

## 温度和光照对黑藻生长及净化污水效果的影响

陈文音<sup>1,4</sup>, 袁少雄<sup>1,4</sup>, 李化军<sup>2</sup>, 林丰平<sup>3</sup>, 李青<sup>2</sup>, 胡进民<sup>2</sup>, 陈章和<sup>1,\*</sup>

(1. 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广东省植物发育生物工程重点实验室, 华南师范大学生命科学学院, 510631 广州;

2. 广州市白云区水务局, 510405 广州; 3. 广州市白云区纪律检查委员会, 510405 广州; 4. 广州地理研究所, 510070 广州)

**摘要:** 研究温度和光照对黑藻 (*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle) 生长和净化污水效果的影响。结果表明在 35 °C、25 °C 的培养中黑藻生长旺盛, 经过 15d 的培养, 植株生物量显著高于 5 °C 的处理 ( $P < 0.05$ ), 对总氮 (TN) 的去除率达到 78%, 对总磷 (TP) 的去除率达到 98%; 在 15 °C 中黑藻生长较慢, 对污水的净化效果有所下降, 但对 TN 和 TP 的去除率仍达到 76% 和 82%; 在 5 °C 的培养中黑藻的生长受到抑制, 对 TN 和 TP 的去除率都仅为 46%, 显著低于 15、25 °C 和 35 °C 的处理 ( $P < 0.05$ )。在较高光照强度 (2000—4000 lx) 的培养中黑藻的生长和对污染物的去除率无显著差异, 而在较低光照强度 (1000 lx) 下, 黑藻生长量和对 TN 和氨态氮 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 的去除率显著降低 ( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 黑藻; 温度; 光照强度; 生长; 净化效果

## Influences of temperature and light intensity on the growth and pollutant removal by *Hydrilla verticillata*

CHEN Wenyin<sup>1,4</sup>, YUAN Shaoxiong<sup>1,4</sup>, LI Hua jun<sup>2</sup>, LIN Fengping<sup>3</sup>, LI Qing<sup>2</sup>, HU Jinmin<sup>2</sup>, CHEN Zhanghe<sup>1,\*</sup>

1 Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, and Guangdong Provincial Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 The Bureau of Water Resources, Baiyun District, Guangzhou 510405 China

3 Commission for Discipline Inspection, Baiyun District, Guangzhou 510405, China

4 Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

**Abstract:** Effects of temperature and light intensity on plant growth and decontamination efficiency were investigated in micro-scale wetlands vegetated by *H. verticillata* (Linn. f.) Royle. Results indicated that after a 15d cultivation period, biomass of *H. verticillata* grown in 25°C and 35°C was significantly higher than that in 5°C ( $P < 0.05$ ). The average removal rates in 25°C and 35°C were 78% for total nitrogen (TN), and 98% for total phosphorus (TP). *H. verticillata* grew slower in 15°C than in 25°C and 35°C, and displayed lower TN and TP removal rates (76% and 82% respectively). Growth of *H. verticillata* was limited and the removal rates were the lowest in 5°C, with a TN removal rate of 46% and a TP removal rate of 46%, which were significantly lower than the removal rates in higher temperatures examined during this study ( $P < 0.05$ ). There were no significant differences in biomass and removal rates among 2000 lx, 3000 lx and 4000 lx, while there were significant differences in biomass and removal rates of TN and ammonium between 1000 lx and other light intensities ( $P < 0.05$ ).

**Key Words:** *Hydrilla verticillata*; temperature; light intensity; growth; decontamination efficiency

人工湿地是 20 世纪 70 年代发展起来的一种污水处理方法<sup>[1-2]</sup>, 以处理效果好、投资少、建造和运行费用低、维护方便, 具有将污水处理与环境生态建设有机结合, 在处理污水同时创造城市生态景观等特点, 在污水

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30470346); 广东省自然科学基金资助项目 (06025056); 广州市白云区水务局资助项目

**收稿日期:** 2009-03-19; **修订日期:** 2009-12-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzzh@sncu.edu.cn

处理中得到越来越广泛的应用<sup>[3-7]</sup>。湿地植物是人工湿地系统中重要组成部分,包括挺水植物、沉水植物和浮叶植物,它们在净化污水过程中发挥了重要的作用<sup>[8-10]</sup>。

黑藻(*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle)又名轮叶黑藻、水王荇、球丝草、灯笼草等,属于单子叶植物纲水鳖科黑藻属,是一种多年生沉水植物,在我国南北各省的湖泊、池沼、水沟及水流缓慢的河中均有分布<sup>[11]</sup>。其适应性强,生长迅速,对污染物吸收、富集能力强,具有较好的净化污水能力<sup>[12-17]</sup>,但目前对黑藻的研究主要集中在其对富营养化水体的净化效果和对重金属的累积,而有关环境因子对黑藻生长和净化污水效果影响的研究较少。本文通过实验探讨温度、光照强度等环境因素对黑藻生长和净化污水效果的影响,从而为黑藻在污水处理中的研究和应用提供科学依据。

## 1 实验方法

采用单因素试验,研究温度、光照对黑藻生长和净化效果的影响。

实验所用黑藻取自华南师范大学生命科学学院鱼类养殖池中,取其顶枝 10cm,栽于蓝色塑料箱(56.0cm×45.0cm×39.5cm)中,灌入自来水,深度为 30cm,置于室外预培养 10d 后,移栽于白色塑料箱中,每箱移栽株数相同,鲜重约 50g,底铺 2cm 厚的干净细沙,构成小型湿地系统,于光照培养箱中培养。

参照生活污水的浓度人工配制实验污水<sup>[18]</sup>。配制的污水:化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)浓度为 100 mg L<sup>-1</sup>,总氮(TN)为 20 mg L<sup>-1</sup>,总磷(TP)为 2.5 mg L<sup>-1</sup>。灌溉量为 10 L,停留时间为 15d。每 3d 采集水样 1 次,测定生物需氧量(BOD<sub>5</sub>)、COD<sub>Cr</sub>、TN、氨态氮(NH<sub>4</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、TP、可溶磷(SP)等指标。采样时混匀培养箱水体后取其表层水,采样量为 250 ml。

小型人工湿地置于光照培养箱(PGX-330A-12H)培养。在相同光照下设 5、15、25℃和 35℃等 4 个温度,每个温度 3 个重复。在相同温度下设 1000、2000、3000lx 和 4000 lx 等 4 个光照强度,每个光照强度 3 个重复。

实验结束时收割各培养箱中黑藻,称鲜重,放入烘箱内 80℃烘 48h,测干重。

水质测定按照国家环境保护局<sup>[19]</sup>的方法,具体如下:(1)TN 为碱性过硫酸钾分解-紫外分光光度法;(2)NH<sub>4</sub>-N 为纳氏试剂光度法;(3)NO<sub>3</sub>-N 为紫外分光光度法;(4)TP 为过硫酸钾氧化-钼蓝比色法;(5)SP 为钼蓝比色法;(6)COD<sub>Cr</sub>为重铬酸钾法;(7)BOD<sub>5</sub>为稀释与接种法。

由于实验水量较少,实验时间较长,考虑到水样蒸发对净化结果的影响,本实验中设定标尺,测定培养箱水体积。各污染物去除率(*R*)的计算考虑水体体积的变化,计算方法如下:

$$R(\%) = [(C_0 V_0 - C_t V_t) / C_0 V_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中,*C*<sub>0</sub>为各污染物初始浓度,*C*<sub>*t*</sub>为取样时各污染物浓度,*V*<sub>0</sub>为培养箱水的初始体积,*V*<sub>*t*</sub>为取样时培养箱中水体体积。

采用 Excel 和 SPSS13.0 统计软件进行数据分析,计算各指标的平均数及标准误差。差异显著性的检验,利用单因素方差分析的方法进行<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度对黑藻生长及净化效果的影响

#### 2.1.1 温度对黑藻生长的影响

黑藻在 15、25、35℃的光照培养中生长良好,经 15d 的生长,生物量分别增长了 12%、25%、21%(图 1),3 个处理间无显著差异。而在 5℃下黑藻生长缓慢,到实验后期部分植株的枝叶死亡腐烂,实验结束时生物量减少了 14%(初始平均生物量为 3.44g),生物量显著低于 15℃培养中的黑藻生物量(*P* < 0.05),极显著地低于 25℃和 35℃(*P* < 0.01)。可见,温度对黑藻的生长有显著影响,15—35℃适宜黑藻生长,有利于黑藻生物量的累积,而低温则对黑藻的生长有抑制作用。

#### 2.1.2 温度对黑藻净化污水效果的影响

黑藻构成的小型模拟湿地系统能有效去除污水中的氮,随实验时间的推移水体中总氮的浓度逐渐下降,总氮的去除率逐渐增大(图 2a)。不同温度下黑藻湿地系统对总氮的去除率不同,实验开始的前 6d,4 个温度

下总氮的去除率相接近,而后较高温度下总氮的去除率增长较快,实验结束时,35、25℃和15℃总氮的去除率分别达到78%、78%和76%,都极显著高于5℃(46%) ( $P < 0.01$ ),而三者间无显著差异。

不同温度下黑藻湿地系统对氨态氮的去除率如图2b所示。在实验的过程中,5℃黑藻湿地系统对氨态氮的去除率为33%—41%,无较大的变化。在15、25℃和35℃,黑藻湿地系统对氨态氮的去除率随时间的增加逐渐增大,实验结束时3个温度下氨态氮的去除率分别达到84%、100%和99%,三者之间无显著差异,但都显著高于5℃下氨态氮的去除率( $P < 0.05$ )。

黑藻湿地系统在25℃和35℃对硝态氮的去除率极显著高于5℃和15℃( $P < 0.01$ );15℃下硝态氮的去除率极显著高于5℃( $P < 0.01$ ) (图2c)。在实验过程中,25℃和35℃下黑藻湿地系统对硝态氮的去除速度非常快,第3天,硝态氮的去除率都达到99%,这可能由于沉水植物优先利用 $\text{NO}_3\text{-N}$ ,黑藻在25℃、35℃下生长迅速,大量吸收 $\text{NO}_3\text{-N}$ ,同时微生物的代谢活动也旺盛,使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除速度非常快,而后由于氨态氮的转化,硝态氮的去除率有所下降,但实验结束时,这两个温度下硝态氮的去除率仍分别达到92%和85%。在5℃和15℃,黑藻湿地系统对硝态氮的去除率逐渐增加,实验结束时分别为22%和37%。可见,在一定的温度范围内,高温有利于黑藻对硝态氮的去除。

不同温度下黑藻湿地系统对总磷的去除率如图2d所示,35℃和25℃下黑藻湿地系统对总磷的去除率都极显著高于5℃( $P < 0.01$ );15℃下总磷的去除率也显著地高于5℃( $P < 0.05$ )。实验结束时,4个温度下黑藻湿地系统对总磷的去除率分别为98%、98%、82%和46%。总体上,黑藻湿地系统对总磷有较好的去除效果。

黑藻湿地系统对可溶磷的去除率在35℃和25℃最高(图2e),极显著高于15℃( $P < 0.01$ );35℃、25℃和15℃的去除率都极显著高于5℃( $P < 0.01$ );35℃和25℃间无显著差异。

黑藻湿地系统在15℃、25℃和35℃,对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除率都较高(图2f),显著高于5℃的去除率( $P < 0.01$ 或 $P < 0.05$ )。在较高的温度下,黑藻湿地系统对 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除速度较快。在实验过程中, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除率有一定的波动,并到实验后期有所下降,这可能是由于黑藻在吸附、吸收有机物以及促进微生物对有机物分解作用的同时,植株有些枝叶凋零沉积,产生新的有机物溶入水中,从而影响了 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除率。

不同温度下黑藻湿地系统对 $\text{BOD}_5$ 的去除率到第15天较接近,但去除速度差别较大(图2g),在25℃、35℃的培养中黑藻对 $\text{BOD}_5$ 的去除速度最快,第3天分别达到87%和88%;在5℃最慢,对 $\text{BOD}_5$ 的去除率显著低于在其他温度的去除率( $P < 0.05$ )。

总体上,温度对黑藻湿地系统的去除效果有显著的影响,25和35℃下黑藻湿地系统的去除率一般较高,且两者间通常无显著差异。而低温(5℃)条件下黑藻湿地系统对各个指标的去除率都显著低于其他温度。

根据黑藻湿地系统不同温度下水质指标的变化,作C-t曲线,并进行回归分析,得出方程及相关性,其通式为 $y = ae^{-bx}$ , ( $a > 0, b > 0$ ),  $y$ 为某水质指标的浓度值,单位为 $\text{mg L}^{-1}$ ,  $x$ 为实验天数,单位为d,  $b$ 为净化系数,可以反映植物的净化能力(表1)。结果表明,温度对黑藻湿地系统的净化能力产生影响。黑藻湿地系统在25℃和35℃时净化能力较强,而随着温度的下降,对各种污染物的去除能力逐渐下降。在25℃和35℃,黑藻湿地系统对不同污染物的净化能力强弱不同,对TN的去除能力在25℃时较强,对TP的去除在35℃时较强,而对SP的去除两个温度下相当,总体上说黑藻湿地系统在25℃和35℃净化能力差异不大,对各种污染物都有较好的去除能力。黑藻湿地系统对不同污染物的净化能力也有不同,在相同温度下黑藻湿地系统对TP的去除能力较TN强。而由于一部分曲线拟合的相关性不好,对其它指标特别是有机物的去除不能予以比

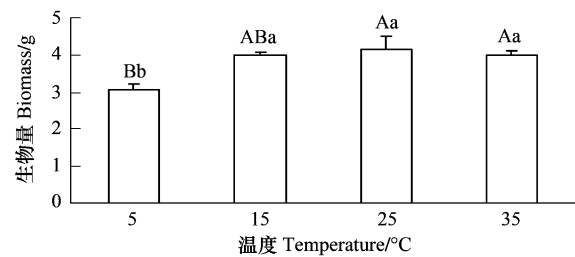


图1 温度对黑藻生物量增长的影响

Fig. 1 Biomass of *Hydrilla verticillata* after a 15d growth in different temperatures

不同大写字母表示极显著差异  $P < 0.01$ , 不同小写字母表示显著差异  $P < 0.05$

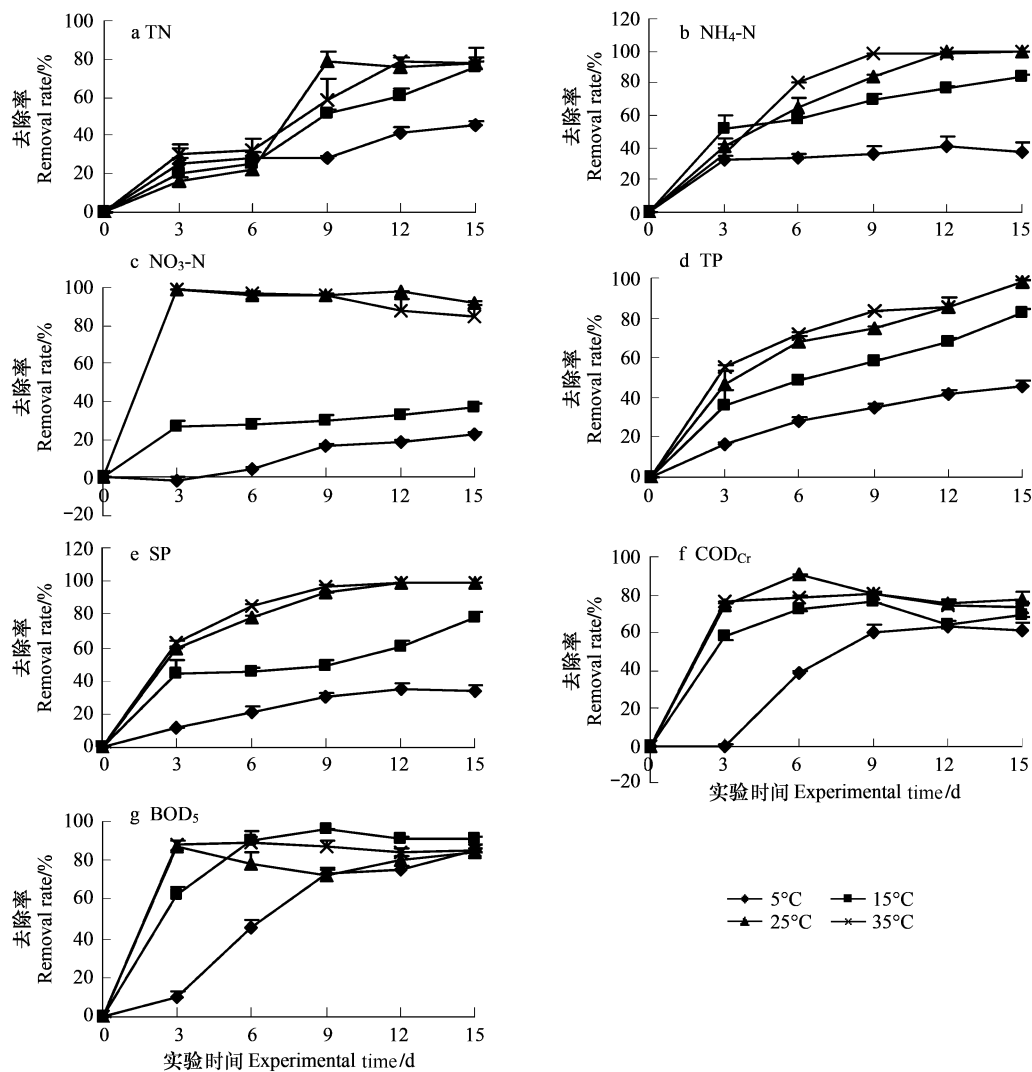


图2 温度对黑藻湿地系统净化污水效果的影响

Fig. 2 Contaminant removal rate from *H. verticillata* micro-scale wetlands grown in different temperatures

表1 不同温度下黑藻湿地系统对污水中污染物去除率 C-t 曲线方程

指标 Index	温度 Temperature/°C			
	5	15	25	35
总氮去除率	$y = 25.99e^{-0.05x}$	$y = 31.04e^{-0.20x}$	$y = 30.34e^{-0.32x}$	$y = 28.57e^{-0.28x}$
C-t 曲线方程 $C_{TN}-t$	$R^2 = 0.57$	$R^2 = 0.94^{**}$	$R^2 = 0.79^*$	$R^2 = 0.89^{**}$
氨氮去除率	—	$y = 13.07e^{-0.26x}$	—	$y = 37.04e^{-1.01x}$
C-t 曲线方程 $C_{NH_4-N}-t$	—	$R^2 = 0.91^{**}$	—	$R^2 = 0.92^{**}$
硝氮去除率	$y = 7.27e^{-0.20x}$	—	—	—
C-t 曲线方程 $C_{NO_3-N}-t$	$R^2 = 0.69^*$	—	—	—
总磷去除率	$y = 3.28e^{-0.06x}$	$y = 3.51e^{-0.23x}$	$y = 6.24e^{-0.62x}$	$y = 5.18e^{-0.63x}$
C-t 曲线方程 $C_{TP}-t$	$R^2 = 0.87^{**}$	$R^2 = 0.95^{**}$	$R^2 = 0.87^{**}$	$R^2 = 0.87^{**}$
可溶磷去除率	—	$y = 2.51e^{-0.17x}$	$y = 7.26e^{-0.91x}$	$y = 5.89e^{-0.91x}$
C-t 曲线方程 $C_{SP}-t$	—	$R^2 = 0.79^*$	$R^2 = 0.97^{**}$	$R^2 = 0.96^{**}$
化学需氧量去除率	$y = 137.06e^{-0.17x}$	—	—	—
C-t 曲线方程 $C_{COD}-t$	$R^2 = 0.77^*$	—	—	—
生物需氧量去除率	$y = 114.49e^{-0.34x}$	$y = 54.28e^{-0.41x}$	—	—
C-t 曲线方程 $C_{BOD}-t$	$R^2 = 0.95^{**}$	$R^2 = 0.53$	—	—

注: \* 和 \*\* 分别表示 0.01 和 0.05 的显著水平

较,对温度对黑藻湿地系统净化能力的影响还不能全面考察。

## 2.2 光照强度对黑藻生长及净化效果的影响

### 2.2.1 光照强度对黑藻生长的影响

实验结束时,黑藻在 4000、3000、2000 lx 的培养中生物量分别增长了 24%、15%、42%,而在 1000 lx 下黑藻的生物量比开始栽种时下降了 3%。1000 lx 光强下黑藻的生物量极显著( $P < 0.01$ )低于其他光强下黑藻的生物量(图 3)。

### 2.2.2 光照强度对黑藻净化效果的影响

不同光照强度下,水体的总氮都随时间而逐渐减少(图 4a),实验结束时,在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光照强度下,黑藻湿地系统对总氮的平均去除率分别达到 42%、75%、80% 和 82%,其中,1000 lx 下黑藻湿地系统对总氮的去除率极显著低于其它 3 个光照强度( $P < 0.01$ ),而其他光照强度间无显著差异。

黑藻湿地系统对氨态氮的去除率随光照强度的减弱而减少(图 4b),经过 15d 的处理,在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光强下,黑藻湿地系统对氨态氮的去除率分别达到 75%、96%、99% 和 99%。在 1000 lx 光照强度下,对氨态氮的去除率显著地低于 3000 lx 和 4000 lx( $P < 0.05$ ),而在其它光照强度下的去除率差异不显著。

黑藻湿地系统在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光照强度下,对硝态氮的去除率非常接近,第 3 天达到 97%—98%(图 4c),而后由于氨化作用,水体中硝态氮浓度有所上升,黑藻湿地系统对硝态氮的去除率有所下降,但在实验结束时,去除率仍达到 84%—89%,具有较好的去除效果,不同光照强度间无显著的差异。

黑藻湿地系统对总磷的去除率随时间逐渐增大(图 4d),实验结束时,在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光照强度下黑藻湿地系统对总磷的去除率分别达到 94%、97%、97% 和 97%,四者间的差异不显著。

在不同光照强度的下,黑藻湿地系统对可溶磷的去除与总磷的去除相似,去除率随时间逐渐增大,实验结束时,在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光照强度下,黑藻湿地系统对可溶磷的去除率分别达到 95%、98%、97%、98%,不同光照强度间无显著差异(图 4e)。

黑藻湿地系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除速度较快,在第 3 天已基本达到最高的去除率(图 4f),1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 光照强度分别达到 69%、73%、85% 和 88%。实验结束时 4 个光照强度下的去除率分别为 84%、86%、89% 和 87%,不同光照强度间无显著差异。

在 1000、2000、3000 lx 和 4000 lx 4 个光照强度中,黑藻湿地系统第 3 天对  $\text{BOD}_5$  的去除率分别达到 96%、94%、85% 和 87%,而后有一定的波动,但仍具有较高的去除率。实验结束时,黑藻湿地系统在 4 个光照强度下对  $\text{BOD}_5$  的去除率分别为 96%、99%、94% 和 95%,不同光照强度间无显著差异(图 4g)。总体上,光照强度对黑藻净化效果的影响不大。

根据黑藻湿地系统不同光照强度下水质指标的变化,作 C-t 曲线,并进行回归分析,得出方程及相关性(表 2)。在曲线拟合的过程中,求得的某些方程的相关性不好,已在表中略去。对曲线拟合得出方程中的  $b$  值进行比较,表明在 1000 lx 下黑藻湿地系统对各种污染物的去除能力较 2000、3000 lx 和 4000 lx 小,而在 2000、3000 lx 和 4000 lx 培养下的黑藻湿地系统对不同污染物的去除能力不同,4000 lx 下黑藻湿地系统对 TN、SP 的去除能力最强,3000 lx 下黑藻湿地系统对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的去除能力最大,而 2000 lx 下黑藻湿地系统对 TP、 $\text{BOD}_5$  的去除能力最强。与温度相比,黑藻湿地系统的净化能力受光照强度的影响较小。

## 3 讨论

植物是湿地处理系统最明显的生物特征,能直接吸收利用污水中的营养物质<sup>[21-23]</sup>,为根区输送氧

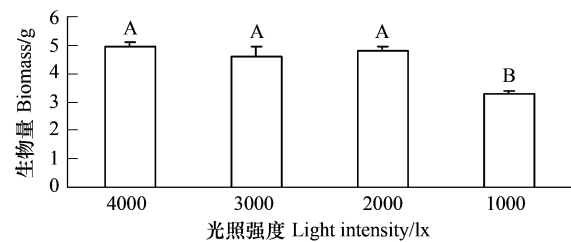


图 3 光照强度对黑藻生物量增长的影响

Fig. 3 Biomass of *H. verticillata* after a 15-d growth in different light intensities

不同大写字母表示极显著差异  $P < 0.01$

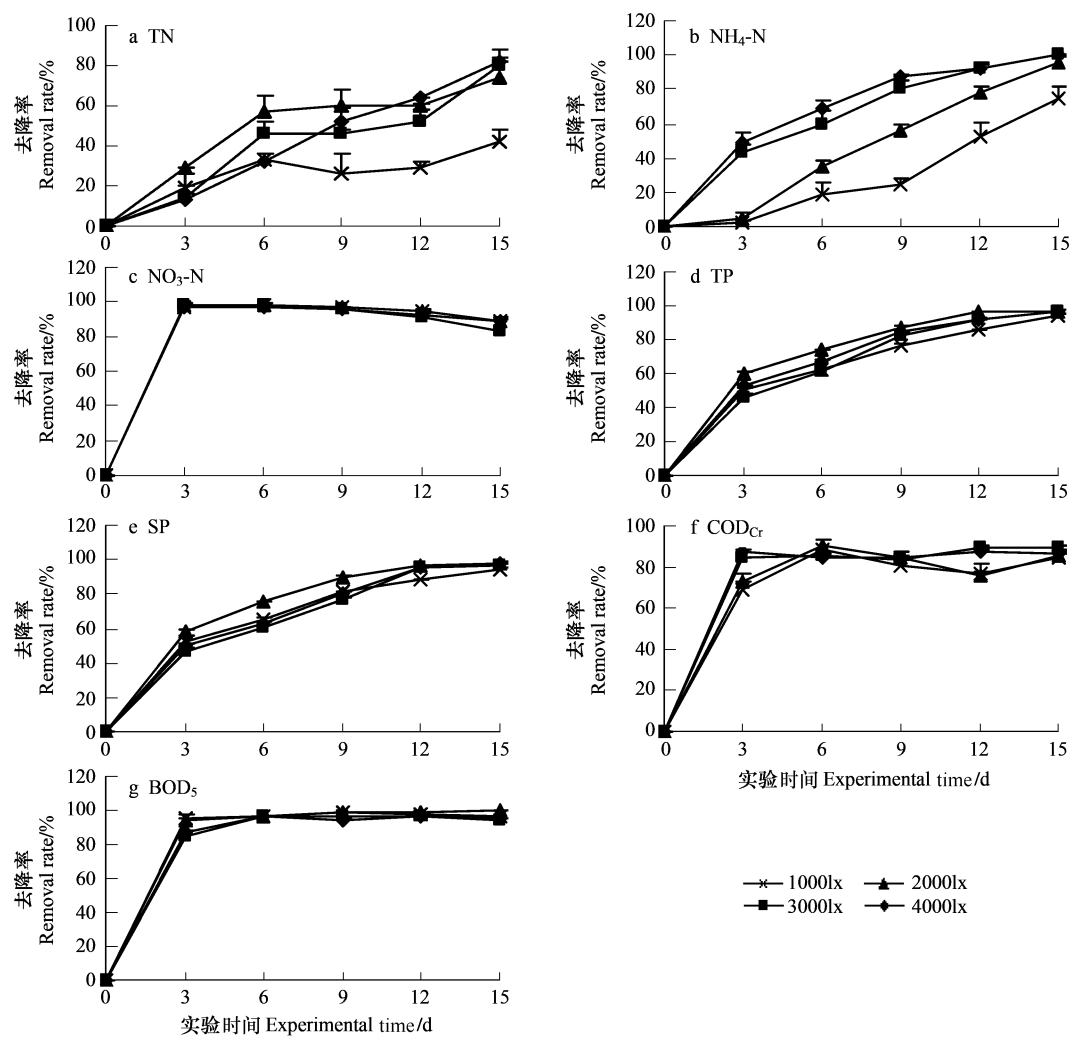


图4 光照强度对黑藻湿地系统净化污水效果的影响

Fig. 4 Contaminant removal rate from *H. verticillata* micro-scale wetlands grown in different light intensities

表2 不同光照强度下黑藻湿地系统对污水中污染物去除率 C-t 曲线方程

Table 2 The C-t curve equations of contaminant removal rates from *H. verticillata* micro-scale wetlands in different light intensities

项目 Item	光照强度 Light intensity/lx			
	4000	3000	2000	1000
总氮去除率	$y = 57.94e^{-0.26x}$	$y = 61.97e^{-0.22x}$	$y = 64.99e^{-0.20x}$	—
C-t 曲线方程 $C_{TN-t}$	$R^2 = 0.92^{**}$	$R^2 = 0.81^*$	$R^2 = 0.87^{**}$	—
氨氮去除率	$y = 59.64e^{-0.97x}$	$y = 59.16e^{-1.01x}$	$y = 22.6e^{-0.54x}$	$y = 12.58e^{-0.22x}$
C-t 曲线方程 $C_{NH_4-N-t}$	$R^2 = 0.84^*$	$R^2 = 0.80^*$	$R^2 = 0.82^*$	$R^2 = 0.79^*$
硝氮去除率	—	—	—	—
C-t 曲线方程 $C_{NO_3-N-t}$	—	—	—	—
总磷去除率	$y = 5.68e^{-0.60x}$	$y = 6.32e^{-0.62x}$	$y = 5.40e^{-0.67x}$	$y = 4.35e^{-0.47x}$
C-t 曲线方程 $C_{TP-t}$	$R^2 = 0.98^{**}$	$R^2 = 0.97^{**}$	$R^2 = 0.97^{**}$	$R^2 = 0.98^{**}$
可溶磷去除率	$y = 7.77e^{-0.73x}$	$y = 7.07e^{-0.67x}$	$y = 6.14e^{-0.72x}$	$y = 5.15e^{-0.51x}$
C-t 曲线方程 $C_{SP-t}$	$R^2 = 0.95^{**}$	$R^2 = 0.93^{**}$	$R^2 = 0.98^{**}$	$R^2 = 0.99^{**}$
化学需氧量去除率	—	$y = 90.03e^{-0.29x}$	—	—
C-t 曲线方程 $C_{COD-t}$	—	$R^2 = 0.50$	—	—
生物需氧量去除率	$y = 35.59e^{-0.46x}$	$y = 34.15e^{-0.47x}$	$y = 138.65e^{-1.14x}$	—
C-t 曲线方程 $C_{BOD-t}$	$R^2 = 0.54$	$R^2 = 0.50$	$R^2 = 0.86^{**}$	—

注: \*\* 和 \* 分别表示 0.01 和 0.05 的显著水平

气<sup>[24-25]</sup>,加强和维持基质的水力传输<sup>[26-27]</sup>,在净化污水中具有重要的作用,而植物对各种污染物的净化效果与其生长状况密切相关,生长越旺盛的植物其净化污水的能力越大。

温度通过影响植物的光合作用、呼吸作用、细胞分裂和伸长来影响植物的生长<sup>[28]</sup>,从而对植物净化能力也产生影响。在 20—32℃ 间,池杉(*Taxodium ascendens* Brongn.)对总氮、总磷的去除能力随温度的升高而增强<sup>[29]</sup>。而芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、蒲草(*Typha angustifolia* L.)组成的湿地系统对 TN 和 NH<sub>4</sub>-N 的去除率随温度的降低而下降<sup>[30]</sup>。本实验研究表明,在 15、25、35℃ 的培养中,黑藻总体上生长较好,对氮、磷、有机物等都具有较高的去除率,而在 5℃ 下黑藻的生长受到抑制,对各种污染物的去除效果也较差,可见低温会限制黑藻的生长,影响其净化能力。亚热带地区全年温度都较高,如广州年平均温度为 21—22℃,最热的 7—8 月份,平均气温 28—29℃,冬季水温一般也在 5℃ 以上,因此在亚热带地区黑藻能较好地用于污水的处理。

光照条件是影响植物生长的主要因素,不同的光照强度会对植物的株高、枝长、生物量等生长情况产生影响<sup>[31]</sup>,从而对植物的净化污水效果也产生一定的影响。鸭跖草(*Commelina communis* L.)在遮阴条件(60% 全光照)下对重度富营养化水体的 TN、TP、NO<sub>3</sub>-N、COD<sub>Cr</sub> 去除效果远好于全光照条件,而灯芯草(*Juncus efusus* L.)则在全光照条件下对污染物的去除效果大大好于遮阴条件<sup>[32]</sup>。本实验结果显示,在自然条件下,黑藻在不低于 1000 lx 的光照强度下,可正常生长,都有较快的生长速度和较好的污染物去除效果,反映了黑藻对水生环境良好的适应。由于污水的透明度都较低及沉水植物完全水生的特点,光照条件是影响沉水植物生长的重要因子。黑藻在较低的光照强度下仍能保持生长和一定的净化污水能力,显示黑藻可以在较深的水下或透光性较差的水下生长,这和野外实验的情况是一致的。在野外严重富营养化的透光性很差的水体,黑藻仍能在水体中定居并迅速生长,显示它在亚热带地区的污水处理中具有较好的应用前景。

**致谢:**古滨河博士对写作给予帮助,特此致谢。

## References:

- [1] Vymazal J. Constructed Wetlands — Subsurface Flow. Encyclopedia of Ecology, 2008, 748-764.
- [2] Vymazal J. Constructed Wetlands — Surface Flow. Encyclopedia of Ecology, 2008, 765-776.
- [3] Vymazal J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecological Engineering, 2009, 35: 1-17.
- [4] Chen Z H, Chen F, Cheng X Y, Liu Y C. Researches on macrophyte roots in the constructed wetlands (A review). Current Tropic in Plant Biology, 2004, 5: 131-142.
- [5] Verhoever J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. Ecological Engineering, 1999, 12 (1): 5-12.
- [6] Shutes R B E. Artificial wetlands and water quality improvement. Environment International, 2001, 26(5/6): 441-447.
- [7] Sundaradivel M, Vigneswaran S. Constructed wetlands for wastewater treatment. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, 31 (4): 351-409.
- [8] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. Water Science and Technology, 1994, 29 (4): 71-78.
- [9] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? Water Science and Technology, 1997, 35 (5): 301-306.
- [10] Kivaisi I A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries; a review. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 545-560.
- [11] Chinese Academy of Sciences, China Flora Editorial Board. Flora of China (Vol. 8). Beijing: Science Press, 1992: 183-184.
- [12] Van T K, Wheeler G S, Center T D. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility. Aquatic Botany, 1999, 62(4): 225-233.
- [13] Chen H D. Productivity of eleven species of submerged macrophytes. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1988, 19(6): 525-531.
- [14] Gu B. Environmental conditions and phosphorus removal in Florida lakes and wetlands inhabited by *Hydrilla verticillata* (Royle): implications for invasive species management. Biological Invasions, 2006, 8(7): 1569-1578.
- [15] Lei Z X, Xie Y F, Xu D L, Liu Z W. Study on the purification of eutrophicated water with aquatic macrophytes. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34 (3): 553-554.
- [16] Prusty B A K, Azeez P A, Jagadeesh E P. Alkali and transition metals in macrophytes of a wetland system. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 78(5): 405-410.

- [17] Bunluesin S, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, Lanza G R, Upatham E S, Soonthornsarathool V. Plant screening and comparison of *Ceratophyllum demersum* and *Hydrilla verticillata* for cadmium accumulation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 73(3): 591-598.
- [18] He R, Zhou Q, Zhang J. Treating domestic sewage by the free-water surface constructed wetlands. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 180-181.
- [19] National Environmental Protection Agency < Water and Wastewater Monitoring Analysis Method > Editorial Board. *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* (4th edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 211, 246, 249, 255, 266, 279.
- [20] Du R Q. *Biostatistics*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 7-18, 61-70, 104-116.
- [21] Knight R L, Gu B, Clarke R A, Newman J M. Long-term phosphorus removal in Florida aquatic systems dominated by submerged aquatic vegetation. *Ecological Engineering*, 2003, 20(1): 45-63.
- [22] Shardendu B, Ambast R S. Relationship of nutrients in water with biomass and nutrient accumulation of submerged macrophytes of a tropical wetland. *New Phytologist*, 1991, 117(3): 493-500.
- [23] Yuan D H, Ren Q J, Gao S X, Zhang H, Yin D Q, Wang L S. Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2337-2341.
- [24] Christensen P B, Revsbech N P, Sand-Jensen K. Microsensor analysis of oxygen in the rhizosphere of the aquatic macrophyte *Littorella uniflora* (L.) Ascherson. *Plant Physiology*, 1994, 105: 847-852.
- [25] Wu Z B, He F, Cheng W Y, Cheng S P, Darwent M J, Armtroug B, Armstrong J. Studies on the oxygen transportation of roots in anaerobic media with polarography. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2000, 26(3): 177-180.
- [26] Liu C C, Xia H P, Jian S G, Ren H, Zhang Q M, Liu G B, Yu X D. A case study on domestic wastewater treatment in Shiyanghe constructed wetland in Shenzhen. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 536-539.
- [27] Cheng S P, Kuang Q J, Xia Y C. Studies on artificial wetland with Cattal (*Typha angustifolia*) and Rush (*Juncus Effusus*) (I): the performance of purifying wastewater. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(4): 351-358.
- [28] Ma H Y, Luan F S, Li Y H. Effect of different temperature environment of growth, yield, biochemical characteristics of cucumber. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2004, 35(6): 697-700.
- [29] Yang C F, Huang G Q, Song W C, Li Q W, Xie Q M. Wastewater treatment by simulated artificial wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(4): 350-354.
- [30] Liu H, Dai M L, Liu X Y, Ouyang W, Liu P B. Performance of treatment wetland systems for surface water quality improvement. *Environmental Science*, 2004, 25(4): 65-69.
- [31] Zeng A P, Liu H J, Xu X W, Yao L J. Influence of different light conditions on the growth of aquatic plants. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2009, (1): 98-100.
- [32] Niu X Y, Ge Y, Wang X Y, Xu Q S, Chang J. Comparison on difference of the purification ability to eutrophic water between five plants in different sunlight conditions. *Bulletin of Science and Technology*, 2001, 17(2): 1-4.

#### 参考文献:

- [11] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第八卷). 北京: 科学出版社, 1992: 183-184.
- [13] 陈洪达. 11 种沉水植物的生产力. *海洋与湖沼*, 1988, 19(6): 525-531.
- [15] 雷泽湘, 谢贻发, 徐德兰, 刘正文. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究. *安徽农业科学*, 2006, 34(3): 553-554.
- [18] 何蓉, 周琪, 张军. 表面流人工湿地处理生活污水的研究. *生态环境*, 2004, 13(2): 180-181.
- [19] 国家环境保护局《水与废水监测分析方法》编委会. *水与废水监测分析方法* (第4版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 211, 246, 249, 255, 266, 279.
- [20] 杜荣骞. *生物统计学*. 北京: 高等教育出版社, 2003: 7-18, 61-70, 104-116.
- [23] 袁东海, 任全进, 高士祥, 张洪, 尹大强, 王连生. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2337-2341.
- [25] 吴振斌, 贺锋, 程旺元, 成水平, Darwent M J, Armtroug B, Armstrong J. 极谱法测定无氧介质中根系氧气输导. *植物生理学报*, 2000, 26(3): 177-180.
- [26] 刘春常, 夏汉平, 简曙光, 任海, 张倩媚, 刘家宝, 郁向东. 人工湿地处理生活污水研究——以深圳石岩河人工湿地为例. *生态环境*, 2005, 14(4): 536-539.
- [27] 成水平, 况琪军, 夏宜珍. 香蒲灯芯草人工湿地的研究(I): 净化污水的效果. *湖泊科学*, 1997, 9(4): 351-358.
- [28] 马鸿艳, 栾非时, 李恩鹤. 不同温度环境对黄瓜生长、产量、理化特性的影响. *东北农业大学学报*, 2004, 35(6): 697-700.
- [29] 杨昌凤, 黄金全, 宋文初, 李雄文, 谢其明. 模拟人工湿地处理污水的试验研究. *应用生态学报*, 1991, 2(4): 350-354.
- [30] 刘红, 代明利, 刘学燕, 欧阳威, 刘培斌. 人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征. *环境科学*, 2004, 25(4): 65-69.
- [31] 曾爱平, 刘洪见, 徐晓薇, 姚丽娟. 不同光照条件对水生植物生长的影响. *浙江农业科学*, 2009, (1): 98-100.
- [32] 牛晓音, 葛滢, 王晓玥, 徐青山, 常杰. 不同光照条件下五种植物对富营养化水净化能力差异的比较. *科技通报*, 2001, 17(2): 1-4.