

景观型人工湿地污水处理系统构建及植物脱氮效应研究

陈明利 ,吴晓芙 ,陈永华 ,蒋丽娟 ,纪智慧 ,马群

(中南林业科技大学环境科学与工程研究所 ,长沙 410004)

摘要 将 15 种景观植物 ,其中包括 4 种陆生木本植物引入人工湿地 ,用于构建景观型人工湿地污水处理系统. 该实验系统由 12 个独立处理单元组成 ,其中包括由 4 个平行处理单元构成的一级处理系统及由 8 个处理单元构成的二级跌流系统. 对植物在各处理单元中的氮积累特征及植物氮吸收对系统脱氮贡献率进行研究 ,结果表明 ,在进水 TN 浓度为 37.5 ~ 55.6 mg/L 时 ,植物吸收脱氮贡献率仅为 1% ~ 3% ,其不能准确反映植物在系统中的重要作用. 因此 ,本研究采用植物脱氮效应(有植物与无植物系统脱氮的差异)来衡量植物在处理系统中的综合作用 ,其包括植物吸收贡献及植物与根际微生物、填料基质的协同效应之和 ,分析表明 ,植物协同效应占系统脱氮效应的 80% 以上.

关键词 :景观湿地 ;污水处理 ;景观植物 ;脱氮 ;植物效应

中图分类号 :X52 文献标识码 :A 文章编号 :0250-3301(2010)03-0660-07

Construction of a Landscaping-type Wetland System for Wastewater Treatment and Analysis of Plant Denitrifying Effect

CHEN Ming-li , WU Xiao-fu , CHEN Yong-hua , JIANG Li-juan , JI Zhi-hui , MA Qun

(Institute of Environment Science and Engineering , Central South University of Forestry and Technology , Changsha 410004 , China)

Abstract :A pilot landscaping-type wetland system for wastewater treatment was constructed by introduction of 15 selected ornamental plant species (including 4 terrestrial plant species). The pilot system consists of 2 sequenced treatment units and 12 sub-units , *i. e.* , a primary treatment unit with 4 parallel cells and a secondary treatment unit with 8 subsurface flow cells. Designed experiments were conducted in the established system to investigate the characteristics of nitrogen accumulation in different plants and the contribution of plant nitrogen uptake to total nitrogen removal of the constructed wetland system. The result shows that the direct contribution by plant uptake to the total nitrogen removal is low , *ca.* 1% -3% within the nitrogen concentration range 37.5-55.6 mg/L in the influent. Plant uptake does not fully reflect the important role of the plant species in the constructed wetland system for wastewater treatment as the function of the plant should include further its interaction with microorganisms and wetland fillers by enhancing microbial activities and filler adsorption capacities. The plant denitrifying effect , defined as the difference in nitrogen removal rates between units with and without plants , has been used to represent the contribution in nitrogen removal due to presence of plant in the system. The plant denitrifying effect thus includes both the plant nitrogen uptake and the interaction effect of plant with microorganisms and wetland fillers , the later being found to account for more than 80% of the total nitrogen removal in the established treatment system.

Key words :constructed landscaping-type wetland ; sewage treatment ; ornamental plants ; nitrogen removal ; plant function

人工湿地处理技术具有运行费用低、维护管理简单、对周边环境影 响小、可以分散化与小型化建设的特点 ,近年来被广泛用于去除有机污染物和氮磷等营养盐污染物^[1-2]. 目前人工湿地系统在发达国家已被用来处理各类被污染的水体 ,包括家畜与家禽的粪水、尾矿排出液、工业废水、农业废水、垃圾场渗滤液、城市暴雨径流或生活污水、富营养化湖水等^[3-6]. 但与常规污水处理技术相比 ,湿地处理系统存在如下问题 :① 处理系统不稳定 ,可持续性差. 表现在系统受季节影响大 ,夏秋处理效果好 ,处理生活污水的脱氮率能高达 90%^[7] ,但冬季处理效果欠佳 ,氮磷的出水水质不能完全达标^[8-9] ;② 景观价值较低. 虽然近 10 年来 ,全国各大城市都相继建立了

兼顾园林观赏的污水处理人工湿地系统如洪湖公园、成都活水公园、上海市松江区五厝现代农业示范区等^[10,11] ,也有研究者^[12,13]对观赏植物的去污效果进行了研究 ,但人工湿地系统中可供选择的具有较高景观价值、较强去污效果的景观植物种类仍然有限 ,常规系统中的植物种类较单一 ,人工湿地在景观方面所具有的优势未能得到充分的发挥 ,从而影响了其进一步的推广使用 ;③ 人工湿地净化机制方面的报道较多 ,但植物作为人工湿地组成元素之一 ,其

收稿日期 :2009-04-08 ;修订日期 :2009-06-29

基金项目 :国家科技部国际合作项目 (2007DFA91420) ;湖南省环境科学学科建设项目(2006180) ;湖南省教育厅科技产业化项目

作者简介 :陈明利(1975 ~) ,女 ,博士 ,讲师 ,主要研究方向为水污染控制 ,E-mail :chml18@163.com

在脱氮过程中与微生物、基质填料所起的协同作用方面的机制仍有必要进行较为深入地探讨。

针对人工湿地在发展应用中存在的以上问题,将不同的景观植物引入人工湿地,并以构建景观型人工湿地污水处理系统为目标来配置植物群落、设计系统的构型与功能,其目的是通过景观型湿地系统的构建提高处理系统的功能价值,实现人工湿地可持续性的净化功能与景观功能的有机结合,同时对引入系统的园林植物脱氮能力进行研究,以进一步揭示植物在人工湿地污水处理系统中的作用。

1 材料与方法

1.1 试验系统设计

设计构建的人工湿地系统位于中南林业科技大学株洲校园内,流程如图1所示。A系列和B系列为平行处理单元,进水浓度一致,B系列和C系列构成一个串联的二级跌流处理系统,其中B系列构成一级处理单元,C系列构成二级处理单元。该系统共12个小处理单元,用于研究不同景观植物所构成的潜流湿地对生活污水的处理效果。

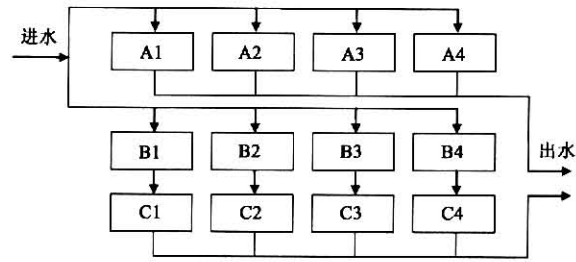


图1 处理系统流程示意
Fig.1 Wastewater treatment flowchart of landscaping wetland system

1.2 处理单元构造

景观湿地各处理单元的构造如图2所示。各单元长5 m,宽2 m,中部设一高度为0.5 m的挡水墙,目的是在床体内增加隔水性较好的砖混结构挡水墙和阻水墙,采用波形设计,防止污水在床体内出现短流,引导污水在床体内形成波形水流,并使得污水充分流经各填料层,提高了填料的利用率。出水口高度为0.6 m,水面线控制在0.6 m。各处理床体均用砖混构筑,床体的填充方式为下部填充粒径为3~5 cm的石灰石40 cm,上面再铺5 cm河沙,中间用纱网做隔层,防止河沙进入石灰石造成堵塞,河沙层之上根据实验设计分别填充膨胀蛭石、红壤、天然沸石各15 cm作为吸附层,最上层再铺约10 cm的细沙,

其上根据设计要求栽种不同的景观植物。

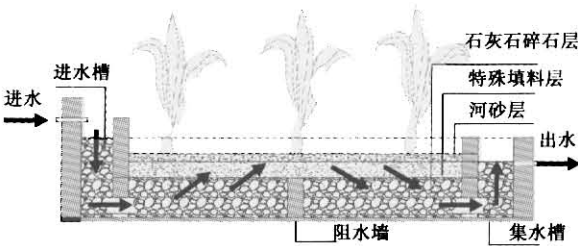


图2 处理单元构造示意
Fig.2 Configuration of treatment cell in landscaping wetland system

1.3 基质与植物配置

通过5年来对引入湿地处理系统的100多种植物的比较筛选,获得了近30余种适应性、净化力强且具有景观价值、可用于湿地系统的园艺植物。根据本试验的要求,选取了其中部分植物作为试验用植物。引入系统的15种植物,均为多年生植物,其中美人蕉(*Canna indica*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)、再力花(*Thalia dealbata*)、香蒲(*Typha angustifolia* Linn.)、花叶芦竹(*Arundo donax* var *versicolor*)、菖蒲(*Acorus gramineus*)、花菖蒲(*Iris ensata* Thunb.)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)均为大型的水生或湿生类观赏植物,月季(*Rose chinensis*)、金叶女贞(*Ligustrum vicaryi*)、冬青(*Ilex latifolia*)和萼距花(*Cuphea hookeriana*)为当地常见的园林植物,一般为陆生栽培,除萼距花外,其他陆生植物冬季地上部分仍然存活。所有植物均于9月初按设计要求移栽入系统,移栽后形成生长良好的群体。系统各单元基质与植物配置如表1所示。

1.4 进水水质

处理系统采用连续进水方式,待处理水为校园生活污水,进水水质如表2所示。

1.5 测定方法

测定试验单元COD、TN、TP、NH₄⁺-N等各项水质指标,采样时间定为每月3次,为月初、中旬和月末,3次出水浓度的算术平均值作为当月的出水浓度。测定方法见《水和废水监测分析方法》(第四版)。

植株生物量测定采用称重法,12月份收获整株植物,在烘箱中烘至恒重后称重。植物体内氮磷浓度测定参考具体测定方法采用浓硫酸消煮-紫外分光光度法^[14]。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况

表 1 不同处理单元基质与植物配置表
Table 1 Substrates and plants used for treatment cells

单元名称	吸附层	植物	栽种株数	栽种密度/株·m ⁻²	行×列/株	植物高度/m
A1	蛭石	美人蕉	50	2.50	10×5	0.5
A2	红壤	美人蕉	50	2.50	10×5	0.5
A3	沸石	美人蕉	50	2.50	10×5	0.5
A4	沸石	无植物	0	0	0	0
B1	蛭石	梭鱼草	50	2.50	10×5	0.6
B2	红壤	香蒲	50	2.50	10×5	0.8
B3	沸石	再力花	40	2.00	10×5	0.7
B4	沸石	梭鱼草	20	1.00	4×5	0.5
		月季	30	1.50	6×5	0.3
		金叶女贞	30	1.50	6×5	0.3
C1	蛭石	花叶芦竹	25	1.25	5×5	0.5
		菖蒲	25	1.25	5×5	0.3
C2	红壤	花叶美人蕉	25	1.25	5×5	0.5
		泽泻	25	1.25	5×5	0.5
C3	沸石	风车草	15	0.75	3×5	0.5
		花菖蒲	30	1.50	6×5	0.3
C4	沸石	千屈菜	25	1.25	5×5	0.5
		冬青	30	1.50	6×5	0.3
		鸢距花	30	1.50	6×5	0.3

表 2 处理系统进水水质
Table 2 Water quality of influent for treatment system

COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	浊度/NTU	pH
164.58~207.09	33.31~49.91	37.5~55.64	2.93~3.17	6.8~9.7	6.5~7.57

水生和湿生型的植物移栽后,在短时间内能形成长势良好的群体,观察有新叶和新根长出,待收获时地上部分的覆盖度基本达到 90%。引入系统的陆生植物,经过一个月的适应生长,根部诱导出大量水生根,地上部分也有不少新叶长出,待收获时覆盖度达 90% 左右。

植物生物量的变化反应出其对环境的适应,对景观湿地 15 种植物生物量的统计结果如表 3 所示。各单元生物量均有一定量的增长,其生长量的分配表现以下特征:不同植物生长量大小不一,大型挺水植物的地上生长量普遍比陆生植物大,大型水生植物地上部分的生长量比地下部分大,而陆生木本植物与之相反,基本上呈现地下生长量大于地上生长量,且混种植物地下生长量大于单种单元的地下生长量。

一级和二级系统之间植物生长量并没出现很大的差异,说明污染物负荷并没有对植物造成较大的影响,氮磷浓度也没有成为植物生长的限制因子,原因可能在于进水 TN 浓度较高,氮素营养较丰富所致。

2.2 植物氮积累

植物通过生物量增长从湿地中吸收氮素被认为是湿地净化机制的重要途径之一^[15]。植物吸收的氮素主要是氨态氮和硝态氮,也包括一些小分子含氮有机物如尿素和氨基酸等,通过同化作用转化为自身组织的一部分^[16]。为了分析试验系统中不同植物氮含量的差异,计算植物吸收从系统中带走的氮量,本研究对景观湿地中 15 种植物组织中的全氮含量及单位面积氮积累量进行测定,结果如表 4 所示。

茎叶氮质量分数在 1.11%~3.69% 之间,最高的为菖蒲。根氮浓度在 0.67%~2.48% 之间,最高的为梭鱼草。末期地上部分茎叶氮含量与地下部分根氮含量的比值>1,说明植物对氮的累积主要集中在茎叶器官,植物体内氮的分配规律呈现茎叶>根。茎叶和根收割时氮质量分数与种植初期相比差别不大,原因可能在于选用的植物幼苗均从该试验基地移植而来。

对植物单位面积吸收氮量与生物量、体内氮含量进行相关性分析,结果表明植物氮吸收与生物量显著正相关($r=0.99$),与体内氮含量相关性很小($r=0.34$)。

表 3 景观湿地植物生物量表
Table 3 Biomass of plants in landscaping wetland system

单元名称	植物	高度/m	茎叶生物量 增量/g·m ⁻²	根生物量增量 /g·m ⁻²	地下/地上 生物量增量比	单元生物量 增量/g·m ⁻²
A1	美人蕉	1.8	401.30	165.5	0.41	566.80
A2	美人蕉	1.8	425.09	165.5	0.39	590.59
A3	美人蕉	1.8	471.71	165.5	0.35	637.21
A4	无植物	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
B1	梭鱼草	1.00	260.00	160.3	0.62	420.30
B2	香蒲	1.70	315.65	100.89	0.32	416.54
B3	再力花	2.00	501.48	182.36	0.36	683.84
B4	梭鱼草	0.90	116.06	142.67	1.23	468.46
	月季	0.25	23.33	71.69	3.07	
	金叶女贞	0.5	23.03	91.68	3.98	
C1	花叶芦竹	1.0	46.13	120.24	2.61	377.87
	菖蒲	0.8	89.10	122.4	1.37	
C2	花叶美人蕉	1.5	212.55	140.67	0.66	477.63
	泽泻	0.7	45.07	79.34	1.76	
C3	风车草	0.9	137.46	107.28	0.78	468.75
	花菖蒲	1.2	126.00	98.01	0.78	
C4	千屈菜	1.5	133.26	143.56	1.08	523.93
	冬青	0.3	14.36	84.61	5.89	
	萼距花	0.3	53.78	94.36	1.75	

表 4 植物氮积累量特征¹⁾
Table 4 Characteristics of nitrogen accumulation in different plants

单元 编号	植物	茎叶初始 全氮质量 分数/%	茎叶末期 全氮质量 分数/%	根初始 氮质量 分数/%	根末期 氮质量 分数/%	地上/地下 氮含量比	茎叶吸收 氮/g·m ⁻²	根吸收氮 /g·m ⁻²	地上/地下 氮吸收比
A1	美人蕉	2.75	2.71	1.66	1.64	1.65	10.84	2.72	3.99
A2	美人蕉	2.59	2.61	1.67	1.64	1.59	11.05	2.71	4.08
A3	美人蕉	2.66	2.62	1.64	1.64	1.59	12.26	2.71	4.52
A4	无植物	—	—	—	—	—	—	—	—
B1	梭鱼草	2.77	2.86	1.44	1.48	1.93	7.44	2.37	3.14
B2	香蒲	2.32	2.38	1.61	1.67	1.43	7.51	1.68	4.47
B3	再力花	2.44	2.42	1.96	1.97	1.23	12.14	3.59	3.38
B4	梭鱼草	3.29	3.32	2.42	2.48	1.34	3.85	3.54	1.09
	月季	1.98	1.94	1.76	1.75	1.11	0.45	1.25	0.36
	金叶女贞	1.15	1.11	0.71	0.67	1.66	0.26	0.61	0.43
C1	花叶芦竹	2.78	2.76	1.36	1.34	2.06	1.27	1.61	0.79
	菖蒲	3.63	3.69	2.49	2.45	1.51	3.29	3.00	1.10
C2	花叶美人蕉	2.03	2.02	1.33	1.36	1.49	4.29	1.91	2.25
	泽泻	2.71	2.75	1.78	1.77	1.55	1.24	1.40	0.89
C3	风车草	2.29	2.25	1.03	1.04	2.16	3.09	1.12	2.76
	花菖蒲	1.92	1.95	1.21	1.12	1.74	2.46	1.10	2.24
C4	千屈菜	2.01	2.04	1.09	1.07	1.91	2.72	1.54	1.77
	冬青	3.16	3.19	1.04	1.03	3.10	0.46	0.87	0.53
	萼距花	1.33	1.35	0.89	0.82	1.65	0.73	0.77	0.94

1)茎叶吸收氮=茎叶全氮质量分数×茎叶生长量,根吸收氮=根氮质量分数×根生长量

2.3 植物吸收贡献率

12个单元植物吸收对各处理系统氮去除的贡献率统计结果见表5所示。植物吸收对总氮负荷减少的贡献率在0.73%~2.35%之间。表明植物吸收对湿地中氮的去除贡献非常有限,植物吸收不是试验湿地系统最主要的脱氮途径。植物吸收贡献率与

单元TN去除量相关性分析结果显示(图3),单元总氮去除量大,植物氮吸收对去氮的贡献率则相对较小。

2.4 植物脱氮效应

从2.3的分析可以看出,植物在湿地脱氮中的作用并不能仅仅由植物氮吸收反应出来,氮吸收的

表 5 不同处理单元植物氮吸收量与其去氮贡献率¹⁾

Table 5 Contribution of plant nitrogen uptake to total nitrogen removal of the wetland system

单元名称	基质/植物	单元面积 /m ²	均进水量 /m ³ ·d ⁻¹	进水 TN 浓度 c ₀ /mg·L ⁻¹	出水 TN 浓度 c _e /mg·L ⁻¹	单元 TN 去除量 /g	单位面积 TN 去除量 /g·m ⁻²	植物 TN 吸收量 /g·m ⁻²	植物吸收贡献率 /%
A1	蛭石/美人蕉	10.8	6.25	51.30	40.23	6 226.88	576.56	13.55	2.35
A2	红壤/美人蕉	10.8	6.25	51.30	39.19	6 811.88	630.73	13.77	2.18
A3	沸石/美人蕉	10.8	6.25	51.30	34.68	9 348.75	865.63	14.98	1.73
A4	沸石	10.8	6.25	51.30	36.44	8 358.75	773.96	0	0.00
B1	蛭石/梭鱼草	9.4	6.25	51.30	33.01	10 288.13	1 094.48	9.81	0.90
B2	红壤/香蒲	9.4	6.25	51.30	36.95	8 071.88	858.71	9.19	1.07
B3	沸石/再力花	9.4	6.25	51.30	26.19	14 124.38	1 502.59	15.73	1.05
B4	沸石/梭鱼草/月季/女贞	9.4	6.25	51.30	28.57	12 785.63	1 360.17	9.97	0.73
C1	蛭石/花叶芦竹/菖蒲	9.4	3.75	33.01	21.70	3 817.13	406.08	9.17	2.26
C2	红壤/美人蕉/泽泻	9.4	3.75	36.95	24.99	4 036.50	429.41	8.85	2.06
C3	沸石/风车草/花菖蒲	9.4	3.75	26.19	14.66	3 891.38	413.98	7.76	1.87
C4	沸石/千屈菜/冬青/萼距花	9.4	3.75	28.75	19.44	3 142.13	334.27	7.08	2.12

1) 单元 TN 去除量 = (进水 TN 浓度 - 出水 TN 浓度) × 均进水量 ; 单位面积 TN 去除量 = 单元 TN 去除量 / 单元面积 ; 植物 TN 吸收量 = (植物全氮质量分数 × 生长量) / 种植面积 ; 植物吸收贡献率 = (植物 TN 吸收量 / 单位面积 TN 去除量) × 100%

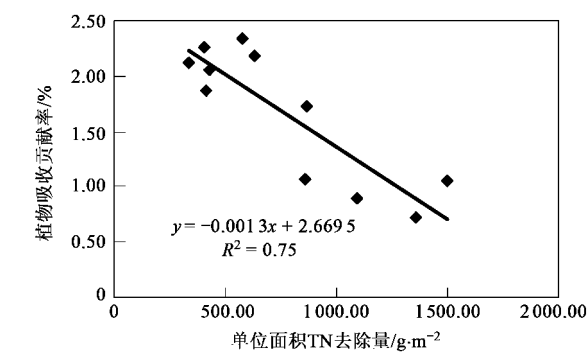


图 3 植物氮吸收贡献率与单元 TN 去除量关系

Fig. 3 Relationship between contribution to nitrogen uptake by plants and amounts of nitrogen removal by cells

贡献率不能代表植物在脱氮中所起的全部作用. 由此, 作者用有植物处理与无植物处理氮去除量的差值占植物处理单元氮总去除量的百分比来表示植物的脱氮效应, 即:

$$\text{植物脱氮效应} = 100 \times (\text{有植物单元去除量} - \text{无植物单元去除量}) / \text{有植物单元去除量} \quad (1)$$

式(1)表明, 植物的脱氮效应包含了植物吸收和植物在系统中通过促进微生物活性、增强基质填料吸附缓冲能力以及改善其它因子条件所产生的去

N 增量方面的综合效应, 前者为植物通过吸收产生的直接贡献, 而后者为植物在与其它因子协同效应中的增效作用, 其中:

$$\text{植物吸收贡献率} = \frac{\text{植物吸收氮量}}{\text{单元氮总去除量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{植物增效作用} = \text{植物脱氮效应} - \text{植物吸收贡献} \quad (3)$$

显然, 与植物吸收贡献率相比, 植物脱氮效应更能反应植物在处理系统中所起的作用. 在对植物效应进行计算时, 为了排除基质的影响, 仅仅对采用同一基质的处理单元进行分析, 分析结果如表 6~7 所示.

TN 吸收贡献率值远小于植物脱氮效应值, 差异大约在 10 倍以上. 植物吸收贡献率也不与植物脱氮效应成正比, 如 B3 的植物吸收贡献率略小于 A3, 但其植物脱氮效应是 A3 的 4 倍之多.

将 TN、NH₄⁺-N 和 COD 三者的总去除量与植物脱氮效应进行比较, 发现植物效应与总去除量的变化呈正相关, 植物脱氮效应大的单元总去除量相应较大. 对系统 NH₄⁺-N、COD 的植物效应分析同样也反映了以上规律, 说明植物脱氮效应能较好反映植

表 6 总氮(TN)去除中的植物效应分析

Table 6 Analysis of plant denitrify effect

单元名称	基质/植物	总去除量/g·m ⁻²	植物效应/%	吸收贡献率/%	植物协同效应/%
A4	沸石/无植物	773.96	0.00	0.00	0.00
A3	沸石/美人蕉	865.63	10.59	1.73	8.86
B3	沸石/再力花	1 502.59	48.49	1.05	47.44
B4	沸石/梭鱼草/月季/女贞	1 360.17	43.10	0.73	42.37

表 7 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、COD 去除中的植物效应分析

Table 7 Analysis of plant effect for $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and COD removal

单元名称	基质/植物	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	植物效应/%	COD 去除量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	植物效应/%
A4	沸石/无植物	576.91	0.00	2 886.98	0.00
A3	沸石/美人蕉	769.44	25.02	3 961.46	27.12
B3	沸石/再力花	1 208.58	52.27	6 799.07	57.54
B4	沸石/梭鱼草/月季/女贞	1 197.41	51.82	7 705.05	62.53

物在湿地净化中所起的作用 ,通过植物脱氮效应分析可以较好解释系统的净化力差异.

3 讨论

3.1 景观植物的特点

景观植物具有较好的观赏价值 ,引入人工湿地污水处理系统无疑能进一步提高系统的景观价值 ,但大部分的园林植物为陆生栽培 ,将其引入人工湿地系统 ,其一需要解决的是植物的生态适应性问题 ;其二 ,引入的园林植物应该对污水具有较好的净化作用. 本研究通过大量地引种实验证实 ,大部分试验过的陆生园林植物均对水生环境具有一定的适应性 ,经过一段时间的水生诱导可以在人工湿地中存活 ,并具有一定的生长量和氮磷吸收能力 ,且具有多年生的特性 ,不需要进行植物的换季 ,从而可以增强系统运行的可持续性和稳定性.

在人工湿地植物选择的过程中 ,不少研究者^[17 ,18]趋向于选择生长快、组织氮含量高和单位面积产量高的植物作为湿地处理系统氮同化和储存的植物. 但从表 4 可以看出 ,单位面积氮吸收量的大小和地上/地下氮吸收的比值与体内氮浓度并没表现出一致性 ,而是受到生物量的影响 ,生物量大 ,植物氮吸收量较大. 因此 ,生物量是处理系统常规植物筛选的重要因子.

3.2 植物的吸收作用

由于植物吸收 N 的能力有限 ,植物 N 吸收在系统脱 N 中的贡献率则与进水氮负荷量相关. 氮负荷量小的系统 ,植物吸收的贡献率值相应大 ,而氮负荷量大的系统 ,植物吸收的贡献率值则相应小(图 3). 王晟等^[19]通过研究也认为氮进水浓度 $> 20 \text{ mg/L}$ 时 ,植物吸收贡献非常有限. 由于进水氮负荷的差异会导致植物吸收对脱氮贡献率的差异 ,植物氮吸收的贡献率不能准确反应不同植物种类的脱氮能力.

3.3 植物的增效功能

从表 6 可以看出 ,虽然植物直接吸收在去 N 中的贡献很小 ,但植物在系统中的增效作用却不可忽视 ,该一作用表明植物具有通过如改善水流、溶解氧

等条件、增加根系和基质中微生物数量、多样性和活性等来增强湿地系统脱氮能力的综合功能^[20 -25]. 如再力花作为大型挺水植物 ,其增效的贡献率达到了 47% ,说明植物在提高人工湿地系统处理效率中具有不可替代的作用. 再力花与美人蕉脱氮效应存在差异 ,其可能是由于 2 种植物根系状况不同所致 ,不同植物种类产生增效差异的机制还有待于进一步研究.

在实验中单种植物单元(A3、B3)与混种植物单元(B4)比较中 ,发现沸石 + 梭鱼草 + 月季 + 女贞混种单元的氮去除率、植物氮吸收及植物效应比单种美人蕉的单元要高 ,混种单元 COD 的去除量高于单种再力花和美人蕉单元 ,其表明植物混种可以提高植物的去污效应 ,再或者说系统的去污效果与系统的植物配置相关. 有研究^[26]曾提出过关于混种群落比单种群落具有更好的脱氮效果的假设 ,Christina 等^[27]通过盆栽试验也发现在某些月份混种群落单元倾向于产生更好的脱氮效果. 但也有研究表明单种群落和混种群落两者对 COD 的净化效果差异不明显^[28] ,其混种群落湿地对总磷的净化效果优于单种群落湿地 ,而单种群落对总氮的净化效果强于多种群落.

本研究表明 ,混种比单种单元的处理效果好 ,其原因可能是通过混种提高了系统的生物多样性 ,改善了系统的结构与功能 ,增加了食物链(网)中物质与能量的转化途径 ,同时也增强了系统对病虫害的抵抗力. 从理论上来说 ,单一物种的净化能力总是有限的 ,不同植物由于生长期、抗逆能力、根系类型和分布不同 ,释氧速率不同 ,对微生物活性影响不同 ,从而净化污水的效率不同. 如草本植物生长期比较短 ,而木本植物生长期长 ,不同植物耐高温或抗寒性有差异等 ,因此 ,合理的搭配可以获得更为理想的处理效果.

4 结论

(1) 实验选用的 15 种景观植物(包括陆生木本植物)在人工湿地中生长良好 ,具有较强的去污能

力. 园林植物的引入增加了湿地植物的选择范围,本试验结果可为构建景观型人工湿地系统植物群落配置提供基础资料.

(2)植物是人工湿地污水处理系统的必要与重要元素,其在提高人工湿地系统处理效率中具有不可替代的作用. 植物在人工湿地系统中最重要的是植物在与其它因子的协同作用中,通过提高系统的整体去污能力所产生的去污增量效应,这一效应对总氮的去除率贡献可达47%,植物在系统脱氮中的增效作用与植物种类相关.

(3)混合种植能进一步增强系统去污能力,因此,人工湿地植物体系的构建中应该考虑多个物种的合理搭配,科学合理的湿地植物群落配置可增强系统的净化能力和稳定性.

参考文献：

[1] 汤显强,黄岁樑. 人工湿地去污机理及国内外应用现状[J]. 水处理技术,2007,33(2) :9-13.

[2] 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.

[3] Coveney M F, Stites D L, Lowe E F, *et al.* Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration [J]. Ecological Engineering, 2002,19(2) :141-159.

[4] 张海,张旭,钟毅,等. 潜流人工湿地去除大庆地区湖泊水体中石油类化合物的研究[J]. 环境科学,2007,28(7) :1449-1454.

[5] Wu X F, Zhao F, Chen M L, *et al.* Factors affecting the adsorption of Zn²⁺ and Cd²⁺ Ions from aqueous solution onto Vermiculite[J]. Adsorption Science Technology, 2008,26(3) :145-155.

[6] 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.

[7] 汤显强,李金中,李学菊,等. 间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响[J]. 环境科学,2008,29(4) :897-901.

[8] 周健,王继欣,张勤,等. 序批式人工湿地冬季低温脱氮的效能研究[J]. 环境科学学报,2007,27(10) :1652-1656.

[9] 尹炜,李培军,尹澄清,等. 潜流人工湿地的局限性与运行问题[J]. 中国给水排水,2004,20(11) :36-38.

[10] 王庆安,任勇,钱骏,等. 成都市活水公园人工湿地塘床系统的生物群落[J]. 重庆环境科学,2001,23(2) :52-55.

[11] 陈飞星,朱斌. 利用水生植物改善北京动物园水环境的研究初探[J]. 上海环境科学,2002,21(8) :469-472.

[12] Zhen H Z, Zed R, Kathy M. Removal of nutrients from secondary-treated municipal wastewater in wetland microcosms using

ornamental plant species [J]. International Journal of Environment and Waste Management,2007,1(4) :363-375.

[13] 陈志澄,郭丹桂,熊明辉,等. 处理生活污水的植物品种的筛选[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(4) :90-93.

[14] 吕伟仙,葛滢,吴建之,等. 植物中硝态氮、氨态氮、总氮测定方法的比较研究[J]. 光谱学与光谱分析,2004,24(2) :204-206.

[15] 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.

[16] Koottatep T, Polprasert C. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics [J]. Water Sci Technol, 1997,36(12) :1-8.

[17] Tanner C C. Plant for constructed wetland treatment systems-A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. Ecological Engineering, 1996,7(1) :56-83.

[18] 成水平. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学,2002,14(2) :179-184

[19] 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,2006,27(11) :2194-2200.

[20] Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands [J]. Water Sci Technol, 1994,29(4) :71-78.

[21] Tanner C C, Kadlec R H, Max M G. Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands-influence of wastewater characteristics[J]. Ecological Engineering, 2002,18(4) :499-20

[22] 吴振斌,梁威. 复合垂直流构建湿地净化污水机制研究. 微生物类群和基质酶[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(2) :180-183.

[23] 张荣社,李广贺,周琪. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究[J]. 环境科学,2005,26(4) :83-86.

[24] Drizo A, Frost C A, Smith K A, *et al.* Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate [J]. Water Sci Technol, 1997,35(5) :95-102.

[25] 王晟,徐祖信,李怀正,等. 植物根系对垂直流人工湿地水力条件的影响[J]. 同济大学学报,2008,36(4) :519-524.

[26] Karpiscak M M, Gerba C P, Watt P M, *et al.* Multi species plant systems for wastewater quality improvements and habitat enhancement [J]. Water Sci Technol, 1996,33(10-11) :231-236.

[27] Christina R P, Lauchlan H F, David S. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetlands microcosms [J]. Bioresource Technology, 2005,96 :1039-1047.

[28] 赵建刚,杨琼,陈章和,等. 几种湿地植物根系生物量研究[J]. 中国环境科学,2003,23(3) :290-294.