

李芸, 吴祥云, 储昭升, 等. 洋河水库微囊藻空间分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 501-505.

LI Yun, WU Xiangyun, CHU Zhaosheng, et al. Spatial distribution characteristics of *Microcystis* and influencing factors in Yanghe Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(5): 501-505.

## 洋河水库微囊藻空间分布特征及其影响因素分析

李芸<sup>1,2</sup>, 吴祥云<sup>1</sup>, 储昭升<sup>2\*</sup>, 张玉宝<sup>2</sup>, 金相灿<sup>2</sup>

1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000

2. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012

**摘要:** 通过野外调查及现场风速实时监测, 对 2010 年夏季我国河北洋河水库微囊藻的空间分布特征及其影响因素进行了研究. 结果表明, 在水平空间上, 西洋河口(主要入湖河口)微囊藻细胞密度最高, 库心、北库心、坝前西、东洋河口等位置次之, 坝前东(取水口)处微囊藻细胞密度最低, 整体呈由水库西北向东南方向降低的趋势. Pearson 相关性检验表明, 洋河水库微囊藻细胞密度与  $\rho(\text{TP})$  显著相关 ( $P < 0.05$ ), 但与  $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{TN})$  及  $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  相关性不显著 ( $P > 0.05$ ). 风场分析表明, 洋河水库水华发生季节东南风风频明显大于西北风, 说明洋河水库微囊藻水平空间分布主要受入湖河流氮、磷污染及风场分布共同影响. 西洋河口和库心的微囊藻昼夜垂向分布特征表现为早晨主要集中在水体的表层(10 cm), 中午主要分布在水体 0~3.5 m 的水层, 而傍晚时则可能下沉至底层, 昼夜变化规律明显, 并且其垂向分布特征主要受藻细胞的光合作用和风浪的混匀作用共同影响.

**关键词:** 洋河水库; 微囊藻; 分布; 磷

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6929(2012)05-0501-05

## Spatial Distribution Characteristics of *Microcystis* and Influencing Factors in Yanghe Reservoir

LI Yun<sup>1,2</sup>, WU Xiang-yun<sup>1</sup>, CHU Zhao-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Yu-bao<sup>2</sup>, JIN Xiang-can<sup>2</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Research Center of Lake Eco-Environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** The spatial distribution of *Microcystis* in the Yanghe Reservoir in Hebei Province, China, was investigated from June to September 2010, and the various influencing factors, such as phosphorus, nitrogen and wind, were studied. The results showed a decreasing trend of *Microcystis* cell density from the northwestern to the southeastern parts of the reservoir. Cell density in the estuary of the Xiyang River was the highest, while that in the front of the east dam was lowest. Statistical analysis showed that cell density was significantly correlated with  $\rho(\text{TP})$  ( $P < 0.05$ ), but not with  $\rho(\text{DTP})$ ,  $\rho(\text{TN})$  or  $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  ( $P > 0.05$ ). Wind field analysis showed a higher frequency of southeastern wind than northwestern wind. These results suggested that the horizontal distribution of *Microcystis* was influenced by nutrient inflows and wind. The vertical distribution of cell density showed that most *Microcystis* was concentrated on the surface layer (10 cm) in the morning, scattered in the water at 0-3.5 m depth at noon, then sunk to the bottom in the evening. This implied that the vertical distribution of *Microcystis* was mainly determined by photosynthesis, and the wave forms were induced by wind.

**Key words:** Yanghe Reservoir; *Microcystis*; distribution; phosphorus

近年来,我国湖库富营养化问题日益突出,蓝藻

水华频繁发生<sup>[1-3]</sup>. 蓝藻水华暴发常会引起鱼类及水生植物死亡、供水系统堵塞等问题,更为严重的是,以微囊藻为优势种的水华常常伴生异味物质和藻毒素<sup>[4-5]</sup>,威胁饮用水安全,严重影响湖泊周边人民的生活和健康<sup>[6-7]</sup>. 目前,湖库中蓝藻水华暴发机理已成为研究热点. 氮、磷营养元素对水华暴发的影响受到的关注最多,水体中氮、磷浓度(尤其是磷浓度)的增加通常会导致水体中浮游植物的种群组成朝着形

收稿日期: 2011-09-16      修订日期: 2011-11-09

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(200809145); 国家自然科学基金项目(50938007, 51078341)

作者简介: 李芸(1985-), 男, 江西宜春人, liyun19850816@163.com.

\* 责任作者, 储昭升(1973-), 男, 安徽安庆人, 研究员, 博士, 主要从事湖泊富营养化及蓝藻水华研究, chuza@caes.org.cn

成水华的蓝藻演替<sup>[8]</sup>;同时,水体氮磷比也会显著影响蓝藻水华的形成. 研究<sup>[9]</sup>认为,当氮磷质量比小于29时蓝藻较易形成水华;也有研究<sup>[10]</sup>认为,低氮磷比不是蓝藻水华发生的原因,而是蓝藻水华发生的结果. 温度和光照也是蓝藻水华形成的重要因素,多数研究<sup>[11-12]</sup>表明,蓝藻(尤其是微囊藻)水华在水温较高(如夏季)的条件下容易形成,这也许与蓝藻在高温下具有相对较高的生长速率有关<sup>[13-14]</sup>. 光照条件会对水体中的藻类产生重要的影响,在低光条件下的藻类竞争试验中,蓝藻常常会成为优势种<sup>[15]</sup>. 一些关于蓝藻浮力调节的研究认为,伪空胞<sup>[16]</sup>和镇重物质(糖、蛋白质等)<sup>[17-18]</sup>对蓝藻的浮力调节功能是其富营养化水体中占据优势的原因之一. 然而,上述研究大多关注蓝藻水华暴发的机理,很少涉及蓝藻水华暴发的空间分布(尤其是垂向变化)特征<sup>[19-21]</sup>,给全面认识蓝藻水华暴发机理带来了困难. 该文选择我国北方典型的面源污染型浅水水库——洋河水库(平均水面面积13 km<sup>2</sup>,平均水深5.7 m),采用野外调查及现场风速实时监测,对洋河水库暴发的微囊藻水华空间分布特征进行了研究,并对微囊藻垂向迁移特征和机理进行分析,为了解洋河水库微囊藻占据优势并快速增殖的原因提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样

根据洋河水库水文特点,设置7个采样点(见图1),其中3个分布在河口,2个分布在库心,2个分布在坝前区域. 在洋河水库水华暴发期(2010年6—9月),每月2次采集表层水体样品(水深0.5 m处),研究洋河水库微囊藻的水平分布特征. 在8月选取2 d晴朗天气,分别在西洋河口(3#采样点)和库心(5#采样点)分层采样,研究洋河水库微囊藻昼夜垂向分布特征. 采样时间分别为08:00,13:00,18:00和第2天08:00,采样水深为0.5、1.5、2.5、3.5、4.5和5.5 m. 另外,由于08:00时微囊藻在水柱表层有一个聚集层,故该时刻加采表层(0~10 cm)水样. 采用5 L有机玻璃采水器采集原水样品,部分直接冷藏,部分用鲁哥试剂固定.

### 1.2 分析测定

将水样迅速带回实验室进行分析. 其中 $\rho(\text{TN})$ 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定<sup>[22]</sup>, $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 采用酚二磺酸分光光度法测定<sup>[22]</sup>, $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 采用钼锑抗分光光度法测定<sup>[22]</sup>;微



图1 采样点位分布

Fig. 1 Sampling sites in Yanghe Reservoir

囊藻细胞密度采用显微镜计数法测定<sup>[23]</sup>.  $\rho(\text{DO})$ 采用便携式DO仪(YSI DO200)现场测定,水温和pH采用便携式pH仪(PHBJ-260)现场测定;风速、风向为水库中的现场气象站(WeatherHawk 500)测定. 数据统计采用SPSS 18.0软件进行Pearson相关性分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 微囊藻的水平分布及影响因素

洋河水库微囊藻水平空间分布差异较大(见图2),西洋河口内(1#采样点)、西洋河口(3#采样点)微囊藻细胞密度最高,其次是库心(5#采样点)、北库心(2#采样点)、坝前西(6#采样点)、东洋河口(4#采样点),而坝前东(取水口,7#采样点)微囊藻细胞密度较低,由水库西北向东南整体呈降低趋势.

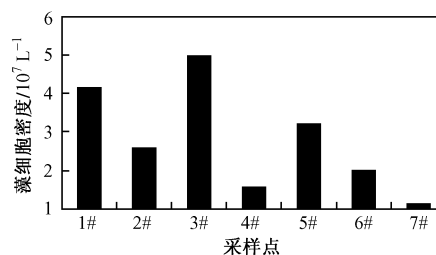


图2 洋河水库微囊藻细胞密度水平空间分布特征

Fig. 2 Spatial density of *Microcystis* among different sites in Yanghe Reservoir

水质监测数据(见图3)显示,洋河水库水体中的氮、磷含量总体偏高,其中西部水体的 $\rho(\text{TP})$ 高于东部;对比图2、3,微囊藻细胞密度较大的区域水体 $\rho(\text{TP})$ 也相应较高. 统计分析(见表1)表明,微囊藻细胞密度与水体 $\rho(\text{TP})$ 呈显著相关,而与 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 的相关性不明显. 营养盐的增加会导致蓝藻细胞浮力增加<sup>[24-26]</sup>,充足的氮、磷环境可以使蓝藻具有过量的伪空胞而使其有足够的浮力

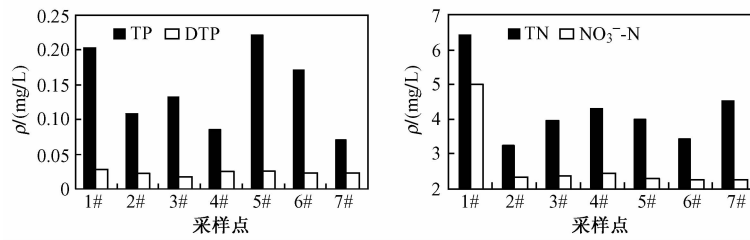


图 3 洋河水库各点位氮、磷质量浓度变化特征

Fig. 3 The mass concentration of nitrogen and phosphorus in sampling sites of Yanghe Reservoir

聚集在水体表层<sup>[27]</sup>. 说明营养盐(尤其是磷)可能是影响洋河水库微囊藻空间分布的一个重要因素.

表 1 微囊藻细胞密度与营养盐的 Pearson 相关性

Table 1 Correlations of cell density of *Microcystis* and nutrients

| 项目                                       | 微囊藻细胞密度 |
|--|---------|
| $\rho$ (TP)                              | 0.734*  |
| $\rho$ (DTP)                             | -0.099  |
| $\rho$ (TN)                              | 0.268   |
| $\rho$ (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N) | 0.507   |

注:  $n = 7$ ; \* 表示  $P < 0.05$ .

洋河水库风玫瑰图(见图 4)显示,2010 年 6—9 月,风频率出现最高的为东南风(39.9%),其次为西北风(23.5%). 研究<sup>[28]</sup>表明,风场能够引起表层水体藻类水平迁移,使藻类聚集从而导致局部水华. 在较高风频(东南风)的影响下,微囊藻经常发生迁移而聚集在水库西北方向的西洋河口区域. 因此,在洋河水库微囊藻暴发期,由于受营养盐(主要是磷)和风场共同的影响,微囊藻水平分布特征为西洋河口(主要入湖河口)藻细胞密度最高,库心、北库心、坝前西、东洋河口等位置次之,坝前东(取水口)处藻细胞密度最低.

2.2 微囊藻的垂向分布及影响因素

微囊藻在水柱中的分布呈明显的昼夜变化,日出前微囊藻主要集中在水柱表面(表层 10 cm 区域),藻细胞密度可达  $1.0 \times 10^{10} L^{-1}$ ,表层 10 cm 藻细胞数量占水柱中藻细胞总量的 59.9% ~ 64.7%;而 10 cm 以下水层藻细胞密度较小且分布较为均匀. 到 13:00,表层 10 cm 藻细胞密度降至与 0.5 m 处大致相等;微囊藻主要分布在水柱的 0 ~ 3.5 m 水层,占水柱中藻细胞总量的 90.4% ~ 96.9%(见图 5);傍晚时水柱中的微囊藻细胞密度急剧下降,第 2 天早晨微囊藻又重新浮到水面.

图 6 为水柱中  $\rho$ (DO)、pH 和水温昼夜垂向变

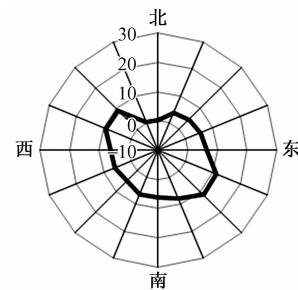
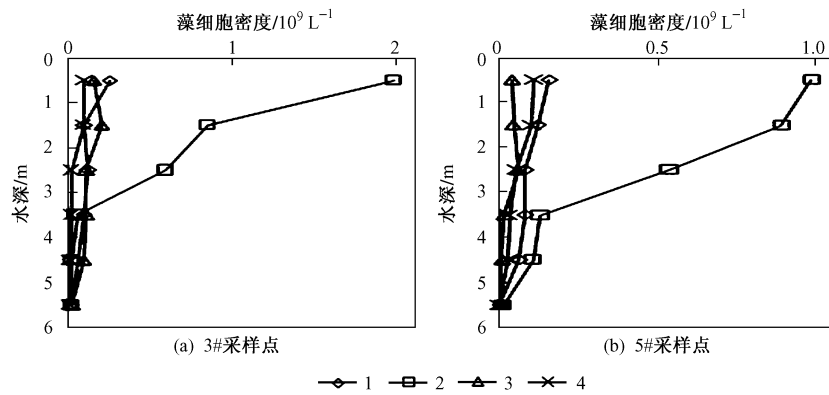


图 4 洋河水库 2010 年 6—9 月风玫瑰图

Fig. 4 Summer wind rose in 2010 of Yanghe Reservoir

化. $\rho$ (DO) 和 pH 的垂向变化趋势相似,高 $\rho$ (DO) 对应高 pH 是因为 $\rho$ (DO) 和 pH 都与微囊藻的光合作用有直接的关系. 中午和傍晚时 0 ~ 3.5 m 层 $\rho$ (DO) 升高,说明微囊藻进行了强烈的光合作用,合成了大量糖和蛋白质等镇重物质;早晨水体 $\rho$ (DO) 和 pH 水平相对较低,说明微囊藻经过一夜的呼吸作用,消耗了大量的糖等镇重物质. 研究<sup>[17]</sup>表明,当微囊藻群体聚集足够的镇重物就会使他们失去浮力,往水体深层迁移,从这点来看,微囊藻在早晨会浮在水面上,而在中午和傍晚会向水柱下层迁移. 西洋河口(3#采样点)和库心(5#采样点)水温的垂向分布呈弱分层现象,水体因温度而产生的扰动作用较小,说明水温对微囊藻的垂向分布影响不大.

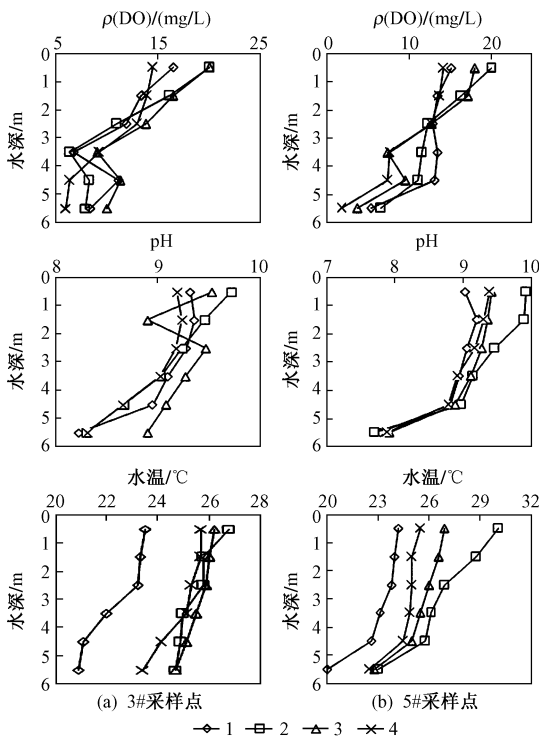
垂向分布试验第 1 天,16:00 前水库风速较小(见图 7,平均风速为 1.77 m/s),湖面只有轻微的扰动,表层水体混匀作用较弱. 此时微囊藻在水柱中的分布受风速影响较小,而早晨至傍晚间微囊藻又进行了强烈的光合作用,说明 16:00 前微囊藻的垂向变化主要受藻细胞光合作用的影响. 16:00—18:00 风速较大(见图 7,平均风速为 3.87 m/s),引起较大的水体扰动,微囊藻在水柱中的分布受风场影响较大. 当



采样时刻: 1—08:00; 2—13:00; 3—18:00; 4—第2天08:00.

图5 一昼夜内微囊藻群体垂向分布

Fig. 5 Diel vertical distribution of *Microcystis* colonies



采样时刻: 1—08:00; 2—13:00; 3—18:00;

4—第2天08:00.

图6 水柱中水温、 $\rho(\text{DO})$ 和pH昼夜垂向变化

Fig. 6 Diel vertical variations of water temperature,  $\rho(\text{DO})$  and pH

风速大于临界风速(3 m/s)时,微囊藻在水中的分布趋于均匀,无表面堆积现象发生,此时微囊藻在水柱中的分布较复杂<sup>[29]</sup>. 而风浪作用引起水体混合时,微囊藻常被胶体沉降物裹挟失去浮力而发生沉降<sup>[30]</sup>,并且此时藻细胞又积累了大量的镇重物质,说明傍晚时微囊藻主要受藻细胞的光合作用和风浪混

匀作用的影响而可能下沉至水柱底层. 因此,在西洋河口和库心位置,由于受藻细胞的光合作用和风浪的混匀作用共同影响,微囊藻垂向分布特征表现为早晨主要集中在表层的10 cm,中午主要分布在水柱0~3.5 m的水层,而傍晚时则可能下沉至底层.

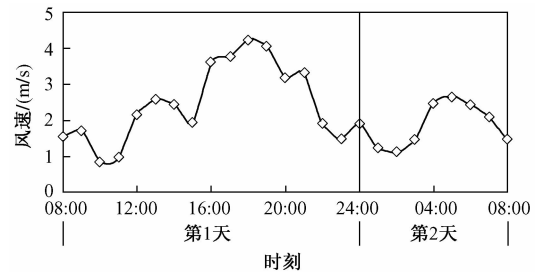


图7 洋河水库垂向分布采样期间的风速变化

Fig. 7 Variation of wind speed during the investigation of *Microcystis* vertical distribution in Yanghe Reservoir

### 3 结论

a. 在洋河水库微囊藻暴发期,微囊藻水平分布特征表现为西洋河口附近藻细胞密度最高,坝前西、库心、北库心、东洋河口等位置次之,坝前东(取水口)处微囊藻细胞密度最低. 微囊藻细胞密度与 $\rho(\text{TP})$ 显著相关( $P < 0.05$ ),并且与风场分布基本保持一致,其水平分布主要受营养盐(主要是磷)和风场共同的影响.

b. 垂向上,在西洋河口和库心位置,在晴朗微风的典型气象条件下,微囊藻分布呈早晨集中在水体表层(10 cm),中午分布在0~3.5 m水层,傍晚下沉至底层的现象;其分布主要受光合作用和风浪的混匀作用的共同影响.

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 万能,宋立荣,王若南,等. 滇池藻类生物量时空分布及其影响因素[J]. 水生生物学报,2008,32(2):184-188.
- [ 2 ] 姜霞,王书航,钟立香,等. 巢湖藻类生物量季节性变化特征[J]. 环境科学,2010,31(9):2056-2062.
- [ 3 ] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学,2008,20(1):21-26.
- [ 4 ] WELKER M,HOEG S,STEINBERG C. Hepatotoxic cyanobacteria in the shallow lake Müggelsee[J]. Hydrobiologia,1999,408/409:263-268.
- [ 5 ] SEKADENDE B C, LYIMO T J, KURMAYER R. Microcystin production by cyanobacteria in the Mwanza Gulf ( Lake Victoria, Tanzania) [J]. Hydrobiologia,2005,543:299-304.
- [ 6 ] YU Shunzhang, CHEN Gang. Blue-green algal toxins and liver cancer[J]. Chinese Journal of Cancer Reseach,1994,6(1):9-17.
- [ 7 ] JOCHIMSEN E M, CARMICHAEL W W, AN J S, et al. Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil[J]. The New England Journal of Medicine,1998,338(13):873-878.
- [ 8 ] STEINBERG C W, HARTMANN M H. Planktonic bloom forming cyanobacteria and the eutrophication of lake and rivers [ J ]. Freshwater Biology,1988,20:279-287.
- [ 9 ] SMITH V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [ J ]. American Association for the Advancement of Science,1983,221:669-671.
- [ 10 ] XIE Liqiang, XIE Ping, LI Sixin, et al. The low TN: TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms [ J ]. Water Res, 2003,37:2073-2080.
- [ 11 ] WHITTON B A, POTTS M. The ecology of cyanobacteria [ M ]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers,2000:149-194.
- [ 12 ] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [ J ]. Limnology,2001,2:45-48.
- [ 13 ] ROBARTS R D, ZOHARY T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria [ J ]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research,1987,21(3):391-399.
- [ 14 ] IRENE K E, BRUNBERG A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (Cyanophyceae) [ J ]. Journal of Phycology,2004,40:831-836.
- [ 15 ] HAVENSA K E, JAMESA T R, EAST T L. N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [ J ]. Environ Pollut,2003,122:379-390.
- [ 16 ] WALSBY A E. Gas vesicle [ J ]. Microbiological Reviews,1994,58(1):94-144.
- [ 17 ] WALLACE B B, HAMILTON D P. The effect of variations in irradiance on buoyancy regulation in *Microcystis aeruginosa* [ J ]. Limnology and Oceanography,1999,44(2):273-281.
- [ 18 ] WALLACE B B, HAMILTON D P. Simulation of water-bloom formation in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [ J ]. Journal of Plankton Research,2000,22(6):1127-1138.
- [ 19 ] 马荣华,孔繁翔,段洪涛,等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识 [ J ]. 湖泊科学,2008,20(6):687-694.
- [ 20 ] 李原,张梅,王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化 [ J ]. 云南大学学报:自然科学版,2005,27(3):272-276.
- [ 21 ] 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(2):611-629.
- [ 22 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [ M ]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社,2002:246,255,259.
- [ 23 ] LI Zonglai, YU Jianwei, YANG Min, et al. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China [ J ]. Harmful Algae,2010,9(5):481-488.
- [ 24 ] KLEMER A R. Effects of nutritional status on cyanobacterial buoyancy, blooms, and dominance, with special reference to inorganic carbon [ J ]. Canadian Journal of Botany,1991,69(5):1133-1138.
- [ 25 ] KONOPKA A. Metalimnetic cyanobacteria in hard-water lakes: Buoyancy regulation and physiological state [ J ]. Limnology and Oceanography,1989,34(7):1174-1184.
- [ 26 ] KONOPKA A, KLEMER A R, WALSBY A E, et al. Effects of macronutrients upon buoyancy regulation by metalimnetic *Oscillatoria agardhii* in Deming Lake, Minnesota [ J ]. Journal of Plankton Research,1993,15(9):1019-1034.
- [ 27 ] BROOKES J D, GANF G G, GREEN D, et al. The influence of light and nutrients on buoyancy, filament aggregation and flotation of *Anabaena circinalis* [ J ]. Journal of Plankton Research,1999,21(2):327-341.
- [ 28 ] WETZEL R G. Limnology [ M ]. Philadelphia: Saunders College Publishing,1983:396.
- [ 29 ] 朱永春,蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究 [ J ]. 湖泊科学,1997,9(2):152-158.
- [ 30 ] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探 [ J ]. 湖泊科学,1996,8(1):67-74.

(责任编辑:郑朔方)