

洱海微囊藻昼夜垂直迁移研究*

胡翠林^{1,2}, 谢平³, 过龙根³, 周永东¹, 王圣瑞⁴

(1.浙江省海洋水产研究所,农业部重点渔场渔业资源科学观测实验站,

浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室,浙江舟山 316021;

2.浙江海洋大学水产学院,浙江舟山 316022;3.中国科学院水生生物研究所东湖台站,湖北武汉 430072;

4.中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地,国家环境保护湖泊污染控制重点实验室,北京 100012)

摘要:为了给洱海藻华预警和微囊藻生态研究提供基础数据,于2009年11月至2010年9月每2个月在洱海定点进行微囊藻昼夜垂直迁移特征观测.结果表明,采样期间微囊藻密度最高值出现在11月,达 $(1.10 \pm 0.52) \times 10^7 \text{ L}^{-1}$;最低值出现在3月,为 $(2.06 \pm 1.05) \times 10^5 \text{ L}^{-1}$.水华爆发(高密度)期,所有月份微囊藻群体都表现出明显的昼夜迁移行为.受光照的影响,微囊藻群体白天分布在水体中下层,夜晚和凌晨迁移至上层水区.其中7月群体细胞分布与温度呈弱相关关系($r^2 = 0.367$),7月和9月微囊藻与pH呈极显著相关关系($P < 0.001$),相关系数分别为0.823和0.712.低密度期(除了5月)微囊藻也表现出了明显的昼夜迁移现象,其中1月的迁移模式和水华(高密度)期相似,3月可能是由于*Daphnia*的捕食,微囊藻表现出了与其他月份相反的聚集模式.

关键词:微囊藻;昼夜垂直迁移;光照;洱海**中图分类号:**Q 958.15 **文献标志码:**A **文章编号:**0258-7971(2018)02-0363-09

蓝藻具有一种调节细胞升降的结构——伪空泡,它们可以通过动态调节伪空泡内的气囊数来控制自身的浮力^[1].蓝藻聚集在水体中的上升/下沉垂直迁移过程,在宏观上被视为蓝藻水华的爆发/消退过程.因此,研究蓝藻细胞的垂直迁移是探究蓝藻水华形成机制和水华预警体系的重要组成部分^[2].微囊藻(*Microcystis*)属于蓝藻门的一种,由于其较高的最适温度和低光利用率以及对低CO₂浓度竞争力强等特点成为许多湖泊蓝藻水华的绝对优势种^[3].目前对微囊藻垂直分布的研究已有很多报道,包括原位调查及室内试验^[4-5].影响微囊藻垂直分布的因素很多,包括水动力、温度、光照、溶解氧等^[4,6].Reynolds等^[7]证明不同湖泊藻类分布特征及其影响因素有所不同.目前我国对野外微囊藻垂直迁移的研究很有限^[8],对云贵高原湖泊微囊藻的分布特征至今还没有报道.另外Okada^[9]指出不同密度的微囊藻其迁移模式有很大差异.国内对野外不同微囊藻密度下其迁移特征的比较研究至

今还未见报道.

洱海(25°36'~58' N, 100°05'~18' E)位于我国云南大理市,面积约249 km²,是云南省第二大淡水湖泊,其水量充足,具有供水、灌溉、发电、旅游、水产养殖等多种功能,对当地的发展有着举足轻重的作用.自1990s以来,随着面源污染及人类活动干扰的不断加剧,洱海水质变差,多次爆发蓝藻水华,严重影响了当地的旅游景观和生态服务功能^[10].近年来调查发现水华优势种由鱼腥藻转变为微囊藻,水华期间微囊藻的比例约占50%~90%^[10-11].夏秋季(7—11月)是微囊藻水华出现较频繁的季节,藻细胞密度达 10^7 L^{-1} 水平^[11-12],其他月份微囊藻密度较低.因此我们通过野外连续监测手段研究微囊藻的昼夜垂直迁移特性,并探讨不同微囊藻密度下(高密度和低密度)它们迁移模式有无差异,为蓝藻水华的预警体系及微囊藻的生态研究提供基础数据.

* 收稿日期:2016-11-08;修回日期:2017-11-28

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-004);浙江省渔业资源增殖放流项目(浙财农(2014)277).

作者简介:胡翠林(1985-)女,安徽人,工程师,博士,主要从事浮游生物生态学研究.E-mail:hel0106@163.com.

通信作者:王圣瑞(1972-),男,内蒙古人,研究员,博士,主要从事水环境研究.E-mail:wangsr@craes.org.cn.

1 材料和方法

1.1 采样及测定方法 从2009年11月到2010年9月每2个月在采样点(图1,水深约10 m)采集样品,水样每隔3 h(8:00、11:00、14:00、17:00、20:00、23:00、2:00、5:00)在不同的水层(0、-1.5、-3.0、-6.0、-9.0 m)分别进行采集.用5 L的有机玻璃采水器采集样品后,取1 L水样用Lugol's溶液固定后放入玻璃沉降器后沉淀48 h,移去上清液浓缩至50 mL.取0.1 mL浓缩水样置于10×40倍的显微镜下进行计数.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计数^[13].*Daphnia*样品用25#浮游生物网(64 μm网眼)过滤20 L水样获得,并保存在5%的福尔马林溶液中.测定水化指标的水样与浮游动、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.总氮(TN)的测定利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,硝酸盐氮(NO₃⁻)和亚硝酸盐氮(NO₂⁻)的测定利用分光光度法,氨氮(NH₄⁺)的测定利用纳氏试剂光度法,总磷(TP)和溶解性总磷(DTP)的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法,溶解性正磷酸盐(PO₄³⁻)的测定利用钼酸铵分光光度法(参照国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》^[14]).水温 and pH用多参数水质分析仪6600(YSI Incorporated, Yellow Springs, OH, USA)现场测定(5月份仪器出现故障,数据缺失).在每个采样日8:00至17:00收集透明度和光照度(illumination intensity)数据,透明度用Secchi透明度盘测定,光照度用多

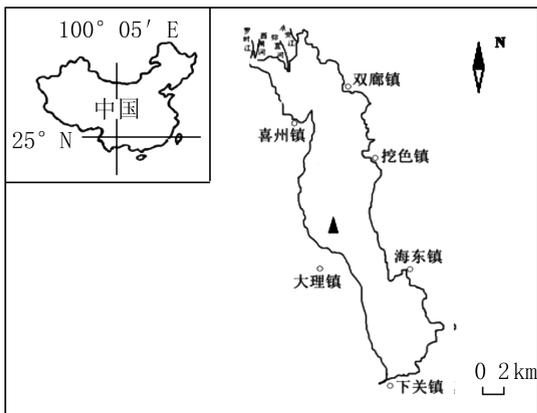


图1 洱海采样点示意图,箭头代表采样点

Fig.1 Sketch map of sampling site in Lake Erhai. The arrow represents the sampling station

参数分析仪现场测定.为了比较不同密度下微囊藻迁移模式的差异,根据前人^[11]和本实验的结果,将2009年11月、2010年7月和9月归为水华(高密度)期,2010年1月、3月和5月归为低密度期.

1.2 数据处理 对每一物种分布模式的研究,一般采用单一样本分布指数(single-sample index of dispersion)(Morisita's index, MI)^[15].我们用它来表示洱海水体中微囊藻的分布特征.MI指数的计算公式为:

$$MI = n(\sum x_i^2 - \sum x_i) / ((\sum x_i)^2 - \sum x_i),$$

其中 x_i 是采样单元(sampling unit)微囊藻的密度, n 是采样单元的个数.指数值大于1表示聚集分布,等于1表示随机分布,小于1表示均匀分布^[15].MI指数定量地表示了微囊藻的聚集程度,但它们的分布深度不能被体现出来.加权平均深度(weighted mean depth)经常被用来定量评估浮游生物的垂直分布深度^[16-17].计算公式为:

$$WMD = \sum N_i D_i / \sum N_i,$$

式中 N_i 是采样单元 i 的生物数量, D_i 是采样单元 i 的深度.

水华期微囊藻的垂直分布与环境因子之间的关系用偏相关分析, $P < 0.05$ 为显著性相关, $P < 0.01$ 为极显著相关.所有月份光照对微囊藻的影响采用线性回归分析,分析之前光照度经 $\log(x+1)$ 转换.数据在Excel 2010、SPSS 16.0和Surfer 8.0中处理.

2 结果

2.1 环境变量 根据表1得知,水华期(11、7月和9月)水体的营养盐水平明显高于其他月份.总氮(TN)平均浓度最高值出现在7月,最低值出现在1月.与总氮不同,溶解性总氮(DTN)和硝态氮(NO₃⁻)最高值分别出现在9月和3月.总磷(TP)浓度最高值出现在9月,最低值出现在1月.溶解性总磷(DTP)最高值出现在11月.溶解性正磷酸盐(PO₄³⁻)最高值出现在7月和9月.各月份pH值均在8.5以上,最高值出现在3月,7月至9月相对较低.与营养盐情况相反,水华(高密度)期水体透明度明显低于低密度期(1月、3月和5月),其中5月透明度最高(2.93 m),7月最低(1.44 m).温度最高值出现在9月,最低值出现在1月.

每个月份各水层间温度相差很小,没有出现温跃层(图2).采样期间7月和9月水下光照度最强,1月最弱(图3).

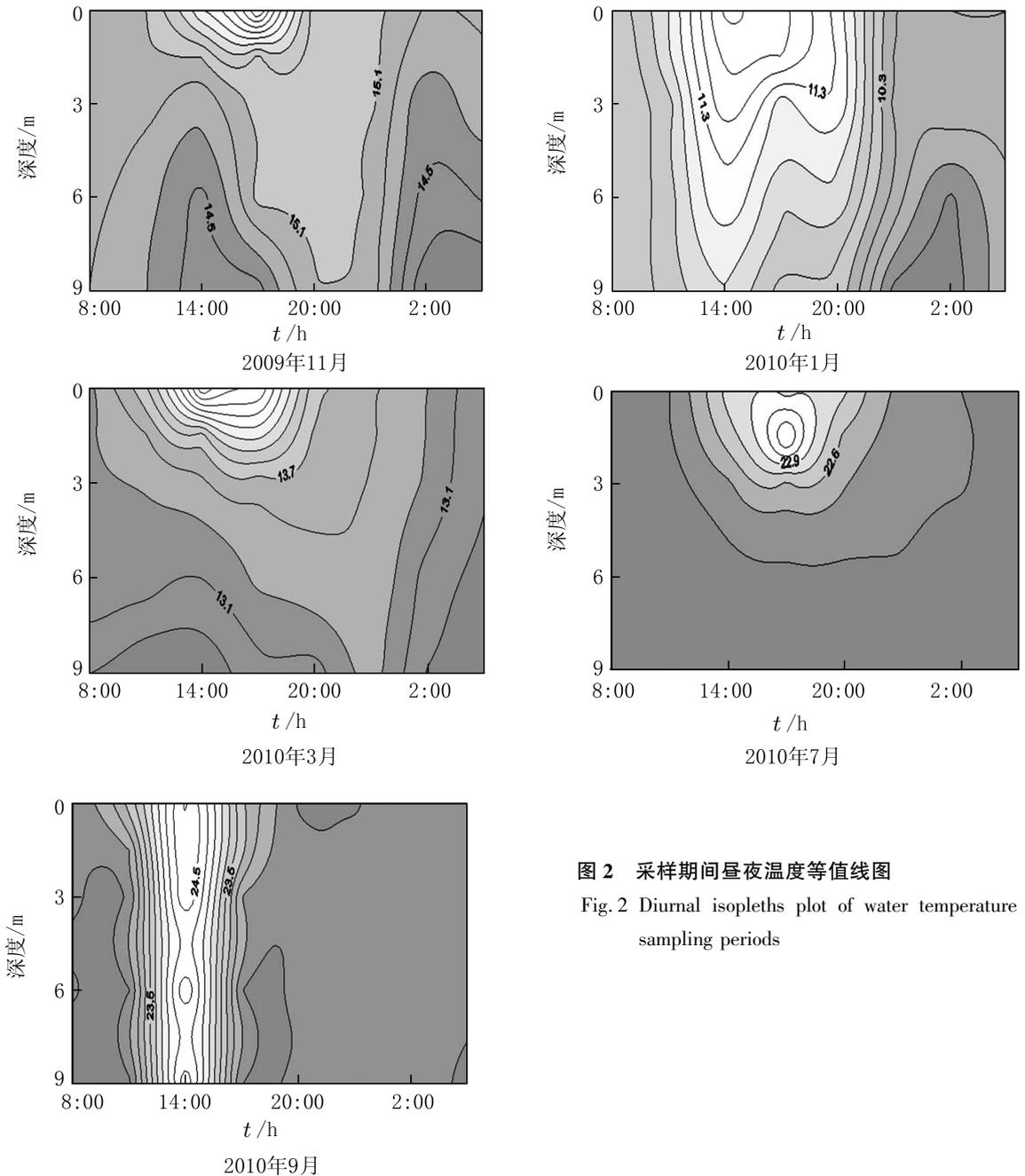


图2 采样期间昼夜温度等值线图

Fig. 2 Diurnal isopleths plot of water temperature during sampling periods

11月水体中开始出现 *Daphnia*, 到翌年3月密度达到最大值, 5月数量急剧下降, 7月和9月 *Daphnia* 在水体中消失(表1)。

2.2 微囊藻密度变化 采样期间微囊藻密度变化见图4, 水华期微囊藻密度显著高于其他月份, 其中最高值出现在11月, 密度达 $(1.10 \pm 0.52) \times 10^7 \text{ L}^{-1}$, 最低值出现在3月, 密度为 $(2.06 \pm 1.05) \times 10^5 \text{ L}^{-1}$ 。

2.3 微囊藻昼夜垂直迁移 水华暴发期间, 微囊

藻群体聚集非常明显, 尤其在上午和凌晨, MI指数均超过1.4, 并且3个月份的微囊藻群体都发生明显的昼夜垂直迁移。2009年11月, 微囊藻早晨8:00后向下迁移, 11:00下降至最深(4.51 m), 之后向上分布, 凌晨02:00和05:00停留在水体中上层。2010年7月, 早晨08:00至傍晚20:00, 微囊藻分布于水体中下层, 晚上23:00至凌晨02:00迁移至浅水区(2.2~2.5 m), 凌晨05:00后重新向下迁移, 整个周期内迁移距离最大达2.47 m。9月, 微囊

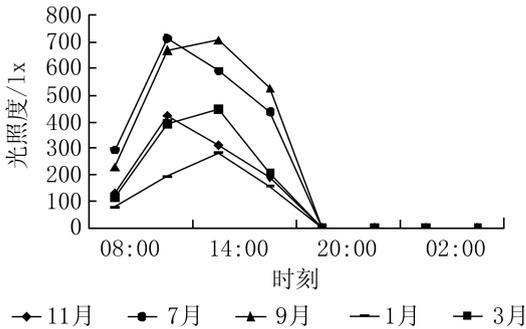


图 3 不同月份水下光照度的变化

Fig.3 Changes in the illumination intensity under water in different months

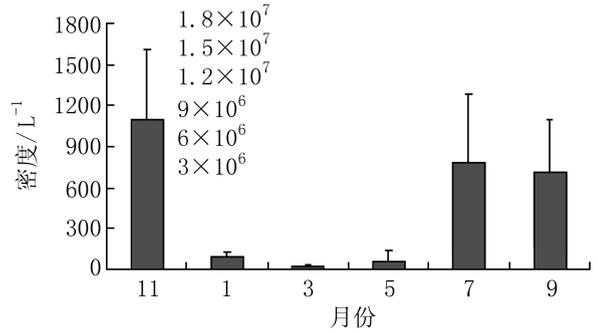


图 4 各月份微囊藻密度的变化

Fig.4 Variations in the density of *Microcystis* sp. in different month

藻分布模式与 7 月份较相似,白天藻细胞集中停留在水体中下层,晚上 20:00 后向上迁移,20:00 至 02:00 分布于水体表层.低密度时期,微囊藻聚集也非常明显,2010 年 1 月和 3 月与水华期相似,聚集程度发生最严重的时期在上午和凌晨.5 月份除了中午有聚集现象之外,其他时间 MI 指数接近 1,处于随机分布模式.1 月,上午微囊藻逐渐向下分布,到下午 14:00 时到达深水处(5.20 m).17:00 后重现向上迁移,至凌晨 02:00 迁至水体上层(2.94 m),整个采样周期内最大迁移距离超过 2.0 m.3 月,微囊藻表现与其他几个月份相反的聚集模式,早晨 08:00 至傍晚 20:00 藻类停留在水体的中上层,晚上 23:00 至凌晨 02:00 聚集于深水区,凌晨 05:00 后上层细胞再次增多.5 月,微囊藻没有表现出迁移行为,整个采样周期藻细胞分布于 3~4 m (图 5).

2.4 微囊藻分布的影响因素 相关分析结果显示,水华期间,7 月份藻密度分别与温度和 pH 呈显著 ($P=0.046$; $n=40$) 和极显著 ($P=0.000$; $n=40$) 相关关系,相关系数分别为 0.367 和 0.823;9 月份藻类分布与 pH 达极显著正相关水平 ($P=0.000$; $r^2=0.712$; $n=40$);其他月份微囊藻密度与任何理化因子都没有相关性 ($P>0.1$).

线性回归分析表明,水华(高密度)期光照度对微囊藻 WMD 和 MI 的影响非常显著,其中在 2009 年 11 月,光照度分别解释了 WMD 和 MI 总变异的 94.2% ($P=0.020$) 和 98.2% ($P=0.006$).7 月,光照度对 WMD 和 MI 总变异解释分别为 95.1% ($P=0.017$) 和 87.4% ($P=0.043$).9 月,光照度分别解释了 WMD 和 MI 总变异的 91.4% ($P=0.029$) 和

98.4% ($P=0.005$).而在低密度期,只有 1 月份光照强度对微囊藻的分布有显著影响,其中对 WMD 和 MI 总变异解释分别为 88.0% ($P=0.041$) 和 92.6% ($P=0.025$) (表 2).

3 讨论

3.1 水华期间微囊藻的迁移特征及影响因素 水华期微囊藻由于其浮力调节机制及群体间隙,表现出明显的昼夜垂直迁移现象^[18].巢湖白天上层水体中微囊藻密度显著高于底层,晚上群体细胞下沉,底层的细胞密度高于上层^[8].在 George 湖中,夜晚和早晨微囊藻群体均匀分布于水体中,中午下沉到水底层^[19].在香溪河夏季微囊藻水华暴发期间,微囊藻群体在中午之前向上迁移,下午向下迁移,到了晚上均匀分布于水体中^[6].本研究结果与他们的不同.本监测中,7 月和 9 月微囊藻群体白天分布于水体中下层,晚上或凌晨集中迁移至水上层,到了早晨又重新向下迁移.Ibelings 等^[20]报道白天微囊藻由于光合作用体内合成大量多糖,浮力下降,细胞下沉;夜晚由于呼吸作用消耗体内多糖,密度减小,细胞上浮.本研究水华(高密度)期的所有月份微囊藻的分布与光照度成显著或极显著回归关系,由此证明了上述观点.我们认为,微囊藻群体白天受到光照影响出现下沉现象,夜晚恢复浮力后上升.光照是影响洱海水华暴发(高密度)期微囊藻群体昼夜迁移的最主要因素.

除了光照,温度也是影响微囊藻垂直分布的重要因子之一^[6,15].在分层的水体中,一般很难发现微囊藻在温跃层以下迁移^[21],并且在夜晚微囊藻群体会聚集于表层,至早晨表层细胞数量出现急剧

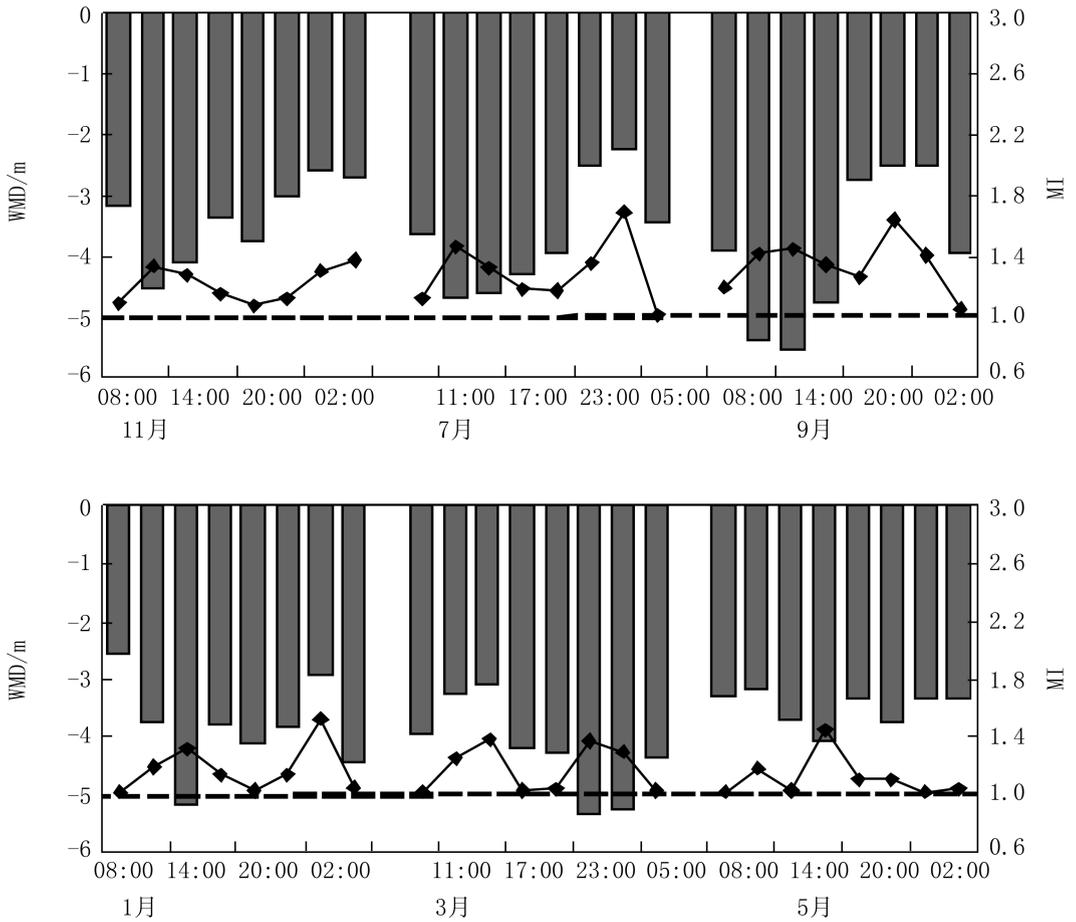


图 5 水华(高密度)期和低密度期微囊藻 WMD 和 MI 昼夜变化

Fig.5 Diurnal weighted mean depth (WMD) and MI of *Microcystis* in different months

表 2 不同月份微囊藻 WMD 和 MI 与光照度的线性回归分析

Tab.2 Linear regressions model analysis for the WMD, MI and illumination intensity of *Microcystis* sp. in different months

日期	模型	<i>P</i>	<i>R</i> ²
2009-11	WMD=2.709 log(Illu+1) -2.655	0.020	0.942
	MI=0.494 log(Illu+1) +0.036	0.006	0.982
2010-01	WMD=4.532 log(Illu+1) -6.203	0.041	0.880
	MI=0.522 log(Illu+1) -0.012	0.025	0.926
2010-07	WMD=2.860 log(Illu+1) -3.370	0.017	0.951
	MI=0.865 log(Illu+1) -1.047	0.043	0.874
2010-09	WMD=3.179 log(Illu+1) -3.660	0.029	0.914
	MI=0.488 log(Illu+1) +0.035	0.005	0.984

下降^[21].本研究结果显示,整个水华暴发期间水体并没有出现分层现象,并且在混合状态下,只有7月微囊藻密度与温度有较弱的相关性.我们认为,

在洱海水体中,温度对微囊藻群体分布的影响很小,这可能与高海拔湖泊温度常年较高有关.

3.2 高密度和低密度下微囊藻迁移模式的比较

Okada^[9]在他的模拟实验结果中提出,不同密度下微囊藻的迁移模式差异很大,高密度时微囊藻更易向上层水中迁移,而在低密度时细胞更倾向分布于水体中下层.唐汇娟通过围隔实验也得出,小群体的微囊藻在水底停留的时间较长,而大群体微囊藻停留的时间较短^[5].Takamura 等^[4]在其研究结果中也证明了这一观点.但本研究结果显示,当微囊藻密度很低时(1 月和 3 月),它们依然向聚集于水体的上层(图 5).Okada 在他的研究中指出,低水温能促使微囊藻向上水层迁移,迁移幅度变小^[9].虽然本研究中低密度期的水温明显低于水华期,但此时期微囊藻的迁移幅度依然很大(1 月和 3 月迁移距离均超过 2.0 m).我们认为,在洱海,低密度期微囊藻的迁移特征不受温度的影响.与水华(高密度)期相似,1 月份微囊藻的分布与光照度呈显著相关,白天光照度很强时细胞下沉,夜晚恢复浮力后上浮到水上层或表层获取适宜的温度及营养盐.所以 1 月微囊藻的分布模式也主要受光照的影响.

与其他月份相比,3 月份微囊藻表现出相反的聚集模式,白天大量细胞停留在水上层,夜晚聚集于水下层(图 5).藻类的分布除受理化因子影响外,还受捕食者的影响^[22-23].小型藻类,例如单个微囊藻,是大型枝角类 *Daphnia* 的重要食物来源^[24-26].在采样期间,除水华暴发期微囊藻形成群体外,低密度期微囊藻都是以单个细胞存在,这就为 *Daphnia* 提供了很好的食物来源.此外,3 月份洱海水体中 *Daphnia* 密度最高,达 15.16 L^{-1} ;并且此时期 *Daphnia* 由于躲避太湖新银鱼捕食及它们具有的趋光性,白天停留在深水层,夜晚迁移至浅水区^[27].因此,此月份微囊藻分布模式呈现出白天底层密度较少,上层至表层密度较多,而到了夜晚呈相反现象,这可能与 *Daphnia* 的摄食有关.因此我们推测,3 月份微囊藻的“特殊”分布模式可能是由于 *Daphnia* 捕食导致的.

4 小 结

微囊藻密度最高值出现在 11 月,最低值出现在 3 月.水华爆发(高密度)期,所有月份微囊藻群体均表现出明显的昼夜迁移行为,表现为白天下沉,夜晚或凌晨上浮,光照是其迁移的最主要因素.低密度期(除了 5 月)微囊藻也表现出了明显的昼夜迁移特征,其中 1 月受光照影响,其迁移模式和水华

(高密度)期相似,3 月可能是由于 *Daphnia* 的捕食,微囊藻表现出了与其他月份相反的聚集模式.

参考文献:

- [1] REYNOLD C S, WALSBY A E. Water-blooms [J]. *Biological Reviews*, 1975, 50: 437-481.
- [2] 黄佳聪, 吴晓东, 高俊峰, 等. 蓝藻水华预报模型及基于遗传算法的参数优化 [J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1 003-1 010.
HUANG J C, WU X D, GAO J F, et al. Cyanobacteria bloom prediction model and parameters optimization based on genetic algorithm [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1 003-1 010.
- [3] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制——从生物进化、生物地球化学及生态学观点 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
XIE P. A review on the cause of cyanobacterial blooms from an evolutionary, biogeochemical and ecological view of point [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] TAKAMURA N, YASUNO M. Diurnal changes in the vertical distribution of phytoplankton in hypertrophic Lake Kasumigaura, Japan [J]. *Hydrobiologia*, 1984, 112: 53-60.
- [5] 唐汇娟, 谢平, 陈非洲. 微囊藻的昼夜垂直变化及其迁移 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2003, 42(S2): 236-239.
TANG H J, XIE P, CHEN F Z. Diurnal and vertical migration pattern of *Microcystis* in shallow hypereutrophic lake [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni: Natural Sciences Edition*, 2003, 42(S2): 236-239.
- [6] WANG L, CAI Q H, ZHANG M, et al. Vertical distribution patterns of phytoplankton in summer *Microcystis* bloom period of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, 20: 553-560.
- [7] REYNOLDS C S, WALSBY A E. Water-blooms [J]. *Biological Reviews*, 1975, 50(4): 437-481.
- [8] 邓道贵, 谢平, 周琼, 等. 巢湖微囊藻和浮游甲壳动物昼夜垂直迁移的初步研究 [J]. *生态科学*, 2006, 25(1): 8-12.
DENG D G, XIE P, ZHOU Q, et al. Diel vertical migration of *Microcystis* and *Crustacean zooplankton* in Lake Chaohu [J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(1): 8-12.
- [9] OKADA M. Simulation of the waterblooms (*Microcystis*) [J]. *Surv Rep Nat Inst Envir Stud*, 1981, 18: 55-69.
- [10] 韩涛, 彭文启, 李怀恩, 等. 洱海水体富营养化的演变

- 及其研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报, 2005,3(1):71-73.
- HAN T, PENG W Q, LI H E, et al. Evolution of eutrophication in the Erhai Lake and its relevant research progress[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005,3(1):71-73.
- [11] 胡明明.浮游细菌与浮游植物多样性及其关系研究[D].武汉:中国科学院水生生物研究所,2011.
- HU M M. Studies on the diversity and relationship of bacterioplankton and phytoplankton[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [12] 卫志宏,张利仙,杨四坤,等.洱海浮游植物群落结构及季节演替[J].水生态学杂志,2012,33(4):21-25.
- WEI Z H, ZHANG L X, YANG S K, et al. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Erhai Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2012,33(4):21-25.
- [13] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统,分类和生态[M].上海:科学技术出版社,2006.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology[M]. Shanghai: Science Press, 2006.
- [14] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:环境科学出版社,2002,243-280.
- The Editorial Board of State Environmental Protection Administration of the Method of Water and Wastewater Monitoring Analysis. The method of water and wastewater monitoring analysis[M]. 4th ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002,243-280.
- [15] THACKERAY S J, GEORGE D G, JONES R I, et al. Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community[J]. Aquatic Ecology, 2006, 40:23-32.
- [16] FROST B W, BOLLENS S M. Variability of diel vertical migration in the marine planktonic copepod *Pseudocalanus newmani* in relation to its predators[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49:1137-1141.
- [17] BEZERRA-NETO J F, PINTO-COELHO R M. Diel vertical migration of the copepod *Thermocyclops inversus* (Kiefer, 1936) in a tropical reservoir: the role of oxygen and the spatial overlap with *Chaoborus*[J]. Aquatic Ecology, 2007, 41:535-545.
- [18] 张永生,郑丙辉,姜霞,等.三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究[J].环境科学,2012,33(11):3787-3796.
- ZHANG Y S, ZHENG B H, JIANG X, et al. Vertical migration of algal cells in the daning river bay of the three gorges reservoir[J]. Ecologic Science, 2012, 33(11):3787-3796.
- [19] GANF G G. Diurnal mixing and the vertical distribution of phytoplankton in a shallow equatorial lake (Lake George Uganda)[J]. Journal of Ecology, 1974, 62:611-629.
- [20] IBELINGS B W, MUR L M, WALSBY A E. Diurnal changes in buoyancy and vertical distribution in population of *Microcystis* in two shallow lakes[J]. Journal of Plankton Research, 1991, 14:419-436.
- [21] WALLACE R K. An assessment of diet-overlap indexes[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1981, 110:72-76.
- [22] BECKER V, CARDOSO L S, HUSZAR VLM. Diel variation of phytoplankton functional groups in a subtropical reservoir in southern Brazil during an autumnal stratification period[J]. Aquatic Ecology, 2009, 43:285-293.
- [23] LATTA L C, O'DONNELL R P, PFRENDER M E. Vertical distribution of *Chlamydomonas* changes in response to grazer and predator kairomones[J]. Oikos, 2009, 118:853-858.
- [24] HIETALA J, LAURÉN-MÄÄTTÄ C, WALLS M. Life history responses of *Daphnia* clones to toxic *Microcystis* at different food levels[J]. Journal of Plankton Research, 1997, 19:917-926.
- [25] LÜRLING M. Effects of microcystin-free and microcystin-containing strains of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on growth of the grazer *Daphnia magna*[J]. Environmental Toxicology, 2003, 18:202-210.
- [26] WILSON A E, HAY M E. A direct test of cyanobacterial chemical defense: Variable effects of microcystin-treated food on two *Daphnia pulicaria* clones[J]. Limnology and Oceanography, 2007, 52(4):1467-1479.
- [27] HU C L, WANG S R, GUO L G, et al. Effects of the proximal factors on the diel vertical migration of zooplankton in a plateau meso-eutrophic Lake Erhai, China[J]. Journal of Limnology, 2014, 73(2):375-386.

Study on diel vertical migration of *Microcystis* in Lake Erhai, Yunnan

HU Cui-lin^{1,2}, XIE Ping³, GUO Long-gen³, ZHOU Yong-dong¹, WANG Sheng-rui⁴

(1. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds, MOA, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fisheries Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China; 2. College of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To support the basic data for forecast of algal blooms and ecological research of *Microcystis*, circadian vertical migration experiment was carried out at a fixing station bimonthly in Lake Erhai from November 2009 to September 2010. The results were as follows: The highest density $(1.10 \pm 0.52) \times 10^7$ ind/L of *Microcystis* was found in November 2009 and the lowest value $(2.06 \pm 1.05) \times 10^5$ ind/L occurred in March 2010. During water blooms (high density) period, *Microcystis* colonies in all months exhibited strong diel vertical migration (DVM) behavior. Due to the influence of light illumination, *Microcystis* stayed in deeper strata during the daytime and migrated into the epilimnion at night and before dawn. The distribution of *Microcystis* was weakly related to temperature in July ($r^2 = 0.367$). *Microcystis* colonies had significant correlation with pH in July and September ($P < 0.001$), and the correlation coefficients were 0.823 and 0.712 respectively. *Microcystis* also showed strong diel vertical migration in low density (except for May 2010), among which, the migration pattern in January was similar with that in water blooms (high density). The aggregation pattern of *Microcystis* was found in March which may be associated with predation of *Daphnia*.

Key words: *Microcystis*; diel vertical migration; light illumination; Erhai