

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第15期 Vol.33 No.15 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 15 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 红树林生态系统遥感监测研究进展..... 孙永光,赵冬至,郭文永,等 (4523)
- 基于能值分析方法的城市代谢过程研究——理论与方法 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (4539)
- 关于生态文明建设与评价的理论思考 赵景柱 (4552)

个体与基础生态

- 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布..... 于婷婷,徐奎栋 (4556)
- 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制..... 方 涛,贺心然,冯志华,等 (4567)
- 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性..... 黄凯旋,张云,欧林坚,等 (4575)
- 模拟酸雨对蒙古栎幼苗生长和根系伤流量的影响..... 梁晓琴,刘 建,丁文娟,等 (4583)
- 有机酸类化感物质对甜瓜的化感效应..... 张志忠,孙志浩,陈文辉,等 (4591)
- 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性..... 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等 (4599)
- 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化..... 王煌平,张 青,翁伯琦,等 (4608)
- 不同类型土壤中分枝杆菌噬菌体分离率的比较..... 徐凤宇,苏胜兵,马红霞,等 (4616)
- 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响 卞雅姣,黄 洁,孙其松,等 (4623)
- 麻花秦艽种子休眠机理及其破除方法 李兵兵,魏小红,徐 严 (4631)
- 4 种金色叶树木对 SO_2 胁迫的生理响应 种培芳,苏世平 (4639)
- 硫丹及其主要代谢产物对紫色土中酶活性的影响..... 熊佰炼,张进忠,代 娟,等 (4649)

种群、群落和生态系统

- 群落水平食物网能流季节演替特征..... 徐 军,周 琼,温周瑞,等 (4658)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (4665)
- 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征..... 朱秋莲,邢肖毅,张 宏,等 (4674)
- 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策..... 李媛媛,董世魁,朱 磊,等 (4683)
- 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化..... 刘 丽,徐明恺,汪思龙,等 (4692)
- 不同玉米品种(系)对玉米蚜生长发育和种群增长的影响 赵 曼,郭线茹,李为争,等 (4707)
- 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响..... 卢训令,丁圣彦,游 莉,等 (4715)
- 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响 刘 伟,门丽娜,刘新民 (4724)
- 铜和营养缺失对海州香薷两个种群生长、耐性及矿质营养吸收的差异影响 柯文山,陈世俭,熊治廷,等 (4737)
- 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算..... 咎 梅,李登秋,居为民,等 (4744)

景观、区域和全球生态

基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例 梁友嘉,徐中民,钟方雷,等 (4758)

人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异 张华兵,刘红玉,侯明行 (4767)

基于 PCA 的滇西北高原纳帕海湿地退化过程分析及其评价 尚 文,杨永兴,韩大勇 (4776)

基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价..... 南 颖,吉 喆,冯恒栋,等 (4790)

呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价..... 吴志丰,李月辉,布仁仓,等 (4799)

降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响..... 郭 群,胡中民,李轩然,等 (4808)

研究简报

我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系.....

..... 王健健,王永吉,来利明,等 (4818)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说:石质山区的退耕还林——桂西北地区是我国喀斯特集中分布的地区之一,这里的石漠化不仅造成土地退化、土壤资源逐步消失、干旱缺水和土地生产力下降,而且还导致生态系统退化和植被消亡。桂西北严重的地质生态环境问题,威胁着当地居民的基本生存,严重制约了当地社会经济的发展。增加植被覆盖是防治石漠化的重要举措。随着国家退耕还林、生态移民等治理措施的实施,区域植被碳密度显著增加,生态环境有所好转。图为喀斯特地区农民见缝插针用来耕种的鸡窝地(指小、碎、分散的土地),已经退耕还林了。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204280613

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.

Yu T T, Xu K D. Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4556-4566.

长江口及邻近海域秋冬季小型 底栖动物类群组成与分布

于婷婷^{1,2}, 徐奎栋^{1,*}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对 2009 年 11—12 月采自长江口及邻近的东海海域 19 个站位的小型底栖动物类群组成、丰度、生物量和空间分布及其与沉积环境的关系进行了研究。结果表明, 该海域秋冬季小型底栖动物的平均丰度和生物量分别为 (1081 ± 700) 个/10 cm² 和 (600 ± 374) μg 干重/10 cm², 均呈现由北往南、由近岸向外海递减的趋势, 且在长江口冲淡水向东海的扩展区域内, 小型底栖动物的丰度明显较东海外围海域高。该数量与同一海域春季的研究结果相近, 但明显低于夏季。在分选出的 12 个主要类群中, 海洋线虫在丰度上占绝对优势 (94.4%), 其次是涡虫类 (2.3%) 和桡足类 (2.0%)。线虫也是生物量上的最优势类群 (占 68.1%), 其次是涡虫类 (14.8%)、桡足类 (6.8%) 和多毛类 (5.8%)。在垂直分布上, 占总量 70.8% 的小型底栖动物和 69.9% 的线虫分布于 0—2 cm 表层, 均高于 54%—65% 的历史资料。Spearman 相关分析表明, 小型底栖动物丰度与叶绿素 a 含量呈显著正相关, 与水深、底层水温和底层盐度呈显著负相关。BIOENV 分析显示与小型底栖动物类群组成和丰度相关性最高的环境因子组合为水深和脱镁叶绿素 a 含量。海洋线虫与桡足类数量之比 (N/C) 可大致反映本海域沉积环境的质量状况, 但沉积物类型等因素的影响可造成环境评价的偏差。通过对 639 条线虫生物体积的测算, 获得两个站位的线虫平均个体干重分别为 0.104 μg /个和 0.365 μg /个。研究表明, 我国当前普遍采用的 0.4 μg /个这一系数估计的线虫生物量将不同程度地高估其实际生物量。

关键词: 长江口; 东海; 小型底栖动物; 线虫; 丰度; 生物量

Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season

Yu Tingting^{1,2}, XU Kuidong^{1,*}

1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

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

Abstract: We investigated the assemblage composition, abundance, biomass and spatial distribution of meiobenthos in relation to benthic environmental variables at 19 stations in the Yangtze (Changjiang) Estuary and its adjacent waters in the East China Sea from November to December 2009. The average abundance of meiobenthos was (1081 ± 700) ind/10 cm² and the biomass was (600 ± 374) μg dwt/10 cm². There was an overall trend in both the abundance and biomass decreasing from the north to the south sea area and from the inshore to the offshore area. Moreover, the abundance was markedly higher in the dilution zone of the Yangtze River than that in the surrounding offshore area. The standing crops of meiobenthos were similar to those obtained from the same area in spring (from April to May 2007), but distinctly lower than those in summer (June 2003). Among the 12 meiobenthos assemblages identified, nematodes were most abundant, accounting for 94.4% of

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (2011CB403604) 和中国科学院知识创新工程重要方向 (KSCX2-EW-Z-5) 资助

收稿日期: 2012-04-28; **修订日期:** 2012-10-26

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

the total abundance, followed by turbellarians (2.3%) and copepods (2.0%). In terms of biomass, nematodes accounted for 68.1%, and followed by turbellarians (14.8%), copepods (6.8%) and polychaetes (5.8%). There were about 70.8% of the total meiobenthos individuals and 69.9% of the nematodes distributed in the surface 0—2 cm sediment layer. These proportions were higher than those recorded in this area (from 54% to 65%). Spearman correlation analysis showed that meiobenthos abundance was positively correlated with sediment chlorophyll-a concentration, and negatively correlated with water depth, bottom water temperature and bottom water salinity. BIOENV analysis suggested that the combination of environmental variables that best correlated with meiobenthos communities consisted of water depth and sediment phaeophytin-a concentration. Our data indicated that the abundance ratio of nematodes to copepods (N/C) generally coincided with the benthic environmental condition in the study area. However, differences in sediment types might discredit the use of this ratio in environmental assessment. Based on the biovolume calculation of 639 individuals from two stations, we obtained the average individual dry weight of nematodes which was 0.104 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 0.365 $\mu\text{g}/\text{ind}$, respectively. Our study indicates that the average individual dry weight of 0.4 $\mu\text{g}/\text{ind}$, which has been widely used domestically to calculate the biomass of nematodes, might more or less over-estimate the true biomass.

Key Words: Yangtze Estuary; East China Sea; meiobenthos; nematodes; abundance; biomass

长江口是太平洋西岸的第一大河口,是长江径流、沿岸流以及台湾暖流等外海水团交汇的区域,是东海生物营养物质的重要来源地,也是环境最为复杂、生态压力较大的区域之一。小型底栖动物通常是指生活于沉积物中的能通过 0.5 mm 网筛,但被 0.042 mm 或 0.031 mm 网筛所阻留的小型后生动物,主要包括自由生线虫、桡足类、涡虫类、动吻类和多毛类等^[1]。它们是底栖微食物网的重要组成部分,在全球生物地化循环中占有重要位置。同时,小型底栖动物作为对环境变化较为敏感的类群,还具有环境指示价值^[2]。国际上有关海洋小型底栖动物的研究较为深入。我国的研究主要集中在黄渤海区,对于长江口及东海海域所涉研究较少,且尚无工作涉及该海域冬季的小型底栖动物现存量及分布情况^[3-5]。

本研究旨在了解长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物的类群组成、丰度和生物量及分布特征,及其与沉积环境因子的关系。同时,针对目前国内进行线虫生物量估算时普遍采用的 0.4 $\mu\text{g}/\text{个}$ 这一系数,在近岸和离岸海域各选取了一个站位,将通过实测线虫的体长和体宽获得的生物量与通过单一系数得到的生物量做了比较,以明确采用 0.4 $\mu\text{g}/\text{个}$ 估算生物量可能造成的偏差。

1 材料与方法

1.1 调查海域与站位

2009 年 11—12 月,搭载“科学三号”考察船对长江口及邻近海域(28—33°N, 121—126°E)的 19 个站位进行了小型底栖动物及其沉积环境因子的研究。采样站位见图 1。

1.2 样品采集和分析

利用 0.1 m² 改进型 Gray-Ohara 箱式采泥器,每个站位采集 3 箱未受扰动的沉积物样品,用内径 23 mm 的注射器改造的采样管在每箱沉积物中随机采集一个长度为 8 cm 的芯样,并按 0—2 cm、2—5 cm、5—8 cm 分层。各分层样品分别加入等体积的 10% 福尔马林溶液固定,用于小型底栖动物的分析。同时在其中一箱中另采集一组分层样品备用。此外,以同样方式取另外 4 个芯样,并按照相应分层合并后,分别装入封口袋,−20 °C 冷冻保存,用于沉积物中叶绿素 a(Chl-a)、脱镁叶绿素 a(Ph-a)、粒度、有机质(OM)及含水量的分析。

室内小型底栖动物样品经虎红(Rose Bengal)染色,用 500 μm 和 31 μm 孔径套筛过滤后,转入 Ludox-TM 硅胶液中悬浮离心,然后在解剖镜下按类群分选计数^[6]。

在计算小型底栖动物生物量时,为保证数据资料的可比性,线虫个体平均干重采用国内通用的 0.4 $\mu\text{g}/\text{个}$ ^[3-5]。桡足类参照 McIntyre^[7] 以 1.86 μg 计算。其他类群的平均个体干重依据 Widbom^[8] 给出的参数,即多毛类 14 μg ; 双壳类 4.2 μg ; 动吻类 2.0 μg ; 介形类 26 μg ; 端足类 15 μg ; 原足类 15 μg ; 其它 3.5 μg 。生产

量依 $P=9B$ 估算 (P 为生产量, B 为生物量)。

为准确估算线虫的生物量,在显微镜下实测了 31007 站位的 372 条线虫和 30001 站位的 267 条线虫的体长(L)和体宽(W),每条线虫的体积(V)通过公式 $V=530 \times L \times W^2$ [9] 计算得出;按照比重为 1.13,干湿比为 1/4 [10],获得每个个体的干重 $=530 \times L \times W^2 \times 1.13 \times 0.25$,计算得出每个站位的线虫个体平均干重值。然后,将通过所得线虫个体平均干重值估算得出的线虫和小型底栖动物的生物量,与利用 $0.4 \mu\text{g}/\text{个}$ 这一系数得出的结果进行比较。

沉积物粒度分析采用 Cilas(940L)型激光粒度仪进行测定。有机质测定参照《海洋调查规范》及刘昌岭等 [11] 改进的方法。有机质含量为有机碳含量乘以系数 1.724。叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 测定采用湿样法 [12]。其它环境资料来自随船温盐深测定仪 (CTD) 现场测定。

1.3 数据统计分析

小型底栖动物的丰度、生物量与环境因子的相关性,及其环境因子之间的相关性,采用 SPSS 16.0 软件包中的 Spearman 相关分析。站位间小型底栖动物丰度和环境因子的相似性分析,采用等级聚类 (CLUSTER) 和非度量多维标序 (MDS)。用 BIOENV 分析连接环境和生物矩阵,分析环境变量与动物群落的相关性,并用 RELATE 分析检验相关性是否显著,上述分析采用 PRIMER 6 软件处理 [13]。

2 结果

2.1 沉积环境

2.1.1 水深、底层水温和底层盐度

调查海域由近岸向外海、由北向南逐渐加深 (图 2)。最深处位于东海的 29007 (87.3 m)、29006 (83.8 m) 和 29005 (82.6 m) 站位。水深最浅的 29002 (12.3 m) 和 31002 (12.9 m) 站水温偏低,分别为 14.2°C 和 13.6°C ;而深水区底层水温相对较高,如 29006 和 29007 站温度为 20.9°C , 29005 站为 21.5°C ,这可能是由于受黑潮水的影响。底层盐度相对稳定,除近岸的 4 个站位 (29001:25.8, 31002:29.5, 30001:30.1 和 CJ2:31.2) 略低外,其余 15 个站位盐度波动较小,平均为 (33.8 ± 0.3) 。

2.1.2 沉积物类型

所涉的 19 个站位包含 5 种沉积物类型:(1) 砂质 (离岸较远的 30006 站),粉砂-粘土含量为 16.5%,中值粒径为 2.0;(2) 粉砂-砂 (覆盖了除近岸外的大部分站位,包括 29007、31003、30002、31006、30005、30004、29006、31004、30003 和 CJ7 等 10 个站位),粉砂-粘土含量为 30.4%—55.9%,中值粒径为 2.4—4.7;(3) 砂-粘土-粉砂 (包括位于南端的 29004 和 29005 两站),粉砂-粘土含量为 62.2%—65.0%,中值粒径为 5.3—5.4;(4) 粘土-砂-粉砂 (离岸较远的 31007 站),粉砂-粘土含量为 79.2%,中值粒径为 6.3;(5) 粘土-粉砂 (位于近岸的 29001、29002、30001、31002 和 CJ2 等 4 站),粉砂-粘土含量为 97.7%—99.8%,中值粒径为 6.6—7.3。调查海域的粉砂-粘土含量由近岸向外海逐渐递减。

2.1.3 含水量和有机质含量

所涉 19 个站位的平均含水量为 $(35.3 \pm 6.9)\%$,最高值出现在 31002 站 (50.9%),最低值出现在 30005 站 (26.8%),其分布呈现由近岸向外海迅速降低,继而又逐渐升高的趋势,与粉砂-粘土含量和中值粒径显著正相关 (均为 $P < 0.01$)。

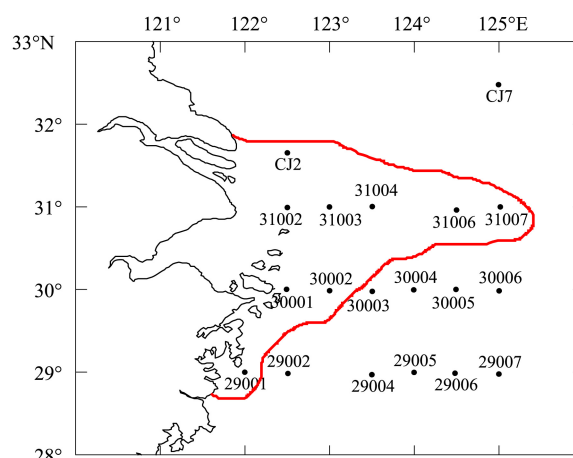


图 1 研究海域取样站位图

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in the East China Sea

19 个站位的有机质平均含量为 $(0.8 \pm 0.5)\%$, 最高值出现在 29006 站 (2.7%) , 最低值出现在 30005 站 (0.4%) 。有机质含量与含水量呈显著正相关 ($P < 0.01$)。

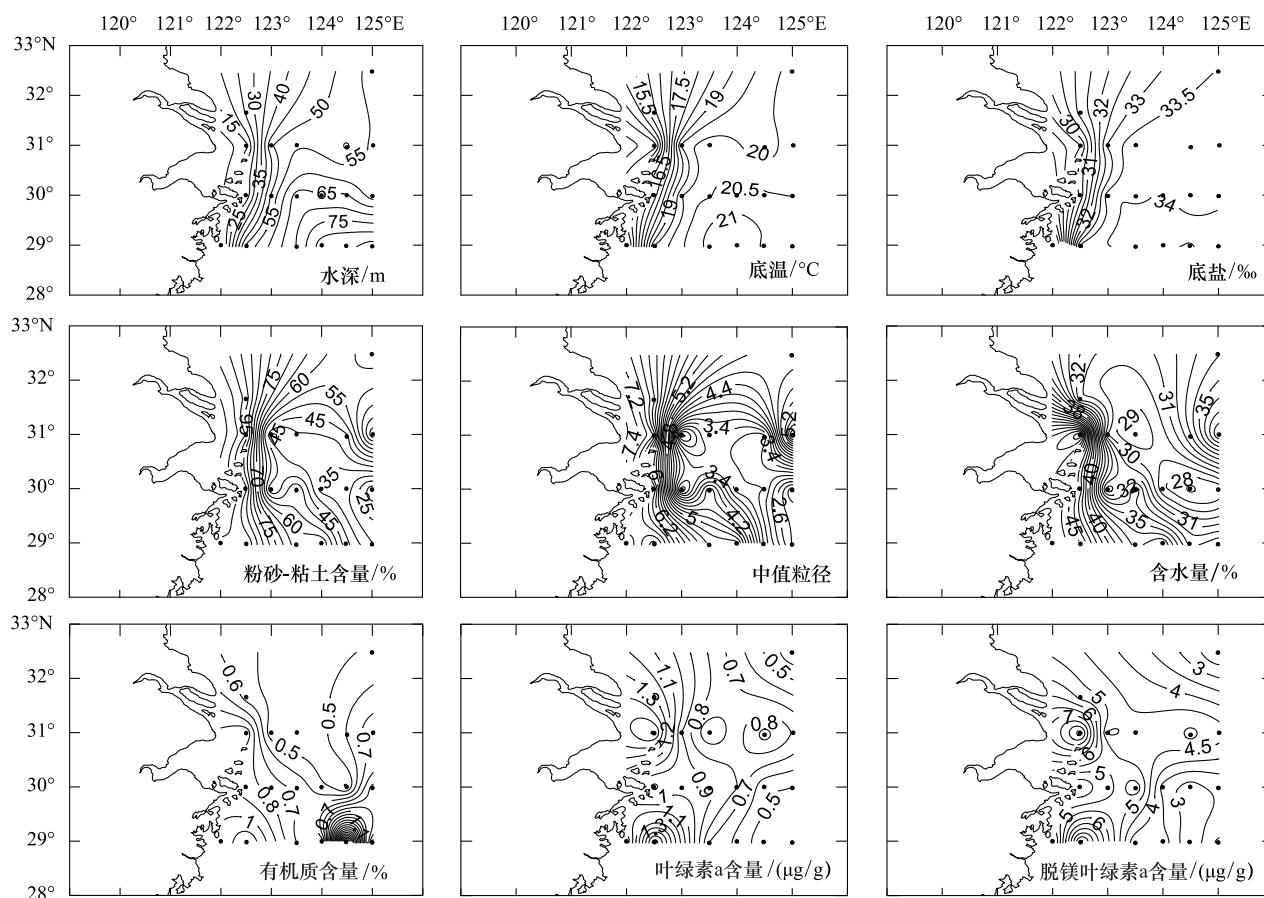


图2 长江口及邻近海域 19 个采样站位的沉积物环境

Fig. 2 The benthic environmental variables at 19 stations in the Yangtze Estuary and its adjacent waters

2.1.4 Chl-a 和 Ph-a 含量

沉积物中的 Chl-a 含量代表初级生产力状况, 小型底栖动物食物的来源及环境状况的好坏, Ph-a 含量则代表了沉积物中已死亡及沉降藻类的多寡。19 个站点沉积物中 Chl-a 的分布从近岸向外海递减, 平均值为 $(0.9 \pm 0.4) \mu\text{g/g}$, 最大值位于 29002 站 $(1.9 \mu\text{g/g})$, 最小值位于 CJ7 站 $(0.3 \mu\text{g/g})$, 与粉砂-粘土含量 ($P < 0.01$)、中值粒径 ($P < 0.05$) 和脱镁叶绿素 ($P < 0.01$) 呈显著正相关, 与水深、底层水温、底层盐度呈显著负相关 (均为 $P < 0.01$)。Chl-a 的含量由表层向底层随着深度的增加而降低, 表层 (0—2 cm)、次表层 (2—5 cm) 和底层 (5—8 cm) 的含量分别为 0.99 、 $0.80 \mu\text{g/g}$ 和 $0.77 \mu\text{g/g}$ 。

Ph-a 的分布也是由近岸向外海递减, 平均值为 $(4.5 \pm 1.8) \mu\text{g/g}$, 最大值位于 31002 站 $(8.8 \mu\text{g/g})$, 最小值位于 CJ7 站 $(2.0 \mu\text{g/g})$, 与粉砂-粘土含量 ($P < 0.05$) 和 Chl-a ($P < 0.01$) 呈显著正相关, 与水深和底层水温呈显著负相关 (均为 $P < 0.01$)。Chl-a 和 Ph-a 在分布上能够较好重合, 也是随着深度的增加而降低, 表层 (0—2 cm)、次表层 (2—5 cm) 和底层 (5—8 cm) 中的含量平均为 5.61 、 $4.32 \mu\text{g/g}$ 和 $3.66 \mu\text{g/g}$ 。

2.1.5 沉积环境因子的 CLUSTER 聚类分析及 MDS 标序

综合环境因子各变量, 由聚类分析结果和 MDS 标序图可以看出 (图 3, 图 4), 在 90% 相似处, 全部 19 个采样站点可分为两组, 经 SIMPROF 检验, 分成两个组的沉积环境具有显著差异 ($P = 0.001$)。组 I 包含近岸的 CJ2、31002、30001、29001 和 29002 等 5 个站, 其共同特征为水深 (平均为 24.7 m) 较浅, 底层水温 ($16.0 \text{ }^\circ\text{C}$) 和盐度 (30.0) 较低, 而叶绿素 a ($1.3 \mu\text{g/g}$)、脱镁叶绿素 a 含量 ($0.7 \mu\text{g/g}$)、粉砂-粘土含量 (98.8%) 及含水

量(43.7%)较高。组Ⅱ包含剩余的14站,其共同特征为水深(平均为64.0 m)较深,底层水温(20.5℃)和盐度(33.8)较高,而叶绿素a(0.7 μg/g)、脱镁叶绿素a(3.9 μg/g)、粉砂-粘土含量(44.6%)及含水量(32.3%)较低。

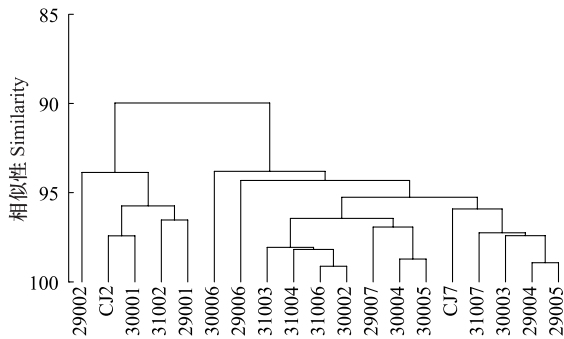


图3 沉积环境因子的 CLUSTER 聚类分析

Fig. 3 CLUSTER analysis of benthic environmental variables

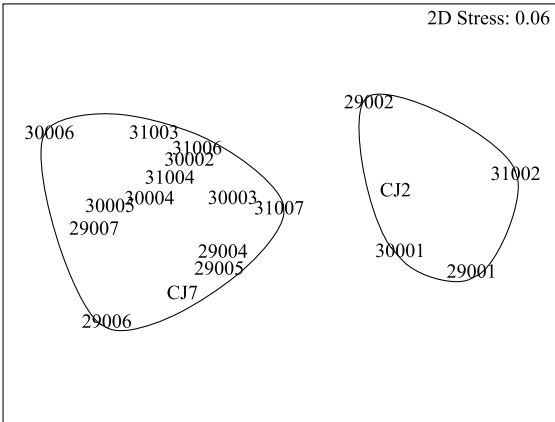


图4 沉积环境因子的 MDS 标序分析

Fig. 4 MDS ordination of benthic environmental parameters

2.2 小型底栖动物类群组成、现存量和空间分布

2.2.1 小型底栖动物类群组成和现存量

本研究共鉴定出12个小型底栖动物类群(表1),其中海洋线虫在丰度上占绝对优势,平均为(1021±665)个/10 cm²,占总数的94.4%,其次是涡虫类(2.3%)和桡足类(2.0%)。其他在数量上较重要的类群依次是动吻类、多毛类和甲壳类幼体。小型底栖动物的丰度由近岸向外海递减,且北部海区较南部高(图5),平均为(1081±700)个/10 cm²(表1)。最高值位于北部近岸的31002站,丰度为(2739±698)个/10 cm²,其次为近岸的29001和30002站,丰度分别为(2154±555)个/10 cm²和(1906±468)个/10 cm²。最低值位于南端离岸较远的29004站,丰度仅为(145±37)个/10 cm²。

表1 长江口及邻近海域19个研究站位小型底栖动物的平均丰度、生物量和生产量

Table 1 Average abundance, biomass and production of meiofaunal groups at 19 sampling stations in the Yangtze Estuary and its adjacent waters

类群 Groups	丰度 Abundance		生物量 Biomass		生产量 Production
	/ (个/10 cm ²)	/ %	/ (μg 干重/10 cm ²)	/ %	/ (μg 干重·10 cm ⁻² ·a ⁻¹)
线虫 Nematoda	1021±665	94.4	408±266	68.1	3675±2396
涡虫 Turbellaria	25±27	2.3	89±94	14.8	797±847
桡足类 Copepoda	22±21	2.0	41±38	6.8	367±344
动吻类 Kinorhyncha	9±10	0.8	18±20	3.0	160±182
多毛类 Polychaeta	2±7	0.2	35±104	5.8	314±936
甲壳类幼体 Nauplii	1±1	0.1	2±4	0.4	19±40
双壳类 Bivalvia	0±1	0.0	1±2	0.2	10±20
端足类 Amphipoda	0±1	0.0	2±6	0.3	17±53
海螨 Halacaroida	0±1	0.0	1±2	0.2	9±19
介形类 Ostracoda	0±0	0.0	2±9	0.4	20±84
腹毛类 Gastropoda	0±0	0.0	0±1	0.1	4±12
等足类 Isopoda	0±0	0.0	1±3	0.1	6±24
总计 Total	1081±700	100.0	430±276	100.0	3873±2486

按经验系数估算的 19 个站位的小型底栖动物的平均生物量和生产量分别为 $(600 \pm 374) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2 和 $(5398 \pm 3369) \mu\text{g}$ 干重/ $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。生物量水平分布同丰度类似,北部近岸丰度最高的 31002 站,其生物量也最高,为 $(1422 \pm 290) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2 ;其次为 31004 站和 30002 站,生物量分别为 $(1072 \pm 182) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2 和 $(1036 \pm 194) \mu\text{g}$ 干重/ 10 cm^2 (图 5)。在主要类群的贡献上,线虫为最优势类群(68.1%),其次是涡虫类(14.8%)、桡足类(6.8%)和多毛类(5.8%)。

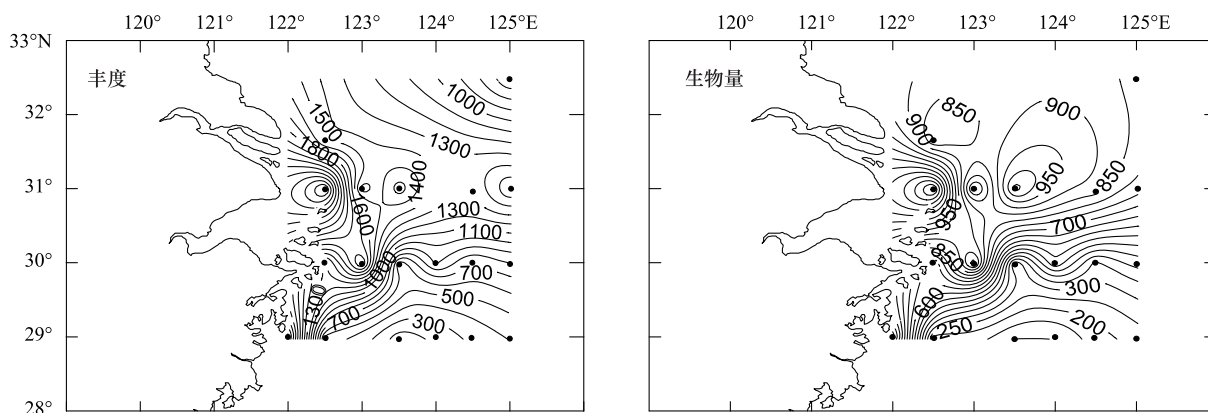


图 5 小型底栖动物丰度(个/ 10 cm^2)和生物量(μg 干重/ 10 cm^2)水平分布图

Fig. 5 Horizontal distribution of meiofaunal abundance and biomass

2.2.2 小型底栖动物空间分布

从小型底栖动物及其主要类群线虫、桡足类和涡虫类丰度的水平分布可以看出,小型底栖动物数量的水平分布不均匀,呈镶嵌(或斑块)分布(图 6)。

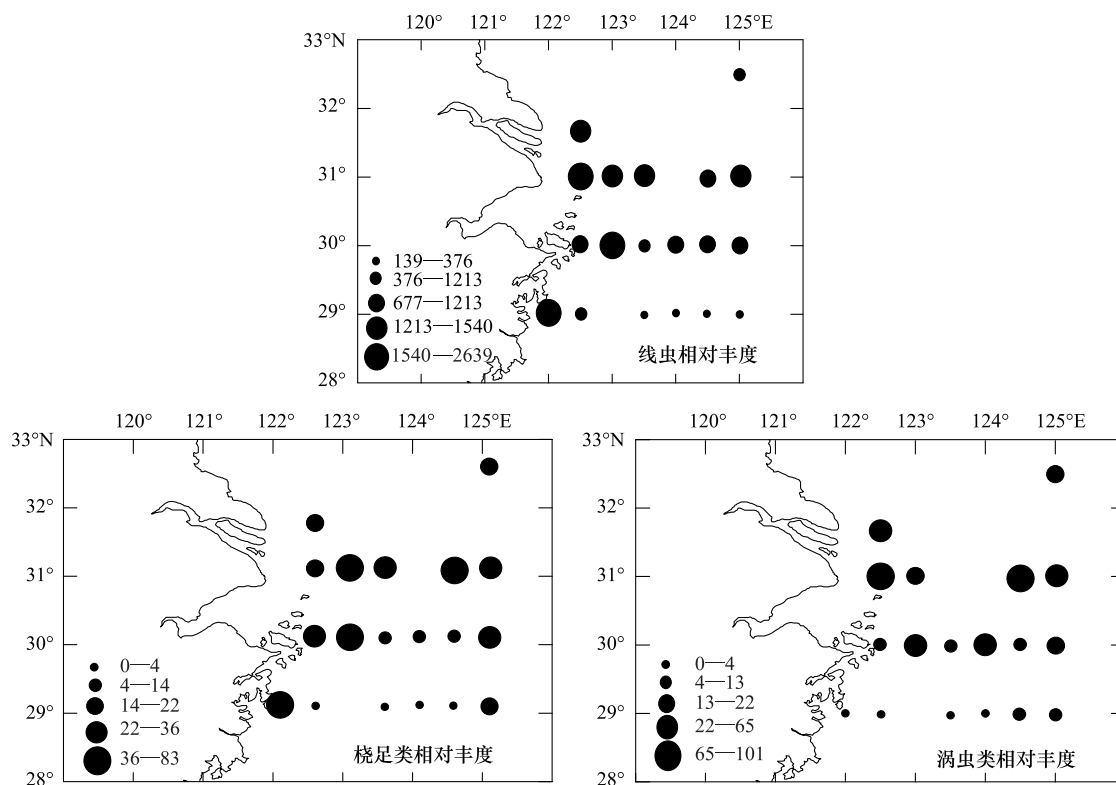


图 6 线虫、桡足类、涡虫类的相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of nematodes, copepods and turbellarians

垂直分布上,小型底栖动物主要分布在沉积物表层(0—2 cm),平均丰度为(756±462) 个/10 cm²,占总数的 70.8%,次表层(2—5 cm)和底层(5—8 cm)中的丰度所占比例分别为 19.9% 和 9.3%。这说明在该海域取芯样 0—5 cm 的取样效率可达 90.7%。不同类群的垂直分布略有不同,69.9% 的线虫分布在 0—2 cm 表层,而涡虫类和桡足类在此表层的比例分别高达 86.8% 和 83.2%。

2.2.3 小型底栖动物丰度的聚类分析

基于 Bray-Curtis 相似性矩阵进行聚类分析 (CLUSTER) 和非度量多维标序 (MDS) 分析的结果具有一致性 (图 7, 图 8)。在 67% 的相似性水平上,19 个站位的小型底栖动物群落可以分为 3 组,经 SIMPROF 检验,组间小型底栖动物的类群组成和丰度具有显著性差异 ($P=0.001$)。组 I 包含 29004 和 29005 站,这两站位位于研究海域的最南端,水深较深 (76.4 m),沉积物中叶绿素 a (0.63 $\mu\text{g/g}$) 和脱镁叶绿素 a (3.65 $\mu\text{g/g}$) 含量较低,小型底栖动物丰度 (平均为 187 个/10 cm²) 较低;组 II 包含 CJ2、31004、31006、30001、31003、31007、29001、30002 和 31002 站,这些站位位于近岸及受长江口冲淡水的影响,水深较浅 (37.0 m),叶绿素 a (1.00 $\mu\text{g/g}$) 和脱镁叶绿素 a (5.05 $\mu\text{g/g}$) 含量较高,小型底栖动物丰度 (平均为 1716 个/10 cm²) 较高;组 III 包含剩余的 29002、29006、30003、29007、CJ7、30005、30004 和 30006 站,这些站位的沉积环境介于组 1 和组 2 之间,水深为 66.9 m,叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 含量分别为 0.73 $\mu\text{g/g}$ 和 4.01 $\mu\text{g/g}$,小型底栖动物的丰度平均为 590 个/10 cm²。

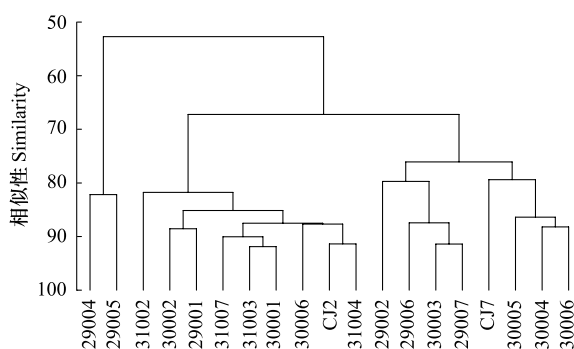


图 7 小型底栖动物丰度的 CLUSTER 聚类分析

Fig. 7 CLUSTER analysis of meiofaunal abundance

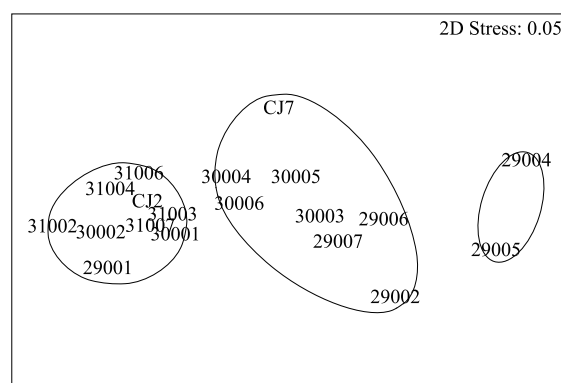


图 8 小型底栖动物丰度的 MDS 标序分析

Fig. 8 MDS ordination of meiofaunal abundance

鉴于以类群-丰度的分组与以环境因子的分组并不完全匹配,综合考虑这两种分组结果,笔者认为 19 个站位的小型底栖动物可划分为一个河口群落 (图 1 站位图中实线圈出的站位) 和一个离岸近海群落。河口群落处于近岸及受长江口冲淡水影响的站位中,包括 CJ2、31004、31006、30001、31003、31007、29001、30002 和 31002 站,其沉积物中营养物质丰富,小型底栖动物丰度较高 (平均为 1716 个/10 cm²)。离岸近海群落处于上述站位以外的站位中,包括 29004、29005、29002、29006、30003、29007、CJ7、30005、30004 和 30006 站,其沉积物相对贫瘠,小型底栖动物丰度相对较低 (平均为 509 个/10 cm²)。在类群组成上,河口群落线虫优势度较高 (95%),其次为涡虫 (2%)、动吻类 (2%) 和桡足类 (1%);离岸近海群落线虫优势度略低 (88%),其次为多毛类 (6%)、涡虫 (3%)、桡足类 (2%) 和动吻类 (1%)。这是因为线虫相较其他小型底栖动物类群对环境污染具有更高的耐受力,因此,在污染较严重的河口区域,线虫的优势度相较离岸近海的群落略高。

2.3 实测和估算的线虫以及小型底栖动物生物量的比较

通过实测 31007 和 30001 两个站位共计 639 条线虫的体长和体宽,利用体积转化法,计算得出了两站位线虫个体平均干重值。其中,近岸偏南的 30001 站 267 条线虫的个体平均干重为 0.365 $\mu\text{g/个}$ (0.010—2.843 $\mu\text{g/个}$),离岸偏北的 31007 站 372 条线虫的统计结果为 0.104 $\mu\text{g/个}$ (0.004—1.870 $\mu\text{g/个}$)。由此可见,不同站位间线虫的个体平均干重值存在较大差异。因此,如果忽略站位间的特异性,在计算生物量时一概

采用 0.4 μg/个这一系数,会对该海域线虫以及小型底栖动物的生物量产生不同程度的低估。当采样站位的实际线虫个体平均干重值与 0.4 μg/个接近时,直接采用这一系数造成的误差较小(如 30001 站,估算所得的线虫生物量与是实测的 1.09 倍);但当两者差别较大时,则误差较大(如 31007 站,估算所得的线虫生物量是实测的 3.85 倍)。

表 2 两个站位实测和估算所获线虫以及小型底栖动物生物量的比较

Table 2 Comparison of nematodes and meiofaunal biomass obtained from biovolume measurements and estimation using 0.4 μg per individual of nematodes at two stations

生物参数	31007 站	30001 站
实测线虫个体平均干重 Measured nematode average individual dry weight/(μg/个)	0.104	0.365
实测线虫总生物量 Measured nematode total biomass/(μg 干重/10 cm ²)	160	443
经由 0.4 μg/个估算的线虫总生物量 Estimated of nematode total biomass/(μg 干重/10 cm ²)	616	485
线虫实测所获小型底栖动物总生物量 Meiofauna total biomass obtained from measured nematode biomass/(μg 干重/10 cm ²)	317±47	551±121
线虫估算所获小型底栖动物总生物量 Meiofauna total biomass obtained from estimated nematode biomass/(μg 干重/10 cm ²)	772±168	593±132

2.4 小型底栖动物丰度、生物量与沉积环境因子的关系

对小型底栖动物丰度及生物量、线虫丰度、桡足类丰度和涡虫类丰度与水深、底层水温、底层盐度、粉砂-粘土含量、中值粒径、有机质含量、叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 含量进行的 Spearman 相关分析表明,小型底栖动物及线虫的丰度均与叶绿素 a 含量呈显著正相关,与水深、底层水温和底层盐度呈显著负相关;桡足类丰度与水深和底层水温呈显著负相关;涡虫类丰度与各环境因子均无显著相关;小型底栖动物的生物量与水深、底层水温和底层盐度呈显著负相关(表 2)。

用 BIOENV 分析将环境矩阵与小型底栖动物类群-丰度矩阵相连接,并用 RELATE 分析检验相关系数的显著性,结果显示与小型底栖动物类群组成及丰度相关性最高的环境因子组合为水深和脱镁叶绿素 a 含量($r=0.361, P=0.003$)。

表 3 研究站位小型底栖动物丰度、生物量与沉积环境因子的 Spearman 相关分析

Table 3 Relative coefficient between meiofaunal abundance, biomass and benthic environmental parameters based on Spearman analysis					
沉积环境因子 Benthic environmental parameters	小型底栖动物丰度 Meiofauna abundance	小型底栖动物生物量 Meiofauna biomass	线虫丰度 Nematode abundance	桡足类丰度 Copepod abundance	涡虫类丰度 Turbellarian abundance
水深 Water depth	-0.821 **	-0.686 **	-0.823 **	-0.604 **	-0.338
底层水温 Temperature	-0.746 **	-0.660 **	-0.747 **	-0.502 *	-0.297
底层盐度 Salinity	-0.682 **	-0.639 **	-0.684 **	-0.411	-0.226
粉砂-粘土含量 Silt-clay content	0.191	0.074	0.216	-0.164	-0.245
中值粒径 Median particle diameter	0.132	0.040	0.160	-0.333	-0.219
含水量 Water content	0.011	-0.091	0.044	-0.158	-0.432
有机质含量 Organic matter content	-0.005	-0.198	0.025	-0.045	-0.339
叶绿素 a 含量 Chl-a concentration	0.530 *	0.274	0.530 *	0.217	0.097
脱镁叶绿素 a 含量	0.418	0.246	0.412	0.193	0.217

* * $P<0.01$, * $P<0.05$

3 讨论

3.1 线虫个体平均干重的测算

目前国内在计算线虫生物量时大都采用 0.4 μg/个这一系数,本研究为与国内已有的文献数据做比较,同样采用了这一系数进行估算。由于线虫的个体平均干重受到种类、幼体数量、季节和研究海域等多种因素

的影响,因此要得到较为精确的线虫个体平均干重值,必须进行体积的实测,以尽量减少估计的误差。本文通过对线虫的体长(L)和体宽(W)的实际测量,利用生物体积计算得出两个站位(31007 和 30001)的线虫个体平均干重分别为 $0.104 \mu\text{g}/\text{个}$ 和 $0.365 \mu\text{g}/\text{个}$ 。同样地,黄勇^①对采自南黄海 1382 条线虫的实测获得的个体平均干重为 $0.261 \mu\text{g}/\text{个}$,也低于国内广泛采用的 $0.4 \mu\text{g}/\text{个}$ 。可见,不同海域或者同一海域的不同站位间,线虫个体干重的平均值存在较大差异,而不同季节还因线虫繁殖阶段的不同造成个体大小的差异,因此,简单地采用 $0.4 \mu\text{g}/\text{个}$ 这一系数会对该海域的实际生物量造成不同程度的低估。

由于线虫的丰度在小型底栖动物群落中所占比例极高(约 90%),对其生物量估算的准确性直接影响了小型底栖动物生物量估计的可靠性。无疑,对各采样站位的线虫个体平均干重进行实测是得到较为准确的线虫生物量的必要手段,而由此带来的工作量十分巨大。因此,为了能够快速且真实地反映研究海域的线虫生物量,应加强对不同海域、不同季节的线虫个体平均干重值的测算,并探索其时空分布模式、影响因子和变化规律。

3.2 长江口冲淡水及黑潮暖流对小型底栖动物分布的影响

长江口及邻近的东海海域由于受长江冲淡水、黑潮暖流及沿岸流等的综合影响,沉积环境因子在时空上波动较大,造成小型底栖动物的类群组成和分布上的一些特性。本研究海域小型底栖动物丰度的水平分布大致呈现出以往所观察到的“北高南低,近岸高外围低”的趋势,但又有其独特性。具体表现为在 3100 断面中离岸较远的站位(31004、31006 和 31007 站)出现较高的丰度值,这些站位恰好处于长江口冲淡水向东海的扩展范围内。与相邻站位的比较发现,31004、31006 和 31007 站的底层水温、底层盐度和沉积物中叶绿素 a 含量皆因长江口冲淡水的影响而变化较大。聚类分析也表明近岸与受长江口冲淡水影响的站位具有较高的相似性。结合环境因子各变量、小型底栖动物丰度分布以及相关分析结果可以看出,长江口及邻近海域小型底栖动物丰度的水平分布明显受到长江口冲淡水的影响,表现为长江口冲淡水向东海的扩展范围内,小型底栖动物的丰度较相邻的东海离岸海域明显增加。这是因为长江冲淡水带来丰富的陆源营养物质,为小型底栖动物提供了丰富的食物,而粘土-粉砂质沉积物类型也为小型底栖动物尤其是线虫提供了良好的栖息环境,二者相辅相成。

另外,通过比较离岸站位的小型底栖动物丰度值,发现在 3100、3000 和 2900 断面,每个断面中离岸最远站位的小型底栖动物丰度值均高于离岸次远站位(如 $31007 > 31006$, $30006 > 30005$, $29007 > 29006$)。结合黑潮路径可以看出,每个断面中离岸最远站位相较离岸次远站位受黑潮的影响更大,即离岸较远的站位受长江冲淡水影响小,而受黑潮暖流的影响较大,黑潮暖流高温高盐的特征使其流经海域更加适合小型底栖动物的生长繁殖,造成这些站位的小型底栖动物丰度较高。

在小型底栖动物的类群组成上,本研究与国内长江口和其他海域的研究结果相比具有相似性,同时也有其独特性。和绝大多数研究一样,线虫在小型底栖动物的丰度组成上占绝对优势(94.4%)。但不同的是,多数研究显示丰度高居第 2 位的是桡足类,而本研究发现涡虫类所占比例略高于桡足类(分别为 2.3% 和 2.0%)。分析该海域桡足类丰度相对较低的原因可能是长江口环境污染较重,底栖桡足类相较其他类群对环境污染更为敏感,导致其数量降低^[14]。此外,本调查时间正值秋冬季,沉积物中叶绿素 a 含量($0.9 \mu\text{g}/\text{g}$)较低,略高于 2007 年 4—5 月对同一海域的测量结果($0.5 \mu\text{g}/\text{g}$),但明显低于 2003 年 6 月($2.5 \mu\text{g}/\text{g}$);沉积物中的叶绿素 a 含量是底栖生产力的主要指标,底栖桡足类多以底栖微藻为食,藻类量少可能对桡足类造成食物限制,从而导致其数量较少。

本研究与我国其他海域的调查结果相比,在东海离岸未受长江口冲淡水影响的海域,小型底栖动物的丰度仅高于台湾海峡^[15],但低于南海的研究结果^[16];而在东海近岸及受长江口冲淡水影响的海域,小型底栖动物丰度较高,接近于南黄海^[17]和胶州湾^[18],但低于北黄海^[17]和渤海^[19]。与长江口同类研究相比,小型底栖

① 黄勇, 2005. 南黄海小型底栖生物生态学和海洋线虫分类学研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 69.

动物丰度平均为 1081 个/10 cm²,接近于 2007 年 4—5 月 (1117 个/10 cm²)^[3],但明显低于 2003 年 6 月的结果 (1971 个/10 cm²)^[4]。究其原因,可能与沉积物中叶绿素 a 含量的多寡密切相关。与本研究一样,华尔^[4]、张志南^[5]、Liu^[20]、张艳^[21]等的研究结果也显示,小型底栖动物丰度与沉积物中叶绿素 a 含量呈显著正相关。在垂直分布上,本研究发现 70.8% 的小型底栖动物和 69.9% 的海洋线虫分布于沉积物 0—2 cm 表层,均高于 2007 年 4—5 月 (65%, 64%) 和 2003 年 6 月 (54%, 54%) 的研究结果,这可能是由于采样站位 (本研究采样站位分布更为广泛,而后两者特别是 2003 年 6 月的采样站位大多集中于近岸) 和季节的不同所致。

3.3 海洋线虫与桡足类数量之比 (N/C) 在环境监测中的应用

由于海洋线虫和桡足类对适宜环境的要求和对有机质污染的耐受力不同,因此可将二者的数量之比 (N/C) 作为指示海洋环境富营养化的指标。一般认为 N/C 比值小于 50 时环境质量正常,50—100 属于富营养化,大于 100 则属于有机质污染。这一简单的数量比值尽管存在一些争议,但仍成功地应用于许多海域的环境评价^[14, 22-24]。

据《2009 年中国海洋环境质量公报》,东海严重污染的海域主要集中在长江口、杭州湾、象山港和乐清湾海域。本研究所得 N/C 比值在长江口及周边海域由近岸向外海递减 (图 9),与该海域的环境质量状况基本吻合,其中近岸的 31002 站 N/C 比值达 142,与该站位及周边所遭受的较重污染吻合。另外,CJ2 和 29001 站的 N/C 比值均大于 50,也是通常富营养化较重的站位,其他站位的 N/C 比值均接近或小于 50。然而在离岸较远的一些站位 (如 29005、29006 和 30005) 的 N/C 比值却离奇增大,这与该海域的环境质量状况并不相符。在自然状态下,线虫和底栖桡足类的丰度与沉积物类型、有机质含量、食物来源、季节和自身繁殖等因素有关,其各自数值的大小随着时间和空间的变化波动^[25]。其中,沉积物类型的影响可能更为显著,通常底栖线虫在泥质或泥沙质沉积物中数量更大,而底栖桡足类则喜栖沙质沉积物,因此将两者数量之比用于反映环境的有机污染状况存在很大的不确定性。

综上所述,N/C 比值可大致反映海域的环境质量状况,可作为环境监测的一个参考指标。但需要特别指出的是,该比值易受沉积物类型等因素的交互影响而造成估计偏差,故利用 N/C 比值进行环境质量评价时,需结合沉积环境因子和小型底栖动物群落组成来具体分析。

致谢:中国科学院海洋研究所“2009 年秋季中国近海海洋科学考察开放共享航次”提供水文数据,底栖生物组全体成员对采样提供帮助,孟昭翠在数据统计分析中给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Zhang Z N, Zhou H. Some progress on the study of meiofauna. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(5): 799-806.
- [2] Coull B C. Role of meiofauna in estuarine soft-bottom habitat. Australian Journal of Ecology, 1999, 24(4): 327-343.
- [3] Wang X G, Wang C S, Zhang D S, Hong L S, Yang D. Abundance and biomass of meiofauna in the Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf waters in spring, 2007. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4717-4727.
- [4] 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.
- [5] Zhang Z N, Lin K X, Zhou H, Han J, Wang R Z, Tian S Y. Abundance and biomass of meiobenthos in autumn and spring in the East China Sea and the Yellow Sea. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 997-1005.
- [6] Pfannkuche O, Thiel H. Sample processing // Heggins R P, Thiel H, eds. Introduction to the Study of Meiofauna. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1988: 134-145.
- [7] McIntyre A D. The meiofauna and macrofauna of some tropical beaches. Journal of Zoology, 1968, 156(3): 377-392.
- [8] Widbom B. Determination of average individual dry weights and ash-free dry weights in different sieve fractions of marine meiofauna. Marine

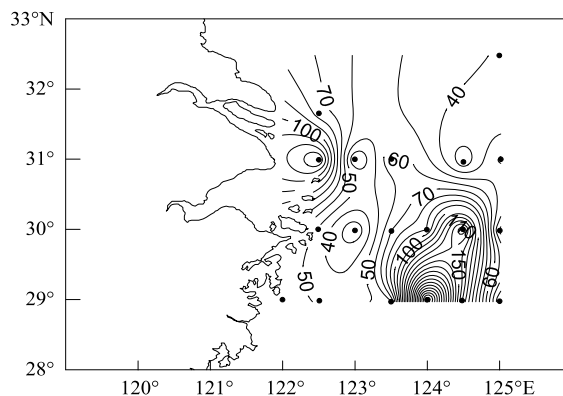


图9 线虫与桡足类丰度比值 (N/C)

Fig.9 Ratio of nematodes to copepods in abundance (N/C)

- Biology, 1984, 84(1): 101-108.
- [9] Nozais C, Perissinotto R, Tita G. Seasonal dynamics of meiofauna in a South African temporarily open/closed estuary (Mdloti Estuary, Indian Ocean). *Estuar, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2): 325-338.
- [10] Wieser W. Benthic studies in Buzzards Bay. II. The meiofauna. *Limnology and Oceanography*, 1960, 5(2): 121-137.
- [11] Liu C L, Zhu Z G, He X L, Zhang B, Xia N. Rapid determination of organic carbon in marine sediment samples by potassium dichromate oxidation-ferrous sulphate titrimetry. *Rock and Mineral Analysis*, 2007, 26(3): 205-208.
- [12] Wang R. Correction of the formula to convert fluorescence measurement to phaeophorbide a concentration in acidification method. *Marine Sciences*, 1986, 10(5): 1-5.
- [13] Zhou H, Zhang Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 58-64.
- [14] Raffaelli D G, Mason C F. Pollution monitoring with meiofauna, using the ratio of nematodes to copepods. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12(5): 158-163.
- [15] Fang S H, Lv X M, Zhang Y P, Cai L Z, Hong H S. Distribution abundance of meiobenthos in the Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(6): 136-140.
- [16] Du Y F, Xu K D, Meng Z C, Wang J D. Spatial distribution of meiofauna in relation to environmental factors in the South China sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(2): 199-207.
- [17] Wang J D, Lei Y L, Xu K D, Du Y F. An investigation on the biomass, abundance and distribution of meiofauna under the cold water mass and its surrounding areas of the Yellow sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(3): 359-366.
- [18] 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(3): 139-147.
- [19] Mu F H, Zhang Z N, Guo Y Q. Abundance and biomass of the benthic meiofauna in the Bohai sea. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(6): 897-905.
- [20] 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(3/4): 616-628.
- [21] Zhang Y. A study on seasonal variation of abundance and biomass of meiofauna at the typical station in Jiaozhou bay. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 296-301.
- [22] Coull B C, Hicks G R F, Wells J B J. Nematode/copepod ratios for monitoring pollution: a rebuttal. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12(11): 378-381.
- [23] Raffaelli D. The behaviour of the nematode/copepod ratio in organic pollution studies. *Marine Environmental Research*, 1987, 23(2): 135-152.
- [24] Warwick R M. The nematode/copepod ratio and its use in pollution ecology. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12(10): 329-333.
- [25] Guo Y Q, Zhang Z N, Mu F H. The study on the ratio of abundance of nematodes to that of copepods in the Bohai sea. *Marine Sciences*, 2002, 26(12): 27-31.

参考文献:

- [1] 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] 王小谷, 王春生, 张东声, 洪丽莎, 杨丹. 长江口及其陆架春季小型底栖生物丰度和生物量. *生态学报*, 2010, 30(17): 4717-4727.
- [4] 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.
- [5] 张志南, 林岚旋, 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] 刘昌岭, 朱志刚, 贺行良, 张波, 夏宁. 重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法快速测定海洋沉积物中有机碳. *岩矿测试*, 2007, 26(3): 205-208.
- [12] 王荣. 荧光法测定浮游植物色素计算公式的修正. *海洋科学*, 1986, 10(3): 1-5.
- [13] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 58-64.
- [15] 方少华, 吕小梅, 张跃平, 蔡立哲, 洪华生. 台湾海峡小型底栖生物数量的量分布. *海洋学报*, 2000, 22(6): 136-140.
- [16] 杜永芬, 徐奎栋, 孟昭翠, 王家栋. 南海小型底栖动物生态学的初步研究. *海洋与湖沼*, 2010, 41(2): 199-207.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 慕芳红, 张志南, 郭玉清. 渤海小型底栖生物的丰度和生物量. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(6): 897-905.
- [21] 张艳. 胶州湾典型站位小型底栖生物丰度和生物量的季节变化研究. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 296-301.
- [25] 郭玉清, 张志南, 慕芳红. 渤海海洋线虫与底栖桡足类数量之比的应用研究. *海洋科学*, 2002, 26(12): 27-31.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 15 Aug. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al (4523)
- Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (4539)
- Theoretical considerations on ecological civilization development and assessment ZHAO Jingzhu (4552)

Autecology & Fundamentals

- Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season Yu Tingting, XU Kuidong (4556)
- Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring FANG Tao, HE Xinran, FENG Zhihua, et al (4567)
- The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al (4575)
- Effects of simulated acid rain on growth and bleeding sap amount of root in *Quercus mongolica* LIANG Xiaoqin, LIU Jian, DING Wenjuan, et al (4583)
- Allelopathic effects of organic acid allelochemicals on melon ZHANG Zhizhong, SUN Zhihao, CHEN Wenhui, et al (4591)
- Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes WU Jiamei, JI Xionghui, HUO Lianjie, et al (4599)
- Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide WANG Huangping, ZHANG Qing, WENG Boqi, et al (4608)
- Comparison of isolation rate of mycobacteriophage in the different type soils XU Fengyu, SU Shengbing, MA Hongxia, et al (4616)
- Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars BIAN Yajiao, HUANG Jie, SUN Qisong, et al (4623)
- The causes of *Gentiana straminea* Maxim. seeds dormancy and the methods for its breaking LI Bingbing, WEI Xiaohong, XU Yan (4631)
- Physiological responses of four golden-leaf trees to SO₂ stress CHONG Peifang, SU Shiping (4639)
- Influence of endosulfan and its metabolites on enzyme activities in purple soil XIONG Bailian, ZHANG Jinzhong, DAI Juan, et al (4649)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level XU Jun, ZHOU Qiong, WEN Zhourui, et al (4658)
- Population dynamics of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (4665)
- Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al (4674)
- Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration LI Yuanyuan, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (4683)
- Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, et al (4692)
- Effects of different maize hybrids (inbreds) on the growth, development and population dynamics of *Rhopalosiphum maidis* Fitch ZHAO Man, GUO Xianru, LI Weizheng, et al (4707)
- Effects of forest canopy structure on understory vegetation characteristics of Funiu Mountain Nature Reserve LU Xunling, DING Shengyan, YOU Li, et al (4715)

- Influence of restoring cropland to grassland on dung beetle assemblages in Wuchuan County, Inner Mongolia, China LIU Wei, MEN Lina, LIU Xinmin (4724)
- Cu and nutrient deficiency on different effects of growth, tolerance and mineral elements accumulation between two *Elsholtzia haichouensis* populations KE Wenshan, CHEN Shijian, XIONG Zhiting, et al (4737)
- Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang ZAN Mei, LI Dengqiu, JU Weimin, et al (4744)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- An spatial ecosystem services approach based on LUCC: a case study of Ganzhou district of Zhangye City LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei, et al (4758)
- Spatiotemporal characteristics of *Spartina alterniflora* marsh change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities ZHANG Huabing, LIU Hongyu, Hou Minghang (4767)
- Process analysis and evaluation of wetlands degradation based on PCA in the lakeside of Napahai, Northwest Yunnan Plateau SHANG Wen, YANG Yongxing, HAN Dayong (4776)
- On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, et al (4790)
- Evaluation and simulation of historical range of variability of forest landscape pattern in Huzhong area WU Zhifeng, LI Yuehui, BU Rencang, et al (4799)
- Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in inner mongolia temperate steppe GUO Qun, HU Zhongmin, LI Xuanran, et al (4808)
- Research Notes**
- Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China WANG Jianjian, WANG Yongji, LAI Liming, et al (4818)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 赵景柱

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 15 期 (2013 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 15 (August, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元