

莱州湾和牟平近海夏季小型底栖生物群落组成及环境状况分析

蒲思潮^{1,3}, 史本泽¹, 张光涛², 徐奎栋^{1,3}

(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, 山东 青岛 266071; 2. 胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究莱州湾和牟平近海小型底栖生物群落组成及影响因子, 作者于2016年7月在这两个海域采集了沉积物样品, 并结合沉积环境因子进行了小型底栖生物群落组成分析。结果表明, 在莱州湾和牟平近海各仅检获了7个小型底栖生物类群, 且莱州湾的小型底栖生物平均丰度和生物量均明显低于牟平近岸海域。莱州湾线虫和桡足类平均丰度分别占小型底栖生物的91.9%和6.3%, 牟平近海分别占92.1%和4.2%。对两个海域小型底栖生物群落组成与环境因子进行Pearson相关性分析, 结果显示: 小型底栖生物丰度与底层水溶解氧含量呈显著正相关; 表层小型底栖生物丰度比与沉积物中叶绿素a含量、脱镁叶绿素含量、沉积物有机质含量以及水深呈显著正相关, 与中值粒径和底层水温度呈显著负相关。本研究显示, 基于不同沉积物类型中的参考比值, 线虫和桡足类丰度比值(N/C)可用于莱州湾和牟平近海沉积环境有机污染状况的评估。研究还发现, 牟平海域的小型底栖生物丰度和生物量呈现由近岸向外海增加的异常趋势, 且小型底栖生物的数量和类群多样性较十年前显著降低, 显示沉积环境受到了明显干扰。

关键词: 渤海; 黄海; 小型底栖生物; 丰度

中图分类号: Q958.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2018)04-0101-11

DOI: 10.11759/hyxx201801220001

小型底栖生物是指在沉积物样品分选时, 可通过500 μm 孔径网筛, 但被31 μm 孔径网筛截留的后生动物, 主要包括自由生线虫(Nematoda)、桡足类(Copepoda)、多毛类(Polychaeta)和涡虫(Turbellaria)等^[1]。在底栖生态系统中, 小型底栖生物与底栖细菌、微藻和原生动物等组成底栖微小食物网^[2-3], 同时其又是许多经济鱼、虾幼体的优质饵料。因此, 小型底栖生物在底栖生态系统的物质循环和能量流动中起着重要作用^[4-6]。此外, 小型底栖生物因其物种多样性高, 数量多且分布广泛, 同时又有繁殖率高且生命周期短的特点, 使其具有对微尺度环境变化快速反应的能力, 通常被视为环境污染监测的重要指标类群^[7-10]。

当前, 日益剧烈的人类活动对海洋生态环境和海洋生物多样性的胁迫日益严峻, 尤其是对于近海环境的威胁, 已经影响到海洋资源的可持续利用和海洋生态系统的可持续发展^[11]。黄渤海是中国重点发展的蓝色经济区的重要载体, 承载着区域发展的重任^[12]。在黄渤海海域, 莱州湾是发展较为迅速的海洋牧场, 而牟平以北海域则于2015年12月被列为首批国家级海洋牧场示范区^[13]。在莱州湾相邻的渤海

中部和牟平近海所在的北黄海海域, 张志南等^[14-17]在近20年做了大量的小型底栖生物多样性工作。然而, 有关莱州湾底栖生物研究多集中于大型底栖生物^[18-23], 迄今尚无小型底栖生物的相关报道。对于牟平近岸海域小型底栖生物的研究则仅王家栋等^[24-25]分别涉及了3个和2个站位的采样分析。

作者对渤海莱州湾和北黄海牟平近海这两个海域的小型底栖生物群落及其与环境因子的关系进行了研究, 并结合相邻海域及站位的历史数据进行了比较分析。对莱州湾和牟平近海小型底栖生物生态进行调查, 将为合理有效开发黄渤海的海洋资源提供本底资料。

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-04-16

基金项目: 科技基础性工作专项 (2013FY111100-03); 国家自然科学基金项目(41706163)

[Foundation: National Special Program on Basic Works for Science and Technology of China, No.NSPBWSTC, No.2013FY111100-03; the National Natural Science Foundation of China, No.41706163]

作者简介: 蒲思潮(1993-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事小型底栖生物生态学研究, E-mail: sichaopu@foxmail.com; 徐奎栋, 通信作者, 研究员, E-mail: kxu@qdio.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域和样品采集

分别于2016年7月7日~8日和7月22日对莱州湾(37.20°~37.30°N, 119.57°~119.82°E)和牟平近海(37.51°~37.67°N, 121.55°~121.65°E)进行采样调查。两个航次中,在莱州湾和牟平近海分别获得4个和5个未受扰动的站位于定量分析(图1)。

利用0.1 m²改进型Gray-O'Hara箱式采泥器采集海底沉积物,用塑料软管吸去上覆水后,从未受

扰动的沉积物中,用直径2.3 cm的注射器改造的取样管分别采集沉积物芯样6个。其中,3个为小型底栖生物样品,每个样按0~2 cm、2~5 cm、5~8 cm分层,置于100 mL样品瓶中,分别加入等体积10%中性甲醛固定液,摇匀后常温放置保存,用作小型底栖生物群落分析。另外3个芯样为环境因子样品,同样分上述3层,将3个重复中同层样品混合均匀装入样品袋中,避光放入-20℃冷冻保存,带回实验室内分析。在各站位,用便携式CTD现场测定水深、底层水温和盐度。

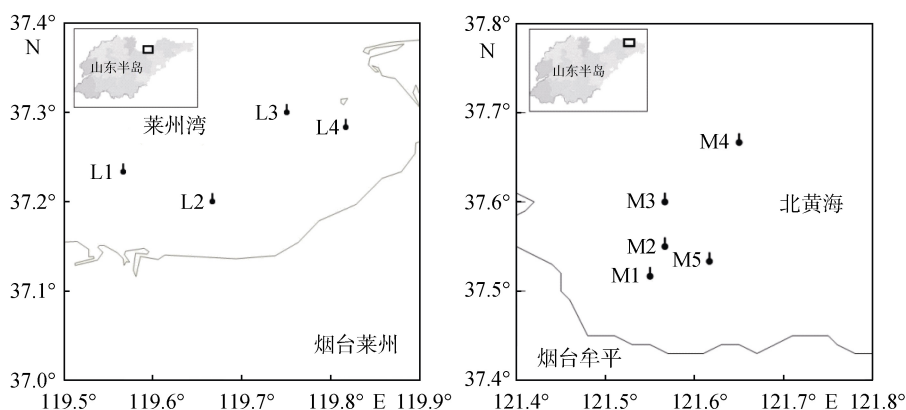


图1 渤海莱州湾和黄海牟平近海采样站位图

Fig. 1 The map of sampling stations in Laizhou Bay in the Bohai Sea and the Muping offshore area in the Yellow Sea

1.2 样品处理和统计分析

小型底栖生物样品处理过程如下:虎红(Rose Bengal)染色、冲洗过筛(500 μm和31 μm的套筛)、用比重为1.15的混合液(水与Ludox HS-40硅溶胶原液体积比=2:3)离心提取(2 000 r/min, 5 min)、解剖镜下进行计数分选^[4]。小型底栖生物丰度通过统计数据与采样面积换算得出,生物量则依据Juarío等^[26-27]所提出的经验系数估算,即每个个体,线虫按0.4 μg估算;多毛类14 μg;双壳类4.2 μg;介形类26 μg;其他类群3.5 μg。桡足类依据McIntyre^[28]所采用的1.86 μg。

叶绿素a和脱镁叶绿素含量用Turner II分光光度计测定,沉积物粒度采用Cilas(940L)型激光粒度仪测定,沉积物总有机碳含量用Vario TOC Cube (Elementar, Germany)测定,有机质含量为有机碳含量乘系数1.724,底层水溶解氧含量则通过化学滴定法测得。

采样站位图通过Surfer 12绘制,小型底栖生物丰度和生物量示意图则采用arcMAP 10.2.2绘制,后者可更直观体现出各站位小型底栖生物类群组成。小型底栖生物群落与环境因子间的相关性分析

采用SPSS 16.0软件包中的Pearson相关性分析。等级聚类分析(CLUSTER)、多维标度分析(MDS)、Margalef (*d*)丰富度指数以及BIOENV分析环境因子和生物群落关联性均通过PRIMER 6中的模块实现^[29]。在做相关性分析时,用到了Pearson相关性分析和BIOENV分析群落和环境因子关系,Pearson相关性分析更倾向于分析单一环境因子和单一群落结构指标的相关性,无法看出何种环境因子组合对生物群落影响最大,而环境因子对生物群落的影响往往是协同作用的。故通过BIOENV着重分析群落组成和环境因子组合间的关系,以期找出与生物群落相关性最强的环境因子组合。Margalef (*d*)丰富度指数计算公式如下: $d = (S-1) / \ln N$,式中*S*为样品中种类数;*N*为个体总数。线虫/桡足类丰度比值用于指示海洋环境有机质污染情况。

2 结果

2.1 底层水和沉积环境

莱州湾4个采样站位平均水深为(6.00±0.82)m,底层水温度为(26.47±0.29)℃,底层水盐度为30.21±

0.06, 底层水溶解氧含量 $7.28 \text{ mg/L} \pm 0.17 \text{ mg/L}$ (表 1)。沉积物基本为粉砂质, 中值粒径为 $(48.45 \sim 62.75) \mu\text{m}$ 。沉积物中的叶绿素 a 含量平均为 $(0.34 \pm 0.23) \mu\text{g/g}$, 最高值出现在最外侧的 L3 站 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层 $(0.53 \pm 0.10) \mu\text{g/g}$, 最低值为 L1 站 $5 \sim 8 \text{ cm}$ 层 $(0.06 \pm 0.002) \mu\text{g/g}$; 脱镁叶绿素平均值为 $(1.04 \pm 0.50) \mu\text{g/g}$, 最高值为 L4 站 $2 \sim 5 \text{ cm}$

层 $(1.89 \pm 0.07) \mu\text{g/g}$, 最低值为 L1 站 $5 \sim 8 \text{ cm}$ 层 $(0.43 \pm 0.04) \mu\text{g/g}$ 。总体上, L3 和 L4 两站叶绿素 a 含量稍高, 且分层现象不明显。沉积物中有机质含量平均为 0.24%, L4 和 L3 较高, 分别为 0.62% 和 0.22%, L1 和 L2 分别仅为 0.06% 和 0.04%。有机质的水平分布趋势与叶绿素 a 分布基本一致。

表 1 莱州湾和牟平近海各站环境因子以及各类群丰度(个/10 cm²)

Tab. 1 Environmental factors and abundance (ind/10 cm²) of meiofaunal groups in Laizhou Bay and the Muping off-shore area

站位	莱州湾				牟平近海				
	L1	L2	L3	L4	M1	M2	M3	M4	M5
中值粒径/ μm	62.75	62.54	59.94	48.45	18.22	19.06	13.36	11.35	14.73
含水量/%	26.75	25.43	23.57	32.66	37.97	39.50	34.91	31.03	35.30
叶绿素 a/ ($\mu\text{g/g}$)	0.14	0.19	0.42	0.57	1.60	1.06	1.05	1.12	1.09
脱镁叶绿素/ ($\mu\text{g/g}$)	0.61	0.62	1.19	1.72	3.60	3.38	2.87	2.62	2.66
有机质含量/%	0.04	0.03	0.13	0.36	1.16	1.00	0.99	1.09	0.91
水深/m	6	6	7	5	14	18	19	20	17
底层水溶解氧/(mg/L)	7.52	7.27	7.16	7.17	7.3	7.32	8.06	8.61	7.79
底层水温度/ $^{\circ}\text{C}$	26.17	26.65	26.29	26.78	19.39	18.83	17.95	15.62	17.75
底层水盐度	30.14	30.28	30.19	30.23	31.35	31.35	31.36	28.16	29.88
线虫丰度/(个/10 cm ²)	1540	1636	1445	2651	1512	1876	2657	4247	2335
桡足类丰度/(个/10 cm ²)	173	247	11	65	231	65	83	124	65
多毛类丰度/(个/10 cm ²)	2	6	—	4	24	196	13	2	40
寡毛类丰度/(个/10 cm ²)	31	52	8	21	16	52	17	—	41
双壳类丰度/(个/10 cm ²)	3	8	2	3	13	40	12	4	22
涡虫丰度/(个/10 cm ²)	1	—	—	—	—	2	7	4	5
介形类丰度/(个/10 cm ²)	—	—	2	1	—	—	—	—	—
海螨丰度/(个/10 cm ²)	—	—	—	—	—	1	—	—	—

注: —, 未检获。

牟平近海 5 个站位的平均水深为 $(17.60 \pm 2.30) \text{ m}$, 底层水温度为 $(17.91 \pm 1.44) ^{\circ}\text{C}$, 底层水盐度为 30.42 ± 1.41 , 底层水溶解氧含量 $(7.82 \pm 0.55) \text{ mg/L}$ (表 1)。沉积物粒径在 5 个站位均为粉砂黏土质, 中值粒径为 $(11.35 \sim 19.06) \mu\text{m}$, 差异不显著。沉积物中叶绿素 a 平均含量为 $(1.31 \pm 0.83) \mu\text{g/g}$, 最高值出现在 M1 站 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层, 达 $(4.06 \pm 1.79) \mu\text{g/g}$, 最低值出现在同一站的 $5 \sim 8 \text{ cm}$ 层, 为 $(0.64 \pm 0.07) \mu\text{g/g}$ 。脱镁叶绿素平均含量为 $3.30 \mu\text{g/g} \pm 1.06 \mu\text{g/g}$, 最高为 M1 站 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层, 达 $(5.78 \pm 0.41) \mu\text{g/g}$, 最低为 M5 站 $5 \sim 8 \text{ cm}$ 层 $(1.73 \pm 1.56) \mu\text{g/g}$ 。牟平近海沉积物中有机质含量明显高于莱州湾, 平均为 $(1.03 \pm 0.10) \%$, Pearson 相关性分析有机质含量与中值粒径呈极显著负相关 ($r = -0.983$, $N = 9$)。

2.2 小型底栖生物类群组成和分布

在莱州湾海域的 4 个站位中分选鉴定出 7 个小型底

栖生物类群(表 2, 图 2), 平均丰度为 $(1979 \pm 474) \text{ 个/10 cm}^2$, 线虫(91.9%)占绝对多数, 其他依次为桡足类(6.3%)、多毛类(0.2%)、涡虫(0.2%)、寡毛类(0.1%)、介形类($<0.1\%$)以及双壳类($<0.1\%$)。丰度最低为 L1 站 $(979 \pm 1307) \text{ 个/10 cm}^2$, 最高为 L2 站 $(2745 \pm 800) \text{ 个/10 cm}^2$ 。海域平均生物量为 $(1134 \pm 279) \mu\text{g-dwt/10 cm}^2$, 最高为 L2 站 $(1409 \pm 173) \mu\text{g-dwt/10 cm}^2$, 最低为 L3 站 $(699 \pm 305) \mu\text{g-dwt/10 cm}^2$ 。该海域平均生物量贡献依次为线虫(64.1%)、桡足类(20.3%)、寡毛类(8.7%)、多毛类(3.6%)、介形类(1.8%)、涡虫(1.3%)和双壳类($<0.1\%$)。

在垂直分布上, $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层小型底栖生物占比为 50.8% (图 3), $2 \sim 5 \text{ cm}$ 层为 35.4%。其中, 分布于 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层和 $2 \sim 5 \text{ cm}$ 层的线虫分别占 47.2% 和 38.1%, 表明其在垂直分布上分层不明显, 其他类群在 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 层的比例均在 70% 左右。

表 2 莱州湾和牟平近海小型底栖生物丰度(个/10 cm²)和生物量(μg·dwt/10 cm²)

Tab. 2 Mean abundance (ind/10 cm²) and biomass (μg·dwt/10 cm²) of meiofaunal groups in Laizhou Bay and the Muping offshore area

类群	莱州湾				牟平近海			
	丰度/ (个/10 cm ²)	百分比/ %	生物量/ (μg·dwt/10 cm ²)	百分比 /%	丰度/ (个/10 cm ²)	百分比 /%	生物量/ (μg·dwt/10 cm ²)	百分比 /%
线虫(Nematoda)	1818±486	91.9	727±194	64.1	2525±945	92.1	1010±378	46.5
桡足类(Copepoda)	124±92	6.3	231±171	20.3	114±63	4.1	211±116	9.7
多毛类(Polychaeta)	3±3	0.0%	41±37	3.6	55±80	2.0	772±1121	35.6
寡毛类(Oligochaeta)	28±18	1.4	9±64	8.7	25±21	0.9	88±73	4.0
涡虫(Turbellaria)	4±3	0.2	15±10	1.3	18±14	0.7	63±50	3.5
双壳类(Bivalvia)	0±0	<0.1	1±2	0.1	4±3	0.1	15±11	0.6
介形类(Ostracoda)	1±1	<0.1	21±30	1.8	—	—	—	—
海螨(Halacaroida)	—	—	—	—	0±1	<0.1	1±2	<0.1
总计	1979±474	100.0	1134±279	100.0	2741±883	100.0	2160±916	100.0

注: —, 未检获。

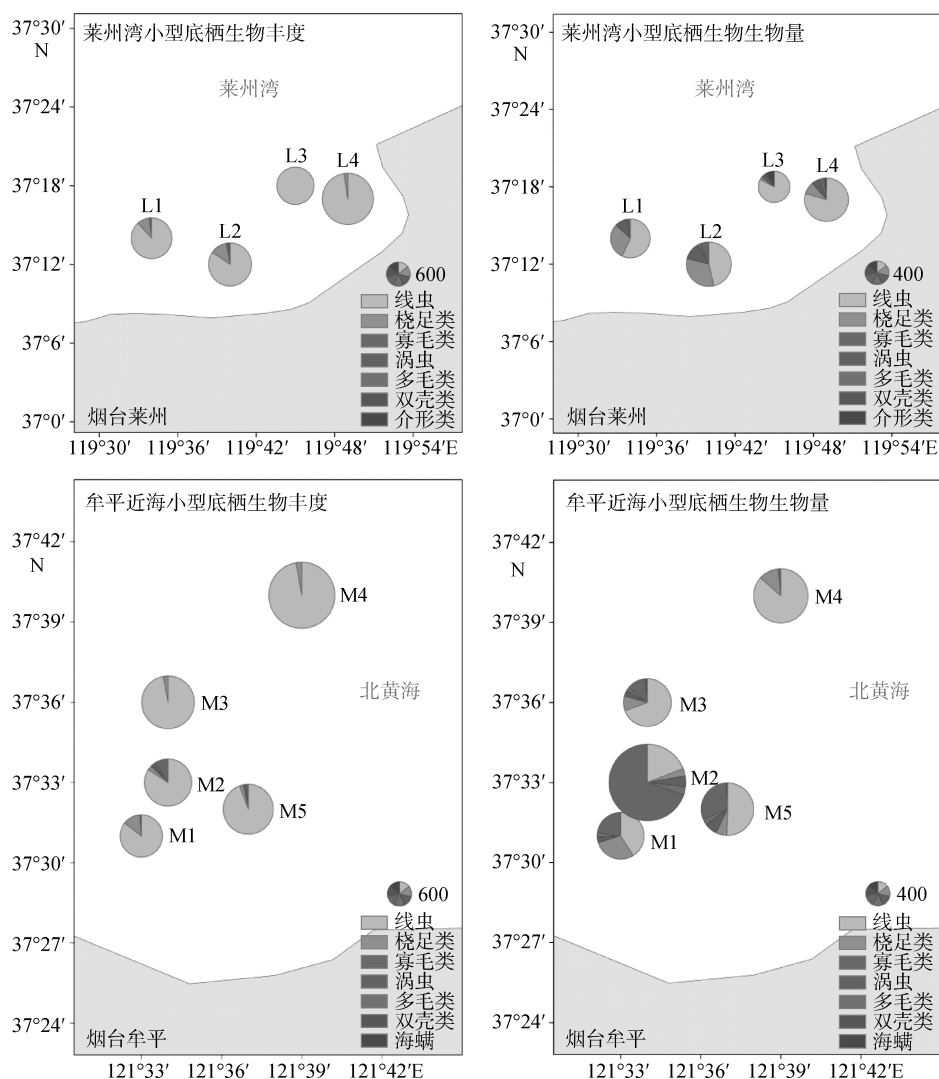


图 2 莱州湾和牟平近海小型底栖生物及各类群的丰度(个/10 cm²)和生物量(μg·dwt/10 cm²)

Fig. 2 Abundance (ind/10 cm²) and biomass (μg·dwt/10 cm²) of meiofauna as well as individual accumulations in Laizhou Bay and the Muping offshore area

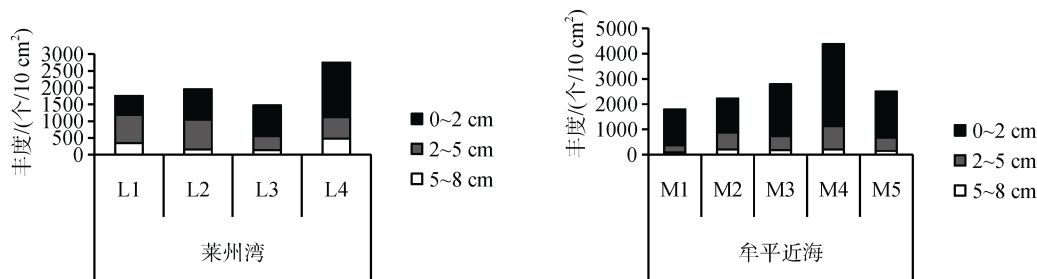


图3 莱州湾和牟平近海小型底栖生物丰度(个/10 cm²)的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of meiofaunal abundance (ind/10 cm²) in Laizhou Bay and the Muping offshore area

该海域线虫平均丰度为(1818±561)个/10 cm², 丰度最高值出现在 L4 站, 为(2651±900)个/10 cm²。线虫在 0~2 cm 层、2~5 cm 层和 5~8 cm 层的丰度所占比例分别为 58.3%、26.1%和 15.6%; 最低值出现在 L3 站, 为(1445±531)个/10 cm², 线虫在 3 个分层的比例依次为 61.7%、29.4%和 8.9%。

在牟平近海共分选出 7 个小型底栖生物类群(表 2, 图 2), 平均丰度为(2 741±883)个/10 cm²。其中, 线虫丰度最高, 占总数的 92.1%, 其他依次为桡足类(4.2%)、多毛类(2.0%)、寡毛类(0.9%)、涡虫(0.7%)、双壳类(0.2%)和海螨(<0.1%)。5 个站位的小型底栖生物丰度呈现由近岸向外海增加的趋势: M1 站丰度最低, 为(1796±187)个/10 cm², 离岸最远的 M4 站丰度最高, 达(4380±3695)个/10 cm²。5 个站平均生物量为(2160±916)μg·dwt/10 cm², 最低为近岸的 M1 站(1473±243)μg·dwt/10 cm², 最高为近岸的 M2 站(3954±2987)μg·dwt/10 cm², M2 站的高生物量主要由于多毛类丰度较高所致(图 2)。

在垂直分布上, 0~2 cm 的小型底栖生物占总数的 72.8%(图 3), 且 68.5%的线虫、68.53%的桡足类、17.8%的多毛类、51.9%的寡毛类、70.7%的涡虫和 93.3%双壳类分布在这一层; 分布于 2~5 cm 层和 5~8 cm 层的小型底栖生物平均占总量的 21.7%和 5.5%。总体来看, 这一海域 0~5 cm 层的小型底栖生物可以达到 95%左右, 明显高于莱州湾。

牟平近海的线虫平均丰度为(2525±945)个/10 cm², 丰度最高的 M4 站位(4 247±3 526)个/10 cm², 在 0~2 cm、2~5 cm 和 5~8 cm 层所占比例分别为 73.7%、21.8%和 4.5%; 丰度最低的 M1 站为(1512±163)个/10 cm²。垂直分布上各层比例则为 77.4%、17.3%和 5.3%, 表明该海域垂直分层现象比较明显。

2.3 线虫和桡足类丰度比值(N/C)

莱州湾的 N/C 变化较大, L1 和 L2 两个站的 N/C 值均低于 10, L3 站的 N/C 值高于 100, L4 站的 N/C 值为 40.8 (图 4)。在该海域, 各站位间的线虫丰度未见明显差别, 但 L3 和 L4 站的桡足类丰度((11~65)个/10 cm²)明显低于 L1 和 L2 站((173~247)个/10 cm²)(表 2), 这一差别导致了 L3 和 L4 站的 N/C 值显著高于前两个站。牟平近海的线虫和桡足类丰度比值(N/C)较为稳定, 除 M1 站为 6.5 以外, 其余各站均在 28.9~35.9。

2.4 小型底栖生物类群和丰度与环境因子的相关性

Pearson 相关性分析显示, 表层小型底栖生物比例与沉积物中叶绿素 a、脱镁叶绿素和有机质含量均呈现极显著正相关; 小型底栖生物丰度和线虫丰度同底层水溶解氧含量呈现极显著正相关, 且对牟平近海(N=5)单独分析后, 也呈现同样结果(表 3)。线虫/桡足类丰度比值则未表现出与底层环境因子的

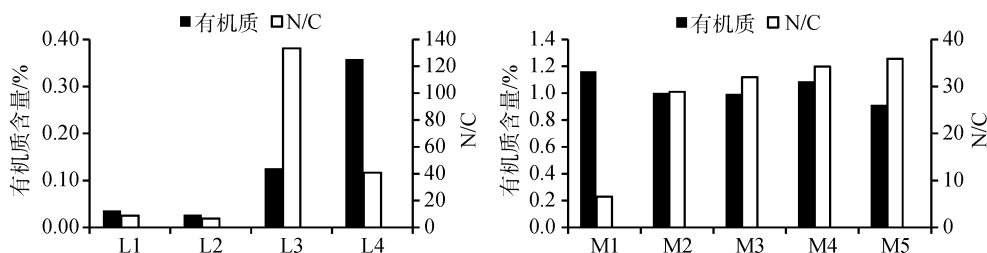


图4 莱州湾和牟平近海有机质含量(%)和线虫桡足类丰度比值

Fig. 4 Organic matter content (%) and nematode: copepod ratio (N/C) in Laizhou Bay and the Muping offshore area

表 3 小型底栖生物和线虫丰度及线虫/桡足类丰度比值与环境因子间的 Pearson 相关性分析结果

Tab. 3 Pearson correlation analysis between the abundance of meiofauna and nematodes, nematode: copepod ratio, and benthic environmental parameters

	莱州湾和牟平近岸海域(N=9)				牟平近岸海域(N=5)			
	小型底栖生物丰度 (个/10 cm ²)	线虫丰度 (个/10 cm ²)	0~2 cm 小型底栖生物比例	线虫/桡足类	小型底栖生物丰度 (个/10 cm ²)	线虫丰度 (个/10 cm ²)	0~2 cm 小型底栖生物比例	线虫/桡足类
中值粒径/μm	-0.578	-0.543	-0.823**	0.232	-0.872	-0.904*	-0.374	-0.581
沉积物含水量/%	0.233	0.174	0.596	-0.412	-0.911*	-0.935*	-0.417	-0.517
叶绿素 a/(μg/g)	0.349	0.316	0.886**	-0.189	-0.453	-0.456	0.625	-0.951*
脱镁叶绿素/(μg/g)	0.328	0.287	0.822**	-0.180	-0.751	-0.783	-0.094	-0.852
有机质含量/%	0.510	0.469	0.838**	-0.247	0.028	0.006	0.482	-0.775
水深/m	0.581	0.542	0.712*	-0.166	0.808	0.804	-0.386	0.844
底层水溶解氧/(mg/L)	0.844**	0.841**	0.395	-0.169	0.951*	0.970**	0.250	0.621
底层水温度/℃	-0.610	-0.571	-0.748*	0.223	-0.981**	-0.986**	-0.107	-0.668
底层水盐度	-0.638	-0.666	0.033	-0.146	-0.874	-0.871	-0.183	-0.497

注: **. 极显著相关($P<0.01$); *. 显著相关($P<0.05$).

显著相关关系。BIOENV 分析显示, 小型底栖生物群落丰度和环境因子矩阵相关度最高的环境因子组合为含水量、底层水温度和底层水盐度($r=0.568$)。

CLUSTER 分析通过对环境因子矩阵距离的计算, 将莱州湾 4 个站同牟平近海 5 个站截然分开, 说明两个海域环境异质性较为明显(图 5)。对两海域小型底栖生物群落进行 MDS 分析(图 6), 在 85% 相似度下, 同一海域站位大都聚在一起, 如莱州湾的 L1、L2 和 L4 站, 牟平的 M2 站、M3 和 M5 站。M1 站虽然同莱州湾海域的 3 个站位聚在一起, 但其与牟平近岸海域其他站位距离也较近, 差异不甚明显。相较而言, L3 和 M4 同其他所有站位距离较远, L3 因桡足类丰度远低于同海域其他站位, 而 M4 则因线虫丰度远高于同海域其他站位而与其他站位分开(表 2)。

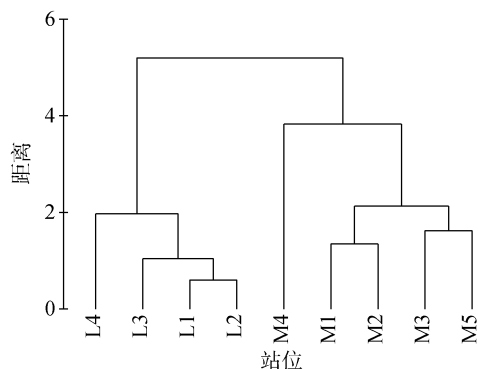


图 5 环境因子聚类分析

Fig. 5 CLUSTER analysis of environmental parameters

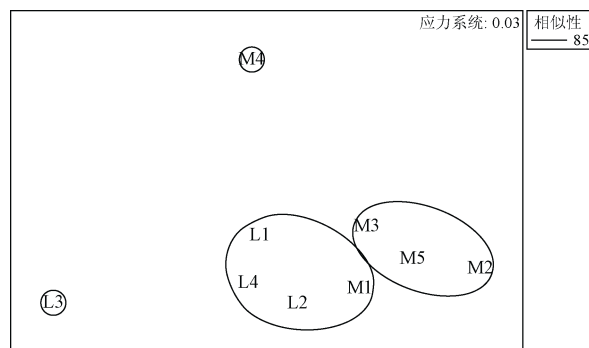


图 6 小型底栖生物群落多维标度(MDS)

Fig. 6 Multidimensional scaling (MDS) of meiofaunal groups

3 讨论

3.1 莱州湾和牟平近海小型底栖生物群落与邻近海域比较

本研究在莱州湾调查所得到的小型底栖生物丰度明显高于 1998—1999 年慕芳红等^[15]在渤海的结果, 而与其 1997 年 6 月所得的数值相当(表 4)。造成这种差异的主要原因可能是采样站位和季节不同所致。另外, 慕芳红等^[15]和本研究分选过程中所采用的不同孔径网筛(48 μm 和 31 μm)可能部分导致了结果的差异, 孔径大的网筛易造成样品中部分小个体小型底栖生物如占绝对优势的线虫的遗失^[24]。但于青等^[25]同时采用 48 μm 和 31 μm 孔径网筛处理样品的对比分析发现, 前者对小型底栖生物的提取效率约为后者的(93.89±6.23)%, 由此认为不同孔径网筛处理之间的差异可能并未显著影响实验结果。

表 4 莱州湾和牟平近海与邻近海域小型底栖生物丰度比较

Tab. 4 A comparison of the meiofaunal abundance in Laizhou Bay, the Muping offshore area, and adjacent sea areas

研究海域	沉积物采集与过筛			平均丰度			参考 文献
	采样时间(年-月)	采样深度/cm	过筛孔径/ μm	小型底栖生物	线虫	线虫比例/%	
渤海	1997-06	5	48	2300	2151	93	[15]
	1998-09	5	48	869	758	87	[15]
	1999-04	5	48	632	558	87	[15]
	2016-07	8	31	1978	1818	92	本研究
北黄海	2006-07	10	61	1099	791	72	[17]
	2007-04	10	61	1601	1376	85	[17]
	2007-06	8	31	3410	2988	88	[24]
	2008-07	8	31	1257	—	—	[31]
	2011-06	8	31	1219	—	—	[25]
	2011-06	8	31	1219	1032	85	[30]
	2011-11	8	31	1182	1088	92	[30]
	2012-05	8	31	833	622	75	[30]
	2013-11	8	31	331	—	—	[25]
	2016-07	8	31	2741	2525	92	本研究

注: —, 原文中未提及。

牟平近海地处北黄海海域, 黄海海域小型底栖生物丰度也是中国各海域中最高的, 但不同研究检获的丰度值差异很大。本研究在牟平近海所获的小型底栖生物丰度低于王家栋等^[24]在北黄海大面站所获的丰度值, 与于青等^[25]、张凯^[30]在与本研究位置相近的站位所获数值大致相当, 而明显高于北黄海其他海域研究所获的数值(表 4)。与王家栋等^[24]在牟平近海水深与本研究相近(18 m 左右)的 3 个相邻站位(站位编号分别为 2013、2017 和 2021)相比, 本研究所获的小型底栖生物丰度((2741±883)个/10 cm²)明显低于后者((4513±537)个/10 cm²)。比较分析发现, 王家栋等^[24]在牟平近海的 3 个站位所测底层水温度(11.50±0.22℃)还低于本研究(17.91±1.44℃), 其余环境因子均与本研究相近。而通常, 较高的底层水温与较高的小型底栖生物丰度相关联。

进一步对牟平海域小型底栖生物分析显示, 相较本研究在牟平近海 5 个站位检获的 7 个类群, 10a 前王家栋等^[24]仅在其中的 3 个站就检获了 10 个类群, 此次未检获的类群包括介形类(Ostracoda)、动吻类(Kinorhyncha)和甲壳类幼体(Nauplii)。该海域小型底栖生物类群的 Margalef (*d*)丰富度指数也由 10a 前的 0.75±0.06 (*N*=3) 降至 0.61±0.11 (*N*=5), 线虫占小型底栖生物的平均丰度比达 91%, 略高于 10a 前的 88%。而且, 小型底栖生物丰度和生物量均呈现由近岸向外海增加的异常趋势, 离岸较近的 M2 站出现了较高

比例的多毛类个体。牟平海域曾是黄海的主要捕捞和养殖区之一, 早期的底拖网活动较多。根据 Pusceddu 等^[32]在地中海西北部的研究, 在长期拖网捕捞海区的小型底栖生物丰度、多样性和线虫种类丰富度均明显低于非拖网作业海区, 仅为后者的 80%、50%和 25%; 且在环境污染和扰动压力下, 一些敏感类群, 如介形类(Ostracoda)、腹毛类(Gastrotricha)、缓步动物(Tardigrada)等逐渐消失, 而线虫及多毛类等抗扰动能力强的类群则更具数量优势^[33]。因此, 牟平近海小型底栖生物数量和多样性的显著降低, 显示沉积环境受到了明显干扰, 可能主要系人为活动(如底拖网和近海养殖)的影响所致。

3.2 莱州湾和牟平近海小型底栖生物与环境因子的关系

对两个海域全部 9 个站以及牟平近海的 5 个站位分别进行的环境因子和小型底栖生物群落相关性分析显示, 底层水溶解氧含量与小型底栖生物丰度和线虫丰度均呈现极显著正相关关系(表 3)。通常认为, 水体中溶解氧含量低于 2 mg/L, 即意味着低氧区出现^[34]。在此次调查的两个海域, 底层水溶解氧含量仍属正常范围(7.58±0.49 mg/L), 并基本接近于这一温度条件下的饱和值。在这种浓度梯度下, 本研究中得到的极显著正相关难以解释二者的真正关系。而且已有的小型底栖生物研究极少涉及底层水溶解

氧含量的分析,因此底层水溶解氧含量与小型底栖生物的关系仍需要进一步研究,在将来的小型底栖生物调查中,应考虑增加底层水溶解氧这一重要环境因子的测量。

沉积物中叶绿素 a 作为小型底栖生物的重要食物来源,通常是影响小型底栖生物丰度的一个主要环境因子,然而关于二者的相关性分析结果尚无统一结论,有研究显示二者呈显著正相关关系^[14-15],但也有研究显示二者呈显著负相关关系^[35],还有许多研究二者之间未见显著相关^[16, 36-38]。本研究涉及牟平近岸海域沉积物中的叶绿素 a 平均含量是莱州湾海域的 4 倍,前者的小型底栖生物丰度和生产量分别为后者的 1.5 倍和 2 倍。小型底栖生物分布趋势与叶绿素 a 分布趋势总体一致,显示高叶绿素 a 含量与高丰度有关联,然而相关性分析未见二者显著相关,可能与本研究站位较少有关。

小型底栖生物类群和丰度与环境因子之间的 Pearson 相关性分析(表 3)显示,沉积物中值粒径与表层小型底栖生物比例呈现极显著负相关关系($r=-0.823$, $P=0.006$),但与小型底栖生物丰度的水平分布未见显著性,说明沉积物中值粒径影响着小型底栖生物的垂直分布。两个海域 9 个采样站位中,小型底栖生物在莱州湾海域分布于表层(0~2 cm)和次表层(2~5 cm)的比例分别为 51%和 35%,而在牟平近海分别为 73%和 22%,小型底栖生物垂直分布差异很好地反映出莱州湾海域沉积物粒度明显大于牟平近海。通过对各站环境因子的聚类(图 5)以及小型底栖生物各类群多维标度(图 6)的分析比较发现,环境因子聚类分析可将两个海域站位清楚地分开,而小型底栖生物各类群多维标度分析大体与环境因子的分析结果相一致,仅 M1 站同莱州湾各站小型底栖群落差异不明显。这一结果也说明,总体上小型底栖生物群落与环境因子关系密切,但环境因子的作用较为复杂,无法通过现有的单一或简单组合完全解释其对小型底栖生物的影响。

3.3 线虫和桡足类丰度比值对沉积物环境的指示作用

线虫和桡足类丰度比值这一评价指标最初由 Raffaelli 等^[39]提出,其主要理论依据是桡足类对有机质污染的压力比较敏感,而某些种类线虫对污染的耐受力较强,从而出现数量比值的变化,因而认为这一比值可以用来评估某一海域受有机质污染的情况。

这一比值因使用简单,无需复杂的分类鉴定,因此广泛应用于许多海域的环境监测中^[40-41]。

然而,小型底栖生物丰度和类群构成受季节变化和繁殖周期的影响而出现变化,不同底质条件更是显著影响小型底栖生物群落的因子影响^[42-43],这些因素与环境质量并无直接关联,简单地以这一比值评估沉积环境的状况容易得出片面的结论。因此,N/C 值的环境监测效能一直存在争议,在不同沉积物类型中反映沉积物环境质量的分辨率不够。

为此,Warwick^[44]进一步根据沉积物类型和小型底栖生物的营养动力学提出更为细致的划分,即泥质沉积物中 N/C 值大于 40,砂质沉积物中 N/C 值大于 10,即表明环境受到有机质污染。具体到某一特定海域,在底质条件短期内不会发生较大变化的情况下,这一比值的波动仍能够比较好的体现这一区域的有机质环境变化。本研究中,牟平近海的沉积物粒径较小,基本为粉砂黏土底质,N/C 值基本都在 30 左右。根据 Warwick^[44]的标准判断,牟平近海未受到有机物污染,尽管该海域沉积物中有机质含量由于底质粒径较小而总体上明显高于莱州湾。莱州湾的沉积物粒径较大,基本为粉砂质,接近于砂质沉积物,因此莱州湾 L1 和 L2 两个站位的 N/C 分别为 8.9 和 6.6,显示未受到有机污染;而 L3 和 L4 两个站位的 N/C 分别达 133.3 和 40.8,显示有机污染相较严重。这一结果与 L3 和 L4 两站位的沉积物中有机质含量是 L1 和 L2 站位的 4~12 倍相一致,表明 N/C 值在本研究所涉及的两个海域中能较好地反映沉积物有机污染状况。对于长期监测,尤其是大范围的海域监测来说,这一比值的评估效能仍需通过长期历史数据的积累不断完善。

致谢:李菊,周通,徐雨等在样品采集与后期环境因子测定过程中给予了协助,王家栋提供历史数据以供分析,一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 张志南,周红.自由生活海洋线虫的系统分类学[J].青岛海洋大学学报,2003,33(6):891-900.
Zhang Zhinan, Zhou Hong. The systematics of free-living marine nematodes[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(6): 891-900.
- [2] Moens T, dos Santos G A P, Thompson F, et al. Do nematode mucus secretions affect bacterial growth[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2005, 40(1): 77-83.
- [3] Ansari S G, Ansari Z A, Wahab R, et al. Glucose sensor

- based on nano-baskets of tin oxide templated in porous alumina by plasma enhanced CVD[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, 23(12): 1838-1842.
- [4] Coull B C. Ecology of the marine meiofauna[C]// Introduction to the study of Meiofauna. Washington DC: Smithsonian Institution Press, 1988: 18-38.
- [5] 张艳, 张志南, 华尔. 南黄海小型底栖动物分布及其与环境因子的关系[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(19): 323-329.
Zhang Yan, Zhang Zhinan, Hua Er. Relationship between distribution of meiofauna and environmental factors in southern Yellow Sea[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(19): 323-329.
- [6] 张志南, 周红. 国际小型底栖生物研究的某些进展[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(5): 799-806.
Zhang Zhinan, Zhou Hong. Some progress on the study of meiofauna[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(5): 799-806.
- [7] Coull B C. Role of meiofauna in estuarine soft-bottom habitats[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1999, 24(4): 327-343.
- [8] Kennedy A D, Jacoby C A. Biological indicators of marine environmental health: meiofauna-a neglected benthic component[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 54(1): 47-68.
- [9] Pinckney J L, Carman K R, Lumsden S E, et al. Microalgal-meiofaunal trophic relationships in muddy intertidal estuarine sediments[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 31: 99-108.
- [10] Moreno M, Ferrero T J, Gallizia I, et al. An assessment of the spatial heterogeneity of environmental disturbance within an enclosed harbour through the analysis of meiofauna and nematode assemblages[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 565-576.
- [11] 国家海洋局. 2014 年中国海洋环境状况公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2015.
State Oceanic Administration. Chinese marine environments' state bulletin in 2014[R]. Beijing: State Oceanic Administration, People's Republic of China, 2015.
- [12] 国家发展改革委员会. 山东半岛蓝色经济区发展规划[R]. 北京: 国家发展改革委员会, 2011.
National Development and Reform Commission. Planning about development of blue economic zone in Shandong Peninsula[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.
- [13] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. *水产学报*, 2016, 40(7): 1133-1140.
Yang Hongsheng. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [14] 张志南, 林岩旋, 周红, 等. 东、黄海春秋小型底栖生物丰度和生物量研究[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 997-1005.
Zhang Zhinan, Lin Kuixuan, Zhou Hong, et al. Abundance and biomass of meiobenthos in autumn and spring in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 997-1005.
- [15] 慕芳红, 张志南, 郭玉清. 渤海小型底栖生物的丰度和生物量[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(6): 897-905.
Mu Fanghong, Zhang Zhinan, Guo Yuqing. Abundance and biomass of the benthic meiofauna in the Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(6): 897-905.
- [16] 郭玉清, 张志南, 慕芳红. 渤海小型底栖生物丰度的分布格局[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1463-1469.
Guo Yuqing, Zhang Zhinan, Mu Fanghong. Large-scale patterns of meiofaunal abundance in the Bohai Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1463-1469.
- [17] 陈海燕, 周红, 慕芳红, 等. 北黄海小型底栖生物丰度和生物量时空分布特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(4): 657-663.
Chen Haiyan, Zhou Hong, Mu Fanghong, et al. The spatial-temporal distributional characteristics of meiobenthic abundance and biomass in the northern Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 657-663.
- [18] 刘晓收, 赵瑞, 华尔, 等. 莱州湾夏季大型底栖动物群落结构特征及其与历史资料的比较[J]. *海洋通报*, 2014, 33(3): 283-292.
Liu Xiaoshou, Zhao Rui, Hua Er, et al. Macrofaunal community structure in the Laizhou Bay in summer and the comparison with historical data[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(3): 283-292.
- [19] Zhou Hong, Zhang Zhinan, Liu Xiaoshou, et al. Changes in the shelf macrobenthic community over large temporal and spatial scales in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 67(3-4): 312-321.
- [20] Zhou Hong, Zhang Zhinan, Liu Xiaoshou, et al. Decadal change in sublittoral macrofaunal biodiversity in the Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2364-2373.
- [21] Zhang Junlong, Xiao Ning, Zhang Suping, et al. A comparative study on the macrobenthic community over a half century in the Yellow Sea, China[J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72(2): 189-205.
- [22] Zhang Junlong, Xu Fengshan, Liu Ruiyu. Community structure changes of macrobenthos in the South Yellow Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30 (2): 248-255.
- [23] 徐勇, 隋吉星, 李新正, 等. 南黄海大型底栖动物群落划分及变化[J]. *广西科学*, 2016, 23(4): 339-345.

- Xu Yong, Sui Jixing, Li Xinzhen, et al. Variations of macrofaunal community classification in the south Yellow Sea[J]. Guangxi Sciences, 2016, 23(4): 339-345.
- [24] 王家栋, 类彦立, 徐奎栋, 等. 黄海冷水团及周边海域夏初小型底栖生物现存量及空间分布研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 359-366.
Wang Jiadong, Lei Yanli, Xu Kuidong, et al. An investigation on the biomass, abundance and distribution of meiofauna under the cold water mass and its surrounding areas of the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(3): 359-366.
- [25] 于青, 周红, 张凯, 等. 北黄海冷水团对小型底栖生物时空分布的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(12): 60-67.
Yu Qing, Zhou Hong, Zhang Kai, et al. Effects of the northern Yellow Sea cold water mass on the spatio-temporal distribution of the meiofauna[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(12): 60-67.
- [26] Juario J V. Nematode species composition and seasonal fluctuation of a sublittoral meiofauna community in the German Bight[J]. VerOfentlichungen des Instituts far Meeresforschung Bremerhaven, 1975, 15: 283-337.
- [27] Widbom B. Determination of average individual dry weights and ash-free dry weights in different sieve fractions of marine meiofauna[J]. Marine Biology, 1984, 84(1): 101-108.
- [28] McIntyre A D. The macrofauna and meiofauna of some trophic beaches[J]. Journal of Zoology, 1968, 156(3): 377-392.
- [29] 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[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 58-64.
Zhou Hong, Zhang Zhinan. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 58-64.
- [30] 张凯. 北黄海中部小型底栖生物时空分布规律及与五年前的比较[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Zhang Kai. The spatio-temporal distributional characteristics of meiobenthos and the comparison with five years ago in the central part of northern Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [31] 吴秀芹, 徐奎栋, 于子山, 等. 2008 年浒苔大暴发末期黄海小型底栖生物现存量及空间分布[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2140-2147.
Wu Xiuqing, Xu Kuidong, Yu Zishan, et al. Standing crop and spatial distribution of meiofauna in Yellow Sea at late stage of *Enteromorpha prolifera* bloom in 2008[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2140-2147.
- [32] Pusceddu A, Bianchelli S, Martín J, et al. Chronic and intensive bottom trawling impairs deep-sea biodiversity and ecosystem functioning[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(24): 8861-8866.
- [33] Pusceddu A, Fraschetti S, Mirto S, et al. Effects of intensive mariculture on sediment biochemistry[J]. Ecological Applications, 2007, 17(5): 1366-1378.
- [34] Diaz R J. Overview of hypoxia around the world[J]. Environmental Quality, 2001, 30(2): 275-281.
- [35] 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[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(3): 199-205.
Huang Yong, Zhang Zhinan, Liu Xiaoshou. The marine nematodes community in winter southern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(3): 199-205.
- [36] 王小谷, 王春生, 张东声, 等. 长江口及其陆架春季小型底栖生物丰度和生物量[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4717-4727.
Wang Xiaogu, Wang Chunsheng, Zhang Dongsheng, et al. Abundance and biomass of meiofauna in the Changjiang Estuary and its adjacent continental shelf waters in spring, 2007[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4717-4727.
- [37] Pfannkuche O. The deep-sea meiofauna of the Porcupine Sea bight and abyssalplain (NE Atlantic): population structure, distribution, standing stocks[J]. Oceanologica Acta, 1985, 8(3): 343-353.
- [38] Pfannkuche O, Thiel H. Meiobenthic stocks and benthic activity on the NE-Svalbard Shelf and in the Nansen Basin[J]. Polar Biology, 1987, 7(5): 253-266.
- [39] Raffaelli D G, Mason C F. Pollution monitoring with meiofauna, using the ratio of nematodes to copepods[J]. Marine Pollution Bulletin, 1981, 12(5): 158-163.
- [40] Montagna P, Harper D E Jr. Benthic infaunal long term response to offshore production platforms in the Gulf of Mexico[J]. Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences, 1996, 53(11): 2567-2588.
- [41] Shiells G M, Anderson K J. Pollution monitoring using the nematode/copepod ratio A practical application[J]. Marine Pollution Bulletin, 1985, 16(2): 62-68.
- [42] Lambshead P J D. The nematode/copepod ratio – some anomalous results from the Firth of Clyde[J]. Marine Pollution Bulletin, 1984, 15(7): 256-259.
- [43] Ansari Z A, Ingole B. Effect of an oil spill from MV sea transporter on intertidal meiofauna at Goa, India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(5): 396-402.
- [44] Warwick R M. The nematode'copepod ratio and its use in pollution ecology[J]. Marine Pollution Bulletin, 1981, 12(10): 329-333.

Meiofaunal community structure and environmental conditions in Laizhou Bay and the Muping offshore area in summer

PU Si-chao^{1, 3}, SHI Ben-ze¹, ZHANG Guang-tao², XU Kui-dong^{1, 3}

(1. Department of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jan. 22, 2018

Key words: Bohai Sea; Yellow Sea; meiofauna; abundance

Abstract: This study aimed to analyze the meiofaunal and environmental samples collected from Laizhou Bay and the Muping offshore area in July 2016 to assess the meiofaunal community structure and the impact of environmental parameters. Only seven meiofaunal groups were obtained from each sea area. Both the mean abundance and biomass of meiofauna in the Muping offshore area were much higher than those in Laizhou Bay. Nematodes were the most abundant group in both sea areas (Laizhou Bay, 91.9%; Muping offshore area, 92.1%), followed by copepods (6.3% and 4.2%, respectively). Pearson correlation analysis between the composition of meiofaunal groups and environmental parameters revealed a significant positive correlation between the meiofaunal abundance and dissolved oxygen concentration of the bottom water. The ratio of meiofaunal abundance in the surface sediment layer to the total meiofaunal abundance exhibited a significant positive correlation with contents of chlorophyll a, pheophytin, and organic matter as well as water depth and a significant negative correlation with the sediment grain size and temperature of bottom water, respectively. According to the reference values for different types of sediments, our results indicate that the nematode: copepod ratio can be used to assess the condition of organic pollution of sediments in the two sea areas. Moreover, we observed an unusual trend of the meiofaunal abundance and biomass, which increased from the nearshore station to the farthest station in the Muping offshore area. Compared with the data obtained from the same sea area off Muping in June 2007, both the abundance and taxonomic diversity of meiofauna have distinctly decreased, indicating the effect of apparent disturbance in the sediment environments.

(本文编辑: 谭雪静)