

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19112

## 海南西北部近岸海域浮游动物群落结构与环境因子的关系

杨杰青, 欧阳珑玲, 唐峰华, 史贊荣, 晁敏, 王云龙

中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090

**摘要:** 根据 2016 年 11 月至 2017 年 8 月 4 个季度的调查资料, 采用冗余分析模型, 分析报道了海南西北部近岸海域浮游动物的种类组成、丰度和生物量、群落结构与环境因子之间的关系。结果表明, 4 个季度共鉴定浮游动物 7 门 113 属 215 种, 种类数秋季最多(134 种), 丰度均值冬季最高( $152.43 \text{ ind/m}^3$ ), 生物量均值冬季最高( $263.68 \text{ mg/m}^3$ ); 浮游动物种类组成、丰度和生物量与水深、浮游植物丰度、透明度、表层水温、表层溶解氧和表层总氮显著相关( $P<0.05$ ), 其中水深是关键环境因子, 其影响随季节变化而变化; 生态类群具有一定的生态分化现象, 春季、夏季热带暖水种占优, 秋季、冬季近岸暖水种占优, 各季节生态类群受控的环境因子各异。

**关键词:** 海南; 浮游动物; 生态类群; 群落结构; 环境因子

中图分类号: S931; P735

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)02-0236-14

受全球气候变暖、海洋环境污染及工程用海(风电、核电、围填海等)等多重压力作用, 近岸海域海洋环境正遭受着前所未有的破坏, 海洋生态群落结构已发生改变。浮游动物作为海洋生态系统中物质循环和能量流动的重要类群<sup>[1-2]</sup>, 对环境因子的变化具有较高的敏感性<sup>[3]</sup>, 如水温上升可致使水母类迁移和暴发<sup>[4]</sup>; 盐度和浊度是决定河口区域内浮游动物丰度分布的主要环境因子<sup>[5-6]</sup>; 污染较重的海域浮游动物以小型桡足类占优势<sup>[7]</sup>; 对于垂直尺度上浮游动物丰度的分布, 溶解氧的决定作用较为明显<sup>[8]</sup>。

海南岛处于热带北缘, 具有典型的热带海洋性气候<sup>[9]</sup>, 受北部湾环流<sup>[10]</sup>、琼东海域上升流<sup>[11]</sup>、黑潮暖流<sup>[12]</sup>及南海暖水<sup>[13]</sup>影响, 近岸海域水文条件复杂多变, 而西北部近岸海域紧邻北部湾, 其季节环流较为突出<sup>[13]</sup>(湾内春、夏季顺时针流向, 秋、冬季逆时针流向)。目前关于海南岛近岸海域浮游动物的研究已有不少, 主要集中于单一季节或局域尺度上对浮游动物生物多样性<sup>[14]</sup>、生态类

群<sup>[15]</sup>、群落结构特征<sup>[16]</sup>等的研究, 虽有部分关于群落结构与环境因子之间关系的报道, 也仅位于东部的三亚湾海域<sup>[17]</sup>, 而对于西北部近岸海域受季节环流影响较为突出的四季群落结构与环境因子之间的关系则鲜有报道。

本研究根据 2016 年 11 月至 2017 年 8 月海南西北部近岸海域 4 个季度的调查资料, 分析了该海域浮游动物种类组成、丰度和生物量、群落结构及其与环境因子之间的关系, 以期为热带海域浮游动物季节变化规律、生物多样性和环境保护提供基础数据和科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 调查时间及站位

调查范围位于海南岛西北部近岸海域: 西到东方市八所镇, 东到儋州市白马井镇(图 1)。调查分 4 个航次, 分别为 2016 年 11 月(秋季)、2017 年 2 月(冬季)、2017 年 5 月(春季)和 2017 年 8 月(夏季), 共布设 26 个站位。

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2019-05-15.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901405).

作者简介: 杨杰青(1990-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为渔业生态学与环境保护. E-mail: 513118751@qq.com

通信作者: 王云龙, 研究员, 研究方向为海洋渔业生态研究. E-mail: yunlong\_wang @hotmail.com

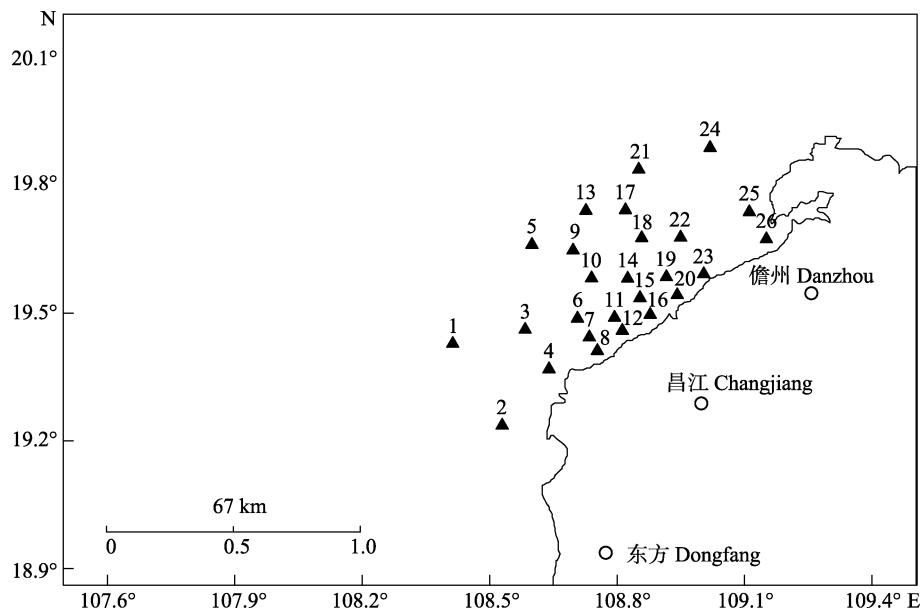


图1 本研究采样站位示意图  
Fig. 1 Map of the sampling sites in the study

## 1.2 样品采集与分析

浮游动物样品采集按《海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查》(GB/T12763.6-2007)进行<sup>[18]</sup>。水深小于等于30 m时采用浅水I型浮游生物网(网口内径50 cm, 网长145 cm, 网目0.505 mm); 水深大于30 m时采用大型浮游生物网(网口内径80 cm, 网长280 cm, 网目0.505 mm)。采用绞车由底层至表层进行垂直拖网1次, 采集后的样品立即用福尔马林溶液固定至最终溶液浓度为5%, 带回实验室在体视显微镜下分析鉴定(包括种类、个数等), 用电子天平(梅特勒 AR2140)称量总湿重, 重量精确到0.01 g。

水温、水深、透明度、盐度、pH、溶解氧等采用YSI plus型水质分析仪进行现场测定, 同步采集水样, 对总氮、总磷、悬浮颗粒物、浮游植物等项目进行分析测定, 样品处理及分析方法参照《海洋监测规范 第4部分: 海水分析》(GB17378.4-2007)<sup>[19]</sup>。

## 1.3 数据处理与分析

浮游动物丰度利用采样时的滤水体积, 以每立方米水体中的个数(ind/m<sup>3</sup>)来表示, 生物量根据各站位浮游动物总湿重, 通过滤水量来换算(mg/m<sup>3</sup>)。

采用Surfer 8绘制站位图, SPSS19.0对26个

站位的浮游动物丰度、浮游动物生物量、浮游动物种类、浮游植物丰度和水质环境因子调查数据进行统计及 Pearson 相关性分析, 通过 Species-sample 做 DCA 分析, Lengths of gradient 的第一轴数值小于 3.0, 因此采用冗余分析法(redundancy analysis, RDA)分析浮游动物种类与环境因子之间的关系, 用 PRIMER5 对群落结构的差异进行非度量多维标度分析, 并采用 ANOSIM 相似性检验群落之间的差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 种类组成

4个季度共鉴定浮游动物7门113属215种(不包括浮游动物幼体, 含未定种), 分为17大类(表1)。其中春季共鉴定7门63属111种, 夏季共鉴定7门52属94种, 秋季共鉴定7门76属134种, 冬季共鉴定7门82属113种, 各季节均以桡足类和水螅水母类占优。

### 2.2 丰度与生物量

冬季浮游动物丰度均值最高(152.43 ind/m<sup>3</sup>), 其次为秋季(124.75 ind/m<sup>3</sup>), 而春季(64.76 ind/m<sup>3</sup>)和夏季(74.44 ind/m<sup>3</sup>)较为接近。空间区域分布上, 春、夏两季丰度均值、变化幅度较为一致(图2), 高值区主要位于远岸(水深大于40 m)海域, 整体上

表 1 海南西北部近岸海域浮游动物种类组成  
Tab. 1 Species composition of zooplankton in northwest offshore of Hainan

类群 group		春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
		种类数 species number	占比例/% percentage	种类数 species number	占比例/% percentage	种类数 species number	占比例/% percentage	种类数 species number	占比例/% percentage
刺胞动物门 Cnidaria	水螅水母类 hydroidomedusae	10	9.01	8	8.51	19	14.18	20	17.70
	管水母类 siphonophorae	5	4.50	4	4.26	4	2.99	3	2.65
栉水母门 Ctenophora	栉水母类 ctenophora	1	0.90	1	1.06	2	1.49	2	1.77
甲壳动物门 Crustacean	桡足类 copepoda	57	51.35	47	50.00	74	55.22	47	41.59
	枝角类 cladocera	2	1.80	0	0	0	0	0	0
	介形类 ostracoda	3	2.70	2	2.13	5	3.73	3	2.65
	端足类 amphipoda	2	1.80	2	2.13	2	1.49	7	6.19
	等足类 isopoda	1	0.90	1	1.06	1	0.75	2	1.77
	磷虾类 euphausiacea	0	0	0	0	4	2.99	1	0.88
	糠虾类 mysidacea	0	0	0	0	3	2.24	5	4.42
	十足类 decapod	4	3.60	5	5.32	6	4.48	5	4.42
	涟虫类 cumacea	0	0	0	0	0	0	1	0.88
毛颚动物门 Chaetognatha	毛颚类 chaetognatha	10	9.01	10	10.64	7	5.22	3	2.65
环节动物门 Annelida	多毛类 polychaeta	5	4.50	3	3.19	4	2.99	5	4.42
软体动物门 Mollusca	异足类 heteropoda	1	0.90	0	0	1	0.75	0	0
	翼足类 pteropoda	6	5.41	6	6.38	1	0.75	6	5.31
尾索动物门 Urochorda	被囊类 tunicata	4	3.60	5	5.32	3	2.24	3	2.65
	总计 total	111	100	94	100	134	100	113	100
	浮游幼体 decapoda	8		7		11		11	

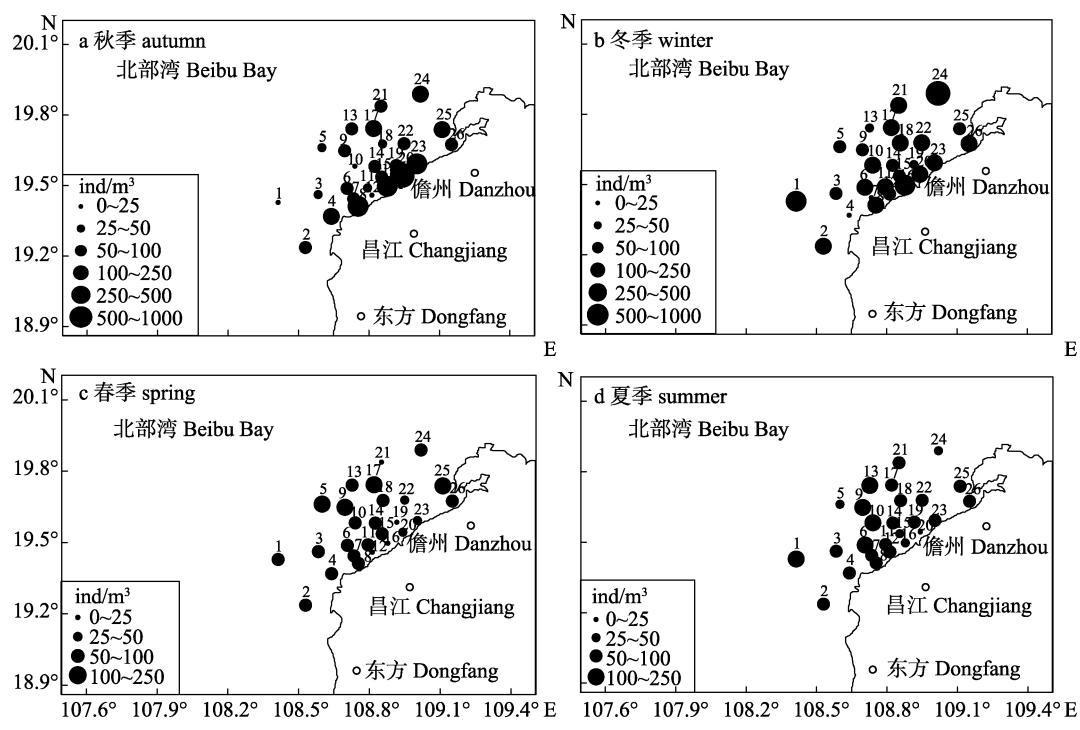


图 2 北部湾 4 个季节浮游动物丰度分布图

Fig. 2 Zooplankton abundance distribution in four seasons in Beibu Bay

呈现近岸低远岸高的特点; 秋季高值区主要位于昌江近岸(水深 10~20 m)海域, 而冬季各站位总丰度变化幅度较大, 高值点分布相对较为分散; 整体上春、夏季的丰度均值要远低于秋、冬季。

浮游动物生物量均值冬季最高( $263.68 \text{ mg/m}^3$ ), 秋季次之( $147.38 \text{ mg/m}^3$ ), 而春季( $59.13 \text{ mg/m}^3$ )和夏季( $61.45 \text{ mg/m}^3$ )较低(图 3)。整体上看, 春季和夏季生物量均值、变化幅度较为相似, 空间分布

上呈现近岸低远岸高的特点; 秋季生物量呈现近岸高远岸低的变化特点, 而冬季变化幅度大, 高值点分布较为分散; 春季、夏季的生物量均值要明显低于秋季、冬季。

### 2.3 环境因子与浮游动物种类组成、丰度及生物量相关性

Pearson 相关分析表明(表 2), 影响海南西北部近岸海域浮游动物种类组成、丰度及生物量的

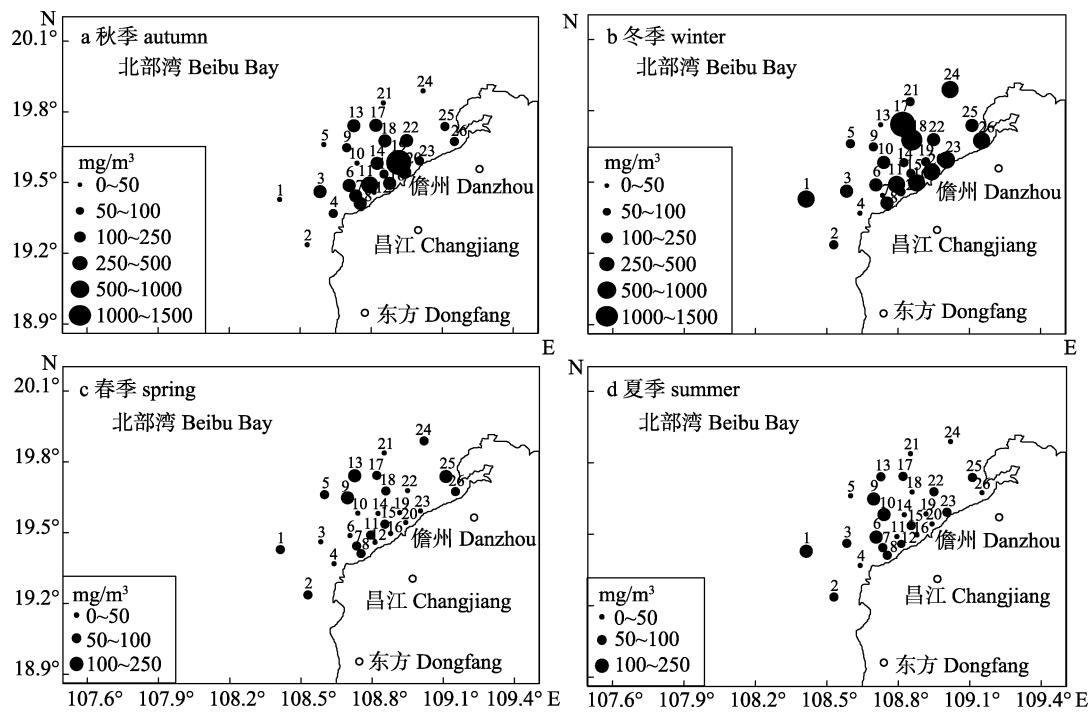


图 3 北部湾 4 个季节浮游动物生物量分布图  
Fig. 3 Zooplankton biomass distribution in four seasons in Beibu Bay

表 2 浮游动物与环境因子的相关性分析

Tab. 2 The relativity analysis of the zooplankton and the environmental factors

指标 item	春季 spring			夏季 summer			秋季 autumn			冬季 winter		
	ZA	ZB	ZS	ZA	ZB	ZS	ZA	ZB	ZS	ZA	ZB	ZS
ZB	0.839**				0.947**					0.440*		
ZS	0.553**	0.639**			0.727**	0.684**		-0.564**				
H	0.458*			0.757**	0.584**	0.571**	0.714**	-0.560**				
TT									0.435*			
PA				-0.508**	-0.427*	-0.393*						
sT	-0.508**			-0.454*								-0.419*
sDO					0.433*	0.490*						
sTN							0.519**			-0.508**	-0.529**	

注: \*代表显著相关( $P<0.05$ ); \*\*代表极显著相关( $P<0.01$ ); ZA 为浮游动物丰度; ZB 为浮游动物生物量; ZS 为浮游动物种类; H 为水深; TT 为透明度; PA 为浮游植物丰度; sT 为表层温度; sDO 为表层溶解氧; sTN 为表层总氮。

Notes: \*means significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* means extremely significant correlation ( $P<0.01$ ); ZA means zooplankton abundance; ZB means zooplankton biomass; ZS means species of zooplankton; H means depth; TT means transparency; PA means phytoplankton abundance; sT means surface temperature; sDO means surface dissolved oxygen; sTN means surface total nitrogen.

环境因子随季节变化而变化。春季浮游动物种类组成与水深极显著正相关( $P<0.01$ )，与浮游植物密度和表层温度显著负相关( $P<0.05$ )；丰度与水深显著正相关( $P<0.05$ )，与表层温度极显著负相关( $P<0.01$ )。夏季浮游动物种类组成与水深极显著正相关( $P<0.01$ )；水深、表层溶解氧与丰度、生物量显著正相关( $P<0.05$ )，浮游植物密度与丰度、生物量显著负相关( $P<0.05$ )。

秋季浮游动物种类组成与透明度显著正相关( $P<0.05$ )；影响丰度分布的主要环境因子为水深和表层总氮，与水深极显著负相关( $P<0.01$ )，与表层总氮极显著正相关( $P<0.01$ )。冬季浮游动物种类与表层溶解氧显著负相关( $P<0.05$ )；丰度、生物量与表层总氮均极显著负相关( $P<0.01$ )。

## 2.4 主要浮游动物种类与环境因子之间的关系

各季节浮游动物种类数相对较多，为减少机会种群对群落整体结构造成的影响，因此选取浮游动物出现频率大于 40% 的种类进行分析，春季选取了 18 种浮游动物(占总丰度的 74.85%)，夏季选取了 20 种浮游动物(占总丰度的 72.44%)，秋季选取了 26 种浮游动物(占总丰度的 80.46%)，冬季选取了 25 种浮游动物(占总丰度的 93.66%)，列于表 3。

通过表 4 和图 4 的 RDA 排序分析可知，春季与 RDA1 相关性较高的环境因子为水深和表层温度，与 RDA2 相关性较高的环境因子为水深、浮游植物密度和表层 pH。暖温种的中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*)、近海暖水种的锥形宽水蚤 (*Temora turbinata*) 和异尾宽水蚤 (*T. discaudata*)、

表 3 浮游动物主要种类代码及生态类群  
Tab. 3 The mainly species code and ecological groups of zooplankton

种类 species	代码 code	生态类群 eco-group	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
疣真囊水母 <i>Euphyllia verrucosa</i>	YZN	近岸暖水种 nearshore warm water species				•
半口壮丽水母 <i>Aglaura hemistoma</i>	BKZ	大洋广布种 cosmopolitan ocean species				•
两手筐水母 <i>Solmundella bitentaculata</i>	LSK	大洋广布种 cosmopolitan ocean species			•	•
拟细浅室水母 <i>Lensia subtiloides</i>	NXQ	近岸暖水种 nearshore warm water species				•
双生水母 <i>Diphyes chamissonis</i>	SSS	近岸暖水种 nearshore warm water species			•	
球型侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	QXC	近岸低盐种 nearshore low salt species			•	•
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	ZHZ	暖温种 warm temperature species	•			•
微刺哲水蚤 <i>Canthocalanus pauper</i>	WCZ	广温广盐种 eurythermal and euryhaline species	•	•	•	•
小哲水蚤 <i>Nannocalanus minor</i>	XZS	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		
普通波水蚤 <i>Undinula vulgaris</i>	PTB	热带暖水种 tropical warm water species				•
强次真哲水蚤 <i>Subeucalanus crassus</i>	QCZ	热带暖水种 tropical warm water species			•	•
亚强次真哲水蚤 <i>S. subcrassus</i>	YQC	热带暖水种 tropical warm water species	•	•	•	•
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	XNZ	近岸暖水种 nearshore warm water species		•	•	•
强额拟哲水蚤 <i>P. crassirostris</i>	QEN	近岸暖水种 nearshore warm water species			•	
狭额真哲水蚤 <i>Eucalanus subtenuis</i>	XEZ	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		
微驼隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gracilis</i>	WTL	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		•
精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	JZZ	暖水广布种 cosmopolitan warm water species	•	•	•	•
平滑真刺水蚤 <i>E. plana</i>	PHZ	暖水广布种 cosmopolitan warm water species	•	•	•	
缘齿厚壳水蚤 <i>Scolecithrix nicobarica</i>	YCH	近岸暖水种 nearshore warm water species			•	•
锥形宽水蚤 <i>Temora turbinata</i>	ZXK	近海暖水种 offshore warm water species	•	•		
异尾宽水蚤 <i>T. discaudata</i>	YWK	近海暖水种 offshore warm water species	•	•		
叉胸刺水蚤 <i>Centropages furcatus</i>	CXC	热带暖水种 tropical warm water species		•	•	
卵形光水蚤 <i>Lucicutia ovalis</i>	LXG	热带暖水种 tropical warm water species				•
伯氏平头水蚤 <i>Candacia bradyi</i>	BSP	热带暖水种 tropical warm water species			•	•

(待续 to be continued)

(续表3 Tab. 3 continued)

种类 species	代码 code	生态类群 eco-groups	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
幼平头水蚤 <i>C. catula</i>	YPT	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	TPY	近岸暖水种 nearshore warm water species		•		
小长腹剑水蚤 <i>Oithona nana</i>	XCF	近岸暖水种 nearshore warm water species			•	
伪长腹剑水蚤 <i>O. fallax</i>	WCF	近岸暖水种 nearshore warm water species			•	
灵巧大眼剑水蚤 <i>Corycaeus catus</i>	LQD	热带暖水种 tropical warm water species			•	
红小毛猛水蚤 <i>Microsetella rosea</i>	HXM	热带暖水种 tropical warm water species			•	
孟加拉童螺 <i>Lestrigonus bengalensis</i>	MJL	广温广盐种 eurythermal and euryhaline species			•	
宽额假磷虾 <i>Pseudeuphausia latifrons</i>	KEJ	广温广盐种 eurythermal and euryhaline species		•	•	
中型莹虾 <i>Lucifer intermedius</i>	ZHX	热带暖水种 tropical warm water species	•	•	•	
刷状莹虾 <i>L. penicillifer</i>	SZY	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		
正型莹虾 <i>L. typus</i>	ZXY	热带暖水种 tropical warm water species		•		
四刺节糠虾 <i>Siriella quadrispinosa</i>	SCJ	近岸低盐种 nearesore low salt species			•	
尖尾海萤 <i>Cypridina acuminata</i>	JWH	近岸种 nearshore species			•	
针刺真浮萤 <i>Euconchoecia aculeata</i>	ZCZ	近岸种 nearshore species			•	•
肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	FPJ	暖水广布种 cosmopolitan warm water species	•	•	•	•
六鳍箭虫 <i>S. hexaptera</i>	LQJ	大洋广布种 cosmopolitan ocean species	•			
百陶箭虫 <i>S. bedoti</i>	BTJ	近岸暖水种 nearshore warm water species	•	•	•	•
海龙箭虫 <i>S. nagae</i>	HLJ	暖温种 warm temperature species	•	•		
小型箭虫 <i>S. neglecta</i>	XXJ	热带暖水种 tropical warm water species	•	•		
长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i>	CWZ	广温广盐种、近岸种 eurythermal and euryhaline species, nearshore species			•	•
异体住囊虫 <i>O. dioica</i>	YTZ	广温广盐种、近岸种 eurythermal and euryhaline species, nearshore species			•	•
软拟海樽 <i>Dolioletta gegenbauri</i>	RNH	大洋广布种 cosmopolitan ocean species				•

注: 浮游动物代码同图4, •表示出现。

Note: The code of zooplankton are the same with Fig. 4, • denotes appearance.

表4 RDA 分析排序轴与环境因子相关系数  
Tab.4 Axes-environment correlation coefficients of RDA

环境因子 environmental factor	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2
H	-0.6252	-0.6155	-0.7032	-0.5092	-0.7419	0.0638	0.4251	0.0460
TT	-0.1600	0.1571	0.0192	-0.7961	0.2522	0.1339	0.5739	0.1981
PA	0.2135	0.7387	0.4320	0.3201	0.1266	-0.2057	-0.0094	-0.2092
sT	0.4865	0.2925	0.3416	-0.5707	-0.4683	0.0786	-0.2939	-0.3545
spH	0.1580	-0.4899	0.1048	-0.2241	-0.0192	0.5642	0.0641	-0.2557
sDO	-0.1446	0.2076	-0.4806	-0.2992	0.2770	0.1805	0.2560	-0.4332
sS	-0.1136	0.1066	-0.1653	0.7343	-0.0631	-0.1612	-0.5673	-0.3384
sTN	-0.2335	-0.2552	-0.2010	0.2686	0.5070	-0.4301	0.1174	-0.8174
sTP	-0.3092	-0.1583	-0.0016	-0.1033	0.1256	0.1169	-0.0936	0.1103
sSS	0.1612	-0.0753	0.0083	0.7190	0.1615	0.3716	0.2612	-0.3400

注: H 为水深; TT 为透明度; PA 为浮游植物丰度; sT 为表层温度; spH 为表层酸碱度; sDO 为表层溶解氧; sS 为表层盐度; sTN 为表层总氮; sTP 为表层总磷; sSS 为表层悬浮颗粒物。

Note: H means depth; TT means transparency; PA means phytoplankton abundance; sT means surface temperature; spH means surface potential hydrogen; sDO means surface dissolved oxygen; sS means surface salinity; sTN means surface total nitrogen; sTP means surface total phosphorus; sSS means surface suspended particulate matter.

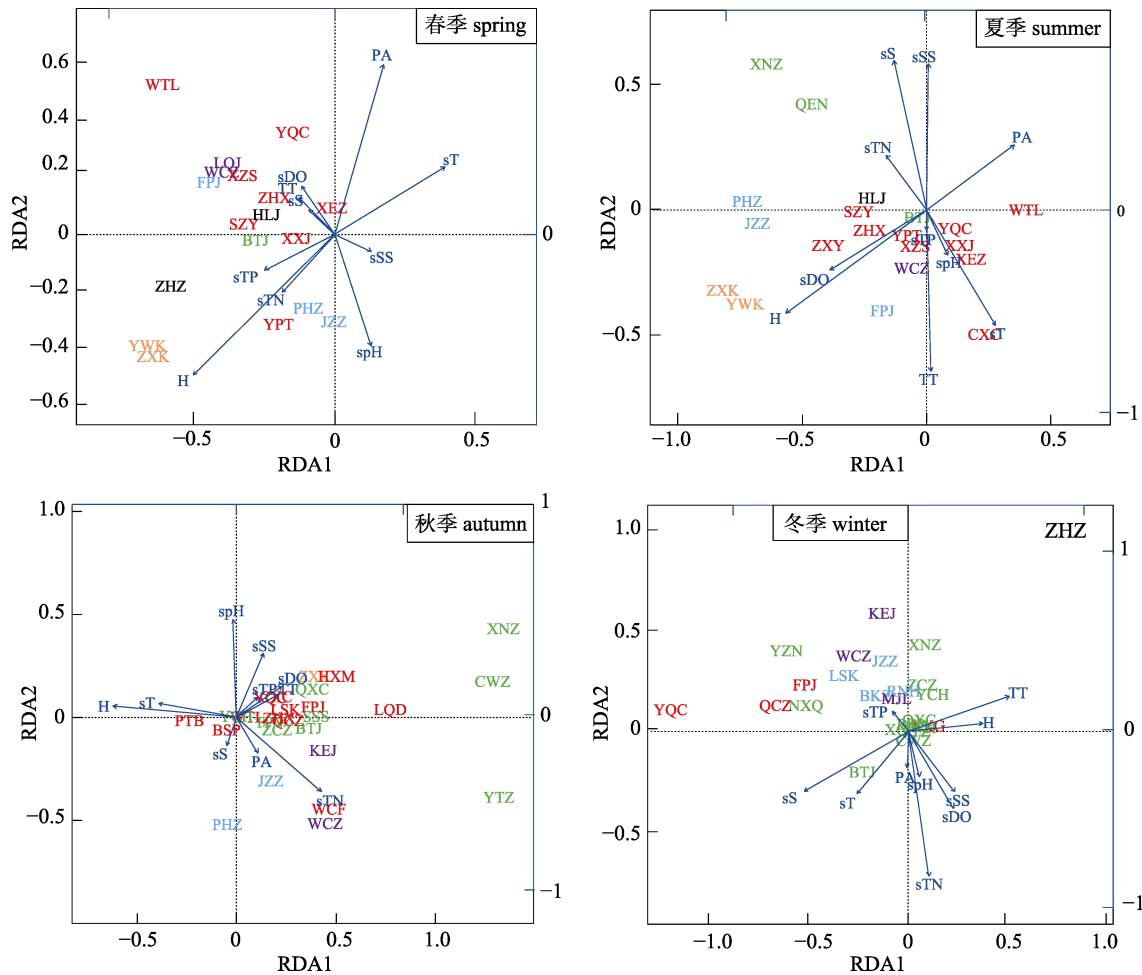


图 4 不同季节浮游动物与环境因子之间的 RDA 分析排序图  
 黑色(暖温种); 橙色(近海暖水种); 绿色(近岸暖水种、近岸低盐种、近岸种);  
 红色(热带暖水种); 蓝色(暖水广布种); 紫色(广温广盐种、大洋广布种).

Fig. 4 RDA ordination diagrams of zooplankton abundance and environmental variables in the four seasons  
 Black means warm temperature species; orange means offshore warm water species; green means nearshore warm water species, nearshore low salt species, nearshore species; red means tropical warm water species; blue means cosmopolitan warm water species; purple means eurythermal and euryhaline species, cosmopolitan ocean species.

暖水广布种的精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*)和平滑针刺水蚤(*E. plana*)等与水深正相关,与表层温度负相关,且可以看出同一生态类群种类群聚较为清晰,热带暖水种主要位于坐标轴左上方区域,受水深和表层温度的影响并不显著。

夏季与 RDA1 相关性较高的环境因子为水深、表层溶解氧和浮游植物密度,与 RDA2 相关性较高的环境因子为透明度、表层温度、表层盐度和表层悬浮颗粒物。夏季排序图中,浮游动物分布较为分散,但生态群落的集群特征仍较明显。如近岸暖水种小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)和强额拟哲水蚤(*P. crassirostris*)与表层盐度和表

层悬浮物浓度正相关,与表层温度负相关,位于排序轴左上方;暖水广布种的平滑针刺水蚤和精致真刺水蚤、近海暖水种的异尾宽水蚤和锥形宽水蚤与水深、表层溶解氧正相关,位于排序轴左侧;热带暖水种和近岸暖水种主要位于第一排序轴下方的原点附近,主要受水深、表层溶解氧、透明度和表层温度影响。热带暖水种具体因种类对环境需求的差别其环境影响因子又有所差异,如中型莹虾(*Lucifer intermedius*)、刷状莹虾(*L. penicillifer*)和正型莹虾(*L. typus*)等与水深、表层溶解氧正相关,微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)、小哲水蚤(*Nannocalanus minor*)、亚强次真哲水蚤(*S.*

*subcrassus*)、狭额真哲水蚤(*Eucalanus subtenuis*)、小型箭虫(*Sagitta neglecta*)、叉胸刺水蚤(*Centropages furcatus*)和微驼隆哲水蚤(*Acrocalanus gracilis*)等与透明度、表层温度正相关。

秋季与 RDA1 相关性较高的环境因子为水深、表层总氮和表层温度, 与 RDA2 相关性较高的环境因子为表层总氮和表层 pH。同一生态类群群聚特征较为清晰, 其中广温广盐近岸种的长尾住囊虫(*Oikopleura longicauda*)、异体住囊虫(*O. dioica*)和小拟哲水蚤主要位于排序轴最右侧, 与水深和表层温度负相关; 暖水广布种和广温广盐种微刺哲水蚤、宽额假磷虾(*Pseudeuphausia latifrons*)、平滑针刺水蚤和精致真刺水蚤等主要与表层总氮正相关; 热带暖水种和近岸种(近岸暖水种、近岸低盐种和近岸种)主要位于 RDA2 右侧, 与水深和表层温度负相关。

冬季与 RDA1 相关性较高的环境因子为透明度和表层盐度, 与 RDA2 相关性较高的环境因子

为表层总氮。群落集群仍较清晰, 生态类群较为丰富。暖温种中华哲水蚤位于排序轴右上方, 与表层温度和表层盐度负相关; 瘢真囊水母(*Euphyllora verrucosa*)、拟细浅室水母(*Lensia subtiloides*)、亚强次真哲水蚤、强次真哲水蚤(*S. crassus*)、肥胖箭虫(*S. enflata*)、软拟海樽(*Dolioletta gegenbauri*)、精致真刺水蚤、两手筐水母(*Solmundella bitentaculata*)、半口壮丽水母(*Aglaura hemistoma*)、微刺哲水蚤、小拟哲水蚤、宽额假磷虾、孟加拉蛮蝎(*Lestrigonus bengalensis*)等主要位于 RDA1 上方, RDA2 左侧区域, 与表层总氮负相关, 生态类群为近岸暖水种、热带暖水种、暖水广布种和广温广盐种; 其余则位于中心点位置, 其分布受环境因子的影响不显著。

## 2.5 群落格局

对不同季节的站位进行聚类分析(图 5), 结果显示群落结构受水深影响较为明显, 群落 a 主要是位于水深小于 25 m 的站位, 群落 b 是位于

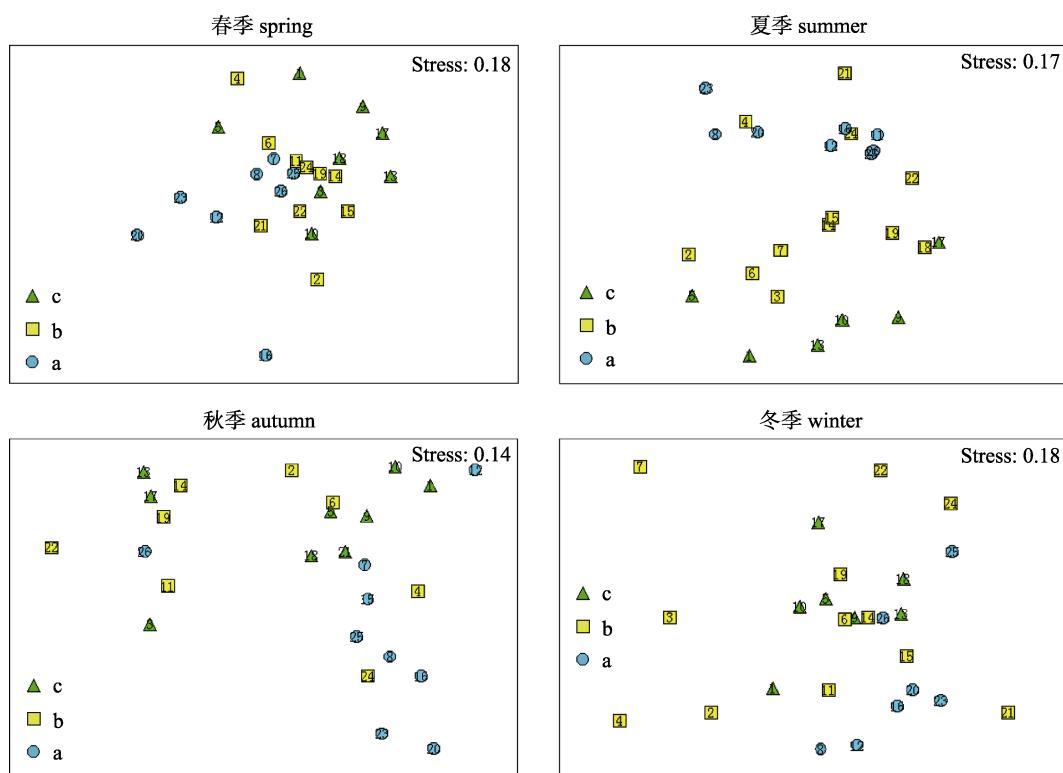


图 5 浮游动物群落非度量多维标度分析

群落 a 位于水深小于 25 m, 群落 b 位于水深介于 25 m 到 40 m, 群落 c 位于水深大于 40 m.

Fig. 5 Nonmetric multidimensional scaling ordination of zooplankton communities  
Community a locates depth below 25 meters, community b locates depth between 25 and 40 meters, community c locates depth higher than 40 meters.

水深介于 25~40 m 的站位, 而群落 c 是位于水深大于 40 m 的站位。

ANOSIM 相似性检验结果显示, 春季群落 a 和 c 的差异极显著( $P<0.01$ , 表 5); 聚类图中 b 位于 a 和 c 之间, a 和 b 差异显著( $P<0.05$ ), 但 b 和 c 差异不显著( $P>0.05$ )。由 ANOSIM 相似性检验的  $R$  值(表 5)也可以作出相同的解释 [ $R_{(a,c)}>R_{(a,b)}>R_{(b,c)}$ ],  $R$  趋向于 1 时, 两个划定群落之间差异性较大。

表 5 浮游动物丰度的群落相似性检验

Tab. 5 Results of one-way analysis of similarities  
(ANOSIM) for zooplankton communities

季节 season	群落 community	ANOSIM( $R$ )	ANOSIM( $P$ )
春季 spring	a, b	0.181	0.022*
	b, c	0.027	0.337
	a, c	0.287	0.004**
夏季 summer	a, b	0.127	0.076
	b, c	0.190	0.067
	a, c	0.761	0.001**
秋季 autumn	a, b	0.216	0.032*
	b, c	0.037	0.264
	a, c	0.216	0.019*
冬季 winter	a, b	0.044	0.276
	b, c	0.086	0.798
	a, c	0.188	0.049*

注: \* 表示两群落间差异显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $P<0.01$ )。

Note: \* and \*\* denotes significant difference ( $P<0.05$ ) and extremely significant difference ( $P<0.01$ ) between two communities.

夏季群落 a 和 c 聚类的距离较远, 因此两个群落之间差异也极为显著( $P<0.01$ ); b 的分布较为分散, 介于 a 和 c 之间, 群落 b 和 a、c 之间差异不显著( $P>0.05$ )。

秋季各群落对应站位分布相对较为分散, 群落 b 和 c 对应站位交错排列, 因此群落结构无显著差异( $P>0.05$ ), 但仍可看出 a 和 b 之间( $P<0.05$ )、a 和 c 之间( $P<0.05$ )群落界限较为清晰。

冬季各群落对应站位之间分布也较为分散, b 与 a、c 基本融为一体, 因此 b 和 a、b 和 c 之间均无显著差异( $P>0.05$ ), 但 a 和 c 之间仍具有明显的分界线, 差异较为显著( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 浮游动物种群结构及时空变化

浮游动物种类数在季节上的差别主要体现在

桡足类和水螅水母类的不同, 在其他种类相差不大的前提下, 夏季桡足类明显低于春、秋两季(表 1), 虽与冬季持平, 但水螅水母类远少于冬季。这可能因为一方面夏季严酷的生境(高温高盐的环境)限制了其他种类的生长和繁殖, 桡足类和水螅水母类生态类群相对单一(以热带暖水性和高温高盐种为主), 而其他季节近岸河口种、近岸暖水种、广温广盐种及大洋广布种等也占有一定比例, 生态类群的丰富性带来种类的多样性; 另一方面, 秋、冬两季适宜的水温及饵料生物密度可能是热带海域水母暴发的原因<sup>[20]</sup>, 因此水母种类相对较多。与同纬度海南岛北部的澄迈<sup>[14]</sup>、东寨港<sup>[15]</sup>及低纬度三亚湾<sup>[21-22]</sup>、万宁海域<sup>[23]</sup>调查相比, 相同的是各海域浮游动物种类数季节变化仍较明显, 优势类群均以桡足类和水螅水母类为主, 不同的是本海域各季节浮游动物种类数相对较为丰富, 主要原因归结于调查区域的大小、季节、海区性质的不同等。而与高纬度的北部湾<sup>[10]</sup>、南海北部近岸<sup>[24]</sup>海域相比, 本海域浮游动物种类数稍低, 但优势类群、生态群落及季节变化特点基本一致。

研究表明, 浮游动物丰度与生物量可呈现季节变化且二者具有一定相关性<sup>[25-27]</sup>, 本研究春、夏、冬季浮游动物丰度与生物量具有统计学上的相关性(表 2), 均达显著水平, 因此浮游动物丰度与生物量变化趋势(变动幅度、空间分布特征)具有较高的一致性。这种相关性和变化趋势的一致性在高纬度的北部湾海域<sup>[26]</sup>、乐清湾海域<sup>[28]</sup>及杭州湾海域<sup>[29]</sup>均有体现。秋季丰度与生物量并未显著相关, 这与该季节水母种类较多并在昌江近岸海域大量聚集不无关系。水母类对浮游动物生物量的贡献较高, 秋季丰度空间分布整体呈现近岸高远岸低的变化特征, 生物量较高的站位聚集在昌江近岸海域, 而其他站位变动不大(图 2、图 3)。另外浮游动物种类数、占优势类群的物种数量是影响丰度与生物量季节变化的关键原因, 如春、夏两季浮游动物种类数、占优势类群的物种数量较低的情况下, 丰度与生物量均值也远低于秋、冬季; 春、夏两季浮游动物种类数、占优势类群的物种数量组成一致, 各站位丰度与生物量变化幅度及空间分布特征也较一致。

### 3.2 环境因子对浮游动物种类和丰度的影响

影响浮游动物分布的关键环境因子主要有温度、盐度、溶解氧、水深、浮游植物丰度<sup>[30-33]</sup>等。但不同的浮游动物对环境的需求也各具差异, 某一环境因子对某些种类比较适宜, 而对其他种类则不然。决定本研究浮游动物种类和丰度分布的环境因子主要有水深、浮游植物密度、表层温度、表层总氮、表层溶解氧等, 但不同季节决定其分布的环境因子又各有差异。表层盐度虽未成为决定该海域四季浮游动物丰度分布的环境因子, 但在不同季节与某些种类仍具有一定的相关性, 如冬季偏好高温高盐生境的亚强次真哲水蚤和强次真哲水蚤与表层盐度呈现较强的正相关, 这在秋季的东海区也有相同的表现<sup>[34-35]</sup>。浮游动物分布状况是综合多种环境因子的结果, 物种对环境的适应也随季节变化而变化, 如春季中华哲水蚤、锥形宽水蚤和异尾宽水蚤与水深正相关, 而与表层温度负相关, 这也表明春季其主要分布于较深的下层水域; 亚强次真哲水蚤夏季受表层温度、透明度、表层盐度和表层悬浮物浓度综合作用, 与表层盐度、表层悬浮物浓度呈现负相关, 与表层温度、透明度呈现正相关, 表明夏季亚强次真哲水蚤更偏好表层温度和透明度较高的上层水域。

春、夏两季水深与浮游动物丰度呈极显著正相关(表 2、图 4), 秋季呈显著负相关, 冬季虽未达显著水准, 但仍可看出具有负相关的关系。这可从所列主要种类的生态类群及丰度占比角度给出合理解释, 春季和夏季热带暖水种、广温广盐种及广布种占比之和(分别为 72.22% 和 70.00%)高于秋、冬季(分别为 55.56% 和 52.00%), 近岸种所占比(分别为 5.56% 和 15.00%)低于秋、冬季(分别为 38.46% 和 48.00%), 且秋、冬两季近岸种丰度占比(分别为 33.45% 和 20.77%)要远高于春、夏季(分别为 3.14% 和 7.15%), 可见春、夏两季浮游动物远岸(水深大)分布较高而秋、冬两季近岸(水深小)分布较高, 水深与浮游动物丰度的相关性在东海的舟山海域也有一致的表现<sup>[36]</sup>。

另外, 表层温度和浮游植物密度对浮游动物丰度分布的影响也较为明显。春季表层温度与浮游动物丰度显著负相关, 其他各季虽未显著相关,

但对某些种类的分布又起决定性作用。这也表明春季多数种类对表层温度的适应性较为相似, 而其他各季浮游动物对表层温度的选择性较高。暖水种较暖温种而言, 对表层温度的适应随季节变化而变化, 如暖温种中华哲水蚤和海龙箭虫(*S. nagaee*)所出现季节与表层温度呈负相关, 而暖水种百陶箭虫(*S. bedoti*)、小型箭虫、中型莹虾、幼平头水蚤(*Candacia catula*)、精致真刺水蚤等在不同季节所呈正负相关性各异(夏季正相关, 其他负相关), 也可说明暖温种更偏好低温环境, 而暖水种适温范围更广。春、夏季浮游植物密度与浮游动物丰度显著负相关, 秋、冬两季与浮游植物密度的相关性虽未达显著水准, 但在表层总氮上仍能体现出显著的相关性(表层总氮是浮游植物生长的营养物质, 二者关系密切)。研究表明, 浮游植物密度的高低可间接控制浮游动物的分布, 适宜的浮游植物密度范围可促使浮游动物的生长与繁殖, 但过量的浮游植物可导致浮游动物种类和丰度的下降<sup>[37]</sup>。因此, 春、夏两季浮游植物密度与主要浮游动物分布所呈现的显著负相关, 与春、夏两季浮游植物细胞密度量级较高有关(浮游植物密度均值: 春季  $8.98 \times 10^5$  cell/m<sup>3</sup>, 夏季  $1.67 \times 10^5$  cell/m<sup>3</sup>, 秋季  $3.17 \times 10^5$  cell/m<sup>3</sup>, 冬季  $2.28 \times 10^4$  cell/m<sup>3</sup>; 浮游动物丰度均值: 春季 64.74 ind/m<sup>3</sup>, 夏季 74.44 ind/m<sup>3</sup>, 秋季 124.75 ind/m<sup>3</sup>, 冬季 152.43 ind/m<sup>3</sup>)。

### 3.3 环境因子对浮游动物群落结构的影响

群落结构上, RDA 排序图可较清晰地解释生态类群与环境因子之间的关系, 但不同季节生态类群的生态分化情况各异。春、夏两季, 在偏南风作用下, 南海暖流携带大量热带暖水种<sup>[38]</sup>经越南沿岸顺时针流向进入北部湾, 其中一个分支经海南岛西北部沿岸由南部海域流出。春季具有一年中相对较适宜的环境条件, 各生态类群之间距离较近(受浮游植物密度、水深和表层温度控制), 夏季严酷的生境(高温高盐水)使得各生态类群生态分化距离加大, 决定群落分布的环境因子增加(水深、表层溶解氧、浮游植物密度、表层盐度、表层悬浮物浓度、透明度和表层温度)。春、夏两季均以热带暖水种占优, 这与张光星等<sup>[9]</sup>研究春、

夏季海南岛近岸海域浮游动物优势生态类群结果一致, 同时能反映出春、夏季热带海域生态群落结构特征与亚热带海域<sup>[39-40]</sup>(很少由某一生态类群占绝对优势)的区别。秋季, 随着北部湾顺时针环流<sup>[13]</sup>的减弱, 琼州海峡低温海流<sup>[11]</sup>的介入, 调查海域外测站位形成海流或水团的交汇, 生态类群较为丰富, 暖水性类群优势明显, 而近岸水体交换能力有限, 一年中较适中的表层温度及较高的表层总氮(有利于浮游植物的生长, 饵料充足)有利于近岸种(河口种和近岸暖水种)的大量生长和繁殖, 因此秋季优势类群热带暖水种和近岸种共存(图 4)。冬季, 近岸种(优势类群)占主导地位。冬季东北季风加强, 琼州海峡低温海流得到助长, 水体表层温度达一年中最低值, 浮游植物生长较慢, 细胞密度为一年中最低, 透明度随之下降, 热带暖水种数量急剧消退, 热带暖水种、近岸种、广布种和广温广盐种之间的距离收缩, 侧面说明其对环境因子的需求较为相似, 但较低的温度适合偏好低温生境的暖温种生存, 因此加大了与暖水类群之间的生态分化距离。

而空间结构上, 水深是影响空间结构的关键环境因子, 且空间结构存在季节上的差异, 春季和秋季相似(群落相互之间, 群落 a 仅与群落 b 和群落 c 差异显著), 冬季和夏季相似(群落 a 仅与群落 c 差异显著), 这也说明从春、秋季到冬、夏季, 群落的空间结构有从 a 结构向群落 b 和群落 c 结构靠拢的趋势。考虑到群落的空间变化特征受水深影响, 因此生态类群从近岸种、近海种及大洋广布种的划分上看, 生态类群的平均密度及占比对空间结构的季节差异能进行一定的解释(表 6)。春、秋季群落 b 和群落 c 中近岸种、近海种及大洋广布种的平均密度及占比为一致, 而群落 a 中近岸种、大洋广布种平均密度较高。冬、夏季在各水深范围内生态类群分配相对均匀的前提下, 群落 a 中近岸种、近海种及大洋广布种的平均密度远高于群落 c。另外 R 值整体偏小(表 5), 这表明群落之间存在较小的差异, 但与长江口等海域<sup>[41]</sup>相比, 该区域并未像河口区域因温度和盐度的渐变所造成的群落空间结构差异大(优势种及主要种类组成变化明显)。

表 6 不同水深( $H$ )范围内的站位浮游动物生态类群平均丰度及占比  
Tab. 6 The average abundance of zooplankton ecological group and its percentage corresponding to depth ( $H$ ) on different sampling sites

季节 season	生态类群 ecological group	$H \leq 25$ m		$25 < H \leq 40$ m		$H > 40$ m	
		平均丰度/ (ind/m <sup>3</sup> ) average abundance	占比% percentage	平均丰度/ average abundance (ind/m <sup>3</sup> )	占比% percentage	平均丰度/ average abundance (ind/m <sup>3</sup> )	占比% percentage
春季 spring	近岸种 nearshore species	38.84	39.25	32.64	20.70	35.11	22.39
	近海种 offshore species	0.09	0.09	38.61	24.48	44.83	28.58
	大洋广布种 cosmopolitan ocean species	60.02	60.66	86.45	54.82	76.90	49.03
	总计 total	98.95	100	157.70	100	156.84	100
秋季 autumn	近岸种 nearshore species	939.61	75.11	104.73	45.05	78.31	36.30
	近海种 offshore species	12.24	0.98	10.57	4.55	9.05	4.19
	大洋广布种 cosmopolitan ocean species	299.06	23.91	117.16	50.40	128.39	59.51
	总计 total	1250.91	100	232.46	100	215.75	100
夏季 summer	近岸种 nearshore species	101.52	29.86	55.00	21.25	53.52	25.22
	近海种 offshore species	115.06	33.84	87.50	33.80	79.91	37.66
	大洋广布种 cosmopolitan ocean species	123.41	36.30	116.37	44.95	78.78	37.12
	总计 total	339.99	100	258.87	100	212.21	100
冬季 winter	近岸种 nearshore species	397.57	39.61	175.43	23.92	186.91	43.20
	近海种 offshore species	276.29	27.52	210.03	28.64	89.62	20.71
	大洋广布种 cosmopolitan ocean species	329.94	32.87	348.00	47.45	156.17	36.09
	总计 total	1003.80	100	733.46	100	432.70	100

## 参考文献:

- [1] Zhou S C, Jin B S, Guo L, et al. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze river estuary, China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 399-406.
- [2] Mazumder D, Saintilan N, Williams R J. Trophic relationships between itinerant fish and crab larvae in a temperate Australian saltmarsh[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2006, 57(2): 192-199.
- [3] Deng B P, Xu R, Liu C C, et al. Distribution characteristics of zooplankton communities in offshore waters of the Southern Yellow Sea and the East China Sea in summer[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(4): 11-19. [邓邦平, 徐韧, 刘材材, 等. 夏季黄海南部和东海近海浮游动物群落分布特征[J]. 南方水产科学, 2015, 11(4): 11-19.]
- [4] Du M M, Liu Z S, Wang C S, et al. The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5407-5418. [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.]
- [5] Costa S D, Pai I K. Zooplankton community structure in the nearshore waters of central west coast of India[J]. *Tropical Ecology*, 2015, 56(3): 311-322.
- [6] Shao Q W, Liu Z S, Zhang J, 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. [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.]
- [7] Li Z W, Cui L T. Environmental control of zooplankton community structure in Tangshan Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3797-3804. [李志伟, 崔力拓. 环境因子对唐山湾海域浮游动物群落结构的驱动作用[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3797-3804.]
- [8] Elliott D T, Pierson J J, Roman M R. Relationship between environmental conditions and zooplankton community structure during summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico [J]. *Journal of Plankton Research*, 2012, 34(7): 602-613.
- [9] Zhang G X, Chen S Q, Chen D D, et al. The relationship between zooplankton and the environmental factors in the coastal waters of Hainan island in the early summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(12): 125-132. [张光星, 陈石泉, 陈丹丹, 等. 海南岛近岸海域夏初浮游动物与环境因子的关系[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 125-132.]
- [10] Zheng B W, Cao W Q, Lin Y S, et al. Ecosystem structure and function in northern Beibu Gulf. I. The temporal and spatial variation of species composition on zooplankton[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(6): 154-161. [郑白雯, 曹文清, 林元烧, 等. 北部湾北部生态系统结构与功能研  
究 I. 浮游动物种类组成及其时空变化[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(6): 154-161.]
- [11] Deng S, Zhong H L, Wang M W, et al. On relation between upwelling off Qionghai and fishery[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1995, 14(1): 51-56. [邓松, 钟欢良, 王名文, 等. 琼海沿岸上升流及其与渔场的关系[J]. 台湾海峡, 1995, 14(1): 51-56.]
- [12] Lian X P, Tan Y H, Liu Y H, et al. Preliminary study of zooplankton community in the Luzon strait[J]. *Journal of Biology*, 2013, 30(1): 31-35, 42. [连喜平, 谭烨辉, 刘永宏, 等. 吕宋海峡浮游动物群落结构的初步研究[J]. 生物学杂志, 2013, 30(1): 31-35, 42.]
- [13] Wang Q. The study of the seasonal and interannual variations of the South China sea warm water[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(6): 821-824, 832. [王启. 关于南海暖水季节和年际变化的研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(6): 821-824, 832.]
- [14] Zhou Z G, Wu G W. Marine biodiversity study in Chengmai Gulf of Hainan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(3): 32-33, 44, 117. [周祖光, 吴国文. 海南澄迈湾海洋生物多样性研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(3): 32-33, 44, 117.]
- [15] Ding J J, Hu Y Q, Huang B, et al. Characteristics of spring and autumn zooplankton community in Dongzhai Harbor, Hainan[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2016, 34(3): 257-263. [丁敬敬, 胡亚强, 黄勃, 等. 海南岛东寨港红树林春、秋季节浮游动物群落的特征研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 257-263.]
- [16] Sun R X, Wang Y G, Lian G S, et al. Distribution and community characteristics of planktonic copepods in the northwest coastal waters off Hainan island[J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(3): 320-328. [孙柔鑫, 王彦国, 连光山, 等. 海南岛西北沿岸海域浮游桡足类的分布及群落特征[J]. 生物多样性, 2014, 22(3): 320-328.]
- [17] Zhang G X, Wu Z J, Chen S Q, et al. The ecological characteristics of zooplankton and the relationship among environmental factors in the Sanya Bay in spring[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2014, 36(3): 176-184. [张光星, 吴钟解, 陈石泉, 等. 春季三亚湾浮游动物生态特征与环境因子的关系[J]. 福建水产, 2014, 36(3): 176-184.]
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准《海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查 GB/T 12763-2007》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.]

- [19] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Marine monitoring specification—Part 4: Analysis of seawater GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. [中华人民共和国标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准《海洋监测规范第 4 部分: 海水分析 GB/T12763-2007》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.]
- [20] Wang C S, Chen X Q, Liu Z S. Marine Biology and Ecology in China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 479-599. [王春生, 陈兴群, 刘镇盛. 我国近海海洋生物与生态[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 479-599.]
- [21] Shi X, Wang H K, Tan Y H, et al. Seasonal variation of zooplankton community structure and species composition in the Sanya Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(4): 42-49. [时翔, 王汉奎, 谭烨辉, 等. 三亚湾浮游动物数量分布及群落特征的季节变化[J]. 海洋通报, 2007, 26(4): 42-49.]
- [22] Yin J Q, Zhang G X ,Tan Y H, et al. Species composition and quantitative distribution of zooplankton in Sanya Bay, Hainan province, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(5): 1-9. [尹健强, 张谷贤, 谭烨辉, 等. 三亚湾浮游动物的种类组成与数量分布[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 1-9.]
- [23] Luo M, Miao S Y, Yu H B, et al. Community structure of zooplankton in the offshore water of Wanning at the end of spring[J]. Marine Sciences, 2013, 37(11): 79-84. [罗鸣, 苗素英, 于红兵, 等. 春末海南万宁海域浮游动物群落结构研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(11): 79-84.]
- [24] Li C H, Jia X P, Cai W G. Diversity of marine zooplankton in the north of South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(2): 139-146. [李纯厚, 贾晓平, 蔡文贵. 南海北部浮游动物多样性研究[J]. 中国水产科学, 2004, 11(2): 139-146.]
- [25] Du F Y, Li C H, Jia X P. Species composition and quantity distribution of Chaetognatha in beibu bay in autumn and winter[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(3): 235-241. [杜飞雁, 李纯厚, 贾晓平. 北部湾海域秋、冬季毛领类的种类组成与数量分布[J]. 中国水产科学, 2003, 10(3): 235-241.]
- [26] Zheng B W, Cao W Q, Lin Y S, et al. Ecosystem structure and function in northern Beibu Gulf II. Quantitative distribution and dominant species of zooplankton[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(4): 82-90. [郑白雯, 曹文清, 林元烧, 等. 北部湾北部生态系统结构与功能研究 II. 浮游动物数量分布及优势种[J]. 海洋学报(中文版), 2014, 36(4): 82-90.]
- [27] Kurt T T, Polat S. Seasonal distribution of coastal mesozooplankton community in relation to the environmental factors in İskenderun Bay (North-East Levantine, Mediterranean Sea)[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2013, 93(5): 1163-1174.
- [28] Xu X Q, Zeng J N, Chen Q Z, et al. Seasonal variations of zooplankton community distribution and environmental impact factors in Yueqing Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2012, 30(1): 34-40. [徐晓群, 曾江宁, 陈全震, 等. 乐清湾海域浮游动物群落分布的季节变化特征及其环境影响因子[J]. 海洋学研究, 2012, 30(1): 34-40.]
- [29] Tang Z H, Zhong J S, Hu M, et al. The composition and seasonal changes of surface zooplankton in the north shore of Hangzhou Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(6): 927-935. [唐子涵, 钟俊生, 胡敏, 等. 杭州湾北岸表层水域浮游动物种类组成及季节变化[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(6): 927-935.]
- [30] Abdul W O, Adekoya E O, Ademolu K O, et al. The effects of environmental parameters on zooplankton assemblages in tropical coastal estuary, South-West, Nigeria[J]. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2016, 42(3): 281-287.
- [31] Gluchowska M, Trudnowska E, Gosczko I, et al. Variations in the structural and functional diversity of zooplankton over vertical and horizontal environmental gradients en route to the Arctic Ocean through the Fram Strait[J]. PLoS ONE, 2017, 12(2): e0171715.
- [32] Lucena-Moya P, Duggan I C. Correspondence between zooplankton assemblages and the estuary environment classification system[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 184: 1-9.
- [33] McWhirter A C. Environmental controls on zooplankton composition and distribution in Muchalat Inlet, Nootka Sound, B.C., Canada[D]. Seattle: University of Washington, 2015.
- [34] Xu Z L. Ecological characters of the *Eucalanus subcrassus* population in the East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1151-1158. [徐兆礼. 东海亚强真哲水蚤种群生态特征[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1151-1158.]
- [35] Du P, Xu X Q, Liu J J, et al. Distribution of zooplankton in the Jiaojiang estuary and its response to environment factors in spring and autumn[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(4): 486-494. [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.]
- [36] Luo X, Zeng J N, Xu X Q, 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. [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.]
- [37] Yang L, Liu J, Zhang J, et al. Zooplankton community variation and its relationship with environmental variables in Bohai Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2018, 36(1):

- 93-101. [杨璐, 刘捷, 张健, 等. 渤海湾浮游动物群落变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋学研究, 2018, 36(1): 93-101.]
- [38] Zu T T. Analysis of the current and its mechanism in the Gulf of Beibu[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005. [俎婷婷. 北部湾环流及其机制的分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.]
- [39] Sun L F, Ke C, Xu Z L, 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. [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.]
- [40] Zhang D R, Xu Z L, Xu J Y, et al. Comparison of zooplankton communities inside and outside the Hangzhou Bay in autumn[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(7): 767-780. [张冬融, 徐兆礼, 徐佳奕, 等. 杭州湾内外海域秋季浮游动物群落的比较[J]. 生物多样性, 2016, 24(7): 767-780.]
- [41] Gao Q, Xu Z L, Zhuang P. Comparison of mesozooplankton communities in north channel and north branch of Yangtze river estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2049-2055. [高倩, 徐兆礼, 庄平. 长江口北港和北支浮游动物群落比较[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2049-2055.]

## Relationship between the zooplankton community structure and environmental factors offshore of northwest Hainan Island, China

YANG Jieqing, OUYANG Longling, TANG Fenghua, SHI Yunrong, CHAO Min, WANG Yunlong

Key Laboratory of East China Sea Fishery Resources Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

**Abstract:** To understand the community structure of zooplankton offshore of northwest Hainan Island and explore the relevant environmental factors affecting their distribution, we conducted seasonal investigations in sites offshore of northwest Hainan Island in November 2016 and February, May, and August 2017. A redundancy analysis model was used to analyze the relationship between the community structure and environmental factors. Nonmetric multidimensional scaling ordination analysis was applied to test the differences between the communities. Furthermore, ANOSIM similarity testing was used to analyze the differences among the communities. A total of 215 species, belonging to 113 genus and 7 phyla, were identified, among which 134 species were present in autumn and 94 in summer. The number of identified species was relatively close between winter (113 species) and spring (111 species). The seasonal differences in the average abundance of zooplankton was significant, being highest in winter ( $152.43 \text{ ind}/\text{m}^3$ ) and lowest in spring ( $64.76 \text{ ind}/\text{m}^3$ ). The seasonal differences in the average biomass of zooplankton was also significant, being highest in winter ( $263.68 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) and lowest in spring ( $59.13 \text{ mg}/\text{m}^3$ ). The RDA showed that the water depth, phytoplankton abundance, transparency, surface temperature, surface dissolved oxygen, and surface total nitrogen have significant correlations with the community structure of zooplankton. Among these environmental factors, the water depth was the key factor, which affected the variation in the zooplankton community structure according to the seasons. Tropical warm water species were the dominant groups in spring and summer, while offshore warm water species were dominant in autumn and winter, suggesting an ecological differentiation among ecological groups. This was mainly caused by the flow direction of the current in Beibu Bay. Compared with the same latitude (waters of Cheng Mai and Dongzhai Harbor) and a lower latitude (Sanya Bay and waters of Wanning), higher amounts of zooplankton species were found offshore of northwest Hainan Island. When compared with Beibu Bay and the coastal waters of the northern South China Sea, the number of zooplankton species in this study was lower. However, the changing tendencies of dominant groups, ecological communities, and seasonal variation characteristics were consistent among these areas.

**Key words:** Hainan Island; zooplankton; ecological group; community structure; environmental factor

**Corresponding author:** WANG Yunlong. E-mail: yunlong\_wang@hotmail.com