

春季白沙湾浮游纤毛虫群落结构及其与环境因子的关系

吴风霞¹, 黄洪辉¹, 黄建荣², 刘华雪¹

1. 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;

2. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275

摘要: 根据 2014 年春季(4 月)白沙湾海域 3 个功能区域(鱼类网箱养殖区、贝藻混养区、非养殖区) 13 个站位生物和环境的调查资料, 对浮游纤毛虫的群落特征进行分析, 并且探讨了影响浮游纤毛虫群落变动的主要环境因素。结果表明: 共检出 19 种纤毛虫, 隶属于 6 目 11 属; 纤毛虫丰度范围为 80~3740 个·L⁻¹, 平均丰度为 995.4±123.1 个·L⁻¹, 以环毛目(Cyclotrichida)、急游目(Strombidiida)和砂壳目(Tintinnida)为主; 优势种包括红色中缢虫(*Mesodinium rubrum*)、锥形急游虫(*Strombidium conicum*)、百乐拟铃虫(*Tintinnopsis beroidea*)、球形急游虫(*Strombidium globosaneum*)、小拟铃虫(*Tintinnopsis minuta*)和锥形旋曳尾虫(*Spirotontonia turbinata*)。纤毛虫群落结构存在显著的空间差异, 种类数及丰度呈现鱼类网箱养殖区偏低, 而贝类混养区和对照区较高的特征。通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)多元分析发现, 白沙湾浮游纤毛虫群落结构差异主要与水体营养盐水平和叶绿素 *a* 浓度有关。

关键词: 浮游纤毛虫; 白沙湾; 群落结构; 环境因子; 多元分析

中图分类号: P735.532 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2016)03-0079-08

Spatial pattern of the planktonic ciliate community in spring in Baisha Bay, South China Sea, and its relationship with its environment

WU Fengxia¹, HUANG Honghui¹, HUANG Jianrong², LIU Huaxue¹

1. Key Laboratory of Marine Fishery Ecology Environment of Guangdong Province, Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. School of Life Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Based on the samples collected in surface waters from three functional areas including 13 sites (cage fish culture area, oyster-algae mixed culture area and non-aquaculture area) in Baisha Bay in April 2014, species composition and abundance of planktonic ciliate were investigated. They were combined with environmental data to obtain spatial pattern of the ciliate community and its relationship with environment variables. A total of 19 species belonging to 11 genera and six orders were identified. The mean abundance of ciliate was 995.4±123.1 ind·L⁻¹ (80~3740 ind·L⁻¹), and Tintinnida, Strombidiida and Cyclotrichida were the most abundant in terms of both number and abundance. There were six dominant species (dominance $Y \geq 0.02$), including *Mesodinium rubrum*, *Strombidium conicum*, *Tintinnopsis beroidea*, *Strombidium globosaneum*, *Tintinnopsis minuta*, and *Spirotontonia turbinata*. Clear spatial distributions in terms of species composition and abundance were observed. Planktonic ciliate was more abundant and diverse in the oyster-algae mixed culture area and non-aquaculture area, but lowest

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-08-28。殷波编辑

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2014YD02)

作者简介: 吴风霞(1979—), 女, 山东省章丘市人, 助理研究员, 博士研究生, 从事渔业生态与环境研究。E-mail: wufxMC@126.com

通信作者: 黄洪辉。E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

Received date: 2015-07-20; Revised date: 2015-08-28. Editor: YIN Bo

Foundation item: Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences (2014YD02)

Corresponding author: HUANG Honghui. Email: huanghh@scsfri.ac.cn

abundance and species occurred in the cage fish culture area. Clustering analysis also indicated that the total samples could be separated based on spatial distribution. Redundancy analysis demonstrated that the nutrient level and Chlorophyll *a* concentration were the most important factors affecting the spatial pattern of planktonic ciliate community in Baisha Bay.

Key words: planktonic ciliate; Baisha Bay; community structure; environment variables; multivariate analysis

浮游纤毛虫是海洋中营浮游生活的一类单细胞真核原生动动物, 摄食 pico-级($0.2\sim 2\mu\text{m}$)和 nano-级($2\sim 20\mu\text{m}$)初级生产者, 同时又是鱼类、虾类、贝类和底栖动物的饵料来源(Pierce et al, 1993)。因此, 作为联系微食物网和经典食物链的关键环节(Azam et al, 1983), 浮游纤毛虫的群落结构变化往往会影响整个微生物网及生态系统结构的变动(Finlay et al, 1998)。纤毛虫具有较薄的外表膜, 对环境的各种胁迫反应敏感, 其种群动态、群落结构与功能特点可以反映出所在水体的营养水平和水环境质量, 已在河流、湖泊、水库和沿海的水质监测中得到了广泛的应用(许木启 等, 2001; 李静 等, 2014; Xu et al, 2008; Jiang et al, 2011)。

白沙湾位于南澳岛北部, 面积约 6.84km^2 , 平均水深 3m (谷阳光 等, 2013), 与福建柘林湾隔海相望, 被东、南、西三面陆地包围成“V”形湾口, 良好的自然环境使白沙湾发展成为南澳主要养殖区。近年来, 为发展当地经济, 南澳海域已开展了大规模的鱼类网箱养殖、牡蛎养殖和龙须菜养殖(杜虹 等, 2010),

导致养殖海域环境日趋恶化。本文研究了白沙湾海域春季浮游纤毛虫的群落结构以及浮游纤毛虫与环境间的关系。

1 材料和方法

1.1 采样位点设置和样品采集

2014 年 4 月 21 日在白沙湾海域的 13 个站位进行采样(图 1)。其中鱼类网箱养殖区设 3 个站位(S1、S2、S3), 贝藻混养区设 7 个站位(S4、S5、S6、S7、S8、S9、S10), 对照区设 3 个站位(S11、S12、S13)。采样时, 用 Niskin 采水器采集表层水(水面下 0.5m)。纤毛虫丰度和种类测定样品的前处理方法是: 将 2.5L 表层海水倒入白色塑料桶, 加入甲醛固定, 甲醛终浓度为 2% , 颠倒几次使混合均匀。取 500mL 水样经 GF/F 滤膜过滤, 滤膜吸干后置于 -20°C 冰箱保存, 用以测定叶绿素 *a* 浓度。将 1L 水样装入干净的塑料瓶, 放入保温箱, 尽快带回实验室用来测定其他水化学指标。各站位温度(*T*)、盐度(*Sal*)、pH 用便携式水质分析仪(YSI Professional Plus)现场测定。

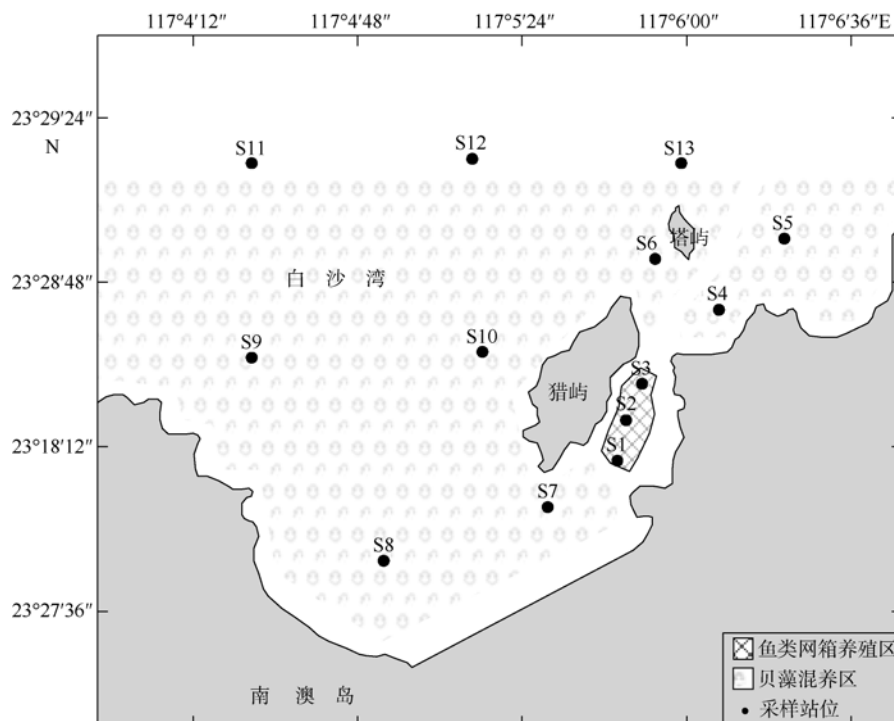


图 1 2014 年 4 月白沙湾海域浮游纤毛虫调查站位分布

Fig. 1 Sampling stations of planktonic ciliate in surface waters around Baisha Bay in spring 2014

1.2 样品分析及鉴定

带回实验室的 GF/F 滤膜用 90% 丙酮在黑暗中

于 -20°C 萃取 24h , 然后用荧光光度计(Tuner-10-AU)测定叶绿素 *a* (Chl *a*)浓度。主要生态环境因子包

括溶解氧(DO)、化学好氧量(COD_{Mn})、营养盐浓度(NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P)等分析均按照《海洋监测规范》(国家质量监督检验检疫总局, 2007)规定的方法进行。由甲醛固定的2.5L海水浮游纤毛虫样品, 在实验室自然沉降48h以上, 逐步浓缩至50mL, 然后将样品摇匀, 取0.1mL滴入计数框中, 用200×或400×光学显微镜进行全片计数和种类鉴定。每个样品计数6次, 取平均值, 控制标准差(SE)使小于8%, 然后换算成每升水体的个体数。种类鉴定和分类参照宋微波(2008), 刘瑞玉等(2008)和Kofoid (1929、1939)。

1.3 数据处理与分析

浮游纤毛虫数量丰度以每升出现的个体数表示(个·L⁻¹)。优势种的优势度公式为 $Y = (n_i / N) \times f_i$ 。式中: n_i 为第*i*种纤毛虫的丰度; f_i 为第*i*种纤毛虫在各站位中出现的频率; N 为总个体丰度。优势种以 $Y \geq 0.02$ 为划分标准(徐兆礼等, 1989)。物种结构多样性指数包括样品的种类多样性指数(H'), 即Shannon-Winner指数、种类均匀度指数(J')和种类丰富度指数(d)(Jiang et al, 2011), 计算公式如下:

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

$$J' = H' / \ln S \tag{2}$$

$$d = (S - 1) / \ln N \tag{3}$$

式中: P_i 为样品中属于*i*种纤毛虫的丰度比例; S 为总种类数; N 为总个体丰度; n_i 为第*i*种纤毛虫的丰度; f_i 为第*i*种纤毛虫的出现频率。

本研究数据中的多元分析采用PRIMER v5.0软件包完成, 其中群落结构分析部分采用聚类分析(CLUSTER)和多维定标分析(MDS)模块; 不同区域群落及环境因子间的差异显著性检验采用ASOSIM

模块; 生物环境相关分析采用生物-环境链接(BIOENV)模块; 环境变量的显著性检验采用RELATE模块。采用Bray-Curtis相似性方法构建生物因子相似性矩阵, 浮游纤毛虫种类丰度数据转换采用4次方根转换(廖秀丽等, 2013); 采用欧氏距离(Euclidean)法构建环境因子相似性矩阵。

筛选得到出现频率 ≥ 3 个站位和丰度比例 $\geq 1\%$ 的纤毛虫种类丰度数据, 利用CANOCO 4.5软件包的去趋势对应分析(DCA)来确定生物数据适用于线性模型还是单峰型模型, 通过冗余分析(RDA)获得纤毛虫群落与环境变量的关系。RDA分析所用数据为经过 $\log(x+1)$ 转换的数据。Spearman相关性分析采用SPSS v20.0软件。纤毛虫水平分布图用surfer 12软件绘制。

2 结果

2.1 环境因子

白沙湾3个调查区域的水体理化因子参数见表1。水温、溶解氧、盐度和pH在3个调查区域无明显差异。鱼类网箱养殖区总氮DIN(包括NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N)、磷(PO₄³⁻-P)等营养盐水平高于贝藻混养区和对照区。氮、磷营养盐含量均以S1站位最高(总氮13.06μmol·L⁻¹, 磷0.93μmol·L⁻¹), 而贝藻混养区的S8站位(总氮4.50μmol·L⁻¹, 磷0.36μmol·L⁻¹)和S9站位(总氮6.37μmol·L⁻¹, 磷0.29μmol·L⁻¹)均较低。鱼类网箱养殖区的化学耗氧量(COD_{Mn})为0.97mg·L⁻¹, 高于对照区(0.45mg·L⁻¹)和贝藻混养区(0.66mg·L⁻¹)。叶绿素*a*浓度在鱼类网箱养殖区偏低为1.00μg·L⁻¹, 而在对照区(1.94μg·L⁻¹)和贝藻混养区(1.90μg·L⁻¹)均较高。

表1 2014年4月白沙湾采样点表层水中理化因子状况
Tab. 1 Variation of environmental variables at the three sampling areas in Baisha Bay in spring 2014

环境参数	对照区	鱼类网箱养殖区	贝藻混养区
温度/℃	21.75 (21.53~21.98)	22.03 (21.7~22.2)	22.20 (21.69~23.51)
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	6.37 (6.27~6.48)	6.20 (5.84~6.51)	6.24 (6.08~6.44)
盐度/‰	31.16 (30.93~31.45)	31.56 (31.43~31.67)	31.49 (30.97~31.88)
pH	8.20 (8.17~8.21)	8.19 (8.12~8.25)	8.24 (8.06~8.39)
化学耗氧量/(mg·L ⁻¹)	0.45 (0.30~0.67)	0.97 (0.49~1.32)	0.66 (0.29~0.86)
NO ₂ ⁻ 度/(μmol·L ⁻¹)	0.29 (0.27~0.32)	0.32 (0.07~0.48)	0.33 (0.28~0.37)
NO ₃ ⁻ 浓度/(μmol·L ⁻¹)	5.54 (4.50~7.93)	8.79 (7.86~9.29)	4.79 (4.00~5.29)
NH ₄ ⁺ 浓度/(μmol·L ⁻¹)	2.76 (2.07~3.50)	3.12 (2.86~3.36)	2.67 (1.50~3.64)
总氮浓度/(μmol·L ⁻¹)	8.59 (8.41~8.72)	12.23 (11.37~13.06)	7.79 (4.50~10.13)
PO ₄ ³⁻ 浓度/(μmol·L ⁻¹)	0.55 (0.50~0.57)	0.88 (0.86~0.93)	0.61 (0.28~0.79)
Chl <i>a</i> 密度/(μg·L ⁻¹)	1.94 (1.78~2.06)	1.00 (0.77~1.15)	1.90 (1.31~3.77)

注: 表中数值分别为平均值及其变化范围

2.2 纤毛虫种类组成和丰度

经鉴定, 所采集样品中共有纤毛虫 19 种, 隶属于 11 属, 6 目, 分别是急游目(Strombidiida)、砂壳目(Tintinnida)、游仆目(Euplotida)、环毛目(Cyclotrichida)、内生目(Endogenida)和固着目(Sessilida)。其中, 砂壳目种类最多, 共 10 种, 占总种类的 52.63%; 急游目次之, 共 5 种, 占总种数的 26.32%; 其余 4 个目, 各出现 1 种, 占总种数的 5.26%。环毛目、急游目和砂壳目类纤毛虫丰度最大, 分别占总丰度的 50.39%、28.28%、20.4%。优势种共 6 种, 依次是红色中缢虫(*Mesodinium rubrum*)、锥形急游虫(*Strombidium conicum*)、百乐拟铃虫(*Tintinnopsis beroidea*)、球形急游虫(*Strombidium globosaneum*)、小拟铃虫(*Tintinnopsis minuta*)和锥形旋曳尾虫(*Spirotontonia turbinata*) (表 2)。优势种的累积丰度占总丰度的 87.9%, 全部优势种的出现频率都在 70% 以上, 球形急游虫在全部样品中均有记录。

2.3 纤毛虫水平分布

白沙湾表层海域的浮游纤毛虫丰度变化范围为 80~3740 个·L⁻¹, 平均丰度为 995.4±123.1 个·L⁻¹, 呈现贝藻混养区和非养殖区较高, 鱼类网箱养殖区较低的特征(图 2a)。不同站位之间纤毛虫种类差异较

大(4~10 种之间), 分布趋势如图 2b 所示。丰度最高值出现在 S10 站位, 尤其是红色中缢虫丰度达到 3040 个·L⁻¹; 丰度低值出现在 S2 站位, 仅 80 个·L⁻¹ (图 3a)。在鱼类网箱养殖区的站位 S1 和 S2, 种数最少, 而种类数的高值区出现在贝藻混养区的 S8 和 S10 (图 3b)。

表 2 2014 年 4 月白沙湾纤毛虫名录及优势种
Tab. 2 List of ciliate species recorded and dominant species in Baisha Bay in spring 2014

1 锥形急游虫* <i>Strombidium conicum</i>	11 东方拟铃虫 <i>Tintinnopsis vosmaeri</i>
2 球形急游虫* <i>Strombidium globosaneum</i>	12 太平洋领细壳虫 <i>Stenosemella pacifica</i>
3 急游虫 <i>Strombidium</i> sp.	13 杆状真丁丁虫 <i>Eutintinnus stramentus</i>
4 锥形旋曳尾虫* <i>Spirotontonia turbinata</i>	14 开孔真丁丁虫 <i>Eutintinnus apertus</i>
5 球果螺体虫 <i>Laboea strobila</i>	15 简单薄铃虫 <i>Leprotintinnus simplex</i>
6 小拟铃虫* <i>Tintinnopsis minuta</i>	16 红色中缢虫* <i>Mesodinium rubrum</i>
7 根突拟铃虫 <i>Tintinnopsis radix</i>	17 稀毛游仆虫 <i>Euplotes rariseta</i>
8 百乐拟铃虫* <i>Tintinnopsis beroidea</i>	18 足吸管虫 <i>Podophrya</i> sp.
9 管状拟铃虫 <i>Tintinnopsis tubulosa</i>	19 钟虫 <i>Vorticella</i> sp.
10 盾形拟铃虫 <i>Tintinnopsis urnula</i>	

注: *为优势种($Y \geq 0.02$)

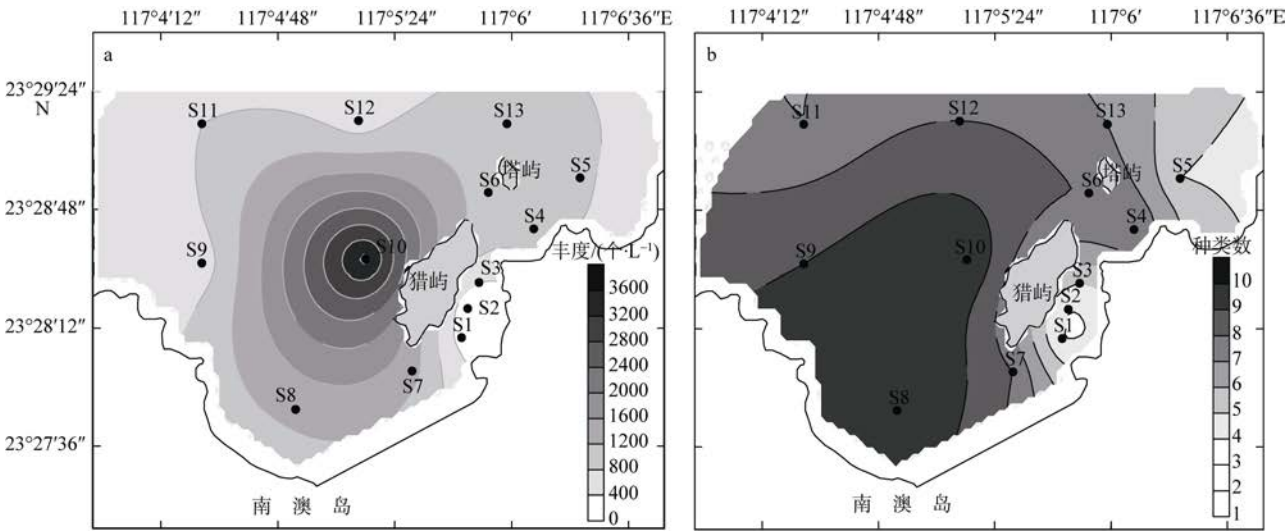


图 2 2014 年 4 月白沙湾浮游纤毛虫丰度(a)和种类数(b)水平分布图
Fig. 2 Horizontal distributions of planktonic ciliate abundance (a) and species number (b) in Baisha Bay in spring 2014

2.4 纤毛虫群落结构

基于组平均法的聚类分析对纤毛虫群落进行划分, 将 13 个表层浮游纤毛虫样品在 40% 的相似性水平上划分为 2 组(图 4a): 第一组包括位于鱼类网箱养殖区站位 S2 的样品, 该组的丰度最低; 第二组包括鱼类网箱养殖区部分站位, 贝藻混养区及对照区

全部站位的样品(S1、S3~S13)。同时第二组在 60% 的相似水平上可进一步划分为 3 个亚组: 第一亚组为站位 S9, 该站出现了固着类纤毛虫——钟虫(*Vorticella* sp.); 第二亚组为站位 S1, 未出现红色中缢虫(*M. rubrum*); 第三亚组的主要贡献种是红色中缢虫(*M. rubrum*)、锥形急游虫(*S. conicum*)、百乐拟铃虫(*T.*

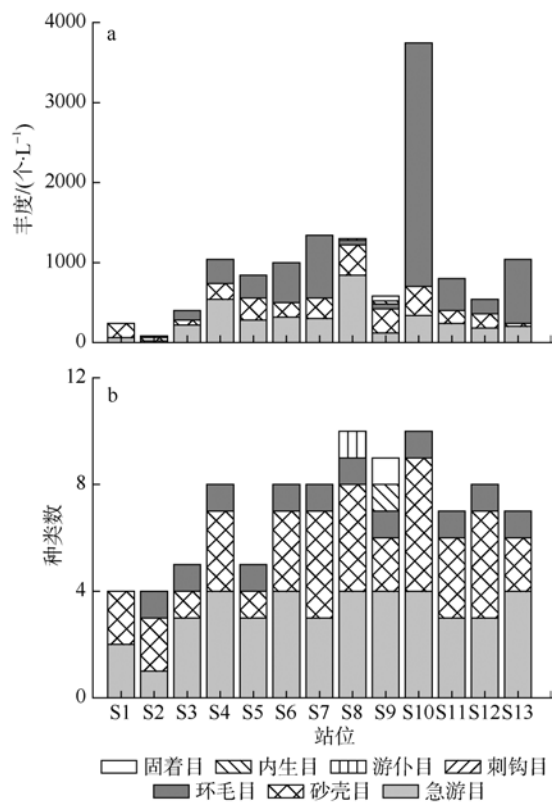


图 3 2014 年 4 月白沙湾浮游纤毛虫丰度(a)和种类数(b)
Fig. 3 Variations of ciliate abundance (a) and species number (b) in 13 sites of Baisha Bay in spring 2014

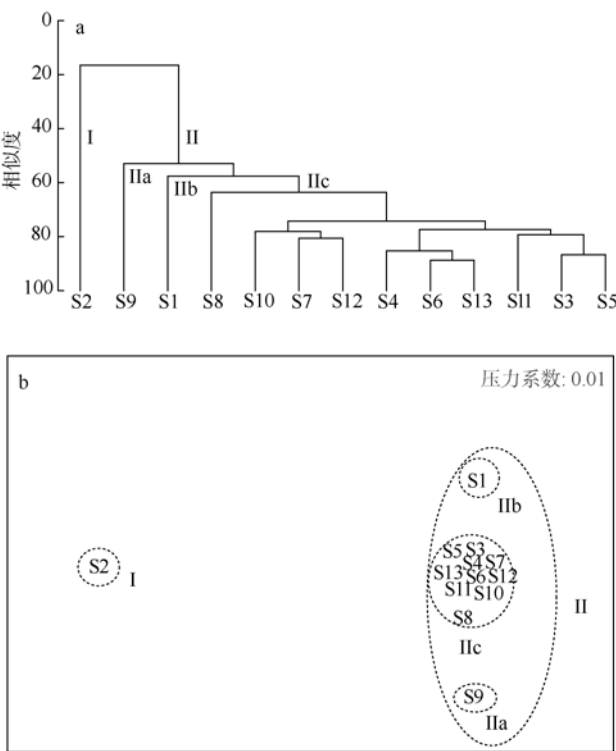


图 4 2014 年 4 月白沙湾 13 个站位浮游纤毛虫样品的聚类分析树状图(a)和 MDS 分析图(b)
Fig. 4 Dendrogram of cluster analysis (a) and MDS plot (b) based on the data of surface samples from 13 sites in Baisha Bay in spring 2014

beroidea)和球形急游虫(*S. globosaneum*)。相似性分析(ANOSIM)表明各组之间存在显著性差异($r=0.969$, $p<0.05$), 通过多维尺度分析(MDS)得出了与聚类分析一致的结果(图 4b)。

2.5 纤毛虫群落与环境因子的相关性

BIOENV 分析表明, 对纤毛虫群落的空间分布影响最为显著的环境因子是 COD_{Mn} 、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DIN 和 $\text{Chl } a$ (表 3)。在最匹配的 10 组变量中全部出现了 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 $\text{Chl } a$, 说明这三者是主要的环境因子。RELATE 分析显示, 纤毛虫群落分布的空间差异与环境因子的变化之间有显著的相关性($r=0.367$, $p=0.022$)。Spearman 相关性分析结果表明, 纤毛虫种类数和种类丰富度均与 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 呈负相关($p<0.05$); 纤毛虫丰度与 $\text{Chl } a$ 呈正相关($p<0.05$), 而与 NO_3^- -N 和 DIN 呈负相关($p<0.01$); 种类均匀度与 $\text{Chl } a$ 呈负相关。此外, 浮游纤毛虫优势种——红色中缢虫与 $\text{Chl } a$ 呈显著正相关关系($p<0.01$), 而小拟铃虫与氮磷营养盐(如 NO_2^- 、 NH_4^+ 、DIN、 PO_4^{3-})呈显著负相关(表 4)。

表 3 2014 年 4 月白沙湾 13 个采样点纤毛种类虫丰度与环境因子之间关系的 BIOENV 分析

Tab. 3 Summary results from BIOENV for the best matches of environmental variables with spatial variations in ciliate abundance at 13 sampling sites in Baisha Bay in spring 2014

排序	环境因子	r	p
1	COD_{Mn} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.986	0.01
2	NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 PO_4^{3-} 、 $\text{Chl } a$	0.968	0.01
3	COD_{Mn} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 $\text{Chl } a$	0.967	0.01
4	NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.960	0.01
5	DO、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.958	0.01
6	T 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.958	0.01
7	Sal、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.958	0.01
8	NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.958	0.01
9	pH、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、DIN、 $\text{Chl } a$	0.958	0.01
10	COD_{Mn} 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 $\text{Chl } a$	0.955	0.01

用限制性排序法研究出现频率 ≥ 3 个站位并且丰度比例 $\geq 1\%$ 的纤毛虫种类的纤毛虫丰度与各环境因子之间的关系。首先, 通过去趋势对应分析(DCA)得到最大梯度为 1.451 (<3), 表明适用于线性分布模型的冗余分析(RDA)能够更好地体现纤毛虫群落的变化与环境变化之间的关系。4 个排序轴($p<0.05$)解释了 83.8%的物种-环境关系, 第一、二两轴分别解释了 44.9%和 17.8%的纤毛虫群落变化(图 5)。环境因子 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P、pH 和 $\text{Chl } a$ 是浮游纤毛虫

表 4 2014 年 4 月白沙湾 13 个采样点环境因子与纤毛虫种类数(S), 丰度(N), 种类多样性(H'), 种类均匀度(J'), 种类丰富度(d)和优势种的 Spearman 相关性分析

Tab. 4 Correlations (Spearman analysis) of environmental variables with species number (S), abundance (N), species diversity (H'), species evenness (J'), and species richness (d) of ciliate and dominant species at 13 sampling sites in Baisha Bay in spring 2014

	T	DO	Sal	pH	COD	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	TIN	PO_4^{3-}	Chl a
S	0.363	-0.117	0.169	0.361	-0.160	-0.055	0.194	-0.636*	-0.097	-0.621*	0.534
N	0.051	-0.152	0.228	0.125	0.024	0.308	-0.664*	0.230	-0.629*	-0.080	0.861**
H'	0.123	-0.111	-0.036	0.135	-0.115	-0.178	-0.324	-0.160	0.341	-0.306	-0.463
J'	-0.063	-0.128	0.007	-0.081	0.110	-0.125	-0.486	0.292	-0.292	0.249	-0.725**
d	0.438	-0.197	0.209	0.432	-0.208	-0.229	0.074	-0.719**	-0.238	-0.704**	0.328
<i>S. conicum</i>	0.827**	-0.193	0.231	0.396	0.131	-0.406	-0.353	-0.236	-0.407	-0.462	-0.078
<i>S. globosaneum</i>	-0.189	-0.129	-0.266	-0.493	-0.111	0.381	0.080	-0.227	-0.007	0.218	0.057
<i>S. turbinata</i>	-0.013	0.083	-0.404	-0.148	-0.438	0.654*	0.457	0.313	0.536	-0.081	0.556*
<i>T. minuta</i>	0.749*	-0.096	0.618	0.811**	0.324	-0.701**	-0.387	-0.652*	-0.615*	-0.755**	0.018
<i>T. beroidea</i>	-0.121	0.213	-0.148	-0.159	-0.005	0.659**	0.132	0.455	0.323	0.301	0.515
<i>M. rubrum</i>	-0.190	-0.108	0.140	-0.029	-0.029	0.530	0.507	0.434	0.392	0.091	0.883**

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$

群落变化的最主要的影响因子, 其次是 DIN、Sal、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N。第一轴与 Chl a 、 NO_2^- -N 和 DO 呈现负相关性, 而与其他环境变量呈现正相关性(图 5)。鱼类网箱养殖区样品位于第二轴的右侧, 而贝藻混养区(S5、S9 除外)和对照区样品则位于左侧(图 5)。此外, 鱼类网箱养殖区样品 S1~S3 位于第一轴正向, 呈现出高氮磷营养盐, 低 Chl a 含量的特征(尤其是 S2 最低), 同时该区纤毛虫丰度最小。球形急游虫和百乐拟铃虫是鱼类网箱养殖区的突出优势种。在贝类混养区及对照区样品(S4~S13)呈现氮磷相对较低, 但 Chl a 浓度较高的特征。其中: 样品 S4、S6、S7、S8、S10、S11、S13 具有较高的 Chl a 含量, 且纤毛虫的丰度也较大, 尤其 S10 (Chl a 浓度和纤毛虫的丰度均最高); 样品 S4、S10 还表现出高亚硝酸盐(NO_2^- -N)特征; 样品 S5 和 S12 具有较高的 Chl a 浓度, 但其纤毛虫丰度相对偏低; 样品 S5 还表现出高氨氮(NH_4^+ -N)的特征; 样品 S9 氮磷营养盐水平稍低, 其纤毛虫丰度也相对较小。贝藻混养区和对照区主要的优势种是红色中缢虫、锥形急游虫、百乐拟铃虫、球形急游虫。

3 讨论

3.1 纤毛虫群落的水平分布

在本研究中, 浮游纤毛虫的种类数和丰度在贝藻混养区和对照区较高, 而在鱼类网箱养殖区偏低, 这可能与人类活动的干扰有关。在白沙湾鱼类网箱养殖区, 鱼排过于拥挤密集, 悬浮物密度高, 水体透光性差, 阻碍浮游植物的光合作用; 在海水网箱

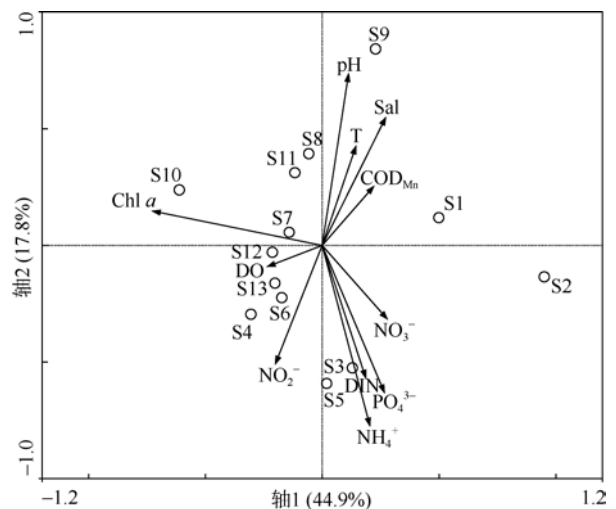


图 5 2014 年 4 月白沙湾纤毛虫群落与环境因子关系的 RDA 二维排序图

百分比为环境因子对纤毛虫群落组成变化的解释大小

Fig. 5 RDA two-dimensional plot showing the relationships between ciliate community and environmental variables in Baisha Bay in spring 2014

养殖过程中, 残饵、粪便、投药及鱼类排泄物的影响, 造成水体环境复杂, 加之鱼类对浮游植物的摄食作用的影响(张俊梅 等, 2012; 彭鹏飞 等, 2012); 另外, 鱼类网箱养殖区特殊的地理条件, 造成水体交换能力比较差, 致使该区的浮游植物密度较低(叶绿素 a 含量: 对照区 > 贝藻混养区 > 鱼类网箱养殖区); 浮游纤毛虫群落不仅受到捕食者(如桡足类、幼鱼)的影响, 也受到食物-浮游植物的影响(Miyaguchi et al, 2006; Pitt et al, 2007), 这可能是导致鱼类网箱养殖区浮游纤毛虫丰度低的一个主要原因。此外,

在贝藻混养养殖区,一方面,贝藻混养区水体交换能力比鱼类网箱养殖区好;另一方面,大型藻类可以去除养殖生物的可溶性代谢物,改善水质,综合调控养殖环境(岳维忠等,2004),因此叶绿素 *a* 浓度及浮游纤毛虫丰度均相应较高。在对照区,由于位于航道上,水体搅动频繁,营养盐丰富,叶绿素 *a* 浓度较高,浮游纤毛虫丰度也相应较高。

3.2 纤毛虫群落与环境因子的关系

纤毛虫群落结构受到多种因素的共同影响,如光强、海水扰动程度、温度、营养盐水平以及食物来源和捕食者等(Sanders et al, 1995; Wang et al, 2014; 于莹等, 2011)。其中,营养盐水平是影响纤毛虫群落结构变化的一个重要因素。Wang等(2013)对北部湾海域的研究表明,浮游纤毛虫群落结构与氮磷营养盐的含量显著相关。在对胶州湾纤毛虫的研究中发现,纤毛虫的丰度与硝态氮(NO_3^- -N)和溶解活性磷酸盐(SRP)显著正相关(Jiang et al, 2011)。但是,在本研究中纤毛虫的丰度与 NO_3^- -N 呈负相关关系。这可能主要与鱼类网箱养殖活动的自身污染以及水体交换条件不好有关。另外, Spearman 相关性分析表明纤毛虫群落对叶绿素 *a* 浓度十分敏感。纤毛虫丰度与叶绿素 *a* 浓度之间呈显著正相关关系,这表明食物供给是影响浮游纤毛虫群落变动的一个重要因素。Wang等(2014)在对深沪湾的调查

中发现,砂壳类纤毛虫的丰度与浮游植物的丰度呈显著正相关关系。Uye等(1996)发现砂壳类纤毛虫生物量与叶绿素含量也呈现正相关关系。因此,上述研究结果都显示纤毛虫群落与水体中氮磷营养盐的水平及叶绿素 *a* 含量有着潜在的关联,而这些环境因子对纤毛虫群落的影响在不同海域有所差异。

红色中缢虫作为本研究中优势度最高的纤毛虫,其平均丰度为 $501.5 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,对纤毛虫丰度的贡献十分显著。红色中缢虫是自养纤毛虫,体内含有内共生的叶绿体,可以利用光照和营养盐进行光合作用,合成自身所需的有机碳(Stoecker et al, 1989)。在本研究中,红色中缢虫的最高丰度($3040 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$)出现在猎岛西侧的 S10 站,其丰度与叶绿素 *a* 浓度呈现显著的正相关,因此红色中缢虫自身对叶绿素 *a* 浓度的贡献不可忽略。此外,红色中缢虫是一种广泛分布的赤潮原生动物(宋微波等, 1997),在富营养化水域,可短时间内形成很高的密度,并引发赤潮,进而对该海域生态环境和水产养殖造成严重的危害(刘华雪等, 2010)。在春季白沙湾若是在适宜的理化条件,红色中缢虫有可能爆发赤潮,进而对白沙湾的水产养殖业带来很大的危害。总之,纤毛虫群落对营养盐和叶绿素 *a* 的响应都显示出纤毛虫作为生物指标对环境变化有着较高的敏感度。

参考文献 References

- 杜虹, 郑兵, 陈伟洲, 等, 2010. 深澳湾海水养殖区水化因子的动态变化与水质评价[J]. 海洋与湖沼, 41(6): 816–823.
- DU HONG, ZHENG BING, CHEN WEIZHOU, et al, 2010. Variation of water chemical factors and assessment of water quality of Shen'ao Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 41(6): 816–823 (in Chinese).
- 谷阳光, 杨宇峰, 林钦, 2013. 汕头南澳白沙湾养殖区沉积物重金属形态及潜在生态风险[J]. 海洋环境科学, 32(3): 333–337.
- GU YANGGUANG, YANG YUFENG, LIN QIN, 2013. Heavy metal speciation and potential risk assessment in sediments from the mariculture areas in Baisha Bay, Nanao, Shantou[J]. Marine Environmental Science, 32(3): 333–337 (in Chinese).
- 国家质量监督检验检疫总局, 2007. GB/T 17378.4—2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社. GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION, INSPECTION AND QUARANTINE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, 2007. GB/T 17378.4—2007, The Specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standard Press (in Chinese).
- 李静, 戴曦, 孙颖, 等, 2014. 太湖浮游纤毛虫群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 34(16): 4672–4681. LI JING, DAI XI, SUN YING, et al, 2014. Community structure of planktonic ciliates and its relationship to environmental variables in Lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(16): 4672–4681 (in Chinese).
- 廖秀丽, 陈丕茂, 马胜伟, 等, 2013. 大亚湾杨梅坑海域投礁前后浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 南方水产科学, 9(5): 109–119. LIAO XIULI, CHEN PIMAO, MA SHENGWEI, et al, 2013. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors before and after construction of artificial reefs in Yangmeikeng, Daya Bay[J]. South China Fisheries Science, 9(5): 109–119 (in Chinese).
- 刘华雪, 谭烨辉, 黄良民, 等, 2010. 夏季南海北部纤毛虫群落组成及其水平分布[J]. 生态学报, 30(9): 2340–2346. LIU HUAXUE, TAN YEHUI, HUANG LIANGMIN, et al, 2010. Composition and distribution of ciliates in northern South China Sea during summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 30(9): 2340–2346 (in Chinese).
- 刘瑞玉, 徐奎栋, 2008. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社: 216–241. LIU RUIYU, XU KUIDONG, 2008. Checklist

- of marine biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press: 216–241 (in Chinese).
- 彭鹏飞, 胡超群, 于宗赫, 等, 2012. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖区水环境的时空变化及营养状态分析[J]. 热带海洋学报, 31(2): 110–117. PENG PENGFEI, HU CHAOQUN, YU ZONGHE, et al, 2012. Analysis of spatial-temporal variation and nutritional status of water environment in the Dapeng Cove[J]. Journal of Tropical Oceanography, 31(2): 110–117 (in Chinese).
- 宋微波, 胡晓钟, 魏军, 1997. 海洋赤潮纤毛虫—中缢虫 (*Mesodinium* spp.) 的形态学及种间比较[J]. 应用环境生态学报, 3(2): 163–167. SONG WEIBO, HU XIAOZHONG, WEI JUN, 1997. Morphological and comparative studies on *Mesodinium*-red-tidal ciliates in the marine biotope (Protozoa, Ciliophora)[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 3(2): 163–167 (in Chinese).
- 宋微波, 2008. 中国黄渤海的自由生纤毛虫[M]. 北京: 科学出版社: 1–518. SONG WEIBO, 2008. Free-living ciliates in the Bohai and Yellow Seas, China[M]. Beijing: Science Press: 1–518 (in Chinese).
- 许木启, 朱江, 曹宏, 2001. 白洋淀原生动物群落多样性变化与水质关系研究[J]. 生态学报, 21(7): 1114–1120. XU MUQI, ZHU JIANG, CAO HONG, 2001. The relationship between the protozoan community diversity and the water quality in the Baiyangdian Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 21(7): 1114–1120 (in Chinese).
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与给势渔场的关系[J]. 生态学报, 8(4): 13–15. XU ZHAOLI, CHEN YAQU, 1989. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Ecology, 8(4): 13–15 (in Chinese).
- 于莹, 张武昌, 赵楠, 等, 2011. 胶州湾浮游纤毛虫丰度和生物量的周年变化[J]. 海洋与湖沼, 42(5): 690–701. YU YING, ZHANG WUCHANG, ZHAO NAN, et al, 2011. Annual variations in the abundance and biomass of planktonic ciliate in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 42(5): 690–701 (in Chinese).
- 岳维忠, 黄小平, 黄良民, 等, 2004. 大型藻类净化养殖水体的初步研究[J]. 海洋环境科学, 23(1): 13–15. YUE WEIZHONG, HUANG XIAOPING, HUANG LIANGMIN, et al, 2004. Preliminary study on purification of mariculture water by macroscopic algae[J]. Marine Environmental Science, 23(1): 13–15 (in Chinese).
- 张俊梅, 刘擎, 王庆, 等, 2012. 汕头南澳白沙湾浮游植物群落结构及水体营养盐分布特征[J]. 水生态学杂志, 33(2): 61–68. ZHANG JUNMEI, LIU QING, WANG QING, et al, 2012. The phytoplankton community and distribution of nutrients in Baisha Bay, Nanao, Shantou[J]. Journal of Hydroecology, 33(2): 61–68 (in Chinese).
- AZAM F, FEBCHEL T, FIELD J G, et al, 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 10: 257–263.
- FINLAY B J, ESTEBAN G F, 1998. Freshwater protozoa: biodiversity and ecological function[J]. Biological Conservation, 7: 1163–1186.
- JIANG YONG, XU HENGLONG, HU XIAOZHONG, et al, 2011. An approach to analyzing spatial patterns of planktonic ciliate communities for monitoring water quality in Jiaozhou Bay, Northern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 62: 227–235.
- KOFOID C A, CAMPBELL A S, 1929. A conspectus of the marine and freshwater Ciliata belonging to the suborder Tintinninea, with descriptions of new species principally from the Agassiz expedition to the eastern tropical Pacific 1904–1905[M]. Los Angeles: University of California Press: 1–403.
- KOFOID C A, CAMPBELL A S, 1939. The ciliate: the tintinninea[M]. Boston: Museum of Comparative Zoology: 1–473.
- MIYAGUCHI H, FUJIKI T, KIKUCHI T, et al, 2006. Relationship between the bloom of *N. scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan[J]. Journal of Plankton Research, 28: 313–324.
- PIERCE R W, TURNER J T, 1993. Global biogeography of marine tintinnids[J]. Marine Ecology-Progress Series, 94: 11–26.
- PITT K A, KINGSFORD M J, RISSIK D, et al, 2007. Jellyfish modify the response of planktonic assemblages to nutrient pulses[J]. Marine Ecology Progress Series, 351: 1–13.
- SANDERS R W, 1995. Seasonal distributions of the photosynthesizing ciliates *Laboea strobila* and *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*) in an estuary of the Gulf of Maine[J]. Aquatic Microbial Ecology, 9: 237–242.
- STOECKER D K, TANIGUCHI A, MICHAELS A E, 1989. Abundance of autotrophic, mixotrophic and heterotrophic planktonic ciliates in shelf and slope waters[J]. Marine Ecology Progress Series, 50(3): 241–254.
- UYE S, NAGANO N, TAMAKI H, 1996. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan[J]. Journal of Oceanography, 52(6): 689–703.
- WANG YIBO, ZHANG WENJING, LIN YUANSHAO, et al, 2013. Spatial pattern of the planktonic ciliate community and its relationship with the environment in spring in the northern Beibu Gulf, South China Sea[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 42 (4): 470–479.
- WANG YIBO, ZHANG WENJING, LIN YUANSHAO, et al, 2014. Spatial and seasonal variations of large tintinnid ciliates in Shenhui Bay of China[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 43 (3): 292–302.
- XU HENGLONG, SONG WEIBO, WARREN A, et al, 2008. Planktonic protist communities in a semi-enclosed mariculture pond: structural variation and correlation with environmental conditions[J]. Journal of Marine Biological Association of United Kingdom, 88: 1353–1362.