

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19096

2017—2018 年长江口海域夏季浮游动物群落的年际变化及影响因素

沈海琪¹, 许永久¹, 王健鑫², 袁锴彬¹, 严泽宇¹, 周富源¹, 侯伟芬¹

1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022;

2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022

摘要: 根据 2017—2018 年夏季长江口海域浮游动物连续站及断面站的数据, 应用典范对应分析(CCA)研究了浮游动物的种类组成、主要类群数量年际变化、昼夜变化、空间变化及与环境因子的关系。结果显示, 2017 年和 2018 年夏季分别鉴定浮游动物 49 种和 50 种, 两年共同优势种为中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)、精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*)、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)和肥胖三角溞(*Evadne tergestina*)。相似性百分比分析(SIMPER)分析表明, 年间浮游动物群落差异的主要贡献种为肥胖三角溞、中华哲水蚤、海樽类(Thaliacea), CCA 分析表明, 表层温度(T_s)、底层盐度(S_b)和表层叶绿素 a (C_s)是影响年际间浮游动物类群差异的主要环境因子, 解释了两年的浮游动物类群变异的 47.51%。根据 2018 年叶绿素 a 空间分布, 将站位分为叶绿素 a 锋面区和非锋面区, L1~L2 站为非叶绿素 a 锋面区, L3~L4 站为叶绿素 a 锋面区。浮游动物群落在二者空间差异的主要贡献种为肥胖三角溞、背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)、精致真刺水蚤, CCA 分析表明, 底层盐度(S_b)、底层温度(T_b)和表层叶绿素 a (C_s)是影响浮游动物类群空间变化的主要环境因子, 解释了 2018 年浮游动物类群组成变异的 56.31%。该结果表明, 引起盐度和叶绿素 a 变化的长江冲淡水径流量对浮游动物群落结构年际变化造成了重要影响。

关键词: 长江口; 浮游动物群落结构; 年际变化; 空间变化; 环境因子; CCA

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)03-0327-09

长江口是我国最大的河口, 受长江冲淡水、沿岸流系、台湾暖流等多重影响^[1], 水文条件复杂, 且深受人类活动的影响^[2], 致使其生态系统敏感脆弱。每年 7—8 月丰水期, 长江口冲淡水势力强盛, 对长江口的生物群落结构产生显著影响。浮游动物既对环境变化敏感, 又在海洋食物链中起着承上启下的作用^[3], 它可以通过上行效应影响渔业资源的变动, 也可通过下行效应调控初级生产力变化。因此, 浮游动物的动态变化不仅是对海洋环境变化的响应, 也对河口生态系统的物质循环和能量流动产生深刻影响。

关于长江口及其邻近海域浮游动物的研究已有较多报道^[4-11], 徐兆礼^[4]对 2000—2003 年浮游

动物群落特征及变化趋势进行了研究, 表明盐度是影响浮游动物群落的主要因子; 徐韧等^[6]研究了长江口不同水域浮游动物种类和数量的空间变化特征及影响因素。这些研究大多集中在浮游动物季节变化、数量空间分布特征及其影响因素, 而对于长江口冲淡水年际变化对浮游动物群落的影响方面的研究较少。2017 年 7 月的长江流量($59252.11 \text{ m}^3/\text{s}$)显著高于 2018 年($41757.01 \text{ m}^3/\text{s}$), 势必对浮游生物类群组成、空间分布造成显著的影响, 本文根据 2017—2018 年每年 7 月在长江口邻近海域的浮游动物 24 h 连续生态环境调查及 2018 年 7 月断面调查, 研究长江冲淡水量的差异对长江口浮游动物类群组成及数量分布的影响,

收稿日期: 2019-05-18; 修订日期: 2019-06-25.

基金项目: 国家海洋局海洋生态环境科学与工程重点实验室开放基金项目(MESE-2018-01); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2018R411006); 浙江海洋大学“水产”省一流学科开放课题(20160010).

作者简介: 沈海琪(1998-), 女, 研究方向为海洋资源与环境. E-mail: shq1592654@163.com

通信作者: 许永久, 讲师, 从事海洋资源与环境研究. E-mail: xuyongjiu@zjou.edu.cn

探索浮游动物群落结构年际变化的主要原因和浮游动物短时间尺度-昼夜变化的影响因素,为该长江口近岸海域的生态系统修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

2017—2018 年每年夏季(7 月)搭载“浙渔科 2 号”于长江口邻近海域分别进行 24 h 的连续站浮游动物样品采集,两年调查站位如图 1 所示。其中,2017 年在 S1 站位的进行了连续采样调查,2018 年除在 S2 站进行连续调查外,在 L1、L2、L3、L4 进行断面调查,其中 S1、S2 和 L3、L2 处同一位置。两个航次的浮游动物样品的采集、处理和分析均参照《海洋调查规范-海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)。浮游动物采用浅水 I 型浮游生物网(网口内径 50 cm,筛绢 CQ14,孔径 0.505 mm),采集频率为 3 h。从距底 2 m 垂直拖拽至表层,滤水体积由流量计测定并换算相关示数获得,网底管样品经 5% 甲醛海水溶液固定保存。同步进行叶绿素 a 水样采集,根据水深进行标准层采样,包括表层、5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 和底层(底上 2 m),

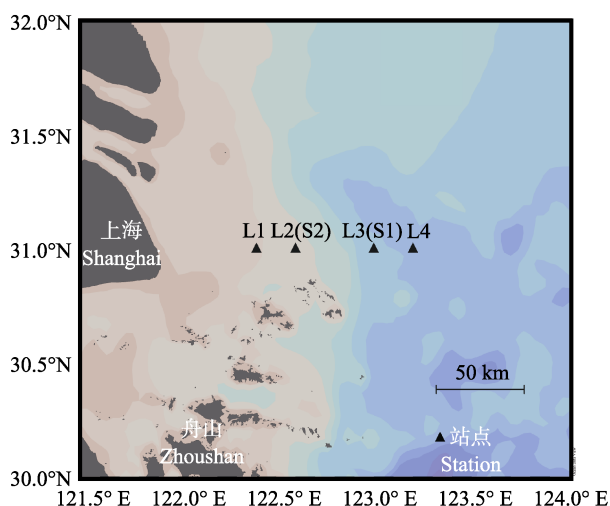


图 1 2017—2018 年长江口海域采样站位
S1 站和 S2 站分别是 2017 年和 2018 年连续站站位, L1、L2、L3 和 L4 是 2018 年断面站站位。

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze River Estuary in 2017–2018

The S1 and S2 stations are continuous sampling stations in 2017 and 2018, respectively; L1, L2, L3 and L4 are section stations in 2018.

量取 100 mL 过滤水样,在<50 kPa 负压下抽滤到 whatman GF/F 玻璃纤维滤膜上,滤膜经由锡箔纸包裹置于-80℃液氮内冷冻保存。叶绿素样品于低温避光条件下用 90% 丙酮萃取 48 h,采用 Trilogy 荧光计测定上清液的荧光值,获取对应叶绿素 a 浓度。浮游动物样品用浮游动物分样器进行等分,再通过立体显微镜下进行镜检鉴定种属和计数。两个航次的水深、温度、盐度等参数均由船载 CTD 获得。浮游动物连续站位的温度,盐度和叶绿素 a 等值线剖面图均采用 Surfer13 软件绘制。

1.2 浮游动物丰度(N)和优势度(Y)计算

浮游动物丰度(N)计算:

$$N=n/V$$

其中, N 为单位体积海水中浮游动物的个体数(ind/m³); V 为浮游动物采集所过滤的海水体积(m³); n 为镜检计数获得的浮游动物个体数。

优势度(Y)计算:

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

式中, N 为各个采样时间所有种类的丰度; n_i 为第 i 种的丰度; f_i 为该种在各采样时间出现的频率。 $Y>0.02$ 的种类拟定为优势种;同样,部分类群 $Y>0.02$ 时,认定为优势类群,同优势种合称为优势种类。

1.3 统计分析

将采样时间分为年际尺度和昼夜尺度:年际尺度根据调查不同年份确定;昼夜尺度,6:00 至 18:00 为白天(所有此时间内的样本为组 1),18:00 至次日 6:00 为夜间(所有此时间内的样本为组 2);利用 t 检验分析浮游动物群落结构的年际和昼夜差异显著性。根据叶绿素 a 分布的历史调查资料^[12],将 2018 年夏季调查的 L1、L2(亦为 2018 年连续站 S2 站)视为叶绿素 a 非锋面区, L3(亦为 2017 年连续站 S1 站)、L4 视为叶绿素 a 的锋面区,并比较锋面及非锋面区浮游动物群落的空间差异。为了验证长江冲淡水差异是否对两年浮游动物类群有显著影响,根据 2018 年 L3、L4 的采样时间,匹配 2017 年 S1 站相近的调查时间,比较锋面区 2017 年与 2018 年浮游动物类群组成的年际差异。

以浮游动物种类的丰度为指标,两年的采样时间和站位为样本,将两年的浮游动物数据进行

合并, 构建浮游动物群落和环境因子矩阵, 利用 Primer 5.0 软件计算群落之间的 Bray-Curtis 距离, 根据相似性百分比分析(SIMPER), 分析各浮游动物种类对群落的贡献; 利用单因子相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)检验两年浮游动物群落结构的显著性。利用 Canoco5.0 软件中的典范对应分析法 CCA 分析浮游动物类群结构与环境因子的关系。

2 结果与分析

2.1 环境因子的昼夜变化和垂直分布

2017 年 7 月 19—20 日、2018 年 7 月 15—16 日夏季长江口近海 S1、S2 站的温度、盐度、叶绿素 a 剖面时间序列变化如图 2 所示。2017 年的温

度、盐度昼夜变化不显著($P>0.05$)(图 2a、图 2b 和图 2c), 但在垂直方向上温度、盐度差异显著($P<0.05$), 分层现象明显。表层受到长江冲淡水影响, 盐度较低, 叶绿素(0~10 m)浓度较高。2018 年 S2 站受到水体混合的影响, 温度、盐度及叶绿素 a 的昼夜差异不显著($P>0.05$)(图 2d、图 2e 和图 2f)。相较于 2017 年 S1 站, 2018 年 S2 站受长江冲淡水的影响较小。

2018 年夏季长江口 L1~L4 站位断面的温度、盐度和叶绿素 a 分布情况如图 3。断面 L3~L4 站(深水处)的温度、盐度垂直方向上层化明显(图 3a 和图 3b), 与 L1~L2 站相比, L3~L4 站的表层(0~5 m)叶绿素 a 呈现显著高值区(图 3c), 说明 L3~L4 站可能为叶绿素 a 锋面, 而 L1~L2 站受到近岸水体

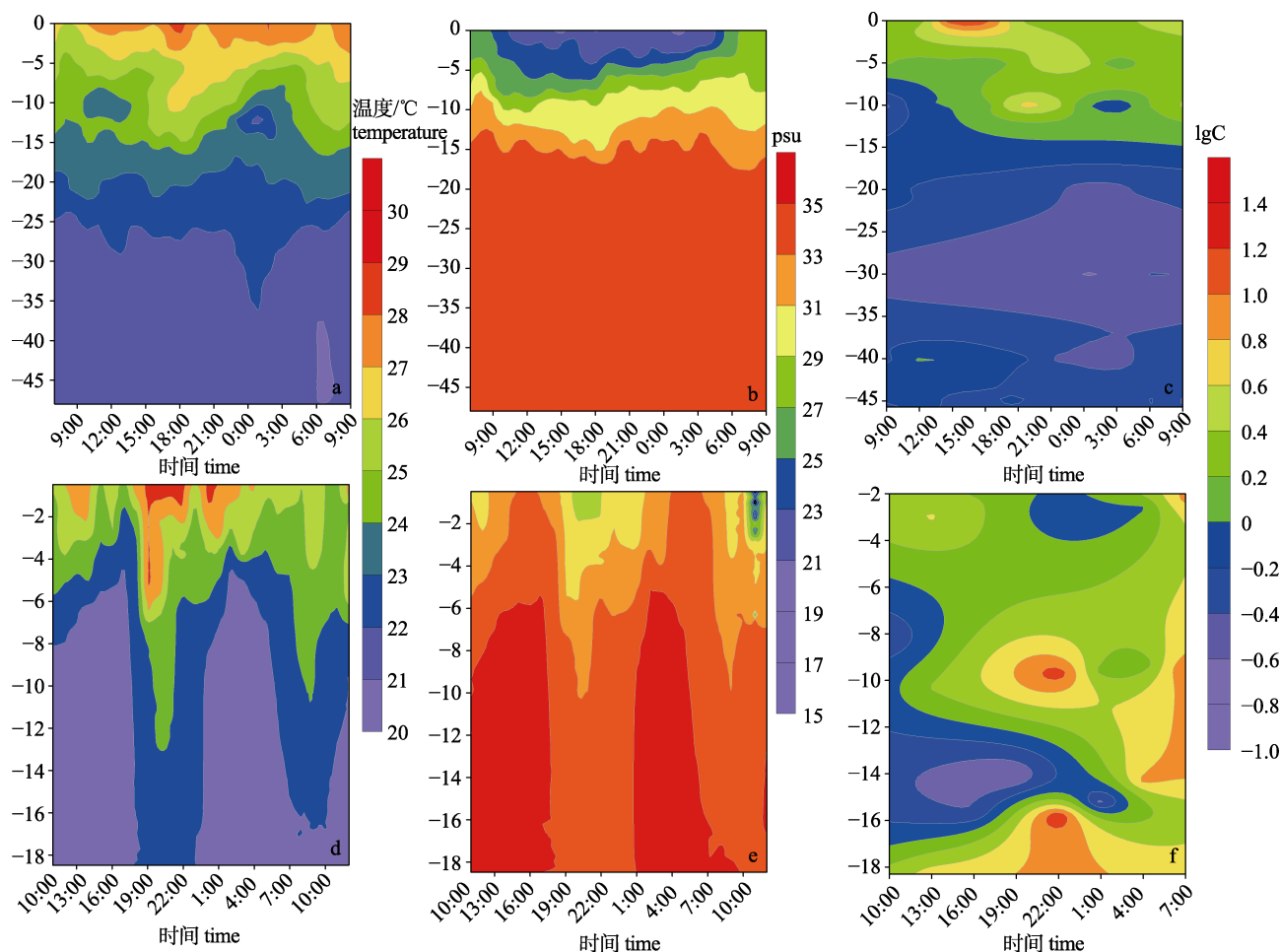


图 2 2017—2018 年长江口连续站温度、盐度、叶绿素分布特征

图 a、b、c 是 2017 年 S1 站的温度、盐度和叶绿素分布图; 图 d、e、f 是 2018 年 S2 站的温度、盐度和叶绿素分布图。

Fig. 2 24 hour time-series survey of temperature, salinity and chlorophyll distribution in the Yangtze River Estuary in 2017-2018
Figure a, b and c are the 24 hour time-series temperature, salinity and chlorophyll distribution of the S1 station in 2017; figures d, e and f are the 24 hour time-series temperature, salinity and chlorophyll distribution of the S2 station in 2018.

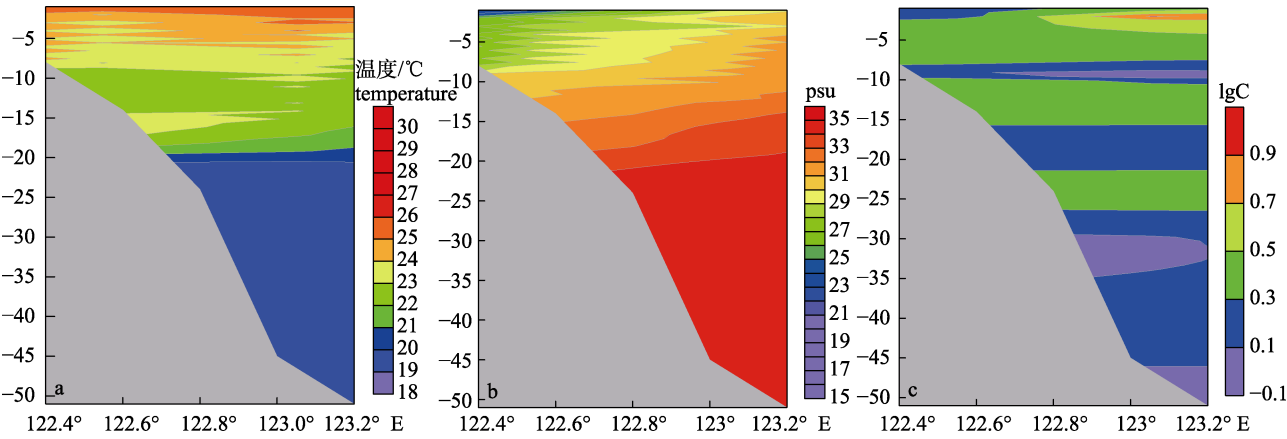


图 3 2018 年长江口断面站(L1~L4)温度、盐度、叶绿素剖面
Fig. 3 Section profiles (L1-L4) of temperature, salinity and chlorophyll in the Yangtze River Estuary in 2018

混合及高浑浊度的影响, 尽管营养盐较丰富, 叶绿素 a 值偏低。2017 年 S1 站和 2018 年 L3~L4 站环境因子对比发现, 前者表层盐度小于 25, 而后者表层盐度达 30, 盐度的年际差异直接反映了冲淡水量的影响。

2.2 浮游动物的种类组成及优势种类

2017—2018 年夏季共鉴定浮游动物 60 种, 其中 2017 年 49 种, 2018 年 50 种, 隶属于 7 个门的 15 个类群。鉴定结果显示 2017 年种类数占比最大的是水母类 13 种, 占当年总种数的 26.53%; 2018 年种类数占比最大的是桡足类 15 种, 占当年总种数的 30%。两年的浮游动物种类数差异不显著($P>0.05$), 浮游动物的种类组成则存在年际变化。2017 年鉴定水母类 13 种, 2018 年 9 种, 存在 8 种共有种; 2017 年鉴定桡足类 9 种, 2018 年 15 种, 共有种 8 种。

2017 年浮游动物优势种类共计 9 种(类), 包括桡足类 3 种、枝角类 1 种、毛颚类 1 种、介形类 1 种、浮游虾类 1 种、尾索动物 1 个类群(海樽类)以及浮游幼虫 1 个类群。中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)为第一优势种, 优势度为 0.26, 占当年浮游动物总丰度的 25.91%(表 1)。2018 年优势种类共计 7 种, 包括桡足类 4 种、毛颚类 2 种以及枝角类 1 种, 太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)为第一优势种, 优势度为 0.27, 占当年浮游动物总丰度的 29.71% (表 1)。两年均出现的优势种有中华哲水蚤、太平洋纺锤水蚤、精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*)、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)和肥胖三角溞(*Evadne tergestina*)(表 1)。

表 1 浮游动物优势种(类)		
Tab. 1 Dominant species (groups) of zooplankton		
年份 year	优势种(类) dominant species (group)	优势度 dominance
2017	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.26
	肥胖三角溞 <i>Evadne tergestina</i>	0.18
	精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	0.12
	海樽类 <i>Thaliacea</i>	0.10
	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	0.07
	肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	0.06
	介形类 <i>Ostracoda</i>	0.04
	莹虾 <i>Lucifer</i> sp.	0.03
	长尾类溞状幼体 <i>Macrura zoea</i>	0.02
2018	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	0.27
	精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	0.16
	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.12
	背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	0.04
	肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	0.04
	肥胖三角溞 <i>Evadne tergestina</i>	0.03
	海龙箭虫 <i>Sagitta nagae</i>	0.02

2.3 浮游动物的群落特征

2017 年和 2018 年调查站位处于长江口区域, 浮游动物平均丰度均呈现高值, 物种总丰度依次是 2610.27 ind/m³ 和 2548.69 ind/m³。两年对物种总丰度的贡献类群有所差别, 2017 年主要为桡足类、枝角类和海樽类; 2018 年为桡足类、毛颚类和枝角类。

2017 年和 2018 年连续站的浮游动物群落结构昼夜变化均不存在显著性差异($P>0.05$)。对于深水站位进行浮游动物群落的年际比较发现, 浮游

动物群落结构年变化上存在显著差异(ANOSIM, $P<0.05$), 非相似水平为 58.81%, 主要贡献种(贡献率 $>10\%$)发生改变(表 2), 引起年间浮游动物群落差异的主要贡献种为肥胖三角溞(贡献率 28.82%)、中华哲水蚤(贡献率 14.82%)、海樽类(Thaliacea)(贡献率 10.11%)。

表 2 2017—2018 年浮游动物群落结构差异的贡献度分析
Tab. 2 Contribution analysis of zooplankton community structure differences between 2017 and 2018

年份 year	贡献者 contributor	贡献率/% contribution rate
2017	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	30.39
	精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	20.08
	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	15.57
2018	肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	16.47
	海樽类 Thaliacea	13.24
	肥胖三角溞 <i>Evadne tergestina</i>	12.61
	精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	11.35

2018 年同非锋面区站位(L1、L2)和锋面区站位(L3、L4)样本比较分析显示, 锋面区和非锋面

区浮游动物群落非相似水平达 72.18%, 空间差异的主要贡献种为肥胖三角溞(贡献率 27.58%)、背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)(贡献率 11.35%)、精致真刺水蚤(贡献率 11.14%)。

2.4 浮游动物群落与环境因子的相关性分析

2.4.1 浮游动物类群丰度的昼夜变化与环境因子的相关性分析 对两年连续站浮游动物各类群丰度与表层温度(T_s)、表层盐度(S_s)、表层叶绿素 a (C_s)、底层温度(S_b)、底层盐度(T_b)和底层叶绿素 a (C_b)等环境因子进行相关性分析。在短时间变化(1 d)内, 环境因子仅对部分浮游动物类群丰度有显著影响(表 3)。2017 年毛颚类物种丰度与 C_s 呈极显著正相关($P<0.01$); 水母类丰度同 T_b 和 C_b 呈显著正相关($P<0.05$), 与 S_b 呈极显著正相关($P<0.01$); 枝角类丰度与 C_s 呈显著正相关($P<0.05$); 浮游虾类的丰度与 S_b 呈显著正相关($P<0.05$); 仔鱼及鱼卵的丰度与 C_s 呈极显著正相关($P<0.01$)。2018 年毛颚类和水母类的物种丰度均与 T_b 呈显著正相关($P<0.01$)。而绝大部分浮游动物类群与环境因子关系不显著($P>0.05$)。

表 3 浮游动物类群丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析
Tab. 3 Pearson correlation analysis of zooplankton group abundance and environmental factors

年份 year	2017						2018					
	表层 surface			底层 bottom			表层 surface			底层 bottom		
	温度 temperature	盐度 salinity	叶绿素 chlorophyll	温度 temperature	盐度 salinity	叶绿素 chlorophyll	温度 temperature	盐度 salinity	叶绿素 chlorophyll	温度 temperature	盐度 salinity	叶绿素 chlorophyll
桡足类 Copepoda	0.300	0.374	-0.013	0.339	0.524	0.162	-0.104	0.016	0.174	-0.241	0.256	-0.131
毛颚类 Chaetognatha	0.616	-0.480	0.897**	0.625	0.475	0.389	-0.469	0.033	0.013	-0.718*	0.562	-0.570
水母类 Medusae	-0.055	0.220	0.283	0.691*	0.820**	0.675*	-0.393	0.588	0.157	-0.792*	0.695	-0.439
枝角类 Cladocera	0.470	-0.021	0.780*	0.208	0.060	0.267	-0.346	0.237	-0.238	0.197	-0.333	0.093
浮游虾类 planktonic shrimp	-0.043	0.011	0.479	0.639	0.670*	0.194	-0.327	-0.246	0.546	-0.444	0.503	-0.344
浮游幼虫 pelagic larva	0.125	-0.360	0.507	0.556	0.621	0.101	0.327	0.036	-0.109	0.162	-0.152	-0.560
海樽类 Thaliacea	0.201	-0.559	0.626	0.476	0.456	0.187	-0.383	0.458	-0.174	-0.259	0.241	-0.389
其他 others	-0.311	0.469	-0.025	0.405	0.574	0.251	-0.241	0.416	-0.002	-0.394	0.448	0.380
仔鱼/鱼卵 fish eggs	0.606	-0.268	0.844**	0.080	-0.051	0.170	-0.209	0.215	0.242	-0.425	0.379	0.062

注: *在 0.05 水平(双尾)上显著相关, **在 0.01 水平(双尾)上极显著相关。
Note: * means significantly correlated at the 0.05 level (two-tailed), and ** means highly significantly correlated at the 0.01 level (two-tailed).

2.4.2 浮游动物类群的年际和空间变化与环境因子的相关性分析 根据 CCA 的分析结果(图 4a), 经度(Lon)、表层盐度(S_s)、底层盐度(S_b)、表层温度(T_s)、底层温度(T_b)和表层叶绿素 a(C_s)是影响两年所有站位样品浮游动物类群组成的主要原因。2017 年连续站样本 1~9 号分布于 CCA1 的左侧, 而 2018 年连续站 10~17 号样本分布于 CCA1 的右侧, CCA1 主要反映了年际差异, 也反映了部分空间差异。同时, 2018 年的连续站和断面站 L1、L2 站位于下半轴, 2017 年的连续站样本绝大部分位于上半轴, 因此, CCA2 主要反映了空间差异, 但也反映了部分年际差异。CCA1 和 CCA2 共解释了浮游动物类群总变异的 61.86%。为进一步了解浮游动物类群与环境

因子的关系, 根据图 4a 站位划分结果, 对 2017 年 S1 连续站样本和 2018 年 L3~L4 站样本、2018 年 S2 连续站样本和 2018 年的 L1~L4 断面站样本分别进行了 CCA 分析(图 4b 和图 4c)。分析结果发现, T_s 、 S_b 、 C_s 和 C_b 是影响浮游动物类群年际变化的主要环境因子, 解释了两年的浮游动物类群变异的 47.51%; S_b 、 T_b 和 C_s 是引起锋面区和非锋面区浮游动物类群空间变化的主要环境因子, 解释了 2018 年浮游动物类群组成变异的 56.31%。桡足类(A)的丰度与 T_b 有一定的正相关关系; 仔鱼及鱼卵(H)和海樽类(G)的丰度与叶绿素均呈现一定相关性; 水母类(C)的丰度与 S_s 呈现一定正相关; 枝角类(D)丰度与 T_b 、 C_s 分别有一定负相关、正相关关系。

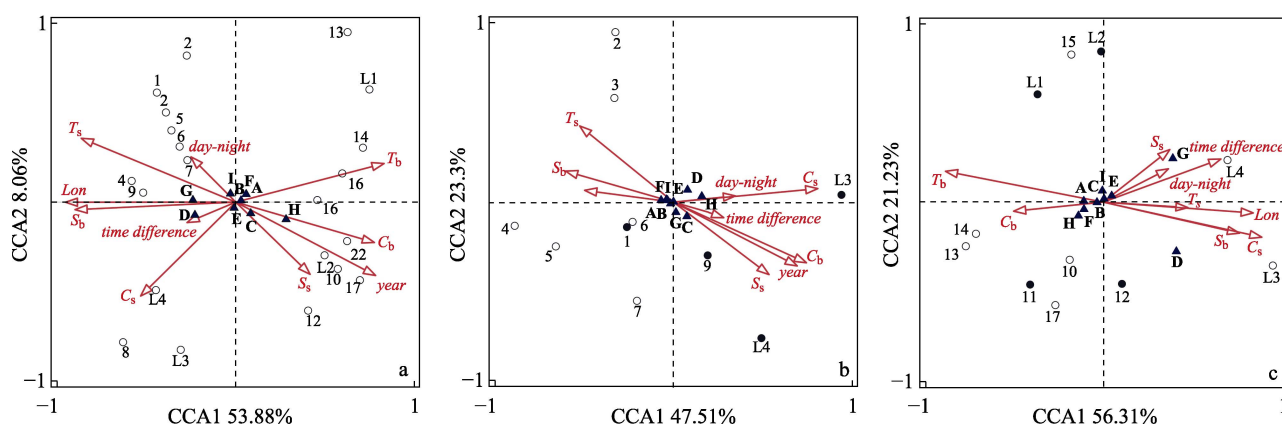


图 4 2017—2018 年浮游动物类群组成与环境因子的典范对应分析

a. 含有两年连续站和断面站所有样本; b. 仅含 2017 年和 2018 年深度相近站位, 即 2017 年连续站和 2018 年的 L3、L4 站样本;
c. 仅含 2018 年连续站和 2018 年的 L1~L4 站样本。

A. 桡足类; B. 毛颚类; C. 水母类; D. 枝角类; E. 浮游虾类; F. 浮游幼虫; G. 海樽类; H. 仔鱼及鱼卵; I. 其他(介形类、端足类等); Lon. 站位经度; T_s . 表层温度; S_s . 表层盐度; C_s . 表层叶绿素 a; T_b . 底层温度; S_b . 底层盐度; C_b . 底层叶绿素 a; day-night. 昼夜; time difference. 距正午或午夜的时间段。1~9 和 10~17 分别是 2017 年和 2018 年连续站采样样本,

L1~L4 是 2018 年断面站采样样本。实心圆标表示连续站采样时间与断面站相近的样本。

Fig. 4 Canonical correspondence analysis between samples and environmental factors in 2017-2018

a. containing all samples of two-year continuous stations and section stations in 2017 and the L3-L4 stations in 2018; b. containing the samples of the continuous station and the L3-L4 stations in 2018.

A. Copepoda; B. Chaetognatha; C. Medusae; D. Cladocera; E. planktonic shrimp; F. pelagic larva; G. Thaliacea; H. fish eggs; I. others (Ostracoda, Amphipoda, et al.); Lon. longitude.; T_s . surface temperature; S_s . surface salinity; C_s . surface chlorophyll a; T_b . bottom temperature; S_b . bottom salinity; C_b . bottom chlorophyll a; day-night. day or night; time difference. time interval from noon or midnight. 1-9 and 10-17 are samples of continuous sampling stations in 2017 and 2018, respectively, and L1-L4 were samples of stations in 2018. The solid circles indicate the continuous samples have the sampling time closed to the section samples.

3 讨论

3.1 浮游动物群落年际变化及影响因素

本研究表明, 表层温度、底层盐度和表层叶绿素 a 是引起年际间浮游动物群落结构发生变化

的主要因素, 长江口海域的大量研究表明, 影响浮游动物类群主要环境因子为盐度、温度^[13-15], 这些研究与本文的研究结果一致。本文也发现了 2017 年夏季冲淡水带来了大量的低盐类群枝角类, 而 2018 年夏季较弱的冲淡水伴随着近海的鱼卵

仔鱼和水母增多。2017 年是近 10 年中径流量较大的一年, 而 2018 年是近 10 年中径流量最小的一年, 锋面区站位的盐度年间差异显著, 对生态类群的分布造成重要影响。2018 年的鱼卵及仔鱼多于 2017 年, 长江口及舟山嵊泗近岸海域, 是很多鱼类的产卵场与育幼场^[16], 由于 2017 年长江冲淡水势力相对强盛, 致使鱼卵及仔鱼随之向外逐渐扩散, 相比之下 2018 年势力弱, 鱼卵仔鱼则相对较多。而枝角类的高丰度区通常分布在低盐水域^[17], 此次调查显示其大量出现在 2017 年, 说明该年冲淡水势力范围广, 淡水漂浮于高盐水之上, 为枝角类的聚集提供了适宜的盐度范围(图 2b)。

本研究发现 2018 年太平洋纺锤水蚤数量较 2017 年多, 而中华哲水蚤数量发生改变, 2017 年较 2018 年多, 这种演替方式可能与饵料竞争或者捕食者有关, 亦受到环境因子的强烈影响。刘守海等^[8]在对 2007—2008 年长江口浮游动物的研究结果认为太平洋纺锤水蚤是丰水期咸淡水的主要优势种; 而陈洪举等^[18]在 2006 年夏季长江口浮游动物调查中并未发现太平纺锤水蚤成为优势种。这种长江口优势种的演替主要受到冲淡水和近海水团势力的交互影响, 具体演替机制需要更进一步的调查分析。

3.2 浮游动物类群的昼夜动态变化及影响因素

虽然 2017—2018 年连续站浮游动物群落结构昼夜变化均不存在显著差异($P>0.05$), 但各类群丰度在昼夜分布上存在差异。2017 年浮游动物丰度夜间高于白天, 2018 年则相反, 白天高于夜间。有研究表明河口水域的浮游动物数量夜间高于白天^[19-20], 这可能是由于冲淡水带来的营养盐使得饵料充足, 夜间会吸引大量浮游动物浮游摄食, 而白天捕食压力较大, 浮游动物大都会迁移到水层深处躲避捕食^[21-22]。2017 年连续站, 水深约 50 m, 具有明显的垂直分层尤其是叶绿素 a 在上层较多, 浮游动物需要通过夜间垂直迁移才能到饵料较丰富的上层摄食。而 2018 年连续站水深浅, 由于水体混合(图 2d、图 2e), 浮游动物混合均匀, 导致昼夜采样没有差异。

致谢: 感谢 A15 资环班张浩良和 A16 资环班汪超

同学在出海过程中协助采样, 感谢海洋资源与环境系主任水柏年老师对出海采样的支持, 感谢浙渔科 2 号船员在浮游动物采样过程中的帮助。

参考文献:

- [1] Tang X H, Wang F. Analyses on hydrographic structure in the Changjiang River estuary adjacent waters in summer and winter[M]// *Studia Marina Sinica*. Beijing: Science Press, 2004, 46: 42-66. [唐晓晖, 王凡. 长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析[M]// 海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 2004, 46: 42-66.]
- [2] Fan H M, Jiang X S, Ji H H, et al. Integrated evaluation of the marine ecological environment in the Yangtze River Estuary and its adjacent area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4660-4675. [范海梅, 蒋晓山, 纪焕红, 等. 长江口及其邻近海域生态环境综合评价[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4660-4675.]
- [3] Tang Q S, Su J L. Study on marine ecosystem dynamics and living resources sustainable utilization[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 5-11. [唐启升, 苏纪兰. 海洋生态系统动力学研究与海洋生物资源可持续利用[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 5-11.]
- [4] Xu Z L. Character of zooplankton community and its variation in the water near the Yangtze River estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 780-784. [徐兆礼. 长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 780-784.]
- [5] Liu Z S. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [6] Xu R, Li Y H, Li Z E, et al. Quantitative comparison of zooplankton in different habitats of the Changjiang Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1688-1696. [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): 1688-1696.]
- [7] Shao Q W, Liu Z S, Zhang J, et al. Seasonal variation in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 683-691. [邵倩文, 刘镇盛, 章菁, 等. 长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 683-691.]
- [8] Liu S H, Xiang L Y, Liu C C, et al. Ecological distribution characteristics of zooplankton in Yangtze River estuary in spring and summer during 2007-2008[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(2): 184-190. [刘守海, 项凌云, 刘材材,

- 等. 2007-2008 年春夏季长江口水域浮游动物生态分布特征研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(2): 184-190.]
- [9] Yin X L, Xu Z L. Similarity analysis of zooplankton assemblages among different zones in the Yangtze River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5621-5631. [殷晓龙, 徐兆礼. 长江口南支、北支、北港及口外水域浮游动物群聚相似性[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5621-5631.]
- [10] Gao Q, Xu Z L, Zhuang P. Comparison of mesozooplankton communities in North Channel and North Branch of Yangtze River Estuary[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2049-2055. [高倩, 徐兆礼, 庄平. 长江口北港和北支浮游动物群落比较[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2049-2055.]
- [11] Zhang D R, Xu Z L, Xu J Y, et al. Comparison of zooplankton communities inside and outside the Hangzhou Bay in autumn[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(7): 767-780. [张冬融, 徐兆礼, 徐佳奕, 等. 杭州湾内外海域秋季浮游动物群落的比较[J]. 生物多样性, 2016, 24(7): 767-780.]
- [12] Song S Q, Sun J, Yu Z M. Vertical pattern of chlorophyll a in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 369-379. [宋书群, 孙军, 俞志明. 长江口及其邻近水域叶绿素 a 的垂直格局及成因初析[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 369-379.]
- [13] Zhu Y Z, Liu L S, Zheng B H, 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(1): 59-65. [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(1): 59-65.]
- [14] Du M M, Liu Z S, Wang C S, et al. The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5407-5418. [杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5407-5418.]
- [15] Yang W D, Zheng L M, Li W W, et al. Species composition and interannual variation of macro-meso zooplankton and the influential factors in the adjacent waters of the Yangtze River Estuary in summer[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2018, 57(4): 517-525. [杨位迪, 郑连明, 李伟巍, 等. 长江口邻近海域夏季大中型浮游动物物种多样性、年际变化及其影响因素[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(4): 517-525.]
- [16] Zhou Y D, Jin H W, Jiang R J, et al. The category composition and abundance distributions of ichthyoplankton along the north-central coast of Zhejiang Province in spring and summer[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(6): 880-889. [周永东, 金海卫, 蒋日进, 等. 浙江中北部沿岸春、夏季鱼卵和仔稚鱼种类组成与数量分布[J]. 水产学报, 2011, 35(6): 880-889.]
- [17] Xu Z L, Gao Q, Chen H, et al. Ecological adaptation of pelagic Cladocera and Cumacea in East China Sea[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(11): 1782-1787. [徐兆礼, 高倩, 陈华, 等. 东海浮游枝角类和涟虫类生态适应性[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1782-1787.]
- [18] Chen H J, Liu G X. 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): 393-398. [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(自然科学版), 2009, 45(4): 393-398.]
- [19] Froneman P W. Feeding studies on selected zooplankton in a temperate estuary, South Africa[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(5): 543-552.
- [20] Kibirige I, Perissinotto R. The zooplankton community of the Mpenjati Estuary, a South African temporarily open/closed system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58(4): 727-741.
- [21] Zhang W C. A review on the diel vertical migration of zooplankton[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(11): 18-21. [张武昌. 浮游动物的昼夜垂直迁移[J]. 海洋科学, 2000, 24(11): 18-21.]
- [22] Yang Y F, Wang Q, Chen J F, et al. Research advance in estuarine zooplankton ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 576-585. [杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 等. 河口浮游动物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 576-585.]

Interannual variation of and factors influencing the summer zooplankton community in the Yangtze River Estuary in the summers of 2017–2018

SHEN Haiqi¹, XU Yongjiu¹, WANG Jianxin², YUAN Kaibin¹, YAN Zeyu¹, ZHOU Fuyuan¹, HOU Weifen¹

1. School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

Abstract: In this study, we analyzed the species composition, ecological distribution, and spatial, diurnal, and interannual variation of zooplankton in the Yangtze River Estuary in the summers of 2017–2018. We used a 24 time-series analysis, a section stations survey, and the canonical correspondence analysis (CCA) to reveal the relationship between the abundance of dominant groups and the environmental variables. The results showed that there were 49 and 50 zooplankton species in the summers of 2017 and 2018, respectively, of which, *Calanus sinicus*, *Acartia pacifica*, *Euchaeta concinna*, *Sagitta enflata*, and *Evadne tergestina* were the dominant species. The SIMPER analysis indicated that the main contributors to the interannual variation of the zooplankton community were *Evadne tergestina*, *Calanus sinicus*, and Thaliacea. CCA analysis showed that the surface temperature, bottom salinity, and surface chlorophyll a were the main environmental factors affecting the interannual variation of zooplankton groups, explaining 47.51% of the two-year zooplankton variation. Based on the spatial distribution of chlorophyll a in 2018, the stations were divided into chlorophyll a frontal and non-frontal area, which contained the L1-L2 and L3-L4 stations, respectively. The main contributors to the spatial differences of the zooplankton community were *Evadne tergestina*, *Centropages dorsispinatus*, and *Euchaeta concinna*. CCA analysis showed that the bottom salinity, bottom temperature, and surface chlorophyll a were the main environmental factors affecting the spatial variation of zooplankton groups, accounting for 56.31% of the variation in the composition of zooplankton in 2018. The results indicated that the different runoffs of the Yangtze river, diluting the water and causing changes in salinity and chlorophyll a, had an important impact on the interannual variation of the zooplankton community.

Key words: Yangtze River Estuary; zooplankton community structure; interannual variation; spatial variation; environmental factors; CCA

Corresponding author: XU Yongjiu. E-mail: xuyongjiu@zjou.edu.cn