

【调查与研究】

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

沈盎绿¹, 欧阳珑玲¹, 尹艳娥¹, 周 钦², 马增岭²

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200902; 2. 温州大学, 浙江省水环境与海洋生物资源保护重点实验室, 浙江 温州 325035)

摘要:根据 2016 年 6 月中旬浙江南部沿海一次红色赤潮藻主导的混合赤潮的调查数据, 分析了赤潮海域和非赤潮海域浮游生物的种类及丰度、优势种、多样性指数差异以及其与水环境因子的相关性。结果表明, 该海域共鉴定出浮游植物 22 种, 浮游动物 20 种, 赤潮区浮游植物平均丰度显著高于非赤潮区, 赤潮区与非赤潮区浮游动物平均丰度和生物量差异不显著。赤潮区浮游植物均匀度指数显著低于非赤潮区, 而赤潮区和非赤潮区浮游动物各指数均差异不显著。赤潮发生对桡足类影响较大, 其在赤潮区的种类和丰度均显著少于非赤潮区。主成分分析结果表明非赤潮区最主要优势种红色赤潮藻与氮磷浓度呈正相关, 赤潮区则相反。浮游动物总丰度在非赤潮区及赤潮区均与叉状角藻丰度呈正相关, 与有毒赤潮生物具刺膝沟藻丰度呈负相关。以上结果表明红色赤潮藻为主的混合赤潮爆发能够显著改变赤潮发生海域浮游生物的群落结构。

关键词:种类组成; 优势种; 丰度; 多样性指数; 主成分分析

中图分类号: X17; X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2018)05-0625-06

Effects of *Akashiwo sanguinea*-dominated algal blooms on the plankton community as observed from the coastal waters of southern Zhejiang, China

SHEN Ang-lu¹, OUYANG Long-ling¹, YIN Yan-e¹, ZHOU Qin², MA Zeng-ling²

(1. Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, P. R. China; East China Sea Fisheries Research Institute, Shanghai 200902, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory for Subtropical Water Environment and Marine Biological Resources Protection, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Based on the data collected from *Akashiwo sanguinea*-dominated algal blooms occurred in the coastal waters of southern Zhejiang province, in mid-June 2016, the species composition and abundance, dominant species, diversity indices of plankton community between algal bloom and non-bloom areas were compared, and the relationships of biodiversity to environmental factors were analyzed. A total of 22 phytoplankton and 20 zooplankton species were identified. The average abundance of phytoplankton in the bloom area was significantly higher than that in the non-bloom area. No significant difference in the average abundance and biomass of zooplankton was found between the bloom and non-bloom areas. The average evenness index of phytoplankton in the non-bloom area was significantly higher than that in the bloom area. However, and no significant difference in other biodiversity indices of zooplankton existed between the bloom and non-bloom areas. In addition, the number of copepod species and their abundances in the bloom area

收稿日期: 2017-04-19, 修订日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41506194); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2015M06); 浙江省水环境与海洋生物资源保护重点实验室开放基金(KF201502); 浙江省自然科学基金(LY14C030006); 浙江省科技厅公益项目(2015C33246)

作者简介: 沈盎绿(1980-), 男, 浙江象山人, 副研究员, 博士, 研究方向为海洋浮游生物生态学, E-mail: shenanglv@163.com

were significantly less than those in the non-bloom area. The results of principal component analysis for the dominant species and environmental variables showed that *A. sanguinea* abundance positively correlated with nutrients in the non-blooms area, but negatively correlated with the ones in the blooms area. The total zooplankton abundance was positively correlated with *Ceratium furca* both in the bloom and non-bloom areas, but negatively correlated with the abundance of *Gonyaulax spinifera*, a toxic dinoflagellate. These results indicate that the *Akashiwo sanguinea*-dominated algal blooms can significantly change the community structure of plankton.

Key words: species composition; dominant species; abundance; diversity indices; principal component analysis.

近几十年以来,随着社会经济发展迅速和人为污染的加剧,有害赤潮(harmful algal blooms, HABs)在世界范围的主要内海、河口以及沿海地区发生的频次和规模越来越严重^[1]。在我国也有几个重点的赤潮高发区,比如渤海湾、长江口东海沿海、珠江口等水域,东海赤潮高发区尤其严重,主要包括长江口及其邻近水域、浙江福建沿海等地区^[2]。其中浙江南部沿海北麂以及南麂列岛每年春夏季节都多次爆发硅藻和甲藻赤潮^[3-4]。

红色赤潮藻(*Akashiwo sanguinea*),属于甲藻纲(Dinophyceae),裸甲藻科(Gymnodiniaceae),哈卡藻属(*Akashiwo*)(旧称血红哈卡藻),红色赤潮藻是一种个体较大,广温、广盐的裸甲藻,南、北美洲,欧洲,亚洲均有分布^[5-7]。红色赤潮藻在各地经常形成优势种并引发藻华,我国山东省、浙江省以及福建省等海域也多次出现红色赤潮藻赤潮^[8-10],已经成为我国沿海常见的赤潮生物。另外,其他甲藻比如具刺膝沟藻(*Gonyaulax spinifera*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)和叉状角藻(*Ceratium furca*)也是我国沿海广泛分布的赤潮生物^[11]。赤潮发生时短时间内优势种生物异常快速增殖,会对浮游生物群落结构产生很大影响,如红色赤潮藻能够分泌鱼毒素(ichthyotoxins)^[12],使鱼类死亡,具刺膝沟藻能够分泌硫酸化衍生物虾夷扇贝毒素(yessotoxins, YTXs)^[11],从而对整个海洋生态系统产生不利影响。目前,主要研究集中在红色赤潮藻赤潮成因方面^[8-9,13],但是红色赤潮藻赤潮对浮游生物群落结构的影响未见报道。

2016年6月中旬在浙江温州南部南麂和北麂列岛附近海域发现赤潮后,于17日和18日连续在赤潮海域以及非赤潮海域进行了水文、化学以及浮游生物调查研究。本文通过对海洋理化指标以及浮游生物的综合分析,在我国沿海首次报道并分析红色赤潮藻为主导并伴有具刺膝沟藻、

三角角藻和叉状角藻的混合赤潮对浮游生物群落结构的影响,同时结合理化参数数据与浮游生物优势种类鉴定与计数结果进行相关性研究,探讨赤潮发生时的海洋生态环境特征。

1 材料与方法

1.1 调查站位及采样方法

本次调查共设12个站(B1-B6为赤潮站位,NB1-NB6位非赤潮站位,定义水采浮游植物总丰度大于 1.00×10^4 个/L为赤潮站位,关于此标准设定,详见讨论),具体调查站位见图1。水文参数包括海水表面温度(T)、水体电导率(EC)、pH、盐度(S)和溶解氧(DO),由多参数水质测定仪(sensION156,哈希公司,美国)在现场测定。化学指标硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、铵盐(NH_4^+)和磷酸盐(PO_4^{3-}),其中可溶性无机氮(DIN)为硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐之和,利用采水器采集表层海水,经过 $0.45 \mu\text{m}$ 纤维滤膜过滤,冷冻 -20°C 保存,在实验室由连续流动分析仪测定(SKALAR公司,荷兰)。浮游植物利用采水器采集表层海水,取出其中1L,加入鲁哥氏液固定,浮游植物样品经沉淀、浓缩,实验室内显微镜下鉴定和计数,换算成为单位水体的细胞数(个/L)。浮游动物利用浅水I型浮游生物网(网口直径50cm,网口面积 0.2 m^2 ,网目孔径 0.505 mm)自底至表垂直拖网采集,样品用5%甲醛固定和保存,浮游动物样品实验室体视显微镜下鉴定和计数,换算成为单位水体的个体数(个/ m^3),并且称量湿重(mg/m^3)。浮游生物样品的采集、处理以及数据处理均严格按照《海洋调查规范——第六部分海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)^[14]执行。

1.2 数据处理与分析

采用浮游生物群落优势度(Y)、Simpson单纯度指数(C)、Shannon-Weaver多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J')和Margalef丰富度指数

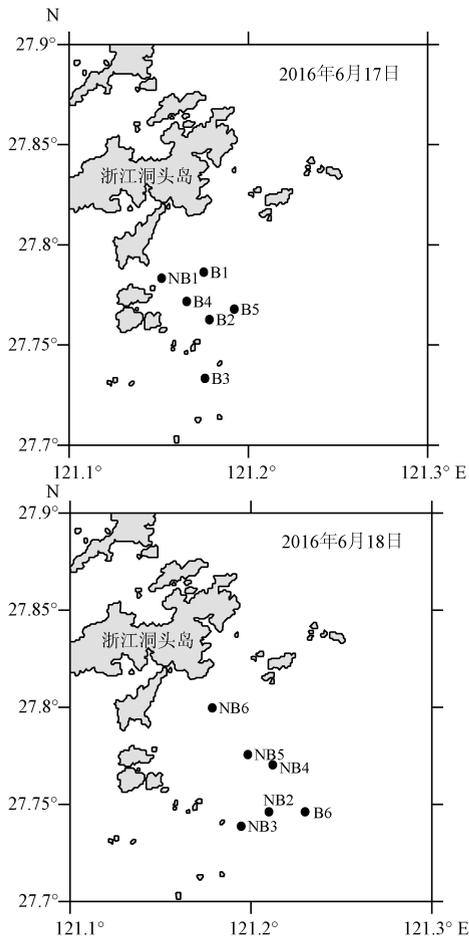


图1 浙江南部海域调查站位

Fig. 1 Locations of survey stations in the southern coast of Zhejiang province

(*d*)来研究浮游生物群落的结构特征,定义浮游动物优势度 $Y \geq 0.02$ 的种为优势种^[15]。

另外,利用R语言PCA软件包对浮游植物优势种丰度以及浮游动物总丰度与主要海水理化因子(DO、 PO_4^{3-} 和DIN)进行主成分分析。非赤潮区和赤潮区各类参数之间比较采用均值比较独立样本*T*检验(正态分布数据)或者非参数检验(非正态分布数据),上述检验的显著性水平设定为0.05。数据处理采用的软件为PASW Statistics 18.0和Excel 2010。

2 结果与讨论

2.1 混合赤潮对浮游生物种类的影响

调查海域共鉴定出浮游植物3门17属22种,其中硅藻门种类数最多,占总种数的50.00%,甲藻门次之,占总种数的45.45%,金藻门最少,占总种数的4.55%。其中非赤潮区浮游植物12种,其中硅藻门和甲藻门各占一半;赤潮区浮

游植物17种,其中硅藻门7种,甲藻门9种,金藻门1种。取优势度 $Y \geq 0.02$ 的浮游生物为调查水域的优势种,非赤潮区出现优势种数为6种,其中主要优势种类为三角角藻和红色赤潮藻;赤潮区出现优势种数为6种,其中水采浮游植物主要优势种类为红色赤潮藻、具刺膝沟藻、三角角藻和叉状角藻。这次混合赤潮并没有造成赤潮区浮游植物的减少,相反,在赤潮区浮游植物种类数(17种)要高于非赤潮区浮游植物种类数(12种),这可能是本次调查赤潮海域面积较小,赤潮站位与非赤潮站位之间距离也比较近,采样的随机误差可能对结果会有一定的影响。

调查海域共鉴定出浮游动物4门13属20种(包括6种浮游幼体),其中腔肠动物门和节肢动物门种类数最多,各占总种数的35.71%,毛颚动物门和脊索动物门各占总种数的14.29%。其中非赤潮区浮游动物18种(包括5种浮游幼体),节肢动物门种类数最多,腔肠动物门次之;赤潮区浮游动物12种(包括3种浮游幼体),腔肠动物门和节肢动物门种类数最多,脊索动物门次之,毛颚动物门最少。非赤潮区出现优势种数为9种(包括浮游幼体),其中浮游动物优势度最大种类为海龙箭虫;赤潮区出现优势种数为8种(包括浮游幼体),其中第一优势种为五角水母。

2.2 混合赤潮对浮游生物丰度和生物量的影响

赤潮是一种复杂的生态异常现象,目前国内外尚无统一判断指标和评价标准。首先可以从海水的颜色、嗅味和透明度来初步判定水域是否发生赤潮,不同优势种主导的赤潮具有不同的颜色;其次赤潮发生时的生物量指标,即浮游植物群落中有害赤潮生物种类在单位水体中的个体数,同时形成赤潮的生物个体大小与生物量密切相关^[16]。华泽爱^[17]提出不同赤潮生物种类达到赤潮标准的基准密度,比如常见的骨条藻属赤潮基准密度为 5.00×10^6 个/L,原甲藻属赤潮基准密度为 5.00×10^5 个/L,米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)赤潮基准密度为 5.00×10^6 个/L。我国2005年修订发布的《赤潮监测技术规程HY/T 069-2005》^[18]综合了上述标准而且进行了更加细化的赤潮生物种类基准密度的规定,其中规定红色赤潮藻和具刺膝沟藻赤潮基准密度为 5.00×10^5 个/L,三角角藻和叉状角藻赤潮基准密度分别为 2.00×10^5 个/L和 1.00×10^5 个/L。本次调查海域

浮游植物平均丰度为 6.97×10^4 个/L, 其中非赤潮区浮游植物平均丰度为 2.27×10^3 个/L, 赤潮区浮游植物平均丰度为 1.37×10^5 个/L, 非赤潮区与赤潮区浮游植物平均丰度差异显著(非参数检验, $P < 0.05$)。非赤潮区浮游植物由硅藻和甲藻组成, 其中甲藻平均丰度大于硅藻平均丰度, 主要优势种三角角藻和红色赤潮藻的平均丰度分别为 5.83×10^2 个/L 和 5.42×10^2 个/L。赤潮区浮游植物由硅藻、甲藻和金藻组成, 其中甲藻平均丰度最大, 硅藻次之, 金藻最低, 主要优势种红色赤潮藻和具刺膝沟藻的平均丰度分别为 8.15×10^4 个/L 和 3.77×10^4 个/L, 特别是在 B1、B2 和 B3 站位(6月17日)两种藻类丰度均大于 3.00×10^4 个/L, B4 和 B5 站位(6月17日)两种藻类丰度之和大于 3.00×10^4 个/L。现场调查发现, 海水颜色已经发生明显改变, 赤潮生物密度却未到上述定义的基准密度, 因此, 《赤潮监测技术规程 HY/T 069-2005》^[18] 以及华泽爱^[17] 对赤潮生物基准密度的设定我们认为偏高。综合以上因素考虑, 本次赤潮调查分级标准采用调查站位浮游植物总丰度超过 1.00×10^4 个/L(现场海水颜色也明显变色)作为小型浮游植物红色赤潮藻为主导的赤潮区与非赤潮区的一个判别标准。因此, 可以判定该区域6月17日爆发红色赤潮藻和具刺膝沟藻的混合赤潮。另外, B6 站位(6月18日)红色赤潮藻、三角角藻和叉状角藻的丰度均大于 1.00×10^4 个/L, 三者之和为 4.07×10^5 个/L, 可以判定该区域6月18日爆发红色赤潮藻、三角角藻和叉状角藻的混合赤潮。

另外, 调查海域浮游动物平均丰度为 15.94 个/ m^3 , 其中非赤潮区浮游动物平均丰度为 22.77 个/ m^3 , 主要优势种海龙箭虫(*Sagitta naga*)平均丰度为 4.63 个/ m^3 , 赤潮区浮游动物平均丰度为 9.11 个/ m^3 , 主要优势种五角水母(*Muggiaea atlantica*)平均丰度为 1.90 个/ m^3 , 非赤潮区浮游动物平均丰度要高于赤潮区, 但是差异不显著(非参数检验, $P > 0.05$)。浮游动物平均生物量为 24.95 mg/ m^3 , 其中非赤潮区浮游动物平均生物量为 34.34 mg/ m^3 , 赤潮区浮游动物平均生物量为 14.39 mg/ m^3 , 非赤潮区浮游动物平均生物量稍高于赤潮区, 但是差异不显著(非参数检验, $P > 0.05$)。另外, 在本次调查中发现非赤潮区中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)也是优势种之一(优势度

为 0.04), 而在赤潮区优势种生物中则没有出现桡足类生物, 说明该混合赤潮对桡足类的影响很大。

2.3 混合赤潮对浮游生物群落结构的影响

本次调查海域发生的红色赤潮藻为主导的混合赤潮对浮游生物群落结构产生了一定的影响, 其中赤潮区浮游植物平均丰度显著高于非赤潮区($P < 0.05$), 均匀度指数(J')也显著低于非赤潮区(t 检验, $P < 0.05$; 图 2A)。但是其他生物多样性指数如单纯度指数(C)、多样性指数(H')何丰富度指数(d)则相差不显著($P > 0.05$; 图 2A)。

一般来说, 赤潮生物特别是有毒有害赤潮爆发会对浮游动物繁殖、种群生长产生不利影响, 进而影响到整个食物链^[19-21]。在本次调查中发现, 赤潮区浮游动物种类少于非赤潮区, 平均丰度和生物量也少于非赤潮区, 但是相差不显著(非参数检验, $P > 0.05$; 图 2B), 浮游动物群落多样性等指标也差异不显著($P > 0.05$), 这说明红色赤潮藻主导的混合赤潮对浮游动物群落结构种类演替产生了较大的影响, 但对整个浮游动物群落结构的稳定性影响不大, 浮游动物群落可以较快地调整其结构组成。深入分析发现, 赤潮区桡足类种类和丰度却显著小于非赤潮区($P < 0.05$), 在非赤潮区中华哲水蚤还是优势种($Y = 0.04$), 而赤潮区则未发现中华哲水蚤出现, 这有可能是红色赤潮藻或者具刺膝沟藻分泌的毒素对桡足类产生了较大的毒害效益, 从而导致其种类和生物量大幅减少, 而五角水母、球形侧腕水母和小齿海樽($Y > 0.1$)等非饵料生物却成为主要优势种生物, 这些生物可能对红色赤潮藻或者具刺膝沟藻等赤潮毒素不敏感。所以浮游动物群落结构的变化却不利于正常的食物链发展, 鱼类等海洋生物可能会因为饵料生物的缺乏而逃离该海域, 如果赤潮规模持续时间久、范围广, 更会对海洋生物产生直接的毒害效益。有研究表明红色赤潮藻和多边膝沟藻(*Gonyaulax polyedra*)会对柱形宽水蚤(*Temora stylifera*)繁殖能力产生明显的下降^[22], Lin 等^[20]发现东海区大规模东海原甲藻和米氏凯伦藻赤潮对中华哲水蚤的存活和繁殖等方面均产生不利的影响。本次调查赤潮区桡足类种类和生物量均大幅下降的原因可能也是因为赤潮生物分泌有毒物质影响桡足类的产生较大的急性毒性, 从而导致桡足类死亡或者逃逸, 也有可能影响到桡足类

的繁殖能力。今后需要在实验室进一步开展红色赤潮藻/具刺膝沟藻等有害赤潮藻毒素对桡足类和水母类的生态毒理学研究。

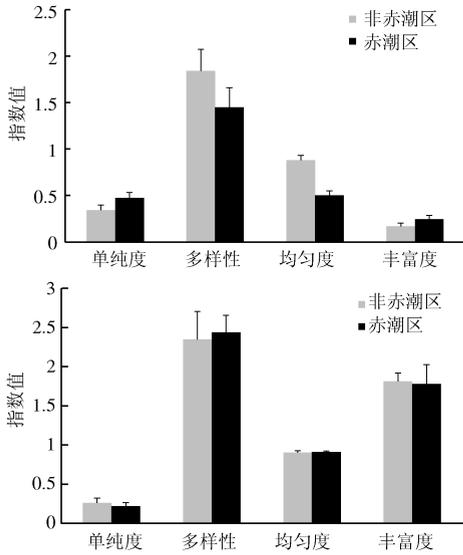


图 2 非赤潮区和赤潮区浮游生物多样性指数 (A:浮游植物;B:浮游动物)

Fig. 2 Comparison of plankton diversity indices in non-blooms and blooms area (A: phytoplankton by water sample; B: zooplankton)

2.4 浮游植物优势种、浮游动物以及环境因子之间的相关性

本次调查浮游植物(分别选择非赤潮区和赤潮区各主要优势种红色赤潮藻、具刺膝沟藻、三角角藻和叉状角藻丰度)、浮游动物(总丰度)与环境因子进行了 PCA 分析(图 3)。非赤潮区浮游植物优势种以及浮游动物总丰度与环境因子的排序图(图 3A)说明红色赤潮藻、具刺膝沟藻与 DO、 PO_4^{3-} 和 DIN 呈正相关,叉状角藻则正好相反,浮游动物总丰度则与叉状角藻呈正相关,与具刺膝沟藻呈负相关,与红色赤潮藻和三角角藻相关性不大。这说明体积较小的甲藻红色赤潮藻和具刺膝沟藻生长更偏向光合自营养类型需要大量营养盐,而体积较大的甲藻叉状角藻和三角角藻则与红色赤潮藻和具刺膝沟藻错开生态位,避免更多种间竞争,另外,也可以通过吞噬作用等异养方式获得生长,而浮游动物则主动避开能够分泌有毒物质的具刺膝沟藻,与其呈负相关。赤潮区浮游植物优势种以及浮游动物总丰度与环境因子的排序图(图 3B)表明说明红色赤潮藻、三角角藻、叉状角藻与 DO、 PO_4^{3-} 和 DIN 呈负相关,具刺膝沟

藻则正好相反,浮游动物总丰度则与红色赤潮藻、三角角藻、叉状角藻呈正相关,与具刺膝沟藻呈负相关。这说明红色赤潮藻爆发赤潮异常增殖,消耗了大量的营养盐,从而导致整个赤潮区域营养盐下降,浮游动物总丰度与环境因子的相关性则与非赤潮区基本一致,与叉状角藻、三角角藻和红色赤潮藻正相关,与具刺膝沟藻成负相关,浮游动物与红色赤潮藻的正相关性则说明在赤潮区红色赤潮藻是第一优势种,覆盖整个赤潮区域,浮游动物无法主动避开,对红色赤潮藻分泌的毒素敏感且运动能力较强的种类如中华哲水蚤等桡足类生物死亡或者逃逸该区域。

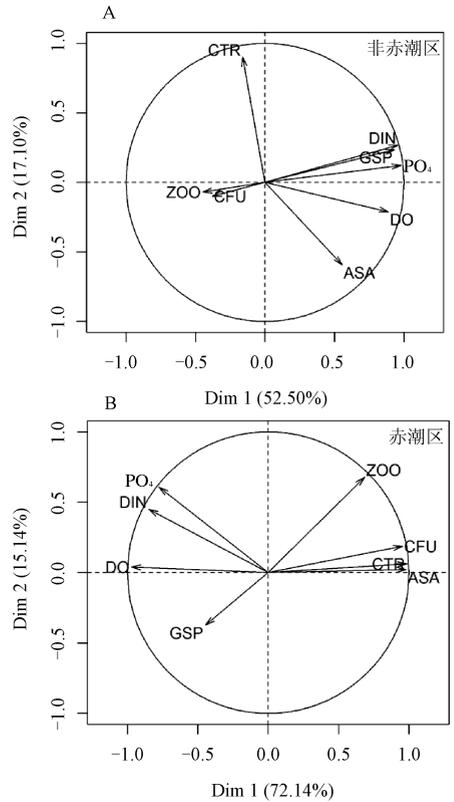


图 3 浮游生物与环境因子的 PCA 排序 (ASA、GSP、CFU、CTR 和 ZOO 分别表示红色赤潮藻丰度、具刺膝沟藻丰度、叉状角藻丰度、三角角藻丰度和浮游动物总丰度)

Fig. 3 The ordination plot of PCA between plankton and environmental variables

3 结论

(1) 本次混合赤潮现场调查共鉴定出浮游植物 22 种,浮游动物 20 种,赤潮区浮游植物平均丰度显著高于非赤潮区 ($P < 0.05$),浮游植物均匀度

指数显著低于非赤潮区($P < 0.05$),而赤潮区与非赤潮区浮游动物平均丰度和生物量差异不显著。由于红色赤潮藻为主的混合赤潮包含多种有毒赤潮种类,对该海域浮游生物群落结构产生了明显的不利影响,尤其是混合赤潮对饵料生物桡足类影响极大,赤潮区桡足类种类和丰度显著少于非赤潮区。

(2)主成分分析结果表明浮游动物总丰度无论在非赤潮区还是赤潮区均与叉状角藻呈正相关,与有毒赤潮生物具刺膝沟藻呈负相关。近几年来,红色赤潮藻赤潮报道的越来越多,但是红色赤潮藻赤潮与其他多种赤潮生物形成混合赤潮比较罕见,有关混合赤潮的优势种演替以及生消机理有待于进一步深入调查研究。

(3)另外,作为海洋食物链中承上启下的浮游动物在赤潮中的群落特征以及随着赤潮生消过程浮游动物优势种变化特征也需要更多的调查数据来支撑,同样需要开展更多有关不同有毒有害赤潮生物对不同浮游动物的毒害效益及其机理的研究。

参考文献:

[1] ANDERSON D M, CEBELLA A D, HALLEGRAEFF G M. Progress in understanding harmful algal bloom: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management [J]. Annual Review of Marine Science, 2012, 4: 143-176.

[2] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (7): 673-679.

[3] 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海域浮游植物生态特征及甲藻赤潮频发原因 [J]. 海洋科学进展, 2008, 26 (2): 234-242.

[4] LI Y, LU S H, JIANG T J, et al. Environmental factors and seasonal dynamics of *Prorocentrum* populations in Nanji Islands National Nature Reserve, East China Sea [J]. Harmful Algae, 2011, 10 (5): 426-432.

[5] HORNER R A, GARRISON D L, PLUMLEY F G. Harmful algal blooms and red tide problems on the U. S. west coast [J]. Limnology & Oceanography, 1997, 42 (5): 1076-1088.

[6] GÓMEZ F., BOICENCO L. An annotated checklist of dinoflagellates in the Black Sea [J]. Hydrobiologia, 2004, 517 (1/2/3): 43-59.

[7] DOMINGOS P, MENEZES M. Taxonomic remarks on planktonic phytoflagellates in a hypertrophic tropical lagoon (Brazil) [J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 297-313.

[8] 陈国斌. 厦门海域一次冬季血红哈卡藻赤潮的初步分析 [J]. 福建水产, 2012, 34 (5): 392-397.

[9] 喻龙, 马兆虎, 郝彦菊, 等. 四十里湾 2012 年一次血红哈卡藻赤潮的调查分析 [J]. 海洋科学进展, 2014, 32 (1): 84-91.

[10] 黄伟卿, 陈彩珍, 张艺, 等. 诱发三都湾海域赤潮的原因探讨 [J]. 河北渔业, 2012 (9): 33-36.

[11] 郭皓, 林凤翔, 刘永健, 等. 近年来我国海域多发性赤潮生物种类以及赤潮风险指数分级预警方法 [J]. 海洋环境科学, 2014, 33 (1): 94-98.

[12] LU S H, HODGKISS I J. Harmful algal bloom causative collected from Hong Kong waters [J]. Hydrobiologia, 2004, 512 (1/2/3): 231-238.

[13] 苏灵江. 厦门海域血红哈卡藻赤潮的环流形势和水文气象条件分析 [J]. 福建水产, 2009 (3): 62-66.

[14] GB/T 12763. 6-2007, 海洋调查规范-第六部分海洋生物调查 [S].

[15] 孙军, 刘冬艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用 [J]. 海洋学报, 2004, 26 (1): 62-75.

[16] 赵冬至. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 2000.

[17] 华泽爱. 赤潮灾害 [M]. 北京: 海洋出版社, 1994.

[18] HY/T 069-2005, 赤潮监测技术规程 [S].

[19] WANG L P, YAN T, YU R C, et al. Experimental study on the impact of dinoflagellate *Alexandrium* species on populations of the rotifer *Brachionus plicatilis* [J]. Harmful Algae, 2005, 4 (2): 371-382.

[20] LIN J N, SONG J J, YAN T, et al. Large-scale dinoflagellate bloom species *Prorocentrum donghaiense* and *Karenia mikimotoi* reduce the survival and reproduction of copepod *Calanussinicus* [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2015, 95 (6): 1071-1079.

[21] 陈洋, 颜天, 周名江. 东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 和链状亚历山大藻 (*Alexandrium catenella*) 对模拟食物链物质传递的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27 (10): 22-30.

[22] LANORA A, MIRALTO A, BUTTINO I, et al. First evidence of some dinoflagellates reducing male copepod fertilization capacity [J]. Limnology & Oceanography, 1999, 44 (1): 147-153.