

基于 1998~2011 年调查数据的长江口海域浮游动物群落划分

王晓东^{1,2}, 李超伦^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态和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: 长江口海域是受人类活动以及自然变动多重压力影响下的典型水域。为研究长江口海域浮游动物群落动态, 作者基于 1998~2011 年每年 5 月(春季)和 11 月(秋季)长江口海域(30°30'~32°00'N, 121°00'~123°20'E)浮游动物调查资料, 利用多元统计分析方法, 开展了该水域浮游动物群落结构分析。基于物种组成及相对丰度进行聚类, 春、秋季长江口海域的浮游动物可分为 3 个群落: A(淡水/半咸水群落、B(过渡群落)、C(外海群落)。群落的地理分布与海域的盐度梯度分布相对应, 其中: 浮游动物群落 A 与群落 B 的地理分界一般在盐度等值线 14~18, 群落 B 与群落 C 的地理分界一般在盐度等值线 24~28。淡水种以及半咸水种只在群落 A 中占优势; 水母类只在群落 C 中优势度值较高。比较分析 1998 年~2011 年各群落的物种多样性的年间变化, 发现秋季群落 A 的物种多样性呈现显著升高的趋势, 而群落 B 的物种多样性呈现显著降低的趋势; 春季, 群落 B 的物种多样性呈现显著升高的趋势, 而群落 C 则呈现显著降低的趋势。

关键词: 浮游动物; 长江口; 群落

中图分类号: P736 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2018)08-0038-10

DOI: 10.11759/hyxx20171128003

大陆架边缘海以全球海洋 7% 的面积产生了 30% 的初级生产力和 90% 的渔获量^[1], 而河口又是陆架海中生物生产力水平最高的区域, 也是海洋中受人类活动和气候变化影响最剧烈的区域之一^[2, 3]。

长江口海域是中国主要的河口区域之一, 受人类活动影响显著^[4-6]。近几十年来, 伴随着污染物河流输入、大型工程及渔业捕捞的持续开展, 长江口海域生态环境发生了显著的变化, 最直接的表现是海水富营养化及渔业资源退化。富营养化可通过上行控制作用影响整个生态系统, 而渔业资源退化表现为高级捕食者丰度降低后的下行控制作用减弱。这二者叠加后的生态效应, 可以通过食物网中起承上启下作用的浮游动物类群的变动得以反应^[7]。多数浮游动物生活史周期较短, 种群动态变化与环境变化耦合性较好^[8]。有证据表明浮游生物类群可以非线性的响应模式来放大一些微小的环境信号^[9]。因此, 通过长期观测浮游动物类群变动更易探知长江口海域所存在的环境变化。

长江口浮游动物群落分布特点与其生态环境的空间异质性是密切相关的。作为典型的河口, 其邻近水域生境(如温度、盐度以及浑浊度、营养盐、初级生产力)会随着径流量表现明显的季节及年际变化。而与之相对应河口附近生物群落组成也会表现时空上的动态变化^[10-14]。

作者为研究生态环境空间异质性对浮游动物群落的影响, 利用 1998~2011 年获得的长江口邻近海域春季和秋季的浮游动物长期调查资料, 开展该水域的浮游动物群落结构分析, 明确群落优势种的年间变化及组成动态; 目的在于确定较长时间序列基础上的浮游动物群落生态地理区划特点, 为深入研究气候变化和水利工程等人类活动对长江口生态系统的长期影响奠定基础。

1 材料和方法

1.1 研究海域以及采样方法

本研究数据来自中国科学院海洋研究所浮游动物课题组在长江口邻近海域的长期调查资料。采样站位覆盖了长江口 30°30'~32°00'N、121°00'~123°20'E 的海域(图 1)。调查时间为 1998~2011 年的春季(5 月)和秋季(11 月)。在每个采样站位, 使用标准浮游动物大网(网口直径 0.8 m, 网孔直径 500 μm), 以大约

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41476139)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41476139]

作者简介: 王晓东(1987-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游动物生态学研究, E-mail: xdwang@outlook.com; 李超伦, 通信作者, E-mail: lcl@qdio.ac.cn

1m/s 的速度从底到表垂直拖网。获得的浮游动物样品立即用 5% 的中性福尔马林溶液固定、保存。海上采样结束后, 在实验室内解剖镜下完成浮游动物样品的鉴定和计数工作。

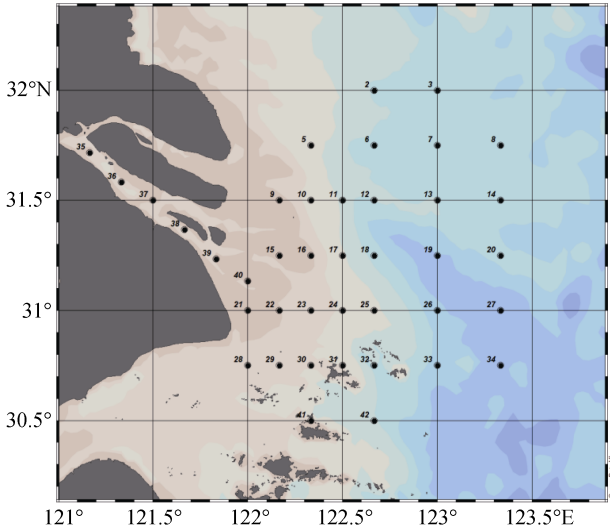


图 1 长江口调查站位图

Fig. 1 Location of sampling stations in the Changjiang River Estuary

1.2 数据分析

将各站位采集到的样品作定量分析, 浮游动物的丰度为单位体积海水中所含有该种(类)的个数(个/m³), 即: $d = n_i/V$ 。

式中 n_i 为群落内物种 i 的总个数; V 为滤水体积。某个站位的浮游动物丰度为该站所出现的所有浮游动物种类丰度的总和。

为研究浮游动物群落地理分布, 采用多维多度分析(MDS)进行分析。原始数值经标准化后基于 Bray-Curtis 相似性指数进行 Q 型聚类, 并进行多维多度分析(MDS)。聚类得到的每一个群组定义为一个

群落。将群落划分结果叠加在盐度等值线图上, 对比盐度等值线和群落的地理分布区域。该分析使用多元统计软件 PRIMER 6.0(Plymouth Routine In Multivariate Ecology Research)进行。

群落划分完成以后, 每个群落的浮游动物优势种根据每个种在该群落中的优势度(Y)来确定:

$$Y = (n_i/N)f_i$$

式中, f_i 为该物种出现的频率, 即出现站位与总站位数的比值; n_i 为群落内物种 i 的个数; N 为群落内所有物种的总个数。依据文献[11]的研究方法, 选取优势度 $Y \geq 0.02$ 的物种作为优势种。

为了更好地从群落水平上考察变化情况, 本研究采用 3 个多样性指数开展分析:

(1) 辛普森多样性指数(Simpson's index of diversity, D) $D = 1/\sum(A_i/A)^2$

(2) 香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener index, H') $H' = -\sum(A_i/A) \cdot \log_2(A_i/A)$

(3) 均匀度(J') $J' = H'/\log_2 S$

式中 A 为总丰度, S 为总物种数。

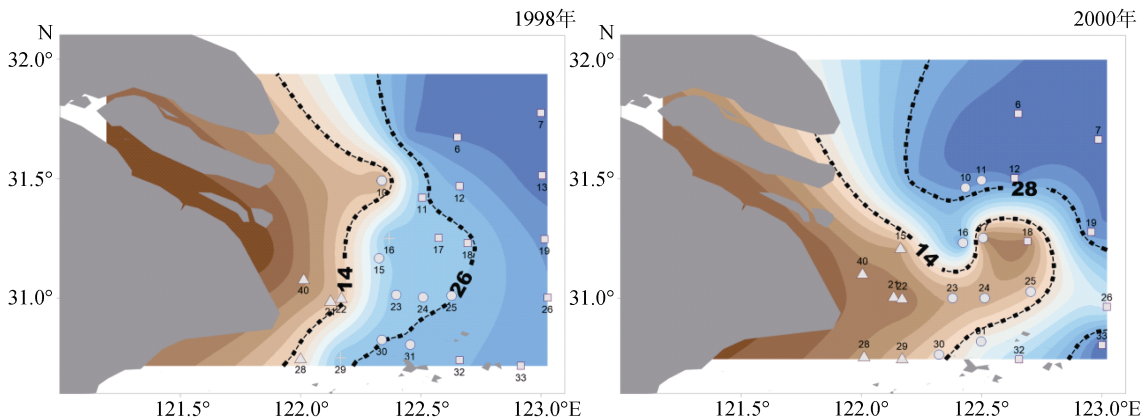
为了考察群落的长期变化趋势, 对丰度及多样性指数在时间序列上变化趋势的显著性进行单因子方差分析(One-way ANOVA)。

调查站位分布图使用软件 Ocean Data View 4.7(ODV)制作。环境因子等值线以及群落地理分布图使用 Surfer 13.0 和 Adobe Illustrator CC 制作。聚类分析、MDS 分析、PCA 分析以及群落物种多样性指数计算使用 PRIMER 6.0 完成。

2 结果

2.1 群落分布与盐度梯度关系

对比春季和秋季各调查年份所得的浮游动物群落分布(图 2 和图 3)可得, 长江口邻近水域存在较为稳定的 3 个群落: 群落 A、群落 B、群落 C。



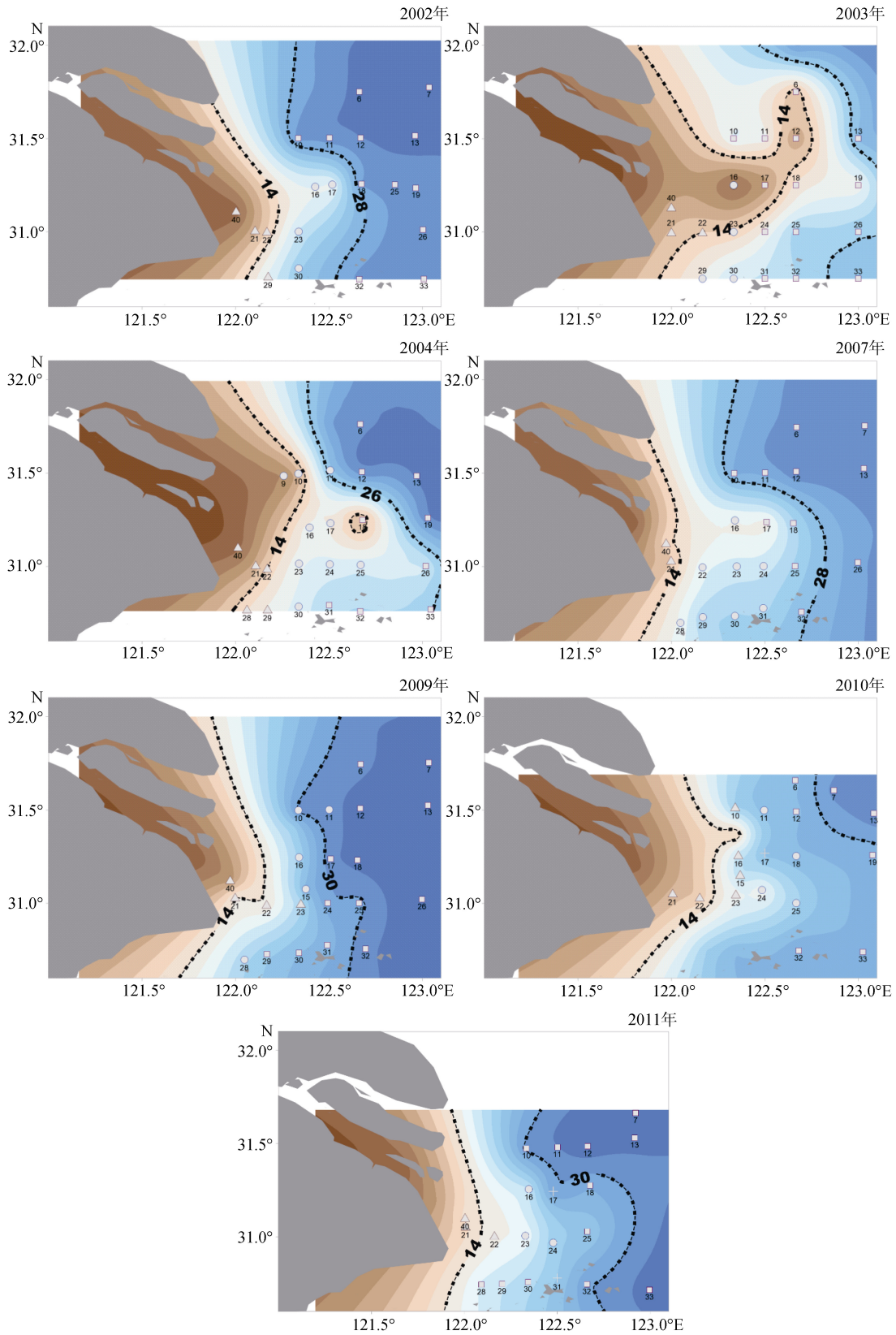


图 2 秋季各调查航次浮游动物群落的地理分布
 Fig. 2 Geographic distribution of zooplankton communities in autumn
 △. 群落 A; ○. 群落 B; □. 群落 C
 △. Community A; ○. Community B; □. Community C

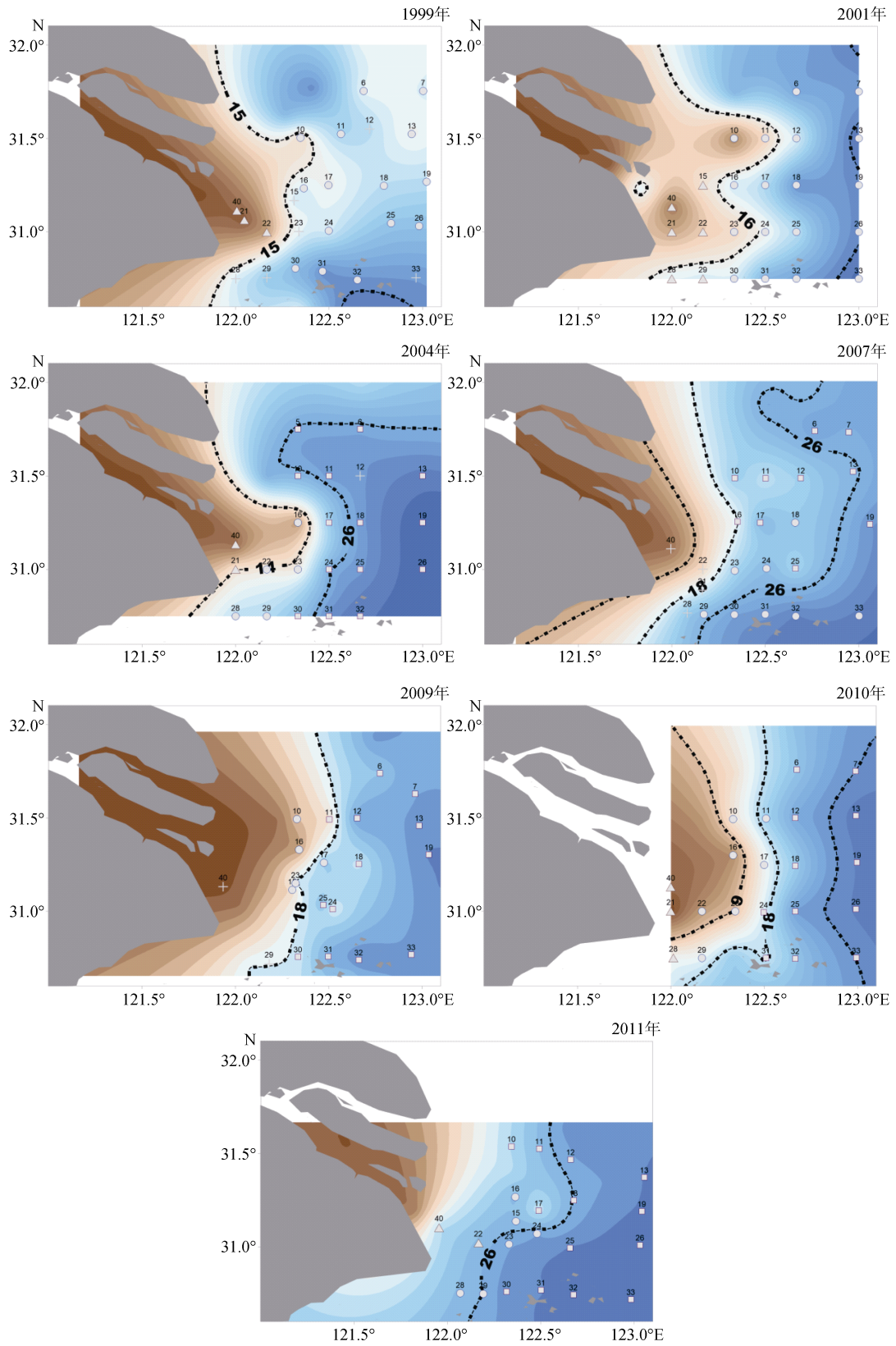


图3 春季各调查航次浮游动物群落的地理分布
 Fig. 3 Geographic distribution of zooplankton communities in spring
 △. 群落 A; ○. 群落 B; □. 群落 C
 △. Community A; ○. Community B; □. Community C

秋季(11月),考虑浮游动物群落与站位的对应,可以得到如下结果:群落A:40、21、22号站3个近岸站位稳定地归属于群落A;群落B:16、23、24号站3个中部站位在大多数年份归属于群落B;群落C:6、7、12、13、18、19、26、32、33号站9个外海站位稳定地归属于群落C。其中,在不同的年份里,中部海域近岸一侧站位在群落A和B之间摇摆,远海一侧站位在群落B和C之间摇摆。

根据前人的结果^[15]并结合浮游动物实际采样站位的分布,以表层盐度18和30为分界点,将长江口区域划分为高盐水带(盐度>30)、中盐水带(18<盐度<30)和低盐水带(盐度<18)。可以看出,浮游动物群落的分布与盐水带有紧密的关联,但并不完全一致。浮游动物群落A与群落B的地理分界一般在盐度=14至盐度=18之间,群落B与群落C的地理分界一般在盐度=24至盐度=28之间。因此,群落A大致位于低盐水带,但范围略有收缩;群落C大致位于高盐水带,但是显著地向近岸方向扩展。

在春季(5月),浮游动物群落与站位的对应结果如下:群落A:40、21、22号站3个近岸站位在大部分年份归属于群落A,在2007年和2009年虽然不能严格的聚为一类,但是与其他站位的差异一直是显著的;群落B:16、17、23、24号站4个中部站位在

大多数年份归属于群落B;群落C:6、7、12、13、18、19、25、26、32、33号站10个外海站位在大部分年份归属于群落C。与秋季类似,中部海域近岸一侧站位在群落A和B之间摇摆,远海一侧站位在群落B和C之间摇摆。盐水带与浮游动物群落有一定的关联。群落A与群落B的地理分界一般在盐度14至盐度=18之间,群落B与群落C的地理分界一般在盐度=20至盐度=26之间。但是与秋季相比,浮游动物群落的分布与盐度梯度的耦合性较弱,群落的年际变动较大。

综合1998~2011年浮游动物群落聚类分析及结合盐度梯度分析,群落A、B、C可分别对应淡水/半咸水群落、过渡群落、外海群落。

2.2 1998~2011年长江口海域群落物种多样性

1998~2011年长江口海域浮游动物多样性特征(表1)可分为两个阶段,1998~2004年及2004年后。2004年以前由群落A至群落C,即由近岸到外海,物种多样性呈现出升高的态势。2004年后,物种多样性分布存在着局部的变动,主要表现在群落B,有些年份增加,如2004年秋季,有些年份则下降,如2011年秋季,多样性的空间分布规律性不明显。

表1 各地理群落的物种多样性指数(D、H'和J')

Tab. 1 Diversity index (D, H', J') of each zooplankton community in autumn

年	种类			D			H'			J'			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
秋季	1998	9	11	16	0.568	0.789	0.801	1.126	1.867	1.991	0.526	0.791	0.736
	2000	10	12	18	0.729	0.778	0.852	1.605	1.766	2.126	0.708	0.713	0.734
	2002	4	16	22	0.616	0.629	0.846	1.022	1.563	2.225	0.730	0.570	0.732
	2003	9	13	25	0.477	0.642	0.878	1.042	1.458	2.434	0.482	0.589	0.759
	2004	14	19	22	0.737	0.793	0.724	1.727	2.046	1.906	0.670	0.693	0.619
	2007	17	21	48	0.780	0.590	0.882	1.937	1.408	2.675	0.684	0.502	0.700
	2009	8	15	24	0.837	0.748	0.834	1.790	1.693	2.171	0.861	0.631	0.690
	2010	7	10	15	0.753	0.718	0.586	1.610	1.626	1.395	0.856	0.703	0.525
	2011	6	5	15	0.755	0.664	0.843	1.637	1.275	2.183	0.888	0.908	0.821
	1999	4	12		0.581	0.349		0.962	0.776		0.710	0.317	
春季	2001	16	19		0.680	0.662		1.655	1.682		0.599	0.571	
	2004	7	14	18	0.516	0.766	0.697	0.983	1.778	1.618	0.530	0.687	0.559
	2007	11	22	26	0.598	0.521	0.759	1.427	1.317	1.871	0.594	0.429	0.577
	2009		24	11		0.783	0.499		2.140	1.124		0.679	0.473
	2010	6	17	25	0.599	0.732	0.696	1.243	1.811	1.785	0.665	0.641	0.554
	2011	9	11	15	0.686	0.659	0.351	1.508	1.486	0.885	0.679	0.642	0.334
1999	4	12		0.581	0.349		0.962	0.776		0.710	0.317		

续表

年	种类			<i>D</i>			<i>H'</i>			<i>J'</i>			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
2001	16	19		0.680	0.662		1.655	1.682		0.599	0.571		
2004	7	14	18	0.516	0.766	0.697	0.983	1.778	1.618	0.530	0.687	0.559	
春季	2007	11	22	26	0.598	0.521	0.759	1.427	1.317	1.871	0.594	0.429	0.577
	2009		24	11		0.783	0.499		2.140	1.124		0.679	0.473
	2010	6	17	25	0.599	0.732	0.696	1.243	1.811	1.785	0.665	0.641	0.554
	2011	9	11	15	0.686	0.659	0.351	1.508	1.486	0.885	0.679	0.642	0.334

虽然 3 个群落总丰度在时间序列上并没有显著性的变化(ANOVA, $P>0.05$), 然而在秋季, 群落 A 的物种多样性呈现出显著升高的趋势, 而群落 B 则呈现出显著降低的趋势; 在春季, 群落 B 的物种多样性呈现出显著升高的趋势, 而群落 C 则呈现出显著降低的趋势(表 2)。

表 2 浮游动物群落变化趋势统计结果
Tab. 2 Statistical reports of the long-term changes in zooplankton

	总丰度	群落		
		A	B	C
秋季	<i>J'</i>	+		
	<i>H'</i>	+	-	
	<i>D</i>	+	-	
春季	<i>J'</i>		+	-
	<i>H'</i>		+	-
	<i>D</i>		+	-

注: +. 显著上升; -. 显著下降; 空白. 变化不显著

2.3 群落的优势物种

群落 A 的优势种主要为华哲水蚤(*Sinocalanus* spp.)、歪水蚤(*Tortanus* spp.)、许水蚤(*Schmackeris* spp.) 和真刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)(表 3、表 4)。华哲水蚤为淡水种, 歪水蚤、许水蚤为半咸水种, 真刺唇角水蚤为近岸种, 这些物种的占优势反映了群落 A 作为淡水和半咸水生态群落特点。胶质类浮游动物在群落 A 中很少出现, 只有秋季 2011 年出现了半球美螳水母(*Clytia hemisphaerica*), 这是一种多见于近岸的小型水母。

淡水种(如华哲水蚤)以及半咸水种(如许水蚤、歪水蚤)只在群落 A 中占优势, 在群落 B 中少量出现, 在群落 C 中消失; 近岸种(如真刺唇角水蚤)出现在群落 A 和群落 B, 在群落 C 中消失; 群落 B 优势种组成开始出现外海种, 群落 C 优势种组成以外海种为

主导; 水母类只在群落 C 中优势度值相对较高。

群落 A 的平均丰度年际波动很大, 最高值出现在 1998 年秋季, 平均丰度为 1 841 个/m³, 该年 28 号站出现了真刺唇角水蚤和火腿许水蚤的高值, 丰度分别高达 4 200 个/m³和 1 825 个/m³。但在 2009 年, 平均丰度只有 19.2 个/m³。

3 讨论

通过对长江口海域 1998~2011 年春秋季节浮游动物群落结果的长期连续调查, 作者的研究结果表明: 长江口海域存在 3 个浮游动物群落, 并且不同群落空间分布范围存在着年际变动, 与之前研究结果相似, 长江口浮游动物群落分布与盐度有关^[16-20]。不同于之前研究所划分的生态类群^[21, 22], 作者基于长时间序列的数据, 还发现长江口邻近水域不同浮游动物群落地理分布范围是动态的, 具有时空分布异质性。长江口邻近水域出现的浮游动物种类的生态习性可归于偏淡水、半咸水以及咸水(或者河口、近岸种以及远海)类型。盐度的分布是上述不同生态类型种类分布的决定因子。已划分的 3 个群落中, 群落 A 与群落 C 分布的地理区域相对稳定, 所出现的浮游动物优势种的生态习性也是相对稳定的。群落 B 位于过渡水域, 淡水和外海水间相互作用具有季节、年间差异, 这也是导致该群落的地理分布区域以及浮游动物优势种组成的变动较大的原因。

就时空分布而言, 2004 年前与其后, 长江口浮游动物的生物多样性存在的差异主要表现在过渡群落的空间分布不稳定。而该阶段是否与三峡蓄水的影响^[23, 24]有关, 尚有待于进一步的研究和观测。

总体而言, 在长江口邻近水域存在着明显的空间异质性, 对该区域的浮游动物群落细致的研究, 可能会发现更多可能的对环境响应的表征。本研究中, 虽然 1998~2011 年整个长江口邻近海域浮游动物群落的物种多样性保持稳定, 但就各群落来看,

不同群落、不同季节的年间变化趋势是不一致的,这其中与环境因子的关系有待深入的探讨。

表 3 秋季各地理群落的优势种组成及优势度(Y)

Tab. 3 Dominant species and their dominance index (Y) of each zooplankton community in autumn

年	A		B		C	
	种名	Y	种名	Y	种名	Y
1998	真刺唇角水蚤	0.60	强壮箭虫	0.35	精致真刺水蚤	0.32
	火腿许水蚤	0.26	精致真刺水蚤	0.14	腕足类幼体	0.14
	刺尾歪水蚤	0.07	太平洋纺锤水蚤	0.09	强壮箭虫	0.10
2000	指状许水蚤	0.28	背针胸刺水蚤	0.20	精致真刺水蚤	0.21
	火腿许水蚤	0.22	太平洋磷虾	0.19	太平洋磷虾	0.21
	细巧华哲水蚤	0.15	强壮箭虫	0.19	小拟哲水蚤	0.16
			小拟哲水蚤	0.15	强壮箭虫	0.10
2002	指状许水蚤	0.52	箭虫幼体	0.31	精致真刺水蚤	0.21
	真刺唇角水蚤	0.16	背针胸刺水蚤	0.28	强壮箭虫	0.14
	火腿许水蚤	0.14	真刺唇角水蚤	0.09	肥胖箭虫	0.07
2003	火腿许水蚤	0.73	小拟哲水蚤	0.52	小拟哲水蚤	0.12
	真刺唇角水蚤	0.14	背针胸刺水蚤	0.12	精致真刺水蚤	0.10
			真刺唇角水蚤	0.12	双生水母	0.09
			太平洋纺锤水蚤	0.10		
2004	真刺唇角水蚤	0.34	中华哲水蚤	0.43	精致真刺水蚤	0.34
	针刺拟哲水蚤	0.16	拿卡箭虫	0.09	针刺拟哲水蚤	0.15
	中华胸刺水蚤	0.11	虾幼体	0.07	拿卡箭虫	0.05
2007	虫肢歪水蚤	0.43	针刺拟哲水蚤	0.65	长刺小厚壳水蚤	0.11
	火腿许水蚤	0.29	刺尾纺锤水蚤	0.07	针刺拟哲水蚤	0.11
	真刺唇角水蚤	0.09	拿卡箭虫	0.04	真刺水蚤幼体	0.11
					拿卡箭虫	0.09
					中华哲水蚤	0.07
2009	火腿许水蚤	0.21	中华哲水蚤	0.42	强额拟哲水蚤	0.10
	华哲水蚤	0.21	强壮箭虫	0.20	中华哲水蚤	0.10
	小拟哲水蚤	0.08	小拟哲水蚤	0.19	精致真刺水蚤	0.08
	钩虾	0.08			百陶箭虫	0.08
	糠虾幼体	0.04			真刺唇角水蚤	0.07
2010	小拟哲水蚤	0.28	中华哲水蚤	0.35	中华哲水蚤	0.68
	刺尾歪水蚤	0.25	小拟哲水蚤	0.32	小拟哲水蚤	0.11
	真刺唇角水蚤	0.18	双毛纺锤水蚤	0.12	精致真刺水蚤	0.06
2011	刺尾歪水蚤	0.40	中华哲水蚤	0.16	精致真刺水蚤	0.19
	指状许水蚤	0.14	中华假磷虾幼体	0.15	双生水母	0.17
	华哲水蚤	0.12	太平洋纺锤水蚤	0.07	中华哲水蚤	0.12

注: 限于篇幅仅列出优势度排在前三位的优势种(表 4 同); 火腿许水蚤 (*Schmackeria poplesia*), 指状许水蚤 (*Schmackeria inopinus*), 虫肢歪水蚤(*Tortanus vermiculus*), 刺尾歪水蚤(*Tortanus spinicaudatus*), 双毛纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*), 太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*), 小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*), 针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*), 强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*), 华哲水蚤(*Sinocalanus sinensis*), 细巧华哲水蚤(*Sinocalanus tenellus*), 中华哲水蚤(*Calanus sinicus*), 真刺唇角水蚤(*Labidocera euhaeta*), 精致真刺水蚤(*Euchaeta concinna*), 中华胸刺水蚤(*Centropages sinensis*), 背针胸刺水蚤(*Centropages dorsipinatus*), 钩虾(*Gammaridea*), 糠虾幼体(*Mysidacea*) larva, 太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*), 中华假磷虾幼体(*Pseudeuphausia sinica*) larva, 拿卡箭虫(*Sagitta nagae*), 强壮箭虫(*Sagitta crassa*), 百陶箭虫(*Sagitta bedoti*), 肥胖箭虫(*Sagitta enflata*), 双生水母(*Diphyes chamissonis*), 五角水母(*Muggiaea atlantica*), 住囊虫(*Oikopleura dioica*)

表 4 春季各地理群落的优势种组成及优势度(Y)

Tab. 4 Dominant species and their dominance index (Y) of each zooplankton community in spring

年	A		B		C	
	种类	Y	种类	Y	种类	Y
1999	细巧华哲水蚤	0.38	中华哲水蚤	0.83		
	刺尾歪水蚤	0.38	五角水母	0.06		
	火腿许水蚤	0.23	拿卡箭虫	0.06		
2001	华哲水蚤	0.45	中华哲水蚤	0.44		
	刺尾歪水蚤	0.22	腹足类幼体	0.14		
	指状许水蚤	0.05	海龙箭虫	0.05		
2004	短尾类蚤状幼体	0.64	真刺唇角水蚤	0.32	中华哲水蚤	0.43
	细巧华哲水蚤	0.15	虾幼体	0.14	箭虫幼体	0.19
	真刺唇角水蚤	0.13	短尾类蚤状幼体	0.10	双生水母	0.08
2007	虫肢歪水蚤	0.55	中华哲水蚤	0.71	中华哲水蚤	0.33
	火腿许水蚤	0.26	真刺水蚤幼体	0.08	拿卡箭虫	0.28
	真刺唇角水蚤	0.09	拿卡箭虫	0.08	五角水母	0.06
			短尾类幼体	0.02	长尾类幼体	0.06
			长尾类幼体	0.02	短尾类幼体	0.06
2009	火腿许水蚤	0.37	中华哲水蚤	0.43	中华哲水蚤	0.70
	虫肢歪水蚤	0.18	小拟哲水蚤	0.05	箭虫幼体	0.13
	指状许水蚤	0.16	华哲水蚤	0.05	小拟哲水蚤	0.05
			住囊虫	0.04		
			箭虫幼体	0.04		
2010	华哲水蚤	0.34	小拟哲水蚤	0.43	小拟哲水蚤	0.50
	火腿许水蚤	0.19	背针胸刺水蚤	0.10	精致真刺水蚤	0.17
	指状许水蚤	0.11	太平洋纺锤水蚤	0.07	太平洋纺锤水蚤	0.05
2011	刺尾歪水蚤	0.46	中华哲水蚤	0.54	中华哲水蚤	0.80
	真刺唇角水蚤	0.14	短尾类幼体	0.14	拿卡箭虫	0.05
	中华哲水蚤	0.10	拿卡箭虫	0.05	精致真刺水蚤	0.03

4 结论

基于浮游动物物种组成及相对丰度进行聚类, 结果表明, 长江口海域存在稳定的 3 个浮游动物群落。根据这 3 个群落所处水域盐度特点, 归为淡水 / 半咸水群落、过渡群落、外海群落。

群落的优势种所属的生态习性与水域内的盐度分布特点是一致的。从空间分布和时间序列分别考察 3 个群落, 能够发现被整体掩盖的变化趋势, 这对于研究长江口这样一个空间异质性明显的海域是重要的。

参考文献:

- [1] Bianchi T S. The role of terrestrially derived organic carbon in the coastal ocean: A changing paradigm and the priming effect[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(49): 19473-19481.
- [2] Cloern J E, Foster S Q, Kleckner A E. Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems[J]. Biogeosciences, 2014, 11(9): 2477-2501.
- [3] Beardsley R C, Limeburner R, Yu H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4: 57-76.
- [4] Wang B. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69(3): 471-477.
- [5] Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition[J]. Marine Chemistry, 2011, 125(1): 108-116.
- [6] Zhou M, Shen Z, Yu R. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. Continental Shelf

- Research, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [7] Schminke H K. Entomology for the copepodologist[J]. Journal of Plankton Research, 2007, 29 (Suppl. 1): 149-162.
- [8] Hays G C, Richardson A J, Robinson C. Climate change and plankton[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2005, 20: 337-344.
- [9] Taylor A H, Allen J I, Clark P A. Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem[J]. Nature, 2006, 416: 629-632.
- [10] 张锦平, 徐兆礼, 汪琴, 等. 长江口九段沙附近水域浮游动物生态特征[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(4): 383-389.
Zhang Jinping, Xu Zhaoli, Wang Qin, et al. Ecological characteristics of zooplankton near the Jiuduansha waters of the Yangtze River estuary[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(4): 383-389.
- [11] 徐兆礼. 长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 780-784.
Xu Zhaoli. Character of zooplankton community and its variation in the water near the Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 780-784.
- [12] 纪焕红, 叶属峰. 长江口浮游动物生态分布特征及其与环境的关系[J]. 海洋科学, 2006, 30(6): 23-30.
Ji Huanhong, Ye Shufeng. Ecological distribution characteristics of zooplankton and its relationship with environmental factors in the Changjiang River Estuary[J]. Marine Sciences, 2006, 30(6): 23-30.
- [13] 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, Zheng 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.
- [14] Wang L, Chen Q, Han R, et al. Zooplankton community in Yangtze River Estuary and adjacent sea areas after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Annales de Limnologie-International Journal of Limnology, 2016, 52: 273-284.
- [15] 陈吉余, 张重乐. 长江河口及其邻近海域的自然环境[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1987, 2: 86-94.
Chen Jiyu, Zhang Chongle. Natural environment of the Changjiang Estuary and its adjacent sea[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science Edition), 1987, 2: 86-94.
- [16] 徐兆礼, 沈新强. 长江口水域浮游动物生物量及其年间变化[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 282-286.
Xu Zhaoli, Shen Xinqiang. Zooplankton biomass and its variation in water near Changjiang Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin, 2005, 14(3): 282-286.
- [17] 徐兆礼, 沈新强, 马胜伟. 春、夏季长江口邻近水域浮游动物优势种的生态特征[J]. 海洋科学, 2005, 29(12): 13-19.
Xu Zhaoli, Shen Xinqiang, Ma Shengwei. Ecological characters of zooplankton dominant species in the waters near the Changjiang Estuary in spring and summer[J]. Marine Sciences, 2005, 29(12): 13-19.
- [18] 王金辉, 徐韧, 秦玉涛, 等. 长江口基础生物资源现状及年际变化趋势分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(5): 821-828.
Wang Jinhui, Xu Ren, Qin Yutao, et al. The basic biological resources and variation during the last decades in the Changjiang Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(5): 821-828.
- [19] 徐韧, 李亿红, 李志恩, 等. 长江口不同水域浮游动物数量特征比较[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1688-1696.
Xu Ren, Li Yihong, Li Zhien, et al. Quantitative comparison of zooplankton in different habitats of the Changjiang Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1688-1696.
- [20] 陈洪举, 刘光兴. 2006年夏季长江口及其邻近水域浮游动物的群落结构[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 393-398.
Chen Hongju, Liu Guangxing. Zooplankton community structure in Yangtze River Estuary and adjacent sea area in summer 2006[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2009, 45(4): 393-398.
- [21] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 II 种类组成, 群落结构, 水系指示种[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 59-63.
Chen Yaqu, Xu Zhaoli, Wang Yunlong, et al. An ecological study of zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River Estuary area II species composition, community structure and indicator species[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1995, 2(1): 59-63.
- [22] 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. 生态学报, 2017, 37(2): 683-691.
Shao Qianwen, Liu Zhensheng, Zhang Jing, 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.
- [23] 汤新武, 蔡德所, 陈求稳, 等. 三峡工程三期蓄水初期长江口水域春季浮游动物群落特征及其与环境的关系[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1082-1088.
Tang Xinwu, Cai Desuo, Chen Qiwen, et al. Spring

character of zooplankton community and its relation to environmental factors in Yangtze Estuary right after the third-stage impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 1082-1088.

[24] 刘光兴, 陈洪举, 朱延忠, 等. 三峡工程一期蓄水后长江口及其邻近水域浮游动物的群落结构[J]. *中国*

海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 789-794.

Liu Guangxing, Chen Hongju, Zhu Yanzhong, et al. Study on the zooplankton community structure in the Changjiang River Estuary and adjacent sea area after the first-stage storage of the three-gorges project[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(5): 789-794.

Classification of zooplankton communities in the adjacent waters of the Changjiang River estuary based on data from 1998 to 2011

WANG Xiao-dong^{1, 2}, LI Chao-lun^{1, 2}

(1. CAS 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)

Received: Nov. 28, 2017

Key words: zooplankton; Changjiang River Estuary; community

Abstract: The Changjiang River Estuary has been facing multiple environmental pressures due to extensive human activities and climatic changes. Therefore, a long-term investigation (1998–2011) was conducted in each May and November to investigate the effects of these environmental changes on the community dynamics of zooplankton in the adjacent waters of Changjiang River estuary (30°30'N to 32°00'N, 121°00'E to 123°20'E). Based on the species compositions and the relative abundances of zooplankton, the following three distinguishing zooplankton communities were identified: Community A (freshwater and brackish water species), Community B (transition community), and Community C (marine species). The long-term investigation illustrated the continuous changes occurring in the three zooplankton communities at the interannual level. Moreover, coupled relationships between the communities and relative abundance and seawater salinity were detected over the entire study period. Seawater salinity between 14 and 18 was identified as the geographic boundary between Community A and Community B, whereas seawater salinity between 24 and 28 was identified as the boundary between Community B and Community C. Community A was dominated by freshwater and brackish water species, whereas jellyfish were found only in Community C. Over the entire study period, for autumn, the trends in species diversities revealed a significant increase for Community A and a significant decline for Community B. For spring, the trends in species diversities exhibited a significant increase for Community B and a significant decline for Community C.

(本文编辑: 谭雪静、张培新)