

人工模拟污水净化系统去除生活污水氮、磷效果的比较研究*

张志勇 冯明雷 杨林章[†] 王建国

(中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘 要 在温室内,分别以炉渣、沸石和土壤为湿地基质,水芹(*Oenanthe javanica*)、黑麦草(*Lolium multiflorum*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)为植被构建了模拟人工湿地和无基质的浮床植物系统处理生活污水,比较研究了不同污水净化系统去除氮、磷的效果。结果表明,在较低氮、磷负荷和水力停留时间为 6 d 的条件下,炉渣、沸石和土壤基质人工湿地系统对生活污水中的全氮(TN)、 NH_4^+ -N 和全磷(TP)均表现出很好的净化效果,平均去除率均在 91.0% 以上;对 NO_3^- -N 的去除率较低,为 58.0%~85.5%。浮床系统因承受较高的负荷,对 TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 的去除率均明显低于各基质湿地。而从污染负荷的去除率来看,土壤基质湿地对 TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TP 的负荷去除率低于炉渣和沸石基质湿地;浮床各系统 NO_3^- -N 负荷去除率的负增加使 TN 的负荷去除率降低,但其 NH_4^+ -N 的负荷去除率均高于各湿地系统;浮床水芹和黑麦草系统的 TP 负荷去除率也高于各湿地系统。植物种类不同,其吸收 N、P 的能力存在很大差异。以黑麦草为植被的人工湿地和浮床系统,植物的吸收作用是各系统去氮除磷的主要机制;水芹和香根草吸收的氮、磷总量在人工湿地中远小于黑麦草,其吸收作用仅是各湿地系统去除氮、磷的一个途径;而水芹和香根草对磷的吸收则是浮床系统除磷的主要机制。

关键词 人工湿地;浮床植物系统;基质;生活污水;净化效果;植物吸收

中图分类号 X703 **文献标识码** A

水环境污染和水资源短缺是当今全球淡水资源面临的两大危机。有效降低水体中的氮、磷含量,控制和修复水体富营养化已成为现代水处理技术研究的热点。在众多污水治理技术中,人工湿地具有投资及运行费用低、运行管理方便、对负荷变化适应性强、出水具有一定的生物安全性及生态环境效益显著等特点,应用最为广泛,已被用于处理各类污水^[1~6]。近年来,新出现的直接利用水生或陆生植物净化富营养化水体的技术(简称“浮床植物技术”),因具有原位处理污水、适应各种水深及能够产生相当的经济效益等优点^[7],得到快速的推广,也已成为控制和修复富营养化水体的主要技术之一。其净化的富营养化水体也不再局限于工业废水、富营养化湖、河水和养殖水^[8~12],开始转向生活污水^[13]和化粪池污水^[14]等水体。

人工湿地净化污染物的机理极为复杂,基质和

植物作为人工湿地的重要组成部分,在湿地的净化过程中均发挥着重要的作用。近年来很多学者致力于人工湿地基质填料的筛选研究,应用于人工湿地的基质由过去传统的砂粒、土壤和砾石扩展到了黏土矿物、部分工业副产物和废弃物等^[15~17]。选择合适的基质材料已成为构建人工湿地,提高人工湿地净化能力的关键措施^[18]。植物除能够提高整个湿地生态系统微生物数量、调整其组成结构、促进系统的硝化和反硝化作用的进行和强化其净化能力^[13]外,自身还能吸收同化污水中一定量的氮磷等污染物。植物的吸收作用被一些学者认为是人工湿地去除氮磷等污染物的主要途径^[19,20],但也有些学者持不同观点^[21,22]。浮床植物系统不存在基质,植物的吸收作用对系统内氮、磷等污染物的去除贡献可能更大。但不同植物种类在营养吸收能力、根系深度、氧气释放量、生物量和抗逆性等方面存在差

* 国家“十五”重大科技专项“河网区面源污染控制成套技术(2002AA601012)”资助

[†] 通讯作者

作者简介: 张志勇(1977~),男,博士研究生,主要从事面源污染治理技术研究。E-mail: zy Zhang @issas. ac. cn

收稿日期:2006-11-07;收到修改稿日期:2007-03-14

异^[23], 所以其自身吸收作用对于污染物的去除贡献并不相同。因此, 开展植物净化能力的比较研究对提高污水治理技术的净化效率也极为重要。

目前, 有关人工湿地和浮床植物技术净化同一污水的效果和机理的比较研究少见报道。本研究在温室内分别以炉渣、沸石、土壤为基质, 水芹、黑麦草和香根草为植被构建人工湿地和浮床植物模拟系统, 对人工湿地和浮床植物技术去除生活污水氮、磷的效果和机理进行了初步探索, 旨在为今后生活污水的有效净化提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物

黑麦草和水芹来自土培苗, 香根草苗购自南京江宁区苗圃。当黑麦草、水芹苗高 8~10 cm 时与香根草苗(修剪为 15 cm 左右)同移栽到人工湿地和浮床系统内, 注入污水预培养 2 周后开始试验。

1.2 试验装置

1.2.1 人工湿地系统 采用大型塑料箱在温室内模拟人工湿地, 塑料箱长、宽、高分别为 56、46 和 35 cm。在其侧底部设有一内插水龙头的橡胶塞, 用于排水。试验基质炉渣、沸石和土壤均采自江苏宜兴市, 炉渣和沸石粒径分别约为 4~5 cm 和 1~2 cm, 土壤为当地水稻土。炉渣基质湿地系统(Slag-bed wetland, SW)的下部填充 20 cm 厚的炉渣, 上部为 10 cm 厚水稻田土壤。沸石基质湿地系统(Zeolite-bed wetland, ZW)的结构与炉渣系统相同。土壤基质湿地系统(Paddy soil-bed wetland, PW)内只填充 30 cm 厚的水稻田土。每种基质湿地系统依植被种类的不同均设 3 个处理, 分别栽种水芹、黑麦草和香根草, 每处理均设 3 次重复。另外, 3 种基质湿地系统各设一个仅填充基质而未种植物的系统作为对照。3 种基质人工湿地模拟试验共由 30 个处理单元组成, 随机排列。

1.2.2 浮床植物系统(Floating bed plant systems, FB) 培养容器同人工湿地。漂浮载体为聚乙烯泡沫板(48 cm × 38 cm × 3 cm), 在其上按 12 cm × 15 cm 的间距打圆孔。将定量预培养好的水芹、黑麦草和香根草移入泡沫载体的圆孔内, 用海绵条加以固定。每处理 3 次重复, 另设一个无植株的对照系统。浮床植物系统模拟试验共 10 个处理单元, 随机排列。

1.3 试验方法

本期试验自 2006 年 5 月 1 日开始至下一批植物(空心菜和水稻)引入前结束(6 月 24 日)。试验用水取自南京锁金村生活污水渠, pH 中性。试验期污水的水质指标平均为: 全氮(TN) 26.0 ± 2.9 mg L⁻¹; NH₄⁺-N 23.1 ± 3.6 mg L⁻¹; NO₃⁻-N 1.8 ± 0.7 mg L⁻¹; 全磷(TP) 1.6 ± 0.4 mg L⁻¹。3 种基质人工湿地和浮床植物系统均采用间歇方式进水, 污水一次性注入, 水力停留时间为 6 d。各净化系统的下一周期污水均在前一周排水后的隔天注入, 整个试验期共分 8 个净化周期。炉渣和沸石基质人工湿地每周期进水量均为 20 L, 水力负荷为 0.013 m³ m⁻² d⁻¹。土壤基质人工湿地因容水体积的限制, 每周期注入污水 15 L, 水力负荷为 0.01 m³ m⁻² d⁻¹。浮床植物系统每周期注入污水 45 L。试验期间因蒸散(植物蒸腾和自由蒸发)损失掉的污水不再进行补充。每个净化周期结束后自各净化系统出水口采集水样分析 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 等指标, 同时记录各系统的出水体积。试验结束后收获并测定各系统植物的地上部、地下部的生物量干重, 并测定其氮、磷含量, 用以计算植物的氮、磷养分吸收量。

1.4 分析方法

TN 采用 K₂S₂O₈ 氧化紫外消解比色法; NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法; NO₃⁻-N 采用硫酸联氨还原-重氮化偶合比色法; TP 采用紫外消解钼蓝比色法。

植物样品中的全氮和全磷采用常规农化分析方法测定。

各污染物去除率计算公式为:

$$\text{去除率}(\%) = (C_0 \times V_0 - C_i \times V_i) \div (C_0 \times V_0) \times 100\%$$

式中, C₀ 为初始时的浓度; V₀ 为初始时的体积; C_i 为第 i 天的浓度; V_i 为第 i 天的水体积。

2 结果与分析

2.1 不同污水净化系统对污水中氮的去除

2.1.1 TN、NH₄⁺-N 的去除率 整个试验期, 炉渣、沸石和土壤基质湿地各系统对 TN、NH₄⁺-N 均表现出良好的去除效果(见表 1, 表中列出的各系统氮、磷出水浓度及去除率均为试验期间所有净化周期测定结果的加权平均值, 样本数为 24)。3 种基质人工湿地的 TN、NH₄⁺-N 平均去除率均在 91.0% 以上且各基质人工湿地间的 TN、NH₄⁺-N 去除率无明显

显差异。同 3 种基质人工湿地相比,浮床系统因承受的氮负荷高于人工湿地且缺乏基质的作用,其对 TN、NH₄⁺-N 的平均去除率较低。

同一基质不同植被的净化系统的 TN、NH₄⁺-N 去除效果存在一定差异,以黑麦草为植被的净化系统对 TN、NH₄⁺-N 的去除率均高于水芹和香根草系统,尤以浮床系统最为明显。植物的存在在一定程度上提高了各系统的 TN、NH₄⁺-N 去除效果。炉渣、沸石、土壤基质人工湿地和浮床系统的 TN、NH₄⁺-N 去除率均高于对照系统, TN 分别高出 3.5% ~ 4.9%、0.7% ~ 5.5%、1.2% ~ 2.0%、4.1% ~ 26.2%; NH₄⁺-N 分别高出 3.0% ~ 3.3%、1.0% ~

4.4%、2.9% ~ 3.3%、3.0% ~ 31.4%。尽管无植物的存在,人工湿地对照系统仍能保持较高的 TN、NH₄⁺-N 去除率,可能因为(1)湿地承受的氮负荷相对较低,且炉渣、沸石和土壤 3 种基质具有一定的 NH₄⁺-N 吸附能力^[17,24,25],输入的部分 NH₄⁺-N 被基质吸附;(2)对照系统存在一定数量的硝化、反硝化细菌,NH₄⁺-N 通过硝化-反硝化作用得以部分去除;(3)试验期内,对照系统中藻类的生长吸收利用了部分输入的氮。浮床对照系统较高的 NH₄⁺-N 去除率(平均为 45.0%)说明,自然状态下 NH₄⁺-N 也可通过微生物的硝化-反硝化及固定作用等途径达到部分去除。

表 1 不同净化系统对污水 TN 和 NH₄⁺-N 的去除率

Table 1 TN and NH₄⁺-N removal rates of different wastewater purifying systems

成分 Elements	植物 Plants	炉渣基质湿地 SW		沸石基质湿地 ZW		土壤基质湿地 PW		浮床系统 FB	
		出水浓度 Outflow concentration	去除率 Removal rate	出水浓度 Outflow concentration	去除率 Removal rate	出水浓度 Outflow concentration	去除率 Removal rate	出水浓度 Outflow concentration	去除率 Removal rate
		(mg L ⁻¹)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)	(mg L ⁻¹)	(%)
TN	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	1.82 ±0.47	95.3 ±1.4	3.45 ±1.15	92.2 ±4.2	1.54 ±0.57	96.6 ±1.3	15.7 ±4.3	50.9 ±8.7
	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	1.77 ±0.86	96.6 ±2.0	1.80 ±1.03	96.6 ±1.8	1.29 ±0.39	97.4 ±1.0	13.8 ±4.6	54.2 ±21.9
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	2.00 ±0.68	95.2 ±0.9	2.79 ±0.74	92.2 ±2.9	1.58 ±0.60	96.9 ±1.4	19.2 ±2.9	32.1 ±5.3
	对照 No plant	2.94 ±0.35	91.7 ±1.4	3.15 ±0.82	91.5 ±3.3	2.19 ±0.56	95.4 ±1.3	20.2 ±3.3	28.0 ±7.1
NH ₄ ⁺ -N	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	0.65 ±0.33	98.2 ±0.7	1.86 ±0.52	94.4 ±0.7	0.42 ±0.14	99.0 ±0.4	11.8 ±5.1	59.5 ±14.5
	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	0.88 ±0.65	98.3 ±1.6	0.99 ±0.73	97.8 ±1.6	0.40 ±0.21	99.3 ±0.4	6.93 ±3.94	76.4 ±15.7
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	0.90 ±0.89	98.0 ±1.1	1.46 ±0.37	95.3 ±0.7	0.50 ±0.24	98.9 ±0.6	12.8 ±4.7	48.0 ±15.4
	对照 No plant	1.54 ±0.58	95.0 ±1.3	2.11 ±0.59	93.4 ±1.4	1.48 ±0.52	96.0 ±2.3	13.2 ±4.8	45.0 ±15.9

注:平均值 ±标准偏差,下同 Note: Means ± std, the same as below

2.1.2 NO₃⁻-N 的去除率 由表 2(表中数据的计算同表 1)可知,3 种基质人工湿地各系统对 NO₃⁻-N 表现出了一定的去除效果,而浮床各系统对 NO₃⁻-N 却表现为负去除率,系统内的 NO₃⁻-N 大量累积。与 TN、NH₄⁺-N 的去除效果相比,各净化系统对 NO₃⁻-N 的去除很不稳定,去除率变化幅度较大。对 4 种污水净化系统的 NO₃⁻-N 去除率与进水 NO₃⁻-N 浓度的相关分析发现,多数人工湿地的 NO₃⁻-N 去除率与进水 NO₃⁻-N 浓度呈显著相关,相关系数在 0.77 以上

(表 3)。这说明进水 NO₃⁻-N 浓度处于一定范围时,人工湿地对 NO₃⁻-N 的去除效果会随进水浓度的升高而提高^[26]。浮床系统中仅黑麦草系统的 NO₃⁻-N 去除率与进水 NO₃⁻-N 浓度呈极显著相关,其他系统均未表现出相关性。浮床系统内 NO₃⁻-N 的累积很可能是因为试验所用生活污水中的氮主要以 NH₄⁺-N 形态存在,NH₄⁺-N 的大量存在一定程度上促进了硝化作用的进行,使得 NO₃⁻-N 的生成速率大于其去除速率,从而造成了 NO₃⁻-N 的累积。

表 2 不同净化系统对污水 NO_3^- -N 的去除率Table 2 NO_3^- -N removal rates of different wastewater purifying systems (%)

植物 Plants	炉渣基质湿地 SW		沸石基质湿地 ZW		土壤基质湿地 PW		浮床系统 FB	
	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率
	Outflow	Removal	Outflow	Removal	Outflow	Removal	Outflow	Removal
	concentration	rate	concentration	rate	concentration	rate	concentration	Rate
	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)
水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	0.71 \pm 0.63	65.3 \pm 34.4	1.40 \pm 1.24	74.3 \pm 11.8	0.66 \pm 0.64	71.2 \pm 30.0	3.52 \pm 1.23	- 69.5 \pm 71.2
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0.61 \pm 0.47	76.2 \pm 24.6	0.40 \pm 0.32	85.5 \pm 14.0	0.61 \pm 0.57	80.2 \pm 1.8	7.62 \pm 4.03	- 328 \pm 317
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	0.84 \pm 0.67	60.1 \pm 40.4	0.98 \pm 0.78	69.2 \pm 22.0	0.77 \pm 0.76	66.6 \pm 34.4	5.06 \pm 1.99	- 189 \pm 110
对照 No plant	0.97 \pm 0.58	57.7 \pm 32.6	0.67 \pm 0.41	70.7 \pm 22.2	0.55 \pm 0.44	76.5 \pm 18.9	5.81 \pm 3.31	- 236 \pm 192

表 3 不同净化系统的 NO_3^- -N 去除率与入水 NO_3^- -N 浓度的相关关系Table 3 Correlation coefficient of NO_3^- -N removal rates of different systems and NO_3^- -N concentrations in inflow wastewater

植物 Plants	样本数 Sample number	炉渣基质湿地 SW	沸石基质湿地 ZW	土壤基质湿地 PW	浮床系统 FB
水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	8	0.78 *	0.43	0.81 *	0.54
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	8	0.79 *	0.77 *	0.79 *	0.91 **
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	8	0.80 *	0.30	0.79 *	0.63
对照 No plant	8	0.49	0.80 *	0.63	0.62

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

表 4 不同净化系统对污水 TP 的去除率

Table 4 TP removal rates of different wastewater purifying systems (%)

植物 Plants	炉渣基质湿地 SW		沸石基质湿地 ZW		土壤基质湿地 PW		浮床系统 FB	
	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率	出水浓度	去除率
	Outflow	Removal	Outflow	Removal	Outflow	Removal	Outflow	Removal
	concentration	rate	concentration	rate	concentration	rate	concentration	Rate
	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)	(mg L^{-1})	(%)
水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	0.08 \pm 0.04	96.3 \pm 1.5	0.05 \pm 0.04	97.8 \pm 1.6	0.07 \pm 0.03	97.3 \pm 1.4	0.38 \pm 0.21	77.1 \pm 11.4
黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0.06 \pm 0.04	97.7 \pm 1.5	0.05 \pm 0.03	98.5 \pm 0.9	0.05 \pm 0.02	97.9 \pm 1.1	0.73 \pm 0.63	56.0 \pm 34.9
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	0.08 \pm 0.04	96.4 \pm 1.9	0.06 \pm 0.03	97.5 \pm 1.3	0.06 \pm 0.03	97.9 \pm 1.1	1.08 \pm 0.29	38.4 \pm 12.2
对照 No plant	0.13 \pm 0.05	93.0 \pm 2.9	0.10 \pm 0.11	95.8 \pm 3.4	0.05 \pm 0.03	98.1 \pm 1.0	1.24 \pm 0.37	22.9 \pm 12.6

2.2 不同污水净化系统对总磷的去除

由表 4(表中数据计算同表 1)可知,3 种基质人工湿地对 TP 均有极高的去除率,各湿地系统(包括对照)的 TP 平均去除率均在 93.0% 以上。理论上,人工湿地系统中的磷可以通过植物的吸收、微生物的固定、填料的吸附等作用去除,但最主要的是填料的吸附和化学沉淀作用^[27]。本试验选用的炉渣、沸石和土壤基质对磷均有较好的吸附能力^[27~29],且人工湿地所承载的磷负荷很低,从而使得各湿地系统能够高效地去除 TP。浮床系统因承受的磷负荷

较高且不存在基质,其对 TP 的去除率普遍低于人工湿地系统。植物的存在提高了炉渣、沸石基质湿地和浮床系统的 TP 去除率,尤以浮床系统最为明显,TP 的去除率高出对照系统 15.5%~54.2%。而对土壤基质湿地而言,植物的存在并未提高 TP 的去除率,黑麦草、水芹和香根草系统的 TP 去除率均低于对照系统,这很可能与土壤基质湿地的对照系统中大量生长的藻类和水生生物对磷的吸收和固定有关。

2.3 不同污水净化系统对氮、磷负荷的去除

目前对人工湿地系统的去除效率评价标准不一,大多数研究以百分比去除率来评价系统的效率,但这会造成对系统性能的误导,因为系统的效率以百分率表示时,系统的去除效率会随着入水浓度的变化而变化,并且以百分率计算系统的去除效率不能反映出进水浓度的状况^[30]。因此,有学者认为这样笼统地对系统性能进行评价不太合适,而如以负荷去除率计算则可反映出系统的实际性能^[31]。

本试验 4 种污水净化系统的单位面积负荷去除率见图 1。炉渣、沸石和土壤基质湿地系统对污水中各污染物的单位面积负荷去除率分别为:TN 296~311、304~323、228~233 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 270~283、266~289、204~210 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 13.9~18.3、12.4~20.3、12.2~14.0 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$; TP 18.1~18.9、19.4~19.9、13.9~14.0 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。

尽管 3 种基质人工湿地各系统间的 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP 的百分去除率没有明显的差异,但

就各污染物的单位面积负荷去除率而言,炉渣和沸石基质湿地各系统均明显高出土壤基质湿地,而炉渣和沸石基质湿地系统间的差异不明显。这是由 3 种基质湿地所承受的污染物负荷量的不同引起的。因为整个试验期内,炉渣和沸石基质湿地始终承受相同的污染物负荷,而土壤基质湿地因容纳体积有限,各污染物的负荷均相对较低,致使其对各污染物的单位面积负荷去除率最低。浮床各系统的 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP 负荷去除率分别为 200~368、288~476、-29.7~-121 和 12.0~34.5 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。虽然浮床系统的氮、磷去除率均明显低于 3 种基质人工湿地,但因承受的氮、磷负荷较高,各系统的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 负荷去除率均高于各人工湿地。浮床系统的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 负荷去除率为负值,这在一定程度上影响了 TN 的负荷去除效果。由于浮床系统不存在基质的吸附、沉淀作用,其对照系统的 TP 负荷去除率在所有净化系统中最低。

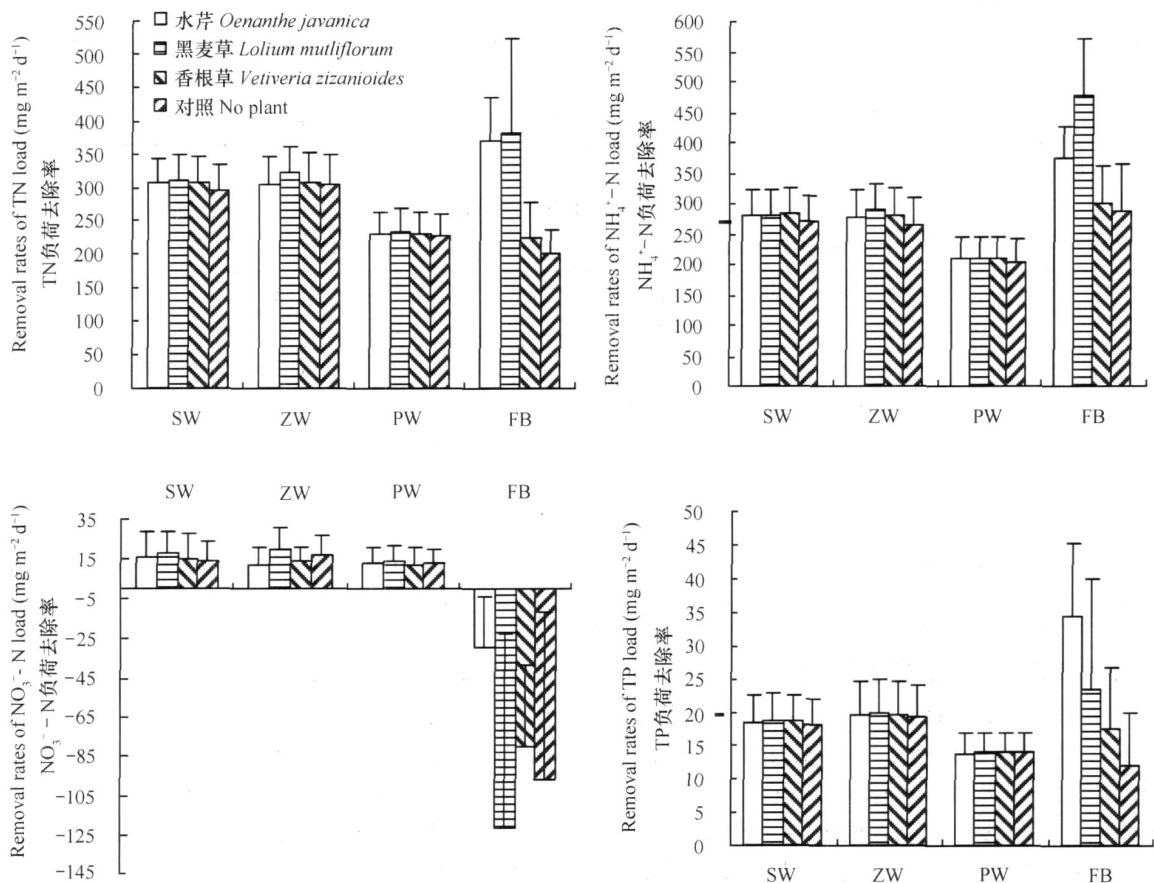


图 1 各污水净化系统对 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP 的负荷去除率

Fig. 1 The removal rates of TN, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and TP load in different wastewater purifying systems

2.4 不同污水净化系统中植物吸收作用对氮、磷的去除贡献

人工湿地系统的除氮机理是多样的,主要包括植物和其他生物的吸收、挥发、氨化作用、硝化作用、反硝化作用以及基质吸附等,其中微生物的硝化-反硝化作用被认为是湿地脱氮的主要途径^[16,18,32]。而磷的去除主要是基质的沉淀和吸附作用^[16,33]。也有一些学者对人工湿地的氮、磷去除机理持不同的观点,认为植物的吸收作用才是湿地系统去除氮、磷的主要机制^[19,20]。与人工湿地相比,浮床系统因不存在基质,其对氮、磷的去除则很可能主要依赖于植物的吸收和微生物的作用。

本研究通过对各污水净化系统中不同植物的收获干重和植物体内氮、磷养分含量的测定,计算了各种植物通过吸收作用累积的氮、磷量及其对各净化系统去除氮、磷的贡献(表 5,表 6)。结果表明,4 种污水净化系统中,水芹、黑麦草和香根草的氮、磷累积量均以浮床系统最高。同基质的净化系统中不同植物吸收的氮、磷量存在明显的差异;黑麦草在 4 种净化系统中的氮累积总量均远高于水芹和香根草,其氮的累积量高达 $5.3 \sim 11.7 \text{ g m}^{-2}$,高出水芹 $0.4 \sim 4.9$ 倍,高出香根草 $3.9 \sim 10.8$ 倍;除浮床系统

外,3 种植物对磷的累积总量也均以黑麦草最高。黑麦草吸收的氮量分别约占炉渣、沸石、土壤基质湿地和浮床系统 TN 输入量的 57.4% 、 54.5% 、 38.3% 和 28.9% ,约占 4 种净化系统 TN 去除量的 59.4% 、 56.2% 、 39.3% 和 50.1% ;黑麦草吸收的磷量占各系统总磷输入量的比例为 $52.8\% \sim 90.6\%$,对各系统 TP 去除量的贡献高达 88.9% 以上。这表明,在以黑麦草为植被的各净化系统中,植物的吸收作用已成为系统去氮除磷的主要机制。水芹吸收的氮量约占各系统 TN 输入量的 $9.7\% \sim 19.9\%$,对各净化系统 TN 去除量的贡献为 $10.2\% \sim 37.6\%$ 。可见,水芹对氮的吸收作用仅是各净化系统 TN 去除的一个途径,而微生物的硝化-反硝化作用才是系统除氮的主要机制。水芹吸收的磷量对 3 种基质湿地系统 TP 去除量的贡献为 $16.1\% \sim 35.0\%$,表明基质的吸附和沉淀作用是以水芹为植被的湿地系统除磷的主要机制;而在浮床系统中,水芹吸收的磷量对系统 TP 去除量的贡献高达 96.3% ,因此,其吸收作用是浮床水芹系统除磷的主要机制。香根草通过吸收作用去除的氮、磷总量均低于水芹,其自身吸收作用对各净化系统氮、磷的去除贡献也接近于水芹。

表 5 植物吸收作用对不同污水净化系统 TN 去除的贡献

Table 5 Contribution of plant assimilation to TN removal in different wastewater purifying systems

净化系统 Wastewater purifying systems	植物 Plants	TN 输入量 Input amounts of TN (g m^{-2})	TN 去除量 Removal amounts of TN (g m^{-2})	植物吸氮量 TN assimilation (g m^{-2})	吸氮量/输入量 Ratio of assimilation to input (%)	吸氮量/去除量 Ratio of assimilation to removal (%)
炉渣基质湿地 SW	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	19.4	18.7	11.1	57.4	59.4
	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	19.4	18.5	1.88	9.73	10.2
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	19.4	18.4	1.57	8.11	8.53
沸石基质湿地 ZW	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	19.4	18.8	10.6	54.5	56.2
	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	19.4	17.9	3.10	16.0	17.4
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	19.4	17.9	0.86	4.46	4.81
土壤基质湿地 PW	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	13.7	13.4	5.26	38.3	39.3
	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	13.7	13.3	2.51	18.3	18.9
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	13.7	13.3	0.94	6.82	7.06
浮床植物系统 FB	黑麦草 <i>Lolium mutiflorum</i>	40.5	23.4	11.7	28.9	50.1
	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	40.5	21.5	8.08	19.9	37.6
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	40.5	13.8	2.44	6.02	17.7

表 6 植物吸收作用对不同污水净化系统 TP 去除的贡献

Table 6 Contribution of plant assimilation to TP removal in different wastewater purifying systems

净化系统 Wastewater purifying systems	植物 Plants	TP 输入量 Input amounts of TP (g m ⁻²)	TP 去除量 Removal amounts of TP (g m ⁻²)	植物吸磷量 TP assimilation (g m ⁻²)	吸磷量/输入量 Ratio of assimilation to input (%)	吸磷量/去除量 Ratio of assimilation to removal (%)
炉渣基质湿地	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	1.17	1.14	1.06	90.6	93.0
SW	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	1.17	1.12	0.18	15.4	16.1
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	1.17	1.08	0.14	12.0	13.0
沸石基质湿地	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	1.17	1.08	1.03	88.0	95.4
ZW	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	1.17	1.15	0.37	31.6	32.2
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	1.17	1.14	0.07	5.98	6.14
土壤基质湿地	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	0.83	0.81	0.72	86.8	88.9
PW	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	0.83	0.80	0.28	33.7	35.0
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	0.83	0.81	0.11	13.3	13.6
浮床植物系统	黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	2.48	1.40	1.31	52.8	93.6
FB	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	2.48	1.90	1.83	73.8	96.3
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	2.48	0.95	0.79	31.9	83.2

3 讨论

研究发现,影响氮磷去除的内外因素很多,如湿地基质、植物、微生物、污染负荷、停留时间及布水方式等,在这些因素的综合影响下,人工湿地在实际的运行和操作中并不是一个很稳定的过程,系统的氮磷去除率会有很大的变化范围。人工湿地对氮磷的去除率一般接近 50%,有的为 60%~86%^[33]。本研究炉渣、沸石和土壤基质人工湿地对 TN、NH₄⁺-N、TP 均表现出了很高的去除率,很可能是由于温室模拟条件下湿地承受的污染负荷相对较低,且采用的是间歇入水所致。因为研究表明在控制进水污染物负荷的情况下,TN 的去除率可高达 84%^[34],并且间歇负荷有助于提高系统氮、磷的去除率^[35]。同时从炉渣、沸石和土壤湿地较高的氮、磷去除率来看,可适当增加 3 种湿地系统所承载的污染负荷,但对此还需进一步的监测。

尽管 NO₃⁻-N 的积累是湿地系统去污的一个棘手难题^[36],但本试验是在模拟条件下进行的,各湿地所承受的 NO₃⁻-N 负荷较低,3 种人工湿地对 NO₃⁻-N 均表现出了一定的去除能力,并未出现累积现象。而在整个试验期,浮床各系统的 NO₃⁻-N 却发生了不同程度的累积,各系统出水中 NO₃⁻-N 的平均浓度分别达 3.52 mg L⁻¹(水芹)、7.62 mg L⁻¹(黑麦

草)、5.06 mg L⁻¹(香根草)和 5.81 mg L⁻¹(对照),但均未超出国家环境质量标准规定的“标准类水中 NO₃⁻-N 浓度不超过 10 mg L⁻¹”的要求。已有的研究表明,通过不同植物的混合种植很可能是解决 NO₃⁻-N 净化问题的有效途径^[36]。

黑麦草、水芹和香根草在 4 种污水净化系统中的氮、磷吸收量间的差异说明,不同植物种类以及同一植物在不同生长环境下,其对氮、磷具有不同的吸收能力。研究表明,植物吸收氮、磷的能力与自身生物量和植物组织中氮、磷的浓度有关^[19]。整个试验期,3 种基质人工湿地系统中黑麦草的生物量均远高于水芹和香根草,因此,黑麦草的氮、磷累积量也高于水芹和香根草。浮床系统因承受更高的氮、磷负荷,系统内的植物很可能对氮、磷发生了奢侈性吸收,从而使得黑麦草、水芹和香根草的氮磷累积量均高于人工湿地系统。

磷在人工湿地中的去除与基质有着密切的关系,Reddy^[37]研究发现人工湿地中 7%~87%的磷可能通过基质的吸附或沉淀反应而降解。本研究中炉渣、沸石和土壤基质人工湿地系统对污水中 TP 均表现出了很好的去除效果,其去除率高达 93.0%~98.5%,但因湿地植被的吸磷能力存在差异,3 种基质在不同植物湿地系统中的作用程度不同。黑麦草由于吸磷能力很强,3 种基质在以黑麦草为植被的湿地系统中通过吸附、沉淀作用去除磷的贡献很小。

这是因为基质对磷的吸附沉淀是一个部分可逆过程,当水中磷的浓度较低时,基质中部分磷就会被释放到水中,从而供植物吸收再利用^[38]。而在水芹和香根草为植被的湿地系统中,由于植物吸磷能力较弱,污水中的磷则主要依靠 3 种基质的吸附、沉淀作用得以去除。

基质作为人工湿地的重要组成部分,不仅为植物和微生物提供生长介质,还能够通过沉淀、过滤、吸附等作用直接去除污染物,尤其对磷的去除至关重要。选择基质构建人工湿地时,除要考虑基质的去污能力外,还必须顾及到基质的易得性和经济适用性等因素。在室内模拟试验的运行条件下,3 种基质人工湿地系统均表现出了很好的污染负荷去除能力,这说明炉渣、沸石和土壤作为构建人工湿地的基质均具有很好的去污潜力。但以土壤为基质的人工湿地由于通透性差,很容易发生堵塞、滋生蚊蝇、形成短流或漫流,且需要占用更多的土地,已逐渐被其他基质取代;沸石虽然具有较好的通透性和巨大的吸附表面积,但其产地较少且价格相对昂贵,因此,对于构建基质需求量较大的人工湿地而言,其材料的易得性和经济适用性较差;相比之下,炉渣作为工业的副产物即价廉又便于取材,比较适合作为人工湿地的基质。

作为一种比较新型的富营养化水体原位修复和控制技术,浮床植物技术多用于净化低浓度的污染水体。本试验利用浮床植物技术净化污染物浓度较高的生活污水,仍表现出了较好的氮(NO_3^- -N 除外)、磷负荷去除能力,进一步显示了浮床植物技术在污水治理方面的优越性。

参考文献

- [1] Gillespie B, Hawkins B, Rodgers H, et al. Transfers and transformations of zinc in constructed wetlands: Mitigation of fare finery effluent. *Ecological Engineering*, 2000, 14:279~292
- [2] Juwarkar A S, OKE B, Juwarkar A, et al. Domestic wastewater treatment through constructed wetland in India. *Wat. Sci. Tech.*, 1995, 32(3): 291~294
- [3] 靖元孝,陈兆平,杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(6): 614~617. Jing Y X, Chen Z P, Yang D J. Purifying efficiency of *Cyperus alternifolius* to domestic sewage and its application in constructed wetland (In Chinese). *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2002, 8(6): 614~617
- [4] 廖新娣,骆世明. 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*, 2002, 13(6):719~722. Liao X D, Luo S M. Effects of constructed wetlands on treating with nitrogen and phosphorus in wastewater from hogery (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):719~722
- [5] 徐丽花,周琪. 模拟暴雨径流人工湿地系统中 N 和 P 的去除及其分布. *给水排水*, 2002, 28(10):12~15. Xu L H, Zhou Q. Removal and distribution of N and P at a simulated artificial wetland system treating stormy runoff (In Chinese). *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(10): 12~15
- [6] Braskerud B C. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution. *Ecological Engineering*, 2002, 19: 41~61
- [7] Li W, Friedrich R. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: Preliminary results from growth chamber trial. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2002, 90:9~15
- [8] 戴全裕,蔡述伟,张秀英. 多花黑麦草对黄金废水净化与富集的研究. *环境科学学报*, 1998, 18(5):553~556. Dai Q Y, Cai S W, Zhang X Y. Studies on the purification and accumulation of gold-bearing wastewater with *Lolium multiflorum* (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5):553~556
- [9] 邴旭文,陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质. *湛江海洋大学学报*, 2001, 21(3):29~33. Bing X W, Chen J C. The control of eutrophic water in ponds by floating-bed soilless culture of plant (In Chinese). *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2001, 21(3): 29~33
- [10] 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 香根草对富营养化水体净化效果研究. *应用生态学报*, 2003, 14(2):277~279. Si Y B, Bao J J, Cao D J, et al. Purification of eutrophicated water body by *Vertiveria zizanioid* (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2):277~279
- [11] 周小平,王建国,杨林章,等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究. *应用生态学报*, 2005, 16(11):2199~2203. Zhou X P, Wang J G, Yang L Z, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2199~2203
- [12] 严以新,操家顺,李欲如. 冬、春季浮床技术净化重污染河水的动态试验研究. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2):119~122. Yan Y X, Cao J S, Li Y R. Dynamic pilot study on purification of heavily polluted river water with floating bed technology in winter-spring (In Chinese). *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(2):119~122
- [13] 袁东海,高士祥,任全进,等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究. *水土保持学报*, 2004, 18(4):77~80,92. Yuan D H, Gao S X, Ren Q J, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4):77~80,92
- [14] 徐晓锋,史龙新,杨林章. 水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果. *生态学杂志*, 2006, 25(4):383~388. Xu X F, Shi L X, Yang L Z, et al. Effects of aquacultured economic plants on phosphorus removal from sewage (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4):383~388
- [15] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等. 煤渣-草炭基质垂直流人工湿

- 地系统对城市污水的净化效果. 应用生态学报, 2003, 14(4): 597~600. Cui L H, Zhu X Z, Luo S M, *et al.* Purification efficiency of vertical-flow wetland system constructed by cinder and turf substrate on municipal wastewater (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 597~600
- [16] Sakadevan K. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. Water Research, 1998, 32(2): 393~399
- [17] 周小平, 杨林章, 王建国, 等. 炉渣等4种基质对富营养化水体中N、P的降解研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 94~98. Zhou X P, Yang L Z, Wang J G, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance from eutrophic water body by four substrates (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(Suppl.): 94~98
- [18] 李旭东, 周琪, 张荣社, 等. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究. 地学前缘, 2005, 12(增刊): 73~76. Li X D, Zhou Q, Zang R S, *et al.* A comparative study on nitrogen and phosphorus removal performance for three types of constructed wetland (In Chinese). Earth Science Frontiers, 2005, 12(Suppl.): 73~76
- [19] 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. 生态学报, 2004, 24(8): 1720~1725. Jiang Y P, Ge Y, Yue C L, *et al.* Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1720~1725
- [20] 刘剑彤, 丘昌强, 陈珠金, 等. 复合生态系统中高效去除磷、氮植被植物的筛选研究. 水生生物学报, 1998, 22(1): 1~7. Liu J T, Qiu C Q, Chen Z J, *et al.* Screening study of the vegetational plant species for N and P removal from domestic wastewater in the integrated eco-engineering system (In Chinese). Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(1): 1~7
- [21] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究. 环境科学, 2005, 26(4): 83~86. Zhang R S, Li G H, Zhou Q, *et al.* Effects of plants on nitrogen/phosphorus removal in subsurface constructed wetlands (In Chinese). Environmental Science, 2005, 26(4): 83~86
- [22] Kim S Y, Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants. Water Sci. Technol., 2001, 44: 61~67
- [23] 李志炎, 唐宇力, 杨在娟, 等. 人工湿地植物研究现状. 浙江林业科技, 2004, 24(4): 56~58, 62. Li Z Y, Tang Y L, Yang Z J, *et al.* Current situation of study on plants on constructed wetland (In Chinese). Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology, 2004, 24(4): 56~58, 62
- [24] 张曦, 陆轶峰. 天然沸石吸附技术防治暴雨径流氮磷污染. 云南环境科学, 2003, 22(1): 48~51. Zhang X, Lu Y F. The technology of natural zeolite absorbing prevents nitrogen and phosphorus pollution in stormy runoff (In Chinese). Yunnan Environmental Science, 2003, 22(1): 48~51
- [25] 李志安, 林永标, 沈承德, 等. 华南不同人工林土壤铵吸附特征及其吸附动力学研究. 土壤学报, 2001, 38(3): 383~389. Li Z A, Lin Y B, Shen C D, *et al.* Adsorption and adsorption kinetics of ammonium soils under different man-made forests in South China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 383~389
- [26] 吴振斌, 徐光来, 周培疆, 等. 复合垂直流人工湿地对不同氮污水的净化. 环境科学与技术, 2004, 27(增刊): 30~32, 54. Wu Z B, Xu G L, Zhou P J, *et al.* Study on purification of different nitrogen contaminated wastewater integrated vertical flow constructed wetland (In Chinese). Environmental Science and Technology, 2004, 27(Suppl.): 30~32, 54
- [27] 邓雁希, 许虹, 黄玲, 等. 炉渣处理含磷废水的实验研究. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 290~292. Deng Y X, Xu H, Huang L, *et al.* The removal of phosphorus from wastewater with the help of slag (In Chinese). Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(3): 290~292
- [28] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析. 环境科学, 2005, 26(1): 51~55. Yuan D H, Jing L J, Gao S X, *et al.* Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems (In Chinese). Environmental Science, 2005, 26(1): 51~55
- [29] 李静, 魏世强, 杨勇, 等. 库区消落区紫色土与水稻土磷吸附解吸特征. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4): 459~463. Li J, Wei S Q, Yang Y, *et al.* Phosphorus sorption and desorption properties of purple and paddy soils in water level fluctuation zone in Three-Gorges Reservoir (In Chinese). Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 27(4): 459~463
- [30] Ymazal J V. Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic the first 5 years experience. Wat. Sci. Tech., 1996, 34(11): 159~164
- [31] 张虎成, 俞穆清, 田卫, 等. 人工湿地生态系统中氮的净化机理及其影响因素研究进展. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 163~168. Zhang H C, Yu M Q, Tian W, *et al.* Study progress on mechanisms and effect factors of nitrogen removal in constructed wetlands ecosystem (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(4): 163~168
- [32] Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants — The root-zone method. Wat. Sci. Tech., 1987, 19: 107~118
- [33] 熊飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展. 湿地科学, 2005, 3(3): 228~234. Xiong F, Li W C, Pang J Z, *et al.* Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A review (In Chinese). Wetland Science, 2005, 3(3): 228~234
- [34] Headley T R, Huett D O, Davison L. The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal flow wetlands. Water Science and Technology, 2001, 44(11/12): 77~84
- [35] 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. 中国给水排水, 2004, 20(10): 18~21. He F, Wu Z B, Cheng S P, *et al.* Effect of integrated vertical-flow constructed wetland on nitrogen removal (In Chinese). China Water & Wastewater, 2004, 20(10): 18~21
- [36] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51~59. Xia H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetland (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(4): 51~59

- [37] Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes. *J. Environ. Qual.*, 1983, 12(1): 137 ~ 141
- [38] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展. *环境科学动态*, 2000(3): 32 ~ 37. Liang W, Wu Z B. Pilot study on mechanism of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetland (In Chinese). *Environmental Science Trends*, 2000(3): 32 ~ 37

COMPARATIVE STUDY ON EFFICIENCY OF SIMULATED CONSTRUCTED WETLANDS REMOVING NITROGEN AND PHOSPHORUS FROM DOMESTIC SEWAGE

Zhang Zhiyong Feng Minglei Yang Linzhang[†] Wang Jianguo
(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract In greenhouse, three different simulated constructed wetland systems were built up with slag, zeolite and paddy soil, respectively, as substrate, and with *Oenanthe javanica*, *Lolium mutiflorum* and *Vetiveria zizanioides*, respectively, as vegetation. Efficiencies of the three wetland systems removing nitrogen and phosphorus from domestic sewage were studied as compared with that of the floating-bed plant system (no substrate). Results showed that when nitrogen and phosphorus load was low and the hydraulic retention time was 6 days, the constructed wetlands of slag, zeolite and paddy soil displayed high efficiency in removing total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) and total phosphorus (TP), with an average removal rate of over 91.0% for all the three, but low efficiency in removing nitrate nitrogen (NO_3^- -N) with a rate ranging from 58.0% to 85.5%. When nitrogen and phosphorus load was high, the floating-bed plant system was much lower than the three simulated ones in removing efficiency. In terms of removal amount, the paddy soil system was lower than the slag and zeolite ones. In the floating-bed plant systems, negative increase in NO_3^- -N removal amounts led to decrease in TN removal amounts, but its NH_4^+ -N removal amounts was significantly higher than those in the three simulated wetland systems. The removal amounts of TP in the *Oenanthe javanica* and *Vetiveria zizanioides* floating-bed systems were also higher than those in all the three simulated wetland systems. Different plants were different in ability to assimilate nitrogen and phosphorus. The four wastewater purifying systems with *Lolium mutiflorum* as vegetation regardless of substrate, assimilation of TN and TP by the plant was the main mechanism for TN and TP removal. TN and TP uptake by *Oenanthe javanica* and *Vetiveria zizanioides* were much smaller than those by *Lolium mutiflorum* in the three simulated wetland systems, suggesting that *Oenanthe javanica* and *Vetiveria zizanioides* assimilation of TN and TP contributed partly to TN and TP removal in the three systems. However, the assimilation of P by *Oenanthe javanica* and *Vetiveria zizanioides* was the main mechanism for TP removal in the floating-bed plant systems.

Key words Constructed wetland; Floating-bed plant system; Substrate; Domestic sewage; Removal efficiency; Plant uptake