

一个新植物组合的人工湿地及其污水净化效果*

张倩媚¹ 范炳标¹ 任海¹ 刘春常¹ 张太平² 卢琼³

1. 中国科学院华南植物园 广东广州 510650

2. 华南理工大学环境科学与工程学院 广东广州 510640

3. 佛山市高明区园林管理处 广东高明 528500

摘要 通过对广州周边天然湿地的调查,筛选了 44 种新的且具较好净化作用的水生植物组合成人工湿地,并与传统植物组合成的人工湿地进行比较发现:在未驯化植物床的 44 种植物中,6 种乔灌木只有落羽杉能在上下二级植物床中存活,是可用乔木种;而灌木种没有存活的,这与自然湿地调查发现很少湿地灌木相吻合;38 种草本植物中,能存活的有 24 种;草本植物以分蘖数和生长高度为指标筛选发现,只有薹苳、象草、白姜花、黄苞蝎尾蕉、叠穗莎草、黄花蔺等 6 种适应不同污水浓度、生长较好、高度增长快、易分蘖,是非常好的人工湿地植物,以上驯化和未驯化床生长较好的植物植株高度和分蘖数之间无显著性差异。两组植物床均保持了较好的污水净化能力,显著降低了污水的 pH,对 COD_{Cr}、BOD₅、TP、TN 和 NH₃-N 的去除率也分别达到了 65.7%、64.6%、78.5%、20.2%和 18.3%以上。细菌总数、真菌总数、放线菌总数、总大肠菌群的去除率均达到 99%以上,其中总大肠菌群去除率竟高达 99.9%以上。上述结果表明,传统植物组合的净化效果较好,新植物组合的净化效果也好,这些新植物组合可为人工湿地增加生物多样性和加强景观效果。

关键词 人工湿地 新植物组合 污水净化

1 前言

人工湿地是一种为处理废水而利用工程措施模拟自然湿地建造的生态系统,由于其结构简单,建设成本低,易维护,净化效果好,近 10 多年来发展较为迅速,广泛用于城市生活污水处理。人工湿地主要由介质、植物和微生物构成,它主要利用系统中基质-水生植物-微生物的物理、化学、生物的三重协同作用,通过基质过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化^[1,2,3,4]。人工湿地的植物可吸收富集污染物,提供能量,景观美,为微生物提供生境等而具有重要作用。当前大量用于城市生活污水处理的植物主要有水烛(*Typha angustifolia*)、灯心草(*Juncus effuses*)、宽叶香蒲(*Typha latifolia*)、芦苇(*Phragmites communis*)、水葱(*Schoenoplectus lacustris*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)、象草(*Pennisetum purpureum*)、美人蕉(*Canna indica*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、纸莎草(*Cyperus papyrus*)、水竹芋(*Thalia dealbata*)等^[5]。作者通过对广州周边天然湿地的调查,筛选了一些新的且具较好净化作用植物种类,与传统植物组合比较,以期丰富人工湿地的植物多样性并提高植物的观赏性。

2 材料与方法

2.1 人工湿地系统

实验在中国科学院华南植物园西北角的人工湿地研究基地进行。人工湿地于2004年1月建成,2-3月间种植植物,4月中旬运行,全天24小时运行,每天污水处理量40吨。华南植物园属南亚热带气候,年均气温为22℃,最冷月1月气温为13.2℃,最热月7月为28.3℃,年均降雨量约1700mm。

该人工湿地的取水口是从广州艺术学校和华南植物园生活区排出的生活污水。人工湿地系统由抽滤池、沉淀池、配水池、植物床和出水池 5 部分组成,是串并联复合式垂直流人工湿地(图 1)。其中,植物床由 4 块面积均为 5×5 m²的垂直流的池体组成。其中 5、6 池为下行流植物床,7、8 池为上行流植物床,下行床比上行床高 30 cm。各床内基质填料均为下部 20 cm 厚的碎石和上部 100 cm 厚的细沙。植物床表面和碎石层均铺设了配水或集水管道,串联植物床底部用管道相连,并联植物

* 广东省科技攻关项目(2003C32201)和广州市攻关项目(2003J1-C0341)资助。华南植物园何道泉、范岳庄、韦强、高泽正、王少平同志和深圳宝安环保局郁向东工程师等参与部分试验。特此致谢!

床平行，相互之间不连通。植物配置方面，植物床 6、8 中的植物香根草、芦苇、风车草、纸莎草、水竹芋、美人蕉等 6 种是目前国内外常用种，来自深圳石岩河人工湿地。植物床 5、7 中的植物采自广州自然湿地，大多尚未广泛应用于人工湿地系统，共 44 种。种植时，串联的下行和上行植物床的植物种类相同，同一种其植株高度、种植密度和个体数尽量保持一致。

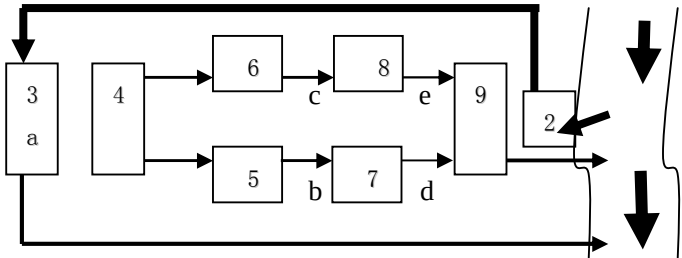


图 1 复合垂直流人工湿地简图

1.排污渠，2.抽滤池，3.沉淀池，4.配水池，5-6.垂直下行流植物床(上级)，7-8.垂直上行流植物床(下级)，9.出水槽
箭头为水流方向，线条粗细为水流量的相对大小，a-e 表示的是水样采集点。

2.2 水质分析方法

采用国家环保总局推荐的方法分析如下水质指标：COD_{Cr}、BOD₅、TP（总磷）、TN（总氮）、NH₃-N、NO₃-N、NO₂⁻N、T（温度）、DO（溶解氧）和 pH 等 10 项^[6]。

2.3 微生物数量的测定

水质取水，每块湿地选择三种不同的长势良好的植物取根系水样。用无菌长吸管伸入沙层下 5~10cm 吸取约 10ml 水样到无菌试管中。进水口及出水口试样也进行微生物指标的测定，故共取 5+4×3=17 个水样。用于测定细菌总数、真菌数、放线菌数及总大肠菌群数。细菌、真菌、放线菌及总大肠菌群采用稀释平板法，培养基配方参照文献^[7,8,9]。

3 结果与分析

3.1 植物生长状况

植物种植时正值生长季节，经过 3-4 个月的生长，驯化植物床 6 和 8 中种植的 6 种植物皆生长良好，植物覆盖度由 20%左右发展到接近 100%。而未驯化植物床 5 中有 10 种植物死亡，7 号床有 19 种植物死亡，覆盖率分别为 85%和 75%左右。死亡的植物中，主要是一些乔木、灌木及一些紧贴地面生长的藤本植物。在 7 号床中能存活的植物在 5 号床中均能存活。总体上看，在未驯化植物床的 44 种植物中，6 种乔灌木只有落羽杉能在上下二级植物床中存活，是可用乔木种；而灌木种没有存活的，这与自然湿地调查发现很少湿地灌木相吻合。38 种草本植物中，能存活的有 24 种。草本植物以分蘖数和生长高度为指标筛选发现，只有薏苡、象草、白姜花、黄苞蝎尾蕉、叠穗莎草、黄花蔺等 6 种适应不同污水浓度、生长较好、高度增长快、易分蘖，是非常好的种。

研究期间对全部植物生长进行了调查，表 1 列出了驯化植物床中 6 种植物和未驯化植物床中生长状况较好的 6 种植物生长情况。各植物床中植株平均高度在 134-159cm 之间，平均增高 96-122cm。同时，植物床 5-7 和植物床 6-8 的配对 T 检验，结果显示植株高度和分蘖数在下行和上行植物床之间无显著性差异。驯化和未驯化床生长较好的植物植株高度和分蘖数之间无显著性差异。

表 1 生长状况较好的植物调查列表

植物名	移植株数	存活数	种植物前/调查时平均高	种植物前/调查时平均分蘖数	移植株数	存活数	种植物前/调查时平均高	种植物前/调查时平均分蘖数
			床 6				床 8	
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>			20/164.0	4.0/10.3			20/208.3	4.0/12.0
芦苇 <i>Phragmites australis</i>			26.0/133.0	6.5/38.0			25.3/110.5	11.0/31.0
风车草 <i>Cyperus alternifolius</i>			15.0/98.3	7.3/52.5			15.0/94.7	8.30/50.7
纸莎草 <i>Cyperus papyrus</i>			65.5/150.0	8.30/50.7			65.8/156.7	8.3/44.7
水竹芋 <i>Thalia dealbata</i>			94.4/180.0	10.3/31.0			96.5/185.0	6.7/35.0
美人蕉 <i>Canna spp.</i>			35.0/170.7	4.3/7.0			31.2/175.0	7.0/14.0
			床 5				床 7	

薏苡 <i>Coix lacryma</i>	8	8	36.0/124.7	3.0/8.7	8	8	42.0/157.3	3.0/14.0
象草 <i>Pennisetum purpureum</i>	4	4	68.3/345.5	7.5/30.0	4	3	57.4/218.5	7.0/10.0
白姜花 <i>Hedychium coronarium</i>	15	15	20.0/96.3	3.0/12.0	15	15	20.0(3.0)/127	3.0/7.3
黃苞蝎尾蕉 <i>Heliconia latistaha</i>	6	6	20.0/84.0	3.0/15.0	6	4	20.0/82.0	3.0/5.0
疊穗莎草 <i>Phaius flavus</i>	10	10	15.0/119.3	4.0/11.0	10	10	15.0/109.3	4.0/15.0
黃花蔺 <i>Limnocharis flava</i>	3	3	14.4/187.6					

3.2 人工湿地系统进出水温度 (T)、溶解氧 (DO) 和 pH 值

同时进行的大气温度测定显示，环境温度变化值在 21.8℃-34.8℃ 之间，平均 25.8℃。如图 2A 所示，污水处理前后温度变化较小，在 0.3℃ 以内。溶解氧的测定结果表明（图 2B），水中溶解氧经过下行植物床 5、6 后，浓度降低至接近 0 的水平，而后在通过上行植物床 7、8 后，溶解氧浓度又上升至比较高的水平，整个变化趋势呈“V”字形。pH 是水质的一个重要指标，影响着与污水处理相关的一系列反应。图 2C 表明，污水略显碱性，经过植物床处理后，pH 值明显下降。

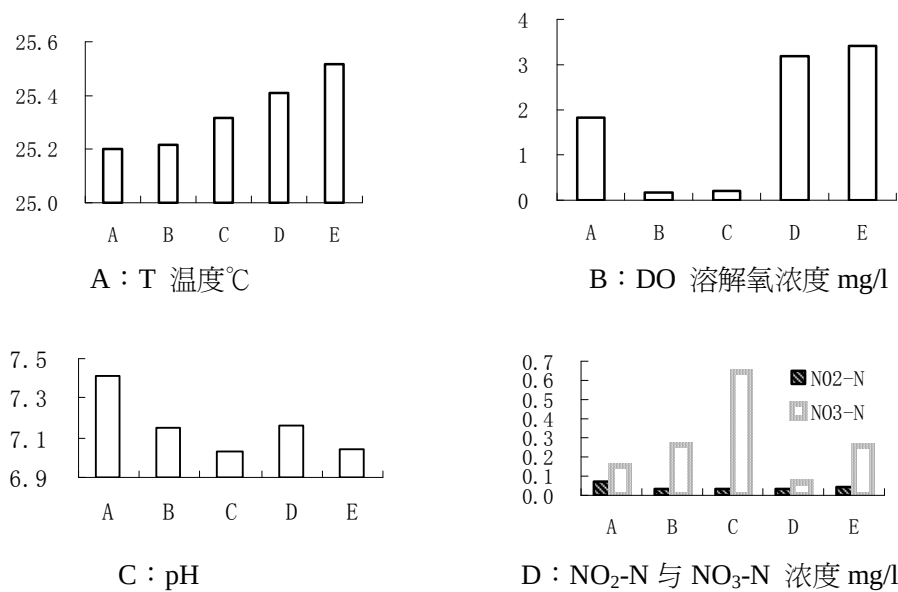


图 2 各取样点温度 (T) 及溶解氧 (DO)、pH、NO₃⁻N 和 NO₂⁻N 浓度变化

3.3 COD、BOD 及氮、磷去除效果

表 2 列出了污水处理前后几个重要污染物指标 COD_{Cr}、BOD₅、TP、TN 和 NH₄⁺-N 在不同取样点的浓度变化情况，图 3 对取样点 b、c、d 和 e 各指标相对取样点 a 的去除率作了比较。结果表明，污水中 COD_{Cr} 和 BOD₅ 处于相对较低的水平，经过植物床 5、6 处理后，去除率达到 60% 以上。含氮污染物主要以氨氮的形式存在，氨氮占总氮量的 80% 以上。相对含碳化合物较高的去除率，含氮化合物的去除率则要低得多，其值不到 40%。硝态氮是硝化反应的终产物，是氮污染的一种重要形式，从图 2D 可看出，它的浓度相对较低，在 0.1mg·l⁻¹-0.7mg·l⁻¹ 之间，亚硝态氮是硝化反硝化过程的中间产物，很不稳定，浓度均低于 0.1mg·l⁻¹。磷是各种污染物中去除效果最好的，从图 3 可以看出，总磷去除率超过 80%，但下行植物床去除的量只占一小部分，特别是在植物床 5、7 中，绝大部分磷在上行植物床去除。总体上看，新、旧植物床的净化效果均达到预期效果。

表 2 几种主要污染物指标在污水处理过程中的浓度变化					
单位：mg·l ⁻¹ .					
测试指标	取样点 a	取样点 b	取样点 c	取样点 d	取样点 e
COD _{Cr} (mg·l ⁻¹)	59.80±15.28	21.24±5.12	20.52±8.38	20.51±7.89	18.57±3.89
BOD ₅ (mg·l ⁻¹)	39.72±13.59	17.64±6.02	14.96±4.77	14.07±6.71	11.27±6.14
NH ₄ ⁺ -N (mg·l ⁻¹)	12.41±3.5	10.12±1.57	8.30±1.63	10.14±2.19	7.85±1.91
TN (mg·l ⁻¹)	14.13±3.09	12.1±1.30	10.64±1.46	11.27±2.15	9.39±1.83
TP (mg·l ⁻¹)	1.360±0.483	1.228±0.246	0.941±0.209	0.211±0.027	0.293±0.215

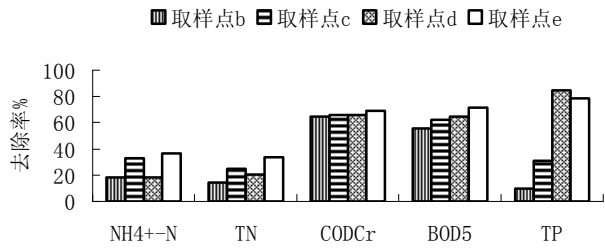


图 3 污染物去除率比较

3.4 水质微生物指标

为了更好地了解人工湿地生态系统微生物群落的建立与生物污水处理净化效果之间的关系，对人工湿地中的微生物指标也进行了测定。经过二级人工湿地系统的处理后，细菌总数减少了 3 个数量级，真菌总数与放线菌总数减少了 2 个数量级，总大肠菌群 MPN 数减少了 3 个数量级。细菌总数、真菌总数、放线菌总数、总大肠菌群的去除率均达到 99% 以上，其中总大肠菌群去除率竟高达 99.9 % 以上（表 3）。在微生物指标方面，两个平行工艺没有明显的差异。这表明该生活污水人工湿地处理系统对微生物的去除具有高效性。

表 3 人工湿地水质微生物指标平均值及去除率 %

项目	取样点 a	取样点 b	取样点 c	取样点 d	取样点 e
放线菌总数(×1000 个/ml)	64.75±2.50	35.50±6.45\45.17	22.75±7.14\64.86	0.33±0.17\99.50	0.23±0.15\99.65
细菌总数(×10000 个/ml)	144.25±6.13	38.50±5.07\73.31	35.38±5.41\75.48	0.43±0.06\99.71	0.37±0.09\99.74
真菌总数(×1000 个/ml)	47.25±5.56	8.25±2.22\82.54	8.75±0.96\81.48	0.52±0.12\98.89	0.18±0.09\99.63
总大肠菌群 100ml 的 MPN 数	7240000.00±0.00	24500.00±3316.62\99.66	29500.00±11000.00\99.59	4275.00±95.74\99.94	4000.00±61.88\99.94

4 结论

传统植物组合和新植物组合的净化效果都较好。驯化的植物在生长过程中比较稳定，且在上下行植物床中其生长状态无明显差异。未经驯化的植物在观测期间有部分出现停滞生长或死亡的现象，而且在下行植物床中存活的植物中有多种未能在上行植物床中存活。薹苳、象草、白姜花、黄苞蝎尾蕉、叠穗莎草、黄花蔺等 6 植物是较好的新人工湿地植物组合，这个组合具高多样性、高成活率、耐污染、高净化、景观美、能衍生微生物种群的特点。

两组植物床均保持了较好的污水净化能力，显著降低了污水的 pH，对 COD_{Cr}、BOD₅、TP、TN 和 NH₃-N 的去除率也分别达到了 65.7%、64.6%、78.5%、20.2%和 18.3% 以上。尽管如此，由于植物配置不同，两组植物床对污水的净化效果也存在较大的差别，驯化植物床的 pH 下降幅度明显高于未驯化植物床的，对 TN、NH₃-N 和 NO₃⁻N 的去除能力也是前者明显好于后者。对于串联的下行与上行植物床来说，DO（溶解氧）浓度先下降到接近 0 的水平，再上升至比初始更高的水平，NO₃⁻N 浓度变化趋势与 DO 相反，TP 的去除则主要集中在上行植物床。人工湿地对生活污水的净化效果看，经一级系统后，出水水质各指标均达国家地面水质 III 类标准以上，部分达 II 级以上，有的甚至达到 I 级标准。经二级系统以后，出水水质各指标均达 II 级以上。结果表明，这个人工湿地的净化效果能达到甚至优于传统的二级生化处理厂效果。

参考文献

[1] 吴晓磊.人工湿地处理机理.环境科学, 1995, 16(3): 83~86

[2] Hammer D A. Constructed wetlands for wastewater treatment. Michigan: Lewis Publishers Inc. 1989, 5~20

[3] Jos TA. Verhoeven. Wetlands for wastewater treatment:opportunities and limitations. Ecological Engineering, 1999,12:5~12

[4] 于少鹏,王海霞,万忠娟等.人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景.地理科学进展,2004 ,23(1) :22~29

[5] 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

[6] 国家环保局编.水和废水监测方法.北京:中国环境科学出版社, 1989

[7] 中国科学院南京土壤研究所微生物室.土壤微生物研究法.北京:科学出版社, 1985

[8] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册.北京:农业出版社, 1986

[9] 吴振斌,周巧红,贺锋等.构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究.中国环境科学, 2003, 23(4): 422~426