

# 新开口海湾扇贝养殖区环境质量状况分析及评价

姚新悦<sup>1,2,3</sup>, 肖国华<sup>1,2</sup>, 李步先<sup>4</sup>, 郭冉<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>河北省海洋与水产科学研究院, 河北 秦皇岛

<sup>2</sup>河北省海洋生物资源与环境重点实验室, 河北 秦皇岛

<sup>3</sup>河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛

<sup>4</sup>唐山工业职业技术学院, 河北 唐山

收稿日期: 2021年11月9日; 录用日期: 2021年11月25日; 发布日期: 2021年12月9日

## 摘要

根据2018年新开口海湾扇贝养殖区水质、沉积物和养殖生物4次的监测数据, 按照单因子评价和环境质量综合指数法评价新开口海湾扇贝养殖区环境质量综合状况。新开口扇贝浮筏养殖区水环境监测结果: 溶解氧7.17~12.4 mg/L; COD 0.904~1.56 mg/L; 无机氮0.0158~0.339 mg/L, 活性磷酸盐0.000428~0.0263 mg/L; 石油类0.0144~0.0214 mg/L; 重金属汞0~0.0000660 mg/L; 铜0.000593~0.00202 mg/L; 铅0.000428~0.00313 mg/L; 镉0.0000640~0.000292 mg/L; 铬0.000359~0.00276 mg/L; 砷0.00107~0.00248 mg/L; 各污染指数均小于1, 满足海水水质二类要求。表层沉积物中硫化物 $31.50\sim34.00 \times 10^{-6}$  mg/L, 有机碳0.23~0.25%; 石油类 $25.10\sim32.60 \times 10^{-6}$  mg/L; 铜 $24.30\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L; 铅 $20.10\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L; 镉 $0.14\sim0.18 \times 10^{-6}$  mg/L; 铬 $43.60\sim52.20 \times 10^{-6}$  mg/L; 砷 $7.83\sim11.40 \times 10^{-6}$  mg/L。生物体内污染物质含量符合第一类海洋生物质量标准。环境质量综合指数98.1, 养殖区环境质量等级优良。

## 关键词

新开口, 海湾扇贝, 水环境, 沉积物, 生物质量, 环境质量, 综合指数

# Analysis and Evaluation of Environmental Quality in Scallop Breeding Area of Xinkaikou Bay

Xinyue Yao<sup>1,2,3</sup>, Guohua Xiao<sup>1,2</sup>, Buxian Li<sup>4</sup>, Ran Guo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Hebei Academy of Marine and Fishery Sciences, Qinhuangdao Hebei

\*通讯作者。

<sup>2</sup>Key Laboratory of Marine Bio-Resources and Environment of Hebei Province, Qinhuangdao Hebei

<sup>3</sup>Ocean College, Hebei Agricultural University, Qinhuangdao Hebei

<sup>4</sup>Tangshan Industrial Vocational Technical College, Tangshan Hebei

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the monitoring data of water quality, sediment and aquaculture organisms for 4 times in 2018, the comprehensive status of environmental quality in Xinkaiwan Bay scallop breeding area was evaluated by single factor evaluation and environmental quality comprehensive index method. The results of water environment monitoring in the floating raft culture area of Scallop were as follows: dissolved oxygen 7.17~12.4 mg/L; COD 0.904~1.56 mg/L; Inorganic nitrogen 0.0158~0.339 mg/L, active phosphate 0.000428~0.0263 mg/L; Petroleum 0.0144~0.0214 mg/L; Mercury 0~0.0000660 mg/L; Copper is 0.000593~0.00202 mg/L; Lead is 0.000428~0.00313 mg/L; Cadmium 0.0000640~0.000292 mg/L; Chrome 0.000359~0.00276 mg/L; Arsenic is 0.00107~0.00248 mg/L; All pollution indexes are less than 1, meeting the requirements of class II seawater quality. Sulfur compounds in surface sediments were  $31.50\sim34.00 \times 10^{-6}$  mg/L and organic carbon was 0.23%~0.25%. Petroleum  $25.10\sim32.60 \times 10^{-6}$  mg/L; Copper is  $24.30\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L; Lead is  $20.10\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L; Cadmium is  $0.14\sim0.18 \times 10^{-6}$  mg/L; Chrome  $43.60\sim52.20 \times 10^{-6}$  mg/L; Arsenic is  $7.83\sim11.40 \times 10^{-6}$  mg/L. The contents of pollutants in the organisms meet the quality standards of category I Marine organisms. The comprehensive index of environmental quality is 98.1, and the environmental quality of the breeding area is excellent.

## Keywords

New Opening Bay, Scallop, Water Environment, Sediment, Bioquality, Environmental Quality, Composite Index

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

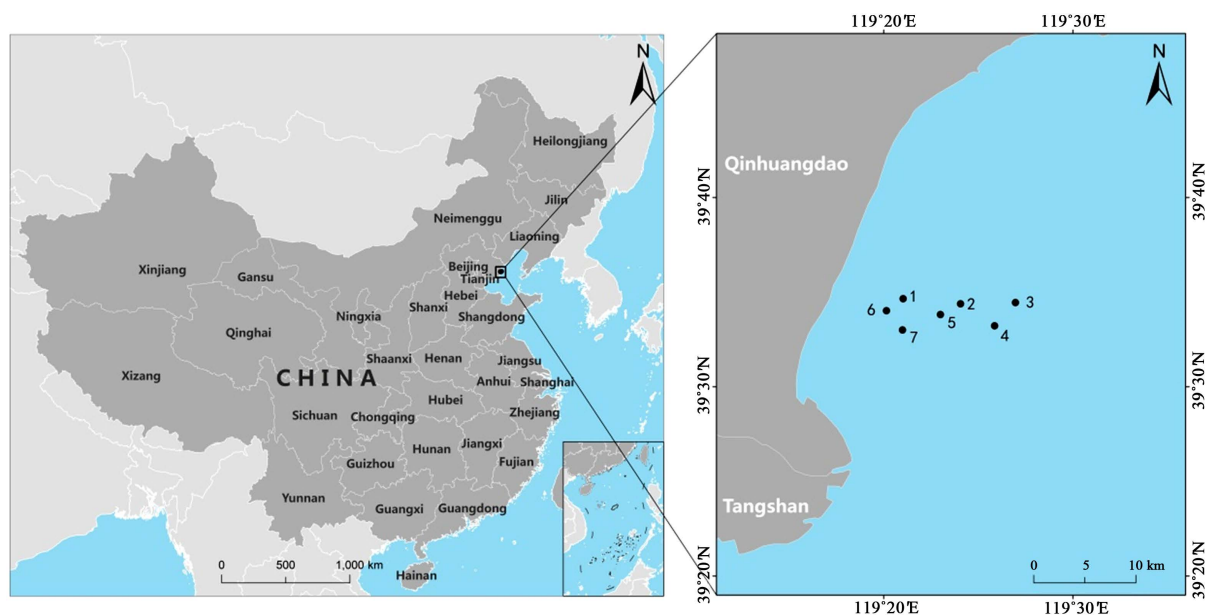
海水贝类养殖是我国渔业的重要组成部分,但贝类养殖区的水域污染问题也日益凸显[1]。廖勇[2]等对江苏如东贝类养殖区环境质量进行评价,研究表明溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)、重金属锌(Zn)、铅(Pb)和汞(Hg)的超标对贝类养殖区造成轻度污染。康飞金[3]等发现宁波滩涂贝类养殖区僧帽牡蛎中铜(Cu)和镉(Cd)含量严重超标准限值,超标率接近 100%;姚茹[4]发现广西沿海牡蛎体内同样存在严重的重金属富集现象。在我国近海,每年筏式海湾扇贝养殖会有大量的粪便堆积在海底,养殖环境不断恶化,引发海湾扇贝发生病害甚至大规模死亡[5]。渔业水域污染问题已经严重影响到了养殖区域生态健康和渔业产品安全,因此,如何在贝类产业快速发展的同时,实现贝类养殖和海洋环境的可持续发展成为亟待解决的问题。这更凸显了对养殖区域内的环境质量进行及时监测与评估的重要性。

本研究对河北典型海湾扇贝养殖区——昌黎新开口扇贝浮筏养殖区水环境、沉积环境和养殖生物及环境质量综合指数进行了评估和分析,以期对河北扇贝养殖区海洋管理和健康养殖提供科学决策依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 样品采集和监测要素

在昌黎新开口海湾扇贝养殖区均匀布设 6 个海水水质调查站位；并在水质调查站位中选取 3 个站位(站位 1#、3#、5#)进行沉积物监测，同时在养殖区外选取自然环境因子与养殖区类似的海域(站位 7#)设置为参照站位进行沉积环境监测。实验于 2018 年开展，对水质、沉积物以及养殖生物质量进行了为期一年的监测。监测站位分布见图 1，监测要素、监测频率和时间见表 1。



**Figure 1.** Distribution of monitoring station at the new opening floating raft farming area

**图 1.** 新开口浮筏养殖区监测站位分布图

**Table 1.** Monitoring elements, frequency and time at the new opening floating raft farming area

**表 1.** 新开口浮筏养殖区环境监测要素、频率和时间

监测介质 Monitoring content	监测要素 Monitoring element	监测频率/(次/年) Monitoring frequency	监测时间 Monitoring time
水质 Water quality	水温、透明度、盐度、pH、DO、COD、磷酸盐、铜、铬、汞、镉、铅、砷、石油类	4	5、7、8、10月各监测一次
沉积物质量 Sediment quality	硫化物、有机碳、重金属(Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、As)	1	8月
生物质量 Biological quality	细菌总数、大肠菌群、石油烃、铜、铬、总汞、镉、铅、砷	1	成熟期

### 2.2. 监测分析方法

水质、沉积物和养殖生物质量监测分析方法依据《海水增养殖区环境监测与评价技术规程(试行)》[6]、《海洋监测技术规程》[7] (HY/T 147-2013)和《海洋调查规范》[8] (GB/T 12763-2007)。

### 2.3. 评价方法与标准

根据《海水增殖区环境监测与评价技术规程》[6], 综合考虑水质、沉积物和养殖生物中各监测要素的达标情况(评价指标和标准见表 2), 计算环境质量综合指数, 进而根据所在等级判断是否满足增殖区功能要求。评价标准见表 2。

**Table 2.** Evaluation indicators and criteria of mariculture area

**表 2.** 海水增殖区评价指标和标准

评价介质 Evaluating content	评价指标 Evaluating indicator	评价标准 Evaluation criterion
水质 Water quality	pH、DO、COD、磷酸盐、铜、铬、汞、镉、铅、砷、石油类	《海水水质标准》(GB3097-1997)第二类标准
沉积物质量 Sedimen quality	硫化物、有机碳、重金属(Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、As)	《海洋沉积物质量》GB18668-2002 第一类标准
生物质量 Biological quality	细菌总数、大肠菌群、石油烃、铜、铬、总汞、镉、铅、砷	《海洋生物质量》(GB18421-2001)第一类标准

#### 2.3.1. 单因子评价

$$P_i = \frac{C_i}{C_{io}}$$

式中:  $P_i$ ——为某污染因子的污染指数, 即单因子污染指数;  $C_i$ ——为某污染因子的实测浓度;  $C_{io}$ ——为某污染因子的评价标准。

以单因子污染指数 1.0 作为该因子是否对沉积环境产生污染的基本分界线, 小于 0.5 为沉积物未受该因子污染; 介于 0.5~1.0 之间为沉积物受到该因子污染; 大于 1.0 表明沉积物已受到该因子污染。

根据溶解氧的特点采用蔡墨罗(N.L. Nemerow)的指数公式计算溶解氧污染指数。

$$P_i = \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - C_{io}}$$

式中:  $P_i$ ——为溶解氧的污染指数;  $C_i$ ——为溶解氧的实测值;  $C_{io}$ ——为溶解氧的评价标准;  $C_{im}$ ——为本次调查中溶解氧的最大值。

根据 pH 的特点, pH 的评价模式如下:  $SpH = \frac{|pH - pH_{sm}|}{DS}$

其中:  $pH_{sm} = \frac{pH_{su} + pH_{sd}}{2}$ ,  $DS = \frac{pH_{su} - pH_{sd}}{2}$

式中:  $SpH$ ——为 pH 的污染指数; pH——为本次调查实测值;  $pH_{su}$ ——为海水 pH 标准的上限值;  $pH_{sd}$ ——为海水 pH 标准的下限值。

#### 2.3.2. 环境质量综合指数 EQI

EQI 是环境质量参数和环境质量标准的复合值, 是由若干个用单独某一个污染物或参数反映环境质量的分指数, 参数按一定原理合并构成反映几个污染物共同存在下的“综合质量指数”。增殖区水域 EQI 分级见表 3。

$$EQI = \left( 100 - \left[ \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right] \right) \times \left\{ \frac{60}{45} - \frac{1}{165} \times \left( 100 - \left[ \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right] - 45 \right) \right\}$$

式中：EQI——环境质量综合指数；

$F_1$ ——所评价时间段内，监测海域不符合水质、沉积物、生物质量标准的环境要素的比值：

$$F_1 = \left[ \frac{N'_V}{N_V} \right] \times 100$$

其中： $N_V$ ——为拟评价环境要素的总数； $N'_V$ ——为未达到质量标准要求的环境要素数量。

$F_2$ ——为各环境要素不符合质量标准要求的测定数据个数的比值：

$$F_2 = \left[ \frac{N'_T}{N_T} \right] \times 100$$

其中： $N_T$ ——为所有拟评价环境要素的总测定次数； $N'_T$ ——为未达到质量标准要求的测定次数。

$F_3$ ——为不符合环境质量的测定结果偏离标准的程度， $F_3$ 要分三步来求算：第一步，先求算出某个环境要素单次测定结果的超标程度。

当环境质量标准为不得大于目标值时：

$$P_i = \frac{NM_i}{M_{si}} - 1$$

其中： $P_i$ ——为第*i*个超标测定值的污染指数值； $NM_i$ ——为超标要素的测定值；

$M_{si}$ ——为该超标要素的环境质量标准值。

当环境质量标准为不得小于目标值时：

$$P_i = \frac{M_{si}}{NM_i} - 1$$

第二步，加和所有未达到环境质量标准要求的测定结果的污染指数值，并除以总的测定次数(包括达标的和未达标的测定次数总和)。

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{N'_T} P_i}{N_T}$$

其中： $nse$ ——为不符合环境质量的测定结果偏离标准的程度；

第三步：对 $nse$ 进行归一化，即得到 $F_3$ 。

$$F_3 = \frac{nse}{0.01nse + 0.01}$$

**Table 3.** Ranking and scoring of environmental quality of aquaculture areas

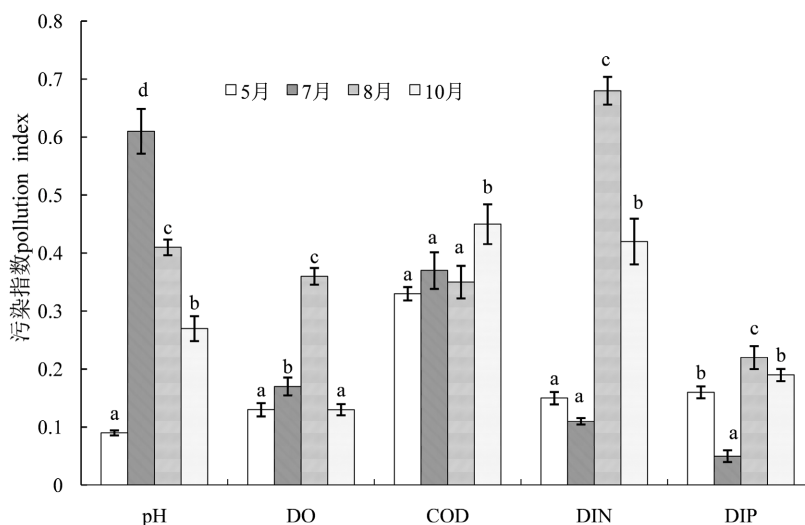
**表 3.** 增养殖区环境质量等级划分与赋分

综合指数	质量等级	含义
$90 \leq EQI \leq 100$	优良	养殖环境质量优良，满足功能区环境质量要求
$80 \leq EQI < 90$	较好	养殖环境质量较好，一般能满足功能区环境质量要求
$60 \leq EQI < 80$	及格	养殖环境质量及格，个别时段不能满足功能区环境质量要求
$0 \leq EQI < 60$	较差	养殖环境质量较差，不能满足功能区环境质量要求

### 3. 结果与分析

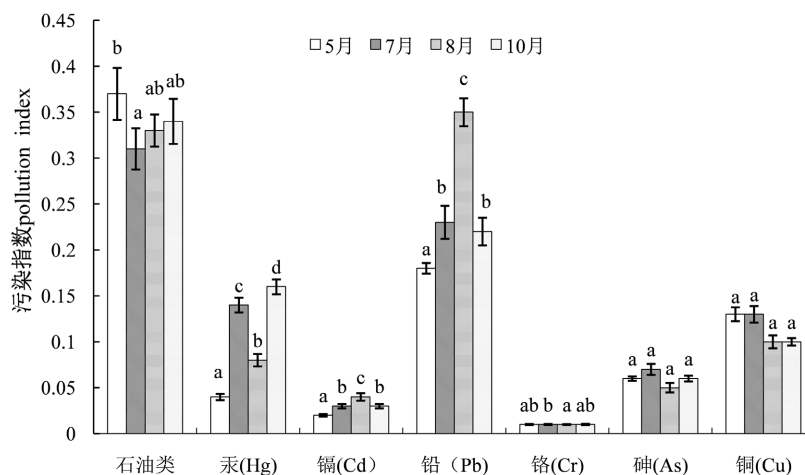
#### 3.1. 水环境监测要素评价

2018年度水环境监测要素评价监测如图2和图3所示：新开口浮筏养殖区 pH 值平均值为 8.16，变化范围为 7.87~8.42，符合国家二类水质标准；溶解氧平均值为 8.82 mg/L，变化范围为 7.17~12.4 mg/L，符合国家二类水质标准；COD 平均值为 1.12 mg/L，变化范围为 0.904~1.56 mg/L，污染指数小于 1，满足养殖区的水质要求；无机氮平均值为 0.102 mg/L，变化范围为 0.0158~0.339 mg/L，满足国家二类水质要求；活性磷酸盐平均值为 0.00467 mg/L，变化范围为 0.000428~0.0263 mg/L，满足国家二类水质要求。



**Figure 2.** General contaminant pollution index for each monitoring month at the new open floating raft farming area. The data marked with different letters in the single-factor pollution index of sediment in the figure indicate significant differences between each other ( $P < 0.05$ )

**图 2.** 新开口浮筏养殖区各监测月份一般污染物污染指数。图中沉积物单因子污染指数标有不同字母的数据表示相互之间差异显著( $P < 0.05$ )



**Figure 3.** Water quality petroleum and ortho-metal pollution indices for each monitoring month at the new open floating raft farming area. The data marked with different letters in the single-factor pollution index of sediment in the figure indicate significant differences between each other ( $P < 0.05$ )

**图 3.** 新开口浮筏养殖区各监测月份水质石油类和重金属污染指数。图中沉积物单因子污染指数标有不同字母的数据表示相互之间差异显著( $P < 0.05$ )

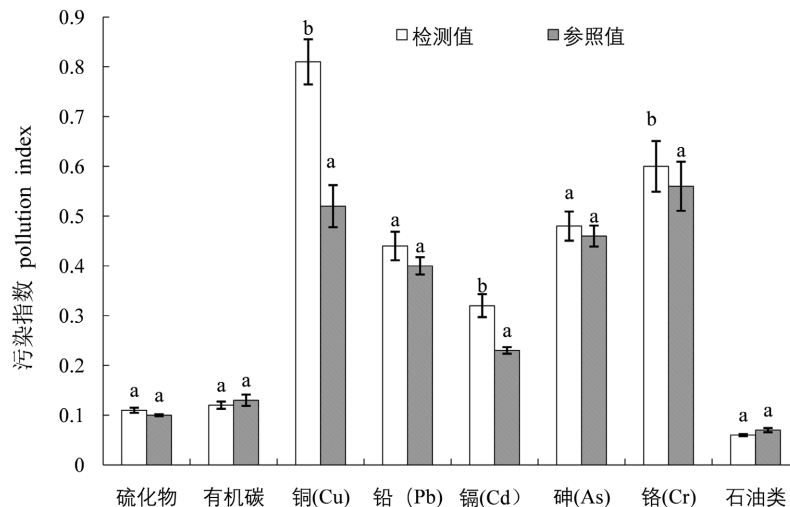


石油类平均值为 0.0164 mg/L, 变化范围为 0.0144~0.0214 mg/L, 各监测月份污染指数都小于 1。汞、镉、铅、铜、铬是海水中重要的重金属, 汞平均值为 0.0000246 mg/L, 变化范围为 0~0.0000660 mg/L; 铜平均值为 0.00115 mg/L, 变化范围为 0.000593~0.00202 mg/L; 铅平均值为 0.00123 mg/L, 变化范围为 0.000428~0.00313 mg/L; 镉平均值为 0.000157 mg/L, 变化范围为 0.0000640~0.000292 mg/L; 铬平均值为 0.000882 mg/L, 变化范围为 0.000359~0.00276 mg/L; 砷平均值为 0.00177 mg/L, 变化范围为 0.00107~0.00248 mg/L。各重金属数值都达到二类海水水质标准, 而且各污染指数均小于 1。

### 3.2. 沉积环境监测要素评价

在新开口浮筏养殖区监测站位中选取 1#、3#、5#作为沉积物环境监测站位, 于 8 月份实施监测, 监测指标为硫化物、有机碳、石油类、汞、镉、铅、铜、铬、砷。监测结果: 新开口浮筏养殖区海域表层沉积物中硫化物含量范围为  $31.50\sim34.00 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $32.60 \times 10^{-6}$  mg/L, 有机碳含量范围为 0.23~0.25%, 平均值为 0.24%; 石油类含量范围为  $25.10\sim32.60 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $28.40 \times 10^{-6}$  mg/L, 铜含量范围为  $24.30\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $28.30 \times 10^{-6}$  mg/L, 铅含量范围为  $20.10\sim33.20 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $26.30 \times 10^{-6}$  mg/L, 镉含量范围为  $0.14\sim0.18 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $0.16 \times 10^{-6}$  mg/L; 铬含量范围为  $43.60\sim52.20 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $47.90 \times 10^{-6}$  mg/L; 砷含量范围为  $7.83\sim11.40 \times 10^{-6}$  mg/L, 平均值为  $9.60 \times 10^{-6}$  mg/L。

根据单因子评价模式对新开口浮筏养殖区 8 月份硫化物、有机碳、汞、镉、铅、铜、铬的单因子污染指数与新开口浮筏养殖区参照站位沉积物单因子污染指数进行对比, 如图 4 所示。新开口浮筏养殖区各类监测因子污染指数均小于 1.0, 表明养殖区沉积物基本未受到污染, 该养殖区沉积物质量为 1 级, 总体处于良好水平。



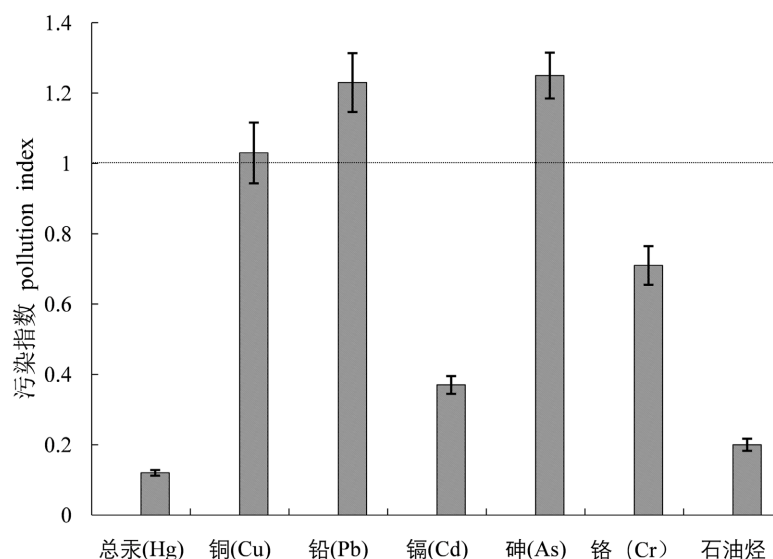
**Figure 4.** Comparison of sediment mono-factor contamination indices for newly opened raft culture areas and reference stations. The data marked with different letters in the single-factor pollution index of sediment in the figure indicate significant differences between each other ( $P < 0.05$ )

**图 4.** 新开口浮筏养殖区与参照站位沉积物单因子污染指数对比。图中沉积物单因子污染指数标有不同字母的数据表示相互之间差异显著( $P < 0.05$ )

### 3.3. 养殖生物监测要素评价

2018 年 10 月从监测的养殖区采集海湾扇贝样品。按照生物体内污染物含量评价标准, 单因子污染指数如图 5 所示。海湾扇贝中铜、铅、砷的污染指数大于 1, 超出一类海洋生物质量标准, 表明养殖

区养殖海湾扇贝已经受到了重金属铜、铅、砷的污染。其他各项监测因子均小于 1，符合第一类海洋生物质量标准。



**Figure 5.** Mono-factor pollution index for aquaculture organisms in the new open floating raft culture area  
**图 5.** 新开口浮筏养殖区养殖生物单因子污染指数

### 3.4. 环境质量综合指数

根据环境质量综合指数的计算方法，经过对新开口浮筏养殖区水质环境、沉积环境、生物质量的监测结果计算，得到表 4。从表 4 可以得出养殖区环境质量等级优良，满足功能区环境质量要求。

**Table 4.** Assessment results of EQI

**表 4.** 环境质量综合指数(EQI)评价结果

$F_1$	$F_2$	$F_3$	EQI
7.89	0.64	0.11	98.1

## 4. 讨论

调查研究结果显示，2018 年新开口海湾扇贝养殖区各调查站位海水水质、沉积物各监测指标污染指数均小于 1，符合二类海水水质标准。但值得注意的是，无机氮污染指数在夏秋季节大幅上升，一旦磷含量得到补充，潜在的多余营养盐将有可能出现富营养化现象，存在赤潮爆发的潜在危险[9]。另外，四次调查中，pH 单因素方差分析结果均呈现显著差异性( $P < 0.05$ )，这可能与新开口陆源污染物的在夏季时对海区的影响较大有关[10]。

新开口海湾扇贝养殖区沉积物环境质量综合指数等级优良，满足功能区环境质量要求。调查结果与对照区相比，养殖区环境中硫化物和汞、铜、铅、镉、砷等重金属含量均显著提高，并且养殖区沉积环境中石油类和有机碳含量明显偏高。这可能与扇贝对重金属的生物富集作用有关[11]，滤食性贝类可以通过生物沉降作用导致沉积环境有机质和重金属大量积累[12][13]。林怡辰[14]对重金属在近岸海域海产品富集中发现双壳类扇贝的重金属污染状况最严重。另外，养殖区扇贝体内重金属铅、砷、铜超标，不符合 GB18421-2001 第一类海洋生物质量标准，但是铅( $\leq 2.0$  mg/kg)、砷( $\leq 5.0$  mg/kg)、铜( $\leq 25$  mg/kg)满足二



类海洋生物质量标准。这可能与贝类滤食的生活特点和特殊的生活环境极容易受到重金属的污染和毒害有关[15]。尽管扇贝体内铅、砷、铜含量在相关标准值之内,但铅、砷、铜等重金属在体内蓄积应引起更多关注。

## 5. 小结

近岸贝类养殖面临的问题,除了病害以外,过高的养殖密度和规模、贝类饵料品质、贝类种质问题、以及养殖系统过于单一导致系统内的污染加重和环境恶化等问题也制约着贝类产业的发展。基于本研究,建议海洋和渔业行政管理部门对海水养殖业加强行政监督与管理,实时掌握养殖区环境质量变化状况,对重点养殖区域和养殖季节进行重点监测。科学养殖、合理布局、严格控制养殖用海规模和养殖容量,积极推广科学生态养殖,引导海水养殖业由目前的单种类、高密度养殖方式向复合立体化养殖方式转型,实现海水养殖的可持续发展。多营养层次综合水产养殖(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA)是一种基于生态系统水平的适应性管理策略,该养殖方式被认为是一种健康可持续的养殖模式,其一方面可以提高单位水体的利用效率,另一方面可以通过水产养殖废物的资源化再利用减少养殖环境的污染,从而实现经济和环境效益的双赢,可以尝试在该海域应用推广。同时,加强宣传教育,使养殖户了解由养殖对海洋环境造成污染的危害,提高环保意识,减少因水产养殖对邻近海域潜在环境风险影响。

## 基金项目

河北省自然科学基金青年科学基金(C2020204151)。

## 参考文献

- [1] 印丽云,杨振才,喻子牛,李玉娟,吴宁燕,李丹,李培华.海水贝类养殖中的问题及对策[J].水产科学,2012,31(5):302-305.
- [2] 廖勇.江苏如东贝类养殖区环境质量评价[D]:[硕士学位论文].上海:上海海洋大学,2012.
- [3] 康飞金.宁波海域滩涂主要养殖贝类重金属残留及其安全性评价[D]:[硕士学位论文].宁波:宁波大学,2011.
- [4] 姚茹,黎小正.广西沿海主要贝类养殖区海水、表层沉积物及近江牡蛎体内重金属镉监测与评价[J].江苏农业科学,2014,42(1):316-318.
- [5] 梁玉波,杨波,刘仁沿,等.海湾扇贝自身污染的研究[J].海洋环境科学,1998,17(3):11-18.
- [6] 国家海洋局.海水增养殖区环境监测与评价技术规程(试行)[Z].北京:国家海洋局,2015.
- [7] 国家海洋局.HY/T 147-2013 海洋监测技术规程[S].北京:国家海洋局,2013.
- [8] 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.GB/T12763-2007 海洋调查规范[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [9] 张晓昱,袁广旺,毛成贵,周超凡.江苏重点紫菜增养殖区环境质量状况评价[J].淮海工学院学报(自然科学版),2017,26(4):78-83.
- [10] 崔玉环,王杰,刘友存,郝泷,周婷.长江下游沿江升金湖河湖过渡带地下水来源及水质影响因素分析[J].湖泊科学,2021,33(5):1448-1457.
- [11] 谢文军,孙同秋,陈昕,宋颖.海湾扇贝养殖区海水水质及扇贝体内Cu、Zn富集分析[J].中国农学通报,2013,29(11):50-54.
- [12] Beveridge, M.C.M., Phillips, M.J. and Clarke, R.M. (1991) A Quantitative and Qualitative Assessment of Wastes from Aquatic Animal Production. In: Brune, D.E. and Tomasso, J.R., Eds., *Advances in World Aquaculture* (Volume 3, Chapter 506-533), World Aquaculture Society, Baton Rouge.
- [13] 杨红生,周毅.滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展[J].海洋科学,1998(2):42-44.
- [14] 林怡辰.重金属在近岸海域海产品中的富集及其影响机制研究[D]:[博士学位论文].烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所),2021.
- [15] 李玉环,林洪.镉对海湾扇贝的急性毒性研究[J].海洋水产研究,2006(6):80-83.