



福建敖江口表层沉积硅藻空间分布特征

张纪晖, 周成旭, 李冬玲, 林忠洲, 邱悦, 沙龙滨

引用本文:

张纪晖, 周成旭, 李冬玲, 等. 福建敖江口表层沉积硅藻空间分布特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(6): 597–604.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4375>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广东鉴江水系底栖硅藻多样性与时空分布特征

Species Diversity and Temporal–spatial Distribution of Benthic Diatoms in Jianjiang River, Guangdong Province

热带亚热带植物学报. 2016, 24(2): 197–207 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.011>

南亚热带磷限制水库中浮游植物群落对氮磷比变化的响应

Responses of Phytoplankton Communities to N/P Ratio Changes in Phosphorus–limited Subtropical Reservoir in Southern China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 20–30 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4250>

福建省农田生态系统外来入侵植物种类及其分布

Species and Distribution of Invasive Alien Plants in Farmland Ecosystems of Fujian Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(6): 547–556 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4206>

基于Maxent模型的假臭草潜在分布区预测

Prediction of Potential Distribution Area of *Praxelis clematidea* Based on Maxent Model

热带亚热带植物学报. 2019, 27(3): 250–260 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3977>

嵊州市公益林群落数量分类、排序及环境解析

Numerical Classification, Ordination and Environment Analysis of Public Welfare Forest Community in Shengzhou

热带亚热带植物学报. 2015(3): 334–342 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.03.016>

向下翻页, 浏览PDF全文

福建敖江口表层沉积硅藻空间分布特征

张纪晖^{1a}, 周成旭^{1b}, 李冬玲^{1a}, 林忠洲², 邱悦^{1a}, 沙龙滨^{1a*}

(1. 宁波大学, a. 地理与空间信息技术系; b. 食品与药学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波海洋研究院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 为探讨福建敖江口表层沉积硅藻空间分布特征, 2019年7月对敖江口进行表层沉积硅藻的采样调查, 并研究了硅藻与环境因子的关系。结果表明, 从13个站点共检出硅藻114种, 隶属于39属。硅藻丰度具有从河口向外海先减少后增加的变化特征。聚类分析表明, 主要硅藻属种可划分为淡水种组合带和半咸水-咸水种组合带。典型对应分析(CCA)表明, 表层海水温度和盐度是影响硅藻分布的主要环境变量。河口区盐度相对较低, 主要分布淡水种双面曲壳藻、优美曲壳藻和颗粒沟链藻; 外海区北部盐度相对较高, 主要分布咸水种流水双菱藻; 外海区南部盐度相对较低, 主要分布淡水种优美曲壳藻和颗粒沟链藻; 滩涂的沉积物较粗, 主要分布优美曲壳藻。此外, 河口区和外海区南部可能存在一定的水体污染。

关键词: 福建; 敖江; 硅藻; 环境; 典型对应分析; 聚类分析

doi: 10.11926/jtsb.4375

Diatom Distribution in Surface Sediments of Aojiang River Estuary in Fujian, China

ZHANG Jihui^{1a}, ZHOU Chengxu^{1b}, LI Dongling^{1a}, LIN Zhongzhou², QIU Yue^{1a}, SHA Longbin^{1a*}

(1a. Department of Geography and Spatial Information Techniques; 1b. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Ningbo Institute of Oceanography, Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: To understand the spatial distribution characteristic of diatoms in Aojiang River estuary area, Fujian, surface sediment samples from 13 sites were collected in July 2019, and the relationship between distribution of diatoms and environmental factors was studied. The results showed that there were 114 species of diatoms belonging to 39 genera identified from sediment samples. The abundance of diatoms from estuarine to offshore was firstly decreased and then increased. Cluster analysis showed that the main diatom species could be divided into fresh water assemblage zone and brackish-brackish water assemblage zone. Surface water temperature and salinity were the main environmental variables that affect the distribution of diatoms by canonical correspondence analysis (CCA). The salinity in the estuary area was relatively low, freshwater diatoms, such as *Achnanthes biasolettiana*, *A. delicatula* and *Aulacoseira granulata* were the dominant species. The salinity of northern offshore area of Aojiang River was high, marine diatom *Surirella fluminensis* was dominant. However, the salinity of southern offshore area was low, the abundance of freshwater diatom *Achnanthes delicatula* was higher than that in northern area. In addition, it is speculated that there may be some water pollution in estuary and the southern offshore area.

Key words: Aojiang River; Diatom; Environment; Canonical correspondence analysis; Cluster analysis

近岸海域是航道交通、生产生活的重点区域。随着社会经济的发展和海岸海洋资源开发力度的不断

加大, 人类活动对近岸海域的生态环境产生着越来越重要的影响: 不仅包括海水养殖, 海洋捕捞等社会经

收稿日期: 2021-01-08

接受日期: 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900702); 国家自然科学基金项目(41776193, 41876215); 浙江省自然科学基金项目(Y19D010011)资助

This work was supported by the Project for Key Research & Development of China (Grant No. 2018YFD0900702), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41776193, 41876215), and the Project for Natural Science in Zhejiang (Grant No. Y19D010011).

作者简介: 张纪晖(1998~), 男, 主要从事海洋环境研究。E-mail: zhangjihui0@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: shalongbin@nbu.edu.cn

济活动,还包括伴随这些活动而产生的各类环境污染。为研究日益复杂化的近岸海域水体环境,在研究中往往需要寻找一种对环境变量敏感的物种,通过研究该物种的时空分布变化特征,从而指示海域的环境变化。

硅藻是一种个体微小的单细胞生物,分布范围极其广泛,在陆地湖泊、近岸海域以及海洋中均有发现^[1]。硅藻对环境因子(如温度、盐度、酸碱度、营养盐含量等)的变化灵敏^[2],能对水体环境变化做出迅速的反应,因而其组合结构就是对当前水体环境特点最直接的体现^[3],硅藻已成为广泛用于水体环境监测的指示类物种^[4-5]。

敖江口是福建敖江干流的入海口,位于福建连江县,坐落于我国浙闽东南沿海地区,是我国海洋经济最为发达的区域之一。连江县生产生活主要以第一产业为主,以海洋经济为传统支柱产业,海水养殖业尤为发达,以养殖鲍鱼、缢蛏和海带等水产为名。发达的海水养殖业势必会对敖江口水体环境产生影响,然而目前使用硅藻作为指标对该区域水体环境进行研究较少,目前已有采用其他指标对敖江口周边和敖江流域水体环境状况进行研究的报道,阮金山等^[6]对连江县东南部养殖水体中的重金属和有机污染物含量进行了研究;张玉珍等^[7]对敖江全流域底栖动物和鱼类群落结构进行了研究;张丹丹等^[8]对敖江下游河段的抗生素抗性基因分布特征进行了研究。

本文通过在福建敖江口采集表层沉积物,调查

河口、滩涂和外海区表层沉积硅藻分布情况,探讨了敖江口表层沉积硅藻的空间分布特征,并对主要硅藻属种与表层海水温度、盐度、pH 等环境因子间的关系进行分析,了解该海域河口、滩涂和外海区影响硅藻分布的主要环境因素。研究结果将为了了解敖江口硅藻对环境的响应机制、该区域生态系统的初级生产力变化,以及人类活动对该区域生态环境的综合影响研究提供依据。

1 材料和方法

1.1 样品和环境变量的采集

表层沉积物采样工作于 2019 年 7 月完成。使用抓斗在 13 个采样点抓取底部表层沉积物,样品密封保存送至实验室。使用 HORIBA 设备收集采样点表层海水温度、盐度、pH、浊度等环境信息。采样站点位置见图 1,其中外海站点 4 个(WH1、WH2、WH3、WH4);滩涂站点 6 个(TT1、TT2、TT3、TT4、TT5、TT6);河口站点 3 个(HD1、HD2、HD4)。

1.2 方法

硅藻鉴定 称取约 1 g 烘干样品放入烧杯,加入 10% 的稀盐酸搅拌均匀,待充分反应后加入 30% 的双氧水去除有机质,待完全反应并出现明显分层后,加入去离子水静置约 10 h,抽去上层清液,重

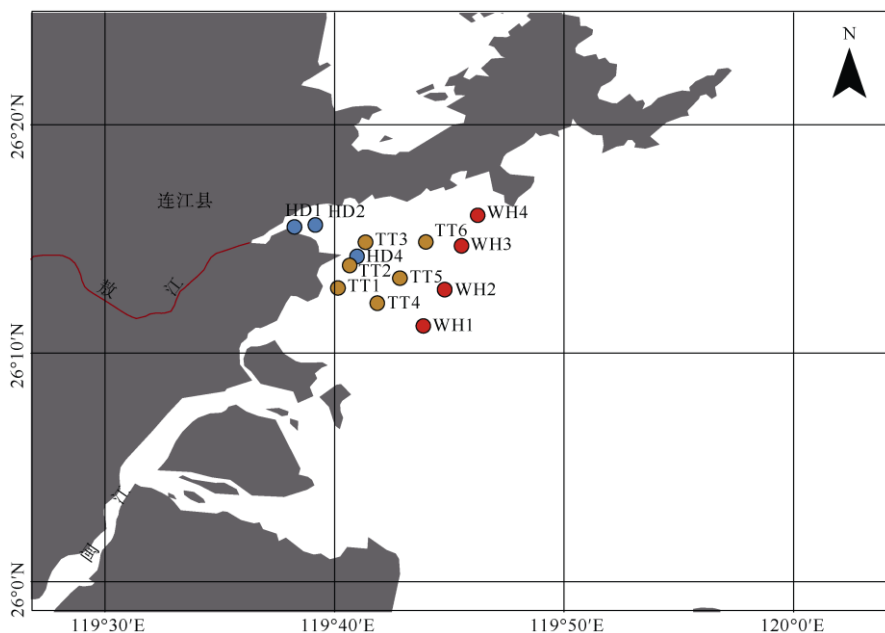


图 1 敖江口采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Aojiang estuary

复洗酸 3 次; 将样品倒入比色管中, 加入明胶溶液和去离子水定容摇匀, 转移至固定好盖玻片的培养皿中静置 24 h 后引流; 将处理好的盖玻片用 Naphrax 胶($dn=1.73$)固定于载玻片上。在徕卡光学显微镜下进行鉴定, 放大倍率为 $1\ 000\times$ 油镜, 随机逐行统计硅藻属种与数量, 对于不完整的硅藻, 若是超过一半则视为整体处理。参考 Krammer 等^[9-12]和金德祥等^[13]的方法进行硅藻鉴定, 大部分硅藻鉴定到种, 少数不确定的鉴定到属。

粒度分析 称取烘干样品 0.2 g 置于干净烧杯中, 先加入 10 mL 10% 的双氧水溶液去除有机质, 然后加入 10 mL 10% 的 HCl 溶液去除碳酸盐; 水浴加热 2 h 后, 烧杯中加满去离子水静置 12 h。待样品颗粒尽量分散后抽取上层清液, 加入 2 滴 1 mol/L 的六偏磷酸钠 $[(NaPO_3)_6]$ 溶液, 放入超声波仪中震荡分散 15 min 后在 Beckman Coulter LS13320 型激光粒度仪上进行粒度测试, 使用自带软件 LS13320 对数据进行处理分析。依照福克-洛克三角分级和命名法分为 3 个粒度, 即粘土($<4\ \mu m$)、粉砂($4\sim 63\ \mu m$)和砂($>63\ \mu m$)。

1.3 数据处理

硅藻丰度计算 绝对丰度 $F=N/W$, 式中, F 为绝对丰度(cell/g), N 为硅藻总个数(cell), W 为样品干质量(g)。在实际操作中, 参照梁钰莹等^[14]的方法, 上式可转化为 $F=(q\times S)/(n\times W)$, 式中, q 为显微镜视野内硅藻个数(cell), n 为显微镜视野面积(cm^2), S 为培养皿面积(cm^2)。硅藻丰度的空间分布特征采用 Surfer 软件分析。

聚类分析 聚类分析是一种生态学研究的常用方法。以样点间的相似性为依据划分为不同的组, 从而找出样点间的共性与规律。根据样点特征, 当样点本身具有空间或时间的连续属性时, 应当采用顺序聚类的方式; 反之当样点本身不具有空间或时间连续性时, 应当采用无序聚类的方式。本文采用 Tilia 软件的无序聚类方式。

相关性分析 硅藻分布不仅受生境的影响, 还受到外在因素的制约, 如局地海流、水体营养化等。而通过相关性分析, 如典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA), 可以将硅藻属种与环境变量的相互关系通过二维图的形式表现出来, 从而得出硅藻属种与各环境变量间的关系^[15]。CCA 分析是一种有效的直接梯度分析法, 将环境变

量、物种数据和站点同时显示在一个低维空间中, 可以非常直观地展现出环境变量与物种之间的关系特征。CCA 分析的假设前提是物种与环境的关系呈现非线性的单峰响应特点。因此, 在进行 CCA 分析之前, 应当首先进行去趋势分析(detrended correspondence analysis, DCA), 得到物种数据的梯度长度, 当梯度长度 >4 时, 表明物种数据具有单峰分布的特点, 适用于 CCA 分析; 若梯度长度 <3 时物种数据更适用于冗余分析(redundancy analysis, RDA)等线性模型。本文采用 CANOCO 软件进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 环境变量特征

从表 1 可知, 研究区域内表层海水温度存在一定的波动, 为 $26.00^\circ C\sim 28.07^\circ C$, 最高值出现在 TT1 站点, 最低值出现在 WH1 站点。盐度的变化很大 ($4.50\%\sim 26.90\%$), 主要是由于敖江径流输入的影响, 从而导致河口区的盐度明显低于外海和滩涂区。沉积物粒度存在显著差异, 河口区与外海区的沉积物多为粘土质粉砂, 而滩涂区的沉积物多为砂。研究区 pH 变化不大 ($7.86\sim 8.26$), 溶解氧含量为 $5.86\sim 7.47\ mg/L$, 浊度为 $30.0\sim 237.0\ NTU$, 浊度的高值分别出现在 HD1、HD2、HD4 和 TT6 站点。

2.2 主要硅藻属种

从沉积物中共鉴定出硅藻 114 种, 分属 39 属, 其中河口区站点的硅藻属种最多, 平均 54 种; 滩涂区站点最少, 平均 22 种。硅藻属种最多的是 HD4 站点, 位于河口区, 共鉴定出 59 种; 最少的是 TT1 站点, 位于滩涂区, 共鉴定出 13 种。

敖江口表层沉积硅藻常见属为小环藻属(*Cyclotella*)、曲壳藻属(*Achnanthes*)、辐环藻属(*Actinocyclus*)、圆筛藻属(*Coscinodiscus*)和沟链藻属(*Aulacoseria*); 主要硅藻有双面曲壳藻(*Achnanthes biasolettiana*)、优美曲壳藻(*A. delicatula*)、诺氏辐环藻(*Actinocyclus normanii*)、简单双眉藻(*Amphora exigua*)、颗粒沟链藻(*Aulacoseira granulata*)、条纹小环藻(*Cyclotella striata*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、流水双菱藻(*Surirella fluminensis*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)和卵形摺盘藻(*Tryblioptychus cocconeiformis*)。

表 1 研究区站点的环境因子

Table 1 Environmental factors in study sites

区域 Area	站点 Site	温度 (°C) Temperature	盐度 /‰ Salinity	pH	浊度 (NTU) Turbidity	溶解氧 (mg/L) Dissolved oxygen	沉积物岩性 Lithology	粒度 (μm) Grain size
河口区 Estuary	HD1	26.90	4.50	7.93	162.0	6.62	粉砂质砂 Silty sand	90.23
	HD2	27.54	11.90	8.04	116.0	6.72	粘土质粉砂 Clayey silt	26.85
	HD4	26.79	25.40	8.21	147.0	5.86	粘土质粉砂 Clayey silt	117.54
滩涂区 Mudflat	TT1	28.07	23.50	8.26	30.0	7.82	砂 Sand	320.02
	TT2	27.61	25.10	8.21	37.9	7.35	砂 Sand	479.51
	TT3	27.24	26.20	7.86	51.1	6.73	砂 Sand	428.95
	TT4	26.60	20.10	8.13	54.2	6.09	砂 Ssand	308.45
	TT5	26.25	19.50	8.14	46.8	6.15	粉砂质砂 Silty sand	341.01
	TT6	26.27	19.80	8.13	237.0	5.97	粘土质粉砂 Clayey silt	15.43
	TT6	26.27	19.80	8.13	237.0	5.97	粘土质粉砂 Clayey silt	15.43
外海区 Offshore	WH1	26.00	11.60	7.97	63.5	6.52	粘土质粉砂 Clayey silt	15.73
	WH2	27.13	24.60	8.23	26.4	7.47	粘土质粉砂 Clayey silt	18.05
	WH3	26.98	25.40	8.16	34.0	7.10	粘土质粉砂 Clayey silt	11.15
	WH4	26.84	26.90	8.20	33.3	6.76	粘土质粉砂 Clayey silt	11.43

2.3 硅藻丰度特征

将敖江口各站点的硅藻丰度导入 Surfer 软件中, 使用克里金插值法进行插值计算, 得到敖江口表层硅藻的空间分布情况(图 2)。硅藻在河口区和外海区分布相对集中, 硅藻丰度由河口向外海呈现先减少后增加的特征。最大硅藻丰度位于 HD2 站点, 最小硅藻丰度位于 TT2 站点。硅藻在滩涂区丰度最小, 平均丰度为 5 136.67 cell/g; 在河口区丰度最大, 平均丰度为 67 579.35 cell/g。

2.4 硅藻分布特征和聚类分析

采用 Tilia 软件进行聚类分析结果表明(图 3), 条纹小环藻、具槽直链藻、菱形海线藻和卵形褶盘藻

在除 TT1 以外的所有站点均有分布, 是研究区内的优势种。根据聚类分析结果, 可以将敖江口表层沉积硅藻划分为 2 个组合带: I 带有 HD1、HD2 和 HD4 共 3 个站点, 颗粒沟链藻和双面曲壳藻在这 3 个站点含量较高, 在其他站点几乎没有发现; 虽然优美曲壳藻在这 3 个站点也有发现, 但占比相对较少, 其主要在 TT1 站点有大量分布, 因而 I 带的主要硅藻组合为颗粒沟链藻-双面曲壳藻。II 带有 WH2、WH3、WH4、TT5 和 TT6 共 5 个站点, 流水双菱藻在这些站点的含量较高, 在其他站点较少发现; 条纹小环藻在这些站点中的含量明显高于 I 带站点, 具槽直链藻、菱形海线藻和卵形褶盘藻的含量则变化不大, 因而 II 带主要硅藻组合为流水双菱藻-条纹小环藻。

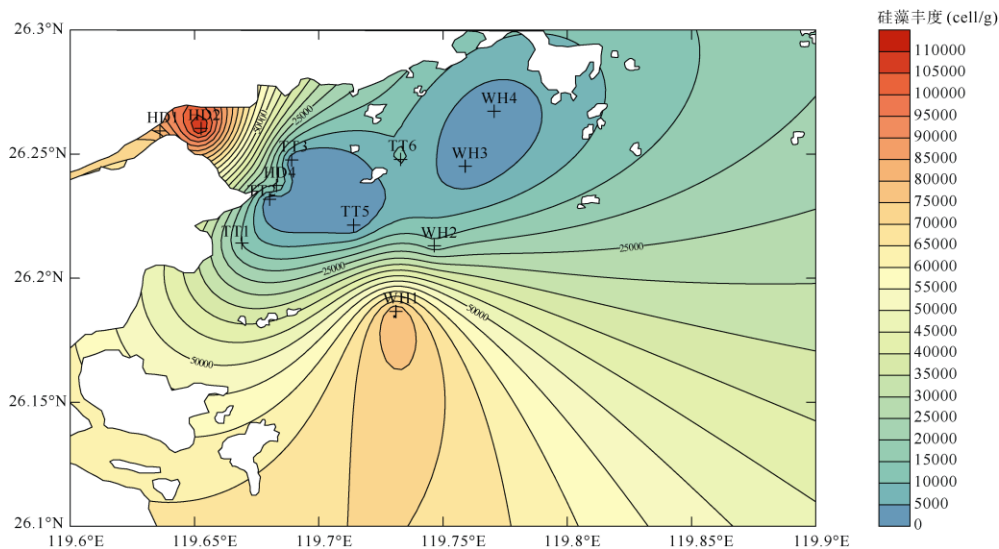


图 2 敖江口硅藻丰度(cell/g)分布插值图

Fig. 2 Interpolation map of diatom abundance (cell/g) distribution in Aojiang estuary

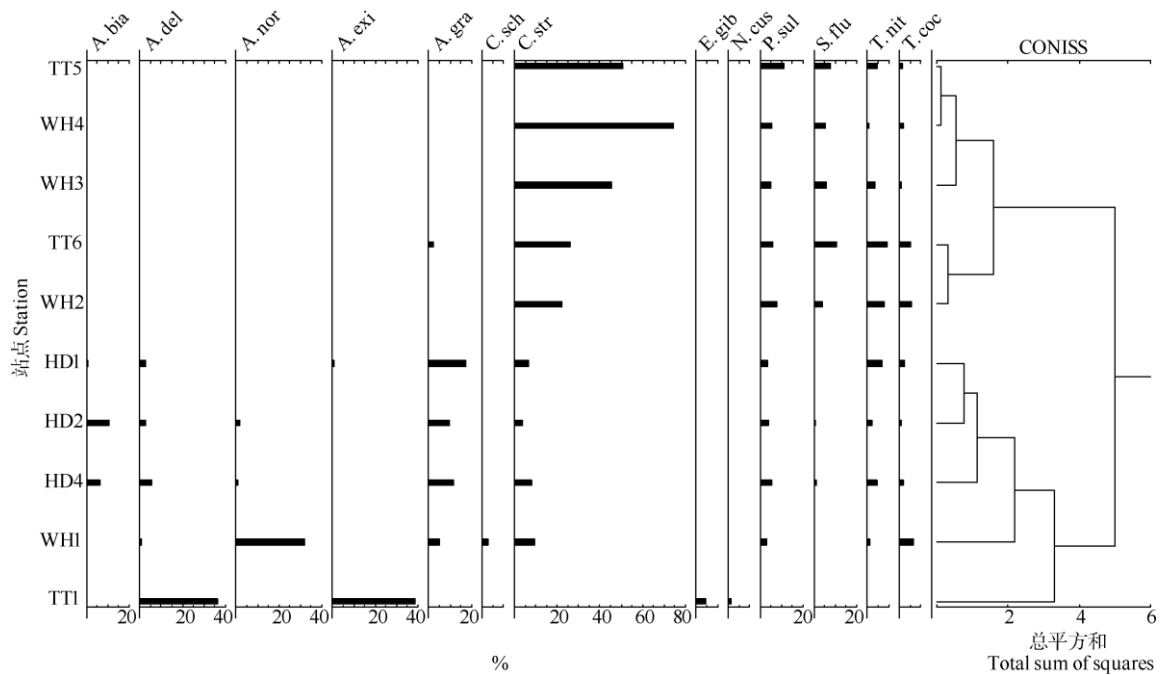


图 3 敖江口硅藻的聚类分析。A. bia: 双面曲壳藻; A. del: 优美曲壳藻; A. nor: 诺氏辐环藻; A. exi: 简单双眉藻; A. gra: 颗粒沟链藻; C. sch: 叔曼小环藻; C. str: 条纹小环藻; E. gib: 驼峰窗纹藻; N. cus: 急尖舟形藻; P. sul: 具槽帕拉藻; S. flu: 流水双菱藻; T. nit: 菱形海线藻; T. coc: 卵形褶盘藻。图 5 同。

Fig. 3 Cluster analysis of diatom species in Aojiang estuary. A. bia: *Achnanthes biasolettiana*; A. del: *A. delicatula*; A. nor: *Actinocyclus normanii*; A. exi: *Amphora exigua*; A. gra: *Aulacoseira granulata*; C. sch: *Cyclotella schumannii*; C. str: *C. striata*; E. gib: *Epithemia gibberala*; N. cus: *Navicula cuspidata*; P. sul: *Paralia sulcata*; S. flu: *Surirella fluminensis*; T. nit: *Thalassionema nitzschioides*; T. coc: *Tryblionella cocconeiformis*. The same is Figure 5.

从图 3 还可看出, WH1 和 TT1 是特殊站点, WH1 站点中诺氏辐环藻的含量很高, 优美曲壳藻、颗粒沟链藻和叔曼小环藻(*Cyclotella schumannii*)仅有少量, 未检出流水双菱藻。相比于其他外海区站点, WH1 站点的硅藻分布特征更接近河口区站点。TT1 站点的硅藻分布特征最为特殊, 未见优势种(如条纹小环藻)以及 I 带和 II 带的主要硅藻(如颗粒沟链藻和流水双菱藻), 其含量最高的是优美曲壳藻和简单双眉藻, 还有少量的驼峰窗纹藻(*Epithemia gibberala*)和急尖舟形藻(*Navicula cuspidata*)。

2.5 相关性分析

首先对敖江口表层沉积硅藻进行 DCA 分析, 得到物种的梯度长度为 6.006, 表明硅藻属种在坐标轴上具有非线性单峰分布的特点, 说明 CCA 分析更适用于敖江口表层沉积硅藻-环境变量的相关性分析。硅藻与环境变量的 CCA 分析结果表明, 前两轴特征值分别为 0.837 和 0.567, 可以解释 53.09% 的硅藻-环境变量关系的变化特征, 研究区硅藻属种和环境变量之间具有很高的相关性。通过膨胀系数(VIF \geq 20)以及蒙特卡罗筛选检验(999 次循环)后, 最终筛选出

5 个环境变量: 表层海水温度、盐度、浊度、pH 和溶解氧含量。将这 5 个环境变量与硅藻属种再次进行 CCA 分析, 结果表明前两轴特征值分别为 0.634 和 0.481, 共解释了 70.16% 的硅藻-环境变量关系变化特征(表 2), 比未筛选前有很大提高。此外, 表层海水温度与盐度的特征值分别占 5 个环境变量的 39.88% 和 30.28%, 进一步说明表层海水温度与盐度是影响敖江口表层沉积硅藻分布的关键环境变量。

对站点-环境变量间的关系进行 CCA 分析, 环境变量用矢量表示, 箭头指向表示其极值, 具有相似的硅藻属种和环境变量的站点在图中位置相近^[15], 站点的投影在环境变量正延长线上表示其与环境变量呈正相关性, 反之呈负相关性^[16]。从图 4 可见, HD1、HD2、HD4 和 WH1 站点与盐度呈负相关, WH3、WH4、TT5、TT6、WH2 和 TT1 站点与盐度呈正相关; HD1、HD2、TT1 和 WH2 站点与表层海水温度呈正相关, WH1、WH3、WH4、TT5、TT6 和 HD4 站点与表层海水温度呈负相关。从分析结果可知, 河口区水体盐度相对较低, 海水温度相对较高; 外海区海水温度总体上相对较低, 然而南部(WH1 站点)和北部(WH2、WH3 和 WH4 站点)的盐度存在差

表 2 硅藻属种-环境变量的 CCA 分析

Table 2 CCA result of diatom species and selected environmental variables

	CCA 轴 CCA axis				
	1	2	3	4	5
特征值 Eigenvalues	0.634	0.481	0.226	0.147	0.101
累积比例 Cumulative proportion	0.399	0.702	0.844	0.936	1.000

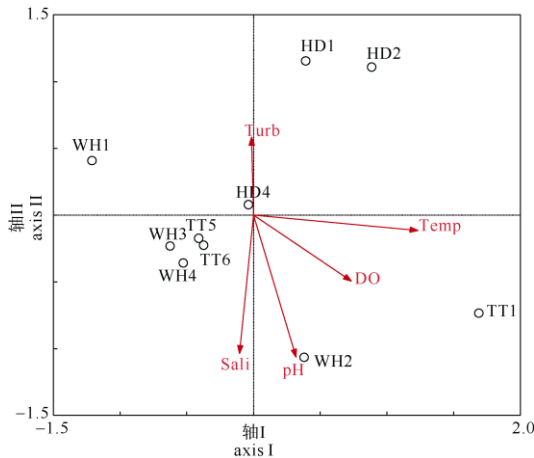


图 4 敖江口站点与环境变量的 CCA 关系图。Turb: 浊度; Temp: 表层海水温度; DO: 溶解氧; Sali: 盐度。下图同。

Fig. 4 CCA biplot between environmental factors and sites in Aojiang estuary. Turb: Turbidity; Temp: Surface water temperature; DO: Dissolved oxygen; Sali: Salinity. The same is following Figure.

异, 表现为南部比北部低。滩涂区 TT1 站点的海水温度和盐度较高, 而 TT5 和 TT6 站点的水体环境则更接近于外海区北部的 WH3 和 WH4 站点。

对主要硅藻属种-环境变量的关系进行 CCA 分析, 环境变量使用矢量表示, 针对某一具体的环境变量, 可以将该变量沿矢量反方向延长, 从而将其近似地看作这一环境变量的“数轴”, 硅藻属种与环境变量的关系体现在硅藻投影到环境变量“数轴”上的得分情况。从图 5 可见, 大部分硅藻与盐度呈正相关, 只有叔曼小环藻、诺氏辐环藻、颗粒沟链藻和双面曲壳藻与盐度呈负相关。在与表层海水温度的相关性上, 硅藻属种的分布比较均衡。

3 结论和讨论

河口与近岸海域是一个复杂的水体环境, 作为河水、海水和人类活动的交集地, 往往会受到三者的共同影响, 因而, 河口与近岸海域中的硅藻分布特征往往是温、盐、沉积环境和人类活动等多重因素共同作用的结果^[17]。福建敖江口是典型的潮间带

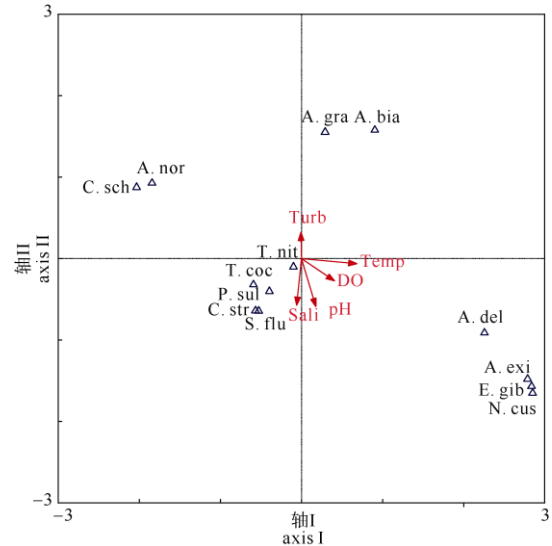


图 5 敖江口硅藻与环境变量关系图

Fig. 5 CCA biplot of environment variables and diatom species in Aojiang estuary

海域, 通过对其表层沉积物中的硅藻进行鉴定, 发现条纹小环藻、具槽直链藻、菱形海线藻和卵形褶盘藻是该海域的优势种(图 3), 其中条纹小环藻、具槽直链藻和菱形海线藻都是我国近岸海域最为常见的广布种^[18-21], 卵形褶盘藻则是福建沿海的常见种^[13]。结合 CCA 分析表明, 由于敖江径流和外海的共同影响, 表层海水温度和盐度是影响敖江口表层沉积硅藻自河口向外海分布呈现空间差异的最重要环境变量。此外, 从沉积物粒度、硅藻丰度及硅藻组成来看, 河口、滩涂和外海沉积环境的差异和人类活动因素, 也对敖江口的表层沉积硅藻分布存在一定影响。

敖江径流的输入使盐度成为硅藻分布最关键的影响因子。作为受敖江径流影响最大的区域, 河口区具有低盐度、低表层海水温度的特征, 硅藻组合属于 I 带, 主要分布有淡水种双面曲壳藻、颗粒沟链藻和优美曲壳藻^[18,22-25]。此外, 河口区也是敖江口硅藻丰度最高的区域(图 2)。河口区的浊度较高, 推测可能是人类活动引起的水体富营养化。颗粒沟链藻对水体富营养化程度具有指示作用, 常在中度

营养盐的水体中占据优势地位^[23], 该种在河口区较为丰富, 指示了河口区的水体富营养化较为严重。

外海区远离敖江径流, 受人类活动影响小, 总体上海水温度较低, 然而在盐度上却存在空间差异, 表现为外海区北部水体盐度高于南部水体。聚类分析结果表明, 外海区北部 WH2、WH3 和 WH4 站点硅藻组合属于 II 带, 优势种为流水双菱藻, 是典型的咸水种^[26-27], 表明水体盐度较高; 但外海区南部水体中流水双菱藻的含量很低, 淡水种优美曲壳藻和颗粒沟链藻的含量却相对较高(图 3), 推测这片区域可能受到了来自敖江南部的闽江淡水影响。此外, 诺氏辐环藻在这片区域的含量较高(图 3), 其被认为是一种水体富营养化指示种^[23], 因而外海区南部的水体中可能也存在一定的水体污染。

河口区与外海区的主要沉积物都是粘土质粉砂, 而滩涂区的主要沉积物则是砂(表 1)。这种沉积物粒度的空间差异性可能导致滩涂区硅藻分布特征有别于河口和外海区。聚类结果表明 TT1 站点的优美曲壳藻和简单双眉藻的含量非常高(图 3)。有研究表明, 优美曲壳藻对沉积物粒度具有指示作用^[19]。因此, 在滩涂区, 沉积物粒度对硅藻分布的影响较为显著。

综上所述, 通过对福建敖江口表层沉积硅藻的采样调查与结果分析, 发现敖江口表层沉积硅藻在空间分布上具有显著的差异性, 表现为河口区、外海区北部、外海区南部和滩涂区 4 个区域主要硅藻属种的差异性。相关性分析表明, 表层沉积硅藻的空间分布受到盐度和海水温度的显著影响。此外, 研究区域中沉积物粒度和人为活动因素对表层沉积硅藻的空间分布也具有一定的影响。

参考文献

- [1] ZHANG J P. Study on sedimentary diatoms of late Holocene from middle offshore sea area of Fujian Province [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009: 1-2.
张金鹏. 福建中部近岸海域晚全新世沉积硅藻研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009: 1-2.
- [2] ANDERSON N J, VOS P. Learning from the past: Diatoms as palaeoecological indicators of changes in marine environments [J]. *Neth J Aquat Ecol*, 1992, 26(1): 19-30. doi: 10.1007/BF02298025.
- [3] QIU L C, WEI G F, LI X J, et al. Species diversity and temporal-spatial distribution of benthic diatoms in Jianjiang River, Guangdong Province [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2016, 24(2): 197-207. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.011.
邱礼城, 韦桂峰, 李湘姣, 等. 广东鉴江水系底栖硅藻多样性与时空分布特征 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(2): 197-207. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.011.
- [4] HE Q, WEI G F, LIU J, et al. Species diversity and spatial distribution of benthic diatom in Zeng River, Guangdong Province, southern China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2011, 19(3): 245-253. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.009.
何琦, 韦桂峰, 刘静, 等. 增江底栖硅藻种类多样性及分布特征 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(3): 245-253. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.009.
- [5] XU C C, YANG X Y, LU L, et al. Comparison of benthic diatom assemblages from mangrove and reed wetland in Qi'ao Island, Zhuhai, Guangdong Province, China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(3): 217-223. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.03.001.
徐承超, 杨晓莹, 卢亮, 等. 珠海淇澳岛红树林和芦苇湿地底栖硅藻群落比较 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(3): 217-223. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.03.001.
- [6] RUAN J S, ZHONG S L, LIN H X, et al. Quality security assessment of shellfish-culture Lianjiang southeast sea area, Fujian [J]. *J Fujian Fish*, 2011, 33(2): 10-17.
阮金山, 钟硕良, 林后祥, 等. 福建连江县东南部海域养殖贝类质量安全评估 [J]. *福建水产*, 2011, 33(2): 10-17.
- [7] ZHANG Y Z, HUANG W D, WANG Z Y, et al. Evaluation of aquatic ecosystem health in Aojiang Basin, Fujian province [J]. *J Lake Sci*, 2015, 27(6): 1079-1086. doi: 10.18307/2015.0612.
张玉珍, 黄文丹, 王智苑, 等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(6): 1079-1086. doi: 10.18307/2015.0612.
- [8] ZHANG D D, GUO Y P, REN H Y, et al. Characteristics of antibiotic resistance genes in downstream areas of the Aojiang River, Fujian Province [J]. *Environ Sci*, 2018, 39(6): 2600-2606. doi: 10.13227/j.hjx.201710121.
张丹丹, 郭亚平, 任红云, 等. 福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2600-2606. doi: 10.13227/j.hjx.201710121.
- [9] KRAMMER K, LANGE-BERTALOT H. Bacillariophyceae. teil 1: Naviculaceae [M]// Ettl H, GÄRTNER G, GERLOFF J, et al. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2(1). New York: Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1986: 480-750.
- [10] KRAMMER K, LANGE-BERTALOT H. Bacillariophyceae. teil 2: Bacillariaceae, epithemiaceae, surirellaceae [M]// Ettl H, GÄRTNER G, GERLOFF J, et al. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2(2). New York: Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1988: 300-421.
- [11] KRAMMER K, LANGE-BERTALOT H. Bacillariophyceae. teil 3: Centrales, fragilariaceae, eunotiaceae [M]// Ettl H, GÄRTNER G, GERLOFF J, et al. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2(3). Jena:

- Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1991: 320–325.
- [12] KRAMMER K, LANGE-BERTALOT H. Bacillariophyceae. teil 4: Achnantheaceae. kritische ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema* [M]// Ettl H, GÄRTNER G, GERLOFF J, et al. Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2(4). Jena: Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1991: 276–422.
- [13] JIN D X, CHEN Z D, LIN J M, et al. Benthic Diatoms in the Oceans of China, Volume 1 [M]. Beijing: China Ocean Press, 1982: 102–322. 金德祥, 程兆第, 林均民, 等. 中国海洋底栖硅藻类(上卷) [M]. 北京: 海洋出版社, 1982: 102–322.
- [14] LIANG Y Y, LI D L, SHA L B, et al. Early to mid-Holocene sedimentary environment evolution in Xianghu Lake Area, Zhejiang Province, based on a diatom record [J]. Quat Sci, 2018, 38(4): 842–853. doi: 10.11928/j.issn.1001-7410.2018.04.04. 梁钰莹, 李冬玲, 沙龙滨, 等. 浙江湘湖早-中全新世的硅藻记录及沉积环境演变 [J]. 第四纪研究, 2018, 38(4): 842–853. doi: 10.11928/j.issn.1001-7410.2018.04.04.
- [15] SHA L B, LIU Y G, LI D L, et al. Diatoms from the surface sediments off west Greenland and their relationship to sea-ice cover [J]. Acta Micropalaeontol Sin, 2012, 29(4): 321–332. 沙龙滨, 刘焱光, 李冬玲, 等. 格陵兰西部海域表层沉积硅藻分布与海冰覆盖率关系探讨 [J]. 微体古生物学报, 2012, 29(4): 321–332.
- [16] SHEN L N, CHEN M, LAN B B, et al. Diatom distribution as an environmental indicator in surface sediments of the West Philippine Basin [J]. Chin J Ocean Limnol, 2017, 35(2): 431–443. doi: 10.1007/s00343-016-5306-8.
- [17] WANG S S, LIU D Y, WANG Y Y, et al. Temporal and spatial variations of benthic diatom communities at three estuaries in the Bohai Sea [J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(8): 101–114. doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.009. 王珊珊, 刘东艳, 王玉钰, 等. 渤海 3 个河口区底栖硅藻群落的时空变化特征 [J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 101–114. doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.009.
- [18] HUANG Y. Distribution of the surface sediment diatoms in the outer bay of Qinzhou bay of Guangxi [J]. Mar Sci, 2017, 41(1): 96–103. doi: 10.11759/hyxx20150927001. 黄玥. 广西钦州湾外湾表层沉积硅藻分布特征 [J]. 海洋科学, 2017, 41(1): 96–103. doi: 10.11759/hyxx20150927001.
- [19] SHANG Z W, TIAN L Z, WANG H, et al. Diatom assemblages from surficial sediments in north-central Bohai Bay and their implications for environments [J]. Geol China, 2012, 39(4): 1099–1107. doi: 10.3969/j.issn.1000-3657.2012.04.027. 商志文, 田立柱, 王宏, 等. 渤海湾中北部表层沉积硅藻分布及环境指示意义 [J]. 中国地质, 2012, 39(4): 1099–1107. doi: 10.3969/j.issn.1000-3657.2012.04.027.
- [20] HUANG Y, HUANG Y H. Characteristics of surface sediments diatom distribution in Zhenzhu Bay of Guangxi [J]. Adv Marine Sci, 2016, 34(3): 411–420. doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.0000.00.011. 黄玥, 黄元辉. 广西珍珠湾表层沉积硅藻分布特征 [J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 411–420. doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.0000.00.011.
- [21] HUANG Y H, HUANG Y, JIANG H. Surface water temperature changes in the northern South China Sea over last ca. 15 000 years: Evidence from marine diatoms [J]. Mar Geol Quat Geol, 2007, 27(5): 65–74. doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2007.05.002. 黄元辉, 黄玥, 蒋辉. 南海北部 15kaBP 以来表层海水温度变化: 来自海洋硅藻的记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 65–74. doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2007.05.002.
- [22] GAO Y H, CHEN C P, LI Y, et al. A preliminary study on nanodiatoms from Holocene sediments in the Jiulong River and Dongyu Island of Fujian Province, China [J]. Acta Oceanol Sin, 2003, 25(6): 89–98. doi: 10.3321/j.issn.0253-4193.2003.06.011. 高亚辉, 陈长平, 李扬, 等. 福建九龙江和东屿地区全新世微型硅藻的初步研究 [J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 89–98. doi: 10.3321/j.issn.0253-4193.2003.06.011.
- [23] ZHAO L. Taxonomic and ecological studies on common epipsammic diatoms in the coasts of China [D]. Xiamen: Xiamen University, 2016: 85. 赵龙. 中国沿海常见沙生境硅藻的分类学与生态学研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016: 85.
- [24] WU Y N, LI D L, SHA L B, et al. A diatom record of rapid sea-level rise during early to mid-Holocene in Baima lake area, Zhejiang Province [J]. Acta Palaeontol Sin, 2016, 55(4): 495–507. doi: 10.19800/j.cnki.aps.2016.04.010. 吴燕妮, 李冬玲, 沙龙滨, 等. 浙江白马湖地区硅藻记录的早-中全新世海平面上升事件 [J]. 古生物学报, 2016, 55(4): 495–507. doi: 10.19800/j.cnki.aps.2016.04.010.
- [25] CAO Q. Seasonal change of diatoms and climate response in recent 800 years of Douhu, Fujian [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018: 21. 曹奇. 福建斗湖硅藻季节变化及近 800 年来的气候响应 [D]. 福州: 福建师范大学, 2018: 21.
- [26] CHEN C. Distribution of diatoms in surface sediment in Chinese inshore waters and their environmental significance [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 90. 陈淳. 中国近岸海域表层沉积硅藻的地理分布特征及其环境意义 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 90.
- [27] LAN B B. Diatoms and their palaeoenvironments from the cores of Xijiang Delta in China [D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, SOA, 2007: 47. 兰彬斌. 西江三角洲岩芯中的硅藻及其记录的古环境 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2007: 47.