

清澜港近岸海湾春秋两季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

曾茹, 李亚军, 何金曼, 黄晓晴, 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, 海南海口 571101)

摘要 [目的]了解清澜港近岸海湾浮游植物的群落结构特征和水质环境因子之间的关系。[方法]于2019年4月和9月对清澜港近岸海湾12个站位的浮游植物进行网采取样调查。[结果]春季记录浮游植物共40属76种, 秋季共鉴定出浮游植物35属62种, 其中硅藻门和甲藻门种类组成占优势, 主要优势种有中肋骨条藻和热带骨条藻。春季多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均分别为2.14、0.53、1.65; 秋季多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均分别为1.71、0.45、1.12。典型冗余RDA分析结果显示, 春季水温、COD、氨氮和总磷是影响浮游植物群落组成的最主要因素; 而秋季盐度、电导率和pH对浮游植物的群落结构影响最大, 水质方面, 氨氮、总氮和总磷是浮游植物的显著影响因子。[结论]该研究为流域内的水生生物资源利用和水环境管理提供参考。

关键词 清澜港; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 典型冗余分析

中图分类号 Q 948.8 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)10-0077-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.10.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Characteristics of Phytoplankton Community Structure in the Coastal Bay of Qinglan Port in Spring and Autumn and Its Relationship with Environmental Factors

ZENG Ru, LI Ya-jun, HE Jin-man et al (Institute of Tropical Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Hainan Provincial Key Laboratory of Marine Biological Resources Research and Utilization, Haikou, Hainan 571101)

Abstract [Objective] To understand the relationship between the community structure characteristics of phytoplankton and the water quality environmental factors in the coastal bay of Qinglan Port. [Method] This study conducted a sampling survey of phytoplankton at 12 stations in the coastal bay of Qinglan Port in April and September 2019. [Result] A total number of 76 species belonging to 40 genera in spring and that a total number of 62 species belonging to 35 genera in autumn, in which diatoms and dinoflagellates were predominant in the species composition and the cell abundance. The dominant species were *Skeletonema costatum* and *Skeletonema tropicum*. The average Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef diversity index were 2.14, 0.53, 1.65 in spring, respectively. And the average Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef diversity index were 1.71, 0.45, 1.12 in autumn, respectively. The results of RDA analysis showed that water temperature, COD, the content of ammonia nitrogen and total phosphorus content were the most important factors affecting the composition of phytoplankton community in spring, while salinity, electronic conductivity and pH had the greatest impact on phytoplankton community structure in autumn. Which in terms of water quality, the content of ammonia nitrogen, total nitrogen content and total phosphorus content were significant influencing factors of phytoplankton community structure in autumn. [Conclusion] This study provides reference for the utilization of aquatic biological resources and water environment management in the basin.

Key words Qinglan Port; Phytoplankton; Community structure; Environmental factors; RDA

浮游植物(Phytoplankton)作为水域生态系统的主要初级生产者,对水域生态系统的能量流动、物质循环以及维持生态系统的平衡具有极重要的作用^[1]。据报道,浮游植物可以有效地反映水体水质的状况,具有指示环境的作用,与水域生态环境的变化密切相关^[2]。浮游植物的群落组成能够快速且灵敏地反映水域生态系统环境的变化,同时,生态系统中水域环境的变化也会反过来导致浮游植物的群落组成和时空分布发生改变^[3]。目前,浮游植物的群落组成结构特征和水环境因子之间的关系已受到相关领域学者的广泛关注^[4-6]。因此,研究浮游植物的群落结构对研究水域生态系统以及水域的水体状况具有重要的意义。

清澜港位于海南文昌市东南部,是海南东部第一大港,水域宽阔,面积达12万m²,地处八门湾,是国家一级开放口岸港口、三沙市补给基地、文昌航天发射中心中转枢纽、海南

第二大渔港。清澜港近岸海湾多为居民居住点、渔民生活区,大量渔船停靠,酒店众多,大量工业、农业及生活污水排入港湾等,这些因素日渐影响清澜港的水体环境和水域生态系统的状况,导致其生物多样性的降低和水域生态系统功能的下降等^[7]。对于清澜港有关浮游植物的研究报道较少,主要集中在红树林地区浮游植物的研究上^[7],而清澜港近岸海湾有关浮游植物的相关研究鲜见报道。因此,该研究分春秋两季分别于2019年4月和9月对清澜港近岸海湾的浮游植物进行取样调查,旨在了解该水域浮游植物的种类组成、群落生物多样性特征及其与环境因子的关系,以期为流域内的水生生物资源利用和水环境管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查站位设置和采样方法 在清澜港海域设置12个站位,站位设置主要参考《海洋调查规范》(GB 12763—2007),站位地理坐标见表1,各站位采样分布见图1。浮游植物的采集、贮存、运输和预处理按照《海洋调查规范第9部分:海洋生态调查指南》(GB 17378.7—2007)规定的海洋生物调查规范方法进行。浮游藻类样品用浅Ⅲ型浮游生物网采样,由底到表方式垂直拖网一次采集样品,将采集到的藻类样品收集至1L标本瓶中。样品用终浓度为5%的甲醛固定后带回实验室,随后静置沉淀浓缩至50 mL,取0.1 mL浓缩样品在

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

作者简介 曾茹(1992—),女,海南海口人,硕士,从事微生物生理生化及开发研究。*通信作者,研究员,博士,硕士生导师,从事微生物生理生化及开发研究。

收稿日期 2020-09-28

CX41 生物显微镜下进行种类鉴定和计数。现场测定水温、pH、盐度、溶解氧、电导率、透明度、水深等指标。

表1 清澜港近岸海域浮游植物调查站位地理坐标

Table 1 Geographical positions of sampling stations in Qinglan Port

站位 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude
1-1	110°48'41.91"E	19°30'19.25"N
1-2	110°49'27.59"E	19°29'41.09"N
1-3	110°50'13.59"E	19°29'20.24"N
2-1	110°48'26.54"E	19°31'15.75"N
2-2	110°49'24.50"E	19°30'44.86"N
2-3	110°50'03.42"E	19°30'14.94"N
3-1	110°48'59.90"E	19°32'13.51"N
3-2	110°49'33.38"E	19°31'40.24"N
3-3	110°50'14.17"E	19°31'16.52"N
4-1	110°50'17.03"E	19°32'24.99"N
4-2	110°49'33.29"E	19°33'42.72"N
4-3	110°48'55.08"E	19°35'33.61"N

1.2 样品处理及分析 将样品带回室内,浓缩至 50 mL,在 CX41 生物显微镜下计数、鉴定。

Shannon-Wiener 多样性指数(H'),计算公式^[8]:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

Pielou 均匀度指数(J'),计算公式^[9]:

$$J' = H' / \log_2 S \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数(D'),计算公式^[10]:

$$D' = (S-1) / \ln N \quad (3)$$

优势种确定是由优势度决定的,计算公式^[11]:

$$Y = f_i \times P_i \quad (4)$$

式中, S 为种类数; $P_i = n_i / N$ (n_i 是第 i 个物种的个体数, N 是全部物种的个体数); f_i 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。

1.3 水质测定 利用哈希 DR3900 多参数水质检测仪对采集的海水进行分析,包括总氮、总磷、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和 COD 含量等水质参数,具体操作按试验说明进行。



图1 清澜港浮游植物采样站位分布

Fig.1 Distribution of phytoplankton sampling stations in Qinglan Port

2 结果与分析

2.1 样品采集地环境相关的理化数据 调查期间清澜港附近海域水温、盐度、pH、电导率、溶解氧如表 2 所示。春季样品在 4 月份采集,水温为 25.4~27.9 °C,平均水温为 26.7 °C;秋季样品在 9 月份采集,水温略高于春季,平均水温为 30.1 °C。春秋两季 pH 变化差异不大,平均 pH 分别为 8.2 和 8.3。春季电导率较为稳定,为 20.4~22.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$;秋季电导率变化较大,最低值出现在站位 4-3,为 16.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$,平均值为 23.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。调查海域海水盐度变化较大,春季平均值为 29.4‰,最高出现在站位 3-1,为 34.6‰,最低出现在站位 4-3,为 25.3‰;秋季平均盐度为 27.6‰,各站位盐度差异大,最

低出现在站位 4-3,为 18.3‰,最高为站位 3-1,为 29.6‰。12 个站位中,春季溶解氧除了站位 4-3 为 4.7 mg/L 外,其余均较为稳定,平均值为 5.3 mg/L;秋季溶解氧变化大,最高为站位 4-3,为 7.7 mg/L,最低为站位 3-2,为 5.7 mg/L,秋季溶解氧高于春季。12 个调查站位的水深和透明度差异大,最深水深有 950 m,透明度 150 m;最浅水深 150 m,透明度 30 m。

2.2 浮游植物种类组成 根据此次调查海域采集到的样品经显微镜鉴定,清澜港春季共鉴定出浮游植物 40 属 76 种,秋季共鉴定出浮游植物 35 属 62 种,分属于硅藻门、甲藻门、蓝藻门、黄藻门、绿藻门,其中春季硅藻门种类最丰富,为 61 种,占有物种的 84.7%,其次为甲藻门,为 12 种,占有物种

的 15.7%;硅藻门种类在秋季同样也占优势,为 42 种,占有物种的 67.7%,其次为甲藻门,为 13 种,占有物种的 20.9%。春季物种数多于秋季,春季鉴定出 1 种黄藻门种类,秋季未出现,秋季鉴定出 1 种绿藻门种类。春季 1-3 站位浮游植物种类最

丰富,共采集到 28 种属,1-2 站位种类最少,仅采集到 9 种属;秋季 1-2 站位浮游植物种类最丰富,共采集到 21 种属,2-2 站位种类最少,仅采集到 7 种属(图 2)。

表 2 2019 年春秋两季清澜港各调查站位环境参数

Table 2 Environmental parameters of survey stations in Qinglan Port in the spring and autumn of 2019

站位 Station	水温 Water temperature//℃		pH		电导率 Conductivity//μs/cm		盐度 Salinity//‰		溶解氧 DO mg/L	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
1-1	27.6	30.8	8.2	8.4	22.1	24.6	30.0	29.4	5.1	7.1
1-2	26.2	30.3	8.3	8.4	22.1	23.1	27.0	28.3	5.5	7.4
1-3	25.6	29.8	8.3	8.4	22.1	24.3	30.7	28.9	5.7	7.3
2-1	27.7	31.0	8.3	8.3	21.7	24.4	31.0	29.4	5.8	6.9
2-2	27.0	29.5	8.2	8.4	22.3	23.6	33.0	28.4	5.4	7.2
2-3	25.4	30.1	8.3	8.4	22.4	24.0	28.3	28.4	5.4	7.3
3-1	27.9	30.6	8.2	8.2	22.1	25.0	34.6	29.6	5.1	6.5
3-2	27.5	30.5	8.2	8.3	22.1	24.9	26.0	29.5	5.1	5.7
3-3	26.4	29.9	8.2	8.2	22.2	24.3	29.7	28.9	5.2	6.9
4-1	25.9	29.4	8.2	8.3	22.3	22.6	29.0	27.6	5.0	6.7
4-2	26.5	29.5	8.2	8.3	21.7	18.6	28.0	25.0	5.2	7.4
4-3	26.7	30.0	8.2	8.4	20.4	16.6	25.3	18.3	4.7	7.7

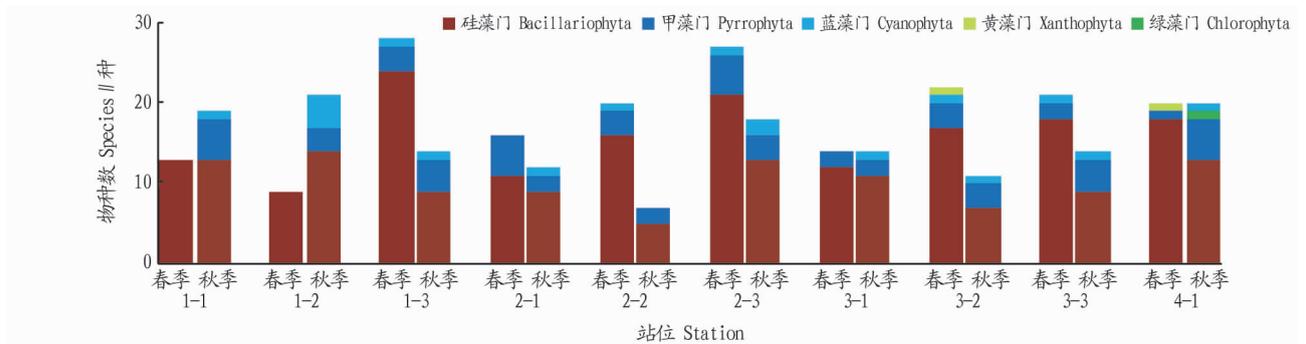


图 2 清澜港调查站位浮游植物物种数

Fig.2 Species of phytoplankton at the survey station of Qinglan Port

2.3 密度分布 从表 3 可以看出,清澜港春秋两季硅藻细胞 密度显著高于其他种类微藻,春秋两季细胞密度平均占总密

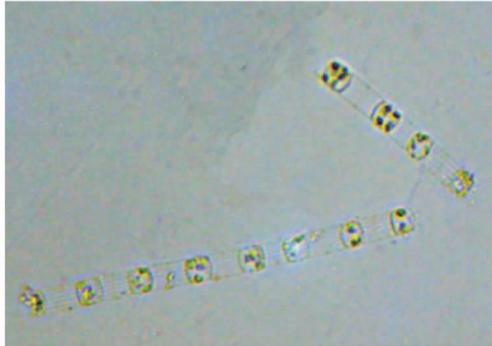
表 3 2019 年清澜港各调查站位浮游植物密度

Table 3 Phytoplankton density at each survey site of Qinglan Port in 2019

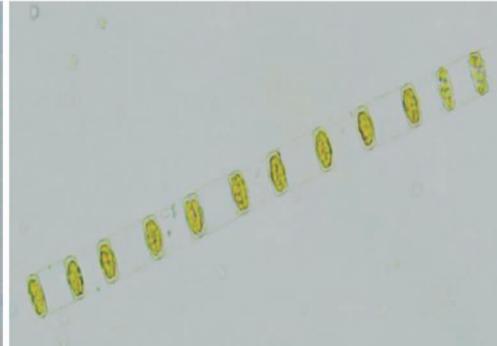
站位 Station	硅藻门占比 Proportion of bacillariophyta//%		甲藻门占比 Proportion of pyrrophyta//%		蓝藻门占比 Proportion of cyanophyta//%		黄藻门占比 Proportion of xanthophyta//%		密度 Density ×10 ³ cells/mL	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
1-1	100	99.74	0	0.11	0	0.15	0	0	7.4	1 615.3
1-2	100	98.31	0	1.58	0	0.12	0	0	4.9	115.0
1-3	98.76	97.77	0.89	0.87	0.36	1.35	0	0	18.7	42.8
2-1	92.54	99.59	7.46	0.14	0	0.27	0	0	18.2	434.4
2-2	98.39	99.88	1.49	0	0.11	0.12	0	0	45.1	60.9
2-3	97.94	97.88	0.61	1.80	1.44	0.32	0	0	23.0	175.8
3-1	99.85	99.17	0.15	0.33	0	0.50	0	0	713.7	198.7
3-2	99.94	97.70	0.04	1.02	0.01	1.28	0.01	0	2 397.7	117.0
3-3	99.82	92.33	0.11	6.51	0.07	1.16	0	0	1 046.2	25.8
4-1	99.68	99.70	0.01	0.25	0	0.04	0.31	0.01	173.5	788.1
4-2	96.40	98.91	3.36	0.47	0.24	0.62	0	0	3.9	128.4
4-3	99.25	85.15	0.75	14.68	0	0.17	0	0	8.2	647.5
平均 Mean	98.55	97.18	1.24	2.31	0.19	0.51	0.03	0	371.7	362.5

度的比例分别为 98.55% 和 97.18%。春秋两季 12 个调查站位浮游植物的细胞平均密度相当,分别为 371.7×10^3 和 362.5×10^3 cells/mL。春季站位 3-2 的细胞密度最高,为 $2\,397.7 \times 10^3$ cells/mL,根据浮游植物细胞密度评价水质的标准^[12],该站位水体为贫中营养;其次为站位 3-3,细胞密度为 $1\,046.2 \times 10^3$ cells/mL,水体属于贫中营养;最低为站位 4-2,为 3.9×10^3 cells/mL。秋季 3-3 站位细胞密度最低,为 25.8×10^3 cells/mL,细胞密度最高值出现在站位 1-1,为 $1\,615.3 \times 10^3$ cells/mL,水体属于贫中营养,秋季细胞密度较春季降低。

2.4 优势种 此次调查结果显示,清澜港调查海域的优势种只有 2 种,分别为中肋骨条藻和热带骨条藻(表 4 和图 3)。



中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*



热带骨条藻 *Skeletonema tropicum*

图 3 清澜港浮游植物优势种

Fig.3 Dominant species of phytoplankton in Qinglan Port

2.5 多样性指数、均匀度指数与丰富度指数 从表 5 可以看出,该海域春季多样性指数、均匀度指数和丰富度指数 3 个参数的平均数值分别为 2.21、0.53 和 1.65,秋季分别为 1.62、0.45、1.12。春季多样性指数最高值出现在站位 1-2,为 2.94,最低值出现在站位 3-2,为 0.71;高隆湾内的站位 3-1 和 3-3 多样性指数均低于 2.00,站位 3-2 的多样性指数低于 1.00;其余站位多样性指数均为 2.00~3.00。Shannon-Wiener 多样性指数为 0~1 时,水体为重污染;指数值为 1~3 时,为中度污染;指数值大于 3 时,为清污染或无污染^[12]。由此可见春

中肋骨条藻的优势度(Y)春秋两季分别为 0.52 和 0.38。热带骨条藻的优势度(Y)春秋两季分别为 0.10 和 0.37。说明 2019 年度清澜港存在一定的赤潮现象。

表 4 清澜港浮游植物优势种

Table 4 Dominant species of phytoplankton in Qinglan Port

季节 Season	种名 Specific name	细胞密度 Cell density cells/mL	P_i	f_i	Y
春季 Spring	中肋骨条藻	292 210	0.79	0.67	0.52
	热带骨条藻	48 440	0.13	0.75	0.10
秋季 Autumn	中肋骨条藻	142 000	0.38	1.00	0.38
	热带骨条藻	137 900	0.37	1.00	0.37

表 5 各站位浮游植物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数

Table 5 The diversity index, evenness index and richness index of phytoplankton at each station

站位 Station	多样性指数(H')		均匀度指数(J')		丰富度指数(D')	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
1-1	2.60	1.26	0.70	0.30	1.35	1.26
1-2	2.94	2.09	0.93	0.48	0.94	1.72
1-3	2.85	1.90	0.59	0.50	2.75	1.22
2-1	2.38	1.06	0.60	0.29	1.53	0.85
2-2	2.27	1.22	0.53	0.43	1.77	0.54
2-3	2.43	1.60	0.51	0.38	2.59	1.41
3-1	1.29	2.35	0.34	0.62	0.96	1.07
3-2	0.71	1.54	0.16	0.45	1.43	0.86
3-3	1.12	2.65	0.29	0.70	1.44	1.28
4-1	2.17	1.28	0.50	0.30	1.57	1.40
4-2	2.68	1.36	0.64	0.38	2.06	0.94
4-3	2.04	1.16	0.54	0.58	1.44	0.90
平均 Mean	2.21	1.62	0.53	0.45	1.65	1.12

2.6 清澜港各调查站位水质分析 从清澜港 12 个站位水体中总氮、总磷、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、化学需氧量含量检测结果(图 4)可以看出,清澜港调查海域春季海水总氮含量为 6.69~9.79 mg/L,平均值为 7.57 mg/L;秋季总氮含量为 5.52~8.05 mg/L,平均值为 6.82 mg/L。春季硝酸盐氮含量为 0.77~1.03 mg/L,平均值为 0.90 mg/L;秋季硝酸盐氮含量为 0.47~0.77 mg/L,平均值为 0.60 mg/L;春季每个调查站位硝酸盐氮含量均显著高于秋季。春季亚硝酸盐氮含量为 0.007~0.011 mg/L,平均值为 0.008 mg/L,最高为站位 1-1;秋季各站位亚硝酸盐氮含量变化较大,平均值为 0.007 mg/L,个别站位如 1-1、2-2、2-3、4-1 与春季相比下降较多。春秋两季调查期间海水氨氮含量平均值分别为 1.57 和 1.87 mg/L。站

位 3-1、3-2、3-3 在春季氨氮含量较其他站位高,分别为 2.5、5.5、2.7 mg/L,其余站位为 0.70~1.91 mg/L;秋季氨氮含量最高为站位 1-1,氨氮含量为 5.6 mg/L,其次为站位 4-1,氨氮含量为 4.1 mg/L;与春季相比,秋季站位 1-1 和 4-1 的氨氮含量急剧增加。春季总磷含量为 0.17~1.68 mg/L,平均值为 0.73 mg/L;秋季总磷含量为 0.47~1.33 mg/L,平均值为 0.64 mg/L,略低于春季;春秋两季总磷含量最高的站位分别为 3-2 和 1-1,春季总磷最低值出现在站位 2-2,而秋季总磷含量最低值出现在靠近外海的 2 个站位 2-3 和 1-3。春季海水化学需氧量(COD)含量较稳定,为 121.19~130.93 mg/L,平均值为 125.50 mg/L;秋季 COD 平均值为 137.21 mg/L,每个调查站位的 COD 值均远高于春季。

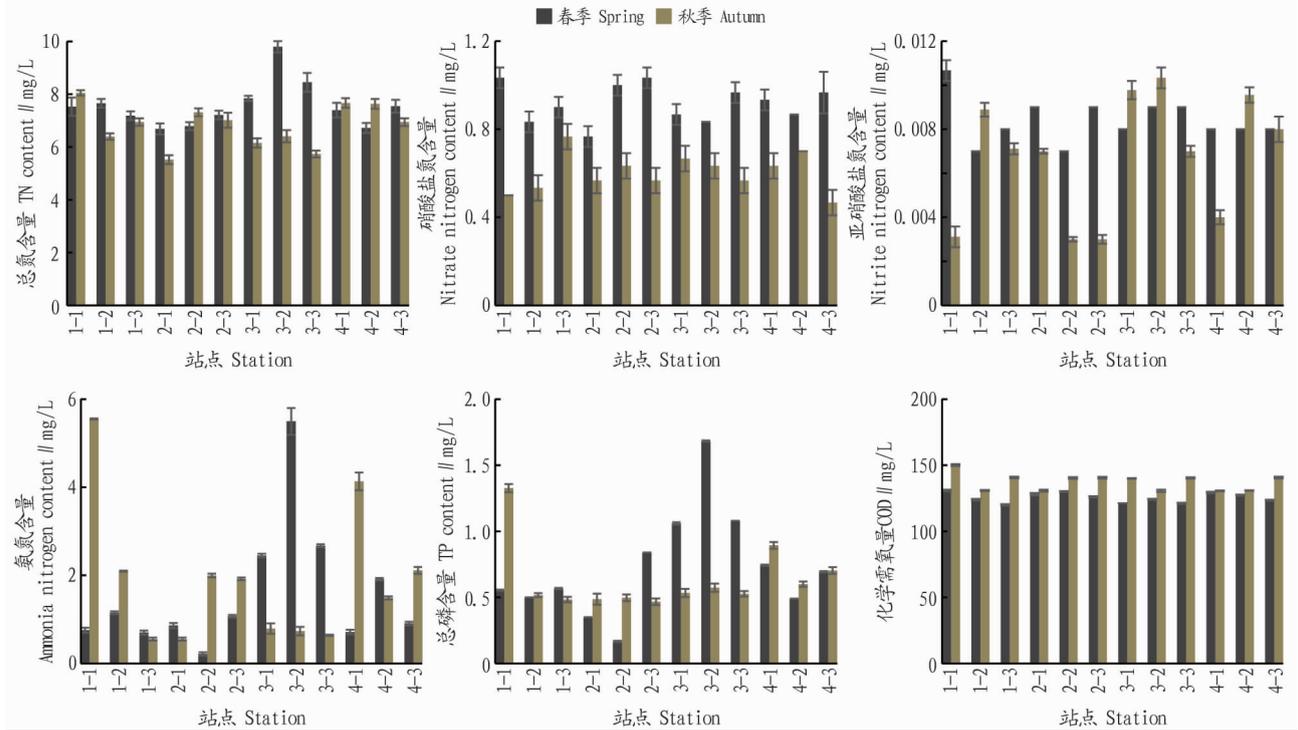


图 4 清澜港水质检测结果

Fig.4 Results of water quality tests in Qinglan Port

2.7 浮游植物群落与环境因子 RDA 对应分析 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。选出浮游植物丰度前 10 的物种,首先对物种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,春秋两季数据采用典型冗余分析(RDA)较为合适。

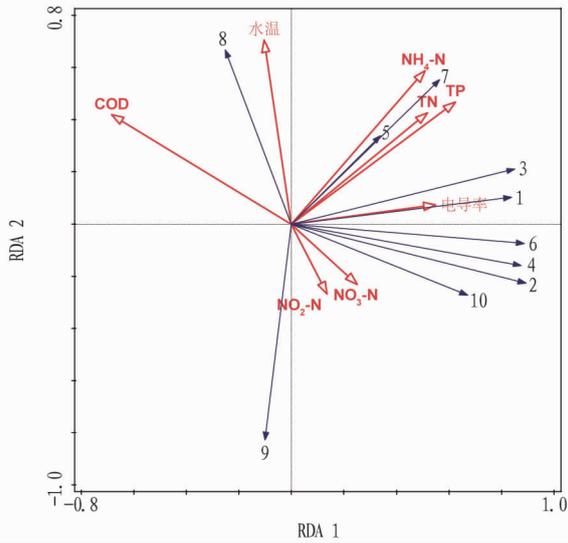
2.7.1 春季浮游植物群落与环境因子 RDA 对应分析。以清澜港浮游植物丰度前 10 的藻株和水体与环境因子进行 RDA 分析,见图 5,轴 1 和轴 2 能反映 66.59%的物种信息。由图 5 可知,春季水温、COD、氨氮(NH₄-N)和总磷(TP)对浮游植物群落结构影响较大,与浮游植物群落分布呈正相关;总氮(TN)和电导率次之;硝酸盐氮(NO₃-N)和亚硝酸盐氮(NO₂-N)影响最小。就藻株个体而言,电导率是影响中肋骨条藻的最主要因素,总氮、总磷和氨氮是影响锤状中鼓藻和钟形中鼓藻的主要因素;水温是新月菱形藻最主要的影响因

素;这些因素都与藻株呈正相关。

2.7.2 秋季浮游植物群落与环境因子 RDA 对应分析。以清澜港浮游植物丰度前 10 的藻株和水体与环境因子进行 RDA 分析,见图 6,轴 1 和轴 2 能反映 77.70%的物种信息。由图 6 可知,秋季盐度、电导率和 pH 对浮游植物的群落结构影响最大,水温次之,COD 影响最小;水质方面,总氮是影响浮游植物最主要的因素,氨氮和总磷次之,这些因素与浮游植物群落分布呈正相关;亚硝酸盐氮影响最小。就藻株个体来说,水温是影响柔弱拟菱形藻的主要因素,其次是盐度和电导率;总氮是影响菱形海线藻矮小变种的主要因素,其次为氨氮;氨氮是影响热带骨条藻的主要因素,其次是总磷和总氮;总磷是影响色球藻的主要因素;pH 对角毛藻影响最大。

3 结论与讨论

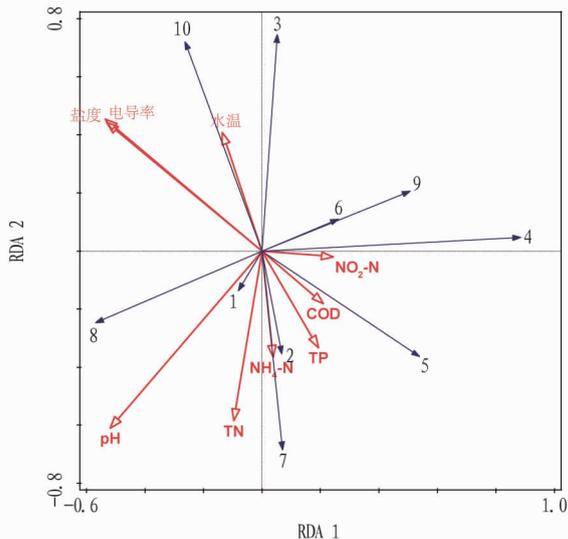
2019 年清澜港春秋两季 2 个航次调查 12 个站位,春季共鉴定出浮游植物 40 属 76 种,秋季鉴定出 35 属 62 种。春秋



注: 1. 中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*); 2. 热带骨条藻 (*Skeletonema tropicum*); 3. 柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*); 4. 尖刺拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*); 5. 锤状中鼓藻 (*Bellerochea malleus*); 6. 丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*); 7. 钟形中鼓藻 (*Bellerochea horologicalis*); 8. 新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*); 9. 薄壁几内亚藻 (*Guinardia flaccida*); 10. 并基角毛藻 (*Chaetoceros decipiens*)

图5 春季浮游植物与环境因子 RDA 对应分析

Fig.5 RDA correspondence analysis of phytoplankton and environmental factors in spring



注: 1. 中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*); 2. 热带骨条藻 (*Skeletonema tropicum*); 3. 细弱海链藻 (*Thalassiosira subtilis*); 4. 小环藻 (*Cyclotella* sp.); 5. 色球藻 (*Chroococcus* sp.); 6. 菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*); 7. 菱形海线藻矮小变种 (*Thalassionema nitzschioides* var. *Parva*); 8. 角毛藻 (*Chaetoceros* spp.); 9. 旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*); 10. 柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*)

图6 秋季浮游植物与环境因子的 RDA 对应分析

Fig.6 RDA correspondence analysis of phytoplankton and environmental factors in autumn

两季浮游植物细胞密度以硅藻门为主,分别占总密度的 97% 以上。而此次研究结果显示,春秋两季浮游植物种类均以硅

藻门为主,与历年检出结果较为接近^[7]。尽管 2 个航次平均细胞密度相差不大,为 $362.5 \times 10^3 \sim 371.7 \times 10^3$ cells/mL,但春季 12 个调查站位之间细胞密度相差比较悬殊;高隆湾内的站位包括 3-2 和 3-3 的细胞密度远高于其他几个站位,水体处于贫中营养的状态,可能的原因是由于周边酒店林立,人为活动造成的水体富营养化从而导致浮游植物密度急剧增加。有研究显示,水体环境的富营养化会加剧浮游植物密度的急剧增长^[13]。秋季站位 1-1 细胞密度远高于其他站位,处于贫中营养的水体状态,同时,八门湾内的 3 个站位包括 4-1、4-2 和 4-3 受人为活动影响较大,细胞密度也显著高于其他几个调查站位。研究表明,氮磷含量的高低与骨条藻的生长密切相关,两者呈正相关^[14],2019 年清澜港调查海域的优势种只有中肋骨条藻和热带骨条藻,可能是与该海域的氮磷营养盐含量高有关。

浮游植物的种类组成、丰度及空间分布与环境因子密切相关,这些环境因子包括盐度、温度、光照、营养盐、浮游动物摄食等^[15-16]。此次研究将浮游植物和环境因子参数进行典型冗余分析 (RDA),结果表明,春季水温、COD、氨氮和总磷是影响清澜港浮游植物群落结构的主要因素。研究调查发现,水温的增高,光照作用的增强,有利于藻类的生长^[17]。水温会影响藻类的生长和呼吸速率, Davison^[18] 提出光自养生物主要通过温度来控制酶动力学,从而影响其生长。就藻株个体而言,春季电导率是影响中肋骨条藻的最主要因素;总氮、总磷和氨氮是影响锤状中鼓藻和钟形中鼓藻的主要因素;水温是新月菱形藻最主要的影响因素,20~25 °C 是其最适合生长的温度^[19];这些因素均与藻株呈正相关。秋季在水质方面,总氮是影响浮游植物最主要的因素,氨氮和总磷次之,这些因素与浮游植物群落分布呈正相关。秋季就藻株个体来说,总氮是影响菱形海线藻矮小变种的主要因素,其次为氨氮;氨氮是影响热带骨条藻的主要因素,其次是总磷和总氮;总磷是影响色球藻的主要因素。总的来说,春秋季节对浮游植物群落结构影响较大的因素主要是氮磷营养盐的含量。研究报道,大多数藻类与氮磷营养盐含量密切相关^[20]。同时 RDA 结果也显示,清澜港水域营养盐是影响浮游植物群落组成结构的重要因素之一,这与于一雷等^[7]的研究结果相符合。营养盐是浮游植物生长的物质基础条件^[21],一般情况下,营养盐含量的升高可以明显促进浮游植物的生长^[22]。

研究表明,浮游植物生物群落是否稳定可用多样性指数来衡量,一般情况下,生物多样性越高,群落结构越稳定,代表水质状况或者水体营养状态比较好^[23-24]。此次研究结果显示,春季调查海域除站位 3-1、3-2 和 3-3 的多样性指数小于 2,其余站位多样性指数均为 2~3,表明春季调查海域浮游植物的生境质量一般;而秋季大部分站位多样性指数均小于 2,表明秋季浮游植物的生长环境质量变差,秋季水体状况不如春季水体环境状态好。总体显示,清澜港浮游植物种类丰富,以硅藻门和甲藻门为主。春季水温、氨氮和总磷是影

(下转第 100 页)

性细菌的基因组提取特点进行比较,以便今后对于特殊环境 微生物基因组进行提取方法的摸索与改良。

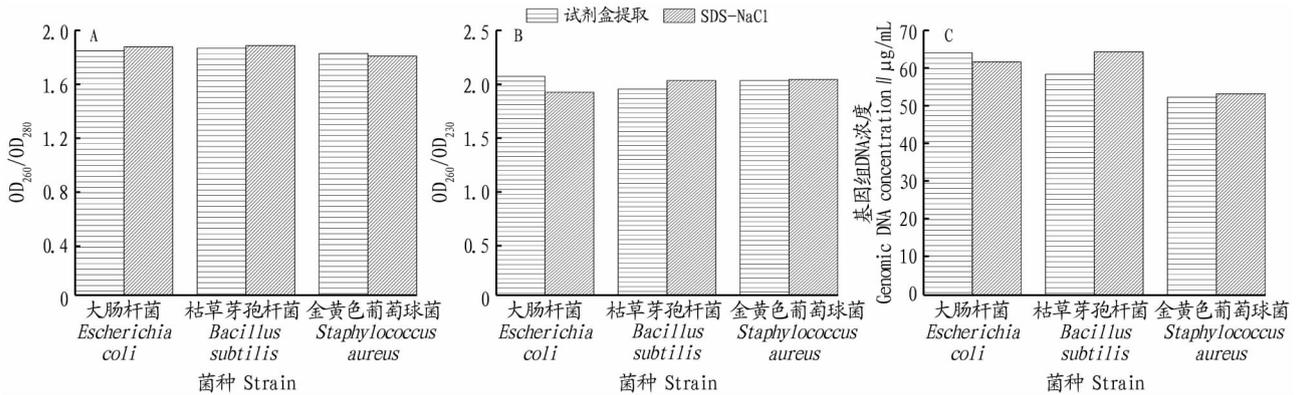


图3 商品化试剂盒与改良 SDS-NaCl 法提取基因组 DNA 质量的比较

Fig.3 Comparison of quality of genomic DNA extracted by commercial kit and modified SDS-NaCl method

参考文献

- [1] ZHAO X M, DUSZYNSKI D W, LOKER E S. A simple method of DNA extraction for *Eimeria* species [J]. *Journal of microbiological methods*, 2001, 44(2): 131-137.
- [2] 刘国兴, 刘源涌, 张辉, 等. 东北梅花鹿瘤胃微生物基因组的 DNA 提取 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(11): 227-229.
- [3] 刘水平, 罗志勇. 分子生物学实验中使用液氮研磨组织的方法 [J]. *实验教学与仪器*, 2005, 22(3): 29.
- [4] 刘薇, 方国庆, 刘立成, 等. 奶牛瘤胃微生物 DNA 提取法的研究与优化 [J]. *中国畜牧杂志*, 2011, 47(13): 71-75.
- [5] 冯唐楷, 赵文亮. 细菌基因组 DNA 提取方法简化的研究 [J]. *景德镇学院学报*, 2014, 29(6): 42, 47.
- [6] 高秋月, 景奉香, 李海燕, 等. 基于磁珠的细菌基因组 DNA 快速提取方法 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11071-11074.
- [7] 常健, 王琪. 晋西北酸沼发酵过程中微生物基因组 DNA 提取方法的比较 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 209-212, 233.
- [8] 戴方伟, 宋晓明, 周莎柔, 等. 大鼠肠内容物细菌基因组 DNA 提取方法的比较 [J]. *中国实验动物学报*, 2011, 19(3): 246-249.
- [9] 夏涵, 府伟灵, 陈鸣, 等. 快速提取细菌 DNA 方法的研究 [J]. *现代预防医学*, 2005, 32(5): 571-573.
- [10] 刘晓侠, 林建平, 岑沛霖. 微生物基因组 DNA 提取方法的比较与改进 [J]. *嘉兴学院学报*, 2007, 19(3): 48-50.
- [11] 陶兴玲, 雷琼, 马立安. 一种快速提取土壤微生物 DNA 的方法 [J]. *长江大学学报(自科版)*, 2018, 15(2): 54-58.
- [12] PANOVA M, ARONSSON H, CAMERON R A, et al. DNA extraction protocols for whole-genome sequencing in marine organisms [J]. *Methods in molecular biology*, 2016, 1452: 13-44.
- [13] OLSON N D, MORROW J B. DNA extract characterization process for microbial detection methods development and validation [J]. *BMC Research Notes*, 2012, 5(1): 668.
- [14] ZHOU J Z, BRUNS M A, TIEDJE J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. *Applied & environmental microbiology*, 1996, 62(2): 316-322.
- [15] 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.
- [16] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展 [J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91.
- [17] 王雨, 卢昌义, 谭凤仪, 等. 深圳红树林水体浮游植物多样性与营养状态评价 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(1): 17-21, 26.
- [18] 刘冲钲, 葛世斌, 何宁, 等. 碳、氮、磷营养对 7 种海洋微藻种群增长的影响研究 [J]. *南方水产科学*, 2020, 16(1): 87-97.
- [19] 李亚军, 王先明, 程贤松, 等. 美济礁近岸海域夏季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41(3): 615-621.
- [20] 陶志英, 陈文静, 余智杰, 等. 太湖浮游植物群落结构特征及其与环境因子相关性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(3): 63-67, 106.
- [21] 徐琼, 贾克力, 李文宝, 等. 达里诺尔湖夏季浮游植物群落结构及分布特征 [J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(6): 14-22.
- [22] DAVISON I R. Environmental effects on algal photosynthesis: Temperature [J]. *J. Phycol.*, 1991, 27(1): 2-8.
- [23] 丁蕾, 文崇远. 环境对硅藻的影响及硅藻对环境的监测 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(3): 13-16.
- [24] 舒卫先, 张云舒, 韦翠珍. 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(5): 115-122.
- [25] ZHANG M, SHI X L, YANG Z, et al. Long-term dynamics and drivers of phytoplankton biomass in eutrophic Lake Taihu [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 645: 876-886.
- [26] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2230-2236.
- [27] 郑丙辉, 田自强, 张雷, 等. 太湖西岸湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况 [J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4214-4223.
- [28] 张家路, 王银平, 蔺丹清, 等. 安庆新洲水域浮游植物群落结构特征 [J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(5): 680-688.

(上接第 82 页)

响浮游植物群落结构的主要因素, 而秋季盐度、电导率和 pH 是影响浮游植物群落结构的主要显著因子, 在水质方面, 浮游植物主要的影响因子是氨氮、总氮和总磷。

参考文献

- [1] CHEN B H, XU Z H, ZHOU Q L, et al. Long-term changes of phytoplankton community in Xiagu waters of Xiamen, China [J]. *Acta Oceanol Sin*, 2010, 29(6): 104-114.
- [2] YEANNY M S. Phytoplankton community as bioindicator of fertility in belawan river [J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2018, 130(1): e012030.
- [3] DAVID C P C, STA MARIA Y Y, SIRINGAN F P, et al. Coastal pollution due to increasing nutrient flux in aquaculture sites [J]. *Environ Geol*, 2009, 58(2): 447-454.
- [4] ACEVEDO-TREJOS E, MARAÑÓN E, MERICO A. Phytoplankton size diversity and ecosystem function relationships across oceanic regions [J]. *Proc Biol Sci*, 2018, 285: 1-9.
- [5] 朱佳志, 刘明典, 黄福江, 等. 西双版纳南腊河浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系 [J]. *淡水渔业*, 2015, 45(6): 39-45, 69.
- [6] 胡勤海, 余伟, 朱荫涓, 等. 钱塘江水系富春江段水污染现状调查研究 [J]. *环境污染与防治*, 1997, 19(6): 16-20.
- [7] 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.
- [8] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana IL: The University of Illinois Press, 1949: 1-125.
- [9] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology [M]. New York: Wiley Interscience, 1969: 1-286.
- [10] MARGALEF R. La teoría de la información en ecología [J]. *Memorias de la real academia de ciencias y artes de barcelona*, 1957, 32(13): 373-449.