

基于PSR模型的珠江口海域富营养化特征与评价

龙 苒^{1,2}, 陈海刚², 田 斐², 王学锋³, 张林宝², 张 喆²,
唐振朝², 叶国玲², 陈建华^{1*}

(1. 江苏海洋大学海洋科学与水产学院, 江苏省海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东珠江口生态系统野外科学观测研究站, 广东 广州 510300;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524025)

摘要:本研究依据2020年4月(春季)和2020年10月(秋季)珠江口海域的调查数据,根据“压力-状态-响应”(PSR)模型对珠江口海域进行富营养化状况评价,并通过主成分分析以及相关性分析来说明各环境因子对珠江口富营养化的影响。结果表明:在“优、良、中、差、劣”5个富营养化等级中,珠江口PSR综合评价等级为“差”等级,近几年内变化趋于稳定。有机污染物与营养盐对珠江口富营养化的影响较大,其次为叶绿素a和溶解氧。珠江口营养盐与盐度呈显著负相关,与叶绿素a呈显著正相关。周边城市的陆源排放输入是导致珠江口富营养化的主要因素,河口稀释混合作用以及浮游植物对珠江口的富营养化程度有影响。

关键词:海洋化学;压力-状态-响应;富营养化;营养盐;珠江口

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.02.014

中图分类号:P734

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2023)02-0317-12

珠江口位于广东省中南部由于其特殊的地理位置和在经济发展中重要的地位,其生态环境备受关注^[1-4]。根据近几年发布的《广东省海洋环境状况公报》^[5],珠江口仍是中国近岸海域污染严重的海域之一。2006—2010年夏季对珠江口海域的调查显示珠江口上游富营养化较为严重^[6];2016年调查结果显示珠江口所调查的站位均属于富营养化状态^[7];2019年夏季珠江口接近一半的站位为高度富营养化^[8]。这些研究都说明海水富营养化问题已成为珠江口面临的主要威胁之一。

我国近岸海域富营养化评价体系大多为第一代评价体系,即用包含氮、磷和溶解氧等指标的公式计算出的值来反映该海域的富营养化程度。前人对珠江口的富营养评价多采用单因子法、富营养指数法和营养质量状态指数法、模糊数学法等来表述调查海域富营养化的状态。但评价结果因年代不同,或

因方法不同而各有差异。例如,高鹏等(2007)运用营养状态指数法对珠江口八大口门水域进行富营养化分析研究,研究结果表明各口门均属于氮超标型富营养化^[9];彭云辉等(1991)采用模糊数学结合营养状态指数法评价珠江口的富营养化,结果表明珠江口海域属于中营养水平,但无机氮污染严重^[10];徐淑敏等(2019)采用无机氮、磷酸盐的含量与比例为指标对深澳湾进行富营养化评价,评价结果显示深澳湾全年处于贫营养化水平^[11]。随着人们对富营养化问题进一步的认识,国际上很多研究开始使用以“压力-状态-响应”(PSR)指标框架为基础的第二代富营养化评价体系来评价调查海域的富营养状况。PSR模型最早于1992年联合国环发大会后提出的,主要用于探究人类活动对环境造成的影响,因此该方法被众多国内外学者广泛的应用到环境评价中^[12-13]。这种基于PSR框架的评价

收稿日期:2022-01-12

资助项目:中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2021SD17);南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2019-06);广东省科技计划(2019B121201001);江苏省海洋生物技术重点实验研究项目(HS2022002)

作者简介:龙苒(1998—),女,硕士研究生;E-mail: ZHLongRan@163.com

* 通讯作者:陈建华(1978—),男,副教授;E-mail: chenjianhuazsu@163.com

方法不仅考虑了指标的浓度,还考虑到浓度出现的频率和空间覆盖度,可以更科学地反应富营养化的程度。我国学者基于 PSR 模型对渤海湾天津近岸^[14]、山东胶州湾^[15]、浙江象山港^[16]等海域进行了富营养化评价。

鉴于目前应用 PSR 模型对珠江口近岸海域进行富营养化特征的评价鲜有报道,本研究选择 2020 年春、秋两季的珠江口近岸海域调查数据为分析对象,采用调整后的 PSR 模型^[17-18],并利用主成分分析法对珠江口进行富营养化特征的评价,以期客观反映珠江口近岸水域的富营养化状态,并为珠江口流域的水环境保护和管理提供科学支持。

1 研究方法

1.1 调查海域与采样站位

本调查于 2020 年春秋两季在珠江口 22°15′—22°45′N, 113°35′—113°55′E 海域进行样品采集,共设置 28 个站位(图 1)。同时本研究 2015—2019 年珠江口营养盐变化趋势的调查数据来源于本课题组于 2015 年 4 月、2015 年 9 月、2017 年 9 月、2018 年 4 月、2018 年 5 月、2018 年 8 月、2018 年 11 月、2019 年 1 月共 8 个航次的调查,调查站位均为与本研究相近站位。样品的采集和储运按照《海洋监测规范》^[19]相关规定操作。

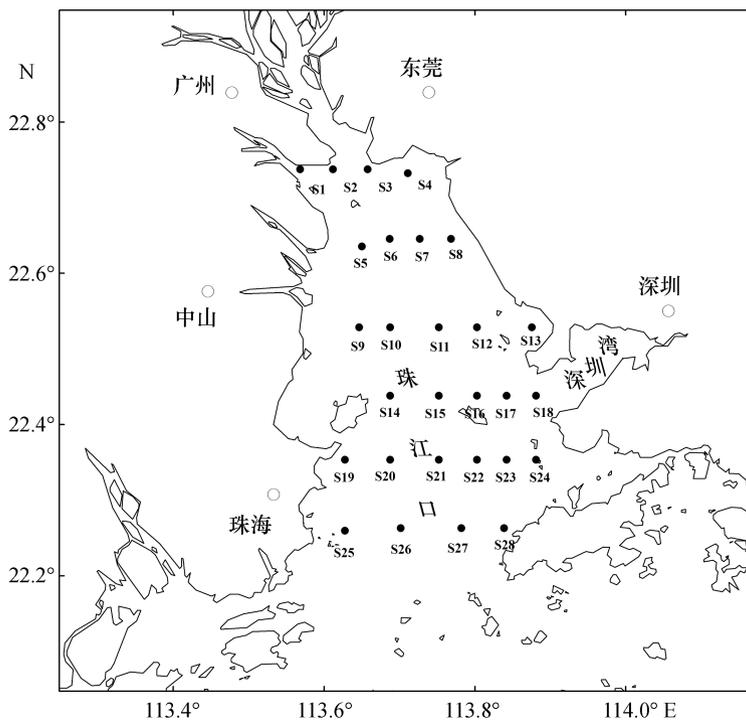


图 1 珠江口海域采样站位

Fig.1 Sampling stations in the Pearl River Estuary

1.2 监测指标

监测指标包括 pH、水温(*T*)、盐度(*S*)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、活性磷酸盐(DIP)、无机氮(DIN)、石油类(TPH)、总磷(TP)、总氮(TN)和叶绿素 a(Chl-a)。水样的检测分析均按照《海洋监测规范》^[20]规范操作。

1.3 评价指标和标准

1.3.1 富营养化评价 本研究引用第二代水体富营养化评价体系“压力-状态-响应”为框架,评价指标包括水体富营养化压力、富营养化状态初级指标和次级指标、富营养化响应。参照王保栋等(2012)

的方法设置评价指标^[16],各类指标取决于分数最低的那项指标,最后的评价结果采用矩阵法得出。

①水体富营养化压力。水体富营养化与营养盐、COD 的含量密切相关,故选取评价海域 1 年循环中累积 90%所对应的总氮、总磷、无机氮、活性磷酸盐和 COD 浓度作为压力指标。评价指标标准见表 1。

②水体富营养化状态。状态指标包括初级状态和次级状态:初级状态采用评价海域 1 年中叶绿素 a 浓度累积到 90%所对应数值;次级状态则用溶解氧和赤潮状况来评价,溶解氧选用 1 年中溶解氧

累积到 10%所对应的溶解氧浓度来表示缺氧程度。 评价指标标准见表 2。

表 1 水体富营养化压力(P)评价

Tab. 1 Assessment of water eutrophic pressure

指标类别	评价标准	评价指标				
		总氮含量 /(mg · L ⁻¹)	总磷含量 /(mg · L ⁻¹)	无机氮含量 /(mg · L ⁻¹)	活性磷酸盐含量 /(mg · L ⁻¹)	COD 含量 /(mg · L ⁻¹)
压力	低(5分)	<0.4	<0.03	<0.2	<0.015	<2
	中低(4分)	0.4~<0.6	0.03~<0.06	0.2~<0.3	0.015~<0.030	2
	中(3分)	0.6~<0.8	0.06~<0.08	0.3~<0.4	0.030~<0.040	>2~<3
	中高(2分)	0.8~<1.0	0.08~<0.10	0.4~<0.5	0.040~<0.050	3~<4
	高(1分)	≥1.0	≥0.10	≥0.5	≥0.050	≥4

表 2 水体富营养化状态(S)评价

Tab. 2 Assessment of water eutrophic status

指标类别	评价标准	评价指标		
		初级状态	次级状态	
		叶绿素 a 含量/(μg · L ⁻¹)	溶解氧含量/(mg · L ⁻¹)	赤潮状况
状态	低(5分)	<5	>5	持续 3 d 以内、非周期性
	中低(4分)	5~<10	5~>4	持续 3 d 以上、非周期性
	中(3分)	10~<20	4~>3	持续 1 周以上、非周期性,或持续 3 d 以上、周期性
	中高(2分)	10~<40	3~>2	持续 1 月以上、非周期性,或持续 1 周以上、周期性
	高(1分)	≥40	≤2	持续 1 月以上、非周期性,或持续 2 周以上、周期性

③水体富营养化响应。预测海域水体未来几年内的富营养化响应情况非常重要,所以本研究响应指标采用营养盐含量的年变化率来评价海域富营养化的发展趋势。评价指标的评价标准见表 3。

表 3 水体富营养化响应(R)评价

Tab. 3 Assessment of water eutrophic response

指标类别	评价标准	评价指标
		营养盐年均增长率/%
响应	低(5分)	<-40
	中低(4分)	-40~<-10
	中(3分)	-10~<10
	中高(2分)	10~<40
	高(1分)	≥40

④最终评价。本研究采用矩阵法对 3 大类指标得分进行整合与评价,富营养化状态占比最高、富营养化压力次之、富营养化响应占比最小。在去掉不合理的组合后将最终的指标分为优、良、中、差、劣 5 类,见表 4^[16]。

表 4 水体富营养化评价划分矩阵表

Tab. 4 Assessment matrix for classifying overall water eutrophic grade

指标类型	排列组合矩阵	最终级别
P	5 5 5 4 4 4	优
S	5 5 5 5 5 5	
R	5 4 3 5 4 3	
P	5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3	良
S	5 5 4 4 4 4 4 5 5 4 4 4 5 5 4 4 4	
R	2 1 5 4 3 2 1 2 1 5 4 3 5 4 3 5 4 3	
P	5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 1 1	中
S	3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 5 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 2 3 3	
R	2 1 5 4 3 2 1 5 4 3 2 1 2 1 2 1 5 4 3 5 4 3 2 1 5 4 3 5 5 4	
P	4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1	差
S	2 2 2 2 2 3 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 2 2 3 3 3 2 2	
R	5 4 3 2 1 2 1 5 4 3 2 1 2 1 4 3 2 1 3 2 1 5 4	
P	3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1	劣
S	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1	
R	5 4 3 2 1 5 4 3 2 1 3 2 1 5 4 3 2 1	

注:“P”表示压力,“S”表示状态,“R”表示响应。

1.3.2 主成分分析 传统的主成分分析方法所用的

“中心标准化”方法虽然能够统一数据^[21],但同时又把体现样本间的差异性忽略了。因此本研究参照刘清园等(2017)的方法对主成分分析进行改进^[22],采用比重法对原始数据进行标准化。其公式如下:

$$ZX_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (1)$$

式(1)中: ZX_i 表示第*i*个主成分得分的无量纲数据,*i*表示有*i*个评价对象,*j*表示*j*个评价指标,每个指标的原始数据值为 x_{ij} 。

1.3.3 相关性分析 首先对原始数据进行标准化处理,再运用 SPSS 20.0 统计软件对调查数据进行

相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 富营养化评价

2.1.1 富营养化压力评价 从图 2 可以看出,珠江口海域 2020 年所调查数据中总氮和无机氮含量累积 90% 对应值分别为 2.72 和 0.619 mg/L,评价等级为“高”,总磷和活性磷酸盐含量值分别为 0.084 和 0.021 mg/L,分别属于“中”级和“中低”级;COD 含量值为 2.196 mg/L,属于“中”级别。根据各类指标取决于分数最低的那项指标的原则,压力指标的最终级别为“高”,分值为 1(表 5)。

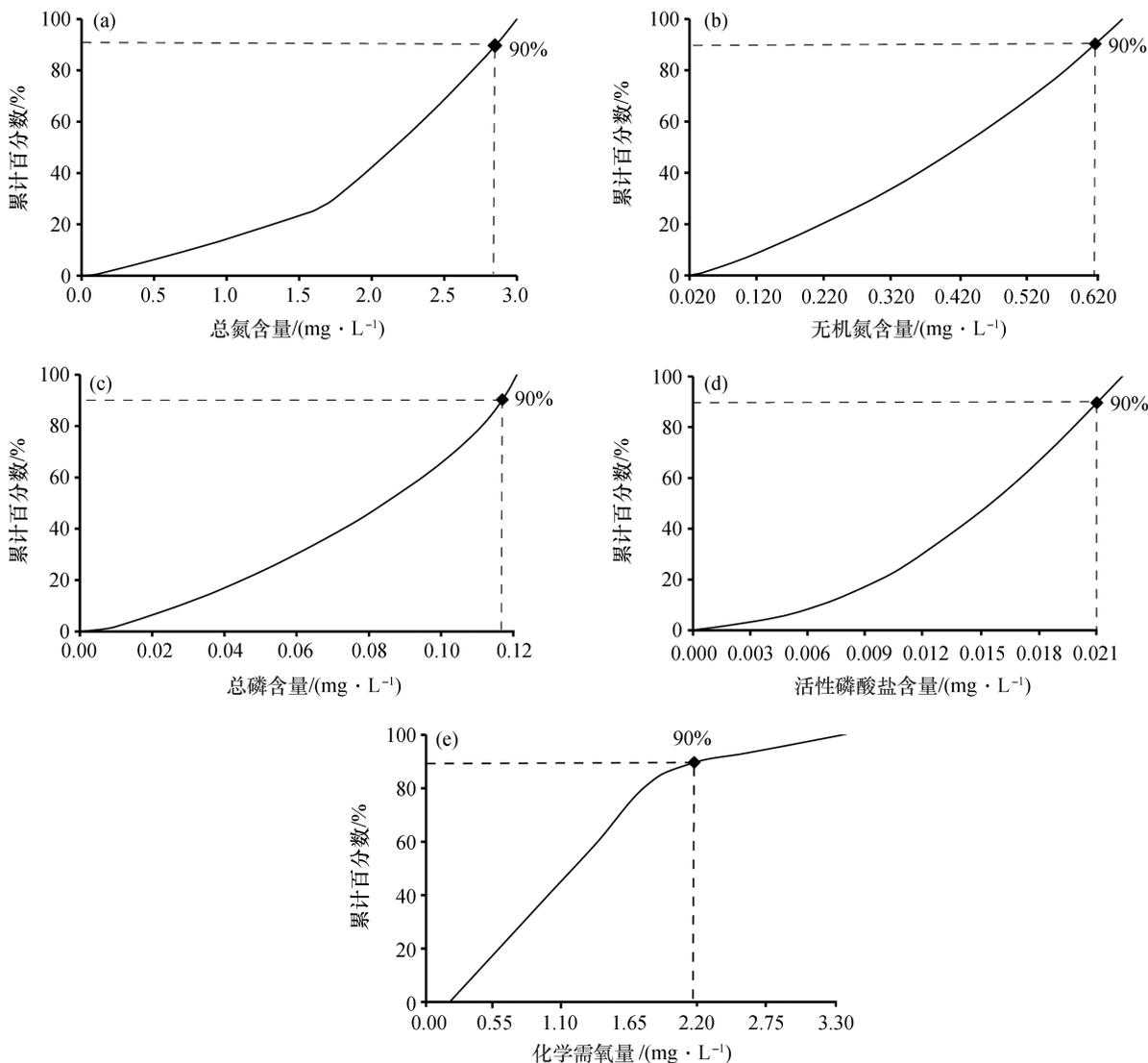


图 2 富营养化压力累计曲线

Fig. 2 Eutrophic pressure accumulation curve

造成富营养化压力等级偏高的原因通常是污染源的直接排放以及有机物的转化,有机氮分解为氨

氮后会被氧化成亚硝酸氮和硝酸氮,而这些不同来源的含氮污染物随着所处的环境、时间的不同,其在

水体中存在的形态也不同。前人研究表明珠江口水体中的氮主要以硝态氮的形式存在^[2,6,23]。通过计算也可以看出,影响富营养化压力评价得分的主要

指标是总氮和无机氮。对珠江入海口营养状况的调查中显示珠江口 TN/TP 高达 41.9^[24],远高于正常值,氮比磷对珠江口的影响更大。

表 5 水体富营养化压力(P)评价结果

Tab. 5 Assessment results of water eutrophic pressure

指标类别	评价指标	累计含量/(mg · L ⁻¹)	指标得分
富营养化压力	总氮	2.72	1(高)
	总磷	0.089	
	无机氮	0.619	
	活性磷酸盐	0.021	

根据本课题组 2015—2020 年对珠江口的历史调查资料(图 3),珠江口近岸海水 COD 的平均值在 2015—2020 年间呈现不断波动并缓慢下降的趋势,且一直处于海水水质标准第一类标准内。无机氮的平均值在 2015 年 4 月含量相对偏高,这与 2015 年调查站位较靠近沿岸城市以及调查站位较少也有一定关系,考虑到整体数据的连贯性,我们对 2015—

2020 年的无机氮数据进行整体考虑分析。无机氮平均值在 2017 年 9 月趋于平稳,而活性磷酸盐的平均值基本在同一水平上下波动。由此看来 2020 年珠江口近岸海域水体中的无机氮的含量与往年相比虽有所下降,但珠江口近岸海域仍然呈现高氮低磷的富营养状态。

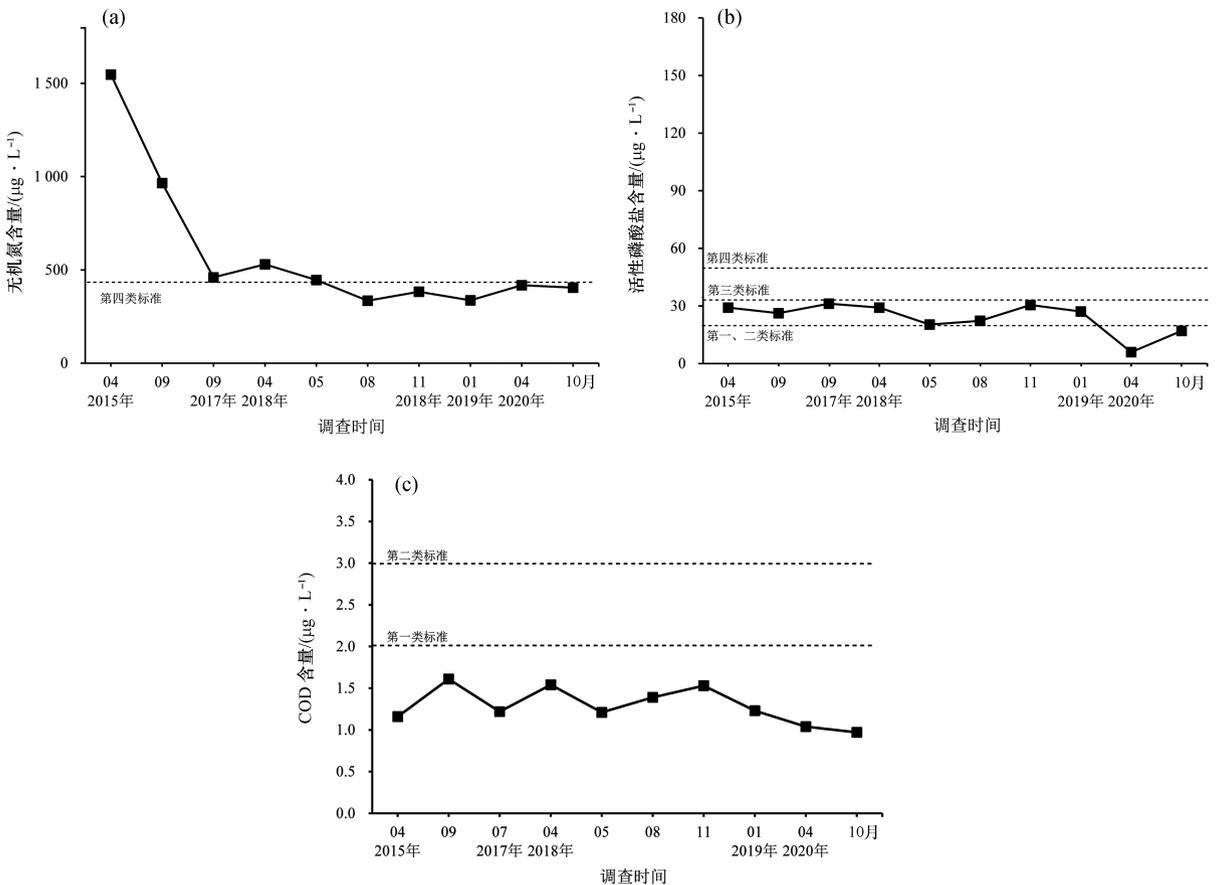


图 3 2015—2020 年珠江口无机氮、活性磷酸盐、COD 平均值变化趋势

Fig. 3 Average variations of inorganic nitrogen and phosphorus in the PRE from 2015 to 2020

2.1.2 富营养化状态评价 从图 4 可以看出,珠江

口海域 2020 年所有调查数据中累积百分数 90%所

对应的叶绿素 a 浓度值为 8.98 $\mu\text{g/L}$,故富营养化初级状态属于“中低”级别,分值为 4。珠江口海域 2020 年所有调查数据中累积百分数 10% 所对应的

溶解氧浓度值为 5.72 mg/L ,根据表 2,缺氧状况属于“低”级别。

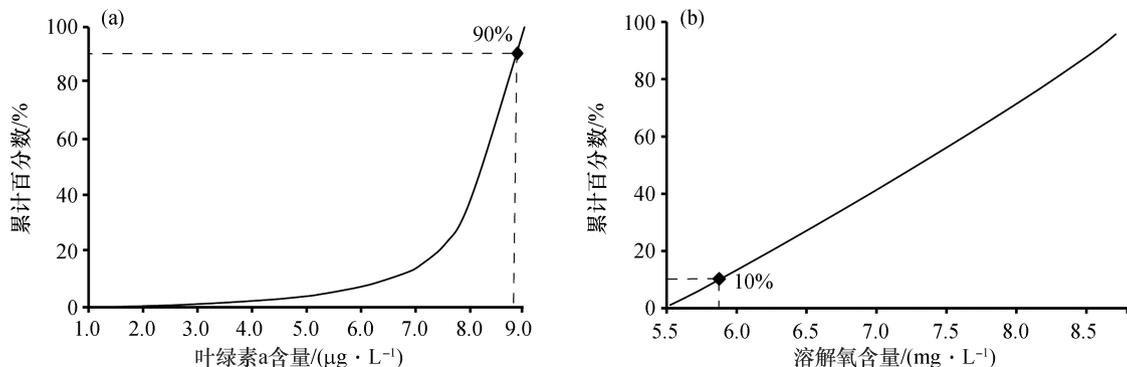


图 4 富营养化状态累计曲线

Fig. 4 Eutrophic status curve

上述结果也进一步表明目前珠江口的溶解氧浓度基本不会引起珠江口出现缺氧的现象,与杨婉玲等(2007)的调查结果一致^[25],但谢建明等(2019)的研究中则表明:珠江口藻华现象频繁发生,这一现象增大了氧气的消耗量,从而导致了缺氧面积的增加,并且珠江口在夏季更容易出现缺氧现象,这与本调查的结果不同^[26]。有研究表明,有机污染物消耗溶解氧是造成海域缺氧的主要原因,有机污染物的含量随着径流方向逐渐降低,从而使氧气的消耗量也逐渐降低^[27]。而近年溶解氧有所上升的原因可能是由于“十三五”期间珠江口入海有机物总量的

消减导致的。2020 年珠江口 6 市(广州、深圳、东莞、中山、珠海、江门)废、污水的总氮削减空间约为 $7.61 \times 10^4 \text{ t/a}$ ^[28],氮以及其他有机污染物含量的大幅下降使得近年珠江口近岸海域的溶解氧状况良好。

根据《2020 年广东省环境状况公报》^[29]和《2020 年中国海洋灾害公报》^[30],2020 年在珠江口检测到 5 次赤潮,其中 1 月 18 日到 23 日赤潮持续时间 6 d,因此,珠江口海域赤潮状况属于“中”级。根据各类指标取决于分数最低的那项指标的原则,状态指标的最终级别为“中”,分值为 3(表 6)。

表 6 水体富营养化状态(S)评价结果

Tab. 6 Assessment results of eutrophic status

指标类别		评价指标	累积浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	发生频率	指标得分	总得分
富营养化状态	初级富营养化状态	叶绿素 a 含量	8.98	—	4(中低)	3(低)
		溶解氧含量	5.72	—		
	次级富营养化状态	赤潮状况	—	持续 3 d 以上,周期性	3(低)	

有研究显示,珠江口于 1998 年发生以裸甲藻(*Gymnodinium aerucyinosum*)为优势种的赤潮^[28];2002 年暴发条纹环沟藻(*Gyrodinium instriatum*)引起的赤潮^[31];由《2017 年广东省环境状况公报》^[32]可知,2017 年引起珠江口赤潮的原因有 3 种,分别为锥状斯克里普藻(*Scrippsiella trochoidea*)、球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)和赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*);《2020 年广东省环境状况公报》^[29]显示珠江口引发赤潮的原因共有 4 种,分别为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、赤潮异弯藻、双胞旋沟

藻(*Cochlodinium geminatum*)和球形棕囊藻。在赤潮发生时,该海域的营养盐含量以及叶绿素 a 含量也会发生明显的变化,例如 2002 年珠江口暴发的条纹环沟藻赤潮时,该海域无机氮含量由 0.86 mg/L 上升至 1.05 mg/L ,叶绿素 a 含量也出现迅速增长,而其相邻的没有发生赤潮的海域,其无机氮与叶绿素 a 的含量基本没有变化^[33]。由此可以看出,引发赤潮的优势种类与营养盐含量密切相关。根据本课题组的环境调查显示 2020 年秋季珠江口海域浮游植物的优势种为中肋骨条藻,而该藻种喜于生存在

中富营养水体中,且复合氮源条件比单一氮源更有利于藻细胞的生长^[34],故在氮多磷少的珠江口近岸海域更适合该藻种的生长,这进一步说明赤潮的发生与营养盐的含量存在一定相关性。

2.1.3 富营养化响应评价 根据 2015 年至 2020 年《广东省海洋环境状况公报》^[5]可以看出:2015 年珠江口近岸海域年均优良水质面积比例接近 90%、2016 年为 85.2%、2017 年为 81.5%、2018 年为 79.3%,从 2015 年至 2018 年珠江口近岸海域年均优良水质面积逐年下降,且在 2018 年下降较为明显,而 2019 年和 2020 年珠江口近岸海域年均优良水质面积开始稍有好转,分别为 87.2% 以及 89.5%。且这五年中劣四类海水的主要超标因子均为无机氮和活性磷酸盐,所以本调查选取无机氮与活性磷酸盐作为水体富营养化响应评价的因子。

根据本课题组 2015—2020 年对珠江口的历史调查资料,2015 年无机氮和活性磷酸盐的年均含量分别为 1.256 0、0.246 5 mg/L,2020 年无机氮和活性磷酸盐的年均含量为 0.411 5、0.014 4 mg/L。由此得出 2015 年至 2020 年无机氮和活性磷酸盐含量的年变化率分别为 -6.6% 和 -12.2%,均属于“中”级别,所以响应指标的最终级别为“中”,分值为 3(表 7)。

表 7 水体富营养化响应(R)评价结果

Tab. 7 Assessment results of eutrophic response

指标类别	评价指标	年变化率/%	指标得分
富营养化响应	无机氮	-6.6	3(中)
	活性磷酸盐	-12.2	

2.1.4 富营养化评价结果 综上所述,2020 年珠江口海域的富营养化的 PSR 指标得分为 1-3-3,最终富营养化状况级别为“差”。本研究结果与近些年珠江口海域富营养化评价的结果基本一致,珠江口近岸海域有机污染呈严重污染,营养状况呈富营养化水平。前人研究结果显示珠江口海域的富营养化程度从湾内向湾外递减的趋势^[35],且有向重度富营养状态发展的趋势^[36];珠江口夏季富营养化程度较秋季严重^[37]。

但本研究通过采用各环境指标的浓度、一年中的赤潮发生状况以及近五年的营养盐年变化率作为分析数据,对珠江口的富营养化状态进行评价的结果显示,珠江口溶解氧浓度状况良好,无机氮含量有所下降但仍处于氮多磷少的状态,在这种状态下使中肋骨条藻容易成为该海域优势藻,从而增加珠江

口赤潮的发生概率。总体来说珠江口近岸海域不仅存在富营养化,而且其程度处于较为严重的状况,同时本研究还通过富营养化响应的预测分析,发现接下来几年内珠江口的富营养化综合评价等级基本维持在差级水平,变化趋于稳定。

2.2 富营养化影响因素分析

2.2.1 主成分分析 本调查中对珠江口海域监测指标 pH、盐度(S)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、无机氮(DIN)和活性磷酸盐(DIP)、石油类(TPH)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)等 10 个因子进行主成分分析。结果显示,KMO 统计量为 0.549,大于 0.5;显著性为 0.000,小于 0.05(表 8),说明调查区域之间存在相关性,可对调查区域进行相关性分析。

表 8 主成分分析 KMO 和 Bartlett 检验

Tab. 8 KMO and Bartlett's test using principal component analysis

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量	Bartlett 的球形度 检验近似卡方	自由度	显著性
0.549	140.441	45	0.000

提取主成分 N1、N2、N3、N4,累计贡献率为 85.383%(表 9)。即 4 个主成分就可以解释绝大多数信息。旋转成分矩阵见表 10。

表 9 特征值及方差贡献率

Tab. 9 Eigenvalues and variance contribution rates

成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
ZX1	3.662	36.618	36.618
ZX2	2.526	25.260	61.878
ZX3	1.458	14.577	76.454
ZX4	0.893	8.928	85.383

表 10 主成分 1 中,化学需氧量、活性磷酸盐、石油类对主成分 1 的亲密度最大,通常用化学需氧量来反映水体中的有机污染状况^[37],珠江口化学需氧量从 1980 年至 2007 年一直处于比较平稳的状态,且近几年略有下降的趋势^[1];2012 年珠江口海域的化学需氧量较低^[38],此后 2012—2015 年间珠江口海域中化学需氧量入海总量呈现逐渐升高的趋势^[39]。同时根据《2020 年中国海洋生态环境状况公报》^[40]显示珠江口的化学需氧量仍处于超标的状态,且超标率大于 10%。珠江口化学需氧量对富营养化的影响仍需重视。

表 10 旋转成分矩阵

Tab. 10 Rotational component matrix

变量	成分			
	N1	N2	N3	N4
叶绿素 a	0.782	-0.015	-0.919	0.354
总氮	-0.139	-0.500	0.651	-0.384
总磷	-0.051	0.094	0.861	0.061
无机氮	0.058	-0.887	-0.190	-0.117
活性磷酸盐	0.874	-0.172	-0.047	-0.040
盐度	-0.131	0.837	-0.092	-0.254
pH	0.115	0.790	-0.141	0.326
化学需氧量	0.915	0.005	-0.069	0.076
溶解氧	0.233	0.068	-0.043	0.932
石油类	0.826	0.200	0.213	0.429

有研究显示,营养盐与河口径流的相关性不大,而深圳湾附近的污染物排放和珠江口附近沿岸带来的营养盐对该海域的活性磷酸盐含量影响较大^[41],这可能导致活性磷酸盐在主成分 1 中占比较大。珠江口也是航运的主要通道,漏油事件频发,据报道每年经过珠江口海域的运油船有大约 20 万艘,油类运输量约达到 $2 \times 10^7 \text{ t}$ ^[42],同时有研究表明,海水中石油类可以为海洋浮游植物生长提供所需的部分碳源,对海洋浮游植物的生长产生一定的促进作用^[43],对东海赤潮高发地区的研究中,也发现赤潮发生的区域石油类的浓度较其他调查区域相对偏高^[44],说明赤潮发生与石油类浓度有一定关系,所以石油类也是造成珠江口近岸海域富营养化不可忽视的因素之一。第一主成分的方差贡献率为 36.618%,远大于其他几个主成分的方差贡献率,故第一主成分对水体的富营养化评价起着主要作用;主成分 2 中密切相关的指标是无机氮、盐度和 pH,盐度可以间接影响营养盐的浓度^[45],所以第二主成分主要反应了营养盐对珠江口富营养化的影响;主成分 3

中主要与叶绿素 a、总磷密切相关。主成分 4 中与溶解氧密切相关,溶解氧反映了水体的自净能力。

提取的主成分分析结果表明,影响珠江口海域富营养化的主要因素为有机污染物与营养盐,次要因素为叶绿素 a 和溶解氧。同上述原因类似,随着经济的迅速发展,珠江口经济带作为最活跃的城市发展区域,人口数量也在逐年增长,密集的人口导致有机污染与营养盐水平受人类活动影响一直处于较高水平。《广东省环境状况公报》指出 2014—2017 年周边城镇生活污水排放量基本维持在 75 亿吨左右^[29];而且珠江口有机污染程度主要受到虎门、深圳以及香港的陆源排放影响^[6];《2020 年广东省海洋环境状况公报》^[5]也指出珠江口中的活性磷酸盐大多来自于含磷工业废水的排放以及居民生活用水。主成分分析也反映出多种因素影响珠江口水质,但在人类活动因素影响下多种环境因子对河口区富营养化作用的相关机理及主要污染物的来源仍值得深入研究。

2.2.2 相关性分析 表 11 给出了相关参数之间的相关性。由表中可知无机氮与盐度呈显著负相关,叶绿素 a 与盐度的相关性不显著,与 2014 年春季对珠江口进行的营养盐环境特征的调查结果相似^[38]。上述研究结果进一步表明珠江口海域无机氮主要与周边城市的排放有关,无机氮还存在由湾内向湾外逐渐递减的分布特征。而河口稀释作用对叶绿素 a 的分布影响不大,初步分析可能是近岸悬浮物扩散对浮游植物生长影响较大导致的,但其原因有待进一步深入分析。从表 11 中的研究结果也可以看出,营养盐与叶绿素 a 和盐度都具有显著相关性,说明珠江口营养盐的分布可能受径流影响,同时营养盐的分布也影响着浮游植物的生长,而珠江口的富营养化受到营养盐输入的影响,从而可以看出河口混合稀释作用以及浮游植物的生长作用也影响着珠江口的富营养化程度。

表 11 珠江口营养盐及其他相关环境因子之间的相关性

Tab. 11 Correlation coefficients among nutrients and related environment factors in water of the PRE

项目	叶绿素 a	总氮	总磷	无机氮	活性磷酸盐	盐度	pH	溶解氧	化学需氧量	石油类
叶绿素 a	1.000	-0.381	-0.300	0.557 *	0.622 **	-0.047	0.214	0.539 **	0.704 **	0.738 **
总氮	-0.381	1.000	0.495 *	0.371	-0.126	-0.320	-0.563 **	-0.416 *	-0.170	-0.250
总磷	-0.300	0.495 *	1.000	-0.224	-0.084	-0.514 *	-0.066	-0.005	-0.153	0.212
无机氮	0.557 *	0.371	-0.224	1.000	0.156	-0.616 **	-0.633 **	-0.173	0.017	-0.187
活性磷酸盐	0.622 **	-0.126	-0.084	0.156	1.000	-0.269	-0.081	0.188	0.691 **	0.613 **
盐度	-0.047	-0.320	-0.514 *	-0.616 **	-0.269	1.000	0.466 *	0.128	-0.187	-0.071

续表

项目	叶绿素 a	总氮	总磷	无机氮	活性磷酸盐	盐度	pH	溶解氧	化学需氧量	石油类
pH	0.214	-0.563 **	-0.066	-0.633 **	-0.081	0.466 *	1.000	0.314	0.168	0.376
溶解氧	0.539 **	-0.416 *	-0.005	-0.173	0.188	0.128	0.314	1.000	0.283	0.564 **
化学需氧量	0.704 **	-0.170	-0.153	0.017	0.691 **	-0.187	0.168	0.283	1.000	0.772 **
石油类	0.738 **	-0.250	0.212	-0.187	0.613 **	-0.071	0.376	0.564 **	0.772 **	1.000

注:“*”表示显著性水平 $p < 0.05$;“**”表示显著性水平 $p < 0.01$ 。

3 结论

(1)2020 年珠江口海域富营养化压力评价等级为高级,富营养化状态等级为中级,富营养化响应等级为中级,其 PSR 得分为 1-3-3,参照水体富营养化评价分矩阵表,确定珠江口海域富营养化综合评价等级为“差”。说明珠江口海域仍存在较为严重的富营养化现象,且根据富营养化响应评价结果来看,珠江口海域富营养化程度未来几年基本保持这个水平,变化趋于稳定。

(2)主成分分析结果表明,有机污染物与营养

盐是影响珠江口海域富营养化的主要因素,叶绿素 a 和溶解氧是次要因素。

(3)将提取的主成分因子进行相关性分析得出,调查期间珠江口海域的营养盐与盐度呈负相关,营养盐和叶绿素 a 呈显著正相关,说明径流对珠江口营养盐的分布有一定的影响,同时营养盐影响着浮游植物的生长,从而影响着调查海域的富营养化状况。

致谢:南海水产研究所渔业环境研究室李艺彤和唐海威参与了本研究现场调查和样品分析工作,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 黄小平,田磊,彭勃,等. 珠江口海域环境污染研究进展[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 1-7.
HUANG X P, TIAN L, PENG B, et al. Environmental pollution in the Pearl River Estuary: a review[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 1-7.
- [2] 谢群,施玉珍,张际标,等. 珠江口海域春季富营养化现状与影响分析[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(3): 356-364.
XIE Q, SHI Y Z, ZHANG J B, et al. Eutrophication status and the influence of Pearl River Estuary in spring[J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 36(3): 356-364.
- [3] 何桂芳,袁国明,李凤岐. 珠江口沿岸城市经济发展对珠江口水质的影响[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 50-52.
HE G F, YUAN G M, LI F Q. Effect of economic development on water quality in Zhujiang Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(4): 50-52.
- [4] 严少红,李涛. 利用水质综合污染指数评价珠江口近岸海域环境质量[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(7): 173-175.
YAN S H, LI T. Assessment of the Pearl River Estuary pollution by water comprehensives pollution index[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(7): 173-175.
- [5] 广东省海洋与渔业局. 广东省海洋环境质量状况公报[R]. 广州: 广东省海洋与渔业局, 2015—2021.
Administration of Ocean and Fisheries of Guangdong Province. Report on the state of Guangdong provincial ecology and environment[R]. Guangzhou: Administration of Ocean and Fisheries of Guangdong Province, 2015—2021.
- [6] 曾丹娜,牛丽霞,陶伟,等. 夏季珠江口水域营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(3): 73-82.
ZENG D N, NIU L X, TAO W, et al. Nutrient dynamics in Pearl River Estuary and their eutrophication evaluation[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(3): 73-82.
- [7] 党二莎,唐俊逸,周连宁,等. 珠江口近岸海域水质状况评价及富营养化分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 580-587.
DANG E S, TANG J Y, ZHOU L N, et al. Water quality assessment and eutrophication analysis in coastal waters of Pearl River Estuary[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(4): 580-587.
- [8] 马奔,赵辉. 夏季珠江口叶绿素 a 和营养盐分布特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(5): 707-716.
MA B, ZHAO H. Distribution characteristics of chlorophyll a and nutrients in the Pearl River Estuary in summer and their relationship with environmental factors[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(5): 707-716.
- [9] 高鹏,赖子尼,魏泰莉,等. 珠江口水域无机氮与活性磷酸盐含量调查[J]. 南方水产, 2007, 3(4): 32-37.
GAO P, LAI Z N, WEI T L, et al. Investigation of inorganic nitrogen and active phosphorus contents in Pearl River Estuary[J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(4): 32-37.
- [10] 彭云辉,王肇鼎. 珠江河口富营养化水平评价[J]. 海洋环境科学, 1991, 10(3): 7-13.
PENG Y H, WANG Z D. Evaluation of eutrophication level in Pearl River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 1991, 10(3): 7-13.

- [11] 徐淑敏, 齐占会, 史荣君, 等. 水产养殖对亚热带海湾氮磷营养盐时空分布的影响: 以深澳湾为例[J]. 南方水产科学, 2019, 15(4): 29-38.
XU S M, QI Z H, SHI R J, et al. Influence of mariculture on tempo-spatial distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in subtropical zone: a case study of Shen'ao Bay[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(4): 29-38.
- [12] DAS S, PRADHAN B, SHIT P K, et al. Assessment of wetland ecosystem health using the pressure-state-response (PSR) model: a case study of mursidabad district of west Bengal (India)[J]. Sustainability, 2020, 12(15): 59-32.
- [13] HAZBAVI Z, SADEGHI S H, GHOLAMALIFARD M, et al. Watershed health assessment using the pressure-state-response (PSR) framework [J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(1): 3-19.
- [14] 庞文博, 张秋丰, 陈燕珍, 等. 基于 PSR 模型和层次分析法的渤海湾天津近岸海域富营养化评价[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 111-118.
PANG W B, ZHANG Q F, CHEN Y Z, et al. Eutrophication evaluation of Tianjin coastal waters in Bohai Bay based on PSR model and analytic hierarchy process[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 111-118.
- [15] 徐国锋, 崔永平, 刘莲. 应用压力-状态-响应模型评价象山港富营养化水平[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(4): 52-60.
XU G F, CUI Y P, LIU L. Assessment of eutrophication status by using the pressure-status-response model in Xiangshan Bay, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(4): 52-60.
- [16] SUN B D, TANG J C, YU D H, et al. Ecosystem health assessment: a PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China [J]. Ocean & Coastal Management, 2019, 168: 41-50.
- [17] 王保栋, 孙霞, 韦钦胜, 等. 我国近岸海域富营养化评价新方法及应用[J]. 海洋学报, 2012, 34(4): 61-66.
WANG B D, SUN X, WEI Q S, et al. A new method for assessment of eutrophication status in estuarine and coastal waters off China and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(4): 61-66.
- [18] 吴迪, 王菊英, 马德毅, 等. 基于 PSR 框架的典型海湾富营养化综合评价方法研究[J]. 海洋湖沼通报, 2011(1): 131-136.
WU D, WANG J Y, MA D Y, et al. Comprehensive eutrophication assessment for representative bays based on the psr framework in China [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011(1): 131-136.
- [19] 国家海洋局. 海洋监测规范 第 2 部分 数据处理与分析质量控制 GB 17378.2—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring Part 2: quality control of data processing and analysis GB 1738.2—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [20] 国家海洋局. 海洋监测规范 第 4 部分 海水分析 GB 17378.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring Part 4: seawater analysis: GB 1738.2—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [21] 童新安, 许超. 基于非线性主成分和聚类分析的综合评价方法[J]. 统计与信息论坛, 2008, 23(2): 37-41.
TONG X A, XU C. A new method of synthetic evaluation based on non-linear principal component and cluster analysis[J]. Statistics & Information Forum, 2008, 23(2): 37-41.
- [22] 刘清园, 李永, 蒲迅赤, 等. 改进的主成分分析法在水库水质评价中的应用研究[J]. 四川环境, 2017, 36(6): 116-122.
LIU Q Y, LI Y, PU X C, et al. Application Research of the improved principal component analysis on reservoir water quality evaluation[J]. Sichuan Environment, 2017, 36(6): 116-122.
- [23] 关风杰. 珠江口水体和沉积物中氮的赋存形态及其时空分布格局[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
GUAN F J. Forms and distribution of nitrogen in the water and sediments of the pearl river estuary, China[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
- [24] 杨婉玲, 赖子尼, 魏泰莉, 等. 2006 年珠江入海口营养现状调查及生态危害评价[J]. 广东农业科学, 2010, 37(11): 196-199.
YAG W L, LAI Z N, WEI T L, et al. Study on nutrition variation at coastal water areas of Pearl River Estuary[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(11): 196-199.
- [25] 杨婉玲, 赖子尼, 魏泰莉, 等. 珠江口近岸水域营养盐现状调查与研究 [C]//中国水产学会. 2007 年中国水产学会学术年会暨水产微生物生态调控技术论坛论文摘要汇编. 桂林: 中国水产学会, 2007: 121-122.
YANG W L, LAI Z N, WEI T L, et al. Investigation and study on the status of nutrient salts in the coastal waters of the Pearl River Estuary [C]//Chinese Society of Fisheries. Annual Symposium of Chinese Society of Fisheries & Forum on Aquatic Microecological Regulation. Guilin: Chinese society of Fisheries, 2007: 121-122.
- [26] 谢建明. 珠江口浮游生物群落呼吸速率及其影响因素[D]. 厦门: 集美大学, 2019.
XIE J M. Factors regulating plankton community respiration in the Pearl River Estuary[D]. Xiamen: Jimei University, 2019.
- [27] 李秀芹, 卢楚谦, 蔡伟钊, 等. 珠江口上游海域春季水体缺氧特征及相关因素[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 854-859.
LI X Q, LU C Q, CAI W X, et al. The character of hypoxia and the correlating factors in the upper reach of the Pearl River Estuary during spring [J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 854-859.
- [28] 黄鹤, 吴子怡, 赵婷, 等. “十四五”期间珠江口入海总氮削减空间及途径[J]. 环境保护, 2021, 49(19): 18-20.
HUANG H, WU Z Y, ZHAO T, et al. The space and approaches to reduce the total nitrogen discharged into the Pearl River Estuary during the 14th five-year plan[J]. Environmental Protection, 2021, 49(19): 18-20.
- [29] 广东省生态环境厅. 2020 年广东省环境状况公报[R]. 广州: 广东省生态环境厅, 2021.
Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. 2020 Report on the state of Guangdong Provincial environment [R]. Guangzhou: Department of Ecology and Environment of Guangdong province, 2021.

- [30] 中华人民共和国自然资源部. 2020 年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
Ministry of Natural Resource. 2020 Bulletin of China marine disaster[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2021.
- [31] 黄长江, 董巧香. 1998 年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征 III [J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 1-6.
HUANG C J, DONG Q X. Taxonomic and biological studies on organisms causing a large scale red tide in Zhujiang River Estuary in spring, 1998 III [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 1-6.
- [32] 广东省生态环境厅. 2017 年广东省环境状况公报[R]. 广州: 广东省生态环境厅, 2018.
Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. 2017 Report on the state of Guangdong Provincial environment[R]. Guangzhou: Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, 2018.
- [33] 王汉奎, 黄良民, 黄小平, 等. 珠江口海域条纹环沟藻赤潮的生消过程和环境特征[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 55-62.
WANG H K, HUANG L M, HUANG X P, et al. A red tide caused by *Gyrodinium instriatum* and its environmental characters in Zhujiang River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(5): 55-62.
- [34] 乔倩, 王朝晖, 郭鑫. 不同氮源对中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 生长的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2 110-2 116.
QIAO Q, WANG Z H, GUO X, et al. Effects of nitrogen sources on the growth of *Skeletonema costatum*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2 110-2 116.
- [35] 张景平, 黄小平, 江志坚, 等. 2006—2007 年珠江口富营养化水平的季节性变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 113-120.
ZHANG J P, HUANG X P, JIANG Z J, et al. Seasonal variations of eutrophication and the relationship with environmental factors in the Zhujiang Estuary in 2006—2007[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3): 113-120.
- [36] 邝欣欣, 赖子尼, 高原, 等. 珠三角河网初级生产力时空差异及其影响因素[J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 1-8.
BING X X, LAI Z N, GAO Y, et al. Spatial and temporal difference of primary productivity and its influencing factors in the Pearl River Delta [J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(2): 1-8.
- [37] 施玉珍, 赵辉, 王喜达, 等. 珠江口海域营养盐和叶绿素 a 的时空分布特征[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(1): 56-65.
SHI Y Z, ZHAO H, WANG X D, et al. Distribution characteristics of nutritive salts and chlorophyll a in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(1): 56-65.
- [38] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221-227.
CAI Y Y, CEN J Y, OU L J, et al. Distribution characteristics of COD, DO and nutrients in Pearl River Estuary and its eutrophication assessment in summer and autumn[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(3): 221-227.
- [39] 曾建军, 蔡淑娟, 佟元铭. 广东省入海污染变化趋势及减排对策措施研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4): 11-13.
ZENG J J, CAI S J, TONG Y M. Trends of pollutant discharge to sea in Guangdong Province and countermeasures for pollutant discharge reduction strategy[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(4): 11-13.
- [40] 生态环境部. 2020 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2021.
Ministry of Ecology and Environment. 2020 Bulletin of China marine ecological environment[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2021.
- [41] HUANG X P, HUANG L M, YUE W Z. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River Estuary, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47(1/2/3/4/5/6): 30-36.
- [42] SHI X Y, WANG X L, HAN X R, et al. Relationship between petroleum hydrocarbon and plankton in a mesocosm experiment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20(2): 231-240.
- [43] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区 COD 和石油烃分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1 093-1 096.
ZHANG C S, WANG X L, SHI X Y, et al. Distributions of COD and petroleum hydrocarbons and their relationships with occurrence of red tide in East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1 093-1 096.
- [44] 周竹军, 蒋奕. “12·7”事故对珠江口区域溢油应急合作的启发[J]. 中国海事, 2009(6): 54-57.
ZHOU Z J, JIANG Y. “12·7” Illumination of the “December 7” Accident on the Pearl River Estuary regional cooperation for oil spill emergency [J]. China Maritime Safety, 2009(6): 54-57.
- [45] 周凤霞, 陈法锦, 李志阳, 等. 2014 年春季珠江口营养盐的环境特征[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(3): 42-48.
ZHOU F X, CHEN F J, LI Z Y, et al. Environmental characteristics of nutrients in the Pearl River Estuary in spring 2014[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(3): 42-48.

Evaluation and characteristics of water eutrophication in the Pearl River Estuary based on PSR model

LONG Ran^{1,2}, CHEN Hangang², TIAN Fei², WANG Xuefeng³, ZHANG Linbao²,
ZHANG Zhe², TANG Zhenchao², YE Guoling², CHEN Jianhua^{1*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology/College of Marine Science and Fisheries,
Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resource and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Scientific Observation and Research Field Station of Pearl River Estuary Ecosystem, Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510300, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524025, China)

Abstract: Based on the environmental survey data from the Pearl River Estuary (PRE) in April (spring) and October (autumn) 2020, the pressure-state-response (PSR) model evaluation, the principal component analysis and the correlation analysis were used to evaluate eutrophication status and the environmental factors in the PRE. Results showed that the PSR comprehensive evaluation for the PRE grade was Moderate-Poor, among the five, “Superior, Superior-Moderate, Moderate, Moderate-Poor and Poor”, and it fluctuated insignificantly in recent years. The primary factors affecting the PRE eutrophication were organic pollutants and nutrients and the secondary factors are chlorophyll and dissolved oxygen. The nutrients were negatively correlated with salinity and positively correlated with chlorophyll in water. Eutrophication in the PRE was mainly caused by terrestrial discharges from the city surrounding areas and the water mixed nutrients and phytoplankton activities had affected the eutrophication status of the PRE.

Key words: marine chemistry; pressure-state-response; eutrophication; nutrient; Pearl River Estuary

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2023.02.014

(责任编辑:杜俊民)