

山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物类群 组成与分布格局

赵美红^{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 为研究山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物的类群组成和分布格局,于2019年3-10月在山东半岛沿岸10个潮间带区域对小型底栖动物进行了定量调查。结果表明,小型底栖动物的平均丰度为 524.96 ± 443.72 (ind. $\cdot 10 \text{ cm}^{-2}$),平均生物量为 398.48 ± 308.37 ($\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$)。受人为影响较少的潮间带区域,包括位于海阳麻姑岛的M05区域、位于荣成天鹅湖的M07区域、位于庙岛群岛砣矶岛的M10区域,小型底栖动物丰度较高。中潮带的小型底栖动物丰度大于高潮带和低潮带。共鉴定出11个小型底栖动物类群,分别是自由生活海洋线虫、桡足类、甲壳类幼体、介形类、动吻类、双壳类、涟虫类、涡虫类、多毛类、缓步类和腹毛类。在丰度方面,海洋线虫丰度为 473.90 ± 421.68 (ind. $\cdot 10 \text{ cm}^{-2}$),占小型底栖动物丰度的90.27%,其次为桡足类,占6.42%。在生物量方面,海洋线虫的干重生物量最大,为 189.56 ± 168.67 ($\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$),占小型底栖动物总生物量的47.57%,其次是多毛类,占28.87%。小型底栖动物的生物量与中值粒径呈现显著正相关。小型底栖动物群落受多种环境参量的综合影响,解释其变异度的最佳环境因子组合为间隙水温度、盐度和沉积物含水量。

关键词 小型底栖动物;类群组成;分布格局;潮间带;山东半岛

中图分类号 Q959.17

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Taxa Composition and Distribution Patterns of Meiofauna in the Intertidal Zones of Shandong Peninsula

ZHAO Meihong^{1,2}, LIU Xiaoshou^{1,2}

(1.School 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 In order to assess the taxa composition and distribution patterns of meiofauna in the intertidal zones of Shandong Peninsula,a quantitative survey of meiofauna in 10 intertidal zones along Shandong Peninsula was conducted from March to October 2019.The average values of abundance and biomass of meiofauna were 524.96 ± 443.72 (ind. $\cdot 10 \text{ cm}^{-2}$) and 398.48 ± 308.37 ($\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$), respectively.The sites less affected by human activities,including Sites M05 (Magu Island of Haiyang),M07 (Swan Lake of Rongcheng),and M10 (Tuoji Island) had higher values of meiofaunal abundance.Compared with high and

收稿日期:2021-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41976131);生态环境部“生物多样性调查、观测和评估”专项资助

通讯作者:刘晓收,男,汉族,博士,教授,博士生导师,研究方向:海洋底栖生态学,E-mail:liuxs@ouc.edu.cn.

low tidal zones, mid-tidal zones supported higher meiofaunal abundance. A total of 11 meiofaunal taxa were found, including free-living marine nematodes, copepods, crustacean larva, ostracods, kinorhynchans, bivalves, cumaceans, turbellarians, polychaetes, tardigrades, and gastropods. The values of abundance and biomass of free-living marine nematodes were 473.90 ± 421.68 (ind. $\cdot 10 \text{ cm}^{-2}$) and 189.56 ± 168.67 ($\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$), respectively. Free-living marine nematodes were the most dominant group, accounting for 90.27% and 47.57% of the total abundance and biomass of meiofauna, respectively, followed by copepods and polychaetes. The sediment median grain size was correlated significantly with the meiofaunal biomass. The community structure of meiofauna were jointly affected by a variety of environmental parameters. The combination of interstitial water temperature, salinity and sediment water content was the best combination of environmental factors to explain the variance of meiofaunal community.

Key words meiofauna; taxa composition; distribution pattern; intertidal zone; Shandong Peninsula

0 前言

潮间带是位于大潮期的最高潮位和最低潮位之间的海岸,是海洋与陆地之间的交混地带^[1]。潮间带的理化环境(如盐度、温度、有机碳含量、沉积物粒度分布暴露时间等)呈明显的梯度变化^[2]。潮间带生态系统生态因子复杂多样、生物多样性高、区系成分复杂且群落类型多种多样,并与人类活动有密切的关系^[3]。

小型底栖动物指能通过 $500 \mu\text{m}$ 孔径筛网但不能通过 $42 \mu\text{m}$ 或 $31 \mu\text{m}$ 孔径筛网的底栖动物^[4]。小型底栖动物数量大、种类多、分布广,具有较高的周转率^[5],是底栖食物网中十分重要的一环。同时它们还是许多经济鱼类、虾类和贝类幼体阶段的优质饵料^[6,7]。小型底栖动物的多样性格局、群落结构及生物量变动直接控制着大型经济无脊椎动物幼体的补充^[5],在连接碎屑食物链、初级生产力以及水层-底栖耦合过程中起着重要作用^[8]。小型底栖动物具有刺激微生物生产、加速有机物降解、促进营养物质再循环等多方面的作用^[9]。因此,小型底栖动物的群落结构和分布特征在基础研究和应用研究方面一直备受重视^[10]。

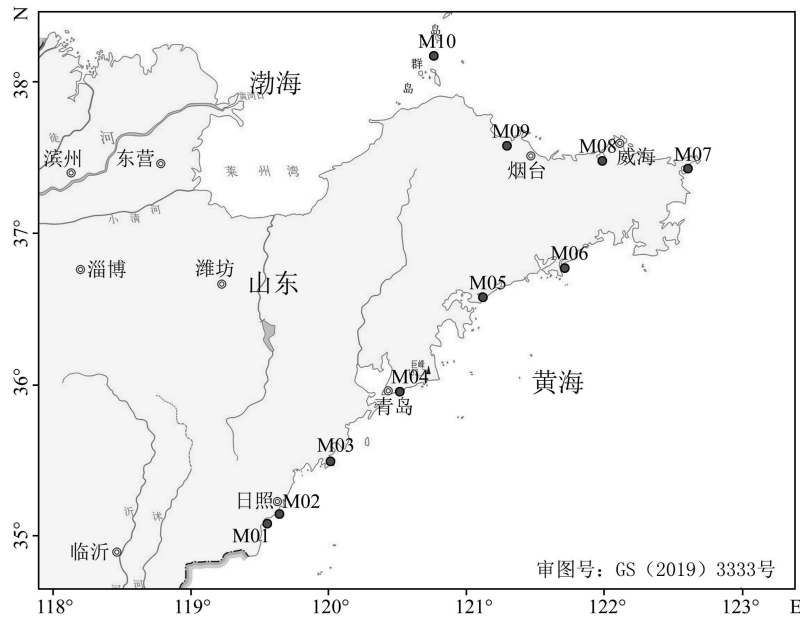
我国潮间带小型底栖动物的研究始于 20 世纪 80 年代中期,主要是张志南等^[11,12]在秦皇岛、大连等潮间带的研究。近年来,潮间带小型底栖动物的研究在丰度、生物量时空分布的基础上,逐步开展了小型底栖动物对踩踏^[13]、有机污染^[14]等人类活动响应的研究。目前,国内潮间带小型底栖动物研究主要集中于特定潮间带的季节动态变化研究方面^[1,2],但对山东半岛沿岸潮间带整体分布格局的研究还未见报道。

山东半岛($35^{\circ}05' - 37^{\circ}50' \text{N}$, $119^{\circ}16' - 122^{\circ}42' \text{E}$)是中国最大的半岛,在山东省东部,位于胶莱谷地以东,伸入渤海、黄海间,东西最长 290 km,南北最宽 190 km,最窄处 50 km,三面环海,位于重要的生态地理位置。本文根据对山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物的定量调查,结合环境因子,对山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物的类群组成、分布格局等方面进行研究,分析了山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物对人为扰动及环境变化的响应,为我国潮间带小型底栖生物生态学的深入研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域与野外采样

2019 年 3 月到 10 月,在山东半岛沿岸日照、青岛、烟台、威海等地共计 10 个区域(图 1;表 2)进行了潮间带沉积物环境因子和小型底栖动物现场采样。除 M05 区域只在高潮带、中潮带进行采样以外,在每个区域的大潮期间分高、中、低潮三个潮带分别进行采样,其中各区域中的高、中、低潮带分别用 H、M、L 表示。使用内径为 2.9 cm 的取样管(塑料注射器改装)在每个区域的每个潮带取 3 个长度为 8 cm 的芯样,分成 0-4 cm、4-8 cm,分别装入 125 mL 的广口瓶中,加入 5% 的福尔马林溶液进行样品固定。同时取一定量的表层沉积物用于沉积物粒度、有机质、叶绿素等环境因子的测定分析,以上用于测定环境因子的样品立即放入 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冰柜冷冻保存。



注: M01:日照付疃河口, M02:日照灯塔景区, M03:青岛琅琊台, M04:青岛第二海水浴场, M05:海阳麻姑岛, M06:威海乳山口, M07:荣成天鹅湖, M08:威海双岛湾, M09:烟台夹河口, M10:砣矶岛。

图1 山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物调查区域分布图

1.2 环境因子的测定

沉积物有机质的测定参照《海洋监测规范》中的重铬酸钾氧化-还原容量法进行^[15]。沉积物粒度分析采用 Master Sizer 3000 型激光粒度仪进行测定。叶绿素含量的测定采用分光光度法^[16]。温度、盐度和 pH 值通过 YSI 600XLM 水质分析仪的现场测定直接获得。

1.3 小型底栖动物的室内分选

分选前首先在每瓶样品中加入 3-5 mL 虎红染液混合均匀, 染色 24 h, 使用倒清液淘洗法进行小型底栖动物的分离, 淘洗 7 次后将样品倒在 0.5 mm (小型底栖动物的上限) 和 0.031 mm (小型底栖动物的下限) 两层网筛上用自来水冲洗^[17]。在解剖镜下将所有的后生小型底栖动物挑出, 按小型底栖动物各类群分开装瓶并计数, 分别用 5% 的甲醛溶液保存于 5 mL 玻璃样品瓶中。

1.4 数据处理与分析

小型底栖动物的丰度一般以每 10 cm² 所包含的生物个体数来表示。根据取样管的直径 (2.9 cm), 将每个区域的小型底栖动物丰度换算为每 10 cm² 的个体数。小型底栖动物的生物量测定方法采用换算法。利用小型底栖动物各个类群的丰度值, 乘以相对类群的平均干重得到小型底栖动物各个类群的生物量^[18]。小型底栖动物各主要类群的平均个体干重如表 1。

使用 ArcGIS 10.2 中的 Arc Map 进行调查区域图、各区域的丰度和生物量等平面图的绘制。使用 PRIMER 6.0 软件中的 PCA 对环境因子进行了主成分分析, 以获取对区域环境差异起主要作用的环境因子。同时采用 PRIMER 6.0 软件中的 BIO-ENV 和 RELATE 对群落结构及环境因子的相关性及相关系数的显著性进行了分析, 以揭示环境因子及其组合对小型底栖动物群落结构的影响。使用 SPSS 19.0 中的 Spearman 相关分析 (Spearman Correlation Analysis) 对小型底栖动物的丰度与各种环境因子进行相关性分析。

表 1 小型底栖动物的个体平均干重换算系数

类群	个体干重/ μg
线虫 Nematoda	0.4
桡足类 Copepoda	1.86
多毛类 Polychaeta	14
双壳类 Bivalvia	4.2
介形类 Ostracoda	26
涡虫类 Turbellaria	3.5
缓步动物 Tardigrada	3.5
甲壳类幼体 Crustacean larvae	0.11
动物类 Kinorhyncha	2
涟虫 Cumacea	3.5
腹毛类 Gastrotricha	4.2

2 结果与分析

2.1 环境因子

山东半岛沿岸潮间带各区域的环境因子如表 2 所示。10 个区域间隙水的温度变化范围为 11-27 °C, 平均水温为 15.8 ± 5.86 °C, M02 区域的水温最低, M04 区域的水温最高。10 个区域间隙水的盐度的变化范围为 24‰-40‰, 平均盐度为 33.2 ± 5.09 ‰, M06 区域的盐度最高, M01 区域的盐度最低。

表 2 山东半岛沿岸潮间带调查区域环境因子

区域	东经/°	北纬/°	温度/°C	盐度/‰	潮带	叶绿素 <i>a</i> 含量 / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	沉积物 含水率/%	有机质 含量/%	中值粒径/mm	沉积物类型
M01	119.4511	35.2994	12	24	H	1.240	15.5	3.073	1.100	砾质砂
					M	2.012	17.9	5.688	0.820	砾质砂
					L	0.463	19.1	8.934	0.740	砾质砂
M02	119.5667	35.3947	11	28	H	0.016	20.9	1.306	0.340	含砾砂
					M	1.044	22.3	0.398	0.300	砾质砂
					L	0.090	22.8	8.993	0.340	砾质砂
M03	119.9107	35.6593	13	30	H	1.773	25.7	5.211	0.141	砂
					M	3.507	27.2	9.513	0.148	砂
					L	2.346	26.8	8.763	0.140	砂
M04	120.3495	36.0503	27	33	H	0.142	9.2	1.921	0.230	砂
					M	0.113	18.0	5.106	0.281	砂
					L	0.272	24.0	11.10	0.230	砂
M05	120.9869	36.6214	17	37	H	1.048	31.8	8.539	0.015	粉砂
					M	0.376	33.1	19.65	0.028	砂质粉砂
					H	0.779	24.1	12.98	0.129	粉砂质砂
M06	121.6247	36.7639	13	40	M	0.214	24.7	8.426	0.146	粉砂质砂
					L	0.434	22.8	3.124	0.208	砂
					H	0.311	20.9	4.970	0.246	砂
M07	122.5814	37.3486	14	38	M	0.244	15.8	5.982	0.304	砂
					L	0.381	15.1	5.309	0.334	砂
					H	1.298	20.6	9.813	0.249	砂
M08	121.9628	37.4736	12	37	M	0.920	18.9	0.768	0.267	砂
					L	4.222	22.8	7.412	0.233	砂
					H	0.852	18.4	1.656	0.224	粉砂质砂
M09	121.2939	37.5744	13	35	M	2.030	26.5	3.136	0.041	砂质粉砂
					L	1.447	23.2	3.245	0.163	粉砂质砂
					H	0.215	22.1	4.951	0.296	砂
M10	120.7531	38.17	26	30	M	0.684	21.5	5.738	0.212	砂
					L	1.165	22.5	1.855	0.173	粉砂质砂

10 个调查区域的沉积物含水率变化范围为 9.20%-33.10%, 平均含水率为 21.87 ± 4.94 %, 其中 M04 区域的含水率最低, M05 区域的含水率最高。在不同潮带中, 高潮带含水率的变化范围为 9.20%-31.8%, 平均值为 $20.92\% \pm 6.02\%$, 其中 M04 区域高潮带的含水率最低, M05 区域高潮带的含水率最高; 中潮带含水率的变化范围为 15.80%-33.10%, 平均值为 $22.59\% \pm 5.33\%$, 其中 M07 区域中潮带的含水率最低, M05 区域

的含水率最高;除 M05 区域外,低潮带含水率的变化范围为 15.1%-26.80%,平均值为 22.12%±3.29%,其中 M07 区域低潮带的含水率最低,M03 区域低潮带的含水率最高。

10 个调查区域沉积物的有机质含量介于 0.39%-19.65%之间,平均值为 6.12%±4.21%,其中 M09 区域的有机质含量最低,M05 区域的有机质含量最高。在不同潮带中,高潮带的有机质含量介于 1.31%-12.99%之间,平均值为 5.44%±3.88%,其中 M02 区域高潮带有机质含量最低,M06 高潮带有机质含量最高;中潮带的有机质含量介于 0.39%-19.65%,平均值为 6.44%±5.48%,其中 M02 区域中潮带的有机质含量最低,M05 区域中潮带的有机质含量最高;除 M05 区域外,低潮带的有机质含量介于 1.85%-11.10%之间,平均值为 6.52%±3.24%,其中 M10 区域低潮带的有机质含量最低,M04 区域低潮带的有机质含量最高。

10 个调查区域沉积物叶绿素 *a* 含量介于 0.016-4.222 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 1.022±1.020 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其中 M04 区域叶绿素 *a* 的含量最低,M03 区域叶绿素 *a* 的含量最高。在不同潮带中,高潮带的叶绿素 *a* 含量介于 0.0162-1.774 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 0.768±0.58 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其中 M02 区域高潮带叶绿素 *a* 含量最低,M03 区域高潮带的叶绿素 *a* 含量最高;中潮带的叶绿素 *a* 含量介于 0.113-3.507 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 1.115±1.090 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,M04 区域中潮带的叶绿素 *a* 含量最低,M03 区域中潮带的叶绿素 *a* 含量最高;除 M05 区域外,低潮带的叶绿素 *a* 含量介于 0.091-4.222 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 1.201±1.340 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,M02 区域低潮带的叶绿素 *a* 含量最低,M08 区域低潮带的叶绿素 *a* 含量最高。

10 个调查区域沉积物中值粒径的变化范围为 0.015-1.100 mm,平均值为 0.278±0.230 mm,其中 M05 区域的中值粒径最小,M01 区域的中值粒径最大。从不同潮带来看,高潮带中值粒径的变化范围为 0.015-1.100 mm,平均值为 0.297±0.301 mm;中潮带中值粒径的变化范围为 0.028-0.820 mm,平均值为 0.254±0.227 mm;除 M05 区域外,低潮带中值粒径的变化范围为 0.140-0.740 mm,平均值为 0.284±0.186 mm,其中 M03 区域低潮带的中值粒径最小。M01 区域高中低潮的中值粒径都是最大的,在高潮带,中潮带 M05 区域的中值粒径都是最小的。

PCA 结果如图 2 所示。PC1 与 PC2 轴累计可解释环境变异度的 64.3%。对 PC1 轴贡献较大的依次为沉积物中值粒径、沉积物含水率、间隙水盐度、有机质含量、沉积物叶绿素 *a* 含量和间隙水温度;对 PC2 轴贡献较大的依次为沉积物叶绿素 *a* 含量、间隙水温度、沉积物含水率、间隙水盐度、沉积物中值粒径和有机质含量。

对温度、盐度、叶绿素 *a*、有机质含量、中值粒径这 5 个环境因子进行了 Pearson 相关性分析,结果表明(表 3),盐度与中值粒径呈极显著负相关($r = -0.647; p < 0.01$);沉积物含水率与沉积物有机质含量呈显著正相关($r = 0.555; p < 0.01$),与中值粒径呈极显著负相关($r = -0.553; p < 0.01$)。由结果可知,沉积物环境因子间相互影响相互作用,其中尤为突出的是,中值粒径与盐度、沉积物含水率之间的相互作用。

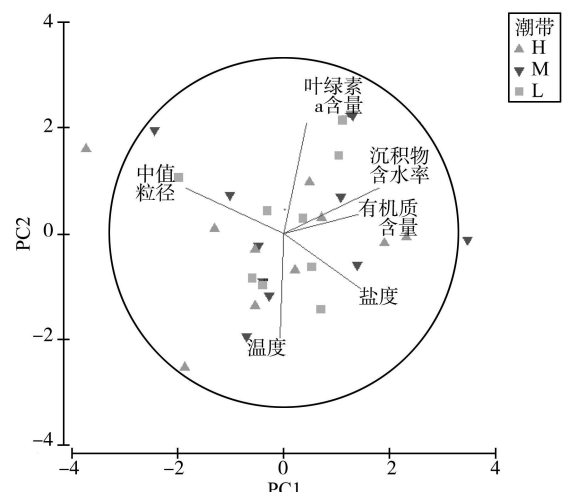


图 2 山东半岛沿岸潮间带调查区域环境因子主成分分析图

表 3 山东半岛沿岸潮间带环境因子相关性分析结果

	温度/℃	盐度/‰	叶绿素 <i>a</i> 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	沉积物含水率/%	有机质含量/%
盐度/‰	-0.038				
叶绿素 <i>a</i> 含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	-0.324	-0.11			
沉积物含水率/%	-0.137	0.178	0.285		
有机质含量/%	-0.002	0.207	0.043	0.555**	
中值粒径/mm	-0.196	-0.647**	-0.049	-0.553**	-0.216

注: ** :在 0.01 水平(双侧)上显著相关); * :在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2 小型底栖动物

2.2.1 小型底栖动物的类群组成。在本次调查中,共鉴定出 11 个小型底栖动物类群,包括自由生活海洋线虫、桡足类、甲壳类幼体、介形类、动物类、双壳类、涟虫类、涡虫类、多毛类、缓步类和腹毛类。各类型丰度生物量及其所占百分比如表 4 所示。可知,小型底栖动物的平均丰度为 $524.96 \pm 443.72 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,平均生物量为 $398.48 \pm 308.37 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 。海洋线虫是绝对的优势类群,占小型底栖动物丰度的 90.27%;桡足类次之,占 6.42%;多毛类再次,占 1.56%。线虫、桡足类和多毛类的数目之和为 98.26%,其余类之和仅为 1.74%。

从生物量来看,线虫的干重生物量最大,为 $189.56 \pm 168.67 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,占小型底栖动物总生物量的 47.57%;其次是多毛类,为 $115.05 \pm 100.70 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,占总数的 28.87%;居生物量第三的是桡足类,其干重生物量为 $62.73 \pm 127.53 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,占总数的 15.74%;线虫、多毛类和桡足类的生物量之和为 92.18%,其他类的生物量较小,其总和为 7.82%。

桡足类的丰度大于多毛类,但是由于多毛类的个体平均干重 $14.00 \mu\text{g}$ 大于桡足类的个体平均干重 $1.86 \mu\text{g}$,所以多毛类的总体生物量比桡足类大。

表 4 山东半岛沿岸潮间带各类群小型底栖动物的丰度和生物量

类群	丰度/ $\text{ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$	丰度百分比/%	生物量/ $\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$	生物量百分比/%
线虫	473.90 ± 421.68	90.27	189.56 ± 168.67	47.57
桡足类	33.72 ± 68.56	6.42	62.73 ± 127.53	15.74
多毛类	8.21 ± 7.19	1.57	115.05 ± 100.70	28.87
甲壳幼	0.88 ± 1.81	0.17	0.09 ± 0.20	0.02
介形	0.01 ± 0.09	0.00	0.45 ± 2.44	0.11
动物	0.01 ± 0.09	0.00	0.03 ± 0.19	0.01
双壳类	2.22 ± 8.10	0.42	9.36 ± 34.02	2.35
涟虫	0.01 ± 0.09	0.00	0.06 ± 0.33	0.02
涡虫	5.17 ± 8.39	0.99	18.10 ± 29.38	4.54
缓步类	0.36 ± 1.24	0.07	1.27 ± 4.35	0.32
腹毛类	0.41 ± 1.16	0.08	1.75 ± 4.88	0.44
总计	524.96 ± 443.72	100	398.48 ± 308.37	100

表 5 山东半岛沿岸潮间带调查区域小型底栖动物丰度分布

区域	小型底栖动物丰度/ $\text{ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$				
	H	M	L	平均值	比较
M01	817.9 ± 231.49	1080.0 ± 196.65	869.4 ± 102.36	922.5 ± 138.86	$M > L > H$
M02	135.3 ± 29.31	418.1 ± 85.51	524.6 ± 118.88	359.3 ± 201.18	$L > M > H$
M03	397.8 ± 198.08	690.7 ± 103.76	541.8 ± 162.96	543.4 ± 146.45	$M > L > H$
M04	29.7 ± 9.85	30.3 ± 12.02	573.6 ± 75.92	211.2 ± 313.82	$L > M > H$
M05	1233.9 ± 322.29	759.9 ± 235.78	-	996.9 ± 355.23	$H > M$
M06	391.3 ± 288.56	261.0 ± 104.00	73.7 ± 13.23	242.0 ± 159.65	$H > M > L$
M07	661.4 ± 58.67	744.7 ± 201.16	150.5 ± 51.53	518.9 ± 321.77	$M > H > L$
M08	108.5 ± 6.83	2033.8 ± 91.04	165.1 ± 91.82	769.1 ± 1095.54	$M > L > H$
M09	125.7 ± 85.54	354.4 ± 39.82	139.8 ± 78.55	206.7 ± 128.16	$M > L > H$
M10	244.9 ± 37.02	1006.8 ± 72.49	658.9 ± 87.89	636.9 ± 381.43	$M > L > H$
平均	414.7 ± 384.10	737.9 ± 562.62	410.8 ± 283.65	524.9 ± 443.72	$M > H > L$

2.2.2 小型底栖动物丰度分布。由表 5 和图 3 可知,10 个区域小型底栖动物的丰度介于 $206.7\text{--}996.9 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $540.7 \pm 188.00 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,其中 M09 区域小型底栖动物丰度最低,M05 区域小型底栖动物丰度最高。在不同潮带中,高潮带的小型底栖动物的丰度介于 $29.8\text{--}1233.9 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $414.7 \pm 384.10 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,其中 M04 区域高潮带小型底栖动物丰度最低,M05 区域高潮带的小型底栖动物丰度最高;

中潮带的小型底栖动物丰度介于 $30.3\text{--}2033.7 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $737.9 \pm 562.62 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,M04 区域中潮带的小型底栖动物丰度最低,M08 区域中潮带的小型底栖动物丰度最高;除 M05 区域外,低潮带的小型底栖动物丰度介于 $73.7\text{--}869.4 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $410.8 \pm 283.65 \text{ ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,M06 区域低潮带的小型底栖动物丰度最低,M01 区域低潮带的小型底栖动物丰度最高。

在 10 个调查区域中,有 6 个区域的中潮带小型底栖动物丰度大于高潮带与低潮带,调查区域高潮带与低潮带的小型底栖动物丰度相差不大。

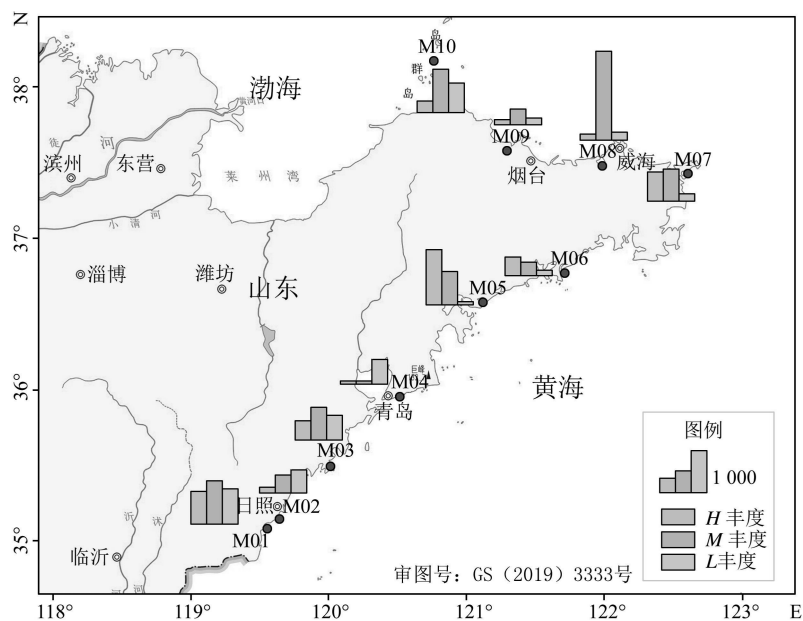


图 3 山东半岛沿岸高、中、低潮带小型底栖动物丰度分布图(单位: $\text{ind.} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$)

表 6 山东半岛沿岸潮间带调查区域小型底栖动物生物量分布

区域	小型底栖动物生物量/ $\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$				比较
	高潮带(H)	中潮带(M)	低潮带(L)	平均值	
M01	1037.47 ± 450.92	892.09 ± 146.99	517.55 ± 50.79	815.71 ± 268.25	$H > M > L$
M02	177.73 ± 31.20	366.36 ± 24.23	329.52 ± 51.84	291.21 ± 99.98	$M > L > H$
M03	190.30 ± 72.04	464.44 ± 23.13	403.39 ± 96.25	352.71 ± 143.93	$M > L > H$
M04	39.38 ± 8.58	53.81 ± 37.49	388.07 ± 69.23	160.42 ± 197.29	$L > M > H$
M05	725.47 ± 195.45	390.26 ± 139.71		558.12 ± 237.38	$H > M$
M06	215.37 ± 125.05	155.44 ± 54.59	107.82 ± 27.49	159.55 ± 53.89	$H > M > L$
M07	677.52 ± 83.23	1096.40 ± 349.73	265.36 ± 30.52	679.77 ± 415.52	$M > H > L$
M08	152.58 ± 36.56	1064.26 ± 200.12	458.49 ± 570.65	558.45 ± 463.98	$M > L > H$
M09	122.30 ± 71.22	237.12 ± 24.46	93.89 ± 65.86	151.10 ± 75.84	$M > H > L$
M10	132.28 ± 29.36	455.18 ± 53.45	345.41 ± 110.72	310.95 ± 164.18	$M > L > H$
平均	347.09 ± 338.16	517.53 ± 371.91	323.28 ± 145.59	398.48 ± 308.37	$M > H > L$

2.2.3 小型底栖动物生物量分布。由表 6 和图 4 可知,10 个区域小型底栖动物的生物量介于 $151.10\text{--}815.71$

$\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $395.97 \pm 105.95 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,其中 M09 区域小型底栖动物生物量最低,M01 区域小型底栖动物生物量最高。

在不同潮带中,高潮带的小型底栖动物的生物量介于 $39.38\text{-}1037.47 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $347.09 \pm 338.16 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,其中 M04 区域高潮带小型底栖动物生物量最低,M01 区域高潮带的小型底栖动物生物量最高;中潮带的小型底栖动物生物量介于 $53.81\text{-}1096.40 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $517.53 \pm 371.91 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,M04 区域中潮带的小型底栖动物生物量最低,M07 区域中潮带的小型底栖动物生物量最高;除 M05 区域外,低潮带的小型底栖动物生物量介于 $93.89\text{-}517.55 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$ 之间,平均值为 $323.28 \pm 145.59 \mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$,M09 区域低潮带的小型底栖动物生物量最低,M01 区域低潮带的小型底栖动物生物量最高。

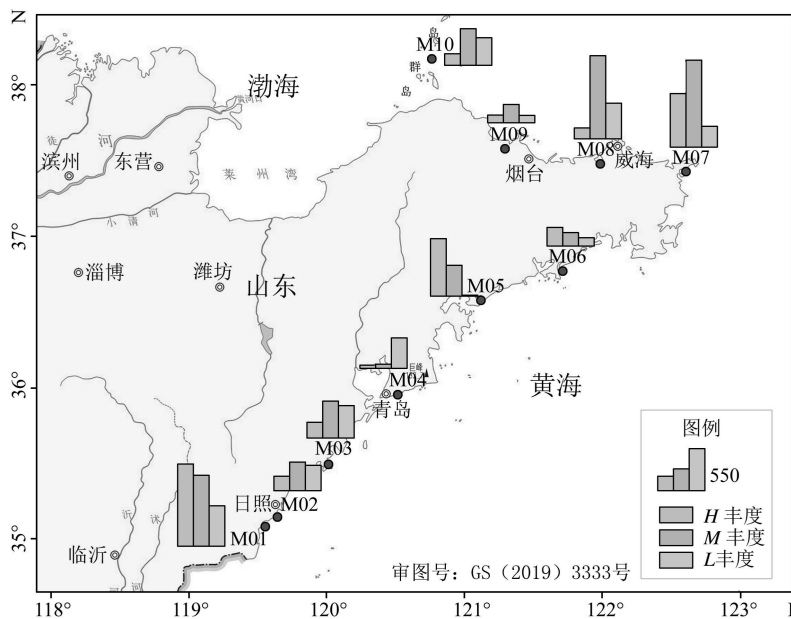


图 4 山东半岛沿岸高、中、低潮带小型底栖动物生物量分布图(单位: $\mu\text{g} \cdot 10 \text{ cm}^{-2}$)

2.2.4 小型底栖生物丰度、生物量与环境因子的相关性分析。Pearson 相关性分析结果(表 7)表明,小型底栖动物的生物量与沉积物中值粒径呈显著正相关($0.469, p < 0.05$)。小型底栖动物群落与环境因子之间的 BIOENV 分析结果表明(表 8),小型底栖动物群落受多种环境参量的综合影响,解释其群落结构变异的最佳环境因子组合为间隙水温度、盐度和沉积物含水量,其相关系数为 0.230。RELATE 检验表明小型底栖动物和环境因子(非)相似性矩阵之间没有显著性相关 ($p = 0.70 > 0.05$)。

表 7 山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物丰度、生物量与环境因子的相关性分析结果

	MA	MB	T	S	Chl-a	W	OM	Md
MA	1	0.810**	-0.084	-0.173	0.059	0.147	0.069	0.199
MB	0.810**	1	-0.249	-0.176	0.144	-0.106	-0.011	0.469*

注: ** :在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * :在 0.05 水平(双侧)上显著相关;MA:小型底栖动物丰度;MB:(meiofauna biomass)小型底栖动物生物量(meiofauna biomass);T:温度(Temperature);S:盐度(Salinity);Chl-a:叶绿素含量(Chlorophyll-a content);W:含水量(Water content);OM:有机质含量(Organic matter content);Md:中值粒径(Median grain size)

3 讨论

3.1 山东半岛沿岸小型底栖动物分布格局

小型底栖动物丰度受多种生物与非生物因素的影响,非生物因素包括季节、水温、水深、pH、沉积物粒度、叶绿素 a 含量等;生物因素有大型底栖动物活动的干扰、捕食作用等^[19]。与以往研究结果相同,自由生

活线虫是小型底栖动物中最优势的类群,大约占小型底栖动物的 60%-90%^[4],在某些生境中可达到 90%以上^[20]。对于潮间带,诸如人为踩踏、沙子采挖和海滩清洁等人类活动可能直接影响海洋底栖生态系统中的小型底栖动物丰度^[13]。研究区域小型底栖动物丰度分布不均匀,小型底栖动物丰度较高的几个区域,M05 区域、M07 区域、M08 区域和 M10 区域都是受人为影响较少的潮间带。M05 区域位于海阳麻姑岛,是大面积的泥滩,属于被私人承包的区域,受人为踩踏影响很小;M07 区域位于荣成天鹅湖,虽说是旅游景点,但由于采样时间为 4 月份,在保护生境时间内,人流量很少;M10 区域位于长岛中的一个非景点岛屿,少有游客。小型底栖动物丰度较小的区域,例如 M09,位于烟台夹河口,采样过程中陆续有很多当地人来采样地点挖蛭子和蛤蜊;M04 区域青岛第二海水浴场也是青岛市人流量比较大的景点。旅游者的踩踏会直接影响沉积物的含水量、气水渗透性,压缩沉积物会导致沉积物溶氧量的降低^[21],进而导致小型底栖动物丰度的降低。

沉积物粒径在潮间带沉积物微环境中被认为是重要的物理因子,尤其是在大尺度的空间分布上^[22]。另外小型底栖动物的分布及类群组成受许多沉积环境因子的综合影响^[3]。环境因子之间存在互相影响的关系,沉积物粒度特征可以通过影响其他环境因子,间接影响小型底栖动物群落^[23]。沉积物颗粒越细,含水率越高,越有利于有机质保存,从而有机质含量越高^[24]。沉积物中的叶绿素 *a*,有机质含量是底栖动物的食物来源,也是其生存的重要有机环境^[25]。M05 区域的小型底栖丰度最高,M05 区域沉积物含水率最高且沉积物有机质含量也最高,中值粒径最小。M09 区域小型底栖动物丰度最低,M09 区域沉积物有机质含量最低。

在 10 个区域中,有 6 个区域的中潮带小型底栖动物丰度与生物量大于高潮带与低潮带,调查区域高潮带与低潮带的小型底栖动物丰度与生物量相差不大。以往的研究^[26-28]也表明中潮带往往是小型底栖动物的最佳生存环境,因为中潮带的有机质输入、间隙水溶解氧含量以及水分保持到达最佳的平衡点,能支撑相对较高的底栖生物丰度和生物多样性。

3.2 与其他潮间带海域小型底栖动物的比较

与其他潮间带小型底栖动物研究相比(表 9),本次研究小型底栖动物丰度较低。本次研究调查的小型底栖动物丰度小于青岛第二海水浴场和石老人海水浴场^[29],青岛第二海水浴场和石老人海水浴场小型底栖动物丰度与中值粒径和有机质含量显著正相关,还受到叶绿素含量与人为扰动的影响。可能是由于本次调查期间,M04 区域采样时间是在夏季,夏季的潮间带间隙水温度较高,小型底栖动物会向沉积物深处迁移^[13];另外夏季游客量增多,旅游者的踩踏会影响到小型底栖动物的分布,沙滩的机械清理在清除了人为垃圾的同时也清除了有机碎屑^[28],会导致小型底栖动物丰度的降低。

本次研究调查的小型底栖动物丰度也小于双台子河口^[1],其为我国最北端的河口潮间带,潮间带较为平缓,属典型光滩,并且双台子河口区域小型底栖动物丰度也高于我国其他砂质潮间带报道。

本次研究也低于厦门大德记沙滩小型底栖动物丰度,厦门大德记沙滩沉积物粗砂含量高,具有较好的渗透性^[19],为其间生活的底栖生物滞留颗粒和溶解性的有机物质。薛家岛砂质潮间带小型底栖动物丰度^[14]也高于本次调查研究,薛家岛砂质潮间带远离市区,游客践踏等扰动较低,并且采样点海滩附近的污水处理厂排放口常年排放的污水以及大型鲍鱼养殖厂排出的养殖废水导致其海滩的有机质含量比青岛其他旅游沙

表 8 山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物丰度与环境因子 BIOENV 分析结果

环境因子变量数	相关系数	环境因子变量组合
3	0.230	T, S, W
2	0.221	T, W
1	0.216	W
2	0.211	S, W
3	0.203	T, W, Md
4	0.185	T, S, W, Md
2	0.185	W, Md
3	0.164	S, W, Md
4	0.164	T, S, W, Md
4	0.144	T, S, Chl-a, W

注: T: 温度(Temperature); S: 盐度(Salinity); Chl-a: 叶绿素含量(chlorophyll-a content); W: 含水量(Water content); OM: 有机质含量(Organic matter content); Md: 中值粒径(Median grain size)

滩高。

本次研究小型底栖动物丰度高于南极菲尔德斯半岛^[8]。山东半岛处于北温带,相较于南大洋温度高,沉积物有机质含量高,更适合小型底栖动物的生存。另外在南极菲尔德斯半岛小型底栖动物调查中,涡虫属于除线虫外的优势类群,较粗的沉积物中为小型底栖动物提供了更大的生存空间,更适于相对较大个体的底栖动物生存,在碎石底质中,涡虫类群占比较高。

表 9 山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物丰度和优势类群与其他潮间带的比较

研究海域	丰度/ind. · 10 cm ⁻²	丰度优势类群	资料来源
青岛第二海水浴场	1167.3	线虫、涡虫	李佳等 ^[29] , 2012
青岛石老人海水浴场	1130.2	线虫、涡虫	李佳等 ^[29] , 2012
三亚大东海砂质潮间带	595.77	线虫、桡足	骆添等 ^[30] , 2020
大连金沙滩潮间带	425.2	线虫、桡足	臧瑜等 ^[2] , 2020
青岛沧口潮间带	936.02	线虫	付姗姗等 ^[31] , 2012
青岛薛家岛潮间带	1384.69	线虫、涡虫	韦晓慧等 ^[14] , 2013
厦门大德记沙滩	660.2	桡足类、线虫、缓步类	慕芳红等 ^[19] , 2020
双台子河口砂质潮间带	3530	线虫	杨纯懿等 ^[1] , 2020
南极菲尔德斯半岛	256.8(8.5-1698.5)	线虫、涡虫	刘晓收等 ^[8] , 2020
山东半岛沿岸潮间带	524.96	线虫、桡足	本研究

4 结论

本文对山东半岛沿岸日照、青岛、烟台、威海等地共计 10 个区域小型底栖动物进行了研究,包括小型底栖动物的类群组成、丰度与生物量的分布格局。结果表明,共发现 11 个小型底栖动物类群,包括自由生活海洋线虫、桡足类、甲壳类幼体、介形类、动吻类、双壳类、涟虫类、涡虫类、多毛类、缓步类和腹毛类。山东半岛沿岸潮间带小型底栖动物平均丰度为 524.96 ± 443.72 ind. · 10 cm⁻²,其中海洋线虫丰度占绝对优势,占总丰度的 90.27%,桡足类占比 6.42%。小型底栖动物平均生物量为 398.48 ± 308.37 μg · 10 cm⁻²,海洋线虫的干重生物量最大,为 189.56 ± 168.67 μg · 10 cm⁻²,占总生物量的 47.57%,其次是多毛类,占 28.87%。小型底栖动物的生物量与中值粒径呈现显著正相关。小型底栖动物群落结构受多种环境参量的综合影响,解释其变异度的最佳环境因子组合为间隙水温度、盐度和沉积物含水量。小型底栖动物丰度表现出区域差异,海阳麻姑岛、荣成天鹅湖和砣矶岛等受人活动影响较小的区域丰度相对较高。青岛第二海水浴场和烟台夹河口等游客量大,受人类活动影响大的区域小型底栖动物丰度较低。相对于国内其他潮间带小型底栖动物研究,本调查区域小型底栖动物丰度较低,海洋线虫丰度占小型底栖动物总丰度的绝对优势与以往研究相似。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 臧瑜,孙燕,杨丽莉,等.大连金沙滩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.
- [3] MOENS T, BRAECKMAN U, DERYCKE S, et al. Ecology of free-living marine nematodes[M]. Research Gate, 2013.
- [4] HIGGINS R P, THIEL H. Introduction to the study of Mei fauna[M]. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1988.
- [5] MONTAGNA P A. Rates of metazoan mei faunal microbivory: A review[J]. Vie et Milieu, 1995, 45(1): 1-9.
- [6] GERLACH S A. On the importance of marine mei fauna for benthos communities[J]. Oecologia, 1971, 6(2): 176-190.
- [7] COULL B C. Role of mei fauna in estuarine soft-bottom habitats[J]. Australian Journal of Ecology, 1999, 24(4): 327-343.
- [8] 刘晓收,王笑笑,王璐,等.南极菲尔德斯半岛潮间带小型底栖动物初步研究[J].极地研究,2020,32(3):281-289.
- [9] 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.

- [10] ALVES A S, CAETANO A, COSTA J L, et al. Estuarine intertidal meiofauna and nematode communities as indicator of ecosystem's recovery following mitigation measures[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 54: 184-196.
- [11] 张志南. 秦皇岛砂滩海洋线虫的数量研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1991, 21(1): 63-75.
- [12] 张志南, 党宏月, 于子山. 青岛湾有机质污染带小型底栖生物群落的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1993, 23(1): 83-91.
- [13] 华尔, 林佳宁, 冯颂, 等. 踩踏对砂质滩小型底栖动物的影响: 现场扰动实验初步结果[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(10): 63-68.
- [14] 韦晓慧, 慕芳红, 杨世超. 青岛薛家岛砂质潮间带小型底栖生物丰度和生物量[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(10): 60-66.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海洋监测规范 第5部分: 流积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] 王荣. 荧光法测定浮游植物色素计算公式的修正[J]. *海洋科学*, 1986, 10(3): 1-5.
- [17] 张志南, 钱国珍. 小型底栖生物取样方法的研究. *海洋湖沼通报*[J]. 1990(4): 37-42.
- [18] 刘晓收, 许嫒, 张敬怀, 等. 南海北部深海小型底栖动物丰度和生物量[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(2): 52-59.
- [19] 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.
- [20] 乔春艳, 郝映东, 陆洋, 等. 南海北部潮间带自由生活线虫的生物量及生物多样性初步研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(2): 65-72.
- [21] WYNBERG R P, BRANCH G M. Disturbance associated with bait collection for sand prawns (*Callinassa kraussi*) and mud prawns (*Upogebia africana*): long term effects on the biota of intertidal sandflats[J]. *Journal of Marine Research*, 1994, 52: 523-528.
- [22] GIÈRE O. Meiobenthology: the microscopic motile fauna of aquatic sediments[J]. *Meiobenthology: The Microscopic Motile Fauna of Aquatic Sediments*, 2009(7): 15-27.
- [23] TREBUKHOVA Y, MILJUTIN D, PAVLYUK O, et al. Changes in deep-sea metazoan meiobenthic communities and nematode assemblages along a depth gradient (North-western Sea of Japan, Pacific) [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 86-87: 56-65.
- [24] 何蕾, 华尔, 刘晓收, 等. 夏、秋季渤海小型底栖动物类群组成及分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2794-2805.
- [25] Wang X X, Liu X S, Xu J H. Distribution Patterns of Meiofauna Assemblages and Their Relationship With Environmental Factors of Deep Sea Adjacent to the Yap Trench, Western Pacific Ocean[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 725.
- [26] HUSTON M. A general hypothesis of species diversity[J]. *The American Naturalist*, 1979, 113: 81-101.
- [27] PATTNAIK A, RAO M V L. Composition and distribution of interstitial meiofauna of the sandy beach at Gopalpur, south Orissa coast [J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 1990, 19(3): 165-170.
- [28] GHESKIERE T, HOSTE E, VANAVERBEKE J, et al. Horizontal zonation patterns and feeding structure of marine nematode assemblages on a macrotidal, ultra-dissipative sandy beach (De Panne, Belgium) [J]. *Journal of Sea Research*, 2004, 52(3): 211-226.
- [29] 李佳, 华尔, 张志南. 青岛砂质潮间带小型底栖动物分布及季节动态[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3458-3466.
- [30] 骆添, 梁宸梓, 孙燕, 等. 三亚大东海砂质潮间带小型底栖生物的时空分布及影响因素[J]. *海洋科学*, 2020, 44(2): 36-44.
- [31] 付姗姗, 慕芳红, 杨世超. 青岛沧口潮间带小型底栖生物的时空分布研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(9): 124-130.