

潜流型菖蒲人工湿地不同 C/N 对污染物的去除效率*

胡秋香 赵永军 任丽君 温腾 李航 安树青**

(南京大学生命科学学院湿地生态研究所,南京 210093)

摘要 选取炉渣和砾石为基质,以无植被为对照,分别设置低、中、高浓度的 3 个碳水平(C1、C2、C3)和 3 个氮水平(N1、N2、N3)处理,研究潜流型菖蒲人工湿地在不同 C/N 下净化生活污水中 COD、总氮(TN)、总磷(TP)的效果。结果表明,在不同 C/N 下,菖蒲人工湿地对污水中 COD、TN 的去除效果显著高于无植被的人工湿地,菖蒲植被能增加人工湿地 COD 去除率 10.53%,增加 TN 去除率 6.73%;而对于 TP 的去除,有无植被无显著差异。随着进水 N、P 浓度及 C/N 的变化,菖蒲湿地对 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 67.57%~75.85%、20.91%~56.82% 和 7.15%~17.78%;同时,菖蒲植株对 N、P 的积累量也相应的变化,其地上部的 N、P 积累量为 4.44~14.79 和 1.11~3.37 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,平均占湿地 N、P 去除率的 6.91% 和 10.67%;地下部的 N、P 积累量分别为 2.35~5.20 和 0.74~1.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,平均占湿地 N、P 去除率的 2.69% 和 6.02%。植物地上器官对湿地 N、P 的积累量大于地下部,有利于通过收割作用去除湿地系统中的 N、P。

关键词 潜流型人工湿地;C/N 比;湿地植物;去除效果

中图分类号 Q948 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)3-0473-06

Effects of different C/N ratios in subsurface *Acorus calamus* constructed wetland on pollutant removal efficiency. HU Qiu-xiang, ZHAO Yong-jun, REN Li-jun, WEN Teng, LI Hang, AN Shu-qing (Institute of Wetland Ecology, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(3) 473-478.

Abstract: By using slag and gravel as substrates, and with no plant as the control, three carbon levels (C1, C2, and C3) and three nitrogen levels (N1, N2, and N3) were set to study the removal efficiency of COD, TN, and TP in subsurface *Acorus calamus* constructed wetland with different C/N ratios. A significantly higher removal efficiency of COD and TN was found in the wetlands with plants, compared with the control. *A. calamus* increased the removal efficiency of COD and TN by 10.53% and 6.73%, respectively, but had no significant effect in the removal of TP. With the changes of N and P concentrations and C/N ratios in the influent, the removal efficiency of COD, TN and TP in planted wetlands were 67.57%-75.85%, 20.91%-56.82%, and 7.15%-17.78%, respectively. The N and P accumulations in aboveground part of *A. calamus* were 4.44-14.79 and 1.11-3.37 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, occupying 6.91% and 10.67% of the total N and P removal, while those in belowground part of *A. calamus* were 2.35-5.20 and 0.74-1.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, occupying 2.69% and 6.02% of the total N and P removal, respectively, which implied that it would be helpful to remove the N and P in wetland system through harvesting the aboveground part of plants.

Key words: subsurface constructed wetland; C/N ratio; wetland plant; removal efficiency.

自然湿地具有十分强大的生态功能,在水质进化方面,湿地被认为是“天然的污水净化器”(夏汉

平 2000),素有地球的“自然之肾”之称。20 世纪 70—80 年代,在长期应用天然湿地净化功能的基础上,人工湿地或构造湿地作为一种水质净化与污水资源化生态工程技术发展起来,人工湿地从生态学原理出发,模仿自然生态系统,根据污水处理的目的

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07101-001)。

** 通讯作者 E-mail: anshq@nju.edu.cn

收稿日期:2009-08-10 接受日期:2009-11-11

加以改造和强化,其设计和建造是通过将湿地自然生态系统中的物理、化学和生物作用的优化组合来进行的,一般利用三者的协同作用来处理污水(Huang *et al.* 2000)。

20多年来,有关人工湿地生态技术的研究主要集中在其对N、P、COD、BOD和重金属离子的去除效果(Bachand & Home 2000)及人工湿地系统的设计参数,如水流速度、污水停留时间、水力负荷等方面(Okurut *et al.* 1999)。由于植物在不同C/N的环境中生长表现不同,养分的相对可利用性能够影响生态系统的生产力、生物组成、物种动态,以及生物种群间的交互作用(Vymazal 1999)。因此,不同富营养化水平及养分相对可利用性对构造湿地植物生长以及对湿地处理系统去污能力的影响值得深入研究。当前国内外对不同富营养化水平对人工湿地去污效率的影响研究已经较多,然而对养分相对可利用性方面的研究相对较少。

湿地植物的选择必须遵循耐污能力强、去污效果好、适合当地环境、根系发达、抗病虫害能力强、具备美观和经济价值等原则(吴建强和丁玲 2006)。菖蒲作为一种重要的湿地植物,兼具上述各项特点,是比较理想的研究材料。为此,本文研究了养分的供应量(营养元素浓度)和相对可利用性(不同C/N)对有无植被的模拟人工湿地系统去污效果的影响,以及菖蒲在不同C/N下的生长及其对去污作用的贡献,为合理建造与运营人工湿地提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

湿地植物选用多年生水生草本植物菖蒲(*Acorus calamus*)。菖蒲属于天南星科,菖蒲属,在我国南北各省均有分布,常见于浅水池塘、水沟及溪涧湿地处,冬季地下茎潜入泥中越冬,具有很好的观赏性和药用价值(赵家荣和秦八一 2003)。

人工湿地的基质分为垂直2层,各30 cm厚。下层铺设粒径为5~10 mm的砾石层,上层为粒径10~15 mm的炉渣层(图1)。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟人工湿地构建 中试试验系统建于南京大学浦口校区生态学实验基地,为潜流型人工湿地(图2),长、宽、高分别为100、80、90 cm。进水与出水口有15 cm宽的缓冲池,分别由高度85和

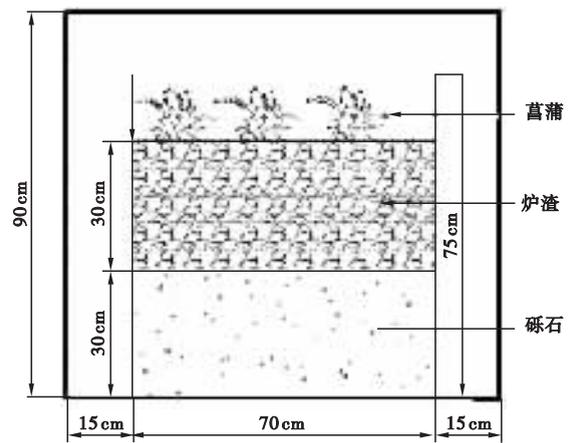


图1 湿地基质分布示意图

Fig. 1 Matrix distribution in constructed wetlands

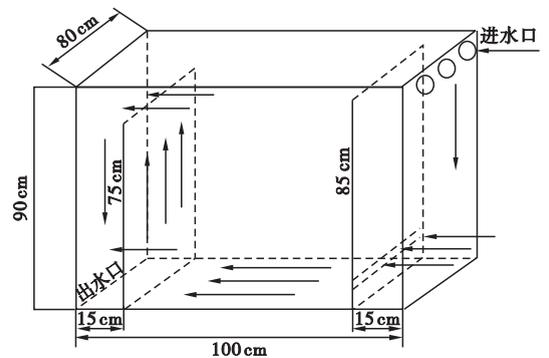


图2 湿地构造示意图

Fig. 2 Construction of the wetlands

75 cm的隔墙与外部池壁构成,以形成上行潜流型湿地系统。进水区采用穿孔PVC管均匀布水,人工湿地构建后,栽种植物,加自来水至基质饱和并保持其上2~3 cm薄水层,稳定15 d,期间加自来水试运行2~3次,检验其完好性。

1.2.2 试验设计和运行 试验共设6种处理,分别为C1、C2、C3、N1、N2、N3,每个处理重复3次,并对各处理设置对照试验,不栽种任何植物,共计36个模拟人工湿地系统。试验处理是依据南京市排水监测站提供的南京市生活污水主要污染物COD、TN和TP浓度多年监测结果(一般COD为250~300 mg·L⁻¹,TN为45 mg·L⁻¹) (王卫等 2007)而设置的,碳源采用葡萄糖,氮源采用尿素,磷源采用KH₂PO₄和NaH₂PO₄。首先,采取基本固定N浓度,变化C浓度的方式,配制3批不同C/N比的人工污水,分别为C1、C2、C3;其次,基本固定C浓度,变化N浓度,配制另3批不同C/N比的人工污水,为N1、N2、N3。6种处理的磷含量与pH基本保持不变,维

表 1 实验中进水的的水质

Tab. 1 Water quality of the influent in experiments

处理	COD _{Cr} (mg · L ⁻¹)	TN(mg · L ⁻¹)	TP(mg · L ⁻¹)	pH	C/N
C1	48.0 ± 11.31	43.31 ± 1.09	5.85 ± 0.23	7.31 ± 0.03	1.1
C2	148 ± 27.23	42.32 ± 0.77	6.59 ± 0.46	7.38 ± 0.02	3.5
C3	252 ± 13.66	38.48 ± 1.94	6.78 ± 0.65	7.46 ± 0.10	6.5
N1	161.6 ± 4.49	30.86 ± 1.49	5.84 ± 0.48	7.20 ± 0.02	5.2
N2	161 ± 14.27	37.84 ± 0.96	6.55 ± 0.29	7.26 ± 0.08	4.2
N3	152 ± 18.20	64.51 ± 0.94	6.30 ± 0.26	7.22 ± 0.20	2.3

数据为平均值 ± SD。

持在 5 ~ 7 mg · L⁻¹ 和 7 ~ 8。各处理污水的营养元素浓度及 C/N 详见表 1。

选取生长良好、长势基本一致的菖蒲,高度约 30 cm,剪除部分老叶,每个模拟人工湿地中种植菖蒲 42 株,于 2008 年 5 月移栽。

试验于 2008 年 5—11 月进行,试运行 30 d 后正式开始污水处理试验。每个月定量地将 320 L 污水布施到各个湿地装置中,并定时收集出水,每次在各模拟湿地装置中分别取污水 100 ml,测定其 COD_{Cr}、TN、TP 浓度,并计算污水处理效率。

1.2.3 污水中主要污染物测定 COD 采用重铬酸钾氧化法,总氮采用德国 LiquiTOC 仪器直接测定,总磷采用过硫酸铵消解,AQ2 间断流化学分析仪测定。

1.2.4 植物生物量和植物体内 N、P 含量测定 经过 165 d 的生长以后,每个湿地处理中随机取 3 株植物,将每株植物样品分为地上部分和地下部分,在 80 °C 烘箱中烘至恒量后称量,计算单株平均生物量和单位面积的生物量。植物全氮采用硫酸-双氧水消解,奈氏比色法;全磷采用硫酸-双氧水消解,钼锑抗比色法(鲍士旦 2000)。植物 N、P 积累量的计算公式为:

$$PA = PC \times PB$$

式中:PA 为植物 N 或 P 积累量(g · m⁻²);PC 为植物 N 或 P 的质量浓度(mg · g⁻¹);PB 为植物生物量(g · m⁻²)。

1.3 数据处理

用 SPSS (13.0) 统计软件进行数据统计分析,采用 Duncan 法进行多重比较。对水质和植物样品测定结果进行平均值及标准差计算、相关性分析和配对样 T 检验,并计算污染质去除率。

2 结果与分析

2.1 不同 C/N 下有无植被对湿地系统的污水净化效果的影响

湿地对 COD_{Cr} 的去除率受有无植被影响极显

著,受不同 C/N 比的影响不显著,而二者之间的交互作用对 COD_{Cr} 去除率的影响极显著;对湿地 TN 的去除率而言,不同 C/N 和有无植被都对其有极显著的影响,二者的交互作用对 TN 的去除率影响显著;不同 C/N 对湿地 TP 的去除率影响显著,有无植被及二者之间的交互作用对其无显著影响(表 2)。

2.1.1 对 COD_{Cr} 去除率的影响 由图 3 可以看出,6 种处理下人工湿地对污水中 COD_{Cr} 都有去除作用,菖蒲人工湿地对 COD_{Cr} 的平均去除率为 71.78%,无植被对照组的平均去除率为 61.25%。同无植被人工湿地相比,菖蒲能增加人工湿地 COD_{Cr} 去除率 10.53%,有无植被对 COD_{Cr} 的去除率有极显著影响。随着进水 C 浓度的增加,菖蒲湿地对 COD_{Cr} 的去除率有所增加,但增幅不大,无植被对照组则出现显著下降趋势;而随着进水 N 浓度的变化,除了中等 N 浓度下有无植被对 COD_{Cr} 的去除率有显著差异之外,其余均无明显差异。从不同 C/N 角度分析,当进水 C/N 从 1 增加到 6 时,菖蒲湿地和对照组湿地对 COD_{Cr} 的去除率都无显著差异。

2.1.2 对 TN 去除率的影响 图 4 显示,C1、C2、C3 处理对 TN 去除效果的差异不显著,而随着进水 TN 浓度由 30.86 mg · L⁻¹ 增加到 64.51 mg · L⁻¹ 时,N1、N2、N3 处理的 TN 去除率之间有显著差异,去除

表 2 不同 C/N 和有无植被对污染质去除率的二维方差
Tab. 2 Results of two-way ANOVA of sewage removal efficiency for different C/N and with/without plants

污染质	变异来源	F	P
COD _{Cr}	不同 C/N	2.912	0.340
	有无植被	41.217	0.000 **
	不同 C/N × 有无植被	6.345	0.001 **
TN	不同 C/N	49.731	0.000 **
	有无植被	15.842	0.001 **
	不同 C/N × 有无植被	3.432	0.018 *
TP	不同 C/N	3.171	0.024 *
	有无植被	2.678	0.115
	不同 C/N × 有无植被	0.229	0.946

* P < 0.05, ** P < 0.01。

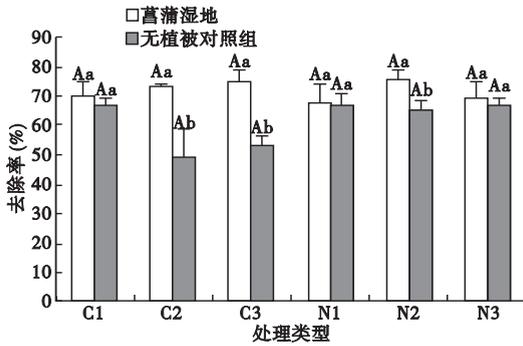


图 3 人工湿地对 COD_{Cr} 的去除率
Fig. 3 Removal efficiency of COD_{Cr} in the constructed wetlands

大写字母表示菖蒲湿地或对照组湿地在各浓度处理间差异显著性,小写字母表示同种浓度处理下有无植被间差异显著性。图 4、图 5 同。

率由 20.91% 上升到 56.82% ,对照组的去除率也由 15.94% 上升到 54.78%。同无植被人工湿地相比,菖蒲能增加人工湿地 TN 平均去除率 6.73% ,有无植被对 TN 的去除率有极显著的影响,说明菖蒲对于污水中 TN 的去除有着重要的作用。从不同 C/N 角度分析,当进水 C/N 为 2(N3)时,TN 去除率最高,当进水 C/N 为 5(N1)时,TN 去除率最低,菖蒲湿地和无植被对照组中不同 C/N 对 TN 的去除率都有极显著的影响。

2.1.3 对 TP 去除率的影响 6 种处理下的人工湿地对污水中 TP 都有不同程度的去除作用,菖蒲人工湿地总磷平均去除率为 11.58% ,无植被人工湿地平均去除率为 8.65%。同无植被人工湿地相比,菖蒲能增加人工湿地 TP 去除率 2.93% ,但有无植被对 TP 的去除率无显著差异。菖蒲湿地对 TP 的去除率随着进水 C 浓度的增加有所增加,而无植被对照组去除率略有下降(图 5)。随着进水 N 浓度的

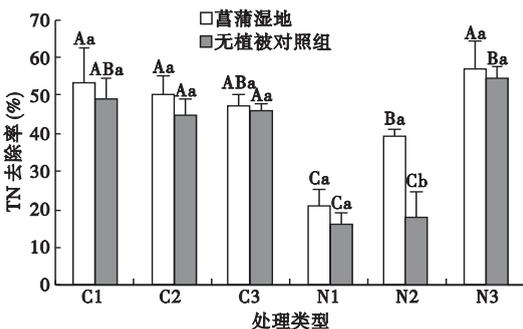


图 4 人工湿地对 TN 的去除率
Fig. 4 Removal efficiency of TN in the constructed wetlands

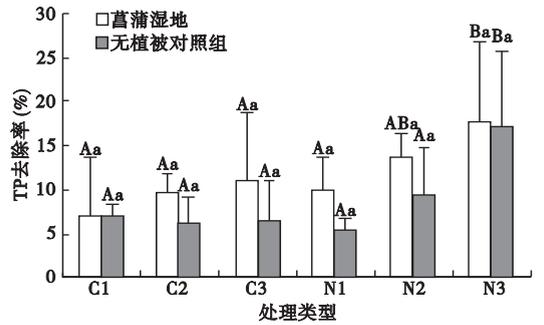


图 5 人工湿地对 TP 的去除率
Fig. 5 Removal efficiency of TP in the constructed wetlands

增加,菖蒲湿地和无植被湿地对 TP 的去除率都有所增加,高 N 时效果最好。从不同 C/N 角度分析,当进水 C/N 为 2(N3)时,菖蒲湿地和对照组湿地的 TP 去除率都最高,而当进水 C/N 为 1(C1)时,菖蒲湿地 TP 去除率最低,无植被湿地则在进水 C/N 为 5(N1)时对 TP 的去除率最低,不同 C/N 对菖蒲湿地和无植被湿地的 TP 去除率都有显著影响。

2.2 不同 C/N 下植物累积对污水 N、P 去除的贡献

2.2.1 植物生物量生长 试验结束时,各处理的地上生物量、地下生物量及总生物量均有显著增加。对各处理比较发现,随着进水 C、N 浓度的增加,菖蒲的生物量生长呈现递增的趋势。从 C/N 角度分析,当 C/N 从 1~6 变化时,菖蒲的生物量变化很大,且差异显著,当 C/N 为 6(C3)时,总生物量和地上生物量增加量最大,当 C/N 为 2(N3)时次之,而当 C/N 为 5(N1)时,菖蒲的地上生物量、地下生物量及总生物量的增加量都最小。在增加的生物量中,地上生物量的增加量明显高于地下生物量的增加量(图 6)。

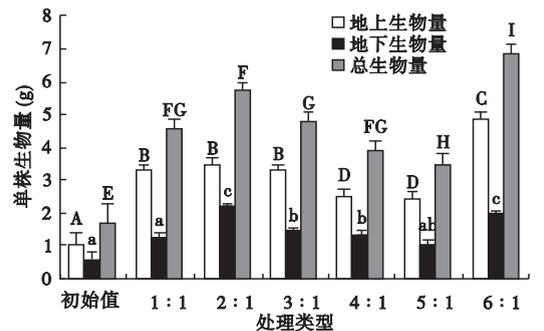


图 6 菖蒲的生物量变化
Fig. 6 Biomass variation of Acorus calamus
A、B、C、D 表示地上部差异显著,a、b、c 表示地下部差异显著,E、F、G、H 表示总生物量差异显著。图 7 同。

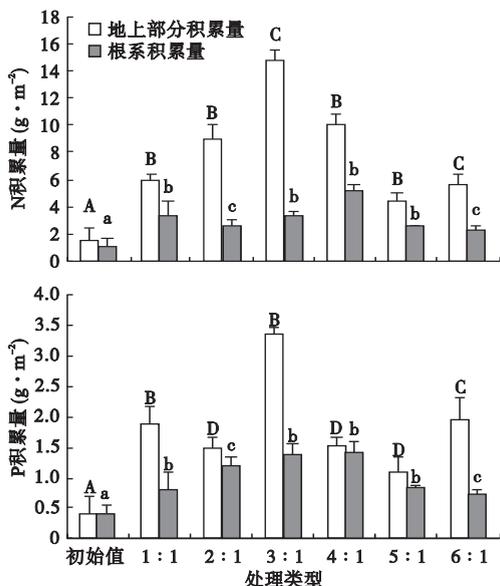


图7 菖蒲 N、P 积累量

Fig.7 N and P accumulation in *Acorus calamus*

2.2.2 植物吸收的氮、磷积累量 湿地植物通过自身的生长代谢可以吸收水体中的 N、P,一些种类还可以富集重金属或吸收有机污染物(尹炜等,2006)。植物 N、P 积累量反映了该植物对 N、P 的直接去除能力,尤其是地上部分 N、P 积累量,可通过收割作用从而达到去除湿地系统中的 N、P 污染的目的。

本试验中,植物地上部分 N、P 积累量为 4.44 ~ 14.79 和 1.11 ~ 3.37 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,地下部分 N、P 积累量分别为 2.35 ~ 5.20 和 0.74 ~ 1.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从 C/N 角度分析,当 C/N 为 3(C2)时,菖蒲地上 N 积累量最大,当比值为 2(N3)和 4(N2)时,积累量次之,当 C/N 为 5(N1)时地上 N 积累量最低。根系 N 积累量在比值为 4(N2)时最大,6(C3)时最小。对于 P 积累量而言,当比值为 3(C2)时,地上部 P 积累量最大,5(N1)时最小,而根系 P 积累量在 4(N2)时达到最大值,在比值为 6(C3)时积累量最小(图7)。

3 讨论

许多研究认为,人工湿地对污水中污染物质净化机理主要是基质的过滤作用和微生物的分解作用,即使在污水滞留时间较短的情况下,人工湿地对污染物质也有较好的滤过功能。在有植被的情况下,植物根系微生物能促进污染物质分解和吸收,提

高湿地 COD_{Cr} 的净化能力。本研究中没有植被的人工湿地,对污水中 COD_{Cr} 的去除主要靠基质的过滤作用,有植被的人工湿地,不仅基质有过滤作用,湿地植物对 COD_{Cr} 也有去除作用,这种作用与根系微生物活动有关(廖新伟和骆世明,2002)。与植被的显著作用相比,本研究中营养浓度变化和不同 C/N 对 COD_{Cr} 的去除率影响均不显著。

本研究中,人工湿地进水口污水 pH 在中性附近,除了基质吸附和 N 的硝化和反硝化途径以外, N 的其他净化途径基本上是植物吸收。试验结果表明,无植被系统人工湿地通过基质吸附及硝化和反硝化途径对 TN 的平均净化率为 38.08%,而菖蒲湿地系统为 44.81%。由此可见,通过植物吸收同化能增加 N 污染物净化效率,这还与植被根系环境和微生物作用有关(袁东海和任全进,2004)。从不同 C/N 和营养浓度变化来看, N 营养浓度变化对 TN 去除率的影响大于 C/N。

有研究表明,人工湿地对磷的去除主要是通过不溶性磷的吸附和沉积作用,基质对磷的去除占有较大的作用,而植物、藻类等对无机可溶性磷酸盐的吸收作用并不明显(蒋跃平和葛莹,2004),本试验结果进一步验证了该结论,菖蒲对磷的去除作用并不大。但是,不同 C/N 对 P 的去除影响较大,当进水 C/N 为 2 和 4 时,菖蒲湿地与对照组湿地的 TP 去除率都最高。

在整个试验过程中,有植被的人工湿地中生物量都有不同程度的增加,其中 C3 和 N3 处理下菖蒲的生物量增加量最高,表明在一定的营养元素浓度范围内,营养浓度越高,植物的生物量增加越快,在增加的生物量中,地上生物量的增加量高于根系生物量的增加量,这有利于通过收割作用去除湿地系统中的 N、P 污染。

试验期间人工湿地的单位 P 负荷为 17.70 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, N 负荷根据处理的不同有所变化,单位 N 负荷值从 86.43 上升到 180.63 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,6 种处理下植物的 N、P 积累量占湿地 N、P 负荷的 6.46% ~ 15.30% 和 11% ~ 26.77%。其中地上部的平均 N、P 积累量分别为 8.29 和 1.89 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占湿地 N、P 负荷的 6.91% 和 10.67%。植物 N、P 积累量对人工湿地

N、P 去除的平均贡献率分别为 9.85% 和 16.69%。通过植物平均 N、P 积累量可以看出 6 种处理中,当 C/N 为 2 和 3 时,菖蒲的 N、P 积累量超过植物平均 N、P 积累量,对湿地的 N、P 去除率贡献最大。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第3版). 北京:中国农业出版社.
- 蒋跃平,葛莹. 2004. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. 生态学报, **24**(8):1718-1723.
- 廖新佛,骆世明. 2002. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究. 应用生态学报, **13**(6):719-722.
- 王卫,黄辉,徐炎华. 2007. 人工湿地污水处理技术及其在南京浦口区应用的可行性. 污染防治技术, **20**(4):42-44.
- 吴建强,丁玲. 2006. 不同植物的表面流人工湿地系统对污染物的去除效果. 环境污染与防治, **28**(6):432-434.
- 夏汉平. 2000. 香根草和水花生对垃圾污水中 N、P、Cl 的吸收效果. 植物生态学报, **24**(5):616-623.
- 尹炜,李培军,裘巧俊. 2006. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献. 生态学杂志, **25**(2):218-221.
- 袁东海,任全进. 2004. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较. 应用生态学报, **15**(12):2337-2341.
- 赵家荣,秦八一. 2003. 水生观赏植物. 北京:化学工业出版社.
- Bachand P, Home AJ. 2000. Denitrification in constructed free water surface wetlands: Effects of vegetation and temperature. *Ecological Engineering*, **14**:17-32.
- Huang J, Reneau JB, Hagedorn C. 2000. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater. *Water Research*, **34**:2582-2588.
- Okurut TO, Rjis GBJ, Van Bruggen JA. 1999. Design and performance of experimental constructed wetlands in Uganda, planted with *Cyperus papyrus* and *Pheagnites mauritianus*. *Water Science and Technology*, **40**:265-271.
- Vymazal J. 1999. Removal of BOD in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: CZECH experience. *Water Science and Technology*, **40**:133-138.

作者简介 胡秋香,女,1984年生,硕士研究生。主要从事湿地生态学研究。E-mail:zhen1118168@126.com
责任编辑 魏中青
