

梭鱼草净化黑臭河水的日变化试验研究

陈建军^{1,2}, 卢晓明², 卢少勇^{1*}, 金相灿^{1,2}, 黄民生², 张勇², 赵丰²

(1. 中国环境科学研究院湖泊环境创新基地, 北京 100012; 2. 华东师范大学城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要: 测定了曝气和非曝气的2个植物净化槽在1 d中7个不同时间点的出水水质理化指标(pH、DO、COD、NH₄⁺-N、TP)及植物叶片的叶绿素(Chla)、可溶性蛋白(SP)含量及过氧化物酶(POD)活性, 另设空白槽为对照; 试验目的是研究各指标的日变化情况及其相互关系, 为提高梭鱼草净化黑臭河水的处理效率及其植物净化槽的合理优化运行提供科学依据。结果表明, 各水槽内所测指标的变化均在一定程度上与光强变化相关, 对非曝气植物槽的分析发现, 在出水理化指标中TP浓度与光强的相关性最好($r = 0.93, p < 0.01$), 而在植物生理指标中SP含量与光强相关性最好($r = 0.91, p < 0.01$); 植物处理使出水的DO日均值增加了0.13 mg/L, 而曝气植物处理则使其增加了1.8 mg/L, 曝气是对城市黑臭河水进行植物净化修复的必要辅助手段; 曝气植物槽对黑臭河水中COD和NH₄⁺-N的去除率日均值比植物槽升高了7.1%和6.3% ($p < 0.01$), TP去除率却相应下降了38% ($p < 0.01$); 与非曝气槽植物相比, 曝气槽植物体内Chla、SP日平均含量显著降低($p < 0.05$)而POD活性显著升高($p < 0.05$); 光强和曝气的变化能迅速而显著地影响梭鱼草的生理特性从而改善其净化槽出水水质, 是构建和优化黑臭河水植物净化槽时值得考虑的重要调控因素。

关键词: 梭鱼草; 黑臭河水; 水质改善; 生理特性; 日变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3585-05

Diurnal Variations in Purifying tanks When Use *Pontederia cordata* Treating the Malodorous River Water

CHEN Jian-jun^{1,2}, LU Xiao-ming², LU Shao-yong¹, JIN Xiang-can^{1,2}, HUANG Min-sheng², ZHANG Yong², ZHAO Feng²

(1. Research Center for Lake Ecology & Environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Aquatic plants (*Pontederia cordata*) were soaked in two purifying tanks to investigate the effects of illumination intensity and aeration on diurnal variations of Chla, SP, POD of *Pontederia cordata* and pH, DO, COD, NH₄⁺-N, TP of water from purifying tanks when treating the malodorous river water at seven different times, another blank purifying tank was set as a control. Comparative studies and correlation analysis of these different indicators were carried out to improve the plants working efficiency and provide scientific basis for optimal operation of plant purifying tanks. Results showed that all indicators affected by changes of light intensity, TP shows best correlation coefficient ($r = 0.93, p < 0.01$) of physicochemical indicators and SP behaves best correlation coefficient ($r = 0.91, p < 0.01$) of plant physiology indicators in non-aeration purifying tank; aeration is necessary as diurnal average of DO shows an increase of 0.13 mg/L by treatment of plant meanwhile 1.8 mg/L by plant with aeration, purifying tanks with aeration got 7.1%, 6.3% higher removing rates of COD, NH₄⁺-N and 38% less TP removing rate than non-aeration plant purifying tanks ($p < 0.01$); with aeration treatment, significant reduction of Chla, SP content ($p < 0.05$) and increase of POD activity ($p < 0.05$) observed in plants; the changes of illumination intensity and aeration can significantly affect physiological characteristics of plants and should be considered carefully and need further study when treating malodorous river water by plant purifying tanks.

Key words: *Pontederia cordata*; malodorous black water; water quality improvement; physiological characteristics; diurnal variations

利用高等水生植物对氮、磷等无机营养的吸收来防治水体富营养化是我国当前城市水环境治理领域的热点研究课题^[1-3], 但以往的研究多侧重于植物对富营养化水体的净化效果, 在利用植物处理严重富营养化甚至黑臭的城市河道水体时, 关于外界环境条件(光照强度、曝气与否)对植物自身生理特性的影响及其与水质净化关系的研究极为少见^[4-7]。

梭鱼草(*Pontederia cordata*), 别名北美梭鱼草, 是

雨久花科梭鱼草属多年生挺水或湿生草本植物, 株高50~150 cm, 花紫色、花期长, 叶圆筒形、叶和叶柄绿色, 叶形大且美观, 具有良好的景观效应, 是不可多得的观赏水生花卉。虽然近年已有少数有关梭鱼草对富营养化及黑臭水体中氮和磷去除效果的研究^[8-9], 但

收稿日期: 2009-04-20; 修订日期: 2009-03-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101, 2008ZX07317)

作者简介: 陈建军(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制与生态修复, E-mail: jj.chen1980s@yahoo.com.cn

通讯联系人: E-mail: luyx@cmes.org.cn

尚未有梭鱼草处理城市黑臭河水时对外界环境条件的生理响应及其相关机制的研究报道. 本实验以处理黑臭河水的梭鱼草净化槽为研究对象, 分析了不同光强和是否曝气条件下, 梭鱼草在 1 d 不同时段的生理特性及对黑臭河水水质的改善效果变化情况, 植物生理特性与水质改善效果间的对应关系, 旨在为提高梭鱼草净化黑臭河水的处理效率及梭鱼草净化槽的合理构建及优化运行提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 装置构建与植物培养

工业河是位于上海普陀区桃浦镇境内的一条断头浜, 水体黑臭, 各项水质指标均为 V 类或者劣 V 类. 试验装置搭建在工业河道旁边的勤丰泵站内, 该套装置(图 1)由 1 个平衡水箱(上部尺寸 1 500 mm × 1 000 mm, 下部尺寸 1 450 mm × 950 mm, 深 600 mm)和 3 个水槽(上部尺寸 1 240 mm × 620 mm, 下部尺寸 1 150 mm × 550 mm, 深 760 mm) 构建而成. 平衡水箱设有溢流管用来控制水位, 使 3 个净化槽的进水均匀分配. 河水通过水泵送入平衡水箱, 经水箱上设置的固定出水管流入净化槽. 各净化槽末端的出水管高程将槽内水深控制在 0.6m. 每个净化槽中间用隔板隔开, 留出离槽底高约 20 cm 的过流断面, 以防槽内河水短流. 各净化槽连续进、出水, 水力停留时间(HRT)设为 8 h. 曝气采用浙江森森实业有限公司生产的 ACQ-004 型电磁式空气泵(60 L/min), 曝气气流设为 30 L/min. 选取大小均匀(高约 12 cm)的梭鱼草幼苗(购于上海泽龙生物工程有限公司), 分别在 2 个塑料槽(2 号为曝气植物槽, 3 号为非曝气植物槽)中各种植 10 棵, 另设空白槽作对照(1 号), 启动装置并使试验植物在各水槽中稳定培养

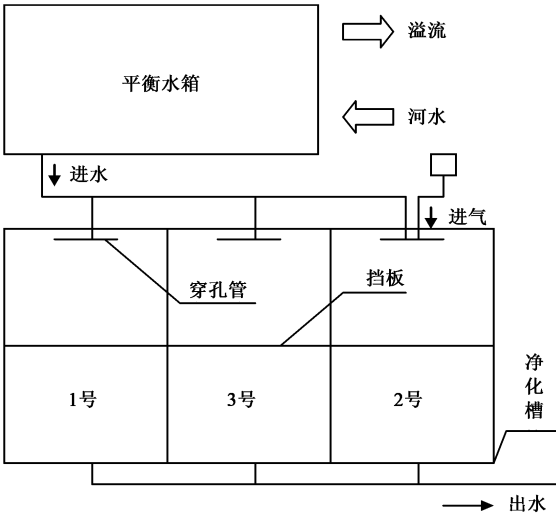


图1 植物净化槽系统平面示意
Fig. 1 Schematic diagram of plant purifying tanks

60 d(2008-02-26~ 2008-04-26).

1.2 供试植物样品、水质监测及光强测定

试验在 2 月底梭鱼草幼苗开始生长时启动, 在各试验水槽中经过 2 个月的培养, 梭鱼草植株已生长稳定, 且此时 1 d 内光强变化幅度大(表 1), 适合对其采样进行日变化分析. 从 4 月 27 号开始, 进行了连续 3 次采样(均为晴朗天气), 每次在 1 d 内不同时间(08:00、10:00、12:00、13:00、14:00、16:00、18:00)从各净化槽中选定的一棵植株上采生长旺盛的最上层叶片 2.0 g 备用; 同时在对时间, 从每个净化槽出水口处采集水样进行水质理化指标分析(pH、DO、COD、NH₄⁺-N、TP), 测定采用标准方法^[10]; 测定各对应时间的光强, 光强的测定采用 TPS-1 便携式光合测定仪(英国 PP-Systems 公司生产), 开放式气路.

表 1 光强的日变化

Table 1 Diurnal variations of light intensity

测定时间	08:00	10:00	12:00	13:00	14:00	16:00	18:00
光强 μmol·(m ² ·s) ⁻¹	672.5±11.53	1243.6±8.27	1632.7±4.24	1895.8±5.71	1827.0±8.05	1022.5±10.37	751.3±6.65

1.3 叶绿素(Chla)含量的测定

按照 Heged 等^[11]提出的方法进行, 作以下改进: 取 0.3 g 植物叶片加入 80% 丙酮溶液, 浸提 24 h 后用分光光度计测定浸提液的吸光值, 单位为 mg/g.

1.4 可溶性蛋白(SP)含量及酶活性测定

据 Bradford^[12]的考马斯亮兰法测定 SP 含量; 用牛血清蛋白作标准曲线, 单位: mg/g. POD 活性测定采用愈创木酚法^[13], 以每 min 光密度变化表示酶活

性大小, 即 1 min 内 A₄₆₀值每增加 0.1 为一个活性单位, 单位为 U/(g·min).

1.5 数据分析

图表中每个指标数据点均为 3 次采样的数据平均值, 并使用 SPSS11.0 软件进行统计分析和比较.

2 结果及分析

2.1 出水理化指标分析

试验期间, 对 3 次 1 d 内不同时段(08: 00、10: 00、12: 00、13: 00、14: 00、16: 00、18: 00) 的光照强度取均值进行比较发现, 1 d 内光强随时间顺序出现先升高后降低的变化规律, 早晚(08: 00、18: 00) 光照强度较低而中午时分(12: 00~ 14: 00) 光强相对有极显著的升高($p < 0. 01$), 光强最大值出现在 1 d 中的 13: 00~ 14: 00 时段(表 1) .

各净化槽水体 DO 浓度相应出现先升高后降低的变化趋势, 并且在 14: 00~ 16: 00 之间出现峰值, 稍滞后于光照强度的变化(图 2) . 植物槽中水体 DO 浓度变化与光照强度变化显著相关($r = 0. 89, p < 0. 05$), 植物槽(3 号) 出水的溶氧浓度略高于对照槽(1 号), 其日均值分别为 0. 36 mg/L 和 0. 49 mg/L, 两者都远低于曝气植物槽(2 号) 的溶氧浓度的日均值 2. 2 mg/L(图 2), 植物处理使出水的 DO 日均值增加了 0. 13 mg/L, 而曝气植物处理则使其增加了 1. 8 mg/L, 对以上 3 组平均值两两间进行成对样本 t 检验分析, 发现各组间均有显著差异($p < 0. 01$) . 以上分析说明在处理黑臭河水过程中, 光照的增强可以提高梭鱼草对水体溶氧改善的效果, 但是试验中植物的根系放氧作用非常有限, 人工曝气增氧是对受重污染的黑臭水体进行净化修复的必要手段.

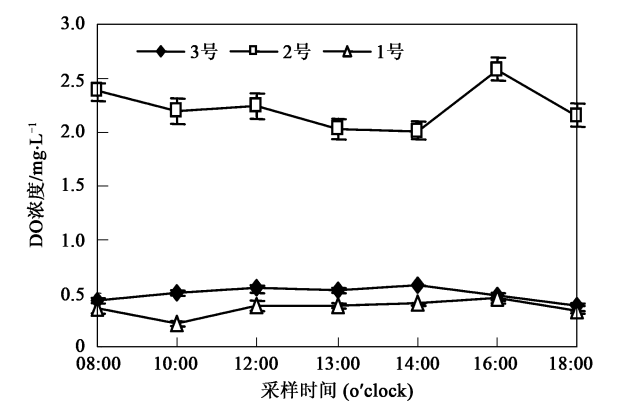


图 2 各净化槽出水的 DO 浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variations of DO contents in water from purifying-tanks

各净化槽水体的 pH 值在 1 d 内也受到光强变化的影响, 其日变化的峰值出现在 14: 00~ 16: 00 之间, 但植物槽中水体的 pH 值和光强变化之间相关性不强($r = 0. 72, p < 0. 05$), 且 pH 值的日变化幅度没有 DO 浓度明显(图 2 和图 3); 植物槽和曝气植物槽的 pH 值总体上明显低于空白对照槽(图 3), 其日平均值分别为 8. 0、7. 7、8. 3, 各组间平均值有显著差异(成对样本 t 检验: $p < 0. 05$) . 以上分析说明

植物净化及曝气处理均能使黑臭河水 pH 值明显降低, 可能是植物及曝气处理促进了河水中污染物特别是氨氮的吸收与转化, 并在该过程中消耗了大量的碱性物质.

随光照的增强, 植物槽(3 号) 及曝气植物槽(2 号) 中 COD、TP 和 NH_4^+-N 的去除率均有升高且均在 13: 00~ 14: 00 间达到峰值(图 1、图 4~ 6), 其中植

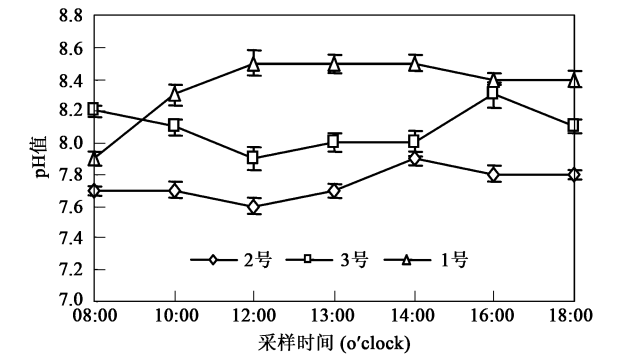


图 3 各净化槽出水的 pH 值日变化

Fig. 3 Diurnal variations of pH in water from purifying-tanks

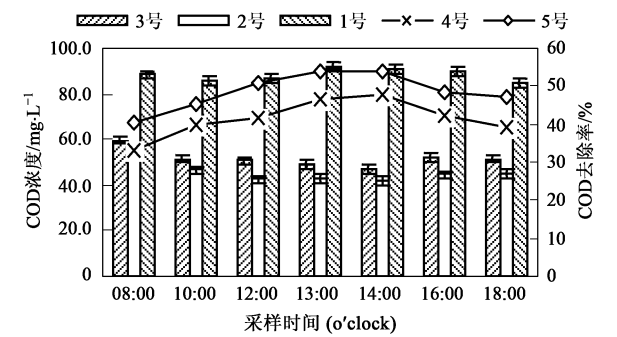


图 4 各净化槽出水的 COD 浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variations of COD contents in water from purifying-tanks

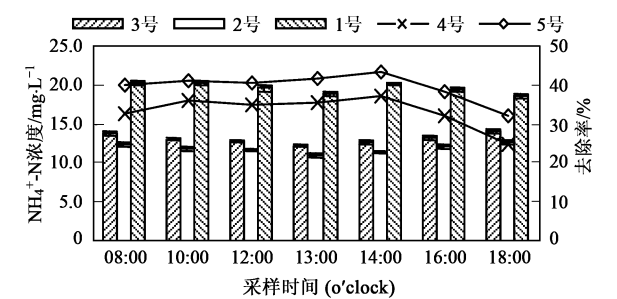


图 5 各净化槽出水的 NH_4^+-N 浓度日变化

Fig. 5 Diurnal variations of NH_4^+-N contents in water from purifying-tanks

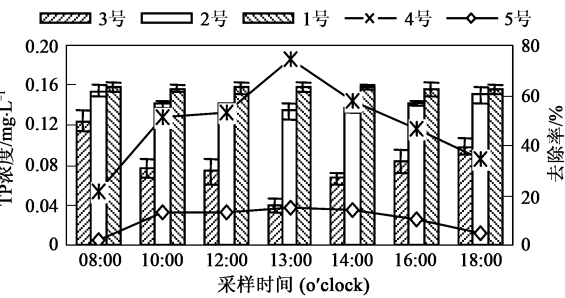


图6 各净化槽出水的TP浓度日变化
Fig. 6 Diurnal variations of TP contents
in water from purifying tanks

物槽的TP去除率日变化幅度最大且与光强变化相关性达到极显著水平($r=0.93, p<0.01$), 在光强影响下梭鱼草的生理变化对COD、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果都有一定影响且对TP的去除效果影响最大; 植物槽及曝气植物槽对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率明显高于对照槽(1号), 与植物槽相比, 曝气植物槽出水COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率日均值分别升高了7.1%和6.3%(图4及图5, 其中4号为植物槽, 5号为曝气植物槽), 而TP的去除率日均值下降了38%(图6), 增加曝气有利于植物槽对黑臭河水中COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除, 但对TP的去除不利, 另发现植物槽及曝气植物槽出水的TP浓度日均值(分别为0.08 mg/L和0.14 mg/L)均低于对照槽(0.16 mg/L), 这可

能是因为植物对水体中磷元素的吸收作用所致. 以上各组平均值之间的比较均有显著差异, 成对样本 t 检验: $p<0.01$.

2.2 植物相关生理指标(Chla、SP、POD)的变化分析
叶绿素含量与光合速率之间关系密切, 光合作用代谢产物可溶性蛋白质(SP)含量的高低是反映植物生长和生理特性的重要指标^[13]. 酶与植物的生长发育和生理特性均有联系, POD是普遍存在于植物细胞内保护酶系统的一种氧化还原酶^[14], 它参与多种生理活动, 对各种逆境反应灵敏, 与植物抵御不良环境条件有相当关系^[15, 16]. 对试验数据的方差分析表明, 各净化槽植物体内Chla和SP含量、POD活性在1 d内变化出现显著差异($p<0.05$), 在13:00~14:00之间各指标的数据出现最高值(表1), 另植物槽中植物体内SP含量(3号, 表2)随光强的变化幅度较大且植物槽出水的SP含量与光强变化相关性达到极显著水平($r=0.91, p<0.01$), 说明植物体内的SP含量较好地体现了植物对外界光照条件变化的内在生理响应; 曝气植物槽中植物体内的Chla和SP含量(2号, 表2)的平均值显著低于植物槽(成对样本 t 检验: p 为0.005和 $0.04<0.05$), 而POD活性均值却显著升高(成对样本 t 检验: $p=0.005<0.01$)说明曝气对植物生理产生了不利影响, 而植物体对这种不利的外在影响产生了内在的生理响应.

表2 净化槽中植物的Chla、SP含量及POD活性日变化¹⁾
Table 2 Diurnal variation of Chla, SP contents and POD activities in plants

指标		测定时间						
		08:00	10:00	12:00	13:00	14:00	16:00	18:00
Chla/mg·g ⁻¹	2号	1.15±0.07	1.32±0.05	1.66±0.06	1.65±0.09	1.83±0.06	1.37±0.07	1.24±0.03
	3号	1.62±0.05	1.70±0.04	2.04±0.05	2.10±0.07	2.19±0.06	1.76±0.04	1.54±0.05
SP/mg·g ⁻¹	2号	43.82±2.72	60.03±3.97	77.59±2.63	72.94±3.49	93.10±3.11	34.57±3.24	38.17±2.42
	3号	64.18±2.72	90.32±2.04	111.3±2.67	98.99±2.72	117.0±2.23	68.65±2.75	60.64±1.78
POD/U·(g·min) ⁻¹	2号	0.12±0.005	0.13±0.006	0.14±0.005	0.19±0.003	0.17±0.008	0.09±0.004	0.05±0.005
	3号	0.08±0.006	0.09±0.003	0.10±0.004	0.16±0.007	0.11±0.005	0.60±0.004	0.03±0.002

1) 表中数据为均值±标准差($n=3$), 各行内数据存在显著差异($p<0.05$)

3 讨论

虽然近年已有少数关于梭鱼草对富营养化及黑臭水体中氮和磷去除效果的研究^[8, 9], 但尚未有梭鱼草(*Pontederia cordata*)处理城市黑臭河水时对外界环境条件的生理响应及其相关机制的研究报道. 本试验观测到梭鱼草在净化黑臭河水的过程中, 随着光强的变化, 各水槽内植物生理及水质理化指标均在一定程度上出现相应变化, 在出水理化指标中, DO、TP浓度与光强的相关性较好(r 为0.89和

0.93, $p<0.05$), 而在植物的生理指标中, SP含量与光强相关性较好($r=0.91, p<0.01$), 随TP去除率的升高, 植物体内SP变化存在升高的趋势(图6和表2); 根据各指标数据的变化规律分析, 植物体内的相关响应机制可能是: 随着光强增强, 植物的光合作用增强, 植株吸收水体中更多的可溶性N、P等营养元素^[5, 17, 18], 用来合成光合代谢产物SP等有机物, 同时植物根部泌氧增多, 导致水体DO浓度升高, 结果是河水TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低, pH值逐渐下降, 水质逐渐改善. 由此可见, 外界环境条件(光强、曝气)

能够明显改变植物对水体污染物净化效果并可以通过相关生理特性变化得以反映,对植物净化污水时生理特性的研究应该可以为提高植物的净化效率,合理构建及优化运行植物净化槽提供科学依据。另对试验数据的分析发现,植物难以提高黑臭河水的 DO 浓度,曝气是对城市黑臭河水进行植物净化修复的必要辅助手段,增加曝气可以明显提高植物槽的出水 DO 浓度、降低其 pH 值,并强化其对水体中 COD 和 NH_4^+-N 的去除,但曝气对植物槽去除水体中的 TP 有不利影响(可能是因为曝气干扰了河水中颗粒态磷的沉淀和植物根系对颗粒态磷的吸附过滤作用^[8,9]),而且曝气对梭鱼草的生理产生了胁迫作用,影响了植物对水体中污染物的吸收去除,因此,在利用植物修复受重污染水体时,曝气是必要的辅助手段,但对水体的曝气量和曝气时间选择可能需要进一步的考虑和研究。

4 结论

(1) 各水槽内植物生理及水质理化指标的变化均在一定程度上与光强变化相关,在非曝气植物槽的出水理化指标中,TP 浓度与光强的相关性最好($r = 0.93, p < 0.01$),而在非曝气槽的植物生理指标中,SP 含量与光强相关性最好($r = 0.91, p < 0.01$)。

(2) 试验期间,空白对照水槽、植物槽和曝气植物槽中的 DO 浓度的日平均值分别为 0.36、0.49 和 2.2 mg/L,各组间均值比较差异均达显著水平($p < 0.05$),植物槽出水的溶氧浓度略高于对照槽,远低于曝气植物槽;植物处理使出水的 DO 日均值增加了 0.13 mg/L,而曝气植物处理则使其增加了 1.8 mg/L;说明在该试验条件下,黑臭河水的耗氧速率远超过了植物的供氧光合作用,植物难以提高黑臭河水的 DO 浓度,曝气是对城市黑臭河水进行植物净化修复的必要辅助手段。

(3) 曝气可以有效地提高黑臭河水的 DO 浓度并强化植物槽对黑臭河水中 COD 和 NH_4^+-N 的去除效果,曝气植物槽对黑臭河水中 COD 和 NH_4^+-N 的去除率日均值比植物槽升高了 7.1% 和 6.3% ($p < 0.01$),但曝气对植物槽去除黑臭河水中的 TP 有不利影响,曝气植物槽中 TP 去除率日均值比植物槽下降了 38% ($p < 0.01$);另曝气对梭鱼草的生理产生

了一定的胁迫作用,表现为曝气处理后植物体内 Chla 和 SP 含量的显著降低($p < 0.05$) 以及 POD 活性的显著升高($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 王超,张文明,王沛芳,等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 975-981.
- [2] 种云霄,胡洪营,钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(2): 36-40.
- [3] Nyakang O J B, van Bruggen J J A. Combination of a well functioning constructed wetland with a pleasing landscape design in Nairobi, Kenya[J]. Wat Sci Tech, 1999, **40**(3): 249-256.
- [4] 王寿兵,阮晓峰,胡欢,等. 不同观赏植物在城市河道污水中的生长试验[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 204-207.
- [5] 童昌华,杨肖娥,濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1447-1450.
- [6] 李宗辉,唐文浩,宋志文. 人工湿地处理污水时水生植物形态和生理特性对污水长期浸泡的响应[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(1): 75-79.
- [7] 陈国祥,刘双,王娜,等. 磷对水生植物菱及睡莲叶生理活性的影响[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2002, **25**(1): 71-77.
- [8] 高尚,黄民生,吴林林,等. 生物净化槽对黑臭河水净化的中试研究[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 433-437.
- [9] 刘春光,王春生,李贺,等. 几种大型水生植物对富营养水体中氮和磷的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(增刊): 635-638.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Heged A, Erdei S, Horvath G. Comparative studies of H_2O_2 detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress[J]. Plant Sci, 2001, **160**(6): 1085-1093.
- [12] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Anal Biochem, 1976, **72**(1): 248-254.
- [13] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 154-155.
- [14] Fridovich. The biology of oxygen radical[J]. Science, 1978, **201**(4359): 875-880.
- [15] 章华. 典型污染对几种植物过氧化物酶活性的影响[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 39-43.
- [16] Li J, Zu Y G. Generation of activated oxygen and change of cell defense enzyme activity in leaves of Korean pine seedling under low temperature[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, **42**(2): 148-152.
- [17] 雒维国,王世和,黄娟,等. 植物光合及蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(1): 30-33.
- [18] 宋克敏. 植物的磷营养: 磷酸盐运转系统及其调节[J]. 植物学通报, 1999, **16**(3): 251-256.