

植物功能群多样性对人工湿地微生物生物量和营养滞留的影响

李红梅, 陶高峰, 徐凌, 倪露佳, 蒋小娜, 周超群, 杨月, 张崇邦*
(浙江省台州学院生命科学学院, 浙江临海 317000)

摘要: 为了检验植物功能群多样性是否影响人工湿地植物生物量、微生物生物量和填料营养滞留, 本研究在垂直流人工湿地中设置了5个植物功能群丰富度处理(未栽培处理以及分别栽培1、2、3和4个功能群处理), 分析了不同处理下的植物生物量、微生物生物量碳和氮、填料中有机碳、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和有效磷含量。单因素方差分析表明: 植物生物量、微生物生物量碳和氮均随着植物功能群丰富度显著提高 ($P < 0.05$), 而填料中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量仅依赖于植物栽培与否。相关分析揭示出, 植物功能群丰富度与植物生物量、微生物生物量碳和氮以及填料中的 NO_3^- -N 含量均呈正相关关系, 而微生物生物量碳分别与填料中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量呈正相关。本研究突出了植物功能群多样性在改善人工湿地中的植物生物量、微生物生物量碳和氮方面的重要性。

关键词: 人工湿地; 植物功能群丰富度; 植物生物量; 微生物生物量; 营养滞留

中图分类号: X176; S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2011)06-1365-07

Effects of plant functional group diversity on microbial biomass and nutrient retention in a constructed wetland

LI Hong-mei, TAO Gao-feng, XU Ling, NI Lu-jia, JIANG Xiao-na, ZHOU Chao-qun, YANG Yue, ZHANG Chong-bang*
(School of Life Sciences, Taizhou College, Linhai, Zhejiang 317000, China)

Abstract: In order to test whether plant functional group diversity affects plant biomass, microbial biomass and nutrient retention in constructed wetlands, five plant functional group richness treatments (including unplanted treatment, treatments planted with one, two, three and four functional groups, respectively) were established. The plant biomass, microbial biomass carbon and nitrogen, as well as organic carbon, NH_4^+ -N, NO_3^- -N and available phosphorus contents in the filled material were analyzed, respectively. The results of the one-way analysis of variance (ANOVA) indicate that plant biomass, microbial biomass carbon and nitrogen are significantly increased with the plant functional group richness ($P < 0.05$), while the contents of NH_4^+ -N of NO_3^- -N are depended on whether the treatments are planted or unplanted. Correlation analysis reveals that the plant functional group richness is positively related to plant biomass and microbial biomass carbon and nitrogen, and as well as the NO_3^- -N content, and the microbial biomass carbon is positively related to the contents of NH_4^+ -N of NO_3^- -N. The present study highlights the importance of plant functional group diversity in improving plant biomass, microbial biomass carbon and nitrogen in a constructed wetland.

Key words: constructed wetland; plant functional group richness; plant biomass; microbial biomass; nutrient retention

收稿日期: 2011-03-18 接受日期: 2011-07-10

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y5100017)资助。

作者简介: 李红梅(1989—), 女, 甘肃天水市甘谷县人, 本科生, 主要从事污水控制研究。E-mail: 740372996@qq.com

* 通讯作者 E-mail: llhzcb@163.com

人工湿地(Constructed wetland, CW)是20世纪70年代蓬勃兴起的处理污水的新型生态技术,它的原理主要是利用湿地中的植物、基质和微生物之间的相互作用,并通过一系列的物理、化学以及生物过程来净化污水。作为人工湿地的重要类型之一,垂直流湿地(Vertical flow constructed wetland, VFCW)属于不饱和系统,由于其对COD、BOD₅和总磷均具有较好的处理效果,且占地面积较小而得到了广泛应用^[1]。

关于植物在人工湿地中的作用研究多集中于栽培与未栽培植物的比较方面,并且所得出的结论也存在着较大的分歧^[2-3]。一些研究表明:与未栽培植物相比,栽培植物对人工湿地微生物群落大小(生物量)、结构和活性具有显著的影响^[4-6],而另外一些研究则报道栽培植物对填料中微生物没有显著影响^[7-9]。这些不同的研究结果可能与人工湿地设计、植物种类选择和填料类型等方面的差异有关,因而采用植物多样性设计对上述争议做进一步研究是有价值的^[2]。

近些年来,基于生物多样性与生态系统功能关系原理,将植物多样性应用于人工湿地的研究国内外已经逐渐开展起来,如Engelhardt和Ritchie^[10]首次将植物种类多样性应用于人工湿地中,并得出结论:维持人工湿地植物种类多样性对于强化人工湿地系统功能发挥具有重要意义。Sirianuntapiboon和Jitvimolnimit^[11]的研究发现:提高植物种类多样性能显著改善废水硝态氮的净化效率。最近,我国学者在一个实际运行的人工湿地中也开展了类似的工作,并且研究结果初步表明,植物种类多样性的提高不仅显著提高了填料对硝态氮的吸附量^[12],而且也显著提高了微生物生物量以及微生物群落对氨基酸的利用活性^[3]。

来自于陆地生态系统的相关研究表明:植物功能群组成在改变生态系统功能方面要比种类组成还要重要^[13-14]。然而,人工湿地在许多方面(如基质和水负荷条件等)均不同于自然的或扰动的陆地系统,上述现象是否也同样会发生在人工湿地中呢?这是一个目前尚未得到详细研究的问题。为此,我们根据植物的功能特征将16种水生或湿生性植物划分为4个功能群(阔叶草本植物、C3植物、C4植物和豆科植物),并在一个实际运行的垂直流人工湿地中分别设置了含有1、2、3和4个功能群的栽培处理,同时为了比较,也设置了未栽培植物的处理为对照,目的在于了解不同植物功能群丰富度条件下

植物生物量、微生物生物量以及湿地基质中主要营养成分的动态变化,为将来植物功能群应用于人工湿地设计、运行与调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究样地位于浙江省舟山市朱家尖郊区舟山市朱家尖污水处理厂院内(29°89'N, 122°40'E),该地区属于亚热带季风性海洋气候,冬季寒冷潮湿,夏季干燥炎热。年均降水量为927~1620 mm,年均气温为16~19℃,无霜期251~303 d。

湿地类型为垂直流湿地系统(IVFCW,下行池),总面积为1000 m²,人工湿地全长50 m,宽20 m,平均深度为1.2 m,整体构造全部用石块灌注水泥砌成,底部覆三合土夯实,并抹水泥以防渗。每个处理池最底层铺上50 cm厚、直径50~120 mm的砾石,中间层铺20 cm厚直径为20 mm左右的粗砂,最上层铺40 cm厚直径为6~12 mm的细海砂(图1)。该湿地系统处理的是来自舟山城市污水处理厂处理后的生活污水(BOD₅ = 12.6 mg/L, COD = 13.2 mg/L, 总氮 = 39.3 mg/L, 总磷 = 3.6 mg/L, 总悬浮物 = 66.0 mg/L),灌溉方式为间歇式供水,其处理能力为2000 m³/d。

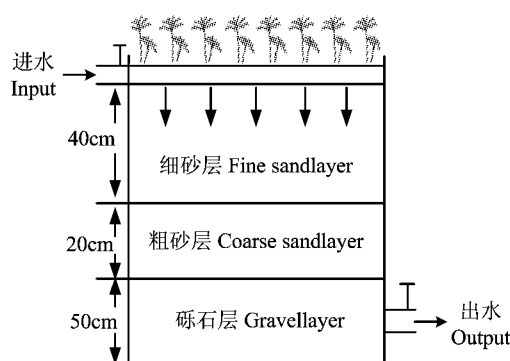


图1 垂直流人工湿地系统结构

Fig. 1 Scheme of the vertical flow constructed wetland

本试验种植植物均为湿地多年生植物,具有典型的水生、湿生或中生特征,根系发达、生物量较大(表1)。植物功能群划分标准为植物叶形态、光合作用途径和有无固氮能力。植物栽培样方为2 m × 2 m,采用随机分组方式分布在湿地中,各处理重复次数采用非平衡设计,即栽培1个功能群的处理重复15次,栽培2或3个功能群的分别重复8次,栽培4个功能群的重复13次。另外设5个未栽培任何植物的样方作为对照,总样方数为49个(图2)。

表 1 垂直流湿地系统中使用的植物种类
Table 1 Plant species used in the vertical flow constructed wetland

物种中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	拉丁名缩写 Abbreviation	功能群 Functional group
香蒲	<i>Typha orientalis</i> Presl	To	F
千屈菜	<i>Lythrum salicaria</i> Linn.	Ly	F
白茅	<i>Imperata cylindrical</i> (Linn.) Beauv.	Ic	C4
杭子梢	<i>Campylotropis macrocarpa</i> (Bge.) Rehd.	Cm	L
马棘	<i>Indigofera pseudotinctoria</i> Mats	Ip	L
芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	Pa	C3
风车草	<i>Cyperus alternifolius</i> Linn.	Ca	F
美人蕉	<i>Canna indica</i> Linn.	Ci	F
再丽花	<i>Thalia dealbata</i>	Td	F
荻	<i>Triarrhena sacchariflora</i> (Maxim.) Nakai	Ts	C4
胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz	Lb	L
伞房决明	<i>Cassia tora</i> Linn.	Ct	L
芒	<i>Miscanthus sinensis</i> Anderss	Ms	C4
菩提子	<i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn	Sm	C4
山类芦	<i>Neyraudia montana</i> Keng	Nm	C3
斑茅	<i>Saccharu arundinaceum</i> Retz.	Sa	C4
芦竹	<i>Arundo donax</i> Linn.	Ad	C3

注 (Note): F—阔叶草本植物 Forbs; L—豆科植物 Legume species; C3— C3 植物 Graminoids; C4— C4 植物 Graminoids.

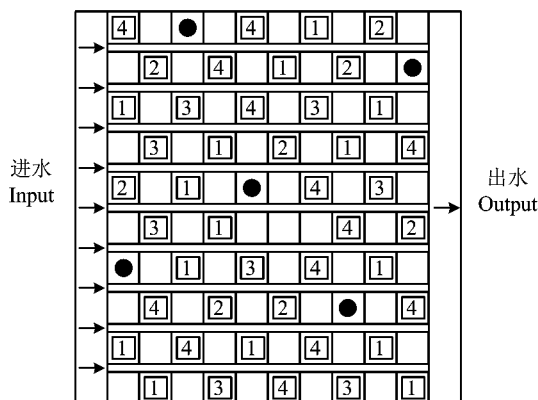


图 2 植物功能群在垂直流人工湿地中的分布

Fig. 2 Distribution of plant functional groups in the vertical flow constructed wetland

[注 (Note): 黑色实心圆点代表未栽培植物处理; 空心框代表栽培植物处理, 其中的 1, 2, 3 和 4 分别表示植物功能群数 The circle dots filled with blackness represent the treatments unplanted with plants, while the empty rectangles represent treatments planted with plants, where one, two, three and four indicates number of plant functional groups, respectively.]

2006 年 6 月,除了芦苇采用单个芽体根状茎栽培以外,所有其它植物均先在室内培养发芽,待植株长至 2~6 cm 高时,按 144 株/m² 的密度移栽培到事先划定的样方内,并在栽培初期跟踪观察植物生长情况,如果发现有萎蔫或枯死现象发生,则尽快补栽,直到满足实验要求为止。同时,为了严格控制植物功能群丰富度的梯度,在试验过程中如发现非试验植物入侵,则立即予以清除。

1.2 植物生物量分析

湿地运行 1 年后,2007 年 8 月份收集植物样品,为了尽量减小对第 2 年废水处理效果的影响,仅收集地上植物样品。在每个样方中设 3 个小样方 (35 cm × 35 cm),沿高出地面 2.5 cm 处收割植物地上部,用牛皮纸包扎后,在 65℃ 下烘干 24 小时,称重,换算成单位平方米干重。

1.3 微生物生物量分析

植物收割后,首先清除湿地填料表面的枯枝落叶,然后分别在每个样方中划分为 3 个小样方 (25 cm × 25 cm),在每个小样方中用取样铲收集上层

10—20 cm 深的填料样品 1 份(该深度为植物地下部分主要分布区),并混合成混合填料样品,过 2 mm 筛后装入封口塑料袋中。5 个处理共收集 49 个混合填料样品,立即运回实验室,进行微生物生物量分析。填料微生物生物量碳和氮分别采用氯仿熏蒸提取法进行测定^[15-16],即:称取 20 g 鲜样,放入 9 cm 的培养皿中,分别在真空干燥器中用氯仿熏蒸 24 h 和 5 d。然后分别用 0.5 mol/L K_2SO_4 和 2 mol/L KCl 进行提取。微生物生物量碳用硫酸亚铁铵(6 水)滴定,所测得的有机碳用 0.35 系数进行换算,微生物生物量碳以 $C \mu\text{g/g}$, DW 表示;微生物生物量氮用茚三酮比色法进行测定,茚三酮反应氮用 0.31 系数换算,微生物生物量氮以 HR-N $\mu\text{g/g}$, DW 表示。

1.4 填料主要营养成分分析

填料中总有机碳采用硫酸重铬酸钾溶液消煮,0.2 mol/L 硫酸亚铁滴定^[17]。 $NH_4^+ -N$ 和 $NO_3^- -N$ 含量分别用 2 mol/L KCl 溶液提取,过滤后,加显色试剂(分别为二氯异氰尿酸钠溶液和铜皮的锌粒)显色后,分别在 660 nm 和 210 nm 波长下比色测定^[6]。填料中有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提液浸提,钼锑抗比色法测定^[18]。

1.5 数据分析

数据采用 SPSS13.0 统计软件进行分析,单因素方差分析(one-way ANOVA),检验不同植物功能群丰富度处理之间植物生物量产量、微生物生物量、填料营养含量的差异(LSD, $P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 植物功能群丰富度与植物生物量的关系

植物功能群丰富度与其生物量之间表现为促进

关系(图 3)。分析表明,所有栽培植物处理的植物生物量显著高于未栽培植物的对照处理;栽培 1、2 和 3 个功能群处理的平均生物量之间没有显著差异(生物量分别 577.20、479.56 和 644.88 g/m^2 , $P > 0.05$),栽培 4 个功能群样地中的生物量显著高于以上三个样地(1208.39 g/m^2)。

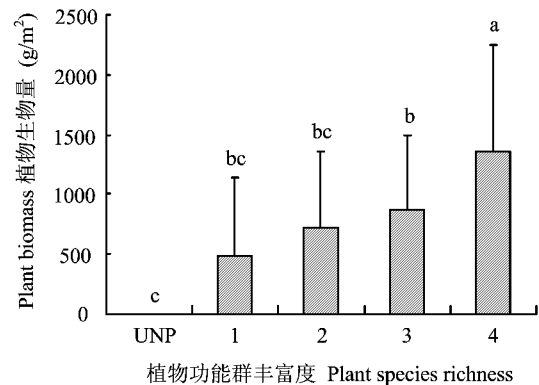


图 3 植物功能群丰富度对植物生物量产量的影响

Fig. 3 Effects of plant functional group richness on plant biomass production

[注(Note): UNP 代表未栽培植物处理

The "UNP" represents the unplanted treatment.]

2.2 植物功能群丰富度与微生物生物量的关系

从图 4 可以看出,4 个植物功能群处理下的填料微生物生物量碳(A)和氮(B)均显著高于未栽培植物的对照处理(UNP),与植物生物量的趋势一致,栽培 1、2 和 3 个功能群处理的微生物生物量碳没有显著差异,栽培 4 个功能群样地的微生物生物量碳显著高于其他处理;微生物生物量氮在栽培 2、3 和 4 个植物功能群处理之间没有显著差异。

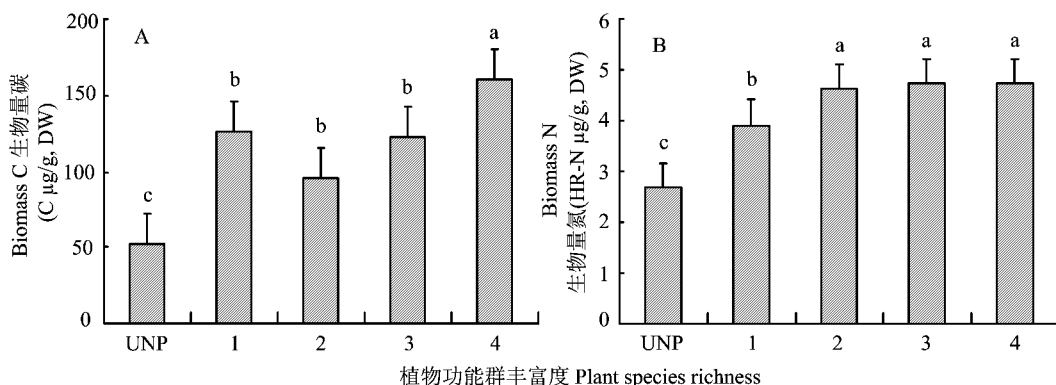


图 4 植物功能群丰富度对微生物生物量的影响

Fig. 4 Effects of plant functional group richness on microbial biomasses

[注(Note): UNP 代表未栽培植物处理 The "UNP" represents the unplanted treatment. "HR-N" 代表茚三酮反应氮

The "HR-N" represents the ninhydrin reactive nitrogen.]

2.3 植物功能群丰富度与营养滞留的关系

与未栽培植物处理相比,所有栽培植物处理下的填料有机碳和有效磷含量均没有显著变化(图 5A

和 B);栽培植物处理中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量均显著高于未栽培植物处理(图 5C 和 D),但在 4 个栽培植物处理之间没有明显差异($P > 0.05$)。

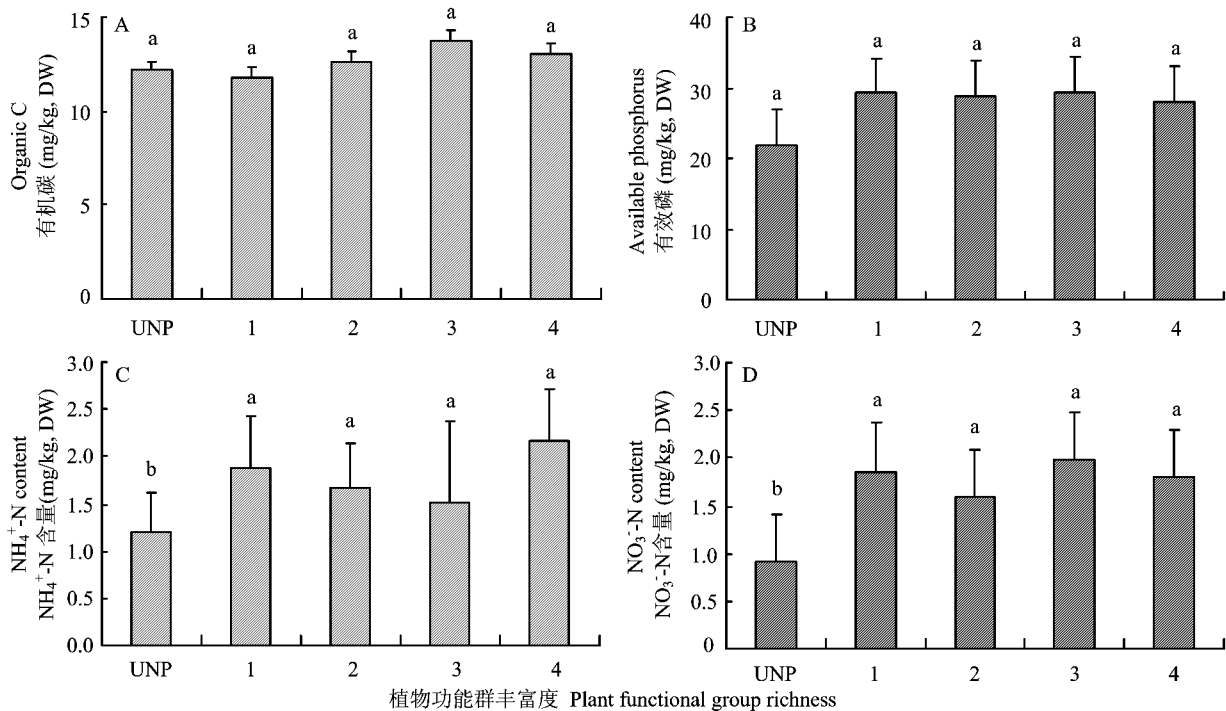


图 5 植物功能群丰富度对垂直流湿地填料营养含量的影响

Fig. 5 Effects of plant functional group richness on nutrient contents in the filter of the vertical flow constructed wetland

[注(Note): UNP 代表未栽培植物处理 The “UNP” represents the unplanted treatment.]

2.4 植物生物量、微生物生物量和营养滞留的关系

Pearson 相关分析表明:植物功能群丰富度显著影响了植物生物量、填料微生物生物量和 NO_3^- -N (表 2)。植物生物量与填料有机碳滞留呈显著正相

关,但与其它营养滞留相关不显著。微生物生物量碳分别与 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 滞留呈显著正相关,但微生物生物量氮与任何营养滞留没有明显的相关性。

表 2 不同参数之间的相关系数 (r)

Table 2 Coefficients between different parameters

项目 Item	PFGR	PB	MBC	MBN	OC	NH_4^- -N	NO_3^- -N	AP
PFGR	1							
PB	0.553 **	1						
MBC	0.531 **	0.148	1					
MBN	0.364 *	0.274	0.137	1				
OC	0.166	0.287 *	0.143	0.035	1			
NH_4^- -N	0.237	0.113	0.429 **	0.113	-0.05	1		
NO_3^- -N	0.328 *	0.190	0.407 **	0.124	0.089	0.326 *	1	
AP	0.063	0.024	0.011	0.021	0.336 *	0.160	0.191	1

注(Note): PFGR—植物功能群丰富度 Plant functional group richness; PB—植物生物量 Plant biomass; MBC—微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN—微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen; OC—有机碳 Organic carbon; AP—有效磷 Available phosphorus.

3 讨论

来自陆地生态系统的研究表明,植物多样性和系统生产力之间的关系主要包括以下几种模式:正的、负的、U形的以及没有关系^[19-21]。我们的研究表明:在废水载荷量一致的基础上,垂直流湿地中的植物功能群丰富度与其生物量产量呈显著正相关,因而证实了植物多样性和系统生产力之间的促进关系。产生这种促进关系的主要原因可能来自于两个方面:一是含有较高浓度营养的废水灌溉可能消除了植物功能群之间对营养的竞争,另一方面也可能得益于植物功能群之间对废水营养的补偿性利用。这与 Engelhardt 和 Ritchie^[10]的研究不同,他们采用微宇宙垂直流湿地检验了植物种类丰富度与其生物量的关系,结果表明植物种类丰富度与其植物枝条生物量没有显著促进关系,他们认为可能与取样差异有关(即随着植物种类丰富度的提高,具有较小生产力的物种被选择的机会较大。然而我们的结果与 Sirianuntapiboon 和 Jitvimolnimit^[11]的研究结果一致。他们研究了潜流人工湿地植物种类丰富度(每个处理分别含有 0、1 和 2 个种类)与废水处理效率的关系,结果表明,含两个种类的处理具有较高的植物生物量产量。

在营养资源有限的陆地土壤生态系统中,植物多样性对土壤微生物生物量的影响也存在着不同的争议,如有些学者认为植物多样性对土壤微生物生物量具有明显影响^[2, 22],而另外一些研究则表明植物多样性或生产力对土壤微生物群落结构或生物量影响较小^[14, 23]。在我们的垂直流湿地研究中,微生物生物量碳和氮均随着植物功能群丰富度的提高而显著提高,并且与地上植物生物量产量呈极显著正相关。这可能由于植物功能群丰富度主要影响进入根区的植物凋落物的质量(包括 C/N、磷含量等),而植物凋落物质量上的差异会更大程度地影响土壤中微生物群落的丰富度、活性和组成^[14]。另外,湿地填料中的 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 含量的提高可能也是一个重要的影响因素,因为相关分析表明微生物生物量碳分别与湿地填料中的 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 含量呈显著正相关。然而,微生物生物量氮却与任何湿地填料营养含量没有显著的相关性,具体原因还须进一步探讨。

通过对营养吸收或根系吸附,湿地植物显著地影响着废水中的营养滞留,尤其对氮和磷的滞留^[4]。在本研究中,植物功能群丰富度显著地影响

了 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 在湿地填料中的滞留,这可能与植物根系对两种营养成分的过滤吸附和吸收有关,尤其是根系的吸收可能是主要因素,因为枯死的根系会滞留在填料中^[24]。然而,植物功能群丰富度并没有显著地影响有效磷的滞留,这可能与磷的滞留机理有关,因为磷在湿地中的滞留主要是以化学沉淀和填料吸附为主^[25]。值得注意的是,植物功能群丰富度影响了植物地上生物量,但没有显著地影响湿地填料中的有机碳积累,这可能与植物功能群丰富度仅仅是表明植物的多样化程度,并非代表植物向填料的物质输入量有关^[3],我们的结果也部分证实了 Hunter 等^[26]的研究,即湿地填料中的有机碳在栽培与未栽培植物处理之间没有显著差异。然而,植物地上生物量却与湿地填料中的有机碳含量呈正相关,这可能与植物凋落物在填料中占优势积累有关。

总之,本研究表明,植物功能群丰富度显著影响了植物生物量、填料微生物生物量、 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 的滞留,因而在未来人工湿地设计中,植物功能群丰富度将是一个需要考虑的重要参数。

参考文献:

- [1] 吴振斌,成水平,贺锋,等. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京:科学出版社,2008.
Wu Z B, Cheng S P, He F *et al.* Integrated vertical flow constructed wetlands [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] Zhang C B, Wang J, Liu W L *et al.* Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland[J]. *Ecol. Eng.*, 2010, 36: 62-68.
- [3] Zhang C B, Wang J, Liu W L *et al.* Effects of plant diversity on nutrient retention and enzyme activities in a full-scale constructed wetland[J]. *Bioresour. Technol.*, 2010, 101: 1686-1692.
- [4] Silvan N, Vasander H, Laine J. Vegetation is the main factor in nutrient retention in a constructed wetland buffer[J]. *Plant Soil*, 2004, 258: 179-187.
- [5] Caravaca F, Alguacil M M, Torres P *et al.* Plant type mediates rhizospheric microbial activities and soil aggregation in a semiarid Mediterranean salt marsh[J]. *Geoderma*, 2005, 124: 375-382.
- [6] Keeney D R, Nelson D W. Nitrogen: Inorganic forms [A]. Page AL. *Methods of soil analysis, Part 2 (2nd Ed.)*, Agronomy monograph 9[M]. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982, WI: 643-698.
- [7] Ahn C, Gillevet P M, Sikaroodi M. Molecular characterization of microbial communities in treatment microcosm wetlands as influenced by macrophytes and phosphorus loading[J]. *Ecol. Indic.*, 2007, 7: 852-863.
- [8] DeJournett T D, Arnold W A, LaPara T M. The characterization and quantification of methanotrophic bacterial populations in con-

- structed wetland sediments using PCR targeting 16S rRNA gene fragments[J]. *Appl. Soil Ecol.*, 2007, 35: 648–659.
- [9] Tietz A, Kirschner A, Langergraber G *et al.* Characterisation of microbial biocoenosis in vertical subsurface flow constructed wetlands[J]. *Sci. Total Environ.*, 2007, 380: 163–172.
- [10] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services [J]. *Nature*, 2001, 411: 687–689.
- [11] Sirianuntapiboon S, Jitvimolnimit S. Effect of plantation pattern on the efficiency of subsurface flow constructed wetland (SFCW) for sewage treatment[J]. *Afr. J. Agri. Res.*, 2007, 2: 447–454.
- [12] Zhu S X, Ge H L, Ge Y *et al.* Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland [J]. *Ecol. Eng.*, 2010, 36: 1307–1313.
- [13] Spehn E M, Joshi J, Schmid B *et al.* Plant diversity effects on soil heterotrophic activity in experimental grassland ecosystems [J]. *Plant Soil*, 2000, 224: 217–230.
- [14] Milcu A, Patsch S, Langel R *et al.* The response of decomposers (earthworms, springtails and microorganisms) to variations in species and functional group diversity of plants [J]. *Oikos*, 2006, 112: 513–524.
- [15] Sparling G P, West A W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labeled cells[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1988, 20: 337–343.
- [16] Amato M, Ladd J N. Assay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soils [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1988, 20: 107–114.
- [17] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter [A]. Page A L. *Methods of soil analysis, Part 2* (2nd Ed.), Agronomy monograph 9[M]. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982, WI: 539–579.
- [18] Bray R H, Kurtz L T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil[J]. *Soil Sci.*, 1945, 59: 39–45.
- [19] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability [J]. *Ecology*, 1996, 77: 350–363.
- [20] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. *Nature*, 2007, 448: 188–191.
- [21] Gjerde I, Sætersdal M, Rolstad J *et al.* Productivity-diversity relationships for plants, bryophytes, lichens, and polypore fungi in six northern forest landscapes[J]. *Ecography*, 2005, 28: 705–720.
- [22] Liu Z F, Liu G H, Fu B J *et al.* Relationship between plant species diversity and soil microbial functional diversity along a longitudinal gradient in temperate grasslands of Hulunbeir, Inner Mongolia, China[J]. *Ecol. Res.*, 2008, 23: 511–518.
- [23] Ladygina N, Hedlund K. Plant species influence microbial diversity and carbon allocation in the rhizosphere [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2010, 42: 162–168.
- [24] Mugisha P, Kansiime F, Mucunguzi P. Wetland vegetation and nutrient retention in Nakivubo and Kirinya wetlands in the Lake Victoria basin of Uganda[J]. *Phys. Chem. Earth*, 2007, 32: 1359–1365.
- [25] Braskerud B C. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. *Ecol. Eng.*, 2002, 19: 41–61.
- [26] Hunter R G, Combs D L, George D B. Nitrogen, phosphorous, and organic carbon removal in simulated wetland treatment systems[J]. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2001, 41: 274–281.