考洲洋海域水质季节变化及评价方法初步研究

梁婷婷,王军星,余清华,杨小平,钟锦明

(惠州市海洋技术中心 惠州 516008)

摘要:文章于2018年1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)对我国考洲洋海域海水中的溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、无机氮(DIN)、活性磷酸盐(DIP)4个主要海水水质因子进行了综合调查。结果表明,4个水质因子DIP、DIN、COD、DO的平均浓度由高到低的季节变化分别为:冬季(0.058 mg/L)、春季(0.046 mg/L)、夏季(0.009 mg/L)、秋季(0.006 mg/L);冬季(0.465 mg/L)、春季(0.171 mg/L)、夏季(0.064 mg/L)、秋季(0.040 mg/L);夏季(1.57 mg/L)、冬季(1.26 mg/L)、秋季(1.22 mg/L)、春季(0.89 mg/L);冬季(11.70 mg/L)、夏季(7.41 mg/L)、秋季(7.36 mg/L)、春季(7.18 mg/L)。评价结果显示,春季和冬季主要超标因子为DIP和DIN,夏季超标因子为DIP,秋季水质因子均满足要求。同时,本研究利用单因子标准指数法、富营养化指数法和有机污染评价指数法对考洲洋地区水质状况进行评价并对其进行初步比较和分析,结果表明,3种方法在季节性变化上的评价结果基本一致(由高到低均为:冬季、春季、夏季、秋季),然而,同一季节不同评价方法的超标站位比例不同(单因子指数法:冬季占100%,春季占80%,夏季占10%,秋季则无;富营养化指数法:冬季占90%,春季占70%,夏季和秋季均为无;有机污染指数评价法:冬季和春季均占80%,夏季和秋季均为无),比较分析表明,3种评价方法具有不同的评价作用和适用性。

关键词:考洲洋;水质评价;季节变化;富营养化;有机污染

中图分类号:P71 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-9857(2021)07-0096-07

Preliminary Study on Seasonal Variation of the Sea Water Quality and Its Evaluation Methods in the Sea of Kaozhou Bay

LIANG Tingting, WANG Junxing, YU Qinghua, YANG Xiaoping, ZHONG Jinming

(Huizhou Marine Technology Center, Huizhou 516008, China)

Abstract: In this study, four main factors, including Dissolved Oxygen (DO), Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), and Dissolved Inorganic Phosphate(DIP), in the sea of Kaozhou Bay, were investigated in January (winter), April(spring), July(summer),

收稿日期:2021-01-28;**修订日期**:2021-06-17

基金项目:惠州市海洋与渔业环境资源调查项目(F2017-01-2).

作者简介:梁婷婷,助理工程师,研究方向为海洋生态环境、海洋生物、海洋应急监测等

通信作者:王军星,高级工程师,博士,研究方向为海洋生态环境、海洋生物、海洋应急监测等

and October (autumn) 2018. Results showed that the changes seasonally for average concentrations of DIP, DIN, COD, DO were, respectively, winter (0.058 mg/L) > spring (0.046 mg/L) > summer (0.009 mg/L) > autumn (0.006 mg/L), winter (0.465 mg/L) > spring (0.171 mg/L) > summer (0.064 mg/L) > autumn (0.040 mg/L), summer (1.57 mg/L) > autumn (1.26 mg/L) > winter (1.22 mg/L) > spring(0.89 mg/L), winter (11.70mg/L) > summer (7.41 mg/L) > autumn (7.36 mg/L) > spring (7.18 mg/L); The evaluation results showed that DIP and DIN were out of water quality standard both in spring and summer, DIP in summer, and all the water quality factors met the requirements in autumn. At the same time, using single factor index method, eutrophication index method, and organic pollution index method, the water quality situation were evaluated and their evaluation results were compared by three methods. This study showed the evaluation results of water quality on the seasonal variation were basically identical (from high to low were: winter > spring > summer > autumn) among three methods, however, proportions of over standard stations were different in the same season by using three different kinds of evaluation methods (Single Factor Index Method: winter (100%), spring (80%), summer (10%), autumn (0%); Eutrophication Index Method: winter (90%), spring (70%), summer and autumn (0%); Organic Pollution Index Method: winter and spring (80%), summer and autumn (0%), the comparative analysis showed, there were clearly different evaluation target and discrepant applicability.

Keywords: Kaozhou Bay, Water quality evaluation, Seasonal variation, Eutrophication, Organic pollution

0　引言

随着近年我国打造海洋蓝色生态经济的快速发展,我国打造海洋蓝色生态环境所应对面临的环境挑战和发展压力也越来越大[1]。目前关于考洲洋海域海水水质状况的分布特征与评价有一些相关报道,但间隔时间较长且分析方向也有不同[2-8]。由于考洲洋海域周边经济的繁荣和发展、项目的实施、人们环境保护意识的提高和环境整治工作力度的加强等原因,考洲洋海域的水质也在发生变化。通过合理的海水水质调查站位布设能够较综合、全面地反映考洲洋海域水环境状况。为此,本研究通过对考洲洋 2018 年春、夏、秋、冬 4 个季节的水环境进行调查,探讨其海水水质现状以及富营养化季节变化情况,并依据季节变化下海水质量的变化,探究考洲洋季节更替对其海水水质的影响,为摸清考洲洋海域水环境现状以及对水环境保护和管理提供技术支持。同时,本研究通过 3 种不同方法分别对考洲洋的污染情况进行了分析评价,探讨单因子标准指数法、富营养化指数法以及有机污染评价指数法对当前考洲洋海域海水质量状况评价的适用性,以期能够为考洲洋海域生态环境的保护发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　站位布设

考洲洋海域整体水质调查总共设立 10 个监测站位,其网格化布设方式如图 1 所示,调查海水水质站位主要考虑在考洲洋出海口、考洲洋中部海域、考洲洋内入海河口等进行网格化布设,以确保数据分析所得的监测结果能够更加综合地反映出整个考洲洋海域水环境状况。

1.2　样品采集

本次海水水质调查分别于 2018 年春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)和冬季(1 月)分 4 个航次进行,采集的站点海水深度超过 10 m,采集表层(水下 0.5 m)和底层(离底 1 m)水质样品,深度小于 10 m只采集表层(水下 0.5 m)样品。在考洲洋调查

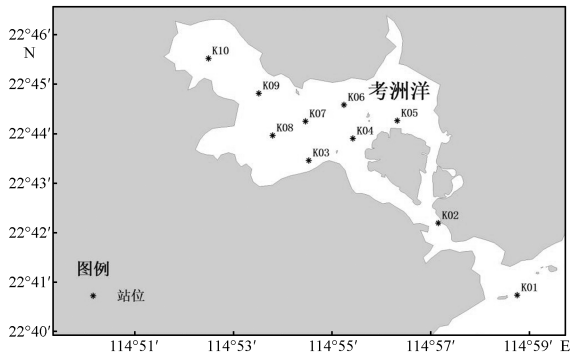


图 1 研究区域及采样站位布设

除现场测定项目外，其余测定项目水样低温保存带回实验室进行检测。采样、保存、运输均按照《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007)[9]要求操作。

1.3 样品分析

海水样品的溶解氧采用多参数水质分析仪(德国 WTW Multi3501)测定；化学需氧量采用《海洋监测规范》GB 17378.4—2007(32)碱性高锰酸钾法测定；无机氮即亚硝酸盐氮(NO_2-N)、硝酸盐氮(NO_3-N)和氨氮(NH_4-N)之和，分别采用 GB 17378.4—2007(37)、GB 17378.4—2007(38.2)、GB 17378.4—2007(36.2)测定；活性磷酸盐采用 GB 17378.4—2007(39.1)磷钼蓝分光光度法测定。

1.4 数据处理

本研究根据《惠州市海洋功能区划(2013—2020 年)》中考洲洋海域功能区划将各站位按不同功能区进行划分，其中 K01 属于东山海增殖区，K02-K10 均属于考洲洋养殖区，K01-K10 所在功能区海水水质质量均执行《海水水质标准》(GB/T 3097—1997)中第二类标准。

监测数据采用 Excel 进行数据处理，主要统计各营养盐的最大最小值、平均值和计算各站点的单因子标准指数、富营养化指数以及有机污染指数等，并在 ArcGIS 的支持下经过加权平均和复合[10−11]分析得出考洲洋海域 4 个季度富营养化以及有机污染程度的空间分布特征。

1.5 评价方法

1.5.1 单因子标准指数法

单因子标准指数法[12−13]是利用实测值与标准值进行对比，确定水质各评价指标的等级，计算公式如下：

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

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(mg/L)；C_{io} 为某污染因子的评价标准浓度(mg/L)。

海水中溶解氧的单因子指数评价采用莱默罗(N. L. Nemerow)的指数公式计算，计算公式如下：

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

式中：P_i 为溶解氧的污染指数；C_i 为溶解氧的实测浓度(mg/L)；C_{io} 为溶解氧的评价标准浓度(mg/L)；C_{max} 为本次调查中溶解氧的最大值。当 $P \leqslant 1$ 时，表明该监测站位水体没有遭受该因子的污染；当 $P > 1$ 时，表明遭受该因子的污染且 P 值越大污染越严重。

1.5.2 富营养化指数法

富营养化指数法[14−15]是目前常用于我国近岸海域富营养化评价的方法之一，计算公式如下：

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

式中：COD、DIN 和 DIP 分别为海域水体中的实测浓度(mg/L)，当 $E \geqslant 1$ 时，表明该海域水体呈现富营养化状态，E 值越大，表明该海域富营养化程度越严重。其计算结果得出的富营养化指数对应的水质等级见表 1。

表 1 水质富营养化分级标准

水质等级	富营养化指数
贫营养	$E < 1.0$
轻度富营养	$1.0 \leqslant E < 2.0$
中度富营养	$2.0 \leqslant E < 5.0$
重富营养	$5.0 \leqslant E < 15.0$
严重富营养	$E \geqslant 15.0$

1.5.3 有机污染评价指数法

有机污染评价指数法[12,16]是根据 DO、COD、DIN 和 DIP 这 4 个水质因子的标准综合评价水质的有机污染情况，计算公式如下：

$$A = \frac{\mathrm{COD}}{\mathrm{COD}_0} + \frac{\mathrm{DIN}}{\mathrm{DIN}_0} + \frac{\mathrm{DIP}}{\mathrm{DIP}_0} - \frac{\mathrm{DO}}{\mathrm{DO}_0}$$

式中：COD、DIN、DIP 和 DO 分别为海域水体中的实测浓度(mg/L)；COD_0、DIN_0、DIP_0 和 DO_0 为海

域水体中上述对应指标的评价标准浓度(mg/L),当 $A>0$ 时,表明该水体开始受到有机污染,A 值越大,受污染的程度越严重。其计算结果得出的有机污染指数对应的污染程度等级见表 2。

表 2　有机污染程度评价分级标准

A 值	污染程度分级	水质评价
<0	0	良好
0~1	1	较好
1~2	2	开始受到污染
2~3	3	轻度污染
3~4	4	中度污染
>4	5	严重污染

2　结果与讨论

2.1　水质状况及评价

由表 3 可知,4 个季节的 DIP 平均浓度由大到小依次为:冬季(0.058 mg/L)、春季(0.046 mg/L)、夏季(0.009 mg/L)、秋季(0.006 mg/L);DIN 平均浓度由大到小依次为:冬季(0.465 mg/L)、春季(0.171 mg/L)、夏季(0.064 mg/L)、秋季(0.040 mg/L);COD 平均浓度由大到小依次为:夏季(1.57 mg/L)、冬季(1.26 mg/L)、秋季(1.22 mg/L)、春季(0.89 mg/L);DO 平均浓度由大到小依次为:冬季(11.70 mg/L)、夏季(7.41 mg/L)、秋季(7.36 mg/L)、春季(7.18 mg/L)。

表 3　2018 年考洲洋水质监测数据及单因子指数评价

项目	监测站位	春季(4 月)				夏季(7 月)				秋季(10 月)				冬季(1 月)			
		DO	COD	DIP	DIN	DO	COD	DIP	DIN	DO	COD	DIP	DIN	DO	COD	DIP	DIN
单因子指数 P_i	K01	0.00	0.26	0.25	0.08	0.13	0.25	0.18	0.02	0.13	0.30	0.25	0.08	0.00	0.13	1.16	0.98
	K02	0.05	0.14	0.47	0.33	0.65	0.32	0.13	0.26	0.65	0.19	0.16	0.12	0.13	0.23	2.19	1.26
	K03	0.12	0.13	1.77	0.52	0.42	0.44	0.34	0.33	0.42	0.39	0.15	0.06	0.18	0.33	2.02	1.58
	K04	0.11	0.26	1.99	1.02	0.31	0.53	0.16	0.29	0.31	0.33	0.15	0.20	0.23	0.44	3.30	0.93
	K05	0.10	0.28	2.80	1.51	0.00	0.74	0.06	0.15	0.00	0.44	0.14	0.35	0.21	0.33	2.83	1.22
	K06	0.09	0.28	2.63	0.42	0.12	0.67	0.11	0.31	0.12	0.42	0.15	0.25	0.15	0.41	2.36	1.39
	K07	0.09	0.35	1.22	1.06	0.08	0.75	0.08	0.09	0.08	0.23	0.14	0.09	0.04	0.34	1.68	1.44
	K08	0.12	0.32	1.91	0.43	0.27	0.51	0.83	0.26	0.27	0.44	0.18	0.19	0.14	0.42	1.34	1.61
	K09	0.05	0.45	2.87	1.10	0.25	0.75	0.36	0.39	0.25	0.48	0.22	0.14	0.23	0.51	1.43	2.17
	K10	0.05	0.74	1.96	0.23	0.53	0.83	1.26	0.15	0.53	0.80	0.26	0.08	0.10	1.05	1.06	2.92
实测值 C_i /(mg·L^{-1})	最大值	8.09	2.23	0.086	0.086	8.53	2.50	0.038	0.116	8.53	2.51	0.008	0.105	12.80	3.15	0.099	0.876
	最小值	6.51	0.37	0.006	0.006	6.21	0.72	0.001	0.006	6.21	0.57	0.004	0.014	11.00	0.40	0.032	0.280
	均值	7.18	0.89	0.046	0.046	7.41	1.57	0.009	0.064	7.36	1.22	0.006	0.040	11.70	1.26	0.058	0.465

注:功能区水质执行第二类水质要求。

利用常规单因子评价可知(表 3),春季超出功能区水质标准的站位占总监测站位的 80%,夏季占 10%,冬季占 100%,秋季均符合功能区标准,超出功能区水质标准比例由高到低依次为:冬季、春季、夏季、秋季。春季超出功能区水质标准的站位主要位于吉隆河入海口以及盐洲岛西北部,夏季超出功能区水质标准的点位主要位于考洲洋西北部。冬季因为受到 DIP 因子的影响,整个考洲洋海域都呈现超出功能区水质标准的状况。

2.2　考洲洋水质富营养化情况

富营养化评价(E)结果表明,冬季呈富营养化($E\geqslant1$)的监测站位占总监测站位的 90%,春季占 70%,夏季和秋季均未出现富营养化。富营养化指数由高到低依次为:冬季(7.340)、春季(2.765)、夏季(0.294)、秋季(0.067),主要分布在考洲洋内湾。其中,冬季和春季的重富营养化($E\geqslant5$)主要分布于吉隆河入海口以及盐洲岛西北部往内湾逐渐增大,并且冬季在考洲洋西北部出现严重富营养化($E\geqslant15$),详见图 2(a)~(d)和表 4。

2.3　考洲洋有机污染情况

有机污染评价(A)结果表明,有机污染指数由高到低依次为:冬季(1.57)、春季(1.37)、夏季(−0.36)、秋季(−0.77),春季和冬季受到有机污染($A\geqslant1$)的站位占总监测站位的 80%,主要分布

在吉隆河入海口以及考洲洋西北部内湾，其中春季在盐洲岛麒麟河入海口出现了中度有机污染（$A \geqslant 3$），夏季和秋季均未受到有机污染，详见图 2(e)～(h)和表 4。

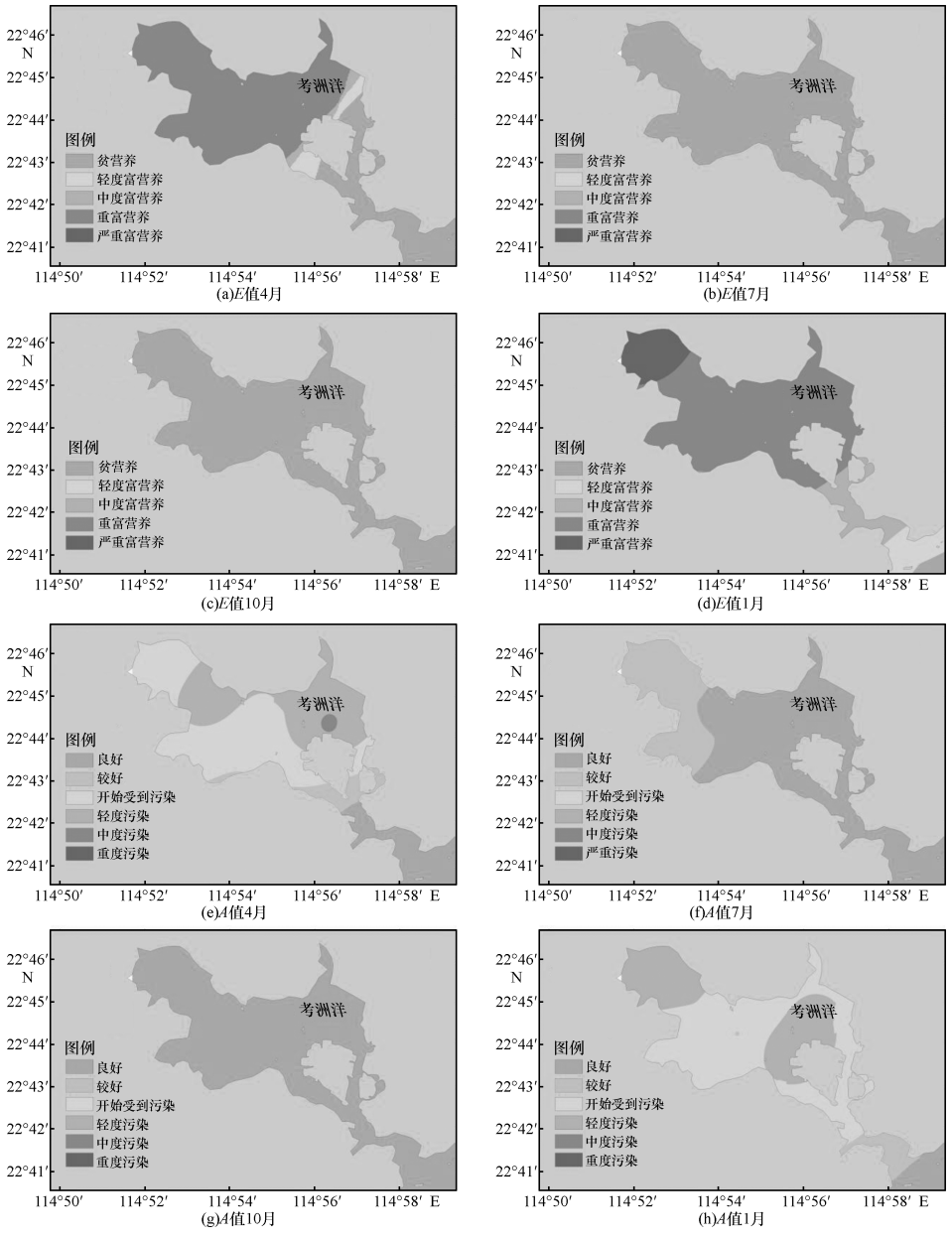


图 2 E 值和 A 值水平分布图

表 4 2018 年考洲洋富营养化指数与有机污染指数季度变化

监测站位	富营养化指数(E)				有机污染指数(A)			
	春季（4 月）	夏季（7 月）	秋季（10 月）	冬季（1 月）	春季（4 月）	夏季（7 月）	秋季（10 月）	冬季（1 月）
K01	0.031	0.006	0.035	0.903	−1.02	−1.16	−0.99	−0.29
K02	0.130	0.067	0.022	3.814	−0.54	−0.53	−0.77	1.32
K03	0.712	0.298	0.022	6.339	1.12	−0.30	−0.80	1.66

续表

监测站位	富营养化指数(E)				有机污染指数(A)			
	春季(4 月)	夏季(7 月)	秋季(10 月)	冬季(1 月)	春季(4 月)	夏季(7 月)	秋季(10 月)	冬季(1 月)
K04	3.165	0.148	0.061	8.106	1.94	−0.51	−0.80	2.47
K05	7.021	0.040	0.133	6.865	3.22	−0.76	−0.77	2.15
K06	1.853	0.139	0.097	8.008	1.96	−0.53	−0.80	1.84
K07	2.739	0.033	0.018	4.960	1.25	−0.73	−1.19	0.96
K08	1.582	0.656	0.090	5.473	1.35	0.09	−0.71	1.04
K09	8.433	0.628	0.086	9.488	2.94	−0.03	−0.70	1.91
K10	1.978	0.929	0.102	19.442	1.45	0.91	−0.19	2.63
平均值	2.765	0.294	0.067	7.340	1.37	−0.36	−0.77	1.57

注:功能区水质执行第二类水质要求。

2.4　3 种方法比较

通过单因子指数法、富营养化指数法和有机污染评价指数法对海水水质评价的结果对比基本保持一致(由高到低依次为:冬季、春季、夏季、秋季)。但是根据监测站位超标比例分析可知,单因子指数法结果表明考洲洋冬季超出功能区水质标准的站位占总监测站位的 100%,春季占 80%,夏季占 10%,秋季均符合功能区标准;富营养化评价(EIM)结果表明冬季呈富营养化($E\geqslant1$)的站位占总监测站位的 90%,春季占 70%,夏季和秋季均未出现富营养化。有机污染评价指数法结果显示春季和冬季受到有机污染($A\geqslant1$)的站位占总监测站位的 80%,夏季和秋季均未受到有机污染。

单因子标准指数法对海域水质进行评价时,执行的水质等级是最差的水质因子等级,即只要有一个水质因子超出海洋功能区的水质标准,其他水质因子等级无论多好,该海域也视为超出海洋功能区水质标准。单因子标准指数法较适用于海洋环境监管执法部门在日常海洋环境监督管理、重大涉海项目的海洋环评论证以及海域使用论证等必须参照最严格的海洋环境保护要求的情况。对 2018 年考洲洋水环境进行单因子标准指数进行评价时,超标因子 DIP 起了决定性的作用。

富营养化是指水体中营养盐的过度累积导致藻类和其他高等植物的加速生长繁殖,对水体中各种生物平衡造成不良的环境干扰以及对整体水质的严重破坏。富营养化指数评价法在我国近海的富营养化评价中应用最为广泛,多在水体发生水华和赤潮时评价水环境的状况。

有机污染指数评价法综合考虑了海水的有机污染和无机污染指标,利用 COD、DIN、DIP 和 DO 4 个水质指标对海水质量状况进行评价,能反映水质整体的有机污染状况[17]。

富营养化指数评价法和有机污染指数评价法在对海域的水环境进行评价时都充分考虑各水质评价因子对水环境评价的影响。两种评价方法都计算了 COD、DIN、DIP 对水环境污染的影响,区别是有机污染评价指数法还计算了 DO 对水环境污染的影响,DO 是水体中各种生物生存不可或缺的关键因子[18−19],其中 DIP、DIN 都是消耗 DO 的水质因子。利用富营养化指数评价法和有机污染指数评价法在对 2018 年考洲洋水环境进行评价时,春季和冬季考洲洋西北部内湾均出现了富营养化($E\geqslant1$)和有机污染($A\geqslant1$)的情况。

3　结论

本研究通过对考洲洋海域 2018 年 4 个季度水质状况分析得出以下结论:

(1)2018 年考洲洋海域海水中的 DIP、DIN、COD 和 DO 平均浓度的季节变化由高到低依次为:冬季(0.058 mg/L)、春季(0.046 mg/L)、夏季(0.009 mg/L)、秋季(0.006 mg/L);冬季(0.465 mg/L)、春季(0.171 mg/L)、夏季(0.064 mg/L)、秋季(0.040 mg/L);夏季

(1.57 mg/L)、冬季(1.26 mg/L)、秋季(1.22 mg/L)、春季(0.89 mg/L);冬季(11.70 mg/L)、夏季(7.41 mg/L)、秋季(7.36 mg/L)、春季(7.18 mg/L)。

(2)根据惠州市海洋功能区水质标准评价结果显示,2018 年春季和冬季的主要超标因子为 DIP 和 DIN,夏季的超标因子为 DIP,秋季水质所有监测指标均满足要求。考洲洋水质质量由高到低依次为:秋季、夏季、春季、冬季。

(3)通过单因子指数法、富营养化指数法和有机污染评价指数法对海水水质评价的季节性变化结果基本一致(由高到低依次为:冬季、春季、夏季、秋季)。但是根据超标站位比例分析可知,单因子指数法($P>1$)结果显示冬季占 100%,春季占 80%,夏季占 10%,秋季均符合功能区标准;富营养化指数法($E\geqslant 1$)结果显示冬季占 90%,春季占 70%,夏季和秋季均未呈现出富营养化;有机污染指数评价法($A\geqslant 1$)结果显示春季和冬季均占 80%,夏季和秋季均未受到有机污染。进一步分析结果可知,单因子标准指数法比较适用于海洋环境监管执法机构对水环境监督检查,富营养化指数法适用于水体中发生水华和赤潮时评价水环境状况,有机污染评价指数法能较好地反映整体的有机污染状况,因此,3 种评价方法具有不同的评价作用和适用性。

参考文献

[1] 赵聪蛟,赵斌,周燕.基于海洋生态文明及绿色发展的海洋环境实时监测[J].海洋开发与管理,2017,34(5):91-97.

[2] 马正波,梁浩亮,梁婷婷,等.考洲洋水环境质量及受潮汐影响变化分析[J].环境保护科学,2017,28(5):72-78.

[3] 叶冠,王军星,梁浩亮,等.春、秋季考洲洋海水质量状况及评价方法初探[J].海洋开发与管理,2020,37(5):41-45.

[4] 蔡文贵,贾晓平,林钦,等.基于 GIS 的考洲洋养殖水域水质状况分析[J].水产学报,2004,28(5):522-528.

[5] 杨美兰,林钦,甘居利,等.考洲洋化学耗氧量(COD)的含量特征[J].湛江海洋大学学报,2001,21(4):27-31.

[6] 甘居利,贾晓平,李纯厚,等.南海东北部考洲洋海洋渔业环境质量评价[J].海洋环境科学,2004,23(1):9-12.

[7] 蔡文贵,林钦,贾晓平,等.考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价[J].生态学杂志,2005,24(3):343-347.

[8] 杨美兰,林钦,甘居利,等.考洲洋底质中硫化物的含量与分布[J].湛江海洋大学学报,2002,22(3):47-51.

[9] 国家海洋局.GB17378-2007 海洋监测规范[S].北京:中国标准出版社,2008.

[10] 徐祖舰.GIS 入门与提高[M].重庆:重庆大学出版社,2001.

[11] ESRI Inc. Arc view spatial analys[M]. Redland, CA, USA, 1996:45-50.

[12] 国家海洋局.海水增养殖区监测技术规程[S].2002.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB12763-2007 海洋调查规范[S].北京:中国标准出版社,2007.

[14] 严少红,李涛.深圳市大鹏湾近岸海域水质状况与评价[J].环境科学导刊,2019,38(1):85-89.

[15] 李莉,陈武军,张永丰,等.北戴河近岸海域富营养化状况的评价研究[J].安徽农业科学,2015,43(32):111-114.

[16] 贾晓平,林钦,甘居利,等.红海湾水产养殖示范区水质综合评价[J].湛江海洋大学学报,2002(4):37-43.

[17] 蔡真珍,王宪,郑盛华.湄洲湾水质季节变化特征及评价[J].海洋环境科学,2008,27(2):161-164.

[18] ROBERT J D, RUTGER R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems.[J]Science, 2008, 321(5891): 926-929.

[19] LIAO Y, SHOU L, TANG Y, et al. Macrobenthic assemblages of the Changjisng River estuary (Yangtze River, China) and adjacent continental shelf relative to mild summer hypoxia [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(3):481-488.