

# 春季青岛鳌山湾沿岸海水水质状况分析与评价

张 锺, 任宏伟, 牟 亮, 胡玉斌

(山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 本文根据 2019 年春季的调查资料, 运用污染指数评价法对鳌山湾沿岸的海水环境质量进行评价, 分别使用相对和绝对限制法确定营养盐限制因子, 采用营养状态质量指数法和富营养化指数法评价其营养现状, 并分析化学需氧量与浊度的相关性。结果表明: (1) 春季鳌山湾沿岸海水属 I 类水质, 化学需氧量、溶解无机氮和溶解无机磷污染程度较低; (2) 鳌山湾沿岸海水出现硅限制和磷限制现象, 无氮限制现象; (3) 鳌山湾沿岸未出现富营养化现象; (4) 鳌山湾沿岸海水的化学需氧量与浊度呈显著正相关性。

**关键词:** 鳌山湾; 营养盐限制; 富营养化; 化学需氧量

中图分类号: P734; X824 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)04-0515-06

## Assessment on the water quality of coastal seawater in the Aoshan bay, Qingdao in spring

ZHANG Zhe, REN Hong-wei, MOU Liang, HU Yu-bin

(College of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Based on the investigated data in spring 2019, the water quality of the coastal seawater in the Aoshan bay was evaluated by the pollution index. Nutrient limitation factors were determined by both the relative and absolute limiting principle methods, and nutritive status was assessed with both the nutrient state quality index and eutrophication index. The correlation between chemical oxygen demand (COD) and turbidity was analyzed. The results showed that: (1) The coastal seawater of the Aoshan bay was of good quality in spring, with low pollution in COD, dissolved inorganic nitrogen and dissolved inorganic phosphorus; (2) There existed silicon and phosphorus limitations but no nitrogen limitation; (3) There was no eutrophication situation; (4) COD and turbidity presented a significant positive correlation.

**Key words:** Aoshan bay; nutrient limitation; eutrophication; chemical oxygen demand

近年来, 随着我国海岸带和海洋资源的利用开发, 大量污染物质的排放导致沿岸海水环境质量不断下降<sup>[1]</sup>。山东半岛南部近岸海域属于黄海, 诸多海湾分布于此, 如青岛的胶州湾、唐岛湾和鳌山湾等。目前关于青岛海湾的水质状况调查主要集中于胶州湾<sup>[2]</sup>, 沿岸生活污水和工业

废水的排放给该湾带来了一系列环境问题。张学庆等<sup>[3]</sup>指出胶州湾的主要污染因子是氮, 海湾东北部呈现带状污染, 污染程度较为严重。但目前关于鳌山湾水质状况的认知还相对有限。

鳌山湾又称北湾, 位于青岛市即墨区东部, 湾内面积约 120 km<sup>2</sup>, 最大水深为 14 m, 湾口宽

收稿日期: 2020-07-06, 修订日期: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41806094); 山东大学青年学者未来计划项目(2018WJLJH43); 山东大学基本科研业务费专项资金项目(2017TB005)

作者简介: 张 锺(1998-), 男, 河北邢台人, 硕士, 主要研究方向为海洋化学, E-mail: 1837972726@qq.com

通讯作者: 胡玉斌, 副研究员, 主要从事海洋化学研究, E-mail: yubinh@sd.edu.cn

度约 11 km, 与黄海中部相通。鳌山湾面向东南, 呈“C”字形, 是一个半封闭型养殖海湾, 养殖区域多分布在水交换较差的内湾和沿岸, 养殖废水中的饵料和鱼类排泄物等造成水体的“二次倍增污染”<sup>[4]</sup>。相关研究表明<sup>[5-6]</sup>, 海水养殖过程可能对环境造成严重的有机污染, 有机物在降解过程中释放硝酸盐、磷酸盐等营养盐, 可能导致养殖海域富营养化程度加重。以往研究<sup>[7-8]</sup>主要关注鳌山湾湾内, 侧重于对湾内营养结构与状况的分析, 而人类活动和高密集的养殖生产区多分布于鳌山湾沿岸, 有关该湾沿岸水体环境质量、营养结构与状况的研究基本空白。因此, 本研究对鳌山湾沿岸海水水质污染状况、营养盐结构和富营养化水平这 3 个方面的环境质量进行评价, 探索该湾沿岸海水受人类活动影响的程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位布设

本次调查时间为 2019 年 4 月 18 日至 19 日, 共设 8 个站位, 均在鳌山湾沿岸, 覆盖了港口码头、养殖区以及生活区, 调查范围及站位分布如图 1 所示。其中, 站位 A、G 和 H 位于湾口, 靠近码头与港口(鳌山码头、钓鱼嘴码头和女岛港); 站位 B、C、D 和 F 均位于生活区附近(靠近

七沟村、海泉湾、人工岛和黑子村); 站位 E 位于湾顶的大桥滩附近, 北侧为大桥盐场。海泉湾和大桥滩存在河流输入现象, 如水泊河、抬头河及其支流等。

### 1.2 样品采集及测定方法

水样取自沿岸表层, 采集和保存按《海洋监测规范—海水分析》(GB 17378.4-2007)<sup>[9]</sup>中规定的相关方法进行。水质测定指标包括水温(现场测定)、pH<sub>25</sub>(修正到 25 °C 下的 pH)、盐度、浊度、化学需氧量(COD)、叶绿素(Chl *a*)、溶解无机氮(DIN, 为 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 之和)、溶解无机磷(DIP)和溶解无机硅(DISI), 各指标的具体分析方法见表 1。其中, 水样的化学需氧量(COD)于 24 h 内测定完成, 为总 COD(包括溶解性 COD 和非溶解性 COD), 营养盐待测水样经 0.45 μm 滤膜(Millipore Express, PES Membrane)过滤保存, 一个月内测定。其中, DIP、NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 待测水样于 -20 °C 冷冻保存, DISi 和 NH<sub>4</sub>-N 待测水样添加 0.1% 氯仿于 4 °C 冷藏保存。

表 1 沿岸水质监测指标及分析方法

Tab.1 The investigated parameters and analytical method of the coastal seawater

监测指标	分析方法	检出限/ mg·L <sup>-1</sup>	精密 度 (相对标准偏差)/(%)
pH	玻璃电极法	—	0.1
盐度	电导率法	—	0.3
浊度	分光光度法	—	0.7
COD	碱性高锰酸钾法	—	1.2
Chl <i>a</i>	分光光度法	—	5.2
NH <sub>4</sub> -N	靛酚蓝分光光度法	0.012	5.7
NO <sub>3</sub> -N	萘乙二胺分光光度法	0.001	1.0
NO <sub>2</sub> -N	萘乙二胺分光光度法	0.001	3.2
DIP	磷钼蓝分光光度法	0.004	4.0
DISi	硅钼蓝分光光度法	0.002	2.4

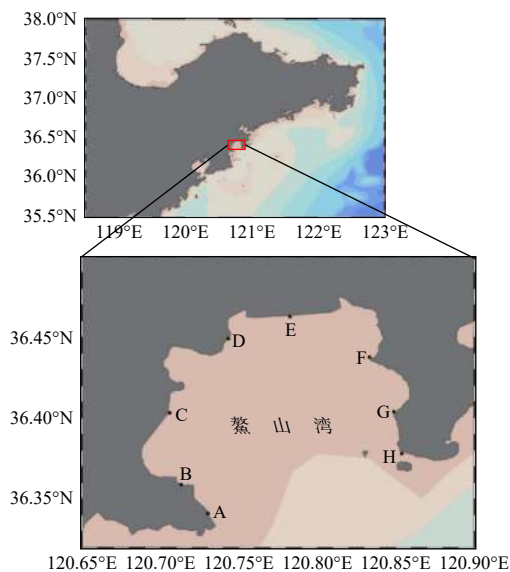


图 1 调查区域和站位分布

Fig. 1 Studying area and sampling stations

### 1.3 水质评价方法

#### 1.3.1 水质污染评价

DIN、DIP 及 COD 是我国近海及养殖区的主要污染物监测指标。沿岸水质污染评价采用单因子污染指数法<sup>[10]</sup>, 计算公式如下:

$$S_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (1)$$

式中:  $S_t$  为第  $t$  类污染物的污染指数;  $C_t$  为第  $t$  类污染物的实测值, mg/L;  $C_0$  为第  $t$  类污染物标准值, mg/L。当  $S_t \leq 1$  时, 表明该站位水质符合该类海水水质标准; 当  $S_t > 1$  时, 表明水质不符合该类海水水质标准,  $S_t$  值越大表示污染程度越重。

### 1.3.2 营养盐限制因子的确定

浮游植物的生长离不开营养盐, 营养盐浓度与结构的变化会影响海洋浮游植物的群落结构。N/P、Si/N 和 Si/P 是评价营养盐结构的重要指标, 过高或过低均可导致浮游植物的生长受到某一浓度相对较低元素的限制。本文运用相对限制法与绝对限制法进行潜在性限制评估, 其中, 相对限制法则: (1) 如果  $N/P < 10$  且  $Si/N > 1$ , 则为氮潜在限制; (2) 如果  $N/P > 22$  且  $Si/P > 22$ , 则为磷潜在限制; (3) 如果  $Si/P < 10$  且  $Si/N < 1$ , 则为硅潜在限制。绝对限制法则: 浮游植物对于营养盐的吸收都会有最低阈值, 营养盐氮、磷和硅的阈值分别为  $1 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.03 \mu\text{mol/L}$  和  $2 \mu\text{mol/L}$ <sup>[11]</sup>。若水体中某种营养盐的浓度达不到最低阈值, 则该营养盐为限制因子。

### 1.3.3 沿岸海水富营养化程度评价

适量营养盐会促进浮游植物的生长, 但过量营养盐则可能会导致海水富营养化<sup>[12]</sup>。本文分别运用营养状态质量指数法和富营养化指数法对鳌山湾沿岸海水富营养化程度进行评价。营养状态质量指数法是国内研究海水富营养化中使用较多的一种方法, 适用于监测指标之间浓度相差不大(指标浓度无过高值或无过低值情况)的情况<sup>[13]</sup>, 计算公式为:

$$NQI = \frac{COD_r}{COD_s} + \frac{DIN_r}{DIN_s} + \frac{DIP_r}{DIP_s} + \frac{Chl a_r}{Chl a_s} \quad (2)$$

式中:  $NQI$  为营养状态质量指数;  $COD_r$ 、 $DIN_r$ 、 $DIP_r$ 、 $Chl a_r$  分别为海水 COD、DIN、DIP、Chl  $a$  的实测浓度 (mg/L);  $COD_s$ 、 $DIN_s$ 、 $DIP_s$ 、 $Chl a_s$  分别为海水 COD、DIN、DIP、Chl  $a$  的标准值 (mg/L)。当  $NQI \leq 2$  时, 表明该水体为贫营养水平; 当  $2 < NQI < 3$  时, 为中等营养水平; 当  $NQI \geq 3$  时, 为富营养水平。

富营养化指数法最早来源于日本, 国内学者邹景忠等<sup>[14]</sup> 在此基础上, 结合我国海湾的实际

水质状况, 优化了原有公式, 计算公式为:

$$E = \frac{C_{COD} \cdot C_{DIN} \cdot C_{DIP} \cdot 10^6}{4500} \quad (3)$$

式中:  $E$  为富营养化指数;  $C_{COD}$ 、 $C_{DIN}$ 、 $C_{DIP}$  分别为海水 COD、DIN、DIP 实测浓度 (mg/L)。当  $E < 1$  时, 水体为贫营养水平; 当  $E \geq 1$  时, 水体呈富营养化。 $E$  值越大, 水体的富营养化程度越高。

## 2 结果与讨论

### 2.1 监测结果及单因子污染指数评价

COD、DIN 和 DIP 的污染指数见表 2, 春季鳌山湾沿岸水质监测数据见表 3。本次调查沿岸水体温度变化范围为  $12.0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 平均值为  $16.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 盐度变化范围为  $31.44 \sim 33.22$ , 平均值为  $32.54$ 。受温泉河和大任河输入的影响, 海泉湾附近盐度相对于其他站位略低, 而人工岛和大桥滩附近受盐场的影响, 盐度明显高于平均值。pH 变化范围为  $7.97 \sim 8.11$ , 平均值为  $8.08$ , 各站位间的差异较小。

表 2 COD、DIN 和 DIP 污染指数  
Tab.2 The pollution index of COD, DIN and DIP

站位	$S_t(\text{COD})$	$S_t(\text{DIN})$	$S_t(\text{DIP})$
A	0.21	0.13	0.14
B	0.33	0.14	0.13
C	0.31	0.35	0.22
D	0.57	0.33	0.24
E	0.47	0.32	0.29
F	0.39	0.27	0.28
G	0.49	0.12	0.19
H	0.22	0.13	0.13

沿岸营养盐浓度呈现出湾内高于湾口的特征。DIN 浓度范围为  $0.035 \sim 0.106 \text{ mg/L}$ , 平均浓度为  $0.068 \text{ mg/L}$ 。DIP 浓度范围为  $0.004 \sim 0.009 \text{ mg/L}$ , 平均浓度为  $0.006 \text{ mg/L}$ 。DISi 浓度范围为  $0.034 \sim 0.290 \text{ mg/L}$ , 平均浓度为  $0.129 \text{ mg/L}$ 。靠近海泉湾、人工岛和大桥滩站位的营养盐浓度高, 湾口鳌山码头和女岛港附近营养盐浓度相对较低。Chl  $a$  浓度范围为  $1.68 \sim 5.02 \mu\text{g/L}$ , 平均浓度为  $2.74 \mu\text{g/L}$ 。除海泉湾附近 Chl  $a$  浓度相对较高外, 其他站位附近 Chl  $a$  浓度相差不大。

表 3 春季鳌山湾沿岸水质监测数据

Tab.3 The investigated data of water quality in the coastal seawater of the Aoshan bay in spring

站位	水温/°C	盐度	pH <sub>25</sub>	浊度/NTU	Chl <i>a</i> /μg·L <sup>-1</sup>	COD	DIN	DIP	DISi
A	12.0	32.46	8.07	24.2	2.63	0.63	0.040	0.004	0.034
B	18.0	32.60	8.01	100.3	3.16	0.99	0.041	0.004	0.043
C	19.0	31.44	8.03	31.7	5.02	0.94	0.106	0.007	0.290
D	16.5	33.04	8.00	298.7	2.01	1.72	0.100	0.007	0.223
E	19.5	33.22	7.97	374.7	3.07	1.40	0.097	0.009	0.245
F	17.0	32.63	8.02	93.3	2.29	1.18	0.082	0.008	0.087
G	14.0	32.52	8.09	202.3	1.68	1.47	0.035	0.006	0.063
H	13.5	32.41	8.11	9.8	2.04	0.65	0.040	0.004	0.049

本研究调查站位虽全部位于沿岸,覆盖码头港口、生活区和养殖区,但 DIN、DIP 和 COD 的污染指数均小于 1,符合 I 类海水水质标准,这表明沿岸人类活动及养殖生产排放入湾的污染物均未超过水体的环境容量。这也可能与水体具有一定的自净能力有关。

本次调查集中在沿岸海域,营养盐氮、磷浓度湾内沿岸站位高于湾口沿岸站位,呈现出北高南低的特点。此现象与幸福言等<sup>[7]</sup>于 1996 年 11 月—1998 年 5 月在鳌山湾湾内进行的调查结果一致,这可能与该湾水交换能力有关。由于鳌山湾水体交换能力一般<sup>[4]</sup>,不利于湾内营养盐向海外运输和扩散,因此排入沿岸的营养盐在此处停留时间较长,进而造成营养盐在湾内富集。

表 4 春季鳌山湾沿岸海域营养盐 DIN、DIP 和 DISi 浓度及其比值

Tab.4 The content of DIN, DIP and DISi and their ratios in the coastal seawater of the Aoshan bay in spring

站位	DIN	DIP	DISi	N/P	Si/P	Si/N	限制因子
	μmol·L <sup>-1</sup>						
A	2.88	0.13	1.21	21.56	9.05	0.42	Si
B	2.94	0.12	1.55	23.88	12.57	0.53	Si
C	7.49	0.22	10.35	34.77	48.00	1.38	P
D	7.15	0.24	7.96	30.23	33.67	1.11	P
E	6.94	0.28	8.74	25.01	31.48	1.26	P
F	5.84	0.27	3.12	21.87	11.70	0.53	—
G	2.48	0.18	2.25	13.40	12.17	0.91	—
H	2.84	0.12	1.76	23.06	14.26	0.62	Si

绝大部分调查站位的水体 N/P 高于 22, DIN 浓度远高于浮游植物生长阈值,尤其在海泉湾、人工岛、大桥滩和黑子村附近, DIN 浓度是其生

## 2.2 沿岸海水营养盐限制因子的确定

大洋中,营养盐之间的摩尔比例一般是恒定的,这一比值称为 Redfield 比值<sup>[15]</sup>。在沿岸浅海区,这一比值并不总是恒定的,营养盐比例不平衡,浮游植物的生长会受制于某一相对不足的营养盐,被称为营养盐限制。

春季鳌山湾沿岸海域营养盐 DIN、DIP 和 DISi 浓度及其比值见表 4。结果表明,沿岸水体 N/P 范围为 13.40~34.77,平均值为 24.22; Si/P 范围为 9.05~48.00,平均值为 21.61; Si/N 范围为 0.42~1.38,平均值为 0.85。根据相对与绝对限制法则,春季鳌山湾沿岸水体出现了磷限制和硅限制,所有站位均未出现氮限制。

长阈值的 5 倍以上。所有站位均未出现氮限制,这可能是由于在达到浮游植物生长的最低需求时,磷营养盐优先于氮营养盐被消耗。除此之

外,海水中的氮营养盐还可以通过固氮作用进行补充<sup>[16]</sup>。

靠近海泉湾、人工岛和大桥滩的 C 站位、D 站位和 E 站位出现磷限制, N/P 和 Si/P 均大于 22。靠近海泉湾的 C 站位浊度较低, Chl *a* 浓度相对较高, 出现磷限制的原因可能是浮游植物生长对磷酸盐的大量利用。靠近人工岛和大桥滩的 D、E 站位浊度较高, Chl *a* 浓度较低, 造成磷限制的可能原因是沿岸海水中悬浮颗粒物对磷酸盐产生的吸附作用<sup>[17]</sup>。

以往的调查主要集中在湾内, 相关研究<sup>[7-8]</sup>表明, 20 世纪末到 21 世纪初, 鳌山湾湾内主要营养盐限制因子由氮变为磷, 未出现硅限制。本研究中鳌山湾沿岸海水营养盐限制因子除磷外, 还出现了硅限制的现象。硅的缺乏可能会导致浮游植物群落构成的动态变化, 硅藻优势种可能会被取代, 这从一定程度上反映出进行该湾沿岸海水营养盐结构分析的重要性。谢琳萍等<sup>[18]</sup>对 2006—2007 年 4 个季节的营养盐调查结果指出, 山东半岛该区域附近海域春季 Si/P 较低, 硅酸盐浓度低于其生长阈值, 存在硅限制现象。本次调查出现硅限制的站位均位于湾口, 与黄海相通。虽然 Si/P 绝大部分大于 10, 但位于湾口附近的鳌山码头、七沟村和女岛港沿岸的硅浓度低于其生长阈值, 造成该调查海域为硅限制。

### 2.3 沿岸海水富营养化评价

营养状态质量指数法和富营养化指数法评价结果见表 5。结果表明, 沿岸 *NQI* 小于 2, *E* 小于 1, 湾内站位 *NQI* 和 *E* 均高于湾口, 未出现富营养化现象, 这与丁喜桂等<sup>[8]</sup>对春季鳌山湾的调查结果一致。周斌等<sup>[19]</sup>于 2006—2007 年分 4 个季节对山东半岛南部沿岸海域进行了水质调查, 运用主成分分析法与潜在性富营养化法对水体进行富营养化评价, 结果表明, 春季鳌山湾海水未发生水体富营养化, 而冬季该湾富营养化程度较高, 此现象可能与季节变化导致水体生物活动的差异有关。水体浮游生物量高峰一般出现在春季或夏季, 入海的大量营养盐被生物体吸收利用, 而冬季环境恶劣(特别是温度太低), 浮游生物对于入海营养盐吸收量减少。这从一定程度上反映出水体富营养化的形成与季节变化有密切关系。

表 5 营养状态质量指数法和富营养化指数法评价结果

Tab.5 The evaluation results from nutrient state quality index and eutrophication index

站位	<i>NQI</i>	<i>E</i>
A	0.75	0.02
B	0.91	0.03
C	1.39	0.15
D	1.35	0.28
E	1.39	0.26
F	1.17	0.18
G	0.96	0.06
H	0.68	0.02

### 2.4 COD 与浊度相关性分析

COD 是度量水体受有机物污染程度的重要指标之一。已有研究<sup>[20-21]</sup>表明, 生活污水 COD 与浊度存在较为显著的相关性。依据这一关系, 可根据测定的浊度来间接反映水体受有机物污染的程度。本研究采用碱性高锰酸钾法来测定海水 COD, 探讨鳌山湾海水 COD 与浊度之间的相关性。春季鳌山湾沿岸海水 COD 与浊度的相关性分析如图 2 所示, 结果表明, 海水 COD 与浊度呈显著相关性, 相关系数为 0.75, *p* 值为 0.006。邹建军等<sup>[22]</sup>研究表明, 许多有机污染物质排入沿岸表层水体后逐步附着于悬浮颗粒。本次调查中浊度变化范围为 9.8~374.7 NTU, 平均值为 141.9 NTU, 大桥滩和人工岛附近浊度较高, 而湾口鳌山码头和女岛港附近浊度较低。COD 浓度范围为 0.63~1.72 mg/L, 平均浓度为 1.12 mg/L。COD 高值主要分布在湾顶附近, 基本呈现出从湾顶到湾口降低的特征, 这可能与湾顶沿岸海水中悬浮颗粒物对有机污染物质的较强吸附特性

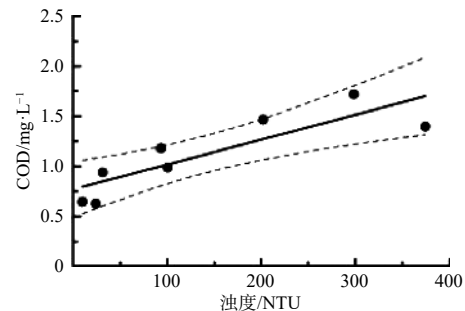


图 2 春季鳌山湾沿岸海水 COD 与浊度相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of COD and turbidity in the nearshore seawater of the Aoshan bay in spring

有关。该湾大量的养殖排泄废物和残留饵料等有可能吸附到沿岸悬浮颗粒物中,且湾内水体交换能力较弱,颗粒物上吸附的有机污染物质不能及时扩散稀释,进而造成湾顶 COD 值较高的现象。

### 3 结论

(1)2019 年春季青岛鳌山湾沿岸水体污染程度较低,水质良好。

(2)沿岸部分站位出现硅限制和磷限制,但未发现氮限制。硅限制主要位于湾口,而磷限制出现在湾内。

(3)营养状态质量指数法和富营养化指数法评价结果表明,鳌山湾沿岸水体 *NQI* 值小于 2, *E* 值小于 1,湾内站位 *E* 值均高于湾口,均未达到富营养化水平。

(4)该湾沿岸水体 COD 与浊度具有较为显著的相关性,呈现出由湾内到湾口逐渐降低的趋势。

### 参考文献:

- [1] PAERL H W. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: interactive effects of human and climatic perturbations[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 26(1): 40-54.
- [2] GAO S Q, LIN Y A, JIN M M, et al. Transport and distribution of nutrients in anchovy spawning ground to the southern waters of Shandong Peninsula[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(4): 533-546.
- [3] 张学庆,孙英兰,蔡惠文,等.胶州湾COD、N、P污染物浓度数值模拟[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(3): 64-67.
- [4] XIAO X F, TIAN Y, ZHANG Q. Nitrogen, phosphorus nutrient distribution in spring and potentially eutrophic evaluation of seawater in culture zones of Tangdao Bay[C]. Proceedings of the 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2011: 4189-4192.
- [5] 蒋增杰,方建光,毛玉泽,等.海水鱼类网箱养殖水域沉积物有机质的来源甄别[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(2): 348-354.
- [6] GUO L G, LI Z J. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1/2/3/4): 201-212.
- [7] 辛福言,曲克明,崔毅,等.鳌山湾氮、磷营养盐的分布及变化特征[J]. *中国水产科学*, 2001, 8(4): 79-82.
- [8] 丁喜桂,叶思源,高宗军.青岛鳌山湾海区营养结构与营养状况评价[J]. *湛江海洋大学学报*, 2006, 26(1): 22-26.
- [9] GB 17378.2-2007, 海洋监测规范 第2部分:数据处理与分析质量控制[S].
- [10] 刘爱英,马元庆,李斌,等.山东三个贝类增养殖区营养盐季节分布及营养盐限制性分析[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(1): 54-57.
- [11] 杨东方,张经,陈豫,等.营养盐限制的唯一性因子探究[J]. *海洋科学*, 2001, 25(12): 49-51.
- [12] 窦勇,唐学玺,杨震,等.山东近海黄海段营养盐结构对初级生产力的影响研究[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(2): 177-181.
- [13] 李保石,厉丞烜,金玉休,等.广海湾海域营养盐时空分布及富营养化评价[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 657-663.
- [14] 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): 41-54.
- [15] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *Science Progress*, 1960, 11: 150-170.
- [16] 黄亚楠.南海西北部海水中固氮作用的初步研究[D].湛江:广东海洋大学,2015.
- [17] 刘敏,侯立军,许世远,等.长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. *地理学报*, 2002, 57(4): 397-406.
- [18] 谢琳萍,孙霞,王保栋,等.渤海湾营养盐结构及其潜在限制作用的时空分布[J]. *海洋科学*, 2012, 36(9): 45-53.
- [19] 周斌,王悠,王进河,等.山东半岛南部近岸海域富营养化状况的多元评价研究[J]. *海洋学报*, 2010, 32(2): 128-138.
- [20] 张红,施永生,孙娜.生活污水浊度与化学需氧量的关系[J]. *工业水处理*, 2007, 27(3): 44-45.
- [21] 何继宝,黄建平,王臻.生活污水水质中浊度与化学需氧量相关性的分析[J]. *现代预防医学*, 2002, 29(5): 719-720.
- [22] 邹建军,李双林,程新民.近岸海域的沉积物污染研究[J]. *海洋地质动态*, 2004, 20(8): 5-9.