

巢湖微囊藻和浮游甲壳动物昼夜垂直迁移的初步研究

邓道贵^{1,2}, 谢平^{1,*}, 周琼¹, 杨华¹ (1 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 东湖湖泊生态系统试验站, 武汉 430072; 2 淮北煤炭师范学院生物系, 安徽淮北 235000)

【摘要】 2002年10月进行了巢湖微囊藻和几种优势浮游甲壳动物的昼夜垂直变化的研究, 结果表明: 微囊藻具有明显的昼夜垂直变化现象。白天上层水中的微囊藻密度显著高于下层水中, 夜晚逐渐下沉使得下层水中的密度相对高于上层水。微囊藻与叶绿素 a、水温、溶解氧和 pH 等均呈显著的正相关($p < 0.01$)。几种优势浮游甲壳动物的昼夜垂直迁移存在较大的差异。短尾秀体溞和角突网纹溞白天在下层水 (1.5 m 和 2.5 m) 中的密度较高, 夜晚则倾向于在上层水 (0 m 和 0.5 m) 中活动。相反, 卵形盘肠溞白天在上层水中密度较高, 象鼻溞则在 11:00 和 15:00 时各水层中的密度显著高于夜晚。汤匙华哲水蚤和广布中剑水蚤白天倾向于在下层水中活动, 夜晚则逐渐迁移到上层水中。许水蚤在夜晚和凌晨 3:00 时各水层中的密度显著高于白天。中华窄腹剑水蚤昼夜垂直变化不明显。微囊藻与短尾秀体溞密度呈显著的负相关, 而与象鼻溞和卵形盘肠溞呈显著的正相关($p < 0.01$)。

关键词: 巢湖; 微囊藻; 浮游甲壳动物; 昼夜垂直迁移

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1008-8873(2006)01-008-05

Diel vertical migration of *Microcystis* and crustacean zooplankton in Lake Chaohu

DENG Dao-gui^{1,2}, XIE Ping^{1,*}, ZHOU Qiong¹, YANG Hua¹ (1 Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems; State Key Laboratory for Freshwater Ecology and Biotechnology; Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430072; 2 Department of Biology, Huaibei Coal Industry Teachers' College, Anhui, Huaibei 235000)

Abstract Diel vertical migration of *Microcystis* and crustacean zooplankton were investigated in October 2002. The results showed: Diel vertical migration of *Microcystis* (predominant *Microcystis aeruginosa*) was obvious. The daily density of *Microcystis* in the upper layer was higher than in the lower layer, the reversed pattern was observed at night. Chlorophyll-a (chl-a) had a similar pattern. Positive correlations ($p < 0.01$) of *Microcystis* were observed with chl-a, water temperature, DO and pH. Diel vertical migration of several dominantly crustacean zooplanktons was surveyed. For *Diaphanosoma brachyurum* and *Ceriodaphnia cornuta*, higher density occurred daily in the lower water layer (1.5 m and 2.5 m), while they migrated to the upper layer (0 m and 0.5 m) at night. On the contrary, higher density of *Chydorus ovalis* appeared daily at 0 m and 0.5 m. The density of *Bosmina* at 11:00 and 15:00 at different water layers was higher than at night. *Sinocalanus dorrii* and *Mesocyclops leuckarti* were daily inclined to concentrate on the lower layers while they migrated to the upper layers. The density of *Schmackeria* sp. in different water layers at night and at 03:00 was greatly higher than other sampling times. Diel vertical migration of *Limnoithona sinensis* was not obvious. The negative correlation ($p < 0.01$) between *Microcystis* and the density of *D. brachyurum* was observed, while it was positive with *Bosmina* and *C. ovalis*.

Key words: Lake Chaohu; *Microcystis*; Crustacean zooplankton; Diel vertical migration

微囊藻水华形成是湖泊富营养化的重要标志, 其危害性已越来越受到科学工作者的广泛关注。微囊藻能通过伪空泡调节其在水层中的位置, 以适应外界环境 (如光照、营养盐等) 变化的影响^[1, 2]。有关水体中微囊藻的迁移变化研究已有较多的报道^[2-4]。浮游动物作为水体生态系统中的一个重要组成部分, 其垂直分布受湖水理化因子、食物来源和被捕食的影响。

巢湖位于安徽省的中部, 面积约为 780 km², 是一个典型的浅水富营养湖泊。自从八十年代以来, 蓝藻 (主要是铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 和螺旋鱼腥藻 *Anabaena spiroides*) 水华大量暴发, 严重影响了湖区周围城市供水和渔业发展^[5, 6]。湖鲚 (*Coilia ectenes*) 是一种以食浮游甲壳动物为主的小型鱼类, 自五十年代后期至今一直成为巢湖的优势鱼类种群,

约占总鱼产量的 75~80%^[7, 8]。2002 年鲚鱼的捕捞产量约为 6 000 t。开展巢湖微囊藻和浮游甲壳动物的昼夜变化研究, 对于了解它们在浅水湖泊中的变化规律, 探讨微囊藻和食浮游动物鱼类对浮游甲壳动物的迁移影响有着重要的理论意义。

1 研究方法

1.1 研究地点

采样点位于巢湖忠庙附近的开阔水域 (117°29'20", 31°31'35")。水深约 3 m, 透明度约 0.3 m,

收稿日期: 2005-10-31, 2006-01-20 接受

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-12) 资助

作者简介: 邓道贵 (1969—), 男, 安徽巢湖人; 副教授; 博士; 主要从事淡水无脊椎动物和浮游生物生态学研究。E-mail: dengdg@263.net

*通讯作者: E-mail: xieping@ihb.ac.cn

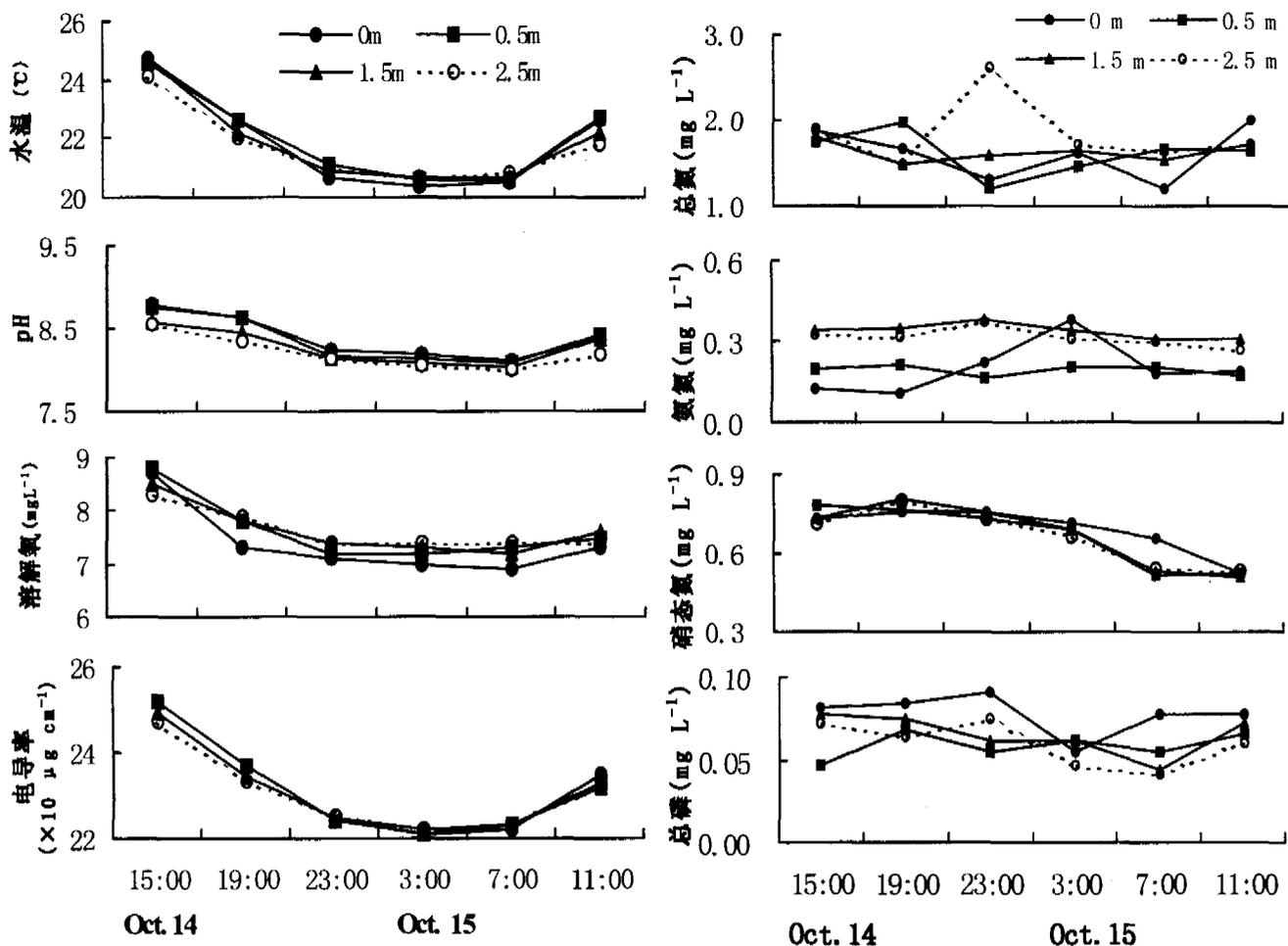


图1 几种理化因子的昼夜垂直变化

Figure 1 Diel vertical variations of several physical-chemical factors during the study of Lake Chaohu

无高等水生植物分布。实验期间湖面基本平静或风力较小。

1.2 浮游植物和浮游动物的采集与处理

采样时间在2002年10月14日下午15:00开始至15日上午11:00结束。水样每隔4h分0m、0.5m、1.5m、2.5m四个水层进行采集。对浮游植物来说,用2.5L的有机玻璃采水器采集样品后,取1L水样(用Lugol's液固定)放入玻璃沉降器中沉淀48h,移去上清液。显微镜记数。群体微囊藻用JY88-II型超声波细胞粉碎仪使其分解成单细胞记数。对浮游动物来说,用5L的有机玻璃采水器采集20L水样,水样经孔径为64 μ m的浮游生物网过滤,再用4%福尔马林溶液固定。显微镜观察并记数。

1.3 叶绿素a的测定

用于测定叶绿素a的水样与浮游植物水样同时采集。用Whatman GF/C滤膜抽滤,滤膜被研磨后用90%丙酮提取,离心取上清液,752-型紫外分光光度计测定。

1.4 理化因子测定

水温、pH、溶解氧和电导率分别用温度计、便携式pH计、溶氧仪和电导率仪现场测定。

测定化学指标的水样也与浮游植物同时采集。除总氮和总磷外,水样经国产玻璃纤维滤膜过滤,以盐酸a-萘胺法测定亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$);纳氏比色法测定氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$);硫酸消解法测定总磷(TP);紫外分光光度法测定总氮(TN)。

2 结果

2.1 理化指标

水温昼夜变动范围为20.4 $^{\circ}\text{C}$ 至24.7 $^{\circ}\text{C}$,同一采样时间、不同水层间的温度差异不超过1 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,实验期间湖水分层不明显。电导率最大值出现在下午15:00,最小值在凌晨3:00,不受水层的影响。pH在8以上,愈靠近表面水层pH愈高。最大的溶解氧出现在下午15:00的0.5m水层中,但0m水层中的溶

解氧总是小于其他水层 (图 1)。

氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 浓度在各水层中都保持在一个相对稳定的水平。不管采样时间, 在 2.5 m 和 1.5 m 处较高而在 0 m 和 0.5 m 处较低。硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 浓度下午较高而夜晚相对较低。总氮 (TN) 浓度波动较大, 最大值出现在 11:00 的 0 m 水层中。总磷 (TP) 浓度变化较大, 在上层水中偏大 (图 1)。

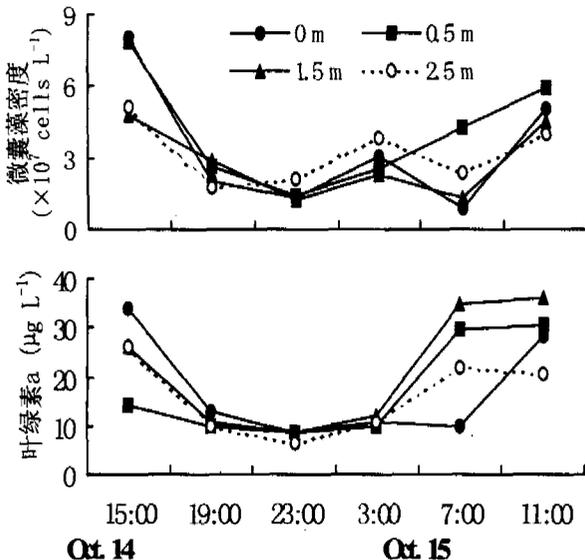


图 2 微囊藻密度和叶绿素 a 的昼夜垂直变化
Figure 2 Diel vertical migration of *Microcystis* density and chlorophyll-a

2.2 微囊藻密度和叶绿素 a (Chl-a) 的昼夜垂直变化

实验期间, 微囊藻约占浮游植物总密度的 90% 以上, 昼夜垂直变化明显。白天上层水 (0 m 和 0.5 m) 中的微囊藻密度明显高于下层水 (1.5 m 和 2.5 m)。而夜晚和凌晨下层水中的微囊藻密度则相对高于上层水。对 0.5 m 水层而言, 在凌晨 3:00 时微囊藻的密度开始增加, 然后逐渐升高, 到下午 15:00 时达到最大值 ($7.88 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), 随之出现下降的趋势, 在 23:00 降到最低值 ($1.361 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)。表面水层 (0 m) 也有相似的昼夜变化, 所不同的是在凌晨 3:00 时微囊藻的密度比早晨 7:00 时高。另外, 在早晨 7:00 时 0.5 m 中的微囊藻密度显著高于其它水层 (图 2)。

微囊藻仅与以下理化因子呈显著的相关 ($n=24$, $P<0.01$): 温度 ($r=0.75$), 溶解氧 ($r=0.72$), 电导率 ($r=0.74$) 和 pH ($r=0.65$)。

叶绿素 a 的昼夜垂直变化与微囊藻较一致。表面水层 (0 m) 的最大值 ($33.85 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 出现在下午 15:00 时, 而晚间和凌晨均处于较低的水平。与微囊藻变化

不同的是在 7:00 和 11:00 时 1.5 m 水层中的叶绿素 a 值均高于其它三个水层, 且 0 m 水层中的值相对较低 (图 2)。微囊藻与叶绿素 a 呈显著的正相关 ($r=0.63$, $n=24$, $P<0.01$)。

2.3 巢湖浮游甲壳动物的昼夜变化

几种优势浮游甲壳动物的昼夜迁移活动存在较大的差异。枝角类中的 *Diaphanosoma brachyurum* 夜晚倾向于到上层水 (0 m 和 0.5 m) 中活动, 凌晨 3:00 时 0 m 水层中的密度达最大值 ($5.7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$)。早晨 7:00 又从表面水层向下层迁移, 下午 15:00 时 0 m 水层出现最小值 ($0.7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$)。 *Ceriodaphnia corruta* 有相似的昼夜垂直迁移。与前两者不同的是, *Chydorus ovalis* 白天倾向于在水面上层活动。上午 11:00 时 0 m 水层中 *C. ovalis* 的密度为 $24.2 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 下午 15:00 时 0.5 m 水层中的密度可达 $26.2 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 。此外, *Bosmina* 白天 (11:00 和 15:00) 各水层的密度显著高于夜晚 (图 3)。

对桡足类而言, *Sinocalanus dorrii* 除早晨 7:00 外在下层水中的密度始终较高。白天在 0 m 水层中普遍较低, 夜晚则迁移到上层水中, 形成较大的密度。 *Mesocyclops leuckarti* 白天倾向于在下层水中活动, 夜晚则逐渐迁移到上层水中, 在 23:00 时 0.5 m 的水层中达最大值 ($2 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$)。而 *Schmackeria* sp. 在夜晚和凌晨时各水层中的密度均显著高于白天。 *Limnoithona sinensis* 昼夜垂直变化不明显 (图 3)。

微囊藻密度与 *D. brachyurum* 密度 ($r=-0.56$, $p<0.01$) 和 *Schmackeria* ($r=-0.44$, $p<0.05$) 呈显著的负相关 ($n=24$), 而与 *Bosmina* ($r=0.69$) 和 *C. ovalis* ($r=0.78$) 呈显著的正相关 ($n=24$, $p<0.01$)。微囊藻密度分别与 *Mesocyclops leuckarti* 及 *Limnoithona sinensis* 之间无相关关系。

3 讨论

微囊藻因具伪空泡能调整其在水体中的位置, 避免过强或过弱的光照, 有利于自身的生长和发育^[9]。光强、营养物浓度及风浪的作用是影响微囊藻垂直分布的另一些重要原因^[3, 4, 10]。较多的研究表明: 微囊藻群体夜晚和早晨聚集在水的表面, 而下午集中分布在中等深度的水层中^[1, 3, 4, 9]。但本研究结果与上述作者的结论不一致, 即巢湖微囊藻虽然在早晨 7:00 时 0.5 m 水层的密度高于其它水层且形成薄的表面水华, 但微囊藻密度继续上升并在下午 15:00 时上层水 (0 m 和 0.5 m) 中达到最大值, 形成较厚的表面水华。作者认为下午 15:00 时尽管太阳照射处于较强的状态,

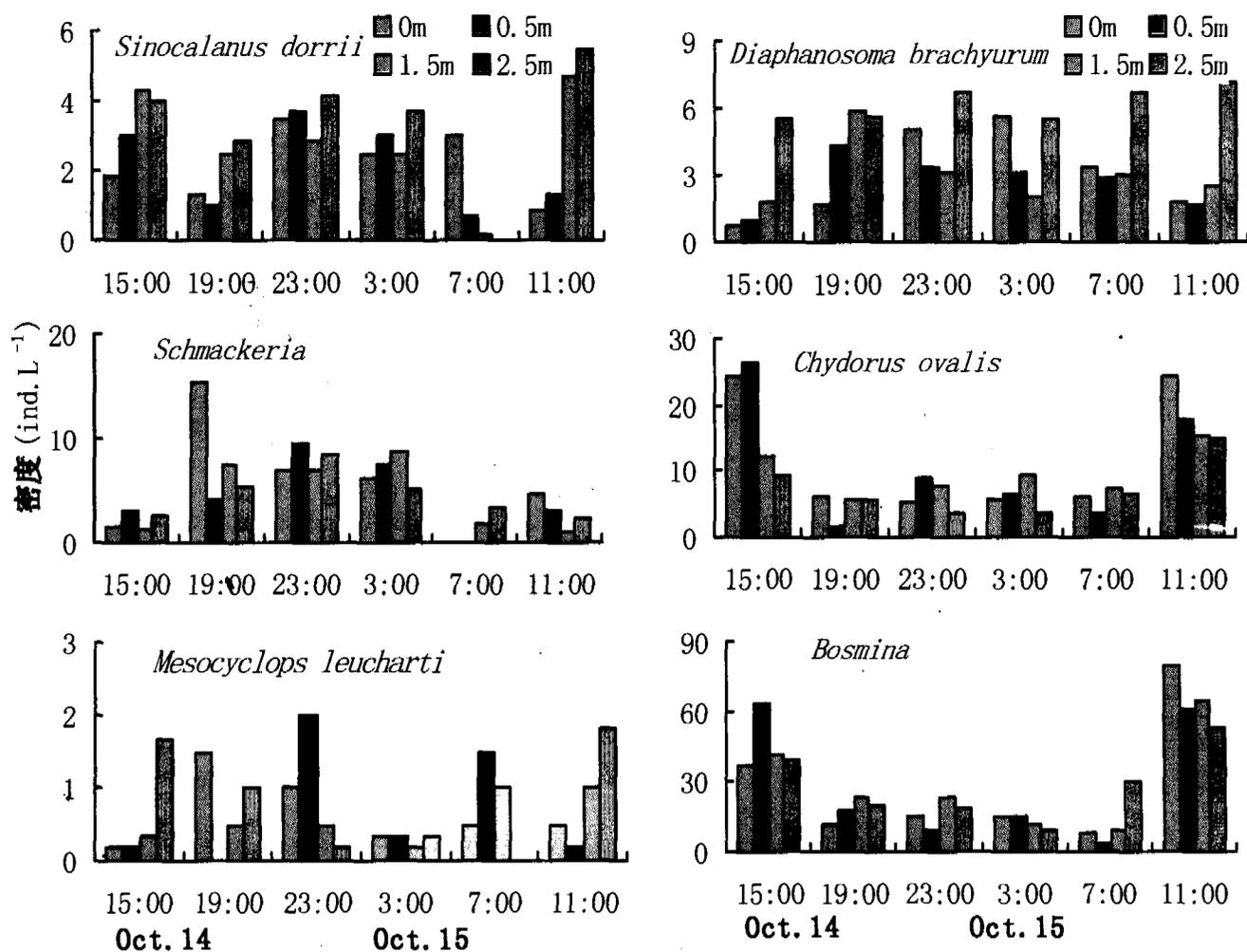


图3 几种优势浮游甲壳动物的昼夜垂直迁移

Figure 3 Diel vertical migration of several dominant crustacean zooplanktons

但由于水体透明度低 (0.3 m)、浊度大, 光线不能穿透较深的水层, 致使下层水柱中的微囊藻因得不到应有的光照而上浮到表层水中。

在浅水湖-Geiger 湖里, Woodmansee and Grantham (1961) 发现 *Mesocyclops edax* 白天集中在底部或底部附近, 夜晚则明显地上升移动 (在黎明 3:00 时出现最大值) [11]。而在另一浅水湖泊 (武汉东湖), *Mesocyclops leuckarti* 的昼夜垂直变化也是明显的, 但变化规律是表层数量白天超过夜晚, 而近中午时为最多, 黄昏时最少 [12]。在本研究中, *M. leuckarti* 的变化规律与前者相似, 而与后者有所不同。鉴于巢湖和东湖的研究背景在鱼类密度、水草和浮游植物优势种等方面存在明显的差异, 因此作者认为鱼类捕食压力的大小和躲避场所的有无可能是造成两湖中 *M. leuckarti* 昼夜垂直差异的重要原因。

在武汉东湖中, 神秘华哲水蚤 (*Sinocalanus*

mystrophorus) 表层数量不论白昼或夜晚一般均小于底层 [12]。但在巢湖, 汤匙华哲水蚤 (*S. dorrii*) 则在午夜和凌晨 (23:00~7:00) 时段向上层集中, 以至表层 (0 m) 的密度是其它时间段的 2-3 倍。另外, *Schmackeria* sp. 在夜晚和凌晨 3:00 时各个水层中的密度显著高于白天。由于湖鲚有捕食大型桡足类的习性 [8, 12], 因此, 巢湖两个大型种类的“夜晚上升、白天下降”现象可能与湖鲚的迁移活动和捕食行为密切相关。

在本实验期间, 枝角类中的 *D. brachyurum* 和 *C. corruta* 有相似的昼夜垂直迁移习性, 即夜晚到上层水中活动, 凌晨从表面水层向更深水层迁移。肠道解剖发现, 枝角类是巢湖湖鲚的重要食物来源 [8]。可以推测, *D. brachyurum* 和 *C. corruta* 的昼夜活动现象与湖鲚的摄食行为相关。在 Atchafalaya River Basin 的浅水湖泊中, *Diaphanosoma birgei* 和 *Moina micrura* 的垂直分布与食浮游生物鱼类存在显著的相关性 [13]。在深

水湖 Kinneret, Gophen M. (1979) 也观察到 *Ceriodaphnia* spp. 和 *Diaphanosoma* sp. 集中分布在水深 1~10 m 范围内, 且在 18:30~00:30 的时间段上升到 1 m 范围内, 但小型枝角类 (*Ceriodaphnia*, *Diaphanosoma* 和 *Bosmina*) 与以食浮游动物为主的鱼类之间不存在显著的相关性^[14]。因此, 鱼类对枝角类的昼夜垂直分布的影响与湖泊深度存在一定的关系。此外, 湖泊中大型沉水植物的有无也是影响浮游动物垂直分布的一个重要因素。在浅水湖 Naardermeer 中, 水生高等植物 *Chara* 的存在对小型枝角类 (*Ceriodaphnia*、*Bosmina*、*Chydorus sphaericus* 和 *Diaphanosoma brachyurum*) 的昼夜垂直迁移产生一定的影响, 两者之间存在显著的相关性^[15]。

在深水湖 Kinneret 中, Easton and Gophen (2003) 观察到群体微囊藻夜晚在水深 2.5 m 处形成最大的峰值, 且在凌晨 7:00 向更浅的水层集中分布。而在这一时间段和水层中分布的浮游甲壳动物明显少于其它时间段的相应水层, 暗示了群体微囊藻的存在抑制了浮游甲壳动物的昼夜垂直分布^[16]。本研究发现, 白天当微囊藻群体上升到水体表面形成水华时, *D. brachyurum* 则聚集在下层水体中; 夜晚当微囊藻群体下降时, *D. brachyurum* 则上移至水体上层。可以推测, 群体微囊藻的存在影响了 *D. brachyurum* 的昼夜垂直分布。微囊藻与 *D. brachyurum* 密度之间的显著负相关性也可以说明这一点。在室内实验条件下, Chen and Xie (2003) 也曾观察到铜绿微囊藻群体能显著地减少 *D. brachyurum* 和 *C. cornuta* 的种群增长率^[17]。

参考文献

- [1] Sirenko L A, Kokyrtsa P N. 1981. Daily vertical migration of *Microcystis aeruginosa* and its effect on the content of nitrogenous components in the cells [J]. *Hydrobiol. J.*, **17**: 34-42
- [2] Wallace B B, Bailey M C, Hamilton D P. 2000. Simulation of vertical position of buoyancy regulating *Microcystis aeruginosa* in a shallow eutrophic lake [J]. *Aquat. Sci.*, **62**: 320-333
- [3] Takamura N, Yasuno M. 1984. Diurnal changes in the vertical distribution of phytoplankton in hypertrophic Lake Kasumigaura, Japan [J]. *Hydrobiologia*, **112**: 53-60
- [4] Ha K, Kim H W, Jeong K S, Joo G J. 2000. Vertical distribution of *Microcystis populatin* in the regulated Nakdong River, Korea [J]. *Limnology*, **1**: 225-230
- [5] 刘贞秋, 蒙仁宪. 巢湖浮游蓝藻的初步研究 [J]. 1989. 海洋湖沼通报, **2**: 35-41
- [6] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清, 等. 1990. 巢湖—富营养化研究 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- [7] 王岐山. 巢湖鱼类区系研究 [J]. 1987. 安徽大学学报 (自), **2**: 70-78
- [8] 刁铸山, 汪留全, 张德英, 等. 1981. 湖鲚资源变动分析及渔业利用的建议. 巢湖水产资源增殖研究资料, **1**: 62-72
- [9] Reynolds C S. 1973. Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* Kütz. Emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake [J]. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, **184**: 29-50
- [10] Okada M, Aiba S. 1983. Simulation of water-bloom in a eutrophic lake III. Modeling the vertical migration and growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Res.*, **8**: 883-893
- [11] Woodmansee R A, Grantham B J. 1961. Diel vertical migrations of two zooplankters (*Mesocyclops* and *Chaoborus*) in a Mississippi Lake [J]. *Ecology*, **42**(4): 619-628
- [12] 陈受忠. 1965. 武昌东湖桡足类数量的周年资料 [J]. 水生生物学集刊, **5**(2): 202-219
- [13] Kelso W E, Rutherford D A, Davidson N L. 2003. Diel vertical migration of cladocerans and copepods in the Atchafalaya River Basin floodplain [J]. *J. Freshwater Ecol.*, **18**(2): 259-268
- [14] Gophen M. 1979. Bathymetrical distribution and diurnal migrations of zooplankton in Lake Kinneret (Israel) with particular emphasis on *Mesocyclops leuckarti* (Claus) [J]. *Hydrobiologia*, **64**(3): 199-208
- [15] Cerbin S, Balayla D J, de Bund W. J. 2003. Small-scale distribution and diel vertical migration of zooplankton in a shallow lake (Lake Naardermeer, the Netherlands) [J]. *Hydrobiologia*, **491**: 111-117
- [16] 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*, **491**: 91-100
- [17] Chen F Z, Xie P. 2003. The effects of fresh and decomposed *Microcystis aeruginosa* on cladocerans from a subtropic Chinese Lake [J]. *J. Freshwater Ecol.*, **18**(1): 97-104