

湿地植物在不同水力条件下对中水的净化效果

胡碧莹, 王海洋* (西南大学园艺园林学院, 重庆 400715)

摘要 [目的]研究湿地植物在不同水力条件下对中水的净化功效。[方法]在人工构建的湿地系统中,将中水回用作为湿地水源,研究了5种湿地植物菖蒲、美人蕉、梭鱼草、再力花和狐尾藻在不同水力停留时间、水深和流速(湿地表面流速和湿地渗滤流速)下对供试中水总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果。[结果]湿地植物在适宜水力条件下对中水具有一定的净化效果,其中菖蒲和美人蕉的TN系统出水含量符合“地表水环境质量标准Ⅲ类”水体要求,TP系统出水含量符合“地表水环境质量标准Ⅱ类”水体要求。综合考虑5种植物对TN、TP的去除效果,模拟湿地系统适宜采用的水力停留时间为2 d,水深为20 cm。该情况下,不同表面流速处理对中水TN平均表面去除率达到21.08%,TP平均表面去除率达到17.63%。而不同渗滤流速处理对中水TN、TP系统去除均值分别为57.72%和64.84%。[结论]该研究可为中水污染治理提供科学依据。

关键词 湿地植物;水力停留时间;水深;水流速度;中水净化

中图分类号 X52 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)08-0081-05

Purification Effects of Wetland Plants in Reclaimed Water under Different Hydraulic Conditions

HU Bi-ying, WANG Hai-yang* (School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract [Objective] To study the purification efficiency of wetland plants under different hydraulic conditions. [Method] Based on the constructed wetland system with reclaimed water, the experiments on removal efficiency of TN, TP under different hydraulic retention time, water depth and velocity (surface flow velocity and percolation flow velocity) in *Acorus calamus* L., *Canna indica* L., *Pontederia cordata* L., *Thalia dealbata* L. and *Myriophyllum verticillatum* L. were conducted. [Result] The results showed that wetland plants under varying hydraulic conditions have significant effects on reclaimed water purification. Above all the five plants, *Acorus calamus* L. and *Canna indica* L. have optimal performance on pollutants' removal. The concentrations of TN in the treated effluent of *Acorus calamus* L. and *Canna indica* L. could achieve the “Environmental Quality Standards For Surface Water Class III Standard”, and which of TP could achieve “Environmental Quality Standards For Surface Water Class II Standard”. Comprehensively considering the removal capability of five plants, suitable hydraulic conditions was suggested as 2 d of hydraulic retention time, 20 cm of water depth. Under this circumstances, the average surface removal rate of TN, TP were 21.08%, 17.63%, the mean values of TN, TP in system treated effluent were 57.72%, 64.84% respectively. [Conclusion] The study can provide scientific basis for water pollution control.

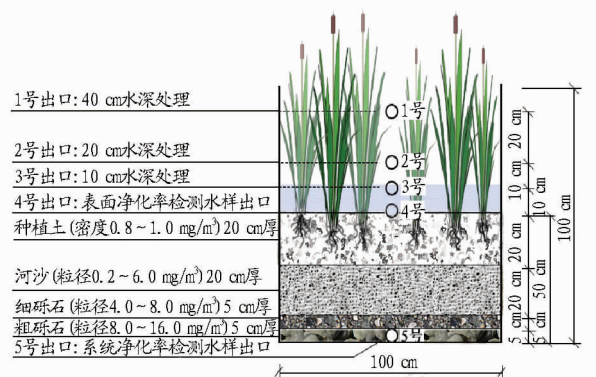
Key words Wetland plants; Hydraulic retention time; Water depth; Water velocity; Reclaimed water purification

面对日趋严重的水资源匮乏问题,城市污水再利用变得尤为重要,中水因其回用成本较低、水源含量相对丰富等特点,适合作为湿地水源的补给。在中水回用作湿地水源的过程中,不同水力条件处理对净化效果的影响显著,在模拟多个不同特征的湿地水流运动过程后发现,水力停留时间、水深和水力负荷是影响湿地净化效果的三大水力要素,在实际运行中均存在一个最佳值,大于或小于该值均会使去除率有所下降^[1]。

在实地考察和规划中,湿地水流速度比水力负荷更易于获取,有研究表明,湿地表面流具有高阻力、低流速的特点^[2],而湿地渗滤流则依据达西定律(Darcy's law),其数值随着湿地蓄水量的下降而下降^[3-4],用于表示湿地系统内水流速度。笔者引入湿地水流速度这一要素,并将其细化为湿地表面流速和湿地渗滤流速,与水力停留时间以及水深一起作为试验水力条件。选取5种常用湿地植物菖蒲(*Acorus calamus* L.)、美人蕉(*Canna indica* L.)、梭鱼草(*Pontederia cordata* L.)、再力花(*Thalia dealbata* L.)和狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L.),人工构建5个基质成分相同的单物种湿地单元,将中水回用作为系统水源,研究分析了5种湿地植物在不同水力条件下对中水总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果,旨在为中水污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 人工湿地系统构建 该试验在重庆市北碚区西南大学植物大棚内进行。依据《人工湿地污水处理技术导则》(RISN-TG 006—2009)^[5]要求,共构建了5个长2 m、宽1 m、高1 m的湿地系统,每个系统内仅栽单种植物,种植密度为16~25株/m²。湿地系统构造如图1所示。



注:1~3号出口为调节水深处理;4号为表面净化率检测水样出口;5号为系统净化率检测水样出口

Note: No. 1-3 stand for exports of regulating water level treatments; No. 4 stands for export of surface purification rate; No. 5 stands for export of system purification rate

图1 湿地系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of wetland system

作者简介 胡碧莹(1989—),女,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向:风景园林生态植物学。*通讯作者,教授,博士,硕士生导师,从事风景园林生态研究。

收稿日期 2017-03-05

1.2 试验进水水质 试验进水模拟中水各项指标,参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)^[6]中一级

A排放标准进行人工配置,主要成分包括 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、葡萄糖等。各项水质指标见表1。

表1 试验水质指标

Table 1 Index changes of experimental water

指标 Index	总氮 Total nitrogen (TN) //mg/L	氨氮 Ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) //mg/L	总磷 Total phosphorus (TP) //mg/L	pH
浓度范围 Concentration range	9.70 ~ 19.50	5.30 ~ 16.50	0.60 ~ 1.50	7.43 ~ 7.85
平均值 Mean	14.35	8.42	0.80	7.49

1.3 试验处理 于2016年3—11月研究5种湿地植物在不同水力停留时间、水深和水流速度(湿地表面流速和湿地渗滤流速)下的净化效果,考虑所选植物性状,试验期间配以恒流泵保持系统连续进出水。水力停留时间和水深试验先进行,共设置1、2、3 d 3组水力停留时间处理;10、20、40 cm 3组水深处理。以上每组控制试验重复3次,试验结束后及时取水样进行检测。

水流速度试验在水力停留时间和水深试验之后进行,试验期间配以流速仪监控水流速。通过对彩云湖国家湿地公园、璧山观音塘湿地公园和九曲河湿地公园的实地考察及水速测量,共设置0.01、0.03、0.05 m/s 3组湿地表面流速处理;依据《人工湿地污水处理技术导则》要求,设置0.05、0.10、0.20 m/d 3组湿地渗滤流速处理。以上每组控制试验重复3次,取样后及时进行检测。

5种湿地植物进入成熟期后启动试验,期间采用间歇进水方式,试验期连续进出水,非试验期则不进水,将试验系统置于“湿润—干旱—湿润”的水循环中模拟天然湿地水环境,最大程度地还原天然湿地水文特点。

1.4 数据分析 用Excel和SPSS 19对数据进行统计分析,包括比较各供试植物在不同水力停留时间、水深和水流速度下对中水TN、TP的去除率,以及供试植物种间去除率差异等。

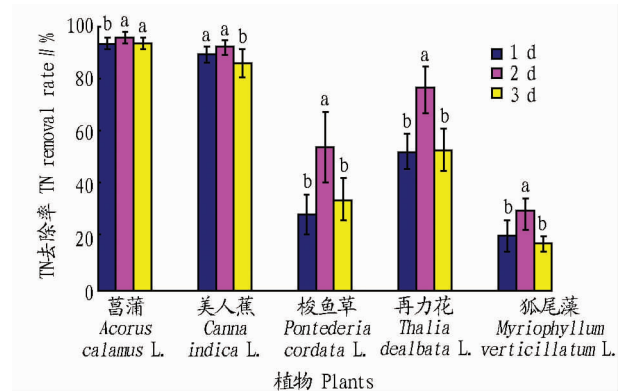
2 结果与分析

2.1 不同水力停留时间和水深处理对植物去除TN、TP能力的影响

2.1.1 不同水力停留时间处理下5种植物对TN、TP的去除效果。人工湿地去除TN、TP的能力与植物类型、温度、土壤等条件相关,不同水力停留时间对污染物去除率造成影响^[7-8]。由图2可见,5种植物对TN的平均去除率从大到小依次为菖蒲、美人蕉、再力花、梭鱼草、狐尾藻,其中菖蒲对TN的平均去除率为94.62%,狐尾藻的平均去除率仅为22.50%。每种植物的TN去除率都在2 d达到峰值,之后降低。

由图3可见,5种植物对TP的平均去除率从大到小依次为美人蕉、菖蒲、再力花、梭鱼草、狐尾藻。除再力花外,其余植物均在2 d达到去除峰值。所有试验处理中,去除效果最好的是2 d处理下的美人蕉,TP平均去除率达到93.41%,而狐尾藻的TP平均去除率仅32.79%。有研究表明,适当延长水力停留时间可以提高人工湿地磷的去除率,因为水力停留时间影响污水中磷向基质微孔表面扩散和向吸附点靠近

的概率^[9],而且随着水力停留时间的延长,湿地植物对磷的吸收量也会增加。

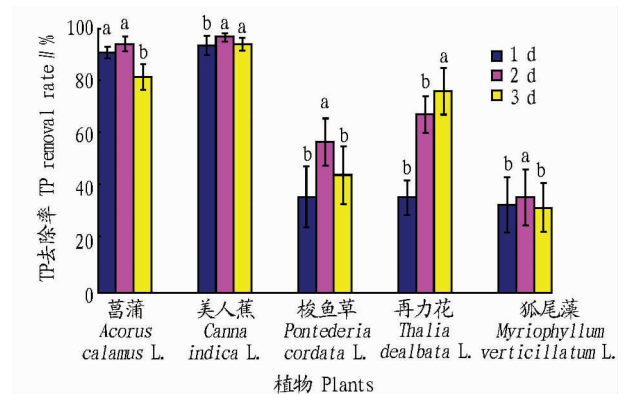


注:同一植物不同处理间不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same plant indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图2 不同水力停留时间处理下5种植物对TN的去除率

Fig. 2 Removal rate of TN in 5 plants under different HRT treatments



注:同一植物不同处理间不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same plant indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图3 不同水力停留时间处理下5种植物对TP的去除率

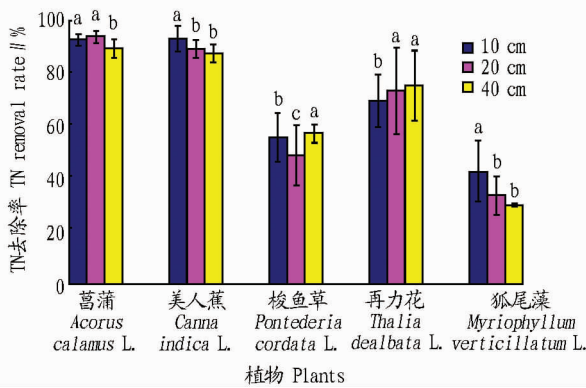
Fig. 3 Removal rate of TP in 5 plants under different HRT treatments

湿地系统中氮、磷的去除一方面可以借由植物的吸收同化作用,另一方面,植物可为微生物的生长繁殖提供良好的环境,通过微生物和植物的协同作用也能降解水体中污染物含量^[10]。水力停留时间过短会导致生化反应不充分,停留时间过长则会引起污染物的滞留,结合图2、3可知,水力停留时间设置为2 d较为合适。

2.1.2 不同水深处理下 5 种植物对 TN、TP 的去除效果。水深会直接影响湿地植物的生长、繁殖、分布等过程,其对植物种群竞争和群落演替具有重要意义^[11]。有研究表明,随着水深的增加,污染物的去除率呈先增大后降低的趋势,污染物的主要去除途径也会发生变化^[12]。

从图 4 可见,不同水深处理下 5 种植物对 TN 的去除效果差异明显,其中菖蒲的平均 TN 去除率最大,达 93.75%。每种植物的最适水深差异较大,其中,狐尾藻、美人蕉的净化峰值出现在 10 cm 水深处,菖蒲的净化峰值出现在 20 cm 水深处,而梭鱼草、再力花的净化峰值出现在 40 cm 水深处。这与供试植物“机会窗”^[13]水深不同有关,同时也表明植物去除 TN 的能力受种间差异影响或水深差异影响。

从图 5 可见,5 种植物中以 20 cm 水深处的美人蕉对 TP 的去除率最大,平均去除率达 95.80%。菖蒲和梭鱼草的 TP 去除峰值也出现在水深 20 cm 处,再力花和狐尾藻的去除峰值出现在水深 10 cm 处。水体中磷素的去除途径与氮素有很大不同,磷素无法通过气态挥发离开水体,绝大部分磷以不溶性磷酸盐的形式存在,在同样的停留时间下,虽然深水位磷的负荷量更大,但从试验结果来看,水深 40 cm 处磷的去除率并不高,这可能是由于进水中磷浓度较低的缘故。



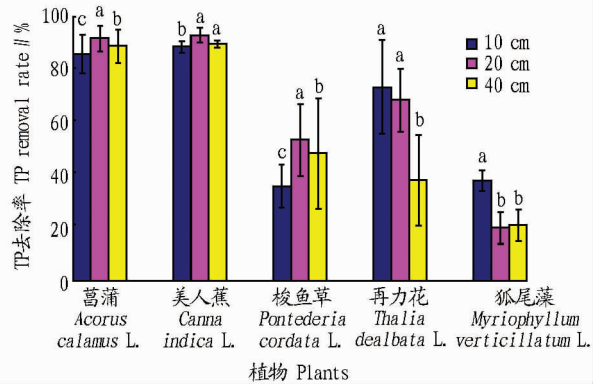
注:同一植物不同处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)
Note: Different lowercase letters in the same plant indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图 4 不同水深处理下 5 种植物对 TN 的去除率

Fig. 4 Removal rate of TN in 5 plants under different water depth treatments

以上分析表明,水深处理对 5 种植物去除 TN、TP 的效果均有显著影响,但最适水深在不同植物间差别较大。5 种供试植物“机会窗”水深不同,试验结果也显示在“机会窗”水深附近的去除效果显著优于其他水深处理。Holland 等^[14]利用罗丹明对人工湿地不同水深和流量情况下的水流过程进行试验,发现随着水深的增大,湿地的水力性能逐渐减弱。郭长强等^[15]研究指出,水深较大时会致使湿地水环境分布不均,影响植物净化效果,这与笔者的研究结论相似,水深 40 cm 处 5 种植物 TN、TP 的净化效果普遍不如水深 20、10 cm 处。

2.2 不同水流速度处理对植物去除 TN、TP 能力的影响 依据上述试验结果,将流速试验的水力停留时间设置为 2 d,水深设置为 20 cm。



注:同一植物不同处理间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same plant indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图 5 不同水深处理下 5 种植物对 TP 的去除率

Fig. 5 Removal rate of TP in 5 plants under different water depth treatments

2.2.1 不同表面流速处理下 5 种植物对 TN、TP 的去除效果。由表 2 可知,5 种植物对 TN、TP 的表面去除率均高于空白对照 (CK),说明湿地植物有良好的去污效果。5 种植物中美人蕉对 TN、TP 的平均去除率最高,这是由于其根系最为发达,自身吸收作用效果显著^[16]。

表 2 5 种植物对 TN、TP 的表面去除率

Table 2 Surface removal rate of TN and TP in 5 plants %

植物 Plants	去除率 Removal rate	
	TN	TP
菖蒲 <i>Acorus calamus</i> L.	17.21 ± 7.89 b	13.36 ± 3.88 ab
美人蕉 <i>Cannna indica</i> L.	47.68 ± 8.52 a	21.54 ± 8.16 a
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i> L.	9.77 ± 3.54 b	14.59 ± 4.11 ab
再力花 <i>Thalia dealbata</i> L.	20.20 ± 8.98 b	21.37 ± 7.31 a
狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	9.14 ± 3.09 b	12.43 ± 3.64 ab
CK	6.11 ± 0.69 b	8.64 ± 1.85 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

从图 6、7 可见,美人蕉、再力花、狐尾藻在表面流速 0.01 m/s 时对 TN、TP 的去除效果最好,菖蒲在 0.03 m/s 时对 TN 的去除效果最好。各处理以表面流速 0.01 m/s 时的美人蕉对 TN 的去除效果最好,去除率达 57.40%。菖蒲、梭鱼草、狐尾藻在表面流速 0.01 m/s 时对 TP 的去除效果最好,美人蕉和再力花在表面流速 0.03 m/s 时的去除效率最好,5 种植物中对 TP 去除率最高的是表面流速 0.03 m/s 时的再力花,去除率达 32.53%。

低流速时水源在基质中的穿行速度较慢,有利于对氮、磷的吸附和沉淀,而流速过快会造成水体中的微小颗粒难于被基质和植物根系上的生物膜吸附,甚至将生物膜冲刷脱落,不利于植物对营养物质的吸收和湿地内生化反应的进行。对不同表面流速处理下的 TN、TP 去除率进行 One-way ANOVA 分析,结合图 6、7 的去除均值动态,可知 TN 去除效果比 TP 去除效果稍好,二者平均去除率分别为 21.08% 和 17.63%,均在 0.01 m/s 处达到峰值。

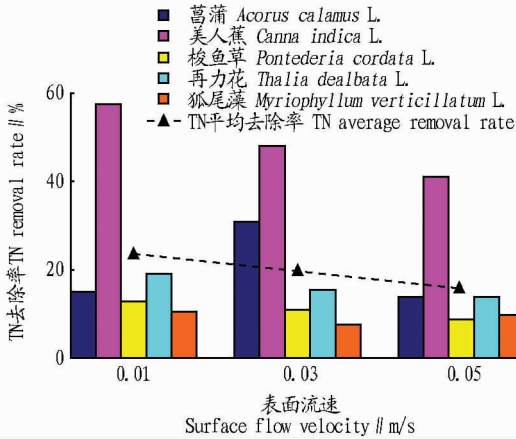


图6 不同表面流速处理下5种植物对TN的去除率

Fig.6 Removal rate of TN in 5 plants under different surface flow velocity

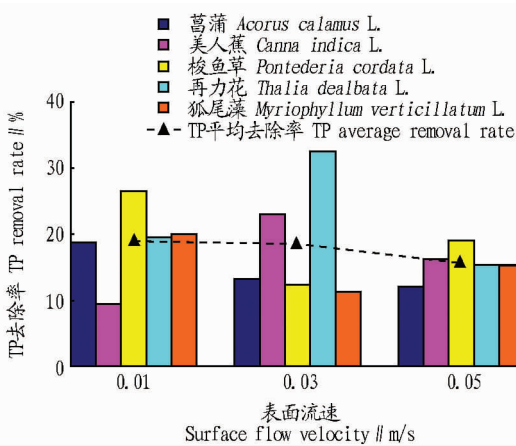


图7 不同表面流速处理下5种植物对TP的去除率

Fig.7 Removal rate of TP in 5 plants under different surface flow velocity

2.2.2 不同渗滤流速处理下5种植物对TN、TP的去除效果。由表3可知,5种植物对TN、TP的去除率均高于空白对照。5种植物中对TN去除效果最好的是菖蒲,对TP去除效果最好的是美人蕉。将表3和表2进行比较,发现各植物对TN、TP的系统去除率明显高于表面去除率,说明氮、磷的主要去除途径为植物根系与微生物的协同作用^[17],植物体自身吸收同化所占比例不高。

表3 5种植物对TN、TP的系统去除率

Table 3 System removal rate of TN and TP in 5 plants %

植物 Plants	去除率 Removal rate	
	TN	TP
菖蒲 <i>Acorus calamus</i> L.	95.97 ± 2.58 a	89.14 ± 7.51 a
美人蕉 <i>Canna indica</i> L.	89.42 ± 7.56 a	95.06 ± 2.25 a
梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i> L.	40.66 ± 25.63 c	53.16 ± 9.91 b
再力花 <i>Thalia dealbata</i> L.	59.62 ± 17.16 b	57.49 ± 22.49 b
狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	25.72 ± 8.64 d	29.59 ± 7.18 c
CK	21.11 ± 2.69 d	23.64 ± 4.47 c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between treatments ($P < 0.05$)

从图8可见,菖蒲、美人蕉、再力花在流渗滤流速0.05 m/d时对TN的去除率最大,梭鱼草和狐尾藻在0.10 m/d时对TN的去除率最大。所有组合中TN去除率最高能达到97.78%,出现在0.05 m/d时的菖蒲。

从图9可知,美人蕉、再力花、狐尾藻在渗滤流速0.05 m/d时对TP的去除率最大,菖蒲和梭鱼草在0.10 m/d时的TP去除率最大,所有组合中对TP去除效果最好的是0.05 m/d时的美人蕉,去除率达96.89%。

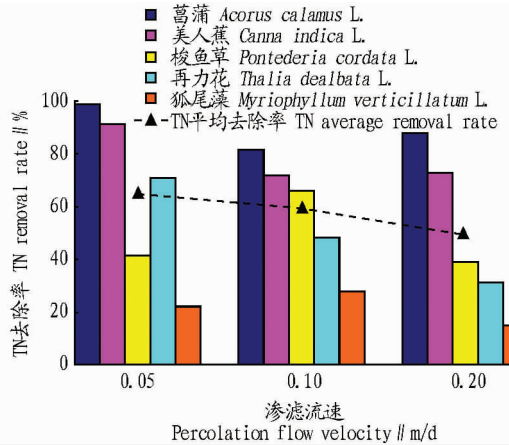


图8 不同渗滤流速处理下5种植物对TN的去除率

Fig.8 Removal rate of TN in 5 plants under different percolation flow velocity

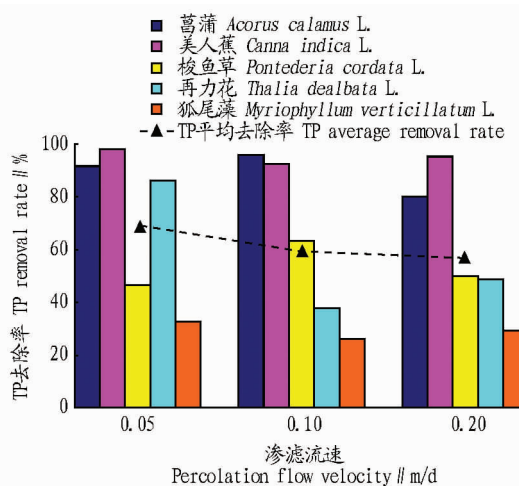


图9 不同渗滤流速处理下5种植物对TP的去除率

Fig.9 Removal rate of TP in 5 plants under different percolation flow velocity

对不同渗滤流速处理下的TN、TP去除率分别进行One-way ANOVA分析,结果显示,其平均去除率分别为57.72%和64.84%。虽然不同渗滤流速处理对TN、TP的去除率影响不显著,但结合图8、9去除均值动态可知,5种植物在0.10、0.20 m/d时对TN、TP的去除效果不如0.05 m/d时,表明在一定范围内,较低的渗滤流速有利于植物对氮、磷的吸收和湿地内生生化反应的进行。

3 讨论

3.1 湿地植物净化中水效果 参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[18]中关于景观用水的要求,该试验中除表

面流速试验因采集系统表层水样净化率不高以外,其余处理下各植物对中水 TN、TP 去除效果较好,尤以菖蒲和美人蕉优势最为明显,其 TP 去除效果达到 II 类水体要求、TN 去除效果达到 III 类水体要求,显示出中水用于湿地供水的优势。我国水资源短缺,中水因其回用成本较低及水源含量相对丰富等特点,非常适合作为景观水体的补给。

3.2 净化效果与水力条件的相关性 水力条件对湿地净化效果影响显著,且在各水力条件间存在动态平衡,以达到最优去除率。结合该试验结果,适当延长水力停留时间可以提高人工湿地氮、磷的去除率;而水深试验结果在不同植物间受“机会窗”影响较大,但总体趋势表明,一定范围内,水深增大会导致湿地净化性能降低。水流速度的减缓有利于植物和基质对氮、磷的吸附和沉淀,在连续进出水的情况下,表面流速设置在 0.01 m/s 时效果最好;而渗滤流速处理对 TN、TP 的去除率影响不明显。

3.3 5 种植物消氮纳磷能力及配置建议 在 5 种供试植物中,菖蒲、美人蕉为湿生植物或挺水植物,梭鱼草、再力花为挺水植物,狐尾藻为沉水植物,试验结果显示,狐尾藻对 TN、TP 的去除率低于另外 4 种植物。这是由于挺水植物比沉水植物有更大的生物量和更为发达的根系,因此挺水植物对污水的净化效果和对污染负荷变化的适应性均优于沉水植物。本着人工湿地景观美化及污水净化的功能需求,结合各湿地植物生长特性及氮、磷去除效果的动态特征,以“高+中+低”立体式层次搭配为基础诉求,在实际植物配置应用中,可以考虑将沉水植物区域置于挺水植物区域之前。

4 结论

(1) 5 种供试植物对中水 TN、TP 均有一定的去除效果,其中美人蕉和菖蒲去除率较高,且去除效果稳定,其 TP 系统出水含量符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水体要求, TN 含量符合 III 类水体要求。

(2) 在 3 组水力停留时间(1、2、3 d)处理下,5 种供试植物对 TN、TP 的去除率基本呈先上升后下降的趋势,因此可将水力停留时间设置在 2 d 最为合适。不同水深处理(10、20、40 cm)下对 TN、TP 的去除效果在植物种间差别较大,但总体趋势显示水深 40 cm 处效果不如水深 20 或 10 cm 处。

(3) 不同表面流速处理(0.01、0.03、0.05 m/s)对中水

TN、TP 的去除效果影响明显, TN 平均表面去除率达到 21.08%, TP 平均表面去除率达到 17.63%。而不同渗滤流速处理(0.05、0.10、0.20 m/d)对中水 TN、TP 的去除效果影响不明显, TN 和 TP 的平均系统去除率分别为 57.72% 和 64.84%。

参考文献

- [1] 王世和,王薇,俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,33(3):359-362.
- [2] 宋新山,邓伟. 基于连续性扩散流的湿地表面水流动力学模型[J]. 水利学报,2007,37(10):1166-1171.
- [3] 何江涛,马振民,张金炳,等. 污水渗滤土地处理系统中的堵塞问题[J]. 中国环境科学,2003,23(1):85-89.
- [4] 张建,黄霞,魏杰,等. 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理[J]. 中国环境科学,2002,22(5):438-441.
- [5] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 人工湿地污水处理技术导则:RISN-TG 006—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [6] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S]. 北京:中国环境出版社,2002.
- [7] 杨长明,顾国泉,李建华,等. 潜流人工湿地系统停留时间分布与 N、P 浓度空间变化[J]. 环境科学,2008,29(11):3043-3048.
- [8] 郑艳侠,冯绍元,刘培斌. 水温与水力停留时间对人工渗滤系统的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(12):2509-2513.
- [9] HEALY M G, RODGERS M, MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. Bioresource technology,2007,98(12):2268-2281.
- [10] REDDY K R, PATRICK W H JR. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition, and nitrogen loss in a flooded soil[J]. Soil biology & biochemistry,1975,7(2):87-94.
- [11] 王海洋,陈家宽,周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响[J]. 植物生态学报,1999,23(3):269-274.
- [12] 刘永,郭怀成,周丰,等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报,2006,26(9):3117-3126.
- [13] GAFHY S, GASITH A. Spatially and temporally sporadic appearance of macrophytes in the littoral zone of Lake Kinneret, Israel: Taking advantage of a window of opportunity[J]. Aquatic botany,1999,62(4):249-267.
- [14] HOLLAND J F, MARTIN J F, GRANATA T, et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics[J]. Ecological engineering,2004,23(3):189-203.
- [15] 郭长强,董斌,刘俊杰,等. 水深对塘堰湿地水力性能的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(11):3287-3295.
- [16] MÜNCH C H, KUSCHK P, RÖSKE I. Root stimulated nitrogen removal: Only a local effect or important for water treatment[J]. Water science and technology,2005,51(9):185-192.
- [17] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究,2009,22(3):337-342.
- [18] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 王飞,赵立欣,沈玉君,等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报,2013,29(19):202-208.
- [10] 祁玉峰,祁玉峡,祁凌云. 饲料质量安全问题解析[J]. 河南农业科学,2003(10):60-61.
- [11] 沈秀丽,杨增玲,韩鲁佳. 畜禽粪便引发的重金属污染的研究现状[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 重庆:中国农业工程学会,2011.
- [12] 李刚,岳建芝,郭前辉. 秸秆沼气工程化对环境的影响及应对措施[J]. 农业工程学报,2011,27(S1):200-204.
- [13] 鲍艳宇,娄翼来,颜丽,等. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb Cd Cu Zn 的变化特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1820-1826.

(上接第 63 页)

- [3] 裴莹,曾晓楠. 沼液中几种抗生素的检测与樱花细菌性穿孔病防效研究[J]. 中国园艺文摘,2014(1):76-77.
- [4] 叶小梅,常志州,钱玉婷,等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J]. 农业工程学报,2012,28(6):222-227.
- [5] 钟攀,李泽碧,李清荣,等. 重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(S1):165-171.
- [6] 张继方,袁海荣,邹德勋,等. 沼液养分和重金属农用安全风险分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(19):10246-10250.
- [7] 朱泉雯. 重金属在猪饲料-粪污-沼液中的变化特征[J]. 水土保持研究,2014,21(6):284-289.
- [8] 郑阳选,李健. 德国沼肥利用的安全性及生态卫生[J]. 中国沼气,2009,27(2):45-48.