

# 黑藻群丛对水体氮素和其他主要环境因子日变化的影响

毛丽娜<sup>1</sup>, 王国祥<sup>1</sup>①, 张利民<sup>2</sup>, 董彬<sup>1,3</sup>, 周锋<sup>1</sup>, 李振国<sup>1</sup> (1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省太湖水污染防治办公室, 江苏 南京 210024; 3. 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276000)

**摘要:** 通过引种黑藻(*Hydrilla verticillata*)构建了沉水植物-水-沉积物模拟微实验系统,研究了沉水植物黑藻生理活动的日变化对水体氮素迁移转化及其他环境因子的影响。结果表明,黑藻组水体中溶解氧浓度、pH值和氧化还原电位显著高于对照组(无黑藻水体)( $P < 0.05$ ),溶解性总固体浓度显著低于对照组( $P < 0.05$ );溶解氧浓度、pH值和氧化还原电位日变化均呈单峰曲线,15:00时达到峰值。水体 $\text{NH}_4^+$ -N和TN浓度始终保持稳定,且低于对照组。从日变化规律来看,在15:00—18:00之间 $\text{NO}_3^-$ -N平均浓度较高,在24:00—次日2:00 $\text{NO}_2^-$ -N浓度较低。

**关键词:** 黑藻; 环境因子; 氮素; 日变化

**中图分类号:** X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)06-0811-05

**Effects of Diurnal Variation of *Hydrilla verticillata* Photosynthesis on Nitrogen and Some Other Major Environmental Factors in Water.** MAO Li-na<sup>1</sup>, WANG Guo-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Li-min<sup>2</sup>, DONG Bin<sup>1,3</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>, LI Zhen-guo<sup>1</sup> (1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. General Office of Lake Taihu Water Pollution Prevention and Control of Jiangsu Province, Nanjing 210024, China; 3. School of Resources and Environment, Linyi Normal University, Linyi 276000, China)

**Abstract:** A simulated submerged plant-water-sediment micro-ecosystem was established in an experiment using an alien species of submerged plant, *Hydrilla verticillata* to study the effects of the diurnal changes in physiological activities of *H. verticillata* on migration and transformation of nitrogen and some other environmental factors in water. Results show that the presence of *H. verticillata* significantly increased DO concentration, pH, and Eh, but lowered TDS. The diurnal variations of water pH, DO and Eh all displayed a single-peak curve. The peaks appeared all around 15:00. In addition, the concentrations of total nitrogen (TN) and  $\text{NH}_4^+$ -N remained nearly constant but relatively lower than that of the control during the whole day. The mean concentration of  $\text{NO}_3^-$ -N was relatively higher between 15:00 to 18:00, and the mean concentration of  $\text{NO}_2^-$ -N relatively lower between 24:00-2:00 next day as compared to the control.

**Key words:** *Hydrilla verticillata*; environmental factor; nitrogen; diurnal variation

沉水植物是健康水生态系统的重要组成部分,通过影响底泥理化指标<sup>[1-2]</sup>、营养盐的吸收<sup>[3-4]</sup>和抑制藻类生长<sup>[3]</sup>等途径达到改善水质的作用。沉水植物对水质的影响及其作用机理已有较深入研究<sup>[5-7]</sup>,但多集中在较长时间尺度(周、月、年)层面,而对于短时间尺度(小时、天)条件下沉水植物与水质的相关研究仍相对较少。

近年来,部分学者开始关注水生植物生理活动日变化与水环境因子间相关关系的研究,如通过模拟实验研究了苦草光合作用日变化对水体理化因子的影响<sup>[8]</sup>,研究了有伊乐藻池塘春夏秋冬的水体理化因子的日变化以及营养盐的季节变化<sup>[9]</sup>。氮磷是水体富营养化过程的重要影响和指示因子,沉水植物生理活动日变化对水体磷的影响已有报道,如王立志等<sup>[10]</sup>通过24 h监测沉水植物苦草叶绿素

荧光参数、水体物理指标以及上覆水中各形态磷浓度,揭示了光合作用对沉积物磷释放的影响,但沉水植物生理活动日变化对水体中各形态氮影响的报道相对较少。理论上,由于水生植物在白天和夜晚有不同的生理活动过程,通过白天的光合作用,可吸收二氧化碳并释放氧气,导致水中溶解氧浓度和pH值升高,夜晚呼吸作用增强则导致溶解氧浓度下降。水中溶解氧和pH值的变化可能对氮素形态间的迁移转化产生影响<sup>[11-14]</sup>,而溶解氧和pH值的昼夜变化与水体中各形态氮素转化及响应的研究报道则较少。因此,笔者选择茎叶发达、顶冠蓬

收稿日期: 2013-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(41173078); 江苏省科技厅科技支撑计划(BE2011690); 常熟市科技计划(3012)

① 通信作者 E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

散的沉水植物——黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 作为试验植物,建立了沉水植物-沉积物-水体微实验系统,研究黑藻生理活动日变化对水体中环境因子及氮素迁移的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

沉积物采自南京市某地 (32°06'10.36" N, 118°54'13.75" E) 富营养化水体,采用彼得森采泥器于2012年6月采集,其基本理化性质: $w$  (有机质) 为  $349.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $w$  (总氮) 为  $1845.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $w$  (总磷) 为  $760.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采集后过筛以除去粗颗粒和动植物残体并充分混匀。选择由芽孢培养的健康黑藻幼苗作为供试黑藻,长 (30±1) cm。

### 1.2 试验方法

称取 5 kg 混匀后的沉积物放入聚乙烯方盒 (35 cm×23 cm×12 cm) 中,将方盒放入 70 cm 高的圆柱形高密度聚乙烯桶内,加自来水至距桶口 10 cm 处,系统稳定 3 周后移栽沉水植物。选取株高约 30 cm 的黑藻幼苗 150 g (约 460 株) 均匀种植于方盒中,无沉水植物的作为对照组,各组均设 3 个平行。试验在玻璃温室内进行,试验期间平均温度为 (35.2±0.1) °C。培养 60 d 后,生物量达到  $26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,选择晴朗无云的天气进行取样测定。

### 1.3 取样与分析

采样时间从第 1 天 8:00 至次日 6:00,溶解氧 (DO)、酸碱度 (pH)、氧化还原电位 (Eh)、溶解性总固体 (TDS)、水温 ( $t$ )、[光]照度 ( $E$ ) 每隔 1~3 h 测定 1 次,分别采用 YSI-550A 溶氧仪、SX-620 型笔式 pH 计、雷磁-501ORP 复合电极、SX-620 型笔式 TDS 计和 ZDS-10 型照度计进行测定,并用注射器准确采集表层 10 cm 处水样后立即放入冰箱冷藏,24 h 内测定,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度采用 Skalar (荷兰) 流动分析仪测定,TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 13.0 统计软件对试验数据进行统计分析,数据为 3 组平行的平均值, $P < 0.05$  表示差异显著, $P < 0.01$  表示差异极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子的日变化

由图 1 可知,试验期间[光]照度日变化呈明显的单峰型,平均[光]照度为  $12.93 \times 10^3 \text{ lx}$ ,最大值为  $49.30 \times 10^3 \text{ lx}$ ,出现在 13:00 左右,8:00—12:00 和

15:00—17:00 是[光]照度迅速上升和迅速下降的阶段。水温日变化曲线也呈单峰型,水温变幅为 23.9~28.5 °C,平均温度为 25.5 °C。黑藻组 DO 浓度和 pH 值日变化曲线都呈单峰型,从 8:00 开始,DO 和 pH 值均在 15:00 左右达到最高值 (图 2)。对照组 pH 值和 DO 浓度的变化较平稳,pH 值基本处于 8.8~9.2 之间。黑藻组 Eh 在 15:00 时达到最大值 364.4 mV (图 2),9:00 时 Eh 开始迅速升高,并在 15:00 时达到最大值后又迅速下降。对照组 Eh 没有明显的日变化趋势,在 266.1~317.8 mV 之间波动。黑藻组 TDS 浓度在 17:00 左右出现模糊峰值 (图 2),对照组处于相对稳定状态,两者日均值分别为 161 和 207 mg·L<sup>-1</sup>,黑藻组明显低于对照组。

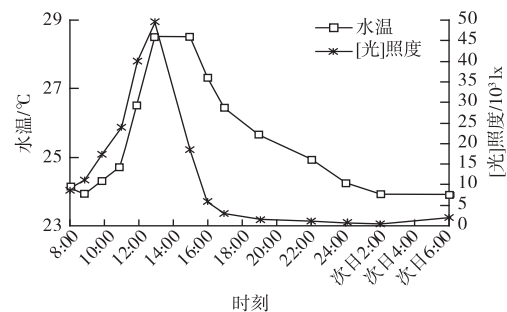


图 1 水体温度和[光]照度的日变化  
Fig. 1 Diurnal variations of water temperature and light intensity

### 2.2 水体氮素浓度日变化特征

由图 3 可知,黑藻组和对照组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度 24 h 内稍有波动,日变化趋势不明显,且与环境因子间不存在显著相关性,但对照组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均浓度大于黑藻组,为黑藻组的 1.77 倍。从 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度日变化 (图 3) 可以看出,黑藻组 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化曲线呈中间高、两端低的模糊趋势,在 15:00—18:00 时段, $\rho$  (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 较高,平均为 0.079 mg·L<sup>-1</sup>,而 8:00—14:00 和 20:00—次日 6:00  $\rho$  (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 平均值分别为 0.069 和 0.062 mg·L<sup>-1</sup>。在 8:00—22:00,黑藻组和对照组 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化趋势差异不明显 (图 3),黑藻组  $\rho$  (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N) 在 4.24~6.11 mg·L<sup>-1</sup> 之间波动,对照组在 4.11~5.72 mg·L<sup>-1</sup> 之间波动,而 24:00—次日 2:00 黑藻组与对照组 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度均显著下降 ( $P < 0.05$ ),次日 4:00 之后 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度逐渐增加。黑藻组与对照组水体 TN 浓度存在明显差异 (图 3),黑藻能显著降低水中 TN 浓度,对照组和黑藻组水中  $\rho$  (TN) 日均值分别为 1.11 和 0.78 mg·L<sup>-1</sup>,前者约为后者的 1.42 倍。

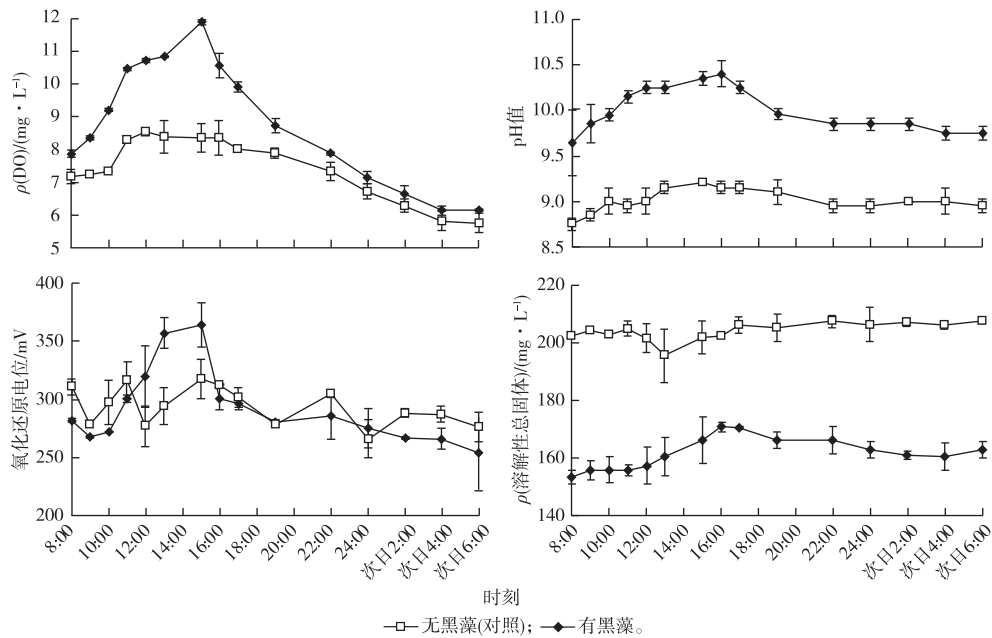


图 2 有无黑藻对水体质量日变化的影响

Fig. 2 Diurnal variation of dissolved oxygen, pH, Eh and TDS as affected by the presence of *Hydrilla verticillata*

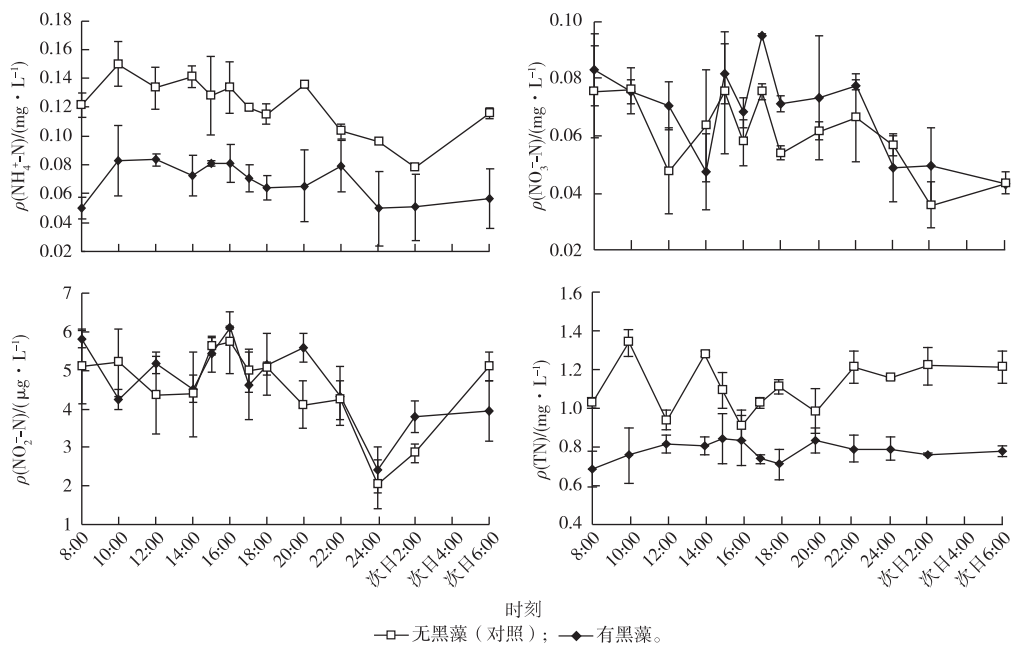


图 3 有无黑藻对水体氮浓度日变化的影响

Fig. 3 Diurnal variation of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and TN concentrations as affected by the presence of *Hydrilla verticillata*

### 3 讨论

#### 3.1 环境因子

水体温度与光照强度是影响沉水植物光合作用和水体水质指标的重要环境因子。据报道,黑藻在[光]照度为  $53.20 \times 10^2 \sim 120.00 \times 10^2$  lx、温度为

$20 \sim 30$  °C 条件下生长良好<sup>[15]</sup>。笔者试验期间平均[光]照度为  $129.3 \times 10^2$  lx, 平均温度为  $25.5$  °C, 为黑藻生长的最适范围内。

黑藻光合作用的日变化对水体 pH 值和 DO 影响极显著(表 1,  $P < 0.01$ )。由图 1~2 可知,随着[光]照度的升高和黑藻光合作用的增强,水体 pH

值和 DO 浓度不断升高,而在下午和晚上,随着[光]照度的逐渐减弱,水温降低,DO 浓度下降而 CO<sub>2</sub> 浓度增加,CO<sub>2</sub> 浓度增加促使 H<sup>+</sup> 浓度升高,从而使得 pH 值下降。对照组 DO 浓度存在一个模糊的峰值,峰值出现在 12:00 左右(图 2),可能是由于对照组水体中有少量藻类引起的<sup>[16-17]</sup>,藻类的光合作用导致对照组水体 DO 浓度发生变化。

表 1 环境因子的皮尔逊相关系数矩阵

Table 1 Matrix of Pearson correlation coefficients between environment factors

项目	水温	[光]照度	溶解氧浓度	pH 值	氧化还原电位
[光]照度	0.547*				
溶解氧浓度	0.822**	0.769**			
pH 值	0.856**	0.581*	0.916**		
氧化还原电位	0.639*	0.364	0.659*	0.699**	
溶解性总固体浓度	0.524	0.023	0.524	0.711**	0.564*

\*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ 。

水体 Eh 变化和水质 DO 浓度间显著相关(表 1,  $P < 0.05$ ),该结果与 SHROUT 等<sup>[18]</sup>的研究结果一致,在 15:00 时,黑藻光合作用强烈,水质 DO 浓度最高,Eh 也迅速升高;而到夜晚,黑藻进入呼吸作用阶段,Eh 又迅速下降。

TDS 指水体中各种离子、分子和化合物的总量。黑藻能明显降低水质 TDS 浓度,在 15:00—17:00 左右黑藻组出现模糊峰值,可能是由于此时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 TN 浓度较高所致(图 3)。黑藻组 TDS 浓度显著低于对照组,一方面是由于黑藻直接吸收营养物质,另一方面,沉水植物光合作用过程中向水质释放大氧,有利于保持水质的高度氧化状态,促进有机污染物和某些还原性无机物的氧化分解<sup>[19]</sup>。

### 3.2 水质氮素的迁移

黑藻组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度明显低于对照组,这种差异可能是由于黑藻的吸收以及微生物作用引起的。童昌华等<sup>[20]</sup>的试验结果表明,尽管氨氮可以通过直接挥发和底泥吸附等途径从水质中去除<sup>[21-23]</sup>,但硝化和反硝化作用才是氨氮去除的主要途径<sup>[24]</sup>。硝化作用是一个序列反应,先由氨化细菌将氨氧化为亚硝酸盐,再由亚硝酸盐氧化菌将亚硝酸盐氧化为硝酸盐<sup>[25,18]</sup>,而 DO 浓度是影响硝化作用的重要因素。李正魁等<sup>[14]</sup>研究表明,当  $\rho(\text{DO})$  低于 4.3 mg · L<sup>-1</sup> 时,硝化反应速率较低;而笔者试验中,在 13:00—17:00 时段黑藻组水质  $\rho(\text{DO})$  平均值为 10.80 mg · L<sup>-1</sup>,有利于促进硝化作用,因此可能是

导致 15:00—18:00 时段 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度较高的原因。由于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度较低,受水质温度和溶解氧影响较大<sup>[26]</sup>,日变化趋势不明显,而亚硝酸盐是氮循环的中间产物,当溶解氧浓度一定时,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度取决于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的转化率,黑藻组水质中  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$  平均值为 0.068 mg · L<sup>-1</sup>,导致 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度水平较低;另一方面,由于在 24:00—次日 2:00 水温较低(图 1),而水温的降低对硝化作用具有一定的控制效果<sup>[27]</sup>,故此时硝化作用不明显,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度降低明显( $P < 0.05$ )。

水质 TN 水平受植物吸收、微生物转换以及底泥释放等多个过程的综合影响。笔者研究中,黑藻鲜质量比栽植时增长约 170 倍,植物生长引起水质 TN 浓度降低,可能促进底泥释放过程,但日变化显示,黑藻的光合作用未引起水质中 TN 浓度的明显波动。王永平等<sup>[8]</sup>研究了苦草的光合作用日变化对水质的影响,结果表明 TN 浓度日变化波动不显著,与笔者研究结果一致。从图 3 可知,虽然对照组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度日变化趋势不明显,但黑藻组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度明显低于对照组( $P < 0.05$ ),主要是由于黑藻的吸收作用以及水质微生物的作用<sup>[28]</sup>。笔者的试验结果显示对照组 TN 浓度高于黑藻组,且观察到对照组水质中丝状藻较多,有明显的悬浮颗粒物,而黑藻组上覆水清澈透明,这可能与黑藻茎叶对水质悬浮物的吸附作用有关,吸附作用有效地降低悬浮物浓度,增加水质透明度。同时,黑藻可吸收水质氮素并抑制沉积物中营养物溶出速度<sup>[29-31]</sup>,从而使黑藻组 TN 浓度明显下降。植物生长消耗底泥中氮、茎叶附着细菌和藻类的生长以及水质微生物变化等因素对硝化和反硝化过程的影响尚有待进一步研究。

## 4 结论

(1)黑藻能显著提高水质溶解氧浓度、氧化还原电位和 pH 值,并降低 TDS 浓度,对水质有明显改善作用。除 TDS 浓度外,其他环境因子在 15:00 左右出现最高值,日变化呈单峰曲线。因此,植物光合放氧对上述水质环境因子有显著影响。

(2)黑藻引起水质中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 浓度明显降低,但无明显日变化趋势。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度在 15:00—18:00 时有所升高,显示较高的溶解氧水平对微生物硝化过程具有促进作用。

(3)在沉水植物系统的沉水植物、水质和沉积物这 3 个要素中,黑藻光合放氧过程引起水质环境

条件的改变,特别是溶解氧浓度的变化,与微生物作用密切联系,进而影响水体硝化和反硝化等氮转化过程及净化效果。

#### 参考文献:

- [1] JEPPESEN E, KRISTENSEN P, JENSEN J P, *et al.* Recovery Resilience Following a Reduction in External Phosphorus Loading of Shallow, Eutrophic Danish Lakes: Duration, Regulating Factors and Methods for Overcoming Resilience [J]. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia*, 1991, 48: 127-148.
- [2] 张俊, 朱学诞. 菹草生理特性对底质物理性质变化的响应 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1311-1314.
- [3] BAILEY P, BOON P, MORRIS K, *et al.* Managing Nutrients in Floodplain Wetlands and Shallow Lakes: 2. Rivers and Riparian Land Management Technical Guideline Update [M]. Canberra, Australia: Land & Water Australia, 2002: 1-8.
- [4] 吴海龙, 霍元子. 连续可调式沉水植物网床对河道水质的修复 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2580-2586.
- [5] ZHOU J, GAO J, LIU Y, *et al.* Removal of Fluoride From Water by Five Submerged Plants [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 89(2): 395-399.
- [6] WANG L Z, WANG G X, GE X G, *et al.* Effects of *Hydrilla verticillata* (L. F.) Royle on Phosphorus Sorption in Sediments [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2011, 23(9): 3949-3954.
- [7] YU H, YE C, SONG X, *et al.* Comparative Analysis of Growth and Physio-Biochemical Responses of *Hydrilla verticillata* to Different Sediments in Freshwater Microcosms [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1285-1289.
- [8] 王永平, 王小东. 苦草光合作用日变化对水质的影响 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(10): 1141-1144.
- [9] REDDY K R. Diel Variations of Certain Physico-Chemical Parameters of Water in Selected Aquatic Systems [J]. *Hydrobiologia*, 1981, 85(3): 201-207.
- [10] 王立志, 王国祥. 苦草光合作用日变化对水体环境因子及磷质量浓度的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2669-2674.
- [11] CHEN G, CAO X, SONG C, *et al.* Adverse Effects of Ammonia on Nitrification Process: The Case of Chinese Shallow Freshwater Lakes [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 210(1): 297-306.
- [12] TURK O, MAVINIC D S. Maintaining Nitrite Build-Up in a System Acclimated to Free Ammonia [J]. *Water Research*, 1989, 23(11): 1383-1388.
- [13] 孔繁翔, 尹大强, 严国安. *环境生物学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 276-283.
- [14] 李正魁, 杨竹攸, 赖鼎东, 等. 影响固定化纯种氨氧化细菌 *Comamonas aquatica* LNL3 短程硝化过程因素动力学分析 [J]. *核技术*, 2009, 32(4): 292-297.
- [15] 朱丹婷, 乔宁宁. 光强、温度、总氮浓度对黑藻生长的影响 [J]. *水生生物学报*, 2011, 35(1): 88-97.
- [16] KEMP W M, BOYNTON W R. Influence of Biological and Physical Processes on Dissolved Oxygen Dynamics in an Estuarine System: Implications for Measurement of Community Metabolism [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1980, 11(4): 407-431.
- [17] TUDOR M. Diurnal Changes of Dissolved Oxygen in Fouling Land-Based Tanks for Rearing of Sea Bass [J]. *Aquacultural Engineering*, 1999, 19(4): 243-258.
- [18] SHROUT J D, PARKIN G F. Influence of Electron Donor, Oxygen, and Redox Potential on Bacterial Perchlorate Degradation [J]. *Water Research*, 2006, 40(6): 1191-1199.
- [19] 王传海, 李宽意. 苦草对水中环境因子影响的日变化特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 798-800.
- [20] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 低温季节水生植物对污染水体的净化效果研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 159-162.
- [21] 庄源益, 戴树桂, 张明顺. 水中氨氮挥发影响因素探讨 [J]. *环境化学*, 1995, 14(4): 343-346.
- [22] 王晓蓉. *环境化学* [M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 147.
- [23] REDDY K R, DEBUSK T A. State-of-the-Art Utilization of Aquatic Plants in Water Pollution Control [J]. *Water Science & Technology*, 1987, 19(10): 61-79.
- [24] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理 [J]. *中国环境科学*, 1995, 15(2): 140-144.
- [25] SCHMIDT I, SLIEKERS O, SCHMID M, *et al.* New Concepts of Microbial Treatment Processes for the Nitrogen Removal in Wastewater [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27(4): 481-492.
- [26] 刘建广, 张晓健, 王占生. 温度对生物炭滤池处理高氨氮原水硝化的影响 [J]. *中国环境科学*, 2004, 24(2): 233-236.
- [27] 周玲玲, 张永吉, 宋正国, 等. pH 和温度对氯胺消毒给水管网硝化作用的影响 [J]. *环境科学*, 2011, 32(6): 1627-1631.
- [28] 王智, 张志勇, 张尹倩. 两种水生植物对滇池草海富营养化水体水质的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 328-335.
- [29] 戴莽, 倪乐意, 谢平, 等. 利用大型围隔研究沉水植被对水体富营养化的影响 [J]. *水生生物学报*, 1999, 23(2): 97-101.
- [30] 倪乐意, 蔡庆华, 黎道丰, 等. 黄淮海平原封丘试区水生植被 [J]. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 357-364.
- [31] DIETER C D. The Importance of Emergent Vegetation in Reducing Sediment Resuspension in Wetlands [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1990, 5(4): 467-473.

作者简介: 毛丽娜(1989—), 女, 江苏常州人, 硕士生, 主要研究方向为水生态环境修复。E-mail: nell.89@163.com