

旱柳无性系在富营养化水体中的生长 及去除氮磷能力

施翔, 陈益泰, 王树凤, 王小雪, 李霞, 潘红伟, 孙海菁*

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】比较旱柳无性系的生长以及对水体中氮、磷去除效果,以筛选出处理富营养化水体效果较好的无性系。【方法】利用8个旱柳无性系在富营养化水体中进行静态培养试验,研究各无性系的形态特征、叶绿素相对含量指数、对营养元素的吸收以及对废水中氮、磷的去除效率。【结果】旱柳无性系在整个试验期间生长良好,无死亡现象。各无性系最终生物量、苗高和相对生长率有显著差异,其中,早59和早97整体表现最好。旱柳无性系对富营养化水体中氮、磷吸收较好,地上部分营养元素浓度较高。旱柳各无性系对总氮、氨氮和硝态氮的去除效率分别为87.17%~96.94%、90.35%~99.33%和66.66%~88.19%,对总磷的去除效率为76.59%~83.15%,无性系早13总的去除效率最高。【结论】参试8个旱柳无性系均能在富营养化水体中正常生长,但各无性系在富营养化水体中的生长响应有较大差异。综合多个指标并结合长期野外试验观察,早13、早59、早97是适合修复富营养化水体的较好材料。

关键词:旱柳;无性系;生长;富营养化;植物修复

中图分类号:S792.12

文献标识码:A

Growth and Nutrition Removal of *Salix matsudana* Clone Seedlings in Eutrophic Water

SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, WANG Xiao-xue, LI Xia, PAN Hong-wei, SUN Hai-jing

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of
Tree Breeding of Zhejiang Provincial, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: Objective The aim of the study was to screen out the proper clones for eutrophication treatment. **Method** A riparian plant-based wastewater treatment was carried out to investigate the plant growth, nutrient uptake, and nutrient removal efficiency of eight *Salix matsudana* clones in eutrophic water. **Result** *S. matsudana* grew good during the experiment, and had no phenomenon of death. At the end of experiment, the height, biomass and relative growth rate were significantly different among the clones of *S. matsudana*. Clone 59 and 97 were performed best among the clones. The results indicated that *S. matsudana* could accumulate high concentration of N and P in above-ground tissues under conditions of abundant supply. The concentration of nitrogen and phosphorus in the treated eutrophic water decreased during the experiment. The total nitrogen, ammonia and nitrate nitrogen removal rates were from 87.17% to 96.94%, 90.35% to 99.33% and 66.66% to 88.19%, respectively. The removal rate of phosphorus was from 76.59% to 83.15%. The nutrition removal rates of *S. matsudana* clone 13 were higher than that of other clones. **Conclusion** The approach of clone characterisation used here rapidly generated a

收稿日期:2014-10-08

基金项目:浙江省科技厅公益技术应用研究计划项目(2011C22003);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(RISF6917);浙江省自然科学基金项目(Y3110411)

作者简介:施翔(1981—),男,湖南长沙人,助理研究员,博士研究生,主要从事植物修复研究。

* 通讯作者:孙海菁,副研究员,博士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:sunhaijing@163.com

high quantity of growth-physiological information on clone performance and characteristics under eutrophication conditions. According to the results, *S. matsudana* clone 13, 59, and 97 which performed good under the eutrophication condition, had great potential application for water purification in remediation of eutrophic water bodies.

Key words: *Salix matsudana*; clone; growth; eutrophication; phytoremediation

随着农业和工业的发展,大量营养元素被释放到环境中。过量营养元素,特别是氮和磷,加速地表水体富营养化进程,这已成为全世界最关注的水环境问题。因此,来自工业、农业以及市政的废水在进入自然水体之前必须经过处理,以减少富营养化带来的负面影响。目前,国内外利用不同方法对控制水体富营养化问题作了较多研究^[1],其中,植物修复技术对富营养化水体治理起到重要作用。生长快速并有较高去除养分能力的水生植物是目前研究的重点^[2-3]。然而,水生植物对氮、磷的去除能力受到季节的显著影响。与夏季相比,冬季植物对氮、磷的去除率较低^[2]。

与水生植物相比,柳树(*Salix* spp.)由于其具备高蒸发量、高生物量以及对营养元素的有效吸收,同时又有较好的耐涝性,因此,常被作为富营养化水体植物修复的材料^[4]。过去20多年中,研究人员在人工湿地污水处理系统中主要利用短周期的柳树进行污水处理^[5-9]。瑞典在污染修复中利用短周期柳树过滤带对生活污水进行处理,同时也可产生生物质能源^[10]。在北京昌平地区运行一种由垂柳(*S. babylonica* L.)构建的人工湿地系统用于污水处理,整个系统能去除88.4%的氨氮和87.8%的总磷^[11]。柳树在植物修复中的快速发展应用将使柳树由单一的生物量生产向多用途应用转变^[5]。目前的研究主要集中在以柳树为主的人工湿地处理系统的构建以及去除效率的评价^[11-13],较少研究柳树无性系材料在富营养化水体环境下的应用潜力^[5]。传统的田间无性系测试时间较长并且费用昂贵,而短周期无性系测试方法所获得的信息在选择有潜力的植物材料方面要优于大规模的无性系田间测试^[14]。旱柳(*S. matsudana* Koidz)是我国常见的柳属(*Salix* L.)植物,因其极易扦插繁殖,根系发达,生长迅速并且能够固定土壤,是一种具有潜力的修复树种。目前,国内对旱柳去除富营养化污水中氮、磷效果的研究还较少。因此,本研究以8个旱柳无性系为材料,采用短周期的无性系测试方法,对其在富营养化污水中的生长以及净化效率进行分析和评价,旨在筛选出适合修复净化富营养化水体的优良无性系。

1 材料与方法

1.1 植物材料

本试验8个旱柳无性系编号分别为:旱10、旱13、旱16、旱34、旱39、旱59、旱70和旱97。试验所用插条均采集自课题组采穗圃扦插苗。试验在中国林业科学研究院亚热带林业研究所试验大棚进行。将旱柳插条(长约8 cm)扦插于45 cm × 35 cm × 15 cm(长×宽×高)的容器内的泡沫板上,往容器中注入改良的Hoagland营养液^[15]进行培养,连续充气,自然光照,温度为30~38℃,相对湿度60%~80%。在培养过程中通过加入HCl或NaOH溶液调节pH,使pH值维持在5~6。6周后,选择生长相似的各旱柳无性系进行试验。由于各无性系本身生长差异,选择时尽量避免无性系之间有较大差异。各无性系初始苗高为50~68 cm,初始生物量(鲜质量)8.3~12.5 g·株⁻¹。

1.2 废水成分

试验所用废水采自杭州富阳某养牛场。根据预试验,将废水进行一定稀释。废水主要营养成分为总氮(Total nitrogen, TN)39.3 mg·L⁻¹、总磷(Total phosphorus, TP)1.25 mg·L⁻¹、氨氮(Ammonia, NH₄-N)28.3 mg·L⁻¹、硝态氮(Nitrate nitrogen, NO₃-N)6.4 mg·L⁻¹。化学需氧量(COD_{Cr})为60 mg·L⁻¹。pH值和氧化还原电位值(Eh)分别为8.07和129 mV。

1.3 试验方法

试验按照随机区组设计,每个无性系处理设3个重复,每重复含9株扦插苗,同时设置不加植物的空白对照。整个试验期间,每7 d向水培容器中加入少量与初始废水性质基本相似的废水,保证每个水培容器中12 L处理水,同时适当充气以保证供氧。处理时间为2010年6月21日至8月23日,共63 d。试验前选择与各参试无性系扦插苗生长基本一致的6株样株测定初始生物量。试验期间,每周定株测量苗高1次,每2周定叶测量叶绿素1次,水样在7、14、21、28、35、49和63 d各收集1次。试验结束后,收获所有植物,测定生物量、根系形态和植

物组织中的营养元素。

1.4 样品分析

植物收获后,将其分为叶片、茎枝和根系3部分。根系用去离子水洗净,并用 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 浸泡。植物样品经 105°C 杀青 30 min , 75°C 烘干 3 d 后称其生物量。参照冷华妮等^[16]方法测定全P含量,凯氏定氮仪测定全N含量。

废水pH和Eh用PHS-3C酸度计(上海精密科学仪器有限公司)测定,TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等指标用DR2800多参数水质分析仪(美国HACH公司)测定。

叶片叶绿素相对含量指数(Chlorophyll content index, CCI)用CCM200型手持叶绿素仪测定(美国CID公司),随机选取植株上部叶片15片,测定其叶绿素相对含量指数,取平均值。

植物根系去离子水洗净后,用双光源扫描仪扫描。根系形态参数(根长、根表面积、根体积、根平均直径以及不同径级的根系长度)通过图片用根系分析软件WinRHIZO Pro 2005b分析(加拿大Regent公司)。

1.5 数据分析

为了避免植物材料本身对结果的影响,本文选用相对生长速率(Relative growth rate, RGR)来比较旱柳各无性系生长。

$$RGR = \frac{(\ln A_f - \ln A_i)}{t_f - t_i} \quad [17]$$

式中: A_f 表示植物最后收获时株高或生物量3个重复的算术平均值, A_i 表示植物初始株高或生物量3个重复的算术平均值; $t_f - t_i$ 表示2次测定时间的间隔(d)。

$$\text{营养元素去除效率} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$$

式中: C_i 为废水中初始营养元素浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), C_f 为试验结束时废水中营养元素浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

所有试验数据采用Excel 2003软件和DPS 7.05数据处理系统进行方差分析和LSD法差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 旱柳无性系的生长表现

旱柳能在高浓度废水中正常生长,在整个试验期间没有发现旱柳有生长受抑制或死亡现象。8个

旱柳无性系苗高生长见图1。污水处理下,各无性系苗高生长具有显著差异($p < 0.05$),试验结束时,以无性系早70苗高最高。污水培养期间,无性系平均每周生长 $4.02 \sim 6.02\text{ cm}$ 。株高相对生长率(RGR_h)与初始干质量(Pearson $r = -0.486$, $p < 0.05$, $n = 24$)和苗高(Pearson $r = -0.419$, $p < 0.05$, $n = 24$)呈负相关,且各无性系间存在显著差异($p < 0.05$),其中,无性系早34的 RGR_h 最高。尽管无性系早70苗高最高,但其株高相对生长率最低。

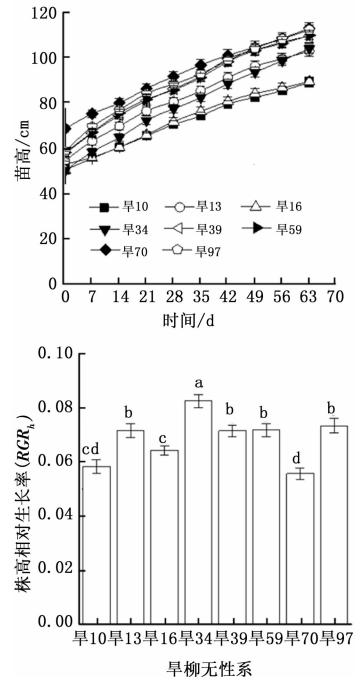


图1 8个旱柳无性系高生长和相对生长率
(图中相同字母表示差异显著($p < 0.05$),下同)

收获时旱柳无性系生物量(干质量)见表1。旱柳幼苗各部分生物量受污水影响在各无性系中有显著差异。最终生物量与植物初始苗高呈显著正相关(Pearson $r = 0.753$, $p < 0.001$, $n = 24$),同时最终生物量与初始生物量呈负相关,但不显著(Pearson $r = -0.011$, $p = 0.961$, $n = 24$)。茎枝和根系生物量也有相似关系(表1)。各无性系中,早59、早70、早97的整株生物量较大(表1)。旱柳干质量增长率普遍较高,其中,早13和早59最高,达到 402.3% ,而早16和早10较低,分别为 228.6% 和 231.4% 。旱柳无性系整株生物量相对生长率(RGR_m)值有显著差异($p < 0.05$),其中,早13和早59的 RGR_m 值最高,为 0.18 (图2)。茎、叶片生物量相对生长率 RGR_s 、 RGR_l 值有显著差异($p < 0.05$),其中,早97的 RGR_l 值最高,早34的 RGR_s 值最高。根系生物量的相对

生长率 RGR 值差异不显著 ($p > 0.05$)。早柳各无性系根冠比和含水率差异显著 ($p < 0.05$)。在废水

中早柳各无性系根冠比为 0.37 ~ 0.61, 而含水率为 0.694 ~ 0.729 (表 1)。

表 1 8 个早柳无性系平均生物量(干质量)

无性系	整株生物量/ (g·株 ⁻¹)	叶片生物量/ (g·株 ⁻¹)	茎生物量/ (g·株 ⁻¹)	根系生物量/ (g·株 ⁻¹)	插条生物量/ (g·株 ⁻¹)	含水率	根冠比
早 10	7.39 ± 1.48 b	1.69 ± 0.38 b	2.92 ± 0.75 d	0.77 ± 0.22 ab	2.00 ± 0.41 b	0.714 ± 0.018 b	0.61 ± 0.10 a
早 13	7.18 ± 1.41 b	1.43 ± 0.30 c	3.14 ± 0.74 cd	0.81 ± 0.23 a	1.78 ± 0.46 bc	0.705 ± 0.022 bcd	0.57 ± 0.09 a
早 16	6.77 ± 1.59 b	1.39 ± 0.38 c	2.90 ± 0.82 d	0.78 ± 0.31 a	1.69 ± 0.50 cd	0.716 ± 0.019 b	0.59 ± 0.14 a
早 34	7.52 ± 2.10 b	2.01 ± 0.59 a	3.48 ± 1.08 bc	0.56 ± 0.22 c	1.46 ± 0.37 d	0.700 ± 0.015 cd	0.37 ± 0.06 c
早 39	7.04 ± 1.64 b	1.39 ± 0.38 c	3.59 ± 0.96 bc	0.64 ± 0.19 bc	1.42 ± 0.34 d	0.729 ± 0.024 a	0.43 ± 0.09 c
早 59	8.69 ± 2.46 a	1.98 ± 0.58 a	4.15 ± 1.33 a	0.90 ± 0.41 a	1.65 ± 0.41 cd	0.712 ± 0.029 bc	0.43 ± 0.11 c
早 70	9.19 ± 2.19 a	1.39 ± 0.33 c	4.43 ± 1.38 a	0.86 ± 0.26 a	2.50 ± 0.78 a	0.707 ± 0.021 bc	0.61 ± 0.19 a
早 97	8.58 ± 1.61 a	1.71 ± 0.50 b	4.02 ± 0.80 ab	0.84 ± 0.19 a	2.00 ± 0.56 b	0.694 ± 0.026 d	0.50 ± 0.11 b

注:数据以平均值 ± 标准差(mean ± SD)表示,各列数据后相同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上无显著差异。表 2、3 皆同。

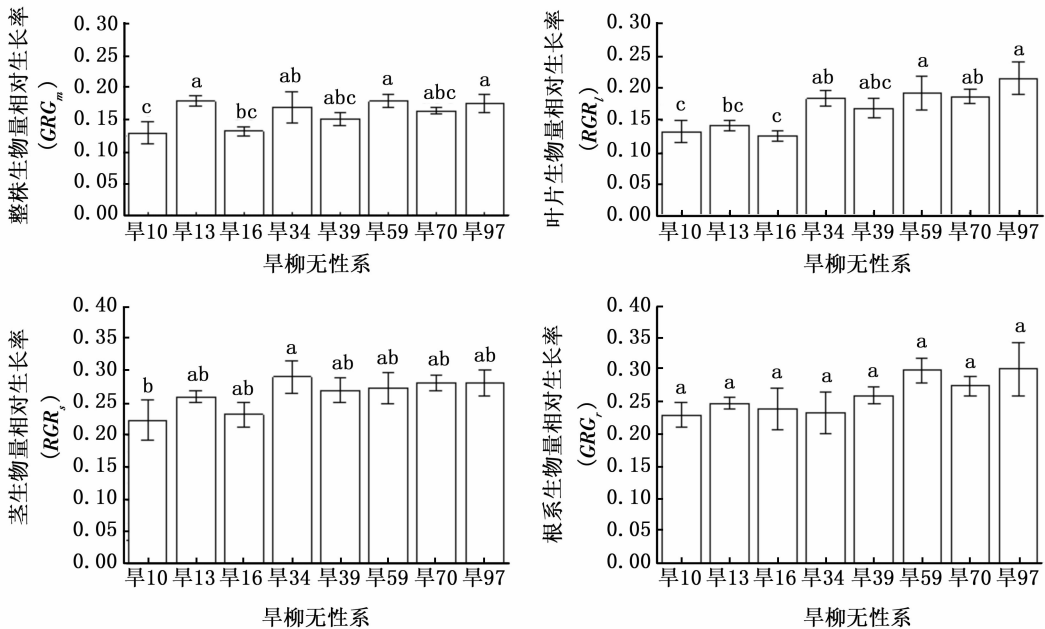


图 2 8 个早柳无性系生物量相对生长率

2.2 早柳无性系的根系特征

早柳各无性系根长、根表面积、根体积、根平均直径以及根尖数等根系形态参数表 2 表明:各早柳无性系根系在废水中的发育差异显著,与生物量表现一致,其中,无性系早 59 的根系各形态参数最高,与其根系生物量表现一致。为进一步评价根系对废水的适应性,对早柳各无性系不同径级的根系长度进行分析(表 3),所有无性系根系长度主要集中在 < 0.5 mm 径级,而其它径级根系长度所占比例较小。参试无性系在较大径级(1.0 ~ 2.0 mm 和 > 2.0 mm),特别是在 > 2.0 mm 径级中根系长度较短。

2.3 早柳无性系叶片叶绿素相对含量指数

早柳各无性系在试验期间叶片叶绿素相对含量

指数 (CCI) 的变化趋势(图 3)表明:早柳各无性系 CCI 值随时间的推移而增高且与植物生长表现一致。方差分析表明: CCI 值在各无性系中和不同时间有显著差异($p < 0.05$)。图中个别无性系 CCI 值有突然增高或降低的现象,这可能是随机选取叶片时造成的误差,也可能是试验后期废水中营养物质减少所致。

2.4 植株组织中营养元素的积累

图 4 表明:早柳无性系不同器官中氮和磷浓度存在显著差异,且叶片中营养物质浓度显著高于其它器官($p < 0.05$)。叶片中氮浓度与植物高生长 (Pearson $r = -0.490$, $p < 0.05$, $n = 24$) 和叶片生物量 (Pearson $r = -0.488$, $p < 0.05$, $n = 24$) 显著负相关;

表2 8个早柳无性系根系形态参数

无性系	根长/cm		根表面积/cm ²		根体积/cm ³		根平均直径/mm		根尖数	
	初始	最终	初始	最终	初始	最终	初始	最终	初始	最终
早10	1 042 ± 283 a	4 029 ± 809 d	90.2 ± 31.4 a	455 ± 79 cde	0.62 ± 0.27 a	4.13 ± 0.71 cde	0.32 ± 0.15 a	1.08 ± 0.29 c	3 714 ± 1159 a	13 401 ± 2 911 cd
早13	920 ± 359 ab	3 553 ± 711 d	76.1 ± 31.9 a	403 ± 91 e	0.50 ± 0.23 a	3.66 ± 0.94 de	0.29 ± 0.09 a	1.08 ± 0.20 c	3 778 ± 1 063 a	11 880 ± 2 028 d
早16	994 ± 334 ab	4 877 ± 1 011 bc	82.8 ± 34.9 a	529 ± 96 c	0.55 ± 0.27 a	4.60 ± 0.78 bc	0.35 ± 0.16 a	1.46 ± 0.20 b	3 714 ± 1 159 a	16 853 ± 3 171 bc
早34	778 ± 322 ab	4 325 ± 933 cd	69.0 ± 36.7 a	434 ± 95 de	0.49 ± 0.32 a	3.51 ± 0.81 e	0.27 ± 0.03 a	1.13 ± 0.22 c	2 849 ± 525 a	16 291 ± 2 995 bc
早39	699 ± 153 b	4 127 ± 1 091 cd	66.3 ± 18.9 a	482 ± 121 cde	0.50 ± 0.18 a	4.53 ± 1.15 bcd	0.29 ± 0.02 a	1.65 ± 0.37 ab	2 661 ± 258 a	15 832 ± 4 139 bc
早59	747 ± 183 ab	7 529 ± 1 122 a	62.4 ± 20.1 a	809 ± 107 a	0.42 ± 0.16 a	6.98 ± 0.91 a	0.30 ± 0.12 a	1.66 ± 0.29 ab	3 785 ± 1 169 a	29 109 ± 4 979 a
早70	842 ± 142 ab	5 308 ± 538 b	67.8 ± 16.3 a	674 ± 84 b	0.43 ± 0.14 a	6.96 ± 1.34 a	0.25 ± 0.02 a	1.78 ± 0.26 a	3 303 ± 768 a	17 656 ± 2 449 b
早97	689 ± 329 b	4 093 ± 438 cd	57.1 ± 29.4 a	507 ± 56 cd	0.38 ± 0.21 a	5.07 ± 0.76 b	0.26 ± 0.03 a	1.58 ± 0.24 ab	3 434 ± 1 510 a	15 070 ± 1 723 bc

表3 8个早柳无性系不同径级根系长度

无性系	<0.5 mm		0.5 ~ 1.0 mm		1.0 ~ 2.0 mm		>2.0 mm	
	初始	最终	初始	最终	初始	最终	初始	最终
早10	893 ± 228 a	3 247 ± 722 cd	130.1 ± 52.4 a	551 ± 90 cd	15.96 ± 5.27 a	207 ± 45 d	0.128 ± 0.094 ab	12.41 ± 6.28 cd
早13	791 ± 315 ab	2 859 ± 546 de	113.6 ± 47.1 a	507 ± 131 d	11.74 ± 3.71 a	168 ± 47 de	0.191 ± 0.095 ab	7.92 ± 4.82 d
早16	858 ± 270 a	3 966 ± 870 b	122.6 ± 53.9 a	674 ± 163 b	10.56 ± 4.92 a	211 ± 34 d	0.056 ± 0.039 ab	11.53 ± 7.57 cd
早34	662 ± 259 ab	3 634 ± 826 bc	97.8 ± 50.5 a	535 ± 85 cd	16.36 ± 5.78 a	133 ± 38 e	0.055 ± 0.028 ab	8.10 ± 4.54 d
早39	575 ± 121 b	3 242 ± 890 cd	105.6 ± 28.9 a	602 ± 161 bcd	16.06 ± 4.03 a	264 ± 71 c	0.237 ± 0.139 a	8.15 ± 3.73 d
早59	641 ± 148 ab	6 245 ± 1 005 a	87.9 ± 30.8 a	887 ± 98 a	14.24 ± 4.31 a	346 ± 56 a	0.172 ± 0.079 ab	28.10 ± 10.29 b
早70	736 ± 108 ab	4 100 ± 453 b	93.5 ± 37.5 a	832 ± 110 a	9.68 ± 1.94 a	317 ± 61 ab	0.005 ± 0.005 b	43.56 ± 19.88 a
早97	583 ± 279 b	3 139 ± 387 cd	94.79 ± 45.3 a	634 ± 112 bc	8.76 ± 4.09 a	291 ± 52 bc	0.055 ± 0.055 ab	17.53 ± 10.71 c

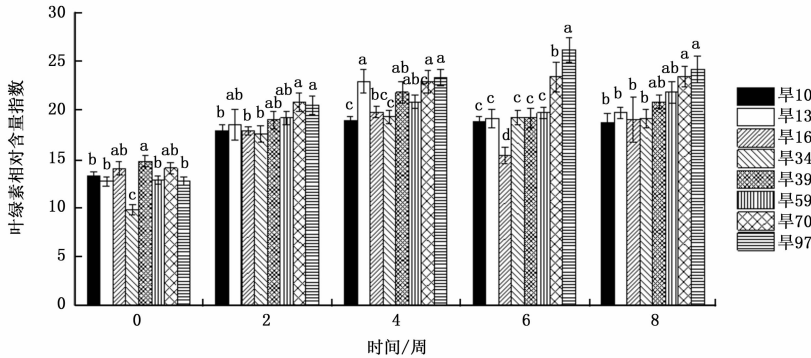


图3 8个早柳无性系叶片叶绿素相对含量指数(数据以平均值 ± 标准误(mean ± SE)表示, n = 15)

但叶片中磷浓度和叶片生物量呈正相关(Pearson $r = 0.495$, $p < 0.05$, $n = 24$),而叶片中磷浓度与植物高生长呈负相关,但不显著。方差分析表明:早柳无性系不同器官中营养元素浓度存在显著差异($p < 0.05$)。植物不同器官中营养元素含量与植物生物量和体内营养元素浓度有关。本试验中,早柳无性系植株中氮和磷平均含量分别为 108.8 、 $9.06 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,其中,无性系早70氮和磷积累量最高,分别为 129.5 、 $11.72 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

2.5 早柳无性系的氮磷去除效率

总氮是由氨氮、硝态氮以及有机氮等不同形态的氮组成。与空白对照相比,废水中总氮浓度在试验后期下降显著($p < 0.05$,图5)。试验结束后,早

柳各无性系处理组能去除 $87.17\% \sim 96.94\%$ 的总氮,显著高于空白对照 27% 的去除效率。无性系早13的去除效率最高,为 96.94% 。

试验初期,废水中氨氮浓度较高,氨氮的去除与总氮的趋势相似。试验结束时,早柳各无性系氨氮去除效率比总氮去除效率高(图5), $90.35\% \sim 99.33\%$ 的氨氮被早柳各无性系去除;同时在空白对照中, 36.69% 氨氮被去除。与总氮去除效率相似,无性系早13表现最好。

与废水中总氮和氨氮浓度随时间一直下降相反,硝态氮浓度在空白对照中有增高的趋势,同时早柳各无性系处理中硝态氮浓度有升高再降低的趋势。在对照中,硝态氮浓度由 $9.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到

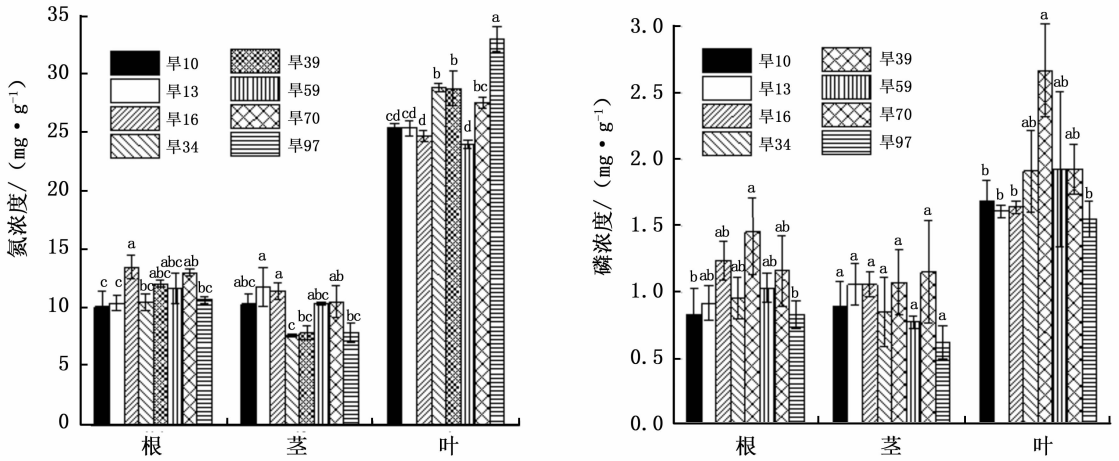


图4 8个早柳无性系不同器官中氮和磷含量(干质量)(数据以平均值±标准误(mean±SE)表示,n=3。图5、6皆同)

16.56 mg·L⁻¹,而无性系处理中,硝态氮浓度在处理2周后开始显著下降,最终66.66%~88.19%的硝态氮被去除。硝态氮去除效率与氨氮去除效率呈显著正相关(Pearson $r = 0.730, p < 0.001, n = 24$)。

总磷的变化趋势与总氮的变化基本一致,但是早柳各无性系对总磷的去除效率显著低于对总氮的去除效率(图6)。试验结束时,早柳各无性系对总磷的去除效率为76.59%~83.15%,无性系早97的去除效率最高。

2.6 植物材料的综合选择

根据早柳无性系在富营养化水体中的生长情况,对氮、磷的利用效率以及水质改善效率,早柳无性系早10和早16可归为一类,其余无性系归为另一类,这与野外试验表现一致,其中,无性系早10和早16在试验过程中整体表现相对不佳,而无性系早13、早59和早97整体表现较佳。结合长期野外试验观察结果,早13、早59和早97这3个无性系是适

合修复富营养化水体的较好材料。

3 结论与讨论

本研究通过阐明早柳无性系在污水环境中的短周期特征表现,预筛选出较适宜修复富营养化水体的无性系,这种短周期的无性系特征表现能在一定程度上反映无性系在野外的长期表现,且本研究试验结果与课题组在浙江和安徽的野外试验结果相似。

3.1 早柳无性系生长

试验中早柳8个无性系在富营养化水体中生长良好,表明在没有有毒离子存在下,早柳无性系可作为富营养化水体修复材料;然而,与其它水生植物相比,其在富营养化水体中的生长速率相对较低^[18]。本研究中,各无性系各方面特征差异显著,这种差异可能与无性系对气候的适应和试验光照条件有关;

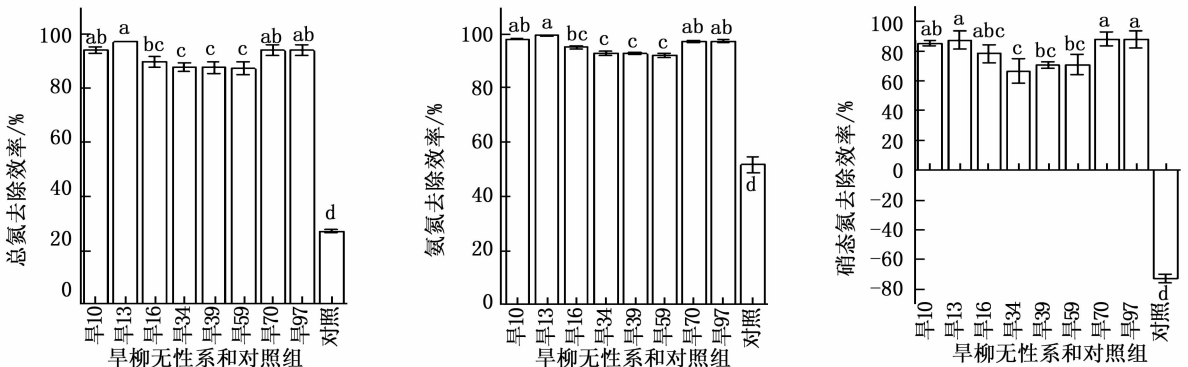


图5 8个早柳无性系处理组氮去除效率

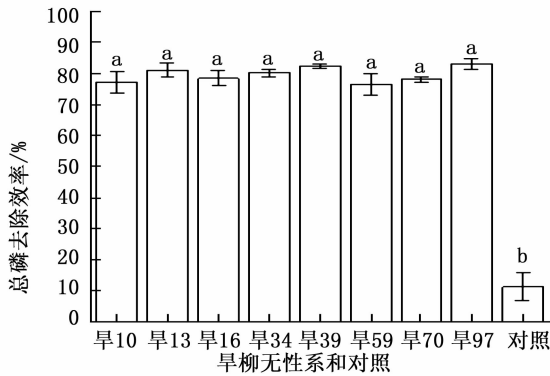


图6 8个早柳无性系处理组磷去除效率

同时,柳树各无性系的生长发育受基因强烈控制。Kopp等^[19]报道,在北纬地区相对较短的生长周期,有些在生长季早期快速生长(快生长型)植物比慢速生长(慢生长型)植物能获得较大的生物量,并且初始生物量将强烈影响最终生物量。本试验中,早柳大部分无性系从扦插到试验初期,生长较快,因而获得较大生物量,可归为快生长型。如无性系早70在生长季初期快速生长,从而获得较大最终生物量,而慢生长型早16在初期生长缓慢,因而在试验末期其株高和生物量均较小,这与Weih等^[5]的研究结果相似。同时,试验结果表明,慢生长型无性系具有较高相对生长速率RGR,如慢生长型早34具有最高的RGR_h和RGR_v值。

3.2 植株中营养元素积累

研究表明,早柳无性系能够在其地上部分积累较高浓度的氮和磷。在本研究中,各无性系叶片氮浓度为24.1~33.2 mg·g⁻¹,与报道的蒿柳(*S. viminalis* L.)叶片氮浓度相似或者高于其值^[6,20]。这种差异与营养元素供应浓度、N/P以及介质中有机质含量有关。叶片氮浓度越高,叶片颜色也越深,这与叶绿素相对含量的结果相符。研究表明,柳树叶片中氮浓度在25 mg·g⁻¹以上时生长较好^[21],这与早柳无性系生长表现一致。试验结果表明,早柳无性系茎枝氮含量较以往报道的蒿柳^[6]和毛枝柳(*S. dasyclados* Wimm.)的高^[21]。根冠比是反映植物地上部分和地下部分不同时期生长中心的指标^[22]。试验后期植物根冠比的下降,表明茎叶部分迅速生长,因此,短周期轮伐可以去除污水中的大量营养元素。据Elowson^[21]报道,一片柳树林地上部分生物量4 a可达50 t·hm⁻²,如果以茎枝中氮浓度为7 mg·g⁻¹测算,收获时氮去除总量将达350 kg·hm⁻²。

3.3 早柳无性系氮磷去除效率

试验结束时,早柳各无性系对TN、NH₄-N和

NO₃-N的去除效率分别为87.17%~96.94%、90.35%~99.33%和66.66%~88.19%,其去除效率高于蒿柳的57.7%(NH₄-N)^[6],与毛枝柳NH₄-N和NO₃-N去除效率相似^[23]。与其它水生植物相比,其NH₄-N去除效率显著高于日本苇(*Phragmites japonica* Steud.)^[23]、水葫芦(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)^[24],较黄花水龙(*Jussiaea stipulacea* Ohwi)^[2]、大藻(*Pistia stratiotes* L.)^[25]稍低,与其它21种水生植物相似^[26]。造成不同植物去除效率不同的主要原因除植物材料本身外,也可能与试验环境有关。氮的去除主要有微生物硝化和反硝化作用、植物吸收、氨氮挥发^[27]。水体pH值也是影响硝化和反硝化的一个重要原因^[18],在pH值分别为5.8~8.5和7.5~8.6时是反硝化和硝化的最佳pH值^[28]。试验初期pH在7.5左右,这是因为试验用水中氮的形态主要是氨氮,硝态氮含量很低。同时硝化作用发生,这与整个系统初期不同氮形态变化趋势一致。试验后期pH值下降,硝化作用减弱。生长较好的早柳处理组对氮的去除显著好于空白对照,表明此时植物吸收是氮去除的主要驱动力;同时根系巨大的表面积能刺激根区微生物活性并形成生物滤膜,从而加速氮的去除^[29]。早柳各无性系磷的去除效率为76.59%~83.15%,比黄花水龙夏季25%的去除效率高^[2],与毛枝柳相似^[23],但低于蒿柳90.6%的PO₃-P去除效率^[6]。与氮可氨化挥发不同,磷主要存在于介质中,在植物组织中储存较少,同时不同的试验环境和条件会影响磷的去除。磷的去除与氮不同,主要有吸附、络合、沉淀、微生物同化和植物吸收^[28]。本试验中,早柳无性系组织中磷浓度较试验前显著增加,同时水体中磷浓度减少,表明植物吸收起到一定作用。与对照相比,植物系统有较好的磷去除效果,可能植物根区促进微生物活动,加速微生物的同化作用,从而共同促进磷的去除^[30]。

参试8个早柳无性系均能在富营养化水体中正常生长,但各无性系在富营养化水体中的生长响应有较大差异,无性系早59和早97生长最佳。各早柳无性系对氮和磷的利用率较高,能有效去除水体中的氮和磷,并且其叶片中氮浓度在25 mg·kg⁻¹以上,无性系早13综合去除营养元素的能力最高。综合多个指标并结合长期野外试验观察,早柳无性系早13、早59、早97是适合修复富营养化水体的较好材料。

参考文献:

- [1] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science; where do we go from here [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(4): 201 - 207.
- [2] 王 超, 张文明, 王沛芳, 等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(5): 975 - 981.
- [3] Wu X, Yang X E, Zed R. Phytoremediation facilitates removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated water and release from sediment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 157(1-4): 277 - 285.
- [4] Holm B, Heinsoo K. Municipal wastewater application to Short Rotation Coppice of willows-Treatment efficiency and clone response in Estonian case study [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 57: 126 - 135.
- [5] Weih M, Nordh N E. Characterising willows for biomass and phytoremediation; growth, nitrogen and water use of 14 willow clones under different irrigation and fertilization regimes [J]. *Biomass Bioenergy*, 2002, 23(6): 397 - 413.
- [6] Mant C, Peterkin J, May E, *et al.* A feasibility study of a *Salix viminalis* gravel hydroponic system to renovate primary settled wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(1): 19 - 25.
- [7] Dimitriou I, Aronsson P. Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters-Plant response and treatment efficiency [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(1): 161 - 170.
- [8] Dimitriou I, Rosenqvist H. Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production-Biological and economic potential [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(2): 835 - 842.
- [9] Nissim W G, Voicu A, Labrecque M. Willow short-rotation coppice for treatment of polluted groundwater [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 102 - 114.
- [10] Mirck J, Isebrands J G, Verwijst T, *et al.* Development of short - rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(2): 219 - 228.
- [11] Wu S B, Austin D, Liu L, *et al.* Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 948 - 954.
- [12] Bialowiec A, Davies L, Albuquerque A, *et al.* Nitrogen removal from landfill leachate in constructed wetlands with reed and willow: Redox potential in the root zone [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 97: 22 - 27.
- [13] Amofah L R, Mattsson J, Hedström A. Willow bed fertigated with domestic wastewater to recover nutrients in subarctic climates [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 174 - 181.
- [14] Adegbi H G, Volk T A, White E H, *et al.* Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 20(6): 399 - 411.
- [15] Watson C, Riddell-Black D. Screening of willow species for resistance to heavy metals: Comparison of performance in a hydroponics system and field trials [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5(4): 351 - 365.
- [16] 冷华妮, 陈益泰, 段红平, 等. 磷胁迫对不同种源枫香生长及氮、磷吸收利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 754 - 760.
- [17] Dimitriou I, Aronsson P, Weih M. Stress tolerance of five willow clones after irrigation with different amounts of landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(1): 150 - 157.
- [18] Hu M H, Ao Y S, Yang X E, *et al.* Treating eutrophic water for nutrient reduction using an aquatic macrophyte (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system [J]. *Agriculture Water Management*, 2008, 95(5): 607 - 615.
- [19] Kopp R F, Smart L B, Maynard C A, *et al.* The development of improved willow clones for eastern North America [J]. *Forestry Chronicle*, 2001, 77(2): 287 - 292.
- [20] Fillion M, Brisson J, Teodorescu T I, *et al.* Performance of *Salix viminalis* and *Populus nigra* × *Populus maximowiczii* in short rotation intensive culture under high irrigation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(9): 1271 - 1277.
- [21] Elowson S. Willow as a vegetation filter for cleaning of polluted drainage water from agricultural land [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16(4): 281 - 290.
- [22] 蒋 跃, 童 琰, 由文辉, 等. 3 种浮床植物生长特性及氮、磷吸收的优化配置研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(5): 774 - 780.
- [23] Shin J Y, Park S S, An K G. Removal of nitrogen and phosphorus using dominant riparian plants in a hydroponic culture system [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2004, 39(3): 821 - 834.
- [24] Fox L J, Struik P C, Appleton B L, *et al.* Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) [J]. *Water Air Soil & Pollution*, 2008, 194(1-4): 199 - 207.
- [25] Lu Q, He Z L, Graetz D A, *et al.* Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2010, 17(1): 84 - 96.
- [26] Iamchaturapat J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(3): 287 - 293.
- [27] Bindu T, Sylas V P, Mahesh M, *et al.* Pollutant removal from domestic wastewater with taro (*Colocasia esculenta*) planted in a subsurface flow system [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(1): 68 - 82.
- [28] Im J H, Woo H J, Choi M W, *et al.* Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system [J]. *Water Research*, 2001, 35(10): 2403 - 2410.
- [29] Gopal B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems [J]. *Water Science Technology*, 1999, 40(3): 27 - 35.
- [30] Kadlec R H, Tanner C C, Hally V M, *et al.* Nitrogen spiraling in subsurface flow constructed wetlands; implications for treatment response [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(4): 365 - 381.