

太湖五里湖湖滨带浮游动物群落结构特征

代培¹, 刘凯¹, 周彦锋¹, 周游², 徐跑¹

(1. 农村农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏无锡 214081;

2. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

摘要:湖滨带在保持物种多样性、拦截陆源污染物、净化水体等方面发挥着重要作用。选取经生态修复的五里湖湖滨带为研究对象, 于 2014 年 7 月至 2015 年 6 月对该水域 4 个区域(A, B, C, D)浮游动物进行逐月采样, 以探讨五里湖湖滨带浮游动物群落结构及其生态意义。结果表明, 本次调查共鉴定出浮游动物 104 属 207 种, 其中原生动物 37 属 88 种, 轮虫 38 属 76 种, 枝角类 17 属 29 种, 桡足类 12 属 14 种, 物种数最多出现在 8 月(63 种), 最少出现在 2 月(25 种); 岸型对物种数的影响表现为自然滩地型明显高于水泥护岸。浮游动物丰度和生物量均值分别为 3 135.35 个/L 和 2.38 mg/L, 原生动物和轮虫丰度是五里湖湖滨带浮游动物丰度主体, 轮虫生物量是五里湖湖滨带浮游动物生物量主体。浮游动物群落结构的季节差异明显, 枝角类丰度和生物量表现为春季最高, 夏季最低, 而浮游动物、原生动物、轮虫和桡足类丰度和生物量均为秋季最高, 冬季或春季最低; 空间格局上也存在较大差异, 浮游动物及各类群丰度和生物量均表现为 C 区>D 区>B 区>A 区, 整体呈现东五里湖高于西五里湖的趋势。浮游动物多样性指数及丰度对水质的分析表明, 五里湖湖滨带水质为中污染, 水体营养状态为轻度富营养。冗余分析表明, TN、DO、Chl-a 及 pH 是影响浮游动物群落结构动态变化的重要环境因子。

关键词:五里湖湖滨带; 浮游动物; 群落结构; 生物多样性; 水质评价

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)01-0055-09

五里湖为太湖北部的一个相对独立的浅水湖泊, 20 世纪 70 年代以来, 随着沿湖社会经济快速发展, 人类活动不断加剧, 五里湖水质逐年下降, 沉水植被基本消失, 湖滨带大型水生维管植物大幅减少, 鱼类趋于小型化, 蓝藻水华频发, 五里湖水体向藻型化水体演变(李文朝等, 1996; 李英杰等, 2008)。为恢复五里湖的生态环境, 自 2002 年起, 无锡市政府对五里湖开展了生态清淤、污水截流、退渔还湖、动力换水、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设工程(杨红军等, 2008; 朱喜等, 2009); 并于 2006 年起实施了保水渔业项目, 经生态治理后, 五里湖水环境得到明显改善, 且生态系统的净化能力和稳定性显著提高(陈家长等, 2009)。湖滨带是湖泊水生生态系统和陆地生态系统之间的过渡带, 在保持物种多样性、拦截陆源污染物、净化水体和稳定水陆相邻生态

系统等方面发挥着重要作用(叶春等, 2015)。在五里湖的综合治理中, 无锡市将湖滨带周围 20 km² 作为生态重建区, 并于 2004 年 3 月建成, 其中重要的举措包括环湖公园化、搬迁污染源、闸控或封堵周边污染河道, 同时整治湖岸、修复水生植被、开展湖滨带生态恢复研究等, 均取得了较好的效果(徐新洲等, 2013)。

目前, 有关五里湖湖滨带生态恢复的研究多是关于恢复后水质评价及修复技术的探究(杨红军等, 2008; 王书航等, 2014); 针对浮游动物群落结构及其对湖滨带进行生态评价的研究甚少。浮游动物种类组成及动态变化是湖泊生态系统研究的基础内容, 其多样性是水域生态系统服务功能的重要评价之一, 其种类组成和现存量的变动能及时准确地反映水域生态环境的质量优劣。此外, 浮游动物还是许多经济鱼类的重要饵料, 起着调节控制藻类和细菌数量的作用(郭沛涌等, 2003)。为此, 本文基于 2014 年 7 月至 2015 年 6 月周年调查结果, 探讨了五里湖湖滨带的浮游动物群落结构及其生态意义, 以期为其湖滨带生态恢复评价及综合整治提供科学依据。

收稿日期: 2017-02-12

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012093); 国家科技基础条件平台项目/长江中下游水产种质资源标准化整理、整合与共享项目(2015DKA30470)。

作者简介: 代培, 1991 年生, 女, 硕士, 研究方向为水生生态学。
E-mail: 2015813037@njau.edu.cn

通信作者: 徐跑。E-mail: xup@ffrc.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

五里湖大体呈葫芦状,东西长约 6.0 km,南北宽 0.3~1.8 km,面积约 8.6 km²(图 1)。以宝界桥、蠡湖大桥和蠡堤为界将五里湖划分为 4 个区域,分别为 A、B、C、D 区,宝界桥作为东五里湖和西五里湖的界限。其中,A 区进行过湖体清淤和水生植被重建工程;B 区曾经展开过底泥环保疏浚治理和水生植被整治工程;C 区沿岸实施了整治工程(长广溪湿地的建设);D 区周围居民楼比较集中。

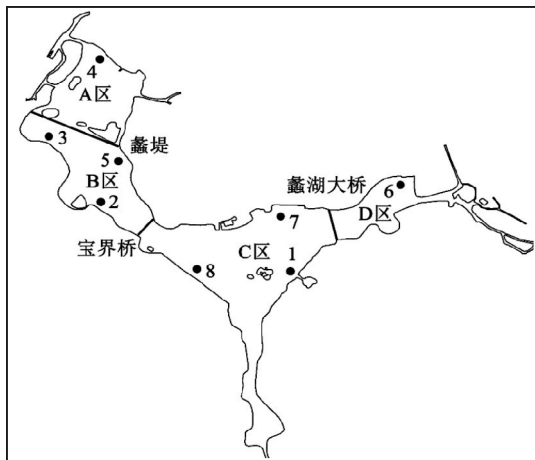


图 1 五里湖湖滨带浮游动物采样点分布

Fig.1 Sampling sites of zooplankton in the lakeside zone of Wuli Lake

1.2 样点设置和采样时间

本研究在五里湖湖滨带共设置 8 个采样点(图 1)。其中,1 号、2 号和 4 号的生境类型为自然滩地,其余采样点为水泥护岸;从水生植被的覆盖情况看,各采样点间有所差异,1、2、6、7、8 号全年均有较丰富的水生植被,3 号和 5 号仅在春季和夏初有少量的杂草分布。本研究于 2014 年 7 月至 2015 年 6 月进行逐月采样。在水质采样与分析中,逐月现场测定溶解氧(DO)、酸碱度(pH)、浊度(Tur)和水温(WT)指标;总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 a (Chl-a)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)为每季度测定 1 次(国家环境保护总局,2004)。

1.3 样品的采集与分析

1.3.1 定性样品 样品以 25 号浮游生物网在水体表层以约 0.5 m/s 的速度呈∞字状拖曳 5 min,并将滤取的样品放入标本瓶中,加 4% 甲醛溶液固定,且在显微镜下进行浮游动物的鉴定(王家辑,1961;韩茂森,1995;沈韞芬,1999)。

1.3.2 定量样品 原生动物和轮虫采集使用 5 L 有机玻璃采水器,根据采样点的深度,每隔 0.5 m 采集混合水样 1 L,加入 1% 鲁哥试液固定带回实验室,沉淀 48 h 后浓缩并定容到 60 mL,然后分别吸取 0.1 mL(计数原生动物)和 1 mL(计数轮虫)的浓缩液注入 0.1 mL 和 1 mL 计数框中,在 10×20 的放大倍数下计数 2 次,取其平均值。按下式换算单位体积中原生动物或轮虫的个体数量:

$$N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$$

式中: N 为 1 L 水样中浮游动物的个体数(个/L); V 为采样体积(L); V_s 为沉淀体积(mL); V_a 为计算体积(mL); n 为计数所得的个体数。

枝角类与桡足类定量采集使用 5 L 有机玻璃采水器,根据采样点的深度,每个样品每隔 0.5 m 采集混合水样 20 L,用 25 号浮游生物网过滤浓缩,收集的样品用 4% 的甲醛溶液固定,浓缩的样品带回实验室后用于全部计数。

1.4 数据处理与统计分析

利用 Margalef 指数(D)(Margalef, 1968)、Shannon-Wiener 指数(H')(Shannon & Wiener, 1949)和 Pielou 均匀度指数(J)(Pielou, 1966)以及优势度指数(Y)对五里湖湖滨带浮游动物群落多样性进行描述,计算公式如下:

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

$$H' = -\sum_{i=1}^S (N_i / N) \ln (N_i / N)$$

$$J = H / \ln S$$

$$Y = (N_i / N) \times f_i$$

式中: S 为物种总数; N 为所有种类的总个体数; N_i 为第 i 种的个体数;以 $Y > 0.02$ 定为优势种。

利用 SPSS17.0 对各季节水体理化指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并取 $P < 0.05$ 作为差异显著性的判定标准。用 CANOCO 4.5 软件分析浮游动物分布与环境因子的关系,对浮游动物种群信息进行去趋势对应分析(DCA)结果显示,排序轴梯度长度(LGA)最大值为 $2.619 < 3$,适合用基于线性的冗余分析(RDA)。排序种群满足两个条件:相对丰度 $> 1\%$,出现频率 $> 25\%$ 。

2 结果与分析

2.1 理化因子

周年调查期间,水温变幅为 $5.5 \sim 32.0^\circ\text{C}$,pH 为 $6.43 \sim 9.78$,均值为 8.03,水体呈弱碱性;溶氧表现为春季、冬季较高;浊度表现为春、冬季较低。总氮

(TN)、高锰酸盐(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chl-a)最高值出现在夏季,总磷(TP)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)最高值在秋季,除叶绿素 a 的最低值在冬季,其余指标的最低值均出现在春季(表 1)。各理化指标中除 TP 外,其余指标的季节性差异显著($P<0.01$)。

表 1 五里湖湖滨带理化参数

Tab.1 Physicochemical water quality parameters in the lakeside zone of Wuli Lake							
季节	月份	WT/ ℃	Tur/ NTU	pH	DO/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹
冬季	12	6.48±0.43	7.72±5.66	7.19±0.08	12.26±0.42	2.19±0.67	0.08±0.05
	1	8.09±0.12	9.19±4.36	7.46±0.45	10.21±0.70		
	2	6.15±0.52	3.32±1.05	7.87±0.13	10.10±2.94		
春季	3	8.23±0.37	6.53±2.64	7.15±0.32	12.2±11.04		
	4	17.70±1.06	5.18±2.27	8.43±0.45	11.56±3.02	0.89±0.27	0.11±0.07
	5	22.40±0.66	9.13±2.97	8.33±0.42	7.58±2.20		
夏季	6	24.03±0.81	7.63±3.20	8.10±0.46	13.14±1.80		
	7	31.15±0.82	20.85±9.51	9.24±0.56	7.70±3.60	2.49±0.64	0.11±0.05
	8	26.40±0.28	18.40±8.00	8.29±0.34	5.76±1.73		
秋季	9	24.45±0.74	20.50±6.28	8.63±0.29	6.96±1.82		
	10	17.59±0.36	7.79±2.90	8.40±0.06	4.80±0.81	1.61±0.33	0.20±0.12
	11	13.41±0.81	12.39±3.93	7.30±0.09	7.52±0.26		

季节	月份	PO ₄ ³⁻ -P/ mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg · L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/ mg · L ⁻¹	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹	Chl-a/ μg · L ⁻¹
冬季	12	0.03±0.01	0.25±0.15	3.14±0.70	2.34±0.50	6.81±2.15
春季	4	0.01±0.00	0.23±0.51	2.03±0.03	1.53±0.40	48.61±17.00
夏季	7	0.02±0.01	0.51±0.11	2.98±0.03	2.77±0.53	70.53±20.85
秋季	10	0.05±0.01	0.25±0.12	2.67±0.07	1.94±0.23	23.19±6.55

2.2 浮游动物物种组成

本次调查共鉴定出浮游动物 104 属 207 种,其中原生动物 37 属 88 种,占浮游动物总物种数的 42.51%;轮虫 3 属 76 种,占 36.72%;枝角类 17 属 29 种,占 14%;桡足类 12 属 14 种,占 6.76%。总体来说,小型浮游动物是五里湖湖滨带浮游动物的主要组成部分。时间上,8 月的物种数最多,为 61 种,2 月最少,仅 23 种;整体表现为夏、秋季物种数较多,冬、春季较少(图 2)。空间上看,1 号采样点物种数最多,为 93 种,5 号物种数最少,为 66 种(图 3)。

2.3 浮游动物丰度及其时空特征

调查期间,浮游动物丰度年均均为 3135.35 个/L,其中原生动物相对丰度为 52.46%,轮虫相对丰度为 42.41%,二者是构成五里湖湖滨带浮游动物丰度的主体。枝角类和桡足类比例较低,分别为 0.32%和 4.82%。浮游动物生物量年均 2.38 mg/L,其中轮虫的相对生物量为 66.96%,是五里湖湖滨带浮游动物生物量贡献最大的类群,其次为桡足类,其相对生物量为 21.26%;枝角类和原生动物占比较低,分别为 8.33%和 3.45%(表 2)。

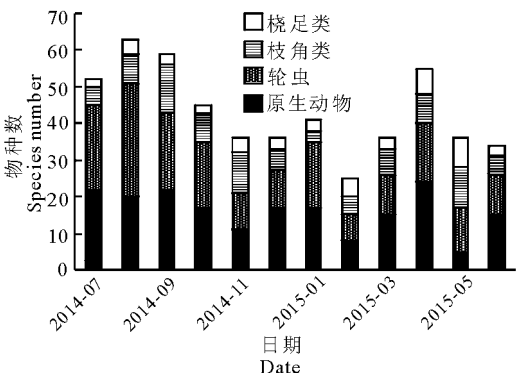


图 2 五里湖湖滨带浮游动物物种数及月变化
Fig.2 Monthly variation of zooplankton species number in the lakeside zone of Wuli Lake

浮游动物丰度以 9 月最高,为 14 756.54 个/L,2 月最低,为 985.22 个/L。总体上,浮游动物、原生动物、轮虫和桡足类丰度均以秋季最高,且除桡足类丰度最低值出现在春季外,其余均出现在冬季;枝角类丰度是以春季最高、夏季最低。浮游动物生物量的变化趋势同丰度一致,9 月最高,为 5.97 mg/L;2 月最低,仅 0.73 mg/L。浮游动物丰度和生物量的月变化见图 4 和图 5。

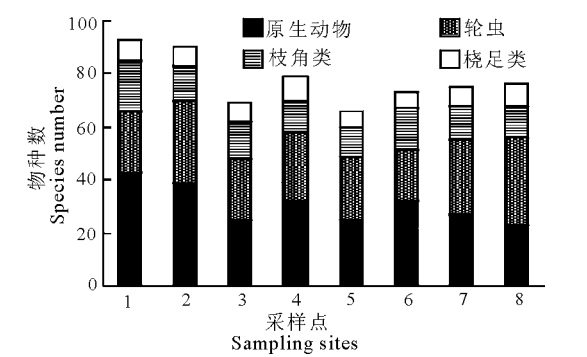


图3 五里湖湖滨带浮游动物物种数及空间变化
Fig.3 Spatial variation of zooplankton species number in the lakeside zone of Wuli Lake

表2 五里湖浮游动物及各类群丰度和生物量
Tab.2 Zooplankton abundance and biomass for each taxa in the lakeside zone of Wuli Lake

类群	丰度/ 个·L ⁻¹	相对丰度/ %	生物量/ mg·L ⁻¹	相对生物量/ %
原生动物	1644.75	52.46	0.08	3.45
轮虫	1329.65	42.41	1.60	66.96
枝角类	9.92	0.32	0.2	8.33
桡足类	151.03	4.82	0.51	21.26

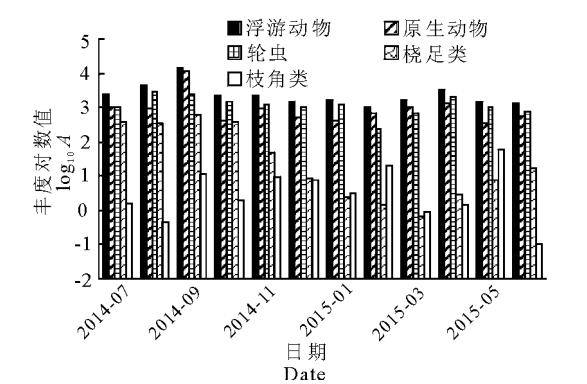


图4 五里湖湖滨带浮游动物丰度及月变化
Fig.4 Monthly variation of zooplankton abundance in the lakeside zone of Wuli Lake

不同采样点中,浮游动物、原生动物和轮虫丰度最高值均出现在7号采样点,分别为5 947.29 个/L、2 938.17 个/L和2 811.58 个/L;桡足类丰度以6号采样点最高,为255.65 个/L;枝角类丰度以8号采样点最高,为43.80 个/L;4号采样点的浮游动物、原生动物及枝角类丰度最低,分别为1 810.44 个/L、830.75 个/L和1.175 个/L;轮虫和桡足类丰度以5号采样点最低,分别为588.67 个/L和67.14 个/L。浮游动物生物量最高值出现在7号采样点,为4.43 mg/L,与丰度最高值一致;最低值有所差异,出现在5号采样点,为1.12 mg/L;其各类群的最高值与最低值均与丰度一致。就整个湖区而言,浮游动物丰度和生物量均表现为C区>D区

>B区>A区,整体表现为东五里湖高于西五里湖(图6和图7)。

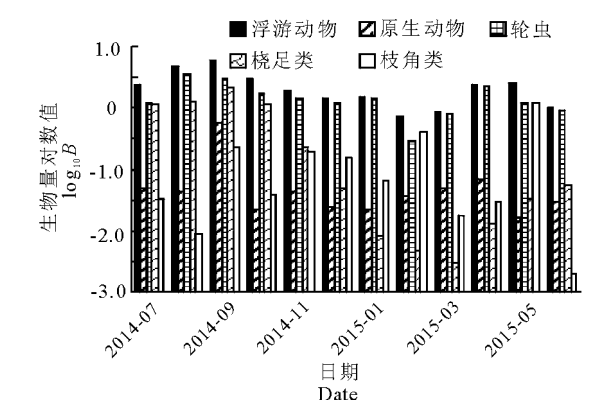


图5 五里湖湖滨带浮游动物生物量及月变化
Fig.5 Monthly variation of zooplankton biomass in the lakeside zone of Wuli Lake

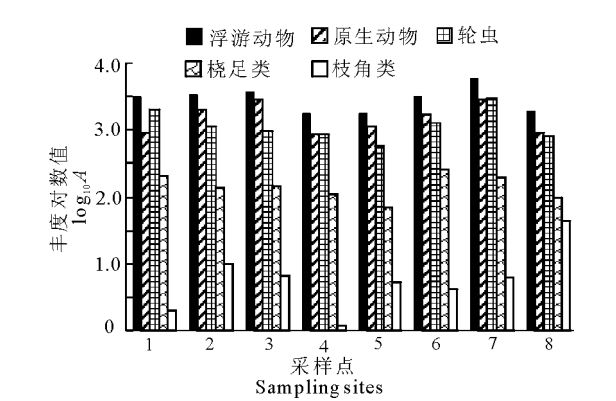


图6 五里湖湖滨带浮游动物丰度及空间变化
Fig.6 Spatial variation of zooplankton abundance in the lakeside zone of Wuli Lake

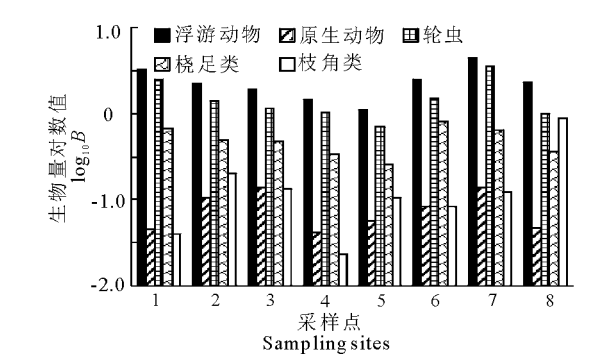


图7 五里湖湖滨带浮游动物生物量及空间变化
Fig.7 Spatial variation of zooplankton biomass in the lakeside zone of Wuli Lake

2.4 浮游动物群落多样性的时空特征
Shannon-Weiner 指数(H')年均2.34,变幅为1.74~2.83,最大值在7月,最小值在2月;Margalef 丰富度指数(D)年均5.67,变幅为3.77~7.67,最大值在8月,最小值在2月;Pielou 均匀度指数

7月最多,优势种有11种,2月和3月最少,仅3种。总体表现为夏秋季优势种多,春冬季少。王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)是10个月的优势种,针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)和螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)为9个月的优势种(表3)。按采样点统计优势种,优势种共计5种,8个站点差异不大,王氏似铃壳虫和针簇多肢轮虫为8个采样点的公共优势种,优势种最多的出现在6号和7号,为4种(表4)。

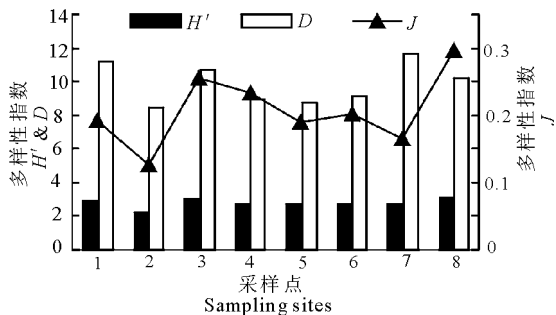


图 9 五里湖湖滨带浮游动物群落多样性及空间变化
Fig.9 Spatial variation of zooplankton diversity indices
in the lakeside zone of Wuli Lake

以优势度 $Y > 0.02$ 为标准,优势种共计 24 种。

Tab.3 Dominant species and dominance degree for each month in the lakeside zone of Wuli Lake

[illegible]

表 4 五里湖湖滨带浮游动物优势种及优势度空间变化

Tab.4 Dominant species and dominance degree for each sampling site in the lakeside zone of Wuli Lake

优势物种	不同采样点的浮游动物优势度							
	1	2	3	4	5	6	7	8
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	0.090	0.236	0.218	0.086	0.252	0.227	0.134	0.205
钟虫 <i>Vorticella</i> sp.	—	—	—	—	—	—	0.025	—
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.089	0.034	—	—	—	0.075	0.099	0.064
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.228	0.050	0.060	0.150	0.041	0.096	0.102	0.065
梳状疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectindta</i>	—	—	—	—	—	0.028	—	—
无节幼体 <i>Copepod nauplii</i>	0.056	0.036	0.036	0.060	0.028	0.076	0.030	0.039

2.6 浮游动物与环境因子的相关性

按照相对丰度>1%、出现频率>25%标准对五里湖湖滨带浮游动物进行筛选,最终筛选出 12 种浮游动物,并对其进行 DCA 分析(图 10)。结果显示,排序轴梯度长度(LGA)最大值为 2.619,故选择 RDA 进行约束性排序。

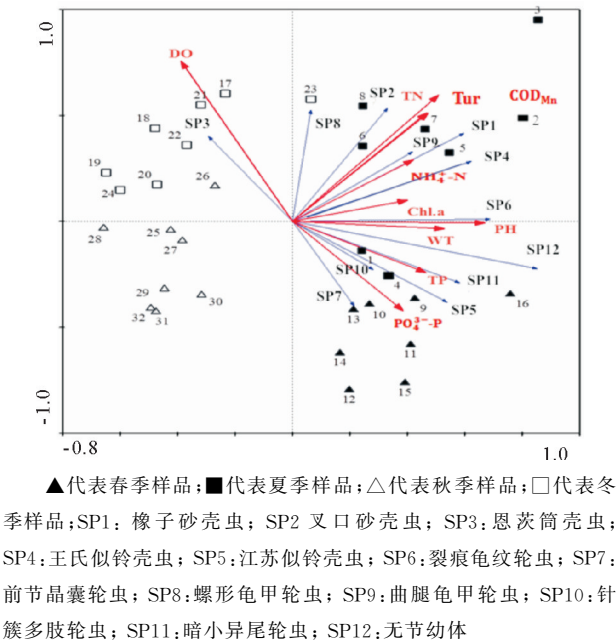


图 10 物种与环境相互关系的 RDA 排序图

▲ spring samples; ■ summer samples; △ autumn samples; □ winter samples; SP1: *Diffugia glans*; SP2: *Diffugia gra-men*; SP3: *Tintinnidium entzii*; SP4: *Tintinnopsis wangi*; SP5: *Tintinnopsis kiangsuensis*; SP6: *Anuraeopsis fissa*; SP7: *Asplach-na priodonta*; SP8: *Keratella cochlearis*; SP9: *Keratella valaa*; SP10: *Polyarthra trigla*; SP11: *Trichocerca pusilla*; SP12: *Copepod naupli*

Fig.10 Relationships between zooplankton species and environmental parameters by canonical correspondence analysis (RDA)

RDA 分析结果显示(表 5),前 3 轴的累计值占特征值总和的 88.7%,表明这 3 轴集中了绝大部分的环境因子对浮游动物分布格局,前两轴的特征值为 0.256 和 0.133 共解释了浮游动物群落变异程度

的 71.8%;表明在 10 种环境因子中,TN、DO、pH 和 Chl-a 是与五里湖湖滨带浮游动物群落结构相关性较强的环境因子,其中 DO 相关性最强的因子($r=0.66$)。并且发现不同季节影响浮游动物群落结构的环境因子是不同的,其中春季和夏季的浮游动物主要受 TN、pH、Chl-a 和及 COD_{Mn} 影响,并且与 TN、pH、Chl-a 和及 COD_{Mn} 呈正相关;秋冬季浮游动物主要受 DO、pH 及 WT 的影响,秋冬季浮游动物分布与 DO 呈正相关,与 $PO_4^{3-}-P$ 、pH 和 WT 呈负相关。

表 5 典型对应分析(RDA)结果

Tab.5 Canonical correspondence analysis results (RDA)

指标	轴 1	轴 2	轴 3
TN	0.42	0.52	0.13
pH	0.56	-0.01	-0.50
DO	-0.32	0.66	0.10
$PO_4^{3-}-P$	0.32	-0.37	0.49
NTU	0.39	0.45	-0.46
WT	0.44	-0.03	-0.57
TP	0.39	-0.21	0.33
NH_4^+-N	0.35	0.26	-0.25
Chl-a	0.34	0.09	-0.53
COD_{Mn}	0.39	0.45	0.04
特征值	0.256	0.133	0.092
属种-环境相关性	0.835	0.877	0.796
累计方差百分比			
属种数据	25.6	38.9	48.1
属种环境关系	47.2	71.8	88.7
典型特征值总和	0.542		

3 讨论

3.1 浮游动物的群落结构变化

湖泊湖滨带光照充分、有机质和营养物质丰富,从而造就了较高的生产力;同时湖滨带流速小、水生植被丰富,为水生生物提供了丰富的食物来源及多样化的栖息生境(叶春等,2015)。本研究在五里湖湖滨带共鉴定出浮游动物 207 种,群落特征表现为小型浮游动物物种数和丰度占总物种数和丰度的比例较高,生物量则以轮虫为主体,这与国内已有的关于江河、湖泊和水库的研究结果类似(陈光荣等,

2008;杨亮杰等,2014);较往年的调查结果,其总物种数与 1950—1951 年的调查结果较接近(190 种)(白国栋等,1962);此外,与 2003 年五里湖轮虫、枝角类和桡足类调查结果相比,此次调查轮虫的物种数和丰度变化较明显,分别上升了 2.3 倍和 3.5 倍。2006—2010 年为控藻护水期,五里湖开展了鱼种的人工放流,其中鲢鳙占 90% 以上且为大规格 2 龄鱼种,同时实施全湖禁渔,因此水域中有一定的鲢鳙群体(陈家长等,2009)。鳙是以浮游动物为主食的滤食性鱼类,且通常优先选择大型浮游动物为食(刘敏等,2010),因此鱼类的捕食行为在一定程度上减少了原生动物和轮虫的种外竞争压力(Korponai et al,2003),因此在物种组成和丰度上均以小型浮游动物占优;此外,五里湖浮游植物均以蓝绿藻占优势,也会不利于枝角类等大型浮游动物的摄食(王延洋等,2008;陈家长,2009)。

3.2 浮游动物现存量时空特征及其影响因子

本研究中,浮游动物丰度和生物量的季节变化规律一致为秋季>夏季>春季>冬季,其中最大值出现在 9 月,最小值出现在 2 月,但各类群的丰度和生物量随季节的变化特征有所差异,其中原生动物丰度和生物量的高峰出现在秋季和春季,这是由于原生动物对周围环境变化比较敏感,其数量会随水温变化产生较大幅度变动,且其最适生长的温度为 10~25℃(沈韞芬,1999)。调查期间,五里湖春季平均水温为 16.11℃,夏季为 27.19℃,秋季为 18.48℃,冬季为 9.33℃,因此春季和秋季的水温较适宜其生长和繁殖。值得注意的是,9 月喜清洁水体的王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)丰度极高,为秋季原生动物丰度贡献了 72.21%,这可能是由于该月水环境较好,导致了其快速繁殖与集群生长。轮虫生长温度与原生动物大致相同,其丰度和生物量的峰值也出现在秋季,其次是春季。本研究发现,桡足类的主要存在形式为无节幼体和桡足幼体,两者对桡足类丰度贡献率高达 99.39%,其中无节幼体贡献率为 91.15%,二者在 6—10 月丰度较高,故桡足类的丰度和生物量高峰在秋季和夏季。有研究发现,无节幼体以滤食细菌为主,6—10 月水温较高,细菌大量繁殖,为无节幼体提供了丰富的食物来源,有利于其生长(Sherr & Sherr,1987);夏季至秋初,五里湖以绿藻和蓝藻占优,且在风速、风向、湖流及地形的影响下聚集于湖滨带(孟顺龙等,2009)。蓝藻由于营养价值低,且易堵塞滤食性器官,对绝大多数滤食性的枝角类产生较大危害,因此枝角类丰度和生物

量在夏季出现全年最低值。春季,一方面由于荇草等沉水植被处于生长旺季,为枝角类提供了遮蔽物;另一方面,由于春季浮游植物丰度增加且蓝藻丰度较低,因此枝角类丰度和生物量的高峰出现在春季。

五里湖湖滨带浮游动物现存量总体表现为东部高于西部,其中丰度高出 42.20%,生物量高出 82.03%,并呈现 C 区>D 区>B 区>A 区的变化趋势。不同采样点中,丰度和生物量最高值均出现于东五里湖的 7 号采样点,最小值分别出现于西五里湖的 4 号和 5 号,出现这样的空间特征与环境因子密不可分。大量研究表明,浮游动物丰度与影响湖泊营养状态的 TN、TP 和 Chl-a 的含量密切相关(Druvietis et al,1998);RDA 的分析结果表明,TN 和 Chl-a 与浮游动物群落结构显著相关($P<0.01$)。本研究发现水体理化因子中,TN、TP、Chl-a、COD_{Mn}、pH、Tur 及 DO 的空间特征均表现为东五里湖高于西五里湖,且 TN、TP、Chl-a 和 Tur 最小值均在 4 号采样点。水体理化指标及浮游动物现存量的空间特征与五里湖的综合治理及周边环境密不可分,2003 年以来,无锡市对五里湖实施了“重污染水体底泥环保疏浚与生态重建工程”,对 A 区和 B 区进行过底泥疏浚和水生植被重建工程,外源污染基本得到控制,退湖还渔区(A 区)的水质明显较好;C 区附近有较多小型支流,汇入的水体水质较差,影响邻近湖区水质,D 区人口密集且有入河河道,受人类干扰较大,富营养化污染较严重;另外,湖滨带的岸型对浮游动物分布有一定影响,表现为自然滩地岸带(1、2、4 号)的物种数明显高于水泥护岸(3、5 号),且水生植被最为丰富的 1 号点物种数最为丰富,但现存量并没有表现出类似特征。

3.3 五里湖湖滨带水质总体评价

根据浮游动物丰度小于 1 000 个/L 为贫营养,1 000~3 000 个/L 为中营养,大于 3 000 个/L 为富营养的生物指标评价标准(张觉民等,1990),五里湖湖滨带浮游动物年均丰度为 3135.35 个/L,且在 4 月、8 月和 9 月都大于 3 000 个/L,由此可知,2014 年 7 月至 2015 年 6 月五里湖湖滨带水体总体营养状况为轻度富营养,其中 4 月、8 月和 9 月为富营养。就优势种组成来看,在 3 个月份(站点)及以上作为优势种出现的喜清洁水体的有 4 种,分别为球形砂壳虫(*Difflugia globulosa*)、江苏似铃壳虫(*Tintinnopsis kiangsuensis*)、王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)和梳状疣毛轮虫(*Synchaeta pectindta*),耐污型种类有 3 种,为针簇多肢轮虫

(*Polyarthra trigla*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)和等刺异尾轮虫(*Trichocerca similis*) (Sommer, 1989; 赵文, 2016)。总体看来, 2月水体富营养程度较低, 3、4、5号采样点的水体富营养程度较低。

利用浮游动物多样性指数对可评价水域生态环境的优劣, 根据 H' 值在 $0\sim 1$, J 值在 $0\sim 0.3$ 时水质为重污染; H' 值在 $1\sim 3$, J 值在 $0.3\sim 0.5$ 时水质为中污染; H' 值大于 3, J 值在 $0.5\sim 0.8$ 时水质为无污染或轻度污染(刘超等, 2007; 孙志强等, 2013)。本次调查结果显示, H' 值年均 2.34, J 值年均 0.25, 即五里湖 2014 年 6 月到 2015 年 7 月水质污染程度为中度污染, 其中 9 月的水质状况最差。6 月和 7 月为中污染, 水质较全年其它月份好。 H' 值和 J 值评价各个采样点的全年水质基本情况是中度或重污染, 其中 8 号采样点水质较其他采样点好, 3 号点最差。就 4 个湖区而言, A 区最好, 其次是 C 区, B 区和 D 区水质状况相近且较差。

综上, 2014 年 7 月至 2015 年 6 月五里湖湖滨带水质状态处于中污染或重污染, 水体营养状态处于轻度富营养, 夏季温度较高时有水华出现。应继续实行增殖放流并适当增加鲢的放养比例, 控制氮磷营养盐的输入, 优化湖滨带生态环境。

参考文献

白国栋, 1962. 五里湖 1951 年湖泊学调查[J]. 水生生物学集刊, 2(1): 63-113.

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.

陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等, 2009. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报, 18(4): 1358-1367.

郭沛涌, 沈焕庭, 刘阿成, 等, 2003. 长江河口浮游动物的种类组成群落结构及多样性[J]. 生态学报, 23(5): 892-900.

国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法(4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社.

韩茂森, 1995. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社.

李文朝, 1996. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变[J]. 湖泊科学, (S1): 37-45.

李英杰, 年跃刚, 胡社荣, 等, 2008. 太湖五里湖水生植物群落演替及其驱动因素[J]. 水资源保护, 24(3): 12-16.

刘超, 禹娜, 陈立侨, 等, 2007. 上海市西南城郊河道春季的浮游生物组成及水质评价[J]. 复旦学报(自然科学版), 46(6): 913-919.

刘敏, 徐敏娴, 许迪亮, 等, 2010. 鲢、鳙非经典生物操纵作用的研究进展与应用现状[J]. 水生态学杂志, (3): 99-

103.

沈韞芬, 1999. 原生动物学[M]. 北京: 科学出版社.

孙志强, 施心路, 徐琳琳, 等, 2013. 景观湿地夏季原生动物群落结构与水质关系[J]. 水生生物学报, 37(2): 290-299.

王家辑, 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社.

王书航, 王雯雯, 姜霞, 等, 2014. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. 中国环境科学, 34(5): 1268-1276.

温新利, 席贻龙, 张雷, 等, 2006. 芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质的生态学评价[J]. 水生生物学报, 26(2): 152-158.

徐新洲, 2013. 无锡蠡湖湖滨湿地植被修复与景观重建研究[D]. 南京: 南京林业大学: 12-18.

杨红军, 2008. 五里湖湖滨带生态恢复和重建的基础研究[D]. 上海: 上海交通大学.

杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等, 2014. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 水生生物学报, 38(4): 720-728.

叶春, 李春华, 邓婷婷, 2015. 论湖滨带的结构与生态功能[J]. 环境科学研究, 28(2): 171-181.

张觉民, 何志辉, 1991. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 中国农业出版社.

赵文, 2016. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社.

朱喜, 张扬文, 2009. 五里湖水污染治理现状及继续治理对策[J]. 水资源保护, 25(1): 86-89.

Druvitis I, Klavins M, Urtane L, et al, 1998. Evaluation of plankton communities in small highly humic bog lakes in Latvia[J]. Environment International, 24(5): 595-602.

Han M S, 1995. The Fresh water Biology Map of China[M]. Beijing: Ocean Press.

Korponai J, Paulovits G, Mátyás K, et al, 2003. Long-term changes of cladoceran community in a shallow hypertrophic reservoir in Hungary[J]. Hydrobiologia, 504(1): 193-201.

Margalef R, 1968. Perspectives in Ecological Theory[M]. Chicago: The University of Chicago Press.

Pielou E C, 1966. The measurements of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology, 13: 131-144.

Shannon C E, Weaver W, 1949. A Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press.

Sherr E B, Sherr B F, 1987. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates[J]. Nature, 325: 710-711.

Sommer U, 1989. Plankton ecology: succession in plankton communities[M]. Berlin Brock/Springer Press.

Zooplankton Community Characteristics in the Lakeside Zone of Wuli Lake, Taihu Lake

DAI Pei¹, LIU Kai¹, ZHOU Yan-feng¹, ZHOU You², XU Pao¹

(1.Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River, Ministry of Agriculture Rural Areas, Freshwater Fisheries Research Center, CAFS, Wuxi 214081,P.R.China;
2.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122,P.R.China)

Abstract: Wuli Lake is a typical shallow urban lake in Wuxi City. Since March of 2004, an ecological restoration project has been ongoing in the lakeside zone of Wuli Lake. The lakeside zone (shoreline) of the lake plays an important role in maintaining species diversity, intercepting land-source pollutants and purifying water. In this study, we investigated the zooplankton community structure in the lakeside zone of Wuli Lake and assessed the water quality based on the results, aiming to provide data for assessing the ecological restoration and integrated improvement of the lakeside zone. The lakeside zone was divided into four areas: A, under treatment, desilting and restoration of aquatic vegetation; B, under treatment, sediment dredging and restoration of aquatic vegetation; C, wetland construction along the lakeshore; D residential. From July 2014 to June 2015, zooplankton samples were collected monthly at eight nearshore sites in Wuli Lake and water quality parameters were measured, including pH, dissolved oxygen (DO), turbidity (Tur), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), permanganate chemical oxygen demand (COD_{Mn}), chlorophyll-a (Chl-a), ortho-phosphate (PO₄³⁻-P), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) and nitrite nitrogen (NO₂⁻-N). A total of 207 zooplankton species belonging to 104 genera were identified, consisting of 88 protozoa species (37 genera), 76 rotifer species (38 genera), 29 cladocera species (17 genera) and 14 copepod species (12 genera). The highest species richness occurred in August (63 species) and the lowest occurred in February (25 species). Natural bottomland had a more positive impact on species richness than cement revetment. The average zooplankton density and biomass were 3 135.35 ind/L and 2.38 mg/L and protozoans and rotifers dominated total density, while rotifers dominated total biomass. The zooplankton community structure presented obvious seasonal differences. Cladocera density and biomass was highest in spring and lowest in summer, while the density and biomass of protozoa, rotifera and copepoda were highest in autumn and lowest in winter or spring. Spatially, zooplankton density and biomass in the eastern lake were higher than in the western lake, both following the same order, C>D>B>A, and presenting significant spatial differences. Based on the diversity indices and density of zooplankton, the water in Wuli Lake was polluted moderately and slightly eutrophic. Redundancy analysis revealed that TN, Chl-a, DO and pH were the important environmental factors affecting zooplankton community structure.

Key words: Wuli Lake nearshore zone; zooplankton; community structure; biodiversity; water quality