

木本植物作为人工湿地植物的可行性试验

赵 珊¹, 张 军¹, 陈 沉¹, 周 军¹, 甘一萍¹, 马 可²

(1 北京城市排水集团有限责任公司 北京 100124; 2 北京森富高科林业发展中心 北京 101300)

摘 要 景观水体的一个主要问题是水体富营养化将导致水华的暴发,并导致水体透明度下降,溶解氧降低,水生植物和鱼类大量死亡。为了防止水华暴发,人工湿地技术常被应用于景观水体水质维护之中,但其存在运行操作费用不足而导致的传统湿地植物到了秋季无人收割,和植物吸收营养盐总量较小等问题。因此,该课题通过中试研究,进行某良种柳树(*S.matsudana Koidz*)和黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)的对比试验,并结合前人的研究成果,得出的结论为:该柳树的茎叶部一年中可去除氮的总量为 10.8 g/m²,去除磷的总量为 1.89 g/m²,在去除总量上比传统湿地植物具有明显优势,并且收割下来的柳树可作为生物质能源或造纸原料,能部分弥补湿地的运行费用,是一种很有潜力的湿地植物。未来,从保障湿地的运行效果和解决运行费用的角度来讲,具有经济价值的木本植物是湿地研究的一个方向。

关键词 杂交柳树 再生水 人工湿地

中图分类号 X52

文献标识码 B

文章编号 1009-0177(2012)01-0073-07

Feasibility Experiments in Application of Woody Plants as Constructed Wetland Plants

Zhao Shan¹, Zhang Jun¹, Chen Chen¹, Zhou Jun¹, Gan Yiping¹, Ma Ke²

(1. Beijing drainage group, Beijing 100124, China;

2. Beijing senfu development center, Beijing 101300, China)

Abstract Water-bloom is easy to break out in scenic water which utilizes reclaimed water as source water. Constructed wetland is a common bioremediation technology for reclaimed water reuse in landscape. There were some disadvantages in constructed wetland, such as plants weren't harvested caused by insufficient operating cost, and amount of nutrients absorbed by plants was small. Pilot test was carried out in the hybrid willow (*S.matsudana Koidz*) and yellow iris (*Iris wilsonii*) in R&D center in Beijing Drainage Group. Combined with previous researches, the results show that: hybrid willow (*S.matsudana Koidz*) grew well in constructed wetland; removed total of nitrogen is 10.8 g/m², of phosphorus is 1.89 g/m². This effect is better than traditional wetland plants. Therefore, hybrid willow is an excellent wetland plant. In the future, aim to upgrading wetlands effectiveness and reducing operating costs, woody plants with economic value is a research direction in constructed wetland.

Keywords hybrid willow reclaimed water constructed wetland

我国水资源严重短缺,根据 2002 年的统计数据,中国共有市级以上城市 668 个,其中缺水城市 400 多个。且人均水资源量逐年递减,2007 年的人均水资源量仅为 2000 年的 87%。为了解决我国日益缺水的严峻局面,再生水成为了城市的“第二水源”。再生水回用于景观环境是满足缺水城市对于娱乐性水环境需要而发展起来的一种再生水回用方式,也是完成水生态循环的自然修复与恢复的最佳途径^[1]。但是,城市再生水景观利用面临的主要问

题是虽然再生水中污染物相对于污水有了本质上的降低,已满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)的要求(TN=15 mg/L,TP=0.5 mg/L,观赏性景观环境用水,湖泊类),但相对于天然水体《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类水(TN=1.5 mg/L,TP=0.1 mg/L),再生水中污染物本底值仍然较高,城市景观水体流动缓慢甚至完全静止,城市景观水体水深较浅,阳光易于投射。这些不利条件极易导致藻类过度生长,甚至爆发水华。

水华通常是指天然水体受到污染,氮磷等营养物质大量增加,致使水体达到富营养化或者严重富营养化状态,在一定的温度、光照、水流流速等条件下,某些藻类发生暴发性的繁殖,引起明显的水色变化,并在水面形成或厚或薄的绿色或其他颜色的

[收稿日期] 2011-05-27

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07314-008)

[作者简介] 赵珊(1981-),女,工学硕士,工程师,主要从事再生水景观利用水质标准、水华预警技术和人工湿地技术的研究。
联系电话 (010)51352882,13651026023;
E-mail zhaoshan@bdc.cn butiner2003@yahoo.com.cn。

藻类漂浮现象^[2-3]。

1 试验基本情况

1.1 试验基地

试验基地为北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心景观湖,湖水面积 100 m²,池底和四周壁面均为水泥,水池的结构为长方形,池长约 20 m,宽约 5 m,池深度约 1.5 m,有效水深 1.0 m。水流形态:低进高出。进水为北京城市排水集团有限责任公司高碑店污水厂产生的二沉水。城市再生水景观回用中试试验工艺如图 1 所示。本试验重点在传统湿地植物(黄花鸢尾(别名黄菖蒲) *Iris wilsonii*)和新型湿地植物(某种柳树 *S.matsudana Koidz*)之间进行对比。黄花鸢尾人工湿地设计参数如表 1 所示,试验过程中人工湿地的处理流量为 10 m³/d。

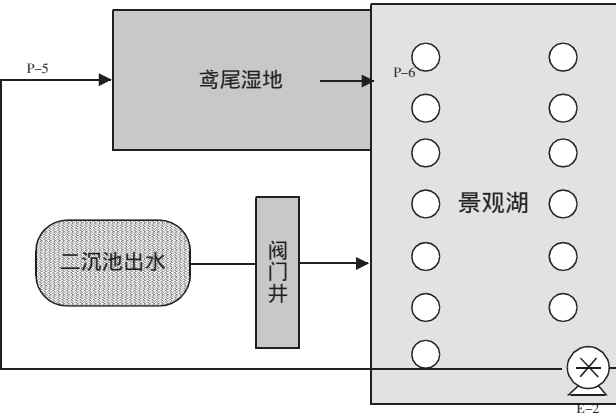


图 1 城市再生水景观回用中试试验工艺图
Fig.1 Pilot Test Artwork of Reclaimed Water Reuse in Landscape

表 1 鸢尾人工湿地设计参数
Tab.1 Design Parameters of Constructed Wetland

湿地类型	长/m	宽/m	下层填料/深度/m	上层填料/深度/m	超高/m	植物类型
垂直潜流	7.02	0.88	5~10 mm 石灰石/0.7	砂土/0.6	0.4	黄花鸢尾
水平潜流	8.28	4.64	5~10 mm 石灰石/0.7	砂土/0.6	0.4	黄花鸢尾

1.2 分析项目及方法

根据《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)的规定调节景观湖水质和水力停留时间。试验时期 2010 年 5 月~9 月。试验初期从实际湖水中引入部分原水(通过镜检,优势藻种为绿藻中的水网藻、小球藻),作为藻种来源。检

测项目为总氮(检测方法:碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法 GB 11894—89)、氨氮(纳氏试剂光度法 GB 7479—87)、溶解性总磷(过硫酸钾氧化钼锑抗分光光度法 GB 11893—89)、叶绿素(研磨-分光光度法)和化学需氧量(快速消解分光光度法 HJ/T 399—2007)。在试验期间藻类经历适应、增长、衰亡等阶段。

1.3 补水水质

为更加接近实际情况,本试验补水选用北京城市排水集团有限责任公司高碑店污水处理厂出水,水质如图 2 所示。从图中可知,该厂出水符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准(总氮除外)。

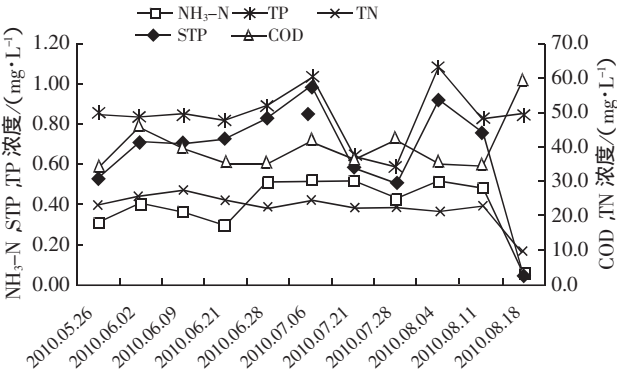


图 2 2010 年 05 月~10 月试验用补水水质
Fig.2 Supplement Water Quality in Pilot Test in 2010.05~2010.10

1.4 人工湿地引入新型湿地植物的必要性

人工湿地属于生物修复技术中的一项常用手段。该技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种新型的污水生态处理新技术,其特点是投资少、效率高、抗冲击处理效果稳定、运行费用低、维护方便和景观相容性好,并逐渐被应用于各类被污染水体的治理之中^[4-5]。人工湿地是通过植物-土壤-微生物的综合作用实现对污染物的去除的,其中微生物是对污染物进行吸收和降解的主要生物群体和承担者^[6-8]。本试验使用的人工湿地为潜流人工湿地,根据清华大学相关人员的研究成果^[9],黄花鸢尾是一种适应于北方景观水体的挺水植物,因此,本人工湿地栽种黄花鸢尾。

但与常规污水处理技术相比,湿地处理系统存在如下问题:①处理系统不稳定,可持续性差,冬季处理效果欠佳^[10-12]。②常规人工湿地中的植物种类单一,景观效果优势未充分发挥^[13]。③处理负荷低,占地面积大^[14]。部分水生草本植物具有倒伏腐烂、越冬保苗、防虫二次污染等劣势^[15],需要较为精细的维

护管理,且由于水生草本植物难以产生经济效益,所以导致某些人工湿地运行管理不到位、水质处理效果欠佳。因此在本研究中,引入部分生长速度快、生物量大、适应性强、具有一定经济效益的木本植物。根据北方地区的特点,重点引入植物为灌木柳无性系——某良种柳树(*S. matsudana Koidz*)。

灌木柳属于杨柳科柳属(*Salix spp.*)植物中的一个大类,在欧亚大陆有广泛的分布,多生长于山区河流沿岸、低湿地以及林缘。在上个世纪 80 年代开始,欧洲瑞典、英国等国家以为蒿柳(*S. viminalis*)、毛枝柳(*S. dasyclados*)等为育种材料,培育出了一系列不同的无性系或杂交种,如 Tora 等无性系,主要用于生物质能源林的培育和生态环境的修复与保护方面。在本试验研究中选用的灌木柳无性系,是在 1996 年从美国引进,2000 经过陕西省林木良种审定委员会审定林木良种,名称为中富 1 号(*S. matsudana Koidz*)。其具有生长速度快、地上生物量高、耐水淹、抗逆性强、对有害重金属具有较强的吸附能力、耐平茬经营等优良特点。

该柳树作为一种外来入侵物种,虽然其生态适应能力较强,但其不具有根系萌蘖或分生能力,不会由根系萌蘖或分生产生新的植株,因此不具备无性入侵的条件。它的繁殖往往依靠人工条件下进行无性扦插繁殖,而自身不会通过无性或者有性方式进行传播,因此,应用地的生态安全性得到了保障。

2 试验数据分析

2.1 试验柳树生长状态及生物量研究

2.1.1 试验柳树生长状态

该柳树耐水能力强,在遭受水淹时,能生出许多不定根,漂浮水中,有吸收和运输养分的功能。但它不是真正意义上的水生植物,如若要将其作为湿地植物使用,尚需考证其生长状况。

排水集团于 2010 年 5 月中旬,自某林业发展中心取得一年生扦插苗,在排水集团景观湖进行试种。2010 年度的生长状态记录如下。

2010 年 05 月 26 日——将 100 mm 长、直径约 5 mm 的该柳树扦插苗种植于复合填料容器中。复合填料组成为鹅卵石+生物滤料+营养土。此即为模拟小型湿地,放于景观湖水中。一周后,扦插苗长出新叶,生根成活。

2010 年 06 月 28 日——每根柳树扦插苗上生长出 2~4 根侧枝。新生侧枝长 500 mm,地径 5 mm。模拟小型湿地中的柳树长势良好,与陆地养殖对照



图 3 2010 年 05 月 26 日现场

Fig.3 Experiment Scene on 26th May 2010

组没有明显差距。



图 4 2010 年 06 月 28 日现场

Fig.4 Experiment Scene on 28th Jun. 2010

2010 年 07 月 29 日——柳树长高至 1 500 mm,地径 6 mm。柳梢出现枯萎,查阅相关资料、调研北京森富高科林业发展中心后,证实柳梢枯萎是由天气高热所引起的。约 1 周后,从枯萎部分的下面重新分发出新的枝丫。



图 5 2010 年 07 月 29 日现场

Fig.5 Experiment Scene on 29th Jul. 2010

2010 年 08 月 25 日——柳树长高至 2 000 mm,地径 8 mm。由于根部长长期浸没于水中,根部滋生大量红色须根,漂浮水中,起到吸收和运输养分的作用。



图6 2010年08月25日现场

Fig.6 Experiment Scene on 25th Aug. 2010

2010年09月25日——降雨后,因为树型高挑 种植密度较小,柳树出现了一定程度的倒伏。柳树平均株高2 300 mm,地径13 mm。

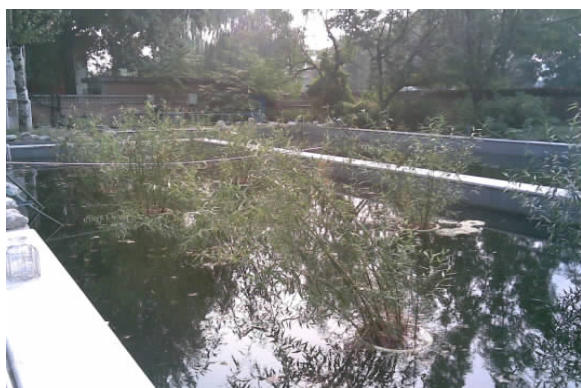


图7 2010年09月25日现场

Fig.7 Experiment Scene on 25th Sep. 2010

2.1.2 试验柳树生长生物量

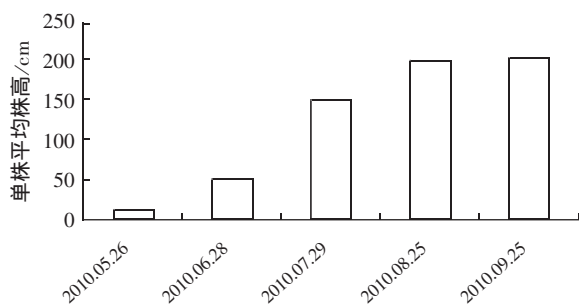


图8 2010年排水集团景观湖柳树单株平均株高曲线图

Fig.8 Average Plant Height of Hybrid Willow in Scenic Lake in Beijing Drainage Group in 2010

在排水集团景观湖的试验中,共栽种柳树100株,在试验过程中测量并估算柳树的单株平均株高和总生长量。从图8和9中可以看出,经过2010年5月~9月排水集团的试验,仅仅经过4个多月的生长期,当年扦插柳树苗的株高可达到2 m,单株重量

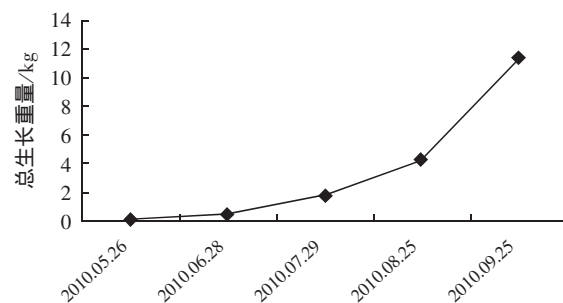


图9 2010年排水集团景观湖柳树总生长重量曲线图

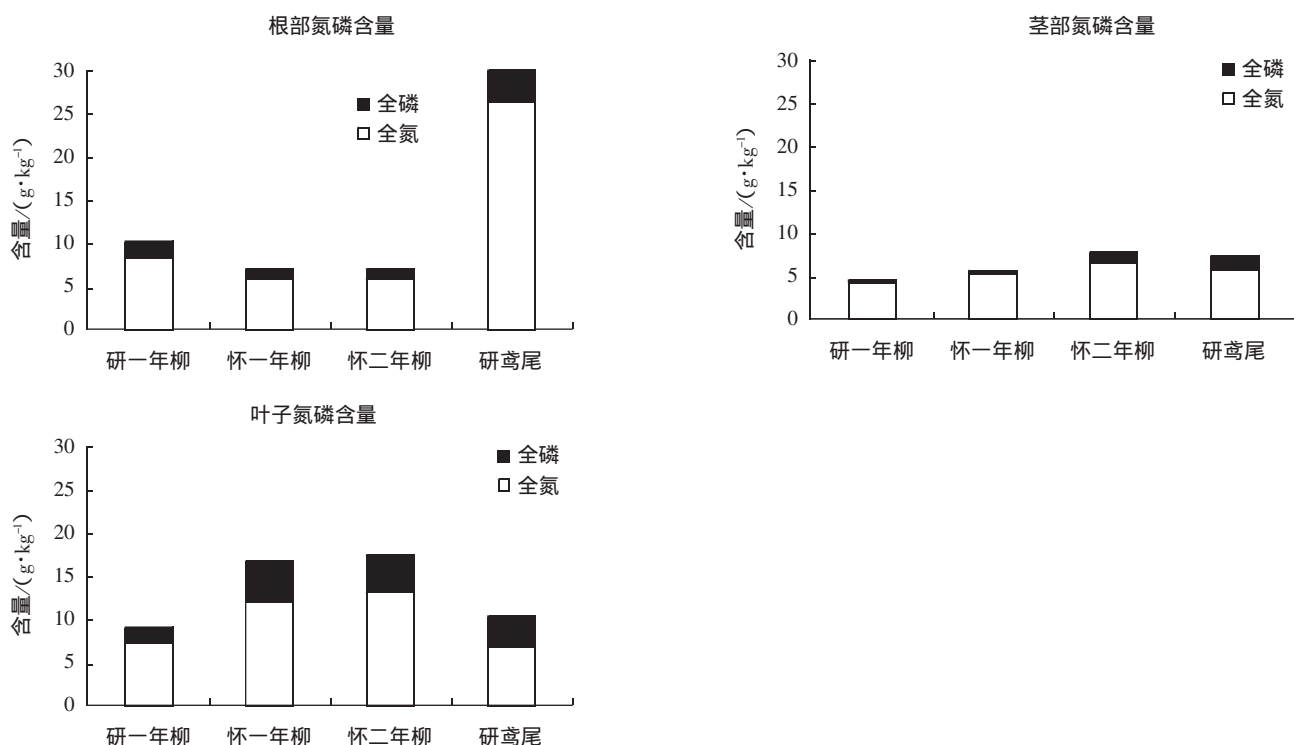
Fig.9 Total Weight of Hybrid Willow in Scenic Lake in Beijing Drainage Group in 2010

平均达到0.115 kg,地径1.3 cm,种植的柳树总重量达到11.5 kg。怀柔西栅子柳树育苗基地的当年扦插苗,于2010年05月03日扦插,管理措施为整地后覆膜,其当年扦插苗的株高达到2.02 m,地径1.1 cm。虽然排水集团景观湖中的柳树生长在水中,但与陆地种植的该柳树相比,其生长未受到抑制,从株高和地径两项指标来看,还略优于怀柔西栅子该柳树育苗基地的当年扦插苗。这表明该柳树能在长期水浸的条件下,成活并生长。可以作为人工湿地植物的一种备选方案。

2.2 木本植物作为人工湿地植物的可行性研究

利用该种试验柳建立的人工湿地,通过合理的抚育管理和短轮伐期的采收,可以把富余的氮、磷等元素彻底从湖泊生态系统中转移出,进而进行生物质能源的开发利用。避免了实际应用中,由于常见挺水人工湿地植物大多经济效益不高,在湿地运行操作中需要持续的投入费用,这就导致了很可能传统湿地植物到了秋季无人收割、植物茎叶部腐烂倒伏等问题,这样被传统湿地植物吸收和固定的氮、磷等元素又回到了湿地系统中。

在试验结束后,检测该种柳树各部分中的氮磷含量,由于样品总数较少,且不具有明显的差异,所以采用的采样方法为简单随机抽样方法,所得结果可代表试验样品的平均水平。从图10湿地植物的氮磷含量分布可知:除根部氮磷含量,该种柳树明显小于鸢尾之外,在根茎中氮磷的含量,该种柳树与传统湿地植物鸢尾近似。由于每年定期收割时,需要保留湿地植物的根部,所以,该柳树根部氮磷含量不会影响其对再生水中氮磷的去除效果。且随着该柳树种植年限的增加,茎叶部分的氮磷含量也有所增加。由于受到样品的限制,本次试验只选取了一年生和两年生的该柳树进行检测,日后随着样



注：“研一年柳”代表研发中心一年生的柳树；“怀一年柳”代表怀柔基地一年生的柳树；
“怀二年柳”代表怀柔基地二年生的柳树；“研鸢尾”代表研发中心的鸢尾。

图 10 人工湿地植物根、茎、叶部氮磷含量

Fig.10 Nitrogen and Phosphorus Content in Constructed Wetland Plants

品的增加,这部分数据还将进一步充实。

金树权等^[16]的课题选取 10 种水生植物水罨粟、黄花水龙、大聚藻、香菇草、水芹、大藻、凤眼莲、美人蕉、黄菖蒲和鸢尾等为研究对象,结果表明:水体氮、磷去除率与水生植物净增生物量存在较高相关

性,而与植株氮、磷含量不存在相关性,因而氮、磷吸收量而不是植株氮、磷含量应作为水生植物筛选的一个重要指标。这 10 种水生植物的生物量变化和茎叶部氮磷含量如表 2 所示。

表 2 金树权等人研究 10 种水生植物的生物量变化和茎叶部氮磷含量

Tab.2 Comparison of Nitrogen, Phosphorus Content, and Weight of Ten Aquatic Macrophytes

10 种水生植物的生物量变化

植物名	茎叶部/(g·m ⁻²)			根部/(g·m ⁻²)			总净增生物量 /(g·m ⁻²)
	2 月中旬	6 月中旬	净增量	2 月中旬	6 月中旬	净增量	
水罨粟	83.2±7.4	208.6±21.0	125.4±28.3	—	—	—	125.4±28.3
黄花水龙	59.4±1.9	169.3±20.5	109.9±22.4	—	—	—	109.9±22.4
大聚藻	472.1±25.2	1 686.2±91.8	1 214.1±67.6	—	—	—	1 214.1±67.6
香菇草	445.9±20.3	1 957±125.9	1 511.1±106.8	—	—	—	1 511.1±106.8
水 芹	617.4±35.6	1 553.0±140.1	935.6±108.2	—	—	—	935.6±108.2
大 藻	52.6±7.4	352.6±30.9	300.0±25.4	15.0±1.6	87.8±6.4	72.8±4.9	372.8±25.9
凤眼莲	117.2±6.6	621.0±28.9	503.8±22.5	48.1±4.7	152.9±10.1	104.8±5.6	608.6±28.0
美人蕉	216.6±7.9	1 213.1±166.4	996.5±166.2	410.8±21.3	616.6±19.5	205.8±8.4	1 202.3±158.4
黄菖蒲	578.1±23.6	780.9±38.3	193.8±21.9	578.2±22.0	698.2±23.5	120.0±3.5	313.8±25.4
鸢 尾	545.8±38.4	690.3±69.9	144.5±50.3	638.8±33.2	698.2±32.8	196.0±10.4	340.5±40.0

注:同一列数据后不同小写字母表示在 P<0.05 差异显著水平。下同。

10 种水生植物的植株氮、磷含量

植物名	含氮量/(g·m ⁻²)				含磷量/(g·m ⁻²)			
	2 月中旬		6 月中旬		2 月中旬		6 月中旬	
	茎叶部	根部	茎叶部	根部	茎叶部	根部	茎叶部	根部
水罌粟	21.12±1.37	—	17.96±1.58	—	3.50±0.25	—	2.40±0.24	—
黄花水龙	23.44±1.05	—	18.59±0.61	—	3.44±0.22	—	2.59±0.12	—
大聚藻	23.33±1.52	—	15.66±0.67	—	1.79±0.10	—	1.36±0.20	—
香菇草	21.35±1.53	—	11.55±0.85	—	2.83±0.11	—	2.19±0.14	—
水 芹	20.95±1.75	—	16.43±0.98	—	2.83±0.11	—	2.19±0.14	—
大 藻	22.38±1.80	17.80±0.80	16.68±1.11	13.67±1.23	3.25±0.21	2.43±0.19	2.63±0.37	1.62±0.15
凤眼莲	23.79±1.84	19.76±0.84	16.96±1.56	14.23±0.88	2.40±0.21	2.16±0.18	1.98±0.23	1.77±0.17
美人蕉	26.38±1.92	24.68±1.95	17.97±0.89	19.71±0.75	2.24±0.17	2.41±0.21	1.62±0.06	2.05±0.18
黄菖蒲	23.18±1.47	18.60±0.62	18.34±1.22	16.20±0.19	2.16±0.08	1.89±0.15	1.77±0.08	1.59±0.11
鸢 尾	21.40±2.75	19.30±0.53	18.18±0.89	15.89±0.33	2.08±0.15	1.93±0.11	1.85±0.16	1.67±0.16

通过上述数据, 计算 10 种水生植物茎叶部一年中可去除氮磷的总量。如表 2 所示。从中可以看出: 这 10 种水生植物中对氮去除总量最大的是大

聚藻, 为 19.01 g/m²。对磷去除总量最大的是香菇草, 为 1.75 g/m²。

表 3 10 种水生植物的氮磷去除量 (单位: g/m²)

Tab.3 Comparison of Nitrogen, Phosphorus Total Removal Amount of Ten Aquatic Macrophytes

	水罌粟	黄花水龙	大聚藻	香菇草	水芹	大藻	凤眼莲	美人蕉	黄菖蒲	鸢尾
氮去除量	2.25	2.04	19.01	17.45	15.37	5.00	8.54	17.9	3.55	2.63
磷去除量	0.30	0.28	1.65	1.75	2.05	0.79	1.00	0.67	0.34	0.27

该种柳树茎叶部一年中可去除氮的总量为(计算依据见表 3): 10.8 g/m², 磷的总量为: 1.89 g/m²。虽然, 扦插苗当年除氮的能力略逊于大聚藻, 但它的生长能力极强, 第二年的生物量将有突飞猛进的增加, 势必导致氮磷去除能力的增加。因此, 具有较大生物量的该种柳树在氮磷去除总量上比传统湿地植物具有明显优势。

表 4 试验柳树植物的氮磷去除量

Tab.4 Nitrogen, Phosphorus Total Removal Amount of Hybrid Willow

	含氮量 (g·kg ⁻¹ , 干)	含磷量 (g·kg ⁻¹ , 干)	含水率 /%	种植密度 (棵·m ⁻²)	单棵重量 (kg·棵 ⁻¹)
研一年柳	5.38	0.94	50	35	0.115
怀一年柳	7.61	1.89	50	35	0.122
怀二年柳	8.97	2.03	50	35	0.357

2.3 试验柳树对景观水体维护效果研究

试验期间为 2010 年 8 月 11 日~2010 年 9 月 25 日, 历时一个多月。湖水中 COD_{Cr}, TN, NH₃-N, STP 和叶绿素的变化趋势如图 11 所示。从中可以看出, 虽然水质指标变化不明显, 但是水体中的叶绿素含量出现了大幅波动, 特别是 2010 年 9 月 18 日叶绿素达到近 50 mg/m³, 绿藻水华爆发, 水体的观赏性明显下降。这说明虽然该种柳树能大量吸收水中的氮磷营养盐用于自身的生长, 但这种优势只体现在它与其他水生植物的相对比较的基础之上, 但是水华爆发是一个比较复杂的问题, 即便水中的营养盐处于相对较低的水平, 仍能维持藻类的生长和繁殖。如果不能有效地控制或降低水中藻类的总量, 藻类仍旧有爆发的危险。因此, 仅凭该柳树作为单一的因素难以达到长期维持水质、控制藻类生长的作用, 还需要结合其他水质维护手段(例如: 人工湿地中的物理、化学、生物作用)协同工作, 共同达到进一步降低水体中营养盐和去除藻种的目的。

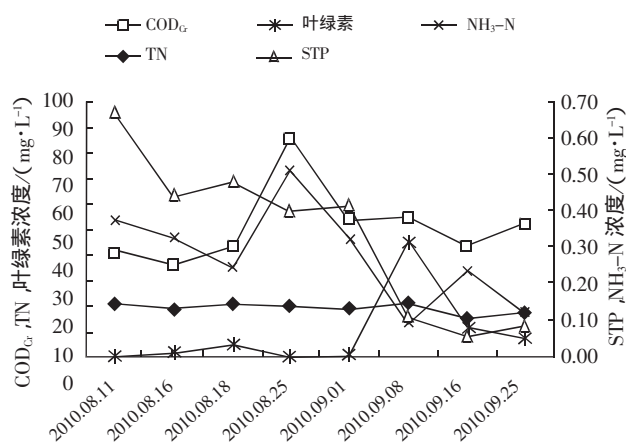


图 11 COD_{Cr}, TN, NH₃-N, STP 和叶绿素的变化趋势

Fig.11 Change Trend of COD_{Cr}, TN, NH₃-N, STP and Chlorophyllous

3 结论与展望

本研究通过 2010 年对研发中心中试试验基地的研究,得出以下结论:

(1) 现北京污水处理厂出水水质良好,试验期间水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 B 标准,符合国家规定。且除总氮外的其他指标均达到一级 A 标准。虽然出水中的营养盐氮磷含量相对于进水已经有了本质上的削减,但是难以成为藻类生长的限制因素。

(2) 试验柳树虽然是一种喜水湿的陆生植物,但其在人工湿地中长势良好,与陆地培养的该种柳树在生长量上没有明显差异,茎叶部一年中可去除氮的总量为 10.8 g/m²,去除磷的总量为 1.89 g/m²,在去除总量上比传统湿地植物具有明显优势,是一种非常有力量的湿地植物。并且,利用该种柳树建立的人工湿地可以作为短轮伐期能源林进行培育,通过合理的抚育管理和采收利用,可以把富余的氮、磷等元素彻底从湖泊生态系统中转移出,并且收割后的柳树作为生物质能源或造纸原料能产生一定的经济效益,部分解决了人工湿地由于后期运行操作费用不足而导致的传统湿地植物到了秋季无人收割、当年被湿地植物吸收和固定氮、磷等元素不能被转移出湖泊生态系统的问题。

(3) 未来,人工湿地应更加注重构建景观型人

工湿地再生水维持系统,重点要实现人工湿地可持续性净化功能与景观功能的有机结合。因此在未来研究中,应引入部分生物量大、抗性强、具有一定经济效益的陆生木本植物。重点进行不同种类的草本和木本植物联种的组合和种植密度等试验研究。

参考文献

- [1] Reed, Sherwood C., Ronald W., *et al.* Natural systems for waste management and treatment[M]. New York: Lewis Publishers, 1995.
- [2] 周栋,王瑟澜,杨云,等.景观水体“水华”防治措施[J]. 净水技术, 2004,23(6):28-31.
- [3] GAMINI H.. Freshwater Algal Blooms and Their Control; Comparison of the European and Australian Experience[J]. Journal of Environmental Management,1997,51:217-227.
- [4] 汤显强,黄岁樑.人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术,2007,33(2):9-13.
- [5] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理[J].生态学报, 2006,26(8):2670-2677.
- [6] 张巍,赵军,郎咸明,等.人工湿地系统微生物去除污染物的研究进展[J].环境工程学报,2010(4):721-728.
- [7] 周炜,谢爱军,年跃刚,等.人工湿地净化富营养化河水试验研究(一)——植物对高磷污染物的净化作用[J]. 净水技术,2006,25(3):35-39.
- [8] 周炜,黄民生,谢爱军,等.人工湿地净化富营养化河水试验研究(二)——基质层及流态对氮、磷污染物净化效果的影响[J]. 净水技术,2006,25(4):40-44.
- [9] 李涛,周律.湿地植物对污水中氮、磷去除效果的试验研究[J]. 环境工程,2009,(4).
- [10] 汤显强,李金中,间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响[J]. 水处理信息报导,2008(5):58-58.
- [11] 周健,王继欣,张勤,等.序批式人工湿地冬季低温脱氮的效能研究[J]. 环境科学学报,2007,27(10):1652-1656.
- [12] 尹伟,李培军,尹澄清,等.潜流人工湿地的局限性与运行问题[J]. 中国给水排水,2004,20(11):36-38.
- [13] 陈志澄,郭丹桂,熊明辉,等.处理生活污水的植物品种的筛选[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,(4).
- [14] 陈明利,吴晓芙,陈永华,等.景观型人工湿地污水处理系统构建及植物脱氮效应研究[J]. 环境科学,2010,(3).
- [15] 李光远.北方潜流人工湿地植物布局与管理探讨[J]. 中国水利, 2010,(5).
- [16] 金树权,周金波,朱晓丽,等.10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报,2010,(8).