



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202011063

中图分类号 X703

文献标识码 A

王勇, 欧阳兵, 徐军礼, 等. 延安市污水处理厂提标改造工程设计方案与实施效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3410-3417.

WANG Yong, OUYANG Bing, XU Junli, et al. Design scheme and implementation effect of upgrading project for Yan'an sewage treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3410-3417.

延安市污水处理厂提标改造工程设计方案与实施效果

王勇¹, 欧阳兵², 徐军礼¹, 左优¹, 张炜杰^{1,✉}, 杜木子¹, 潘兆辉¹, 许润全¹

1. 陕西省城乡规划设计研究院生态环境设计所, 西安 710021

2. 延安水务环保集团水环境治理有限公司, 延安 716000

第一作者: 王勇(1984—), 男, 大学本科, 高级工程师。研究方向: 水环境治理。E-mail: 420657626@qq.com

✉通信作者: 张炜杰(1993—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 水环境治理。E-mail: liuliu6854@126.com

摘要 延安市污水处理厂一期工程处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 原采用以“厌氧池+氧化沟+二沉池”为核心的污水处理工艺。提标改造前, 污水处理系统存在设计水质偏低而污泥负荷偏高等问题, 导致冬季低温或进水水质波动较大时, 出水水质难以稳定达标。对此, 通过加高氧化沟池体的方式, 将生化池总水力停留时间延长至 19.82 h; 结合 MBR 工艺, 利用膜组件的高效固液分离能力实现泥水分离, 将生化池平均污泥浓度提高至 $7\ 050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并在内沟好氧池中增设搅拌机及碳源投加装置, 使冬季低温或进水总氮较高时, 生化系统整体以 AAOAO 的方式运行, 从而进一步控制出水总氮含量。提标改造工程实施后, 一期生化处理系统反硝化污泥负荷和 BOD_5 污泥负荷(以每天单位 MLSS 的 TN/BOD_5 测定值计)分别降低至 0.030 和 $0.033 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下污水处理系统的理论 TN 和 BOD_5 去除能力分别提升至 44.32 和 $286.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到了污染物去除需求。提标改造后污水处理系统运行良好, 出水可稳定达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224-2018)中的 A 标准, 可为该地区同类型污水处理厂提标改造提供参考。

关键词 污水处理厂; 提标改造; 低温; MBR; 污泥负荷

近年来, 随着城市水环境综合治理需求的不断提升, 作为城市水环境保护的末端屏障——污水处理厂的作用愈加凸显^[1-3]。陕西省绝大多数污水处理厂执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准^[4]。为切实提升区域水环境质量, 实现地表水污染治理目标, 陕西省生态环境厅于 2019 年 1 月 15 日颁布了《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224-2018), 要求设计规模大于 $2\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的城镇污水处理厂出水水质达到地表准 IV 类标准。然而, 大多污水处理厂由于建厂时间较早, 处理能力已难以满足日趋增长的水质、水量需求, 必须实施提标改造^[5]。

现状污水处理厂通常已历经过多次改造, 厂内管线复杂, 预留用地十分有限^[6]。为顺利实现污水处理厂的提标改造目标, 须充分挖掘生化系统的处理能力, 提高活性污泥脱氮除磷效能^[7]。移动床生物膜工艺(MBBR)和膜生物反应器工艺(MBR)均可在不改变生化池容积的条件下, 增加系统

活性污泥浓度，优化系统微生物组成，因此，被广泛应用于我国城镇污水处理厂提标改造工程中^[8-9]。

吴迪等^[10]采用 MBBR 工艺将山西某污水处理厂出水水质提升至一级 A 标准。滕良方等^[11]采用 Bardenpho-MBBR 工艺结合高效沉淀池及反硝化深床滤池对浙江省某污水处理厂进行提标改造，将出水水质由原一级 B 标准提升至地表准 IV 类水质标准。陈建平等^[12]采用 MBR 工艺与 A²/O-高效沉淀池-反硝化深床滤池工艺并行考虑，对宁波市污水处理厂进行提标改造，结果显示 2 种工艺出水均可稳定达到地表准 IV 类水质标准。综合上述各项研究，采用 MBBR 与 MBR 工艺都能够大幅增加生化池污泥浓度，降低污泥负荷，提高活性污泥系统的脱氮除磷效果与抗冲击负荷能力。但与 MBR 工艺相比，MBBR 工艺需配套高效沉淀池、反硝化滤池等深度处理工艺，以保证系统出水满足准 IV 类水质标准，故新建构筑物相对较多。

陕西省北部地区污水处理厂普遍存在厂区预留用地有限问题，且运行过程中呈现明显的长期高寒低温、进水水质剧烈波动现象，故出水水质难以稳定达标。目前，关于陕北地区污水处理厂提标改造的相关研究报道较少。基于此，本文以延安市污水处理厂提标改造工程为例，在充分解析现状污水处理系统运行情况、核算污染物负荷的基础上，提出了以增大生化池池容、提高活性污泥浓度及重新构建生化池分区为核心的提标改造工艺方案，论述了改造后不同温度下处理系统的理论污染物去除效能及实际运行效果，并简要测算了工程投资及运行成本，以期为西北地区相近污水处理工程的提标改造设计提供参考。

1 污水处理厂现状

1.1 污水处理厂概况

延安市污水处理厂占地约 77 000 m²，总处理能力 70 000 m³·d⁻¹，分两期建设，现状出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准。其中，一期工程于 1998 年筹建，2003 年开始运营，2012 年实施了提标改造，设计处理能力 50 000 m³·d⁻¹，处理工艺为“预处理+厌氧池+氧化沟+二沉池+中间水池+N/DN 滤池+滤布滤池+消毒池”，生物反应池容积 37 280 m³(好氧区 23 278 m³，缺氧区 11 194 m³，厌氧区 2 808 m³)，污泥浓度 4 000 mg·L⁻¹；二期工程于 2015 建设完成，设计处理能力 20 000 m³·d⁻¹，处理工艺为“预处理+A²/O+二沉池+中间水池+高密度沉淀池+纤维转盘滤池+消毒池”，生物反应池容积 27 330 m³(好氧区 14 750 m³，缺氧区 11 080 m³，厌氧区 1 500 m³)，污泥浓度 4 000 mg·L⁻¹。

1.2 一期工程运行情况及存在问题解析

1) 进水水质结构失衡。进水 BOD₅/COD 平均值为 0.54，说明进水易生物降解有机物含量高，可生化性整体较好^[13]。本工程进水平均 BOD₅/TN 为 3.68，略小于 4，而对于 A²/O 或氧化沟等传统脱氮除磷工艺，当 BOD₅/TN 大于 4 时才能够实现较好的总氮去除效果^[14]。这表明，污水在反硝化脱氮过程中存在一定的碳源不足现象。韦启信等^[14]的研究表明，SS/BOD₅ 与反硝化速率呈负相关关系，SS/BOD₅ 越高，生化系统的反硝化速率越低。当 SS/BOD₅ 为 1.2 时，生化池可实现较好的反硝化效果^[14]，但本研究中污水处理厂进水 SS/BOD₅ 平均值为 1.44，且全年约 40% 的时间 SS/BOD₅ 大于 1.5。过低的反硝化速率会导致水中有限碳源在缺氧段难以被反硝化细菌高效利用，系统脱氮能力降低^[14]。

2) 进水温度低。2019 年延安市污水处理厂进水温度范围为 6.0~25.0 ℃，年平均值为 15.4 ℃，各月份进水温度统计学分析如图 1 所示。由图 1 可知，1—4 月及 11、12 月，进水月平均温度低于 15.0 ℃，说明 2019 年全年，污水处理厂约有 50% 的时间在低温条件下运行，此时微生物活性及其硝化/反硝化作用将受到明显抑制^[15-16]，系统抗冲击负荷能力差，出水水质波动较大。而 1—2 月的

平均水温低于 10 ℃，在此期间活性污泥系统的硝化能力将急剧下降^[17]，系统只能通过降低进水量的方式延长水力停留时间，降低污泥负荷，从而在一定程度上保障出水水质。

3) 设计进水水质保证率低。延安市污水处理厂一期工程原设计进水水质及 2019 年实际进水水质统计学分析结果如表 1 所示。刘成军等^[18]和马耀平等^[19]的研究表明，应用统计学方法分析污水处理厂进水水质时，采用 90% 的保证率，可以有效指导污水处理厂的生产运营。由表 1 可知，一期工程原设计进水水质对于 COD 和 SS 的保证率均约为 70%，对 TP 的保证率约为 60%，对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 仅为 31.45%，表明原设计进水水质过低，已难以满足目前的污水处理需求。

1.3 二期工程运行情况

目前，二期工程运行状况良好。在冬季进水温度过低，一期工程难以满负荷运行时，二期处理系统可超负荷运行，日处理量达 24 000 m^3 。同时，根据运营月报数据显示，二期超负荷运行时，出水水质指标可满足《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224-2018)中的 A 标准。

1.4 改造难点

1) 厂区预留改造空间有限。污水处理厂位于宝塔区桥沟东十里铺，目前厂区周边已无可用地块。而厂区内部分于 2012 年和 2015 年先后实施了提标改造和扩容工程，预留新建用地紧张，地下管线错综复杂。

2) 不停水改造。污水处理厂已满负荷运行，排水高峰期存在超负荷运行现象。在改造过程中，需保证厂区正常运行，处理水量不减少，且指标不降低，改造期间不外排污水。

2 提标改造技术方案

2.1 设计水量及进出水水质

1) 设计水量。通过工艺运行情况分析，明确了污水处理厂一期工程存在抗冲击负荷能力差，出水水质波动大等问题；而二期工程运行情况良好，出水水质可稳定达标。因此，本研究主要针对一期工程进行提标改造。根据《延安市城市总体规划》(2015—2030)，延安市新建姚店污水厂已进入前期准备阶段，后期将逐步承担起城区的污水处理任务，因此，本次提标改造工程不考虑短期增长量，确定提标改造工程设计规模为 50 000 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，与原一期工程处理规模一致。

2) 设计进出水水质及处理程度。采用频率统计法，对延安市污水处理厂近一年的实际进水水质进行统计学分析，以 90% 的保证率确定本次提标改造工程的设计进水水质。设计出水水质执行《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB61/224-2018)中的 A 标准。主要指标及处理程度如表 2 所示。

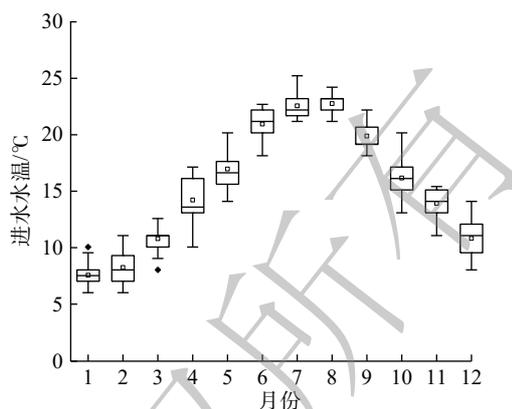


图 1 污水处理厂进水温度

Fig. 1 Inlet water temperature of the WWTP

表 1 一期工程设计进水水质及水质保证率

Table 1 Inlet water quality and water quality guarantee rate of the first phase project

水质指标	设计进水水质/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	保证率
COD	400	69.11%
BOD_5	200	79.56%
SS	300	73.45%
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	35	31.45%
TP	6	60.45%

2.2 系统处理负荷分析

一期、二期处理系统同时存在进水结构失衡、水温过低等问题。在冬季低温时，一期工程必须降负荷运行，而二期处理系统不仅可以确保出水稳定达标，甚至可超负荷 20% 运行。为明确同等条件下一、二期处理系统在污染物削减能力上存在的差异，揭示上述差异存在的原因，采用《室外排水设计规范》GB 50014-2006(2016年版)中的式 6.6.18-1~6.6.18-6，对不同水温条件下一、二期处理系统的污染物去除效能进行了分析，并核算了 2 个系统的污泥负荷。核算时，生物反应池内混合液悬浮固体平均浓度 X 取 $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的脱氮速率 $K_{\text{de}(20)}$ 取 0.06 d^{-1} ，MLSS 中 MLVSS 所占比例 y 取 0.7，污泥总产率系数 Y_t 取 1，生物反应池进、出水五日生化需氧量 S_0 和 S_e 分别为 $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，安全系数 F 取 2.5，生物反应池中氨氮浓度取 $46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，硝化作用中氮的半速率常数 K_N 取 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。核算结果如图 2 所示。

由表 2 可知，污水处理系统进水 BOD_5 和 TN 分别为 $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，当生化池出水 BOD_5 和 TN 浓度低于 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，可满足出水水质要求。因此，生化池对于 BOD_5 和 TN 的削减能力应分别达到 $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。由图 2 可知，对于一期处理系统而言，当进水温度在 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下时，随着脱氮速率 K_{de} 的不断下降，系统脱氮能力受到明显抑制；当进水温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，一期处理系统的理论脱氮能力仅为 $32.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，不足其处理需求的 75%。而二期处理系统可始终保持较好脱氮效果，在进水温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，其脱氮能力可达到 $57.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其原因如下：二期处理系统反硝化污泥负荷为(以每天单位 MLSS 的 TN 测定值计) $0.020 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ；而一期处理系统的反硝化污泥负荷高达 $0.050 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ，是二期处理系统的 2.5 倍。较高的污泥负荷会导致一期处理系统难以有效适应温度及进水水质的大幅度波动^[20]。

由图 2(b) 可知，一期处理系统同样存在冬季低温条件下的除碳能力不足问题。当温度低于 $9 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，一期系统 BOD_5 去除能力已不能满足要求；当温度下降至 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，系统 BOD_5 去除能力仅为 $128.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，不足同等条件下二期系统的 65%。一期和二期系统的 BOD_5 污泥负荷(以每天单位 MLSS 的 BOD_5 测定值计)分别为 0.064 和 $0.035 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。经对比分析可知，对于去除 BOD_5 而言，一期处理系统仍存在因污泥负荷偏高而引起的出水水质波动问题。

表 2 设计进出水水质与处理程度

Table 2 Designed quality and treatment rates of the influent and effluent

水质指标	设计进水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	设计出水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	处理程度
COD	450	≤ 30	93.33%
BOD_5	210	≤ 6	97.14%
SS	450	≤ 10	97.78%
TN	60	≤ 15	75%
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	46	$\leq 1.5(3)$	96.74%(93.48%)
TP	8	≤ 0.3	96.25%

注：括号外数值为水温 $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的控制指标，括号内数值为水温 $\leq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的控制指标。

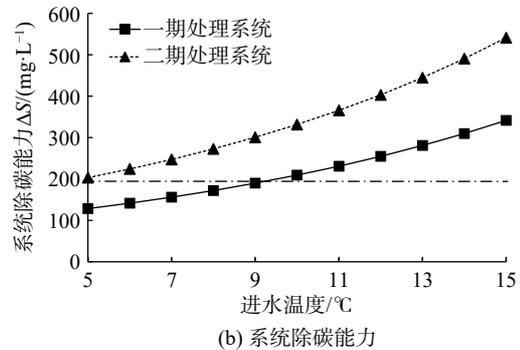
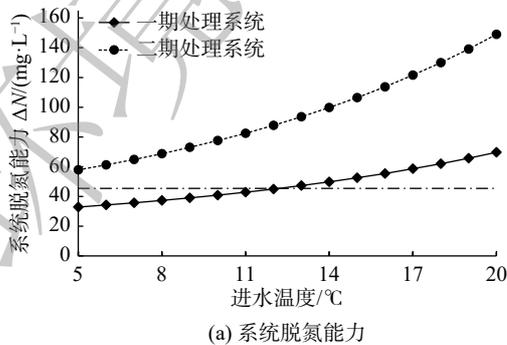


图 2 改造前不同温度下的系统处理能力

Fig. 2 Removal capacities of the system at different temperatures

2.3 改造技术方案

通过对比一期、二期处理系统运行情况可知,目前一期处理系统存在的主要问题是污泥负荷偏高。对此,本研究提出增大生化池池容与提高污泥浓度相结合的改造技术方案,使一期污泥负荷降低至与二期相近的水平,同时对一期生化池进行重新分区,优化其处理效能,具体如下。

1) 增大生化池池容。低温条件下,微生物活性降低,脱氮效率随之下降。此时,适当增加水力停留时间,降低污泥负荷,是提高生化池处理能力的有效途径^[21]。然而,延安市污水处理厂目前处于满负荷运行状态,处理构筑物已无预留调节池容。同时,经改造及扩建后,厂区内几乎已无可用地块,也无法新建生化池。对此,本研究提出加高原生化池池壁,提高有效水深,从而增大池容,延长水力停留时间的改造技术方案。

一期处理系统生化池包括厌氧池和氧化沟。原厌氧池尺寸为 $28.0\text{ m}\times 21.0\text{ m}\times 5.5\text{ m}$ ($L\times B\times H$),有效水深 5.2 m ,有效池容 $2\,808\text{ m}^3$,水力停留时间 1.35 h 。原氧化沟共分4座,单座尺寸为 $60.0\text{ m}\times 40.0\text{ m}\times 5.15\text{ m}$ ($L\times B\times H$),有效水深 4.3 m ,超高 0.85 m 。则氧化沟总池容 $34\,470\text{ m}^3$,总水力停留时间 16.55 h 。本研究将原有氧化沟池体整体加高 0.5 m ,相应有效水深升高至 4.8 m ,总池容增大至 $38\,480\text{ m}^3$,水力停留时间延长至 18.47 h 。增大氧化沟池容后,系统反硝化污泥负荷降低至 $0.045\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, BOD_5 污泥负荷降低至 $0.058\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,但仍远高于二期处理系统。

2) 提高污泥浓度。增大生化池池容可以在一定程度上延长水力停留时间,但对于污泥负荷的降低作用十分有限。因此,本研究通过提高污泥浓度的方式,进一步降低一期生化系统污泥负荷。

在污水处理厂运行过程中,一般可以通过调整污泥回流比来增加系统活性污泥总量^[15]。本研究中,由一期处理系统运营月报可知,氧化沟内污泥容积指数(sludge volume index, SVI)约为 $140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,则二沉池剩余污泥浓度约为 $7\,100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当进水 BOD_5 为 $210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、出水 BOD_5 为 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、处理量为 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 时,要将一期生化池 BOD_5 污泥负荷降至 $0.035\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,则生化池内污泥的质量浓度需升高至 $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,与剩余污泥浓度基本一致。上述条件表明,仅通过提高污泥回流比,无法将生化池污泥浓度提高至目标值。

考虑到厂区内预留用地有限,提出在生化池后设置膜组件,与原有生化池形成MBR工艺,利用膜组件的高效固液分离作用实现泥水分离,从而在提高生化池污泥浓度的同时,进一步提升系统处理效能,确保出水稳定达标。膜池及设备间总设计流量 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,单组膜池设计流量 $12\,500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,池容 836.45 m^3 ,有效水深 3.8 m ,水力停留时间 1.6 h 。膜池设计污泥浓度 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,膜池-好氧池、好氧池-缺氧池和缺氧池-厌氧池回流比分别为 400% 、 300% 和 100% ,好氧池、缺氧池及厌氧池的污泥浓度分别为 $8\,000$ 、 $6\,000$ 和 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生物反应池平均污泥浓度约为 $7\,050\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3) 重新构建生化池分区。在传统 A^2/O 工艺运行过程中,携带大量硝态氮的好氧池混合液回流至缺氧池,在缺氧池中通过反硝化作用实现脱氮,其脱氮效率受限于混合液回流比而难以进一步提高^[22]。同时,好氧池出水中含有硝态氮,若进水总氮过高或运行不当,往往会导致出水总氮难以稳定达标。对此,可在氧化沟内沟好氧池中增设搅拌机及碳源投加装置。当冬季低温或进水总氮较高时,内沟以缺氧方式运行,与后续膜池组成AO工艺,使生化系统整体以AAOAO的方式运行。此时,在后缺氧区内通过反硝化作用进一步去除好氧池出水中的硝态氮,以提升系统脱氮能力;膜池作为后好氧区控制由后缺氧池投加碳源而引起的出水 BOD_5 升高问题。为防止出水TP超标,在好氧池末端设置化学除磷装置。

综合上述改造技术方案,确定改造后的污水处理工艺流程如图3所示。

3 提标改造后系统的处理效能及运行效果

3.1 系统处理效能

提标改造后，不同温度下一期处理系统脱氮和除碳能力如图 4 所示。在 5℃ 条件下，污水处理系统的理论脱氮能力可达到 44.3 mg·L⁻¹，除碳能力可达到 286.2 mg·L⁻¹，表明改造后一期处理系统可满足低温条件下的污染物去除要求。随着进水温度的升高，系统对 TN 和 BOD₅ 的去除能力也逐渐升高。系统反硝化污泥负荷为 0.030 kg·(kg·d)⁻¹，降低至改造前的 59.7%，略高于二期处理系统；BOD₅ 污泥负荷降低至 0.033 kg·(kg·d)⁻¹，约为改造前的 50%，与二期处理系统基本一致。

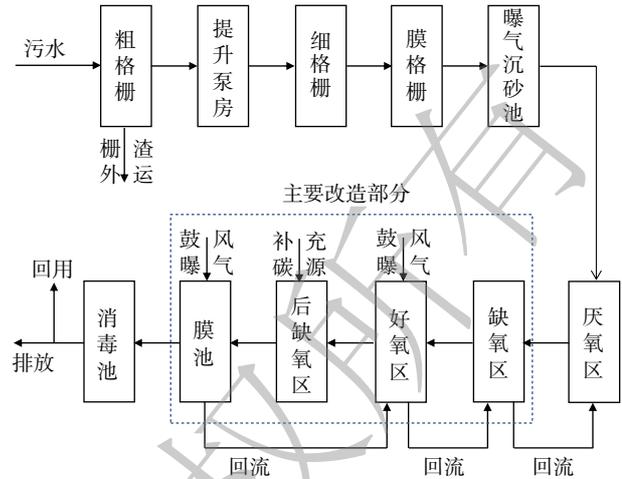


图 3 污水处理工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of the sewage treatment process

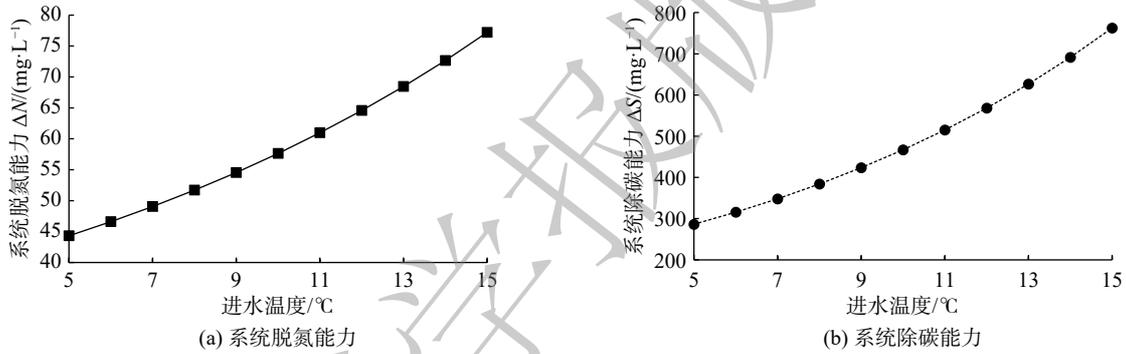


图 4 改造后不同温度下一期处理系统处理效能

Fig. 4 Removal capacities of the first stage treatment system at different temperatures after upgrade

3.2 系统运行效果

一期工程改造完成后，自 2019 年 9 月开始稳定运行。2020 年 1 月至 9 月，不同温度下一期处理系统实际进水平均 TN 的统计结果如图 5(a) 所示。冬季低温条件对硝化细菌的抑制作用导致出水 TN 整体呈现随进水温度的降低而升高的趋势。当进水温度为 6.5℃ 时，出水 TN 达到峰值，为 13.8 mg·L⁻¹，低于出水水质标准中的 15 mg·L⁻¹。这表明，在一期处理系统的改造过程中，合理增大生化池池容以延长水力停留时间，采用膜分离技术大幅度提高生化池中的活性污泥浓度，降低污泥负荷，以及结合 AAOAO 的运行方式进一步削减出水中的硝酸盐氮含量，能够实现低温条件下出水 TN 的有效控制。

由图 5(b) 可知，不同温度条件下进水平均 BOD₅ 存在较大差异，在进水温度为 20.0℃ 时，进水平均 BOD₅ 高达 314.5 mg·L⁻¹，约为设计进水 BOD₅ 的 1.5 倍，此时出水平均 BOD₅ 为 3.8 mg·L⁻¹，系统在该温度下的平均 BOD₅ 削减量达到 310.7 mg·L⁻¹。不同进水温度条件下，系统出水平均 BOD₅ 始终低于出水水质标准要求的 6.0 mg·L⁻¹，最低温度 6.0℃ 时，系统出水平均 BOD₅ 仅为 4.6 mg·L⁻¹。这表明，降低生化系统 BOD₅ 污泥负荷的改造方式，明显提升了一期处理系统的抗冲击负荷及低温下的污染物削减能力。

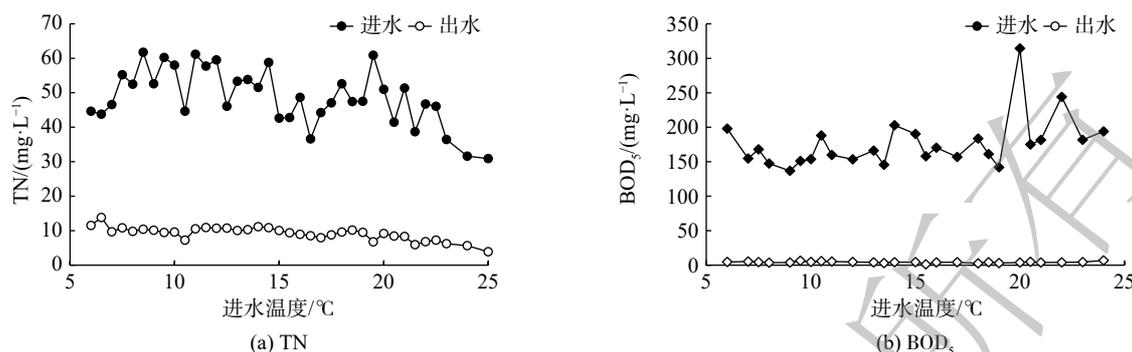


图5 改造后不同温度下一期处理系统进出水水质

Fig. 5 Water quality at the inlet and outlet of the first stage treatment system at different temperatures after upgrade

2020年1月至9月,实际进出水水质及平均去除率如表3所示。1—2月,进水平均温度10.6℃,最低进水温度仅为6.0℃。3—4月,进水温度有所上升,但其平均值也仅为10.2℃。低温条件下,一期工程满负荷运行,在进水水质波动较大的情况下,实际出水水质仍能稳定达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224-2018)中的A标准。

表3 提标改造后实际进出水水质

Table 3 Actual water quality of influent and effluent after the upgrade and reconstruction

统计值或去除率	COD/(mg·L ⁻¹)		BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)		SS/(mg·L ⁻¹)		NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)		TP/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最大值	740.0	29.00	379.0	5.70	405.0	9.00	87.30	2.75	12.70	0.33	96.80	13.80
最小值	227.0	11.10	110.0	1.80	110.0	4.00	29.00	0.03	1.78	0.01	31.50	4.50
平均值	423.7	19.10	211.4	4.17	202.7	4.34	63.50	0.60	5.52	0.11	68.94	10.66
平均去除率	95.49%		98.03%		97.86%		99.06%		98.00%		84.54%	

4 工程投资及运行成本

本次提标改造工程投资概算总额为13 667.78万元。运行成本主要包括膜组件更换费用、动力消耗费用以及药剂消耗费用,总计约1 269.68万元·a⁻¹。一期工程年处理污水1 825×10⁴ m³,单位水处理成本约0.696元·m⁻³。

5 结论

1) 延安市污水处理厂一期工程污泥负荷偏高,导致该污水处理厂在冬季进水温度偏低时,系统出水难以稳定达标。5℃时,其理论TN及BOD₅去除能力仅为32.9和128.2 mg·L⁻¹,远低于45和190 mg·L⁻¹的污染物去除需求。

2) 通过加高池体,将原氧化沟扩容至38 480 m³,在一定程度上延长了生化池总水力停留时间,但系统污泥负荷仍然较高。通过增设膜组件,与原生化池形成MBR工艺,将生化池平均污泥浓度提高至7 050 mg·L⁻¹,相应反硝化污泥负荷和BOD₅污泥负荷(以每天单位MLSS的TN/BOD₅测定值计)分别降低至0.030和0.033 kg·(kg·d)⁻¹。通过重新构建生化池分区,在冬季低温或进水总氮较高时,可使生化池按照AAOAO运行方式,确保出水总氮稳定达标。

3) 提标改造后,5℃条件下延安市污水处理厂一期工程生化系统理论TN及BOD₅去除能力分别提升至44.32和286.19 mg·L⁻¹,达到了污染物去除需求。在冬季低温或进水水质大幅度波动的情况下,实际出水水质可稳定达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224-2018)中的A标准。

参 考 文 献

- [1] 丁一. 城市河道水环境综合整治工程实测[J]. 环境工程, 2018, 36(9): 30-35.
- [2] 刘杰, 徐桂淋, 阙添进, 等. 污水处理厂MBR生化段提标改造方案分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 22-25.
- [3] 焦辉平. 生物活性砂过滤器应用于城镇污水处理厂出水提标改造[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [4] 郭会平. 我国城市污水处理现状及污水处理厂提标改造路径分析[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.
- [5] 辛涛, 郑临奥, 夏超, 等. 广东省某污水厂提标改造工程设计[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 34-38.
- [6] 王晓康, 杨欣, 边靖, 等. MBBR工艺在采用氧化沟工艺的污水厂提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 55-59.
- [7] 刘科军. 太湖流域城镇污水厂提标改造工艺的比较和选择[J]. 净水技术, 2013, 32(1): 48-51.
- [8] 栾志翔, 吴迪, 韩文杰, 等. 北方某污水厂MBBR工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 333-341.
- [9] 张鹤清, 朱帅, 吴振军, 等. 城镇污水处理厂“准IV类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30.
- [10] 吴迪, 周家中, 郑志佳, 等. MBBR用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 6-11.
- [11] 滕良方, 吴迪, 郑志佳, 等. 某污水厂Bardenpho-MBBR准IV类水提标改造分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(11): 33-39.
- [12] 陈建平, 毛云飞. 传统污水处理厂类IV类水提标改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 87-91.
- [13] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 54(6): 12-15.
- [14] 韦启信, 郑兴灿. 影响污水生物脱氮能力的关键水质参数及空间分布特征研究[J]. 给水排水, 2013, 49(9): 127-131.
- [15] 王阿华. 城镇污水处理厂提标改造的若干问题探讨[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 19-22.
- [16] 何伶俐, 汪勇, 黄皓, 等. 江苏太湖流域污水处理厂一级A提标改造技术总结[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10): 33-39.
- [17] 李磊, 王社平, 杨亚红, 等. 氧化沟中试装置低温条件下脱氮除磷效果分析[J]. 水处理技术, 2012, 38(11): 116-119.
- [18] 刘成军, 孟涛. 城市污水处理厂进水水质分布类型判别及应用[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 87-90.
- [19] 马耀平, 朱海荣, 王社平, 等. 西安市第五污水处理厂设计进水水质量的分析与确定[J]. 环境工程, 2010, 28(6): 24-27.
- [20] 李思敏, 郝同, 王若冰, 等. 改良型A²O工艺在低温不同污泥负荷下的运行研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13): 64-68.
- [21] 杜理智. 水解反硝化工艺对低碳氮比和低温城市污水的脱氮性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [22] 吴悦颖, 王洪臣, 孙娟, 等. 我国城镇污水处理设施脱氮除磷能力现状分析及对策建议[J]. 给水排水, 2014, 50(S1): 118-122.

(责任编辑: 靳炜)

Design scheme and implementation effect of upgrading project for Yan'an sewage treatment plant

WANG Yong¹, OUYANG Bing², XU Junli¹, ZUO You¹, ZHANG Weijie^{1*}, DU Muzi¹, PAN Zhaohui¹, XU Runquan¹

1. Ecological Environment Design Institute, Shaanxi Institute of Urban and Rural Planning and Design, Xi'an 710021, China

2. Yan'an Water Environmental Protection Group Water Environment Treatment Co. Ltd, Yan'an 716000, China

*Corresponding author, E-mail: liuliu6854@126.com

Abstract The scale of the first-phase project of the Yan'an Sewage Treatment Plant is $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, and the core treatment process is “anaerobic tank+oxidation ditch+secondary sedimentation tank”. Before the upgrade, there were some issues of the sewage treatment system such as low design inlet water quality and high sludge load, which led to violation of effluent discharge standards under low water temperature in winter or great fluctuation in inlet water quality. In this regard, the total hydraulic residence time of biochemical pool was extended to 19.82 h by rising the height of the aeration unit. The membrane module and associated equipment were added after the original biochemical tank to achieve the high-efficiency separation of sludge and water. The average sludge concentration of the biochemical tank was increased to $7\ 050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In addition, a mixer and a carbon source feeding device were equipped to the inner ditch aerobic unit to make the biochemical pool operate in AAOAO mode when the temperature is low in winter or the total nitrogen of the inlet water is high, further controlling the total nitrogen content in the effluent. After the implementation of the project, the denitrifying sludge load and BOD₅ sludge load (measured as TN/BOD₅ of MLSS per day) of the first stage biochemical treatment system were reduced to $0.03 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.03 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ respectively. The theoretical TN and BOD₅ removal capacity of the system were increased to $44.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $286.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively at 5 °C, meeting the pollutant removal requirements. After the upgrade, the sewage treatment operates stably meeting the Class A level in the “Integrated Wastewater Discharge Standard for the Yellow River Basin of Shaanxi Province” (DB 61/224-2018).

Keywords wastewater treatment plant; upgrade and reconstruction project; low temperature; membrane reactor; sludge load