

•研究报告•

# 南麂列岛砂质潮间带底栖硅藻多样性与群落结构的时空变化

李宇航<sup>1</sup> 陈万东<sup>2</sup> 蔡厚才<sup>2</sup> 孙忠民<sup>1,4</sup> 徐奎栋<sup>1,3,4\*</sup><sup>1</sup> (中国科学院海洋研究所海洋生物分类与系统演化实验室, 山东青岛 266071)<sup>2</sup> (南麂列岛国家级海洋自然保护区管理局, 浙江平阳 325401)<sup>3</sup> (青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生物学与生物技术功能实验室, 山东青岛 266071)<sup>4</sup> (中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了解南麂列岛国家级海洋自然保护区砂质潮间带底栖硅藻多样性与群落结构的现状及近20多年来的变化, 于2013年11月至2014年8月, 对南麂列岛火焜岙砂质潮间带的底栖硅藻进行了4个季节的采样和研究, 并与1981–1993年有关的历史资料进行了比较分析。本研究共鉴定底栖硅藻49属120种, 海岸曲解藻(*Fallacia litoricola*)、史氏双壁藻(*Diploneis smithii*)、稀疏双壁藻(*D. parca*)等17种为目前的优势种。Shannon多样性指数在2.388–3.445之间, 以春季最高, 秋季最低; 在空间分布上依次为: 中潮区 > 低潮区 > 高潮区。相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)表明底栖硅藻群落落在不同潮区间差异显著, 而季节差异不显著。BIOENV分析显示盐度与底栖硅藻群落结构的相关性最高。本研究结果表明, 南麂列岛砂质潮间带的底栖硅藻群落结构近几十年来已发生了明显变化。与1981–1993年南麂列岛的3次调查数据相比, 目级阶元减少了2个, 科级阶元增加了7个, 而属级和种级阶元较过去的29属55种有了显著增加, 这可能是分类研究强度增加所致。但分类学多样性降低, 平均分类差异指数 $\Delta^+$ 由过去的79.79降至71.41; 且过去记录的大个体固着类群被现今的小个体固着类群和间隙运动类群(epipelon)所取代, 这可能是火焜岙过去人类活动频繁、有机质过量排放的长期效应所致。

**关键词:** 底栖硅藻; 多样性; 群落结构; 优势种; 南麂列岛

## Spatio-temporal variation of benthic diatom diversity and community structure in a sandy intertidal zone of the Nanji Islands, China

Yuhang Li<sup>1</sup>, Wandong Chen<sup>2</sup>, Houcai Cai<sup>2</sup>, Zhongmin Sun<sup>1,4</sup>, Kuidong Xu<sup>1,3,4\*</sup><sup>1</sup> Department of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071<sup>2</sup> Nanji Islands National Marine Natural Reserve Administration Bureau, Pingyang, Zhejiang 325401<sup>3</sup> Laboratory for Marine Biology and Biotechnology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071<sup>4</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** To know the status and 20 years' variation of benthic diatom biodiversity and community structure in intertidal sandy sediment in the Nanji Islands National Marine Nature Reserve (NINMNR) of China, we investigated community composition and seasonal variations of marine benthic diatoms between November 2013 and August 2014 in the intertidal zone of the Huokun'ao sandy beach in the NINMNR, and compared this to historic data obtained from intertidal sandy sediments of the Nanji Islands. A total of 120 benthic diatom species belonging to 49 genera were identified. Among these, 17 species were classified as dominant species, including *Fallacia litoricola*, *Diploneis smithii* and *D. parca*. The Shannon diversity index ( $H'$ ) values of benthic diatoms varied between 2.388 and 3.455. The peak of  $H'$  appeared in spring, and the lowest value occurred in fall. Spatially, the highest  $H'$  value was present in the middle tidal zone and the lowest was

收稿日期: 2017-02-21; 接受日期: 2017-07-26

基金项目: 南麂列岛国家级海洋自然保护区博士后研究项目(NJKJ-2015-005)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: kxu@qdio.ac.cn

found in the high tide zone. The result of analysis of similarities (ANOSIM) showed there were significant differences in the benthic community between the high, middle and low tidal areas, while no significant differences were observed between the four seasons. The result of BIOENV suggested that salinity was the most important factor regulating the benthic diatom community. The present study and historic data indicate that the community structure of benthic diatoms in the sandy sediments of Nanji Islands changed markedly over the past few decades. Compared with data obtained from three surveys conducted between 1981 and 1993, the number of diatom orders has decreased from 16 to 14, while the number of families has increased from 24 to 31, and the number of genera and species has significantly increased from 29 to 49 and from 55 to 120, respectively. The increase of diatom taxa is likely due to the enhanced intensity of taxonomic study. Nonetheless, the average taxonomic distinctness index ( $\Delta^+$ ) values decreased from 79.79 to 71.41. Strikingly, large attached diatoms recorded in the past have been replaced by small attached forms as well as epipelons. This could be the result of intense human activities and the long-term effects of over-discharged organic matter.

**Key words:** marine benthic diatoms; biodiversity; community structure; dominant species; Nanji Islands

硅藻具有极高的多样性, 估计有10万余种, 目前已报道12,000余种(Mann & Vanormelingen, 2013), 分布于几乎所有水环境中。硅藻是初级生产力的主要提供者, 其生产力相当于所有雨林之和(Field et al, 1990)。在近岸和浅海底栖生境中, 底栖硅藻是底栖微藻(microphytobenthos)的主要优势类群, 在底栖食物网中占有十分重要的地位, 能提供超过50%的初级生产力, 也被认为是全球碳汇(missing carbon sink)的来源之一(Schindler, 1999; Underwood & Kromkamp, 1999; Jean-Marc et al, 2008)。此外, 底栖硅藻还是近岸环境变化的重要指示生物, 对环境变化反应迅速, 可在群落水平上反应环境和生态系统的变化, 因此具有生态系统与环境质量评价的潜能。

南麂列岛位于浙江温州市以东30海里处, 黑潮分支台湾暖流和江浙沿岸流在此交汇, 生态区系独特, 生物多样性高, 以贝、藻资源最为丰富, 被誉为“贝藻王国”, 是我国唯一以贝类和藻类为主要保护对象的国家级海洋自然保护区(蔡厚才和彭欣, 2011; 俞永跃, 2011)。朱根海等(1998a, b)对南麂列岛曾于1981–1982年和1992–1993年的各4个季节以及1990年春、秋季开展过3次微、小型藻类的调查, 共鉴定浮游和底栖微藻459种, 其中砂质潮间带底栖硅藻55种。此后, 再无相关研究和报道, 而现今南麂列岛潮间带底栖硅藻的物种多样性和群落构成以及它们在近20年来发生了何种变化, 关系到该保护区生物多样性的保护和管理, 因此亟待进行研究与评估。

火焮岙位于南麂列岛的东部, 其潮间带为泥沙底质, 平缓而狭长, 大潮退去后露出的潮滩纵深可

达300 m以上, 高潮区有淡水输入。该地原为南麂镇政府所在地, 居民较多, 人类活动频繁, 曾建有鱼粉厂。1986年乡政府迁离火焮岙, 1990年保护区建立之后又关闭了鱼粉厂, 但20世纪90年代初的环境调查显示其潮间带仍为轻度污染。本研究针对火焮岙砂质潮间带底栖硅藻的多样性与群落结构进行研究, 旨在了解该地区底栖硅藻的多样性构成、分布和季节演替, 探讨南麂列岛近20多年来底栖硅藻多样性的变化, 为南麂列岛国家级海洋自然保护区的保护和发展提供有效的基础数据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样地点为南麂列岛国家级海洋自然保护区火焮岙砂质潮间带(图1a)。设置高潮区(27°27.851' N, 121°04.806' E)、中潮区(27°27.810' N, 121°04.840' E)和低潮区(27°27.772' N, 121°04.881' E) 3个采样点(图1b, c)。分别于2013年11月2日(秋季)、2014年2月14日(冬季)、5月14日(春季)和8月8日(夏季)进行样品采集。每个季节的采样时间均选择大潮期, 大都在下午两点左右大潮退去后采样。

使用内径3.4 cm的有机玻璃管采集表层4 cm的柱状样, 每个采样点3次重复, 使用4%戊二醛固定后带回实验室。环境因子样品采样方法相同, 于-20℃保存并带回实验室。

### 1.2 样品及环境因子分析

使用Ludox提取沉积物中的底栖硅藻, 经双氧水酸化后制成永久封片(Ribeiro, 2010)。在显微镜下对底栖硅藻进行鉴定和计数, 每个样品需计数300个硅藻壳以上, 装片内的硅藻若不足300个则全部

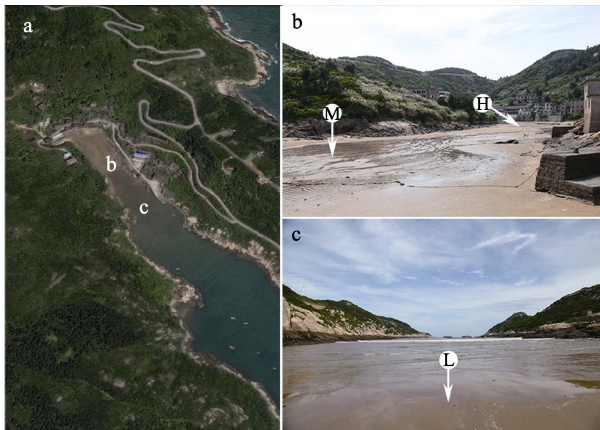


图1 南麂列岛火焜岙潮间带底栖硅藻采样站位。H、M、L分别表示高、中、低潮区。

Fig. 1 Sampling sites of benthic diatoms from the intertidal zone of Huokun'ao in the Nanji Islands. H, M, and L represent high tide zone, middle tide zone and low tide zone, respectively.

计数。对光镜下较难鉴定的种类,使用Hitachi S-3400N扫描电子显微镜进行观察和鉴定。

在样品采集时现场测定沉积物间隙水的温度和盐度。利用Turner II荧光光度计测定叶绿素 $a$ 的含量。含水量为沉积物烘干(80℃, 48 h)前后质量的差值。利用总有机碳分析仪Vario TOC Cube (Elementar, Germany)测定有机碳含量,有机质含量为有机碳含量乘以系数1.724。春季低潮区异常的盐度值和冬季中潮区异常的有机质值在统计分析中被剔除。

### 1.3 数据统计分析

采用Shannon多样性指数( $H'$ ) (Shannon, 1948)、Pielou均匀度指数( $J'$ ) (Pielou, 1975)、Simpson优势度指数( $1-\lambda$ ) (Simpson, 1949)和物种优势度指数( $Y$ ) (Pielou, 1984)等对底栖硅藻多样性进行分析。优势种按照 $Y \geq 0.02$ 进行界定。

采用聚类分析和非参数多维标度排序(non-multiple dimensional scaling, nMDS)观察群落结构的相似性;采用双因素相似性分析(two-way crossed ANOSIM)判断群落结构的季节和潮区差异。利用相似性百分比分析(analysis of similarity percentages, SIMPER)计算组内相似性和组间差异及主要贡献种。利用BIOENV分析探讨与底栖硅藻群落结构相关性最高的环境因子或组合。物种丰度矩阵经平方根转化,环境数据经 $\log(X+1)$ 转化和标准化后进行分析。

采用平均分类差异指数(average taxonomic distinctness index,  $\Delta^+$ )和分类差异变异指数(variation in

taxonomic distinctness index,  $\Delta^+$ ),比较分析了本研究鉴定的底栖硅藻物种与1981–1993年南麂列岛砂质潮间带3次调查所获底栖硅藻物种的分类多样性差异。对于分类学地位发生变化的物种,按照Medlin (2004)的分类体系进行了统一处理。

所有数据分析采用SPSS 19.0和PRIMER v6.1.18 (plymouth routines in multivariate ecological research)实现(Clarke & Gorley, 2006)。

## 2 结果

### 2.1 采样站位的环境因子

2013–2014年,南麂列岛火焜岙潮间带沉积物间隙水的四季温度变化范围为12–30℃,平均温度为 $20 \pm 6.48^\circ\text{C}$ 。全年平均间隙水盐度在剔除春季低潮区的异常值后,呈现中潮区( $28 \pm 0.7$ )、低潮区( $27.67 \pm 1.89$ )较高,而高潮区( $21.93 \pm 9.96$ )较低的趋势,高潮区和中潮区间隙水盐度的变异程度高于低潮区。中潮区盐度略高可能源于退潮后蒸发所致,高潮区的低盐则由于相邻陆地山丘溪涧的淡水输入造成。冬季高潮区和中潮区的间隙水盐度出现年中最小值,低潮区在春季达到最低。同时,高潮区( $24.72 \pm 4.38$ )、中潮区( $23.86 \pm 1.84$ )、低潮区( $23.66 \pm 0.23$ )的全年平均沉积物含水量及其变化范围依次降低(图2)。有机质含量在冬季中潮区出现极值1.67%。其余季节呈现为:春季( $0.154 \pm 0.062$ )% > 夏季( $0.095 \pm 0.003$ )% > 秋季( $0.069 \pm 0.008$ )% 的趋势。在剔除冬季数据后,潮区间差异为高潮区( $0.130 \pm 0.080$ )% > 低潮区( $0.101 \pm 0.037$ )% > 中潮区( $0.087 \pm 0.020$ )%。

南麂列岛火焜岙潮间带沉积物中的叶绿素 $a$ 含量在0.117–3.925  $\mu\text{g/g}$ 之间,年平均值 $0.700 \pm 1.009 \mu\text{g/g}$ 。冬季和春季高潮区分别为1.134  $\mu\text{g/g}$ 和3.925  $\mu\text{g/g}$ ,显著高于其他采样时间和站位。除夏季外,其他站位均呈现高潮区高于中、低潮区的趋势(图3)。

### 2.2 底栖硅藻的群落结构与物种多样性及其变化

火焜岙潮间带表层4 cm的底栖硅藻全年平均丰度为 $4,529 \pm 4,661 \text{ cells/cm}^3$ ,最高值出现在春季的高潮区,细胞丰度达13,913  $\text{cells/cm}^3$ ,最低值出现在冬季的中潮区,细胞丰度只有23  $\text{cells/cm}^3$  (图3)。在季节上,底栖硅藻丰度呈现为双峰型分布模式,峰值出现在春季(平均为 $6,668 \pm 5,318 \text{ cells/cm}^3$ )和秋季( $6,570 \pm 5,345 \text{ cells/cm}^3$ ),冬季( $3,598 \pm$

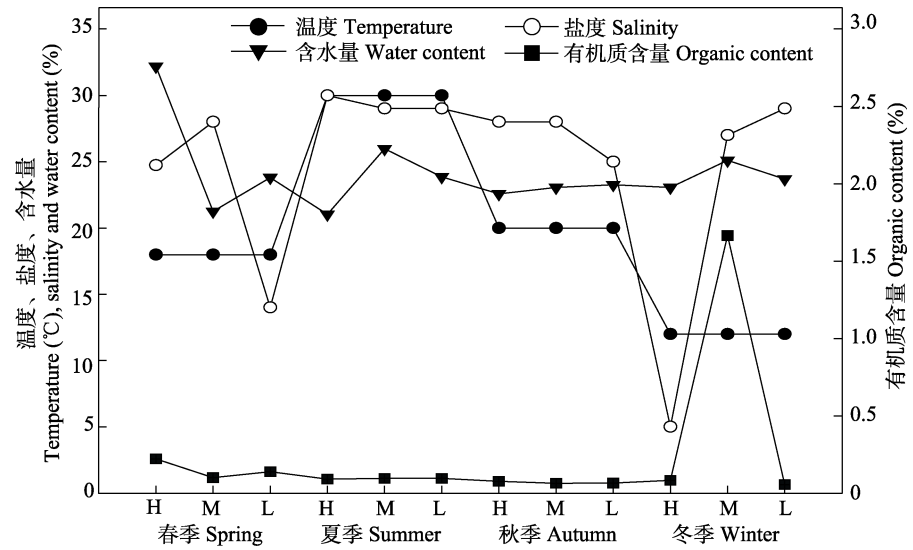


图2 南麂列岛火焮吞潮间带环境因子的季节变化。H、M、L分别表示高、中、低潮区。  
Fig. 2 Seasonal changes in environmental factors in the intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands. H, M, and L represent high tide zone, middle tide zone and low tide zone, respectively.

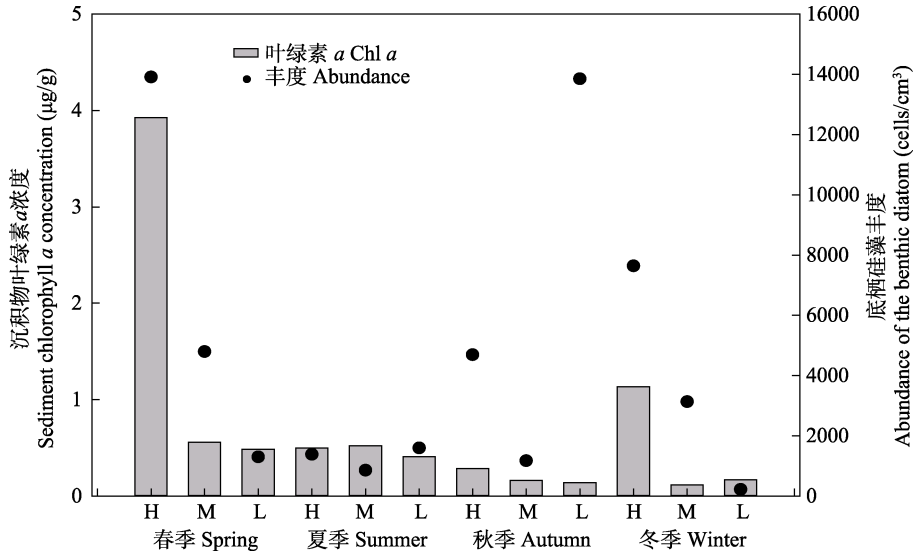


图3 南麂列岛火焮吞潮间带底栖硅藻丰度和沉积物中叶绿素a浓度。H、M、L分别表示高、中、低潮区。  
Fig. 3 Diatom abundance and sediments chlorophyll a concentration in intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands. H, M, and L represent high tide zone, middle tide zone and low tide zone, respectively.

3,128 cells/cm<sup>3</sup>)次之, 夏季的平均丰度最低(1,279 ± 312 cells/cm<sup>3</sup>)。不同潮区的全年平均丰度依次为: 高潮区(6,907 ± 4,511 cells/cm<sup>3</sup>) > 低潮区(4,192 ± 5,608 cells/cm<sup>3</sup>) > 中潮区(2,487 ± 1,591 cells/cm<sup>3</sup>)。然而, 在不同季节各潮区间细胞丰度的高低趋势存在差异: 在春季和冬季呈高潮区>中潮区>低潮区的趋势, 而在夏季和秋季则呈低潮区>高潮区>中潮区的趋势。

共分离鉴定底栖硅藻120种, 隶属3纲14目31科49属。平均分类差异指数Δ<sup>+</sup>为71.41, 分类差异变异

指数Δ<sup>+</sup>为393.4。在检获的17个优势种(Y ≥ 0.02)中, 海岸曲解藻(*Fallacia litoricola*)、史氏双壁藻(*Diploneis smithii*)和稀疏双壁藻(*D. parca*)的优势度显著高于其他种类(表1)。其中, 稀疏双壁藻在秋、冬季优势度较高(0.1487, 0.1477), 而在春、夏季, 优势度分别下降至0.0277和0.0482。史氏双壁藻在春季和冬季优势度较高, 达0.1446和0.1195, 而在夏、秋季, 优势度下降至0.0257和0.0188。海岸曲解藻除春季(0.0185)外都有较高的优势度, 分别为夏季0.16、秋季0.1195和冬季0.147。

表 1 南麂列岛火焮吞潮间带底栖硅藻优势种  
Table 1 Dominant species of benthic diatoms in the intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands

物种 Species	优势度 Dominant index (Y)
海岸曲解藻 <i>Fallacia litoricola</i>	0.1942
史氏双壁藻 <i>Diploneis smithii</i>	0.1780
稀疏双壁藻 <i>Diploneis parca</i>	0.1585
似叶状舟形藻 <i>Navicula phylleptosoma</i>	0.0718
匙形菱形藻 <i>Nitzschia spathulata</i>	0.0550
钳状曲解藻 <i>Fallacia forcipata</i>	0.0522
沙生舟形藻 <i>Navicula arenaria</i>	0.0520
琴状福氏藻 <i>Fogedia lyra</i>	0.0509
矩形羽纹藻 <i>Pinnularia rectangulata</i>	0.0447
方格舟形藻 <i>Navicula cancellata</i>	0.0397
线性蹄状藻 <i>Hippodonta linearis</i>	0.0274
格氏双眉藻 <i>Amphora graeffeana</i>	0.0273
直菱板藻加拉变种 <i>Hantzschia virgata</i> var. <i>kariana</i>	0.0264
海岸曲解藻长圆变种 <i>Diploneis litoralis</i> var. <i>clathrata</i>	0.0254
新西兰美壁藻 <i>Diploneis novaeseelandiae</i>	0.0243
蹄状藻一种 <i>Hippodonta</i> sp.	0.0234
海洋菱板藻 <i>Hantzschia marina</i>	0.0223

春季和夏季的优势种最多达12种, 秋季为10种, 冬季最少为9种。春季的主要优势种为史氏双壁藻、直菱板藻加拉变种(*Hantzschia virgata* var. *kariana*)、矩形羽纹藻(*Pinnularia rectangulata*)、琴状福氏藻(*Fogedia lyra*)、蹄状藻一种(*Hippodonta* sp.)等。夏季主要优势种为海岸曲解藻、直边脊弯藻(*Carina-sigma rectum*)、似叶状舟形藻(*Navicula phylleptosoma*)、琴状福氏藻、沙生舟形藻(*Navicula arenaria*)等。其中直边脊弯藻仅在夏季具有较高的优势度, 因此并未出现在全年优势种中。秋季主要优势种为稀疏双壁藻、史氏双壁藻、海岸曲解藻、方格舟形藻(*Navicula cancellata*)、海洋菱板藻(*Hantzschia*

*marina*)等。冬季的主要优势种为海岸曲解藻、稀疏双壁藻、极小舟形藻(*Navicula perminuta*)、钳状曲解藻(*Fallacia forcipata*)、似叶状舟形藻等。

火焮吞潮间带底栖硅藻的Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数见表2。春季中潮区的底栖硅藻群落具有最高的Shannon多样性指数(3.445)、均匀度指数(0.8761)和最低的优势度(0.9549)。Shannon多样性指数的最低点出现在秋季的高潮区(2.388)。春季Shannon多样性指数最高( $2.937 \pm 0.349$ ), 其次为冬季( $2.857 \pm 0.197$ )和夏季( $2.721 \pm 0.197$ ), 最低为秋季( $2.586 \pm 0.143$ )。同时, 中潮区的年平均Shannon多样性指数最高( $2.88 \pm 0.353$ ), 其次为低潮区( $2.705 \pm 0.215$ )和高潮区( $2.761 \pm 0.137$ )。

2.3 底栖硅藻群落结构参数统计分析

由火焮吞不同季节底栖硅藻群落优势(K-dominance)累积相对丰度曲线(图4)可知, 春、秋和冬季底栖硅藻的相对丰度随物种等级增加的趋势基本一致, 而夏季的趋势高于其他季节。聚类分

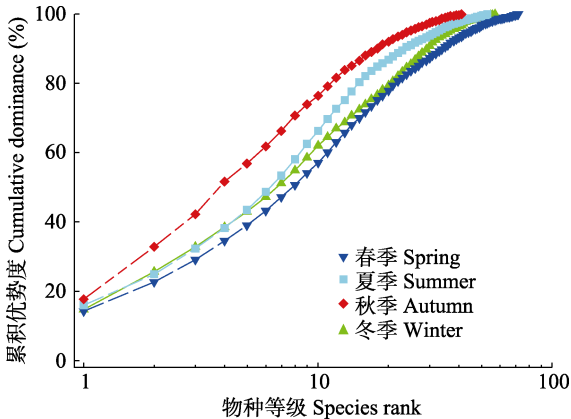


图 4 南麂列岛火焮吞潮间带不同季节底栖硅藻群落的 K 优势曲线  
Fig. 4 K-dominance curve of the benthic diatom community in the intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands

表 2 南麂列岛火焮吞潮间带不同季节底栖硅藻的 Shannon 多样性( $H'$ )、均匀度( $J'$ )和优势度( $1-\lambda$ )。H、M、L 分别表示高、中、低潮区。  
Table 2 Diversity ( $H'$ ), evenness ( $J'$ ) and dominance index ( $1-\lambda$ ) of benthic diatoms in the intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands. H, M, and L represent high tide zone, middle tide zone, and low tide zone, respectively.

	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn			冬季 Winter		
	H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L
$J'$	0.7861	0.8761	0.7394	0.7785	0.8053	0.8284	0.6955	0.8034	0.8681	0.8644	0.8301	0.8108
$H'$	2.817	3.445	2.629	2.648	2.525	2.991	2.388	2.648	2.722	2.968	2.902	2.702
$1-\lambda$	0.9112	0.9549	0.8511	0.8766	0.8856	0.9304	0.839	0.8974	0.9103	0.9302	0.9199	0.9041



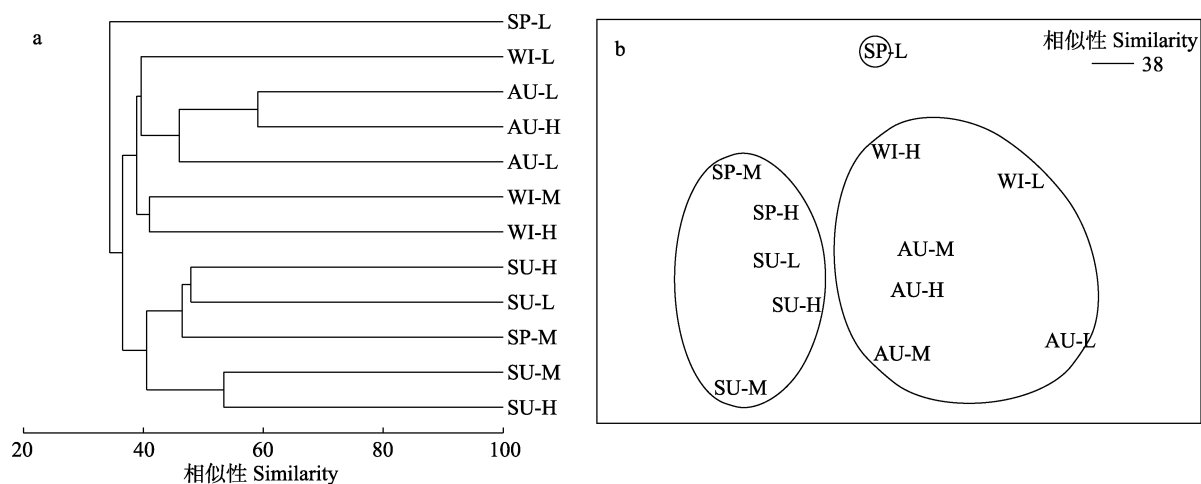


图 5 南麂列岛火焮吞潮间带底栖硅藻的等级聚类和非参数多维标度排序。SP、SU、AU、WI 分别代表春季、夏季、秋季、冬季; H、M、L 分别表示高、中、低潮区。

Fig. 5 Clustering and Non-metric Multidimensional scaling (MDS) of benthic diatom community in the intertidal zone of Huokun'ao, Nanji Islands. SP, SU, AU, and WI represent spring, summer, autumn and winter, respectively. H, M, and L represent high tide zone, middle tide zone, and low tide zone, respectively.

析和nMDS分析显示, 春、夏季底栖硅藻群落(除春季低潮区外)聚成一组; 秋、冬季底栖硅藻群落形成一组(图5)。

双因素相似性分析结果表明, 火焮吞潮间带底栖硅藻群落在季节上差异不显著, 而在潮区间则存在显著差异( $p = 0.75$ ,  $P = 0.04$ )。高、中、低潮区底栖硅藻群落差异在50.24–58.86%之间。除史氏双壁藻(6.61%)外, 其余各底栖硅藻物种对群落差异的贡献率均小于5%, 平均差异均小于4, 不同物种对差异的贡献率较为平均。

BIOENV分析结果显示, 盐度与火焮吞潮间带底栖硅藻的群落结构最为相关(相关系数为0.249), 其余依次为: 盐度和有机质(0.218)、温度和盐度(0.191), 有机质(0.182)及温度(0.180)。

### 3 讨论

#### 3.1 潮间带底栖硅藻的群落结构及多样性与时空分布

底栖硅藻通常都有其特定的微生境和生活型, 如生活在砂砾间隙的间隙运动类群, 附着在砂粒表面的附砂类群等(Sabbe, 1997)。已有研究表明, 底质类型通常是影响底栖硅藻物种组成的主要环境因子(Sabbe, 1993, 1997; Du & Chung, 2007; Du et al, 2009; Ribeiro, 2010; Ribeiro et al, 2013)。在火焮吞潮间带, 不同潮区间(高、中、低潮区)具有相同或相近的底质类型, 因此底质类型并不是解释不同潮区底

栖硅藻群落结构显著差异的主要因素。

通常, 潮间带底栖硅藻由于温度、光照、营养盐、生活史周期等因素的驱动, 物种及个体丰度存在一定的季节性周期变化(Hendey, 1964)。南麂列岛火焮吞潮间带底栖硅藻丰度呈明确的双峰型季节分布, 符合硅藻的一般分布模式。然而, 统计分析显示底栖硅藻的群落结构在潮区而非季节间存在显著差异, 并与盐度的相关性最高, 且盐度的重要性超过盐度和温度的组合。这一分布特点类似于河口区潮间带(Sabbe, 1997; Ribeiro et al, 2013): 河口区由于盐度的梯度差异, 使具有不同盐度适应性的底栖硅藻物种及其个体丰度出现差异。火焮吞潮间带由于高潮区的陆源淡水注入以及中潮区的蒸发, 形成了类似河口区的盐度梯度, 由此造成不同潮区间底栖硅藻群落结构及多样性的显著差异。

南麂列岛火焮吞潮间带春、冬季底栖硅藻的Shannon多样性和丰度要高于夏、秋季, 且春、冬季中、高潮区高于低潮区。这可能是由于在春季和冬季陆源淡水输入增多导致高潮区含水量上升, 盐度下降明显。一些广盐性种类如曲解藻(*Fallacia*)、舟形藻(*Navicula*)、双壁藻(*Diploneis*)等大量增殖, 在一定程度上减少了底栖硅藻的物种数, 导致了较低的Shannon多样性和高细胞丰度。而在春季中潮区, 因盐度适宜, 物种数达到最高(51种)。在夏、秋季则低潮区的Shannon多样性要高于中、高潮区, 可能与夏、秋两季蒸发量大导致含水量下降, 一些移动能

力强的种类随水位下降进入低潮区有关。

相对于潮间带大型藻类明确的带状分布特点,我们对底栖硅藻的分布特点仍然不清楚。Hendey (1964)提出潮间带底栖硅藻呈斑块状分布,但Sabbe (1997)的研究发现底栖硅藻物种存在随潮区变化的趋势。本研究发现底栖硅藻在数量分布上随潮区呈现不同程度的倾向性,例如,沙生舟形藻、似叶状舟形藻、海岸曲解藻和线形蹄状藻(*Hippodonta linearis*)等物种在高潮区和中潮区具有较高的丰度,而匙形菱形藻(*Nitzschia spathulata*)和格氏双眉藻(*Amphora graeffeana*)在中、低潮区的丰度则高于高潮区。然而,影响底栖硅藻分布的因素很多,包括非生物和生物因素,上述底栖硅藻在火焜岙潮区的分布是否具有生境特异性还需更多的研究数据积累和验证。

### 3.2 南麂列岛潮间带底栖硅藻多样性近20多年来的潜在变化

本研究对南麂列岛火焜岙的底栖硅藻多样性进行了全面细致的研究,共记录了120种底栖硅藻,隶属3纲14目31科49属,为南麂列岛国家级海洋自然保护区提供了一份翔实的本底资料。火焜岙曾是南麂列岛上人类活动比较密集的区域,曾建有鱼粉厂等企业,造成了一定程度的有机质污染,至今潮间带次表层中仍可见一些颜色较深(有些甚至是黑色)的沉积物存在。在当地居民及相关生产单位搬迁后的近20多年来,该区域的海洋生物多样性保护成效如何,是否发生了某种变化,一直是保护区关切的主要问题。1981–1993年在南麂列岛曾开展过底

栖硅藻的调查,但并未在火焜岙砂质潮间带设置站位,因此比较分析其近20年来发生的变化并非易事。本研究通过对火焜岙潮间带底栖硅藻多样性的研究,并与南麂列岛保护区周边相同或相近底质类型潮间带的历史资料进行对比分析,以期从侧面解析南麂列岛底栖硅藻多样性的一些潜在变化。

据1981–1993年开展的3次微、小型藻类调查结果(朱根海等, 1998a, b),在南麂列岛砂质潮间带共鉴定出底栖硅藻55种,隶属3纲16目24科29属;平均分类差异指数 $\Delta^+$ 为79.79,分类差异变异指数 $\Delta^+$ 为485.5。本研究显示,底栖硅藻的平均分类差异指数 $\Delta^+$ 下降至71.41,分类差异变异指数 $\Delta^+$ 下降至393.4(图6)。在物种组成上,本次调查在纲级阶元的数量上未变。而由于在本次调查中并未检出辐辏藻属(*Actinoptychus*)、蛛网藻属(*Arachnoidiscus*)、沟盘藻属(*Aulacodiscus*)和杆线藻属(*Rhabdonema*)等属,导致其所在的目级阶元减少。本研究还检获了许多以前不曾报道的间隙运动类群或小个体附生类群,如棍形藻属(*Bacillaria*)、脊弯藻属(*Carinasigma*)、蹄状藻属(*Hippodonta*)和卵形藻属(*Cocconeis*)等。相关科、属级阶元和物种数的增加,主要是由于本研究采样和分类学研究的强度增大所致,尤其是后者,使更多的小个体硅藻物种得以被发现和鉴定(表3)。尽管如此,底栖硅藻在分类学多样性上却仍然降低了。这可能主要归因于沉积环境变化,如过去的陆源物质排放造成沉积物颗粒和间隙变小,环境压力增加,导致原有的个体较大或固着类群被小个体且移动能力更强的机会类群所取代。

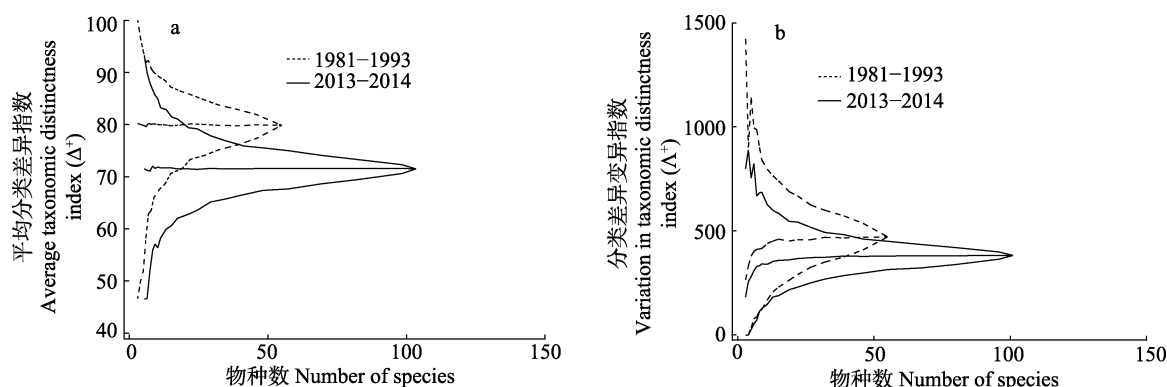


图6 南麂列岛火焜岙潮间带底栖硅藻分类差异性指数( $\Delta^+$ )和分类差异性变异指数( $\Delta^+$ )与历史资料(朱根海等 1998a, b)比较的95%置信区间漏斗图,分类阶元间路径长度为1。

Fig. 6 95% confidence intervals of average taxonomic distinctness index ( $\Delta^+$ ) and variation in taxonomic distinctness index ( $\Delta^+$ ), comparing with benthic diatoms data between this study and 1981–1993 (Zhu et al, 1998a, b). The distance between each taxon was set to 1.

表 3 南麂列岛火焜沓潮间带底栖硅藻(属)的变化  
Table 3 Changes of benthic diatom genera from the intertidal sandy sediments of Huokun'ao, Nanji Islands

属 Genus	1981–1993*	2013–2014#	属 Genus	1981–1993*	2013–2014#
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	+	+	蹄状藻属 <i>Hippodonta</i>		+
长曲壳藻属 <i>Achnanthidium</i>		+	泥生藻属 <i>Luticola</i>		+
辐裯藻属 <i>Actinoptychus</i>	+		胸隔藻属 <i>Mastogloia</i>	+	
双眉藻属 <i>Amphora</i>	+	+	直链藻属 <i>Melosira</i>	+	+
蛛网藻属 <i>Arachnoidiscus</i>	+		栖沙藻属 <i>Moreneis</i>		+
沟盘藻属 <i>Aulacodiscus</i>	+		舟形藻属 <i>Navicula</i>	+	+
棍形藻属 <i>Bacillaria</i>		+	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	+	+
中鼓藻属 <i>Bellerochea</i>		+	齿状藻属 <i>Odontella</i>	+	+
伯克力藻属 <i>Berkeleya</i>	+	+	书形藻属 <i>Parlibellus</i>		+
盒形藻属 <i>Biddulphia</i>	+		石舟藻属 <i>Petroneis</i>	+	+
对纹藻属 <i>Biremis</i>		+	羽纹藻属 <i>Pinnularia</i>		+
美壁藻属 <i>Caloneis</i>		+	斜脊藻属 <i>Plagiotropis</i>		+
脊弯藻属 <i>Carinasigma</i>		+	平面藻属 <i>Planothidium</i>		+
链形藻属 <i>Catenula</i>		+	斜纹藻属 <i>Pleurosigma</i>	+	+
梯舟藻属 <i>Climaconeis</i>		+	柄链藻属 <i>Podosira</i>		+
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>		+	普氏藻属 <i>Proschkinia</i>		+
圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	+	+	沙网藻属 <i>Psammodictyon</i>		+
筒柱藻属 <i>Cylindrotheca</i>	+		杆线藻属 <i>Rhabdonema</i>	+	
桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	+		洛氏藻属 <i>Roperia</i>		+
迪氏藻属 <i>Dickieia</i>		+	半舟藻属 <i>Seminavis</i>		+
双壁藻属 <i>Diploneis</i>	+	+	骨条藻属 <i>Skeletonema</i>		+
唐氏藻属 <i>Donkina</i>		+	辐节藻属 <i>Stauroneis</i>	+	+
内茧藻属 <i>Entomoneis</i>	+	+	班盘藻属 <i>Sticodiscus</i>	+	
曲解藻属 <i>Fallacia</i>	+	+	条纹藻属 <i>Striatella</i>	+	
福氏藻属 <i>Fogedia</i>		+	双菱藻属 <i>Surirella</i>		+
斑条藻属 <i>Grammatophora</i>	+	+	针杆藻属 <i>Synedra</i>	+	
布纹藻属 <i>Gyrosigma</i>	+	+	平片藻属 <i>Tabularia</i>		+
海生双眉藻属 <i>Halamphora</i>		+	海链藻属 <i>Thalassiosira</i>		+
菱板藻属 <i>Hantzschia</i>	+	+	粗纹藻属 <i>Trachyneis</i>	+	+
海氏藻属 <i>Haslea</i>		+	盘杆藻属 <i>Tryblionella</i>		+

\*朱根海等, 1998a, b; #本研究。\* Zhu et al, 1998a, b; # This study.

参考文献

Cai HC, Peng X (2001) Welcome to the Kingdom of Shellfish and Algae. Shanghai People's Fine Arts Publishing House, Shanghai. (in Chinese) [蔡厚才, 彭欣 (2011) 走进贝藻王国. 上海人民美术出版社, 上海.]

Clarke KR, Gorley RN (2006) PRIMER v6: User Manual/ Tutorial (Plymouth Routines in Multivariate Ecological research). Primer-E Ltd., Plymouth.

Du GY, Chung IK (2007) Spatio-temporal variation of intertidal microphytobenthos in the Nakdong estuary. The Sea, 12, 186–190.

Du GY, Son M, Yun M, An S, Chung IK (2009) Microphytobenthic biomass and species composition in intertidal flats of the Nakdong River estuary, Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 82, 663–672.

Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998) Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 281, 237–240.

Hendey NI (1964) An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Water. V. Bacillariophyceae (Diatoms). H. M. Stationary Office, London.

Jean-Marc G, Laurent C, Jennifer CG (2008) Can the intertidal benthic microalgal primary production account for the “Missing Carbon Sink”? Journal of Oceanography, Research and Data, 1, 13–19.

Mann DG, Vanormelingen P (2013) An inordinate fondness? The number, distributions, and origins of diatom species. Journal of Eukaryotic Microbiology, 60, 414–420.

Medlin LK, Kaczmarek I (2004) Evolution of the diatoms. V.



- Morphological and cytological support for the major clades and a taxonomic revision. *Phycologia*, 43, 245–270.
- Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Pielou EC (1984) *The Interpretation of Ecological Data: A Primer on Classification and Ordination*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Ribeiro L (2010) *Intertidal Benthic Diatoms of the Tagus Estuary: Taxonomic Compositoin and Spatial-temporal Variation*. PhD dissertation, University of Lisbon, Lisbon.
- Ribeiro L, Brotas V, Rincé Y, Jesus B (2013) Structure and diversity of intertidal benthic diatom assemblages in contrasting shores: a case study from the Tagus estuary. *Journal of Phycology*, 49, 258–270.
- Sabbe K (1993) Short-term fluctuations in benthic diatom number on an intertidal sandflat in the Westerschelde estuary (Zeeland, The Netherlands). *Hydrobiologia*, 269/270, 275–284.
- Sabbe K (1997) *Systematics and Ecology of Intertidal Benthic Diatoms of the Westerschelde Estuary (The Netherlands)*. PhD dissertation, Ghent University, Ghent.
- Schindler DW (1999) Carbon cycling: the mysterious missing sink. *Nature*, 198, 105–107.
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688.
- Underwood GJC, Kromkamp J (1999) Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. In: *Advances in Ecological Research* (eds Nedwell DB, Raffaelli DG), pp. 93–153. Academic Press, London.
- Yu YY (2011) *Practices and Lessons from Island-based Conservation of Biodiversity in Nanji Islands, China*. Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [俞永跃 (2011) 基于海岛管理的南麂列岛生物多样性保护实践与经验. 海洋出版社, 北京.]
- Zhu GH, Wang X, Wang CS, Gao AG (1998a) Ecological studies on nanoalgae and microalgae in Nanji Island National Marine Nature Conservation Area. I. Species composition and ecological characteristics. *Journal of Marine Sciences*, 16(2), 1–21. (in Chinese with English abstract) [朱根海, 王旭, 王春生, 高爱根 (1998a) 南麂列岛国家海洋自然保护区微、小型藻类生态研究. I. 种类组成与生态特点. 东海海洋, 16(2), 1–21.]
- Zhu GH, Wang X, Wang CS, Gao AG (1998b) Ecological studies on nanoalgae and microalgae in Nanji Islands National Marine Natural Conservation Area. II. Quantitative distribution. *Journal of Marine Sciences*, 16(2), 22–28. (in Chinese with English abstract) [朱根海, 王旭, 王春生, 高爱根 (1998b) 南麂列岛国家海洋自然保护区微、小型藻类生态研究. II. 数量分布. 东海海洋, 16(2), 23–28.]

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 南麂列岛火焜岙底栖硅藻物种名录

Appendix 1 Checklist of benthic diatoms in Huokun'ao, Nanji Islands

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017052-1.pdf>