

杨杰青, 史赞荣, 全为民, 等. 基于 RDA 与 GAMs 模型的东海近岸海域浮游动物与温盐关系[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 72–84, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.007

Yang Jieqing, Shi Yunrong, Quan Weimin, et al. Analysis of the relationships between zooplankton and temperature-salinity based on RDA and GAMs model in coastal East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 72–84, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.007

基于 RDA 与 GAMs 模型的东海近岸海域 浮游动物与温盐关系

杨杰青¹, 史赞荣¹, 全为民¹, 王云龙^{1*}

(1. 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: 为进一步探讨东海近岸海域浮游动物季节演替与温盐的变化关系, 根据 2013 年 5 月 (春季)、8 月 (夏季) 和 12 月 (冬季) 东海近岸海域 3 个航次的浮游动物调查资料, 利用冗余分析模型分析了优势种与温盐的变化关系, 广义加性模型分析了生物多样性参数与温盐之间的关系。结果表明: (1) 优势种季节演替较为明显, 由春季 2 种演替成夏季 10 种, 再更替为冬季 5 种, 春季和冬季优势种的种类和生态类群相对单一, 夏季较为丰富。(2) 优势种时空分布是综合多层环境因子的结果, 如春季中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 与表层盐度和底层盐度正相关, 夏季与表层温度和底层温度负相关, 冬季与表层盐度正相关; 春季五角水母 (*Muggiaea atlantica*) 与底层温度、底层盐度呈现较好的正相关; 夏季盐度是决定暖水性和高温高盐性优势种分布的关键因子, 且呈现较强的正相关; 冬季真刺唇角水蚤 (*Labidocera euchaeta*)、强壮滨箭虫 (*Aidanosagitta crassa*) 与表层温度关系密切, 并呈现较强的负相关。(3) 春季和冬季香农-威纳指数多样性指数与纬度呈负相关。(4) 温度和盐度对生物多样性参数影响显著, 但季节上又呈现出差异。

关键词: 东海; 浮游动物; 优势种; 生物多样性参数; 温度; 盐度

中图分类号: S932.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)08-0072-13

1 引言

东海是太平洋西岸一个受多种性质水系(沿岸径流、黄海冷水团、台湾暖流和黑潮暖流等)影响且较为开阔性的海区^[1-2], 其水文环境复杂多变, 地理区域跨度也较大(横跨温带和亚热带)^[3-4], 因此浮游动物生态类群四季演替较为明显。浮游动物作为海洋次级生产者, 对海洋物质循环和能量流动具有承上启下的作用^[5-9], 另外作为海流或水团的指示种及水体环境变化的敏感类群^[1, 10-11], 对于探索水团随季节变化特征及海洋生态环境质量状况等具有重要意义。

有关东海范围内浮游动物的生态研究已较为多见, 多数集中在对浮游动物种类组成^[12-14]、数量分布^[15-16]、生态类群变化特征^[17-18]、区域分布特征及多样性变化特征^[4, 13, 15, 19-20]等研究上, 虽有部分研究探讨了浮游动物群落结构与环境因子^[21-24]的变化关系, 但也只是局限于部分区域内(海湾、河口、保护区等)且分析方法较为单一, 而有关整个东海近岸海域浮游动物优势种及生物多样性参数与环境因子的变化关系方面的研究还仍少见。冗余分析模型(Redundancy Analysis, RDA)是将样点投射到两条排序轴构成的二维平面上, 通过样点的散集形态、在象限的

收稿日期: 2018-03-15; 修订日期: 2018-12-03。

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303047)。

作者简介: 杨杰青(1990—), 男, 安徽省阜阳市人, 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(1964—), 男, 研究员, 主要从事海洋渔业生态的研究。E-mail: yunlong_wang@hotmail.com

分布等来反映研究区的特点, 统计学上是通过原始变量与典型变量之间的相关性, 分析引起原始变量变异的原因。广义加性模型(Generalized Additive Models, GAMs)是通过对自变量用非参数函数形式来拟合估计因变量和自变量之间的关系, 其更加关注探测数据间的复杂关系, 因其灵活性强, 可控制季节趋势、长期趋势以及时间相关的混杂因素影响, 目前已应用到许多学科领域中。

为了进一步探讨浮游动物优势种、生物多样性参数与温盐的关系, 本文依据 2013 年 5 月、8 月和 12 月 3 个航次的调查资料, 利用冗余分析模型分析了优势种与温盐的变化关系, 广义加性模型分析了生物多样性参数与温盐之间的关系, 以期为东海近岸海域浮游动物长期变化规律和生物多样性保护提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 调查时间及站位

调查范围位于东海北部近岸水域: 32°N 以北(含 32°N, A1~A23 站位, 其中春季调查站位 A1~A23, 夏季 A11~A23, 冬季 A11~A23); 长江口及其邻近水域: 30°~31.5°N(B24~B44, 春、夏和冬季调查站位均为 B24~B44); 东海中南部近岸水域: 29.5°N 以南(含 29.5°N, C45~C67 站位; 其中春季调查站位 C45~C63, 夏季 C45~C56、C58~C63, 冬季 C45~C57)(图 1)。

2.2 样品采集与分析

浮游动物样品采集与分析方法按《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)^[25]进行。针对近岸海域采用了浅水 I 型浮游生物网(配制网具规格为: 网口内径 50 cm, 网长 145 cm, 网囊网目为 0.505 mm), 由底层至表层进行垂直拖网一次, 采集后的样品立即用福尔马林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)。环境参数(温度、盐度)采用 YSI plus 型水质分析仪现场测定。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 优势度

浮游动物的优势度(Y)计算公式为

$$Y = (n_i/N) \times f_i, \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为样品总个数, f_i 为出现频率, 以 $Y \geq 0.02$ 为优势种的划分标准^[20, 26]。

2.3.2 生物多样性指数

香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数

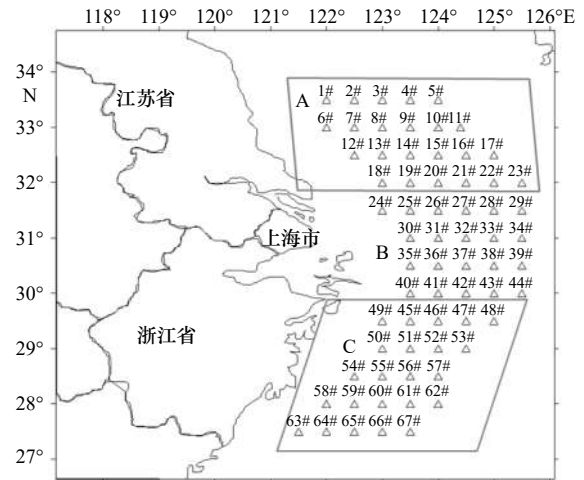


图 1 采样站位

Fig. 1 Map of the sampling sites

A. 东海北部近岸水域; B. 长江口及其邻近水域; C. 东海中南部近岸水域

A. Coastal waters of northern East China Sea; B. Changjiang River Estuary and adjacent waters; C. coastal waters of central and southern East China Sea

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i, \quad (2)$$

皮洛均匀度指数(Pielou evenness index)

$$J' = H' / \log_2 S. \quad (3)$$

马加利夫丰富度指数(Margalef's index)

$$d = (S - 1) / \log_2 N. \quad (4)$$

单纯度指数

$$C = \text{sum}(n_i/N)^2. \quad (5)$$

式(2)至式(5)中, S 为该站记录种类数; P_i 为样品中第 i 种物种的个体比例, 如样品总个数为 N 第 i 种个数为 n_i , 则 $P_i = n_i/N$ 。

2.3.3 处理方法

为探讨优势种与温盐之间的相关性, 并分析其分布受何种环境因子影响, 通过物种样本做 DCA 分析, 梯度长度的第一轴数值小于 3.0, 因此采用 RDA 线性分析, RDA 排序图可较清晰地解释出二者之间的关系, 图中温盐一般用带有箭头的线段表示, 其箭头长短代表其在主轴中的作用大小, 物种与温盐之间夹角的余弦值表示对应的相关性, 夹角越小表示相关性越高, 如果箭头同向, 表示正相关, 反向表示负相关, 夹角接近直角, 表示相关性很小。并采用蒙特卡洛检验环境因子与排序轴之间的相关性。因 GAMs 模型事先不需要进行相关性假设, 又可探讨变量间的非单调、非线性关系, 因此采用 GAMs 模型分析物种多样性指数与温盐之间的关系, 根据多样性指数与温盐之

间的显著性,筛选有效的环境因子进入分析模型,对模型进行赤池信息准则(Akaike's Information Criterion, AIC)检验,当 AIC 数值最小时说明拟合效果最好,显著水平定为 $P < 0.05$ 。优势种丰度分布图采用 Surfer 8 绘制,香农-威纳多样性指数与纬度的关系图利用 Excel 2010 绘制,并用 SPSS19.0 线性回归分析其相关性。

3 结果

3.1 优势种

春季共鉴定优势种 ($Y \geq 0.02$) 2 种,分别为中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和五角水母 (*Muggiaea atlantica*)

(表 1)。夏季优势种有 10 种,分别为中华假磷虾 (*Pseudeuphausia sinica*)、肥胖软箭虫 (*Flaccisagitta enflata*)、百陶带箭虫 (*Zonosagitta bedoti*)、纳噶带箭虫 (*Z. nagae*)、中华哲水蚤、亚强次真哲水蚤 (*Subeucalanus subcrassus*)、精致真刺水蚤 (*Enchaeta concinna*)、平滑真刺水蚤 (*E. plana*)、真刺水蚤属 (*Euchaeta* sp.) 和真刺唇角水蚤 (*Labidocera euchaeta*)。冬季优势种有 5 种,分别为中华假磷虾、强壮滨箭虫 (*Aidanisagitta crassa*)、百陶带箭虫、中华哲水蚤和真刺唇角水蚤。其中,中华哲水蚤是 3 个季度共有优势种,优势种季节演替较为明显。

表 1 东海近岸海域浮游动物优势种的优势度 ($Y \geq 0.02$)、平均丰度

Tab. 1 The dominance of dominant species ($Y \geq 0.02$), average abundance in coastal waters of East China Sea

优势种		春季		夏季		冬季	
种类	生态类群	Y	丰度均值/ind.·m ⁻³	Y	丰度均值/ind.·m ⁻³	Y	丰度均值/ind.·m ⁻³
中华假磷虾	近岸低盐种	/	/	0.03	5.72	0.03	0.53
强壮滨箭虫	近岸低盐种	/	/	/	/	0.02	0.45
肥胖软箭虫	暖水种	/	/	0.03	7.53	/	/
百陶带箭虫	亚热带近海种	/	/	0.05	11.20	0.03	0.58
纳噶带箭虫	亚热带近海种	/	/	0.03	9.72	/	/
中华哲水蚤	广温种	0.82	500.18	0.10	26.86	0.65	7.03
五角水母	暖水低盐种	0.04	39.70	/	/	/	/
亚强次真哲水蚤	高温高盐种	/	/	0.03	9.10	/	/
精致真刺水蚤	暖水广盐种	/	/	0.03	8.28	/	/
平滑真刺水蚤	暖水种	/	/	0.02	9.86	/	/
真刺水蚤属	/	/	/	0.04	17.50	/	/
真刺唇角水蚤	低盐种	/	/	0.04	14.90	0.05	1.11

注:“/”表示非优势种。

优势种季节和区域分布各具特色,其中中华哲水蚤平均丰度春季远高于夏季和冬季,而区域分布上春季东海北部近岸和中南部近岸海域要远高于长江口及其邻近海域(表 2)。中华假磷虾、百陶带箭虫和真刺唇角水蚤平均丰度夏季远高于冬季,而区域分布上,中华假磷虾分布相对均匀,百陶带箭虫高值区在长江口及其邻近海域,真刺唇角水蚤高值区在东海北部近岸海域。

3.2 优势种与温盐的关系

春季总被分析环境因子解释比例为 47.29%,其中 RDA1 解释比例为 43.21%,RDA2 解释比例为 4.08%(表 3),表 4 中底层温度(Bottom Temperature,

BT)、底层盐度(Bottom Salinity, BS)与 RDA1 相关性较高(极显著, $P < 0.01$),表层温度(Surface Temperature, ST)、表层盐度(Surface Salinity, SS)与 RDA2 密切相关(极显著, $P < 0.01$)。夏季总被分析环境因子解释比例为 16.50%,其中 RDA1 解释比例为 15.10%,RDA2 解释比例为 1.40%,ST、BT、BS 与 RDA1 排序轴相关性较高,其中与 ST 相关性达显著水平($P < 0.05$),与 BT、BS 达极显著水平($P < 0.01$),SS 与 RDA2 排序轴具有较高相关性(极显著, $P < 0.01$)。冬季总被分析环境因子解释比例为 24.31%,其中 RDA1 解释比例为 14.77%,RDA2 解释比例为 8.54%,ST、BT 与 RDA1 排序轴相关性较高(极显著, $P < 0.01$),SS 与

表 2 东海近岸海域浮游动物优势种平均丰度区域分布 (单位: ind./m³)Tab. 2 Regional distribution of dominant species' average abundance of zooplankton in coastal waters of East China Sea (unit: ind./m³)

	春季			夏季			冬季		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
中华假磷虾	/	/	/	6.25	6.48	7.54	0.25	0.62	1.71
强壮滨箭虫	/	/	/	/	/	/	0.52	1.35	0
肥胖软箭虫	/	/	/	3.10	13.50	8.23	/	/	/
百陶带箭虫	/	/	/	2.36	22.28	12.42	0.71	1.21	0.75
纳噶带箭虫	/	/	/	3.13	21.98	15.45	/	/	/
中华哲水蚤	662.63	184.75	645.29	3.45	41.45	57.47	6.14	10.12	3.43
五角水母	125.84	34.73	82.26	/	/	/	/	/	/
亚强次真哲水蚤	/	/	/	0	6.93	22.80	/	/	/
精致真刺水蚤	/	/	/	2.40	8.08	17.07	/	/	/
平滑真刺水蚤	/	/	/	3.60	16.60	28.81	/	/	/
真刺水蚤属	/	/	/	0	26.25	57.29	/	/	/
真刺唇角水蚤	/	/	/	51.17	15.92	1.31	2.76	1.40	0

注: A. 东海北部近岸水域; B. 长江口及其邻近水域; C. 东海中南部近岸水域; “/”表示非优势种。

RDA2 排序轴具有较高的相关性 ($P < 0.05$) (表 3)。

如图 2 所示, 温盐与物种之间的夹角余弦值越接近于 1 或 -1, 则表明相关性较密切, 夹角余弦值越接近于 0 则表明相关性较小。春季五角水母与 BT、BS 密切相关, 而中华哲水蚤与 BS 具有较为密切的关系。夏季盐度是决定暖水性和高温高盐性优势种分布的关键因子, 且呈现较强的正相关; 亚强次真哲水蚤与 ST、SS 和 BS 均具有较高的密切性, 且与 ST 呈负相关, 而与 SS、BS 呈正相关; 真刺唇角水蚤与 BT、BS 密切相关, 其中与 BT 正相关, 与 BS 负相关; 精致真刺水蚤、平滑真刺水蚤和真刺水蚤属对生态的适应性较为相似, 与 SS、BS 正相关; 中华哲水蚤、百陶

带箭虫、纳噶带箭虫和肥胖软箭虫对温盐的适应性较为相似, 均与 ST、BT、BS 相关, 其中与 ST 正相关, 与 SS、BS 负相关。冬季中华假磷虾与 ST、BT 关系较为密切, 且呈正相关, 中华哲水蚤、百陶带箭虫与 SS 关系较为密切, 且呈正相关, 强壮滨箭虫、真刺唇角水蚤与 ST、BT 负相关。

通过优势种与温盐的 RDA 排序关系, 选择具有代表性的 4 个优势种 (五角水母、中华哲水蚤、真刺唇角水蚤和强壮滨箭虫) 探究了其区域分布特征。春季优势种五角水母主要分布于长江口以南的近岸海域, 而冬季优势种真刺唇角水蚤和强壮滨箭虫主要分布于长江口以北 (图 3)。中华哲水蚤对温度的适应

表 3 RDA 前两轴排序分析及蒙特卡洛检验结果

Tab. 3 Results by RDA ordination with the first two axis and Monte Carlo permutation test in herb layer

	春季		夏季		冬季	
	RDA1	RDA 2	RDA 1	RDA 2	RDA 1	RDA 2
ST	0.512	0.727**	-0.623*	0.219	-0.823**	-0.522
SS	0.368	-0.769**	0.460	0.759**	0.070	-0.630*
BT	0.709**	0.559	-0.702**	0.531	0.093	-0.727**
BS	0.861**	-0.374	0.772**	0.395	-0.179	-0.078
总被分析环境因子解释比例	43.21%	4.08%	15.10%	1.40%	14.77%	8.54%

注: ST 表示表层温度; SS 表示表层盐度; BT 表示底层温度; BS 表示底层盐度; *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

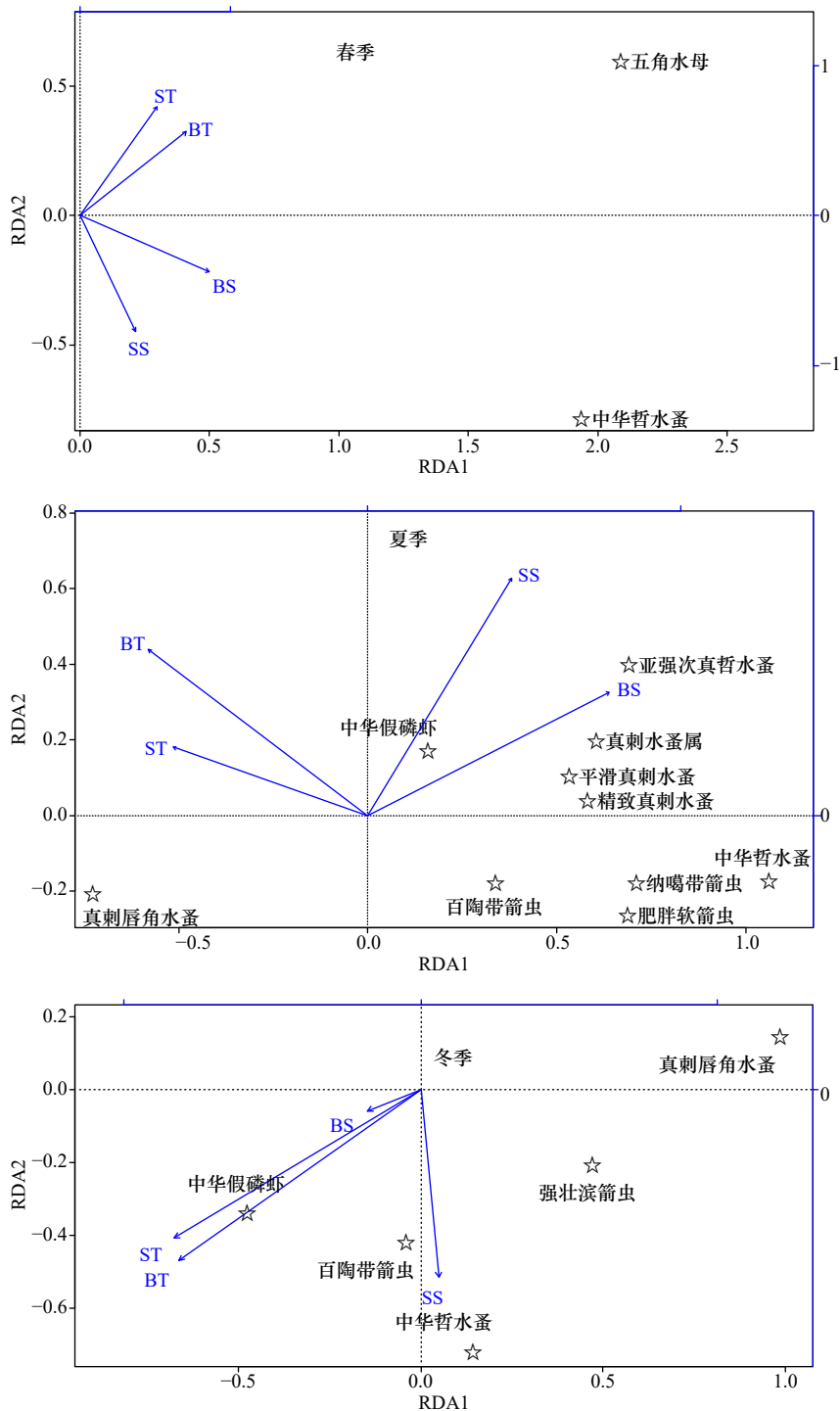


图 2 优势种与温盐的冗余分析模型(RDA)排序

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) ordination diagram of dominant species and temperature-salinity

性较广(其温度的高丰度分布介于 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间), 偏好稍高盐度的生境(盐度的高丰度分布介于 $27\sim 32$ 之间)(图 4)。

3.3 香农-威纳多样性指数与纬度关系

春季、冬季香农-威纳多样性指数与纬度呈显著负相关, 且达极显著水平($P<0.01$), 但夏季香农-威纳多样性指数与纬度相关性并不显著($P>0.05$)(图 5)。

3.4 多样性指数与温盐的关系

由表 5 可看出, 春季决定浮游动物生物多样性指数是综合多层环境因子的结果, 其中种类数 S 、多样性指数 H' 和单纯度指数 C 与 ST、BT 和 BS 相关, 均匀度指数 J' 与 ST、SS 和 BS 相关, 而夏季和冬季决定浮游动物生物多样性指数的环境因子相对较为单一, 夏季与多样性指数 H' 、单纯度指数 C 和均匀度指数

表 4 不同区域内的环境参数
Tab. 4 Environmental parameters in different areas

季节	区域	平均表温/°C	平均表盐	平均底温/°C	平均底盐
春季	A	13.7±0.78	30.2±1.07	12.6±1.27	30.6±0.95
	B	15.7±0.88	26.4±3.06	15.5±1.72	30.7±3.56
	C	17.0±0.74	29.3±1.45	17.9±1.39	31.3±2.38
夏季	A	26.3±0.75	29.9±0.83	26.5±0.76	29.8±0.67
	B	25.7±0.65	28.3±5.00	23.3±2.28	31.0±4.58
	C	26.2±0.70	32.0±1.21	25.2±2.47	32.6±1.21
冬季	A	8.3±0.52	30.1±0.88	8.6±0.52	30.2±0.68
	B	11.8±2.59	29.8±2.95	17.0±2.78	29.4±4.15
	C	12.9±2.27	29.5±1.72	13.3±2.38	29.7±1.82

注: A. 东海北部近岸水域; B. 长江口及邻近水域; C. 东海中南部近岸海域。

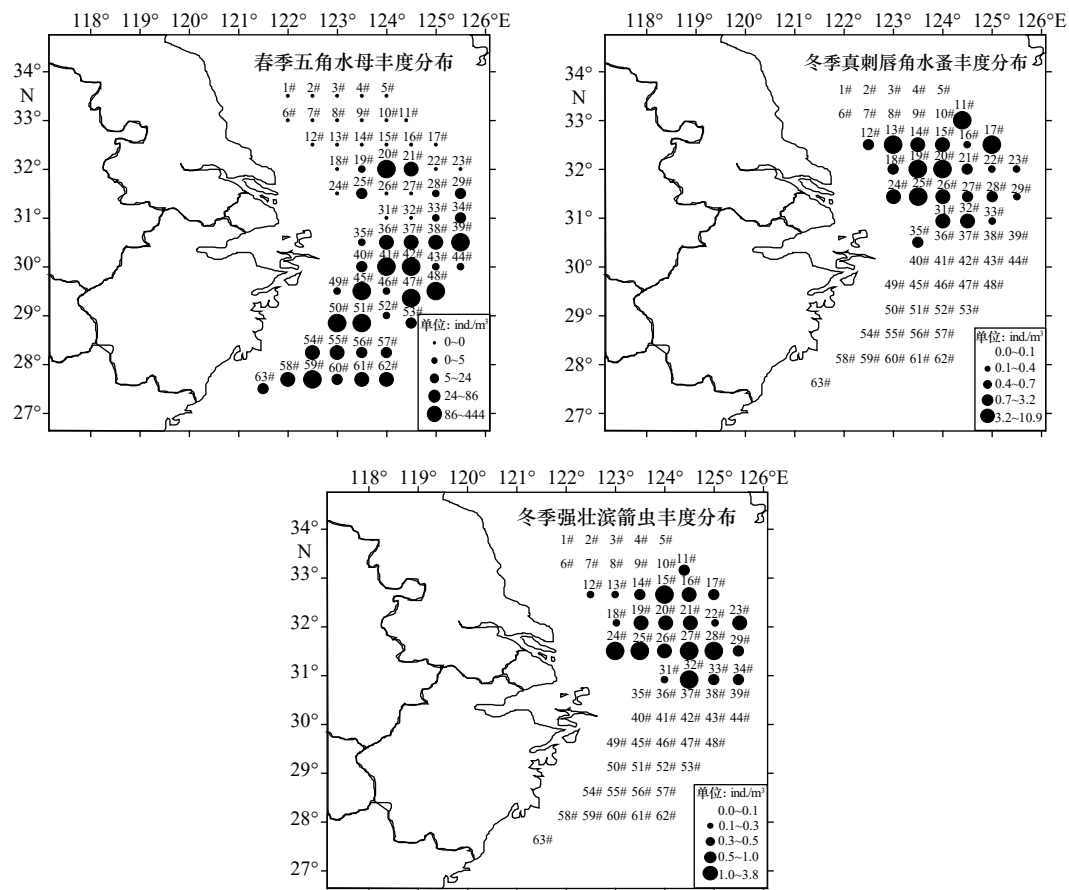


图 3 优势种丰度分布

Fig. 3 Abundance distribution of dominant species

J' 相关的环境因子为 BS, 与丰富度指数 d 相关的环境因子为 SS, 冬季与种类数 S 、多样性指数 H' 、单纯度指数 C 和丰富度指数 d 相关的环境因子主要是 ST。

春季浮游动物种类数 S 与 ST、SS、BT 和 BS 之间的相关性各具差异, 与 ST 先负相关后正相关(温度

介于 14~16°C 时 S 较低), 与 BT 相关性较为复杂, 呈三峰变化, 与 SS 负相关(SS 越高, S 越少), 与 BS 相关性呈双峰变化(图 6)。多样性指数 H' 与 ST 和 BS 的关系较为复杂, 其相关性呈波动变化, 与 BT 正相关。对比发现单纯度指数 C 和多样性指数 H' 分别

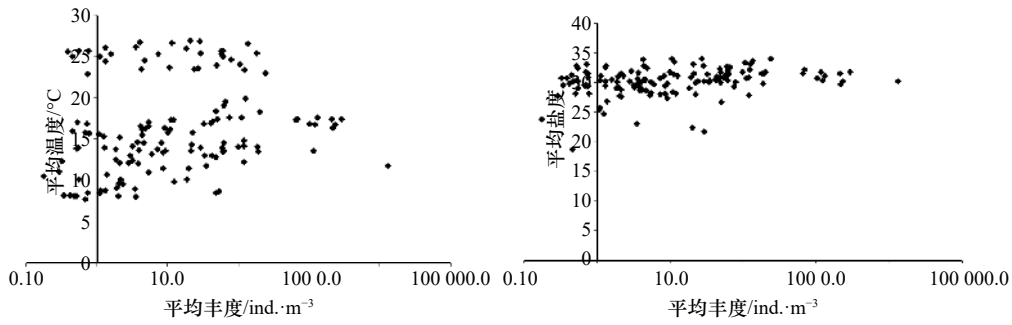


图 4 平均温度、平均盐度与中华哲水蚤丰度分布关系

Fig. 4 The distribution relationship of *C. sinicus* abundance with average temperature and average salinity

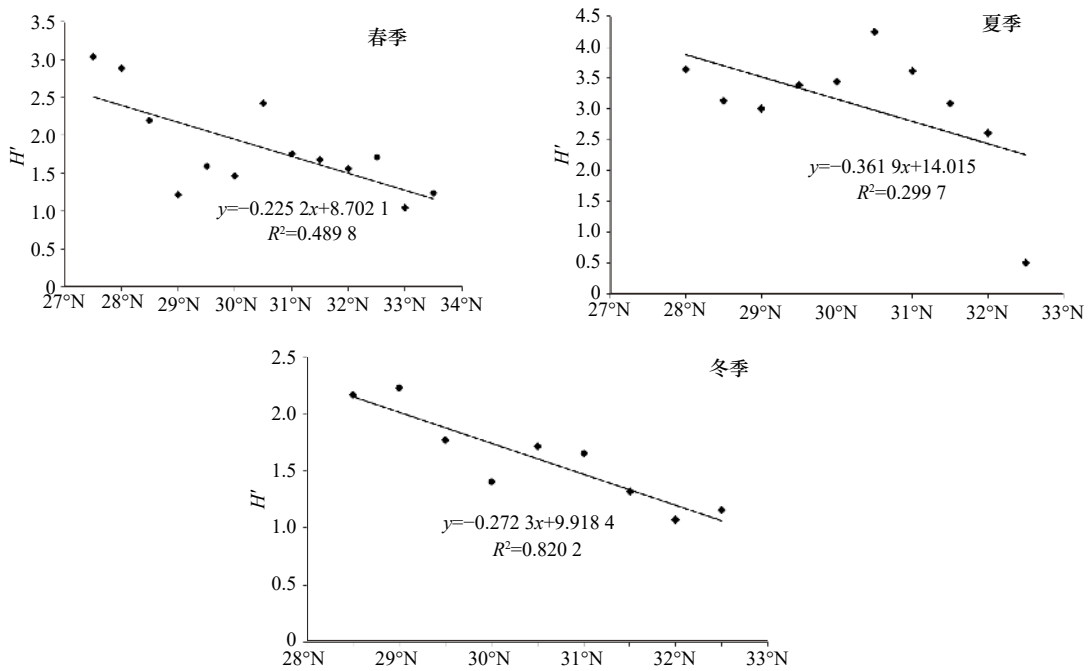


图 5 香农-威纳多样性指数 (H') 与纬度的线性关系

Fig. 5 The linear relationship of Shannon-Wiener diversity index (H') and latitude

表 5 不同季节生物多样性参数与温盐关系 GAMs 模型分析结果

Tab. 5 Results of relations in biodiversity parameters and temperature-salinity based on GAMs model in different season

		种类数 S	多样性指数 H'	单纯度指数 C	均匀度指数 J'	丰富度指数 d
春季	环境因子	ST+SS+BT+BS	ST+ BT+BS	ST+ BT+BS	ST+ SS+BS	/
	AIC值	31.00	4.95	83.29	90.55	/
	偏差解释比例/%	82.4	62.7	57.2	66.8	/
夏季	环境因子	/	BS	BS	BS	SS
	AIC值	/	34.19	50.31	61.65	29.35
	偏差解释比例/%	/	49.4	49.0	48.8	16.5
冬季	环境因子	ST+SS	ST	ST	/	ST
	AIC值	12.04	11.57	50.67	/	34.36
	偏差解释比例/%	68.3	31.6	27.4	/	37.5

注: ST表示表层温度; SS表示表层盐度; BT表示底层温度; BS表示底层盐度。AIC亦池信息准则。“/”表示无数据。

与 ST、BT 和 BS 的相关性变化趋势刚好相反。

夏季 BS 小于 20 时, 多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 与 BS 正相关, 20~28 范围内多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 与 BS 负相关, 30~35 范围内多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 与 BS 又正相关, 而单纯度指数 C 与 BS 的变化趋势恰恰相反。冬季种类数 S 、多样性指数 H' 和丰富度指数 d 与 ST 正相关, 单纯度指数 C 与 ST 负相关。

4 讨论

4.1 优势种分布与温盐的关系

东海近岸海域优势种季节演替较为明显, 由春季

2 种演替成夏季 10 种, 再更替为冬季的 5 种。春季和冬季优势种的种类和生态类群相对单一(表 1), 而夏季较为丰富。已有研究表明^[21, 27-28], 浮游动物群落分布是综合各种环境因子影响的结果, 其中温度、盐度是影响其分布的重要环境因子。由于不同种类的浮游动物对温盐耐受性的差异, 因此其种类、数量和生态类群在区域及季节分布上又各显差异。

本研究发现, 不同季节(春、夏、冬)的温度、盐度与中华哲水蚤丰度分布关系各有差异。中华哲水蚤对温度的适应性较广(其温度的高丰度分布介于 10~20℃ 之间), 偏好稍高盐度的生境(盐度的高丰度分布介于 27~32 之间)(图 4)。林元烧和李松^[29]

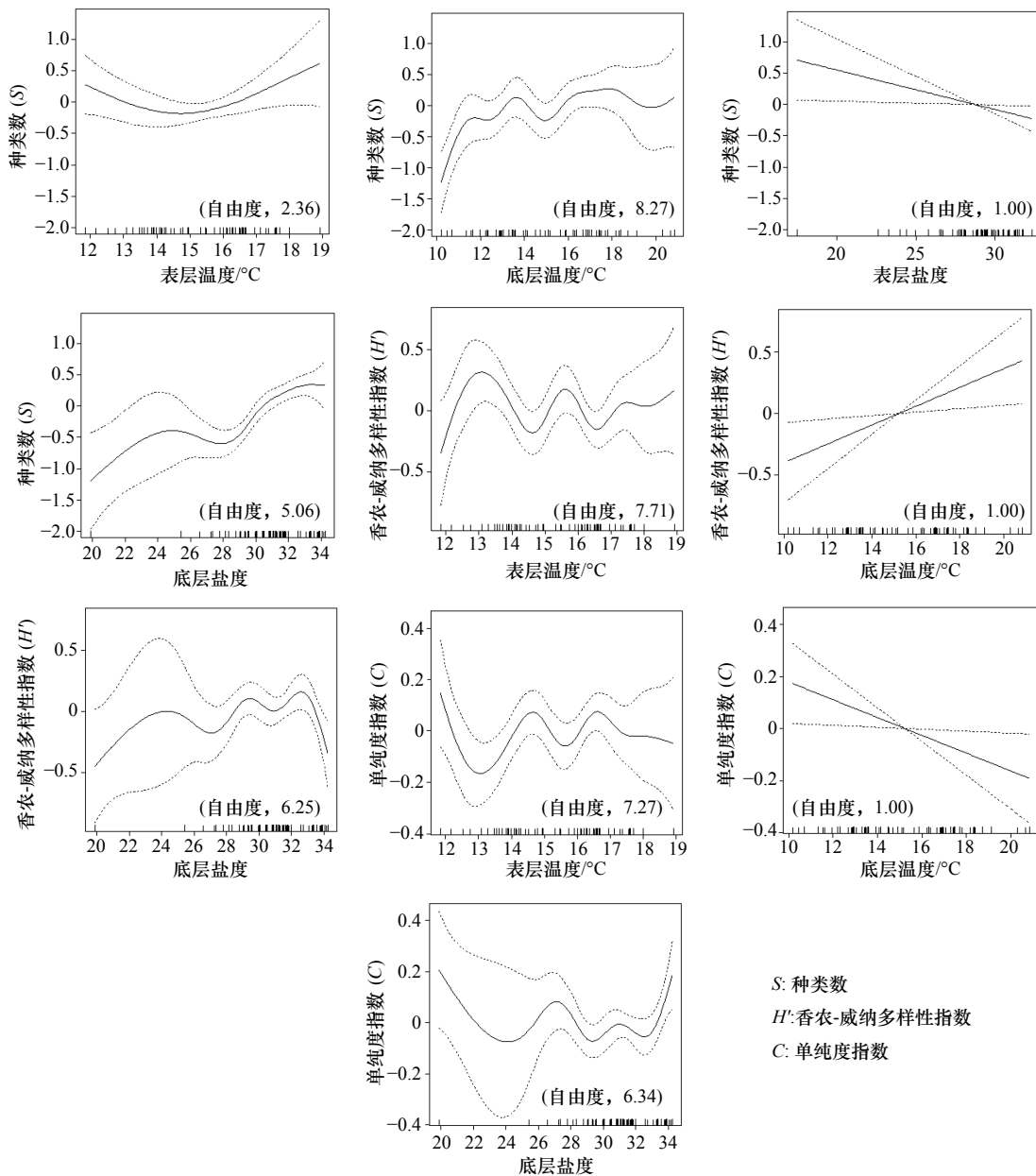


图 6 春季基于 GAMs 模型生物多样性参数与温盐的关系

Fig. 6 Relations in biodiversity parameters and temperature-salinity based on GAMs model in spring

在研究厦门港中华哲水蚤生活周期时发现,当水温高于 24℃ 时中华哲水蚤便开始消失;Uye^[30] 研究认为实验室中中华哲水蚤胚胎发育水温上限为 23℃;徐兆礼和李云^[31] 研究认为,中华哲水蚤生长最适温度为 17.48℃。这种高温生境对中华哲水蚤丰度的限制在本研究中也得到证实,如夏季因调查海域平均水温处于一年中的最高值(ST>25℃, BT>21℃),大于其最适生长温度,中华哲水蚤分布与温度呈现较强的负相关;而冬、春两季水温相对较为适宜,温度又与其分布呈正相关(图 2)。黄加祺和郑重^[32] 研究认为,中华哲水蚤最适盐度为 30,本研究中华哲水蚤高丰度分布介于盐度 27~32 之间,因此也证实了中华哲水蚤偏好稍高盐度的生境。另外,生活史也决定着中华哲水蚤的丰度和区域分布,暖温种的中华哲水蚤主要分布于黄海和东海近海海域,春季是其大量繁殖的季节,因此在季节上具有明显的体现,如春季平均丰度最高(表 1)。另外受长江口冲淡水影响(长江口及其邻近水域表层盐度较低),区域分布上也具有明显差异,如春季东海北部海域和中南部海域要远高于长江口及其邻近水域(表 2)。

春、冬两季低盐性优势种(如五角水母、真刺唇角水蚤和强壮滨箭虫等)的分布主要取决于温度,如五角水母与 BT 呈现较好的正相关,真刺唇角水蚤、强壮滨箭虫与 ST 呈现较强的负相关(图 2)。水文、气候等经过一年四季的轮回,春季整体水温较冬季有一定的提升,东海近岸海域水温呈现南高北低的特征(表 4),长江口以南海域表层盐度整体不高,因此偏好暖水低盐性的五角水母^[33],其分布主要位于长江口以南的近岸海域,而偏好低温性的真刺唇角水蚤和强壮滨箭虫主要分布于长江口以北。这与丁峰元等^[17] 研究东海近海海域春季优势种(五角水母、强壮滨箭虫)群落分布较为一致。

夏季的盐度是决定暖水性和高温高盐性优势种(肥胖软箭虫、亚强次真哲水蚤、精致真刺水蚤和平滑真刺水蚤等)分布的关键因子,且盐度与其分布呈现较强的正相关。夏季外海黑潮暖流和南部台湾暖流给东海近岸带来了许多外海种和暖水种^[34-36],作为暖流所带来的优势种肥胖软箭虫、亚强次真哲水蚤、精致真刺水蚤和平滑真刺水蚤等,主要偏好高温高盐的环境。但因夏季整个东海近岸温度较高且相对均匀(表 4),较适宜其生长繁殖,因此温度与其分布并未表现出显著的相关性。夏季沿岸径流(河口、海湾等)达一年中的最大值,近岸水体盐度分布不均匀(夏季盐度呈梯度变化,河口、海湾等近岸盐度低,远岸

盐度高),因此这种环境格局也是盐度与其分布呈现较强正相关的最好解释。

4.2 香农-威纳多样性指数随纬度变化

香农-威纳多样性指数是基于物种数量反映群落种类多样性,种类越多、各物种个体均匀程度越高,即 H' 值愈大,群落所含的信息量愈大^[37]。本研究发现,春、冬两季香农-威纳多样性指数与纬度呈负相关,但夏季相关性不显著。从种类数量方面可对春、冬两季香农-威纳多样性指数与纬度的负相关关系做出解释(低纬度浮游动物种类数多,高纬度种类数少)。

夏季香农-威纳多样性指数与纬度相关性不显著,这主要由香农-威纳多样性指数在纬度 30.0°~31.0°N 上偏高所引起(图 5)。首先长江口与舟山渔场介于此纬度之间(图 1),夏季该区域因台湾暖流和长江径流的汇合为该区域输送来多种生态类型的物种(如河口半咸水种、近岸低盐种、近岸暖水种、高温高盐种等)^[21],因此种类上相对较为丰富。其次长江口及邻近海域内平均均匀度指数(0.84)较其他两个区域的 0.45 与 0.81 都高,因此从数量均匀程度上也可以给予较好的解释。

4.3 生物多样性参数与温盐的关系

已有研究表明,温度和盐度可调控海域中浮游动物的种类组成、数量分布、群落结构及生物多样性等^[10,38]。而本研究也发现,温度和盐度对生物多样性参数也具有不同程度的影响。不同季节的温度和盐度与生物多样性参数之间的相关性也不相同,春季生物多样性参数是综合多层环境因子的结果,而冬、夏两季决定浮游动物生物多样性指数的环境因子相对较为单一。

春季整体水温还不高(表 4),东海近岸受多种水团影响,其中东北部近岸仍受黄海冷水团控制^[17],水温较低,长江口及邻近水域属咸淡水交汇区,而东海中南部近岸海域也受微弱台湾暖流影响^[36],因此春季上层水域浮游动物分布呈斑块出现,分布不均匀,所以在种类数 S 、多样性指数 H' 上也具有一定体现(与 ST 的相关性波动变化)。研究表明浮游动物具有一定的垂直分布现象^[39],春季浮游动物多喜欢生活于下层水温高、盐度高的水域(图 6),BT 和 BS 越高其种类数 S 和多样性指数 H' 就越大,单纯度指数 C 越小(说明不单一)。夏季整体气温升高,表层水温达一年中最大值,黑潮暖流和台湾暖流也越加强劲^[34-36],因此较高的水温仅适宜于少数高温高盐种的生存,而限制了其他类群的存在,表层温盐并未起决定性作用,仅 BS 与多样性指数 H' 、单纯度指数 C 和均匀度指

数 J 显著相关, 夏季受沿岸冲淡水及降雨量的影响, 在咸淡水交汇区底层盐度 20 左右时其多样性指数 H' 和均匀度指数 J' 达最高值(图 7)。冬季因整体水温最低, 整个海区南北表层水温差异明显, 多样性指数

H' 与纬度又极显著负相关, 因此 ST 与浮游动物种类数 S 、多样性指数 H' 和丰富度指数 d 显著正相关, 而与单纯度指数 C 显著负相关。

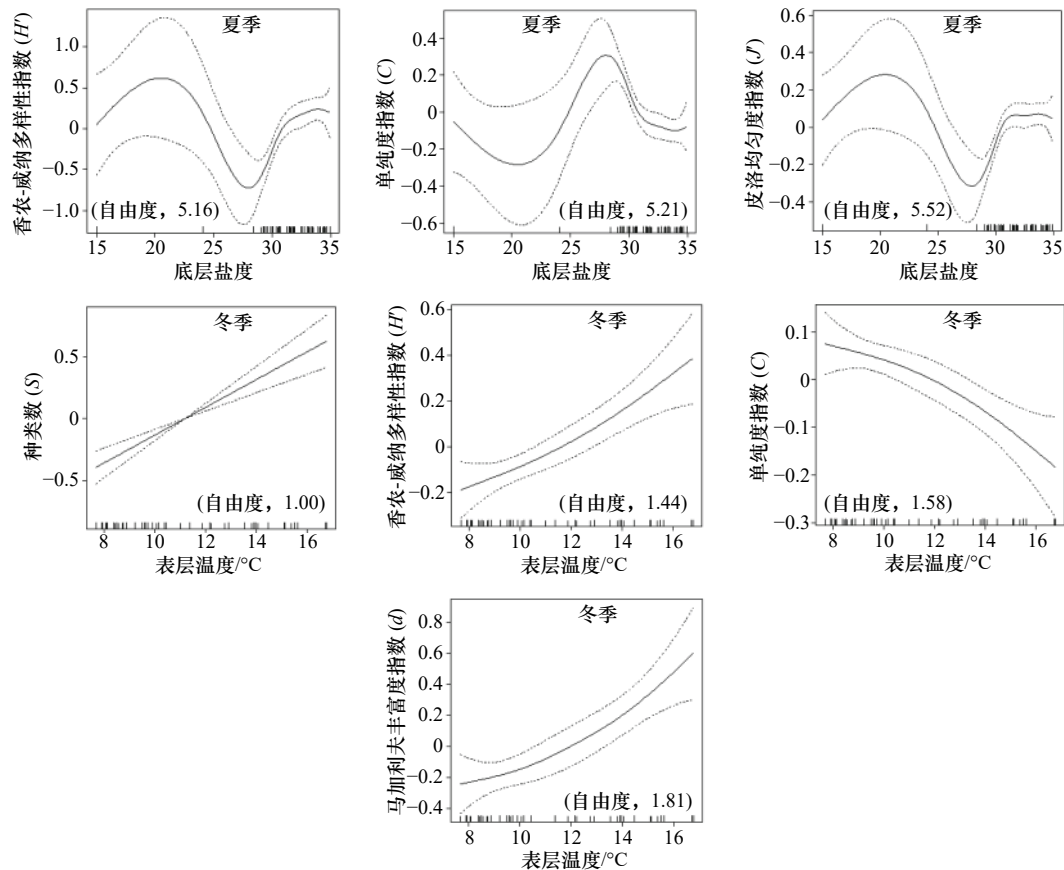


图 7 夏季和冬季基于 GAMs 模型生物多样性参数与温盐的关系

Fig. 7 Relations in biodiversity parameters and temperature-salinity based on GAMs model in summer and winter

5 结论

(1) 优势种季节演替较为明显, 由春季 2 种演替成夏季 10 种, 再更替为冬季 5 种, 春季和冬季优势种的种类和生态类群相对单一, 夏季较为丰富。

(2) 优势种时空分布是综合多层环境因子的结果, 如春季中华哲水蚤与 SS 和 BS 正相关, 夏季与 ST 和 BT 负相关, 冬季与 SS 正相关; 春季五角水母与

BT、BS 呈现较好的正相关; 夏季盐度是决定暖水性和高温高盐性优势种分布的关键因子, 且呈现较强的正相关; 冬季真刺唇角水蚤、强壮滨箭虫与 ST 关系密切, 且呈现较强的负相关。

(3) 春季和冬季香农-威纳多样性指数与纬度呈负相关, 而夏季两者的相关性不显著。

(4) 温度和盐度对生物多样性参数影响显著, 又呈现出季节上的差异性。

参考文献:

- [1] 邓邦平, 徐切, 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.
Deng Bangping, Xu Ren, Liu Caicai, 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.
- [2] 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.
Du Mingmin, Liu Zhensheng, Wang Chunsheng, et al. The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5407-5418.
- [3] 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.

- Gao Qian, Xu Zhaoli, Zhuang Ping. 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.
- [4] 刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Liu Zhensheng. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [5] 林景宏, 陈明达, 陈瑞祥. 南黄海和东海浮游端足类的分布特征[J]. *海洋学报*, 1995, 17(5): 117–123.
Lin Jinghong, Chen Mingda, Chen Ruixiang. Distribution characteristics of pelagic Amphipoda in south Yellow Sea and East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1995, 17(5): 117–123.
- [6] 齐衍萍. 夏、冬季黄东海浮游动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Qi Yanping. Study on the community ecology of zooplankton in the Yellow Sea and the East China Sea in summer and winter[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [7] 左涛. 东、黄海浮游动物群落结构研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003.
Zuo Tao. Community structure of zooplankton in the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [8] 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): 193–199.
- [9] Zhou Shuchan, Jin Binsong, Guo Li, 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.
- [10] 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.
Zhang Guangxing, Chen Shiquan, Chen Dandan, et al. The relationship between zooplankton and the environmental factors in the coastal waters of Hainan Island in the early summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(12): 125–132.
- [11] Chang K H, Amano A, Miller T W, et al. Pollution study in Manila Bay: eutrophication and its impact on plankton community[M]//Obayashi Y, Isobe T, Subramanian A, et al. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry—Environmental Research in Asia*. Tokyo: Terrapub, 2009, 261–267.
- [12] 陈涛, 王云龙, 廖勇. 象山港人工鱼礁区浮游动物种类组成及群落结构特征[J]. *海洋科学*, 2014, 38(7): 41–46.
Chen Tao, Wang Yunlong, Liao Yong. The species composition and community structure of zooplankton in Xiangshan Bay[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(7): 41–46.
- [13] 郭沛涌, 沈焕庭, 刘阿成, 等. 长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 892–900.
Guo Peiyong, Shen Huanting, Liu Acheng, et al. The species composition, community structure and diversity of zooplankton in Changjiang Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 892–900.
- [14] 张壮丽, 叶孙忠. 福建海区浮游动物种类组成及数量分布特点[J]. *南方水产*, 2005, 1(6): 34–38.
Zhang Zhuangli, Ye Sunzhong. The species composition and quantity distribution characteristics of zooplankton in Fujian sea area[J]. *South China Fisheries Science*, 2005, 1(6): 34–38.
- [15] 王晓娟. 福建近岸海域夏季浮游动物的数量和分布[J]. *海峡科学*, 2013, 12(6): 19–21, 35.
Wang Xiaojuan. The quantity and distribution of zooplankton at Fujian offshore in summer[J]. *Straits Science*, 2013, 12(6): 19–21, 35.
- [16] 徐兆礼, 晁敏, 陈亚瞿. 东海浮游动物生物量分布特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(3): 93–101.
Xu Zhaoli, Chao Min, Chen Yaqu. Distribution characteristics of zooplankton biomass in the East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2004, 26(3): 93–101.
- [17] 丁峰元, 李圣法, 董婧, 等. 春季东海区近海浮游动物群落结构及其影响因子[J]. *海洋渔业*, 2005, 27(1): 26–32.
Ding Fengyuan, Li Shengfa, Dong Jing, et al. Preliminary study on the zooplankton community structure and its influential factors in the offshore waters of the East China Sea in spring[J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(1): 26–32.
- [18] 高瑜, 江志兵, 杜萍, 等. 乐清湾春季浮游生物群落和环境因子分布特征[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(6): 82–89.
Gao Yu, Jiang Zhibing, Du Ping, et al. Characteristics of plankton community and its relations with environmental factors in Yueqing Bay[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(6): 82–89.
- [19] 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.
Li Chunhou, Jia Xiaoping, Cai Wengui. Diversity of marine zooplankton in the north of South China Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(2): 139–146.
- [20] 于雯雯, 刘培廷, 高银生, 等. 春夏季吕泗渔场水产种质资源保护区浮游动物分布特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2744–2749.
Yu Wenwen, Liu Peiting, Gao Yinsheng, et al. Distribution characteristics of zooplankton in national aquatic germplasm conservation area in Lusi fishing ground of east China in spring and summer[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2744–2749.
- [21] 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.
Luo Xin, Zeng Jiangning, Xu Xiaoqun, 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.
- [22] 张冬融, 徐佳奕, 徐兆礼, 等. 杭州湾南岸海域春秋浮游动物分布特征与主要环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2115–2123.

- Zhang Dongrong, Xu Jiayi, Xu Zhaoli, et al. Distribution pattern of zooplankton in the south part of Hangzhou Bay during spring and autumn in relation to main environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2115–2123.
- [23] 赵坤, 吴波, 尤庆敏, 等. 长江口九段沙附近水域浮游动物时空分布及其与环境因子的关系[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 374–379.
- Zhao Kun, Wu Bo, You Qingmin, et al. Spatio-temporal distribution of zooplankton and its relation with environmental factors in Jiduduansha inshore waters of Yangtze Estuary[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 374–379.
- [24] 朱延忠, 刘录三, 郑丙辉, 等. 春季长江口及毗邻海域浮游动物空间分布及与环境因子的关系[J]. 海洋科学, 2011, 35(1): 59–65.
- Zhu Yanzhong, Liu Lusan, Zhen Binghui, et al. Relationship between spatial distribution of zooplankton and environmental factors in the Changjiang Estuary and its adjacent waters in spring[J]. Marine Sciences, 2011, 35(1): 59–65.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T12763.6-2007, 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 12763.6-2007, Specifications for oceanographic survey—Part 6: marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [26] 王晓. 南黄海浮游动物群落及环境因子对其分布影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Wang Xiao. Studies on zooplankton community and the effects of environmental factors on its distribution in the southern Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [27] 姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 等. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7308–7319.
- Jiang Huichao, Chen Haigang, Song Xiukai, et al. Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7308–7319.
- [28] 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.
- Xu Xiaohun, Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, 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.
- [29] 林元烧, 李松. 厦门港中华哲水蚤生活周期的初步研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1984, 23(1): 111–116.
- Lin Yuanshao, Li Song. A preliminary study on the life cycle of *Calanus sinicus* (Brodsky) in Xiamen Harbour[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1984, 23(1): 111–116.
- [30] Uye S I. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory[J]. Hydrobiologia, 1988, 167–168(1): 285–293.
- [31] 徐兆礼, 李云. 长江口中华哲水蚤对不同温度和盐度的适应[C]//2008年中国水产学会学术年会论文摘要集. 北京: 海洋出版社, 2008.
- Xu Zhaoli, Li Yun. Adaptation of *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) to temperature and salinity in the Changjiang Estuary[C]//Fisheries of Academic Annual Meeting Abstract Set of China. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [32] 黄加祺, 郑重. 温度和盐度对厦门港几种桡足类存活率的影响[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(2): 161–167.
- Huang Jiaqi, Zheng Zhong. The effects of temperature and salinity on the survival of some Copepods from Xiamen Harbour[J]. Oceanology et Limnologia Sinica, 1986, 17(2): 161–167.
- [33] 许振祖, 黄加祺, 林茂, 等. 中国刺胞动物门水螅虫总纲[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 833–834.
- Xu Zhenzu, Huang Jiaqi, Lin Mao, et al. The Superclass Hydrozoa of the Phylum Cnidaria in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 833–834.
- [34] 齐衍萍, 陈洪举, 朱延忠, 等. 福建罗源湾浮游动物群落特征[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(1): 39–46.
- Qi Yanping, Chen Hongju, Zhu Yanzhong, et al. Characteristics of zooplankton community in Luoyuan Bay, Fujian[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(1): 39–46.
- [35] 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.
- Sun Lufeng, Ke Chang, Xu Zhaoli, 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.
- [36] 孙鲁峰, 孙岳, 徐兆礼. 椒江口海域浮游动物群落季节变化特征[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 131–138.
- Sun Lufeng, Sun Yue, Xu Zhaoli. The study on the seasonal variations of zooplankton community in Jiaojiang coastal waters[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1): 131–138.
- [37] 张海景. 春夏季苏北浅滩浮游动物生态特征的分析研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- Zhang Haijing. Ecological characteristics of zooplankton in the Northern Jiangsu Shoal in spring and summer[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [38] 彭鹏飞, 李绪录, 蔡钰灿. 珠江口万山群岛海域秋冬季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(18): 170–174.
- Peng Pengfei, Li Xulu, Cai Yucan. Distributing characteristics of zooplankton and its relationship to environmental factors in Wanshan islands sea of the Pearl River Estuary in fall and spring[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(18): 170–174.
- [39] 龚玉艳, 杨玉滔, 范江涛, 等. 南海北部陆架斜坡海域夏季浮游动物群落的空间分布[J]. 南方水产科学, 2017, 13(5): 8–15.

Gong Yuyan, Yang Yutao, Fan Jiangtao, et al. Spatial distribution of zooplankton in continental slope of northern South China Sea in summer[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(5): 8–15.

Analysis of the relationships between zooplankton and temperature-salinity based on RDA and GAMs model in coastal East China Sea

Yang Jieqing¹, Shi Yunrong¹, Quan Weimin¹, Wang Yunlong¹

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

Abstract: In order to further explore the changes in relationships between seasonal succession of zooplankton and temperature-salinity in coastal East China sea, zooplankton survey data of three voyages in May (spring), August (summer) and December (winter) of 2013 were analyzed. Redundancy analysis model (RDA) was used to analyze the relationship between the changes of the dominant species and temperature-salinity, then the general algebraic modeling system (GAMs) was applied to analyze the relationship between temperature-salinity and parameters of the biological diversity. Results show that the dominant species' succession changes seasonally from spring (2 kinds) to summer (10 kinds), then becomes 5 kinds in winter. Dominant species and the ecological groups are relatively single in spring and winter, but rich in summer. The temporal and spatial distribution of dominant species are the results of a comprehensive multi-level of environmental factors. For example, *Calanus sinicus* positively relates to surface salinity and bottom salinity in spring, negatively relates to surface temperature and bottom temperature in summer, positively relates to surface salinity in winter. *Muggiaea atlantica* presents better positive correlations with bottom temperature and bottom salinity in spring. What's more, salinity is the key factor to determine the distribution of dominant species like warm water species and high temperature-salinity groups in summer, it also presents strong positive correlations. *Labidocera euchaeta* and *Aidanosagitta crassa* have strong negative correlations with surface temperature in winter. Shannon-Wiener diversity index negatively correlates with latitude in spring and winter. Biodiversity parameters are significantly affected by the temperature and salinity, but the influence presents differences seasonally.

Key words: East China Sea; zooplankton; dominant species; biodiversity parameters; temperature; salinity