

光照强度对水鬼蕉 (*Hymenocallis littoralis*) 生长及生理生态特性的影响

谭卫锋, 陈文音, 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 4 个光照强度水平对水鬼蕉 (*Hymenocallis littoralis* (Jacq.) Salisb.) 在土壤和碎石基质人工湿地中生长的影响。4 个光处理平均光照强度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 是: 701 (全光照, 光强 I)、495 (全光照的 71.4%, 光强 II)、304 (全光照的 44.7%, 光强 III)、141 (全光照的 20.2%, 光强 IV)。研究表明, 在较弱光强 (III、IV) 下, 水鬼蕉的株高、叶生物量、叶片长度、叶绿素含量通常显著高于较高光强 (I、II) 下的植物。较低光强植株的生物量通常高于较高光强的植株, 但差异一般不显著。光合作用和根生物量虽以全光照的植株较高, 但不同光强之间差异不显著。可见, 水鬼蕉具有一定的耐阴性, 适度的荫蔽 (全光照的约 50%) 有利于其生长。水鬼蕉在土壤和碎石基质对光照强度的反应不完全相同。在相同的光照强度下, 生长于碎石基质的水鬼蕉的测定指标 (除叶绿素含量外) 通常都显著高于生长于土壤基质的植物。水鬼蕉 100 cm 左右的高度、较慢的生长速度、在碎石基质适度遮荫有利于生长等特点使其适合用于构建多种植物人工湿地群落的中下层植物, 是一种在污水处理人工湿地有较好应用潜力的植物。

关键词: 水鬼蕉; 光照强度; 基质; 生长; 生理生态特性

文章编号: 1000-0933 (2009) 03-1320-10 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

Influence of light intensity on the growth and ecophysiological characteristics of *Hymenocallis littoralis*

TAN Wei-Feng, CHEN Wen-Yin, CHEN Zhang-He*

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1320 ~ 1329.

Abstract: The influence of light intensity on the growth of *Hymenocallis littoralis* (Jacq.) Salisb. was studied in microcosm scale constructed wetlands with soil and gravel substrates. Four average light intensity ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) treatments were used: 701 (full illumination, light I), 495 (71.4% of full illumination, light II), 304 (44.7% of full illumination, light III), and 141 (20.2% of full illumination, light IV). Results showed that plant height, leaf biomass, leaf length, and chlorophyll content were generally higher in the low light intensities (III, IV) than in the high light intensities (I, II). Total biomass per plant was higher in low light, but the difference is generally not significant. Photosynthesis and root biomass were greater in full illumination although the difference was not significant. Our findings indicated that *H. littoralis* had shading tolerance, and about 50% of sunlight is favorable to its growth. Effects of light intensity on growth varied with substrate type. Under the same light intensity, plants grew significantly fast in gravel bed than in soil bed. This plant may be used in constructed treatment wetland, specially as a lower-stratum plant in the mixed-cultivated wetlands from its height of about 100 cm, comparatively slow growth rate, adaptation to the gravel substrate, and favorable growth in suitable

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

收稿日期: 2007-10-18; 修订日期: 2008-05-27

致谢: 感谢古滨河博士对本文写作给予的帮助。

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

shading.

Key Words: *Hymenocallis littoralis*; light intensity; substrate; growth; ecophysiological characteristics

植物是人工湿地污水处理系统重要的组成部分,目前,多数研究表明,植物在人工湿地污水净化中有显著的作用^[1~3]。全球发现的高等湿地植物多达 6700 余种,但应用于人工湿地的植物很少,很多植物还从未试用^[4]。研究和应用表明,不同的植物种,对不同的气候条件、不同污水的适应能力和净化效果,有较大的差别^[5]。因此,筛选优良的湿地植物,对提高人工湿地的污水净化效果,有重要的理论和实践意义。目前污水处理人工湿地的群落大多是单种植物群落,而少量对单种和多种植物人工湿地净化效果比较研究的结果并不一致,有的认为多种的净化效果好^[5~7],有的认为两者没显著差异^[8,9]。近几年对单种和多种植物群落人工湿地的比较研究发现单种群落和多种群落人工湿地的净化效果和所选的植物种、不同种的时空结构有很大关系^[10],物种的合理搭配和良好时空结构的构建是提高多种群落人工湿地净化能力的关键。目前从植物种不同的时空结构特点方面进行筛选和构建群落的研究还很少,而我国常用的人工湿地植物,如芦苇、风车草、美人蕉、香蒲等,都为喜光种类,适于配置在群落上层,由这样的种类组成多种群落,会导致强烈的竞争,难以形成稳定高效的多种植物湿地群落。从空间结构看,特别缺少具有耐荫能力的、用于群落中下层的植物种类。

水鬼蕉是一种有较好应用潜力的污水处理人工湿地植物^[11~13]。它株型秀美,少枯叶,花白色,和深绿色的叶相衬托,十分高雅,常作为园林绿化人工植物群落下层的地被植物^[14],在林下生长良好。因此推测,水鬼蕉可能具有一定的耐荫能力,特别是它的高度在 50~100 cm 左右,有可能是构建多种人工湿地植物群落良好的中下层植物。本研究的目的是探讨这一推测,研究光照强度对水鬼蕉生长和生理生态特性的影响,探讨水鬼蕉在人工湿地,特别是多种混合的人工湿地的应用潜力。

目前国内外鲜有水鬼蕉在人工湿地中的研究和应用,国外目前仅发现 Prapa 等用水鬼蕉等六种植物对海产养殖废水进行处理的报道^[15]。国内除对水鬼蕉在人工湿地中的生长和净化效果进行研究外^[11,12],未见水鬼蕉在污水处理人工湿地研究和应用的其他报道。

1 研究方法

1.1 实验设置

实验地点在广州华南师范大学校园内人工湿地研究基地。广州属南亚热带气候,年平均气温 22℃,最冷月 1 月和最热月 7 月平均气温分别为 13.3℃和 28.4℃,年平均降雨量 1694 mm。人工湿地研究基地面积约为 600 m²,华南师范大学一栋学生宿舍的生活污水经化粪池初步处理后,引入人工湿地的沉淀池,作研究的污水水源。污水主要污染物的平均浓度为(mg L⁻¹)BOD₅(30.90±14.13),COD(75.92±24.67),TN(34.05±25.94),NH₄-N(18.44±5.81),NO₃-N(2.27±0.94),TP(2.11±0.75),SP(1.94±0.60)。

采用 40 个黑色塑料桶(高 34.5 cm,桶口直径 36.5 cm,底部直径 30.0 cm)构建 40 个微型人工湿地,其中 20 个用粗 2 cm 左右的花岗岩碎石为生长基质,另 20 个用标本园中的土壤。土壤为砂壤土,粘粒(<0.002 mm)占 16.6%±3.1%,粉粒(0.002~0.05 mm)占 14.0%±2.0%,砂粒(0.05~2 mm)占 69.4%±3.1%。土壤有机质含量为 0.84%±0.00%,总氮为 0.048%±0.001%,总磷为 0.055%±0.002%。从华南师范大学园林绿化中心选大小、生长状况一致的水鬼蕉幼苗(高约 10 cm),每湿地种一株。放置在基地的空旷处,每个湿地的距离为 10 cm。实验设置 4 个光照强度和两种生长基质共 8 种处理,每一处理 5 个重复。4 个光强处理的日平均光照强度(用 LI-6400 光合测定仪于晴朗天气每季度测 3d,从 7:00 至 17:00 每隔 2 h 测一次,取平均值)分别为(μmol m⁻² s⁻¹)701(全光照,光强 I)、495(全光照的 71.4%,光强 II)、304(全光照的 44.7%,光强 III)、141(全光照的 20.2%,光强 IV)。把相同光照处理的湿地排放在一起,用竹木搭一个高 170 cm 的架,顶部和四周离地面 40cm 以上,用苗圃常用的遮荫用黑色塑料网遮光,不同光照强度通过调节不同黑网的层数获得。全光照处理则不用竹木架和黑网。植物生长一个月后,开始污水处理,每周灌污水 1 次,污水

负荷量为 $0.05 \text{ t d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。2006 年 3 月栽种,2007 年 1 月实验结束。

1.2 测定方法

1.2.1 植物生长和生物量

每周定期测定植株高度(以叶片自然生长的最大高度表示),每月定期测定分株数、叶片数、叶片长度和宽度。

实验结束时,测定植物的生物量。从基质的表面把植株剪开,分别称叶片、茎(包括叶片基部形成的假茎)等部分的鲜重。把根与土壤和碎石基质分开,洗净根系,用吸水纸吸干表面水分,每株植物的根按 $d \leq 1 \text{ mm}$ 、 $1 < d \leq 3 \text{ mm}$ 和 $d > 3 \text{ mm}$ 三个直径级分别测定鲜重。用精度 0.1 g 天平称取各器官新鲜材料 200 g 左右,在 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 48 h ,用精度 0.1 mg 电子天平称干重。据含水量计算植株各器官的干重。

1.2.2 生理生态指标测定

测定光合作用、叶绿素含量和根系活力。光合作用每季度测定一次,每次测 3 d ,从 $7:00$ 至 $19:00$ 每 2 h 用 LI-6400 便携式光合作用测定系统测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和光照强度(PAR)等指标,每处理选择 3 片叶作为测定对象,重复测定 3 次。

叶绿素含量用混合液提取法^[16],于 6 月、9 月和 12 月进行 3 次测定。在 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,取每植株新鲜叶片 1 cm^2 (约 0.05 g),用丙酮:乙醇 = $2:1$ 的混合液 10 ml 在 50 ml 的比色管中浸提 24 h ,浸提液在紫外分光光度计中测定。

根系活力采用 α -萘胺氧化法^[17]测定,每季度测定一次。每株挖出 $d \leq 1 \text{ mm}$ 、 $1 < d \leq 3 \text{ mm}$ 和 $d > 3 \text{ mm}$ 三个径级的新鲜根,用纯净水洗净,分别称 $1 \sim 2 \text{ g}$ 放于 100 ml 的三角烧瓶中,加 $50 \mu\text{g ml}^{-1}$ 的 α -萘胺溶液与磷酸缓冲液($\text{pH} = 7$)等量混合液 50 ml ,静置 10 min ,取 2 ml 溶液测定。

1.2.3 数据的处理和分析

采用 SPSS 统计软件计算各个指标的平均值和标准差,用 T -检验和方差分析法分析差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 光照强度对水鬼蕉生长的影响

2.1.1 株高生长

株高生长在 6 月前很慢,7 月和 8 月份增长最快,8 月份植株达到最高(图 1)。8 月份以后,叶片长得较为肥大,向两边摊开,高度有所降低。在土壤基质,光强 IV 和 III 的植株极显著($P < 0.01$)高于光强 II 和 I 的植株。在碎石基质,以光强 III 的植株最高,但不同光强之间的株高并无显著差异($P > 0.05$)。总体上说,适度遮荫有利于水鬼蕉的株高生长。碎石基质中水鬼蕉的平均株高高于土壤基质中水鬼蕉的株高,除在光强 IV 下两者的差异不显著外,在其他光强下,前者都显著大于后者($P < 0.01$)。

2.1.2 叶片生长

生长季末,土壤基质,光强 I 植株的叶片数显著($P < 0.05$)多于 II、III 和 IV 植株的叶片数;在碎石基质,光强 III 植株的叶片数较多,显著多于($P < 0.05$)光强 I 植株,但与 II、IV 植株的叶片数差异不显著,其他光强间的差异也不显著。一年中叶片数的增长 6 月前较慢,6 月以后增长较快。从两种基质的比较看,碎石基质的植株叶数增长较快,生长季末平均每株的叶数极显著($P < 0.01$)多于土壤基质植株(图 2)。

在光强 I、II、III、IV,土壤基质的水鬼蕉最大叶片长分别为 43.2 、 44.5 、 60.2 cm 和 62.0 cm ;碎石基质的水鬼蕉最大叶片长分别为 53.3 、 56.4 、 70.1 cm 和 79.2 cm 。两种基质的植株叶片长度均以较弱光照的长。相同光照下,碎石基质植株的平均叶长显著($P < 0.05$)大于土壤基质植株。

2.1.3 分株生长

在 4 个光照水平下,水鬼蕉的分株随光照强度的增强而增加,但在碎石基质中不同光照强度间的差异都不显著。生长季末,土壤基质全光照下植株的分株数显著高于光强 IV 和 III 植物的分株数($P < 0.05$),其它光照强度间的差异不显著(表 1)。4 个光照水平下碎石基质植株的分株数都显著($P < 0.05$)高于相应土壤基质

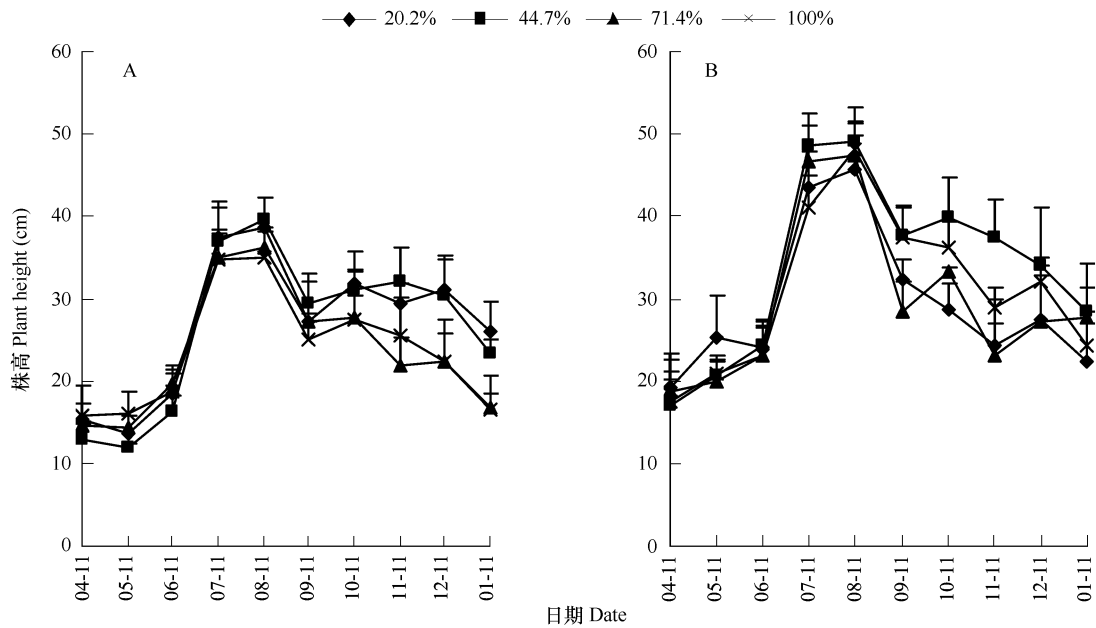


图1 不同光照强度下水鬼蕉的株高生长

Fig.1 Plant height of *H. littoralis* grown in different light intensities

A 土壤基质 in soil medium wetland; B 碎石基质 in gravel medium wetland

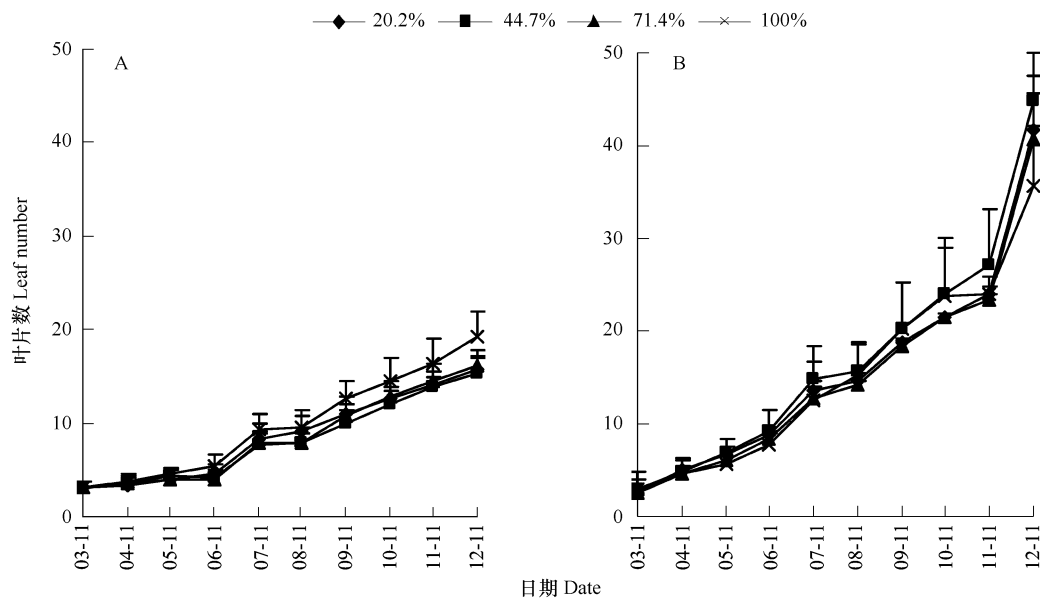


图2 不同光照强度下水鬼蕉植株的叶片增长

Fig.2 Leaf number of *H. littoralis* grown in different light intensities

A 土壤基质 in soil medium wetland; B 碎石基质 in gravel medium wetland

植株。分株的生长与分株的大小密切相关,小分株很快停止生长(土壤中表现尤为明显),大分株生长较快,生长季末与主株大小相当。在碎石基质,4个光照水平的植物都有一个较大的分株,与主株大小相近。土壤中植物的大分株很少。

2.1.4 生物量

不同光照强度下水鬼蕉平均每株生物量(g)较接近,除了碎石基质光强Ⅲ植株的生物量显著高于光强Ⅱ的植株外,不论土壤基质还是碎石基质,不同光强之间植株生物量无显著差异($P>0.05$)(图3A)。在4个光

照强度下,碎石基质植株的生物量都显著高于土壤基质植株的生物量($P < 0.01$)。

表1 不同光照水平水鬼蕉的分株数

Table 1 Tiller number of *H. littoralis* in different light intensities (Mean, $n = 5$)

基质类型 Medium type	光照强度 Light intensity (%)	分株数 (Mean, $n = 5$) Tiller number					
		8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January
土壤 Soil	20.2	0a	0a	0a	0a	0a	0a
	44.7	0a	0a	0a	0a	0a	0a
	71.4	0a	0.4a	0.4a	0.4 ab	0.8 ab	0.6 ab
	100	0.2a	0.4a	0.6a	1.0b	1.4b	1.4b
碎石 Gravel	20.2	2.0a	3.0a	3.0a	3.4a	3.8a	3.8a
	44.7	2.4a	3.4a	3.6a	3.8a	3.8a	3.8a
	71.4	2.4a	3.4a	3.8a	4.0a	4.2a	4.4a
	100	2.4a	3.2a	3.2a	3.2a	3.2a	3.2a

表中的差异显著性检验是分别对土壤和碎石基质中不同光照强度的分株数进行的,不同的上标字母表示两者具有显著差异($P < 0.05$)

Significant difference tests of tiller number are conducted between different light intensities in the same medium (soil or gravel), different letters denote a significant difference ($P < 0.05$)

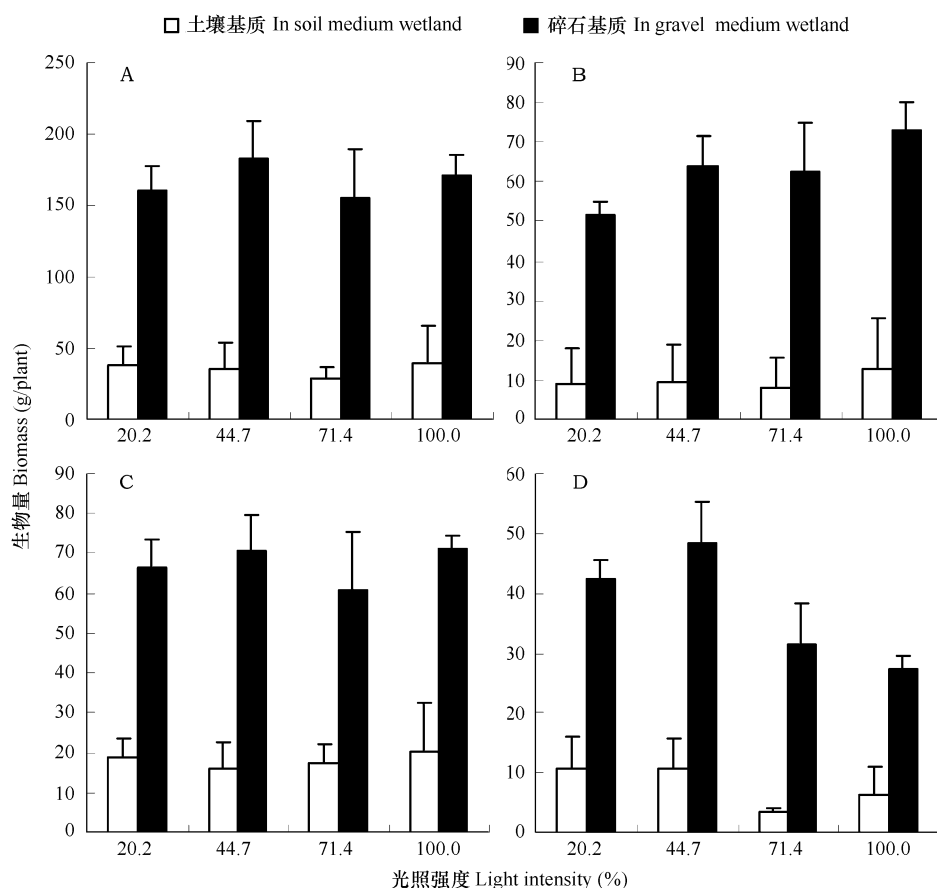


图3 不同光照强度下水鬼蕉植株的生物量

Fig. 3 Biomass of *H. littoralis* grown in different light intensities (Mean $\pm$ SD, $n = 5$)

A 总生物量 Total biomass; B 根生物量 Root biomass; C 茎生物量 Stem biomass; D 叶生物量 Leaf biomass

根生物量以较高光强植株较大(图3B)。在碎石基质,光强IV植株的根生物量(g)显著低于($P < 0.05$)其他光强植物的根生物量,其他光强之间,根生物量差异不显著。在土壤基质中,不同光照强度之间平均每植株根生物量差异不显著($P > 0.05$)。在4个光照强度下,碎石基质植株的根生物量均显著高于土壤基质植株

($P < 0.01$)。

在每一光照强度下,土壤和碎石基质植株的根生物量都以 $d \leq 1 \text{ mm}$ 的生物量最少, $1 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 的生物量居中,直径 $d > 3 \text{ mm}$ 的生物量最大(图4)。

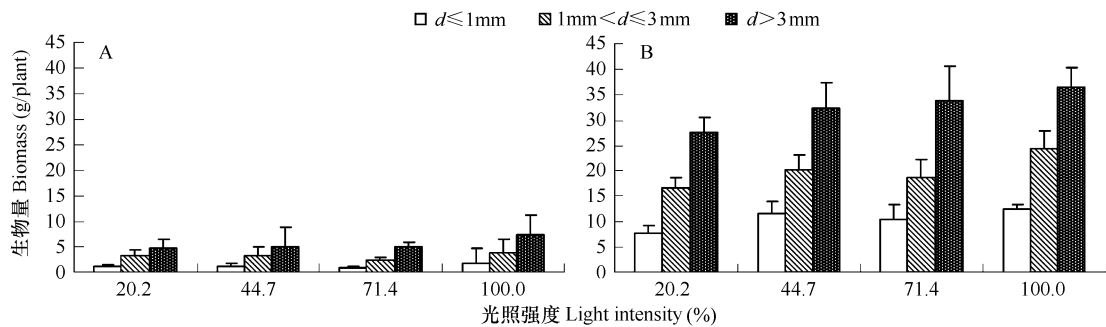


图4 不同光照强度下水鬼蕉不同径级的根生物量

Fig. 4 Root biomass of different sizes of *H. littoralis* grown in different light intensities (Mean $\pm$ SD, $n = 5$)

A 土壤基质 in soil medium wetland; B 碎石基质 in gravel medium wetland

土壤基质和碎石基质的茎生物量在不同光照强度间均无显著差异(图3C)。4个光照强度碎石基质的植株茎生物量都显著($P < 0.01$)高于土壤基质的植株。

叶生物量与根生物量相反,以较低光强下植物的叶生物量较高。在土壤基质中,叶的生物量以光强Ⅳ的植株最高,光强Ⅲ的略低,两者显著高于光强Ⅱ和光强Ⅰ植株的叶生物量($P < 0.05$),但Ⅳ和Ⅲ之间,Ⅱ和Ⅰ之间的差异不显著。碎石基质植物的叶生物量以光强Ⅲ植株最高,其次为光强Ⅳ的植株,两者显著($P < 0.05$)高于光强Ⅱ和Ⅰ的植株,但Ⅳ和Ⅲ之间,Ⅱ和Ⅰ之间差异不显著(图3D)。

4个光照水平碎石基质植株的叶生物量都显著($P < 0.01$)高于土壤基质植株的叶生物量。

2.2 光照强度对水鬼蕉生理生态指标的影响

2.2.1 光合作用

水鬼蕉植株的净光合速率的日变化为单峰型,13:00出现峰值。在两种生长基质均以较高光照强度下的净光合强度较高(图5),但不同光照强度之间无显著差异($P > 0.05$)。同样的光照强度下,碎石基质植株的光合速率大于土壤基质植株的光合速率,在光强Ⅲ,两者差异极显著($P < 0.01$);在光强Ⅰ,两者差异显著

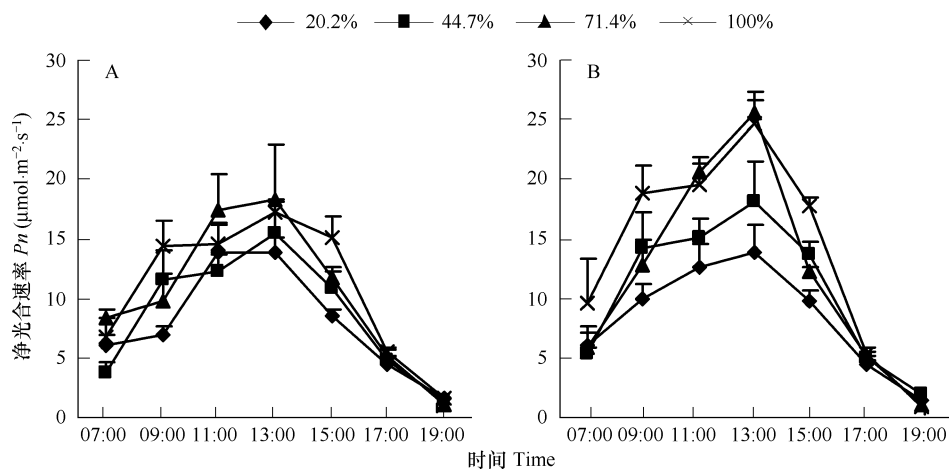


图5 水鬼蕉在不同光照强度下光合作用的日变化

Fig. 5 Daily variation of photosynthesis (P_n) of *H. littoralis* grown in different light intensities (Mean $\pm$ SD, $n = 5$)

A. 土壤基质 in soil medium wetland; B. 碎石基质 in gravel medium wetland

($P < 0.05$); 在光强Ⅳ和Ⅱ, 两者差异不显著。在不同光照强度与基质中, 水鬼蕉的光合作用的季节变化情况基本一致, 通常春夏较高, 秋冬较低, 但不同季节平均光合速率无显著差异($P > 0.05$) (图6)。

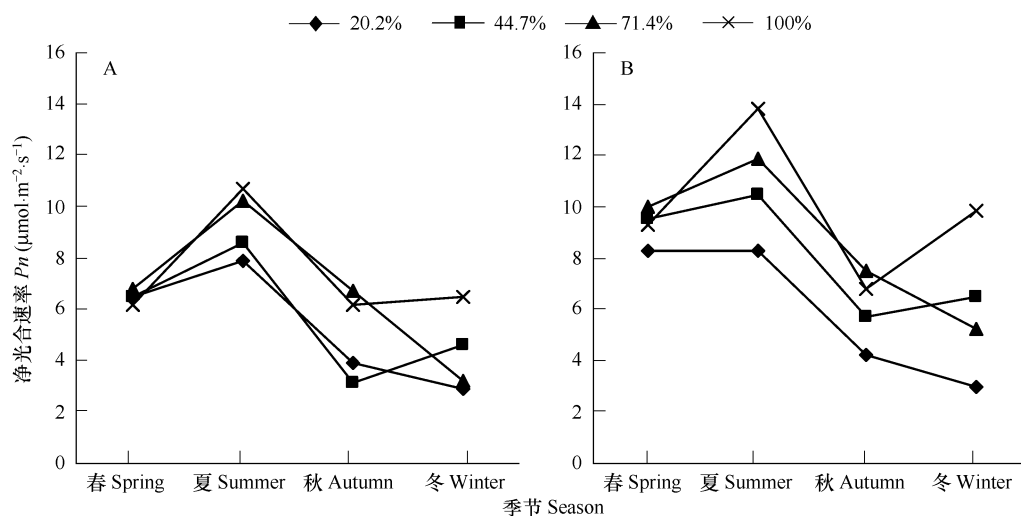


图6 水鬼蕉在不同光照强度下光合作用的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of photosynthesis (P_n) of *H. littoralis* grown in different light intensities

A. 土壤基质 in soil medium wetland; B. 碎石基质 in gravel medium wetland

2.2.2 叶绿素含量

在土壤基质, 光强Ⅲ植株叶绿素含量较高, 与光强Ⅱ和光强Ⅰ的差异极显著($P < 0.01$), 与光强Ⅳ的差异显著($P < 0.05$)。在碎石基质, 光强Ⅳ植物的叶绿素含量极显著高于光强Ⅰ($P < 0.01$), 显著高于光强Ⅱ的植株($P < 0.05$)。其他光照强度之间, 差异不显著。不同月份之间, 一般6月份的叶绿素含量略高, 12月份含量略低, 但不同月份间一般无显著差异(表2)。土壤基质植株叶绿素含量在光强Ⅰ显著高于碎石基质植株的含量($P < 0.01$), 而在光强Ⅱ则显著低于碎石基质中植株叶绿素含量($P < 0.05$), 光强Ⅲ、Ⅳ中, 土壤与碎石基质植株叶绿素含量无显著差异($P > 0.05$)。

2.2.3 根系活力

在土壤基质, 以较弱光照下植物的根系活力略高, 但不同光照强度植物间差异不显著($P > 0.05$)。在碎石基质以较弱光照下植物的根系活力较低, 光强Ⅳ植物的根系活力显著低于($P < 0.05$)其他3个光强植物的根系活力, 其他光强植物之间无显著差异。碎石基质的水鬼蕉根系活力极显著高于土壤基质的根系活力($P < 0.01$) (图7)。

3 讨论

光是重要的生态因子, 植物的生长情况与光照强度有密切的关系^[18]。对喜光植物来说, 荫蔽一般会影响其生长发育。如玉簪的生物量随着光照强度的减弱而减少^[19]; 在较弱的光照强度下, 烤烟的茎秆变细, 叶片

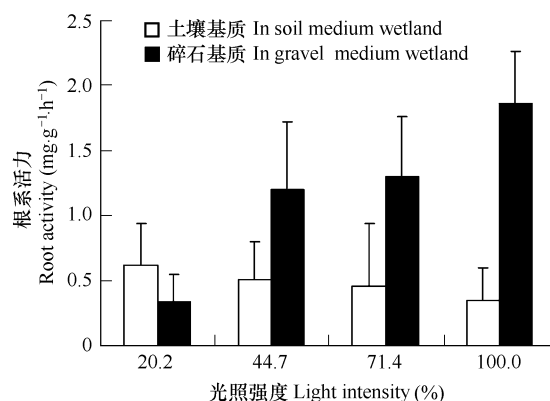


图7 不同光照强度下水鬼蕉的根系活力

Fig. 7 Root activity of *H. littoralis* grown in different light intensities

数减少, 叶片长宽比增大, 生物量减少^[20]。而对耐阴植物, 适度的荫蔽有利于其生长和发育。本实验研究表明, 在碎石基质中, 较弱光照强度下(光强Ⅲ、Ⅳ)水鬼蕉的株高、叶片数、叶片长、生物量、叶生物量、叶绿素含量等生长和生理生态指标都高于光强Ⅰ、Ⅱ, 并以光强Ⅲ的植株生长较好, 而分株数、茎生物量、净光合速率等

指标虽较全光照的植株小,但并无显著差异;在土壤基质中,较弱光照强度下植株的株高、叶片长、叶生物量、叶绿素含量、根系活力等指标也高于光强 I、II 植物的相应值,而总生物量、根生物量、茎生物量、净光合速率等指标与全光照无显著差异。可见,水鬼蕉具有一定的耐阴性,适度的荫蔽有利于水鬼蕉的生长。从研究结果看,在湿润的南亚热带地区,50% 左右的光照强度可能较适合碎石基质湿地水鬼蕉的生长。

表 2 不同光强水鬼蕉叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content of *H. littoralis* grown in different light intensities (Mean $\pm$ SD, $n = 3$)

	光照强度 (%) Light Intensity	叶绿素含量 (Mean $\pm$ SD, $n = 3$) Chlorophyll content (mg g^{-1} FW)		
		6 月 June	9 月 September	12 月 December
土壤 Soil	20.2	1.18 $\pm$ 0.09 ^{aA}	1.40 $\pm$ 0.42 ^{aA}	0.88 $\pm$ 0.06 ^{bB}
	44.7	1.65 $\pm$ 0.51 ^{aA}	1.43 $\pm$ 0.15 ^{aA}	1.44 $\pm$ 0.21 ^{aA}
	71.4	1.20 $\pm$ 0.53 ^{aA}	0.70 $\pm$ 0.07 ^{bA}	0.58 $\pm$ 0.05 ^{cB}
	100	1.06 $\pm$ 0.17 ^{aA}	1.08 $\pm$ 0.39 ^{abA}	0.67 $\pm$ 0.19 ^{bcB}
	平均 Average	1.27 $\pm$ 0.33	1.15 $\pm$ 0.26	0.89 $\pm$ 0.13
碎石 Gravel	20.2	1.57 $\pm$ 0.20 ^{aA}	1.56 $\pm$ 0.10 ^{aA}	0.86 $\pm$ 0.06 ^{abAB}
	44.7	1.03 $\pm$ 0.07 ^{bA}	1.08 $\pm$ 0.53 ^{abA}	1.22 $\pm$ 0.41 ^{aA}
	71.4	1.31 $\pm$ 0.14 ^{abA}	0.87 $\pm$ 0.14 ^{bA}	0.75 $\pm$ 0.01 ^{bAB}
	100	0.97 $\pm$ 0.35 ^{bA}	0.99 $\pm$ 0.28 ^{abA}	0.56 $\pm$ 0.06 ^{bB}
	平均 Average	1.22 $\pm$ 0.19	1.12 $\pm$ 0.26	0.85 $\pm$ 0.13

表中的差异显著性检验是分别对土壤和碎石基质中不同光照强度下叶绿素含量进行的,不同的小写字母表示两者具有显著差异 ($P < 0.05$),不同的大写字母表示两者具有极显著差异 ($P < 0.01$)。The significant difference tests of chlorophyll content are conducted between different light intensities in the same medium (soil or gravel), different small letters denote a significant difference ($P < 0.05$), and different capitals denote a very significant difference ($P < 0.01$)

水鬼蕉不同的器官的生长和生理生态特性对光照强度的反应不同。例如根系活力和植物的分株,两者有较明显的差异。在碎石基质,光强 IV 的根系活力显著低于其他光强的,这可能与低光强下植物的蒸腾作用较弱有关。但在土壤基质,低光强植物的根系活力并不低。两种基质植物对光强不同反应的原因仍不清楚。根生物量通常以较高光强的植物较高,而叶生物量以较低光强下植物的较高。较高光强下的水鬼蕉根生物量较高,可能是在较高光强下,植物的水分蒸腾较大,促进根系的发展。而在较低的光强下,植物有较大的叶片、较高的叶绿素浓度、较高的叶生物量,从而使水鬼蕉在较低的光强下仍有不低的光合作用,这显示了水鬼蕉对荫蔽条件的适应性。植物的生长状况和生理活动也受基质的影响。据研究,美人蕉在沸石基质中的生长状况、株高、生物量优于砾石基质^[21]。苦草在湖泥上生长情况较沙石好,其生物量、株高、根系活力、叶绿素含量都显著高于沙石^[22]。而本实验中,4 个光照水平下,碎石基质水鬼蕉的各种生长和生理生态指标都显著优于土壤基质的植株。在碎石基质湿地,水鬼蕉生长旺盛,根系发达,叶子宽而大,生物量较高,表明水鬼蕉对人工湿地碎石基质有良好的适应。而土壤基质湿地的水鬼蕉长势弱,根系欠发达,植株矮小,叶片小而少,生物量小。这一结果也可能受土壤基质板结的影响有关。本实验所用的土壤为普通沙壤土,土壤颗粒中,沙粒占 69%,耕作性能良好,在中试规模的表面流人工湿地不会出现板结。而较重的土壤颗粒在本实验较小的桶的表面上反复的污水灌溉可能反而易引起土壤板结。本研究水鬼蕉经过一个生长季的生长,总生物量为 182.79g,而在相近条件下生长的风车草、美人蕉、香根草等,生物量可达 1186.49、382.53、216.86g,表明水鬼蕉的生长速度较慢。水鬼蕉根较粗,以直径 3 mm 以上的根的生物量最大(图 4),陈章和等把它归为“根茎型”植物^[23],他们在近几年的研究中,发现碎石基质对“根茎型”植物根状茎的生长是不利的。例如,在中试规模的人工污水处理湿地,菖蒲的根状茎很少能分布在碎石基质中,一般都分布在碎石的表面上;芦苇在碎石基质人工湿地中的根生物量显著低于土壤基质;而水鬼蕉在两种基质的根生物量无显著差异。根茎型湿地植物具有较强的耐污能力,是人工污水处理湿地的主要应用植物,而目前应用的污水处理人工湿地大多数用碎石为基质,因此,根系能在碎石基质中良好生长的根茎型植物是很值得重视的。水鬼蕉高度通常在 50 ~ 100 cm 之间,适

度荫蔽有利于其生长,因此适合作为中下层植物,用于构建多种、多层次的人工湿地植物群落。水鬼蕉还被发现含有多种生物碱^[24],其中一种新的生物碱,能抑制人体免疫缺损病毒逆转录酶活性^[25]。水鬼蕉用于提取生物碱如能工业应用,将能进一步促进水鬼蕉在人工湿地中的应用。

References:

- [1] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries; a review. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4): 545—560.
- [2] Matheson F E, Nguyen M L, Cooper A B, *et al.* Fate of ¹⁵N-nitrate in unplanted, planted and harvested riparian wetland soil microcosms. *Ecological Engineering*, 2002, 19(4): 249—264.
- [3] Yang Q, Chen Z H, Zhao J G, *et al.* Contaminant removal of domestic wastewater by constructed wetlands; effects of plant species. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49 (4): 437—446.
- [4] Kadlec H R, Knight R L. *Treatment wetlands*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1996.
- [5] Bachand P A M, Horne A J. Denitrification in constructed free-water surface wetlands II. Effects of vegetation and temperature. *Ecological Engineering*, 2000, 14(1-2): 17—32.
- [6] Coleman J, Hench K, Garbutt K, *et al.* Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 128(3/4): 283—295.
- [7] Karathanasis A D, Potter C L, Coyne M S. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 2003, 20(2): 157—169.
- [8] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 185—192.
- [9] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1039—1047.
- [10] Zhao J G, Chen Z H. Effect of mono-species and poly-species constructed wetlands on wastewater purification and plant growth. *Chinese Journal of Applied and Environment Biology*, 2006, 12(2): 203—206.
- [11] Chen Z H, Chen F, Liu X C, *et al.* A new method for root biomass measurement in subsurface flow gravel-bed constructed wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 668—673.
- [12] Chen W Y, Chen Z H, He Q F, *et al.* Root growth of wetland plants with different root types. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 450—458.
- [13] Zhao J G, Liu L N, Chen Z H. Study on removal rate of pollutants and plant growth in subsurface and surface flow constructed wetlands. *Ecological Science*, 2006, 25(1): 74—77.
- [14] Wu L, Gao Y H, Yang Q, *et al.* The ground cover plants in ecological gardens and its compound. *Modern Landscape Architecture*, 2007, (6): 13—17.
- [15] Prapa S, Andrew J, Suntud S. Seafood wastewater treatment in constructed wetland; tropical case. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5): 1218—1224.
- [16] Yang Z D. Studies on the determination of chlorophyll content by spectrophotometric method. *Journal of Guangxi Agricultural University*, 1996, 15(2): 145—150.
- [17] Zhang Z L. *Experimental guidance of plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 1990. 59—64.
- [18] Poorter L. Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species. *Functional Ecology*, 2001, 15(1): 113—123.
- [19] Shi A P, Zhang J Z, Zhang Q X, *et al.* Growth characteristic analyse of shading levels on four *Hosta Cultivars*. *Bulletin of Botanical Research*, 2004, 24(4): 486—490.
- [20] Qiao X R, Guo Q Y, Liu G S, *et al.* Effects of light intensity on growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(3): 76—79.
- [21] Huang D, Li T. Effect of the substrate on purification of eutrophic scenic water in integrated vertical-flow constructed wetlands. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(8): 616—621.
- [22] Chen K N, Chen X F, Chen W M, *et al.* Effects of sediments on submerged macrophytes growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1511—1516.

- [23] Chen Z H, Chen F, Cheng X Y, *et al.* Researches on macrophyte roots in the constructed wetlands (A review). *Current Topics in Plant Biology*, 2004, (5): 131—142.
- [24] Idso S B, Kimball B A, Pettit III G R, *et al.* Effects of atmospheric CO₂ enrichment on the growth and development of *Hymenocallis littoralis* (Amaryllidaceae) and the concentrations of several antineoplastic and antiviral constituents of its bulbs. *American Journal of Botany*, 2000, 87 (6): 769—773.
- [25] Lin L Z, Hu S F, Chai H B, *et al.* Lycorine alkaloids from *Hymenocallis littoralis*. *Phytochemistry*, 1995, 40(4): 1295—1298.

参考文献:

- [10] 赵建刚, 陈章和. 单种和多种群落湿地对污水的净化效果和植物生长生物量研究. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(2): 203~206.
- [11] 陈章和, 陈芳, 刘谓承. 测定潜流人工湿地根系生物量的新方法. *生态学报*, 2007, 27(2): 668~673.
- [12] 陈文音, 陈章和, 何其凡, 等. 两种不同根系类型湿地植物的根系生长. *生态学报*, 2007, 27(2): 450~458.
- [13] 赵建刚, 刘丽娜, 陈章和. 潜流湿地和表面流湿地的净化效果与植物生长比较. *生态科学*, 2006, 25(1): 74~77.
- [14] 吴玲, 高亚红, 杨倩, 等. 生态园林中的地被植物及其配置. *农业科技与信息(现代园林)*, 2007, (6): 13~17.
- [16] 杨振德. 分光光度法测定叶绿素含量的探讨. *广西农业大学学报*, 1996, 15(2): 145~150.
- [17] 张志良. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 1999. 59~64.
- [19] 施爱萍, 张金政, 张启翔, 等. 不同遮荫水平下4个玉簪品种的生长性状分析. *植物研究*, 2004, 24(4): 486~490.
- [20] 乔新荣, 郭桥燕, 刘国顺, 等. 光强对烤烟生长发育及光合特性的影响. *华北农学报*, 2007, 22(3): 76~79.
- [21] 黄德锋, 李田. 不同基质复合垂直流人工湿地对富营养化景观水的净化效果. *环境污染与防治*, 2007, 29(8): 616~621.
- [22] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟, 等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1511~1516.