

连续曝气下河水水质及睡莲 生理响应的季节变化

卢晓明¹ 张勇² 陈建军²

(1. 温州科技职业学院生态环境研究所,温州 325006; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院,上海 200062)

摘要 采取现场实验方法,在春、夏、秋三季测定了6个睡莲(*Nymphaea tetragona* L.)植物净化槽(曝气、非曝气)中睡莲的叶绿素(Chl)、可溶性蛋白(SP)含量与过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,氮磷积累、生物量、根长、茎高、叶长、分蘖数、根密度等生物学指标及对应的水质常规理化指标,探讨了连续曝气下睡莲的生理响应及河水水质的季节变化。结果表明,连续曝气明显影响了睡莲的生理特性,导致净化槽中水质发生相应变化,且影响程度与睡莲生长状况的季节变化相关。曝气槽中睡莲植物的根长、茎高、叶长较短,叶片Chl-a、Chl-b、SP含量下降,而根组织POD、CAT活性升高,氮磷积累、生物量下降,分蘖数、根密度下降;春、夏季曝气对睡莲的影响相对较小,曝气槽中TN、NH₄⁺-N浓度低于非曝气槽,而TP、溶解性P浓度明显升高;秋季曝气对睡莲的影响较严重,曝气槽中TN、NH₄⁺-N、TP、溶解性P浓度均高于非曝气槽。研究结论为在污染河道生态修复工程实践中,针对水生植物生长状况的季节变化而进行曝气方式调节提供理论依据。

关键词 连续曝气 睡莲 生理响应 季节变化

中图分类号 X173 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)09-1978-07

Seasonal variation of river water qualities and physiological responses of *Nymphaea tetragona* L. under continuous aeration

Lu Xiaoming¹ Zhang Yong² Chen Jianjun²

(1. Institute for Eco-Environmental Sciences, Wenzhou Vocational College of Science & Technology, Wenzhou 325006, China;

2. School of Resources and Environment Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract With testing outside, *Nymphaea tetragona* L. plants were cultivated in 6 purifying-tanks (aeration and non aeration), to investigate the plants' physiological characteristics and polluted water's physical and chemical qualities during spring, summer and autumn. The plants' biological indexes included chlorophyll (Chl) and soluble protein (SP) contents, peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities, nitrogen (N) and phosphorus (P) accumulations and biomass, lengths of roots, stems and leaves, tillers and roots densities. Seasonal variations of physiological responses of the plants and water qualities under continuous aeration were analyzed. Results showed that continuous aeration significantly affected the plants' physiological characteristics, which resulted in water qualities in purifying-tanks varied. And the effects were correlated to the plants' seasonal growths. Roots, stems and leaves lengths of the plants under the aeration were shorter than the non aeration, respectively. Chl-a, Chl-b and SP contents of the leaves at the aeration decreased, while POD and CAT activities of roots tissues increased. N and P accumulations and biomass of the plants at the aeration decreased. Tillers and roots densities in the aeration tanks decreased too. In spring and summer, effects of aeration on the plants were comparatively less. TN and NH₄⁺-N concentrations at the aeration were lower than the non aeration, while TP and soluble P concentrations increased significantly. In autumn, effects of aeration on the plants became heavier. TN, NH₄⁺-N, TP and soluble P concentrations at the aeration were higher than the non aeration, respectively. This work provided theoretical evidences for regulating aeration techniques based on seasonal variations of aquatic plants' growths in the ecological restoration engineering of polluted rivers.

Key words continuous aeration; *Nymphaea tetragona* L.; physiological response; seasonal variation

河道水体黑臭是我国城市河网的普遍现象^[1],溶解氧含量不足是水体黑臭的根本原因。河道曝气增氧是城市河道水体复氧的重要方式,对城市黑臭

基金项目 国家重大科技专项(2008ZX07317-006);上海市科委重点项目资助(062312019)

收稿日期: 2009-09-21; **修订日期**: 2009-11-04

作者简介: 卢晓明(1970~),男,博士,讲师,主要从事水污染控制研究工作。E-mail: xm155@sina.com

河道生境改善和生态修复具有极其重要的意义^[2],对河流水体进行人工曝气复氧研究在国外已经开展了40多年^[3]。河道曝气复氧技术从20世纪60年代起就被很多国家应用于污染河道水环境治理与水质改善^[4]。国内外研究表明:人工曝气复氧是治理污染河道的一种有效工程措施^[4,5]。近年来,植物浮床在污染河道生态修复工程中已得到广泛应用^[6-8]。本课题组在已往的河道治理工程实践中,发现污染河道进行人工曝气复氧时,曝气气流及由此产生的水流扰动在一定条件下(如气流流速过大、曝气机与水生植物定植位置的间距过近及曝气持续时间过长等)可能对浮床植物的生长状况产生一定影响,如靠近曝气机附近的浮床上植物矮小,曝气过程中产生大量表面活性剂泡沫覆盖在植物叶面上,水流对浮床上植物裸露嫩根的损伤等。另外,机械曝气需要大量能耗。因此,通过监测曝气过程中植物的生理变化规律,科学分析和评估曝气对植物生长及河水净化的影响机制和程度,对优化污染河道治理工程的系统组合与运行调控具有重要的理论意义和应用价值。目前此方面的研究还鲜见报道。

工业河为位于上海普陀区桃浦镇境内的一条断头浜,常年重度污染,水体黑臭,水质属劣五类。近年来,对观赏水生植物修复污染河水方面的研究报道较多,但是,对睡莲(*Nymphaea tetragona* L.)净化重度污染河水方面的相关报道还很少,故本文通过采用大型观赏水生植物睡莲现场处理该黑臭河水,曝气气流速率设为30 L/min且长期连续曝气,探讨了睡莲在连续曝气下的生理响应及黑臭河水水质的季节(春、夏、秋)变化,旨在为污染河道生态修复工程实践中,针对水生植物生长状况的季节变化而进行曝气方式调节提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 装置构建与植物培养

实验装置(图1)由1个平衡水箱(上部1 500 mm×1 000 mm,下部1 450 mm×950 mm,深600 mm)和7个塑料净化槽(上部1 240 mm×620 mm,下部1 150 mm×550 mm,深760 mm)构建。平衡水箱设有溢流管用来平衡水位,使7个净化槽的进水均匀。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0.6 m。每个净化槽中央用隔板隔开,留出离槽底高约20 cm的过

流断面,以防净化槽内河水短流。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ACO-004型电磁式空气泵(60 L/min),曝气气流设为30 L/min。选取大小均匀的睡莲幼苗(高约10 cm)(购于上海泽龙生物工程有限公司),分别在6个净化槽(本实验设置非曝气和曝气2组净化槽,sk与sk₀分别代表非曝气和曝气净化槽,见图1)中各水培10棵,另设空白槽对照(CK),从睡莲幼苗开始培养到整个实验结束始终直接采用来自工业河的黑臭河水。为避免气候变化对实验分析的影响,整个装置设在工业河河边的露天现场(北纬31°11',东经121°29'),周边无高大建筑及树木,使处在相同气候条件下,在标准条件下进行实验。

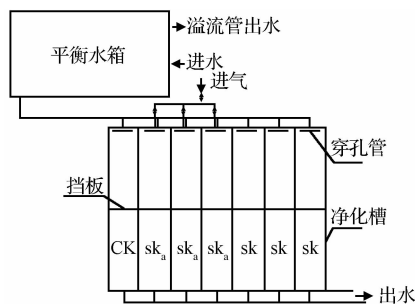


图1 植物净化装置平面示意图

Fig. 1 Sketch of purifying-tanks

1.2 供试植物样与水质监测

分别于2008年春季(4月26日)、夏季(7月6日)、秋季(10月16日),从各净化槽生长旺盛的植物样(均有2片或2片叶以上)中随机选定7棵,依次采取每棵选定植株的最上叶片、须根各0.40 g,备用;从每个净化槽出水口处采集对应的水样,采用标准方法^[9]进行水质分析。然后,收获选定的植物样,用卷尺与游标卡尺测量植株的根(主根)长、茎高、叶(最上叶)长,各取均值。计数各净化槽中植物的分蘖数量与根密度,各取均值。

1.3 植株的氮磷含量与生物量及叶片叶绿素含量的测定

经过自然风干的植物样,于80℃下烘48 h至恒重。烘干的植物材料先用硫酸-高氯酸消化,然后分别采用靛酚蓝比色法、钼锑抗比色法测定氮磷^[10]。测定植株的生物量(干重)。

Chl含量的测定按Heged等^[11]提出的方法进行,并作以下改进:取0.05 g植物叶片加入80%丙酮溶

液,浸提 24 h 后分光光度计测浸提液的吸光度。

1.4 酶液提取与可溶性蛋白 (SP) 含量、酶活性的测定

分别取 0.30 g 植物新鲜叶片与根组织在预冷的磷酸盐 (pH 7.8) 中匀浆,4℃ 下 13 000 r/min 离心 30 min ,上清液即为酶液提取液。根据 Bradford 的考马斯亮兰法测定 SP 含量^[12],用牛血清蛋白作标准曲线。CAT 活性测定采用 Rao 等^[13]紫外分光光度法,以 D240 值每减少 0.1 为一个活性单位。POD 活性测定采用愈创木酚法^[14],以每 min 光密度变化表示酶活性大小,以 D460 值每增加 0.1 为一个活性单位。

1.5 数据分析

测定每个净化槽中 7 棵植物的待测生理指标,以 1 个净化槽为单元分别取得各指标数据的均值,然后以每个季节 3 个平行净化槽中的所得指标均值做为各个相应植物生理指标的三次重复;利用 SPSS 15.0 分析软件中独立样本的 *t* 检验法对实验结果的差异显著性进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同季节曝气对净化槽中黑臭河水水质的影响

研究发现,曝气槽与非曝气槽中水质存在季节差异,实验结果如表 1 所示。

表 1 与图 2 表明,春、夏季曝气槽中 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度均低于非曝气槽,TP、溶 P 浓度明显高于非曝气槽,而秋季曝气槽中 COD、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP、溶 P 浓度均高于非曝气槽。

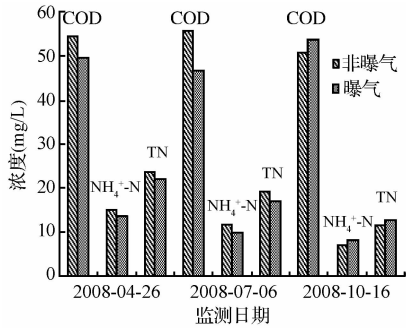


图 2 曝气与非曝气过程中水体污染物变化对比图
Fig. 2 Comparison of water pollutant variations between aeration and non-aeration

2.2 不同季节曝气对睡莲植物生理特性的影响

实验发现,曝气槽与非曝气槽中植物生理特性存在季节差异,结果如表 2 所示。

表 2 与图 3 表明:连续曝气影响了睡莲的生长状况,曝气槽中睡莲植株较矮小,叶片 Chl-a、Chl-b 和 SP 含量下降,而根组织 POD、CAT 活性升高;曝气槽中睡莲的分蘖数量减少导致根密度下降。

曝气对睡莲植物的影响程度与睡莲的生长状况密切相关,春、夏季睡莲分别处于生长初期、旺盛期,

表 1 不同季节曝气对净化槽中黑臭河水水质的影响
Table 1 Effects of aeration on qualities of heavily polluted river water in purifying-tanks in various seasons

均值	COD 浓度 (mg/L)	溶 P 浓度 (mg/L)	TP 浓度 (mg/L)	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度 (mg/L)	TN 浓度 (mg/L)	DO (mg/L)	pH 值	水温 (℃)
C +	49.82	0.047	0.206	13.60	21.79	2.35	8.1	25.9
C -	54.74	0.042	0.182	15.11	23.98	0.92	8.2	25.2
CK	69.60	0.050	0.228	19.33	30.15	0.12	8.4	27.3
X +	46.50	0.116	0.123	9.99	16.90	2.47	7.9	31.5
X -	55.60	0.090	0.098	12.00	19.57	1.03	8.1	30.3
CK	92.30	0.144	0.159	20.26	31.60	0.13	8.5	34.6
Q +	53.51	0.074	0.145	7.99	12.84	2.40	8.0	26.1
Q -	51.20	0.056	0.102	7.41	12.03	0.98	7.9	25.3
CK	76.02	0.080	0.161	11.53	17.98	0.12	8.4	27.2

注: C、X、Q 代表春、夏、秋季;-、+代表非曝气、曝气;下文表同

表 2 不同季节曝气对睡莲生理特性的影响

Table 2 Effects of aeration on physiological characteristics of *N. tetragona* in various seasons

均值	根 (cm)	茎 (cm)	叶 (cm)	POD (U/g · min)	CAT (mg/g · min)
C -	18.4 ± 1.9 ^a	15.2 ± 1.7 ^a	4.0 ± 0.4 ^a	0.1521 ± 0.0502 ^a	2.1097 ± 1.0640 ^a
C +	13.9 ± 1.5 ^b	11.7 ± 1.4 ^b	3.1 ± 0.3 ^b	0.2586 ± 0.1022 ^b	2.6346 ± 1.0452 ^a
X -	44.6 ± 4.8 ^a	37.1 ± 4.2 ^a	8.7 ± 0.9 ^a	0.2631 ± 0.1003 ^a	0.4532 ± 0.1848 ^a
X +	34.3 ± 3.6 ^b	29.0 ± 2.9 ^b	6.9 ± 0.7 ^b	0.3137 ± 0.1270 ^a	0.5715 ± 0.1890 ^a
Q -	40.9 ± 4.2 ^a	34.6 ± 4.0 ^a	7.2 ± 0.8 ^a	0.2182 ± 0.0596 ^a	0.3051 ± 0.0657 ^a
Q +	10.6 ± 1.1 ^b	9.5 ± 1.1 ^b	2.6 ± 0.3 ^b	0.4821 ± 0.1288 ^b	0.5945 ± 0.2128 ^b

均值	SP (mg/g)	Chl-a (mg/g)	Chl-b (mg/g)	分蘖数	根密度 (根/m ²)
C -	43.83 ± 14.16 ^a	1.8033 ± 0.3006 ^a	0.5188 ± 0.0964 ^a	66	259
C +	33.22 ± 13.30 ^a	1.4975 ± 0.3092 ^a	0.4132 ± 0.0797 ^b	51	198
X -	34.09 ± 10.21 ^a	1.4423 ± 0.2285 ^a	0.4449 ± 0.0790 ^a	140	603
X +	25.51 ± 9.81 ^a	1.1316 ± 0.1765 ^b	0.3351 ± 0.0690 ^b	109	470
Q -	63.20 ± 15.24 ^a	1.0334 ± 0.2015 ^a	0.4502 ± 0.0668 ^a	122	512
Q +	19.87 ± 8.63 ^b	0.3746 ± 0.0873 ^b	0.1489 ± 0.0229 ^b	40	165

注: 同一栏数据 (Mean ± S. D.) 的“a, b”表示数据 *t* 检验的差异显著性 (*n* = 3, *p* < 0.05), 下文表同

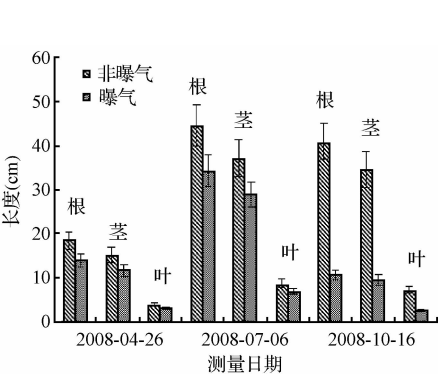


图 3 曝气与非曝气过程中睡莲生长指标对比图

Fig. 3 Comparison of physiological characteristics of *N. tetragona* between aeration and non aeration

曝气影响较小,2 个净化槽中睡莲的生理特性差异相对较小,而秋季睡莲处于衰老期,曝气影响最明显,2 个净化槽中睡莲的生理特性差异性显著。

2.3 不同季节曝气对睡莲植株氮磷积累的影响

研究发现,曝气槽与非曝气槽中睡莲植株氮磷积累量存在季节差异,实验结果如表 3 所示。

由表 3 可知,三季的连续曝气都影响了睡莲植株的氮磷积累与生物量,曝气槽中植株的氮磷积累、生物量下降,差异都是显著的,但季节作用有区别,春、夏季曝气对睡莲的影响相对较小,2 个净化槽中植株的氮磷积累、生物量均值差距相对较小;而秋季曝气严重影响了睡莲,2 个净化槽中植株的氮磷积累、生物量均值差距较大。

表 3 不同季节曝气对睡莲植株氮磷积累的影响

Table 3 Effects of aeration on N and P accumulations of *N. tetragona* in various seasons

均值	N (g/kg)	P (g/kg)	生物量 (g/棵)	含水率 (%)
C +	5.67 ± 0.26 ^a	0.82 ± 0.04 ^a	6.62 ± 0.31 ^a	95.9 ± 2.4 ^a
C -	7.04 ± 0.31 ^b	1.13 ± 0.06 ^b	9.65 ± 0.47 ^b	94.7 ± 2.2 ^a
X +	14.24 ± 0.63 ^a	1.74 ± 0.09 ^a	17.23 ± 0.83 ^a	92.8 ± 2.1 ^a
X -	16.68 ± 0.82 ^b	2.13 ± 0.11 ^b	22.57 ± 1.12 ^b	92.1 ± 2.0 ^a
Q +	15.33 ± 0.74 ^a	1.90 ± 0.09 ^a	18.49 ± 0.95 ^a	92.4 ± 1.7 ^a
Q -	19.96 ± 1.01 ^b	2.42 ± 0.13 ^b	25.64 ± 1.26 ^b	91.6 ± 1.6 ^a

总而言之,春、夏季曝气对睡莲的生理生长影响较小(表2~3),曝气槽中N浓度低于非曝气槽(表1),秋季曝气严重影响了睡莲的生长状况(表2),导致非曝气槽中N浓度反而低于曝气槽(表1)。这种曝气与非曝气净化槽中水质N浓度的季节差异,主要是由于2个净化槽中睡莲植物的根总表面积的季节变化(据表2,比较根长及根密度可得知,春、夏季2个净化槽中睡莲的根总表面积之间差异不会很显著,而秋季非曝气槽很可能大幅超过曝气槽),引起根总表面生物膜的微生物数量的季节变化,从而导致微生物净化黑臭河水的季节变化,造成净化槽中水质N浓度的季节差异。

3 讨论

水生植物的生长状况主要取决于水质的理化特征、底泥性质及水文条件,由于本实验采用睡莲水培,因此没有底泥因素的干扰,而曝气引发的水流扰动改变了净化槽中的微观水文状况,从而影响睡莲根系的生长状况,使睡莲根形态发生变化,进而影响植株的生理状况,同时也对河水水质产生影响。

人工曝气增氧通常能有效提高水生植物的污水净化效果,但长期连续曝气将影响水生植物的形态、生理特性。睡莲在黑臭河水中生长良好,但长期连续曝气影响了睡莲的生理状况。曝气引起的水流扰动导致睡莲裸露根的长度变短、根密度下降,影响了根对水中氮磷营养元素的吸附、吸收,导致植株的氮磷积累下降,进而影响植株的生理代谢,以及生长与分蘖,使睡莲叶片Chl的合成能力减弱,导致叶片Chl含量下降,而植物叶片Chl含量与净光合速率之间关联密切,因此长期连续曝气影响了睡莲植物的光合作用。监测表明,曝气槽中睡莲植株的氮磷含量低于非曝气槽中睡莲,加上连续曝气影响了睡莲植株的生长使非曝气槽中植株明显比曝气槽中植株高大(表2),且其生物量也更大,而两净化槽中植株的含水率差异不明显,这些现象表明在相同时间里,曝气槽中睡莲从污水吸收的可溶性氮磷量少于非曝气槽中睡莲,因此,连续曝气很可能影响了睡莲的蒸腾作用。

长期连续曝气影响水生植物体内的抗性酶活性。黑臭河水胁迫引起植物细胞内超氧自由基增加而导致氧化胁迫^[15],而植物细胞内的抗氧化酶CAT与POD能够协同清除和阻止活性氧的形成^[16]。POD对逆境反应灵敏,与植物抵御逆境存在相关关

系^[17]。本实验中,水流扰动对睡莲的裸露根进行长时间的持续冲刷,影响了根的生长状况(甚至可能损伤幼嫩的须根)和根区对水中氮磷营养元素的吸附、吸收,进而影响植株的生理活动,导致根组织POD、CAT活性增强。这种植物抗性酶活性由于受曝气影响而增强的现象与李宗辉等^[18]报道的湿地植物经污水长期浸泡后根组织POD活性增强的现象不同,后者是由于植物吸收了大量可溶性污染物所致。目前已有相关报道^[19,20],POD与植物细胞的生长及组织的再生有关,在植物的损伤愈合中起着重要作用,在愈伤组织中分布较多。

长期连续曝气影响睡莲植物的生长状况,导致净化槽中水质发生相应变化。曝气槽与非曝气槽中污水净化效果的优劣取决于睡莲植物对水中污染物的直接吸收与微生物对水中污染物的降解、转化的综合平衡结果。污水中的氨态氮是水生植物组织中氮的重要来源^[21]。植物N、P营养的吸收靠根从污水中吸收,与根表面积、内部结构及污水性质相关^[21]。长期连续曝气影响了睡莲根的生长(表2),影响了植株的氮磷积累(表3)。春、夏季节,虽然非曝气槽中睡莲植株的氮磷积累高于曝气槽中睡莲,且非曝气槽中睡莲的根长分别为曝气槽中睡莲根长的1.32倍和1.30倍(表2),根密度分别为曝气槽的1.31倍和1.28倍(表2),非曝气槽中睡莲根的总表面积很可能超过曝气槽中睡莲根的总表面积,但是,非曝气槽中污水TN、 NH_4^+-N 浓度仍高于曝气槽,可能是由于曝气槽中的DO升高更有利于睡莲根区微生物降解、转化 NH_4^+-N ^[3~5]所致。已有研究^[22]表明,水生植物吸收的氮在污水的总除氮中仅约占17%左右,大部分氮的去除是靠微生物作用来完成的。同样,曝气槽中的DO升高也有利于睡莲根区一些异养微生物对污水中COD的降解吸收。曝气槽中TP、溶P浓度升高是由于曝气减弱了磷的自然沉降途径以及水流扰动影响了睡莲根区对水中氮磷元素的吸附、吸收作用所致(比较2个净化槽中植株的氮磷积累量可间接得知,见表3),而水生植物主要是通过蒸腾流吸收途径来去除污水中的可溶性氮磷^[22,23]。春、夏季曝气槽中pH值较低主要是由于 NH_4^+-N 浓度下降所致。经类似分析可得知,秋季连续曝气严重影响了睡莲植物的根长与根密度,使秋季非曝气槽中睡莲根的总表面积很可能大幅超过曝气槽中睡莲根的总表面积(表2),而净化槽中植物根区微生物的生长繁殖与植物根区提供

的附生表面积大小密切相关,因此,秋季连续曝气不仅影响了睡莲对水中污染物的吸附、吸收,同时也很可能影响了根区微生物的生长繁殖(由于根总表面积的变化引起根总表面生物膜的微生物数量变化),进而影响这些微生物对水中污染物的降解、转化。因此,虽然曝气槽中 DO 浓度明显升高(表1),但是,非曝气槽中植物根区可能更有利于微生物的生长繁殖,使这些微生物能更有效地降解、转化水中污染物^[3~5],加上非曝气槽中污染物的自然沉降作用与睡莲植物根的吸附、吸收作用更有效,导致非曝气槽中 COD、TN、 NH_4^+ -N、TP 和溶 P 浓度均低于曝气槽。

长期连续曝气影响睡莲植株的生长,从而使曝气槽与非曝气槽中污水所受到的阳光照射不同,导致不同净化槽中水温存在差异,而水温差异很可能影响净化槽中水质。监测表明,不同季节里曝气槽中水温均略高于非曝气槽(表1)。春、夏季,曝气槽中 COD、 NH_4^+ -N 和 TN 浓度低于非曝气槽,是由于水温升高有利于植物根区异养微生物的代谢活动,使它们更有效地分解、转化水中污染物;另一方面,水温升高使植物的蒸腾吸收增强,有利于植物对水中污染物的吸附、吸收。秋季,水温升高虽然在一定程度上促进了净化槽中污染物的去除,但是,连续曝气严重影响了植物的生理状况,导致植物蒸腾减弱,同时植物根区微生物的数量很可能也受影响而减少,从而导致曝气槽中 COD、 NH_4^+ -N 和 TN 浓度略低于非曝气槽。水温对植物生理指标也可能产生影响。曝气槽中水温升高促使植物体内 POD、CAT 活性高于非曝气槽中植物,可能是由于水温升高在一定程度上刺激增强了植物体内的抗性酶活性,而植物叶片 SP、Chl-a、Chl-b 含量下降,可能是由于水温升高使植物体内光合酶的活性受影响而减弱所致。

可见,相同的曝气方式对睡莲植物生理生化产生的影响与睡莲的生长状况密切相关,春、夏季睡莲处于生长期,曝气影响较小,DO 浓度升高导致曝气槽中 N 浓度低于非曝气槽;秋季睡莲处于衰老期,曝气影响最严重,导致非曝气槽中 N、P 浓度反而低于曝气槽。因此,在城市污染河道生态修复工程实践中,宜依据水生植物生长状况的季节变化,对人工曝气方式进行相应调节。

4 结 论

(1)长期连续曝气明显影响了睡莲的生长与分

蘖,影响了睡莲的生理特性,导致其根组织 POD、CAT 活性增强,叶片 Chl、SP 含量下降,植株的氮磷积累、生物量下降。

(2)相同的曝气方式对睡莲植物产生的影响与睡莲的生长状况密切相关。春、夏季睡莲处于生长期,曝气影响较小,2 个净化槽中睡莲的生理特性差异相对较小,曝气槽中 COD、TN 和 NH_4^+ -N 浓度低于非曝气槽,而 TP、溶 P 浓度明显高于非曝气槽;秋季睡莲处于衰老期,曝气影响最严重,2 个净化槽中睡莲生理特性的差异性显著,曝气槽中 COD、TN、 NH_4^+ -N、TP 和溶 P 浓度均高于非曝气槽。

参 考 文 献

- [1] 温丽容,刘乙敏,刘国光,等.广东省跨市河流边界水质状况研究.生态环境,2004,13(2):177~179
- [2] 黄民生,徐亚同,戚仁海.苏州河污染支流——绥宁河生物修复试验研究.上海环境科学,2003,22(60):384~389
- [3] 周杰,章永泰,杨贤智.人工曝气复氧治理黑臭河流.中国给水排水,2001,17(4):47~49
- [4] 陈伟,叶舜涛,张明旭.苏州河河道曝气复氧探讨.给水排水,2001,27(4):7~9
- [5] 徐续,操家顺.河道曝气技术在苏州地区河流污染治理中的应用.水资源保护,2006,22(1):30~33
- [6] 罗固源,郑剑锋,许晓毅,等.4 种浮床栽培植物生长特性及吸收氮磷能力的比较.环境科学学报,2009,29(2):285~290
- [7] Li W., Friedrich R. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber trial. Agric. Ecosyst. Environ., 2002, 90(1):9~15
- [8] Monnet F., Vaillant N., Hitmi A., et al. Treatment of domestic wastewater using the nutrient film technique (NFT) to produce horticultural roses. Water Res., 2002, 36(4):3489~3496
- [9] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版).北京:中国环境科学出版社,2002
- [10] 董鸣,王义凤,孔繁志,等.陆地生物群落调查与分析.北京:中国标准出版社,1996.256~257
- [11] Heged A., Erdei S., Horvath G. Comparative studies of H_2O_2 detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress. 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. Anal. Biochem., 1976,

- 72(5):248~254
- [13] Rao M. V. , Paliyath G. , Ormrod D. P. Ultraviolet-B radiation and ozone-induced biochemical changes in the antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiol. , **1996**, 110(1):125~136
- [14] 张志良. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, **1990**. 154~155
- [15] Jabs T. Reactive oxygen intermediates as mediators of programmed cell death in plants and animals. Biochem. Pharmacol. , **1999**, 57(3):231~245
- [16] Kaufmann J. A. , Bickford P. C. Free radical-dependent changes in constitutive nuclear factor kappa B in the aged hippocampus. Neuroreport, **2002**, 13(15):1917~1928
- [17] 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. Acta Bot. Sin. , **2000**, 42(2):148~152
- [18] 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. 环境科学学报, **2007**, 27(1):75~79
- [19] Hou H. W. , Kalima-N'Koma MWANGE, Wang Y. Q. , et al. Changes of soluble protein, peroxidase activity and distribution during regeneration after girdling in *Eucommia ulmoides*. Acta Bot. Sin. , **2004**, 46(2):216~223
- [20] Liskay A. , Kenk B. , Schopfer P. Evidence for the involvement of cell wall peroxidase in the generation of hydroxyl radicals mediating extension growth. Planta, **2003**, 217(4):658~667
- [21] 范国兰, 李伟. 穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.) 在不同程度富营养化水体中的营养积累特点及营养分配对策. 武汉植物学研究, **2005**, 23(3):267~271
- [22] 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. 中国环境科学, **2006**, 26(1):30~33
- [23] 宋克敏. 植物的磷营养: 磷酸盐运转系统及其调节. 植物学通报, **1999**, 16(3):251~256