

秋季三亚西岛海域营养盐状况分析与评价*

郑忠陆 韩玉[#] 王昭允 石晓然 李霞 雒焕新 宋一阳

(海南热带海洋学院海洋科学技术学院,崖州湾创新研究院,海南 三亚 572022)

摘要 于2021年10月(秋季)对三亚西岛海域进行了水质调查,分析了水体中营养盐分布及结构特征,利用富营养化指数和有机污染指数进行了评价。结果表明:西岛海域表层和底层水体中溶解氧(DO)质量浓度分别为7.43~9.74、7.35~7.60 mg/L;化学需氧量(COD)质量浓度分别为1.01~2.35、0.49~1.75 mg/L;溶解无机氮(DIN)质量浓度分别为0.113~0.190、0.118~0.201 mg/L,以硝酸盐氮为主,其次为氨氮;活性磷酸盐(DIP)质量浓度分别为0.012~0.022、0.011~0.042 mg/L;硅酸盐质量浓度分别为0.137~0.211、0.161~0.215 mg/L。整体上,西岛西部海域的营养盐高于东部海域。营养盐结构显示,大部分站位不受营养盐限制,少部分站位受硅酸盐限制。富营养化指数显示,表层和底层水体中贫营养站位占比分别为69.2%、88.9%,轻度富营养站位占比分别为30.8%、11.1%。有机污染指数显示,表层和底层水体中受到污染站位占比分别为69.2%、66.7%,轻度污染站位占比分别为30.8%、11.1%,中度污染站位占比分别为0、22.2%。西岛海域水质状况总体较好,但已开始受到污染,需加强监管,防止水质进一步恶化。

关键词 三亚西岛 营养盐 富营养化指数 有机污染指数

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.12.014

Analysis and evaluation of nutrients in the sea area of West Island of Sanya in autumn ZHENG Zhonglu, HAN Yu, WANG Zhaoyun, SHI Xiaoran, LI Xia, LUO Huanxin, SONG Yiyang. (College of Marine Science and Technology, Yazhou Bay Innovation Institute, Hainan Tropical Ocean University, Sanya Hainan 572022)

Abstract: Water quality in the sea area of West Island of Sanya was investigated in October (autumn) 2021, the distribution and structure characteristics of nutrients in the water were analyzed, and the eutrophication index and organic pollution index were used to evaluate the water quality. Results showed that the mass concentrations of dissolved oxygen (DO) in surface and bottom water of West Island were 7.43-9.74 and 7.35-7.60 mg/L, and chemical oxygen demand (COD) were 1.01-2.35 and 0.49-1.75 mg/L, respectively. The mass concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in surface and bottom water were 0.113-0.190 and 0.118-0.201 mg/L, respectively, which was dominated by nitrate nitrogen and followed by ammonia nitrogen. The mass concentrations of dissolved labile phosphate (DIP) in surface and bottom water were 0.012-0.022 and 0.011-0.042 mg/L, respectively. The mass concentrations of silicate in surface and bottom water were 0.137-0.211 and 0.161-0.215 mg/L, respectively. On the whole, the nutrients were higher in the western coastal than those in the eastern coastal. The nutrient structure showed that most stations were in an unrestricted state, except that a few stations were restricted by silicate. The eutrophication index showed that the proportion of poor eutrophication in the surface and bottom water was 69.2% and 88.9%, and that of mild eutrophication was 30.8% and 11.1%, respectively. The organic pollution index showed that the proportion of polluted state in the surface and bottom water was 69.2% and 66.7%, that of mild pollution was 30.8% and 11.1%, and that of moderate pollution was 0 and 22.2%, respectively. The water quality in the sea area of West Island was generally good, but it was beginning to be polluted, so it was necessary to strengthen supervision to prevent further deterioration of water quality.

Keywords: West Island of Sanya; nutrients; eutrophication index; organic pollution index

营养盐是海水中生物生长繁殖所需的生源要素,对海洋生态系统、水生生物及渔业生产具有重要作用^[1-2]。营养盐作为海洋中初级生产力和食物链

的基础,其含量、结构的变化影响着水中浮游植物群落和食物网结构^[3]。近岸海域的营养盐主要来源于河流输入、大气沉降、有机物降解以及外海输入等,

第一作者:郑忠陆,男,1997年生,硕士研究生,研究方向为海洋环境化学。[#]通讯作者。

*海南热带海洋学院崖州湾创新研究院开放课题(No.2022CXKFKT11);海南省自然科学基金面上项目(No.420MS058);海南省自然科学基金青年基金项目(No.422QN327);海南热带海洋学院博士研究生科研启动项目(No.RHDXB201622)。

水产养殖、农业种植等人为活动对近岸海域营养盐分布具有重要影响^[4-5]。随着沿海城市的快速发展,人类对海洋资源的开发利用增加,近岸海域营养盐明显增多,导致海水富营养化、赤潮等问题频繁出现,进而导致海域溶解氧(DO)降低、生境退化、生物多样性减少以及有毒有害藻类大量繁殖,对海域生态环境造成极大破坏^[6-8]。

三亚西岛是海南沿海第二大岛屿,面积 2.8 km²,岛上有丰富的热带海岛自然资源及历史悠久的渔村文化,是国家 4A 级景区,节假日客流量多时高达数万人^[9],附近海域环境已经遭到不同程度的破坏,然而岛内生活垃圾、污水处理设施还不完善^[10],因此三亚西岛的环境承载力和环境保护研究已经成为重要课题。但由于西岛海域属于珊瑚礁国家级自然保护区,开展调查审批严格,因此该海域调查研究报道甚少。本研究于 2021 年秋季在三亚西岛海域开展了以营养盐为主的水质调查,并对海水污染状况进行评估,对了解西岛海域水质、推进海南生态环境发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 采样站位与时间

2021 年 10 月,对三亚西岛周边海域进行调查,共布设了 14 个采样站位(见图 1),采集了表层、底层水样(有部分样品缺失)。

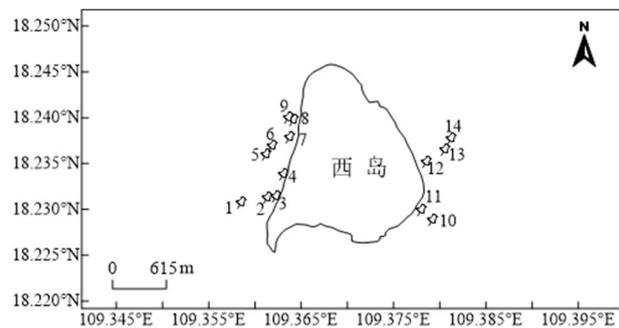


图 1 西岛海域采样站位分布

Fig.1 Sampling station distribution in the sea area of West Island

1.2 样品采集与测定

样品采集按照《海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3—2007)的相关要求执行。悬浮颗粒物(SPM)、化学需氧量(COD)和营养盐测定参照《海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》(GB 17378.4—2007),SPM 用重量法,COD 用碱性高锰酸钾法,氨氮用水杨酸钠法,硝酸盐氮用隔柱还原法,亚硝酸盐氮用盐酸萘乙二胺法,活性磷酸盐

(DIP)用磷钼蓝法,硅酸盐用硅钼蓝法,溶解无机氮(DIN)为氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮之和。温度、盐度、DO、pH 用多参数水质分析仪(WTW Multi36308)现场测定。

1.3 水质评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法^[11]进行污染评价,计算公式如下:

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

式中: I_i 为污染因子*i*的单因子污染指数; C_i 为污染因子*i*的实测值,mg/L; S_i 为污染因子*i*的评价标准值,mg/L。当 $I_i > 1$ 时,说明该污染因子已超标,本研究以《海水水质标准》(GB 3097—1997)中第一类海水水质标准作为评价标准值。

1.3.2 富营养化评价方法

采用富营养化指数评价富营养化状态^[12],计算公式如下:

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}}}{45} \times 10^4 \quad (2)$$

式中: E 为富营养化指数; C_{COD} 为 COD 质量浓度,mg/L; C_{DIN} 为 DIN 质量浓度,mg/L; C_{DIP} 为 DIP 质量浓度,mg/L。 $E < 1$ 为贫营养; $1 \leq E < 2$ 为轻度富营养; $2 \leq E < 5$ 为中度富营养; $5 \leq E < 15$ 为重度富营养; $E \geq 15$ 为严重富营养。

1.3.3 有机污染评价方法

采用有机污染指数评价有机污染状况^[13],计算公式如下:

$$A = \frac{C_{\text{COD}}}{S_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{DIN}}}{S_{\text{DIN}}} + \frac{C_{\text{DIP}}}{S_{\text{DIP}}} + \frac{C_{\text{DO}}}{S_{\text{DO}}} \quad (3)$$

式中: A 为有机污染指数; C_{DO} 为 DO 质量浓度,mg/L; S_{COD} 、 S_{DIN} 、 S_{DIP} 、 S_{DO} 分别为 GB 3097—1997 中 COD、DIN、DIP、DO 第一类海水水质标准,mg/L,依次为 2、0.20、0.015、6 mg/L。 $A \leq 0$ 为良好; $0 < A \leq 1$ 为较好; $1 < A \leq 2$ 为受到污染; $2 < A \leq 3$ 为轻度污染; $3 < A \leq 4$ 为中度污染; $A > 4$ 为严重污染。

2 结果与讨论

2.1 常规水质指标分布特征

西岛海域水体中温度、盐度、pH、SPM、DO 和 COD 的分布见表 1。秋季受台风影响,水体扰动性大,温度、盐度、pH 在水平及垂直方向上差异一般较小^[14]。表层水体 DO 东部由近岸向外海逐渐降低,

表 1 常规水质指标分布¹⁾
Table 1 Distribution of common water parameters

采样站位	水层	温度/℃	盐度/‰	pH	SPM/(mg/L)	DO/(mg/L)	COD/(mg/L)
1	表层	28.8	32.9	8.18	2.41	7.60	2.35
	底层	28.3	32.9	8.13	2.50	7.54	1.50
2	表层	28.4	33.0	8.18	56.44	7.60	1.41
	底层	28.6	32.8	8.16	13.30	7.54	0.49
3	表层	28.4	32.9	8.15	5.91	7.50	1.48
	底层	/	/	/	/	/	/
4	表层	28.2	32.9	8.14	3.11	7.51	1.55
	底层	28.3	32.9	8.08	1.70	7.60	1.44
5	表层	28.8	32.9	8.09	2.56	7.53	1.28
	底层	28.4	32.9	8.11	3.80	7.57	1.64
6	表层	28.5	32.9	8.13	12.71	7.59	1.50
	底层	28.3	32.9	8.04	0.20	7.60	/
7	表层	28.2	32.9	8.04	3.91	7.43	1.33
	底层	28.0	33.0	7.96	3.20	7.55	1.50
8	表层	28.1	32.9	8.18	7.86	7.53	1.33
	底层	28.1	32.9	8.02	20.2	7.46	1.21
9	表层	28.1	32.9	8.17	/	7.57	1.29
	底层	28.4	32.8	8.72	18.50	7.52	1.38
10	表层	28.3	33.1	8.15	9.09	7.57	1.09
	底层	28.2	33.1	8.15	8.20	7.42	/
11	表层	28.3	33.1	8.21	5.36	8.32	1.43
	底层	/	/	/	/	/	/
12	表层	28.7	33.0	8.22	4.86	9.74	1.77
	底层	28.3	33.1	8.13	3.80	7.39	1.75
13	表层	28.4	33.0	8.12	12.71	7.55	1.01
	底层	28.2	33.1	8.15	11.30	7.35	1.35
14	表层	28.4	32.9	7.95	91.51	7.47	1.69
	底层	28.2	33.1	8.03	4.60	7.40	/

注:1)“/”表示数据缺失。表 2 同。

西部相对偏低,但差异不大;底层水体 DO 西部与东部海域更加接近。东部海域水生植物生长较为旺盛,光合作用释放 O₂,导致水体中 DO 较高^[15]。SPM 总体表层高于底层,14 号站位表层特别高,可能是受三亚湾近岸污染随潮汐涌入的影响^{[16]111}。COD 表层最高值出现在西部 1 号站位,底层除 2 号站位较小外,其余站位 COD 相差不大。

2.2 营养盐指标分布特征

西岛海域水体中营养盐指标的分布见表 2。表层和底层水体中 DIN 相差不大,硝酸盐氮平均分别占 DIN 的 77%、74%,氨氮分别占 21%、23%,但西岛海域 DIN 含量远高于周边的三亚河河口海域^{[17]55}和三亚红沙湾海域^{[18]585}。在水平分布上,西岛海域的表层和底层水体中 DIN 均表现为西部略高于东部,高值出现在近岸的 2、3、4 号站位,可能受岛内居民及游客的污水排放影响^{[16]111,[19]}。DIN 的

单因子污染指数结果显示,表层单因子污染指数为 0.57~0.95,说明表层 DIN 均符合第一类海水水质标准;底层单因子污染指数为 0.59~1.00,有 1 个站位刚刚超过第一类海水水质标准。

西岛海域表层和底层水体中 DIP 也相差不大,含量也是远高于三亚河河口海域^{[17]55}和三亚红沙湾海域^{[18]585}。在水平分布上,DIP 浓度分布也表现出西部高于东部。西岛海域水体中氮、磷营养盐含量均表现为西部海域较高,还因为西部海域存在大量养殖区,残留的鱼饵及水生动物的排泄物等都会造成水体营养盐含量相对较高^[20]。DIP 的单因子污染指数结果显示,表层单因子污染指数为 0.80~1.47,有 42.86%的站位超出第一类海水水质标准;底层单因子污染指数为 0.74~2.83,有 33.33%的站位超出第一类海水水质标准。

西岛海域表层和底层硅酸盐相差不大,在水平

表 2 营养盐指标分布
Table 2 Distribution of nutrient parameters

采样站位	水层	mg/L					
		氨氮	硝酸盐氮	亚硝酸盐氮	DIN	DIP	硅酸盐
1	表层	0.025	0.123	0.002 3	0.150	0.015	0.211
	底层	0.024	0.100	0.003 0	0.127	0.012	0.202
2	表层	0.027	0.152	0.002 2	0.181	0.022	0.167
	底层	0.052	0.147	0.002 7	0.201	0.042	0.181
3	表层	0.039	0.125	0.002 8	0.167	0.014	0.205
	底层	/	/	/	/	/	/
4	表层	0.035	0.152	0.003 6	0.190	0.018	0.199
	底层	0.030	0.143	0.002 1	0.175	0.014	0.186
5	表层	0.025	0.130	0.002 2	0.157	0.015	0.191
	底层	0.039	0.118	0.002 3	0.160	0.034	0.210
6	表层	0.036	0.102	0.001 9	0.140	0.022	0.184
	底层	0.035	0.086	0.002 0	0.123	0.021	0.215
7	表层	0.025	0.126	0.002 8	0.154	0.013	0.207
	底层	0.048	0.125	0.002 6	0.175	0.012	0.161
8	表层	0.029	0.099	0.002 9	0.131	0.017	0.209
	底层	0.024	0.114	0.002 7	0.141	0.013	0.176
9	表层	0.031	/	0.002 2	/	0.015	0.193
	底层	0.022	0.095	0.002 1	0.118	0.015	0.199
10	表层	0.044	0.112	0.003 9	0.160	0.013	0.201
	底层	0.025	0.108	0.008 7	0.141	0.013	0.204
11	表层	0.034	0.127	0.002 4	0.164	0.014	0.160
	底层	/	/	/	/	/	/
12	表层	0.034	0.096	0.003 2	0.133	0.013	0.137
	底层	0.024	0.090	0.009 9	0.124	0.011	0.179
13	表层	0.030	0.079	0.004 4	0.113	0.012	0.209
	底层	0.058	0.079	0.006 3	0.143	0.013	0.175
14	表层	0.024	0.124	0.003 6	0.152	0.015	0.209
	底层	0.026	0.108	0.007 5	0.142	0.013	0.207

表 3 秋季西岛海域营养盐结构
Table 3 Structure of nutrients in waters of West Island in autumn

指标	表层		底层	
	变化范围	均值±标准偏差	变化范围	均值±标准偏差
DIN/DIP	14.01~27.38	22.28±3.84	10.51~33.18	21.58±6.83
硅酸盐/DIP	8.38~19.37	14.07±3.00	4.73~18.92	14.19±4.25
硅酸盐/DIN	0.46~0.92	0.64±0.12	0.45~0.88	0.67±0.13

分布上,西部水体硅酸盐浓度整体变化不大,东部表现出从近岸向外海逐渐升高的趋势,高值区出现在靠近三亚湾附近的海域。10月三亚盛行东北季风,三亚湾海域的一部分硅酸盐在季风影响下随洋流向西岛东部海域聚集,造成该海域硅酸盐含量较高^[21-22]。

2.3 指标相关性分析

西岛海域表层水体 DO 与硅酸盐呈显著负相关性($P < 0.05$), pH 与 SPM 呈显著负相关性($P < 0.01$);底层水体盐度与 DO 呈显著负相关性($P <$

0.01), DIN 与 DIP 呈显著负相关性($P < 0.05$)。可以说明,营养盐的含量及分布受多种因素影响,底层水体中氮、磷营养盐的来源更趋于一致。

2.4 营养盐限制状况探讨

营养盐结构是影响海域浮游植物生长繁殖的重要因素。本研究分别用 DIN/DIP、硅酸盐/DIP、硅酸盐/DIN(摩尔比)来研究水体营养盐结构,结果见表 3。本研究中营养盐质量浓度均大于浮游植物对 DIN、DIP 及硅酸盐吸收的最低阈值(DIN:0.014 mg/L、DIP:0.003 1 mg/L、硅酸盐:0.056 mg/L)^[23]。

根据 JUSTIC 等^[24]提出的营养盐限制标准进行潜在限制因子分析,发现西岛海域表层和底层水体中分别仅表层 2、6 号站位和底层 2、5 号站位受硅酸盐限制。

2.5 富营养化与有机污染评价

秋季西岛海域表层水体富营养化指数为 0.30~1.25,其中 1、2、4、6 号站位属于轻度富营养,其余站位皆属于贫营养;底层水体富营养化指数为 0.48~1.94,只有 5 号站位属于轻度富营养,其余站位皆属于贫营养。表层和底层水体的轻度富营养站位都出现在西岛西部海域,一方面受西部养殖区残留的鱼饵、肥料以及水生动物的排泄物影响,另一方面也受到岛内生活垃圾及污水排放的影响。

秋季西岛海域表层水体有机污染指数为 1.11~2.80,均大于 1,说明都受到了不同程度的有机污染,其中 1、2、4、6 号站位表现为轻度污染,其余站位均为受到污染;底层水体有机污染指数为 1.52~3.41,4 号站位表现为轻度污染,2、5 号站位表现为中度污染,其余站位表现为受到污染,底层水体较表层有机污染相对更严重一些。

三亚西岛风景秀丽,水阔潮平,能见度高,环岛海域生长着大量珊瑚及各种热带海鱼,是一个巨大的热带海洋生态圈。但通过水质调查及富营养化和有机污染评估发现,西岛海域也开始受到污染。良好的生态环境是城市可持续发展的重要基础,在加快西岛旅游业发展的同时,应控制岛内生活垃圾及污水地合理排放,控制附近海域水产养殖规模,加强海洋环境监测与治理,实现人类与环境的可持续发展。

3 结 论

1) 三亚西岛海域表层和底层水体 DIN 主要以硝酸盐氮为主,其次是氨氮。空间分布上,表层和底层水体中 DIN、DIP 均表现为西部高于东部海域,而硅酸盐在西岛东部有出现近岸向外海升高的趋势。

2) 富营养化指数结果显示,表层和底层水体中贫营养站位占比分别为 69.2%、88.9%,轻度富营养站位占比分别为 30.8%、11.1%。有机污染指数结果显示,表层和底层水体中受到污染站位占比分别为 69.2%、66.7%,轻度污染站位占比分别为 30.8%、11.1%,底层还有 22.2%的站位受到中度污染。西岛海域水质状况总体良好,但已开始受到污染,应引起重视。

参考文献:

- [1] OYATOLA O O, POPOOLA S O, NUBI O A, et al. Distribution of nutrients and chlorophyll-a in coastal waters and mesotidal estuary of Ilaje, Ondo state, South Western, Nigeria[J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2021, 11(10):11840.
- [2] SURATMAN S, HEE Y Y. Distribution of nutrients in Kelantan River Basin, Malaysia[J]. Asian Journal of Chemistry, 2019, 31(11):2466-2472.
- [3] 周超凡,袁广旺,彭模,等.江苏启东邻近海域氮磷营养盐分布特征、组成及营养水平评价[J].环境污染与防治,2022,44(1):104-110.
- [4] YANG B, GAO X L, ZHAO J M, et al. Biogeochemistry of dissolved inorganic nutrients in an oligotrophic coastal mariculture region of the northern Shandong Peninsula, north Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150:110693.
- [5] PANELO J, WIEGNER T N, COLBERT S L, et al. Spatial distribution and sources of nutrients at two coastal developments in South Kohala, Hawai'i[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 174:113143.
- [6] 彭祥捷,黄继国,赵勇胜,等.长春南湖营养盐与叶绿素 a 的分布与富营养化评价[J].环境污染与防治,2010,32(9):50-54.
- [7] ZHANG P, CHEN Y, PENG C, et al. Spatiotemporal variation, composition of DIN and its contribution to eutrophication in coastal waters adjacent to Hainan Island, China[J]. Regional Studies in Marine Science, 2020, 37:101332.
- [8] TESTA J M, KEMP W M, BOYNTON W R. Season-specific trends and linkages of nitrogen and oxygen cycles in Chesapeake Bay[J]. Limnology and Oceanography, 2018, 63(5):2045-2064.
- [9] 张丽,曹雪,廖民生.三亚西岛海洋旅游资源开发分析及文旅融合发展策略研究[J].现代商业,2021(35):111-114.
- [10] 蒋钰瑾.三亚西岛旅游环境承载力评价及系统仿真研究[D].海口:海南大学,2020.
- [11] GB 17378.7—2007,海洋监测规范 第 7 部分:近海污染生态调查和生物监测[S].
- [12] 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.
- [13] 蒋国昌,王玉衡,董恒霖,等.浙江沿海富营养化程度的初步探讨[J].海洋通报,1987(4):38-46.
- [14] 刘春兰,金石磊,马铁凡,等.长江口邻近海域夏季营养盐的含量与分布特征[J].厦门大学学报(自然科学版),2020,59(增刊1):75-80.
- [15] BALAKRISHNAN S, CHELLADURAI G, MOHANRAJ J, et al. Seasonal variations in physico-chemical characteristics of Tuticorin coastal waters, southeast coast of India[J]. Applied Water Science, 2017, 7:1881-1886.
- [16] 黄建中,魏宇衡,顾志峰,等.海南西岛珊瑚群落变化及其影响因素[J].热带海洋学报,2020,39(6).
- [17] 车志伟,史云峰.三亚河口海域叶绿素 a 与海洋环境因子的关系研究[J].环境污染与防治,2015,37(4).

(下转第 1709 页)