第 49 卷第 10 期
2021 年 10 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 49 No. 10
Oct. 2021

文章编号：0253-374X(2021)10-1363-11 **DOI**：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 21245

夏季长江口—东海陆架大中型浮游生物分布特征及影响因素

刘承莹[1,2]，王　锐[1]，高　航[2]，王鹏远[3]，尹大强[1]

(1. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室，上海 200092；2. 同济大学 海洋地质国家重点实验室，上海 200092；
3. 中国长江三峡集团有限公司，北京 100038)

摘要：根据2019年夏季长江口及邻近海域17个站位的大中型浮游生物与水质参数分析，研究了大中型浮游生物的空间分布特征及其主要影响因素。在长江口咸淡水混合影响下，长江口－东海陆架断面浮游生物物种数及生物多样性指数均随盐度增加而增大，且淡水及低盐度站位与高盐度站位的优势物种存在显著差异。长江口－东海陆架关键断面13个站位的大中型浮游生物密度及生物量与叶绿素a无显著相关性，与营养盐含量呈显著负相关，表明上行效应并非控制该断面浮游生物分布特征的主要因素。在咸淡水混合所致多因素变化的复杂影响下，该断面大中型浮游生物分布的主要影响因素呈现出盐度相关的区域性差异。首次利用浮游生物在线成像和分类设备(CPICS)在多个高盐度站位开展原位观测，获得了多种大中型浮游生物的原位影像，可对夜光藻、双生水母等大型浮游动物鉴定至种，对桡足类鉴定至亚纲。CPICS垂直布放原位观测与野外垂直拖网采样分析结果所反映的物种数变化趋势具有一致性。

关键词：长江口；浮游生物；原位观测；生物多样性

中图分类号：X142；P592　　**文献标志码**：A

Distribution and Factors Influencing Macro- and Meso-Plankton in the Yangtze River Estuary- East China Sea Continental Shelf in Summer

LIU Chengying[1,2], *WANG Rui*[1], *GAO Hang*[2], *WANG Pengyuan*[3], *YIN Daqiang*[1]

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the analysis of meso- and macro-plankton and water quality parameters from 17 stations in the Yangtze River estuary and adjacent regions in the summer of 2019, the present study investigated the spatial distribution patterns and major factors influencing meso- and macro-plankton. Under the influence of freshwater - seawater mixing in the Yangtze River estuary region, the species number and biodiversity indexes increased with increasing salinity in this transect, and the dominant species significantly differed among freshwater sites and low- and high- salinity sites. The density and biomass of meso- and macro-plankton in 13 stations of the typical transect along the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf showed no significant relationship with Chl-a, and significantly negatively correlated with the concentrations of nutrients, indicating that bottom-up effect was not the main controlling factor for the plankton distribution in this transect. Under the influence of multifactor changes derived by freshwater - seawater mixing, the main controlling factors on the distribution of meso- and macro-plankton exhibited regional differences related with salinity. The present study for the first time conducted *in situ* observation of plankton using a continuous particle imaging and classification system (CPICS) in some of the high salinity sites, and obtained *in situ* photographs of meso- and macro-plankton, which could support the species identification of macro-plankton (such as *Noctiluca scientillans*, *Diphyopsis chamissonis*), and could support the identification of copepods to subclass. The results of *in situ* observation by CPICS (vertically moving) and laboratory analysis of field samples (obtained via vertical tows) showed a

收稿日期：2021-06-01
基金项目：中国长江三峡集团科研项目(201903145)
第一作者：刘承莹(1991—)，女，博士生，主要研究方向为水生生态与污染物的生物学过程。
E-mail：1710308@tongji. edu. cn
通信作者：王　锐(1986—)，女，副教授，硕士生导师，理学博士，主要研究方向为环境生物学。
E-mail：wangr@tongji. edu. cn

论文拓展介绍

similar tendency on the changes of species numbers. In the future, with the help of long-term *in situ* observation in the whole water column and intelligent analysis of mega-data, CPICS would provide important real-time data for the species composition and evolution of plankton in the East China Sea.

Key words: Yangtze River estuary; plankton; *in situ* observation; biodiversity

河口海岸浮游生物作为近海生态系统的基础,在近海物质循环和能量流动中起重要作用,是决定沿海地区渔业资源丰富程度的关键因素。河口水域海陆界面水动力作用强烈,在陆源营养盐输入的影响下,往往呈现高生产力特征,但生态系统复杂且敏感,环境胁迫极易被放大[1]。浮游生物可迅速响应营养盐、洋流、气候等环境因素的变化,因而对海洋物理化学等生境要素变化具有生物指示作用[2]。长江口作为我国第一大河口,在沿江城镇及长三角城市群高强度的人为活动影响下,正面临严峻的生态环境问题,如水体富营养化[3]、邻近海域赤潮频发[4-5]、化学品污染风险上升[6-7]等。长江口水域受长江冲淡水、台湾暖流、黄海冷水团等强烈影响,咸淡水混合剧烈,其具有明显的屏障作用,阻挡了营养盐等物质向外海输送[8-9],来自河流的悬浮物质(尤其是细颗粒泥沙)在该水域聚集,其浓度稳定高于河口的上游和下游,被称为最大浑浊带,对营养盐等物质有明显的过滤作用[10]。因此,长江口咸淡水混合会引起该水域溶解态营养盐、水体透光性等因素剧烈变化,从而可极大地影响浮游生物分布特征。

然而,目前我国对长江口浮游生物的研究大多集中于长江口内[11]或口外[12-13]局部区域的群落结构及影响因素探讨,不能充分反映整个长江口-东海内陆架典型断面,在剧烈而复杂的咸淡水混合影响下,不同水域浮游生物分布特征及主控因素的差异性。因此,本研究以长江口-东海陆架典型断面为研究对象,系统研究了长江口内淡水端至东海海洋端浮游生物分布特征(优势物种组成、生物多样性指数、生物密度与生物量)的空间异质性,并结合水域环境特征(盐度、浊度、营养盐、叶绿素等)探索咸淡水混合影响下不同水域浮游动物分布特征的主要控制因素,从而可为长江口水生生态系统研究和邻近海域渔业资源分布提供重要基础信息。在研究方法上,本研究除了采用传统的野外采样分类鉴定方法,还首次利用浮游生物在线成像和分类设备对浮游生物开展原位观测。与野外采样分析方法相比,浮游生物原位观测基于原位拍摄进行在线种别鉴定,能更直观地反映实际环境中的浮游生物种属和分布特征,且可连续反映长时间尺度上的种群数据,该方法已被应用于全球不同地区海洋生态系统的浮游生物群落监测和赤潮预警研究中[14-18]。本研究首次获得了长江口-东海陆架邻近海域大中型浮游生物的原位影像图片,定性直观反映了该水域浮游生物组成和分布特征,表明了该原位观测设备在东海海域浮游生物实时监测与赤潮预警研究中的潜在应用价值。

1 材料与方法

1.1 浮游生物采集与分析

2019年7月29日-8月3日、8月29日-9月4日,分别搭载同济大学海洋与地球科学学院海洋技术专业实习航次以及同济大学海洋地质国家重点实验室组织的“长江口-东海陆架综合观测航次(KECES 2019)”共享航次,对位于长江口-杭州湾外咸淡水混合断面(B1~B4,位于122°E-123°E,29°N-31°N海域,图1)和长江口-东海内陆架典型断面(A1~A13,位于121°E-125°E,29°N-32°N海域,图1)共计17个站位进行随船海洋观测和浮游生物样品采集。A断面西起徐六泾水文站(A1),东至杭州湾外125°E,30°N附近水域(A13),受咸淡水混合影响剧烈,且跨越长江口最大浑浊带(A4~A5)。B断面西起长江口外,自长江口咸淡水混合区(B1)由西北向东南延伸至杭州湾外东海内陆架高盐度水域(B4)。在每个观测站位,通过搭载的多参数观测系统YSI(6600V2,SeaBird,美国)现场测定浊度、盐度、温度等水质参数。本研究中A断面的叶绿素(Chl-a)、溶解氧(DO)、溶解硝酸盐(DIN)、溶解磷酸盐(DIP)、溶解硅酸盐(DISi)数据由“KECES 2019”共享航次提供,B断面的叶绿素(Chl-a)、溶解硝酸盐(DIN)数据由“KECES 2019”海洋技术专业实习航次提供。

在每个站位,利用配备垂直流量计(HYDRO-BIOS,德国)的浮游生物网(孔径202 μm,Nytex,General Oceanics,美国)进行由离底1~2 m至表的垂直拖网采样。将采集到的浮游生物样品全部收集后,加入5%甲醛(体积分数)保存在4 ℃冰箱中,以用于后续的浮游生物物种鉴定及计数。浮游生物的鉴定和计数工作在实验室完成,利用配备计数软件

和显微镜（奥林巴斯CX33，日本）的浮游生物计数仪（迅数F31，中国）进行拍照与计数，并参考长江口及中国海洋浮游生物的物种图谱资料[19-20]开展物种鉴定。每个站位根据垂直流量计读数估算过水体积，再根据浮游生物计数结果，计算得出浮游生物密度（个·m^{-3}）。

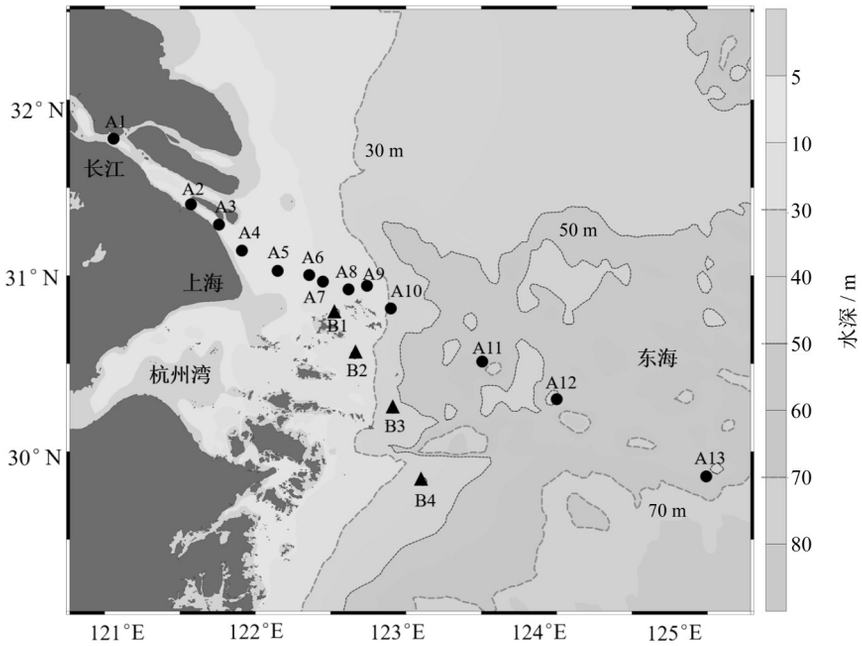

图1　长江口—东海陆架典型断面海洋观测及浮游生物采样站位

Fig.1　Stations of marine observation and plankton sampling in a typical transect along the Yangtze River estuary- East China Sea continental shelf

1.2　浮游生物原位观测

本研究在B断面调查中还首次使用浮游生物（颗粒物）在线成像和分类设备（continuous particle imaging and classification system，CPICS，Coastal Ocean Vision，美国）进行浮游生物的原位观测。该仪器使用暗场显微成像技术对浮游生物进行成像，拍摄区域为11 mm×15 mm×2 mm（校正后拍摄体积为0.865 mL·帧$^{-1}$），在0.9倍率镜头下理论上可实现50 μm～2 mm之间的浮游动物成像，拍照速度可调（最高可达10 帧·s^{-1}）。野外原位观测中拍摄得到的全框图及个体图可实时存储，通过手动拣选处理，采用人工判别或自动分类软件系统分析浮游生物种属构成信息。其中，全框图为拍摄得到的全帧图像（分辨率可达6 M像素），而个体图为仪器软件从全框图中自动识别得到的目标个体图像，用于进一步的鉴定。

1.3　数据分析

分别使用Ocean Data View4.5、Surfer13软件绘制采样站点图和水质参数剖面分布图，使用Origin 8.5绘制浮游生物分布柱状图、密度及生物量等数据图。采用SPSS 18.0软件分析浮游生物密度、生物量与非生物因子（盐度、浊度、温度、Chl-a、营养盐）等环境因子的相关性。

浮游生物优势种用优势度Y来计算，分别计算淡水区（A1～A3）、低盐区（A4～A5）及高盐区（A6～A13）浮游生物物种优势度，当$Y \geqslant 0.02$[21]时，定义该种为优势种，计算公式如下：

$$Y = \frac{N_i/N}{f_i} \tag{1}$$

式中：N为各站位所有种类浮游生物的密度；N_i为第i种浮游生物的密度；f_i为第i种浮游生物在各站位出现的频率。

采用Shannon-Wiener多样性指数（H'）表示物种多样性，计算公式如下：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} \frac{N_i}{N} \times \log_2 \frac{N_i}{N} \tag{2}$$

采用Margalef丰富度指数（D）表示物种数目的多寡，计算公式如下：

$$D = \frac{S-1}{\ln N} \tag{3}$$

式中：S为各站位的总物种数。

2 结果与讨论

2.1 长江口—东海陆架大中型浮游生物种属分布特征

在调查的长江口—东海陆架典型断面的13个站位中,共鉴定出大中型浮游动物35种,隶属于4个门5个大类(表1)。其中,桡足类占绝对优势,共鉴定出21种,占浮游生物总种数的60.0%;水母类为第二优势类群,共鉴定出6种,占浮游生物总种数的17.1%;其他浮游动物还包括箭虫(4种)、海樽类(2种)、磷虾类(2种)。

表1 长江口—东海陆架A1~A13站位浮游动物群落特征

Tab.1 Community characteristics of zooplankton at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary- East China Sea continental shelf

门类	类群	种类数	贡献率/%
腔肠动物门Coelenterate	水母类Medusae	6	17.2
节肢动物门Arthropods	桡足类 Copepods	21	60.0
	磷虾类 Euphausiacea	2	5.7
毛颚动物门 Chaetognaths	箭虫类 Sagittoidea	4	11.4
尾索动物门Urochordata	海樽类 Thaliacea	2	5.7

长江口—东海陆架的大中型浮游生物种属构成受到长江冲淡水的显著影响,从长江口淡水端至东海海洋端呈现出浮游生物分布特征的空间异质性:淡水站位(A1~A3,盐度<1.0)、低盐度站位(A4~A5,盐度1.5~12.4)和高盐度站位(A6~A13,盐度>19)的浮游生物群落明显不同(图2)。与本研究结果类似,此前已有研究[22-23]在长江口及邻近海域(121°E—122.5°E,30°N—31.5°N;122°E—124°E,29°N—33°N)也发现盐度是影响长江口浮游生物群落构成的关键因素。总体而言,长江口的淡水站位存在很多近岸性浮游动物,如虫肢歪水蚤(*Tortanus vermiculus*)、火腿许水蚤(*Pseudodiaptomus poplesia*)等。随着盐度的升高,高盐类的浮游动物开始占优势,如小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*)等。广盐性浮游动物肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)在低盐区和高盐区均有发现,并成为高盐区浮游生物优势种,这与此前的研究结果一致[24],表明该生物对长江河口水域复杂多变的水文环境有较强的适应能力。除了桡足类,大多数高盐度站位还观察到了水母、磷虾、箭虫、海樽等。具体而言,本次调查区域全断面的浮游生物优势种共有12种(表2)。在长江口内淡水区站位中(A1~A3),桡足类占绝对优势(表2),其中主要优势物种为虫肢歪水蚤、火腿许水蚤、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)。在低盐度站位(A4~A5),桡足类中的许水蚤属和歪水蚤属的相对丰度相比淡水区站位要低(图2),而唇角水蚤属的针刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)成为新增桡足类优势物种(表2)。哲水蚤属在A4~A5站位所占相对丰度分别高达11%及9%,但其包含了中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、强额拟哲水蚤(*Pavocalanus crassirostri*)、矮隆哲水蚤(*Bestiola amoyensis*)等多物种,而这些哲水蚤的单一物种优势度皆不足0.02,未能成为优势种。在高盐度站位(A6~A13),浮游生物优势物种总体更为多样化,与淡水区、低盐区站位种属构成存在显著差异(图2,表2),主要优势物种包括桡足类的小拟哲水蚤、针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)、强额拟哲水蚤、太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)、精致真刺水蚤(*Paracalanus aculeatus*)等,以及尾索类的软拟海樽(*Dolioetta gegenbauri*)、毛颚类的肥胖箭虫、腔肠类的双生水母(*Diphyopsis chamissonis*)。

2019年夏季,从长江口至东海陆架典型断面的13个站位大中型浮游生物(>202 μm)的密度(38.3~783.9个·m^{-3},平均值为383.9个·m^{-3})和生物量(48.4~ 652.8 mg·m^{-3},平均值为380.5 mg·m^{-3})随盐度增加而逐渐上升(图3)。淡水区站位(A1~A3)大中型浮游生物平均密度为44.1个·m^{-3},低盐区的A4和A5站位大中型浮游生物密度分别为59.9个·m^{-3}及101.79个·m^{-3},而高盐区站位(A6~A13)的平均密度则上升至530.5个·m^{-3}。大中型浮游生物生物量分布的空间变化规律与密度类似(图3),在淡水区站位(A1~A3)较低,低盐区站位(A4~A5)逐渐升高,而在高盐区显著上升。该13个站位的Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数(表3)范围分别为2.11~4.47、1.12~3.04,其空间变化规律均呈现出在淡水区及低盐区较低而在高盐区显著上升的趋势。在该断面的13个站位中,A11~A13站位(123.5°E—125°E,29°N —30.5°N)的大中型浮游生物密度及生物量、物种数、Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数

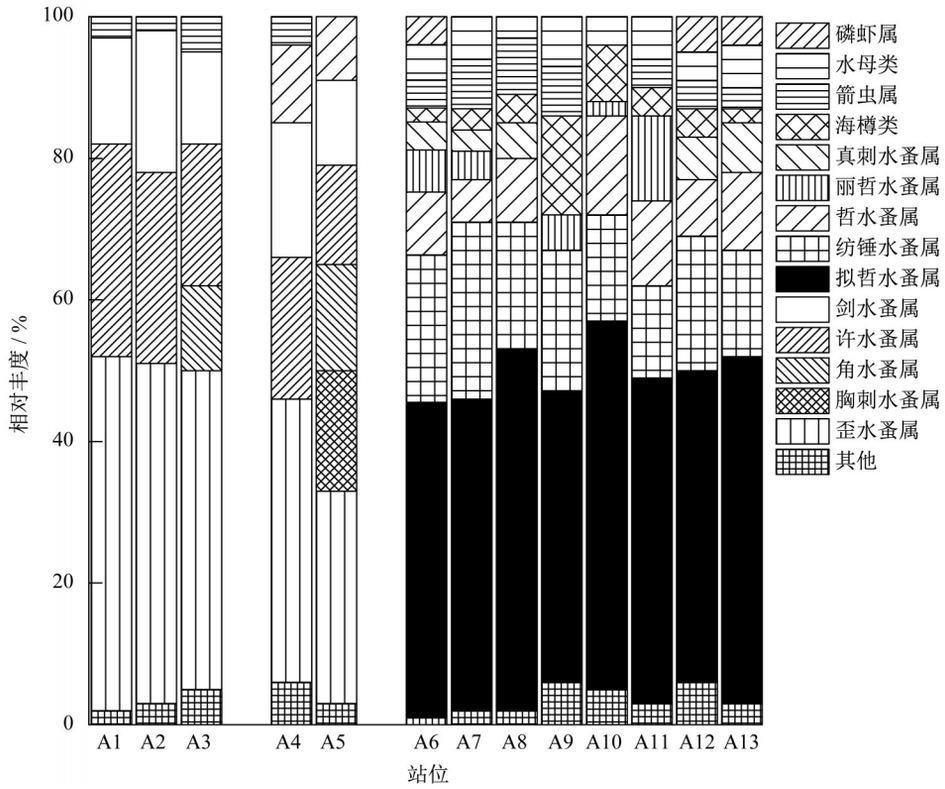

图 2　长江口—东海陆架 A1~A13 站位大中型浮游生物相对密度

Fig.2　Relative abundance of meso- and macro-plankton at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf

表 2　长江口—东海陆架 A1~A13 站位大中型浮游动物群落特征

Tab.2　Dominant species of meso- and macro-plankton at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf

种类	优势度		
	A1～A3	A4～A5	A6～A13
虫肢歪水蚤 *Tortanus vermiculus*	0.069	0.072	
火腿许水蚤 *Schmackeri apoplesia*	0.055	0.059	
拟长腹剑水蚤 *Oithona similis*	0.023	0.045	
针刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*		0.022	
小拟哲水蚤 *Paracalanus Parvus*			0.092
针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus*			0.090
强额拟哲水蚤 *Paracalanus crassirostris*			0.083
太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica*			0.076
软拟海樽 *Dolioetta gegenbauri*			0.033
肥胖箭虫 *Sagitta enflata*			0.030
精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna*			0.025
双生水母 *Diphyopsis chamissonis*			0.022

表 3　长江口—东海陆架 A1~A13 站位大中型浮游生物多样性

Tab.3　Biodiversity indexes of meso-and macro-plankton at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental Shelf

站位	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
H'	2.11	2.32	2.12	2.23	3.25	3.61	2.65	3.22	3.33	3.58	3.96	4.23	4.47
D	1.12	1.44	1.23	1.78	2.52	2.23	2.37	2.42	3.01	3.08	3.08	3.12	3.04

均呈现高值,表明该区域大中型浮游生物数量多且生物多样性高。总体而言,长江口—东海陆架浮游动物种类和数量随盐度增大而增加,这与前人在长江口及邻近海域观察到的现象一致[25-26]。

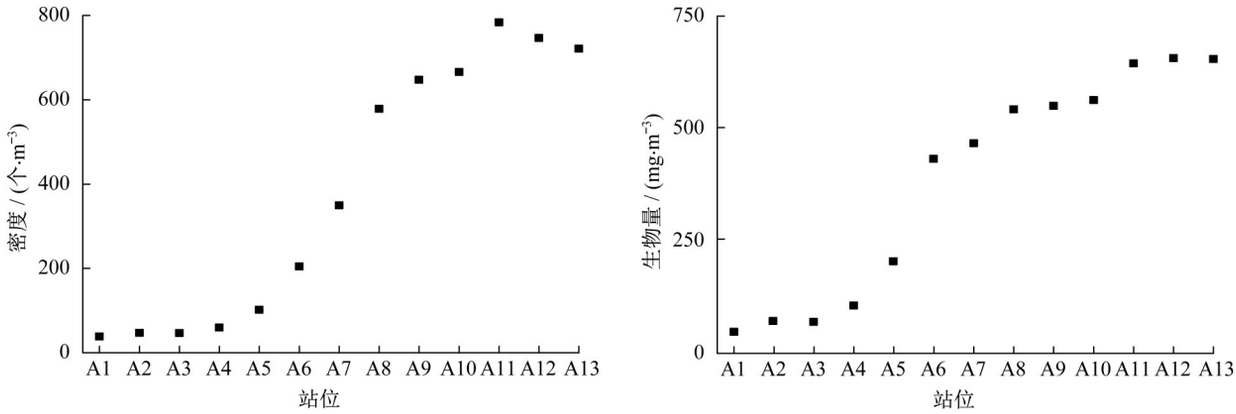

图3 长江口—东海陆架A1~A13站位大中型浮游生物密度及生物量

Fig.3 Density and biomass of meso-and macro-plankton at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf

2.2 长江口—东海陆架大中型浮游生物分布与水环境因子的关系

在夏季长江冲淡水、外海水团及洋流的影响下，长江口—东海陆架典型断面的各站位水环境参数均值(盐度、浊度、温度、营养盐)的变化特征呈现出显著的咸淡水混合特征(表4)。其中，A1～A3站位于长江口内淡水区，盐度＜0.2，A4～A5位于长江冲淡水主控下的低盐度混合区，盐度范围在1.5～12.4之间，长江口外的A6～A13站位盐度相对较高，在19.0～33.0之间。该研究水域的水体浊度在长江口内及低盐区较高，尤其在A4及A5站位平均浊度均高于110 NTU，表明该区域为最大浑浊带水域。在最大浑浊带以东水域，水体浊度从A6至A13站位显著递减。夏季水体温度普遍较高，长江口内水温(26.9～28.9 ℃)略高于口外水温(23.7～26.2℃)。从长江口至东海陆架水域，DIN和DISi含量呈现逐渐递减的规律，与盐度呈显著负相关关系(DIN：R^2=0.95，p<0.01；DISi：R^2=0.90，p<0.01；表5)，表明该水域DIN、DISi主要来源于长江冲淡水，并随着海水的混合稀释作用由长江口至东海陆架逐渐降低。该水域DIP含量与盐度无明显相关性，可能因其来源与形态转化较为复杂。DIP浓度的最高值位于最大浑浊带附近的A5(1.23 μmol·L^{-1})和A6(1.05 μmol·L^{-1})站位，可能与悬浮颗粒物的磷释放有关。已有相关研究表明，表层DIP常被浮游植物吸收利用而转移，底层DIP可由浮游生物死亡而分解再生，同时沉积物和悬浮颗粒物对DIP含量也有缓冲作用[27]。

分析A断面所有站位水体Chl-a含量与环境因子(不同水层的平均值)的相关性(表5)，发现DIN、DIP和DISi含量与Chl-a含量均未呈现显著相关性，表明长江口—东海陆架水域初级生产力变化特征并不取决于营养盐含量，而可能受控于咸淡水混合影响下的多因素变化联合影响。A断面所有站位大中型浮游生物密度、生物量与Chl-a含量(不同水层的平均值)未呈现显著相关性(表6)，与营养盐(尤其是DIN及DISi)呈显著负相关，表明该断面大中型浮游生物分布并非受控于上行效应，而是受到咸淡水混合影响下的水体理化性质等多因素变化的复杂影响。本研究发现该断面在复杂而强烈的咸淡水混合影响下，其水体Chl-a含量和大中型浮游生物分布特征的主控因素有明显的空间差异。长江口内淡水站位(A1～A3)，营养盐含量高，水体浊度高，Chl-a含量相对较低(范围为1.28～1.63 μg·L^{-1})，大中型浮游动物密度和生物量也显著较低，表明光照限制了该水域浮游植物的生长，进而导致浮游动物生长繁殖饵料不足。位于最大浑浊带的A4和A5站位，营养盐含量较长江口内水域略有降低，Chl-a含量相对较低(1.49～1.97 μg·L^{-1})，表明光照也是该水域初级生产力的限制性因素。A4和A5站位的大中型浮游动物密度和生物量相比长江口内淡水站位(A1～A3)有所升高(图3)，可能是由于最大浑浊带给浮游动物提供了较好的庇护场所从而降低了其被捕食的概率。在盐度较高的A6～A12站位，营养盐含量和浊度逐步下降，但Chl-a含量(1.29～4.93 μg·L^{-1}，平均值为3.01 μg·L^{-1})和大中型浮游生物密度及生物量(图3)明显较高，表明该水域充足的光照和适宜的营养盐水平支撑了浮游植物的生长。已有研究[28]在长江口和杭州湾附近水域也发现，夏季在盐度为25～30的冲淡水区，光照强度和营养盐含量取

得最佳平衡，浮游植物密度出现峰值，为浮游动物生长繁殖提供了丰富的饵料。在长江口离岸最远的A13站位，水体浊度很低，营养盐含量显著低于其他站位，Chl-a含量最低（0.44 μg·L^{-1}），表明该水域初级生产力受到了营养盐限制，但该站位浮游动物密度和生物量依然较高。总体而言，高盐度站位（A6～A13）的大中型浮游动物密度和生物量与Chl-a无显著相关性，表明浮游动物的分布并非受控于初级生产力（上行效应），而是受到了捕食压力变化等其因他素的影响。

表4　长江口—东海陆架A1~A13站位主要水质参数均值（来自不同水层）与底层溶解氧

Tab.4　Major water quality parameters (average value from different water layers) and DO in bottom water at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary -East China Sea continental shelf

站位	盐度	浊度/NTU	ρ(Chl-a)/(μg·L^{-1})	温度/℃	c(底层DO)/(μmol·L^{-1})	c(DIN)/(μmol·L^{-1})	c(DIP)/(μmol·L^{-1})	c(DISi)/(μmol·L^{-1})
A1	0.15	48.68	1.28	28.92	7.09	106.58	0.65	117.49
A2	0.15	97.40	1.40	28.83	6.94	100.87	0.53	107.81
A3	0.15	117.38	1.63	28.98	6.71	109.89	0.62	104.54
A4	1.47	111.61	1.97	27.93	6.53	107.74	0.73	106.63
A5	12.36	114.35	1.49	26.97	5.89	71.97	1.23	66.43
A6	19.11	64.43	2.34	25.37	5.54	57.13	1.05	60.48
A7	24.99	38.93	4.93	25.88	4.85	36.24	0.50	38.02
A8	27.47	46.33	4.55	25.22	3.37	28.10	0.48	28.74
A9	27.44	31.96	2.30	24.17	2.42	25.02	0.54	29.13
A10	30.14	17.49	1.29	23.69	1.64	21.75	0.56	24.78
A11	30.78	1.82	3.30	23.69	2.90	15.57	0.61	16.08
A12	31.34	0.38	5.29	24.91	3.24	9.50	0.30	7.59
A13	33.04	0.91	0.44	26.15	4.24	4.00	0.21	7.18

表5　长江口—东海陆架A1~A13站位水质参数的皮尔逊相关性分析

Tab.5　Pearson's correlation analysis between water quality parameters at A1 to A13 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf

水质参数	盐度	浊度	Chl-a	温度	DIN	DIP	DISi
盐度	1	−0.641**	0.002	−0.669**	−0.977**	−0.234	−0.948**
浊度		1	−0.214	0.323	0.693**	0.548*	0.680**
Chl-a			1			−0.411*	−0.185
温度				0.190	−0.109	−0.320	0.482*
DIN				1	0.540*	0.391	0.386
DIP					1	1	0.432*

注：** 表示$p<0.01$；*表示$0.01<p<0.05$。

2.3　长江口—杭州湾咸淡水混合断面浮游生物分布特征

从长江口咸淡水混合区向东南延伸至杭州湾外的B断面站位总体盐度较高（28.56～32.86，表7），平均温度范围为23.37～25.09 °C。与A断面高盐区（A6～A13）类似，高盐类的桡足类浮游生物构成了该水域的优势种（图4），主要优势物种包括拟哲水蚤属的小拟哲水蚤、针刺拟哲水蚤、强额拟哲水蚤，还包括纺锤蚤属的太平洋纺锤水蚤。该断面还鉴定出了软拟海樽（B2）、肥胖箭虫（B1、B2及B4），以及双生水母（B1～B4），这些物种均与A断面高盐区相同。此外，在2019年夏季海洋观测的航次中，B断面附近海域夜晚出现了肉眼可见的夜光藻爆发现象（蓝色荧光）。实验室鉴定也发现B2～B4站位大中型浮游生物样品中包含有夜光藻（*Noctiluca scintillans*），其相对丰度分别可达5%、2%、12%。

B断面站位的水温范围为23.37～25.09℃，与A断面高盐区差异不大。从B1到B4站位，水体平均浊度和营养盐含量（DIN）显著下降（表7），而大中型浮游动物密度（567.9 ～927.5 个·m^{-3}）与生物量（465.5 ～659.7 mg·m^{-3}）逐渐上升，该变化趋势与A断面高盐区（A6～A13）一致（图3，表4）。B断面站位水体Chl-a含量与主要水质参数无显著关联，表明该断面初级生产力可能受到咸淡水混合影响下的多因素变化共同影响。大中型浮游生物密度及生物量与水体浊度（相关系数分别为：R^2=0.97，$p<0.01$；R^2=0.66，$p<0.01$）、DIN浓度（相关系数分别为：R^2=0.97，$p<0.01$；R^2=0.65，$p<0.01$）呈显著负

表6 长江口—东海陆架浮游生物密度、生物量与水质参数的皮尔逊相关性分析

Tab.6 Pearson's correlation analysis between plankton density, biomass and water quality parameters in the Yangtze River estuary-East China Sea continental shelf

水质参数	皮尔逊相关性	
	密度	生物量
盐度	0.938**	0.941**
浊度	−0.399	−0.392
温度	−0.478	−0.466
ρ(Chl−a)	0.363	0.375
c(DIN)	−0.943**	−0.953**
c(DIP)	−0.582*	−0.575*
c(DISi)	−0.933**	−0.945**

注:** 表示$p<0.01$;* 表示$0.01<p<0.05$。

相关关系,而与Chl-a含量无显著关联,表明咸淡水混合影响下的理化因素变化也是影响B断面大中型浮游生物分布的重要因素。其中,B1站位大中型浮游生物密度及生物量最低,可能由于光照(平均浊度为29.32 NTU)限制了浮游植物的生长(Chl-a平均含量为0.15 μg·L^{-1}),进而影响了浮游动物生长繁殖(上行效应)。B2及B3站位水体浊度较低,Chl-a含量较B1显著升高,大中型浮游生物密度及生物量也显著升高。B4站位在较低含量营养盐(DIN含量最低)影响下Chl-a含量较低(0.83 μg·L^{-1}),但该水域大中型浮游动物密度及生物量高达927.5个·m^{-3}及659.7 mg·m^{-3},可能由于其捕食压力低于B2及B3站位。

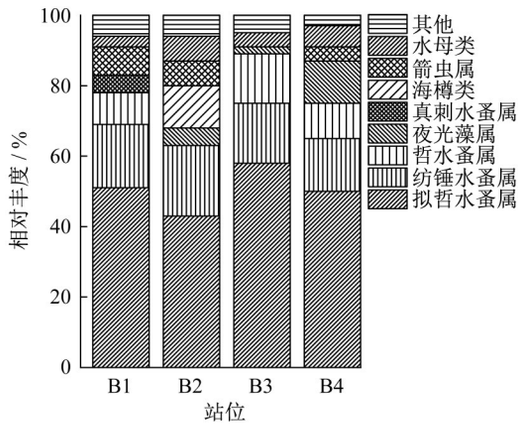

图4 长江口—东海陆架B1~B4站位大中型浮游生物相对丰度

Fig.4 Relative abundance of meso-and macro-plankton at B1to B4 stations in the Yangtze River estuary - East China Sea continental shelf

表7 长江口—东海陆架B1~B4站位主要水质参数均值(来自不同水层)、密度、生物量与底层溶解氧

Tab.7 Major water quality parameters (average value from different water layers), abundance, biomass, and DO in bottom water at B1to B4 stations in the Yangtze River estuary -East China Sea continental shelf

站位	盐度	浊度/NTU	ρ(Chl-a)/(μg·L^{-1})	温度/℃	ρ(DIN)/(μg·L^{-1})	c(底层DO)/(μmol·L^{-1})	密度/(个·m^{-3})	生物量/(mg·m^{-3})
B1	28.56	29.32	0.15	25.09	34.09	4.94	567.9	465.5
B2	32.28	7.12	9.03	23.37	11.99	2.95	828.5	539.3
B3	32.86	2.67	4.33	23.96	10.20	3.03	846.3	548.2
B4	32.81	1.24	0.83	24.20	8.02	4.19	927.5	659.7

本研究首次采用CPICS原位观测方式对B断面4个站位水体进行了浮游生物垂直分布调查。CPICS共采集到4 658张全框图,其中157张拍摄到目标物。经人工拣选识别发现,这些目标物主要为大中型浮游生物和颗粒物。基于分析CPICS在各站位拍摄到的所有图片,鉴定得到B1~B4的浮游生物隶属于6门6纲,包括毛颚动物门箭虫纲箭虫属、节肢动物门甲壳纲桡足亚纲、腔肠动物门有触手纲双生水母属、软体动物门头足纲乌贼属、原生动物门肉足虫纲有孔虫属及甲藻门夜光藻纲夜光藻属。比较B断面不同站位原位观测和实验室镜检结果,发现其呈现的物种组成变化规律总体一致。4个站位中,CPICS在B4站位拍摄到的浮游生物种类最多(6类),而该站位采集到的大中型浮游生物经实验室鉴定得到的物种数也最多(21种)。从拍摄结果来看,甲藻门中的夜光藻是B1~B4 4个站位共同优势种,节肢动物门的箭虫及腔肠动物门的水母在4个站位也均有发现,且水母在B2站位出现最为频繁,而原生动物门的有孔虫仅在B3、B4站位被拍摄到。从拍摄效果来看,CPICS对夜光藻、乌贼、箭虫、有孔虫、水母等大型浮游动物的成像效果较清晰(图5a、5c~5f),最高可鉴定至属;但对部分桡足类浮游动物尾叉、触角等细节的成像不清晰(图5b),仅可鉴定至亚纲。值得注意的是,CPICS在4个站位均拍摄到了夜光藻,且其出现频次在所拍摄到的目标物中占比极高,甚至拍摄到了正在分裂的夜光藻(图5a)。

夜光藻作为我国沿海水域常见的赤潮种,对环境适应能力很强,一直是渤海和黄海的主要赤潮种[10,29],近几年也常出现在舟山海域附近[30]。夜光藻虽然本身不含毒素,但直径较大(150~2 000 μm),在大量爆发时可黏附于鱼腮上阻碍鱼类呼吸甚至窒息死亡,其生态风险值得关注。本研究发现CPICS对夜光藻有非常清晰的成像效果,且目标框选较准确,未来基于长期原位观测可为东海水域夜光藻的生消规律及演变趋势提供重要数据支撑。

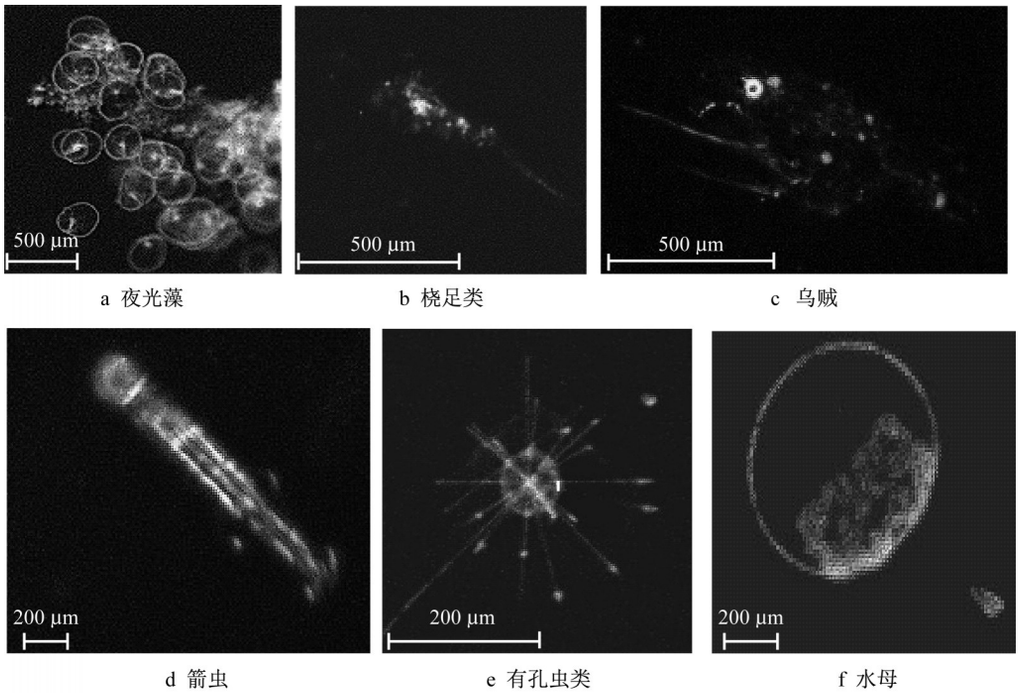

图5　B1~B4站位CPICS拍摄的大中型浮游生物图片

Fig.5　Pictures of meso- and macro-plankton photographed by CPICS at B1 to B4 stations

3　结论与展望

本文对长江口—东海陆架典型断面大中型浮游生物群落组成、密度、生物量进行分析,以阐释长江口浮游生物分布特征在咸淡水混合影响下呈现的空间异质性,并利用浮游生物连续成像和分类仪在高盐度站位进行浮游生物原位观测和同步采样分析,结果表明:

(1)长江口—东海陆架典型断面大中型浮游生物种属分布在长江口咸淡水混合显著影响下,呈现出显著的空间异质性。该断面淡水及低盐度站位,桡足类占绝对优势,其主要优势种为虫肢歪水蚤、火腿许水蚤、拟长腹剑水蚤等淡水物种。长江口外高盐度站位浮游生物优势物种更为多样化,除了小拟哲水蚤、针刺拟哲水蚤等桡足类物种,还有软拟海樽、肥胖箭虫和双生水母。总体而言,该断面大中型浮游生物物种数、Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数均随盐度增加而增大。

(2)长江口—东海陆架关键断面Chl-a与大中型浮游生物分布特征的主控因素存在明显的空间差异。在淡水站位,初级生产力主要受高浊度影响下的光照限制,进而影响浮游动物生长繁殖。在最大浑浊带附近的低盐度站位,Chl-a含量较低但大中型浮游动物明显增多,可能由于高浊度水体降低了浮游动物被捕食的概率。在高盐度站位,充足的光照和营养盐支撑了浮游植物生长,但浮游动物分布并非受控于上行效应,而受到了捕食压力变化等其他因素的影响。

(3)浮游生物连续成像和分类仪(CPICS)对夜光藻、箭虫、水母等大型浮游生物成像效果好,一般可鉴定至属,对桡足类拍摄细节有待提升,可鉴定至亚纲。尽管CPICS原位剖面观测数据和野外采样分析分类鉴定结果因鉴定分类水平存在差异,但二者所反映的物种数变化趋势具有一致性,即离岸高盐度站位物种更为丰富。

总体来说,本研究较全面地反映了长江口咸淡

水混合影响下的大中型浮游动物种属构成与分布特征的空间异质性,可为长江口水生生态系统提供重要基础资料。浮游生物在线成像和分类设备首次在东海成功拍摄到了多种大中型浮游生物的原位影像,但对桡足类细节结构的成像效果有待提升。野外采样和原位观测结果在物种变化趋势上展现出了一致性,未来有望进一步基于全水柱定点长期观测的大数据,结合智能识别分类技术实现在线自动准确定性定量分析,实现东海水域浮游生物生消规律及演变趋势的实时观测。

作者贡献声明:

刘承莹:样品采集与分析,论文撰写与修改。
王　锐:研究方案制定,论文撰写与修改。
高　航:原位观测与结果分析,论文修改。
王鹏远:学术指导,论文审阅。
尹大强:学术指导,论文修改。

参考文献:

[1] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海洋科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31 (10): 1133.
LUO Yongming. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31 (10): 1133.

[2] 左涛, 王荣, 陈亚瞿,等. 春季和秋季东、黄海陆架区大型网采浮游动物群落划分[J]. 生态学报, 2005, 25 (7): 1531.
ZUO Tao, WANG Rong, CHEN Yaqu, *et al*. Net macro-zooplankton community classification on the shelf area of the east China sea and the Yellow Sea in spring and autumn [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (7): 1531.

[3] 俞志明, 沈志良,陈亚瞿,等. 长江口水域富营养化[M]. 北京:科学出版社, 2011.
YU Zhiming, SHEN Zhiliang, CHEN Yaqu, *et al*. Eutrophication in Changjiang estuary and its adjacent waters [M]. Beijing:Science Press.,2011.

[4] 张善发, 王茜, 关淳雅,等. 2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素[J]. 北京大学学报, 2020, 56 (6): 1129.
ZHANG Shanfa, WANG Qian, GUAN Chunya, *et al*. Study on the occurrence law of red tide and its influencing factors in the offshore waters of China from 2001 to 2017 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56 (6): 1129.

[5] 周名江,朱明远,张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学学报, 1996 (3): 277.
ZHOU Mingjiang, ZHU Mingyuan, ZHANG Jing. Status of harmful algae blooms and related researches activities in China [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 1996 (3): 277.

[6] 黄俊, 程金平. 长江口及近邻水环境中新型污染物研究进展[J]. 环境化学, 2014 (33): 1484.
HUANG Jun, CHENG Jinping. Emerging contaminants in the Yangtze estuary and adjacent coastal area [J]. China. Environmental Chemistry, 2014 (33): 1484.

[7] GUO Y, YANG S. Heavy metal enrichments in the Changjiang (Yangtze River) catchment and on the inner shelf of the East China Sea over the last 150 years[J]. Science Total Environment, 2016 (543): 105.

[8] 陈沈良,谷国传,胡方西. 长江口外羽状锋的屏障效应及其对水下三角洲塑造的影响[J]. 海洋科学, 2001 (5): 55.
CHEN Shenliang, GU Guochuan, HU Fangxi. The barrier effect of plume front on the submerged delta development of Yangtze River estuary[J]. Marine Sciences, 2001 (5): 55.

[9] 胡方西,胡辉,谷国传,等. 长江河口盐度锋[J]. 海洋与湖沼, 1995 (S1): 23.
HU Fangxi,HU Hui, GU Guochuan, *et al*. Salinity front in the Changjiang estuary[J]. Oceanologia Limnologia Sinica , 1995 (S1): 23.

[10] GEBHARDT A C, SCHOSTER F. The turbidity maximum zone of the Yenisei River and its impact on organic and inorganic proxies [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005 (65): 61.

[11] 徐超, 王思凯, 赵峰,等. 长江口水生动物食物网营养结构及其变化[J]. 水生生物学报, 2019, 43 (1): 155.
XU Chao, WANG Sikai, ZHAO Feng, *et al*. Trophic structure and changes of aquatic animal food web in the Yangtze River estuary [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43 (1): 155.

[12] 蒋巧丽,许永久,俞存根,等. 2016年夏季长江口邻近海域浮游动物群落结构[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (94): 3078.
JIANG Qiaoli, XU Yongjiu, YU Cungen, *et al*. Community structure of zooplankton in adjacent area of Changjiang estuary, China in summer 2016 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (94): 3078.

[13] 杨颖,刘鹏霞,周红宏,等. 近15年长江口海域海洋生物变化趋势及健康状况评价[J]. 生态学报, 2020, 40 (24): 8892.
YANG Ying, LIU Pengxia, ZHOU Honghong, *et al*. Evaluation of the biodiversity variation and ecosystem health assessment in Changjiang estuary during the past 15 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (24): 8892.

[14] OLSON R J, SOSIK H M. A submersible imaging-in-flow instrument to analyze nano-and microplankton: imaging flowcytobot[J]. Limnology and Oceanography Methods, 2007 (5): 195.

[15] HARRED L B, CAMPBELL L. Predicting harmful algal blooms: a case study with *Dinophysis ovum* in the gulf of Mexico[J]. Journal Plankton Research, 2014 (36): 1434.

[16] BROSNAHAN M L, VELOSUAREZ L, RALSTON D K, *et al*. Rapid growth and concerted sexual transitions by a bloom of the harmful dinoflagellate *Alexandrium fundyense* (Dinophyceae)[J]. Limnology and Oceanography, 2015 (60):

2059.

[17] PEACOCK E E, OLSON R J, SOSIK H M, *et al*. Parasitic infection of the diatom *Guinardia delicatula*, a recurrent and ecologically important phenomenon on the New England shelf [J]. Marine Ecology-Progress Series, 2014 (503): 1.

[18] MARY M, GROSSMANN S, GALLAGER M. Continuous monitoring of near-bottom mesoplankton communities in the East China Sea during a series of typhoons [J]. Journal of Oceanography, 2015 (71): 115.

[19] 沈盎绿,欧阳珑玲. 长江口浮游生物[M].北京:中国农业出版社,2018.
SHEN Yanglv, OUYANG Longling. Plankton in Changjiang estuary[H]. Beijing:China Agriculture Press, 2018.

[20] 连光山,王彦国,孙柔鑫,等. 中国海洋浮游桡足类多样性[M].北京:海洋出版社. 2018.
LIAN Guangshan, WANG Yanguo, SUN Rouxin, *et al*. Species diversity of marine planktonic copepods in China sea [H]. Beijing:Marine Press, 2018.

[21] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系[J]. 生态学报, 1989, 8 (4): 13.
XU Zhaoli, CHEN Yaqu. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in the East China Sea and Yellow Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 1989, 8 (4): 13.

[22] 徐兆礼, 沈新强, 马胜伟. 春、夏季长江口邻近水域浮游动物优势种的生态特征[J]. 海洋科学, 2005 (12):13.
XU Zhaoli, SHEN Xinqiang, MA Shengwei. Ecological characters of zooplankton dominant species in the waters near Changjiang estuary in spring and summer[J]. Marine Sciences, 2005 (12): 13.

[23] 陈洪举, 刘光兴. 2006年夏季长江口及其邻近水域浮游动物的群落结构[J]. 北京师范大学学报, 2009, 45 (4): 393.
CHEN Hongju, LIU Guangxing. Zooplankton community structure in Yangtze River Estuary and adjacent sea area in summer 2006 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45 (4): 393.

[24] 徐韧, 李亿红,李志恩,等. 长江口不同水域浮游动物数量特征比较[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1688.
XU Ren, LI Yihong, LI Zhien, *et al*. Quantitative comparison of zooplankton in different habitats of the Changjiang Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (4): 1688.

[25] 丁峰元, 李圣法,董婧,等. 春季东海区近海浮游动物群落结构及其影响因子[J]. 海洋渔业, 2005, 27 (1): 26.
DING Fengyuan, LI Shengfa, DONG Jing, *et al*. Preliminary study on the zooplankton community structure and its influential factors in the offshore waters of the East China Sea in spring [J]. Marine Fisheries, 2005, 27 (1): 26.

[26] 朱延忠, 刘录三, 郑丙辉,等. 春季长江口及毗邻海域浮游动物空间分布及与环境因子的关系[J]. 海洋科学, 2011 (35): 59.
ZHU Yanzhong, LIU Lusan, ZHENG Binghui, *et al*. Relationship between spatial distribution of zooplankton and environmental factors in the Changjiang estuary and its adjacent waters in spring[J]. Marine Sciences, 2011 (35): 59.

[25] SHEN Z L, ZHOU S Q, PEI S F. Transfer and transport of phosphorus and silica in turbidity maximum zone of the Changjiang Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008 (78): 481.

[28] 宁修仁, 史君贤, 蔡昱明. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J]. 海洋学报, 2011 (6): 96.
NING Xiuren, SHI Junxian, CAI Yuming. Biological productivity fronts and their ecological effects in the Yangtze River estuary and Hangzhou Bay[J]. Haiyang, 2011 (6): 96.

[29] 孙跃,沈阳,戴铃灵,等. 夏冬季黄海浮游动物群落结构及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50 (7): 82.
SUN Yue, SHEN Yang, DAI Lingling, *et al*. Zooplankton community structure and its influencing factors in the yellow sea in summer and winter [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020,50 (7): 82.

[30] 许卓昀,陈根,张靖尧,等. 舟山附近海域环境调查及浮游生物分析[J]. 环境生态学, 2019, 1 (5): 43.
XU Zhuoyun, CHEN Gen, ZHANG Jingyao, *et al*. Environmental investigation and analysis of plankton community in Zhoushan offshore sea area [J]. Environmental Ecology, 2019, 1 (5): 43.