文章编号: 1674 − 7054(2020)03 − 0257 − 09

海南岛海尾湾浮游植物群落结构及水质的调查

李亚军, 王先明, 程贤松, 魏盟智, 李江月, 朱为菊, 邓晓东
(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: 于 2018 年 7 月和 9 月, 对海南岛海尾湾近岸海域网采浮游植物的种类、群落结构、优势种种类、多样性特征和水质进行调查。本研究共设 12 个调查站位, 进行了夏秋 2 个航次的调查。调查结果表明: 夏秋两季分别鉴定出浮游植物 3 门 119 种和 114 种, 其中硅藻类占多数。夏秋两季中浮游植物的优势种分别为 7 种和 10 种, 其中旋链角毛藻、角毛藻属和尖刺拟菱形藻在夏秋两季均为优势种。夏季时浮游植物平均细胞密度为 6.15×10^6 个·m^{-3}, 夏季的平均细胞密度比秋季的约高 10 倍。夏秋两季的浮游植物丰富度指数分别为 5.3 和 5.52, 差异不大; 秋季的多样性指数(4.19)和均匀度指数(0.76)均高于夏季的多样性指数(3.27)和均匀度指数(0.56)。调查后冗余分析结果表明, 海尾湾海域生态环境优良, 海尾湾夏季浮游植物与活性硅酸盐、总氮呈显著正相关, 与亚硝酸盐呈显著负相关; 秋季影响浮游植物的主要环境因子是 pH 值, 说明海尾湾浮游植物主要受硅、氮元素以及海水 pH 值的影响。结果表明, 海尾湾浮游植物群落结构与水体营养盐密切相关, 应加强海尾湾陆源污水的排放管理, 保护好海尾湾的近海环境。

关键词: 海尾湾; 浮游植物; 群落结构; 优势种; 冗余分析
中图分类号: Q 178.1　　**文献标志码:** A　　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.2020.03.001

水生态环境是海洋生物赖以生存的基础, 而浮游植物是水环境中的重要组成部分, 其种类与群落结构的变化与水环境密切相关[1]。由于受到陆地和海洋的双重影响, 近岸海域的生态系统比较脆弱, 有毒有害微藻种类大量繁殖导致的赤潮, 常常会破坏渔业资源, 并危害人类健康, 带来严重的经济损失[2]。因此, 对海域中的浮游植物群落结构和水质状况进行调查研究, 有助于海域生态环境的保护和提前预警。我国有关海洋浮游植物的调查范围涉及渤海、南黄海、东海、南海及北部湾海域。据统计, 1959 ~ 2015 年, 渤海海域共发现浮游植物 170 余种, 优势种从角毛藻和圆筛藻为主演变为以具槽帕拉藻、海线藻及甲藻中的夜光藻和角藻为主[3]。近年来, 渤海海域包括渤海湾、莱州湾、天津、秦皇岛和曹妃甸等近岸海域的浮游植物均有调查记录[4 − 8]。2007 ~ 2017 年, 黄备等对南黄海海域的浮游植物进行了调查, 发现该海域共有浮游植物 371 种, 优势种以裸甲藻和柔弱拟菱形藻为主[9]。东海海域浮游植物资源调查主要集中在长江口、舟山海域、浙江沿海及福建东北部海域[10 − 13], 发现浮游植物群落结构与水温、盐度、溶解氧、悬浮物浓度及磷含量等密切相关。南海海域浮游植物调查则集中在南海北部和南沙群岛[14 − 19], 优势种以中肋骨条藻、柔弱拟菱形藻、菱形海线藻和角毛藻等为主。海南岛近岸海域浮游植物调查海域包括铺前湾、黎安湾和清澜港红树林海域[20 − 22]。海尾湾位于海南岛西部、昌江黎族自治县境内, 为国家一级渔港, 其渔业资源丰富, 是海南省重点渔港之一。目前尚未见有关海尾湾浮游植物群落结构及水质状况, 以及休渔期对浮游植物及水质的影响的研究报道, 因此, 笔者于 2018 年 7 月和 9 月, 对海南岛海尾湾近岸海域网采浮游植物种类、群落结构、优势种种类、多样性特征和水质进行了调查、分析, 旨在为海南岛海尾湾近岸

收稿日期: 2019 − 04 − 29　　**修回日期:** 2020 − 01 − 02
基金项目: 农业农村部财政专项(NFZX2018); 中国热带农业科学院生物技术研究基本业务费(1630052016009)
第一作者: 李亚军(1980−), 女, 博士, 副研究员. 研究方向: 藻类生理生化及分子生物学. E-mail: liyajun@itbb.org.cn
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

海域生态系统保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查范围及站位设置 在海南岛海尾湾附近海域(108°45′15.44″~108°48′31.19″E; 19°24′13.26″~19°26′21.38″N)共设置 12 个调查站位, 于 2018 年 7 月和 9 月进行 2 个航次的调查。各调查站位的站位示意图见图 1。站位设置主要参考《海洋调查规范》(GB12763.9—2007), 并结合海尾湾实际的地理特征和水文环境。

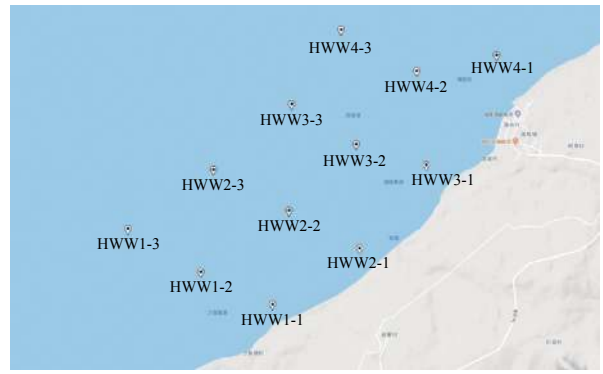

图 1 海南岛海尾湾浮游植物调查站位示意图

Fig. 1 The sketch map of sampling stations in Haiwei Bay

1.2 海尾湾附近海域各调查站位环境参数 现场测定调查站位的气温、水温、pH 值、盐度、溶解氧、电导率、透明度和水深(表 1)。海尾湾夏季平均气温 30.3 ℃, 水温平均 28.9 ℃; 秋季气温平均 28.8 ℃, 水温平均 26.8 ℃。各调查站位的 pH 值夏季低于秋季, 夏季为 7.5~7.8, 秋季为 8.1~8.2。电导率秋季稍高于夏季, 秋季为 21.12, 夏季为 20.93。盐度春季稍高于秋季, 差异不明显, 溶解氧夏季稍低于秋季, 夏季平均值 5.63 mg·L^{-1}, 秋季溶解氧平均含量为 6.56 mg·L^{-1}。

表 1 2018 年海尾湾附近海域各调查站位环境参数

Tab. 1 Environmental parameters of seawater in Haiwei Bay in 2018

地点 Sampling station	气温/℃ Temperature		水温/℃ Water temperature		pH		电导率 Conductivity		盐度/% Salinity		溶解氧/(mg·L^{-1}) Dissolved oxygen		水深/m Depth of water
	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋	夏	秋	
1-1	31	28	28.2	26.5	7.5	8.2	21.1	2.08	3.3	3.0	4.09	6.4	3.0
1-2	29	28	28.1	26	7.6	8.1	21.2	21.4	3.4	3.1	5.70	6.6	8.6
1-3	29	28	28.5	26.5	7.6	8.2	21.1	21.2	3.5	3.2	6.14	7.0	16.8
2-1	32	29.5	29	27	7.5	8.2	20.9	21.1	3.2	3.0	4.30	6.5	3.2
2-2	31	30	29.1	27	7.6	8.2	21	21.3	3.4	3.1	5.41	7.5	8.3
2-3	29	27	28.9	26.5	7.6	8.2	21.1	21.3	3.5	3.2	6.29	6.2	15.0
3-1	32	30	29.1	27.5	7.6	8	20.8	20.7	3.2	2.8	5.16	5.0	4.0
3-2	31	30	29	27.5	7.5	8.2	20.9	21.2	3.2	3.1	5.83	6.8	8.5
3-3	28	27	28.8	26	7.6	8.1	21	21.5	3.5	3.1	6.47	6.1	18.0
4-1	33	30	29.8	28	7.6	8.1	20.5	20.9	3.0	3.1	5.67	6.2	4.0
4-2	33	31	29.7	28	7.6	8.2	20.5	20.7	3.1	3.1	5.90	7.4	12.5
4-3	28	26.5	29.1	25.5	7.8	8.2	21	21.3	3.35	3.2	6.60	7.1	16.0

1.3 采样与分析方法 按《海洋调查规范》(GB 17378.7—2007)中的有关浮游植物调查的规定进行采样。利用浅水Ⅲ型浮游生物网采(网长 140 cm, 网口内径 37 cm, 网口面积 0.1 m^2)样, 拖网方式为底—表垂直拖网。样品用甲醛溶液固定, 最终浓度为 5%。样品静止、浓缩后, 取 0.1 mL 均匀样品至于计数框中, 在光学显微镜下全片观察, 计数两片取其平均值。

1.4 浮游植物群落特征指数评价方法 用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J')、优势度(Y)和丰富度指数(d)对浮游植物群落结构特征进行分析。计算公式如下:

$$Y = Pi \times fi,$$

式中, $Pi=ni/N$, ni 为第 i 种的个体数量; N 为全部物种的个体数; fi 为第 i 种的出现频率; 优势度≥0.02 的种

类作为该海域的优势种类。

Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式如下[23]:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \log 2 P_i ,$$

式中, H'≥3.0 表明生境指数优良; 2≤H'<3.0 为一般; 1≤H'<2.0 为差; H'<1.0 为极差。

Pielou 均匀度指数(J')计算公式如下[24]:

$$J = H' / Hmax ,$$

式中, $Pi = ni/N$; $H\max = \log_2 S$, 为最大多样性指数; ni 为第 i 种的个体数量; N 为全部物种的个体数; fi 为某种生物的出现频率/%; S 表示样品中的总种类数。

Margalef 丰富度指数计算公式如下[25]:

$$d = (S-1)/\log_2 N ,$$

式中, d 表示丰富度指数; S 表示样品中的总种类数; N 表示全部物种的个体数。

1.5　水质测定及分析　水质与浮游植物同步采集, 参考《海洋调查规范》(GB12763.9—2007), 分层采样后混合, 取 4 L 水保存于 4 ℃, 采样后第 2 天开始进行水质各项指标测定。利用哈希 DR3900 多参数水质检测仪来分析海水样品中的总氮、总磷、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和 COD 含量, 具体操作按照试验说明进行。活性硅酸盐含量的测定方法为硅钼黄分光光度法(FHZDZHS0035)。海水经 45 μm 孔径的 Whatman 滤膜过滤, 滤膜上的浮游植物经丙酮萃取, 利用分光光度计测定叶绿素 a 的含量, 叶绿素 a 指标代表浮游植物生物量, 数值越大, 则表明浮游植物生物量越高。采用软件 Canoco 5.0 来分析浮游植物群落与各环境因子之间的关系。优势度排名前 20 的物种数据和环境数据均经过 lg(X+1)转换。去趋势对应分析(DCA)结果显示夏、秋季 4 个排序轴中的梯度长度数值分别为 0.17 ~ 0.60 和 0.43 ~ 0.88, 最大值均≥2, 应选择基于线性模型的排序方法, 因此浮游植物与环境因子的关系研究选择冗余分析(RDA)。

2　结果与分析

2.1　浮游植物种类组成　夏季航次采集的样品中共鉴定出浮游植物 3 门 119 种, 秋季航次共鉴定出浮游植物 3 门 114 种。其中, 硅藻门种类分别为 102 种和 92 种, 占浮游植物总种类数的 85.71% 和 80.70%; 其次为甲藻门, 夏秋两季航次分别鉴定出 13 种和 18 种, 占总种类数的 10.93% 和 15.79%; 另外, 还分别鉴定出 4 种蓝藻占总种类数的 3.36%, 各站位种类分布见图 2。夏秋两季航次的浮游植物种类均以硅藻为主, 甲藻次之, 与夏季航次相比, 秋季航次甲藻含量相对增加, 而硅藻种类有所下降。

2.2　浮游植物密度分布　夏秋两季航次的调查中, 硅藻细胞密度明显高于其他藻类, 为主要优势类群。夏季航次硅藻密度占总密度的 98.39%, 秋季航次硅藻占 69.65%。夏季航次 12 个调查站位浮游植物的细胞平均密度为 6.151×10^6 个·m^{-3}; 秋季航次细胞密度介于(0.14 ~ 1.38)×10^6 个·m^{-3} 之间, 平均密度为 0.54×10^6 个·m^{-3}(图 3), 远低于夏季调查区间的细胞密度水平。秋季调查中, 除站位“3-1”和“4-1”外, 其他

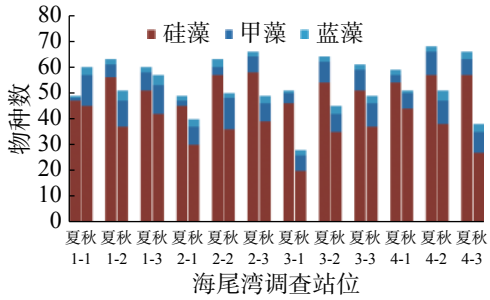

图 2　2018 年海尾湾附近海域各站位浮游植物物种数

Fig. 2　Number of phytoplankton species in the sampling stations in Haiwei Bay in 2018

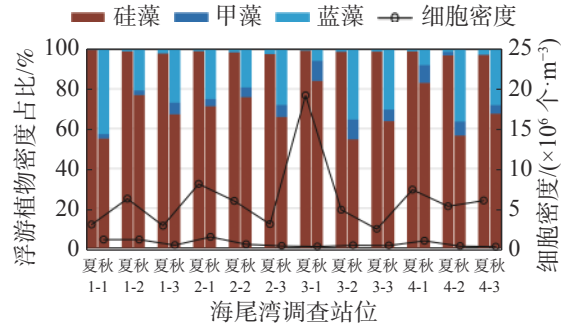

图 3　2018 年海尾湾附近海域各调查站位网采浮游植物密度

Fig. 3　Cell density of phytoplankton in Haiwei Bay in 2018

站位细胞密度均以蓝藻次之(图 3)。

2.3 浮游植物优势种 优势种的确定由优势度决定,优势度≥0.02 的种类作为该海域的优势种类。夏季调查期间,该海域浮游植物优势种有 7 种分别是旋链角毛藻、柔弱拟菱形藻、钟形中鼓藻、尖刺拟菱形藻、角毛藻属、笔尖根管藻和拟旋链角毛藻(表 2);其中旋链角毛藻是第 1 优势种,优势度为 0.388,平均密度为 2.39×10^6 个·m^{-3}(表 2)。秋季调查期间,该海域浮游植物优势种共 10 种,分别为旋链角毛藻、并基角毛藻、平滑角毛藻、窄隙角毛藻、角毛藻属、变异辐杆藻、菱形海线藻、尖刺拟菱形藻、汉氏束毛藻、束毛藻属(表 2)。束毛藻属为第 1 优势种,优势度为 0.202,平均细胞密度为 0.11×10^6 个·m^{-3}(表 2)。旋链角毛藻、尖刺拟菱形藻和角毛藻属种类在海尾湾夏秋两季航次均为优势种类。

表 2 2018 年春季海尾湾附近海域浮游植物优势种

Tab. 2 Dominant species of phytoplankton in Haiwei Bay in 2018

航次 Sampling season	优势种 Dominant species	平均密度 Average cell density/ ($\times10^6$ 个·m^{-3})	占总密度比例 Percentage of total cell density /%	出现频率 Frequency /%	优势度 Dominance
夏季	旋链角毛藻	2.39	38.78	100	0.388
	柔弱拟菱形藻	1.36	22.13	100	0.221
	钟形中鼓藻	0.31	5.07	100	0.051
	尖刺拟菱形藻	0.29	4.69	100	0.047
	角毛藻属	0.29	4.65	100	0.047
	笔尖根管藻	0.21	3.34	100	0.033
	拟旋链角毛藻	0.16	2.53	100	0.025
秋季	束毛藻属	0.11	20.24	100	0.202
	菱形海线藻	0.06	10.38	100	0.104
	旋链角毛藻	0.06	11.32	75	0.085
	角毛藻属	0.05	9.03	83.3	0.075
	尖刺拟菱形藻	0.02	3.22	100	0.032
	变异辐杆藻	0.02	3.29	91.67	0.03
	并基角毛藻	0.02	2.48	91.67	0.023
	汉氏束毛藻	0.02	2.41	91.67	0.022
	窄隙角毛藻	0.02	2.40	91.67	0.022
	平滑角毛藻	0.02	2.26	91.67	0.021

2.4 多样性指数、均匀度与丰富度指数 结果(表 3)表明,夏季海尾湾海域浮游植物的多样性指数和均匀度平均值分别为 3.27 和 0.56。丰富度指数范围在 4.88 ~ 5.57 之间,平均为 5.30。秋季该海域浮游植物的多样性指数和均匀度平均值分别为 4.19 和 0.76。丰富度指数范围在 4.75 ~ 6.03 之间,平均为 5.52。

2.5 海尾湾附近海域水质状况分析 对海尾湾海域 12 个站点水体中的总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、COD、活性硅酸盐和叶绿素 a 含量进行了检测。结果(图 4)表明,各调查站位总氮含量变化趋势一致,夏季航次平均值 5.74 mg·L^{-1},稍高于秋季航次的 5.08 mg·L^{-1}。硝酸盐氮含量和亚硝酸盐氮含量夏秋两季航次的变化无明显规律,随调查站位的不同而不同。秋季航次总磷、活性硅酸盐和叶绿素 a 的含量均高于夏季航次,但 COD 含量夏季航次高于秋季航次。

表 3　2018 年海尾湾附近海域各站位浮游植物多样性指数、均匀度和丰富度指数

Tab. 3　Diversity, evenness and richness of phytoplankton in Haiwei Bay in 2018

站位 Sampling station	多样性指数 Shannon-Wiener diversity index		均匀度指数 Pielou evenness index		丰富度指数 Margelef richness index	
	夏	秋	夏	秋	夏	秋
1-1	3.59	3.58	0.64	0.61	5.49	4.75
1-2	3.09	4.20	0.52	0.74	5.23	4.97
1-3	3.60	4.64	0.61	0.80	5.51	5.33
2-1	3.21	3.79	0.57	0.71	5.14	4.81
2-2	3.41	4.38	0.57	0.78	5.25	5.23
2-3	3.62	3.91	0.60	0.70	5.48	5.33
3-1	3.19	4.18	0.56	0.87	4.88	6.03
3-2	3.56	4.29	0.59	0.78	5.32	5.16
3-3	3.30	4.31	0.56	0.77	5.57	5.25
4-1	2.32	4.55	0.39	0.80	5.17	5.24
4-2	3.29	4.28	0.54	0.75	5.29	5.43
4-3	3.11	4.16	0.51	0.79	5.24	5.52
平均值	3.27	4.19	0.56	0.76	5.30	5.52

2.6　浮游植物群落结构与环境因子的关系　海尾湾浮游植物与环境因子的 RDA 分析结果表明(表 4), 夏季航次前两个排序轴的特征值分别为 0.549 和 0.220, 累计解释了 76.81% 的物种变化信息; 秋季航次前两个排序轴的特征值分别为 0.276 和 0.206, 累积解释了 48.21% 的物种变化信息。两季航次环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数均大于 0.95, 较好地反映了物种与环境之间的关系。

利用向前引入法逐步筛选环境因子, 在夏季航次调查结果中, 13 个环境因子中有 3 个环境因子的检验结果达到显著水平, 分别是活性硅酸盐(SiO_4)(F=3.6, P=0.014), 亚硝态氮(NO_2-N)(F=3.3, P=0.046)和总氮(TN)(F=3.1, P=0.05); 秋季航次的调查结果中, 仅 pH 达到显著水平(F=2.2, P=0.034)。说明这 4 个环境因子是影响海尾湾浮游植物群落结构的主要环境因子。

浮游植物与环境因子的 RDA 排序图表明(图 5), 浮游植物物种主要集中在第 3 象限, 春季浮游植物优势种如旋链角毛藻和柔弱菱形藻等均与活性硅酸盐、硝态氮、COD 和水温呈正相关, 与亚硝态氮、总氮、电导率和盐度呈负相关。拟旋链角毛藻与溶解氧和总磷呈负相关, 其余 6 个优势种则与之相反。其余优势度较高的藻种如多变鱼腥藻、薄壁几内亚藻和菱形海线藻等与环境因子的关系与旋链角毛藻类似, 除了斯氏根管藻和平滑角毛藻与盐度负相关。并基角毛藻和菱形海线藻与亚硝酸盐、COD 和电导率呈负相关, 与其余环境因子呈正相关。奇异棍形藻则与所测环境因子均呈负相关关系。秋季浮游植物优势种与环境因子的关系有明显变化, 可分为 3 类, 第 1 类包括优势种束毛藻和菱形海线藻等, 该类物种与 pH、溶解氧、电导率和硝态氮呈正相关关系, 与 COD、温度、总磷、总氮、氨氮和活性硅酸盐呈负相关关系。第 1 类浮游植物包括汉氏束毛藻等, 与 pH、溶解氧、电导率、硝态氮和 COD 呈正相关关系, 与温度、总磷、总氮、氨氮和活性硅酸盐呈负相关关系。第 3 类物种包括平滑角毛藻等, 该类浮游植物与环境因子的关系与第 2 类相反, 与 pH、溶解氧、电导率、硝态氮和 COD 呈负相关关系, 与温度、总磷、总氮、氨氮和活性硅酸盐呈正相关关系。

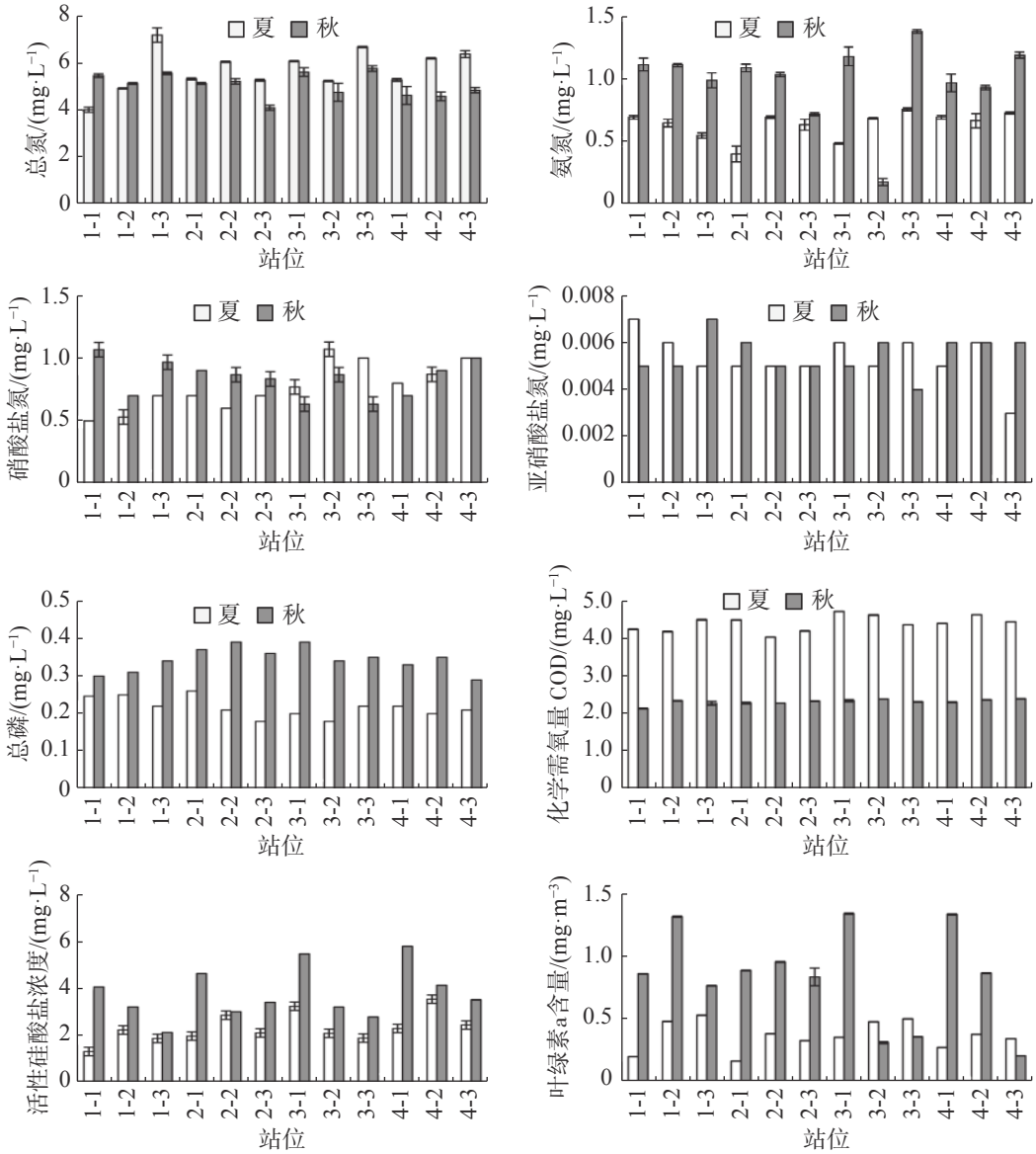

图 4 2018 年海尾湾附近海域各调查站位的水质测定结果

Fig. 4 Sea water quality parameters in Haiwei Bay in 2018

表 4 海尾湾浮游植物与环境因子的 RDA 分析结果

Tab. 4 Redundancy analysis (RDA) of phytoplankton and environmental factors in Haiwei Bay

	轴 Axis	特征值 Eigenvalue	物种−环境相关性 Pseudo-canonical correlation	累积变量百分比/% Percentage of cumulative variables		总特征值 Sum of all eigenvalues	所有典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues
				物种数据 Explained variation (cumulative)	物种环境相关性 Explained fitted variation (cumulative)		
夏季	轴1	0.549	0.999 8	54.85	55.24	1	0.99
	轴2	0.220	0.999 5	76.81	77.35		
	轴3	0.151	0.999 7	91.91	92.56		
	轴4	0.029	0.953 9	94.81	95.48		
秋季	轴1	0.276	0.999 8	27.63	28.90	1	0.96
	轴2	0.206	0.992 3	48.21	50.43		
	轴3	0.189	0.981 0	67.14	70.23		
	轴4	0.102	0.982 3	77.34	80.89		

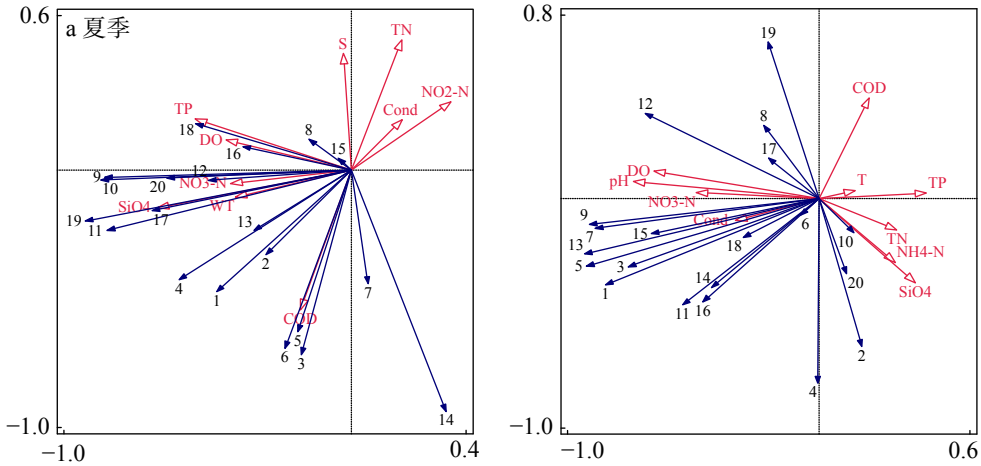

图 5　海尾湾夏季(a)和秋季(b)浮游植物与环境因子的 RDA 排序图

TN: 总氮; TP: 总磷; NO_2-N: 亚硝酸盐氮; NO_3-N: 硝酸盐氮; NH_4-N: 氨氮; COD: 化学需氧量; SiO_4: 活性硅酸盐含量; T: 气温; WT: 水温; S: 盐度; DO: 溶解氧; Cond: 电导率。a 夏季浮游植物与环境因子排序图中 1: 旋链角毛藻; 2: 柔弱拟菱形藻; 3: 钟形中鼓藻; 4: 尖刺拟菱形藻; 5: 角毛藻属; 6: 笔尖根管藻; 7: 拟旋链角毛藻; 8: 细弱海链藻; 9: 并基角毛藻; 10: 中肋骨条藻; 11: 多变鱼腥藻; 12: 奇异棍形藻; 13: 环纹娄氏藻; 14: 厚刺根管藻; 15: 菱形海线藻矮小变种; 16: 斯氏根管藻; 17: 薄壁几内亚藻; 18: 平滑角毛藻; 19: 菱形海线藻; 20: 劳氏角毛藻。b 秋季浮游植物与环境因子排序图中 1: 束毛藻属; 2: 旋链角毛藻; 3: 菱形海线藻; 4: 角毛藻属; 5: 变异辐杆藻; 6: 尖刺拟菱形藻; 7: 并基角毛藻; 8: 汉氏束毛藻; 9: 窄隙角毛藻; 10: 平滑角毛藻; 11: 笔尖根管藻; 12: 红海束毛藻; 13: 双凹梯形藻; 14: 奇异棍形藻; 15: 中肋骨条藻; 16: 梭状新角藻; 17: 圆筛藻; 18: 叉状新角藻; 19: 多变鱼腥藻; 20: 膜状舟形藻。

Fig. 5　RDA biplot of phytoplankton and environmental factors in Haiwei Bay in summer (a) and autumn (b)

TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; NO_2-N: nitrite; NO_3-N: nitrate; NH_4-N: ammonia nitrogen; COD: chemical oxygen demand; SiO_4: active silicate; T: temperature; WT: water temperature; S: salinity; DO: dissolved oxygen; Cond: conductivity. In the RDA biplot of phytoplankton and environment factors in summer 1, *Chaetoceros curvisetus*; 2, *Pseudo-nitzschia delicatissima*; 3, *Bellerochea orologicalis* Stosch; 4, *Pseudo-nitzschia pungens*; 5, *Chaetoceros sp.*; 6, *Rhizosolenia styliformis*; 7, *Chaetoceros pseudocurvisetus*; 8, *Thalassiosira subtilis*; 9, *Chaetoceros decipiens*; 10, *Skeletonema costatum*; 11, *Anabaena variabilis*; 12, *Bacillaria paradoxa* Gmelin; 13, *Lauderia annulata* Cleve; 14, *Rhizosolenia crassispina* Schroder; 15, *Thalassionema nitzschioides var. parva*; 16, *Rhizosolenia stolterfothii* Peragallo; 17, *Guinardia flaccida (Castracane) Peragallo*; 18, *Chaetoceros laevis Leuduger-Formorel*; 19, *Thalassionema nitzschioides*; 20, *Chaetoceros lorenzianus*. Among the RDA biplot of phytoplankton and environment factor in autumn: 1, *Trichodesmium* sp.; 2, *Chaetoceros curvisetus*; 3, *Thalassionema nitzschioides*; 4, *Chaetoceros* sp.; 5, *Bacteriastrum varians*; 6, *Pseudo-nitzschia pungens*; 7, *Chaetoceros decipiens*; 8, *Trichodesmium hildebrandtii*; 9, *Chaetoceros affinis*, 10, *Chaetoceros laevis Leuduger-Formorel*; 11, *Rhizosolenia styliformis*; 12, *Trichodesmium erythraeum*; 13, *Climacodium biconcavum*; 14, *Bacillaria paradoxa* Gmelin; 15, *Skeletonema costatum*; 16, *Ceratium fusus*; 17, *Coscinodiscus sp.*; 18, *Ceratium furca*; 19, *Anabaena variabilis*; 20, *Navicula membranacea*.

3　讨　论

在夏秋两季对海南岛海尾湾近岸海域浮游植物和水质进行了调查, 共发现浮游植物 110 余种, 主要以硅藻为主, 其次为甲藻和蓝藻, 这与历年南海浮游植物种类调查结果相符[26]。夏秋两季硅藻的细胞密度占比分别达到 98.4% 和 69.7%, 为主要优势类群。在秋季调查期间, 除站位 3-1 和 4-1 外, 蓝藻细胞密度占比平均达到 29.3%, 为第 2 优势类群, 蓝藻种类主要为束毛藻。束毛藻是广泛分布在寡营养盐海域中的固氮蓝藻[23], 其中汉氏束毛藻为南海北部近岸海域的常见物种[24]。温度是影响束毛藻分布的重要因素, 可能海尾湾秋季水温更适于束毛藻生长, 从而导致蓝藻细胞密度大于甲藻, 成为第 2 优势类群。

夏季海尾湾调查海域共有 7 种优势种, 其中旋链角毛藻为第 1 优势种, 其次为柔弱拟菱形藻。旋链角毛藻为广温性沿岸种类, 是中国近海中比较常见的赤潮藻种[25, 27], 但海尾湾在调查期间并未发现赤潮现象, 表明旋链角毛藻的细胞丰度还不足以引起赤潮, 但旋链角毛藻细胞粒径较小, 生长速度快, 往往是水体富营养化的表征[28]。秋季调查海域共发现 10 种优势藻种, 其中第 1 优势种为束毛藻属, 束毛藻在南海海域广泛分布, 是海洋中重要的固氮蓝藻。海尾湾浮游植物多样性指数均大于 3, 均匀度指数大于 0.3, 丰富度指数大于 5, 表明海尾湾浮游植物种类多样性高, 群落结构稳定[29]。

水质调查结果表明，总体上秋季调查海域中的氨氮、总磷、活性硅酸盐和叶绿素 a 的含量均高于夏季，但是夏季的化学需氧量高于秋季。而秋季浮游植物细胞密度低于夏季。氮磷是浮游植物生长必须的营养元素，当海水中的营养盐充足时，硅的含量可促进硅藻的细胞生长。有研究表明，除单个营养元素的含量之外，营养盐中的氮磷比、氮硅比和硅磷比的高低更能影响浮游植物对营养盐的吸收，从而影响浮游植物的群落结构[30]。较低的氮磷比和氮硅比可能是秋季浮游植物细胞密度低于夏季的原因。海尾湾夏季调查海域化学需氧量（COD）比秋季高，COD 是表征水体有机污染的一项重要指标，COD 越高表明水体受有机物的污染越严重，说明夏季调查海域水质比秋季稍差，但夏秋两季的水质均符合国家 I 类海水水质标准。

夏季影响海尾湾浮游植物的主要环境因子有活性硅酸盐、亚硝态氮和总氮。优势度排名前 20 的浮游植物密度均与海水中亚硝态氮含量呈显著负相关，19 种浮游植物密度与活性硅酸盐和总氮含量呈显著正相关。硅和氮元素是浮游植物生长非常重要的元素，在本研究中则是海尾湾浮游植物生长的限制因子。已有研究表明南海浮游植物群落结构的主要影响因子为硅酸盐和总氮[15, 18]。秋季影响海尾湾浮游植物的主要因子是海水的 pH。在对多个海域如珠江口南沙海域和大亚湾等的的浮游植物调查中，发现 pH 是浮游植物群落结构的重要影响因子[14, 16]。由此可见，海尾湾环境中的营养盐和 pH 值的变化是影响浮游植物群落演变的主要因子。

海尾湾调查海域秋季海水生态环境较夏季差，浮游植物细胞密度也低于夏季，且蓝藻密度高于夏季，成为第 2 优势类群。另一方面，水质中的 N, P 等元素的含量秋季均高于夏季。陆源生活污水的排放是近岸海湾海水富营养化的主要因素，因此，应加强海尾湾陆源生活污水的排放管控，保护好海港的生态环境。

参考文献:

[1] 粟丽, 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] 富砚昭, 韩成伟, 许士国. 近岸海域赤潮发生机制及其控制途径研究[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 146 − 152.
[3] 栾青杉, 康元德, 王俊. 渤海浮游植物群落的长期变化[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(4): 9 − 18.
[4] 王瑜, 刘录三, 朱延忠, 等. 渤海湾近岸海域春秋季网采浮游植物群落特征[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 564 − 570.
[5] 于湖洋, 崔磊, 潘霖, 等. 秦皇岛海域浮游植物的群落结构特征[J]. 海洋科学, 2016, 40(5): 66 − 75.
[6] 孙慧慧, 刘西汉, 孙西艳, 等. 莱州湾浮游植物群落结构与环境因子的时空变化特征研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 662 − 669.
[7] 张彭如雁, 李德亮, 戴媛媛, 等. 天津近岸海域浮游植物群落结构特征[J]. 海洋湖沼通报, 2016, 6: 53 − 59.
[8] 梁淼, 孙丽艳, 姜倩, 等. 曹妃甸近岸海域网采浮游植物群落结构特征及其与环境因子的相关性研究[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(2): 252 − 265.
[9] 黄备, 魏娜, 唐静亮, 等. 南黄海 2007—2017 年浮游植物群落结构及多样性变化[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 137 − 148.
[10] 高月鑫, 江志兵, 曾江宁, 等. 春季长江口北支邻近海域浮游植物群落及其影响因子[J]. 海洋通报, 2018, 37(4): 430 − 439.
[11] 汤易上, 刘强, 程传东, 等. 舟山东极海域浮游植物群落结构特征分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2715 − 2722.
[12] 陈丹琴, 叶然, 魏永杰, 等. 三门湾浮游植物群落结构与环境因子的关系研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 70 − 75.
[13] 唐娅菲, 王金辉, 程宏, 等. 三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 522 − 530.
[14] 粟丽, 黄梓荣, 罗艳. 大亚湾夏、冬浮游植物群落结构与环境因子[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(2): 284 − 293.
[15] 刘陈, 魏南, 王庆, 等. 广东汕头南澳岛近岸海域浮游植物群落结构与环境特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1091 − 1098.
[16] 徐姗楠, 杨玉滔, 粟丽, 等. 珠江口南沙海域浮游植物群落结构特征[J]. 南方水产科学, 2017, 13(4): 26 − 33.
[17] 李冬融, 戴鑫烽, 陆斗定, 等. 2012 年夏季南海西北部网采浮游植物群落结构[J]. 海洋学研究, 2014, 32(3): 87 − 96.
[18] 薛冰, 孙军, 李婷婷. 2014 年夏季南海北部浮游植物群落结构[J]. 海洋学报, 2016, 38(4): 54 − 65.
[19] 戴明, 刘华雪, 廖秀丽, 等. 初秋南沙群岛海域网采浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3553 − 3560.
[20] 殷安齐, 王兴华. 海南岛铺前湾浮游植物群落结构初步研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(2/3): 103 − 112.
[21] 王超超, 陈新, 班贵媛, 等. 海南黎安湾浮游植物群落特征及其对环境因子的响应[J]. 热带生物学报, 2016, 7(2): 177 − 184.
[22] 于一雷, 郭菊兰, 武高洁, 等. 清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 102 − 110.
[23] 丁昌玲, 孙军, 薛冰. 冬夏季南海西部固氮蓝藻[J]. 海洋学报, 2016, 38(4): 84 − 94.
[24] 丁昌玲. 黄海、东海和南海海域蓝藻生物量及其时空分布[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.

[25] 黄海燕, 杨翼, 杨璐, 等. 2004—2015 年夏季渤海湾生态监控区网采浮游植物变化研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(1): 115－128.
[26] 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.
[27] 戴红, 邱茂福, 杨毕铖, 等. 闽江口以南海域夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 渔业研究, 2016, 38(1): 56－66.
[28] 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.
[29] 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.
[30] 杨波. 深圳西部沿岸排海污水营养盐的转化及其对海水浮游植物的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.

A Survey of Phytoplankton Community Structure and Seawater Quality in the Seawaters near Haiwei Bay, Hainan Province

LI Yajun, WANG Xianming, CHENG Xiansong, WEI Mengzhi,
LI Jiangyue, ZHU Weiju, DENG Xiaodong
(The Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/ Hainan Key Laboratory for Research and Utilization of Functional Components of Marine Bioresources, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: Haiwei Bay is one of the important fishing ports in Hainan Province. Phytoplanton and sea water were sampled in 12 sampling stations in the seawaters near Haiwei Bay in July (summer) and September (autumn), 2018 to analyze the structure of phytoplankton community and the quality of seawater which had important effects on fishery resources. The results showed that there were a total number of 119 species of phytoplankton identified in July, and a total number of 114 species identified in September, in which diatoms and dinoflagellates were predominant in the species composition and the cell abundance. There were 7 and 10 dominant species in July and September, respectively. Interestingly, *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros sp* and *Pseudo-nitzschia pungens* were dominant both in July and September. The average cell density was 6.15×10^6 cells·m^{-3} in July, which was 10 times more than that in September. The seawaters in Haiwei Bay was rich in phytoplankton species. The average Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef diversity index were 5.3, 3.27, 0.56 in July, respectively, and 5.52, 4.19, 0.76 in September, respectively. All these indexes showed that the ecological environment in the seawaters was good. The redundancy analysis showed that the phytoplankton were positively significantly correlated with reactive silicate and total nitrogen, and negatively significantly with nitrite in July, while the main factor affecting the phytoplankton was pH in September, indicating that the main environmental factors for phytoplankton were silicate, total nitrogen and pH in the seawaters. The results showed the structure of phytoplankton community in Haiwei Bay was closely correlated with the seawater nutrients.

Keywords: Haiwei Bay; phytoplankton; community structure; dominant species; RDA analysis

(责任编辑: 钟云芳)