

植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献

李林锋¹, 年跃刚², 蒋高明³

1. 广东海洋大学 农学院, 广东 湛江 524088
2. 中国环境科学研究院 水污染控制创新基地, 北京 100012
3. 中国科学院 植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

摘要: 通过研究人工湿地植物对氮、磷的吸收能力, 评价植物吸收在人工湿地脱氮除磷方面的贡献。结果表明, 不同湿地植物其组织中 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 差异极显著, 湿地植物对 TN 和 TP 的吸收量分别为 6.1~94.0 和 0.5~9.0 g/(m²·a)。按全年衡算, 湿地植物对 TN 和 TP 的吸收量分别占人工湿地 TN 和 TP 去除量的 0.6%~17.3% 和 1.4%~41.2%。但由于湿地植物吸收的 TN 和 TP 中有相当一部分是储存在湿地植物的地下部, 通过收获植物地上部的 TN 和 TP 吸收量仅占人工湿地 TN 和 TP 去除量的 0.3%~14.1% 和 0.8%~19.6%。由此可见, 湿地植物的直接吸收在人工湿地系统氮、磷去除中不占重要地位, 人工湿地植物的选择和利用应该更注重其间接生态效应的发挥。

关键词: 湿地植物; 人工湿地; 氮磷去除

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6929(2009)03-0337-06

Contribution of Macrophytes Assimilation in Constructed Wetlands to Nitrogen and Phosphorous Removal

LI Lin-feng¹, NIAN Yue-gang², JIANG Gao-ming³

1. College of Agricultural, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
2. Research Center for Water Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
3. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Macrophyte nitrogen and phosphorous assimilation and its contribution in constructed wetlands (CWs) to nitrogen and phosphorous removal were assessed in this paper. The results showed that the contents of total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP) were significantly different among the macrophytes. TN and TP absorption of macrophytes varies from 6.1 to 94.0 g/(m²·a) and from 0.5 to 9.0 g/(m²·a), respectively. Based on nutrient balance in an entire year, only 0.6%-17.3% of TN and 1.4%-41.2% TP were uptaken by macrophytes compared with TN and TP removal by CWs. However, due to a considerable portion of TN and TP which macrophytes absorbed was stored in the biomass of under-ground, only 0.3%-14.1% of TN and 0.8%-19.6% TP were removed by harvesting the macrophytes (above-ground biomass) compared with TN and TP removal by CWs. This shows that the macrophyte nitrogen and phosphorous assimilation could not play an important role for nutrient removal in CWs. More attention should be paid to the selection and utilization of macrophytes and their other ecological effects.

Key words: macrophyte; constructed wetland; nitrogen and phosphorus removal

人工湿地是由天然湿地发展而来的,是由特定的基质(按一定比例设计的填料如土壤、砂或砾石等),特定的植物(去污性能好、成活率高、耐水渍性强、生长期长、美观且有经济价值的水生或湿生植物)所组成的复杂、独特的生态系统^[1]。人工湿地改变了湿地的传统形态,通过科学的设计和改造,用自

然生态系统中的物理、化学和生物的三重协同作用来实现对水体的净化^[2]。

氮、磷通常以多种形态存在于污水中,会引起水体的富营养化,以至于降低水体水质和影响水体功能,所以长期以来污水脱氮除磷一直是人工湿地处理系统的一项重要任务。湿地植物是人工湿地处理系统中不可缺少的一部分^[3],它不但直接吸收利用污水中的营养物质,而且还能输送氧气到根区,满足根区微生物对氧的需求,同时也能维持和加强人工湿地系统内的水力传导。关于植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献,研究者的报道很不统一^[4]。

收稿日期: 2008-05-28 修订日期: 2008-07-24

基金项目: 国家“十五”重大科技专项(2002AA601013)

作者简介: 李林锋(1972-),男,甘肃镇原人,讲师,博士,主要从事植物生态学方面的研究,lf801@126.com。

BRIX^[5]和 HABERL 等^[6]认为在人工湿地处理污水的整个过程中,植物的吸收并不重要. GELLER^[7]对运行 4 年的芦苇人工湿地的物质衡算结果表明,湿地植物的 TN 和 TP 吸收量分别占人工湿地 TN 和 TP 去除量的 4%和 2%. 尹炜等^[8]研究发现,芦苇的 TN 和 TP 吸收量分别占湿地年 TN 和 TP 去除量的 8%和 10%. 靖元孝等^[9]认为,人工湿地栽培的水翁 (*Cleistocalyx operculatus*)对 TN 和 TP 的吸收量分别占湿地年 TN 和 TP 去除量的 16.4%和 12.6%. 而 BREEN^[10]则认为,湿地植物 (*Typha* sp.)对氮的吸收量占湿地氮去除量的 50%. ROGERS 等^[11]认为,湿地植物 (*Scirpus validus*)直接吸收的氮达到湿地氮去除量的 90%. 造成以上研究结果有差异的主要原因是研究条件的不同,而污水性质、进水负荷、湿地基质、气候条件、植物种类及其生长特性等都对植物的氮、磷吸收有着重要的影响^[4]. 为此,笔者通过构建人工湿地,研究相似环境条件下人工湿地系统对富营养化水体的净化处理效果及不同湿地植物的氮、磷吸收能力,并测算其在人工湿地脱氮除磷中的贡献,以期为人工湿地植物的选择和合理利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况及人工湿地工艺流程

人工湿地位于无锡市东五里湖湖岸(东经 120°15',北纬 31°30'),2004 年 4 月开始建造,6 月底建成. 该区属北亚热带南部向中亚热带北部过渡的季风气候区,四季分明,无霜期长,热量充裕,降水丰沛,年均气温 15.6℃,7 月最高(平均 31.5℃),1 月最低(平均 -0.83℃);年均降水量 1 112.3 mm^[12].

共设 6 个(1~6 号)平行的人工湿地处理单元,每个单元长 20 m,宽 1.5 m,深 0.8 m. 处理单元两两之间用 1 m 宽的土埂隔开,单元底部及土埂先用黏土夯实,后铺 0.5 cm 防水布防止渗漏. 每个处理单元分 3 层,依次填充基质,其中下层填充粒径为 25~35 mm 砾石,厚度为 0.25 m;中层填充粒径为 16~25 mm 砾石,厚度为 0.25 m;上层填充粒径为 5~10 mm 砾石,厚度为 0.30 m. 各处理单元均设有布水区和集水区,集水区底部安装多孔集水管并与外部一个出水高度可调的竖管相连接. 2004 年 6 月底人工湿地基建完工后,按 8 株(丛)/m² 的密度将香蒲 (*Typha latifolia*)、芦苇 (*Phragmites communis*)、茭白 (*Zizania caduciflora*) 分别定植在 1~3 号处理单元中;水葱 (*Scirpus validus*) 和千屈菜 (*Lythrum*

salicaria) 定植在 4 号处理单元中(按进水方向水葱栽前 1/2 单元,千屈菜栽后 1/2 单元);鸢尾 (*Iris pseudacorus*) 和菖蒲 (*Acorus calamus*) 定植在 5 号处理单元中(鸢尾栽前 1/2 单元,菖蒲栽后 1/2 单元);6 号为空白,不栽植物. 湿地植物栽植后经过 1 个月的适应期,于 2004 年 8 月开始试验,2005 年 7 月结束,历时 12 个月. 五里湖富营养化水经潜水泵(水面下 40 cm 处)抽提后通过 PVC 管流入各处理单元,人工调节各控制阀门,使受污染水体平均以 0.8 m³/h 的流速连续均匀流入各处理单元,水力负荷为 0.64 m/d.

1.2 水质指标分析

从 2004 年 8 月—2005 年 7 月约每 15 d 取样 1 次,水样采集后 30 min 内带回实验室用 Skalar 连续流动分析仪(荷兰)测定 (TN), (NH₄⁺-N), (NO₃⁻-N), (NO₂⁻-N) 和 (TP). 以上所有测定方法均按照《水和废水监测分析方法》^[13] 严格进行.

1.3 湿地植物生长、生物量及组织养分含量的测定

2005 年 3 月底至 7 月约每 7 d 测量 1 次湿地植物的株高. 2004 年 11 月生长季末收获上述各处理单元湿地植物的地上部分,2005 年 8 月通过样方法对各处理单元湿地植物进行全株收获,每种湿地植物在各自所生长处理单元中随机选择 3 个样方,每个样方面积为 0.25 m². 湿地植物的地下部(根茎、根系)先用自来水冲洗,再用蒸馏水冲洗以除去附着其上的营养物质. 所有湿地植物分地下部和地上部分别取样. 所有样品在 70℃ 下烘干至恒重,计算生物量;然后粉碎,过 100 目(0.15 mm)筛,用凯氏定氮法测 w (TN),用钼蓝比色法测 w (TP)^[14].

1.4 数据分析

用 SPSS 软件包 (SPSS 10.0 for Windows, Chicago, USA) 对观察数据进行统计分析,求出方差、平均值及标准误差,并对同一测定项目在不同植物种间的差异进行方差分析比较. 用 SigmaPlot 9.0 (SPSS, Inc. USA) 绘制图形.

2 结果与分析

2.1 植物生长状况分析

2004 年 6 月底采自人工湿地试验地点附近自然水域岸边的香蒲、芦苇和茭白以及从上海某花卉公司购买并预先在试验地点附近自然水域水培养护的水葱、千屈菜、鸢尾和菖蒲被成功移栽到各处理单元. 由于香蒲、芦苇、茭白和水葱移栽时高度在 1 m 以上且水葱自然弯折比较严重,为减少蒸腾和提高

成活率,上述 4 种湿地植物移栽后在距地面 40 cm 处人工修剪,千屈菜、鸢尾和菖蒲保持原来自然高度(约 40 cm)。观察发现,香蒲适应人工湿地环境的能力较强,至 2004 年 11 月其植株生长高度达 150 cm,其余植物虽然成活率都很高,但增高生长情况一般。7 种湿地植物于 2005 年 3 月底开始萌芽和分蘖生长。图 1 为 2005 年 3 月底(湿地植物萌芽)至 7 月(试验结束)各湿地植物的生长趋势。由图 1 可见,在 4—5 月 7 种湿地植物的株高增长都比较快,随后其生长趋于缓慢并各自稳定在某一高度。整个观测期间湿地植物的日平均生长速率依次为芦苇(2.49 cm/d) > 香蒲(2.23 cm/d) > 水葱(2.20 cm/d) > 千屈菜(2.08 cm/d) > 茭白(1.62 cm/d) > 鸢尾(1.49 cm/d) > 菖蒲(0.89 cm/d)。试验结束时各植物的最大株高:香蒲为 223.4 cm,芦苇为 248.5 cm,茭白为 161.7 cm,水葱为 220.0 cm,千屈菜为 207.5 cm,鸢尾为 148.7 cm,菖蒲为 71.3 cm。与旱地栽培的鸢尾相

比,人工湿地栽培的鸢尾生长非常繁茂,其高度是旱地栽培植株高度(40~50 cm)的 3 倍。但菖蒲自 6 月开花之后,大部分植株叶尖干枯,并出现衰败迹象。

2.2 湿地植物生物量

7 种湿地植物的生物量差异极显著 ($P < 0.01$),平均生物量(以干质量计)为 0.26~6.65 kg/m²(见图 2),其中菖蒲的生物量最低,香蒲的生物量最高。香蒲、芦苇、茭白、鸢尾、水葱的地上部和地下部的生物量也有明显的差异,芦苇的地上部生物量最大值(3.19 kg/m²)约为菖蒲生物量(0.14 kg/m²)的 22.79 倍。不同湿地植物的根/冠(即地下部和地上部生物量的比值)也不尽相同,香蒲根/冠比最大,达 2.11,芦苇根/冠比最小,仅为 0.34。

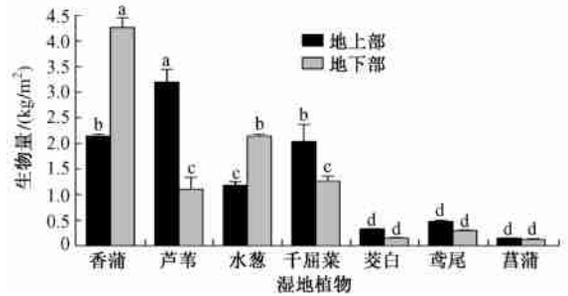


图 2 湿地植物生物量比较

Fig. 2 Comparison on dry biomass weight of plants in the constructed wetland

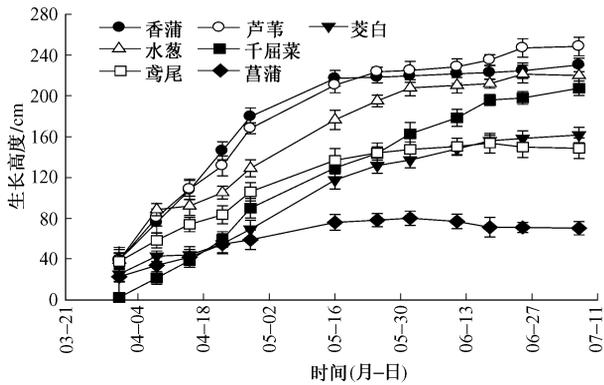


图 1 湿地植物 2005 年生长状况比较

Fig. 1 Comparison on growth status of plants in the constructed wetland in the year of 2005

2.3 人工湿地氮、磷的去除效果

运行 1 年的人工湿地各处理单元水质检测统计结果见表 1。由表 1 可以看出,污水流经各处理单元后其污染物含量均有所降低,且有湿地植物的处理单元对 TN 和 TP 的去除效果显著高于无湿地植物处理单元,但不同湿地植物处理单元间对 TN 和 TP 的去除效果虽有变化但差异不显著。

表 1 不同类型人工湿地氮、磷处理效果

Table 1 Nitrogen and phosphorous removal rate of different constructed wetland

物质	参数	进水	出水					
			1号	2号	3号	4号	5号	6号
NH ₄ ⁺ -N	/(mg/L)	1.63 ±0.60	0.97 ±0.11	1.22 ±0.11	0.85 ±0.11	0.93 ±0.11	1.07 ±0.13	1.17 ±0.15
	去除率/%		44.6 ^a ±6.2	32.6 ^a ±4.1	47.3 ^a ±5.7	42.3 ^a ±6.3	37.6 ^a ±5.5	39.2 ^a ±5.4
NO ₃ ⁻ -N	/(mg/L)	1.41 ±0.90	0.56 ±0.13	0.41 ±0.11	0.29 ±0.08	0.33 ±0.09	0.33 ±0.09	0.66 ±0.14
	去除率/%		62.2 ^b ±5.9	69.5 ^b ±5.7	74.9 ^b ±5.6	70.4 ^b ±6.6	72.2 ^b ±6.6	41.2 ^a ±9.1
NO ₂ ⁻ -N	/(mg/L)	0.27 ±0.10	0.045 ±0.020	0.047 ±0.010	0.064 ±0.020	0.062 ±0.010	0.039 ±0.010	0.057 ±0.010
	去除率/%		75.2 ^a ±4.6	75.2 ^a ±4.5	74.6 ^a ±5.0	69.8 ^a ±7.1	74.6 ^a ±6.3	72.9 ^a ±4.2
TN	/(mg/L)	4.82 ±0.90	2.35 ±0.23	2.49 ±0.20	2.03 ±0.22	2.24 ±0.27	2.60 ±0.28	3.03 ±0.24
	去除率/%		52.5 ^b ±2.9	51.2 ^b ±2.9	59.1 ^b ±4.0	55.3 ^b ±4.5	48.5 ^b ±4.4	39.9 ^a ±3.2
TP	/(mg/L)	0.152 ±0.030	0.059 ±0.010	0.052 ±0.010	0.063 ±0.010	0.071 ±0.010	0.070 ±0.010	0.077 ±0.010
	去除率/%		61.1 ^b ±3.2	62.8 ^b ±4.6	57.3 ^b ±5.5	54.6 ^b ±5.3	56.6 ^b ±5.2	44.3 ^a ±4.4

注:数据为 n 次取样的平均值 ±标准差 (n = 24); 同行不同字母表示处理单元在 0.05 水平差异显著。

2.4 湿地植物对 TN 的吸收与去除

不同湿地植物地上部组织中 $w(TN)$ 差异极显著 ($P < 0.01$), $w(TN)$ 为 13.27 ~ 24.73 mg/g, 鸢尾叶片 $w(TN)$ 最高, 香蒲最低; 地下部组织中 $w(TN)$ 差异也极显著 ($P < 0.01$), 其 $w(TN)$ 为 11.65 ~ 25.26 mg/g, 菖蒲地下部 $w(TN)$ 最高, 香蒲最低 (见图 3)。不同湿

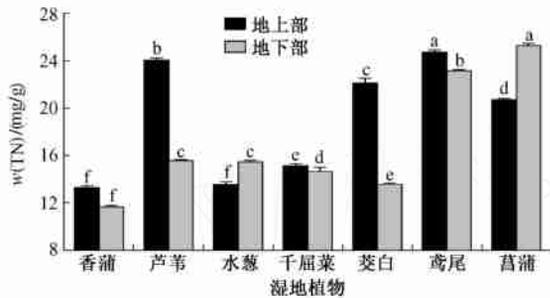


图 3 湿地植物组织 $w(TN)$ 比较

Fig. 3 Comparison on tissue total nitrogen concentration of plants in the constructed wetland

地植物地上部和地下部组织中 $w(TN)$ 也有差异, 除菖蒲和水葱地上部组织中 $w(TN)$ 与地下部组织中

表 2 湿地植物 TN 和 TP 的吸收量及其在人工湿地 TN 和 TP 去除量中的比例

Table 2 The proportion of plants TN and TP assimilation to the total amount of TN and TP reduction in constructed wetland

湿地植物	植物 TN 吸收量/g		植物 TP 吸收量/g		湿地 TN 和 TP 去除量/g		植物吸收量在湿地去除量中的比例/%		植物地上部吸收量在湿地去除量中的比例/%	
	地上部	地下部	地上部	地下部	TN	TP	TN	TP	TN	TP
香蒲	853.5	1 489.6	94.5	173.9	17 309.8	651.7	13.5	41.2	4.9	14.5
芦苇	2 305.5	513.2	137.1	33.7	16 328.6	700.8	17.3	24.4	14.1	19.6
茭白	218.9	61.0	17.4	7.3	19 552.3	623.7	1.4	4.0	1.1	2.8
水葱	239.4	496.6	35.0	62.7	18 080.6	567.7	4.1	17.2	1.3	6.2
千屈菜	461.8	277.4	47.5	50.2	18 080.6	567.7	4.1	17.2	2.6	8.4
鸢尾	175.6	101.8	17.4	9.9	15 557.8	574.7	1.8	4.8	1.1	3.0
菖蒲	44.5	46.7	4.4	3.4	15 557.8	574.7	0.6	1.3	0.3	0.8
CK					12 544.3	525.6				

2.5 湿地植物对 TP 的吸收与去除

不同湿地植物地上部组织中 $w(TP)$ 差异极显著 ($P < 0.01$), $w(TP)$ 为 1.43 ~ 2.45 mg/g, 鸢尾地上部组织 $w(TP)$ 最高, 芦苇最低; 地下部组织中 $w(TP)$ 差异也极显著 ($P < 0.01$), 其 $w(TP)$ 为 1.02 ~ 2.65 mg/g, 千屈菜地下部组织 $w(TP)$ 最高, 芦苇最低 (见图 4)。除千屈菜地下部组织 $w(TP)$ 显著大于地上部外, 其余植物的 $w(TP)$ 都是地上部高于地下部, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。湿地植物对 TP 的吸收量为 0.5 ~ 9.0 g/(m² a), 香蒲 TP 吸收量最高, 菖蒲最低。湿地植物对 TP 的吸收量占人工湿地 TP 去除量的比例为 1.3 % ~ 41.2 %, 香蒲最高, 菖蒲最低 (见表 2)。

$w(TN)$ 的比值小于 1 外, 其余湿地植物该比值都大于 1, 说明香蒲、芦苇、茭白、千屈菜和鸢尾吸收的氮向地上部迁移和积累得较多。在人工湿地系统中, 湿地植物对氮、磷直接吸收所起的贡献一般用湿地植物对 TN 和 TP 的吸收量占湿地 TN 和 TP 去除量的比例来表示, 即 $M_P / (C_{in} - C_{out}) Q t$ 。式中, M_P 为湿地植物对 TN 和 TP 的吸收量; C_{in} 和 C_{out} 分别为湿地进、出水 (TN) 或 (TP); Q 为进水流量; t 为在该流量下的运行时间^[4]。

各湿地植物对 TN 和 TP 的吸收量以及其在各自的人工湿地处理单元 TN 和 TP 去除量中的比例见表 2。由表 2 可以看出, 湿地植物对 TN 的吸收量为 6.1 ~ 94.0 g/(m² a), 其中芦苇最高, 其次为香蒲, 菖蒲最低。湿地植物对 TN 的吸收量在人工湿地 TN 去除量中的比例为 0.6 % ~ 17.3 %, 芦苇最高, 菖蒲最低。由于湿地植物在对 TN 的吸收量中有相当一部分氮是储存在湿地植物的地下部, 通过收获植物地上部的 TN 去除量仅占人工湿地 TN 去除量的 0.3 % ~ 14.1 %, 其中芦苇最高, 菖蒲最低。

同 TN 的去除情况类似, 由于湿地植物在对 TP 的吸收量中也有相当一部分磷是储存在湿地植物的地下部, 通过收获湿地植物地上部的 TP 去除量仅占人工湿地 TP 去除量的 0.8 % ~ 19.6 %, 其中芦苇最高, 菖蒲最低。

3 讨论

湿地植物是人工湿地系统的重要组成部分, 它直接或者间接地影响人工湿地系统对污水的净化效果, 因此在人工湿地污水处理工程中扮演着重要角色。COOPER^[15] 研究发现, 种植水烛 (*Typha angustifolia*) 和灯心草 (*Juncus effuses*) 的人工湿地基质中氮、磷含量分别比无湿地植物的对照基质中的

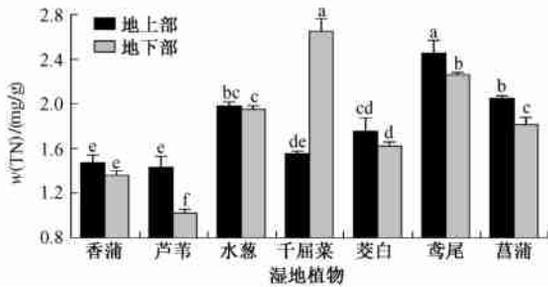


图4 湿地植物组织 $w(\text{TP})$ 比较

Fig. 4 Comparison on tissue total phosphorous concentration of plants in the constructed wetland

低 18%~28% 和 20%~31%, 可见水葱和灯心草吸收利用了污水中部分的氮和磷物质. 在海涂, 芦苇床湿地系统是削减进入海洋过量营养物质的强有力手段之一^[16]. 袁东海等^[17] 通过对照试验研究了潜流人工湿地系统对污水氮的净化效果, 发现石菖蒲 (*Acorus gramineus*)、灯心草和蝴蝶花 (*Iris japonica*) 3 个有湿地植物系统的 TN 平均去除率为 77.7%, 71.2% 和 66.4%, 而无湿地植物系统的去除率仅为 55.8%. 吴振斌等^[18] 采用复合垂直流人工湿地系统研究对污水磷的净化效果, 发现有湿地植物的人工湿地系统 TP 去除率为 59%~65%, 而无湿地植物系统的 TP 去除率仅为 28%. 由此可见, 湿地植物存在与否对人工湿地系统氮、磷去除具有很大的影响, 有湿地植物的人工湿地系统去除率要明显好于无湿地植物系统, 而且湿地植物的生长状况也直接影响到系统的去除效果, 湿地植物的良好长势是对氮、磷去除的重要保证. 试验期间, 湿地植物 2005 年的日平均生长速率相对较高, 芦苇、香蒲、水葱和千屈菜的日平均生长速率都在 2 cm 以上, 正是湿地植物的良好生长状态, 保证了人工湿地较好的处理效果, 有湿地植物的处理单元对 TN 和 TP 的去除率分别为 48.5%~59.1% 和 54.6%~62.8%, 而无湿地植物的处理单元的去除率仅为 39.9% 和 44.3%. 有湿地植物的处理单元对 TN 和 TP 的处理效果显著优于无湿地植物的处理单元, 这与袁东海等^[17-18] 的研究结果相似.

徐德福等^[19] 研究认为, 湿地植物氮、磷吸收量与其生物量呈极显著正相关. 研究发现, 不同湿地植物的生物量大小差异极显著, 平均生物量 (以干质量计) 为 0.26~6.65 kg/m², 生物量的巨大差异主要缘于物种种间的差异. 除香蒲和水葱的地下部生物量显著大于地上部外, 其余植物都是地上部生物量大于地下部. 从人工湿地氮、磷去除机理的角度分

析, 地下部生物量越大, 越利于微生物的附着, 越有利于提高人工湿地的处理效果, 但从湿地植物收获的可操作性分析, 地上部生物量在总生物量中的比例越高, 越有利于湿地生态工程中通过收获植物地上部生物量来达到去除氮、磷污染目的. 研究发现, 芦苇、香蒲、水葱和千屈菜的生物量较大, 吸收的 TN 也较多, 而菖蒲和鸢尾尽管植株组织 $w(\text{TN})$ 较高, 但由于其生物量相对较低, 故吸收的 TN 较少. 与此相似, 湿地植物对 TP 的吸收量为 0.5~9.0 g/(m²·a), 香蒲对 TP 的吸收量最高, 菖蒲最低. 湿地植物对 TP 吸收的巨大差异, 除与湿地植物自身组织 $w(\text{磷})$ 和生物量有关外, 还可能与湿地植物根表铁氧化胶膜形成有关. 有报道认为, 根表铁氧化胶膜的形成影响了水稻对磷的吸收^[20-21]. 湿地植物与水稻有相似的生活习性, 根表铁氧化胶膜对人工湿地植物磷吸收的影响及程度大小还有待进一步研究.

湿地植物是通过自身的生长代谢来吸收水体中的氮、磷等营养物质的, 正常情况下植物组织中 $w(\text{氮})$ 为 0.3%~1%, $w(\text{磷})$ 为 0~0.3%^[22]. 有研究表明, 湿地植物对氮的吸收量为 0.03~0.30 g/(m²·d), 且在衰老和死亡期植物没有除氮效果, 通过收获植物对污水中氮的去除率小于 20%^[23-26]; 植物能够通过根系吸收可溶性无机磷, 大型湿地植物的磷吸收量为 1.8~18.0 g/(m²·a), 大部分 (41 种) 沼生植物的干物质生物量中 $w(\text{磷})$ 为 0.15%~1.05%^[27], 通常湿地植物对磷的吸收量小于城市污水负荷的 5%^[28], 所以, 氮、磷的植物吸收只是在低污染负荷系统中才具有数量上的重要性^[29], 这和徐治国等^[30] 的研究结果相一致, 即在高外源氮、磷施用量情况下, 湿地植物对氮、磷的吸收量反而变小. 研究发现, 人工湿地进水氮、磷的污染负荷远小于城市生活污水的污染负荷, 湿地植物 TN 吸收量为 6.1~94.0 g/(m²·a), TP 吸收量为 0.5~9.0 g/(m²·a). 这与种云霄等^[23] 和 McJANNET 等^[27] 报道的湿地植物对 TN 和 TP 吸收量的研究结论相似, 即人工湿地对氮的去除主要依靠微生物的氨化、硝化和反硝化作用; 磷的去除主要通过沉淀、植物吸收、介质吸附以及有机物质积累等作用来实现, 且磷容易被富含 Fe、Al 及 Ca 等的矿物质所吸附, 植物吸收对氮、磷的去除率影响不大^[31-32]. 通过年度进出水污染物浓度计算, 湿地植物 TN 的吸收量占人工湿地 TN 去除量的 0.6%~17.3%, TP 的吸收量占人工湿地 TP 去除量的 1.3%~41.2%. 香蒲和芦苇的

TN 和 TP 吸收量在人工湿地单元 TN 和 TP 去除量中的比例较大,但香蒲 TN 和 TP 吸收量中约 65% 是储存在地下部生物量中,不利于通过收获植物而移除,最终会通过根系的衰老死亡营养重新返回到湿地系统中;芦苇虽然有 80% 的 TN 和 TP 储存在地上部生物量中,然而通过收获芦苇(地上部)对污水中 TN 和 TP 的去除量仅占人工湿地 TN 和 TP 去除量的 14.1% 和 19.6%。与芦苇、香蒲相比,其余湿地植物的去除量更小。由此可见,湿地植物的选择和利用在更大程度上应注重其间接生态效应的发挥,不应仅局限于其营养物质的直接吸收,植物吸收在人工湿地氮、磷去除中并不占重要地位。

4 结论

a. 各湿地植物都能适应人工湿地环境,且生长良好。正是湿地植物的良好生长状态,保证了人工湿地较好的处理效果,有湿地植物的人工湿地处理单元对 TN 的去除率为 48.5% ~ 59.1%,对 TP 的去除率为 54.6% ~ 62.8%,显著优于无湿地植物的处理单元。

b. 湿地植物对 TN 的吸收量为 6.1 ~ 94.0 g/(m² a),芦苇最高,菖蒲最低。湿地植物对 TN 的吸收量占人工湿地 TN 去除量的 0.6% ~ 17.3%,芦苇最高,菖蒲最低,通过收获湿地植物(地上部生物量)对人工湿地 TN 去除量的贡献 < 15%;湿地植物对 TP 的吸收量为 0.5 ~ 9.0 g/(m² a),香蒲最高,菖蒲最低,湿地植物对 TP 的吸收量占人工湿地 TP 去除量的 1.3% ~ 41.2%,香蒲最高,菖蒲最低,通过收获湿地植物(地上部生物量)对人工湿地 TP 去除量的贡献 < 20%。由此可见,湿地植物的直接吸收作用在人工湿地氮、磷去除中不占重要地位。

参考文献(References):

- [1] 徐丽华,周琪.人工湿地控制暴雨径流污染的实验研究[J].上海环境科学,2002,21(5):274-277.
- [2] 白晓慧,王宝贞,余敏,等.人工湿地污水处理技术及其发展应用[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(6):88-92.
- [3] BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants: the root-zone method [J]. Water Sci Technol, 1987, 19: 107-118.
- [4] 金卫红,付融冰,顾国维.人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J].环境科学研究,2007,20(3):75-80.
- [5] BRIX H. Function of macrophytes in constructed wetlands[J]. Water Sci Technol, 1994, 29(4): 71-78.
- [6] HABERL R, PERHLER R. Nutrient removal in the reed bed systems [J]. Water Sci Technol, 1991, 29(4): 15-27.
- [7] GELLER G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: summary of long term scientific practical and experiences, recommendations[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5): 157-166.
- [8] 尹炜,李培军,裘巧俊,等.植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献[J].生态学杂志,2006,25(2):218-221.
- [9] 靖元孝,杨丹菁,任延丽,等.水翁在人工湿地的生长特性及对污染物的去除效果[J].环境科学研究,2005,18(1):9-12.
- [10] BREEN P E. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment [J]. Water Res, 1991, 24(6): 689-697.
- [11] ROGERS K H, BREEN A J, CHICK A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants [J]. Research Journal of the Water Pollution Control Federation, 1991, 63(7): 934-941.
- [12] 孙顺才,黄漪平.太湖[M].北京:海洋出版社,1993:196-250.
- [13] 国家环境保护总局.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.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999:308-315.
- [15] COOPER P. The design and performance of a nitrifying vertical flow reed bed treatment system[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5): 215-221.
- [16] HOSOKAWA Y, HORIE T. Flow and particulate nutrient removal by wetland with emergent macrophyte [J]. Sci Total Environ, 1992 (Suppl.): 1271-1281.
- [17] 袁东海,任全进,高士祥,等.几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较[J].应用生态学报,2004,15(12):2337-2341.
- [18] 吴振斌,陈辉蓉,贺峰,等.人工湿地系统对污水磷的净化效果[J].水生生物学报,2001,25(1):28-34.
- [19] 徐德福,徐建民,王华胜,等.湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):597-601.
- [20] GREIPESON S, CROWDER A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice [J]. Canada Journal of Botany, 1992, 70: 824-830.
- [21] 张西科,张福锁,毛达如.水稻根表铁氧化胶膜对水稻吸收磷的影响[J].植物营养与肥料学报,1997,3(4):295-299.
- [22] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社,2003.
- [23] 种云霄,胡洪营,钱易.大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(2):36-40.
- [24] 梁威,胡洪营.人工湿地净化污水过程中的生物作用[J].中国给水排水,2003,19(10):28-31.
- [25] STOTTMEISTER U, WIELNER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advance, 2003, 22: 93-117.
- [26] US EPA. Constructed wetland treatment of municipal wastewaters manual [M]. Ohio: EPA625 R. 99. 010, Office of Research and Development, Cincinnati, 2000.
- [27] McJANNET C L, KEDDY P A, PICK F R. Nitrogen and phosphorus tissue concentration in 41 wetland plants: a comparison across habitats and function groups[J]. Functional Ecology, 1995, 9: 231-238.
- [28] KIM S Y, GEARY P M. The impact of biomass harvesting oil phosphorus uptake by wetland plants[J]. Water Sci Technol, 2001, 44(3): 61-67.
- [29] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5): 11-17.
- [30] 徐治国,何岩,闫百兴,等.湿地植物对外源氮、磷输入的响应研究[J].环境科学研究,2007,20(1):64-68.
- [31] REDDY K R, D'ANGELO E M. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetland[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(2): 1-10.
- [32] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. Aquaculture, 2002, 209(1/2/3/4): 169-184.

(责任编辑:孔欣)