

间歇曝气对生物填料人工湿地氮磷去除性能的影响

汤显强¹, 李金中², 李学菊², 刘学功², 黄岁樑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: 采用部分生物填料替换页岩构建生物填料人工湿地处理津河富营养化水体,并在填料内部设置曝气装置研究间歇曝气对湿地氮磷去除效果的影响。设计水力负荷 $800 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 气水比 15:1。结果表明,当氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总氮(TN)、溶解性反应磷(SRP)和总磷(TP)平均进水浓度为 4.61 、 5.68 、 0.338 和 $0.464 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,无曝气条件下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、SRP、TP 平均去除率分别为 65.9%、65.3%、62.2%和 56.9%。中部曝气使 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、SRP 和 TP 平均去除率分别提高 15.9%、8%、13.7% 和 8.9%,底部曝气则为 24.4%、12.9%、16.1%和 12%,间歇曝气能够有效提高生物填料人工湿地 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、SRP 和 TP 去除效率。但是曝气产生的有氧环境不利于硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)去除,试验期间底部曝气和中部曝气 $\text{NO}_3\text{-N}$ 出水浓度均高于无曝气系统。

关键词: 间歇曝气;生物填料;人工湿地;氮;磷

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2008)01-0318-05

Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetlands with Biofilm Carrier as 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: Subsurface flow wetlands were constructed by replacing part of shale with biofilm carrier as substrate for eutrophic Jin River water treatment. Air diffuser was used to investigate the effect of intermittent aeration on nitrogen and phosphorus removal. In this study, hydraulic loading rate was equal to $800 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, and ratio of air to water was 15:1. During the experimental period, when average influent ammonia-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$), total nitrogen(TN), soluble reactive phosphorus (SRP)and total phosphorus (TP) concentrations were $4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $5.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.338 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.464 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, mean removal rates of these pollutants were 65.9%, 65.3%, 62.2% and 56.9% respectively in non-aerated constructed wetland. In contrast to the non-aerated wetland, aeration enhanced $\text{NH}_4\text{-N}$, TN, SRP and TP removal by about 15.9%, 8%, 13.7% and 8.9% for aeration in the middle, and 24.4%, 12.9%, 16.1% and 12% for aeration at the bottom of the substrate, respectively. However, aeration failed to improve the nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) removal. During the whole experimental period, effluent $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations were much higher for aerated constructed wetlands (regardless of aeration in the middle and at the bottom) than those of non-aerated system.

Keywords: intermittent aeration; biofilm carrier; constructed wetland; nitrogen; phosphorus

与页岩、粗砾石等传统湿地填料相比,生物填料比表面积大,孔隙率高,亲水性和生物亲和性良好,能够有效提高微生物浓度及活性^[1-3]。基于此考虑,本文

采用部分生物填料替换页岩构建生物填料人工湿地处理津河富营养化水体。研究表明,溶解氧供给不足是导致潜流湿地氮去除率较低的主要原因^[4]。潜流湿地磷去除也受溶解氧影响,当湿地内部溶解氧浓度下降时, Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , 其结合的磷以 PO_4^{3-} 的形式释放,导致湿地磷去除效率下降^[5]。除化学除磷外,潜流湿地内部生物除磷也需要良好的好氧-厌氧交替环境^[6],改善溶解氧供给对提高湿地氮磷去除性能意义重大。

收稿日期:2007-03-23

基金项目: 天津市科委重大基金项目“天津市外环河水质改善及水资源保护工程”;国家自然科学基金(50479034);教育部留学归国服务人员启动基金;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:anbition@mail.nankai.edu.cn

通讯联系人: 黄岁樑—E-mail:sthuang@nankai.edu.cn

湿地植物可通过根系释放部分溶解氧,但由于释放量较小,难以满足有机污染物降解、氨氮硝化等过程对溶解氧的需求,因此有必要采取措施提高潜流湿地溶解氧供给水平^[1,7]。人工曝气常用于增加富营养化景观水体中的溶解氧浓度和去除异味^[7,8],当采用人工潜流湿地处理富营养化景观水体时,引入人工曝气增加溶解氧供给是便利可行的。本文采取间歇曝气的方式改善生物填料人工湿地溶解氧可利用水平,研究间歇曝气对湿地氮磷去除性能的影响。

1 材料及方法

1.1 试验材料及装置

采用室外试验研究间歇曝气对生物填料人工湿地氮磷去除的影响。人工湿地系统包括一个下行潜流湿地单元和一个上行潜流湿地单元(图 1),两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[9])和生物填料(主要性能参数见表 1)作为湿地填料。试验装置共 3 套(1#:中部曝气、2#:底部曝气、3#:无曝气对照),每套装置内填料设置情况完全相同。以 1# 为例,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 40 cm 页岩和 20 cm 生物填料作为主填料层,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 30 cm 页岩和 20 cm 生物填料为主填料,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 的高度差以保证污水自重力流

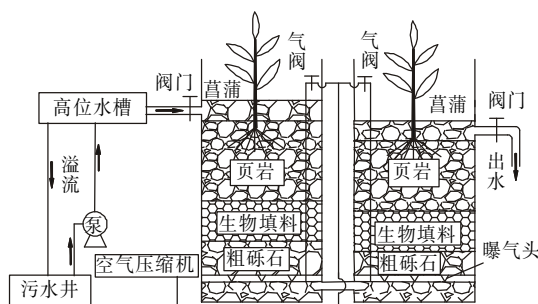


图 1 人工湿地试验装置简图(底部曝气)

Figure 1 Schematic diagram of sub-surface vertical-flow constructed wetland(aerated at the bottom)

动。

为研究间歇曝气对湿地氮磷去除的影响,在 1# 下行流和上行流单元的中部(距页岩填料上表面 30 cm)和 2# 下行流和上行流单元的底部(距装置底部 10 cm)均匀设置 3 个曝气头(同一水平面上)。采用小型空气压缩机(ACQ-007 型,供气量 100 L·min⁻¹)向 1#、2# 从早上 8 点到下午 4 点每日供气 8 h,其余时间不曝气,工作期间气水比为 15:1。

1.2 试验方法

试验在天津市水利科学研究所院内进行,采用富营养化津河河水为湿地污水水源,进行氮磷去除效果试验。设计水力负荷 800 mm·d⁻¹,理论水力停留时间约(HRT)12 h。在 2006 年 5 月 13 日,选择株型大小基本一致,生物量相当的香蒲(平均株高为(38±2) cm),栽种于填料中,密度为每桶 6~8 株。香蒲栽种后观察其成活情况,两周后植物已成活并适应污水特性开始生长。2006 年 6 月 9 日~11 月 18 日试验正常运行,试验期间进水水质见表 2。采样频率每周 1 次,主要测定进出水中溶解性反应磷(SRP)、总磷(TP)、氨氮(NH₄-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)和总氮(TN)浓度,研究间歇曝气对生物填料人工湿地氮磷去除性能的影响。同时测定曝气后下行单元 0.3 m、0.6 m 和上行单元 0.3 m、0.6 m 处溶解氧浓度,频率为每月 1 次。11 月 18 日后,夜间气温下降至 0℃左右,停止试验以防装置冻结。

1.3 分析方法

溶解性反应磷通过 0.45 μm 滤膜过滤后,用钼锑抗比色法测定。总磷采用过硫酸钾消解钼锑抗比色法。氨氮、硝酸盐氮分别采用纳氏试剂分光光度法和酚二黄酸分光光度法。总氮采用碱性过硫酸钾消解,紫外分光光度法。DO 采用美国 YSI 52 溶解氧测定仪分析。其他指标测定参照《水和废水监测分析》第四版^[10]。

2 结果与讨论

2.1 间歇曝气对人工湿地氮去除的影响

2.1.1 间歇曝气对 NH₄-N 去除的影响

从图 2 可看出,NH₄-N 进水浓度随时间变化起

表 1 生物填料主要性能参数

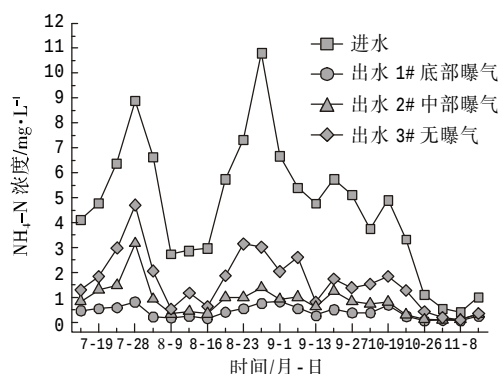
Table 1 Major properties of biofilm carrier

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

表 2 人工湿地试验期间主要进水水质参数(N=6×4)

Table 2 Influent water quality parameters of constructed wetlands during experimental period(N=6×4)

水质参数	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	SRP/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	DO/mg·L ⁻¹	pH	T/℃
平均值	106.02	5.74	1.19	7.34	0.398	0.516	3.42	7.73	24.56
标准偏差	±13.7	±3.03	±0.23	±3.61	±0.251	±0.282	±1.69	±0.39	±3.69

图 2 NH₄-N 去除性能Figure 2 NH₄-N removal performance

伏较大,1#、2# 和 3#NH₄-N 出水浓度随进水浓度增加而上升。采用 SPSS12.0 对试验期间 1#、2# 和 3#NH₄-N 出水浓度进行统计分析,在显著性水平 $P \leq 0.05$ 时,NH₄-N 出水浓度间存在显著性差异,1#、2#NH₄-N 出水浓度低于 3#,间歇曝气有利于提高生物填料人工湿地 NH₄-N 去除性能。试验期间,在 NH₄-N 平均进水浓度为 $4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,1#、2# 和 3# 的 NH₄-N 平均去除率分别为 90.3%、81.8% 和 65.9%,与无曝气相比,底部曝气和中部曝气使 NH₄-N 平均去除率分别提高约 24.4%和 15.9%。

从表 3 可看出,间歇曝气可有效增加潜流湿地溶解氧的可利用性。1#(中部曝气)和 2#(底部曝气)内 DO 浓度在各采样口处均高于 3#(无曝气)。间歇曝气增加了溶解氧供给,有利于湿地微生物如氨氧化细菌、硝化细菌等的生长繁殖和活性增强^[11],进而改善潜流湿地生物除氮性能。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 NH₄-N 去除的主要贡献因素,硝化才是 NH₄-N 去除

的主要途径^[1,5]。采用间歇曝气的方式增加了潜流湿地溶解氧浓度,有利于氨氮硝化过程顺利进行,提高潜流湿地 NH₄-N 去除效率。

间歇曝气对 NH₄-N 去除效果的影响受进水浓度制约,NH₄-N 进水浓度较低时,湿地植物通过自身根毛释放的氧气满足 NH₄-N 硝化对溶解氧的需求^[1]。10 月 20 日后,NH₄-N 进水浓度较低($<1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),此时 1#、2#、3#NH₄-N 出水浓度相近,是否曝气对 NH₄-N 去除影响不大。

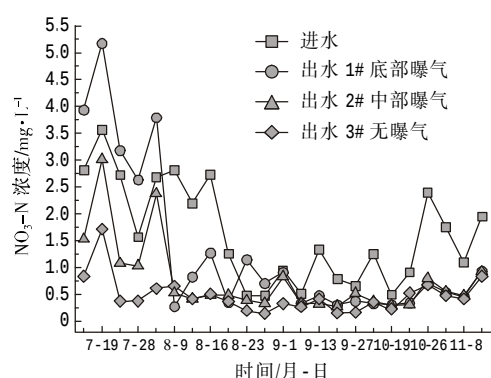
2.1.2 间歇曝气对 NO₃-N 去除的影响

试验初期,1#、2#NO₃-N 出水浓度随进水浓度变化较大,且 1#NO₃-N 出水浓度高于进水浓度。造成这一现象的主要原因可能为:①1#、2#NO₃-N 除部分来源于进水外,主要还是 NH₄-N 硝化的贡献。7 月 14 日~8 月 25 日,NH₄-N 进水浓度较高,波动较大,经过曝气硝化后,出水中 NO₃-N 浓度相应增加,导致 1#、2#NO₃-N 出水浓度高且起伏较大。②1#底部曝气溶解氧浓度高于 2#中部曝气(表 3),不利于 NO₃-N 生物吸收和反硝化去除^[12,13],造成 1#NO₃-N 去除性能较差且出水浓度高于进水浓度。

NO₃-N 平均进水浓度为 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,1#、2# 和 3#NO₃-N 平均去除率分别为 52.5%、52.7%和 64.3%,间歇曝气不利于潜流湿地 NO₃-N 去除。NO₃-N 去除主要通过反硝化实现^[1],间歇曝气后,1# 和 2# 溶解氧水平高于 3#(表 3),较高的溶解氧供给无法提供硝态氮反硝化所需的厌氧环境,NO₃-N 反硝化进程受阻导致 1# 和 2#NO₃-N 平均去除率低于 3#。3#无曝气,依靠湿地植物自身释放的氧气进行氨氮硝化,并在根际周围形成好氧、缺氧和厌氧区域促进 NO₃-N 的反硝化去除^[1,12],NO₃-N 去除效果相对较好。

表 3 人工湿地填料内溶解氧(DO)浓度(mg·L⁻¹)Table 3 Dissolved oxygen concentrations in constructed wetlands (mg·L⁻¹)

填料深度	1#(底部曝气)					2#(中部曝气)					3#(无曝气)				
	7月	8月	9月	10月	11月	7月	8月	9月	10月	11月	7月	8月	9月	10月	11月
下行 30 cm	5.2	2.7	3.2	1.6	2.0	1.6	6.8	1.7	3.7	1.8	1.7	1.5	1.1	2.1	1.5
下行 60 cm	4.6	6.8	3.6	2.3	1.9	1.8	2.0	1.9	2.5	2.2	1.9	2.0	1.2	2.5	2.0
上行 30 cm	6.6	1.9	6.7	3.5	2.5	3.6	2.3	2.1	5.3	2.8	2.0	2.1	1.6	1.5	2.5
上行 60 cm	6.3	2.7	6.5	4.0	1.9	2.5	2.0	2.7	3.7	2.9	2.3	1.9	1.8	2.2	2.9

图 3 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除性能Figure 3 $\text{NO}_3\text{-N}$ removal performance

2.1.3 间歇曝气对 TN 去除的影响

TN 去除是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除的综合反映, 1#、2# 和 3# TN 去除随时间的变化情况如图 4 所示。7 月 14 日~8 月 23 日, 受曝气影响, 1#、2# 填料内部溶解氧浓度较高(表 3), 有利于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 生物吸收和硝化, 但曝气造成的高溶解氧水平不利于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 反硝化去除, 此时 1#、2# TN 出水浓度高于 3#。

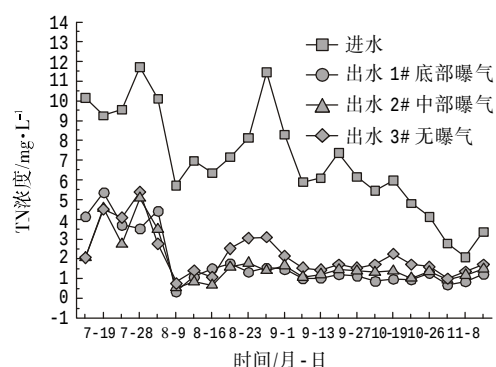


图 4 TN 去除性能

Figure 4 TN removal performance

8 月 23 日后, TN 出水浓度变化较均匀, 此时采用 SPSS12.0 对 1#、2# 和 3# TN 出水浓度进行统计分析, 在显著性水平 $P \leq 0.05$ 时, TN 出水浓度间存在显著性差异, 1#、2# TN 出水浓度低于 3#, 间歇曝气有利于提高生物填料潜流湿地 TN 去除性能。在 TN 平均进水浓度为 $5.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 1#、2# 和 3# TN 平均去除率分别为 78.2%、73.3% 和 65.3%。底部曝气和中部曝气使 TN 平均去除率分别提高 12.9% 和 8%。硝化-反硝化、水生植物和湿地微生物吸收是潜流湿地 TN 去除的主要途径^[11]。采用间歇曝气后, TN 与填料、植物和微生物接触效果得到改善。考虑到曝气后, 好氧环境不利于氮的硝化-反硝化去除, 湿地植物及其根

际微生物吸收(微生物对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收^[14])可能是间歇曝气提高 TN 去除效率的重要途径。

2.2 间歇曝气对湿地磷去除的影响

1#、2#、3# 对 SRP 和 TP 去除效果见图 5 和图 6。进水中 SRP 和 TP 的平均浓度分别为 0.398 和 $0.516 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SRP 是 TP 的主要组成部分, SRP 和 TP 进水浓度随时间变化趋势相一致。总体来说, 1#、2# 和 3# 的 SRP 和 TP 出水浓度随进水浓度增加而升高。

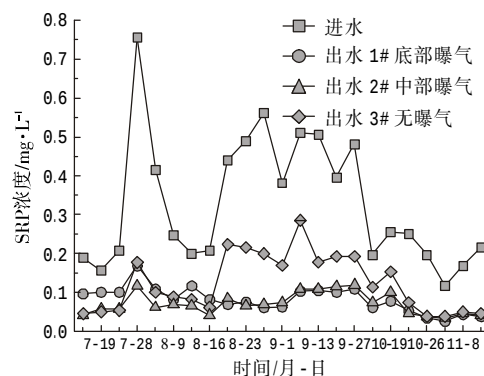


图 5 SRP 去除性能

Figure 5 SRP removal performance

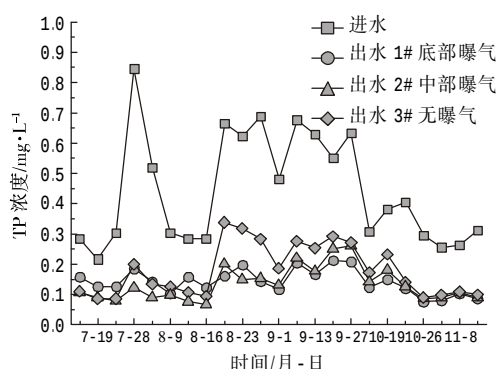


图 6 TP 去除性能

Figure 6 TP removal performance

7 月 14 日—8 月 23 日, 间歇曝气使填料内部水流紊动增强, 有助于改善填料与磷接触效果, 提高磷吸附去除性能。但曝气导致 1#、2# 填料内部溶解氧浓度处于较高水平(表 3), 不利于聚磷菌生物除磷(厌氧释放后再吸收^[15]), 1#、2# SRP 和 TP 出水浓度高于 3#, 间歇曝气对湿地磷去除影响不大。8 月 23 日后, 采用 SPSS12.0 对 1#、2# 和 3# 的 SRP 和 TP 出水浓度进行统计分析, 在显著性水平 $P \leq 0.05$ 时, SRP 和 TP 出水浓度间存在显著性差异, 1#、2# SRP 和 TP 出水浓度低于 3#, 间歇曝气有利于提高生物填料人工湿地磷去除性能。在 SRP、TP 平均进水浓度为 0.338

和 $0.464 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,1#、2# 和 3#SRP 平均去除率分别为 78.3%、75.9%和 62.2%,TP 平均去除率分别为 68.9%、65.8%和 56.9%。底部曝气、中部曝气使生物填料人工湿地 SRP 去除效率分别提高 16.1%和 13.7%,TP 去除率分别提高 12%和 8.9%。

潜流湿地内,磷与填料直接接触,吸附滞留是磷去除的主要途径^[1,8,9]。采用间歇曝气后,有利于增强磷与湿地填料的接触效果,改善填料磷吸附去除性能,提高潜流湿地磷去除效率。此外,间歇曝气增加了湿地溶解氧供给,有利于湿地微生物的生长繁殖和活性增强^[11],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^[16],这可能是1#、2# SRP 和 TP 去除性能优于 3# 的另一重要原因。

3 结论

为改善人工湿地溶解氧供给水平,提高湿地氮磷去除效果,采用在湿地填料内部埋设曝气头的方法开展曝气对生物填料人工湿地氮磷去除效果研究。结果表明,在高水力负荷下 ($800 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$),间歇曝气能够增加湿地溶解氧供给水平,改善微生物硝化、反硝化、生物吸收等作用,有效提高人工湿地 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、SRP 和 TP 去除性能。但曝气使湿地填料内部处于有氧环境,不利于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 反硝化去除。

参考文献:

- [1] 汤显强,黄岁樑.人工湿地去污机理及国内外应用现状[J].水处理技术,2007,33(2):9-13.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecol Eng, 2002, 18(5):633-646.
- [5] Scholz M. Wetland systems to control urban runoff[M]. Amsterdam:Elsevier, 2006.
- [6] De-Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003)[J]. Wat Res, 2004, 38(19):4222-4246.
- [7] Ouellet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, et al. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. Ecol Eng, 2006, 27(3):258-264.
- [8] Scholz M, Lee B-H. Constructed wetlands: a review[J]. Int J Environm Stud, 2005, 62(4):421-447.
- [9] 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.
- [10] 中国国家环境保护总局.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.
- [11] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(5):11-17.
- [12] Huett D O. Diagnostic leaf nutrient standards for lowchill peaches in sub-tropical Australia[J]. Aust J Exp Agric, 1997, 37:119-126.
- [13] Hunt P G, Poach M E, Liehr S K. Nitrogen cycling in wetland systems [C]//Dunne E J, Reddy K R, Carton O T. Nutrient management in agricultural watersheds: a wetland solution. Wageningen, Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2005, 93-104.
- [14] Metcalf, Eddy, Inc. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse[M]. McGraw-Hill Ltd, New Delhi, India.1995.
- [15] Satoshi Tsuneda, Takashi Ohno, Koichi Soejima, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 27:191-196.
- [16] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2):393-399.