

王慧君, 许永久, 俞存根, 等. 2018–2019 年舟山近海浮游动物群落结构春季年际变化及其与水团的关系[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 90–100, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.011

Wang Huijun, Xu Yongjiu, Yu Cungen, et al. Spring interannual changes of zooplankton community structure and the influencing factors of water masses in the Zhoushan nearshore waters during 2018–2019[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 90–100, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.011

2018–2019 年舟山近海浮游动物群落结构春季年际变化及其与水团的关系

王慧君¹, 许永久^{1*}, 俞存根¹, 章寒¹, 张洪亮², 蒋日进², 梁君², 郭爱²,
朱文斌², 徐开达², 刘连为², 王皓学²

(1. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021)

摘要: 根据 2018–2019 年春季两个航次在舟山近海进行的浮游生物调查结果, 对舟山近海的浮游动物群落结构(类群组成、优势种数量)年际变化进行了研究, 利用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)研究了两年春季浮游动物类群组成差异、优势种变化的原因, 初步探讨了春季浮游动物群落结构动态变化的机制。结果表明: 根据表层温度(Sea Surface Temperature, SST)、表层盐度(Sea Surface Salinity, SSS)的聚类分析, 将该区域分为 3 个水团: 杭州湾内水团(I 区)、舟山本岛上升流水团(II 区)、舟山近海水团(III 区)。不同水团对浮游动物类群组成影响显著, 引起 2018 年和 2019 年春季 3 个水团区差异的主要贡献种(贡献率>10%)均为中华哲水蚤, 同一水团两年间年际差异的贡献种如下: I 区为捷氏歪水蚤(56.91%)和真刺唇角水蚤(12.34%); II 区为中华哲水蚤(72.64%)、五角水母(13.35%); III 区为中华哲水蚤(41.93%)、夜光虫(22.94%)。CCA 分析表明, 第 1 CCA 轴(CCA1)和第 2 CCA 轴(CCA2)共解释了两年春季浮游动物优势种累计方差的 46.14% 和物种–环境累计方差的 97.82%。CCA1 主要反映了空间(近海水团和湾内水团)的差异。CCA2 主要反映了 2018 年和 2019 年站位的年际差异。盐度是影响春季浮游动物群落结构空间差异的主要因素, 而温度、叶绿素 *a* 浓度是春季浮游动物群落结构年际差异的主要因素。

关键词: 舟山近海; 浮游动物群落结构; 水团; 年际变化; 空间差异

中图分类号: P714⁺.5; Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)06-0090-11

1 引言

舟山近海海域位于长江口以南, 杭州湾以东, 受冲淡水(长江、钱塘江两大江河)以及来自外海的台湾暖流的强烈影响, 水域环境复杂多变。水团交汇带来大量营养盐, 为该海域群落结构产生显著影响^[1-8]。尤其是, 浮游动物具有随波逐流的生活方式, 使之对

海洋中水团的变化非常敏感^[9]。因此, 研究浮游动物群落结构与水团的关系具有重要的意义, 不仅对分析浮游动物群落结构、数量分布以及其对海洋环境变化的响应具有科学意义, 也可对海洋生态系统结构和功能的修复提供重要的参考。

目前, 关于舟山近海的浮游动物群落结构与时空分布有较多的研究报道^[6-10]。这些研究大多集中在浮

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-09-23。

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20C030004); 国家重点研发计划资助项目子课题(2018YFD0900904); 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); 浙江海洋大学“水产”省一流学科 2019 年度开放课题(20190010); 舟山市科技局浙江海洋大学专项资助(2019C21021); 2019 年浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2019R411011)。

作者简介: 王慧君(1994—), 女, 山东省济南市人, 从事渔业资源方面研究。E-mail: 731178849@qq.com

* **通信作者:** 许永久(1981—), 博士, 从事浮游生物生态、渔业生态环境等方面研究。E-mail: xuyongjiu@zjou.edu.cn

游动物种类组成、数量空间分布、多样性特征及其影响因素,而对于舟山近海水团动态变化对浮游动物群落结构的影响方面的研究较少。本文根据2018–2019年春季在舟山近海调查所获得的浮游动物和水团数据,研究了该海域浮游动物的种类组成、数量分布以及与水团的关系,探讨浮游动物群落结构年际变化的主要原因,以期对舟山近海生态环境评价以及生态系统修复提供基础资料和科学依据。

2 材料与方法

2018年4月8–22日和2019年4月11–23日(春季),搭乘“浙普渔43019”进行两个航次的浮游动物生态调查,调查区域为29°~32°N, 121°~125°E,调查站位分别为41个和37个,近岸平均水深约8~10 m,近海约15~60 m(图1)。浮游动物样品采集均采用浅水I型浮游生物网(口径50 cm、筛绢CQ14,网长145 cm、孔径0.505 mm)进行,根据网口流量计计算滤水体积,所获样品经5%福尔马林溶液固定带回实验室后,去除样品中的杂物,通过显微镜镜检进行分类鉴定和计数。将每个站位的浮游动物统一换算为单位水体中的丰度(ind./m³)。使用温盐深仪(CTD)同步观测水温、盐度和叶绿素 a 浓度。浮游动物样品的采集、保存、运输和分析均按照《海洋调查规范:海洋生物调查》(GB/T 12763.6–2007)中的规定执行。

2.1 数据处理

2.1.1 浮游动物类群划分

本文采取张冬融^[11]对浮游动物分类的方法,将鉴

定的浮游动物主要划分为桡足类、毛颚类、水母类、糠虾类、磷虾类、十足类、浮游幼体、夜光虫与其他类共9个浮游动物类群(表1)。夜光虫虽为浮游植物甲藻门,但它能够摄食浮游生物、硅藻甚至鱼卵。最近10多年,夜光虫在东海暴发频繁,对浮游生物生态系统影响巨大^[12–14],本文考虑将其作为一种特殊的浮游生物,可以与浮游动物对等,在分类中将它单独作为一类进行研究。所鉴定物种如端足类、多毛类、介形类、海樽类等在所有站位中出现频率低于5%,本文将其统归为一类,即其他类进行研究。为降低浮游动物数据的极化程度,减少稀有种的影响,对浮游动物丰度采用对数转化, $Y_i = \log_{10}(N + 1)$, N 为原始丰度, Y_i 为转换后数值。

2.1.2 浮游动物丰度和优势度

浮游动物丰度(N)计算公式为

$$N = n/V, \quad (1)$$

$$V = (R_1 - R_2) \times 0.042, \quad (2)$$

式中, N 为单位体积海水中浮游动物的个体数(ind./m³); V 为采集浮游动物样品过滤的海水体积(m³); n 为样品鉴定计数获得的浮游动物个体数; R_1 为浮游动物采样网出水时的流量计读数; R_2 为浮游动物采样网下水前流量计读数。

浮游动物优势度(Y)计算公式为

$$Y = (n_i/N) \times f_i, \quad (3)$$

式中, N 为各采样站位所有种类的丰度; n_i 为第 i 种的丰度; f_i 为该种在各站位出现的频率。根据以往学者

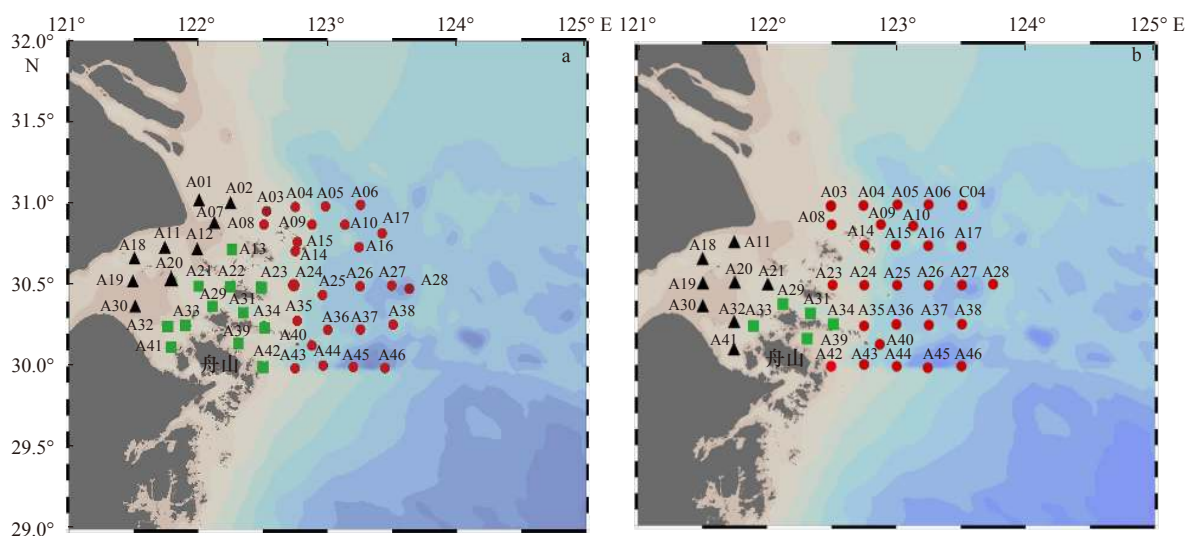


图1 2018年(a)和2019年(b)春季调查站位

Fig. 1 Sampling stations of spring 2018 (a) and spring 2019 (b)

黑色三角代表杭州湾内水团(I区),绿色方形代表舟山本岛上升流水团(II区),红色圆圈代表舟山近海水团(III区)

The black triangle represents the water mass in the Hangzhou Bay (Area I), the green square represents upwelling water mass of the Zhoushan Islands (Area II), and the red circle represents the offshore water mass of the Zhoushan (Area III)

表 1 舟山近海海域浮游动物种类组成

Table 1 Composition of zooplankton in the Zhoushan nearshore waters

类群	2018年4月	2019年4月
	物种	物种
桡足类 Copepoda	中华哲水蚤 (<i>Calanus sinicus</i>), 小拟哲水蚤 (<i>Paracalanus parvus</i>), 精致真刺水蚤 (<i>Euchaeta concinna</i>), 小哲水蚤 (<i>Nannocalanus minor</i>), 中华华哲水蚤 (<i>Sinocalanus sinensis</i>), 真刺唇角水蚤 (<i>Labidocera euchaeta</i>), 猛水蚤目 (Harpacticoida), 亚强次真哲水蚤 (<i>Subeucalanus subcrassus</i>), 平滑真刺水蚤 (<i>Euchaeta plana</i>), 太平洋纺锤水蚤 (<i>Acartia pacifica</i>), 双刺唇角水蚤 (<i>Labidocera bipinnata</i>), 拟长腹剑水蚤 (<i>Oithona similis</i>), 大眼剑水蚤属 (<i>Corycaeus</i>)	中华哲水蚤 (<i>Calanus sinicus</i>), 精致真刺水蚤 (<i>Euchaeta concinna</i>), 真刺唇角水蚤 (<i>Labidocera euchaeta</i>), 捷氏歪水蚤 (<i>Tortanus derjugini</i>), 皇筒角水蚤 (<i>Pontellopsis regalis</i>), 中华胸刺水蚤 (<i>Centropages sinensis</i>), 近邻剑水蚤 (<i>Cyclops vicinus</i>), 瘦尾筒角水蚤 (<i>Pontellopsis tenuicauda</i>), 伯氏平头水蚤 (<i>Candacia bradyi</i>), 大眼剑水蚤属 (<i>Corycaeus</i>)
水母类 Medusae	刺胞动物 (Cnidaria): 拟细浅室水母 (<i>Lensia subtiloides</i>), 五角水母 (<i>Muggiaea atlantica</i>), 崂山秀氏水母 (<i>Sugiura chengshanense</i>), 气囊水母 (<i>Physophora hydrostatica</i>), 双生水母 (<i>Diphyes chamissonis</i>), 两手筐水母 (<i>Solmundella bitenticulata</i>), 锡兰和平水母 (<i>Eirene ceylonensis</i>), 真囊水母 (<i>Euphysora bigelowi</i>), 多面水母科 (Abylidae), 巴斯水母 (<i>Bassia bassensis</i>), 八斑芮氏水母 (<i>Rathkea octopunctata</i>), 四叶小舌水母 (<i>Liriope tetraphylla</i>), 四手筐水母 (<i>Aegina citrea</i>), 爪室水母 (<i>Chelophyes appendiculata</i>); 栉板动物 (Ctenophora): 球形侧腕水母 (<i>Pleurobranchia globosa</i>), 瓜水母 (<i>Beroë cucumis</i>)	刺胞动物 (Cnidaria): 五角水母 (<i>Muggiaea atlantica</i>), 双生水母 (<i>Diphyes chamissonis</i>), 异双生水母 (<i>Diphyes dispar</i>); 栉板动物 (Ctenophora): 球形侧腕水母 (<i>Pleurobranchia globosa</i>)
毛颚类 Chaetognatha	拿卡箭虫 (<i>Sagitta nagae</i>)	拿卡箭虫 (<i>Sagitta nagae</i>)
糠虾类 Mysida	儿岛囊糠虾 (<i>Gastrosaccus kogimaensis</i>)	儿岛囊糠虾 (<i>Gastrosaccus kogimaensis</i>), 长额刺糠虾 (<i>Acanthomysis longirostris</i>)
磷虾类 Euphausiacea	太平洋磷虾 (<i>Euphausia pacifica</i>), 中华假磷虾 (<i>Pseudeuphausia sinica</i>)	太平洋磷虾 (<i>Euphausia pacifica</i>)
十足类 Decapoda	莹虾属 (<i>Lucifer</i>)	正型莹虾 (<i>Lucifer typus</i>), 中国毛虾 (<i>Acetes chinensis</i>), 日本毛虾 (<i>Acetes japonicus</i>)
浮游幼体 Pelagic larvae	桡足类无节幼体 (Copepoda Nauplius larva), 长尾类溞状幼体 (<i>Macrura zoea</i>), 短尾类溞状幼体 (<i>Brachyura zoea larva</i>), 担轮幼虫 (trochophora), 短尾类大眼幼体 (<i>Megalopa</i>), 面盘幼虫 (瓣鳃类) (Veliger)	桡足类无节幼体 (Copepoda Nauplius larva), 长尾类溞状幼体 (<i>Macrura zoea</i>), 短尾类溞状幼体 (<i>Brachyura zoea larva</i>)
其他类 Others	长尾住囊虫 (<i>Oikopleura longicauda</i>), 肥胖三角溞 (<i>Euadne tergestina</i>), 端足类 (Amphipoda), 多毛类 (Polychaeta), 明螺 (<i>Atlanta peroni</i>), 介形类 (Ostracoda), 海樽类 (Thaliacea), 蝴蝶螺 (<i>Desmopteris papilio</i>), 尖笔帽螺 (<i>Creseis acicula</i>), 涟虫类 (Cumacea)	海蛭属 (<i>Cypridina</i>), 钩虾科 (Gammaridae), 多毛类 (Polychaeta), 虫戎科 (Hyperaidae), 芽笔帽螺 (<i>Creseis virgula</i>), 海樽类 (Thaliacea)
夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>		夜光虫 (<i>Noctiluca scintillans</i>)

的观点, 本文将 Y 大于 0.02 的种类定为优势种。环境因子空间分布图、浮游动物类群丰度分布图等均使用海洋数据视图软件 (Ocean Date View) 绘制。

2.2 统计分析

根据每个站位的表层温度 (Sea Surface Temperature, SST) 和表层盐度 (Sea Surface Salinity, SSS), 利用 SPSS19.0 软件中的 Ward 法进行空间站位聚类, 据此, 进行水团的划分。根据舟山近海水文条件, 将该海域划分为杭州湾水团 (I 区)、舟山本岛上升流水团 (II 区)、舟山近海水团 (III 区); 利用 Primer5.0 软件中的相似性百分比分析 (SIMPER) 分析不同浮游动物类群、物种在群落结构中的贡献率。采用单因子相似性分析 (ANOSIM) 对不同水团间的群落结构的差异显著性进行检验。应用典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 来研究类群组成及与环境因子关系。使用 CCA 三变量图, 研究物种组成、站

位及环境因子之间的关系。显著性检验根据 Monte Carlo 检验确定。变量的重要性由变量对应轴之间的相关系数 R 决定, 当 $|R| \geq 0.4$ 时, 该变量即认为具有重要意义^[15]。

3 结果

3.1 水文条件及水团划分

2018–2019 年春季 SST、SSS、表层叶绿素 (*Chlorophyll a*, *Chl a*) 浓度都呈现出近海高, 近岸低的趋势。2018 年春季 SST 整体较 2019 年低, 2018 年舟山近海水团 SST 为 14~16℃, 上升流水团 SST 为 12~13.5℃; 2019 年舟山近海水团 SST 为 15.3~18.3℃, 上升流水团 SST 为 13.4~13.8℃; 2018–2019 年春季舟山近海水团 SSS 较高 (26~35), 杭州湾水团 SSS 低 (<15); 2018–2019 年春季舟山近海 *Chl a* 浓度差异较明显, 2018 年 *Chl a* 浓度较低 (1.5~2.5 mg/m³), 而

2019年出现Chl *a*浓度高值(2.5~5 mg/m³)(图2)。

根据对SST、SSS的聚类分析结果,可以将调查区域分为3个水团:杭州湾内水团、舟山本岛上升流水团、舟山近海水团(图3)。杭州湾水团为低盐水,舟山本岛上升流水团为低温水,舟山近海水团为高温高盐水。

3.2 舟山近海浮游动物群落结构

2018年和2019年分别鉴定浮游动物50种和31种(表1),2018年鉴定物种如中华哲水蚤、五角水母,拿卡箭虫、太平洋磷虾以及桡足类无节幼体,它们分别属于桡足类、水母类、毛颚类、磷虾类、浮游

幼体。水母类为2018年春季的绝对优势类群,共鉴定出16种,占浮游动物总种数的32%,桡足类为第2大优势类群,共鉴定出13种,种数比例为26%。另外其他类10种(20%),浮游幼体6种(12%),磷虾类2种(4%),毛颚类、糠虾类、十足类各1种(2%)。

与2018年相比,2019年所鉴定出的种数明显减少,桡足类成为绝对优势类群,共鉴定出10种,种数比例为32.26%。水母类仅有4种,种数比例为12.90%;另外6大类群鉴定种数由多到少依次为:其他类6种(19.35%),浮游幼体和十足类各3种(9.68%),糠虾类2种(6.45%),毛颚类和磷虾类各1种(3.23%)。夜

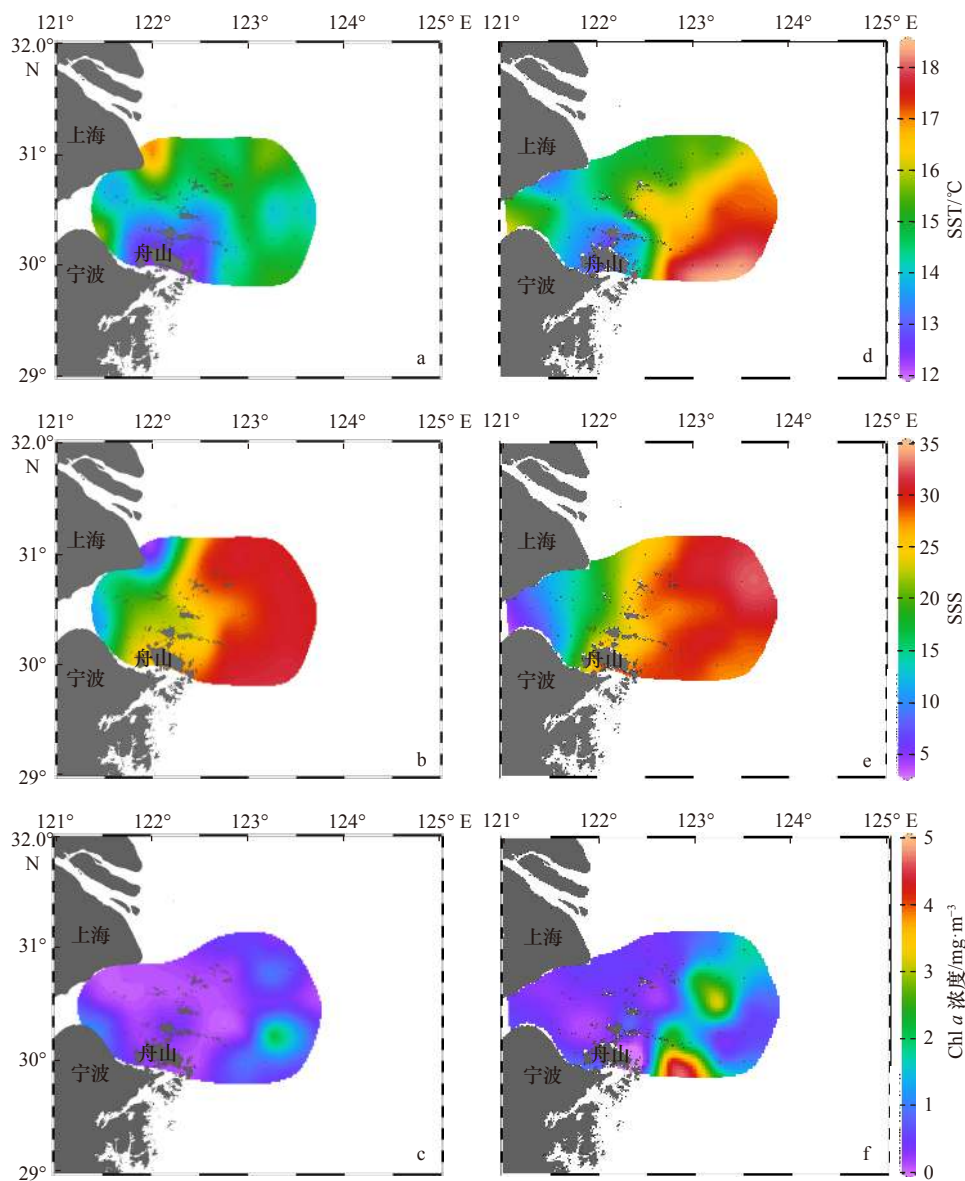


图2 2018年春季与2019年春季舟山近海海域表层温度(SST)、盐度(SSS)、叶绿素*a*(Chl *a*)浓度分布与年际变化
Fig. 2 Surface temperature, salinity, Chl *a* concentration distribution in the Zhoushan nearshore waters in spring 2018 and spring 2019

a. 2018年SST, b. 2018年SSS, c. 2018年Chl *a*浓度, d. 2019年SST, e. 2019年SSS, f. 2019年Chl *a*浓度

a. Sea surface temperature in 2018, b. sea surface salinity in 2018, c. sea surface Chl *a* concentration in 2018, d. sea surface salinity in 2019, e. sea surface salinity in 2019, f. sea surface Chl *a* concentration in 2019

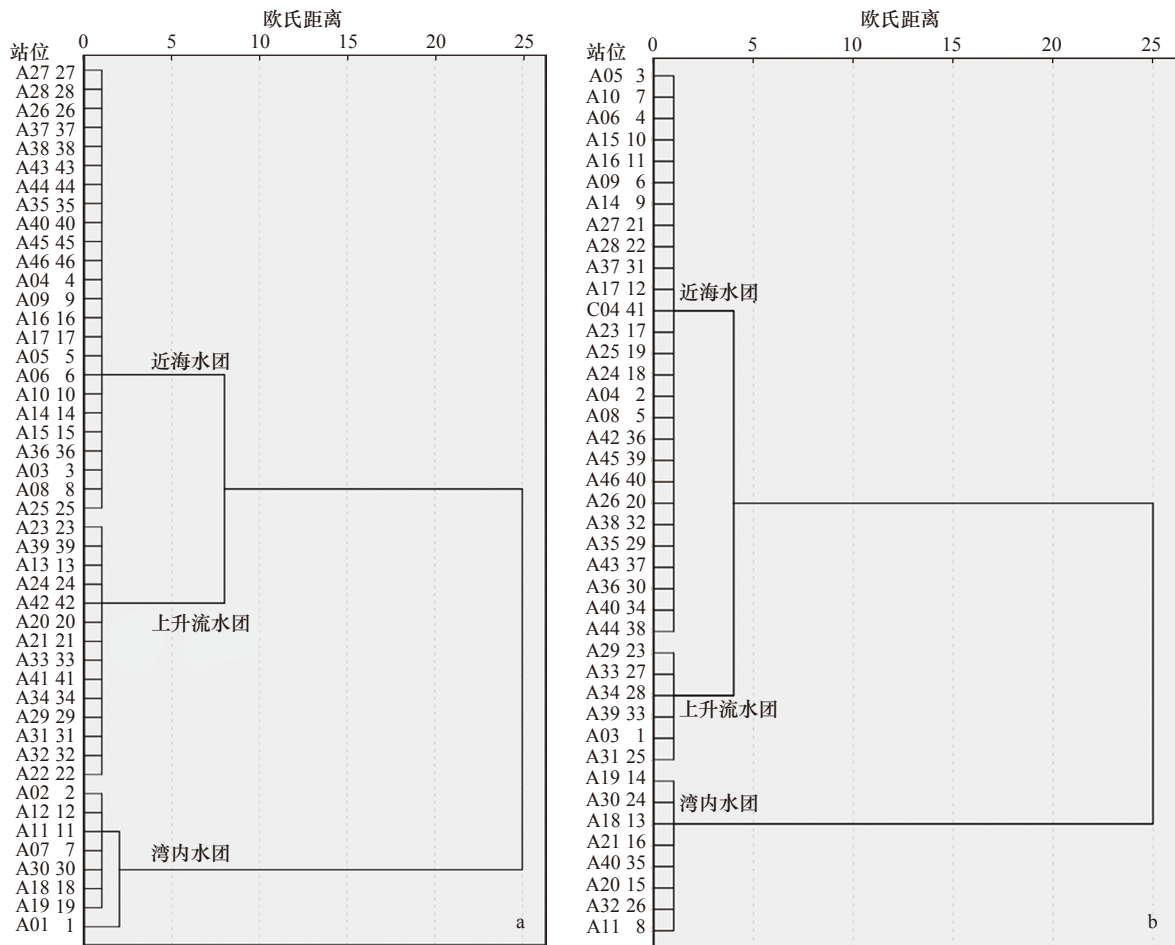


图3 2018年春季(a)与2019年春季(b)水团聚类

Fig. 3 Water mass group clustering of sampling stations in spring 2018 (a) and spring 2019 (b)

光虫在2019年数量巨大,在近海区域分布广泛(3.23%)。

水团对春季浮游动物群落结构空间分布格局具有显著影响(Anosim 检验, $p < 0.05$), 2018年春季, I区-II区、II区-III区平均相异性分别为48.67%、63.83%, 2018年春季所有物种的SIMPER分析表明,引起3个水团区差异的主要贡献种(贡献率 $>10\%$)为中华哲水蚤。2019年春季, I区-II区、II区-III区平均相异性分别为44.76%、64.91%,引起I区与II区、II区与III区差异的主要贡献种为中华哲水蚤(贡献率分别为52.98%、63.10%)。I区与III区差异的主要贡献种为捷氏歪水蚤(*Tortanus derjugini*) (贡献率38.85%) (表2)。水团对浮游动物群落结构年际差异亦具有显著影响(Anosim 检验, $p < 0.05$), I区、II区、III区年际平均相异性分别为: 52.21%、50.72%、75.58%。引起2018年和2019年I区、II区、III区以及整个调查区域年际差异的主要贡献种为中华哲水蚤、夜光虫和捷氏歪水蚤(贡献率分别为33.63%、19.15%、12.75%) (表3)。

3.3 舟山近海优势种及其空间分布格局

2018年春季优势种有中华哲水蚤、拿卡箭虫、小拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤(表4)。其中,中华哲水蚤在3个水团区出现频率均较高(图4a),在近海海域出现高值,平均丰度达124.93 ind./m³;拿卡箭虫多分布在舟山近海海域(图4b),平均丰度13.25 ind./m³;小拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤分布区域相似,更多的分布在近海海域(图4c,图4d),平均丰度分别为6.58 ind./m³、6.12 ind./m³。与2018年相比,2019年春季水温的升高,长江径流量增大,调查海域优势种发生改变,分别为中华哲水蚤、捷氏歪水蚤、五角水母、夜光虫。中华哲水蚤仅在上升流水团和近海水团出现频率较高(图4e),平均丰度12.28 ind./m³;其次捷氏歪水蚤在杭州湾内较集中(图4f),平均丰度8.17 ind./m³;五角水母在上升流水团数量较大(图4g),平均丰度2.46 ind./m³。

2018年总丰度时空分布特征为近海(III区)高,近岸(I区和II区)低(图4i),而2019年分布特征为近

表 2 2018 年和 2019 年春季各水团间差异的主要贡献种和贡献率

Table 2 Main contribution species and contribution rate of differences among water masses in spring 2018 and spring 2019, respectively

年份	I 区–II 区		II 区–III 区		I 区–III 区	
	贡献种	贡献率/%	贡献种	贡献率/%	贡献种	贡献率/%
2018	中华哲水蚤	27.11	中华哲水蚤	55.99	中华哲水蚤	56.23
	拟长腹剑水蚤	23.80				
	精致真刺水蚤	10.75				
2019	中华哲水蚤	52.98	中华哲水蚤	63.10	捷氏歪水蚤	38.85
	捷氏歪水蚤	22.80	夜光虫	12.23	夜光虫	19.93
	五角水母	11.20	五角水母	11.43	中华哲水蚤	14.87

表 3 2018 年和 2019 年春季不同水团对浮游动物群落结构组成年际变化和区系格局的影响

Table 3 The influence of different water masses on the interannual variation and floristic pattern of zooplankton community in spring 2018 and spring 2019

分区	2018年 I 区		2018年 II 区		2018年 III 区		全部区域对比	
	贡献种	贡献率/%	贡献种	贡献率/%	贡献种	贡献率/%	贡献种	贡献率/%
2019年 I 区	捷氏歪水蚤	56.91					中华哲水蚤	33.63
	真刺唇角水蚤	12.34					夜光虫	19.15
2019年 II 区			中华哲水蚤	72.64			捷氏歪水蚤	12.75
			五角水母	13.35				
2019年 III 区					中华哲水蚤	41.93		
					夜光虫	22.94		

表 4 2018 年和 2019 年春季优势种和优势度

Table 4 Dominant species and their dominance in spring 2018 and spring 2019

年份	优势种	优势度	丰度比例/%
2018	中华哲水蚤	0.632	64.62
	拿卡箭虫	0.054	6.86
	小拟哲水蚤	0.023	3.40
	拟长腹剑水蚤	0.020	3.16
2019	中华哲水蚤	0.359	37.79
	捷氏歪水蚤	0.098	25.13
	五角水母	0.059	0.10
	夜光虫	0.054	18.07

3.4 舟山近海浮游动物春季优势种数量年际变化与水团及环境因子的关系

2018 年春季与 2019 年春季各优势种丰度和环境变量的 CCA 分析结果显示(图 5), 前 4 轴与环境变量之间的相关性显著 ($F=10.7, p<0.01$), 第 1 CCA 轴 (CCA1, 特征值: 0.44) 和第 2 CCA 轴 (CCA2, 特征值: 0.37) 表现出很高的物种-环境相关性, CCA1 和 CCA2 解释了物种累计方差百分比的 46.14% 和物种-环境累计方差总百分比的 97.82%, Chl *a* 浓度、海底层温度 (SBT)、SST、海底层盐度 (SBS) 和 SSS 聚集在 CCA1 的负轴, 与 CCA1 呈负相关。CCA1 主要反映了近海水团和湾内水团的差异。CCA2 正负轴两边呈现较好的 2018 年站位和 2019 年站位的年际差异。捷氏歪水蚤聚集在杭州湾内水团 (CCA1 的正轴), 与 SSS、SBS、SST 及 SBT 呈现明显的负相关性, 说明 SSS、SST 是影响其分布水域的主要因素。同时, 捷氏歪水蚤在 2019 年呈现高值, 说明冲淡水势力

海 (III 区) 低, 近岸 (I 区和 II 区) 高 (图 4j)。春季浮游动物总丰度年间差异显著 (Anosim 检验, $p<0.05$), 两年浮游动物总丰度分别为: $7\ 152.78\ \text{ind./m}^3$, $1\ 007.43\ \text{ind./m}^3$ 。

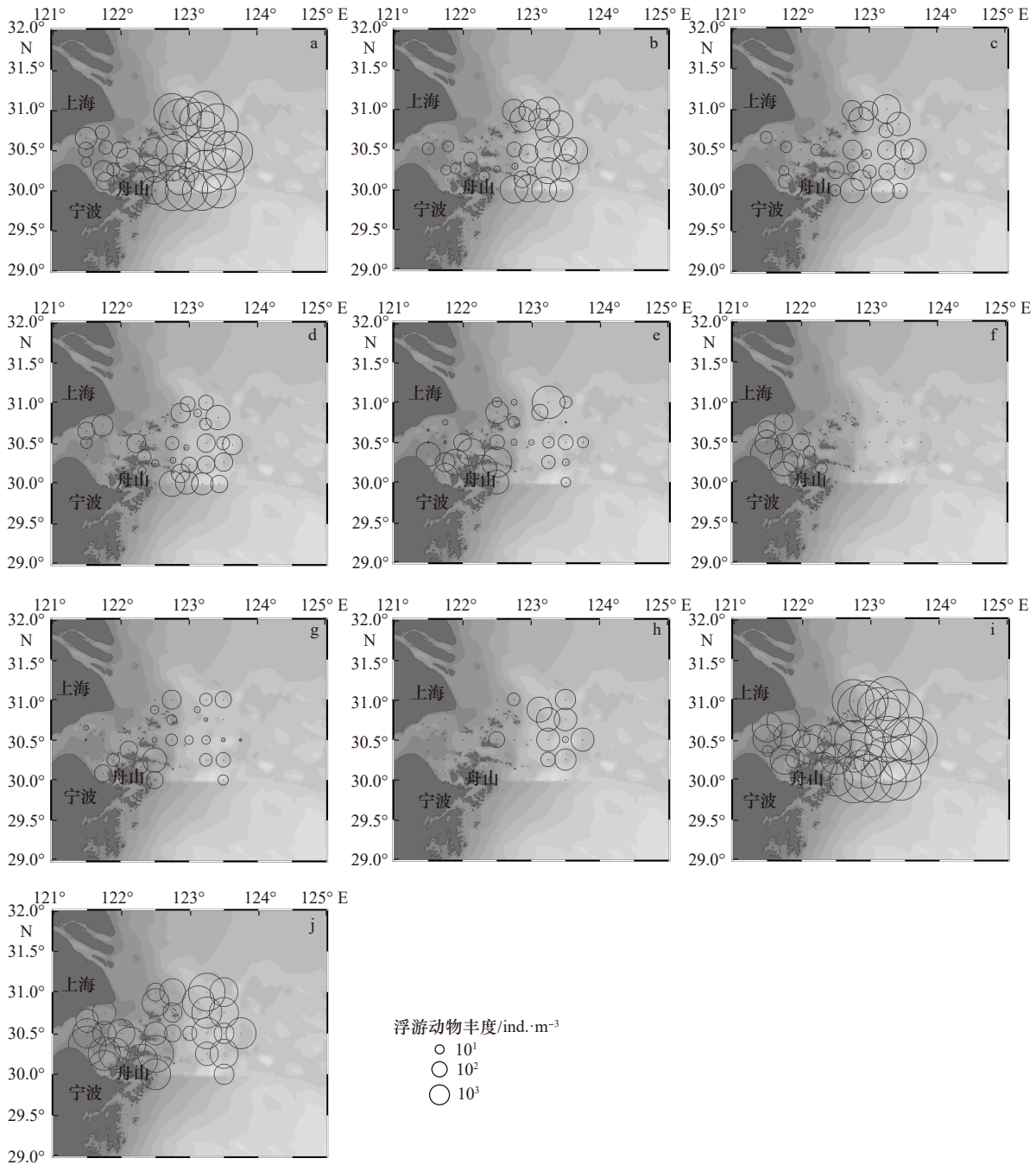


图 4 2018 年和 2019 年春季浮游动物优势种分布

Fig. 4 Distribution of dominant zooplankton species in spring 2018 and spring 2019

2018 年春季优势种: a. 中华哲水蚤, b. 拿卡箭虫, c. 小拟哲水蚤, d. 拟长腹剑水蚤; 2019 年春季优势种: e. 中华哲水蚤, f. 捷氏歪水蚤, g. 五角水母, h. 夜光虫; i. 2018 年春季物种总丰度; j. 2019 年春季物种总丰度

Dominant species in spring 2018: a. *Calanus sinicus*, b. *Sagitta nageae*, c. *Paracalanus parvus*, d. *Oithona similis*; dominant species in spring 2019: e. *Calanus sinicus*, f. *Tortanus derjugini*, g. *Muggiaea atlantica*, h. *Noctiluca scintillans*; i. total species abundance in spring 2018; j. total species abundance in spring 2019

较强, 湾内 SSS 较低, 导致该河口种类在 2019 年春季聚集。同时, 优势种夜光虫聚集在 CCA2 的正轴, 说明 2019 年春季的高 SST、高 Chl *a* 浓度是影响夜光虫分布的主要因素。而中华哲水蚤、拟长腹剑水蚤、小拟哲水蚤、拿卡箭虫和五角水母则聚集在近海海域, 说明温暖环境是影响其分布的主要因素。这些分隔

模式可能反映了浮游动物对栖息地类型的偏好或者其生态习性的适应性。

4 讨论

4.1 春季浮游动物优势种的年际变化与水团的关系

本研究结果显示, 2018 年各水团区域浮游动物丰

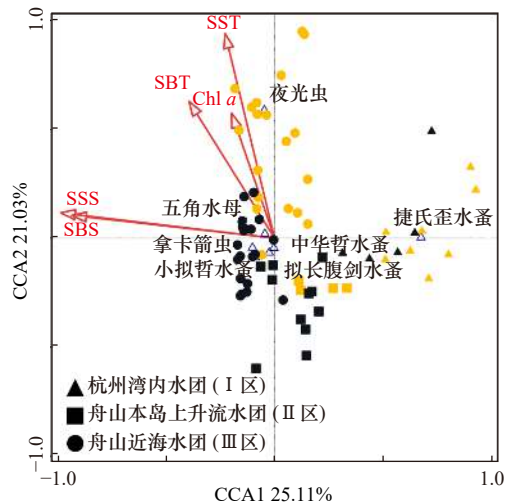


图5 浮游动物优势种与环境因子典范对应分析

Fig. 5 Correspondence analysis between dominant zooplankton species and environmental factors

黑色表示 2018 年站位, 黄色表示 2019 年站位。三角形表示杭州湾内水团, 正方形表示舟山本岛上升流水团, 圆形表示舟山近海水团。图中各环境因子表示: 表层温度 (SST)、表层盐度 (SSS)、表层叶绿素 *a* (Chl *a*)、底层温度 (SBT)、底层盐度 (SBS)

Black stands for data in 2018 and yellow stands for data in 2019. The triangle represents the water mass in the Hangzhou Bay, the square represents the upwelling water mass of the Zhoushan Island, and the circle represents the offshore water mass of the Zhoushan. The environmental factors in the figure are shown as follows: surface temperature (SST), surface salinity (SSS), surface chlorophyll *a* (Chl *a*), bottom temperature (SBT), bottom salinity (SBS)

度由高到低依次为舟山近海水团(平均 332.37 ind./m³)、上升流水团(平均 11.11 ind./m³)、杭州湾水团(平均 10.17 ind./m³)。无论是物种组成还是类群组成, 3 个划分区域所有浮游动物组成均具有显著差异(表 2), 此外, 在近海海域, 近海种如中华哲水蚤、拿卡箭虫丰度最高, 显示出近海水团具有适合近海种栖息的环境。这与以往研究^[15-18]相一致。春季水温的回升, 有利于浮游植物的生长繁殖, 不仅为浮游动物提供了丰富的饵料, 而且为浮游动物摄食浮游植物提供了较好的环境条件^[19-21]。

然而, 与 2018 年春季的分布趋势相反, 2019 年春季各水团区域浮游动物丰度由高到低依次为: 上升流水团(平均 57.52 ind./m³)、杭州湾水团(平均 44.75 ind./m³)、舟山近海水团(平均 22.07 ind./m³), 相关分析也表明, 2019 年春季研究海域浮游动物丰度与水温 and 盐度呈显著负相关($p < 0.05$)。造成这一差异的主要原因可能为 2019 年春季近海夜光虫暴发, 大量聚集在近海高 Chl *a* 浓度区域, 侵占浮游动物原本的生存空间^[12-13], 导致其他浮游动物如中华哲水蚤、捷氏歪水

蚤在其他海域(杭州湾水团、上升流水团)聚集, 最终影响浮游动物的分布格局或生物量, 这一结果与胡翠林等^[14]的研究类似。

2018 年春季长江冲淡水径流量(19823.64 m³/s), 显著小于 2019 年(26387.1 m³/s), 本文猜测冲淡水的差异可能会对浮游动物的优势种的数量变化与空间分布格局造成显著的影响^[22-23]。2018 年春季浮游动物大都分布于舟山近海水团, 而较少在杭州湾内水团出现, 这可能与冲淡水量较小导致的杭州湾内营养盐的总体水平较低有关。2019 年较大的冲淡水量, 引起了较多的浮游动物在杭州湾内聚集, 同时, 舟山近海发生了较强的浮游植物藻华, 也引起了部分浮游动物(比如夜光虫)在近海聚集。因此, 2018 年和 2019 年的浮游动物空间分布格局主要体现了饵料对生物聚集的调控。周孔霖^[24]也发现了饵料浓度影响浮游动物的生长和聚集, 本文的研究结论与其结果一致。

4.2 浮游动物总生物量年际差异的原因

本文结果显示, 2018 年春季 SSS 高、SST 低、Chl *a* 浓度低, 而浮游动物总丰度大, 与此相反, 2019 年 SSS 较低、SST 较高、Chl *a* 浓度较高, 而浮游动物总丰度低(图 2, 图 4)。根据食物匹配和温度有利于生理生长的理论^[25-28], 2018 年的浮游动物总丰度应该较 2019 年低。本文的研究结果与常规的理论推测相反, 造成这一现象可能与两个因素有关。

一是 2019 年春季长江冲淡水量异常偏高, 为有害赤潮藻暴发提供了丰富的营养盐, 导致适宜生长的夜光虫暴发。夜光虫虽然本身不含毒素, 但其暴发后, 导致其他浮游生物生存环境更加恶劣(比如缺氧、挤占生存空间、浮游动物适宜的饵料数量减少), 从而导致 2019 年春季高营养物质流入有害赤潮藻类, 导致大量有害浮游植物不能被浮游动物有效利用, 造成浮游动物数量偏低。很多研究^[14, 29-30]也表明, 发生赤潮藻华时, 浮游动物生物量不升反降, 与本文的研究结果一致。

二是气候条件所致, 2018 年春季呈现明显的拉尼娜现象^[31], 温度总体偏低, 可能导致偏冷水性浮游动物数量较多, 而偏暖温性浮游动物数量较少, 亦有研究(<http://www.bom.gov.au/climate/enso/>)表明, 2019 年春季呈现厄尔尼诺现象^[31], 导致原来栖息于此的偏冷水性浮游动物大量死亡, 从而导致总的浮游动物数量偏低。如果这两年推论成立, 本研究结果表明, 人类活动和气候变化会对浮游动物种群数量变化产生显著的影响, 对优势种的交替具有重要的影响。对于本研究推论的广泛适用性, 还需要结合其他年份的调查

数据,进一步的调查验证。

5 结论

本研究根据 2018–2019 年春季的浮游动物丰度数据和环境因子数据,发现舟山近海海域存在 3 个水团:杭州湾内水团、舟山本岛上升流水团和舟山近海水团。分析发现,不同水团对春季浮游动物群落结构地理分布格局影响显著,且对浮游动物群落结构的年际变化具有显著影响,盐度是影响春季浮游动物群落

结构空间差异的主要因素,温度、叶绿素 *a* 浓度是春季浮游动物群落结构年际差异的主要因素。其次,夜光虫等浮游生物的暴发对浮游动物分布会造成重要影响。

致谢: 感谢“浙普渔 43019”号全体船员在出海采样过程中的帮助,A17 海洋资源与环境班级董军、官道伊、江丹妮、张晗、龙丽梅等同学参与部分实验,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 陈小庆,陈斌,黄备,等. 夏季舟山渔场及邻近海域浮游动物群落结构特征分析[J]. *动物学研究*, 2010, 31(1): 99–107.
Chen Xiaoqing, Chen Bin, Huang Bei, et al. Analysis on community structure of zooplankton in Zhoushan fishing ground and its adjacent area in summer[J]. *Zoological Research*, 2010, 31(1): 99–107.
- [2] 章菁,杨关铭,王春生,等. 舟山群岛邻近海域浮游动物生态研究 I. 种类组成与数量分布[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 20–28.
Zhang Jing, Yang Guanming, Wang Chunsheng, et al. Ecological study of zooplankton in the waters near the Zhoushan Archipelago I. Species composition and quantitative distribution[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(4): 20–28.
- [3] 骆鑫,曾江宁,徐晓群,等. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8194–8204.
Luo Xin, Zeng Jiangning, Xu Xiaoqun, et al. Distribution of zooplankton in the Zhoushan sea and its relationship with environmental factors in summer and autumn[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8194–8204.
- [4] 俞存根,陈小庆,胡颖琰,等. 舟山渔场及邻近海域浮游动物种类组成及群落结构特征[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(1): 183–193.
Yu Cungen, Chen Xiaoqing, Hu Haoyan, et al. Species composition and community structure characteristics of zooplankton in the Zhoushan fishing ground and its adjacent area[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(1): 183–193.
- [5] 朱明星,俞存根,许永久,等. 舟山近岸海域秋季桡足类种类组成和数量分布[J]. *水产科学*, 2017, 36(4): 514–518.
Zhu Mingxing, Yu Cungen, Xu Yongjiu, et al. Species composition and quantity distribution of copepods at Zhoushan offshore in autumn[J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(4): 514–518.
- [6] 覃涛,俞存根,陈小庆,等. 舟山渔场及邻近海域桡足类种类组成和数量分布[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 780–789.
Qin Tao, Yu Cungen, Chen Xiaoqing, et al. Species composition and quantitative distribution of copepods in Zhoushan fishing ground and adjacent waters[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 780–789.
- [7] 陈小庆,俞存根,胡颖琰,等. 舟山渔场及邻近海域浮游动物数量分布特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1834–1844.
Chen Xiaoqing, Yu Cungen, Hu Haoyan, et al. Distribution characteristic of zooplankton quantitative in Zhoushan fishing ground and its adjacent area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1834–1844.
- [8] 何舟洋,许永久,俞存根,等. 舟山近岸海域秋季浮游动物多样性与环境因子的关系[J]. *浙江海洋学院学报:自然科学版*, 2017, 36(2): 144–150.
He Zhouyang, Xu Yongjiu, Yu Cungen, et al. The relationship between zooplankton diversity and environmental factors in the coastal waters of Zhoushan in autumn[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2017, 36(2): 144–150.
- [9] 黄备,吴健平,唐静亮,等. 杭州湾浮游动物群落与水团的相关性研究[J]. *海洋学报*, 2010, 32(1): 170–175.
Huang Bei, Wu Jianping, Tang Jingliang, et al. The study on the correlation between zooplankton community and water mass in the Hangzhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(1): 170–175.
- [10] 孙鲁峰,柯昶,徐兆礼,等. 上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1811–1821.
Sun Lufeng, Ke Chang, Xu Zhaoli, et al. The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1811–1821.
- [11] 张冬融. 杭州湾湾内不同海域浮游动物群落和分布特征及与湾外海域的比较[D]. 上海:上海海洋大学, 2015.
Zhang Dongrong. Zooplankton community and distribution in different part of Hangzhou Bay and comparison between inside and outside the bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [12] 綦世斌,覃超梅,黄少建,等. 夜光藻斑块分布与水环境因子的相关关系[J]. *热带生物学报*, 2018, 9(1): 1–11.
Qi Shibin, Qin Chaomei, Huang Shaojian, et al. Correlation between the patch distribution of *Noctiluca scintillans* bloom and aquatic environmental factors[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2018, 9(1): 1–11.
- [13] 徐兆礼. 长江口夜光藻(*Noctiluca scintillans*)年间变化和水域富营养化趋势[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 793–798.
Xu Zhaoli. The inter-annual variations in *Noctiluca scintillans* abundance and eutrophication in Changjiang Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(6): 793–798.
- [14] 胡翠林,金海卫,李振华,等. 赤潮生物夜光藻的研究进展[J]. *浙江海洋学院学报:自然科学版*, 2015, 34(4): 379–386.
Hu Cuilin, Jin Haiwei, Li Zhenhua, et al. Research advance of *Noctiluca scintillans*[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural*

- Science, 2015, 34(4): 379–386.
- [15] 许永久, 俞存根, 张平, 等. 杭州湾–舟山近海春季游泳动物群落结构及与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 605–617.
Xu Yongjiu, Yu Cungen, Zhang Ping, et al. Spring nekton community structure and its relationship with environmental variables in Hangzhou Bay–Zhoushan inshore waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(3): 605–617.
- [16] 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.
Xu Reng, Li Yihong, Li Zhi'en, et al. Quantitative comparison of zooplankton in different habitats of the Changjiang Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1688–1696.
- [17] 徐佳奕, 刘守海, 徐兆礼, 等. 三沙湾浮游动物群落对水团季节变化的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5): 869–876.
Xu Jiayi, Liu Shouhai, Xu Zhaoli, et al. Responses of zooplankton community to changes in water masses in the Sansha Bay[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, 20(5): 869–876.
- [18] 黄备, 王婕妤, 沈明富, 等. 浙江北部海域春季浮游动物的群落结构研究[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 64–68.
Huang Bei, Wang Jieyu, Shen Mingfu, et al. Community structure of zooplankton in the offshore water of the northern Zhejiang[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(4): 64–68.
- [19] 曾祥波, 黄邦钦. 厦门西海域微型浮游动物的丰度、生物量及其生产力的季节变动[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2010, 49(1): 109–115.
Zeng Xiangbo, Huang Bangqin. Seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton at west of Xiamen waters[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(1): 109–115.
- [20] 周伟华, 王汉奎, 董俊德, 等. 三亚湾秋、冬季浮游植物和细菌的生物量分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2633–2639.
Zhou Weihua, Wang Hankui, Dong Junde, et al. Phytoplankton and bacterial biomass and their relationship with the environmental factors in autumn and winter in the Sanya Bay, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2633–2639.
- [21] 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.
Du Mingmin, Liu Zhensheng, Wang Chunsheng, et al. The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5407–5418.
- [22] 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): 26–32.
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): 26–32.
- [23] 陈思杨, 宋琍琍, 余骏, 等. 杭州湾营养盐时空分布特征及其影响研究[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(11): 61–66.
Chen Siyang, Song Lili, Yu Jun, et al. Temporal-spatial distribution and influencing factors of nutrients in the Hangzhou Bay[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(11): 61–66.
- [24] 周孔霖. 黄海中华哲水蚤度夏机制的新探索: 温度和饵料的作用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.
Zhou Konglin. Exploration of the over-summering mechanism of *Calanus sinicus* in the Yellow Sea: effects of temperature and food[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [25] 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.
Liu Zhensheng. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [26] 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.
Shao Qianwen, Liu Zhensheng, Zhang Jing, 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.
- [27] 左涛. 东、黄海浮游动物群落结构研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003.
Zuo Tao. Community structure of zooplankton in the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [28] Pavez M A, Landaeta M F, Castro L R, et al. Distribution of carnivorous gelatinous zooplankton in the upwelling zone off central Chile (austral spring 2001)[J]. Journal of Plankton Research, 2010, 32(7): 1051–1065.
- [29] 沈益绿, 欧阳珑玲, 尹艳娥, 等. 红色赤潮藻主导的混合赤潮对浮游生物群落结构的影响——以浙江南部沿海为例[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 625–630.
Shen Anglü, Ouyang Longling, Yin Yan'e, et al. Effects of *Akashiwo sanguinea*-dominated algal blooms on the plankton community as observed from the coastal waters of southern Zhejiang, China[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(5): 625–630.
- [30] 徐兆礼. 东海近海春季赤潮发生与浮游动物群落结构的关系[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 257–260.
Xu Zhaoli. Relationship between red tide occurrence and zooplankton communities structure in the coastal sea of East China Sea in spring[J]. China Environmental Science, 2004, 24(3): 257–260.
- [31] 张海生, 宁修仁, 乐凤凤, 等. 三门湾沉积记录中长链烯酮不饱和指数-海表温度和浮游动物群落对厄尔尼诺/拉尼娜的响应[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 40–50.
Zhang Haisheng, Ning Xiuren, Le Fengfeng, et al. Responses of long-chain alkenone unsaturation index-sea surface temperature in stratigraphic record and zooplankton community in the Sanmen Bay to El Niño/La Niña phenomina[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(3): 40–50.

Spring interannual changes of zooplankton community structure and the influencing factors of water masses in the Zhoushan nearshore waters during 2018–2019

Wang Huijun¹, Xu Yongjiu¹, Yu Cungen¹, Zhang Han¹, Zhang Hongliang², Jiang Rijin², Liang Jun², Guo Ai², Zhu Wenbin², Xu Kaida², Liu Lianwei², Wang Haoxue²

(1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang, Zhoushan 316021, China)

Abstract: According to two years (2018–2019) spring plankton surveys in the Zhoushan coastal waters, the zooplankton community structure (species composition, abundance of dominant species) were investigated, the canonical correspondence analysis (CCA) was used to study spring interannual difference of zooplankton community and causes of their dynamics, the mechanism of community dynamics were discussed according to our results. The results show that the study region is divided into three groups according to cluster analysis of sea surface temperature (SST) and sea surface salinity (SSS): Hangzhou Bay water masses (Area I), upwelling water masses in Zhoushan Island (Area II), and water masses in Zhoushan offshore area (Area III). Water mass groups have significant influence on the composition of zooplankton community. The main species contributing to the difference between the three water masses in spring 2018 and spring 2019 (contribution rate >10%) are *Calanus sinicus*. The contribution species of the same water mass in two years were: *Tortanus derjugini* (56.91%) and *Labidocera eucaeta* (12.34%) in Area I, *Calanus sinicus* (72.64%) and *Muggiaea atlantica* (13.35%) in Area II, *Calanus sinicus* (41.93%) and *Noctiluca scintillans* (22.94%) in Area III. CCA shows that the first CCA axis (CCA1) and the second CCA axis (CCA2) explained 46.14% of the accumulated variance of the dominant species of zooplankton and 97.82% of the species-environment accumulated variance in spring 2018 and spring 2019. CCA1 mainly reflects the spatial difference between the offshore water mass and the Hangzhou Bay water mass. CCA2 mainly reflects the interannual difference between the stations in 2018 and 2019. Salinity is the main factor influencing the spatial difference of zooplankton community structure in spring, while temperature and chlorophyll *a* concentration are the main factors controlling the interannual difference of zooplankton community structure in spring.

Key words: Zhoushan offshore; zooplankton community structure; water mass; interannual variation; spatial differences