

温州沿岸海域春、夏季浮游动物群落特征 及与环境因子的关系

林义, 邹清, 王航俊, 刘亚林, 邱进坤

(国家海洋局温州海洋环境监测中心站 温州 325027)

摘要:文章根据2016年5月(春季)和8月(夏季)温州沿岸海域浮游动物和环境因子的调查资料,对浮游动物的种类组成、生态类群、优势种、丰度和生物量进行研究,并通过典范对应分析探索环境因子对浮游动物群落特征的影响。研究表明:春、夏季共鉴定到浮游动物117种和浮游幼虫20类,大多数种类属于暖水性近海类群;春季的优势种包括中华哲水蚤、大西洋五角水母和百陶箭虫,夏季的优势种包括拟细浅室水母、齿形海萤、肥胖箭虫和精致真刺水蚤等;浮游动物的丰度和生物量春季高于夏季,水平分布大致为近岸低、远岸高;浮游动物样品的季节性差异与表层水温和盐度有较大关系,而影响浮游动物群落结构空间差异的环境因子春季为盐度、活性磷酸盐、硝酸盐和氨氮,夏季为盐度、总氮、总磷和叶绿素a。

关键词:温州沿岸;浮游动物;环境因子;优势种;典范对应分析

中图分类号:P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)06-0051-09

Characteristics of Zooplankton Community Structure and Its Response to Environment Factors in the Wenzhou Coastal Waters During Spring and Summer

LIN Yi, ZOU Qing, WANG Hangjun, LIU Yalin, QIU Jinkun

(Wenzhou Marine Environmental Monitoring Center Station, SOA, Wenzhou 325027, China)

Abstract: Based on the investigation of zooplankton species and environmental factors in the coastal waters of Wenzhou in May (spring) and August (summer) 2016, the species composition, ecotypes, dominant species, abundance and biomass were analyzed, and the effects of environmental factors on zooplankton community characteristics were explored by canonical correspondence analysis. The result showed that a total of 117 species of zooplankton and 20 groups of pelagic larvae were identified in 2 seasons, most of which belonged to offshore warm temperate group. The dominant species in spring were *Calanus sinicus*, *Muggiaea atlantica*, and *Sagitta bedoti*. The major dominant species in summer were *Lensia subtiloides*, *Cypridina dentata*, *Sagitta*

收稿日期:2020-07-30;修订日期:2021-05-24

基金项目:自然资源部东海局青年海洋科学基金项目(201806).

作者简介:林义,助理工程师,硕士,研究方向为海洋浮游生态

enflata, *Euchaeta concinna*, et al.. The average abundance and biomass in spring were higher than those in summer. In addition, Both the abundance and biomass were lower in nearshore waters than those in offshore waters. The seasonal variability of zooplankton samples related to water temperature and salinity. The principal factors driving spatial differentiation of zooplankton community structure were salinity, Active Phosphate, Nitrate, Ammonia Nitrogen in spring, and salinity, Total Nitrogen, Total Phosphorus, Chlorophyll a in summer.

Keywords: Wenzhou coastal waters, Zooplankton, Environment factor, Dominant species, Canonical correspondence analysis

0 引言

温州海域北与台州海域相连,南与福建海域毗邻,面积约为 1.1 万 km²;从北到南分布洞头、北麂、北龙、南麂和七星 5 片列岛区,岛陆面积约为 170 km²;主要有瓯江、飞云江和鳌江 3 条河流入海,其中瓯江是浙江第二大河,海域生态资源极为丰富^[1-2]。

浮游动物是整个海洋食物网的中间环节,对海洋生态系统的调控发挥重要作用,其种类组成和数量变化往往能够直接影响海洋生态系统的物质循环和能量流动^[3-4]。由于浮游动物对环境变化十分敏感,其是反映海洋环境变化的理想研究对象,且一些种类与水团运动的关系密切,可作为暖流或寒流的指示生物^[5]。因此,掌握浮游动物的群落特征及其变化规律对保护海洋生态环境具有重要意义。

目前对温州相关海域浮游动物的研究主要集中在河口和少数自然保护区^[6-8],空间尺度较小,研究内容也多为对群落特征的描述,而鲜有与环境因子的相关性研究。为此,本研究根据 2016 年 5 月和 8 月温州沿岸海域 2 个航次的调查数据,在中等尺度上分析温州沿岸海域浮游动物的生态特征,并利用典范对应分析法(CCA)探索浮游动物的分布与各环境因子的关系,以为温州沿岸海域的生物多样性保护和资源开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位布设和采样方法

2016 年 5 月和 8 月在温州沿岸海域布设 40 个站位,进行浮游动物生态环境综合调查(图 1)。

浮游动物样品采用浅水 I 型浮游生物网(筛绢

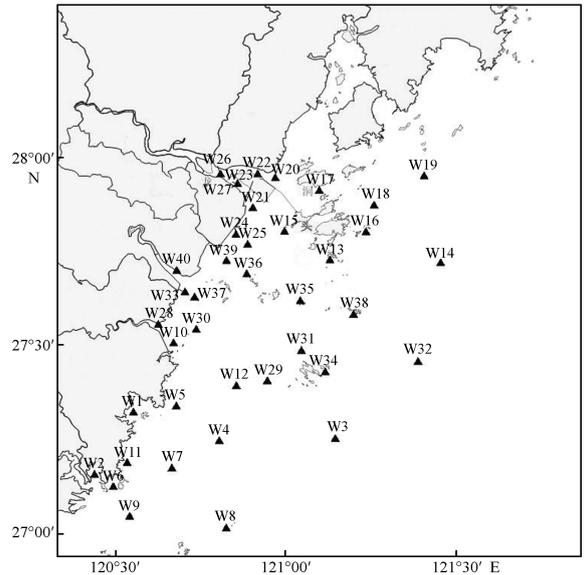


图 1 采样站位

孔径为 505 μm)从底至表垂直拖拽获得,样品采集后用 5% 福尔马林溶液固定并带回实验室分析。各站位同步调查表层水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)、硝酸盐(NO₃⁻)、亚硝酸盐(NO₂⁻)、氨氮(NH₄⁺)、活性磷酸盐(PO₄³⁻)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl a)、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、油类(Oil)和 pH 值共 14 项环境因子。样品的采集、处理和环境指标的测定等均按《海洋调查规范》^[9]和《海洋监测规范》^[10]的相关规定执行。

1.2 数据处理

浮游动物优势度的计算公式为:

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

式中:Y 为浮游动物优势度; n_i 为第 i 种浮游动物的个体数; N 为所有浮游动物种类的总个体数; f_i 为出现频率。Y 值大于 0.02 的种类为优势种^[11]。

本次调查站位图和相关平面分布图的绘制采用 Surfer 13.0 软件,物种和环境数据的分析采用 CANOCO 5.0 软件。先对物种采用去趋势对应分析法(DCA),如排序轴最大梯度长度大于 4 即选用典范对应分析法(CCA),如排序轴最大梯度长度小于 3 即选用冗余分析法(RDA),如排序轴最大梯度长度为 3~4 则选用 RDA 或 CCA 均可。在分析环境因子时,只选择 Monte Carlo 检验中与浮游动物群落结构明显相关的因子($P < 0.05$)^[12]。浮游动物选择出现频率大于 5%且丰度值占比大于 1%的种类。环境因子和浮游动物丰度数据矩阵均经过 $\lg(x+1)$ 转换,方差分析使用 SPSS 19 软件。

2 海域环境特征

温州沿岸海域的环境因子参数如表 1 所示。

表 1 温州沿岸海域各环境因子参数

环境因子	5月(春季)		8月(夏季)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
S/‰**	23.169	7.225	31.853	4.537
pH值**	8.36	0.23	8.17	0.14
SS/(mg·L ⁻¹)	166.4	305.9	97.5	148.8
DO/(mg·L ⁻¹)**	8.31	1.39	6.87	0.68
COD/(mg·L ⁻¹)**	1.44	0.74	0.95	0.33
NO ₂ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	0.011 9	0.007 1	0.012 0	0.015 5
NO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)*	0.367 3	0.356 3	0.203 8	0.339 8
NH ₄ ⁺ /(mg·L ⁻¹)	0.052 1	0.029 5	0.050 9	0.026 9
PO ₄ ³⁻ /(mg·L ⁻¹)	0.019 6	0.027 3	0.016 7	0.025 6
TN/(mg·L ⁻¹)**	2.87	0.58	3.45	0.61
TP/(mg·L ⁻¹)	0.126 1	0.185 0	0.101 8	0.187 7
Oil/(mg·L ⁻¹)*	0.025	0.011	0.031	0.014
Chl a/(μg·L ⁻¹)	4.0	3.9	4.0	2.9
T/℃**	20.1	1.1	31.7	1.5

注: ** 和 * 分别表示在 1% 和 5% 水平上显著。

单因素方差分析显示,调查海域春、夏季的盐度、pH 值、溶解氧、化学需氧量、总氮和表层水温 6 项环境因子存在极显著差异($P < 0.01$),硝酸盐和油类 2 项环境因子存在显著差异($P < 0.05$)。春季的盐度、总氮、油类和表层水温的平均值明显低于夏季,而悬浮物、溶解氧、化学需氧量和硝酸盐的

平均值明显高于夏季。

调查海域春、夏季的盐度均呈现由近岸向外递增的趋势,其中春季盐度梯度的扩散范围较大,并呈舌状分布。

3 浮游动物的群落结构

3.1 种类组成

温州沿岸海域春、夏季共鉴定出浮游动物 15 大类 117 种和浮游幼虫 20 类,其中桡足类最多(共 45 种),水母类 27 种,十足类 6 种,被囊类、介形类、糠虾类、毛颚类和翼足类各 5 种,端足类和栉板动物类各 3 种,涟虫类、多毛类和枝角类各 2 种,磷虾类和异足类各 1 种。春季共鉴定出浮游动物 11 大类 50 种和浮游幼虫 15 类,其中种类数量较多的有水母类 15 种和桡足类 13 种,其余类别包括糠虾类 4 种,栉板动物类、毛颚类和十足类各 3 种,被囊类、端足类、涟虫类和枝角类各 2 种,磷虾类 1 种;夏季共鉴定出浮游动物 15 大类 101 种和浮游幼虫 18 类,其中种类数量较多的有桡足类 39 种和水母类 21 种,其余类别包括十足类 6 种,翼足类、介形类、毛颚类和被囊类各 5 种,端足类 3 种,多毛类、糠虾类、涟虫类、枝角类和栉板动物类各 2 种,磷虾类和异足类各 1 种(表 2)。

表 2 温州沿岸海域浮游动物和浮游幼虫种类名录

	种类	春季 夏季	
		春季	夏季
	半口壮丽水母 <i>Aglaura hemistoma</i>	-	+
	双手水母 <i>Amphinema dinema</i>	-	+
	指突水母 <i>Blackfordia manhattensis</i>	+	+
	鳞茎高手水母 <i>Bougainvillia ramosa</i>	+	+
	十字高手水母 <i>Bougainvillia vervoorti</i>	-	+
	泉州枝萨水母 <i>Cladosarsia quanzhouensis</i>	-	+
	半球美螵水母 <i>Clytia hemisphaerica</i>	+	+
	眼刺铃水母 <i>Cnidocodon ocellata</i>	-	+
水母类	双生水母 <i>Diphyes chamissonis</i>	-	+
	杜氏外肋水母 <i>Ectopleura dumontieri</i>	+	-
	顶管外肋水母 <i>Ectopleura minerva</i>	+	+
	无疣和平水母 <i>Eirene averucifoemis</i>	-	+
	细颈和平水母 <i>Eirene menoni</i>	-	+
	疣真囊水母 <i>Euphysora verrucosa</i>	+	+
	拟细浅室水母 <i>Lensia subtiloides</i>	-	+
	四叶小舌水母 <i>Liriope tetraphylla</i>	+	+
	卡玛拉水母 <i>Malagazzia carolinae</i>	+	-

		续表				续表	
		春季	夏季			春季	夏季
种类				种类			
水母类	大西洋五角水母 <i>Muggiaea atlantica</i>	+	-	水母类	近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>	+	-
	性辄小型水母 <i>Nanomia bijuga</i>	-	+		红大眼剑水蚤 <i>Corycaeus erythraeus</i>	-	+
	贝氏拟线水母 <i>Nemopsis bachei</i>	+	-		美丽大眼剑水蚤 <i>Corycaeus speciosus</i>	-	+
	藪枝螳水母 <i>Obelia</i> sp.	+	+		达氏筛哲水蚤 <i>Cosmocalanus darwinii</i>	-	+
	印度八拟杯水母 <i>Octophialucium indicum</i>	-	+		精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	+	+
	八斑唇腕水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	+	-		平滑真刺水蚤 <i>Euchaeta plana</i>	+	+
	两手筐水母 <i>Solmundella bitentaculata</i>	+	+		尖刺唇角水蚤 <i>Labidocera acuta</i>	-	+
	嵯山秀氏水母 <i>Sugiura chengshanense</i>	+	-		真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	+	+
	灯塔水母 <i>Turritopsis nutricula</i>	-	+		圆唇角水蚤 <i>Labidocera rotunda</i>	+	+
	帽铃水母 <i>Tiaricoddon coeruleus</i>	+	+		左突唇角水蚤 <i>Labidocera sinilobata</i>	-	+
栉板动物类	瓜水母 <i>Beroe cucumis</i>	+	+	小哲水蚤 <i>Namocalanus minor</i>	-	+	
	蝶水母 <i>Ocyropsis crystallina</i>	+	-	羽长腹剑水蚤 <i>Oithona plumifera</i>	-	+	
	球型侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	+	+	丽隆剑水蚤 <i>Oncaea venusta</i>	-	+	
多毛类	无瘤蚕 <i>Ravsiopsis dubia</i>	-	+	桡足类	针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>	-	+
	玫瑰浮蚕 <i>Tomopteris nationalis</i>	-	+		小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	+	-
	尖笔帽螺 <i>Creseis acicula</i>	-	+		瘦尾筒角水蚤 <i>Pontellopsis tenuicauda</i>	-	+
棒笔帽螺 <i>Creseis clava</i>	-	+	火腿伪镖水蚤 <i>Pseudodiaptomus poplesia</i>		+	-	
翼足类	蝴蝶螺 <i>Desmopterus papilio</i>	-	+		达氏叶剑水蚤 <i>Sapphirina darwinii</i>	-	+
	马蹄螺 <i>Limacina trochiformis</i>	-	+		红叶剑水蚤 <i>Sapphirina scarlata</i>	-	+
	拟海若螺 <i>Paraclione longicaudata</i>	-	+		长刺小厚壳水蚤 <i>Scolecithricella longispinosa</i>	-	+
异足类	明螺 <i>Atlanta</i> sp.	-	+		强次真哲水蚤 <i>Subeucalanus crassus</i>	-	+
	肥胖三角溞 <i>Evadne tergestina</i>	+	+		亚强次真哲水蚤 <i>Subeucalanus subcrassus</i>	-	+
枝角类	鸟喙尖头溞 <i>Penilia avirostris</i>	+	+		狭额次真哲水蚤 <i>Subeucalanus subtenuis</i>	-	+
	齿形海萤 <i>Cypridina dentata</i>	-	+	异尾宽水蚤 <i>Temora discaudata</i>	-	+	
介形类	针刺真浮萤 <i>Euconchoecia aculeata</i>	-	+	柱形宽水蚤 <i>Temora stylifera</i>	-	+	
	细长真浮萤 <i>Euconchoecia elongata</i>	-	+	锥形宽水蚤 <i>Temora turbinata</i>	+	+	
	后圆真浮萤 <i>Euconchoecia maimai</i>	-	+	虫肢歪水蚤 <i>Tortanus vermiculus</i>	+	-	
	条纹直浮萤 <i>Orthoconchoecia striola</i>	-	+	普通波水蚤 <i>Undinula vulgaris</i>	-	+	
桡足类	克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausi</i>	+	-	短额刺糠虾 <i>Acanthomysis brevirostris</i>	+	-	
	红纺锤水蚤 <i>Acartia erythraea</i>	-	+	宽尾刺糠虾 <i>Acanthomysis laticauda</i>	-	+	
	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	+	+	糠虾类	长额刺糠虾 <i>Acanthomysis longirostris</i>	+	+
	刺尾纺锤水蚤 <i>Acartia spinicauda</i>	-	+		漂浮小井伊糠虾 <i>Iiella pelagicus</i>	+	-
	驼背隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gibber</i>	-	+		黑褐新糠虾 <i>Neomysis awastschensis</i>	+	-
	微驼隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gracilis</i>	-	+	磷虾类	中华假磷虾 <i>Pseudeuphausia sinica</i>	+	+
	椭圆形长足水蚤 <i>Calanopia elliptica</i>	-	+		钩虾 <i>Gammaridae</i> sp.	+	+
	汤氏长足水蚤 <i>Calanopia thompsoni</i>	-	+	端足类	孟加蛮虫戎 <i>Lestrigonus bengalensis</i>	+	+
	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	+	+		细尖小涂氏虫戎 <i>Tullbergella cuspidata</i>	-	+
	伯氏平头水蚤 <i>Candacia bradyi</i>	-	+	涟虫类	三叶针尾涟虫 <i>Diastylis tricineta</i>	+	+
	微刺哲水蚤 <i>Canthocalanus pauper</i>	-	+		细长涟虫 <i>Iphinoe tenera</i>	+	+
	背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	-	+	十足类	日本毛虾 <i>Acetes japonicus</i>	-	+
	叉胸刺水蚤 <i>Centropages furcatus</i>	-	+		尖尾细螯虾 <i>Leptochela aculeocaudata</i>	+	+
	奥氏胸刺水蚤 <i>Centropages orsinii</i>	-	+		细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>	+	+
	中华胸刺水蚤 <i>Centropages sinensis</i>	-	+		亨生莹虾 <i>Lucifer hansenii</i>	-	+
	瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	+	-		中型莹虾 <i>Lucifer intermedius</i>	+	+
奇桨剑水蚤 <i>Copilia mirabilis</i>	-	+	东方长眼虾 <i>Ogyrides orientalis</i>		-	+	

续表

种类	春季		夏季	
	春季	夏季	春季	夏季
百陶箭虫 <i>Sagitta bedoti</i>	+	+		
肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	+	+		
毛颚类 凶形箭虫 <i>Sagitta ferox</i>	-	+		
美丽箭虫 <i>Sagitta pulchra</i>	-	+		
中华箭虫 <i>Sagitta sinica</i>	+	+		
软拟海樽 <i>Dolioletta gegenbauri</i>	-	+		
小齿海樽 <i>Doliolum denticulatum</i>	+	+		
被囊类 异体住囊虫 <i>Oikopleura dioica</i>	+	+		
长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i>	-	+		
红住囊虫 <i>Oikopleura rufescens</i>	-	+		
带虫类辐轮幼虫 <i>Actinotrocha larva</i>	+	-		
阿利玛幼体 <i>Alima larva</i>	+	+		
异尾类溞状幼虫 <i>Anomura zoea</i>	-	+		
海参类耳状幼虫 <i>Auricularia larva</i>	+	+		
双壳类幼体 <i>Bivalvia larva</i>	+	+		
短尾类大眼幼虫 <i>Brachyura megalopa</i>	+	+		
短尾类溞状幼虫 <i>Brachyura zoea</i>	+	+		
头足类幼虫 <i>Cephalopoda larva</i>	-	+		
蔓足类无节幼虫 <i>Cirripedia nauplius</i>	+	-		
蔓足类腺介幼虫 <i>Cypris larva</i>	-	+		
浮游幼虫 磷虾幼虫 <i>Euphausia larva</i>	+	+		
鱼卵 <i>Fish egg</i>	-	+		
仔鱼 <i>Fish larva</i>	+	+		
腹足类幼虫 <i>Gastropoda larva</i>	+	+		
仔蟹 <i>Juvenile crab</i>	-	+		
软水母幼虫 <i>Leptomedusae larva</i>	+	+		
长尾类幼虫 <i>Macrura larva</i>	+	+		
糠虾幼虫 <i>Mysidacea larva</i>	+	+		
蛇尾类长腕幼虫 <i>Ophiopluteus larva</i>	+	+		
多毛类幼虫 <i>Polychaeta larva</i>	+	+		

表 3 优势种的优势度和平均丰度

季节	优势种	优势度	平均丰度/ (ind · m ⁻³)	丰度占比/%
春季	中华哲水蚤	0.53	264.88	59.60
	大西洋五角水母	0.12	61.92	13.93
	百陶箭虫	0.02	11.64	2.62
夏季	拟细浅室水母	0.14	39.78	15.78
	齿形海萤	0.06	23.68	9.39
	长尾类幼体	0.05	17.67	7.01
	肥胖箭虫	0.04	14.82	5.88
	精致真刺水蚤	0.04	14.10	5.59
	锥形宽水蚤	0.03	10.80	4.28
	短尾类溞状幼虫	0.02	7.73	3.07

3.3 丰度和生物量

温州沿岸海域浮游动物丰度的平面分布如图 2 所示。

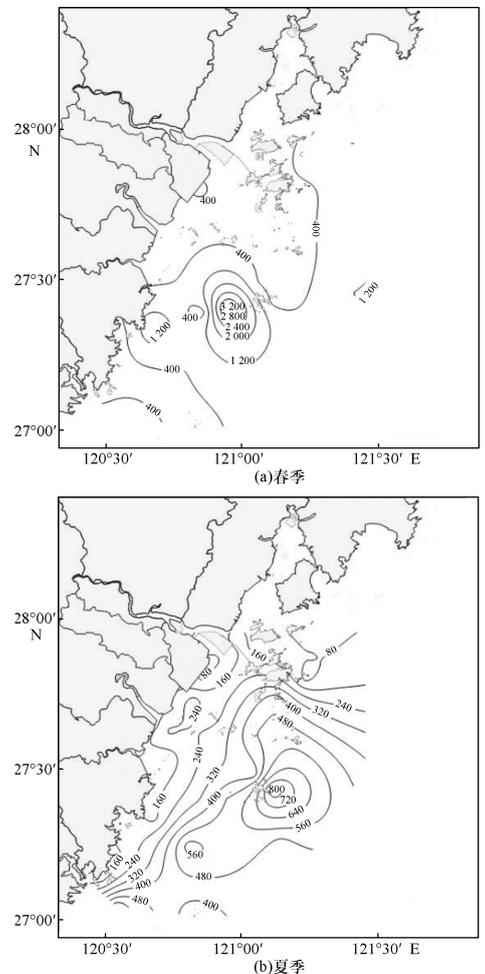


图 2 温州沿岸海域浮游动物丰度的平面分布(ind/m³)

3.2 优势种

温州沿岸海域浮游动物优势种的优势度和平均丰度如表 3 所示。春季优势种有 3 种,分别为中华哲水蚤、大西洋五角水母和百陶箭虫,其中中华哲水蚤的优势度为 0.53,明显高于其他种类,其平均丰度达到 264.88 ind/m³,占总丰度的 59.60%;夏季优势种有 7 种,分别为拟细浅室水母、齿形海萤、长尾类幼体、肥胖箭虫、精致真刺水蚤、锥形宽水蚤和短尾类溞状幼虫,其中拟细浅室水母的优势度最高(0.14),平均丰度为 39.78 ind/m³,占总丰度的 15.78%。

春季浮游动物丰度为 $31.60 \sim 5\,041.67 \text{ ind/m}^3$ ，平均值为 444.44 ind/m^3 ，最高值位于南麂列岛西南方向的 W29 站位；夏季浮游动物丰度为 $56.83 \sim 854.29 \text{ ind/m}^3$ ，平均值为 252.14 ind/m^3 ，最高值位于南麂列岛附近海域的 W34 站位。春季浮游动物丰度近岸低于远岸且梯度变化较大，局部海域浮游动物聚集现象明显；夏季浮游动物丰度的变化趋势大致为近岸低、远岸高。

温州沿岸海域浮游动物生物量的平面分布如图 3 所示。

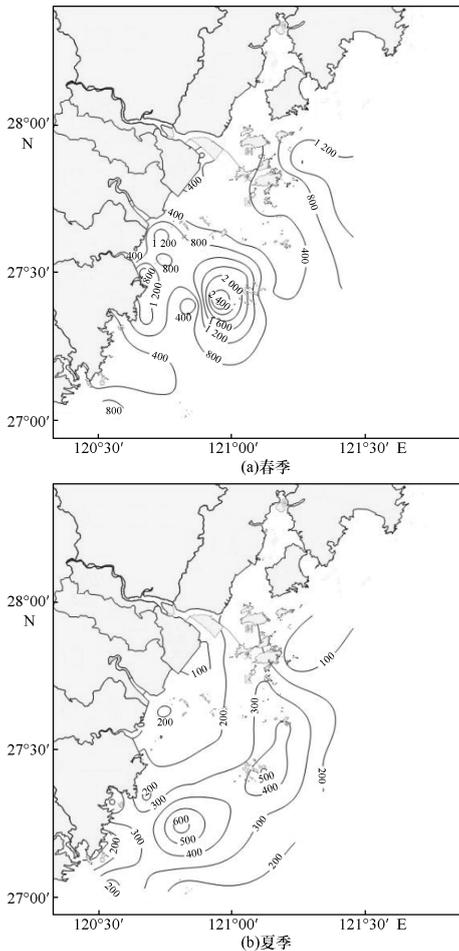


图 3 温州沿岸海域浮游动物生物量的平面分布(mg/m^3)

春季浮游动物生物量为 $20.83 \sim 3\,587.50 \text{ mg/m}^3$ ，平均值为 640.00 mg/m^3 ，最高值位于南麂列岛西南方向的 W29 站位；夏季浮游动物生物量为 $27.78 \sim 679.01 \text{ mg/m}^3$ ，平均值为 198.38 mg/m^3 ，最高值位于苍南沿岸的 W4 站位。春、夏季浮游动物生物量

的平面分布规律与其丰度基本一致。

4 浮游动物群落与环境因子的相关性

根据浮游动物丰度和出现频率占比，春季选取浮游动物 46 种，夏季选取浮游动物 75 种。对物种数据进行去趋势对应分析，结果显示春、夏季排序轴最大梯度长度均大于 3，故选用 CCA 单峰模型排序。

4.1 浮游动物季节分布特征的典范对应分析

对春、夏季共 80 个样品进行 CCA 排序，样品在环境因子排序图中存在显著的季节性差异。春季站位主要分布在第二主轴的右侧，夏季站位主要分布在第二主轴的左侧。表层水温与第一主轴呈最显著负相关性，相关系数为 -0.8751 ，因此其是影响浮游动物样品季节性差异的最重要环境因子；盐度与第一主轴呈较显著负相关性，相关系数为 -0.8021 ，因此其是影响浮游动物样品季节性差异的另一个重要环境因子。

4.2 浮游动物种类与环境因子关系的典范对应分析

浮游动物种类与环境因子关系的典范对应分析结果如表 4 所示。

表 4 CCA 排序轴与环境因子相关性系数

参数	春季		夏季	
	第一主轴	第二主轴	第一主轴	第二主轴
NO_3^-	0.708	0.241	—	—
NH_4^+	0.305	0.533	—	—
PO_4^{3-}	0.842	-0.191	—	—
S	-0.9610	0.0097	-0.7360	-0.4210
TN	—	—	0.539	-0.302
TP	—	—	0.583	0.385
Chl a	—	—	0.645	-0.490
特征值	0.467	0.119	0.309	0.095
物种-环境因子相关性	0.967	0.798	0.909	0.852
物种数据的方差累积百分数/%	19.3	24.2	20.2	26.3
物种-环境因子关系的方差累积百分数/%	64.0	80.4	62.2	81.2

由表 4 可以看出：春季前两轴共解释浮游动物

种类与环境因子关系的 80.4%,夏季前两轴共解释浮游动物种类与环境因子关系的 81.2%,表明 CCA 前两轴已能较好反映该海域群落物种与环境因子之间的关系。春季活性磷酸盐和硝酸盐与第一主 轴呈显著正相关性,盐度与第一主轴呈显著负相关性,氨氮与第二主轴呈显著正相关性;夏季叶绿素 a、总氮和总磷与第一主轴呈显著正相关性,盐度与第一 主轴呈显著负相关性。

根据 CCA 排序结果,对调查海域的浮游动物 进行分组。春季可分成 3 组:①组 1 包含虫肢歪 水蚤、长额刺糠虾和火腿伪镖水蚤 3 种,位于排序 轴的右下方,适应低盐海域,且分布与活性磷酸盐 有较强的正相关性;②组 2 包含贝氏拟线水母、顶 管外肋水母、指突水母、太平洋纺锤水蚤和钩虾 5 种,位于排序轴的右上方,适应盐度稍低海域,与 硝酸盐和氨氮有较强的正相关性;③组 3 包含其 他大多数种类,位于排序轴的中心位置。夏季大 致可分成 4 组:①组 1 仅包含长额刺糠虾 1 种,位 于排序轴的最右上方,适应盐度最低海域,且分布 与总磷相关;②组 2 包含指突水母、顶管外肋水 母、中华胸刺水蚤、汤氏长足水蚤、真刺唇角水蚤 和钩虾 6 种,同样位于排序轴的右上方,适应低盐 海域,且分布与总磷有较强的正相关性;③组 4 包 含强次真哲水蚤、小齿海樽、马蹄胡螺、蝴蝶螺 和棒笔帽螺 5 种,位于排序轴的左上方,适应高盐 和寡营养盐海域;④组 3 包含其他大多数种类,位 于排序轴的中心位置。

5 讨论

5.1 浮游动物群落特征

温州沿海岸域春、夏季共鉴定出浮游动物 15 大 类 117 种和浮游幼虫 20 类,种类数量较多的有桡足 类 45 种和水母类 27 种。春、夏季浮游动物的优势 种完全不同,其中春季为中华哲水蚤、大西洋五角 水母和百陶箭虫,夏季为拟细浅室水母、齿形海萤、 长尾类幼体、肥胖箭虫、精致真刺水蚤、锥形宽水蚤 和短尾类溞状幼虫。本研究调查的种类数量高于 王婕好等^[13]对浙南海域浮游动物的调查结果,但优 势种的组成与其调查结果较为接近。

根据浮游动物的生态习性^[14-16],可将调查海域

的浮游动物大致分成 5 类。①河口半咸水类群,适 应半咸水海域,调查海域该类群的种类数量不多, 以火腿伪镖水蚤、虫肢歪水蚤和长额刺糠虾为代 表;②暖温带近海类群,适应相对低温海域,以中华 哲水蚤、大西洋五角水母和中华假磷虾为代表,春 季优势种全部属于该类群;③暖水性近海类群,适 应偏高温低盐海域,调查海域该类群占绝大多数; ④暖水性广布类群,适应偏高温海域,对盐度的适 应范围较广,以精致真刺水蚤和肥胖箭虫为代表; ⑤热带外海类群,适应高温高盐海域,主要出现在 夏季,以尖笔帽螺、棒笔帽螺、蝴蝶螺、马蹄峨螺 和拟海若螺为代表。

5.2 浮游动物丰度与水团的关系

浮游动物丰度往往与水团运动有较大关系。 影响温州沿海岸域的水团主要包括沿岸流、台湾暖 流和各江冲淡水^[13,17],各水团随季节变化此消彼 长,共同作用于调查海域,并对浮游动物丰度产生 相应的影响。

春季受东北季风减弱的影响,台湾暖流略有增 强,沿岸流势力虽有下降但仍控制温州沿岸大部分 海域。同时,春季(5 月)正是瓯江、飞云江和鳌江的 丰水期,径流量较大,在冲淡水和南下沿岸流的共 同作用下,低温低盐的近岸水团向东南方向延伸并 与北上的台湾暖流交汇,形成舌状的混合水团区。 由于混合水团区内的表层水温相对适宜且饵料丰 富,暖温带近海类群在混合水团区偏沿岸流一侧聚 集并形成高丰度区。例如:W29 站位中华哲水蚤的 丰度高达 4 916.67 ind/m³,占该站位总丰度的 97.5%;W5 站位中华哲水蚤和大西洋五角水母的 丰度分别达到 1 562.50 ind/m³和 104.17 ind/m³, 二者共占该站位总丰度的 82.0%。混合水团区外 侧受台湾暖流的影响,出现肥胖箭虫、精致真刺水 蚤和四叶小舌水母等暖水性广布类群,但其丰度仍 处于较低水平,如 W8 站位肥胖箭虫和四叶小舌水 母的丰度分别为 1.15 ind/m³和 0.57 ind/m³,二者 共占该站位总丰度的 0.9%。与此同时,在混合水 团区外侧高盐海水的作用下,中华哲水蚤的丰度有 所下降,如 W8 和 W32 站位中华哲水蚤的丰度均低 于 200.00 ind/m³。

夏季西南季风盛行,沿岸流势力进一步减弱,台湾暖流逐步控制温州沿岸海域,主要特征为表层水温和盐度均显著升高。此时(8月)瓯江、飞云江和鳌江虽仍处于丰水期,但受台湾暖流增强和沿岸流减弱的影响,混合水团区的位置向沿岸一带靠近。受此影响,以拟细浅室水母为代表的暖水性近海类群和以精致真刺水蚤为代表的暖水性广布类群出现明显聚集,成为影响该季浮游动物总丰度变化的最主要优势种。从优势种的分布上看,拟细浅室水母丰度最高的4个站位(W9、W12、W29和W35)和精致真刺水蚤丰度最高的3个站位(W13、W34和W38)全部位于混合水团区偏暖水一侧,而在靠近近岸受冲淡水团影响的狭长海域(如W5、W10和W39站位)主要分布适应盐度稍低的类群如针刺拟哲水蚤和百陶箭虫,但其平均丰度均低于 10.00 ind/m^3 ,这也是调查海域夏季浮游动物丰度近岸低、远岸高的重要原因。

5.3 影响浮游动物群落结构的主要环境因子

温州沿岸海域浮游动物群落结构的季节差异显著,CCA结果显示表层水温和盐度是影响其季节分化的主要环境因子。而温盐特性作为水团的主要分析指标^[18-19],进一步证实水团运动在浮游动物季节分化中起到至关重要的作用。

由于生态系统具有空间差异性,影响浮游动物群落结构的主要环境因子在不同海域也有所不同。杜萍等^[20]利用CCA研究椒江口海域浮游动物群落结构与环境因子的响应,发现营养盐、盐度和溶解氧是影响浮游动物群落结构的主要环境因子;俞存根等^[21]发现舟山渔场及其邻近海域的浮游动物分布受水温、盐度、悬浮物、化学需氧量和营养盐等的影响。本研究的温州沿岸海域浮游动物群落结构的分布,春季主要与盐度和营养盐(硝酸盐、氨氮和活性磷酸盐)有关,夏季主要与盐度、营养盐(总氮和总磷)和叶绿素a有关。盐度作为春、夏季相关性最高的环境因子,显示出极为重要的作用,目前已有较多研究证实盐度可影响浮游动物的个体生存和生长发育,如细巧华哲水蚤最适宜生长的盐度为 $12.4\% \sim 18.9\%$,超出该范围其生长速度将减缓^[22]。营养盐对浮游动物的影响较为复杂,一般

通过影响初级生产力来间接影响浮游动物的类群动态^[23],因此常与叶绿素a共同对浮游动物群落结构造成影响。从CCA结果上看,温州沿岸海域春、夏季浮游动物均与含氮和含磷的营养盐有显著正相关性,但与叶绿素a的相关性仅在夏季可观察到,这可能与浮游动物的选择性摄食有关。春季浮游动物的种类数量较少,且中华哲水蚤的优势度高度集中;相关研究表明中华哲水蚤的食物来源除浮游植物外还包括动物性饵料和有机碎屑等颗粒物^[24-25],在浮游植物不足的情况下,其会主动选择颗粒物作为补充食物;因此春季叶绿素a的变化并未真实反馈到浮游动物的摄食强度。

CCA排序能够间接反映不同物种的生态分化现象,通常位于排序轴中心位置的种类对生境的适应范围较广,而适应特定生境的种类往往远离排序轴中心位置。春、夏季的物种-环境因子CCA排序图从右到左实际反映浮游动物群落结构由近岸向远岸的渐变过程。春季组1位于排序轴最右方,包含的虫肢歪水蚤、长额刺糠虾和火腿伪镖水蚤均为河口半咸水类群,分布于盐度最低海域;组2主要由贝氏拟线水母和太平洋纺锤水蚤等暖水性近海类群组成,受沿岸冲淡水的影响分布于盐度稍低海域,但其盐度适应范围略高于组1;组1和组2所包含的种类分别与活性磷酸盐和含氮营养盐(氨氮和硝酸盐)关系密切,表明这些类群倾向高营养盐水体,并可能对近岸水体污染具有一定的指示作用;组3包含大多数种类,分布受环境因子的影响较小,是保持整个群落结构稳定的重要组成部分。夏季受远岸海水高温高盐扩散的影响,在排序轴左上方(组4)出现马蹄胡螺、蝴蝶螺和棒笔帽螺等热带外海类群,适应高盐和寡营养盐海域,主要分布在调查海域最外侧,可作为暖水水团的重要指示生物。此外,受低盐海域范围缩小的影响,夏季河口半咸水类群与适应低盐海域的暖水性近海类群的生态位有所重叠,2组类群共同分布在排序轴右上方,且均与总磷关系密切。由此可见,将海洋环境因子梯度变化与浮游动物群落特征进行对应分析,有助于发现环境因子对浮游动物分布规律的影响,并较好地解释二者之间的内在联系。

参考文献

- [1] 李孟国,温春鹏,蔡寅.温州海域研究与开发进展[J].水道港口,2012,33(4):277-290.
- [2] 傅金龙,徐伟金,朱李鸣.瓯江口温州区域开发建设的规划探索[J].海洋学研究,2009,27(S1):97-104.
- [3] 周青云,宋微,刘永清,等.2003年胶州湾红岛海域生物现状的初步研究Ⅱ:浮游动物现状的初步调查与研究[J].海洋科学,2005,29(6):80-83.
- [4] 沈国英,施并章.海洋生态学[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] BIERI R. The distribution of the planktonic Chaetognatha in the Pacific and their relationship to the water masses[J]. Limnology and Oceanography, 1959, 4(1): 1-28.
- [6] 高倩,徐兆礼.瓯江口水域夏、秋季浮游动物数量时空分布特征[J].中国水产科学,2009,16(3):372-380.
- [7] 王春生,杨关铭,朱根海,等.南麂列岛附近海域浮游动物的分布及其与浮游藻类和营养盐的关系[J].东海海洋,1998,16(2):41-48.
- [8] 董开兴,徐兆礼.飞云江口附近海域浮游动物群落特征[J].生态学杂志,2015,34(3):744-752.
- [9] 国家技术监督局.海洋调查规范:GB 12763.6-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [10] 国家技术监督局.海洋监测规范:GB 17378.4-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [11] 孙儒泳.动物生态学原理[M].3版.北京:北京师范大学出版社,2001.
- [12] LEPŠ J, ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [13] 王婕好,唐静亮,胡颖琰,等.浙江近岸海域浮游动物的生态分布特征[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2008,27(5):384-389.
- [14] 邹清,姚炜民,张舒敏.乐清湾2009年夏季浮游动物种类组成和数量分布[J].海洋科学进展,2012,30(2):266-273.
- [15] 陈清潮,章淑珍.黄海和东海的浮游桡足类: I. 哲水蚤目[J].海洋科学集刊,1965(7):20-137.
- [16] 张金标.中国海域水螅水母类区系的初步分析[J].海洋学报,1979,1(1):128-137.
- [17] 曾定勇,倪晓波,黄大吉.冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J].中国科学,2012,42(7):1123-1134.
- [18] 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.
- [19] 闫雨,陈斌,李博.2016年秋季黄东海温盐特征与水团划分[J].海洋预报,2018,35(5):7-16.
- [20] 杜萍,徐晓群,刘晶晶,等.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[J].应用与环境生物学报,2011,17(4):486-494.
- [21] 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.
- [22] 薛泽,朱丽岩,王博渊,等.温度和盐度对两种海洋桡足类动物摄食和代谢的影响[J].海洋与湖沼,2020,51(1):95-102.
- [23] 管卫兵,王丽娅,许东峰.珠江河口氮和磷循环及溶解氧的数值模拟[J].海洋学报,2003,25(1):52-60.
- [24] HUO Y Z, WANG S W, SUN S, et al. Feeding and egg production of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in spring and autumn in the Yellow Sea[J]. Journal of Plankton Research, 2008, 30(6): 723-734.
- [25] ZHANG G T, LI C L, SUN S, et al. Feeding habit of *Calanus sinicus* (Crustacea: copepoda) during spring and autumn in the Bohai Sea studied with herbivore index [J]. Scientia Marina, 2006, 70(3): 381-388.