

两种不同根系类型湿地植物的根系生长

陈文音 陈章和* 何其凡 汪晓燕 王才荣 陈达丰 赖增隆

(华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

摘要 实验设计了一个水培系统, 利用生活污水培养, 对 4 种“须根型”植物美人蕉、风车草、象草和香根草和 4 种根茎型植物菖蒲、水鬼蕉、芦苇和水烛的根系生长进行比较研究。该系统由用于盛污水的塑料桶(顶部直径 36.5cm, 底部直径 30.0cm, 高 34.5cm)和用于固定植物于水面的泡沫板构成。每桶种植 1 株植物, 每种种 5 株。水培至 10 周时, 须根型植物的平均根数达到 1349 条/株, 而根茎型植物的平均根数只有 549 条/株。实验结束(水培第 21 周)时, 须根型植物的平均根生物量为 11.3g/株, 根茎型植物的平均根生物量为 7.4g/株。须根型植物根系中 $d < 1\text{mm}$ 的细根生物量占根系总生物量的 51.9%, 而根茎型植物 $d < 1\text{mm}$ 的细根的生物量只占 25.1%。根茎型植物的根生物量与地上生物量的比值为 0.2, 显著高于须根型湿地植物(0.1)。须根型湿地植物的根系表面积($6933\text{cm}^2/\text{株}$)极显著地高于根茎型湿地植物($1897\text{cm}^2/\text{株}$)。根茎型湿地植物根的平均寿命(46.6d)较须根型湿地植物根的平均寿命(34.8d)长。美人蕉的平均根数达 1871 条/株, 根表面积达到 $22832\text{cm}^2/\text{株}$, 远较其他种高。

关键词 湿地植物 须根型 根茎型 根系 生长 水培系统

文章编号: 1000-0933 (2007)02-0450-09 中图分类号: Q948.1 X171 文献标识码: A

Root growth of wetland plants with different root types

CHEN Wen-Yin, CHEN Zhang-He*, HE Qi-Fan, WANG Xiao-Yan, WANG Cai-Rong, CHEN Da-Feng, LAI Zeng-Long

College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0450 ~ 0458.

Abstract : A wastewater culture system was designed to study root growth of eight species of wetland plants. The system included a plastic barrel (top diameter = 36.5cm, bottom diameter = 30.0cm, height = 34.5cm) for holding wastewater and a foam plate for holding the plant. Four species, i. e., *Canna indica* Linn., *Cyperus alternifolius* subsp. *flabelliformis* (Rottb.) Kuckenth., *Pennisetum purpureum* Schum. and *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash, with fibril root system and another four species, i. e., *Acorus calamus* Linn., *Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb., *Phragmites communis* Trin., and *Typha angustifolia* Linn. with rhizomatic root system were comparatively studied. Results indicated that root growth of the plants with fibril root system was faster than that of the plants with rhizomatic root system. After ten weeks' cultivation, average root number of fibril root species reached 1349 per plant while average root number of the plants with rhizomatic root system only reached 549 per plant. Our study also showed that average root biomass of fibril root plants was 11.3g per plant while the average biomass of rhizomatic root plants was 7.4g per plant. Fine root biomass of diameter $< 1\text{mm}$ made up

基金项目 广东省自然科学基金资助项目 (021082) 国家自然科学基金资助项目 (30470346)

收稿日期 2006-01-07 ; 修订日期 2006-08-21

作者简介 陈文音 (1982 ~) 女 广东人 硕士生 从事湿地生态学研究. E-mail: zwy_220@163.com

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

Foundation item The project was financially supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 021082), and National Natural Science Foundation of China (No. 30470346)

Received date 2005-01-07 ; **Accepted date** 2006-08-21

Biography CHEN Wen-Yin, Master candidate, mainly engaged in wetland ecology. E-mail: zwy_220@163.com

51.9% of total root biomass in fibril root plants , while it comprised only 25.1% in rhizomatic root plants. The ratio of root biomass to shoot biomass of rhizomatic root plants was 0.2 , which was higher than that of fibril root plants (0.1). Root surface area of the fibril root plants (6933 cm² per plant) was considerably larger than that of rhizomatic root species (1897cm² per plant). Rhizomatic root species showed longer root lifespan (46.6 days) than fibril root plants (34.8 days). *C. indica* had more developed root system than other plants , with root number 1871 and root surface area 22832 cm² per plant.

Key Words wetland plants ; fibril root system ; rhizomatic root system ; growth ; wastewater culture

人工湿地是人工建设的、可控制的和工程化的湿地系统 ,其设计和建造是通过 对湿地自然生态系统中的物理、化学和生物作用的优化组合来进行废水处理^[1]。人工湿地中植物、微生物、基质和污染物间的物理、化学和生物作用主要发生在根区^[2]。湿地植物庞大的根系是植物与污染物直接作用的区域 ,能从污水中吸收营养物质并加以利用^[2~6] ,吸附和富集重金属和一些有毒物质^[5~10] ,同时为微生物提供较大的附着面积^[11] ;植物根系根际对氧的传递释放促进污水中有机物的有氧分解^[3,12] ,使湿地床、植物根系及周围的微环境依次呈现出好氧、缺氧及厌氧状态 ,为微生物提供了不同的生境^[6,10,13,14] ,植物根系释放到土壤中的有机碳可作为微生物的底物 ,促进对氮等的去除^[2,3,15,16] ,而抗生素等物质的释放可直接抑制、杀死污水中的细菌^[3,14,17] ,植物的根和根系对介质的穿透增强了介质的疏松度 ,加强和维持介质的水力传输^[3,6,17] ,在污水的净化中发挥重要作用。但目前人工湿地的研究主要集中在工艺设计方面^[2] ,对湿地植物的研究还较少 ,特别对植物根系生长情况的研究还很少。陈章和等对湿地植物的研究中注意到 ,湿地植物的根系主要有两类 ,一是以较粗的根为主的植物 ,包括具根状茎的植物 ,如芦苇、菖蒲、香蒲等 ,他们把这类植物称为“根茎型”植物。另一类是以细小根为主的植物 ,如象草、风车草及其他一些禾本科的湿地植物 ,把这类植物称为“须根型”植物。他们提出假说 ,须根型植物和根茎型植物在根系生长、分布特点、从地上部分往根系输氧能力、根表面和根际微生物的种类和数量方面 ,存在着重要差异 ,从而对污水的净化能力有重要影响 ;须根型植物对缺氧环境的忍受能力比根茎型植物差 ,但其对污水的净化能力较根茎型植物强^[18]。本文旨在比较研究须根型和根茎型这两种根系类型湿地植物根系的生长情况 ,对这一假说进行探讨 ,为深入研究人工湿地对污水的净化机理 ,筛选湿地植物提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文比较研究了美人蕉 (*Canna indica* Linn.)、风车草 (*Cyperus alternifolius* subsp. *flabelliformis* (Rottb.) Kuentz)、象草 (*Pennisetum purpureum* Schum.)、香根草 (*Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash)、菖蒲 (*Acorus calamus* Linn.)、水鬼蕉 (*Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb.)、芦苇 (*Phragmites communis* Trin.)、水烛 (*Typha angustifolia* Linn.)等 8 种湿地植物 ,其中风车草、象草、香根草为须根型 ,菖蒲、芦苇、水烛为根茎型。美人蕉虽有根状茎 ,但其根状茎没有通气组织 ,只起储藏作用 ,起吸收和通气作用的根大多数直径小于 1mm ,故把它归须根型植物一类 ,而水鬼蕉虽无根状茎 ,但其根系多以直径大于 1mm 的粗根为主 ,故归入根茎型植物一类。在华南师范大学生物标本园人工湿地研究基地采集 8 种植物的幼苗 ,栽入装满泥土的花盆中 (花盆直径为 22cm ,高为 13cm) ,每盆各植入 1 株 ,每种植物各植 20 株 ,置于华南师范大学生物标本园中的空地上培养 ,定期浇水 ,以备作实验材料。当幼苗长至 20cm 左右 ,移栽至试验系统。

1.2 研究方法

1.2.1 水培试验方法

土培法不能定期观察根系的生长情况 ,因此 ,设计了水培系统用于实验。该系统由用于盛污水的塑料桶和用于固定植物于水面的泡沫板构成 (图 1)。桶为市售黑色的塑料桶 ,上口直径为 36.5cm ,桶底直径为 30.0cm ,桶高为 34.5cm ,装水深度为 31.5cm。塑料泡沫厚度为 2cm ,直径与桶的上口直径接近。2005 年 3 月 7

日开始水培实验,在盆栽的植物中挑选长势良好,大小均匀的植株,用自来水清洗根部,修剪,只保留少量的叶片和根,用海绵包裹住植株的基部,使其固定在泡沫板上,置于塑料桶中培养,水淹没根部,每桶各培养1株,每种5株。40株植物随机排列于华南师范大学生物标本园的平坦空地上,行间距为26cm×10cm。每周换水1次,第1周用自来水进行适应性培养,第2至4周用一半污水一半自来水进行实验,第5至6周换入全污水培养,实验中发现全污水浓度太高,故第7到21周重新用一半污水一半自来水培养。实验所用的污水为华南师范大学行政学院学生宿舍和食堂排放的生活污水,水中主要污染物浓度见表1。

1.2.2 测定的项目及方法

测定根系的根数、根长、根寿命、根生物量和根系表面积。根数、根长每周测量一次。根数的测定是对每株植物的根数进行计数,根长是测量每株植物最长的根。根寿命的测定是在每株植物中任选两条新根作标记,定期观察生长状况,记录其成活时间。水培至第21周收割植株,在根茎交界处剪开,并通过游标卡尺根据根的直径对根进行分组($d < 1\text{mm}$, $1\text{mm} < d < 3\text{mm}$, $d > 3\text{mm}$, 根茎茎),以清水冲洗干净,用吸水纸吸干表面的水,分别称鲜重,每组根各取100g左右的样品烘干(80℃, 48h),用电子天平(上海天平仪器厂,FA1104型)称干重。用排水法^[9]测量各组根的体积,利用公式 $S = 4V/d$ 求出根系表面积^[20]。对所得数据进行标准差、T-测验分析(根数及根生长速度用成对检验,其它均为成组检验),方差分析^[21]。



图1 水培实验系统
Fig. 1 Wastewater culture system

表1 水培(半负荷)污水若干污染物的浓度(mg/L)

Table 1 Concentrations of some contaminants in the wastewater used in the experiment (mg/L)					
COD _{Cr}	TN	TP	SP	NO ₃ -N	NH ₄ -N
76.08 ± 11.09	11.43 ± 1.68	0.56 ± 0.21	0.47 ± 0.20	1.11 ± 0.01	5.14 ± 1.13

2 结果与分析

2.1 须根型湿地植物和根茎型湿地植物根系的生长

2.1.1 根数量的增长

8种植物根数的增长如图2所示,须根型湿地植物美人蕉、风车草、象草和香根草在第10周时单株平均根数分别达到1871条、1309条、1231条和985条,而根茎型湿地植物中除菖蒲根数最多,单株平均根数达到1709条外,水鬼蕉、芦苇和水烛在第10周中单株平均根数只有28、291条和168条。每周测定时,须根型植物的根数都较根茎型植物的根数高,至第10周4种须根型植物的平均根数达到1349条/株,而4种根茎型植物的平均根数只有549条/株(图3),两种类型植物根数间的差异显著($P = 0.011$, $df = 9$)。须根型植物平均每天新增根数较根茎型植物多(图4),但两者的差异不显著($P = 0.083$, $df = 8$)。

在半负荷污水培养中,须根型湿地植物和根茎型湿地植物的根系长势良好,根数都呈增长的趋势,而在全负荷污水(第5周和第6周)中8种植物都有一些根出现不同程度的腐烂死亡,根的平均数量出现下降(图2)。须根型植物在换入全负荷污水的第2周出现下降,且下降迅速,在第6周平均每株根数减少速度达到20条/d。根茎型植物在全负荷污水的培养中根数也出现下降,但下降速度较为缓慢,第6周平均每株下降速度为5条/d(图4)。可见,根茎型植物的耐污能力较强。

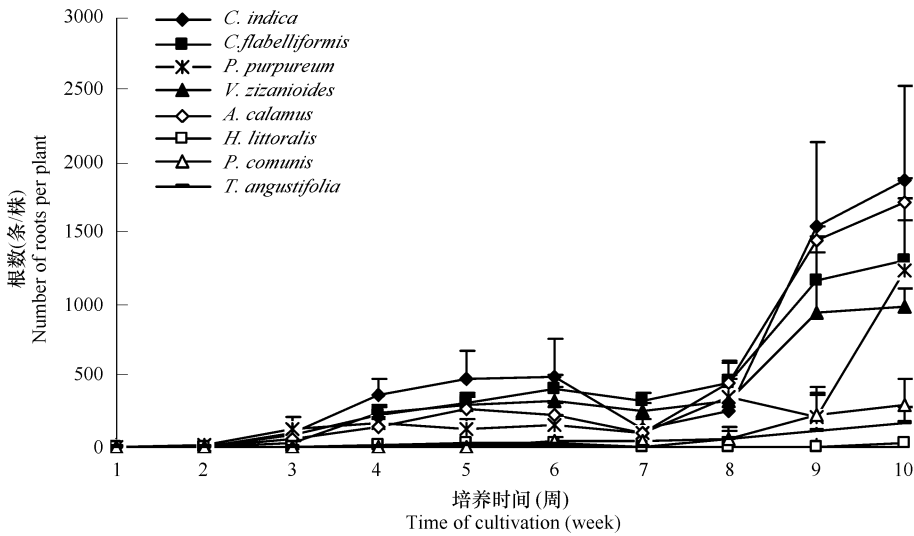


图2 8种湿地植物在污水培养中根数的变化情况

Fig.2 Number of roots per plant of eight wetland species in the wastewater cultivation

2.1.2 根长的变化情况

两类湿地植物平均根长变化如图5。须根型植物在第1周到第8周平均根长高于根茎型植物,但从第9周开始,两类植物的平均根长相差不大,最长分别达到24.1和24.2cm。可见,须根型湿地植物和根茎型湿地植物在根长方面没明显差异,但须根型湿地植物在早期的培养中根长的增长速度较快。在第5至第8周的全负荷污水中两类植物的根长都呈下降趋势,这主要是由于全负荷污水的浓度较高,8种植物的根系都有部分根死亡,从而影响了根系的长度。

2.2 须根型湿地植物和根茎型湿地植物的生物量

须根型湿地植物美人蕉、风车草、象草和香根草在21周的培养中长势良好,生长旺盛(表2),植株的平均地上高度分别达到113.5、69.4、216.1cm和149.6cm,分别比刚开始水培实验时植株的高度增长了497.4%、378.6%、909.6%、647.8%,单株平均地上生物量分别达到131.7、51.8、145.1g和66.1g。而根茎型植物菖蒲、水鬼蕉、芦苇和水烛在培养中生长总体上较须根型植物慢,其植株21周时的高度分别为110.1、50.2、100.2cm和162.2cm,分别比实验开始时增长了378.6%、464.9%、252.8%和528.8%,单株平均地上生物量分别为45.4、26.2、12.1g和15.8g。4种须根型植物的地上生物量平均达到98.7g/株,而4种根茎型植物的地上生物量平均为26.7g/株,两类根系植物地上生物量差异极显著($P=0.000$, $df=24$)(表2)。

在21周的培养中,8种植物根系生长情况不同,美人蕉在污水培养中根系发达,产生了大量新根,风车草、香根草、菖蒲、水鬼蕉、芦苇和水烛根系的长势良好。象草的根系也较为发达,但有部分根出现腐烂死亡,

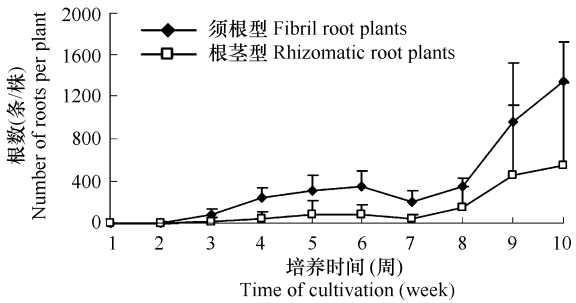


图3 须根型湿地植物与根茎型湿地植物在污水培养中平均根数的变化情况

Fig.3 Average number of roots of wetland plants with fibril root and rhizomatic root system in the wastewater cultivation

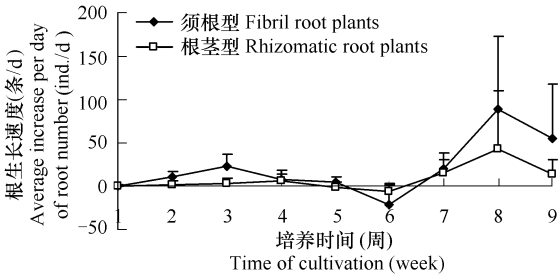


图4 须根型湿地植物与根茎型湿地植物在污水培养中平均每天根的数量增长

Fig.4 Average per day increase in root number of wetland plants with fibril root and rhizomatic root system in the wastewater cultivation

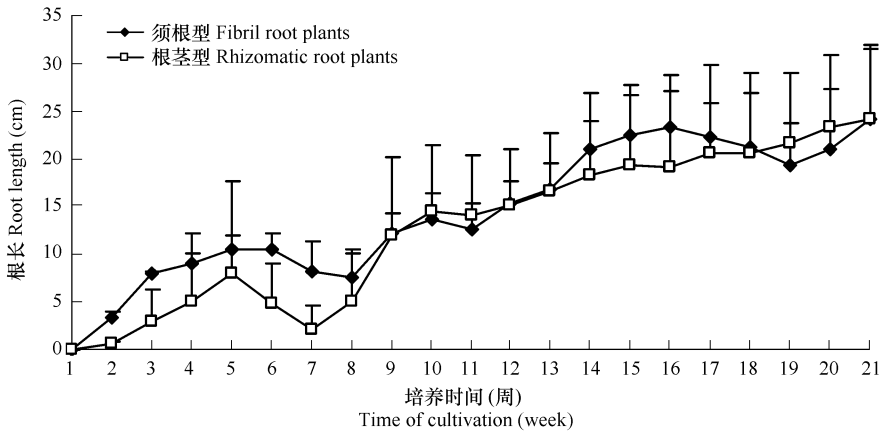


图5 须根型湿地植物和根茎型湿地植物在污水培养中平均根长的变化

Fig. 5 Average root length of the wetland plants with fibril root and rhizomatic root system in the wastewater cultivation

这可能与其耐淹能力较差有关。总体上须根型植物的根系较根茎型植物的根系发达。生物量大小有以下顺序(表3) ,美人蕉>菖蒲>香根草>水鬼蕉>风车草>芦苇>象草>水烛。须根型植物根系的平均生物量达到 11.3g/株 ,根茎型植物根系的平均生物量为 7.4g/株 ,两者间的差异不显著 ($P=0.277$ $\mu f=29$)。但其根系中 $d<1\text{mm}$ 的细根的生物量所占的比例有极显著的差异 ($P=0.000$ $\mu f=35$) ,须根型植物根系平均有 51.9% 是 $d<1\text{mm}$ 的细根 ,而根茎型植物根系中 $d<1\text{mm}$ 的细根只占其生物量的 25.1%。

表2 须根型湿地植物与根茎型湿地植物在污水培养中地上部分生长情况

Table 2 Shoot growth of wetland plants with fibril root and rhizomatic root system in the wastewater cultivation			
植物类型 Plant type	植物种 Species	植株高度 Shoot height (cm)	地上生物量 Shoot biomass (g/plant)
须根型 Fibril root species	美人蕉 <i>C. indica</i>	113.5 ± 9.7 (497.4)	131.7 ± 23.7
	风车草 <i>C. flabelliformis</i>	69.4 ± 3.6 (378.6)	51.8 ± 7.9
	象草 <i>P. purpureum</i>	216.1 ± 15.9 (909.6)	145.1 ± 22.8
	香根草 <i>V. zizanioides</i>	149.6 ± 12.5 (647.8)	66.1 ± 15.3
	平均 Mean	137.1 ± 56.1	98.7 ± 44.7
根茎型 Rhizomatic root species	菖蒲 <i>A. calamus</i>	110.1 ± 6.4 (378.6)	45.4 ± 3.0
	水鬼蕉 <i>H. littoralis</i>	50.2 ± 5.0 (464.9)	26.2 ± 9.8
	芦苇 <i>P. communis</i>	100.2 ± 24.5 (252.8)	12.1 ± 10.6
	水烛 <i>T. angustifolia</i>	162.2 ± 5.2 (528.8)	15.8 ± 0.9
	平均 Mean	99.3 ± 40.8 *	26.7 ± 15.3 **

括号内为增幅(%) ; * 表示两类植物相应值差异显著 ($P<0.05$) , * * 表示两类植物相应值差异极显著 ($P<0.01$) ;Values in brackets are rates of increase (%) ; * denotes significant difference between two types of plants ($P<0.05$) , * * denotes highly significant difference ($P<0.01$) between the two types

从地上部分和地下部分的关系来看 ,实验中根茎型湿地植物的根生物量与地上部分生物量的比值 (0.2) 是须根型植物相应比值 (0.1) 的两倍 ,两者间差异极显著 ($P=0.000$ $\mu f=35$)。

2.3 须根型湿地植物和根茎型湿地植物根系表面积

须根型湿地植物的根系表面积平均为 6933cm²/株 ,根茎型湿地植物根系的平均表面积为 1897cm²/株 ,两者间的差异显著 ($P=0.030$ $\mu f=20$) (表4)。8种植物根系表面积最大的是美人蕉 ,达到 22832cm²/株。其根系表面积主要是由 $d<1\text{mm}$ 的细根所构成的 , $d<1\text{mm}$ 细根的表面积为 18999cm²/株 ,占其根系表面积的 83% ,其它3种须根型湿地植物风车草、象草和香根草根系表面积中 $d<1\text{mm}$ 细根的表面积也分别占根系总面积的 75%、74%、58% ,须根型植物 $d<1\text{mm}$ 细根的表面积平均为 5588cm²/株 ,平均占根系表面积的 81%。根茎型植物 $d<1\text{mm}$ 细根的平均表面积只有 869cm²/株 ,占其根系表面积的 46% ,菖蒲、水鬼蕉、水烛和芦苇细根的比例分别是 37%、50%、67%、71%。可见 ,须根型植物的根系表面积主要是 $d<1\text{mm}$ 细根所构成的 ,其

2.4 须根型湿地植物和根茎型湿地植物根寿命

8 种湿地植物根的寿命如图 6 所示,根茎型植物水鬼蕉的根寿命最长,平均达到 66.0d,另一种根茎型植物芦苇的根平均寿命也达到 53.0d,菖蒲和水烛的平均寿命相对较短,为 33.2d 和 28.2d。须根型植物中美人蕉、风车草、香根草的根平均寿命分别为 43.5、33.7d 和 42.1d,象草的根平均寿命最短,只有 20.0d。从总体上看,在污水的培养中根茎型植物的根寿命要长于须根型植物,平均寿命为 46.6d,为须根型平均寿命(34.8d)的 1.3 倍,两者间的差异显著($P=0.021$, $df=35$)。

3 讨论

湿地植物的净化功能与其根系的发达程度相关^[13, 22],根系发达,根系较长的植物能够大大扩展人工湿地净化污水的空间,有利于微生物特别是好氧细菌向湿地深部分布^[23],提高其净化污水的能力^[24],因此在湿地植物的选择时,要充分考虑其根系的生长情况。成水平等研究认为香蒲(*Typha angustifolia* L.)和灯心草(*Juncus effusus* L.)的根系主要分布在 25cm 的区域^[25],而两栖榕(*Ficus* sp.)的主根在湿地中只能伸入地下 20cm 左右(靖元孝等 2003)^[26]。在本实验中,须根型植物和根型植物经过 21 周的培养,根长平均为 24.1cm、24.2cm,也表明湿地植物的根系主要分布在 25cm 以内的区域,为人工湿地的建设提供了参考。

已有的研究表明,不同的湿地植物种,根的生长速度和生物量不同。赵建刚等研究发现经过五个月的湿地生长,美人蕉、象草、香根草、芦苇和香蒲的根生物量分别达到 64.2、59.8、39.5、29.2g/m²和 15.2g/m²^[27]。而美人蕉、菖蒲和香蒲在人工湿地生长 105d 后,地上生物量和地下生物量的比值分别为 4.29、2.94 和 3.10^[28]。Kyambadde 等研究表明,纸莎草(*Cyperus papyrus* L.)和 *Miscanthidium violaceum* (K. Schum.) Robyns 根系的生长情况不同,在直径为 0.58m,深为 0.43m 的微人工湿地中,其根系的增长速度分别为 77 条/周和 32 条/周,并且纸莎草的须根数量和根系表积极显著高于 *M. violaceum*^[29]。彭江燕等在比较几种水生植物的根系生物量、根长度和根密度后发现,芦苇和风车草具有较好的根密度,根长度和须根鲜重^[30]。Sorrell 等研究发现长苞香蒲(*Typha domingensis* Pers.)的根直径小于华克拉莎(*Cladium jamaicense* Crantz),其侧根密度则较大^[31]。而 Lorenzen 等发现长苞香蒲的侧根直径小于华克拉莎,从而表明其具有较大的根表面积^[32]。然而,人们很少分析不同类型湿地植物之间根系生长和生物量的差异,因而难以了解不同湿地植物之间根系生长和生物量差异的规律性。本实验研究表明,须根型湿地植物和根茎型湿地植物之间,在根生长速度、根的大小、根的寿命、根与地上部分的生物量比例等方面,存在着显著的差异,甚至在地上部分的生长速度方面,也存在显著的差异。这就为合理选择湿地,构建污水净化效果好的湿地植物群落,提供了有用的参考。实验中由于缺乏经验,第 5、6 周用全负荷污水培养,结果因污水浓度太高,植物根部分死亡。而须根型植物根受高浓度污水的影响比根茎型植物显著得多。这一意外结果表明,根茎型植物比须根型植物具有较强的耐污能力。当然,这是 8 种植物的比较研究结果,为了充分证实这一结论,还需要对更多的种进行比较。

实验结果表明,根茎型湿地植物和须根型湿地植物的根生物量差异不显著,而根的数量、根的表面积和 $d < 1\text{mm}$ 的根的生物量差异显著,反映了根茎型植物的根较粗而数量少。这一结果显示,评价湿地植物根的作用,根生物量可能并不是最重要的指标。

目前,我国人工湿地中运行最多的植物为传统的芦苇、香蒲等种^[33],本实验中,美人蕉的根系发达,根系的生长速度、根数及根生物量都高于其它植物,特别其根系表积极显著地高于其它实验植物,在第 20 周时达到 22832cm²/株,其根在污水培养中的寿命也较长,具有一定的耐污性,而且很多研究表明,美人蕉具有较

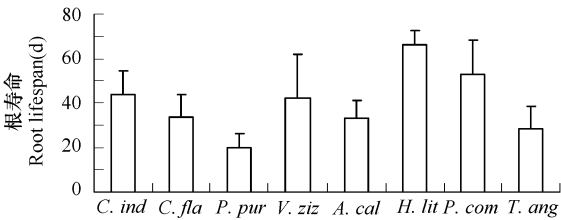


图 6 8 种湿地植物在污水培养中的根寿命
Fig. 6 Root lifespan of eight wetland plants in the wastewater cultivation
C. ind : *C. indica*, *C. fla* : *C. flabelliformis*, *P. pur* : *P. purpureum*, *V. ziz* : *V. zizanioides*, *A. cal* : *A. calamus*, *H. lit* : *H. littoralis*, *P. com* : *P. communis*, *T. ang* : *T. angustifolia*.

好的净化效果 ,对 COD、TP 和各形式的氮的去除率都较高^[33~35] ,还具有净化空气的作用和观赏价值^[36] ,是湿地植物的较好选择。

对植物根系的研究一般采用挖掘法、土钻法等^[19] ,但这些方法无法及时了解植物根系的变化情况 ,本实验的水培试验方法用于湿地植物根系的观察 ,该方法能够在不损伤植物根系的情况下对根系定期观察 ,及时了解植物整个根系的变化情况 ,并能对实验用水较好地控制 ,但实验中当植物的植株长到一定程度 ,特别是地上部分生物量较大的植物容易出现倒伏的现象 ,需要借助其它工具进行固定 ,同时由于桶的体积有限 ,可能对根系的生长有一定的限制。因此 ,该实验方法较适于研究生物量较小的植物的根系生长 ,对体型较大的植物 ,则较适合研究较短一段时间的植物根系生长情况。此外 ,在实验后期 ,由于根数量多 ,记数需要较长时间 ,尽管记数过程中保持根的湿润 ,但暴露在光下和空气中可能对根的生长有一定的影响。

References :

[1] Wang B Z , Wang L. New technologies for wastewater treatment — new technic , new concepts , new theories. Beijing : Science Press , 2004. 200 — 202.

[2] Stottmeister U , Wießner A , Kusch P , *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances* , 2003 , 22 (1-2) : 93 — 117.

[3] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands ? *Water Science and Technology* , 1997 , 35 (5) : 11 — 17.

[4] Yuan D H , Ren Q J , Gao S X , *et al.* Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2004 , 15 (12) : 2337 — 2341.

[5] Wang S R , Nian Y G , Hou W H , *et al.* Macrophyte selection in artificial wetlands. *Journal of Lake Sciences* , 2004 , 16 (1) : 91 — 95.

[6] Cheng S P , Wu Z B , Kuang Q J. Macrophytes in artifical wetland. *Journal of Lake Sciences* , 2002 , 14 (2) : 179 — 184.

[7] Polprasert C , Dan N P , Thayalakumaran N. Application of constructed wetlands to treat some toxic wastewaters under tropical conditions. *Water Science and Technology* , 1996 , 34 (11) : 165 — 171.

[8] Collins B S , Sharitz R R , Coughlin S D. Elemental composition of native wetland plants in constructed mesocosm treatment wetlands. *Bioresource Technology* , 2005 , 96 (8) : 937 — 948.

[9] Gazea B , Adam K , Kontopoulos A. A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage. *Mineral Engineering* , 1996 , 9 (1) : 23 — 42.

[10] Dai X C , Xu Y T , Xie B. Elementary introduction to applications of constructed wetland wastewater treatment. Shanghai Chemical Industry , 2004 , (10) : 7 — 9.

[11] Deng R F , Zhang Y C , Gu J B. The present situation and prospect of using the constructed wetlands to reduce nonpoint source pollutin. *Environmental Protection of Xinjiang* , 2004 , 26 (3) : 19 — 22.

[12] Wood A. Constructucted wetlands in water pollution control : fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology* , 1995 , 32 (3) : 21 — 29.

[13] Cheng S P. Advances in biological fundamental studies on artificial wetland wastewater treatment system. *Journal of Lake Sciences* , 1996 , 8 (3) : 268 — 272.

[14] Bai F Q , Zheng B H , Tian Z Q. Ecological effects of aquatic plants on water pollution control. *Environmental Science and Technology* , 2004 , 27 (4) : 99 — 110.

[15] Cronk K J. Constructed wetlands to treat wastewater from dairy and swine operations : a review. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 1996 , 58 (2-3) : 97 — 114.

[16] Weiss J V , Emerson D , Megonigal J P. Geochemical control of microbial Fe (III) reduction potential in wetlands : comparison of the rhizosphere to non — rhizosphere soil. *FEMS Microbiology Ecology* , 2004 , 48 (1) : 89 — 100.

[17] Li Z Y , Tang Y L , Yang Z J , *et al.* Current situation of study on plants on constructed wetland. *Journal of Zhejiang for Science and Technology* , 2004 , 24 (4) : 56 — 58 , 62.

[18] Chen Z H , Chen F , Cheng X Y , *et al.* Researches on macrophyte roots in the constructed wetlands (A review). *Current Tropic in Plant Biology* , 2004 , 5 : 131 — 142.

[19] Bohm W. Methods of studying root systems. Beijing : Science Press , 1985. 175 , 6.

[20] Sun X , Chen Y F. Research on root systems of *Ceratoides arboresorens*. *Grassland of China* , 1994 , (4) : 39 — 44.

[21] Deng R S. Biostatistics. Beijing : Higher Education Press , 2003. 7 — 18 , 61 — 70 , 104 — 116.

[22] Cheng S P , Kuang Q J , Xia Y C. Studies on artificial wetland with Cattail (*Typha angustifolia*) and Rush (*Juncus effusus*) I. the performance of purifying wastewater. *Journal of Lake Sciences* , 1997 , 9 (4) : 351 — 358.

[23] Cheng S P , Wu Z B , Xia Y C. Review on gas exchange and transportation in macrophytes. *Acta Hydrobiologica Sinica* , 2003 , 27 (4) : 413 — 417.

[24] Wu J Q , Ruan X H , Wang X. Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands. *Water Resources Protection* ,2005 ,21 (1) :1 — 6.

[25] Cheng S P , Xia Y C. Artificial wetland with Cattail (*Typha angustifolia*) , Rush (*Juncus effusus*) II. purifying space. *Journal of Lake Sciences* ,1998 ,10 (1) :62 — 66.

[26] Jing Y X , Yang D J , Chen Z H , *et al.* Growth characteristics and sewage purifying effect of amphibious banyan in constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 (3) :614 — 619.

[27] Zhao J G , Yang Q , Chen Z H , *et al.* Studies on root system biomass of the plants in several kinds of wetland. *China Environmental Science* ,2003 ,23 (3) :290 — 294.

[28] Jiang Y P , Ge Y , Yue C L , *et al.* Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 (8) :1720 — 1725.

[29] Kyambadde J , Kansime F , Gumaels L , *et al.* A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum* — based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate. *Water Research* ,2004 ,38 (2) :475 — 485.

[30] Peng J Y , Liu Z H. Comparison of major parameters of the influence of various aqua — plants on waste water treatment. *Yunnan Environmental Science* ,1998 ,17 (2) :47 — 51.

[31] Sorrell B K , Mendelssohn A , McKeel K L , *et al.* Ecophysiology of wetland plant roots : a modelling comparison of aeration in relation to species distribution. *Annals of Botany* ,2000 ,86 (3) :675 — 685.

[32] Lorenzena B , Brix H , Mendelssohn I A , *et al.* Growth , biomass allocation and nutrient use efficiency in *Cladium jamaicense* and *Typha domingensis* as affected by phosphorus and oxygen availability. *Aquatic Botany* ,2001 ,70 (2) :117 — 133.

[33] Lu M , Zeng Q F. Study on treatment of domestic sewage by constructed wetland planted with seven wetland plants. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering* ,2004 ,17 (2) :32 — 35.

[34] Zhu X Z , Cui L H , Liu W , *et al.* Removal efficiencies of septic tank effluent by simulating vertical-flow constructed *Canna indica* Linn. wetlands. *Journal of Agro-Enviroment Science* ,2004 ,23 (4) :761 — 765.

[35] Liu Y , Xia B C. Nitrogen removal in domestic sewage by constructed wetland with different plants. *Journal of Plant Resources and Environment* ,2005 ,14 (4) :46 — 48.

[36] Li W F. *Canna indica* Linn. . *Forest Science and Technology* ,1999 , (4) :45.

参考文献：

[1] 王宝贞,王琳. 水污染治理新技术——新工艺、新概念、新理论. 北京:科学出版社,2004. 200 ~ 202.

[4] 袁东海,任全进,高士祥,等. 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.

[5] 王圣瑞,年跃刚,侯文华,等. 人工湿地植物的选择. *湖泊科学* ,2004 ,16 (1) :91 ~ 95.

[6] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究. *湖泊科学* ,2002 ,14 (2) :179 ~ 184.

[10] 戴兴春,徐亚同,谢冰. 浅谈人工湿地法在水污染控制中的应用. *上海化工* 2004 , (10) 7 ~ 9.

[11] 邓瑞芳,张永春,谷江波. 人工湿地对污染物去除的研究现状及发展前景. *新疆环境保护* ,2004 ,26 (3) :19 ~ 22.

[13] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展. *湖泊科学* ,1996 ,8 (3) :268 ~ 272.

[14] 白峰青,郑丙辉,田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应. *环境科学与技术* ,2004 ,27 (4) :99 ~ 110.

[17] 李志炎,唐宇力,杨在娟,等. 人工湿地植物研究现状. *浙江林业科技* ,2004 ,24 (4) :56 ~ 58 ,62.

[19] W. 伯姆. 根系研究法. 北京:科学出版社,1985. 175 ,6.

[20] 孙祥,陈亚凡. 驼绒蒿根系的研究. *中国草地* ,1994 , (4) :39 ~ 44.

[21] 杜荣骞. 生物统计学. 北京:高等教育出版社,2003. 7 ~ 18 ,61 ~ 70 ,104 ~ 116.

[22] 成水平,况琪军,夏宜琰. 香蒲、灯心草人工湿地的研究 I. 净化污水的效果. *湖泊科学* ,1997 ,9 (4) :351 ~ 358.

[23] 成水平,吴振斌,夏宜琰. 水生植物的气体交换与输导代谢. *水生生物学报* ,2003 ,27 (4) :413 ~ 417.

[24] 吴建强,阮晓红,王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择. *水资源保护* ,2005 ,21 (1) :1 ~ 6.

[25] 成水平,夏宜琰. 香蒲、灯心草人工湿地的研究 II. 净化污水的空间. *湖泊科学* ,1998 ,10 (1) :62 ~ 66.

[26] 靖元孝,杨丹青,陈章和,等. 两栖榕在人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果. *生态学报* ,2003 ,23 (3) :614 ~ 619.

[27] 赵建刚,杨琼,陈章和,等. 几种湿地植物根系生物量研究. *中国环境科学* ,2003 ,23 (3) :290 ~ 294.

[28] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. *生态学报* ,2004 ,24 (8) :1720 ~ 1725.

[30] 彭江燕,刘忠翰. 不同水生植物影响污水处理效果的主要参数比较. *云南环境科学* ,1998 ,17 (2) :47 ~ 51.

[33] 鲁敏,曾庆福. 七种植物的人工湿地处理生活污水的研究. *武汉科技学院学报* ,2004 ,17 (2) :32 ~ 35.

[34] 朱夕珍,崔理华,刘雯,等. 垂直流美人蕉模拟人工湿地对化粪池出水的净化效果. *农业环境科学学报* ,2004 ,23 (4) :761 ~ 765.

[35] 刘育,夏北成. 不同植物构成的人工湿地对生活污水中氮的去除效应. *植物资源与环境学报* ,2005 ,14 (4) :46 ~ 48.

[36] 李万方. 美人蕉. *林业科技通讯* ,1999 , (4) :45.