

三峡水库正常运行下库区干流浮游动物群落特征研究

吴利^{1,2}, 唐会元¹, 龚云¹, 杨志¹, 朱正强¹, 陈小娟¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;

2. 合肥师范学院生命科学学院, 合肥 230061)

摘要: 研究三峡水库正常运行对库区江段浮游动物群落结构的影响, 为三峡库区环境保护提供基础参考资料。调查江段为位于库首的秭归、巫山江段, 位于库中的万州、云阳江段, 位于库尾的涪陵江段, 位于库区回水末端的江津江段; 每个江段设左、中、右 3 个样点, 采样时间为 2016 年 7 月、2016 年 9 月、2016 年 12 月、2017 年 3 月。共鉴定浮游动物 45 种, 其中原生动物 9 种、轮虫 12 种、枝角类 13 种、桡足类 11 种; 浮游动物密度为 30.99×10^4 个/L, 其中原生动物占 9.28%、轮虫占 90.33%、枝角类占 0.24%、桡足类占 0.15%。江津、涪陵、万州江段水体为超富营养水平, 云阳、巫山、秭归江段水体为富营养水平。低水位期的夏季和水位下降期的春季浮游动物密度较高, 高水位期的冬季和蓄水期的秋季浮游动物密度较低; 坝前秭归江段浮游动物密度最高, 沿坝前江段溯河而上直到库尾流水江段浮游动物密度呈现降低的趋势。三峡干流浮游动物优势种共 16 种, 以耐污性的种类为主。三峡干流浮游动物物种多样性指数秋季最高, 夏季最低; 均匀度指数以秋季和冬季较高, 夏季最低。物种多样性指数和均匀度指数万州调查江段均最低, 总体均呈现库首至回水末端降低的趋势。三峡水库蓄水运行后, 浮游动物群落结构在水库的纵轴上表现出明显的分布梯度; 夏季和秋季浮游动物群落主要受水温、叶绿素 a、总磷、铜、汞、挥发酚、石油类的影响, 并呈正相关关系; 春季和冬季江段浮游动物群落主要受溶解氧影响。

关键词: 浮游动物; 群落结构; 水质; 三峡水库

中图分类号: Q178.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)01-0058-08

浮游动物(Zooplankton)是淡水生态系统重要组成部分, 其在水生态系统物质转化、能量流动等生态过程中起重要的作用, 显示了水生态系统结构和功能的许多特征(Meshram et al, 2018)。浮游动物对环境变化(如水体污染)反应灵敏, 因此被广泛用于淡水生态系统的监测(Meshram et al, 2018; Sakamoto et al, 2018; Stamou et al, 2019)。

三峡工程是中国、也是世界上最大的水利枢纽工程, 是治理和开发长江的关键性骨干工程。随着三峡水库建设运行, 三峡工程将发挥巨大的防洪、发电和通航等效益, 但同时也对库区的生态环境带来显著影响(中国科学院环境评价部和长江水资源保护科学研究所, 1991)。三峡水库蓄水后, 库区水位

提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长, 水域环境发生了巨大变化, 水生生物群落也随之发生了根本性改变(蔡庆华和胡征宇, 2006)。关于三峡水库浮游动物生态学研究的积累较少, 针对水库浮游动物群落受水库调度运行影响以及对环境变化响应的研究更为缺乏。目前, 相关研究主要有建坝前原生动物背景状况调查及各江段污染状况评价(沈韞芬等, 1987; Gu et al, 1988), 三峡水库 135 m 蓄水过程坝前水域浮游生物变化(韩德举等, 2005), 三峡库区试验性蓄水期间浮游生物群落特点研究(王英才等, 2012), 三峡水库蓄水后浮游甲壳动物生态学研究(姚建良, 2007)。关于浮游动物群落在三峡水库正常运行期(水位 145~175 m)不同生境江段(库首、库中、库尾及回水末端区)之间的变动规律以及三峡库区正常运行对浮游动物群落的影响研究报道较少(郑金秀等, 2015)。鉴于此, 本研究基于 2016 年 7 月-2017 年 3 月在库区干流 6 个典型代表江段的浮游动物调查数据, 对该区域浮游动物群落结构的周年时空变动特征进行了研究, 分析浮游动物的时空差异, 了解三峡水库正常运行对库区江段浮游动物群落结构的影响, 为三峡库区环境保护提供基础参考资料。

收稿日期: 2019-06-22

基金项目: 水利部三峡工程管理局委托项目“三峡库区鱼类资源保护的生态调度综合技术研究(2018 年度)”; 国家重大水利工程建设基金项目(12620200600018J001); 国家自然科学基金项目(51909051); 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室开放基金课题(巢湖浮游动物功能群对蓝藻水华的响应)。

作者简介: 吴利, 女, 1981 年生, 博士, 教授, 研究方向为浮游动物生态学。E-mail: wuli090121@126.com

通信作者: 陈小娟。E-mail: 45923194@qq.com

1 材料与方法

1.1 样点设置与采样时间

调查江段包括三峡库区干流的秭归(ZG)、巫山(WS)、云阳(YY)、万州(WZ)、涪陵(FL)、江津(JJ) 6个江段(图1),其中秭归、巫山调查江段位于库首,万州、云阳调查江段位于库中,涪陵调查江段位于库尾,江津调查江段位于三峡库区回水末端。每个江段设左、中、右3个样点。采样时间为三峡水库低水位运行期2016年7月(夏季)、蓄水期2016年9月(秋季)、高水位运行期2016年12月(冬季)、水位下降期2017年3月(春季)。

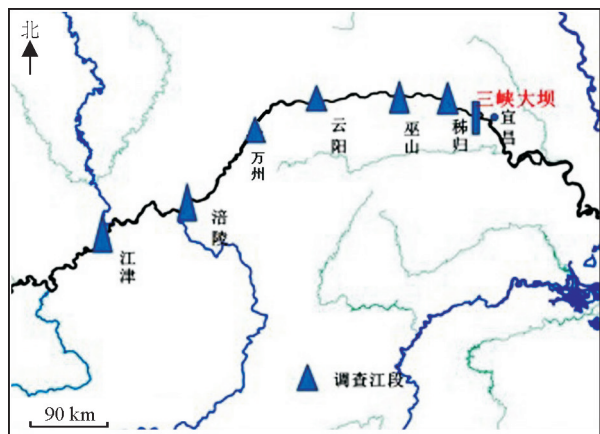


图1 三峡库区采样江段分布示意

Fig.1 Location of sampling sections in the main stem of Three Gorges Reservoir

1.2 样品采集与处理

浮游动物采集参照章宗涉和黄祥飞(1991)的方法,种类鉴定参照蒋燮治和堵南山(1979)、沈韞芬等(1990)、王家楫(1961)和中国科学院动物研究所甲壳动物研究组(1979)的方法进行。每个样点采集上、中、下不同深度水体混合样品,采集方法按照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会,2002)。水温(WT)、pH、溶解氧(DO)采用YSI多参数水质分析仪现场测量;水体重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)经硝酸消解后用ICP-MS进行测定(环境保护部,2014a),汞(Hg)采用原子荧光光度法测定(环境保护部,2014b);六价铬(Cr^{6+})采用二苯碳酰二肼分光光度法分析,挥发酚(volatile phenol, VP)采用4-氨基安替比林分光光度法分析,石油类(petroleum, PE)采用红外分光光度法分析,高锰酸盐(COD)采用高锰酸盐指数法分析,总磷(TP)采用酸性钼酸铵分光光度法、氨氮(NH_3-N)采用纳氏试剂

法、叶绿素a(Chl-a)采用分光光度法分析(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会,2002)。

1.3 数据处理与分析方法

物种多样性采用Shannon-Weaver指数(H')(Shannon and Weaver, 1949),计算公式:

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

物种均匀度指数(J)计算公式(Pielou, 1966):

$$J = H / \log_2 S \quad (2)$$

式中: S 为浮游动物种类总数, P_i 为第*i*种的个体数与样品总个体数的比值。

水体营养水平依据总磷(TP)评判(OECD, 1982)。浮游动物优势种依据其优势度 >0.02 为标准(纪焕红等,2006)。

理化数据进行对数转换以使数据呈正态分布,差异的判别用SPSS 13.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并取 $P < 0.05$ 作为差异显著性判定标准。浮游动物群落的非加权对组算术平均值聚类分析(UPGMA)通过SPSS 13.0软件完成。运用冗余分析(redundancy analysis, RDA)分析浮游动物群落物种密度与环境因子的关系,通过前选法(Forward selection)和蒙特卡罗检验(Monte Carlo Permutation Test)排除贡献小的因子。RDA在CANOCO 4.5软件中实现。

2 结果与分析

2.1 理化参数分析

三峡水库干流各季节和各江段理化参数如表1和表2。铜、锌、铅、镉、汞、挥发酚、石油类、高锰酸盐、总磷、氨氮、叶绿素a、水温在夏季和秋季较高,在冬季和春季较低;溶解氧在冬季和春季较高,而在夏季和秋季较低。三峡水库干流低水位运行期夏季和蓄水期秋季为超富营养水平,高水位运行期冬季和水位下降期春季为富营养水平。

方差分析表明,所有理化因子在4个季节均存在显著差异性($P < 0.05$);除铜、挥发酚、高锰酸盐、叶绿素a、水温、pH 6个理化因子外,其他理化因子在6个江段间存在显著差异性($P < 0.05$)。三峡干流6个江段营养水平呈现回水末端的江津江段高于库尾的涪陵江段高于库中的万州、云阳江段高于库首的巫山、秭归江段的趋势,并且坝前的秭归江段营养水平最低。依据总磷(TP)指标的评判标准,江津、涪陵、万州为超富营养水平,云阳、巫山、秭归为富营养水平。

表1 各季节理化参数

Tab.1 Physiochemical water quality parameters by season

参数	夏季		秋季		冬季		春季		P
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	
Cu/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	24.30	12.53	23.59	12.41	3.98	3.17	3.03	1.16	0.000
Zn/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	11.49	6.32	12.00	6.00	4.60	2.47	4.58	1.95	0.000
Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	16.62	8.06	15.23	7.96	3.72	1.83	3.47	1.80	0.000
Cd/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3.12	2.16	3.13	2.27	1.72	1.02	0.22	0.05	0.000
Cr ⁶⁺ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.73	0.71	2.60	1.52	3.15	1.25	2.60	0.68	0.003
Hg/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.70	0.35	0.85	0.44	0.31	0.16	0.21	0.01	0.000
挥发酚/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	12.55	6.69	10.11	3.59	2.94	1.47	1.68	0.35	0.000
石油类/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3.51	1.77	4.24	2.19	0.48	0.25	1.41	0.52	0.000
高锰酸盐/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.22	1.58	3.73	1.65	1.13	0.41	1.01	0.21	0.000
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.13	0.06	0.16	0.06	0.05	0.03	0.07	0.02	0.000
氨氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.16	0.06	0.17	0.06	0.12	0.04	0.07	0.02	0.000
叶绿素 a/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	11.46	5.47	14.66	8.14	2.00	0.74	1.51	0.36	0.000
水温/ $^{\circ}\text{C}$	25.21	0.48	24.12	0.81	15.44	0.54	13.66	0.30	0.000
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.75	0.57	6.34	0.69	8.72	2.48	8.44	0.43	0.000
pH	7.55	0.34	7.77	0.19	7.49	0.11	7.61	0.25	0.006

表2 各江段理化参数

Tab.2 Physiochemical water quality parameters by sampling section

参数	江津		涪陵		万州		云阳		巫山		秭归		P
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	
Cu/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	17.38	16.25	20.33	18.69	15.97	14.39	13.57	13.14	8.57	5.09	6.52	3.30	n.s.
Zn/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	11.93	7.30	7.86	4.04	9.12	6.56	10.08	7.14	5.78	1.94	4.21	2.34	0.009
Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	13.23	9.65	15.22	11.62	11.33	8.31	8.58	6.88	5.43	3.58	4.75	1.99	0.006
Cd/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3.20	3.12	3.25	2.40	2.17	1.59	1.42	0.89	1.14	0.87	1.12	1.12	0.009
Cr ⁶⁺ / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3.38	1.12	2.14	1.01	2.52	0.79	2.97	0.88	1.96	0.91	2.16	1.71	0.018
Hg/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.71	0.53	0.68	0.50	0.61	0.37	0.49	0.35	0.33	0.11	0.29	0.14	0.024
挥发酚/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	5.88	4.65	6.28	4.98	8.26	7.77	5.60	5.21	6.41	6.05	8.47	7.28	n.s.
石油类/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3.43	2.75	3.46	2.43	2.99	1.96	2.19	1.98	1.36	0.75	1.04	0.41	0.006
高锰酸盐/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.26	2.33	3.26	2.24	2.71	2.17	2.51	1.60	2.02	1.13	1.35	0.62	n.s.
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.14	0.07	0.12	0.06	0.12	0.07	0.09	0.05	0.08	0.04	0.05	0.03	0.004
氨氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.17	0.06	0.17	0.07	0.12	0.05	0.13	0.06	0.09	0.05	0.08	0.04	0.009
叶绿素 a/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	10.87	10.32	7.86	6.66	8.89	8.43	8.41	7.11	6.32	6.70	2.09	0.97	n.s.
水温/ $^{\circ}\text{C}$	19.01	4.83	19.57	5.43	19.62	5.34	19.72	5.56	19.69	5.37	20.05	5.57	n.s.
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	7.45	1.44	7.56	0.98	7.36	0.91	8.38	3.26	7.19	0.99	7.43	1.26	n.s.
pH	7.44	0.21	7.61	0.09	7.64	0.22	7.69	0.20	7.55	0.44	7.70	0.18	n.s.

2.2 浮游动物种类组成及密度

本次调查共鉴定出浮游动物 45 种。其中原生动物 9 种,占浮游动物总物种数的 20%;轮虫 12 种,占 27%;枝角类 13 种,占 29%;桡足类 11 种,占 24%。浮游动物和 4 个类群的种类组成及密度时空变化见表 3。浮游动物密度为 30.99×10^4 个/L,其中原生动物占 9.28%、轮虫占 90.33%、枝角类占 0.24%、桡足类占 0.15%,轮虫密度是三峡干流浮游动物密度最主要的组成部分。浮游动物、轮虫密度以夏季和春季较高,原生动物密度以秋季和春季较高;枝角类密度以冬季最高;桡足类密度以秋季最高。浮游动物、轮虫、枝角类密度均以坝前的秭归最高,原生动物密度以涪陵最高,桡足类密度以万州和云阳较高。方差分析结果表明,浮游动物及 4 个类群的物种数和密度在 4 个季节均存在显著差异性

($P < 0.05$),6 个江段浮游动物及 4 个类群的密度存在显著差异性($P < 0.05$);6 个江段轮虫的物种数存在显著差异性,浮游动物、原生动物、枝角类、桡足类的物种数均不存在显著差异性($P > 0.05$)。总体而言,低水位期的夏季和水位下降期的春季浮游动物密度较高,高水位期的冬季和蓄水期的秋季浮游动物密度较低;坝前秭归江段浮游动物密度最高,沿坝前江段溯河而上直到库尾流水江段浮游动物密度呈现降低的趋势。

UPGMA 聚类结果表明秭归和云阳聚为一组,巫山聚为一组,万州、涪陵、江津聚为一组(图 2)。

2.3 浮游动物优势种

三峡干流浮游动物优势种共 16 种(表 4),以原生动物和轮虫为主。秋季优势种最多(13 种),夏季 10 种、冬季和春季均为 11 种。除冬季外,囊形单趾

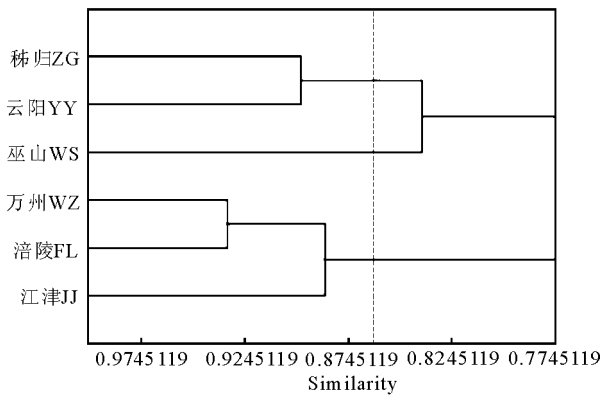


图2 采样江段浮游动物群落相似性聚类

Fig.2 Cluster analysis of the zooplankton community at different sampling sections

轮虫在3个季节及6个江段均为优势度最高的种类,王氏似铃壳虫、角突臂尾轮虫、裂足臂尾轮虫、独角聚花轮虫、螺形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫、蹄形腔

轮虫、轮虫未定种、罗氏异尾轮虫等9种优势种在4个季节及6个江段均为出现频次较高的种类。原生动物主要以耐污性种类和河流中出现频次较高的王氏似铃壳虫为主,轮虫主要以耐污性种类为主。

2.4 物种多样性指数和均匀度指数

三峡干流浮游动物物种多样性指数秋季最高,夏季最低;均匀度指数以秋季和冬季较高,夏季最低(图3-a)。物种多样性指数和均匀度指数万州调查江段均最低,总体均呈现库首至回水末端降低的趋势(图3-b)。

2.5 浮游动物群落结构与环境因子的关系

$P < 0.01$ 的3种因子(水温、叶绿素a、总磷)及 $P < 0.05$ 的5种因子(溶解氧、铜、汞、挥发酚、石油类)对RDA各轴的贡献存在显著差异,其中水温、叶绿素a、总磷、铜、汞、挥发酚、石油类与第一轴呈负相关,溶解氧与第一轴呈正相关(图4、表5)。

表3 浮游动物种类数及密度季节和空间变化

Tab.3 Temporal-spatial variations of species number and abundance of zooplankton by taxa

浮游动物	夏季	秋季	冬季	春季	P	江津	涪陵	万州	云阳	巫山	秭归	合计	P
浮游动物 种类数	37	36	28	40	0.018	40	38	42	43	42	39	45	n.s.
动物 密度/ 10^4 个 \cdot L $^{-1}$	9.63	5.49	5.70	10.16	0.000	5.40	4.67	5.07	4.61	5.14	6.09	30.99	0.000
原生动物 种类数	6	8	2	8	0.000	8	6	7	9	9	9	9	n.s.
动物 密度/ 10^3 个 \cdot L $^{-1}$	4.70	8.25	2.85	12.95	0.000	4.15	6.25	3.20	4.75	4.45	5.95	28.75	0.000
轮虫 种类数	10	10	10	12	0.042	10	10	11	11	10	10	12	0.004
动物 密度/ 10^4 个 \cdot L $^{-1}$	9.14	4.62	5.38	8.84	0.000	4.97	4.03	4.73	4.12	4.68	5.46	27.99	0.002
枝角类 种类数	10	9	11	12	0.000	12	12	13	13	13	11	13	n.s.
动物 密度/个 \cdot L $^{-1}$	123.5	214.5	293	108	0.002	113	88	89.5	74.5	116.5	257.5	739	0.000
桡足类 种类数	11	9	5	8	0.000	10	10	11	10	10	9	11	n.s.
动物 密度/个 \cdot L $^{-1}$	117	169.5	92	97	0.000	80	70	93	91	73	68.5	475.5	0.000

表4 浮游动物优势种及其优势度季节变化和空间变化

Tab.4 Spatial-temporal variations of dominant zooplankton species and dominance values

优势种	优势度									
	夏季	秋季	冬季	春季	江津	涪陵	万州	云阳	巫山	秭归
纤毛虫未定种 <i>Ciliophora</i> sp.	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
长颈虫 <i>Dileptus</i> sp.	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	0.02
漫游虫 <i>Litonotus</i> sp.	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
蚤中缢虫 <i>Mesodinium pulex</i>	-	-	-	0.04	-	-	-	0.03	0.02	-
筒壳虫 <i>Tintinnidium</i> sp.	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	0.04	0.03	-	0.06	0.04	0.10	0.02	0.02	0.02	-
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	-	0.03	0.05	0.03	-	-	0.03	0.03	0.09	-
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	0.05	0.06	0.05	0.11	0.04	0.09	0.18	0.04	0.04	0.02
裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus schizocerca</i>	0.21	0.13	0.05	0.14	0.22	0.15	0.16	0.10	0.06	0.15
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	0.09	0.08	0.14	0.09	0.05	0.07	0.12	0.11	0.16	0.10
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.12	0.13	0.11
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valae</i>	0.04	0.08	0.08	-	0.04	0.03	0.03	0.04	0.08	0.05
蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	0.05	0.04	0.20	0.10	0.05	0.05	0.09	0.08	0.07	0.14
囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>	0.23	0.22	0.17	0.16	0.27	0.23	0.22	0.19	0.11	0.17
轮虫未定种 <i>Rotifera</i> sp.	0.03	0.10	0.06	0.03	0.03	0.04	-	0.07	0.08	0.03
罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>	0.13	-	0.08	0.12	0.16	0.07	0.07	0.06	0.07	0.13
优势种种数总计	10	13	11	11	10	10	10	12	12	10

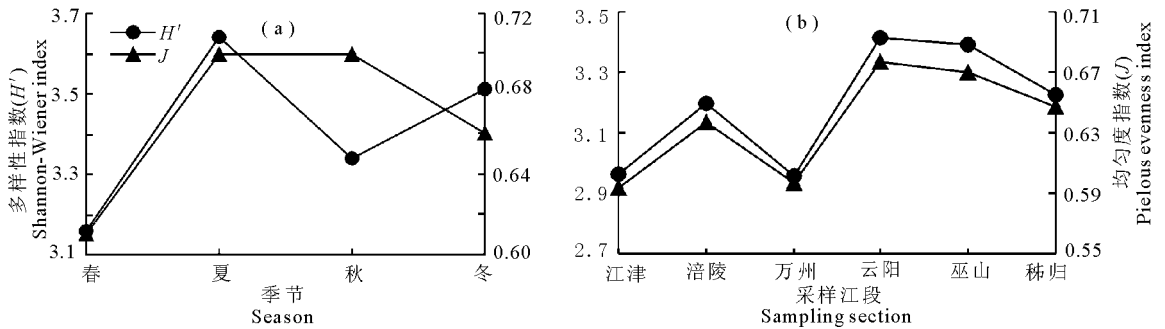


图3 浮游动物物种多样性指数和均匀度指数季节和空间变化

Fig.3 Spatial-temporal variations of the Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness indices of the zooplankton community

4个季节的浮游动物群落能较好地分开,呈现较强的时间异质性。其中夏季和秋季浮游动物群落主要受水温、叶绿素 a、总磷、铜、汞、挥发酚、石油类的影响,并呈正相关关系;春季和冬季江段浮游动物群落主要受溶解氧正相关影响。

3 讨论

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程,三峡水库蓄水过程中,水动力条件改变使水域环境发生了巨大变化,因此三峡水库首次蓄水成库后即出现了以富营养化和藻类水华暴发为代表的水环境问题(蔡庆华和孙志禹, 2012),水生生物群落也随之发生了根本性改变。韩德举等(2005)于2003年三峡水库蓄水准备期、蓄水期、运行期共发现69种浮游动物,王英才等(2012)于2009年对三峡水库10个采样断面周年调查共发现122种浮游动物。本次三峡库区干流的6个江段周年调查共鉴定出浮游动物45种,相较上述研究者少。王英才等(2012)发现浮游动物种类数中以轮虫物种数最高,占59.84%,原生动物、枝角类和桡足类3个类群比例较低且较相似,分别为11.48%、16.39%、12.3%。本研究中,浮游动物4种类群物种数所占比例较相似,轮虫物种数比例显著降低,仅为27%,而原生动物、枝角类和桡足类3个类群物种数比例升高,分别为20%、29%、24%,这与韩德举等(2005)的研究一致,即随着三峡水库的蓄水和运行,大型浮游动物种类显著增加。水库蓄水过程中,流速、悬浮物、水滞留时间、富营养化等一系列因子的变化造成了浮游动物的上述变化(韩德举等, 2005)。

本研究,浮游动物及4个类群物种数和密度在4个季节均存在显著差异性($P < 0.05$),与王英才等(2012)的研究一致,三峡库区干流冬季浮游动物物种数最少,夏季和春季浮游动物密度较高,秋季和冬季浮游动物密度较低。王英才等(2012)指出造成三峡水库浮游动物密度空间差异的主要因素应是流速、流量及浊度;吴利等(2008)指出流速较大的河流不利于浮游动物的栖息和生长繁殖。水温是影响浮游动物生长、发育、群落组成和数量变化等极为重要

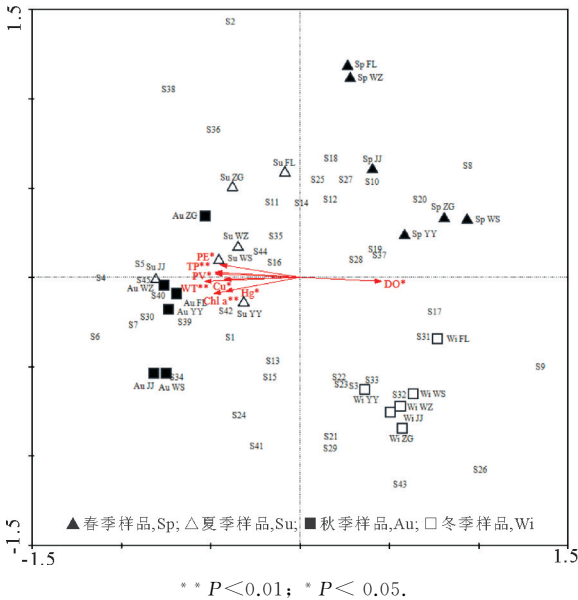


图4 物种-环境相互关系冗余分析排序

Fig.4 Redundancy analysis of zooplankton species-physicochemical parameter relationships

表5 冗余分析结果

Tab.5 Summary of redundancy analysis (RDA) results

环境因子	CCA1	CCA2
水温/°C	-0.5351	-0.0226
叶绿素 a/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4841	-0.0908
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4746	0.0195
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.4579	-0.0218
铜/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4266	-0.0107
汞/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4174	-0.0767
挥发酚/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4754	0.0292
石油类/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	-0.4482	0.0715

的环境因子(Czerniawski & Domagała, 2010)。本研究,水温是影响三峡库区干流浮游动物群落结构主要的环境因子。冬季虽然水位高、流速慢、营养水平较低,但温度较低,不利于浮游动物生长繁殖;秋季虽然温度较高,但营养水平较高,水位较低,流速较快,亦不利于浮游动物生长繁殖。因此本研究秋季和冬季浮游动物密度较低。

在河流以下至大坝间被库水淹没的库区,根据生境的差异划分为湖泊区(lacustrine zone)、过渡区(transitional zone)和河流区(riverine zone)(Thornton et al, 1990),这3个区域的水体理化因子和水文特征存在显著差异,浮游动物群落结构也表现出差异(林秋奇和韩博平, 2001; Marzolf, 1990)。本研究中秭归、巫山、云阳、万州江段为湖泊区,涪陵江段为过渡区,江津江段为河流区。除万州调查江段,物种多样性指数和均匀度指数总体均呈现库首至回水末端降低的趋势,但6个江段营养水平呈现相反的趋势,即随着江段营养水平的逐渐升高,浮游动物物种多样性指数及均匀度指数逐渐降低。坝前的秭归江段营养水平最低,而浮游动物密度最高,说明水库下游坝前段环境较适合浮游动物的生长,浮游动物在水库的静水区密度较高。聚类分析表明,位置较近的江段浮游动物群落相似性较高,即湖泊带的秭归、云阳、巫山江段浮游动物群落相似性较高,万州、涪陵、江津江段浮游动物群落相似性较高。本研究表明三峡水库蓄水运行后,浮游动物群落结构在水库的纵轴上表现出明显的分布梯度。

理化指标分析表明,三峡干流各季节和各江段水体营养水平均为富营养化以上,各季节和各江段浮游动物优势种的物种数和种类组成均较为相似,并且出现频次较高的种类均以耐污性种类为主。外来营养物质过多的输入对浮游动物群落的丰度、组成和多样性产生重要影响(Li et al, 2019),并且随着水体富营养化程度提高,浮游动物群落结构趋于简单(胡春英, 1999)。本研究中三峡库区干流各季节和各江段水体营养水平较高且较相似可能是各季节和各江段浮游动物优势种没有明显区别的原因。

水体营养状况是影响浮游动物群落结构变化的重要环境因素(Ergönül et al, 2016; Ochocka & Pasztaleniec, 2016; García-Chicote et al, 2018)。本研究,RDA分析表明4个季节的江段浮游动物群落能较好地分开,呈现较强的时间差异性,并且水温、叶绿素a、总磷、溶解氧、铜、汞、挥发酚、石油类

是影响三峡库区干流浮游动物群落结构时间和空间分布的环境因素。在淡水生态系统中,叶绿素a、总磷、溶解氧可以显著影响浮游动物群落结构的变化,特别是在富营养水体中的浮游动物群落对此产生明显的响应(Jeppesen et al, 2000; Sousa et al, 2008; Wu et al, 2017)。顾曼如和闻根芳(1983)研究发现,在受重金属污染的水体中,重金属浓度对原生动物的呼吸代谢可能产生不良影响,致使其某些适应性的功能减弱或消失;许木启和王子健(1996)分析了江西乐安江一鄱阳湖湖口的浮游动物群落结构与功能特征及其与水质的相互关系,结果表明浮游动物群落结构、功能参数的变化与重金属Cu的含量关系密切;沈南南等(2006)指出石油污染影响多种海洋浮游生物的生长、分布、营养吸收等。本研究,总磷、叶绿素a、铜和石油类在夏季和秋季较高,而夏季和秋季浮游动物的分布与总磷、叶绿素a、铜和石油类呈正相关;而溶解氧在冬季和春季较高,春季和冬季浮游动物群落主要与溶解氧呈正相关。

参考文献

- 蔡庆华, 胡征宇, 2006. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 30(1): 7-11.
- 蔡庆华, 孙志禹, 2012. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 24(2): 169-177.
- 顾曼如, 闻根芳, 1983. 重金属离子对原生动物的呼吸功能影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 14(6): 577-581.
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 韩德举, 胡菊香, 高少波, 等, 2005. 三峡水库135m蓄水过程坝前水域浮游生物变化的研究[J]. 水利渔业, 25(5): 55-58.
- 胡春英, 1999. 不同湖泊演替过程中浮游动物数量及多样性的研究[J]. 水生生物学报, 23(3): 217-226.
- 环境保护部, 2014a. HJ 700-2014 水质 65种元素的测定-电感耦合等离子质谱法[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 环境保护部, 2014b. HJ 694-2014 水质汞、砷、硒、铋和锑的测定-原子荧光法[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 2006. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性[J]. 生物多样性, 14(3): 206-215.
- 蒋楚治, 堵南山, 1979. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社.
- 林秋奇, 韩博平, 2001. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 21(6): 1034-1040.

- 沈南南, 李纯厚, 王晓伟, 2006. 石油污染对海洋浮游生物的影响[J]. 生物技术通报, (S): 95-99.
- 沈蕴芬, 顾曼如, 冯伟松, 1987. 长江三峡地区原生动物种背景值及其对污染的评价[C]//中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社.
- 沈蕴芬, 章宗涉, 龚循矩, 等, 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 王家楫, 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社.
- 王英才, 邱光胜, 陈水松, 等, 2012. 三峡库区试验性蓄水期间浮游生物群落特点研究[J]. 人民长江, 43(12): 4-9.
- 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.
- 许木启, 王子健, 1996. 利用浮游动物群落结构与功能特征监测乐安江——鄱阳湖湖口重金属污染[J]. 应用与环境生物学报, 2(2): 169-174.
- 姚建良, 2007. 三峡水库蓄水后浮游甲壳动物生态学研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 郑金秀, 池仕运, 李聃, 等, 2015. 三峡水库运行期间原生动物种群的时空异质性[J]. 生态学报, 35(11): 3569-3579.
- 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组, 1979. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院环境评价部, 长江水资源保护科学研究所, 1991. 长江三峡水利枢纽环境影响报告书[R].
- Czerniawski R, Domagała J, 2010. Similarities in zooplankton community between River Drawa and its two tributaries (Polish part of River Odra)[J]. Hydrobiologia, 638(1): 137-149.
- Ergönül M B, Erdogan S, Altındag A, et al, 2016. Rotifera and Cladocera fauna of several lakes from the Central Anatolia, Marmara, and Western Black Sea regions of Turkey[J]. Turkish Journal of Zoology, 40: 141-146.
- García-Chicote J, Armengol X, Rojo C, 2018. Zooplankton abundance: a neglected key element in the evaluation of reservoir water quality[J]. Limnologica, 69: 46-54.
- Gu M R, Feng W S, Shen Y F, 1988. Ecological study on protozoa in the sediment of the Three-Gorges Area of the Changjiang River[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 6(3): 272-280.
- Jeppesen E, Jensen J P, Søndergaard M, et al, 2000. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient[J]. Freshwater Biology, 45: 201-218.
- Li Y, Liu L, Cui S Z, et al, 2019. Long-term effects of nutrient changes on rotifer communities in a subtropical lake[J]. Limnology, 20(2): 191-201.
- Marzolf G R, 1990. Reservoirs as environments for zooplankton[M]//Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. New York: John Wiley & Sons.
- Meshram D, Catherine D, Badhe N, et al, 2018. Zooplankton diversity as indicators of pollution in warm monomictic Dal-Nigeen lake. Sustain [J]. Water Resources Management, 4: 897-904.
- Ochocka A, Pasztaleniec A, 2016. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 188: 622. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5634-3>.
- OECD, 1982. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control[S]. Paris, France: Organisation for economic and cooperative development.
- Pielou E, 1966. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 10: 370-383.
- Sakamoto M, Nagata T, Hanazato T, et al, 2018. Long-term zooplankton community records (1996-2017) for Lake Suwa (Japan)[J]. Ecological Research, 33: 1. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1528-2>.
- Shannon C E, Weaver W, 1949. The mathematical theory of communication[M]. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Sousa W, Attayde J L, Rocha EDaS, et al, 2008. The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil[J]. Journal of Plankton Research, 30(6): 699-708.
- Stamou G, Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, et al, 2019. Trophic state assessment based on zooplankton communities in Mediterranean lakes[J]. Hydrobiologia, 844: 83-103.
- Thornton K W, Kimmel B L, Payne F E, 1990. Reservoir limnology: Ecological perspectives [M]. New York: John Wiley.
- Wu L, Zhou M H, Shen Z J, et al, 2017. Spatio-temporal variations in zooplankton community structure and water quality in a Chinese eutrophic river[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 15(3): 1417-1442.

Temporal-Spatial Distribution of Zooplankton Community in the Main Stem of Three Gorges Reservoir under Normal Operation

WU Li^{1,2}, TANG Hui-yuan¹, GONG Yun¹, YANG Zhi¹, ZHU Zheng-qiang¹, CHEN Xiao-juan¹

1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R.China;
2. School of Life Sciences, Hefei Normal University, Hefei 230061, P.R.China)

Abstract: Zooplankton are sensitive to environment change and widely used in monitoring fresh water ecosystems. The impoundment of Three Gorges Reservoir dramatically altered the water environment, but little research has been conducted on the response of the zooplankton community to reservoir impoundment and operation. To obtain baseline data and provide a reference for environmental conservation in Three Gorges Reservoir, we investigated the temporal-spatial distribution characteristics of the zooplankton community in the main stem of Three Gorges Reservoir under normal operation. Seasonal sampling was carried out in July, September, December 2016 and March 2017, at six representative sections covering the entire length of the reservoir: Zigui (ZG), Wushan (WS), Yunyang (YY), Wanzhou (WZ), Fulin (FL) and Jiangjin (JJ). Physiochemical water quality parameters were monitored synchronously with each sampling. A total of 45 zooplankton species were identified, including 9 protozoans, 12 rotifers, 13 cladocerans, 11 copepods, accounting, respectively for 20%, 27%, 29% and 24% of the total number of species. The average zooplankton density was 30.99×10^4 ind/L, with absolute dominance by rotifers (90.33%), followed by protozoa (9.28%), cladocera (0.24%) and copepoda (0.15%). The water was hypereutrophic at Jiangjin, Fuling and Wanzhou and eutrophic at Zigui, Wushan and Yunyang. Zooplankton density was higher in summer and spring with lower water levels, and lower in winter and autumn with higher water levels. Spatially, zooplankton density was the highest at Zigui, nearest the dam, and trended downward to Jiangjin, farthest from the dam. There were 16 dominant zooplankton species, known to be pollution-tolerant, in the main stem of Three Gorges Reservoir. The Shannon-Wiener diversity index of the zooplankton community was highest in autumn and lowest in summer, and Pielou evenness index was higher in autumn and winter, and lower in summer. Zooplankton diversity and evenness indices also trended downward from Zigui to Jiangjin, but the lowest values both occurred at Wanzhou. Zooplankton community structure showed obvious variations along the vertical gradient of the reservoir, and displayed the strongest positive correlations with water temperature (WT), chlorophyll a (Chl-a), total phosphorus (TP), copper (Cu), mercury (Hg), volatile phenol (VP) and petroleum (PE) in summer and autumn, and with dissolved oxygen (DO) in spring and winter.

Key words: zooplankton; community structure; water quality; Three Gorges Reservoir