

长江三口—西洞庭湖环境因子对浮游动物群落组成的影响

严广寒^{1,2,3}, 殷雪妍^{1,3}, 汪 星^{1,2,3}, 王丽婧^{2,4}, 李莹杰^{2,4}, 李 虹^{2,4}, 陈 威²

1. 中国环境科学研究院 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012;
2. 中国环境科学研究院 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 湖南 岳阳 414000;
3. 中国环境科学研究院 国家环境保护饮用水水源保护重点实验室, 北京 100012;
4. 中国环境科学研究院 长江经济带生态环境研究中心, 北京 100012)

摘要:了解长江三口(藕池口、松滋口、太平口)和西洞庭湖浮游动物群落结构特征及主要环境影响因子, 探究洞庭湖来水及浮游动物多样性和现存量的周年动态变化, 运用典范对应分析(CCA)浮游动物分布与环境因子之间的关系, 可为洞庭湖水生态环境保护及污染防治提供数据支撑, 于2016年11月、2017年3月和8月对长江三口及西洞庭湖18个断面进行了浮游动物调查。结果显示, 共检出浮游动物4门、40种, 长江三口浮游动物密度为9~323个/L, 生物量为0.006~0.319 mg/L, 西洞庭湖浮游动物密度为9~45个/L, 生物量为0.019~0.045 mg/L, 枯水期与丰水期浮游动物密度差异显著, 长江三口浮游动物密度均值(67个/L)高于西洞庭湖(23个/L); 三口的优势类群为无节幼体(Nauplii)、桡足幼体(Copepodid)、曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*), 西洞庭湖优势种为螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、普通表壳虫(*Arcella vulgaris*)、曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*); 长江三口浮游动物Shannon-Wiener指数及Pielou均匀度指数分别为1.07和0.77, 西洞庭湖分别为1.17和0.80。CCA分析表明, 水温(WT)、总氮(TN)、总磷(TP)和正磷酸盐(PO₄-P)是影响长江三口浮游动物分布的主要因子, 而WT、TN是影响西洞庭湖区浮游动物分布的主要因子。

关键词:浮游动物; 群落结构; 环境因子; 长江三口; 西洞庭湖

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)02-0023-10

浮游动物处于水域生态系统中重要的基础环节, 对淡水生态系统物质循环和能量流动有重要作用, 其群落结构可为解释湖泊富营养化进程提供重要依据(Xie & Yang, 2000)。在不同生境下, 浮游动物会产生不同的响应, 导致其种类、密度的变化, 因此对水环境具有一定程度的指示作用(Chang et al., 2005)。影响浮游动物群落结构的因素包括营养盐、光照、温度、透明度等非生物因素(Berzin & Pejler, 1989)和寄生、捕食与竞争等生物因素(An et al., 2012)。由于空间环境的异质性以及生物之间相互作用的复杂性, 导致浮游动物群落的主要环境影响因子在不同水体中存在差异(Alcaraz et al.,

2007)。对浮游动物群落结构进行分析有助于对水质状况作出评价, 是理化监测的有力补充。

洞庭湖是我国第二大淡水湖泊, 位于湖南省北部, 长江中游南岸, 具有调蓄长江来水、提供饮用水源及生物多样性保护等重要功能(张光贵等, 2016)。西洞庭湖是其重要的组成部分, 沅江、澧水以及长江三口(藕池口、松滋口、太平口)来水交汇于此, 属湖泊型水体, 北部长江三口的来水属河道型水体。近年来, 国内外学者围绕洞庭湖水质及水生态问题开展了大量研究(Zhang et al., 2013; 王岩等, 2014; Wang & Liang, 2016)。随着洞庭湖流域社会经济快速发展, 水体营养物质超标现象严重, 污染问题较为突出, 致使其生物群落结构和功能发生一定程度的变化。

以往研究多关注于浮游植物群落结构和多样性, 且研究区域大多数集中在洞庭湖湖区(汪星等, 2012; 李利强等, 2014; 汪星等, 2016; 王丑明等, 2018); 但鲜有涉及洞庭湖来水及湖体浮游动物群落演变研究。本文基于2017年洞庭湖浮游动物群落和环境参数的调查和测定, 研究其来水及浮游动物多样性和现存量的周年动态变化, 运用典范对应分

收稿日期:2019-05-13

基金项目:中国环境科学研究院、中央级公益性科研院所改革启动费业务专项-洞庭湖三口至西洞庭湖浮游生物时空演替规律及影响因素研究(22060302014000); 洞庭湖江湖生态监测重点站(JJ2017-028); 三峡工程运行对洞庭湖水环境影响及保护技术研究(2017HXXY-05)。

作者简介:严广寒, 1992年生, 男, 工程师, 主要从事水生生物评价研究。E-mail: yanguanghan9978@sina.com

通信作者:汪星。E-mail: wangxing@craes.org.cn

析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),探讨浮游动物分布与环境因子之间的关系,进而分析河道型(长江三口)与湖泊型(西洞庭湖)浮游动物群落分布与组成差异,以期为洞庭湖水生态环境保护及污染防治提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样时间与样点设置

根据长江三口及西洞庭湖的水系和湖区特征,本研究共设定18个采样断面(图1),各采样点具体特征如表1所示。根据洞庭湖枯水期、平水期、丰水期的水位变动情况,监测时间分为2016年11月以及2017年3月和8月。

1.2 监测指标

1.2.1 样品采集与鉴定 浮游动物中的原生动物和轮虫样品采集1 L水样,加1.5%鲁哥试剂固定,带回实验室自然沉淀48 h后,用虹吸管吸取上清液,将样品浓缩至50 mL;枝角类、桡足类用5 L采水器自表层而下每隔0.5 m或1.0 m采集混合水样20 L,经25号浮游生物网浓缩至50 mL,用4%的甲醛固定后获得浮游动物的定量样本。在奥林巴斯CX31型生物显微镜(100~1000倍)下用计数框对浮游动物进行计数,参考相关文献(王家楫,1961;章宗涉和黄祥飞,1991;周凤霞和陈剑虹,2011)对样本进行种类鉴定与计数,生物量根据虫体体积计算(黄祥飞,2000)。

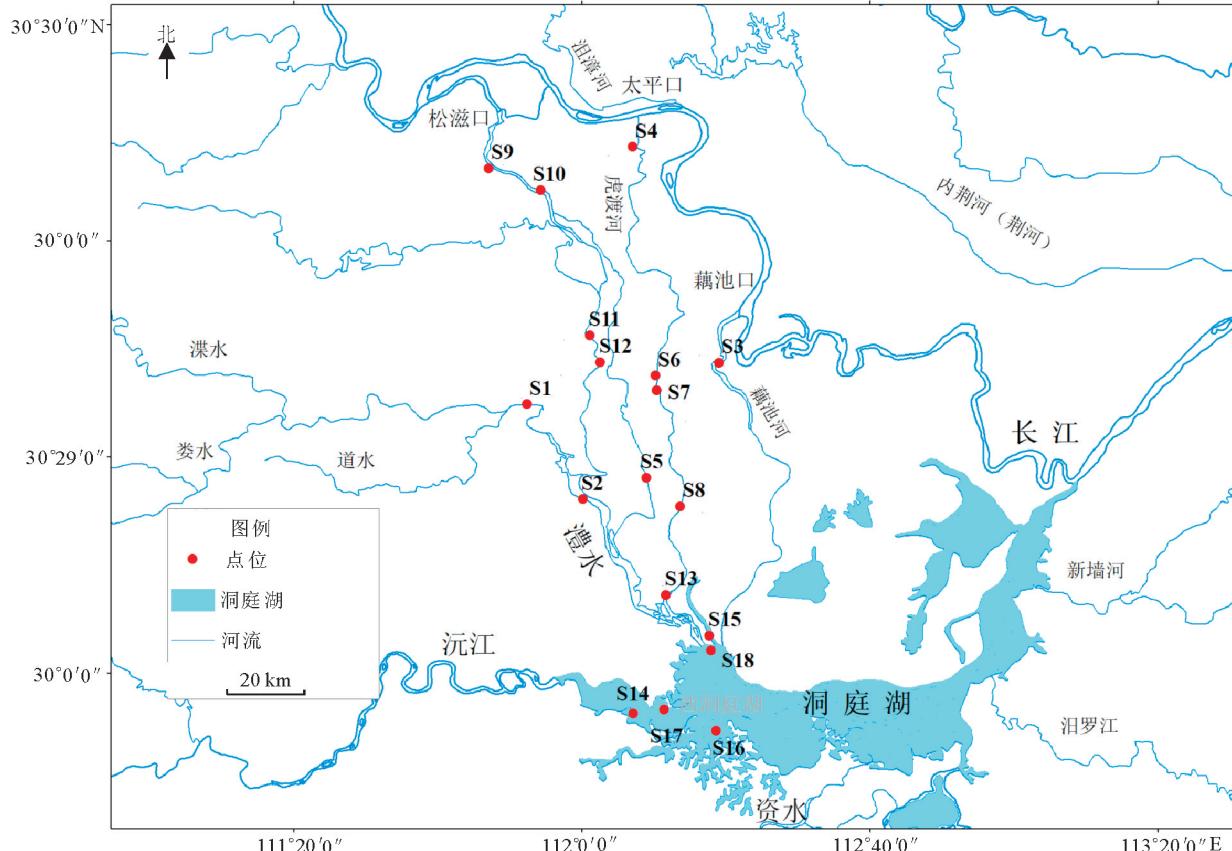


图1 长江三口和西洞庭湖监测断面

Fig.1 Location of sampling sites in the three outlets connecting Yangtze River with west Dongting Lake

1.2.2 理化指标测定 理化指标采用现场和室内分析测定的方法。使用YSI-EXO多参数水质分析仪(USA)现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)和pH等参数。总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、正磷酸盐(PO_4^3-P)取350 mL水样带回实验室测定。参照《水和废水监测分析方法(第4版)》测定水样,TN采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度计法,TP、 PO_4^3-P 采用钼酸铵分光光度法, $\text{NH}_3\text{-N}$

采用纳氏试剂光度法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用硝酸钾分光光度法。

1.3 数据处理及分析方法

1.3.1 数据处理 Shannon-Winener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)、优势度(Y)和 Jaccard 相似指数(Z) (Jaccard, 1908; Shannon, 1950; Ul-anowicz, 2000; Pielou, 2011; Aksnes & Wassmann, 1993)的计算公式如下:

表1 长江三口-西洞庭湖采样点分布

Tab.1 Distribution of sampling sites in the three outlets connecting the Yangtze River with west Dongting Lake

序号	名称	地理坐标	分类
S1	津市	111°52'21.51"E; 29°37'19.15"N	
S2	石龟山	112°00'05.90"E; 29°24'17.06"N	
S3	管家铺	112°19'00.00"E; 29°44'00.00"N	
S4	弥陀寺	112°07'00.00"E; 30°13'00.00"N	
S5	安乡	112°09'12.04"E; 29°40'47.73"N	长江
S6	黄山头上	112°10'10.70"E; 29°40'47.73"N	三口
S7	黄山头下	112°10'19.48"E; 29°39'32.13"N	
S8	虎渡河下游	112°12'38.51"E; 29°22'04.68"N	(河道型
S9	新江口	111°47'00.00"E; 30°11'00.00"N	水体)
S10	沙道观	111°55'00.00"E; 30°10'00.00"N	
S11	松滋河	112°01'00.98"E; 29°46'24.49"N	
S12	松滋河东支	112°01'38.73"E; 29°45'50.37"N	
S13	肖家湾	112°11'38.00"E; 29°10'28.47"N	
S14	坡头	112°07'03.44"E; 28°54'49.22"N	西洞
S15	三岔河	112°17'38.17"E; 29°05'37.10"N	庭湖
S16	小河嘴	112°18'37.44"E; 28°51'06.56"N	(湖泊型
S17	目平湖	112°11'21.07"E; 28°54'58.56"N	水体)
S18	南嘴	112°17'51.92"E; 29°03'38.02"N	

$$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad ①$$

$$J = H'/\log_2 S \quad ②$$

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad ③$$

$$Z = c/(a+b-c) \quad ④$$

式中: S 为群落中物种数; $P_i = N_i/N$, N_i 为第*i*种物种的个数, N 为观察到的总个数; n_i 为第*i*种的总个体数; f_i 为该样品中出现的频率; $Y > 0.02$ 时定为优势种。 a 为A水域的生物种类数, b 为B水域的生物种类数, c 为两个水域中的共有的种类数。

表2 长江三口-西洞庭湖水体理化性质

Tab.2 Physicochemical characteristics of water in the three outlets connecting the Yangtze River with west Dongting Lake

断面	WT/ ℃	pH	DO/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	NH ₃ -N/ mg · L ⁻¹	NO ₃ -N/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹	PO ₄ -P/ mg · L ⁻¹
S1	20.79±6.10	8.81±0.73	6.68±1.28	1.60±0.62	0.12±0.13	1.25±0.28	0.08±0.06	0.03±0.03
S2	20.71±7.23	8.52±0.72	6.52±0.65	1.79±0.33	0.28±0.42	0.94±0.55	0.08±0.05	0.03±0.03
S3	20.81±6.30	8.35±0.56	9.72±2.00	2.03±1.32	0.22±0.20	1.78±1.03	0.15±0.06	0.09±0.03
S4	22.09±3.88	8.34±0.26	6.89±1.58	1.33±0.32	0.08±0.07	1.10±0.36	0.13±0.04	0.07±0.04
S5	21.07±5.13	8.71±0.58	8.08±1.57	1.79±0.46	0.14±0.11	1.19±0.13	0.15±0.05	0.08±0.07
S6	20.39±7.45	9.14±0.59	8.46±1.80	0.68±0.22	0.20±0.18	0.29±0.10	0.03±0.02	0.01±0.01
S7	20.96±7.27	8.73±0.82	7.38±0.74	1.43±0.74	0.26±0.26	0.84±0.53	0.07±0.05	0.03±0.03
S8	20.88±8.09	8.72±1.00	7.03±0.81	1.55±1.03	0.38±0.34	0.92±0.67	0.05±0.02	0.02±0.03
S9	21.68±4.84	7.91±0.39	6.10±1.53	1.39±0.20	0.17±0.17	0.97±0.50	0.17±0.06	0.09±0.09
S10	19.73±5.67	8.14±0.44	7.06±1.55	1.05±0.35	0.10±0.09	0.82±0.49	0.14±0.09	0.07±0.06
S11	19.45±6.11	7.70±1.29	6.76±0.52	1.57±0.23	0.18±0.20	1.17±0.28	0.11±0.08	0.06±0.04
S12	20.23±6.58	8.22±0.51	6.70±0.62	1.56±0.28	0.20±0.21	0.86±0.20	0.09±0.05	0.01±0.01
S13	21.26±8.47	8.63±0.72	6.95±0.87	1.63±0.25	0.13±0.13	1.21±0.27	0.16±0.09	0.07±0.05
S14	20.51±6.09	8.23±0.32	7.10±0.35	2.71±1.95	0.22±0.32	1.01±0.74	0.05±0.03	0.03±0.02
S15	23.52±8.17	8.79±0.21	7.41±2.04	2.82±0.72	0.31±0.33	1.97±0.87	0.09±0.03	0.05±0.04
S16	22.30±7.25	8.59±0.65	7.41±2.20	3.08±2.30	0.14±0.16	1.16±0.51	0.06±0.02	0.03±0.02
S17	21.22±5.38	8.45±0.50	7.96±1.24	1.50±0.66	0.13±0.14	1.14±0.58	0.05±0.03	0.03±0.02
S18	22.51±8.29	8.80±0.72	6.61±0.82	1.69±0.59	0.18±0.20	1.25±0.58	0.07±0.01	0.03±0.01

根据 Jaccard 相似性原理,当 Z 为 0~0.25 时为极不相似,0.25~0.50 时为中等不相似,0.50~0.75 时为中等相似,0.75~1.00 为极相似。

1.3.2 分析方法 生物指标差异性分析 t 检验和皮尔逊相关分析均采用 SPSS17.0 统计处理, $P < 0.05$ 为差异性显著, $P < 0.01$ 为差异性极显著。

采用主成分(PCA)中的因子分析法,将各采样点的环境数据进行标准化处理(溶解氧 DO 为逆指标,将其先进行倒数变换,然后标准化)。为使每个主成分的意义更加明确,采用 Varimax 最大方差法对因子进行旋转,按照特征值(λ)大于 1 的原则提取成分,选择主成分的因子载荷量大于 0.7 的环境因子进行典范对应分析。所有的数据分析均在 SPSS17.0 软件下进行。

采用 Canoco for Windows 4.5 对物种数据和环境数据进行典范对应分析(CCA)。按照如下要求对浮游动物物种进行筛选:该物种在各样点出现的频度 $> 10\%$,且至少 1 个样点的相对密度 $\geq 1\%$ (Lopes et al, 2005)。最终包含 15 个浮游动物分类单元和 8 个环境因子。物种矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换。除 pH 外,环境因子数据全部进行 $\lg(x+1)$ 转换(Flores & Baroness, 1998),排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示。

2 结果与分析

2.1 环境理化指标

长江三口-西洞庭湖各断面的环境因子如表 2。

*t*检验表明,长江三口和西洞庭湖间的年均pH和DO均无显著差异($P>0.05$),WT、TN和TP在长江三口和西洞庭湖之间均存在显著差异($P<0.05$)。总体来看,长江三口及西洞庭湖各断面的水质状况良好,但值得注意的是,水体中TN、

TP及NH₃-N、NO₃-N、PO₄-P浓度偏高,处于IV~V类水质标准。

2.2 浮游动物群落结构组成与分布

2.2.1 种类组成 在对长江三口-西洞庭湖的调查中,共鉴定浮游动物4门、40种(表3)。

表3 长江三口和西洞庭湖各监测断面的浮游动物种类

Tab.3 Phytoplankton species composition at each sampling site in the three outlets of the Yangtze River and west Dongting Lake

种 类	监 测 断 面																
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
白钟虫 <i>Vorticella alba</i>							+	+									+
沟钟虫 <i>V. convallaria</i>								+									
钟形钟虫 <i>V. campanula</i>																+	
普通表壳虫 <i>Arcella vulgaris</i>	+	+					+	+	++		+	+	+	+	+	+	
盘状表壳虫 <i>A. discooides</i>																	+
长圆砂壳虫 <i>Diffugia oblonga</i>			+							+	+						+
球形砂壳虫 <i>D. globulosa</i>																	+
圆体砂壳虫 <i>D. urceolata</i>	+																
盘状匣壳虫 <i>Cevrotropeixis discooides</i>	+		+				+		+		+	+	+				+
斜口三足虫 <i>Trinema enchelys</i>	+																+
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+				+		++	+						+	+	+	+
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>						+		+						+	+	++	+
方形臂尾轮虫 <i>B. quadridentatus</i>							+	+	+	+				+	+	+	
剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>								++	+								+
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	+	+					+	+	+	+				+			+
壶状臂尾轮虫 <i>B. urceus</i>	+		+				++		+								
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>							+	++							++	+	+
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>							++	++							++	+	+
卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>								++	+	+					+	+	+
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+						+	+							+	+	+
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>									++								
顶生三肢轮虫 <i>Filinia terminalis</i>									+								
长三肢轮虫 <i>F. longiseta</i>										+							++
脾状三肢轮虫 <i>F. opoliensis</i>											+						
精致单肢轮虫 <i>Monostyla elachis</i>							+										+
叶状帆叶轮虫 <i>Argonotholca foliacea</i>											+	+					
月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>							+				+						+
蹄形腔轮虫 <i>L. ungulate</i>												+					
椎尾水轮虫 <i>Epiophanes senta</i>								+									+
唇形叶轮虫 <i>Notholca labis</i>									+								
巨长肢轮虫 <i>Monommata grandis</i>															+		
隆线溞 <i>Daphnia carinata</i>																	+
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	+	+					+	++	+					+	+	+	+
长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	++								+								+
寡刺秀体溞 <i>D. paucispinosum</i>	+																
奇异尖额溞 <i>Alona eximia</i>									+								
点滴尖额溞 <i>A. guttata</i>							+	+	+					+			
老年低额溞 <i>Simocephalus vetulus</i>										+							
无节幼体 <i>Nauplii</i>	++	++	+	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
桡足幼体 <i>Copepodid</i>	++	++	+	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++

注:1~5 000个/m³为+,5 001~10 000个/m³为++,10 001~50 000个/m³为++,50 000个/m³以上为+++。

Note: + represents 1~5 000 ind/m³, ++ represents 5 001~10 000 ind/m³, +++ represents 10 001~50 000 ind/m³, ++++ represents 50 000 ind/m³.

轮虫(Rotifer)种类最为丰富,为21种,占总数的52.5%;其次是原生动物(Protozoa)8种,占20.0%;枝角类(Cladocera)7种,占17.5%,桡足类(Copepoda)2种,占5.0%。总体来说,轮虫和原生动物是长江三口及西洞庭湖浮游动物的主要组成部分,枝角类和桡足类的种类偏少。

2.2.2 密度变化及不同水期的生物量 长江三口浮游动物密度为9~323个/L,生物量为0.006~

0.319 mg/L; 西洞庭湖浮游动物密度为9~45个/L,生物量为0.019~0.045 mg/L。监测过程中,其三口浮游动物年均密度(67个/L)高于西洞庭湖(23个/L)。*t*检验表明,长江三口与西洞庭湖间浮游动物密度和生物量在枯水期和丰水期变化显著($P<0.05$)(图2)。三口的总密度显著高于西洞庭湖,但二者不同监测断面间浮游动物密度和生物量无显著差异($P>0.05$)(图3)。

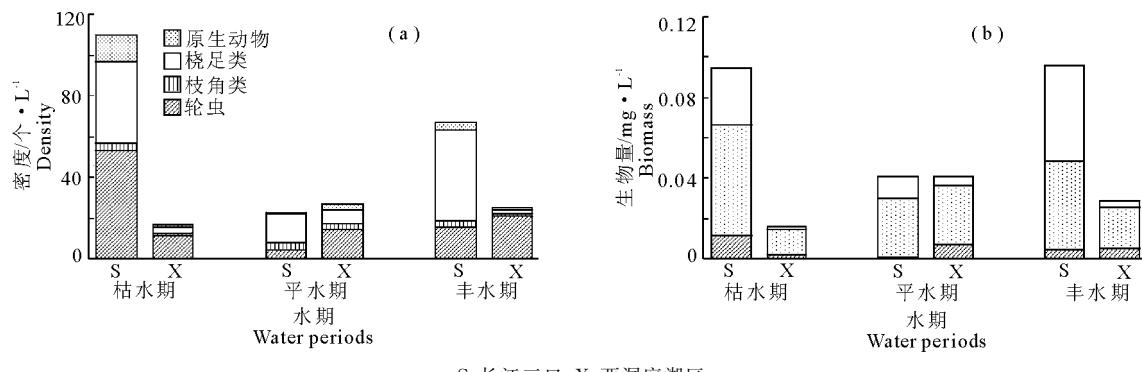


图2 不同水期各类群浮游动物密度(a)及生物量(b)分布

S: the three outlets of the Yangtze River; X: west Dongting Lake

Fig.2 Zooplankton community density(a) and biomass(b) in the three water periods

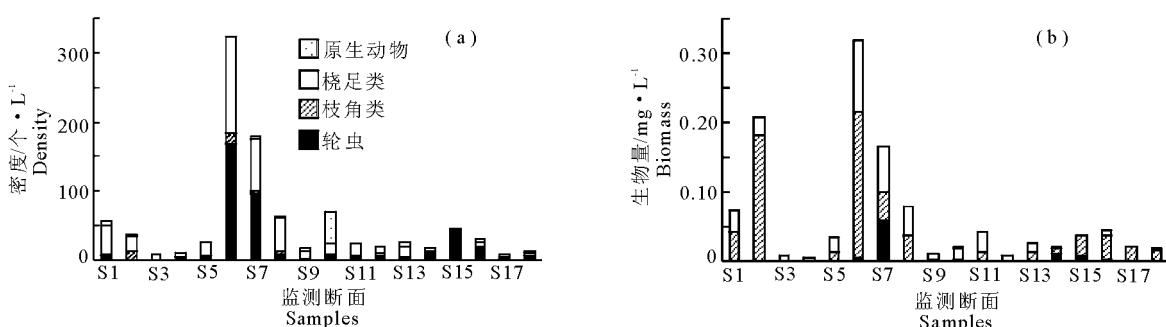


图3 各类群浮游动物密度(a)及生物量(b)不同断面分布

Fig.3 Density(a) and biomass(b) of different zooplankton taxa in different sampling transects

2.2.3 优势种 长江三口-西洞庭湖浮游动物的优势种见表4。其优势种均为原生动物、轮虫和桡足类。三口水系不同优势种根据其优势度由高到低的排列

表4 2017洞庭湖浮游动物优势种分布

Tab.4 Distribution of zooplankton dominant species in Dongting Lake in 2017

浮游动物	种名	长江三口		西洞庭湖	
		f	Y	f	Y
原生动物	普通表壳虫	0.33	0.023	0.37	0.032
	曲腿龟甲轮虫	0.15	0.023	0.20	0.051
	轮虫	0.15	0.021	0.40	0.024
桡足	萼花臂尾轮虫	0.20	0.027	0.27	0.025
	角突臂尾轮虫	0.40	0.062	0.46	0.022
	螺形龟甲轮虫	0.69	0.230	0.67	0.112
	卜氏晶囊轮虫	0.27	0.025	0.022	0.021
	无节幼体	0.46	0.022	0.022	0.021

依次为无节幼体、桡足幼体、曲腿龟甲轮虫、普通表壳虫和萼花臂尾轮虫; 西洞庭湖不同优势种根据其优势度高低排列依次为螺形龟甲轮虫、普通表壳虫、曲腿龟甲轮虫、卜氏晶囊轮虫、萼花臂尾轮虫、无节幼体和角突臂尾轮虫。总体来看,无节幼体和桡足幼体是三口浮游动物优势种类的主体,西洞庭湖轮虫占优。

2.2.4 多样性指数 长江三口-西洞庭湖浮游动物Shannon-Wiener多样性指数(H')和Pielou均匀度指数(J)变化见图4。监测期间,两者的变化规律基本一致,不同监测点位间的多样性呈现较大差异,长江三口的 H' 值变化范围为0.49~1.78,均值为1.07; 西洞庭湖 H' 值为0.92~1.39,均值为1.17。

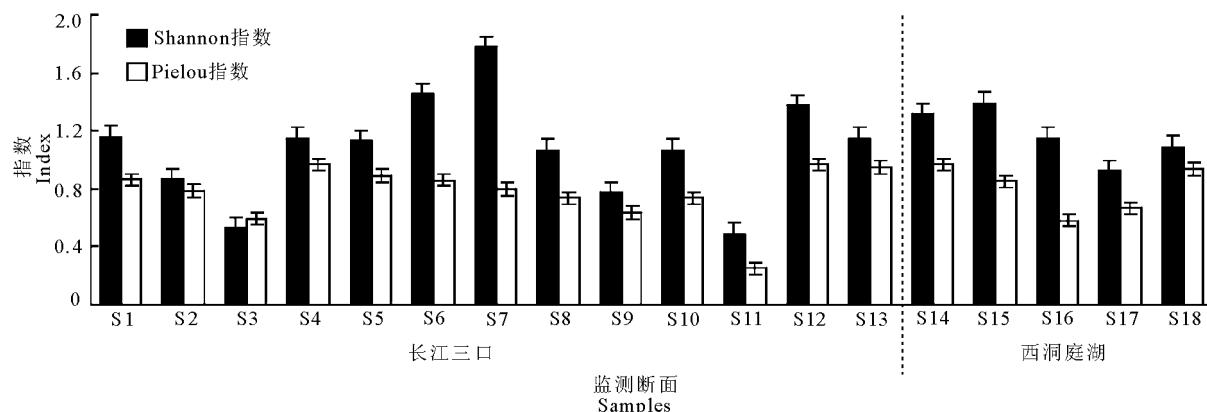


图4 长江三口-西洞庭湖浮游动物多样性指数

Fig.4 Zooplankton diversity indices in the three outlets connecting the Yangtze River with west Dongting Lake

三口的J值变化范围为0.25~0.97,均值为0.77;西洞庭湖J值为0.58~0.97,均值为0.80。

2.2.5 浮游动物种类相似性 由表5可知,长江三口与西洞庭湖的浮游动物种类相似性指数在丰水期最高,达到中等相似水平;平水期次之,枯水期最低,均为中等不相似水平。总体来说,长江三口与西洞庭湖群落结构存在一定的差异。

表5 长江三口-西洞庭湖浮游动物种类相似性指数

Tab.5 Similarity coefficients of zooplankton communities in the three outlets of the Yangtze River and west Dongting Lake

水期	枯水期	平水期	丰水期
相似性指数	0.43	0.48	0.50

2.3 环境因子主成分分析

由表6可知,长江三口及西洞庭湖水域的主要环境因子累计贡献率分别达到77.395%和82.417%,该主成分分析所得指标的载荷超过0.7即为主要环境影响因子(Ulanowicz, 2000)。长江三口的主要环境

表6 Varimax转轴后的因子载荷量

Tab.6 Load capacity of the environmental factors in rotated component matrix

项目	长江三口			西洞庭湖		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
WT	-0.828	-0.098	0.027	-0.130	-0.566	-0.729
pH	-0.325	0.306	-0.626	0.907	-0.035	0.056
$\rho(\text{DO})$	0.763	-0.205	-0.135	-0.631	0.318	0.316
$\rho(\text{TN})$	0.118	0.956	-0.030	-0.046	-0.100	0.879
$\rho(\text{TP})$	-0.258	0.270	0.798	0.066	0.910	-0.021
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.861	0.187	0.061	-0.497	0.206	0.780
$\rho(\text{NO}_3\text{-N})$	-0.016	0.912	0.269	0.922	0.248	-0.104
$\rho(\text{PO}_4\text{-P})$	-0.071	0.182	0.914	-0.114	0.907	0.160
特征值	2.200	2.032	1.959	2.354	2.187	2.052
方差/%	27.503	25.404	24.488	29.422	27.341	25.655
累计方差/%	27.503	52.907	77.395	29.422	56.763	82.417

注:加粗数据表示环境因子在不同主成分中的载荷超过0.7。

Note: The bold part of the data indicates that the load of environmental factors in different principal components exceeds 0.7.

因子为WT、DO、TN、TP、NH₃-N、NO₃-N、PO₄-P,西洞庭湖的主要环境因子为水温、pH、TN、TP、NH₃-N、NO₃-N、PO₄-P。

2.4 环境因子与浮游植物的CCA分析

通过CANOCO 4.5软件,根据浮游动物密度至少在1个样点中的百分比≥1%,并且在采样点中出现的频度≥10%,选取15种常见的浮游动物进行分析,见表7。

表7 CCA分析中浮游动物的种类代码及其出现频度

Tab.7 Zooplankton species codes for CCA and their occurrence frequency

编号	种类	频度/%
Z1	普通表壳虫 <i>Arcella vulgaris</i>	20.4
Z2	盘状匣壳虫 <i>Centropyxis discoides</i>	14.8
Z3	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	22.2
Z4	蝶形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	20.4
Z5	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	16.7
Z6	方形臂尾轮虫 <i>Brachionus quadridentatus</i>	14.8
Z7	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	14.8
Z8	卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>	14.8
Z9	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusillid</i>	14.8
Z10	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	11.1
Z11	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	11.1
Z12	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	11.1
Z13	无节幼体 <i>Nauplii</i>	66.7
Z14	桡足幼体 <i>Copepodid</i>	55.6
Z15	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	24.1

CCA统计分析结果见表8。长江三口对浮游动物群落结构分布显著相关的环境因子($P < 0.05$)为TN、TP、WT、NO₃-N和PO₄-P,其中PO₄-P对浮游动物群落结构分布的影响最大;而西洞庭湖有所差异,WT和TN是影响其群落分布的主要环境因子。

DCA分析结果显示,长江三口和西洞庭湖排序轴最大梯度的长度分别为3.459和3.247,因而使用

CCA 分析浮游动物群落与环境因子的关系。CCA 分析排序(图 5)显示,其环境因子轴 1、轴 2 间的相关系数为 0,表明分析结果可信(Braak,1986)。

对于长江三口,盘状匣壳虫、暗小异尾轮虫、裂足臂尾轮虫、角突臂尾轮虫和剪形臂尾轮虫等受 WT 影响最大,与之呈现密切的正相关关系,同时与 DO 呈正相关性,而曲腿龟甲轮虫与之呈负相关性;萼花臂尾轮虫、卜氏晶囊轮虫和壶状臂尾轮虫与 DO 呈正相关性;螺形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫和方

形臂尾轮虫与 TN、NO₃-N 和 TP 等呈正相关性,其他常见浮游动物与之呈负相关性。

西洞庭湖裂足臂尾轮虫和角突臂尾轮虫与 WT 呈正相关性,其余浮游动物与其呈较强的负相关性;普通表壳虫、盘状匣壳虫、方形臂尾轮虫和无节幼体与 pH 呈正相关性;裂足臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、暗小臂尾轮虫,以及桡足幼体和长额象鼻溞与 TN、TP、NH₃-N、NO₃-N 和 PO₄-P 呈负相关性,而与另外的浮游动物呈正相关性。

表 8 环境变量梯度分析统计量

Tab.8 Statistical analysis of environmental variable gradients

指标	TN	TP	WT	NO ₃ -N	NH ₃ -N	PO ₄ -P	DO	pH	样点位置
F	2.413	2.970	2.293	2.269	1.695	3.515	1.459	/	长江三口
P	0.014	0.002	0.024	0.030	0.070	0.002	0.146	/	
F	1.770	1.567	2.254	1.295	1.622	1.103	/	0.797	西洞庭湖
P	0.050	0.120	0.010	0.218	0.086	0.436	/	0.682	

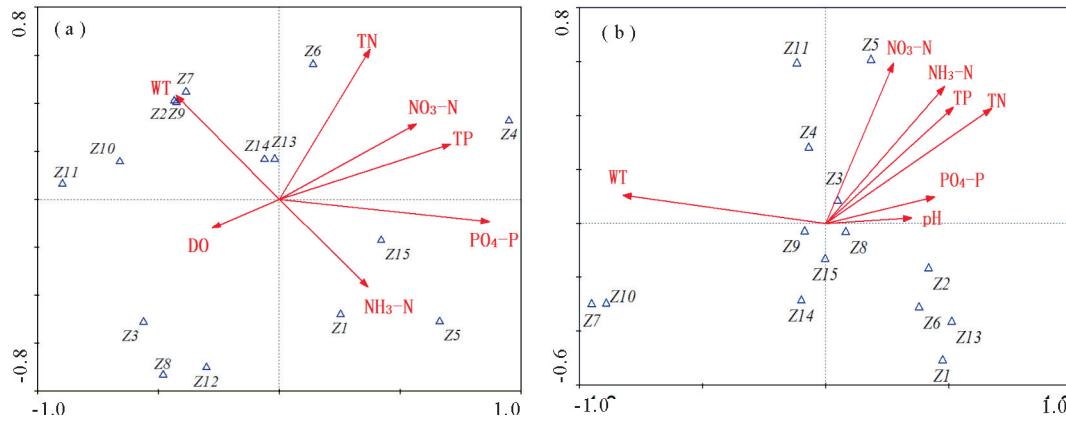


图 5 长江三口(a)和西洞庭湖(b)常见浮游动物与主要环境因子的典范对应分析

Fig.5 Canonical correspondence analysis of common zooplankton species and primary environmental factors in the three outlets of Yangtze River(a) and west Dongting Lake(b)

3 讨论

3.1 浮游动物群落特征及优势种演变

长江三口浮游动物以轮虫、桡足类的种类数和密度占比较高,西洞庭湖则以轮虫占一定优势。与大型枝角类和桡足类相比,轮虫个体小、发育快、生命周期短,能以较快速度抢占生态系统中空的生态位,在淡水系统中常处于优势地位(吴利等,2011)。洞庭湖作为典型吞吐型湖泊,湖区水体交换较快,三口为河道型水体,周边沿岸接近生活与种植区,水体环境复杂,营养物质丰富,且相对于水生植物缺乏的湖区水体而言,三口不同河段生长有不同的高等水生植物。更高的有机质含量有助于为轮虫提供更多食物来源,同时也能为浮游动物创造相对适宜的多样性生境,这与林青等(2014)对滴水湖的研究结果一致,这也是三口轮虫与桡足占较高比例的原因之

一;此外,三口来水汇入西洞庭湖的同时,常携带泥沙和悬浮物,导致水体浑浊,透明度降低,对湖区浮游动物产生较大影响,不利于枝角、桡足类等大型浮游动物的生存。作为西洞庭湖入湖口的坡头(S14)和三岔河断面(S15),其浮游动物密度和生物量相对高于湖区其他断面(图 3)。因此,总体来看,三口的浮游动物密度与生物量均高于西洞庭湖。

对于三口河道,各监测断面的多样性指数相差较大(图 4),可能是由于沿程由多种异质性很强的生态因子生境形成了极为丰富的流域生境多样化条件,对生物群落的性质、优势种和种群丰度产生了重大影响(董哲仁,2003);而相较于西洞庭湖湖区,在三口与沅江来水汇入后,融入大面积的水域,其水生境状况相差不大,导致多样性指数变化相差不大;此外,三口属河道型水体,水体流速较快,而西洞庭湖面积较大,同等流量的水体汇入西洞庭湖后,流速减

缓,加之浮游动物游动能力弱,因此在流速较快的水域,浮游动物种类数要低于流速较慢的水域(吴利等,2008),导致三口多样性指数低于西洞庭湖。本次调查中,长江三口和西洞庭湖区的Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度均小于3,属于中污染状态(Douterelo et al,2004);三口水系以无节幼体、桡足幼体、曲腿龟甲轮虫和普通表壳虫占优,西洞庭湖以耐污能力强的螺形龟甲轮虫占优。汪梦琪等(2018)对洞庭湖平水期的研究表明,洞庭湖三口水系优势属为砂壳虫,湖区优势属为砂壳虫、多肢轮虫。从浮游动物种类相似性角度来看,三口河道与西洞庭湖的种类相似性是丰水期达到中等相似水平,枯、平水期为中等不相似水平,这是由于丰水期水位升高,水体流动性增强,导致种类相似性较高;而枯水期和平水期的水位较低,甚至部分河道出现断流现象,水体流动性较弱,很大程度上影响了三口、西洞庭湖的生境,导致种类差异较大(马健荣等,2012)。可见洞庭湖不同水期的浮游动物群落有所差异。

3.2 浮游动物与环境因子的关系

大量研究表明,影响浮游动物分布的重要因素是水温、氮磷营养盐、pH和溶解氧等(陈光荣等,2008;杜明敏等,2013;杜明勇等,2014)。水温可以通过改变浮游动物的生理状态和食物来源,进而影响浮游动物的代谢、繁殖以及休眠卵的萌发(Frone-man,2001;Marques et al,2006)。本研究中,三口与西洞庭湖水温差异显著,枯水期和丰水期的浮游动物密度也有显著差异,由环境梯度变量分析可知(表8),作为气候变化分明的湖泊,洞庭湖不同季节的水温差异显著。因此,水温必然成为浮游动物生长的限制因子之一,从而影响浮游动物的分布,这与吴利等(2011)研究结果一致。CCA分析也表明,在三口水系和西洞庭湖中,常见浮游动物超过50%的种受水温影响,与之呈密切的正相关性。与此同时,水体富营养化程度增加将导致物种数的降低和耐污性物种丰度的增加。洞庭湖水质在2010~2015年,TN浓度增加明显,TP浓度在IV~V类水质标准(王艳分等,2018)。随着近年来湖南省益阳市茅草街生活区的人口聚集和南县农村建设的发展,集中式耕地形成了农业面源污染,产生的氮磷污染物直接或间接汇入湖区,TN、TP等营养盐浓度仍较高,处在中-轻度富营养化,导致螺形龟甲轮虫、卜氏晶囊轮虫、萼花臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫等一些耐污种在浮游动物群落中占据优势。

浮游动物分布由营养水平、食物网结构和水体滞留时间等多因素共同决定,不同水体影响浮游动物群落结构的主要环境因子是不同的。如本次研究通过主成分分析法筛选出影响长江三口和西洞庭湖浮游动物分布差异的环境因子是DO和pH。究其原因,是西洞庭湖水域的小河嘴、万子湖及目平湖断面处于旅游城市沅江市境内,由于地方政府保护有力,湖泊水体外来污染压力及人为干扰较小,水质受DO的影响较弱(王丽婧等,2013);此外,CCA分析结果也表明,长江三口和西洞庭湖浮游动物分布均与TN有较强的相关性,但由于生态系统的空间差异性,长江三口浮游动物分布受TP、PO₄-P的影响也较为显著,这与高子涵等(2016)的研究结果一致。

总体来看,长江三口和西洞庭湖的水环境因子影响存在差异,WT、TN、TP和PO₄-P是影响长江三口典型断面浮游动物种群分布格局的主要因子,WT、TN是影响西洞庭湖的主要因子,其他环境因子对长江三口及西洞庭湖浮游动物种群分布影响也较为明显。

参考文献

- 陈光荣,钟萍,张修峰,等,2008.惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J].湖泊科学,20(3):351~356.
- 董哲仁,2003.河流形态多样性与生物群落多样性[J].水利学报,34(11):1~6.
- 杜明敏,刘镇盛,王春生,等,2013.中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J].生态学报,33(17):5407~5418.
- 杜明勇,于洋,阳振,等,2014.太湖流域2012年枯水期浮游生物群落结构特征[J].湖泊科学,26(5):724~734.
- 高子涵,张健,皮杰,等,2016.湖南省大通湖浮游动物群落结构及其与环境因子关系[J].生态学杂志,35(3):733~740.
- 黄祥飞,2000.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社.
- 李利强,黄代中,熊剑,等,2014.洞庭湖浮游植物增长的限制性营养元素研究[J].生态环境学报,23(2):283~288.
- 林青,由文辉,徐凤洁,等,2014.滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].生态学报,34(23):6918~6929.
- 马健荣,夏品华,詹金星,等,2012.贵州三水库冬季浮游生物分布及影响因子分析[J].中国环境监测,28(5):57~63.
- 汪梦琪,汪金成,王琪,等,2018.洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状[J].生态学杂志,37(8):2418~2429.

- 汪星,郑丙辉,刘录三,等,2012.洞庭湖典型断面藻类组成及其与环境因子典范对应分析[J].农业环境科学学报,31(5): 995-1002.
- 汪星,李利强,郑丙辉,等,2016.洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究[J].中国环境科学,36(12): 3766-3776.
- 王丑明,吴可方,张屹,等,2018.洞庭湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析[J].淡水渔业,48(4): 52-57.
- 王家楫,1961.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社.
- 王丽婧,汪星,刘录三,等,2013.洞庭湖水质因子的多元分析[J].环境科学研究,26(1): 1-7.
- 王岩,姜霞,李永峰,等,2014.洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J].环境科学研究,27(5): 484-491.
- 王艳分,倪兆奎,林日彭,等,2018.洞庭湖水环境演变特征及关键影响因素识别[J].环境科学学报,38(7): 2554-2559.
- 吴利,冯伟松,陈小娟,等,2008.新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征[J].应用生态学报,19(1): 163-172.
- 吴利,冯伟松,张堂林,等,2011.湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,23(4): 619-625.
- 张光贵,王丑明,田琪,2016.三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析[J].湖泊科学,28(4): 734-742.
- 章宗涉,黄祥飞,1991.淡水浮游生物研究方法[J].北京:科学出版社.
- 周凤霞,陈剑虹,2011.淡水微型生物与底栖动物图谱[M].北京:化学工业出版社.
- Aksnes D L, Wassmann P, 1993. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production[J]. Limnology & Oceanography, 38(5): 978-985.
- Alcaraz M, Calbet A, Estrada M, et al, 2007. Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea Prog Oceanogr[J]. Progress in Oceanography, 74(2): 294-312.
- An X P, Du Z H, Zhang J H, et al, 2012. Structure of the zooplankton community in Hulun Lake, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 13: 1099-1109.
- Berzin B, Pejler B, 1989. Rotifer occurrence in relation to temperature[J]. Hydrobiologia, 175(3): 223-231.
- Braak C J F T, 1986. Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis[J]. Ecology, 67(5): 1167-1179.
- Chang K H, Sakamoto M, Hanazato T, 2005. Impact of pesticide application on zooplankton communities with different densities of invertebrate predators: An experimental analysis using small-scale mesocosms [J]. Aquatic Toxicology, 72(4): 373-382.
- Douterelo I, Perona E, Mateo P, 2004. Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters[J]. Environmental Pollution, 127(3): 377-384.
- Flores L N, Barone R, 1998. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosa-marina and Lake Arancio, Sicily, Italy)[J]. Hydrobiologia, 369/370: 163-178.
- Froneman P W, 2001. Seasonal changes in zooplankton biomass and grazing in a temperate Estuary, South Africa [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 52(5): 543-553.
- Jaccard P, 1908. Nouvelles recherches sur la distribution florale [J]. Bull Soc Vaud Sci Nat, 44: 223-270.
- Lopes M R M, Bicudo C E D M, Ferragut M C, 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. Hydrobiologia, 542(1): 235-247.
- Marques S, Azeiteiro U Jc, Neto J, et al, 2006. Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns [J]. Journal of Plankton Research, 28(3): 297-312.
- Pielou E C, 2011. An introduction to mathematical ecology [J]. Bioscience, 24(2): 7-12.
- Shannon C E, 1950. The mathematical theory of communication[J]. M D Computing: Computers in Medical Practice, 3(9): 31-32.
- Ulanowicz R E, 2000. Information theory in ecology[J]. Computers & Chemistry, 25(4): 393-399.
- Wang L, Liang T, 2016. Distribution patterns and dynamics of phosphorus forms in the overlying water and sediment of Dongting Lake[J]. Journal of Great Lakes Research, 42(3): 565-570.
- Xie P, Yang Y, 2000. Long-term changes of Copepoda community (1957-1996) in a subtropical Chinese lake stocked densely with planktivorous filter-feeding silver and bighead carp[J]. Journal of Plankton Research, 22(9): 1757-1778.
- Zhang M W, Wang Y, Li B, et al, 2013. Possible impacts of the Three Gorges Project and converting farmland into lake on the *Microtus fortis* population in Dongting Lake region[J]. Asian Agricultural Research, 23(6): 69-73.

(责任编辑 万月华)

Effects of Environmental Factors on Zooplankton Community Composition in the Three Outlets of Yangtze River to West Dongting Lake

YAN Guang-han^{1,2,3}, YIN Xue-yan^{1,3}, WANG Xing^{1,2,3}, WANG Li-jing^{2,4},
LI Ying-jie^{2,4}, LI Hong^{2,4}, CHEN Wei²

- (1.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration,
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China;
2.State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu,
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Yueyang 414000, P.R.China;
3.State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese
Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China;
4.Research Center of Ecological Environment for Yangtze River Economic Belt, Chinese Research
Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

Abstract: The three outlets (Ouchi, Songzi and Taiping) that connect the Yangtze River with west Dongting Lake play an important role in flood control and water resource utilization in Dongting Lake. In this study, we investigated the zooplankton community structure and the primary environmental factors at 18 sampling sites in the three channels and west Dongting Lake in November 2016, and March and August 2017. The results were used to explore the annual dynamics of the three channels and Dongting Lake and characterize zooplankton diversity and stock. The relationship between zooplankton distribution and environmental factors was analyzed by canonical correspondence analysis (CCA). The research provides data to support the ecological environment protection and pollution prevention of Dongting Lake. A total of 40 zooplankton species from 4 phyla was detected, with dominance by Rotifers (21 species, 52.5%), Protozoa (8 species, 20%), Cladocera (7 species, 17.5%) and Copepoda (2 species, 5%). Zooplankton density and biomass in the three channels were in the range of 9–323 ind./L and 0.006–0.319 mg/L, and the ranges in the west Dongting Lake were 9–45 ind./L and 0.019–0.045 mg/L. The average density in the three outlets (67 ind./L) was higher than in west Dongting Lake (23 ind./L) and the differences in zooplankton density between dry and wet periods were significant. In terms of the dominant groups, Nauplii, Copepoda and *Keratella valga* dominated in the outlets, and west Dongting Lake was dominated by *Keratella cochlearis*, *Arcella vulgaris* and *Keratella valga*. The Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness indices were 1.07 and 0.77 in the outlets and 1.17 and 0.80 in the west Dongting Lake. CCA of zooplankton community and water environmental factors shows that water temperature (WT), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and orthophosphate (PO₄-P) were the primary factors affecting the distribution of zooplankton in the three outlets, while WT and TN were the primary factors affecting the distribution of zooplankton in west Dongting Lake.

Key words: zooplankton; community structure; environmental factors; three outlets of the Yangtze river; west Dongting Lake