

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.019

表面流人工湿地不同植物及其组合净化污水处理厂尾水研究

吴丹^{1,2}, 缪爱军^{1,2}, 李丽^{1,2}, 甘琳^{1,2}, 王爱丽^{1,2}, 杨柳燕^{1,2}

(1. 南京大学环境学院, 江苏南京 210023; 2. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏南京 210023)

摘要:为提高表面流人工湿地对低污染水的生态净化效率,对人工湿地中湿生植物的组成进行对比研究,设置8个由不同湿生植物(包括挺水、沉水和浮叶植物)组成的表面流人工湿地,比较其净化尾水氮磷效果。结果表明:挺水植物圆币草(*Hydrocotyle verticillata*)和大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)组合的表面流人工湿地净化尾水氮磷效果最好,其人工湿地对TN、NO₃-N和NH₃-N的平均去除率分别为68.6%、62.6%和78.2%,对TP和溶解性无机磷(DIP)的平均去除率分别为64.5%和80%。浮叶植物睡莲(*Nymphaea* L.)人工湿地去除氮磷能力次之,TN、NO₃-N、NH₃-N、TP和DIP平均去除率分别为55%、55.2%、63.3%、56.1%和64.7%,体现一定的污染物去除潜力。沉水植物苦草[*Vallisneria natans* (Lour.) Hara]在与圆币草等共存净化尾水过程中逐渐失去优势种地位。而由黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)和再力花(*Thalia dealbata*)等挺水植物构建的表面流人工湿地,虽然生物量高,但其氮磷去除效果较差,尤其是再力花人工湿地对TN、NO₃-N和NH₃-N平均去除率仅在18%~36.2%之间,对TP和DIP平均去除率也分别只有41.5%和38.7%。因此,采用圆币草和大聚藻组合构建的表面流人工湿地能更有效净化污水处理厂尾水中氮磷,对TN的去除尤为高效,能有效提升尾水水质。

关键词:表面流人工湿地;污水处理厂尾水;湿生植物;氮磷去除率

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2015)06-0115-07

Research on different Plants in surface flow constructed wetlands and their combination effects on purification of tail water from sewage treatment plant

WU Dan^{1,2}, MIAO Aijun^{1,2}, LI Li^{1,2}, GAN Lin^{1,2}, WANG Aili^{1,2}, YANG Liuyan^{1,2}

(1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To optimize the efficiency of surface flow constructed wetlands purifying the polluted water, eight different wetland plants (including emergent, submerged and floating leaf plants) were selected to construct eight wetlands to monitor and compare their removal rates of nitrogen and phosphorus pollutants. The results showed that wetlands with emergent plants *Hydrocotyle verticillata* and *Myriophyllum aquaticum* are the most applicable to further treat tail water as they grew densely. The average removal rates of TN, NO₃-N and NH₃-N were 68.6%, 62.6% and 78.2% respectively and the average removal rates of TP and DIP were 64.5% and 80% respectively. Wetlands with floating leaf plants *Nymphaea* L. also showed a certain potential for nitrogen and phosphorus removal and the average removal rates of TN, NO₃-N, NH₃-N, TP and DIP were 55%, 55.2%, 63.3%, 56.1% and 64.7% respectively. Submerged plants *Vallisneria natans* (Lour.) Hara lost its dominant position gradually when competing with *Hydrocotyle verticillata* to purify the tail water. Even though emergent plants *Iris pseudacorus* L. and

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07101006)

作者简介:吴丹(1990—),女,硕士研究生,研究方向为污染水体的生态治理。E-mail: yiyuanwanderlost@126.com

通信作者:杨柳燕,教授。E-mail: yangly@nju.edu.cn

Thalia dealbata had large amount of biomass, the wetlands with these plants exhibited low pollutants removal ability. The pollutants removal rates of *Thalia dealbata* wetlands were especially low, with nitrogen removal rates only between 18% and 36.2% and TP and DIP removal rates only about 41.5% and 38.7%, respectively. So it would be better to choose emergent plants such as *Hydrocotyle verticillata* and *Myriophyllum aquaticum* rather than other emergent plants when using surface flow constructed wetlands to remove nitrogenous and phosphorus pollutants in tail water from sewage treatment plant.

Key words: surface flow constructed wetland; tail water from sewage treatment plant; wetland plants; removal rates of nitrogen and phosphorus

为了有效控制水体富营养化,遏制太湖蓝藻水华大规模暴发,太湖流域城镇污水处理厂尾水排放标准严格执行 GB18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中 I 级 A 标准,有效削减太湖氮磷输入负荷,但是,达标尾水中氮磷污染物浓度仍远高于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 V 类水质标准。因此,对污水处理厂尾水进行深度净化,对于改善太湖水环境质量具有重要的现实意义^[1-2]。

人工湿地因其投资运行费用低、二次污染少、操作简单、处理效果稳定等优点被越来越多地用于污水处理厂尾水的深度处理^[3]。表面流人工湿地是一种应用最早的人工湿地,其经济性使之在中小型城镇污水治理方面具有明显优势,并在太湖流域尾水处理中得到广泛应用。植物作为人工湿地的主要组成部分之一,在其脱氮除磷过程中起到了重要作用^[4],因此,比较不同湿生植物及其组合表面流人工湿地净化效果对于人工湿地构建非常必要。可用于构建表面流人工湿地的湿生植物有挺水植物(如鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.))、菖蒲、芦苇、圆币草和大聚藻)、沉水植物(如苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)、菹草)、浮叶植物(如睡莲(*Nymphaea* L.))和漂浮植物(凤眼莲、浮萍)^[5]。吴建强等^[6]选取 4 种不同挺水植物构建表面流人工湿地系统来净化劣 V 类河水,以 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为评价指标,结果表明香蒲和美人蕉人工湿地净化能力强于千屈菜和水葱人工湿地。Park 等^[7]对比了分别种植菖蒲和香蒲的表面流湿地处理污水处理厂出水的效果,结果发现提高水力停留时间后香蒲人工湿地比黄菖蒲人工湿地对污染物去除率更高。陈进军等^[8]的批量盆栽试验表明水葫芦表面流人工湿地对 COD_{Cr} 和 TN 具有很高的去除效率。李跃勋等^[9]将废弃鱼塘改造成表面流湿地,以削减滇池湖滨区面源污染中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP,有效净化低污染水。综合研究发现,以往或单一侧重挺水植物表面流人工湿地研究,较少涉及各类湿生植物组合表面流人工湿地比较研究,尤其是关于圆币草、大聚藻等挺水植物的表面流人工湿地研究相对缺乏。

同时表面流人工湿地处理对象往往为河流污水、农田排水等,对污水处理厂尾水处理研究较少,或仅选取了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 作为氮污染物研究指标,缺乏针对污水处理厂尾水中高浓度的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为净化对象的研究^[10];此外,很多研究以小试和中试为主,缺乏工程化大规模的研究,因此,笔者选取了不同湿生植物及其组合在污水处理厂内构建表面流人工湿地以深度净化尾水,湿生植物遍及挺水、沉水、漂浮和浮叶植物,选取 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP、DIP(溶解性无机磷)为污染物去除指标,并且结合对湿生植物生物量的调查,探究湿生植物及其组合的表面流人工湿地净化污水处理厂尾水潜力,从而为尾水生态净化的表面流人工湿地构建提供设计依据。

1 研究方法

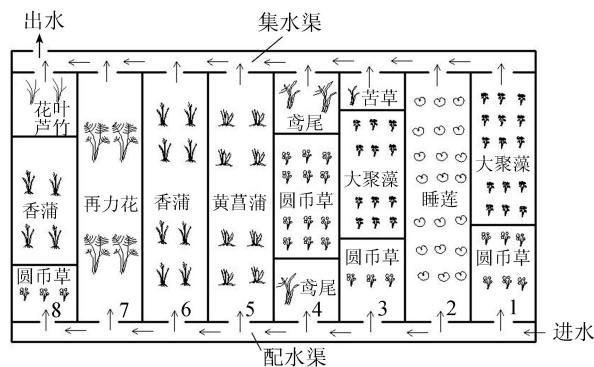
1.1 表面流人工湿地构建

表面流人工湿地位于无锡某污水处理厂内,该厂采用“SBR+混凝沉淀+过滤”处理工艺,出水执行 GB18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》I 级 A 标准。尾水生态净化实际总处理规模约为 0.8 万 m^3/d ,湿地总面积为 9 600 m^2 ,设计水深为 0.4 m,均分 8 格并联运行,即每格人工湿地面积为 60 m×20 m,水力停留时间均为 12 h。进水水质 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 质量浓度分别在 7.6 ~ 14.5 mg/L、1.7 ~ 4.7 mg/L、0.4 ~ 0.48 mg/L 和 31.1 ~ 46.7 mg/L 之间。

2014 年 4 月,表面流人工湿地开始种植不同湿生植物,包括浮叶植物睡莲(*Nymphaea* L.),沉水植物苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)以及挺水植物圆币草(*Hydrocotyle verticillata*)、大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)、鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)、香蒲(*Typha orientalis* Presl.)、再力花(*Thalia dealbata*)和花叶芦竹[*Arundo donax* L. var. *versicolor*]。其中圆币草、大聚草依附浮框移栽入湿地,种植密度为 20 牙/ m^2 ,苦草种子于实验室 4℃ 取出室温发芽后粘附于黏土块上,再洒在表面流人工湿地中。黄菖蒲、香蒲、再

力花、花叶芦竹、鸢尾移栽株高约 40 cm, 种植密度分别为 4 丛/m², 每丛 5~10 株, 种植时切除上部 1/3 叶片。睡莲种植方式为盆栽, 种植密度为 0.25 盆/m²。

表面流湿地湿生植物配制见图 1, 其中 1 号人工湿地种植挺水植物组合(圆币草-大聚藻), 2 号湿地种植浮叶植物(睡莲), 3、4 号湿地混合种植沉水和挺水植物组合(分别为苦草-大聚藻-圆币草、鸢尾-圆币草), 5、6、7 号湿地种植不同挺水植物(分别为黄菖蒲、香蒲、再力花), 8 号湿地混合种植不同挺水植物组合(花叶芦竹-香蒲-圆币草), 通过对不同湿生植物单一或组合种植, 比较不同湿生植物表面流人工湿地对尾水氮磷的去除效果。



(1~8 代表配置不同湿生植物的人工湿地)

图 1 表面流湿地湿生植物配置

1.2 数据分析

2014 年 4—6 月为试运行阶段, 2014 年 7 月进入运行阶段, 监测配置不同植物的表面流人工湿地进出口水质, 监测频率为每月 2 次, 监测至 2015 年 2 月。监测指标包括 TN、NH₃-N、NO₃-N、TP 和 DIP, 按照国标法分别进行测定^[11]。2014 年 10 月对湿生植物种类进行调查, 估算不同人工湿地中湿生植物的盖度, 采集部分植物样品于实验室洗净后称量, 于 50℃ 烘干至恒重, 计算其生物量干质量。

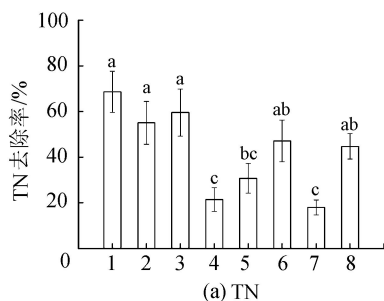
1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件对不同湿生植物的人工湿地污染物去除效果进行数据分析, 结果以“平均值 ± 标准误差”表示; 采用单因素方差(ANOVA)分析不同植物组氮磷去除差异性, 显著性水平为 0.05; 采用 Excel 2010 软件分析不同人工湿地湿生植物生物量与污染物去除率之间的相关性。

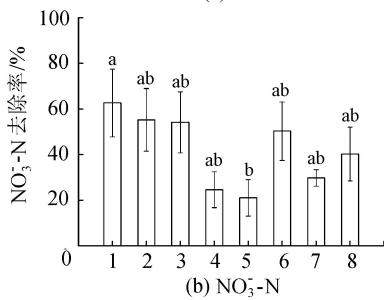
2 研究结果

2.1 不同表面流人工湿地脱氮除磷效果

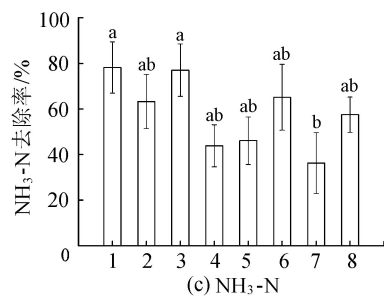
运行阶段各表面流人工湿地对污水处理厂尾水中氮磷去除率见图 2 和图 3, 结果表明不同湿生植物表面流人工湿地对尾水中氮磷具有不同的净化效果。



(a) TN



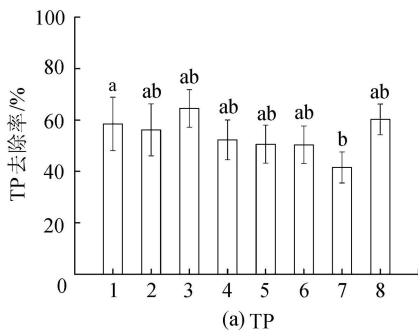
(b) NO₃-N



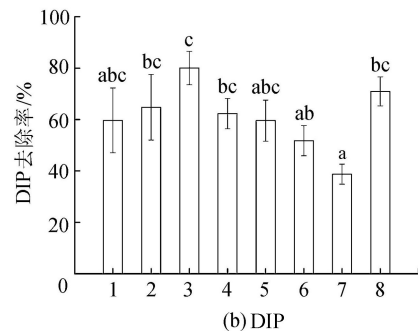
(c) NH₃-N

(图中横坐标 1~8 代表不同人工湿地, 同图 1; 图中有相同字母标注的植物组间无显著性差异, P>0.05)

图 2 不同表面流人工湿地对尾水中 TN、NO₃-N 和 NH₃-N 的平均去除率



(a) TP



(b) DIP

(图中横坐标 1~8 代表不同人工湿地, 同图 1; 图中有相同字母标注的植物组间无显著性差异, P>0.05)

图 3 不同表面流人工湿地对尾水中 TP 和 DIP 的平均去除率

2.1.1 对 TN、NO₃-N 和 NH₃-N 的净化效果

不同植物及其组合表面流人工湿地对 TN、NO₃-N 和 NH₃-N 去除效果差别较大(图 2),其去除率相对较高的为圆币草-大聚藻人工湿地、睡莲人工湿地和苦草-圆币草-大聚藻人工湿地,其次为香蒲人工湿地和花叶芦竹-香蒲-圆币草人工湿地,而再力花人工湿地和黄菖蒲人工湿地对氮素去除效果相对较差。

圆币草-大聚藻、苦草-圆币草-大聚藻和睡莲这 3 个表面流人工湿地去除污水处理厂尾水中 TN 效率最高,去除率分别为 68.6%、60% 和 55%,明显高于黄菖蒲和再力花表面流人工湿地($P < 0.05$),后者对 TN 去除率分别只有 17.9% 和 30.7%。香蒲和花叶芦竹-香蒲-圆币草人工湿地对 TN 去除能力居中,分别为 47.1% 和 44.7%,显著高于再力花人工湿地($P < 0.05$)(图 2(a))。污水处理厂尾水中 TN 以 NO₃-N 为主(约 67%),黄菖蒲表面流人工湿地对 NO₃-N 去除率较低(21%),圆币草-大聚藻表面流人工湿地对 NO₃-N 去除率为 62.6%,显著高于前者($P < 0.05$),其他各组无显著差异($P > 0.05$)(图 2(b))。不同表面流人工湿地对 NH₃-N 的去除率与 TN 去除率相近(图 2(c))。NH₃-N 去除率最高为圆币草-大聚藻表面流人工湿地(78.2%),再力花表面流人工湿地对 NH₃-N 去除率最低(36.2%),两者存在显著差异($P < 0.05$)。由此可见,圆币草、大聚藻和睡莲表面流人工湿地对尾水中氮素污染物去除能力较强,香蒲、花叶芦竹表面流人工湿地脱氮能力居中,而再力花和黄菖蒲等挺水植物表面流人工湿地对氮素去除能力较弱,不宜用于表面流人工湿地来净化污水处理厂尾水。

2.1.2 对 TP 和 DIP 的净化效果

相对于氮素去除效果,不同植物表面流人工湿地对磷的去除率差异性相对较小(图 3)。苦草-圆币草-大聚藻人工湿地对 TP 和 DIP 去除率最高,分别为 64.5% 和 80%,其次为花叶芦竹-香蒲-圆币草人工湿地,分别为 60.2% 和 70.9%,去除率最低的为再力花人工湿地,仅为 41.5% 和 38.7%。除对尾水 TP 去除能力较差的再力花表面流人工湿地外,其他表面流人工湿地对 TP 去除能力无显著差异($P > 0.05$)。对尾水中 DIP 去除率最低的为再力花(38.7%),表面流人工湿地,去除率最高为苦草-大聚藻-圆币草表面流人工湿地(80%)($P < 0.05$),从除磷效果看黄菖蒲和再力花不合作为表面流人工湿地的湿生植物来净化尾水。值得注意的是,与氮素去除略有不同的是,去除磷效率高的表面流人工湿地除了种植苦草-圆币草-大聚藻外,还有种植

花叶芦竹-香蒲-圆币草的人工湿地。

2.2 表面流人工湿地湿生植物种类和生物量

2014 年 10 月份 8 个表面流人工湿地中主要湿生植物种类和生物量进行了调查(表 1)。

表 1 表面流人工湿地中优势种植物名称和生物量

人工 湿地 编号	名称	优势种		
		面积/ m ²	覆盖度/ %	总生物量 干质量/g
1	圆币草(<i>Hydrocotyle verticillata</i>)	426	36.72	79 201.92
	大聚藻(<i>Myriophyllum aquaticum</i>)	671	57.84	193 248.00
2	睡莲(<i>Nymphaea</i> L.)	124	10.69	7 297.40
3	圆币草(<i>Hydrocotyle verticillata</i>)	284	24.48	53 948.64
	大聚藻(<i>Myriophyllum aquaticum</i>)	564	48.62	151 152.00
	浮萍(<i>Lemna minor</i> L.)	240	20.69	9 600.00
4	圆币草(<i>Hydrocotyle verticillata</i>)	600	51.72	164 400.00
	浮萍(<i>Lemna minor</i> L.)	445	38.36	5 933.33
5	黄菖蒲(<i>Iris pseudacorus</i> L.)	420	36.21	112 854.00
6	香蒲(<i>Typha orientalis</i> Presl.)	1121	96.64	2 849 806.00
7	再力花(<i>Thalia dealbata</i>)	1158	99.83	1 593 856.00
8	圆币草(<i>Hydrocotyle verticillata</i>)	240	20.69	45 590.40
	香蒲(<i>Typha orientalis</i> Presl.)	446.5	38.49	366 755.10
	花叶芦竹 [<i>Arundo donax</i> L. var. <i>versicolor</i>]	270.2	23.29	712 158.00

由表 1 可知,每个湿地中的植物优势种与人工配置种植植物类型基本相符,同时又伴随有一些自然或种植带入的物种。8 个表面流人工湿地的优势湿生植物种类总数约 8 种,其中挺水植物 6 种,以再力花和香蒲为主,沉水植物、浮叶植物优势种类较少,各有 1 种。此外,1 号湿地伴生少量浮萍、香蒲、美人蕉、芦苇和李氏禾,它们的总覆盖度为 8.47%; 2 号湿地伴生少量香蒲、芦苇、大聚藻、苦草和水花生,它们的总覆盖度为 1.66%; 3 号湿地伴生少量美人蕉、李氏禾、香蒲和苦草,它们的总覆盖度为 0.90%; 4 号湿地伴生少量西伯利亚鸢尾、芦苇、香蒲、泽泻、水花生和大茨藻,它们的总覆盖度为 5.85%; 5 号湿地伴生少量圆币草、李氏禾、芦苇、水花生、香蒲和浮萍,它们的总覆盖度为 1.96%; 6 号湿地伴生少量水花生、芦苇、圆币草和浮萍,它们的总覆盖度为 4.22%; 7 号湿地伴生少量水花生,其覆盖度为 0.09%; 8 号湿地伴生少量浮萍、李氏禾、千屈菜、大聚藻和芦苇,它们总覆盖度为 16.49%。因此,不同表面流人工湿地湿生植物优势种明显,除了种植沉水植物苦草不能成为优势种外,其他种植的挺水植物和浮叶植物保持为优势种,表明在污染物浓度相对较高的尾水中,不利于沉水植物生长。同时,由于表面流人工湿地中优势种明显,覆盖度高,可以进行不同湿生植物及其组合对氮磷净化效率的比较。

2.3 湿生植物生物量与污染物去除率相关性分析

相关性分析结果表明,不同表面流人工湿地中

湿生植物的生物量大小与污染物去除率之间无显著相关(图4)。香蒲和再力花表面流人工湿地中生物量最高,分别达到 2849 kg 和 1593 kg,但其 TN、TP 去除率并非最高,TN、TP 去除率最高的为圆币草-大聚藻人工湿地和苦草-大聚藻-圆币草人工湿地,湿生植物生物量分别只有 272 kg 和 214 kg,明显低于香蒲人工湿地和再力花人工湿地的生物量。

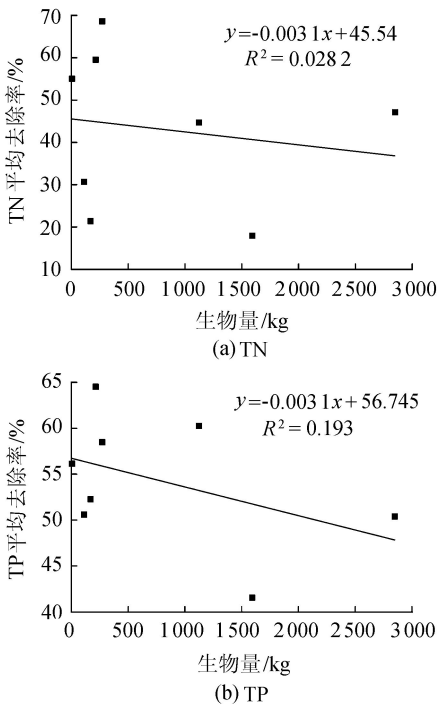


图4 人工湿地植物生物量与污染物去除率之间的相关性

3 讨论

在人工湿地中植物能够吸收、同化尾水中氮磷等营养物质,植物根茎叶也能够拦截、吸附悬浮物,并吸收、富集尾水中重金属等有毒物质;植物根系可作为微生物附着生长的基质,同时,具有泌氧作用,从而改善水体氧化还原生境^[12]。但是由于湿生植物种类的差异会对人工湿地削减氮磷产生不同的影响。

人工湿地去除尾水中 TN 的主要途径包括植物吸收、基质吸附和微生物硝化反硝化脱氮等^[13],圆币草和大聚藻生长茂盛,叶片肥美,盘根错节,根系发达,对氮去除率最高(图2)。圆币草和大聚藻根系巨大并悬浮于水体,为微生物的生长繁殖提供了载体,形成了丰厚的生物膜,有利于尾水微生物脱氮,因此,圆币草和大聚藻人工湿地中微生物的硝化和反硝化作用是去除 TN 的主要途径^[14]。此外, Koottatep 等^[15]的研究表明,植物根系越发达越有利于人工湿地对污染物的去除,圆币草和大聚藻根系旺盛,污染物吸收能力强。

表面流人工湿地对 NO₃-N 的去除是难点之一,

其去除途径除被植物吸收外,主要是通过微生物的反硝化过程,将 NO₃-N 还原为氮气逸出^[16]。影响 NO₃-N 去除的因子除温度和 pH 外,还有用于反硝化脱氮的碳源数量^[17-18],污水处理厂尾水中碳氮比值较低,碳源不足,因此,NO₃-N 去除能力较低。圆币草和大聚藻巨大的根系有利于微生物附着生长,同时,植物根系还可以分泌大量有机物,补充尾水中碳源用于反硝化脱氮^[19]。此外,圆币草和大聚藻覆盖度高,不利于大气复氧,在夜晚有利于形成厌氧状态,有助于尾水中 NO₃-N 的去除。

相对于圆币草和大聚藻表面流人工湿地,浮叶植物睡莲尽管生长分布相对稀疏,盖度低(约 10.7%),但是也有较好的氮磷去除效果。睡莲常用作景观植物,有关其单独水质净化研究不多,彭婉婷等^[20]研究了 7 种湿生植物组合对污水中氮和磷的去除效果,结果发现,凡是去除效果优的湿生植物组合中都存在睡莲,由此可见睡莲具有较高的污染物去除潜力。此外,几乎所有湿地中都存在漂浮植物浮萍,浮萍主要用于氧化塘污水处理系统和生物质资源化方面^[21],也能有效去除尾水中氮磷污染物。沉水植物苦草叶片宽大,能吸收尾水中营养盐物质,但是,由于表面流人工湿地中生长大量挺水植物圆币草、大聚藻和漂浮植物浮萍,阻止阳光进入水体,导致苦草不能成为优势种。

在分别种植挺水植物香蒲、花叶芦竹、黄菖蒲、西伯利亚鸢尾和再力花表面流人工湿地中,黄菖蒲和再力花表面流人工湿地对氮素去除效果最差,香蒲表面流人工湿地对氮素去除效果较好。陈国元等^[22]在研究黄菖蒲和香蒲根系对氮素吸收动力学时指出,香蒲比黄菖蒲对污水中 NO₃-N 吸收能力强,更适用于对污染水体中硝酸盐的去除,结果与本研究一致。陈进军等^[8]指出挺水植物人工湿地对氮去除效果不如浮叶植物人工湿地,原因之一在于前者扎根在土壤中,根系微生物不能直接净化水体中污染物,而后者根系生长于污水中,有利于对污水净化,但是,本研究中选用的挺水植物圆币草和大聚藻根系生长于水中,因此,对氮磷削减能力强。

表面流人工湿地湿生植物生物量与污染物去除率之间相关性分析结果表明,生物量与污染物去除率之间无显著相关(图4),由此可见,湿生植物对氮磷吸收作用并非人工湿地去除氮素的最主要途径^[23],因此,人工湿地中湿生植物生物量不是影响氮去除的主导因素。圆币草和大聚藻比再立花、香蒲更加适合用于构建表面流人工湿地净化污水处理厂尾水。

人工湿地对磷去除途径主要有沉淀、基质吸附、

微生物吸磷及植物吸收作用等^[24],有植物的人工湿地对磷去除能力明显高于无植物的湿地^[25]。本研究各人工湿地种植湿生植物后对磷去除效果较种植前平均提高10%~20%。研究结果还表明,表面流人工湿地对磷去除能力与湿生植物生物量无必然联系,但是人工湿地中植物种类越多对磷去除能力越强。夏汉平^[26]研究指出当湿地中种植多种植物时较单一种植物对磷净化效率更高、更稳定,与本文研究结果一致。因此,表面流人工湿地主要通过基质吸附去除尾水中磷,湿生植物的存在增强了基质对磷的吸附。

4 结 论

挺水植物圆币草和大聚藻构建的表面流人工湿地对氮磷污染物净化效果好,尤其具有很高的TN和NO₃⁻-N去除效率,适合于尾水的处理,浮叶植物睡莲对尾水净化能力也较强,而再力花和菖蒲等挺水植物尽管生长旺盛,生物量大,但其构建的表面流人工湿地对污染物去除能力较低。不同湿生植物及其组合的表面流人工湿地对TP和DIP去除能力差异较小,优势种较多且生物量较大的表面流人工湿地相对除磷效果较好,其中苦草-大聚藻-圆币草和花叶芦竹-香蒲-圆币草人工湿地对尾水中磷去除效果最好,而黄菖蒲和再力花人工湿地对磷去除效果最差。

在选用表面流人工湿地净化污水处理厂尾水时,因尾水中NO₃⁻-N含量较高,在湿生植物配置方面,应选择圆币草和大聚藻等挺水植物及其组合,而非再力花、香蒲等挺水植物。本研究比选了不同湿生植物及其组合表面流人工湿地对尾水净化效果,提出了有效的湿生植物种类及其组合,但是其内在的氮磷削减机制有待进一步研究。

参考文献:

[1] 周遗品,雷泽湘,李迪武,等. 河源城南污水处理厂尾水深度处理效果的研究[J]. 环境工程,2012,30(3):28-30. (ZHOU Yipin, LEI Zexiang, LI Diwu. Study on the removal efficiencies of advanced treatment for tail water from the South of Heyuan City Sewage Treatment Plant [J]. Environmental Engineering,2012,30(3):28-30. (in Chinese))

[2] 边博,朱伟,李冰,等. 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术[J]. 水资源保护,2015,31(1):48-55. (BIAN Bo, ZHU Wei, LI Bing, et al. Characteristics and control techniques of non-point pollution in the western region of Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2015,31(1):48-55. (in Chinese))

[3] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水,2009,25(18):41-43. (YANG Lijun. Application of vertical flow constructed wetland to advanced treatment of tailwater from municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater,2009,25(18):41-43. (in Chinese))

[4] GRAS A F, KOCH M S, MADDEN C J. Phosphorus uptake kinetics of a dominant tropical seagrass *Thalassia testudinum* [J]. Aquatic Botany,2003,76(4):299-315.

[5] 吴建强,黄沈发,丁玲. 水生植物水体修复机理及其影响因素[J]. 水资源保护,2007,23(4):18-22. (WU Jianqiang, HUANG Shenfa, DING Ling. Mechanisms of water restoration by aquatic plants and its influencing factors [J]. Water Resources Protection,2007,23(4):18-22. (in Chinese)).

[6] 吴建强,丁玲. 不同植物的表面流人工湿地系统对污染物的去除效果[J]. 环境污染与防治,2006,28(6):432-434. (WU Jianqiang, DING Ling. Study on treatment of polluted river water using pilot-scale surface flow constructed wetlands system [J]. Environmental Pollution & Control,2006,28(6):432-434. (in Chinese))

[7] PARK N, KIM J H, CHO J. Organic matter, anion, and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea [J]. Ecological Engineering,2009,32:68-71.

[8] 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. (CHEN Jinjun, ZHENG Chong, ZHENG Shaokui. Pollutant purification performance of a surface flow constructed wetland planted with different aquatic macrophytes and their combination [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(10):2029-2035. (in Chinese))

[9] 李跃勋,徐晓梅,洪昌海,等. 表面流人工湿地在滇池湖滨区面源污染控制中的应用研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(10):2155-2160. (LI Yuexun, XU Xiaomei, HONG Changhai, et al. The application on surface constructed wetlands for non-point source pollution control at Dianchi lakeshore region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10): 2155-2160. in Chinese))

[10] CAO H Q, GEY, LIU D. NH₄⁺/NO₃⁻ ratio affect Ryegrass (*Lolium perenne* L.) growth and N accumulation in a hydroponic system [J]. Journal of Plant Nutrition,2011,34:1-11.

[11] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[12] 吴建强,阮晓红,王雪,等. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. 水资源保护,2005,21(1):1-6. (WU Jianqiang, RUAN Xiaohong, WANG Xue. Selection and

- function of aquatic plants in constructed wetlands [J]. Water Resources Protection, 2005, 21 (1): 1-6. (in Chinese))
- [13] 陈浩,崔康平,许为义,等. 污水厂尾水的人工湿地处理工艺及植物筛选[J]. 净水技术, 2014(1): 50-53. (CHEN Hao, CUI Kangping, XU Weiyi. Screening of plants and technological process of tail water treatment in constructed wetland for sewage plant effluent [J]. Water Purification Technology, 2014(1): 50-53. (in Chinese))
- [14] 王骥,张兰英,卢少勇,等. 再力花/菖蒲生物湿地床去除河水中氮磷的试验[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42 (增刊 1): 408-414. (WANG Ji, ZHANG Lanying, LU Shaoyong, et al. Removal of N and P from river water treated by the bio-rack wetland planted with *Thalia dealbata* and *Acorus calamus Linn* [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42 (Sup. 1): 408-414. (in Chinese))
- [15] KOOTTATEP T, POLPRASERT C. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics [J]. Water Science and Technology, 1997, 36 (12): 1-8.
- [16] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26 (8): 2670-2677. (LU Shaoyong, JIN Xiangcan, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (8): 2670-2677. (in Chinese))
- [17] SAEED T, SUN G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 429-448.
- [18] HE Y L, TAO W D, WANG Z Y, et al. Effects of pH and seasonal temperature variation on simultaneous partial nitrification and anammox in free-water surface wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 110: 103-109.
- [19] DUANN J R, LIN S, HU W, et al. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study [J]. Ecological Engineering, 1999, 14 (99): 9-15(7).
- [20] 彭婉婷,邹琳,段维波,等. 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, 2012, 32 (3): 612-617. (PENG Wanting, ZOU Lin, DUAN Weibo, et al. Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from sewage by various combinations of wetland plants [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32 (3): 612-617. (in Chinese))
- [21] 种云霄,胡洪营,崔理华,等. 浮萍植物在污水处理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7 (3): 14-17. (CHONG Yunxiao, HU Hongying, CUI Lihua, et al. Application of duckweeds in wastewater treatment [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7 (3): 14-17. (in Chinese))
- [22] 陈国元,李国新,唐凯. 黄菖蒲和狭叶香蒲根系对氮磷的吸收动力学[J]. 环境科学学报, 2013, 12 (7): 4638-4642. (CHEN Guoyuan, LI Guoxin, TANG Kai. Kinetics of nitrogen and phosphorus uptake by root system of *Iris pseudacorus L.* and *Typha angustifolia L.* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 12 (7): 4638-4642. (in Chinese))
- [23] 张荣社,周琪,张建,等. 潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J]. 环境科学, 2003(1): 113-116. (ZHANG Rongshe, ZHOU Qi, ZHANG Jian, et al. Study on nitrogen removal treating agriculture waste water in subsurface constructed wetland [J]. Environmental Science, 2003 (1): 113-116. (in Chinese))
- [24] 张太平,陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14 (4): 580-584. (ZHANG Taiping, CHEN Weili. Advances in removal efficiency of nitrogen and phosphorus in constructed wetland ecosystem [J]. Ecology and Environment, 2005, 14 (4): 580-584. (in Chinese))
- [25] 陈润,陈中祥,莫李娟. 不同基质和植物人工湿地净化效果试验[J]. 水资源保护, 2010, 26 (4): 62-66. (CHEN Run, CHEN Zhongxiang, MO Lijuan. Experimental study on purification effect of constructed wetland with different substrates and plants [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (4): 62-66. (in Chinese))
- [26] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21 (4): 51-59. (XIA Hanping. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21 (4): 51-59. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-07 编辑:徐娟)

