

张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 等. 29种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 392-402.

ZHANG Qian-ni, CHEN Yong-hua, YANG Hao-ran, et al. Study on the purification ability of 29 aquatic plants to rural domestic sewage[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 392-402.

## 29种水生植物对农村生活污水净化能力研究

张倩妮, 陈永华\*, 杨皓然, 陈明利, 柳俊

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:**为筛选出对农村散户生活污水出水净化效果好的水生植物,以29种常见水生植物为材料,对模拟农村生活污水出水进行净化能力比较,并将不同植物对污染物的去除能力进行聚类分析。结果表明,有植物处理对污染物的去除率明显高于无植物对照,水力停留时间(HRT)对净化效果具有显著影响,水生植物在早期对污染物净化速率快。有植物处理对TN(总氮)的净化率比无植物对照组提高6.21%~26.66%,对NH<sub>3</sub>-N(氨氮)、TP(总磷)、COD<sub>Cr</sub>(化学需氧量)、SS(悬浮固体)的净化率分别提高7.03%~23.92%、17.40%~28.13%、7.47%~18.62%、8.90%~13.00%。其中凤眼莲在试验前期对TN、NH<sub>3</sub>-N、TP净化具有一定优势,但试验后期对污染物净化能力与其他植物基本无差异,芦苇和香蒲在试验后期对TP净化效果较好。根据筛选指标的平均隶属函数值对29种植物进行聚类分析,可将植物分为高、中、低净化能力植物三大类:高净化能力植物为芦苇、凤眼莲、香蒲、花叶芦竹、美人蕉;中等净化能力植物为旱伞草、马蹄莲、大藻、睡莲、槐叶萍、伊乐藻、满江红、水葱、苦草、菖蒲、金鱼藻、千屈菜、荷花、萍蓬草、梭鱼草、茭草、狐尾藻、再力花、菹草、轮叶黑藻、德国鸢尾、芡实、黄菖蒲;低净化能力植物为菱。研究表明,挺水植物芦苇、香蒲、花叶芦竹、美人蕉,浮叶植物睡莲,漂浮植物凤眼莲,沉水植物伊乐藻、苦草对农村生活污水出水具有较高的净化能力,适合用于农村散户生活污水的植物修复治理中。凤眼莲属于外来入侵物种,在工程应用中需要采取一定控养措施,防止其对原有生态系统造成危害。

**关键词:**水生植物;净化能力;农村;生活污水;聚类分析

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)03-0392-11

doi: 10.13254/j.jare.2018.0235

### Study on the purification ability of 29 aquatic plants to rural domestic sewage

ZHANG Qian-ni, CHEN Yong-hua\*, YANG Hao-ran, CHEN Ming-li, LIU Jun

(Environmental Science and Engineering College, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to screen aquatic plants for the effective purification of rural retail sewage water, 29 common aquatic plants were tested to compare their removal capacity for total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD<sub>Cr</sub>), and suspended solid (SS) in a septic tank effluent system. The removal ability of different plants on pollutants was determined and clustering analysis was conducted. The results showed that the removal rate of pollutants in control without plant was significantly lower than that of plant treatment. Treatment time significantly affected the purification efficiency of all pollutants. In the early stage of the experiment, the purification rate of pollutants by aquatic plants was fast. At the end of the 75-day experiment, the purification rate of TN was 6.21%~26.66% higher than that of the non-plant control, the purification rate of NH<sub>3</sub>-N, TP, COD<sub>Cr</sub>, and SS was increased by 7.03%~23.92%, 17.40%~28.13%, 7.47%~18.62%, and 8.90%~13.00%, respectively. *Eichhornia crassipes* had certain advantages in the purification rate of TN, NH<sub>3</sub>-N, and TP in the early stage of experiment, indicating that the purification of these pollutants was obviously affected

收稿日期:2018-09-12 录用日期:2018-10-08

作者简介:张倩妮(1993—),女,湖南株洲人,硕士研究生,从事环境生态修复研究。E-mail:542705861@qq.com

\*通信作者:陈永华 E-mail:chenyonghua3333@163.com

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07206001-07);湖南省自然科学基金项目(2015JJ2202);湖南省重点研发项目(2018SK2017)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2014ZX07206001-07);The Natural Science Foundation of Hunan Province, China(2015JJ2202);The Key Research and Development Project of Hunan Province(2018SK2017)

by *Eichhornia crassipes* in a short period of time. However, the purifying ability of *Eichhornia crassipes* in the late stage of the experiment was similar to that of other plants. *Phragmites australis* and *Typha orientalis* had better TP purification effects in the later experiment. According to the average subordinate function value of screening index, 29 species of plants were clustered and classified into three categories: high purifying ability plants including *Phragmites australis*, *Eichhornia crassipes*, *Typha orientalis*, *Arundo donax*, and *Canna indica*; medium purifying ability plants such as *Cyperus alternifolius*, *Zantedeschia aethiopica*, *Pistia stratiotes*, *Nymphaea* L., *Salvinia natans*, *Elodea nuttallii*, *Azolla imbricata*, *Scirpus validus*, *Vallisneria natans*, *Acorus calamus*, *Ceratophyllum demersum*, *Lythrum salicaria*, *Nelumbo nucifera*, *Nuphar pumilum*, *Pontederia cordata*, *Zizania caduciflora*, *Myriophyllum verticillatum*, *Thalia dealbata*, *Potamogeton crispus*, *Hydrilla verticillata*, *Iris germanica*, *Euryale ferox*, and *Iris pseudacorus*; and low purifying ability species *Trapa bispinosa*. Results showed that emerged plant (*Phragmites australis*, *Typha orientalis*, *Arundo donax*, *Canna indica*), floating-leaved plant (*Nymphaea* L.), floating plant (*Eichhornia crassipes*), and submerged plant (*Elodea nuttallii* and *Vallisneria natans*) were suitable for phytoremediation and treatment of rural domestic sewage. *Eichhornia crassipes* was an invasive alien species, certain control measures need to be taken to prevent damage to the original ecosystem in engineering application.

**Keywords:** aquatic plants; purifying capacity; rural; domestic sewage; cluster analysis

传统的生活污水处理工艺在农村应用存在建设与运营成本太高的问题,农村散户生活污水通常仅经过三格化粪池或者四格净化池(三格化粪池+人工湿地)处理后,排入沟渠汇入附近的鱼塘、河流、湖泊等,对自然水体的水质造成严重威胁<sup>[1-2]</sup>,面源污染风险严重。针对农村散户生活污水量差异大、污染源相对分散、可生化性好、污染物浓度较高等特点<sup>[3]</sup>,利用农户周边鱼塘、农田构建湿地,使污染物进一步降解后再进入自然水体的植物修复技术,具有效果好、投资运行成本低、景观效果好、能产生一定的经济价值等优点,成为分散农村生活污水治理的首选工艺之一<sup>[4]</sup>。这类湿地的净化机理是依靠植物的吸附/吸收作用、微生物作用和物理化学作用<sup>[5]</sup>共同对污水进行净化处理,其运行效果的关键因素是植物类型。目前,关于水生植物净化能力的研究很多<sup>[6-9]</sup>,主要是比较不同植物对不同污染程度水体的修复效果,由于各研究的实验条件、植物品种、进水浓度等存在差异,植物在污水处理系统中去污能力不同,给设计与施工单位选择净化能力强的植物造成困难。因而筛选出具有显著去污特性的水生植物,成为植物修复技术的关键之一。

据调查,农村散户生活污水中主要污染物出水浓度为TN(总氮)27.6~159.3 mg·L<sup>-1</sup>、TP(总磷)1.58~18.16 mg·L<sup>-1</sup>、COD<sub>Cr</sub>(化学需氧量)80.9~313.2 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>3</sub>-N(氨氮)21.3~148.9 mg·L<sup>-1</sup>、SS(悬浮固体)151.0~685.0 mg·L<sup>-1</sup><sup>[10-11]</sup>,本研究在设定的模拟化农村散户生活污水出水浓度下,比较29种水生植物净化系统对污染物的去除效果,通过聚类分析筛选出一批净化效果好的水生植物,为农村分散生活污水面源污

染水生态修复提供技术参考与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

以常见的29种水生植物为材料,植物品种见表1。

表1 实验水生植物品种

Table 1 Species of experimental aquatic plant

类型Types	植物种名Species
挺水植物	荷花( <i>Nelumbo nucifera</i> )、千屈菜( <i>Lythrum salicaria</i> )、菖蒲( <i>Acorus calamus</i> )、黄菖蒲( <i>Iris pseudacorus</i> )、水葱( <i>Scirpus validus</i> )、再力花( <i>Thalia dealbata</i> )、梭鱼草( <i>Pontederia cordata</i> )、花叶芦竹( <i>Arundo donax</i> )、香蒲( <i>Typha orientalis</i> )、美人蕉( <i>Canna indica</i> )、德国鸢尾( <i>Iris germanica</i> )、旱伞草( <i>Cyperus alternifolius</i> )、芦苇( <i>Phragmites australis</i> )、茭草( <i>Zizania caduciflora</i> )、马蹄莲( <i>Zantedeschia aethiopica</i> )
浮叶植物	睡莲( <i>Nymphaea</i> L.)、芡实( <i>Euryale ferox</i> )、菱( <i>Trapa bispinosa</i> )、萍蓬草( <i>Nuphar pumilum</i> )
漂浮植物	大藻( <i>Pistia stratiotes</i> )、凤眼莲( <i>Eichhornia crassipes</i> )、满江红( <i>Azolla imbricata</i> )、槐叶萍( <i>Salvinia natans</i> )
沉水植物	狐尾藻( <i>Myriophyllum verticillatum</i> )、菹草( <i>Potamogeton crispus</i> )、金鱼藻( <i>Ceratophyllum demersum</i> )、轮叶黑藻( <i>Hydrilla verticillata</i> )、伊乐藻( <i>Elodea nuttallii</i> )、苦草( <i>Vallisneria natans</i> )

### 1.2 试验方法

试验于2017年7—9月在中南林业科技大学苗圃内进行,选取处于生长旺盛期的植物,用长×宽×高=0.80 m×0.70 m×0.80 m的粗陶水缸进行露天避雨缸栽试验,每缸种植的同类植物初始生物量大致保持一致,并设置无植物对照,每个处理设置3个重复。基质为细砂,深度为25.00 cm。在自然光照、避雨条件

下用静置1 d的自来水培育水生植物10 d,待植物正常生长后一次性加入中南林业科技大学校区化粪池出水,模拟农村散户生活污水,最终实验水体TN为31.76~31.97 mg·L<sup>-1</sup>,TP为3.89~3.94 mg·L<sup>-1</sup>,COD<sub>Cr</sub>为178.87~178.98 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>3</sub>-N为23.58~23.69 mg·L<sup>-1</sup>,SS为166.65~166.77 mg·L<sup>-1</sup>,pH为6.96~7.01。生长过程中,每隔15 d对实验缸中水质进行采样分析,每次采水样100 mL,试验周期为75 d。试验中用静置1 d的自来水每5 d补充因蒸发蒸腾及试验采样损耗的水分。每缸水深始终保持在50 cm。

1.3 分析方法

TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012);TP采用钼酸铵分光光度法(HJ 671—2013);COD<sub>Cr</sub>采用重铬酸盐法(HJ 828—2017);NH<sub>3</sub>-N采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009);SS采用重量法(GB 11901—1989);pH采用酸度计测量。

(1)生物量变化量=种植75 d生物量-种植0 d生物量

(2)污水中污染物去除植物效应

$$\text{植物效应} = (C_0 - C - C') / C_0 \times 100\%$$

式中:C<sub>0</sub>为污染物初始浓度;C为污染物最终浓度;C'为对照组污染物浓度。

(3)隶属函数值计算方法<sup>[12]</sup>

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{i \min}}{X_{i \max} - X_{i \min}}$$

若指标与植物去污能力负相关,计算方法为:

$$Z_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{i \min}}{X_{i \max} - X_{i \min}}$$

式中:Z<sub>ij</sub>为i植物j指标的去污隶属函数值;X<sub>ij</sub>为i植物j指标的测定值;X<sub>i min</sub>和X<sub>i max</sub>分别为各植物同一指标值的最小值和最大值。

1.4 数据分析

数据分析采用SPSS 19.0。

2 结果与分析

2.1 水生植物生物量变化量

试验75 d后水生植物生物量变化量(图1)在每缸125.40~1 212.30 g之间,平均值为508.90 g。其中,美人蕉、芦苇、凤眼莲生物量变化量具有显著性优势,水葱、再力花、花叶芦竹、香蒲、茭草、萍蓬草、大藻、旱伞草的生物量变化量大于29种植物的平均值。生物量变化量是衡量植物生长状况及适宜性的一个重要指标,结果表明以上植物均能适应实验中的污水环境,具有很好的耐污能力。

2.2 水生植物对TN的去除效果

由29种水生植物对TN的去除效果(表2)可以看出,不同水力停留时间(HRT)时TN的净化效果具有

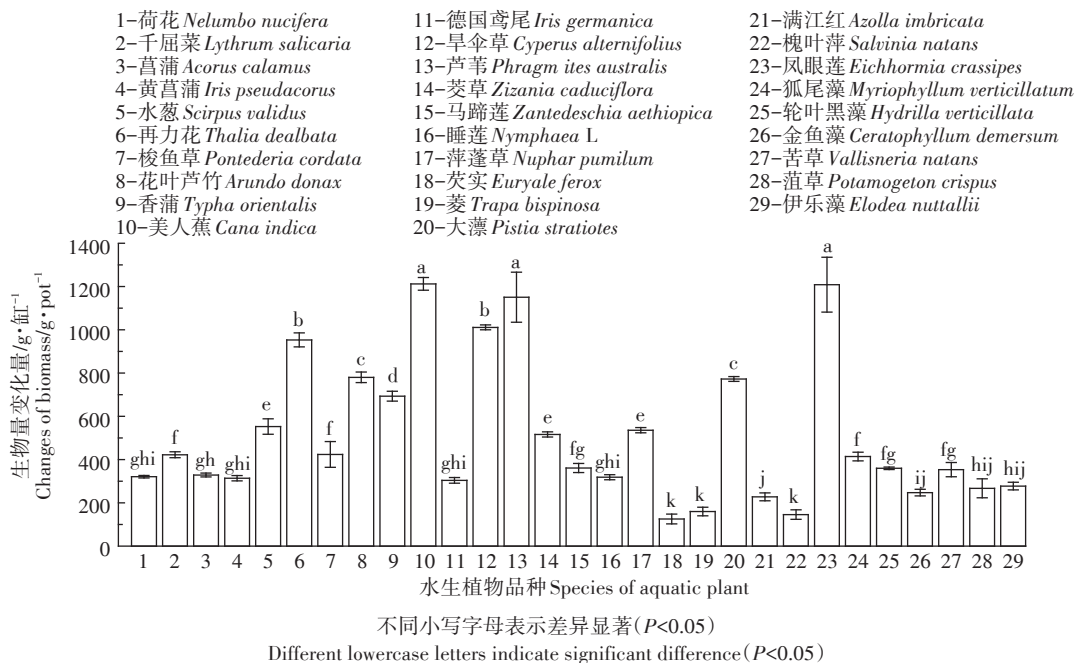


图1 水生植物生物量变化量(0~75 d)

Figure 1 Changes of aquatic plant biomass(0~75 d)

表2 29种水生植物对TN的净化能力比较

Table 2 Comparison of the purification ability of 29 aquatic plants on TN

编号 No.	植物 Plants	TN/mg·L <sup>-1</sup>						植物效应 Plant effect/%
		0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	
1	荷花	31.88±0.11a	17.53±0.33b	9.17±0.32c	5.03±0.18d	3.59±0.19e	2.21±0.25f	24.34ABC
2	千屈菜	31.88±0.11a	17.29±0.11b	9.55±0.45c	5.77±0.49d	3.14±0.25e	2.15±0.35f	24.53ABC
3	菖蒲	31.88±0.11a	17.83±0.18b	9.38±0.19c	4.71±0.11d	2.59±0.18e	1.99±0.52e	25.03AB
4	黄菖蒲	31.88±0.11a	18.64±0.65b	9.61±0.43c	7.26±0.25d	5.03±0.12e	2.96±0.18f	21.99CDE
5	水葱	31.88±0.11a	18.07±0.06b	8.89±0.07c	7.09±0.11d	4.66±0.05e	3.01±0.06f	21.83CDE
6	再力花	31.88±0.11a	19.03±1.03b	9.78±0.24c	6.36±0.22d	4.27±0.19e	2.95±0.17f	22.02CDE
7	梭鱼草	31.88±0.11a	18.92±0.95b	9.64±0.17c	5.66±0.24d	3.58±0.19e	2.63±0.40f	23.03BCD
8	花叶芦竹	31.88±0.11a	16.62±0.23b	8.97±1.01c	4.98±0.32d	2.78±0.29e	1.65±0.16f	26.10A
9	香蒲	31.88±0.11a	15.29±0.87b	8.36±0.65c	4.21±0.21d	2.19±0.12e	1.47±0.15e	26.66A
10	美人蕉	31.88±0.11a	15.61±0.97b	8.66±0.25c	4.48±0.44d	2.65±0.20e	1.52±0.27f	26.51A
11	德国鸢尾	31.88±0.11a	17.23±0.25b	9.56±0.25c	7.18±0.42d	4.92±0.23e	3.77±0.32f	19.45EFG
12	旱伞草	31.88±0.11a	18.09±1.00b	9.25±0.93c	5.35±0.10d	3.05±0.47e	1.91±0.17f	25.28AB
13	芦苇	31.88±0.11a	15.55±0.93b	8.57±0.34c	4.66±0.28d	2.73±0.18e	1.59±0.14f	26.29A
14	菱草	31.88±0.11a	15.34±0.43b	9.13±0.26c	6.29±0.40d	3.29±0.33e	2.03±0.21f	24.91AB
15	马蹄莲	31.88±0.11a	17.47±0.95b	9.02±0.27c	5.13±0.12d	2.33±0.20e	2.18±0.13e	24.44ABC
16	睡莲	31.88±0.11a	17.18±0.32b	8.94±0.24c	4.76±0.55d	2.69±0.44e	2.01±0.38f	24.97AB
17	萍蓬草	31.88±0.11a	17.59±1.00b	9.57±0.78c	7.26±0.26d	3.93±0.17e	2.65±0.23f	22.96BCD
18	芡实	31.88±0.11a	19.87±0.31b	14.35±0.76c	8.97±0.49d	7.31±0.85e	5.94±0.17f	12.64I
19	菱	31.88±0.11a	19.93±0.82b	15.01±0.48c	8.83±0.14d	8.21±0.83d	7.99±0.58d	6.21J
20	大藻	31.88±0.11a	16.59±0.87b	8.98±0.93c	5.58±0.42d	3.67±0.51e	2.16±0.11f	24.50ABC
21	满江红	31.88±0.11a	16.92±0.73b	9.75±0.35c	7.59±0.31d	3.84±0.39e	2.28±0.53f	24.12ABCD
22	槐叶萍	31.88±0.11a	17.36±0.43b	10.19±0.84c	8.64±0.54d	4.22±0.49e	2.33±0.42f	23.97ABCD
23	凤眼莲	31.88±0.11a	15.18±0.89b	5.95±0.60c	3.02±0.61d	2.49±0.58de	1.83±0.36e	25.54AB
24	狐尾藻	31.88±0.11a	16.89±0.92b	8.73±0.56c	7.67±0.56c	4.78±0.88d	4.32±0.23d	17.72GH
25	轮叶黑藻	31.88±0.11a	17.21±0.74b	8.92±0.95c	7.72±0.85c	5.21±0.96d	4.85±0.41d	16.06H
26	金鱼藻	31.88±0.11a	16.48±0.87b	8.29±0.75c	7.97±0.97c	4.46±0.70d	4.03±0.68d	18.63GH
27	苦草	31.88±0.11a	16.37±0.74b	8.39±0.88c	7.45±0.55c	4.19±0.41d	3.96±0.97d	18.86FG
28	菹草	31.88±0.11a	16.73±0.94b	8.87±0.82c	7.83±0.73c	4.61±1.01d	4.17±0.61d	18.20GH
29	伊乐藻	31.88±0.11a	15.93±0.92b	8.07±0.82c	7.03±0.93c	3.94±0.53d	3.16±0.47d	21.36DEF
30	对照	31.88±0.11a	24.56±0.61b	17.86±0.77c	13.55±0.43d	11.83±0.89e	9.97±0.14f	—

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );同列不同大写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant difference ( $P<0.05$ ); Different uppercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ). The same below.

显著差异性( $P<0.05$ ),但试验中后期HRT对菖蒲、马蹄莲、凤眼莲、菱以及所有沉水植物的去除效果影响不显著。HRT在30 d和45 d时凤眼莲净化能力明显优于其他植物。15 d后芡实和菱的净化能力逊于其他植物。75 d实验结束时,29种植物净化TN的植物效应为6.21%~26.66%,花叶芦竹、香蒲、美人蕉、芦苇对TN的净化具有显著优势( $P<0.05$ ),净化能力较强。

### 2.3 水生植物对NH<sub>3</sub>-N的去除效果

由29种水生植物对NH<sub>3</sub>-N的去除效果(表3)可

以看出,不同HRT时NH<sub>3</sub>-N的净化效果具有显著差异性( $P<0.05$ ),在试验60 d后HRT对德国鸢尾、马蹄莲、睡莲、菱、狐尾藻、轮叶黑藻、伊乐藻的去除效果影响不显著。HRT在30 d和45 d时凤眼莲的净化能力优于其他28种植物,净化速率较快,45 d后净化能力减弱。芡实和菱在试验中净化能力逊于其他植物。75 d试验结束时,29种植物净化NH<sub>3</sub>-N的植物效应为7.03%~23.92%,芦苇对NH<sub>3</sub>-N的净化具有显著优势( $P<0.05$ ),净化能力较强。

表3 29种水生植物对NH<sub>3</sub>-N的净化能力比较

Table 3 Comparison of the purification ability of 29 aquatic plants on NH<sub>3</sub>-N

编号 No.	植物 Plants	NH <sub>3</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>						植物效应 Plant effect/%
		0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	
1	荷花	23.62±0.06a	12.31±0.13b	5.16±0.15c	3.36±0.09d	2.17±0.12e	1.31±0.14f	21.29FGH
2	千屈菜	23.62±0.06a	12.26±0.18b	5.42±0.46c	3.51±0.32d	1.99±0.13e	1.24±0.06f	21.59EFGH
3	菖蒲	23.62±0.06a	11.31±0.14b	5.34±0.39c	3.06±0.23d	1.87±0.19e	0.96±0.08f	22.78ABCDE
4	黄菖蒲	23.62±0.06a	12.11±0.35b	6.49±0.24c	4.12±0.17d	2.85±0.22e	2.27±0.09f	17.23MN
5	水葱	23.62±0.06a	11.78±0.11b	5.52±0.33c	4.08±0.17d	2.34±0.12e	1.66±0.12f	19.81IJ
6	再力花	23.62±0.06a	12.59±0.14b	5.61±0.10c	3.91±0.16d	2.39±0.10e	1.81±0.22f	19.18JK
7	梭鱼草	23.62±0.06a	12.34±0.06b	5.57±0.16c	3.49±0.22d	2.21±0.17e	1.44±0.15f	20.75GHI
8	花叶芦竹	23.62±0.06a	10.03±0.22b	5.21±0.24c	3.17±0.13d	1.79±0.08e	0.84±0.15f	23.29ABC
9	香蒲	23.62±0.06a	9.64±0.16b	4.92±0.17c	2.35±0.22d	1.22±0.15e	0.73±0.27f	23.75AB
10	美人蕉	23.62±0.06a	9.83±0.26b	5.06±0.14c	2.91±0.45d	1.63±0.18e	0.79±0.21f	23.50ABC
11	德国鸢尾	23.62±0.06a	11.58±0.43b	5.62±0.13c	3.89±0.20d	2.23±0.36e	2.19±0.07e	17.57MN
12	旱伞草	23.62±0.06a	11.53±0.16b	5.29±0.33c	3.24±0.19d	1.67±0.22e	0.97±0.12f	22.73ABCDE
13	芦苇	23.62±0.06a	9.88±0.07b	4.96±0.14c	2.68±0.19d	1.01±0.12e	0.69±0.06f	23.92A
14	茭草	23.62±0.06a	9.26±0.24b	5.15±0.28c	3.87±0.30d	1.56±0.11e	1.01±0.13f	22.57BCDEF
15	马蹄莲	23.62±0.06a	11.54±0.37b	4.83±0.28c	3.03±0.13d	1.19±0.07e	1.16±0.08e	21.93DEFG
16	睡莲	23.62±0.06a	11.38±0.36b	4.62±0.08c	2.95±0.15d	1.23±0.13e	1.04±0.08e	22.44CDEF
17	萍蓬草	23.62±0.06a	11.62±0.15b	5.06±0.06c	3.74±0.44d	2.26±0.20e	1.47±0.37f	20.62HI
18	芡实	23.62±0.06a	14.02±0.08b	8.96±0.19c	5.15±0.09d	4.36±0.22e	3.74±0.17f	11.01P
19	菱	23.62±0.06a	14.18±0.15b	9.33±0.28c	5.23±0.30d	4.97±0.16de	4.68±0.40e	7.03Q
20	大藻	23.62±0.06a	10.77±0.37b	5.27±0.07c	2.95±0.11d	1.72±0.18e	1.14±0.09f	22.01DEF
21	满江红	23.62±0.06a	10.96±0.32b	6.35±0.26c	3.46±0.18d	1.97±0.09e	1.21±0.08f	21.72EFGH
22	槐叶萍	23.62±0.06a	11.65±0.18b	6.71±0.29c	4.02±0.08d	2.16±0.16e	1.19±0.09f	21.80EFGH
23	凤眼莲	23.62±0.06a	9.53±0.17b	3.79±0.11c	1.82±0.16d	1.91±0.14d	0.89±0.24e	23.07ABCD
24	狐尾藻	23.62±0.06a	11.37±0.22b	5.09±0.25c	3.38±0.12d	2.57±0.15e	2.38±0.08e	16.77NO
25	轮叶黑藻	23.62±0.06a	11.87±0.27b	5.21±0.06c	3.56±0.42d	2.81±0.30e	2.56±0.09e	16.00O
26	金鱼藻	23.62±0.06a	10.61±0.24b	4.62±0.28c	3.45±0.17d	2.49±0.13e	2.06±0.09f	18.12KLM
27	苦草	23.62±0.06a	10.53±0.15b	4.99±0.24c	3.21±0.12d	2.32±0.15e	1.98±0.18f	18.46KLM
28	菹草	23.62±0.06a	10.74±0.34b	5.04±0.24c	3.81±0.32d	2.67±0.16e	2.14±0.17f	17.78LMN
29	伊乐藻	23.62±0.06a	10.06±0.16b	4.92±0.36c	3.63±0.17d	2.14±0.07e	1.88±0.21e	18.88JKL
30	对照	23.62±0.06a	16.69±0.09b	12.33±0.16c	8.82±0.17d	7.51±0.24e	6.34±0.08f	—

2.4 水生植物对TP的去除效果

由29种水生植物对TP的去除效果(表4)可以看出,不同HRT时TP的净化效果具有显著差异性( $P<0.05$ ),在试验中后期HRT对菖蒲、花叶芦竹、茭草、美人蕉、凤眼莲、芦苇的去除效果影响不显著。HRT在30 d和45 d时凤眼莲的净化能力优于其他28种植物,净化速率较快,45 d后净化能力减弱。香蒲、芦苇在45 d后净化能力优于其他植物,金鱼藻、轮叶黑藻、萍蓬草在60 d前净化能力逊于其他植物,之后净化能力提高。75 d试验结束时,29种植物净化TP的植物效应为17.40%~28.13%。香蒲、芦苇对TP的净化具有显著优势( $P<0.05$ ),净化能力较强。

2.5 水生植物对COD<sub>Cr</sub>的去除效果

由29种水生植物对COD<sub>Cr</sub>的去除效果(表5)可以看出,不同HRT时COD<sub>Cr</sub>的净化效果具有显著差异性( $P<0.05$ )。凤眼莲净化能力优于其他28种植物,净化速率较快。HRT在30 d和45 d时槐叶萍的净化能力较强,后期净化能力减弱。茭草在45 d和60 d净化能力逊于其他植物,之后净化能力提高。75 d试验结束时,29种植物净化COD<sub>Cr</sub>的植物效应为7.47%~18.62%,凤眼莲对COD<sub>Cr</sub>的净化具有显著优势( $P<0.05$ ),净化能力较好。

2.6 水生植物对SS的去除效果

由29种水生植物对SS的去除效果(表6)可以看

表4 29种水生植物对TP的净化能力比较  
Table 4 Comparison of the purification ability of 29 aquatic plants on TP

编号 No.	植物 Plants	TP/mg·L <sup>-1</sup>						植物效应 Plant effect/%
		0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	
1	荷花	3.91±0.03a	2.26±0.12b	1.57±0.09c	1.29±0.04d	0.56±0.07e	0.37±0.06f	20.46CDE
2	千屈菜	3.91±0.03a	2.33±0.04b	1.78±0.03c	1.31±0.04d	0.62±0.09e	0.31±0.08f	21.99BC
3	菖蒲	3.91±0.03a	1.82±0.08b	1.01±0.10c	0.68±0.13d	0.41±0.09e	0.33±0.07e	21.48BCDE
4	黄菖蒲	3.91±0.03a	2.26±0.07b	1.69±0.12c	1.38±0.05d	0.71±0.06e	0.42±0.09f	19.20CDE
5	水葱	3.91±0.03a	2.35±0.05b	1.59±0.07c	1.27±0.05d	0.69±0.11e	0.32±0.10f	21.75BCD
6	再力花	3.91±0.03a	2.18±0.09b	1.73±0.05c	1.34±0.04d	0.72±0.06e	0.49±0.06f	17.40E
7	梭鱼草	3.91±0.03a	1.92±0.12b	1.38±0.09c	0.99±0.10d	0.57±0.06e	0.34±0.06f	21.23BCDE
8	花叶芦竹	3.91±0.03a	1.85±0.09b	1.07±0.06c	0.43±0.08d	0.27±0.09e	0.19±0.02e	25.07AB
9	香蒲	3.91±0.03a	2.13±0.03b	1.24±0.07c	0.34±0.09d	0.22±0.06e	0.09±0.05f	27.62A
10	美人蕉	3.91±0.03a	1.55±0.05b	0.97±0.08c	0.37±0.04d	0.30±0.07d	0.27±0.07d	23.03BC
11	德国鸢尾	3.91±0.03a	2.57±0.11b	1.88±0.09c	1.36±0.06d	0.83±0.08e	0.41±0.02f	19.44CDE
12	旱伞草	3.91±0.03a	2.39±0.03b	1.42±0.08c	1.20±0.09d	0.64±0.07e	0.32±0.04f	21.74BCD
13	芦苇	3.91±0.03a	1.57±0.10b	0.92±0.08c	0.27±0.04d	0.19±0.06d	0.07±0.03e	28.13A
14	菱草	3.91±0.03a	2.15±0.09b	1.25±0.04c	0.66±0.04d	0.49±0.10e	0.41±0.07e	19.43CDE
15	马蹄莲	3.91±0.03a	1.67±0.06b	1.35±0.02c	1.31±0.03c	0.52±0.03d	0.32±0.06e	21.74BCD
16	睡莲	3.91±0.03a	2.08±0.10b	1.36±0.04c	1.03±0.08d	0.63±0.03e	0.30±0.11f	22.25BC
17	萍蓬草	3.91±0.03a	3.05±0.09b	2.51±0.06c	1.93±0.09d	1.22±0.03e	0.40±0.04f	19.70CDE
18	芡实	3.91±0.03a	2.58±0.05b	1.78±0.08c	1.23±0.02d	0.57±0.10e	0.39±0.07f	19.96CDE
19	菱	3.91±0.03a	2.46±0.07b	1.57±0.09c	1.09±0.02d	0.49±0.06e	0.37±0.07f	20.46CDE
20	大藻	3.91±0.03a	1.81±0.06b	1.29±0.08c	0.75±0.07d	0.59±0.09e	0.38±0.05f	20.21CDE
21	满江红	3.91±0.03a	1.97±0.03b	1.36±0.04c	0.81±0.02d	0.63±0.06e	0.32±0.06f	21.74BCD
22	槐叶萍	3.91±0.03a	1.93±0.12b	1.42±0.08c	0.87±0.05d	0.57±0.10e	0.31±0.07f	22.01BC
23	凤眼莲	3.91±0.03a	1.39±0.06b	0.90±0.08c	0.41±0.06d	0.39±0.08d	0.28±0.04e	22.76BC
24	狐尾藻	3.91±0.03a	2.51±0.05b	2.17±0.04c	1.76±0.04d	0.84±0.06e	0.37±0.03f	20.46CDE
25	轮叶黑藻	3.91±0.03a	2.92±0.08b	2.36±0.05c	1.81±0.06d	1.17±0.08e	0.41±0.04f	19.45CDE
26	金鱼藻	3.91±0.03a	3.18±0.03b	2.67±0.09c	2.38±0.08d	1.43±0.03e	0.48±0.06f	17.66DE
27	苦草	3.91±0.03a	2.78±0.05b	2.13±0.11c	1.57±0.04d	0.98±0.09e	0.33±0.09f	21.48BCDE
28	菹草	3.91±0.03a	2.69±0.09b	2.25±0.07c	1.72±0.06d	0.78±0.05e	0.40±0.08f	19.70CDE
29	伊乐藻	3.91±0.03a	2.15±0.02b	1.86±0.04c	1.13±0.09d	0.62±0.03e	0.28±0.10f	22.78BC
30	对照	3.91±0.03a	3.41±0.04b	2.89±0.09c	2.17±0.03d	1.67±0.04e	1.17±0.05f	—

出,不同HRT时SS的净化效果具有显著差异性( $P<0.05$ )。芦苇30 d后净化能力优于其他28种植物,净化速率较快。HRT在15 d和30 d时德国鸢尾净化能力较弱,HRT在30 d和45 d时芡实净化能力较弱,后期净化能力增强。75 d试验结束时,29种植物净化SS的植物效应为8.90%~13.00%。芦苇对SS的净化具有显著优势( $P<0.05$ ),净化能力较好。

### 2.7 水生植物生物量变化量与各污染物净化率相关性分析

对四类水生植物生物量变化量与四类水生植物对5种污染物的植物效应进行相关性分析(表7),挺水植物生物量变化量与挺水植物对SS的植物效应呈极显著

正相关关系( $P<0.01$ ),漂浮植物生物量变化量与漂浮植物对TN、COD<sub>Cr</sub>的植物效应呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),结果表明,挺水植物对SS的净化能力,漂浮植物对TN、COD<sub>Cr</sub>的净化能力受生物量变化量的影响较大。

### 2.8 水生植物净化能力聚类分析

筛选净化能力强的水生植物品种,不仅要求其其对污染物具有较高的植物效应,同时要求其净化速率也要高。因此将水生植物的生物量变化量,水生植物对TN、NH<sub>3</sub>-N、TP、COD<sub>Cr</sub>、SS的植物效应,以及植物净化效果达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB/T 18918—2002)一级A标准的时间作为筛选指标,得到29种水生植物筛选指标的平均隶属函数值(表8),可

表5 29种水生植物对COD<sub>Cr</sub>的净化能力比较

Table 5 Comparison of the purification ability of 29 aquatic plants on COD<sub>Cr</sub>

编号 No.	植物 Plants	COD <sub>Cr</sub> /mg·L <sup>-1</sup>						植物效应 Plant effect/%
		0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	
1	荷花	178.94±0.06a	77.13±0.06b	62.57±0.08c	51.34±0.12d	39.98±0.10e	28.11±0.07f	13.96K
2	千屈菜	178.94±0.06a	78.34±0.10b	65.79±0.11c	59.49±0.13d	47.81±0.05e	31.06±0.07f	12.31P
3	菖蒲	178.94±0.06a	66.68±0.06b	55.97±0.07c	53.21±0.11d	45.18±0.06e	37.57±0.08f	8.67R
4	黄菖蒲	178.94±0.06a	80.05±0.04b	67.91±0.07c	62.16±0.06d	51.07±0.09e	38.67±0.11f	8.06S
5	水葱	178.94±0.06a	62.42±0.07b	58.72±0.07c	49.11±0.04d	36.36±0.10e	28.74±0.05f	13.61L
6	再力花	178.94±0.06a	75.27±0.08b	63.19±0.10c	55.74±0.03d	44.76±0.08e	37.57±0.07f	8.67R
7	梭鱼草	178.94±0.06a	77.92±0.07b	68.01±0.04c	59.73±0.04d	44.48±0.05e	35.92±0.05f	9.60Q
8	花叶芦竹	178.94±0.06a	70.24±0.08b	61.33±0.04c	57.95±0.12d	41.05±0.09e	25.47±0.04f	15.44E
9	香蒲	178.94±0.06a	57.59±0.04b	53.23±0.09c	46.36±0.07d	37.88±0.12e	29.74±0.08f	13.05N
10	美人蕉	178.94±0.06a	75.68±0.05b	64.32±0.07c	52.77±0.06d	40.31±0.03e	29.28±0.02f	13.31M
11	德国鸢尾	178.94±0.06a	81.99±0.06b	69.36±0.03c	60.31±0.05d	49.28±0.05e	39.37±0.06f	7.67T
12	旱伞草	178.94±0.06a	73.64±0.05b	63.28±0.04c	57.95±0.10d	39.69±0.03e	24.77±0.09f	15.83D
13	芦苇	178.94±0.06a	69.94±0.05b	61.97±0.10c	55.36±0.06d	38.72±0.06e	25.01±0.09f	15.69D
14	茭草	178.94±0.06a	74.75±0.06b	66.23±0.06c	65.35±0.05d	61.18±0.04e	39.73±0.02f	7.47U
15	马蹄莲	178.94±0.06a	59.72±0.12b	56.61±0.07c	51.96±0.07d	37.85±0.05e	21.03±0.06f	17.92B
16	睡莲	178.94±0.06a	69.26±0.07b	59.17±0.03c	50.22±0.04d	33.76±0.04e	22.56±0.08f	17.06C
17	萍蓬草	178.94±0.06a	77.37±0.08b	62.11±0.03c	56.73±0.05d	43.82±0.07e	30.19±0.03f	12.80O
18	芡实	178.94±0.06a	71.84±0.04b	58.35±0.08c	49.41±0.05d	39.84±0.04e	28.82±0.06f	13.56L
19	菱	178.94±0.06a	79.91±0.04b	60.92±0.04c	52.36±0.08d	41.15±0.07e	29.12±0.08f	13.40M
20	大藻	178.94±0.06a	72.15±0.07b	61.56±0.11c	44.62±0.07d	38.34±0.03e	24.84±0.04f	15.79D
21	满江红	178.94±0.06a	77.29±0.04b	58.25±0.03c	47.71±0.07d	40.12±0.04e	28.12±0.03f	13.95K
22	槐叶萍	178.94±0.06a	83.26±0.08b	49.77±0.05c	38.83±0.05d	35.73±0.07e	27.85±0.11f	14.11J
23	凤眼莲	178.94±0.06a	56.75±0.04b	50.38±0.04c	39.27±0.05d	32.56±0.02e	19.77±0.08f	18.62A
24	狐尾藻	178.94±0.06a	80.06±0.10b	64.29±0.07c	55.38±0.05d	43.02±0.06e	26.87±0.04f	14.65H
25	轮叶黑藻	178.94±0.06a	81.74±0.03b	69.69±0.05c	53.57±0.06d	39.05±0.10e	29.29±0.05f	13.30M
26	金鱼藻	178.94±0.06a	78.81±0.04b	61.09±0.06c	49.87±0.11d	35.69±0.07e	25.92±0.09f	15.18F
27	苦草	178.94±0.06a	71.04±0.07b	62.39±0.04c	50.85±0.08d	41.26±0.05e	27.11±0.09f	14.52I
28	菹草	178.94±0.06a	74.36±0.07b	65.17±0.05c	55.69±0.06d	42.73±0.04e	29.29±0.04f	13.30M
29	伊乐藻	178.94±0.06a	79.54±0.10b	67.87±0.09c	51.33±0.05d	38.91±0.11e	26.37±0.05f	14.93G
30	对照	178.94±0.06a	113.74±0.05b	82.15±0.04c	71.68±0.05d	63.57±0.07e	53.09±0.03f	—

比较出各植物间的净化能力强弱。挺水植物中芦苇、香蒲、花叶芦竹、美人蕉净化能力较强,浮叶植物中睡莲净化能力较强,漂浮植物中凤眼莲净化能力较强,沉水植物中伊乐藻、苦草净化能力较强。对水生植物净化能力强弱采用组间连接方法进行系统聚类分析(图2),可将29种水生植物分为三大类:高净化能力植物为芦苇、凤眼莲、香蒲、花叶芦竹、美人蕉;中等净化能力植物为旱伞草、马蹄莲、大藻、睡莲、槐叶萍、伊乐藻、满江红、水葱、苦草、菖蒲、金鱼藻、千屈菜、荷花、萍蓬草、梭鱼草、茭草、狐尾藻、再力花、菹草、轮叶黑藻、德国鸢尾、芡实、黄菖蒲;低净化能力植物为菱。

### 3 讨论

本研究显示挺水植物中芦苇、香蒲、花叶芦竹、美人蕉净化能力较强,浮叶植物中睡莲净化能力较强,漂浮植物中凤眼莲净化能力较强,沉水植物中伊乐藻、苦草净化能力较强,这与前人对水生植物净化能力的研究结果基本一致<sup>[13-20]</sup>。净水机理主要包括植物的吸附/吸收作用、微生物作用和物理化学作用<sup>[11]</sup>。水生植物对于净水效果的提升除了植物本身对污染物的吸附作用,还可以通过根系的泌氧作用促进微生物的繁殖,从而强化水生植物系统对污水的净化效

表6 29种水生植物对SS的净化能力比较  
Table 6 Comparison of the purification ability of 29 aquatic plants on SS

编号 No.	植物 Plants	SS/mg·L <sup>-1</sup>						植物效应 Plant effect/%
		0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	
1	荷花	166.72±0.06a	87.65±0.11b	66.63±0.08c	35.86±0.22d	18.97±0.08e	8.39±0.10f	9.85M
2	千屈菜	166.72±0.06a	92.19±0.07b	70.06±0.08c	43.59±0.18d	26.71±0.06e	8.61±0.05f	9.72M
3	菖蒲	166.72±0.06a	88.99±0.07b	57.14±0.05c	28.57±0.08d	14.66±0.07e	7.26±0.04f	10.53HIJ
4	黄菖蒲	166.72±0.06a	93.49±0.08b	70.62±0.17c	42.55±0.06d	26.88±0.09e	9.22±0.05f	9.35N
5	水葱	166.72±0.06a	87.66±0.09b	69.15±0.03c	37.54±0.10d	19.68±0.12e	7.94±0.04f	10.12L
6	再力花	166.72±0.06a	91.33±0.07b	72.05±0.06c	41.98±0.18d	22.31±0.05e	8.05±0.04f	10.05L
7	梭鱼草	166.72±0.06a	96.13±0.03b	69.24±0.08c	38.82±0.06d	19.93±0.03e	7.77±0.07f	10.22KL
8	花叶芦竹	166.72±0.06a	79.23±0.05b	57.11±0.03c	30.24±0.07d	13.61±0.08e	6.17±0.03f	11.18C
9	香蒲	166.72±0.06a	76.51±0.10b	49.73±0.09c	19.26±0.03d	9.84±0.10e	5.87±0.12f	11.36B
10	美人蕉	166.72±0.06a	80.45±0.12b	52.36±0.07c	21.35±0.18d	10.06±0.08e	6.67±0.04f	10.88DE
11	德国鸢尾	166.72±0.06a	108.16±0.03b	88.32±0.04c	46.92±0.07d	28.31±0.03e	9.97±0.10f	8.90O
12	旱伞草	166.72±0.06a	78.93±0.06b	55.39±0.08c	29.16±0.05d	13.21±0.09e	6.91±0.10f	10.74EFG
13	芦苇	166.72±0.06a	60.32±0.04b	21.15±0.09c	9.28±0.05d	6.81±0.07e	3.13±0.06f	13.00A
14	茭草	166.72±0.06a	87.21±0.09b	69.73±0.11c	43.11±0.04d	25.67±0.08e	8.96±0.07f	9.51N
15	马蹄莲	166.72±0.06a	92.67±0.03b	65.16±0.08c	38.97±0.09d	21.35±0.08e	7.82±0.06f	10.19KL
16	睡莲	166.72±0.06a	78.76±0.08b	58.74±0.10c	31.57±0.09d	19.89±0.05e	8.56±0.07f	9.75M
17	萍蓬草	166.72±0.06a	89.97±0.08b	62.58±0.03c	39.91±0.05d	22.33±0.06e	7.91±0.06f	10.14L
18	芡实	166.72±0.06a	97.25±0.09b	86.32±0.09c	53.26±0.06d	25.13±0.05e	7.25±0.07f	10.53HIJ
19	菱	166.72±0.06a	82.13±0.08b	72.15±0.11c	41.35±0.13d	22.36±0.05e	7.38±0.14f	10.45IJ
20	大藻	166.72±0.06a	79.66±0.11b	52.17±0.06c	36.58±0.08d	13.38±0.05e	7.02±0.09f	10.67FGH
21	满江红	166.72±0.06a	75.65±0.06b	58.67±0.04c	38.98±0.04d	11.05±0.07e	7.33±0.04f	10.48IJ
22	槐叶萍	166.72±0.06a	80.88±0.05b	61.26±0.08c	39.27±0.12d	14.54±0.05e	7.53±0.05f	10.36JK
23	凤眼莲	166.72±0.06a	72.33±0.09b	47.12±0.08c	24.69±0.13d	9.26±0.04e	5.82±0.05f	11.39B
24	狐尾藻	166.72±0.06a	79.05±0.07b	52.13±0.06c	30.86±0.05d	14.56±0.09e	7.99±0.04f	10.09L
25	轮叶黑藻	166.72±0.06a	68.62±0.09b	55.13±0.04c	31.05±0.07d	15.86±0.08e	7.86±0.09f	10.17L
26	金鱼藻	166.72±0.06a	61.97±0.09b	46.78±0.05c	35.57±0.10d	11.66±0.10e	7.13±0.03f	10.60GHI
27	苦草	166.72±0.06a	59.33±0.07b	41.26±0.08c	33.11±0.04d	12.11±0.08e	6.79±0.06f	10.81DEF
28	菹草	166.72±0.06a	71.28±0.08b	52.31±0.04c	36.77±0.07d	15.78±0.05e	7.55±0.09f	10.35JK
29	伊乐藻	166.72±0.06a	60.01±0.07b	43.22±0.04c	29.12±0.09d	14.57±0.02e	6.56±0.10f	10.95D
30	对照	166.72±0.06a	112.78±0.03b	98.63±0.11c	62.19±0.10d	34.79±0.04e	24.81±0.13f	—

果<sup>[21]</sup>。有研究证明凤眼莲、狐尾藻等水生植物对氮、磷的去除主要依靠植物吸附作用<sup>[22]</sup>。本研究试验结束时,无植物对照组可以净化大部分污染物成分,而各植物对污染物的去除率仅占10%~20%左右,说明微生物作用、物理化学作用是本试验污水净化的主要机理,这与杨晓波<sup>[23]</sup>的研究结果一致,其可能原因是污水较为浑浊,沉淀物质对污水中污染物浓度有一定影响。但是植物的种植可以有效提高污染物的去除率,这主要来自于植物本身吸收、吸附作用以及根际植物提高微生物活性的作用,其总体作用即为植物效应<sup>[21]</sup>。

本研究结果表明,挺水植物对SS的净化能力、漂

浮植物对TN、COD<sub>Cr</sub>的净化能力受生物量变化量的影响较大,挺水植物生物量变化量与挺水植物对SS的植物效应呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),漂浮植物生物量变化量与漂浮植物对TN、COD<sub>Cr</sub>的植物效应呈显著正相关关系( $P<0.05$ )。其原因可能是微生物作用、物理化学作用是本试验污水净化的主要机理,生物量的增加可以促进植物的吸附、吸收作用,同时生物量增加的过程中根系也在进一步生长,释放充足的氧气,为微生物提供了良好的活动场所,促进了微生物的作用。

凤眼莲对COD<sub>Cr</sub>的去除效果具有一定优势,适用于对有机物的去除。凤眼莲在试验处理前期对TN、



表7 四类植物生物量变化量与各污染物植物效应的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between four kinds of plant biomass changes and purification rate of various pollutants

生物量变化量 Changes of biomass	植物效应 Plant effect				
	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	COD <sub>Cr</sub>	SS
挺水植物	0.503	0.502	0.438	0.381	0.699**
浮叶植物	0.768	0.788	-0.078	-0.049	-0.574
漂浮植物	0.961*	0.914	0.144	0.976*	0.946
沉水植物	-0.483	-0.603	0.240	-0.139	-0.523

注:\*表示在0.05水平上相关性显著(双尾),\*\*表示在0.01水平上相关性显著(双尾)。

Note:\* means the significant correlation at the level of 0.05(both tails),\*\* means the significant correlation at the level of 0.01(both tails).

表8 水生植物净化能力排序

Table 8 Aquatic plant purification capacity sorting

植物 Plants	平均隶属函数值 Mean membership index value	排序 Sorting	植物 Plants	平均隶属函数值 Mean membership index value	排序 Sorting	植物 Plants	平均隶属函数值 Mean membership index value	排序 Sorting
芦苇	0.912 9	1	伊乐藻	0.512 3	11	菱草	0.411 3	21
凤眼莲	0.861 9	2	满江红	0.491 9	12	狐尾藻	0.407 8	22
香蒲	0.843 6	3	水葱	0.488 2	13	再力花	0.407 3	23
花叶芦竹	0.672 7	4	苦草	0.485 7	14	菹草	0.391 7	24
美人蕉	0.669 1	5	菖蒲	0.479 2	15	轮叶黑藻	0.373 0	25
早伞草	0.559 7	6	金鱼藻	0.475 1	16	德国鸢尾	0.316 5	26
马蹄莲	0.549 6	7	千屈菜	0.449 7	17	芡实	0.311 5	27
大藻	0.549 2	8	荷花	0.443 1	18	黄菖蒲	0.307 4	28
睡莲	0.537 4	9	萍蓬草	0.441 3	19	菱	0.189 5	29
槐叶萍	0.517 4	10	梭鱼草	0.419 8	20			

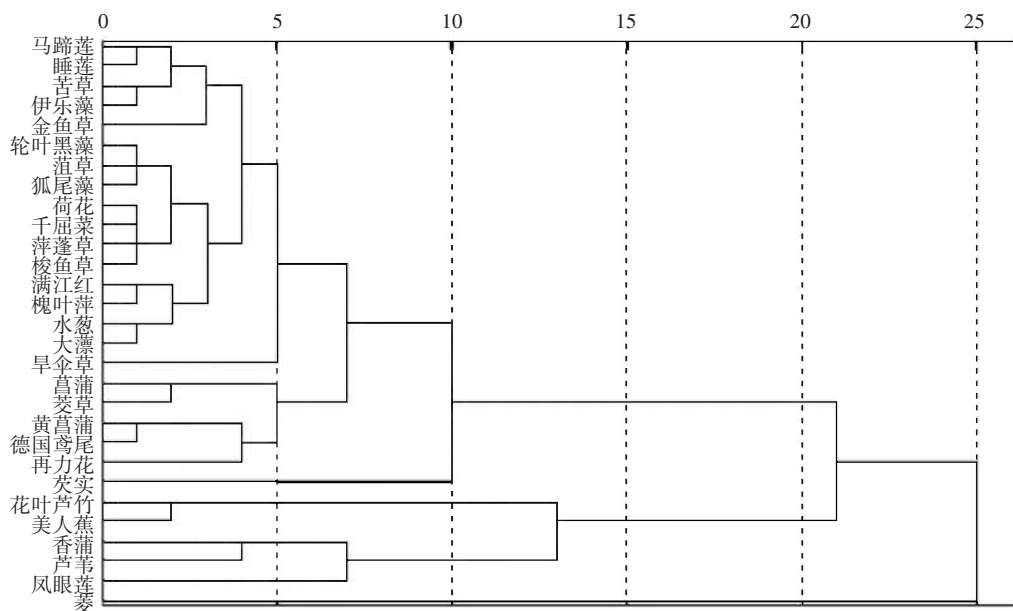


图2 水生植物净化能力等级分类

Figure 2 The level classification of aquatic plant purification ability

NH<sub>3</sub>-N、TP净化速率具有一定优势,说明凤眼莲针对这些污染物的净化在短期内具有明显效果,但是在试验后期对污染物净化能力与其他植物无显著差异,说

明凤眼莲对低浓度生活污水的净化能力无明显优势。芦苇和香蒲在试验后期对TP净化效果较好,说明芦苇和香蒲对低浓度生活污水TP的去除能力较强。试

验筛选出的5种净化效果较好的水生植物当中,凤眼莲属于外来入侵物种,在工程应用中,需要采取一定控养措施<sup>[24-25]</sup>,防止其对原有生态系统造成危害。

#### 4 结论

(1)凤眼莲对TN、NH<sub>3</sub>-N、TP的净化在短期内具有明显效果。芦苇和香蒲在试验后期对TP净化效果较好。

(2)挺水植物中芦苇、香蒲、花叶芦竹、美人蕉净化能力较强,浮叶植物中睡莲净化能力较强,漂浮植物中凤眼莲净化能力较强,沉水植物中伊乐藻、苦草净化能力较强。

#### 参考文献:

[1] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5):37-38.  
WANG Qing-ying. Present situation and prospect on rural sewage treatment in China[J]. *Pollution Control Technology*, 2007, 20(5):37-38.

[2] 苏东辉, 郑正, 王勇, 等. 农村生活污水处理技术探讨[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(1):80-82.  
SU Dong-hui, ZHENG Zheng, WANG Yong, et al. Discussion on treatment technology of rural domestic wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 28(1):80-82.

[3] 余浩. 水解池-滴滤池-人工湿地处理农村生活污水研究[D]. 南京:东南大学, 2006.  
YU Hao. Study on the treatment of rural domestic wastewater by hydrolysis pond/trickling filter/constructed wetland[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

[4] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1):96-101.  
YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101.

[5] 赵宇. 人工湿地系统的净化机理[J]. 江西化工, 2017(2):153-154.  
ZHAO Yu. Purification mechanism of constructed wetland system[J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2017(2):153-154.

[6] Li K, Liu L L, Yang H X, et al. Phytoremediation potential of three species of macrophytes for nitrate in contaminated water[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2016, 7(8):1259-1267.

[7] Duan J J, Zhao J N, Xue L H, et al. Nutrient removal of a floating plant system receiving low-pollution wastewater: Effects of plant species and influent concentration[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 41(1):012028.

[8] 曾小梅, 刘鹏, 张晓斌. 水生观赏植物对城市污水的修复研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5):349-353.

ZENG Xiao-mei, LIU Peng, ZHANG Xiao-bin. Phytoremediation of urban wastewater by ornamental hydrophytes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(5):349-353.

[9] Romanchuck L D, Fedonyuk T P, Fedonyuk R G, et al. Hydrophyte water purification under conditions of "zhytomyrvodokanal" communal enterprise[J]. *Biotechnologia Acta*, 2016, 9(6):58-71.

[10] 张增胜. 农村分散式污水处理适用技术及机理研究[D]. 上海:东华大学, 2010.  
ZHANG Zeng-sheng. A study on applicable technology and mechanism of treatment for rural decentralized sewage[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.

[11] 蒙语桦. 化粪池与人工湿地联用处理湖南农村地区生活污水研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.  
MENG Yu-hua. Study on domestic wastewater treatment of rural area in Hunan Province by using septic tank coupled with constructed wetland[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[12] 付超, 周雪玲, 朱春林. 应用隶属函数法综合评价高酸苹果抗寒性及果实品质[J]. 北方园艺, 2017(2):11-15.  
FU Chao, ZHOU Xue-ling, ZHU Chun-lin. Comprehensive evaluation of cold resistance and fruit quality of apple with high acidity by subordinate function[J]. *Northern Horticulture*, 2017(2):11-15.

[13] 张德喜. 不同人工湿地植物对生活污水净化效果研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(4):1621-1628.  
ZHANG De-xi. Study on purification efficiency of domestic wastewater by different constructed wetland plants[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2018, 37(4):1621-1628.

[14] 刘海琴, 邱园园, 闻学政, 等. 4种水生植物深度净化村镇生活污水厂尾水效果研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4):616-626.  
LIU Hai-qin, QIU Yuan-yuan, WEN Xue-zheng, et al. The deep purification of four aquatic macrophytes for tailrace of rural sewage treatment plants[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4):616-626.

[15] 杨帆, 刘赢男, 焉志远, 等. 阿什河流域10种水生植物对水质氮磷的净化能力比较[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4):708-714.  
YANG Fan, LIU Ying-nan, YAN Zhi-yuan, et al. Compare the water purification ability of ten aquatic macrophytes about nitrogen and phosphorus in Ashi River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4):708-714.

[16] 周卿伟, 梁银秀, 阎百兴, 等. 冷季不同植物人工湿地处理生活污水的工程实例分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1):130-138.  
ZHOU Qing-wei, LIANG Yin-xiu, YAN Bai-xing, et al. The constructed wetlands engineering cases with different plants treating domestic sewage in a subtropical climate at cold seasons[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1):130-138.

[17] 高岩, 马涛, 张振华, 等. 不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2427-2435.  
GAO Yan, MA Tao, ZHANG Zhen-hua, et al. Nitrient removals from eutrophic water by *Eichhornia crassipes* at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2427-2435.

[18] 周胜杰, 路斌, 贾婷婷, 等. 4种水培植物对富营养化水体中总

- 氮、总磷去除率影响的研究[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(1):44-47.
- ZHOU Sheng-jie, LU Bin, JIA Ting-ting, et al. Study of four kinds of hydroponic plant on removal efficiency of total nitrogen, total phosphorus of eutrophication aquaculture water[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2017, 24(1):44-47.
- [19] 丁玲, 李羚君, 李剑峰, 等. 沉水植物净化人工水源湖原水中氮磷和悬浮物的试验研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1):122-129.
- DING Ling, LI Ling-jun, LI Jian-feng, et al. Experimental studies on purification of nitrogen, phosphorus and suspended solids in raw water from an artificial source lake by submerged macrophytes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(1):122-129.
- [20] Zhu T S, Cao T, Ni L Y, et al. Improvement of water quality by sediment capping and re-vegetation with *Vallisneria natans* L.: A short-term investigation using an in situ enclosure experiment in Lake Erhai, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86:113-119.
- [21] 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.
- CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HE Gang, et al. Analysis of plant effect and rhizosphere enzyme activity in a constructed vertical-flow wetland established for sewage treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6051-6058.
- [22] Lu B, Xu Z S, Li J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 110:18-26.
- [23] 杨晓波. 水生植物对贾鲁河污水的净化效果和相关机理的探讨[D]. 郑州:郑州大学, 2011.
- YANG Xiao-bo. Purification efficiency of aquatic macrophytes on sewage from Jialu River and investigate on related mechanism[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2011.
- [24] 刘国锋, 何俊, 华伯仙, 等. 控养速生植物治理污染水体的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21):1-6.
- LIU Guo-feng, HE Jun, HUA Bo-xian, et al. Research progress of controlling fast-growing plants to control polluted water body[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(21):1-6.
- [25] 李礼, 林艺滨, 刘灿. 入侵植物凤眼莲的生物学特性及生态管理对策[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(3):60-62, 67.
- LI Li, LIN Yi-bin, LIU can. Review on biological characteristics and management strategies of *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(3):60-62, 67.