

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.019

# 寒冷地区冬季脱氮除磷工艺调控及效果分析

杨红<sup>1</sup>, 白文龙<sup>1,2</sup>, 梅小乐<sup>1</sup>, 邬冉琨<sup>3</sup>, 于淑玉<sup>1</sup>, 沈倩青<sup>4</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古鑫水源科技有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 014300; 3. 固阳县水土保持工作站, 内蒙古 固阳 014200; 4. 华瑞国际项目管理有限公司, 山东 德州 253082)

**摘要:** 内蒙古自治区某污水处理厂冬季运行过程中, 针对低温下脱氮、除磷效果差, 药剂投加量大等问题, 结合污水厂实际工程情况, 将卡鲁塞尔氧化沟的厌氧池用作反硝化池, 通过延长水力停留时间、增加污泥龄、加大回流比、依据水温梯级投加碳源等工艺调节措施, 强化脱氮; 深度处理的混凝反应池用于强化化学除磷。采取这些工艺调节措施后, 使得该污水厂冬季运行成本降低了0.17元/m<sup>3</sup>, 在水温<6℃的情况下, 出水水质稳定达到一级A标准, 可为寒冷地区类似工艺污水厂冬季运行提供参考。

**关键词:** 污水处理; 氧化沟; 低温; 反硝化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0107-05

## Adjustment and Analysis of Nitrogen and Phosphorus Removal Process to Resist Winter in Cold Regions

YANG Hong<sup>1</sup>, BAI Wen-long<sup>1,2</sup>, MEI Xiao-le<sup>1</sup>, WU Ran-kun<sup>3</sup>, YU Shu-yu<sup>1</sup>, SHEN Qian-qing<sup>4</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Xinshuiyuan Technology Co. Ltd., Erdos 014300, China; 3. Guyang Water and Soil Conservation Workstation, Guyang 014200, China; 4. Huarui International Project Management Co. Ltd., Dezhou 253082, China)

**Abstract:** To improve the removal efficiency of nitrogen and phosphorus and to reduce the chemical dosage of a sewage treatment plant in Inner Mongolia autonomous region in winter, a sequence of measures was adopted to strength denitrification such as using anaerobic tank as denitrification tank in the Carrousel oxidation ditch, extending hydraulic retention time, increasing sludge age and reflux ratio, dosing carbon source step by step based on water temperature. Phosphorus removal was enhanced by chemical coagulant in advanced treatment stage. The adjustment of treatment process reduced operating cost by 0.17 yuan/m<sup>3</sup>, in the same time, the effluent quality has been achieved the first level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) even in the extreme case of water temperature below 6℃, which could be reference for similar wastewater treatment plant in cold area in winter.

**Key words:** sewage treatment; oxidation ditch; low temperature; denitrification

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51641806); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017BS0509)

## 1 工程概况

某污水处理厂位于内蒙古自治区的中部,该地区属典型的温带大陆性半干旱季风气候,少雨、多风、干燥,冬夏气温变化较大,冬季严寒漫长,年均气温 $6\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低 $-34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这些地域的气候特点,尤其是冬季低温给城镇污水处理厂的运行带来一系列问题和挑战。冬季污水水温低,微生物代谢活性降低,生物脱氮、除磷作用受到抑制,为实现出水达

标排放,需增加碳源和除磷剂投加量。

该污水处理厂担负着辖区内居民生活污水及部分工业废水的处理任务。采用卡鲁塞尔氧化沟处理工艺,设计规模为 $1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,占地约 $2.67\text{ hm}^2$ ,厂区及配套管网总投资为0.56亿元,2012年建成投运,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,处理后中水全部用作电厂循环水。污水处理工艺流程见图1。

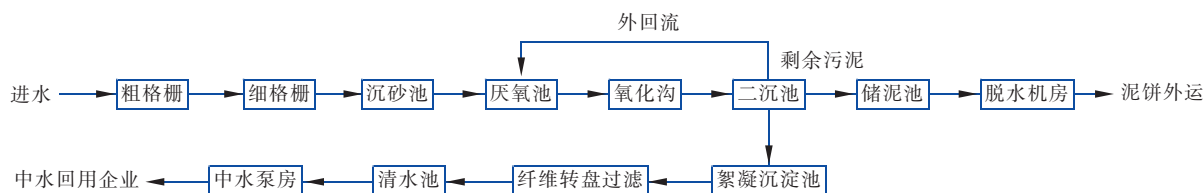


图1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

## 2 运行中存在的问题

### ① 冬季水温低,易发生污泥膨胀

图2显示了2019年10月—2020年初的水温情况,检测位置为好氧池水深2 m处,对厌氧池和缺氧池水温也进行了检测,与好氧池的温差 $\leq 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图2可以看出,2019年10月—12月,好氧池水温持续降低,10月下旬开始低于 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进入12月好氧池内水温 $< 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,2019年12月31日最低水温为 $5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

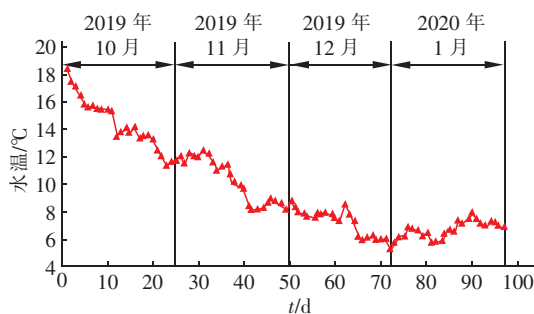


图2 好氧池水温变化

Fig. 2 Change of water temperature in aerobic tank

该污水厂主要处理县城的居民生活污水,但距离县城较远,输水管网较长(3~5 km)。冬季室外温度低至 $-20\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,甚至会低到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,排水管道即使埋在冻土线以下,也会受气温影响。从城镇管网到污水厂进水口沿途散热严重,且自来水水源为地下水,水温低,导致该厂冬季进水温度低于同纬度其他污水厂。

该污水厂夏季运行一切正常,污水的B/C值为

0.4~0.45。但在冬季,受低温影响,容易发生季节性污泥膨胀<sup>[1]</sup>。二沉池有肉眼可见的污泥上浮,伴随着 $SV_{30}$ 和SVI值过高等问题,需要增加高分子絮凝剂的投量,增加水力停留时间,以保证泥水分离效果。夏季6月和冬季11月的 $SV_{30}$ 、SVI比较如图3所示。

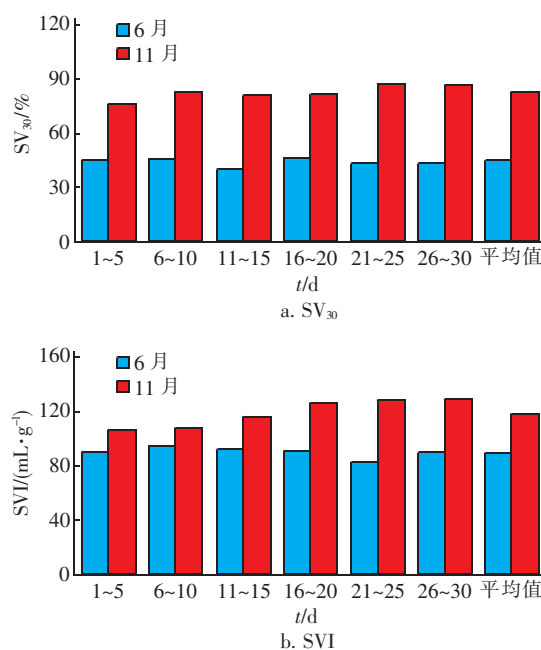


图3 夏季和冬季污泥的 $SV_{30}$ 和SVI对比

Fig. 3 Comparison of sludge  $SV_{30}$  and SVI in summer and winter

从图3可以看出,6月污泥的 $SV_{30}$ 和SVI值明显低于11月,且整个11月呈现SVI值逐渐升高的

趋势。可能的原因是:温度持续降低,微生物为抵御外界不良环境,污泥中的产荚膜菌代谢出大量糖类物质;低温使得污泥中微生物活性降低,分解代谢能力差,好氧池对水中污染物的去除以吸附为主,菌胶团表面吸附有机大分子物质增加<sup>[2]</sup>,这两方面都使得污泥沉降性能降低。

### ② 冬季低温,脱氮除磷效果差

冬季运行低温同样抑制了反硝化菌和聚磷菌的代谢活动<sup>[3]</sup>,脱氮除磷效果差<sup>[4]</sup>,需投加大量的乙酸钠作为碳源,投加的絮凝剂量增加,运行费用大幅增加,污泥产量增加,同时后续的深度处理运行压力增大。

## 3 运行参数调节

① 针对好氧池微生物代谢缓慢,有机物降解不彻底,依靠吸附去除有机物的情况,采取以下措施:通过增加混合液浓度,提高微生物数量,好氧池SS值由4 000 mg/L提高至6 000 mg/L。由此,污泥负荷降低,由夏季的 $0.067 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 降至 $0.05 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ;提高污泥龄,由夏季的20.3 d增至30 d,使被吸附的有机物在系统内得以降解转化,缓解污泥膨胀。污泥外回流比为100%,卡鲁塞尔氧化沟内回流门呈全开状态,内回流比升至400%。

② 为提高反硝化效率,结合该污水厂工况做出调整。该厂设计厌氧段池容为 $712 \text{ m}^3$ ,缺氧段池容为 $1\,350 \text{ m}^3$ ,好氧段池容为 $6\,288 \text{ m}^3$ ,好氧段池容满足处理能力,COD和氨氮指标能稳定达标,但在冬季低温条件下,不能满足反硝化要求。现将厌氧池用作缺氧反硝化池,总缺氧反硝化池容增至 $2\,062 \text{ m}^3$ ,水力停留时间9.89 h,在好氧池末端增加1台 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 回流泵,回流点在原厌氧池入口。厌氧池和缺氧池溶解氧维持在 $0.4 \text{ mg/L}$ ,好氧池溶解氧控制在 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ ,同时还需要投加乙酸钠作为反硝化碳源。依据该污水厂前期的运行数据,水量变化范围为 $3\,475 \sim 9\,486 \text{ m}^3/\text{d}$ ,调试过程中以进水日常均值 $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 为基准,调节投药量。例如乙酸钠投加量维持在 $100 \text{ mg/L}$ ,即总投加量为 $500 \text{ kg/d}$ ,实际波动范围为 $52 \sim 143 \text{ mg/L}$ 。

经过调节,厌氧池取消,生物除磷作用降低,因此需要投加絮凝剂,强化化学除磷。最终投加乙酸钠碳源 $200 \text{ mg/L}$ ,投加点在缺氧池,PAC投加量为 $80 \text{ mg/L}$ ,投加点在深度处理混凝反应池。

## 4 调节后的运行效果

依据往年的运行经验,污水处理厂水温 $<14^\circ\text{C}$ 前改变运行参数,才能保障出水水质达标:冬季主要通过增加药剂投加量,实现氮磷达标排放,但使得运行成本大幅增加,污泥产量也增加。为降低冬季运行成本,2019年10月1日开始依据温度变化逐步调整运行参数,逐步增加脱氮除磷药剂投量,经过两个多月的稳步调节运行,2020年1月在 $8^\circ\text{C}$ 低温下可以稳定进行COD、氨氮和总氮的去除,二沉池出水水质达到一级A标准,总磷经混凝反应深度处理后达标。

从厂区的进、出水数据可以看出,进水COD、氨氮、总氮、总磷波动幅度较大。

### ① COD

COD处理效果见图4。

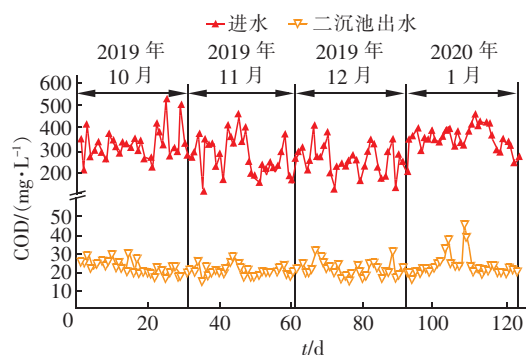


图4 COD处理效果

Fig. 4 Removal effect of COD

进水COD为 $124 \sim 496 \text{ mg/L}$ ,均值为 $302 \text{ mg/L}$ ,去除率均值为92.41%。COD去除效果稳定,源于进水的B/C值高,可生化性强。

### ② 氨氮

氨氮处理效果见图5。

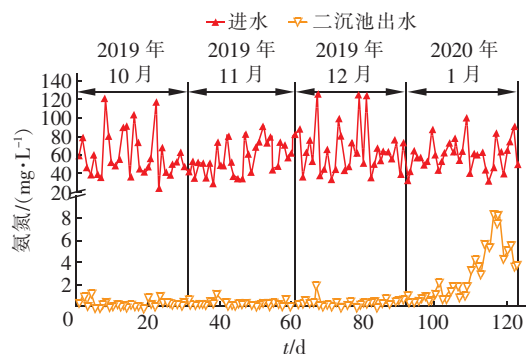


图5 氨氮处理效果

Fig. 5 Removal effect of  $\text{NH}_3 - \text{N}$

进水氨氮为 29 ~ 123 mg/L, 均值为 59.35 mg/L, 在调节运行的 4 个月期间平均去除率达到 98.13%, 仅在 2020 年 1 月下旬二沉池出水出现氨氮偏高的问题, 经分析此情况与当时曝气设备故障有直接关系, 曝气设备正常运转后, 二沉池出水氨氮值持续降低。

### ③ 总氮

总氮处理效果见图 6。

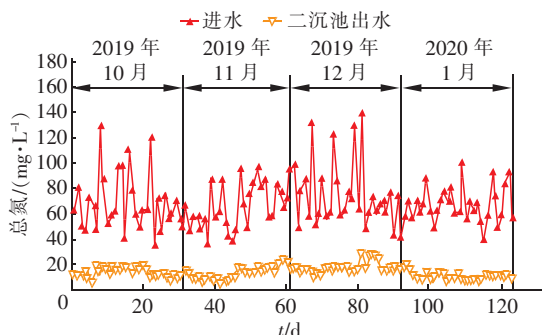


图 6 总氮处理效果

Fig. 6 Removal effect of total nitrogen

进水总氮为 35 ~ 139.6 mg/L, 均值为 68.93 mg/L, 在调节运行的 4 个月期间平均去除率仅为 77.39%。2019 年 12 月中旬生物池内水温  $< 6^{\circ}\text{C}$ , 反硝化菌代谢作用缓慢, 总氮去除率下降至 60% 左右, 并在 12 月 20 日, 受到高含氮进水 (139.6 mg/L) 冲击后, 连续一周生物池出水总氮  $> 25$  mg/L, 最终通过将乙酸钠投量从 100 mg/L 增至 200 mg/L, 使得 2020 年 1 月运行期间, 出水总氮低于排放标准。该污水厂夏季运行期间, 无需投加碳源即可达到脱氮效果, 出水水质达标, 但秋末冬初就需要开始逐步提高碳源投量, 才能保障脱氮效果。可能的原因是碳源的投加也是一个菌种驯化、适应环境的过程, 保证了反硝化菌不会因为温度的骤然下降而完全失去代谢活性<sup>[5]</sup>, 这一点需要在以后的运行过程中获取更多的微生物菌群结构的资料来验证。

2019 年 10 月初水温在  $18^{\circ}\text{C}$  左右, 反硝化池容由  $1\,350\text{ m}^3$  扩增至  $2\,062\text{ m}^3$ , 同时开始投加乙酸钠, 投药量仅为 10 mg/L, 温度降至  $14^{\circ}\text{C}$  时投药量增加至 50 mg/L, 基本保持出水总氮稳定, 当温度降至  $8^{\circ}\text{C}$  时投药量增至 100 mg/L, 而当水温降至  $6^{\circ}\text{C}$  时, 投药量猛增至 200 mg/L 才能保证出水总氮达标,  $2^{\circ}\text{C}$  的变化需要成倍的碳源补偿反硝化菌的代谢缓慢。截至 2020 年 2 月初, 与污水厂往年冬季水

温  $< 12^{\circ}\text{C}$  开始投加碳源并维持高投加量相比, 按照 2019 年 10 月以来梯级式碳源投加方法, 乙酸钠投加量比上一年的冬季运行节省 58 t。该污水厂往年为了应对低温反硝化效果差的问题, 采用的方法是水温  $< 12^{\circ}\text{C}$  开始大量投加乙酸钠, 约 150 mg/L, 才能维持出水达标, 而采用梯级投加,  $18^{\circ}\text{C}$  以下开始调节运行, 大幅降低了运行成本。同时, 碳源投量的减少, 好氧池 SS 的增加以及污泥龄的延长, 使得剩余污泥的产生量降低, 2019 年 10 月初—2020 年 1 月末, 累计 4 个月的污泥产生量与上一年同期相比减少约 72 t, 降低了污泥脱水过程中混凝剂的用量和处理处置费用。

### ④ 总磷

总磷处理效果见图 7。

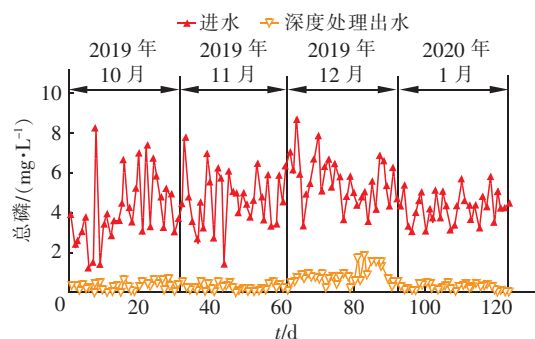


图 7 总磷处理效果

Fig. 7 Removal effect of total phosphorus

进水总磷为 1.15 ~ 7.37 mg/L, 均值为 4.62 mg/L, 在调节运行期间平均去除率为 89.81%。该污水厂为了强化反硝化作用, 提高了污泥龄, 由夏季的 20.3 d 增至 30 d 左右, 而生物除磷需要通过富集聚磷菌的剩余污泥达到除磷目的, 因此, 工艺调节后, 生物除磷效果降低, 需在深度处理混凝阶段提高药剂投加量。12 月中下旬温度低至  $6^{\circ}\text{C}$  左右, 低温影响了混凝剂的混凝效果, 药剂投量从 60 mg/L 提高至 80 mg/L, 除磷效果趋于稳定。经数据比较, 除磷剂投量比往年同期增加 2.9 t, 因投加的 PAC 稳定存在, 不会被微生物降解, 最终随污泥排出。

从以上的分析可以看出, 取消厌氧池后, 冬季运行过程中除磷剂的投量并没有大幅提高。可能的原因是厌氧区的硝态氮降低了除磷能力, 一方面部分聚磷菌具有反硝化能力 (如气单胞菌), 硝态氮的存在会使部分聚磷菌利用其作为电子受体进行反硝化, 从而抑制了聚磷菌的释磷和摄磷能力; 另一方



面,厌氧区内硝酸盐还原过程中消耗了可供聚磷菌利用的有机基质,降低了进水有机物与总磷的比值,抑制了聚磷菌对磷的释放,从而影响了在好氧条件下聚磷菌对磷的吸收。因此,污水厂即使往年设有厌氧池,但实际的释磷能力受到硝态氮和低温的影响,整体除磷能力不高,主要依靠化学除磷使得总磷达标。

## 5 经济分析

该污水处理厂自2019年10月1日开始运行参数调节,至2020年1月31日止,乙酸钠和污泥处理处置费用较上一年同期降低17.2万元;回流泵电耗、深度处理段混凝剂和人员费用较上一年同期增加8.3万元,污水处理费用降低了0.17元/m<sup>3</sup>。

## 6 结论

① 通过增加反硝化池池容、加大内回流比、延长反硝化池水力停留时间、延长污泥龄、提高污泥浓度、投加乙酸钠碳源等一系列的调节措施,可有效地提高污水处理厂低温下的脱氮效率,在水温<6℃的极端环境下维持了出水水质的稳定达标。

② 因厌氧池的改变,影响生物释磷除磷效率,后端的混凝化学除磷工艺,需增加除磷剂用量。增加化学除磷药剂剂量较小(约2.9t),而减少投入的碳源药剂剂量较大(约58t),同时降低了污泥产量和处理处置费用,整体运行费用降幅较大。

③ 污水处理厂面对低温环境的工艺参数调节是一个渐进的过程,尤其是反硝化菌的碳源投加,需依据水温进行梯级投加,在水温低于影响微生物代谢活性之前开始逐步增加投量。

## 参考文献:

[1] 马烨姝,姚俊芹,汪溪远,等. 干旱寒冷地区氧化沟工

艺活性污泥的菌群结构研究[J]. 环境工程,2020,38(3):58-62,50.

MA Yesu, YAO Junqin, WANG Xiyuan, et al. Microbial community structure of activated sludge in oxidation ditch process in arid and cold region [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 58-62, 50 (in Chinese).

[2] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 882-894.

[3] 李楠. SBR系统在低温条件下的废水生物除磷性能及除磷途径分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. LI Nan. Performance and Removal Approaches of Biological Phosphorus Removal from Wastewater in SBR under Low Temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).

[4] HALMØ G, EIMHJELLEN K. Low temperature removal of nitrate by bacterial denitrification [J]. Water Research, 1981, 15(8): 989-998.

[5] 杨朝晖,徐峥勇,曾光明,等. 不同低温驯化策略下的厌氧氨氧化活性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 300-305.

YANG Zhaohui, XU Zhengyong, ZENG Guangming, et al. Anaerobic ammonia oxidation activity under different low temperature domestication strategy [J]. China Environmental Science, 2007, 27(3): 300-305 (in Chinese).

作者简介:杨红(1978-),女,内蒙古准格尔旗人,硕士,讲师,从事给排水科学与工程专业教学工作,主要研究方向为水与废水处理。

E-mail: yang-h1215@163.com

收稿日期:2020-05-27

修回日期:2020-07-22

(编辑:衣春敏)

做好水文监测分析预报,保障国家水安全