

海寿植物在不同季节连续曝气黑臭河水中的生理响应及净水效果的比较研究

卢晓明, 陈玉霞, 陈建军, 黄民生, 耿 亮

(华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062)

摘 要:采取现场试验方法,在不同季节测定了6个各种有10棵海寿植物的水培净化槽(曝气、非曝气各设3个平行)中植物叶片的叶绿素(Chl)、可溶性蛋白(SP)含量与植物根组织过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性及对应的净化槽出水水质,测定了植物根、茎、叶的长度,植物分蘖数、根密度,植株氮磷积累、生物量等生物学指标,比较研究了不同季节连续曝气下海寿的生理响应及净水效果。结果表明,曝气影响植物的生理特性,植物根、茎、叶的长度分别较非曝气槽中植物短,叶片Chla、Chlb、SP含量分别较非曝气槽中植物叶片低,而根组织POD、CAT活性分别较非曝气槽中植物根组织高,曝气槽中植株的氮磷含量、生物量分别较非曝气槽中植株低,曝气槽中植物的分蘖数、根密度分别高于非曝气槽中植物;曝气槽出水中TN、NH₄⁺-N去除效率较非曝气槽出水高,而TP、溶P去除效率较非曝气槽出水低;曝气对植物生理特性的影响与植物的生长状况密切相关,春、夏季曝气对植物的影响较小,但两类净化槽的水质差异较明显,秋季曝气对植物的影响较大,两类净化槽的水质差异较小。

关键词:曝气;黑臭河水;海寿;生理响应;净化

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)09-1919-05

Comparative Investigation on Physiological Responses of *Pontederia cordata* and Purifying Efficiencies of Heavily Polluted River Water Under Continuous Aeration in Various Seasons

LU Xiao-ming, CHEN Yu-xia, CHEN Jian-jun, HUANG Min-sheng, GENG Liang

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

Abstract: With field test, *Pontederia cordata* was hydroponic cultivated in 6 purifying-tanks (aeration and no aeration) with same planting density of 10, to investigate physiological characteristics (POD and CAT of roots tissues, Chl and SP of leaves) of the plant and main physical and chemical characteristics of the corresponding effluents in various seasons (spring, summer and autumn). Lengths of roots, stems and leaves, tillers and roots densities, nitrogen (N) and phosphorus (P) accumulations and the biomass et al. of the plant's biological indexes were analyzed. Comparative investigation on physiological responses of *P. cordata* and purifying efficiencies of heavily polluted river water under continuous aeration in various seasons was conducted. Results showed aeration affected physiological characteristics of the plant. Roots, stems and leaves lengths of the plant at the aeration were shorter than the lengths at the no aeration, respectively. Chla, Chlb and SP contents of the leaves at the aeration were lower than the contents at the no aeration, respectively. However, POD and CAT activities of roots tissues at the aeration exceeded the activities under the no aeration. N and P accumulations and the biomass of the plant were lower at the aeration than the plant at the no aeration. Tillers and roots densities in aeration purifying-tanks were more than the no aeration purifying-tanks. TN and NH₄⁺-N removals of the effluents at the aeration exceeded the removals at the no aeration, while TP and soluble P removals were lower than the removals at the no aeration. Effects of aeration on physiological characteristics of the plant were obviously correlated with the growing of the plant. The effects became less in spring and summer, while the water qualities differences between two type purifying-tanks were great. However, the effects were obvious in autumn, while the water qualities variations between two type purifying-tanks became less.

Keywords: aeration; heavily polluted river water; *Pontederia cordata*; physiological response; purifying efficiency

收稿日期: 2009-02-12

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07317-006); 上海市科委重点项目“中心城区河流水质改善与生态修复技术研究”(062312019)

作者简介: 卢晓明(1970—), 男, 浙江永嘉人, 博士, 主要研究方向为废水生物治理工程。E-mail: lxm158156@sina.com

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,对河流水体进行人工曝气复氧研究在国外已经开展了20多年^[2]。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河道治理^[3]。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^[3-4]。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。由施工经验得知,当浮床植物距离水车式增氧机(型号为YC-2.2-6,2.2 kW,清水充氧量 $3.80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$)过近(约10 m以内)时,曝气对植物生长存在明显影响,而当距离达30 m左右或以外时,则影响较小。可见,污染河道进行人工曝气复氧时,除了已大量报道的正面效应^[3-4]外,曝气气流及由此产生的水流冲击在一定条件下(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,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。本文通过采用观赏水生植物海寿现场处理该黑臭河水,曝气气流速率设为 $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 且长期连续曝气,探讨了不同季节(春、夏、秋)海寿在长期连续曝气下的生理响应及对脱氮除磷的影响,旨在合理开发观赏水生植物在城市黑臭河道修复工程中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 装置构建与植物培养

试验装置(图1)由1个平衡水箱(上部 $1500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$,下部 $1450 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$,深600 mm)和7个塑料净化槽(上部 $1240 \text{ mm} \times 620 \text{ mm}$,下部 $1150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$,深760 mm)构建而成。平衡水箱设有溢流管

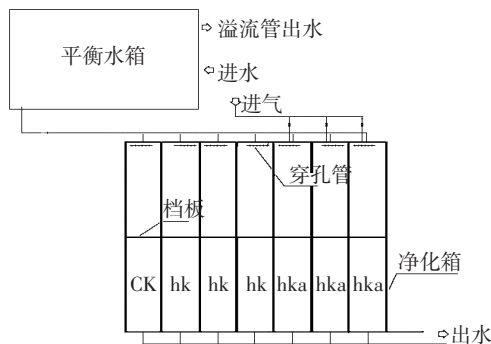


图1 植物净化装置平面示意图

Figure 1 Sketch of plant purification device

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($60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$),曝气气流设为 $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。选取大小均匀的海寿幼苗(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(曝气、非曝气各设3个平行,hk为非曝气槽,hka为曝气槽)中各水培10棵,另设空白槽对照(CK),从植物幼苗开始培养到整个试验结束始终直接采用来自黑臭河道的黑臭河水。为避免气候对试验结果分析的影响,整个装置设在露天现场,处在相同气候条件下,且周边无高大建筑及树木。

1.2 供试植物样、水质监测

分别于2008年4月26日(春季,14~24℃,晴)、7月19日(夏季,27~36.3℃,晴)、10月11日(秋季,21~29℃,晴),在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,依次采取其中每棵选定植株的最上叶片、须根各0.400 g,备用;从每个净化槽出水口处采集对应时间的水样,采用标准方法^[5]分析水质。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)、茎、叶(最上叶)长,各取均值。统计各净化槽的植物分蘖数与根密度,各取均值。

1.3 植株氮磷含量与生物量及叶片叶绿素(Chl)含量

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^[6]。测定植物植株的生物量(干重)。Chl含量的测定,按Heged等^[7]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后分光光度计测定浸提液的吸光值。

1.4 酶液提取与可溶性蛋白(SP)含量及酶活性测定

分别取0.3 g植物新鲜叶片与根组织在预冷的磷酸盐(pH7.8)中匀浆,4℃下 $13000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 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^[8],用牛血清蛋白作标准曲线。CAT活性测定采用Rao等^[9]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^[10],以每分钟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 棵植物的待测指标,以 1 个槽为独立单位分别取得各指标数据的均值,然后以 3 个平行槽的所得均值分别为各个对应指标的 3 个平行样数据;利用 SPSS 15.0 分析软件中的独立样本的 t 检验法对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同季节曝气对海寿植物生理特性的影响

结果表明:曝气影响植物生长,曝气槽植物根、茎、叶的长度分别较非曝气槽植物短;叶片 Chla、Chlb、SP 含量分别较非曝气时低;而根组织 POD、CAT 活性高于非曝气槽植物。曝气槽植物的分蘖数量高于非曝气槽植物,由于非曝气槽植物长得较高大,遮挡了阳光对分蘖幼株的照射,从而影响了这些幼株的光合作用,不利于其生长,而曝气槽植物较矮小,其分蘖幼株有较多机会获取阳光。曝气槽植物根密度高于非曝气槽,是由于曝气槽植物分蘖数量明显增多引起的。

曝气对植物的影响与植物的生长状况密切相关,春、夏季植物处于生长初期、旺盛期,曝气影响较小,两类净化槽植物的生理特性差异较小,秋季植物处于生长衰老期,曝气影响最明显,两类净化槽植物的生理特性差异显著。

2.2 不同季节曝气对海寿植株氮磷积累的影响

曝气影响植株的氮磷积累及生物量。曝气槽植物的氮磷积累、生物量分别较非曝气槽植物低。由于曝气气流引发的水流冲击影响植物根的生长,使根吸收的氮磷量减少,导致植株的氮磷积累下降。曝气影响植物的生长,非曝气槽植物比曝气槽植物高大(表 1),而含水率差异不显著,因此,就植物而言,曝气槽植物的氮磷吸收比非曝气槽植物弱。

春、夏季曝气对植物生理状况影响较小,两类净化槽中植物的氮磷积累、生物量差异较小;秋季曝气

对植物生长状况影响较明显,两类净化槽中植物的氮磷积累、生物量差异较明显。

2.3 不同季节曝气对黑臭河水水质的影响

不同季节曝气槽出水 DO 浓度与 COD、TN、 NH_4^+-N 去除率分别高于非曝气槽出水,而 TP、溶 P 去除率明显低于非曝气槽出水。虽然曝气槽中植物的氮磷积累低于非曝气槽中植物,但曝气槽出水中的 TN、 NH_4^+-N 去除效率反而较高,这可能是由于曝气使水体 DO 升高,利于植物根表面生物膜的亚硝化细菌、硝化细菌等生物净化的结果^[2-4]。已有研究指出,水生植物吸收的氮在污水的总除氮中仅占 17% 左右,大部分氮去除是靠微生物作用来完成的。同时,较高的 DO 浓度使异养微生物代谢增强,利于污水 COD 去除,使曝气槽有更高的 COD 去除效果。水生植物主要是通过蒸腾吸收来去除污水中的可溶性氮磷^[11-12]。此结果与锥维国等^[11]的报道一致。曝气槽 TP、溶 P 去除率较低可能是由于曝气减弱了磷的自然沉降以及曝气气流引发的水流冲击影响植物的蒸腾作用所致(比较两类净化槽的植株体内氮磷积累可间接得知,见表 2)。曝气槽 pH 较低可能是由于较高的 NH_4^+-N 去除率引起的。

春、夏季曝气对植物生理状况影响较小,而两类净化槽出水的水质差异较明显,秋季曝气对植物生理状况影响较明显,而两类净化槽出水的水质差异较小。这种曝气与非曝气植物净化槽在处理黑臭河水效果的季节性差异,主要是由于两类净化槽中植物根总表面积的季节性变化(据表 1,比较根长及根密度可得知,春、秋季两类净化槽的植物根总表面积差异不会很明显,而夏季曝气槽很可能超过非曝气槽),引起根总表面生物膜的微生物数量的季节性变化,从而导致了微生物处理黑臭河水的效果的季节性变化。

3 讨论

曝气影响海寿的光合、蒸腾作用。海寿处理黑臭

表 1 不同季节曝气对植物生理特性的影响比较

Table 1 Comparison of effects of aeration on physiological characteristics of the plant in various seasons

平均值	根长/cm	茎长/cm	叶长/cm	POD/U·g ⁻¹ ·min ⁻¹	CAT/mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹	SP/mg·g ⁻¹	Chla/mg·g ⁻¹	Chlb/mg·g ⁻¹	分蘖数/个	根密度/根·m ⁻²								
C-	12.3±1.3 ^a	38.2±3.9 ^a	7.9±0.8 ^a	0.048	4±0.009	9 ^a	0.487	5±0.111	0 ^a	71.86±20.30 ^a	1.884	8±0.206	2 ^a	0.583	1±0.046	3 ^a	154	910
C+	9.0±0.8 ^b	24.3±2.3 ^b	6.8±0.7 ^b	0.063	0±0.015	1 ^a	0.797	0±0.203	9 ^a	54.50±13.66 ^a	1.697	1±0.327	3 ^a	0.498	4±0.050	9 ^a	189	1 138
X-	22.6±2.3 ^a	68.2±6.9 ^a	16.8±1.7 ^a	0.093	3±0.024	6 ^a	0.653	8±0.217	2 ^a	69.09±18.95 ^a	1.805	5±0.152	9 ^a	0.526	8±0.088	7 ^a	288	1 453
X+	17.7±1.7 ^b	46.0±4.4 ^b	14.1±1.4 ^b	0.120	6±0.025	6 ^a	0.819	1±0.235	7 ^a	52.42±16.09 ^a	1.413	5±0.180	1 ^b	0.365	3±0.064	9 ^b	350	2 103
Q-	20.1±2.1 ^a	64.3±6.5 ^a	15.6±1.6 ^a	0.028	2±0.006	8 ^a	0.320	9±0.088	5 ^a	38.35±12.05 ^a	1.608	6±0.174	2 ^a	0.572	1±0.062	9 ^a	264	1 317
Q+	14.0±1.5 ^b	39.1±4.0 ^b	12.0±1.3 ^b	0.053	5±0.021	1 ^b	0.675	7±0.138	7 ^b	17.86±4.64 ^b	1.160	0±0.238	5 ^b	0.405	5±0.023	3 ^b	302	1 503

注:a、b 代表差异显著性;C、X、Q 分别代表春、夏、秋季;-、+分别代表非曝气、曝气;下同。

表2 不同季节曝气对植株氮磷积累的影响比较

Table 2 Comparison of effects of aeration on N and P accumulations of the plant in various seasons

平均值	N/g·kg ⁻¹	P/g·kg ⁻¹	生物量/g·棵 ⁻¹	含水率/%
C+	3.86±0.35 ^a	0.98±0.06 ^a	8.79±0.23 ^a	96.7±2.5 ^a
C-	4.73±0.42 ^b	1.33±0.12 ^b	10.92±0.31 ^b	95.5±2.3 ^a
X+	17.43±1.43 ^a	2.12±0.16 ^a	23.48±0.44 ^a	93.6±2.1 ^a
X-	22.02±1.92 ^b	3.01±0.29 ^b	28.67±0.52 ^b	93.4±2.2 ^a
Q+	17.96±1.35 ^a	2.23±0.18 ^a	25.74±0.54 ^a	93.1±1.8 ^a
Q-	25.37±2.02 ^b	3.67±0.31 ^b	34.66±0.46 ^b	92.2±1.7 ^a

河水时,曝气槽植物叶片 Chl 含量低于非曝气槽植物,由于曝气气流引起的水流冲击影响植物裸露根的生长,从而对植物的生理代谢产生影响,使植物叶片 Chl 的合成能力减弱,导致叶片 Chl 含量下降,而植物叶片 Chl 含量与有效光合速率之间关系密切,因此曝气影响了植物的光合作用,同时影响了光合代谢产物 SP 的含量。同样,曝气影响了植物的蒸腾作用。由于曝气槽中植物的氮磷的单位质量含量低于非曝气槽中植物,且非曝气槽中植物明显较曝气槽植物高大(表1),说明曝气槽中植物在相同时间里从黑臭河水吸收的可溶性氮磷较非曝气槽中植物少,也就表明了曝气槽中植物的蒸腾吸收较非曝气槽植物弱,因此,曝气影响了植物蒸腾作用。由于氮磷是植物生长的必需养分,长期连续曝气影响了植物的生长(表1)。

曝气影响植株对氮磷的吸收和积累。污染水体中的 NH_4^+-N 含量是水生植物组织中氮的重要来源^[13]。植物营养(N、P)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密切相关^[13]。污水中 N、P 被根吸收后,由根运输到茎叶。长期连续曝气影响植物根的生长(表1),影响植株的氮磷积累(表2),因此,曝气影响植物对水体氮磷的吸收。曝气槽出水 TN、 NH_4^+-N 去除率高于非曝气槽出水,虽然非曝气槽中植物的根比曝气槽中植物的根长(表1),但曝气槽中植物根密度高于非曝气槽中植物(表2),可见,曝气槽中植物根表面积总和可能大于非曝气槽中植物根表面积总和(夏季),而在春、秋季槽中植物总表面积间差异不显著,且曝气槽 DO 明显高于非曝气槽(表3),因此,曝气槽植物根表面生物膜的亚硝化细菌、硝化细菌等更有效转化 NH_4^+-N ^[2-4],导致 TN、 NH_4^+-N 去除率高于非曝气槽出水。

曝气影响植物体内的抗性酶活性,而酶与植物的生理活动联系紧密。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^[14],但植物细胞内存在

表3 不同季节曝气对净化槽黑臭河水水质的影响比较

Table 3 Comparison of effects of aeration on heavily polluted river water qualities in purifying-tanks in various seasons

平均值	COD 去除率/	溶 P 去除率/	TP 去除率/	NH_4^+-N 去除率/	TN 去除率/	DO/ mg·L ⁻¹	pH 值	水温/ ℃
单位	%	%	%	%	%			
C+	43.55	18.83	16.60	29.61	26.65	2.31	7.9	25.2
C-	30.82	43.69	46.66	21.30	20.13	0.59	8.1	25.9
CK	6.24	5.62	6.53	3.57	3.27	0.12	8.4	27.3
X+	60.62	13.53	10.26	43.69	37.56	2.64	7.8	30.3
X-	41.50	57.32	48.44	32.26	27.98	0.97	8.0	31.5
CK	6.76	5.92	6.94	3.96	3.69	0.13	8.5	34.6
Q+	45.46	16.18	12.91	35.43	31.41	2.45	7.9	25.3
Q-	39.54	38.10	24.23	30.46	27.05	0.68	8.0	26.1
CK	6.45	5.71	6.82	3.86	3.46	0.12	8.4	27.2

抗氧化酶系统清除这些自由基。CAT、POD 是细胞抗氧化酶系统的重要成员,起着协同清除和阻止活性氧形成^[15]。POD 在植物体内普遍存在,参与多种生理活动,并对逆境反应灵敏,与植物抵御逆境存在相关关系^[16]。水生植物的生长状况主要取决于水质、底泥性质及水文条件,由于本试验采用水培进行植物培养,没有底泥因素的干扰,而曝气气流引起的水流冲击在某种意义上相当于改变了曝气槽中水生植物的微观水文条件。曝气引发的水流对水生植物的裸露根进行长时间持续冲击,影响根(特别是那些幼嫩的须根)的生长,影响植物的正常生长,而植物对这种影响作出生理响应,表现出叶片 Chl、SP 含量下降及根组织 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^[17]报道的人工湿地植物经污水长期浸泡后根组织 POD 活性增强的现象的产生机理不同,湿地植物抗性酶活性增强是由于植物吸收了大量的可溶性污染物引起的。目前已有的相关研究^[18-19]表明,POD 在植物的损伤愈合中起重要作用,在愈伤组织中分布较多,与植物细胞的生长及组织的再生有关。

曝气对植物生理生化产生的影响与植物的生长状况密切相关,春、夏季植物处于生长期,曝气影响较小,而两类净化槽出水的水质差异较明显,秋季植物处于生长衰老期,曝气影响最明显,而两类净化槽出水的水质差异较小。可见,在城市污染河道生态修复工程中,宜依据水生植物的生长状况的季节性变化,对人工曝气进行季节性调节。

4 结论

(1)曝气影响植物的生长,但对其分蘖繁殖能力

的影响不明显。

(2)曝气影响植物的生理特性,导致植物根组织 POD、CAT 活性较非曝气槽植物强,而叶片 Chl、SP 含量较非曝气槽中植物低,植株的氮磷积累、生物量分别较非曝气槽中植物低。

(3)曝气槽 COD、TN、 NH_4^+-N 去除率高于非曝气槽,而 TP、溶 P 去除率明显低于非曝气槽。

(4)曝气对植物产生的影响与植物的生长状况密切相关,春、夏季植物处于生长期,曝气影响较小,两类净化槽中植物的生理特性差异较小,而出水的水质差异较明显,秋季植物处于生长衰老期,曝气影响最明显,两类净化槽中植物生理特性的差异显著,而出水水质的差异较小。

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[J]. 生态环境, 2004, 13(2):177-179.
WEN Li-rong, LIU Yi-min, LIU Guo-guang, et al. Investigation on water quality of multi-city river sections in Guangdong [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):177-179.
- [2] 周杰,章永泰,杨贤智.人工曝气复氧治理黑臭河流[J]. 中国给水排水, 2001, 17(4):47-49.
ZHOU Jie, ZHANG Yong-tai, YANG Xian-zhi. Renovation of polluted river water by artificial reaeration[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(4):47-49.
- [3] 陈伟,叶舜涛,张明旭.苏州河河道曝气复氧探讨[J]. 给水排水, 2001, 27(4):7-9.
CHEN Wei, YE Shun-tao, ZHANG Ming-xu. Approach on re-aeration of Suzhou creek[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(4):7-9.
- [4] 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[J]. 水资源保护, 2006, 22(1):30-33.
XU Xu, CAO Jia-shun. Application of river aeration technology in river pollution control of Suzhou area[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(1):30-33.
- [5] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Bureau. Monitoring methods of water and wastewater (4th Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [6] 董鸣,王义凤,孔繁志,等.陆地生物群落调查与分析[M].北京:中国标准出版社, 1996:256-257.
DONG Ming, WANG Yi-feng, KONG Fan-zhi, et al. Surveys and analysis of terrestrial biocommunities [M]. Beijing: China Standard Press, 1996:256-257.
- [7] 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, 160:1085-1093.
- [8] 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, 72:248-254.
- [9] Rao M V, Paliyath G, Ormrod D P. Ultraviolet-B radiation and ozone-induced biochemical changes in the antioxidant enzymes of *A. rabidopsis thaliana*[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110:125-136.
- [10] 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.
ZHANG Zhi-liang. Laboratory procedure of plant physiology[M]. Beijing: Higher Educational Press, 1990:154-155.
- [11] 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.
LUO Wei-guo, WANG Shi-he, HUANG Juan, et al. Influence of plant photosynthesis and transpiration character on nitrogen removal effect in wetland[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(1):30-33.
- [12] 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.
SONG Ke-min. Phosphorus nutrition of plants: phosphate transport systems and their regulation[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(3):251-256.
- [13] 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[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(3):267-271.
FAN Guo-lan, LI Wei. Response of nutrient accumulation characteristics and nutrient strategy of *Myriophyllum spicatum* L. under different eutrophication conditions[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005, 23(3):267-271.
- [14] Jabs T. Reactive oxygen intermediates as mediators of programmed cell death in plants and animals[J]. *Biochem Pharmacol*, 1999(57):231-245.
- [15] Kaufmann J A, Bickford P C. Free radical-dependent changes in constitutive nuclear factor kappa B in the aged hippocampus[J]. *Neuroreport*, 2002, 13(15):1917-1928.
- [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] 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.
LI Zong-hui, TANG Wen-hao, SONG Zhi-wen. Response of the morphological and physiological characteristics of aquatic plants to long-term soaking in the process of constructed wetland wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1):75-79.
- [18] HOU Hong-Wei, Kalima-N'Koma MWANGE, WANG Ya-Qing, et al. Changes of soluble protein, peroxidase activity and distribution during regeneration after girdling in *eucommia ulmoides*[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(2):216-223.
- [19] Liszky A, Kenk B, Schopfer P. Evidence for the involvement of cell wall peroxidase in the generation of hydroxyl radicals mediating extension growth[J]. *Planta*, 2003, 217:658-667.