

# 组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水

吴树彪<sup>1</sup>, 董仁杰<sup>3</sup>, 翟旭<sup>2</sup>, 胡静<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 刘琳<sup>1</sup>, 刘竹青<sup>1</sup>\*

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 西北农林科技大学, 农业部沼气西北分中心, 杨凌 712100; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 该文对组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水进行了为期 10 个月的试验研究 (包括冬季)。湿地床上部铺设了 0.5 m 的生物质保温层, 使在冬季最低气温-15℃的低温下, 系统温度仍维持在 7℃以上, 保证了系统的正常运行。结果表明, 化学需氧量 (COD<sub>Cr</sub>)、生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>)、氨氮 (NH<sub>3</sub>-N)、总磷 (TP)、总固体悬浮物 (TSS) 和浊度的平均去除率分别为 93.0%、96.0%、88.4%、87.7%、97.0% 和 89.6%, 出水体积质量平均值分别为 36.0、11.8、3.5、0.6、3.8 mg/L 和浊度 9.1 NTU, 满足国家排放二级标准。组合家庭人工湿地系统是一种适合农村分散式家庭污水处理的新途径。

**关键词:** 湿地, 污水处理, 环境工程, 组合家庭人工湿地, 农村环境, 分散式处理

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.11.052

中图分类号: S625.51

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-11-0282-06

吴树彪, 董仁杰, 翟旭, 等. 组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 282-287.

Wu Shubiao, Dong Renjie, Zhai Xu, et al. Northern rural domestic sewage treatment by integrated household constructed wetlands[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(11): 282-287. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

中国水源污染、水体富营养化及环境水质恶化日趋严重<sup>[1]</sup>。2005 年, 中国将实现村容整洁和改善农民的生存环境作为社会主义新农村建设的重要目标之一。农村地区没有统一的地下排水管道, 农民生活污水多未经任何处理即排放。全国 50% 的非点源污染来自农村废水排放<sup>[2]</sup>, 直接威胁着农民的生活环境和饮用水安全<sup>[3-4]</sup>。近年来, 中国的污水处理虽然取得了卓越的成效, 但是农村地区的污水处理率还不到 1%<sup>[5]</sup>。对于高人居密度的大中城市, 集中式的污水处理模式行之有效<sup>[6]</sup>, 但对于农村地区来说, 集中污水处理的建设和运行维护费用高, 难以推广<sup>[7-8]</sup>。

分散式污水处理技术由于其低廉的成本已成为现在农村处理污水的关注点。传统的分散式污水处理有氧化塘、化粪池、土地渗滤系统。氧化塘美观视觉较差<sup>[9]</sup>, 有机物的好氧分解和氮素的硝化去除不良<sup>[10]</sup>。化粪池多为污水处理系统的预处理, 但出水仍具有较高浓度的悬浮物、生化需氧量 (BOD)、氮 (N)、磷 (P) 和细菌, 不能直接排入水体<sup>[11]</sup>。在美国, 化粪池是地下水污染最严重的 3 个污染源之一<sup>[12]</sup>, 证明其并不是一种合适的农村

污水独立处理系统<sup>[13]</sup>。分散式污水处理技术在北方地区的应用过程中, 冬季微生物的活性难以维持<sup>[14-15]</sup>, 使维持系统正常运行成为难题<sup>[16-18]</sup>。适应于广泛气候尤其是北方地区的农村家庭污水分散处理模式的开发, 成为现在学者们关注的焦点。

人工湿地系统是一种以基质、植物及微生物协同通过物理、化学和生物作用进行污水处理的新型生态系统, 具投资少、建设运营成本低; 净化效果好、去除氮 (N) 磷 (P) 能力强; 工艺简单、不占地上面积等特点。中国农业大学为此开发了组合家庭人工湿地系统 (发明专利 03157161.1、实用新型 200720173930.2), 并在北京市教委、天津市农委和国家科技部的先后资助下, 对专利技术进行熟化、改进和二次创新, 将组合家庭人工湿地系统应用于北方地区农村单户家庭的生活污水处理, 考察其净化处理效果, 进一步探讨在新农村建设中推广, 进行农村家庭污水处理、改善农村环境的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与装置

组合家庭人工湿地系统 (图 1) 建于北京市昌平区朝凤庵村的路旁餐馆后院内, 占地面积 2 m<sup>2</sup>, 由地下沉淀池和柳树湿地床组成, 系统内墙刷以防水漆防止污水泄漏。沉淀池 1 和沉淀池 2 的内部有效容积为 0.6 和 0.4 m<sup>3</sup>, 且 2 个池体由浮阀联通控制间歇进水。柳树湿地床部分的容积为 1.2 m<sup>3</sup>, 沙层深度为 1.1 m。为保证该系统在冬季能够正常运行, 在湿地床上铺设了 0.5 m 厚的木屑稻壳层作为保温层, 在保温层上部铺有塑料薄膜, 防止降雨影响。滤层有效砂粒径为 0.25~1 mm, 不均匀系数小于 4.0。系统底层铺有直径为 1~2.5 cm 的砾石排水层, 布

收稿日期: 2009-06-01 修订日期: 2009-07-21

基金项目: 科技部农业科技成果转化资金项目“北方地区农村污水生态净化技术中试与示范”(2007GB23600460)

作者简介: 吴树彪 (1983-), 河北沧州人, 男, 博士生, 从事人工湿地污水处理相关研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: wsb4660017@126.com

\*通信作者: 刘竹青 (1973-), 山西武乡人, 男, 副教授, 研究方向: 流体工程与灌溉技术。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: lzq@cau.edu.cn

董仁杰, 中国农业工程学会会员 (E041100008S)

水层采用相同粒径砾石铺设 20 cm，布水管采用 DN50 的 PVC 管，底部每隔 5 cm 打有  $\phi 5$  mm 的孔以便布水均匀。出水口处铺设 0.4 m 厚的磷吸附材料。柳树在北方由于其耐水性强、根系发达、易于成活生长，故本试验尝试将柳树作为湿地植物。栽于湿地床的柳树 (*Salix matsudana*) 从苗圃市场购买，径粗 3.5 cm，高度 2.6 m。

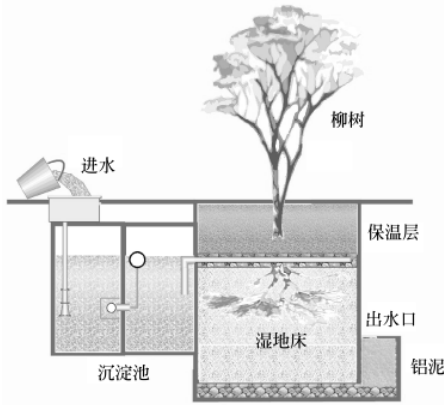


图 1 组合家庭人工湿地污水处理系统

Fig.1 Schematic diagram of the integrated constructed wetland system (IHCWS)

### 1.2 进水水质

进水为北京市昌平区朝凤庵村餐馆废水，水力负荷为 0.04 m/d，水质指标见表 1。

表 1 试验期间进水水质指标

Table 1 Water quality of influent wastewater

指标	单位	范围	平均值
pH 值	—	7.05~7.56	7.32
溶解氧(DO)	mg/L	1.89~3.78	2.91
化学需氧量(COD <sub>Cr</sub> )	mg/L	382.0~777.0	539.3
生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	mg/L	203.0~486.0	302.4
氨氮(NH <sub>3</sub> -N)	mg/L	19.8~34.5	30.7
总磷(TP)	mg/L	3.60~6.35	5.0
总固体悬浮物(TSS)	mg/L	95~222	132
浊度	NTU	62~167	87

### 1.3 检测项目及方法

检测项目及方法见表 2。试验运行期间，每 7~10 d 取水样一次，每次取 200 mL，水质于中国农业大学农业部设施农业生物环境重点实验室测定，每个指标进行 3 个重复。试验期间空气最高最低温度采取北京气象局提供的北京市气温资料。试验运行时间为 2008-05-01—2009-01-18。

表 2 试验测定项目及方法

Table 2 Parameters and methods of experiment

检测项目	检测方法
pH 值	Orion 3-Star pH 计
溶解氧(DO)	Orion 3-Star 溶氧仪
化学需氧量(COD <sub>Cr</sub> )	接种培养法
生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	重铬酸钾法
氨氮(NH <sub>3</sub> -N)	水杨酸-次氯酸盐光度法
总磷(TP)	钼锑抗分光光度法
总固体悬浮物(TSS)	不可滤残渣烘干法
浊度	HACH2100CN 浊度仪

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机物的去除

试验期间，系统运行稳定，进水、沉淀池和出水化学需氧量 (COD<sub>Cr</sub>) 和生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>) 体积质量随时间变化以及平均去除率如图 2 和表 3 所示，COD<sub>Cr</sub> 的系统平均去除率为 93.0%，BOD<sub>5</sub> 的平均去除率为 96.0%。

表 3 试验期间组合家庭人工湿地处理系统平均去除率

Table 3 Average removal efficiency of the integrated constructed wetland system (IHCWS)

项目	进水浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )		出水浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )		去除率/%	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
化学需氧量 (COD <sub>Cr</sub> )	539.3	104.8	36.0	10.7	93.0	2.8
生化需氧量 (BOD <sub>5</sub> )	302.4	64.2	11.8	3.6	96.0	1.4
氨氮(NH <sub>3</sub> -N)	30.7	4.6	3.5	1.4	88.4	4.0
总磷(TP)	5.0	0.7	0.6	0.2	87.7	3.2
总固体悬浮物 (TSS)	128.6	24.1	3.8	1.8	97.0	1.6
浊度	90.9	20.7	9.1	3.8	89.6	4.9

注：浊度单位为 NUT，其余指标单位为 mg/L。

废水经过沉淀池初步厌氧分解之后，有机物体积质量有所降低，COD<sub>Cr</sub> 由平均进水体积质量 539.3 mg/L 降到 360.9 mg/L，BOD<sub>5</sub> 由平均进水体积质量 302.4 mg/L 降到 205.1 mg/L；COD<sub>Cr</sub> 的去除率为 32.0%，BOD<sub>5</sub> 去除率为 31.0%，可见对污染物的沉淀和厌氧降解的作用有限<sup>[19]</sup>，不能满足中国污水排放标准，所以农村地区农户单纯设置化粪池并不能满足农民单户污水处理及无害化排放的要求。

柳树湿地床的净化作用一方面在于粒状滤料的机械截留作用，重要的还是依靠砂粒表面生物膜的接触絮凝、生物氧化作用达到对水中有机物的高效去除。柳树湿地床的出水体积质量 COD<sub>Cr</sub> 为 36.0 mg/L，BOD<sub>5</sub> 为 11.8 mg/L，COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 的去除率分别为 61.0%、65.0%。出水可以达到污水排放一级标准，有效地解决了农村生活污水的有效处理和达标排放问题。

### 2.2 氨氮的去除

由图 2d 和表 3 可知，试验期间，进水氨氮(NH<sub>3</sub>-N) 的体积质量平均值为 30.7 mg/L，经过沉淀池后，平均体积质量变为 26.5 mg/L，较进水体积质量略有降低，最后系统出水体积质量为 3.5 mg/L。总体氨氮的去除率平均为 88.4%，其中沉淀池的去除率为 13.0%，地下垂直流湿地床的去除率为 75.4% (图 3)，达到污水综合排放标准 (GB8978—1996) 规定的一级标准。

沉淀池在整个系统中相当于一个预处理单元，埋于地下，温度较为恒定，不易受到外部空气温度波动影响，为细菌、硝化细菌和氨化细菌提供了良好的繁殖场所。由于某些胶体杂质或水中吸附了氨氮的杂质颗粒在沉淀池中被沉淀后经硝化细菌等氧化去除<sup>[20]</sup>，使得沉淀池出

水氨氮体积质量降低；同时一部分有机物被氧化分解，有机氮转变成无机氮，又使氨氮体积质量升高，使得沉淀池中的氨氮体积质量会偶尔高于进水浓度，但总体来说降低了 13%左右。

随着每日进水，一部分微生物会继续留在沉淀池中繁殖，一部分则会随水流流出进入湿地床，附着在砂粒上，靠自身分泌的胶体黏液留在砂粒表面<sup>[21]</sup>。微生物在

砂粒较粗糙的表面上形成生物膜，砂粒上生物膜之间存在着生物絮体，使得湿地增强了吸附、接触絮凝作用。湿地床一方面依靠介质的机械截留，另一方面则是依靠砂粒表面生物膜的接触絮凝、生物氧化作用达到对水中悬浮物质和胶体颗粒等污染物质的去除。在机械截留和生物氧化的双重作用下，地下垂直流湿地床对氨氮有很高的去除率<sup>[21-22]</sup>。

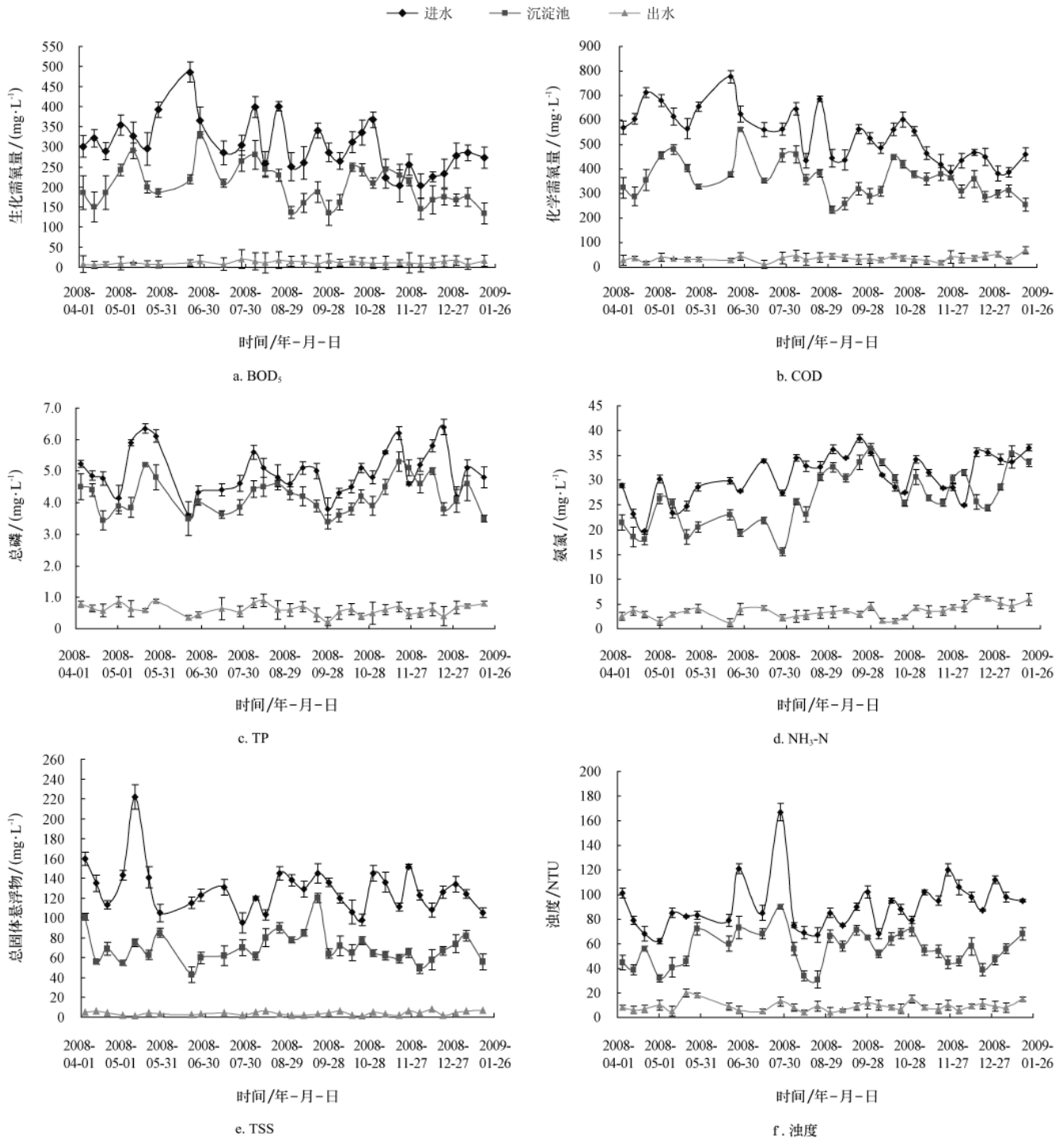


图 2 试验期间系统进水出水水质变化

Fig.2 Pollutants concentration of influent, sedimentation tank and effluent change with running time in the integrated constructed wetland system (IHCWS)

### 2.3 总磷的去除

试验期间的进水总磷体积质量平均为 5.0 mg/L，以溶

解态和颗粒态存在，分为有机、无机和聚合磷酸盐。其中无机磷酸盐主要是来自洗涤剂，有机磷化合物主要

来自生物过程、生活污水中的食物残余和废水中的活性或非活性生物（如来自处理池的细菌）等。当污水进入沉淀池后，部分颗粒态磷会得到沉淀，污水中总磷浓度降低为 4.2 mg/L。系统出水总磷体积质量为 0.35~0.90 mg/L，平均值为 0.61 mg/L，总磷总体去除率为 87.7%，其中沉淀池的去除率为 15%，地下垂直流湿地床的去除率为 73%，满足中国污染物排放的二级标准。

垂直流湿地床部分磷的去除包括湿地植物吸收<sup>[23]</sup>、湿地微生物的生物化学作用以及基质的吸附<sup>[24]</sup>、络合和沉淀等<sup>[25]</sup>。有研究证明，植物的吸收和微生物的活动对污水中磷的去除贡献不大<sup>[16,26-27]</sup>，基质的吸附和沉淀占除磷的 70%~87%。湿地床的主体材料采用建筑砂和砾石。污水中可溶性磷酸盐容易与基质中的 Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等金属离子、金属氧化物和氢氧化物以及粘土矿物通过配位体交换作用发生吸附和沉淀反应，生成难溶性磷酸盐而固定下来。国内外研究证明，可以使用专门除磷基质加强湿地系统对磷的长期吸附<sup>[28-34]</sup>。本文在系统出水口处设置 0.4 m 厚的除磷基质，也证明了其对于磷的去除较其他系统有了很大的提高。

### 2.4 总固体悬浮物（TSS）和浊度的去除

试验期间，系统的进水、沉淀池和系统出水的总固体悬浮物（TSS）和浊度变化如图 2e 和图 2f 所示。组合家庭人工湿地系统对 TSS 和浊度的去除有着显著的效果，去除率平均分别达到 97.0%和 89.6%。其中沉淀池对于 TSS 和浊度的去除率分别为 44%、38%；而地下垂直流湿地床对 TSS 和浊度的去除率均为 38%（图 3）。沉淀池的设置在整个系统中起着非常重要的作用，其不仅可以把复杂难降解、大颗粒的有机物水解成易降解的简单有机物，大大降低废水中的悬浮固体（SS）含量，提高废水的可生化性，同时还可以起到调节水量、水温以及酸碱度的作用，为地下垂直流湿地床提供一个较为稳定的进水环境。而湿地床主要是依靠被微生物膜覆盖的滤料表面对悬浮颗粒和可溶性污染物进行吸附和截留，进而通过微生物氧化和胞外酶降解吸附的有机物<sup>[35]</sup>。

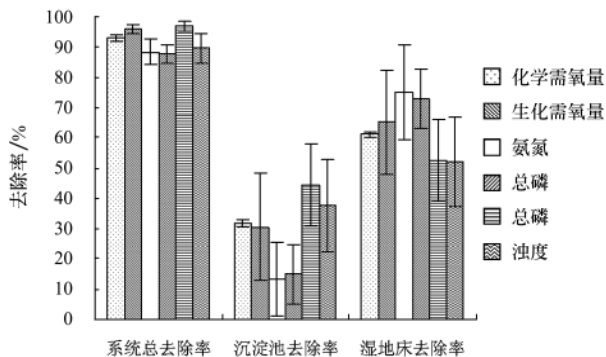


图 3 沉淀池、湿地床对污染物的去除率

Fig.3 Removal efficiency of sedimentation tank and constructed wetland bed

### 2.5 低温运行

传统人工湿地受气温影响较大，冬季（11 月、12 月、1 月）低温时污染物的去除率比气温高的季节低，特别是

N 等污染物<sup>[36-37]</sup>。本文在系统上部铺设了 0.5 m 厚的生物质层作为保温层。试验期间冬季（11 月、12 月、1 月）的室外最低气温为 -15℃，但垂直流湿地床的温度一直维持在 7℃以上（图 4）。温度对微生物的生长繁殖与活性有显著影响，其中硝化细菌和亚硝化细菌的生长繁殖速率和活性会受到低温的抑制，硝化速率在 10℃以下受抑制，在 6℃以下急剧下降<sup>[38]</sup>，在 4℃以下趋于停止<sup>[39]</sup>。如图 5 所示，本系统在冬季低温条件下 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、TSS 的去除率虽有 3%、6%、2%下降，但相对传统湿地仍具有较高的污染物去除率<sup>[4,40]</sup>。Brix<sup>[41]</sup>、Steer<sup>[42]</sup>、刘佳<sup>[43]</sup>等认为人工湿地在冬季低温条件下对 SS、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 仍有较高的去除率，也在图 5 中得到验证。总磷受富含 Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等金属离子的基质的吸附，可溶性磷酸盐通过配位体交换作用发生吸附和沉淀反应，生成难溶性磷酸盐而固定下来，不易受温度条件限制。

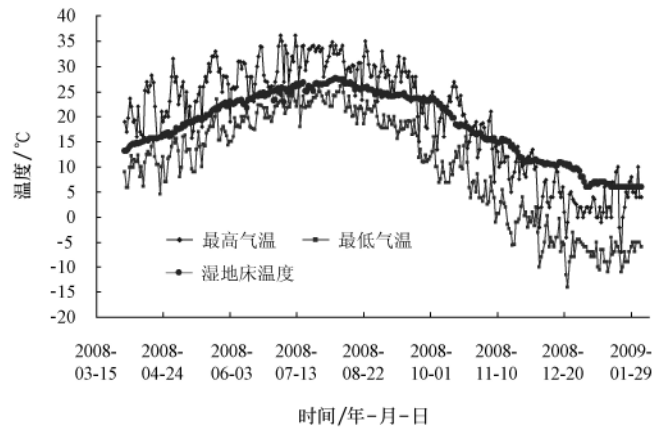


图 4 温度变化

Fig.4 Temperature changes with running time

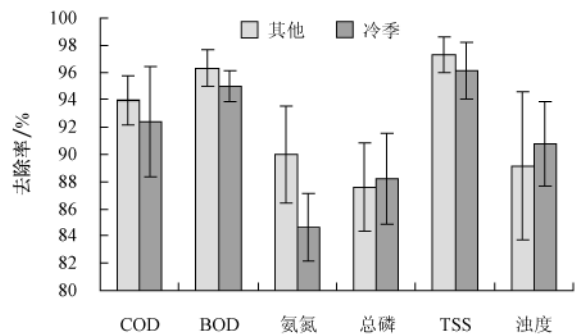


图 5 非冬季和冬季(11、12、1月)污染物去除率比较  
Fig.5 Comparison of removal efficiency between winter and not winter

## 3 结 论

1) 组合家庭人工湿地系统是一种以基质、植物及微生物协同作用进行污水处理的新型生态系统，适合农村分散式污水的处理。

2) 单纯沉淀池较难满足污水的排放标准。沉淀池与地下垂直流湿地床的组合处理，强化了湿地床各污染物的高效去除。其中沉淀池不仅沉淀大颗粒物质和降低 SS 含量，同时还可以将大分子难降解的有机物水解成湿地

床微生物易于降解的简单有机物,对系统高效去除污染物有重要作用。其与地下垂直流湿地床的组合,有效处理农村生活污水。其各污染指标较好的去除效果为组合家庭人工湿地系统在农村的推广应用奠定基础。

3) 试验运行期间,系统出水中 COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、TSS 和浊度等体积质量分别为 36.0、11.8、3.5、0.6、3.8 mg/L 和浊度 9.1 NTU,整体去除率分别为 93.0%、96.0%、88.4%、87.7%、97.0%、89.6%,满足国家排放标准。

4) 0.5 m 厚生物质保温层,使本系统在冬季空气最低气温-15℃时环境下仍能维持在 7℃以上,保证了系统的稳定运行及较好的处理效果。

#### [参 考 文 献]

- [1] Zhang Jie, Cao Xiangsheng, Meng Xuezheng. Sustainable urban sewerage system and its application in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 51(2): 284—293.
- [2] 柴世伟, 裴晓梅, 张亚雷, 等. 农业面源污染及其控制技术[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 192—195. Chai Shiwei, Pei Xiaomei, Zhang Yalei, et al. Research on agricultural diffuse pollution and controlling technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 192—195. (in Chinese with English abstract)
- [3] Babatunde A Q, Zhao Yaqian, O'Neill M, et al. Constructed wetlands for environmental pollution control: A review of developments, research and practice in Ireland[J]. Environment International, 2008, 34(1): 116—126.
- [4] Oron G, Campos C, Gillerman L, et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities[J]. Agricultural Water Management, 1999, 38(3): 223—234.
- [5] Pan T, Zhu Z L, Xu G M, et al. Vertical bio-filter technique for decentralized wastewater system in a case of Sino-German technical cooperation pilot project in Changzhou city[C]//The 6th ministers' forum on infrastructure development in the Asia-Pacific region & the 2nd international conference for China urban water development, 2007: 700—706.
- [6] Harremoës P. Water as a transport medium for waste out of towns[J]. Water Science & Technology, 1999, 39(5): 1—8.
- [7] Aiyuk S, Amoako J, Raskin L, et al. Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept[J]. Water Research, 2004, 38(13): 3031—3042.
- [8] Behling E, Diaz A, Colina G, et al. Domestic wastewater treatment using a UASB reactor[J]. Bioresource Technology, 1997, 61(3): 239—245.
- [9] Woldt W E. Constructing wetlands to replace rural septic systems[J]. ProQuest Biology Journal, 2003, 10(5): 7.
- [10] Herrera Melian J A, Arana J, Gonzalez Diaz O, et al. Effect of stone filters in a pond-wetland system treating raw wastewater from a university campus[J]. Desalination, 2009, 237(1/2/3): 277—284.
- [11] Fox E G. Septic tank: their functions and operations[C]// Proceedings of a Seminar on Land Treatment of Wastes Part I, Wellington, New Zealand, 1984: 193—202.
- [12] USEPA. National Water Quality Inventory: 1998 Report to Congress[R]. EPA 305(b) Report. USEPA, Washington, DC. 1998.
- [13] Guleda O E, Demir I. Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79(4): 357—363.
- [14] Liang W, Wu Z B, Cheng S P, et al. Roles of substrate microorganisms and urease activities in wastewater purification in a constructed wetland system[J]. Ecological Engineering, 2003, 21: 191—5.
- [15] 崔玉波, 韩相奎, 宋铁红. 潜流人工湿地污水处理技术的效能与设计[J]. 环境科学动态, 2003, (2): 23—25.
- [16] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. Water Science & Technology, 1997, 35(5): 11—17.
- [17] 申欢, 胡洪营, 潘永宝. 潜流式人工湿地冬季运行的强化措施研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(5): 44—46. Shen Huan, Hu Hongying, Pan Yongbao. Study on enhanced measures for operation of subsurface flow constructed wetlands in winter[J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(5): 44—46. (in Chinese with English abstract)
- [18] Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2005, 25: 478—90.
- [19] 白春燕, 刘丽萍. 浅谈化粪池的设置[J]. 黑龙江科技信息, 2002, (3): 23.
- [20] 王占生, 刘文君. 微污染水源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [21] 方平, 陆少鸣, 刘姣. 生物砂滤池对有机物和氨氮的去除[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 73—80. Fang Ping, Lu Shaoming, Liu Jiao. Removal of organic matter and NH<sub>3</sub>-N by biological sand filter[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(12): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [22] 范平, 吴纯德, 陆少鸣, 等. GAC—石英砂生物滤池处理微污染原水[J]. 水处理技术, 2008, 34(8): 59—62. Fan Ping, Wu Chunde, Lu Shaoming, et al. Study on micro-polluted raw water treatment by GAC-sand biofiltration[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(8): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [23] Greenway M, Woolley A. Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation[J]. Ecological Engineering, 1999, 12(1/2): 39—55.
- [24] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review[J]. Critical Review in Environmental Science Technology, 1999, 29(1): 83—146.
- [25] Drizo A, Reddy K R, Moore P A. Solubility of inorganic P in stream water as influenced by pH and Ca concentration[J]. Water Research, 1994, 28(8): 1755—1763.
- [26] Brix H. Functions of macrophytes play a role in constructed wetlands[J]. Water Science & Technology, 1994, 29(4): 71—78.
- [27] Arias C A, Del Bubba M, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. Water Research, 2001, 35(5): 1159—1168.
- [28] Razali M, Zhao Yaqian, Bruen M. Effectiveness of drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution[C]//Separation and Purification Technology, 2007, 55: 300—306.
- [29] Babatunde A Q, Zhao Y Q, Yang Y, et al. Investigation of the application of dewatered alum sludge as a medium in reed beds for animal farm wastewater treatment[J]. 7th International Symposium on Waste Management Problem in

- Agro-industries, Amsterdam, 2006: 27—29.
- [30] Babatunde A Q, Zhao Y Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2007, 37: 129—164.
- [31] 邹映红. 氧化沟与曝气生物滤池除磷效果比较[J]. *工业水处理*, 2008, 28(3): 78—80.  
Zou Yinghong. Comparison of the phosphorus removal efficiencies of oxidation ditch and biological aerated filter[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(3): 78—80. (in Chinese with English abstract)
- [32] 曹向东, 王宝贞, 蓝云兰, 等. 强化塘—人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(2): 15—19.  
Cao Xiangdong, Wang Baozhen, Lan Yunlan, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in the pond-wetland combined system[J]. *Research of Environmental Science*, 2000, 13(2): 15—19. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张荣社, 周琪, 史云鹏, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中磷的效果[J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 105—108.  
Zhang Rongshe, Zhou Qi, Shi Yunpeng, et al. Phosphorus removal of agriculture wastewater through subsurface constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 105—108. (in Chinese with English abstract)
- [34] 余兆祥, 冯耀宇, 齐荣, 等. 利用人工湿地脱除废水中氨氮和磷的统计分析[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(1): 17—20.  
Yu Zhaoxiang, Feng Yaoyu, Qi Rong, et al. A statistical analysis on removal of  $\text{NH}_3\text{-N}$  and orthophosphate in wastewater using constructed wetland[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2006, 28(1): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [35] 施东文, 陈健波, 奚旦立. 活性炭滤池深度处理水中有机物[J]. *环境工程*, 2006, 24(6): 85—87.  
Shi Wendong, Chen Jianbo, Xi Danli, et al. Advanced treatment of organic compounds in water using activated carbon filter[J]. *Environmental Engineering*, 2006, 24(6): 85—87. (in Chinese with English abstract)
- [36] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 19(1): 1—11.
- [37] Kadlec R H, Reddy K R. Temperature effects in treatment wetlands[J]. *Water Environment Research*, 2001, 73(5): 543—547.
- [38] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1039—1047.
- [39] 雒维国, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(8): 37—40.  
Luo Weiguo, Wang Shihe, Huang Juan, et al. Denitrification by using subsurface constructed wetland in low temperature[J]. *China Water and Wastewater*, 2005, 21(8): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘学燕, 代明利, 刘培斌. 人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1077—1081.  
Liu Xueyan, Dai Mingli, Liu Peibin. Application of subsurface flow constructed wetland in north area of china in winter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1077—1081. (in Chinese with English abstract)
- [41] Brix H, Arias C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: new Danish guidelines[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 491—500.
- [42] Steer D N, Fraster L H, Seibert B A. Cell-to-cell pollution reduction effectiveness of subsurface domestic treatment wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(8): 969—976.
- [43] 刘佳, 孙浩诚, 李亚峰, 等. 垂直流人工湿地在北方地区的应用[J]. *工业用水与废水*, 2006, 37(4): 20—22.  
Liu Jia, Sun Haocheng, Li Yafeng, et al. Application of vertical flow constructed wetland in northern areas[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2006, 37(4): 20—22. (in Chinese with English abstract)

## Northern rural domestic sewage treatment by integrated household constructed wetlands

Wu Shubiao<sup>1</sup>, Dong Renjie<sup>3</sup>, Zhai Xu<sup>2</sup>, Hu Jing<sup>1</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>, Liu Lin<sup>1</sup>, Liu Zhuqing<sup>1\*</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. The Northwest Station of Biogas Products and Equipment Quality center of Ministry of Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A ten months continuous study (covering winter period) was conducted on an integrated household constructed wetland system for rural wastewater treatment. With a 0.5 m of biomass thermal insulation layer on the top of the system, the system temperature remained above 7°C while the lowest climate temperature of -15°C, guaranteeing the ordinary treatment efficiency. The removal rates of COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TP, TSS, and turbidity were 93.0%, 96.0%, 88.4%, 87.7%, 97.0% and 89.6%, respectively. The effluent concentrations were 36.0, 11.8, 3.5, 0.6, 3.8 mg/L and 9.1NTU, respectively. The perfect removal efficiency of integrated household constructed wetland proved its potential application in the rural areas for the distributed wastewater treatment and environment protection.

**Key words:** wetlands, wastewater treatment, environment engineering, integrated household constructed wetland, rural environment, decentralized treatment