

富营养化水体中芦苇和菖蒲浮床氮净化能力比较研究

邓志强^{1,2}, 李旭辉¹, 阎百兴^{1*}, 张 燕^{1,2}, 吕兑安^{1,2}

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以小兴凯湖水为原水配制不同富营养化程度的污水, 比较了芦苇和菖蒲浮床系统对 TN 的去除效果, 分析了植物根系特征和植物吸收氮总量与氮去除效率和速率之间的关系, 研究氮去除的主要途径和主要影响因素。结果表明, 芦苇和菖蒲浮床对 TN 均有较强的净化能力, 在 TN 浓度分别为 9.63、4.58 mg·L⁻¹ 的污水中, 芦苇浮床对 TN 的平均去除率分别为 91.5% 和 84.2%, 菖蒲浮床的去除效率分别为 89.9% 和 82.8%, 植物吸收对氮去除的贡献率为 36.4%~77.1%。两种污水中, 芦苇浮床在生长末期前 2 d 对 TN 的平均去除速率分别为 4.20、1.77 mg·L⁻¹·d⁻¹, 显著高于菖蒲浮床的 1.75、1.04 mg·L⁻¹·d⁻¹。两种植物的根系总长度、表面积和体积 3 个指标均与 TN 去除速率呈正相关关系 ($R \geq 0.826$, $P < 0.01$), 根系发达程度是影响 TN 去除速率的主要因素。

关键词:富营养化; 氮; 净化能力; 芦苇; 菖蒲

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)11-2258-06 **doi:**10.11654/jaes.2013.11.022

A Comparative Study on Nitrogen Removal from Polluted Water by Floating Beds Planted with *Phragmites australis* and *Acorus calamus*

DENG Zhi-qiang^{1,2}, LI Xu-hui¹, YAN Bai-xing^{1*}, ZHANG Yan^{1,2}, LÜ Dui-an^{1,2}

(1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lab-scale experiments were carried out to compare the efficiency of nitrogen (N) removal by floating beds planted with common reed (*Phragmites australis*) and calamus (*Acorus calamus*) in eutrophic water man-made from water of Khanka Lake. The rhizome characteristics and the efficiency and rate of nitrogen removal by *Phragmites australis* and *Acorus calamus* were examined to study nitrogen removal mechanisms and major influencing factors. Results demonstrated that floating beds planted with *Phragmites australis* (3 replicas) and *Acorus calamus* (3 replicas) had water purifying ability. The average TN removal percentage was 91.5% and 84.2% for the reed beds and 89.9% and 82.8% for the calamus beds at 9.63 mg·L⁻¹ (feed A) and 4.58 mg·L⁻¹ (feed B) of TN concentrations in the feed water, respectively. Plant uptake contributed to 36.4%~77.1% of TN removal. The mean TN removal rate by the reed beds at late growth stage was 4.20 mg·L⁻¹·d⁻¹ and 1.77 mg·L⁻¹·d⁻¹, while that of the calamus beds was 1.75 mg·L⁻¹·d⁻¹ and 1.04 mg·L⁻¹·d⁻¹, respectively, for feed A and feed B. Significant correlations ($R \geq 0.826$ and $P < 0.01$) were found between TN removal rates and total length, surface area and volume of plant roots. The plant roots is found to be the determinant factor of nitrogen removal efficiency in floating beds.

Keywords: eutrophication; nitrogen; purification capacity; *Phragmites australis*; *Acorus calamus*

水体富营养化引起了一系列的环境问题, 去除污染水体中的氮磷也成为国内外研究重点之一。生态浮床技术作为一种新型的地表水修复技术, 主要依靠植物和微生物的共同作用实现对氮磷的去除。具有不占

用土地、不消耗能源、成本低、管理简单等优点, 被越来越多地应用于富营养化水体的治理^[1-3]。

作为生态浮床的主体, 植物是决定浮床系统净化能力最重要的因素之一, 筛选出氮磷去除能力强的优势植物也就成为浮床技术应用的前提条件。在植物筛选方面, 已有大量研究成果, 获得许多适宜应用于浮床的植物, 如美人蕉 (*Canna indica*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 等^[2,4-5]。

植物根系对水质净化的影响显著。发达的根系可

收稿日期: 2013-01-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07201004);
国家自然科学基金青年项目 (41201520)

作者简介: 邓志强 (1987—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为水环境污染与防治。E-mail: dengzhilong1121@126.com

* 通信作者: 阎百兴 E-mail: yanbx@neigae.ac.cn

附着更多的微生物,向水中释放更多的氧气,有利于氮磷的去除。以往的研究主要关注植物的吸收量及对氮磷去除的贡献^[6-7],关于植物根系以及与污染物去除关系方面的研究较少。本文以 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 为指标,分析芦苇和菖蒲(*Acorus calamus*)在两种不同富营养化程度污水中的氮净化能力,在对植物氮吸收量进行比较的基础上,对植物根系生长状况进行定量描述,分析其与氮净化能力的关系,识别影响植物净化能力的主要因素。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用盆栽模拟方式进行。在塑料桶(桶高 33 cm、直径 34 cm)中加入模拟污水 15 L,水面放置泡沫板(规格为 25 cm×25 cm×3.5 cm)。泡沫板上均匀钻 5 个孔(孔径 3 cm),用海绵将芦苇、菖蒲固定于孔内,每孔 1 株。所选芦苇和菖蒲均为野外挖掘的当地品种,挑选大小均匀的植株,将根部洗净后移栽在试验水桶中的浮床上。移栽时芦苇根长 10 cm,茎叶长 30 cm;菖蒲根长 14 cm,茎叶修剪至 20 cm。

1.2 试验方法

试验设高低两个浓度,以小兴凯湖湖水为原水,加入 NH₄NO₃ 和 KH₂PO₄ 配制至所需氮磷浓度,初始水质指标如表 1 所示,2012 年生长季试验期间水温在 15~26 °C 之间变化。每个处理设 3 个重复,并设 3 个无植物的对照处理。每 10 d 为一个实验周期,周期末重新换水,至试验结束共进行 7 个周期。每个周期的开始和结束时,采集水样测定 pH、TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度,并计算去除率。在快速生长期(第 3 周期)、生长稳定期(第 5 周期)和生长末期(第 7 周期)内,于换水后第 2、4、7 d 再取水样测各项指标,蒸发水量用自来水补充。在试验开始和结束时取植物样,分地上部和地下部称鲜重、干重(65 °C 烘至恒重),测定全氮含量。植物收获后取中等大小的植物,测量根系总根长、表面积和体积。

1.3 分析测定方法

水样 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894—1989),NH₄⁺-N 用纳氏试剂比色法

(GB 7479—1987)测定,NO₃⁻-N 用紫外分光光度法(HJ 346—2007)测定,pH 用玻璃电极法(GB 6920—1986)测定。植物样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,用水杨酸分光光度法测定全氮含量^[8]。植物根系用爱普生 Expression 10000XL 扫描仪扫描,并用 WinRHIZO 软件分析,得出根系总长度、表面积和体积。

1.4 数据处理及分析

试验数据经 Excel 处理后,应用 SPSS17.0 进行分析,显著性差异用独立样本 *t* 检验和单因素方差分析,相关关系用 Pearson 分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况及氮吸收量

污水 A 中芦苇和菖蒲的最终株高分别为 66.2 cm 和 57.3 cm,分别高于污水 B 中的 53.7 cm 和 41.1 cm ($P<0.05$)。在两种污水中,菖蒲株高在前 3 个周期内增长较快,之后株高保持稳定;芦苇株高在整个试验期间一直保持较低增长率(图 1)。高浓度污水中芦苇和菖蒲株高、干重及氮含量均明显高于低浓度,说明本实验条件下高浓度污水有利于植物的生长。在污水 A 和 B 中,芦苇地上部鲜重和干重均高于菖蒲,芦苇长势好于菖蒲(表 2)。由于菖蒲植株氮含量高于芦苇,在污水 A 中,芦苇、菖蒲的氮净吸收量(分别为 675 mg 和 622 mg)差异不明显(表 3)。在污水 B 中,芦苇的氮总吸收量为 264 mg,明显高于菖蒲的 147 mg ($P<0.05$)。高浓度污水 A 中芦苇和菖蒲氮吸收量明显高于低浓度 B ($P<0.01$),与植物干重的差异一致。

2.2 植物根系参数

在污水 A 和 B 中,单株芦苇的总根长分别为 414 m 和 258 m,远高于菖蒲的 22.6 m 和 12.3 m;根表面积

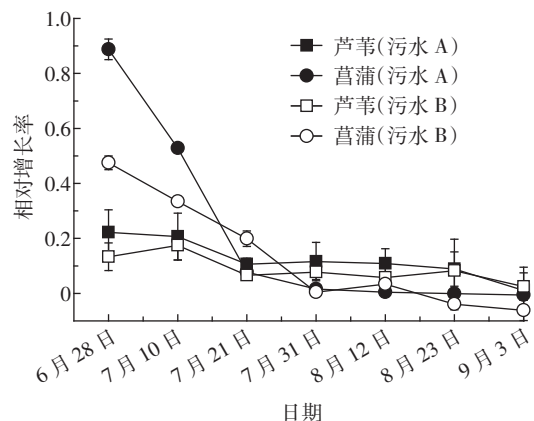


图 1 不同污水中芦苇和菖蒲株高相对增长率

Figure 1 Relative growth rates of *P. australis* and *A. calamus* in different wastewater

表 1 试验初始水质指标

Table 1 Initial water quality of simulated wastewater

污水	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	pH
A	9.63±0.85	1.02±0.14	5.06±0.49	4.80±0.21	6.82±0.10
B	4.58±0.46	0.50±0.08	2.52±0.33	2.24±0.27	6.76±0.13

表 2 试验开始及结束时芦苇和菖蒲生物量及氮含量

Table 2 Biomass and nitrogen concentrations of *P. australis* and *A. calamus* before and after the experiment

处理	植物	地上部			地下部		
		鲜重/g	干重/g	N 含量/mg·g ⁻¹	鲜重/g	干重/g	N 含量/mg·g ⁻¹
初始	芦苇	7.58±1.48	2.44±0.41	18.3±2.0	11.17±0.99	2.85±0.49	14.8±1.7
	菖蒲	15.14±4.34	2.72±0.60	21.0±2.76	28.6±4.28	7.86±1.37	14.5±1.18
污水 A	芦苇	59.53±5.68	27.83±3.89	17.1±1.8	70.58±5.95	27.95±1.87	10.4±0.3
	菖蒲	46.88±10.68	12.45±4.39	24.2±6.8	89.36±21.42	26.20±7.12	21.5±2.4
污水 B	芦苇	32.09±5.20	18.23±2.78	11.3±0.6	50.76±5.26	19.61±3.03	9.14±0.59
	菖蒲	18.90±3.75	5.56±0.68	17.6±2.5	44.96±10.88	13.60±1.53	15.3±0.5

表 3 污水中 N 净去除量和植物吸收量的比较

Table 3 Net removal and plant uptake of nitrogen from wastewater

污水	植物	加入 N 量/mg	剩余 N 量/mg	净去除量/mg	植物吸收量/mg	植物贡献率/%
A	芦苇	1022	86.7	935	675a	72.2a
	菖蒲	963	98.0	865	622a	77.1a
B	芦苇	477	75.5	401	264b	66.4a
	菖蒲	486	84.0	403	147c	36.4b

注:表中 a、b、c 表示数据间差异,同一污水不同植物间和同一植物不同污水间数据进行两两比较,分析方法为独立样本 *t* 检验,相同字母表示无显著性差异($P<0.05$)。

和体积也都显著高于菖蒲($P<0.01$),高约一个数量级(表 4)。芦苇和菖蒲在高浓度污水中根系比低浓度中发达,这与芦苇和菖蒲在高浓度污水中长势较好相一致。

2.3 芦苇、菖蒲对污染水体中氮的去除效果

芦苇和菖蒲浮床系统中污水 pH 值在快速生长期、生长稳定期和生长末期变化均不明显,在 6.7~7.5 之间波动,而无植物的对照系统中 pH 值在 3 个周期内均逐渐升高,这与 Kyambadde 等的研究结果一致^[9]。植物根系可向水中释放 H⁺、CO₂ 和有机酸,抑制了 pH 值升高^[10]。

对高浓度污水 A,芦苇和菖蒲在 7 个周期内对 TN 平均去除率分别为 91.5%和 89.9%,明显高于对照的 48.7%($P<0.05$);各周期结束时,芦苇和菖蒲处理的 TN 平均浓度分别为 0.83、0.94 mg·L⁻¹,明显小于对照的 4.99 mg·L⁻¹($P<0.01$)(图 2)。对低浓度污水 B,平均去除率分别为 84.2%和 82.8%,明显高于对照的 61.3%($P<0.05$),TN 最终浓度也明显低于对照。在污水 A 和污水 B 中,芦苇的净化效果均略高于菖蒲,但差异并不显著。

在污水 A 中,芦苇和菖蒲浮床系统去除 N 总量分别为 935、865 mg,其中植物吸收的贡献率分别为 72.2%和 77.1%,两者无明显差异(表 3)。对于污水 B,

表 4 试验结束时芦苇、菖蒲的根系特征(单株)

Table 4 Root characteristics of single *P. australis* and *A. calamus* at the end of the experiment

污水	总根长/m		表面积/×10 ³ cm ²		体积/cm ³	
	芦苇	菖蒲	芦苇	菖蒲	芦苇	菖蒲
A	414±81	22.6±3.4	5.40±0.68	0.38±0.06	58.0±14.0	5.16±0.76
B	258±118	12.3±3.4	3.14±14.8	0.23±0.04	30.9±14.9	3.46±0.84

芦苇和菖蒲浮床对污水中 N 净去除量分别为 401、403 mg,芦苇吸收贡献率(66.4%)明显高于菖蒲(36.4%)。

虽然芦苇和菖蒲浮床系统对 N 的最终净化效果基本相同,但去除速率却存在明显差异。在污水 A 和 B 中,芦苇在快速生长期、生长稳定期和生长末期只需 2~4 d 便将 TN 净化至最低浓度,而菖蒲需 7 d 或 10 d,芦苇浮床净化速率明显高于菖蒲(图 3)。在污水 A 和 B 中,芦苇浮床对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的去除速率也均比菖蒲高(图 4)。

在污水 A 中,芦苇在快速生长期、生长稳定期和生长末期的前 2 d 对 TN 的平均去除速率分别为 2.95、3.85、4.20 mg·L⁻¹·d⁻¹,菖蒲为 1.53、1.57、1.77 mg·L⁻¹·d⁻¹,两种植物浮床的净化速率在试验后期均比前期高,周期结束时污水 A 和 B 的 TN 浓度均有所下降,且去除率都有所上升(图 2)。

3 讨论

在污水 A 中,芦苇浮床在生长末期前 2 d 对 TN 的平均去除速率为 4.20 mg·L⁻¹·d⁻¹,显著高于菖蒲浮床的 1.75 mg·L⁻¹·d⁻¹($P<0.01$)。芦苇的根长、表面积和体积均显著高于菖蒲($P<0.01$),分别把两种植物的根系总长度、表面积和体积与去除速率进行相关分析, Pearson 系数分别为 0.969、0.983 和 0.950($P<0.01$)。在污水 B 中,芦苇和菖蒲浮床在生长末期前 2 d 对 TN 的平均去除速率为 1.77、1.04 mg·L⁻¹·d⁻¹,去除速

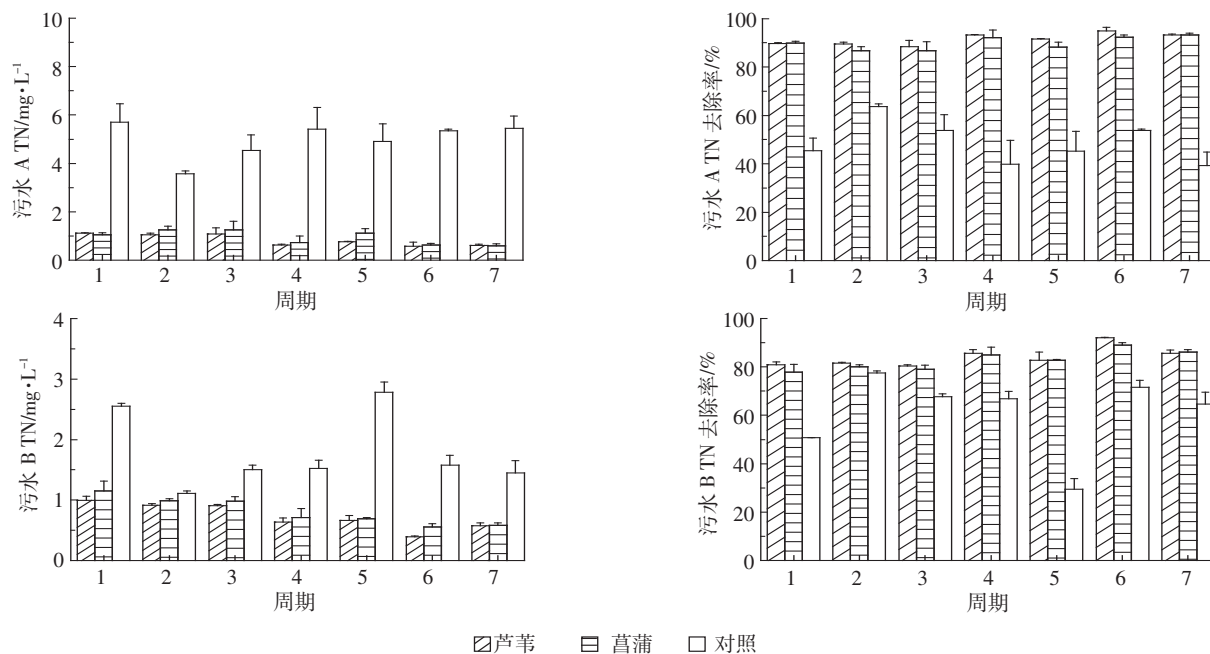


图 2 不同处理下各周期结束时 N 浓度及去除率

Figure 2 Concentrations and removal efficiencies of total nitrogen in different wastewater at the end of seven periods

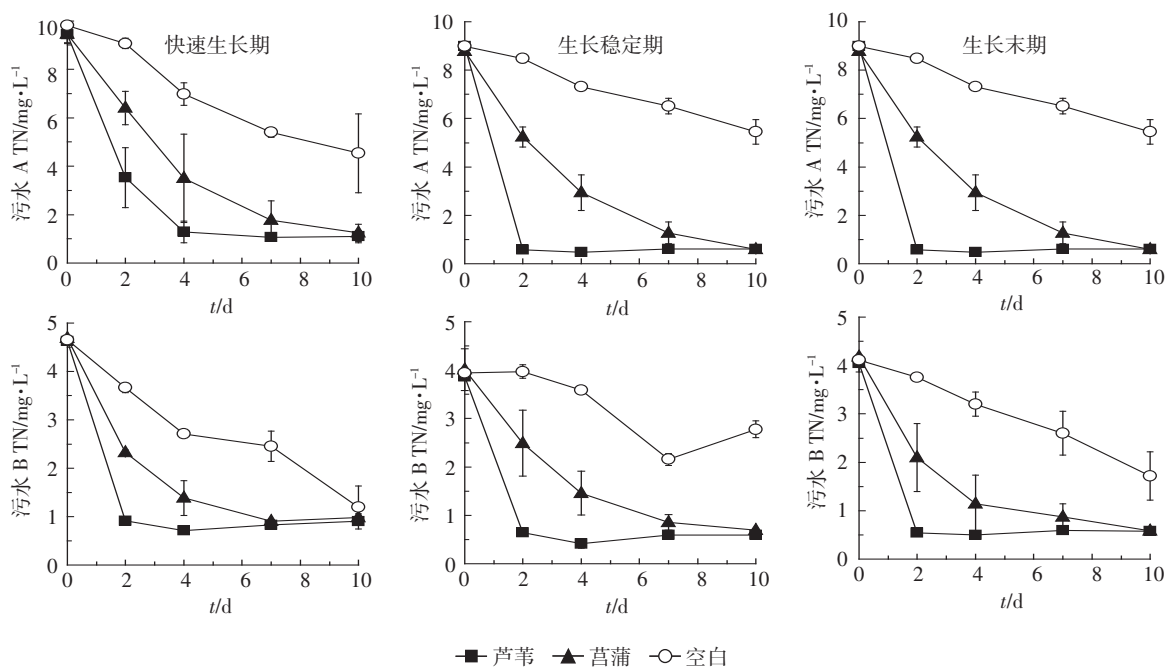


图 3 3 个典型生长期污水 TN 浓度的变化

Figure 3 Changes of total nitrogen concentrations in wastewater during three growth periods

率与根系总长度、表面积和体积的 Pearson 相关系数分别为 0.865、0.851 和 0.826 ($P < 0.05$), 说明根系发达程度是影响去除速率的重要因素。发达的根系可能有利于对氮的吸收, 释放更多的氧气, 并且巨大根表面积能附着更多微生物, 微生物的生化反应有利于氮的去除^[9, 11-12]。所以在筛选浮床植物时, 应优先选择根系

发达的植物。De Stefani 等^[13]报道鸭茅 (*Dactylis glomerata*) 在 Sile 河中生长 8 个月后根长达到 115 cm, 比香根草 (*Chrysopogon zizanioides*) 更适合在浮床技术中应用。

芦苇对污水 A 的氮去除率 (平均 91.5%) 明显高于污水 B (平均 84.2%) ($P < 0.05$), 菖蒲亦是如此。污水

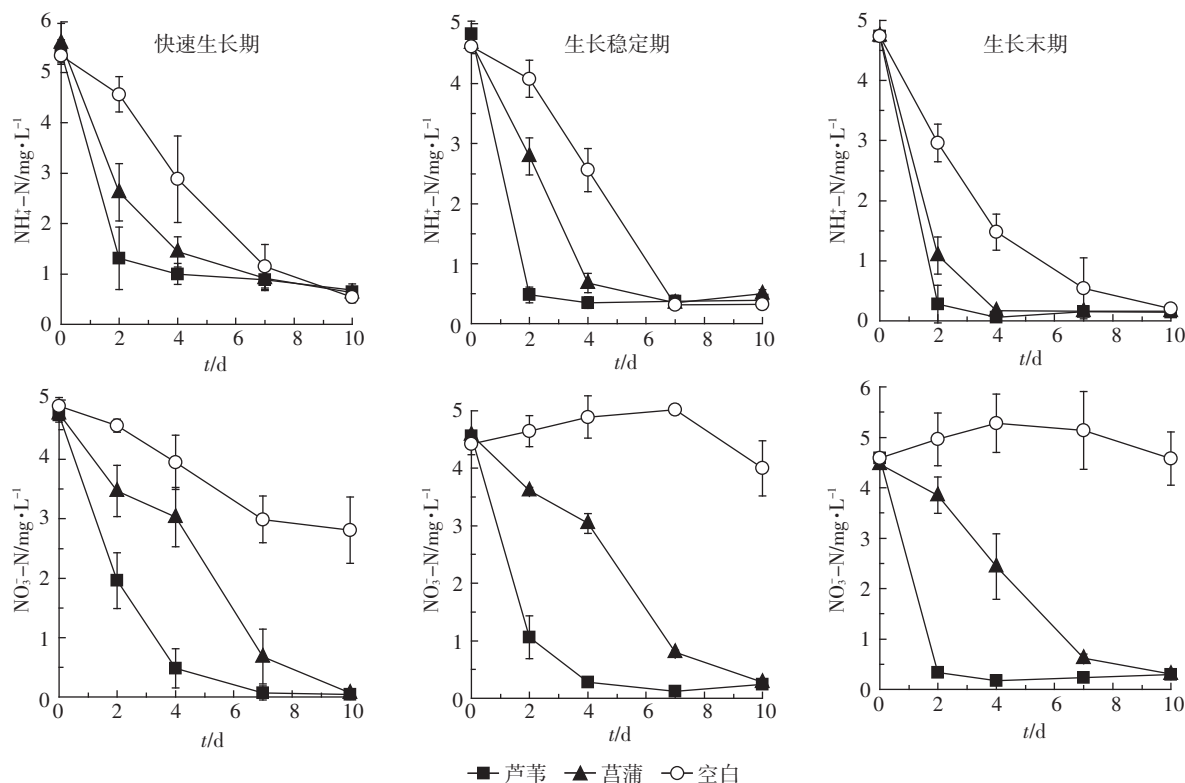


图4 3个典型生长期污水A中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化

Figure 4 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations of wastewater A in three growth periods

A的N初始浓度约是污水B的2倍,而周期结束时稳定浓度相差不大,所以污水A中的氮去除率较高。产生这种结果的原因是污水A中的植物长势较好,而且根系发达(表3),浮床系统植物生长与水质变化是一个相互影响的过程^[14]。

影响植物吸收贡献率大小的因素很多,植物不同、水质不同、试验运行方案不同,得到的贡献率也就不同。Kyambadde等^[9]研究发现纸莎草(*Cyperus papyrus* L.)吸收氮量占总去除量的69.5%,Reddy等^[15]报道凤眼莲、水蕴草(*Egeria densa*)等8种植物吸收对总氮去除的贡献率为16%~75%,与本试验结果36.4%~77.1%相近。Körner等^[16]研究发现浮萍(*Lemna gibba* L.)吸收氮量占总去除量的30%~47%,Sekiranda和Kiwanuka^[17]曾报道芦苇(*Phragmites mauritanus*)吸收氮量占浮床系统去除的19%,本试验植物吸收贡献率较高的原因可能是TN初始浓度较低(高浓度 $9.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低浓度 $4.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),且周期较长(10 d),营养供应不足,植物的生长吸收了大部分氮。

与植物吸收相比,大部分学者认为微生物生化反应(同化作用和硝化、反硝化反应)是氮去除的主要作用^[16-17],此外还包括沉淀作用和挥发作用^[18-19]。本试验氮

氮浓度较低,且污水pH均小于8,挥发过程基本不会发生。在两种污水中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速率均大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,且在对照试验中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度先增大后减小(图4),均说明系统中发生了硝化反硝化反应^[15]。试验用水含有少量悬浮颗粒物,颗粒物吸附氮并沉降至水底也是氮去除的方式之一。在对照试验中,污水A的TN去除率为48.7%,污水B为61.3%,主要途径是微生物生化反应和沉淀作用。这也解释了在污水B中,虽然菖蒲总氮吸收较少(占总氮去除的36.4%),但最终氮去除率仍较高的现象。然而,在有植物存在的系统中,由于在各周期的中后期,水中氮磷浓度较低,植物处于营养匮乏状态,在换水之后,植物迅速从水中吸收氮磷,抑制了其他过程的发生,所以植物对总氮去除贡献率相对较高。本文仅计算植物吸收的贡献,微生物作用大小尚不能确定,需进行更多研究。

植物吸收在高浓度污水A中的贡献率比低浓度污水B中高,这与以往的湿地系统净化结果有所不同^[20-21]。如Peterson和Teal^[22]报道,在人工湿地系统处理高负荷污水($15.6\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)的实验中,去除的N仅有4%被植物吸收,而在处理低负荷污水时($0.44\sim 1.83\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),30%的N被植物吸收。在人工湿地

系统中,由于有基质的存在,植物生长所需营养物质充足,在处理不同 N 负荷污水时,植物吸收氮量差别不大,而高 N 负荷污水中的氮去除量比低浓度污水高,所以植物吸收的贡献率会偏小。在浮床系统中,植物不能直接从底泥中吸收营养物质,水体氮磷浓度影响着植物的生长状况。在高氮磷负荷的污水中,植物生长旺盛,吸收更多的氮磷,所以本试验会出现上述结果。

4 结论

(1)对高浓度污水 A,芦苇和菖蒲浮床在 7 个周期内对 TN 平均去除率分别为 91.5%和 89.9%,明显高于对照的 48.7%;对低浓度污水 B,平均去除率分别为 84.2%和 82.8%,明显高于对照的 61.3%。植物吸收对氮去除的贡献率为 36.4%~77.1%,微生物作用和沉淀作用也是氮去除的主要途径。

(2)在污水 A 和 B 中,芦苇浮床对 TN 净化速率均明显高于菖蒲浮床,芦苇根系远比菖蒲发达,植物根系发达程度是影响浮床净化能力的主要因素。

参考文献:

- [1] 孙从军,高阳俊,曹勇,等.淀山湖河口生态浮床试验工程设计与效果研究[J].中国给水排水,2010,26(18):64-68.
SUN Cong-jun, GAO Yang-jun, CAO Yong, et al. Study on design and effect of estuary ecological floating bed pilot project at Dianshan Lake[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(18):64-68.
- [2] Nakamura K, Tsukidate M, Shimatani Y. Characteristic of ecosystem of an artificial vegetated floating island[J]. *Ecosystem and Sustainable Development*, 1997, 181:171-182.
- [3] 任照阳,邓春光.生态浮床技术应用研究进展[J].农业环境科学学报,2007,26(增刊1):261-263.
REN Zhao-yang, DENG Chun-guang. Application of ecological floating bed technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (Suppl1):261-263.
- [4] 罗固源,韩金奎,肖华,等.美人蕉和风车草人工浮床治理临江河[J].水处理技术,2008,34(8):46-48.
LUO Gu-yuan, HAN Jin-kui, XIAO Hua, et al. Study on Lin Jiang River control by *Canna indica* and *Cyperus alternifolius* artificial floating rafts[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(8):46-48.
- [5] Zhao F, Xi S, Yang X, et al. Purifying eutrophic river waters with integrated floating island systems [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 53-60.
- [6] Zhu L D, Li Z K, Ketola T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10):1460-1466.
- [7] 吴建强,王敏,蒋跃,等.4种浮床植物吸收水体氮磷能力试验研究[J].环境科学,2011,32(4):995-999.
WU Jian-qiang, WANG Min, JIANG Yue, et al. Study on the nitrogen and phosphorus uptake ability of four plants cultivated on floating-bed[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4):995-999.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000:86-103.
LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 2000:86-103.
- [9] Kyambadde J, Kansime F, Gumaelius L, et al. A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate[J]. *Water Research*, 2004, 38(2):475-485.
- [10] Coleman J, Hench K, Garbutt K, et al. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2001, 128(3):283-295.
- [11] Stewart F M, Mulholland T, Cunningham A B, et al. Floating islands as an alternative to constructed wetlands for treatment of excess nutrients from agricultural and municipal wastes—results of laboratory-scale tests[J]. *Land Contamination & Reclamation*, 2008, 16(1):25-33.
- [12] Mitsch W J, Lefeuve J C, Bouchard V. Ecological engineering applied to river and wetland restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18: 529-541.
- [13] De Stefani, G, Tocchetto D, Salvato M, et al. Performance of a floating treatment wetland for in-stream water amelioration in NE Italy[J]. *Hydrobiologia*, 2011:1-11.
- [14] Henry-Silva G G, Camargo A F M, Pezzato M M. Growth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 610:153-160.
- [15] Reddy K R, De Busk W F. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes I[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14 (4):459-462.
- [16] Körner S, Vermaat J. The relative importance of *Lemna gibba* L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater[J]. *Water Research*, 1998, 32(12):3651-3661.
- [17] Sekiranda S B K, Kiwanuka S. A study of nutrient removal efficiency of *Phragmites mauritianus* in experimental reactors in Uganda[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 364(1):83-91.
- [18] Gross A, Boyd C, Wood C. Ammonia volatilization from freshwater fish ponds[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(3):793-797.
- [19] 罗固源,卜发平,许晓毅,等.生态浮床的去污效果与机理研究[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(6):108-113.
LUO Gu-yuan, BU Fa-ping, XU Xiao-yi, et al. Study on removal effect and mechanism in ecological floating-beds[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(6):108-113.
- [20] 王晟,徐祖信,李怀正.潜流湿地处理不同浓度有机污水的差异分析[J].环境科学,2006(11):2194-2200.
WANG Sheng, XU Zu-xin, LI Huai-zheng. Difference between sub-surface wetlands for different water treatment[J]. *Environmental Science*, 2006(11):2194-2200.
- [21] Rogers K, Breen P, Chick A. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants[J]. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1991:934-941.
- [22] Peterson S B, Teal J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6(1-3):137-148.