

微曝气生态浮床水芹吸收 N、P 的特性及其对系统去除 N、P 贡献的研究

李海英^{1,2}, 李文朝¹, 冯慕华¹, 潘继征¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对污染河水黑臭缺氧、 NH_4^+-N 含量高等问题, 研发了一种“漂浮载体悬挂弹性生物膜填料+水生植物并辅以人工微曝气系统”的微曝气生态浮床系统, 以漂浮植物水芹为例研究了系统中水芹对 N、P 的吸收特性和去除作用。结果表明, 随着水芹的生长, 其生物量干重显著增加, 生长 80 d 左右时总生物干重在 $2\ 497.2\sim 3\ 144.4\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 上、下部生物量比平均为 13.4。不同部位水芹 N、P 的含量不同, 总的趋势为含 N 量叶>根>茎, 含 P 量茎>根>叶。不同生长时间水芹 N、P 含量及其吸收速率不同, 随着水芹的生长, 组织内 N、P 含量逐渐降低, N 的吸收速率总趋势为 $60\sim 80\ \text{d}>35\sim 60\ \text{d}>1\sim 35\ \text{d}$, P 的吸收速率总趋势为 $35\sim 60\ \text{d}>1\sim 35\ \text{d}>60\sim 80\ \text{d}$ 。而随着水芹的生长, 吸收 N、P 的总量却在逐渐增加, 吸收 N 的总量从 $17.69\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $61.66\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 吸收 P 的总量从 $4.99\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $13.55\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 这主要取决于自身的生物量和 N、P 的含量。水芹对 N、P 的积累主要集中在上部, 分别占 N、P 吸收总量的 92.2%~93.4%、92.5%~93.1%。水芹生长 35、60、80 d 时, 吸收 N 量占系统 TN 去除量的比率分别为 4.50%、6.06% 和 6.87%, 水芹对 P 的吸收量分别占系统去除 P 总量的 18.53%、26.82%、22.00%。水芹对 N、P 的吸收仅是微曝气生态浮床净化系统去除 N、P 的一个途径, 但水芹根际微生物的作用不可忽视。

关键词: 微曝气生态浮床; 水芹; N、P 吸收量; 吸收特性; 去除贡献

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)09-1908-06

Characteristics and Contribution of *Oenanthe javanica* Uptake to Nitrogen and Phosphorus Removal Based on a Micro-aerated Ecological Floating Bed

LI Hai-ying^{1,2}, LI Wen-chao¹, FENG Mu-hua¹, PAN Ji-zheng¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A micro-aerated ecological floating bed system was developed to mitigate the negative influences of black-odor, oxygen deficiency and high concentration of ammonia-nitrogen in polluted river systems. The system was comprised mainly by biofilm packing, floating aquatic macrophyte and auxiliary aeration device. Taking *Oenanthe javanica* as an example of water plant, the characteristics and contribution of its uptake to nitrogen (N) and phosphorus (P) removal in the system were studied in a period of 80 days in situ. Significant growth of the plant *Oenanthe javanica* was observed with total biomass (dry weight) ranging from $2\ 497.2\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ to $3\ 144.4\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, and a biomass ratio of 13.4 between above water and underwater part at the end of the study. Different concentrations of N and P were found in different parts of *Oenanthe javanica* with the following orders: leaf>root>stem for N and stem>root>leaf for P respectively. The uptake rates for N or P were demonstrated highly dynamic in different growth periods with general trends: $60\sim 80\ \text{d}>35\sim 60\ \text{d}>1\sim 35\ \text{d}$ for N and $35\sim 60\ \text{d}>1\sim 35\ \text{d}>60\sim 80\ \text{d}$ for P respectively. However, the total uptake of N and P by *Oenanthe javanica* was increased gradually. Total N uptake increased from $17.69\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ to $61.66\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ and total P from $4.99\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ to $13.55\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ from the start to the end of the experiment, which was mainly depended on biomass of the plant and concentrations of N and P in the respective tissues. Most N and P were enriched in the above water part, which accounted for 92.2%~93.4% and 92.5%~93.1% of total N and P uptake, respectively. The uptake of N by *Oenanthe javanica* accounted for 4.50%, 6.06% and 6.87% of total N removal of the system at the days of 35, 60, and 80 d of the experiment, while the uptake of P accounted for 18.53%, 26.82% and 22.00% of total P removal in the system at respective sampling days. This study suggested that *Oenanthe javanica* uptake was not

收稿日期: 2009-01-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2005AA60101004, 2006AA06Z325) 国家 973 计划资助项目(2008CB418005)

作者简介: 李海英(1978—), 女, 山东高密人, 博士研究生, 主要从事湖泊生态与环境工程方面的研究。E-mail: hylh78@163.com

the main mechanism for TN and TP removal in the system and rhizosphere bacteria *Oenanthe javanica* might play an important role in N removal of the system.

Keywords micro-aerated ecological floating bed; *Oenanthe javanica*; nitrogen and phosphorus uptake; uptake characteristics; removal contribution

滇池是我国污染问题比较严重的高原浅水湖泊,地处昆明市下游,由于人口激增和工农业生产的发展,越来越多的城市污水和农业污水通过入湖河道源源不断地流进湖泊。这些入湖河流污染严重,水体中 NH_4^+-N 含量高,长期黑臭缺氧,成为滇池的重要污染源。为了改善湖泊水环境,控制入湖河流污染是削减湖泊污染负荷的重要方面。而利用河道或河口区水面建设生态工程,过滤净化入湖河水,是控制湖泊污染的重要途径之一,越来越受到国内外的关注。

浮床技术作为改善富营养化水体水质的有效方法之一,因其运行、管理简便并且能直接从水体中去除污染物等优点^[1-2],在国内外的研究和应用中日益增多^[3-5]。但是传统的生物浮床技术主要依靠浮床上种植的植物吸收 N、P 等营养物和有机物,由于受季节和浮床植物量的限制,对于漂浮植物来说它只利用表层水体,其净化效果很难进一步提高^[6-7]。因此,我们提出一种微曝气生态浮床工艺,采用“漂浮载体悬挂弹性生物膜填料+漂浮植物结构并辅以人工微曝气系统”,对黑臭缺氧、 NH_4^+-N 污染严重的重污染河水进行原位水质净化,水生植物是该系统重要组成部分之一。

以往的研究表明,水芹(*Oenanthe javanica*)可以有效地去除污水中的 N、P^[8-9],但有关水芹在净化系统中的研究主要涉及污水的净化效果,针对水芹的累积 N、P 特性及其对污水 N、P 的吸收能力和去除作用的研究较少,而水芹喜冷凉,昆明地区全年气温不高,正适宜其生长。因此本研究微曝气生态浮床系统选用水芹,在了解系统净化效果的基础上,着重研究水芹吸收 N、P 的特性及其对系统去除 N、P 的贡献,以期水芹在微曝气生态浮床净化系统中的应用以及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验场地

试验地点位于昆明市大清河河口东侧福保文化城六口土埂池塘中的 1 号池塘,具体位置如图 1 箭头所示,面积约为 6 175 m^2 ,水深 2 m 左右。大清河是昆明主城区盘龙江以东主要的排污河道,同时也是重要的行洪河道,最终流入滇池。大清河是滇池众多入湖

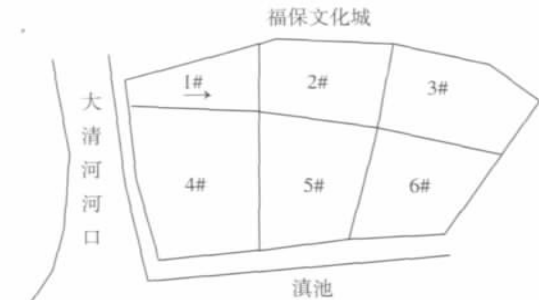


图 1 实验区位置

Figure 1 Location of the experiment

河道中的一条典型河道,由于生活污水和城市、农村面源的影响,大清河水质污染严重,长期处于黑臭状态。经往年监测数据可知,其水质长期劣于地表水环境质量标准(GB 3838—2002) 类。

1.2 微曝气生态浮床设计

微曝气生态浮床系统采用“漂浮载体悬挂弹性生物膜填料+漂浮植物结构,并辅以人工微曝气系统”(图 2)。在“田”字形框架上面附着不锈钢丝网格(15 $\text{cm} \times 15 \text{ cm}$),四角以塑料浮球承载,浮球颈向上,通过灌水调节框架高度。在钢丝网架上悬挂 YDT 弹性立体填料(规格:直径 15 cm ,长度 1.5 m),将顶端系于网格交点上,下端系以沉子以保持伸展。

漂浮植物选用水芹,插播在网架上让其自然生长。曝气系统由主管+支管+沙芯曝气头组成,支管在水中的深度与弹性生物膜填料的悬挂深度相同,用风机提供动力在模型底部进行连续曝气。

1.3 系统运行与进水水质

系统进水口在 1# 池塘西侧池埂处,出水管靠近

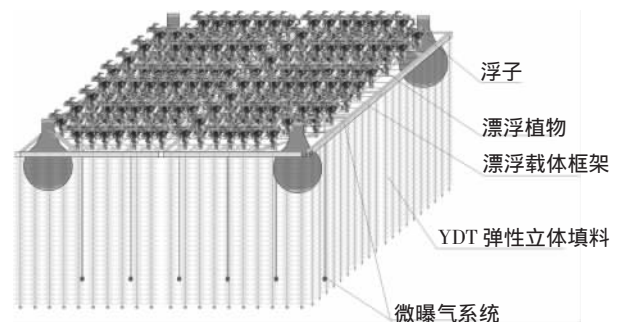


图 2 微曝气生态浮床单元示意图

Figure 2 Schematic diagram of the micro-aerated ecological floating bed

1# 池塘东侧池埂,从进水口到出水集水管的距离约为 119 m。从进水口到出水口,微曝气生态浮床单元排成若干排,每排间隔约 1.5 m,浮床总面积为 2 700 m²,覆盖率为 43.7%。实验所用水芹取自云南澄江县马料河构造湿地,将幼芽插播在漂浮载体网格内。水芹生长 80 d 左右进行收获,接着下一茬生长。

系统启动过程采用自然挂膜,常规运行时每天进水量约 6 400 m³,气水比范围为 0.12:1~0.19:1,曝气时不会扰动下层底泥。本实验于 2007 年 6 月开始,至 2007 年 9 月结束。

试验期间进水水质指标和污水 N、P 输入量见表 1,平均水温为(16.5±3.6)℃,pH 为 7.93±0.44,进水的的水质波动较大,主要污染物为有机物和 NH₄⁺-N,进水 NH₄⁺-N 平均为总 N 含量的 85%;水体中 DO 浓度通常都低于 0.5 mg·L⁻¹。

1.4 采样与分析

每周两次采集进、出水水样进行水质分析,所有水质指标的监测采用国家标准方法^[10]。

水芹样品:采样区域为系统的进水端、中部和出水端,每个区域随机选 3 个样方,每个样方的大小为 1 m×1 m。观察水芹的长势,测定其生物量,并从每个样方中随机选取长势基本一致的水芹若干株带回实验室处理和分析,测定干物质、全 N、全 P 含量^[11]。

微生物:在现场,用灭过菌的剪刀、镊子将上述样方中有代表性的水芹根系剪下放置于灭过菌的采样罐中,立即带回实验室进行接种培养。每采一个样都要用酒精对器皿进行消毒。在无菌条件下分别将样品悬液稀释成不同的稀释度接种,培养基分别为牛肉膏基础培养基、亚硝酸细菌培养基、硝酸细菌培养基、有机磷培养基和无机磷培养基,于恒温培养箱中培养^[12]。

数据的统计分析采用 SPSS version 11.5 统计软件(SPSS Inc., Standard Version)进行。

2 结果

2.1 水芹的生长情况

2.1.1 水芹的增长速率

试验期间,水芹生长旺盛,根系发达,须根分枝和根毛多,而且能分蘖更多的水芹茎秆,系统内不同生

长时期水芹生物量增长情况如表 2 所示。1~35 d,水芹生物量干重的增长速率为 16.1 g·m⁻²·d⁻¹,35~60 d 生物量增长速率为 36.6 g·m⁻²·d⁻¹,60~80 d 平均增长速率为 76.2 g·m⁻²·d⁻¹。可见不同时期水芹生物量的增长速率有所不同。

表 2 系统内水芹生物量干重的增长速率
Table 2 Growth complexion of *Oenanthe javanica*

生长时期/d	水上部生物量/ g·m ⁻² ·d ⁻¹	水下部生物量/ g·m ⁻² ·d ⁻¹	总生物量/ g·m ⁻² ·d ⁻¹
1~35	14.8±5.2 c	1.3±0.2 b	16.1±5.3 c
35~60	34.2±14.3 b	2.4±0.4 b	36.6±14.2 b
60~80	71.1±22.7 a	5.2±1.6 a	76.2±22.6 a

注:表中小写字母表示同一列进行比较,代表 95%的显著水平。

2.1.2 生物量及分配

生长 80 d,水芹总生物量干重在 2 497.2~3 144.4 g·m⁻²之间,其中水上部生物量干重平均为 2 795.4 g·m⁻²,水芹上、下部生物量之比平均为 13.4。通过表 3 分析可见,进水端水芹的总生物量干重比中部和出水端的生物量略高,但没有显著性差异,系统内水质的变化对水芹的生物量没有显著影响。

表 3 生长 80 d 的水芹生物量干重
Table 3 Biomass(dry weight) of the *Oenanthe javanica*
growing 80 days

采样位置	水上部生物量/ g·m ⁻²	水下部生物量/ g·m ⁻²	总生物量/ g·m ⁻²	水上/水下
进水端	2 923.1±102.7 a	221.2±42.2 a	3 144.4±133.6 a	13.2
中部	2 826.1±176.9 a	204.4±20.4 a	2 497.2±968.7 a	13.8
出水端	2 636.9±152.6 a	199.2±11.6 a	2 836.1±152.7 a	13.2

2.2 水芹的吸收特性

2.2.1 水芹不同部位 N、P 的含量

以生长 60 d 的水芹为例,于系统进水端、中部和出水端 3 个位置取样,分别测定了水芹叶、茎和根部 N、P 浓度。由表 4 可见,该系统内水芹不同部位含 N、P 量不同:叶的含 N 量显著高于茎的含量,水芹各部位含 N 量总的趋势为叶>根>茎;各部位含 P 量总的趋势为茎>根>叶,茎的含 P 量显著高于根和叶的含量,根的含 P 量高于叶。已有研究表明不同植物种类以及同一植株不同部位的 N、P 含量各不相同。贺锋

表 1 实验期间进水水质状况

Table 1 The influent wastewater characteristics during experiment

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TP	SS
浓度/mg·L ⁻¹	124.71±40.37	48.73±19.14	14.82±7.18	10.93±7.24	0.23±0.42	0.10±0.13	0.99±0.37	76.76±32.26
负荷/g·m ⁻² ·d ⁻¹	129.25±41.84	50.51±19.84	14.49±7.75	11.33±7.50	0.24±0.43	0.10±0.14	1.03±0.39	79.56±33.43

等^[13]利用复合垂直流人工湿地处理武汉东湖污染水体的研究结果显示,美人蕉体内 N 的分布为叶>根>茎,菖蒲表现为叶>地下部位;陈桂珠等^[14-15]的研究显示秋茄各器官的 N 含量顺序为叶>茎>根>胚轴, P 含量的顺序为叶>根>茎>胚轴。

通过对进水端、中部和出水端 3 个区域水芹样品的分析,可以看出 3 个区域生长的水芹体内 N、P 的积累并没有显著性差异,系统内进、出水水质的差异对水芹 N、P 的积累并没有显著影响。

本研究还测定了生长 35 和 80 d 的水芹各部位及其在净化系统不同位置 N、P 的含量,基本趋势同 60 d。

2.2.2 不同生长时期水芹体内 N、P 的含量

不同生长天数水芹体内 N、P 的含量见表 5,生长 35 d 左右时,上部(茎、叶的混合样品)N、P 的平均含量分别为 31.51 和 9.04 g·kg⁻¹,水下部 N、P 平均含量分别为 30.37 和 8.37 g·kg⁻¹;生长 80 d 左右时,水上部 N、P 的平均含量分别为 20.34 和 4.50 g·kg⁻¹,水下部 N、P 平均含量分别为 23.21 和 4.58 g·kg⁻¹。不同生长时间水芹 N、P 的含量不同,植株开始衰老时体内 N、P 含量相对较低。

2.2.3 不同生长期水芹吸收 N、P 的速率

依据水芹的生物量干重、体内 N、P 含量和相对生长天数,计算不同生长时期水芹体内 N、P 的吸收速率(表 6)。结果表明,不同生长时期水芹吸收 N、P 的速率不同,水芹上、下部 N 的吸收速率总的趋势为 60~80 d>35~60 d>1~35 d,随着水芹的生长,其对 P 的吸收速率加快,然后又减慢,植株 P 的吸收速率总的趋势为 35~60 d>1~35 d>60~80 d。

2.3 水芹对净化系统去除 N、P 的贡献

2.3.1 水芹对 N、P 的吸收量

依据上、下部分生物量干重和各组织内 N、P 的含量,计算水芹上部和下部 N、P 吸收量,并相加求得植株的 N、P 吸收总量(表 7)。生长 35、60 和 80 d 左右时,水芹吸收 N 的总量分别为 17.69、40.81 和 61.66 g·m⁻²,吸收 P 的总量为 4.99、12.39、13.55 g·m⁻²。这一期间,随着水芹的生长,吸收 N、P 的总量逐渐增加。由表 7 还可见,上部的 N、P 吸收量远远高于下部,上部的 N、P 吸收量分别占 N、P 吸收总量的 92.2%~93.4%、92.5%~93.1%,水芹对 N、P 的积累主要集中在上部。

表 4 水芹不同部位 N、P 的含量(以生长 60 d 为例)

Table 4 Nitrogen and phosphorus concentrations in different parts of *Oenanthe javanica*(growing 60 days)

取样位置	TP/g·kg ⁻¹			TN/g·kg ⁻¹		
	叶	茎	根	叶	茎	根
进水端	7.08±0.29 a C	10.80±0.82 a A	8.41±0.17 a B	32.04±3.22 a A	21.07±2.30 a B	27.45±1.05 a A
中部	6.41±0.49 a C	10.02±0.54 a A	8.06±0.40 a B	34.74±2.50 a A	20.90±2.01 a B	25.80±4.56 a B
出水端	6.58±0.49 a C	9.97±0.48 a A	8.14±0.42 a B	30.76±2.46 a A	22.76±1.59 a B	24.72±0.88 a B

注:小写字母表示同一列进行比较,大写字母表示每一指标同一行进行比较,都代表 95%的显著水平。

表 5 不同生长时期水芹 N、P 的含量

Table 5 N and P concentrations of *Oenanthe javanica* at different growing stages

生长天数/d	水上部含量/g·kg ⁻¹		水下部含量/g·kg ⁻¹	
	N	P	N	P
35	31.51±1.56 a	9.04±0.88 a	30.37±0.84 a	8.37±0.22 a
60	27.70±0.40 b	8.42±0.28 a	25.99±1.38 b	8.21±0.19 a
80	20.34±1.52 c	4.50±0.65 b	23.21±1.63 b	4.58±0.15 b

表 6 不同生长时期水芹 N、P 吸收速率的比较

Table 6 Nitrogen and phosphorus accumulation rates of *Oenanthe javanica* at different growing stages

生长时期	相对天数	水上部吸收速率/g·m ⁻² ·d ⁻¹		水下部吸收速率/g·m ⁻² ·d ⁻¹	
		N	P	N	P
1~35 d	35	0.466±0.134 a	0.132±0.030 b	0.039±0.005 b	0.011±0.001 b
35~60 d	25	0.871±0.095 a	0.277±0.023 a	0.054±0.004 b	0.019±0.001 a
60~80 d	20	0.956±0.540 a	0.053±0.095 c	0.106±0.033 a	0.006±0.005 b

表 7 水芹对 N、P 的吸收量

Table 7 N and P uptake by the *Oenanthe javanica*

取样位置	P/g·m ⁻²			N/g·m ⁻²		
	水上部吸收量	水下部吸收量	总吸收量	水上部吸收量	水下部吸收量	总吸收量
35 d	4.62±1.03 b	0.38±0.05 b	4.99±1.07 b	16.32±4.70 c	1.37±0.17 c	17.69±4.84 c
60 d	11.53±1.60 a	0.86±0.05 a	12.39±1.63 a	38.10±6.60 b	2.72±0.06 b	40.81±6.64 b
80 d	12.59±2.04 a	0.96±0.08 a	13.55±2.11 a	56.82±4.27 a	4.85±0.61 a	61.66±4.72 a

2.3.2 系统对污染河水 N、P 的去除

系统去除污染河水 TN、TP 的效果见表 8。出水 TN 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的平均浓度分别为 3.16 和 $1.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率分别为 77.4% 、 84.7% ，对 TP 的平均去除率为 75.1% 。对有机物亦有较强的去除能力，出水 COD_Cr 平均浓度为 $34.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微曝气生态浮床系统对有机物、N 和 P 都有较高的去除效率，并且在进水水质不断变化的情况下去除效果比较稳定。试验期间，系统 TN 和 TP 的去除负荷分别为 11.22 和 $0.77 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

表 8 系统出水水质与净化效果

Table 8 Concentration and removal rate of the effluent

指标	出水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均去除率/%	去除负荷/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
TN	3.16 ± 1.42	77.4	11.22 ± 6.56
TP	0.25 ± 0.14	75.1	0.77 ± 0.28
$\text{NH}_4\text{-N}$	1.67 ± 1.47	84.7	9.60 ± 6.49
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.10 ± 0.16	-	-
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.54 ± 0.60	-	-
COD_Cr	34.35 ± 19.93	72.5	93.65 ± 45.99

2.3.3 水芹吸收对污染河水 N、P 去除的贡献

水芹生长 35、60、80 d 时，吸收 N 的总量对微曝气生态浮床净化系统 TN 去除量的贡献分别为 4.50% 、 6.06% 和 6.87% ，见表 9；随着水芹的生长，其吸收 N 量对系统去除 N 的贡献有增高的趋势；水芹对 N 的吸收作用仅是净化系统 N 去除的一个途径，而微生物的硝化、反硝化作用才是该系统去除 N 的主要机制。

生长 35 d 时，水芹吸收 P 的总量占系统去除 TP 量的 18.53% ；在 60 d 左右，比率增高为 26.82% ；生长 80 d 左右，吸收 P 的总量占系统 TP 去除量的 22.00% 。净化系统中水芹吸收对系统除 P 的贡献有先增高然后又降低的趋势，同时还表明，水芹对 P 的吸收作用仅是系统除 P 的一个途径，该系统内去除 P 的主要机制为基质的吸附和沉淀作用而非水芹的吸收作用。

2.3.4 水芹根际微生物的数量

在系统进水端、中部和出水端 3 个区域采集水芹

表 9 植物吸收作用对净化系统中 N、P 的去除贡献

Table 9 Contribution of plant uptake to TN and TP removal in the treatment system

生长 时间/d	TN 占去除量的比率/%			TP 占去除量的比率/%		
	水上部	水下部	总量	水上部	水下部	总量
35	4.16 ± 1.20	0.35 ± 0.04	4.50 ± 1.23	17.13 ± 3.83	1.40 ± 0.17	18.53 ± 3.99
60	5.66 ± 0.98	0.40 ± 0.01	6.06 ± 0.99	24.96 ± 3.47	1.86 ± 0.11	26.82 ± 3.53
80	6.33 ± 0.48	0.54 ± 0.07	6.87 ± 0.53	20.45 ± 3.31	1.55 ± 0.14	22.00 ± 3.43

根系样品分析其微生物的数量。结果表明(表 10) 水芹根际异养菌、氨化菌和亚硝酸盐氧化菌的数量都为 $10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ ，硝化菌与异养菌数量处于同一个数量级；有机磷细菌、无机磷细菌数量分别为 $10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表 10 水芹根际细菌的数量

Table 10 Rhizosphere bacteria amount of *Oenanthe javanica*

培养基类型	进水端	中部	出水端
牛肉膏基础培养基/ $\times 10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	7.3 ± 5.6	6.9 ± 5.9	6.8 ± 6.8
亚硝酸细菌培养基/ $\times 10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	5.4 ± 6.1	5.5 ± 5.1	5.8 ± 5.8
硝酸细菌培养基/ $\times 10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	1.7 ± 1.3	2.2 ± 1.6	2.7 ± 3.7
有机磷培养基/ $\times 10^7 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	4.8 ± 5.2	3.7 ± 3.2	5.1 ± 5.3
无机磷培养基/ $\times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$	4.6 ± 6.4	4.5 ± 3.7	5.1 ± 5.0

3 讨论

本研究显示，随着水芹的生长其生物量干重迅速增加，但不同生长时间水芹生物量干重增加速率、植株体内 N、P 含量和对 N、P 的吸收速率存在着差异：随着水芹的生长，生物量干重增加速率越来越高，但体内 N、P 含量却逐渐降低，吸收 N 的速率逐渐增加，而对 P 的吸收速率先升高然后降低。进一步说明由于生长阶段不同，植物的生长速率及代谢功能也不同，从而导致植物对 N、P 吸收的变化^[16]。

植物的吸收作用被一些学者认为是植物浮床系统和人工湿地去除 N、P 等污染物的主要途径^[17-18]。在该净化系统中，水芹吸收对系统除 N 的贡献很小，不到系统总去除量的 10% ，因此微生物的硝化、反硝化作用才是该系统去除 N 的主要机制；不同生长时期水芹吸收对系统除 P 的贡献为 $18.53\%\sim 26.81\%$ 之间。但这并不能忽视水芹在系统中的作用。水生植物另一个功能是它的根区为微生物的生存及其降解营养物质提供了必要的场所和好氧、厌氧条件^[19-21]。微曝气生态浮床净化系统中，不仅 YDT 弹性立体填料上生物膜中有大量的微生物，而且水芹根际也有大量的异养菌，硝化菌、亚硝化菌的数量也很高，与异养菌同在一个数量级(表 10)，这是系统去除氮的又一个途径。

4 结论

不同生长时期水芹生物量的增长速率呈显著性差异，不同生长时间水芹体内 N、P 的含量也不相同，植株开始衰老时体内 N、P 含量相对较低；其对 N、P 的积累主要集中在上部，分别占 N、P 吸收总量的

92.2%~93.4%、92.5%~93.1%。

水芹不同部位 N、P 含量总的趋势为 :N 含量叶>根>茎, P 含量则为茎>根>叶。净化系统中不同位置水芹总生物量和 N、P 的积累量并没有显著性差异。

水芹对 N、P 的吸收仅是微曝气生态浮床净化系统去除 N、P 的一个途径,其生长 35~80 d 时,吸收 N 量占系统 TN 去除量的比率为 4.50%~6.87%,水芹对 P 的吸收量占系统去除 P 总量的 18.53%~26.82%。但水芹根际有大量的异养菌、硝化菌和磷细菌,因此其根际微生物的作用不可忽视。

参考文献:

- [1] Li W, Friedrich R. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 90: 9-15.
- [2] Sooknah R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed manure wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22: 27-42.
- [3] 李英杰, 年跃刚, 胡社荣, 等. 生态浮床对河口水质的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(11): 60-63.
LI Ying-jie, NIAN Yue-gang, HU She-rong, et al. Purification effect of ecological floating bed on water quality of an estuary[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 60-63.
- [4] Monnet F, Vaillant N, Hitmi A, et al. Treatment of domestic wastewater using the nutrient film technique(NFT) to produce horticultural roses[J]. *Water Research*, 2002, 36(4): 3489-3496.
- [5] Hamersley R M, Howes L B, White S D, et al. Nitrogen balance and cycling in an ecologically engineered septage treatment system[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 18: 61-75.
- [6] Browning K, Greenway M. Nutrient removal and plant biomass in a subsurface flow constructed wetland in Brisbane, Australia[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(5): 183-189.
- [7] Langergraber G. The role of plant uptake on the removal of organic matter and nutrients in subsurface flow constructed wetlands: a simulation study[J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(9): 213-223.
- [8] 王旭明, 匡晶. 水芹菜对污水净化的研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(1): 34-35.
WANG Xu-ming, KUANG Jing. Study on polluted water purification with *Oenanthe javanica*[J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(1): 34-35.
- [9] 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2000(1): 99-102.
YOU Wen-hui, LIU Shu-yuan, QIAN Xiao-yan. A study on polluted water body purification with economical aquatic plants[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2000(1): 99-102.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Standard methods for the examination of water and wastewater (forth edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
LU Ru-kun. Methods of soil and agriculture chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Microbiological Research Department, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods for studying soil microbial[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [13] 贺锋, 吴振斌, 成水平, 等. 复合垂直流人工湿地对氮的净化效果[J]. 中国给水排水, 2004, 20(10): 18-21.
HE Feng, WU Zhen-bin, CHENG Shui-ping, et al. Effect of integrated vertical-flow constructed wetland on nitrogen removal[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(10): 18-21.
- [14] 陈桂珠, 缪绅裕, 黄玉山, 等. 人工污水中的 N 在模拟秋茄湿地系统中的分配循环及其净化效果[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1): 44-50.
CHEN Gui-zhu, MIAO Shen-yu, WONG Yuk-shan, et al. Allocation, cycle and purged effects of nutrient pollutant N in artificial wastewater in simulated *Kandelia candel* wetland system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(1): 44-50.
- [15] 缪绅裕, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 236-241.
MIAO Shen-yu, CHEN Gui-zhu, WONG Yuk-shan, et al. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 236-241.
- [16] 高吉喜, 叶春, 杜鹃, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 247-251.
GAO Ji-xi, YE Chun, DU Juan, et al. Study of removing ability of macrophytes to N, P in run-off[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(3): 247-251.
- [17] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1720-1725.
- [18] 刘剑彤, 丘昌强, 陈珠金, 等. 复合生态系统工程中高效去除磷、氮植被植物的筛选研究[J]. 水生生物学报, 1998, 22(1): 1-7.
LIU Jian-tong, QIU Chang-qiang, CHENG Zhu-jin, et al. Screening study of the vegetational plant species for N and P removal from domestic wastewater on the integrated eco-engineering system[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1998, 22(1): 1-7.
- [19] Stottmeister U, Wiesner A, Kuschik P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1-2): 93-117.
- [20] Elliott L F, Gilmour C M, Lynch J M, et al. Bacterial colonization of plant roots[M]//Todd R L, Giddens J E(eds). Microbial-plant interactions. Madison: Soil Science Society of America, 1984: 1-16.
- [21] Brix H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance[M]//Moshiri G A (ed). Constructed wetlands for water quality improvement. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1993: 9-22.