第 32 卷第 3 期
2012 年 3 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 32, No. 3
Mar., 2012

彭婉婷,邹琳,段维波,等. 2012. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报,32(3):612-617
Peng W T, Zou L, Duan W B, *et al*. 2012. Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from sewage by various combinations of wetland plants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(3):612-617

多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果

彭婉婷[1],邹琳[1],段维波[1],李银霞[1],潘远智[1,*],曾德刚[2]

1. 四川农业大学风景园林学院,成都 611130
2. 四川省凉山农业学校,西昌 615022

收稿日期:2011-05-03　　**修回日期**:2011-07-17　　**录用日期**:2011-07-28

摘要:通过室内静水实验,研究了再力花(*Thalia dealbata*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、茭白(*Zizania aquatica*)、睡莲(*Nymphaea tetragona Georgi*)、大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)、马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica Spreng*)7 种不同生态型的湿地植物进行镶嵌组合后各组合对水体中氮、磷的去除效果. 结果表明,不同生态型的湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果较好,8 种组合中对总氮和氨氮去除效果最好的组合为睡莲 + 再力花(S + Z)和睡莲 + 马蹄莲 + 茭白 + 菖蒲(S + M + J + C),最大去除率分别为 92.29% 和 95.50%. 对总磷的去除效果最好的组合为睡莲 + 再力花 + 鸢尾(S + Z + Y),较无植物对照组的最大净化率提高了 43.73%. 不同水生植物组合后对氮、磷的净化效果差异较小,8 种湿地植物组合对总氮、氨氮和磷的去除率范围分别为 83.19% ~92.29%、86.50% ~95.50% 和 85.67% ~99.87%. 运用隶属函数进行综合评价,筛选出对污水中氮和磷净化能力较强的组合为:睡莲 + 再力花(S + Z)、睡莲 + 马蹄莲 + 茭白 + 菖蒲(S + M + J + C)、睡莲 + 再力花 + 鸢尾(S + Z + Y)及睡莲 + 再力花 + 茭白 + 菖蒲(S + Z + J + C).

关键词:湿地植物;氮;磷;净化

文章编号:0253-2468(2012)03-612-06　　**中图分类号**:X703.1　　**文献标识码**:A

Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from sewage by various combinations of wetland plants

PENG Wanting[1], ZOU Lin[1], DUAN Weibo[1], LI Yinxia[1], PAN Yuanzhi[1,*], ZNEG Degang[2]

1. College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130
2. Liangshan Agricultural University, Xichang 615022

Received 3 May 2011;　　**received** in revised form 17 July 2011;　　**accepted** 28 July 2011

Abstract: The effects of nitrogen (N) and phosphorus (P) removal from sewage by 8 different ecotype combinations of wetland plants, such as emerged plant *Thalia dealbata*, *Iris tectorum*, *Acorus calamus*, *Zizania aquatica*, floating plant *Nymphaea tetragona Georgi*, submerged plant *Myriophyllum aquaticum* and Hygrophytes *Zantedeschia aethiopica Spreng*, were studied under the indoor hydrostatic conditions. The results showed that different ecotypes of wetland plants could effectively remove N and P in sewage. Among the 8 combinations, the combination of *Nymphaea tetragona Georgi* with *Thalia dealbata* (S + Z) had the highest removal rate of total nitrogen (TN) (92.29%), while the other one *Nymphaea tetragona Georgi*, *Zantedeschia aethiopica Spreng*, *Acorus calamus* with *Iris tectorum* (S + M + J + C) remove ammonia nitrogen up to 95.50%. The combination *Nymphaea tetragona Georgi*, *Thalia dealbata* with *Iris tectorum* (S + Z + Y) had the best removal efficiency of Total Phosphorus (TP), increasing 43.73% compared with the control group without plants. There were little differences among different combinations for removal efficiency of N and P. The ranges of removal rate of TN, Ammonium nitrogen (NH_4^+-N) and TP of 8 combinations were 83.19% ~92.29%, 86.50% ~95.50% and 85.67% ~99.87% respectively. Using comprehensive evaluation of the membership function, the following combinations with better water purification capacity were selected: *Nymphaea tetragona Georgi* with *Thalia dealbata* (S + Z), *Nymphaea tetragona Georgi*, *Zantedeschia aethiopica Spreng*, *Iris tectorum* with *Acorus calamus* (S + M + J + C), *Nymphaea tetragona Georgi*, *Thalia dealbata* with *Iris tectorum* (S + Z + Y), and *Nymphaea tetragona Georgi*, *Thalia dealbata*, *Acorus calamus* with *Zizania aquatic* (S + Z + J + C).

Keywords: wetland plants; nitrogen; phosphorus; purification

基金项目: 大学生创新性实验计划项目(No. 101062656)
Supported by the Undergraduate Innovative Experiment Program(No. 101062656)
作者简介: 彭婉婷(1989—),女, E-mail:Pengwanting2010@yeah.net; * **通讯作者(责任作者)**, E-mail:scpyzls@163.com
Biography: PENG Wanting (1989—), female, E-mail:Pengwanting2010@yeah.net; * **Corresponding author**, E-mail:scpyzls@163.com

1　引言(Introduction)

人工湿地作为一种兼有水体修复、园林绿地和景观效果功能的水处理设施,已成为一种独具特色的新型污水处理技术,且具有较高的应用价值(Kivaisi,2001).水生植物是人工湿地处理系统的核心之一,它在人工湿地污水处理系统中具有多种作用(Engelhardt *et al*. 2001).一方面水生植物自身能吸收一部分营养物质,同时它的根区可为微生物的生存和降解营养物质提供必要的场所和好氧厌氧条件(陈永华等,2008).当前,有关水生植物在净化污水中的作用已被实验和实践证明(李建娜等,2007;徐进等,2006),而且研究还发现多种植物的合理搭配组合能够提高氮和磷去除效率,并发挥其最大净化潜力(陈进军等,2008;李淑英等,2010).但目前国内外针对单种水生植物去氮除磷效果的研究较多,且主要集中于用单一生态型的水生植物对水体净化效果的对比研究(袁东海等,2004;汤显强等,2007),而有关不同生态型湿地植物组合的研究还鲜有报道.因此,本文选取不同生态型的 7 种湿地植物,通过室内静水实验,研究其镶嵌组合对污水中总氮、总磷和氨氮的净化效果,旨在优化水生植物配置,提高对污水中氮和磷的净化效果,以期为湿地植物在控制水体富营养化的选择应用提供理论依据.

2　材料与方法(Materials and methods)

2.1　实验植物的选择

本实验中植物的选择以耐污能力强、去污效果好、根系发达且具有一定经济和观赏价值为原则.取野生生长良好的水生植物作为实验材料,包括挺水植物:再力花(*Thalia dealbata*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、茭白(*Zizania aquatica*);浮叶植物:睡莲(*Nymphaea tetragona Georgi*);沉水植物:大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*);湿生植物:马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica Spreng*).按照所选植物的生长习性和景观效益,对这 7 种不同生态类型的水生植物进行组合配置,处理组合依次为:睡莲 + 再力花(S + Z)、睡莲 + 再力花 + 鸢尾(S + Z + Y)、睡莲 + 再力花 + 大聚藻(S + Z + D)、睡莲 + 再力花 + 茭白 + 菖蒲(S + Z + J + C)、睡莲 + 马蹄莲(S + M)、睡莲 + 马蹄莲 + 鸢尾(S + M + Y)、睡莲 + 马蹄莲 + 大聚藻(S + M + D)、睡莲 + 马蹄莲 + 茭白 + 菖蒲(S + M + J + C).

2.2　实验水质

供试水样取自四川农业大学校内寝室污水和食堂污水,各项理化指标如表 1 所示.参考国家地表水环境质量标准(GB 3838—2002)可知,此水样为重度富营养化水体(劣Ⅴ类水质).

表 1　供试水样的基本理化性质

Table 1　Physical and chemical properteies of the tested water

TN /(mg·L^{-1})	TP /(mg·L^{-1})	COD /(mg·L^{-1})	NH_4^+-N /(mg·L^{-1})	pH
23.50	7.31	2825	4.94	7.6

2.3　实验系统及数据分析

实验在四川农业大学农场温室内进行,供试植物苗先洗净根系上的污泥,经水样适应性培养 30 d,期间用去离子水浇灌,使水位维持在高出基质 8 cm 水平.随后,选取长势一致的植物幼苗,洗净根后置于高 48 cm、口径 80 cm、底径 70 cm 的塑料桶内进行实验.桶内基质(粗砂和小石头)经盐酸浸泡 12 h 并用去离子水漂洗 5 次后铺于桶中,桶底铺厚 15 ~ 20 cm 的粗砂,上部再填充小石头.实验期间,每隔 1d 加去离子水补充蒸发的水分,以保持缸内水样高度基本稳定.实验设 8 种植物组合和对照共 9 个处理,以无水生植物配置为对照.每个处理 3 次重复.实验期间每 5 d 取水样 1 次,每次取水样 300 mL(取样前搅动多次,使缸内水样混合均匀).按照国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》(国家环保总局,2002)测定 pH 值、化学需氧量、总氮、氨氮和总磷等指标.pH 采用 pH 仪测定,COD 采用重铬酸钾氧化法测定,总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,总磷采用过硫酸钾消解 - 钼锑抗分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂光度法测定.去除率 η 的计算公式如下:

$$\eta = (C_0 - C_i)/C_0 \times 100\%$$

式中,C_0 为实验开始时水体中的污染物浓度(mg·L^{-1}),C_i 为第 i 天时水体中的污染物浓度(mg·L^{-1}).实验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理,应用 SPSS 13.0 软件进行统计分析.

3　结果(Results)

3.1　多种湿地植物组合水体中 TN 的变化

多种植物组合对污水中的总氮均有较好的去除效果(图 1a),尽管其各自的去除效率不同,但随着水体交换时间的延长,去除率的总体变化趋势大

致相同. 实验水体的最初总氮浓度为 23.50 mg·L^{-1},最终浓度在 1.81 ~ 4.43 mg·L^{-1}之间(图 1b).

在实验初期(6 d),各植物组合的总氮浓度迅速下降,净化效果较好. 除睡莲 + 再力花 + 茭白 + 菖蒲 (S + Z + J + C)组合的去除率为 76.39%,其它植物组合的去除率均高于 80%,与对照(53.62%)差异明显. 实验第 12 d,各植物组合中水体的总氮浓度回升至 4.67 ~ 7.75 mg·L^{-1},平均去除率仅为 71.25%,其中,睡莲、再力花和大聚藻组合(S + Z + D)的去除率下降为 62.88%,与实验初期相比下降了 21.69%. 实验至第 18 d,各植物组合的总氮浓度再次呈下降趋势,但随着实验时间的延长,总氮浓度下降速度减缓. 实验第 30 d 时,各植物组合中的总氮浓度已经很低. 多种植物组合对污水中总氮净化效果的排序为:S + Z > S + Z + Y > S + M + J + C > S + M > S + Z + J + C > S + M + D > S + Z + D > S + M + Y > CK,它们对总氮的最大去除率分别为:92.29%、90.76%、90.43%、89.21%、89.10%、88.80%、87.14%、83.19%、81.12%.

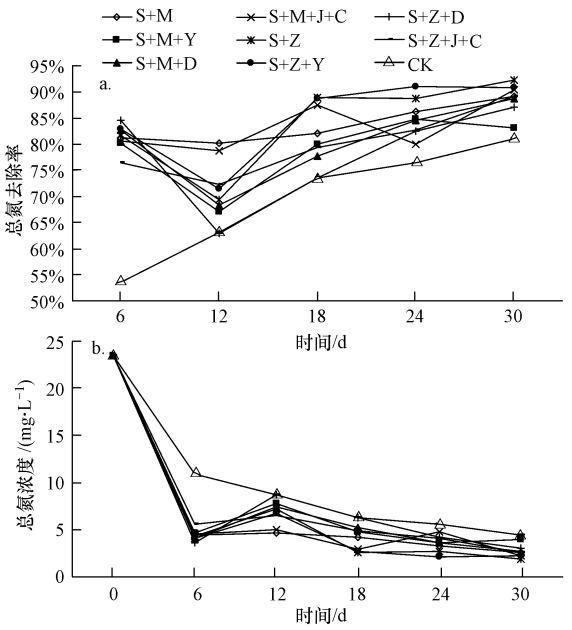

图 1 实验水体中 TN 去除率和浓度变化

Fig. 1 TN removal efficiency and TN concentration in studied water body

3.2 多种湿地植物组合水体中 TP 的变化

多种植物镶嵌组合后对污水中的总磷均有较好的去除效果,其总磷去除率的总体变化趋势大致与总氮相同(图 2a). 在实验初期(6 d),各植物组合水体中的总磷浓度迅速下降(图 2b),去除率均高于 80%,而空白对照组的去除率仅为 14.52%. 实验至 12 d 时,TP 浓度出现明显回升,其原因可能是底部基质吸附饱和,少量磷会逐渐从基质中释放出来. 此阶段后总磷浓度呈平稳趋势下降. 实验至 18 d 时,TP 浓度下降最明显的组合为睡莲 + 马蹄莲(S + M)、睡莲 + 马蹄莲 + 鸢尾(S + M + Y),均为 2.09 mg·L^{-1}. 至实验结束时,各植物组合水体的 TP 浓度均为较低,对总磷净化效果排序为:S + Z + Y > S + M + J + C > S + Z + J + C > S + M > S + M + Y > S + M + D > S + Z > S + Z + D > CK,其最大去除率分别为:99.87%、99.68%、99.56%、99.34%、98.50%、92.83%、90.88%、85.67%、56.14%.

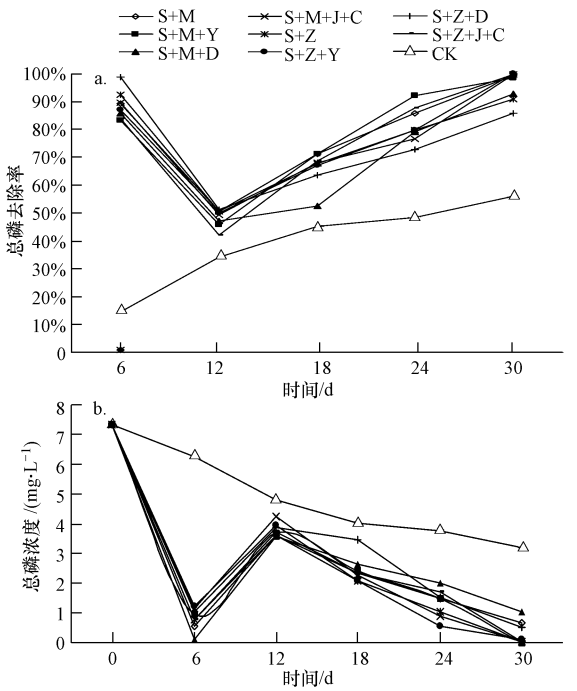

图 2 实验水体中 TP 去除率和浓度变化

Fig. 2 TP removal efficiency and TP concentration in studied water body

3.3 多种湿地植物组合水体中氨氮的变化

各植物组合水体中氨氮浓度变化总体趋势与总氮相近(图 3b). 实验水体的总氮最初浓度为 4.94 mg·L^{-1},各植物组合水体中最后氨氮终浓度均低于 0.68 mg·L^{-1}. 在实验初期(6 d),部分植物组合的氨氮浓度有明显下降,其中,睡莲 + 再力花(S + Z)的去除率达到 78.63% (图 3a),均高于对照,但其他植物组合的氨氮去除率变化不明显. 实验 12 d 时,氨氮浓度出现明显回升,这与总氮浓度变化趋势相一致. 实验至第 18 d,氨氮浓度明显下

降,此后,各植物组合氨氮浓度呈继续下降趋势,但下降幅度明显减小. 实验至第 30 d 时,各处理组中的氨氮浓度在 0.22 ~ 0.67 mg·L^{-1}之间. 各处理组对氨氮净化效果的排序为:S + M + J + C > S + M + D = S + Z > S + M > S + Z + Y > S + Z + D > S + M + Y > S + Z + J + C > CK,去除率分别为:95.50%、94.37%、91.00%、89.87%、88.75%、87.62%、86.50%、82.59%.

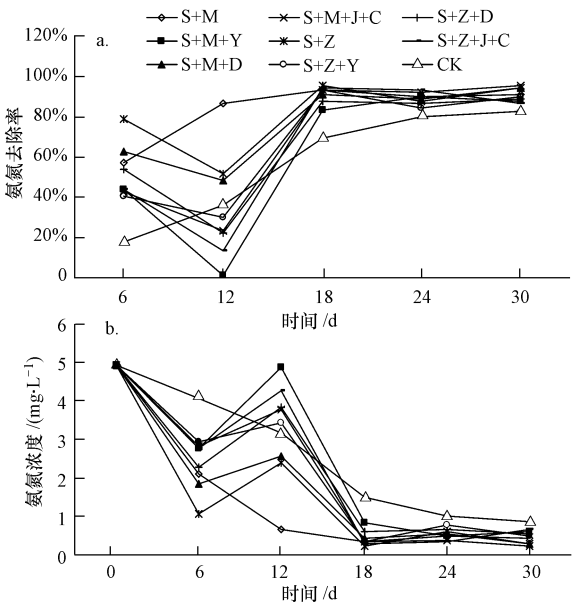

图 3　实验水体中氨氮去除率和浓度变化

Fig. 3　NH_4^+-N removal efficiency and NH_4^+-N concentration in studied water body

3.4　多种湿地植物组合净化效果的综合评价

从以上分析来看,所测试的 8 种植物组合在每个阶段对总氮、总磷、氨氮的去除率都有差异,因此,在分析植物组合的净化能力时,不能只根据一个或几个指标来评判,而应进行综合考虑和分析. 为了较全面地了解不同植物组合配置对污水净化能力的差异,采用模糊综合评判方法(朱栗琼,2010)对测定指标进行综合评价,分析 3 种指标的关系(李玉文,2009),给出权重系数:A = {TN, TP, NH_4^+-N} = {0.308, 0.385, 0.307}

经计算得到具体的隶属度函数值及综合评价结果如表 2 所示. 隶属函数评判结果表明,8 种湿地植物组合在对污水净化能力上的大小排序为:S + Z > S + M + J + C > S + Z + Y > S + Z + J + C > S + M + Y > S + M > S + Z + D > S + M + D > CK. 从综合评判值来看可以将研究的 8 种湿地植物组合的净化能力分成 3 类:S + Z 和 S + M + J + C 为一类,其净化效果较为明显,在污水中对氮和磷有较强去除能力;S + Z + Y、S + Z + J + C、S + M + Y、S + M 为一类,对污水净化能力适中;而 S + Z + D、S + M + D 为对污水中氮和磷净化效果较差的一类.

表 2　8 种湿地植物组合对污水中氮和磷净化能力的隶属函数值及综合评价

Table 2　8 kinds of wetland plants in sewage combination of nitrogen and phosphorus purification capacity subordinate function value and comprehensive evaluation

处理	隶属度函数值	排序
S + M	0.8081	6
S + M + Y	0.8160	5
S + M + D	0.7861	8
S + M + J + C	0.9110	2
S + Z	0.9129	1
S + Z + Y	0.8695	3
S + Z + D	0.7966	7
S + Z + J + C	0.8476	4
CK	0.4391	9

4　讨论(Discussion)

本研究中,不同生态型的湿地植物组合显示出对氮和磷很好的净化效果,并且能够长期维持其效果. 这是因为湿地植物可强化填料内部微生物活动,促进根际微生物吸收、根系滞留、根际周围硝化反硝化等作用,提高去氮除磷氮效果(李慎瑰等,2009). 实验中所有植物组合的氮和磷去除率均明显高于对照,水体中氮和磷的最终去除率分别为 83.19% ~ 92.29% 和 85.67% ~ 99.87%. 研究表明(金树权,2010),水质中氮、磷去除率与水生植物净增生物量密切相关. 将不同生态型的湿地植物进行组合,植物能够在上下立体空间生长,增加等面积水域的生物量,提高对水体中氮和磷的净化率. 而且植物组合能够在污水中氮和磷浓度均较低时维持净化效果,这与李淑英等(2006)以慈姑、大薸、穗状狐尾藻进行镶嵌组合对富营养化水体中的 TN 和 TP 去除效果较好,且在浓度降低后一直维持在一个低水平状态的结论相一致. 因为不同水生植物的净化优势不同,不同的水生植物组合有利于植物间的取长补短,提高植物对水体氮磷的综合净化率,以保证植物处理系统对多种污染物的净化效果和其自身的稳定性.

与其他研究相比(陈进军等,2008),本实验植物组合对氮和磷的去除率较高. 一方面可能是由于

实验体系不同造成的,本实验采用室内静水方法,与动水条件相比,水质中的氮、磷通过沉淀、底质吸附和微生物降解等其他作用方式的去除有所不同.另一方面是植物或植物的配置不同,而不同湿地植物或湿地植物配置方式对富营养水体中氮和磷的去除效果影响更大.本实验选取浮叶植物睡莲同挺水植物再力花、茭白、菖蒲进行组合,显示出对氮和磷较好的净化效果.因为挺水植物和浮叶植物均能直接从污水中吸收过剩营养物质,净化水体.但挺水植物因其能吸收水、底泥中氮、磷等营养元素,可以通过竞争途径抑制同样吸收氮、磷等营养元素的藻类的繁殖.同时,还能在水面上下很大空间内立体发展,生物量大,净化效率高.而浮叶植物睡莲的生物量仅取决于根系和水面浮叶,不会向水面以上空间立体发展,对氮的净化效率相对较低.将浮叶植物和挺水植物进行组合能提高其对污水的净化速率,同时睡莲在高温下能正常生长,园林运用较广,配合使用能增加其景观效果.而睡莲、再力花同沉水植物大聚藻组合,最大净化率较低,但整个实验期净化速率较稳定.吴振斌等(2003)研究证明,沉水植物在稳定生态系统和净化水体方面有其特有的作用.且大聚藻具有一定的耐寒特征,在我国南方地区冬季低温条件下能少量生长,适宜在人工湿地和稳定塘中进行利用,可以提高冬季条件下的持续净水能力和景观效果.

但实际运用中需注意对水生植物加强日常管理,像睡莲等生长速度较快的水生植物,需适当控制其栽种密度,并加强日常的管理,及时清理茎叶脱落后的败物,防止对水质的影响(刘春光等,2006).在本实验第 12 d,氮磷浓度均出现回升,其中一个原因就是睡莲茎叶的脱落分解对水质造成的影响,而另一个原因可能是根际微生物对于植物代谢产物的分解.大量的微生物在基质表面形成灰色的生物膜,增加了微生物数量分解代谢的面积,使植物根部的污染物(富集或者沉降下来的)被微生物利用或者经生物代谢,导致水的氮磷浓度增加.同时,还应注意在水生植物成熟后及时进行收割,为防止氮素从植物地上组织向地下组织转移,致使植物吸收累积的氮素再释放造成二次污染(高吉喜等,1997).

5 结论(Conclusions)

不同生态型的水生植物所组成的 8 种镶嵌组合中,马蹄莲 + 再力花(S + Z)对总氮的净化效果尤为突出,最终去除率为 92.29%.睡莲 + 再力花 + 鸢尾(S + Z + Y)、睡莲 + 马蹄莲 + 茭白 + 菖蒲(S + M + J + C)、睡莲 + 再力花 + 茭白 + 菖蒲(S + Z + J + C)组合对总磷的净化效果位于前 3 位,其最终去除率分别为 99.87%、99.68%、99.56%.睡莲 + 再力花(S + Z)组合在氨氮浓度较高时净化优势明显,6 天时净化率达到 78.63%.运用模糊综合评判法筛选出对污水中氮和磷净化能力较强的组合为:睡莲 + 再力花(S + Z)、睡莲 + 马蹄莲 + 茭白 + 菖蒲(S + M + J + C)、睡莲 + 再力花 + 鸢尾(S + Z + Y)和睡莲 + 再力花 + 茭白 + 菖蒲(S + Z + J + C).

责任作者简介:潘远智(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事园林植物栽培与应用研究.E-mail: scpyzls@163.com.

参考文献(References):

陈进军,郑狲,郑少奎.2008.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,28(10):2029-2035

Chen J J, Zheng S, Zheng S K. 2008. Pollutant purification performance of a surface flow constructed wetland planted with different aquatic macrophytesand their combination [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(10): 2029-2035(in Chinese)

陈永华,吴晓芙,蒋丽鹃,等. 2008. 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, 28 (8): 1549-1554

Chen Y H, Wu X F, Jiang L J, *et al*. 2008. Screening and evaluation of plant purification potential for phytoremediation of sanitary sewage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28 (8): 1549-1554 (in Chinese)

Engelhardt K A M, Ritchie M E. 2001. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services[J]. Nature, 12(7): 687-689

金树权,周金波,朱晓丽.2010.10 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,29(8):1571-1575

Jin S Q, Zhou J B, Zhu X L. 2010. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 29 (8): 1571-1575(in Chinese)

国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M].北京:中国环境科学出版社

State Environment Protection Administration/Water and WastewaterMonitoring and Analysis Methods Editorial Board. 2002. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods [M](4th edition). Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)

高吉喜,叶春. 1997. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学,17(3):247-251

Gao J X, Ye C. 1997. Study of removing ability of macrophytes to N,P in run off[J]. China Environmental Science, 17(3): 247-251(in

Chinese)

刘春光,王春生,李贺. 2006. 几种大型水生植物对富营养水体中氮和磷的去除效果[J]. 农业环境科学学报,25(增刊):635-638

Liu C G, Wang C S, Li H. 2006. Removal efficiency for nitrogen and phosphorus in eutrophic waterbody by macrophytes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 25 (supplement): 635-638 (in Chinese)

李建娜,胡曰利,吴晓芙,等. 2007. 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 29(7): 506-509

Li J N, Hu Y L, Wu X F, *et al*. 2007. Nitrogen and phosphorus removal capacity of plant species in constructed wetlands for treating municipal wastewater[J]. Environmental Pollution & Control, 29 (7): 506-509(in Chinese)

李慎瑰,赵以军,程凯. 2009. 湿地植物根际微生物生物处理生活污水的模型规模研究[J]. 工业安全与环保,35(8):9-10

Li S G, Zhao Y J, Cheng K. 2009. Model study of wetland plant rhizosphere microorganism in the treatment of sanitary wastewater [J]. Industrial Safety and Dust Control, 35(8): 9-10(in Chinese)

李淑英,周元清,胡承,等. 2010. 水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J]. 环境科学与技术,33(3):148-151

Li S Y, Zhou Y Q, Hu C, *et al*. 2010. Water purification of rhizosphere microorgaism in mosaic community of macrophytes environmental science and technology[J]. Environmental Science & Technology, 33(3): 148-151(in Chinese)

李玉文,张继岩,于雷. 2009. 基于指标协调性的水体富营养化状况的模糊识别[J]. 环境科学与管理,34(10) :76-78

Li Y W, Zhang J Y, Yu L. 2009. Fuzzy pattern recognition to water trophic grade in Chao Lake based on coordination and fuzzy weight [J]. Environmental Science and Management, 34(10): 76-78(in Chinese)

Kivaisi A K. 2001. The potential for constructed wetlands forwastewater treatment and reuse in develop ing countries: a review [J]. Ecological Engineering, 16 (4): 545-560

汤显强,李金中,李学菊. 2007. 7 种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2(2): 9-13

Tang X Q, Li J Z, Li X J. 2007. Research on seven hydrophytes' removal effect on nitrogen and phosphorus in eutrophic water[J]. Journal of Subt ropical Resources and Environment, 2(2): 9-13(in Chinese)

吴振斌,邱东茹,贺锋. 2003. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报,14(8):1351-1353

Wu Z B, Qiu D R, He F. 2003. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake[J]. Chin J Appl Ecol, 14(8): 1351-1353

徐进,张奇,王世和,等. 2006. 几种植物对潜流型湖滨湿地中氮磷的处理效果比较[J]. 生态环境,15(5):936-940

Xu J, Zhang Q, Wang S H, *et al*. 2006. Comparison of removal effect of several macrophytes on nitrogen and phosphorus in subsurface-flow wetlands of riparian zone[J]. Ecology and Environment, 15(5): 936-940(in Chinese)

袁东海,高士祥,任全进,等. 2004. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报,18(4):77-80; 92

Yuan D H, Gao S X, Ren Q J, *et al*. 2004. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands [J]. Journal of Soil Water Conservation, 18(4):77-80; 92(in Chinese)

朱栗琼,招礼军,林大庆,等. 2010. 5 种绿化灌木茎叶解剖结构及耐寒性比较[J]. 中国农学通报,26(20) :267-270

Zhu L Q, Zhao L J, Lin D Q, *et al*. 2010. Comparison on leaf and stem anatomical structures and cold tolerance of five shrub species[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 26 (20): 267- 270 (in Chinese)