

DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0101

飞云江口附近海域浮游动物群落特征*

董开兴^{1,2} 徐兆礼^{1,2**}

(¹厦门大学海洋与地球学院, 福建厦门 361102; ²中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090)

摘要 根据 2010—2011 年在飞云江附近海域(27°46′N—27°75′N, 120°66′E—121°01′E) 秋、冬、春 3 个季节的调查资料, 分析了浮游动物的种类组成及多样性分布、总丰度的平面分布和季节变化及其与水团变化的关系。结果表明: 飞云江口附近水域秋、冬、春三季共鉴定出浮游动物 60 种, 分属于 11 大类; 秋季检出浮游动物 9 大类 42 种, 冬季检出 5 大类 20 种, 春季检出 8 大类 34 种; 调查水域浮游动物丰度在秋、冬之间和冬、春之间有较大变化, 秋、冬、春三季浮游动物平均丰度分别为 221.69、19.52 和 137.50 ind · m⁻³; 秋、冬、春季种类数近岸较少, 外海较多; 三季中, 秋季浮游动物 Shannon 多样性指数最高, 高值区位于调查水域的东南部, 其次为春季, 最高值出现在飞云江口外海域, 冬季为三季最低, 最高值出现在调查水域北侧岛群之间; 中华哲水蚤(*Calanus sinicus*) 是冬、春季影响总丰度变化最主要的种类, 秋季总丰度变化主要受针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*) 和百陶箭虫(*Sagitta bedoti*) 影响; 各水团随季节变化此消彼长共同作用于研究水域, 对该水域浮游动物数量分布和群落组成产生相应的影响。

关键词 飞云江口; 浮游动物; 群落; 水团

中图分类号 Q178.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)3-0744-09

Characteristics of zooplankton communities off the Feiyun River estuary. DONG Kai-xing^{1,2}, XU Zhao-li^{1,2**} (¹College of Ocean & Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; ²Key and Open Laboratory of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture of China, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(3): 744-752.

Abstract: Based on three oceanographic surveys conducted off the Feiyun River estuary (27°46′–27°75′N, 120°66′–121°01′E) in November 2010 (autumn), January 2011 (winter) and May 2011 (spring), the species composition, Shannon diversity, abundance, horizontal distribution, and seasonal variation of zooplankton were investigated, and their relationship to seasonal variation of water masses was also examined. A total of 60 species belonging to 11 groups were identified, including 42 species belonging to 9 groups in autumn, 20 species belonging to 5 groups in winter and 34 species belonging to 8 groups in spring. The abundance of zooplankton was highest in autumn (221.69 ind · m⁻³), least in winter (19.52 ind · m⁻³), and intermediate in spring (137.50 ind · m⁻³). Spatially, the zooplankton was most numerous in the offshore water. The Shannon diversity of zooplankton was highest in autumn followed by spring and winter. The high value area of diversity was situated in the southeast of investigation waters (autumn), in the outer area of Feiyun River estuary (spring) and among archipelago in the north (winter), respectively. In winter and spring, *Calanus sinicus* was the predominant which determined the distribution pattern of zooplankton abundance. In autumn, *Paracalanus aculeatus* and *Sagitta bedoti* exerted the greatest influence on the distribution of zooplankton abundance. Furthermore, the abundance and community composition of zooplankton was influenced by seasonal variation of water masses to some extent.

Key words: Feiyun River estuary; zooplankton; community; water mass.

* 国家自然科学基金项目(41176131)和海洋公益性行业科研经费专项(201305027-8)资助。

** 通讯作者 E-mail: xu_zhaoli@126.com

收稿日期: 2014-06-06 接受日期: 2014-11-02

飞云江位于浙江省南部,是浙江省第四大河流。飞云江口外海域海底地形复杂,岛屿众多,同时受飞云江径流、浙江沿岸流、台湾暖流和东海外海水的影响(苏纪兰等,2005;王婕妤等,2008),加上水团的季节变化,使得这一海域浮游动物资源比较丰富。

关于浙江省沿海岸域浮游动物的研究已有诸多报道,王婕妤等(2008)根据2006年调查数据,对浙江近岸海域浮游动物的生态分布特征进行了大范围的研究,但较少涉及特定生境浮游动物的细节。黄备等(2012)对浙江北部海域春季浮游动物的群落结构特征进行了分析研究。孙鲁峰等(2013)对浙江中部近海浮游动物生态类群分布与上升流的关系进行了研究。高倩等(2009)系统地研究了瓯江口水域浮游动物群落组成、多样性特征以及该水域浮游动物分布特征与环境因子的关系。然而,对于瓯江口以南河口的浮游动物研究较少。国际上对于河口浮游动物的相关研究也一直是一个热点,例如:Gaughan等(1995)研究了Wilson河口水域盐度变化与优势类群绕足类的种类多样性之间的关系。Froneman(2002)研究了南非河口Kasouga的水动力条件对河口浮游动物的影响。Laprise等(1994)研究了环境变异对美国圣劳伦斯河口浮游动物分布的影响。

与浙江省其他水域相比,飞云江口海域的浮游动物亚热带群落的特征更为明显。本文根据2010年11月、2011年1月和5月3个航次的调查资料,对飞云江口附近水域秋冬春三季的浮游动物分布特征进行了研究,以期对浙江南部河口海域浮游动物的生态特征有一个基本了解,促进亚热带浮游动物群落研究进一步深入。

1 材料与方法

1.1 采样时间、区域和方法

2010年11月1—7日(秋季)、2011年1月8—17日(冬季)与5月3—11日(春季)于飞云江口附近水域(27°46'N—27°75'N和120°66'E—121°01'E)租用浙洞渔2206#渔船进行了3个航次的海洋生态环境调查,春、秋航次设置14个测站(1~14),冬季航次于在江口处增设一个站位15测站(图1)。调查水域大体水深介于4~10 m,仅个别站位稍深于10 m。

浮游动物采集及处理方法均按照《海洋调查规范—海洋生物调查》(国家质量技术监督局,2007)的规范进行操作。浮游动物样品采集用浅水I型浮

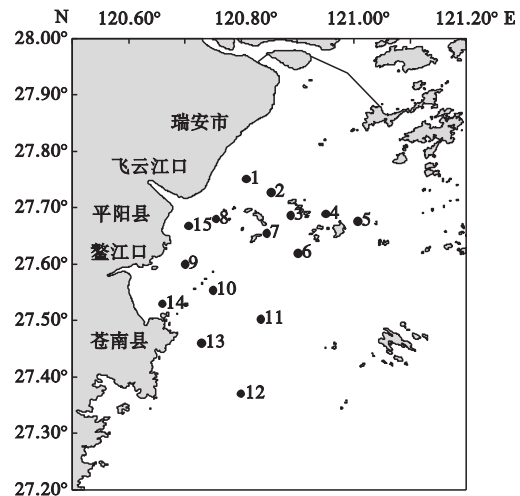


图1 采样站位示意图
Fig.1 Sampling stations

游生物网(口径50 cm、筛绢CQ14、孔径0.505 mm),自海底至海面垂直拖拽获得浮游动物样品。网采所获样品经5%福尔马林溶液固定,带回实验室,剔除样品杂质后进行分类鉴定、计数和称重(生物量为湿重,单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;个体丰度单位为 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$)。盐度、水温和水深使用温盐深仪(conductivity-temperature-depth,CTD)于网采现场直接测出。

1.2 数据处理

优势种计算采用如下自编程序(徐兆礼等,1989),优势度公式:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, n_i 为第*i*种类在各站出现的总丰度($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$), N 为所有物种在各站出现的总丰度($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$), f_i 为第*i*种类在各站出现的频率。将浮游动物优势度 $Y \geq 0.02$ (徐兆礼等,1989)的种界定为优势种。

采用Shannon多样性指数(Shannon,1948):

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

式中, S 为样品中浮游动物的种类数, p_i 为物种*i*的个体占群落中总个体的比例,来计算群落的物种多样性指数。

丰富度公式(赵志模等,1984):

$$d = (S-1) \ln N$$

式中, S 为种类数, N 为总丰度。

用Surfer软件绘制站位、盐度、种类数和优势种的丰度等空间分布图,采用SPSS软件对多样性指

数进行方差分析,采用 Excel 软件分析处理部分数据并绘制相关柱状图。利用表层温度、盐度作为自变量,总丰度、总生物量、种类数以及多样性指数分别作为因变量,利用 DPS 软件对它们做逐步回归分析。

采用逐步回归分析优势种对总丰度变化的影响,以各优势种丰度为自变量,总丰度为因变量,根据 P 值 (<0.05) 筛选出对总丰度回归方差贡献显著的优势种,然后计算标准回归系数 (β)。标准回归系数作为总丰度贡献指数值用于研究各优势种对总丰度变化的影响(田丰歌等,2012a) 具体计算方法参照文献(中国科学院计算中心概率统计组,1979)。

2 结果与分析

2.1 温度和盐度特征

调查水域水团秋季平均表温为 $22.30\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度范围为 $17.00\sim 24.90\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均盐度为 26.44 ,盐度范围 $23.00\sim 28.00$ 。冬季,平均表温为 $8.58\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度范围 $6.80\sim 11.10\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均盐度为 20.89 ,盐度范围为 $18.53\sim 22.10$;春季,平均温度上升至 $19.59\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度范围为 $17.7\sim 22.20\text{ }^{\circ}\text{C}$;平均盐度下降至 24.23 ,盐度范围为 $20.20\sim 27.90$ (图2)。

2.2 浮游动物种类组成及多样性分布

飞云江口附近水域秋冬春三季共鉴定出浮游动物 60 种,分属于 11 大类,其中 桡足类种类最多,其次为腔肠动物,再次为浮游动物幼体。秋季检出浮游动物 9 大类 42 种,冬季检出 5 大类 20 种,春季检出 8 大类 34 种。其种类数水平分布如图 3 所示,秋季种类数呈现由近岸一侧较少向离岸一侧较多的趋势,但是沿飞云江径流冲刷自江口向外侧呈现相反分布趋势。冬季浮游动物种类数整体呈现自近岸

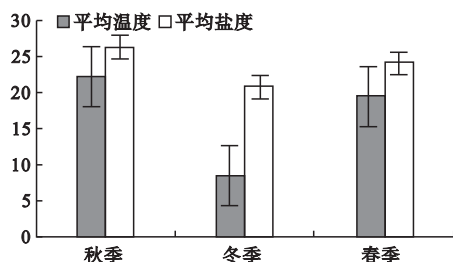


图2 飞云江口附近水域表层海水平均温度和平均盐度(标准误差 SE)

Fig.2 Average surface water temperature and salinity in surrounding area of Feiyun estuary

向离岸方向逐渐增多的趋势。春季,浮游动物种类数在江口北侧岛群之间出现高值中心且呈现有近岸向离岸逐渐增多的趋势;调查水域南侧,则呈现自北向南浮游动物种类数逐渐递增的趋势。

从浮游动物多样性和种类数水平分布上来看,秋季多样性指数的高值区位于调查水域的 12 号站,这与种类数的分布趋势基本一致。冬季,浮游动物种类数的最高值出现于调查水域东南部的 10 号和 11 号站位但由于中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 在 10、11 号站位大量聚集,降低了该区域的多样性指数,所以冬季多样性指数的最高值出现在调查水域北侧岛群之间的 1、4 号站位附近水域;春季,种类数较大的 3 个站位分别为北部岛群间的 4 号站位、飞云江口外的 8 号站位和南部的 13 号站位,但由于中华哲水蚤在 4 号和 13 号站位大量聚集降低了这 2 个区域的多样性指数,所以春季多样性指数的最高值出现在 8 号站位附近海域。另外由于嵎山秀氏水母 (*Sugiura chengshanense*) 在 10 号站位大量出现,成为该站位占绝对优势的种类,使得多样性指数在 10 号站位附近出现了一个明显的低值区(图3)。

从多样性指数和丰富度数值上看(图4),秋季为三季中浮游动物多样性指数最高的季节,均值为 2.45,变化范围为 1.08~3.57。其次为春季,多样性指数均值仅次于春季为 2.06,变化范围为 0.70~3.59。冬季多样性指数均值为 1.31,为三季最低,最低值仅为 0.40;从丰富度上看,秋季和春季较为接近,均值分别为 1.71 和 1.65,冬季的丰富度最低,均值仅为 0.92。整体,多样性指数和丰富度均呈现按照秋、春、冬三季递减的趋势。

2.3 浮游动物总丰度分布特征

从总丰度来看,秋季调查水域浮游动物丰度范围为 $30.00\sim 2170.00\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$,平均丰度为 $221.69\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$ (图5)。丰度高峰出现在飞云江外江口近岸的 8 号站,针刺拟哲水蚤 (*Paracalanus aculeatus*) 占据绝对主导地位。此外,位于飞云江口北侧岛群之间站位的丰度也相对较高。

冬季,调查水域浮游动物丰度范围为 $1.42\sim 60.00\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$,丰度整体分布比较均匀,以中华哲水蚤为主要种类。平均丰度明显低于春、秋季仅为 $19.52\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$,丰度最高值位于江口北侧近岸的 1 号站位附近水域,为 $60.00\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

春季浮游动物丰度范围为 $4.38\sim 479.00\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$,平均丰度为 $137.50\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$ 。丰度最高值出现

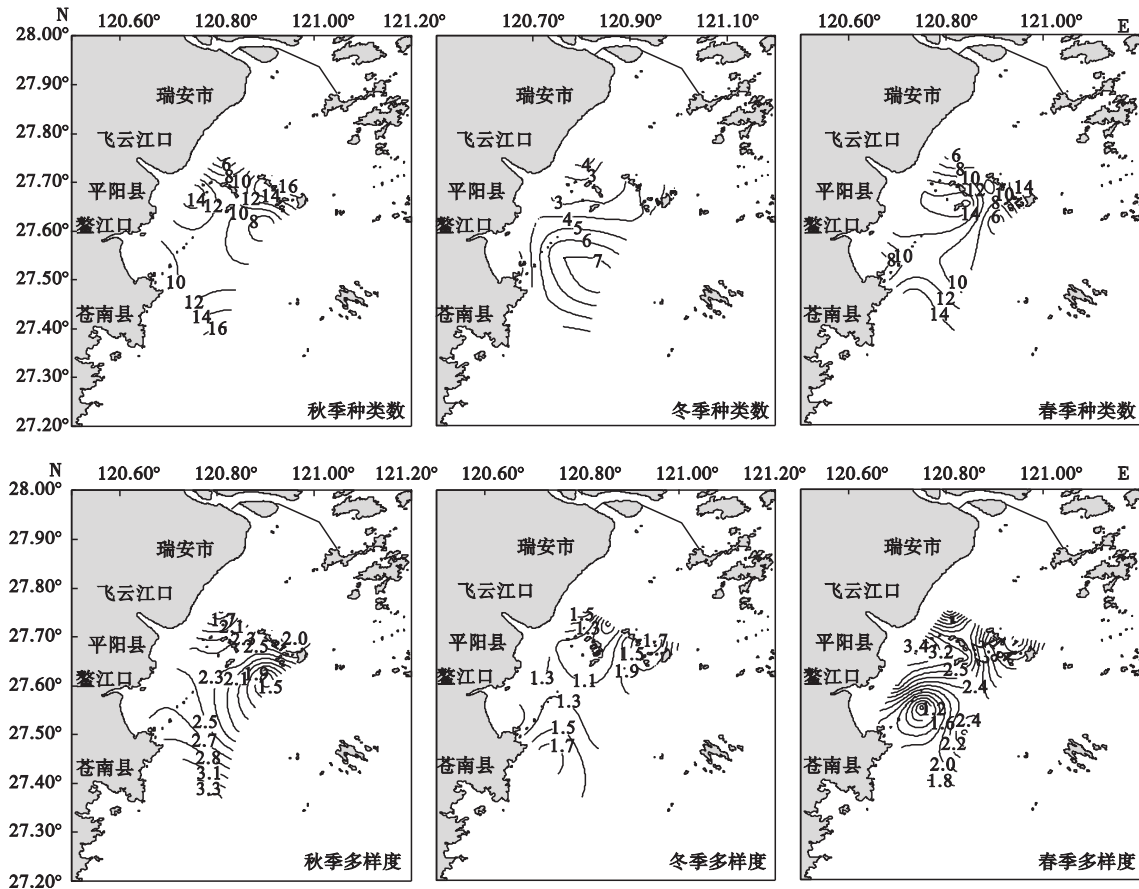


图3 浮游动物多样性指数与种类数的水平分布示意图

Fig.3 Horizontal distribution of zooplankton's diversity index and species number

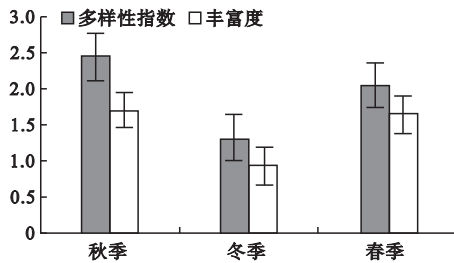


图4 不同季节浮游动物多样性指数与丰富度均值(标准误差 SE)

Fig.4 Diversity index and species richness of zooplankton in different seasons

在南部的10号站位为 $479.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,其中崂山秀氏水母占绝对优势地位。13号站位丰度 $432.14 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,排在丰度第二位置,主要种类是中华哲水蚤。

2.4 优势种分布及对总丰度分布的贡献

三季共有优势种8种。其中秋季优势种为6种,冬季优势种2种和春季优势种4种(表1)。从优势度上看,冬、春季皆以中华哲水蚤为占绝对优势

的种类。尤其是冬季,中华哲水蚤的优势度高达0.62,远高于其他种类。秋季调查海域优势种种类数最多且趋于相对均匀,以针刺拟哲水蚤占主导地位,优势度为0.37;百陶箭虫(*Sagitta bedoti*)其次,优势度为0.14。其他种类优势度均较低不到0.1。

从对总丰度的贡献上看,秋季对总丰度有显著贡献($P < 0.05$)的有针刺拟哲水蚤、背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)和中华哲水蚤3种。秋季没有出现对总丰度贡献极其显著($P < 0.01$)的优势种,β值较大的2个种为针刺拟哲水蚤和百陶箭虫,分别为0.40和0.45,其他种类的β值均 < 0.10 (表1);冬季的2个优势种,中华哲水蚤和针刺拟哲水蚤均对总丰度的贡献极显著,其中又以中华哲水蚤占绝对主导地位。β值分别为0.83和0.44。春季,对总丰度贡献极显著的有中华哲水蚤、崂山秀氏水母和球形侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*),其中又以中华哲水蚤和崂山秀氏水母贡献最大,β值分别为0.64和0.41。而百陶箭虫对总丰度的贡献不显著。

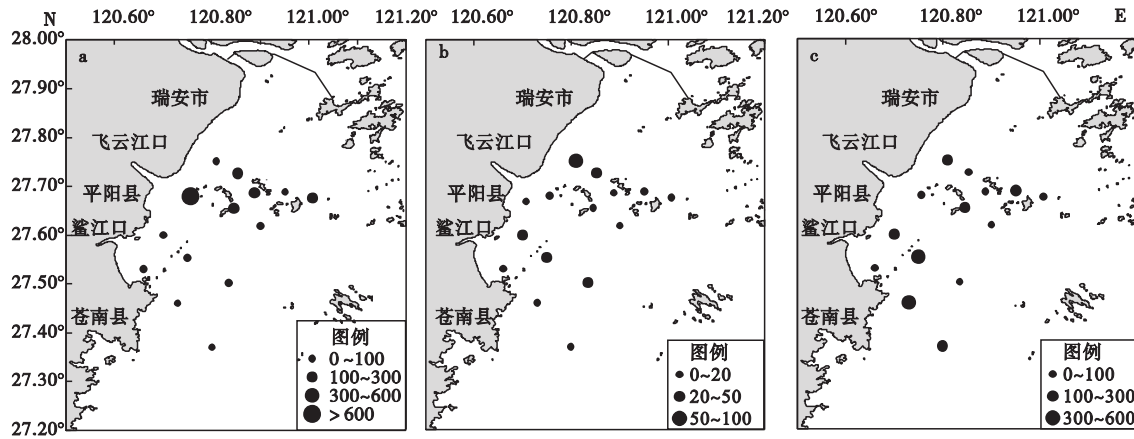


图5 不同季节浮游动物单位丰度分布点示意图

Fig.5 Horizontal distribution of total abundance of zooplankton in different seasons

a. 秋季浮游动物总丰度分布 b. 冬季浮游动物总丰度分布 c. 春季浮游动物总丰度分布。

表1 优势种 ($Y \geq 0.02$) 的优势度 (Y)、平均丰度 (\bar{x}) ($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$) 及对总丰度的贡献 (β 为标准回归系数)

Table 1 Dominance (Y), average abundance (\bar{x}), and contribution to total abundance of dominant species

优势种	秋季				冬季				春季			
	Y	\bar{x}	β	P	Y	\bar{x}	β	P	Y	\bar{x}	β	P
针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>	0.37	103.96	0.40	0.03	0.14	3.62	0.44	<0.01	-	-	-	-
百陶箭虫 <i>Sagitta bedoti</i>	0.14	35.24	0.45	0.08	-	-	-	-	0.03	5.26	0.08	0.14
背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	0.09	26.97	0.08	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	0.05	16.53	0.03	0.57	-	-	-	-	-	-	-	-
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.03	9.90	<0.01	0.33	0.62	12.2	0.83	<0.01	0.31	60.44	0.64	<0.01
精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	0.02	5.84	0.05	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
嵎山秀氏水母 <i>Sugiura chengshanense</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09	33.41	0.41	<0.01
球型侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	6.77	0.21	<0.01

2.5 重要种类丰度分布

将对总丰度贡献极显著, β 值 > 0.30 的优势种类称为重要种类(田丰歌等, 2012a)。秋季为针刺拟哲水蚤和百陶箭虫; 冬季为中华哲水蚤和针刺拟哲水蚤; 春季为中华哲水蚤和嵎山秀氏水母。

秋季, 针刺拟哲水蚤和百陶箭虫的平均丰度分别为 103.96 和 35.24 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。针刺拟哲水蚤的丰度分布较不平均, 在靠近飞云江口水域的 8 号站位丰度值高达 1115.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 其他站位尤其是东南部站位的丰度值都较低, 除了北部岛群之间的 3 号和 6 号站位以外, 丰度值都低于 50.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。秋季百陶箭虫的平均丰度值为 35.24 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 丰度以 8 号站位为高值中心, 为 395.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 自此向外侧水域呈逐渐降低趋势。

冬季, 浮游动物整体丰度水平较低, 中华哲水蚤和针刺拟哲的平均丰度分别为 12.20 和 3.62 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。中华哲水蚤丰度的最高值出现在 11 号站位, 为 36.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此外, 邻近的 10 号站位以及调查水域北部的 1 号和 2 号站位同样是中华哲水蚤丰度较高的站位。针刺拟哲水蚤丰度最高只出现在 1 号站位, 为 20.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其他站位针刺拟哲水蚤丰度均不足 10.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

春季, 中华哲水蚤的平均丰度值升到 60.44 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。丰度的最高值出现在南部水域 13 号站位, 为 280.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。北部岛群中 4 号站位中华哲水蚤的丰度也较高, 为 248.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。嵎山秀氏水母的丰度分布较不均匀, 在 10 号站位丰度值高达 432.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此外, 除了 7、9、11 和 12 号站

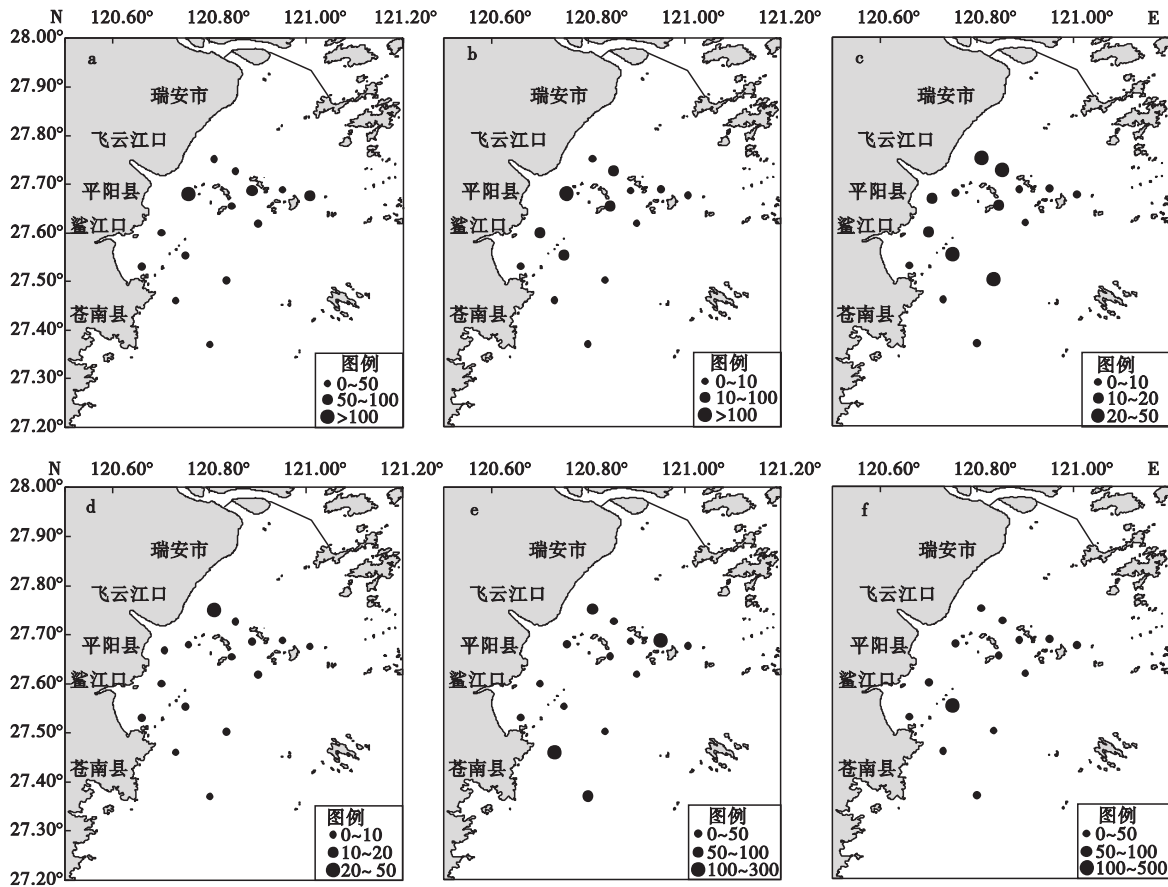


图6 重要种类的丰度($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$) 分布示意图

Fig.6 Horizontal distribution of important species in different seasons

a. 秋季针刺拟哲水蚤丰度 b. 秋季百陶箭虫丰度 c. 冬季中华哲水蚤 d. 冬季针刺拟哲水蚤丰度 e. 春季中华哲水蚤丰度 f. 春季嵯山秀氏水母丰度。

位有少量出现,其他站位均未出现嵯山秀氏水母。

3 讨论

3.1 浮游动物数量分布和水团的关系

浮游动物的平面分布往往是研究区域的水团分布的主要指示。在飞云江口附近海域,东北受浙江沿岸的浙闽沿岸流的影响,东南有来自台湾暖流北上带来的高温高盐水,西部有来自飞云江的淡水径流。各个水团随季节变化此消彼长共同作用于研究水域,对该水域浮游动物数量分布产生相应的影响。

秋季,研究水域浮游动物数量分布受飞云江径流、浙江沿岸流和台湾暖流3个水团的共同影响。其中,近岸水域主要受飞云江径流和浙江沿岸流影响,在飞云江口附近形成一个冲淡水团。受此冲淡水团影响,针刺拟哲水蚤、百陶箭虫和太平洋纺锤水蚤等适应较低盐度的近海种出现了明显的聚集。例如,在飞云江口外的8号站位针刺拟哲水蚤、百陶箭虫的丰度分别达到了1115.00和395.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$,

因而是该季节各站位总丰度的最高值。在外侧海域,受北上的台湾暖流影响,出现了以精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*)、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)和亚强次真哲水蚤(*Subeucalanus subcrassus*)等亚热带外海种(高倩等,2009;孙鲁峰等,2013),这些种主要分布于浙江沿岸流与台湾暖流交汇偏暖水一侧,但其丰度远低于近海种类,平均丰度不足10.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。与此同时,外部站位例如6、11和12号站位针刺拟哲水蚤、百陶箭虫的丰度由于受高盐度的外海水的影响,明显低于近岸水域,分别不足30.00和5.00 $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (图6)。因此造成外侧海域浮游动物丰度远远低于近海水域浮游动物丰度。由此可见,调查海域浮游动物丰度整体呈现以近岸河口处为高值中心,数量逐渐向外递减的趋势,主要是由于近岸海域受到冲淡水影响,外侧海域受到暖流影响造成的。

冬季,浮游动物丰度分布主要受低温低盐的浙江沿岸流影响。强劲的东北季风起到促进浙江沿岸

流南下和阻止台湾暖流北上的作用,从而使浙江沿岸水的影响范围扩大(张彩云等,2005)。同时冬季是飞云江的枯水期,径流较小,因此冬季研究水域基本全部处于低温的沿岸流影响之下。受此低温水团影响,冬季平均丰度仅为 $19.52 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,明显低于其他季节。冬季浮游动物优势种以典型的近岸暖温种中华哲水蚤为主,其分布趋势以近岸水域为高值中心,向外侧其丰度逐渐降低。这样的分布规律,以往的文献也曾有报道(田丰歌等,2012a)。总丰度高值位于江口北侧的1号站位为 $60.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,其中以中华哲水蚤($35.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$)为主,针刺拟哲水蚤($25.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$)其次。外侧站位例如5号、6号和12号站位总丰度很低均不足 $10.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (图5)。由此可见,沿岸流的控制以及适应于沿岸流影响的中华哲水蚤为主要优势种是造成冬季研究水域浮游动物丰度分布差异的主要原因。

春季,浮游动物丰度的分布主要受到台湾暖流和沿岸流的共同影响,呈现两水团交汇区丰度高,交汇区两侧丰度较低的现象。尽管春季浙江沿岸流有所减弱,台湾暖流势头较冬季略有增强但影响力总体尚弱(孙鲁峰等,2013),因此研究水域近海水团仍处于浙江沿岸流与河口冲淡水的影响之下,沿岸流带来冲淡水和营养盐使得近岸水团呈现出水温低、盐度低、营养高的特点。受此低温水团的影响,近岸浮游动物仍以暖温带低盐性的近海种为主,中华哲水蚤在沿岸站位的丰度对应冬季相应站位均有所上升,以1号站位为例,中华哲水蚤丰度从冬季 $35.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 到春季 $80.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (图6);调查区外部水团受高温高盐的台湾暖流影响,呈现盐度高、营养盐低的特点,致使外海种略有增多但其丰度仍然处于较低水平,例如,5号站位长尾住囊虫(*Oikopleura longicauda*)的丰度仅 $1.25 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,锥形宽水蚤(*Temora turbinata*)在12号站位丰度不足 $4.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$;低温低盐的沿岸水向外延伸的水舌与台湾暖流带来的高温高盐水交汇,形成混合水团区。在混合水团区,水温相对适宜、营养盐较丰富,因此在沿岸流与台湾暖流的交汇混合水团区偏沿岸流一侧形成了一条高丰度带,这与王春生等(1996)研究得出的高生物量区通常出现在不同海流、水团的交汇锋面和黑潮次表层水的涌升区的结论吻合。春季浮游动物丰度最高的4个站位4、7、10和13号站位均在此混合水团区(图5),这4个站位的丰度均高于春季浮游动物总丰度的平均值($137.50 \text{ ind} \cdot$

m^{-3}),以中华哲水蚤和嵊山秀氏水母等暖温种为主。由此可见,春季调查海域浮游动物丰度分布特征与沿岸流和台湾暖流两大水团的交汇密切相关。浮游动物数量的变化与各个水团此消彼长的动态季节性变化息息相关。

3.2 重要种类的丰度对总丰度变化的影响

群落重要种的分布特征往往反映了水环境的季节变化。优势种对总丰度变化的回归贡献能够反映重要种类的数量对总丰度变化的影响。因此,参照优势种类回归贡献率的高低,可以衡量该种类的分布对形成总丰度分布特征的影响的大小。

中华哲水蚤是对冬、春两季总丰度分布特征均产生较大贡献的种类。其对总丰度变化的贡献值 β 在两季分别达到0.62和0.64。在冬季,中华哲水蚤是绝对优势种,其丰度分布主导了冬季浮游动物的总丰度分布。在春季,嵊山秀氏水母也是对总丰度分布特征产生较大贡献的种类, β 值为0.41。但是,其除了在10号站大量出现(丰度为 $432.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$)对总丰度产生了一定的影响外,仅在附近4站有少量出现且丰度均不足 $15.00 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$,对总丰度影响不大。因此,春季浮游动物总丰度的分布特征基本与中华哲水蚤的分布特征相一致。由此可见,在冬、春两季,浮游动物总丰度所形成的分布特征,主要受到中华哲水蚤分布的影响。这都显示出在冬春两季,研究水域属于暖温带海域,水温、盐度等环境因素适应暖温带近海种类的生活。

秋季,尽管各种类的优势度相差不十分显著,但是百陶箭虫和针刺拟哲水蚤的 β 值仍明显大于其他种类,因此是秋季影响浮游动物总丰度变化的最主要优势种。秋季亚热带近海种百陶箭虫和针刺拟哲水蚤的丰度最高值都出现在飞云江外江口的8号站位,以此为中心向外部水域逐渐呈现降低的趋势,这与秋季浮游动物总丰度的分布特征相一致。可见,在秋季,百陶箭虫和针刺拟哲水蚤的分布对浮游动物总丰度的分布特征起到了最主要的作用。此外,同季节的优势种还有亚热带近海种背针胸刺水蚤、太平洋纺锤水蚤和亚热带外海种精致真刺水蚤3种亚热带种(田丰歌等,2012b), β 值分别为0.08、0.03和0.05。背针胸刺水蚤、太平洋纺锤水蚤的分布趋势也是由近岸向外侧海域递减,精致真刺水蚤则主要分布于外侧海域。这显示出,在秋季,研究水域据有亚热带海域特征,近岸海域受沿岸流及飞云江径流影响亚热带近海种聚集且向外侧递减,外部海域

以亚热带外海种为主但数量较少。

各季节重要种类所呈现丰度分布规律,反映了水环境的季节变化特征。此外,还与各种类的生态适应性有着直接的联系。

3.3 重要种类的生态适应及其影响

浮游动物数量的变化在很大程度上受到重要优势种生态适应性的影响。秋季最主要的优势种为亚热带近海种针刺拟哲水蚤和百陶箭虫,冬季为暖温带近海种中华哲水蚤和针刺拟哲水蚤,春季为暖温带近海种中华哲水蚤和崂山秀氏水母。

百陶箭虫和针刺拟哲水蚤同属于暖水性较强的种类。根据徐兆礼等(2005)对东海毛颚类优势种的研究,在浙南近海百陶箭虫为秋季毛颚类第一优势种,其高丰度区均接近于近岸海域,即咸淡水团与外海水团交汇处。此外百陶箭虫最适温度在 21°C 左右不适合高温环境因此丰度分布呈现自近岸低温区向外部高温区递减的趋势,这两方面特征与本文的调查研究结果一致;针刺拟哲水蚤虽然是适温适盐较广的种类,但更偏向于近海暖水性类型。本文调查显示在秋季针刺拟哲水蚤的较高丰度区主要分布于近岸河口冲淡水区这与高倩等(2009)关于瓯江口水域浮游动物的研究相符合。中华哲水蚤为典型的近岸暖温种,适宜生活于低温低盐的近岸水团中。温度是其主要限制因子(Uye, 2000),适宜温度范围为 $8\sim 20^{\circ}\text{C}$ (刘桂梅等, 2002), 20°C 已接近其适宜生活和生殖的上限(田丰歌等, 2012a)。Pu等(2004)研究表明,在 18°C 的水温环境中,中华哲水蚤能较好的生存,但是夏季 27°C 的水温对其有明显的致死效应,可见较高的水温不利于其生长和繁殖。根据徐兆礼(2009)对东海水螅水母环境适应的研究,崂山秀氏水母属于暖温带近海种,最适温度低于 20°C ,其高数量主要出现于春季水温较低的浙江近海。这与本文调查显示崂山秀氏水母高丰度区位于浙江沿岸流与台湾暖流交汇处偏近岸冷水一侧的现象相一致。

秋季,亚热带近海种百陶箭虫和针刺拟哲水蚤的生态适应性使它们在飞云江口外海域聚集且向外递减分布。冬季,包括中华哲水蚤在内的各种浮游动物对冬季低温海水的不适应是导致冬季调查海域浮游动物丰度低的重要原因。春季,中华哲水蚤和崂山秀氏水母在温盐度适应性的驱动下于沿岸流和台湾暖流的交汇区域形成高丰度带。由此可见,在飞云江口水域,重要种类的生态适应性对各季节浮

游动物数量变化产生重要影响。

3.4 水团变化对多样性的影响

调查水域水团变化对浮游动物多样性的影响较好地反映在各个多样性指标上。秋季浮游动物的多样性指数均值最高,其次是春季,冬季的多样性指数均值最低,这与飞云江口附近水域季节性水团变化密切相关。

秋季,研究水域主要受到台湾暖流以及沿岸流影响,此时,飞云江径流量也相对较大。沿岸流带来营养丰富的冲淡水团与台湾暖流北上的高温高盐水交汇使研究水域营养丰富,且此时研究水域温度盐度也都处于较高的水平,适宜大部分浮游动物种类生存,表现为秋季亚热带种类数占据相当大的比例(60%)。因此,秋季研究海域浮游动物种类数及优势种类数均为三季最高,丰富度和多样性指数也是三个季节中最高的。

冬季,沿岸流势力增强,研究水域主要由低温低盐的沿岸流控制,而浮游动物的种类数也最少,这是由于浮游动物对低温环境的不适应造成的。由于冬季调查水域浮游动物种类数较少且优势种中华哲水蚤在其中占据绝对主导地位,所以冬季的多样性指数在三个季节中最低。

春季,飞云江口附近水域一定程度上仍受沿岸流控制,水温仍处于相对较低的水平,因此浮游动物群落仍以暖温种类为主。但由于受到台湾暖流北上的影响,海水温度较冬季有明显上升,此时浮游动物对水温因素的适应表现为部分适应,主要表现为浮游动物种类增加和丰度升高(田丰歌等, 2012a),尤其是中华哲水蚤的丰度较冬季有大幅提升,并且以崂山秀氏水母为代表的胶质浮游动物数量有了大幅提升。虽然春季中华哲水蚤和崂山秀氏水母的丰度在浮游动物中占有绝对优势且分布不均匀,但春季的种类数要远高于冬季,因此春季的多样性指数仍然维持在一个较高的水平。

浮游动物种类数因其适应属性而随季节性水团的变化而变化,秋季研究水域暖水种居多,冬季、春季浮游动物以暖温种为主。

致谢 沈晓民为本文的写作给予大量的指导,陈佳杰、孙鲁峰、田丰歌等帮助采集样品,特此一并谨致谢忱。

参考文献

高倩,徐兆礼. 2009. 瓯江口夏、秋季浮游动物种类组成及其多样性. 生态学杂志, 28(10): 2048-2055.

- 国家质量技术监督局. 2007. 海洋监测规范第6部分: 海洋生物调查(GB 12763.6-2007). 北京: 中国标准出版社.
- 黄 备, 王婕妤, 沈明富, 等. 2012. 浙江北部海域春季浮游动物的群落结构研究. 中国环境监测, **28**(4): 64-68.
- 刘桂梅, 孙 松, 王 辉, 等. 2002. 春秋季节黄海海洋锋对中华哲水蚤分布的影响. 自然科学进展, **12**(11): 1150-1154.
- 苏纪兰, 袁业立. 2005. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社.
- 孙鲁峰, 柯 昶, 徐兆礼, 等. 2013. 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. 生态学报, **33**(6): 1811-1821.
- 孙鲁峰, 柯 昶, 徐兆礼, 等. 2013. 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. 生态学报, **33**(6): 1811-1821.
- 田丰歌, 徐兆礼. 2012a. 福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系. 生态学报, **32**(4): 93-100.
- 田丰歌, 徐兆礼. 2012b. 福建中部近海浮游动物生态特征与水团的关系. 热带海洋学报, **31**(6): 107-114.
- 王春生, 何德华, 刘红斌, 等. 1996. 东海东南部浮游动物生物量的分布特征. 海洋学报, **18**(3): 66-77.
- 王婕妤, 唐静亮, 胡颢琰, 等. 2008. 浙江近岸海域浮游动物的生态分布特征. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, **27**(4): 384-389.
- 徐兆礼, 陈亚瞿. 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鱼参渔场的关系. 生态学杂志, **8**(4): 13-15.
- 徐兆礼, 陈亚瞿. 2005. 东海毛颚类优势种及与环境的关系. 中国水产科学, **12**(1): 76-82.
- 徐兆礼. 2009. 东海水螅水母环境适应与生态类群. 应用生态学报, **20**(1): 177-184.
- 张彩云, 商少凌, 陈德文, 等. 2005. 冬季浙闽沿岸水分布的短期变动与风的关系初探. 遥感学报, **9**(4): 452-458.
- 赵志模, 周新远. 1984. 生态学引论. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社.
- 中国科学院计算中心概率统计组. 1979. 概率统计计算. 北京: 科学出版社.
- Froneman PW. 2002. Response of the plankton to three different hydrological phases of the temporarily open/closed Kasouga Estuary, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**: 535-546.
- Gaughan DJ, Potter IC. 1995. Composition, distribution and seasonal abundance of zooplankton in a shallow, seasonally closed estuary in temperate Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **41**: 117-135.
- Laprise R, Dodson JJ. 1994. Environmental variability as a factor controlling spatial patterns in distribution and species diversity of zooplankton in the St. Lawrence Estuary. *Marine Ecology Progress Series*, **107**: 67-81.
- Pu XM, Sun S, Yang B, et al. 2004. The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. *Journal of Plankton Research*, **26**: 1049-1057.
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, **27**: 379-423.
- Uye S. 2000. Why does *Calanus sinicus* prosper in the shelf ecosystem of the Northwest Pacific Ocean. *ICES Journal of Marine Science*, **57**: 1850-1855.

作者简介 董开兴 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要研究海洋浮游动物生态学. E-mail: dongkaixing1@126.com
责任编辑 李凤芹
