

两栖榕在人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果

靖元孝¹, 杨丹菁², 陈章和¹, 陈兆平¹

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631; 2. 广州市环境保护科学研究所, 广州 510620)

摘要: 研究了两栖榕在潜流型人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果。一年多的实验表明, 生长在人工湿地的两栖榕具有发达的侧根和不定根, 保持正常的净光合速率、蒸腾速率、根系活力和生长速率。两栖榕人工湿地对 TN, TP, COD_{Cr} 和 BOD₅ 的去除率分别为 54.2%、40.9%、72.4% 和 74.3%, 与无植物系统相比较, 去除率分别提高了 17%、12%、10% 和 11%。此外, 两栖榕人工湿地系统中, 水力停留时间对去除效果有一定影响。

关键词: 两栖榕; 人工湿地; 去除率; 水力停留时间; 净光合速率

Growth characteristics and sewage purifying effect of amphibious banyan in constructed wetland

JING Yuan-Xiao¹, YANG Dan-Jing², CHEN Zhang-He¹, CHEN Zhao-Ping¹ (1. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Guangzhou Research Institute of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 614~619.

Abstract: The amphibious banyan (*Ficus* spp.), an evergreen tree mainly in Guangdong Province, is conspicuously distinct from a commonly cultivated and widely distributed banyan in subtropical China, *Ficus microcarpa*, in morphology, anatomy and flooding tolerance. In the study presented in this report, two main approaches were made to: (1) the morphological, growth-related and photosynthetic characteristics, and (2) the purifying efficiency for sewage of amphibious banyan cultivated in the constructed wetland.

The experiment was performed in South China Normal University, Guangdong Province of China. Seedlings of one-year old of amphibious banyans were planted in rows with a density of 6 plants per square meter in the subsurface flow constructed wetland (SFW) (length × width × depth: 1.3m × 0.84m × 0.6m), and another SFW with the same dimension but without amphibious banyans and other plants was taken as the control. The photosynthesis/transpiration rate and stomatal conductance, the vigor of the root system and the relative growth rate of the plant were measured when the plants grew to a height of about 1.5m. From April through July, 2000, the wetlands had been continuously receiving sewage with a flow rate of 50Ld⁻¹ and a hydraulic retention time (HRT) of approximately 4 days. After the wetlands were running for two months, water samples from the influx and efflux were collected respectively once a week for seven weeks, and analyzed for COD_{Cr}, BOD₅, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP).

基金项目: 广东省教育厅自然科学基金资助项目(200022); 广东省自然科学基金资助项目(021082); 广东省重点学科基金资助项目。

收稿日期: 2002-07-16; **修订日期:** 2002-11-30

作者简介: 靖元孝(1963~), 男, 副教授, 主要从事植物资源与环境保护研究。

Foundation item: Supported by Natural Science Foundation of Educational Department of Guangdong, Provincial Natural Science Foundation of Guangdong and Provincial Key Subjects Foundation of Guangdong.

Received date: 2002-07-16; **Accepted date:** 2002-11-30

Biography: JING Yuan-Xiao, Vice-Professor, Engaged in Research Work on Plant Resource and Environmental Protection.

The following results were obtained: (1) The plants in the constructed wetland possessed a large amount of lateral roots and aerial roots emerged from the basal and upper parts of trunks and most branches, some aerial roots were able to reach the soil and developed proper roots. (2) The amphibious banyan in the constructed wetland maintained a normal rate of net photosynthesis ($18.4 \pm 2.0 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), with a transpiration rate of $21.7 \pm 1.8 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a stomatal conductance of $638.1 \pm 61 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a vigor of $22.5 \pm 4.2 \mu\text{g} \cdot \text{C}_{10}\text{H}_7\text{NH}_2 \cdot \text{g}^{-1}\text{DW min}^{-1}$ in the root system and a relative growth rate of $7.1 \pm 0.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{day}^{-1} \text{ DW}$, respectively. These measured parameters in plants growing in wetland were not significantly different from those in plants of the same species growing in natural conditions. (3) The removing rates of TN, TP, COD_{Cr} and BOD_5 from the sewage in the constructed wetland with amphibious banyan were 54.2%, 40.9%, 72.4% and 74.3% respectively, corresponding to increases of 17%, 12%, 10% and 11% over those in the control wetland, respectively. (4) The removing efficiencies of TN, TP, COD_{Cr} and BOD_5 were influenced by the hydraulic retention time (HRT) in the amphibious banyan wetland. For example, the removal efficiencies in HRT2d and HRT3d accounted only for 65% and 90% of that in HRT4d, respectively.

Generally, the amphibious banyan in the constructed wetland possessed a complex and well developed root system to keep normal physiological metabolism and high capability of pollutant removal. The plant appeared to be a desirable and constructive species in the constructed wetland because of its long growth period, little secondary pollution, simple management and pleasing landscape.

Key words: amphibious banyan; constructed wetland; removal rate; hydraulic retention time (HRT); net photosynthetic rate

文章编号:1000-0933(2003)03-0614-06 中图分类号:Q143 文献标识码:A

榕树是桑科(*Moraceae*)榕属(*Ficus*)植物的总称,陆生,常绿乔木,具气生根,分布于我国广东、广西、福建、台湾、浙江、云南和贵州等地。莫熙穆、郑中华^[1,2]等在广东局部地区发现了一种既耐淹又耐旱的两栖型榕树[暂定名为两栖榕(*Ficus* sp.)]。两栖榕与广东广泛分布并已作为道路绿化树种的小叶榕(*Ficus microcarpa*)在形态结构、生理生化特性及生态适应性等方面有较大差异,实验证明两栖榕在水库库岸有很好的水土保持效果^[1]。

人工湿地系统的应用始于 20 世纪 70 年代初期,1977 年德国学者 Kickuth 提出“根区法”推动了对人工湿地污水处理的试验研究。近年来,国内外学者利用芦苇、风车草、香蒲等水生植物人工湿地系统来处理城市生活废水的研究已有许多报道^[4~9],该方法被证明是一种低投资、低能耗、低成本和能脱氮除磷的新型污水处理技术。高等水生植物在人工湿地系统的应用发挥了十分重要的作用,但这些植物多为草本植物,而利用乔木作为人工湿地植物的报道甚少,这主要是因为适应湿地环境的乔木不多^[10]。1999 年 Keith^[11]等人在人工湿地种植木本植物 *Melaleuca quinquenervia* 和 *Melaleuca alternifolia*,对污染物有很好的去除作用。胡焕斌等^[12]采用木本植物(池杉)作为人工湿地的主要植被来处理污水,其处理污水的效果与常用的芦苇相近。考虑到两栖榕的两栖特性,本文在研究该植物在人工湿地的生长特性的基础上,对其净化生活污水的效果进行了研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料及处理方法

两栖榕(*Ficus* sp.)由华南师范大学生命科学学院固氮中心提供,植株为 12 个月的幼苗,平均株高 80cm,共设 2 种处理,分别是:对照组,在本校牧草山于正常条件下种植;湿地组,种在潜流型人工湿地,地下部分淹水,土壤水分达到饱和状态;实验从 2001 年 5 月开始,数据收集暂到 2002 年 7 月,并将继续收集。

1.2 生物量测定数据

调查两栖榕 30 株,求其平均胸径和平均高度,由此选定 6 株标准木进行整株收获。按下式计算生物量

(包括根、茎、叶);

$$W = a(D^2H)^b \quad \text{即} \quad \lg W = \lg a + b \times \lg(D^2H)$$

式中, W 为两栖榕各相应部分的生物量, D 为胸径, H 为株高。

1.3 相对生长速率(R)的计算^[13]:

$$R = (\ln W_2 - \ln W_1) / (T_2 - T_1)$$

式中, R 代表相对生长速率, W_1 和 W_2 分别是时间 T_1 和 T_2 时的植株干重。

1.4 净光合速率、蒸腾速率及气孔传导率的测定

每个处理中, 在具代表性的 3 株幼苗各选取 3 片成熟叶(共 9 片), 擦去表面的水汽与尘埃, 利用美国制造的 Li-cor 6200 光合作用测定仪进行测定。

1.5 根系活力的测定 用 α -萘胺氧化法测定。

1.6 潜流型人工湿地污水处理系统设计

1.6.1 潜流型人工湿地构造 处理系统由水池改造而成, 处理区长 130 cm、宽 84 cm、高 60 cm, 床体填充 3 种不同的基质: 表层为厚 26cm 的细砂; 中间为粒径 6mm 的石砾, 厚度为 4cm; 底层铺设粒径 30~40mm 的石块, 厚度为 30cm。两栖榕种于床的表层, 密度为 6 株/ m^2 。按水面线计总体积为 622 L, 总间隙水体体积约为 200L。另设不种植物的人工湿地污水处理系统作为对照, 系统连续进水, 研究其在动态条件下对污水的净化能力。

1.6.2 运行条件 实验在 2002 年 4~7 月期间进行, 月平均气温在 25℃ 以上。污水来自本校行政学院生活污水, 污水 COD_{Cr} 约 260mg/L、 BOD_5 约 135mg/L、总氮 18 mg/L、总磷 4.3 mg/L。水力负荷 50 L/d (14cm/d), 水力停留时间约为 4 d。按处理区实际面积计算, 处理系统 TN、TP、 BOD_5 和 COD_{Cr} 的面积负荷分别为 8.2 kg/(d · hm^2)、1.9 kg/(d · hm^2)、62 kg/(d · hm^2) 和 120 kg/(d · hm^2)。

1.6.3 取样与分析 人工湿地运行 2 个月稳定后, 分别采集进水和出水水样。用碱性过硫酸钾氧化法测定水中总氮, 钼-锑-抗法测定水中总磷, 用常规方法测定 BOD_5 , 重铬酸钾法测定 COD_{Cr} 。

2 结果及分析

2.1 人工湿地中两栖榕根系特点及根系活力

2.1.1 两栖榕根系特点 一年多的实验表明, 人工湿地上两栖榕的根系包括主根、侧根和不定根。两栖榕属于浅根系植物, 再加上人工湿地的淹水环境, 主根只能伸入到地下 20cm 左右; 离地面 5cm 以上部分有发达的侧根系, 株高 150cm、胸径 4.5mm 的两栖榕的一级侧根数量多达 30 条, 长度达 100~150cm 左右; 气生根发达, 其中有些向下生长, 直达地面, 穿入土中, 形成支柱根, 有些垂直向上生长, 暴露在空气中, 成为呼吸根。由于两栖榕具有发达的地表侧根和不定根, 为该植物在人工湿地维持正常生长奠定了基础, 同时也可人工湿地传输一定的氧气, 为人工湿地中的微生物提供附着载体。

2.1.2 根系活力 根系活力是植物生长的重要生理指标之一, 分别测定了对照组和人工湿地组两栖榕地表侧根的根系活力, 结果见表 1。

结果表明: 生长在人工湿地的两栖榕与在自然状态条件下生长的两栖榕相比, 前者根系活力与后者没有明显差异($P>0.05$), 正常的根系活力是两栖榕在人工湿地保持正常的光合作用、水分代谢和矿质营养代谢所必需的。

2.2 净光合速率、蒸腾速率和相对生长速率

根据调查数据得到两栖榕的平均株高和平均胸径, 然后选定 6 株收获。由 $W=a(D^2H)^b$ 或 $\lg W=\lg a+b \times \lg(D^2H)$ 两个方程计算得出总生物量(W)与 D^2H 的相对生长式和对数式回归方程(表

表 1 根系活力($\mu\text{g}\alpha\text{-萘胺} \cdot \text{g}^{-1}\text{DWmin}^{-1}$)

Table 1 Vigor of root system	
对照组 Control	人工湿地组 Constructed wetland
24.5±4.3	22.5±4.2

数据为 n 次取样的平均值±标准差($n=7$), Values are means±SE for n times of sampling($n=7$)

表 2 相对生长式及对数式回归方程

Table 2 Relative growth equation and linear regression equation	
相对生长式	对数式回归方程
Relative growth equation	Linear regression equation
$W=0.135(D^2H)^{0.592}$	$\lg W=-0.87+0.592 \times \lg(D^2H)$

2)。

获得相对生长式后,计算出不同时间的生物量,然后得到植物的相对生长速率(R)(表3为2002年4~7月生长期所测得的相对生长速率)。

净光合速率、气孔传导率及蒸腾速率数据收集从2002年5月至6月,测定时间在10:30~11:30,光照强度为900~1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,结果见表3。

表3 净光合速率、蒸腾速率、气孔传导率和相对生长速率				
Table 3 Net photosynthetic rate,transpiration rate,stomatal conductance and relative growth rate				
处理 Treatment	净光合速率	蒸腾速率	气孔传导率	相对生长速率
	Net photosynthetic rate ($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Relative growth rate ($\text{mgg}^{-1}\text{d}^{-1}\text{DW}$)
两栖榕人工湿地 Banyan constructed wetland	18.4±2.0	21.7±1.8	638.1±61	7.1±0.4
对照 Control	19.2±6.0	23.1±2.4	656.5±55	7.6±0.5

数据为 n 次取样的平均值±标准差($n=11$) Values are means±SE for n times of sampling($n=11$)

结果表明,生长在人工湿地的两栖榕与在自然状态条件下生长的两栖榕相比,前者的净光合速率、蒸腾速率、气孔传导率和相对生长速率均略低于后者,但没有明显差异($P>0.05$)。人工湿地中的两栖榕由于具有正常的光合作用和水分代谢,从而保持正常的生长速率。

2.3 两栖榕人工湿地系统的净化效果

人工湿地运行1个月后,于2002年4~7月开始测定进、出水各污染物浓度,然后计算去除率。

表4结果表明,HRT4d时,两栖榕人工湿地对污水中TN、TP、COD_{Cr}和BOD₅的去除率分别为54.2%、40.9%、72.4%和74.3%,与未种植物的人工湿地相比TN、TP、COD_{Cr}和BOD₅的去除率分别提高17%、12%、10%和11%,统计分析结果表明两系统对污水的去除率差异极显著($P<0.01$)。这一结果显示了两栖榕在人工湿地处理污水的过程中起到了一定作用,其机制可能在于植物根系为微生物提供了附着物和代谢需要的氧气,从而加快微生物对污染物的代谢作用。此外,植物还能通过吸收污水中的N和P而将污染物去除。

		表4 人工湿地系统TN、TP、COD _{Cr} 及BOD ₅ 的去除率															
		Table 4 Removal ratio of TN,TP、COD _{Cr} and BOD ₅ in the constructed wetland system															
检测次数 Times	进水浓度(mg·L ⁻¹) Influent concentration	出水浓度(mg·L ⁻¹) Effluent concentration												去除率(%) Removal rate			
		两栖榕系统				无植物系统				两栖榕系统				无植物系统			
		Constructed wetland with banyan				Constructed wetland without plant				Constructed wetland with banyan				Constructed wetland without plant			
		TN	TP	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	TP	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	TP	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	TP	COD _{Cr}	BOD ₅
1	18.3	4.1	266.6	142.5	8.2	2.4	68.0	35.5	11.5	2.9	95.4	45.0	55.3	41.2	74.5	75.1	37.3
2	16.8	3.9	240.5	138.3	8.0	2.3	71.9	38.6	10.5	2.8	101	48.1	52.4	42.3	70.1	72.1	37.5
3	18.2	4.4	270.5	143.7	7.6	2.6	63.6	45.4	11.2	3.1	90.6	54.2	58.1	39.8	76.5	68.4	38.2
4	15.8	3.7	220.3	130.3	7.4	2.2	60.4	22.8	9.8	2.6	94.3	51.1	53.2	40.3	72.6	82.5	37.8
5	16.2	4.1	250.3	140.0	8.0	2.5	72.1	26.2	10.2	3.0	81.8	57.1	50.5	38.8	71.2	81.3	36.9
6	17.5	4.2	264.5	142.5	7.8	2.4	81.2	47.7	11.3	3.1	106	52.4	55.4	42.8	69.3	66.5	35.2
平均	Mean	17.1	4.0	252.1	139.6	7.8	2.4	69.5	35.8	10.8	2.9	94.8	51.4	54.2	40.9	72.4	74.3

HRT4d时,两栖榕人工湿地系统的污染物负荷分别为TN:8.2 kg/(d·hm²)、TP:1.9 kg/(d·hm²)、BOD₅:62 kg/(d·hm²)、COD_{Cr}:120 kg/(d·hm²),属中等负荷水平^[14]。污染物负荷水平与张甲耀^[15]等人、Kantawanichkul^[7]等人及大港油田城区的人工湿地系统相当,但处理效果好于张甲耀等人的芦苇和茭白系统,而稍逊于Kantawanichkul等人的香根草人工湿地和大港油田城区的芦苇人工湿地系统。

2.4 停留时间与污水净化效果

停留时间计算:停留时间=孔隙体积/每天进水负荷

在进水浓度基本相同条件下,控制进水负荷,将水力停留时间(HRT)分别调整为 2d、3d 和 4d,然后分别计算两栖榕人工湿地对污水的净化效果。

由图 1 可知,在两栖榕人工湿地系统中,TN、TP、COD_{Cr}和 BOD₅ 的去除率随停留时间的延长而增加,HRT2d 时的去除率只有 HRT4d 的 60%~70%左右,HRT3d 时去除率达到 HRT4d 时去除率的 90%左右。在一定范围内,污水在人工湿地停留时间愈长,去污效果愈好,反之亦然。停留时间延长,去除率提高,这一规律主要因湿地系统对污染物的生物作用所致^[16]。

3 结论

人工湿地上的两栖榕具有复杂而发达的根系,可维持正常的光合作用、水分代谢和矿质营养代谢,保持正常的生长速率,从而为两栖榕在人工湿地的应用打下基础。

两栖榕人工湿地对生活污水的 TN、TP、COD_{Cr}和 BOD₅ 有较好的净化效果,与未种植物系统相比,TN、TP、COD_{Cr}和 BOD₅ 的去除率均有明显的增加。两栖榕作为人工湿地植被来净化污水有如下特点:1)两栖榕向上生长可达 5~10m,单位面积湿地有较大的生物量,因此同草本植物相比,单位面积湿地的生物有较强的吸收污染物的能力;2)有较好的绿化效果;3)生活期长达几十年,净化周期长;4)两栖榕为常绿树种,可减少因为落叶而产生的二次污染;5)容易管理。

构建人工湿地时,一方面要考虑净化效果,同时也要考虑净化效率。因此在进水浓度一定的条件下,进水负荷太大导致停留时间缩短,达不到净化要求;进水负荷太小则停留时间延长,不能充分发挥湿地的净化效率。本研究结果表明 HRT3d 的去除率为 HRT4d 的 90%,因此可以将 HRT 控制在 3d 左右。

在利用两栖榕作为人工湿地作为主要植被时,由于主根不发达且侧根主要集中在地表,导致该植物为人工湿地微生物提供附着物和传输氧气的作用比草本植物差,从而影响净化效果,COD_{Cr}、BOD₅ 的去除率只有 70%左右,TN、TP 的去除率只有 40%~50%。因此可考虑两栖榕和草本植物混种,草本植物地下发达的须根系与两栖榕地表发达的侧根系和不定根系形成纵横交错的根系网,地上部分最充分利用阳光,地下部分密度最大,为人工湿地中的微生物提供充足氧气和理想的附着物,从而达到最佳净化效果,目前作者正在开展这方面的研究。

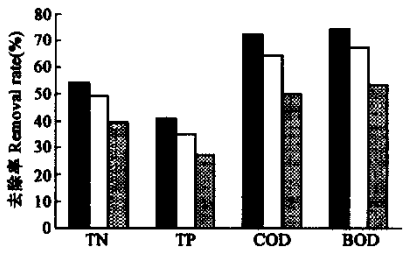


图 1 去除率与 HRT 的关系
Fig. 1 Relationship between removal ratio and HRT
■HRT4d □HRT3d ▨HRT2d

Reference:

[1] Zheng Z H,Xu D B, Sun G C. Study of afforestation and soil solidification effects of lake banyan mix plantation for bank prevention. *Soil and water conservation in China*,2000,(11):15~17.

[2] Zhao P,Sun G C,Zeng X P, *et al.* A comparative study on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and diurnal course of leaf gas exchange of two ecotypes of banyan. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2000,**11**(3):327~332.

[3] Li Y X,Zhang D M,Mo X M, *et al.* The morphological and structure of flower between *Ficus* sp. and *Ficus microcarpa*. *Ecol. Sci.*,1999,(4):30~34.

[4] Wu Z B,Chen H R,He F, *et al.* Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001,**25**(1):28~35.

[5] Liao X D,Luo S M. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002,**13**(1):113~117.

[6] Xu K, Kato T, *et al.* Evaluation of water purification function of artificial reed field wetland ecosystems created on dredged sediments. *Journal of Water and Waste*,1999,**41**(6):504~512.

[7] Kantawanichkul S, Pilaila S, Tanapiyawanich W. Wastewater treatment by tropical plants in vertical-flow

constructed wetland. *Water Sci. Technol.*, 1999, **40**(3):173~178.

[8] Ayaz S C, Akca I. Treatment of wastewater by constructed wetland in small settlements. *Water Sci. Technol.*, 2000, **41**(1):69~72.

[9] Neralla S, Weaver R W, Varvel T W, *et al.* Phytoremediation and on-site treatment of septic effluents in sub-surface flow constructed wetland. *Environ. Technol.*, 1999, **20**(11):1139~1146.

[10] Froend R H, Heddle E M, Bell D T. Effect of salinity and waterlogging on the vegetation of Lake Toolbin. Western Australia. *Aust. J. Ecol.*, 1987, **12**: 281~298.

[11] Keith G, Bolton E, Greenway M. Pollutant removal capability of a *constructed Melaleuca* wetland receiving primary settled sewage. *Wat. Sci. Technol.*, 1999, **39**(6):199~206.

[12] Hu H B, Zhou H M, Wang G Z, *et al.* Explosive sewage treated by artificial wetland. *Environ Sci Technol.*, 1997, (3):17~19.

[13] Tang Z C, Kozlowski T T. Physiological, morphological, and growth responses of *Platanus occidentalis* seedlings to flooding. *Plant Soil*, 1982, **66**:243~255.

[14] Zhu H C, Hu J C. New technology of treating wastewater-design methods of constructed wetlands. *Environ. Sci.*, 1993, **14**(2):39~43.

[15] Zhang J Y, Xia S L, Qiu K M, *et al.* Nitrogen removal by a subsurface flow constructed wetlands wastewater treatment system and nitrogen transformation bacteria. *Acta Sci. Circums.*, 1999, **19**(3):323~327.

[16] Sievers D M. Performance of four constructed wetlands treating anaerobic swine lagoon effluents. *Amer. Soc. Agric. Engin.*, 1997, **40**(3):769~775.

参考文献:

[1] 郑中华,许大彬,孙谷畴. 湖榕、水翁混交护岸林绿化固土效果研究. 中国水土保持, 2000, (11):15~17.

[2] 赵平,孙谷畴,曾小平,等. 两种生态型榕树的叶绿素含量、荧光特性和叶片气体交换日变化的比较研究. 应用生态学报, 2000, **11**(3):327~332.

[3] 李煜祥,张德明,莫熙穆,等. 湖榕和小叶榕花形态结构特征的研究. 生态科学, 1999, (4):30~34.

[4] 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果. 水生生物学报, 2001, **25**(5):28~35.

[5] 廖新, 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究. 应用生态学报, 2002, **13**(1):113~117.

[12] 胡焕斌,周化民,王桂珍,等. 人工湿地处理矿山炸药污水. 环境科学与技术, 1997, (3):17~19.

[14] 诸惠昌,胡纪苹. 新型废水处理工艺-人工湿地的设计方法. 环境科学, 1993, **14**(2):39~43.

[15] 张甲耀,夏盛林,邱克明,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究. 环境科学学报, 1999, **19**(3):323~327.