

DOI: 10.5846/stxb201401020008

周百灵, 孟昭翠, 赵峰, 徐奎栋. 长江口外海域微型和小型底栖生物群落结构和时空变化. 生态学报, 2015, 35(15): 5050-5063.

Zhou B L, Meng Z C, Zhao F, Xu K D. Community structure and spatio-temporal variation of microbenthos and meiobenthos in sediments off the Yangtze Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5050-5063.

长江口外海域微型和小型底栖生物群落结构和时空变化

周百灵^{1,2}, 孟昭翠¹, 赵峰¹, 徐奎栋^{1,*}

1 中国科学院海洋研究所, 海洋生物分类与系统演化实验室, 青岛 266071

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:利用 DAPI 荧光计数法和 Ludox-QPS 方法并结合环境因子的分析,研究了 2010 年和 2011 年夏季 (7 月) 及秋季 (11 月) 长江口至济州岛沿线的 CJ 断面沉积物中的微型及小型底栖生物的组成、丰度和生物量及分布特点。结果表明,表层 5 cm 沉积物中,细菌 (10^8 个/cm³)、蓝细菌 (10^6 个/cm³)、自养 (10^6 个/cm³) 和异养微型鞭毛虫 (10^5 — 10^6 个/cm³) 的丰度较其他类群高 3 个数量级以上;细菌 (19—24 $\mu\text{g C/cm}^3$)、自养 (13—31 $\mu\text{g C/cm}^3$) 和异养 (5—44 $\mu\text{g C/cm}^3$) 微型鞭毛虫的生物量明显较蓝细菌 (1—2 $\mu\text{g C/cm}^3$)、小型底栖生物 (0.9—1 $\mu\text{g C/cm}^3$)、纤毛虫 (0.04—0.2 $\mu\text{g C/cm}^3$)、异养小鞭毛虫 (0.02—0.08 $\mu\text{g C/cm}^3$) 及硅藻 (0.001—0.008 $\mu\text{g C/cm}^3$) 高。除细菌和蓝细菌外,2011 年微型底栖生物和小型底栖生物各类群的丰度和生物量大多高于 2010 年,且大多为秋季高于夏季。发现的 166 种纤毛虫中,肉食性纤毛虫所占现存量的比例最大,菌食性次之,藻食性和杂食性最小;肉食性纤毛虫在秋季所占比例高于夏季,而菌食性则相反。统计分析表明,微型底栖生物丰度和生物量年度间具有极显著差异,基于物种-丰度的纤毛虫群落结构年度间呈极显著差异,而小型底栖生物则未见显著差异。微型和小型底栖生物各类群夏季和秋季的分布受多因子而非单一环境因子的影响,长江冲淡水对该断面的微型和小型底栖生物的影响不显著。对微型底栖生物各类群及水体中相应类群的比较分析表明,该海域的微型底栖生物具有明显的数量和功能重要性。

关键词:微型底栖生物;小型底栖生物;丰度;生物量;分布;东海

Community structure and spatio-temporal variation of microbenthos and meiobenthos in sediments off the Yangtze Estuary

ZHOU Bailing^{1,2}, MENG Zhaocui¹, ZHAO Feng¹, XU Kuidong^{1,*}

1 Department of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Using epifluorescence microscopy and the Ludox-QPS method, we investigated the community composition, abundance, and biomass as well as distribution of microbenthos and meiobenthos in combination with the analysis of benthic environmental variables at four stations off the Yangtze Estuary in the summer (July) and fall (November) of 2010 and 2011, respectively. The abundances of bacteria (10^8 cells/cm³), cyanobacteria (10^6 cells/cm³), and phototrophic (PNF, 10^6 cells/cm³) and heterotrophic nanoflagellates (HNF, 10^5 — 10^6 cells/cm³) were much higher than those of other components in the upper 5 cm of sediments. The biomass partitioning indicates the primary importance of benthic bacteria (19—24 $\mu\text{g C/cm}^3$), followed by PNF (13—31 $\mu\text{g C/cm}^3$), HNF (5—44 $\mu\text{g C/cm}^3$), cyanobacteria (1—2 $\mu\text{g C/cm}^3$), meiobenthos (0.9—1 $\mu\text{g C/cm}^3$), ciliates (0.04—0.2 $\mu\text{g C/cm}^3$), heterotrophic microflagellates (HMF, 0.02—

基金项目:国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2011CB403604);中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-EW-Z-5);国家自然科学基金项目 (41306153);中国科学院海洋研究所“一三五”专项资助项目 (201210060104) 联合资助

收稿日期:2014-01-02; 修订日期:2014-12-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kxu@qdio.ac.cn

0.08 $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$), and diatoms (0.001—0.008 $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$). The standing crops of microbenthic and meiobenthic assemblages, except of bacteria and cyanobacteria, were generally higher in 2011 than in 2010 and usually higher in the fall than in the summer. About 84% of diatoms, 82% of ciliates, 65% of HMF, and 77% of meiobenthos were distributed in the upper 2 cm of the sediments, whereas no distinct vertical distribution was observed for bacteria, cyanobacteria, PNF, and HNF. The vertical distribution had little variation between the years and seasons. The estimated productivity of diatoms ranged from 0.05 to 0.4 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ and contributed only 0.01%—0.1% of the primary productivity. Thus, most of the primary productivity was contributed by the pico- and nano-sized benthos. The estimated productivity of bacteria was 80—101 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, about 17%—21% of the primary productivity. The biomass of bacteria was nine to 18 times higher than that of the meiobenthos, whereas the productivity was 30—61 times higher than that of the meiobenthos (2—3 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$). The biomass of ciliates was much lower than that of the meiobenthos, while the ciliate productivity (3—23 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) was one to 14 times higher than that of the meiobenthos. The relative metabolic rates indicate that benthic heterotrophic nanoflagellates constitute the most important group in sediment respiration, accounting for 92.9%—99.1% of the estimated combined metabolic rate of the microbenthic and meiobenthic consumers. Among the 166 identified ciliate species, carnivorous ciliates constituted the primary feeding type in standing crops, followed by bacterivores, algivores, and omnivores. Carnivorous ciliates contributed a relatively higher proportion of standing crops in the fall than in the summer, whereas the contribution of bacterivorous ciliates was inverse. The abundance and biomass of the microbenthos as well as the ciliate community structure based on species-abundance varied significantly between the years, while no significant difference was observed for meiobenthos. Statistical analyses show that the distribution of microbenthos and meiobenthos in the summer and fall was affected by multiple factors rather than a single environmental factor, and diluted water of the Yangtze River did not show an obvious impact on the microbenthos and meiobenthos. BIOENV analysis indicates that in the summer, the microbenthic abundance had the highest correlation with the chlorophyll *a* concentration and ciliate species-abundance had the highest correlation with the combination of the bottom water temperature, chlorophyll *a* concentration, and organic matter content, while no correlation was found for meiobenthos. In the fall, the meiobenthic abundance had the highest correlation with the median grain size of the sediments, while no correlation was found for the microbenthos and ciliates. Comparative analyses between the microbenthic assemblages and corresponding ones in the upper pelagic waters suggest that the microbenthos had numerical and functional importance in the study area.

Key Words: microbenthos; meiobenthos; abundance; biomass; distribution; East China Sea

海洋底栖生物是通常指生活史的全部或大部分时间栖息于沉积物内、底表或水域底部的生物总称,按粒径大小可分为微型、小型和大型底栖生物。微型底栖生物 (microbenthos) 主要包括原核微生物、真核微藻和原生动物等^[1];小型底栖生物 (meiobenthos) 是指能通过 500 μm 孔径网筛,而被 42 μm 或 31 μm 孔径网筛所阻留的后生动物,主要包括线虫、桡足类、多毛类、动物类等类群^[2]。微型和小型底栖生物作为底栖微/小食物网重要组成部分,通过复杂的营养关系形成一个有机整体,在底栖生态系统中起着重要作用^[3]。原核微生物及微藻在底栖生态系统的初级生产、有机质利用及营养物质循环中起着基础作用,原生动物和小型动物是底栖微食物网中由初级生产力向高营养级转换的枢纽。微型和小型底栖生物的群落结构、现存量及分布格局的变动会对底栖微食物网及近岸浅海生态系统产生影响。

微型底栖生物由于个体微小且定量困难,需从泥沙中有效分离和提取出来才能进行定性和定量分析,国际上对海洋微型底栖生物各类群的研究少,且主要针对潮间带生境^[4-6],我国对海洋微型底栖生物的现存量及生态特点仅有零星报道^[7-8]。国际上对小型底栖生物的研究较为深入^[9],国内相关研究主要集中在黄渤海,对长江口海域研究相对较少^[10-11]。

长江是我国流入东海的最大河流,长江口及其邻近海域在长江巨量径流、复杂流系结构和特殊地形的共

同影响下形成独特的生态特征。有研究表明,夏季长江冲淡水 123°E 附近存在浮游植物生物量和初级生产力高值区^[12],浮游纤毛虫丰度较外围海域高 1 倍^[13];小型底栖生物在冲淡水区域丰度也较外围海域高^[11]。夏季台湾暖流水的入侵可致使浙江三门湾大型底栖生物群落种类数减少^[14]。目前,尚无冲淡水及台湾暖流对微型底栖生物群落结构影响的报道。此外,2011 年夏季黄、东海出现水母旺发,且可对纤毛虫和鞭毛虫等微小浮游生物产生明显影响^[15],但对底栖生态系统的影响尚不可知。本研究旨在了解长江口外海区微型和小型底栖生物的种类群构成、丰度、生物量及分布的时空变化,分析其时空变化与环境因子的关系,并探讨环境因子对其分布的影响,为长江口底栖生态系统尤其是极为欠缺的微型底栖生物生态学研究提供必要资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究搭载中国科学院海洋研究所 2010 年、2011 年 7 月 (夏季) 和 11 月 (秋季) 开放共享航次,对黄、东海的交界处——长江口至韩国济州岛沿线的 CJ 断面进行了底栖生物采样调查,在 CJ2, CJ5, CJ6 和 CJ7 四个站位成功采集到微型和小型底栖生物样品及用于环境因子分析的样品。其中,2010 年秋季 CJ6 站位未成功采到相关样品, CJ5 站位仅采到纤毛虫、小鞭毛虫、硅藻及小型底栖生物样品 (图 1)。

利用 0.1 m² 改进型 Gray-Ohara 箱式采泥器在每一站位采集 3 箱未受扰动的沉积物样品,使用内径为 1.6 cm 的注射器改造的采样管随机采集 5 cm 长芯样 4 个 (前两箱各采 1 管,第三箱采集 2 管),每 2 个芯样按 0—2 cm、2—5 cm 分层合并分别移入 50 mL 离心管中,加入经滤膜 (孔径 0.22 μm) 过滤的海水配制的 2% 冷戊二醛至 40 mL 进行固定。从离心管中各取 20 mL 按照分层合并共计 40 mL, 4 °C 避光保存用于细菌、蓝细菌及微型鞭毛虫分析。另外,采用内径为 2.3 cm 的注射器改造的采样管采集 8 cm 长芯样 8 个,按 0—2 cm、2—5 cm、5—8 cm 进行分层,其中 4 个芯样的各分层分别瓶装,用终浓度为 2% 冷戊二醛溶液固定,4 °C 避光保存用于纤毛虫、硅藻、小型鞭毛虫和小型底栖生物分析;另外 4 个芯样的相应分层合并后,分别装入封口袋, -20 °C 冷冻保存,用于沉积物粒度、叶绿素 a、脱镁叶绿素 a、有机质及总氮测定。

1.2 样品及环境因子分析

水深及底层水温度、盐度数据由随船温盐深测定仪 (CTD) 现场测定。沉积物粒度分析采用 Cilas (940L) 型激光粒度仪测定。叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 含量利用 Turner II 荧光光度计测定。有机碳和总氮含量利用元素分析仪 Vario Macro Cube (Elementar, Germany) 测定,有机质含量为有机碳含量乘以系数 1.724。

沉积物中的细菌、蓝细菌和微型鞭毛虫经过样品分散、超声波处理、稀释后,经 DAPI 荧光染色后镜检计数^[7],其中微型鞭毛虫根据其色素颗粒的有无对自养 (PNF) 与异养微型鞭毛虫 (HNF) 分别计数,并按 2—5 μm、5—10 μm、10—20 μm 3 个粒级进行计数。沉积物中底栖硅藻、纤毛虫和异养小鞭毛虫 (HMF) 及小型底栖生物利用 Ludox-QPS 染色方法进行分析^[16],主要步骤包括:密度梯度离心提取,定量蛋白银染色 (QPS),制片,镜检,对微型和小型底栖生物进行鉴定和计数。微型和小型底栖生物的生物量通过生物体积换算法和相应转换系数进行计算^[1,17-18]。

对沉积物中初级生产力的估算按照 Davis^[19]等: $P = 9.57 + 0.35 \text{ Chl } a$, P 为初级生产力总量 ($\text{mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), $\text{Chl } a$ 为沉积物中叶绿素 a 含量 (mg/m^2)。底栖硅藻的生产力通过其增长率 (μ) 和生物量 (B) 来估

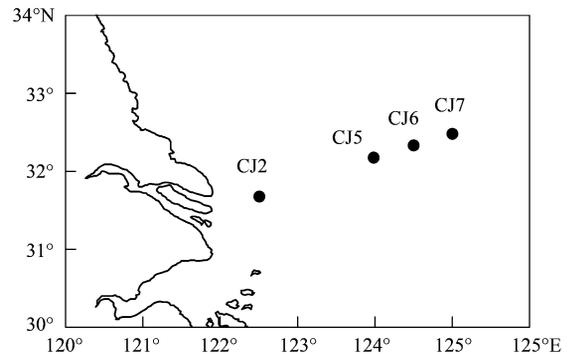


图 1 黄、东海交汇区域典型断面采样站位图

Fig. 1 Sampling stations along a representative transect in the boundary area between the Yellow Sea and the East China Sea
CJ2, CJ5, CJ6, CJ7: 采样点

算: $P = \mu \times B$,式中增长率的估算依据 Montagnes 等^[20]: $\mu = -2.40 \times 0.85^T - 0.0056 \log V \times T + 1.10$,式中 μ 为增长率(/d), V 为硅藻体积(μm^3), T 为温度($^{\circ}\text{C}$)。底栖细菌生产力的估算依据 Cole 等^[21]: $\log P = 2.054 + 1.08 \log B$,式中 P 为生产力($\mu\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$), B 为细菌生物量(mg C/m^2)。底栖纤毛虫的生产力通过其增长率和生物量来估算,增长率的估算依据 Müller^[22]: $\ln \mu_m = 1.52 \times \ln T - 0.27 \times \ln V - 1.44$,式中 μ_m 为增长率(/d), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), V 为纤毛虫体积(μm^3)。小型底栖生物的生产力以 $P = 9B$ 估算^[23]。

依据 Fenchel 中 $R = a W^{-0.25}$ 对纤毛虫、异养鞭毛虫和小型底栖生物的相对新陈代谢率进行估算,式中纤毛虫和异养鞭毛虫的 a 为 $10^{-1.94}$,小型底栖动物的 a 为 $10^{-1.64}$, W 为估算的平均个体重(约为总生物量/总丰度)^[24]。

表层 0—2 cm 沉积物中纤毛虫对细菌的摄食率按 37—525 个细菌 纤毛虫⁻¹ h⁻¹^[4,25-26] 进行估算,纤毛虫对硅藻的摄食率估算按 17 个硅藻 纤毛虫⁻¹ · h⁻¹^[4]。

1.3 数据统计分析

采用 Surfer 8.0 绘制站位图,采用 Excel 绘制柱状图。采用 SPSS 15.0 统计软件对微型和小型底栖生物各类群丰度与环境因子进行相关分析。利用 PRIMER 6 (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research) 软件包中的 CLUSTER 分析各研究站位的环境因子、微型和小型底栖生物丰度和生物量的等级聚类;利用 ANOSIM 分析环境因子、各类群丰度和生物量年度、季节和站位间差异;利用 BIOENV 分析找出与生物群落结构相关性最高的环境因子组合。为使数据正态分布,原始数据经过 $\log(x+1)$ 转化处理。

2 结果

2.1 采样站位的环境因子

所研究 4 个站位的水深从 CJ2 到 CJ7 逐渐加深,依次为 28,43,45,58 m (图 2)。

2010 年和 2011 年夏季 4 个站位底层水温度平均值差异不大,依次为 15.4 ± 3.2 (平均值 \pm 标准差) $^{\circ}\text{C}$ 、 $(15.6 \pm 3.5)^{\circ}\text{C}$;两年秋季底层水温度均高于夏季,依次为 $(17.9 \pm 0.4)^{\circ}\text{C}$ 、 $(19.7 \pm 0.7)^{\circ}\text{C}$ 。从 CJ2 到 CJ7 夏季各站位底层水温度逐渐降低,而两年秋季各站位温度先降低后升高,但总体上各站差异不大(图 2)。

2010 年和 2011 年夏季各站底层水盐度分别为 31.8 ± 0.6 、 32.2 ± 0.6 ,秋季底层水盐度分别为 32.7 ± 0.7 、 32.4 ± 0.8 ,年度和季节之间的变化均不大,从 CJ2 到 CJ7 站底层水盐度先降低后升高,但 CJ5 站 2010 年秋季同比下一年度明显较高(图 2)。

研究海域 4 个站位的沉积物类型主要为粉砂,中值粒径为 5—185 μm 。年度和季节间的变化均不大,从 CJ2 到 CJ7 站中值粒径先增大后减小,从粉砂变为粉砂质砂再变为粘土质粉砂,其中 2010 年夏季 CJ7 站中值粒径高达 185 μm ,远大于其他站位(图 2)。

表层 2 cm 沉积物中,2010 年和 2011 年夏季各站叶绿素 a 含量依次为 $(0.67 \pm 0.37) \mu\text{g/g}$ 沉积物干重、 $(0.45 \pm 0.03) \mu\text{g/g}$,脱镁叶绿素 a 含量依次为 $(3.64 \pm 1.19) \mu\text{g/g}$ 、 $(5.46 \pm 1.03) \mu\text{g/g}$;2010 年和 2011 年秋季叶绿素 a 含量依次为 $(0.52 \pm 0.05) \mu\text{g/g}$ 、 $(0.46 \pm 0.18) \mu\text{g/g}$,脱镁叶绿素 a 含量依次为 $(5.49 \pm 0.65) \mu\text{g/g}$ 、 $(6.26 \pm 3.07) \mu\text{g/g}$ 。叶绿素 a 含量夏季略高于秋季,2010 年略高于 2011 年,而脱镁叶绿素 a 含量的变化却相反。从 CJ2 到 CJ7 叶绿素 a 含量逐渐降低,而脱镁叶绿素 a 含量先增高后降低(图 2)。

2010 年和 2011 年各站夏季沉积物有机质含量分别为 $(0.56 \pm 0.23)\%$ 、 $(0.59 \pm 0.19)\%$,秋季含量分别为 $(0.56 \pm 0.18)\%$ 、 $(0.63 \pm 0.43)\%$ 。年度和季节间变化均不大,从 CJ2 到 CJ7 有机质含量先升高后降低,其中 2011 年秋季 CJ6 站有机质含量高于其他站位(图 2)。

2010 年夏季未获得沉积物总氮数据,2011 年夏季各站沉积物总氮含量为 $(0.04 \pm 0.02)\%$,2010 年和 2011 年秋季含量分别为 $(0.05 \pm 0.03)\%$ 、 $(0.09 \pm 0.03)\%$ 。从 CJ2 到 CJ7 总氮含量先升高后降低,2011 年秋季 CJ6 站总氮含量高于其他站位(图 2)。

综合环境因子各变量,经 CLUSTER 聚类分析显示,基本上相同站位聚集在一起。单因子相似性检验

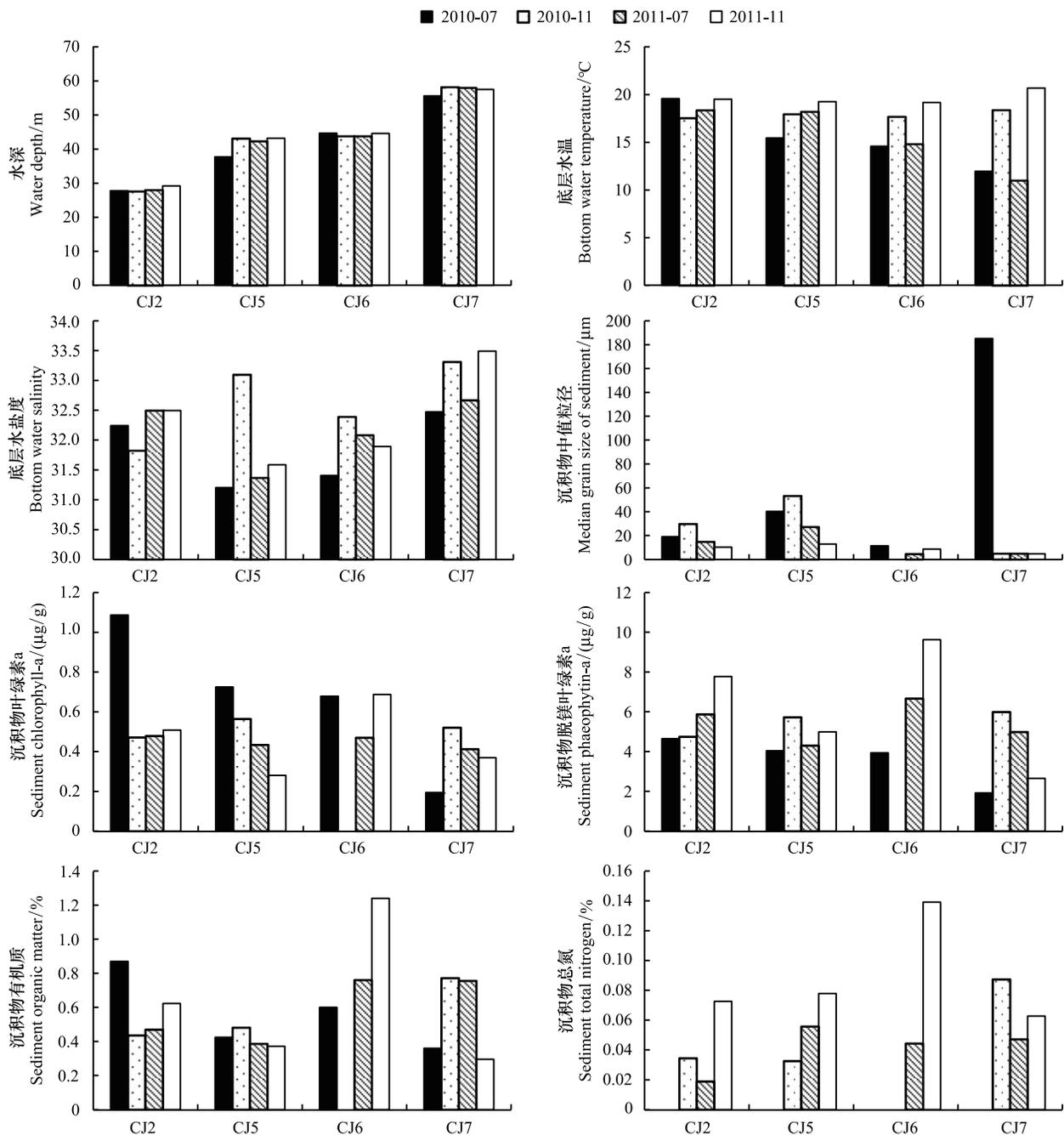


图2 长江口外海域各研究站位(CJ2-7)的环境因子

Fig.2 Benthic environmental variables at the stations CJ2-7 off the Yangtze Estuary

(One-Way ANOSIM) 结果显示, 站位差异 > 年度差异 > 季节差异, 不同站位间有极显著差异 (Global $R = 0.456$, $P = 0.002$), 年度间和季节间均无显著差异。

2.2 微型底栖生物丰度和生物量的时空变化

2010 年和 2011 年夏季长江口外海区表层 0—5 cm 沉积物中, 各站细菌丰度分别为 $(5.47 \pm 0.50) \times 10^8$ 个/cm³ 和 $(4.62 \pm 1.02) \times 10^8$ 个/cm³, 生物量为 $(24.05 \pm 2.19) \mu\text{g C/cm}^3$ 和 $(20.33 \pm 4.50) \mu\text{g C/cm}^3$, 两年秋季丰度为 $(4.97 \pm 0.72) \times 10^8$ 个/cm³ 和 $(4.42 \pm 1.09) \times 10^8$ 个/cm³, 生物量为 $(21.88 \pm 3.17) \mu\text{g C/cm}^3$ 和 $(19.46 \pm 4.78) \mu\text{g C/cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站细菌丰度和生物量呈现先降低后增高的趋势, 最低值多出现在 CJ5 站, 最高值多出现 CJ6 站 (图 3, 图 4)。

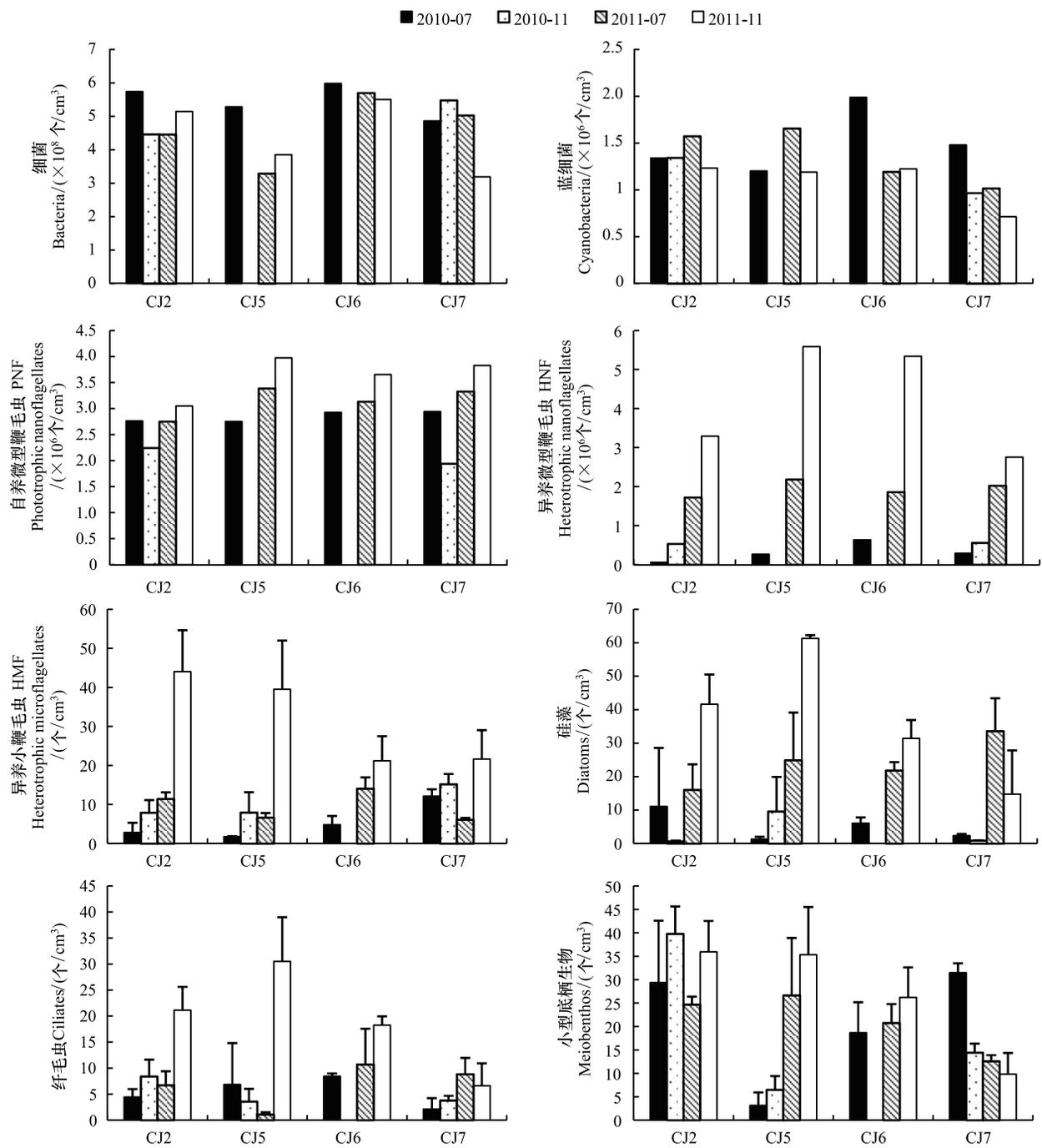


图3 长江口外海域各研究站位(CJ2-7)微型和小型底栖生物各类群的丰度

Fig.3 The abundances of microbenthos and meiobenthos at the stations CJ2-7 off the Yangtze Estuary

在表层 0—5 cm 沉积物中,2010 年和 2011 年夏季各站蓝细菌丰度为 $(1.50 \pm 0.34) \times 10^6$ 个/ cm^3 、 $(1.36 \pm 0.31) \times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量为 $(1.95 \pm 0.45) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、 $(1.77 \pm 0.40) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$,两年秋季丰度为 $(1.15 \pm 0.27) \times 10^6$ 个/ cm^3 、 $(1.09 \pm 0.25) \times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量为 $(1.50 \pm 0.35) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、 $(1.42 \pm 0.33) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站蓝细菌丰度和生物量呈现逐渐降低趋势,最低值多出现在 CJ7 站(图 3,图 4)。

自养微型鞭毛虫(PNF)在 0—5 cm 沉积物中的丰度,两年夏季依次为 $(2.84 \pm 0.10) \times 10^6$ 个/ cm^3 、 $(3.15 \pm 0.29) \times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量依次为 $(16.52 \pm 3.22) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、 $(17.52 \pm 3.63) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$,两年秋季各站丰度依次为 $(2.09 \pm 0.21) \times 10^6$ 个/ cm^3 、 $(3.63 \pm 0.41) \times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量依次为 $(12.51 \pm 2.78) \mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、

(30.92 ± 7.72) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站 PNF 丰度呈逐渐增高的趋势,最低值多出现在 CJ2 站(图 3,图 4)。按鞭毛虫大小看,2—5 μm 鞭毛虫的丰度最高(可达 10^6 个/ cm^3),5—10 μm 鞭毛虫丰度次之(10^5 个/ cm^3),10—20 μm 鞭毛虫丰度最小(10^4 个/ cm^3)。

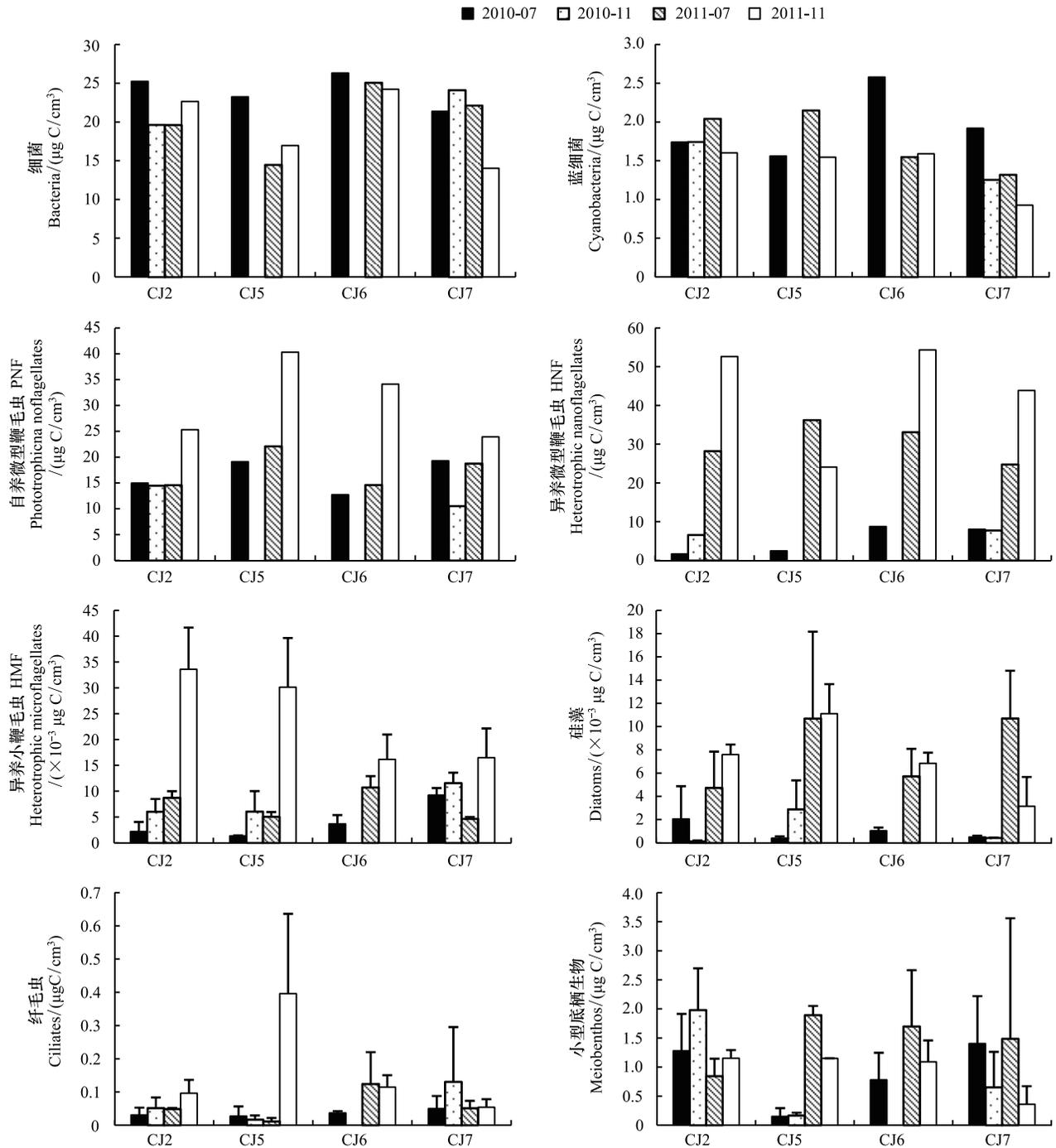


图 4 长江口外海域各研究站位(CJ2-7)微型和小型底栖生物各类群的生物量

Fig.4 The biomasses of microbenthos and meiobenthos at the stations CJ2-7 off the Yangtze Estuary

异养微型鞭毛虫(HNF)在0—5 cm沉积物中的丰度,各站两年夏季依次为(3.12 ± 2.39) $\times 10^5$ 个/ cm^3 、(1.95 ± 0.20) $\times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量依次为(5.23 ± 3.67) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(30.60 ± 5.09) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$,两年秋季丰度依次为(5.48 ± 0.20) $\times 10^5$ 个/ cm^3 、(4.24 ± 1.43) $\times 10^6$ 个/ cm^3 ,生物量依次为(7.19 ± 0.82) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(43.72 ± 13.87) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站 HNF 丰度呈现先增高后降低的趋势,最高值多出现在 CJ5 站(图 3,

图 4)。各粒级异养微型鞭毛虫丰度同样也是 2—5 μm 粒级最高 (10^5 — 10^6 个/ cm^3), 其次是 5—10 μm 粒级 (多为 10^4 — 10^5 个/ cm^3), 10—20 μm 粒级丰度最小 (多为 10^4 个/ cm^3)。

在表层 0—8 cm 沉积物中, 2010 年和 2011 年夏季各站异养小鞭毛虫 (HMF) 的丰度分别为 (5 ± 5) 个/ cm^3 、(10 ± 4) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.0041 ± 0.0036) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.0073 ± 0.0029) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。两年秋季丰度分别为 (10 ± 4) 个/ cm^3 、(32 ± 12) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.0079 ± 0.0032) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.024 ± 0.0091) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站 HMF 丰度呈现逐渐增高的趋势, 但 2011 年秋季逐渐降低, 其中 2011 年秋季 CJ2 站和 CJ5 站 HMF 丰度远高于其他站位 (图 3, 图 4)。

在表层 0—8 cm 沉积物中, 2010 年和 2011 年夏季各站硅藻的丰度分别为 (5 ± 4) 个/ cm^3 、(24 ± 7) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.0010 ± 0.00076) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.0080 ± 0.0032) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。两年秋季丰度为 (4 ± 5) 个/ cm^3 、(37 ± 19) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.0011 ± 0.0015) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.0072 ± 0.0033) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站硅藻丰度呈现先升高后降低的趋势, CJ5 站多出现最高值 (图 3, 图 4)。本研究中共发现硅藻 7 属 9 种, 优势类群均为曲舟藻 (*Pleurosigma*)、菱形藻 (*Nitzschia*) 和舟形藻 (*Navicula*)。

在表层 0—8 cm 沉积物中, 2010 年和 2011 年夏季各站纤毛虫的丰度分别为 (5 ± 3) 个/ cm^3 、(7 ± 4) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.036 ± 0.010) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.059 ± 0.047) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。两年秋季丰度为 (5 ± 3) 个/ cm^3 、(19 ± 10) 个/ cm^3 , 生物量为 (0.066 ± 0.058) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 、(0.17 ± 0.16) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ 。从 CJ2 站到 CJ7 站夏季时丰度先降低后增高, 秋季时呈现逐渐降低的趋势。最低值多出现在 CJ5 站, 但 2011 年秋季此站出现各站次纤毛虫丰度最高值 (图 3, 图 4)。

年度变化上, 除细菌、蓝细菌外微型生物各类群丰度和生物量多为 2011 年高于 2010 年, 其中硅藻丰度 2011 年秋季较 2010 年秋季高 9 倍; 季节变化上, 除细菌、蓝细菌外微型生物各类群丰度和生物量多为秋季高于夏季, 其中 2011 年秋季 HMF 的丰度是夏季的 3 倍。基于 Bray-Curtis 相似性矩阵对微型底栖生物各类群的丰度进行 CLUSTER 聚类分析, 结果表明, 在 94.96% 相似性水平上, 2010 年和 2011 年各自聚为一组, 经 SIMPROF 检验两个组具有极显著差异 ($P=0.002$), 且同航次的聚在一起, 但不同季节间和不同站位间均无显著差异。

2.3 小型底栖生物丰度和生物量的水平分布与时空变化

2010 年和 2011 年夏季表层 0—8 cm 沉积物中, 各站小型底栖生物的丰度分别为 (21 ± 13) 个/ cm^3 (相当于 1653 个/ 10 cm^2)、(21 ± 6) 个/ cm^3 (1692 个/ 10 cm^2), 生物量为 (0.90 ± 0.57) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($72 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)、(1.48 ± 0.46) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($118 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)。2011 年夏季生物量增加主要是 CJ5、CJ6 两站位多毛类增多。两年秋季丰度为 (20 ± 17) 个/ cm^3 (1617 个/ 10 cm^2)、(27 ± 12) 个/ cm^3 (2146 个/ 10 cm^2), 生物量为 (0.93 ± 0.94) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($75 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)、(0.94 ± 0.39) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($75 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)。从 CJ2 站到 CJ7 站, 2010 年丰度先降低后增高, 最低值出现在 CJ5 站; 与此不同, 2011 年呈现逐渐降低的趋势, 最高值出现在 CJ2 站 (图 3, 图 4)。

在鉴定出的 11 个小型底栖生物类群, 线虫在丰度上占绝对优势, 其分布趋势与小型底栖生物一致, 在小型底栖生物中所占的比例基本上从 CJ2 站到 CJ7 站呈逐渐降低的趋势。2010 年和 2011 年夏季各站线虫丰度分别为 (18 ± 11) 个/ cm^3 (1461 个/ 10 cm^2)、(18 ± 7) 个/ cm^3 (1469 个/ 10 cm^2), 生物量为 (0.54 ± 0.35) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($43 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)、(0.39 ± 0.30) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($32 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)。两年秋季丰度为 (18 ± 16) 个/ cm^3 (1466 个/ 10 cm^2)、(25 ± 11) 个/ cm^3 (1970 个/ 10 cm^2), 生物量为 (0.44 ± 0.41) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($35 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)、(0.44 ± 0.29) $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ($36 \mu\text{g C}/10 \text{ cm}^2$)。秋季小个体线虫比例增加。其他常见类群为桡足类、多毛类、动物类等。

小型底栖生物各类群丰度和生物量年度季节间变化均不大, 多为 2011 年略高于 2010 年, 线虫和腹毛类为秋季略高于夏季。基于 Bray-Curtis 相似性矩阵对小型底栖生物各类群的丰度进行聚类分析 (CLUSTER), 结果显示无明显的聚类分组。

2.4 微型和小型底栖生物的垂直分布

2010 年及 2011 年四航次微型和小型底栖生物的丰度及生物量随沉积物深度的增加而减少, 年度和季节

间变化均不大。沉积物表层 0—2 cm 中细菌、蓝细菌、PNF、HNF 的数量分别占各自总数的 50%、54%、51%、54%，2—5 cm 分层中各类群数量分别占各自总数的 50%、46%、49%、46%。HMF 垂直分层较上述四类群明显，表层 0—2 cm 分层中其数量占总数的 65%，22% 分布在 2—5 cm，13% 分布在 5—8 cm 分层。硅藻和纤毛虫分布在 0—2 cm 沉积物表层的数量分别占各自总数的 84% 和 82%，仅 4% 的硅藻和 5% 的纤毛虫分布在 5—8 cm 分层。四航次各站位表层 0—2 cm 沉积物中的纤毛虫数量的变动直接影响 0—8 cm 沉积物中纤毛虫丰度的变化趋势。秋季表层 0—2 cm 中纤毛虫数量占总数量的比值 CJ2、CJ7 略高于夏季，CJ5、CJ6 略低于夏季。小型底栖生物同样主要分布在沉积物表层 0—2 cm（占总数的 77%），17% 分布在 2—5 cm 分层，仅有 6% 分布在 5—8 cm 分层。

2.5 微型和小型底栖生物的生产力和新陈代谢率

表层 5 cm 沉积物中，通过沉积物叶绿素 a 含量换算的初级生产力总量为 444—602 mg C m⁻² d⁻¹；底栖硅藻的生产力估算值为 0.05—0.4 mg C m⁻² d⁻¹，仅占初级生产力的 0.009%—0.09%。底栖细菌的生产力为 80—101 mg C m⁻² d⁻¹，相当于初级生产力的 17%—21%；底栖纤毛虫的平均生产力为 3—23 mg C m⁻² d⁻¹；小型底栖生物的平均生产力为 2—3 mg C m⁻² d⁻¹。

就微型和小型异养类群的新陈代谢率来看，异养鞭毛虫所占的比例最高（72.4%—99.6%），其次是小型底栖生物（0.3%—27.0%），纤毛虫仅占 0.01%—0.7%（表 1）。相较 2010 年，异养鞭毛虫的贡献在 2011 年明显增大。

表 1 纤毛虫、异养鞭毛虫及小型底栖生物生物量及新陈代谢率的相对贡献

季节 Seasons	生物量 Biomass* / %	新陈代谢率 Metabolic rate* / %
2010-07	1.3 : 78.4 : 20.3	0.3 : 92.9 : 6.8
2010-11	1.6 : 76.9 : 21.5	0.3 : 93.0 : 6.6
2011-07	0.2 : 92.8 : 7.0	0.1 : 98.2 : 1.8
2011-11	0.7 : 96.3 : 2.9	0.1 : 99.1 : 0.8

* 纤毛虫:异养鞭毛虫:小型底栖生物;所有均为 0—5 cm 沉积物中的数据

2.6 底栖纤毛虫群落结构特征

本研究中共发现纤毛虫 166 种，隶属 14 纲/亚纲，83 属。钩刺亚纲（Haptoria）种类数最多（46 种），其次是前口纲（Prostomatea，34 种）、盾纤亚纲（Scuticociliatia，26 种）、腹毛亚纲（Hypotrichia，14）和核残迹纲（Karyorelictea，13 种）。前口纲在丰度及生物量上均为最优势的类群，其次为钩刺亚纲，盾纤亚纲，腹毛亚纲，篮口纲（Nassophorea）等，各类群丰度和生物量所占比例年度季节间变化均不大。纤毛虫在各航次、各站位检获的物种数范围为 6—66，最小值和最大值分别出现在 2011 年夏季和秋季的 CJ5 站。Margalef 多样性指数为 2.3—12.1，Shannon-Wiener 多样性指数在 1.58—3.48 之间。各多样性指数 2011 年高于 2010 年，秋季高于夏季。

依据相关文献及对纤毛虫食物泡的镜检观察，检获肉食性纤毛虫 74 种，菌食性 69 种，藻食性 15 种，杂食性 8 种。肉食性纤毛虫主要是前口纲的裸口虫属（*Holophrya*）、钩刺亚纲及核残迹纲的代表种类，在夏季 0—8 cm 沉积物中其丰度占总丰度的 39%—54%，生物量占总生物量的 36%—83%；秋季其丰度和生物量所占比例均增加（丰度占 52%—62%，生物量占 68%—86%）。菌食性纤毛虫主要为楯纤虫属（*Aspidisca*）、游仆虫属（*Euplotes*）、中圆虫属（*Metacystis*）及盾纤亚纲的一些类群，夏季其丰度占 33%—56%，生物量占 10%—61%；秋季其丰度和生物量所占比例均减小（丰度占 32%—40%，生物量占 9%—26%）。藻食性纤毛虫主要类群为佛瑞环须虫（*Peritromus faurei*）及带膜虫属（*Zosterodasys*）的类群，夏季其丰度仅占 5%—8%，生物量占 3%—4%；秋季比例变化不大（丰度占 3%—6%，生物量占 1%—5%）。杂食性纤毛虫丰度和生物量所占比例均最小，夏季丰度仅占 0.4%—5%，生物量占 0.2%—2%；秋季丰度占 1%—3%，生物量占 1%—3%（图 5）。

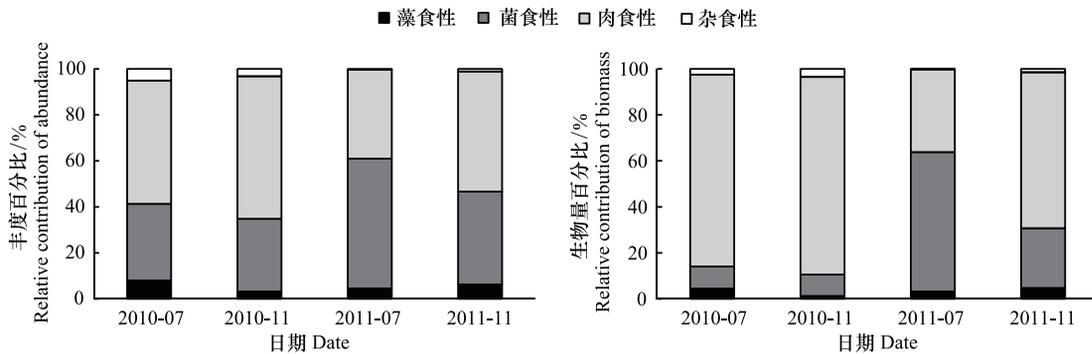


图5 长江口外海域研究站位纤毛虫各营养类型的丰度及生物量百分比

Fig.5 Relative contribution of the four trophic types to ciliate abundance and biomass at the stations off the Yangtze Estuary

就各站位来看,在0—8 cm 沉积物中,CJ6 站在 2011 年的夏季和秋季均以菌食性纤毛虫所占比例最多,在 2010 夏季则以肉食性纤毛虫为最多;除 2011 年夏季的 CJ2 站和 2010 年秋季的 CJ5 站以菌食性纤毛虫生物量所占比例最高外,这两个站位的其他航次样品中均以肉食性纤毛虫所占比例最高。CJ7 站各航次均为肉食性所占比例最高,秋季所占比例较夏季高(图 6)。

在表层 2 cm 沉积物中,即使采用最大的细菌摄食率,纤毛虫仅利用细菌日现存量的 0.002%—0.08%,对硅藻日现存量的消耗均达到 100%以上(450%—21969%,2010 秋季 CJ2 和 2011 夏季 CJ5 站均未检获藻食性纤毛虫)。

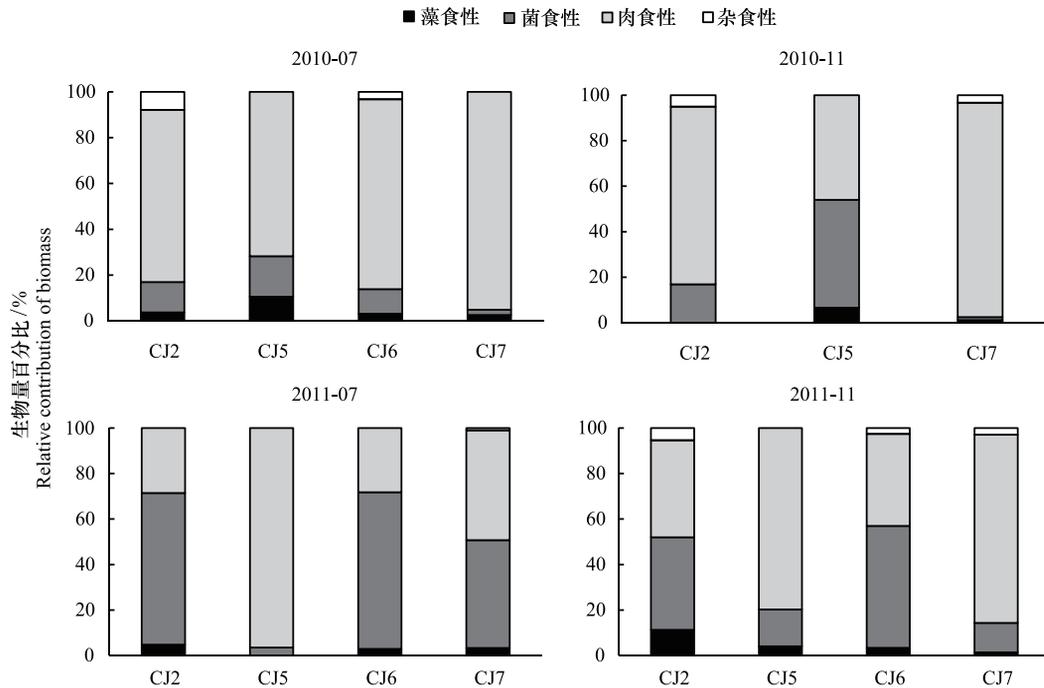


图6 长江口外海域各研究站位(CJ2-7)纤毛虫各营养类型生物量的相对百分比

Fig.6 Relative contribution of the trophic types to ciliate biomass at the stations CJ2-7 off the Yangtze Estuary

对研究站位纤毛虫群落结构进行 CLUSTER 聚类分析,基本上同年度同季节的样品聚合在一起。单因子相似性检验(One-Way ANOSIM)分析结果显示,年度差异大于季节差异,大于站位差异,不同年度间(Global $R=0.328$, $P=0.006$)有极显著差异,不同季节间和不同站位间无显著差异。

2.7 微型和小型底栖生物各类群丰度与环境因子的关系

Spearman 相关分析表明,夏季时,PNF 丰度和温度呈负相关 ($P = 0.047$),和水深呈正相关 ($P = 0.021$),纤毛虫丰度和中值粒径呈负相关关系 ($P = 0.047$),HNF 和 HMF 丰度均与叶绿素 a 含量呈负相关关系 ($P = 0.037$, $P = 0.047$),PNF 和 HNF 丰度与总氮含量呈正相关 ($P = 0$),桡足类、多毛类丰度和总氮含量呈显著正相关 ($P = 0.016$, $P = 0.001$)。BIOENV 分析表明,微型底栖生物群落结构与叶绿素 a 含量最相关 ($R = 0.529$, $P = 0.006$);其中,纤毛虫群落结构与底层水温、叶绿素 a 含量和有机质含量的组合最相关 ($R = 0.414$, $P = 0.015$)。

秋季时,HMF 丰度和底层水温呈正相关 ($P = 0.014$),细菌丰度和叶绿素 a 含量、有机质含量呈正相关关系 ($P = 0.019$, $P = 0.005$),蓝细菌丰度和水深呈负相关关系 ($P = 0.019$),与中值粒径呈正相关关系 ($P = 0.042$),小型底栖生物丰度和线虫丰度均与盐度呈负相关 ($P = 0.023$, $P = 0.023$)。BIOENV 分析表明,小型底栖生物群落结构与中值粒径最相关 ($R = 0.668$, $P = 0.004$);微型底栖生物群落结构和纤毛虫群落结构未见最相关的因子组合。

3 讨论

3.1 微型和小型底栖生物的数量和功能重要性

在长江口及东海海域,对底栖细菌丰度和生物量的报道较少。季倩等采用流式细胞仪技术研究发现长江口及邻近海域底栖细菌的丰度为 10^6 个/g 沉积物^[27],其结果明显低于本研究自表层 5 cm 沉积物中细菌的丰度,原因可能是采用流式细胞仪计数沉积物中细菌会造成对其数量的低估^[8]。本研究自长江口外海区获得的细菌丰度略高于同海域 2009 年春秋两季底栖细菌丰度^[8],与黄海陆架区夏季细菌丰度接近^[7]。据报道,东海水体异养细菌的丰度为 10^5 个/cm³^[28],本研究单位体积沉积物中细菌较水体中细菌丰度高 3 个数量级。由此,即使在表层 5 cm 的沉积物中,底栖细菌的总量和 50 m 水深中的细菌相当。由于细菌在沉积物中的分布很深,且所研究区域大多低于 50 m,因此底栖细菌在数量上无疑更多。

蓝细菌作为初级生产者在生态系统中具有重要作用,但目前较少工作涉及底栖蓝细菌的生态学研究。国外已有研究表明,不足 4 m 的浅水区域沉积物中蓝细菌的丰度为 10^7 — 10^8 个/cm³^[6],明显较本研究获蓝细菌丰度高,主要原因可能是所研区域水体透明度不高,且平均水深逾 40 m,海底光线弱,不利于蓝细菌的繁殖。与同海域研究结果相较,本研究获蓝细菌数量高于 2009 年春季的数据^[8],与秋季的数据较为接近,但在平均值上略低。此外,与黄海陆架区夏季数据较为接近^[7],平均值较后者略高。季倩报道长江口海域夏季水体表层蓝细菌的丰度为 10 — 10^5 个/mL^[27],相较于此,本研究单位体积沉积物中蓝细菌的数量高 1—5 个数量级。

在潮间带,底栖异养鞭毛虫的丰度为 10^3 — 10^5 个/cm³,主要为微型鞭毛虫^[6]。本研究结果与其相一致,但丰度 (10^5 — 10^6 个/cm³) 较潮间带的高。本研究获微型鞭毛虫丰度和生物量与同海域春秋两季 (丰度 10^5 — 10^6 个/cm³,生物量 4—21 $\mu\text{g C/cm}^3$)^[8] 和黄海陆架区夏季 (丰度 10^6 个/cm³,生物量 19—41 $\mu\text{g C/cm}^3$)^[7] 的数据接近,而 HMF 丰度相较偏低。对黄东海春夏季浮游鞭毛虫的研究显示,各水层微型鞭毛虫的总丰度为 10^2 个/mL,生物量为 20 $\mu\text{g C/L}$ ^[15]。如此,本研究单位体积沉积物中微型鞭毛虫较水体中浮游鞭毛虫丰度高 3—4 个数量级,生物量较后者高 3 个数量级。由此,即使表层 5 cm 沉积物中,该海域底栖鞭毛虫的绝对数量也明显较水柱中的总量高。

在浮游生态系统中,异养鞭毛虫是重要的细菌摄食者,影响细菌的现存量及生态系统的净生产量。已有研究表明,在海洋水体中细菌和 HNF 丰度比值多为 1000:1,在此比值下两者在食物链中维持在一个稳定的状态^[29]。而在海洋潮间带的研究表明,细菌和 HNF 丰度比值可达 10^4 — 10^6 :1,鞭毛虫摄食不是影响细菌生产力的重要因素^[4,30-31]。与浮游生态系统相似,本研究中 2010 年夏季和秋季细菌和 HNF 丰度比值量为 1000:1,而 2011 年夏季和秋季两者比值均约为 100:1,在这种情况下 HNF 可对细菌的现存量产生明显的摄食影响。

长江口及其邻近海域、黄海陆架区和潮间带底栖硅藻的丰度为 10^3 — 10^6 个/ cm^3 ^[7-8,23,32],均较本研究自表层 8 cm 沉积物中检获的硅藻丰度高。其原因可能在于,本研究的站位正好位于长江入海口及冲淡水转向区域,海水中有大量泥沙,透明度低,影响了光线的传播,能够到达海底的光较弱,抑制了硅藻的生长。虽然如此,本研究单位体积沉积物中硅藻的数量仍比同海域已报道春季浮游硅藻数量 (10^3 个/L) 高一个数量级^[33]。

同海域春秋及黄海陆架区夏季沉积物中获得的纤毛虫丰度为 9—33 个/ cm^3 ,生物量为 0.01—0.15 $\mu\text{g C}/\text{cm}^3$ ^[7-8,23],均较本研究检获的丰度高。相较于潮间带报道的 10^2 — 10^3 个/mL 数据^[32],本研究结果明显偏低,但较长江口及东海春夏季的浮游纤毛虫丰度高 3—4 个数量级^[15]。因此,底栖纤毛虫在该海域单位面积沉积物中的绝对数量明显要较水柱中的浮游纤毛虫总量高。本研究通过经验公式的估算显示,该海域底栖纤毛虫对细菌几乎无摄食影响,但对底栖硅藻的摄食控制明显。

本研究获长江口外海区小型底栖生物的丰度与相同海域的已有报道接近,低于北黄海,高于南黄海、东海和南海^[10],而生物量均低于上述报道。其原因可能是本研究采用测量各类群个体大小来计算生物量,而以往研究多采用各类群个体干重的经验系数计算干重生物量。因处于不同生长周期的小型底栖生物各类群的个体大小往往有较大差异,若采用传统的个体干重的经验系数计算生物量可能会造成对实际生物量的高估。本研究与孟昭翠对 2011 年春季长江口及东海的报道采用相同方法计算生物量^[23]结果相近。

从单位面积沉积物来看,在调查站位 0—5 cm 沉积物中,就微型和小型底栖生物各类群而言,细菌丰度 (10^{10} 个/ 10 cm^2)、PNF (10^8 个/ 10 cm^2)、蓝细菌 (10^7 个/ 10 cm^2) 及 HNF (10^7 — 10^8 个/ 10 cm^2) 远高于其他类群。在生物量上,细菌 (973—1203 $\mu\text{g C}/10\text{ cm}^2$) 占微型和小型底栖生物总生物量的 20%—49%,PNF (626—1546 $\mu\text{g C}/10\text{ cm}^2$) 占总生物量的 24%—34%,HNF (261—2186 $\mu\text{g C}/10\text{ cm}^2$) 占总生物量的 11%—45% (图 7)。就微型和小型底栖生物各类群生物量所占比例而言,细菌、蓝细菌和硅藻两年均为夏季高于秋季,HNF、HMF 和纤毛虫则相反。

从生产力上看,夏季底栖细菌生物量为小型底栖生物的 9—18 倍,生产力则高达 30—61 倍;秋季底栖细菌生物量为小型底栖生物的 15—16 倍,生产力高达 49—53 倍。纤毛虫尽管在生物量上低于小型底栖生物,但其夏季的生产力约是后者的 1—3 倍,秋季是后者的 3—14 倍 (图 7)。异养小鞭毛虫由于个体更小,生物量更大,其周转率会更高,但目前尚无可依据的公式进行估算。从新陈代谢率上看,异养鞭毛虫所占的比例最高,远高于小型底栖生物。需要指出的是,根据经验公式估算的微型和小型底栖生物各类群生产力及新陈代谢率,会产生不同程度的偏差,但还是从一个侧面获得了其相对重要性。

微型底栖生物巨大的现存量、高生产力及新陈代谢率,必然预示着其在底栖微食物网乃至整个生态系统中的重要作用。因此,未来有关生态系统的全面研究也应该将底栖和浮游两个生态系统结合起来,作为一个整体看待。

3.2 微型和小型底栖生物的时空变化与环境因子的关系

研究站位的环境因子仅在站位间有极显著差异,而在年度季节间均未见显著差异。相反,微型底栖生物各类群的丰度和生物量仅在年度间有极显著差异,小型底栖生物各类群丰度和生物量未见显著差异,说明 CJ 断面的微型和小型底栖生物在站位和季节间的变化不显著。统计分析表明,影响微型和小型底栖生物各类群在夏季和秋季分布的环境因子不同,且受多个因子而非单一环境因子的影响。所测环境因子中,冲淡水和台湾暖流主要影响此海域的温度、盐度、有机质和总氮含量等。统计分析表明,夏季的纤毛虫群落结构与底层水温、叶绿素 a 和有机质含量的因子组合最相关,但从总体看,与夏季微型底栖生物最相关的环境因子为叶绿素 a 含量,秋季的小型底栖生物群落结构和中值粒径最相关。

2011 年夏季 CJ5、CJ6 站位总氮含量较高,且盐度低于 32^[13],可能受到了长江冲淡水的影响,冲淡水携带来的营养物质多,桡足类和多毛类丰度均较高,均和总氮含量正相关。由于桡足类和多毛类个体相对较大,因此 2011 年夏季小型底栖生物丰度尽管与 2010 年夏季相近,但生物量高于 2010 年夏季。2011 年夏季 CJ5 站位叶绿素 a 和有机质含量均为 4 个站位最低,中值粒径较大,有机质的保存积累不易,可能是导致 2011 年夏

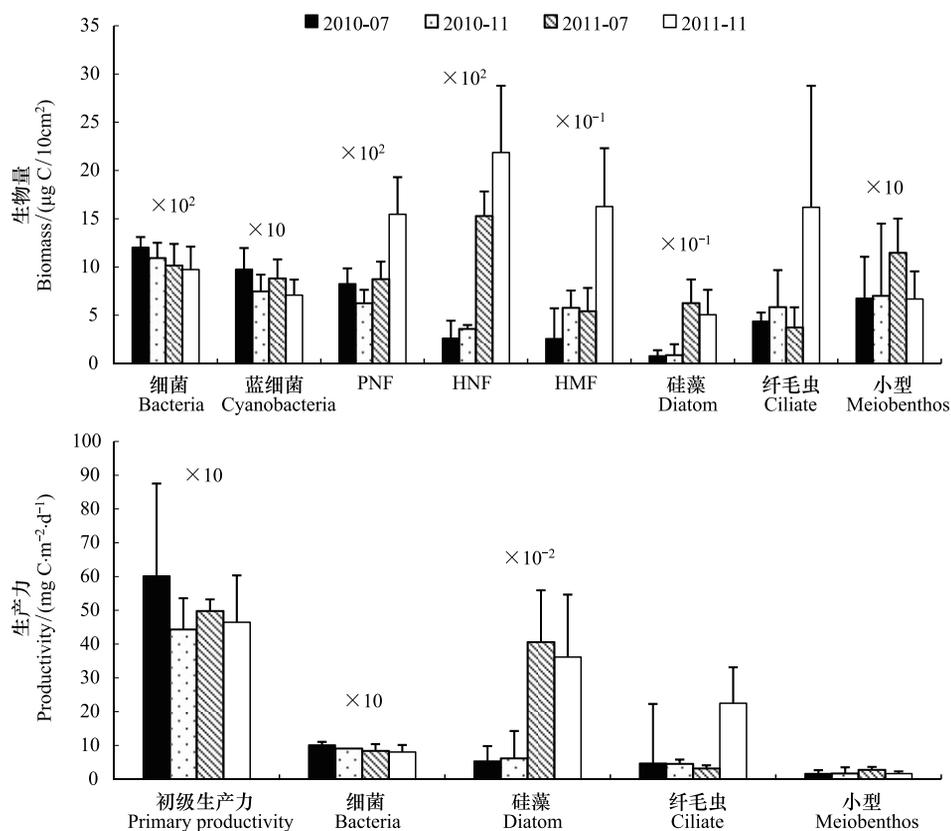


图7 微型和小型底栖生物在0—5cm沉积物中的生物量和生产力

Fig.7 The biomasses and productivities of microbenthos and meiobenthos in the surface 0–5 cm sediments

季 CJ5 站位出现纤毛虫丰度和种类数最低的主要原因。CJ2 站位水最浅,但夏季的 PNF 较少,可能是因为长江径流带来大量泥沙,水体浑浊,影响了 PNF 的生长。CJ7 站位在两年秋季还受到台湾暖流的影响(依据已有的文献^[34],盐度高于 33.5 的站位受到台湾暖流水的影响),温度高于其余站位。但 CJ7 站的微型和小型底栖生物类群丰度和生物量多为 4 个站位的最低值,可能是因为高盐影响了微型和小型底栖生物的生长,这一点得到了小型底栖生物的丰度及线虫丰度和盐度负相关关系的支持。小型底栖生物群落结构与中值粒径最相关,从 CJ2 到 CJ7 站线虫在小型底栖生物中所占比例逐渐降低,说明底质类型是影响小型底栖生物的主要因子。

相较 2010 年,2011 年黄、东海生态系统的显著变化是夏季出现了水母的旺发,而研究断面正是夏季水母分布较多的区域。Condon 等将水母和由细菌、HNF、纤毛虫组成的微生物环间的碳循环称为“水母环”(jelly loop),水母的旺发将初级生产固定的碳更多地转化为自身胶质有机碳,阻止了有机碳向更高营养级的流通,导致生态系统能流向微食物环倾斜,而且水母释放的有机质更多的是被细菌的呼吸作用所消耗而非用于细菌的二次生产,降低了细菌的生长效率^[35]。这一过程可能解释了 2011 年较 2010 年底栖细菌数量减少这一现象。就食性来看,近岸的 CJ2 站位 2011 年夏季时菌食性纤毛虫所占比例最高,而且,2011 年夏季 CJ6 站位出现了菌食性占主导的纤毛虫群落,异于其他年份以肉食性纤毛虫为主导的功能群。本研究的一个较明显的效应是 2011 年异养鞭毛虫对新陈代谢率的贡献增大,显示沉积物底栖生态系统的异养化程度增高。

致谢:中国科学院海洋研究所“2010—2011 年中国近海海洋科学考察开放共享航次”提供水文数据,本课题组代仁海、于婷婷和丁军军协助采样,代仁海、李菊、张均龙和吴旭文协助进行了部分环境因子的测定,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 中国科学院海洋研究所. HY/T 140—2011 海洋微型底栖生物调查规范. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 张志南, 周红. 国际小型底栖生物研究的某些进展. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004, 34(5): 799-806.
- [3] Kuipers B R, de Wilde P A W J, Creutzberg F. Energy flow in a tidal flat ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 1981, 5: 215-221.
- [4] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. I. Trophic interactions and grazing rates in two tidal flat communities. *Microbial Ecology*, 1997, 34(3): 188-198.
- [5] Hamels I, Sabbe K, Muylaert K, Vyverman W. Quantitative importance, composition, and seasonal dynamics of protozoan communities in polyhaline versus freshwater intertidal sediments. *Microbial Ecology*, 2004, 47(1): 18-29.
- [6] Dietrich D, Arndt H. Biomass partitioning of benthic microbes in a Baltic inlet: relationships between bacteria, algae, heterotrophic flagellates and ciliates. *Marine Biology*, 2000, 136(2): 309-322.
- [7] Meng Z C, Xu K D, Lei Y L. Community composition, distribution, and contribution of microbenthos in offshore sediments from the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(14): 1437-1446.
- [8] 代仁海. 黄东海底栖纤毛虫多样性及微型底栖生物群落结构特点 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [9] Higgins R P, Thiel H. Introduction to the Study of Meiofauna. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1988: 488-488.
- [10] 王家栋, 类彦立, 徐奎栋, 杜永芬. 黄海冷水团及周边海域夏初小型底栖动物现存量及空间分布研究. *海洋与湖沼*, 2011, 42(3): 359-366.
- [11] 于婷婷, 徐奎栋. 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布. *生态学报*, 2013, 33(15): 4556-4566.
- [12] 王春生. 长江口季节性低氧及生物效应 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [13] 于莹. 我国海区浮游纤毛虫的时空分布 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [14] 张海生, 陆斗定, 朱小莹, 潘建明, 卢冰, 高爱根, 武光海. U^{K37} 沉积地层记录; 三门湾海表温度 (SST) 和 EI Ni ño 现象及其对大型底栖动物生命活动的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 4935-4943.
- [15] 丁军军. 黄东海微小浮游动物群落结构与分布及水母发生的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [16] Xu K D, Du Y F, Lei Y L, Dai R H. A practical method of Ludox density gradient centrifugation combined with protargol staining for extracting and estimating ciliates in marine sediments. *European Journal of Protistology*, 2010, 46(4): 263-270.
- [17] Nozais C, Perissinotto R, Tita G. Seasonal dynamics of meiofauna in a South African temporarily open/closed estuary (Mdloti Estuary, Indian Ocean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2): 325-338.
- [18] Feller R J, Warwick R M. *Energetics/Higgins R P, Thiel H. Introduction to the Study of Meiofauna*. London: Smithsonian Institution Press, 1988: 181-196.
- [19] Davis M W, David McIntire C. Effects of physical gradients on the production dynamics of sediment-associated algae. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 13: 103-114.
- [20] Montagnes D J S, Franklin D J. Effect of temperature on diatom volume, growth rate, and carbon and nitrogen content: Reconsidering some paradigms. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2008-2018.
- [21] Cole J J, Findlay S, Pace M L. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 43: 1-10.
- [22] Müller H, Geller W. Maximum growth rates of aquatic ciliated protozoa: the dependence on body size and temperature reconsidered. *Archiv für Hydrobiologie*, 1993, 126: 315-327.
- [23] 孟昭翠, 徐奎栋. 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点. *生态学报*, 2013, 33(21): 6813-6824.
- [24] Fenchel T. Intrinsic rate of natural increase: The Relationship with Body Size. *Oecologia*, 1974, 14(4): 317-326.
- [25] Epstein S S, Shiaris M P. Rates of microbenthic and meiobenthic bacterivory in a temperate muddy tidal flat community. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, 58(8): 2426-2431.
- [26] Kemp P F. Bacterivory by benthic ciliates-significance as a carbon source and impact on sediment bacteria. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 49(1/2): 163-169.
- [27] 季倩. 长江口邻近海域水体及底栖微型浮游生物研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [28] 张东声. 长江口及其邻近海域微生物的多样性和生态分布特征研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [29] Fenchel T. *Ecology of Protozoa: The Biology of Free-Living Phagotrophic Protists*. New York: Springer-Verlag, 1987: 197-197.
- [30] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. *Microbial Ecology*, 1997, 34(3): 199-209.
- [31] Hamels I, Muylaert K, Casteleyn G, Vyverman W. Uncoupling of bacterial production and flagellate grazing in aquatic sediments: a case study from an intertidal flat. *Aquatic Microbial Ecology*, 2001, 25(1): 31-42.
- [32] Lei Y L, Stumm K, Volkenborn N, Wickham S A, Berminger U. Impact of *Arenicola marina* (Polychaeta) on the microbial assemblages and meiobenthos in a marine intertidal flat. *Marine Biology*, 2010, 157(6): 1271-1282.
- [33] 高亚辉, 虞秋波, 齐雨藻, 邹景忠, 陆斗定, 李扬, 陈长平. 长江口附近海域春季浮游硅藻的种类组成和生态分布. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1044-1048.
- [34] 唐晓晖, 王凡. 长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析. *海洋科学集刊*, 2004, (46): 42-66.
- [35] Condon R H, Steinberg D K, del Giorgio P A, Bouvier T C, Bronk D A, Graham W M, Ducklow H W. Jellyfish blooms result in a major microbial respiratory sink of carbon in marine systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(25): 10225-10230.