

复合式高效植物生态系统用于污水厂尾水处理

楼朝刚¹, 陈向昌²

(1. 浙江大学能源工程设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 中都工程设计有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 针对 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 临安城市污水厂尾水的水质特点, 采用基于水资源循环利用的多级复合式高效植物生态系统工艺对其进行深度处理。结果表明, 经过两年多的运行, 出水水质达到了设计标准, 除 TN 外, 其他指标均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的 IV 类标准, 有效改善了东苕溪带的水环境质量, 并实现了一定的社会效益。

关键词: 尾水; 脱氮除磷; 复合式高效植物生态系统

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)12-0063-04

Advanced Treatment of Wastewater Treatment Plant Effluent via Composite Effective Plant Ecosystem

LOU Chao-gang¹, CHEN Xiang-chang²

(1. Energy Engineering Design and Research Institute of Zhejiang University Co. Ltd., Hangzhou 310007, China; 2. Zhongdu International Engineering Co. Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Based on the effluent quality of Lin'an municipal wastewater treatment plant, the project of a multi-stage composite effective plant ecosystem with treatment capacity of $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ was designed to recycle and reuse the effluent. The results showed that the effluent quality could meet the design requirement after more than two years operation. All the items except TN reached the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) class IV standards. The plant ecosystem effluent effectively improve the water environment of East Sea River belt, and in turn, which achieved a certain social and economic benefits.

Key words: effluent; nitrogen and phosphorus removal; composite effective plant ecosystem

近 10 多年来, 国内外科学家在运用植物生态系统技术净化富营养化水体、恢复富营养化水体生态系统良性循环方面, 已经取得了一些成功的经验^[1,2]。

临安城市污水处理厂位于苕流域边, 从削减入湖氮磷营养物、减轻流域的污染负荷和改善下游太湖水质的角度考虑, 结合临安污水厂已建的 $2\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 尾水植物生态系统净化示范工程多年的运行效果、经验及该污水厂周边的实际情况, 提出采用多级复合式高效植物生态系统进行 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水厂尾水的后续深度处理, 以期为类似的脱氮除磷工

程设计及运行提供参考。

1 工艺设计

1.1 设计水质、水量

该深度处理工程进水为临安城市污水处理厂的二级 B 标准出水, 设计水量为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 24 h 运行, 要求深度处理出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。即在一级 A 标准基础上, 除 TN 外, 其他指标需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准。

具体设计进、出水水质见表 1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg · L⁻¹

项 目	COD	BOD ₅	TN	NH ₃ -N	TP
进水水质	60	20	20	8(15)	1.0
出水水质	30	6	8	1.5	0.3
Ⅳ类标准	30	6	1.5	1.5	0.3

1.2 工艺流程

由于临安城市污水厂建在青山湖淹没区高地上,且下游有大量闲置土地资源,因此在不占用耕地的基础上考虑利用青山湖淹没区(30年一遇)河滩露地 14.3 hm²,构建高效植物生态系统和植物资源化利用系统。整个工程利用现有地形进行设计,根据水质净化和植物资源化利用要求将整个系统划分为六个功能单元:①强化生物膜系统,占地面积为 4 320 m²;②有毒物质高效脱除系统,占地面积为 3 280 m²;③营养盐集约式植物资源化系统,占地面积为 13 440 m²;④高效自净水生生态系统,占地面积为 43 330 m²;⑤高效生态滤地系统,占地面积为 24 000 m²;⑥植物资源化利用加工区,占地面积为 3 568 m²。具体工艺平面布置图见图1。

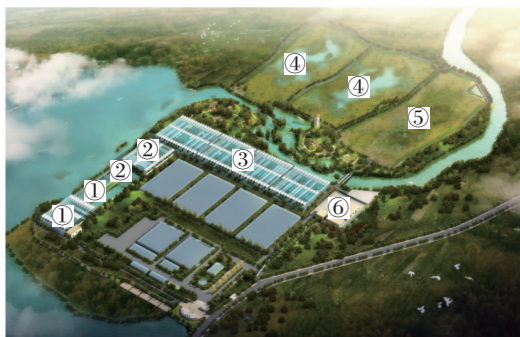


图1 工艺平面布置

Fig.1 Process layout plan

污水处理厂尾水自流进入强化生物膜系统,完成 COD、BOD₅ 的降解和氨氮的硝化;出水自流进入有毒物质高效脱除系统,实现有毒、难分解合成有机化合物的脱除和反硝化;出水通过该单元的布水渠,使水体形成均匀水平流进入营养盐集约式植物资源化系统,进一步降解 COD、BOD₅ 及促进沉降、促使磷等矿物盐沉淀输出;出水自流进入高效自净水生生态系统,实现水质深度澄清,残存 NH₃-N 等基本转化和去除;出水最后自流进入高效生态滤地系统,完成反硝化脱氮及除磷、净化水质。具体处理工艺流程见图2。植物资源化利用系统主要是对生态系

统产出的植物进行商品化和再生化利用。采用架空设计,确保洪水期不淹没,主要包括原料堆场、成品仓库和加工车间等设施。

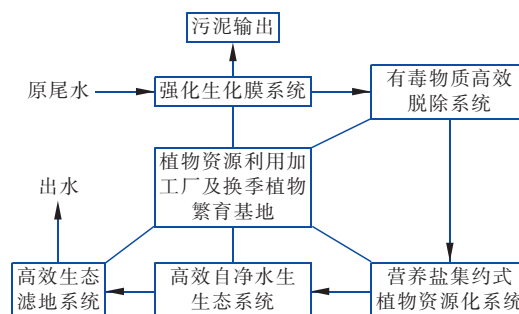


图2 工艺流程

Fig.2 Process flow chart

1.3 设计特点

① 充分利用地形地貌、地势的特点,因势利导,在现有临安城市污水厂出水高程下,于青山湖淹没区河滩露地上建造多级复合式高效植物生态系统。根据功能需要,依据环境条件和群落特性按一定的比例在空间、时间分布方面进行设计。

② 针对该区块短期受淹影响的特点,设计时分别对池体构筑物、机电设备、生态系统植物等进行耐淹设计。

③ 应用营养生态学和循环经济理论,充分利用太阳能,建立以绿色植物为主的复合式高效植物生态系统,将污染水体中的氮磷转化为生物资源取出和再生利用,形成良性生态循环,从根本上解决富营养化难题。

④ 项目建成后,将形成集污水处理和景观工程为一体的生态湿地公园。

1.4 主要构筑物设计

1.4.1 强化生物膜系统

本系统主要由接触氧化池及沉淀池组成。接触氧化池内固定比表面积较大的弹性生物填料,水面种植漂浮植物,水底布设微曝气系统,强化接种氮循环微生物。

① 接触氧化池

尺寸为 52 m × 40 m × 4.5 m,有效水深为 4.0 m,5 组,半地下式钢筋混凝土结构,总有效容积为 8 320 m³,水力停留时间为 3.3 h。水池上方建玻璃智能温室。主要设备:罗茨风机(22.94 m³/min,50 kPa 风压,37 kW)3 台,2 用 1 备。

主要植物、生物填料及载体:耐累积性聚草

2 120 m²;弹性生物填料 5 300 m³,填料高度为 2.5 m;UPVC 单层浮力支架 2 120 m²。

② 沉淀池

尺寸为 56 m × 16 m × 4.0 m,有效水深为 3.6 m,4 组,半地下式钢筋混凝土结构,表面负荷为 1.40 m³/(m² · h),水平流速度为 12.1 mm/s。配备排泥泵(40 m³/h,150 kPa,4 kW)8 台,4 用 4 备。

③ 污泥贮池/反冲洗贮水池

尺寸为 16 m × 14 m × 6.0 m,2 组,半地下式钢筋混凝土结构,总有效容积为 2 464 m³。以污泥含水率为 99.2% 计,污泥量为 45 m³/d。配置污泥泵(250 m³/h,150 kPa,18.5 kW)2 台,1 用 1 备;贮水提升泵(250 m³/h,150 kPa,18.5 kW)2 台,1 用 1 备。

1.4.2 有毒物质高效脱除系统

本系统主要为串联的吸附性滤料床,上覆水生植物及接种微生物。

① 过滤池

尺寸为 40 m × 12 m × 4.5 m,有效水深为 4.0 m,5 组,半地下式钢筋混凝土结构,设计滤速为 5.2 m/h。过滤周期为 48 h,反冲洗气强度为 15 L/(m² · s),水强度为 3 L/(m² · s)。主要设备:反冲洗罗茨风机(35.84 m³/min,40 kPa 风压,45 kW)2 台;反冲洗泵(440 m³/h,240 kPa,45 kW)2 台。

② 吸附过滤池

尺寸为 64 m × 40 m × 4.5 m,有效水深为 4.0 m,6 组,半地下式钢筋混凝土结构,总有效容积为 10 240 m³,水力停留时间为 4.1 h。水池上方建玻璃智能温室。设置反冲洗罗茨风机(35.84 m³/min,40 kPa 风压,45 kW)2 台。

主要植物、生物填料及载体:埃及莎草 1 920 m²;镶嵌东南景天及铜草 1 000 m²;椰棕组合生物填料 2 560 m³;UPVC + PA 多层浮力立体栽植支架 2 560 m²。

1.4.3 营养盐集约式植物资源化系统

本系统主要由多级串联池塘组成,配置高效吸收营养盐水生植物、接种微生物及各种形式填料。尺寸为 56 m × 72 m × 3.5 m,有效水深为 3.0 m,4 组,半地下式钢筋混凝土结构,总有效容积为 48 384 m³,水力停留时间为 19.4 h。水池上方建玻璃智能温室。

主要植物、生物填料及载体:旱伞草 3 500 m²,

再力花 2 000 m²,水生鸢尾 1 500 m²,欧洲大慈姑 1 500 m²,米仁 2 000 m²,冬季轮种水芹菜 2 000 m²,象草 2 000 m²,镶嵌西洋菜 2 000 m²,椰棕组合生物填料 6 270 m³,竹编组合填料 6 270 m³,PA 高分子柔性组合填料 4 700 m³,惰性立体弹性填料 4 700 m³,UPVC + PA 多层浮力立体栽植支架 13 000 m²。

1.4.4 高效自净水生生态系统

本系统设多级串联生态表面流湿地,配置具有高效净水能力的水生植物及接种微生物。根据地形状况分隔出多级表面流湿地,控制水深为 0.5 m,占地面积为 43 330 m²,5 组,土坝结构,总有效容积为 21 665 m³,水力停留时间为 8.7 h。在系统底部及坡面进行了 HDPE 土工膜防渗处理。

主要植物、生物填料及载体:德国鸢尾 4 000 m²,再力花 7 000 m²,梭鱼草 7 000 m²,水葱 4 000 m²,镶嵌西洋菜 4 000 m²,睡莲 3 000 m²,聚草 4 000 m²,绿苇 10 000 m²,钱币草 12 000 m²。

1.4.5 高效生态滤地系统

该系统设多级串联粗砂床植物滤地,配置不同规格滤料及栽植具有高效净水能力的植物。控制水深为 0.9 m,占地面积为 24 600 m²,5 组,砖混结构,总有效容积为 22 140 m³,水力停留时间为 8.9 h。在系统底部及坡面进行了 HDPE 土工膜防渗处理。滤地主要由配水渠、调节堰、整流区、穿孔墙、填料、反冲洗系统和排泥系统等组成。

主要植物:再力花 5 000 m²,香根草 3 000 m²,镶嵌钱币草 2 000 m²,水生美人蕉 2 000 m²,香蒲 2 000 m²,绿苇 11 000 m²。

1.4.6 植物资源化利用系统

① 生产厂房

占地面积为 800 m²,框架结构。含高低配电间、中控室及秸秆加工间。

主要设备:秸秆烘干机组(产能为 2.5 ~ 3.0 t/h,259 kW)2 套;输送带(0.6 m 宽,3 kW)1 套;滚刀式切碎机(进料速度为 15 m/min,5.5 kW)4 套;包装封口机(1.5 kW)1 组。

② 植物秸秆堆场

占地面积为 2 050 m²,框架结构。

主要设备:铲车(3 t)1 套。

2 运行效果

该工程于 2014 年 9 月建成,2014 年 10 月投入运行。2015 年 1 月—12 月的去除效果见表 2。可

见,多级复合式高效植物生态系统对污水厂尾水具有良好的净化效果,各月出水均值除 TN 外,其他指标均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)

Ⅳ类标准,其中 COD 平均去除率 $\geq 30\%$;TP 平均去除率 $\geq 43\%$;TN 平均去除率 $\geq 42\%$;对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果更明显,平均去除率 $\geq 80\%$,最高达 89%。

表 2 2015 年对主要水质指标的去除效果

Tab. 2 Removal effect of main water quality indexes in 2015

月份	COD			$\text{NH}_3 - \text{N}$			TP			TN		
	进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除 率/%	进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除 率/%	进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除 率/%	进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除 率/%
1	58.5	29.6	49	10.97	1.39	87	0.47	0.27	43	13.55	7.86	42
2	51.2	28.0	45	7.55	0.82	89	0.65	0.3	54	14.43	7.07	51
3	40.1	27.2	32	4.65	0.52	89	0.85	0.3	65	16.01	6.9	57
4	39.6	27.7	30	4.73	0.95	80	0.8	0.3	63	12.67	6.82	46
5	46.7	25.8	45	7.36	0.85	88	1.02	0.25	75	9.69	5.43	44
6	52.8	24.0	55	7.28	0.79	89	0.92	0.28	70	10.84	6.3	42
7	57.1	28.9	49	4.57	0.65	86	0.82	0.3	63	15.03	7.7	49
8	59.3	26.5	55	5.77	0.81	86	0.61	0.28	54	17.77	6.39	64
9	47.6	26.9	43	6.55	0.79	88	1.01	0.29	71	16.88	6.27	63
10	56.2	28.1	50	4.67	0.56	88	0.97	0.29	70	16.14	7.23	55
11	48.3	29.8	38	10.33	1.38	87	1.22	0.25	80	15.87	7.73	51
12	47.6	28.7	40	11.98	1.45	88	0.78	0.3	62	18.46	7.45	60

3 主要技术经济指标

该工程占地为 14.3 hm^2 ,总投资为 12 981.2 万元,运行功率为 275.85 kW,运行支出为 8 852.26 元/d(其中电费为 4 634.28 元/d,人工费为 2 137 元/d,水费为 9.75 元/d,维护费为 1 200 元/d,植物秸秆处理费为 871.23 元/d);牧草饲料销售运行收入为 300 元/d;合计运行成本为 8 552.26 元/d,则单位运行成本为 0.143 元/m^3 。

4 结论

① 多级复合式高效植物生态系统可有效地削减污水厂尾水中残留的污染物,除 TN 外,其他出水指标均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准。该工艺具有不易堵塞、操作管理简便、出水水质较好等优点,适合污水厂尾水深度处理。

② 根据本工程两年多的运行经验,除强化生物膜系统外,其他系统每年汛期被淹没,淹没时间最长为 15 d,淹没深度约 1~2 m。由于东苕溪带的漂浮物不多,每年泥浆在植物表面沉积不足 3.0 mm,因此不会对生态系统运行造成重大影响。

③ 通过对高效植物生态系统技术以及农业轮套作技术进行高度集成和创新,形成了成套的污水厂尾水营养盐资源化深度处理系统,为污水处理厂尾水的水生态修复、农业和农村面源污染控制提供

了技术支撑,具有明显的社会、经济与环境效益。

参考文献:

- [1] 王国祥,濮培民,张圣照,等. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用[J]. 中国环境科学,1999,19(2):106-109.
- [2] Janse J H, van Donk E, Aldenbeeg T. A model study on the stability of the macrophyte-dominated state as affected by biological factors[J]. Water Res, 1998, 32(9):2696-2706.



作者简介:楼朝刚(1982—),男,浙江东阳人,硕士,注册环保工程师,主要从事市政管网工程和污水处理设计工作。

E-mail:85301964@qq.com

收稿日期:2017-01-03