

汕头东部近岸海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系

赵晨辉¹, 王永生¹, 贾胜华^{2,3}, 刘国强¹

(1.自然资源部汕头海洋中心, 广东 汕尾 516600; 2.浙江省海洋科学院, 浙江 杭州 310000; 3.自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为了解汕头东部近岸海域大型底栖动物群落及其与环境因子的关系, 笔者于 2020 年 7 月、11 月和 2021 年 4 月、12 月对汕头东部近岸海域开展 4 个航次的调查, 分析其大型底栖动物群落结构、季节变化及其与环境因子的关联。结果显示, 4 个航次的调查共采集到大型底栖动物 44 种, 其中, 环节动物 14 种、节肢动物 10 种、软体动物 9 种、其他类 11 种。优势种类以内卷齿蚕 (*Aglaophamus* sp.)、光滑倍棘蛇尾 (*Amphioplus laevis*) 为主。大型底栖动物年平均栖息密度和平均生物量分别为 410.4 ind./m² 和 133.47 g/m², 总栖息密度为夏季>秋季>春季>冬季, 总生物量变化为秋季>夏季>春季>冬季。Shannon 多样性指数为 0.68~0.99, Margalef 丰富度指数为 0.35~0.64, Pielou 均匀度指数为 0.89~0.98。聚类分析表明, 调查到的大型底栖动物可分为 5 个群落。丰度/生物量曲线分析显示, 夏季时群落因受扰动表现为不稳定状态, 而春、秋、冬季则较为稳定。典范对应分析显示, 不同季节影响大型底栖动物群落的环境因子不同, 盐度、水温和含氮营养盐是影响大型底栖动物群落结构的主要环境因子。

关键词: 汕头东部近岸海域; 大型底栖动物; ABC 曲线; 环境因子

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2023)06-0853-11

Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in the eastern coastal waters of Shantou

ZHAO Chenhui¹, WANG Yongsheng¹, JIA Shenghua^{2,3}, LIU Guoqiang¹

(1. Shantou Marine Center, MNR, Shanwei 516600, China; 2. Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China; 3. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, MNR, Hangzhou 310000, China)

Abstract: To evaluate the relationship between macrozoobenthic communities and environmental factors in the eastern coastal waters of Shantou, four voyage investigations were conducted in this study in July, November of 2020 and April, December of 2021. Community structure (species composition, density, biomass, diversity indices and community classification), seasonal variation of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors were analysed. A total of 44 species were collected, which mainly composed of 14 species of annelins, 10 species of arthropods, 9 species of molluscs, and 11 species of others. *Aglaophamus* sp. and *Amphioplus laevis* were the dominant species. The average abundance of macrozoobenthos were 410.4 ind./m² and the biomass were 133.47 g/m². The total density of macrozoobenthos was the greatest in summer, followed by autumn, spring, and winter. Total biomass was the greatest in autumn followed by summer, spring and winter. Shannon index of four seasons were 0.68~0.99, Margalef richness index were

收稿日期: 2023-04-13, 修订日期: 2023-06-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(21307019)

作者简介: 赵晨辉(1992-), 男, 广东汕尾人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: zhaochenhui2017@163.com

0.35 ~ 0.64, and Pielou evenness index were 0.89 ~ 0.98. Cluster analysis showed that five communities of macrozoobenthos can be identified in the studied area. The abundance/biomass curves showed that macrozoobenthic communities were disturbed in summer, but stable in spring, autumn and winter. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that, the main environmental factor affecting macrozoobenthic community was salinity, temperature, ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$) and nitrite ($\text{NO}_2\text{-N}$).

Key words: coastal waters of Shantou; macrozoobenthic community; ABC curve; environmental factors

大型底栖动物是海洋生态系统中重要的生态类群之一,常通过摄食、掘穴和建管等活动影响周边海洋环境,在海洋生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用^[1]。大型底栖动物不但对环境污染反应敏感,而且具有迁移能力弱、活动范围有限、栖息地相对稳定等特点^[2],因此,常被作为海洋生态环境质量变化的重要指示生物^[3]。

汕头市地处闽粤交界,是珠三角经济区和海峡西岸经济区的重要连接点,拥有丰富的渔业资源、港口海岸资源及滨海旅游资源,素有“粤东之门户、华南之要冲”之美称。汕头市东部水系繁多,自南向北有练江、榕江、韩江东溪下半段(莲阳河)、韩江西溪后半段(外砂河、新津河、梅溪河)等,这些水系上游延伸至内陆很远,流域面积广,年径流量大。近年来,随着汕头东部区域经济的快速发展,大量陆源物质在河流的作用下汇入汕头东部近岸海域,对海域生态环境产生了一定的影响。目前,汕头东部近岸海域的海洋生态系统已出现生物多样性降低、种类减少等生态问题。因此,为了解汕头东部近岸海域的生态环境质量及其变化,选取科学有效的生物指示类群开展汕头东部近岸海域的生态环境研究具有重要的意义。

目前,关于汕头市近海区域大型底栖动物群落的研究报道仍较缺乏。黄建荣^[4]对汕头湾底栖甲壳动物资源进行了调查;孙典荣等^[5]对南澎列岛附近海域大型底栖生物的群落特征展开了调查分析;唐以杰、曹启民等则分别对汕头市莲阳河口区红树林、国际湿地示范区的三种大型底栖动物群落进行了研究^[6-7]。以上研究的区域多集中在河口区红树林或南澳岛周边海域,而关于汕头东部近岸海域大型底栖动物群落的研究却鲜有报道。因此,本研究通过分析汕头东部近

岸海域大型底栖动物群落的季节变化、分布特征及其与环境因子的相关性,探讨该海域大型底栖动物群落结构及其驱动因子,以期进一步掌握汕头东部近岸海域生态环境状况,为粤东海域海洋可持续发展和海洋生态文明建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域和时间

在汕头东部近岸海域布设站位 20 个(图 1),分别于 2020 年 7 月(夏季)、11 月(秋季)和 2021 年 4 月(春季)、12 月(冬季)开展共计 4 个航次的调查。

1.2 样本采集与处理

大型底栖动物采样时,采用面积为 0.05 m^2 的抓斗式采泥器重复取样三次,将所得底泥样品倒入孔径为 0.5 mm 的套筛中,用海水冲洗后检出所有生物样品,装入样品瓶中,加入 5% 福尔马林溶液固定,带回实验室进行种类鉴定。鉴定出的物种名称与 WoRMS 网站(<https://www.marinespecies.org/>)进行比对并统一。

底层海水的温度、pH、盐度、溶解氧、化学需氧量、无机磷、亚硝酸盐、硝酸盐和氨等环境因子采样和分析方法按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)进行。站位水深测量和沉积物粒度采样及分析按《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)进行。

1.3 数据处理

运用物种优势度指数 Y 确定群落的优势种,计算公式如下:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为第 i 个物种的数量; N 为所有物种的总个体数; f_i 为第 i 个物种出现的频率; 当优势度 $Y \geq 0.02$ 时,该物种被认定为优势种。

运用 Shannon 多样性指数 H' 、Margalef 丰富

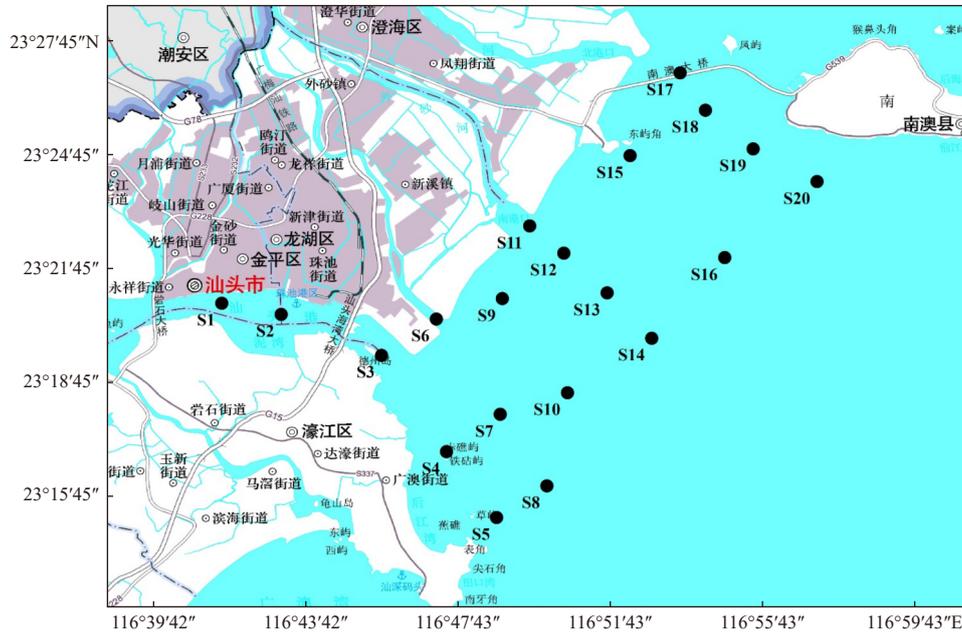


图 1 汕头东部近岸海域采样站位图

Fig. 1 Sampling stations in the eastern coastal waters of Shantou

度指数 d 、Pielou 均匀度指数 J' 分析大型底栖动物群落的生态特征, 计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$d = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 种的个数与该样品总个体数的比值; S 为样品中物种总数; n_i 是第 i 个物种的个体数; N 为所有物种的总个体数, 与公式(1)中 N 为相同参数。

利用 PRIMER 6.0 软件进行聚类分析和非度量多维标度排序分析, 以探讨大型底栖动物群落结构特征。同时, 利用该软件绘制丰度/生物量曲线(ABC 曲线), 以表征大型底栖动物群落稳定性水平及受干扰程度。如果生物量曲线始终在丰度曲线之上, 则表征群落未受扰动, 较为稳定; 反之, 则表征群落受到严重扰动, 不稳定; 当两个曲线交叉或重叠时, 则表征群落受中等程度的扰动, 不够稳定。

利用 Canoco 5.0 软件开展典范对应分析(CCA)或冗余分析(RDA), 并进行蒙特卡洛循环检验, 分析大型底栖动物群落与环境因子的关系。首先进行去趋势对应分析(DCA), 若其最大梯度轴长大于 4, 选用典范对应分析(CCA); 若其最大梯度轴长小于 3, 选用冗余分析(RDA);

若其最大梯度轴长为 3~4, 则两种模型均可采用。

利用 SPSS Statistics 19.0 软件对各季节环境因子进行显著性差异计算。先进行方差齐性检验, 如方差齐性($P > 0.05$), 选择方差分析(ANOVA), 若方差非齐性则选择非参数检验进行分析, 显著性水平设为 0.05。

优势度、多样性指数采用 Microsoft Excel 2016 软件计算; 柱形图采用 Origin 2018 软件绘制; 采样站位图采用软件 ArcGIS 10.6 绘制; 物种栖息密度和生物量空间分布图采用软件 Surfer 11.0 绘制。

2 结果与讨论

2.1 海域环境状况

研究区域环境参数的季节变化见表 1。方差齐性检验结果显示, 方差为非齐性($P < 0.05$)。非参数检验法分析结果表明, 各环境参数季节之间不存在显著性差异($P = 0.39 > 0.05$)。

2.2 种类组成及优势种季节变化

本研究共鉴定出大型底栖动物 44 种, 隶属 8 个类群, 各类群发现的种类数分别为: 环节动物 14 种、节肢动物 10 种、软体动物 9 种、棘皮动物 3 种、脊索动物 3 种、纽形动物 2 种、蠕虫动物 2 种、星虫动物 1 种。部分物种在不同季节

表 1 海洋环境参数(平均值±标准差)的季节变化

Tab.1 Monthly change of environmental parameters (means ± standard deviation) in the studied area

环境参数	春季	夏季	秋季	冬季
水深/m	9.20±3.10	8.50±2.60	9.40±3.10	9.70±2.40
水温/°C	21.10±0.80	24.10±1.50	22.40±0.73	18.90±0.80
盐度	31.42±2.99	32.59±2.59	28.20±3.61	30.13±4.45
pH	8.00±0.09	8.07±0.19	8.11±0.10	8.05±0.17
溶解氧/mg·L ⁻¹	7.05±0.68	5.29±0.84	6.80±0.40	7.18±0.43
化学需氧量/mg·L ⁻¹	0.95±0.41	0.73±0.37	1.32±0.42	1.42±0.62
亚硝酸盐/μg·L ⁻¹	2.10±1.40	2.20±1.70	2.60±1.60	7.30±0.80
硝酸盐/μg·L ⁻¹	15.90±14.10	18.10±12.50	23.50±11.90	2.70±1.30
氨/μg·L ⁻¹	7.80±1.10	7.40±0.80	6.20±0.80	16.90±12.70
无机磷/μg L ⁻¹	1.60±1.50	1.70±1.20	3.40±1.10	3.70±1.50
中值粒径/μm	86.60±278.88	51.60±77.39	49.37±129.78	10.43±6.99

重复出现。在季节变化方面,夏季大型底栖动物种类最丰富(25种),其次是秋季(21种)和春季(18种),冬季最少(仅有12种)(表2)。从物种类群季节变化来看,环节动物在四季中出现的比例均最高,其次是节肢动物、软体动物,而棘皮动物、脊索动物、纽形动物、蠕虫动物、星虫动

物占比则较低。环节动物、节肢动物、软体动物构成了汕头东部近岸海域大型底栖动物的主要类群,这与韩江下游河流、珠江口、柘林湾、南彭列岛附近海域以及福建南部近海等邻近区域发现的主要物种组成相似(表3)^[5,8-11],但种类数量比周边区域低。

表 2 大型底栖动物各季节类群组成和占比

Tab.2 Seasonal variation of species composition and percentage of macrozoobenthos taxon

类群	春季		夏季		秋季		冬季	
	种数	比例/(%)	种数	比例/(%)	种数	比例/(%)	种数	比例/(%)
环节动物	9	50.00	8	32.00	6	28.57	6	50.00
软体动物	3	16.67	7	28.00	6	28.57	1	8.33
节肢动物	2	11.11	6	24.00	4	19.05	2	16.67
棘皮动物	1	5.56	2	8.00	2	9.52	1	8.33
脊索动物	1	5.56	2	8.00	1	4.76	1	8.33
纽形动物	1	5.56	0	0.00	1	4.76	0	0.00
蠕虫动物	0	0.00	0	0.00	1	4.76	1	8.33
星虫动物	1	5.56	0	0.00	0	0.00	0	0.00
合计	18	100	25	100	21	100	12	100

研究海域各季节的优势种存在一定差异(表4)。春季优势种为索沙蚕(*Lumbrineris* sp.)、内卷齿蚕(*Aglaophamus* sp.);夏季优势种为帝纹樱蛤(*Tellinides timorensis*)、光滑倍棘蛇尾(*Amphioplus laevis*);秋季优势种为内卷齿蚕、光滑倍棘蛇尾、胡桃蛤科(Nuculidae);冬季优势种

为内卷齿蚕、中华内卷齿蚕(*Aglaophamus sinensis*)。由优势种组成可知,内卷齿蚕是春、秋、冬三个季节的共同优势种,其余优势种仅在不同季节出现。环节动物多毛类由于个体小,繁殖能力强,适应恶劣环境的能力较强,更能适应复杂多变的水体环境,这可能是其成为区域优势

表 3 邻近区域大型底栖动物类群调查结果

Tab.3 Survey results of macrozoobenthos in the adjacent area

调查区域	种类数	多样性指数 H'	主要类群	数据来源
韩江下游河流	47	—	软体动物、水生昆虫、寡毛类	[8]
柘林湾	89	1.69 ~ 1.95	软体动物、环节动物、棘皮动物、节肢动物	[9]
南彭列岛附近海域	64	2.58 ~ 3.41	多毛类、软体动物、甲壳类	[5]
福建南部近海	126	3.69(均值)	环节动物、节肢动物、软体动物	[10]
珠江口	34	0.79 ~ 1.49	多毛类、软体动物	[11]
汕头东部近岸海域	44	0.68 ~ 0.99	环节动物、节肢动物、软体动物	本研究

表 4 大型底栖动物各季节优势种及优势度

Tab.4 Dominant species and its dominance degree of macrozoobenthos during four seasons

类群	优势种	优势度(Y)			
		春季	夏季	秋季	冬季
环节动物	索沙蚕(<i>Lumbrineris</i> sp.)	0.100	—	—	—
环节动物	内卷齿蚕(<i>Aglaophamus</i> sp.)	0.023	—	0.037	0.031
软体动物	帝纹樱蛤(<i>Tellinides timorensis</i>)	—	0.024	—	—
棘皮动物	光滑倍棘蛇尾(<i>Amphioplus laevis</i>)	—	0.024	0.030	—
软体动物	胡桃蛤科(Nuculidae)	—	—	0.027	—
环节动物	中华内卷齿蚕(<i>Aglaophamus sinensis</i>)	—	—	—	0.023

类群的主要原因。环节动物多毛类的旺发是环境质量变差、底质不稳定的直接证明^[12-15],说明研究海域已经受到一定程度的污染。

2.3 栖息密度、生物量和多样性

研究海域大型底栖动物年均栖息密度和生物量分别为 410.4 ind./m^2 和 133.47 g/m^2 。从季节变化看(图 2),大型底栖动物总栖息密度(ind./m^2)为夏季(640.1)>秋季(447.3)>春季(340.5)>冬季(213.7),最高值出现在夏季;总生物量(g/m^2)变化表现为秋季(206.47)>夏季(154.39)>春季(115.02)>冬季(58.01),最高值出现在秋季。春、冬季大型底栖动物的栖息密度和生物量较低。从种类上看,环节动物、软体动物、节肢动物、棘皮动物、脊索动物、纽形动物、蠕虫动物、星虫动物的平均栖息密度分别为 47.2 ind./m^2 、 51.9 ind./m^2 、 18.0 ind./m^2 、 71.2 ind./m^2 、 28.9 ind./m^2 、 6.7 ind./m^2 、 6.7 ind./m^2 和 6.7 ind./m^2 ,平均生物量分别为 8.71 g/m^2 、 21.20 g/m^2 、 10.45 g/m^2 、 17.60 g/m^2 、 4.53 g/m^2 、 5.94 g/m^2 、 19.00 g/m^2 和 0.40 g/m^2 。

研究海域大型底栖动物各季节栖息密度空

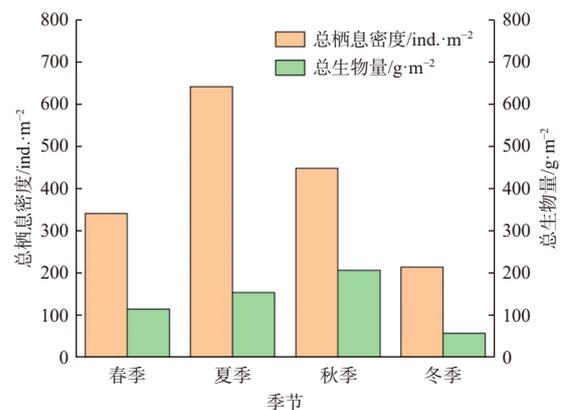


图 2 大型底栖动物总栖息密度和总生物量季节变化

Fig. 2 Seasonal change of macrozoobenthic abundance and biomass

间分布呈不同的特征(图 3)。春、冬季时,较高值出现在榕江、新津河、外砂河、莲阳河及濠江近岸河口区域;夏季时,新津河口和 S16 号站位附近区域出现较高值,其他区域差异不大;秋季时,栖息密度则随站位由近向远逐渐增加。大型底栖动物各季节生物量的空间分布(图 4)也有差异。春、夏、冬季时,莲阳河入海口附近区域生物量较高,其他区域生物量差别不大;秋季时,

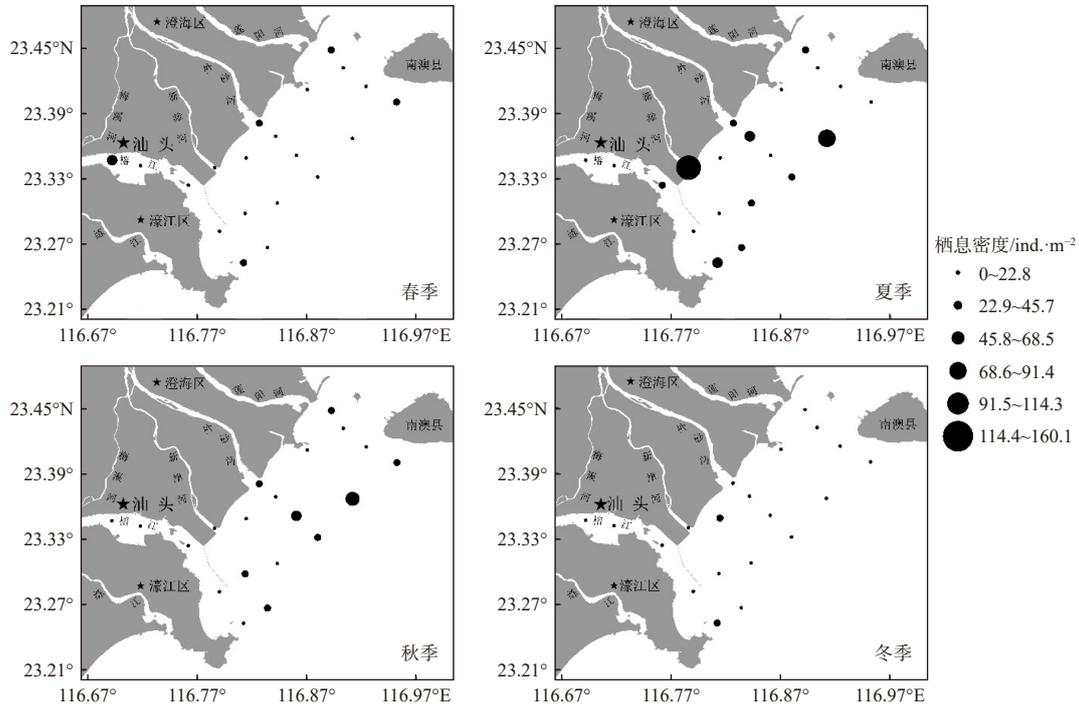


图 3 大型底栖动物各季节栖息密度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of macrozoobenthic abundance during four seasons

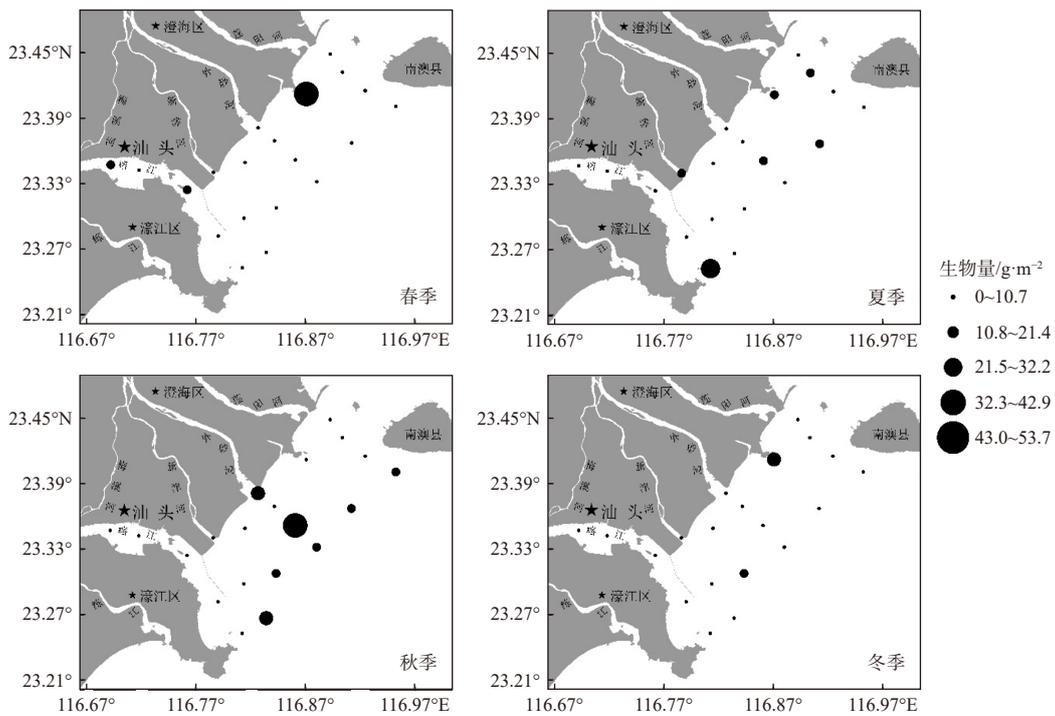


图 4 大型底栖动物各季节生物量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of macrozoobenthic biomass during four seasons

外砂河入海口区域为高值区, 而周边区域含量较低。

研究海域大型底栖动物的 Shannon 多样性指数 H' 、均匀度指数 J' 、丰富度指数 d 结果见

表5。Shannon 多样性指数为 0.68 ~ 0.99, Margalef 丰富度指数为 0.35 ~ 0.64, 两者均表现为夏季最高而冬季最低; Pielou 均匀度指数为 0.89 ~ 0.98, 表现为冬季最高而夏季最低。研究区域内大型底栖动物多样性指数不高 ($H' < 1$), 与邻近区域相比处于较低水平(表3)。

表5 大型底栖动物多样性指数的季节变化

Tab.5 Seasonal variation of macrozoobenthos diversity index

季节	多样性指数(H')	丰富度指数(d)	均匀度指数(J')
春季	0.80	0.47	0.91
夏季	0.99	0.64	0.89
秋季	0.97	0.56	0.94
冬季	0.68	0.35	0.98

河口区大型底栖动物的空间分布受水动力的影响较大^[16-17]。根据大型底栖动物群落栖息密度和生物量空间分布结果来看, 研究区域大型底栖动物主要聚集于近岸区域, 尤其是河口入海

区。研究区域为强潮型河口区, 底质沉积较粗, 岸滩冲淤变化剧烈, 多支河流裹挟上游物质流入近岸区域, 水体环境极不稳定。在汕头港外, 上升流和涨潮流的流路均随沿岸流向东北方向运动。同时, 外海传来的协振潮进入近岸时, 因受榕江入海口附近地形的影响, 底层余流的流向表现为沿岸线流向湾内^[18]。因此, 在粤东冲淡水、闽浙沿岸水、台湾暖流西支水、南海表层水、南海次表层水等多股不同属性的水系作用下^[19-20], 该海区大型底栖动物群落结构呈近岸区域汇集、其他区域分散的空间分布格局。多种水动力模式的交汇作用可能是研究区大型底栖动物群落在空间分布出现季节性差异的主要原因。

2.4 群落聚类分析

将各个站位 4 个季节的数据进行 Bray-Curtis 相似性聚类分析(图5), 以 20% 的相似性水平进行划分, 研究区域的大型底栖动物可分为 5 个群落。

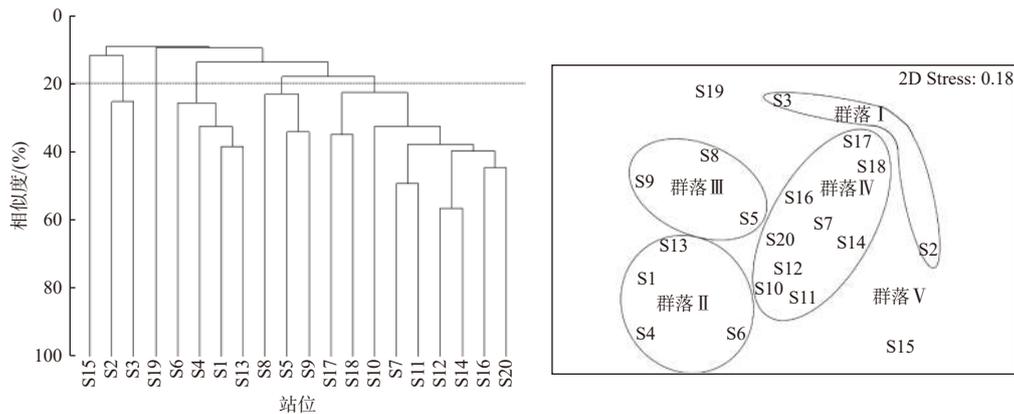


图5 大型底栖动物聚类分析和非度量多维标度分析

Fig. 5 Cluster analysis and non-metric multidimensional scaling analysis of macrozoobenthos

(1)多鳞虫科-其他类群落(群落 I): 该群落主要位于榕江珠池肚河口区域, 占据了 10% 的站位(站位 S2、S3)。大型底栖动物共采集到 7 种, 平均生物量为 5.27 g/m^2 , 平均栖息密度为 16.2 ind./m^2 。优势种为多鳞虫科(Polynoidae)。

(2)索沙蚕-帝纹樱蛤群落(群落 II): 该群落主要位于榕江、新津河入海口近岸区域, 占据了 20% 的站位(站位 S1、S4、S6、S13)。大型底栖动物共采集到 11 种, 平均生物量为 3.81 g/m^2 , 平均栖息密度为 30.35 ind./m^2 。优势种为索沙蚕、

帝纹樱蛤。

(3)中华内卷齿蚕-光滑倍棘蛇尾群落(群落 III): 该群落主要位于榕江、新津河入海口西南侧近岸区域, 占据了 15% 的站位(站位 S5、S8、S9)。大型底栖动物共有 17 种, 平均生物量为 2.64 g/m^2 , 平均栖息密度为 16.89 ind./m^2 。优势种为中华内卷齿蚕、光滑倍棘蛇尾。

(4)内卷齿蚕-光滑倍棘蛇尾-索沙蚕-胡桃蛤科群落(群落 IV): 该群落主要位于榕江、新津河、外砂河、莲阳河入海口外东侧区域, 占据了

45% 的站位(站位 S7、S10、S11、S12、S14、S16、S17、S18、S20)。大型底栖动物共采集到 32 种, 平均生物量为 2.24 g/m^2 , 平均栖息密度为 25.45 ind./m^2 。优势种为内卷齿蚕、光滑倍棘蛇尾、索沙蚕、胡桃蛤科。

(5) 其他群落(群落 V): 该群落位于南澳岛西侧区域(站位 S15、S19), 距离各河流入海口较远。大型底栖动物共采集到 11 种, 平均生物量为 12.2 g/m^2 , 平均栖息密度为 8.52 ind./m^2 。物种间相似性很低(低于 20%), 差异较大。优势种为美女白樱蛤(*Macoma candida*)。

有研究表明, 大型底栖动物不同分类阶元区分群落的改变主要依赖于人类活动的干扰强度,

人类活动的干扰会促进更高分类阶元(属级、科级)的物种分类聚集^[21-22]。聚类分析结果显示, 多个群落易聚集在周边人类活动密集的榕江、新津河、外砂河、莲阳河等入海口区, 结合前文生物多样性的分析结果, 进一步反映了研究区域大型底栖动物群落结构受到了人类活动的影响。

2.5 生物群落稳定性

ABC 曲线分析结果显示(图 6): 春季、秋季、冬季时, 生物量曲线均在丰度曲线之上, 说明大型底栖动物群落未受扰动, 较为稳定; 夏季时, 生物量曲线起点低于丰度曲线起点, 两条曲线有交叉, 说明大型底栖动物群落受到中等程度的扰动, 不稳定。

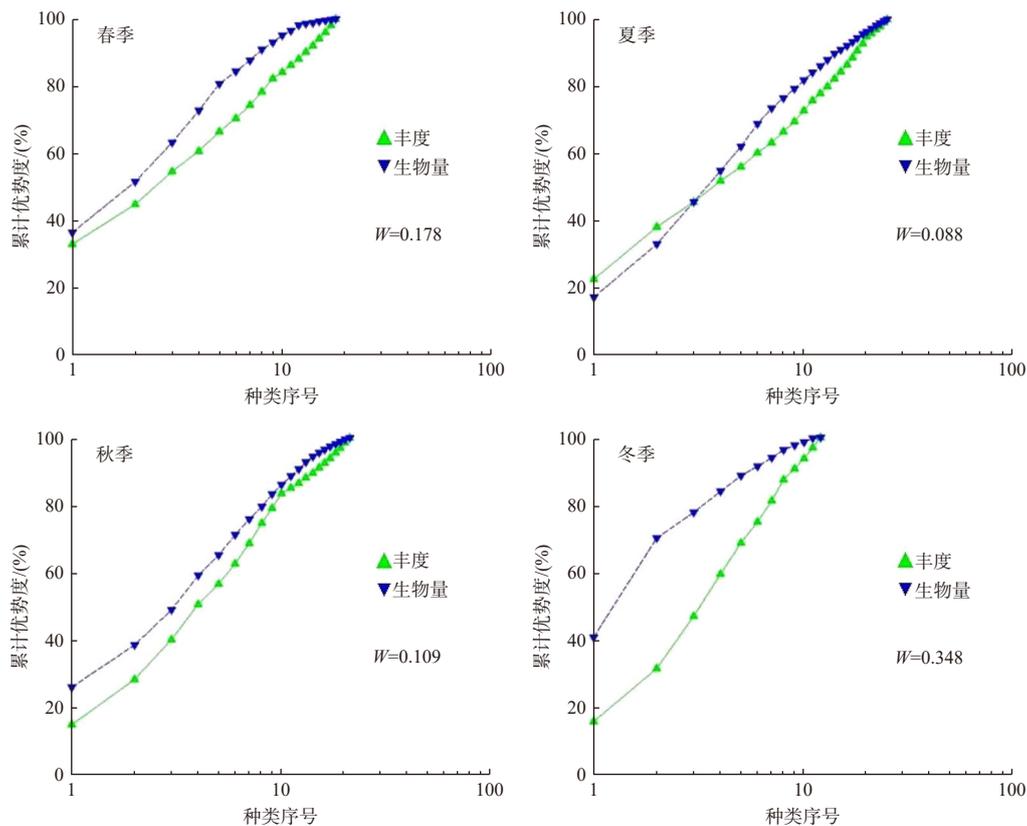


图 6 各季节大型底栖动物群落 ABC 曲线

Fig. 6 ABC curves of macrozoobenthos community in four seasons

汕头市夏季(2020 年 7 月)的降雨量大于同年其他三个季节, 充沛的雨量使莲阳河、外砂河、新津河等周边江河水位上涨, 河流更易携带上游沿岸的污染物质进入汕头东部近岸海域。同时, 夏季底层水温较高(平均水温为 $24.1 \text{ }^\circ\text{C}$), 高温会加速有机体的代谢效率, 促进水体中有机

质等物质分解, 进一步导致底栖生物的栖息环境恶化, 群落结构的稳定性受到影响^[23]。当然, 影响汕头东部近岸海域底栖动物群落结构的因素还有很多, 如航道船只的扰动、周边养殖业的养殖活动以及水体富营养化等, 都会对底栖动物群落的分布产生较大影响。

2.6 大型底栖动物与环境因子的关系

对不同季节不同站位的物种组成与环境因子关系进行分析,可以确定影响大型底栖动物群落结构变化的主要环境因子^[24]。去趋势对应分析(DCA)结果显示,最大梯度轴长均大于 4.0,因此采用典范对应分析(CCA)方法对四个季节的数据进行分析。

各季节 CCA 排序中轴 1 和轴 2 的特征值以及物种与环境因子相关系数显示,第一排序轴和所有轴均呈显著性差异,排序图(图 7)能较好地

反映物种和环境因子之间的关系。春季时,底栖动物群落与各个环境因子数据之间无显著相关关系(P 值均大于 0.05)。夏季时,盐度($F=2.1, P=0.002$)、水温($F=1.6, P=0.012$)、氨($F=1.6, P=0.020$)与底栖动物群落之间具有显著相关性。秋季时,硝酸盐($F=2.0, P=0.004$)、亚硝酸盐($F=1.7, P=0.022$)与底栖动物群落之间具有显著相关性。冬季时,盐度($F=2.0, P=0.004$)与底栖动物群落之间具有显著相关性,而其他环境因子与物种数据均无显著相关关系(P 值均大于 0.05)。

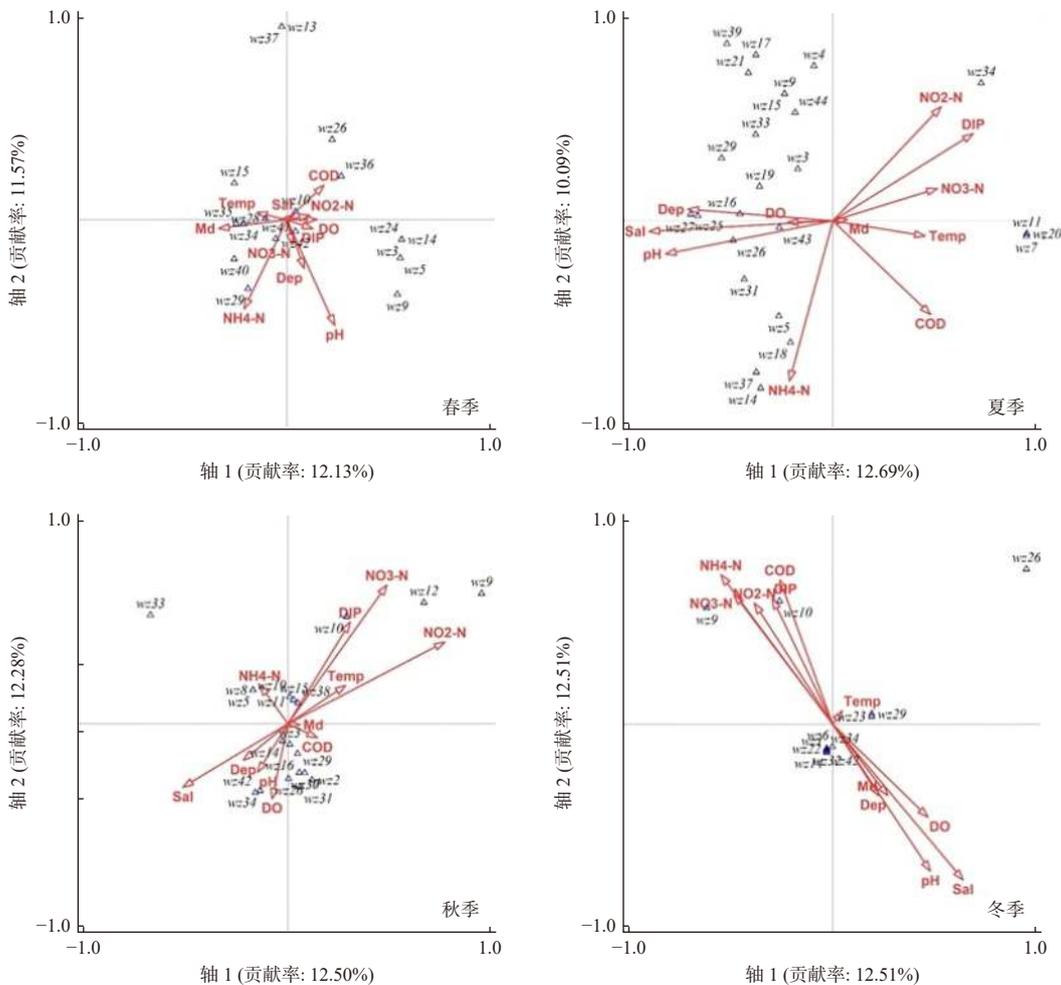


图 7 大型底栖动物与环境因子间 CCA 排序图

Fig. 7 CCA ordination diagram between major species of macrozoobenthic community and environmental factors

大型底栖动物群落特征受环境因子影响较大^[25-26]。全秋梅等认为温度、有机质和中值粒径是影响胶州湾大型底栖动物分布特征的主要因子^[27]。彭松耀等认为珠江口大型底栖动物群落

在不同季节受不同环境因子影响,夏季锌、铜、铅、磷酸盐、透明度与群落相关性显著,秋季为氨,冬季和春季则分别为透明度和温度^[11]。寿鹿等认为杭州湾大型底栖动物受自然环境特征的影响比受人类活动的影响大,不同物种受物理因子、生物化学因子影响程度不同^[14]。孙艺等认

为不同分类阶元对环境因子响应结果在不同季节存在差异^[22]。在不同季节不同区域,影响大型底栖动物群落分布特征的环境因子往往不同。本研究典范对应分析结果显示,在夏、秋、冬季中,盐度、水温和含氮营养盐是影响大型底栖动物群落结构的主要环境因子。而春季时,环境因子均未与底栖动物群落数据呈显著相关关系。大型底栖动物运动能力弱,如内卷齿蚕、索沙蚕等底栖生物往往钻进或依附在底质泥沙中生存。当河流冲刷、船舶航行、渔业养殖等活动导致底质环境产生较大扰动时,大型底栖动物易随沉积物底质迁移^[16]。同时,沉积物间隙水和上覆水等周边多种环境因素也制约着大型底栖动物的生存,这可能是导致春季时大型底栖动物群落特征与单个环境因子无明显相关性的原因。在河口区域,水温和盐度是影响大型底栖动物丰度的重要因子,对底栖生物的分布和生长起关键性作用^[28]。水温不仅可通过影响浮游植物和浮游动物的生长而间接影响底栖动物的摄食效率,还可直接降低耐受性差的底栖动物的活动能力,进而降低其生长速率。盐度梯度变化对狭盐性物种(包括底栖动物、鱼类和浮游植物)的分布具有胁迫限制作用^[29],能通过扰动底质稳定性对大型底栖动物群落产生影响。含氮营养盐在不同季节均对大型底栖动物群落有较大影响。有研

究表明,含氮无机化合物对大型底栖生物具有一定的毒性效应^[30],对海洋大型底栖动物的生长速率、繁殖和代谢均会产生影响^[31]。水体富营养化直接影响大型底栖动物群落的分布特征^[32]。研究区域西北侧的众多河流携带大量陆源含氮污染物汇入该区域。同时,研究区域东北侧柘林湾、南澳岛周边发达的养殖业也为该区域带来大量的含氮营养物质。这些含氮营养物质的输入改变了大型底栖动物的摄食结构,这可能是氨、硝酸盐和亚硝酸盐在不同季节均与物种丰度具有较好相关性的原因。因此,除水动力等自然环境特征的影响外,周边人类活动也会对研究区域的大型底栖动物群落结构产生较大的影响。

本研究结果显示(表6),盐度、水温、氨、硝酸盐、亚硝酸盐是影响研究区域大型底栖动物群落结构的主要环境因子。由于河口区大型底栖动物的栖息环境复杂多变,影响其群落结构的因素众多。除本文采集到的环境因子外,沉积物的理化性质(有机质、硫化物、氧化还原电位等)、上覆水中的叶绿素 *a* 等因子也会直接或间接影响底栖动物群落。今后对汕头海域的研究中需增加该类环境因子的测定及研究,进一步探讨该海域大型底栖动物群落结构变化特征,以更加科学合理地开发、利用该海域。

表6 大型底栖动物与环境因子间 CCA 排序结果

Tab.6 Results of CCA between major species of macrozoobenthic community and environmental factors

季节	第1轴		第2轴		影响大型底栖动物群落的主要环境因子
	特征值	物种-环境相关系数	特征值	物种-环境相关系数	
春季	0.8857	0.9519	0.8447	0.9421	无($P>0.05$)
夏季	0.9832	0.9968	0.7811	0.9635	盐度($F=2.1, P=0.002$); 水温($F=1.6, P=0.012$); 氨($F=1.6, P=0.020$)
秋季	0.9376	0.9879	0.9201	0.9774	硝酸盐($F=2.0, P=0.004$); 亚硝酸盐($F=1.7, P=0.022$)
冬季	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	盐度($F=2.0, P=0.004$)

3 结论

(1)本研究共采集到大型底栖动物 44 种,其中,环节动物 14 种,节肢动物 10 种,软体动物 9 种,其他类 11 种。优势种类以内卷齿蚕、光滑倍棘蛇尾为主。在季节变化上,大型底栖动物总栖息密度表现为夏季>秋季>春季>冬季,总生物

量表现为秋季>夏季>春季>冬季。各季节的 Shannon 多样性指数为 0.68 ~ 0.99, Margalef 丰富度指数为 0.35 ~ 0.64, Pielou 均匀度指数为 0.89 ~ 0.98。

(2)聚类分析结果显示,研究区域的大型底栖动物可分为 5 个群落。ABC 曲线分析结果表明,在夏季,群落结构受到中等程度扰动而不稳

定,春、秋、冬季则较为稳定。

(3)研究区域大型底栖动物群落结构受自然环境和人类活动两方面因素影响。盐度、水温和含氮营养盐是影响大型底栖动物群落结构的主要环境因子。

参考文献:

- [1] QIU D D, YAN J G, MA X, et al. How vegetation influence the macrobenthos distribution in different saltmarsh zones along coastal topographic gradients[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 151: 104767.
- [2] 姚凯胜, 和雅静, 赵永晶, 等. 流溪河大型底栖动物群落结构及其影响因素[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(3): 83-93.
- [3] 陈梓林, 李纯厚, 肖雅元, 等. 江门近岸海域大型底栖动物群落结构的分布特征[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(4): 18-27.
- [4] 黄建荣. 广东省主要海湾底栖甲壳动物资源和生态学研究[D]. 广州: 中山大学, 2009.
- [5] 孙典荣, 李纯厚, 吴洽儿, 等. 广东南彭列岛海域大型底栖生物群落特征[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(10): 2084-2087.
- [6] 唐以杰, 陈思敏, 方展强, 等. 汕头3种人工红树林湿地大型底栖动物群落的比较[J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 53-60.
- [7] 曹启民, 陈桂珠, 黄雄飞, 等. 汕头湿地示范区红树林底栖动物体中石油烃组成特征分析[J]. *环境化学*, 2009, 28(4): 547-552.
- [8] 蓝宗辉. 韩江下游底栖动物的分布及其对水质的评价[J]. *生态学杂志*, 1997, 16(4): 24-28.
- [9] 舒黎明, 陈丕茂, 黎小国, 等. 柘林湾及其邻近海域大型底栖动物的种类组成和季节变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 124-132.
- [10] 黄 昆, 傅婷婷, 黄智伟, 等. 福建省南部近海夏季大型底栖动物群落特征[J]. *渔业研究*, 2022, 44(4): 312-323.
- [11] 彭松耀, 赖子尼, 蒋万祥, 等. 珠江口大型底栖动物的群落结构及影响因子研究[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(6): 1179-1189.
- [12] 张 莹, 刘元进, 张 英, 等. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 888-895.
- [13] 孙道元, 陈 木. 小头虫作为有机质污染指示生物的调查研究[J]. *环境科学*, 1978 (1): 19-21.
- [14] 寿 鹿, 曾江宁, 廖一波, 等. 杭州湾大型底栖动物季节分布及环境相关性分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 151-159.
- [15] 刘 坤, 林和山, 何雪宝, 等. 厦门近岸海域大型底栖动物摄食功能群及其与环境因子的关系[J]. *海洋学报*, 2016, 38(12): 95-105.
- [16] 陈含墨, 渠晓东, 王 芳. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 758-765.
- [17] BOON A R, VAN DALFSEN J. Long-term changes in the macrobenthic assemblages at a harbour sediment disposal site in the southern North Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2022, 178: 105663.
- [18] 陈 翰, 陈 忠, 颜 文, 等. 汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 314-324.
- [19] 许金电, 郭小钢, 李 立, 等. 2002年夏季粤东外海的海洋状况[J]. *台湾海峡*, 2003, 22(2): 218-228.
- [20] 范立群, 苏育嵩, 李凤岐. 南海北部海区水团分析[J]. *海洋学报*, 1988, 10(2): 136-145.
- [21] ELLIS D. Taxonomic sufficiency in pollution assessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1985, 16(12): 459.
- [22] 孙 艺, 李宏俊, 顾炎斌, 等. 利用分类充分性对辽河口大型底栖动物监测的优化研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1645-1655.
- [23] 张海生, 陆斗定, 朱小莹, 等. UK³⁷沉积地层记录: 三门湾海表温度(SST)和El Niño现象及其对大型底栖动物生命活动的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 4935-4943.
- [24] 王宗兴, 韦钦胜, 刘 军, 等. 乳山湾外海夏季大型底栖动物分布与环境因子的典范对应分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(4): 599-604.
- [25] SAHU N, HALDAR S. Evaluation of benthic quality status and ecosystem functioning of soft bottom macrobenthos in the intertidal region with reference to Gulf of Khambhat, India[J]. *Journal of Sea Research*, 2022, 189: 102273.
- [26] HU C Y, DONG J Y, GAO L J, et al. Macrobenthos functional trait responses to heavy metal pollution gradients in a temperate lagoon[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1107-1116.
- [27] 全秋梅, 肖雅元, 徐姗姗, 等. 胶州湾大型底栖动物群落结构季节变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 4110-4120.
- [28] TESKE P R, WOOLDRIDGE T H. What limits the distribution of subtidal macrobenthos in permanently open and temporarily open/closed south African estuaries? Salinity vs. sediment particle size[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(1/2): 225-238.
- [29] VAN DIGGELEN A D, MONTAGNA P A. Is salinity variability a benthic disturbance in estuaries?[J]. *Estuaries and Coasts*, 2016, 39(4): 967-980.
- [30] CAMARGO J A, ALONSO A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment[J]. *Environment International*, 2006, 32(6): 831-849.
- [31] JESSEN C, BEDNARZ V N, RIX L, et al. Marine eutrophication[M]//ARMON R H, NNINEN O H. *Environmental Indicators*. Dordrecht: Springer, 2015: 177-203.
- [32] 龚志军, 谢 平, 唐汇涓, 等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2001, 25(3): 210-216.

(本文编辑: 曲丽梅)