

北缘红树林着生藻类群落结构特征及其影响因素探究

崔晨曦, 李晓钰, 水柏年, 张润祺, 曲昱玮, 张勇, 胡成业

(浙江海洋大学水产学院 舟山 316022)

摘要: 为探究红树林着生藻类群落结构特征及其与环境因子的关系, 于2024年1月、5月、8月、11月对浙江省龙港市、苍南县红树林区域设置17个站位进行着生藻类研究调查, 共采集到藻类5门54属212种(包括变种), 其中硅藻门43属, 绿藻门5属, 蓝藻门4属, 裸藻门、甲藻门各1属。进一步分析显示, 该研究区域着生藻类优势种隶属于硅藻门。通过生物多样性指数(H')、均匀度指数(J')和丰富度指数(D')对着生藻类生物多样性进行分析, 春季和夏季老林(LL)红树林区域处于重度干扰状态, 而冬季各监测采样点区域基本处于轻度干扰状态。冗余分析(RDA)结果表明: 盐度、TOC(总有机碳)、温度、总磷是影响该研究区域着生藻类群落结构的主要因素。

关键词: 红树林区; 着生藻类; 群落结构; 环境因子

中图分类号: Q948.8; S718.5; P942

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2025)10-0105-16

Study on the Structural Characteristics and Influencing Factors of Epiphytic Algal Communities in Northern Mangroves

CUI Chenxi, LI Xiaoyu, SHUI Bonian, ZHANG Runqi, QU Yuwei, ZHANG Yong, HU Chengye

(School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: To comprehend the structural traits of the mangrove periphytic algae community and its association with soil environmental factors, the current study was conducted in January 2025 and May, August, and November 2025 at 17 sites within the mangrove forests of Longgang City, Zhejiang Province, and Cangnan County, Zhejiang Province. A total of 212 species of algae were gathered from 54 genus belonging to 5 phyla (encompassing variants), in which 43 genus belonged to Bacillariophyta, 5 genus belonged to Chlorophyta, 4 genus belonged to Cyanophyta, and 2 genus were Euglenophyta and Pyrroptata. Further analysis indicated that the dominant algal species in the study area was Bacillariophyta. The biodiversity indices of the living algae were analyzed through the biodiversity index (H'), the evenness index (J'), and the richness index (D').

收稿日期: 2025-03-06; 修订日期: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(42306188).

作者简介: 崔晨曦, 研究生, 研究方向为海洋环境生物学

通信作者: 李晓钰, 讲师, 博士, 研究方向为海洋环境生物学

The results indicated that the mangrove area of Laolin (LL) was under severe disturbance during spring and summer, while all monitoring stations were under mild disturbance during winter. Redundancy analysis (RDA) results showed that salinity, total organic carbon (TOC), temperature, and total phosphorus (TP) were the primary environmental factors influencing the community structure of epiphytic algae in the study area.

Keywords: Mangrove forest, Periphytic algae, Community structure, Environmental factors

红树林生态系统是指分布于热带和亚热带海岸潮间带的木本植物群落及其环境所构成的有机复合系统。作为地球上独特且重要的生态系统之一,红树林因其位于海陆交界处的特殊生境而具有显著的生态功能,被称为“海上森林”。中国现有红树林面积大约 3.03 万 hm^2 , 主要分布于海南、福建、广东、广西、台湾等沿海地区,而浙江省的红树林为人工引种,以秋茄为主要造林树种^[1]。经过多年的种植,红树林取得了较好发展,形成了浙江苍南、龙港等规模较大的浙江南部沿岸红树林,并且郁闭成林^[2],成为中国红树林自然分布的北缘区域,是浙江省红树林重点保护区^[3]。

红树林区的藻类是一种分布极为广泛的生物,是海洋中最为丰富的生物类群^[4]。根据生态习性可以将藻类划分为浮游藻类和底栖藻类^[5]。其中着生藻类在红树林生态系统中占据重要地位,不仅是红树林生态系统中物质循环和能量流动的关键环节,而且对维持生态系统的稳定性和生物多样性具有不可忽视的作用;同时也是海洋动物的直接饵料^[4-6]。藻类与红树植物相互作用,共同维系着生态系统的稳定。其群落多样性受环境因子影响较大:沉积物温度直接影响着生藻类的生长;沉积物的总有机碳(TOC)分解后可以释放出氮、磷等营养元素,其为藻类生长必需的元素,但若营养物质过剩,则会抑制着生藻类的生长。有研究表明,在红树林中,硅藻在水域中占有较大优势。基于环境因子分析,盐度、pH 和总磷与浮游藻类群落分布之间具有显著相关性^[7]。

目前,红树林浮游藻类受到越来越多研究者的

重视,但是对于北缘区域红树林着生藻类的群落结构及其影响因素的探究仍较为匮乏。因此,本研究于 2024 年分 4 个季节对浙江省龙港市和苍南县红树林区域开展野外采样,结合实验室分析、生物多样性指数、冗余分析(RDA)及环境因子的差异性分析,综合解析了着生藻类群落结构及其与环境因子的关系,旨在揭示环境驱动因子对着生藻类分布的影响,并评估不同区域的生态干扰程度,为红树林生态系统的保护和管理提供基础研究支撑,进一步揭示着生藻类在红树林生态系统中的生态功能及其对环境因子的响应机制。

1 材料与方法

1.1 采样区域及站位

本研究于 2024 年 1 月、5 月、8 月、11 月,在浙江省龙港市选择 1 片、苍南县选择 2 片,共 3 片进行红树林区域的野外采样工作。采样点位于龙港市红树林省级湿地公园、苍南县下在水闸附近以及拥有 20 亩(约 0.013 3 km^2)红树林的特定区域。共设置 17 个采样点(图 1)。其中,DQ1、DQ2、DQ3、DQ4、DQ5、DQ6、DQ7 和 DQ8 采样点位于浙江省龙港市红树林省级湿地公园,为龙港红树林区;LL1、LL2、LL3、LL4、LL5 和 LL6 采样点位于苍南县 20 亩红树林区域,为老林红树林区;XZ1、XZ2 和 XZ3 采样点位于苍南县的下在水闸附近,为下在水闸红树林区。每个样点采集着生藻类 3 个平行样本,并将表层土样放进密封袋中,带回实验室进行分析测定,同时现场测定林下沉积物的氧化还原电位和温度等环境参数。

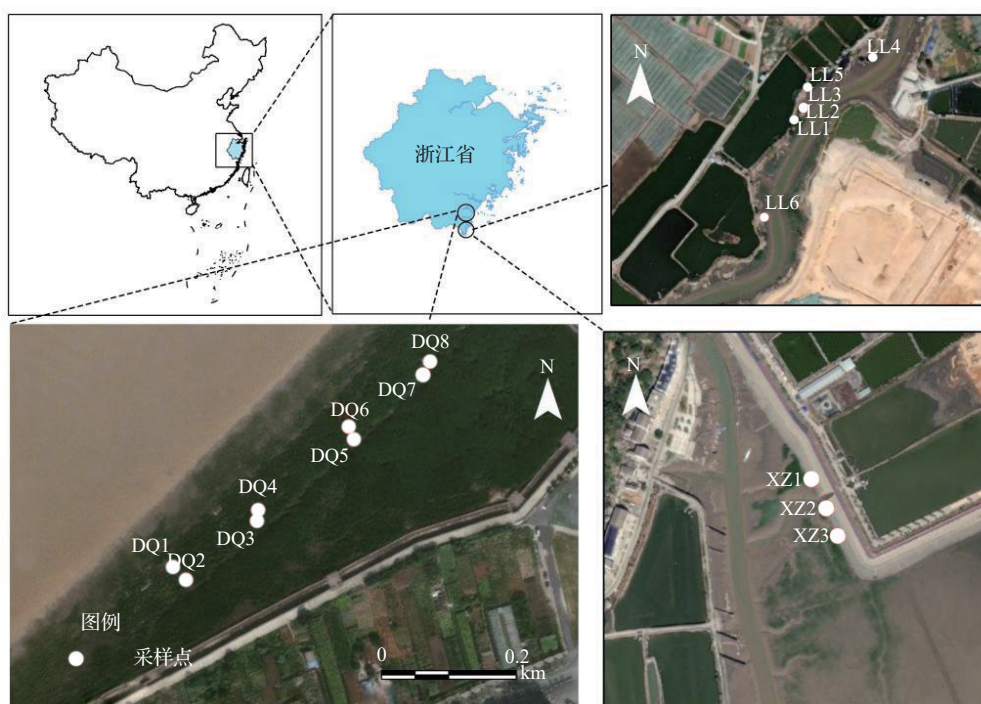


图 1 采样点站位分布

Fig.1 Sampling stations

注: 基于标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4619 号的标准地图制作, 底图无修改。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 着生藻类采集与测定

在采样点中, 选取较为粗壮的红树, 接近红树的基茎 (0.3 ~ 0.5 cm) 位置, 用土壤刀刮取大约 10 cm × 10 cm 的树皮或腐木样本, 随后将其装入样品袋中并标记。用去离子水将其冲洗到 1 L 的量筒中, 然后转移到 500 mL 的塑料样品瓶中, 立即加入 5 mL 5% 的鲁哥试剂固定, 用于后续定量分析。着生藻类定性样品需进行酸化处理, 倒入 10% 的盐酸溶液, 浸泡 24 h 后, 用去离子水少量多次冲刷刮取附着物, 确保所有着生藻类全部转移到样品瓶中, 同样立即加入 5 mL 的鲁哥试剂固定, 静置沉淀 48 h 后, 浓缩定容至 30 mL。若水样较为浑浊, 沉淀物浓缩定容至 100 mL。将着生藻类浓缩样品充分摇匀后, 取 0.1 mL 移至浮游植物计数框内, 通过奥林巴斯正置显微镜 CX33 进行种 (属) 鉴定并计数。每个计数板观察 120 个视野, 每个采样点鉴定 4 片。多数着生藻类鉴定到种、变种, 部分鉴定到属, 鉴定参考《中国海洋底栖硅藻类》《中国

内陆水域常见藻类图谱》等相关书籍和国内外相关文献^[8-13]。

1.2.2 沉积物环境因子的采集与测定

各采样点的沉积物环境参数采用现场测定和实验室测定相结合的方法。使用全球定位系统记录采样的经纬度。现场采样时, 用氧化还原电位测量沉积物的温度和氧化还原电位; 在实验室中, 用玻璃电极—甘汞电极 pH 计法测定沉积物, 用烘干法测定盐度, 用分光光度法 (GB 17378.5—2007) 测定总磷, 使用重铬酸钾氧化—还原容量法 (GB/T 20173778—2007) 测定有机碳, 并用荧光分光光度法 (GB/T 20173778—2007) 测定油类物质^[14-15]。

1.3 着生藻类生物多样性指数分析

用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 反映群落结构的复杂性和稳定性、Pielou 均匀度指数 (J') 反映物种间个体分布的均匀性、Margalef 丰富度指数 (D') 反映物种丰富度和个体数量^[16-17] 及优势度 (Y) 来反映物种间个体分布的一致性^[18], 计算

公式分别如下:

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'):

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

式中: H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数; S 为着生藻类(属)种的总数; P_i 为第 i 种物种个体数。

Pielou 均匀度指数 (J'):

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (2)$$

式中: J' 为均匀度指数; H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数; S 为样品中物种数。

Margalef 丰富度指数 (D'):

$$D' = \frac{(S-1)}{\log_2 N} \quad (3)$$

式中: D' 为丰富度指数; S 为样品中物种的种类数; N 为样品中物种的总个体数。

优势度 (Y):

$$Y = -f_i \times p_i \quad (4)$$

式中: Y 为优势度; f_i 为第 i 种在样品中出现的频率; p_i 为第 i 种个体数量在总体数量中的比例。本研究将 $Y \geq 0.02$ 的藻种定为优势种^[19]。

1.4 数据处理与分析

在本研究中,利用 ArcGIS10.8 软件分析监测断面空间分布,采用 GraphPad Prism10.1.2 与 Origin 2024 软件进行数据综合分析,借助 PRIMER5 软件深入探究数据的多样性分析。进一步运用 Canoco5 进行冗余分析(RDA)以揭示生态特征,同时利用 IBM SPSS Statistics 27 对着生藻类进行 Kruskal-Wallis H 检验,确保研究结果的精确性与科学性。

2 结果与分析

2.1 着生藻类群落结构

在 4 个季节所有采集的样品中共鉴定出着生藻类 5 门 54 属 212 种(包括变种和变型),藻类种类多样,随着季节的变化而变化。其中,硅藻门

的种类最为丰富,为主要的类群,共计 43 属 190 种,占比为 89.62%,其余依次为绿藻门 5 属 11 种、蓝藻门 4 属 9 种、裸藻门 1 属 1 种、甲藻门 1 属 1 种。

从时间上看,春季共鉴定 99 种,隶属 4 门 31 属。硅藻门(26 属 91 种,占 92%)为优势类群;蓝藻门(2 属 4 种,占 4%);裸藻门(1 属 1 种)和绿藻门(2 属 3 种)合计占 4%(图 2)。夏季仅鉴定出 3 门 23 属 74 种,硅藻门(70 种,占 94%)占绝对优势,绿藻门和蓝藻门合计占 6%(图 3)。秋季记录 96 种,隶属 5 门 26 属。硅藻门(85 种,89%)为主,绿藻门(5 种,5%)、蓝藻门(4 种,4%)次之,甲藻门和裸藻门各 1 种(共 2%)(图 4)。冬季共鉴定出 5 门 41 属 119 种,硅藻门(106 种,占 89%)仍占主导,绿藻门(7 种,占 6%)、蓝藻门(4 种,占 3%)较少,甲藻门和裸藻门各 1 种(共占 2%)(图 5)。北缘红树林 4 个季节着生藻类组成最主要门类为硅藻,且受季节变化影响较大。

空间分布上,硅藻门在 3 个红树林区均占绝对优势。春季龙港硅藻最多(73 种),老林(20 种)和水闸(17 种)较少(图 2)。夏季龙港硅藻达 70 种,老林 32 种,水闸仅 24 种(图 3)。秋季,老林硅藻最多(53 种),龙港和水闸均为 44 种(图 4)。冬季龙港硅藻 61 种,水闸 55 种,老林 38 种(图 5)。蓝藻、绿藻和裸藻在各区零星分布,其中龙港红树林区四季藻类总数最多,绿藻在冬季龙港达 5 种,其他区域和季节均不超过 4 种。水闸的藻类多样性总体上最低。

数量分布上,四季藻类丰度峰值站点,分别为春季 DQ3 (165×10^3 ind/dm³)、夏季 DQ2 (102×10^3 ind/dm³)、秋季 LL2 (170×10^3 ind/dm³)、冬季 XZ3 (118×10^3 ind/dm³);最低值分别出现在 LL1 (春季 19×10^3 ind/dm³)、DQ8 (夏季 27×10^3 ind/dm³,冬季 7×10^3 ind/dm³)和 DQ3 (秋季 13×10^3 ind/dm³)。龙港红树林区藻类丰度最高,因其湿地环境及淡水输入导致淡水藻类占比较高(图 6)。

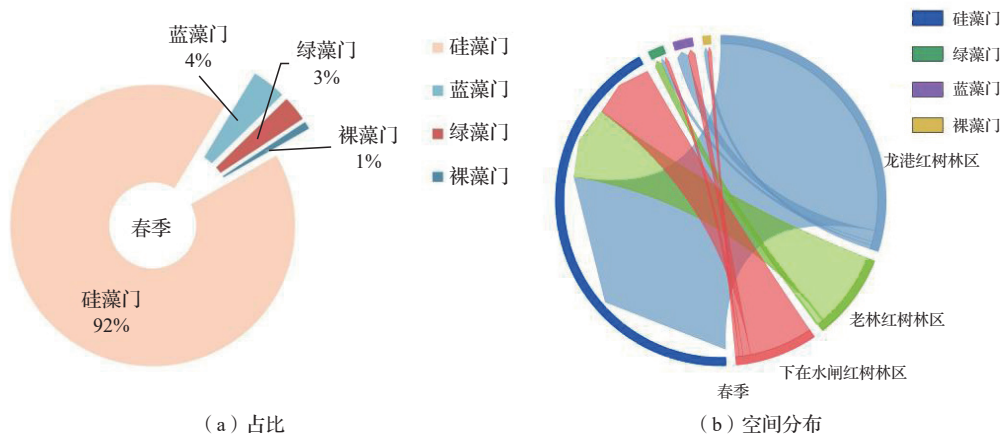


图 2 北缘红树林春季着生藻类物种组成

Fig.2 Species composition of epiphytic algae community in northern mangroves forests during spring

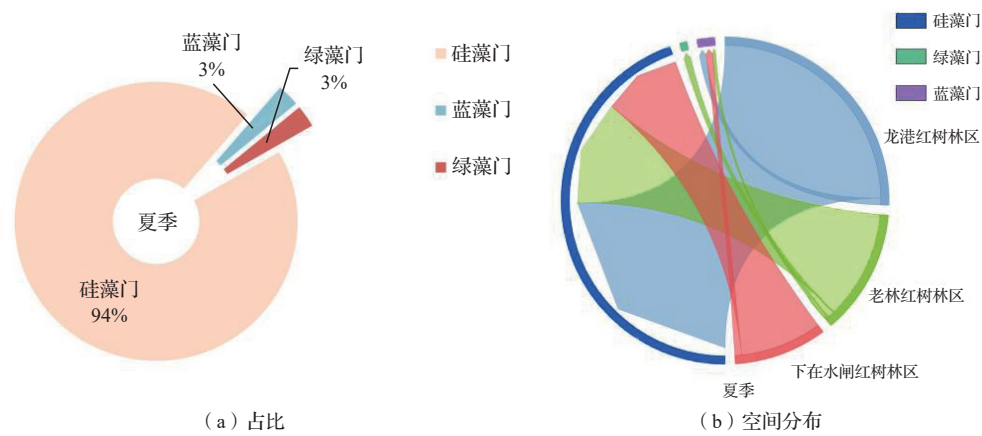


图 3 北缘红树林夏季着生藻类物种组成

Fig.3 Species composition of epiphytic algae community in northern mangroves forests during summer

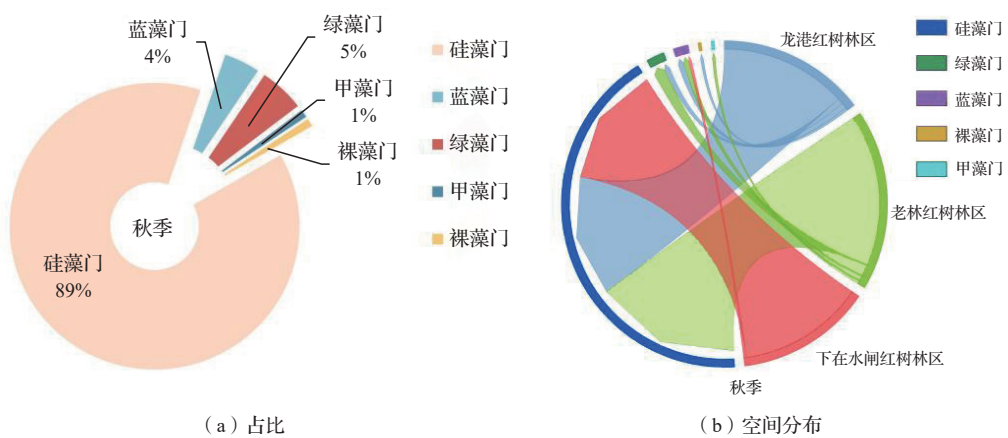


图 4 北缘红树林秋季着生藻类物种组成

Fig.4 Species composition of epiphytic algae community in northern mangroves forests during autumn

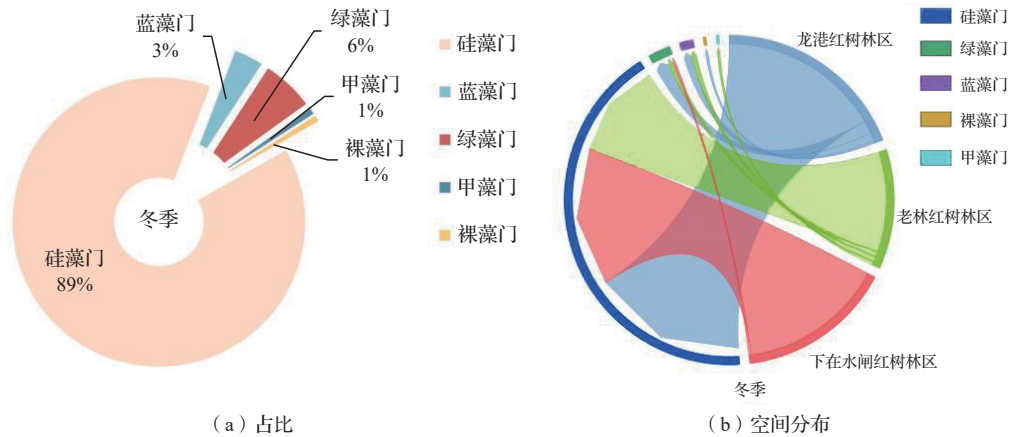


图5 北缘红树林冬季着生藻类物种组成

Fig.5 Species composition of epiphytic algae community in northern mangroves forests during winter

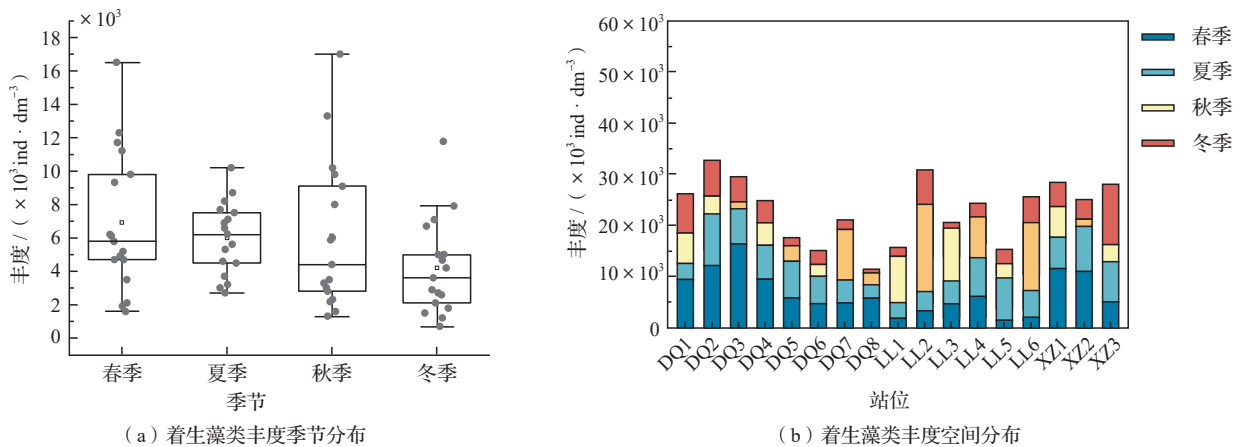


图6 着生藻类丰度时空差异

Fig.6 Spatial difference of algae abundance during winter and spring

2.2 优势种的分布特征

北缘红树林区着生藻类优势种的分布在各季节之间存在一定的差异。4个季节共有11种优势种，着生藻类优势度指数（ Y ）范围为0.02~0.24，以硅藻门为主。

4个季节优势种以硅藻为主，克劳斯菱形藻（*Nitzschia clausii*）（优势度0.02~0.24）为全年共有；弯菱形藻（*Nitzschia sigma*）（0.06~0.17）见于春、夏、秋季；仰光羽纹藻（*Pinnularia rangoonensis*）（0.02~0.07）为夏、秋季共有。冬季以特里羽纹藻（*Pinnularia trevelyana*）（0.03）和克劳斯菱形

藻（0.08）为主。各优势种优势度详见表1。

空间分布特征显示，不同季节优势藻类在不同采样点的丰度差异显著。春季，DQ2的钝头菱形藻（*Nitzschia obtusa*）及其变种丰度最高；DQ3以克劳斯菱形藻为主，XZ2以弯菱形藻为主。夏季，DQ2以仰光羽纹藻和微辐节羽纹藻（*Pinnularia microstauron*）为主，XZ1以克劳斯菱形藻为主，LL5和XZ2以弯菱形藻为主。秋季，LL2克劳斯菱形藻丰度最高，DQ7仰光羽纹藻较多。冬季，DQ2特里羽纹藻和克劳斯菱形藻占优，但整体丰度较低（图6）。

表 1 北缘红树林着生藻类各优势种类及其优势度
Table 1 The dominant species and their dominance of alga in northern mangroves

季节	门类	中文名称	拉丁名称	生境	优势度 ($Y \geq 0.02$)
春季	硅藻门	弯菱形藻	<i>Nitzschia sigma</i>	海水	0.17
	硅藻门	克劳斯菱形藻	<i>Nitzschia clausii</i>	淡水	0.20
	硅藻门	钝头菱形藻	<i>Nitzschia obtusa</i>	海水	0.02
	硅藻门	类 S 状菱形藻	<i>Nitzschia sigmoidea</i>	淡水	0.02
	硅藻门	钝头菱形藻刀形变种	<i>Nitzschia obtusa</i> var. <i>scalpelliformis</i>	海水	0.03
夏季	硅藻门	羽纹藻	<i>Pinnularia</i> sp.	淡水及海水	0.02
	硅藻门	仰光羽纹藻	<i>Pinnularia rangoonensis</i>	淡水	0.07
	硅藻门	微辐节羽纹藻	<i>Pinnularia microstauron</i>	淡水及半咸水	0.02
	硅藻门	克劳斯菱形藻	<i>Nitzschia clausii</i>	淡水	0.24
	硅藻门	弯菱形藻	<i>Nitzschia sigma</i>	海水	0.16
秋季	硅藻门	菱形藻	<i>Nitzschia</i> sp.	淡水及海水	0.03
	硅藻门	弯菱形藻	<i>Nitzschia sigma</i>	海水	0.06
	硅藻门	克劳斯菱形藻	<i>Nitzschia clausii</i>	淡水	0.24
	硅藻门	近黏连菱形藻斯科舍变种	<i>Nitzschia subcohaerens</i>	淡水	0.02
	硅藻门	仰光羽纹藻	<i>Pinnularia rangoonensis</i>	淡水	0.02
冬季	硅藻门	特里羽纹藻	<i>Pinnularia trevelyana</i>	淡水、半咸水 及海水	0.03
	硅藻门	克劳斯菱形藻	<i>Nitzschia clausii</i>	淡水及海水	0.08

2.3 多样性指数、均匀度和丰富度

北缘红树林区域不同季节着生藻类生物多样性指数见图 7。在 17 个采样点中, H' 值范围在 0.893 ~ 3.287 之间; 均匀度 J' 值范围在 0.555 ~ 0.980 之间; 丰富度 D' 值范围在 0.910 ~ 7.546 之间。

春季多样性指数显示, H' 值范围在 0.893 ~ 3.067、 J' 范围在 0.555 ~ 0.921、 D' 范围在 1.039 ~ 6.856, LL3 受重度干扰 ($H'=0.893$), DQ1 无干扰且物种丰富 ($D'=6.856$)。夏季 H' 值范围在 1.178 ~ 3.146、

J' 范围在 0.596 ~ 0.920、 D' 范围在 0.882 ~ 6.948, LL4 处于无干扰状态 ($H'=3.146$), LL1 丰富度较低, 处于重度干扰状态 ($D'=0.882$)。秋季 H' 值范围在 1.468 ~ 3.287、 J' 范围在 0.699 ~ 0.980、 D' 范围在 1.294 ~ 7.566, 该季节 LL3 处于无干扰状态, 且最丰富 ($D'=7.556$)。冬季 H' 值范围在 0.995 ~ 3.172、 J' 范围在 0.807 ~ 0.961、 D' 范围在 0.910 ~ 7.546, 多数站点处于轻度干扰, DQ8 处于重度干扰 ($D'=0.910$), 导致其丰富度极低 (图 7)。

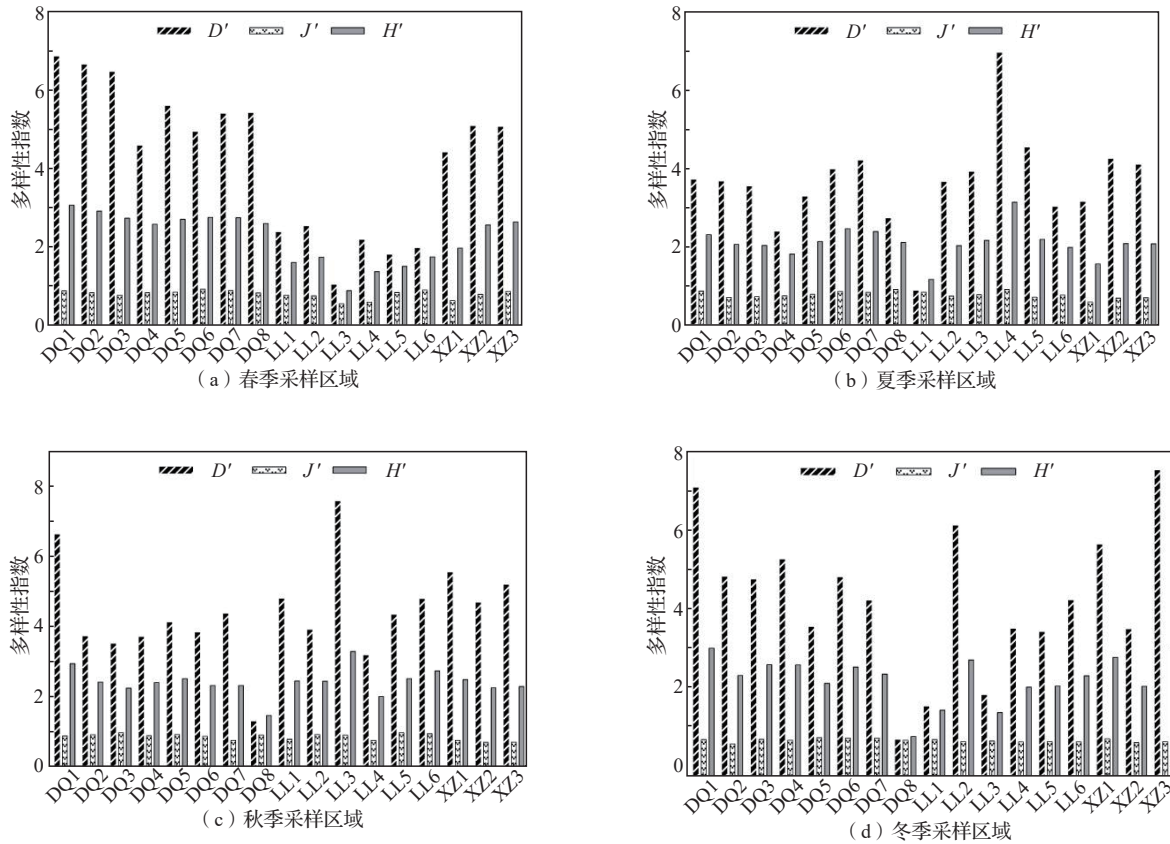


图7 着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J') 及 Margalef 丰富度指数 (D') 的区域差异

Fig.7 Regional difference of Shannon-Wiener diversity index (H'), Pielou evenness index (J') and Margalef richness index (D') of periphytic algae

2.4 沉积物环境因子变化特征

环境因子统计结果如表 2 所示, 环境因子对生物分布的影响是复杂多变的过程, 常受 pH、总磷等制约。下文将在整理龙港市和苍南县红树林区域沉积物监测数据资料的基础上, 对环境因子进行数据分析, 其数据较为分散, 不符合正态分布, 所以使用非参数检验 (Kruskal-Wallis H)。

表 2 环境因子平均值

Table 2 The average value of the environmental parameters

沉积物环境指标	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	P-value
pH	6.61	8.88	7.88 ± 0.49	< 0.001***
盐度	13.17	159.42	72.26 ± 40.70	< 0.001***
TOC	0.01	33.14	2.58 ± 4.45	< 0.001***
油类 ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	0.55	153.43	5.92 ± 18.28	< 0.001***

续表 2

沉积物环境指标	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	P-value
温度 / $^{\circ}\text{C}$	11.30	35.23	17.18 ± 7.54	< 0.001***
总磷 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	4.64	36.94	17.26 ± 7.25	< 0.001***
ORP/mV	12	4 999	770.66 ± 1 473.20	< 0.001***

注: ** 表示显著相关, $P < 0.05$; *** 表示极显著相关, $P < 0.001$ 。

研究表明, 北缘红树林环境因子呈现显著的季节性差异 (Kruskal-Wallis H 检验, $P < 0.001$)。理化参数 (pH、盐度、温度)、营养盐指标 (总有机碳、总磷)、氧化还原特征 (ORP) 及污染物 (油类含量) 均表现出明显的季节变化, 其中温度变化最为显著 ($H=54.10, df=3$), ORP 值波动范围最大 (12 ~ 4 999 mV), 油类含量均值为 5.92 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

盐度表现出最大的波动范围 (13.17 ~ 159.42, 均值 72.26), 其次是 ORP 和油类含量。这 3 个

参数的变异系数均较高, 表明其在时间尺度上具有显著的不稳定性。环境因子均通过显著性检验 ($P < 0.001$), 这些参数对红树林生态系统生物分布的影响存在明显的季节动态。特别是盐度、油类含量和 ORP 的大幅波动, 可能对生物群落结构产生重要影响 (表 2)。

从环境因子空间分布特征分析, 总磷、油类的趋势呈现一致性 (图 4)。以下按季节分述各环境因子的差异化特征: 春季, 老林采样区域的 pH 显著高于其他区域; DQ1、DQ4、LL5 采样点盐度水平显著高于全域均值, 其余区域盐度保持稳定。TOC 指标在 XZ3 采样点出现高值, 同时 LL3 区域的油类含量较其他区域呈轻微偏高态势。夏季, 林下沉积物温度呈现区域性升高特征, 其中 DQ1 采样点温度达到季节峰值; 老林红树林区域的总磷浓度显著高于其他采样区域, 形成季节性高值区。秋季, DQ8 与 XZ1 采样点的 pH 显著低于全域平均水平, 成为该季节的特征

性低值区域。冬季, LL2 采样点的 TOC 值出现季节性高值; 氧化还原电位 (ORP) 整体高于其他季节, 其中 DQ3、DQ8、LL3、LL6、XZ1、XZ2、XZ3 等区域呈现显著高值, 构成冬季特征性环境参数分布区。盐度数值整体偏高, 其主要原因是龙港红树林接壤鳌江, 受潮汐的作用, 海水持续涌入并滞留, 海水盐分滞留积累, 导致沉积物盐度升高; 春季, LL3 采样区域中油类含量明显高于其他区域, 主要原因是周边出现大量垃圾堆积, 与鱼塘养殖和人类活动频繁密切相关。进入春季, 林下沉积物的温度普遍偏高, 尤其是 DQ1 采样点的温度最高; 苍南红树林采样区域周边农业活动频繁, 其生活污水未经处理直接排入红树林区域, 导致磷元素在沉积物中积累。此外, 冬季氧化还原电位高于春季, 尤其是 DQ3、DQ8、LL3、LL6、XZ1、XZ2、XZ3 区域的 ORP 值最高, 其差异主要与季节性水文变化和有机物分解速率有关 (图 8)。

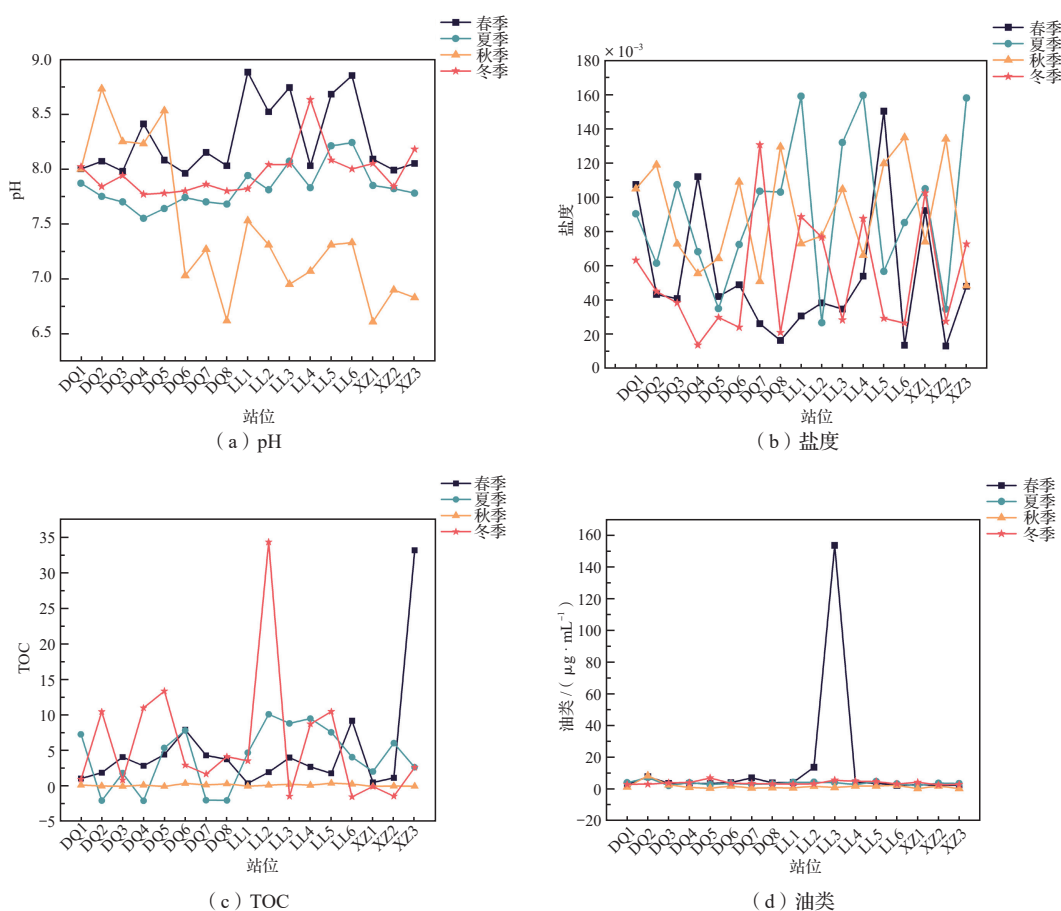


图 8 环境因子空间分布情况

Fig.8 Spatial distribution of soil environmental factors

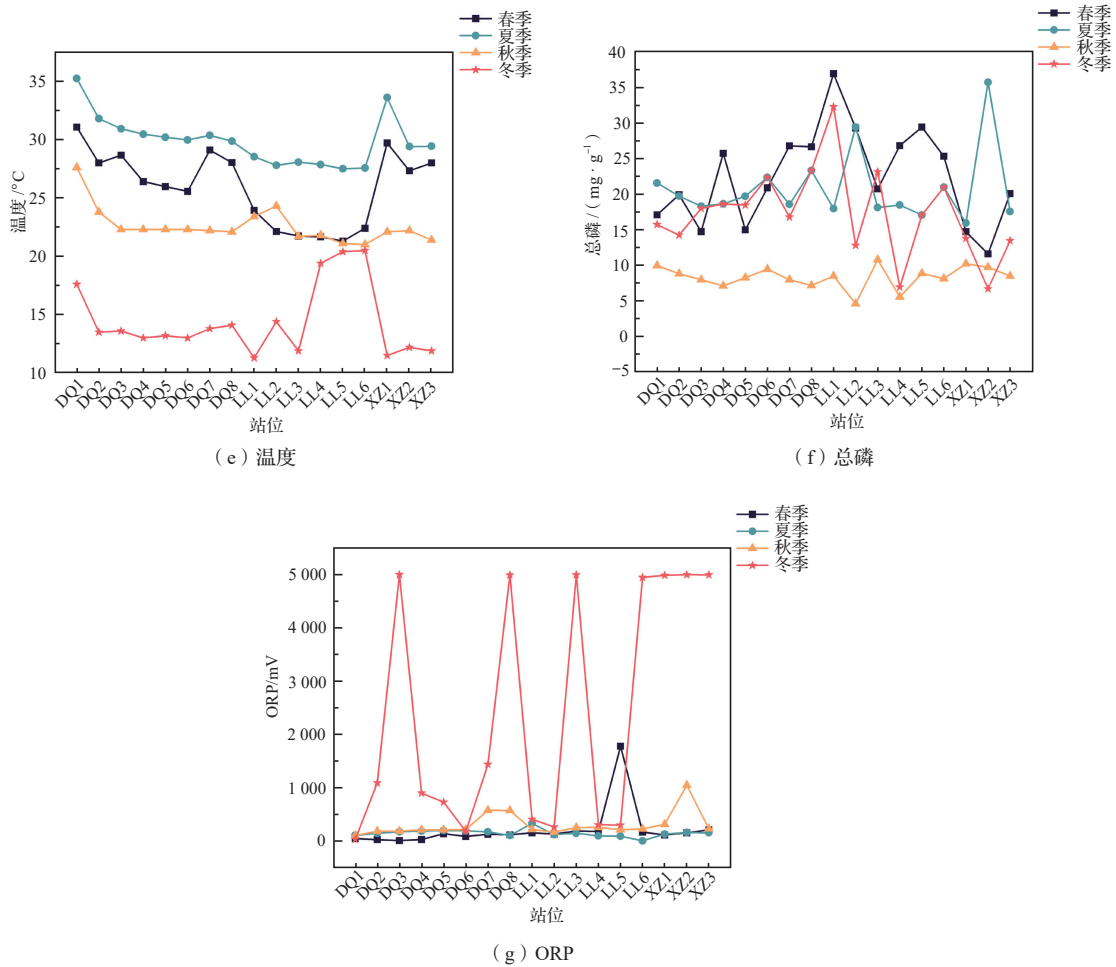


图 8 环境因子空间分布情况 (续图 8)

Fig.8 Spatial distribution of soil environmental factors

2.5 着生藻类群落结构与沉积物环境因子的相关性分析

RDA 分析显示, 北缘红树林着生藻类与环境因子具有显著相关性 (轴 1 为 24.11%, 轴 2 为 8.82%)。春季分析表明, 双菱藻属、肋缝藻属、舟形藻属、菱形藻属、羽纹藻属、长萼藻属、美壁藻属与盐度、温度正相关, 与 TP、Oil、pH、ORP、TOC 负相关, 与温度的相关性较高; 布纹藻属、斜纹藻属、颤藻属、脆杆藻属、双眉藻属、其他藻属与 Temp、TOC 正相关, 与 TP、pH、Oil、ORP 负相关, 与 Temp、TOC 相关性较高; 新月藻属与 ORP、pH、Oil、TP 正相关, 与 Sal 负相关, 与 TP、pH 相关性较高。所以盐度、温度、TP 是影响春季着生藻类群落结构的最主要的环境因子 (图 9)。

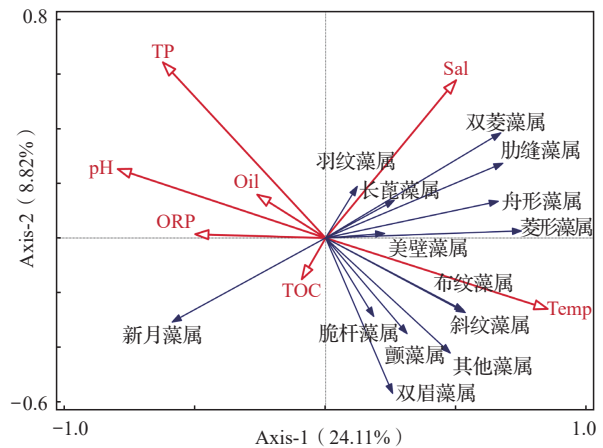


图 9 春季着生藻类与环境因子的 RDA 分析

Fig.9 RDA analysis of periphytic algae and environmental factors in spring

RDA 分析显示, 夏季着生藻类与环境因子显著相关(轴 1 为 24.03%, 轴 2 为 13.24%)。小环藻属、双壁藻属、舟形藻属和桥弯藻属与盐度(Sal)正相关, 与总磷(TP)、氧化还原电位(ORP)和温度(Temp)负相关; 羽纹藻属和新月藻属与 Temp、ORP 和油类(Oil)正相关; 棍形藻属、异极藻属等与 pH 和总有机碳(TOC)正相关; 布纹藻属和菱形藻属与 TP、pH 正相关。布纹藻属和菱形藻属与 TOC 呈轻微负相关, 油类(Oil)和盐度(Sal)是影响夏季藻类群落的主要环境因子(图 10)。

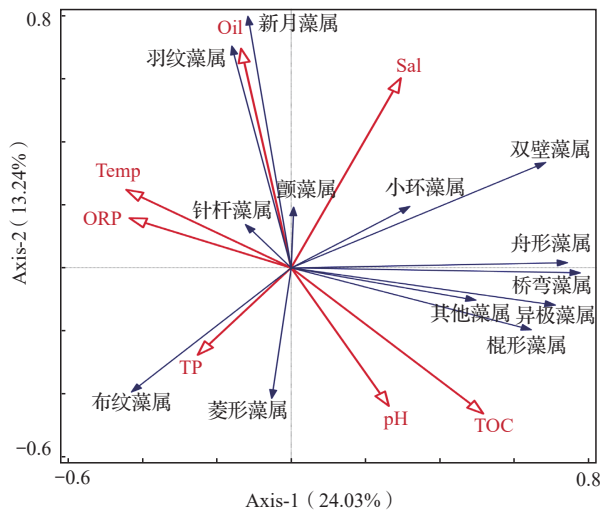


图 10 夏季着生藻类与环境因子的 RDA 分析

Fig.10 RDA analysis of periphytic algae and environmental factors in summer

RDA 分析显示, 秋季着生藻类与环境因子显著相关(轴 1 为 18.80%, 轴 2 为 10.00%)。直链藻属、双菱藻属、菱形藻属和双壁藻属与氧化还原电位(ORP)、盐度(Sal)正相关; 新月藻属和羽纹藻属与 pH 正相关; 小环藻属和颤藻属与 pH、温度(Temp)正相关; 菱板藻属、斜纹藻属和舟形藻属与总磷(TP)、Sal 正相关; 根管藻属、针杆藻属和束丝藻属与 TP、总有机碳(TOC)和 Temp 正相关。ORP、TOC 和 TP 是影响秋季藻类群落的关键环境因子(图 11)。

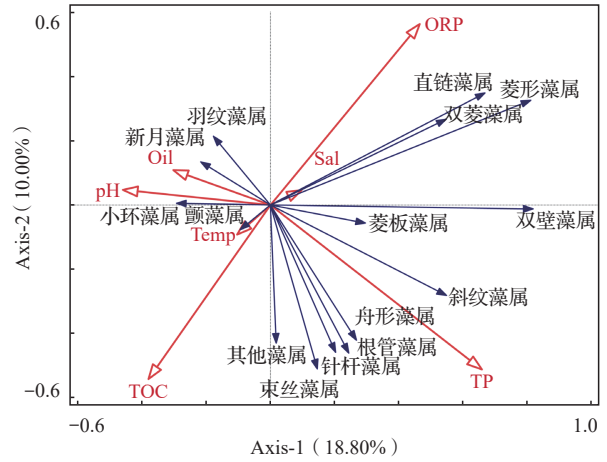


图 11 秋季着生藻类与环境因子的 RDA 分析

Fig.11 RDA analysis of periphytic algae and environmental factors in autumn

RDA 分析表明, 冬季着生藻类与环境因子显著相关(轴 1 为 12.86%, 轴 2 为 10.81%)。褐指藻属和小环藻属与油类(Oil)、总磷(TP)正相关; 针杆藻属和双壁藻属等与温度(Temp)、总有机碳(TOC)和 pH 正相关; 菱形藻属与 pH、盐度(Sal)正相关; 菱板藻属、舟形藻属等 11 个藻属与 ORP 正相关。温度(Temp)、总有机碳(TOC)、总磷(TP)和油类(Oil)是影响冬季藻类群落的主要环境因子(图 12)。

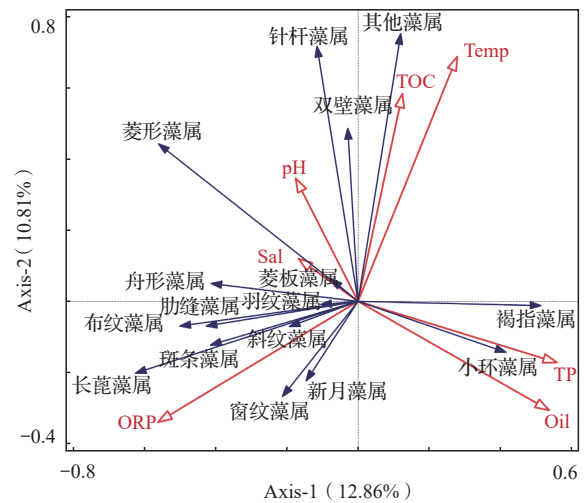


图 12 冬季着生藻类与环境因子的 RDA 分析

Fig.12 RDA analysis of periphytic algae and environmental factors in winter

3 讨论

3.1 着生藻类群落结构特征和多样性

在浙江省龙港市和温州市苍南县的红树林区域共鉴定出 212 种 (属) 着生藻类, 其中以硅藻门属种为主要的优势种, 这与 Wah 等^[20]的研究发现相契合, 他们在对新加坡和马来西亚柔佛州红树林中着生藻类群落结构进行研究时, 也发现硅藻为主要优势种。Chen 等^[21]对中国不同地理区域红树秋茄上着生藻类进行多样性调查发现, 共鉴定出附着硅藻 103 种 (包括变种), 隶属于 40 属。Nitzschia 属 (20 种) 和 Navicula 属 (7 种) 是物种最丰富的两个属, 由此可见, 硅藻门同样是优势门类, 这与本研究结果一致。综上所述, 硅藻门在红树林区域中的着生藻类群落占主要优势, 可能源于硅藻具有很强的适应能力, 对温度和盐度具有较强的耐受性, 从而能够在多变的环境条件下生存^[22]。

4 个季节的样品中共鉴定出 11 种优势种, 包括特里羽纹藻 (*Pinnularia trevelyana*)、克劳斯菱形藻 (*Nitzschia clausii*)、弯菱形藻 (*Nitzschia sigma*)、钝头菱形藻 (*Nitzschia obtusa*)、类 S 状菱形藻 (*Nitzschia sigmoidea*)、钝头菱形藻刀形变种 (*Nitzschia obtusa* var. *scalpelliformis*)、仰光羽纹藻 (*Pinnularia rangoonensis*)、微辐节羽纹藻 (*Pinnularia microstauron*)、近黏连菱形藻斯科舍变种 (*Nitzschia subcohaerens*)、羽纹藻 (*Pinnularia* sp.)、菱形藻 (*Nitzschia* sp.), 均隶属于硅藻门, 其中克劳斯菱形藻 (*Nitzschia clausii*) 在红树林基部附着生长良好。苍南县和龙港市近岸水域受人类活动影响较大, 陆源营养物质输入较多, 对着生藻类的物种组成影响较大。南麂列岛处于台湾暖流和江浙沿岸流的交汇处, 属于亚热带季风气候, 一年四季中出现一定数量的广温性质的藻类, 藻类较为丰富, 其底栖藻类多以菱形藻类为主^[23]。张玉荣等对温州乐清湾浮游植物进行调查, 结果显示其主要优势种由硅藻和甲藻组成, 表明该区域水质存在一定程度的富营养化^[24]。与温州其他水域浮游植物群落主要由蓝藻、硅藻和甲藻组成的特征相比, 本研究区域着生藻类群落结构表现出显著差异, 这种差异与水体营养盐浓度、光照强度等环境因子密切相

关。此外, 着生藻类的物种多样性比浮游植物群落更加稳定, 其主要原因是着生藻类主要附着于植物表面, 受水流影响较小, 其物种多样性比浮游植物群落更为稳定。

近年来, 随着氮、磷在温州水体中的浓度持续增加, 该区域水体富营养化问题日益凸显, 尤其是在春夏季节, 浮游植物群落出现爆发性增长。相比之下, 着生藻类由于生长方式较为固定, 能够更好地适应环境的波动^[25]。龙港、苍南的红树林区域地理位置特殊, 毗邻鳌江、横阳支江、桥墩水库, 频繁受到雨水的冲刷, 大量淡水携带着各类藻类涌入采样区。这使得该区域淡水藻类的数量显著增加, 占比高达 67.4%。这种独特的生态环境塑造了龙港、苍南红树林区着生藻类群落结构的特殊性, 使其呈现出与温州其他水域浮游植物截然不同的生态特征。

多样性分析显示, 龙港和苍南红树林区域的着生藻类生物多样性指数和均匀度指数均出现了一定的波动 (图 3)。春季和夏季, 老林 (LL3 和 LL1) 采样点的 H' 值最低; 冬季, 龙港 (DQ8) 采样点的 H' 值最低, 呈现显著差异, 表明该区域的藻类群落处于重度干扰状态。物种组成单一, 生态系统的稳定性较差, 可能受到人为活动、污染或其他环境压力的显著影响。春季 (DQ1)、夏季和秋季 (LL3 和 LL4) 处于无干扰状态, 反映该研究区域的藻类物种多样性较高, 其藻类的群落结构相对稳定。冬季, 各监测采样点区域基本处于轻度干扰状态。本研究通过分析红树林区域着生藻类群落季节性变化, 揭示了不同环境因子对藻类多样性的影响机制。4 个季节的 H' 、 J' 及 D' 指数均显示出显著差异, 特别是春季和夏季, 老林红树林采样区域处于重度干扰状态。

3.2 影响着生藻类群落结构的环境因子

着生藻类群落结构受多种环境因子的共同影响, 如温度、pH、营养盐等^[26]。研究表明, 不同季节影响着生藻类群落结构的关键环境因子存在显著差异。春季期间, 盐度、水温和总磷浓度是影响着生藻类丰度的主导因素; 进入夏季, 沉积物油类和盐度成为主要限制因子; 秋季时, 氧化还原

电位 (ORP)、总有机碳 (TOC) 和总磷浓度共同作用, 显著影响着生藻类的群落组成; 而冬季着生藻类的分布则主要受到水温、TOC、总磷浓度以及油类污染物等多重环境因子的综合影响。有些环境因子并不能促进着生藻类的生长, 反而具有限制作用, 其限制影响会随着季节的变化而变化^[26]。在本研究中, 沉积物温度是影响着生藻类群落结构的关键因素。春季平均温度为 26.49℃, 着生藻类的丰度较高, 优势种数量显著增加。但是冬季的平均温度为 14.42℃, 着生藻类的丰度较低, 并且优势种仅有两种。所以着生藻类的种类组成和数量分布主要受温度的影响, 与朱根海等^[23]对微小底栖藻类的研究结果一致。这证实了温度是决定着生藻类种类组成和数量分布的主要因素。红树林生态系统大多处于咸淡水交汇区, 潮汐作用会使得沉积物的盐度较高, 从而促进着生藻类的生长。硅藻门适宜生活在高 pH 的环境中。盐度和 pH 对硅藻门的生长起着决定性作用, 温度则是影响绿藻门和蓝藻门生长的关键因素, 而总磷含量的变化对裸藻门和甲藻门的生长具有极其重要的促进作用。

沉积物的 pH、盐度、温度和总磷是沉积物重要的理化性质, 不仅影响植物生长, 还对微生物活动及沉积物养分状况产生重要影响^[27]。刘欢等^[28]和林世玲^[29]认为, 土壤养分供给强度和速度直接影响红树的生长与发育, 土壤的氧化还原性对植物的生长起到了至关重要的作用。冬季温度下降导致沉积物微生物活性降低, 还原反应速率减缓, 使沉积物保持较高的氧化状态, ORP 值普遍高于其他季节。这表明冬季沉积物的透气性和氧化性增强, 但着生藻类数量较春季显著减少。沉积物 TOC 在适量的情况下促进红树植物的生长, 同时也促进着生藻类的生长。过多的油类物质会抑制藻类的生长, 油类物质会覆盖在藻类的表面, 阻碍藻类进行光合作用和气体交换。可见, 盐度、TOC (总有机碳)、温度、总磷是促进着生藻类生长的主要因素。

3.3 红树林生态系统着生藻类的生态作用

红树林生态系统作为海岸带重要的生态屏障, 其生物多样性和生态功能备受研究者关注。然而, 关于红树林生态系统中着生藻类的研究相对匮乏,

尤其与浮游植物相比, 着生藻类的研究尚未形成系统性和广泛性。国外相关研究多集中于特定区域, 如美国路易斯安那州、新加坡和马来西亚南部, 而对其他区域的系统性探讨较少。

着生藻类在红树林生态系统中扮演着极为关键的角色, 具有重要的生态功能。着生藻类是红树林中许多鱼类、软体动物和甲壳动物的饵料来源, 附着硅藻在红树林区的浮游植物中占有优势地位, 它的繁衍生息不仅关系到经济动物、经济藻类的产量, 而且对于维持红树林生态系统中的生物链和食物网的稳定也起着举足轻重的作用^[30-31]。陈长平^[32]注意到底栖硅藻可以丰富浮游植物群落, 为各种海洋生物营造良好的生长环境, 并且根系的附着硅藻组合可以作为评价红树林水质的指标来指示营养状况, 丰富红树林生态系统的生物多样性。此外, 着生藻类和红树植物一样, 能够通过光合作用进行固碳, 通过不同的途径输送到海洋中, 在红树林生态系统的碳汇和碳循环中起到重要作用。邱勇等^[33]发现, 在红树林外围的光滩生境中, 底栖微藻的光合作用平衡了异养作用, 使全年的群落净生产略高于零, 进而影响红树林湿地生态系统的碳源汇格局。这表明着生藻类在红树林生态系统的碳循环中具有不可忽视的作用。红树植物上存在大量的着生藻类群落, 这对红树植物有着寄生的不利影响, 同时也会抑制红树植物的生长^[34]。

4 结论

通过对北缘红树林着生藻类的群落组成研究和沉积物的理化因子监测, 分析了着生藻类群落结构特征及其与沉积物环境因子的关系, 初步掌握了该研究区域着生藻类群落的结构特征及其影响因素, 得到如下结论。

(1) 该调查区域的着生藻类以硅藻为主, 种类和数量较为丰富。共鉴定出着生藻类 5 门 54 属 212 种, 由硅藻门、绿藻门、蓝藻门、裸藻门、甲藻门组成, 其中硅藻门最多 (占 89.62%), 优势种有 11 种。

(2) Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J')、Margalef 丰富度指数 (D') 综合分析显示, 春季和夏季老林 (LL) 红树林区域处于

重度干扰状态,而冬季各监测采样点区域基本处于轻度干扰状态。

(3) 依据冗余分析(RDA),盐度、TOC(总

有机碳)、温度、总磷是促进着生藻类生长的主要因素。

参考文献(References):

- [1] 周兆德, 谢瑞红. 红树林生态系统及功能研究综述[J]. 华南热带农业大学学报, 2005(4): 48-52.
ZHOU Zhaode, XIE Ruihong. Review on the ecosystem and functions of mangrove forests[J]. Journal of South China Tropical Agricultural University, 2005(4): 48-52.
- [2] 沈小雪, 关淳雅, 王茜, 等. 红树林生态开发现状与对策研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 4004-4016.
SHEN Xiaoxue, GUAN Chunya, WANG Qian, et al. Study on the current situation and countermeasures of mangrove ecological exploitation[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 4004-4016.
- [3] 上官明珠, 胡成业, 王晶, 等. 我国北缘红树林大型底栖动物群落 beta 多样性格局及其驱动因素[J]. 水产学报, 2025, 49(8): 97-110.
SHANGGUAN Mingzhu, HU Chengye, WANG Jing, et al. Beta diversity patterns and its driving factors of the northern margin mangrove macrobenthos community in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(8): 97-110.
- [4] 陈长平, 高亚辉, 林鹏. 红树林区硅藻研究进展[J]. 海洋科学, 2002, 26(3): 17-19.
CHEN Changping, GAO Yahui, LIN Peng. Research progress on diatoms in mangrove areas[J]. Marine Sciences, 2002, 26(3): 17-19.
- [5] 高宇, 林光辉. 典型红树林生态系统藻类多样性及其在生态过程中的作用[J]. 生物多样性, 2018, 26(11): 1223-1235.
GAO Yu, LIN Guanghui. Algal diversity and their importance in ecological processes in typical mangrove ecosystems[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(11): 1223-1235.
- [6] BISWAS H, DEY M, GANGULY D, et al. Comparative analysis of phytoplankton composition and abundance over a two-decade period at the land-ocean boundary of a tropical mangrove ecosystem[J]. Estuaries Coast, 2010, 33(2): 384-394.
- [7] HILALUDDIN F, YUSOFF F M, NATRAH F M I, et al. Disturbance of mangrove forests causes alterations in estuarine phytoplankton community structure in Malaysian Matang mangrove forests[J]. Marine Environmental Research, 2020, 158: 104935.
- [8] 金德祥. 中国海洋底栖硅藻类(上卷)[J]. 海洋地质研究动态, 1983(9): 19.
JIN Dexiang. The benthic diatoms of Chinese seas (Part I)[J]. Marine Geology Research Trends, 1983(9): 19.
- [9] 水利部水文局, 长江流域水环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
Hydrological Bureau of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Basin Water Environment Monitoring Center. The common algae of inland waters in China[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2012.
- [10] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第十四卷: 硅藻门: 舟形藻科. I [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LI Jiaying, QI Yuzao. The Freshwater Algae of China, Vol. XIV, Bacillariophyta. Naviculaceae, Part I. China Freshwater Algae, Vol. XIV, Bacillariophyta. Naviculaceae, Part I[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [11] 程兆第, 高亚辉. 中国海藻志: 第五卷: 硅藻门: 第三册: 羽纹纲 II 舟形藻目 舟形藻科 桥弯藻科 耳形藻科 异极藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
CHENG Zhaodi, GAO Yahui. The marine algae of China, Vol. 5, Bacillariophyta, Part 3, Fragilariophyceae II Naviculales Naviculaceae, Pontaliaceae, Amphipodaceae, Denticulaceae. China Marine Algae, Vol. 5, Bacillariophyta, Part 3[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [12] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU Hongjun, LI Yaoying, WEI Yinxin, et al. China freshwater algae: systematics, taxonomy, and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [13] SERIEYSSOL K K. Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats[J]. Diatom Research, 2012, 27(2): 103.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范. 第5部分, 沉积物分析: GB 17378.7—1998[S]. 1999.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Marine monitoring specifications. part 5: sediment analysis: GB 17378.7—1998[S]. 1999.
- [15] 何书哈, 欧阳添, 赵璐, 等. 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3242-3252.
HE Shuhan, OUYANG Tian, ZHAO Lu, et al. Analysis of phytoplankton community stability and influencing factors in a tributary of the three gorges reservoir[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3242-3252.
- [16] 宋倩, 丁嘉苇, 尹卫, 等. 青海玛柯河丰水期着生藻类多样性及其与水环境因子的关系[J]. 青海大学学报, 2024, 42(04): 1-9.
SONG Qian, DING Jiawei, YIN Wei, et al. Diversity of periphytic algae and its relationship with water environmental factors in the Maqu River of Qinghai during high-flow period[J]. Journal of Qinghai University, 2024, 42(04): 1-9.
- [17] 李涛. 松花江下游藻类群落结构特征与环境因子的关系[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
LI Tao. Relationship between algal community structure and environmental factors in the lower reaches of the Songhua River[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [18] 张玥彤. 密江河丰、枯水期着生藻类与环境因子关系的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
ZHANG Yuetong. Relationship between periphytic algae and environmental factors in the Mijiang River during high-flow and low-flow periods[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023.
- [19] 徐季雄, 徐敏月, 王金东, 等. 淮河干流江苏段着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(3): 41-46.
XU Jixiong, XU Minyue, WANG Jindong, et al. Relationship between periphytic algae community structure and environmental factors in Jiangsu section of the mainstream of Huai River[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2024, 36(3): 41-46.
- [20] WAH T T, WEE Y C. Diatoms from mangrove environments of Singapore and southern Peninsular Malaysia[J]. Botanica Marina, 1988, 31(4): 317-328.
- [21] CHEN C P, GAO Y H, Lin P. Geographical and seasonal patterns of epiphytic diatoms on a subtropical mangrove (*Kandelia candel*) in southern China[J]. Ecol Indic, 2010, 10(2): 143-147.
- [22] 刘玉, 陈桂珠. 深圳福田红树林区藻类群落结构和生态学研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1997(1): 102-107.
LIU Yu, CHEN Guizhu. Study on community structure and ecology of algae in mangrove areas in Futian, Shenzhen[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1997(1): 102-107.
- [23] 朱根海, 陈国通, 杨俊毅. 南麂列岛潮间带的微小型底栖藻类[J]. 东海海洋, 1994, 12(2): 17-28.
ZHU Genhai, CHEN Guotong, YANG Junyi. Microbenthic algae in the intertidal zone of the Nanji Islands[J]. Donghai Haiyang, 1994, 12(2): 17-28.
- [24] 张玉荣, 丁跃平, 郭远明, 等. 乐清湾浮游植物群落结构调查研究[J]. 福建水产, 2013, 35(4): 249-257.
ZHANG Yurong, DING Yueping, GUO Yuanming, et al. Investigation on community structure of phytoplankton in Yueqing Bay[J]. Journal of Fisheries Research, 2013, 35(4): 249-257.
- [25] 姚炜民, 郑爱榕, 邱进坤. 浙江洞头列岛海域水体富营养化及其与赤潮的关系[J]. 海洋环境科学, 2007(5): 466-469.
YAO Weimin, ZHENG Airong, QIU Jinkun. Eutrophication in Dongtou Islands Zhejiang and the relationships between eutrophication and red tide[J]. Marine Environmental Science, 2007(5): 466-469.
- [26] ZHAO K, YANG J, LYU J, et al. Structural characteristics of periphytic algal community and its relationship with environmental factors in the Taiyuan region of the Fenhe River[J]. Water (Basel), 2022, 14(14): 2151.
- [27] 李程程. 双台子河口湿地植物—土壤生态化学计量特征及其相关性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
LI Chengcheng. Study on ecological stoichiometry characteristics and correlation of plants and soil in the wetland of Shuangtaizi Estuary[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [28] 刘欢, 何洁, 樊晓茹, 等. 盘锦红海滩土壤理化性质和土壤酶调查[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 46-53.
LIU Huan, HE Jie, FAN Xiaoru, et al. A preliminary study on the reasons for the degradation of *S. heteroptera*: soil physical and chemical properties and soil enzyme investigation[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 46-53.
- [29] 林世玲. 硫肥和 pH 值的变化对土壤有效磷含量和作物产量的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
LIN Shiling. Effect of sulfur fertilizer and pH on available phosphorus and grain yield[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [30] MAPLES R. Community structure of diatoms epiphytic on pneumatophores of the black mangrove, *avicennia germinans*, in a

- Louisiana salt marsh[J]. *Gulf Research Reports*, 1983, 7: 255-259.
- [31] 刘松萌, 杜晓辉, 肖勤. 藻类的生态价值及研究意义[J]. *环球市场信息导报*, 2018(17): 175.
LIU Songmeng, DU Xiaohui, XIAO Qin. Ecological value and research significance of algae[J]. *Global Market Information Herald*, 2018(17): 175.
- [32] 陈长平. 闽粤沿海几个红树林区硅藻的生态分布和 6 种重金属对底栖硅藻胞外产物的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2004.
CHEN Changping. Ecological distribution of diatoms in some mangrove areas along the coast of Fujian and Guangdong Province and influence of six heavy metals on extracellular polymeric substances secreted by benthic diatoms[D]. Xiamen: Xiamen University, 2004.
- [33] 邱勇, 王源勇, 谢聿原, 等. 福建漳江口红树林底质环境因子对底栖硅藻初级生产力的影响[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(1): 53-61.
QIU Yong, WANG Yuanyong, XIE Yuyuan, et al. Effects of environmental factors on primary production of microphytobenthos in the mangrove system of Zhangjiang Estuary Fujian Province[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(1): 53-61.
- [34] 陈长平, 高亚辉, 林鹏. 福建省福鼎市后屿湾红树林区水体浮游植物群落动态研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2005(1): 118-122.
CHEN Changping, GAO Yahui, LIN Peng. Dynamics of phytoplankton community in mangrove waters in Fuding City, Fujian Province, China[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2005(1): 118-122.