紫霞湖浮游甲壳动物昼夜垂直迁移及其影响因子分析

吕志均[1,2],戴 曦[1],孙 颖[1],李 静[1],陈非洲[1],陈元芳[2]

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008;
2. 河海大学水文与水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:2010年9月19~21日,对江苏南京紫霞湖(水深8.5 m)浮游甲壳动物昼夜垂直迁移行为进行了调查,分析了影响昼夜垂直迁移的因素。结果表明,奥氏秀体溞(*Diaphanosoma orghidani*)、象鼻溞(*Bosmina* sp.)、颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)、台湾温剑水蚤(*Thermocyclops taihokuensis*)和中华原镖水蚤(*Eodiapotomus sinensis*)成体均表现出昼夜迁移现象,中华原镖水蚤幼体和无节幼体无明显昼夜迁移。紫霞湖的温度、溶解氧和叶绿素a浓度的垂直变化不是导致浮游甲壳动物昼夜垂直迁移的主导因子,光照强度和鱼类捕食可能是影响浮游甲壳动物昼夜垂直迁移的主要因素。

关键词:浮游甲壳动物;昼夜垂直迁移;紫霞湖

中图分类号:Q178.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2011)03-0043-05

浮游甲壳动物昼夜垂直迁移(diel vertical migration, DVM)是海洋、湖泊和水库中的一种常见现象,即浮游甲壳动物白天生活在深层水域,夜晚上升到水体表层;或发生反相的运动,即白天向上游,夜晚向下迁移。用来解释DVM原因的假说包括躲避捕食者假说、光驱动假说和资源获得假说等(Ringelberg, 2010);其中,躲避捕食者假说得到最多的支持。该假说认为,浮游甲壳动物白天为了避开水面食浮游动物鱼类捕食而迁移到暗的深水层,夜晚水面捕食者的威胁减小,它们又游回湖面(Rinke & Petzoldt, 2008);湖面具有较高的食物浓度和温度,有利于浮游甲壳动物的生长和繁殖(Lampert, 2003);光驱动假说认为昼夜垂直迁移能使浮游动物保持在最适宜的光强环境中,垂直迁移发生的时间和速度均与光强的变化有关(Harley, 1993; Ringelberg, 1993);能量和资源利用假认为浮游甲壳动物的昼夜垂直迁移是针对不同的能量代谢因子或者资源波动作出的适应性反应(Lampert, 2003)。

尽管导致DVM的因子有很多,Ringelberg(2010)认为浮游动物DVM是逃避被捕食和获得资源的共同作用的结果,或者有其他因素参与共同作用所导致,但最终均不能完全解释浮游甲壳动物的垂直迁移行为(刘顺会等, 2008)。本研究通过在江苏南京紫霞湖进行连续2昼夜的观察,采集不同水层的浮游甲壳动物,检验水质的理化指标,分析紫霞湖浮游甲壳动物昼夜垂直迁移特性及其可能的影响因素。

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

紫霞湖位于江苏省南京市明孝陵东北部,面积约50 000 m^2。采样点位于紫霞湖中心处,水深8.5 m,透明度为2.1~3.4 m;采样分为8层,即每1 m为1个样;采样时间从2010年9月19日18:00开始,到21日18:00结束,共2 d;其中第2天作为第1天的重复,观察浮游甲壳动物2 d的迁移行为是否一致;每隔4 h采样1次,共计13次。采样期间天气均为晴天,无风或微风;19和20日晚均为月圆夜。

1.2 样品采集及分析

1.2.1 *浮游甲壳动物* 用5L采水器采集水样,每层样采上、下两层水各5 L,混合后用25号浮游生物网过滤,收集于加有1 mL甲醛溶液的50 mL塑料瓶中固定。浮游甲壳动物鉴定参照蒋燮治和堵南山(1978)、沈嘉瑞(1978)以及Korovchinsky(1992)。

1.2.2 *鱼类标本* 用3种规格的丝网采集鱼类,分别是(目大×长×高):1.0 cm×24.0 m×1.0 m、1.5 cm×22.0 m×1.2 m和2.5 cm×18.0 m×1.5 m;采样时间为12:00~14:00和0:00~2:00。将3种规格的网悬挂在水表面,2 h后取出,摘下丝网上的鱼,然后送回试验室冷冻。室内进行

收稿日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金(30900195)。

通讯作者:陈非洲。E-mail: feizhch@niglas.ac.cn

作者简介:吕志均,1985年生,男,硕士研究生,主要从事湖泊生态学研究。E-mail: lvzhijun013579@163.com

肠含物分析,鱼类鉴定参照朱松泉(1995)。

1.2.3 理化指标 水温、pH和溶解氧(DO)现场用YSI6600测定;光照强度于每次采水样前用LI-COR仪测定,从水面向下依次每隔0.5 m测1次光强,每层读3个数求平均值;用于叶绿素a浓度测定的水样采集时间为20号和21号的6:00、14:00及22:00,共6次,每层采水样1 L,水样用0.45 μm醋酸纤维膜抽滤,用90%丙酮溶液萃取24 h,取上清夜,用紫外分光光度计测定(金相灿和屠清瑛,1990)。

1.3 数据分析

对各层水体的温度、pH、溶解氧和叶绿素a浓度进行显著性差异分析。为了表征不同种类浮游甲壳动物在水柱中分布状况,选取水柱中总个体数量的50%所处深度为临界深度,即临界深度上下水柱中的个体数均为50%(Mavuti, 1992)。

2 结果与分析

2.1 浮游甲壳动物组成与垂直分布

2.1.1 组成 紫霞湖浮游甲壳动物包括枝角类的奥氏秀体溞(*Diaphanosoma orghidani*)、颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)和象鼻溞(*Bosmina* sp.)、桡足类的台湾温剑水蚤(*Thermocyclops taihokuensis*)和中华原镖水蚤(*Eodiapotomus sinensis*),平均密度为55.3个/L(21.0 ~ 103.2个/L),其中枝角类占10%,桡足类占90%。在枝角类中,奥氏秀体溞和颈沟基合溞个体数相当,分别约为37%,象鼻溞为26%;桡足类以无节幼体个数最多,约占总密度的67%;台湾温剑水蚤(成体+幼体)占16%,其中幼体占80% ~90%;中华原镖水蚤也以幼体为主,占总数(成体+幼体)的65% ~70%。

2.1.2 垂直分布 同种类的浮游甲壳动物垂直分布特性在2 d中表现一致(图1)。

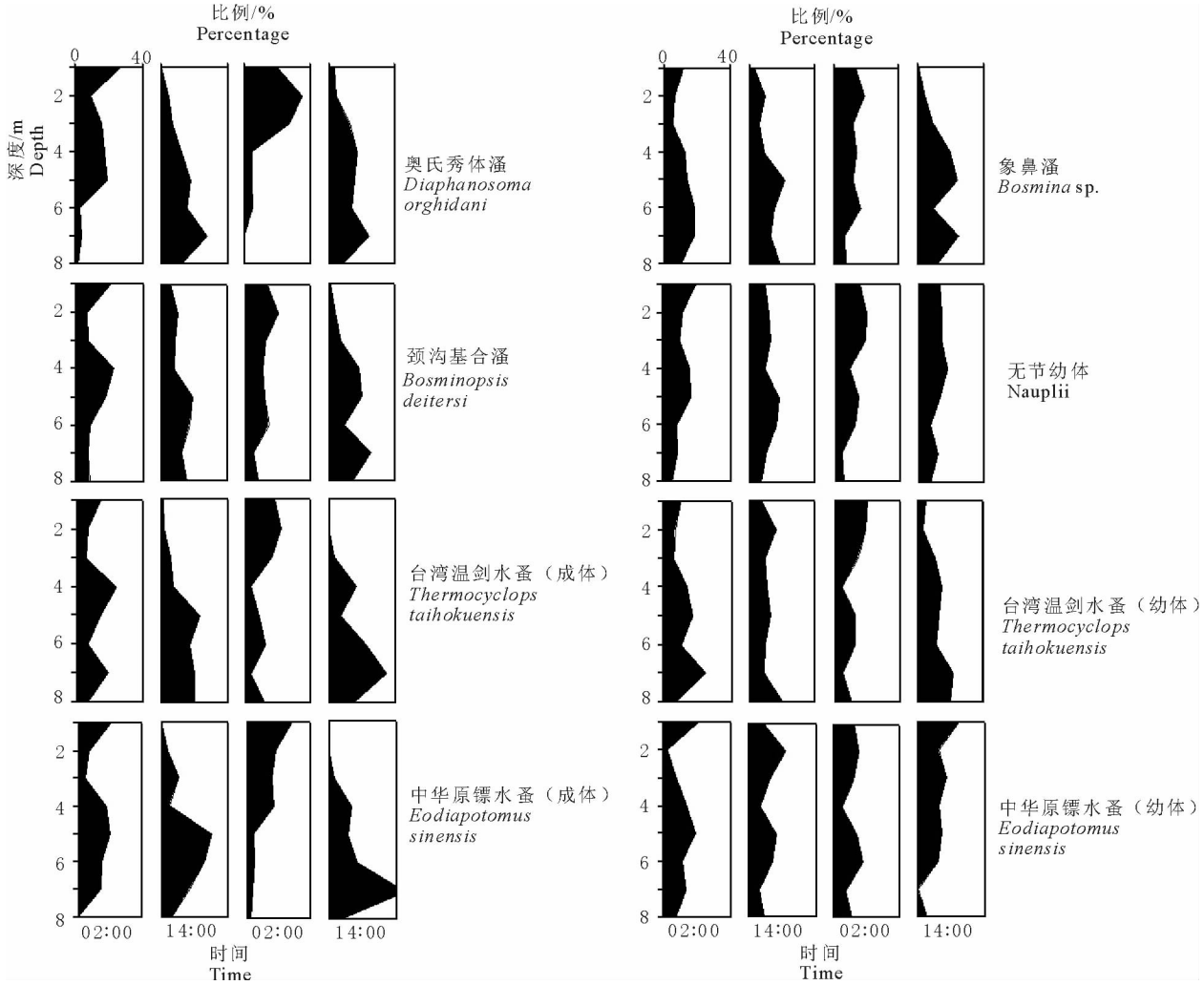


图1 不同时刻浮游甲壳动物在水层中的分布(2010-09-20-02:00~09-21-14:00)

Fig.1 Distribution of crustacean zooplankton at different depths and time

奥氏秀体溞、象鼻溞、颈沟基合溞、台湾温剑水蚤成体和幼体、中华原镖水蚤成体均表现出明显的昼夜垂直迁移。这些种类白天集中在 4 m 以下的水层，而夜晚集中在 4 m 以上的水层（图 2）。中华原镖水蚤幼体和桡足类无节幼体没有明显的昼夜垂直迁移行为，白天和夜晚在各水层中的分布比较均匀。

2.2　理化指标的垂直变化

理化指标的测定结果见图 3。

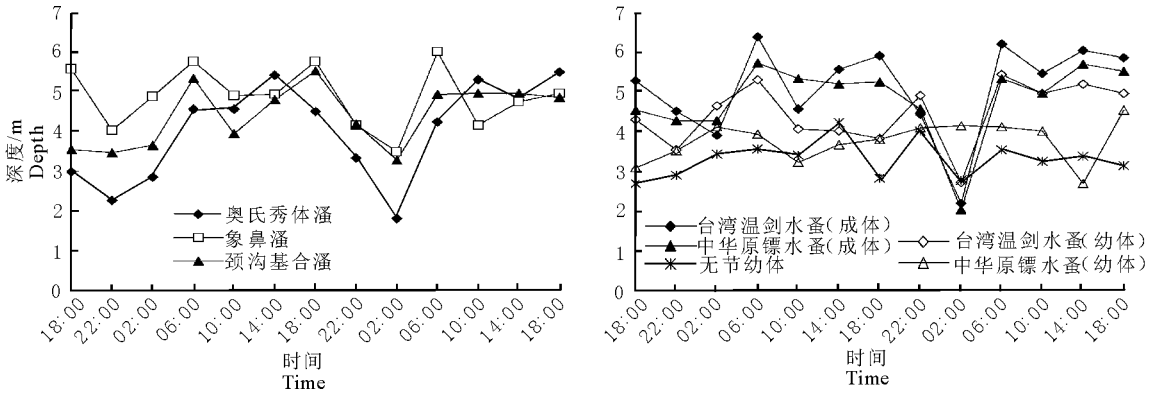


图 2　紫霞湖不同种类不同时刻水柱中总个体 50% 的临界深度

（2010－09－20－02：00～09－21－14：00）

Fig. 2　Critical depth of 50% total number of different species in water column at different time in Lake Zixia

（18：00 September 19 to 18：00 September 21，2010）

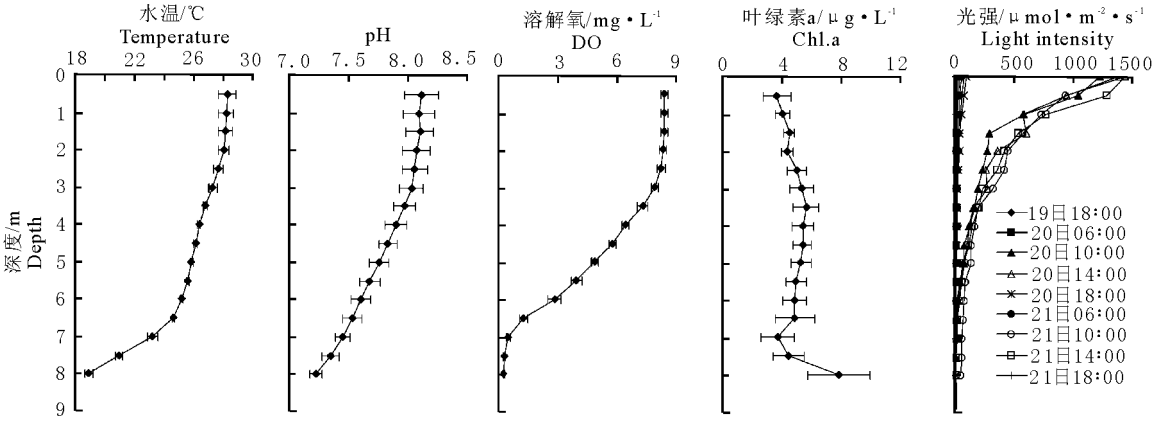


图 3　水温、pH、溶解氧、叶绿素 a 浓度和光强随水深的变化

Fig. 3　Temperature，pH，dissolved oxygen，cholorophyll a concentration and light intensity at different water depths

紫霞湖不同水层在不同时刻的温度、pH 和溶解氧变化趋势基本一致。表层平均温度为（28.3 ± 0.6）℃，底层温度为（18.9 ± 0.3）℃；表层平均 pH 值为（8.12 ± 0.14），底层为（7.22 ± 0.05）；表层平均溶解氧（DO）为（8.31 ± 0.18）mg/L，底层为（0.25 ± 0.02）mg/L。

表层叶绿素 a（Chl. a）平均浓度为（3.79 ± 0.91）μg/L。随着深度增加到 4 m，Chl. a 浓度增加到（5.67 ± 0.81）μg/L；4～7 m 的 Chl. a 浓度随水深的增加而减小，在 7 m 达到最小值（3.70 ± 1.14）μg/L；7～8 m 水体中，Chl. a 浓度急剧增加，8 m 时达最大值（7.91 ± 2.14）μg/L。Chl. a 浓度昼夜变化不显著（$P > 0.05$）。

光照在 10：00 和 14：00 时较强，6：00 和 18：00 时较低，9 月 21 日 14：00 湖面光强达 1 436.3 μmol/（m^2 · s），底部 43.7 μmol/（m^2 · s）。光强随水深增加逐渐减弱，10：00 和 14：00 表层光强的 50% 出现在 1 m 处，10% 出现在 4 m 处，1% 出现在 6～8 m 处。

2.3　渔获物及肠含物中的浮游甲壳动物

调查期间捕获的鱼均为鲿（*Hemiculter leucisulus*）。在中午捕获的鲿的肠道内，含有大量的浮游甲壳动物，平均 196 个/尾。不同浮游甲壳动物种类在鲿条肠道内的个体占总数量比例平均值分别为 奥氏秀体溞 0.1%（0%～0.5%）、象鼻溞 46.3%（16.7%～95.6%）、颈沟基合溞 18.3%（3.1%～38.5%）、台湾温剑水蚤 26.9%（1.0%～75.0%）、中华原镖水蚤 8.5%（0%～18.4%）。在夜晚捕获

的鳃肠道中,碎屑含量多,浮游甲壳动物的数量极少,平均0.2个/尾。

3 讨论

3.1 影响浮游甲壳动物DVM行为的可能因素

本次调查表明,奥氏秀体溞、象鼻溞、颈沟基合溞、台湾温剑水蚤和中华原镖水蚤成体均表现出昼夜迁移特性(DVM),而中华原镖水蚤幼体和无节幼体无明显昼夜迁移。不同时刻叶绿素a浓度在不同水层的分布相似,而且其浓度的最大值并不出现在表层;虽然有研究表明食物浓度是影响浮游甲壳动物DVM的因素之一(Haney, 1993),但食物浓度并不是紫霞湖浮游甲壳动物DVM的决定因素,Williamson等(1996)通过分析研究也表明,表层食物并非对浮游甲壳动物是最有益的;除食物浓度外,食物质量也是影响浮游甲壳动物DVM的可能因素(Lampert, 2003)。但本次调查并没有分析不同水层食物质量的差异,因此无法判断其对浮游甲壳动物的DVM是否有影响。

3.2 影响浮游甲壳动物DVM行为的驱动因子

逃避捕食是浮游甲壳动物DVM行为的重要驱动因子(Rinke & Petzoldt, 2008)。紫霞湖鳜的肠含物分析表明,除了奥氏秀体溞和无节幼体外,其他的种类均易被鳜取食,因此颈沟基合溞、象鼻溞、台湾温剑水蚤成体和幼体、中华原镖水蚤成体的昼夜垂直迁移可部分归因于鱼类的捕食作用,类似的现象在其他研究中也有报道(Easton & Gophen, 2003; Dobrynin, 2009)。但中华原镖水蚤幼体却不表现昼夜垂直迁移习性尚需进一步的研究。

3.3 光照强度对浮游甲壳动物DVM的影响

光照也是影响浮游甲壳动物DVM特性的重要因子(Harley,1993)。如前所述,奥氏秀体溞受鱼类捕食的控制较弱,那么昼夜光照的变化就成为其垂直迁移的主要原因(Semyalo et al, 2009)。不同的浮游动物受光控制的机理不同,并不是所有的种类对光强刺激敏感,如无节幼体等(Forward,1988)。Liu & Wang (1991)认为浮游动物早期幼体对光具有趋光性,但当它们长大到桡足幼体时有避光性。本次调查中,9月21日14: 00表层的中华原镖水蚤幼体比例达到了25.1%,说明不同种类的不同生长阶段对光强的反应也有所不同。

3.4 遗传差异对浮游甲壳动物DVM的影响

由于浮游甲壳动物的垂直迁移需要消耗其本身的能量,而这种能量消耗的代价必然要获取更大的收益(Ringelberg,2010)。对于紫霞湖具有DVM特性的浮游甲壳动物而言,夜晚聚集到表层,可以获得更高的水温和溶氧,这对于促进其生长和繁殖有很大的益处;但紫霞湖不同水层温度、溶氧的昼夜变化并不明显;因此,如果浮游甲壳动物在夜晚聚集到表层可以获得更高的水温和溶氧,那也只是昼夜迁移的结果,而非原因。即便如此,对于有DVM行为的种类而言,也并非所有个体都在夜晚迁移到上层,种群遗传特征的差异也会影响到个体DVM的特性。

参考文献

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.

金相灿, 屠清英. 1990. 湖泊富营养调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社.

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.

沈嘉瑞. 1979. 中国动物志——淡水桡足类[M]. 北京:科学出版社.

朱松泉. 1995. 中国淡水鱼类检索[M]. 南京:江苏科学技术出版社.

Dobrynin A E. 2009. Diurnal dynamics of the vertical distribution of zooplankton in an oligotrophic lake[J]. Inland Water Biol, 2(2):162 – 170.

Easton J, Gophen M. 2003. Diel variation in the vertical distribution of fish and plankton in Lake Kinneret: a 24-h study of ecological overlap[J]. Hydrobiologia, 49:91 – 100.

Forward R B. 1988. Diel vertical migration:zooplankton photobiology and behavior[J]. Oceanogr Mar Biol Annu Rev, 26:361 – 393.

Harley J F. 1993. Environmental control of diel vertical migration behavior[J]. Ergeb Limnol, 39(6):1 – 17.

Korovchinsky N M. 1992. Sididae and Holopediidae. Guides to the identi? cation of the microinvertebrates of the continental waters of the world, 3[M]. The Hague:SPB Academic Publishing.

Lampert W. 2003. Trade-offs in the vertical distribution of zooplankton: ideal free distribution with costs? [J]. Proc R Soc Lond B, 270:765 – 773.

Liu X D, Wang Z L. 1991. Preliminary studies on the diel vertical migration of *Calanus sinicus* nauplius-adult larvae at every stage in the North Huanghai Sea[J]. Acta Oceanol Sin, 13(10):247 – 254.

Mavuti K M. 1992. Diel vertical distribution of zooplankton in Lake Naivasha, Kenya[J]. Hydrobiologia,232:31 – 41.

Ringelberg J. 1993. Phototaxis as a behavioural component of

diel vertical migration in a pelagic *Daphnia*[J]. Ergeb Limnol, 39(6):45 – 55.

Ringelberg J. 2010. Diel vertical migration of zooplankton in lakes and oceans[M]. Springer.

Rinke K, Petzoldt T. 2008. Individual-based simulation of diel vertical migration of *Daphnia*: a synthesis of proximate and ultimate factors[J]. Limnologica,38:269 – 285.

Semyalo R, Nattabi J K, Larsson P. 2009. Diel vertical migration of zooplankton in a eutrophic bay of Lake Victoria[J]. Hydrobiologia, 635:383 – 394.

Williamson C E, Sanders R W, Moeller R E, et al. 1996. Utilization of subsurface food resources for zooplankton reproduction: implications for diel vertical migration theory[J]. Limnol Oceanogr, 41: 224 – 233.

（责任编辑　万月华）

Diel Vertical Migration of Crustacean Zooplankton in Lake Zixia and Analysis of Its Impacted Factors

LV Zhi-jun[1,2], DAI Xi[1], SUN Ying[1], LI Jing[1], CHEN Fei-zhou[1], CHEN Yuan-fang[2]

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Diel vertical migration (DVM) of the crustacean zooplankton was investigated from September 19 to 21, 2010 in Lake Zixia, Nanjing. The factors impacting on DVM were also analyzed. The depth of the site for DVM investigation was 8.5 m. The physiochemical factors, chlorophyll. a and fish composition were measured for analyzing the possible factors impacting the DVM. The results showed that *Diaphanosona orghidani*, *Bosmina* sp., *Bosminopsis deitersi*, *Thermocyclops taihokuensis* and adult *Eodiapotomus sinensis* had evident diel vertical migration. Nauplii and juveniles of Eodiapotomus sinensis showed no diel vertical migration. The analysis indicated that temperature, dissolved oxygen and cholorophyll a were not the main factors for diel vertical migration; light intensity and fish predation were important factors affecting the diel vertical migration of crustacean zooplankton.

Key words: crustacean zooplankton; diel vertical migration; Lake Zixia