

南昌市3个城中湖泊夏季轮虫和甲壳类群落特征及水质评价

文 媛,秦海明,胡旭仁,胡火玲

(南昌大学生命科学研究院流域生态研究所,南昌 330031)

摘要:为探究城市湖泊浮游动物群落结构特征和分布与水环境因子之间的关系,并评价南昌市典型城市湖泊夏季水质状况,运用多维尺度分析(MDS)和典范对应分析(CCA)方法,对南昌3个城市湖泊——东湖、青山湖、月亮湖的轮虫和甲壳类浮游动物群落进行了研究,分析了浮游动物的多样性指数。结果表明,轮虫是夏季城市湖泊中浮游动物的优势类群,优势度(Y)大于0.02的浮游动物分别为剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、桡足类无节幼体(*Copepoda nauplii*)和卜氏晶囊轮虫(*Asplanchna brightwelli*);3个湖泊之间浮游动物的群落结构差异显著($P < 0.05$),明显划分为东湖群落、青山湖群落和月亮湖群落。叶绿素a浓度、浊度和溶氧是浮游动物分布的显著影响因子($P < 0.05$)。多样性指数评价显示,东湖为清洁型水体,青山湖为清洁-中污型水体,月亮湖为轻污-中污型水体。综合评价表明,东湖和青山湖水体为寡营养水平,月亮湖为中富营养水平。

关键词:浮游动物;群落结构;水质评价;城市湖泊

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2015)02-0046-09

城市湖泊具有防汛排涝、休闲娱乐、调节气候以及改善城市生态环境等功能(刘军等,2007)。近年来,随着城市化进程的加快,湖泊在大型公共绿地建设中出现得越来越多,成为城市园林绿地中的重要景观。在城市发展和人口大量增加的同时,水资源日益紧张,大量含有氮、磷营养盐的生活污水排入城市湖泊,直接或间接地造成其生态环境改变、点面污染源增加,导致湖泊水体受到污染,加剧了富营养化程度。调查表明,全球范围内30%~40%的湖泊和水库已不同程度受富营养化的影响(马经安和李红清,2002)。

浮游动物作为次级生产力在水生态系统中具有重要作用,在摄食细菌、浮游植物和有机碎屑的同时,又被鱼类等水生动物捕食(Dalpadado et al, 2000; Porri et al, 2007),对水生态系统的物质循环和能量流动起关键作用(李超伦和王克,2002)。浮游动物的种类组成、数量变化和分布与水环境状况密切相关,水位波动、pH、水温、溶解氧、水体营养状

态等非生物因子以及食源状况、捕食、水生植物分布等生物因子均对浮游动物群落结构具有直接或间接影响(Hessen et al, 2006; Wu et al, 2008; 张冬融等,2014)。不同类群的浮游动物对水环境变化的敏感性和适应能力各不相同,一些浮游动物对环境污染极为敏感,可作为水质污染的指示种(Duggan et al, 2001; 周淑婵等,2006);另一些种类的浮游动物本身能积累和代谢一定量的污染物质,在一定程度上发挥水质净化器的作用(许木启,1996)。利用浮游动物群落结构变化以及物种多样性差异监测与评价水环境质量具有重要的应用价值(王新华等,2008)。

本研究通过分析夏季南昌市3个城市湖泊水体的理化因子及轮虫类和甲壳类浮游动物的群落结构特征、密度和多样性指数,探讨了水环境因子对浮游动物群落与分布的影响,并基于浮游动物多样性指标评价了湖泊水质污染状况,旨在为城市湖泊生态环境保护 and 富营养化治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

选择江西省南昌市内3个城市湖泊进行研究,分别为东湖、青山湖和月亮湖(图1)。东湖面积约13 hm²,主要靠降雨和人工注水保持水位,20世纪70年代曾经进行过人工清淤;青山湖面积约306 hm²,水源主要来自降雨以及引入象湖水,2002

收稿日期:2014-11-11

基金项目:江西省教育厅青年基金(GJJ13018);南昌大学“鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室”开放基金(13006457);美国国际鹤类基金会鄱阳湖越冬候鸟保护及生态调查项目(13006226)。

作者简介:文媛,1994年生,女,本科,主要从事水生生物学研究。E-mail: 864796652@qq.com

通信作者:秦海明,1978年生,男,副研究员,主要从事水生生态学。E-mail: qinhaiming@ncu.edu.cn

年曾进行过人工清淤;月亮湖面积约为3 hm²,2005年人工开挖而成,主要靠降雨和人工注水保持水位。

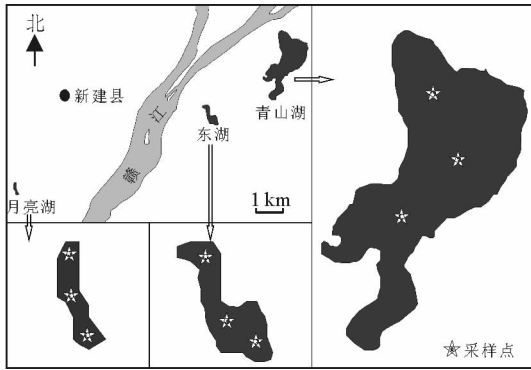


图1 南昌市3个调查湖泊位置及采样点示意
Fig.1 Location of sampling sites in three lakes of Nanchang

1.2 采样方法

选择轮虫、枝角类、桡足类占据优势的夏季,于2013年7月25日、26日和8月10日分别在青山湖、东湖和月亮湖的敞水区各设置3个采样点,3个湖泊的样点间隔分别为300 m、100 m和40 m,每个采样点均设置3个重复,间隔均为3 m。使用2 L浮游生物采水器在距离表层0.5 m深处采集浮游动物样品,水深超过2.0 m时,在水表层0.5 m和距离水底0.5 m处分别采样。通过25号浮游生物网过滤采集的浮游动物,装入50 mL透明塑料标本瓶,现场用鲁哥氏液和4%福尔马林混合液固定保存样品。在采集水样的同时,使用多参数水质监测仪(YSI6600V2)测量各采样点的水温、pH值、溶解氧、叶绿素a浓度和浊度等理化指标。

利用浮游生物沉淀器在实验室内对采集的浮游动物进行富集,收集到30 mL标本瓶中,使用虎红染色液将样品染色。浮游动物种类鉴定参考相关文献(王家楫,1961;蒋燮治和堵南山,1979;中国科学院动物研究所甲壳动物研究组,1979);当单个浮游动物样品总数超过1000个时,采用体积法抽样法进行鉴定和计数(章宗涉和黄祥飞,1991)。

1.3 数据分析

1.3.1 优势度及生物量 优势度计算公式如下: $Y = n_i \times f_i / N$;式中: Y 表示物种优势度, n_i 为第*i*种的个体数, N 为所有个体总数的和, f_i 为该种出现的频度,当某一物种 $Y \geq 0.02$ 时,可视为优势种类,当某一物种 $f_i \geq 0.65$ 时可视为常见种(杨关铭等,1998)。浮游动物生物量计算方法参考章宗涉和黄祥飞(1991)。

1.3.2 多样性指数 浮游动物物种 Shannon-Wie-

ner多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J)和Margalef丰富度指数(D)计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

$$J = H' / \log_2 S$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N$$

式中: N 为浮游动物总个体数; S 为浮游动物种类总数; P_i 为第*i*种的个体数与样品中总个体数的比值(n_i/N)。

参照惯用的评价标准, $H' > 3$ 水质为清洁,1~3为中污,0~1为重污; $J > 0.5$ 为清洁,0.3~0.5为中污,0~0.3为重污; $D > 3$ 为清洁,2~3为轻污,1~2为中污,0~1为重污(管越强等,2007)。

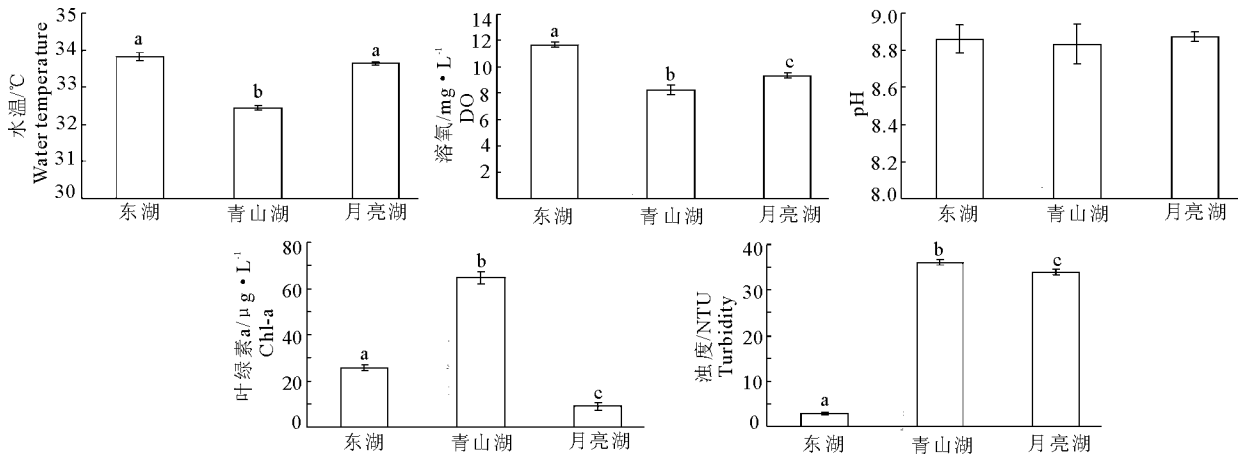
1.3.3 水体营养程度评价 根据Sladeczek(1983)污染等级的分类方法,将轮虫分为异污性、寡污性、 β -中污性和 α -中污性。异污性和寡污性的轮虫指示寡营养状态, β -中污性和 α -中污性轮虫指示富营养状态;并用臂尾轮虫种类(B)与异尾轮虫种类(T)的比值(Q)的大小判断水体营养程度。 $Q < 1$ 为寡营养型, $1 \leq Q \leq 2$ 为中营养型, $Q > 2$ 为富营养型。

1.3.4 数据统计 相似性分析(ANOSIM)和多维尺度分析(MDS)排序在Primer 5.0软件中进行;典范对应分析(CCA)和蒙特卡罗检验(Monte Carlo Test)在Canoco for Windows 4.5统计分析软件中进行。单因子方差分析(ANOVA)在Statistica 7.0中进行,通过最低显著性差异法(Fisher LSD)比较不同城市湖泊的浮游动物密度及生物量差异, $P < 0.05$ 表示有显著差异, $P < 0.01$ 表示有极显著差异。所有数据在进行统计分析前均进行了 $\lg(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 水体理化指标

3个城市湖泊水体理化指标的测定结果见图2。青山湖的水温和溶氧量均显著低于东湖和月亮湖($P < 0.05$),青山湖溶氧最低为(8.25 ± 0.07) mg/L,东湖溶氧最高,可达(11.68 ± 0.19) mg/L。3个湖泊的水体均为弱碱性,pH值为8.83~8.87,无差异。浊度和叶绿素浓度在3个湖泊间的变化趋势相同,均表现为青山湖>月亮湖>东湖,且青山湖显著高于月亮湖和东湖($P < 0.05$);青山湖的浊度最高,为(36.01 ± 0.59) NTU,月亮湖浊度最低,为(2.88 ± 0.17) NTU;青山湖叶绿素a浓度最高,可达(64.71 ± 2.62) $\mu\text{g/L}$,月亮湖叶绿素a浓度最低,仅为(8.79 ± 1.67) $\mu\text{g/L}$ 。



(不同字母表示湖泊之间存在显著差异)

图2 3个城市湖泊水体理化指标测定结果

(a, b and c indicate a significant difference between different lakes)

Fig. 2 Physicochemical characteristics of the three urban lakes

2.2 浮游动物种类组成

2013年夏季在南昌3个湖泊中共采集到轮虫及甲壳类浮游动物52种,分属于2门、14科(表1)。包括轮虫8科、39种,枝角类3科、4种,桡足类3科、9种;其中桡足类无节幼体未鉴定到物种水平,

作为1个种类进行统计分析。东湖、月亮湖和青山湖的浮游动物种类数分别为22、27和34种。3个湖泊中均以轮虫为优势类群,其个体数均占浮游动物总个体数的75%以上,其中青山湖的轮虫占总数的97.32%(图3)。

表1 浮游动物种类名录及缩写

Tab. 1 Zooplankton species list

浮游动物	东湖	青山湖	月亮湖	缩写
轮虫 Rotifera				
臂尾轮科 Brachionidae				
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+	+	+	Cal
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>		+	+	For
浦达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>		+	+	Bud
裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	+	+	+	Div
腹棘管轮虫 <i>Mytilina ventralis</i>		+		Ven
大肚鬃足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>	+			Dil
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>		+	+	Coc
矩形龟甲轮虫 <i>Keratella quadrata</i>	+			Qua
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>		+	+	Val
腔轮科 Lecanidae				
尖棘腔轮虫 <i>Lecane arcua</i>	+			Arc
晶囊轮科 Asplanchnidae				
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	+	+	+	Pri
盖氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna girodi</i>	+	+	+	Gir
卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>	+	+	+	Bri
多突囊足轮虫 <i>Asplanchnopus multiceps</i>		+		Mul
椎轮科 Notommatidae				
暖昧前翼轮虫 <i>Proales fallaciosus</i>		+		Fal
污前翼轮虫 <i>Proales sordida</i>			+	Sor
粗壮侧盘轮虫 <i>Pleurotrocha robusta</i>		+		Rob
冷淡索轮虫 <i>Resticula gelida</i>		+		Gel
圆盖柱头轮虫 <i>Eosphora thoa</i>			+	Tho

续表1 Tab.1 continued

浮游动物	东湖	青山湖	月亮湖	缩写
腹尾轮科 Gastropodidae				
柱足腹尾轮虫 <i>Gastropus stylifer</i>		+		Styl1
卵形彩胃轮虫 <i>Chromogaster ovalis</i>	+			Ova
舞跃无柄轮虫 <i>Ascomorpha saltans</i>	+	+	+	Sal
没尾无柄轮虫 <i>Ascomorpha ecaudis</i>		+	+	Eca
鼠轮科 Trichocercidae				
尖头同尾轮虫 <i>Diurella tigris</i>	+			Tig
韦氏同尾轮虫 <i>Diurella weberi</i>	+	+	+	Web
对棘同尾轮虫 <i>Diurella stylata</i>		+		Sty2
田奈同尾轮虫 <i>Diurella dixon-nuttalli</i>		+		Dix
细异尾轮虫 <i>Trichocerca gracilis</i>		+	+	Gra
刺盖异尾轮虫 <i>Trichocerca capucina</i>		+	+	Cap
二突异尾轮虫 <i>Trichocerca bicristata</i>			+	Bic
鼠异尾轮虫 <i>Trichocerca rattus</i>		+		Rat
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>		+		Pus
纵长异尾轮虫 <i>Trichocerca elongata</i>		+		Elo
疣毛轮科 Synchaetidae				
长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>		+		Dol
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	+	+	+	Tri
镜轮科 Testudinellidae				
沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>			+	Sul
奇异巨腕轮虫 <i>Pedalia mira</i>		+		Mir
臂三肢轮虫 <i>Filinia brachiata</i>		+		Bra1
迈生三肢轮虫 <i>Filinia maior</i>		+	+	Mai
节肢动物 Arthropoda				
枝角类 Cladocerans				
仙达蚤科 Sididae				
短尾秀体蚤 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	+	+	+	Bra2
长肢秀体蚤 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>			+	Leul
裸腹蚤科 Moinidae				
多刺裸腹蚤 <i>Moina macrocopa</i>		+		Mac
象鼻蚤科 Bosminidae				
颈沟基合蚤 <i>Bosminopsis deitersi</i>	+			Dei
桡足类 Copepods				
桡足类无节幼体 <i>Copepoda nauplii</i>	+	+	+	Nau
胸刺水蚤科 Centropagidae				
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	+		+	Dor
长腹剑水蚤科 Oithonidae				
中华窄腹水蚤 <i>Limnoithona sinensis</i>			+	Sin
剑水蚤科 Cyclopidae				
棕色大剑水蚤 <i>Macrocylops fuscus</i>	+			Fus
跨立小剑水蚤 <i>Microcylops varicans</i>	+		+	Var
扁平小剑水蚤 <i>Microcylops uenoi</i>		+		Uen
广布中剑水蚤 <i>Mesocylops leuckarti</i>	+			Leu2
透明温剑水蚤 <i>Thermocylops hyalinus</i>	+			Hya
等刺温剑水蚤 <i>Thermocylops kawamurai</i>	+		+	Kaw

2.3 浮游动物密度

检验结果表明,月亮湖和青山湖浮游动物总密度极显著 ($P < 0.001$) 高于东湖(表2)。3类主要浮游动物类群中,青山湖的轮虫密度最高,为(541.16 ± 94.68)个/L。东湖轮虫类和枝角类的密度极显著低于月亮湖和青山湖($P < 0.001$)。东湖和青山

湖的轮虫密度均极显著高于枝角类和桡足类 ($P < 0.01$)。5种优势物种当中,除裂足臂尾轮虫和桡足类无节幼体外,其他3种优势物种在月亮湖和青山湖的密度均极显著高于东湖 ($P < 0.001$);其中剪形臂尾轮虫在月亮湖具有最高密度(355.77 ± 116.05)个/L。

2.4 浮游动物生物量

由表3可见,月亮湖和青山湖浮游动物总生物量极显著($P < 0.001$)高于东湖。3类主要浮游动物类群中,青山湖轮虫和枝角类的生物量最大,分别为(1.424 ± 0.238) mg/L和(0.530 ± 0.102) mg/L,月亮湖桡足类的生物量最大,为(1.860 ± 0.473) mg/L。5种优势种中,卜氏晶囊轮虫在青山湖的生物量最大,为(0.861 ± 0.206) mg/L,月亮湖次之,为(0.463 ± 0.177) mg/L,且均极显著高于东湖($P = 0.001$);青山湖萼花臂尾轮虫和裂足臂尾轮虫的生物量极显著高于东湖和月亮湖($P < 0.001$);

月亮湖剪形臂尾轮虫和桡足类无节幼体的生物量极显著高于东湖和青山湖($P < 0.001$)。

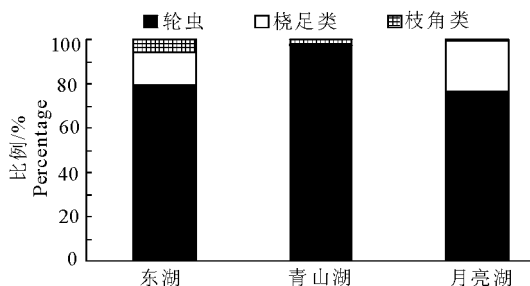


图3 浮游动物主要类群百分比组成

Fig. 3 Dominant zooplankton populations by percent in the three urban lakes

表2 3个城市湖泊的浮游动物密度

个/L

Tab. 2 Zooplankton density of dominant populations and species in the three urban lakes

浮游动物		东湖	青山湖	月亮湖
总密度		9.48 ± 1.12^a	556.06 ± 95.30^b	563.29 ± 128.07^b
主要类群	轮虫类	7.52 ± 0.90^a	541.16 ± 94.68^b	431.77 ± 115.27^b
	枝角类	0.56 ± 0.19^a	10.61 ± 2.04^b	3.03 ± 0.62^c
	桡足类	1.41 ± 0.23^a	4.29 ± 1.67^a	128.50 ± 24.63^b
优势种类	卜氏晶囊轮虫	2.41 ± 0.57^a	16.41 ± 3.93^b	8.84 ± 2.22^b
	萼花臂尾轮虫	0.93 ± 0.30^a	88.38 ± 14.11^b	20.02 ± 7.75^c
	裂足臂尾轮虫	1.00 ± 0.38^a	242.17 ± 54.49^b	2.27 ± 1.52^a
	剪形臂尾轮虫	0.00 ± 0.00^a	20.71 ± 5.48^b	355.77 ± 116.05^c
	桡足类无节幼体	0.78 ± 0.21^a	3.79 ± 1.56^a	59.05 ± 12.97^b

注:同行不同字母表示差异显著。

Note: Values in the same row with different superscript letters indicate a significant difference.

表3 3个城市湖泊的浮游动物生物量

mg/L

Tab. 3 Zooplankton biomass of the dominant populations and species in the three urban lakes

浮游动物		东湖	青山湖	月亮湖
总生物量		0.239 ± 0.037^a	1.981 ± 0.297^b	2.614 ± 0.489^b
主要类群	轮虫类	0.170 ± 0.030^a	1.424 ± 0.238^b	0.602 ± 0.123^c
	枝角类	0.028 ± 0.010^a	0.530 ± 0.102^b	0.152 ± 0.031^a
	桡足类	0.040 ± 0.022^a	0.027 ± 0.016^a	1.860 ± 0.473^b
优势种类	卜氏晶囊轮虫	0.126 ± 0.030^a	0.861 ± 0.206^b	0.463 ± 0.117^b
	萼花臂尾轮虫	0.002 ± 0.001^a	0.221 ± 0.035^b	0.050 ± 0.019^a
	裂足臂尾轮虫	0.001 ± 0.000^a	0.127 ± 0.029^b	0.001 ± 0.001^a
	剪形臂尾轮虫	0.000 ± 0.000^a	0.003 ± 0.001^a	0.046 ± 0.015^b
	桡足类无节幼体	0.002 ± 0.001^a	0.011 ± 0.005^a	0.177 ± 0.039^b

注:同行不同字母表示差异显著。

Note: Values in the same row with different superscript letters indicate a significant difference.

2.5 浮游动物群落结构

相似性分析(ANOSIM)表明,浮游动物群落在3个湖泊之间的差异极显著($R = 0.995$, $P = 0.001$)。基于浮游动物个体数的多维尺度分析(MDS)表明,2013年夏季南昌3个城市湖泊的浮游动物明显划分为东湖群落、青山湖群落和月亮湖群落(图4)。

2.6 浮游动物群落结构与水体理化因子的关系

对夏季南昌市3个湖泊的6个水质理化因子及57种浮游动物进行典范相关分析(CCA)结果显示,

浮游动物主要分布于第一轴两侧(图5-a),其中21种位于第I和第IV象限,26种位于第II和第III象限,另有10种浮游动物分布于离原点较远的第II象限内。浮游动物的5种优势种类在排序图中具有明显的分布差异,卜氏晶囊轮虫(Bri)位于第II象限,与溶氧呈正相关关系,与浊度呈显著负相关关系;萼花臂尾轮虫(Cal)和裂足臂尾轮虫(Div)位于第I象限,与叶绿素a浓度呈正相关关系,与水温呈负相关关系;剪形臂尾轮虫(For)在第III象限,与水

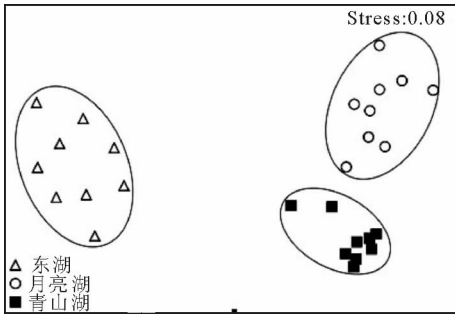


图4 南昌市3个湖泊浮游动物群落多尺度排序

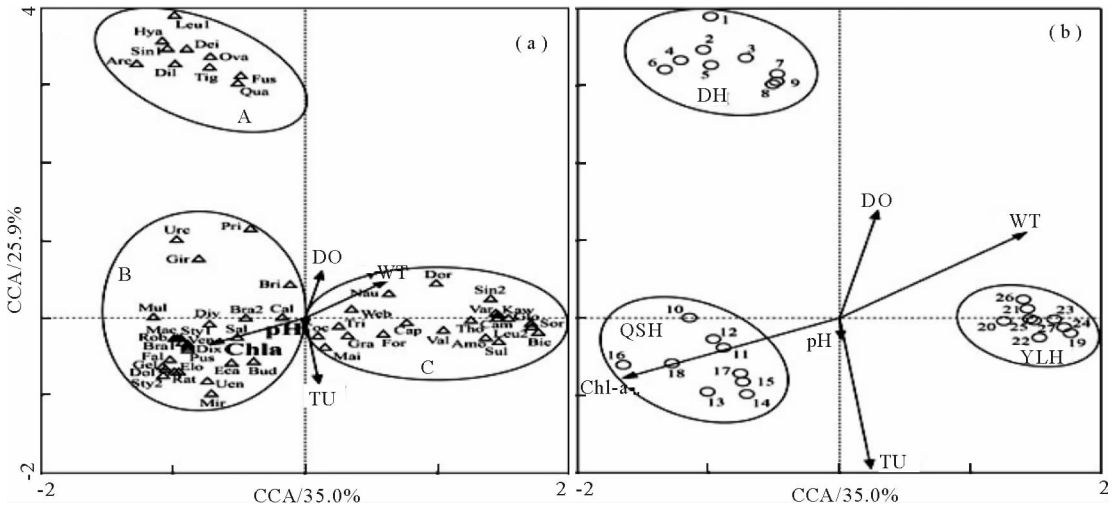
Fig.4 Multidimensional scaling(MDS) ordination of zooplankton communities in three urban lakes

温呈正相关关系,与叶绿素浓度呈负相关关系;桡足类无节幼体(Nau)第II象限,与溶氧和水温呈正相

关关系,与叶绿素a浓度呈负相关关系。

典范相关分析(CCA)对夏季南昌市3个城中湖泊的6个水理化因子及27个浮游动物样品进行排序结果显示,不同湖泊的样品分别聚到一起(图5-b)。东湖样品分布在第II象限,与浊度呈显著负相关关系;青山湖样品主要分布在第III象限,与叶绿素a浓度呈正相关关系,与溶氧和水温呈负相关关系;月亮湖样品分布在第I和IV象限,与水温呈正相关关系,与叶绿素a浓度呈负相关关系。

蒙特卡罗检验(Monte Carlo Test)发现,叶绿素a浓度、浊度和溶氧是影响浮游动物分布的显著影响因子($P < 0.01$),水温是边缘显著影响因子($P = 0.06$)。



(a) 浮游动物群落与水环境因子的排序图;(b) 浮游动物样品与水环境因子的排序图;

Chl-a:叶绿素a浓度;DO:溶解氧;TU:浊度;WT:水温;DH:东湖;QSH:青山湖;YLH:月亮湖

图5 典范对应分析结果

(a) biplot of zooplankton community and water environmental factors;(b) biplot of zooplankton samples and water environmental factors;

Chl-a: chlorophyll-a concentration; DO: Dissolved oxygen; TU: Turbidity; WT: Water temperature;

DH: Donghu Lake; QSH: Qingshan Lake; YLH: Yueliang Lake

Fig.5 Ordination diagrams of CCA

2.7 浮游动物多样性指数及水质评价

3个湖泊浮游动物的物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)和丰富度指数(D)的变化趋势相同,均为东湖>青山湖>月亮湖(表3);3种指数的变化范围分别为2.18~3.16、0.44~0.78和2.35~3.69。青山湖和月亮湖的多样性指数为2~3,为中污型水体,东湖多样性指数大于3,为清洁型水体;东湖和青山湖的均匀度指数大于0.5,为清洁型水体,月亮湖为0.3~0.5,为中污型水体;青山湖和月亮湖的物种丰富度指数为2~3,为轻污型水体,东湖物种丰富度指数大于3,为清洁型水体。

表4 3个湖泊浮游动物的多样性指数、均匀度指数和物种丰富度指数与水质评价

Tab.4 Water quality assessment based on Shannon-Wiener index(H'), Pielon evenness index(J) and species richness index(D) of zooplankton in the three urban lakes

指数与水质评价	东湖	青山湖	月亮湖
H'	3.61	2.93	2.18
水质评价	清洁	中污	中污
J	0.78	0.57	0.44
水质评价	清洁	清洁	中污
D	3.69	2.84	2.35
水质评价	清洁	轻污	轻污

根据 Sladeczek (1983) 对轮虫进行污染等级的分类方法及湖泊的富营养化程度判断标准, 月亮湖臂尾轮虫种类数与异尾轮虫种类数比值 (Q) 为 1.333, 介于 1 和 2 之间, 水质为中富营养型; 青山湖的 Q 值为 0.8, 小于 1, 水质为寡营养型; 东湖仅采集到 2 种臂尾轮虫, 没采集到异尾轮虫, 未进行湖泊营养程度评价。

3 讨论

3.1 浮游动物的群落结构特征

本次研究发现, 南昌市城区内个湖泊浮游动物的种类、密度和生物量均具有明显差异。在 3 个湖泊均出现的种类仅有 11 种 (占总数的 19.30%) ; 且密度和生物量之间存在显著差异, 青山湖和月亮湖均极显著高于东湖 ($P < 0.001$)。多维尺度分析结果也表明, 3 个湖泊的浮游动物群落结构差异显著 ($P < 0.05$), 明显区分为 3 个群落 (图 4), 此结果表明浮游动物存在空间分布异质性 (Fernández-Rosado & Lucena, 2001)。

有研究认为轮虫种类和数量的多少与水体酸碱度有重要关系 (Metchell, 1992); 在 pH 7.0 以上的弱碱性水体中, 轮虫的种类较少, 但个体数量往往很高 (王家楫, 1961)。本研究采集到的轮虫多为适应弱碱性环境的臂尾轮虫、晶囊轮虫及三肢轮虫 (表 1), 同时还发现 3 个湖泊的 pH 值均在 8.0 以上, 该结果证明了弱碱性水体中轮虫种类数少、密度高的观点。浮游动物百分比组成结果显示, 城市湖泊中轮虫数量占绝对优势 (图 3), 且其密度显著高于其他浮游动物类群 (表 2), 可见南昌市区部分湖泊的浮游动物由于受水体污染等因素的影响表现出趋于小型化的特征。

3.2 环境因子对浮游动物群落结构的影响

研究表明, 水温、溶解氧、叶绿素 a 浓度、pH 和盐度等是影响浮游动物种类组成、数量变化和群落结构的环境因子, 也是影响其分布的重要因素 (林青和由文辉, 2013)。水温是影响浮游动物生长、发育、群落组成和数量变化极为重要的环境因子, 也是影响其水平分布的一个重要因素 (陈光荣等, 2010), 温度会影响浮游动物种类和丰度的时空变化, 促使优势种的更替 (Fulton, 1983)。本研究在同一时期进行, 气温差异不大, 由于 3 个湖泊水体大小存在显著差异, 面积最大的青山湖比热容较大, 水温变化比东湖和月亮湖小, 因此导致 3 个湖泊的实测水温具有明显差异 (图 2)。3 个湖泊浮游动物个体

数与水环境因子典型对应分析中, 蒙特卡罗检验发现水温对城市湖泊浮游动物密度具有相当程度的影响 ($P = 0.06$)。Zimmermann (1997) 研究发现, 叶绿素 a 浓度降低可导致轮虫密度降低; 周淑婵等 (2006) 认为叶绿素 a 浓度对长江口潮间带潮沟中浮游动物群落结构的季节演变具有重要影响; 林青和由文辉 (2013) 报道浮游动物密度与叶绿素 a 浓度具有显著正相关关系; 本研究结果与前期报道一致。

统计分析表明, 叶绿素 a 浓度对城市湖泊浮游动物的密度具有极显著影响 ($P < 0.01$), 优势物种萼花臂尾轮虫和裂足臂尾轮虫与叶绿素 a 浓度呈正相关关系。水体的 pH 值对浮游动物的分布也具有重要影响 (王金秋等, 1997); 浮游动物密度与 pH 呈极显著负相关 (林青和由文辉, 2013); 但本研究发现, 城市湖泊的浮游动物密度与 pH 值的相关性不显著 ($P > 0.05$), 原因可能在于本研究的 3 个城市湖泊水体均呈弱碱性 (8.23 ~ 9.17), pH 值无显著差异 (图 2)。浊度直接关系到水体的初级生产力, 浮游植物密度越高, 水体的浊度也越高; 浮游植物密度的变化可以通过食源的改变直接影响植食性浮游动物的数量, 同时可以通过密度变化带来的浊度改变而间接影响浮游动物的密度。本研究发现城市湖泊浊度变化对浮游动物密度有极显著影响 ($P < 0.01$), 优势物种卜氏晶囊轮虫与水体浊度呈显著负相关关系 (图 5)。

3.3 浮游动物多样性指数与水质评价

近年来, 水质评价的方法和指标越来越多, 因此要准确评价某一水体的受污染状况, 需要采纳多种方法和指标进行综合比较方能全面。浮游动物中的轮虫对水质变化敏感, 能较为迅速地反应环境的变化, 相对易于采集, 被认为是较好的指示生物 (Duggan et al, 2001; 周淑婵等, 2006)。Maemets (1983) 指出轮虫可以分为 3 类主要的指示动物群, 即贫 - 中营养、中 - 富营养和富营养湖泊种类。本研究在南昌 3 个城市湖泊发现的常见种类臂尾轮虫、异尾轮虫、晶囊轮虫均为富营养水体的指示种类 (王家楫, 1961)。对湖北武汉东湖浮游动物的研究发现, 轮虫种类数随水体富营养化的加剧而减少, 其数量随水体富营养化程度的加剧而增加 (刘健康, 1990; 杨宇峰和黄祥飞, 1994); 即当水体从中营养型向超富营养型过度时, 浮游动物的多样性降低, 但其密度和生物量却逐渐增加, 并呈现小型化的趋势 (黄祥飞等, 1984)。

本研究根据浮游动物多样性指数并参考 Sladeczek(1983)对轮虫作为指示物种的划分方法,判断东湖和青山湖富营养化程度低于月亮湖,原因在于东湖和青山湖是城市休闲旅游景区内的湖泊,管理部门每年夏季高温季节会向湖内投放硝化细菌等净水剂和生物有机高效分解素;此外,本研究发现的5种轮虫优势种中的4种为水质污染指示种(任治安,2012),说明调查的3个城市湖泊由于受到人类活动干扰,水质已经受到了不同程度的污染。

参考文献

陈光荣,雷泽湘,谭镇,等. 2010. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响[J]. 水生态学杂志, 3(4): 28-32.

管越强,郭云学,李博,等. 2007. 拒马河浮游植物群落特征及水质评价[J]. 河北大学学报:自然科学版,27(4): 401-406.

黄祥飞,陈雪梅,伍焯田,等. 1984. 武汉东湖浮游动物数量与生物量变动的研究[J]. 水生生物学集刊, 8(3): 345-358.

蒋燮治,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.

李超伦,王克. 2002. 植食性浮游桡足类摄食生态学研究进展[J]. 生态学报, 22(4): 593-596.

林青,由文辉. 2013. 滴水湖后生浮游动物群落结构研究及水质评价[J]. 长江流域资源与环境, 22(Z1): 23-29.

刘健康. 1990. 东湖生态研究(一)[M]. 北京:科学出版社.

刘军,林叔忠,胡和平. 2007. 水源水库富营养化问题及生态治理途径[J]. 水利渔业, 27(5): 75-77.

马经安,李红清. 2002. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 11(6): 575-578.

任治安. 2012. 滴水湖及其引水河道主要浮游动物群落研究[D]. 上海:上海海洋大学:14-15.

王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京:科学出版社.

王金秋,李德尚,罗一兵,等. 1997. pH值对蕲花臂尾轮虫种群增长及繁殖的影响[J]. 应用生态学报, 8(4): 435-438.

王新华,王宏鹏,纪炳纯. 2008. 天津市团泊水库浮游动物研究与水环境评价[J]. 四川动物, 27(5): 807-809.

许木启. 1996. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学报, 20(3): 212-220.

杨长铭,何德华,王春生. 1998. 浙江省海岛海域环境生态特征 I. 浮游动物种类优势度与水体生态性质[J]. 海洋环境科学, 17(4): 48-53.

杨宇峰,黄祥飞. 1994. 武汉东湖浮游动物群落结构研究[J]. 应用生态学报, 5(3): 319-324.

张冬融,徐佳奕,徐兆礼,等. 2014. 杭州湾南岸海域春秋季

浮游动物分布特征与主要环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 33(8): 2115-2123.

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:358-371.

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:301-418.

周淑婵,黄祥飞,唐涛,等. 2006. 香溪河库湾轮虫现状及水质评价初探[J]. 水生生物学报, 30(1): 52-57.

Dalpadado P, Ellertsen B, Melle W, et al. 2000. Food and feeding conditions of Norwegian spring-spawning herring (*Clupea harengus*) through its feeding migrations [J]. *Journal of Marine Science*, 57:843-857.

Duggan I C, Green J D, Shiel R J. 2001. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand and their potential use as bioindicators of lake trophic state[J]. *Hydrobiologia*, 446/447(1): 155-164.

Fernández-Rosado M J, Lucena J. 2001. Space-time heterogeneities of the zooplankton distribution in La Concepción reservoir (Istún, Málaga, Spain) [J]. *Hydrobiologia*, 455: 157-170.

Fulton R S. 1983. Interactive effects of temperature and predation on an estuarine zooplankton community[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 72(1): 67-81.

Hessen D O, Faafeng B A, Smith V H, et al. 2006. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes[J]. *Ecology*, 87(2): 433-443.

Maemets A. 1983. Rotifers as indicators of lake type in Estonia [J]. *Hydrobiologia*, 104: 357-361.

Metchell S A. 1992. The effect of pH on *Brachionus calyciflorus* Palla (Rotifera) [J]. *Hydrobiologia*, 245: 87-93.

Porri F, McQuaid C D, Froneman W P. 2007. Spatio-temporal variability of small copepods (especially *Oithona plumifera*) in shallow nearshore water off the south coast of South Africa[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72(4): 711-720.

Sladeczek V. 1983. Rotifers as indicators of water quality[J]. *Hydrobiologia*, 100: 169-201.

Wu Z B, Liu A F, Zhang S Y, et al. 2008. Short-term effects of drawing water for connectivity of rivers and lakes on zooplankton community structure[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 20: 419-423.

Zimmermann H. 1997. The microbial community on aggregates in the Elbe estuary[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 13: 37-46.

Characterization of Summer Zooplankton (Rotifer and Crustacean) Community and Water Quality Assessment of Three Typical Nanchang Lakes

WEN Yuan, QIN Hai-ming, HU Xu-ren, HU Huo-ling

(Center of Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China)

Abstract: With continuing development, urban lakes account for an increasing proportion of urban green space and serve several important functions including climate regulation, increased bio-diversity, flood control, and recreation. However, domestic sewage discharge and other anthropogenic activities have caused severe eutrophication in urban lakes. Changes in the water environment have significantly influenced the zooplankton community in these lakes. Monitoring the zooplankton community dynamics and variation in species diversity provides a meaningful evaluation of the water environment. In this study, the zooplankton community was characterised in three urban lakes in Nanchang during the summer of 2013, with emphasis on the density, abundance and diversity index of the rotifer and crustacean communities. The relationship between zooplankton distribution and environmental factors were analyzed through multidimensional scaling analysis and canonical correspondence analysis. The pollution status of the three urban lakes was evaluated based on the Shannon-Wiener index, Pielou evenness index and species richness index of zooplankton. Zooplankton sampling was conducted in the open area of Donghu Lake, Qingshan Lake and Yueliang Lake on July 25, July 26 and August 10 of 2013, with three sampling sites in each lake and samples collected in triplicate at each site. Zooplankton were collected with a 2 L plankton sampler and filtered with a No. 25 plankton net. The samples were then fixed and preserved with a mixture of Lugol's solution and 4% formalin for species identification and counting. The physiochemical parameters of the lakes were determined in situ with a multi-parameter water quality analyzer and included water temperature, pH, dissolved oxygen, chlorophyll-a and turbidity. Results show that rotifers dominated the three urban lakes and the dominant species were *Brachionus forficula*, *Brachionus diversicornis*, *Brachionus calyciflorus*, Copepod nauplii and *Asplanchna brightwelli* (dominance value $Y > 0.02$). The community structure was significantly different among the three lakes ($P < 0.05$), characterized by three obvious groups: Qingshan Lake community, Donghu Lake community and Yueliang Lake community. Canonical correspondence analysis shows that chlorophyll-a, turbidity and dissolved oxygen were the primary factors affecting the distribution of zooplankton ($P < 0.05$). Diversity index of zooplankton and pollution indicator species of Rotifera reveal that Donghu Lake is clean, Qingshan Lake is clean to moderately polluted and Yueliang Lake is lightly to moderately polluted. Overall, Donghu Lake and Qingshan Lake are oligotrophic and Yueliang Lake is mesotrophic.

Key words: zooplankton; community structure; water quality assessment; urban lakes