

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20090

## 基于大型底栖动物的桑沟湾不同养殖区底栖生境健康评价

丁敬坤<sup>1, 2, 3</sup>, 薛素燕<sup>1, 2</sup>, 李加琦<sup>1, 2</sup>, 张雯雯<sup>1, 2, 3</sup>, 霍恩泽<sup>1, 2</sup>, 于文涵<sup>1, 2</sup>, 马占飞<sup>1, 2</sup>, 蒋增杰<sup>1, 2</sup>, 毛玉泽<sup>1, 2</sup>

1. 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

**摘要:** 为了解桑沟湾养殖区大型底栖动物的动态变化以及底栖生境的健康状况, 于2019年5—9月采集了中国北方典型养殖海湾桑沟湾不同养殖区(藻类、贝类和网箱养殖区)大型底栖动物样品, 分析了不同养殖区大型底栖动物的种类、组成、数量分布、群落结构及生物多样性等群落特征, 运用多样性指数、AMBI和M-AMBI指数法评价了不同养殖区底栖生境健康状况的时空变化。调查共鉴定出大型底栖动物56种, 其中多毛类31种, 甲壳类10种, 软体动物9种, 棘皮动物4种, 其他类2种, 大型底栖动物的优势种主要为多毛类, 以污染耐受种为主; 调查期间, 贝类养殖区和网箱养殖区的群落多样性指数 $H'$ 呈现下降趋势, 表明贝类养殖活动和网箱养殖活动已经造成沉积物中有机物颗粒过度积累。ABC曲线显示, 7月桑沟湾养殖区开始受到干扰, 8月和9月受到中等程度的干扰。AMBI和M-AMBI指数评价显示桑沟湾养殖区域底栖生态系统处于轻度或中度干扰状态, 底栖生境健康状况处于高等或者良好的状态。

**关键词:** 桑沟湾; 大型底栖动物; 底栖生境; 健康评价

中图分类号: S967

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1393-09

底栖生境对海洋生物至关重要, 因为海洋生物直接或间接地依赖海底来进食、躲藏、休息或繁殖。栖息于海底的主要为动植物群落, 与鱼类或海洋哺乳动物相比, 它们无法移动或移动缓慢。当底部出现压力时, 整个群落都会暴露出来。因此, 底栖生物栖息地的状况反映了施加于其上的所有压力的综合作用。底栖生物通常用来评估不同压力(例如养殖活动对底栖生物的扰动、营养盐和有机物质的富集、污染物沉积)对底栖生境和群落状况的影响。大型底栖动物作为底栖生境的重要组成部分, 其群落的物种组成通常会随着非生物条件和人类干扰的变化而变化, 使得大型底

栖动物经常被用作指示底栖生境健康状况的长期指标, 且由于大型底栖动物相对固定, 其物种组成和丰度等可作为反映海洋环境变化的生物指标<sup>[1]</sup>。

桑沟湾是中国北方重要的养殖海域, 已经有30多年的养殖历史, 养殖规模较大, 占全湾面积的70%, 主要的水产养殖种类有牡蛎、海带、扇贝、海参等, 形成了一种多营养层次综合养殖模式<sup>[2]</sup>。关于桑沟湾的生态健康状况已有较多的研究, 例如水体的营养状况<sup>[3]</sup>, 贝类养殖活动对水动力条件、浮游动植物的影响和养殖生态系统健康综合评价等<sup>[4-7]</sup>。然而, 关于桑沟湾大型底栖动物的研究较少, 主要涉及群落结构、多样性及次

收稿日期: 2020-04-20; 修订日期: 2020-06-29.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900803); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费项目(20603022020001); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD50).

作者简介: 丁敬坤(1995-), 男, 硕士研究生, 从事海洋生态系统健康评价研究. E-mail: 913292967@qq.com

通信作者: 毛玉泽, 研究员, 从事养殖生态学研究. E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn

级生产力<sup>[8-9]</sup>等一些基础研究,未对桑沟湾底栖生境健康状况进行研究。本文通过对桑沟湾不同养殖区大型底栖动物的群落组成和结构特征的研究,分析养殖活动对大型底栖动物的影响,并对养殖海域的底栖生境健康状况进行评价,从而为桑沟湾海洋生态系统的健康评价提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位设置和样品处理

于 2019 年 5 月至 9 月在桑沟湾养殖区和对照区进行了 5 个航次的连续采样,调查站位覆盖,藻类养殖区 Z (Z1、Z2、Z3),贝类养殖区 B (B1、B2、B3),网箱区 W (W1、W2、W3、W4、W5),采样站位分布见图 1,每个调查站位采用抓斗式采泥器(型号为 Van Veen grab 1000 cm)采集 2~3 个表层泥样,用 0.5 mm 的筛网过滤、冲洗后,保存于 5% 的甲醛溶液中。

### 1.2 数据统计分析

**1.2.1 群落特征分析** 大型底栖动物群落特征分析主要通过优势度指数( $Y$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )及 Pielou's 均匀度指数( $J'$ )进行分析<sup>[10]</sup>。

**1.2.2 群落结构** 利用 PRIMER 5.0 软件进行大型底栖动物群落结构分析,对大型底栖动物的物种丰度进行  $\lg(x+1)$  转换后,计算站位间的 Bray-Curtis 相似性系数,构建相似性矩阵,并采用等级聚类方法和非度量多维尺度分析大型底栖动物

群落的空间分布<sup>[11]</sup>。

**1.2.3 底栖生境健康评价** 底栖生境质量评价方法采用丰度/生物量(ABC)曲线法、AMBI 指数和 M-AMBI 指数法。AMBI 指数根据各种底栖动物对环境的敏感程度,将其分为 5 个生态组(ecological group, EG)<sup>[12]</sup>, EGI 为干扰敏感种(disturbance-sensitive species),对富营养化非常敏感; EGII 为干扰不敏感种(disturbance-indifferent species),对有机物过剩不敏感; EGIII 为干扰耐受种(disturbance-tolerant species),可以忍耐过量的有机物; EGIV 为二阶机会种(the second-order opportunistic species),生存在显著失衡的环境状态下; EGV 为一阶机会种(the first-order opportunistic species),生存在显著失衡的环境下,皆是食用沉积物的动物。M-AMBI 参照标准按照欧盟对生态环境质量的定义,“差”生态质量的参照状态值选自无生命沉积物下的群落结构参数和 AMBI 值,因此,多样性指数、物种数参考值取 0, AMBI 的参照值取 6<sup>[13-14]</sup>,评价标准详见表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 大型底栖动物群落基本特征

养殖区共鉴定出大型底栖动物 56 种,种类最多的是多毛类共 31 种,占总数的 55%;甲壳类 10 种,占 17%;软体动物 9 种,占 16%;棘皮动物 4 种,占 7%;其他类 2 种,占 4%。不同养殖区大型底栖动物种类分布差异较小,在种类数量上,藻

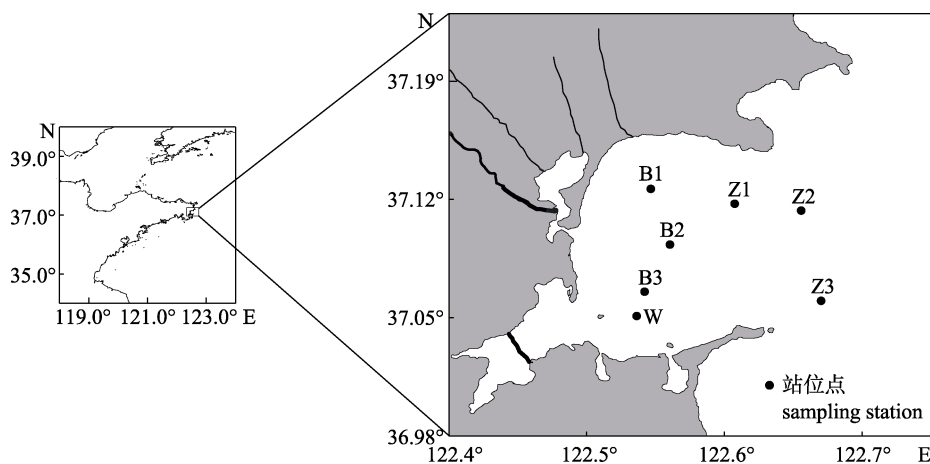


图 1 桑沟湾调查站位

Fig. 1 The sampling stations in Sanggou Bay

表 1 AMBI 和 M-AMBI 指数分级、扰动等级以及生态环境质量状况<sup>[15]</sup>  
Tab. 1 AMBI and M-AMBI values and their ecological classifications<sup>[15]</sup>

AMBI 值 AMBI value	扰动等级 classification	M-AMBI 值 M-AMBI value	生态环境质量状况 benthic habitat health
0.0<AMBI≤1.2	无扰动 undisturbed	0.77<M-AMBI≤1	高等 high
1.2<AMBI≤3.3	轻度扰动 slightly disturbed	0.53<M-AMBI≤0.77	良好 good
3.3<AMBI≤5.0	中度扰动 moderately disturbed	0.38<M-AMBI≤0.53	一般 moderate
5.0<AMBI≤6.0	重度扰动 heavily disturbed	0.20<M-AMBI≤0.38	较差 poor
6.0<AMBI≤7.0	极端扰动 extremely disturbed	0<M-AMBI≤0.20	差 bad

类养殖区和贝类养殖区的总种数及各门类种数基本一致, 网箱养殖区的总种数要高于其他养殖区。在种类组成上, 大型底栖动物存在区域差异, 藻类养殖区、贝类养殖区和网箱养殖区共有种 10 种, 分别占各养殖区总种数的 37%、38%和 28%, 网箱养殖区的共有种最少, 大多数共有种为多毛类。本研究中 5 个航次的优势种及所属生态分组的情况如表 2 所示, 根据优势种大于 0.02 的物种为优势种, 可以看出主要的优势种为索沙蚕 (*Lumbrinereis* sp.)、多丝独毛虫(*Tharyx multifilis*)、背蚓虫(*Notomastus latericeus*)、中蚓虫(*Mediomastus californiensis*)、西方似蛭虫(*Amaeana occidentalis*)、日本拟背尾水虱(*Paranthurus japonica*)、尖锥虫(*Scoloplos* sp.)、光滑河蓝蛤(*Potamocorbula laevis*)、寡节甘吻沙蚕 (*Glycinde gurjanovae*)和日本浪漂水虱(*Cirolana japonensis*)。各个航次的优势种不同, 其中索沙蚕、日本

拟背尾水虱在 5 个航次调查中均为优势种。在大型底栖动物生物类群的分布上, 优势种主要为多毛类, 在生态分组的分布上, 各航次的优势种以 EGIII 为主。

### 2.2 桑沟湾大型底栖动物群落结构

分别对 5 个航次桑沟湾不同养殖区大型底栖动物群落进行等级聚类分析, 结果如图 2 所示, 网箱养殖区各调查站位具有高相似性, 聚类到同一个类群中; 贝类养殖区各调查站位群落结构的相似性要低于网箱养殖区, 但除了个别站位, 也能很好的聚类到相同的群落中, 藻类养殖区各调查站位的相似度最低, 无论与其他养殖区还是藻类养殖区调查站位之间, 除了 6 月和 8 月在极低的相似度下, 聚类到了同一个群落, 其他月份均不能聚类, 规律不明显。在同等类型的水体中, 网箱养殖区和贝类养殖区采样站位内的群落结构差异小, 藻类养殖区差异较大。

表 2 桑沟湾大型底栖动物优势种及优势度

Tab. 2 The dominant species and dominant degree of macrobenthos in Sanggou Bay

优势种 dominant species	优势度 dominant degree					生态分组 ecological group
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 October	9 月 September	
索沙蚕 <i>Lumbrinereis</i> sp.	0.27	0.30	0.27	0.09	0.32	EGIII
多丝独毛虫 <i>Tharyx multifilis</i>	0.11	0.13	0.05	-	-	EGIV
背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>	0.05	-	-	-	-	EGIII
中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	0.05	0.02	0.04	-	0.05	EGIII
西方似蛭虫 <i>Amaeana occidentalis</i>	0.04	0.01	0.06	-	-	EGIII
日本拟背尾水虱 <i>Paranthurus japonica</i>	0.04	0.06	0.08	0.27	0.18	EGIII
尖锥虫 <i>Scoloplos</i> sp.	0.03	0.02	-	-	-	EGI
光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	-	0.03	-	-	-	EGV
寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanovae</i>	-	0.02	-	-	-	EGII
日本浪漂水虱 <i>Cirolana japonensis</i>	-	-	0.03	-	-	EGII

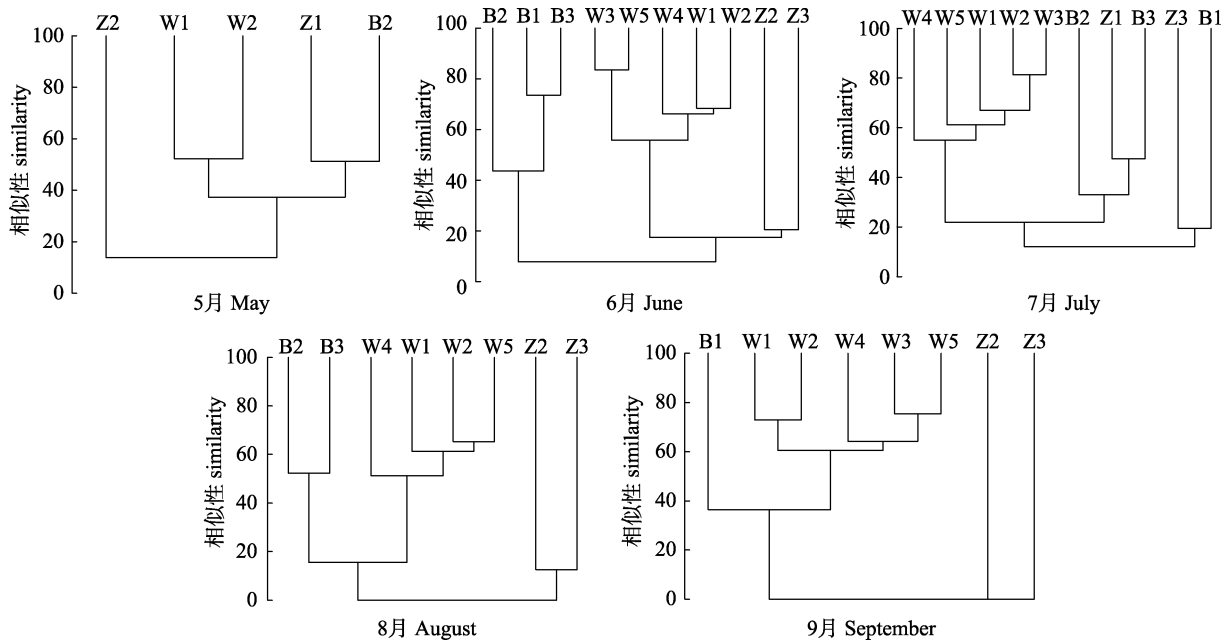


图 2 桑沟湾不同月份大型底栖动物等级聚类图

Fig. 2 The CLUSTER picture of macrobenthos in different months in Sanggou Bay

2.3 大型底栖动物群落多样性特征

藻类养殖区各站位的 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 0.8~2.4 (平均 1.4)(图 3), Pielou 均匀度指数范围为 0.6~1(平均 0.9)(图 4), Margalef 丰富度指数范围为 0.3~1.4(平均 0.7)(图 5); 贝类养殖区站位的 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 0.8~2.2 (平均 1.7), Pielou 均匀度指数范围为 0.8~1.0 (平均 0.9), Margalef 丰富度指数范围为 0.3~1.4 (平均 0.8); 网箱养殖区站位的 Shannon-Wiener 多样性指数范围为 0.9~2.3 (平均 1.5), Pielou

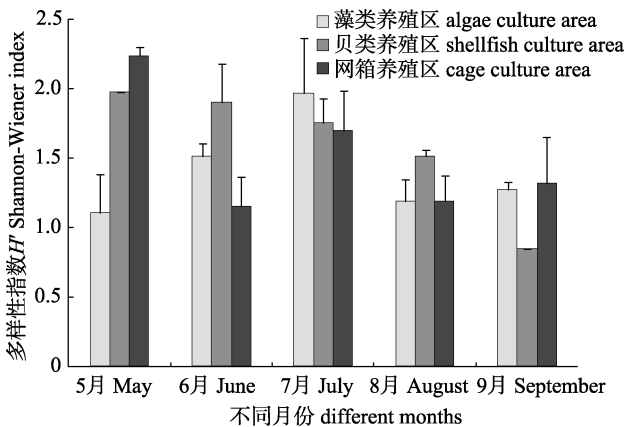


图 3 桑沟湾大型底栖动物群落多样性指数  $H'$  时间分布  
Fig. 3 Temporal distribution characteristic of indices of diversity ( $H'$ ) of macrobenthos in Sanggou Bay

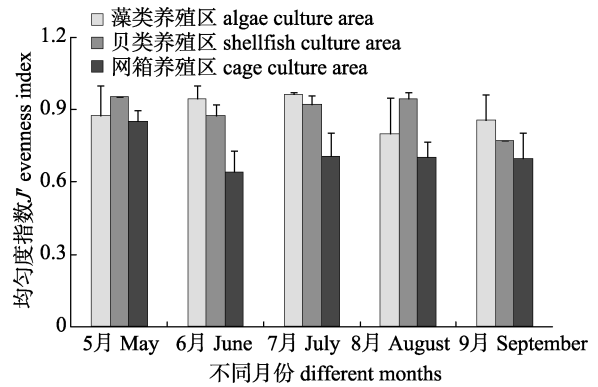


图 4 桑沟湾大型底栖动物群落均匀度指数  $J'$  时间分布  
Fig. 4 Temporal distribution characteristic of indices of evenness ( $J'$ ) of macrobenthos in Sanggou Bay

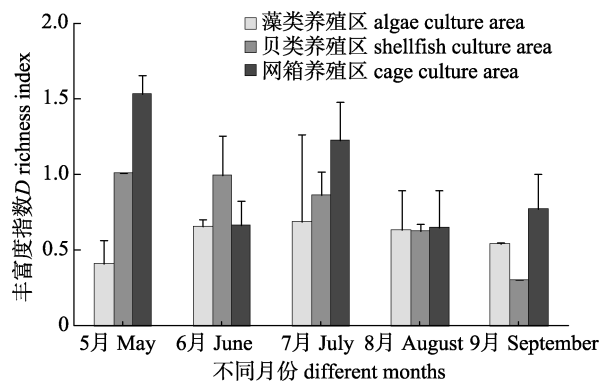


图 5 桑沟湾大型底栖动物群落丰富度指数  $D$  时间分布  
Fig. 5 Temporal distribution characteristic of indices of richness ( $D$ ) of macrobenthos in Sanggou Bay

均匀度指数范围为 0.5~0.9 (平均 0.7), Margalef 丰富度指数范围为 0.3~1.7 (平均 0.9)。

### 2.4 丰度-生物量(ABC)曲线

2019 年 5 月至 9 月桑沟湾养殖区调查的大型底栖动物群落丰度-生物量(ABC)曲线如图 6 所示, 桑沟湾养殖区不同调查航次养殖活动对群落扰动状况差别明显。5 月和 6 月生物量曲线始终在丰度曲线之上, 且优势度明显, 表明大型底栖动物群落尚未受到干扰。7 月生物量和丰度优势度曲线起点位置很接近, 表明养殖区底栖群落开始受到干扰。8 月和 9 月生物量和丰度曲线有交叉, 显

示大型底栖动物群落受到中等程度干扰。

### 2.5 AMBI 和 M-AMBI

桑沟湾养殖区大型底栖动物扰动状况和底栖生境健康状况如图 7、图 8 所示。藻类养殖区 AMBI 的范围为 0.5~3.4, M-AMBI 的范围为 0.4~0.9, 干扰程度为轻度干扰或无干扰状态, 底栖生境处于好或一般状态; 贝类养殖区 AMBI 的范围为 1.8~4.2, M-AMBI 的范围为 0.5~0.8, 干扰程度为轻度干扰, 6 月出现中度干扰, 底栖生境处于好或一般的状态; 网箱养殖区 AMBI 的范围为 1.8~2.6, M-AMBI 的范围为 0.5~0.9, 底栖干扰程度为轻度

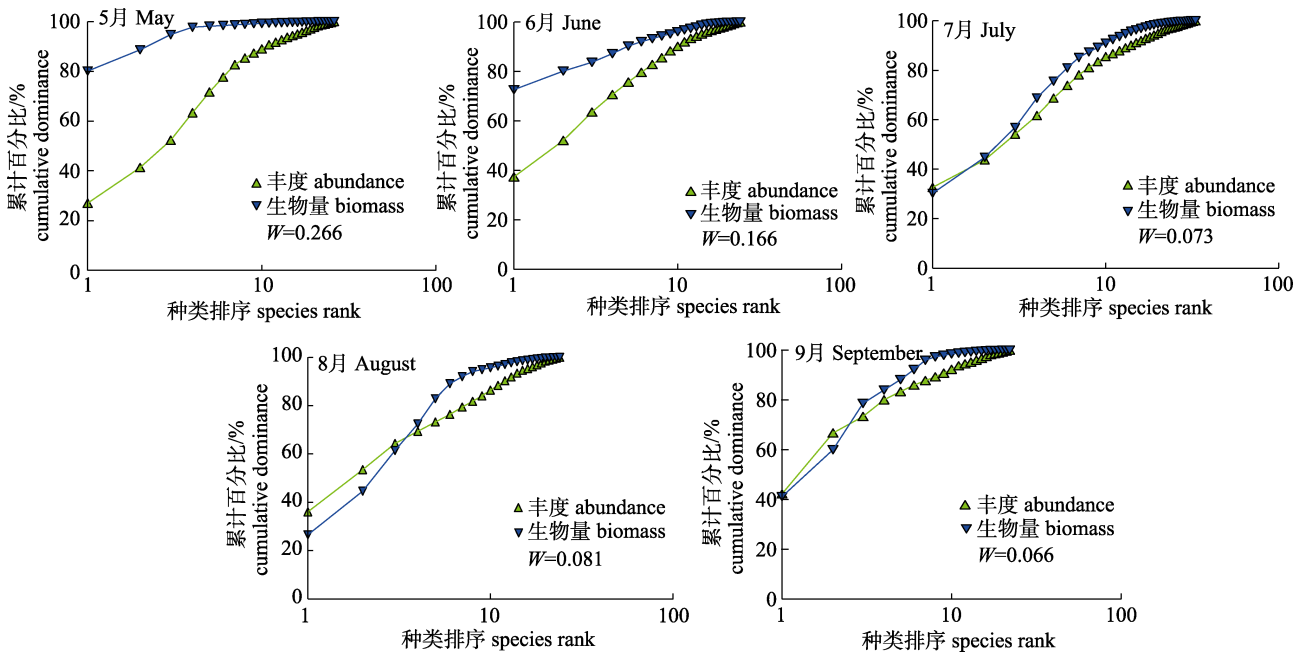


图 6 桑沟湾养殖区大型底栖动物群落 ABC 曲线

Fig. 6 Abundance-biomass curves of macrobenthos in Sanggou Bay

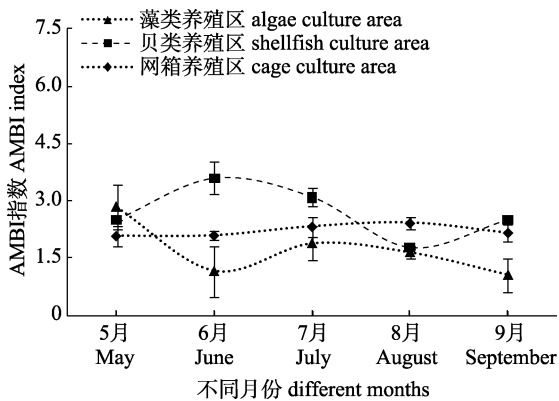


图 7 桑沟湾不同养殖区 AMBI 值

Fig. 7 AMBI index in different culture areas in Sanggou Bay

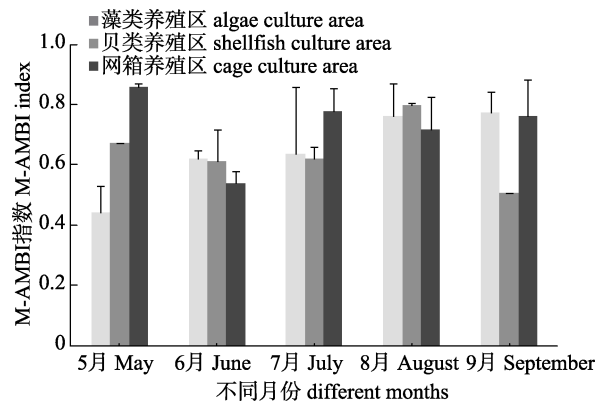


图 8 桑沟湾不同养殖区 M-AMBI 值

Fig. 8 M-AMBI index in different culture areas in Sanggou Bay

干扰,底栖生境处于高或好的状态。

### 3 讨论

#### 3.1 桑沟湾大型底栖动物群落组成和优势种

从大型底栖动物的种类分析,本次调查桑沟湾养殖区大型底栖动物共 56 种,低于 2009 年的调查结果(83 种)<sup>[8]</sup>。本研究结果种类比调查站位相近的杨艳云等<sup>[16]</sup>2016 年的调查结果略少(67 种),5 个航次采集的大型底栖动物样品中,包括多毛类、甲壳类、软体动物和棘皮动物等浅海水域常见大型底栖动物类群,其中多毛类物种数占群落物种总数达 55%,类群数量优势明显,甲壳类和软体动物次之,其他门类较少,群落组成与杨艳云等<sup>[16]</sup>研究结果一致。从不同类群的占比来看,桑沟湾大型底栖动物中多毛类占优势地位。从物种优势度分析,养殖区优势种主要为多毛类,从优势物种的生态分组来看,优势物种主要的生态分组为 EGIII,即干扰耐受种。调查区域优势种与杨艳云等<sup>[16]</sup>研究结果相差不大,均以多毛类为主,其中中蚓虫、尖锥虫、日本拟背尾水虱、多丝独毛虫、寡节甘吻沙蚕为相同的优势种类。总体来看,桑沟湾养殖区大型底栖动物种类和组成结构未发生较大变化。本次调查为连续调查,优势物种从 5 月的 7 种下降到 9 月的 3 种,优势物种的数量呈减少的趋势,且 9 月索沙蚕的优势度高达 0.32。有研究表明,养殖高峰期个别种类具有高优势度,群落内各种生态位处于不平衡状态,生物群落脆弱<sup>[17]</sup>,桑沟湾 7 月、8 月和 9 月是养殖活动的高峰期,据此说明,桑沟湾底栖群落总体处于不稳定状态,受养殖活动影响明显。

#### 3.2 桑沟湾养殖区大型底栖群落结构及多样性特征

大型底栖动物群落结构和多样性指数的变化能够反映底栖生境的变化,特别是连续的监测,能够更加准确地监测不同养殖区域底栖生境的变化。大型底栖动物群落结构相似性分析显示,桑沟湾网箱养殖和贝类养殖区站位间具有较高的相似性,藻类养殖水域站位间空间差异性较强。桑沟湾藻类养殖区、贝类养殖区和网箱养殖区多样性指数时间变化规律不同,藻类养殖区多样性指

数  $H'$  呈波动变化趋势,7 月最高,贝类养殖区和网箱养殖区呈下降趋势。已有的研究表明,桑沟湾大型底栖动物多样性指数受季节性影响较小<sup>[8]</sup>,不同区域的差异主要与养殖方式和位置有关。首先,不同养殖方式对底栖生态系统的贡献不同,藻类养殖区位于湾口,水动力强,藻类在生长过程中,部分藻体随着叶片侵蚀、断裂,有时整个藻体从筏架脱落,藻类养殖通过以上方式向底质输送有机质,但未造成底质中有机质的过度富集,其多样性指数变化受到自然环境的影响较大,而其他两个区域位于湾内,养殖活动均会对底栖生境造成一定的影响,网箱养殖会产生大量的残饵和鱼类代谢物,滞留在网箱养殖区附近,贝类养殖则是将海水中的有机碎屑和生物等通过滤食作用转化为自身的营养物质,但有很大一部分会以粪便和假粪的形式排出,通过生物沉积的方式进入底质中<sup>[18-19]</sup>。2016 年桑沟湾养殖区沉积物中有机物含量分析显示贝类养殖区和网箱养殖区有机物含量随养殖时间增加而增加<sup>[16]</sup>,已有研究表明适当的有机物质的增加对底栖群落有利的影响,生物量增加,群落多样性上升。当有机物过度积累,大量的有机颗粒无法分解,导致沉积环境处于无氧环境,影响底栖动物的生存,耐污种类占据主要优势地位,生物多样性下降<sup>[20-21]</sup>。调查期间贝类和网箱养殖区大型底栖动物丰富度和多样性指数呈下降趋势,这种情况表明桑沟湾网箱养殖和贝类养殖活动已经造成沉积物中有机物颗粒过度积累。

#### 3.3 桑沟湾养殖区底栖健康状况

贝类和网箱养殖在一定程度上都会造成底栖生境有机物质的积累,基于底栖群落种类生物量和丰度优势度的丰度/生物量(ABC)曲线,能够很好地反映底栖生境的有机污染状态<sup>[22-23]</sup>。分析显示 8 月和 9 月桑沟湾养殖区的底栖群落受到中度程度的干扰。其原因可能与海水养殖活动的强度和周期有关,桑沟湾贝类为全年养殖,养殖的高峰期为 4—11 月,网箱养殖周期为 5—11 月,调查期间正是贝类和网箱养殖活动高峰季节,随着时间的推移,养殖活动的影响增强,生物量较低的多毛类种类和数量增多,而大个体的甲壳动物和

棘皮动物减少, 丰度和生物量优势度曲线相交, 底栖群落受到干扰。

杨艳云<sup>[24]</sup>已应用 AMBI 和 M-AMBI 指数对桑沟湾养殖区底栖生境的健康状况进行了评价, 结果显示贝类养殖区受到轻度或中等程度的干扰, 网箱养殖区处于轻度干扰的状态, 与本研究结果一致, 但由于是季节性调查, 且不是同一养殖周期, 未能对养殖期间的底栖生境的动态变化进行调查。本研究通过连续调查, 更加详细地研究了养殖区域底栖生境健康状况动态变化, AMBI 指数分析显示, 桑沟湾不同养殖区的底栖生境受到不同程度的干扰, 位于湾口的藻类养殖区由于与外海交换能力强, 一直处于较低的扰动状态; 网箱养殖区位于桑沟湾西南角, 虽然位于湾内, 水交换能力差<sup>[25]</sup>, 但由于网箱数量较少, 在养殖期间一直处于轻度扰动的状态, 且 5 个航次的调查结果较稳定, 未出现较大的波动; 贝类养殖区受到的干扰程度高于其他养殖区, 在 6 月调查中出现了中等程度的干扰。桑沟湾采用的筏式贝类养殖模式, 养殖量较大<sup>[26]</sup>, 双壳贝类在养殖期间能够产生大量的生物沉积物, 有研究表明, 桑沟湾不同时期, 贝类的生物沉积速率不同, 沉积速率在 5 月、6 月和 7 月都较高, 8 月的生物沉积速率明显降低<sup>[27]</sup>。底栖生境干扰程度与贝类的沉积速率呈现相同的趋势, 沉积速率高, 底栖生境受到的干扰程度就高, 沉积速率下降, 底栖生境受到的干扰程度就低。M-AMBI 指数分析显示, 桑沟湾不同养殖区底栖生境质量状况差异不显著, 除 5 月藻类养殖区和 9 月贝类养殖区外, 其他月份的养殖区底栖生境环境质量均处于好或者高的状态。通过海洋生物指数 M-AMBI 和 AMBI 评价可以看出桑沟湾养殖区域底栖生境健康状况处于高等或者良好的状态, 底栖生态系统处于者轻度干扰或中度干扰的状态。

#### 参考文献:

[1] Li X Z. An overview of studies on marine macrobenthic biodiversity from Chinese waters: Principally from the Yellow Sea[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(6): 676-684. [李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 676-684.]

- [2] Mao Y Z, Li J Q, Xue S Y, et al. Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3230-3237. [毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3230-3237.]
- [3] Zhang J H, Jiang Z J, Wang W, et al. Seasonal distribution and variation of nutrients and nutrients limitation in Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(4): 16-25. [张继红, 蒋增杰, 王巍, 等. 桑沟湾营养盐时空分布及营养盐限制分析[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 16-25.]
- [4] Zhang L H, Zhang X L, Li R X, et al. Impact of scallop culture on dinoflagellate abundance in the Sanggou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(3): 342-346. [张莉红, 张学雷, 李瑞香, 等. 桑沟湾扇贝养殖对甲藻数量的影响[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 342-346.]
- [5] Wan L. Effect of shellfish farming on nutrient salts of seawater in Sanggou Bay in spring[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(6): 62-66. [万玲. 春季桑沟湾海域贝类养殖对海水中营养盐的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(6): 62-66.]
- [6] Liu X H. Ecosystem dynamic models for south Yellow Sea and an aquaculture bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [刘学海. 南黄海及养殖功能海域生态动力学模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [7] Fu M Z, Pu X M, Wang Z L, et al. Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 238-248. [傅明珠, 蒲新明, 王宗灵, 等. 桑沟湾养殖生态系统健康综合评价[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 238-248.]
- [8] Wang Z X, Sun P X, Liu C X, et al. The species diversity of macrobenthic fauna in Sanggou Bay, China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(7): 79-84. [王宗兴, 孙丕喜, 刘彩霞, 等. 桑沟湾大型底栖动物生物多样性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(7): 79-84.]
- [9] Wang Z X, Sun P X, Liu C X, et al. Secondary production of macrobenthos in the Sanggou Bay, Shandong, China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(4): 495-498. [王宗兴, 孙丕喜, 刘彩霞, 等. 桑沟湾大型底栖动物的次级生产力[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 495-498.]
- [10] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey, Part 6: Marine biological survey GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量

- 监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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, 2007.]
- [11] Zhou H, Zhang Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 58-64. [周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(1): 58-64.]
- [12] Borja A, Franco J, Pérez 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.
- [13] Muxika I, Borja A, Bonne W. The suitability of the marine biotic index (AMBI) to new impact sources along European coasts[J]. *Ecological Indicators*, 2005, 5(1): 19-31.
- [14] Forchino A, Borja A, Brambilla F, et al. Evaluating the influence of off-shore cage aquaculture on the benthic ecosystem in Alghero Bay (Sardinia, Italy) using AMBI and M-AMBI[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(5): 1112-1122.
- [15] Borja A, Josefsen A B, Miles A, et al. An approach to the intercalibration of benthic ecological status assessment in the North Atlantic ecoregion, according to the European Water Framework Directive[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 42-52.
- [16] Yang Y Y, Zhang J H, Wu W G, et al. Macrobenthic community characteristics of different culture areas in Sanggou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(6): 922-931. [杨艳云, 张继红, 吴文广, 等. 桑沟湾不同养殖区大型底栖动物的群落结构特征[J]. *水产学报*, 2018, 42(6): 922-931.]
- [17] Zhou J, Ji W W. On species composition and diversity of macrobenthos in Sandu Bay[J]. *Marine Fisheries*, 2011, 33(4): 378-388. [周进, 纪炜炜. 三都澳大型底栖动物种类组成特点[J]. *海洋渔业*, 2011, 33(4): 378-388.]
- [18] Gilbert F, Souchu P, Bianchi M, et al. Influence of shellfish farming activities on nitrification, nitrate reduction to ammonium and denitrification at the water-sediment interface of the Thau lagoon, France[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 151(1-3): 143-153.
- [19] da Costa K G, Nalesso R C. Effects of mussel farming on macrobenthic community structure in Southeastern Brazil[J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1-4): 655-663.
- [20] Tartari M, Turnbull P, Trinkl B, et al. The environmental impact of marine fish cage culture[J]. *Grass & Forage Science*, 2001, 58(2): 1-31.
- [21] Pearson T H, Rosenberg R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment[J]. *Oceanography and Marine Biology*, 1978, 16: 229-311.
- [22] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [23] Warwick R M, Clarke K R. Relearning the ABC: Taxonomic changes and abundance/biomass relationships in disturbed benthic communities[J]. *Marine Biology*, 1994, 118(4): 739-744.
- [24] Yang Y Y. Assessment of the influence of large-scale aquaculture on benthic environment in Sanggou Bay[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018. [杨艳云. 桑沟湾规模化养殖对底质环境的影响评价[D]. 大连: 大连海洋大学, 2018.]
- [25] Wei H, Zhao L, Yuan Y, et al. Study of hydrodynamics and its impact on mariculture carrying capacity of Sanggou Bay: Observation and modeling[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 65-71. [魏皓, 赵亮, 原野, 等. 桑沟湾水动力特征及其对养殖容量影响的研究——观测与模型[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 65-71.]
- [26] Jiang Z J, Fang J G, Men Q, et al. Studies on the interaction between shellfish long-line culture and environment in Sungo Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2006(1): 23-29. [蒋增杰, 方建光, 门强, 等. 桑沟湾贝类筏式养殖与环境相互作用研究[J]. *南方水产*, 2006(1): 23-29.]
- [27] Mao Y Z. Effects of bivalve raft culture on environment and their ecological regulation in Sanggou Bay, China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. [毛玉泽. 桑沟湾滤食性贝类养殖对环境的影响及其生态调控[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.]



## Health assessment of large-scale aquaculture on benthic habitats in Sanggou Bay

DING Jingkun<sup>1,2,3</sup>, XUE Suyan<sup>1,2</sup>, LI Jiaqi<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenwen<sup>1,2,3</sup>, HUO Enze<sup>1,2,3</sup>, YU Wenhan<sup>1,2</sup>, MA Zhanfei<sup>1,2</sup>, JIANG Zengjie<sup>1,2</sup>, MAO Yuze<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Seaweed-bivalve polyculture and Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) of seaweed, bivalves, fishes, and sea cucumbers have been conducted in Sanggou Bay for decades, leading the development of eco-farming globally. To understand the dynamic changes of macrobenthos and the health status of benthic habitats in the Sanggou Bay, five surveys of macrobenthos were conducted in different mariculture areas of to understand the impact of aquaculture on the benthic ecosystem from May to September 2019. The community characteristics of macrobenthos, such as species abundance, composition, distribution, and biodiversity were analyzed in different mariculture areas in five surveys, and the health status of the benthic ecosystem in Sanggou Bay was assessed using the AZTI Marine Index (AMBI) and multivariate-AMBI(M-AMBI). A total of 56 species were identified, including 31 Polychaetes, 10 Crustacea, 9 Mollusca, 3 Echinodermata, and 2 species of other taxa. The dominant species were *Lumbrinereis* sp., *Tharyx multifilis*, *Notomastus latericeus*, *Mediomastus californiensis*, *Amaeana occidentalis*, *Paranthura japonica*, *Scoloplos* sp., *Potamocorbula laevis*, *Glycinde gurjanovae*, and *Cirolana japonensis*. During the breeding period, the community diversity index  $H'$  of the shellfish and cage culture areas showed a downward trend, indicating that shellfish and cage culture activities have caused excessive organic particle accumulation in the sediments. The abundance/biomass curves showed that the macrobenthos community structure in the Sanggou Bay breeding area began to be disturbed in July, and was moderately disturbed in August and September. The AMBI and M-AMBI Index analyses showed that the macrobenthic community was not disturbed or slightly disturbed and the benthic habitat health tended to relatively good.

**Key words:** Sanggou Bay; macrobenthos; benthic habitats; health assessment

**Corresponding author:** MAO Yuze. E-mail: maoyz@ysfr.ac.cn