

# 深圳沙田潜流式人工湿地的运行效能研究

石雷<sup>1</sup>, 王宝贞<sup>1</sup>, 曹向东<sup>2</sup>, 王进<sup>1</sup>, 刘正应<sup>3</sup>, 吕炳南<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090 2. 深圳市龙岗区环保局, 广东 深圳 518000;  
3. 深圳市龙田污水处理有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**研究了深圳沙田潜流人工湿地用于处理 BOD<sub>5</sub>/COD 值为 0.33 的混和污水的运行情况. 该湿地系统设计处理能力为 5 000 m<sup>3</sup>/d; 正常情况下, 出水水质好于国家标准 (GB 8978—1996), 平均值如下, COD 为 29.59 mg/L, BOD<sub>5</sub> 为 6.23 mg/L, TSS 为 7.42 mg/L, TN 为 14.25 mg/L, TP 为 0.65 mg/L. 研究结果表明, 潜流人工湿地系统对城镇污水具有较好的净化效果.

**关键词:**潜流人工湿地; 生产运行; 水质净化

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-0946(2004)06-0696-05

## Study on performance of Shatian SSF constructed wetland in Shenzhen

SHI Lei<sup>1</sup>, WANG Bao-zhen<sup>1</sup>, CAO Xiang-dong<sup>2</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, LIU Zheng-ying<sup>3</sup>, LV Bing-nan<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Longgang District Environmental Protection Agency of Shenzhen, Shenzhen 518000, China;  
3. Longtian Shatian Sewage Manage Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** This paper discussed the operational performance of a full-scale subsurface-flow (SSF) constructed wetland treating the mixed industrial and domestic wastewater with BOD<sub>5</sub>/COD mean ratio of 0.33 in Shatian town of Shenzhen. The capacity of designed treatment is 5 000 m<sup>3</sup>/d. Under normal operational conditions, the final effluent quality well met the National Integrated Waste water Discharge Standard (GB 8978—1996), with the following parameters (mean values): COD 29.59 mg/L, BOD<sub>5</sub> 6.23 mg/L, TSS 7.42 mg/L, TN 14.25 mg/L and TP 0.65 mg/L. The experimental results indicated that the subsurface flow constructed wetland system had better purification effect on the town wastewater.

**Key words:** subsurface-flow constructed wetland; operational performance; waste water treatment

人工湿地已成为了全球性的水污染控制工艺——无论发达国家、还是发展中国家<sup>[1,2]</sup>. 近来的统计结果显示:在欧洲和北美用于市政和工业污水处理的人工湿地分别超过了 6 000 座和 1 000 座<sup>[3]</sup>. 我国早在“七五”期间就开始了人工湿地的研究工作<sup>[4]</sup>,近年来逐渐有了投入生产运行的人工湿地. 在深圳市目前运行的多个人工湿地中,沙田人工湿地是其中最具代表性的范例之一. 本文通过对沙田人工湿地建成两年来生产运行情况的研究,探讨了人工湿地运行中有关各种污染物的去除规律和机理,影响人工湿地运行效能的主要因素等问

题.

## 1 材料和方法

### 1.1 水质水量

沙田人工湿地处理水水源是村镇生活污水和工业废水的混和污水,水质、水量随季节和气候等条件波动较大. 流量最小时不足 2 000 m<sup>3</sup>/d,最大时可达 10 000 m<sup>3</sup>/d 以上. 水质检测结果见表 1.

### 1.2 人工湿地系统组成

沙田人工湿地系统由预处理单元、湿地单元和污泥处理单元组成,平面布局如图 1 所示.

收稿日期:2004-08-12.

作者简介:石雷(1972-),男,博士研究生,研究方向:水污染控制与资源化.

表 1 田脚河污水水质检测结果

检测项目	检测结果(质量浓度)/(mg L <sup>-1</sup> )
COD <sub>cr</sub>	110~250
BOD <sub>5</sub>	40~80
SS	45~110
TN	12~69.7
TP	1.0~5.0

本项目的主体工艺为二级潜流型人工湿地. 预处理单元包括格栅、初级沉淀池、预曝气池(目前未装曝气设施,主要用作调节性储水池). 污泥处理单元包括污泥浓缩池和污泥脱水设施. 一级湿地采用

水平潜流的形式,2组并联,每组分成上、下2部分. 上、下2部分间以溢流堰相隔. 三角堰布水,溢流堰出水. 填料为粒径30~50mm的风化石,填料厚度1m. 一级湿地总面积为4800m<sup>2</sup>,规格(组):L×B×H=80m×30m×1.50m.

二级湿地为垂直下向潜流形式,4个单元并联. 填料上方设穿孔管布水,底层设穿孔管集水;风化石填料粒径为4~32mm,厚度0.75m. 二级湿地总面积为4640m<sup>2</sup>,单池规格:L×B×H=58m×20m×1.65m.

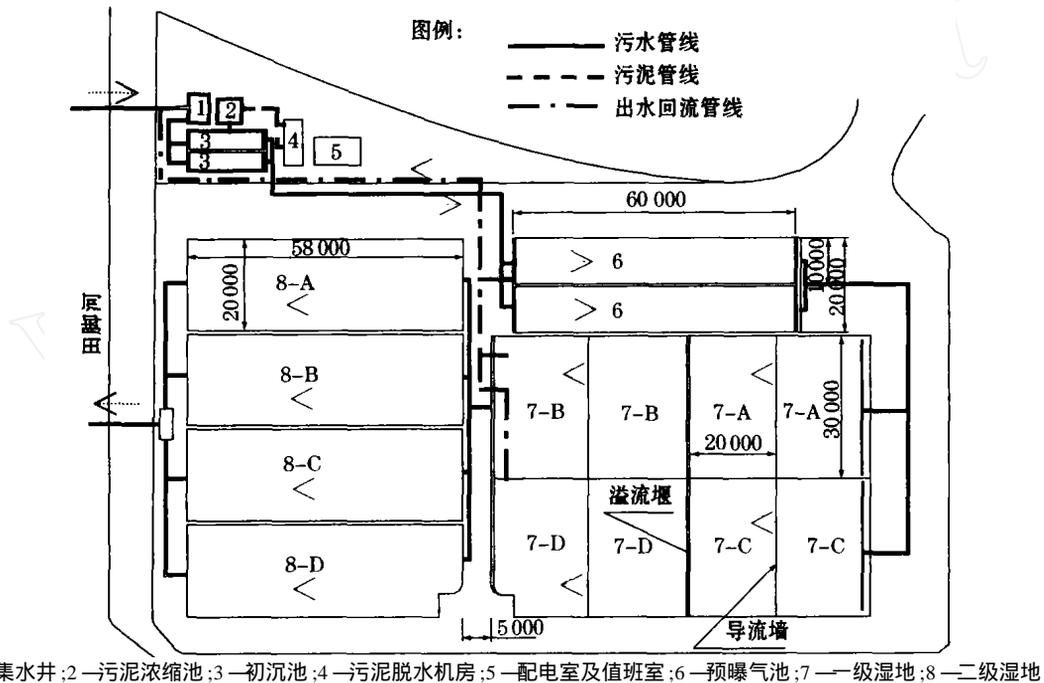


图 1 沙田潜流式人工湿地平面示意图

### 1.3 指标分析

自 2002 年 5、6 月开始,对水质进行取样抽检;自 7 月开始确定了水质检测制度,保证下列各项指标每周的检测次数不低于 3 次(12 月份进水水样取自集水井),各项水质指标的测定均按国家环保局制定的《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行.

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿地系统的运行

沙田人工湿地 2001 年 9 月份建成,至 2003 年 6 月份植物调整基本完毕,实现稳定运行. 本湿地先后共引种了 9 种植物,其中红花、橙花美人蕉因长势不好已经被淘汰;目前除水葱长势较差外,其他各种植物在株高、长速、茁壮度等方面均接近或好于自然状态下的生长. 由于沙田人工湿地所在地区的气候条件良好,植物收割不受季节因素的限制,所以植物一般在进入生长后期或末期才进行收

割. 沙田人工湿地的植物种类、栽种位置及收割周期情况见表 2.

表 2 植物分布及收割周期表

植物种类	栽种位置	收割周期(月)
芦苇 ( <i>Ph. australis Trin</i> )	7 - C	8~12
再力花 ( <i>Thalia dealbata</i> )	7 - A	6~8
荻 ( <i>M. sacchariflorus</i> )	7 - B、8 - A、8 - B、8 - D	~12
水葱 ( <i>S. tabernaemontani Gnel</i> )	7 - D	5~6
纸莎草 ( <i>Cyperus papyrus</i> )	8 - D	4~6
富贵竹 ( <i>Dracaena sanderiana</i> )	8 - B	>12
黄花美人蕉 ( <i>M. sacchariflorus</i> )	8 - A、8 - B、8 - C	3~4
红花美人蕉 ( <i>M. sacchariflorus</i> )	—	3~4
橙花美人蕉 ( <i>M. sacchariflorus</i> )	—	3~4

进行植物收割后的湿地一般采用相对较低的运行负荷,这主要是因为湿地植物的根、茎之间具有明显的相关性:如果负荷过高,不仅植物根系对污染物质的吸收能力降低;而且根区出现厌氧,易

导致烂根。

### 2.2 水质检测结果

沙田人工湿地的水质检测结果平均值见表 3。

表 3 沙田人工湿地水质检测结果表(02.05 - 03.12)

监测指标	进水平均值 /(mg L <sup>-1</sup> )	出水平均值 /(mg L <sup>-1</sup> )	去除率/ %
COD <sub>cr</sub>	131.53 ( ±47.92)	29.59 ( ±14.29)	77.51
BOD <sub>5</sub>	38.13 ( ±14.29)	6.23 ( ±1.52)	83.66
TN	25.54 ( ±11.29)	14.25 ( ±7.85)	44.21
TP	2.71 ( ±1.01)	0.65 ( ±0.46)	76.04
SS	67.42 ( ±19.21)	7.42( ±1.39)	88.99

#### 2.2.1 有机污染物的去除

本湿地在原污水 COD<sub>cr</sub>/BOD<sub>5</sub> 仅为 0.33、可生化性较差的情况下, COD<sub>cr</sub>和 BOD<sub>5</sub> 平均去除率达到了 77.51 %和 83.66 %,这是湿地的基质、植物、微生物协同净化的结果,展现了人工湿地净化机理的独特性。同时在净化过程中,人工湿地也表现出了特有的规律,如图 2 所示,系统在 2002 年 5、6 月份的 COD 去除率较低,除因进水的 COD 值较低外,主要原因是当时湿地植物的长势较差。进入 8 月份,湿地植物达到了生长的旺盛期,系统的处理效率也随之达到了一年中最高的阶段——8、9、10 和 11 月份 COD 和 BOD<sub>5</sub> 的去除率分别达到了 81.87 %和 85.41 %以上。进入 12 月份,气温下降、植物生长减缓,系统的 2 项有机污染物指标去除率有所下降。但随着 2003 年 2 月末气温的回升和植物生长的转旺, COD<sub>cr</sub> 去除率又呈逐步回升的趋势。BOD<sub>5</sub> 的去除一直非常稳定,出水的 BOD<sub>5</sub> 值一直保持在 10 mg/L 之内。

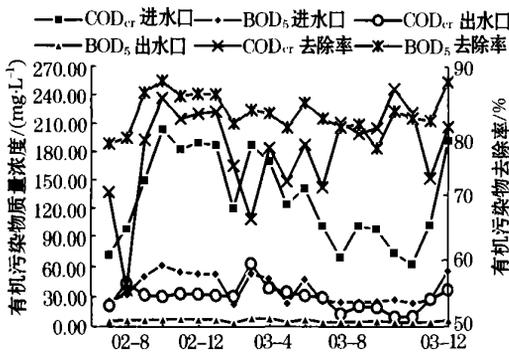


图 2 有机污染去除结果曲线

#### 2.2.2 TN 的去除

本湿地在较高的运行负荷下, TN 去除率达到了 44.21 %的较高水平。由图 3 可以看出,植物的长

势与湿地的除氮效率明显相关:在植物区系还未完全形成的 2002 年 5、6 月份, TN 的去除率仅为 44.41 %和 36.34 %;而随着植物区系的形成, TN 去除率逐步升高,其中 10 月份高达 48.42 %;进入冬季以后,植物生长减缓, TN 的去除率随之下降, 2003 年 1 月的月平均气温低至 13.7 °C,各种植物生长近乎停止,但此温度下硝化/反硝化细菌仍具有较高的活性,所以 TN 去除率仍达 35.56 %。此后随着气温的回升,植物生长加快, TN 去除率也同步上升,至 7 月份达到了 63.82 %的历史最高值。10、11 月份 TN 去除率骤降至 34.82 %和 36.15 %,而此时植物生长旺盛、气温仍然较高,对照图 2、3 可以看到:这 2 个月进水的 TN 大幅升高,而有机物质量浓度却仍处于较低的水平,碳氮比明显低于其他月份,所以碳源不足构成了 TN 去除的主要限制因素。

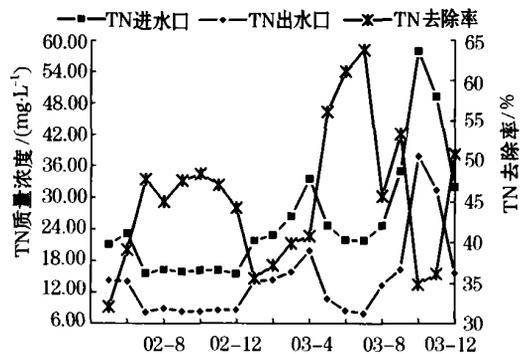


图 3 TN 去除结果曲线

#### 2.2.3 TP 的去除

由图 4 可知,系统运行初期 TP 去除率达到了 77.25 %的较大值,且受季节和植物长势影响不明显。由此可以推断,在本研究周期内生物除磷的贡献不大,而基质(风化石)的化学除磷作用和沉积、过滤作用应当是目前人工湿地除磷的主要途径。随着运行时间的延长,基质表面生成了分散的生物膜,少量的生物膜对系统的除磷作用未构成明显的影响,2003 年元月对 1、2 级湿地的基质进行了采样观测,发现生物膜的数量沿水流方向递减、且在基质上的生长是分散和不均匀的,大部分基质与污水之间仍有机会充分接触,可以保证二者间化学反应的顺利进行。

2003 年的上半年 TP 平均去除率低于 2002 年,且波动性增大;下半年前 4 个月的去除率呈缓慢下降的趋势,只有到了 11、12 月份随着枯水季的到来,水力负荷减小、进水质量浓度增大, TP 去除率

才有所上升,以上种种迹象均表明基质的除磷作用正在减弱.2003年3月份TP去除率显著降低,出现了42.82%的历史最低值,其直接原因是由于该月对植物进行了移栽和补种,造成了基质层的扰动,进而影响了磷的沉积.由此可见,为保证高效、稳定的除磷效果,必须保持湿地系统的相对稳定性.

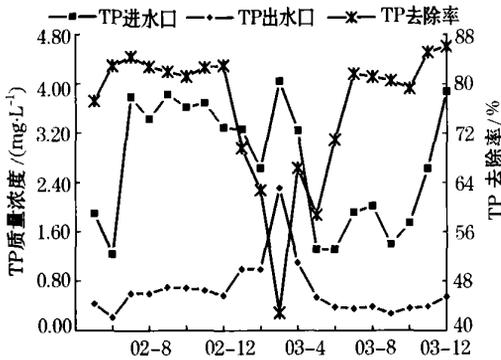


图 4 TP 去除结果曲线

### 2.2.4 SS 的去除

系统对 SS 的去除一直十分稳定,出水的 SS 均低于 10 mg/L,如图 5 所示. SS 总体去除率为 89% 左右,略低于去除率高于 90% 的许多相关报道,这可能主要是风化石的风化碎屑随水出流引起的.根据对基质的定期采样发现,进水中 SS 的沉淀、过滤作用主要发生在一级湿地前端的 10 m 左右、面层以下 20~30 cm 左右的范围内;随着时间的推移和沉积物量的增大,沉淀和过滤作用发生的范围逐渐向下、向后扩大,但速度十分缓慢.

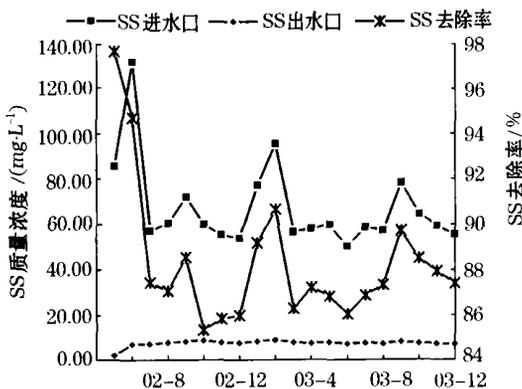


图 5 SS 去除结果曲线

## 2.3 湿地运行的主要影响因素探讨

### 2.3.1 季节的影响

季节因素是气温、植物长势、生物活性等湿地运行影响因素的集中体现.沙田湿地地处赤道北回归线的边缘,靠近海洋,气候温和,春、夏、秋 3 季日

平均气温均接近或高于 20℃,只有冬季的 12 月份、1 月份及 2 月份气温相对较低、植物生长较慢.由图 6 可以看出,不同季节各种污染物的去除率差值均在统计结果的标准偏差范围之内,可见季节对本人工湿地净化污水效果的影响是较小的;但其他季节的 COD<sub>Cr</sub>和 TN 去除率仍明显大于冬季,说明季节的影响依然存在.

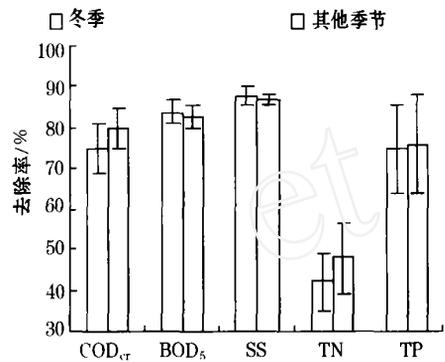
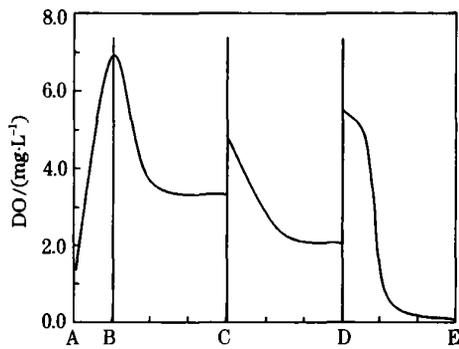


图 6 不同季节污染物去除率对比

### 2.3.2 溶解氧的影响

2003年10月下旬沙田人工湿地进行了湿地系统内沿程溶解氧的测定,湿地床内沿程每隔 5 m 取一个水样,取样点位于水面下 15 cm,测定结果见图 7.从测定结果不难看出,若仅靠人工湿地植物输氧和大气自然复氧是难以满足污染物去除对溶解氧的需求的,湿地的运行结果也验证了这一点.一般在气压较高、有风的天气,进水 DO 值较高,出水水质也较好;而在无风、气压较低的天气,进水 DO 值较低,出水水质也较差.特别在秋冬枯水季节,随着气温的降低,植物的生理活动减弱,而进水的污染物浓度却较高,随着溶解氧的大量消耗,湿地的后半段很快便处于缺氧或厌氧状态;这种情况若持续时间较长,则填料内就会产生并积聚大量的 H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>,在湿地内即可闻到强烈的刺激性气味,水葱、纸莎草、美人蕉等向根端输氧能力较弱的植物,根系会因长时间进行无氧呼吸而积累大量乙醇和 CO<sub>2</sub>,进而导致烂根的发生,严重影响植物的正常生长.植物腐烂的碎屑伴随着湿地内厌氧生成的金属硫化物大量外流,致使出水水质下降.

通过图 7 还可以看到,本湿地的布水槽、溢流堰、一级湿地出水堰、二级湿地滴洒式布水管等多个位置可产生跌水曝气作用,补充溶解氧效果明显,一定程度上弥补了溶解氧的不足.此外,采取污水回流的方法,对溶解氧不足也有缓解作用.



A—河道进水口;B—布水槽;C—溢流堰  
D—一级湿地出水堰;E—总出水口

图7 湿地内部溶解氧沿程变化曲线

### 2.3.3 回流措施的采用对湿地运行结果的影响

沙田人工湿地在运行条件不利的情况下,采用了一级湿地或曝气池末回流的措施,在回流的过程中可以产生多次跌水曝气,这样可以使湿地进水的污染物浓度降低、DO值提高,进而改善湿地系统的运行效果。2002年12月采取了一级湿地出水回流的措施,回流比约为1;为对比回流对污染物去除的影响,在气候和水质基本相近的2003年1月份未回流,两个月的主要污染物去除率统计结果见表4。由统计结果可见,回流措施的采用对 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、TN和TP去除效果的改善十分明显,分别提高了8.37%、8.70%和13.25%;但回流后系统的 $\text{BOD}_5$ 和SS去除率略有下降,从图2、5可以看到,此2项

表4 不同运行模式的污染物去除率对比表

运行方式	$\text{COD}_{\text{cr}}$ / %	$\text{BOD}_5$ / %	SS / %	TN / %	TP / %
出水回流	74.56	81.15	85.97	44.26	82.98
不回流	66.19	83.29	89.19	35.56	69.63

指标的出水质量浓度在回流前后差别不大,去除率下降的原因主要是由于回流降低了进水质量浓度所致。所以回流措施的采用是行之有效的。

## 3 结 语

本湿地系统的运行结果证明,人工湿地工艺对村镇污水具有较好的净化效果。较高的有机污染物去除率是由于湿地系统的填料、植物、微生物等共同作用,使各自的净化能力得到了更好发挥的结果。TN在湿地系统中的去除与季节和植物的长势明显相关,碳源不足会对湿地系统的脱氮能力产生影响。湿地较好的除磷效果主要是依靠填料(风化石)的物理化学除磷作用来实现的,但随着运行时间的延长这种作用逐渐减弱。

季节对湿地运行效果的影响虽然不大,但却不容忽视。湿地系统自身的充氧能力是有限的,水体一定的DO值是系统较好的污水处理效果及湿地植物正常生长的必要保证。跌水曝气可有效改善湿地的溶解氧状况。污水回流措施可改善湿地进水的DO值,并可明显提高系统对 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、TN和TP的去除率。

### 参考文献:

- [1] COOPER P F, GREEN M B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom: the first 10 years experience[J]. Wat. Sci. Tech, 1995, 32(3): 317 - 327.
- [2] IWA Scientific and Technical Report No. 8[A]. Constructed Wetlands for Pollution Control - Processes, Performance, Design and Operation[C]. By IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, 2000.
- [3] KNIGHT R L, KADLER R H. Constructed treatment wetlands - a global technology[J]. Water, 2000, 21(6): 57 - 58.
- [4] LI S R, ZHENG X H. Studies on wastewater land treatment and utilization systems in Tianjin Municipality[A]. China's NEPA: Water Pollution Control and Wastewater Reclamation as Resources. Collection of research achievements on environmental protection in 7th five years plan period[C]. Scientific Publishing House, 1993. 284 - 310.