

海洋生物环境指示作用的研究进展*

Advances in the Environmental Indication Using Marine Organisms

蔡文倩,朱延忠,刘静,周娟,林岩璇**,刘录三

CAI Wen-qian,ZHU Yan-zhong,LIU Jing,ZHOU Juan,LIN Kui-xuan,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:随着世界范围内海洋沿岸经济的迅速发展,人类活动对海洋环境的干扰越来越大,近岸生态环境急剧恶化,进而影响到栖居于此的生物。同时,生物对环境压力的响应具有明显的时空梯度,研究生物的变化状况可以快速、准确地评估环境质量状况。本文对国内外海洋生物环境指示作用研究现状进行系统地描述,并以大型底栖动物为例,重点介绍生物指数的发展情况及其在生物环境指示作用研究中的应用。建议加强野外观测平台的建设,建立适用于我国海域特征的指数评价体系。

关键词:生物指示 海洋环境质量 生物指数

中图分类号:P735 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2015)05-0532-08

Abstract: The environmental and ecological statuses in coastal zone are becoming seriously worse due to the rapid development of coastal economy and the disturbance from increasing human activities, which impacts greatly on habitant organisms in turn. Meanwhile, organisms can response to the environmental changing with an obvious spatial-temporal gradient. Hence, the marine ecological status can be evaluated quickly and accurately by researching on the organisms characters. The advanced researches of marine bio-indication in the world were reviewed in the present work. By the example of macrobenthic assemblages to introduce the biotic indices as well as their application in the research of bio-indication. Finally, it was suggested to strengthen the construction of the field monitoring platform, and to determine the best biotic indices applicable for the Chinese marine waters.

Key words: bio-indication, marine environmental quality, biotic indices

0 引言

自然界由于各种生物相互依存(制约)而保持平衡。在自然状态下,生物群落结构稳定,生态系统健康;当环境受到污染或干扰时,栖居于此的生物就会受到影响,如栖息密度锐减、生长发育繁殖受损甚至死亡等,最终导致群落结构发生变化,生态系统失衡^[1]。生物的群落结构变化能反映生态环境健康状况,这是生物环境指示作用研究的理论基础。自1902年起,Kolkwitz和Marsson陆续发表用于评价

收稿日期:2015-06-10

修回日期:2015-08-17

作者简介:蔡文倩(1986-),女,助理研究员,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:林岩璇(1974-),男,助理研究员,主要从事海洋底栖生态学研究,E-mail:linkuixuan@aliyun.com。

水质污染的指示动物和植物物种名录,并以某种生物在环境中的出现(或不出现)为环境污染状况的判断标准,开创污水生物体系(Scaprobic system)即“指示生物”研究^[1]。该方法虽然有较多缺陷,但有关方面的研究仍在继续^[2]。随着认识的加深,生物环境指示作用的研究方式向多样化发展。目前,海洋生态学家及环境工作者更重视从群落指标变化、生物体内残毒分析等角度来评价海洋生态环境质量状况。

1 生物环境指示作用研究的特点及尺度

1.1 特点

传统的环境质量评价方法有化学评价(水体和沉积物)和生物评价。化学评价能直接迅速地响应水体(沉积物)污染物的类别和浓度,花费较少,可行性高,但却无法反映污染的危害程度及作用机理,尤其是复合污染物对生态系统的综合影响;生物评价则能够响应污染物的复合效应^[3]。有些污染物如多氯联苯在水体和沉积物中含量甚微,化学监测很难检出;但经过生物富集作用,生物体内污染物含量远高于水体或沉积物中的。因此,生物体的污染物含量可以用来评估生态系统对污染物的响应状况^[4]。同时,生物评价还可以指示栖居地的早期退化(或污染),监测污染效应的动态变化规律。尽管如此,生物评价的局限性也较为明显,如费时费力,需要丰厚的分类学和生态学知识等^[2]。此外,导致海洋生态系统变化的原因较为复杂,而生物对环境变化的响应方式及类别也较难预测和量化,加之人为压力与自然变化相互叠加,很难根据某个指标或某种方法的研究结果来鉴别哪种环境压力导致群落变化,这也正是目前生物环境指示作用研究中亟需解决的问题之一^[2]。

1.2 尺度

海洋水体和沉积物中的污染物会直接或间接地影响栖居于此的生物,产生一系列生物效应,对生物的个体、种群、群落等方面均有影响,这也使得底栖生物对环境的指示作用有多个层级,即个体(如性畸变)、种群(如某一物种的出现频率,种群动力学变化)、群落(如群落结构指标的增加或降低)及生态系统(如全球尺度下的生态系统健康状况)^[5]等。

早期,人们通过观察群落指标如栖息密度、生物量等的时空序列变化来判断底栖动物群落对环境的响应状况^[6]。近些年,基于生物群落水平的研究基础较为雄厚,且生物群落能够响应污染的实际效应和环境污染的长期变化,因此人们常从生物群落的角度来指示海洋环境质量状况^[7,8]。而建立在群落指标基础上的生物指数,因其整合和相关的生态信息,对环境

质量状况的响应更全面^[9],已成为目前海洋环境质量评价方法研究的热点之一。尤其是在美国 EPA 及欧盟 WFD 的推动下,生物指数的研究发展迅速,各种新指数层出不穷^[10]。目前,世界上约有数百种底栖生物指数^[11],仅欧盟常用的就多达 90 种^[12]。然而,费用较高,结果获取的时间较长,生物指标较难选取等因素长期困扰着群落水平上生物指示作用的研究^[13]。

2 指示生物的内涵及选择标准

指示生物能反映给定水体环境的生物或非生物状态,阐明群落或生态系统栖居地环境变化的影响。指示生物能指示某一子集分类群的多样性,或区域内总的生物多样性,可分为环境指示种、生态指示种、生物多样性指示种^[14]。早期的指示生物是指生活在水体内的、能响应水质污染程度和类别的所有生物类群,如细菌、浮游生物、鱼类等。随着认识程度的加深,小头虫(*Capitella capitata*)、颤蚓(*Tubifex* sp.)及贻贝(*Mytilus edulis*)等指示生物获得了更多的重视。现在常用的指示生物有微生物、藻类、高等植物、环节动物、软体动物、甲壳动物等^[15]。

面对纷繁多样的指示生物,如何选择最合适的指示种,一直是海洋生态学家关注的热点。20 世纪七八十年代,Phillips^[3,16]总结了指示种应该满足的一般条件。随后,Hodkinson 等^[5]在前人研究的基础上,指出指示种需满足以下条件:①分类阶元稳定,易于辨认;②生物学研究透彻,能响应环境压力及栖居地状态;③栖息密度高,易于采集和实验室培养;④同一尺度上有不同层级的分类阶元,符合研究的时空需求;⑤对整个群落具有明显的代表性。但随着认识程度的加深,人们对指示种的选择越来越注重专一性(Specificity)、单调性(Monotonicity)、变化性等^[17]。

3 常用的指示生物类群

一般来说,海洋微生物通常在种群(细菌总数和粪大肠杆菌计数)^[2]或群落水平上(原生动物)^[18]指示环境中有机污染物、重金属等的污染程度。随着 DNA 和电泳技术日益发展,微生物对环境的指示作用已进入到个体和分子水平^[15];而藻类和高等植物则主要通过群落结构演替来指示水质变化情况^[19]或通过生理生化变化指示水体中的重金属含量^[20]。

对于底栖动物来说,在 20 世纪初,德国人就开始利用环节动物寡毛类的出现及其种群数量来指示淡水水域的污染状况。与此同时,小头虫也被用来指示海洋有机污染^[21]。20 世纪 60 年代以后,美国开始利

用牡蛎(Ostreidae)、贻贝(*Mytilus mytilus*)等双壳类动物来监测合成有机物污染。目前,贻贝基本上成为监测海洋重金属、有机污染物等的模式生物^[22]。总体来看,底栖动物环境指示作用研究包括组织水平上的生物残毒分析、个体水平上的指示生物研究及群落水平上的群落结构指标变化等^[2,23,24]。常用的底栖指示生物类群有双壳类软体动物、甲壳动物、底栖鱼类、环节动物、棘皮动物、腔肠动物等。

3.1 软体动物

由于化学监测无法提供水体环境中重金属的生物利用度(bioavailability)信息^[25],且水体中的重金属浓度经常处于或低于设备检测的浓度上限或下限而不易被检测出来^[26],因而大多数学者在指示河口环境中的重金属浓度时,首选以双壳类为代表的生物监测方法,较为常用的受体生物包括紫贻贝^[27]、变异短齿螺、帽贝等^[28]。需要注意的是,在研究软体动物对重金属的指示作用时,应注意采样季节、地点、盐度和水温等环境参数,以及生物个体年龄、重量、大小、性别等生理参数对有机体内重金属含量的联合效应^[3]。软体动物还可以指示合成化学物的污染,如TBT^[29,30]、POPs^[31]等。此外,软体动物还可通过个体、种群或群落指标来指示环境质量状况^[32],如牡蛎的身体状况指数、胆碱酯酶P1、总ATP酶等均可作为生物标记^[33]。我国从20世纪80年代开始利用毛蚶作为指示种监测海洋环境中的汞含量^[34],目前则集中研究其组织病变、性畸变、DNA变异等,用以反映海洋生态系统中的重金属及有机污染物污染^[35,36]。

3.2 甲壳动物

甲壳动物个体大、分布广、经济价值高,对污染的敏感性较强^[9],因此也常用来指示生态环境质量,如十足目中的蓝蟹(*Callinectes sapidus*)、锯缘青齿蟹(*Sylla serrata*)、鬼蟹^[37,38],蔓足纲的藤壶^[39]。其中,端足类的麦秆虫(*Caprella*)因其种类丰富、分布广泛、生长速度快、生产时间短、很容易定居在人工结构上等特性,常作为潜在的生物指示种^[40];口足类是底栖礁石的驻留者,可用于指示特定地区珊瑚礁的健康程度^[29]。但是,这类生物对污染物和有毒物的敏感程度不同,对环境的指示作用也常局限在少数分类学基础和自然历史调查基础较好的温带地区。

3.3 底栖鱼类

鱼类的环境指示作用主要表现在因食物链的富集作用而反应出的毒理特性上^[15]。鱼类对重金属具有较强的生物富集能力,常用来指示重金属污染,如鱼类肝脏可监测镉污染。近年来,鱼类的生理生化指

标如细胞色素P4501A1、金属硫蛋白和DNA加合物等均用来指示栖居地类型、海洋环境污染状况^[41]和人类扰动对环境的影响^[42]。阿拉伯黑鳍蝴蝶鱼(*Chaetodon melapterus*)可作为捕鱼压力较低区域的指示种^[43];另外,蝴蝶鱼还可为珊瑚礁的退化提供早期预警信号^[29],在亚洲,蝴蝶鱼已被纳入珊瑚礁监测工程^[44,45],并写入监测手册^[46]。除个体和种群水平上外,鱼类群落变化还可用以指示大尺度下的生态环境质量状况^[47]。

3.4 环节动物

环节动物常用来指示海洋有机污染。1955年,美国科学家首先提出以颤蚓类个体数作为水质评价的指标,小头虫也于1916年首先用于指示海洋环境污染^[48]。随后,人们通过观察和记录环境中小头虫的栖息密度、生物量、生长速率及核酸组成等变化来判断环境质量状况^[49]。20世纪60年代,我国就开展小头虫指示作用的研究,发现其可作为海洋严重污染状况下的指示种^[50]。20世纪80年代在研究中发现毛轮沙蚕(*Ophryotrocha puerilis*)也可用作海洋环境污染的指示种^[51]。近年来,学者们通过测定沙蚕(*Nereis diversicolor*)、沙蠅(*Arenicola marina*)等环节动物组织内的重金属含量来指示沉积物中的重金属污染^[3,52]。此外,多毛类多为环境耐污种,其出现或者所占群落比例的上升意味着底栖群落受到一定的扰动^[53~55],这种扰动本身即可指示生态环境质量变化。

3.5 棘皮动物和腔肠动物

腔肠动物海葵的发育和身体特征可指示PAH和重金属污染,同时亦可响应由近岸海域资源开发带来的环境质量演变^[56],而棘皮动物梅氏长海胆(*Echinometra mathaei*)也作为捕捞程度较弱地区的环境指示种^[43]。另外,棘皮动物多为敏感种,其群落指标的降低、优势地位的比例下降也常被认为是生境质量变差的标志^[53~55]。

4 底栖生物指数

研究大型底栖动物群落的环境指示作用,首先应了解大型底栖动物群落指标特征及其变化。指标可以是有机体,也可以是有机体的一部分,或者是包含环境质量信息的一系列有机体^[57],如生物量、栖息密度、多样性指数等。指标的优势在于可以评估系统状态,也可以评估环境保护措施的效率^[27],但却无法反映生物的完整性信息,也不利于非专业人士理解执行^[9]。

底栖生物指数建立在生物指标(indicator)之上,

将生态系统中的各种元素提炼成单一的数值,并整和相关生态信息全面地展示生物完整性状况,描述综合压力对环境的影响,评价生态环境质量现状。一个合理的生物指数必须与生物完整性相关(relevance to ecological integrity),适用广泛(broad scale applicability),可行性高(feasibility of implementation),具有明确的参考状态(Interpretability against reference conditions),能检测早期的环境退化(early detection capacity)并响应引起生态系统退化的环境压力(linking ecosystem degradation to its causative stressors)^[12]。

4.1 底栖生物指数的分类

每位学者对生物指数的分类标准不尽相同。从指数采用指标的数量上来看,生物指数分为3大类^[58]:①单变量个体-物种资料或群落结构参数指标,如丰度/生物量比较曲线(ABC曲线)、香农-维纳生物多样性指数(Shannon-Wiener多样性指数);②多个指标,结合群落压力响应指标融合成单个指数,如AZTI海洋生物指数(AMBI)、底栖生物完整性指数(B-IBI)等64种^[58];③描述聚类模式的多变量方法,包括模型,如底栖响应指数^[53]、多维尺度分析^[22]、典范对应分析(CCA分析)^[59]、多元AZTI海洋生物指数(M-AMBI)等^[60,61]。

从指数建立依据的群落特征来看^[12],可分为4大类:①基于特定物种功能或结构属性的生物指数,如单生物指标(FSS-Bi),多元生物指标(FSS-MBk)等。单变量生物指数的评价结果易于量度和解释,却无法检测环境的早期扰动,也无法指示诱因压力的信息。多变量指数可以监测早期扰动且有助于连接生物退化及其诱因压力,但却无法充分反映整个生态系统的完整性;②基于群落指标的生物指数。这类指数建立在一个或多个群落指标上,如香农-维纳多样性指数、AMBI(栖息密度)、M-AMBI(多样性指数、物种数、栖息密度)、摄食均匀度指数(j_{FD})等^[62]。这类指数均能反映整个生态系统状况,但对自然因素或方法学的依赖性较强^[63~65],对数据的统一性要求也较高。同时,该类指数对生物分类学基础的要求也较高;③基于群落功能参数的生物指数。此类指数建立在初级生产力等单个指标上或生态网络(ecological network)和热动力学概念(thermodynamic concepts)上,能够准确反映生态系统完整性,但可行性较差;④基于不同生物群落信息的集成指数。这类指数较好地解释多元压力的相互作用,能加深对生态系统的认识,但会受到各个指数缺陷的制约,且花费较高、技术难度较大,也需要各研究单位的配合,可操作

性较差。

4.2 底栖生物指数的应用

目前,在欧盟和美国的推动下,世界上常用的生物指数主要有AMBI、M-AMBI、B-IBI、BTA^[66]、 j_{FD} ^[62,67]等。这些指数能够响应多种环境压力,客观地评价生态环境质量^[68,69],已在世界各地得到较为成功的应用。

相比国外,我国于20世纪80年代引入生物多样性指数来评估淡水藻类对白洋淀水域污染的评价状况^[70],ABC曲线则于1992年开始用于厦门湾底栖生物群落受扰动状况评价^[71]。目前来看,我国多是引入国外较为成熟的指数来评价生态环境质量,如物种多样性指数、ABC曲线^[72]、AMBI^[73]、B-IBI^[2,74]等。值得注意的是,蔡立哲^[2]在ABC曲线的基础上建立大型底栖动物污染指数(MPI),将图形数字化,评价结果比ABC法更符合实际,目前已成功应用于评价厦门湾的生态环境质量。总的来看,我国在新指数的发展和应用研究方面,因起步较晚、资料短缺等诸多因素的制约,仍落后于欧美国家。目前,Shannon-Wiener多样性指数和ABC曲线法仍是我国海洋底栖生物群落环境指示作用研究的主要方法。尽管我国在研究中引用了新的指数,如AMBI^[75~77]、M-AMBI^[76,77]、B-IBI^[74]、摄食均匀度指数^[67],但在指数的应用过程中也出现较多问题^[2],因此需要进一步地研究使之能够更准确地指示我国海洋生态环境质量状况。

5 展望

目前国际上在生物指示作用方面的研究已比较成熟,并已开发数百种指数来表征大型底栖动物群落对人为压力的响应。而我国则还存在着一些不足,如有关群落功能特征方面的研究较为匮乏、生物评价基本依赖国外已有的指数或方法等。因此,现阶段我国应加强野外观测平台的建设,筛选合适的生物评价指标,建立适用于我国海域特征的生物评价指数体系,为提高环境管理者的科学决策水平、维护近海生态系统健康提供科学依据,同时为完善我国近海生态系统生态质量状况评价体系提供扎实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 范振刚. 海洋环境质量生物学指标的研究——潮间带生物群落结构[J]. 环境科学, 1978, 6: 37-42.
Fan Z G. Studies on the biological indicator of marine environmental quality—organic community structure in the intertidal zones[J]. Environmental Science, 1978, 6: 37-42.

- [2] 蔡立哲. 河口港湾沉积环境质量的底栖生物评价[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.
- [3] Phillips D J H. The use of biological indicator of organisms to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments—A review[J]. *Environment Pollution*, 1977, 13: 281-317.
- [4] 吴玉霖, 崔可铎, 赵儒鸿, 等. 渤海无脊椎动物体内痕量金属含量的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1986, 17(6): 539-547.
Wu Y L, Cui K D, Zhao R H, et al. Studies on trace metal concentrations in invertebrate from Bohai Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1986, 17(6): 539-547.
- [5] Hodkinson I D, Jackson J K. Terrestrial and aquatic invertebrates as bioindicators for environmental monitoring, with particular reference to mountain ecosystems [J]. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 649-666.
- [6] NRC (National Research Council). *Ecological Indicators for the Nation*[M]. Washington D C: National Academy Press, 2000.
- [7] Birk S, Bonne W, Borja Á, et al. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 31-41.
- [8] Borja Á, Dauer D, Diaz R, et al. Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: A comparison of three indices [J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(4): 395-403.
- [9] Dauvin J C. Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 271-281.
- [10] Hoey G V, Permuy D C, Vandendriessche S, et al. An ecological quality status assessment procedure for soft-sediment benthic habitats: Weighing alternative approaches [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 25: 266-278.
- [11] Diaz R J, Solan M, Valente R M. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 73(3): 165-181.
- [12] Martinez-Crego B, Alcoverro T, Romero J. Biotic indices for assessing the status of coastal waters: A review of strengths and weakness [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(5): 1013-1028.
- [13] Borja A, Dauer D M, Gremare A. The importance of setting targets and reference conditions in assessing marine ecosystem quality [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 12(1): 1-7.
- [14] McGeoch M A. The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1998, 73(2): 181-201.
- [15] 白树猛, 田黎. 指示生物在海洋污染监测中的应用 [J]. *海洋科学*, 2010, 34(1): 80-83.
Bai S M, Tian L. Application of organisms in marine pollution monitoring [J]. *Marine Science*, 2010, 34(1): 80-83.
- [16] Phillips D J H. Organochlorines and trace metals in green-lipped mussels *perna viridis* from Hong Kong waters: A test of indicator ability [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1985, 21: 251-258.
- [17] Beliaeff B, Pelletier D. A general framework for indicator design and use with application to the assessment of coastal water quality and marine protected area management [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2011, 54(1): 84-92.
- [18] 杨金鹏, 姜勇, 胡晓钟. 青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1703-1712.
Yang J P, Jiang Y, Hu X Z. The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1703-1712.
- [19] 曾丽璇, 陈桂珠, 余日清, 等. 水体重金属污染生物监测的研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2003, 15(3): 12-15.
Zeng L X, Chen G Z, Yu R Q, et al. Review of biological monitoring about water heavy metal pollutants [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2003, 15(3): 12-15.
- [20] 浩云涛, 李建宏, 潘欣, 等. 椭圆小球藻 (*Chlorella ellipsoidea*) 对 4 种重金属的耐受性及富集 [J]. *湖泊科学*, 2001, 13(2): 158-162.
Hao Y T, Li J H, Pan X, et al. Tolerance of *Chlorella ellipsoidea* and its removal of heavy metals [J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 13(2): 158-162.
- [21] Pearson T H, Rosenberg R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of marine environment [J]. *Oceanography and Marine Biology Annual Review*, 1978, 16: 229-311.
- [22] Clarke K R, Warwick R M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation* [M]. 2nd edition. Plymouth: Primer-E Ltd, 2001.
- [23] 何明海. 利用底栖生物监测与评价海洋环境质量 [J]. *海洋环境科学*, 1989, 8(4): 49-54.
He M H. Monitoring and evaluating marine environ-

- mental science using macrobenthos[J]. Marine Environmental Science, 1989, 8(4): 49-54.
- [24] 周名江, 颜天. 中国海洋生态毒理学的研究进展[J]. 环境科学研究, 1997, 10(3): 1-6.
Zhou M J, Yan T. Progress in marine eco-toxicology study in China [J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(3): 1-6.
- [25] Morillo J, Usero J, Gracia I. Biomonitoring of trace metals in a mine-polluted estuarine system (Spain) [J]. Chemosphere, 2005, 58: 1421-1430.
- [26] Rainbow P S. Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31(4): 183-192.
- [27] Bourgoin B P. *Mytilus edulis* shell as a bioindicator of lead pollution: Considerations on bioavailability and variability [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 61(3): 253-262.
- [28] Nakhlé K F, Cossa D, Khalaf G, et al. *Brachidontes variabilis* and *Patella* sp. as quantitative biological indicators for cadmium, lead and mercury in the Lebanese coastal waters [J]. Environmental Pollution, 2006, 142(1): 73-82.
- [29] Linton D M, Warner G F. Biological indicators in the Caribbean coastal zone and their role in integrated coastal management [J]. Ocean & Coastal Management, 2003, 46(3-4): 261-276.
- [30] Rodríguez J G, Rouget P, Franco J, et al. Evaluation of the use of transplanted *Nassarius reticulatus* (Linnaeus, 1758), in monitoring TBT pollution, within the European Water Framework Directive [J]. Ecological Indicators, 2010, 10(4): 891-895.
- [31] Tanabe S, Subramanian A. Bioindicators Suitable for Monitoring POPs in Developing Countries [M]. Japan: Center for Marine Environmental Studies (CMES), Ehime University, 2003: 130.
- [32] Volety A K, Savarese M, Tolley S G, et al. Eastern oysters (*Crassostrea virginica*) as an indicator for restoration of Everglades ecosystems [J]. Ecological Indicators, 2009, 9: 120-136.
- [33] Valdez Domingos F X, Azevedo M, Silva M D, et al. Multibiomarker assessment of three Brazilian estuaries using oysters as bioindicators [J]. Environmental Research, 2007, 105(3): 350-363.
- [34] 谭燕翔, 苏步青, 李秀荣, 等. 利用毛蚶作为海湾汞污染的指示生物 [J]. 环境科学, 1982, 3(1): 21-24.
Tan Y X, Su B Q, Li X R, et al. Using *Scapharca subcrenata* as the indicator for Hg pollution in the bay [J]. Environmental Science, 1982, 3(1): 21-24.
- [35] 汤丽, 刘青坡, 施华宏, 等. 厦门海域岩相海岸带疣荔枝螺 (*Thais clavigera*) 与甲虫螺 (*Cantharus cecillei*) 性畸变 [J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4640-4647.
Tang L, Liu Q P, Shi H H, et al. Imposex of *Thais clavigera* and *Cantharus cecillei* in the coastal waters of Xiamen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4640-4647.
- [36] 安立会, 郑丙辉, 付青, 等. 以梭鱼金属硫蛋白基因表达检测海洋重金属污染 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1383-1389.
An L H, Zheng B H, Fu Q, et al. Metallothionein mRNA expression in wild redeye mullet (*Liza Haematochela*) for monitoring marine heavy metal pollution [J]. China Environmental Science, 2011, 31(8): 1383-1389.
- [37] Oosterom J v, King S C, Negri A, et al. Investigation of the mud crab (*Scylla serrata*) as a potential bio-monitoring species for tropical coastal marine environments of Australia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 60(2): 283-290.
- [38] Schlacher T A, de Jager R, Nielsen T. Vegetation and ghost crabs in coastal dunes as indicators of putative stressors from tourism [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 284-294.
- [39] Ireland M P. Variations in the zinc, copper, manganese and lead content of *Balanus balanoides* in Cardigan Bay, Wales [J]. Environmental Pollution, 1974, 7(1): 65-75.
- [40] Guerra-Garcia J M, Garcia-Gomez J C. The spatial distribution of Caprellidea (Crustacea: Amphipoda): A stress bioindicator in Ceuta (North Africa, Gibraltar area) [J]. Pubblicazioni Della Stazione Zoologica Di Napoli I, Marine Ecology, 2001, 22(4): 357-367.
- [41] 李慧蓉. 生物监测技术及其研究进展 [J]. 江苏石油化工学院学报, 2002, 14(2): 57-60.
Li H R. Biological monitoring technology and its progress in research [J]. Journal of Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, 2002, 14(2): 57-60.
- [42] Oehman M C, Rajasuriya A, Svensson S. The use of Butterflyfishes (Chaetodontidae) as bio-indicators of habitat structure and human disturbance [J]. Ambio, 1998, 27(8): 708-716.
- [43] Valavi H, avaria A, Yavari V, et al. Coral reef anthropogenic impact bioindicators in the northern part of the Persian Gulf [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2009, 7(3): 215-227.
- [44] Nash S V. Reef diversity index survey method for special lists [J]. Tropical Coastal Area Management, 1989, 4: 14-17.
- [45] White A T. *Chaetodon* occurrence relative to coral reef

- habitat in the Philippines with the implication for reef assessment[J]. Proc 6th Int Coral Reef Symp 2, 1998; 427-432.
- [46] Crosby M P, Reese E S. A Manual for Monitoring Coral Reefs with Indicator Species; Butterflyfishes as Indicators of Change on Indo-Pacific Reefs [R]. Silver Spring, MD: Office of Ocean and Coastal Resource Management, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1996; 45.
- [47] Jordan S J, Lewis M A, Harwell L M, et al. Summer fish communities in northern Gulf of Mexico estuaries: Indices of ecological condition [J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 504-515.
- [48] Reish D I. A discussion of the importance of screen size in washing quantitative marine bottom samples [J]. Ecology, 1985, 46(2): 307-309.
- [49] Foss H E, Forbes V E. Effects of the polycyclic aromatic hydrocarbon fluoranthene on growth rate and nucleic acid composition of *Capitella* sp. 1 [J]. Marine Biology, 1997, 129(3): 489-497.
- [50] 吴宝铃. 小头虫的亚种分化及其生态特点 [J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(3): 260-271.
- Wu B L. Subspecific differentiation and ecological characteristics of *Capitella Capitata* (Fabricius, 1780) (Polychaeta, Capitellidae) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1964, 6(3): 260-271.
- [51] 吴宝铃. 中国海首次发现的海洋污染研究实验动物——毛轮沙蚕 [J]. 环境科学学报, 1981, 1(2): 1703-1712.
- Wu B L. Test animal (*Ophryotrocha puerilis* Claparède et Metschnikov) for the study of marine pollution in the China Sea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1981, 1(2): 1703-1712.
- [52] 孙福红, 周启星. 沙蚕耐污染的特征及机理研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 530-534.
- Sun G H, Zhou Q X. Research advance in characteristics and mechanisms of *Nereis diversicolor* endurance against environmental pollution [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 530-534.
- [53] 蔡文倩, 刘录三, 乔飞, 等. 渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 [J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3098-3013.
- Cai W Q, Liu L S, Qiao F, et al. Study on the changes of macrobenthos communities and their causes in Bohai Bay [J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3098-3013.
- [54] 刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 等. 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨 [J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 134-145.
- Liu L S, Zheng B H, Li B Q, et al. Long-term trends of macrobenthos in Changjiang Estuary, China in relation to environmental changes [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(3): 134-145.
- [55] 刘录三, 孟伟, 郑丙辉, 等. 辽东湾北部海域大型底栖动物研究: I. 种类组成与数量分布 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 118-123.
- Liu L S, Meng W, Zheng B H, et al. Studies on macrobenthos in the northern waters of Liaodong Bay: I. Species composition and number distribution [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(6): 118-123.
- [56] Winston G W, Heffernan L M. Development an characterization of Sea Anemones as Bioindicators of Offshore Research Exploitation and Environmental Impact. U. S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service. Gulf of Mexico OCS Region [R]. New Orleans, Louisiana; OCS Study MMS 99-0037, 1999.
- [57] Markert B, Wappelhorst O, Weckert V, et al. The use of bioindicators for monitoring the heavy-metal status of the environment [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1999, 240(2): 425-429.
- [58] Borja A, Dauer D M. Assessing the environmental quality status in estuarine and coastal systems; Comparing methodologies and indices [J]. Ecological Indicators, 2008, 8(4): 331-337.
- [59] ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows—Software for Canonical Community Ordination (Version 4) [M]. Ithaca, NY; Microcomputer Power, 1984.
- [60] Borja A, Franco J, Valencia V, et al. Implementation of the European Water Framework Directive from the Basque Country (northern Spain): A methodological approach [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48(3-4): 209-218.
- [61] 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 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 55(1-6): 16-29.
- [62] Gamito S, Patricio J, Neto J, et al. Feeding diversity index as complementary information in the assessment of ecological quality status [J]. Ecological Indicators, 2012, 19: 73-78.
- [63] Reiss H, Kröncke I. Seasonal variability of benthic indices; An approach to test the applicability of different indices for ecosystem quality assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(12): 1490-1499.
- [64] de Paz L, Patricio J, Marques J C, et al. Ecological status assessment in the lower Eo estuary (Spain). The

- challenge of habitat heterogeneity integration: A benthic perspective[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(7):1275-1283.
- [65] Weisberg S B, Word J Q, Velarde R G, et al. The level of agreement among experts applying best professional judgment to assess the condition of benthic infaunal communities[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(4):389-394.
- [66] Lerberg S B, Holland F, Sanger D M. Responses of tidal creek macrobenthic communities to the effects of watershed development [J]. *Estuaries*, 2000, 23(6):838-853.
- [67] Peng S T, Zhou R, Qin X B, et al. Application of macrobenthos functional groups to estimate the ecosystem health in a semi-enclosed bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74:302-310.
- [68] Pinto R, Patricio J, Baeta A, et al. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 9(1):1-25.
- [69] Borja A, Barbone E, Basset A, et al. Response of single benthic metrics and multi-metric methods to anthropogenic pressure gradients, in five distinct European coastal and transitional ecosystems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(3):499-513.
- [70] 孙彦华, 陈青山. 从淡水藻类评价白洋淀几个水域的污染[J]. *河北大学学报:自然科学版*, 1982(2):21-28.
Sun Y H, Chen Q S. Evaluating the Baiyangdian watershed pollution using the freshwater algae[J]. *Journal of Hebei University: Nature Science*, 1982(2):21-28.
- [71] 李荣冠, 江锦祥. 应用栖息密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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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*, 2007, 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*, 2007, 30(1):242-247.
- [75] 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.
- [76] 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 等. Assessing benthic ecological status in stressed Liaodong Bay (China) with AMBI and M-AMBI[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(3):482-492.
- [77] 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.

(责任编辑:米慧芝)