

DOI: 10.5846/stxb201505221032

骆鑫, 曾江宁, 徐晓群, 杜萍, 廖一波, 刘晶晶. 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. 生态学报, 2016, 36(24): - .
Luo X, Zeng J N, Xu X Q, Du P, Liao Y B, Liu J J. Distribution of zooplankton in the Zhoushan Sea and its relationship with environmental factors in summer and autumn. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

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

骆鑫, 曾江宁*, 徐晓群, 杜萍, 廖一波, 刘晶晶

国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要:为更好地了解舟山海域浮游动物的群落结构、生物量和丰度的时空分布特征及其与主要环境因子的关系, 分别于 2014 年 7 月和 10 月进行了夏季、秋季两次生态综合调查, 并用多维尺度分析法、典范对应分析法对浮游动物群落结构进行了研究。结果表明: 夏季舟山海域调查的浮游动物有 13 类, 64 种, 优势种为背针胸刺水蚤 (*Centropages dorsispinatus*)、圆唇角水蚤 (*Labidocera rotunda*)、中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*)、精致真刺水蚤 (*Euchaeta concinna*)、百陶带箭虫 (*Zonosagitta bedoti*) 和真刺唇角水蚤 (*Labidocera euchaeta*); 秋季鉴定到浮游动物 12 类, 45 种, 优势种为背针胸刺水蚤 (*Centropages dorsispinatus*)、百陶带箭虫 (*Zonosagitta bedoti*)、双生水母 (*Diphyes chamissonis*)、瓜水母 (*Beroe cucumis*) 和中华哲水蚤。夏季浮游动物平均丰度及平均生物量 (144.0 ind/m^3 和 176.3 mg/m^3) 都分别高于秋季 (21.4 ind/m^3 和 86.3 mg/m^3); Shannon-Wiener 多样性指数夏季 (3.03) 高于秋季 (2.82), Pielou 均匀度指数则是秋季 (0.83) 高于夏季 (0.64); 夏季不同区域浮游动物群落之间具有明显的差异, 而秋季大部分站位群落之间差异不显著; 温度、盐度、叶绿素 a 浓度和营养盐含量是影响舟山海域浮游动物分布的主要环境因子; 与历史资料相比, 舟山海域浮游动物丰度及生物量呈下降趋势, 其优势种保持较稳定。

关键词: 舟山海域; 浮游动物; 典范对应分析; 多维尺度分析; 环境因子

Distribution of zooplankton in the Zhoushan Sea and its relationship with environmental factors in summer and autumn

LUO Xin, ZENG Jiangning*, XU Xiaoqun, DU Ping, LIAO Yibo, LIU Jingjing

Key laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: The Zhoushan Sea (121.82° — 122.35° E, 29.80° — 30.22° N) is located along the northeast coast of Zhejiang Province, where the estuaries of the Yangze and Qiantang Rivers converge. The Zhoushan Sea is one of the deepest harbors in China, and it provides the largest marine economic base for the country. However, an increase in oil pollution and eutrophication in the area has been observed in recent years, which poses considerable threat to marine environments and resources. Understanding how oil pollution and eutrophication influence the marine ecological environment in the Zhoushan Sea is fundamental to protecting marine resources. Zooplankton plays a key role in marine food webs, and they are often used as indicator species of both small-, and large-scale nutrient pollution in aquatic ecosystems. However, there is little information available on how environmental factors influence the zooplankton community in the Zhoushan Sea. Our study investigated how environmental factors affect the zooplankton community in different seasons. In 2014, we conducted a

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (201305009, 201405007); 国家自然科学基金 (41306112); 浙江省自然科学基金 (LY14D060007); 浙江省重中之重学科开放基金 (XKZSC1444); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项 (JG1311, JG1312, JG1412); 国家海洋局青年科学基金 (2013144)

收稿日期: 2015-05-22; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangningz@126.com

summer (July) and autumn (October) survey in the Zhoushan Sea, to measure the abundance, biomass, and temporal and spatial distribution of the zooplankton community. Multidimensional scaling (MDS) and canonical correspondence analysis (CCA) were used to study the zooplankton community. In summer, we documented 64 species in 13 groups, with 6 dominant species: *Centropages dorsispinatus*, *Labidocera rotunda*, *Calanus sinicus*, *Euchaeta concinna*, *Zonosagitta bedoti*, and *Labidocera euchaeta*. In autumn, 45 species in 12 groups were identified, with 5 dominant species: *Centropages dorsispinatus*, *Zonosagitta bedoti*, *Diphyes chamissionis*, *Beroe cucumis*, and *Calanus sinicus*. The abundance and biomass of zooplankton were greater in summer (143.97 ind/m^3 and 176.34 mg/m^3 , respectively) than in autumn (21.38 ind/m^3 and 86.28 mg/m^3 , respectively). The Shannon-Wiener diversity index was higher in summer (3.03) than in autumn (2.82), and Pielou's evenness index was lower in summer (0.64) than in autumn (0.83). Furthermore, according to our MDS analysis, zooplankton community composition was highly variable in summer, but not in autumn. The results of the CCA showed that temperature, salinity, chlorophyll a, and nutrients were the main environmental factors that affected the zooplankton community. Finally, we compared our results with historical data and found that zooplankton abundance and biomass has declined in the Zhoushan Sea, but the dominant species have remained relatively stable.

Key Words: Zhoushan Sea; zooplankton; canonical correspondence analysis (CCA); multidimensional scaling analysis; environmental factor

舟山海域位于浙江沿海北部,地处长江及钱塘江两大河口的交汇处,由于其独特的地理条件以及所拥有的丰富的海洋渔业和滩涂资源,使其不仅成为中国最大的海水产品生产、加工、销售基地,更是中国屈指可数的天然深水良港。然而,随着 2011 年舟山新区的设立,旅游、水产捕捞、港口建设、船舶修造和油罐储蓄等产业加快发展,人口也愈加密集,海水中石油烃、重金属等污染加剧^[1],生产及生活排污增多,海水富营养化^[2-3],加上早期的过度捕捞导致许多原有优势种逐渐消失^[4],舟山海洋生态系统正承受越来越大的压力。为了更好地保护及开发海洋资源,了解舟山海域海洋生态环境必不可少,而浮游动物作为海洋食物链(网)上下行效应的关键环节,在海洋生态系统中具有重要地位,同时,浮游动物许多种类的分布与水环境因子有着密切的联系,可以作为水团、特定污染物的指示种^[5-6],因此,掌握并研究舟山海域浮游动物的种类组成和群落结构,探究其与环境因子的相互关系,对海洋生态环境保护具有重要意义。

有关舟山海域浮游动物及其环境因子的报道不多^[7-11],本文根据 2014 年在环舟山本岛海域夏、秋两季浮游动物的调查资料,对该海域水环境情况、浮游动物的群落组成和分布情况进行系统报道,同时分析浮游动物物种分布与相关环境因子的关系,为今后舟山对海洋生态环境的保护及可持续利用提供基础资料与依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域与采样

2014 年 7 月和 10 月在环舟山本岛附近海域对浮游动物等进行 2 个航次的综合调查,调查共设 25 个大面站(图 1),调查范围为环舟山本岛及环金塘岛的附近海域(121.82° — 122.35°E , 29.80° — 30.22°N)。用浅水 I 型浮游生物网(网口内径为 50cm,网长为 145cm,筛绢孔径为 $505 \mu\text{m}$)自底层至表层作垂直拖网采集,样品用福尔马林液固定(最终浓度 5%),在显微镜和体视镜下对样品进行鉴定、计数并剔除杂质,然后称量浮游动物湿重(天平称量法),所有操作均按照《海洋调查规范》^[12]进行。采集各站位表层(0.5 m)水样,当场测定水深(垂直铅鱼法)、温度(水温表法)和盐度(盐度计法),之后在黑暗冷藏条件下将水样带回实验室,测定其叶绿素 a(萃取荧光法)、硝酸盐(锌片还原分光光度法)、亚硝酸盐(萘乙二胺分光光度法)、铵盐(次溴酸盐氧化分光光度法)、活性磷酸盐(磷钼蓝分光光度法)和硅酸盐(硅钼黄法)含量,相关测定严格按照《海洋监测规范》^[13]进行。

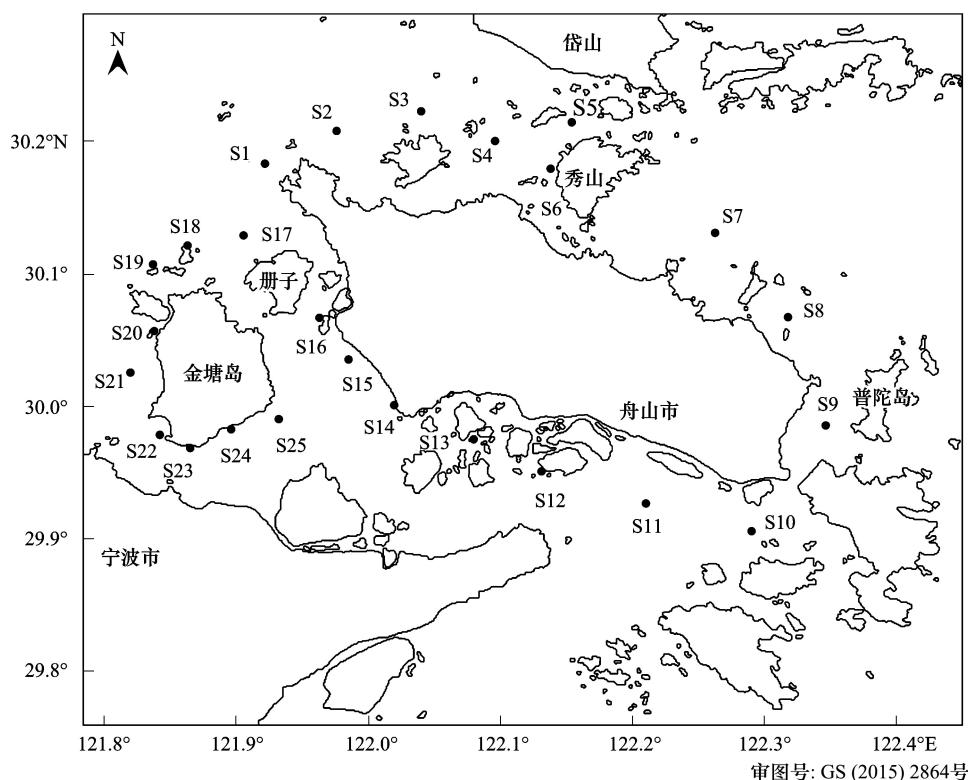


图1 舟山调查站位

Fig.1 Sample stations in Zhoushan Sea

1.2 数据处理与分析

用 Primer 6.0 计算浮游动物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')^[14] 和 Pielou 均匀度指数 (J'), 并将各站位物种数据进行多维尺度分析 (MDS)。采用 Surfer 11.0 绘制站位图, 温度、盐度分布图以及浮游动物丰度、生物量分布图; 采用 SPSS 16.0 进行数据统计及配对样本平均数 T 检验 (Paired-samples T Test) 和相关性分析 (Correlation Analysis); 采用 CANOCO 进行物种-环境因子的典范对应分析 (CCA)^[15]。

优势度 Y 计算公式为:

$$Y = n_i \cdot f_i / N$$

式中, N 为样品的总丰度; n_i 为样品中第 i 种的丰度; f_i 为该种在各样品中的出现频率。若某物种的 $Y \geq 0.02$, 则认定为优势种。文中除物种数外的其他数据都以平均值 $\pm$ 标准差 (Mean $\pm$ SD) 表示, 根据浮游动物的适温适盐范围将其分成不同的生态类群^[16-17]。

2 结果

2.1 理化环境因子

两个航次的各理化因子及其比较见表 1, 除水深外, 其他环境因子夏、秋两个季节之间皆具有显著差异 ($P < 0.05$), 说明两个季节之间的环境条件有着明显的季节变化。其中, 温度、盐度和叶绿素 a 含量皆是显著高于秋季, 而溶解氧、化学需氧量、溶解硅、溶解无机磷和溶解无机氮的含量则是秋季高于夏季。夏季舟山海域的温度与盐度表现出明显的梯度 (图 2), 从西往东温度逐渐递减, 盐度则逐渐递增。

2.2 种类组成与优势种

舟山海域夏季共鉴定出浮游动物 13 个类群, 67 种和 15 类浮游幼体, 其中桡足类最多, 共有 22 种, 占总数的 32.8%, 其次为浮游幼体 15 类, 水螅水母类 10 种。秋季共鉴定出浮游动物 12 个类群, 45 种和 7 类浮游幼

体,其中桡足类 19 种,占总数 42.2%,其次为浮游幼体 7 类,毛颚类 4 种。根据浮游动物适温适盐范围,可以将其分为 3 个生态类群:(1)近岸低盐类群:该类群为本次调查海域的主要类群,数量上占统治地位,主要有背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)、真刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)、百陶带箭虫(*Zonosagitta bedoti*)、中华假磷虾(*Pseudeuphausia sinica*)、针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)等;(2)暖水性外海类群:该类群种类较少,仅在夏季较多出现,主要物种有精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*)、肥胖软箭虫(*Flaccisagitta enflata*)等;(3)广布种:该类群鉴定出的种数稀少,主要物种有小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)等。

表 1 舟山海域环境因子的分季节比较

Table 1 Environmental variables (Mean ± SD) in different seasons				
环境因子 Environmental variables	夏季 Summer	秋季 Autumn	$T_{(24)}$	P
水深 Depth/m	15.00±6.70	13.32±5.40	1.10	0.280
温度 Temp/℃	25.38±1.08	20.17±0.45	21.34	0.000
盐度 Sal	25.18±2.50	21.21±2.13	18.74	0.000
溶解氧 DO/(mg/L)	6.13±0.52	7.71±0.28	-15.58	0.000
化学需氧量 COD/(mg/L)	0.83±0.28	1.77±1.04	-4.72	0.000
叶绿素 a Chl-a/(μg/L)	0.72±0.32	0.24±0.10	7.73	0.000
溶解硅 DSi/(mg/L)	1.236±0.263	1.743±0.252	-15.16	0.000
溶解无机磷 DIP/(mg/L)	0.038±0.008	0.052±0.006	-10.90	0.000
溶解无机氮 DIN/(mg/L)	0.634±0.168	1.075±0.167	-13.25	0.000

Temp:温度 temperature; Sal:盐度 salinity; DO:溶解氧 dissolved oxygen; COD:化学需氧量 COD chemical oxygen demand; Chl-a:叶绿素 a Chlophyll-a; DSi:溶解硅 dissolved silicon; DIP:溶解无机磷 dissolved inorganic phosphorus; DIN:溶解无机氮 dissolved inorganic nitrogen

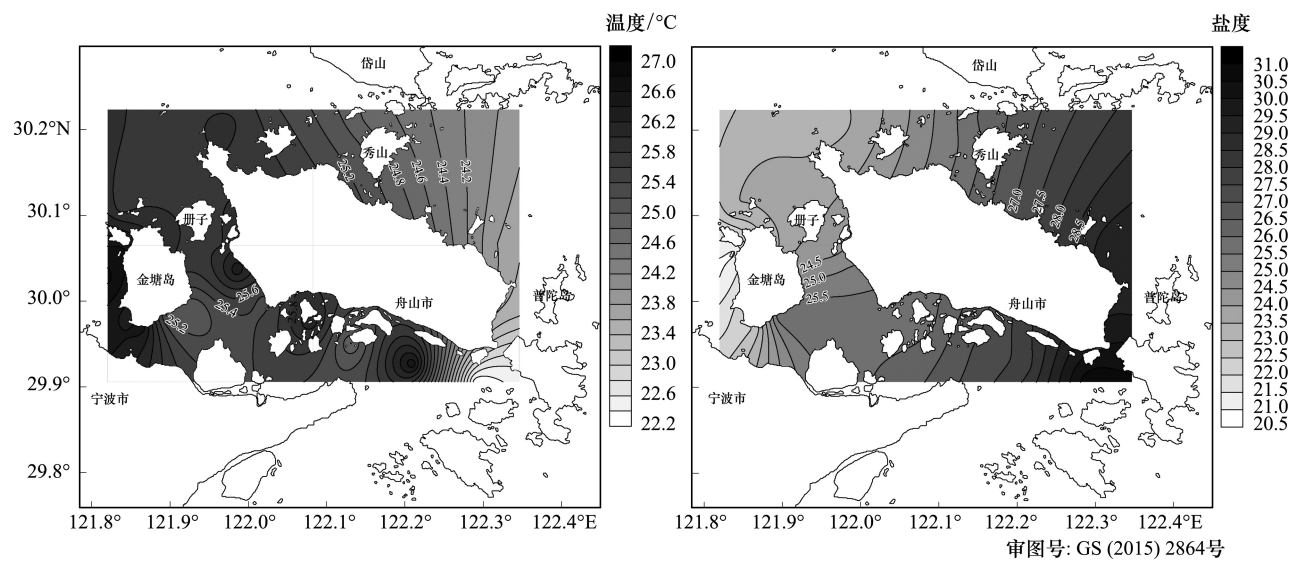


图 2 夏季温度、盐度平面分布图

Fig.2 Horizontal distribution of temperature and salinity in summer

两个季节的浮游动物物种组成都以近岸低盐类为主,有着较明显的季节变化。夏季除近岸低盐类物种外,暖水性物种较多,主要分布于调查区域的东南部和北部(图 3),在夏季整个浮游动物群落中占有重要地位;而秋季随着暖水性物种、水螅水母类和浮游幼体大量消失,近岸低盐类所占比例增大。在两个季节都出现的物种主要有背针胸刺水蚤、真刺唇角水蚤、小拟哲水蚤、百陶带箭虫和中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)等。

两次调查浮游动物优势种($Y \geq 0.02$)共有 8 种,其中夏季 6 种,秋季 5 种,夏、秋两季优势度最大的均为背针胸刺水蚤($Y=0.404$ 和 0.255),明显高于其他物种,其丰度占浮游动物总丰度的比例分别为 37.0%和 28.5%,其他优势种及其优势度见表 2。

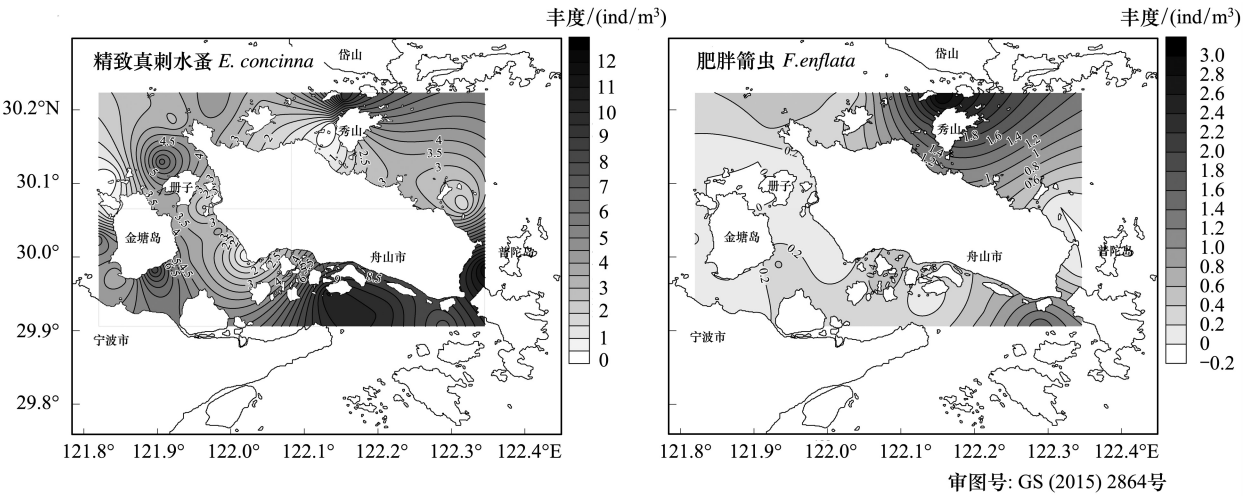


图 3 夏季精致真刺水蚤、肥胖软箭虫的丰度的平面分布图

Fig.3 Horizotal distributions of abundance of *Euchaeta concinna* and *Flaccisagitta enflata* in summer

表 2 舟山海域浮游动物优势种及优势度

Table 2 The dominant species and dominance of zooplankton in Zhoushan Sea				
序号 Code	夏季 Summer		秋季 Autumn	
	优势种 Dominant species	优势度 Y	优势种 Dominant species	优势度 Y
1	背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	0.404	背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	0.255
2	圆唇角水蚤 <i>Labidocera rotunda</i>	0.092	百陶带箭虫 <i>Zonosagitta bedoti</i>	0.099
3	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.079	双生水母 <i>Diphyes chamissionis</i>	0.097
4	精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	0.032	瓜水母 <i>Beroe cucumis</i>	0.071
5	百陶带箭虫 <i>Zonosagitta bedoti</i>	0.026	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.027
6	真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	0.022		

2.3 丰度与生物量分布

夏季浮游动物平均丰度为 147.8 ind/m³, 丰度最高值出现在 S5 站 (383.8 ind/m³), 最低值出现在金塘岛北部海域的 S19 站 (50.8 ind/m³), 调查海域北部 (S2、S3、S5 站) 浮游动物丰度高于其他海域, 本岛西部、金塘岛之间的册子岛附近海域浮游动物丰度最低; 夏季调查海域浮游动物生物量平均值为 172.8 mg/m³, 其最高值位于秀山岛以北海域的 S5 号站 (349.9 mg/m³), 最低值位于宁波与金塘岛之间海域的 S22 站 (58.2 mg/m³), 舟山岛东部海域浮游动物生物量高于西部海域, 其中舟山本岛与金塘岛之间的册子岛海域生物量最低 (图 4)。

秋季浮游动物平均丰度为 21.4 ind/m³, 最高值出现在金塘岛与舟山本岛之间海域的 S16 站 (76.2 ind/m³), 最低值出现在 S3 站 (4.9 ind/m³), 浮游动物丰度以舟山本岛北部、南部以及金塘岛西北部海域较低, 舟山本岛东部、金塘岛东南部以及金塘岛册子岛之间的附近海域则较高。秋季浮游动物平均生物量为 86.3 mg/m³, 除 S16 站 (452.9 mg/m³) 和 S6 站 (333.3 mg/m³) 以外, 其他站位生物量皆低于 120.0 mg/m³, 最低值位于 S3 站, 仅 12.0 mg/m³ (图 4)。

2.4 均匀度指数和多样性指数

调查海域夏季浮游动物均匀度指数平均值为 0.64; 多样性指数平均值为 3.03, 多样性较高的站位主要位于调查海域西北部。秋季浮游动物均匀度指数平均值为 0.83, 除了秀山西部海域出现较高值以外, 其他海域均匀度指数分布比较均匀; 秋季浮游动物多样性指数平均值为 2.82, 多样性较高的站位主要位于普陀岛附近海域 (图 5)。

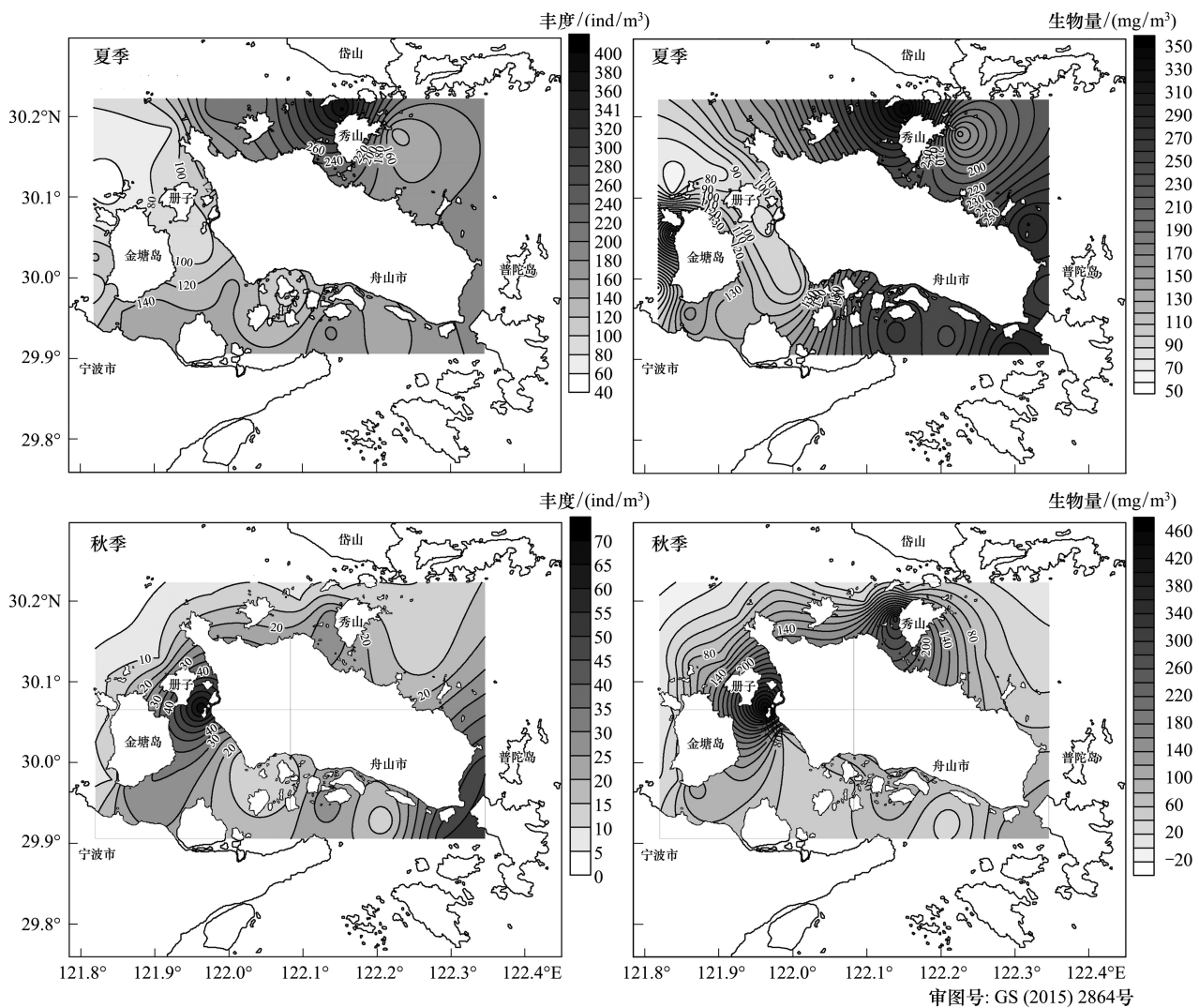


图 4 舟山海域浮游动物丰度、生物量平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of zooplankton abundance and biomass

2.5 不同区域之间群落结构差异

将两个季节不同站位的浮游动物物种丰度数据进行多维尺度分析,得出结果如下。可将夏季各站位浮游动物群落分为组 I、组 II、组 III、组 IV、组 V (图 6),这表明在本次调查舟山本岛附近海域中,不同海域之间的浮游动物群落具有较大组成差异。夏季调查中,组 I 的 S6 站物种最为丰富,丰度和生物量较其他站位高得多,与其他站位相似度最低(仅 32.35%)。其次是组 V,与其他浮游动物群落仅 42.73% 的相似度。

秋季分析结果表明,除少数群落(如 S3 站群落、S5 站群落、S21 站群落等)组成与其他区域差异较大以外,大部分群落(组 VI)之间并无较大不同。

2.6 浮游动物群落与环境因子的关系

根据浮游动物的优势度,选取主要物种($Y \geq 0.01$)用于 CCA 排序,夏季选取 12 个物种,蒙特卡罗检验表明,第一轴($P=0.048$)和全部轴($P=0.028$)均呈显著性差异($P < 0.05$),故排序结果是可信的。秋季选取 9 个物种进行排序,第一轴($P=0.052$)和全部轴($P=0.220$)均无显著性差异($P > 0.05$),排序结果不可信。

夏季排序结果显示:排序图中 9 个环境因子可解释浮游动物群落总变量的 47.8%,第一轴和第二轴特征值分别为 0.042 和 0.019,并各自解释了 24.0% 和 10.9% 的物种变量,第一轴和第二轴的物种-环境相关系数分别为 0.862 和 0.870,表明 12 种主要浮游动物种类和 9 种环境因子相关性较好。

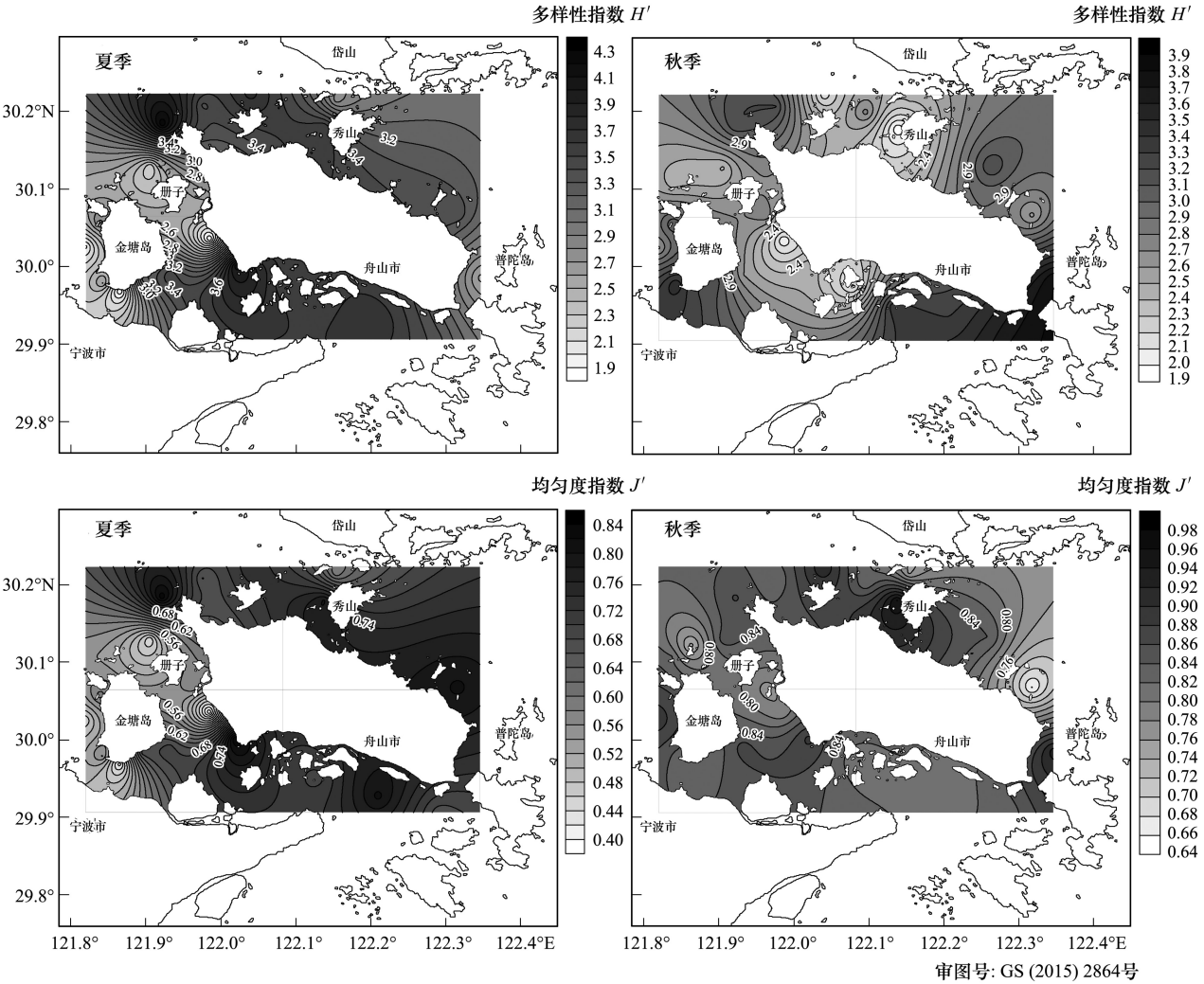


图 5 浮游动物生物多样性指数和均匀度指数平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of zooplankton evenness and diversity in Zhoushan Sea

结合 CCA 排序轴与各环境因子的相关性大小(表 3)可知,排序图中轴一基本反应的是溶解无机磷(0.6859)、叶绿素 a(−0.6302)、溶解硅(0.5954)、温度(0.5150)和盐度(−0.5094)的变化,轴二主要反应深度(−0.5754)的变化。据此分析排序图(图 7)可知,温度、盐度、叶绿素 a 含量和营养盐浓度是影响夏季浮游动物分布的主要环境因子。组 I 的物种(圆唇角水蚤、中华哲水蚤等)与叶绿素 a 含量和盐度有着较好的正相关,而与温度、营养盐呈负相关的现象,与组 III(背针胸刺水蚤、精致真刺水蚤等)相反。组 II(百陶带箭虫、瓜水母等)与溶解氧含量呈现一定的负相关,与其他环境因子相关性不明显。

表 3 夏季 CCA 分析排序轴与环境因子相关性系数

Table 3 Axes-environment correlation coefficient of CCA in summer					
环境因子 Environmental factor	轴一 SPEC AX1	轴二 SPEC AX2	环境因子 Environmental factor	轴一 SPEC AX1	轴二 SPEC AX2
深度 Depth	0.2358	−0.5754	温度 Temp	0.515	0.131
盐度 Sal	−0.5094	−0.1993	溶解氧 DO	0.1607	0.329
化学需氧量 COD	0.1542	0.1631	叶绿素 a Chl-a	−0.6302	0.1027
溶解硅 DSi	0.5954	−0.0272	溶解无机磷 DIP	0.6859	−0.2336
溶解无机氮 DIN	0.2859	0.0953			

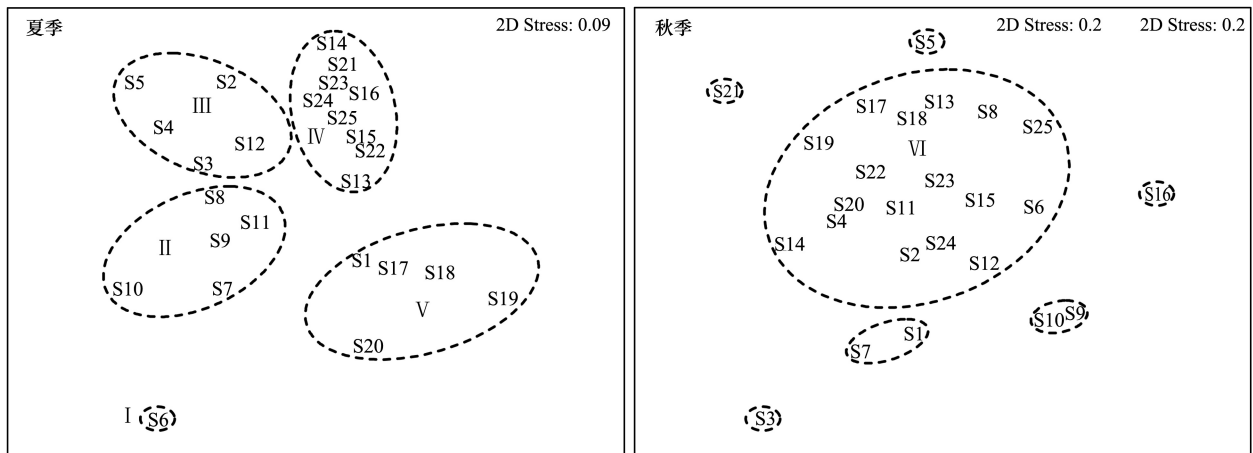


图6 各站位浮游动物样品的多维尺度分析

Fig.6 Multidimensional scaling (MDS) of different zooplankton samples

夏季中, I: S6 站群落; II: (S7—S11) 站群落; III: (S2—S5, S12) 站群落; IV: (S13—S16, S21—S25) 站群落; V: (S1, S17—S20) 站群落。秋季中, VI: (S2, S4, S6, S8, S11—S14, S15, S17—S20, S22—S25) 站群落

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构分布特征及其季节变化

本次调查浮游动物种类组成有着明显的季节变化,夏季水温较高,食物充足,水螅水母类和浮游幼体在夏季大量生长繁殖,所以夏季浮游动物较秋季更为丰富。由于大多数浮游动物没有、或者缺乏运动能力,其分布受水团及潮流影响较大^[18],而舟山及其附近海域夏季会受台湾暖流支流与黑潮作用^[19-21],所以夏季浮游动物种类组成除近岸低盐类(背针胸刺水蚤、真刺唇角水蚤、中华假磷虾等)外,暖水性类群比较多。秋季随着水温下降,暖水性物种、水螅水母类和浮游幼体大幅减少,近岸低盐类和中、小型桡足类所占比例相应增大。夏季浮游动物多样性指数略高于秋季,说明夏季种类组成更为丰富,而夏季均匀度指数低于秋季,这与夏季不同站位群落之间差异更大有关。夏季主要暖水性物种主要分布于调查海域东南部与北部的靠外海区域,西部靠河口的站位丰度较低(图3),这种分布的不均匀性直接拉低了均匀度水平。

3.2 浮游动物与环境因子的关系

舟山海域位于长江及钱塘江两大河口的交汇处,夏季正处于陆地河川的丰水期,此时舟山海域受到钱塘江径流和长江冲淡水的作用强烈^[22-23],所以夏季舟山海域的盐度等值线呈现出从西北往东南逐渐递增的现象,而温度则呈递减趋势(秋季则无此现象),梯度十分明显(图2),这种明显的梯度分布为浮游动物生长繁殖提供了不同的环境,可能对舟山海域浮游动物群落组成结构造成重要影响。夏季的多维尺度分析表明(图6),位于调查海域西北部的(S1、S17—S20)站群落与其他海域群落结构差

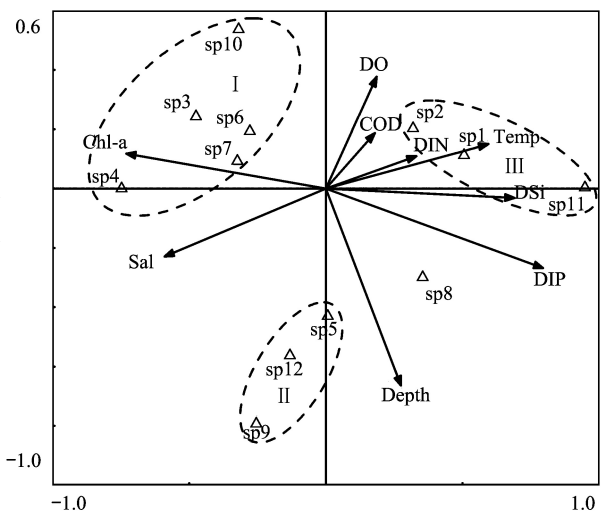


图7 夏季主要浮游动物种类与环境因子之间的 CCA 排序图

Fig.7 CCA ordination of main zooplankton species with environmental variables in summer

sp1:背针胸刺水蚤 *Centropages dorsispinatus*; sp2:糠虾幼体 *Mysidacea larva*; sp3:圆唇角水蚤 *Labidocera rotunda*; sp4:中华哲水蚤 *Calanus sinicus*; sp5:百陶带箭虫 *Zonosagitta bedoti*; sp6:小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*; sp7:真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*; sp8:短额刺糠虾 *Acanthomysis brevirostris*; sp9:真刺水蚤幼体 *Euchaeta sp.*; sp10:平滑针刺水蚤 *Euchaeta plana*; sp11:精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna*; sp12:瓜水母 *Beroe cucumis*

异较大,尤其是与东南部的(S7-S11)站群落具有明显差异(仅 42.73% 的相似度),夏季物种鉴定结果同时表明,精致真刺水蚤、肥胖软箭虫等暖水性外海种主要分布于调查海域的东南部、北部,即靠外海区域,而西北部靠河口的区域丰度极低(图 3),这种不同区域群落结构的明显差异可能与出现的温、盐梯度现象相关^[24-25], Zakaria 等的研究^[26]也表明,海水的盐度差异对浮游动物群落结构有着重要影响。秋季的温度、盐度等环境因子无明显梯度或斑块状分布,这可能是导致秋季多维尺度分析中,大多数站位群落之间无较大差异的主要原因。

除温度和盐度外,叶绿素 a 和营养盐含量也是影响浮游动物分布的重要因子^[27]。夏季 CCA 排序结果亦表明(图 7),多数直接捕食浮游植物的浮游动物种类和叶绿素 a 含量具有正相关,毛颚类、水母等次级消费者主要以其他浮游动物为食^[28]的浮游动物与叶绿素 a 的相关性不明显。叶绿素 a 含量与浮游植物含量有着直接的关系,从而在间接表征许多以浮游植物为食的浮游动物分布特征,夏季叶绿素 a 含量与浮游动物丰度之间相关性分析表明($R=0.451, P=0.035$)两者之间有着显著正相关,所以夏季的浮游动物丰度高于秋季,可能与夏季的叶绿素 a 含量高于秋季有一定关系。浮游动物的生长受营养盐的控制,合适的营养盐比例既是浮游植物生长旺盛的重要因素^[29],也因此间接影响着浮游动物群落的结果,CCA 排序结果表明,大部分浮游动物与营养盐呈负相关,这与 Badosa^[30]的研究结果相一致。

3.3 人类活动对浮游动物的影响

从 20 世纪 60 年代以来,除个别年份(丰度在 2007 年,生物量在 2011 年)外,舟山海域浮游动物丰度及生物量呈现下降的趋势(表 4)。本次调查浮游动物丰度和生物量较以往偏低,与本次调查区域较以往较窄有关系,此外,舟山海域近年来水体的石油污染加剧也与上述改变也有一定关系^[31-37]。Almeda 等^[33]研究发现,石油对一些汤氏纺锤水蚤(*Acartia tonsa*)等中型桡足类有着毒害作用,抑制其生长繁殖。Bejarano^[34]和 Bellas^[35]的研究都表明,长期暴露于石油污染物当中,即使浓度较低,桡足类也会出现生长率和繁殖率降低等异常现象。除此之外,暴露于石油的仔鱼、仔虾和许多其他浮游动物都会出现活动能力下降,甚至昏迷致死的现象^[36-37]。舟山作为我国最为重要的石油储备基地之一,石油类海洋污染日趋严重,2008、2009 两年间仅因游

表 4 舟山海域不同年份浮游动物群落参数
Table 4 Community parameter of zooplankton at different year in Zhoushan Sea

季节 Season	时间 Time	丰度/(ind/m ³) Abundance	生物量/(mg/m ³) Biomass	优势种(及丰度较高的种类) Dominant species (species with high abundance)	参考文献 Reference
夏季 Summer	1959-06	—	—	(中华哲水蚤;中华假磷虾)	[45]
	1982-07	—	—	(真刺唇角水蚤;针刺拟哲水蚤);精致真刺水蚤;肥胖软箭虫)	[46]
	2006-08	270.87	—	百陶带箭虫;肥胖三角溞(<i>Evadne tergestina</i>);精致真刺水蚤;肥胖软箭虫	[10]
	2014-08	143.97	176.34	背针胸刺水蚤;圆唇角水蚤;中华哲水蚤;精致真刺水蚤	本次调查 This paper
秋季 Autumn	1958-11	—	—	(中华哲水蚤;中华假磷虾;精致真刺水蚤;双生水母)	[45]
	1982-10	—	—	(针刺拟哲水蚤;真刺唇角水蚤;中华假磷虾)	[46]
	1990-10	81.43	92.76	中华哲水蚤;背针胸刺水蚤;百陶带箭虫;真刺唇角水蚤	[47]
	2007-11	138.00	—	亚强哲水蚤(<i>Eucalanus subcrassus</i>);缘齿厚壳水蚤(<i>Scolecithrix nicobarica</i>);百陶带箭虫;	[10]
	2011-11	76.40	185.20	肥胖软箭虫;百陶带箭虫;背针胸刺水蚤;真刺唇角水蚤	[11]
	2014-10	21.38	86.28	背针胸刺水蚤;百陶带箭虫;双生水母;瓜水母	本次调查 This paper

轮事故造成的溢油就高达 17.4 t^[38],而因此造成的海洋污染是长期性的,一般会持续 10 a,一旦污染出现,就会对浮游动物造成持续影响。此外,舟山水体中重金属污染在不同程度上制约着浮游动物的生长及繁殖过程,Hook^[39]对纺锤水蚤的 Hg 毒性实验以及 Sullivan^[40]对近亲真宽水蚤(*Eurytemora affinis*)的 Cu 毒性实验都证实了这一点。作为重要的港口城市和主要渔场之一,舟山人口越来越密集,船体和港口作业产生的大量工业废水和生活污水的直接排放对海水造成的重金属污染十分严重,调查表明,2010 年舟山近岸海域基本没有一类海水,而四类 and 劣四类海水比过去增加 19.9%^[41]。

舟山海域浮游动物优势种构成无较大变化(表 4)。夏季除近岸低盐种以外,暖水性物种较多,包括精致真刺水蚤、肥胖软箭虫等,秋季则多见以近岸低盐类群为主要优势种,包括真刺唇角水蚤、背针胸刺水蚤、百陶带箭虫等,历史情况总体比较稳定。水质的恶化对海水中浮游动物的丰度和生物量有着负面作用,但是却基本没有改变浮游动物群落的基本结构,这与该海区主要优势种(中型桡足类,毛颚类)对石油和重金属等污染物有一定的耐受力有关^[42-43],黄逸君等^[37]研究表明,真刺唇角水蚤、中华哲水蚤等大、中型桡足类相对于小型桡足类来说,对石油的污染具有更好的耐受性。此外,舟山海域本身较开放,在多个水团作用下,水动力条件(潮汐、流场)一年四季都比较强烈,能够较快地和外部海区完成水体的交换^[44],从而有效地改善海洋污染物在该海域的累积状况,这可能是该海域浮游动物群落结构保持总体稳定的又一重要原因。

致谢:感谢刘小涯、姚龙奎、蔡晓霞与张海峰等人帮助采样及提供理化数据

参考文献 (References):

- [1] 张传松,王修林,石晓勇,韩秀荣,孙霞,祝陈坚,陆茸.东海赤潮高发区 COD 和石油烃分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究.应用生态学报,2003,14(7):1093-1096.
- [2] 韩秀荣,王修林,孙霞,石晓勇,祝陈坚,张传松,陆茸.东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究.应用生态学报,2003,14(7):1097-1101.
- [3] 尹艳娥,沈新强,蒋玫,袁琪,平仙隐,徐亚岩,韩金娣,王云龙.长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系.生态环境学报,2014,23(4):622-629.
- [4] 樊伟,周魁芳,崔雪森,程炎宏.拖网捕捞对东海渔业资源种群结构的影响.应用生态学报,2003,14(10):1697-1700.
- [5] He D H, Wang C S, Liu H B, Yang G M. A study on zooplankton distribution patterns and indicator species in Kuroshio upstream area and adjacent East China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 11(2):237-254.
- [6] 徐兆礼,沈鑫绿.东海浮游糠虾类生态类型划分及其对水团的指示作用.应用生态学报,2007,18(10):2347-2353.
- [7] 俞存根,陈小庆,胡颖琰,黄备,郑基,覃涛,宁平.舟山渔场及邻近海域浮游动物种类组成及群落结构特征.水生生物学报,2011,35(1):183-193.
- [8] 章菁,杨关铭,王春生,张东声.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.海洋学研究,2008,26(4):20-28.
- [9] 徐韧,李亿红,李志恩,王金辉.长江口不同水域浮游动物数量特征比较.生态学报,2009,29(4):1688-1696.
- [10] 陈小庆,俞存根,胡颖琰,郑基,黄备,王婕妤.舟山渔场及邻近海域浮游动物数量分布特征.生态学报,2010,30(7):1834-1844.
- [11] 王婕妤,黄备,贾海波,魏娜.2011 年春、秋季浙江舟山海域浮游动物群落结构和多样性现状.浙江海洋学院学报:自然科学版,2014,33(4):311-316.
- [12] 国家标准化管理委员会. GB/T 17378.4-2007.海洋监测规范 第 4 部分:海水分析.北京:中国标准出版社,2007.
- [13] 国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007.海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查.北京:中国标准出版社,2007.
- [14] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana, USA: University of Illinois Press, 1949.
- [15] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. London: Cambridge University Press, 2003:1-280.
- [16] 刘镇盛,王春生,张志南,刘诚刚,杨关铭.三门湾浮游动物的季节变动及微型浮游动物摄食影响.生态学报,2006,2(12):3931-3941.
- [17] 刘镇盛,王春生,张志南,蔡昱明,张东声.乐清湾浮游动物的季节变动及摄食率.生态学报,2005,25(8):1853-1862.
- [18] 杨关铭,何德华,王春生,苗育田,于洪华.台湾以北海域浮游桡足类生物海洋学特征研究 II. 群落特征.海洋学报,1999,21(6):72-80.
- [19] 沈国英,施并章.海洋生态学(第二版).北京:科学出版社,2002,37-39.
- [20] Umezawa Y, Yamauchi A, Ishizaka J, Hasegawa T, Yoshimizu C, Tayasu I, Yoshimura H, Morii Y, Aoshima T, Yamawaki N. Seasonal shifts in the contributions of the Changjiang River and the Kuroshio Current to nitrate dynamics in the continental shelf of the northern East China Sea based on a

- nitrate dual isotopic composition approach. *Biogeosciences*, 2014, 11(4): 1297-1317.
- [21] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 2005: 207-246.
- [22] Zhou F, Xue H J, Huang D J, Xuan J L, Ni X B, Xiu P, Hao Q. Cross-shelf exchange in the shelf of the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3): 1545-1572.
- [23] Gao X L, Song J M, Li X G. Zooplankton spatial and diurnal variations in the Changjiang River estuary before operation of the Three Gorges Dam. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(3): 591-602.
- [24] Telesh I V, Khlebovich V V. Principal processes within the Estuarine salinity gradient: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 61(4/6): 149-155.
- [25] Modéran J, Bouvais P, David V, Le Noc S, Simon-Bouhet B, Niquil N, Miramand P, Fichet D. Zooplankton community structure in a highly turbid environment (Charente estuary, France): Spatio-temporal patterns and environmental control. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 2010, 88(2): 219-232.
- [26] Zakaria H Y, Radwan A A, Said M A. Influence of salinity variations on zooplankton community in El-mex Bay, Alexandria, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2007, 33(3): 52-67.
- [27] Zhou S C, Jin B S, Guo L, Qin H M, Chu T J, Wu J H. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze River Estuary, China. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 399-406.
- [28] 徐晓群, 曾江宁, 陈全震, 刘晶晶, 杜萍, 王桂忠. 浙江三门湾浮游动物优势种空间生态位. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 818-824.
- [29] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46(3): 205-221.
- [30] Badosa A, Boix D, Brucet S, López-Flores R, Gascón S, Quintana X D. Zooplankton taxonomic and size diversity in Mediterranean Coastal Lagoons (NE Iberian Peninsula): Influence of hydrology, nutrient composition, food resource availability and Predation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1/2): 335-346.
- [31] Barata C, Baird D J, Medina M, Albalat A, Soares A M V M. Determining the ecotoxicological mode of action of toxic chemicals in meiobenthic marine organisms: Stage-specific short tests with *Tisbe battagliai*. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 230: 183-194.
- [32] Carls M G, Short J W, Payne J. Accumulation of poly cyclic aromatic hydrocarbons by *Neocalanus* copepods in Port Valdez, Alaska. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(11): 1480-1489.
- [33] Almeda R, Wambaugh Z, Wang Z C, Hyatt C, Liu Z F, Buskey E J. Interactions between zooplankton and crude oil: toxic effects and bioaccumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *PLoS ONE*, 2013, 8(6): e67212.
- [34] Bejarano A C, Chandler G T, He L J, Coull B C. Individual to population level effects of South Louisiana crude oil water accommodated hydrocarbon fraction (WAF) on a marine meiobenthic copepod. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 332(1): 49-59.
- [35] Bellas J, Thor P. Effects of selected PAHs on reproduction and survival of the calanoid copepod *Acartia tonsa*. *Ecotoxicology*, 2007, 16(6): 465-474.
- [36] 贾晓平, 林钦. 南海原油和燃料油对仔虾和仔鱼的急性毒性试验. *热带海洋*, 1998, 17(1): 93-98.
- [37] 黄逸君, 陈全震, 曾江宁, 江志兵, 徐晓群. 原油和消油剂对海洋桡足类的急性毒性效应. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(4): 566-571.
- [38] 舟山市海洋与渔业局. 2011 年舟山市海洋环境公报, 舟山: 国家海洋局东海分局, 2011.
- [39] Hook S E, Fisher N S. Reproductive toxicity of metals in calanoid copepods. *Marine Biology*, 2001, 138(6): 1131-1140.
- [40] Sullivan B K, Buskey E, Miller D C, Ritacco P J. Effects of copper and cadmium on growth, swimming and predator avoidance in *Eurytemora affinis* (Copepoda). *Marine Biology*, 1983, 77(3): 299-306.
- [41] 王麒杰, 竺柏康. 舟山港口石油类海洋污染的调查和防治. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2013, 32(2): 173-177.
- [42] 曾艳艺, 黄小平. 重金属对海洋桡足类的影响研究进展. *生态学报*, 2010, 30(4): 1042-1049.
- [43] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 曾江宁, 陈全震, 寿鹿, 廖一波, 周青松. 椒江口春、秋季浮游动物分布特征及与主要环境因子的关系. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4): 486-494.
- [44] Isobe A. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(4): 569-584.
- [45] 国家海洋局第二海洋研究所. 全国海洋综合调查报告之八: 浮游生物. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 1964.
- [46] 国家海洋局第二海洋研究所. 浙江省海岸带资源综合调查专业报告之九: 海洋生物. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 1985.
- [47] 国家海洋局第二海洋研究所. 浙江省海岛海域生物资源综合调查报告. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 1993.