

人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价

陈永华, 吴晓芙*, 陈明利, 蒋丽娟, 李科林, 雷电, 王海滨

(中南林业科技大学环境科学与工程研究所, 长沙 410004)

摘要: 选用25种冬季湿地植物进行了污水净化潜力筛选试验, 并在综合应用原有湿地植物筛选与评价体系的基础上, 增加植物逆境酶和基质酶指标, 对试验植物进行了聚类分析。结果表明, 测试植物的根系长度、活力、叶片丙二醛含量、生长量、氮磷浓度、氮磷的积累能力、根际基质脲酶活性与磷酸酶活性均存在显著差异。采用建立的净化潜力评价体系将测试植物聚类分为3大类, 第1类净化力强, 植物种类有水芹、油菜、灯芯草、虎耳草、德国鸢尾、桂花和花菖蒲, 第2类净化力中等, 植物种类有羽衣甘蓝、金盏菊、撒金珊瑚、女贞、红甜菜、杜鹃和大叶冬青, 第3类净化力弱, 植物种类有白菜、五月菊、月季、金鱼草、麦冬、葱兰、熊掌木、矮牵牛、小叶冬青、香石竹和红继木。

关键词: 冬季湿地植物; 根系活力; 丙二醛; 生长量; 氮磷积累量; 基质酶

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1789-06

Selection of Winter Plant Species for Wetlands Constructed as Sewage Treatment Systems and Evaluation of Their Wastewater Purification Potentials

CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, CHEN Ming-li, JIANG Li-juan, LI Ke-lin, LEI Dian, WANG Hai-bin

(Institute of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to establish an evaluation system for selection of winter wetland plants possessing high wastewater purification potentials in subtropics areas, designed sewage treatment experiments were carried out by introducing into the constructed wetlands 25 species of winter wetland plants. Cluster analysis was performed by including harmful environment-resistant enzyme and substrate enzyme activities into the commonly applied plant screening and assessment indexes system. The obtained results indicated that there were significant differences among the tested winter plants in their root length and vigor, leaf malonaldehyde (MDA), biomass, average nitrogen and phosphorus concentration and uptake, and urease and phosphoric acid enzyme activities in the root areas. Based on the established evaluation system, the tested plants were clustered into 3 groups. The plants in the 1st group possessing high purification potentials are *Oenanthe javanica*, *Brassicacapestris*, *Juncus effusus*, *Saxifragaceae*, *Iris pseudoacorus*, *Osmanthus fragrans* and *Iris ensata*; those in the 2nd group possessing moderate purification potentials are *Brassica oleracea* var *acephala*, *Calendula officinalis*, *Aucuba japonica*, *Ligustrum lucidu*, *Beta vulgaris*, *Rhododendron simsii* and *Ilex latifolia*; and those in the 3rd group with low purification potentials are *Brassica oleracea* var *acephala*, *Calistephus chinensis*, *Rosa chinensis*, *Antirrhinums*, *Liriope palatyphylla*, *Zephyranthes candida*, *Fatschedera lizei*, *Petunia hybrida*, *Ilex quihoui*, *Dianthus caryophyllus* and *Loropetalum chinensis*.

Key words: winter wetland plant; root vigor; malonaldehyde (MDA); biomass; N and P uptake; substrate enzyme

人工湿地技术是利用湿地中基质、植物和微生物之间的相互作用, 通过一系列物理、化学及生物作用来净化污水^[1-4]。在人工湿地系统中, 植物是核心要素, 湿地植物不仅可以通过直接吸收带走污质, 还可通过根系滞留、促进根际硝化与反硝化速率, 改善通气条件提高根际微生物的降解活性等交互作用来提高系统整体的净化能力^[5,6]。

目前各国建立的人工湿地处理系统主要集中在温暖地带, 湿地植物方面的研究也多在南部地区, 而在北方寒冷地带建立的人工湿地系统通常是采用覆盖保温材料来提高冬季的处理效果^[7-12]。寒冷气候条件下人工湿地的运行与管理是湿地技术的难点, 其极大地限制了湿地技术的推广应用^[13-15]。湖南位于亚热带地区, 但在这一地区的冬季, 目前人工湿地系统中采用的大多数植物都会停止生长甚至死亡,

其不仅降低了人工湿地的净化能力, 也严重影响着湿地系统的景观效果。

针对上述问题, 本研究设计了人工湿地污水处理系统中不同植物作用的比较试验, 并在现有湿地植物筛选与评价体系的基础上, 增加了与植物抗性相关的酶和植物与微生物互作产生的基质酶活性作为冬季湿地植物筛选与净化潜力评价的重要指标,

收稿日期: 2009-10-11; 修订日期: 2009-11-20

基金项目: 环保公益性行业科研专项(200909066); 国家科技部国际合作项目(2007-DFA91420); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07212-001); 湖南省科技厅博士后专项基金项目(2008RS4027); 中南林业科技大学校青年基金重点项目(2008001A); 湖南省高校创新平台开放基金项目(09K055); 湖南省环境科学重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 陈永华(1977~), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为湿地植物的选育与应用, E-mail: chen Yonghua3333@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuxiaofu530911@vip.163.com

在中试条件下对 25 种在亚热带地区可以越冬的水生和陆生植物进行筛选与评价,旨在建立一套科学的冬季湿地植物筛选与净化潜力评价体系,并筛选出一批可以在亚热带地区的冬季引入人工湿地的高效去污植物种类,以期对相关地区人工湿地冬季植物的选择提供基础数据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验系统

本组合人工湿地污水处理系统于 2001 年建成,总面积为 $1\,455\text{ m}^2$,其中潜流人工湿地单元总面积为 379 m^2 . 潜流湿地单元的床体深 1m,下部填充粒径为 3~5 cm 的石灰石 40 cm,上面铺 5 cm 河沙,然后铺沸石 15 cm,最上层再铺约 10 cm 的细沙. 2006 年 10~11 月将收集的冬季植物引入到潜流人工湿地中,观察存活率和生长状况. 经过 1 a 的初选,2007 年 11 月将生长较好的 25 种植物作为试验物种,沿水流方向平行排列种植在潜流湿地中,每种植物 5 株,植物栽植密度 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$. 在本试验处理系统流程为(图 1):进水为生活区污水,污水经过水泵提升后,首先进入表流预处理单元,进行预处理,然后经过布水槽,均匀进入植物与对照潜流处理单元,经处理后的污水再进入表流湿地处理单元,最后达标排放. 经预处理后进入潜流湿地(试验)处理单元的污水主要水质指标为: COD $108.26 \sim 125.74\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TN $39.53 \sim 44.47\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TP $2.09 \sim 2.43\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验期间系统在自然条件下连续运行,水力负荷保持为 $2.4\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,植物系统与对照系统的污水停留时间一致,但由于不同时间进水量有差异,污水停留时间在试验时期内的变化范围约为 48~60 h. 试验观测期为 2007-11-15~2008-04-15,系统运行中定期观测与测定水质,5 个月后每种植物取 3

株作为样本测定生长量、植物 N 及 P 含量等各项指标.

1.2 测定方法

1.2.1 水质指标的测定

方法参照文献[16].

1.2.2 植物适应能力与抗寒指标

植物根系长度与活力、丙二醛含量是反应植物适应污水与寒冷环境条件能力的主要指标之一,根系长度采用 3 株植物的最长根平均数计算,根系活力、丙二醛(MDA)含量的测定方法参照文献[17].

1.2.3 植物生长量

植物生长量是反应植物适应胁迫环境能力的重要指标之一. 试验用植物在移植前称干重,经过 5 个月生长以后再称干重,将待测样品在 80°C 烘箱中烘至恒重后称重,计算单株平均生长量.

1.2.4 植物氮磷积累量

植物氮磷积累量是植物通过吸收从湿地系统中带走的氮磷量,其反映植物的直接净化能力. 植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮制备成溶液, NH_4^+ 含量用过硫酸钾氧化吸光光度法测定^[18],总磷用钒钼蓝法测定^[19]. 植物氮磷积累量(PA)的计算公式为:

$$\text{PA} = \text{PC} \times \text{PB} \quad (1)$$

式中,PA 为植物氮磷积累量,PC 为植物氮磷浓度, PB 为植物生长量.

1.2.5 根际基质脲酶与基质磷酸酶活性

根际基质脲酶与基质磷酸酶活性反映植物根系与微生物的互作强度,其测定方法参照文献[20]. 土壤基质脲酶活性以 24 h 后 100 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 mg 数表示,土壤基质磷酸酶活性以 24 h 后 100 g 土壤中酚的 mg 数表示.

实验数据采用 SPSS 软件进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 试验系统的处理效果

表 1 给出了冬季植物实验和对照系统试验期间水质结果月平均值. 由于污水经过了前置单元的预处理,进入试验系统的进水污染物浓度较低,有植物和对照处理系统的各项指标均达到了国家规定的二级排放标准(GB 18918-2002). 从表 1 可以看出,有植物处理系统的 COD、TN 与 TP 的去除率均明显高于对照的值,统计分析表明,处理与对照 COD 去除率差异极显著 ($p < 0.01$). 此外,试验系统出水 COD 浓度呈现随着时间推移逐渐增高的趋势,各月份之间出水的 TN 和 TP 浓度的差异不显著. 比较试

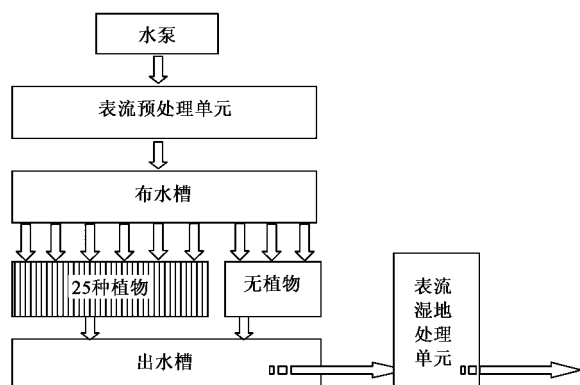


图 1 试验处理系统流程示意

Fig. 1 Process of the treatment system

验系统在各月份间的去除率,可看出 COD、TN 与 TP 的去除率都在 1 月时最低,其原因是该时期发生特大冰灾,试验区温度急剧下降,处理系统的生物活性极低.在 2008 年 1 月湖南特大冰灾期间,试验区十多天持续低温至 -9.5°C ,处理系统中所有试验植物

都被冰雪覆盖,植物地上部分尤其是叶片受到严重的冻害.然而在这种异常冰冻的条件下,绝大多数试验植物的主干和地下部分都没有被冻死,冻害过后所有试验植物都能迅速恢复生长,说明筛选的植物具有极强的抗寒能力.

表 1 试验期间水质分析(月平均值)

Table 1 Water quality analysis during experimental period (average month value)

时间	平均温度	类型	COD		TN		TP	
			出水浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率 $/\%$	出水浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率 $/\%$	出水浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率 $/\%$
2007-11	18.0	有植物	64.34	40.57	30.63	27.87	1.39	36.57
		无植物	73.47	32.14	32.74	22.92	1.52	30.51
2007-12	7.5	有植物	68.27	39.63	28.03	32.35	1.45	40.23
		无植物	77.11	31.81	30.36	26.71	1.55	36.38
2008-01	5.3	有植物	71.11	34.36	32.61	26.66	1.62	30.61
		无植物	77.80	28.19	35.94	20.18	1.75	24.83
2008-02	6.3	有植物	70.37	36.24	27.64	30.08	1.50	33.81
		无植物	78.05	29.28	29.67	24.94	1.57	30.52
2008-03	13.1	有植物	73.05	38.96	30.14	30.15	1.42	32.08
		无植物	82.15	31.35	30.88	28.43	1.53	26.79
2008-04	17.0	有植物	77.75	38.17	25.20	36.82	1.45	31.16
		无植物	86.57	31.15	26.51	33.55	1.57	25.78

2.2 植物生理特性与相关指标比较与评价

2.2.1 植物根系长度、根系氯化三苯基四氮唑(TTC)还原量以及叶片丙二醛含量

许多学者在进行湿地植物筛选时把根系的长度、数量、活力作为最常用的指标^[21,22],其中常用根系 TTC 还原量来反映根系的活力水平.另外,植物器官在逆境条件下,往往发生膜脂过氧化作用,其产物 MDA 通常作为脂质过氧化指标,表示对逆境条件反应的强弱.因此本试验测定分析了植物的根系长度、根系 TTC 还原量和叶片 MDA 含量,其结果见表 2.

试验植物在冬季人工湿地中生长 5 个月后,其根系长度、根系 TTC 还原量、叶片 MDA 含量方面都表现出明显的差异.根系发育良好的植物有油菜、德国鸢尾、金鱼草、白菜、女贞、灯芯草和水芹,这 7 种植物的根系长度都在 15 cm 以上,油菜、德国鸢尾可达到 25~27 cm,基本与地上部分高度相同.根系较短的包括红甜菜、香石竹、虎耳草、矮牵牛、小叶冬青,这 5 种植物的根系长度都在 8 cm 以下,根系活力较强的依次为:女贞、金盏菊、撒金珊瑚、五月菊、葱兰、羽衣甘蓝、麦冬、白菜,这 8 种植物的根系 TTC 还原量都在 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot(0.5\text{ g}\cdot2\text{ h})^{-1}$ 以上;根系活力较弱的包括德国鸢尾、杜鹃、矮牵牛、红田菜、大叶冬青,这 5 种植物的根系 TTC 还原量都在 $30\text{ }\mu\text{g}\cdot(0.5\text{ g}\cdot2\text{ h})^{-1}$ 以下(表 2).

有些研究发现在湿地运行中根系数量过多对水

流起一定的阻碍作用,造成处理床堵塞^[23],因此认为根系数量有时不宜作为湿地植物的筛选指标,但大多数研究者都认为根系长度在湿地植物的净化中起着关键作用,而根系活力水平决定根系吸收的强弱^[23,24].本试验结果表明根系长度和活力可作为湿地植物适应能力强弱的筛选指标.

有研究表明,植物在遇到低温时,MDA 含量会升高,抗性越强的植物其 MDA 含量越低^[25,26].因此,叶片 MDA 含量可以作为湿地植物抗寒能力筛选的指标之一.本试验植物中叶片 MDA 含量较低的依次为:矮牵牛、葱兰、德国鸢尾、白菜、金鱼草、香石竹、花菖蒲、撒金珊瑚,这 8 种植物 MDA 含量都在 $10\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下.MDA 含量较高的有:麦冬、羽衣甘蓝、月季、杜鹃、桂花,这 5 种植物的 MDA 含量都在 $23.44\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上.

2.2.2 试验植物生长和氮磷积累量

植物的氮磷积累量是植物在湿地系统中去除氮磷的直接贡献,有研究表明植物吸收去除氮磷的量较小,约为湿地系统去除氮磷总量的 5% 左右^[26,27].植物在系统的去 N 除 P 功能更主要表现为其在改善根际微生态环境中与填料、微生物的协同作用.

在一定程度上,冬季植物的生长量与氮磷积累量不仅能反映植物对寒冷环境的适应性,也能反映植物的抗污能力.生长量是植物在一段时期内重量的净增加值,而且有很多研究显示,生物量与氮、磷

积累量的相关性优于植物体内氮、磷浓度^[27,28],植物氮磷积累量是表示植物从湿地系统中带走的氮磷量,是直接反映植物的净化潜力的重要指标之一,其大小由生长量和植物氮磷浓度决定,每种植物体内N、P含量是一定的,因此,要提高植物对污染物的直接吸收功能,主要是依靠提高植物的生长量来增加植物氮磷积累量。

试验植物的氮、磷的积累能力排名与生长量的排名基本一致(见表3),较强的依次为:油菜、德国鸢尾、水芹、灯芯草、白菜、金盏菊,较弱的依次为女贞、小叶冬青、杜鹃、红继木等。表3中的数据说明植物氮磷的积累能力主要由生长量决定,因此,生物量的大小是评价植物耐污与去污能力的重要的指标之一。

表2 试验植物根系活力与叶片丙二醛含量

Table 2 Comparison of physiological characteristics of plant roots and leaves

植物	拉丁名	根系长度 /cm	排名	TTC 还原量 / $\mu\text{g} \cdot (0.5 \text{ g} \cdot 2 \text{ h})^{-1}$	排名	MDA 含量 / $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$	排名
月季	<i>Rosa chinensis</i>	12	14	93.35	9	51.77	23
女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	17	5	181.63	2	12.98	15
熊掌木	<i>Fatsyhedera lizei</i>	10	17	65.09	15	11.73	13
红继木	<i>Loropetalum chinensis</i>	13	11	68.63	14	10.34	10
撒金珊瑚	<i>Aucuba japonica</i>	10	17	164.32	4	9.63	8
桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>	13	11	36.84	19	23.44	21
德国鸢尾	<i>Iris pseudoacorus</i>	25	2	15.65	25	6.98	3
大叶冬青	<i>Ilex latifolia</i>	9	20	29.78	21	14.86	18
五月菊	<i>Calistephus chinensis</i>	14	8	192.22	1	10.27	9
羽衣甘蓝	<i>Brassica oleracea var acephala</i>	13	11	164.32	4	58.21	24
金鱼草	<i>Antirrhinum</i>	24	3	75.69	12	8.75	5
矮牵牛	<i>Petunia hybrida</i>	6	21	26.25	23	2.26	1
水芹	<i>Oenanthe javanica</i>	15	7	54.5	18	11.56	11
小叶冬青	<i>Ilex quihoui</i>	6	21	30.67	20	13.38	16
葱兰	<i>Zephyranthes candida</i>	14	8	118.07	8	6.36	2
花菖蒲	<i>Iris ensata</i>	11	15	82.75	11	9.58	7
虎耳草	<i>Saxifragaceae</i>	6	21	55.25	17	16.27	19
麦冬	<i>Liriope palatophylla</i>	14	8	132.19	7	75.79	25
杜鹃	<i>Rhododendron simsii</i>	11	15	19.17	24	37.00	22
油菜	<i>Brassicapestris</i>	27	1	58.03	16	13.53	17
白菜	<i>Brassica campestris</i>	20	4	178.1	3	8.72	4
灯芯草	<i>Juncus effusus</i>	16	6	72.16	13	12.02	14
红甜菜	<i>Beta vulgaris</i>	5	24	29.78	21	16.47	20
香石竹	<i>Dianthus caryophyllus</i>	5	25	89.81	10	8.81	6
金盏菊	<i>Calendula officinalis</i>	10	17	135.72	6	11.71	12

2.2.3 试验植物根际基质酶活性

根际基质脲酶与磷酸酶活性能反应植物根系与微生物互作强度。基质脲酶是一种酰胺酶,能酶促有机质分子中肽键的水解,研究发现基质脲酶活性与基质的微生物数量、有机物质含量、全氮和速效氮含量呈正相关^[29],基质磷酸酶能酶促有机磷化物的水解^[30]。因此,根际基质脲酶与基质磷酸酶活性是间接反映植物对N、P吸收能力强弱的主要指标之一。以前的研究结果^[28]已表明,根际基质脲酶与磷酸酶活性与湿地系统COD、TN、TP的去除率具有相关性,其结果与吴振斌等^[31]的报道一致。

试验植物的根际基质脲酶与基质磷酸酶活性排名见表4,基质脲酶活性较强的依次为:虎耳草、水芹、花菖蒲、月季、红继木,基质脲酶活性较弱的有:

小叶冬青、金盏菊、灯心草、五月菊、白菜、大叶冬青。基质磷酸酶活性较强的依次为:油菜、葱兰、五月菊、虎耳草、香石竹。基质磷酸酶活性较弱的有:金盏菊、熊掌木、水芹、红甜菜、杜鹃等。

2.3 聚类分析与净化潜力评价

建立科学的冬季人工湿地植物筛选与净化潜力评价体系,是湿地植物筛选工作必须先解决的问题。从试验植物上述的单一指标排名可看出,不同指标间的排名有一定相关性,但也存在着显著的差异,说明采用单一的指标不能科学客观地反映植物的抗寒能力与污水净化潜力。因此,本研究对根系长度、活力、叶片丙二醛含量、生长量、植物体氮浓度、植物体磷浓度、植物氮的积累量、植物磷的积累量、根际基质脲酶活性与磷酸酶活性这10个指标进行了欧

表 3 湿地植物的氮磷积累量比较										
Table 3 Comparison of plan uptake of N and P										
植物	平均生长量 /g·株 ⁻¹	排名	植物氮磷浓度/mg·g ⁻¹		排名		植物氮磷积累量/mg·株 ⁻¹		排名	
			N	P	N	P	N	P	N	P
月季	17.31	16	8.25	3.65	18	3	142.85	63.23	19	15
女贞	4.36	24	18.15	1.91	8	10	79.15	8.34	22	24
熊掌木	13.30	18	8.48	0.65	17	22	112.75	8.68	21	22
红继木	7.04	23	1.44	1.22	24	17	10.14	8.61	24	23
撒金珊瑚	43.33	12	17.09	2.56	10	7	740.49	110.92	11	11
桂花	11.31	19	45.18	2.24	3	8	510.83	25.37	14	17
德国鸢尾	477.31	2	2.84	5.00	22	1	1 354.16	2 387.71	7	1
大叶冬青	16.36	17	51.19	4.28	1	2	837.46	69.95	10	13
五月菊	89.73	9	3.34	1.31	21	16	299.36	117.51	16	9
羽衣甘蓝	94.13	8	17.48	2.63	9	6	1 645.56	247.91	4	8
金鱼草	96.28	7	6.66	2.70	19	4	641.31	259.89	12	7
矮牵牛	7.12	22	25.69	1.95	6	9	183.01	13.91	18	21
水芹	347.22	4	25.01	1.13	7	18	8 684.38	393.43	2	4
小叶冬青	3.79	25	5.73	0.77	20	21	21.73	2.90	23	25
葱兰	41.95	13	12.09	0.63	13	23	506.98	26.43	15	16
花菖蒲	28.18	15	47.52	2.67	2	5	1 339.04	75.30	8	12
虎耳草	52.60	11	27.89	0.59	4	24	1 467.15	30.88	6	14
麦冬	10.69	20	11.88	1.56	14	15	127.03	16.66	20	18
杜鹃	8.51	21	27.41	1.71	5	13	233.25	14.53	17	20
油菜	719.25	1	14.22	1.72	12	12	10 226.87	1 235.75	1	2
白菜	257.23	5	2.14	1.02	23	20	550.11	261.90	13	6
灯芯草	383.17	3	11.45	1.11	15	19	4 387.42	424.73	3	3
红甜菜	67.88	10	16.01	1.68	11	14	1 086.94	113.98	9	10
香石竹	36.01	14	0.22	0.41	25	25	7.76	14.78	25	19
金盏菊	167.76	6	9.57	1.77	16	11	1 604.81	297.53	5	5

表 4 试验植物根际基质脲酶与磷酸酶活性比较				
Table 4 Comparison of substrate urease and phosphatase				
植物	基质脲酶活性 /mg·100 g ⁻¹	排名	基质磷酸酶活性 /mg·100 g ⁻¹	排名
月季	14. 83	4	44. 85	16
女贞	7. 41	13	44. 85	17
熊掌木	4. 94	19	42. 69	24
红继木	12. 36	5	46. 49	12
撒金珊瑚	12. 36	6	45. 39	13
桂花	12. 36	7	44. 31	20
德国鸢尾	9. 88	9	44. 85	18
大叶冬青	4. 94	20	49. 17	9
五月菊	4. 94	21	55. 12	3
羽衣甘蓝	7. 41	14	44. 85	19
金鱼草	12. 36	8	47. 55	10
矮牵牛	6. 36	18	50. 25	8
水芹	88. 99	2	43. 23	23
小叶冬青	4. 68	25	45. 32	15
葱兰	7. 41	15	55. 66	2
花菖蒲	24. 71	3	51. 87	6
虎耳草	93. 04	1	53. 49	4
麦冬	9. 88	10	45. 39	14
杜鹃	9. 88	11	44. 31	21
油菜	7. 41	16	57. 82	1
白菜	4. 94	22	47. 55	11
灯芯草	4. 94	23	51. 87	7
红甜菜	7. 41	17	44. 31	22
香石竹	9. 88	12	52. 4	5
金盏菊	4. 94	24	42. 15	25

式距离综合聚类分析^[32],图 2 给出了聚类分析的结果。

从聚类距离来看,将 25 种植物以并类距离 128 为标准时刻分为 3 大类较为科学合理,其中,第 1 类

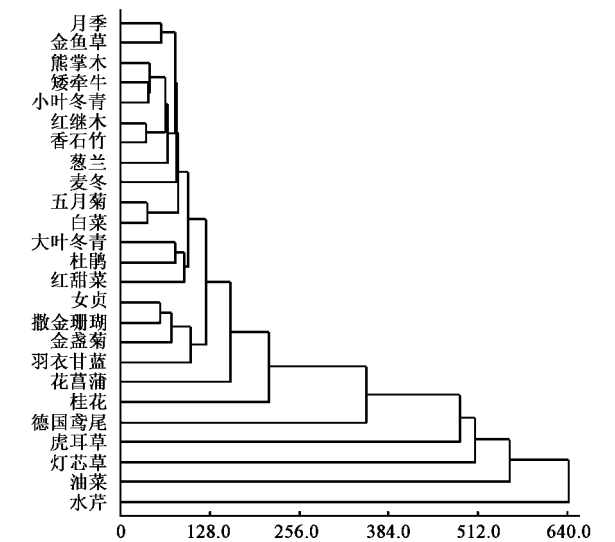


图 2 25 种植物采用净化潜力评价指标聚类

Fig. 2 Clustering of purification potential evaluation indicators of 25 kinds plant

为净化潜力强的植物,有水芹、油菜、灯芯草、虎耳草、桂花、德国鸢尾、桂花和花菖蒲,第2类为净化潜力中等的植物,有羽衣甘蓝、金盏菊、撒金珊瑚、女贞、红甜菜、杜鹃和大叶冬青.第3类为净化潜力较弱的植物,有白菜、五月菊、月季、金鱼草、麦冬、葱兰、熊掌木、矮牵牛、小叶冬青、香石竹和红继木.

3 结论

(1)本研究筛选的25种植物在试验期间表现出极强的抗寒能力和较强的污水净化能力,可作为我国南方冬季人工湿地系统的备选植物,尤其是水芹、油菜、灯芯草、虎耳草、德国鸢尾、桂花、花菖蒲7种植物.

(2)用筛选植物建立的污水处理人工湿地系统在冬季运行良好,系统处理后出水的各项指标可达到了国家规定的二级排放标准(GB 18918-2002),说明筛选植物具有较强的污水净化能力.

(3)采用植物根系长度、活力、叶片丙二醛含量、生长量、氮磷浓度、氮磷的积累能力、根际基质脲酶活性与磷酸酶活性这10项指标建立的净化潜力评价体系可用于人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价.

参考文献:

- [1] Ryszard B, Sadzide M B. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow[J]. Water Science Technology, 1997, **35**:183-188.
- [2] Anderson T A, Cuthie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environmental Science and Technology, 1994, **27**: 26302-26361.
- [3] 杨新萍,周立祥,戴媛媛,等.潜流人工湿地处理微污染河道水中有机物和氮的净化效率及沿程变化[J].环境科学, 2008, **29**(8):2177-2182.
- [4] 叶建锋,徐祖信,李怀正.垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J].环境科学,2008, **29**(8):2166-2171.
- [5] 陈永华,吴晓芙,蒋丽鹃,等.处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J].环境科学学报,2008, **28**(8): 1549-1554.
- [6] 陈进军,郑翀,郑少奎.表面流人工湿地中水生植被的净化效应与组合系统净化效果[J].环境科学学报, 2008, **28**(10): 2029-2035.
- [7] 蒋永荣,莫德清,段钧元,等.不同植物配置人工湿地冬季生活污水净化效果比较[J].水资源保护,2009, **25**(3):25-28.
- [8] 张建,邵文生,何苗,等.潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究[J].环境科学,2006, **27**(8):1560-1564.
- [9] 项学敏,杨洪涛,周集体,等.人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究:冬季和夏季对比[J].环境科学,2009, **30**(3):713-719.
- [10] 雒维国,王世和,黄娟,等.潜流型人工湿地冬季污水净化效果[J].中国环境科学,2006, **26**(增刊):32-35.
- [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] 刘学燕,代明利,刘培斌,等.人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究[J].农业环境科学学报,2004, **23**(6):1077-1081.
- [13] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. Ecological Engineering,2002, **19**(1):1-11.
- [14] 宋晨,项学敏,周集体,等.人工湿地对北方城市污水深度处理效果的研究[J].环境污染与防治,2007, **29**(6):433-436.
- [15] Cookson W R, Cornforth I S, Rowarth J S, et al. Winter soil temperature(2-15℃) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils;a laboratory and field study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(10):1401-1415.
- [16] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.89-283.
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [18] 吴建之,葛滢,王晓月.过硫酸钾氧化分光光度法测定植物总氮[J].理化检验——化学分册,2000, **36**(4):166-167.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 李阜棣,喻子牛,何绍红.农业微生物学实验技术[M].北京:中国农业出版社,1996.
- [21] Armstrong J, Armstrong W. *Phragmites australis*-a preliminary study of soil-oxidizing sites and internal gas transport pathway[J]. New Phytologist, 1998, **108**: 373-382.
- [22] 徐德福,李映雪,方华,等.4种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响[J].农业环境科学学报,2009, **28**(3):587-591.
- [23] 王晟,徐祖信,李怀正,等.植物根系对垂直流人工湿地水力条件的影响[J].同济大学学报(自然科学版)2008, **36**(4):519-524.
- [24] Brix H, Arias C A, Lienard A. Danish guidelines for small scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage[J]. Water Science Technogy,2005, **51**(9):1-8.
- [25] 靖元孝,任延丽,杨丹菁,等.人工湿地污水处理系统三种红树植物抗性生理特性[J].应用生态学报,2006, **17**(8):1544-1546.
- [26] 陈明利,吴晓芙,陈永华,等.蛭石人工湿地中吸附生物转化系统脱氮能力及其机理研究[J].环境工程学报,2009, **3**(2):223-228.
- [27] 李建娜,胡曰利,吴晓芙,等.人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究[J].环境污染与防治,2007, **29**(7):506-509.
- [28] 陈永华,吴晓芙,何钢,等.人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J].生态学报,2009, **29**(11):6051-6058.
- [29] 梁威,吴振斌,周巧红,等.复合垂直流构建湿地基质微生物类群及酶活性的空间分布[J].云南环境科学,2002, **21**(1):5-8.
- [30] Ebersberger D, Niklaus P A, Kandeler E. Long term CO₂ enrichment stimulates N-mineralisation and enzyme activities in calcareous grassland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(7):965-972.
- [31] 吴振斌,梁威,邱东茹,等.复合垂直流构建湿地基质酶活性与污水净化效果[J].生态学报,2002, **22**(7):1012-1017.
- [31] 薛薇.统计分析与SPSS的应用[M].北京:中国人民大学出版社,2003.225-236.