

文章编号: 1674-7054(2021)01-0015-10

三亚湾春秋浮游植物分布及其与环境因子的关系

程贤松^{1,2}, 李亚军², 李兴涵², 李江月², 黄晓晴², 邓晓东²

(1. 海南大学 热带作物学院, 海口 570228; 2. 中国热带农业科学院 热带生物技术研究所
海南省海洋生物资源功能性成分研究与利用重点实验室, 海口 571101)

摘要: 为了解三亚湾浮游植物的群落结构特征及其与环境因子之间的关系, 笔者于 2019 年春(4 月份)、秋(9 月份)两季对三亚湾 12 个站位的浮游植物及水质进行了网采取样调查。春季采样记录浮游植物共 6 门 82 种, 秋季共鉴定出浮游植物 4 门 85 种, 其中硅藻门和甲藻门种类组成占优势, 春、秋季硅藻门分别占 55 种和 67 种(分别占浮游植物总种类数的 67.07% 和 78.82%)。三亚湾春季浮游植物优势种共 4 种, 分别为角毛藻属(*Chaetoceros* sp.)、印度角毛藻(*Chaetoceros indicus*)、三角新角藻(*Neoceratium tripos*)和薄壁几内亚藻(*Guinardia flaccida*), 其中, 角毛藻属(*Chaetoceros* sp.)为第一优势种。秋季调优势种共 9 种, 分别为菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、热带骨条藻(*Skeletonema tropicum*)、霍氏半管藻(*Hemiaulus hauckii*)、日本星杆藻(*Asterionella japonica*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、柔弱拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)和异角毛藻(*Chaetoceros diversus*), 其中, 菱形海线藻为第一优势种。春季多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均分别为 3.33、0.80、2.26; 秋季多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均分别为 4.05、0.79、3.09。RDA 分析结果显示, 春季总磷、氨氮和水温是影响浮游植物群落组成的主要因素, 秋季总氮、盐度和电导率对浮游植物的群落结构影响最大。

关键词: 三亚湾; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; RDA

中图分类号: Q 948.8 **文献标志码:** A

引用格式: 程贤松, 李亚军, 李兴涵, 等. 三亚湾春秋浮游植物分布及其与环境因子的关系 [J]. 热带生物学报, 2021, 12(1): 15-24. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.2021.01.003

海洋是地球上最广阔的水体, 在生态环境的演变和人类社会文明进程中都发挥着很重要的作用, 其中海洋近海岸的生态环境与人类生产活动关系最密切^[1-2]。旅游业、航运、海湾建设和水产养殖业等产业在带来经济发展的同时, 对近海岸的生态系统也产生了显著的影响, 如导致海水水体不同程度的污染、海洋垃圾增多、水质下降、富营养化、生物多样性下降等^[3], 这一现象已经引起了国内外学者的广泛关注。浮游植物是海洋生态系统中的一个重要的组成部分, 也是海洋食物链中最基础的一个环节^[4], 其作为海洋中有机质的重要来源, 对海洋生态系统中的物质循环和能量流动都发挥着不可代替的作用^[5]。据报道, 浮游植物的群落结构组成对海洋生态系统影响巨大, 海洋生态系统的变化也会反过来影响浮游植物的群落结构^[6-7]。因此, 研究浮游植物的群落结构变化对了解海洋生态系统的变化极具重要性。三亚湾(18°13'~18°17'N; 109°22'~109°29'E)位于海南省三亚市南部沿海, 是一片绵延 22 km 的海滩旅游胜地, 该海域分布着东玳瑁洲和西玳瑁洲。由于近年来旅游业的发展, 人类的频繁活动对该海域产生了或多或少的影响。笔者根据 2019 年夏(4 月份)、秋(9 月份)两季对三亚湾海域网采浮游植物和水样调查, 对三

收稿日期: 2020-10-18

修回日期: 2021-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(31870344); 农业农村部财政专项(NFZX2018); 海南省重点科技计划(ZDYF2018124); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(19CXTD-32)

第一作者: 程贤松(1993-), 男, 海南大学热带作物学院 2018 级硕士研究生. E-mail: 1039155005@qq.com

通信作者: 邓晓东(1969-), 男, 博士, 研究员. 研究方向: 藻类生理生化. E-mail: dengxiaodong@itbb.org.cn

亚湾的浮游植物种类组成、海洋藻类物种多样性以及海水水质进行了分析,旨在为三亚湾旅游胜地环境保护和海洋近海岸生态系统保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 站位设置和采样方法 2019年4月和9月,参考《海洋调查规范》(GB12763.9—2007),在三亚湾海域设置12个调查站位(图1),地理坐标见表1,依据GB12763.6—2007《海洋监测规范》规定,对三亚湾浮游植物进行网采、贮存、运输和预处理。浅水区域使用浅水Ⅲ型浮游生物网(网长140 cm,网口内径37 cm,网口面积0.1 m²)进行网采,距底层2 m的位置开始往上垂直拖网3次采集样品。水深超过50 m的调查站位,由50 m至表层垂直拖网3次采集样品,现场测定气温、水温、水深、盐度、透明度、溶解氧、pH值和电导率。取1 L网采样品用终浓度为2%的甲醛固定后带回实验室备用,剩余样品随后静置沉淀浓缩至50 mL,取0.1 mL浓缩样品在LEICADM6000B生物显微镜下进行种类鉴定和计数。



图1 三亚湾浮游植物采样站位示意图

Fig.1 The schematic diagram of phytoplankton survey stations in Sanya Bay

表1 三亚湾近岸海域浮游植物调查站位地理坐标

Tab. 1 Geographical locations of the survey stations in Sanya Bay

站位 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	站位 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude
SYW1-1	109°29'62.64"	18°15'25.60"	SYW3-1	109°25'40.17"	18°17'16.29"
SYW 1-2	109°28'64.52"	18°14'40.02"	SYW3-2	109°25'02.31"	18°16'24.50"
SYW 1-3	109°27'40.35"	18°13'51.32"	SYW3-3	109°24'53.51"	18°15'40.60"
SYW 2-1	109°27'95.60"	18°16'62.48"	SYW4-1	109°23'41.00"	18°17'26.04"
SYW 2-2	109°27'13.76"	18°15'38.84"	SYW4-2	109°22'48.61"	18°16'05.49"
SYW 2-3	109°26'19.22"	18°14'66.95"	SYW4-3	109°22'29.77"	18°15'07.20"

1.2 样品处理及分析 取0.1 mL浓缩样品在生物显微镜下计数、鉴定。Shannon-Wiener多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J')、Margalef丰富度指数(D)和优势种确定(优势度 Y)的计算公式^[8-11]如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i;$$

$$J' = H' / \log_2 S;$$

$$D = (S - 1) / \ln N;$$

$$Y = fi \times Pi;$$

式中: H' 为多样性指数; S 为种类数; $P_i = ni/N$ (ni 是第 i 个物种的个体数, N 是全部物种的个体数); fi 为第 i 种在各个站位出现的频率, P_i 为第 i 种占各个站位细胞总量的比例。

2 结果与分析

2.1 三亚湾调查海域环境参数 调查期间三亚湾春季平均水温26.5℃,秋季平均水温28.87℃。调查水域春秋两季pH值均为8.28。春季盐度平均为31,秋季盐度高达35.31。春季电导率为20.53~20.87 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值为20.75 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。秋季电导率有所增高,平均值达到24.31 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。春季溶解氧为8.97~10.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为9.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于秋季,秋季的平均值5.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表2)。

表 2 2019 年春秋两季三亚湾各调查站位环境参数
Tab. 2 Environmental parameters of survey stations in Sanya Bay in 2019

站位 Station	水温		pH		电导率		盐度		溶解氧 DO/(g·L ⁻¹)	
	Seawater temperature				Conductivity		Salinity		Dissolved oxygen	
	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋
SYW1-1	26.47	29.60	8.29	8.30	20.67	25.00	31	34	8.97	6.09
SYW1-2	26.50	29.30	8.28	8.30	20.73	25.00	31	36	8.97	5.65
SYW1-3	26.47	28.80	8.29	8.30	20.70	25.00	31	35	9.00	5.72
SYW2-1	26.17	29.50	8.28	8.30	20.87	25.00	31	36	9.93	5.39
SYW2-2	26.10	29.40	8.27	8.30	20.80	25.00	31	35	10.40	5.57
SYW2-3	26.10	28.80	8.24	8.20	20.87	25.00	32	35	10.17	5.81
SYW3-1	26.70	28.20	8.27	8.30	20.87	25.00	31	36	10.00	5.82
SYW3-2	26.73	28.40	8.29	8.30	20.80	16.73	31	36	10.03	5.43
SYW3-3	26.43	28.70	8.29	8.30	20.83	25.00	31	34	10.50	5.52
SYW4-1	26.83	28.20	8.26	8.30	20.83	25.00	31	36	10.13	5.37
SYW4-2	26.43	28.80	8.28	8.20	20.47	25.00	31	35	10.20	5.27
SYW4-3	26.43	28.70	8.27	8.30	20.53	25.00	30	34	10.23	6.10
平均值 Mean	26.45	28.87	8.28	8.28	20.75	24.31	31	35	9.88	5.65

2.2 三亚湾各调查站位浮游植物种类组成 三亚湾调查海域春季鉴定出浮游植物 6 门 82 种, 秋季鉴定出 4 门 85 种。其中, 春、秋季硅藻门分别占浮游植物总种类数的 67.07% 和 78.82%, 占据优势类群。春季鉴定出甲藻门 22 种, 秋季 16 种; 春秋两季均鉴定出蓝藻门 1 种和金藻门 1 种。除此之外, 春季还鉴定出定鞭藻门 2 种。秋季各调查站位鉴定的浮游植物种类均比春季多(图 2)。

2.3 三亚湾各调查站位浮游植物密度分布 三亚湾春季浮游植物细胞平均密度为 5.13×10^3 个·m⁻³; 秋季浮游植物细胞平均密度为 99.8×10^3 个·m⁻³。秋季平均细胞密度是春季的 20 倍左右(表 3)。除春季站位 4-3 以定鞭藻门为优势类群, 其余站位均以硅藻门为优势种类。春秋两季硅藻细胞密度均明显高于其他藻类, 春季占细胞总密度的 78.31%, 明显低于秋季(96.08%), 但春季甲藻细胞密度明显高于秋季(图 3)。

2.4 三亚湾各调查站位浮游植物优势种 优势度决定优势种, 将优势度 ≥ 0.02 的浮游植物种类作为该海域的优势种类。春季调查期间三亚湾浮游植物优势种共 4 种, 分别为角毛藻属(*Chaetoceros* sp.)、印度角毛藻(*Chaetoceros indicus*)、三角新角藻(*Neoceratium tripos*)和薄壁几内亚藻(*Guinardia flaccida*)。角毛藻属(*Chaetoceros* sp.)为第一优势种, 优势度为 0.163, 平均密度为 0.84×10^3 个·m⁻³(表 4), 在 SYW3-2 号站位密度最大; 印度角毛藻为第二优势种, 优势度为 0.091, 平均密度为 0.62×10^3 个·m⁻³, 在 SYW4-1 号站位密度最大(图 4)。秋季调查期间该海域浮游植物优势种共 9 种, 分别为菱形海线藻(*Thalassi-*

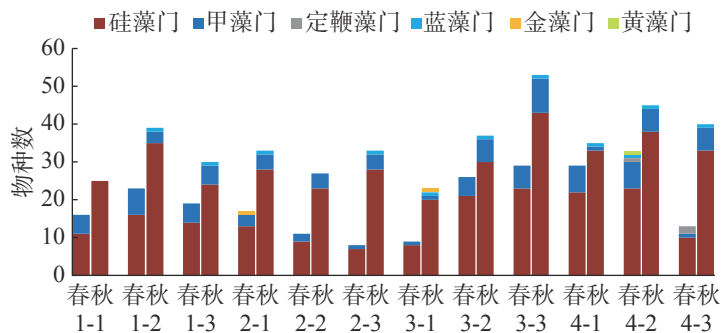


图 2 2019 年三亚湾各站位浮游植物物种数

Fig. 2 Number of phytoplankton species at each station in Sanya Bay in 2019

表3 各站位浮游植物密度

Tab. 3 Phytoplankton density at each station

站位 Station	浮游植物密度占比/%										密度/(10^3 个· m^{-3})	
	硅藻门		甲藻门		蓝藻门		金藻门		黄藻门	定鞭藻门	春	秋
	春	秋	春	秋	春	秋	春	秋	春			
SYW1-1	74.16	100	25.84	0	0	0	0	0	0	0	5.08	32.5
SYW1-2	80.58	98.47	19.42	0.77	0	0.77	0	0	0	0	2.25	12.17
SYW1-3	87.88	95.07	12.12	4.23	0	4.23	0	0	0	0	0.96	23.6
SYW2-1	87.8	98.66	9.76	0.67	0	0.67	2.44	0	0	0	6.53	557.6
SYW2-2	88.89	96.92	11.11	3.08	0	3.08	0	0	0	0	0.64	41.6
SYW2-3	93.33	95.19	6.67	2.14	0	2.14	0	0	0	0	0.31	34.9
SYW3-1	95	97.79	5	0.55	0	0.55	0	0.55	0	0	3.54	90.1
SYW3-2	88.89	94.26	11.11	2.36	0	2.36	0	0	0	0	10.03	65.5
SYW3-3	90.2	95.16	9.8	2.96	0	2.96	0	0	0	0	5.8	44.4
SYW4-1	77.33	98.54	22.67	0.49	0	0.49	0	0	0	0	14.93	76.9
SYW4-2	70.79	90.51	17.98	6.72	1.12	6.72	0	0	1.12	8.99	2.11	48
SYW4-3	4.89	92.34	0	3.28	0	3.28	0	0	9.36	94.89	9.36	60.6
平均值 Mean	78.31	96.08	12.64	2.27	0.09	1.61	0.2	0.05	0.09	8.66	5.13	99.8

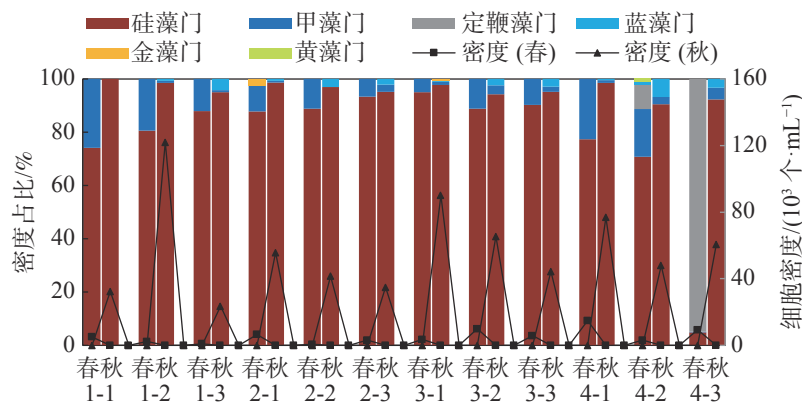


图3 各门浮游植物空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of phytoplankton

onema nitzschoides)、热带骨条藻 (*Skeletonema tropicum*)、霍氏半管藻 (*Hemiaulus hauckii*)、日本星杆藻 (*Asterionella japonica*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*)、劳氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*)、柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、窄隙角毛藻 (*Chaetoceros affinis*) 和异角毛藻 (*Chaetoceros diversus*)。菱形海线藻为第一优势种, 优势度为 0.184, 平均密度为 18.3×10^3 个· m^{-3} (表 4), 在 2-1 号站位密度最大; 热带骨条藻为第二优势种, 优势度为 0.074, 平均密度为 80.0×10^3 个· m^{-3} , 在 2-1 号站位密度最大 (表 4, 图 4), 优势种显微镜下放大 400 倍的生物学特征见图 5。

2.5 多样性指数、均匀度与丰富度指数 浮游植物多样性指数是反映其种类的多寡和各个种类数量差异的函数关系, 均匀度则反映其种类数量的分布情况, 可以作为生态监测的参数。计算结果表明, 春季三亚湾浮游植物的多样性指数和均匀度平均值分别为 3.33 和 0.80, 秋季多样性指数和均匀度分别为 4.05 和 0.79。秋季调查时, 所有站位的多样性指数均大于 3, 表明三亚湾海域生境环境优良。春季丰富度指数在 0.98 ~ 4.18 之间, 平均为 2.26。秋季丰富度指数在 2.13 ~ 5.41 之间, 平均为 3.715 (表 5)。

表 4 2019 年三亚湾浮游植物优势种

Tab. 4 Dominant species of phytoplankton in Sanya Bay in 2019

季节 Season	优势种 Dominant species	平均密度/(10 ³ 个·m ⁻³) Mean density	占总密度比例/% Over total density	出现频率/% Frequency	优势度 Dominance
春 Spring	角毛藻属(<i>Chaetoceros</i> sp.)	0.84	16.32	100	0.163
	印度角毛藻(<i>Chaetoceros indicus</i>)	0.62	12.1	75	0.091
	三角新角藻(<i>Neoceratium tripos</i>)	0.36	7.1	91.67	0.065
	薄壁几内亚藻(<i>Guinardia flaccida</i>)	0.2	3.93	91.67	0.036
秋 Autumn	菱形海线藻(<i>Thalassionema nitzschioides</i>)	1.83	18.35	100	0.184
	热带骨条藻(<i>Skeletonema tropicum</i>)	0.8	8.02	91.67	0.074
	霍氏半管藻(<i>Hemiaulus hauckii</i>)	0.71	7.1	100	0.071
	日本星杆藻(<i>Asterionella japonica</i>)	0.67	6.72	100	0.067
	丹麦细柱藻(<i>Leptocylindrus danicus</i>)	0.7	6.99	91.67	0.064
	劳氏角毛藻(<i>Chaetoceros lorenzianus</i>)	0.52	5.21	100	0.052
	柔弱拟菱形藻(<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>)	0.45	4.49	83.33	0.037
	窄隙角毛藻(<i>Chaetoceros affinis</i>)	0.31	3.07	91.67	0.028
	异角毛藻(<i>Chaetoceros diversus</i>)	0.25	2.48	83.33	0.021

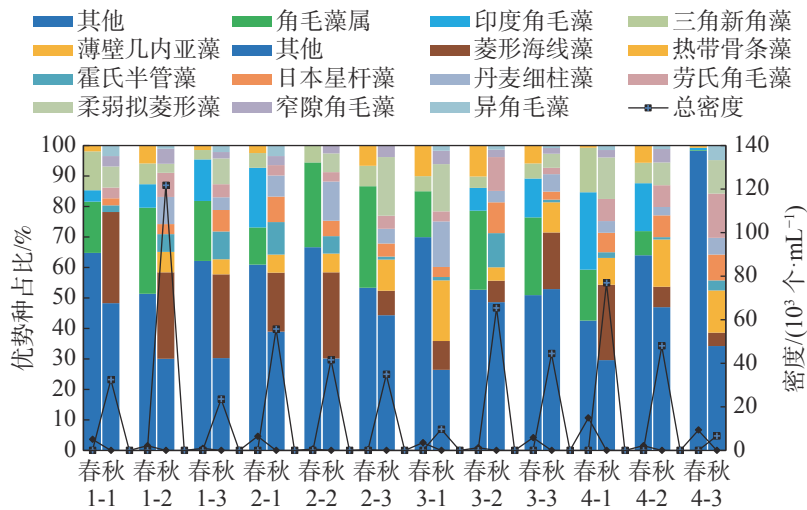


图 4 2019 年三亚湾优势种空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of dominant species in Sanya Bay in 2019

2.6 各调查站位水质分析 三亚湾海域 12 个站点水体的总氮、硝态氮、亚硝态氮、氨氮、总磷、COD 测定结果(图 6)显示, 三亚湾春季总氮含量平均值为 4.35 mg·L⁻¹, 低于秋季的 6.45 mg·L⁻¹。春秋两季硝酸盐氮含量平均值分别为 0.83 mg·L⁻¹ 和 0.89 mg·L⁻¹, 差异不大。春秋两季亚硝酸盐氮含量平均值均为 0.008 mg·L⁻¹。秋季氨氮含量平均值为 1.91 mg·L⁻¹, 高于春季的平均值(0.53 mg·L⁻¹)。春秋两季总磷含量平均值分别为 2.09 mg·L⁻¹ 和 0.80 mg·L⁻¹, 秋季含量明显下降。春秋两季 COD 平均值分别为 2.81 mg·L⁻¹ 和 5.02 mg·L⁻¹, 秋季的含量高于春季的。

2.7 浮游植物群落与环境因子 RDA 对应关系分析 根据采样调查数据, 利用 Canoco 5 软件对浮游植物群落和环境因子关系进行对应分析。选择出浮游植物丰度前 10 的物种, 首先对数据矩阵进行降趋势对应分析 (DCA), 根据分析结果中排序轴数值大小特征, 判断下一步分析方法。分析结果表明, 春秋两季数

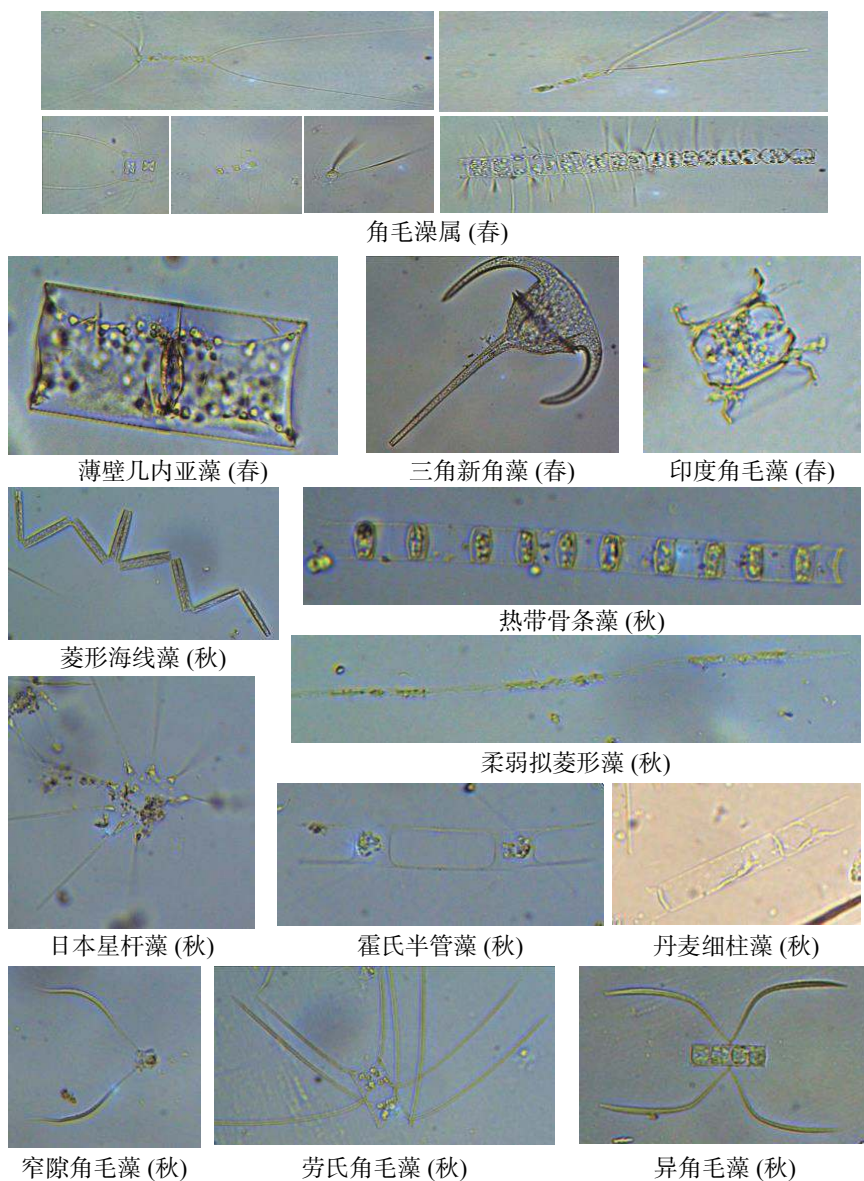


图5 三亚湾浮游植物优势种显微图片

Fig. 5 Photomicrograph of dominant species of phytoplankton in Sanya Bay

表5 2019年三亚湾各站位浮游植物多样性指数、均匀度和丰富度指数

Tab. 5 Diversity, evenness and richness of phytoplankton in Sanya Bay in 2019

站位 Station	多样性指数 Diversity index		均匀度指数 Evenness index		丰富度指数 Richness index	
	春	秋	春	秋	春	秋
SYW1-1	3.57	3.76	0.89	0.81	1.76	2.58
SYW1-2	3.54	3.89	0.78	0.74	2.85	3.58
SYW1-3	3.55	3.94	0.84	0.80	2.62	3.23
SYW2-1	3.74	3.66	0.91	0.72	1.82	2.64
SYW2-2	3.19	3.74	0.92	0.79	1.55	2.73
SYW2-3	2.68	4.24	0.89	0.84	1.22	3.42
SYW3-1	2.98	3.57	0.94	0.79	0.98	2.13
SYW3-2	3.92	4.08	0.83	0.78	2.71	3.60
SYW3-3	4.03	4.69	0.83	0.82	3.23	5.41
SYW4-1	3.75	4.00	0.77	0.78	2.91	3.35
SYW4-2	4.50	4.69	0.89	0.85	4.18	4.55
SYW4-3	0.55	4.32	0.15	0.81	1.31	3.93

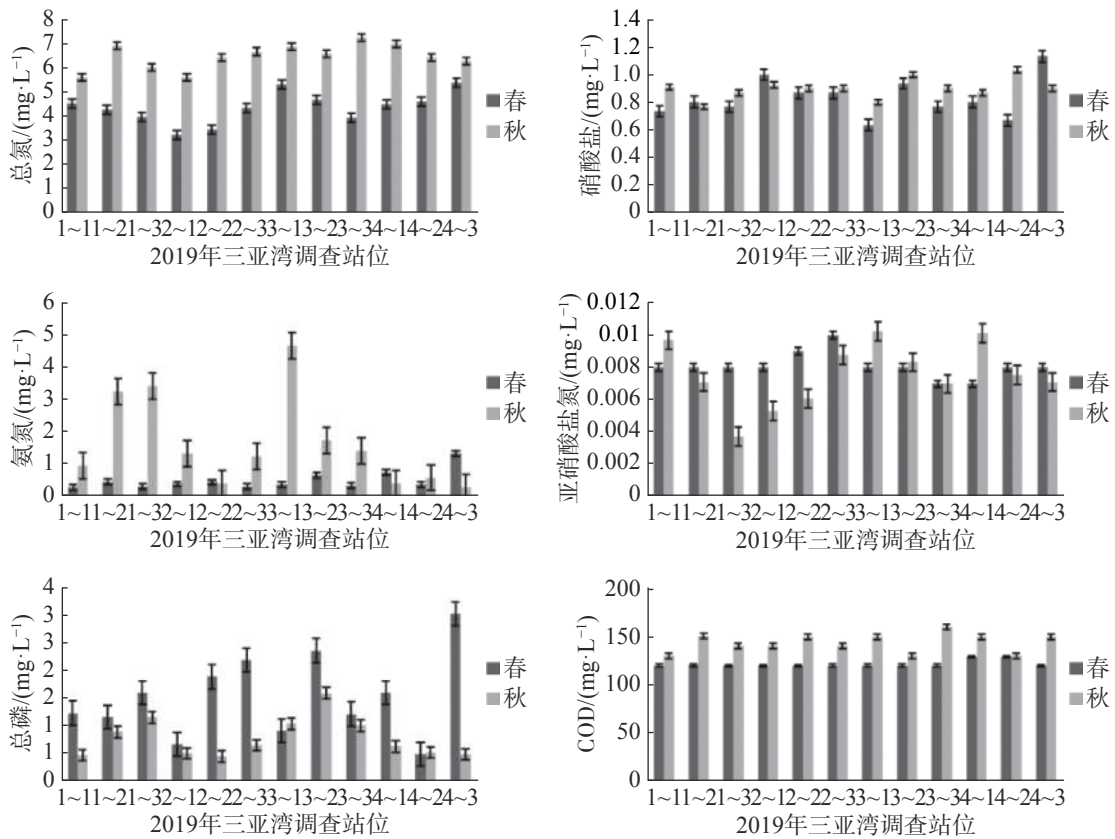


图 6 2019 年三亚湾各调查站位水质相关指标测定结果

Fig. 6 Quality-related indicators of seawater at various survey stations in Sanya Bay in 2019

据采用冗余分析(RDA)较合适。通过蒙特卡洛方法对春秋两季浮游植物群落与环境因子 RDA 对应关系分析结果。基于三亚湾浮游植物丰度前 10 的藻株进行相关分析(图 7), 浮游植物物种主要分布在第一和第四象限, 春季总磷、氨氮、水温和 pH 对浮游植物群落结构影响较大, 其中棕囊藻属与总磷和氨氮呈正相关关系, 优势藻种中的印度角毛藻、具槽直链藻、丹麦角毛藻和薄壁几内亚藻与水温和 pH 2 个环境因子呈正相关关系。大角管藻、角毛藻属、三角新角藻、螺端根管藻和膜状舟形藻与总磷、氨氮、硝态氮呈负相关关系。秋季影响浮游植物最大的因素 COD、电导率、溶解氧和盐度, 水温次之; 在水质方面, 总

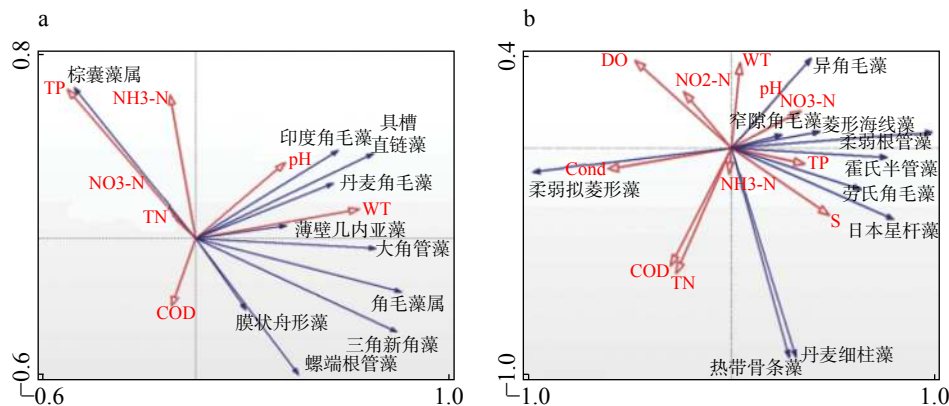


图 7 三亚湾春季(a)和秋季(b)浮游植物与环境因子 RDA 分析

DO: 溶解氧; Cond: 电导率; NO₂-N: 亚硝态氮; NO₃-N: 硝态氮; NH₃-N: 氨氮; S: 盐度; TP: 总磷; TN: 总氮; WT: 水温; COD: 化学需氧量。

Fig. 7 RDA analysis of phytoplankton and environmental factors in Sanya Bay in spring (a) and autumn (b)

DO: Dissolved oxygen; Cond: Conductivity; NO₂-N: Nitrite; NO₃-N: Nitrate; NH₃-N: ammonia nitrogen; S: Salinity; TP: Total phosphorus; TN: Total nitrogen; WT: Water temperature; COD: Chemical oxygen demand.

氮、总磷和硝态氮影响最大。柔弱拟菱形藻与电导率、COD 和总氮呈正相关,与 pH、水温、硝态氮和总磷呈负相关;异角毛藻、窄隙角毛藻、菱形海链藻和柔弱根管藻与 pH、水温和硝态氮正相关,与 COD、电导率和总氮呈负相关;霍氏半根藻、劳氏角毛藻、日本星杆藻、丹麦细柱藻和热带骨条藻与总磷和盐度呈正相关,与溶解氧和亚硝态氮呈负相关。

3 讨 论

三亚湾春秋两个航次调查结果显示,春季共鉴定出浮游植物 6 门 82 种,秋季共鉴定出浮游植物 4 门 85 种,共发现 167 种浮游植物,其中春秋两季不同种共 145 种,共有 22 种相同浮游植物种类。春秋两季浮游植物种类均以硅藻为主,甲藻次之,与历年三亚湾浮游植物调查研究的结果一致^[12]。同时,杨志浩等的研究发现,三亚湾浮游植物硅藻不仅在种类数上占优势,其细胞密度上也同样占据优势,各季节的浮游植物均以硅藻为优势种,本研究的调查结果显示,春秋两季均以硅藻为优势种,硅藻细胞密度占优势,与之相一致^[13]。定鞭藻门仅在春季出现,秋季各站位浮游植物种类高多于春季。春季藻细胞平均密度为 5.13×10^3 个·m⁻³;秋季藻细胞平均密度为 99.8×10^3 个·m⁻³。秋季藻细胞密度是春季的 20 倍左右。

春季调查期间三亚湾浮游植物优势种共 4 种,分别为角毛藻属、印度角毛藻、三角新角藻和薄壁几内亚藻。其中角毛藻属为第一优势种。春季三亚湾受外海水温度影响较大^[14-15],因此,一些外海广温性种则占据优势。角毛藻属于广温性种,是近岸海域常见的赤潮藻种^[16]。温度盐度是影响角毛藻分布的主要因素^[17],角毛藻的大量生长是水体富营养化的指征之一^[18]。秋季优势种共 9 种,分别为菱形海线藻、热带骨条藻、霍氏半管藻、日本星杆藻、丹麦细柱藻、劳氏角毛藻、柔弱拟菱形藻、窄隙角毛藻和异角毛藻。菱形海线藻为第一优势种。春季三亚湾浮游植物的多样性指数、均匀度和丰富度指数平均值分别为 3.33、0.80 和 2.26,秋季多样性指数、均匀度和丰富度分别为 4.05、0.79 和 3.43。综合多样性指数和均匀度指数来看,三亚湾春秋两季水体环境均为优良等级,浮游植物种类多样性高,且结构稳定^[19]。

历年来研究显示,三亚湾主要的影响环境因子包括温度、盐度、气象条件和营养盐含量等^[20]。本研究水质调查结果显示,三亚湾总氮、氨氮和 COD 含量平均值秋季高于春季,总氮、氨氮和 COD 含量的增高是水体富营养化的特征指标^[21],说明秋季浮游植物生境较春季差。海水中 COD 含量的增高说明了该海域受到有机污染物的污染,COD 含量越高污染越严重,COD 含量的增多是导致赤潮藻类大量繁殖的因素^[22]。说明可能是由于旅游业的开发,而对三亚湾的环境保护措施不足,导致三亚湾的水质受到污染。秋季总磷含量明显下降,硝酸盐氮和亚硝酸盐氮含量两季差异不明显。

RDA 分析结果显示,春季影响浮游植物最主要的环境因子是总磷、氨氮、水温和 pH,其中,棕囊藻属与总磷和氨氮呈正相关关系,氮磷元素是影响浮游藻类生长的主要元素^[23-24]。优势藻种中的印度角毛藻、具槽直链藻、丹麦角毛藻和薄壁几内亚藻与水温和 pH2 个环境因子呈正相关关系。水温变化会进一步导致水体的物理、化学性质和生物的活动发生改变,以此对浮游植物的组成及分布产生影响^[25]。研究报道,在河口浮游植物的调查中发现,pH 是影响其分布组成的重要环境因子^[26-27]。秋季影响浮游植物最大的因素 COD、电导率、溶解氧和盐度,水温次之。盐度的变化主要是影响浮游植物的渗透压,进而对浮游植物的群落组成产生影响^[28]。在水质方面,总氮、总磷和硝态氮影响最大。柔弱拟菱形藻与电导率、COD 和总氮呈正相关,与 pH、水温、硝态氮和总磷呈负相关。异角毛藻、窄隙角毛藻、菱形海链藻和柔弱根管藻与 pH、水温和硝态氮正相关,与 COD、电导率和总氮呈负相关;霍氏半根藻、劳氏角毛藻、日本星杆藻、丹麦细柱藻和热带骨条藻与总磷和盐度呈正相关,与溶解氧和亚硝态氮呈负相关。

总体来说,三亚湾海水中的氮磷营养盐、pH、盐度、COD 和海水的温度是影响该海域浮游藻类的主要因素。三亚湾浮游藻类多样性调查发现,该海域浮游植物生存环境优良,但存在个别赤潮藻种。三亚湾属于旅游开放区,应降低旅游业对三亚湾水体的影响以及减少当地生活污水的排入,保护海域水体环境。

参考文献:

- [1] 栗丽, 黄梓荣, 陈作志. 广东沿岸不同海域浮游植物群落结构特征的比较分析[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 61–65.
- [2] 宋劫, 易雨君, 周扬, 等. 小浪底水库下游浮游生物及细菌群落对水沙调控的响应规律[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1121–1130.
- [3] 孙萍, 李瑞香, 李艳, 等. 2005 年夏末渤海网采浮游植物群落结构[J]. 海洋科学进展, 2008(3): 354–363.
- [4] 冯士筌, 李凤歧, 李少筌. 海洋科学导论[J]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 272–349.
- [5] 李洪波, 刘述锡, 林凤翱, 等. 河北沿岸微微型浮游植物的分布特征[J]. 海洋科学, 2012, 36(7): 49–55.
- [6] LI W K W, SUBBARAO D V, HARRISON W G, et al. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean [J]. *Science*, 1983, 219: 292–295.
- [7] MURPHY L S, HAUGEN E M. The distribution and abundance of phototrophic ultraplankton in the North Atlantic [J]. *Limnol Oceanogr*, 1985, 30: 47–58.
- [8] SHANNON CE, WEAVER W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949: 1–125.
- [9] PIELOU EC. An Introduction to Mathematical Ecology[M]. New York: Wiley Interscience, 1969: 1–286.
- [10] MARGALE R. La teoría de la informacion en ecologia [J]. *Memonas de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, 1957, 32(13): 373–449.
- [11] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 2 版. 北京: 北京师范大学出版社, 1992: 356–357.
- [12] 李红飞, 林森杰. 南海浮游植物生态学研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 1–10.
- [13] 杨志浩, 董俊德, 吴梅林, 等. 三亚湾网采浮游植物群落结构特征分析[J]. 热带海洋学报, 2007(6): 62–66.
- [14] 董俊德, 张燕英, 王友绍, 等. 南海三亚湾及邻近海域海洋蓝藻类群组成、分布及演替特征[J]. 热带海洋学报, 2006(3): 40–46.
- [15] HUANG Liangmin, TAN Yehui, SONG Xingyu, et al. The status of the ecological environment and a proposed protection strategy in Sanya Bay, Hainan Island, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47(1): 180–186.
- [16] 庞勇, 聂瑞, 王道儒, 等. 海南近岸海域夏初角毛藻的种类多样性及其水平分布[J]. 南方水产科学, 2015, 11(6): 9–18.
- [17] 穆亮亮, 曾蓓蓓, 黄旭雄, 等. 盐度-光照强度-温度对角毛藻生长及高不饱和脂肪酸含量的影响[C]//中国水产学会. 2015 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 中国水产学会. 北京: 中国水产学会, 2015.
- [18] 陈宝红. 基于水采样品的厦门海域浮游植物群落对营养盐长期变化的响应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- [19] 马建新, 郑振虎, 李云平, 等. 莱州湾浮游植物分布特征[J]. 海洋湖沼通报, 2002(4): 63–67.
- [20] 董俊德, 王汉奎, 张偲, 等. 三亚湾海水温度季节变化及溶解无机氮的垂直分布特征[J]. 热带海洋学报, 2002(1): 40–47.
- [21] 胡俊, 柳欣, 张钊, 等. 台湾海峡浮游植物生长的营养盐限制研究[J]. 台湾海峡, 2008(4): 452–458.
- [22] 赵行行. 东港赤潮监控区浮游植物生长的环境因子影响分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [23] 张文斌, 董昭皆, 徐书童, 等. 微生物和藻类分解对荣成天鹅湖沉积物氮磷释放的影响[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 561–567.
- [24] 林玉清, 焦聪聪, 施鸿昊, 等. 蓝藻暴发对莫愁湖水体和沉积物营养盐的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 1–11.
- [25] WASMUND N, TUIMALA J, SUIKKANEN S, et al. Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 87(2): 145–159.
- [26] 张亚锋. 近海浮游植物粒级及被摄食和河口 pH 的生物调控机制[D]. 广州: 中山大学, 2017.
- [27] 常思伟. 区分海洋酸化过程中二氧化碳分压上升和 pH 下降对束毛藻的影响及机理初探[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [28] 武丹, 韩龙, 梅鹏蔚, 等. 渤海湾浮游植物群落特征及其环境影响因子[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4): 68–73.

Phytoplankton distribution and its relationship with related environmental factors in Sanya Bay in spring and autumn

CHENG Xiansong^{1,2}, LI Yajun², LI Xinghan², LI Jiangyue², HUANG Xiaoqing², DENG Xiaodong²

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. The Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology/
Hainan Key Laboratory for Functional Components Research and Utilization of Marine Bioresources,
Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: In recent years the economy has developed rapidly in Sanya City, Hainan Province. With the rapid development of tourism, Gulf port construction, aquaculture and other industries, the ecological environment of the coastal waters in Sanya Bay has attracted much attention. In order to understand the relationship between the phytoplankton community structure and environmental factors in Sanya Bay, a sampling survey of phytoplankton and seawater quality at 12 survey stations near the coast of Sanya Bay was made in April and September 2019. The results showed that there are a total number of 82 species of phytoplankton identified in Spring, and a total number of 85 species identified in Autumn, in which diatoms and dinoflagellates were predominant in species composition and cell abundance. There were 4 and 9 dominant species in Spring and Autumn, respectively. *Chaetoceros sp.*, *Chaetoceros indicus*, *Neoceratium tripos* and *Guinardia flaccida* were dominant species in Spring, and *Chaetoceros sp.* was the first dominant species. *Thalassionema nitzschioides*, *Skeletonema tropicum*, *Hemiaulus hauckii*, *Asterionella japonica*, *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros lorenzianus* and *Chaetoceros diversus* were dominant species in Autumn, and *Thalassionema nitzschioides* was the first dominant species. The average Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef diversity index were 3.33, 3.27, 2.26 in Spring, respectively, and 4.05, 0.79, 3.09 in Autumn, respectively. The redundancy analysis showed that the main factors affecting the phytoplankton structure were total phosphorus, ammonia nitrogen and water temperature in Spring, and total nitrogen, salinity and conductivity in Autumn.

Keywords: Sanya Bay; phytoplankton; community structure; environmental factors; RDA

(责任编辑: 钟云芳)