

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14291

2009—2011 年秋季长江口无脊椎动物群落特征及其与环境因子的关系

徐勇^{1,2}, 线薇薇¹, 李文龙¹

1. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 根据 2009—2011 年秋季长江口及其邻近海域渔业资源中无脊椎动物调查数据, 探讨无脊椎动物群落动态特征。结合同步监测的该水域环境数据, 分析无脊椎动物群落时空变异与环境因子间的关系。结果表明, 3 个秋季航次共捕获无脊椎动物 8 目 15 科 25 种, 其中甲壳动物 14 种, 软体动物 11 种。无脊椎动物群落优势种类包括三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*)、日本枪乌贼(*Loligo japonica*)、双斑蟳(*Charybdis bimaculata*), 不同年份优势种类存在变异。无脊椎动物群落资源密度呈逐年增加的趋势, 2009 年最低, 2011 年相对最高。无脊椎动物群落多样性年间差异显著($P < 0.05$)。双向指示种 (TWINSPAN) 群落结构分析表明, 无脊椎动物群落包括 2 个群组, 具有明显的年际演替特征。冗余分析(RDA)群落排序结果显示, 表层盐度和底层温度是驱动长江口无脊椎动物群落结构变异的主要环境因子。长江口无脊椎动物群落年际变异体现在优势种类和多样性的演替上, 水域温度驱动群落的时间变异, 盐度驱动群落的空间变异。

关键词: 无脊椎动物; 群落结构; 环境因子; 长江口

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)03-0478-10

长江口是我国渔业生产力最高的水域之一。长江作为世界第三大河, 向河口输送大量营养物质, 使长江口成为黄东海最重要的陆源营养物质的汇与源, 也使长江口成为重要海洋经济生物的产卵场、育幼场、索饵场和重要洄游通道^[1]。长江口是我国最大的河口渔场, 素有长江口五大渔汛之称。长江口鱼类和无脊椎动物产量是近海渔场形成的重要物质基础, 对我国近海渔业资源发展具有举足轻重的影响。

无脊椎动物群落是渔业资源的重要组成部分。近年来, 随着近海鱼类资源的衰退, 无脊椎动物对渔业资源的贡献逐步增强。国内学者曾对渤海^[2-3]、黄海^[4-5]、东海^[6-9]等海域的无脊椎动物资

源及其重要种类的生物学特征^[10-12]进行了探讨, 但对长江口海域无脊椎动物资源研究较少。刘瑞玉等^[13]曾对 20 个世纪 80 年代长江口海域无脊椎动物的资源状况进行过报道, 吴强等^[14-15]研究了 2006 年长江口海域无脊椎动物群落及与环境因子的关系。本研究拟根据 2009—2011 年秋季长江口及其邻近海域底层拖网调查资料, 分析近年来秋季无脊椎动物群落结构特征及其与环境因子的关系, 以期合理利用该海域无脊椎动物资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海域

2009 年、2010 年、2011 年 11 月在长江口及

收稿日期: 2014-07-09; 修订日期: 2014-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41176138, 31272663); 国家基金委-山东省联合基金项目(U1406403); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08 - 01); 国务院三峡工程建设委员会资助项目(JJ 2012—2013).

作者简介: 徐勇(1989—), 硕士研究生, 研究方向为海洋生物多样性保护. E-mail: da.di.zhi.zi@163.com

通信作者: 线薇薇, 研究员. E-mail: wwxxian@qdio.ac.cn

其邻近海域(30°45'~32°N, 122°30'~123°30'E)选取14~15个站位,完成底层拖网调查(图1)。调查船为底层双拖网渔船(147吨位),调查网具为150.5 m×96.5 m轻拖网,网口周长150.5 m,上纲长66 m,下纲长73 m,网衣最大网目200 mm,网目大小沿轴线自网身随后向囊网递减,囊网部30 mm。经海上实测,拖网时网口张开高度在9~11 m,平均网袖间距18 m,拖网速度2~3节。每站拖网0.5~1 h,将捕获的无脊椎动物分类鉴定^[16-18],记录其数量和重量。

各站位同步调查深度、温度、盐度、pH、溶解氧、化学需氧量、总氮总磷、悬浮物、叶绿素a等环境因子。其中采用声波反射法测定水深,采用Sea-Bird SBE25 CTD测定温度和盐度,采用pH计测定pH,采用碘量滴定法测定溶解氧,采用酸性高锰酸钾法测定化学需氧量,采用QuAatro营养盐流动分析仪测定总氮总磷,采用重量法测定悬浮物,采用萃取荧光法测定叶绿素a。

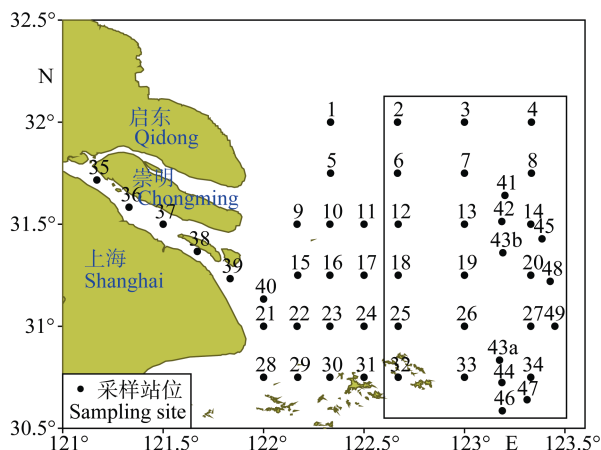


图1 长江口及其邻近海域调查采样站位
方框内为无脊椎动物拖网区域。

Fig.1 Location of study area in the Yangtze River estuary and its adjacent waters
Trawl sites of invertebrates are in the box area.

1.2 数据处理方法

采用Pinkas等^[19]提出的相对重要性指数(IRI)来表示无脊椎动物群落优势度^[4-5]。

$$IRI = (N_i + W_i)F$$

式中: N_i 为某一物种的数量占总数量的百分数; W_i 为某一物种的生物量占总生物量的百分数; F 为某

一物种出现的站位数占调查站位总数的百分数。

采用 Margalef物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H')以及Pielou均匀度指数(J')来计算无脊椎动物群落多样性^[20-21]：

$$D = (S-1)/\ln N$$

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$J' = H'/\ln S$$

式中, S 为种类数; N 为总数量; P_i 为第 i 种无脊椎动物数量占总数量的比例。

种类数更替率(R)的计算公式^[5]为：

$$R = (a+b-2c)/(a+b-c) \times 100\%$$

式中, R 为种类数更替率, a 、 b 为相邻两年的种类数, c 为相邻两年相同种类数。

采用多元统计分析方法研究无脊椎动物群落及其与环境因子的关系,其中使用单因子相似性(ANOSIM)分析群落结构年间的差异性,应用相似性百分比(SIMPER)分析相邻年份群聚结构的平均相异性,使用双向指示种分析(two-way indicator species analysis, TWINSpan)^[22]进行物种和站点排序,使用冗余分析(redundancy analysis, RDA)^[23]研究物种的站点排序与环境因子的关系。为减少稀有种效应,在分析之前去除数量-站位数据矩阵中出现总频率小于5%的物种^[24]。为降低少数优势种权重和环境参数在数量级上的差别,对物种和环境数据进行 $\ln(x+1)$ 转化,使其更接近正态分布^[25]。

站位图采用 Surfer 8.0 软件绘制,ANOSIM 和 SIMPER 分析使用 PRIMER 5 软件, TWINSpan 排序采用 WinTWINS 2.3 软件, RDA 排序使用 CANOCO 4.5 软件,所有数据统计分析使用 SPSS 16.0 完成。

2 结果与分析

2.1 种类组成

2009—2011年秋季共捕获无脊椎动物8目15科25种(表1),其中甲壳动物14种,软体动物11种。不同年份捕获的种类数存在变异,其中2009年16种,隶属于7目9科;2010年15种,隶属于6目9科;2011年13种,隶属于4目8科。从种类更替情况看,2009—2010年和2010—2011年种类数更替率分别为52.38%和60%,均超过50%。可以看出,无脊椎动物群落年际间存在种类演替现象。

表 1 秋季长江口及其邻近海域无脊椎动物种类及其相对重要性指数(IRI)
Tab. 1 Invertebrate species and its index of relative importance(IRI) in the Yangtze River estuary and its adjacent waters during autumn

物种 species	代码 code	年份 year		
		2009	2010	2011
软体动物门 Mollusca				
帘蛤目 Veneroida				
长竹蛏科 Solenidae				
长竹蛏 <i>Solen strictus</i>	<i>Sost</i>		0.09	
中腹足目 Mesogastropoda				
玉螺科 Naticidae				
乳头真玉螺 <i>Eunaticina papilla</i>	<i>Eupa</i>	0.11		
新腹足目 Neogastropoda				
笋螺科 Terebridae				
朝鲜笋螺 <i>Terebra koreana</i>	<i>Teko</i>	1.05		
八腕目 Octopoda				
章鱼科 Octopodidae				
短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>	<i>Ococ</i>	15.96	1.17	
长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	<i>Ocva</i>	7.82		
船蛸科 Argonautidae				
锦葵船蛸 <i>Argonauta hians</i>	<i>Arhi</i>	0.33		
枪形目 Enoploteuthidae				
柔鱼科 Ommastrephidae				
太平洋褶柔鱼 <i>Todarodes pacificus</i>	<i>Topa</i>		1.97	
枪乌贼科 Loliginidae				
日本枪乌贼 <i>Loligo japonica</i>	<i>Loja</i>	784.54	2325.09*	3357.13*
乌贼目 Sepioidea				
耳乌贼科 Sepiolidae				
四盘耳乌贼 <i>Euprymna morsei</i>	<i>Eumo</i>		0.14	12.44
双喙耳乌贼 <i>Sepiola birostrat</i>	<i>Sebi</i>			1.37
乌贼科 Sepiidae				
曼氏无针乌贼 <i>Sepiella maindroni</i>	<i>Sema</i>	39.34	1.64	
节肢动物门 Arthropoda				
十足目 Decapoda				
对虾科 Penaeidae				
周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i>	<i>Mejo</i>		2.92	
鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	<i>Trcu</i>	2575.21*	9914.67*	8210.39*
中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>	<i>Socr</i>	157.42	1.26	0.79
斑节对虾 <i>Penaeus monodon</i>	<i>Pemo</i>		0.73	
鼓虾科 Alpheidae				
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicas</i>	<i>Alja</i>			0.38
藻虾科 Hippolytidae				
鞭腕虾 <i>Hippolysmata vittata</i>	<i>Hivi</i>			230.73
长臂虾科 Palaemonidae				
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	<i>Pagr</i>			98.69

续表 1 tab.1 continued

物种 species	代码 code	优势度 dominance, IRI		
		2009	2010	2011
梭子蟹科 Portunidae				
细点圆趾蟹 <i>Ovalipes punctatus</i>	<i>Ovpu</i>	1.73		1263.26*
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	<i>Potr</i>	9652.71*	666.67	445.56
红星梭子蟹 <i>Portunus sanguinolentus</i>	<i>Posa</i>	1165.46*	662.89	
日本螯 <i>Charybdis japonica</i>	<i>Chja</i>	1.32	0.40	49.78
双斑螯 <i>Charybdis bimaculata</i>	<i>Chbi</i>	304.59	1507.07*	1942.45*
锈斑螯 <i>Charybdis feriatius</i>	<i>Chfe</i>	0.11		
口足目 Stomatopoda				
虾蛄科 Squillidae				
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	<i>Oror</i>	390.09	0.04	112.68

注: *表示优势种.
Note: * represents dominant species.

2.2 优势种

根据 Pinkas(1971)提出的相对重要性指数 IRI 值来确定无脊椎动物的重要性。将 IRI ≥ 5000 的无脊椎动物定为绝对优势种, 5000>IRI≥1000 的定为相对优势种。秋季长江口无脊椎动物的 IRI 值如表 1 所示。可以看出, 2009 年绝对优势种为三疣梭子蟹, 相对优势种为鹰爪虾和红星梭子蟹。2010 年鹰爪虾上升为绝对优势种, 日本枪乌贼和双斑螯为相对优势种, 三疣梭子蟹和红星梭子蟹的优势度较 2009 年均有所下降, 失去优势地位。2011 年鹰爪虾继续占据绝对优势地位, 日本枪乌贼、双斑螯和细点圆趾蟹成为相对优势种, 其中日本枪乌贼和双斑螯的优势度较 2010 年均有所上升。可以看出, 长江口无脊椎动物群落优势种蟹类主要以三疣梭子蟹、双斑螯和细点圆趾蟹为代表, 虾类主要为鹰爪虾, 而软体动物中日本枪乌贼对资源的贡献最大。

2.3 资源密度

不同年份资源密度的变化情况如图 2 所示。可以看出, 无脊椎动物数量密度和生物量密度年际变化趋势一致, 均呈逐年增加的趋势, 但生物量密度年际变异程度较小, 数量密度年际波动显著。数量密度和生物量密度最小值均出现在 2009 年, 分别为 $4.57\times10^3/\text{km}^2$ 和 $185.52\text{ kg}/\text{km}^2$, 最大值均出现在 2011 年, 分别为 $7.346\times10^4/\text{km}^2$ 和 $233.11\text{ kg}/\text{km}^2$ 。方差分析结果表明, 2010 和 2011

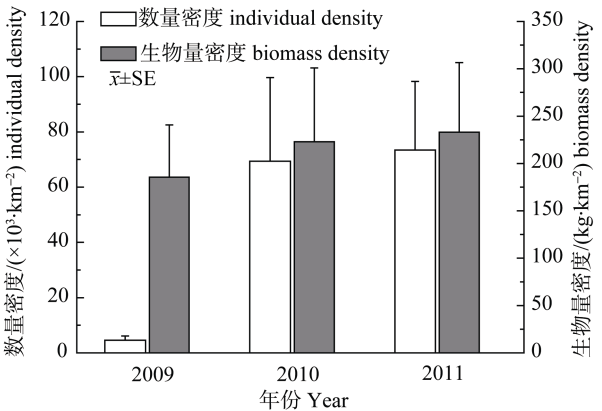


图 2 秋季长江口及其邻近海域无脊椎动物数量和生物量密度

Fig.2 The individual and biomass density of invertebrates in the Yangtze River estuary and its adjacent waters during autumn

年数量密度均显著高于 2009 年($P<0.05$), 而各年份间生物量密度差异不显著($P>0.05$)。

2.4 多样性

表 2 显示 2009—2011 年秋季各年份无脊椎动物的多样性指标。可以看出, 不同多样性指标年际变化趋势不完全一致。其中, Margalef 丰富度指数(D)最大值出现在 2009 年, 显著高于 2010 年和 2011 年($P<0.05$), 而 2010 年和 2011 年年间差异不显著($P>0.05$)。Wiener 多样性指数(H')在 2009 年最大, 显著高于 2010 年($P<0.05$), 但与 2011 年无显著差异($P>0.05$)。Pielou 均匀度指数(J')最大值出现在 2009 年, 显著高于 2010 年($P<0.05$), 与 2011 年的 Pielou 均匀度指数无显著差异($P>0.05$)。可以看出,

表 2 秋季长江口及其邻近海域无脊椎动物群落多样性
Tab. 2 Diversity of invertebrate community in the Yangtze River estuary and its adjacent waters during autumn

年份 year	Margalef 丰富度 Species richness, <i>D</i>			Shannon–Wiener 指数 Shannon–Wiener index, <i>H'</i>			Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index, <i>J'</i>		
	最小 min	最大 max	$\bar{x} \pm \text{SE}$	最小 min	最大 max	$\bar{x} \pm \text{SE}$	最小 min	最大 max	$\bar{x} \pm \text{SE}$
2009	0.2	1.56	0.89 ± 0.09^a	0.5	1.17	1.07 ± 0.10^a	0.42	0.98	0.68 ± 0.04^a
2010	0.28	1.06	0.55 ± 0.07^b	0.02	1.2	0.59 ± 0.08^b	0.02	0.87	0.38 ± 0.05^b
2011	0.14	0.92	0.51 ± 0.06^b	0.26	1.55	1.01 ± 0.10^a	0.24	0.83	0.61 ± 0.04^a

注：同列中不同的上标字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters in the same column indicate that differences are significant ($P<0.05$).

D 值逐年下降, 而 *H'*值和 *J'*值呈先下降后上升的趋势。

2.5 群聚结构

采用 TWINSpan 分类法, 将长江口及其邻近海域 3 个调查航次的 43 个调查站位和筛选后的 13 种无脊椎动物进行群聚分类, 将物种划分为 2 组:

物种第 1 组包括三疣梭子蟹、红星梭子蟹、曼氏无针乌贼、中华管鞭虾和短蛸。这些种类(除中华管鞭虾外)个体相对较大, 经济价值较高, 是长江口海域重要的捕捞对象。其中代表种类是三疣梭子蟹, 占该群组生物总数量和总生物量的 68.65%和 80.27%; 其次为红星梭子蟹, 占 20.41%和 18.12%。

物种第 2 组包括鹰爪虾、日本枪乌贼、葛氏长臂虾、四盘耳乌贼、细点圆趾蟹、双斑蟳、口虾蛄和鞭腕虾。这些种类(除细点圆趾蟹外)个体相对较小, 部分种类由于经济价值低(双斑蟳、四盘耳乌贼)而未被利用。其中代表种类是鹰爪虾, 占该群组生物总数量和总生物量的 59.84%和 48.88%; 其次为日本枪乌贼, 占 18.52%和 18.54%。

TWINSpan 的站位分组如表 3 所示。可以看出, 第 1 组主要为 2009 年和 2010 年的站位, 第 2

组主要为 2010 年和 2011 年的站位。构建 Bray-Curtis 相似矩阵, 探讨不同 TWINSpan 站位分组无脊椎动物群聚结构的差异性。ANOSIM 分析表明, 不同站位分组之间群聚结构存在显著差异($R=0.543$, $P<0.05$), SIMPER 分析显示, 不同站位分组之间群聚结构的平均相异性指数为 65.14%, 这都表明 TWINSpan 的站组间差异显著。

2.6 环境影响

对无脊椎动物数量-站位矩阵进行去趋势对应分析(DCA), 梯度长度最大值为 2.995SD, 故选用线性的 RDA 排序分析无脊椎动物群落与环境因子关系。14 个环境因子经过 forward 筛选($P<0.05$), 保留表层盐度和底层温度 2 个环境因子。RDA 结果表明, 前两个 RDA 轴共解释了 24.7%的物种变异和 100%的物种-环境相关性变异, 排序结果较好地解释了环境因子对无脊椎动物群落分布的影响, 说明 2009—2011 年长江口无脊椎动物群落变异主要的环境驱动因素是表层盐度和底层温度。RDA 第 1 排序轴主要解释了底层温度($R=0.5397$, $P<0.05$)对无脊椎动物群落分布的影响, 第 2 排序轴主要解释了表层盐度($R=-0.4461$, $P<0.05$)和底层温度($R=-0.2636$, $P<0.05$)对无脊椎动物群落分布的影响。

表 3 秋季长江口及其邻近海域无脊椎动物站位的 TWINSpan 分组
Tab. 3 TWINSpan grouping of the stations in the Yangtze River estuary and its adjacent waters during autumn

TWINSpan 分组 TWINSpan grouping	站位 station	
	第 1 组 the first group	第 2 组 the second group
站位分组 station grouping	2009 年 2、3、4、6、7、8、14、19、20、26、27、33、34、43 站 2010 年 3、7、13、14、27、34、45、48、49 站	2009 年 13 站 2010 年 19、20、26、46、47 站 2011 年 3、7、8、13、14、19、20、26、27、34、41、42、43、44 站

RDA 站位排序中, TWINSpan 站位第 1 组的站点(RDA 排序的第 2、3 象限)与第 2 组的站点(RDA 排序的第 1、4 象限)分开(图 3a), 站位第 1 组分布水域底层温度较低, 第 2 组分布水域底层温度则相对较高, 说明底层温度变异带来无脊椎动物分布水域环境时间和空间的分化。RDA 物种排序中, 将 TWINSpan 物种第 1 组的种类(RDA 排序的第 2、3 象限)与第 2 组的种类(RDA

排序的第 1、4 象限)区分, 显示无脊椎动物不同类群对环境的选择性。物种第 1 组中的三疣梭子蟹、红星梭子蟹、曼氏无针乌贼、中华管鞭虾和短蛸主要分布在底层温度相对较低、中等盐度的水域, 物种第 2 组的鹰爪虾、日本枪乌贼、葛氏长臂虾、四盘耳乌贼、细点圆趾蟹、双斑蟳、口虾蛄和鞭腕虾主要分布在底层温度较高、表层盐度偏低的水域(图 3b)。

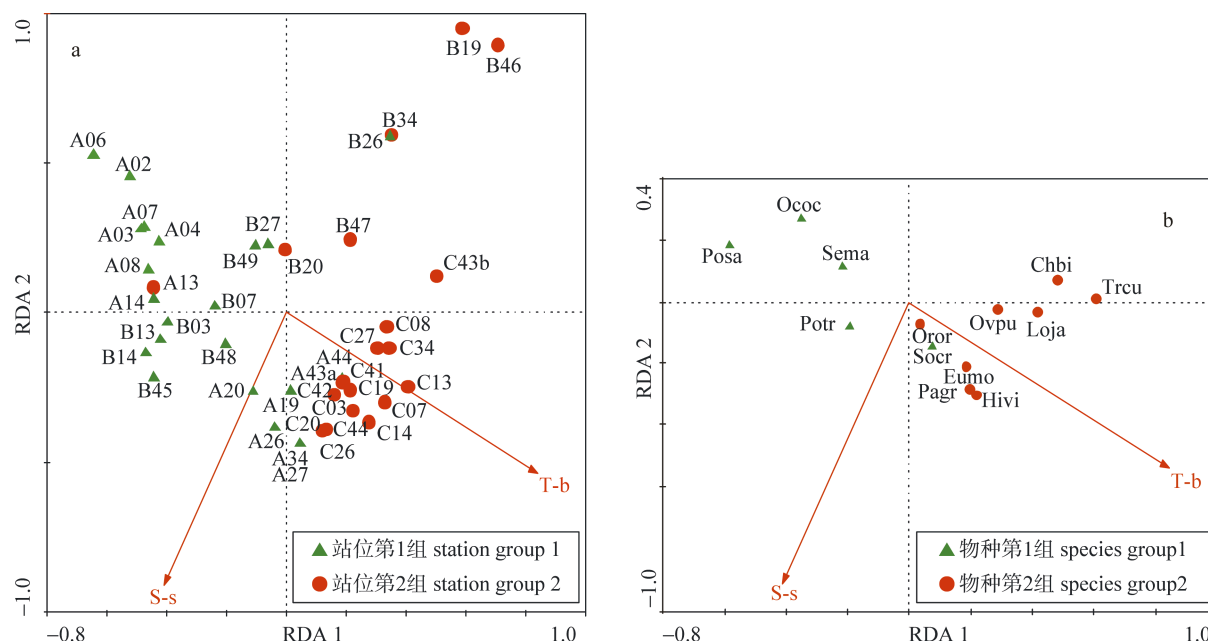


图 3 秋季长江口及其邻近海域无脊椎动物群落的 RDA 排序

a. 站位; b. 物种. T-b: 底层温度; S-s: 表层盐度. 物种代码详见表 1.

Fig.3 RDA ordination of invertebrate community in the Yangtze River estuary and its adjacent waters during autumn. a. Stations; b. Species; T-b: bottom temperature; S-s: surface salinity. The explanation for the code of species are shown in tab.1.

3 讨论

3.1 长江口无脊椎动物种类

2009—2011 年秋季长江口无脊椎动物种类数逐年下降, 且远低于 20 世纪 80 年代秋季捕获的种类数(31 种)^[13]。其中部分 80 年代常年栖居在长江口及邻近海域的无脊椎动物种类, 在 2009—2011 年 3 个秋季航次的渔获物种中均未出现, 如狭额绒螯蟹(*Eriocheir leptognathus*)、哈氏仿对虾(*Parapenaeopsis hardwickii*)、细巧仿对虾(*P. tenella*)等。这些种类在 80 年代曾作为本调查区域的主要捕捞对象^[13]。种类数的变化反映了长江口海

区无脊椎动物在环境变化及人类干扰下发生群落演替的结果。种类数更替率反映了种类更替导致群落稳定性降低的节律, 其值越大表示群落稳定性越小^[5]。本研究发现长江口海区无脊椎动物种类数更替率逐年增大, 这表明无脊椎动物群落的稳定性逐年下降。

3.2 长江口优势种

长江口无脊椎动物具有特有的优势种种类年际变动模式: 2009 年优势种为三疣梭子蟹、鹰爪虾、红星梭子蟹; 2010 年优势种为鹰爪虾、日本枪乌贼、双斑蟳; 2011 年优势种为鹰爪虾、日本

枪乌贼、双斑蟳、细点圆趾蟹。三疣梭子蟹是东海最重要的一种经济蟹类, 20 世纪 80 年代以前资源较为丰富, 90 年代开始随着捕捞强度的增加资源量有所下降。长江口海区的三疣梭子蟹基本上是常年定居种, 没有明显的越冬洄游的生态特点^[26]。本研究发现三疣梭子蟹在 2009—2011 年秋季长江口海域优势度不断下降, 这可能是由于过度捕捞导致三疣梭子蟹种群数量急剧下降, 同时不能得到其他海区三疣梭子蟹的迁入补充。这就需要进行相应的增殖放流进行人为补充。秋季鹰爪虾在 30°00'N 以北的东海海域有较多分布, 是东海近海的优势种之一^[17]。在荣成湾^[27]、胶州湾^[28]以及长江口^[14]等海域的秋季调查中, 鹰爪虾均作为优势种出现。在本研究中, 鹰爪虾在近 3 年无脊椎动物群落中一直处于优势地位, 且近 2 年优势度较高, 成为绝对优势种。日本枪乌贼春季出现率较高, 并以产卵繁殖的亲体为优势群, 产卵后成体大部分消失, 少数可以活到 12 月, 秋季的群体主要由当年新生的幼体组成^[27]。在本研究中, 日本枪乌贼的优势度逐年上升。这可能是由于近几年伏季休渔制度使得枪乌贼类春季产卵群体得到保护, 新生群体得以发展。

3.3 长江口生物多样性

多样性普遍较低是温带河口的特点, 秋季长江口无脊椎动物群落多样性指数平均值($D=0.65$, $H'=0.89$, $J'=0.56$)明显低于荣成湾($D=1.90$, $H'=2.30$, $J'=0.88$)^[27]和胶州湾($D=2.00$, $H'=1.82$, $J'=0.63$)^[28], 这反映出河口生态系统有别于海湾生态系统的点。其中 D 值在 2011 年较低, 与 H' 值的变化趋势不同, 这是由于 2011 年捕获种类数较少, 而拖网时间相对较长, 拖网捕获的无脊椎动物数量相对较多所致。长江口海区的无脊椎动物如三疣梭子蟹、鹰爪虾和日本枪乌贼的捕捞群体多为当年繁衍的新生群体^[26], 生命周期短且繁殖速度较快, 处于营养级的不同水平, 使得长江口海区的无脊椎动物群落结构更新较快, 在一定程度上影响了无脊椎动物的多样性特征。另外长江口海区底质类型复杂多样, 受长江径流及周边海流影响明显, 加之水温、盐度等环境因子年际变

化剧烈, 这些因素都会影响长江口海区无脊椎动物的多样性, 使得多样性指数年际变化显著。

3.4 无脊椎动物群落结构与环境因子的关系

TWINSPAN 分类将 13 个物种和 43 个站位划分为 2 个物种组和 2 个站位组, 分类各组在 RDA 排序图上有特定的分布范围和界限, 能够明显区分, 说明 TWINSPAN 和 RDA 排序的结果较为一致, 客观地反映了群落特征及群落分组与环境因子的关系。每一站位和物种分组都对应特定环境因子, 故可将秋季长江口无脊椎动物群落划分为 2 个群组: 第 1 组以三疣梭子蟹和红星梭子蟹为代表种类, 适应高表层盐度和较低底层温度的海洋环境; 第 2 组以鹰爪虾和日本枪乌贼为代表种类, 适应较高底层温度的海洋环境。

海水的温度和盐度是重要的海洋环境因子, 在海洋生物生活中起重要作用, 影响着海洋生物的新陈代谢, 与海洋生物的分布也有直接的关系。目前已有研究表明温度和盐度对无脊椎动物群落结构具有重要影响。例如, 逢志伟等^[29]研究胶州湾中部虾类群落时发现影响虾类群落结构月变化的主要环境因子为水温和盐度。吴强等^[15]研究长江口及其邻近海域无脊椎动物个体数密度与环境因子的关系时, 发现水温和盐度为影响无脊椎动物密度最明显、最稳定的环境因子, 与本研究的结果一致。Jackson 等^[30]研究澳大利亚 Port River-Barker Inlet 河口的鱼类和大型无脊椎动物群落结构时发现, 相比盐度, 水温能够更好地划分鱼类和大型无脊椎动物群落结构。相建海等^[26]曾根据盐度适应性将长江口海区的无脊椎动物划分为淡水类型、半咸水类型、低盐海水类型和外侧高盐海水类型 4 大无脊椎动物生态类群。本研究通过 RDA 排序发现水温能够更好地将 TWINSPAN 分组的物种划分到相应的群组中, 说明长江口海区无脊椎动物对温度变化幅度的耐受程度低于对盐度变化幅度的耐受程度。

长江口及其邻近海域无脊椎动物在食物链中占有非常重要的地位, 其中许多种类是重要经济鱼类的饵料生物, 其自身也作为捕捞的对象。长江口海区的无脊椎动物从 20 世纪 80 年代开始渔

获量急剧下降, 近几年略有回升, 但群落稳定性有所下降。因此应该保护长江口海域的无脊椎动物资源, 研究增产措施, 实现渔业资源的可持续发展。

参考文献:

- [1] Li J S, Li S F, Cheng J H. The composition and diversity of fishes on fishing grounds of Changjiang estuary[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(1): 37-41.[李建生, 李圣法, 程家骅. 长江口渔场鱼类组成和多样性[J]. 海洋渔业, 2006, 28(1): 37-41.]
- [2] Deng J Y, Zhu J S, Cheng J S, et al. Main invertebrates in the Bohai Sea and their fishery biology[J]. Marine Fisheries Research, 1988, 9: 91-120.[邓景耀, 朱金声, 程济生, 等. 渤海主要无脊椎动物及其渔业生物学[J]. 海洋水产研究, 1988, 9: 91-120.]
- [3] Wu Y Q, Zhang B L. Ecology of the economic invertebrates in the Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 1990, 14(2): 48-52.[吴耀泉, 张宝琳. 渤海经济无脊椎动物生态特点的研究[J]. 海洋科学, 1990, 14(2): 48-52.]
- [4] Cheng J S. Structure and diversity of invertebrate resources in the Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(1): 68-75.[程济生. 黄海无脊椎动物资源结构及多样性[J]. 中国水产科学, 2005, 12(1): 68-75.]
- [5] Wu Q, Wang J, Jin X S, et al. Community structure and diversity of invertebrates in northern region of China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1152-1160.[吴强, 王俊, 金显仕, 等. 中国北部海域主要无脊椎动物群落结构及多样性[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1152-1160.]
- [6] Chen X Q, Yu C G, Song H T, et al. Structural characteristics and spatial distribution of the shrimp population in the mid-north East China Sea[J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(4): 50-58.[陈小庆, 俞存根, 宋海棠, 等. 东海中北部海域虾类群聚结构特征及空间分布[J]. 海洋学研究, 2010, 28(4): 50-58.]
- [7] Yu C G, Song H T, Yao G Z. Geographical distribution and faunal analysis of crab resources in the East China Sea[J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2003, 22(2): 108-113.[俞存根, 宋海棠, 姚光展. 东海蟹类的区系特征和经济蟹类资源分布[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2003, 22(2): 108-113.]
- [8] Yu C G, Song H T, Yao G Z. Crab community structure in the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(3): 213-220.[俞存根, 宋海棠, 姚光展. 东海蟹类群落结构特征的研究[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(3): 213-220.]
- [9] He X B, Yu C G, Qin T, et al. The analysis of the community characteristics of shrimps in Zhoushan fishing ground and its adjacent waters[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(3): 553-559.[何贤保, 俞存根, 覃涛, 等. 舟山渔场及附近海域虾类群落结构特征分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 553-559.]
- [10] Wang Y B, Yu C G, Zheng J, et al. Biological characteristics and seasonal variations of *Ovalipes punctatus* in the Zhoushan fishing ground[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(2): 274-278.[王迎宾, 俞存根, 郑基, 等. 舟山渔场细点圆趾蟹(*Ovalipes punctatus*)生物学特性及其季节变化[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(2): 274-278.]
- [11] Yu C G, Song H T, Yao G Z. Biological characteristics of *Ovalipes punctatus* in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 28(6): 657-662.[俞存根, 宋海棠, 姚光展. 东海细点圆趾蟹的生物学特性[J]. 水产学报, 2005, 28(6): 657-662.]
- [12] Yu C G, Song H T, Yao G Z. The quantity distribution and biological property of *Charybdis japonica* in the East China Sea[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(1): 40-45.[俞存根, 宋海棠, 姚光展. 东海日本螯的数量分布和生物学特性[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 40-45.]
- [13] Liu R Y, Xiang J H, Wu Y Q, et al. Prediction of the impacts of the Three Gorges Project on the invertebrate resources in the Changjiang River estuary[J]. Studia Marina Sinica, 1992, 33: 249-264.[刘瑞玉, 相建海, 吴耀泉, 等. 三峡工程对长江口区无脊椎动物资源影响的预测[J]. 海洋科学集刊, 1992, 33: 249-264.]
- [14] Wu Q, Li X S, Wang J, et al. Community structure and biodiversity of invertebrate resources in the Yangtze River estuary and its adjacent waters[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 73-79.[吴强, 李显森, 王俊, 等. 长江口及邻近海域无脊椎动物群落结构及其生物多样性研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 73-79.]
- [15] Wu Q, Wang J, Yuan W, et al. Relationship between distribution of macroinvertebrate and environmental factors in the Changjiang River estuary and its adjacent waters[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(5): 10-16.[吴强, 王俊, 袁伟, 等. 长江口及邻近海域大型无脊椎动物数量分布及其与环境因子的关系[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(5): 10-16.]
- [16] Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008.[刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [17] Song H T, Yu C G, Xue L J, et al. Economic shrimps and

- crabs in the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.[宋海棠, 俞存根, 薛利建, 等. 东海经济虾蟹类[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.]
- [18] Yang D J, Wang Y L, Ma X T, et al. Invertebrate in Northern Region of China Seas[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.[杨德渐, 王永良, 马绣同, 等. 中国北部海洋无脊椎动物[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.]
- [19] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. Calif Dep Fish Game Fish Bull, 1971, 152: 1-105.
- [20] Ludwig J A, Reynolds J F. Staticstical Ecology[M]. New York: John Wiley & Sona, 1988.
- [21] Ma K P. The measurement of community diversity//Ma K P. Principles and Methodologies of Biodiversity Studies[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994: 141-165.[马克平. 生物群落多样性的测定方法//马克平. 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.]
- [22] Hill M O. TWINSpan-A fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes[M]. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1979.
- [23] Ter Braak C J F. CANOCO-a FORTRAN Programme for Canonical Community Ordination by[partial][detrended][canonical] Correspondence Analysis, Principal Components Analysis and Redundancy Analysis (version 2.1)[M]. Wageningen: Agricultural Mathematics Group, 1988.
- [24] Almeida C, Coelho R, Silva M, et al. Use of different intertidal habitats by faunal communities in a temperate coastal lagoon[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2008, 80(3): 357-364.
- [25] Field J G, Clarke K R, Warwick R M. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1982, 8(1): 37-52.
- [26] Xiang J H, Wu Y Q, Zhang B L. Invertebrates//Luo B Z, Shen H T. The Three Gorges Project and Estuarine Ecology and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1994.[相建海, 吴耀泉, 张宝琳. 无脊椎动物//罗秉征, 沈焕庭. 三峡工程与河口生态环境[M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [27] Yu H T, Ding Y M, Xian W W, et al. Seasonal characteristics of fishery community structures in the Rongcheng Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(2): 67-75.[于海婷, 丁月旻, 线薇薇, 等. 荣成湾渔业资源群落结构季节变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2013(2): 67-75.]
- [28] Chen X J, Xue Y, Xu B D, et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates during autumn and winter in the central waters of Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(3): 78-84.[陈晓娟, 薛莹, 徐宾铎, 等. 胶州湾中部海域秋、冬季大型无脊椎动物群落结构及多样性研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 78-84.]
- [29] Pang Z W, Xu B D, Chen X G, et al. Community structure and diversity of shrimp assemblages in the central waters of Jiaozhou Bay, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(2): 361-371.[逄志伟, 徐宾铎, 陈学刚, 等. 胶州湾中部海域虾类群落结构及其多样性[J]. 中国水产科学, 2013, 20(2): 361-371.]
- [30] Jackson G, Jones G K. Spatial and temporal variation in nearshore fish and macroinvertebrate assemblages from a temperate Australian estuary over a decade[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1999, 182: 253-268.

Invertebrate community characteristics and their relationship with environmental factors in the Yangtze River estuary in autumn 2009–2011

XU Yong^{1,2}, XIAN Weiwei¹, LI Wenlong¹

1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Invertebrates play an important role as a fishery resource. Catches of finfish have declined in recent years, yet invertebrate catches have continued to increase. However, little research has been done on the invertebrate community in the Yangtze River estuary and its adjacent waters. In this study, the characteristics of the invertebrate community dynamics in the Yangtze River estuary and its adjacent waters (30°45′–32°N and 122°30′–123°30′E) were investigated based on data collected from fishery surveys conducted in autumn 2009–2011. The relationships between the spatial and temporal variations in the invertebrate community and related environmental factors were also analyzed. The results indicate that 25 invertebrate species (14 crustaceans and 11 mollusks) were caught, and they belonged to 8 orders and 15 families, which was well below the number of invertebrates captured in the 1980s (31 species). The species replacement rates (R) from 2009 to 2010 and 2010 to 2011 were $> 50\%$, indicating species succession and declining invertebrate community stability. The dominant invertebrate species in the community were *Portunus trituberculatus*, *Trachypenaeus curvirostris*, *Loligo japonica*, and *Charybdis bimaculata*, and they presented a succession phenomenon during autumn 2009–2011. The individual and biomass densities of the invertebrate community showed an increasing trend with minimum values in 2009 (4.57 kN/km² and 185.52 kg/km², respectively) and maximum values in 2011 (73.46 kN/km² and 233.11 kg/km², respectively). The significant interannual variations ($P < 0.05$) in invertebrate species diversity (Species richness, Shannon–Wiener index, and Pielou evenness) were lower in the estuary than those in Laizhou and Jiaozhou Bays. The invertebrate species were classified into two assemblages based on a two-way indicator species analysis, which showed clear interannual variations in the community. A redundancy analysis clarified that surface salinity and bottom temperature were the major factors affecting the invertebrate assemblage structure. In conclusion, the variations in invertebrate community structure were embodied in the alteration of dominant species and diversity during autumn 2009–2011, and temperature and salinity were the primary limiting factors driving the spatial and temporal variations in the invertebrate community in the Yangtze River estuary and its adjacent waters.

Key words: invertebrate; community structure; environmental factor; Yangtze River estuary

Corresponding author: XIAN Weiwei. E-mail: wwian@qdio.ac.cn