

长江口及其陆架春季小型底栖生物丰度和生物量

王小谷^{1,2}, 王春生^{1,2,*}, 张东声^{1,2}, 洪丽莎^{1,2}, 杨丹^{1,2}

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 2007年4—5月对长江口及其陆架海域小型底栖生物进行了调查。结果表明: 调查海域有18个类群小型底栖生物, 平均丰度为 (1117.19 ± 820.36) 个/10cm², 平均生物量为 (754.87 ± 546.37) (μg·干重)/10cm², 其中线虫是绝对优势类群, 占小型底栖生物总丰度的95.42%, 占总生物量的55.35%。其他优势类群分别是桡足类、多毛类和动吻类。垂直分布研究表明: 小型底栖生物丰度随着深度的增加而减少, 其数量的65%分布于0—2cm层, 其中线虫分布于0—2cm层的数量约占64%; 桡足类集中分布于0—2cm层, 占该类总量的88%以上; 多毛类分布于0—2cm层的数量约占61%。各区块小型底栖生物总丰度从高到低依次为东海陆架深水区 > 长江口近岸 > 杭州湾。与环境因子相关分析表明: 盐度与小型底栖生物丰度, 线虫丰度成显著的正相关, 与多毛类, 桡足类丰度以及小型底栖生物生物量呈极显著的正相关。近底溶解氧与小型底栖生物丰度, 多毛类, 线虫丰度以及小型底栖生物生物量呈显著的负相关, 与桡足类丰度呈极显著的负相关。调查海域沉积物的中值粒径, 粘土粉砂含量与小型底栖生物丰度, 多毛类, 线虫丰度以及小型底栖生物生物量的相关性不显著。位沉积物叶绿素a和脱镁叶绿素含量与小型底栖生物丰度, 线虫丰度、多毛类丰度, 桡足类丰度相关不显著; 沉积物中异养细菌含量与多毛类丰度呈显著负相关。

关键词: 小型底栖生物; 丰度; 生物量; 长江口及其陆架

Abundance and biomass of meiofauna in the Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf waters in spring, 2007

WANG Xiaogu^{1,2}, WANG Chunsheng^{1,2,*}, ZHANG Dongsheng^{1,2}, HONG Lisha^{1,2}, YANG Dan^{1,2}

1 The Second Institute of Oceanography, SOA Hangzhou 310012, China

2 Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA Hangzhou 310012, China

Abstract: The Changjiang Estuary is the largest estuary on the west shore of the Pacific, where a number of different water masses, including the Changjiang River plume, China Coastal Current and Taiwan Warm Current, meet and interact to each other. In addition, the Changjiang Estuary is an important source of nutrients to the East China Sea, and the most important and sensitive habitat of many brackish water and marine species as well. As an important component of benthic ecosystem, meiofauna are considered to be energetically important in benthic food web, and they play a role in the recycling of nutrients. On the other hand, as significant environmental bioindicators, the environmental monitoring function of meiofauna has drawn more and more attention.

A quantitative study of meiofauna was carried out in Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf waters (121°—128.0°E, 29.5°—32.5°N) in spring, 2007. Samples were collected using a multiple corer with four tubes of 9.5cm in diameter, and only undisturbed cores with clear overlying water were used. The results showed that there were a total of 18 taxa of meiofauna in the surveyed area, and the average abundance was (1117.19 ± 820.36) ind/10cm², and the average biomass was (754.87 ± 546.37) (μg·DW)/10cm², among which free-living nematodes were unquestionably the most dominant taxon, constituting 94.64% of total meiofauna abundance and 55.48% of the total meiofauna biomass. The other dominant groups were copepods, polychaetes and kinorhyncha. The study of spatial distribution has shown that high values of abundance and biomass occurred at stations along 31°N, and the low values occurred within the Changjiang

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价908专项(908-01-ST04)(908-ZC-I-02)

收稿日期: 2009-11-19; **修订日期:** 2010-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wang-sio@163.com

Estuary. The study of vertical distribution has shown that the abundance of meiofauna tended to reduce with depth, and 65% of the meiofauna was in the top 0—2 cm layer. This vertical distribution pattern was also true for each of the dominant groups, with 64% of nematodes, > 88% of copepods and about 61% of polychaetes found in the 0—2 cm layer, respectively. Geographically, the highest total abundance of meiofauna occurred in the offshore waters of the continental shelf of the East China Sea, followed by the nearshore of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay in descending order.

The average concentrations of chlorophyll *a* and phaeopigment in the top 10 cm sediment were $(0.544 \pm 0.459) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ sediment and $(2.349 \pm 1.973) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ sediment respectively, in which the concentration decreased gradually from the surface to the deeper layers. The results of correlation analysis with environmental factors indicated that there were significant positive relationships between salinity and the abundance and biomass of meiofauna, as well as the abundances of the dominant groups, i. e., nematodes, polychaetes and copepods. Dissolved oxygen near the bottom was significantly negatively correlated with the abundance and biomass of meiofauna and the abundances of polychaetes, nematodes and copepods. However, the median particle size and the contents of sand and slit-clay in the sediment had no significant relationship with the abundance and biomass of meiofauna and its major groups, nor were there significant relationships between the contents of chlorophyll *a* and phaeopigment in the surface sediment and the abundances of meiofauna, nematodes, polychaetes and copepods.

Key Words: meiofauna; abundance; biomass; Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf

长江口是太平洋西岸的第一大河口,是我国重要的海上交通枢纽,其自然条件复杂,是长江径流、沿岸流以及台湾暖流等海水团交汇的区域,是东海生物营养物质的重要来源地,也是最敏感和最重要的生物栖息地^[1]。小型底栖动物作为底栖生态系统的重要组成部分,是构成底栖食物网的基本环节,同时作为环境质量的重要指示生物,在海域环境监测方面的作用也日益受到人们的重视^[2-3]。有关河口、陆架小型底栖动物生态学研究国际上已有较为详细的报道^[4-6]。在我国,渤海,黄海小型底栖动物生态学研究起步较早^[7-14],而对长江口海域的研究仅仅涉及到少数站位,华尔等在 2003 年首次对长江口及邻近海域小型底栖动物生态学进行研究^[12,14],但所调查的站位大多集中于 122.0—122.0°E 之间的近海,并未涉及到长江口内、杭州湾及东海陆架深水(125°E 以东)等区域。本研究是国家重大海洋专项“我国近海海洋综合调查与评价”的一个子项目,调查范围从长江口内一直延伸至东海陆架深水区(121—128.0°E, 29.5—32.5°N)。通过 2007 年的采样调查,分析了调查海域小型底栖动物群落组成、丰度和生物量的水平空间和垂直空间上的分布特征,以及小型底栖动物与该海域环境因子的关系,为了解长江冲淡水、台湾暖流对该海域生态过程的影响提供背景资料。本文是长江三峡大坝蓄水启动后,首次对长江口及其陆架海域小型底栖生物的调查结果,为三峡特大工程对长江口及陆架生境的影响提供参考。

1 材料和方法

1.1 调查区域和站位

本次研究区域包括长江口近岸、杭州湾以及东海陆架深水区。调查范围 121.0—128.0°E, 29.5—32.5°N。共设定 25 个调查站(图 1),其中杭州湾 4 个站(N 系列),长江口近岸区块 15 个站(M, L, O 系列),东海陆架深水区 6 个站(C 系列),研究样品由“海监 49 号”科学调查船于 2007 年 4—5 月采集。

1.2 采样方法

小型底栖生物样品使用 MCS-1 型沉积物多管取样器采集(包括 4 根取样管),每根取样管长 61 cm,内径 9.5 cm,每个站取 2 根取样管样品进行小型底栖生物分样。每根样现场处理如下:(1)将上覆水虹吸入 32 μm 孔径的网筛,滤取其中的小型底栖动物,(2)用分样器把每根样按 0—2 cm、2—5 cm 和 5—10 cm 分层装瓶,上覆水滤样与 0—2 cm 层合装一瓶,用 7% 的中性福尔马林溶液固定。回实验室后样品经 32 μm 孔径的网筛过滤后,采用 ludox 离心法进行离心分选,虎红染色后在显微镜下鉴定并计数^[4]。

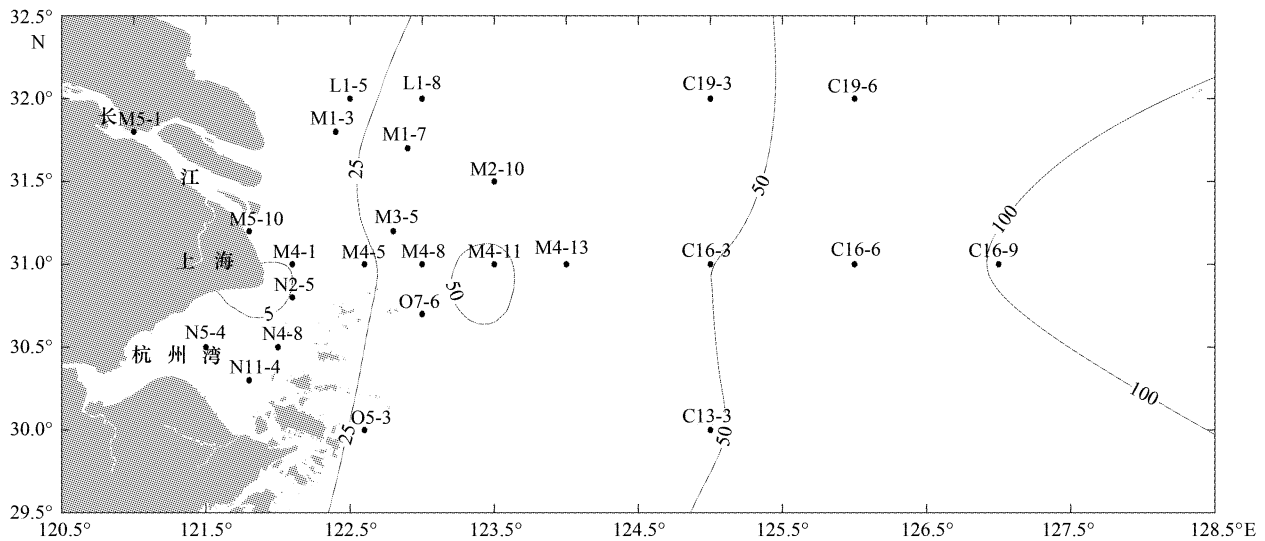


图1 研究海域调查站位图

Fig.1 Map of the sampling stations in the study area

另取一根取样管按0—2cm,2—5cm,5—10cm 分层,分取现场参数测定子样,叶绿素和脱镁叶绿素子样分装在塑料袋保存在-20℃低温中,回实验室后采用唐纳荧光法进行测定。沉积物异养细菌以及沉积物粒度的采样测定方法按《海洋调查规范》^[15]。

1.3 处理方法

小型底栖生物生物量的测定按体积换算法^[4],小型底栖生物不同类群个体的平均体重参照 Jarion、Widbom^[16-17]等。小型底栖生物丰度和生物量分布图采用 Surfer8.0 软件绘制。小型底栖生物丰度和生物量与环境因子相关性分析使用 Primer 6.0。

2 结果

2.1 沉积物类型和组成

如图2所示,调查海域中杭州湾区块的沉积物类型以粘土质粉砂型为主;东海陆架深水区块以砂质粘土质粉砂为主;长江口近岸区块沉积物类型属于镶嵌式分布,包含粘土质粉砂型、粉砂质砂和砂质粘土质粉砂,其北部区域明显以颗粒较粗的沙和粉砂质沙为主。

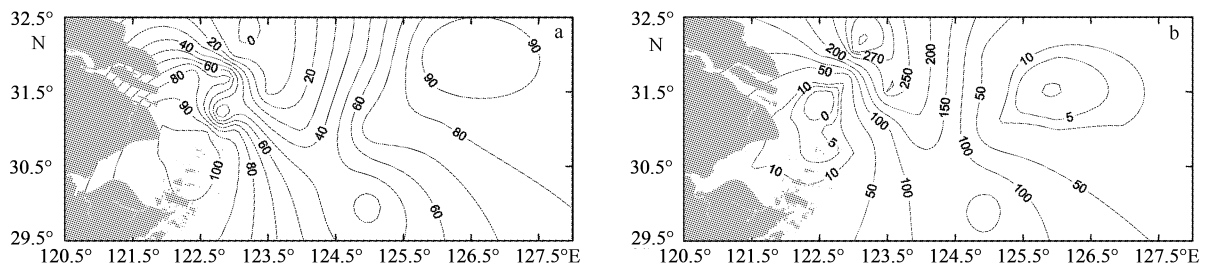


图2 沉积物类型

Fig.2 Sediment types in the area studied

a. 沉积物粉砂粘土含量体积分数/%; b. 沉积物中值粒径/ μm

2.2 沉积物叶绿素 a 和脱镁叶绿素的分布

调查海域沉积物叶绿素 a 的平均值为 $(0.544 \pm 0.459) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重,最高浓度值出现在长江口区块的 M1-7 站,其值为 $(1.548 \pm 3.449) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重;脱镁叶绿素的平均值为 $(2.349 \pm 1.973) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重,最高浓度值也

出现在 M1-7 站,其值为 $(8.513 \pm 16.061) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重。研究海域沉积物中叶绿素 a 和脱镁叶绿素水平分布趋势大致一致,均由长江口内向外逐步增加,以 M1-7 站和 M4-11 站为中心,形成高浓度区(图 3),这是由于该区域是长江三角洲前沿的低凹处,是长江冲淡水 and 台湾暖流共同控制区^[13],长江冲淡水带来的大量陆原营养物质与台湾暖流交会、融合最后沉降,导致该区沉积物中叶绿素现存量较高。沉积物叶绿素 a 在 0—2cm 层的平均值为 $(1.194 \pm 1.521) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重,在 2—5cm 层的平均值为 $(0.500 \pm 0.404) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重,在 5—10cm 层的平均值为 $(0.310 \pm 0.369) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重。叶绿素 a 由表层向底层随着深度的增加有明显的下降趋势。

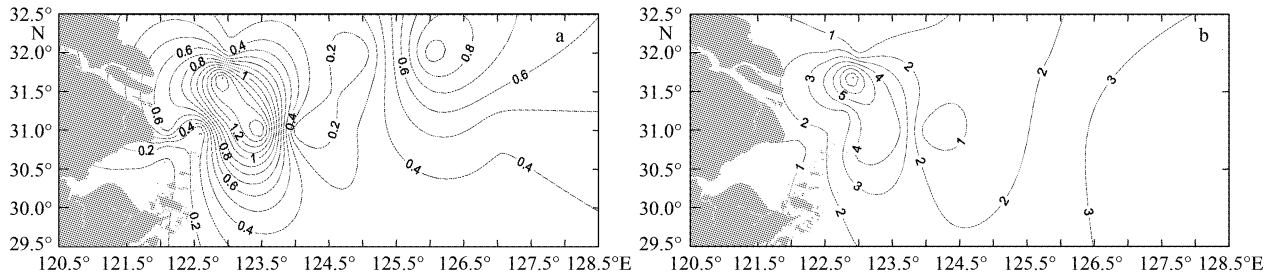


图 3 调查海域沉积物叶绿素 a 和脱镁叶绿素的分布

Fig. 3 distribution of sediment Chl-a and Phl-a

a. 叶绿素 a 含量分布/ $(\mu\text{g}/\text{g})$; b. 脱镁叶绿素含量分布/ $(\mu\text{g}/\text{g})$

2.3 小型底栖生物类群组成

调查海域共发现 18 个类群的小型底栖生物,包括涡虫 (Turbellaria)、线虫 (Nematoda)、腹毛类 (Gastrotricha)、动吻类 (Kinorhyncha)、多毛类 (Polychaeta)、寡毛类 (Oligochaeta)、介形类 (Ostracoda)、桡足类 (绝大部分为猛水蚤 Harpacticoida)、等足类 (Isopoda)、原足类 (Tanaidacea)、端足类 (Amphipoda)、涟虫 (Cumacea)、蜚螨类 (Acari)、双壳类 (Bivalvia)、蛇尾 (Ophiuroidea)、海参 (Holothuroidea)、海星 (Asteroidea)、其他未鉴定种类 (Other)。其中海洋线虫为绝对优势类群,占小型底栖生物总丰度的 94.64%。其他较为重要的类群有底栖桡足类,多毛类,动吻类,双壳类等。小型底栖生物主要类群的丰度和生物量及百分比组成见表 1。

表 1 小型底栖生物各类群平均丰度、生物量

Table 1 Abundanc,biomass of main meiofaunal groups

类群 Group	丰度 Abundance/ $(\text{个}/10\text{cm}^2)$	生物量 Biomass/ $((\mu\text{g} \cdot \text{DW})/10\text{cm}^2)$
线虫 Nematoda	$1065.99 \pm 791.98 (95.42\%)$	$426.39 \pm 316.79 (55.35\%)$
桡足类 Copepoda	$21.09 \pm 20.90 (1.88\%)$	$39.24 \pm 38.88 (5.09\%)$
多毛类 Polychaeta	$12.57 \pm 11.11 (1.13\%)$	$176.02 \pm 155.58 (22.85\%)$
动吻类 Kinorhyncha	$6.47 \pm 10.01 (0.58\%)$	$12.94 \pm 20.02 (1.7\%)$
双壳类 Bivalvia	$2.96 \pm 2.89 (0.26\%)$	$12.42 \pm 12.17 (1.61\%)$
寡毛类 Oligochaeta	$1.87 \pm 2.84 (0.17\%)$	$26.15 \pm 39.82 (3.39\%)$
介形类 Ostracoda	$1.77 \pm 6.18 (0.16\%)$	$46.07 \pm 160.79 (5.98\%)$
原足类 Tanaidacea	$1.37 \pm 2.61 (0.1\%)$	$20.48 \pm 30.18 (2.66\%)$
腹毛类 Gastrotricha	0.07 ± 0.20	0.24 ± 0.71
等足类 Isopoda	0.01 ± 0.06	0.18 ± 0.88
端足类 Amphipoda	0.12 ± 0.32	1.86 ± 4.57
蜚螨类 Acari	0.87 ± 0.97	1.30 ± 1.46
涟虫 Cumacea	0.03 ± 0.08	0.12 ± 0.29
涡虫 Turbellaria	0.06 ± 0.23	0.20 ± 0.81
海参 Holothuroidea	0.03 ± 0.10	0.10 ± 0.35
蛇尾 Ophiuroidea	0.66 ± 1.88	2.31 ± 6.59
海星 Asteroidea	0.88 ± 4.23	3.08 ± 14.09
其他类 other	0.37 ± 1.17	1.30 ± 4.11
总计 Total	1117.19 ± 820.36	754.87 ± 546.37

注: 括号内的数据是该类生物量占总丰度或生物量的百分比

2.4 小型底栖生物及主要类群丰度和生物量水平分布

调查海域小型底栖生物平均丰度为 (1117.19 ± 820.36) 个/ 10cm^2 , 丰度占前 5 位的类群依次为线虫、桡足类、多毛类、动物类和双壳类, 最高丰度值出现在 M4-11 站, 为 3573 个/ 10cm^2 , 其后依次为 M4-8、C16-6、C16-9、C16-3、M4-5, 这几个站全都处在 31°N 纬度线上; 最低丰度出现在长江口内的 M5-1 和 M5-10 站, 分别为 54.45 个/ 10cm^2 和 76.89 个/ 10cm^2 。线虫是小型底栖生物中的绝对优势种, 其分布趋势与小型底栖生物总丰度的分布趋势相同; 桡足类平均丰度为 (21.09 ± 20.90) 个/ 10cm^2 , 最高值出现在 C16-9 站, 为 73.78 个/ 10cm^2 , 其后分别是 M4-11、C16-6、O5-3, 最低值出现在 O5-10 站, 为 0.85 个/ 10cm^2 ; 多毛类也是出现频率极高的类群之一, 其平均丰度为 (12.57 ± 11.11) 个/ 10cm^2 , 最高值出现在 C16-3 站, 为 40.07 个/ 10cm^2 , 其后依次是 C13-3、M4-11, 最低值出现在长江口的 M5-1、M5-10 以及杭州湾的 N11-4 等站, 丰度值为 0.28 个/ 10cm^2 (图 4)。本次调查海域小型底栖生物平均丰度值低于华尔等^[12]2003 年 6 月长江口调查航次的结果 (1971 ± 583.9) 个/ 10cm^2 , 高于张志南^[10]2001 年 4 月东、黄海航次的调查结果 (342 ± 252) 个/ 10cm^2 。值得一提的是本次调查小型底栖生物丰度最高站位 M4-11 站 (123.5°E , 31.0°N) 与华尔 2003 年调查丰度最高站位所处位置极其相近。

调查海域小型底栖生物平均生物量为 (754.87 ± 546.37) ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 占前 4 位的类群依次为线虫、多毛类、介形类、桡足类, 最高生物量出现在 M4-11 站, 为 2472.53 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 其后依次为 M4-8、C16-3、M1-7、C16-6、C16-9; 最低生物量出现在 M5-1 站, 仅为 5.34 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 。调查海域线虫平均生物量 (426.39 ± 316.79) ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 最高值出现在 M4-11 站, 为 1367.55 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 其后依次是 M4-8、C16-6、M4-5; 最低值出现在 M5-1, 为 19.24 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 。多毛类平均生物量 (176.02 ± 155.58) ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 最高值出现在 C16-3 站, 为 560.98 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 其后依次是 C13-3、M4-11; 最低值出现在 M5-1、M5-10 以及 N11-4, 为 3.92 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 另外 M4-1 未检测出多毛类样品。桡足类平均生物量 (39.24 ± 38.88) ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 最高值出现在 C16-9 站, 为 137.23 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 , 其后依次为 M4-11、C16-6; 最低值出现在 M5-10, 为 1.58 ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm^2 (图 5)。

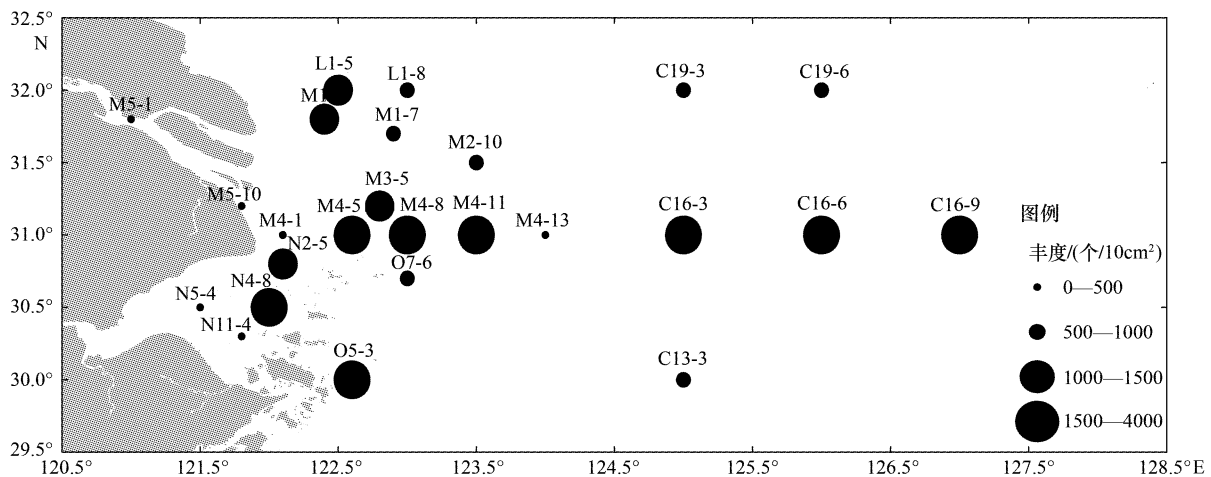


图 4 各站小型底栖生物丰度

Fig. 4 Meiobenthos abundance at sampling stations

2.5 小型底栖生物丰度垂直分布

2.5.1 小型底栖生物丰度垂直分布

小型底栖生物丰度垂直分布的普遍特征为: 小型底栖生物主要分布于沉积物表层, 且随着深度的增加而丰度降低。调查海域 25 个站位小型底栖生物数量的 65% 分布于 0—2cm 层。其中线虫分布于 0—2cm 层的数量约占该类总量的 64%; 桡足类分布于 0—2cm 的约占该类总量的 88%; 多毛类分布于 0—2cm 层的数量

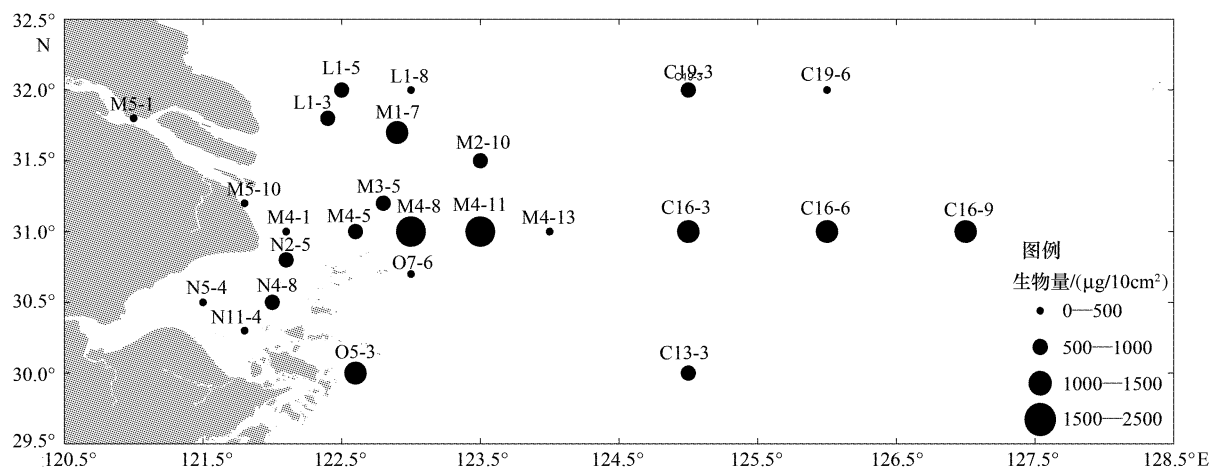


图5 各站小型底栖生物生物量

Fig. 5 Meiofauna biomass at sampling stations

约占 61% (图 6)。

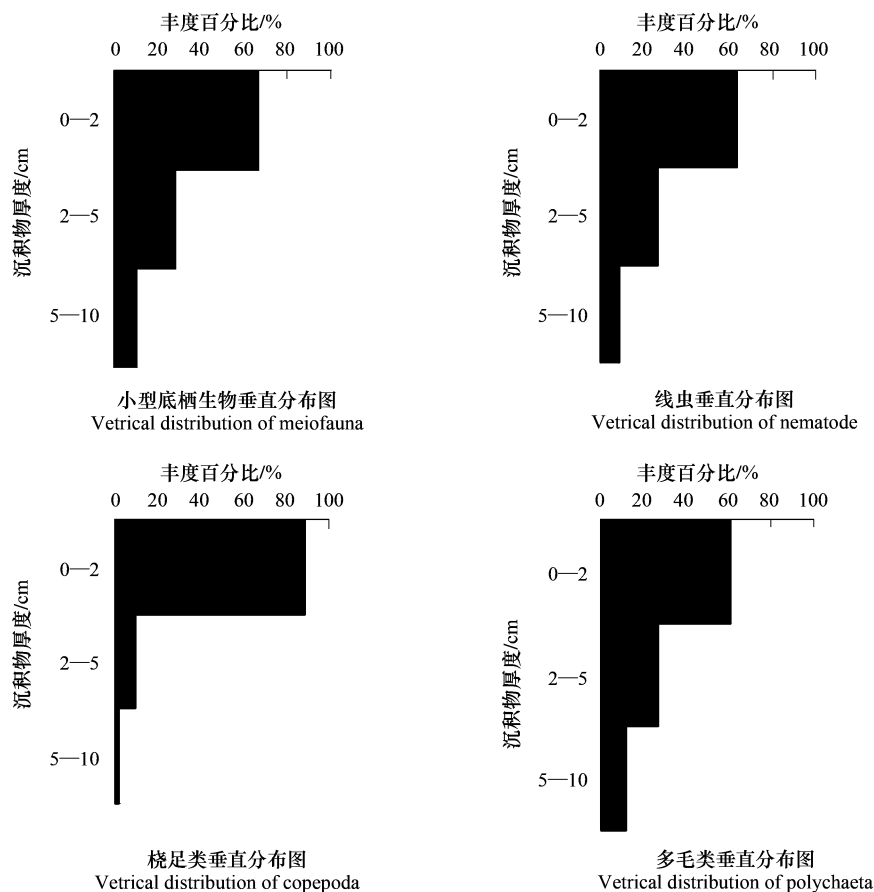


图6 小型底栖生物及主要类群丰度垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of meiofauna and main groups abundance

2.5.2 不同区块的小型底栖生物丰度垂直分布

各区块小型底栖生物丰度的垂直分布特征也基本一致,都是随着沉积物深度的增加而降低。表层小型底栖生物含量最高的区域是杭州湾,有 80% 小型底栖生物分布于 0—2cm 层;最低的是长江口近岸区块,仅有

55% 的小型底栖生物分布于 0—2cm 层(图 7)。

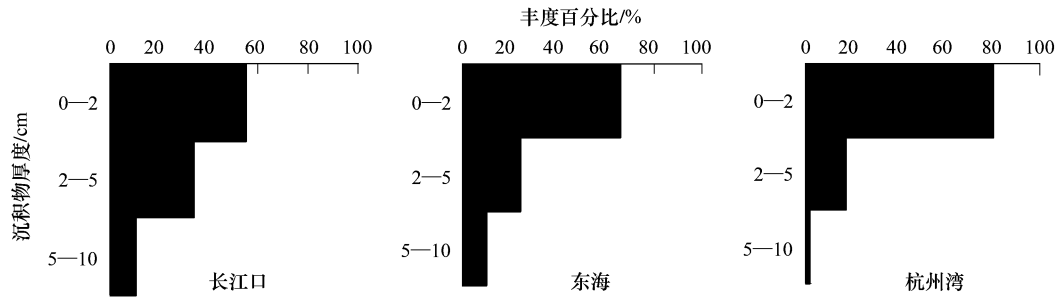


图 7 不同区域的小型底栖生物丰度垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of meiobenthic abundance in different area

2.6 研究海域各区块小型底栖生物总丰度及主要类群丰度比较

各区块小型底栖生物总丰度从高到低依次为东海 > 长江口 > 杭州湾; 线虫丰度、桡足类丰度、多毛类丰度的高低顺序与总丰度一致。

2.7 小型底栖生物丰度与环境变量的相关性

以调查站位小型底栖生物丰度, 线虫丰度, 多毛类丰度, 桡足类丰度以及小型底栖生物生物量分别对各站沉积物中沙含量, 粉砂和粘土含量, 中值粒径, 近底溶解氧, 近底温度, 近底盐度 ($n = 25$) 和叶绿素 a 和脱镁叶绿素含量 ($n = 19$) 以及沉积物异养细菌含量 ($n = 23$) 进行相关分析。结果见表 3。

由表 3 可以看出水深与小型底栖生物丰度成显著的正相关, 与多毛类, 桡足类丰度以及小型底栖生物生物量呈极显著的正相关; 盐度与小型底栖生物丰度, 线虫丰度成显著的正相关, 与多毛类, 桡足类丰度以及小型底栖生物生物量呈极显著的正相关; 近底溶解氧与小型底栖生物丰度, 多毛类, 线虫丰度以及小型底栖生物生物量呈显著的负相关, 与桡足类丰度呈极显著的负相关; 沉积物叶绿素 a 和脱镁叶绿素含量与小型底栖生物丰度, 线虫丰度、多毛类丰度, 桡足类丰度; 多毛类丰度相关不显著; 多毛类丰度沉积物中细菌含量呈显著负相关; 调查海域沉积物中的中值粒径, 粘土粉砂含量与小型底栖生物丰度, 多毛类, 线虫丰度以及小型底栖生物生物量的相关性不显著。

3 讨论

3.1 不同区块沉积环境对小型底栖生物丰度的影响

3.1.1 杭州湾底质类型是粘土质粉砂, 常年水浅、流急、浑浊, 水体中的初级生产力低^[18], 况且不稳定的底质环境难以聚集水体中下沉的有机碎屑, 这可能导致对底栖生物的食物供应较少, 致使该区块的小型底栖生物丰度较低。本次调查还发现, 该区块有 80% 的小型底栖生物分布于表层(0—2cm) (图 7), 是 3 个区块中表层小型底栖生物丰度比例最高的区块, 而且线虫的优势度极高, 占该区小型底栖生物总丰度比例达 98.68% (表 2), 这说明: 线虫对于物理扰动的适应恢复能力强, 同时不稳定的底质环境影响小型底栖生物种群结构和数量。

3.1.2 长江口近岸区块沉积物类型繁杂, 盐度梯度极大, 区块内各站小型底栖生物丰度差别极大: 整个调查海域小型底栖生物丰度最高的站和最低的站均出现在该区块, 盐度最低的站是长江口内的 M5-1, 同时也是整个调查海域小型底栖生物丰度最低的站。可以认为在长江口内低盐区, 盐度是决定小型底栖生物种类组成和丰度的限制因子, 这也充分体现海洋起源的物种缺乏低盐耐受性的特点^[19-22]。该区块北部(32°N)底质类型为粗砂, 由于该类底质对有机物的富集低于细颗粒沉积物^[22-23], 对以硅藻、细菌和有机碎屑为食物的小型底栖生物丰度产生一定的影响^[4]。调查结果显示, 在该区块北部几个站位(M1-7, M2-10, L1-8)的小型底栖生物丰度明显偏低(图 4)。

3.1.3 东海陆架深水区块位于 125°E 以东, 底质物理环境稳定, 从海洋输入的高质有机物对提高底栖生物的

丰度起着重要的作用^[24]。该区块是整个调查海域小型底栖生物丰度和生物量最高的区块,线虫优势度下降,仅占该区块小型底栖生物丰度的 92.9%,桡足类和多毛类比例增加。

表 2 研究海域各区块主要环境、生物特征

Table 2 The main biological and environmental factors of the survey sea

环境和生物特征 Environmental and biology characteristics	东海陆架区块 Offshore waters of the continental shelf of the East China Sea		长江口近岸区块 Nearshore of Changjiang Estuary		杭州湾区块 Hangzhou bay	
水深 WD / m	47—103		6—58		9—11	
近底盐度 BWS/BWS	32—35		2—34		16—28	
近底温度 BWT/ °C	10—16		11—17		12—15	
沉积物 Sediment						
主要类型 Type	砂质粘土质粉砂		粗砂, 粉砂质砂, 粘土质粉砂		粘土质粉砂	
平均砂含量体积分数 * / %	29		39		1	
平均粉砂含量体积分数 / %	47		46		71	
平均粘土含量体积分数 / %	24		14		28	
中值粒径 MD	39		83		3	
平均叶绿素 a 含量 Chl-a / ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.57		0.60		0.10	
小型底栖生物类群数 Groups of Meiofaun	14		18		10	
小型底栖生物 Meiofauna	丰度/ 个/10cm ²	生物量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm ²	丰度/ 个/10cm ²	生物量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm ²	丰度/ 个/10cm ²	生物量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{干重}$)/ 10cm ²
总计 Total	1234.8 ± 496.9	926.8 ± 50.2	1124.1 ± 988.2	769.05 ± 640	914.71 ± 576.5	443.79 ± 287.2

* : Content volume fraction

3.2 环境因子与小型底栖生物丰度相关分析

由于受到长江冲淡水、台湾暖流以及沿岸流的影响,长江口水环境在时空上会有很大的波动,如盐度,温度和溶解氧等。生活在沉积物中小型底栖生物只有适应一系列这样的变化才能得以生存繁殖,它们的种类组成、丰度大小也受到环境因子变化的影响。

3.2.1 在河口区,盐度是变动最大的环境因子之一,它的变动一般也会引起沉积物环境特征、海流、溶解氧浓度、食物供应等一系列变化^[25],因此是影响海洋物种丰度和种类分布的重要因子^[6]。根据 Bouwman^[26] 和 Heip^[27] 等人的研究成果,河口环境中的海洋物种随盐度的降低而逐渐消失,这充分体现海洋起源的物种缺乏低盐耐受性的特点^[19-22]。该趋势在本研究中已经得到了确认。值得关注的是个别特殊站位,如 M4-13,其盐度相对较高而小型底栖生物丰度远低于附近站位(图 4)。

3.2.2 近底溶解氧是影响底栖生物群落结构的重要因子^[28-30]。研究表明,大型底栖生物相对于小型底栖生物对缺氧环境更加敏感^[31-32],而小型底栖生物的优势类群一线虫比其他种类更具有耐缺氧能力因而能成为缺氧区底栖生物的优势种群^[30-33]。小型底栖生物(尤其是线虫)在缺氧环境中成为优势种的原因不但与它们的耐缺氧能力有关,而且与它们的捕食生物减少有关^[34]。因此可以认为,那些对溶解氧浓度要求较高的鱼类、无脊椎动物以及大型底栖生物对小型底栖生物(尤其是底栖桡足类)的捕食是小型底栖生物与溶解氧浓度呈负相关的原因之一。本次调查结果与华尔 2003 年的调查结果相似^[12]。该结果不但反映出小型底栖生物具有耐缺氧性和污染指示生物的特点,同时也反映出小型底栖生物在海洋生态系统中的地位和作用。

3.2.3 20 世纪七八十年代,为了识别小型底栖生物的食物种类,科学工作者针对小型底栖动物摄食性进行了大量的研究^[35-37],现已得知小型底栖生物的食物大致包括硅藻、细菌和有机碎屑^[4],而且不同功能类群(尤其是口器)的小型底栖生物具有不同的摄食机制^[38]。随后许多中尺度海洋生态调查针对小型底栖生物丰度与沉积物叶绿素含量之间的相关性进行了研究分析,结果显示,两者之间的相关性并不确定:如张志南^[10],华尔^[12], Liu X S^[13], Thiel H^[39], Pfannkuche O 等^[40], Pfannkuche O 和 Thiel H^[41], de Bovée, Francis 等^[42] 的调查结果显示两者之间呈显著正相关;而 Pfannkuche O, Sommer S, Kähler A^[43]; Sommer S 和 Pfannkuche O^[44],

表 3 小型底栖生物丰度、生物量与环境因子的相关分析结果

Table 3 Correlation analysis between meiofauna abundance, biomass and environmental variables												
水深 WD	近底溶 解氧 BW _O ₂	近底温度 BWT	近底盐度 BWS	沉积物 叶绿素 a Chl-a	沉积物脱 镁叶绿素 Pha-a	沉积物异养 细菌含量 Bacteria content	中值粒径 MD	粉砂和 粘土 Silt + Clay	小型底栖 生物丰度 Abundance of Meiofauna	线虫丰度 Abundance of Nematoda	多毛类丰度 Abundance of Polychaeta	桡足类丰度 Abundance of Copepoda
水深 WD												
近底溶解氧 BW _O ₂	-0.478 *											
近底温度 BWT	0.072	-0.663 **										
近底盐度 BWS	0.659 **	-0.445 *	-0.059									
沉积物叶绿素 a Chl-a	0.338	-0.279	0.144	0.313								
沉积物脱镁叶绿素 Pha-a	0.321	-0.180	0.140	0.306	0.819							
沉积物异养细菌含量 Bacteria content	-0.525 *	0.438 *	-0.092	-0.446 *	-0.360	-0.303						
中值粒径 MD	-0.023	0.078	-0.232	0.200	-0.118	-0.110						
粉砂和粘土 Silt + Clay	-0.226	-0.067	0.290	-0.250	0.021	0.124	0.010	-0.898 **				
小型底栖生物丰度 Abundance of Meiofauna	0.411 *	-0.413 *	0.271	0.499 *	0.358	0.308	-0.353	-0.176	0.025			
线虫丰度 Abundance of Nematoda	0.387	-0.399 *	0.269	0.482 *	0.354	0.295	-0.336	-0.195	0.044	0.999 **		
多毛类丰度 Abundance of Polychaeta	0.612 **	-0.434 *	0.121	0.573 **	0.217	0.208	-0.489 *	0.084	-0.214	0.592 **	0.570 **	
桡足类丰度 Abundance of Copepoda	0.714 **	-0.538 **	0.266	0.523 **	0.169	0.266	-0.390	0.104	-0.200	0.603 **	0.570 **	0.635 **
小型底栖生物生物量 Biomass of Meiofauna	0.520 **	-0.408 *	0.210	0.593 **	0.535 *	0.560 *	-0.476 *	-0.060	-0.106	0.906 **	0.891 **	0.757 **
												0.692 **

注: * * $P < 0.01$, * $P < 0.05$

郭玉清^[11]等的调查结果显示两者之间的相关性不显著,这与本次调查结果相同;黄勇^[45]的调查结果则显示线虫丰度与叶绿素 a 含量之间呈显著负相关。因此作者认为,在近岸海区,尤其是河口区,由于沉积物类型时空差异极大,对小型底栖生物的功能类群产生影响^[46,4],从而导致其对不同食物种类的选择,因此出现小型底栖生物与叶绿素含量之间无确定相关性的现象。或许只有在小尺度范围或者深海等底质环境相对稳定的环境中,才能得到两者之间相对确定的相关性。

感谢:香港科技大学刘红斌教授对本文写作给予帮助;张富元,章伟艳提供该海区沉积物粒度数据;陈忠元提供沉积物中细菌数据;海监 49 号全体船员帮助样品采集。

References:

- [1] Zhuang P, Wang Y H, Li S F, Deng S M, Li C S, Ni Y. Fish of the Yangtze estuary. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers Press, 2006.
- [2] Coll B C and Chandler G T. Pollution and meiofauna: Field, Laboratory and Mesocosm Study. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1992, 30: 191-271.
- [3] Gyedu-Ababio T K, Furstenberg J P. Nematodes as indicators of pollution: a case study from the Swartkops River system, South Africa. *Hydrobiologia*, 1999, 397: 155-169.
- [4] Higgins R P and Thiel H. Introduction to the study of meiofauna. Washington D C: Smithsonian Institution Press, 1988.
- [5] Steyaert M, Herman P M J, Moens T. Tidal migration of nematodes on an estuarine tidal flat (the molenplaat, Schelde estuary, SW Netherlands). *Mar Ecol Prog Ser*, 2001, 224: 299-304.
- [6] Soefaert K, Vincx M, Witloek J, Tulkens M. Meiobenthic distribution and nematode community structure in five European estuaries. *Hydrobiologia*, 1995, 311: 185-206.
- [7] Zhang Z N, Li Y G, Tu L H, Yu Z S. Preliminary study on the ecology of the benthic meiofauna in the Huanghe River estuary and its adjacent waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20(3): 197-208.
- [8] Zhang Z N, Gu F, Yu Z S. A study on spatial pattern of marine nematodes in the subaqueous delta of the Huanghe river. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(1): 11-18.
- [9] Zhang Z N, Zhou H, Yu Z S, Han J. Abundance and biomass of the benthic meiofauna in the northern soft-bottom of the Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 139-147.
- [10] Zhang Z N, Lin K X, Zhou H, Han J, Wang R Z, Tian S Y. Abundance and biomass of meiofauna in autumn and spring in the East China sea and Yellow sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 997-1005.
- [11] Guo Y Q, Zhang Z N, Mu F H. Large-scale patterns of meiofaunal abundance in the Bohai sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1463-1469.
- [12] Hua E, Zhang Z N, Zhang Y. Abundance and biomass of meiobenthos in the Changjiang (Yangtze River) estuary and its adjacent waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2234-2242.
- [13] Liu X S, Zhang Z N, Huang Y. Sublittoral meiofauna with particular reference to nematodes in the southern Yellow Sea, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 616-628.
- [14] Hua E, Zhang Z N, Zhang Y. Environmental factors affecting nematode community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2009, 89(1): 109-117.
- [15] Specifications for oceanographic survey. The standards of the People's Republic of China GB. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [16] Juario J V. Nematodes species composition and seasonal fluctuation of a sublittoral meiofauna community in the German bight. *Veroff Inst Meeresforsch Bremerh*, 1975, 15: 283-337.
- [17] Widbom B. Determination of average individual dry weight and ash-free dry weight in different sieve fractions of marine meiofauna. *Mar Biol*, 1984, 84: 101-108.
- [18] Liu Z L, Zhang T, Liu Y L, Pan J M, Chen Z Y, Liu X Y. The distributions of chlorophyll a concentration in the water and the surface sediments in the Changjiang River Estuary during spring of 2004. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(4): 1-7.
- [19] Montagna P A and Kalke R D. The effect of freshwater inflow on meiofaunal and macrofaunal populations in the Guadalupe and Nueces Estuaries, Texas. *Estuaries*, 1992, 15: 307-326.
- [20] Bouwman L A, Romeyn K, Kremer D E, Van ES F B. Occurrence and feeding biology of some nematode species in estuarine aufwuchs communities. *Cah. Biol. Mar.*, 1984, 25(3): 287-303.
- [21] Heip C, Vincx M, Vranken G. The ecology of marine nematodes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1985, 23: 399-489.
- [22] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in the continental shelf sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [23] Keil R G, Tsamakis E C, Fuh C B. Mineralogical and texture controls on the organic composition of coastal marine sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 879-893.

- [24] Soetaert K and Herman P M J. Carbon flows in the Westerschelde estuary (The Netherlands) evaluated by means of an ecosystem model (MOSES). *Hydrobiologia*, 1995, 311 (Dev. Hydrobiol. 110): 247-266.
- [25] Little C. The biology of soft shores and estuaries. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- [26] Bouwman L A. A survey of nematodes from the Ems estuary: species assemblages and associations. *Zool. Jahrbuche (Systematik, Ökologie, Geographie)*, 1983, 110: 345-376.
- [27] Heip C, Vincx M and Vranken G. The ecology of marine nematodes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1985, 23: 399-489.
- [28] Thiel H. Benthos in upwelling regions//Boje, R., Tomczak, M. eds. *Upwelling Ecosystems*. Springer, Berlin, 1978: 124-138.
- [29] Sanders H L. Benthic marine diversity and the stability-time hypothesis. *Brookhaven Symposium in Biology*, 1969, 12: 71-81.
- [30] Levin L A, Huggett C L, Wishner K F. Control of deep-sea benthic community structure by oxygen and organic-matter gradients in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Marine Research*, 1991, 49: 763-800.
- [31] Josefson A B, Widbom B. Differential response of benthic macrofauna and meiofauna to hypoxia in the Gullmar Fjord basin. *Marine Biology*, 1988, 100: 31-40.
- [32] Giere O. *Meiobenthology. The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments*. Berlin: Springer, 1993: 1-328.
- [33] Moodley L, van der Zwaan G L, Herman G L, Breugel P. Differential response of benthic meiofauna to anoxia with special reference to foraminifera (Protista; Sarcodina). *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 158: 151-163.
- [34] Neira C, Sellanes J, Levin L A, Arntz W E. Meiofaunal distributions on the Peru margin: relationship to oxygen and organic matter availability. *Deep-sea Research I*, 2001, 48: 2453-2472.
- [35] Watzin M C. The effects of Meiofauna on settling Macrofauna: meiofauna may structure macrofaunal communities. *Oecologia (Berlin)*, 1983, 59: 163-166.
- [36] Rieman F, Schrage M. The mucus-trap hypothesis of feeding of aquatic nematodes and implications for biodegradation and sediment texture. *Oecologia (Berlin)*, 1978, 34: 75-88.
- [37] Hicks G R F, Grahame J. Mucus production and its role in the feeding behaviour of *Diarthrodes nobilis* (Copepoda: Harpacticoida). *Journal of the marine biological association of the United Kingdom*, 1979, 59: 321-330.
- [38] Wieser W. Die Beziehung zwischen Mundhöhle, Gestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden. Eine ökologisch-morphologische Studie. *Arkiv für Zoologie*, 1953, 4: 439-484.
- [39] Thiel H. Meiobenthos and nanobenthos of the deep sea//Rowe, G. T. ed. *The Sea*, Vol. 8. Wiley, New York, 1983: 167-230.
- [40] Pfannkuche O. The deep-sea meiofauna of the Porcupine Seabight and abyssal plain (NE Atlantic): population structure, distribution, standing stocks. *Oceanologica Acta*, 1985, 8 (3): 343-353.
- [41] Pfannkuche O, Thiel H. meiobenthic stocks and benthic activity on the NE-Svalbard Shelf and in the Nansen Basin. *Polar Biology*, 1987, 7: 253-266.
- [42] De Bovée F, Guidi L D and Soyer J. Quantitative distribution of deep-sea meiobenthos in the northwestern Mediterranean (Gulf of Lions). *Continental Shelf Research*, 1990, 10: 1123-1145.
- [43] Pfannkuche O, Sommer S, Kähler A. Coupling between phytodetritus and the small-sized benthic biota in the deep Arabian Sea: analyses of biogenic sediment compound. *Deep Sea Research II*, 2000, 47: 2805-2833.
- [44] Sommer S, Pfannkuche O. Metazoan meiofauna of the deep Arabian Sea: standing stocks, size spectra and regional variability in relation to monsoon induced enhanced sedimentation regimes of particulate organic matter. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47: 2957-2977.
- [45] Huang Y, Zhang Z N, Liu X S. The marine nematodes community in winter Southern Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(3): 199-205.
- [46] Wieser W. The effect of grain size on the distribution of small invertebrates inhabiting the beaches of Puget Sound. *Limnol. Oceanogr.*, 1959, 4: 181-194.

参考文献:

- [1] 庄平, 王幼槐, 李法圣, 邓思明, 李长松, 倪勇. 长江口鱼类. 上海: 上海科技出版社, 2006.
- [7] 张志南, 李永贵, 图立红, 于子山. 黄河口水下三角洲及其邻近水域小型底栖生物的初步研究. *海洋与湖沼*, 1989, 20(3): 197-208.
- [8] 张志南, 谷峰, 于子山. 黄河口水下三角洲海洋线虫空间分布的研究. *海洋与湖沼*, 1990, 21(1): 11-18.
- [9] 张志南, 周红, 于子山, 韩洁. 胶州湾小型底栖生物的丰度和生物量. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 139-147.
- [10] 张志南, 林岗旋, 周红, 韩洁, 王睿照, 田胜艳. 东、黄海春秋小型底栖生物丰度和生物量研究. *生态学报*, 2004, 24(5): 997-1005.
- [11] 郭玉清, 张志南, 慕芳红. 渤海小型底栖生物丰度的分布格局. *生态学报*, 2002, 22(9): 1463-1469.
- [12] 华尔, 张志南, 张艳. 长江口及邻近海域小型底栖生物丰度和生物量. *生态学报*, 2005, 25(9): 2234-2242.
- [15] 海洋调查规范 中华人民共和国国家标准 GB. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 刘子琳, 张涛, 刘艳岚, 潘建明, 陈忠元, 刘小涯. 2004 年春季长江河口水体与沉积物表层的叶绿素 a 浓度分布. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 1-7.
- [45] 黄勇, 张志南, 刘晓收. 南黄海冬季自由生活海洋线虫群落结构的研究. *海洋与湖沼*, 2007, 38(3): 199-205.