



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.02.014

张竞予, 鱼京善, 李占杰, 等. 官厅水库夏季叶绿素 a 浓度短时分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 95-100, 115. ZHANG Jing-yu, YU Jing-shan, LI Zhan-jie, et al. Short-term distribution of chlorophyll-a concentration in summer at Guanting Reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 95-100, 115. (in Chinese)

官厅水库夏季叶绿素 a 浓度短时分布特征

张竞予¹, 鱼京善¹, 李占杰¹, 张跃武², 刘苑³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京市官厅水库管理处, 北京 075441;
3. 河北省保定水文水资源局勘测局, 河北 保定 071000)

摘要:分析官厅水库夏季(8月份)叶绿素 a 浓度短时变化特征,对于水库水体富营养化研究具有重要意义。利用以分钟为步长的水温、水深及叶绿素 a 浓度实测数据及气象数据,对叶绿素 a 浓度垂向及昼夜变化特征进行了分析。结果表明:叶绿素 a 浓度最高值是表层浓度的 1.5~2 倍,其出现位置与温度跃层位置基本一致。叶绿素 a 浓度具有昼夜周期性变化特征。白昼,温度跃层以上叶绿素 a 浓度随水深增加逐渐增加,在温度跃层以下,随水深增加逐渐降低;夜间,温度跃层以上叶绿素 a 浓度基本稳定不变,在温度跃层以下与白昼变化趋势相同。表层水体叶绿素 a 浓度夜间大于白天,且与光照及表层水温呈负相关。水库叶绿素 a 浓度短时分布特征主要与温度分层以及限制性营养盐磷的释放有关。

关键词:叶绿素 a; 温度分层; 短时分布; 垂向变化; 昼夜变化; 官厅水库

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1683(2017)02-0095-06

Short-term distribution of chlorophyll-a concentration in summer at Guanting Reservoir

ZHANG Jing-yu¹, YU Jing-shan¹, LI Zhan-jie¹, ZHANG Yue-wu², LIU Yuan³

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Guanting Reservoir Management Bureau, Beijing 075441, China;

3. Baoding Hydrology and Water Resources Bureau of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: Chlorophyll-a concentration at Guanting Reservoir in summer (August) were analyzed. The analysis has great significance to the study of reservoir water eutrophication. The data of water temperature, water depth, chlorophyll-a concentration, and meteorological data were measured at an interval of one minute, and were analyzed. The results showed that the maximum concentration of chlorophyll-a appeared at basically the same position as that of the thermocline, and it was 1.5~2 times of the surface concentration value. Chlorophyll-a concentration showed circadian variation. During daytime, chlorophyll-a concentration above the thermocline increased as water depth increased; yet below the thermocline, it decreased as water depth increased. At night, the chlorophyll-a concentration below the thermocline had the same variation trend as it had in the daytime; but above the thermocline, it was basically stable. The surface chlorophyll-a concentration was higher at night than during the daytime, and showed a negative correlation with the surface temperature and illumination. The short-term distribution of chlorophyll-a concentration at Guanting Reservoir in summer was mainly related to the temperature stratification and the release of the limiting nutrient phosphorus.

Key words: chlorophyll-a; thermal stratification; short-term distribution; vertical variation; circadian variation; Guanting Reservoir

收稿日期: 2016-09-27 修回日期: 2017-02-13 网络出版时间: 2017-03-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170327.1430.037.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401308); 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 国家自然科学基金项目(41671018)

Funds: National Key Research and Development Program(2016YFC0401308); Fundamental Research Funds for the Central Universities Program; National Natural Science Foundation of China(41671018)

作者简介: 张竞予(1990-), 女, 河北石家庄人, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: zhangjy0910@126.com

通讯作者: 李占杰(1978-), 女, 内蒙古赤峰人, 实验师, 主要从事水资源水环境方面的研究。E-mail: lzhan@bnu.edu.cn

叶绿素 a 作为浮游植物的重要组成成分,是衡量浮游植物现存量和水体富营养化程度的重要指标。国内外对于湖库中叶绿素 a 浓度时空分布研究发现,水体中叶绿素 a 浓度的分布主要受到温度、营养盐、光照和水动力条件的影响^[1-4]。夏季由于光照、温度、降水等因素有利于藻类繁殖,成为水华爆发的高发期,并且水华的爆发是由量变到质变、由渐变到突变的状态阶跃过程^[5-10],因此对夏季湖库水体叶绿素 a 浓度进行短时间步长监测具有重要意义。目前叶绿素 a 浓度监测多采用定点采样实验室分析的方法^[11-12],无法获得连续、垂向的叶绿素 a 浓度数据,尤其是短时间间隔、昼夜连续、多频次的监测尚不多见。

官厅水库位于张家口市怀来县和北京市延庆县界内,属于海河流域。孙寓姣等(2015)^[13]对官厅水库夏季水体 6 个采样点进行水质监测,发现夏季库区采样点总氮总磷平均浓度最高,分别达到了 4.27 mg/L、0.25 mg/L,均超过地表湖库 V 类水标准最易发生水华。目前对于官厅水库水质的研究多采用表层水体取样的方法^[14-15],无法深度探究垂向水质达标情况也无法全面揭示该地区水质状况。因此本文根据官厅水库库区夏季水体叶绿素 a 浓度及相关环境因子的水体垂向、昼夜连续、短时间间隔监测数据,分析短时间尺度上叶绿素 a 浓度动态变化特征,以期为该地区水华爆发的预警提供理论依据。

1 材料及方法

1.1 监测点位置

监测点位于北京市官厅水库下游管理局附近,如图 1 所示。该区域是一个相对独立封闭的区域,水文条件较为简单,便于排除复杂环境因素的干扰。同时,通过对夏季官厅水库水质采样及水华产生时间分析,发现夏季库区水质最差,最易发生水华^[13],因此,采样时间选在 8 月份。

1.2 采样方法

本研究中利用 INFINITY 水质测量仪进行叶绿素 a 浓度监测,利用美国 Onset 公司的 HOBO 水位水温测量仪监测水温,仪器如图 2 所示,参数见表 1、表 2。INFINITY 水质测量仪是利用叶绿素的荧光特性进行浓度测定。测量仪配有携带发光二级管的传感器,当叶绿素 a 的分子吸收光量子得到能量之后便从基态跃迁到了激发态,跃迁到激发态便产生荧光,再由受光器来采集水体所含叶绿素 a 的荧光强度,进而确定叶绿素 a 的含量并进行存储,实

现了长期连续观测的目的。同时,设计制作连续自动升降装置用以搭载 HOBO 和 INFINITY 测量仪。升降装置含有电动马达、12 V 电源、正反向自动控制开关和转轴。装置可定时自动下放、停止和上升,其下放及上升速度约为 0.5 m/min。数据获取间隔为 1 min,每天 10 组观测数据开始时间分别为:0:00;3:00;6:00;8:00;10:00;12:00;14:00;16:00;18:00;21:00。监测指标为水体垂向 0~7 m 及表层分钟间隔的水温、水深、叶绿素 a 浓度。同时在监测区域安装小型气象仪获取气象数据,包括气温、降雨、风向风速、光照,时间步长为 5 min



图 1 官厅水库监测点位置

Fig. 1 The position of Guanting Reservoir monitoring point



图 2 INFINITY 水质监测仪(左)以及 HOBO 水位水温测量仪(右)

Fig. 2 INFINITY water quality monitoring instrument (left); HOBO water level and temperature monitoring instrument (right)

表 1 HOBO 水位水温测量仪参数

Tab. 1 The parameters of HOBO

主要技术指标	参数
水位量程/m	0~76.5
水位精度	±0.05 FS; 3.8 cm
水位分辨率	<0.085 kPa; 0.87 cm
温度范围(°C)	-20~50
温度精度(°C)	±0.44(0~50 时)
温度分辨率(°C)	0.1(25 时)
响应时间	<1s(压力, 90%); 3.5 min(温度, 90%)
尺寸/cm	15(长)×2.46(直径)

1.3 分析方法

本文利用统计分析中的线性回归分析方法以及克里金插值方法对实测数据进行分析。在统计学中,线性回归是利用线性回归方程的最小平函数对一个或多个自变量和因变量之间关系进行建模的一种回归分析。本文使用该方法探究叶绿素 a 浓度最高值所在位置以及温跃层所在位置的相关关系,进而探究水温对叶绿素 a 浓度垂向分布的影响。另外,利用克里金插值方法对实测叶绿素 a 浓度及水温进行插值计算。克里金插值方法又称为空间自协方差最佳插值法,是一种地质统计格网化方法。该方法首先确定对待插点值有影响的距离范围,然后用此范围内的采样点来估计待插点的属性值。本文获取垂直方向以及时间轴上叶绿素 a 浓度及水温实测数据,以该数据作为待插点,利用 Surfer 软件中的克里金插值方法进行插值计算,获得水深和时间方向的叶绿素 a 浓度及水温等值线图并研究其分布规律。

2 结果与分析

2.1 气象要素变化

官厅水库监测时段内气象要素变化如图 3,该时段内无降水。由图可知,温度呈现周期性变化即

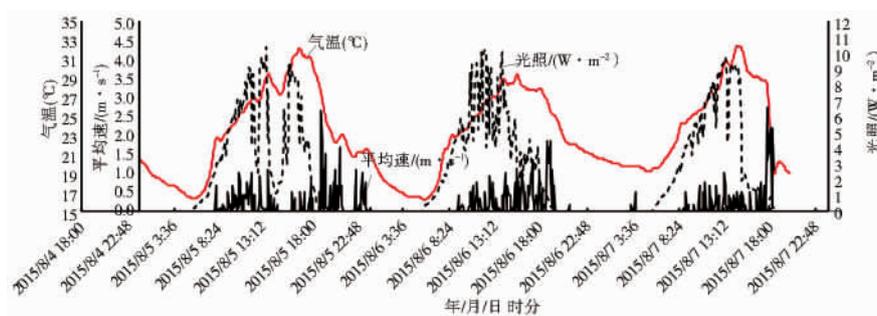


图 3 官厅水库 2015 年 8 月 5 日—7 日气象要素变化序列

Fig. 3 The meteorological elements sequence diagram at Guanting Reservoir during August 5, 2015–August 7, 2015

2.2 水温变化

将监测点位水温进行垂向及时间尺度上的克里金插值,得到水温等值线图,见图 4。可以看出,水体表层温度最高,在 $26^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 之间;底层温度最低,在 $24^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间;出现温度跃层和明显分层现象,温度跃层在水深 $3 \sim 5 \text{ m}$ 之间。夜间(21:00—次日 6:00),水体表层 $0 \sim 3 \text{ m}$ 为恒温混合层,垂向水温基本不变,温度跃层在 $3 \sim 5 \text{ m}$ 处水温下降明显;白天(8:00—18:00),水体表层混合层厚度较夜间有所减小,在某一时刻混合层甚至消失,从表层开始随水深增加水温呈持续下降的状态。温度跃层深度也在变化,夜间温度跃层较深且表层 $0 \sim 3 \text{ m}$ 出现恒温混合层;白天温度跃层深度浅且恒温混

表 2 INFINITY 水质仪参数

Tab. 2 The parameters of INFINITY

存储类型	Mini SD (16MB~2GB)
存储容量	标准存储 1GB
A / D 转换器	16 位的数字转换器
测量模式	连续模式,脉冲模式
测量间隔	0.1~600 s
脉冲时间	1~1 440 min
采样数据	1~18 000
电池类型	锂电池 3 V/ 3.3 Ah
数据传输类型	USB
电流消耗	90 mA
外壳材料	钛合金
尺寸	$\Phi 70 \text{ mm} \times 232 \text{ mm}$
重量	空气 1.3 kg, 水中 0.6 kg
耐水性	相当于 500 m 水深

白天温度高夜间温度低,最高温度出现在 14:00—16:00,约为 33°C ,最低温度出现在凌晨 6:00 左右,约为 17°C 。风速较小,基本在 1.5 m/s 以下,最大风速达到 3.5 m/s 。光照强度呈现较为稳定的周期性变化,与气温变化呈现正相关。该地区监测时段内降雨和风速对叶绿素 a 浓度的影响很小。

合层厚度变浅。研究表明水温分层现象受到光照强度、气温以及水的密度和比热影响,而光照强度与水温呈现显著正相关^[16-17]。水体垂向上由于太阳辐射强度不断衰减,表层水体可不断吸收太阳能使水温增加,而由于衰减作用无法接受太阳辐射的底层水体不能收到加热温度较低,出现温度差。由测得的气象条件可得气温与光照强度呈现一定的同步变化,即光强增加同时伴随着气温升高。水体的热量收支主要在湖面进行,表层水体受到加热密度变小,又由于水体比热较大,底层水体无法快速加温因此此处水温较低密度也较大,因而在水体垂向上出现不同密度、温度且较稳定的分层现象。白天气温升高使得水体垂向水温变化较大;夜间表层水体冷却

密度变大,使得 0~3 m 处出现垂向混合的现象继

而形成恒温混合层。。

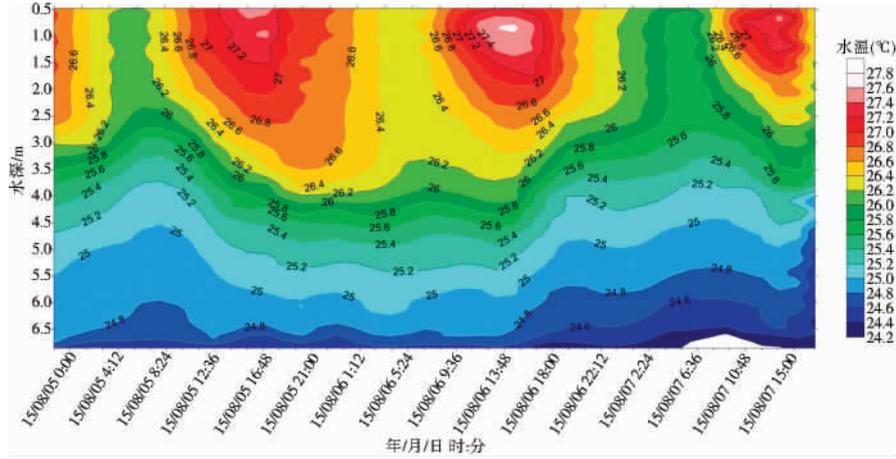


图 4 官厅水库监测点 2015 年 8 月 5 日-7 日水温等值线

Fig. 4 Water temperature contour map at Guanting Reservoir during August 5, 2015-August 7, 2015

2.3 叶绿素 a 浓度变化分析

2.3.1 叶绿素 a 浓度垂向变化

监测点一天内 10 次垂向观测结果见图 5, 其中 2015/8/5 21:00 数据缺失。结果显示,垂向叶绿素 a 浓度最高值出现在水深 3~4 m。夜间水体表层 0~3 m, 叶绿素 a 浓度在水深方向变化不大, 维持在 8~10 $\mu\text{g/L}$ 之间, 随深度增加叶绿素 a 浓度逐渐降低, 最低

浓度在底部约为 4~6 $\mu\text{g/L}$, 整体呈现一定的波动性, 见图 5(a)。白天水体水深 0~3 m 处叶绿素 a 浓度随深度增加而增加, 即水体表层叶绿素 a 浓度较低在 6~9 $\mu\text{g/L}$, 水深 3 m 处达到最大值, 最高浓度在 10~12 $\mu\text{g/L}$ 之间且为水体表层浓度的 1.5~2 倍, 3 m 以下叶绿素 a 浓度呈现随着深度的增加而降低的特征, 在水库底层叶绿素 a 浓度达到最低值, 见图 5(b)。

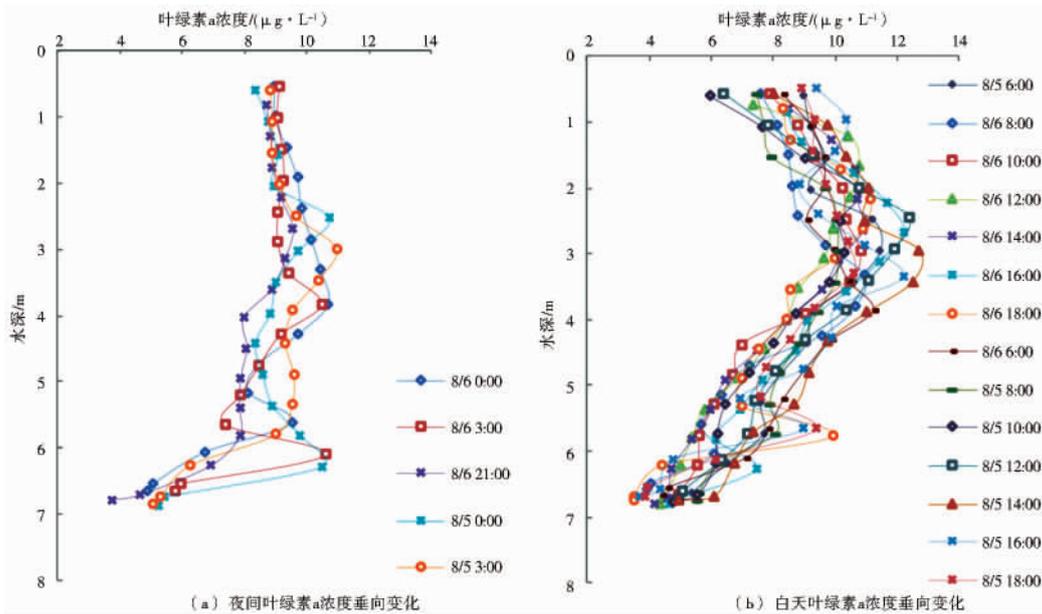


图 5 官厅水库 2015 年 8 月 5-6 日水体叶绿素 a 浓度垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of chlorophyll-a concentration at Guanting Reservoir during August 5, 2015-August 6, 2015

监测点位叶绿素 a 浓度垂向变化呈现白天先增加后减少、夜间先稳定后减少的规律, 且最大值出现的位置与温度跃层出现的位置上基本一致, 两者的相关关系见图 6。这可能与温度分层以及底泥磷的向上释放有关^[18-20]。在天然水体中大部分磷存在于沉积物中, 当水温出现分层现象时会使得湖水在垂

直方向跃层上下水体交换受到抑制同时也会导致湖泊水质出现分层现象。已有研究表明官厅水库地区磷为主要限制性营养盐^[21-22]。底泥中磷的释放, 在水的扰动作用下向上运动, 当达到温度跃层处时, 由于上部混合层和温度跃层处水体上下交换很弱使得磷无法向上补给, 上部混合层磷浓度较温度跃层处

浓度低,又由于温跃层处水温较为适宜,因此在营养盐供给充分的温度跃层处形成叶绿素 a 浓度最大值,温度跃层在水深方向的移动使叶绿素 a 浓度最大值随之变化。

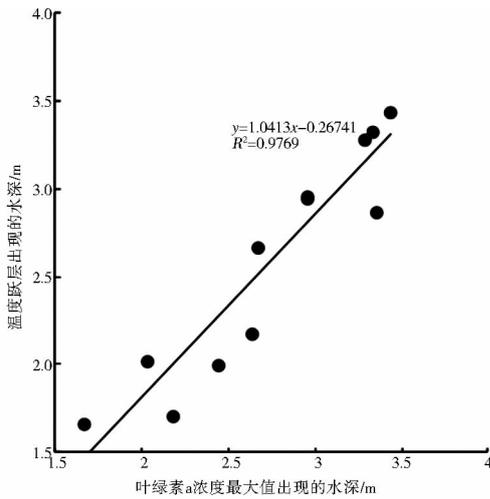


图 6 垂向叶绿素 a 浓度最大值与温度跃层出现位置相关关系

Fig. 6 The correlation between the position of maximum chlorophyll-a concentration and the position of thermocline

2.3.2 叶绿素 a 浓度昼夜变化

将监测点位叶绿素 a 浓度进行垂向及时间尺度

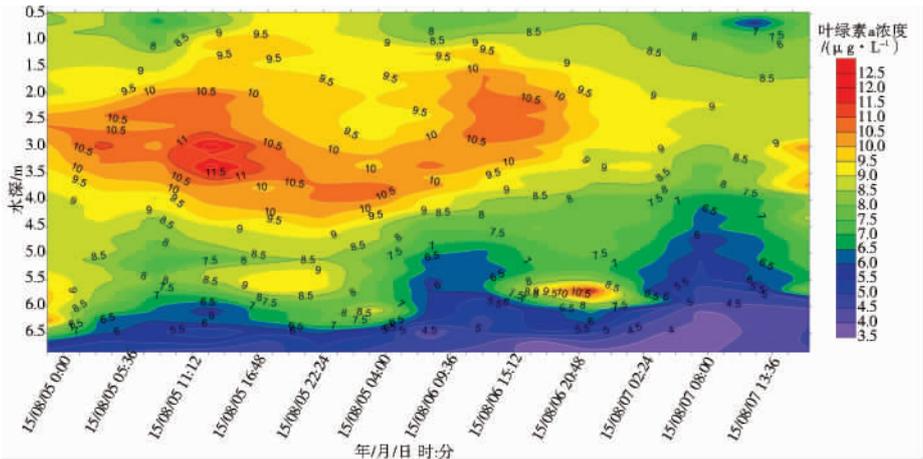


图 7 官厅水库监测点 2015 年 8 月 5 日—7 日叶绿素 a 浓度等值线

Fig. 7 Chlorophyll-a concentration contour map at Guanting Reservoir during August 5, 2015–August 7, 2015

单位面积垂向叶绿素 a 含量昼夜变化见图 8, 在时间尺度上单位面积叶绿素 a 浓度总量变化不大。因此随着叶绿素 a 浓度在温跃层聚集和水体上下混合,表层叶绿素 a 浓度产生相应变化。白天,在温度分层和磷的共同作用下,叶绿素 a 浓度最高值集中出现在温跃层处因此表层浓度相应降低;夜间,表层水体快速降温水体上下混合,此时温跃层处高浓度叶绿素 a 浓度水体向上混合,最终混合层叶绿素 a 浓度基本持平,因此表层浓度相应增加。

4 结论

官厅水库夏季水体叶绿素 a 浓度在垂向水深

上的克里金插值得到叶绿素 a 浓度等值线(图 7)。监测点表层叶绿素 a 浓度昼夜变化呈现一定的周期性,夜间较为稳定白天变化幅度大且叶绿素 a 浓度整体夜间高于白天。凌晨 5:00,叶绿素 a 浓度达到最高值,约为 10 μg/L;5:00—12:00 叶绿素 a 浓度逐渐降低,12:00 处出现最低值约为 4 μg/L;12:00—19:00 叶绿素 a 浓度开始逐渐升高,19:00 又达到最大值,约为 10 μg/L;19:00 至次日 5:00 叶绿素 a 浓度呈一定的下降趋势但基本稳定,维持在 7 μg/L 以上。该变化与表层水温及光照强度呈现相反的趋势。叶绿素 a 浓度垂向最大值出现在水深 2.5~4 m,且垂向最高值的出现位置也随时间不断变化,白天最高值出现的位置深度较浅,最浅在水深 2.5 m 左右;夜间最高值出现的位置深度较深,最深在水深 4 m 左右。

观察到官厅水库监测点监测时间段内,夜间表层叶绿素 a 浓度高于白天与光照和水温呈现相反的变化趋势,且夜间与白天叶绿素 a 浓度的垂向分布也不尽相同。研究表明^[23],水体中浮游植物生长所需的光照条件在自然条件下几乎是满足的,光照并不作为限制性因子。因此,水体表层叶绿素 a 浓度的分布特性与水体温度分层及水体垂向扰动有关。

3~4 m 处出现最大值,其位置与温度跃层所在位置一致,深度随温度跃层深度的变化而变化,其主要原因温度分层引起的上部温度跃层和上部混合层水体上下交换十分缓慢,底泥释放的限制营养盐磷无法及时供给至混合层且表层水温高于底层水温。温跃层以上得不到充分的营养供给,温跃层以下光照弱温度低限制浮游植物生长,因此在温跃层处易形成叶绿素 a 浓度峰值。水体垂向叶绿素 a 浓度最高值为表层浓度的 1.5~2 倍,因此对水体水质分析时仅取表层水体进行采样并不具有代表性。

水体垂向分布昼夜呈现不同的变化趋势。白昼

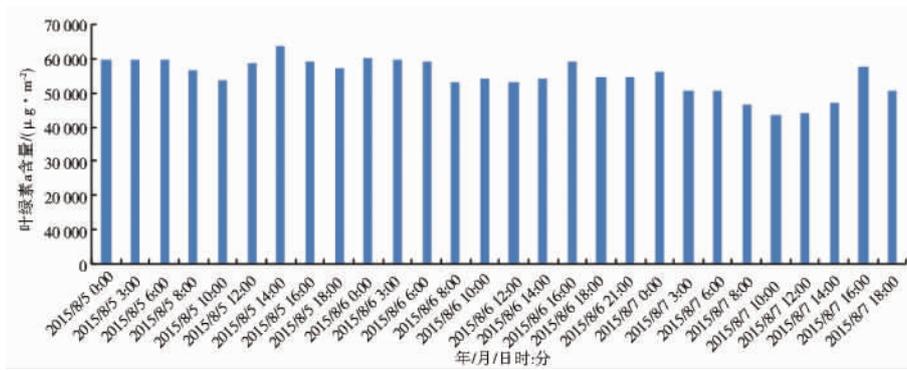


图 8 官厅水库监测点 2015 年 8 月 5 日—7 日单位面积垂向水体叶绿素 a 含量

Fig. 8 Water chlorophyll-a content per unit area in the vertical direction at Guanting Reservoir during August 5, 2015-August 7, 2015

叶绿素 a 浓度在垂向上随深度增加而逐渐增加,在 3 m 处出现最大值,大于 3 m 水深后浓度呈降低趋势;夜间由于表层水体降温上下混合形成混合层,混合层在 0~3 m 水深处,叶绿素 a 浓度在混合层垂向变化不大,大于 3 m 水深后浓度呈减少趋势,但此变化趋势不明显,基本呈波动状。

官厅水库监测点表层叶绿素 a 浓度的昼夜变化呈现一定的周期性,变化趋势与光照及温度相反。夜间表层叶绿素 a 浓度整体高于白天,表层叶绿素 a 浓度与光照及温度呈现负相关变化,这与水体温度分层的变化及水体垂向上下扰动有关。官厅水库监测点单位面积水体叶绿素 a 含量昼夜变化很小,当白天有高密度叶绿素 a 水体聚集在温度跃层处时,表层叶绿素 a 浓度相应降低;但夜间表层水体降温引起上下混合时,温度跃层处含有高密度叶绿素 a 水体向上运动,使得表层叶绿素 a 浓度升高。

参考文献 (References):

[1] Wu Z, He H, Cai Y, et al. Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang, a Yangtze-connected lake [J]. *Hydrobiologia*, 2014, 732(1): 61-70. DOI: 10. 1007/s10750-014-1844-2

[2] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. *湖泊科学*, 2011(1): 67-72. (WU E-nuo, ZHU Meng-jie, TANG Lin, et al. Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011(1): 67-72. (in Chinese))

[3] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 [J]. *生态学报*, 2013(10): 3020-3030. (MA Jian-rong, DENG Jian-ming, QIN Bo-qiang, et al. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013(10): 3020-3030. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb20120214200

[4] 陈桥, 韩红娟, 翟水晶, 等. 太湖地区太阳辐射与水温的变化特征及其对叶绿素 a 的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009(1): 199-206. (CHEN Qiao, HAN Hong-juan, ZHAI Shui-jing, et al. Influence of solar radiation and water temperature on chlorophyll-a levels in Lake Taihu, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009(1): 199-206. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j.

hjkxxb. 2009. 01. 023

[5] Arthur S, Brooks B G T. Vertical and Seasonal Distribution of Chlorophyll a in Lake Michigan [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 2011, 12(34): 2280-2287.

[6] Xu H, Paerl H W, Qin B, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology & Oceanography*, 2010, 55(1): 420-432.

[7] 赵汉取, 韦肖杭, 姚伟忠, 等. 南太湖近岸水域叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系 [J]. *水生生态学杂志*, 2011, 32(5): 59-63. (ZHAO Han-qu, WEI Xiao-hang, YAO Wei-zhong, et al. The relationship between chlorophyll-a content and nitrogen and phosphorus concentration at South Taihu Lake coastal water [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(5): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2011. 05. 010

[8] 武胜利, 刘诚, 孙军, 等. 卫星遥感太湖蓝藻水华分布及其气象影响要素分析 [J]. *气象*, 2009(01): 18-23. (WU Sheng-li, LIU Cheng, SUN Jun, et al. Remote sensing and analysis on meteorological factors of blue algal bloom in Lake Tai [J]. *Meteorological Monthly*, 2009(01): 18-23. (in Chinese))

[9] 陈云峰, 殷福才, 陆根法. 水华爆发的突变模型——以巢湖为例 [J]. *生态学报*, 2006, (03): 878-883. (CHEN Yun-feng, YIN Fu-cai, LU Gen-fa. The catastrophic model of water bloom: a case study on Lake Chaohu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, (03): 878-883. (in Chinese))

[10] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2010(03): 92-98. (ZHAO Yong-hong, DENG Xiang-zheng, ZHAN Jin-yan, et al. Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010(03): 92-98. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2010. 03. 022

[11] 丁二峰. 衡水湖叶绿素 a 含量变化及其与氮、磷浓度关系的初步研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2011(06): 87-89. (DING Er-feng. Preliminary study on change of chlorophyll-a concentration and its relationships with TN and TP in Hengshui Lake [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011(06): 87-89. (in Chinese)). DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 06087

[12] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 [J]. *环境科学*, 2013(7): 2574-2581. (DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013(7): 2574-2581. (in Chinese)). DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2013. 07. 028

(下转第 115 页)

- Ze-cong, HAN Hui-ling, CHEN Li. Calculation of ecological base flow in Dalinghe river based on improved Tennant method[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 29-31. (in Chinese))
- [12] 郑志宏, 黄强, 魏明华, 等. 基于中位数众数理论的 Tennant 法改进与应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 38-42. (ZHENG Zhi-hong, HUANG Qiang, WEI Ming-hua, et al. Improvement and application of Tennant method based on median and mode theory[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 38-42. (in Chinese))
- [13] 刘苏峡, 莫兴国, 夏军, 等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 273-280. (LIU Su-xia, MO Xing-guo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique or slope technique[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 273-280. (in Chinese))
- [14] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 287-291. (JI Li-na, LIU Su-xia, WANG Xin-chun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: a case study in Luanhe water system[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 287-291. (in Chinese))
- [15] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 42-47. (LIU Chang-ming, MEN Bao-hui, SONG Jin-xi. The ecological hydraulic radius approach of ecological flow requirement[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(1): 42-47. (in Chinese))
- [16] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 47-55. (BAN Xuan. Ecological flow requirement for Chinese sturgeon spawning habitat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 47-55. (in Chinese))
- [17] 张远, 王丁明, 王西琴, 等. 基于鱼类保护目标的太子河环境流量研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3143-3150. (ZHANG Yuan, WANG Ding-ming, WANG Xi-qin, et al. Study of environmental flow in Taizi River for fish species protection[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3143-3151. (in Chinese))
- [18] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002(9): 14-19. (NI Jin-ren, CUI Shu-bin, LI Tian-hong, et al. On water demand of river ecosystem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 14-19. (in Chinese))
- [19] 钱正英, 陈家琦, 冯杰. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 1-5. (QIAN Zheng-ying, CHEN Jia-qi, FENG Jie. Harmonious development of humanity and rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 1-5. (in Chinese))

(上接第 100 页)

- [13] 孙寓姣, 陈程, 丁爱中, 等. 官厅水库水质特征及水体微生物多样性的响应[J]. 中国环境科学, 2015(5): 1547-1553. (SUN Yu-jiao, CHEN Cheng, DING Ai-zhong, et al. The corresponding of microbial diversity on water quality and environmental variables of Guanting Reservoir[J]. China Environmental Science, 2015(5): 1547-1553. (in Chinese))
- [14] 罗阳, 周绪申, 张俊, 等. 官厅水库浮游植物多样性及演变趋势分析[J]. 海河水利, 2013(1): 19-22. (LUO Yang, ZHOU Xu-shen, ZHANG Jun, et al. Study the phytoplankton diversity and community changes in recent years at Guanting Reservoir[J]. Haihe Water Resources, 2013(1): 19-22. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-7328. 2013. 01. 007
- [15] 张世禄, 周绪申, 许维, 等. 官厅水库水体富营养化现状及变化趋势分析[J]. 海河水利, 2012(2): 25-26. (ZHANG Shi-lu, ZHOU Xu-shen, XU Wei, et al. Current situation and variation tendency of water eutrophication at Guanting Reservoir[J]. Haihe Water Resources, 2012(2): 25-26. (in Chinese))
- [16] 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等. 太湖水温分层现象的监测与分析[J]. 环境科学与管理, 2008, 6(6): 117-121. (ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, QIAN Y, et al. Monitoring and analysing of water temperature stratification in Taihu Lake[J]. Environmental Science and Management, 2008, 6(6): 117-121. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1212. 2008. 06. 034
- [17] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂直向分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 844-850. (ZHAO Lin-lin, ZHU Guang-wei, CHEN Yuan-fang, et al. Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and Shallow Lake Taihu[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 844-850. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki32. 1209. 2011. 06. 018
- [18] Li C, Yuan H, Huang H. Vertical distribution of phosphorus and P-dissolving/ decomposing bacteria in the sediment of Guanting reservoir[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48: 258-294.
- [19] 陈红军. 官厅水库富营养化污染的磷源研究与分析[D]. 北京化工大学, 2005. 69. (CHEN Hong-jun. Research and analysis on phosphorus sources of Guanting Reservoir[D]. Beijing University of Chemical Technology, 2005. 69. (in Chinese))
- [20] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 82-85. (WANG Zhen-qiang, LIU Chun-guang, QIAO Guang-jian. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 82-85. (in Chinese)). DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2010. 06082
- [21] 付鑫磊. 官厅水库水体富营养化现状及对策探讨[J]. 北京水务, 2015(4): 20-23. (FU Xin-lei. Guanting Reservoir eutrophication status and countermeasures[J]. Beijing Water, 2015(4): 20-23. (in Chinese))
- [22] 杜桂森, 王建厅, 张为华, 等. 官厅水库水体营养状况分析[J]. 湖泊科学, 2004(3): 277-281. (DU Gui-sen, WANG Jian-ting, ZHANG Wei-hua, et al[J]. Journal of Sciences, 2004(3): 277-281. (in Chinese))
- [23] 杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(3): 201-207. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6336. 2007. 03. 001. (Yang Dong-fang, Chen Sheng-tao, Hu Jun, et al. Magnitude Order of The Effect of Light, Water Temperature and Nutrients on Phytoplankton Growth[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(3): 201-207. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6336. 2007. 03. 001