

宋远柳, 刘晓收. 夏、秋季南黄海小型底栖动物空间分布格局及其环境影响因素[J]. 海洋学报, 2023, 45(1): 38–52, doi:10.12284/hyxb2023020

Song Yuanliu, Liu Xiaoshou. Spatial distribution patterns of meiofauna and the influencing environmental factors in the southern Yellow Sea in summer and autumn[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(1): 38–52, doi:10.12284/hyxb2023020

夏、秋季南黄海小型底栖动物空间分布格局及其环境影响因素

宋远柳^{1,2}, 刘晓收^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学 海洋生物多样性与进化研究所, 山东 青岛 266003)

摘要: 为研究南黄海小型底栖动物的空间分布格局及其环境影响因素, 于 2020 年 8 月 (夏季) 和 11 月 (秋季) 对南黄海进行了两个航次的野外观测和采样, 对小型底栖动物的类群组成、丰度、生物量、垂直分布、群落结构及其与环境因子的关系进行了研究。结果显示, 共鉴定出小型底栖动物类群 15 个, 其中自由生活海洋线虫为最优势类群, 在两个航次中分别占小型底栖动物总丰度的 75.6% 和 84.6%。其他较重要的类群还包括底栖桡足类、轮虫类和枝角类等。夏季和秋季小型底栖动物的平均丰度分别为 (514.9 ± 32.1) ind./ (10 cm^2) 和 (350.8 ± 30.7) ind./ (10 cm^2) , 平均生物量 (干质量) 分别为 (651.7 ± 98.0) $\mu\text{g}/(10 \text{ cm}^2)$ 和 (589.2 ± 37.1) $\mu\text{g}/(10 \text{ cm}^2)$ 。小型底栖动物在时空分布上存在差异。在季节分布上, 小型底栖动物丰度和类群组成存在极显著差异。结合环境因子分析结果可知, 沉积物中值粒径是引起差异的主要环境因子。在空间分布上, 夏季小型底栖动物丰度和类群组成在不同水深间存在极显著差异, 秋季小型底栖动物丰度和类群组成在不同水深间差异不显著。推测黄海冷水团是影响夏季小型底栖动物空间分布差异的主要因素。本研究中小型底栖动物的数量和类群多样性相较于国内其他对南黄海小型底栖动物的研究较低, 其中沉积物叶绿素 *a* 含量及有机质含量是引起南黄海小型底栖动物丰度变化的重要因素。海洋线虫与桡足类的丰度比值 (N/C 比值) 评估显示秋季该区域存在有机污染, 这一结果与应用大型底栖动物对同一区域进行环境评价的结果不一致, 对于应用 N/C 比值评价环境质量还需要进一步的研究。

关键词: 小型底栖动物; 自由生活海洋线虫; 丰度; 生物量; 南黄海

中图分类号: P722.5; Q178.535

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)01-0038-15

1 引言

黄海是位于中国大陆和朝鲜半岛之间的半封闭陆架浅海。黄海西北部与渤海相连, 南部与东海相连, 地形从海岸向外倾斜^[1]。由于其自然地理环境, 它通常被分为两部分, 沿山东半岛成山角到朝鲜长山串的连线将其分为南黄海和北黄海。南黄海总面积超

过 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 位于 $31^\circ 45' \sim 38^\circ 00' \text{ N}$, $119^\circ \sim 127^\circ \text{ E}$ 之间, 与东海大陆架相连, 是世界上最大的大陆架地区之一^[2]。南黄海的地形分布具有明显的梯度。同时, 在每年的夏半年 (4–10 月), 南黄海海域出现南北跨度 5 个纬度, 东西跨度 4 个经度 ($33^\circ 43' \sim 38^\circ 45' \text{ N}$, $121^\circ 15' \sim 125^\circ 05' \text{ E}$) 的低温水体, 这种独特的水文现象被称为“黄海冷水团”^[3–6]。

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-08-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (41976131)。

作者简介: 宋远柳 (1996—), 女, 山东省日照市人, 主要从事小型底栖动物生态学研究。E-mail: songyuanliu16@163.com

* 通信作者: 刘晓收, 教授, 主要从事生物海洋学与海洋底栖生物生态学研究。E-mail: liuxs@ouc.edu.cn

小型底栖动物是指在分选时能通过 0.5 mm 孔径的网筛但被 0.042 mm 或 0.031 mm 孔径的网筛所截留的后生动物^[7-9]。在本研究中使用的为 0.031 mm 孔径的网筛,因为许多成熟的小型底栖动物在 0.031 mm 的网筛上仍有保留^[10]。小型底栖动物通过消耗溶解的有机碳、摄食初级生产者和细菌,在碳转移、物质循环中发挥着关键作用^[11-14]。研究小型底栖动物对了解生态系统的功能、可持续性和复原力具有至关重要的意义^[15-16]。此外,小型底栖动物在环境监测中也起着重要作用,近年来小型底栖动物的污染生物学受到了广泛关注,国内外许多专家提出了利用小型底栖动物类群种类变化和线虫饶足丰度比的变化作为环境监测的方法^[17-19]。

国际上对于陆架水域小型底栖动物的研究较多^[20-23]。我国对于北黄海^[24-25]和南黄海^[2, 26-33]海域小型底栖动物的研究已有一定的成果。上述研究表明,南黄海小型底栖动物丰度呈现“近岸低、中部高、外海低”的分布特征^[2, 26, 28],小型底栖动物主要分布于沉积物表层,水深、温度、盐度、沉积物粒度、叶绿素 *a* 含量、脱镁叶绿酸含量、有机质含量、含水量等环境变量对南黄海小型底栖动物分布均可产生影响^[2, 26-32],且小型底栖动物在浅海生态系统的能量流动中占有十分重要的地位^[26-28]。

本研究在上述对南黄海小型底栖动物调查研究的基础上,旨在探讨小型底栖动物在时空分布上是否存在差异。利用统计学方法,结合各种环境因子对南黄海小型底栖动物的类群组成、丰度及生物量进行了研究,探讨小型底栖动物的时空变化及其影响因素,为海洋生态系统结构和功能研究提供参考资料。

2 材料与方法

2.1 研究海域与站位

本次研究分别于 2020 年 8 月和 11 月对南黄海水域(35.00°~36.26°N, 120.89°~122.90°E)进行了采样调查,其中夏季共设置 10 个采样站位(站位编号为 15、17、19、22、24、27、28、31、33、43);秋季共设置 13 个采样站位(站位编号为 15、17、18、19、20、22、24、26、27、28、30、33、39),每个站位分别取 3 个重复样,以-1、-2、-3 区分(夏季 19、27 号站位包括两个重复样)。研究站位见图 1。

2.2 取样方法

现场调查依据《海洋调查规范》进行,使用内径为 2.9 cm 的取样管(由塑料注射器改装而成),从未受扰动的表面积为 0.05 m² 的箱式采泥器中随机取 3 个

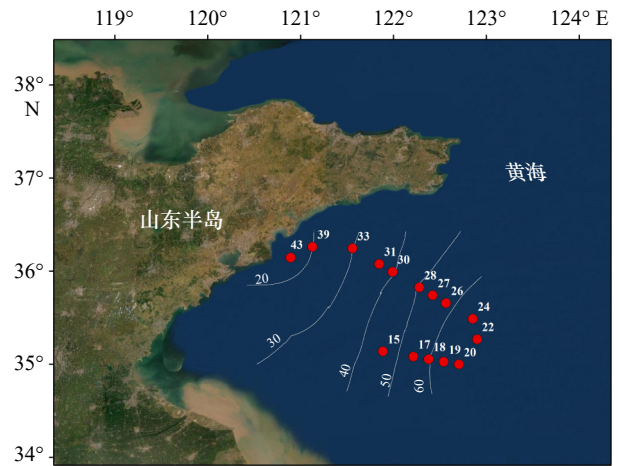


图 1 南黄海夏、秋季小型底栖动物调查站位
Fig. 1 The sampling sites of meiobenthos in the southern Yellow Sea in summer and autumn

重复样,芯样长 8 cm,取出后立即按 0~2 cm、2~5 cm 和 5~8 cm 分层分别装入 250 mL 塑料瓶中,加入 4% 中性甲醛溶液固定保存,用于分析小型底栖动物的类群组成和数量。刮取表层沉积物装入封口袋中,立即冷冻避光保存(-20℃),用于沉积物叶绿素 *a* 含量、有机质含量及粒度分析。其他环境因子由温盐深仪(CTD)现场测定,包括水深、底层水温和底层水盐度等。

2.3 室内分析

加入 3~5 mL 质量分数为 1% 虎红溶液于小型底栖动物样品中,混合均匀,染色 24 h 后将样品转移到 0.5 mm 和 0.031 mm 孔径组成的双层套筛中,用自来水清洗至水流变清。将 0.031 mm 孔径网筛上的样品用 Ludox-TM 溶液(比重为 1.15 g/cm³)冲洗至 100 mL 离心管中,1 800 r/min 离心 10 min,收集上清液,重复离心 3 次。将 3 次离心后获得的上清液倒入 0.031 mm 孔径的网筛上,用自来水冲洗掉 Ludox-TM 溶液,并将样品转移至划线培养皿中。在解剖镜下将后生小型底栖动物挑出,按照类群分开装瓶并计数,并使用 4% 的中性甲醛溶液将其保存在 5 mL 玻璃样品瓶中。

沉积物有机质含量采用重铬酸钾-硫酸(K₂Cr₂O₇-H₂SO₄)氧化法测定。叶绿素 *a*(Chl *a*)和脱镁叶绿酸(Pha)含量用荧光仪(Triology, Turner, 美国)测定。沉积物中值粒径使用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000, Malvern, 英国)测定。

2.4 数据处理与分析

小型底栖动物丰度单位为 ind./(10 cm²),表示每 10 cm² 中所含的小型底栖动物个数。小型底栖动物生物量为干质量生物量,其估算采用各类群丰度值乘以相应类群的平均个体干质量经验值的方法^[28],单位

为 $\mu\text{g}/(10\text{ cm}^2)$, 其中不同类群的小型底栖动物平均干质量参照前人研究成果^[33-36]。表 1 为小型底栖动物各类群的个体平均干质量。

表 1 小型底栖动物各类群的个体平均干质量

Table 1 Individual average dry weight of different meiofauna groups

类群	平均干质量/ μg	类群	平均干质量/ μg
海洋线虫 Nematoda	0.4	动吻类 Kinorhyncha	2
桡足类 Copepoda	1.86	介形类 Ostracoda	26
枝角类 Cladocera	26	端足类 Amphipoda	15
轮虫类 Rotifera	3.5	等足类 Isopoda	15
海螨类 Halacaroidea	1.5	涟虫 Cumacea	3.5
涡虫类 Turbellaria	3.5	原足类 Tanaidacea	15
双壳类 Bivalvia	4.2	其他 Others	3.5
多毛类 Polychaeta	14		

应用 ArcGIS 10.2 绘制采样站点图。应用 SPSS 25.0 软件对所得的生物数据和环境因子数据进行差异性检验, 并对生物数据及各环境因子进行 Pearson 相关性分析。应用 PRIMER 7.0 软件进行多元统计分析。对环境因子进行主成分分析(PCA), 分析环境相似性; 对小型底栖动物群落进行非度量多维分析(nMDS), 并利用 PERMANOVA 检验组间差异显著性; 用 BIOENV 分析连接环境和生物矩阵, 分析环境因子对小型底栖动物类群组成的影响。

3 结果

3.1 环境因子

南黄海研究区域环境因子如表 2 所示。夏季采样站位的平均水深为 47.1 m, 水深分布状况呈现梯度加深的趋势, 可划分为 3 个梯度, 30 m 以浅(33 号、43 号站点)、30~60 m(15 号、17 号、27 号、28 号、31 号站点)、60 m 以深(19 号、22 号、24 号站点)。平均底层水温度为 12.91 $^{\circ}\text{C}$; 平均底层水盐度为 32.37; 中值粒径平均值为 0.022 mm; 叶绿素 *a* 含量平均值为 0.37 $\mu\text{g}/\text{g}$; 脱镁叶绿酸含量平均值为 1.54 $\mu\text{g}/\text{g}$; 有机质含量平均值为 1.63%。

秋季采样站位的平均水深为 52 m, 水深分布状况同样呈现梯度加深的趋势, 可分为 3 个梯度, 30 m 以浅(33 号、39 号站点)、30~60 m(15 号、17 号、18 号、26 号、27 号、28 号、30 号站点)、60 m 以深(19 号、20 号、22 号、24 号站点)。平均底层水温度为 14.46 $^{\circ}\text{C}$;

平均底层水盐度为 32.18; 中值粒径平均值为 0.125 mm; 叶绿素 *a* 含量平均值为 0.26 $\mu\text{g}/\text{g}$; 脱镁叶绿酸含量平均值为 1.39 $\mu\text{g}/\text{g}$; 有机质含量平均值为 1.86%。

夏、秋季南黄海研究区域沉积物类型共有 5 种, 夏季各站位沉积物类型为 4 种, 分别为粉砂质砂、砂-粉砂-黏土、黏土质粉砂和砂质粉砂, 其中砂-粉砂-黏土为沉积物优势类型, 有 6 个站位沉积物属于这一类型。秋季各站位沉积物类型为 3 种, 分别为粉砂质砂、黏土质粉砂和砂, 其中粉砂质砂为沉积物优势类型, 有 10 个站位沉积物属于这一类型。

南黄海夏、秋季采样站位环境因子的主成分分析(PCA)如图 2 所示。PC1 和 PC2 轴累计可解释环境变异度的 66%, 沿 PC1 轴从左至右, 代表粉砂-黏土含量和底温的增加, 中值粒径、含水量、有机质含量、叶绿素 *a* 含量、脱镁叶绿酸含量、水深和底盐的降低; 沿 PC2 轴由上至下, 代表中值粒径、水深和底温的增加, 粉砂黏土含量、含水量、有机质、叶绿素 *a* 含量、脱镁叶绿酸含量和底盐的降低。PCA 反映了环境变量的时空差异, 在 PC1 轴上, 空间差异主要体现在水深、底温和底盐。在 PC2 轴上, 夏、秋季站位呈季节分离, 中值粒径、脱镁叶绿酸含量、叶绿素 *a* 含量和粉砂黏土含量与 PC2 轴高度相关, 是引起环境因子季节差异的主要因素。对夏、秋季各站位环境因子进行独立样本 *t* 检验, 结果显示南黄海沉积物的中值粒径和粉砂黏土含量季节差异极显著($p < 0.01$), 其表现为夏季中值粒径值较小而粉砂黏土含量较高。

3.2 小型底栖动物

3.2.1 小型底栖动物的类群组成、丰度和生物量

共鉴定出小型底栖动物类群 15 个(表 3), 包括自由生活海洋线虫(Nematoda)、底栖桡足类(Copepoda)、端足类(Amphipoda)、枝角类(Cladocera)、原足类(Tanaidacea)、轮虫类(Rotifera)、等足类(Isopoda)、双壳类(Bivalvia)、海螨类(Halacaroidea)、动吻类(Kinorhyncha)、涡虫类(Turbellaria)、多毛类(Polychaeta)、介形类(Ostracoda)、涟虫(Cumacea)和其他类。海洋线虫为最优势类群, 在两个航次中分别占小型底栖动物总丰度的 75.6% 和 84.6%。其次为底栖桡足类, 丰度占比分别为 13.1% 和 5.8%。

夏季小型底栖动物的平均丰度为 $(514.9 \pm 32.1)\text{ ind.}/(10\text{ cm}^2)$ 。如图 3a 所示, 22 号站位丰度最低, 为 275.2 $\text{ind.}/(10\text{ cm}^2)$; 33 号站位丰度最高, 为 923.5 $\text{ind.}/(10\text{ cm}^2)$ 。小型底栖动物丰度呈现出从近岸至外海随水深增加先增加后减小的趋势。对夏季不同水深的小型底栖动物丰度进行单因素方差分析,

表 2 南黄海海域夏、秋季调查站位环境因子

Table 2 Environmental factors at the sampling sites in the southern Yellow Sea in summer and autumn

站位	WD/m	SWT/°C	BWT/°C	BWS	Md/mm	YT/%	W/%	Chl <i>a</i> /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Pha/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	OM/%	底质类型
夏15	41	22.70	10.55	32.22	0.08	42.94	29.81	0.26	1.05	0.53	粉砂质砂
夏17	53	22.24	11.09	32.77	0.01	66.60	45.50	0.23	1.16	0.80	砂-粉砂-黏土
夏19	62	22.37	10.83	32.99	0.02	63.96	45.06	0.10	0.55	0.70	砂-粉砂-黏土
夏22	70	24.05	11.15	32.10	0.02	59.40	49.53	0.32	1.56	1.91	砂-粉砂-黏土
夏24	63	21.76	11.03	33.11	0.01	59.46	52.36	0.51	1.80	3.18	砂-粉砂-黏土
夏27	51	23.23	10.58	32.63	0.02	55.70	51.47	0.50	2.19	2.67	砂-粉砂-黏土
夏28	52	23.63	11.16	32.43	0.01	76.00	49.36	0.28	1.26	2.60	砂-粉砂-黏土
夏31	34	23.51	14.15	32.09	0.01	80.18	39.26	0.29	1.31	1.39	黏土质粉砂
夏33	29	27.16	15.76	32.00	0.03	60.90	35.09	0.47	2.27	1.12	砂质粉砂
夏43	16	26.03	22.84	31.37	0.01	91.77	51.43	0.72	2.22	1.38	黏土质粉砂
秋15	47	17.61	17.85	31.86	0.12	30.15	34.95	0.16	0.69	1.08	粉砂质砂
秋17	53	14.97	14.78	32.00	0.14	32.05	48.90	0.09	0.67	3.02	粉砂质砂
秋18	60	16.11	13.99	32.08	0.11	39.92	49.91	0.03	0.16	2.08	粉砂质砂
秋19	63	19.01	12.72	32.34	0.12	36.74	49.37	0.38	2.26	0.63	粉砂质砂
秋20	67	16.90	11.00	32.97	0.08	46.57	51.15	1.15	7.39	2.36	粉砂质砂
秋22	68	16.19	11.00	32.97	0.19	25.57	51.05	0.17	1.06	0.67	粉砂质砂
秋24	67	17.95	11.02	32.89	0.09	42.25	55.66	0.35	1.49	2.74	粉砂质砂
秋26	57	17.11	12.02	32.45	0.19	24.81	51.16	0.14	0.77	1.96	砂
秋27	53	17.00	12.42	32.23	0.19	23.00	58.93	0.19	0.83	4.65	砂
秋28	51	16.21	17.82	31.66	0.15	30.31	54.65	0.12	0.60	1.63	粉砂质砂
秋30	39	12.34	18.14	31.60	0.10	39.63	43.48	0.14	0.56	0.90	粉砂质砂
秋33	30	18.26	17.85	31.74	0.13	33.27	40.40	0.07	0.40	1.11	粉砂质砂
秋39	20	18.01	17.42	31.60	0.01	92.75	47.30	0.37	1.25	1.30	黏土质粉砂

注: WD. 水深(water depth); SWT. 表层水温度(surface water temperature); BWT. 底层水温度(bottom water temperature); BWS. 底层水盐度(bottom water salinity); Md. 中值粒径(sediment median diameter); YT. 粉砂黏土含量(silt-clay percentage); W. 含水量(water content); Chl *a*. 叶绿素*a*含量(chlorophyll *a* content); Pha. 脱镁叶绿酸含量(phaeophorbide content); OM. 有机质含量(organic matter content)。

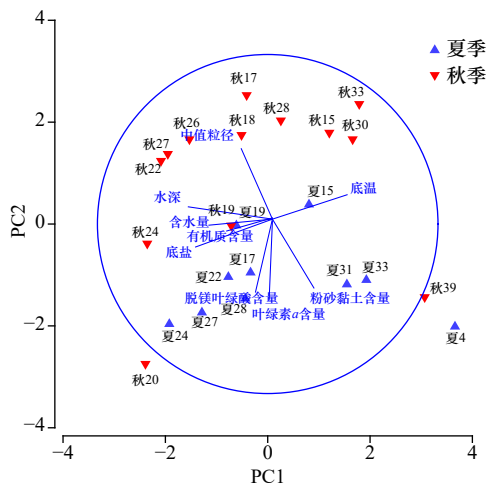


图 2 南黄海调查站位夏、秋季环境因子主成分分析
Fig. 2 Principal component analysis of environmental factors at the sampling sites in the southern Yellow Sea in summer and autumn

结果显示,夏季小型底栖动物丰度在不同水深间差异显著 ($p < 0.05$),水深大于 60 m 的水域线虫丰度显著降低 ($p < 0.05$)。

秋季小型底栖动物的平均丰度为 $(350.8 \pm 30.7) \text{ ind./}(10 \text{ cm}^2)$ 。如图 3b 所示,27 号站位丰度最低,为 $91.4 \text{ ind./}(10 \text{ cm}^2)$;30 号站位丰度最高,为 $1171.9 \text{ ind./}(10 \text{ cm}^2)$ 。秋季 30 号站位小型底栖动物丰度远高于该季节平均丰度,若将秋季 30 号站位去除,则丰度呈现随着水深增加逐渐减小的趋势。对秋季不同水深的小型底栖动物丰度进行单因素方差分析,结果显示,秋季小型底栖动物丰度在不同水深间差异不显著 ($p > 0.05$)。

对夏、秋季小型底栖动物丰度进行独立样本 *t* 检验,结果显示小型底栖动物丰度无显著季节差异 ($p > 0.05$)。将秋季 30 号站位去除后再次进行独立样本

表 3 南黄海海域夏、秋季小型底栖动物各类群丰度和生物量

Table 3 Abundance and biomass of each meiofaunal group in the southern Yellow Sea in summer and autumn

类群	航次	丰度/ (ind.·(10 cm ²) ⁻¹)	丰度占 比/%	生物量/ (μg·(10 cm ²) ⁻¹)	生物量 占比/%
海洋线虫 Nematoda	夏	389.2±18.4	75.6	155.7±7.3	23.9
	秋	296.8±28.1	84.6	118.7±11.3	20.1
桡足类 Copepoda	夏	67.2±16.1	13.1	125±29.9	19.2
	秋	20.4±3.3	5.8	38±6.1	6.4
轮虫类 Rotifera	夏	34.7±1.7	6.7	121.4±6.1	18.6
	秋	10.7±0.5	3.1	37.5±1.8	6.4
枝角类 Cladocera	夏	4.5±2	0.9	115.9±53.2	17.8
	秋	11.6±0.5	3.3	301.9±13.7	51.2
涡虫类 Turbellaria	夏	5.7±1.2	1.1	19.9±4.1	3.1
	秋	3.3±0.6	0.9	11.4±2	1.9
多毛类 Polychaeta	夏	1.9±0.8	0.4	26.7±11.4	4.1
	秋	3.6±1.6	1.0	50.6±22.7	8.6
海蛭类 Halacaroida	夏	3.4±0.6	0.7	5.2±0.9	0.8
	秋	0.1±0.2	0	0.2±0.3	0
动物类 Kinorhyncha	夏	2.7±1.1	0.5	5.4±2.1	0.8
	秋	0.9±0.1	0.3	1.7±0.3	0.3
双壳类 Bivalvia	夏	2.3±0.9	0.4	9.6±3.9	1.5
	秋	0.9±0.4	0.3	3.9±1.8	0.7
介形类 Ostracoda	夏	1.9±1.2	0.4	48.6±31.6	7.5
	秋	0.3±0.1	0.1	8.1±1.7	1.4
等足类 Isopoda	夏	1.0±0.1	0.2	14.6±1.2	2.2
	秋	0.5±0.1	0.1	7±1.7	1.2
涟虫 Cumacea	夏	0.2±0.2	0	0.8±0.7	0.1
	秋	0	0	0	0
端足类 Amphipoda	夏	0.2±0.3	0	2.8±4.9	0.4
	秋	0.1±0.1	0	1.7±1.7	0.3
原足类 Tanaidacea	夏	0	0	0	0
	秋	0.3±0.4	0.1	4.1±5.6	0.7
其他	夏	0.1±0.1	0	0.2±0.4	0
	秋	1.2±0.6	0.3	4.3±1.9	0.7
合计	夏	514.9±32.1	100.0	651.7±98.0	100.0
	秋	350.8±30.7	100.0	589.2±37.1	100.0

t 检验, 结果显示小型底栖动物丰度存在极显著季节差异 ($p < 0.01$)。

夏季小型底栖动物的平均生物量为 (651.7±98.0) μg/(10 cm²), 最高值出现在 28 号站位, 为 1 050.8 μg/(10 cm²)。秋季小型底栖动物的平均生物量为 (589.2±37.1) μg/(10 cm²), 最高值出现在 30 号站

位, 为 1 261.9 μg/(10 cm²)。对夏秋季小型底栖动物生物量进行独立样本 *t* 检验, 结果显示小型底栖动物生物量无显著季节差异 ($p > 0.05$)。

3.2.2 小型底栖动物群落结构

对南黄海夏、秋两季小型底栖动物群落结构进行非度量多维标度 (nMDS) 分析, 结果如图 4 所示。夏、秋季站位各自聚集, 具有季节区分性。PERMANOVA 检验结果显示, 小型底栖动物群落结构在季节间存在极显著差异 ($p < 0.01$)。引起差异的主要类群为海洋线虫 ($p < 0.05$) 和桡足类 ($p < 0.01$), 枝角类、轮虫类、海蛭类和其他类群也存在显著的季节差异, 但同质性检验显示, 该差异可能是由组内分布不均匀引起。

对夏、秋两季不同水深的小型底栖动物群落结构分别进行非度量多维标度 (nMDS) 分析, 结果如图 5、图 6 所示。在夏季站位中, 水深不大于 30 m 和水深为 30~60 m 的站位较为聚集, 水深大于 60 m 的站位则较为分散。秋季站位不同水深则没有显著聚集。PERMANOVA 检验结果显示, 夏季小型底栖动物群落结构在各水深梯度之间存在极显著差异 ($p < 0.01$), 差异表现在水深大于 60 m 与其他水深梯度之间 ($p < 0.01$), 秋季小型底栖动物群落结构在各水深梯度之间无显著差异 ($p > 0.05$)。

3.2.3 小型底栖动物的垂直分布

南黄海海域夏季和秋季调查站位小型底栖动物垂直分布如图 7a、图 7b 所示。夏季小型底栖动物分布在沉积物 0~2 cm、2~5 cm 和 5~8 cm 的比例分别为 53.3%、26.1% 和 20.6%。秋季小型底栖动物分布在沉积物 0~2 cm、2~5 cm 和 5~8 cm 的比例分别为 49.8%、29.9% 和 20.3%。夏、秋季接近一半及以上的小型底栖动物分布于沉积物表层 0~2 cm。对小型底栖动物垂直分布进行独立样本 *t* 检验, 结果显示夏季和秋季小型底栖动物垂直分布无显著差异 ($p > 0.05$), 表明小型底栖动物没有表现出显著的垂直迁移。

3.2.4 线虫和桡足类丰度比值 (N/C 比值)

南黄海夏、秋季海洋线虫和桡足类丰度之比 (N/C 比值) 见表 4。其中夏季 N/C 比值变化较小, 平均为 6.7, 24 号站位 N/C 比值最低, 为 1.3; 43 号站位 N/C 比值最高, 为 15.4。秋季 N/C 比值变化较大, 平均为 19.07, 其中 39 号站位 N/C 比值最低, 为 6.2; 22 号站位 N/C 比值最高, 为 52.8。

3.3 小型底栖动物与环境因子的关系

BIOENV 分析结果显示 (表 5), 沉积物中值粒径 (Md)、含水量 (W) 这两个环境变量组合能够最好地解释小型底栖动物群落结构, 其相关系数为 0.424; 其

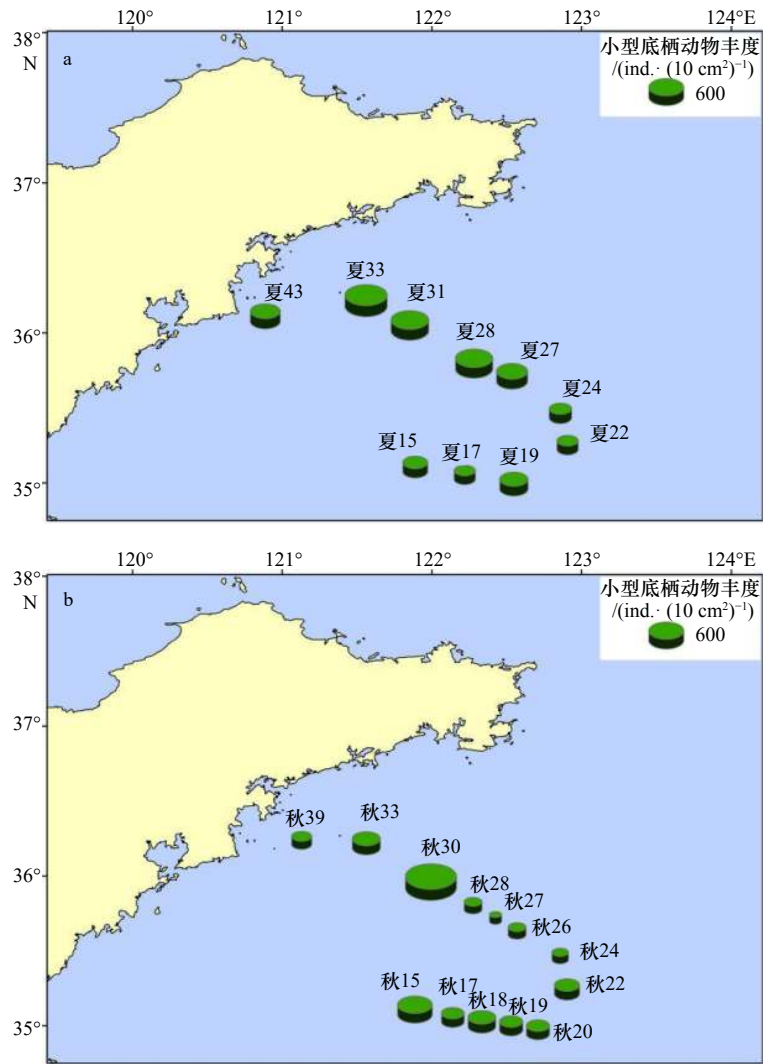


图 3 南黄海夏季(a)、秋季(b)小型底栖动物丰度分布

Fig. 3 Distribution of meiofaunal abundance in the southern Yellow Sea in summer (a) and autumn (b)

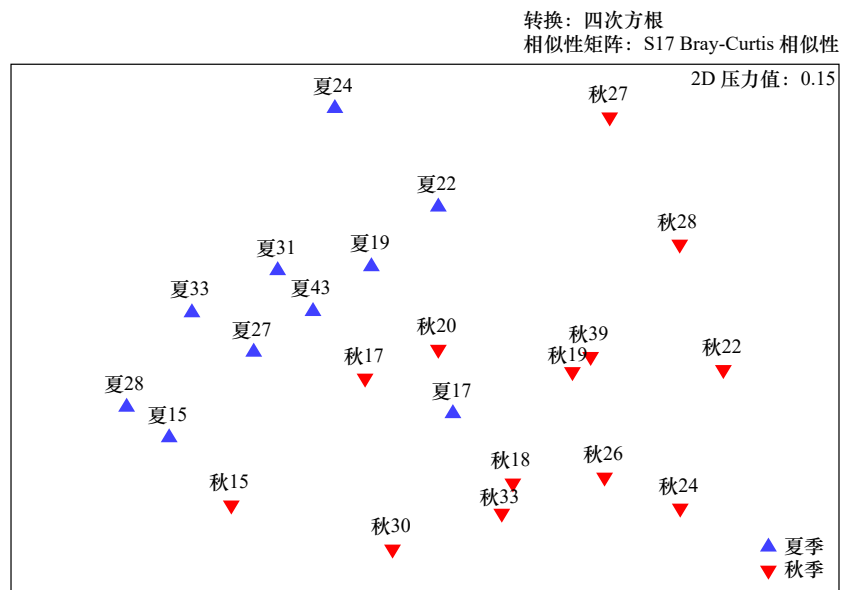


图 4 南黄海海域夏、秋季小型底栖动物群落结构非度量多维标度

Fig. 4 Non-metric multidimensional scaling plot for meiofauna community structure in the southern Yellow Sea in summer and autumn

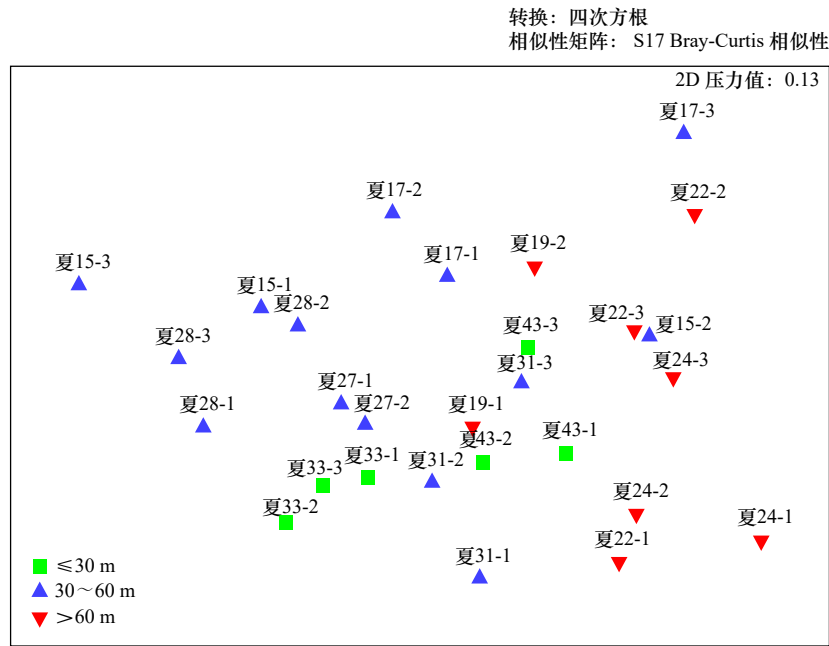


图 5 南黄海海域夏季不同水深的小型底栖动物群落结构的非度量多维标度

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling plot for different depth meiofauna community structure in the southern Yellow Sea in summer

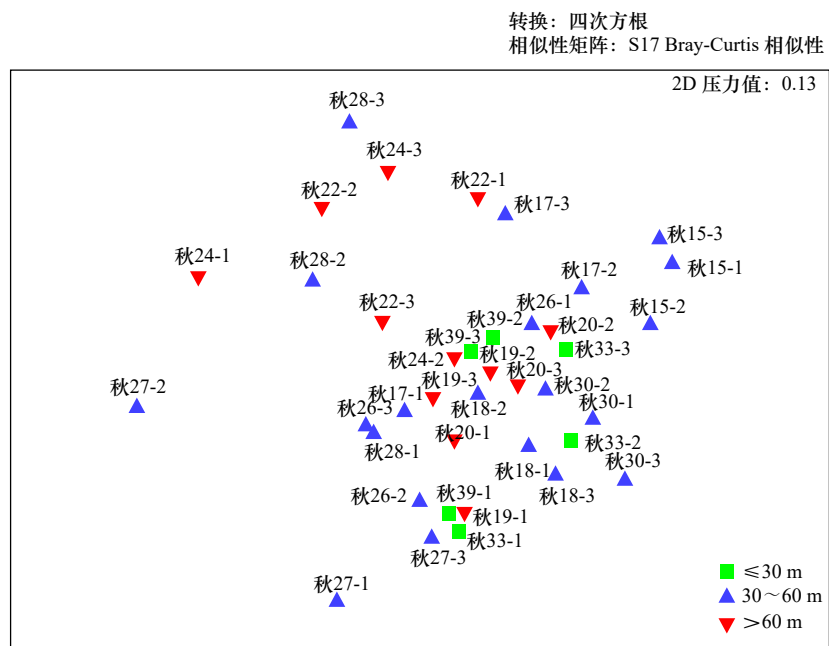


图 6 南黄海海域秋季不同水深的小型底栖动物群落结构的非度量多维标度

Fig. 6 Non-metric multidimensional scaling plot for different depth meiofauna community structure in the southern Yellow Sea in autumn

次为中值粒径(Md)、含水量(W)和有机质含量(OM)组合,其相关系数为 0.419。对群落结构影响最大的单个环境因子为沉积物中值粒径,相关系数为 0.286。Pearson 相关性分析显示(表 6),小型底栖动物丰度与水深呈显著负相关($p<0.05$),与沉积物含水量呈极显著负相关($p<0.01$);生物量与沉积物含水量呈显著负相关($p<0.05$)。去除秋季 30 号站位进行 Pearson 相关性分析显示,小型底栖动物丰度与粉砂黏土含量呈显

著正相关($p<0.05$),与中值粒径呈显著负相关($p<0.05$),与沉积物含水量呈极显著负相关($p<0.01$);生物量与沉积物含水量呈极显著负相关($p<0.01$)。

4 讨论

4.1 小型底栖动物丰度、群落结构的季节差异及其主要影响因素

已有研究报道表明,季节是造成小型底栖动物差

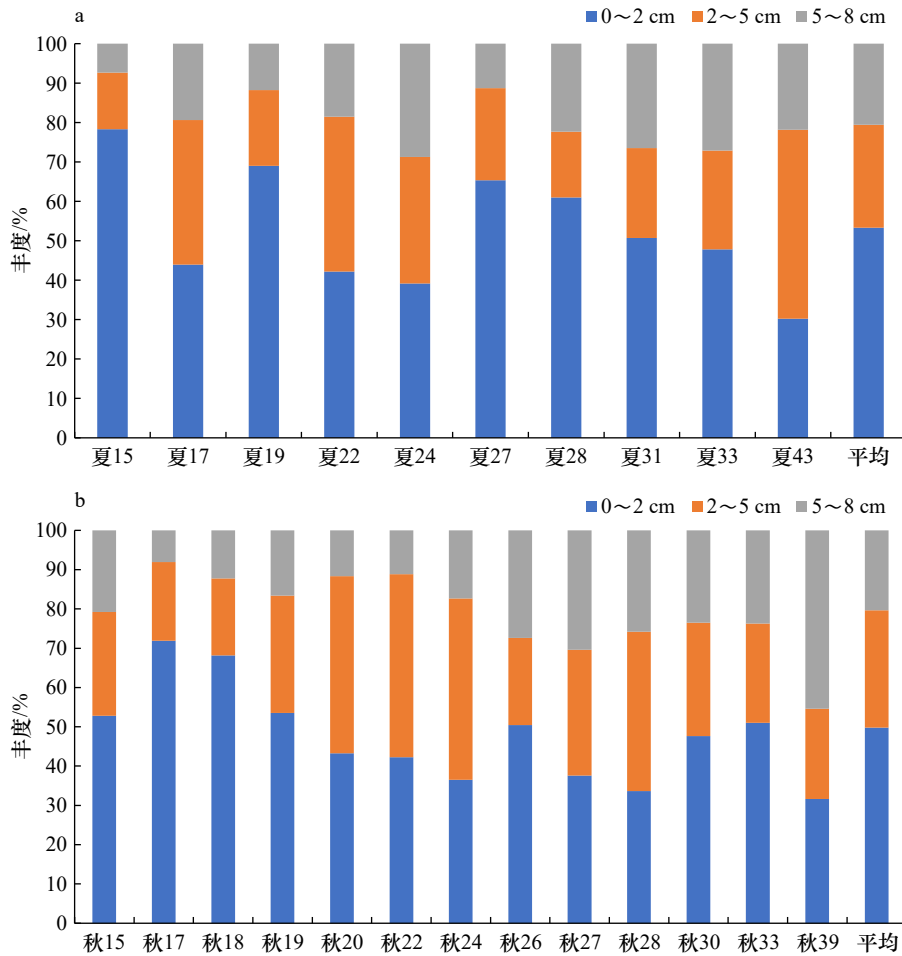


图 7 南黄海夏(a)、秋季(b)调查站位小型底栖动物丰度在沉积物中的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of meiofaunal abundance in sediment in the southern Yellow Sea in summer (a) and autumn (b)

表 4 南黄海海域海洋线虫和桡足类丰度之比

Table 4 Ratios of abundance of nematodes to copepods in the southern Yellow Sea

季节	站位	海洋线虫N	桡足类C	N/C比值
夏季	15	246.4	80.3	3.1
	17	209.5	37.4	5.6
	19	338.5	59.8	5.7
	22	200.4	45.4	4.4
	24	142.4	106.0	1.3
	27	441.5	50.0	8.8
	28	559.4	108.1	5.2
	31	597.3	74.7	8.0
	33	742.7	81.3	9.1
	43	404.4	26.3	15.4
秋季	15	462.0	60.6	7.6
	17	251.4	11.1	22.6
	18	322.1	25.2	12.8
	19	217.1	17.2	12.6
	20	225.7	24.7	9.1
	22	320.1	6.1	52.8
	24	130.8	10.1	13.0
	26	122.7	13.6	9.0
	27	72.2	5.0	14.3
	28	166.6	3.5	47.1
30	1 080.0	44.9	24.0	
33	346.9	20.7	16.8	
39	140.9	22.7	6.2	

表 5 南黄海夏、秋季小型底栖动物与环境因子的 BIOENV 分析

Table 5 Results of BIOENV analysis between meiofaunal assemblage and environmental factors in the southern Yellow Sea in summer and autumn

环境因子变量数	相关系数	环境因子变量组合
2	0.424	Md, W
3	0.419	Md, W, OM
4	0.378	YT, Md, W, OM
3	0.365	YT, Md, W
4	0.346	Md, W, OM, BWS
3	0.342	Md, W, BWS
5	0.331	YT, Md, W, OM, BWS
4	0.329	Md, W, OM, BWT
4	0.323	Md, W, OM, WD
3	0.320	YT, W, OM

注: WD. 水深(water depth); BWT. 底层水温度(bottom water temperature); BWS. 底层水盐度(bottom water salinity); Md. 中值粒径(sediment median diameter); YT. 粉砂黏土含量(silt-clay percentage); W. 含水量(water content); Chl *a*. 叶绿素 *a* 含量(chlorophyll *a* content); Pha. 脱镁叶绿酸含量(phaeophorbide content); OM. 有机质含量(organic matter content)。

异的主要原因^[37-39]。本研究中南黄海夏季小型底栖动物的平均丰度高于秋季,但不构成显著的季节差异。由于秋季 30 号站位小型底栖动物丰度大于 1 000 ind./ (10 cm²), 远高于该季节平均丰度和其他站位。若将秋季 30 号站位这一异常站位去除后,小型底栖动物丰度呈极显著季节差异($p < 0.01$),夏季的丰度高于秋季。Pearson 相关性分析显示,去除秋季 30 号站位后小型底栖动

物丰度与粉砂黏土含量呈显著正相关,与中值粒径呈显著负相关。对夏、秋季各站位环境因子进行独立样本 *t* 检验,结果显示南黄海的中值粒径和粉砂黏土含量呈极显著的季节差异($p < 0.01$)。与夏季相比,秋季站位的沉积物粒径相对于夏季的较高。研究表明,南黄海表层沉积物粒度分布的季节变化主要受环流系统的影响^[40-42]。卢健和李安春^[40]曾报道,南黄海沿岸水深较浅的海域(水深小于 30 m),主要受近岸波浪和潮流的影响,秋季水动力增强,沉积物的粒度组成中粗粒成分增加。由春季至秋季,南黄海中西部区域由主要受黄海冷水团控制转变为主要受黄海沿岸流的影响^[40-41],同时从北黄海输送到南黄海的黄河输沙量在秋季达到最大值^[42]。由于水动力增强,表层沉积物中砂和粉砂含量有所增加,而黏土含量降低,中值粒径相对变粗^[40-42]。

南黄海夏、秋两季小型底栖动物群落结构存在极显著季节差异。研究表明,小型底栖动物的分布受到多种因素的影响,如水深、沉积物粒度、叶绿素 *a* 含量、有机质含量等^[43-44]。结合 BIOENV 分析,中值粒径、含水量和有机质含量是较好解释小型底栖动物群落结构的环境因子组合。沉积物中值粒径的大小决定了小型底栖动物生存空隙的大小以及可利用的有机碎屑量,细砂沉积物通常含有较高含量的营养物质,进而可能促进优势类群海洋线虫丰度及类群多样性增加^[45-47]。本研究南黄海夏季沉积物砂质较细,可能更利于第一优势类群线虫的生存。同时,夏季叶绿素 *a* 含量较高,能够为小型底栖动物提供充足的食物来源,导致小型底栖动物群落结构在季节间产生差异。

夏季小型底栖动物丰度和群落结构在不同水深之间存在显著差异,差异主要表现在水深大于 60 m

表 6 南黄海夏、秋季小型底栖动物丰度、生物量与环境因子的相关分析结果

Table 6 Results of correlation analysis between abundance and biomass of meiofauna and environmental factors in the southern Yellow Sea in summer and autumn

	WD/m	BWT/°C	BWS	Md/mm	YT/%	W/%	Chl <i>a</i> /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Pha/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	OM/%
MA	-0.417*	0.313	-0.297	-0.332	0.266	-0.531**	-0.013	-0.06	-0.339
MB	-0.345	0.301	-0.336	-0.257	0.195	-0.523*	-0.074	-0.113	-0.309
MA'	-0.417	0.187	-0.162	-0.482*	0.428*	-0.590**	0.102	0.031	-0.294
MB'	-0.314	0.197	-0.237	-0.336	0.286	-0.539**	-0.001	-0.054	-0.257

注: **表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关; WD. 水深(water depth); BWT. 底层水温度(bottom water temperature); BWS. 底层水盐度(bottom water salinity); Md. 中值粒径(sediment median diameter); YT. 粉砂黏土含量(silt-clay content); W. 含水量(water content); Chl *a*. 叶绿素 *a* 含量(chlorophyll *a* content); Pha. 脱镁叶绿酸含量(phaeophorbide content); OM. 有机质含量(organic matter content); MA. 小型底栖动物丰度(meiofauna abundance); MB. 小型底栖动物生物量(meiofauna biomass); MA'. 去除秋季 30 号站位的小型底栖动物丰度(meiofauna abundance without Site 30 in autumn); MB'. 去除秋季 30 号站位的小型底栖动物生物量(meiofauna biomass without Site 30 in autumn)。

与其他水深梯度之间,而秋季小型底栖动物丰度和群落结构在不同水深之间则无显著差异。夏季小型底栖动物在不同水深梯度间的差异可能是受到了黄海冷水团影响。黄海冷水团在夏初处于鼎盛期,随着远离近岸,底温逐渐降低,底盐逐渐增加,冷水团中央为低于 10°C 的冷水^[5]。根据水深、温度、盐度及关于黄海冷水团的水文资料^[4-5,48]可知,本研究中夏季60 m以深的站位靠近中央冷水团,受到中央冷水团的影响,小型底栖动物丰度和群落结构在不同水深之间存在显著差异。研究表明,黄海冷水团中心站位小型底栖动物数量明显较低,推测影响小型底栖动物分布的主要因素是冷水团沉积物有机质含量^[30-31]。黄海冬季冷水沉降、黄海暖流的加入和黄海表面夏季环流形成的漩涡,形成了冷水团区域独特的沉积环境^[5,48-49],而不同的生境类型决定了小型底栖动物类群的分布特点^[31,50-51]。

4.2 南黄海小型底栖动物丰度的长周期变化特征及影响因素

本研究与历史资料的对比见表7。本研究中,海洋线虫和桡足类分别为第一和第二优势类群,这与历史研究结果相同^[2,26-32],海洋线虫一直为南黄海海域小型底栖动物的最优势类群。

本研究中,两个航次小型底栖动物的总平均丰度与2007年冬季小型底栖动物平均丰度相似^[2],但低于其他年份的研究^[26-32],丰度由2000年6月(809.3 ± 407.4) ind./(10 cm^2)下降为2020年8月(514.9 ± 32.1) ind./(10 cm^2)和11月(350.8 ± 30.7) ind./(10 cm^2),小型底栖动物的类群数量也低于之前的研究^[2,26-32],这可能

与各研究采样的时间、站位的分布不同等因素有关。本研究沉积物中值粒径相比于其他研究较高,夏季站位沉积物类型主要为砂-粉砂-黏土,秋季站位沉积物类型主要为粉砂质砂。与南黄海小型底栖动物历史研究相比较,南黄海海域沉积物中值粒径呈现波动并略有增大^[2,26-32],说明沉积物颗粒大小呈现一定的增大趋势。沉积物底质的变化会影响沉积物中有机质的含量,相关研究表明,沉积物中有机质的含量一般随着沉积物颗粒的粗化而减小^[52]。小型底栖动物食物来源减少,导致了小型底栖动物丰度下降,但南黄海海域沉积物底质变化对小型底栖动物造成的其他影响尚需进一步的数据支持及更深入的研究。

叶绿素 a 含量可代表研究海域的初级生产力。初级生产力是最基本的生物生产力,是海域生产有机物的基础^[52]。沉积物中叶绿素 a 含量是小型底栖动物的重要食物来源并能反映底质环境状况的好坏,脱镁叶绿酸(Pha)含量的高低则反映了沉积物中已死亡及沉降的藻类多寡^[30,38]。周红等^[53]曾报道,食物的缺乏被看作是小型底栖动物丰度减小最重要的原因。与南黄海海域其他研究相比,本研究中,沉积物叶绿素 a 含量平均值低于其他研究,沉积物有机质含量平均值与张艳等^[29]、王家栋等^[30]的结果相近,但低于其他人的研究结果^[26-28,31-32]。因此,沉积物叶绿素 a 含量及有机质含量的减小是引起南黄海小型底栖动物丰度变化的重要因素。

4.3 N/C 比值在沉积环境有机污染监测上的应用

Raffaelli和Mason^[54]根据底栖桡足类对有机质污染比较敏感,而海洋线虫对有机质污染耐受力较强的

表7 南黄海小型底栖动物历史数据对比

Table 7 Comparison of historical data of meiofauna in the southern Yellow Sea

采样时间	小型底栖动物类群数	小型底栖动物丰度/(ind.·(10 cm ²) ⁻¹)	海洋线虫占比/%	桡足类占比/%	C/N比值	参考文献
2000年6月	18	809.3±407.4	73.8	18.7	3.9	文献[26]
2003年6月	18	1 584.0±686.0	88.7	5.8	16.2	文献[28]
2004年1月	20	1 186.1±486.1	89.77	4.2	21.4	文献[29]
2007年1-2月	15	348.8	77.6	13.3	13.1	文献[2]
2007年6月	18	1 529.0±1 121.0	88.0	6.8	14.8	文献[30]
2011年6月	20	1 194.0±873.0	89.7	5.5	16.3	文献[31]
2013年6月	15	900.8±365.6	84.2	4.2	20.9	文献[32]
2013年11月	13	758.4±403.6	94.0	2.4	39.6	文献[32]
2020年8月	14	514.9±32.1	75.6	13.1	5.8	本研究
2020年11月	14	350.8±30.7	84.6	5.8	14.5	本研究

特点,提出利用海洋线虫和桡足类丰度比值(N/C比值)来评估某一海域的有机质污染程度这一方法^[55]。

根据海洋线虫和底栖桡足类对适宜环境的要求和对有机质污染的耐受力不同,已有很多研究将海洋线虫(N)与桡足类(C)的丰度之比作为指示海洋环境有机质污染程度的指标^[43-44,55]。这一比值因使用简单,无需复杂的分类鉴定,因此广泛应用于海洋环境监测中^[55]。通常,N/C比值小于50,表示海域正常;50~100,表示海域富营养化;大于100,表示海域为有机质污染区。根据这一标准可知,2000-2020年南黄海海域未受到有机质污染(表7)。表4显示,本研究夏季所有站位和秋季站位(除22号站位)N/C比值均小于50,显示海域未受到污染。在自然环境中,小型底栖主要类群(线虫和桡足类)的丰度与沉积物的粒径、有机质含量、食物来源、季节、温度和自身繁殖等因素有关^[17],采用N/C比值对环境状况进行评价过于片面^[55]。Warwick^[56]根据沉积物类型和小型底栖生物的营养动力学提出了更为细致的划分,即泥质沉积物中N/C比值大于40,砂质沉积物中N/C比值大于10,即表明环境受到有机质污染。本研究夏季站位底质类型大多为砂-粉砂-黏土,N/C比值平均为6.7;秋季站位底质类型大多为粉砂质砂,接近于砂质沉积物,N/C比值平均为19.07,根据Warwick^[56]的标准判断,该海域夏季未受到有机污染,秋季受到一定程度的有机污染。

应用大型底栖动物对同一区域进行环境评价,结果显示南黄海夏季和秋季环境评价总体处于良好状态,秋季的环境质量较优于夏季^[57],这与利用N/C比值进行评价结果不一致。由于本文只测定了沉积物有机质含量,没有对其他有机污染物进行测定,无法对南黄海海域环境质量进行准确的评价。在评价生

态环境时,应从多个角度进行考量,对于应用N/C比值评价环境质量还需要进一步的研究。

5 结论

(1)2020年夏季和秋季对南黄海的调查研究共发现小型底栖动物类群15个,包括自由生活海洋线虫、底栖桡足类、端足类、枝角类、原足类、轮虫类、等足类、双壳类、海螵类、动吻类、涡虫类、多毛类、介形类、涟虫和其他类。自由生活海洋线虫为小型底栖动物的最优势类群。

(2)在季节分布上,南黄海夏、秋季小型底栖动物的丰度和群落结构存在显著差异,其中夏季小型底栖动物的平均丰度为 (514.9 ± 32.1) ind./ (10 cm^2) ,显著高于秋季。沉积物粒径是影响小型底栖动物丰度和群落结构季节差异的重要因素。其次,水动力通过选择性沉积不同粒径的沉积物,对小型底栖动物的季节分布也产生了一定的影响。

(3)在空间分布上,夏季小型底栖动物的丰度和群落结构在不同水深梯度间存在显著差异,其中丰度呈现出从近岸至外海先增加后减小的趋势。黄海冷水团可能是影响其分布的重要因素。秋季小型底栖动物的丰度和群落结构在不同水深梯度间则无显著差异。

(4)与南黄海以往研究相比,本研究小型底栖动物的丰度较低。调查时间、站位分布以及沉积物叶绿素含量、有机质含量的不同可能是主要原因。海洋线虫桡足类比值(N/C比值)结果显示,该海域夏季未受到有机污染,而秋季受到一定程度的有机污染。这与相同海域的大型底栖动物评价结果不一致,因此应用N/C比值来评价海洋环境质量还需进一步探讨。

参考文献:

- [1] 李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 676-684.
Li Xinzheng. An overview of studies on marine macrobenthic biodiversity from Chinese waters: principally from the Yellow Sea[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(6): 676-684.
- [2] 范士亮, 王宗兴, 徐宗军, 等. 南黄海冬季小型底栖生物分布特征[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 185-188.
Fan Shiliang, Wang Zongxing, Xu Zongjun, et al. Meiofauna distribution in southern Yellow Sea in winter[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(2): 185-188.
- [3] 翁学传, 张以恩, 王从敏, 等. 黄海冷水团的变化特征[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 368-379.
Weng Xuechuan, Zhang Yiken, Wang Congmin, et al. The variational characteristics of the Huanghai Sea (Yellow Sea) cold water mass[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 368-379.
- [4] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(S1): 887-896.
Ren Huijun, Zhan Jiemin. A numerical study on the seasonal variability of the Yellow Sea cold water mass and the related dynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(S1): 887-896.
- [5] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26-34.

- Yu Fei, Zhang Zhixin, Diao Xinyuan, et al. Analysis of evolution of the Huanghai Sea cold water mass and its relationship with adjacent water masses[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(5): 26–34.
- [6] Yang Yang, Li Kuiping, Du Jianting, et al. Revealing the subsurface Yellow Sea cold water mass from satellite data associated with typhoon Muifa[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 7135–7152.
- [7] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(S2): 83–89.
- Cai Lizhe. Progress on marine benthic ecology and biodiversity[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45(S2): 83–89.
- [8] 张志南, 周红, 华尔, 等. 中国小型底栖生物研究的40年——进展与展望[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 657–671.
- Zhang Zhinan, Zhou Hong, Hua Er, et al. Meiofauna study for the forty years in China—progress and prospect[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(4): 657–671.
- [9] Zhao Meihong, Liu Qinghe, Zhang Dongsheng, et al. Deep-sea meiofauna assemblages with special reference to marine nematodes in the Caiwei Guyot and a Polymetallic Nodule Field in the Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111564.
- [10] Ptatscheck C, Gehner S, Traunspurger W. Should we redefine meiofaunal organisms? The impact of mesh size on collection of meiofauna with special regard to nematodes[J]. *Aquatic Ecology*, 2020, 54(4): 1135–1143.
- [11] 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(自然科学版), 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.
- [12] Schratzberger M, Ingels J. Meiofauna matters: the roles of meiofauna in benthic ecosystems[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, 502: 12–25.
- [13] van der Heijden L H, Niquil N, Haraldsson M, et al. Quantitative food web modeling unravels the importance of the microphytobenthos-meiofauna pathway for a high trophic transfer by meiofauna in soft-bottom intertidal food webs[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 430: 109129.
- [14] Wang Fang, Lin Dunmei, Li Wei, et al. Meiofauna promotes litter decomposition in stream ecosystems depending on leaf species[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(17): 9257–9270.
- [15] Fonseca V G, Sinniger F, Gaspar J M, et al. Revealing higher than expected meiofaunal diversity in Antarctic sediments: a metabarcoding approach[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6094.
- [16] Schratzberger M, Somerfield P J. Effects of widespread human disturbances in the marine environment suggest a new agenda for meiofauna research is needed[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138435.
- [17] 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[J]. 海洋科学, 2002, 26(12): 27–31.
- Guo Yuqing, Zhang Zhinan, Mu Fanghong. The study on the ratio of abundance of nematodes to that of copepods in the Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(12): 27–31.
- [18] Janakiraman A, Naveed M S, Asrar Sheriff M, et al. Ecological restoration assessment of Adyar creek and estuary using meiofaunal communities as ecological indicators for aquatic pollution[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2017, 9: 135–144.
- [19] 刘清河, 马林, 李新正. 东海北部小型底栖动物群落对径流及黑潮暖流入侵的响应[J]. 海洋学报, 2020, 42(2): 52–64.
- Liu Qinghe, Ma Lin, Li Xinzheng. The communities of meiofauna in the northern East China Sea and their responses to runoff and the intrusion of Kuroshio Current[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(2): 52–64.
- [20] Danovaro R, Fraschetti S. Meiofaunal vertical zonation on hard-bottoms: comparison with soft-bottom meiofauna[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 230: 159–169.
- [21] Lins L, Leliaert F, Riehl T, et al. Evaluating environmental drivers of spatial variability in free-living nematode assemblages along the Portuguese margin[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(3): 651–669.
- [22] Kim H G, Song S J, Bae H, et al. Natural and anthropogenic impacts on long-term meiobenthic communities in two contrasting nearshore habitats[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105200.
- [23] Sevastou K, Lampadariou N, Mouriki D, et al. Meiofaunal distribution in the Levantine Basin (Eastern Mediterranean): spatial variability at different scales, depths and distance-to-coast[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2020, 171: 104635.
- [24] 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(自然科学版), 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.
- [25] 于青, 周红, 张凯, 等. 北黄海冷水团对小型底栖动物时空分布的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 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 meiofauna[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(12): 60–67.
- [26] 张志南, 慕芳红, 于子山, 等. 南黄海鲷鱼产卵场小型底栖生物的丰度和生物量[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(2): 251–258.
- Zhang Zhinan, Mu Fanghong, Yu Zishan, et al. Abundance and biomass of the benthic meiofauna in the spawning ground of anchovy (*Engraulis japonicus*) in the southern Yellow Sea, China[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(2): 251–258.
- [27] 黄勇. 南黄海小型底栖生物生态学和海洋线虫分类学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- Huang Yong. Studies on ecology of meiofauna and systematics of free-living marine nematodes in the southern Yellow Sea, China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.

- [28] Liu Xiaoshou, Zhang Zhinan, Huang Yong. Abundance and biomass of meiobenthos in the spawning ground of anchovy (*Engraulis japonicus*) in the southern Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(3): 94–104.
- [29] 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.
- [30] 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动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.
- [31] 刘清河, 刘晓收, 许嫚, 等. 夏季南黄海冷水团及其周边海域小型底栖动物类群组成与分布[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 8062–8074.
Liu Qinghe, Liu Xiaoshou, Xu Man, et al. Meiofaunal assemblage and distribution in the southern Yellow Sea cold water mass and its adjacent waters in summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 8062–8074.
- [32] 许嫚, 刘晓收, 刘清河, 等. 夏秋季南黄海冷水团小型底栖动物类群组成与分布[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 616–624.
Xu Man, Liu Xiaoshou, Liu Qinghe, et al. Assemblage composition and distribution of meiofauna in the southern Yellow Sea cold water mass during summer and autumn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 616–624.
- [33] Xu Man, Liu Qinghe, Zhang Zhinan, et al. Response of free-living marine nematodes to the southern Yellow Sea cold water mass[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 105(1): 58–64.
- [34] 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.
- [35] 张志南, 周红, 于子山, 等. 胶州湾小型底栖生物的丰度和生物量[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 139–147.
Zhang Zhinan, Zhou Hong, Yu Zishan, et al. Abundance and biomass of the benthic meiofauna in the northern soft-bottom of the Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 139–147.
- [36] 赵美红, 刘晓收. 山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物类群组成与分布格局[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(5): 100–110.
Zhao Meihong, Liu Xiaoshou. Taxa composition and distribution patterns of meiofauna in the intertidal zones of Shandong Peninsula[J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science)*, 2021, 34(5): 100–110.
- [37] Baia E, Venekey V. Distribution patterns of meiofauna on a tropical macrotidal sandy beach, with special focus on nematodes (Caixa d'Água, Amazon Coast, Brazil)[J]. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2019, 67: e19230.
- [38] 慕芳红, 张婷, 李佳, 等. 厦门大德记沙滩小型底栖动物的时空分布及影响因素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(9): 34–45.
Mu Fanghong, Zhang Ting, Li Jia, et al. Spatiotemporal distribution of meiofauna and its influencing factors at the Dadeji Beach, Xiamen[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 34–45.
- [39] 臧瑜, 孙燕, 杨丽莉, 等. 大连金沙湾小型底栖生物时空分布特征及影响因素[J]. *海洋科学*, 2020, 44(2): 76–89.
Zang Yu, Sun Yan, Yang Lili, et al. Spatiotemporal distribution pattern of meiofauna and its influencing factors in the Jinshatan Beach, Dalian[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(2): 76–89.
- [40] 卢健, 李安春. 南黄海表层沉积物粒度特征季节变化及其影响因素[J]. *海洋科学*, 2015, 39(3): 48–58.
Lu Jian, Li Anchun. Seasonal variations and influencing factors of the grain size characteristics of surface sediments in the South Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(3): 48–58.
- [41] Lu Jian, Li Anchun, Huang Peng, et al. Mineral distributions in surface sediments of the western South Yellow Sea: implications for sediment provenance and transportation[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(2): 510–524.
- [42] Lu Jing, Qiao Fangli, Wang X H, et al. A numerical study of transport dynamics and seasonal variability of the Yellow River sediment in the Bohai and Yellow seas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(1): 39–51.
- [43] 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.
- [44] 杨纯懿, 张龙辉, 杜永芬, 等. 双台子河口砂质潮间带小型底栖动物的群落结构及其对环境的响应[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 572–582.
Yang Chunyi, Zhang Longhui, Du Yongfen, et al. Meiofaunal community in sandy intertidal zone and its environmental response in Shuangtaizi Estuary, NE China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 572–582.
- [45] Ingels J, dos Santos G, Hicks N, et al. Short-term CO₂ exposure and temperature rise effects on metazoan meiofauna and free-living nematodes in sandy and muddy sediments: results from a flume experiment[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, 502: 211–226.
- [46] 贾素素, 乔春艳, 黄勇. 南海东北部夏季小型底栖生物研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 564–571.
Jia Susu, Qiao Chunyan, Huang Yong. Study on summer meiofauna in the northeastern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 564–571.
- [47] 宋慧丽, 慕芳红, 孙燕, 等. 冬季大连砂质潮间带自由生活海洋线虫群落结构及多样性的比较[J]. *海洋学报*, 2021, 43(8): 139–151.

- Song Huili, Mu Fanghong, Sun Yan, et al. Comparison of community structure and diversity of free-living marine nematodes in the sandy intertidal zone of Dalian in winter[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(8): 139–151.
- [48] Li Wenjian, Wang Zhenyan, Huang Haijun. Relationship between the southern Yellow Sea cold water mass and the distribution and composition of suspended particulate matter in summer and autumn seasons[J]. *Journal of Sea Research*, 2019, 154: 101812.
- [49] 张启龙, 翁学传, 杨玉玲. 南黄海春季水团分析[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(4): 421–428.
- Zhang Qilong, Weng Xuechuan, Yang Yuling. Analysis of water masses in the South Yellow Sea in spring[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27(4): 421–428.
- [50] Gambi C, Carugati L, Lo Martire M, et al. Biodiversity and distribution of meiofauna in the Gioia, Petrace and Dohrn Canyons (Tyrrhenian Sea)[J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 171: 162–174.
- [51] 蒲思潮, 史本泽, 徐奎栋. 西北太平洋深海小型底栖生物群落结构与分布特点初探[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 547–554.
- Pu Sichao, Shi Benze, Xu Kuidong. Community structure and distribution of meiofauna in deep-sea areas of the northwestern Pacific Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 547–554.
- [52] 贾海波, 曹柳燕, 柴小平. 2016–2019年夏季长江口海域大型底栖动物群落结构的变化及其原因分析[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 180–186.
- Jia Haibo, Cao Liuyan, Chai Xiaoping. The changes of macrobenthic community structure and cause analysis in the Yangtze Estuary during summer from 2016 to 2019[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(2): 180–186.
- [53] 周红, Uddin S M D, 黄梦娇, 等. 南海北部陆架和陆坡区小型底栖动物群落的比较研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 555–563.
- Zhou Hong, Uddin S M D, Huang Mengjiao, et al. Comparison in meiofaunal communities between shelf and slope of the northern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 555–563.
- [54] 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.
- [55] 蒲思潮, 史本泽, 张光涛, 等. 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[J]. *海洋科学*, 2018, 42(4): 101–111.
- Pu Sichao, Shi Benze, Zhang Guangtao, et al. Meiofaunal community structure and environmental conditions in Laizhou Bay and the Muping offshore area in summer[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(4): 101–111.
- [56] Warwick R M. The nematode/copepod ratio and its use in pollution ecology[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12(10): 329–333.
- [57] Xu Jing, Lu Xin, Liu Xiaoshou. Patterns of species and functional diversity of macrofaunal assemblages and the bioassessment of benthic ecological quality status in the southern Yellow Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 171: 112784.

Spatial distribution patterns of meiofauna and the influencing environmental factors in the southern Yellow Sea in summer and autumn

Song Yuanliu^{1,2}, Liu Xiaoshou^{1,2}

(1. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Institute of Evolution and Marine Biodiversity, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: To study the spatial distribution patterns of meiofauna in the southern Yellow Sea and the influencing environmental factors, two cruises were conducted in the southern Yellow Sea in August (summer) and November (autumn) 2020 to analyze the taxa composition, abundance, biomass, vertical distribution, community structure of meiofauna and their relationship with environmental factors. The results showed that a total of 15 taxa of meiofauna were identified, among which free-living marine nematode was the most dominant group, accounting for 75.6% and 84.6% of the total abundance of meiofauna in the two cruises, respectively. Other important groups were benthic copepods, rotifers and cladocerans. The average abundance of meiofauna in summer and autumn was (514.9 ± 32.1) ind./ (10 cm^2) and (350.8 ± 30.7) ind./ (10 cm^2) , and the average biomass (dry weight) was (651.7 ± 98.0) $\mu\text{g}/(10 \text{ cm}^2)$ and (589.2 ± 37.1) $\mu\text{g}/(10 \text{ cm}^2)$, respectively. There were differences both in the spatial and temporal distribution of meiofauna. In terms of seasonal distribution, highly significant differences were found in the abundance and taxa composition of meiofauna. Combined with the analysis results of environmental factors, the sediment median diameter was the main environmental factor causing the differences. In terms of spatial distribution, the abundance of meiofauna and community structure differed significantly along the water depth gradient in summer, while no signi-

ficant differences were found along the water depth gradient in autumn. The Yellow Sea Cold Water Mass was supposed to be the main factor affecting the spatial distribution of meiofauna in summer. The abundance and taxa diversity of meiofauna in this study were lower compared with other studies on meiofauna in the southern Yellow Sea. The sediment chlorophyll *a* and organic matter contents were the important factors causing the change in abundance of meiofauna in the southern Yellow Sea. The assessment of the abundance ratio of marine nematodes to copepods (N/C ratio) showed the presence of organic pollution in the area in autumn, while this result was not consistent with that of the macrofaunal assemblages in the environmental quality evaluation of the same area, and further studies are needed for the application of N/C ratio to evaluate the environmental quality.

Key words: meiofauna; free-living marine nematodes; abundance; biomass; southern Yellow Sea