

福建省南部沿海东山湾和浮头湾潮下带春秋两季大型底栖动物的生态健康评估

许贻斌¹, 赵小雨², 蔡立哲^{2*}

(1. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361013; 2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘要: [目的] 东山湾和浮头湾是福建省南部沿海古雷半岛两侧的海湾, 古雷半岛石化基地的生产和东山湾漳州核电站的建设可能对两侧海湾生态环境产生影响。为评估两个海湾大型底栖动物群落分布特征和生态健康状况, 2020 年春季和秋季在东山湾和浮头湾潮下带进行大型底栖动物调查。[方法] 运用方差分析法、聚类分析法、非参数多变量排序法对东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物的物种数、栖息密度、生物量、多样性指数(H')、均匀度指数(J)、丰富度指数(d)、ATZI 海洋生物指数(AMBI)和多变量 AMBI(M-AMBI)8 种群落参数进行分析, 并运用相对重要性指数(IRI)分析了两个海湾、湾内和湾口的大型底栖动物优势种。[结果] 方差分析表明, 东山湾潮下带大型底栖动物栖息密度表现为湾内显著低于湾口($P < 0.05$), 而 J 为湾内显著高于湾口($P < 0.05$); 浮头湾潮下带大型底栖动物物种数、 H' 、 d 和 M-AMBI 均为湾内显著低于湾口($P < 0.05$)。聚类和多变量排序法分析表明东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物有两个主要群落, 第一个主要群落秋季取样站占比高, 第二个主要群落春季取样站占比高。IRI 分析表明东山湾和浮头湾的优势种存在季节和海区差异。3 种生物指数(H' 、AMBI 和 M-AMBI)的平均值均表明两个海湾春秋两季均处于受轻度扰动状态, 浮头湾湾口的生态健康状态优于湾内。[结论] 无论是春季还是秋季, 浮头湾潮下带大型底栖动物的物种数、 H' 、 d 和 M-AMBI 湾内均显著低于湾口($P < 0.05$)。东山湾和浮头湾大型底栖动物群落处于受轻度扰动状态, 浮头湾湾口的生态健康状态优于浮头湾湾内。

关键词: 大型底栖动物; 生态健康评估; 潮下带; 东山湾; 浮头湾

中图分类号: P714.5; Q959.192

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0403-10

Ecological health assessment of benthic macrofauna in the subtidal zone of Dongshan Bay and Futou Bay along the coast of southern Fujian Province in spring and autumn

XU Yibin¹, ZHAO Xiaoyu², CAI Lizhe^{2*}

(1. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China; 2. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: [Objective] Dongshan Bay and Futou Bay are located on both sides of Gulei Peninsula along the coast of southern Fujian Province. The development of the Gulei Peninsula petrochemical base and the construction of Dongshanwan Zhangzhou nuclear power plant may have an impact on the ecological environment of both bays. In recent years, the dismantling of the Bachimen seawall and

收稿日期: 2024-09-12 录用日期: 2024-11-05

基金项目: 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项(FJHY-ZYYH-2023-1-2); 福建省属公益类科研院所基本科研专项(2022R1013006); 国家重点研发计划(2018YFC1407501)

* 通信作者: cailizhe@xmu.edu.cn

引文格式: 许贻斌, 赵小雨, 蔡立哲. 福建省南部沿海东山湾和浮头湾潮下带春秋两季大型底栖动物的生态健康评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 403-412.

Citation: XU Y B, ZHAO X Y, CAI L Z. Ecological health assessment of benthic macrofauna in the subtidal zone of Dongshan Bay and Futou Bay along the coast of southern Fujian Province in spring and autumn[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 403-412. (in Chinese)



several aquaculture cages in Dongshan Bay has taken place, and the effectiveness of ecological restoration needs to be evaluated. To assess the distribution characteristics and ecological health status of macrobenthos communities in the two bays, macrobenthos surveys were conducted in the subtidal zones of Dongshan Bay and Futou Bay in the spring and autumn of 2020. [Methods] Eight parameters of the macrobenthos community were analyzed, including species number, density, biomass, diversity index (H'), evenness index (J), richness index (d), ATZI marine biological index (AMBI) and multivariate AMBI (M-AMBI). These parameters were analyzed by variance analysis, cluster analysis and non-metric multi-dimensional scaling (nMDS) analysis. The dominant species in the macrobenthos communities of the two bays, including the inner bay and estuarine zones, were analyzed using the relative importance index (IRI). [Results] Analysis of variance showed no significant difference between Dongshan Bay and Futou Bay in the eight community parameters of benthic macrofauna; species number, density, biomass, H' , J , d , AMBI, and M-AMBI. In Dongshan Bay, macrobenthos density in the inner bay was significantly lower than that in the estuary ($P < 0.05$), while J value in the inner bay was significantly higher than that in the estuary ($P < 0.05$). In Futou Bay, species number, H' , d and M-AMBI in the inner bay were all significantly lower than those in the estuary ($P < 0.05$). Cluster and nMDS analysis indicated the presence of two main macrobenthos communities in the subtidal zone of both bays. The first community had a higher proportion of sampling stations in autumn, while the second community had a higher proportion of sampling stations in spring. The IRI analysis showed seasonal and spatial variations in the dominant species of Dongshan Bay and Futou Bay. In both bays, the first dominant species was *Amaeana trilobata* in spring, but in autumn, it was *Notomastus latericeus* and *A. trilobata*, respectively. The first dominant species in Futou Bay in spring and autumn is *A. trilobata*, but the first dominant species in the inner bay and bay estuary of Dongshan Bay, and the bay estuary of Futou Bay was different in spring and autumn. The average values of the three biological indices (H' , AMBI and M-AMBI) showed that both bays were in a slightly disturbed state in both seasons, with the estuary of Futou Bay showing better ecological health than its inner bay. [Conclusion] In both spring and autumn, the number of macrozoobenthos species, H' , d and M-AMBI in the inner bay were significantly lower than those in the estuary of Futou Bay, while the multivariate marine biological index was significantly higher, indicating better ecological health in the estuary than the inner bay. These findings suggest that macrozoobenthos communities in Dongshan Bay and Futou Bay were in a slightly disturbed state, with the estuary of Futou Bay maintaining better ecological conditions than its inner bay.

Keywords: benthic macrofauna; ecological health assessment; subtidal zone; Dongshan Bay; Futou Bay

东山湾和浮头湾是福建省南部沿海古雷半岛两侧的海湾,湾形有所不同.东山湾位于福建省漳州市东山县、云霄县、漳浦县之间,呈不规则梨形伸入陆地,湾口朝南,是半封闭型海湾,海域总面积 247.89 km²,其中水域面积为 155.5 km²,是闽南最大的海湾.浮头湾是福建省南部沿海漳浦县的一个海湾,向南伸入东山湾,东望菜屿列岛,西与东山半岛对峙,北以林仓、新厝一线与杜浔相连.

由于东山湾的特殊地理位置,东山湾大型底栖动物群落早在 20 世纪 90 年代有较多报道,如潮下带多毛类的分布^[1]、潮下带前鳃类软体动物的生态^[2]、棘皮动物生态学研究^[3]、潮下带大型底栖生物群落及其环境影响评价^[4]、底栖生物生态研究^[5]等.浮头湾目前仅在闽江口以南近海底栖生物群落生态研究中涉及大型底栖动物群落^[6];在古雷半岛周边海域,春季大型底栖生物多样性现状研究则不仅涉及东山湾也涉及浮头湾^[7].

大型底栖动物是海洋生态系统的关键构成,大多数大型底栖动物易于采集,运动力弱,且对环境变化

极为敏感,因此大型底栖动物的物种数、栖息密度、生物量和优势种成为评估环境质量的群落参数^[4-5,8].基于大型底栖动物的生物指数被广泛应用于海湾生态评估,如香农-维纳(Shannon-Wiener)多样性指数(H')、丰富度指数(d)、ATZI 海洋生物指数(AMBI)和多变量 AMBI(M-AMBI)等^[9-12].

20 世纪 90 年代,东山湾潮下带大型底栖动物的研究仅涉及物种数、栖息密度和生物量,未涉及 H' 、均匀度指数(J)、 d 、AMBI 和 M-AMBI,也未涉及方差和非参数多变量排序法(nMDS)分析^[4-5],浮头湾潮下带则少有关大型底栖动物研究的报道.为此,本研究根据 2020 年春秋两季在东山湾 12 个取样站和浮头湾 10 个取样站获得的大型底栖动物数据,运用方差、聚类、nMDS 和相对重要性指数(IRI)分析东山湾和浮头湾 8 种大型底栖动物群落参数,包括物种数、栖息密度(ind/m², ind 表示个体数)、生物量(g/m²)、 H' 、 J 、 d 、AMBI 和 M-AMBI,旨在揭示东山湾和浮头湾大型底栖动物群落的时空分布特征,并评估两个海湾、湾内、湾口春秋两季的生态健康状态.

1 材料与方法

1.1 站位布设与取样

在东山湾和浮头湾分别设置 12 个和 10 个定量取样站,根据地形地貌和水深,分别将东山湾和浮头湾划分为湾内、湾口。全湾包括湾内和湾口取样站:处于湾内且水深 < 8 m 的取样站为湾内站,东山湾有 D1~D6、D8 和 D9,浮头湾有 F1~F6;处于湾口且水深 > 10 m 的取样站为湾口站,东山湾有 D7、D10~D12,浮头湾有 F7~F10(图 1)。

在 2020 年 5 月(春季)和 10 月(秋季)期间,用 0.05 m² 的抓斗式采泥器进行海上取样。每站重复取样 3 次,合并为一个样品;泥样经淘洗,用网孔 0.5 mm 套筛分选标本;所获样品用 7%(质量分数)甲醛固定后带回实验室,室内进行种类鉴定、个体计数和湿质量测定,具体操作参照《海洋调查规范》(GB 12763.6—2007)^[13]。

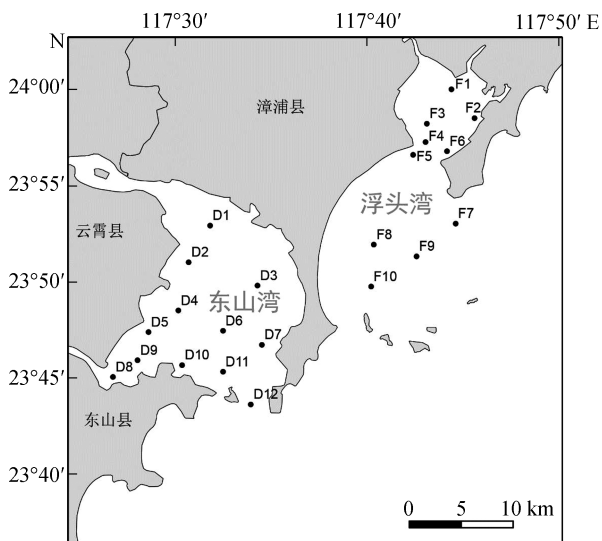


图 1 东山湾和浮头湾大型底栖动物取样站

Fig. 1 Sampling stations of benthic macrofauna at Dongshan Bay and Futou Bay

1.2 数据处理与分析

本研究采用 H' 、 J 和 d 衡量大型底栖动物群落多样性水平,计算公式为 $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$, $J = H' / \log_2 S$, $d = (S-1) / \log_2 N$ 。其中: P_i 是第 i 种大型底栖动物的个体数与总个体数的比值, $P_i = N_i / N$, N 为大型底栖动物总个体数, N_i 为第 i 种大型底栖动物的个体数; S 为样品中大型底栖动物的种类总数^[7,13]。

AMBI 和 M-AMBI 是评价海洋生态质量状况常用的两个指数。AMBI 根据物种对有机质敏感度的差异将其划分为 5 个生态组,分别是敏感种(G I)、无感种(G II)、耐受种(G III)、第二机会种(G IV)和第一机会种(G V)^[14-15]。将各生态组在样方(取样站)中的丰度比例(P_I 、 P_{II} 、 P_{III} 、 P_{IV} 、 P_V)代入以下公式,求得各取样站的 AMBI 值。

$$I_{AMB} = [(0 \times P_I) + (1.5 \times P_{II}) + (3 \times P_{III}) + (4.5 \times P_{IV}) + (6 \times P_V)] / 100.$$

M-AMBI 是结合了 AMBI、物种多样性和物种丰富度的多变量指数^[15]。

H' 、 d 和 J 的计算在 PRIMER7.0 软件上完成^[16], AMBI 和 M-AMBI 的计算在 AMBI 软件(<http://www.azti.es>)上完成。

采用 IRI 对大型底栖动物优势种进行排序和分析,计算公式^[17]如下: $IRI = (R+W) \times F$, 式中, R 为某一物种在该站位的个体数百分比, W 为该物种在该站位中的生物量百分比, F 为该物种出现的站位数占总站位数的百分比。

采用 PRIMER7.0 软件对两个海湾潮下带大型底栖动物群落结构进行群落聚类分析、nMDS 分析和相似性百分比(SIMPER)分析^[16]。为避免个别丰度极大的物种对分析结果的影响,首先对物种丰度数据进行 4 次方根转换,利用转换后的丰度数据计算 Bray-Curtis 相似性矩阵,然后基于 Bray-Curtis 相似性矩阵进行群落聚类和 nMDS 分析。

运用 SPSS25.0 软件,以季节和海湾为固定因子,对大型底栖动物的物种数、栖息密度、生物量、 H' 、 J 、 d 、AMBI 和 M-AMBI 共 8 个生物群落参数进行双因素方差分析(two-way ANOVA),共设置 3 组对比维度,分别为东山湾和浮头湾、东山湾湾内和湾口、浮头湾湾内和湾口。表 1 所示为 H' 、AMBI 和 M-AMBI 与生态健康状况的关系,按此进行评估^[18]。

表 1 3 种生物群落参数与生态健康状况的关系

Tab. 1 Relationship between three biological community parameters and ecological health status

生物群落参数	未受扰动	轻度扰动	中度扰动	严重扰动
H'	>3	>2~3	>1~2	≤1
AMBI	≤1.2	>1.2~3.3	>3.3~5.0	>5.0
M-AMBI	>0.82	>0.62~0.82	>0.41~0.62	0.20~0.41

2 结果与分析

2.1 东山湾和浮头湾大型底栖动物群落物种组成

如图 2 所示:春季在东山湾潮下带采集到大型底栖动物 67 种,其中多毛类物种数最多,为 46 种(含 1 种蠕虫);在浮头湾采集到大型底栖动物 61 种,其中多毛类物种数最多,为 37 种;未采集到纽形和腹足动物. 秋季在东山湾潮下带采集到大型底栖动物 49 种,其中多毛类物种数最多,为 32 种;在浮

头湾采集到大型底栖动物 54 种,其中多毛类物种数最多,为 33 种;未采集到扁形动物.

东山湾春秋两季共获得大型底栖动物 83 种,其中多毛类 54 种,双壳动物 5 种,甲壳动物 15 种,棘皮动物 1 种,底栖鱼类 2 种,其他类群 6 种;浮头湾春秋两季共获得大型底栖动物 85 种,其中多毛类 48 种,双壳动物 11 种,甲壳动物 15 种,棘皮动物 2 种,底栖鱼类 1 种,其他类群 7 种. 可见,东山湾和浮头湾大型底栖动物群落物种组成的特点是多毛类物种数占优势,其次是甲壳类;浮头湾双壳类动物的物种数(11 种)明显多于东山湾(5 种).

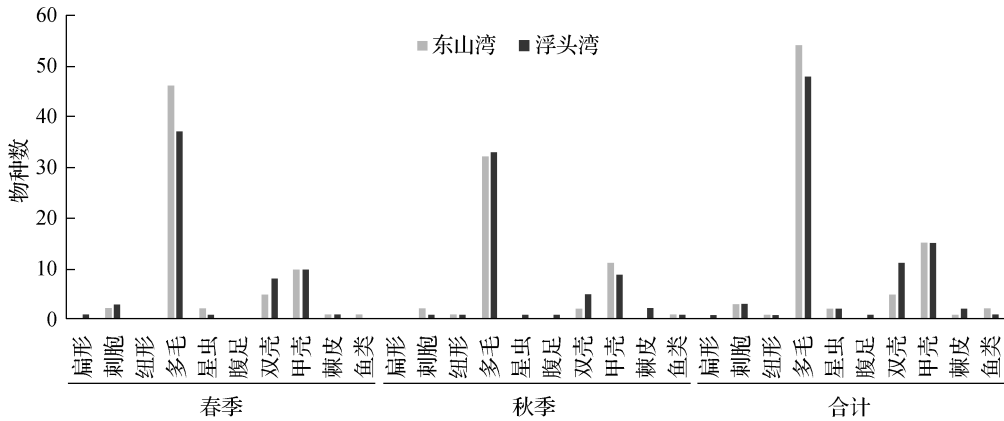


图 2 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落物种组成

Fig. 2 Species composition of macrobenthic communities in the subtidal zones of Dongshan Bay and Futou Bay

2.2 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物的分布特征

如图 3 所示:东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落的全湾平均物种数、栖息密度、生物量、 d 和 M-AMBI 均是春季高于秋季;东山湾全湾的 H' 春季略低于秋季,但浮头湾全湾的 H' 春季高于秋季;东山湾全湾和浮头湾全湾的 J 均是春季低于秋季;东山湾全湾的 AMBI 春季低于秋季,但浮头湾全湾的 AMBI 春季略高于秋季. 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落的平均物种数均是湾内低于湾口,春季高于秋季;东山湾两季的 J 均是湾内高于湾口,但浮头湾两季的 J 均是湾内低于湾口;春季东山湾潮下带大型底栖动物群落的 d 均是湾内高于湾口,但秋季则均是湾内低于湾口.

方差分析表明:东山湾与浮头湾之间潮下带大型底栖动物群落的 8 种参数均无显著差异($P > 0.05$). 大型底栖动物的物种数、栖息密度和 J 有显著季节差异($P < 0.05$),春季东山湾和浮头湾的物种数(平均分别为 13.4 和 15.7)高于秋季(平均分别为 9.2 和 10.3),春季东山湾和浮头湾的栖息密度(平均分别为 314 和

446 ind/m²)高于秋季(平均分别为 143 和 157 ind/m²),春季东山湾和浮头湾的 J (平均分别为 0.767 和 0.767)低于秋季(平均分别为 0.918 和 0.884);但生物量、 H' 、 d 、AMBI 和 M-AMBI 均无显著季节差异($P > 0.05$);湾 \times 季节 8 种参数均无显著差异($P > 0.05$) [支撑材料 (<https://jxmu.xmu.edu.cn/Upload/html/20250304.html>)表 S1].

东山湾潮下带湾内与湾口的大型底栖动物栖息密度和 J 呈显著差异($P < 0.05$),其中春季栖息密度湾内(平均 237 ind/m²)低于湾口(平均 470 ind/m²), J 湾内(平均 0.825)高于湾口(平均 0.651),但大型底栖动物物种数、生物量、 H' 、 d 、AMBI 和 M-AMBI 无显著差异($P > 0.05$);大型底栖动物 J 和 AMBI 呈显著季节差异($P < 0.05$),其中 J 和 AMBI 春季(平均分别为 0.767 和 1.272)低于秋季(平均分别为 0.918 和 2.032),但物种数、栖息密度、生物量、 H' 、 d 和 M-AMBI 均无显著季节差异($P > 0.05$);湾区 \times 季节 H' 呈显著差异($P < 0.05$),其余 7 种群落参数均无显著差异(支撑材料表 S2).

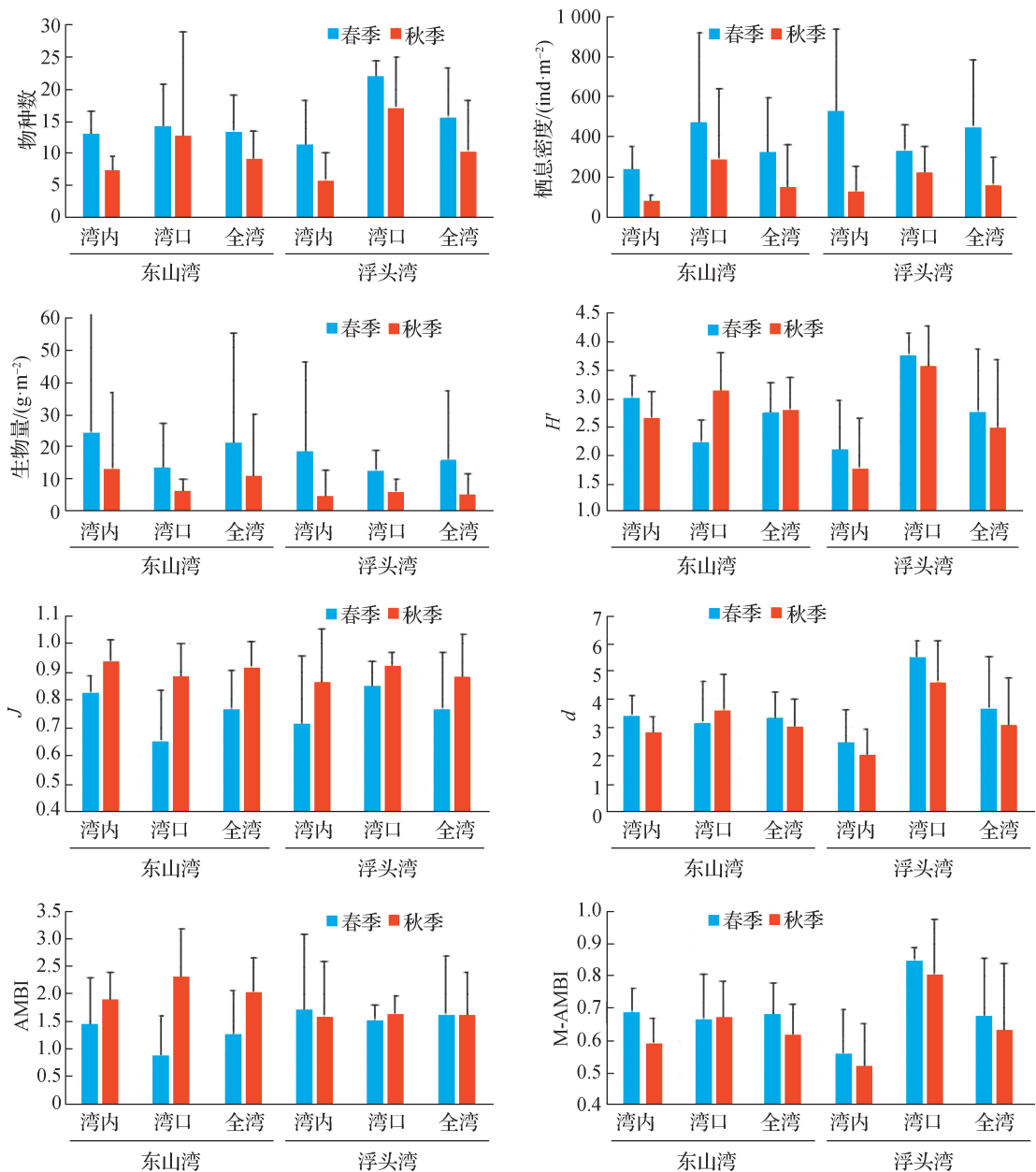


图3 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落的8种参数

Fig. 3 Eight parameters of macrobenthic communities in the subtidal zones of Dongshan Bay and Futou Bay

浮头湾潮下带湾内与湾口的大型底栖动物物种数、 H' 、 d 和M-AMBI呈显著差异($P < 0.05$),湾内春季4种参数平均分别为11.5, 2.086, 2.474和0.559,分别低于湾口的22.0, 3.775, 5.520和0.848,湾内秋季4种参数平均分别为5.8, 1.767, 2.035和0.516,分别低于湾口的17.0, 3.570, 4.638和0.805,但大型底栖动物栖息密度、生物量、 J 和AMBI无显著差异($P < 0.05$);大型底栖动物栖息密度呈显著季节差异($P < 0.05$),春季(湾内、湾口分别为524和328 ind/m²)高于秋季(湾内、湾口分别为119和215 ind/m²),但物种数、生物量、 H' 、 d 、 J 、AMBI和M-AMBI均无显著

季节差异($P > 0.05$);湾区 \times 季节8种大型底栖动物群落参数均无显著差异(支撑材料表S3)。

2.3 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物优势种分布

东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物的前3种相对优势种如表2所示:春季,东山湾和浮头湾潮下带第一优势种均是多毛类动物似蛭虫,但第二和第三优势种不同;东山湾第二和第三优势种分别是甲壳动物裸盲蟹和多毛类动物广东梳鳃虫,浮头湾第二和第三优势种分别是刺胞动物哈氏仙人掌和双壳类动物秀丽勒特蛤。秋季,东山湾与浮头湾有所不同,东山湾

潮下带前 3 种优势种分别是多毛类动物背蚓虫、双壳类动物波纹类缀锦蛤和鼓虾;浮头湾潮下带前 3 种优势种分别是多毛类动物似蜚虫、广东梳鳃虫和欧氏真节虫. 东山湾潮下带大型底栖动物优势种有季节演替现象,即春季前 3 种优势种与秋季的前 3 种优势种不同.

东山湾潮下带春季湾内与湾口第一优势种相同,均是似蜚虫,但第二和第三优势种不同,湾内分别是膜囊尖锥虫和马氏双指虫,湾口分别是裸盲蟹和树栉虫. 东山湾潮下带秋季湾内与湾口前 3 种优势种均不同,湾内分别是背蚓虫、波纹类缀锦蛤和鼓虾,湾口分别是裸盲蟹、奇异稚齿虫和模糊新短眼蟹. 浮头湾潮

下带春季湾内与湾口前 3 种优势种不同,湾内分别是似蜚虫、哈氏仙人掌和马氏双指虫,湾口分别是秀丽勒特蛤、藤田团结蛤和瓦氏亮樱蛤;秋季湾内与湾口的前 3 种优势种也均不同,湾内分别是似蜚虫、背蚓虫和哈氏仙人掌,湾口分别是广东梳鳃虫、太平洋稚齿虫和光滑倍棘蛇尾.

IRI 分析表明东山湾和浮头湾优势种存在季节和湾区差异. 东山湾和浮头湾春季第一优势种均是似蜚虫;秋季则不同,分别是背蚓虫和似蜚虫. 浮头湾湾内春季和秋季第一优势种均是似蜚虫,但东山湾湾内和湾口、浮头湾湾口的第一优势种春季与秋季均不同.

表 2 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落的前 3 种相对优势种

Tab. 2 The top three relative advantage species of macrozoobenthic communities in the subtidal zones of Dongshan Bay and Futou Bay

湾区	春季		秋季	
	前 3 位优势种	IRI	前 3 位优势种	IRI
东山湾	似蜚虫(<i>Amaeana trilobata</i>)	8 236	背蚓虫(<i>Notomastus latericeus</i>)	486
	裸盲蟹(<i>Typhlocarcinus nudus</i>)	576	波纹类缀锦蛤(<i>Paratapes undulata</i>)	456
	广东梳鳃虫(<i>Terebellides guangdongensis</i>)	218	鼓虾(<i>Alpheus</i> sp.)	413
浮头湾	似蜚虫	3 222	似蜚虫	2 548
	哈氏仙人掌(<i>Cavernularia habereri</i>)	931	广东梳鳃虫	875
	秀丽勒特蛤(<i>Raeta pulchella</i>)	903	欧氏真节虫(<i>Euclymene oerstedii</i>)	414
东山湾湾内	似蜚虫	3 079	背蚓虫	924
	膜囊尖锥虫(<i>Scoloplos marsupialis</i>)	372	波纹类缀锦蛤	851
	马氏双指虫(<i>Aphelochaeta marioni</i>)	345	鼓虾	579
东山湾湾口	似蜚虫	9 950	裸盲蟹	1 408
	裸盲蟹	776	奇异稚齿虫(<i>Paraprionospio pinnata</i>)	877
	树栉虫(<i>Pista cristata</i>)	530	模糊新短眼蟹(<i>Neoxenopthalmus obscurus</i>)	805
浮头湾湾内	似蜚虫	4 515	似蜚虫	5 561
	哈氏仙人掌	2 249	背蚓虫	737
	马氏双指虫	794	哈氏仙人掌	648
浮头湾湾口	秀丽勒特蛤	7 399	广东梳鳃虫	2 913
	藤田团结蛤(<i>Abra fujitai</i>)	1 087	太平洋稚齿虫(<i>Prionospio pacifica</i>)	1 021
	瓦氏亮樱蛤(<i>Nitidotellina valtonis</i>)	884	光滑倍棘蛇尾[<i>Amphioplus (Lymanella) laevis</i>]	770

2.4 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落的聚类和多变量排序法分析

聚类分析表明东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物群落在相似度 18.5%上可分为 2 个主要群落(图 4). 第一主要群落包括 13 个站次,即东山湾秋季的 7 个取样站(D1、D4 和 D6~D10)、浮头湾秋季的 4 个取样站(F2、F3、F6 和 F8)、东山湾春季的 1 个取样站

(D9)和浮头湾春季的 1 个取样站(F4). 第一主要群落站次数占总站次数(44 个)的 29.55%,秋季站次 11 个,占秋季总站次数(22 个)的 50.00%. 第二主要群落包括 24 个站次,即东山湾春季的 10 个取样站(D1~D6、D8 和 D10~D12),浮头湾春季的 8 个取样站(F1、F2 和 F5~F10),东山湾秋季的 1 个取样站(D12),浮头湾秋季的 5 个取样站(F1、F5、F7、F9 和 F10). 第二

主要群落站次数占总站次数(44个)的54.55%,春季站次18个,占春季总站次数(22个)的81.82%。春季浮头湾湾口的4个取样站(F7~F10)首先聚为一支,然后再与秋季湾口的3个取样站(F7、F9和F10)聚为

一支。聚类分析表明第一主要群落秋季取样站占比高(11/13),而第二主要群落春季取样站占比高(18/24),说明两个海湾的大型底栖动物群落组成存在明显季节差异。

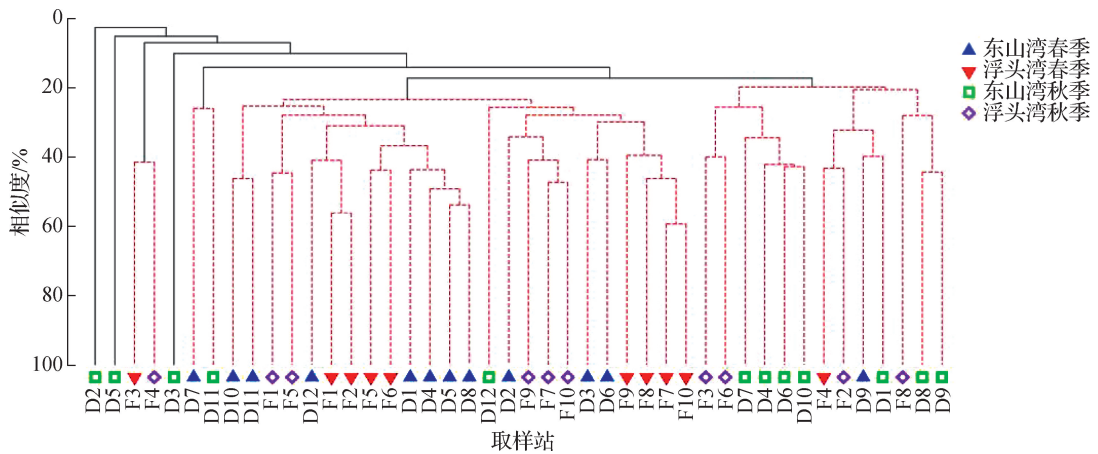


图4 东山湾和浮头湾大型底栖动物群落的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of macrobenthic communities in Dongshan Bay and Futou Bay

nMDS分析表明东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物也有两个主要群落(图5),第一主要群落秋季取样站占比高,第二主要群落春季取样站占比高。

分别是中度扰动、未受扰动和轻度扰动。

运用 AMBI 评估的生态健康状况如下:春季东山湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态分别是轻度扰动、未受扰动和轻度扰动,秋季东山湾、春季和秋季浮头湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态均是轻度扰动。

运用 M-AMBI 评估的生态健康状况如下:春季东山湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态均是轻度扰动,秋季东山湾和秋季浮头湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态分别是中度扰动、轻度扰动和轻度扰动,春季浮头湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态分别是中度扰动、未受扰动和轻度扰动。

上述3种指数表明东山湾和浮头湾受扰动程度不尽相同,但3种指数的平均值均表明两个海湾春秋两季均处于轻度扰动状态,浮头湾湾口的生态健康状态优于湾内。

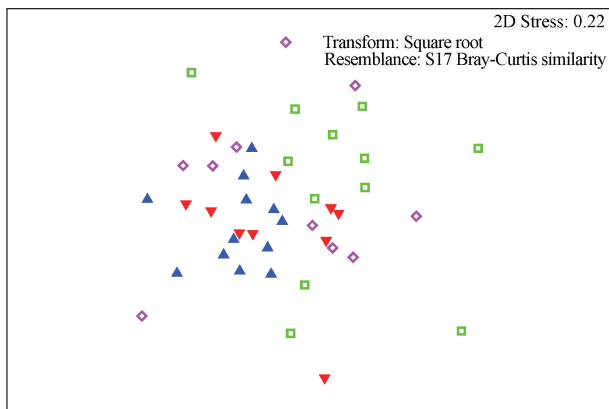


图5 东山湾和浮头湾大型底栖动物群落的 nMDS 分析

Fig. 5 nMDS analysis of macrobenthic communities

in Dongshan Bay and Futou Bay

2.5 东山湾和浮头湾生态健康评估

分别使用 H' 、AMBI、M-AMBI 对东山湾和浮头湾的生态健康状况进行评估,结果如表3所示。运用 H' 评估的生态健康状况如下:春季东山湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态分别是未受扰动、轻度扰动和轻度扰动,秋季东山湾和春季浮头湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态分别是轻度扰动、未受扰动和轻度扰动,秋季浮头湾湾内、湾口和全湾的生态健康状态

3 讨论

3.1 东山湾潮下带大型底栖动物数量与历史数据比较的变化情况

据已有文献报道,1985年以来对东山湾潮下带进行大型底栖动物群落专门研究的报道有3篇,采样时间分别是1985年、1990年和1991年、2011年(表4)。1985年10月在东山湾潮下带采集到大型底栖动物247种,大多数种类为热带、亚热带暖水种和广温性种类,

表 3 东山湾和浮头湾两个季节两个湾区 3 种动物群落参数的平均值和生态健康状态

Tab. 3 The average values and ecological health status of three biological community parameters in two bay areas of Dongshan Bay and Futou Bay in two seasons

海湾	季节	湾区	H'		AMBI		M-AMBI	
			平均值	评估结果	平均值	评估结果	平均值	评估结果
东山湾	春季	湾内	3.017	未受扰动	1.463	轻度扰动	0.690	轻度扰动
		湾口	2.231	轻度扰动	0.889	未受扰动	0.667	轻度扰动
		全湾	2.755	轻度扰动	1.272	轻度扰动	0.682	轻度扰动
	秋季	湾内	2.638	轻度扰动	1.889	轻度扰动	0.591	中度扰动
		湾口	3.123	未受扰动	2.317	轻度扰动	0.670	轻度扰动
		全湾	2.800	轻度扰动	2.032	轻度扰动	0.621	轻度扰动
浮头湾	春季	湾内	2.086	轻度扰动	1.698	轻度扰动	0.559	中度扰动
		湾口	3.775	未受扰动	1.538	轻度扰动	0.848	未受扰动
		全湾	2.761	轻度扰动	1.634	轻度扰动	0.675	轻度扰动
	秋季	湾内	1.767	中度扰动	1.607	轻度扰动	0.516	中度扰动
		湾口	3.570	未受扰动	1.643	轻度扰动	0.805	轻度扰动
		全湾	2.488	轻度扰动	1.621	轻度扰动	0.632	轻度扰动

表 4 1985 年以来东山湾潮下带大型底栖动物群落参数比较

Tab. 4 Comparison of macrobenthic community parameters of Dongshan Bay subtidal zone since 1985

采样年份	站位数	航次	物种数	栖息密度/(ind · m ⁻²)	生物量/(g · m ⁻²)	优势类群(种数)	文献
1985 年	30	1	247	317	213.03	软体动物(69)	[5]
1990—1991 年	21	4	349	192	23.84	软体动物(105)	[4]
2011 年	15	1	145	111	14.79	多毛类(69)	[7]
2020 年	12	2	83	229	15.50	多毛类(54)	本研究

平均栖息密度 317 ind/m², 平均生物量 213.03 g/m², 数量分布很不均匀, 栖息密度范围为 50~1 115 ind/m², 生物量范围为 8.76~2 473.38 g/m², 软体动物 69 种, 多毛类 57 种, 甲壳动物 55 种, 棘皮动物 25 种, 其他类群动物 14 种^[5]. 1990—1991 年在东山岛潮下带进行了 21 个取样站 4 个航次(季节)的大型底栖动物调查, 共采获大型底栖动物 349 种, 平均栖息密度 192 ind/m², 平均生物量 23.84 g/m², 软体动物 105 种, 甲壳动物 83 种, 多毛类 80 种, 棘皮动物 50 种, 底栖鱼类 23 种, 其他类群动物 8 种^[4]. 2011 年春季在古雷半岛周边海域采获大型底栖生物 145 种, 平均栖息密度和生物量分别是 111 ind/m² 和 14.79 g/m², 多毛类 69 种, 软体动物 28 种, 甲壳动物 29 种, 棘皮动物 6 种, 其他类群动物 10 种, 大型藻类 3 种^[7]. 本研究中, 东山湾春秋两季共获得大型底栖动物 83 种, 平均栖息密度和生物量分别是 229 ind/m² 和 15.50 g/m², 多毛类 54

种, 软体动物 5 种, 甲壳动物 15 种, 棘皮动物 1 种, 底栖鱼类 2 种, 其他类群动物 6 种. 不考虑取样站数和采样航次数, 1985 年、1990—1991 年东山湾潮下带大型底栖动物群落的物种数和生物量均高于 2011 年和 2020 年; 1985 年、1990—1991 年东山湾潮下带大型底栖动物群落的优势类群为软体动物, 而在 2011 年和 2020 年优势类群转变为多毛类. 1985 年、1990—1991 年东山湾潮下带软体动物短竹蛭(*Solen brevissimus*) 和棒锥螺(*Turritella bacillum*) 是优势种^[4-5], 但在 2011 年则不是优势种^[7]; 本研究在东山湾没有采集到短竹蛭和棒锥螺, 仅秋季在浮头湾 F10 取样站采集到短竹蛭. 1985—2020 年软体动物种数的减少可能与网箱养殖、清淤、疏浚等施工过程产生底泥悬浮物有关^[19]. 这是由于软体动物双壳类为滤食性, 底泥悬浮物对双壳类影响较大, 而多毛类为吞咽型, 底泥悬浮物对其影响很小^[20].

3.2 东山湾和浮头湾潮下带大型底栖动物的生态健康状况比较

多样性指数和丰富度指数常用于生态健康评价。厦门文昌鱼保护区黄厝潮下带的大型底栖动物多样性指数和丰富度指数在2014年夏季(分别为1.728和1.239)均比2016年夏季(分别为3.579和4.038)的低,多样性指数和丰富度指数与粉砂和黏土含量呈显著正相关^[21]。大亚湾湾内大型底栖动物物种数明显少于湾外^[22]。考洲洋潮下带大型底栖动物多样性指数和丰富度指数均显著低于红海湾的,这是因为考洲洋几乎是封闭海湾,而红海湾是开阔海湾^[23]。多样性指数在罗源湾、湄洲湾、深沪湾、厦门湾和东山湾呈较高值^[24]。本研究中,无论是春季还是秋季,浮头湾潮下带大型底栖动物多样性指数和丰富度指数均为湾内显著低于湾口,说明浮头湾湾口生态健康优于湾内。大型底栖动物群落优势种也证实浮头湾湾口生态健康优于湾内,春季浮头湾湾内第一优势种是多毛类似蜚虫,而浮头湾湾口第一优势种是双壳类秀丽勒特蛤;似蜚虫在生态组群被归为3类,而秀丽勒特蛤被归为2类^[14-15],即似蜚虫较秀丽勒特蛤耐污。秋季浮头湾湾内没有发现光滑倍棘蛇尾,而在浮头湾湾口光滑倍棘蛇尾为第三优势种,光滑倍棘蛇尾在底质粒度较细、含砂量适中的环境中生物量较高^[3]。

近20年来,基于大型底栖动物的M-AMBI已被广泛应用于海湾生态系统健康状况评价^[9-12]。M-AMBI表明长江口潮下带生态健康在2005年、2009年和2010年严重下滑^[25]。利用M-AMBI对大亚湾底栖生态质量开展评价,结果表明38.5%站位处于“一般”或“差”状态^[26]。AMBI和M-AMBI分析显示,烟台长岛海洋牧场总体受污染扰动较小,底栖生态健康较好^[27]。考洲洋潮下带大型底栖动物AMBI显著高于红海湾的^[23]。本研究中,无论是春季还是秋季,浮头湾潮下带大型底栖动物M-AMBI均为湾内显著低于湾口,说明浮头湾湾口的生态健康优于湾内。

H' 、AMBI和M-AMBI表明东山湾和浮头湾受扰动程度不尽相同,但3种指数的平均值均表明两个海湾两个季节均处于轻度扰动状态,属于比较健康的生态环境。本研究中东山湾的评估结果与基于可变模糊评价模型的结果基本一致,即东山湾春季生态系统健康指数为2.36,秋季为2.44,均处于“良与中之间,偏良”水平,春季略优于秋季^[28]。

4 结 论

聚类和nMDS分析表明东山湾和浮头湾潮下带

大型底栖动物有两个主要群落,第一主要群落秋季取样站占比高,第二主要群落春季取样站占比高。无论是春季还是秋季,浮头湾潮下带大型底栖动物的物种数、 H' 、 d 和M-AMBI均为湾内显著低于湾口。东山湾和浮头湾大型底栖动物群落处于轻度扰动状态,浮头湾湾口的生态健康状态优于湾内。

参考文献:

- [1] 何明海. 东山湾潮下带多毛类的分布[J]. 台湾海峡, 1990,9(3):206-211.
- [2] 李荣冠,江锦祥. 东山湾潮下带前鳃类软体动物的生态[J]. 台湾海峡,1993,12(2):171-179.
- [3] 吕小梅. 东山湾棘皮动物生态学研究初报[J]. 热带海洋, 1993,12(1):84-88.
- [4] 蔡立哲,郑天凌. 东山岛潮下带大型底栖生物群落及其环境影响评价[J]. 厦门大学学报(自然科学版),1994,33(增刊1):37-42.
- [5] 张雅芝,胡家财,钟幼平,等. 东山湾底栖生物生态研究[J]. 台湾海峡,1997,16(4):441-448.
- [6] 蓝虹,郑崇荣,周时强,等. 闽江口以南近海底栖生物群落生态研究[J]. 海洋环境科学,2006,25(增刊1):52-56.
- [7] 林俊辉,王建军,林和山,等. 福建古雷半岛周边海域春季大型底栖生物多样性现状[J]. 渔业科学进展,2015,36(2):23-29.
- [8] KHALEDI H. Ecological assessment of macrobenthic communities in Chababar Bay, the gulf of Oman[J]. Continental Shell Research,2024,280:105308.
- [9] HOSOKAWA S,MOMOTA K,CHARITON A A,et al. The use of diversity indices for local assessment of marine sediment quality[J]. Scientific Reports,2021,11(1):14991.
- [10] YAN J,SUI J X,XU Y,et al. Assessment of the benthic ecological status in adjacent areas of the Yangtze River Estuary,China,using AMBI,M-AMBI and BOPA biotic indices[J]. Marine Pollution Bulletin,2020,153(4):111020.
- [11] 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[J]. Marine Pollution Bulletin,2000,40(12):1100-1114.
- [12] LI A,LI J Q,LIU F,et al. Assessment of benthic ecological status and heavy metal contamination in an estuarine intertidal mudflat in the Northern Bohai Sea[J]. Marine Pollution Bulletin,2024,203:116501.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 海洋调查规范 第6部分 海洋生物调查:GB/T 12763.6—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

- [14] BORJA A, ELLIOTT M, ANDERSEN J H, et al. Overview of integrative assessment of marine systems; the ecosystem approach in practice[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3: 20.
- [15] MUXIKA I, BORJA A, BALD J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1/2/3/4/5/6): 16-29.
- [16] CLARKE K, GORLEY R. Getting started with PRIMER v7[M]. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 2015.
- [17] PINKAS L, OLIPHANT M S, IVERSON I L K. Fish bulletin 152. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[M]. California: The Resources Agency, Department of Fish and Game, 1970.
- [18] 蔡立哲. 深圳湾底栖动物生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2015.
- [19] 游远新. 东山八尺门海域底泥悬浮物对黄鳍鲷稚幼鱼的致死效应[J]. *渔业研究*, 2021, 43(6): 571-577.
- [20] SHI Y F, HE Y X, SHIN P K S, et al. Responses of biological traits of macrobenthic fauna to a eutrophication gradient in a semi-enclosed bay, China[J]. *Marine Environmental Research*, 2023, 189: 106072.
- [21] 陈丙温, 蔡立哲, 饶义勇, 等. 底质细化对厦门潮下带文昌鱼栖息地大型底栖动物群落的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 494-505.
- [22] RAO Y Y, CAI L Z, CHEN B W, et al. How do spatial and environmental factors shape the structure of a coastal macrobenthic community and meroplanktonic larvae cohort? Evidence from Daya Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 157: 111242.
- [23] ZHAO X Y, CAI L Z, RAO Y Y, et al. Comparison of macrozoobenthic communities and environmental variables in the subtidal zones between a nearly closed bay and an open bay[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 73: 103464.
- [24] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 福建省主要海湾潮下带大型底栖无脊椎动物组成与分布特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4240-4248.
- [25] LIU L S, LI B Q, LIU K X, et al. Assessing benthic ecological status in coastal area near Changjiang River estuary using AMBI and M-AMBI[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(2): 290-305.
- [26] 高鑫, 李勇, 王长发, 等. 大亚湾大型底栖动物群落特征与生态质量评价研究[J]. *海洋通报*, 2023, 42(6): 677-685.
- [27] 衣帆, 王娇, 刘航, 等. 烟台长岛秋季海洋牧场内外大型底栖动物群落特征分析[J]. *海洋学报*, 2024, 46(5): 57-67.
- [28] 陆志强, 李吉鹏, 章耕耘, 等. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4907-4919.

(责任编辑: 徐婷婷)