

南昌月亮湖夏季浮游动物昼夜垂直分布及迁移特征

胡旭仁¹, 聂雪¹, 兰志春^{1,2,3}, 金斌松^{1,2,3}, 秦海明^{1,2,3}

1. 南昌大学生命科学研究院流域生态研究所和生命科学学院, 南昌 330031;
2. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031;
3. 江西鄱阳湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 南昌 330038)

摘要:2013年8月1日19:00至2日18:00,通过间隔1h的定量采样,研究南昌市典型城市湖泊月亮湖中浮游动物(轮虫、枝角类和桡足类)的昼夜垂直分布规律。结果表明,月亮湖共发现浮游动物20种,其中轮虫16种,枝角类1种,桡足类3种;剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、桡足类无节幼体(Copepoda Nauplii)和迈氏三肢轮虫(*Filinia maior*)为优势物种,分别占总捕获数量的48.27%、15.75%和11.11%。浮游动物主要类群和优势物种的Morisita指数均大于1,说明月亮湖中的浮游动物群落呈聚集分布。密度垂直分布和平均滞留深度分析结果显示,浮游动物垂直分布昼夜差异明显,夜间(19:00-05:00),浮游动物先聚集于月亮湖中层,01:00后逐渐迁移到表层;白天(06:00-18:00),浮游动物逐渐从表层向中层和底层迁移;主要类群中轮虫、枝角类和桡足类的迁移均表现为夜间上升、白天下降、傍晚再上升,轮虫和桡足类的迁移幅度小于枝角类。优势种剪形臂尾轮虫和无节幼体的昼夜垂直迁移表现为夜升昼降,至傍晚再上升;迈氏三肢轮虫昼夜垂直分布差异显著($P < 0.05$),但昼夜垂直迁移活动不明显。相关分析表明,水温、pH值和溶解氧对月亮湖浮游动物的垂直分布和迁移活动有显著影响。

关键词:浮游动物;垂直分布;迁移;月亮湖

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)05-0023-10

昼夜垂直迁移(Diel Vertical Migration, DVM)是浮游动物昼夜活动的一个普遍现象,特别是温带地区的水体在夏季常发生分层现象,不同水层的环境因子存在较大差异(董春颖等,2013),浮游动物会在不同水层之间进行垂直运动(刘顺会等,2008)。其昼夜垂直迁移一般表现为3种类型:(1)常规迁移(傍晚上升、拂晓下降);(2)反向迁移(拂晓上升、傍晚下降);(3)晨昏迁移(傍晚和拂晓上升到水体表层、其他时间在深层)(张武昌,2000);其中常规迁移方式报道最多(Han & Straskraba, 1998)。浮游动物的垂直移动不仅有利于其生存、繁衍和扩大分布范围,而且能够促进不同水层物质和能量的交换,改变各水层的理化环境(王先云等,2010);其垂直迁移活动表现为昼夜间不同分

布水层浮游动物丰度的差异(Brierley, 2014);浮游动物昼夜垂直迁移活动取决于自身生态习性,同时又受环境因素的制约(刘晓丹,1991)。因此,同一物种在不同季节的垂直迁移活动存在差异(刘晓丹和王真良,1991;薛俊增等,2011)。

有关浮游动物垂直迁移的原因,一种观点认为其垂直迁移是其主动逃避视觉捕食者的行为(Gliwicz, 1986; Bollens and Frost, 1991);另外一种观点则认为其垂直迁移是为了躲避紫外线的伤害(Rhode et al, 2001; Ma et al, 2013);此外,光驱动假说、能量和资源利用假说等也对浮游动物的垂直迁移活动作出了相应解释(刘顺会等,2008);但目前关于浮游动物昼夜垂直迁移的研究报道主要聚焦于海洋和湖泊中的甲壳类浮游动物(王先云等,2010; Isla et al, 2015; Chew et al, 2015)以及淡水生态系统中的轮虫(孔令惠等,2008; Doulika & Kehayias, 2011)。迄今为止,未见对城市浅水湖泊中浮游动物昼夜垂直分布与迁移的研究报道。

城市湖泊具有防汛排涝、休闲娱乐、调节气候等功能,对于改善城市生态环境具有重要意义(刘军等,2007)。近年来,伴随着城市发展和人口的大量增加,许多含有氮、磷营养盐的生活污水排入城市湖

收稿日期:2015-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(31560133);江西省教育厅青年基金项目(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)。

作者简介:胡旭仁,1992年生,男,硕士,主要从事浮游动物群落生态学研究。E-mail: hxr2015ncu@163.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研究。E-mail: qinhaiming@ncu.edu.cn

泊,直接或间接地导致湖泊水体污染,并加剧了其富营养化程度(彭俊杰等,2004;熊丽黎等,2013)。在污染较严重的城市浅水湖泊中,浮游动物是否存在垂直分布差异和垂直迁移现象?如果存在,其垂直分布和迁移特征如何,主要受哪些因素的影响?本研究选取江西省南昌市小型人工湖泊——月亮湖作为研究地点,探讨城市浅水湖泊中浮游动物的垂直迁移活动特征及其影响因子,以期对城市小型湖泊的生态系统研究及健康评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

月亮湖于2005年经人工修建而成,位于南昌大学校园内,面积约3 hm²,平均水深约2.0 m,最大水深约3.5 m,本研究选择月亮湖中央的1个采样点,采样点处水深为3.0 m。

1.2 采样方法

2013年8月1日19:00至8月2日18:00,在采样点进行浮游动物采集。将水下0.5 m、1.5 m和2.5 m的水层分别定义为表层、中层和底层,在3个水层每隔1 h进行采样,每个水层设置3个采样点作为重复,间隔为5 m。每个采样点的每个水层均使用2 L采水器采集4 L水样,并用25号(64 μm)浮游生物网过滤收集浮游动物样品,过滤后的样品现场使用鲁哥氏液和4%福尔马林溶液固定保存于50 mL塑料标本瓶中。采样的同时,使用多参数水质监测仪(YSI6600V2)测定3个水层的水温、pH值、溶解氧、电导率、叶绿素a浓度和浊度等理化指标。2013年8月1日的日落时分分为19:07,8月2日的日出时分分为05:37,将19:00–05:00定义为夜间,06:00–18:00定义为白天。实验室内使用虎红染色液将样品染色,浮游动物的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)。

1.3 数据分析

1.3.1 浮游动物计数 本研究采用的计数方法为体积抽样法(章宗涉和黄祥飞,1991)。首先把野外采集的样品倒入0.038 mm的不锈钢网筛中清洗掉杂质,使用移液管回收到100 mL容量瓶中并定容到40 mL,缓慢摇匀,使用移液器取5 mL在体视显微镜下进行鉴定计数,最后换算成单位体积个体数,换算公式如下:

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

式中: N 为单位体积(L)水中浮游动物的数量

(个), V 为采样体积(L), V_s 是定容体积(mL)、 V_a 是计数体积(mL), n 为显微镜下统计的个体数。

1.3.2 Morisita 指数计算 本研究采用 Morisita 指数(Morisita Index, MI)检验浮游动物在各水层中的分布情况(Thackeray et al, 2006),计算公式为:

$$MI = n \times (\sum X^2 - \sum X) / [(\sum X)^2 - \sum X] \quad (1)$$

式中: X 为特定水层浮游动物密度, n 为层数。MI指数等于1表示随机分布;小于1表示均匀分布;大于1表示聚集分布。

浮游动物群落的平均滞留深度(Mean residence depth, D)计算公式为:

$$D = \sum (N_i \times D_i) / \sum N_i \quad (2)$$

式中: N_i 为水深 D_i 处浮游动物的密度(Cruz – Pizarro, 1978; 孔令慧等,2010),本文 D_i 取各采集水层的水深中点值(王先云等,2010)。

1.3.3 统计方法 单因子方差分析(One-way ANOVA)用于检验不同水层理化因子及浮游动物密度的差异。皮尔森相关系数分析(Pearson correlation coefficients)用来检验浮游动物密度与水环境因子之间的相关关系, $P < 0.05$ 表示显著相关。数据统计分析在Statistic 7.0中进行,用于方差分析的数据在统计前进行 $\lg(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 水体理化因子昼夜变化

月亮湖的水温随水深增加而逐渐降低,表层和中层的水温显著高于底层($P < 0.05$,图1)。3个水层的水温昼夜变化规律相似,21:00水温下降,04:00–06:00水温最低,08:00水温开始上升,各水层水温在15:00达到一天的最高值,采样期间一天内水温变化范围是28.3~36.0℃。不同水层的pH、浊度和溶解氧的分布特征和变化趋势与水温大致相似。pH值、浊度和溶解氧的变化范围分别为7.18~8.88、10.6~37.6 NTU和3.32~9.55 mg/L。表层和中层的电导率显著低于底层($P < 0.05$),03:00底层电导率骤然升高,其它时刻3个水层的电导率变化不大,电导率变化范围为2.8~4.8 mS/cm。

2.2 浮游动物种类组成及密度

调查期间在月亮湖发现浮游动物共20种,隶属9科、14属(表1);其中轮虫16种,为6科、10属;桡足类3种,为2科、3属;枝角类1科、1属、1种。桡足类无节幼体未鉴定到物种水平,作为一个种类进行统计。剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、桡足

类无节幼体 (Copepoda Nauplii) 和迈氏三肢轮虫 (*Filinia maior*) 是优势物种, 分别占总数量的 48.27%、15.75% 和 11.11%。

月亮湖浮游动物的总密度仅在中层具有显著的

昼夜差异 ($t = 2.18, P = 0.04$), 夜间显著高于白天。浮游动物的最高密度出现在 22:00 的中层, 为 1 087 个/L, 最低出现在 00:00 的底层, 密度值仅为 374 个/L。

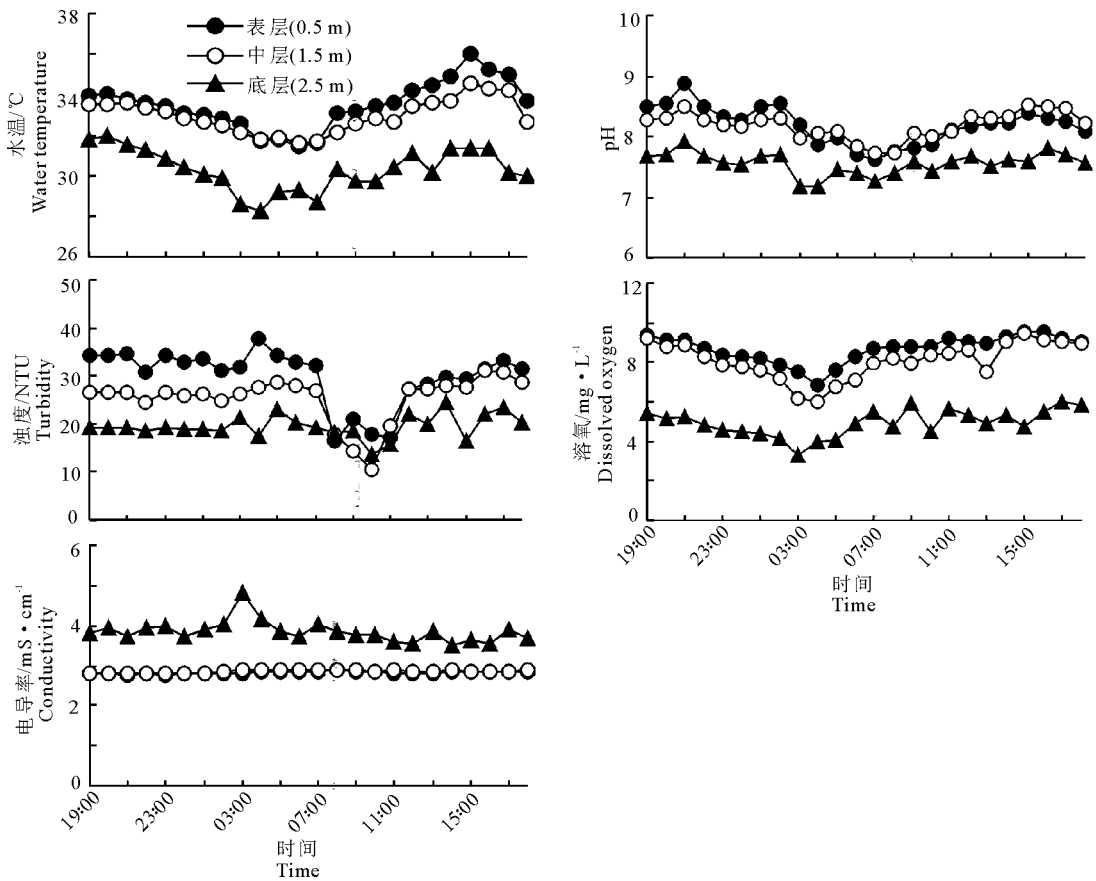


图 1 月亮湖不同水层理化因子的昼夜变化

Fig. 1 Diel variation of physicochemical parameters at different depths in Yueliang Lake

2.3 浮游动物昼夜垂直分布与迁移特征

2.3.1 昼夜垂直分布 在一天的 24 个时刻, 除枝角类在 08:00 和迈氏三肢轮虫在 19:00 的 Morisita 指数小于 1, 其他类群和各优势物种的 Morisita 指数均大于 1 (表 2), 表明月亮湖中的浮游动物多呈聚集分布, 且在不同时刻聚集分布于不同水层 (图 2)。

19:00~02:00, 轮虫和桡足类在中层的密度明显高于表层和底层 (图 3-a, c); 03:00~12:00, 表层密度多高于中层; 13:00~18:00, 中层密度高于表层和底层。除 20:00 外, 枝角类在 19:00~02:00 的分布与轮虫和桡足类相似 (图 3-b), 此时间段枝角类聚集分布于中层; 03:00~09:00, 多数时间枝角类表层密度高于中层和底层; 10:00~18:00, 枝角类聚集分布于中下水层, 在 12:00、14:00 和 15:00, 底层的密度高于表层和

中层。

19:00~01:00, 剪形臂尾轮虫聚集分布于中层 (图 3-d); 02:00~14:00, 聚集分布于表层; 15:00~17:00, 中层的密度高于表层和底层。桡足类无节幼体在 19:00~01:00 的垂直分布与剪形臂尾轮虫一致 (图 3-e); 02:00~12:00, 无节幼体多聚集分布于表层; 13:00~18:00, 无节幼体先聚集于中层和底层, 后在表层聚集。迈氏三肢轮虫的密度垂直分布差异显著 ($P < 0.05$), 但无明显的时间规律 (图 3-f, 图 4-b)。

2.3.2 昼夜垂直迁移 月亮湖浮游动物的昼夜垂直迁移表现为傍晚上升、白天下降、至第 2 天傍晚再次上升 (图 4)。不同类群的迁移幅度存在差异, 轮虫迁移幅度 (升 0.38 m、降 0.33 m) 最小, 桡足类次之 (升 0.41m、降 0.41m), 枝角类最大 (升 0.57 m、降 0.81 m)。

表1 夏季月亮湖浮游动物种类组成、单次捕获个体数、百分比及排序

Tab.1 Species composition, number*, percentage and rank of zooplankton during the summer in Yueliang Lake				
	种 类	个体数	百分比/%	排序
轮虫 Rotifera				
臂尾轮科 Brachionidae				
	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	46	3.40	6
	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	651	48.27	1
	蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	2	0.12	15
	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	2	0.16	15
	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	1	0.03	18
	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	4	0.23	13
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	35	2.61	9
晶囊轮科 Asplanchnidae				
	卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwel</i>	47	3.46	5
椎轮科 Notommatidae				
	污前翼轮虫 <i>Proales sordida</i>	1	0.09	18
	小巨头轮虫 <i>Cephalodella exigua</i>	2	0.16	15
	尾棘巨头轮虫 <i>Cephalodella sterea</i>	6	0.47	11
	高髯轮虫 <i>Scaridium longicaudum</i>	1	0.01	21
腹尾轮科 Gastropodidae				
	舞跃无柄轮虫 <i>Ascomorpha saltans</i>	4	0.26	13
疣毛轮科 Synchaetidae				
	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	36	2.63	8
镜轮科 Testudinellidae				
	沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>	6	0.45	11
	迈氏三肢轮虫 <i>Filinia maior</i>	150	11.11	3
枝角类 Cladocera				
仙达溞科 Sididae				
	短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	45	3.35	7
桡足类 Copepoda				
	无节幼体 Copepods nauplii	212	15.75	2
胸刺水蚤科 Centropagidae				
	汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	1	0.02	18
剑水蚤科 Cyclopidae				
	跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	27	2.04	10
	等刺温剑水蚤 <i>Thermocyclops kawamurai</i>	73	5.39	4

注：* 单次捕获个体数为3个水层216个样品的平均值。

Note: * The average value of 216 samples from 3 water layers.

不同类群的迁移活动存在明显差异。随时间推移,夜间(20:00–07:00)各类群均表现逐渐上升。白天轮虫07:00–13:00先下降($D=1.29\text{ m}$),后上升;枝角类从09:00开始下降,至15:00达最深($D=1.63\text{ m}$),随后波动上升;桡足类从11:00开始下降,至15:00($D=1.38\text{ m}$)后上升;剪形臂尾轮虫的昼夜迁移呈夜升昼降的趋势(图4-b),在19:00~02:00主要聚集于中层,03:00–09:00逐渐由中层向表层迁移,随后由表层向中层和底层迁移;无节幼体在00:00开始向表层迁移,至11:00开始下降,到15:00达最深水层($D=1.44\text{ m}$),随后再上升;迈氏三肢轮虫在夜间(20:00–07:00)升降活动频繁,08:00–18:00逐渐下降,至13:00降至最深($D=1.56\text{ m}$)。

2.4 水环境因子与浮游动物密度的相关分析

不同水层环境因子与浮游动物密度的相关性分析见表3。

在表层,浮游动物的总密度、轮虫、桡足类、枝角类、优势物种剪形臂尾轮虫和桡足类无节幼体的密度均与水温显著负相关($P<0.05$)。浮游动物的总密度、轮虫、桡足类、剪形臂尾轮虫和无节幼体的密度与水体的pH值也具有显著负相关关系($P<0.05$)。溶解氧含量对浮游动物总密度、桡足类、枝角类和无节幼体密度有显著的负影响($P<0.05$);而电导率对浮游动物的总密度、桡足类和无节幼体的密度具有显著正影响($P<0.05$);除枝角类与叶绿素浓度具有显著($P<0.05$)相关性外,其它类群和优势物种的密度与叶绿素浓度无显著相关性。

表 2 月亮湖浮游动物重要类群及优势物种的 Morisita 指数

Tab.2 Morisita index of the primary zooplankton groups and dominant species in Yueliang Lake

日 期	时间	轮虫	枝角类	桡足类	剪形臂尾轮虫	迈氏三肢轮虫	无节幼体
2013 -08 -01	19 : 00	1.06	1.00	1.06	1.06	0.99	1.05
	20 : 00	1.01	1.11	1.02	1.03	1.03	1.04
	21 : 00	1.02	1.03	1.01	1.02	1.01	1.00
	22 : 00	1.11	1.02	1.19	1.12	1.06	1.25
	23 : 00	1.03	1.04	1.00	1.06	1.01	1.02
2013 -08 -02	00 : 00	1.12	1.06	1.07	1.14	1.05	1.03
	01 : 00	1.01	1.15	1.00	1.00	1.06	1.00
	02 : 00	1.01	1.07	1.05	1.00	1.05	1.05
	03 : 00	1.08	1.03	1.10	1.16	1.00	1.15
	04 : 00	1.04	1.13	1.09	1.07	1.34	1.07
	05 : 00	1.08	1.06	1.11	1.09	1.09	1.16
	06 : 00	1.01	1.00	1.01	1.02	1.21	1.09
	07 : 00	1.14	1.16	1.01	1.18	1.01	1.04
	08 : 00	1.05	0.98	1.01	1.05	1.01	1.03
	09 : 00	1.05	1.24	1.05	1.10	1.16	1.04
	10 : 00	1.01	1.32	1.02	1.01	1.07	1.01
	11 : 00	1.05	1.24	1.12	1.12	1.03	1.15
	12 : 00	1.01	1.03	1.00	1.06	1.07	1.00
	13 : 00	1.01	1.04	1.01	1.05	1.35	1.01
	14 : 00	1.00	1.20	1.02	1.00	1.05	1.02
	15 : 00	1.02	1.14	1.08	1.06	1.00	1.09
	16 : 00	1.00	1.00	1.02	1.01	1.02	1.00
	17 : 00	1.03	1.21	1.03	1.05	1.07	1.03
	18 : 00	1.02	1.17	1.03	1.15	1.11	1.03

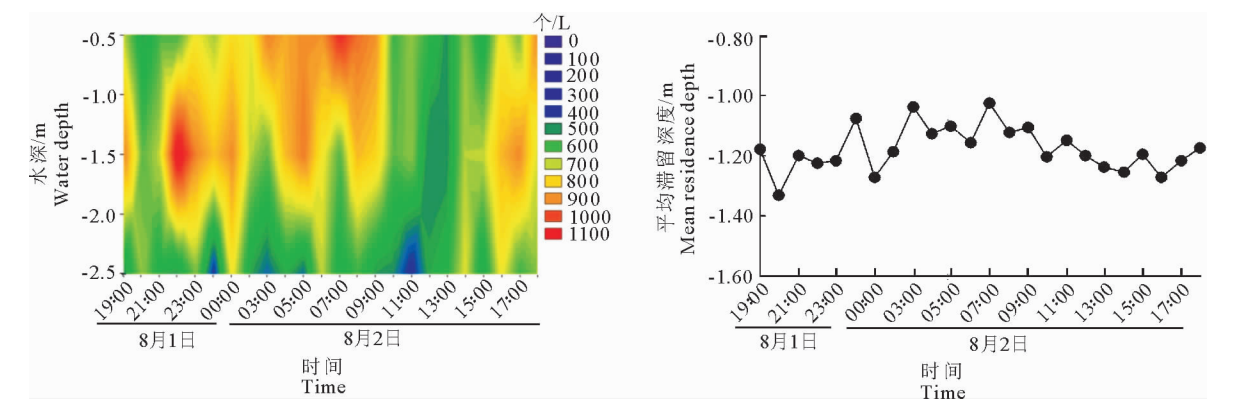


图 2 月亮湖浮游动物总密度和平均滞留深度的昼夜垂直分布

Fig.2 Diel vertical distribution and mean residence depth (*D* value) of zooplankton in Yueliang Lake

在中层,浮游动物的总密度、轮虫、枝角类和剪形臂尾轮虫的密度与叶绿素浓度显著正相关 ($P<0.05$)。电导率与桡足类的密度、浊度和溶解氧与枝角类的密度、电导率与剪形臂尾轮虫的密度均显著正相关($P<0.05$)。

在底层,除了浊度与轮虫和迈氏三肢轮虫的密度以及叶绿素 a 浓度与枝角类的密度显著正相关 ($P<0.05$) 外,浮游动物的总密度及其他类群和优势物种的密度与水环境因子的相关性不显著。

3 讨论

3.1 城市湖泊中浮游动物垂直迁移模式

面对各种环境压力,浮游动物通过垂直迁移策略将种群存活率最大化 (Han & Straskraba, 2001)。许多研究报道,轮虫多分布于较固定的水层,而枝角类和桡足类具有不同的垂直迁移模式 (Mavuti, 1992; Semyalo et al, 2009; Doulka & Kehayias, 2011)。本研究发现,浅水城市湖泊月亮湖中,浮游

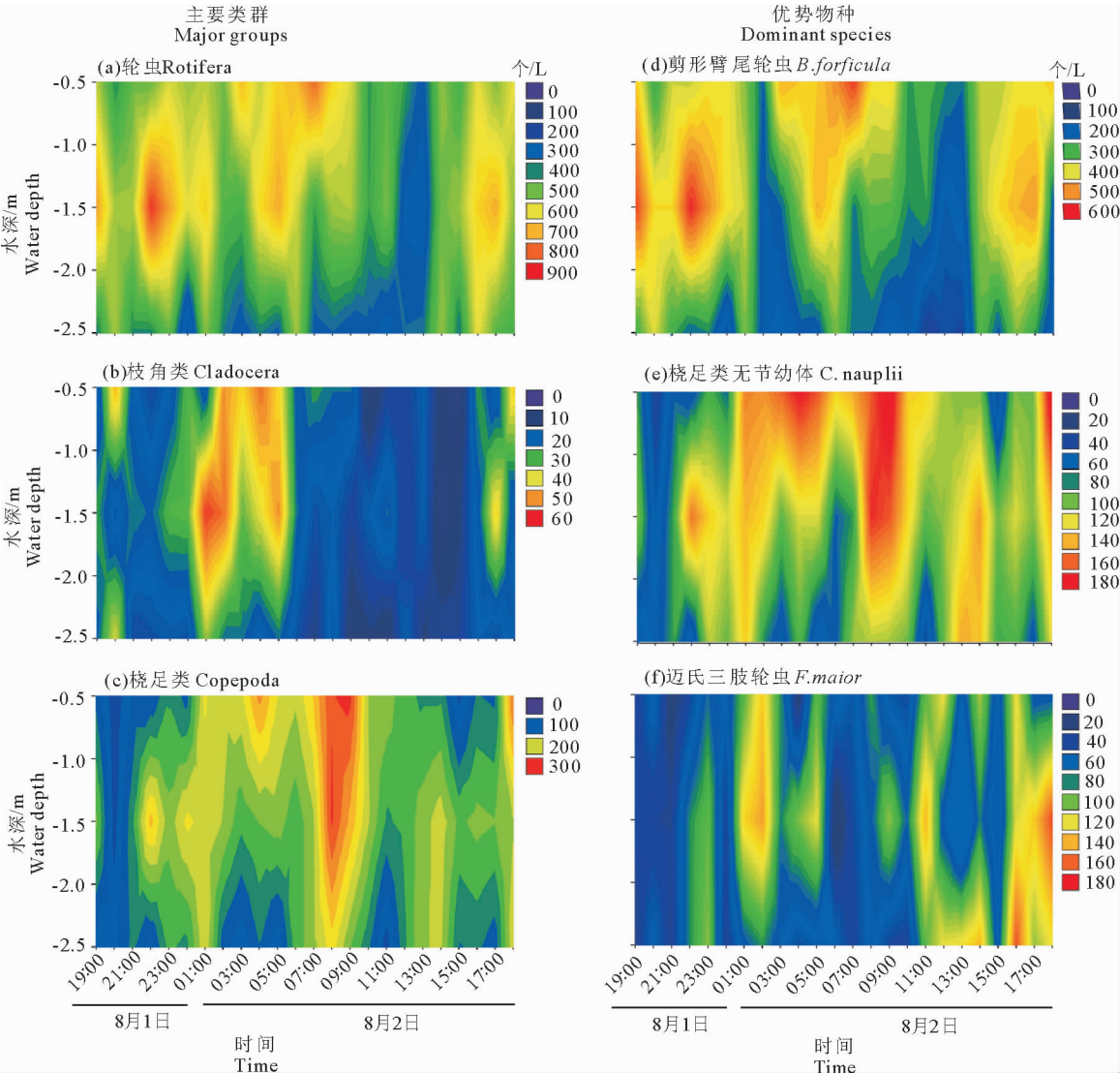


图3 月亮湖浮游动物主要类群和优势物种密度的昼夜垂直分布

Fig.3 Density diel vertical distribution of zooplankton major groups and dominant species in Yueliang Lake

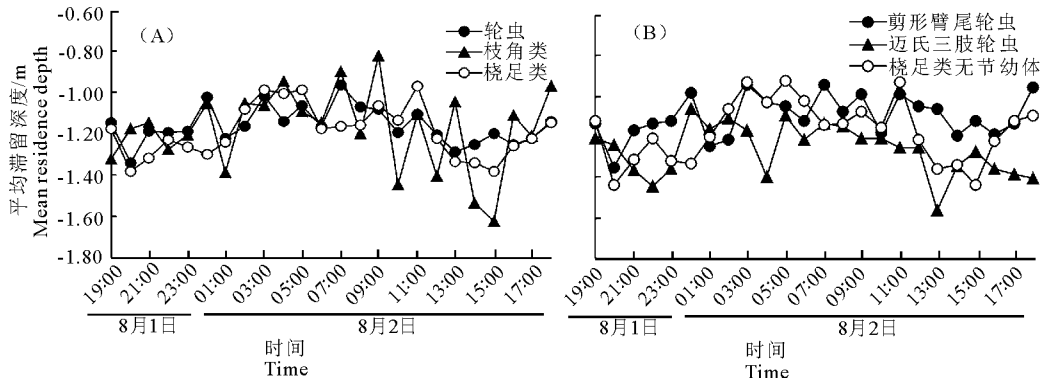


图4 月亮湖浮游动物主要类群(A)和优势物种(B)平均滞留深度的昼夜垂直分布

Fig.4 Diel vertical distribution of the mean residence value for the primary zooplankton groups and dominant species in Yueliang Lake

动物存在明显的昼夜垂直迁移现象,在不同水层呈聚集分布的特征,夜间主要分布在水体的表层和中层,白天主要分布于中层和底层(图2,图3)。在01:00之后开始向表层迁移,09:00之后逐渐向中层和底层迁移,不符合“傍晚上升,拂晓下降”的常规迁移模式,其分布和迁移特征与孔令惠等(2009)

表 3 环境因子与浮游动物密度的皮尔森相关性分析系数

Tab.3 Pearson correlation coefficients between environmental factors and zooplankton density

浮游 动物	水层	水温/ ℃	pH	浊度/ NTU	叶绿素 a/ μg · L ⁻¹	溶氧/ mg · L ⁻¹	电导/ μS · cm ⁻¹	样品数/ 个	
总密度	表层	-0.709	-0.636	0.019	0.183	-0.490	0.438	24	
	中层	-0.022	0.053	0.092	0.496	-0.022	-0.166	24	
	底层	0.247	0.276	0.396	-0.013	0.231	-0.226	24	
主要类群	轮虫	表层	-0.614	-0.508	0.181	0.250	-0.368	0.342	24
		中层	0.076	0.162	0.210	0.562	0.053	-0.243	24
		底层	0.335	0.369	0.417	0.097	0.221	-0.195	24
	枝角类	表层	-0.519	-0.056	0.440	0.573	-0.632	-0.108	24
		中层	-0.317	0.043	0.205	0.632	-0.530	-0.330	24
		底层	0.127	0.108	0.216	0.615	-0.358	0.331	24
	桡足类	表层	-0.603	-0.704	-0.351	-0.095	-0.447	0.532	24
		中层	-0.222	-0.348	-0.414	-0.207	-0.074	0.290	24
		底层	-0.099	-0.093	0.093	-0.361	0.199	-0.236	24
优势物种	剪形臂尾 轮虫	表层	-0.438	-0.451	0.313	0.285	-0.220	0.300	24
		中层	0.350	0.307	0.270	0.408	0.278	-0.417	24
		底层	0.351	0.306	0.236	0.340	0.094	-0.067	24
	桡足类	表层	-0.592	-0.628	-0.249	0.000	-0.521	0.440	24
		中层	-0.080	-0.097	-0.399	-0.205	-0.040	0.248	24
		底层	-0.049	-0.027	0.063	-0.346	0.074	-0.216	24
	无节幼体	表层	0.144	0.046	-0.162	-0.234	0.037	0.117	24
		中层	-0.107	0.151	0.002	0.169	-0.069	0.247	24
		底层	0.280	0.335	0.507	-0.350	0.310	-0.323	24

注:加粗数据表示具有显著相关性 ($P < 0.05$)。
Note: Significant correlations are shown in bold($P < 0.05$).

报道的轮虫垂直迁移活动特征一致。

有研究发现,轮虫和无节幼体等小型浮游动物不进行垂直迁移 (Semyalo et al, 2009);另有报道指出,轮虫在近水体表层处具有最大密度和生物量 (Hu et al, 2014)。本研究发现,轮虫主要分布在月亮湖的表层和中层。无节幼体由于具有趋光性,一般栖息于表层 (郑重, 1964; 刘晓丹和王真良, 1991), 月亮湖中无节幼体占桡足类总数量的 67.9%, 因此桡足类的分布与无节幼体的分布一致, 主要聚集于表层和中层。在千岛湖,短尾秀体蚤主要分布表层和中层,迁移幅度为 3.5 m 左右,是迁移不显著的物种 (王先云等,2010);而香溪河一些轮虫的迁移幅度可达 4 m (孔令惠等,2009)。本研究发现,月亮湖的枝角类 (短尾秀体蚤) 在夜间主要分布在表层和中层,而在白天主要分布于中层和底层,垂直迁移幅度较小 (0.81 m);而轮虫和桡足类的迁移幅度不超过 0.5 m。城市湖泊浮游动物垂直迁移幅度较小的原因,一方面在于其迁移幅度受最大水深限制;另一方面在于城市湖泊不同水层水体理化性质的显著差异 (图 1),这种显著的水环境差异是限制浮游动物垂直迁移的重要因素。

3.2 理化因子对浮游动物垂直分布及迁移的影响

浮游生物昼夜垂直移动是一个多因子调控现象

(Han & Straskraba, 1998; Liu et al, 2003; Liu et al, 2006)。温度是直接和间接影响各物种垂直分布和迁移最重要的非生物因素 (Doulka & Kehayias, 2011),一定程度上影响浮游动物的垂直迁移 (Han & Straskraba, 2001)。

本研究发现,水温对浮游动物的垂直分布具有明显影响,在水体表层,浮游动物的密度与水温呈显著负相关关系 ($P < 0.05$,表 3)。主要原因在于月亮湖水容积较小,水温易受环境变化的影响,夏季气温较高,导致月亮湖水温的昼夜变化较大 (图 1),为了避免较高水温造成的伤害,浮游动物选择在白天下降到较深水层,夜间水温降低时迁移至较浅水层 (图 2,图 3)。

pH 值是影响浮游动物分布的重要影响因子 (秦海明,2011);贫营养的轮虫指示种类一般分布在 pH 为 7.0 或略低的水体中,而指示富营养的轮虫多分布于高于 pH 7.0 的水体中 (Berzins & Pejler, 1987)。本研究发现,pH 对轮虫和桡足类分布具有显著影响 ($P < 0.05$,表 3),在表层水体中,优势物种剪形臂尾轮虫和桡足类无节幼体与 pH 呈显著负相关关系,而迈氏三肢轮虫与 pH 呈正相关关系,说明不同的浮游动物对 pH 变化具有不同的响应。

溶解氧也是限制浮游动物垂直分布和迁移的重要环境因子(孔令惠等,2009)。Heisey & Porter (1977)认为溶解氧浓度较低时浮游动物的摄食效率会显著降低;Baiao & Boavida (2000)研究发现,Meimoa水库中轮虫出现的溶解氧下限是4 mg/L。本研究发现,月亮湖表层和中层溶解氧浓度显著高于底层($P < 0.05$,图1),底层较低的溶氧量可能是导致轮虫主要分布在表层和中层的主要原因。

Soto & De los Rios (2006)研究指出,溞类的丰度与电导呈负相关关系。本研究的结果并不支持这种观点,在月亮湖表层浮游动物的密度与电导呈正相关关系(表3)。Soto & De los Rios (2006)还认为溞类的丰度与叶绿素a浓度存在正相关关系,与研究的结果一致。月亮湖3个水层中的叶绿素a浓度均与短尾秀体溞的密度显著正相关($P < 0.05$,表3),原因在于短尾秀体溞是植食性种类。因此其食物资源藻类的垂直分布差异对其垂直迁移具有直接影响。

有研究认为光照强度的昼夜变化可以激发浮游动物的垂直迁移运动(Stewart & George, 1987);光照增强时轮虫向下运动,光照减弱时轮虫向上运动(孔令惠等,2009)。本研究未进行光照强度的测定,但浊度与浮游动物相关分析表明,浊度与枝角类和轮虫呈正相关关系,而与桡足类呈负相关关系。原因可能在于夏季浮游植物密度的变化导致月亮湖水体浊度产生差异,改变了不同水层的水体透明度,进而影响了浮游动物的垂直分布。

浮游动物昼夜垂直迁移是一个复杂的适应和调节过程,除上述影响因素外,浮游动物自身的生物学特性和水平迁移活动也是导致其垂直分布差异的重要因素,其运动能力的差异、生活周期的不同、生殖活动的差异和水平分布差异均影响其垂直迁移活动(Uye et al, 1990; 李秀玉等,2012; Ma et al, 2013);此外,国外学者研究认为,光密度变化(Ringelberg, 1995; Cohen & Forward, 2009)或逃避视觉捕食者(Kozhov, 1963; Sainmont et al, 2013)也是引起浮游动物垂直迁移的重要因素。

本研究主要从水理化因子对浮游动物的垂直迁移影响角度进行了分析,倘若探索城市湖泊中浮游动物的食物资源、光密度变化和捕食压力是否对其垂直迁移活动有影响,尚需要进一步的实验验证方可定论。

参考文献

- 董春颖,虞左明,吴志旭,等,2013. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 34(7): 2574 - 2581.
- 蒋燮治,堵南山,1979. 中国动物志:淡水枝角类[M]. 北京:科学出版社.
- 孔令惠,蔡庆华,王岚,等,2008. 香溪河库湾春季水华期间浮游轮虫昼夜垂直分布及迁移的研究[J]. 湿地科学, 6(4): 512 - 517.
- 李秀玉,朱丽岩,徐培培,等,2012. 胶州湾不同季节浮游动物昼夜垂直移动规律初步研究[J]. 海洋学报, 34(3): 146 - 154.
- 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.
- 刘顺会,孙松,韩博平,2008. 浮游动物昼夜垂直迁移机理的主要假说及其研究进展[J]. 生态科学, 27(6): 515 - 521.
- 刘晓丹,王真良,1991. 北黄海中华哲水蚤各期幼体昼夜垂直移动的初步研究[J]. 海洋学报, 13(2): 247 - 253.
- 彭俊杰,李传红,黄细花,2004. 城市湖泊富营养化成因和特征[J]. 生态科学, 23(4): 370 - 373.
- 秦海明,2011. 长江口盐沼沟大型浮游动物群落生态学研究[D]. 上海:复旦大学.
- 王家楫,1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京:科学出版社.
- 王先云,王丽卿,盖建军,等,2010. 千岛湖浮游甲壳动物垂直分布与昼夜垂直移动[J]. 动物学杂志, 45(5): 95 - 104.
- 熊丽黎,裴智超,温祖标,等,2013. 城市湖泊水质污染状况研究:以南昌市西湖水质为例[J]. 复旦学报(自然科学版), 52(2): 215 - 219.
- 薛俊增,蔡桢,姚建良,等,2011. 千岛湖水温垂直分布的季节演变对透明溞昼夜垂直迁移的影响[J]. 科技导报, 29(29): 65 - 71.
- 张武昌,2000. 浮游动物的昼夜垂直迁移[J]. 海洋科学, 24(11): 18 - 21.
- 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 - 362.
- 郑重,1964. 浮游生物学概论[M]. 北京:科学出版社: 183 - 191.
- 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组,1979. 中国动物志:淡水桡足类[M]. 北京:科学出版社.
- Baiao C, Boavida M J, 2000. Environmental factors determining the structure of rotifer communities in a river-shed reservoir [J]. Aquatic Ecology, 34(4): 369 - 377.
- Berzins B, Pejler B, 1987. Rotifer occurrence in relation to pH [J]. Hydrobiologia, 147: 107 - 116.

- Bollens S M, Frost B W, 1991. Diel vertical migration in marine zooplankton: rapid individual response to predators [J]. J Plankton Res, 13(6): 1359 – 1365.
- Brierley A S, 2014. Diel vertical migration[J]. Current Biology, 24(22): 1074 – 1076.
- Chew L L, Chong V C, Ooi A L, et al, 2015. Vertical migration and positioning behavior of copepods in a mangrove estuary: Interactions between tidal, diel light and lunar cycles[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 152:142 – 152.
- Cohen J H, Forward R B, 2009. Zooplankton diel vertical migration-a review of proximate control [J]. Oceanography and Marine Biology, 47: 77 – 109.
- Cruz – Pizarro L, 1978. Comparative vertical zonation and diurnal migration among Crustacea and Rotifera in the small high mountain lake La Caldera (Granada, Spain) [J]. Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 20: 1026 – 1032.
- Doulka E, Kehayias G, 2011. Seasonal vertical distribution and diel migration of zooplankton in a temperate stratified lake [J]. Biologia, 66(2): 308 – 319.
- Gliwicz M Z, 1986. Predation and the evolution of vertical migration in zooplankton[J]. Nature, 320: 746 – 748.
- Han B P, Straskraba M, 1998. Modeling patterns of zooplankton diel vertical migration [J]. Journal of Plankton Research, 20: 1463 – 1478.
- Han B P, Straskraba M, 2001. Control mechanisms of diel vertical migration: theoretical assumptions[J]. Journal of Theoretical Biology, 210(3): 305 – 318.
- Heisey D, Porter K G, 1977. The effect of ambient oxygen concentration on filtering and respiration rates of *Daphnia galeata mendotae* and *Daphnia magna* [J]. Limnology and Oceanography, 22: 839 – 845.
- Hu M H, Yang L L, Liu Q G, 2014. Do physicochemical variables regulate the distribution of zooplankton communities in reservoirs dominated by filter-feeding carp? [J] Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 32(2): 266 – 277.
- Isla A, Scharek R, Latasa M, 2015. Zooplankton diel vertical migration and contribution to deep active carbon flux in the NW Mediterranean [J]. Journal of Marine Systems, 143: 86 – 97.
- Kozhov M, 1963. Lake baikal and its life [M]. Netherlands: The Hague.
- Liu S H, Sun S, Han B P, 2003. Diel vertical migration of zooplankton following optimal food intake under predation [J]. Journal of Plankton Research, 25(9): 1069 – 1077.
- Liu S H, Sun S, Han B P, 2006. Viewing DVM via general behaviors of zooplankton: A way bridging the success of individual and population [J]. Journal of Theoretical Biology, 238(2): 435 – 448.
- Ma Z, Li W, Shen A, et al, 2013. Behavioral responses of zooplankton to solar radiation changes: in situ evidence [J]. Hydrobiologia, 711(1): 155 – 163.
- Mavuti K M, 1992. Diel vertical distribution of zooplankton in Lake Naivasha, Kenya [J]. Hydrobiologia, 232(1): 31 – 41.
- Rhode S C, Pawlowski M, Tollrian R, 2001. The impact of ultraviolet radiation on the vertical distribution of zooplankton of the genus *Daphnia* [J]. Nature, 412: 69 – 72.
- Ringelberg J, 1995. Changes in light intensity and diel vertical migration: a comparison of marine and freshwater environments [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 75(1): 15 – 25.
- Sainmont J, Thygesen U H, Visser A W, 2013. Diel vertical migration arising in a habitat selection game [J]. Theoretical Ecology, 6: 241 – 251.
- Semyalo R, Nattabi J K, Larsson P, 2009. Diel Vertical Migration of zooplankton in a eutrophic bay of Lake Victoria [J]. Hydrobiologia, 635(1): 383 – 394.
- Soto D, De los Rios P, 2006. Influence of trophic status and conductivity on zooplankton composition in lakes and ponds of Torres del Paine National Park (Chile) [J]. Biologia, 61(5): 541 – 546.
- Stewart L J, George D G, 1987. Environmental factors influencing the vertical migration of planktonic rotifers in a hypereutrophic tarn [J]. Hydrobiologia, 147: 203 – 208.
- Thackeray S J, George D G, Jones R I, et al, 2006. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community [J]. Aquatic Ecology, 40: 23 – 32.
- Uye S, Huang C, Onbe T, 1990. Ontogenetic diel vertical migration of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan [J]. Marine Biology, 104 (3): 389 – 396.

(责任编辑 万月华)

Summer Diel Vertical Distribution and Migration Characteristics of Zooplankton in Yueliang Lake

HU Xu-ren¹, NIE Xue¹, LAN Zhi-chun^{1,2,3}, JIN Bin-song^{1,2,3}, QIN Hai-ming^{1,2,3}

1. Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science and School of Life Science,
Nanchang 330031, P. R. China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education,
Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China;

3. National Ecosystem Research Station of Jiangxi Poyang Lake Wetland, Nanchang 330038, P. R. China)

Abstract: Zooplankton typically display diel vertical migration and this study characterized the vertical distribution and migration of Rotifera, Cladocera and Copepoda in Yueliang Lake, a small (3 hm²), shallow (average 2.0 m), urban reservoir in Nanchang City, Jiangxi Province. From 19 : 00, August 1 to 18 : 00, August 2, 2013, zooplankton was collected each hour at three depths (0.5, 1.5, 2.5 m) at three sites. Physiochemical factors (water depth, pH, dissolved oxygen, conductivity, Chlorophyll a and turbidity) were determined at the three depths, each time a sample was collected. Variation of zooplankton densities and physiochemical factors at each depth was analyzed using one-way ANOVA. The correlation between zooplankton density and physicochemical factors was analyzed by Pearson correlation coefficients. A total of 20 species of zooplankton (16 Rotifera, 1 Cladocera and 3 Copepoda) were observed. The dominant species were *Brachionus forficula* (48.27%), Copepoda nauplii (15.75%) and *Filinia maior* (11.1%). Morisita indices of the primary zooplankton groups and dominant species were >1, indicating that the zooplankton community aggregated by depth. The vertical distribution and mean residence depth (*D*) of zooplankton varied significantly between day and night. Zooplankton aggregated in the middle layer at night (19 : 00 – 05 : 00) and gradually migrated to the surface layer after 01 : 00 am. During the day (06 : 00 – 18 : 00), zooplankton gradually migrated from the surface layer to the middle and lower layers. Rotifera, Cladocera and Copepoda, the primary zooplankton groups, all ascended to the surface layer at night and descended to the lower layer during the day, but the migration range of Rotifera and Copepoda was smaller than that of Cladocera. The migration characteristics of the dominant species (*Brachionus forficula* and Copepoda nauplii) were consistent with their groups. The vertical distribution of *Filinia maior* was significantly different among the three water layers ($P < 0.05$), but diel vertical migration was not obvious. Pearson correlation coefficients show that water temperature, pH and dissolved oxygen significantly influenced the diel distribution and vertical migration of zooplankton in Yueliang Lake. Our study will provide a scientific basis for assessing shallow urban lakes and contribute to the on-going research in aquatic ecology.

Key words: zooplankton; vertical distribution; migration; Yueliang Lake