

平潭岛中国鲎保护区沙质潮间带的大型底栖动物群落

李国强, 叶伟鹏, 余怀勇, 杨圆媛, 杨洋, 叶晴,
李文君, 饶义勇, 陈昕韡, 蔡立哲

(厦门大学 环境与生态学院 福建 厦门 361102)

摘要:2015 年 7 月底,在平潭岛中国鲎(*Tachypleus tridentatus*)保护区沙质潮间带进行了大型底栖动物调查。结果表明,在山岐澳和坛南湾沙质潮间带未发现鲎的幼体和成体,证实中国鲎在山岐澳和坛南湾已经面临濒危的境况。山岐澳潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)和丰度指数(d)均高于坛南湾潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数、均匀度指数和丰度指数,而山岐澳潮间带的大型底栖动物栖息密度和生物量低于坛南湾潮间带的大型底栖动物栖息密度和生物量。两个海湾大型底栖动物群落的差异与肋蜃螺(*Umbonium costatum*)分布有关,坛南湾潮间带栖息着高密度的肋蜃螺,而在山岐澳潮间带肋蜃螺很少。AZTI's 海洋生物指数(AMBI)和多变量海洋底栖生物指数(M-AMBI)值证实山岐澳和坛南湾沙质潮间带生态环境均属于受轻度扰动状态。山岐澳主要受海水养殖的影响,吊养的生物和浮筒减缓了水动力,导致山岐澳潮间带低洼区表层为泥质沉积物。坛南湾是旅游区,潮间带受人为踩踏较多。

关键词:大型底栖动物;群落;砂质潮间带;中国鲎保护区;平潭岛

中图分类号: X835 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2017)02-0179-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2017.02.004

Community of benthic macrofauna on sandy intertidal zone in Chinese Horseshoe Crab Reserve in Pingtan island, China

LI Guo-qiang, YE Wei-peng, YU Huai-yong, YANG Yuan-yuan, YANG Yang,
YE Qing, LI Wen-jun, RAO Yi-yong, CHEN Xin-wei, CAI Li-zhe

(College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: At the end of July 2015, the benthic macrofauna were investigated in sandy intertidal zone in Chinese Horseshoe Crab Reserve in Pingtan island. The results showed that both the larvae and adult of Chinese horseshoe crab were not found in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay. It was confirmed that *Tachypleus tridentatus* stayed in an endangered situation in the two bays. The species number, species diversity index (H'), evenness index (J) and abundance index (d) of benthic macrofauna in Shanqi bay were all higher than those in Tannan bay, while the density and biomass of benthic macrofauna in the intertidal zone of Shanqi bay were lower than those in Tannan bay. The difference of benthic macrofaunal community between Shanqi bay and Tannan bay was related to the distribution of *Umbonium costatum*. The density of *Umbonium costatum* was high in Tannan bay, but it was few in Shanqi bay. The values of AZTI's Marine Biotic Index (AMBI) and Multivariate Marine Benthic Index (M-AMBI) showed that the ec-

收稿日期: 2016-05-16, 修订日期: 2016-07-26

基金项目: 海洋公益项目(201305030-6); 国家自然科学基金面上项目(41376113); 厦门大学 2015 年大创资助项目

作者简介: 李国强(1992-) 男, 福建南平人, 硕士研究生, 主要研究方向为底栖生物, E-mail: 981317405@qq.com

通讯作者: 蔡立哲, E-mail: cailizhe@xmu.edu.cn

ological and environmental status both in Shanqi bay and Tannan bay were slightly disturbed. The mariculture was the key factor in Shanqi bay because the suspending aquatic organisms and floats retarded hydrodynamic force led to muddy sediment in lower intertidal zone in Shanqi bay. Tannan bay is a tourism region, where has more artificial tread than Shanqi bay.

Key words: benthic macrofauna; community; sandy intertidal zone; Chinese Horseshoe Crab Reserve; Pingtan island

蟹属于节肢动物门 (Arthropoda)、有螯亚门 (Chelicerata)、肢口纲 (Merostomata)、剑尾目 (Xiphosura)、蟹科 (Limulidae), 是最有名的活化石之一。蟹栖息在潮间带和浅海^[1-2], 因此是监测海岸带健康的重要指示种^[3-4]。平潭岛, 亦称海坛岛, 是中国第六大岛、福建省第一大岛, 地处中国东南沿海。平潭岛是享誉世界的产蟹区, 其中国蟹 (*Tachypleus tridentatus*) 产量曾居全国第一, 然而, 由于大量抓捕等原因, 平潭中国蟹已难觅踪迹, 成为了濒危物种。鉴于上述原因, 黄勤等提出了平潭中国蟹保护区规划建议, 即设立两个核心区, 核心 I 区包括安溪澳泥滩及建民、华东两村的沙滩和浅海水域, 核心 II 区以渔庄浅海为中心向外扇形辐射至 60 m 等深线^[5-7]。

有关平潭岛潮间带大型底栖动物研究, 周时强等在福建海岛潮间带底栖生物群落生态研究中, 描述了平潭岛潮间带大型底栖生物 302 种, 但没有说明采集的底质和具体的采样地点^[8]。吕小梅等在福建海坛海峡潮间带大型底栖动物群落结构及次级生产力研究中, 鉴定泥沙质潮间带大型底栖动物 228 种^[9]。翁朝红等在福建及中国其他沿岸海域中国蟹资源分布现状调查中, 对海坛岛建星、芬尾、澳前的中国蟹资源进行了调查^[10]。本研究的目的在于查明平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带的中国蟹资源和大型底栖动物群落现状。

1 材料与方法

1.1 研究区域、站位设置和采样方法

此次调查地位于平潭岛的山岐澳和坛南湾, 山岐澳调查范围为 $25^{\circ}25'0.07''N \sim 25^{\circ}25'6.88''N$, $119^{\circ}44'14.35''E \sim 119^{\circ}44'5.76''E$; 坛南湾调查范围为 $25^{\circ}25'42.50''N \sim 25^{\circ}25'35.10''N$, $119^{\circ}45'10.95''E \sim 119^{\circ}45'10.75''E$ 。两个小海湾均以沙质底质为主。

2015 年 7 月底, 在平潭岛南部的山岐澳和坛南湾潮间带各设置 2 条断面, 山岐澳为 A、B 断

面, 坛南湾为 C、D 断面, 每条断面按高潮带、中潮带、低潮带设 3 个取样站 (图 1)。

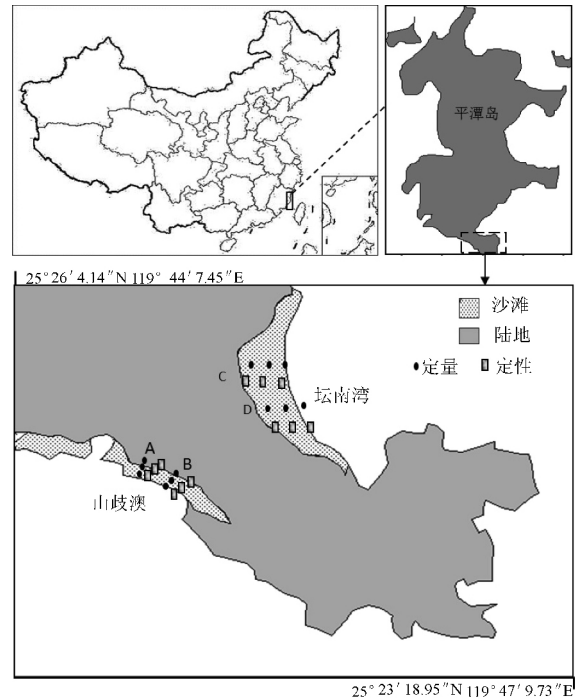


图 1 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物采样断面

Fig. 1 Sketch map of sampling section of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

定量采集方法。每个取样站采用 $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ 样框, 在样框内取深 30 cm 的沉积物, 随机采集 3 个样框, 分别装入塑料袋, 带到岸边水塘处, 倒入桶内, 加水搅拌, 用孔径 0.5 mm 的套筛过滤, 滤出的动物及余留的泥沙用 5% 甲醛固定, 带回实验室内分类和称重。各个样框内的大型底栖动物单独计数和称重。标本处理按《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007) 和《海洋监测规范》(GB/17378.7-2007) 进行。

定性采集方法。每个取样站随机采集 3 个 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 样框, 在样框内用铲子翻挖沉积物, 抓取肉眼可见的大型底栖动物装入标本瓶, 用 5% 甲醛固定, 带回实验室内分类和计数。

1.2 数据分析和生态环境质量评价

将大型底栖动物物种数、个体数和重量在 Excel 2007 上列成矩阵,统计大型底栖动物的物种数、栖息密度和生物量;应用 PRIMER 5.0 软件计算物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)和丰度指数(d),具体计算公式如下:

Shannon-Wiever 物种多样性指数为:

$$H' = - \sum \left(\frac{N_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{N_i}{N} \right)$$

Pielou 物种均匀度指数为: $J = H' / \log_2 S$

Margalef 种类丰富度指数为: $d = (S - 1) / \log_2 N$

式中: S 为生物样品种类; N 为个体总数; Ni 为样品中观察到第 i 种的个体数。

采用 SPSS 15.0 对山歧澳和坛南湾大型底栖动物群落参数进行无重复双因素方差分析。运用西班牙渔业与技术研究所网站(http://www.azti.es) 的 AMBI 软件计算 AZTI's 海洋生物指数(AMBI) 和多变量海洋底栖生物指数(M-AMBI)。AMBI 评价生态环境质量分 5 级,即未受扰动(undisturbed)、轻度扰动(slightly disturbed)、中度扰动(disturbed)、严重扰动(heavily disturbed)、极度扰动(extremely disturbed),其 AMBI 值分别在 0~1.2 之间、1.2~3.3 之间、3.3~5.0 之间、5.0~6.0 之间、>6.0; M-AMBI 评价生态环境质量也分 5 级,即很好(high)、好(good)、一般(fair)、差(poor)、很差(bad),其 M-AMBI 值分别为 >0.82、0.62~0.82、0.41~0.62、0.20~0.40、<0.20^[11-13] 本文将 AMBI 的 5 级与 M-AMBI 的 5 级按顺序相对应。

2 结果与讨论

2.1 山歧澳和坛南湾沙滩潮间带大型底栖动物物种组成

2015 年夏季在平潭岛山歧澳和坛南湾沙质潮间带共获得大型底栖动物 58 种,其中多毛类 25 种,腹足类 4 种,双壳类 7 种,甲壳类 15 种,棘皮动物 3 种,鱼类 2 种,扁形动物和纽形动物各 1 种,未发现中国鲎(Tachypleus tridentatus)。定量采集获得大型底栖动物 39 种,其中多毛类物种数最多,为 20 种。定性采集获得大型底栖动物 31 种,也是多毛类物种数最多,13 种。在山歧澳沙

质潮间带定性和定量采集共获得大型底栖动物 38 种,其中多毛类最多,为 22 种;在坛南湾沙质潮间带定性和定量采集共获得大型底栖动物 34 种,其中甲壳类最多,为 13 种(图 2)。方差分析表明,平潭岛山歧澳和坛南湾沙质潮间带之间定量获得的大型底栖动物物种数呈极显著差异(ANOVA, F = 13.974, P = 0.001)。

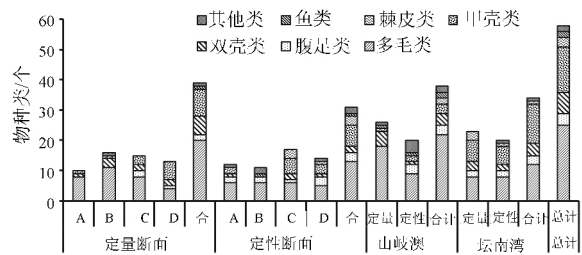


图 2 平潭岛山歧澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物物种数

Fig.2 The species number of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

上述结果表明,无论是山歧澳还是坛南湾,定性采集获得的大型底栖动物物种数均少于定量采集获得的大型底栖动物物种数,特别是多毛类动物物种数,这是因为定量采集时一些小个体的大型底栖动物可以被网筛截留,而定性采集时肉眼不一定能发现小个体大型底栖动物。上述结果还表明,在平潭山歧澳和坛南湾沙质潮间带未采集到中国鲎的幼体和成体,说明这两个海湾已不是中国鲎的产卵地,也证实平潭中国鲎资源量明显减少,“平潭鲎”已经面临濒危的境况^[5-7]。

2.2 大型底栖动物栖息密度和生物量

山歧澳和坛南湾潮间带大型底栖动物平均栖息密度为 716 ind./m²。山歧澳潮间带(A 和 B 断面)的大型底栖动物栖息密度明显低于坛南湾潮间带(C 和 D 断面)的大型底栖动物栖息密度。山歧澳沙质潮间带大型底栖动物栖息密度主要由多毛类组成,A、B 断面多毛类分别占 81.25% 和 65.38%,坛南湾沙质潮间带大型底栖动物栖息密度主要由腹足类组成,C、D 断面分别占 94.87% 和 76.88%(图 3)。方差分析表明,平潭岛山歧澳和坛南湾沙质潮间带之间大型底栖动物栖息密度存在极显著差异(ANOVA, F = 16.312, P < 0.001)。

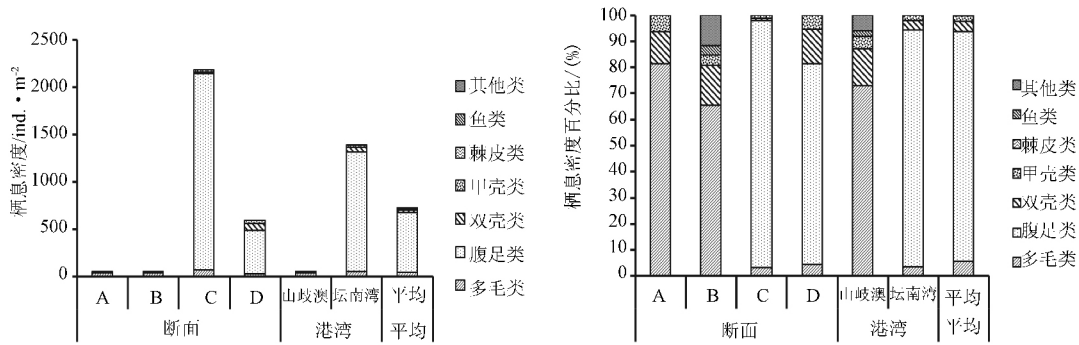


图3 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物栖息密度及其各类群百分比

Fig. 3 The density and the percentage of macrofaunal groups in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay ,Pingtan island

坛南湾潮间带腹足类栖息密度高是由于肋蜆螺 (*Umbonium costatum*) 有着很高的栖息密度,在坛南湾潮间带 CM 取样站高达 3600 ind./m²。其它栖息密度较高的还有寡鳃齿吻沙蚕 (*Nephtys oligobranchia*) 和膜囊尖锥虫 (*Scoloplos marsupialis*)。吕小梅等在海坛海峡潮间带获得的大型底栖动物优势种较多,有 22 种,其中光滑河蓝蛤 (*Potamocorbula laevis*) 栖息密度及生物量分别为 5812 ind./m²和 8.72 g/m²,但绝大部分优势种的栖息密度在 100 ind./m²以下^[9]。海坛海峡潮间带大型底栖动物优势种多,在于底质多样,有泥质潮间带,也有砂泥质潮间带,还有紫菜、牡蛎养殖的潮间带^[9]。这与在泉州湾埭埔潮间带获得的大型底栖动物种类较多是相似的^[14],即生境的多样性导致物种的多样性^[13]。

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物平均生物量为 40.44 g/m²。山岐澳沙质潮间带(A 和 B

断面)的大型底栖动物生物量明显低于坛南湾沙质潮间带(C 和 D 断面)的大型底栖动物生物量。山岐澳沙质潮间带 A 断面大型底栖动物生物量主要由多毛类组成,占 87.63%,B 断面主要由双壳类组成,占 69.18%,山岐澳潮间带 A 断面多毛类生物量高是由于物种数较多,B 断面双壳类生物量高是由于在 BM 取样站采集到尖扁满月蛤 (*Lucinoma acutilineata*),在 BH 取样站采集到长竹蛭 (*Solen strictus*);坛南湾沙质潮间带大型底栖动物生物量主要由腹足类组成,C、D 断面分别占 66.23%和 76.23%(图 4),坛南湾潮间带腹足类生物量高是由于肋蜆螺有着很高的生物量,在坛南湾潮间带 CH 取样站高达 117.94 g/m²。平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间大型底栖动物生物量存在显著差异(ANOVA, $F = 7.354, P = 0.010$)。

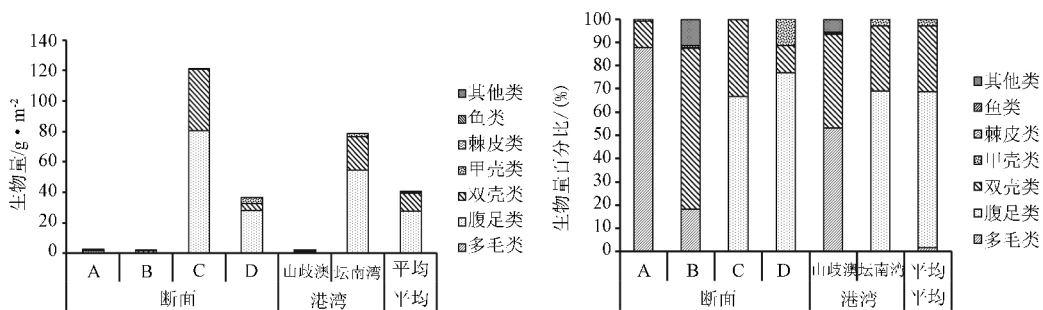


图4 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物生物量及其各类群百分比

Fig. 4 The biomass and the percentage of macrofaunal groups in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay ,Pingtan island

2.3 物种多样性指数、均匀度指数和丰度指数
山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落平

均物种多样性指数为 1.599,山岐澳潮间带大型底栖动物群落的物种多样性指数高于坛南湾潮间

带大型底栖动物群落的物种多样性指数(图 5)。方差分析表明,山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间大型底栖动物多样性指数呈显著差异(ANOVA, $F = 8.024$, $P = 0.020$)。

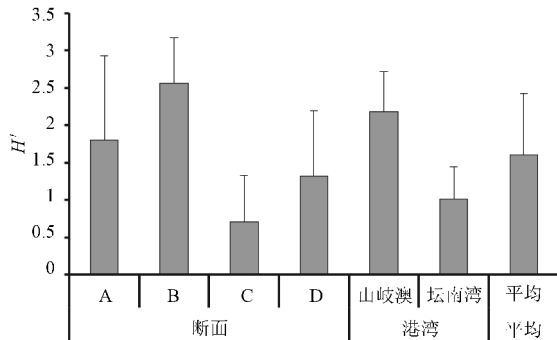


图 5 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物群落的物种多样性指数

Fig. 5 The species diversity index (H') of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落平均均匀度指数为 0.637,山岐澳潮间带大型底栖动物群落的均匀度指数高于坛南湾潮间带大型底栖动物群落的均匀度指数(图 6)。方差分析表明,山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间大型底栖动物均匀度指数呈极显著差异(ANOVA, $F = 23.909$, $P = 0.001$)。

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落平均丰度指数为 0.637,山岐澳潮间带大型底栖动物群落的丰度指数高于坛南湾潮间带大型底栖动物群落的丰度指数(图 7)。方差分析表明,山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间大型底栖动物丰度指数呈显著差异(ANOVA, $F = 6.783$, $P = 0.029$)。

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落平均物种多样性指数为 1.599,与海坛海峡潮间带(在 2.200~4.200 之间)^[9]和浙江象山港潮间带(在 1.76~2.45 之间)^[15]相比,明显偏低。主要原因是海坛海峡潮间带的沉积物有泥有沙,沉积物粒径多样化。坛南湾潮间带为纯沙质的沉积物,虽然山岐澳潮间带大部分区域为沙滩,但山岐澳 A 断面中潮区为低洼处,表层有细泥,B 断面低潮带有牡蛎养殖,吊养的木桩和浮筒减缓了水动力,导致 B 断面低潮区有细泥,可见山岐澳潮间带实际上是泥沙混合的潮滩,因此大型底栖动物的多样性指数高于坛南湾,即生境的多样性导致

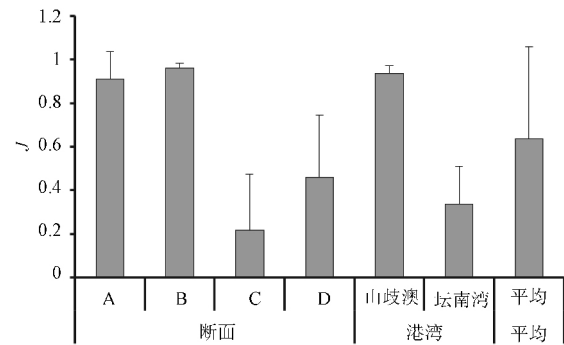


图 6 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物群落的均匀度指数

Fig. 6 Evenness index of benthic macrofauna (J) in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

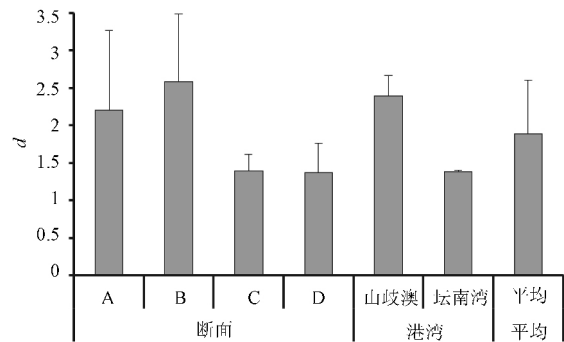


图 7 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物群落的丰度指数

Fig. 7 Richness index (d) of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

物种的多样性^[13]。可见,山岐澳潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)和丰度指数(d)均高于坛南湾潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数、均匀度指数和丰度指数,其原因是山岐澳底质有泥有沙,而坛南湾为纯沙,即山岐澳底质较坛南湾多样。

2.4 AMBI 和 M-AMBI 指数

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落的环境质量指数(AMBI)平均值为 1.242,山岐澳潮间带大型底栖动物群落的环境质量指数(AMBI)平均值略低于坛南湾潮间带大型底栖动物群落的环境质量指数(AMBI)平均值,分别为 1.217 和 1.267(图 8)。方差分析表明,山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间 AMBI 值无显著差异($F = 0.145$, $P = 0.050$)。根据 AMBI 值与生态环境质量的关系,两个湾的潮间带的生态环境质量属于受轻度扰动状态。

山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$ 平均值为 0.674, 山岐澳潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$ 平均值略高于坛南湾潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$ 平均值, 分别为 0.712 和 0.636 (图 9)。方差分析表明, 山岐澳和坛南湾沙质潮间带之间 $M-AMBI$ 值无显著差异 ($F=1.315$, $P=0.281$)。根据 $M-AMBI$ 值与生态环境质量的关系, 两个湾的潮间带的生态环境质量属于好(受轻度扰动)的状态。

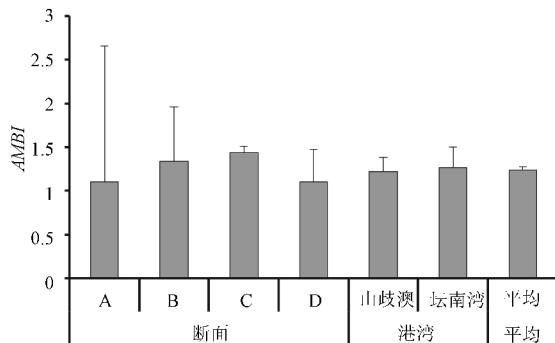


图 8 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物群落的 $AMBI$

Fig. 8 $AMBI$ of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

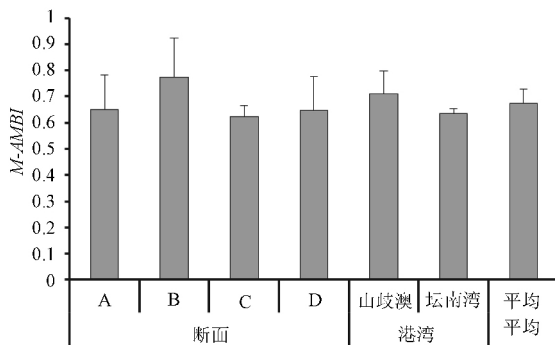


图 9 平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$

Fig. 9 $M-AMBI$ of benthic macrofauna in sandy intertidal zone in Shanqi bay and Tannan bay, Pingtan island

根据 $AMBI$ 值与生态环境质量的关系, 两个湾的潮间带的生态环境质量属于受轻度扰动状态。与深圳湾潮间带的 $AMBI$ 值比较^[13], 平潭岛山岐澳和坛南湾的 $AMBI$ 值低得多。山岐澳潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$ 平均值略高于坛南湾潮间带大型底栖动物群落的 $M-AMBI$ 平均值, 分别为 0.712 和 0.636, 根据 $M-AMBI$ 值与生

态环境质量的关系, 两个湾的潮间带的生态环境质量属于好(受轻度扰动)的状态。与深圳湾潮间带的 $M-AMBI$ 值比较^[13], 平潭岛山岐澳和坛南湾的 $M-AMBI$ 值较高。山岐澳潮间带所受的扰动主要是低潮带附近的牡蛎养殖, 吊养的木桩和浮筒减缓了水动力, 同时由于是海水养殖的通道, 潮间带在渔业活动过程中受到一定的踩踏。坛南湾是旅游区, 夏季经常有人到坛南湾游泳、露营等, 潮间带受人为踩踏较多。都市化和海浪波高是影响沙滩大型底栖动物物种数的重要因子^[16]。

3 结论

(1) 2015 年夏季在平潭岛山岐澳和坛南湾沙质潮间带共获得大型底栖动物 58 种, 其中多毛类 25 种, 腹足类 4 种, 双壳类 7 种, 甲壳类 15 种, 棘皮动物 3 种, 鱼类 2 种, 扁形动物和纽形动物各 1 种, 未发现中国鲎。

(2) 山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物平均栖息密度为 716 ind./m²。山岐澳潮间带(A 和 B 断面)的大型底栖动物栖息密度(44 ind./m²)明显低于坛南湾潮间带(C 和 D 断面)的大型底栖动物栖息密度(1388 ind./m²)。

(3) 山岐澳和坛南湾潮间带大型底栖动物平均生物量为 40.44 g/m²。山岐澳沙质潮间带(A 和 B 断面)的大型底栖动物生物量(2.02 g/m²)明显低于坛南湾沙质潮间带(C 和 D 断面)的大型底栖动物生物量(78.86 g/m²)。

(4) 山岐澳潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)和丰度指数(d)均高于坛南湾潮间带的大型底栖动物物种数、物种多样性指数、均匀度指数和丰度指数。

(5) AZTI's 海洋生物指数($AMBI$)和多变量海洋底栖生物指数($M-AMBI$)值证实山岐澳和坛南湾沙质潮间带生态环境均属于受轻度扰动状态。

参考文献:

- [1] CHEN C P, YE H Y, LIN P F. Conservation of the horseshoe crab at Kinmen, Taiwan: strategies and practices [J]. Biodiversity & Conservation 2004, 13(10): 1889-1904.
- [2] RUDLOE A. Locomotor and light responses of larvae of the horseshoe crab, *Limulus polyphemus* (L.) [J]. Biological Bulletin, 1979, 157(3): 494-505.
- [3] SEKIGUCHI K, SUGITA H. Systematics and hybridization in the

- four living species of horseshoe crabs [J]. *Evolution*, 1980, 34(4): 712-718.
- [4] RUDLOE A, RUDLOE J. The changeless horseshoe crab [J]. *National Geographic*, 1981, 159: 562-572.
- [5] 黄勤, 林能锋, 游华, 等. 建立平潭中国鲎保护区刻不容缓 [J]. *福建环境* 2002, 19(6): 14-16.
- [6] 黄勤, 林能锋, 高扬盛, 等. 平潭中国鲎种群衰退原因分析 [J]. *福建环境* 2003, 20(1): 7-8.
- [7] 黄勤, 林能锋, 陈英禄, 等. 平潭中国鲎保护区规划建议 [J]. *福建环境* 2003, 20(4): 35-38.
- [8] 周时强, 郭丰, 吴荔生, 等. 福建海岛潮间带底栖生物群落生态的研究 [J]. *海洋学报* 2001, 23(5): 104-109.
- [9] 吕小梅, 方少华, 张跃平, 等. 福建海坛海峡潮间带大型底栖动物群落结构及次级生产力 [J]. *动物学报*, 2008, 54(3): 428-435.
- [10] 翁朝红, 谢仰杰, 肖志群, 等. 福建及中国其他沿岸海域中国鲎资源分布现状调查 [J]. *动物学杂志* 2012, 47(3): 40-48.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 蔡立哲. 深圳湾底栖动物生态学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社 2015.
- [14] 卓异, 蔡立哲, 郭涛, 等. 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布 [J]. *生态学报* 2014, 34(5): 1244-1252.
- [15] JIAO H F, ZHENG D, YOU Z J, et al. Species composition and diversity of macrobenthos in the intertidal zone of Xiangshan bay, China [J]. *Journal of Ocean University of China* 2015, 14(2): 375-384.
- [16] MACHADO P M, COSTA L L, SUCIU M C, et al. Extreme storm wave influence on sandy beach macrofauna with distinct human pressures [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 107(1): 125-135.
- (上接第172页)
- [7] MA X L, ZUO H, TIAN M J, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. *Chemosphere* 2016, 144: 264-272.
- [8] LIU M, ZHANG A B, LIAO Y J, et al. The environment quality of heavy metals in sediments from the central Bohai Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin* 2015, 100(1): 534-543.
- [9] 邢颖, 吕永龙, 刘文彬, 等. 中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析 [J]. *环境科学* 2006, 27(2): 228-234.
- [10] 刘敏霞, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及影响因素 [J]. *环境科学* 2013, 34(8): 3309-3315.
- [11] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 胡朝晖, 张干, 丘耀文, 等. 我国渔港沉积物的重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. *地球化学* 2010, 39(4): 297-304.
- [13] 李永忠, 张江山. 闽江口-马祖海域沉积物重金属分布现状与污染分析 [J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 1997, 13(4): 102-106.
- [14] 蔡清海, 杜琦, 钱小明, 等. 福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素来源分析 [J]. *地质学报*, 2007, 81(10): 1444-1448.
- [15] 林建杰. 福建罗源湾海区表层沉积物重金属的含量与分布 [J]. *台湾海峡* 2008, 27(3): 362-366.
- [16] 王宪, 李文权, 张钊. 福建省近岸港湾沉积物质量状况 [J]. *海洋学报* 2002, 24(4): 127-131.
- [17] 张开毕. 福建省近岸浅海沉积物地球化学环境质量 [J]. *海洋地质与第四纪地质* 2008, 28(2): 45-52.
- [18] 赵卫红. 福建近岸海域沉积物污染现状与防治措施 [J]. *环境与开发* 2000, 15(2): 37-38.
- [19] 刘用清. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用 [J]. *海洋环境科学* 1995, 14(2): 68-73.
- [20] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究 [J]. *环境科学* 1991, 13(4): 70-75.