

天津大神堂牡蛎礁保护区海域海水水质 变化趋势分析与评价

徐冠球¹, 谭晓璇², 屠建波¹, 石海明¹,
何荣¹, 刘洋¹

(1.国家海洋局 天津海洋环境监测中心站, 天津 300457; 2.自然资源部 海洋咨询中心, 北京 100071)

摘要: 本文根据 2015—2020 年 6 个航次的调查数据, 对天津大神堂牡蛎礁海域海水温度、盐度、透明度、pH、溶解氧 (DO)、溶解无机氮 (DIN)、溶解无机磷 (DIP)、化学需氧量 (COD)、油类、重金属、悬浮物 (SS) 和叶绿素 *a* (Chl *a*) 共 18 项水质指标进行分析, 并通过营养状态指数 (*E*)、营养状态质量指数 (*NQI*) 和综合污染指数 (*P*) 对牡蛎礁保护区海域的海水状况进行综合分析评价。研究结果显示: 大神堂牡蛎礁海域的主要超标因子, 按贡献率从高到低依次为 DIN、DIP、COD、油类和 DO; 不同年份海水受污染程度和主要污染物水平存在极显著的年度差异 ($P < 0.001$); 调查期间, 海水 N/P 出现较大变化, 由基本不存在氮、磷营养盐结构限制转变为明显的磷限制; 海域 Chl *a* 和初级生产力总体保持稳定。

关键词: 天津海域; 营养盐; 海水水质评价; 牡蛎礁

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)04-0554-09

Trend analysis and assessment of water quality for Dashentang Oyster Reef Marine Special Reserve in Tianjin

XU Guan-qiu¹, TAN Xiao-xuan², TU Jian-bo¹, SHI Hai-ming¹,
HE Rong¹, LIU Yang¹

(1.Tianjin Marine Environment Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Tianjin 300457, China; 2.Oceanic Consulting Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100071, China)

Abstract: Based on the 6 investigation data of the Dashentang Oyster Reef Marine Special Reserve from 2015 to 2020, we analyzed 18 basic water quality indices, including water temperature, salinity, transparency, pH, dissolved oxygen (DO), dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), chemical oxygen demand (COD), oil, heavy metal content, suspended solids and chlorophyll *a* (Chl *a*), in addition to the evaluation of the eutrophication index (*E*), nutrient quality index (*NQI*) and Nemerow pollution index (*P*), in order to evaluate the quality of the oyster reef environment in this region. The results showed that the major exceeding standard factors were DIN, DIP, COD, oil and DO according to contribution rate from high to low. The degree of contamination and the main pollutants in seawater showed highly significant annual difference

收稿日期: 2021-06-20, 修订日期: 2021-10-11

基金项目: 国家重点研发专项 (2019YFC1407801); 天津重点研发计划科技支撑重点项目 (19YFZCSN01130); 天津市规划和自然资源局科技项目 (ML2019-HP-F161)

作者简介: 徐冠球 (1989—), 男, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 主要从事海洋监测与评价工作, E-mail: xugqouc@126.com

通讯作者: 谭晓璇 (1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋环境与经济调查工作, E-mail: alicetanm@sina.com

($P < 0.001$). The N/P ratio of seawater greatly changed from no nitrogen and phosphorus structure limitation to obvious phosphorus limitation. Chl *a* and primary productivity remained basically stable in this sea area.

Key words: Tianjin sea area; nutrients; seawater quality assessment; oyster reef

天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区位于渤海湾湾顶(117°55'E—118°02'E, 39°01'N—39°11'N), 属于半封闭的浅海海域, 水深 3~6 m, 海流作用较弱, 流速平稳, 水交换能力较差。南侧临近永定新河、潮白新河和蓟运河交汇的入海口北塘口, 西北侧临近天津中心渔港和北疆电厂, 受人类活动影响显著。该海域现存我国北方纬度最高、具有独特生态价值和意义的现代活体牡蛎礁, 自然地理环境极其特殊和重要。为此, 我国于 2013 年正式批准建立了天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区, 以加强对牡蛎礁的保护和管理。

牡蛎礁是由大量牡蛎固着生长于硬底物表面所形成的一种生物礁, 除为人类提供食用和药用价值外, 牡蛎礁还具有许多重要的生态功能与服务价值, 如净化水体、能量耦合、提供觅食栖息地、防止岸线侵蚀等^[1]。然而, 在过去的 100 年, 由于海洋工程建设、过度捕捞、水体污染等因素的影响, 全球牡蛎礁面积下降了 85%, 成为全球退化最严重的海洋栖息地之一, 进而加剧了水体环境恶化、渔业资源量下降及自然岸线退化等生态环境问题^[2]。天津大神堂牡蛎礁的退化情况十分严峻, 存在牡蛎礁面积缩小、孤岛化、牡蛎礁中活体牡蛎占比下降等明显退化现象^[3], 相关问题应得到关注和治理。

目前, 有关大神堂牡蛎礁生存环境状况的报道很少, 并且缺乏系统的调查与分析。为了保护这一独特的海洋生境, 本研究于 2015—2020 年对大神堂牡蛎礁海域的海水状况展开了系统性调查, 评估了大神堂牡蛎礁海域的水质状况及变化趋势, 从而为牡蛎礁的保护与修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样站位设定

本课题组于 2015—2020 年每年 8 月, 对天津大神堂牡蛎礁保护区海域共 6 个站位进行采

样调查。其中, 2015—2018 年调查站位为 S1—S6, 2019 年和 2020 年采样站位为 S1'—S6', 具体采样站位见图 1。

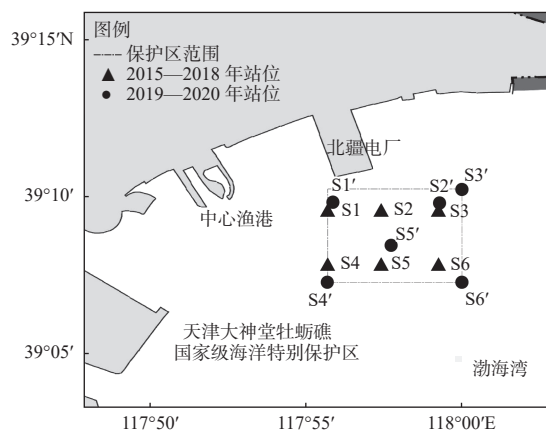


图1 牡蛎礁保护区海域调查站位

Fig. 1 Sampling stations in oyster reef marine reserve

1.2 样品采集与分析

所有站位均采集表层样品, 样品的采集和预处理均按《海洋监测规范 第4部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[4]的要求进行, 调查项目包括水温、透明度、盐度、悬浮物、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、活性磷酸盐(DIP)、叶绿素 *a*(Chl *a*)、油类和重金属(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As)。2015—2018 年调查项目包括以上 20 项参数, 2019 年和 2020 年调查项目包括除油类和重金属以外的 12 项参数。

除 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 采用《海洋监测技术规范 第1部分: 海水》(HY/T 147.1—2013)^[5]的方法进行分析外, 其余调查参数的分析均按照《海洋监测规范 第4部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[4]进行。

1.3 水质评价方法

1.3.1 综合污染指数评价

本文采用 pH、DO、COD、溶解无机氮(DIN, 包括 NH₄-N、NO₃-N 和 NO₂-N)、DIP、油类、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 和 As 共 13 项调查指标, 结

合内梅罗指数评价方法^[6]对调查海域进行污染综合评价,污染水平分级标准见表1。内梅罗指数计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2}{2}} \quad (1)$$

式中: P 为内梅罗综合指数; $P_{\max}$ 和 P_{avg} 分别为单因子污染指数 P_i 的最大值和平均值。单因子污染指数 P_i 计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 类污染物的浓度; S_i 为第 i 类污染物的评价标准。调查海域位于汉沽浅海生态系统海洋保护区和汉沽农渔业区内,因此,采用《海水水质标准》(GB 3097-1997)^[7] 中的第二类标准作为水质评价标准。其中, pH 的单因子污染指数 P_{pH} 采用如下公式计算:

$$P_{\text{pH}} = \frac{|pH_i - pH_{\text{sm}}|}{DS} \quad (3)$$

$$pH_{\text{sm}} = \frac{pH_{\text{su}} + pH_{\text{sd}}}{2} \quad (4)$$

$$DS = \frac{pH_{\text{su}} - pH_{\text{sd}}}{2} \quad (5)$$

式中: pH_i 为 pH 的实测值; pH_{su} 为海水 pH 评价标准的上限值; pH_{sd} 为海水 pH 评价标准的下限值。溶解氧单因子污染指数 P_{DO} 采用如下公式计算^[8]:

$$DO \geq DO_f \quad P_{\text{DO}} = 0 \quad (6)$$

$$DO < DO_f \quad P_{\text{DO}} = \ln \frac{\frac{DO_s}{DO}}{\ln \left(\frac{DO_f}{DO_s} \right)} + 1 \quad (7)$$

$$DO_f = A_1 + A_2 + A_3 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + A_4 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + B \quad (8)$$

$$B = S \left[B_1 + B_2 \left(\frac{T}{100} \right) + B_3 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right] + B_4 \quad (9)$$

式中: DO 为溶解氧的实测值(mg/L); DO_f 为饱和溶解氧浓度($\mu\text{mol/L}$); DO_s 为溶解氧的评价标准值(mg/L); T 为水温(K); S 为盐度; A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 取值依次为-173.4292、249.6339、143.3483 和 -21.8492; B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 取值依次为-0.033096、0.014259、-0.001700 和 4.4912。

表1 内梅罗污染指数污染水平分级标准

Tab.1 Water pollution grading based on Nemerow pollution index

内梅罗指数(P)	$P \leq 0.6$	$0.6 < P \leq 1.0$	$1 < P \leq 2.6$	$2.6 < P \leq 5$	$P > 5$
污染水平	清洁	较清洁	轻度污染	中度污染	重度污染

1.3.2 富营养化评价

本文采用营养状态指数和营养状态质量指数两种评价方法对调查海域的水体营养状况进行评价。营养状态指数 E 的计算公式如下^[9]:

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

式中: C_{COD} 、 C_{DIN} 和 C_{DIP} 分别为 COD、DIN 和 DIP 在水体中的浓度(mg/L)。当 $0 < E < 0.5$ 时,海域为贫营养;当 $0.5 \leq E < 1$ 时,海域为中营养;当 $E \geq 1$ 时,表明海域呈富营养化。 E 值越高,海域富营养化程度越严重。

营养状态质量指数 NQI 的计算公式如下^[10]:

$$NQI = \frac{C_{\text{COD}}}{S_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{DIN}}}{S_{\text{DIN}}} + \frac{C_{\text{DIP}}}{S_{\text{DIP}}} + \frac{C_{\text{Chl } a}}{S_{\text{Chl } a}} \quad (11)$$

式中: C_{COD} 、 C_{DIN} 、 C_{DIP} 和 $C_{\text{Chl } a}$ 分别为海水中 COD、DIN、DIP 和 Chl a 的实测浓度(mg/L); S_{COD} 、 S_{DIN} 和 S_{DIP} 分别为 COD、DIN 和 DIP 的

第二类海水水质标准值;根据调查海域的营养状况, $S_{\text{Chl } a}$ 取值 5 mg/L。当 $NQI < 2$ 时,海域为贫营养;当 $2 \leq NQI \leq 3$ 时,海域为中营养;当 $NQI > 3$ 时,表明海域呈富营养化。 NQI 值越高,海域富营养化程度越严重。

1.3.3 初级生产力

海区初级生产力采用如下公式计算^[11]:

$$U = \frac{C_{\text{Chl } a} \times Q \times D \times E}{2} \quad (12)$$

式中: U 为初级生产力 [$\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; $C_{\text{Chl } a}$ 为 Chl a 浓度(mg/m^3); Q 为不同层次同化系数算术平均值 [$\text{mg C}/[(\text{mg Chl } a) \cdot \text{h}]$], 取经验值 3.7; D 为光照时间(h), 因调查时间为 8 月, 取值 14; E 为真光层深度(m), 取透明度的 3.05 倍。

1.4 数据处理

采用单因子方差分析对调查数据进行显著性检验: $P < 0.001$, 差异极显著; $P < 0.01$, 差异较显

著; $P < 0.05$, 差异显著。采用 Origin 2018 绘图。

2 结果与讨论

2.1 海水水文性质

海水温度、盐度及透明度是重要的海洋水文要素,对海洋动植物的生长和分布有着重要影响。调查海域温度、盐度和透明度的年度分布见图2。调查海域的盐度和温度存在极显著的年度差异($P < 0.001$),盐度在 25.187 至 31.602 之间呈波浪形变化,6 年均值为 28.799 ± 2.223 ,这主要是因为调查海域位于近岸,受陆源输入及降雨

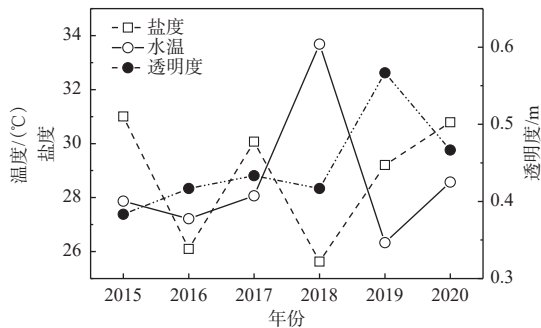


图2 牡蛎礁保护区海域水文性质

Fig. 2 Water temperature, salinity and transparency in oyster reef marine reserve

影响较大;水温总体呈先升高后降低的变化趋势,在 25.0 °C 至 34.6 °C 之间变化,6 年均值为 (28.6 ± 2.4) °C;透明度无显著年度差异($P > 0.05$),各年海水能见度较为均一,6 年平均透明度为 (0.4 ± 0.1) m。各站位的盐度和水温分布较为均匀,受水深影响,透明度远岸站位(S4—S6 和 S4'—S6')总体上略高于近岸站位(S1—S3 和 S1'—S3')。

2.2 海水水质状况

2.2.1 海水 pH 和 DO

pH 和 DO 是影响海洋生物生命活动的重要水质指标,与海洋生物的新陈代谢息息相关。2015—2020 年,调查海域各站位 DO 浓度和 pH 的变化分别见图 3A 和图 3B。调查海域 pH 变化范围为 7.81 ~ 8.25,6 年均值为 8.00 ± 0.11 。单因子方差分析结果表明,pH 存在极显著的年度差异($P < 0.001$),2018 年 pH 较高,年均值为 8.17 ± 0.06 ;2017 年 pH 较低,年均值为 7.83 ± 0.03 。调查期间海水 pH 均满足第二类海水水质标准。调查海域 DO 浓度变化范围为 4.09 ~ 10.07 mg/L,6 年均值为 (6.96 ± 1.59) mg/L。单因子方差分析结果表明,该海域 DO 浓度存在极显著的年度差

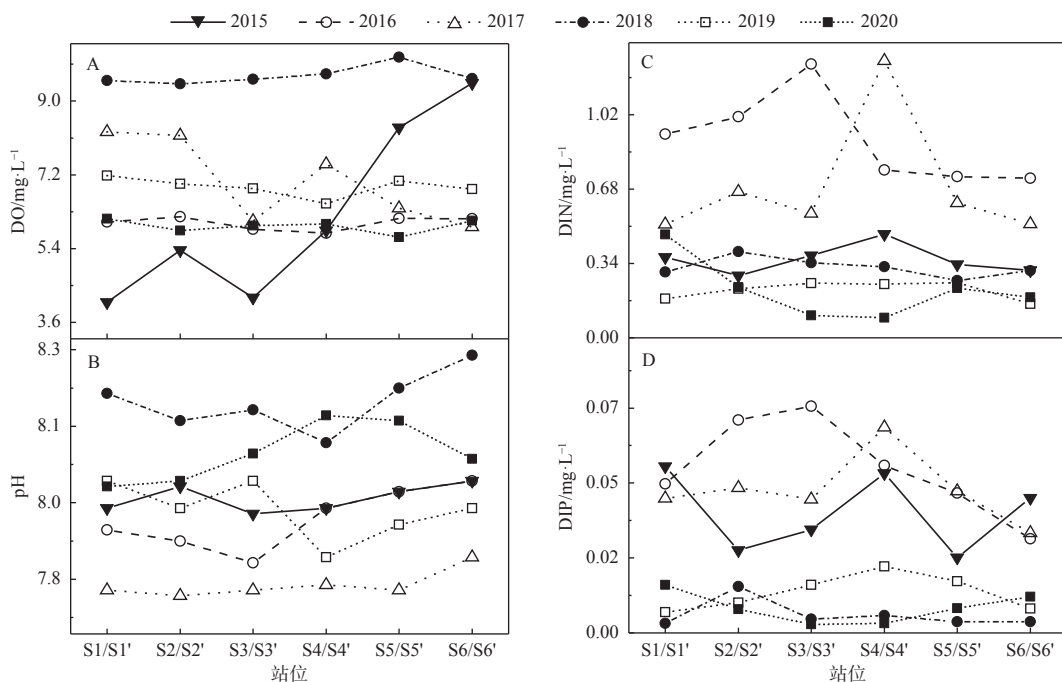


图3 牡蛎礁保护区海域 pH、DO、DIP 和 DIN 浓度的年度变化

Fig. 3 Annual variation of pH and mass concentrations of DO, DIP and DIN in waters of oyster reef marine reserve

异($P<0.001$), 2018年DO浓度较高, 年均值为(9.62 ± 0.23) mg/L; 2020年DO浓度较低, 年均值为(5.95 ± 0.17) mg/L。调查期间, DO浓度在2015年出现超出第二类海水水质标准的现象, 超标站位为近岸的S1和S3站位, 其余年份DO浓度均满足第二类海水水质标准。综合6年调查结果来看, 远岸站位pH和DO浓度要高于近岸站位, 这可能与陆源污染物的输入有关^[12]。

2.2.2 海水营养盐

DIN和DIP是近岸海域影响浮游植物生长的主要营养盐类, 与赤潮的发生密切相关。2015—2020年, 调查海域各站位DIN和DIP浓度的变化分别见图3C和图3D。调查海域DIN浓度变化范围为0.0924~1.27 mg/L, 6年年均值为(0.453 ± 0.300) mg/L。单因子方差分析结果表明, DIN浓度存在极显著的年度差异($P<0.001$), 总体呈现先升高后降低的变化趋势, 2016年DIN浓度较高, 年均值为(0.905 ± 0.205) mg/L; 2019年DIN浓度较低, 年均值为(0.218 ± 0.0412) mg/L。2015—2018年, 调查海域海水中DIN浓度普遍超出第二类海水水质标准, 超标站位比例依次为83.3%、100%、100%和83.3%; 2019年和2020年DIN超标率出现明显下降, 超标率仅分别为0和16.7%。调查海域DIP浓度变化范围为0.0027~0.073 mg/L, 6年年均值为(0.027 ± 0.021) mg/L。单因子方差分析结果表明, DIP浓度存在极显著的年度差异($P<0.001$), 总体同样呈现先升高后降低的变化趋势, 2016年DIP浓度较高, 年均值为(0.053 ± 0.016) mg/L; 2018年DIP浓度较低, 年均值为(0.0059 ± 0.0045) mg/L。2015—2017年, 调查海域海水中DIP浓度普遍超出第二类海水水质标准, 超标站位比例分别为66.7%、100%和100%; 2018—2020年, 海水中DIP浓度均符合第二类海水水质标准, 未出现超标现象。综合6年调查结果来看, S4(S4')站位的DIN和DIP浓度略高于其他站位, 这可能是因为其临近北塘口, 受入海河流营养盐输入影响较大^[12]。

2.2.3 海水污染物

2015—2018年, 调查海域各站位重金属浓度(Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As)见图4A—图4G。单因子方差分析结果表明, Cu、Zn和Hg浓度无

显著性年度差异($P>0.05$), 各调查年份浓度变化不大, 4年浓度均值分别为(1.53 ± 0.31) $\mu\text{g/L}$ 、(3.05 ± 2.69) $\mu\text{g/L}$ 和(0.024 ± 0.005) $\mu\text{g/L}$; Cr和Cd浓度表现出较显著的年度差异($0.01<P<0.05$), 4年浓度均值分别为(0.36 ± 0.23) $\mu\text{g/L}$ 和(0.13 ± 0.08) $\mu\text{g/L}$; Pb和As浓度表现出极显著的年度差异($P<0.001$), 浓度均值分别为(0.26 ± 0.17) $\mu\text{g/L}$ 和(2.26 ± 0.80) $\mu\text{g/L}$ 。总体来看, 该海域Cu、Zn和Hg的浓度基本稳定, Pb和Cd的浓度呈先升高后下降的变化趋势, As的浓度呈先下降后升高的变化趋势, Cr的浓度呈升高的变化趋势。调查期间, 各站位重金属浓度均符合第二类海水水质标准, 未出现超标现象。综合4年调查结果来看, 各站位重金属浓度分布较为均匀, 但近岸海域站位的重金属浓度略高于远岸站位, 呈现近岸高、远岸低的特点, 这与该海域的重金属元素主要由陆源输入的规律相符^[12]。

调查海域各站位油类浓度和COD浓度分别见图4H和图5A。2015—2018年, 油类浓度范围为0.0118~0.0546 mg/L, 4年年均值为(0.0245 ± 0.0109) mg/L。单因子方差分析结果表明, 海水中油类浓度无显著性年度差异($P>0.05$)。2015—2018年, 油类浓度仅在2015年S1站位出现超出第二类海水水质标准的现象, 这可能是由于该站位临近中心渔港, 受到渔港内船舶漏油及排放压舱水的影响^[13]。2015—2020年, COD浓度变化范围为1.52~5.70 mg/L, 6年年均值为(2.11 ± 0.79) mg/L。单因子方差分析结果表明, 海水中COD浓度存在显著年度差异($0.01<P<0.05$), 总体呈波浪式缓慢下降的变化趋势, 2015年COD浓度较高, 年均值为(2.64 ± 1.51) mg/L, 2019年COD浓度较低, 年均值为(1.31 ± 0.24) mg/L。调查期间, 2015年, 在S5站位COD出现超出第四类海水水质标准的现象; 2018年, 在S2站位COD出现超出第二类海水水质标准的现象; 其余调查结果均未超出第二类海水水质标准。COD浓度在近岸站位S2和远岸站位S5分别出现超标现象, 这表明除陆源输入外, 海上渔船及旅游船的作业排污可能也是该海域COD污染的一个重要来源^[13]。

2015—2020年, 调查海域各站位的悬浮物浓度

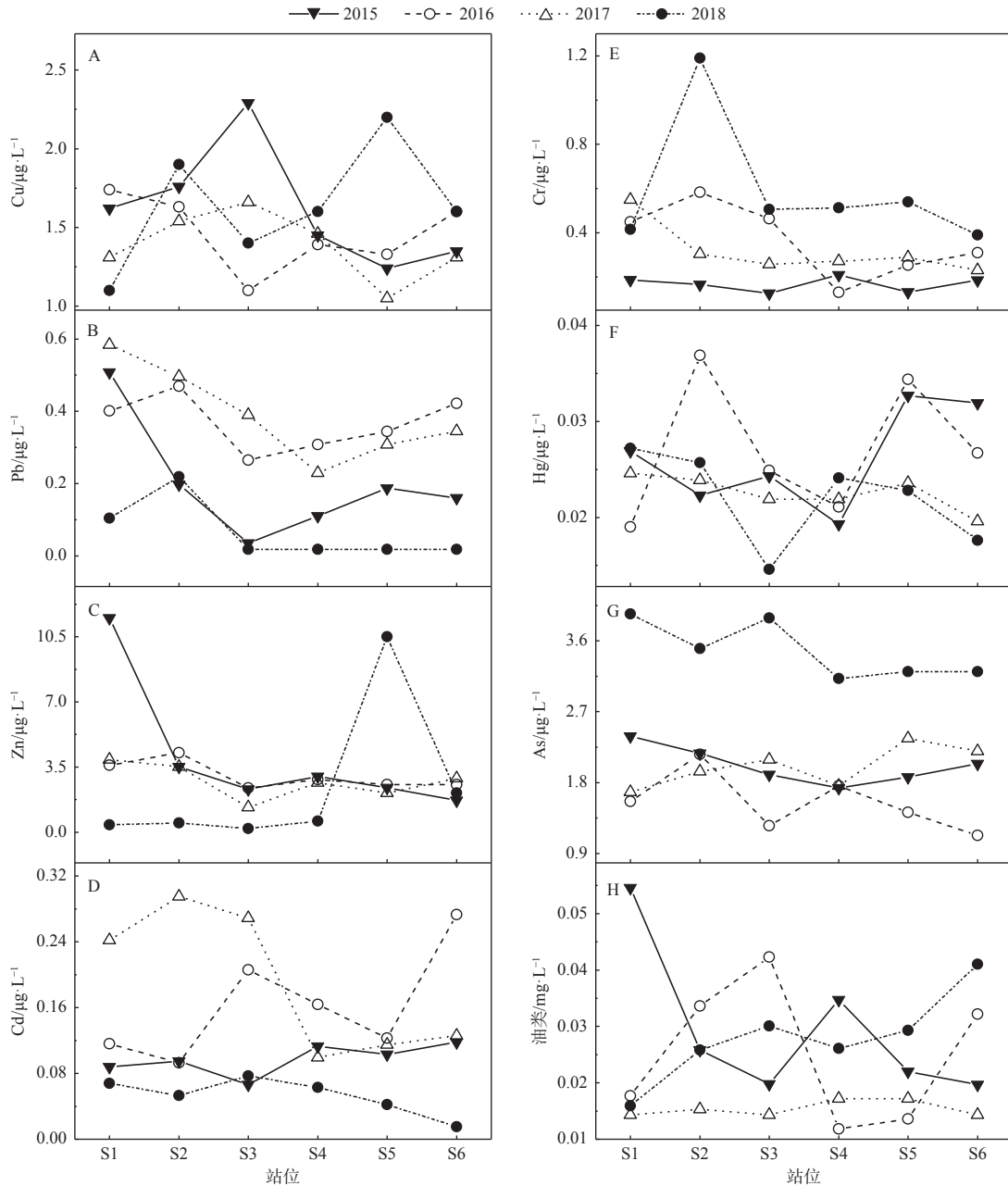


图4 牡蛎礁保护区海域重金属和油类浓度的年度变化

Fig. 4 Annual variation of mass concentrations of heavy metal and oil in waters of oyster reef marine reserve

见图 5B。调查期间, 悬浮物浓度变化范围为 11.2 ~ 104.1 mg/L, 6 年浓度均值为 (24.7 ± 16.0) mg/L。单因子方差分析结果表明, 悬浮物浓度无显著性年度差异 ($P > 0.05$), 各调查年份变化不大。各站位的悬浮物浓度分布也较为均匀, 但 2016 年 S1 站位悬浮物浓度出现了高值, 这可能与其左侧存在一个围海堤坝的开口处有关。该围海堤坝内水深极浅, 受风浪和潮汐作用排出悬浮物质含量较高的海水, 导致 S1 站位悬浮物浓度出现

高值, 而这可能会对牡蛎礁的呼吸觅食产生不利影响。

2.2.4 海水初级生产力

2015—2020 年, 各站位 Chl *a* 浓度和初级生产力见图 5C 和图 5D。Chl *a* 浓度和初级生产力 6 年均值分别为 (7.55 ± 2.98) mg/L 和 (266.96 ± 121.49) mg C/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 二者均存在显著年度差异 ($0.01 < P < 0.05$)。其中 2015—2019 年, Chl *a* 浓度和初级生产力基本保持稳定, 均值分别为

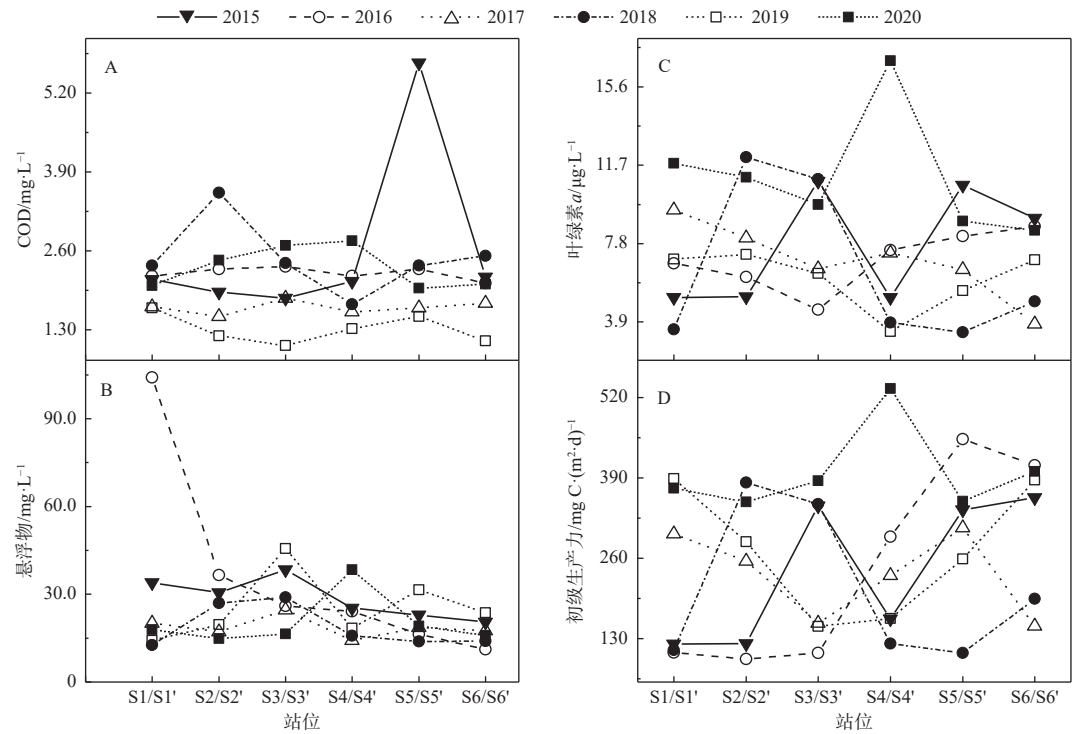


图 5 牡蛎礁保护区海域悬浮物、COD、叶绿素 *a* 和初级生产力的年度变化

Fig. 5 Annual variation of mass concentrations of COD, suspended solids and chlorophyll *a* and primary productivity in waters of oyster reef marine reserve

(6.83 ± 2.41) mg/L 和 (240.50 ± 112.48) mg C/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$); 2020 年, Chl *a* 浓度和初级生产力有较大升高, 均值分别为 (11.2 ± 3.09) mg/L 和 (399.25 ± 68.72) mg C/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。受营养盐、光照、水温及生物群落结构等因素影响, 2020 年调查期间可能遇到了初级生产者的爆发性增长, 导致 Chl *a* 含量和初级生产力较历史调查结果有较大升高。张海波等^[14]2016 年在渤海湾的调查显示, Chl *a* 浓度为 (8.37 ± 2.90) mg/L, 初级生产力为

(204.21 ± 157.69) mg C/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 这与本文 2015—2019 年调查结果基本一致, 但低于 2020 年的结果。

2.3 海水水质评价

2.3.1 富营养化状况评价

牡蛎礁海域营养状态采用营养状态指数(*E*)和营养状态质量指数(*NQI*)评价, 结果见表 2。调查期间, 该海域富营养状态总体呈现先升高后降低的变化趋势($P < 0.001$), 2015—2017 年, 富营养化程度处于较高水平, *E* 和 *NQI* 均值分别为

表 2 牡蛎礁保护区海域营养状态指数和营养状态质量指数

Tab.2 Evaluation result of water nutrition level based on eutrophication index (*E*) and nutrient quality index (*NQI*)

站位	营养状态指数 <i>E</i>						营养状态质量指数 <i>NQI</i>					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2015	2016	2017	2018	2019	2020
S1/S1'	9.28	21.61	8.35	0.48	0.44	3.28	4.74	6.79	5.62	2.60	2.78	5.12
S2/S2'	3.20	35.28	10.50	4.65	0.58	0.96	3.50	7.64	5.90	5.42	2.92	4.06
S3/S3'	5.05	47.27	9.85	0.82	0.89	0.17	5.15	8.28	5.24	4.29	2.96	3.28
S4/S4'	11.31	20.01	29.64	0.69	1.54	0.17	5.01	6.57	8.42	2.62	2.66	4.71
S5/S5'	10.26	16.88	10.34	0.50	1.41	0.79	5.96	6.35	5.43	2.46	2.99	3.47
S6/S6'	6.42	10.11	6.43	0.62	0.30	0.98	5.00	5.86	4.14	2.97	2.55	3.38
平均值	7.59	25.19	12.52	1.29	0.44	3.28	4.89	6.91	5.79	3.39	2.81	4.00

(15.10 ± 11.71)和(5.87 ± 1.32); 2018—2020年,富营养状态处于较低水平, E 和 NQI 均值分别为(1.07 ± 1.14)和(3.40 ± 0.93)。

DIN和DIP是该海域富营养化及其变化的主要影响因子。2015—2017年,DIN浓度均值为(0.652 ± 0.303) mg/L,总体为劣四类海水水质;DIP浓度均值为(0.046 ± 0.014) mg/L,总体为劣三类海水水质。2018—2020年,DIN浓度均值为(0.253 ± 0.0961) mg/L,符合第二类海水水质标准;DIP浓度均值为(0.0089 ± 0.0056) mg/L,符合第一类海水水质标准。王婷等^[15]2012—2013年对天津大神堂牡蛎礁保护区海水富营养化的评价结果与本文2015—2017年的调查结果基本一致,但要高于本文2018—2020年的调查结果。受富营养化影响,该海域也成为渤海湾历史上赤潮的高发区之一^[16],而赤潮的发生会进一步恶化牡蛎礁生存的水体环境。

2018—2020年,调查海域富营养化程度较2015—2017年有较大下降,其中DIP贡献较大,DIN贡献较小。2015—2020年,调查海域的N/P分别为9.3、17.1、15.1、55.0、16.9和27.2,根据Redfield等^[17]和Justic等^[18]的判定标准,调查海域在2015年表现为轻微氮限制,2016年、

2017年和2019年基本不存在氮、磷限制,2018年和2020年表现为明显的磷限制。总体来看,该海域N/P呈逐渐升高的变化趋势。郑丙辉等^[19]1985—2003年在天津近岸海域的调查结果表明,除1985年外,其余年份N/P均大于16。本文N/P的调查结果总体较郑丙辉等的调查结果略低,这可能与陆源输入氮、磷营养盐总量的年度变化有关。

2.3.2 综合污染指数评价

统计分析包含油类和重金属在内共13项调查指标的内梅罗指数,结果见图6A。统计结果显示,2015—2018年,内梅罗指数(13项指标)的变化范围为0.64~3.02,均值为(1.44 ± 0.67),呈现先升高后降低的变化趋势($P < 0.001$)。统计分析不包含油类和重金属在内共5项调查指标的内梅罗指数,结果见图6B。统计结果显示,2015—2020年内梅罗指数(5项指标)的变化范围为0.57~2.30,均值为(1.25 ± 0.72),总体也呈现先升高后降低的变化趋势($P < 0.001$)。上述两类内梅罗指数表明,牡蛎礁保护区海水污染程度在2016—2017年加剧,而后至2020年总体呈逐渐减轻的变化趋势。

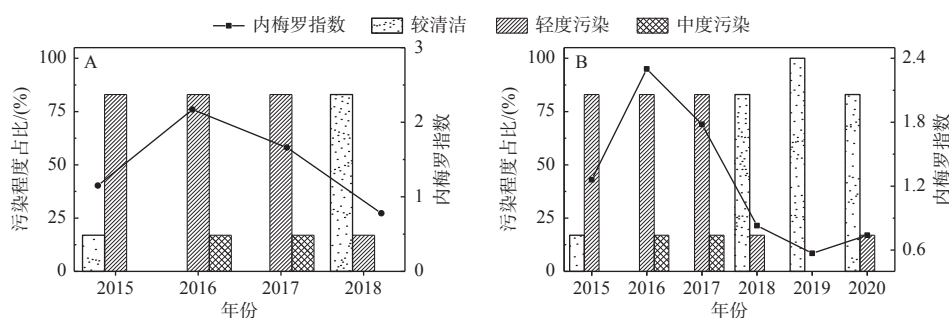


图6 牡蛎礁保护区海域内梅罗指数及污染水平占比情况的年度变化

Fig. 6 Nemerow pollution index and annual variation of water pollution grading in waters of oyster reef marine reserve

该海域海水超标调查因子按贡献率从高到低依次为DIN、DIP、COD、油类和DO,但数量呈逐年下降趋势。2015年,超标污染物种类较多,除富营养化污染外,有机污染较为严重;2016—2017年,有机污染有一定程度好转,但富营养化污染加重;2018年,海水污染因子进一步减少,超标污染物仅为DIN,海水污染程度有了

较大的改善;2019年仅开展了5项评价指标(pH、DO、DIN、DIP和COD)的调查,所有调查指标均未超标;2020年同样开展了5项评价指标的调查,仅DIN在一个站位出现超标情况,其余调查因子均未超标。马同宇等^[13]2007—2011年对天津塘沽近岸海域的调查显示,海水主要污染因子为DIN和DIP,个别站位的COD、油

类、Pb、DO 也存在超标现象;王秋璐等^[20]2011—2015 年对天津近岸陆源入海河流及排污口邻近海域的调查显示,海水主要污染因子为 DIN、DIP、COD 和生化需氧量,本文的调查结果与文献报道基本一致。

按照海水污染程度的变化情况,本次调查可划分为两个时期,即 2015—2017 年和 2018—2020 年。2018—2020 年,该海域污染物数量和污染物程度均较 2015—2017 年有明显下降。2018—2020 年 DIN 和 DIP 浓度较 2015—2017 年分别下降 61.2% 和 80.5%; COD 浓度略有下降,下降率为 6.3%; DO 浓度略有上升,上升率为 16.7%; 2018 年油类浓度较 2015—2017 年略有升高,但并未出现超标现象;2018 年重金属各项元素浓度较 2015—2017 年变化情况不一,但均在水质标准要求范围之内,且污染指数较低,并未对该海域海水水质造成明显影响。总体来看,2018—2020 年牡蛎礁保护区海水水质较 2015—2017 年出现明显好转。从 2018 年开始,我国开始实施了污染防治攻坚战和渤海综合治理攻坚战,这可能是近年来水质改善的主要原因。

3 结论

(1)2015—2020 年,天津大神堂牡蛎礁保护区海域海水总体呈富营养化状态,富营养化程度呈先升高后降低的变化趋势,2018—2020 年富营养化程度较 2015—2017 年有明显下降,由基本不存在氮、磷营养盐结构限制转变为明显的磷限制。

(2)调查期间,天津大神堂牡蛎礁保护区海域海水污染程度由轻度污染转变为较清洁,超标因子按贡献率从高到低依次为 DIN、DIP、COD、油类和 DO,污染因子数量总体呈下降趋势;除陆源输入的影响外,围海堤和渔港码头等海洋工程以及渔业、旅游等海上活动也对海水水质造成一定影响。

(3)调查期间,天津大神堂牡蛎礁保护区海域 Chl *a* 和初级生产力总体保持稳定,平均值分别为 (7.55 ± 2.98) mg/L 和 (266.96 ± 121.49) mg C/(m²·d)。

参考文献:

- [1] 全为民,周为峰,马春艳,等. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁生态现状评价[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7749-7757.
- [2] BRUMBAUGH R D, COEN L D. Contemporary approaches for small-scale oyster reef restoration to address substrate versus recruitment limitation: a review and comments relevant for the Olympia oyster, *Ostrea lurida* carpenter 1864[J]. Journal of Shellfish Research, 2009, 28(1): 147-161.
- [3] 于庆云,张晓理,韩锡锡. 天津大神堂活牡蛎礁渔业资源养护与生态修复浅析[J]. 海洋经济, 2014, 4(5): 16-22.
- [4] GB 17378.4—2007, 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S].
- [5] HY/T 147.1—2013, 海洋监测技术规程 第1部分: 海水[S].
- [6] NEMEROW N L. Scientific stream pollution analysis[M]. Washington: Scripta Book Co., 1974: 163-231.
- [7] GB 3097—1997, 海水水质标准[S].
- [8] 王保栋,孙霞,谢琳萍,等. 海水溶解氧标准指数计算新方法[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 460-464.
- [9] 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.
- [10] 陈于望. 厦门港海域营养状况的分析[J]. 海洋环境科学, 1987, 6(3): 14-19.
- [11] CADÉE G C. Primary production off the Guyana coast[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1975, 9(1): 128-143.
- [12] 吴光红,李万庆,郑洪起. 渤海天津近岸海域水污染特征分析[J]. 海洋学报(中文版), 2007, 29(2): 143-149.
- [13] 马同宇,王静,康苏媛. 滨海新区塘沽近岸海域环境质量现状与分析[J]. 天津科技, 2012, 39(6): 12-14.
- [14] 张海波,裴绍峰,祝雅轩,等. 初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6416-6424.
- [15] 王婷,王群山,尚晓迪,等. 天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区水质分析[J]. 渔业现代化, 2014, 41(6): 47-50.
- [16] 王彬,崔健,李玲,等. 渤海湾赤潮特征研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(2): 200-206.
- [17] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. Science Progress, 1960, 11: 150-170.
- [18] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(3): 339-356.
- [19] 郑丙辉,秦延文,孟伟,等. 1985~2003年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 494-499.
- [20] 王秋璐,路文海,杨翼,等. 天津陆源入海污染状况及变化趋势研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(12): 86-89.