

复合潜流人工湿地强化处理低温地区生活污水

梁建军, 翟俊, 何强, 郭大敬

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 针对传统人工湿地处理低温地区生活污水出现的效能下降问题, 提出以 VBFW/HSF 复合潜流人工湿地专利技术为核心, 辅以化学除磷、接触氧化和污水内回流的工艺进行处理, 并结合工程实例介绍了主要设计参数及特点。运行结果表明: 在气温为 0~5℃、不采取保温措施、PAC 投加量为 10 mg/L、曝气量为 0.6 m³/m in、回流比为 100% 的条件下, 当进水 COD、TP、NH₃-N 及 TN 分别为 (143~205)、(1.2~2.6)、(14.3~30.1) 及 (35.3~56.5) mg/L 时, 出水 COD、TP、NH₃-N 及 TN 平均值分别为 27.5、0.4、6.2 及 14.2 mg/L, 达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 标准。

关键词: 污水处理; 人工湿地; 强化处理; 低温

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)10-0054-05

Application of Hybrid Subsurface-flow Constructed Wetlands to Wastewater Treatment in Low Temperature Regions

LIANG Jian-jun, ZHAI Jun, HE Qiang, GUO Da-jing

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045 China)

Abstract In order to overcome the low efficiency of the traditional constructed wetlands in wastewater treatment in low temperature regions, an enhanced treatment process based on mainly VBFW + HSF hybrid subsurface-flow constructed wetlands accompanied by chemical phosphorus removal, contact oxidation and internal recycle was proposed. The main design parameters and characteristics are introduced with engineering examples. The operation results show that under the conditions of air temperature of 0 to 5℃, no insulation measures, PAC dosage of 10 mg/L, aeration rate of 0.6 m³/m in and reflux ratio of 100%, COD, TP, ammonia nitrogen and TN are reduced from 143 to 205 mg/L, 1.2 to 2.6 mg/L, 14.3 to 30.1 mg/L and 35.3 to 56.5 mg/L in the influent to 27.5 mg/L, 0.4 mg/L, 6.2 mg/L and 14.2 mg/L in the effluent respectively. The effluent quality can reach the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002).

Key words sewage treatment; constructed wetland; enhanced treatment; low temperature

我国西南地区具有丰富的亚热带山地景观, 夏无酷暑, 秋冬气温较低, 通常在 10℃ 以下, 海拔超过

1 200 m 则冬有积雪。近年景观资源开发导致的水污染成为影响自然景观和限制景区发展的制约因素

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07315-001)

之一,研发适宜的山地低温污水处理工艺具有重要的实用价值和推广意义。

人工湿地是景观山地较为适宜的污水处理方式,其中潜流人工湿地以其卫生条件好、植物根系丰富、微生物附着表面积大,并有一定的保温效果,而成为国内外常采用的湿地系统。但人工湿地污水处理效果受温度影响较大,据 W eiker 研究,温度为 10℃左右时,硝化速率受到抑制,温度 < 6℃时,硝化速率迅速降到零^[1];研究表明,冬季人工湿地的有机物去除率比夏季要下降 60%左右^[2];申欢等研究表明,受去除机理的控制,温度对 TP 去除率影响不大,冬季人工湿地的 TP 去除率比夏季下降 15%~34%左右^[1-3]。

潜流人工湿地虽具有一定保温效果,但本质是对自然生态的强化模拟,因此受自然气温影响依然比较大。华莱士提出寒冷地区人工湿地要根据热传导原理设计隔离层进行保温,减少运行中的热量损失^[4];申欢^[3]、刘学燕^[5]、聂志丹^[6]、海热提^[7]等人在国内做出有益尝试,在工程上常通过设置冬贮兼性塘、植物隔离层和人工增氧等措施来提高人工湿地在低温地区的处理效果,并取得一定效果。但 A mstrong 研究发现,植物体腐烂产生的植物毒素(如有机酸、硫化物等)在芦苇等湿地植物组织中的富集会引起芦苇等植物的衰退^[8],影响湿地功能。

笔者针对低温对人工湿地处理效果的制约和植物隔离层保温存在的问题,采用强化 V BFW /H SFW 复合潜流人工湿地(发明专利号为 ZL 200510057047. 2)工艺,应用于重庆市武隆县仙女山国家森林公园景区污水处理,以期得到山地低温地区强化人工湿地相关设计和运行参数,为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 自然条件

仙女山国家森林公园地处东经 107°13'~108°05',北纬 29°02'~29°40'之间,属亚热带季风气候区,海拔为 1 650~2 033 m,年平均气温约 10.0℃,冬季气温 < 0℃,年积雪时间为 90 d 左右。

1.2 工艺介绍

仙女山属于国家级森林公园以及世界自然文化遗产“天坑地缝”外围,污水处理区景观要求高,出水水质需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。结合其地理、经

济、气候等条件,经技术比选,采用以 V BFW /H SFW 复合潜流湿地为核心的强化人工湿地工艺(见图 1),一期(2010年)设计污水处理量为 1 200 m³/d,二期(2020年)污水处理量为 3 500 m³/d。

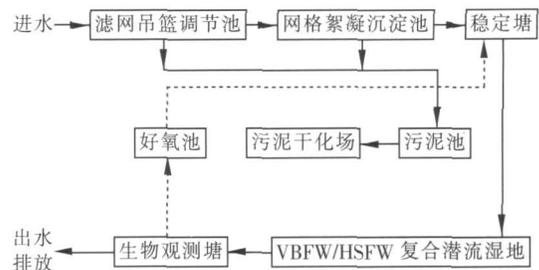


图 1 工艺流程

Fig 1 Flow chart of treatment process

2 工艺设计

2.1 设计进、出水水质

进水主要是与旅游相关的生活污水,出水水质要求达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准,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

| 项 目 | mg·L ⁻¹ | | | | | |
|-----|--------------------|------------------|-----|--------------------|-----|----|
| | COD | BOD ₅ | SS | NH ₃ -N | TP | TN |
| 进水 | 350 | 200 | 250 | 35 | 4.0 | 60 |
| 出水 | 50 | 10 | 10 | 5(8) | 0.5 | 15 |

2.2 主要构筑物设计

2.2.1 滤网吊篮调节池

采用滤网吊篮代替格栅拦截尺寸较大悬浮物,吊篮安装于导轨之上,人工清渣,减少机械操作和缓解湿地堵塞;污水水质较稳定,水量变化较大,调节池主要调节水量。设置滤网吊篮 2 个,吊篮尺寸为 0.60 m × 0.60 m × 0.50 m,滤网孔眼规格为 10 mm × 10 mm (具体见图 2);调节池 HRT 为 8.0 h,尺寸为 18.10 m × 5.80 m × 5.60 m。

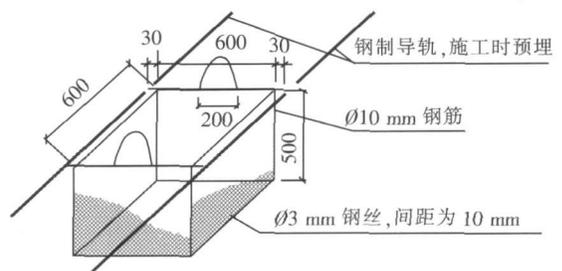


图 2 滤网吊篮

Fig 2 Screen sling basket

2.2.2 絮凝沉淀池

在湿地运行一定年限后及冬季植物生长较弱时,介质对磷的吸附量及植物对磷吸收能力大幅降低,为保证 TP 达标,需进行化学除磷,采用加强型网格絮凝池与高效斜管沉淀池合建。除磷剂采用聚合氯化铝 (PAC),投加量为 5~15 mg/L。

絮凝池分 6 格,絮凝时间为 20 min,水流第一、二段空塔流速为 0.045 m/s,第三、四段空塔流速为 0.023 m/s,单格尺寸为 1.0 m × 1.0 m,有效水深为 3.8 m,泥斗深度为 0.73 m,采用小斗排泥,泥斗坡度为 50°,通过水力快开阀控制排泥阀启闭。

斜管沉淀池尺寸为 6.40 m × 5.60 m × 5.85 m,最大上升流速为 0.42 mm/s,采用 Ø60 mm 的蜂窝状斜管,长为 1 m,倾斜 60°安装。采用液压式池底排泥阀,泥斗斗底坡度为 50°,保证排泥顺畅。

2.2.3 稳定塘

在稳定塘种植芦竹、水浮莲、菖蒲等植物,通过沉淀、截滤、植物吸收、微生物反应等作用进一步去除污水中的固体颗粒和溶解态的有机污染物,降低复合潜流湿地负荷,延长湿地工作周期。为了节省投资,稳定塘采用素土夯实结构,池的侧面及底部铺设 2.0 mm 厚度的毛面 HDPE 防渗膜。稳定塘尺寸 (A × H) 为 798.40 m² × 1.50 m, HRT 为 19 h。

2.2.4 VBFW/HFSW 复合潜流湿地

VBFW/HFSW 复合潜流湿地包括前段竖向折流湿地、后段侧向潜流湿地及自然复氧连接区,共占地为 4562.25 m²,其中竖向折流段占地为 915.6 m²,侧向潜流段占地为 3646.65 m²。

竖向折流湿地采用砖砌结构,平行布置 10 组,每组 10 格串联,单格尺寸为 3.80 m × 1.80 m × 1.80 m,水流以上、下折流的方式通过湿地 (见图 3)。填料采用 Ø30 mm 砾石,由前至后粒径逐级减小,顶部栽种风车草,设计过流断面水力负荷为 0.731 m³/(m²·h),有机负荷为 0.228 kgBOD₅/(m²·d)。

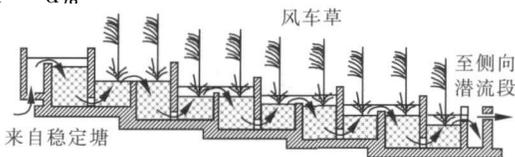


图 3 竖向折流段流程示意

Fig 3 Schematic diagram of VBFW flow

侧向潜流段采用素土夯实,HDPE 土工膜防渗,共 10 组,每组 4 段串联,各段依次由自然复氧区相连 (见图 4),每段又由 4 格串联,水力坡度为 2.89%,水流呈 S 形流动。单格尺寸为 7.00 m × 1.80 m × 0.80 m,保护高度为 0.2 m;表面负荷为 0.0248 m³/(m²·h),有机负荷为 0.0464 kgBOD₅/(m²·d),填料为 Ø8~10 mm 砾石,粒径逐级减小。自然复氧段尺寸为 7.00 m × 1.80 m,水膜厚度为 3~10 mm,坡度为 1.29%,沟底面为锯齿形,以增加水流与空气接触机会,提高复氧效率。

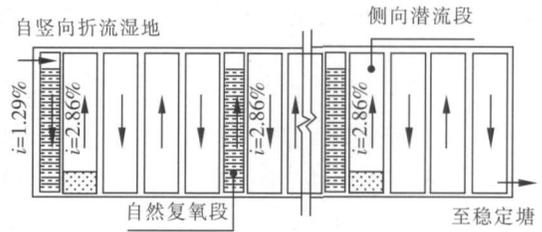


图 4 侧向潜流流程示意

Fig 4 Schematic diagram of HFSW flow

2.2.5 生物观测塘

生物观测塘中种植芦竹、水浮莲、香蒲、菖蒲等水生植物,饲养鱼类 (如草鱼、鲤鱼等) 作为生物性指标以观测水质状况。当水质不能达标时,启动回流泵,将污水经好氧池处理后回流至稳定塘,进入湿地,直至水质达标。生物观测塘尺寸 (A × H) 为 406 m² × 1.5 m, HRT 为 11 h,素土夯实,HDPE 土工膜防渗。

2.2.6 好氧池

当气温较低时氨氮去除效果不佳,为保证达标排放,设置好氧池加强生物硝化作用,然后将出水回流至稳定塘,在湿地进行反硝化,加强脱氮效果。

好氧池尺寸为 13.90 m × 5.60 m × 5.00 m。设计回流比为 100%,回流量为 50 m³/h, HRT 为 4 h, NH₃-N 容积负荷为 0.12 kgNH₃-N/(m³·d)。

好氧区内安装水下曝气机 2 台,曝气量为 35 m³/h,功率为 2.2 kW,吊装 Ø120 mm 聚丙烯半软性填料,盘片间距为 100 mm;回流区安装回流泵 3 台 (2 用 1 备),单台流量为 25 m³/h,功率为 1.5 kW。

3 设计特点

① 针对秋冬气温较低时磷、氮去除率下降问题,不采取专门保温措施,而是采用絮凝沉淀工艺通过化学除磷手段提高湿地在低温季节及介质吸附能力饱和后磷的达标排放率;采取设置好氧池及处理

水内回流措施, 通过接触氧化和降低容积负荷, 提高对氨氮及总氮的去除率。

② 专利技术 VBFW/HISFW 复合潜流人工湿地通过在竖向折流段设置导流墙, 在侧向潜流段设置 S 形沟道, 消除死水区, 增加流动距离, 提高容积利用率和水力停留时间, 并在折流段设置自然复氧区, 形成厌氧、缺氧和好氧区, 流程近似于 A²/O 型的人工湿地, 具有较好的脱氮除磷效果。

③ 自然复氧区的设置可有效提高污水携氧能力, 打破了传统湿地供氧能力不足的限制, 可以大幅增强侧向潜流段对有机物、氨氮的去除作用。资料

研究表明^[9], 在自然复氧区长度为 5~8 m、紊动水层厚度为 3~10 mm 时, 污水溶解氧可由 0 mg/L 提高到 3 mg/L 左右。

4 运行效果及主要技术经济指标

工程于 2008 年 11 月竣工投产, 监测数据表明, 强化型复合潜流人工湿地出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。2009 年 12 月当平均气温为 0~5℃、启用化学除磷及好氧池、PAC 投加量为 10 mg/L、曝气量为 0.60 m³/min 回流比为 100% 时, 运行效果见表 2。3 工程主要技术经济指标见表 4。

表 2 总体运行效果

Tab 2 General operating results

mg·L⁻¹

| 项目 | | COD | BOD ₅ | SS | NH ₃ -N | TP | TN |
|----|----|-----------|------------------|-----------|--------------------|---------|-----------|
| 进水 | 均值 | 167.3 | 104.2(抽检) | 155.1(抽检) | 21.9 | 2.1 | 43.6 |
| | 范围 | 143~205 | | | 14.3~30.1 | 1.2~2.6 | 35.3~56.5 |
| 出水 | 均值 | 27.5 | 8.5(抽检) | 1.6(抽检) | 6.2 | 0.4 | 14.2 |
| | 范围 | 15.4~45.3 | | | 3.5~7.7 | 0.1~0.6 | 12.3~15.1 |

表 3 主要污染物沿程去除效率

Tab 3 Removal efficiency of main pollutants along system

| 项目 | COD | | | TP | | | TN | | | NH ₃ -N | | |
|---------|-------------------------------|--------|------|-------------------------------|--------|------|-------------------------------|--------|------|-------------------------------|--------|------|
| | 均值 / (mg·L ⁻¹) | 去除率 /% | | 均值 / (mg·L ⁻¹) | 去除率 /% | | 均值 / (mg·L ⁻¹) | 去除率 /% | | 均值 / (mg·L ⁻¹) | 去除率 /% | |
| | | 累计 | 本段 |
| 进水口 | 167.3 | | | 2.1 | | | 43.6 | | | 21.9 | | |
| 调节池出口 | 150.5 | 10.0 | 10.0 | 2.0 | 4.8 | 4.8 | 41.2 | 5.5 | 5.5 | 20.6 | 5.9 | 5.9 |
| 沉淀池出口 | 128.7 | 23.1 | 13.0 | 1.3 | 38.1 | 33.3 | 37.9 | 13.1 | 7.6 | 19.2 | 12.3 | 6.4 |
| 稳定塘出口 | 113.9 | 31.9 | 8.8 | 1.2 | 42.9 | 4.8 | 32.3 | 25.9 | 12.8 | 18.1 | 17.4 | 5.0 |
| 竖向折流段出口 | 69.6 | 58.4 | 26.5 | 0.6 | 71.4 | 28.6 | 25.1 | 42.4 | 16.5 | 10.7 | 51.1 | 33.8 |
| 侧向潜流段出口 | 30.4 | 81.8 | 23.4 | 0.4 | 81.0 | 9.5 | 15.9 | 63.5 | 21.1 | 6.5 | 70.3 | 19.2 |
| 观测塘出口 | 27.5 | 83.6 | 1.7 | 0.4 | 81.0 | 0.0 | 14.2 | 67.4 | 3.9 | 6.2 | 71.7 | 1.4 |

表 4 工程主要技术经济指标

Tab 4 Main economic and technical indexes

| 项目 | 数据 |
|---|-----------------|
| 规模 / (m ³ ·d ⁻¹) | 1 200 |
| 占地指标 / (m ² ·m ⁻³) | 9.7(其中湿地 3.8) |
| 单位投资 / (万元·m ⁻³) | 0.22(其中湿地 0.09) |
| 单位运行成本 / (元·m ⁻³) | 0.25 |
| 定员 / 人 | 3 |

由表 2 可知, 在低温季节启用好氧池并进行污水回流, 处理效果满足设计要求, 表明该强化工艺对高山低温地区污水处理具有较好的适应性。

由表 3 可知, 低温对 COD 的去除基本无影响, 这与王湛、崔玉波等人的研究结论一致^[10-12]。COD 去除率为 83.6%, 其中预处理段去除率为 31.9%, 湿地段去除率为 59.9%, 竖向折流段与潜流段贡献

率接近 1:1, 磷的去除受温度影响较小, 去除率为 81.0%, 化学除磷率为 33.3%, 湿地去除率为 38.1%, 由于进水总磷浓度较低, 湿地未能充分发挥对磷的吸附作用, 导致侧向潜流段仅去除磷 9.5%。

研究表明, 低温使植物和微生物活性降低, 同时导致氮去除率与负荷呈线性关系^[13-15]。针对上述问题, 低温时污水回流以降低氨氮的容积负荷, 同时在好氧池进行接触氧化, 提高氮的去除率, 氨氮去除率为 71.7%, 湿地竖向折流段去除率为 33.8%, 侧向潜流段去除率为 19.2%; 总氮去除率为 67.4%, 湿地竖向折流段去除率为 16.5%, 侧向潜流段去除率为 21.1%。

从表 3 可以看出, 湿地侧向潜流段由于自然复氧段的设置, 增加了污水的溶解氧, 在进水 COD 和

氨氮浓度较低情况下,均有较好的去除效果。

5 结语

① 对于高山低温地区的生活污水处理,采用专利技术复合潜流 VBFW/HSFW 人工湿地工艺,结合化学除磷、接触氧化及内回流等强化脱氮除磷措施,在不采取保温措施的情况下,可以满足排放要求。

② 强化复合潜流 VBFW/HSFW 人工湿地工艺用于高山低温地区污水处理,技术、经济可行,在冬季气温为 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、PAC 投加量为 10 mg/L 、回流比为 100%、曝气量为 $0.6\text{ m}^3/\text{min}$ 的条件下,当进水 COD、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 TN 浓度分别为 (143~205)、(1.2~2.6)、(14.3~30.1) 及 (353~565) mg/L 时,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 A 标准。

参考文献:

- [1] Werker A G, Dougherty JM, McHenry JL, *et al*. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates [J]. *Ecol Eng* 2002, 19(1): 1-11.
- [2] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 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.
- [4] S 华莱士, G 帕金, C 考思. 寒冷地区污水处理的人工湿地设计与运行 [J]. *中国环保产业*, 2003 (6): 40-42.
- [5] 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.

- [6] 聂志丹, 年跃刚, 李林锋, 等. 水力负荷及季节变化对人工湿地处理效率的影响 [J]. *给水排水*, 2006, 32(11): 28-31.
- [7] 海热提, 范立维, 谢涛, 等. 两级潜流人工湿地在中国东北高寒地区的应用研究 [J]. *环境科学*, 2007, 28(11): 2442-2447.
- [8] Armstrong J, Armstrong W, Wu Z, *et al*. A role for phytotoxins in the phragmites die back syndrome [J]. *Folia Geobot Phytotax*, 1996, 31(1): 127-142.
- [9] 何强, 万杰, 翟俊, 等. 复合型人工湿地及其在小城镇污水处理中的应用 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(5): 122-126.
- [10] 王湛, 万佳静, 陈晓东, 等. 寒冷地区人工湿地污水处理技术研究进展 [J]. *环境保护科学*, 2009, 35(2): 30-33.
- [11] 戴春雷, 刘晓艳, 张雷, 等. 寒冷地区运用人工湿地处理污水研究进展 [J]. *油气田环境保护*, 2008, 18(4): 53-56.
- [12] 崔玉波, 郭智倩, 姜廷亮. 低温下人工湿地去除营养物的机理与效能 [J]. *西安建筑科技大学学报*, 2008, 40(1): 121-125.
- [13] 黄翔峰, 谢良林, 陆丽君, 等. 人工湿地在冬季低温地区的运用研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(11): 84-89.
- [14] 尹连庆, 谷瑞华. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究 [J]. *环境工程*, 2008, 26(1): 151-155.
- [15] 王东, 李岚波, 王磊. 北方地区人工湿地系统去除氨氮、总磷试验研究 [J]. *环境保护科学*, 2008, 34(3): 86-88.

电话: (023) 65120759

E-mail: liangjianjun98@126.com

收稿日期: 2010-02-10

• 工程信息 •

郑州市五龙口污水处理厂(一期)升级改造工程

工程规模: $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 工程内容: 对原 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 底部曝气氧化沟进行改造, 并增设 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 转盘过滤以及乙酸钠投加间; 工程投资: 约 2000 万元; 资金来源: 建设单位自筹与商业贷款; 建设单位: 郑州市污水净化有限公司; 设计单位: 中国市政工程华北设计研究总院。目前正在初步设计。

(本刊编辑部)