

潜流人工湿地系统停留时间分布与 N、P 浓度空间变化

杨长明, 顾国泉, 李建华, 邓欢欢

(同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过人工湿地小试装置, 研究了风车草和香蒲水平潜流人工湿地处理富营养化养殖水体过程中水力停留时间分布 (RTD) 特征和系统内 N、P 浓度空间变化规律。结果表明, 供试的香蒲潜流湿地和风车草潜流湿地系统 RTD 曲线特征值 σ^2 分别为 0.324 6 和 0.410 8, 表明水流流态介于推流与混合流之间, 风车草潜流湿地系统 RTD 曲线较香蒲潜流湿地平滑, 水流混合流动程度较弱。2 种植物类型湿地床体总氮 (TN) 和氨氮 (NH_4^+ -N) 浓度在垂直方向上的分层现象明显, 尤其在湿地床体前端; TN 浓度随着取样点深度增加而上升, 而 NH_4^+ -N 浓度则以中层取样点为最低; 对于总磷 (TP) 和正磷酸盐 (PO_4^{3-} -P) 浓度, 2 种植物类型湿地系统内均表现为随取样点深度增加而上升, 但这种差异随沿程而降低。与香蒲湿地相比较, 风车草潜流湿地系统 N、P 浓度分层现象更为明显。风车草湿地系统后端各层取样点 TN 和 TP 平均浓度较香蒲湿地系统分别下降了 19.8% 和 12.3%, 说明风车草潜流湿地系统对富营养化养殖水体中氮、磷的去除效果优于香蒲湿地。

关键词:富营养化养殖水体; 水平潜流湿地; 停留时间分布; 氮和磷; 空间变化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-3043-06

Residence Time Distributions and Spatial Variation of N, P in the Subsurface-flow Constructed Wetlands for Purification of Eutrophic Aquaculture Water

YANG Chang-ming, GU Guo-quan, LI Jian-hua, DENG Huan-huan

(Key Laboratory of Yangtze Water Environment of MOE, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Hydraulic residence time distributions (RTD) and spatial variations of N, P were studied in a small-scale horizontal subsurface-flow constructed wetlands (HSFCWs) planted with *Cyperous alternifolius* and *Typha angustifolia* respectively for purification of eutrophic aquaculture water. The results show that the residence time distribution curves of the investigated HSFCWs lie between plug-flow and completely mixed model with characteristic values (σ^2) of 0.324 6 and 0.410 8, respectively. Compared with *Typha angustifolia*, *Cyperous alternifolius* wetland shows fine flow pattern with characteristics of smoother RTD curve and weaker vertical mixed flow. Total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) show stratified distributions in the two HSFCWs, especially in the front end of the wetland beds. TN in the lower layer is higher than that in the upper, while NH_4^+ -N in the middle layer is the lowest in all the sampling layers. Total phosphorus (TP) and phosphate (PO_4^{3-} -P) increases with sampling depth. Differences in TP and PO_4^{3-} -P between the layers decrease gradually along distance. *Cyperous alternifolius* wetland shows better stratification distributions of N, P, as compared with *Typha angustifolia*, which is mainly contributed to the difference in flow patterns between the two HSFCWs. On average, concentrations of TN and TP in the rear end of the *Cyperous alternifolius* wetland are 19.3% and 12.5% lower, respectively, as compared to the *Typha angustifolia* wetland, suggesting that removal efficiencies of the *Cyperous alternifolius* wetland for purification of eutrophic aquaculture water is higher than those of the *Typha angustifolia*.

Key words: eutrophic aquaculture water; horizontal subsurface-flow constructed wetlands (HSFCWs); residence time distribution (RTD); nitrogen and phosphorus; spatial variation

随着我国农村集约化鱼塘养殖规模的不断增加, 养殖水体污染问题日趋突出, 严重影响当地的渔业生产和村镇整体环境的改善^[1, 2], 加强对村镇水环境治理已成为我国未来农村环境整治的一项重要而又迫切的任务。人工湿地作为一种新型的污染水体生态修复技术, 目前在富营养化水体治理中得到广泛应用^[3, 4]。潜流型人工湿地 (subsurface-flow constructed wetlands, SFCWs) 的水流位于填料层以下, 这样就可以充分利用填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及表层土和填料截留等作用, 延长停留时间, 提高处理效果和处理能力, 是目前广泛研究和

应用的湿地处理系统^[5-7]。人工湿地系统水力停留时间和水流状态与污染物降解与去除效率关系密切, 是维持系统正常运行并充分发挥净化效果的重要参数^[8, 9]。根据一级动力学模型, 潜流人工湿地系统属于稳态和理想推流模式^[10], 但由于人工湿地“黑箱效应”, 目前对实际潜流湿地水流状况及其影响因素并未完全掌握, 导致潜流人工湿地的构筑设

收稿日期: 2007-11-22; 修订日期: 2008-01-15

基金项目: 上海市科委重大科技专项项目 (07dz12052); 上海市科委基金项目 (06dz22109); 同济大学工科基金项目

作者简介: 杨长明 (1973~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤和湿地退化过程、机制和生态修复, E-mail: cmyang@mail.tongji.edu.cn

计往往要借助实践经验,从而造成了各地潜流人工湿地的净化效率差异较大^[11].鉴于此,本试验以典型村镇富营养化养殖水体作为处理对象,系统分析了 2 种不同植物类型水平潜流人工湿地系统中水力停留时间分布特征和污染浓度空间变化,以期为进一步解析潜流人工湿地修复富营养化水体的机制以及实际工程设计提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验研究在长江水环境教育部重点实验室崇明(前卫村)实验基地进行,该地区位于东经 121°30′25″和北纬 31°43′36″.地属亚热带季风气候,多年平均气温 16.5℃,全年无霜期 241 d,日平均气温 10℃以上的喜温植物生长期达 233 d.本试验实际过程中发现气候偏暖,特别是 2006 年冬季比多年平均气温高.

实验基地周围属平原河网地区,水产养殖规模大.养殖方式还是我国传统池塘养殖模式,所投饵料主要是猪粪以及合成饲料,大多数鱼塘水系相对比

较封闭,缺乏必要的水体净化功能;大量饵料的投加在提高鱼产量的同时,也带来了养殖水环境的恶化,鱼病频繁发生,严重影响到池塘养殖的总体效益.另外,养殖废水的排放也带来对周边水环境的污染,所以水环境问题日益成为池塘养殖业发展的制约因素.

1.2 人工湿地处理系统构建

试验装置由 2 套水平潜流湿地系统组成,由 PVC 塑料板焊接而成(见图 1).湿地容积为 0.48 m³ (1.5 m × 0.4 m × 0.8 m),两端各有一个长 15 cm 的进水区和出水区,同时在装置侧面布设 9 个采样口.下部铺设深 10 cm 的碎石(φ10 ~ 12 mm),上部主填料为 50 cm 的碎石(φ 4 ~ 6 mm),水在其中水平流动,常水位 55 cm. 2 个潜流湿地分别种植香蒲(*Typha angustifolia*)与风车草(*Cyperous alternifolius*) (20 株/m²,植物间距为 25 cm).统一使用蠕动泵进水.湿地系统于 2006 年 4 月上旬栽种植物,进行养护,并与 5 月中旬开始正常运行,处理负荷为 0.08 m/d,理论停留时间为 69 h.



图 1 风车草和香蒲人工湿地处理系统装置

Fig.1 Constructed wetlands treatment systems of *Cyperous alternifolius* and *Typha angustifolia*

1.3 进水水质状况

本研究供试的进水取自实验基地附近的养殖鱼塘,面积约为 900 m²,平均水深为 1.5 m,表 1 为该鱼

塘水体基本水质状况,鱼塘水质总体上处于富营养化状态,在 2006 年和 2007 年夏季均出现了蓝藻暴发现象.

表 1 供试鱼塘水体水质状况

Table 1 Water quality of investigated fish pond

指标	COD/mg•L ⁻¹	TN/mg•L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg•L ⁻¹	TP/mg•L ⁻¹	Chla/mg•m ⁻³
范围	38.7 ~ 177.8	1.49 ~ 6.64	0.12 ~ 0.81	0.70 ~ 1.64	33.2 ~ 256.4
平均值	123.6	4.65	0.54	1.15	156.8

1.4 取样与测定方法

在人工湿地装置侧壁距进水端 35、75 和 115 cm 处设有取样口,取样点分上、中、下 3 层,上层取样点设在基质表面下 15 cm 处,中层设在基质表面下 30 cm 处,下层设在基质表面下 45 cm 处(见图

2).湿地系统运行 2 个月稳定期后,各取样点开始采集水样,每月取样 1 次,并立即带回实验室分析.进、出水水样中 COD 用重铬酸钾法;总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解、紫外分光光度法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法;叶绿素 a 采用丙酮提取法;总磷(TP)采用

过碱性硫酸钾消解-紫外分光光度法测定方法;可溶性无机正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)用钼酸铵分光光度法.以上方法均参照文献[12].

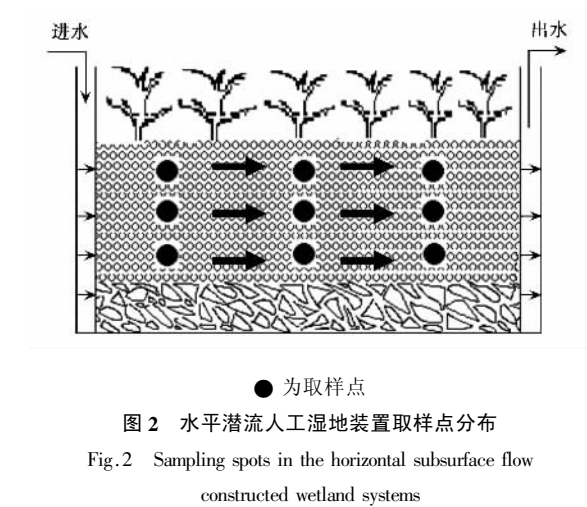


图2 水平潜流人工湿地装置取样点分布

Fig.2 Sampling spots in the horizontal subsurface flow constructed wetland systems

人工湿地系统水力停留时间分布(RTD)采用示踪法^[13]:示踪剂采用氯化锂(LiCl),其工作溶液浓度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.于 2006-09-08 T 21:00 在潜流床体进水端脉冲注入 $7\text{ mL}(\text{Li}:11.53\text{ mg})$ 所配的 LiCl 溶液,同时在出口处取样,之后约每 2 h 取 1 次出水样,并于 2006-09-15 T 11:00 停止取样.采用 ICP-AES 测定湿地出水中 Li^{+} 的浓度,潜流湿地 Li^{+} 背景浓度为 $6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,实际出水 Li^{+} 应减去背景值.

停留时间分布函数[$F(t)$]可以定义为停留时间小于某一时刻的流体在总流体中所占的分率,可表示为:

$$F(t)=\int_0^tE(t)dt\tag{1}$$

式中, $E(t)$ 为停留时间分布密度,停留时间分布函数的特征值平均停留时间 $\bar{t}$ 和方差 σ^2 计算方法:

$$\bar{t}=\frac{\sum tE(t)\Delta t}{\sum E(t)\Delta t}\tag{2}$$

$$\sigma^2=\frac{\sum t^2E(t)\Delta t}{\bar{t}^2\sum E(t)\Delta t}\tag{3}$$

对于全混流,其 $E(t)$ 曲线的方差 $\sigma^2=1.0$;对于水平推流,其 $E(t)$ 曲线的方差 $\sigma^2=0$;所有偏离这 2 种理想流动模式的非理想流动,其方差 σ^2 将处于 $0\sim1.0$ 之间.

2 结果与讨论

2.1 人工湿地系统水力停留时间分布特征

图 3 为香蒲潜流湿地和风车草潜流湿地在水力负荷为 0.08 m/d 下,出水示踪剂停留时间分布(RTD)曲线.从图 3 可明显看出,示踪剂在 2 种植物湿地系统内流态基本一致,在 $t=66\text{ h}$ 左右,两湿地出水 Li^{+} 浓度达到最大值.但比较分析会发现,每个流体单元流经的停留时间不一致,水流在整个介质中呈不均匀流动状态.这可能是由于系统中植物根系的延伸、固体物沉积、生物膜的形成等使基质内部容水间隙分布不均,另外液流本身也有扩散作用的存在^[14, 15].RTD 曲线最后的拖尾较长反映了一部分流体的停留时间偏长,说明供试的 2 种植物类型水平潜流湿地系统内水流存在滞留区.

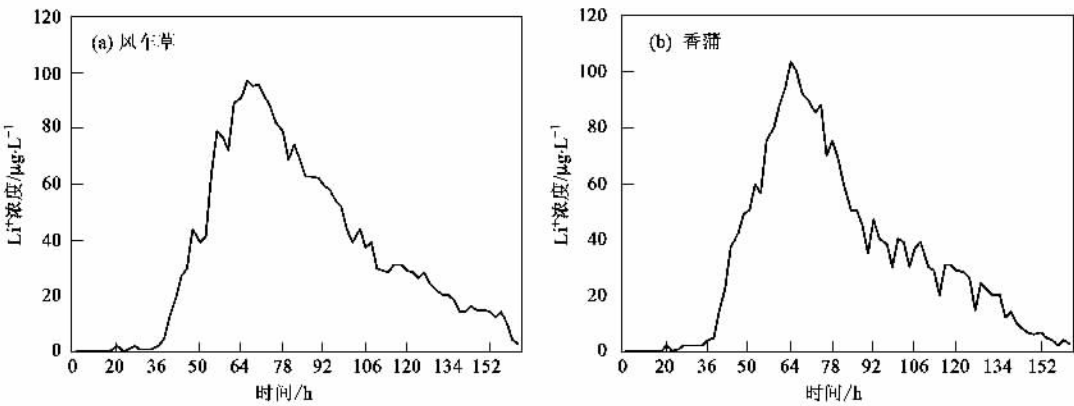


图3 风车草和香蒲停留时间分布(RTD)曲线图

Fig.3 Residence time distributions of constructed wetlands planted with *Cyperous alternifolius* and *Typha angustifolia*

由图 3 还可发现,风车草潜流湿地 RTD 曲线较香蒲潜流湿地平滑,香蒲潜流湿地系统 RTD 曲线尾

部存在多个峰现象,说明该潜流湿地床体内部存在一定程度的内循环,从而造成床体内水流分布明显

长于平均停留时间,这主要是由于床体内部空隙的不均匀造成的,风车草根系多而密,相对在床体内分布较均匀,而香蒲根系密度不如风车草,造成床体空

隙有较大差别。
将风车草和香蒲潜流湿地中示踪锂离子浓度的出流数据代入上述公式(1)~(3),其计算结果见表 2.

表 2 风车草和香蒲潜流人工湿地停留时间分布函数特征值计算表

Table 2 Characteristic values of residence time distribution (RTD) functions of <i>Cyperous alternifolius</i> and <i>Typha angustifolia</i> HSGCWs						
湿地类型	$\sum E(t)\Delta t$	$\sum tE(t)\Delta t$	$\sum t^2E(t)\Delta t$	$\bar{t}/h$	σ^2	回收率/%
风车草湿地	5 479	474 837	13 356 731	86.7	0.324 6	95.0
香蒲湿地	4 997	410 228	13 834 305	82.1	0.410 8	86.7

由表 2 可看出,风车草和香蒲湿地 RTD 方差分别为0.324 6和0.410 8,介于推流和混合流之间,偏向于推流.风车草潜流湿地内部水流停留时间分散程度较低,水流混合流动程度较弱.从实际平均停留时间看,风车草潜流湿地和香蒲潜流湿地分别大于理论停留时间 17.7 h 和 13.1 h,没有发生潜流湿地极易出现的“短路”现象,说明本试验所构建的潜流湿地在防止水流短路上是成功的.但是,由于实际停留时间大于理论停留时间,床体中存在着水的滞留现象.因此,需要通过改进床体、合理分配各填料层以及合适的植物种植搭配来减小理论与实际的水力学差异,以避免死区和短流等不利因素的产生.

2.2 2种植物潜流湿地系统中 TN 和NH₄⁺-N浓度空间分布

考虑到在试验期间,不同月份各采样点污染物浓度变化趋势基本一致,本研究仅对进水富养化程度较高的 7 月份的监测数据进行了统计分析(表 3).从表 3 可明显看出,供试的 2 种植物水平潜流湿地不同深度层次上的总氮(TN)和氨氮(NH₄⁺-N)浓度随沿程逐渐降低,基本符合推流式运行模式.在垂直方向上,2 种植物类型潜流湿地系统 TN 浓度自上而下均呈逐渐增加的变化趋势,NH₄⁺-N浓度则以中层为最低,下层为最高,两者空间分布均表现出明显的分层现象;TN 和NH₄⁺-N在床体空间上的分布,一方面与水平潜流湿地的本身流态特征有关;另一方面,潜流湿地表层复氧能力强,加上中上层植物根系密度高,根际输氧能力和硝化、反硝化能力强^[16],从而有利于对水体中氮的去除.TN 和NH₄⁺-N浓度在垂直方向上的差异,总体上随着沿程逐步减小(表 3),这主要原因可能是,虽然水平潜流湿地系统设计是基于推流,但事实上,多半湿地水流在运行过程中出现斜向下的运动,而非完全水平运动^[17],使得不同层次发生混合现象,本研究结果也证实了这一点(图 3 和表 2).

从表 3 还可明显看出,风车草潜流湿地系统各取样点 TN 和NH₄⁺-N浓度均低于香蒲湿地,说明风车草湿地系统除氮效果要高于香蒲,特别是在中层,风车草湿地系统平均 TN 和NH₄⁺-N浓度较香蒲分别降低了 25.5%和 34.7%.这主要是由于风车草湿地根系较香蒲发达,且大部分分布在中上层,输氧能力和根际微生物活性较强,使得该区域硝化与反硝化能力明显高于香蒲湿地.风车草潜流湿地系统垂直方向上 TN 和NH₄⁺-N平均浓度变异系数为 0.372 和 0.063,而香蒲湿地仅为 0.138 和 0.037,说明风车草潜流湿地 TN 和NH₄⁺-N浓度分层现象较香蒲更为明显.这可能与 2 种湿地系统水流混合强度不同有关,如前面所述,香蒲潜流湿地系统水流混合流动强度高于风车草湿地,从而导致污染物浓度分层差异降低.

表 3 2种植物潜流湿地系统 TN 和NH₄⁺-N浓度空间变化/(mg·L⁻¹)

Table 3 Spatial distributions of TN and NH ₄ ⁺ -N in the horizontal subsurface constructed wetlands/(mg·L ⁻¹)							
湿地类型	床体深度	TN			NH ₄ ⁺ -N		
		前端	中部	后端	前端	中部	后端
风车草湿地	上层	1.616	1.241	0.833	0.686	0.379	0.334
	中层	1.784	1.333	0.934	0.484	0.306	0.267
	下层	2.486	1.809	1.035	1.211	0.544	0.424
香蒲湿地	上层	1.662	1.387	0.882	0.695	0.387	0.352
	中层	2.120	1.586	1.203	0.412	0.359	0.334
	下层	2.785	1.677	1.213	1.074	0.557	0.485

2.3 湿地系统磷浓度空间分布及沿程变化规律

香蒲和风车草水平潜流湿地系统总磷(TP)和正磷酸盐(PO₄³⁻-P)浓度最大值均出现在湿地床体前端,且随沿程逐渐降低(表 4);在垂直方向上,TP 和 PO₄³⁻-P浓度自上而下浓度逐渐升高.这种分层现象主要原因可能是,进水中含有较多的藻类及其他有机悬浮物,受重力影响下,大部分沉降在床体底部,经微生物作用分解后释放出各种含磷物质^[18].这些

含磷物质(包括可溶性正磷酸盐)主要以水平流形式随沿程迁移,使得湿地床体下层样点 TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度高于中、上层取样点.通过比较发现,除床体前端下层外,风车草湿地系统各取样点 TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度皆低于香蒲湿地(表 4),如在湿地床体后端各层取样点 TP 和 PO_4^{3-} -P 平均浓度较香蒲湿地系统分别

表 4 2 种植物潜流湿地系统 TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度空间变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Spatial distributions of TP and PO_4^{3-} -P in the horizontal subsurface constructed wetlands / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

湿地类型	床体深度	TP			PO_4^{3-} -P		
		前端	中部	后端	前端	中部	后端
风车草湿地	上层	0.221	0.179	0.040	0.186	0.118	0.026
	中层	0.398	0.234	0.052	0.327	0.187	0.035
	下层	0.653	0.239	0.057	0.516	0.219	0.036
香蒲湿地	上层	0.241	0.231	0.057	0.202	0.198	0.030
	中层	0.429	0.236	0.059	0.414	0.203	0.038
	下层	0.634	0.276	0.069	0.478	0.246	0.042

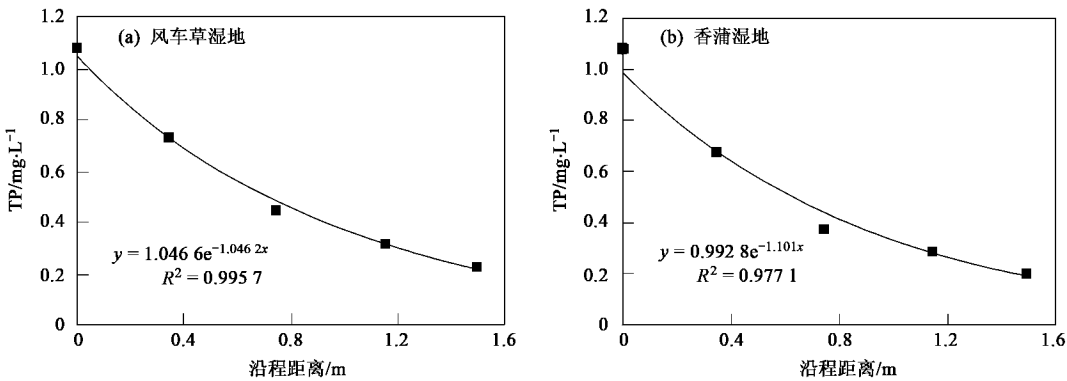


图 4 风车草湿地和香蒲湿地 TP 浓度沿程变化

Fig. 4 Change in TP along distance in the constructed wetlands planted with *Cyperous alternifolius* and *Typha angustifolia*

3 结论

(1) 供试的 2 种植物类型水平潜流湿地流态介于推流和混合流之间,偏向于推流,湿地中存在着死区和反混现象,造成了了流体单元的停留时间不均;风车草潜流湿地水力停留时间分布曲线较香蒲潜流湿地平滑,湿地内部水流停留时间分散程度较低,水流混合流动程度较弱.

(2) 2 种植物水平潜流湿地不同深度层次上的 TN 和 NH_4^+ -N 浓度随沿程逐渐降低,基本符合推流式运行模式;TN 在垂直方向上表现为从上至下逐渐增加的变化趋势, NH_4^+ -N 浓度则以中层样点为最低;风车草潜流湿地 TN 和 NH_4^+ -N 浓度分层现象较香蒲湿地更为明显,且总体对氮去除效果优于香蒲潜流湿地.

低 19.3% 和 11.9%,说明风车草湿地系统对富营养化养殖水体中磷的去除效果优于香蒲湿地.由于 2 种植物类型湿地基质完全相同,形成这种差异这可能与不同湿地植物系统中磷的生物地球化学循环过程(如植物吸收、微生物作用等)存在差异有关^[19].笔者目前的研究也表明,风车草湿地和香蒲湿地系统植物磷吸收量和微生物群落代谢特征存在明显差异^[20].

风车草和香蒲潜流湿地系统内 TP 浓度沿程变化曲线见图 4 所示.从中可知,2 种植物类型湿地系统中 TP 的沿程变化均呈指数变化规律,趋势线拟合度高.从图 4 还可明显看出,香蒲湿地和风车草潜流湿地前段(床体前 1/2 部分)对 TP 的去除率别为 58.6% 和 65.9%,说明在湿地床体前、中段,风车草潜流湿地对磷的去除作用高于香蒲潜流湿地,但这种差异总体随沿程逐步降低.

(3) TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度在 2 种植物类型湿地垂直方向呈现自上而下逐步增加,随沿程逐渐降低;TP 随沿程呈指数函数变化规律,趋势线拟合良好.风车草湿地系统后端各层取样点平均 TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度均低于香蒲湿地系统,说明风车草湿地系统对富营养化养殖水体中磷的去除效果优于香蒲湿地.

参考文献:

[1] Zhang M K, Fang L P. Phosphorus accumulation and eutrophication in feed-supply freshwater fishponds [J]. Journal of Environmental Science, 2006, 18 (4): 816-821.

[2] 宁丰收,刘俊远,古昌红,等.重庆典型养殖鱼塘富营养化调查与评价[J].农业环境与发展,2004, 21(3):37-39.

[3] Gao B, Ge Y, Liu Q X, et al. Purifying performance of constructed wetland treating light eutrophic water in an ornamental fishpond [J]. Fresh Environ Bull, 2006, 15 (12): 1563-1567.

[4] 聂志丹,年跃刚,金相灿,等.3 种类型人工湿地处理富营养

- 化水体中试比较研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1675-1680.
- [5] Matamoras V, Puigagut J, Garcia J, *et al.* Behavior of selected priority organic pollutants in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A preliminary screening [J]. Chemosphere, 2007, **69**(9): 1374-1380.
- [6] Christina V, Reimo A, Kaspar N, *et al.* Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2007, **380**: 66-74.
- [7] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 253-256.
- [8] Florent C, Gérard M, Yves G. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2003, **21**: 165-173.
- [9] Johan K, Anders W, Hakan J, *et al.* Controlling factors for water residence time and flow patterns in Ekeby treatment wetland, Sweden [J]. Advances in Water Resources, 2007, **30**: 838-850.
- [10] 闻岳, 周琪. 水平潜流人工湿地模型[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(2): 456-462.
- [11] Suliman F, Futsaether C, Oxaal U, *et al.* Effect of the inlet-outlet positions on the hydraulic performance of horizontal subsurface-flow wetlands constructed with heterogeneous porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, **87**: 22-36.
- [12] 国家环保总局编. 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.
- [13] David O, Joan V, Màngels G, *et al.* Application of residence time distribution technique to the study of the hydrodynamic behaviour of a full-scale wastewater treatment plant plug-flow bioreactor[J]. Journal Chemical Technology Biotechnology, 2005, **80**(4): 425-432.
- [14] Bernhard H S, Michael A H, Ursula S. Salt tracer experiments in constructed wetland ponds with emergent vegetation: laboratory study on the formation of density layers and its influence on breakthrough curve analysis[J]. Water Research, 2004, **38**: 2095-2102.
- [15] Jeff F H, Jay F M, Timothy G, *et al.* Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics[J]. Ecological Engineering, 2004, **23**: 189-203.
- [16] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 1965-1969.
- [17] Piotr M, Przemysław W, Piotr C. Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds: Constructed wetland in Nowa Słupia (Poland) [J]. Journal of Hydrology, 2006, **331**: 630-642.
- [18] Pratt C, Shilton A, Richard G, *et al.* Phosphorus removal mechanisms in active slag filters treating waste stabilization pond effluent [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(9): 3296-3301.
- [19] Dunne E J, Reddy R, Clark M W. Biogeochemical indices of phosphorus retention and release by wetland soils and adjacent stream sediments[J]. Wetlands, 2006, **26**(4): 1026-1041.
- [20] 邓欢欢. 农村富营养化天然水体的人工湿地净化机理研究[D]. 上海: 同济大学环境科学与工程学院, 2007.