

中新生态城多功能人工湿地建设及持续性效果

葛铜岗, 段梦, 张维, 王金丽, 穆莹, 孙永利, 吕小佳, 黄鹏
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 介绍了中新生态城人工湿地旁路净化景观水体并协同处理雨水径流的多功能集成设计方法、单元设施构成及运行模式,持续跟踪测试了2015年—2016年的工程运行效果。结果表明,非降雨期,人工湿地对景观水体中COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、叶绿素a的年均去除率分别由2015年的34.3%、24.3%、36.8%、53.3%升高至2016年的44.5%、31.4%、44.3%和58.3%,2016年出水COD满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水质要求, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP均满足Ⅱ类水质要求,并且各指标去除率在年内均呈先升高后降低的趋势,7月份达到最高值。降雨期,人工湿地对雨水径流中SS、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的平均去除率分别为93%、69.6%、44.8%和83%。

关键词: 中新生态城; 多功能人工湿地; 景观水体; 雨水径流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)13-0080-06

Construction and Continuous Performance of Multifunctional Constructed Wetlands in Sino-Singapore Tianjin Eco-city

GE Tong-gang, DUAN Meng, ZHANG Wei, WANG Jin-li, MU Ying, SUN Yong-li,
LYU Xiao-jia, HUANG Peng

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: The integrated design method, facility units, and operating mode of constructed wetlands for landscape water purification and rainfall runoff treatment in Sino-Singapore Tianjin Eco-city were introduced. The engineering performance was monitored in 2015 and 2016. The annual average removal rate of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, and chlorophyll a in landscape water during the dry seasons raised from 34.3%, 24.3%, 36.8%, and 53.3% in 2015 to 44.5%, 31.4%, 44.3%, and 58.3% in 2016, respectively. In 2016, the effluent COD met the class IV standard in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP met the class II standard. Monthly, all removal rates increased firstly and then decreased, while reached the maximum in July. The average removal rate of runoff SS, COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, and TP during the wet seasons were 93%, 69.6%, 44.8%, and 83% respectively.

Key words: Sino-Singapore Tianjin Eco-city; multifunctional constructed wetland; landscape water; rainwater runoff

中新生态城是中国和新加坡共同开发的生态城市建设项目。建设之初,就将积存40多年工业污染

的污水库治理作为头号水环境建设重点工程。经过持续多年的治理与生态重建,昔日的污水库变身为该区最大的景观水体^[1]。近年来,区域内大气沉降物的环境影响较为显著^[2],尽管水环境基础设施系统不断更新,污染防治综合措施不断升级,但景观水体水质仍存在较大的季节性波动。基于此,根据中新生态城景观水体水质保持与面源污染控制双重工程技术的需求,在该区水系治理人工湿地可行性分析^[3]基础上,结合场地位置及实际用地条件,建设了集景观水体旁路净化与雨水径流污染控制于一体的多功能人工湿地。

中新生态城围绕故道河设置5处雨水泵站,每处雨水泵站均设置相应处理能力的多功能人工湿地,在雨季发挥处理雨水径流的重要功能,在非雨季发挥旁路净化景观水体、养护湿地生态系统功能。其中,被测试的多功能人工湿地设施位于中新生态城景观水体边岸缓冲带内,距雨污合建泵站200 m,总建设面积为5 766 m²,服务水体范围为96 hm²。通过对工程设施建设的连续跟踪和运行效能的持续性监测,结合工程设计成果,提出了湿地主要功能要素的工程做法及不同模式协同运行调控策略,确定了该工程在连续净化景观水体并协同控制雨水径流污染方面的实际效果,旨在为人工湿地多功能集成设计和多模式协同运行提供参考。

1 工程建设与运行模式

1.1 工程设施布局及单元组成

工程设施布局见图1。该工程共有8个插板闸(配水渠5个、集水渠1个、导流渠2个),潜流湿地单元填料上、下层各设置若干配水管、集水管。

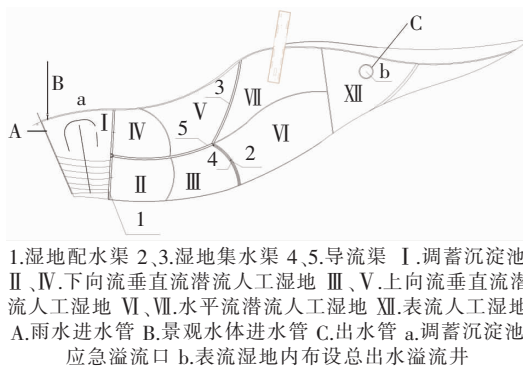


图1 中新生态城多功能人工湿地工程布局

Fig. 1 Layout of multifunctional constructed wetlands in Sino-Singapore Tianjin Eco-city

1.1.1 调蓄沉淀池

调蓄沉淀池容量为900 m³,面积为766 m²。根据池底地形特征,池内设U型导流墙调节水量及沉淀悬浮物。该工程采用双通道进水,雨污合建泵站排出的雨水径流通过A管道(Ø800 mm)进入,景观水体经泵提升通过B管道(Ø200 mm)进入,出水经溢流堰或二次提升泵强制排至湿地配水渠。同时,在调蓄沉淀池靠近水体一侧设置应急溢流排放口,以防止强降雨产流对湿地的运行产生影响,该排放口底部高于溢流堰底。图2为调蓄沉淀池示意。

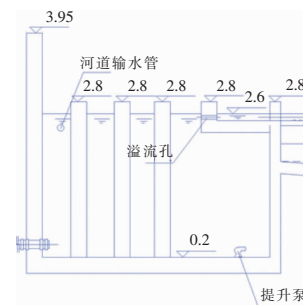


图2 调蓄沉淀池示意

Fig. 2 Schematic diagram of detention-sedimentation tank

1.1.2 垂直流潜流人工湿地

垂直流潜流人工湿地单元分两组平行设置,中间由导流渠隔开。II、III、IV、V 4个湿地单元中的填料均分为底、中、表3层,其中,II和IV单元底、中、表3层的填料依次为砾石、钢渣和细砂,III和V单元底、中、表3层的填料依次为砾石、沸石和细砂。II、IV单元中砾石的厚度分别为30~60、30~40 cm,钢渣和细砂的厚度均分别为30和20 cm。III、V单元中砾石的厚度分别为30~60、30~40 cm,沸石和细砂厚度均分别为30和20 cm。不同基质层之间用透水无纺布隔开。图3为垂直流湿地单元填装示意。

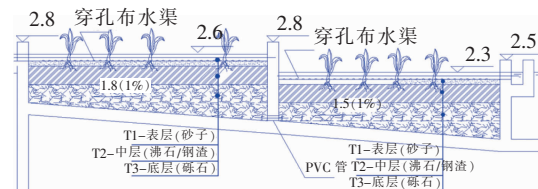


图3 垂直流潜流湿地单元填装示意

Fig. 3 Schematic diagram of vertical subsurface flow constructed wetland

1.1.3 水平流潜流人工湿地

水平流潜流人工湿地单元分两组并列设置,中

间由隔墙隔开。Ⅵ单元进水端经集水渠与Ⅲ单元出水端衔接,Ⅶ单元进水端经集水渠与Ⅴ单元出水端衔接。Ⅵ和Ⅶ单元的出水均经穿孔花墙进入表流人工湿地。Ⅵ和Ⅶ单元的填料均分为底层和表层,底层均依次为碎石、沸石、页岩和细砂,表层覆盖种植土,碎石、沸石、页岩的粒径分别为30~60、8~15、5~10 mm。不同基质层之间用透水无纺布隔开。图4为水平流潜流湿地填装示意。

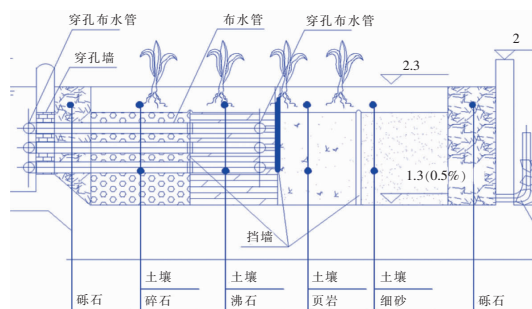


图4 水平流潜流湿地单元填装示意

Fig.4 Schematic diagram of horizontal subsurface flow constructed wetland

1.1.4 表流人工湿地

表流人工湿地单元池底坡度为1:5,进水端由穿孔花墙与水平流湿地单元衔接,出水经溢流井由排水管排入景观水体。图5为表流人工湿地单元设施示意。

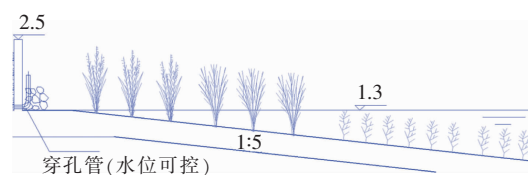


图5 表流人工湿地单元设施示意

Fig.5 Schematic diagram of surface flow constructed wetland

1.1.5 植物栽植

由于中新生态城地处滨海滩涂区域,盐碱胁迫明显,试验筛选了具有一定耐盐功能的景观水生植物。同时为保证湿地四季演替的景观效果,春、夏季种植芦苇、菖蒲,夏、秋季种植芦苇、盐角草、眼子菜等,春、夏、秋三季种植大米草。此外在湿地设施周边种植芦苇、菖蒲、千屈菜等具有较高耐盐性及观赏性的湿生植物,形成郁闭效果良好的湿地景观格局。

1.2 协同运行模式

根据湿地功能定位,针对景观水体旁路连续净

化和雨季雨水径流在线处理需要,采取不同的运行模式。通常情况下(即非降雨期),以景观水体旁路净化的连续运行模式为主(考虑到湿地植物生长及设施安全,冬季停止运行);降雨产流期,视雨水径流量大小,降低或停止泵送河水,切换为雨水径流处理运行模式(为保障湿地单元水力负荷要求,在雨水径流量较少时,将河水与其混掺)。

1.2.1 雨水径流处理运行模式

降雨期间,雨水径流由雨污合建泵站排水管排入,经调蓄沉淀池后,通过配水渠及相关插板闸联合调控,平行进入两组潜流湿地单元串联组合系统(Ⅳ+Ⅴ+Ⅶ、Ⅱ+Ⅲ+Ⅵ),其中垂直流潜流湿地单元出水由集水渠收集后分配至水平流潜流湿地单元,水平流潜流湿地单元出水进入表流湿地单元进一步净化后排入景观水体。若遭遇强度较大、峰现时间较短的突发降雨事件,合建泵站雨水导流模式可能使通往湿地的雨水量超过工程调蓄容量,超量雨水需经调蓄沉淀池应急溢流口排出,以保障后续单元安全有效运行。该模式下,根据中新生态城合建泵站初期雨水弃流泵开启15 min的水量计算,确定设计雨水径流进水规模为2 070 m³/d,调蓄沉淀池水力停留时间为2.6 h,湿地单元总水力停留时间为17 h,总表面水力负荷为0.45 m³/(m²·d)。

1.2.2 景观水体旁路净化模式

景观水体由潜水泵提升经B管道进入调蓄沉淀池后,通过配水渠及插板闸的联合调控,先依次流经下向流钢渣潜流湿地单元和上向流沸石湿地单元后,出水通过插板闸的联合调控分别由导流渠回流至下向流钢渣湿地单元、上向流沸石湿地单元,再经集水渠调节后依次进入水平流潜流湿地单元、表流湿地单元,最终重新排入景观水体。视水量波动情况,也可经集水渠分流上向流沸石湿地单元,一部分出水进入水平流潜流湿地单元。根据雨水径流处理模式的设计水量,结合景观水体旁路净化模式下的工艺流程,确定该模式设计水量为1 700 m³/d,此时调蓄沉淀池水力停留时间为2.1 h,湿地单元总水力停留时间为24 h,总表面水力负荷为0.32 m³/(m²·d)。

2 工程运行效果

2.1 景观水体旁路净化模式的持续性运行效果

根据植物生长期及设施安全养护规律,连续跟踪测试2015年和2016年4月—11月人工湿地工程

净化景观水体的运行过程,监测频率为每月3次,选取 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 和叶绿素 a 评估持续性净水性能及其季节性变化。

2.1.1 COD 的变化

图6为多功能人工湿地控制景观水体中 COD 的效果。

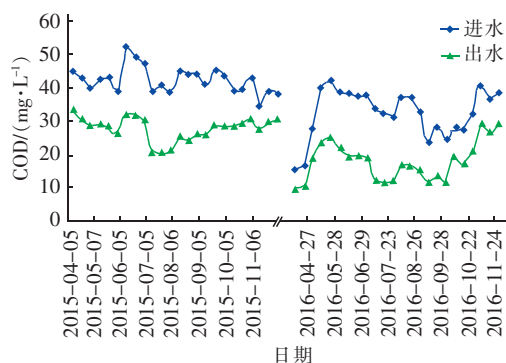


图6 多功能人工湿地控制景观水体中 COD 的效果

Fig. 6 Removal performance of COD in landscape water by multifunctional constructed wetlands

由图6可知,2015年运行期间,景观水体 COD 为 35 ~ 52 mg/L,平均值为 42 mg/L,经湿地处理后 COD 为 21 ~ 34 mg/L,平均值为 28 mg/L。2016年运行期间,景观水体 COD 为 16 ~ 42 mg/L,平均值为 32 mg/L,经湿地处理后 COD 为 10 ~ 29 mg/L,平均值为 18 mg/L,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水质的要求。

经计算,多功能人工湿地运行期间对 COD 的总体平均去除率为 39.3%,其中 2015 年平均去除率为 34.3%,2016 年平均去除率为 44.5%,可以看出 2016 年比 2015 年提高了 10.2 个百分点。在年内变化方面,2015 年和 2016 年的 COD 去除率均呈先升高后降低的趋势,7 月份均达到最高值(2015 年为 46.8%、2016 年为 62.5%),11 月份去除率均最低(2015 年为 22%、2016 年为 26.8%)。

2.1.2 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的变化

图7为多功能人工湿地对景观水体中 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果。2015 年运行期间,景观水体 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 0.17 ~ 1.33 mg/L,平均值为 0.70 mg/L,经人工湿地处理后 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 0.11 ~ 0.97 mg/L,均值为 0.53 mg/L。2016 年运行期间,景观水体 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 0.10 ~ 0.67 mg/L,平均值为 0.39 mg/L,经湿地处理后降至 0.10 ~ 0.43 mg/L,平均值为 0.27 mg/L,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中

Ⅱ类水质的要求。

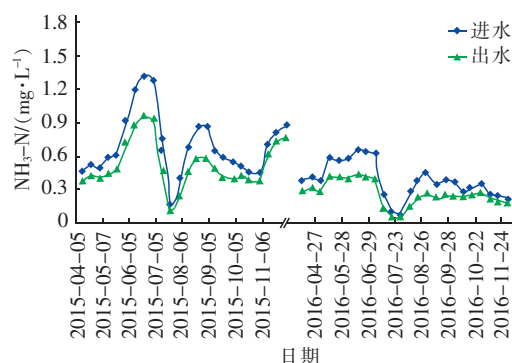


图7 多功能人工湿地控制景观水体中 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的效果

Fig. 7 Removal performance of $\text{NH}_3 - \text{N}$ in landscape water by multifunctional constructed wetlands

经计算,多功能人工湿地运行期间对景观水体中 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的总体平均去除率为 28%,其中 2015 年的平均去除率为 24.3%,2016 年的平均去除率为 31.4%,可见 2016 年比 2015 年提高了 7.1 个百分点。另外,2015 年和 2016 年的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率均呈先升高后降低的趋势,7 月份均达到最高值(2015 年为 37.7%、2016 年为 48.3%),11 月份去除率均最低(2015 年为 12.2%、2016 年为 16.4%)。

2.1.3 TP 的变化

图8为多功能人工湿地对景观水体中 TP 的去除效果。

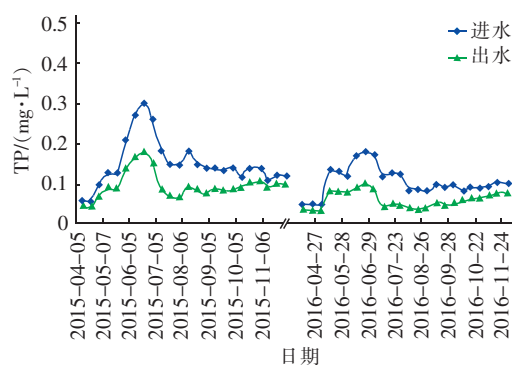


图8 多功能人工湿地控制景观水体中 TP 的效果

Fig. 8 Removal performance of TP in landscape water by multifunctional constructed wetlands

由图8可知,2015 年运行期间,景观水体 TP 为 0.06 ~ 0.30 mg/L,平均值为 0.15 mg/L,经湿地处理后 TP 为 0.04 ~ 0.18 mg/L,平均值为 0.10 mg/L。2016 年运行期间,景观水体 TP 为 0.05 ~ 0.18 mg/L,平均值为 0.11 mg/L,经湿地处理后 TP 为 0.03 ~ 0.10 mg/L,平均值为 0.06 mg/L,满足《地表水环境

质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类水质的要求。

经计算,人工湿地运行期间对景观水体中TP的总体平均去除率为38.9%,其中2015年平均去除率为36.8%,2016年平均去除率为44.3%,可见2016年比2015年提高了7.5个百分点。在年内变化方面,2015年和2016年的TP去除率均呈先升高后降低的趋势,7月份均达到最高值(2015年为53%、2016年为61.9%),11月份去除率均最低(2015年为18.3%、2016年为26.1%)。

2.1.4 叶绿素a

图9为多功能人工湿地对景观水体中叶绿素a的去除效果。

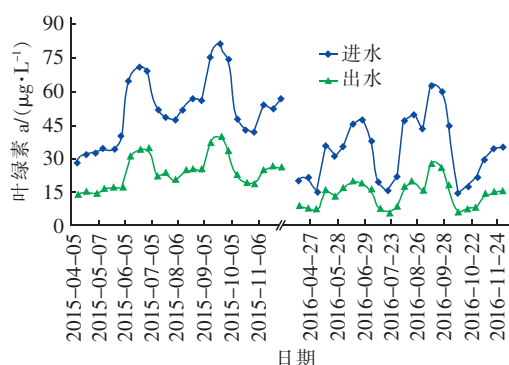


图9 多功能人工湿地控制景观水体中叶绿素a的效果

Fig.9 Removal performance of chlorophyll a in landscape water by multifunctional constructed wetlands

由图9可知,2015年运行期间,景观水体叶绿素a为28~81 μg/L,平均值为52 μg/L,经湿地处理后叶绿素a为14~40 μg/L,平均值为24 μg/L。2016年运行期间,景观水体叶绿素a为15~63 μg/L,平均值为33 μg/L,经湿地处理后叶绿素a为6~28 μg/L,平均值为14 μg/L。

经计算,人工湿地运行期间对景观水体中叶绿素a的总体平均去除率为55.8%,其中2015年平均去除率为53.3%,2016年平均去除率为58.3%,可见2016年比2015年提高了5个百分点,表明人工湿地对景观水体藻密度的降低具有一定作用。

2.2 雨水径流处理运行模式的工程效果

在多功能人工湿地雨水径流处理运行模式下,考虑到湿地单元水力负荷的设计要求及较小降雨产流条件下径流污染负荷相对较高的影响^[4],通常在雨水径流来水量不满足湿地运行水力负荷的情况下,采取混掺部分河水合并处理的运行策略。也就是说,只有在降雨量较大、产流明显的降雨事件中,

湿地实际进水中混掺河水比例相对较小(甚至只包括雨水径流)。基于此,选取2016年6月—8月的3场雨量较大、产流明显的降雨过程中的工程运行数据,评估多功能人工湿地处理雨水径流的工程效能。结果表明,进水SS、COD、NH₃-N、TP浓度分别为157~356、110~185、2.12~4.82、0.66~2.94 mg/L,相应的平均值分别为273、138、3.39、1.76 mg/L。出水SS、COD、NH₃-N、TP浓度分别为17~20、36~50、1.73~2.10、0.17~0.50 mg/L,相应的平均值分别为19、42、1.87、0.30 mg/L。尽管较大降雨过程中雨水径流导致湿地进水COD、NH₃-N、TP浓度明显升高,但系统的净化效果仍然较好。经计算,系统对SS、COD、NH₃-N、TP的去除率分别为93%、69.6%、44.8%和83%。除SS外,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A要求。

3 结论

① 中新生态城多功能人工湿地工程在景观水体旁路净化模式下,工程效果显著。2016年对水体COD、NH₃-N、TP、叶绿素a的年均去除率分别为44.5%、31.4%、44.3%、58.3%,出水COD满足地表水Ⅳ类水质标准,NH₃-N、TP均满足地表水Ⅱ类水质标准。

② 中新生态城多功能人工湿地工程旁路净化景观水体具有明显的季节性、年度变化规律,对COD、NH₃-N和TP的平均去除率在2015年和2016年内均呈先升高后降低的趋势(7月份去除率最高),2016年每月各指标的平均去除率均高于2015年的相应月份。

③ 中新生态城多功能人工湿地工程在雨水径流处理运行模式下,对以雨水径流为主的进水SS、COD、NH₃-N、TP的平均去除率分别为93%、69.6%、44.8%、83%,出水水质总体与城镇污水处理厂一级A标准相当(SS除外)。

综上所述,中新生态城多功能人工湿地工程在旁路净化景观水体并协同在线处理雨水径流方面具有适用性。

参考文献:

- [1] 刘振江,赵益华,陶君,等. 中新生态城污水库环境治理与生态重建[J]. 中国给水排水,2016,32(1):78-82.

- Liu Zhenjiang, Zhao Yihua, Tao Jun, *et al.* Environmental management and ecological reconstruction of wastewater reservoir in Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(1): 78 – 82 (in Chinese).
- [2] 王金丽, 尚巍, 郑兴灿, 等. 中新天津生态城区域沉降物特征及对水环境的影响 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(21): 109 – 113.
- Wang Jinli, Shang Wei, Zheng Xingcan, *et al.* Characteristics of regional deposition in Sino-Singapore Tianjin Eco-city and its influence on water environment [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(21): 109 – 113 (in Chinese).
- [3] 葛铜岗, 黄鹏, 尚巍, 等. 人工湿地在天津生态城水系构建中的应用建议研究 [J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(12): 142 – 143.
- Ge Tonggang, Huang Peng, Shang Wei, *et al.* Application of constructed wetlands in landscape water system construction in Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(12): 142 – 143 (in Chinese).
- [4] 何茜. 海绵城市雨洪控制中雨水径流水质变化规律分

析 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(5): 321 – 325.

He Qian. Sponge urban flood control in the rain runoff water quality variation analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(5): 321 – 325 (in Chinese).



作者简介: 葛铜岗 (1981 –), 男, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为城市水环境治理工程技术。

E – mail: getonggang2004@163. com

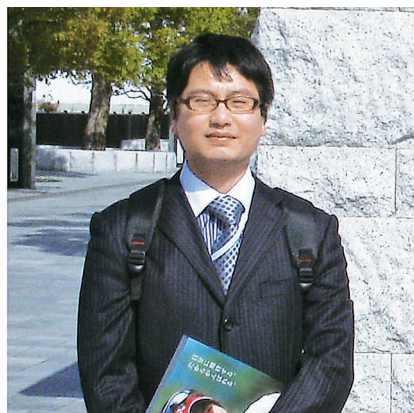
收稿日期: 2018 – 03 – 08

(上接第 79 页)

- PFOA 的生态风险及控制对策 [J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(1): 96 – 101.
- Cao Ying, Zhang Yahui, Yan Zhenguang, *et al.* Ecological risks and control measures of typical perfluorinated compounds PFOS/PFOA [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(1): 96 – 101 (in Chinese).
- [8] Giri R R, Ozaki H, Guo X, *et al.* Oxidative – reductive photodecomposition of perfluorooctanoic acid in water [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, 11(5): 1277 – 1284.
- [9] Van der Bruggen B, Braeken L, Vandecasteele C. Evaluation of parameters describing flux decline in nanofiltration of aqueous solutions containing organic compounds [J]. *Desalination*, 2002, 147(1/3): 281 – 288.
- [10] Agenson K O, Oh J I, Kikuta T, *et al.* Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process [J]. *J Membr Sci*, 2003, 225(1): 91 – 103.
- [11] Kiso Y, Sugiura Y, Kitao T, *et al.* Effects of hydrophobicity and molecular size on rejection of aromatic pesticides with nanofiltration membranes [J]. *J Membr Sci*,

2001, 192(1/2): 1 – 10.

- [12] Ozaki H, Ikejima N, Matsui S, *et al.* The role of membrane-potential in solute rejection by low-pressure reverse osmosis membrane [J]. *Water Sci Technol: Water Supply*, 2002, 2(5/6): 321 – 328.



作者简介: 陈霞明 (1980 –), 男, 福建福清人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事水中微量环境污染物的去除技术研究。

E – mail: xmchen@xujc. com

收稿日期: 2017 – 11 – 21