

# 基于不同生物指数的罗源湾生态环境质量状况评价\*

吴海燕\*\* 陈克亮 张 平 傅世锋 侯建平 陈庆辉

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

**摘 要** 将国外已经成功应用的两类生态环境质量状况评价指数: 严格基于底栖生物敏感度分类的 AZTI 海洋生物指数 (AZTI marine biotic index, AMBI) 和 BENTIX 指数, 以及包含 AMBI、香农多样性指数 ( $H'$ ) 和物种丰度的复合指数——多因子 AZTI 海洋生物指数 (multivariate-AMBI, M-AMBI) 应用于罗源湾, 并将这两类指数的评价结果与我国常用的基于群落结构的  $H'$  进行相互校准, 探讨这些指数在罗源湾的适用性, 以期为我国近岸海域生态环境质量状况评价指数的选择提供一定的参考。结果表明: AMBI 和 BENTIX、M-AMBI 和  $H'$  的评价结果基本一致。这 3 类指数在大部分站点的评价结果是一致的 (13/16), 不一致的站点都是 AMBI 和 BENTIX 的评价等级 (优或良) 高于 M-AMBI 和  $H'$  的评价等级 (中)。综合考虑物种丰度、个体丰度以及生物群组组成等信息, M-AMBI 和  $H'$  的评价等级梯度明显 (从中到优), 评价结果更为合理。对于富营养化程度较高、沉积物有机富集程度低以及底栖生物组成以敏感种为主的罗源湾, 选择  $H'$  和 M-AMBI 指数能够合理地评价生态环境质量状况。

**关键词** 底栖无脊椎动物 生态环境质量状况 评价 生物指数 罗源湾

**文章编号** 1001-9332(2013)03-0825-07 **中图分类号** X822 **文献标识码** A

**Eco-environmental quality assessment of Luoyuan Bay, Fujian Province of East China based on biotic indices.** WU Hai-yan, CHEN Ke-liang, ZHANG Ping, FU Shi-feng, HOU Jian-ping, CHEN Qing-hui (Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, Fujian, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(3): 825-831.

**Abstract:** In this paper, two types of eco-environmental quality assessment indices that have been successively applied abroad, *i. e.*, the AZTI marine biotic index (AMBI) and BENTIX index based on the ecological sensitivity of benthos and the multivariate-AMBI (M-AMBI), a multivariate index integrating AMBI, Shannon Index  $H'$ , and species richness, were applied to assess the eco-environmental quality of Luoyuan Bay, Fujian Province of East China, and the assessment results were compared with those by the  $H'$ , an index based on community structure, which is often applied in China, aimed to test the applicability of these indices to the Bay, and to provide reference in selecting the indices for assessing our coastal eco-environment quality. Similar assessment results were obtained by applying AMBI and BENTIX index, and M-AMBI and  $H'$ . At most stations (13 of 16), the assessment results by applying AMBI and BENTIX index, M-AMBI and  $H'$  were coincident, respectively; while at the other 3 stations, the assessment grade was high or good based on AMBI and BENTIX index, but moderate based on M-AMBI and  $H'$ . Taking account of the richness, individual abundance, and ecological group composition of the benthos in Luoyuan Bay, the assessment results based on M-AMBI and  $H'$  could be more reasonable. It was suggested that for the Luoyuan Bay which has a high level of eutrophication and low organic matter enrichment in sediment and is dominated by sensitive benthos species, M-AMBI and  $H'$  could be more applicative and objective than AMBI and BENTIX index in assessing its eco-environmental quality.

**Key words:** benthic invertebrate; eco-environmental quality status; assessment; biotic index; Luoyuan Bay of Fujian.

\* 国家海洋局青年科学基金项目 (2012149) 和福建省自然科学基金项目 (2011J05110) 资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: haiyan072@sina.com

2012-07-27 收稿, 2012-12-29 接受。

底栖无脊椎动物生活在水体和沉积物的交界处,活动范围小,寿命相对较长,不可避免地会对受到的偶发或长期人为扰动产生响应,因此,通常被认为是水生生态系统有力的指示物种<sup>[1-2]</sup>. 2000 年欧盟颁布了“水框架指令”(The European Water Framework Directive, WFD). 该法令要求各成员国的近岸海域生态环境质量评价必须建立在生物评价的基础上,而且生物评价必须包含底栖生物(2000/60/EC)<sup>[3]</sup>,这极大地促进了基于底栖生物指数法的海洋生态环境质量评价的研究和发展<sup>[4]</sup>. 目前建立的底栖生物指数很多,主要建立于北美和欧洲,可以分为 4 类<sup>[5-6]</sup>:1)严格基于底栖生物敏感度分类的指数. 这类指标包括 AZTI 海洋生物指数(AZTI marine biotic index, AMBI)<sup>[7]</sup>、BENTIX 指数<sup>[8]</sup>和 BO2A 指数(benthic opportunistic annelida amphipod index)<sup>[9]</sup>等;2)严格基于营养级群落分类的指数. 这类指数主要是 ITI(infaunal trophic index)<sup>[10-11]</sup>;3)严格基于多样性的指数. 主要为香农多样性指数( $H'$ );4)综合了其他指数的复合指数. 该类指数主要为多因子 AZTI 海洋生物指数(multivariate-AMBI, M-AMBI)<sup>[12]</sup>. 该指数综合了 AMBI、 $H'$  和物种丰度,并通过因子分析和判别分析计算指数值.

大多学者认为应该重视研究现有方法的适用性,而不是不断建立新的方法<sup>[12]</sup>. AMBI 和 BENTIX 都是基于底栖生物敏感度分类的原理建立起来的<sup>[13]</sup>,目前在欧盟国家得到了广泛的应用. M-AMBI 作为复合指数,被认为更能够反映人为环境压力<sup>[14]</sup>. 但是由于这些指数都是基于特定的地理区域建立的,在建立该指数区域以外的其他地区的应用研究还比较少.

本研究将 AMBI、BENTIX 和 M-AMBI 3 个生物指数在罗源湾进行了应用,并与我国常用的香农多样性指数( $H'$ )进行了比较,以验证这 3 个评价指数在罗源湾的适用性,为我国近岸海域生态环境质量评价指数的选择提供一定的参考.

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

罗源湾位于福建省东北部(26°19'—26°31'N, 119°34'—119°50' E, 图 1),海域总面积 216.44 km<sup>2</sup>,滩涂面积 78.18 km<sup>2</sup>,水深主要在 10~30 m,底层盐度 25~35. 罗源湾湾口宽 950 m,四面环山,是一个典型的口小腹大的半封闭性海湾. 罗源湾周边仅有几条溪流汇入,径流对湾内海水影响较小,湾内

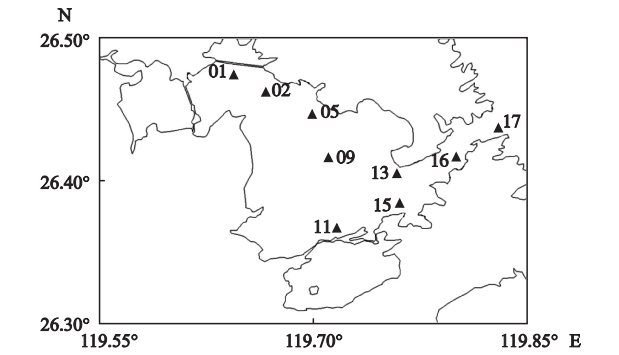


图 1 罗源湾 2009 年采样点分布  
Fig. 1 Sampling sites of Luoyuan Bay in 2009.

水体交换主要靠潮汐来完成. 罗源湾陆源污染物的主要来源是城镇生活污水、港口运输、农田污染与工业废水<sup>[15]</sup>.

本研究中用于罗源湾生态环境质量评价的数据来源于 2009 年的生态调查,其中水质监测 3、5、8 和 11 月各一次,沉积物监测在 8 月进行一次,底栖生物调查 5 月和 11 月各一次. 底栖生物采样面积 0.05 m<sup>2</sup>,每个站取 4~5 个重复样. 用于建立底栖生物评价指数参考基准值的数据来源于 2005—2010 年的监测数据.

1.2 指数计算

1.2.1 AMBI 和 BENTIX 指数 按照底栖生物对不断提高的环境压力等级的敏感度把软基底质的大型底栖生物群落按序分成 5 个群组<sup>[4]</sup>:Group I:物种对有机物的富集非常敏感,出现在无污染状态下(初始状态);Group II:物种对有机物的富集不敏感,在轻微变化过程中,物种密度一直较低(从初始状态向轻微失衡过渡);Group III:物种能耐受过量的有机物质的富集(轻微失衡状态);Group IV:第二级机会种(从轻微失衡到显著失衡状态过渡);Group V:第一级机会种(显著失衡状态). 根据表 1 中的公式计算 AMBI 值和 BENTIX 值. AMBI 具体的

表 1 底栖生物指数计算公式  
Table 1 Calculation formulas of benthic biotic indices

生物指数 Biotic index	公式 Algorithms <sup>[4]</sup>	建立区域 Developed area <sup>[5]</sup>
AMBI	$\frac{[(0 \times \% \text{G I}) + (1.5 \times \% \text{G II}) + (3 \times \% \text{G III}) + (4.5 \times \% \text{G IV}) + (6 \times \% \text{G V})]}{100}$	北海、南部地中海
BENTIX	$(6 \times \% \text{GS} + 2 \times \% \text{GT}) / 100$ 其中:GS= G I + G II, GT=G III + G IV+G V	东部地中海
$H'$	$- \sum_{i=1}^n P_i \cdot \lg_2 P_i$	-

计算过程由 WFD 提供的免费软件 (<http://www.azti.es> v. 4) 完成. 对于不包含在物种清单中的物种, 采用清单中收录的同类群的物种代替<sup>[2,16]</sup>.

**1.2.2 M-AMBI 指数** M-AMBI 是包含底栖无脊椎动物 AMBI、香农多样性指数 ( $H'$ ) 以及物种丰度的复合指数. M-AMBI 指数的应用首先要确定 AMBI、 $H'$  以及物种丰度的参考基准值. M-AMBI 指数的计算采用 WFD 提供的免费软件 (<http://www.azti.es> v. 4) 完成.

1.3 评价标准的确定

**1.3.1 参考基准值的确定** 底栖无脊椎动物 AMBI、 $H'$  和物种丰度的参考基准值以及评价标准边界值的确定参考文献[14]的方法: 根据已有的数据建立数据序列, 采用 SPSS 16.0 进行分析, 去除数据序列的异常值,  $H'$  和物种丰度取数据序列的第 90% 位值为等级优的参考基准值, AMBI 取数据序列的第 10% 位值为等级优参考基准值. M-AMBI 评价标准边界值确定方法: 根据建立的 AMBI、 $H'$  和物种丰度参考基准值, 计算研究区 2005—2010 年的 M-AMBI 序列值, 计算数据序列的平均值和标准偏差, 等级优和良的边界值为平均值和标准偏差的和, 再以此边界值除以 4 依次确定其他等级之间的边界值.

本研究中确定的罗源湾底栖生物 AMBI、 $H'$  和物种丰度的等级优的参考基准值分别为 0.64、4.5 和 46, 以此计算得到的 M-AMBI 优-良-中-差-劣之间的边界值为 0.88-0.66-0.44-0.22, 该边界值与地中海区域的亚得里亚海相同, 高于其他的区域<sup>[14]</sup>.

**1.3.2 评价标准** WFD 建议生态环境质量状况等级划分为 5 个等级, 因此, 本研究中所有的评价指数最终都将生态环境质量状况划分为 5 个等级: 优、良、中、差和劣. 优代表没有受到污染, 良代表受到轻度污染, 中代表受到中等程度污染, 差代表受到严重污染, 劣代表受到极其严重污染 (表 2).

1.4 相互校准

将基于底栖生物敏感度分类的指数 (AMBI 和

BENTIX)、复合指数 (M-AMBI) 与我国应用广泛的  $H'$  的评价结果进行相互校准. 如果 3 类指数的评价结果都在良及以上, 或者中等及以下, 则认为评价的结果一致.

1.5 相关性分析

生物指数 (AMBI、BENTIX、M-AMBI 和  $H'$ ) 和物理化学要素 (底层溶解氧、沉积物总有机碳、重金属和有机污染物) 之间的相关分析用于验证生物指数对人为环境压力的响应<sup>[18]</sup>. 相关显著性采用 Pearson 相关性分析, 由 SPSS 16.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 非生物要素质量状况

罗源湾 2009 年的基本物理要素状况见表 3. 其中底层溶解氧和盐度为 3、5、8 和 11 月 4 个航次的平均值. 调查的 9 个站位水深较浅, 溶解氧状况良好, 底层盐度较高. 由于港湾较为封闭, 调查站位沉积物类型以泥质为主.

沉积物调查的 7 个站位总有机碳 (total organic carbon, TOC) 和重金属含量都比较低. 对照我国海洋沉积物标准, 重金属和有机污染物质量状况较好, 没有超标现象. 而对照美国 EPA 的沉积物标准<sup>[19]</sup>, 部分站位的 As 和所有站位的总 DDT 含量超过了 ERL 值, 可能存在一定的生态风险, 其中 02 站位的总 DDT 超过了 ERM 值, 生态风险则更大<sup>[20]</sup>.

2.2 底栖无脊椎动物的分布特征

表 5 列出了各站位底栖无脊椎动物的基本状况. 总体上, 春季和秋季在优势种、物种种类、生物量等方面差异较大. 春季优势种 (指个体数占总个体数量 10% 以上的物种) 为似蜚虫 (*Amaeana trilobata*), 秋季的优势种则不明显. 除 05 站位外, 春季的物种丰度、 $H'$  以及个体丰度均高于秋季. 其中, 春季以 13 站位状况最好, 秋季以 05 站位最好. 群落组成上, 除春季 02 站位外, 其他站位都以敏感种为主 (G I 和 G II).

表 2 各指数的评价标准值  
Table 2 Evaluation criterion for each index

生物指数 Biotic index	优 High	良 Good	中 Moderate	差 Poor	劣 Bad	文献 References
AMBI	0 ~ 1.2	1.2 ~ 3.3	3.3 ~ 4.3	4.3 ~ 5.5	>5.5	[9]
BENTIX (泥质 Mud)	6 ~ 4	4 ~ 3	3.0 ~ 2.5	2.5 ~ 2	0	[1]
(砂质 Sand)	6 ~ 4.5	4.5 ~ 3.5	3.5 ~ 2.5	2.5 ~ 2	0	[1]
$H'$	≥4	4 ~ 3	3 ~ 2	2 ~ 1	<1	[9,17]
M-AMBI	≥0.88	0.88 ~ 0.66	0.66 ~ 0.44	0.44 ~ 0.22	<0.22	-

表 3 罗源湾基本物理要素特征  
Table 3 Basic physical characteristics of Luoyuan Bay

站位 Station	水深 Water depth (m)	沉积物类型 Sediment type	盐度 Salinity	底层溶解氧 Bottom dissolved oxygen (mg · L <sup>-1</sup> )
01	6.5	泥	28.86	7.28
02	6.0	泥	29.50	7.58
05	8.5	泥砂	29.63	7.74
09	9.5	泥	29.67	7.58
11	—	泥	26.75	7.54
13	43.0	泥	30.14	7.18
15	15.0	泥	29.75	7.51
01	75.0	砂	30.17	7.30
02	60.0	泥岩石	30.34	7.35

2.3 生态环境质量状况评价

AMBI 和 BENTIX 在其建立区域以外地区的应用最大的挑战在于,由于不同地理区域物种上的天然差异造成的未包含在物种清单中的物种的群组划分问题<sup>[21]</sup>. 罗源湾 2009 年春季和秋季 16 个样本调查得到的底栖无脊椎动物总的物种数为 195 种,其中包含在 AMBI 物种清单中的物种数有 110 种

表 4 罗源湾 2009 年沉积物质量状况  
Table 4 Sediment quality status of Luoyuan Bay in 2009

站位 Station	总有机碳 TOC (%)	Cu (×10 <sup>-6</sup> )	Pb (×10 <sup>-6</sup> )	Cd (×10 <sup>-6</sup> )	Hg (×10 <sup>-6</sup> )	As (×10 <sup>-6</sup> )	总 HCHs Total HCHs (×10 <sup>-9</sup> )	总 DDT Total DDT (×10 <sup>-9</sup> )	总 PCBs Total PCBs (×10 <sup>-9</sup> )
01	0.84	22.2	32.7	0.0827	0.049	7.23	0.158	17.1 *	0.854
02	1.17	22.4	30.3	0.0731	0.052	10.00 *	0.120	159.0 *	0.581
05	0.72	21.1	29.1	0.0704	0.040	6.93	0.214	16.6 *	0.110
09	0.76	19.8	28.8	0.0713	0.019	9.24 *	0.172	7.2 *	1.190
11	0.85	24.0	33.6	0.0784	0.066	12.50 *	0.279	9.0 *	0.678
13	1.26	14.6	23.7	0.0728	0.031	7.37	0.291	23.6 *	0.104
15	0.85	24.1	29.8	0.0774	0.033	10.90 *	0.213	11.5 *	0.798

\* 超过了 ERL 值 Exceeded the ERL value. HCHs:六六六 Hexachlorocyclohexanes; PCB:多氯联苯 Polychlorinated biphenyl.

表 5 罗源湾 2009 年底栖无脊椎动物基本状况  
Table 5 Basic status of benthic macroinvertebrate of Luoyuan Bay in 2009

站位 Station	春季(5月) Spring (May)				秋季(11月) Autumn (November)			
	物种丰度 Species richness	H'	个体丰度 Individual Abundance (ind · m <sup>-2</sup> )	GI-GII-GIII-GIV-GV 组成 GI-GII-GIII-GIV-GV composition (%)	物种丰度 Species richness	H'	个体丰度 Individual Abundance (ind · m <sup>-2</sup> )	GI-GII-GIII-GIV-GV 组成 GI-GII-GIII-GIV-GV composition (%)
01	32	3.41	1064	62.9-8.4-3.4-25.3-0	9	2.39	92	73.9-0-13-13-0
02	25	3.9	416	33.7-10.2-23.5-32.7-0	32	4.51	410	54.1-12.2-8.1-25.7-0
05	36	4.17	409	53.1-16.2-10.6-20.2-0	57	5.35	670	40.7-30.1-8.9-20.3-0
09	36	4.78	309	17.8-58.4-8.9-14.9-0	27	4.57	148	50-34.6-15.4-0-0
11	35	4.57	376	47.2-19.1-29.2-4.5-0	5	2.25	75	44-28-18.7-9.3-0
13	62	3.43	2119	64.3-12.9-10.2-12.7-0	21	4.02	191	51.6-22.3-21.7-4.5-0
15	26	3.59	582	77.9-13.9-5.7-2.4-0	15	3.83	100	33.3-53.3-0-13.3-0
16	11	2.33	1440	28.4-49.3-1.5-20.9-0	—	—	—	—
17	27	4.15	1050	54.7-19.8-18.6-5.8-1.2	11	3.42	77	50-50-0-0-0

G: 组 Group.

(56.4%), 经过调整替代后上升到 163 种 (83.6%). 这个比例总体上达到了应用 AMBI 评价的要求(>80%)<sup>[16]</sup>.

由图 2 可见,AMBI 的评价结果中,各站位的春季、秋季以及年平均评价结果都在等级良以上,评价结果较好. 8 个站位(16 站位除外)中,4 个站位(01、02、09 和 17)春季的评价结果好于秋季,其他 4 个站位则是秋季较好.

BENTIX 的评价等级比 AMBI 的评价等级更高,除 02 站位春季的评价等级为良以外,其他情况的评价等级都为优. 除 02 和 17 站位秋季评价结果好于春季外,其他站位春季和秋季的指标值相差甚小.

与 AMBI 和 BENTIX 的评价结果相比,M-AMBI 的评价结果的等级梯度较为明显. 春季 13 站位、秋季 05 站位和年平均的评价等级为优,春季 16 站位和秋季 01、11 站位的评价结果为中等,其他情况的评价等级都为良. 从季节比较来看,8 个站位中,5 个站位(01、11、13、15 和 17)春季的评价结果要好于秋季. 这与 AMBI 的评价结果有一定的差别.



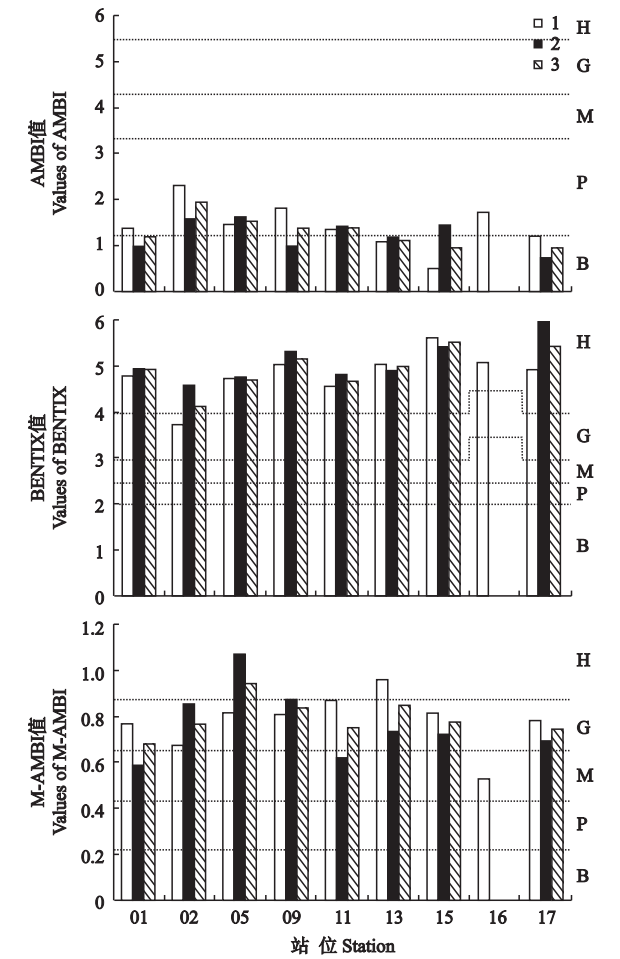


图2 AMBI、BENTIX 和 M-AMBI 对各站点的评价结果

Fig.2 Evaluation results of AMBI, BENTIX and M-AMBI for each station.

1)5 月 May; 2)11 月 Novebmer;3)平均值 Average. H:优 High; G:良 Ciood; M:中等 Moderate; P:差 Poor; B:劣 Bad. 下同 The same below.

2.4 相互校准

严格基于底栖生物敏感度分类的 AMBI 和 BENTIX 指数在所有站点两个季节的评价结果基本相同,都为优或良. 相关性分析(表 6)表明,两个指数的相关性显著,这主要是由于两者建立的基本原理相同,只是计算时各群组的分配系数不同,罗源湾的敏感种比例较高,所以两者的评价结果接近.

表 7 生物指数与环境要素的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between biotic indices and environment elements

生物指数 Biotic index	溶解氧 DO	总有机碳 TOC	Cu	Pb	Cd	Hg	As	总六六六 Total HCH (7)	总 DDTs Total DDTs (7)	总 PCBs Total PCBs (7)
AMBI	0.22	0.16	0.13	0.17	0.33	0.45	0.05	-0.51	0.77 *	-0.12
BENTIX	-0.29	-0.38	-0.06	-0.23	0.13	-0.62	0.03	0.34	-0.77 *	0.31
M-AMBI	0.54	-0.12	-0.46	-0.60	-0.88 **	-0.49	-0.39	-0.26	-0.16	-0.54
H'	0.70	-0.18	-0.19	-0.38	-0.93 **	-0.50	-0.16	-0.20	0.17	-0.13

表 6 各指数的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between each index

生物指数 Biotic index	BENTIX	M-AMBI	H'	S
AMBI	-0.780 *	-0.150	0.065	0.078
BENTIX	-	0.096	-0.140 *	-0.280
M-AMBI	-	-	0.910 **	0.890 **

\* P<0.05; \*\* P<0.01. 下同 The same below.

BENTIX 指数与 H' 显著负相关,可能是由于某些站位有优势度较高的物种(个体数量占站位总个体数量的一半以上),使得多样性指数较低,但这些优势种主要是敏感种,使得 BENTIX 值反而较高<sup>[1]</sup>.

复合指数 M-AMBI 与 H' 的评价结果基本相同. 两者评价结果一致主要在于物种组成都以敏感种为主,M-AMBI 的指数值主要取决于 H'. 相关性分析表明,M-AMBI 和 H' 的相关性极显著,同时 M-AMBI 与物种丰度的相关性也极显著(P<0.01). 这主要是由于 M-AMBI 指数是 H' 和物种丰度的复合指数,但 M-AMBI 指数的计算中,H' 的比重较高<sup>[6]</sup>,因此相关系数略高.

总体上,这 3 类指数的评价结果大部分是一致的,仅在春季 16 站位、秋季 01 和 11 站位不一致. 不一致的情况都是 AMBI 和 BENTIX 的评价等级较高(优或良),而 M-AMBI 和 H' 的评价等级为中等.

这几个不一致的站位虽然敏感种比例较高,但是物种丰度较低(<12),其中秋季 01 和 11 站位的个体丰度也比较低. 综合这些信息来看,M-AMBI 和 H' 的评价结果更为合理.

2.5 相关性分析

相关性分析采用各指数春季和秋季的平均值进行. 结果表明,AMBI、BENTIX 与总 DDTs 显著相关,M-AMBI、H' 与重金属 Cd 极显著相关;与其他因子的相关性则不显著(表 7).

底栖生物敏感度是依据底栖生物对人为压力,尤其是有机物富集的敏感程度而划分的<sup>[1,5]</sup>. 理论上,TOC 的含量与 AMBI 和 BENTIX 应有明显的相关性<sup>[22]</sup>. 本研究中,TOC 含量与各个指标都没有显

著的相关性,可能与数据量较少有关<sup>[23]</sup>,也可能是因为所有站位有机碳含量都很低,没有明显的差异所致。As 和总 DDTs 是两个潜在的生态风险因子(表 4)。本研究 AMBI 和 BENTIX 与总 DDTs 显著相关,能够反映 DDTs 的生态风险,而 As 与所有的指标都不相关。Carvalho 等<sup>[20]</sup>研究表明,AMBI 比  $H'$  以及物种丰度等其他结构性指标更能反映沉积物的有机污染状况,但是不能反映重金属的污染,与本文的研究结果相似。沉积物中 Cd 的浓度很低,但与 M-AMBI 和  $H'$  指数都极显著相关,可能与各站位 Cd 含量呈明显的梯度有关。

### 3 讨 论

由于海洋生态系统本身的复杂性以及人为环境压力的影响,不同的评价指数在同一区域通常给出不同的评价结果<sup>[2]</sup>,使得海洋生态环境质量评价的客观性在很大程度上依赖于生物指数的选择<sup>[24]</sup>。不同指数评价结果的不一致会导致利益相关者和环境保护者之间的争论<sup>[25]</sup>。因此,对特定区域进行生态环境质量评价时,需要对可以选择的生物指数进行适用性评估,并进行相互校验。校验的目的不仅是为了选择最合适的指数,也是为了保证不同指数评价结果的可比性和可靠性<sup>[23]</sup>。

由于底栖生物的复杂性和区域的差异性,采用单因子指数评价所有的生态系统是不现实的<sup>[24]</sup>,甚至在某些地区没有指数是可以单独使用进行评价的<sup>[25]</sup>。本研究中,应用区域(罗源湾)生境与指数建立区域生境之间存在明显的差异,因而单因子指数 AMBI 和 BENTIX 评价结果不完全合理。研究表明,AMBI 更适合有机物和营养物富集的区域<sup>[2]</sup>,而罗源湾沉积物中 TOC 的含量总体都很低。BENTIX 指数建立于东地中海区域,为贫营养区域<sup>[26-27]</sup>。而 2009 年罗源湾同期的水质监测中无机氮和活性磷酸盐的平均浓度分别为 0.50 和 0.043  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,已经接近或达到四类水水质标准,已经富营养化。

AMBI、 $H'$  和物种丰度的复合指数 M-AMBI 已经被应用于不同的水体类型(近岸海域、河口以及泻湖),大部分的应用结果都表明 M-AMBI 指标比单因子指数(AMBI、BENTIX 以及  $H'$  等)更能够反映环境的实际情况<sup>[21]</sup>,这与本研究的结论是一致的。但是 M-AMBI 指数的应用首先要建立参考基准值,当历史数据或古生物学数据缺失的时候,参考基准值以及评价标准边界值的确定是一个难题<sup>[2]</sup>。如何在缺乏详细的历史数据的情况下,探索我国近岸

海域类型专属参考基准值的建立方法是今后值得研究的方向之一。

综上,AMBI 和 BENTIX 的评价结果一致,但罗源湾的生境与两者建立区域的生境存在一定的差异,其评价结果不尽合理; $H'$  与 M-AMBI 的评价结果一致,并且基本合理,说明对于富营养化程度较高、沉积物有机富集程度低,以及底栖无脊椎动物组成以敏感种为主的罗源湾,选择这两个指数能够合理地评价生态环境质量状况。

### 参考文献

- [1] Blanchet H, Lavesque N, Ruellet T, *et al.* Use of biotic indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional water habitats: Implications for the implementation of the European Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 2008, **8**: 360–372
- [2] Medeiros JP, Chaves ML, Silva, *et al.* Benthic condition in low salinity areas of the Mira estuary (Portugal): Lessons learnt from freshwater and marine assessment tools. *Ecological Indicators*, 2012, **19**: 79–88
- [3] European Community. Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. 2000/60/EC
- [4] Simboura N, Argyrou M. An insight into the performance of benthic classification indices tested in eastern Mediterranean coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**: 701–709
- [5] Bakalem A, Ruellet T, Dauvin JC. Benthic indices and ecological quality of shallow Algeria fine sand community. *Ecological Indicators*, 2009, **9**: 395–408
- [6] Ruellet T, Dauvin JC. Benthic indicators: Analysis of the threshold values of ecological quality classifications for transitional waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **54**: 1701–1714
- [7] Borja A, Franco J, Perez V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**: 1100–1114
- [8] Simboura N, Zenetos A. Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new biotic index. *Mediterranean Marine Science*, 2002, **3**: 77–111
- [9] Dauvin JC, Ruellet T. Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **55**: 241–257
- [10] Mearns AJ, Word JQ. Forecasting effects of sewage solids on marine benthic communities// SEPA, ed. Regulation and Monitoring of Marine Cage Fish Farming in Scotland: A Procedures Manual Standard Baseline Survey APS STD BASE 001. Stirling, UK: Scottish Environment Protection Agency, 1982: 1–10
- [11] Afli A, Ayari R, Zaabi S. Ecological quality of some Tunisian coast and lagoon locations, by using benthic community parameters and biotic indices. *Estuarine*,

- Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**: 269–280
- [12] Muxika I, Borja A, 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. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **55**: 16–29
- [13] Grall J, Glemarec M. Using biotic indices to estimate macrobenthic community perturbations in the bay of Brest. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, **44**: 43–53
- [14] Paganelli D, Forni G, Marchini A, *et al.* Critical appraisal on the identification of reference conditions for the evaluation of ecological quality status along the Emilia-Romagna coast (Italy) using M-AMBI. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**: 1725–1735
- [15] Wu HY, Chen KL, Chen ZH, *et al.* Evaluation for the ecological quality status of coastal waters in East China Sea using fuzzy integrated assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**: 546–555
- [16] Borja A, Dauer DM, Diaz R, *et al.* Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: A comparison of three indices. *Ecological Indicators*, 2008, **8**: 295–403
- [17] Chen Z-H (陈朝华), Wu H-Y (吴海燕), Chen K-L (陈克亮), *et al.* An integrated assessment method of ecological quality status in coastal waters: Taking Tong'an Bay as a case. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, **22**(7): 1841–1848 (in Chinese)
- [18] Muxika I, Somerfield P-J, Borja A, *et al.* Assessing proposed modifications to the AZTI marine biotic index (AMBI), using biomass and production. *Ecological Indicators*, 2012, **12**: 96–104
- [19] USEPA. National Coastal Condition Report. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development/Office of Water, 2008
- [20] Carvalho S, Gaspar MB, Moura A, *et al.* The use of the marine biotic index AMBI in the assessment of the ecological status of the Obidos lagoon (Portugal). *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **52**: 1414–1424
- [21] Borja A, Tunberg BG. Assessing benthic health in stressed subtropical estuaries, eastern Florida, USA using AMBI and M-AMBI. *Ecological Indicators*, 2011, **11**: 295–303
- [22] Albayrak S, Balkis H, Zenetos A, *et al.* Ecological quality status of coastal benthic ecosystems in the Sea of Marmara. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **52**: 790–799
- [23] Simboura N, Reizopoulou S. A comparative approach of assessing ecological status in two coastal areas of Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators*, 2007, **7**: 455–468
- [24] Luo X-X (罗先香), Yang J-Q (杨建强). Progress in researches on benthic indices of assessing marine ecosystem health. *Marine Science Bulletin (海洋通报)*, **28**(3): 106–112 (in Chinese)
- [25] Wetzel MA, Ohe PC, Manz W, *et al.* The ecological quality status of the Elbe estuary: A comparative approach on different benthic biotic indices applied to a highly modified estuary. *Ecological Indicators*, 2012, **19**: 119–129
- [26] Munari C, Mistri M. Towards the application of the Water Framework Directive in Italy: Assessing the potential of benthic tools in Adriatic coastal transitional ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**: 1040–1050
- [27] Simboura N, Reizopoulou S, 2008. An intercalibration of classification metrics of benthic macroinvertebrates in coastal and transitional ecosystem of the Eastern Mediterranean ecoregion (Greece). *Marine Pollution Bulletin*, **56**: 116–126

---

**作者简介** 吴海燕,女,1983年生,博士,助理研究员。主要从事海洋环境管理与评价、海岛生态调查与修复研究,发表论文8篇。E-mail: haiyan072@sina.com

**责任编辑** 肖 红

---