

聚丙烯小球对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的优化研究

汤显强¹, 李金中², 李学菊², 刘学功², 黄岁^{1*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津市水利科学研究所, 天津 300061)

摘要: 采用页岩和香蒲(*Typha latifolia* L.) 构建人工垂直潜流湿地处理津河富营养化水体, 并用聚丙烯小球替代部分页岩研究其对垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响. 设计水力负荷 800 mm/d, 理论水力停留时间 12 h. 试验期间(2006-06 ~ 2006-11), 氮磷月平均去除率在 8 月份达到最大值. 与全页岩湿地相比, 聚丙烯小球使氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总氮(TN)、溶解性活性磷(SRP)和总磷(TP)月平均去除率分别提高 13.38%、8.9%、9.29% 和 8.25%, 使用聚丙烯小球能够有效提高人工垂直潜流湿地氮磷去除效率. 试验结束后收割香蒲地上组织(茎和叶), 测定地上组织生物量及茎、叶中的氮磷含量. 结果表明, 聚丙烯小球虽然抑制香蒲地上组织生物量的增加, 但却能够有效提高茎、叶中氮磷含量. 通过收割香蒲地上组织可使 TN 和 TP 去除分别增加 29.382 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 13.469 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$.

关键词: 聚丙烯小球; 人工湿地; 氮; 磷; 香蒲

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1284-05

Optimization of Nitrogen and Phosphorus Removal in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands by Using Polypropylene Pellet as Part of Substrate

TANG Xian-qiang¹, LI Jin-zhong², LI Xue-ju², LIU Xue-gong², HUANG Sui-liang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Hydraulic Science Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Constructed wetlands experiments were conducted by using shale and *Typha latifolia* L. as vertical subsurface flow constructed wetland substrate and plant for eutrophic Jin River water treatment, and part of shale with polypropylene pellet was replaced to investigate its effect on nitrogen and phosphorus removal. In this study, hydraulic loading rate was equal to 800 mm/d, theoretic residence time was equal to 12 h. During the entire running period, maximal monthly mean ammonia-nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), total nitrogen (TN), soluble reactive phosphorus (SRP) and total phosphorus (TP) removal rates were observed in August 2006. In contrast to the full shale used wetland, polypropylene pellet enhanced ammonia-nitrogen, total nitrogen, soluble reactive phosphorus and total phosphorus removal by 13.38%, 8.9%, 9.29% and 8.25% respectively. After finishing the experiment, aboveground plant biomass (stems and leaves) of *Typha latifolia* L. was harvested, and its weight and nutrient content (total nitrogen and total phosphorus) were measured. Analysis of aboveground plant biomass indicated that polypropylene pellet restrained the increase in biomass but stimulated assimilation of nitrogen and phosphorus into stems and leaves. The subsequent harvesting of the plants resulted in the additional removal of total nitrogen and phosphorus of about 29.382 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ and 13.469 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively.

Key words: polypropylene pellet; constructed wetland; nitrogen; phosphorus; *Typha latifolia* L.

人工垂直潜流湿地通过填料、植物及生长在填料和植物根系表面微生物的共同作用将进入湿地系统的氮磷等污染物去除^[1,2]. 有关湿地填料、植物及微生物去除氮磷的机理及影响因素见文献[2]. 操作条件影响潜流湿地脱氮除磷效果. 延长水力停留时间、合理添加碳源改善微生物活性等措施有利于提高湿地氮磷去除效率^[1~4]. 除了操作条件外, 湿地填料作为污染物吸附滞留和湿地微生物的附着载体, 直接影响氮的吸附、生物吸收、硝化-反硝化及磷的吸附沉降、生物吸收等过程^[2~4]. 选取具有较高表面积且具备较好生物亲和性的填料有助于改善人工湿地脱氮除磷性能.

与页岩、粗砾石等传统湿地填料相比, 聚丙烯小球比表面积大、亲水性和生物亲和性良好、可提高微生物浓度及活性, 常用作生物接触氧化池的填料处理各类污水且具备较好氮磷去除效果^[5,6], 但聚丙烯小球作为填料在人工湿地内使用尚鲜见报道. 基于聚丙烯小球的上述优点, 本试验采用聚丙烯小球替代部分页岩作为人工潜流湿地填料, 开展聚丙烯小

收稿日期: 2007-05-20; 修订日期: 2007-09-07

基金项目: 天津市科委重大基金项目; 国家自然科学基金项目(50479034); 教育部留学归国服务人员启动基金项目; 南开大学“引进人才科研启动项目”; 现代水利科技创新项目(XDS2007-05)

作者简介: 汤显强(1981 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: ambition@ mail. nankai. edu. cn

* 通讯联系人, E-mail: slhuang@nankai. edu. cn

球对潜流湿地氮、磷去除性能的优化研究.

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

采用室外试验研究聚丙烯小球对人工垂直潜流湿地氮磷去除的影响.垂直潜流湿地系统包括1个下行潜流湿地单元和1个上行潜流湿地单元(图1),2个湿地单元尺寸相同,具体为内径0.5 m,高1.3 m.潜流湿地单元填充不同深度的页岩、粗砾石(理化性质见文献[7])和聚丙烯小球(主要性能参数见表1)作为湿地填料.试验装置共3套(A:部分页

岩+聚丙烯小球、B:全页岩、C:无植物对照).潜流湿地装置B与A不同的是采用页岩替代A中的聚丙烯小球,装置C的填料设置与B完全相同.以A为例,A的下行潜流湿地单元填充30 cm粗砾石作为底料,起收水和支撑作用.粗砾石上充填20 cm聚丙烯小球和40 cm页岩作为主填料层,最后为防止进水管堵塞,在页岩表面填充15 cm粗砾石.上行潜流湿地单元填充20 cm聚丙烯小球和30 cm页岩为主填料,其余填料设置情况与下行潜流湿地单元相同.下行潜流湿地进水管高度为1.0 m,上行潜流湿地出水管高度为0.9 m,设计0.1 m的高度差保证污

表 1 聚丙烯小球的主要性能参数
Table 1 Major properties of biofilm carrier

填料名称	直径 /mm	比表面积 /m ² •m ⁻³	孔隙率 /m ³ •m ⁻³	堆积系数 /个•m ⁻³	堆积密度 /kg•m ⁻³	材质
多面空心球	25	460	0.81	85 000	210	聚丙烯

水自重力流动.

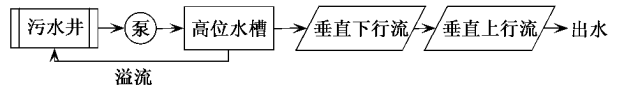


图 1 人工垂直潜流湿地流程

Fig.1 Schematic diagram of sub-surface vertical-flow constructed wetland

1.2 植物种植及驯化

2006-05-01,在A、B的每个潜流湿地单元内种植8株生物量相似的天津本地香蒲(*Typha latifolia* L.)作为湿地植物.此时下行潜流湿地和上行潜流湿地单元内香蒲的平均株高分别为35 cm±3 cm和40 cm±2 cm(A)、38 cm±3 cm和39 cm±3 cm(B).植物种植后的第1周,环境条件的改变导致香蒲大部分地上植物组织(茎和叶)枯萎.为防止死亡的地上组织(茎、叶)脱落入潜流湿地,将所有地上植物组织清除.经过约2周的维护,新的幼株高度达到约

0.3 m.此后每天向A和B供给30L富营养化津河水驯化植物(同时向C供给),在5月底,香蒲开始分蘖发新芽,基本适应津河河水.

1.3 试验运行及取样

采用富营养化的津河河水作为潜流湿地进水.试验正常运行期间(2006-06~2006-11)进水水质情况如表2所示.从表2可看,出潜流湿地进水浓度随时间变化相对稳定.设计水力负荷800 mm/d,水力停留时间约12 h.2006-06~2006-11,在A、B和C下行潜流单元的进水口和上行潜流单元的出水口分别采集进水和出水分析NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、SRP和TP浓度变化,研究聚丙烯小球对垂直潜流湿地氮磷去除的影响,取样频率每周1次.DO采用美国YSI 52溶解氧测定仪分析,其它指标测定参照文献[8].

1.4 植物收割与分析

试验期间,2006-08的月平均气温最高(31.5℃),此时香蒲的株高达到最大值,分别为242 cm(A),238 cm(B)和250 cm(C).随着气温下降,香

表 2 人工湿地进水水质参数(N=4)/mg•L⁻¹
Table 2 Water quality parameters of constructed wetland influent(N=4)/mg•L⁻¹

月份	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	SRP	TP	DO	pH	t/℃
6	112.11±10.7	6.37±0.36	1.12±0.29	7.81±1.08	0.385±0.11	0.484±0.09	2.97±0.23	7.97±0.13	24.16±0.49
7	104.82±5.30	6.04±0.43	1.22±0.28	7.16±0.95	0.392±0.29	0.521±0.25	4.10±0.28	7.75±0.24	24.96±0.12
8	108.48±13.7	5.58±0.77	1.01±0.25	7.98±1.11	0.370±0.15	0.489±0.21	2.37±0.51	8.18±0.17	25.86±0.22
9	107.40±10.7	5.54±0.72	0.86±0.32	7.14±1.19	0.422±0.06	0.535±0.07	3.45±1.06	8.17±0.09	25.56±0.14
10	97.76±12.7	5.84±0.59	1.27±0.81	7.38±1.02	0.391±0.03	0.472±0.042	2.74±0.37	7.27±0.13	18.74±1.69
11	107.74±15.8	5.65±0.31	1.08±0.45	6.84±0.56	0.373±0.05	0.484±0.024	2.84±0.41	7.59±0.07	14.56±1.24

蒲地上组织逐渐枯黄,为防止茎、叶中的氮、磷向根系转移,在 2006-11(月平均气温最低,仅为 7.8℃)对香蒲地上植物组织进行收割.收割后的植物组织在 80℃烘至恒重(至少需要 48 h)并根据 Huett^[9]提供的方法分析测定香蒲茎、叶中的 TN 和 TP 含量.

2 结果与讨论

2.1 聚丙烯小球对湿地氮去除性能的影响

从图 2 可看出,试验期间(2006-06~2006-11),A、B 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 月平均去除率均高于 C,湿地植物通过自身组织吸收、根际微生物吸收、根系滞留、根际硝化反硝化等作用^[1,2]能有效提高人工湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 去除性能.

人工潜流湿地内,湿地填料自然挂膜大概需要 3 个月^[10].限于试验现象观察,笔者没有观测湿地填料内部微生物浓度及活性变化,明确填料具体挂膜时间.从图 2(a)可看出,2006-06~2006-07,湿地填料可能尚处于挂膜阶段,A 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率低于 B,使用聚丙烯小球对湿地氮磷去除性能影响不显著.随着试验进行,在 2006-08,香蒲地上植株高度达到最大值,此时湿地填料可能已完成挂膜(根据文献^[10]挂膜时间),微生物活性增强,湿地植物和微生物通过组织吸收、硝化反硝化等作用^[1,2,10]有效提高潜流湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除性能,A 和 B 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率达到最大值,分别为 80.45% 和 67.07%,聚丙烯小球使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率增加 13.38%.此后随着气温下降,A 和 B 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率呈逐渐降低趋势,在 2006-11 达到最低,分别为 63.78% 和 54.08%,此时聚丙烯小球的使用对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率贡献 9.70%.尽管挥发、植物吸收、填料吸附等过程影响潜流湿地氨氮去除效果,但这些并非 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的主要贡献因素,微生物吸收和硝化才是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的主要途径^[1,2,11,12],据报道微生物同化吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的重量占微生物细胞组织重量的 12.4%^[12].与页岩、粗砾石相比,聚丙烯小球孔隙率高,比表面积大,有利于增加湿地填料内部微生物浓度及其活性,有效促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生物吸收及硝化去除,因此 A 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 月平均去除率在 2006-08~2006-11 高于 B 和 C.

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除如图 2(b)所示.整个试验运行期间,A 和 B 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除效果好于无植物的 C,湿地植物通过根系释放氧气,在根际周围形成好氧、缺氧和厌氧区,有力促进 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 反硝化去除^[1,2].

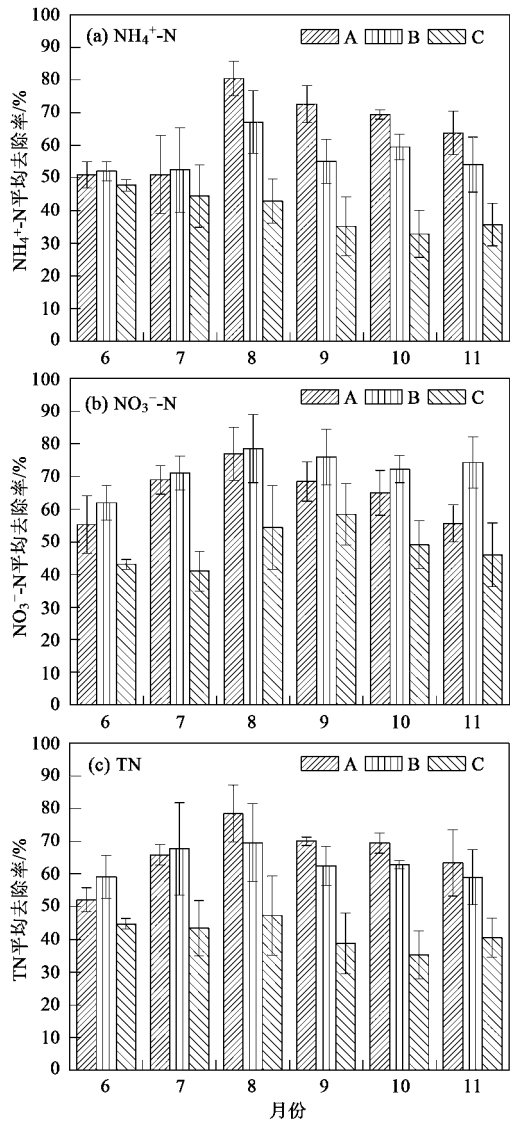


图 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 月平均去除率与时间的关系

Fig.2 Relationships between monthly mean removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN and time

2006-06~2006-11,A 和 B 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 月平均去除率基本处于 70% 以上,且 A 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 月平均去除率略低于 B,使用聚丙烯小球对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除无明显促进作用.潜流湿地中,植物根际以及填料内部的生物吸收、反硝化、填料吸附等过程是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除的重要贡献因素^[13,14].Sun 等^[11]研究表明,垂直潜流湿地较好的供氧条件不利于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的反硝化去除,湿地植物根际以及填料内部的生物吸收、填料吸附等过程才是垂直潜流湿地 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除的主要途径.一般来说,微生物吸收去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 优先于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的存在严重抑制微生物吸收去除 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[15].文中进水 TN 的主要组成部分是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (表 2),对生物吸收

去除 NO_3^- -N 不利,垂直潜流湿地内使用聚丙烯小球虽然有利于增加填料内部微生物浓度及活性,能够强化微生物的 NH_4^+ -N 吸收,但 NH_4^+ -N 的存在却抑制 NO_3^- -N 的吸收效果,因此聚丙烯小球对 NO_3^- -N 去除无显著贡献.页岩对 NO_3^- -N 的吸附等作用可能是 B 的 NO_3^- -N 月平均去除率高于 A 的原因.

TN 下降是 NH_4^+ -N 去除和 NO_3^- -N 去除的综合体现,A 和 B 的 TN 月平均去除率高于 C,湿地植物有助于提高 TN 去除效率. NH_4^+ -N 是 TN 的主要组成部分(表 2),因此 TN 去除主要取决于 NH_4^+ -N 去除.聚丙烯小球的使用能增加湿地内部微生物的浓度和活性,提高 NH_4^+ -N 去除效果,因此图 2(c)中 A 的 TN 月平均去除率高于 B.在 2006-08, A 和 B 的 TN 月平均去除率达到最大值,分别为 78.46% 和 69.56%,聚丙烯小球使 TN 月平均去除率增加 8.9%.TN 去除主要通过硝化-反硝化、湿地植物和湿地微生物吸收实现^[14],但垂直潜流湿地较好的通风供氧条件不利于硝化-反硝化过程进行^[11],湿地植物及其根际微生物吸收(微生物对 NH_4^+ -N 的吸收^[15])可能是聚丙烯小球提高 TN 去除效率的主要原因.

2.2 聚丙烯小球对湿地磷去除性能的影响

进水中 SRP 为 TP 主要组成部分(表 2),因此试验运行期间 SRP 和 TP 月平均去除率随时间变化趋势相一致(图 3).2006-06~2006-11,湿地植物通过根系组织吸收、根际微生物吸收、根系对颗粒态磷的滞留和根际微生物对有机磷的矿化吸收等作用^[16-17]提高 SRP 和 TP 去除性能,A 和 B 的 SRP 和 TP 月平均去除率均高于 C.

2006-06~2006-08,湿地填料可能处于挂膜阶段,使用聚丙烯小球对潜流湿地磷去除影响不显著.随着试验进行,湿地填料表面微生物活动逐渐加强,微生物吸收同化除磷性能不断改善^[18],页岩填料中 Al、Fe 等金属元素受微生物活动影响逐渐释放并形成 Al-P、Fe-P 等^[19],A 的 SRP 和 TP 去除能力逐渐增强并超过 B,在 2006-08,SRP 和 TP 月平均去除率达到最大.此时 A、B 的 SRP 月平均去除率分别为 83.32% 和 74.03%,TP 月平均去除率分别为 81.71% 和 72.76%,聚丙烯小球使 SRP 和 TP 月平均去除率均提高约 9.27% 和 8.95%.除填料吸附除磷外,微生物同化吸收去除也是潜流湿地磷去除的重要途径^[1,2],采用孔隙率高,比表面积大的聚丙烯小球有利于增加湿地填料内部微生物浓度及其活性,微生物除磷性能的增强也是试验期间 A 的 SRP 和

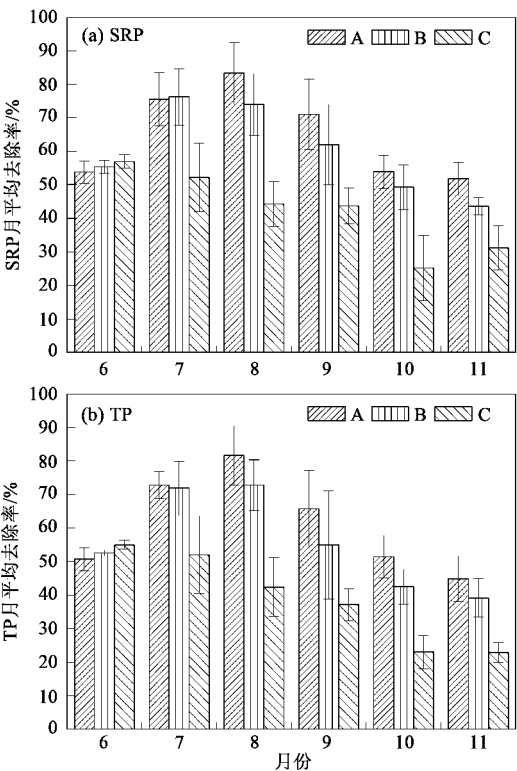


图 3 SRP 和 TP 月平均去除率与时间的关系

Fig.3 Relationships between monthly mean removal rates of SRP, TP and time

TP 月平均去除率均高于 B 的另一个重要原因.

2.3 聚丙烯小球对香蒲生物量及氮、磷含量的影响

香蒲地上组织生物量及氮磷含量分析结果如表 3 所示.香蒲茎、叶的干重分别为 390 和 625 g(A)和 455 和 680 g(B).A 的地上植物组织生物量(1 015 g)低于 B(1 135 g),使用聚丙烯小球不利于香蒲地上组织生物量的增加.香蒲茎和叶中的 TN 含量分别为 3.96 mg/g 干茎和 13.47 mg/g 干叶(A),2.47 mg/g 干茎和 4.53 mg/g 干叶(B),聚丙烯小球的使用可显著提高香蒲茎、叶中的 TN 含量.香蒲茎、叶中 TP 含量与 TN 类似,也是 A 高于 B,具体为 5.44 mg/g 干茎和 5.46 mg/g 干叶(A)和 2.55 mg/g 干茎和 2.55 mg/g 干叶(B).采用孔隙率高,比表面积大的聚丙烯小球有利于增加植物根际以及填料内部微生物浓度及其活性,改善氮、磷在香蒲根系周围的传质效率,提高植物组织吸收氮磷的能力,进而增加香蒲茎、叶中氮磷含量.

植物收割是湿地去除氮磷的重要途径^[1,2].与 B 相比,通过收割香蒲地上组织可使 TN、TP 去除分别增加 29.382 g/m²和 13.469 g/m².湿地植物贮存的氮磷在春季从根系向茎叶转移^[20],在秋季从茎叶向根

表 3 香蒲地上组织 TP 和 TN 含量及植物收割去除 TP 和 TN 的量

Table 3 TP and TN content of the aboveground biomass of <i>Typha latifolia</i> L. and phosphorus and nitrogen removals by harvesting plants								
湿地系统	茎干重 /g	茎 TP 含量 /mg·g ⁻¹	TP 去除 /g·m ⁻²	叶干重 /g	叶 TP 含量 /mg·g ⁻¹	TP 去除 /g·m ⁻²	总干重 /g	TP 去除 /g·m ⁻²
A	390	5.44	10.824	625	5.46	17.411	1015	28.235
B	455	2.55	5.919	680	2.55	8.847	1135	14.766
种植前	— ¹⁾	4.46	—	—	4.83	—	—	—
湿地系统	茎干重 /g	茎 TN 含量 /mg·g ⁻¹	TN 去除 /g·m ⁻²	叶干重 /g	叶 TN 含量 /mg·g ⁻¹	TN 去除 /g·m ⁻²	总干重 /g	TN 去除 /g·m ⁻²
A	390	3.96	7.879	625	13.47	42.953	1015	50.832
B	455	2.47	5.734	680	4.53	15.716	1135	21.450
种植前	—	8.50	—	—	19.37	—	—	—

1)“—”表示由于 2006 年 5 月初,香蒲种植后地上组织大部分死亡,此时将所有地上植物组织清除,因此种植前香蒲地上组织生物量可忽略不计

系转移导致茎、叶中氮磷含量在春季高于秋季^[21]. 本试验也观测到类似现象,香蒲茎、叶中 TN、TP 含量在种植前高于收割时.为防止植物吸收的氮磷从茎、叶向根系转移,应当在秋季及时收割湿地植物,最大限度移出植物吸收的氮磷.

3 结论

湿地填料挂膜后,聚丙烯小球的使用能够提高湿地内微生物浓度和活性,改善湿地生物脱氮除磷效果,提高 NH₄⁺-N、TN、SRP 和 TP 去除效率.由于微生物摄取 NH₄⁺-N 优先于 NO₃⁻-N、微生物吸收去除 NO₃⁻-N 不明显,聚丙烯小球对垂直潜流湿地 NO₃⁻-N 去除影响不显著.试验结束后,收割香蒲地上组织并测定茎、叶中的氮、磷含量,结果表明聚丙烯小球的使用有利于强化根系对氮、磷的组织吸收,提高植物组织氮磷含量.

参考文献:

[1] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. Sci Total Environ, 2007, **380**(1-3): 48-65.

[2] 汤显强,黄岁 . 人工湿地污水处理研究[J]. 水处理技术, 2007, **33**(2): 9-13.

[3] Huett D O, Morrisb S G, Smitha G, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [J]. Wat Res, 2005, **39**(14): 3259-3272.

[4] Baker L A. Design considerations and applications for wetland treatment of high-nitrate waters. [J]. Wat Sci Tech, 1998, **38**(1): 389-395.

[5] 邹华生,陈焕钦.生物填料塔处理餐厅污水的研究[J].工业水处理,2001,**21**(6): 32-34.

[6] 程丽华,钟华文,谢文玉.炼油废水处理生物填料的选择与优化研究[J].环境污染治理技术与设备,2006,**7**(5): 90-92.

[7] 汤显强,李金中,李学菊,等.人工湿地室内小试不同填料去污性能比较[J].水处理技术,2007,**33**(5): 45-49.

[8] 中国环境保护总局.水和废水监测分析[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002. 89-283.

[9] Huett D O. Diagnostic leaf nutrient standards for low chill peaches in subtropical Australia[J]. Aust J Exp Agric, 1997, **37**(1), 119-126.

[10] Ragusa S R, McNevin D, Qasem S, *et al.* Indicators of biofilm development and activity in constructed wetlands microcosms [J]. Wat Res, 2004, **38**(12): 2865-2873.

[11] Sun G Z, Zhao Y Q, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system [J]. J Biotechn, 2005, **115**(2): 189-197.

[12] Cannon A D, Gray K R, Biddlestone A J, *et al.* Pilot-scale development of a bioreactor for the treatment of dairy dirty water[J]. J Agric Eng Res, 2000, **77**(3): 327-334.

[13] Scholz M. Wetland systems to control urban runoff[M]. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2006.

[14] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Wat Sci Tech, 1997, **35**(5): 11-17.

[15] Metcalf and Eddy Inc. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse[M]. New Delhi: McGraw-Hill Ltd, India, 1995.

[16] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems-A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species [J]. Ecol Eng, 1996, **7**(1): 59-83.

[17] Hadada H R, Mainea M A, Bonetto C A. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment [J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1744-1753.

[18] Richardson C J. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands [J]. Science, 1985, **288**: 1424-1427.

[19] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Wat Res, 1998, **32**(2): 393-399.

[20] Headley T R. Removal of nutrients and plant pathogens from plant nursery runoff using horizontal subsurface flow constructed wetlands [D]. Lismore, NSW, Australia: Southern Cross University. 2004.

[21] McJannet C L, Keddy P A, Pick F R. Nitrogen and phosphorus tissue concentrations in 41 wetland plants: a comparison across habitats and functional groups [J]. Funct Ecol, 1995, **9**(5): 231-238.