

钦州湾海洋环境的富营养化水平评价及其对浮游植物叶绿素 a 的影响

康建华¹, 林毅力¹, 王雨¹, 蓝文陆²

(1. 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005; 2. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站 北海 536000)

摘要:文章通过钦州湾现场调查资料,分别利用单因子污染指数法和富营养化指数法对湾内水质的污染状况和富营养化水平进行评价,并分析讨论不同的富营养化水平条件下浮游植物叶绿素 a 的响应。结果显示,钦州湾的污染状况和富营养化程度从湾顶至湾外呈现由重至轻的梯度变化,并出现两个“极端区域”:茅尾海化学需氧量(COD)和营养盐的污染指数劣于三类海水水质标准并重度富营养化;外湾污染指数符合一类海水水质标准并贫营养化。分析表明,茅尾海的重度富营养化是由河流输入、相对封闭的地形以及过度的牡蛎养殖造成,而外湾的贫营养化则主要归因于较少的水产养殖和陆源污水排放以及大量的浮游植物对磷酸盐的消耗。叶绿素 a 在这两个区域均呈现低值,茅尾海内主要是由于贝类滤食大粒径浮游植物和真光层深度下降引起,而外湾则是氮磷比(N/P)失衡,浮游植物生长受磷限制导致。另外,核电站温排水有可能是导致叶绿素 a 较高的原因。减少茅尾海内的养殖规模,种植红树林,集中污水于外湾排放,加强温排水口的水质监控是保证钦州湾海洋生态环境可持续发展的手段。

关键词:富营养化;污染评价;浮游植物;叶绿素 a;钦州湾;茅尾海

中图分类号:X5;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2020)11-0067-08

Assessment of the Eutrophication Level of the Marine Environment and Its Effect on Phytoplankton Chlorophyll a in Qinzhou Bay

KANG Jianhua¹, LIN Yili¹, WANG Yu¹, LAN Wenlu²

(1. Third Institution of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

2. Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000, China)

Abstract: The pollution intensity and eutrophication level of the water has been assessed based on the single factor contaminant index and eutrophication index method, and the response of phytoplankton chlorophyll a under different eutrophication levels was discussed by the analysis of field data in the Qinzhou Bay. The results showed that the gradient of pollution and eutrophication changes from heavy to light in the Qinzhou Bay. Two “extreme areas” were found: One was the

收稿日期:2020-04-18;修订日期:2020-10-20

基金项目:自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2015005)。

作者简介:康建华,副研究员,硕士,研究方向为海洋生物与生态学

通信作者:蓝文陆,教授级高工,博士,研究方向为海洋生物与生态学

Maowei Sea, where pollution indexes were inferior to class III seawater quality standards and status presented severe eutrophication. Another was the outside of bay, where the pollution index complies with Class I seawater quality standards and the state appeared to be oligotrophic. Severe eutrophication was caused by river imports, overly closed terrain and excessive aquaculture in the Maowei Sea, while eutrophication was mainly attributed to less aquaculture and land-based wastewater discharge and a large amount of phytoplankton consumption of phosphate in the outside of Bay. Chlorophyll a presented low values in both the Maowei Sea and the outside of bay, the former was mainly due to the large-diameter phytoplankton being filtered by shellfish and the decrease of the euphotic depth, the latter was mainly due to the imbalance of the N/P ratio and the growth of phytoplankton was restricted by phosphorus. In addition, the warm discharge of nuclear power plants might be the cause of extremely high chlorophyll a. Measures such as reducing the scale of aquaculture in the Maowei Sea, planting more mangroves, centralizing the discharge of sewage in the outer bay, and strengthening the water quality monitoring of the warm discharge were recommended to ensure the sustainable development of the marine ecological environment of the Qinzhou Bay.

Key words: Eutrophication, Pollution assessment, Phytoplankton, Chlorophyll a, Qinzhou Bay, Maowei Sea

0 引言

钦州湾是广西近岸海域规模最大的一个港湾, 钦江、茅岭江和大风江等河流注入该海湾, 钦州湾内部的茅尾海是中国最重要的蚝苗培育和大蚝生产基地之一。随着“海上丝绸之路”和“广西自由贸易试验区”的建设以及茅尾海国家级海洋公园的建立, 钦州港区位和资源优势逐渐凸显, 茅尾海的重要性也日益提高。近年来, 钦州湾水产养殖业规模不断扩大, 工业化和城市化的加剧严重威胁海洋生态系统的结构^[1], 生态环境安全问题随之成为重要的关注点^[2-3], 而与生态环境安全密切相关的化学需氧量(COD)和营养盐参数则成为学者们研究的重点^[2]。据报道, 茅尾海的氮、磷和 COD 浓度不断增加, 富营养化趋势逐渐加重, 不仅导致生态系统退化, 渔民渔业减产, 甚至已影响到人类的健康安全^[4]。公众对富营养化的强烈关注也促使评估富营养化的科学研究的水平不断提高。叶绿素 a 是海洋系统最基本也是关键的生态参数, 它的分布包含海区基本的生态过程信息和生态系统的动力学特征, 目前的研究中, 以叶绿素 a 浓度代表的浮游植物生物量作为水体富营养化、藻华和生产力高低的评判

标准也被普遍接受^[5]。因此, 研究其与富营养化水平的关系理所当然地成为任何一个海洋生态系统安全评价的关键点。

为了解决富营养化威胁生态环境安全的问题, 世界范围内的学者们已经开发了许多综合评估方法^[6], 其中以化学指标为主的营养指标方法在中国近岸水域得到广泛的应用^[7]。近年来, 有关钦州湾海域营养盐特征和富营养化及其对生态影响的研究相对较少^[8-11], 而经济的发展, 养殖业和其他工业的不断扩大却导致陆源入海污染不断增多, 污染数量和范围也不断增大, 营养盐和浮游植物生物量水平也处于不断的变化当中。本项研究工作的主要目标是确定钦州湾营养水平的分布和变化, 使用单因子污染和富营养化指数方法评估钦州湾富营养化状况及其对基础生态参数浮游植物叶绿素 a 的影响, 以期帮助开发和管理人员用合适的方法评估钦州湾生态环境的长期演变, 为保证实施海洋可持续发展战略提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和测定方法

本研究在钦州湾一共设置 16 个调查站位

(图 1),调查时间为 2015 年 11 月。每个站位水样通过 HYDRO BIOS 采水器分层采取,采样层次为表层和底层。

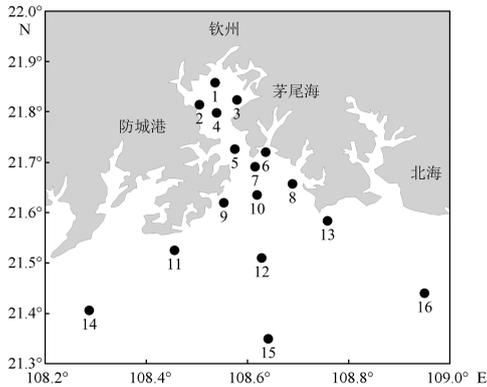


图 1 钦州湾采样站位

叶绿素 a 的测定方法按照《海洋调查规范》^[12](GB/T 12763.6—2007)推荐的萃取荧光法进行。每份水样取 375 mL,加入两滴 1% 碳酸镁溶液,用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,收集的滤膜用 90% 丙酮萃取,定容至 10 mL,放置冰箱内低温(0℃)下萃取 20~24 小时后,用 TURNER-10-AU-005-CE 荧光仪测定。

COD 和营养盐的测定方法则按照《海洋监测规范》^[13](GB17378.4—2007)所规定的方法进行,其中 COD 浓度采用碱性高锰酸钾法进行测定,硝酸盐(NO₃-N)采用镉柱还原法、亚硝酸盐(NO₂-N)采用萘乙二胺分光光度法、铵氮(NH₄-N)采用次溴酸盐氧化法、磷酸盐(PO₄-P)采用磷钼蓝萃取分光光度法、硅酸盐(SiO₃-Si)则采用硅钼黄法分别测定。

1.2 评价方法

1.2.1 单因子污染指数法

目前判断海水水质污染程度主要研究的指标是 COD、溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP),采用的评价方法是《近海海洋环境监测规范》^[14]提出的单因子污染指数法。具体的计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 代表污染物 i 的实测值; S_i 代表污染物 i 的第 N 类(N 为一、二、三、四)评价标准阈值。本研究以我国《海水水质标准》^[15]第 N 类(N 为一、二、三、四)的标准阈值作为

评价标准。当 $P_i > 1$ 时,表明水质超标第 N 类,如果 $P_i \leq 1$ 时,表明水质符合第 N 类标准。

1.2.2 富营养化指数法

海水富营养化水平采用的评价方法是《近海海洋环境监测规范》^[16]提出的富营养化指数法。具体的计算公式如下:

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}}}{4\ 500} \times 10^6$$

式中: E 为富营养化指数(无单位), C_{COD} 、 C_{DIN} 、 C_{DIP} 分别代表 COD、DIN、DIP 的浓度(单位为 mg/L)。当 $E < 1$ 时,表明水质处于贫营养状态; $1 \leq E < 2$ 时,水质处于轻度富营养状态; $2 \leq E < 5$ 时,水质处于中度富营养状态; $5 \leq E < 15$ 时,水质处于重度富营养状态; $E \geq 15$ 时,水质处于严重富营养状态。

2 结果

2.1 海水 COD 和营养盐水平分布

钦州湾 COD、DIN 和 DIP 以及 SiO₃-Si 的水平分布特征如图 2 所示。COD 平均值为 1.44 mg/L,变化范围为 0.65~2.49 mg/L,从湾顶的茅尾海向湾外逐渐增加。DIN 和 DIP 以及 SiO₃-Si 平均值分别为 0.21 mg/L,0.018 mg/L,1.16 mg/L,变化范围分别为 0.04~0.49 mg/L,0.001~0.043 mg/L,0.13~2.62 mg/L,平面分布的变化与 COD 相似,均表现为沿着盐度增加的梯度从湾顶向湾外逐渐降低,DIP 在湾外几乎接近于零。

2.2 海水富营养化水平的评价

2.2.1 单因子污染指数法评价结果

单因子污染指数法的评价结果如图 3 所示。从 COD 单因子污染指数来看,除茅尾海内的 4 个测站不符合一类海水水质标准外,其他站均达一类水质标准,未受 COD 污染。DIN 单因子污染指数则显示调查海域不符合一类海水水质标准的范围有所扩大,已高达一半站位,其中茅尾海内的 2 号和 4 号站劣于二类标准,1 号和 3 号站甚至劣于三类标准。DIP 单因子污染指数表明不符合一类海水水质标准的站位与 DIN 基本一致,不同的是茅尾海内的 4 个测站均劣于三类标准。

综合来看,COD、DIN、DIP 在钦州湾的茅尾海内部均有超标现象,部分站位的 DIN、DIP 甚至劣于

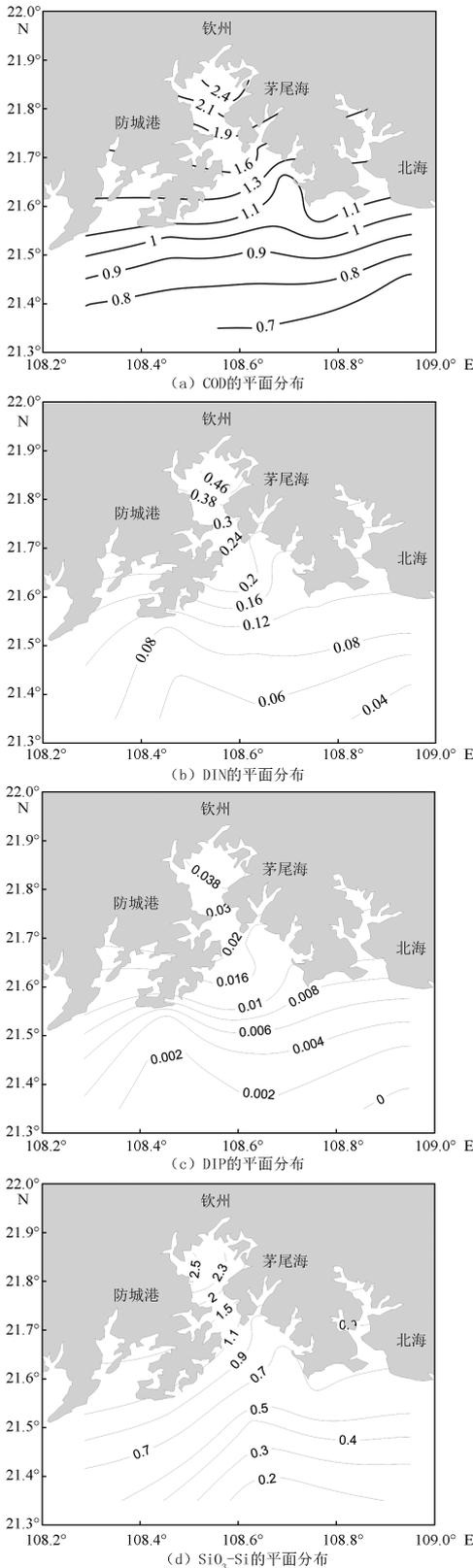


图2 钦州湾 COD(mg/L)和营养盐 (mg/L)的平面分布

三类标准,污染较严重。但也有近一半的站点达到一类海水水质标准,未受任何污染,这些站点多集中于远离近岸的外湾。

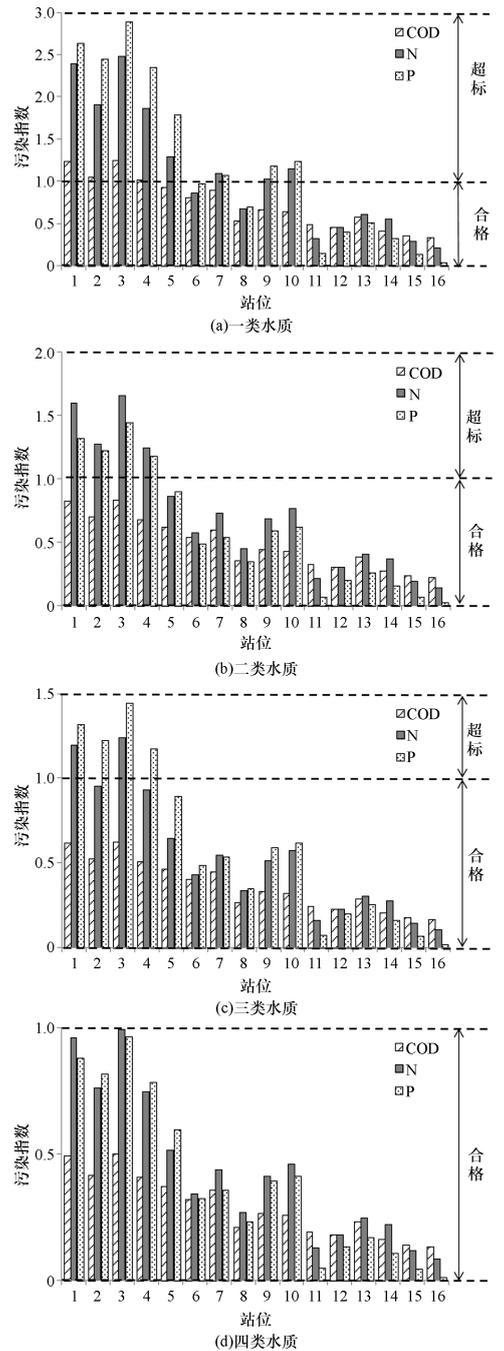


图3 钦州湾不同水质标准下不同污染物的污染指数

2.2.2 富营养化指数法评价结果

图4结果表明,钦州湾富营养化指数E的变化范围介于0.00~11.83之间,平均为2.67。从图5可以看出,富营养化指数E空间分布特征与

营养盐基本保持一致,总体呈现从湾顶向湾外逐渐降低的分布趋势。根据富营养化分级指标,茅尾海内部的富营养化指数 E 平均为 8.63,处于重度富营养化状态,其中以钦江口、茅岭江口的富营养化程度最为严重。连接茅尾海和外部的“咽喉口”航道上处于中度富营养化状态,茅尾海入海口区域情况相对好转,为轻度富营养化状态。由茅尾海入海口区域向外发展,则全部显示为贫营养化状态。

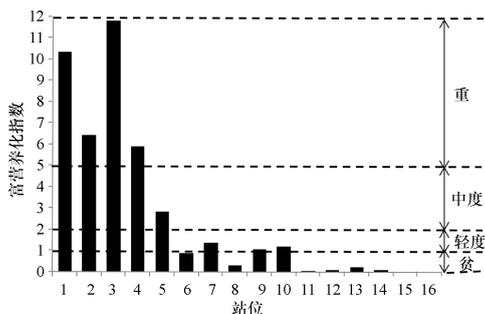


图 4 钦州湾富营养化指数的评价结果

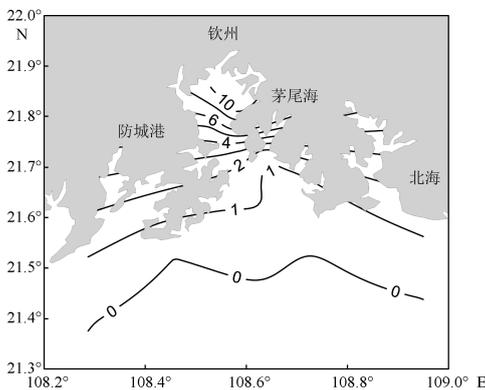


图 5 钦州湾富营养化指数 E 的水平分布

2.3 叶绿素 a 的水平分布

叶绿素 a 的平面分布由湾顶向湾外总体呈现低—高一低—低的趋势(图 6)。钦州湾叶绿素 a 的平均值为 2.93 mg/m^3 ,变化范围为 $1.13 \sim 8.52 \text{ mg/m}^3$,最高值出现在防城港核电站排水口附近的 9 号站,最低值则位于外湾最远端的 16 号站。值得注意的是,受径流影响强烈、污染和富营养化皆较重的茅尾海内,叶绿素 a 值在高营养盐条件下并未保持高值,平均仅 1.83 mg/m^3 。

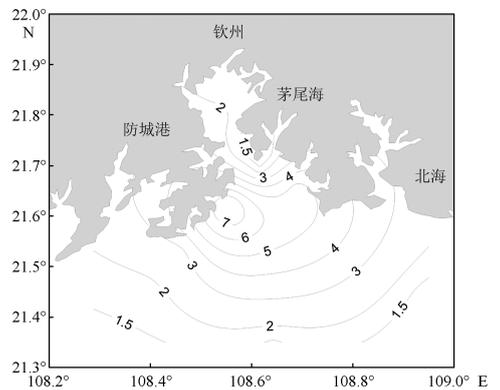


图 6 钦州湾叶绿素 a (mg/m^3) 的水平分布

3 讨论

3.1 富营养化水平的原因分析

单因子污染和富营养化指数法的评价结果表明,钦州湾的污染状况和富营养化程度从湾顶至湾外呈现由重至轻的梯度变化,进而形成了两个“极端区域”:一个是湾顶的茅尾海,污染指数劣于三类海水水质标准并重度富营养化;一个是外湾 21.4°N 以南,污染指数符合一类海水水质标准并贫营养化。

表 1 展示了富营养化指数 E 和海洋环境因子的相关性。结果显示,富营养化指数不仅与 COD 及营养盐显著正相关,同时和温度(T)、盐度(S)、真光层深度(Z_{eu})、pH、溶解氧(DO)之间存在着显著的负相关关系。该结果同时反映了 COD 与 DIN、DIP 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的同源性,揭示河流输入是它们的主要来源,这与多数学者的分析结果一致^[11,17]。

表 1 富营养化指数 E 和海洋环境因子的相关性

参数	Pearson	显著性	N
T	-0.775 **	0.000	16
S	-0.894 **	0.000	16
Z_{eu}	-0.715 **	0.002	16
pH	-0.550 *	0.027	16
DO	-0.675 **	0.004	16
COD	0.894 **	0.000	16
DIN	0.951 **	0.000	16
DIP	0.924 **	0.000	16
$\text{SiO}_3\text{-Si}$	0.894 **	0.000	16

从地形上来看,茅尾海作为一个相对较封闭的

河口湾,同时受到钦江和茅岭江的入海河流输入的影响,盐度相比外湾明显更低^[18]。由于河流带来大量的泥沙,导致真光层深度 Z_{eu} 以及 DO 较外湾低,而咽喉段的存在对于茅尾海内污染物的扩散和降解来说,起到一个巨大的阻滞作用,这将直接拉长污染物在茅尾海内的停留时间^[19]。从营养盐上来看,茅尾海内 DIN 的平均值为 0.43 mg/L, DIP 为 0.04 mg/L, SiO_3-Si 为 2.43 mg/L,与近几年的研究结果相差不大。事实上,茅尾海由于国家海洋公园的建立以及红树林自然保护区的优势^[20],政府保护性政策的及时干预使得我们在沿岸并没有发现较为集中的污水排放口,反而是大量的牡蛎养殖以及河流的输入成了高浓度营养盐和 COD 的主要来源^[21]。

茅尾海的入海口区域,富营养化指数明显降低,平均值仅为 1.28,表明河流和陆源带来的营养盐被迅速降低,一方面归因其湾内牡蛎等贝类和大虾等养殖滤食了大量的藻类和大颗粒的悬浮物^[22];另一方面,这可能与入海口上方存在红树林湿地生态系统有关,有研究表明,陆源输入的 DIN 很大程度上会被红树林截留,从而减轻其营养负荷^[11]。

钦州湾的外湾区域,富营养化指数几乎趋近于零,尤其是 DIP 的含量更是低于浮游植物生长要求的阈值下限, N/P(摩尔比)严重失衡(图 7),硅藻等浮游植物表现为显著的磷限制^[23]。这主要归因于外湾远离河口,主要受到外海水的影响,现场观测未发现大面积水产养殖,较少的陆源污水排放,加上浮游植物的生长消耗利用了大量的磷酸盐^[20],三重因素导致其处于贫营养状态。

3.2 叶绿素 a 与环境因子的关系

表 2 展示了浮游植物叶绿素 a 和海洋环境因子的相关性。结果表明,叶绿素 a 与任何一个环境因子均不存在相关性。

表 2 浮游植物叶绿素 a 和海洋环境因子的相关性

参数	Pearson	显著性	N
E	-0.287	0.282	16
T	0.297	0.264	16
S	0.288	0.280	16
Z_{eu}	0.385	0.140	16
pH	-0.169	0.532	16

续表

参数	Pearson	显著性	N
DO	0.311	0.241	16
COD	-0.234	0.382	16
DIN	-0.156	0.564	16
DIP	-0.147	0.587	16
SiO_3-Si	-0.208	0.439	16

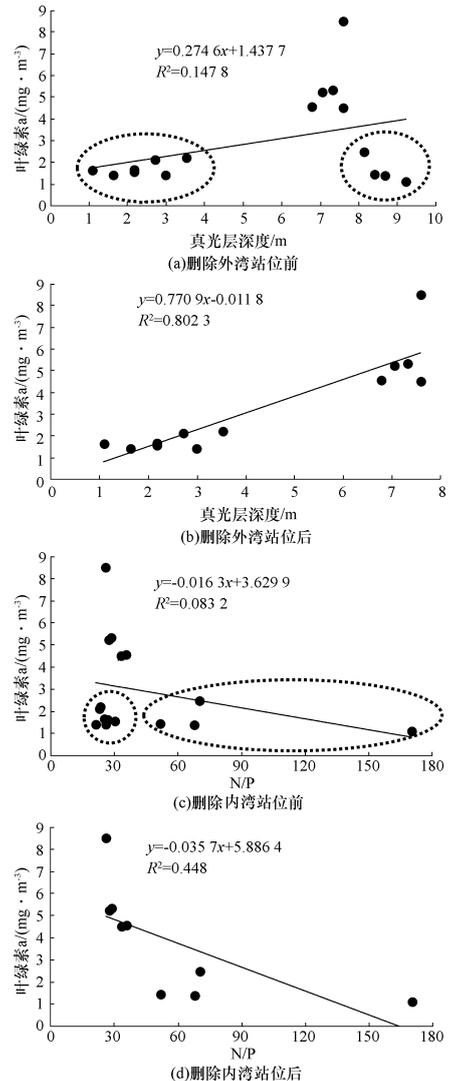


图 7 钦州湾叶绿素 a 与真光层深度和 N/P 的相关性

众所周知,叶绿素 a 的含量受到很多环境影响因子的影响,其中一种参数的极端限制可能会将其他因子的作用直接掩盖^[24],在本次研究中,也发现了这种现象:当外湾的站点由于 N/P 的严重失衡(高于 50)或者茅尾海内湾及湾口真光层深度严重

下降(低于 3.5 m)的情况下,浮游植物生长将受到严重限制,叶绿素 a 含量会明显下降。假设其中的一种极端限制不存在时,叶绿素 a 的其他影响因素则更容易直观显现。例如,本次研究中,当去除外湾极端磷限制的 4 个站时,叶绿素 a 和真光层深度则表现显著的正相关关系,当去除茅尾海内湾透明度较低的 7 个站时,叶绿素 a 和 N/P 则表现显著的负相关关系(图 7)。这表明,只有在真光层深度(平均 7.3 m)和营养盐(N/P 平均 30)同时相对较合适的情况下,浮游植物才能较好地生长,叶绿素 a 才有可能形成高值。由此可见,贝类等滤食大粒径的浮游植物,高浑浊度、严重富营养化的内湾,过度贫营养化、N/P 严重失衡的外湾,均会对叶绿素 a 的提高造成不利影响。

本次调查叶绿素 a 最高值(8.52 mg/m^3)的 9 号站位于防城港核电站的排水口,巧合的是 9 号站的温度(26.62°C)也是全海域最高的,并且其营养盐值也相对较高($\text{DIN}=0.21 \text{ mg/L}$, $\text{DIP}=0.18 \text{ mg/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}=1.00 \text{ mg/L}$)。虽然本次研究海域叶绿素 a 与温度并没有呈现出显著正相关关系,但正如前段分析的原因一样,极端环境因子可能把温度对浮游植物的作用有所掩盖。很多研究表明,热污染造成的区域性水温上升,会改变浮游植物的生物量和生产力、物种组成、多样性和生理习性,进而对整个生态系统的物质循环和能量流动造成影响^[25-26]。应该说,热污染的生态影响是非常有可能存在的,仅靠一个航次的数据无法完全说明问题,需要更多、更长期的数据来系统地分析和研究浮游植物群落结构和生物量对核电站温排水响应的变动规律及其机制,长期不间断的监测结果不仅能有效评估污染影响区域的生态系统安全,而且对于保护和生态恢复以及人类的渔业生产同样具有非常重要的科学意义。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)COD、DIN、DIP、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、富营养化指数的水平分布均呈现从湾顶的茅尾海向湾外逐渐降低的趋势。湾顶的茅尾海,COD 和营养盐的污染指数劣于三类海水水质标准并重度富营养化;外湾

21.4°N 以南,污染指数符合一类海水水质标准并贫营养化。叶绿素 a 的平面分布由湾顶向湾外总体呈现低—高一—低的趋势,其最高值出现在防城港核电站排水口附近的 9 号站,最低值则位于外湾贫营养盐区域最远端的 16 号站。

(2)相关性分析显示,富营养化指数与 COD 及营养盐呈显著正相关关系,与温度、盐度和真光层深度 Z_{cu} 、pH、DO 呈显著负相关关系。造成茅尾海内重度富营养化的主要原因是河流输入、相对封闭的地形以及过度的牡蛎养殖。茅尾海入海口的富营养化缓解则主要归功于湾内贝类的滤食和红树林对营养盐的截留。而外海的贫营养化则是因为无大面积水产养殖,较少的陆源污水排放以及浮游植物对磷酸盐的大量消耗。

(3)叶绿素 a 在茅尾海和外湾两个区域均呈现低值,原因却各不相同:富营养化的茅尾海内主要是由于贝类滤食大量大粒径浮游植物和真光层深度严重下降引起,而贫营养化的外湾则是 N/P 严重失衡,浮游植物生长受磷限制导致。另外,核电站排水口附近的热污染很可能会引起叶绿素 a 含量的提高。

4.2 建议

结合目前的调查结果和历史资料来看,钦州湾近些年沿岸的工业、农业、养殖业等迅速扩展,该海域的生态环境承受的压力越来越大^[27-28],而茅尾海更是由于养殖业的高度发达已呈现重度富营养化状态^[29],企沙附近的防城港核电站温排水对海洋藻类的影响也初现端倪^[30],对钦州湾的海洋资源进行合理开发利用的同时做到尽量降低对海洋生态环境的影响和破坏,保持海洋的可持续发展和利用,成为海洋开发和管理决策者们需要思考的问题。笔者仅就本研究的结果提出以下几点建议。

(1)鉴于茅尾海内污染和富营养化较为严重,建议严格控制污水排放,适当减少养殖规模,扩大红树林的种植面积,改善生态环境。

(2)由于钦州湾是一个半封闭的港湾,建议加强水质的监控和环境管理,通过铺设管道等措施将钦州湾附近沿岸的工业和生活污水集中排放于贫营养状态的湾外,尽可能减少湾内的污染。

(3)建议在防城港核电站排水口附近海域设置定点连续监测站位,定期分析和研究生物地球化学参数对核电站温排水以及富营养化响应的变动规律及其机制,为将来生态环境影响评估提供基础的科学参数。

参考文献

- [1] GU YANGGUANG, QIN LIN, YU ZILING, et al. Speciation and risk of heavy metals in sediments and human health implications of heavy metals in edible nekton in Beibu Gulf, China: A case study of Qinzhou Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 852-859.
- [2] 杨静,张仁铎,赵庄明,等.近25年广西北部湾海域营养盐时空分布特征[J].*生态环境学报*, 2015, 24(9): 1493-1498.
- [3] MENG FANGPING, WANG ZHIFENG, CHENG FENGLIAN, et al. The assessment of environmental pollution along the coast of Beibu Gulf, northern South China Sea: An integrated biomarker approach in the clam *Meretrix meretrix* [J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 85(4): 64-75.
- [4] 蓝文陆,彭小燕,茅尾海富营养化程度及其对浮游植物生物量的影响[J].*广西科学院学报*, 2011, 27(2): 109-112.
- [5] BOYER J N, KELBLE C R, ORTNER P B, et al. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll *a* biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6, Supplement): S56-S67.
- [6] FERREIRA J G, ANDERSEN J H, BORJA A, 2011. et al. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(2): 117-131.
- [7] XIAO YONGJIN, FERREIRA J G, BRICKER S B, et al. Trophic assessment in Chinese coastal systems review of methods and application to the Changjiang (Yangtze) Estuary and Jiaozhou Bay [J]. *Estuaries and Coasts*, 2007, 30(6): 901-918.
- [8] 杨斌,方怀义,钟秋平,等.钦州湾夏季营养盐的分布特征及富营养化评价[J].*海洋通报*, 2012, 31(6): 640-645.
- [9] 马媛,魏巍,高振会,等.钦州湾营养盐的分布特征及影响因素[J].*海洋通报*, 2013, 32(5): 482-487.
- [10] 张荣灿,陈宪云,雷富,等.钦州湾近岸海域六月富营养化水平评价[J].*广西科学院学报*, 2014, 30(3): 170-175.
- [11] 韦重霄,赵爽,宋立荣,等.钦州湾内湾茅尾海营养状况分析与评价研究[J].*环境科学与管理*, 2017, 42(9): 148-153.
- [12] 中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/T12763.4-2007 海洋调查规范—海洋化学要素调查[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [13] 中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/T12763.6-2007 海洋调查规范—海洋生物调查[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [14] 中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.GB17378.7-2007 海洋监测规范—近海污染生态调查和生物监测[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [15] 中国国家质量监督检验检疫总局.GB3097-1997 海水水质标准[S].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [16] 中国环境保护部.近岸海洋环境监测规范[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [17] 杨斌,钟秋平,鲁栋梁,等.钦州湾海域COD时空分布及对富营养化贡献分析[J].*海洋科学*, 2014, 38(3): 20-25.
- [18] 骆鑫,蓝文陆,李天深,等.钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子关系[J].*生态学报*, 2018, 39(7): 2603-2613.
- [19] 夏华永,殷志斌,葛文标.钦州湾物理自净能力研究[J].*广西科学*, 1996, 3(2): 65-70.
- [20] 王倩.钦州茅尾海水环境质量评价及主要污染物的分布特征[D].桂林:广西师范大学,2016.
- [21] 徐敏,韩保新,龙颖贤.钦州湾海域氮磷营养盐近30年变化规律及其来源分析[J].*环境工程技术学报*, 2012, 2(4): 253-258.
- [22] 庞碧剑,李天深,蓝文陆,等.钦州湾秋季和春季浮游动物分布特征及影响因素[J].*生态学报*, 2018, 38(17): 6204-6216.
- [23] 姜发军,陈波,何碧君,等.广西钦州湾浮游植物群落结构特征[J].*广西科学*, 2012, 19(3): 268-275.
- [24] 沈国英,黄凌风,郭丰,等.海洋生态学[M].北京:科学出版社,2011:1-346.
- [25] LIU SHENG. Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 424: 75-85.
- [26] CHEW L L, CHONG V C, WONG R C S, et al. Three decades of sea water abstraction by Kapar power plant (Malaysia): What impacts on tropical zooplankton community [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 69-84.
- [27] 蓝文陆,李天深.钦州湾生态系统健康主要存在问题及保护对策[J].*环境科学管理*, 2013, 38(1): 118-122.
- [28] 赵则春,高金荣.韦伯-费希纳定律在钦州湾近岸海域水质评价中的应用探讨[J].*大众科技*, 2019(9): 16-18.
- [29] 叶亨利.基于牡蛎养殖业的广西茅尾海海洋空间资源承载力评价研究[D].厦门:自然资源部第三海洋研究所,2018.
- [30] 贺立燕,宋秀贤,於凡,等.潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J].*海洋与湖沼*, 2019(3): 700-706.