X Z, Liu L S, Li B Q, et al. Marine Macrozoobenthos in China; Research and Practice[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.

[12] Cai L Z, Tam N F Y, Wong T W Y, et al. Using benthic macrofauna to assess environmental quality of four intertidal mudflats in Hong Kong and Shenzhen Coast [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 22(2): 309-319.

[13] 蔡文倩,刘录三,孟伟,等. AMBI 方法评价环渤海潮间带底栖生态质量的适用性[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 992-1000.

Cai W Q, Liu L S, Meng W, et al. The suitability of AMBI to benthic quality assessment on the intertidal zones of Bohai Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 992-1000.

[14] 罗民波. 长江河口底栖动物群落对大型工程的响应与生态修复研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.

Luo M B. The Communities Response of Macrobenthos to Huge Engineering and the Ecological Restoration in Yangtze Estuarine, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.

[15] 蔡立哲. 河口港湾沉积环境质量的底栖生物评价新方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2003.

Cai L Z. New Methods Studies on Environmental Quality Assessment in Bays and Estuaries; Using Benthos [D]. Xiamen: Xiamen University, 2003.

[16] 李荣冠,江锦祥. 应用丰度生物量比较法监测海洋污染对底栖生物群落的影响[J]. 海洋学报, 1992, 14(1): 108-114.

Li R G, Jiang J X. Monitoring the influence of benthos

- community on the marine pollution using the Abundance/Biomass method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992,14(1):108-114.
- [17] 李宝泉,李新正,王洪法,等.长江口附近海域大型底栖动物群落特征[J]. *动物学报*,2007,53(1):76-82.
Li B Q,Li X Z,Wang H F,et al. Characters of a macrobenthic community off the Changjiang River Estuary [J]. *Acta Zoologica Sinica*,2007,53(1):76-82.
- [18] 刘录三,孟伟,李新正,等.辽东湾北部海域大型底栖动物研究Ⅱ.生物多样性与群落结构[J]. *环境科学研究*, 2009,22(2):155-161.
Liu L S,Meng W,Li X Z,et al. Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: Ⅱ. Biodiversity and community structure[J]. *Research of Environmental Sciences*,2009,22(2):155-161.
- [19] 蔡立哲,陈昕韡,吴辰,等.深圳湾潮间带 1995—2010 年大型底栖动物群落的时空变化[J]. *生物多样性*, 2011,19(6):702-709.
Cai L Z,Chen X W,Wu C,et al. Temporal and spatial variation of macrofaunal communities in Shenzhen Bay intertidal zone between 1995 and 2010[J]. *Biodiversity Science*,2011,19(6):702-709.
- [20] 蔡文倩,孟伟,刘录三,等.长江口海域底栖生态环境质量评价—— AMBI 和 M-AMBI 法[J]. *环境科学*, 2013,34(5):1725-1734.
Cai W Q,Meng W,Liu L S,et al. Assessing the benthic ecological status in Yangtze River Estuary using AMBI and M-AMBI[J]. *Environmental Science*,2013,34(5): 1725-1734.
- [21] 周晓蔚,王丽萍,郑丙辉,等.基于底栖动物完整性指数的河口健康评价[J]. *环境科学*,2009,30(1):242-247.
Zhou X W,Wang L P,Zheng B H,et al. Estuary health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Yangtze estuary and its adjacent waters[J]. *Environmental Science*,2009,30(1):242-247.
- [22] Muniz P,Venturini N,Pires-Vanin A M S,et al. Testing the applicability of a Marine Biotic Index (AMBI) to assessing the ecological quality of soft-bottom benthic communities,in the South America Atlantic region [J]. *Marine Pollution Bulletin*,2005,50(6):624-637.
- [23] 孟伟.海岸带生境退化诊断技术-渤海典型海岸带 [M].北京:科学出版社,2009.
Meng W. The Diagnosis Methods about Coastal Habitat Degradation-typical Coastal Waters in Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press,2009.
- [24] ITTXDP. The Integrated Task Team of the Xiamen Demonstration Project, The Coastal Environmental Profile of Xiamen, MPP-EAS Technical Report no. 6 [R]. Quezon: GEF/UNEP/IMO Regional Programme for the Prevention and Management of Marine Pollution in the East Asian Seas,1996:110.
- [25] 吝涛,薛雄志,曹晓海,等.海岸带湿地变化及其对生态环境的影响:厦门海域案例研究[J]. *海洋环境科学*, 2006,25(1):55-58.
Lin T,Xue X Z,Cao X H,et al. Changes of coastal wetland and impact on eco-environment:Case study in Xiamen[J]. *Marine Environmental Science*,2006,25(1): 55-58.
- [26] 林祥明,陈伟琪,饶欢欢.围填海导致的生态系统服务损失的回顾性评价——以厦门湾为例[J]. *生态经济*, 2010(2):385-389.
Lin X M,Chen W Q,Rao H H. Valuation of marine ecosystem services losses caused by sea reclamation: A case study of Xiamen Bay [J]. *Ecological Economy*, 2010(2):385-389.
- [27] 赵孜苗,张璐平,方秦华,等.厦门湾海岸带区域人类开发活动的环境效应评价[J]. *浙江万里学院学报*,2010, 23(2):54-60.
Zhao Z M,Zhang L P,Fang Q H,et al. Environmental effect assessment of coastal development in Xiamen Bay,China[J]. *Journal of Zhejiang Wanli University*, 2010,23(2):54-60.
- [28] 邱惠燕.厦门市填海造地进程的初步研究[D].厦门:厦门大学,2009.
Qiu H Y. Study on the Process of Sea Reclamation in Xiamen City[D]. Xiamen: Xiamen University,2009.
- [29] 国家海洋局 908 专项办公室.我国近岸海洋综合调查与评价专项:海洋生物生态调查技术规程[M].北京:海洋出版社,2006.
Executive Office of the 908 Special Foundation of State Oceanic Administration, People's Republic of China. The Special Foundation of Comprehensive Investigation and Evaluation on Chinese Coastal Marine Waters; The Technical Regulations of Ecological Investigation on Marine Organisms [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [30] Muxika I,Borja Á,Bald J. Using historical data,expert judgment and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status,according to the European Water Framework Directive[J]. *Marine Pollution Bulletin*,2007,55(1-6):16-29.
- [31] Borja Á,Franco J,Pérez V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within EuroPeau estuarine and coastal environments [J]. *Marine Pollution Bulletin*,2000,40(12):1100-1114.
- [32] Borja Á,Muxika I. Guidelines for the use of AMBI (AZTI's marine biotic index) in the assessment of the benthic ecological quality[J]. *Marine Pollution Bulletin*,2005,50(7):787-789.
- [33] Borja Á,Tunberg B G. Assessing benthic health in stressed subtropical estuaries, eastern Florida, USA using AMBI and M-AMBI[J]. *Ecological Indicators*,2011,11 (2):295-303.
- [34] Meijering E. A chronology of interpolation: From ancient astronomy to modern signal and image processing [J]. *Proceedings of the IEEE*,2002,90(3):319-342.
- [35] 何明海,蔡尔西,吴启泉,等.厦门西港底栖生物的生态 [J]. *台湾海峡*,1988,7(2):189-194.
He M H,Cai E X,Wu Q Q,et al. Ecology of benthos in west harbor of Xiamen[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*,1988,7(2):189-194.

- [36] 吴启泉,蔡尔西,何明海. 台湾海峡西部海域底栖生物生态研究. I 厦门港底栖动物群落分析[J]. 海洋学报, 1985,7(3):378-387.
Wu Q Q, Cai E X, He M H, et al. Studies on the benthos ecology in the Western Sea of Taiwan Strait. I: Benthos community analysis in the Xiamen Harbour [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985,7(3):378-387.
- [37] 田蕴,郑天凌,王新红,等. 厦门马銮湾养殖海区多环芳烃的污染特征[J]. 海洋环境科学, 2003,22(1):29-33.
Tian Y, Zheng T L, Wang X H, et al. Contamination characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in Maluan Bay mariculture area of Xiamen [J]. Marine Environmental Science, 2003,22(1):29-33.
- [38] 黄海宁,林彩,孙秀武,等. 2009年夏季九龙江口表层水主要化学要素的含量分布和来源分析[J]. 台湾海峡, 2012,31(2):261-267.
Huang H N, Lin C, Sun X W, et al. Analysis of concentration distribution and source of main chemical elements in the surface water of Jiulongjiang Estuary during 2009 summer[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012,31(2):261-267.
- [39] Service S K, Feller R J. Long-term trends of subtidal macrobenthos in North Inlet, South Carolina [J]. Hydrobiologia, 1992,231(1):13-40.
- [40] Rhoads D C. Organism-sediment relations on the muddy sea floor[J]. Oceanography of Marine Biology, Annual Review, 1974,12:263-300.
- [41] 吝涛. 海岸带生态安全评价模式研究与案例分析[D]. 厦门:厦门大学, 2007.
Lin T. Studies on the Assessment Models of Coastal Ecological Safety and Cases Analysis[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [42] 林君辉,柯才焕,郑凤武,等. 同安湾春季大型底栖生物群落结构特征[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2007,46(增刊1):155-160.
Lin J H, Ke C H, Zheng F W, et al. Characteristics of macrobenthic community structure in Tong'an Bay in spring [J]. Journal of Xiamen University: Nature Science, 2007,46(s1):155-160.
- [43] 厦门市海洋与渔业局. 2011年厦门市海洋环境质量公报[EB/OL]. (2012-03-29)[2015-06-07]. <http://www.hyj.xm.gov.cn/Ocean/NewsView.aspx>. 2012-4-10.
Oceans & Fisheries Bureau of Xiamen, P. R. China. Report on the Marine Environmental Quality of Xiamen in 2011[EB/OL]. (2012-03-29)[2015-06-07]. <http://www.hyj.xm.gov.cn/Ocean/NewsView.aspx>. 2012-4-10.
- [44] 王延明. 长江口底栖动物分布与沉积物和低氧区的关系研究[D]. 上海:华东师范大学, 2008.
Wang Y M. Distribution of Benthos and Its Relation with Sediment and Hypoxia in the Changjiang Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
- [45] 何明海,蔡尔西,吴启泉,等. 九龙江口底栖生物生态研究[J]. 生态学报, 1988,8(2):133-139.
He M H, Cai E X, Wu Q Q, et al. Studies on the ecology of benthos in the Jiulong Jiang Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 1988,8(2):133-139.
- [46] 孟东平. 厦门市同安湾海域水质现状评价及趋势预测研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
Meng D P. Studies on the Water Quality Assessment and Trend Prediction in Tong'an Bay, Xiamen City [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [47] Beukema J J. Changes in composition of bottom fauna of a tidal-flat area during a period of eutrophication[J]. Marine Biology, 1991,111(2):293-301.
- [48] 潘灿民,张珞平,黄金良,等. 厦门西海域、同安湾入海污染负荷估算研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1):90-95.
Pan C M, Zhang L P, Huang J L, et al. Estimation of marine pollution load in West Sea and Tong'an Bay in Xiamen [J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1):90-95.
- [49] Cai L Z, Tam N F Y, Wong T W Y, et al. Using benthic macrofauna to assess environmental quality of four intertidal mudflats in Hong Kong and Shenzhen coast [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003,22(2):309-319.
- [50] 蔡立哲,马丽,高阳,等. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2002,41(5):641-646.
Cai L Z, Ma L, Gao Y, et al. Analysis on assessing criterion for polluted situation using species diversity index of marine macrofauna [J]. Journal of Xiamen University: Nature Science, 2002,41(5):641-646.
- [51] 蔡立哲. 大型底栖动物污染指数(MPI)[J]. 环境科学学报, 2003,23(5):625-629.
Cai L Z. Macrozoobenthos pollution index (MPI) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003,23(5):625-629.
- [52] 刘佳. 九龙江河口生态系统健康评价研究[D]. 厦门:厦门大学, 2008.
Liu J. Ecosystem Health Assessment of Jiulong River Estuary [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.

(责任编辑:米慧芝)