

四种湿地植物在人工湿地的生长特性研究

赖闻玲, 王玉彬, 彭长连, 陈章和*

(华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广东省植物发育生物工程重点实验室, 广州 510631)

摘要: 研究了表面流人工湿地中香根草(*Vetiveria zizanioides*)、风车草(*Cyperus flabelliformis*)、芦苇(*Phragmites australis*)和水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis*) 4种植物的根生物量和生长量、根系分布、地上部分的生长情况。风车草、香根草和水鬼蕉根系及地上部分的生长节律相似, 9月或10月前生长较快, 以后生长减慢甚至停止; 芦苇则不同, 7月以前生长缓慢, 以后生长加速, 冬季也保持较快的生长。全年根生长量和根生物量以水鬼蕉最大, 显著高于其它植物($P < 0.01$), 香根草最小, 显著低于其它3种植物($P < 0.01$)。香根草的根系垂直向下生长, 分布较深, 而其它3种植物的根系主要分布在浅层土壤中。风车草分株最多, 叶面积指数最大。香根草叶面积指数最小。结果表明, 在构建多种植物人工湿地群落时, 可以考虑将芦苇与大多数湿地植物搭配以保证湿地全年保持较好的净化效果; 水鬼蕉可以作为底层植物, 和风车草等生长早、植株较高的植物构建多种湿地群落。

关键词: 人工湿地; 湿地植物; 根生长; 根生物量; 根系分布; 植株生长

中图分类号: Q945.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)03-0238-07

Growth Characteristics of Four Species in Surface-flow Constructed Wetlands

LAI Wen-ling, WANG Yu-bin, PENG Chang-lian, CHEN Zhang-he*

(Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, Guangdong Provincial Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The root and shoot growth, root biomass, and root distribution of four species, such as *Cyperus flabelliformis*, *Hymenocallis littoralis*, *Phragmites australis*, and *Vetiveria zizanioides*, were studied in a surface-flow constructed wetland. The results showed that root and shoot growth pattern were similar among *C. flabelliformis*, *V. zizanioides*, and *H. littoralis*, with a fast growth stage before September or October, and a slow growth stage during the following months, while *P. australis* was very different, with slow growth of root and shoot before July, and rapid growth maintained throughout winter. *H. littoralis* exhibited significantly faster root growth and significantly larger root biomass than other species ($P < 0.01$), while *V. zizanioides* showed significantly slower root growth and a significantly smaller root biomass than other species ($P < 0.01$). Roots of *V. zizanioides* generally grew vertically, while the roots of the other species were predominantly distributed in the shallow layer of the substrate. *C. flabelliformis* produced the most tillers, and had the highest leaf area index (LAI), while *V. zizanioides* showed the smallest LAI. The results suggest that *P. australis* could be planted with other wetland species to achieve high decontamination rates in treatment wetlands during the autumn and winter months. Results also suggest that *H. littoralis*, a lower stratum plant, could be paired with tall and early growing species like *C. flabelliformis* as a beneficial component of the poly-cultivated wetland community.

Key words: Constructed wetland; Wetland plant; Root growth; Root biomass; Root distribution; Shoot growth

收稿日期: 2009-06-25

接受日期: 2009-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470346); 广东省自然科学基金项目(06025056)资助

作者简介: 赖闻玲(1973~), 理学博士, 从事植物生态学和环环境生态学研究, 现工作于赣南师范学院。email: lwenling@sina.com

第一和第二作者对本文有同等贡献

* 通讯作者 Corresponding author, email: chenzhh@scnu.edu.cn

人工湿地作为污水处理系统已有 50 多年的历史了,一般由植物、基质和微生物组成。人工湿地污水净化机理非常复杂,一般认为,湿地系统对污水的净化是物理、化学及生物共同作用的结果,基质、植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的 3 个主要因素,其中植物是人工湿地的核心^[1]。植物在污水净化过程中有 3 个重要作用:(1)直接吸收利用污水中的营养物质、吸附和富集重金属及一些有毒有害物质;(2)为根区好氧微生物输送 O₂,同时为微生物提供较大的附着面积;(3)增强和维持介质的水力传输^[2-9]。在人工湿地中,最活跃的反应区域是植物根区(或根际),物理、化学和生物过程主要在这里发生,植物、微生物、基质和污染物产生紧密的联系,成为污水净化的主要作用区域^[8,10-13]。多数研究表明,不同的植物的污水净化能力存在差异,有必要对植物进行筛选^[14]。可是,目前对不同植物的污水净化能力差异和机理报道很少,还不能用于进行植物的选择^[14]。我们的研究表明,湿地植物的污水净化能力与其地上部分和根系的生长有关。不同的湿地植物,地上部分和地下部分的生长速度、生长节律,以及根系的分布有明显的差异。了解这些差异,对人工湿地植物筛选、多种植物群落构建、提高污水净化效果有重要指导意义。但目前对人工湿地植物根系生长的特性与分布规律特别是季节节律的研究还较少。本研究通过对 4 种有较好应用潜力的湿地植物在表面流人工湿地中生长的观察,特别是对它们根系生长特性的观察,探讨分析不同湿地植物的生长特点,为人工湿地植物的筛选和多种湿地植物群落的构建提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料和处理

本实验人工湿地位于广州市华南师范大学植物园内。广州属于亚热带季风气候,年均温为 22℃,最冷月(1 月)均温为 13.3℃,最热月(7 月)均温为 28.4℃;年均降雨量 1623 mm,有明显的干湿季,雨季为 4~9 月,旱季为 10~翌年 3 月。通常以每年的 2 月至次年的 1 月作为植物生长的年周期。实验在 16 个 2 m×1 m×0.7 m (L×W×D)表面流湿地进行。植物生长基质为原地的土壤,深度约为 60 cm。土壤为砂壤土,粘粒(<0.002 mm)占 16.6%,粉粒(0.002~0.05 mm)占 14.0%,砂粒(0.05~2 mm)占 69.4%。土壤有机质含量为

0.84%,总氮(TN)为 0.048%,总磷(TP)为 0.055%。实验用污水为学生宿舍生活污水,经化粪池预处理,然后进入人工湿地旁边的沉淀池(8 m×2 m×1 m,L×W×D)沉淀后,再输往湿地。灌溉污水主要污染物年平均浓度(mg L⁻¹):化学需氧量(COD_{Cr}) 84.95,总氮(TN) 23.77,总磷(TP) 1.97,氨氮(NH₄-N) 23.43,硝氮(NO₃-N) 0.65。

实验植物香根草(*Vetiveria zizanioides*)、风车草(*Cyperus flabelliformis*)、芦苇(*Phragmites australis*)和水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis*)于 2005 年 12 月中旬栽种,幼苗选自人工湿地旁边的研究备用植物栽培区。每种植物栽种 4 个湿地,每一湿地种植大小均匀、生长健壮的幼苗 12 株。至 2006 年 3 月,湿地内的植物都已适应新栽种的环境,开始稳定生长,这时开始对所有湿地进行污水灌溉处理,每个湿地水力负荷为 0.02 m³ m⁻² d⁻¹,污水停留时间 7 d。

1.2 根的生长

芦苇的根包括其根状茎。根系生长量采用埋入土柱法^[15-16]。每种设置边长 20 cm 的正方形土柱 8 个(每湿地 2 个),于 2006 年 4 月、7 月、10 月及 2007 年 1 月,分 3 层(0~10,10~20,20~30 cm)挖出固定土柱中的土壤,测量其中的根生物量。第一次取样之后,将挖出的土壤回填取样点,并在取样点做好标记,每次在相同地点取样。4 次测定的根生长量之和作为全年根生长量的估计值。样方内植物根系用清水冲洗干净,80℃下烘至恒重后称干重,精确至 0.001 g。

根系生物量共测定 2 次(2006 年 7 月和 2007 年 1 月),分别视作生长季节中期和后期的根生物量。采用埋入土柱法,每种设置边长 20 cm 的正方形小样方 8 个(每湿地 2 个),分 3 层(0~10,10~20,20~30 cm)测量。第二次的小样方在第一次小样方的旁边。样方内植物根系用清水冲洗干净,于 80℃下烘至恒重后称其干重,精确至 0.001 g。

1.3 地上部分的生长

每月测量 1 次植株的高度、分株数和叶面积指数。每个湿地测固定的 3 个点,采用植物冠层仪(型号 PAC-1760,美国)在测点离地面高度为 20 cm 的位置测定叶面积指数,每次测定时间为中午 12 时左右。

1.4 数据分析

运用 SPSS 13.0 (Statistical Package for the

Social Sciences)和 Microsoft Excel 2003 软件计算平均值和标准差,并生成图表。采用 One-Way ANOVA 和 LSD 检验(双尾)进行种间、层间和不同时期比较的方差分析及差异性分析。

2 结果和分析

实验中实际测量了 3 层土壤(0~10, 10~20, 20~40 cm)中的根,4 种植物的根都分布在 30 cm 的范围内,所以文中采用 3 层(0~10, 10~20, 20~30 cm)叙述。

2.1 根的生长和生物量

植物生长初期,香根草根的生长最快,4 月的生长速度最快,其生长量在 5~7 月最高,干重为 $75.4 \pm 7.4 \text{ g m}^{-2}$,10 月以后根生长减慢,生长量显著低于生长前期($P < 0.01$)。风车草和水鬼蕉根的生长在 2~10 月逐渐加快,10 月以后降低,4 次测定的生长量差异极显著($P < 0.01$),具明显季节性,它们根生长量在 8~10 月最高,干重分别为 $105.0 \pm$

92 g m^{-2} 和 $207.2 \pm 9.7 \text{ g m}^{-2}$ 。芦苇根的生长在 7 月前较慢,7 月以后生长较快,即使在冬季生长也不减弱,4 月的根生长量最低($P < 0.01$),而其它时期的生长量差异不显著(图 1)。全年总的根生长量以水鬼蕉最大(447.3 g m^{-2}),极显著高于其它 3 种植物($P < 0.01$);其次是芦苇(264.4 g m^{-2}),香根草最小(211.5 g m^{-2}),后 3 种植物的差异不显著。

4 种植物生长中期根的生物量以风车草最大,芦苇次之,香根草最小;生长后期根的生物量以水鬼蕉最大,风车草次之,香根草最小(表 1)。香根草生长中期和后期的根生物量都极显著低于其它植物($P < 0.01$)。生长中期,芦苇和水鬼蕉的根生物量差异不显著,但和风车草的差异极显著($P < 0.01$);生长后期,芦苇和风车草的差异不显著,而水鬼蕉极显著高于其它 3 种植物($P < 0.01$)。除香根草外,芦苇、风车草和水鬼蕉 3 种植物生长后期的根生物量均极显著高于其生长中期的根生物量($P < 0.01$)(表 1)。

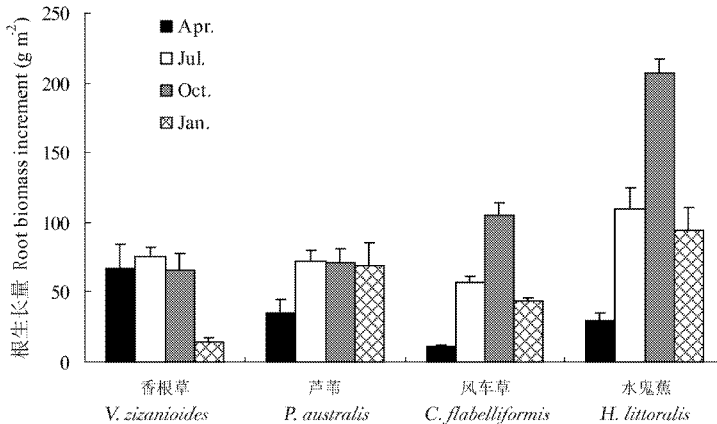


图 1 4 种植物的根生长量($n=8$)

Fig. 1 Root growth of four species measured in different months

表 1 4 种植物在生长中期和后期的根生物量(g m^{-2})

Table 1 Root biomass (g m^{-2}) of four species at early and latter growth stages

时间 Time	土壤深度 Depth of soil (cm)	香根草 <i>V. zizanioides</i>	芦苇 <i>P. australis</i>	风车草 <i>C. flabelliformis</i>	水鬼蕉 <i>H. littoralis</i>
Jul., 2006	0~10	11.1 ± 4.5	104.5 ± 12.3A	121.4 ± 8.1A	101.9 ± 18.8A
	10~20	5.8 ± 2.8	31.2 ± 6.7B	48.5 ± 4.3B	19.1 ± 6.1B
	20~30	20.1 ± 1.0	22.5 ± 5.7B	34.5 ± 11.1B	9.2 ± 3.5B
合计 Total		37.0 ± 5.6c	158.2 ± 4.5b	204.4 ± 11.9a	130.2 ± 27.2b
Jan., 2007	0~10	31.1 ± 5.5	292.9 ± 34.7A	276.8 ± 38.5A	416.7 ± 47.8A
	10~20	18.9 ± 5.4	36.6 ± 10.4B	52.9 ± 19.0B	63.7 ± 14.4B
	20~30	42.3 ± 10.5	55.2 ± 10.2B	74.9 ± 13.4B	24.8 ± 5.5B
合计 Total		92.3 ± 20.8c	384.7 ± 54.9b	404.6 ± 67.6b	505.2 ± 67.6a

$n=8$; 数据后不同大写字母表示同一时期不同层差异极显著($P < 0.01$),小写字母表示同一时期不同植物间差异极显著($P < 0.01$)。Data followed different capital letters indicate significant difference at 0.01 level among different soil layers at the same growth stage, while different small letters present significant difference at 0.01 level among different species at the same growth stage.

香根草的根多垂直向下生长,上、中、下层土壤中的根生物量较接近(表 1),其中 20 cm 以下根的生长量最高(图 2),而其它 3 种植物的根主要分布在 0~10 cm 的土壤中,尤以水鬼蕉为明显,大部分根围绕鳞茎底部呈水平辐射状生长,其 0~10 cm 土层内的根生物量和另两层有极显著差异($P <$

0.01)(表 1)。芦苇地下部主要是横走的根状茎,全年的根生物量中有 2/3 是根状茎贡献的。芦苇的根状茎基本在 0~10 cm 层内,少数深入到 20 cm 以下再横向生长,若不计根状茎,芦苇 90% 的根集中在 0~10 cm 层内。

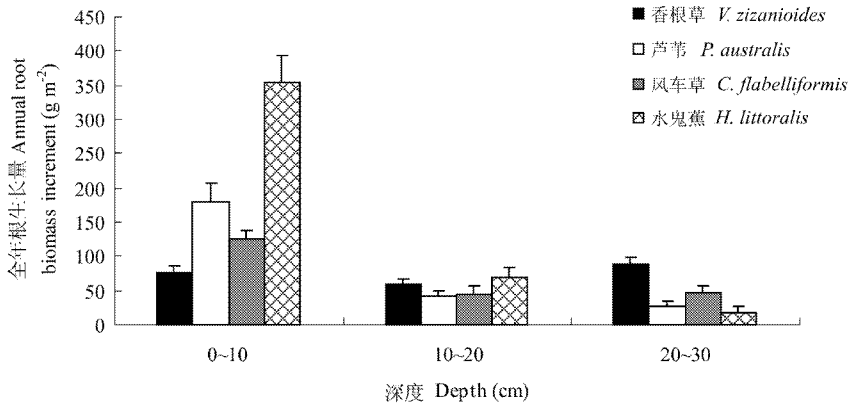


图 2 4 种植物全年根生长量的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of annual root biomass increment of four species

2.2 分株和株高

风车草分株数最多,一直到 12 月份都保持较高的分株能力,但 10 月以后新生芽生长时间较短,部分新生芽在高出湿地表面 5~10 cm 就开始变黑死亡,继续生长的新芽其最终高度也低于 10 月以前长出的芽。香根草在 6~10 月分株迅速,月平均增长率为 45% 左右,显著高于全年的月平均增长率($P < 0.05$),10 月后,分株数只有少量增加。7 月前芦苇高度及分株数增长缓慢,7 月后保持较快增长,其中 10~11 月增长率达到 28%,且新生芽直径增大。水鬼蕉分株数很少,有 1/3 的植株没有分

株,植株的生长主要表现为叶片数的增加和叶片的增大(图 3)。

风车草高度在 4~9 月增长较快,高于全年平均增长率,9 月以后高度增加幅度很小,有的叶片变黄。香根草在 3~9 月的高度增加迅速,其中 4~6 月增加最快,月增长率最高达 53.8%,显著高于全年月平均增长速率($P < 0.05$)。芦苇 6~10 月高度增长较快,增长率高于全年平均增长率,12 月后发生倒伏,平均高度下降。水鬼蕉高度最矮(图 4),株高增加缓慢,月均增高只有 3 cm,在 6 月份由于开花,是植株全年最高的时期。

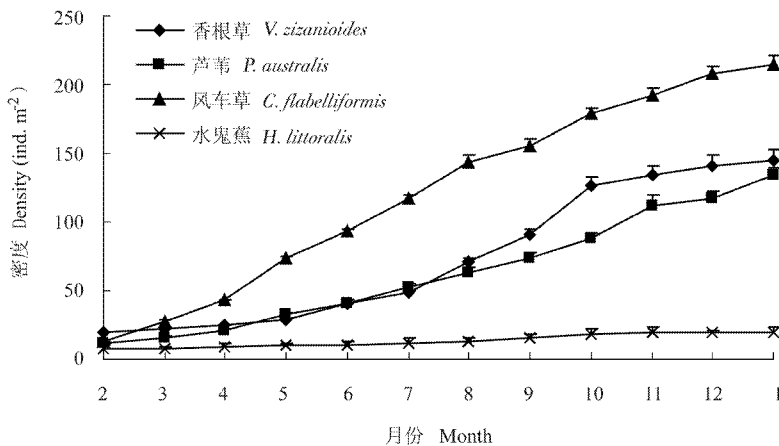


图 3 不同月份 4 种植物的植株密度

Fig. 3 Plant density of four species in different months

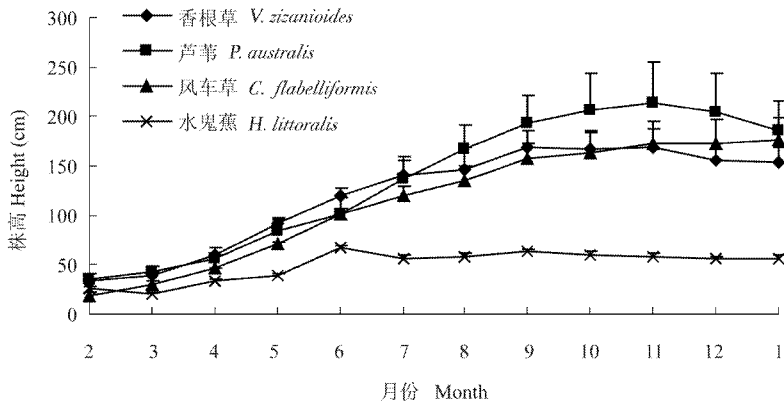


图 4 不同月份 4 种植物的高生长

Fig. 4 Plant height of four species in different months

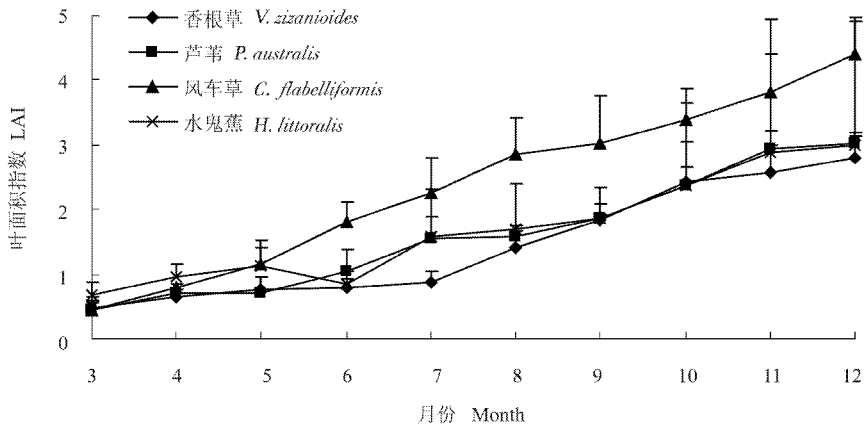


图 5 不同月份 4 种植物的叶面积指数

Fig. 5 Leaf area index (LAI) of four species in different months

总的来看,4种植物地上部分生长存在季节差异。风车草、香根草生长季节性明显,在4~9月(春、夏季)地上部分生长较快,植株生长旺盛。10月后(秋、冬季)生长明显减慢,叶片开始变黄。芦苇7月后(夏季以后)才开始生长加快,秋冬季生长速度没有明显下降,这时地上部分生长明显好于其它3种植物。

2.3 叶面积指数动态

3月,水鬼蕉叶片倾斜角度大、叶片较大较厚、透光率较低,其叶面积指数最高。从5月开始至生长季末,风车草的叶面积指数一直最大,芦苇和水鬼蕉接近,香根草因草株型紧凑、叶片倾斜角度较小,叶面积指数最低,从7月起其叶面积指数显著低于风车草的($P < 0.05$),8~10月和11月芦苇、水鬼蕉的叶面积指数也显著低于风车草($P < 0.05$),但香根草、芦苇和水鬼蕉之间的差异不显著(图5)。

4种植物中,风车草叶面积指数增加最快,月平均增加率最高(44%),显著高于其它3种植物

($P < 0.05$),说明风车草地上部分生长早,植株能较快地全面覆盖湿地床。芦苇在3~8月生长缓慢,叶片覆盖度较低,8月后叶面积指数增加迅速,月平均增长率(35%)高于全年平均增长率(28%)。

3 讨论

实验的4种植物株型差别较大,为尽量减少幼苗状态给整个生长过程带来的影响,实验开始时选择的幼苗苗龄相同,并且香根草、风车草和芦苇的幼苗株高、鲜重相近,水鬼蕉的48株幼苗鲜重、叶片长度和叶片数相近。

本实验根系生长量采用埋入土柱法,每次取样都在相同地点进行,4次测定之和作为全年根生长量的估计值。但它很可能是较低的估计值,因为在两次测定之间(3个月),可能会有少量的根死亡。在水培系统中,一些人工湿地植物的根寿命为20~66 d,且不同种的差异较大^[17];另外土柱中根的获取,也可能对根系有一定的损伤而影响它们的生长速度。根生长量每季度测1次,因而测定结果

只在一定程度上反映根生长的季节性变化。

已有的研究表明,由于湿地植物根系的泌氧特性影响湿地微生物的分布,植物根系的生物量、长度等有可能影响人工湿地的污水处理能力^[18]。湿地植物对N和P的去除有很大部分由植物的吸收作用完成,它们对N和P的吸收量与其生物量呈显著正相关^[19]。而且植物对污染物的直接吸收受到植物生长状态的影响,当植物处于生长旺盛期时,对污染物的吸收强,去除效果佳;当植物衰老或处于冬季生长停滞期,污水的净化效果较差^[20]。因此,选择湿地植物时,根系和植株的生长情况是需重点考虑的因素。赵建刚等报道经过5个月的湿地生长,美人蕉(*Canna indica*)、象草(*Pennisetum purpureum*)、香根草、芦苇和香蒲(*Typha angustifolia*)的根生物量分别达到64.2、59.8、39.5、29.2和15.2 g m⁻²^[21]。彭江燕等比较了几种水生植物的根系生物量、根长度和侧根密度后,认为芦苇和风车草有较好的侧根密度、根长度和须根鲜重^[22]。本实验中4种湿地植物的根生物量、生长和地上部分生长表现出很大的差异。香根草、风车草和水鬼蕉10月以前根的生长较快,以后生长速度降低,这3种植物的地上部分也表现出相似的生长节律。这和大多数植物春夏季生长旺盛、秋冬季逐渐衰老的生长节律相似。不同的是水鬼蕉秋冬季虽然生长减缓,但根生长量是4种植物中最大的。全年根的生物量水鬼蕉最大,达到447.3 g m⁻²,极显著大于其它几种植物($P < 0.01$);香根草最小,极显著小于其它3种植物($P < 0.01$)。水鬼蕉庞大的根系可能对去污作用有利,且秋冬季仍可发挥较好的去污能力,当然这还要考察温、湿度及光照等条件对其去污效果的影响程度。芦苇是目前国内外人工湿地应用最多、去污效果较好的湿地植物,本实验显示芦苇的生长季节节律与其它3种植物有明显的不同。生长前期芦苇根生长较慢,7月后生长加快,显著高于前几个月的生长量($P < 0.01$)。芦苇地上部分的生长节律和地下部分一样,7月后,分株数一直保持较快增长,10~11月其它植物生长减缓时,其增长率仍呈上升趋势。赵丽娜等报道,当年的芦苇春季的生长不如菖蒲(*Acorus calamus*)和香蒲,生长较缓慢^[23]。利用芦苇的快速生长期出现在生长季节的中后期的特点,与快速生长期出现在生长季节前期的湿地植物进行搭配,有可能使人工湿地群落的结构更合理,污水净化效果

更好。

成水平等报道香蒲和灯心草(*Juncus effusus*)的根系主要分布在25 cm的区域^[24],也有研究认为,很少根分布在30 cm以下^[25]。植物根系巨大的表面积使得大量微生物附着,并创造利于微生物生长的微环境。植物根系分布会间接影响污染物的去除,有研究表明水生植物根系主要分布在湿地基质上层25 cm区域,湿地中有机污染物的降解也主要发生在20 cm以上的基质区域^[26]。本文4种植物根系也分布在30 cm区域,它们的分布特点(特别是深度)有较大的差异。香根草的根系主要垂直向下生长,分布较深但范围较窄,其全年根生长量在3个土壤层中大体相当;而其它3种植物的根分布较广但较浅,主要分布在0~10 cm的浅层。在构建人工湿地时需根据它们的根系分布特点和地上部分形状控制合适的种植间距。

植株高度也表现出一定的层次,整个生长季,风车草的株高最高,而且分株快且多,枝叶覆盖率高,所以不适宜在风车草中间种植其它生长较慢且不耐荫的湿地植物。而香根草植株直立、叶片倾斜度较小,植株之间空隙度较高,叶面积指数较小,根系多垂直向下生长,分布范围较小,这些特性似乎可以减少它对其他种的竞争,对构建多种群落有利。水鬼蕉的高度较矮,并且较耐荫^[27],可以尝试作为人工湿地多种植物群落的下层植物。

利用湿地植物的不同生长特性和不同的生长节律合理配置多种植物的人工湿地群落,可提高人工湿地植物群落的稳定性和污水净化效果。在构建多种植物人工湿地群落时,可以考虑将芦苇与大多数湿地植物搭配以保证湿地全年保持较好的净化效果;水鬼蕉具有一定的耐荫性,可以作为底层植物,和风车草等生长早、植株较高的植物构建多种湿地群落。

致谢 古滨河博士对本文英文摘要的撰写提出了修改意见,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Xia H P(夏汉平). Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetland [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 2002, 21(4): 51-59.(in Chinese)
- [2] Cheng S P(成水平), Wu Z B(吴振斌), Kuang Q J(况琪军). Macrophytes in artificial wetland [J]. J Lake Sci(湖泊科学), 2002, 14(2): 179-184.(in Chinese)
- [3] Wang S R(王圣瑞), Nian Y G(年跃刚), Hou W H(侯文华), et al. Macrophyte selection in artificial wetlands [J]. J Lake Sci(湖泊科

- 学), 2004, 16(1): 91–95. (in Chinese)
- [4] Wu Z B(吴振斌), Chen H R(陈辉蓉), He F(贺锋), et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system [J]. *Acta Hydrobiol Sin(水生生物学报)*, 2001, 25(1): 28–35. (in Chinese)
- [5] Armstrong J, Armstrong W, Beckett P M, et al. Pathways of aeration and the mechanisms and beneficial effects of humidity- and venturi-induced convections in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud [J]. *Aquat Bot*, 1996, 54: 177–197.
- [6] Pezeshki S R. Wetland plant responses to soil flooding [J]. *Environ Exp Bot*, 2001, 46: 299–312.
- [7] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: A perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, 26: 17–36.
- [8] Stottmeister U, Wießner A, Kuschik P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechn Adv*, 2003, 22: 93–117.
- [9] Greenway M. The role of macrophytes in nutrient removal using constructed wetlands [M]// Singh S N, Tripathi R D. *Environmental Bioremediation Technologies*. Heidelberg: Springer Berlin, 2007: 331–351.
- [10] Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants — The root zone method [J]. *Water Sci Techn*, 1987, 19: 107–118.
- [11] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deepwater rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ann Bot*, 2003, 91: 301–309.
- [12] Bezbaruah A N, Zhang T C. Quantification of oxygen release by bulrush (*Scirpus validus*) roots in a constructed treatment wetland [J]. *Biotechn Bioeng*, 2005, 89(3): 308–318.
- [13] Li Z H(李宗辉), Tang W H(唐文浩), Song Z W(宋志文). Response of themorphological and physiological characteristics of aquatic plants to long-term soaking in the process of constructed wetland wastewater treatment [J]. *Acta Sci Circ(环境科学学报)*, 2007, 27(1): 75–79. (in Chinese)
- [14] Brisson J, Chazarenc F. Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(13): 3923–3930.
- [15] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forest [J]. *Plant Soil*, 1983, 71(123): 87–101.
- [16] Lee K H, Joe S. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient [J]. *For Ecol Manag*, 2003, 185(3): 263–273.
- [17] Chen W Y(陈文音), Chen Z H(陈章和), He Q F(何其凡), et al. Root growth of wetland plants with different root types [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2007, 27(2): 450–458. (in Chinese)
- [18] Cheng S P(成水平). Advances in biological fundamental studies on artificial wetland wastewater treatment system [J]. *J Lake Sci(湖泊科学)*, 1996, 8(3): 268–272. (in Chinese)
- [19] Ma A N(马安娜), Zhang H G(张洪刚), Hong J M(洪剑明). The fuctions and mechanisms of wetland plants in wastewater treatment [J]. *J Cap Norm Univ(首都师范大学学报)*, 2006, 27(6): 57–63. (in Chinese)
- [20] Xu D F(徐德福), Xu J M(徐建民), Wang H S(王华胜), et al. Absorbability of wetland plants on N and P from eutrophic water [J]. *Plant Nutr Fert Sci(植物营养与肥料学报)*, 2005, 11(5): 579–601. (in Chinese)
- [21] Zhao J G(赵建刚), Yang Q(杨琼), Chen Z H(陈章和), et al. Studies on root system biomass of the plants in several kinds of wetland [J]. *Chin Environ Sci(中国环境科学)*, 2003, 23(3): 290–294. (in Chinese)
- [22] Peng J Y(彭江燕), Liu Z H(刘忠翰). Comparison of major parameters of the influence of various aqua-plants on waste water treatment [J]. *Yunnan Environ Sci(云南环境科学)*, 1998, 17(2): 47–51. (in Chinese)
- [23] Zhao L N(赵丽娜), Ding W M(丁为民), Lu Y F(鲁亚芳), et al. Comparison among of pollutant removal rates in Sewage by several wetland plants in spring season [J]. *Poll Contr Techn(污染防治技术)*, 2007, 20(1): 25–27. (in Chinese)
- [24] Cheng S P(成水平), Xia Y C(夏宜崢). Artificial wetland with Cattail (*Typha angustifolia*), Rush (*Juncus effusus*) II. Purifying space [J]. *J Lake Sci(湖泊科学)*, 1998, 10(1): 62–66. (in Chinese)
- [25] Tanner C C. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands [J]. *Water Sci Techn*, 2001, 44: 9–17.
- [26] Huang J(黄娟), Wang S H(王世和), Luo W G(雒维国), et al. Influence of plant photosynthetic characteristics on DO distribution, purification effect in constructed wetlands [J]. *Acta Sci Circum(环境科学学报)*, 2006, 26(11): 1828–1832. (in Chinese)
- [27] Tan W F(谭卫锋), Chen W Y(陈文音), Chen Z H(陈章和). Influence of light intensity on the growth and ecophysiological characteristics of *Hymenocallis littoralis* [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2009, 29(3): 1320–1329. (in Chinese)