

DOI: 10.5846/stxb202204040862

杨颖, 谭赛章, 陈思思, 周红宏, 季晓, 蔡嫣然, 纪焕红, 杨幸幸, 范海梅, 邓邦平. 2011—2020 年长江口大型底栖动物群落结构变化趋势. 生态学报, 2023, 43(14): 5863-5874.

Yang Y, Tan S Z, Chen S S, Zhou H H, Ji X, Cai Y R, Ji H H, Yang X X, Fan H M, Deng B P. The variation of macrobenthos community structure in Changjiang River estuary from 2011 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5863-5874.

2011—2020 年长江口大型底栖动物群落结构变化趋势

杨颖^{1,2,*}, 谭赛章^{1,2}, 陈思思^{1,2}, 周红宏¹, 季晓¹, 蔡嫣然³, 纪焕红^{1,2}, 杨幸幸¹, 范海梅^{1,2}, 邓邦平^{1,2}

1 国家海洋局东海环境监测中心, 上海 201206

2 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206

3 辽宁石油化工大学环境与安全工程学院, 抚顺 113005

摘要:对 2011—2020 年夏季长江口 48 个站位的大型底栖动物定量监测数据进行统计分析, 研究长江口海域底栖生物群落时空结构演变特征。结果表明, 近 10 年长江口海域共鉴定大型底栖动物 284 种, 其中多毛类 128 种, 占总种数的 45.1%, 甲壳类 64 种占 22.2%, 软体动物 56 种占 19.7%, 棘皮动物 16 种占 5.6%, 其他类合计 20 种。平均生物密度为 (79.5 ± 45.9) 个/ m^2 (年份变幅 14.7—195 个/ m^2)。平均生物量为 (5.20 ± 3.25) g/ m^2 (年份变幅 1.01—10.11 g/ m^2)。多毛类、软体动物、甲壳类是生物密度和生物量组成的主要类群。十年期间种类数、生物密度和生物量均呈现明显上升趋势, 口外区贡献最突出。四个监测区域(南支、北支、杭州湾、口外)的优势种差异大。丝异须虫 *Heteromastus filiformis* 在各年份的优势种中出现的频度显著最大。总体来看, 长江口监测区域大型底栖动物群落自然演变趋势向好。三项多样性指数统计结果表明, 口外区大型底栖动物种类组成多样性水平显著高于口内三个区。生物群落的种类、生物密度和生物量组成及分布的时空格局与河口环境砂沉积底质主体特征、长江口径流动力影响以及海岸带建设工程扰动等因素密切相关。以口外区最外三站为生物群落结构单元绘制丰度/生物量比较曲线(ABC)表明, 十年期间该区底栖生物群落较稳定, 未受不良扰动。

关键词:大型底栖动物; 生物多样性; 群落; 变化趋势; 长江口

The variation of macrobenthos community structure in Changjiang River estuary from 2011 to 2020

YANG Ying^{1,2,*}, TAN Saizhang^{1,2}, CHEN Sisi^{1,2}, ZHOU Honghong¹, JI Xiao¹, CAI Yanran³, JI Huanhong^{1,2}, YANG Xingxing¹, FAN Haimei^{1,2}, DENG Bangping^{1,2}

1 East China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Shanghai 201206, China

2 Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China

3 Liaoning Petrochemical University, Fushun 113005, China

Abstract: Based on the quantitative data of macrobenthos in 48 sites, Changjiang River estuary from 2011 to 2020, the benthos community structure variation and spatial distribution were analyzed. It indicated that there were 284 species macrobenthos in Changjiang River estuary in past 10 years. It included 128 species of Polychaeta with the total percentage of 45.1%, 64 species of Crustacean with the total percentage of 22.2%, 56 species of Granulifusus kiranus with the total percentage of 19.7%, 16 species of Echinodermata with the total percentage of 5.6%, and 20 species of others. The average density was (79.5 ± 45.9) ind/ m^2 (interannual ranges was 14.7—195 ind/ m^2). The average biomass was (5.20 ± 3.25) g/ m^2

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3101702);上海市科委科研项目(18DZ1206503)

收稿日期:2022-04-04; **网络出版日期:**2023-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yy@ecs.mnr.gov.cn

(interannual ranges was 1.01—10.11 g/m²). The species number, density and biomass increased significantly in the past decade, while sea area made a great contribution. The dominant species were very different in four areas (North branch, South branch, Hangzhou bay, and Sea area). *Heteromastus filiformis* was the dominant species with the highest frequency of occurrence in every year. Overall, the variation of macrobenthos community structure became better in Changjiang River estuary. Three diversity indexes indicated that the level of biodiversity in sea area was significantly higher than in other three areas. The lower diversity closely related to sediment types, Changjiang runoff hydrodynamics and engineering disturbance etc. Making the Abundance Biomass Comparison Curve (ABC curve), with the easternmost section (3 sites) in the sea area, the macrobenthos community structure was relatively stable and no clearly disruptions during the decade.

Key Words: macrobenthos; biodiversity; community structure; variation trend; Changjiang River estuary

长江口是我国最大的河流入海口,长江口生态系统状况关系到长江流域、东海近海的海洋资源与生态环境以及通过鸟类迁徙影响到全球生物多样性格局,具有极其重要的生态战略地位。在长江大保护上升到国家战略的背景下,研究长江口海域生态系统状况具有重大意义。底栖生物作为生态系统中的重要组成部分,在海洋食物网和沉积物-水层界面的生物地球化学循环过程中起着重要的作用,它们通过参与碳、氮、硫等元素的生物地化循环,以及影响污染物迁移转化与沉积物稳定性,共同维持着生态系统的结构和功能^[1-2]。因此,有关底栖生物生态的研究受到国内外学术界的广泛关注。关于长江口海域底栖生物研究可追溯到 20 世纪 50 年代末^[3],在 60 年左右的时间里,众多学者对长江口海域底栖生物开展了广泛深入的研究^[3-25]。已有的研究主要集中在长江口及邻近海域大型底栖动物的群落结构^[4-9]及演变趋势分析^[3,10-12]、生物多样性^[13-14]、生态学研究^[15]等,还有针对多毛类^[16]、底栖硅藻、原生动物、小型底栖生物^[17-18]、微型底栖生物群落结构^[19]、底栖纤毛虫^[20]等的研究。除了上述针对底栖生物生态的研究外,部分学者还开展了长江口海域底栖生物与低氧区的关系^[21-23]、大型底栖生物群落与环境因子的典范对应分析^[24]、底栖生物及三峡工程对其影响的预测^[25]等研究,取得了丰富成果。基于 2011—2020 年在长江口海域开展的夏季定点站位监测资料,对长江口不同区域(根据水文状况分为南支、北支、杭州湾北岸、口外海域)的大型底栖动物生态状况进行统计分析,报导长江口区不同水文特征区域的底栖生物群落结构和演变趋势,可为长江口生态系统研究和生态资源与环境的开发利用及保护提供科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据资料来源

1.1.1 监测区域与站位

监测区域为长江口及邻近海域,范围为徐六泾以东至 123°,启东嘴以南至杭州湾上海海域以北,共布设 48 个站位。按照长江口海域的水文特点,将监测海域划分为 4 个区域(图 1),分别简称为“南支”“北支”“杭州湾”和“口外”,其中南支布设监测站位 17 个、北支 4 个、杭州湾 10 个、口外 17 个。

1.1.2 数据来源

本研究的数据采用国家海洋局东海环境监测中心 2011—2020 年间每年 8 月份在长江口开展的生物多样性监测项目中大型底栖动物定量监测数据。采样及监测按照《海洋监测规范》^[26]中的方法检获生物样品。使用 0.1m²的抓斗式采泥器,每站采集 3 次合并为一个定量样品。泥样通过孔径 0.5mm 的网筛淘洗。生物量测定采用 0.001g 感量天平(BS200S-WEI 210g),生物种名参照《中国海洋生物名录》^[27]。文中 3.1 所用的 2020 年长江口海域环境因子数据为与大型底栖动物同步监测的数据。

1.2 数理统计方法

1.2.1 生物多样性指数、优势度和重要值

采用种类多样性指数 H' (Shannon-Weaver index)、种类丰富度指数 d (Margalef'S index)、均匀度指数 J'

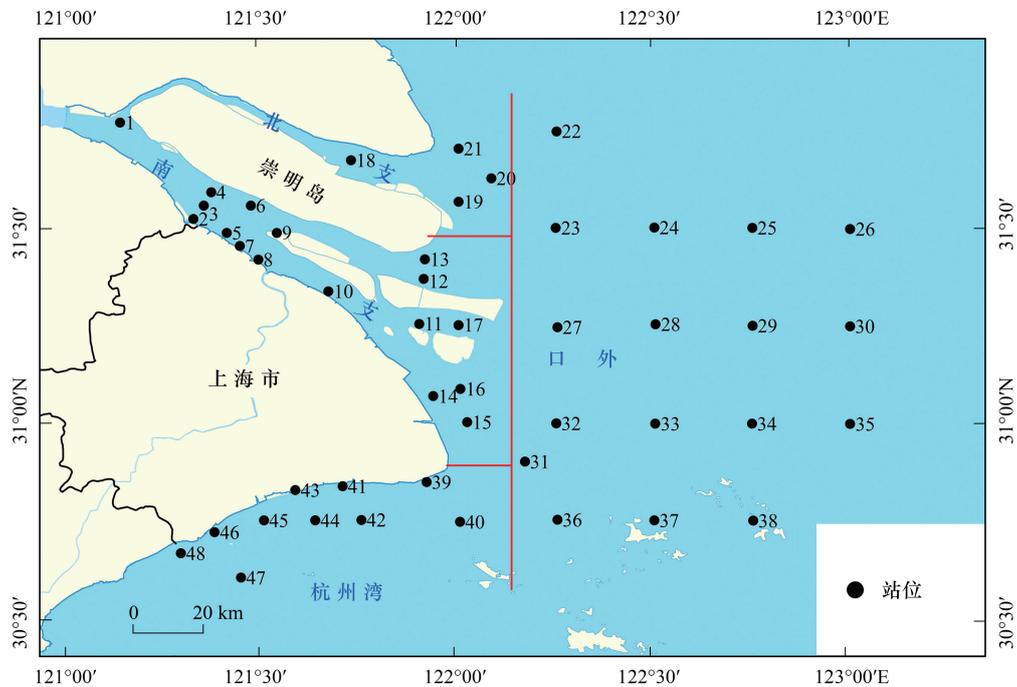


图 1 长江口海域大型底栖动物监测站位示意图

Fig.1 The monitoring sites in Changjiang River estuary

图中数字为站位编号

(Pielou index)、优势度指数 Y [28] 和相对重要性指数 (IRI) 对生物多样性进行评价, 计算公式如式 (1) — (5)。式中: S 为种类数; N 为所有种的个体总数; P_i 为样品中第 i 种个体数占总个体数的比例; W_i 为样品中第 i 种生物量占总生物量的比例; f_i 为第 i 种在各样品中的出现频率; n_i 为样品中第 i 种生物个体数。取 $Y_i \geq 0.02$ 的种类为优势种类 [29]。

$$H' = - \sum P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$d = (S - 1) / \log_2 S \quad (2)$$

$$J' = H' / \log_2 S \quad (3)$$

$$Y_i = n_i / N \times f_i \quad (4)$$

$$\text{IRI} = (P_i + W_i) \times f_i \quad (5)$$

1.2.2 多元统计分析

采用等级聚类 (Cluster)、非度量多维标度 (MDS) 等多变量分析方法分析大型底栖动物群落的空间格局 [28]; 采用丰度/生物量比较曲线 (ABC 曲线) 分析群落的稳定性 [28]。多变量分析及 ABC 曲线统计结果应用 PRIMER 5.0 [30] 软件统计生成。采用典范对应分析 (CCA) 排序图分析大型底栖动物分布与环境因子的关系, (CCA) 图采用 CANOCO 4.5 绘制。

2 监测结果

2.1 种类组成

2011—2020 年, 长江口海域定量监测样品共鉴定大型底栖动物 284 种, 其中定种 259 种, 另有 26 种鉴定到属。其中多毛类 128 种, 占总种数的 45.1%; 甲壳类 64 种占 22.4%; 软体动物 56 种占 19.7%; 棘皮动物 16 种占 5.6%, 其他类 20 种占 7.0%。其他类含脊索动物 12 种, 刺胞动物 3 种, 蠕虫动物和星虫动物各 2 种, 纽形动物 1 种。

各年份大型底栖动物种类组成详见表 1。多毛类是第一大类群,不同年份占比范围为 35.5%—51.4%,甲壳类为第二大类群,不同年份占比范围 14.4%—26.5%;软体动物为第三大类群,2011、2014、2017 年的占比超过甲壳类。其他类群中脊索动物、棘皮动物和刺胞动物种类数较少,纽形动物、蠕虫动物和星虫动物绝大部分年份只有 1 种。

表 1 各年份大型底栖动物种类组成/种

Table 1 The community structures of macrobenthos in 2011—2020 in Changjiang River estuary

种类组成/种 Species compositions	年份 Year									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
多毛类 Polychaeta	36	36	48	48	53	57	63	55	40	55
甲壳类 Crustacean	11	15	18	13	27	30	27	38	29	41
软体动物 Granulifusus kiranus	14	11	13	20	20	23	28	24	18	34
棘皮动物 Echinodermata	3	3	4	4	8	8	5	5	6	5
其他类 Other groups	5	8	12	5	16	16	18	18	17	20
总数 Total	70	73	95	90	124	134	141	140	110	155

2011—2020 年,长江口大型底栖动物总种类数呈现明显升高的趋势,2020 年与 2011 年相比增加了 1 倍以上(图 2)。从类群上,多毛类、甲壳类和软体动物等主要类群的种类数都呈现升高的趋势。从分布区域上,口外海域种类数呈振荡增长趋势,南支、北支和杭州湾北岸区域种类数总体较少,呈波动状态(图 3)。对 4 个区域生物种类进行双因素方差分析,南支、北支和杭州湾三区的种类数无显著差异($F_{2,18} = 0.33, P = 0.33$),与口外海域种类数有极显著差异($F_{3,27} = 97.4, P < 0.01$)。

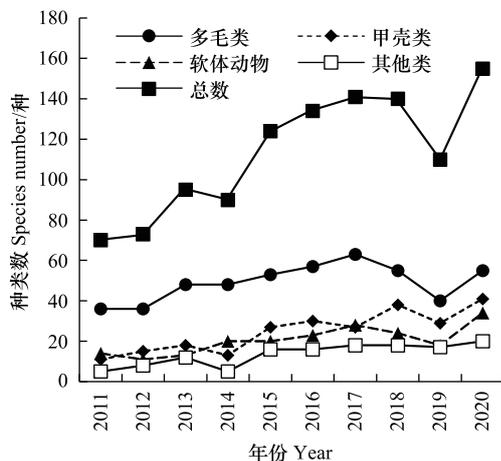


图 2 大型底栖动物各类群种类数年际变化情况

Fig.2 The variation trend of species composition in 2011—2020 in Changjiang estuary

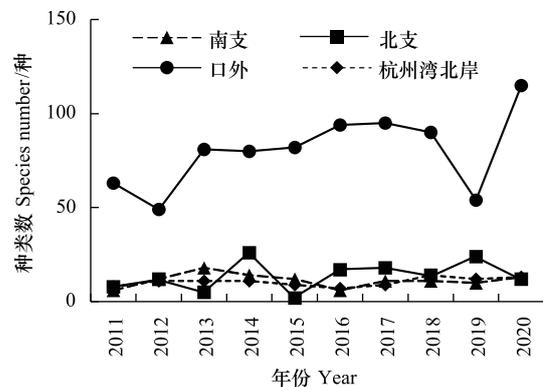


图 3 长江口不同区域大型底栖动物种类数变化

Fig.3 The variation trend of species number in four different areas of Changjiang estuary

2.2 优势种

长江口海域大型底栖动物优势种总体较单一,最常见优势种为丝异须虫。2011—2014 年、2019 年共 5 年均只有丝异须虫一种成为优势种;2015 年和 2016 年未出现优势度达 0.02 以上的种类,丝异须虫优势度最高,均为 0.01;2017 年优势种为河蚬;2018 年优势种为河蚬和丝异须虫两种,优势度分别为 0.07 和 0.03;2020 年优势种为丝异须虫和秀丽波纹蛤两种,优势度分别为 0.05 和 0.03。

10 年期间四区水域分布的底栖生物优势种及其优势度详见表 2。北支水域共有 23 个优势种,其中丝异须虫出现 5 个年份,其次为焦河蓝蛤等;南支水域共有 8 个优势种,其中河蚬出现 7 个年份,其次为圆锯齿吻沙蚕等;杭州湾水域共有 15 个优势种,其中尖叶长手沙蚕和焦河蓝蛤分别出现 5 个年份,丝异须虫出现 4 个

年份;长江口外海域共有 9 个优势种,其中丝异须虫每年都是第一优势种,其他优势种优势度均较低。总体上,丝异须虫作为优势种在四个区均有分布,常见的优势种还有河蚬、焦河篮蛤等。丝异须虫为广分布种,我国四大海区皆有分布^[31],常栖息于较清洁的泥沙环境,为河口区常见。

表 2 2011—2020 年长江口各区域大型底栖动物优势种变化情况(前三优势种/优势度指数)

Table 2 The dominant species of macro benthos in 2011—2020 in four different areas(The first three dominants/index)

年份 Year	北支 North branch	南支 South branch	杭州湾 Hangzhou bay	口外 Sea area
2011	寡鳃齿吻沙蚕/0.115 光滑狭口螺/0.058 焦河篮蛤/0.038	寡鳃齿吻沙蚕/0.147 河蚬/0.038	尖叶长手沙蚕/0.053	丝异须虫/0.091 双形拟单指虫/0.054
2012	丝鳃虫/0.074 丝异须虫/0.037	河蚬/0.125	丝异须虫/0.114 焦河篮蛤/0.029 日本角吻沙蚕/0.023	丝异须虫/0.158
2013	棘头梅童鱼/0.05 纵肋织纹螺/0.05 丝异须虫/0.05	/	丝异须虫/0.121 尖叶长手沙蚕/0.064	丝异须虫/0.023
2014	滩栖阳遂足/0.18 尖叶长手沙蚕/0.027 日本刺沙蚕/0.027	圆锯齿吻沙蚕/0.12 丝异须虫/0.022	丝异须虫/0.073 尖叶长手沙蚕/0.055	丝异须虫/0.046 双形拟单指虫/0.02
2015	/	圆锯齿吻沙蚕/0.029 河蚬/0.020	细丝鳃虫/0.13 日本角吻沙蚕/0.08 尖叶长手沙蚕/0.04	丝异须虫/0.024 双形拟单指虫/0.02 小胡桃蛤/0.02
2016	奇异稚齿虫/0.068 丝异须虫/0.054 日本角吻沙蚕/0.041	凸壳肌蛤/0.049	焦河篮蛤/0.40 大螺赢蜚/0.02	丝异须虫/0.03 扇栉虫/0.02 细丝鳃虫/0.02
2017	奇异稚齿虫/0.22 日本角吻沙蚕/0.06	河蚬/0.18	焦河篮蛤/0.06 短吻铲荚蛭/0.02	丝异须虫/0.03
2018	焦河篮蛤/0.11 多鳃齿吻沙蚕/0.05 日本长手沙蚕/0.05	河蚬/0.132 圆锯齿吻沙蚕/0.028	短吻铲荚蛭/0.05 丝异须虫/0.05 光背节鞭水虱/0.04	丝异须虫/0.06
2019	细长涟虫/0.08 小菱蛭/0.034 寡节甘吻沙蚕/0.031	焦河篮蛤/0.066 河蚬/0.055 圆锯齿吻沙蚕/0.031	焦河篮蛤/0.084 圆锯齿吻沙蚕/0.031 不倒翁虫/0.021	丝异须虫/0.052 细丝鳃虫/0.024
2020	纽虫/0.12 丝异须虫/0.09 圆筒原盒螺/0.08	凸壳肌蛤/0.04 丝异须虫/0.03 大鳌蜚/0.03	焦河篮蛤/0.13 尖叶长手沙蚕/0.05 中华螺赢蜚/0.03	丝异须虫/0.1 秀丽波纹蛤/0.08 日本强鳞虫/0.03

2.3 生物密度与生物量

2011—2020 年,长江口海域大型底栖动物各年份平均密度范围 14.7—195 个/m²,10 年平均值为(79.5±45.9)个/m²,其中 2011 年最低,2020 年最高(图 4);各年份平均生物量范围 1.01—10.11g/m²,10 年平均值为(5.20±3.25)g/m²,其中 2011 年最低,2020 年最高(图 5)。生物量均值的标准差较大,表明数据较离散,各年份之间生物数量差异较大。多毛类、软体动物和甲壳类是生物密度和生物量组成的主要类群。10 年期间平均大型底栖动物密度和生物量总体上都呈现上升的趋势。各区域分布有差异,口外海域平均生物密度总体高于南支、北支和杭州湾区域,大部分年份口外海域平均生物量高于其他 3 个区域。2019 年北支水域平均生物密度和生物量均为最高,是由于北支 1 个站位采集到了较大数量毛蚶,生物量达到 177.6g/m²,另一个站位采集到高密度的细长涟虫(260 个/m²)和较高密度的寡节甘吻沙蚕(100 个/m²)、纵肋饰孔螺(100 个/m²)等。其他年份南支、北支和杭州湾区域生物密度均在较低水平波动,特别是 2020 年,三个区域与口外海域生物密度差异显著。对 4 个区域生物密度和生物量进行双因素方差分析,南支、北支和杭州湾三区的生物密度有显著差异($F_{2,18} = 4.2, P = 0.03$),与口外海域生物密度有极显著差异($F_{3,27} = 12.8, P < 0.01$);4 个区域生物量无显著差异($F_{3,27} = 1.4, P = 0.26$)。

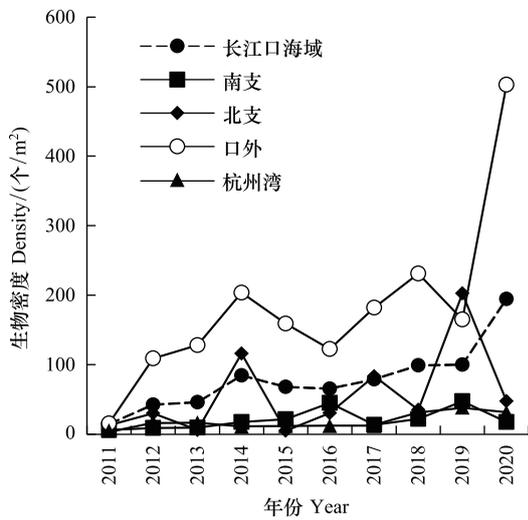


图4 长江口各区域底栖生物生物密度变化

Fig.4 The density variation trend of macro benthos in 2011—2020 in four different areas of Changjiang estuary

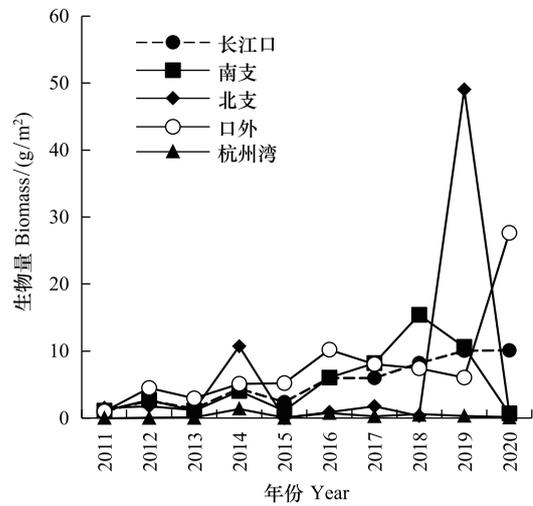


图5 长江口各区域底栖生物生物量变化

Fig.5 The biomass variation trend of macro benthos in 2011—2020 in four different areas of Changjiang estuary

2.4 生物多样性

长江口大型底栖动物群落多样性指数(H') 在 0.99—1.73 之间,10 年均值为(1.32±0.21),其中 2012 年最低、2014 年最高(图 6);物种丰富度指数(d) 在 0.39—0.83 之间,10 年均值为(0.64±0.14),其中 2012 年最低、2020 年最高(图 7);均匀度指数(J') 在 0.47—0.69 之间,10 年均值为(0.56±0.07),其中 2011 最低、2014 年最高(图 8)。区域分布上,口外海域生物多样性指数、丰富度指数均明显高于其他三个区域,均匀度指数总体也较高。三项指数综合来看,南支水域生物多样性最差,大部分年份平均多样性指数、丰富度和均匀度指数均为最低。

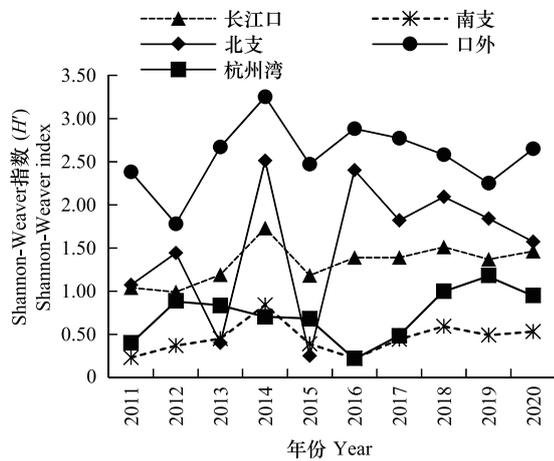


图6 长江口大型底栖动物多样性指数变化

Fig.6 The H' variation trend of macro benthos in 2011—2020 in four different areas of Changjiang estuary

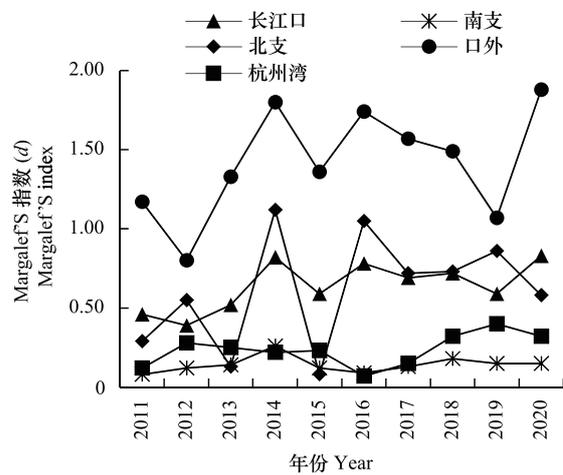


图7 长江口海域大型底栖动物丰富度指数趋势图

Fig.7 The d variation trend of macro benthos in 2011—2020 in four different areas of Changjiang estuary

3 讨论

3.1 大型底栖动物与环境因子的生态关系

大型底栖动物作为海洋生态系统的重要组成部分,在不同时空尺度上表现出与各种环境因子的密切相

关^[32-33]。长江口南支、北支、杭州湾北岸和口外海域具有明显不同的水文、水质和底质特征,对大型底栖动物分布具有一定影响。

2020 年大型底栖动物生物密度和生物量平面分布上(图 9),口门区域和杭州湾北岸明显低于其他区域,口外海域东部和北部站位生物密度和生物量总体较高。口门区域和杭州湾有近似的水文特点,海、淡水剧烈交汇,水动力强,盐度变化大,水体中含有高浓度悬浮物,特别是底层水体悬浮物高达上千或数千 mg/L,沉积速率较高,底上浮泥较厚,沉积环境较严酷,仅有少量广盐性、对底质环境依赖不大的底栖动物能够适应。这与 1985—1986 年^[25]、2005—2006 年^[3]、2009 年^[24]等在长江口海域的调查结论一致。

以 2020 年监测结果为例,采用相对重要性指数 (IRI) 筛选出 11 个主要种,与各监测站位的底层水环境因子进行 CCA 排序(图 10),发现活性磷酸盐、无机氮、硅酸盐、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、悬浮物、盐度和 pH 等指标均为重要影响因子。其中口外海域的秀丽波纹蛤、丝异须虫和日本倍棘蛇尾均与盐度显著相关($P<0.05$),与 pH 和水深正相关,与营养盐、悬浮物、COD 等负相关,且口外海域各站位群落结构相似度较高;南支水域为淡水或半咸水,河蚬、凸壳肌蛤和日本大螯蜚与各环境因子的相关性均较弱;北支水域的东方管须蟹和纽虫与 pH 的相关性极高($P<0.01$);杭州湾的焦河篮蛤和尖叶长手沙蚕比较适应高营养盐、高悬浮物等水体环境。上述只是对底栖生物与底层水化因子生态关系的初步探讨,今后有待于深入研究底栖生物与沉积物间隙水、上覆水环境因子更密切的生态关系。

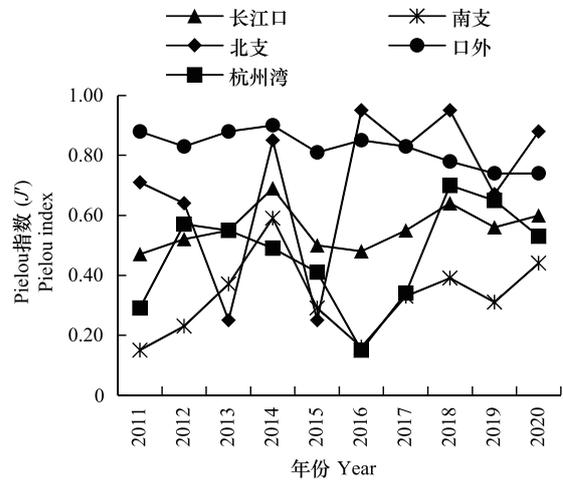


图 8 长江口海域大型底栖动物均匀度指数趋势图

Fig.8 The J' variation trend of macro benthos in 2011-2020 in four different areas of Changjiang estuary

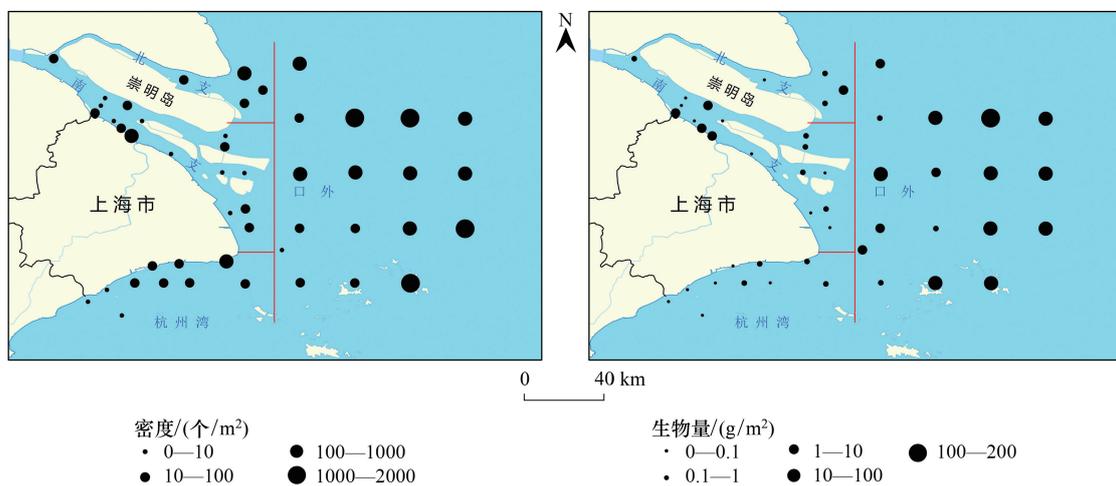


图 9 长江口大型底栖动物生物密度和生物量分布

Fig.9 The density and biomass distribution of macro benthos in Changjiang estuary

底质类型上,北支、南支和杭州湾水域均以砂和粉砂底质为主,总体上粉砂底质的生物密度及生物量高于砂;口外海域 8 个站为粘土质粉砂,8 个站为砂相底质,前者的生物密度与生物量相对明显较高;此外该区东侧与北侧断面的生物密度及生物量总体高于西南侧,应与两者的地理环境的水文因素有关,西南侧受长江口径流影响较大。

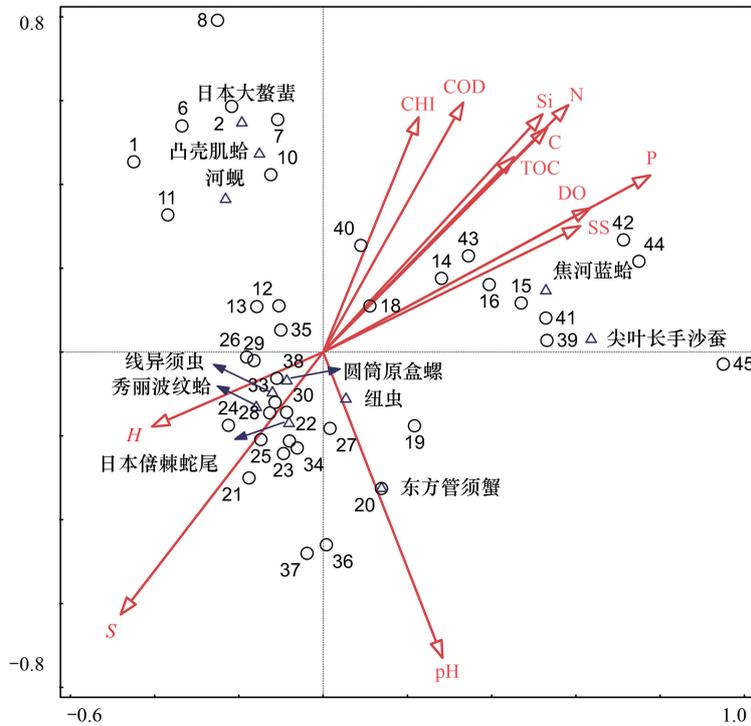


图 10 长江口大型底栖动物主要种类与环境因子典范对应分析排序图

Fig.10 CCA ordination diagram between major macrobenthic species and environmental factors in Changjiang estuary

图中数字为站位编号; S:盐度 Salt; C: 水温 water temperature; H: 水深 Depth; SS: 悬浮物 Suspended solids; pH: 酸碱度 pH; DO: 溶解氧 Dissolved Oxygen; TOC: 总有机碳 Total Organic Carbon; COD: 化学需氧量 Chemical Oxygen Demand; CHI: 叶绿素 Chlorophyll; P: 活性磷酸盐 Phosphate; N: 无机氮 Inorganic nitrogen; Si: 硅酸盐 Silicate

3.2 长江口外大型底栖动物群落结构自然演变特征

长江口是综合开发利用热点区域,建设了长江口深水航道、横沙东滩圈围、东海大桥、洋山深水港等特大型海洋工程项目,工程施工、疏浚等对长江口及邻近海域底栖环境扰动较大^[34-35]。本文选择了长江口监测海域东部最远的纵断面含 26、30 和 35 号共 3 个站位,来分析大型底栖动物的群落演变情况。该区域离河口人类活动区最远,水环境较好,水体盐度稳定在 30 左右,能较好反映长江口外大型底栖动物群落结构自然演变特征。

对 2011—2020 年各年份群落结构,采用靶-皮距 (Bray-Curtis) 相似系数绘制聚类谱系图 (图 11),将相似系数转换距离系数绘制非度量多维标度 (MDS) 图 (图 12),两图组群格局相似,互为印证。从图中可以看出,2014—2016、2018 年为 1 个组群,2017、2019、2020 年为 1 个组群,表明同组群中的各年份间群落结构变化较小。

根据 2011—2020 年 3 个站位大型底栖动物平均生物密度和生物量组成,绘制各年份 ABC 曲线 (图 13)。2011—2013 年状况相近,生物量均在生物密度上方,表明群落结构总体稳定,但物种数稀少,仅 13—15 种。2014、2015 年状况较相近,生物量和生物密度两条曲线接近至近重合,但物种数大幅增加,分别为 55 种和 46 种,表明增加的大型底栖动物种类以小型低生物量种类为主。2014 年大型底栖动物中多毛类占比 65%,甲壳类 11%,软体类 9%,其中对密度贡献最大的种类为钩虾属 *Gammarus* sp. 和丝异须虫,2 个种类占到生物密度的 27%。2015 年大型底栖动物中多毛类占比 67%,甲壳类 13%,软体类 9%,其中对密度贡献最大的种类为小胡桃蛤和钩虾属,2 个种类占到生物密度的 38%。总体来看,2011—2020 年该断面的 ABC 曲线中,生物量优势度曲线始终位于生物密度上方,表明 10 年期间群落结构总体稳定,未受不良扰动。而且生物种类、生物

量和生物密度均呈明显升高的趋势,表明长江口海域底栖生物群落结构功能在近 10 年中处于不断向好的演变过程。

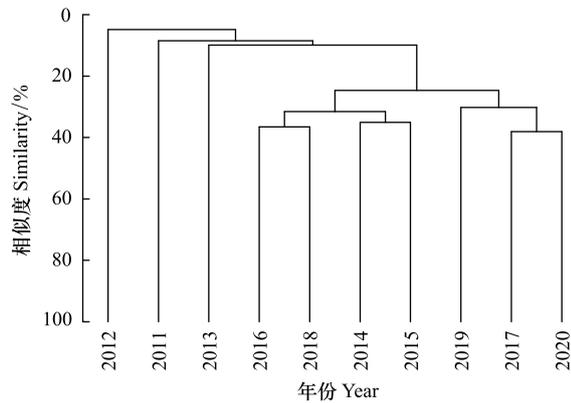


图 11 各年份长江口东断面大型底栖动物聚类分析图

Fig.11 Cluster analysis of macrozoobenthic communities in the eastern section of Changjiang estuary sea area from 2011 to 2020

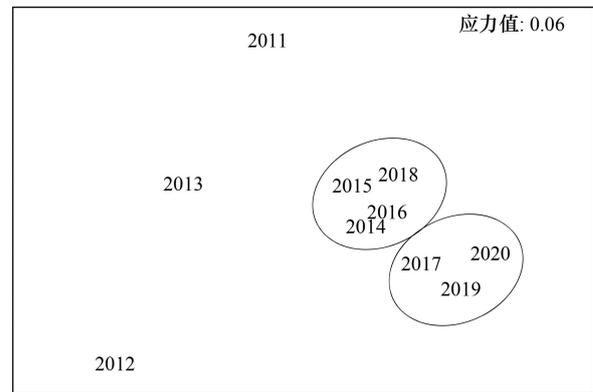


图 12 各年份长江口东断面大型底栖动物非度量多维标度图

Fig.12 Non-metric multidimensional scaling of macrozoobenthic communities in the eastern section of Changjiang estuary sea area from 2011 to 2020

3.3 群落种类组成多样性分析

H' 、 d 和 J' 三项多样性指数常被用作评价大型底栖动物群落稳定性和生态环境质量的参考。Chainho 等^[36]将大型底栖动物群落的 H' 和 d 分成 5 个等级(表 3):高、好、中、低和差。参考此评价等级,长江口大型底栖动物多样性指数均为低值水平(0.99—1.73),丰富度指数均为差(0.39—0.83)。从区域分布上,长江口外海域各年份的平均 H' 总体较好,除 2012 年外,其他年份等级均可达到中(1.78—3.25);南支水域则总体最差,各年份等级均处于差(0.22—0.84)。一般来说,指数值较高群落稳定性较好,对生态环境适应较好。

表 3 大型底栖动物群落多样性指数和丰富度指数的分级^[36]

Table 3 Classification of H' and d for the macrobenthic community

级别 Classifications	多样性指数 Diversity Index(H')	丰富度指数 Richness index(d)	级别 Classifications	多样性指数 Diversity Index(H')	丰富度指数 Richness index(d)
高 High	>4.0	>4.0	低 Poor	1.0—2.0	<2.5
好 Good	3.0—4.0	>4.0	差 Bad	0.0—1.0	<2.5
中 Moderate	2.0—3.0	2.5—4.0			

长江口大型底栖动物群落多样性较低的主要原因与本区域水体富营养化和工程建设等有关。有研究表明,长期富营养化会加速大型底栖动物种类更新频率,导致群落组成变化以及群落功能多样性降低^[37];磷酸盐含量增加与大型底栖动物生物量呈显著负相关关系($r=-0.597$)、长江口严重富营养化面积比例与大型底栖动物优势度均呈显著正相关关系($r=0.751$)^[10]。近 30 年来,长江口长期处于严重富营养化状态^[38],是我国沿海富营养化程度最严重的区域之一。且长江口区域水体中氮、磷、硅等营养要素结构失衡,影响了浮游生物群落结构^[38],也是间接影响大型底栖动物多样性的原因之一。此外,长江口海域大型工程建设改变局部底栖生境和流场,也对大型底栖动物多样性造成不利影响^[39]。

3.4 生物种类与数量的历史变化

对长江口不同调查时期大型底栖动物种类、数量进行统计,分析长江口大型底栖动物长时序年际变化情况。

3.4.1 种类数变化

20 世纪 80 年代,8 月长江口口门内区域大型底栖动物种类数达 37 种(1985 年),口外冲淡水区域大型底

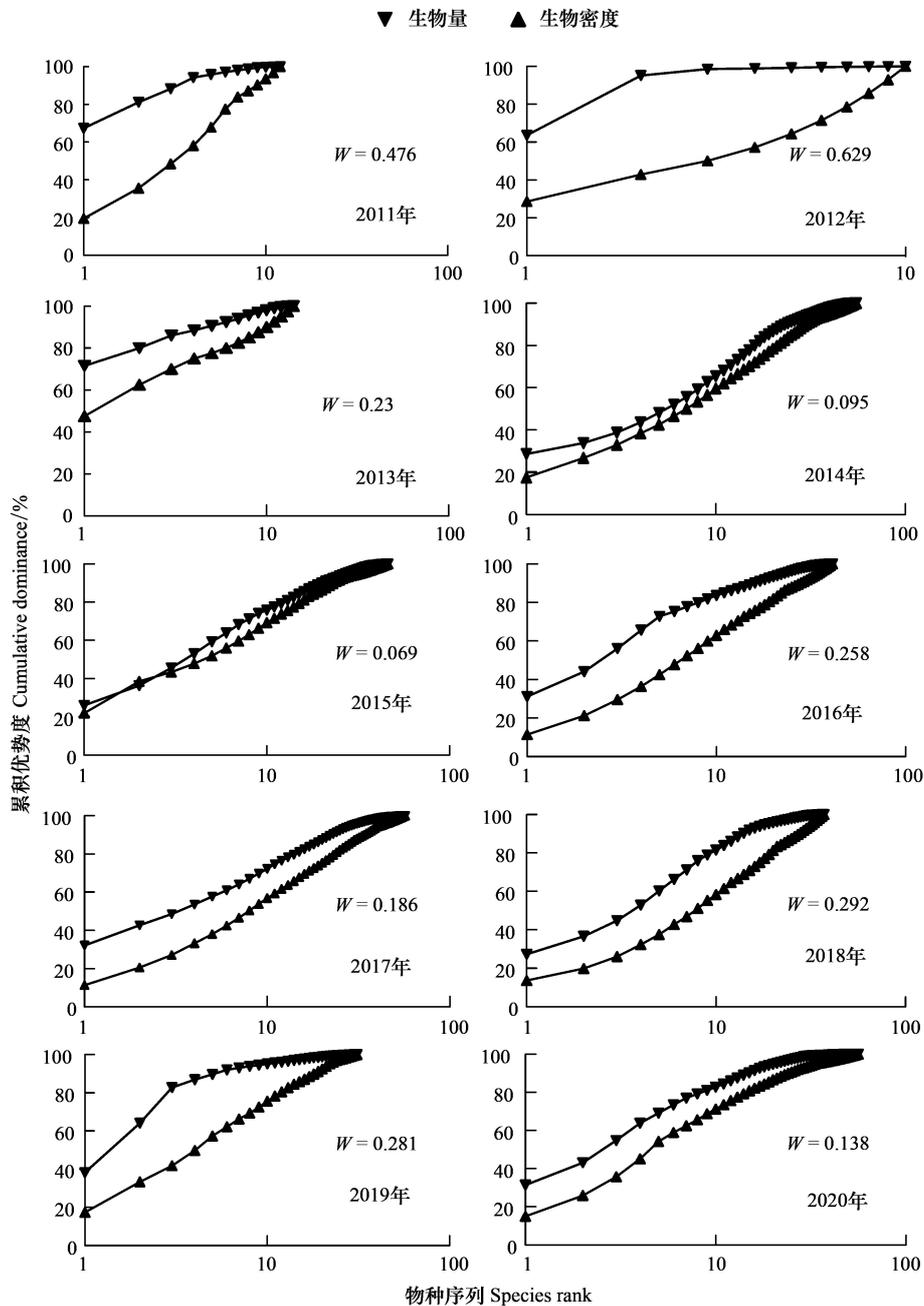


图 13 2011—2020 年长江口东部断面大型底栖动物丰度/生物量比较曲线图

Fig.13 The macrozoobenthic communities ABC curve in eastern section of Changjiang estuary sea area from 2011 to 2020

栖动物种类数达 153 种 (1982 年)^[11]; 本世纪初的 2001—2004 年, 8 月长江口门内区域大型底栖动物种类数年均 8 种 (变幅 2—14 种), 口外冲淡水区域种类数年均 40 种 (变幅 9—78 种)^[11]。2011—2020 年, 8 月口门内大型底栖动物种类数年均 11 种 (变幅 6—18 种), 口外冲淡水区域年均 80 种 (变幅 49—115 种)。各时期监测结果对照发现, 长江口门内、外区域大型底栖动物种类数均经历大幅下降后, 有所恢复, 且口外海域恢复程度好于口门内。

3.4.2 口外海域生物数量变化

收集和筛选了 1959 年^[9]、1978—1979 年^[40]、1982 年^[41]、2005—2006 年^[3]与本研究具宏观可比性意义的长江口外海域大型底栖动物生物数量进行统计比较, 列于表 4。其中 1959 年为长江口外 22 站位 5—7 月调查

数据,1978—1979 年结果为长江口外嵎泗-嵎山渔场邻近海域 3 个航次平均值,1982 年数据为 8 月长江口及邻近海域监测结果,2005—2006 年为长江口外海域 4 个航次平均值,2015—2020 年为历年 8 月长江口外海域监测结果均值。虽然各时段调查的站位时空布局存在差异,但仍可以宏观地看出长江口底栖生物数量的历史变化趋势。

表 4 长江口外海域大型底栖动物生物量的年代际变化

Table 4 The interdecadal variations of macro benthos biomass in Changjiang estuary sea area

调查时间 Time	平均生物密度 Average density/ (ind/m ²)	平均生物量 Average biomass/ (g/m ²)	主要类群生物密度/生物量百分组成/% The main groups density/biomass percentage			
			多毛类 Polychaeta	软体动物 Granulifusus kiranus	甲壳类 Crustacean	棘皮动物 Echinodermata
1959 年 ^[9]	-	21.95	-/16.5	-/23.5	-/3.7	-/43.7
1978—1979 年 ^[40]	120	22.23	-	-	-	-
1982 年 ^[41]	84.8	23.27	29.8/14.8	19.7/ 44.1	27.7/ 7.4	18.4/ 18.0
2005—2006 年 ^[3]	173.7	19.9	-/ 43.4	-/ 24.3	-/ 14.9	-/ 11.8
2015—2020 年	227	10.75	57.5/ 21.4	15.0/31.7	18.4/ 14.2	4.5/ 12.6

-为早期资料缺

从表 4 可以看出,相比于 20 世纪 70、80 年代,21 世纪以来长江口外海域的大型底栖动物的平均生物密度明显升高,平均生物量则有所降低,特别是 2011—2013 年的 3 年中降到了历史最低值,年际平均生物密度仅为 2.8g/m²,2015—2020 年平均生物量有所提高,但整体上仍处于较低水平。从生物密度与生物量的相应匹配来看,长江口大型底栖生物群落的生物密度和生物量组成结构出现的变化,表明底栖生物总体上有小型化变动趋势。

参考文献 (References):

- [1] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Systems*, 1997, 11(3/4): 269-278.
- [2] Heip C H R, Duineveld G, Flach E, Graf G, Helder W, Herman P M J, Lavaleye M, Middelburg J J, Pfannkuche O, Soetaert K, Soltwedel T, de Stigter H, Thomsen L, Vanaverbeke J, de Wilde P. The role of the benthic biota in sedimentary metabolism and sediment-water exchange processes in the Goban Spur area (NE Atlantic). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(14/15): 3223-3243.
- [3] 刘录三, 孟伟, 田自强, 蔡玉林. 长江口及毗邻海域大型底栖动物的空间分布与历史演变. *生态学报*, 2008, 28(7): 3027-3034.
- [4] 刘录三, 孟伟, 李新正. 长江河口段大型底栖动物的群落结构现状研究. *海洋与湖沼*, 2006, 37(S1): 124-129.
- [5] 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. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 180-186.
- [6] 王延明, 方涛, 李道季, 唐静亮, 王益鸣, 刘志刚, 丁平兴. 长江口及毗邻海域底栖生物丰度和生物量研究. *海洋环境科学*, 2009, 28(4): 366-370, 382-382.
- [7] 孙亚伟, 曹恋, 秦玉涛, 王金辉, 程祥圣. 长江口邻近海域大型底栖生物群落结构分析. *海洋通报*, 2007, 26(2): 66-70.
- [8] 杨梅, 李新正, 王洪法, 张宝琳. 长江口邻近海域夏季大型底栖生物群落特征. *海洋科学集刊*, 2016: 269-278.
- [9] 刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 蔡文倩, 韩庆喜, 林岩璇. 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨. *海洋学报*, 2012, 34(3): 134-145.
- [10] 杨颖, 刘鹏霞, 周红宏, 夏利花. 近 15 年长江口海域海洋生物变化趋势及健康状况评价. *生态学报*, 2020, 40(24): 8892-8904.
- [11] 王金辉, 徐韧, 秦玉涛, 孙亚伟, 刘材材. 长江口基础生物资源现状及年际变化趋势分析. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(5): 821-828.
- [12] 何懿臻, 寿鹿, 廖一波, 汤雁滨, 刘强, 刘清河, 陈全震, 高爱根. 长江口及其临近海域大型底栖动物功能群演替初探. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 477-483.
- [13] 陈强. 长江口及其邻近水域大型底栖动物多样性的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [14] 吴耀泉, 李新正. 长江口区底栖生物群落多样性特征//中国甲壳动物学会. 甲壳动物学论文集(第四辑). 北京: 科学出版社, 2003: 279-286.
- [15] 徐兆礼, 蒋玫, 白雪梅, 朱江兴, 袁骥. 长江口底栖动物生态研究. *中国水产科学*, 1999, 6(5): 59-62.
- [16] 孙道元, 董永庭. 长江口及其邻近水域多毛类生态特点. *海洋科学集刊*, 1986, (27): 175-183.

- [17] 孟昭翠, 徐奎栋. 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点. 生态学报, 2013, 33(21): 6813-6824.
- [18] 华尔, 张志南, 张艳. 长江口及邻近海域小型底栖生物丰度和生物量. 生态学报, 2005, 25(9): 2234-2242
- [19] 周百灵, 孟昭翠, 赵峰, 徐奎栋. 长江口外海域微型和小型底栖生物群落结构和时空变化. 生态学报, 2015, 35(15): 5050-5063.
- [20] 孟昭翠, 徐奎栋. 长江口邻近海域夏季底栖纤毛虫的多样性与群落结构特点. 海洋与湖沼, 2020, 51(3): 591-601.
- [21] 王延明, 李道季, 方涛, 刘志刚, 何松琴. 长江口及邻近海域底栖生物分布及与低氧区的关系研究. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 139-143, 164-164.
- [22] 贾海波, 柴小平, 黄备. 2016—2019年长江口海域季节性低氧对大型底栖动物群落的影响. 海洋学研究, 2021, 39(2): 80-88.
- [23] 闫嘉. 长江口邻近海域大型底栖动物群落变化及轻度氧亏损的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2020.
- [24] 贾海波, 曹柳燕, 胡颖琰. 长江口及其邻近海域春季大型底栖生物群落与环境因子的典范对应分析. 中国环境监测, 2014, 30(1): 93-97.
- [25] 刘瑞玉, 徐凤山, 孙道元. 长江口区底栖生物及三峡工程对其影响的预测. 海洋科学集刊, 1992, (33): 237-247.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB17378.7—2007 海洋监测规范 第7部分: 近海污染生态调查和生物监测. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录. 北京: 科学出版社, 2008: 209-870.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.9—2007 海洋调查规范 第9部分: 海洋生态调查指南. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [29] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15.
- [30] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 58-64.
- [31] 杨德渐, 孙瑞平. 中国近海多毛环节动物. 北京: 农业出版社, 1988: 352.
- [32] Gogina M, Glockzin M, Zettler M L. Distribution of benthic macrofaunal communities in the western Baltic Sea with regard to near-bottom environmental parameters. 1. Causal analysis. *Journal of Marine Systems*, 2010, 79(1/2): 112-123.
- [33] Gogina M, Glockzin M, Zettler M L. Distribution of benthic macrofaunal communities in the western Baltic Sea with regard to near-bottom environmental parameters. 2. Modelling and prediction. *Journal of Marine Systems*, 2010, 80(1/2): 57-70.
- [34] 匡翠萍, 董智超, 陈括, 刘旭. 长江口深水航道及横沙东滩促淤圈围对滞流点的影响. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(11): 1621-1628.
- [35] 左书华, 崔成, 谢华亮, 杨华, 张征, 李蓓. 洋山港四期大型集装箱深水化码头开发建设水动力泥沙关键技术研究. 中国科技成果, 2020, 21(6): 51-54.
- [36] Chainho P, Costa J L, Chaves M L, Dauer D M, Costa M J. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(10): 1586-1597.
- [37] Villnäs A, Perus J, Bonsdorff E. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment—implications for community recovery potential. *Journal of Sea Research*, 2011, 65(1): 8-18
- [38] 杨颖, 徐韧. 近 30a 来长江口海域生态环境状况变化趋势分析. 海洋科学, 2015, 39(10): 101-107.
- [39] 叶属峰, 纪焕红, 曹恋, 黄秀清. 河口大型工程对长江河口底栖动物种类组成及生物量的影响研究. 海洋通报, 2004, 23(4): 32-37.
- [40] 东海污染调查监测协作组. 东海污染调查报告(1978—1979年). 北京: 海洋出版社, 1984.
- [41] 戴国梁. 长江口及其邻近水域底栖动物生态特点. 水产学报, 1991, 15(2): 104-116.