

随机间歇运行条件下人工湿地中磷的去除机制

肖海文, 翟俊, 王涛, 卢观彬

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:通过试验研究,考察了随机间歇进水运行条件下,水平潜流人工湿地对模拟径流中磷的去除效果与机制。结果表明:在随机间歇进水、进水表观水力停留时间为36 h的运行条件下,水平潜流人工湿地对模拟城市径流中总磷的去除率为59.3%,年平均去除负荷为 $13.826 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;对溶解性磷的去除率为29.8%,年平均去除负荷为 $3.310 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。植物吸收对模拟径流中总磷的去除贡献较小,但对溶解性磷的去除作用显著,植物对磷的年吸收量为 $1.816 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,分别占人工湿地对磷的年总去除量的13.2%和溶解性磷去除量的54.85%;磷在填料固体累积物中的沉积和填料对磷的直接吸附是人工湿地的主要除磷机制,磷在人工湿地填料固体累积物内的年储留量为 $5.372 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占人工湿地对磷的年总去除量的38.9%,填料直接吸附去除的磷为 $6.640 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占人工湿地年磷总去除量的48.0%。

关键词:人工湿地;磷;径流处理;随机间歇运行

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)04-0105-06

Phosphorus Removal Mechanisms in Constructed Wetland under Stochastic Intermittent Inflow

XIAO Haiwen, ZHAI Jun, WANG Tao, LU Guanbin

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Phosphorus removal and its mechanisms by horizontal subsurface (HSSF) constructed wetland to treat simulated runoff under stochastic inflow condition have been investigated based on an experiment study. The results indicate that under stochastic inflow condition and with constant inflow rate of nominal hydraulic retention time of 36 h, the removal rate of the experimental HSSF constructed wetland for total phosphorus (TP) and total phosphorus (DTP) are 59.3% and 29.8% respectively, and the yearly removal load for TP and DTP are 13.826 and $3.310 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ respectively. Removal of phosphorus by macrophytes assimilation is $1.816 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, which makes up 13.2% of the TP removal and 54.85% of the DTP removal in the constructed wetland. It is indicated that macrophytes assimilation is not the main mechanism for the removal of total phosphorus while it has significant effect on the removal of dissolved phosphorus. The main mechanism for phosphorus removal by the constructed wetland are phosphorus retention in sediments accumulated in the substrates and adsorption by the substrates. The yearly phosphorus retention in sediments accumulated in the substrates is $5.372 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, which contributes to 38.9% of the total phosphorus removal. And yearly phosphorus adsorption by the substrates is $6.640 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, which contributes to 48.0% of the total phosphorus removal.

Key words: constructed wetland; phosphorus; runoff treatment; stochastic intermittent inflow

收稿日期:2011-09-14

基金项目:国家水专项:水体污染控制与治理项目(No. 2009ZX17315-006)

作者简介:肖海文(1976-),女,博士,主要从事废水处理与资源化利用研究,(E-mail) xiaohaiwen99@163.com。

随着点源污染控制水平的提高,面源污染对我国水环境的威胁日益突出。人工湿地作为一种废水生态处理技术,以其能随机间歇运行、抗冲击负荷能力强、无复杂操控设施等优势在农业径流及城市径流污染控制中的应用日益受到关注,现已成为面源污染中氮、磷等营养盐控制的重要技术对策之一^[1-3]。虽然自 20 世纪初,第一个人工湿地建成运行至今,人工湿地在除磷方面的研究取得了重大进展^[4],但这些研究绝大多数都建立在连续流进水、水质水量相对恒定的常规稳态运行基础之上,这与雨水径流处理随机间歇进水,水质水量波动的运行条件有本质的差别。而在实际运行中,由于降雨导致的特殊的运行条件,径流处理人工湿地往往表现出与常规废水处理人工湿地明显相异的磷去除规律^[5-8]。目前,针对径流处理人工湿地实际运行条件对磷去除规律的研究较少,径流处理人工湿地随机间歇运行下的磷去除机制并不明确,使得人工湿地在面源污染、富营养化控制领域的进一步应用受到很大限制。

笔者以水平潜流人工湿地为例,模拟设有前置调蓄设施的径流处理人工湿地的运行条件,考察随机间歇进水运行条件下,磷的去除效果、季节性特点以及磷在湿地内的滞留转化机制。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验水平潜流人工湿地装置位于重庆大学城环学院实验室外,如图 1 所示。

试验人工湿地分为并列 2 组,每组 15.3 m²,由进水井、湿地床和出水井 3 部分构成。主体湿地床为廊道折流式,每组共有 3 个沟槽式廊道,廊道总长为 21.0 m,宽 0.8 m,沟底坡度为 2%。湿地床内填料采用本地石灰岩质砾石填料,填充高度 0.6 m,填料粒径为 10~15 mm。2 组湿地床内的植物均为本地风车草 (*Cyperus alternifolius*) 和菖蒲 (*Iris pseudoacorus*),平均种植密度分别为 20~25 株/m² 和 40~45 株/m²。进水井通过阀门控制进水流量。出水井通过水位调节阀可将湿地水位控制在 0.2、0.4、0.6 m。

1.2 试验安排和水样采集

2008 年 1 月—12 月,考察在表观水力停留时间 HRT 为 36 h、水深 0.4 m 的随机间歇运行条件下,人工湿地对模拟城市径流中磷的净化效果。间歇进水每次持续时间为 7 或 14 d,随机安排;2 次进水的间隔为 1、3 或 8 d,同样随机安排。进水水质模

拟实测城市住宅区径流水质^[7],采用校园生活污水、自来水配制而成。该模拟径流内磷浓度见表 1。

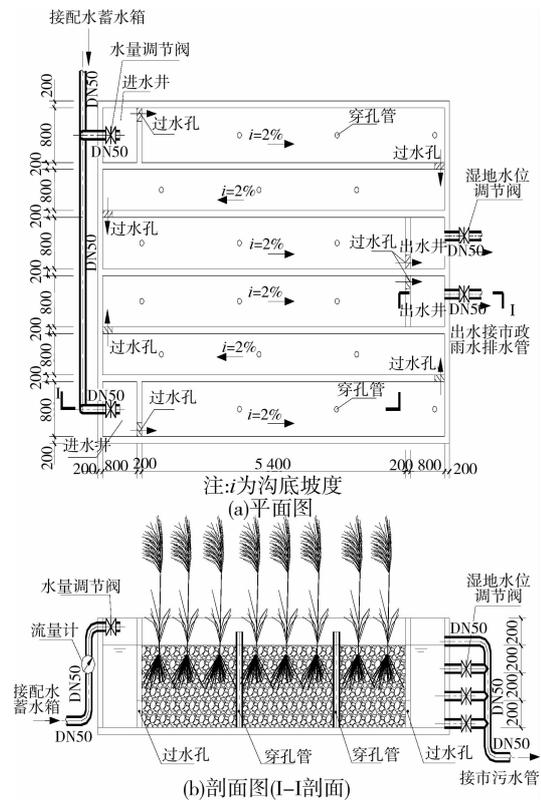


图 1 试验人工湿地装置平剖 面图

表 1 人工湿地进水磷浓度

	TP/(mg·L ⁻¹)	DTP/(mg·L ⁻¹)	DRP/(mg·L ⁻¹)
范围	0.78~1.23	0.28~0.67	0.23~0.58
均值	0.98	0.47	0.41

1.3 采样和分析方法

水样在试验进水期间采集,采样点包括进、出水井和沿程 9 个采样点(见图 1)。进、出水井直接采样,频率 2 次/周;沿程采样点在穿孔管内抽吸采样,抽吸深度为水下 0.1 m,采样频率 1 次/月。植物样与基质样在试验开始(2008 年 1 月)与结束(2008 年 12 月)时采集。在湿地中沿程均匀选择 6 个植物取样断面,每一断面取植物整株 3 株,现场测定鲜重。基质采样用内径 5 cm PVC 柱状采样器,沿流程均匀选择 6 个采样点,每个采样点采集 2 个平行样,常温风干待测。

水样中总磷(TP)和正磷酸盐(DRP)按文献^[9]方法测定。DTP 为按测试方法定义的溶解态总磷,即水样用 45 μm 滤膜抽滤后测定的 TP 值。人工湿地内 pH 值采用哈希 sensION 便携 pH 计在采样点穿孔管内现场测定。植物样中磷含量按不同部位测定:根、茎和叶分别测定干重及含水率,再分别于

60℃下烘干至恒重,研磨后用 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消解,定容 50 mL,之后按水样的测定方法测定总磷含量。基质内固体累积物及磷含量的测定方法为:对风干后的填料进行完全洗脱(蒸馏水充分搅拌清洗过筛($\Phi 2$ mm)后,置于 500 mL 三角瓶内,于 25℃和 300 次/min 恒温振荡器中振荡清洗 48 h 后再过筛,按文献[9]方法测定 2 次清洗混合液中的 TSS 浓度与 TP 浓度,换算为单位面积基质内的 TSS 与磷的含量,以 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 计。

2 结果与讨论

2.1 TP 和 DTP 的去除效果分析

在 HRT 为 36 h 的恒定进水负荷、随机间歇运行条件下,人工湿地中磷在各月份的平均进、出水浓度和去除率见图 2 和图 3。

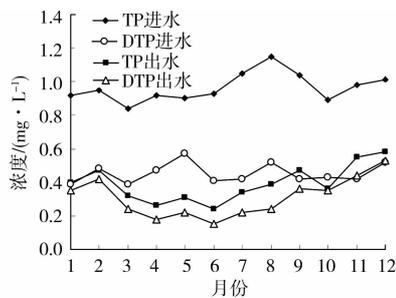


图 2 不同月份人工湿地进出水中磷的浓度

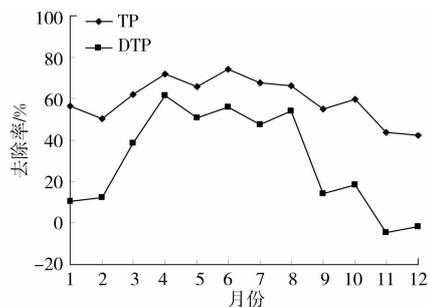


图 3 不同月份人工湿地磷去除率

由图 2 和图 3 可知,人工湿地中 TP 去除效果良好,平均去除率达到 59.3%,年均去除负荷为 $13.830 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。出水 TP 均值浓度能达到 GB 3838-2002 V 类非湖库水质标准($0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。季节变化对 TP 的去除率影响不大。溶解性磷 DTP 去除率相对较低,年均去除负荷为 $3.310 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,平均去除率仅 29.8%,而且受季节变化影响很大,夏季去除率明显高于冬季。这一结果与 O'Luanaigh 等^[10]报道的水平潜流人工湿地对溶解性磷去除效果类似,该人工湿地在连续流进水条件下对正磷酸盐的去除率为 22%,表明人工湿地无论在连续进水

或间歇进水条件下,对溶解性磷的去除效果均较低。

经人工湿地处理后,废水磷素组份构成发生了很大变化。由表 1 可知,进水 DTP/TP 为 47.0%,而出水 DTP/TP 上升至 79.8%,表明人工湿地中磷的去除主要依靠颗粒态磷的沉淀、截滤等作用去除。然而,颗粒态磷素实际包含了颗粒态有机磷与颗粒态无机磷,颗粒态的有机磷在基质中沉降、截滤后往往并不稳定,Kadlec^[4]认为这部分有机磷素在基质内的异氧菌作用下会由有机态、聚合态的磷转化为无机态的磷酸盐,部分磷酸盐可与基质内的钙、镁等离子或水合物发生反应重新沉淀,而部分则会释放入水相,使水中溶解性磷浓度增加。

2.2 磷在人工湿地中的沿程去除规律

进水期间,TP 和 DTP 在人工湿地水相中的沿程分布见图 4。

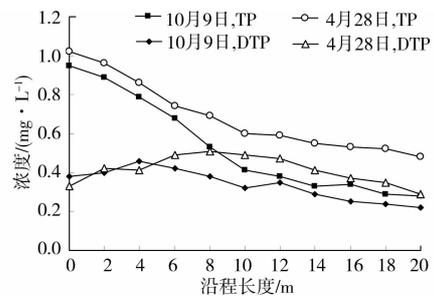


图 4 TP 和 DTP 在人工湿地水相中的沿程分布

由图 4 可知,TP 浓度在湿地床内沿程下降,前半段(前 10 m)下降趋势较陡而后半段则趋于平缓。TP 在人工湿地前 10 m 段的去除量约占人工湿地 TP 总去除量的 3/4。

溶解性磷 DTP 浓度在人工湿地内的分布则出现了起伏波动,前 6~8 m 段有一定的增长趋势,表明人工湿地前段存在溶解性磷释放现象,对溶解性磷的稳定去除主要集中在人工湿地后段。TP 曲线和 DTP 曲线之间的距离变化代表了颗粒态磷在人工湿地水相中的分布变化,由图 4 可看出,颗粒态磷在人工湿地中前 10 m 段迅速减少,之后趋于稳定,变化很小。这一现象也表明湿地床前半段磷的去除主要以颗粒态磷在基质内的物理性沉淀和截滤作用为主。

除植物吸收外,溶解性磷在人工湿地中的去除主要以靠各类吸附和化学沉淀反应。这些作用过程与水相中的理化性质(如 pH、溶解氧水平等)和存在的金属离子类型密切相关。例如酸性条件下,可溶性磷酸盐主要与铝、铁离子及其氧化物发生化学沉淀反应而从水中去除;碱性条件下,磷酸盐则主要靠与水中钙离子形成难溶性磷酸钙而沉淀,pH 值越高,钙盐沉淀发生解吸重新溶解进入水相的可逆作

用就越弱^[11-12]。另外,低溶解氧水平的还原性条件会导致基质中沉积的水合磷酸铁溶解释放出铁离子和磷酸根离子^[4]。

试验中,人工湿地内沿程 pH 值如图 5 所示,表现为先下降后略上升的分布,在湿地中段达到最低值。由于试验人工湿地填料采用的富含 Ca^{2+} 的石灰岩砾石,因此湿地前段 pH 值的降低不利于水中可溶性磷酸盐的沉淀。其次,湿地前半段颗粒性有机磷在异养微生物作用下的分解以及高浓度有机物的耗氧导致的低溶解氧还原性条件^[4]均为人工湿地内磷的释放创造了条件,这与湿地内 DTP 在前半段表现出的上升和波动趋势是一致的。因此,综上所述,人工湿地内 pH 值的降低、颗粒态有机磷的释放以及低溶解氧还原性条件应是导致人工湿地内溶解性磷去除率不高的 3 个主要原因。

2.3 植物对磷的吸收

废水中溶解性磷可通过人工湿地中植物的直接

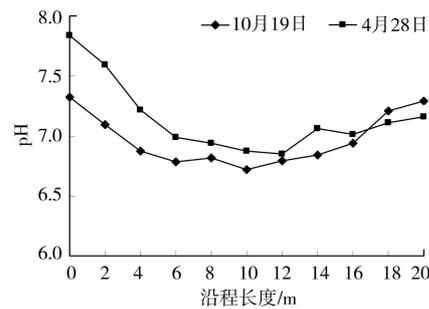


图 5 人工湿地中 pH 沿程分布

吸收同化而被去除。植物对磷的吸收体现在植物量的增值和植物体内磷浓度的增加 2 方面。2008 年 1 月、12 月分别测定了试验人工湿地中风车草和菖蒲 2 种植物不同部位的磷含量,如表 2 所示。由于在此期间植物未进行过收割,因此 2 次人工湿地植物中磷的含量之差,可作为 2008 年植物生长从湿地系统中吸收的磷量。

表 2 1 a 中植物对磷的吸收存留量

样品	部位	背景值(2008 年 1 月测定)				1 a 后(2008 年 12 月测定)			
		鲜重/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	含水率	全磷含量/ %	单位湿地面积 植物磷含量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	鲜重/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	含水率	全磷含量/ %	单位湿地面积 植物磷含量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
风车草	叶	0.00			0.000	1.84	0.68	0.105	0.618
	茎	0.00			0.000	1.38	0.65	0.086	0.415
	根	1.52	0.65	0.058	0.309	2.32	0.61	0.061	0.552
菖蒲	茎叶	0.53	0.60	0.102	0.216	1.09	0.61	0.097	0.412
	根	0.94	0.68	0.061	0.183	1.48	0.69	0.066	0.303
凋落物		0.00			0.000	0.43	0.49	0.102	0.224
小计					0.708				2.524

由表 2 可看出,人工湿地运行 1 年后,风车草和菖蒲根、茎、叶中磷含量均无明显增长,表明在低磷进水浓度下(进水磷浓度远低于生活污水),磷在植物体内并无浓度富集现象,植物对磷的吸收主要依靠植物量的增长。本试验中风车草由于植株高大,生长旺盛,其吸收累积的磷量占整个植物磷累积量的 70.3%。

磷在风车草和菖蒲不同部位中的含量高低均为:叶>茎>根,与陈桂葵等^[13]的研究结果相同。

由于湿地形式、植物种类、进水水质及运行方式的差异,不同湿地植物同化吸收去除废水中磷的能力差别很大^[13-15]。Kadlec^[4]报道了多个潜流人工湿地植物对磷的年吸收量范围为 $2.000\sim 4.900\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。如表 2 所示,本试验中植物对磷的年吸收量为

$1.816\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,低于这一范围,这主要是由于间歇进水和进水磷浓度较低导致的。试验植物对磷的吸收去除量占人工湿地年总磷去除量($13.826\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 13.2%。由此可见,在间歇运行、低进水浓度下植物生长吸收对总磷的去除作用较小。

然而值得注意的是,人工湿地中可溶性正磷酸盐是唯一能被植物或藻类直接吸收的磷的形式^[15],试验人工湿地溶解性总磷的年平均去除负荷为 $3.310\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,则可计算出试验人工湿地内植物对溶解性总磷的去除贡献率为 54.85%,即一半以上的溶解性磷是依靠植物的直接吸收同化作用去除的。这表明植物对可溶性磷的去除作用是显著的,而且对于溶解性磷酸盐含量所占比例越高的废水,植物同化吸收产生的除磷的作用将会更为明显。

2.4 磷在人工湿地基质内的储留

湿地的基质一直被公认为是进入湿地系统的磷的最终归宿。人工湿地中磷的固定主要通过3种方式:1)基质表面发生的化学沉淀和吸附作用;2)基质内细菌、真菌、藻类等微生物的同化吸收作用;3)被基质内沉积的有机或无机颗粒吸附而从水中去除。

试验在2008年1月、12月分别进行了人工湿地基质取样,测定了基质内固体累积物中的磷含量,2次测定结果的差值可间接代表该年湿地内由微生物同化和固体颗粒物沉积所导致的磷在人工湿地中的储留量。其测定和计算结果见表3所示。

表3 基质内固体累积物中磷的储留量测定和计算

项目	2008年 1月测定	2008年 12月测定
基质内固体累积物平均含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	9.48	19.49
TSS内总磷平均含量/%	0.049	0.061
单位重量填料内累积磷平均含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	4.645	11.889
单位面积的填料累积物中磷平均 含量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	3.445	8.817
基质固体累积物中磷全年储留量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)(2次测定值之差)	5.372	

从表3可看出,试验1a间,人工湿地基质内的固体累积物量有很大增长,为试验前本底值的2.06倍,这部分固体累积物由基质内的微生物以及沉积于基质内的有机或无机颗粒物组成;固体累积物中的磷浓度也有较大增加。磷在基质固体累积物中的年平均储留量达到 $5.372\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,高于植物吸收量,占人工湿地系统年磷总去除量的38.9%。这部分磷储留量为微生物和沉积固体累积物中的磷含量之和。Kadlec等^[4]研究表明,虽然微生物活动对磷的同化吸收速率非常快,但由于微生物世代短,对磷的储留总量是有限的。Vymazal等^[16]的研究也表明湿地微生物的吸收同化对磷的储留是暂时,随着生物细胞体的死亡解体,这部分磷最终会释放重新进入水中。因此可认为试验所测的这部分磷储留量主要存在于基质内除微生物外的固体沉积物中。

湿地基质中沉积的固体物质主要由水中沉淀截滤下的无机颗粒、有机颗粒、植物及微生物残体分解后形成的惰性腐殖质等构成。研究表明^[17],天然淡水表流湿地系统沉积物中磷储留量为 $0.060\sim 0.900\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,但在进水磷浓度较高的废水处理人工湿地系统中,沉积物中的磷含量却可达到 $75\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。Elizabeth等^[18]通过湿地沉积物界面

薄层中的磷平衡浓度考察人工湿地累积物对磷的吸收和释放,结果表明,沉积物-水的界面薄层上活性溶解性磷浓度高达 $29.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明沉积物对磷有很强的吸附作用。

可以认为试验中,除了已测定的植物吸收量和填料中固体累积物内的储留量,其余磷均被湿地砾石填料所吸附或通过化学沉淀作用沉积于填料表面,不易洗脱。因此,填料吸附和而沉积去除的磷为年总磷去除量减去植物吸收量和固体累积物中的储留量,则这部分磷为 $6.640\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占总磷去除量的48%。基质对磷的吸附性能和基质物理性质密切相关,试验采用重庆本地石灰岩砾石,富含钙离子,有利于磷的吸附沉淀。例如Koiv等^[19]考察了富含钙离子的水合页岩灰填料在不同进水负荷下对磷的去除,结果表明填料内的钙离子与磷的化学沉淀是除磷的主要机制。Zhang等^[20]研究考察了多种含钙湿地基质对磷的去除量,结果为 $6.280\sim 8.250\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,与本研究结果类似。由此可见,在间歇运行、低磷进水负荷的人工湿地系统中,磷的去除仍然主要依靠基质内的吸附、化学沉淀作用。

3 结论

1)在随机间歇进水、进水HRT为36h的运行条件下,水平潜流人工湿地对模拟径流中TP的去除率为59.3%,年平均去除负荷达到 $13.826\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;对溶解性磷DTP的去除率为29.8%,年平均去除负荷为 $3.310\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2)TP在水平潜流人工湿地内沿程下降,可溶性磷酸盐DTP受有机磷释放和湿地pH值下降的双重影响,呈现出先上升后下降的趋势。

3)植物直接吸收对模拟径流中总磷的去除贡献较小,但对溶解性磷的去除作用显著。植物对磷的年吸收量为 $1.816\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,分别占人工湿地对磷的年总去除量的13.2%和年溶解性磷去除量的54.85%。

4)磷在填料固体累积物中的沉积及填料对磷的化学吸附、沉淀是人工湿地的主要除磷机制。磷在人工湿地填料固体累积物内的年储留量为 $5.372\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占人工湿地年磷总去除量的38.9%。由填料直接吸附去除的磷为 $6.640\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占人工湿地对磷的年总去除量的48%。

参考文献:

- [1] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater

- runoff [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 735-743.
- [2] Yates C R, Prasher S O. Phosphorus reduction from agricultural runoff in a pilot-scale surface-flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(12): 1693-1701.
- [3] White S A, Taylor M D, Albano J P, et al. Phosphorus retention in lab and field-scale subsurface-flow wetlands treating plant nursery runoff [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(12): 1968-1976.
- [4] Kadlec R H, Wallace S D. *Treatment wetlands* [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [5] Lu S Y, Wu F C, Lu Y F, et al. Phosphorus removal from agricultural runoff by constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 402-409.
- [6] Sovik A K, Morkved P T. Use of stable nitrogen isotope fractionation to estimate denitrification in small constructed wetlands treating agricultural runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 392(1): 157-165.
- [7] 肖海文, 翟俊, 邓荣森, 等. 处理生态住宅区雨水径流的人工湿地运行特性研究 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 34-38.
- XIAO Haiwen, ZHAI Jun, DENG Rongshen, et al. Performance of constructed wetland for treatment of stormwater runoff in eco-residential area [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 34-38.
- [8] Beutel M W, Newton C D, Brouillard E S, et al. Nitrate removal in surface-flow constructed wetlands treating dilute agricultural runoff in the lower Yakima Basin, Washington [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1538-1546.
- [9] 国家环境保护局. *水和废水监测分析方法* [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] O'Luanaigh N D, Goodhue R, Gili L W. Nutrient removal from on-site domestic wastewater in horizontal subsurface flow reed beds in Ireland [J]. *Ecological Engineering*, 36(10): 1266-1276.
- [11] Babatunde A O, Zhao Y Q, Zhao X H. Alum sludge-based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: Concept, design and performance analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 6576-6579.
- [12] 李晓东, 孙铁珩, 李海波, 等. 人工湿地除磷研究进展 [J]. *生态学报*, 2007, 27(31): 1226-1232.
- LI Xiaodong, SUN Tieheng, LI Haibo, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(31): 1226-1232.
- [13] 陈桂葵, 陈桂珠. 白骨壤模拟湿地系统中磷的分配循环及其净化效应 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 627-632.
- CHEN Guikui, CHEN Guizhu. Phosphorus cycling in a simulated wastewater-affected mangrove (*Avicennia marina*) wetland system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 627-632.
- [14] Iamchaturapatr J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29: 287-293.
- [15] Hu L M, Hu W P, Deng J C. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(12): 1725-1732.
- [16] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [17] Maine M A, Sune N, Hadad H, et al. Temporal and spatial variation of phosphate distribution in the sediment of a free water surface constructed wetland [J]. *Science of the total environment*, 2007, 380(1-3): 75-83.
- [18] Palmer-Felgate E J, Bowes M J, Stratford C, et al. Phosphorus release from sediments in a treatment wetland: Contrast between DET and EPC0 methodologies [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 826-832.
- [19] Koiv M, Liira M, Mander U, et al. Phosphorus removal using Ca-rich hydrated oil shale ash as filter materiale: the effect of different phosphorus loadings and wastewater compositions [J]. *Water Research*, 2010, 44(18): 5232-5239.
- [20] Zhang Z J, Wang Z D, Wang Y W, et al. Properties of phosphorus retention in sediments under different hydrological regimes: a laboratory-scale simulation study [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(3/4): 109-116.