

基于底栖生物指数的辽东湾生态质量状况评价

蔡文倩^{1,2}, 周娟^{1,2}, 林岚璇^{1,2}, 王瑜^{1,2}, 夏阳^{1,2}, 刘录三^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 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)

摘要: 以 2007 年 7 月辽东湾近岸海域获取的大型底栖动物样品和环境参数数据为基础, 首次将 *W*-statistic 应用于该海域的生态质量状况评价, 并结合 Shannon-Wiener 生物多样性指数及底栖生物完整性指数的评价结果全面分析其生态质量状况。结果表明, 大多数离岸海域取样点的生态环境质量状况以轻度干扰为主, 而北部河口区(如大辽河口、双台子河口)则以重度干扰为主, 且沿河口区向外有明显的空间梯度。这跟入海河流携带大量的营养盐入湾从而导致河口区富营养化程度较高有关。各指数均能较为敏感地响应富营养化的空间梯度变化, 且与富营养化指数显著相关; 同时, 3 个指数之间呈显著的相关关系, 能辨析北岸河口区组与近岸海域组的大型底栖动物群落显著性差异, 适用于评价辽东湾的生态质量状况。

关键词: 大型底栖动物; 底栖生物指数; 生态质量状况评价; 辽东湾

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)10-0105-08
doi: 10.11759/hyxx20160115003

探明人为压力对海洋生态环境的影响, 评价海洋生态系统完整性和健康状况, 恢复退化的栖居地, 已成为全世界共同关注的焦点^[1]。作为生态系统的重要组成部分之一, 大型底栖动物种类丰富且易于收集, 对海底环境的扰动敏感而深刻^[2], 被认为是衡量人为压力最敏感、最合适的生物^[3]。建立在其群落水平上的生物指数因为能较为全面地展示生物完整性状况, 描述综合压力对环境的影响。目前, 在欧盟和美国的推动下, 世界上常用的生物指数主要是建立在群落结构上的指数^[4], 这些指数能够响应多种环境压力, 已广泛用于世界各地的海洋生态质量状况评价^[5]。

与国内其他河口海湾相似, 辽东湾的生态质量状况评价也大致始于 20 世纪 80 年代、90 年代, 基本是通过分析海域内的大型底栖动物群落结构来指示其生态质量状况^[6]。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、丰度/生物量曲线(Abundance and Biomass curves, ABC 曲线)、AZTI 海洋生物指数^[7-8]。近年来, 也有学者采用河口生态系统健康状况综合指数对双台子河口、大辽河口的生态质量状况进行评价, 并指示两个河口均处于亚健康状态^[9-10]。目前来看, 辽东湾海域建立在大型底栖动物群落基础上的生态质量状况评价基本以上述成熟的指数为主, 且缺乏不同指数间的适用性

比较。

本研究拟采用国内外普遍使用的生物多样性指数、*W*-statistic(ABC 曲线的数字化)及底栖生物完整性指数(Benthic Index of the Biotic Integrity, B-IBI)对辽东湾的生态质量状况进行评价, 并将这 3 类指数的评价结果进行比较以验证它们在辽东湾的适用性, 为我国近岸海域生态质量状况评价体系中指数的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域位于北纬 40°12′~40°48′, 东经 120°54′~122°12′之间(图 1), 主要分布在辽东湾北部近岸海域。随着沿岸城市经济的快速发展, 大量的污染物随

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41406160); 国家环保公益性行业科研专项(201309007)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406160; State Environmental Protection, research and public service industry, No. 201309007]

作者简介: 蔡文倩(1986-), 女, 河南鹿邑人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生物监测与评价, 电话: 010-84918794, E-mail: caiwq@craes.org.cn; 刘录三(1975-), 通信作者, 男, 山东莒县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为水生生物监测与评价, 电话: 010-84915316, E-mail: liuls@craes.org.cn

河流入海^[11], 为辽东湾生态环境质量带来严重的危害。其中, 北部河口区作为污染最严重的区域, 其主要污染物有无机氮、活性磷酸盐等等^[12-13], 导致该区域营养盐含量严重超标^[14], 富营养化严重, 赤潮频发^[15]。

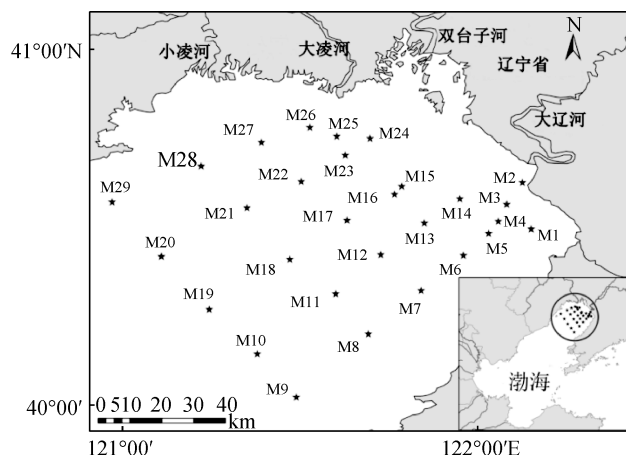


图1 2007年7月航次辽东湾采样示意图(改自参考文献[8])
Fig. 1 Sampling stations in Liaodong Bay in July 2007 (revised from References [8])

1.2 野外样品采集与室内分析

为监测辽东湾的生态质量状况, 兼顾水深及盐度梯度变化, 采用方格式布点方法在该海域设置了5个断面29个点位, 并于2007年7月下旬进行大型底栖动物样品及环境数据的采集工作。

使用0.05 m²的箱式采泥器取样, 每个站位成功取样2次合为1个样品, 随后在1 mm孔径的套筛中对大型底栖生物进行冲洗筛选, 按形体大小及软硬程度将截留在筛网内的动物分拣入盛有海水的器皿中, 难挑选的生物连同余渣带回实验室在解剖镜下挑选。生物标本一律用75%乙醇固定保存, 并带回实验室进行种类鉴定、栖息密度及生物量(湿重)计算等工作(GB/T 12763.6-2007)。

调查中借助YSI现场测定水深、温度、浊度、溶解氧及pH等环境参数。现场采集表层和底层水样, 现场冷藏保存并带至实验室测定水体中的营养盐及化学需氧量等环境参数。采集方法详见GB 17378.4, 测定方法详见《水和废水测定方法》。

1.3 生物指数及环境压力指数

1.3.1 H'

H' 的分级标准为: 等于0, 无大型底栖动物, 生态环境严重干扰; 0~1, 重度干扰; 1~2, 中度干扰; 2~3, 轻度干扰; 大于3, 未受干扰^[16]。计算公式为:

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

式中, S 为样方中的种数; P_i 为样方中的第 i 种所占的比例。

1.3.2 W -statistic

W -statistic 取值区间为(-1, 1), 其数值趋近于+1时, 表明群落仅有一个绝对优势种, 反之则反^[17]。负值代表生态环境重度干扰, 正值代表未受干扰, 而未采集到大型底栖动物时无 W -statistic 值(用“—”表示), 代表严重干扰。计算公式如下:

$$W\text{-statistic} = \sum_{i=1}^S (B_i - A_i) / [50(S-1)]$$

1.3.3 B-IBI

根据以往的研究结果^[18], 辽东湾属于高盐泥质(底层水盐度>18, 粉砂和粘土含量>40%)。该底质类型候选指标为: Shannon-Wiener 多样性指数、总生物量、总栖息密度、耐污种生物量百分比、敏感种生物量百分比、肉食性和杂食性动物密度百分比、5 cm深以下物种丰富度百分比等^[19-20]。

由于本研究未分层采样及食性的确定比较复杂, 去除“5 cm 深以下物种丰富度(或生物量)百分比”及“肉食性和杂食性动物密度百分比”指标^[21]。但为更全面地反映长江口及毗邻海域的生态环境质量状况, 本研究选择添加滤食种生物量百分比及总物种数2个指标^[21-22]。

在参考以往研究经验的基础上, 敏感种为日本倍棘蛇尾(*Amphioplus japonicus*)、中华倍棘蛇尾(*Amphioplus sinicus*)及日本浪漂水虱(*Cirolana japonensis*), 耐污种为刚鳃虫、细丝鳃虫(*Heteromastus filiformis*)、后指虫(*Laonice cirrata*)、岩虫(*Loimia medusa*)、纽虫(Nemertinea)、背蚓虫(*Notomastus latericeus*)、光滑河篮蛤、拟节虫(*Praxillella praetermissa*)及不倒翁虫(*Sternaspis scutata*)。滤食种全部选择双壳类。

选取生境质量较好的M11、M12、M13、M16、M18、M19、M21、M22、M25、M29等10个样点为参考点, 剩余的为受损点。阈值分级标准详见表1。

本文参考Diaz等^[23]设定的B-IBI评分标准: 分值: 5, 优; 3.0~4.9, 良; 2.7~2.9, 中等; 2.0~2.6, 差; 0.0~2.0, 劣。

1.3.4 环境压力指数

考虑到辽东湾承受的人类活动干扰类型^[11, 13-15, 24], 本研究采用富营养化指数(Eutrophication Index, EI)对该海域主要的环境压力进行表征, 并对生物指数响应环境压力的敏感程度进行适用性验证。EI具体计算方法参见邹景忠等^[25]。

表 1 辽东湾 B-IBI 指标的阈值分级标准

Tab. 1 Grading status for the thresholds of B-IBI indicators in Liaodong Bay

分值	5	3	1
总栖息密度(个/m ²)	50~65	40~50 或 65~80	<40 或>80
总生物量(g/m ²)	2.48~4.68	1.28~2.48 或 4.68~95.93	<1.28 或>95.93
Shannon-Weiner	>2.03	1.84~2.03	<1.84
滤食种生物量百分比(%)	1.48~30.23	0~1.48 或 30.23~62.50	<0 或>62.5
耐污种生物量百分比(%)	<0.42	0.42~7.41	>7.41
敏感种生物量百分比(%)	>8.80	0~8.80	<0
总物种数(个)	>9	7~9	<7

1.4 数据处理

本研究数据处理和分析主要采用英国普利茅斯海洋研究所开发的 PRIMER 6.0 及 SPSS 13.0 软件包中的相关程序进行,同时采用 Surfer 8.0 软件绘制平面分布图(克里格插值法)。为了减少机会种对大型底栖动物群落结构的干扰,删除在总栖息密度中比例小于 1%的物种,但保留其中在任一站位的相对栖息密度大于 3%的物种^[7],再利用 PRIMER 软件绘制 ABC 曲线、提取 *W*-statistic 值。数据分析前,环境数据和生物指数经标准化后分别计算欧氏(Euclidean)距离以构建非相似性矩阵进行相关(RELATE)分析。采用 SPSS13.0 软件进行 Pearson 相关性分析、回归分析及单因素方差分析(one-way ANOVA), Pearson 相关分析及回归分析用以判断生物指数之间以及其与环境参数之间的相关性,并检测生物指数对辽东

湾河口区域其他区域生态环境质量差异的敏感性。

2 结果

2.1 各生物指数的空间分布

2.1.1 *H'*

超过 70%的样点的 *H'*值大于 2,大型底栖动物群落生物多样性较高,生态环境处于“未受干扰”和“轻度干扰”状态,这些样点基本分布在离岸海域(图 2)。同时,位于大辽河口附近海域的 M2 和 M15 未采集到底栖动物, *H'*值为 0,生态环境受到“严重干扰”(表 1)。剩余 8 个样点均处于“中度干扰”以上,且其基本分布在北岸河口区(表 2,图 2)。总体上,北岸河口区(如大辽河口、双台子河口)的底栖动物群落多样性最低,指示该处较差的生态环境质量,但沿河口区向外生态质量趋好(图 2)。

表 2 辽东湾 Shannon-Wiener 生物多样性指数值及其指示的生态质量状况

Tab. 2 Shannon-Wiener diversity index values and the corresponding ecological quality status in Liaodong Bay

采样点	<i>H'</i> (log ₂)	受干扰程度	采样点	<i>H'</i> (log ₂)	受干扰程度
M1	1.36	中度干扰	M16	2.92	轻度干扰
M2	0.00	严重干扰	M17	2.75	轻度干扰
M3	0.44	重度干扰	M18	3.39	未受干扰
M4	3.09	未受干扰	M19	2.75	轻度干扰
M5	2.52	轻度干扰	M20	3.42	未受干扰
M6	3.08	未受干扰	M21	3.03	未受干扰
M7	3.10	未受干扰	M22	2.65	轻度干扰
M8	2.81	轻度污染	M23	1.00	中度干扰
M9	2.52	轻度干扰	M24	1.92	中度干扰
M10	3.32	未受干扰	M25	2.85	轻度干扰
M11	3.12	未受干扰	M26	0.47	重度干扰
M12	2.86	轻度干扰	M27	3.08	未受干扰
M13	3.12	未受干扰	M28	1.92	中度干扰
M14	3.52	未受干扰	M29	2.93	轻度干扰
M15	0.00	严重干扰			

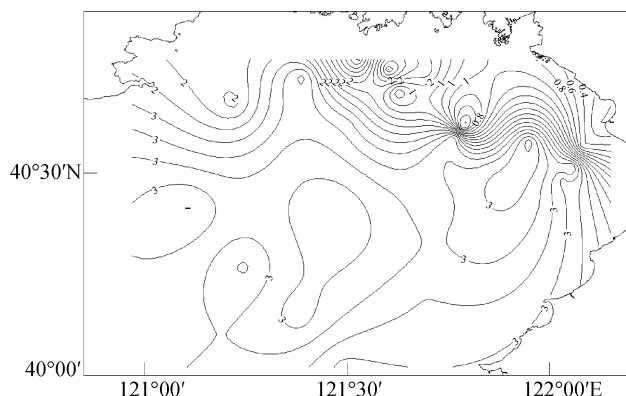


图2 辽东湾 Shannon-Wiener 生物多样性指数值空间分布示意图

Fig. 2 Spatial distribution pattern of the Shannon-Wiener index values in Liaodong Bay

2.1.2 *W*-statistic

除大辽河口附近的 M2 和 M15 站未采集到底栖动物, 大型底栖动物群落受到“严重干扰”, 无法提取出 *W*-statistic 值外, 该指数最高值出现在离岸较远的 M8 站, 生物群落处于“未受干扰”状态;

最低值则在大辽河口区的 M3 站, 生物群落处于“重度干扰”状态。剩余的 22 个样点中, 位于大辽河口的 M1、M3 及大凌河口的 M26 站的生物群落处于“重度干扰”状态, 其他 19 个样点均处于“未受干扰”状态(表 3)。总体上, *W*-statistic 高值区集中在离岸海域, 而低值区则主要集中在大辽河口、大凌河口等北部河流入海口区, 且沿河口区向外指数值趋低(图 3)。

2.1.3 B-IBI

10 个参考点中, 9 个样点的 B-IBI 取值区间为“3.0~4.9”, 生态环境质量状况为“良”, 仅有 1 个位于 2.7~2.9 之间, 为“中等”, 说明参考点设置合理。剩余 19 个受损点中, 10 个为“良”, 其余 9 个为“中等”以下状态(占比超过 40%)。整体上看, B-IBI 最高值出现于离岸海域的 M29 站, 生态环境质量状况为“良”, 而最低值则出现于大辽河口的 M2 站, 生态环境质量为“劣”。总体上看, B-IBI 指示的生态环境质量状况为“劣”的样点均位于北岸河口区(表 4), 且以大辽河口最低, 指示该处的生态环境质量最差, 但沿北岸河口区向外生态环境质量趋好(图 4)。

表 3 辽东湾 *W*-statistic 值及其对应的生态环境质量状况

Tab. 3 *W*-statistic values and the corresponding ecological quality status in Liaodong Bay

采样点	<i>W</i> -statistic	受干扰程度	采样点	<i>W</i> -statistic	受干扰程度	采样点	<i>W</i> -statistic	受干扰程度
M1	-0.25	重度干扰	M11	0.59	未受干扰	M21	0.36	未受干扰
M2	—	严重干扰	M12	0.57	未受干扰	M22	0.38	未受干扰
M3	-0.32	重度干扰	M13	0.51	未受干扰	M23	0.22	未受干扰
M4	0.60	未受干扰	M14	0.64	未受干扰	M24	0.15	未受干扰
M5	0.70	未受干扰	M15	—	严重干扰	M25	0.72	未受干扰
M6	0.53	未受干扰	M16	0.32	未受干扰	M26	-0.04	重度干扰
M7	0.53	未受干扰	M17	0.49	未受干扰	M27	0.43	未受干扰
M8	0.97	未受干扰	M18	0.62	未受干扰	M28	0.43	未受干扰
M9	0.45	未受干扰	M19	0.72	未受干扰	M29	0.38	未受干扰
M10	0.95	未受干扰	M20	0.69	未受干扰			

2.2 各生物指数与环境参数的关系

Pearson 相关分析及多元回归分析结果表明 *H'* 与深度、水体盐度、溶解氧、化学需氧量及营养盐等呈显著线性相关关系($R=0.696$, $F_{(1, 27)}=25.333$, $P<0.05$), RELATE 分析也表明两者之间显著相关($\rho=0.409$, $P<0.05$)。 *H'* 与表层水体内的富营养化指数(EI_{表层})呈显著线性负相关($R=-0.478$, $F_{(1, 27)}=7.974$, $P<0.05$), 与底层水的 EI 之间(EI_{底层})的相关性并不显著($P>0.05$)。 RELATE 分析表明 *H'* 与 EI_{表层} 显著相关($\rho=0.446$, $P<0.05$), 但与 EI_{底层} 的相关性并不显著

($P>0.05$)。

Pearson 相关分析及多元回归分析结果表明 *W*-statistic 与深度、水体盐度、溶解氧、化学需氧量及营养盐呈显著非线性相关关系($R=0.987$, $F_{(25, 3)}=4.576$, $P<0.05$), RELATE 分析也表明两者矩阵之间存在显著的相关关系($\rho=0.455$, $P<0.05$)。该指数与 EI_{表层} 呈显著线性负相关关系($R=-0.690$, $F_{(1, 27)}=24.494$, $P<0.05$), 而与 EI_{底层} 不存在显著的相关关系($P>0.05$)。 RELATE 分析则表明 *W*-statistic 与 EI_{表层} ($\rho=0.479$, $P<0.05$)及 EI_{底层} ($\rho=0.227$, $P<0.05$)矩阵均呈显著相关关系。

表 4 辽东湾 B-IBI 指示的生态环境质量状况

Tab. 4 Ecological quality status of each sampling station indicated by the B-IBI indicators in Liaodong Bay

采样点	B-IBI	生境质量	采样点	B-IBI	生境质量	采样点	B-IBI	生境质量
M1	1.86	劣	M11	3.86	良	M21	4.41	良
M2	1.57	劣	M12	3.29	良	M22	3.57	良
M3	1.86	劣	M13	3.29	良	M23	2.14	差
M4	3.86	良	M14	3.57	良	M24	1.57	劣
M5	3.00	良	M15	2.14	差	M25	3.57	良
M6	3.86	良	M16	2.71	中等	M26	1.86	劣
M7	3.86	良	M17	3.86	良	M27	3.57	良
M8	2.43	中等	M18	3.86	良	M28	2.14	差
M9	3.86	良	M19	3.29	良	M29	4.14	良
M10	3.57	良	M20	3.00	良			

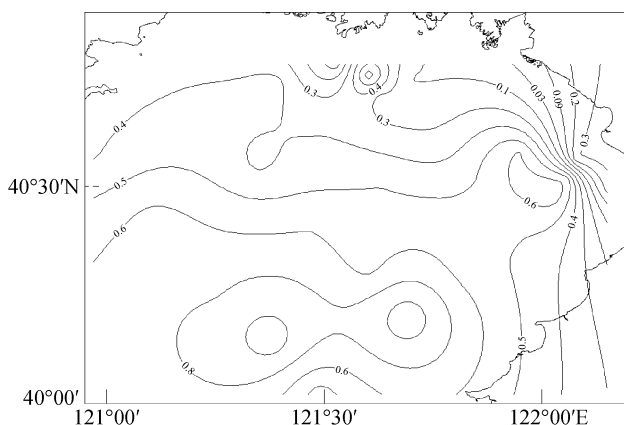


图 3 辽东湾 W -statistic 值空间分布模式示意图

Fig. 3 Spatial distribution pattern of the W -statistic values in Liaodong Bay

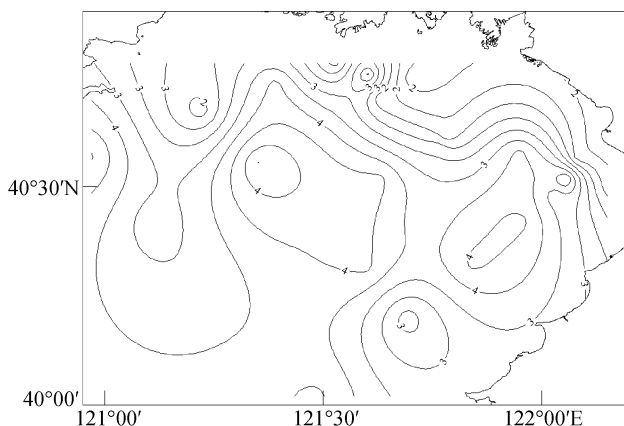


图 4 辽东湾 B-IBI 值空间分布模式示意图

Fig. 4 Spatial distribution pattern of the B-IBI values in Liaodong Bay

Pearson 相关分析表明, B-IBI 与深度、浊度, 表层和底层水体中的溶解氧和盐度均呈显著正相关, 而与表层及底层水体中的营养盐和化学需氧量呈显

著负相关($P < 0.05$)。多元回归分析表明, B-IBI 与环境参数呈显著线性相关($F = 13.52$, $P < 0.05$), RELATE 分析也表明两者矩阵之间呈显著相关($\rho = 0.297$, $P < 0.05$)。B-IBI 与 $EI_{\text{表层}}$ 之间呈显著线性负相关关系($F = 10.001$, $P < 0.05$), 与 $EI_{\text{表层}}$ 之间的相关性不显著($P > 0.05$); RELATE 分析则表明该指数与 $EI_{\text{表层}}$ ($\rho = 0.333$, $P < 0.05$)及 $EI_{\text{底层}}$ ($\rho = 0.227$, $P < 0.05$)矩阵均呈显著相关关系。

2.3 各生物指数在辽东湾生态质量状况评价中的适用性比较

由上文研究结果可知, 上述 3 类指数均能敏感地响应富营养化的空间梯度变化, 指示北部河口区的生态环境质量较差, 而离岸的较好。Pearson 相关分析表明这 3 类指数之间呈显著相关关系($P < 0.05$)。ANOVA 分析结果表明所有指数均能辨识出北岸河口区(M1~M5, M14~M15, M24~M27 等 11 个样点)及近岸海域(剩余的 18 个样点)大型底栖动物群落的显著性差异($df_1 = 1$, $df_2 = 27$, $P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 生物指数的空间分布状况分析

研究证实, 辽东湾北部海域的营养盐、COD、DO 沿河口区向离岸海域有明显的空间梯度^[13, 24], 且以大辽河口、双台子河口及小凌河口等最高^[24], 这与上述 3 类生物指数值的空间分布基本吻合。特别地, 受营口工业园排放的大量工农业和生活污水影响, 加上其自身相对封闭的自然地理特征, 大辽河口海域水体营养盐超标严重, 且呈现从河口内向近岸海域逐渐递减的空间分布趋势, 水体富营养化程度逐渐降低^[11, 26], 而上述 3 类指数均指示该海域调

查样点的生态质量状况为“劣”或“重度干扰”以上(如 M1~M3 站),说明这些指数均能指示北部河口区环境质量最差,且能敏感地响应辽东湾的环境压力梯度。事实上,这 3 类指数已被证实能指示渤海湾、厦门湾、长江口等典型海域面临的环境压力梯度^[21-22, 27-28],表征底栖群落对环境压力梯度的响应(如营养盐输入)^[28],亦如本研究所示。

3.2 生物指数对富营养化压力的响应分析

河流携带入海大量的营养盐(如 DIN)导致辽东湾近岸海域营养盐含量普遍较高,其中又以北部河口区(如大辽河)最高^[14],东南部和中部污染程度较低,水体富营养化程度也从近岸向海湾中部逐渐降低^[8, 26]。本研究中营养盐与上述 3 类生物指数之间的显著相关关系及两者较为一致的空间分布模式也印证了这一结论,说明这些指数均能较为敏感地响应辽东湾的富营养化压力。同时,富营养化会降低水体溶解氧浓度,从而对底栖动物群落产生较大的影响^[29]。本次调查中,大辽河口 M1 和 M2 站的溶解氧浓度分别为 2.59 和 3.64 mg/L,低于清洁水体正常水平的下限(5 mg/L),也证实了大辽河过度的陆源排污已造成河口区水体严重富营养化影响了栖居于此大型底栖动物,如各指数在该处的低值所示。

3.3 生物指数在辽东湾的适用性分析

由上文可知,辽东湾的富营养化程度较高,北部河口区尤为严重^[30],各生物指数均能辨析河口区与近岸海域的底栖生物群落差别及它们与 EI 之间的显著相关关系所示。然而,多样性指数与底层水体的 EI 无显著相关关系,可能与 M3、M15 样点底层环境参数值缺失, EI 在克里格插值基础上得来(ArcGIS 9.0)^[8],从而影响了整体相关分析结果有关。此外,盐度、溶解氧、深度等是影响辽东湾底栖动物群落结构的主要环境参数^[7],而本研究中它们与各生物指数之间的显著相关关系也验证了此结论。各指数均能响应辽东湾大型底栖动物群落指标的空间分布格局及变化,即河口区低且沿河口向外逐渐升高^[31]。事实上,严重的富营养化已使得辽东湾大型底栖动物群落发生较大改变,如北部河口区的群落生物多样性和丰富度显著降低,敏感种逐渐失去优势而机会种逐渐增多^[31],如上述 3 类指数在该海域的低值所示。

3.4 生物评价方法的选用

Shannon-Wiener 多样性指数的普适性较强^[7, 28],但无法辨析自然和人为压力干扰,建议最好用于河

口海湾底栖动物群落特征研究,或作为其他指数如 B-IBI 的指标使用。ABC 曲线及其数字化即 *W*-statistic 可用于描述海洋生态系统的底栖生物群落受扰动状况^[7, 28, 32],但在高强度干扰的海域(如渤海湾大量的围海造陆工程)^[28],群落结构较为脆弱的情况下,最好结合其他指数使用^[28]。由于参考状态设置充分、考虑的群落指标较多, B-IBI 可作为河口海湾的底栖生态质量状况评价的优选方法^[21-22]。

4 结论

(1) Shannon-Wiener 生物多样性指数、*W*-statistic 及 B-IBI 评价结果均能敏感地响应研究区的环境压力梯度变化(主要是富营养化压力),指示北岸河口区尤其是大辽河口、双台子河口等的生态质量较差,离岸海域生态质量状况良好。

(2) 各生物指数之间呈显著相关关系,且能辨析北岸河口区与近岸海域组别大型底栖动物群落的显著性差异,适用于辽东湾的生态质量状况评价。

参考文献:

- [1] Borja Á. Grand challenges in marine ecosystems ecology[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2014, 1: 1-6.
- [2] Pelletier M C, Gold A J, Heltshe J F, et al. A method to identify estuarine macroinvertebrate pollution indicator species in the Virginian Biogeographic Province[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(5): 1037-1048.
- [3] 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.
- [4] Pinto R, Patricio J, Baeta A. et al. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9: 1-25.
- [5] Borja A, Barbone E, Basset A, et al. Trayanova A. 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: 499-513.
- [6] 孙道元, 刘银城. 渤海底栖动物种类组成和数量分布[J]. *黄渤海海洋*, 1991, 9(1): 42-50.
Sun Daoyuan, Liu Yincheng. Species composition and quantitative distributions of biomass and density of the microbenthic infauna in the Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1991, 9(1): 42-50.
- [7] 刘录三, 孟伟, 李子成, 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 Lusan, Meng Wei, Li Zicheng, 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.
- [8] Cai W Q, Meng W, Zhu Y Z, et al. 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.
- [9] 杨福霞. 大辽河口生态系统健康评价指标体系与技术方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Yang Fuxia. Indicators and methods of ecosystem health assessment in Daliao River Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [10] 刘玉令. 双台子河口海域生态环境质量状况与生态系统评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
Liu Yuling. Research of marine ecological environment and ecosystem services in Shuangtaizi Estuary[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [11] 王焕松, 雷坤, 李子成, 等. 辽东湾北岸主要入海河流污染物入海通量及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 2011, 33(6): 110-116.
Wang Huansong, Lei Kun, Li Zicheng, et al. Analysis of major pollutants flux into the sea and influencing factors on the north shore of the Liaodong Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(6): 110-116.
- [12] Dong Z J, Liu D Y, Keesing J K. Jellyfish blooms in China: dominant species, causes and consequences[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(7): 954-963.
- [13] 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 等. 大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2010, 35(10): 3748-3754.
Yang Fuxia, Jian Huimin, Tian Lin, et al. Distribution characteristics of COD and DO and its influencing factors in the Daliaohe Estuary[J]. Environmental Science, 2010, 35(10): 3748-3754.
- [14] 周丹卉. 大辽河口典型污染物时空分布研究[J]. 环境保护与循环经济, 2015, 7: 52-54.
Zhou Danhui. Spatial and Temporal distributions of typical pollutants in Daliaohe Estuary[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2015, 7: 52-54.
- [15] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (MEPPRC). Report on the state of the environment in China [R]. Beijing: MEPPRC, 2008.
- [16] 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 Lizhe, Ma Li, Gao Yang, 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.
- [17] Clarke K R, Warwick R M. Chang in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edition: PRIMER-E[M]. UK: Plymouth Marine Laboratory, 2001.
- [18] 徐东浩, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积粒度分布特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 35-42.
Xu Donghao, Li Jun, Zhao Jingtao, et al. Grain-size distribution of surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai and sedimentary environment restoration[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(5): 35-42.
- [19] Weisberg S B, Ranasinghe J A, Dauer D M, et al. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay[J]. Estuaries, 1997, 20(1): 149-158.
- [20] Llansó R J, Dauer D M. Methods for calculating the Chesapeake Bay benthic index of biotic integrity (EB). <http://www.baybenthos.versar.com>. 2002.
- [21] 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 Lizhe. New methods studies on environmental quality assessment in bays and estuaries: using benthos[D]. Xiamen: Xiamen University, 2003.
- [22] 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 Xiaowei, Wang Liping, Zheng Binghui, 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.
- [23] Diaz R J, Cutter Jr G R, Dauer A M. A comparison of two methods for estimating the status of benthic habitat quality in the Virginia Chesapeake Bay[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 285-286: 371-381.
- [24] 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 等. 2004-2008 年辽东湾水质污染特征分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(8): 987-992.
Qin Yanwen, Zheng Binghui, Zhang Lei, et al. Pollution characteristics analysis of water quality in Liaodong Bay from 2004 to 2008[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(8): 987-992.
- [25] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学, 1983, 2(2): 41-45.
Zou Jingzhong, Dong Liping, Qin Baoping. Preliminary study on the eutrophication and red tide in Bohai Bay[J]. Marine Environmental Sciences, 1983, 2(2): 41-45.
- [26] 王焕松, 雷坤, 李子成, 等. 辽东湾海域水体富营养化的模糊综合评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 413-419.
Wang Huansong, Lei Kun, Li Zicheng, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water eutrophication in Liaodong Bay[J]. Research of Environmental Sciences,

- 2010, 23(4): 413-419.
- [27] 吴海燕, 陈克亮, 张平, 等. 基于不同生物指数的罗源湾生态环境质量状况评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 825-831.
Wu Haiyan, Chen Kelian, Zhang Ping, et al. Eco-environmental quality assessment of Luoyuan Bay, Fujian Province of East China based on biotic indices[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 825-831.
- [28] Cai W Q, Meng W, Liu L S, et al. Evaluation of the ecological status with benthic indices in the coastal system: the case of Bohai Bay (China)[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2014, 8(5): 737-746.
- [29] 王延明, 方涛, 李道季, 等. 长江口及毗邻海域底栖生物丰度和生物量研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(4): 366-382.
Wang Yanming, Fang Tao, Li Daoji, et al. Abundance and biomass of benthos in Changjiang Estuary and adjacent sea[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(4): 366-382.
- [30] Bu H M, Meng W, Zhang Y. Nitrogen pollution and source identification in the Haicheng River basin in Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(18): 3394-3402.
- [31] 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 Lusan, Meng Wei, Zheng Binghui, 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.
- [32] 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 Rongguan, Jiang Jinxiang. Monitoring the affection of marine pollution on macrobenthos community using the abundance/biomass comparison[J]. Acta Ocenologica Sinica, 1992, 14(1): 108-114.

Ecological quality status of Liaodong Bay using benthic indices

CAI Wen-qian^{1,2}, ZHOU Juan^{1,2}, LIN Kui-xuan^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, XIA Yang^{1,2}, LIU Lu-san^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Received: Jan. 15, 2016

Key words: macrozoobenthos; benthic indices; ecological quality status assessment; Liaodong Bay

Abstract: On the basis of the analysis of macrozoobenthos samples and environmental materials collected from Liaodong Bay in July 2007, *W*-statistic was used for the first time to assess the ecological quality status of the study area. In addition, Shannon-Wiener biodiversity index and Benthic Index of Biotic Integrity were employed to comprehensively analyze the ecological quality status of the area. The results of the analysis indicated that majority of the sampling sites in the offshore area were slightly disturbed; however, the areas located in the coastal areas, especially those in the Daliao River and Shuangtaizi River estuaries, were significantly disturbed and a spatial gradient was observed from the estuaries to the offshore area. This spatial pattern may have occurred because of the large amount of industrial and municipal wastewater being discharged every year from Liaoning Province into the Liaodong Bay through land streams, causing severe eutrophication in the northern coastal areas especially near the estuaries. Furthermore, all the indices exhibited sensitivity toward the spatial gradient of the Eutrophication Index (EI) and showed significant relations with EI. These relations were also observed among all the biotic indices that could identify the differences between the macrozoobenthos communities in the north estuaries group and those in the coastal areas group. It was concluded that all indices used in the study were suitable for assessing the ecological quality status in the Liaodong Bay.

(本文编辑: 康亦兼)