

# 人工湿地处理污染河水的持续性运行研究

张建<sup>1,2</sup>, 何苗<sup>2</sup>, 邵文生<sup>1</sup>, 胡洪营<sup>2</sup>, 高宝玉<sup>1</sup>

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:**中国北方地区城市纳污河道内的污染河水具有水量、水质、水温季节性变化大的特点,这给人工湿地污染河水处理系统的持续性运行造成很大困难。通过 1a 多的连续性运行,对潜流人工湿地污染河水处理系统的可持续运行问题进行了系统研究,年平均水力负荷为 15 cm/d。结果表明,季节变化对氨氮的去除效果影响很大,夏季氨氮去除效果良好,去除率达 70% 以上,而冬季水温降低到 15℃ 以下时,氨氮去除率降低到 30% 以下,但季节变化对 COD 去除效果的影响较小。人工湿地在夏季雨季时期可以承受较大的短期洪水水力冲击负荷,在 100 cm/d 的负荷下,对氨氮和 COD 的去除率分别可以达到 52% 和 36%。基质脱氢酶活性与温度和污染物去除效果的季节性变化存在一定的正相关关系。

**关键词:**潜流人工湿地;污染河水;持续性运行

**中图分类号:**X522 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)09-1760-05

## Sustainable Operation of Subsurface Constructed Wetland Treating Polluted River Water

ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, HE Miao<sup>2</sup>, SHAO Wen-sheng<sup>1</sup>, HU Hong-ying<sup>2</sup>, GAO Bao-yu<sup>1</sup>

(1. School of Environment Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. Department of Environment Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Water quality, flux and temperature of polluted river in northern China fluctuate a lot in a year around, which is disadvantageous for sustainable operation of subsurface constructed wetland treating polluted river water. A pilot system of subsurface constructed wetland treating polluted river water was operated for one year to study the sustainable operation of the process. The results show that ammonia removal performance fluctuated a lot according to different seasons. At the hydraulic loading of 15 cm/d, ammonia nitrogen removal rates were above 70% in summer, however, below 30% in winter when water temperature was below 15℃. Changes of water temperature had little influence on COD removal performance. In the wet season of summer, the pilot wetland system could bear a short-period flood hydraulic loading, and ammonia nitrogen and COD removal rates were 52% and 36% respectively at the hydraulic loading of 100 cm/d. The activity of soil dehydrogenase had a positive correlation with seasonal changes of temperature and pollution removal performance.

**Key words:** subsurface constructed wetland; polluted river water; sustainable operation

近年来,随着我国经济的高速发展,生活污水和工业废水大量排放、面源污染不断加剧,导致我国诸多河道成为工业废水、生活污水以及农田面源污染物汇集的纳污河,直接危及城市和工业供水安全及人民健康<sup>[1]</sup>。污染河水的污染物浓度低、水量大,污染物浓度随季节变化较大,有较大的处理难度<sup>[2]</sup>。

河道曝气、生物膜等常用污染河水处理技术的效率低、投资大,难以在中国大规模应用推广<sup>[3,4]</sup>。由于人工湿地具有缓冲容量大、管理简便、基建及运行费用低廉等特点,因此该技术成为纳污河道污染河水处理的优选技术<sup>[5-7]</sup>。

河流治理是一项长期的工程,因此污染河水处理系统必须具有运行的可持续性,才能达到河流治理长期运行的要求。人工湿地系统是一种生态工程处理工艺,其受自然环境条件的影响很大。中国北方地区城市纳污河道内的污染河水具有水量、水质、水

温季节性变化大的特点,这给人工湿地污染河水处理系统的持续性运行造成很大难度。

本研究选择中国北方地区的典型城市纳污河道——淄博市孝妇河为研究对象,采用潜流人工湿地系统对其河道内的污染河水进行处理,系统研究了季节变化和年度变化对污染物去除效果的影响、夏季洪水对系统的水力冲击等人工湿地持续性运行问题。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验装置

潜流人工湿地污染河水处理中试系统建设在淄

收稿日期:2005-10-24;修订日期:2006-01-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601080);国家自然科学基金项目(50508019)

作者简介:张建(1976~),男,博士,讲师,主要研究方向为水污染控制,E-mail:zhangjian00@sdu.edu.cn

博市孝妇河黄土崖段的一段河滩上. 人工湿地中试系统长 15m, 宽 1.5m, 深 0.5m, 采用废砖与废陶瓷等体积混合物为填料, 填料粒径 2~4cm, 沿水流方向等长度种植芦苇、菖蒲和美人蕉, 湿地面积 22.50m<sup>2</sup>. 湿地中每种植物各占面积的 1/3. 植物与湿地壁距为 0.15m, 植物的种植间距为 0.40m. 中试系统的规格如表 1 所示.

表 1 中试系统

Table 1 Pilot wetland systems

长/m	宽/m	深/m	填料	湿地植物(沿水流方向)
15	1.5	0.5	混合填料	芦苇 菖蒲 美人蕉

以孝妇河水作为人工湿地中试系统的进水. 孝妇河是流经淄博市的 1 条典型城市纳污河道, 河水污染严重. 孝妇河的水质情况如表 2 所示. 污染河水的可生化性较差, BOD<sub>5</sub>/COD < 0.3. 由于河水中磷的浓度很低, 本研究没有将磷作为去除对象加以考察.

表 2 污染河水的水质情况

Table 2 Concentration of pollutants in polluted Xiaofu river water

季节	COD	氨氮	总磷
	/mg L <sup>-1</sup>	/mg L <sup>-1</sup>	/mg L <sup>-1</sup>
春季(3~5月)	40~70	17~50	<0.1
夏季(6~8月)	40~80	1~40	<0.1
秋季(9~11月)	35~50	1~10	<0.1
冬季(12月~翌年2月)	40~60	10~16	<0.1

### 1.2 试验方法

孝妇河潜流人工湿地污染河水处理系统于 2004 年初建成通水. 在 2004~2005 年, 控制年平均水力负荷为 15 cm/d, 对人工湿地的运行效果进行了 1a 多的连续监测, 考察了季节变化对污染物去除效果的影响.

夏季是中国北方地区的雨季, 洪水会对人工湿地污染河水处理系统造成短时间的冲击力. 2004-08, 在 30~100 cm/d 之间调整水力负荷, 考察了夏季水力冲击负荷对人工湿地运行效果的影响. 在人工湿地中试系统运行的第 2a, 针对系统中的基质酶活性进行了监测分析, 以研究系统中酶活性的季节变化规律.

试验过程中的主要水质监测项目为 COD 和氨氮, 分别采用标准重铬酸钾法和纳氏试剂比色法<sup>[8]</sup>. 另外, 对填充介质的脱氢酶活性进行了检测, 以研究潜流湿地系统中微生物活性的变化. 土壤脱氢酶活性的分析方法见参考文献[9~11].

## 2 结果与讨论

### 2.1 孝妇河水量、水质和水温变化分析

孝妇河是 1 条典型的北方河流, 随季节的变化其水量变化较大, 而且作为 1 条城市纳污河流, 其水质也受沿岸生产和生活等活动的影响而产生很大波动. 本研究首先对孝妇河的水量、水质和水温的变化情况进行了分析.

1a 中孝妇河水量的变化情况如图 1 所示. 孝妇河流经淄博市中心城区, 雨季主要集中在 6~8 月, 此时, 河道内的流量较大, 而其它季节降水很少, 河道内流量较小. 由于下游橡胶坝拦截蓄水, 1~3 月和 11、12 月的河水流量为 0.

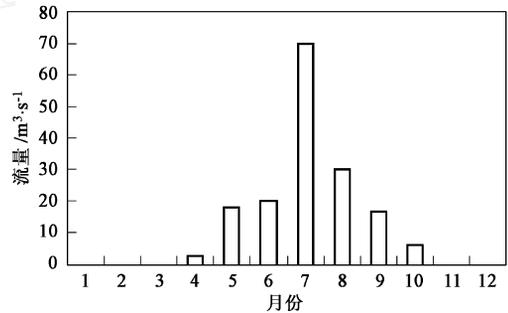


图 1 孝妇河流量的逐月变化情况

Fig. 1 Monthly discharge in Xiaofu River

孝妇河水水温逐月变化情况如图 2 所示. 可见, 7 月河水水温最高, 维持在 30 左右, 随着时间的推移水温逐渐下降, 到 10 月底水温降低到 15 以下. 12 月下旬到来年 1 月下旬, 河道内结冰.

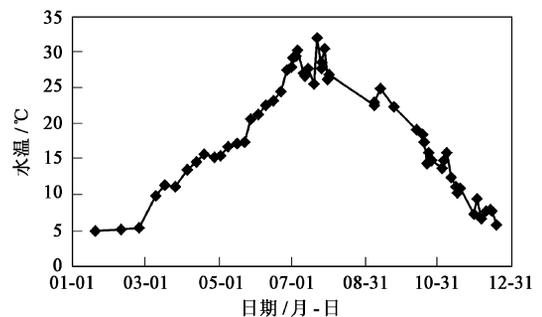


图 2 孝妇河水水温的年变化情况

Fig. 2 Variations of water temperature with time

孝妇河水内的污染浓度逐月变化情况如图 3 所示. 可见, 5、6 月时污染河水中污染物浓度较高, 这种情况一方面由于冬季的拦蓄作用, 导致河水中污染物在河道中逐渐累积; 另一方面由于 5、6 月该地区开始逐渐进入雨季, 初期雨水携带大量的面源污

染进入河道.随着 7、8 月雨季的来临,河水中的污染物浓度迅速降低,到 9 月以后,随着降水的减少河水流量逐渐减小,河水中的污染物浓度逐渐提高.

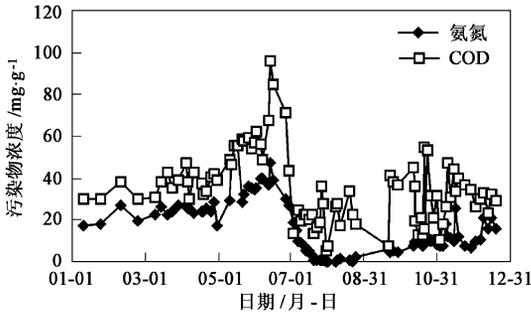


图 3 污染河水中污染物浓度的年变化情况  
Fig. 3 Pollutants concentration versus time

在 2004-08-25,对孝妇河水的各种污染物浓度和水温进行了 24h 连续监测,取样时间间隔为 2h,结果如图 4 所示.可见,污染河水中污染物质浓度和水温的日变化不是很大,这对人工湿地系统运行效果的影响很小.

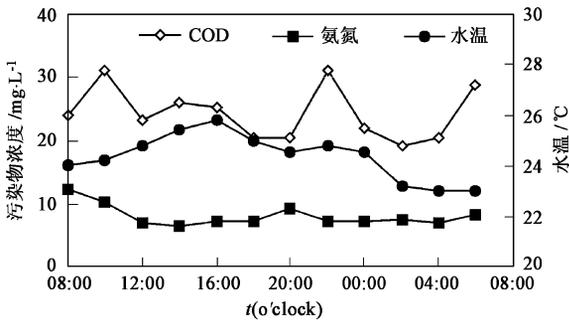


图 4 河水中各污染物浓度和水温的日变化情况  
Fig. 4 Diurnal variations of pollutant concentration and water temperature

综上所述,虽然孝妇河水质的日变化不大,但 1a 中不同季节河水中的污染物浓度波动很大,加上河水流量的季节性波动,给人工湿地系统的运行效果产生很大影响.尤其是 12 月,由于温度的降低导致河水出现结冰现象,这给人工湿地的运行带来了很大困难.

2.2 不同季节对污染河水的净化能力

人工湿地系统 2004 年的氨氮去除效果如图 5 所示,全年的平均水力负荷为 15 cm/d.由于 1 月到 2 月初河水结冰,人工湿地系统无法正常运行.3、4 月为系统的初期运行阶段,该时期的水温低于 15,氨氮的去除效果较差,去除率在 10%~20%;

5、6 月的河水氨氮浓度较高,大多达到 30 mg/L 以上,此时,气温的升高促进了植物的生长和微生物活性的提高,氨氮的去除效果有所提高<sup>[12]</sup>,去除率达到 20%~50%;7~9 月,由于大量的降水导致河水中的氨氮浓度大大降低,此时的氨氮去除率达到 60%以上;进入 10 月以后,水温逐渐降低到 15 以下,氨氮去除率逐渐降低,12 月,水温降低到 10 以下,氨氮的去除效果变得较差,去除率降低到 30%以下.由于操作误差导致 11 月水力负荷较低为 10 cm/d 以下,导致该段时间的氨氮去除率有所提高.

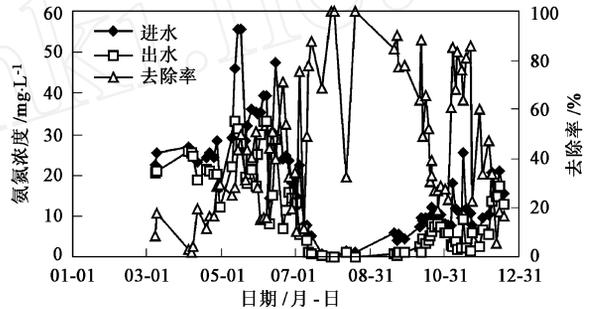


图 5 人工湿地对氨氮去除效果的年变化情况  
Fig. 5 Annual ammonia nitrogen removal performance of the pilot system

人工湿地系统 2004 年的 COD 去除效果如图 6 所示,全年的平均水力负荷为 15 cm/d.可见,人工湿地对污染河水中 COD 的去除稳定性较差,去除效果的波动较大,这与河水中 COD 浓度较低、可生化性较差有关.除了 5、6 月份以外,大多数时间人工湿地处理出水的 COD 低于 30 mg/L,达到了地表水类水质标准(GB3838-2002),可以用作城市的景观娱乐用水. COD 去除效果的季节性变化不明显.

综上所述,季节变化对人工湿地的氨氮去除效果影响很大,在 10 月底,气温逐渐降低到 15 以下时,氨氮去除率逐渐降低,在 12 月份,气温降低到 10 以下时,氨氮的去除效果变得较差,去除率降低

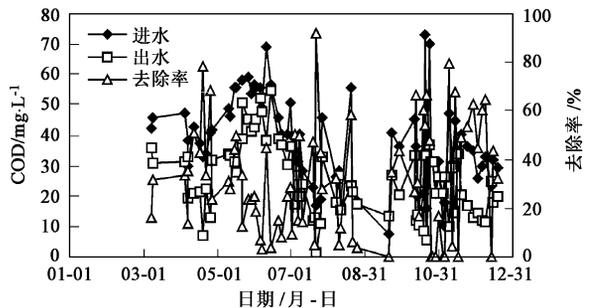


图 6 人工湿地对 COD 去除效果的年变化情况  
Fig. 6 Annual COD removal performance of the pilot system

到 30% 以下. 温度对人工湿地 COD 去除效果的影响很小.

### 2.3 夏季水力冲击负荷对运行效果的影响

夏季是淄博地区的雨季, 城市纳污河道内的洪水将对人工湿地污染河水处理系统造成短时间的冲击力. 本研究在 2004-08 进行了夏季冲击负荷试验, 通过调整进水量模拟洪水冲击水力负荷, 探讨潜流人工湿地在夏季的抗洪水水力冲击能力.

夏季冲击负荷试验持续了 1 个月, 共采用了 4 种水力负荷, 分别为 30 cm/d、60 cm/d、80 cm/d 和 100 cm/d, 每个水力负荷下的运行时间为 1 周.

各种负荷下氨氮的去除效果如表 3 所示. 可见, 人工湿地系统在 100 cm/d 的水力负荷下仍然可以达到 50% 以上的氨氮去除率. 而 60 cm/d 下较低的氨氮去除率与该水力负荷下进水中很低的氨氮浓度有关.

表 3 各水力负荷下氨氮的去除效果

Table 3 Ammonia nitrogen removal performance at different hydraulic loadings

水力负荷 /cm d <sup>-1</sup>	进水浓度 /mg L <sup>-1</sup>	出水浓度 /mg L <sup>-1</sup>	去除率 / %
30	0.77	0.21	73
60	0.36	0.26	28
80	2.11	0.52	75
100	2.27	1.08	52

各种负荷下 COD 的去除效果如表 4 所示. 人工湿地系统在 80 cm/d 的水力负荷下可取得 61% 的 COD 去除率, 在 100 cm/d 的水力负荷下可取得 36% 的 COD 去除率. 可见, 人工湿地系统在夏季雨季时期可以承受较大的短期洪水水力冲击负荷.

表 4 各水力负荷下 COD 的去除效果

Table 4 COD removal performance at different hydraulic loadings

水力负荷 /cm d <sup>-1</sup>	进水浓度 /mg L <sup>-1</sup>	出水浓度 /mg L <sup>-1</sup>	去除率 / %
30	23.94	11.26	53
60	39.07	18.29	53
80	20.37	7.9	61
100	28.68	18.29	36

### 2.4 基质酶活性的季节变化规律

微生物虽然个体比较小, 但是由于其庞大的数量, 在湿地系统污染物去除中占有很大的比例. 脱氢酶能促进有机物质的脱氢作用, 它起着氢的中间传递体的作用, 其活性表征了微生物活性的强弱. 基质脱氢酶活性随季节的变化规律如图 7 所示.

由图 7 可见, 初春时期基质脱氢酶活性和冬季

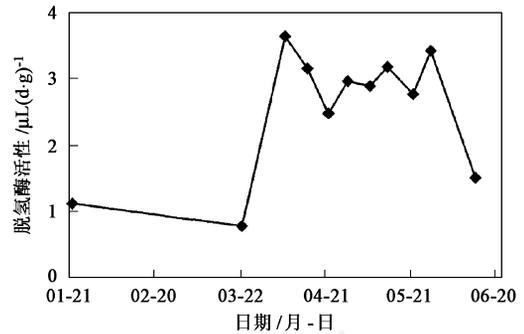


图 7 基质脱氢酶活性的季节性变化

Fig. 7 Seasonal changes of soil dehydrogenase activity

基质脱氢酶活性的差别很小, 可见由于受温度的影响, 冬季和初春时期系统中的微生物活性一直处于较低的水平. 到 4 月初, 随着温度的升高、植物的生长, 基质脱氢酶的活性明显提高, 并且在接下来的时间内一直维持在一个较高的水平. 至 6 月份, 脱氢酶活性有所下降, 但是由于该处只有一个试验数据点, 不能排除试验误差的干扰.

可见, 基质脱氢酶活性与温度的季节性变化存在一定的正相关关系, 这和污染物去除效果随季节的变化规律是一致的.

### 3 结论

(1) 城市纳污河道内污染河水的水质日变化较小, 但是水质、水量和水温随季节变化很大, 给人工湿地污染河水处理系统带来较大的困难.

(2) 季节变化对人工湿地 COD 去除效果的影响较小, 但对氨氮去除效果的影响很大, 夏季氨氮去除率可达 70% 左右, 但冬季水温降低到 15℃ 以下时, 氨氮去除率降低到 30% 以下.

(3) 人工湿地系统在夏季可以承受短时间内较大的洪水冲击水力负荷, 在水力负荷达 100 cm/d 的情况下, 系统对氨氮和 COD 的去除率分别可以达到 52% 和 36%.

(4) 人工湿地系统中基质脱氢酶活性与温度和污染物去除效果存在一定的正相关关系.

### 参考文献:

- [1] 国家环保总局. 2003 年中国环境状况公报[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2003.
- [2] 黄琳, 叶民强, 金式容. 公共河道水污染的博弈分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 326 ~ 330.
- [3] 周杰, 章永泰, 杨贤智. 人工曝气复氧治理黑臭河流[J]. 中国给水排水, 2002, 17(4): 47 ~ 49.
- [4] 王诚信, 凌晖, 史可红. 污染河流的纯氧曝气复氧[J]. 上海

- 环境科学,1999,18(9):411~413.
- [5] 刘红,代名利. 人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征[J]. 环境科学,2004,25(4):65~69.
- [6] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1994,16(3):83~86.
- [7] 贺锋,吴振斌. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学,2005,26(1):47~50.
- [8] 国家环保总局. 水和废水环境监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 吴振斌,周巧红. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究[J]. 中国环境科学,2003,23(4):422~426.
- [10] Zaman M, Cameron K C, Di H J. Changes in mineral N, microbial biomass and enzyme activities in different soil depths after surface applications of dairy shed effluent and chemical fertilizer[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 275~290.
- [11] 中国科学院南京土壤所. 土壤微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [12] 张荣社,周琪. 潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J]. 环境科学,2003,24(1):113~116.

www.cnki.net