

几种水生植物净化能力比较

王庆海^{1,2}, 段留生¹, 李瑞华³, 武菊英²

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100094; 2. 北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097;

3. 华中农业大学 植物科技学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:通过模拟人工湿地的方法测试了7种高等水生植物对农村生活污水的净化能力,旨在筛选合适的湿地植物。结果表明:有植物处理系统对COD、总氮和总磷的去除效果明显高于无植物对照,植物本身的氮磷累积作用对氮的去除贡献为7%~63%,磷的去除贡献为12%~65%。多数测试植物对氮磷的富集量茎叶高于根系。不同植物的净化能力也有较大差异,从强到弱的顺序依次为芦竹>荻>菖蒲>芦苇>水生鸢尾>千屈菜>野慈姑。聚类分析结果显示这7种植物明显分为3类,其中,芦竹单独为一类,此类植物净化能力强;菖蒲、芦苇和荻为一类,此类植物净化能力较强;水生鸢尾、千屈菜和野慈姑为一类,此类植物净化能力较弱。

关键词:水生植物;氮磷累积量;净化能力

中图分类号:S94 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2008)02-0217-06

Comparison of Nutrient Uptake from Rural Domestic Sewage of Aquatic Plants

WANG Qing - hai^{1,2}, DUAN Liu - sheng¹, LI Rui - hua³, WU Ju - ying²

(1. College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of

Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. College of Plant Science

and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The ability of 7 high aquatic plants was compared in constructed wetland simulated for rural domestic sewage treatment. The treatment system with hydrophytes had a higher removal efficiency to COD, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) than that without hydrophytes. The removal contribution rate of plant accumulation to nitrogen and phosphorus was 7% - 63%, 12% - 65%, respectively. Nitrogen and phosphorus accumulation in stems and leaves were higher than that in roots of most tested hydrophytes. The comprehensive evaluation result indicated that, according to plant purification ability to the contamination, the order was *Arundo donax* > *Triarrhena sacchariflora* > *Acorus calamus* > *Phragmites communis* > *Iris pseudacorus* > *Lythrum salicaria* > *Sagittaria trifolia*. The cluster result showed that these 7 hydrophytes were sorted into three groups, the first group including *A. donax*, which possessed the strongest accumulated ability to the contamination; The second group including *A. calamus*, *Triarrhena sacchariflora*, *P. communis*, which possessed stronger accumulated ability; The third group including *I. pseudacorus*, *L. salicaria* and *S. trifolia*, whose uptake ability to water pollution was lowest of the three groups.

Key words: Hydrophyte; Removal of nitrogen and phosphorus; Dequarative ability

人工湿地作为污水处理技术,具有运行费用低、净化效果持久、易管理等特点,现已广泛应用于农村生活污水处理^[1,2]。其中,水生植物系统起着重要的作用,其本身不仅可以吸收同化水体中大量的污

染物,而且它发达的根系还为微生物提供了优良生存环境,改变了基质的通透性,增加了对污染物的吸收和沉淀^[3-5]。湿地植物的生长状况和净化能力受水体富营养化程度^[6,7]、污染物种类^[8,9]、生长季

收稿日期:2007-11-26

基金项目:北京市科委科技新星计划项目(2006B03);北京市科技计划(研发攻关类)资助(ZD7090500550728)

作者简介:王庆海(1973-),男,河北张家口人,助研,主要从事农业面源污染生物治理研究。

通讯作者:武菊英(1961-),女,河北保定人,研究员,主要从事草业科学研究。

节^[10,11]、水深^[12]、地理位置^[13]等诸多因素影响。水生植物的筛选在污水人工湿地处理技术中至关重要,植物的生物量、净化能力和景观效果均是重要的筛选指标^[14,15]。植物所能吸收转化的污染物种类及效果,业已开展了大量的研究^[16-18]。但此类研究多集中于我国南方,对于北方湿生植物的净化能力报道较少。南北方温度的差异直接影响植物对水分和矿质养分的吸收,同种植物在不同地域的污染物吸收转化能力亦不同。本试验比较了北京几种常见水生植物对生活污水中 COD、TN 和 TP 的去除效

果,旨在明确湿地植物的净化能力,为北京地区湿地植物的恢复和利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

本试验根据来源广、易繁殖、病虫害少和美观等原则,确定了7种供试植物(表1)。芦竹来自小汤山苗圃,其他植物均采于野外。试验前对所有植物进行7d的预培养(自来水水培养)。

表1 供试植物

Tab.1 Aquatic plants tested in the experiment

植物 Plant species	科名 Family	来源 Resource	习性 Characteristic
水生鸢尾 <i>Iris pseudacorus</i>	鸢尾科	北京密云	湿生
千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i>	千屈菜科	北京密云	湿生
野慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i>	香蒲科	北京昌平	湿生
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	天南星科	北京昌平	湿生
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	禾本科	北京昌平	湿生
芦竹 <i>Arundo donax</i>	禾本科	北京昌平	湿生
荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	禾本科	北京昌平	湿生

1.2 研究方法

本试验在模拟人工湿地基础上进行。在白色塑料桶(桶高60cm,上部直径50cm,下部直径40cm)中央直立一PVC管(管高60cm,直径10cm),管下部20cm段打直径为0.6cm的孔,孔呈均匀分布,此段用10目左右的塑料窗纱包上,以防砂子进入管内。在桶内放置厚度为40cm、直径为1.5~2.0cm清洗过的砾石作为基质。水用蠕动泵布施,进水管伸入到PVC管底,出水管置于基质上,形成水循环。

表2 试验污水的污染物浓度初始值

Tab.2 Polluter concentration of the domestic sewage used in the experiment

污染物 Polluer	COD _{Cr}	TN	TP
浓度/(mg/L) Concentration	132.00	29.81	0.49

上述植物经预培养后,2006年6月中旬,选取长势良好、大小一致的植株,清洗干净,分为2份,一份用于测定植物茎叶与根系生物量、氮磷含量的初始值,一份用于净化能力测试。将用于净化能力测试的植株移栽到模拟湿地的培养基质上。试验设7种植物和对照共8个处理,各植物种植密度均为每桶5株。对照不种植任何植物。每个处理4次重复。植物在自然条件下培养,配有遮雨设施。每桶加入30L生活污水,污水取自密云县石城镇石塘路村河沟,主要污染物指标(初始值)见表2,水面高出基质约10cm。试验周期为30d。试验期间用蒸馏水补充蒸发的水分。试验结束后,用蒸馏水补足30L后取样。测定水样中的化学耗氧量(COD_{Cr})、总氮

(TN)、总磷(TP)和植物的茎叶与根系的生物量及氮磷含量(终值)。

1.3 有关计算方法

污水中氮磷总量(mg) = 污水体积(30L) × 污水氮磷浓度(mg/L)

去除率(%) = $\frac{\text{水样污染物初始值} - \text{水样污染物终值}}{\text{水样污染物初始值}} \times 100$

污水中总的氮磷去除量(mg) = 污水中氮磷总量(mg) × 去除率

植物对氮磷的累积量(mg) = 植物茎叶及根系氮磷含量(终值) × 植物茎叶及根系生物量(终值) - 植物茎叶及根系氮磷含量(初始值) × 植物茎叶及根系生物量(初始值)

植物的氮磷去除贡献率(%) = $\frac{\text{植物对氮磷的累积量}}{\text{污水中总的氮磷去除量}} \times 100$

无植物对照的氮磷去除贡献率(%) = $\frac{\text{无植物对照的氮磷去除量}}{\text{污水中总的氮磷去除量}} \times 100$

氮磷去除能力(mg/kg) = $\frac{\text{植物氮磷去除量(mg)}}{\text{植物的初始鲜重(kg)}}$

最后对各植物的指标进行主成分分析和得分分析,以此评价每种植物的污染物去除能力。

1.4 数据处理

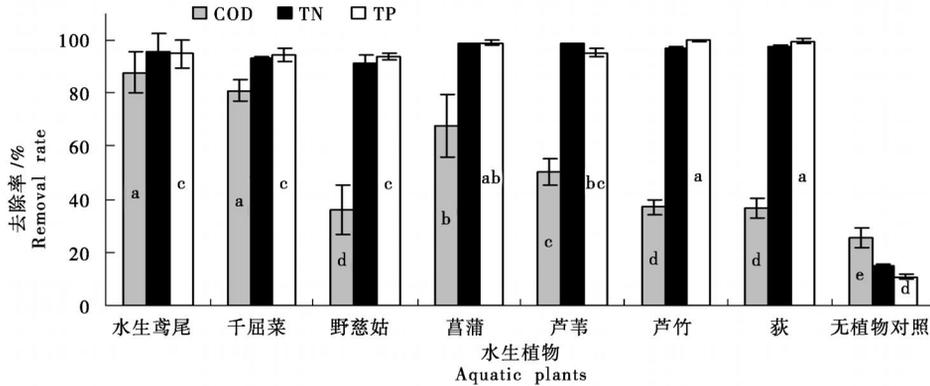
采用Excel 2003制图,用SAS(V9.1)进行Duncan's多重比较检验、主成分分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 水生植物对污染物的去除率

水生植物对污水中COD、TN和TP有明显的去除效果,去除率均显著高于无植物对照,不同植物去除率存在不同程度的差异(图1)。供试植物对COD

去除率差异明显,水生鸢尾与千屈菜处于同一水平,显著高于其他 5 种植物;各植物对 TN 和 TP 均表现出了较高的去除率,相互间差异较小。



图中同列相同字母表示邓肯氏新复极差检验差异不显著 (p > 0.05), 图 2, 3, 5, 6 同

The same letters in the figure mean no significant difference by Duncan's new multiple range test (p > 0.05), the same as Tab. 2, 3, 5, 6

图 1 水生植物对 COD, TN 和 TP 的去除率

Fig. 1 Removal rate of aquatic plants to COD, TN and TP

2.2 水生植物对污水中 N 和 P 的累积量及去除贡献率

供试的 7 种水生植物,对污水中 N 的累积量差异显著(图 2)。芦竹最高;荻次之;野慈姑最低。各植物对 P 的累积量均显著高于无植物对照(图 3)。芦竹的 P 去除量也是最高的,达到 9.56 mg,明显高于其他 6 种植物;荻次之;千屈菜和野慈姑处于同一水平,水生鸢尾、菖蒲和芦苇间无显著差异。

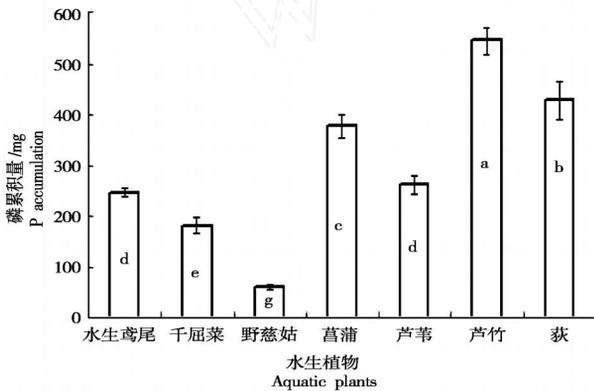


图 2 水生植物的氮累积量

Fig. 2 Nitrogen accumulation of aquatic plants

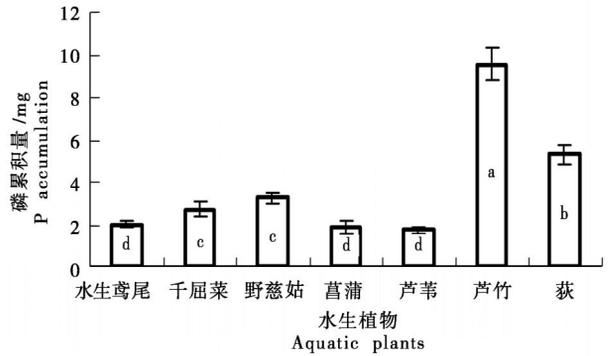


图 3 水生植物的磷累积量

Fig. 3 Phosphorus accumulation of aquatic plants

污水中氮磷污染物消除过程中,非植物条件因素对氮去除的贡献率约为 15%,对磷去除的贡献率约为 11%;水生植物对污水中氮磷的去除发挥了较大作用,但植物不同贡献亦不同(表 3)。供试植物的氮磷去除贡献率,芦竹最大,荻次之。种植有这 2 种植物的条件下,其他因素的氮磷去除贡献较小,介于 21%~52%之间;种植有其他植物时,其他因素的贡献则较大,介于 42%~76%之间。

表 3 水生植物和无植物对照及其他因素对污水中氮磷去除的贡献率

Tab. 3 Removal contribution rate to N and P of aquatic plants, CK without aquatic plants and other factors

植物 Plant species	水生植物/ % Aquatic plants		无植物对照/ % CK without aquatic plants		其他因素/ % Other factors	
	N	P	N	P	N	P
水生鸢尾 <i>I. pseudacorus</i>	28.8 ±1.0 d	14.1 ±0.8 d	15.4 ±0.5	11.3 ±0.3	55.8 ±1.1	74.4 ±0.8
千屈菜 <i>L. salicaria</i>	21.7 ±1.8 e	19.6 ±2.9 c			62.4 ±1.8	68.9 ±3.2
野慈姑 <i>S. trifolia</i>	7.3 ±0.6 f	23.6 ±2.6 c			76.4 ±0.8	64.8 ±2.8
菖蒲 <i>A. calamus</i>	42.8 ±2.6 c	12.7 ±2.2 d			42.2 ±2.6	76.3 ±2.1
芦苇 <i>P. communis</i>	29.5 ±2.0 d	12.2 ±0.9 d			55.5 ±2.0	76.4 ±0.9
芦竹 <i>A. donax</i>	62.8 ±3.0 a	65.2 ±5.2 a			21.9 ±3.0	24.0 ±5.2
荻 <i>T. sacchariflora</i>	49.0 ±4.2 b	36.2 ±3.8 b			35.8 ±4.2	52.9 ±3.9

水生植物根系和茎叶对氮磷的累积量也有差异 (图 4)。水生鸢尾和菖蒲的根系氮磷累积量高于茎

叶氮磷累积量,尤其是磷累积量,水生鸢尾根系是茎叶的2.8倍,菖蒲根系是茎叶的5.9倍。这2种植物的根系生物量均大于茎叶生物量,根系与茎叶生物量比分别为1.5和2.0倍。千屈菜、野慈姑、芦

苇、芦竹和荻的根系氮磷累积量与茎叶氮磷累积量的比值小于1,即茎叶的氮磷累积量高于根系的氮磷累积量。

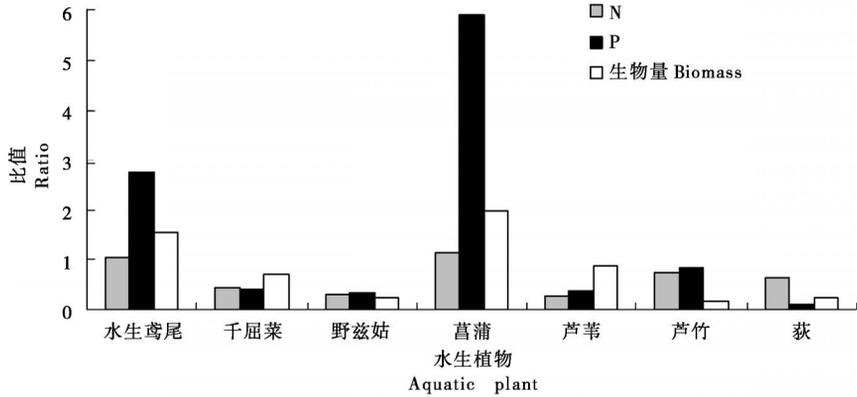


图4 植物根系与茎叶氮磷累积量、生物量的比值

Fig. 4 Ratio of roots to stems and leaves on N, P accumulation and biomass

2.3 水生植物净化能力比较

供试的7种植物对氮磷的去除能力也有较大差异(图5,6)。芦竹对氮磷的去除能力分别为1 804.4 mg和31.7 mg,均显著高于其他植物。芦苇和荻的氮去除能力无显著差异,二者显著高于菖蒲、千屈菜、水生鸢尾和野慈姑的氮去除能力。菖蒲、千屈菜、水生鸢尾和野慈姑的氮去除能力依次降低,相互间差异显著。水生植物的磷去除能力,水生鸢尾和菖蒲处于同一水平,二者显著低于其他5种植物。芦竹、野慈姑、荻、千屈菜和芦苇的磷去除能力依次降低,相互间也存在显著差异。

$$Prin2 = - 0.48X_1 + 0.63X_2 + 0.20X_3 + 0.14X_4 - 0.56X_5。$$

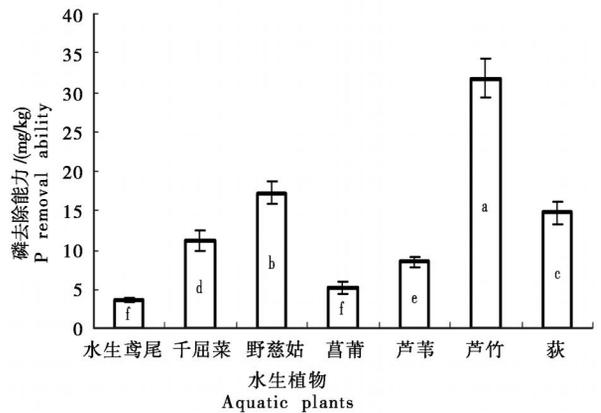


图6 水生植物的磷去除能力

Fig. 6 Phosphorus removal ability of aquatic plants

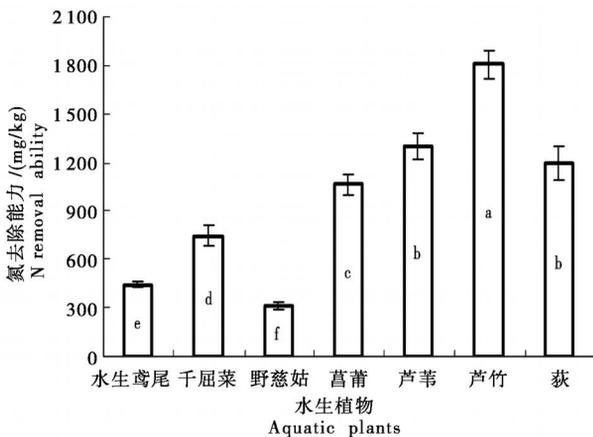


图5 水生植物的氮去除能力

Fig. 5 Nitrogen removal ability of aquatic plants

2.4 水生植物的净化功能群

由主成分分析可知,第1主成分的贡献率57.52%,第2主成分的贡献率29.99%,二者累计贡献率为87.51%,已涵盖了7个指标的大部分信息(表4)。第1主成分和第2主成分的表达式分别为: $Prin1 = - 0.39X_1 + 0.35X_2 + 0.52X_3 + 0.55X_4 + 0.39X_5$;

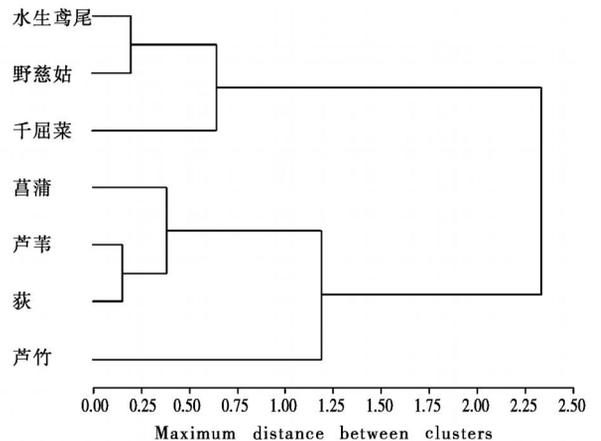


图7 水生植物的主成分聚类图

Fig. 7 Principal component of aquatic plants cluster analysis figure

对第1和第2主成分进行得分分析,由前2个主成分的权重对各植物的主成分得分加权求和,得供试植物净化能力的综合评价并排序见表5。

根据第 1 和第 2 主成分的表达式可以计算出 7 个供试植物的主成分值,并对主成分值进行聚类分析。从聚类图可以看出,当聚类距离为 1 时,这 7 种植物明显分为三类(图 7)。其中,芦竹单独为一类,

此类植物净化能力高;菖蒲、芦苇和荻为一类,此类植物净化能力较高;千屈菜、水生鸢尾和野慈姑为一类,此类植物净化能力相对较低。

表 4 主成分分析的相关矩阵、贡献率和累计贡献率

Tab.4 Eigenvalues of the correlation matrix and eigenvectors of principal component analysis

	第 1 主成分 Prin1	第 2 主成分 Prin2	第 3 主成分 Prin3	第 4 主成分 Prin4	第 5 主成分 Prin5
X ₁	- 0.39	0.48	0.78	0.00	0.10
X ₂	0.35	0.63	- 0.28	0.24	0.58
X ₃	0.52	0.20	0.15	- 0.81	- 0.13
X ₄	0.55	0.14	0.26	0.53	- 0.57
X ₅	0.39	- 0.56	0.47	0.11	0.55
贡献率/ % Proportion	57.52	29.99	7.38	4.69	0.41
累计贡献率/ %Cumulative proportion	57.52	87.51	94.89	99.59	100

注: X₁, X₂, X₃, X₄ 和 X₅ 分别代表 COD_C 去除率、N 去除率、P 去除率、植物的氮累积能力、植物的磷累积能力。

Note: X₁, X₂, X₃, X₄ and X₅ mean removal rate of COD_C, removal rate of nitrogen, removal rate of phosphorus, nitrogen accumulation ability, phosphorus accumulation ability, respectively.

表 5 第 1,2 主成分得分及综合得分

Tab.5 Score of Prin1, Prin2 and synthetic assessment

植物名称 Plant name	第 1 主成分 Prin1		第 2 主成分 Prin2		综合评价 Synthetic assessment	
	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank
	水生鸢尾 <i>I. pseudacorus</i>	- 1.89	7	0.92	2	- 0.81
千屈菜 <i>L. salicaria</i>	- 1.54	6	- 0.21	5	- 0.95	6
野慈姑 <i>S. trifolia</i>	- 1.35	5	- 2.15	7	- 1.42	7
菖蒲 <i>A. calamus</i>	0.34	4	1.49	1	0.64	3
芦苇 <i>P. communis</i>	0.34	3	0.73	3	0.41	4
芦竹 <i>A. donax</i>	2.72	1	- 0.85	6	1.31	1
荻 <i>T. sacchariflora</i>	1.38	2	0.07	4	0.81	2

3 结论与讨论

本试验条件下,有植物处理系统对 COD, TN 和 TP 等污染物的去除效果显著高于无植物对照。而袁东海等^[16]的研究结果却表明这二者差异不大。这可能是由于试验所采用的植物和培养基质均不相同造成的。从本研究结果看,不同植物的氮磷累积能力各异,多数植物的氮磷累积量地上部高于地下部。这样就可以通过适时收割地上部将氮磷污染清除出水体。但当植物根系生物量远大于茎叶生物量时,氮磷富集量地下部则大于地上部。有研究表明,湿地植物根系生物量与湿地污水净化效果之间存在着明显的正相关关系^[19]。在污染物去除过程中,植物本身对氮磷的累积只是湿地净化功能的一个方面。这部分净化作用的污染物去除贡献占有相当比重,金卫红等^[20]以芦苇为研究对象,也得出相似结论。污水在基质中流动也可以降解污染物,试验中无植物对照具有一定的污染物去除能力就体现了这一点。其他因素作用则更为重要。特别是植物根际环境的载体作用,为有益微生物提供了良好的生活

环境,微生物的降解作用也得到加强。梁威等^[21]认为种植不同植物的湿地系统根区微生物数量不同,净化效果也不同。而且微生物的作用,一定程度上可以促进植物对氮磷等污染物的吸收。

根据供试植物的净化能力综合分析结果可以看出,芦竹的净化能力强,适合作为污染程度比较严重水体的净化植物。而且芦竹还是很好的能源植物,具有很高再利用价值。菖蒲、芦苇和荻的净化能力虽不及芦竹,但对 COD, TN 和 TP 亦有良好的污染物去除效果。相对而言,水生鸢尾、千屈菜和野慈姑的综合净化能力较弱。但水生鸢尾对 COD 的去除率是供试植物中最高的,野慈姑对磷的吸收能力也仅次于芦竹。在实际应用中,针对不同污水的污染程度和特点,结合净化植物的多样性和景观配置要求,合理选择水生植物。

参考文献:

- [1] Sato K, Skul H, Sakai Y, et al. Long - term experimental study of the aquatic plant system for polluted river water[J]. Water Science and Technology, 2002, 46 (11 - 12): 217 -

- 224.
- [2] Nalbur B ,Akca L ,Bayhan H. Nitrogen removal during secondary treatment by aquatic system[J]. *Water Science and Technology* ,2003 ,48(11 - 12) :355 - 361.
- [3] Sarah J. Effects of water level and phosphorus enrichment on seedling emergence from marsh seed banks collected from northern Belize[J]. *Aquatic Botany* ,2004 ,79(4) :311 - 323.
- [4] Nina C ,Jens C S ,Niels H S. Sensitivity of aquatic plant to the herbicide metsulfuron - methyl [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety* ,2004 ,57(2) :153 - 161.
- [5] Paresh L ,Bill F. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient[J]. *Aquatic Botany* ,2006 ,84(1) :3 - 16.
- [6] Daniela B ,Anna A ,Paul D T ,*et al.* Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants [J]. *Environmental Pollution* ,2004 ,130(2) :149 - 156.
- [7] 成分平 ,吴振斌 ,况琪军. 人工湿地植物研究[J]. *湖泊科学* ,2002 ,14(2) :179 - 184.
- [8] 梁 威 ,吴振斌 ,詹发萃 ,等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. *湖泊科学* ,2004 ,16(4) :312 - 317.
- [9] 阮晓红 ,张 瑛 ,黄林楠 ,等. 微生物在湿地氮循环系统的效应分析[J]. *水资源保护* ,2004(6) :1 - 7.
- [10] 葛 滢 ,常 杰 ,王晓月 ,等. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J]. *生态学报* ,2000 ,20(6) :1050 - 1055.
- [11] 葛 滢 ,王晓月 ,常 杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. *环境科学学报* ,1999 ,19(6) :690 - 692.
- [12] 成小英 ,王国祥 ,濮培民 ,等. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及其净化作用[J]. *湖泊科学* ,2002 ,14(2) :139 - 144.
- [13] 王国祥 ,濮培民 ,张对照. 冬季高等水生植物对富营养化湖水的净化作用[J]. *中国环境科学* ,1999 ,19(2) :102 - 109.
- [14] 蒋跃平 ,葛 滢 ,岳春雷 ,等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. *生态学报* ,2004 ,24(8) :1718 - 1723.
- [15] 廖 新 ,骆世明 ,吴银宝 ,等. 人工湿地植物筛选的研究[J]. *草业学报* ,2004 ,13(5) :39 - 45.
- [16] 袁东海 ,任全进 ,高士祥 ,等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮的比较[J]. *应用生态学报* ,2004 ,15(12) :2337 - 2341.
- [17] 夏汉平. 香根草和水花生对垃圾污水中 N、P、Cl 的吸收效果[J]. *植物生态学报* ,2000 ,24(5) :613 - 616.
- [18] 文乐元 ,樊国盛. 养殖废水草滤带处理系统的研究[J]. *草业学报* ,2003 ,12(3) :110 - 113.
- [19] 赵建刚 ,杨 琼 ,陈章和 ,等. 几种湿地植物根系生物量研究[J]. *中国环境科学* ,2003 ,23(3) :290 - 294.
- [20] 金卫红 ,付融冰 ,顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J]. *环境科学研究* ,2007 ,20(3) :75 - 80.
- [21] 梁 威 ,吴振斌 ,詹发萃 ,等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. *湖泊科学* ,2004 ,16(4) :312 - 317.