

DOI: 10.5846/stxb201505030902

左涛, 吴强, 王俊, 李忠义. 莱州湾水母种类多样性及群集结构的季节变化. 生态学报, 2016, 36(18): - .

Zuo T, Wu Q, Wang J, Li Z Y. Annual survey of the species diversity and assemblage dynamics of medusae in Laizhou Bay, Bohai Sea. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

莱州湾水母种类多样性及群集结构的季节变化

左涛^{1,2,3,*}, 吴强^{1,4}, 王俊^{1,2,3,4}, 李忠义^{1,2}

1 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266200

3 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 青岛 266071

4 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 青岛 266071

摘要: 基于 2011 年 5 月至 2012 年 4 月 (除冰期 12 月和翌年 1—2 月外) 在渤海莱州湾逐月采集的数据资料, 系统地开展水母种类组成、数量分布的周年季节变动, 弥补自上世纪 90 年代以来该区域相关资料的不足, 有利于掌握该水域水母 (主要是小型水母) 主要种类数量时空分布特点, 促进有关莱州湾生物类群对生境改变响应的相关研究。结果显示: 所有调查中, 共出现水母 30 种, 无全年出现的种类。各月中, 莱州湾水母以 8 月种数最多, 5 月数量居多。各月水母总数的 80% 多由 1—2 种优势种贡献所致; 水母优势种类组成具有明显的季节更替。3—5 月优势种为八斑唇腕水母; 6 月为崂山秀氏水母和贝氏真囊水母; 7 月为贝氏真囊水母; 9 月有细颈和平水母, 10 月为细颈和平水母和大西洋五角水母, 8 月和 11 月无明显的优势种, 但 8 月细颈和平水母和曲膝数枝螅水母数量较多。各季节莱州湾小型水母的聚集结构为, 春季有八斑唇腕水母为代表、在湾内分布的聚集组; 夏季有以崂山秀氏水母和贝氏真囊水母为代表、在湾口西侧和湾中部分布的聚集组, 以及细颈和平水母为代表、在湾中底部分布的聚集组; 秋季有四枝管水母和大西洋五角水母为代表、在湾口和中部分布的聚集组。水温季节变化明显, 且对小型水母数量分布聚集结构分布具有较为重要的影响作用。大型水母在本调查航次出现较少。海蜇和沙海蜇出现于 6—8 月个别站位, 海月水母 7—10 月均有出现, 但高密度区出现在 10 月紧邻莱州湾底水域。

关键词: 水母; 群集结构; 莱州湾; 渤海

Annual survey of the species diversity and assemblage dynamics of medusae in Laizhou Bay, Bohai Sea

ZUO Tao^{1,2,3,*}, WU Qiang^{1,4}, WANG Jun^{1,2,3,4}, LI Zhongyi^{1,2}

1 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

2 Function Laboratory for Marine Ecology and Environmental Sciences, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China

3 Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China

4 Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-Environment, Shandong Province, Qingdao 266071, China

Abstract: Laizhou Bay, an estuary of the Yellow River, lies to the north of the Shandong Peninsula and is one of the three largest and most important bays of the Bohai Sea. It is characterized by a high level of primary productivity and is an important spawning, nursery, and feeding ground for many fish species in the Yellow Sea and Bohai Sea. Medusae play crucial roles, not only ecologically in the marine ecosystem but also economically, as commercial target species for some large scyphomedusae in Laizhou Bay. In the past few decades, the interacting impacts of climate change and human

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2011CB403604); 国家基金委-山东省联合基金项目 (U1406403); 山东省自然科学基金 (2009ZRB02317)

收稿日期: 2015-05-03; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zuotao@ysfri.ac.cn

activities have changed the ecosystem of Laizhou Bay significantly, leading to regime shifts in biological organisms, including medusae. Recently, increasing concern has prompted studies on the ecological impacts of changes in the gelatinous species community of the estuary and coastal area. To explore the temporal and spatial distribution of the composition and abundance of medusa species in the bay, annual surveys were designed and carried out from May 2011 to April 2012 (excluding December 2011 and January and February 2012, because of the presence of sea ice). Based on the data collected from 147 samples collected over the course of 9 cruises, nearly thirty cnidarians including twenty-four hydromedusae, one siphonophore, and three large scyphomedusan jellyfish were identified. The species of hydromedusae and siphonophore were small, and were collected by being vertically hauled from the seafloor to the surface using a mesoplankton net (mesh size 160 μm). Of the smaller medusae, no common species were collected throughout the year. Species richness peaked in August, while the total abundance peaked in May. One or two dominant species contributed over 80% of the total monthly abundance. The dominant species varied among months, with *Rathkea octopunctata* dominating from March to May, *Sugiura chengshanense* and *Euphysora bigelowi* dominating in June, *E. bigelowi* dominating in July, *Eirene menoni* dominating in September, and *E. menoni* and *Muggiaea atlantica* dominating in October. In August, *E. menoni* and *Obelia geniculata* were abundant, but were distributed regionally in the central parts of the bay. Very few medusa species were collected in November. Multiple statistical analyses, including cluster analysis and BVSTEP modules conducted with Primer 6.0 software, were used to identify the best matches for environmental factors that affect the composition of the medusa assemblages. Based on the abundance of small medusae, cluster analysis recognized four seasonal and spatial assemblage groups. The first group, with *R. octopunctata* as its representative species, was collected at the runoff inlet of the bay in spring. The second group was collected in the western section of the river mouth or the central parts of the bay in summer. The second group's representative species were *S. chengshanense* and *E. bigelowi*. The third group also occurred in summer, but its location was very similar to the spring group, and it included *E. menoni* as its representative species. The fourth group appeared in autumn and was collected in the river mouth or the central part of the bay, and included two indicator species: *M. atlantica* and *Proboscidactyla flavicirrata*. According to the results of the BVSTEP modules analysis, the water temperature had a more significant effect on the seasonal and spatial distribution of the hydromedusae than salinity, pH, or dissolved oxygen. The three large scyphomedusan jellyfish were only caught by fishing methods that utilized a net with a 20 mm mesh size. They occurred only at a few inlet sites after June. *Aurelia* spp. peaked later in October. *Rhopilema esculentum* and *Nemopilema nomurai* were collected from June to August at only a few sites.

Key Words: medusae; assemblage; Laizhou Bay; Bohai Sea

水母类种类多、数量大、分布广,可通过摄食和捕食竞争影响鱼类早期补充和种群数量^[1-2],是海洋生态系统中居于顶位营养阶层、且相对独立的一类浮游动物功能群。其数量变动可直接影响海洋生态系统的生物资源产出和服务功能。在 2000 年后全球范围内水母旺发或暴发频增,引发诸多经济、社会问题^[3-4]。水母旺发成为国际浮游动物和渔业生物生态学研究关注的热点和焦点,相关研究更是迅速发展^[5-6]。一般海湾内水母种类较为丰富^[7],这是由于海湾内海流引起的物理驱散扰动作用小、且在陆海交汇作用下湾内营养丰富、具有较高生产力,很多水螅水母类的水螅体可以很好地附着底栖生活。但海湾紧邻陆地,极易受到人类活动及气候变化影响而发生生境的改变,湾内的水母群落结构或格局也会相应发生变化。因此,许多河口及海湾已成为水母研究的重点水域,如加拿大的 Roscoe Bay、美国的切萨皮克湾、日本的广岛湾、巴拿马海湾以及我国的胶州湾等^[8-17]。

莱州湾是中国陆架浅海——渤海的三大海湾之一,位于中国山东省北部、北半球北温带会结冰海的南缘。其东侧紧领渤海口,西侧为中国第二大河黄河的入海口,具有独特的理化和生物特征,是中国北部传统的渔业生物产卵、孵育和索饵场^[18]。

相对于中国北部近海而言,莱州湾水母种类较多,其中水螅虫纲和钵水母纲记录就有 52 种^[19-20]。马喜平等^[21]和毕洪生等^[22]曾基于上世纪 50 年代和 90 年代的野外调查资料详细阐述包括莱州湾在内的渤海小型水母生态特征。但在过去的 50 年中,特别是 2000 年后,莱州湾受到最为强烈的人类活动干扰,生态环境已发生不可逆的改变,湾内水污染严重、呈现超富营养化^[23-25];黄河口入海径流锐减和数次断流^[26]、河口低盐区缩小,湾内海水盐度显著上升、受盐度梯度驱动的物理潮汐和湾口环流退化并开始转向^[27-30];湾内与外海水交换能力持续减弱、封闭性增强;冬季海冰冰潮频发^[31]。此外,莱州湾内生物群落结构和格局已发生重大改变^[32-36]。莱州湾水母种类组成和数量分布也表现了一定的变化。如大型钵水母海蜇(*Rhopilema esculentum*) 1987 年开始在渤海旺发、并在莱州湾形成渔场^[37],1992 年莱州湾的捕捞产量(成品)曾达到 9 万吨,之后资源急剧衰退,目前仅通过人工增殖放流幼水母来维持 2 万吨左右捕捞产量。较莱州湾内其他生物类群如游泳动物^[38-41]、底栖动物^[34,42-43]和微型浮游动物^[44]、小型桡足类^[45]研究进展而言,莱州湾的水母生态学数据资料积累和研究报道自上世纪 90 年代以来已相对滞后。

2011 年 5 月至 2012 年 4 月我们在莱州湾开展了周年现场调查,其中游泳生物、桡足类和微型浮游生物等相关研究结果都已见于报道^[39,41,44-45]。本文即基于同期采集的水母数据资料,着重对莱州湾水母种类组成、数量分布的群集结构进行分析,阐明当前莱州湾水母种类多样性水平,掌握它们的数量时空分布特点,探讨莱州湾水母群集结构与环境因子的关系,为莱州湾生物类群对生境改变的可能响应的相关研究提供必要的资料基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区域水文特征

莱州湾湾内面积约为 7000 km²,湾内水浅、大都 10 m 以内,湾口窄(宽约 96 km)。莱州湾水文特征主要受黄河以及沿岸陆地径流、渤海中央水和季风、气温等影响。莱州湾的海水底表温差小;水温总体上由湾西南侧向东北向递减,以湾口东北侧最低。莱州湾盐度分布受黄河冲淡水影响最大^[46]。黄河冲淡水总量以夏、秋季较多,冬春季偏少。冬季偏北风和夏季南风分别作用下,黄河冲淡水在莱州湾区 6—10 月向东及东北方、7—8 月向北及西北方向、11—5 月沿岸向南及东南方扩散^[47]。由此,冬季除黄河口附近的低盐区外,莱州湾内还有黄河淡水向莱州湾底输送积聚、清晰形成的冬季湾底动力学低盐区^[48];而夏季,由于冲淡水从湾口西北方向向渤海中央扩展,外海高盐水则以补偿形式从湾口东侧进入湾内,莱州湾内的盐度反而较湾口和湾外偏高。

1.2 样品采集和分析

2011 年 5—11 月、2012 年 3 月和 4 月租用渔船“鲁昌渔 4193 号”(350kw)在莱州湾进行了 9 航次的逐月定点综合调查。因 2011 年 12 月 14 日至 2012 年 2 月 26 日持续 75 天海区存在结冰(可参见文献[32]),故 2011 年 12 月、2012 年 1 月和 2 月未进行调查。调查范围是在黄河口东侧、38°30'N 以南及水深>10 m 水域。常设调查站位 18 个,为研究方便,将莱州湾由湾底中部和湾口分为四个区(见图 1)。因天气原因部分航次站位无法正常采样,9 航次有效生物采样 147 站次。

大型水母采用渔拖网采样。调查网具为单船底拖方形网,网具网口周长 30.6 m,网囊网目 20 mm。拖网时网口宽度约 8 m,平均拖速 3 kn,每站拖网 1 小时,每网次扫海面积为 0.044 km²。大型水母体在拖网过程中易碎,海上记录种类及其生物量鲜重(kg)。小型水母使用 160 μm 网孔径的浮游生物网(网口面积为 0.2 m²)从底至表垂直拖网采集,样品固定保存于 5% 甲醛海水溶液。用美国 YSI ProPlus 水质分析仪测定各站表层(1-2m)水温度、盐度、酸碱度(pH)和溶解氧(mg/L),对应分布见图 2。

小型水母样在实验室 Nikon SMZ1500 体式显微镜下镜检分类、计数。参考高尚武等^[19]和许振祖等^[20]进行分类,并以许振祖等^[20]最后校订种名为准。小型水母的数量采用滤水量单位体积水母个数,即:个/立方米(ind/m³)。滤水量由网口面积乘以垂直拖网距离估算得到。大型水母采用单位拖网面积的鲜重(kg/km²)。

1.3 数据分析

数据分析流程参考周红和张志南^[49]和生态统计分析软件 PRIMER 6.0 软件包系列说明进行。首先,基于四次根方后不同种类的小型水母丰度,选取 Bray-Curtis 相似性指数和组平均方法计算采样站次间的相似矩阵,通过聚类分析(Cluster analysis)对小型水母时空分布聚类分组。而后,以月份和采样站的地理位置作为时空分布因子,采用两因素相似性分析方法(ANOSIM)检验聚类组差异显著与否及影响因素、确定有效聚类组。再基于相似性百分比分析 SIMPER 模块,了解表征不同聚类组或造成聚类组差异的物种,即能代表该聚类组的特征种。最后,利用 RELATE 模块,确定小型水母数量组成

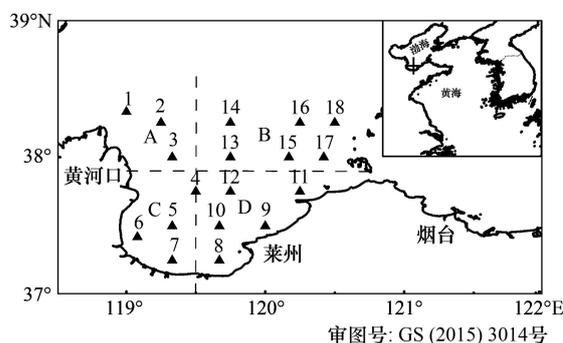


图1 调查海区 and 站位设置。

Fig.1 Study area and geographic distributions of sampled stations
调查海区分为湾口西侧 A 区和东侧 B 区、湾内西侧 C 区和东侧 D 区

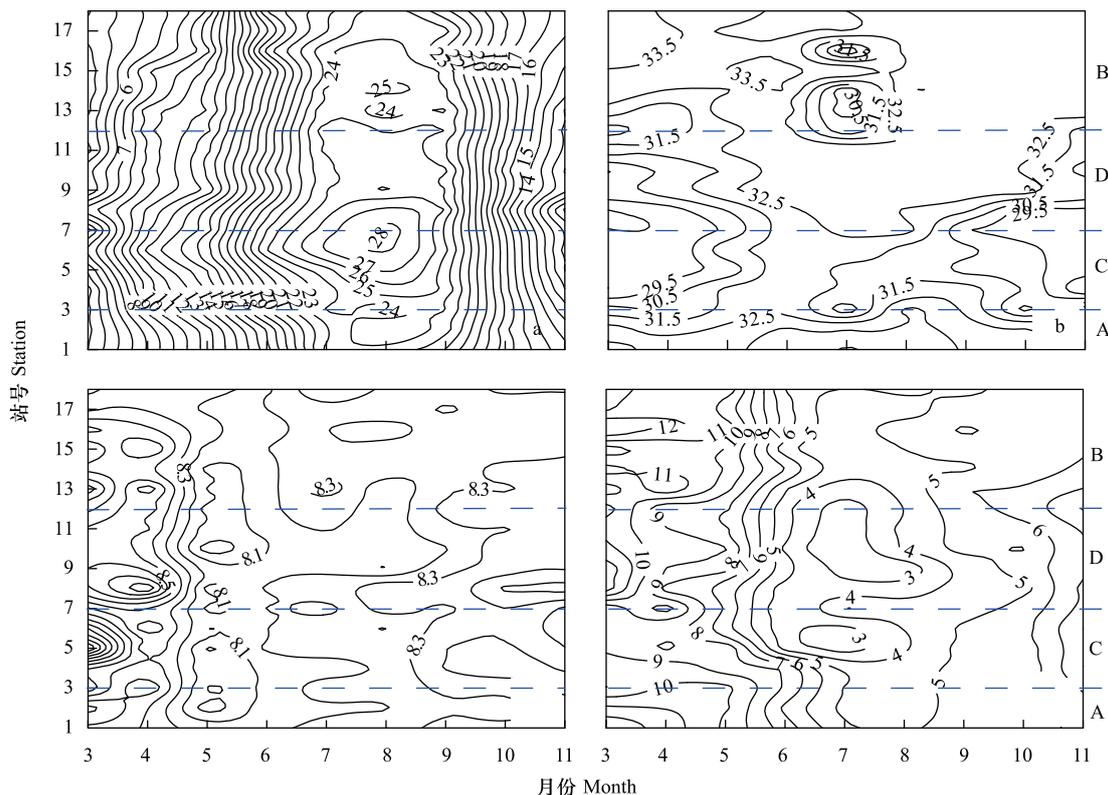


图2 莱州湾各月、各站位的表层水温(°C)、盐度和酸碱度(pH)、溶解氧浓度(mg/L)分布。

Fig.2 Contour distributions of surface water temperature, salinity and pH, dissolved oxygen concentration of the surveyed stations of each cruise in Laizhou Bay

图右侧 A、B 代表湾口西侧和东侧区域, C 和 D 分别代表湾内西侧和东侧区, 分布参见图 1; a. 表层水温 surface water temperature; b. 表层水盐度 surface water salinity; c. 表层水酸碱度 pH of surface water; d. 表层水溶解氧浓度 dissolved oxygen concentration of surface water

和环境数据相似性矩阵间具有显著相关性后,再基于生物—环境分析 BVSTEP 模块,计算当月、1 个月前和 2 个月前环境因子温度、盐度、溶解氧和酸碱度的组合及单因子对莱州湾小型水母时空分布的贡献率或重要性。大型水母的出现站位和季节较少,其数据未用于上述多元统计分析。

上述多元分析结果图为 PRIMER 6.0 绘制完成。平面图和数量比例图采用 Surfur 10.0 和 Grapher 5.0 (Golden software, Inc.) 绘制。

2 结果

2.1 种类多样性

9 航次 147 个浮游生物样中,共有 104 样出现小型水母,包括硬水母类 1 种、水螅水母类 25 种(含 2 待定种)、管水母类 1 种。另外,渔拖网样有钵水母 3 种。所有种类均列于表 1。所有调查月中,11 月和 5 月出现种数最少,仅有 2 种;9 月和 10 月出现种数最多、均超过 15 种。

表 1 2011 年 5 月至 11 月,2012 年 3 月和 4 月莱州湾水母种类及出现站位数

种名 Species	2011 年 The year of 2011							2012 年 The year of 2012	
	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	10 月 Oct	11 月 Nov	3 月 Mar	4 月 Apr
	水螅虫总纲 Cnidaria								
自育水母纲 Automedusa									
硬水母亚纲 Trachymedusae									
烟台异手水母 <i>Varitentaculata yantaiensis</i>					1	1			
水螅水母纲 Hydroidomedusa									
花水母亚纲 Anthomedusae									
鳞茎高手水母 <i>Bougainvillia muscus</i>			1	1		1		1	1
首要高手水母 <i>B. principis</i>			1			3			
单肢水母(未定种) <i>Nubiella</i> sp.			1	3	1				
灯塔水母 <i>Turritopsis nutricula</i>					2				
顶突介水母 <i>Hydractinia apicata</i>			1	1	3				
八斑唇腕水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	8	2	1	3	1	1		9	7
四枝管水母 <i>Proboscidadactyla flavicirrata</i>		1	3		1	9	2	6	2
六枝管水母 <i>P. stellata</i>								1	
贝氏真囊水母 <i>Euphysora bigelowi</i>		9	10	5	3				
耳状囊水母 <i>Euphysa aurata</i>			1						
杜氏外肋水母 <i>Ectopleura dumortieri</i>		7	6	3	1				
软水母亚纲 Leptomedusae									
和平水母(未定种) <i>Eirene</i> sp.						2			
锡兰和平水母 <i>E. ceylonensis</i>					2	2			
六辐和平水母 <i>E. hexanemalis</i>						1			
细颈和平水母 <i>E. menoni</i>		1	3	3	8	10		1	
塔形和平水母 <i>E. pyramidalis</i>		1	2	1	2	4			
真瘤水母 <i>Eutima levuka</i>					1				
印度强壮水母 <i>Eutonina indicans</i>					1				
卡玛拉水母 <i>Malagazzia carolinae</i>		1		1	1	2			
嵯山秀氏水母 <i>Sugiura chengshanense</i>		11	4						
多手帽形水母 <i>Tiaropsis multicirrata</i>						1			
单囊美水母 <i>Clytia folleata</i>						2			
半球美水母 <i>C. hemisphaerica</i>						4			
曲膝藪枝水母 <i>Obelia geniculata</i>	2			1	6	1		3	5
真拟杯水母 <i>Phialucium mbenga</i>						1			
管水母亚纲 Siphonophorae									
大西洋五角水母 <i>Muggiaea atlantica</i>					2	10	1	1	
钵水母纲 Scyphomedusae									
海月水母 <i>Aurelia</i> spp.			1		4	3		1	
海蜇 <i>Rhopilema esculentum</i>			1	1					
沙海蜇 <i>Nemopilema nomurai</i>		1	1	1	1				
总种数 Total species no.	2	9	15	12	18	18	2	7	4
总作站数 Total sampling stations	17	18	17	18	18	18	10	18	11

八斑唇腕水母 (*Rathkea octopunctata*) 出现月份最多,除 11 月外的所有调查月均有出现。四枝管水母 (*Proboscoidactyla flavicirrata*)、细颈和平水母 (*Eirene menoni*)、塔形和平水母 (*Eirene pyramidalis*)、卡玛拉水母 (*Malagazzia carolinae*)、曲膝藪枝螳水母 (*Obelia geniculata*) 也是莱州湾出现月份数较多的种类。大型水母中有海月水母 (*Aurelia* spp.)、沙海蜇 (*Nemopilema nomurai*) 和海蜇 (*R. esculentum*)。海蜇仅出现于夏季 7、8 月,沙海蜇在整个夏季均有出现。海月水母出现在夏季 7 月和秋季 9—10 月。

各调查月中,出现站位频率>50%的常见种类为:3 月为八斑唇腕水母;4 月为八斑唇腕水母、曲膝藪枝螳水母;5 月为八斑唇腕水母;6 月有嵯山秀氏水母 (*Sugiura chengshanense*)、贝氏真囊水母 (*Euphysora bigelowi*) 和杜氏外肋水母 (*Ectopleura dumortieri*);7 月为贝氏真囊水母;9 月和 10 月有细颈和平水母,10 月还有大西洋五角水母 (*Muggiaea atlantica*)、四枝管水母;8 月和 11 月没有出现站位频率>50%的种类。

2.2 数量组成

小型水母月平均数量为 13.86 ± 25.60 ind/m³,各月数量值介于 0.09—81.33 ind/m³,以 5 月值最高、11 月最低(图 3)。

莱州湾小型水母数量在种类间的分布极为集中,各月总数量的 80%都是由 1—2 种贡献所致。所有种类中,单一种数量占当月小型水母总数量的百分比值>10%的小型水母,有八斑唇腕水母(3—5 月)、嵯山秀氏水母(6 月)和贝氏真囊水母(6、7 月)、细颈和平水母(7、8、9、10 月)、曲膝藪枝螳水母(8 月)、灯塔水母 (*Turritopsis nutricula*) (9 月)、大西洋五角水母(10、11 月)、四枝管水母(11 月)(图 4)。

三种大型水母在各季节的出现站位频率均<5%。海蜇数量很少,即使出现,也不超过 30 kg/km²。沙海蜇在 6—9 月四个月中各出现一个站位,其中 8、9 月生物量较高,出现超过 3000 kg/km²密集区。海月水母出现于 7 月和 9—11 月,10 月有两站位的生物量达 25000 kg/km²和 45454 kg/km²。

2.3 群集结构

综合 7%和 25%的相似性水平,可将 147 个出现小型水母的采样站次划分为四个聚类组(I、II-a 和 II-b、III)(图 5)。6 至 8 月站次多聚于 I 组,3 至 5 月则多聚于 III 组,9 月多数站次和少量的 10 月的生物样聚于 II-a 组,10 月多数站次和 11 月以及少数 3 月、9 月采样站次聚于 II-b 组。一维相似性分析 ANOSIM 分析显示,上述各聚类分组总体相关系数值为 0.678,差异性达 1%的显著水平。

由 SIMPER 分析结果,各聚类组非相似性贡献百分比>10%的代表种有:聚类 I 组由贝氏真囊水母、杜氏外肋水母和嵯山秀氏水母组成;聚类 II-a 组为细颈和平水母;聚类 II-b 组为四枝管水母和大西洋五角水母;聚类 III 组为八斑唇腕水母和曲膝藪枝螳水母(表 2)。

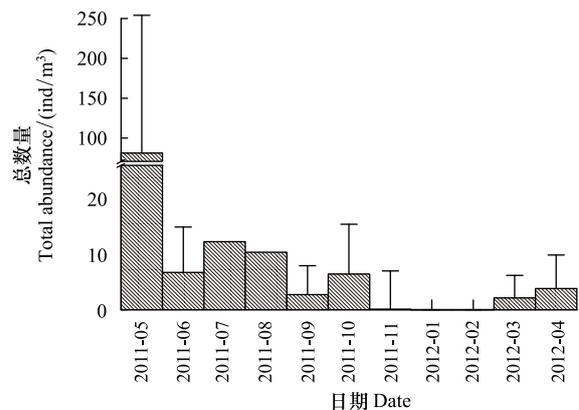


图 3 莱州湾小型水母总数量 (ind/m³) 月变化

Fig. 3 Monthly variations of small medusae abundance in Laizhou Bay

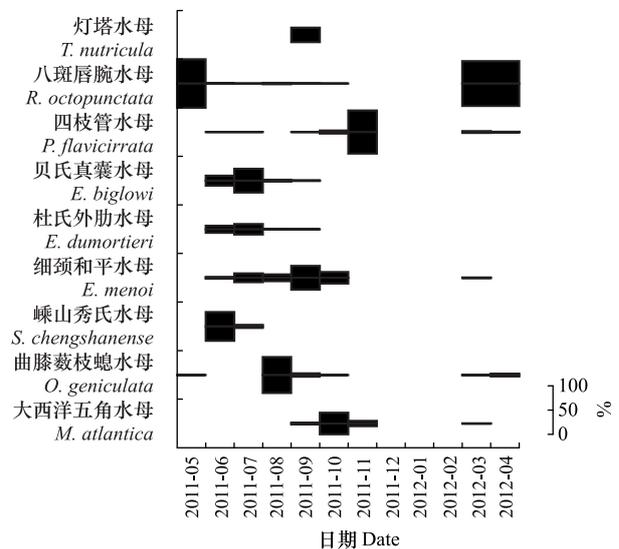


图 4 莱州湾各月小型水母优势种所占的数量百分比

Fig. 4 Monthly percentage contributions of the dominant species to the total small medusa abundance in Laizhou Bay

T. nutricula: 灯塔水母; *R. octopunctata*: 八斑唇腕水母; *P. flavicirrata*: 四枝管水母; *E. bigelowi*: 贝氏真囊水母; *E. dumortieri*: 杜氏外肋水母; *E. menoi*: 细颈和平水母; *S. chengshanense*: 嵯山秀氏水母; *O. geniculata*: 曲膝藪枝螳水母; *M. atlantica*: 大西洋五角水母

2.4 群集结构时空分布与环境因子的关系

ANOSIM 结果为,小型水母数量分布的月间非相似性达到 1% 的显著水平,而站位间非相似性未达到显著水平($P=0.045$)。

除 6、7 月外,莱州湾小型水母总数量表现为湾口较少、湾中部和湾底相对较多(图 6a)。5 月、7 月和 8 月出现 $>100 \text{ ind/m}^3$ 的高密集区,大多站次的数量丰度 $<10 \text{ ind/m}^3$ 。分析各聚类组的代表种数量分布,聚类 I 组的代表种多出现于 6 至 8 月莱州湾口或接近湾中部站位(图 6b-d);聚类组 II-a 的代表种出现于 6—11 月且主要分布莱州湾内中底部(图 6e);聚类组 II-b 的代表种类多出现于 10 月、且主要分布莱州湾口及接近中部站位(图 6f-g);聚类组 III 代表种自 3 月至 9 月都有出现,其中 4 月和 5 月出现频率较多,高丰度值多出现在莱州湾底(图 6h-i)。海蜇、沙海蜇和海月水母的旺发区域都是在湾底的 17 和 18 号站(图 6j-1)。

RELATE 检验,小型水母数量组成和环境数据相似性矩阵间具有显著相关($P=0.01$)。利用生物环境分析(BVSTEP)检验,在温度、盐度、溶解氧和酸碱度等因子中,小型水母数量分布聚集结构只与当月、2 月前温度的因子组合的相关性达到 1% 显著水平(相关系数 $R=0.367$),其中 2 月前温度单个因子承载相关系数值为 0.341。

3 讨论

综合结果 2.1 和 2.2 小型水母出现频率和数量季节变化,莱州湾 3 月至 5 月优势种应为八斑唇腕水母,6 月为嵯山秀氏水母和贝氏真囊水母,7 月为贝氏真囊水母,9 月有细颈和平水母,10 月为细颈和平水母和大西洋五角水母。8 月细颈和平水母和曲膝藪枝螳水母数量较多,但暂无绝对主导的优势种。大型水母以海蜇、沙海蜇和海月水母占主导地位。

虽有报道一些海湾水母随生境改变、其数量大幅增加和种类组成年代更替明显,如胶州湾^[15,17],但 2011 年莱州湾小型水母季节种类组成与 1959 年^[21-22]、1992—1993 年^[21]基本相似,并没有发生明显的改变,优势种或数量较多的种类在冬末(2 月,本研究为 3 月)和春季 5 月仍为八斑唇腕水母、夏季 8 月为和平水母属和藪枝螳水母、秋季 10 月为五角水母和和平水母属。目前暂未收集到其他莱州湾小型水母历史数据,无法确定其数量是否有较大幅度的波动。对比中国近海或海湾水母相关报道,2011 年莱州湾小型水母总数量年均丰

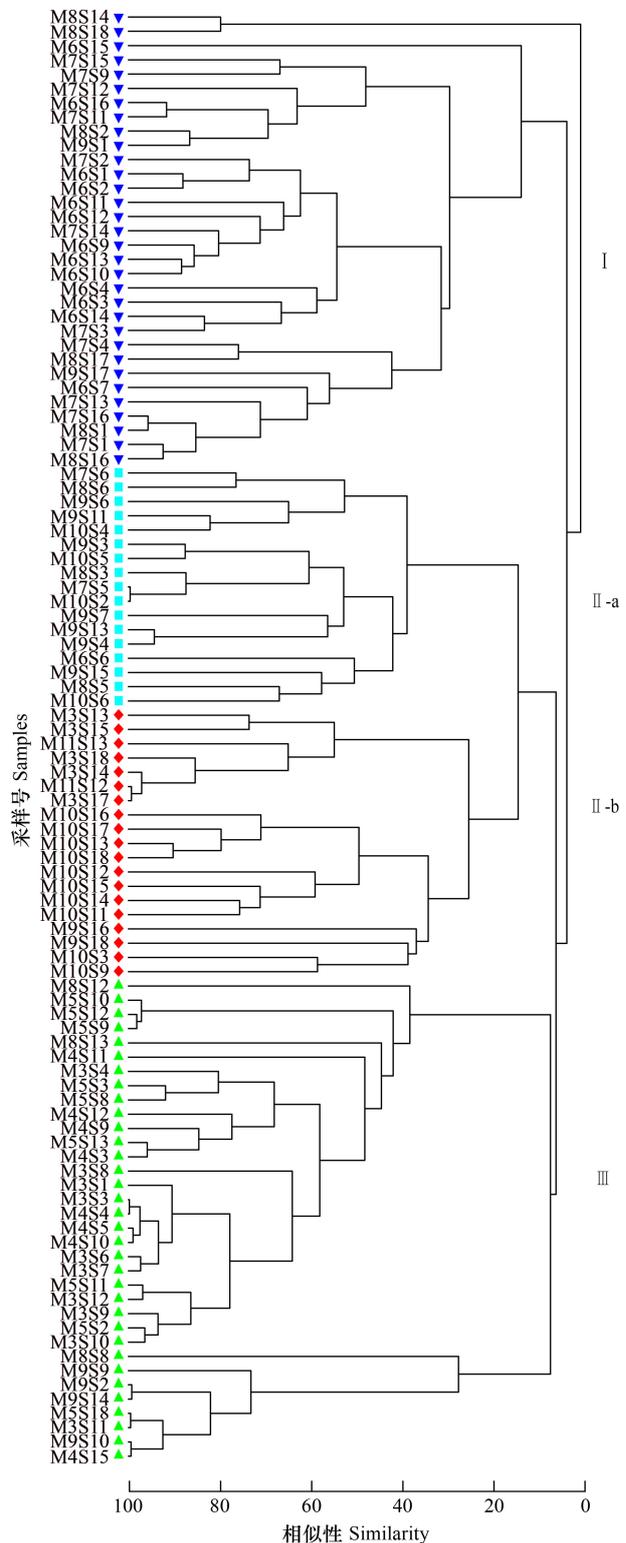


图 5 莱州湾各月小型水母出现站位和种类数量分布聚类图

Fig. 5 Cluster analysis plot based on the seasonal and spatial distributions of small medusae abundance in Laizhou Bay

样品编号规则为:M+月+S+站位序号

度(13.86 ind/m³), 低于胶州湾 26.4 ind/m³[15], 高于 1959 年渤海 2—3 ind/m³[21-22] 和 1992 年渤海的 0.4—3.3 ind/m³[21] 和 2000 年之后的黄海 0.8 ind/m³[50] 和 1997—2000 年间东海的 1.01—5.41 ind/m³[51]。但由于各报道中采样方法不尽相同, 比较结果还待进一步的考证。

表 2 SIMPER 分析的各聚类组非相似性和代表种贡献百分比

Table 2 Similarity of the clusters and the percentages contributed by the representative species by SIMPER analysis

因子 Parameters	聚类组 I Cluster I	聚类组 II-a Cluster II-a	聚类组 II-b Cluster II-b	聚类组 III Cluster III
平均相似性 Average similarity	34%	47%	38%	40%
代表种 Representative species				
杜氏外肋水母 <i>Ectopleura dumortieri</i>	22%	—	—	—
细颈和平水母 <i>Eirene menoni</i>	—	88%	7%	—
贝氏真囊水母 <i>Euphysora bigelowi</i>	56%	—	—	—
大西洋五角水母 <i>Muggiaea atlantica</i>	—	—	33%	—
曲膝数枝螅水母 <i>Obelia geniculata</i>	—	—	—	16%
四枝管水母 <i>Proboscidea flavicirrata</i>	—	—	54%	—
八斑唇腕水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	—	—	—	83%
崂山秀氏水母 <i>Sugiura chengshanense</i>	19%	—	—	—

莱州湾所有小型水母中, 温带偏冷水性近岸种八斑唇腕水母^[52-53]是渤海地源性种类^[21, 50]。该种自上世纪 90 年代后才逐渐成为黄海沿岸、胶州湾和江苏沿岸海州湾的冬、春季水母优势种类^[14-15, 54]。它在渤海多出现于 1—5 月, 周年数量变化为双峰型、峰期为 2 月和 5 月^[21-22]。本研究中, 八斑唇腕水母除 5 月略向湾口西扩外, 其他季节多位于莱州湾内 38°N 以南、水温 < 14°C 和表层盐度 < 31.5 的站位, 38°N 以北湾口东侧从不出现, 这更反映了该种作为相对保守、本地来源种类的特征。本研究因调查季节所限, 未捕捉到八斑唇腕水母在 2 月的数量峰期, 但从已有的 5 月数量来看, 2011 年高密集区可达 506 ind/m³, 远高于 1959 年 2 月高密区的 220 ind/m³[22] 和 5 月高密区的 > 50 ind/m³[21], 据此推测, 2011—2012 年八斑唇腕水母总体数量应高于 1959 年和 1992 年相应水平。

大西洋五角水母是一个广布性的管水母, 是黄海、东海和台湾海峡的优势种类之一。它与八斑唇腕水母不同的是, 该种非渤海地源性种, 是随外海水携入渤海的外源种。该种在中国近海随季节、由南向北、从东海至黄、渤海逐渐推移, 一般于 10—11 月抵达渤海中央海区并形成数量高峰, 尔后向渤海各海湾内延伸, 12 月受水温下降影响又退回渤海中央海区、直至完全退出渤海^[21]。结合图 2 和图 6g, 该种在莱州湾分布范围局限于 119.5°E 以东、37.5°N 以北和温度 16—18°C、盐度 > 32.5 的区域、分布中心位于为湾口东侧; 其季节性的扩展和退缩与其在整个渤海区的总体分布格局是相符的。如, 秋季 9 月它仅在湾口东侧站出现; 10 月大量进入湾内, 但 119.5°E 以西近黄河口和湾底均不出现; 11 月退缩回湾口。根据大西洋五角水母的分布, 推测 2011 年秋季, 渤海外海水在莱州湾的影响范围应不超过 119.5°E 以东、37.5°N 以北。

聚类组 II-a 代表种细颈和平水母所属的和平水母属种类偏喜略高水温, 在渤海多出现于夏秋季, 7—8 月数量最多, 7 月以前主要分布于湾内和沿岸水域, 7 月后向中央海区扩展, 9 月后又缩回沿岸水域^[21]。在莱州湾, 它出现于 6—10 月, 且随月由湾底西侧向整个湾区扩展。聚类组 I 代表种贝氏真囊水母、崂山秀氏水母和杜氏外肋水母多为外海水与近岸水交汇区的常见种^[21, 55]。它们出现季节为夏季 6—7 月, 且数量分布呈现东南至西北走向, 高值区多位于湾口西侧站位, 湾内东侧和湾口东侧站位很少出现。夏季这些小型水母多积聚在湾口西侧, 可能与此季节莱州湾陆地径流增强、冲淡水向湾口西北方向扩展有关。杜氏外肋水母与四枝管水母被认为是分布于渤海和北黄海沿岸、同属于偏低温的近岸种^[55], 但对比图 6b 和图 6f 前种出现季节 6—8 月应早于后种的 7—10 月。

总体而言, 莱州湾的小型水母群集结构的季节特征为, 春季(3—5 月), 莱州湾水温低, 有偏冷水性的近岸

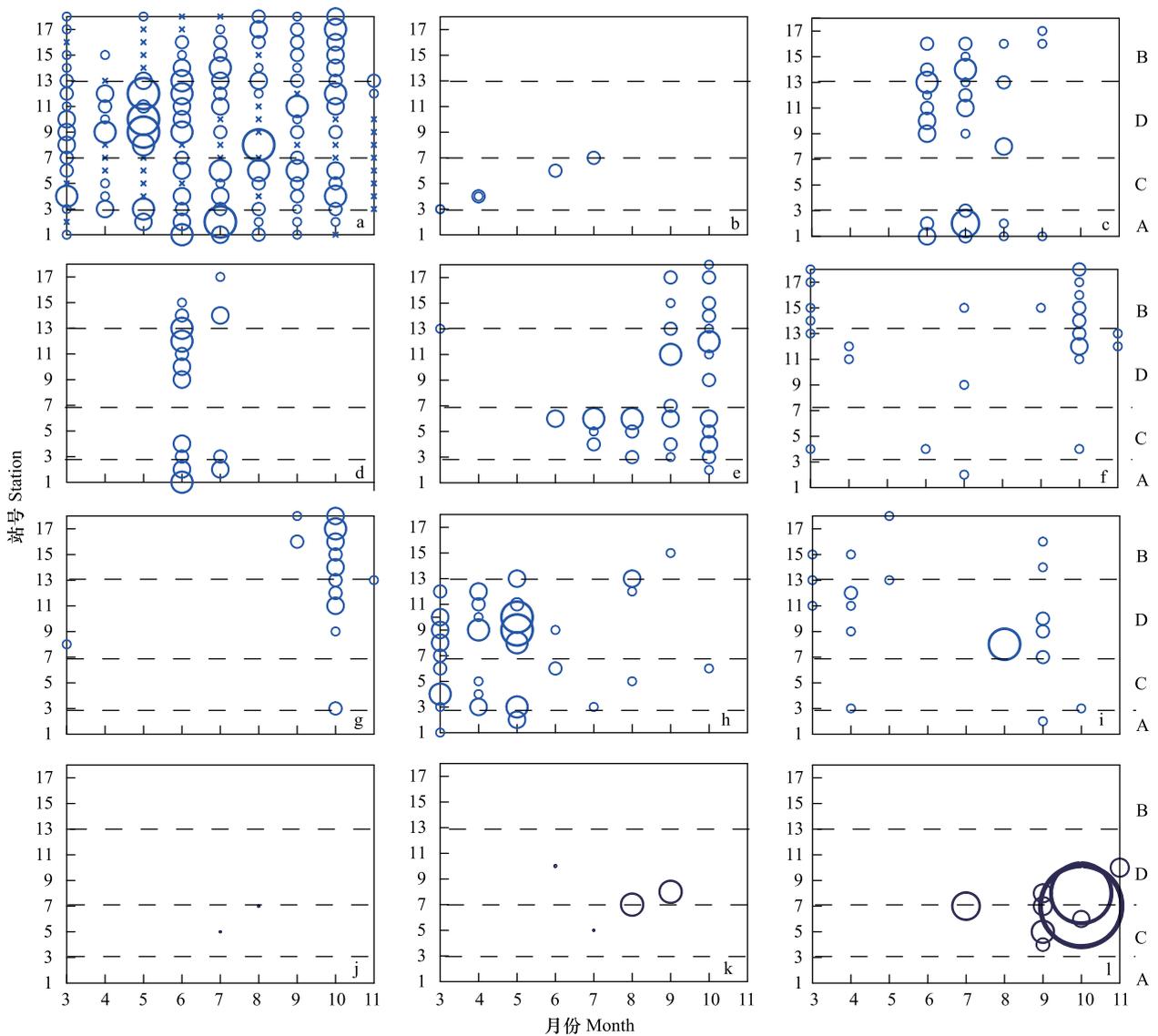


图 6 莱州湾主要水母数量分布

Fig.6 Seasonal and spatial distributions of representative medusa species abundance in Laizhou Bay

图右侧 A、B 代表湾口西侧和东侧区域, C 和 D 分别代表湾内西侧和东侧区, 分布参见图 1; a. 小型水母总丰度 total abundance of small medusa; b. 杜氏外肋水母 *E. dumortieri*; c. 贝氏真囊水母 *E. biglowi*; d. 崂山秀氏水母 *S. chengshanense*; e. 细颈和平水母 *E. menoi*; f. 四枝管水母 *P. flavicirrata*; g. 大西洋五角水母 *M. atlantica*; h. 八斑唇腕水母 *R. octopunctata*; i. 曲膝数枝螅水母 *O. geniculata*; j. 海蜇 *R. esculentum*; k. 沙海蜇 *N. nomurai*; l. 海月水母 *Aurelia* spp.; 图例说明 图 a-i: 图中圆圈直径代表数量(ind/m³)大小。圆圈直径 0.2cm: < 0.5 ind/m³; 0.3cm: 0.5—2.5 ind/m³; 0.4 cm: 2.5—10 ind/m³; 0.5 cm: 10—50 ind/m³; 0.65 cm: 50—100 ind/m³; 0.75 cm: >100 ind/m³. 图 j-l: 图中圆圈直径代表其生物量(kg/m²)的平方根大小。圆圈直径 0.5 cm 代表 3000 kg/m², 其余类推

种八斑唇腕水母为代表的聚集组; 夏季(6—8 月) 水温升高, 黄河入海径流受莱州湾顺时针环流和东南季风影响、向东或东北向流出, 外海水以补偿形式流入湾内, 从而促成以广布性暖温带近岸种如崂山秀氏水母和贝氏真囊水母为代表、在湾口西侧和湾中部分布的聚集组。此外, 夏季为丰水期, 沿岸径流增强, 故而又存在以偏喜略高水温的近岸低盐种细颈和平水母^[21] 为代表、在中底部分布的聚集组。秋季(9—11 月), 偏外海性广布种四枝管水母和大西洋五角水母为代表、更多分布于湾口和中部的聚集组, 但由于此季黄河径流开始向近岸东南向流入莱州湾湾底, 阻止了该聚集组向 37.5°N 以北湾底扩展。可以认为, 莱州湾的小型水母群集结构更多表现为季节性时间格局上的变动, 这在湾内其他生物类群也有体现, 如大型砂壳虫群集结构可分为夏季

(7—9月)型和其他季节(3—6月、10—11月)型^[44],而浮游桡足类小拟哲水蚤的数量组成可分为春季(3—5月)和夏秋(7—11月)型^[45]。莱州湾生物类群群集结构的季节变动格局可能与湾内水浅、水温季节变幅大(>26℃)^[27]有关。从本文结果2.4也可以看到,水温特别是提前2月的水温与莱州湾水母的群集组成具有较密切的相关。大型水母中海蜇和沙海蜇旺发期应为7—8月,受开捕影响,本调查结果并不能反映其真实的数量分布,所以本文未进行更深入讨论。海月水母高生物量出现季节晚于前两种,它的10月高密度区出现站位盐度为29.5—31.5,与其在辽东湾密集区的盐度^[56]相近。

致谢:本文海上样品采集和处理、分析还得到王秀霞、陈峻峰、孙坚强、陈瑞盛以及农业部黄渤海渔业资源环境重点野外科学观测试验站工作人员的帮助,谨致谢忱。

参考文献 (References):

- [1] Purcell J E, Arai M N. Interactions of pelagic cnidarians and ctenophores with fish: a review. *Hydrobiologia*, 2001, 451(1/3): 27-44.
- [2] Lynam C P, Heath M R, Hay S J, Brierley A S. Evidence for impacts by jellyfish on North Sea herring recruitment. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 298: 157-167.
- [3] Purcell J E, Uye S, Lo W T. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 350: 153-174.
- [4] 张芳, 孙松, 李超伦. 海洋水母类生态学研究进展. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 121-130.
- [5] 彭海青, 刘秀娟. 基于 SCI-E、CPCI-S 的水母研究文献分析. *海洋科学*, 2011, 35(12): 101-105.
- [6] 王琳, 冯志纲, 郑文江, 朱立禄, 张芳, 马晓敏, 彭海青. 水母生态研究的文献计量学分析. *海洋科学*, 2014, 38(5): 126-133.
- [7] 马喜平, 孙松, 高尚武. 胶州湾水母类生态的初步研究. I. 群落结构及其年季变化. *海洋科学集刊*, 2000, (42): 91-99.
- [8] Purcell J E, Shiganova T A, Decker M B, Houde E D. The ctenophore *Mnemiopsis* in native and exotic habitats: U.S. estuaries versus the Black Sea basin. *Hydrobiology*, 2001, 451(1/3): 145-176.
- [9] Albert D J, Walsh M L. *Aurelia labiata* jellyfish in Roscoe Bay on the West Coast of Canada: Seasonal changes in adult bell diameter and mingling of juvenile and adult populations. *Journal of Sea Research*, 2014, 85: 178-185.
- [10] Keister J E, Houde E D, Breitburg D L. Effects of bottom-layer hypoxia on abundances and depth distributions of organisms in Patuxent River, Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 205: 43-59.
- [11] Decker M B, Brown C W, Hood R R, Purcell J E, Gross T F, Matanoski J C, Bannon R O, Setzler-Hamilton E M. Predicting the distribution of the scyphomedusa *Chrysaora quinquecirrha* in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 329: 99-113.
- [12] Shoji J, Kudoh T, Takatsuji H, Kawaguchi O, Kasai A. Distribution of moon jellyfish *Aurelia aurita* in relation to summer hypoxia in Hiroshima Bay, Seto Inland Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 485-490.
- [13] Bi H S, Cook S, Yu H, Benfield M C, Houde E D. Deployment of an imaging system to investigate fine-scale spatial distribution of early life stages of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in Chesapeake Bay. *Journal of Plankton Research*, 2013, 35(2): 270-280.
- [14] 张芳, 杨波, 张光涛. 胶州湾水母类生态研究. II. 优势种丰度的时空分布. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 518-526.
- [15] 张芳, 孙松, 杨波. 胶州湾水母类生态研究. I. 种类组成与群落特征. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 507-517.
- [16] 孙松, 李超伦, 张光涛, 孙晓霞, 杨波. 胶州湾浮游动物群落长期变化. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 625-631.
- [17] Sun S, Li Y H, Sun X X. Changes in the small-jellyfish community in recent decades in Jiaozhou Bay, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(4): 507-518.
- [18] 金显仕, 邓景耀. 莱州湾渔业资源群落结构和生物多样性的变化. *生物多样性*, 2000, 8(1): 65-72.
- [19] 高尚武, 洪惠馨, 张士美. *中国动物志(第27卷): 水螅虫纲 钵水母纲*. 北京: 科学出版社, 2002: 1-275.
- [20] 许振祖, 黄加祺, 林茂, 郭东晖, 王春光. *中国刺胞动物门水螅虫总纲(上、下卷)*. 北京: 海洋出版社, 2014: 1-945.
- [21] 马喜平, 高尚武. 渤海水母类生态的初步研究——种类组成、数量分布与季节变化. *生态学报*, 2000, 20(4): 533-540.
- [22] 毕洪生, 孙松, 高尚武, 张光涛, 张芳. 渤海浮游动物群落生态特点 III. 部分浮游动物数量分布和季节变动. *生态学报*, 2001, 21(4): 513-521.
- [23] 吴云凯. 莱州湾海洋环境变化趋势及管理措施研究. *海洋开发与管理*, 2011, 28(9): 90-92.
- [24] 刘义豪, 杨秀兰, 靳洋, 汤宪春, 白艳艳, 孙珊, 陶慧敏, 谷伟丽, 王国华. 莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律. *渔业科学进展*, 2011, 32(4): 1-5.
- [25] 张雪, 张龙军, 侯中里, 廖巍. 1980-2008年莱州湾主要污染物的时空变化. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(11): 91-98.

- [26] Cui B L, Li X Y. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976-2005). *Geomorphology*, 2010, 127(1/2): 32-40.
- [27] 刘哲, 魏皓, 蒋松年. 渤海多年月平均温盐场的季节变化特征及形成机制的初步分析. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 7-14.
- [28] 吴德星, 万修全, 鲍献文, 牟林, 兰健. 渤海 1958 年和 2000 年夏季温盐场及环流结构的比较. *科学通报*, 2004, 49(3): 287-292.
- [29] 王永刚, 魏泽勋, 方国洪, 陈海英, 高秀敏. 黄河口及其邻近海域水深和岸线变化对 M2 分潮影响的数值研究. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 141-147.
- [30] 毕聪聪, 鲍献文, 万凯. 渤海盐度年代际变异对环流结构的影响. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2015, 45(1): 1-8.
- [31] Zhang X L, Zhang Z H, Xu Z J, Li G, Sun Q, Hou X J. Sea ice disasters and their impacts since 2000 in Laizhou Bay of Bohai Sea, China. *Natural Hazards*, 2013, 65(1): 27-40.
- [32] 郝彦菊, 王宗灵, 朱明远, 李瑞香, 孙丕喜, 夏滨, 陈力群. 莱州湾营养盐与浮游植物多样性调查与评价研究. *海洋科学进展*, 2005, 23(2): 197-204.
- [33] 王爱勇, 万瑞景, 金显仕. 渤海莱州湾春季鱼卵、仔稚鱼生物多样性的年代际变化. *渔业科学进展*, 2010, 31(1): 19-24.
- [34] 刘晓收, 赵瑞, 华尔, 路璐, 张志南. 莱州湾夏季大型底栖动物群落结构特征及其与历史资料的比较. *海洋通报*, 2014, 33(3): 283-292.
- [35] Jin X S, Shan X J, Li X S, Wang J, Cui Y, Zuo T. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(3): 366-374.
- [36] 张锦峰, 高学鲁, 庄文, 李培苗, 周凤霞. 莱州湾渔业资源与环境变化趋势分析. *海洋湖沼通报*, 2014, (3): 82-90.
- [37] 信敬福. 山东省海蜃资源增殖回顾及有关问题探讨. *水产科技情报*, 2004, 31(6): 260-262.
- [38] 宋秀凯, 刘爱英, 杨艳艳, 杨建敏, 任利华, 刘丽娟, 孙国华, 刘小静. 莱州湾鱼卵、仔稚鱼数量分布及其与环境因子相关关系研究. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 378-385.
- [39] 张波, 吴强, 金显仕. 莱州湾鱼类群落的营养结构及其变化. *渔业科学进展*, 2013, 34(2): 1-9.
- [40] 李凡, 徐炳庆, 马元庆, 吕振波, 王田田. 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化. *生态学报*, 2014, 34(7): 1736-1745.
- [41] 孙鹏飞, 单秀娟, 吴强, 陈云龙, 金显仕. 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化. *生态学报*, 2014, 34(2): 367-376.
- [42] 周红, 华尔, 张志南. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(8): 80-87.
- [43] 李少文, 刘元进, 李凡, 张莹, 徐宗法, 吕振波, 王田田, 张爱波. 莱州湾大型底栖动物功能群现状. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 380-388.
- [44] 陈雪, 张武昌, 吴强, 栾青杉, 肖天. 莱州湾大型砂壳纤毛虫群落季节变化. *生物多样性*, 2014, 22(5): 649-657.
- [45] 王秀霞, 左涛, 吴强, 陈瑞盛. 莱州湾小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 丰度分布周年变动. *渔业科学进展*, 2015, 36(1): 1-9.
- [46] 赵鹏, 江文胜, 毛新燕, 高会旺, 郭新宇. 2000-2005 年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素. *海洋与湖沼*, 2010, 41(1): 12-23.
- [47] 朱兰部, 赵保仁, 刘克修. 黄河冲淡水转向问题的初步探讨. *海洋科学集刊*, 1997, (38): 61-67.
- [48] 赵进平, 侍茂崇, 李诗新. 低盐区及渤海低盐区的盐度特征. *海洋科学集刊*, 1998, (40): 249-260.
- [49] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 58-64.
- [50] 孙松, 张芳, 李超伦, 杨波, 吉鹏. 黄海小型水母的分布特征. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 429-437.
- [51] 徐兆礼, 张金标, 王云龙. 东海水螅水母类生态研究. *水产学报*, 2003, 27(Z1): 91-97.
- [52] 周太玄, 黄明显. 烟台水螅水母类的研究. *动物学报*, 1958, 10(2): 173-191.
- [53] 张金标. 中国海域水螅水母类区系的初步分析. *海洋学报*, 1979, 1(1): 127-137.
- [54] 苏翠荣, 徐家铸, 李忠武. 江苏海州湾浮游动物的种类组成和分布——(II) 水母类 (水螅水母和栉水母). *南京师大学报: 自然科学版*, 1996, 19(1): 64-67, 71-71.
- [55] 中科院海洋所浮游生物组. 中国近海浮游生物的研究. 见: 全国海洋综合调查报告 (第八册 1959.1-1960.6).. 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室, 1964: 51-53.
- [56] 王彬, 李玉龙, 沈鸿, 李轶平, 王文波, 孙明, 董婧. 2005—2013 年辽东湾北部近海白色霞水母的数量分布. *海洋渔业*, 2014, 36(2): 146-154.