

## 污水处理与回用

陈悦, 李淑萍, 陆勇泽, 等. 低气压环境下改良型双污泥脱氮除磷优化工艺试验[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 82–90, 107.

CHEN Y, LI S P, LU Y Z, et al. Experiment of optimized process for improved dual-sludge phosphorus and nitrogen removal under low atmospheric pressure condition [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 82–90, 107.

### 低气压环境下改良型双污泥脱氮除磷优化工艺试验

陈 悅<sup>1,2,3,4</sup>, 李淑萍<sup>1,2,3</sup>, 陆勇泽<sup>2,3,4</sup>, 韩 震<sup>4</sup>, 德吉央宗<sup>5,\*</sup>, 田 帅<sup>1,2,3</sup>, 朱光灿<sup>1,2,3,4,\*</sup>

(1. 西藏民族大学工学院, 陕西咸阳 712082; 2. 西藏自治区水质安全与水环境健康重点实验室, 陕西咸阳 712082; 3. 西藏水污染控制与生态修复国家民委重点实验室, 陕西咸阳 712082; 4. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 211189; 5. 西藏自治区生态环境监测中心, 西藏拉萨 851414)

**摘要** 【目的】青藏高原地区具有低温、低压、低氧等气候特征, 该气候导致污水生物系统污泥存在沉降性能下降、氧传质速率降低、曝气量显著增加等问题, 急需提出适应该地区气候条件的污水处理工艺, 以提高污水处理效率, 确保出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。【方法】本文以传统活性污泥系统为基础, 结合缺氧吸磷和内碳源反硝化技术, 创新性地提出改良型双污泥除磷脱氮(improved dual-sludge phosphorus and nitrogen removal, IDSPNR)新工艺, 并在低大气压力(72 kPa)条件下启动运行了反应装置, 优化了进水比、水力停留时间(HRT)、溶解氧浓度和污泥回流比(return sludge ratio, RSR)等参数, 分析了该工艺在低气压条件下的污染物去除效果和稳定运行能力。【结果】该工艺在低气压条件下的最优运行参数如下: 低氧: 厌氧进水比为5:5、低氧条件下溶解氧质量浓度为2.0~2.5 mg/L、厌氧池HRT为2.0 h、低氧池HRT为3.0 h、缺氧池HRT为3.0 h、曝气池HRT为4.0 h、RSR为50%。IDSPNR工艺优化运行后系统化学需氧量、总磷、氨氮和总氮去除率分别达到了90.01%±3.29%、81.10%±15.78%、98.01%±2.71%和76.48%±9.57%, 系统出水水质达到一级A标准。【结论】因此, IDSPNR工艺在低大气压力条件下实现了污染物的高效去除, 出水水质稳定达标, 为改造或搭建适用于低气压条件的高原生活污水处理工艺提供了参考价值。

**关键词** 低气压环境 改良型双污泥工艺 除磷脱氮 进水比 水力停留时间(HRT)

**中图分类号:** TU992    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-0177(2025)11-0082-10

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.009

### Experiment of Optimized Process for Improved Dual-Sludge Phosphorus and Nitrogen Removal under Low Atmospheric Pressure Condition

CHEN Yue<sup>1,2,3,4</sup>, LI Shuping<sup>1,2,3</sup>, LU Yongze<sup>2,3,4</sup>, HAN Zhen<sup>4</sup>, DEJI Yangzong<sup>5,\*</sup>, TIAN Shuai<sup>1,2,3</sup>, ZHU Guangcan<sup>1,2,3,4,\*</sup>

(1. School of Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China;

2. Key Laboratory of Water Safety and Aquatic Ecosystem Health of Xizang, Xianyang 712082, China;

3. Key Laboratory of Water Pollution Control and Ecological Restoration of Xizang, National Ethnic Affairs Commission, Xianyang 712082, China;

4. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189, China;

5. Xizang Autonomous Region Ecological Environment Monitoring Center, Lhasa 851414, China)

**Abstract** [Objective] The Qinghai-Tibet Plateau region is characterized by low temperature, low atmospheric pressure, and low

[收稿日期] 2024-05-23

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52160004); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202201ZR0047G)

[作者简介] 陈悦(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高海拔地区污水生物处理, E-mail:ychen@xzmu.edu.cn。

[通信作者] 德吉央宗, 高级工程师, E-mail:Degyi-Yangzom@163.com。朱光灿, 教授, E-mail:gc-zhu@seu.edu.cn

oxygen. In the process of operating and managing the plateau activated sludge process, there are challenges such as difficulties in sludge sedimentation performance, reduced oxygen mass transfer rate, and significantly increased aeration volume in wastewater biological systems. There is an urgent need to propose wastewater treatment technology adapted to the Qinghai-Tibet Plateau region, to ensure that the effluent quality reaches the first class A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 181918—2002). [Methods] Based on the traditional activated sludge system and incorporating anoxic phosphorus removal and internal carbon source denitrification technologies, this paper innovatively proposed an improved dual-sludge phosphorus and nitrogen removal (IDSPNR) process. The experimental setup was started under low atmospheric pressure conditions (72 kPa). The influent ratio, hydraulic retention time (HRT), dissolved oxygen concentration and return sludge ratio (RSR) had been optimized. [Results] The result showed that the optimal operating parameters of the IDSPNR process under plateau conditions were as follows: the influent ratio of hypoxia : anaerobic was 5 : 5, the optimal dissolved oxygen concentration in hypoxia tank was 2.0–2.5 mg/L, the optimal HRT of the anaerobic tank, hypoxia tank, anoxic tank and aeration tank was 2.0 h, 3.0 h, 3.0 h and 4.0 h, respectively, and the optimal RSR was 50%. After the process was optimized, the removal efficiencies of chemical oxygen demand, total phosphorus, ammonia nitrogen, and total nitrogen reached 90.01%±3.29%, 81.10%±15.78%, 98.01%±2.71% and 76.48%±9.57% respectively. The effluent met the First class A standard. [Conclusion] Therefore, the IDSPNR process achieves efficient removal of pollutants under low atmospheric pressure conditions, and the effluent water quality is stable and up to standard. This provides valuable reference for the modification or establishment of wastewater treatment processes in plateau areas with low atmospheric pressure.

**Keywords** low atmospheric pressure condition improved double-sludge process phosphorus and nitrogen removal influent ratio hydraulic retention time (HRT)

青藏高原地区作为我国主要的“高原地带”，被称为“第三极”和“亚洲水塔”，是我国重要的生态安全屏障。经济的快速增长和区域拓展影响了青藏高原生态环境，生活污水处理效果不佳问题尤为严重，有必要研发相关技术确保西藏地区的生态环境持续保持良好状态。西藏地区已经建成或在建的污水处理厂大部分采用污水生物处理工艺：拉萨市污水处理厂一期采用周期循环活性污泥(CASS)工艺、拉萨市污水处理厂二期和山南市泽当镇污水处理厂采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺、日喀则市污水处理厂采用改良型AAO工艺、林芝污水处理厂采用多段多级厌氧-好氧(AMAO)工艺<sup>[1-4]</sup>。青藏高原高海拔的气候特征使得西藏地区年平均温度低、氧含量低、气压低<sup>[5-6]</sup>。本课题组调研发现，当这种成熟工艺在“低温、低压、低氧”高原条件下应用时，出现了污水处理效能差、污泥浓度低(是内陆污泥浓度的25%~50%)、污泥膨胀易发、曝气能耗高等问题，极大影响了污水的处理效率，造成西藏城镇污水处理面临稳定达标困难、污泥膨胀等突出问题。究其原因，低温和低压条件会影响微生物正常生长代谢，使得污泥活性降低，氮、磷去除效率下降<sup>[6]</sup>，从而导致污水生物处理系统出水不能稳定达标<sup>[7]</sup>，其次，高原高寒地区微生物群落结构多样性水平显著低于非高原污水厂，较低的微生物多样性也是导致其除磷

脱氮效果差的一项重要原因<sup>[8]</sup>。此外，该地区地下水位较高，地下水回灌进污水管网中，导致污水厂实际进水水质和设计相差较大，氮、磷和有机物污泥负荷降低，微生物生长受限，污泥浓度降低，从而导致出水水质不能稳定达标<sup>[9]</sup>。为了解决这些问题，众多学者针对污水处理厂受西藏高海拔条件所带来的问题开展了研究。桑柳波等<sup>[10]</sup>采用了增氧式高原污水处理装置，克服高原地区高寒缺氧的环境，对污水采取增氧措施，促进好氧微生物的活性，进而有利于提高净化效率，但其能耗较大，运行成本极高；旦增等<sup>[11]</sup>提出高原污水处理脱氮旋流式的生化反应装置，初步解决了低压环境下充氧效率低、溶解氧(DO)浓度低的问题，但其无法解决进水中磷去除的问题，还需辅助化学或生物除磷，增加投资和运行成本。目前研究关注点大多在于低氧和低温，对于低压、低氧含量及其协同影响的研究较少，已有的相关专利技术大多存在某些缺陷，如运行管理复杂、施工难度大等，使其不能广泛应用。

针对青藏高原地区传统污水处理工艺存在的污泥沉降性能差、氧传质速率低、曝气量大、运维难度大等问题，以传统活性污泥系统为基础，结合缺氧吸磷和内碳源反硝化技术，提出改良型双污泥除磷脱氮(improved dual-sludge phosphorus and nitrogen removal, IDSPNR)新工艺<sup>[12]</sup>，搭建的试验装置在低大

气压力条件(72 kPa)下启动运行,对进水比、水力停留时间(HRT)、DO浓度和污泥回流比(return sludge ratio, RSR)等参数进行了优化,分析了该工艺装置对污染物去除效果,为改造或搭建适用于低大气压条件的高原生活污水处理工艺提供了参考价值。

## 1 试验部分

### 1.1 IDSPNR 工艺试验装置

试验装置为结合缺氧吸磷和内碳源反硝化技术

的IDSPNR工艺,如图1所示。装置主体分为4部分,包括厌氧池2 L、低氧池3 L、缺氧池3 L和曝气池4 L。其中,低氧池为活性污泥与生物膜混合系统,填料为软性和半软性结合的材质,体积填充比为70%~80%。由蠕动泵(BT101S,保定雷弗恒流泵有限公司)控制进水比和RSR,剩余污泥定时排放。HRT和DO浓度的控制分别是利用出水口位置、曝气泵和转子流量计来实现。

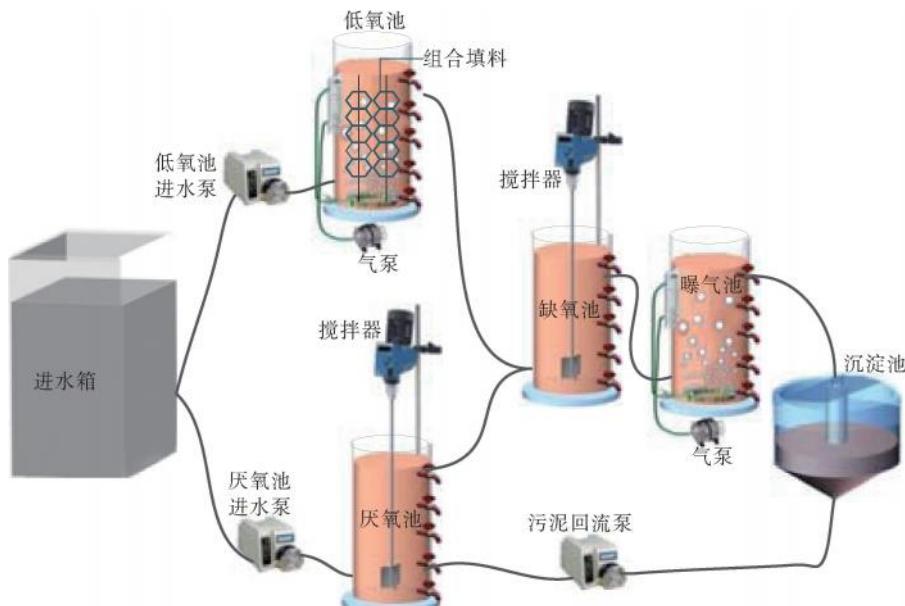


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the IDSPNR Device

### 1.2 模拟废水水质

本试验使用的污水为模拟青藏高原地区某生活污水处理厂实际污水水质,其中化学需氧量(COD)质量浓度为180.00~230.00 mg/L;总氮(TN)质量浓度为20.00~26.00 mg/L;总磷(TP)质量浓度为2.80~3.50 mg/L;氯化钠质量浓度为50 mg/L;七水硫酸镁质量浓度为25 mg/L;氯化钙质量浓度为15 mg/L;碳酸氢钠质量浓度为50 mg/L;微量元素为0.50 mL/L,其成分如表1所示。

### 1.3 装置启动及其运行条件

试验研究在高海拔环境模拟试验舱(定制,南京百夫诺机械设备有限公司)内进行<sup>[13]</sup>,设置大气压力为72 kPa(海拔为2 800 m)。试验舱的大气压力是通过控制连接真空泵的进气阀门和连接试验舱的出气阀门开关来动态调节的。接种咸阳市某污水处理厂活性污泥,采用连续进水、连续出水的方式进

表1 溶液成分与浓度

Tab. 1 Solution Composition and Concentration

成分	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1.50
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	0.10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.15
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.06
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.03
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.12
KI	0.03
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.15
乙二胺四乙酸(EDTA)	10.00

行污泥驯化培养,系统总进水量为24 L/d,水温为(20±3)℃。装置各单元进水量比为厌氧池:低氧池:缺氧池:曝气池=12:12:24:24,HRT比为厌氧池:低氧池:缺氧池:曝气池=3.0:3.0:

4.0 : 2.0, RSR 为 50%, 污泥龄 (SRT) 控制为 20 d 左右。课题组前期调研西藏自治区 6 个地市生活污水处理厂水质特征及工艺效能时发现, 低大气压条件下曝气池 DO 质量浓度一般控制在 3.0~4.0 mg/L, 因此, 本工艺的低氧池和曝气池 DO 质量浓度分别设置为 2.0~2.5 mg/L 和 3.0~4.0 mg/L。

#### 1.4 水质指标和检测分析方法

COD、TP、氨氮、硝酸盐氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N)、亚硝酸盐氮 ( $\text{NO}_2^-$ -N) 和混合液悬浮固体 (MLSS) 根据国标法测定, DO 和 pH 分别由测定仪 [ HQ30d 和 HQ1110d, 哈希水质分析仪器(上海)有限公司] 测定。本工艺系统低氧池的同步硝化反硝化率 (simultaneous nitrification denitrification, SND) <sup>[14-15]</sup>, 计算可简化为式(1)。

$$R = \frac{(C_1 + C_2) - (C'_1 + C'_2)}{C_{\text{N},1} - C_{\text{N},2}} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $R$ —SND;

$C_{\text{N},1}$ —氨氮进水质量浓度, mg/L;

$C_{\text{N},2}$ —氨氮出水质量浓度, mg/L;

$C_1$ — $\text{NO}_2^-$ -N 出水质量浓度, mg/L;

$C_2$ — $\text{NO}_3^-$ -N 出水质量浓度, mg/L;

$C'_1$ — $\text{NO}_2^-$ -N 进水质量浓度, mg/L;

$C'_2$ — $\text{NO}_3^-$ -N 进水质量浓度, mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 IDSPNR 工艺系统的启动运行效果

图 2 为系统启动运行期间进出水水质变化。系统启动结束后 COD、TN 和 TP 去除率分别为  $87.71\% \pm 3.39\%$ 、 $72.16\% \pm 3.49\%$  和  $77.63\% \pm 10.06\%$ , 系统出水氨氮、TN、COD 和 TP 的浓度远低于一级 B 标准, 表明低氧池已形成稳定的生物膜, IDSPNR 系统已经能够稳定运行。

### 2.2 IDSPNR 工艺参数优化

尽管 IDSPNR 工艺系统在启动期间运行效能良好, 但其运行参数仍需进一步优化。对于本系统来说, 低氧池和厌氧池进水的比例是该工艺的一个重要运行参数, 低氧池和厌氧池进水比的大小会直接影响厌氧池和低氧池的有机物和氮、磷负荷。进水比过高时, 导致低氧池的有机物浓度过高, 抑制 SND 过程<sup>[16]</sup>, 而厌氧池有机物浓度过低, 导致释磷不充分<sup>[17]</sup>, 好氧吸磷动力不足; 当进水比过低时, 低

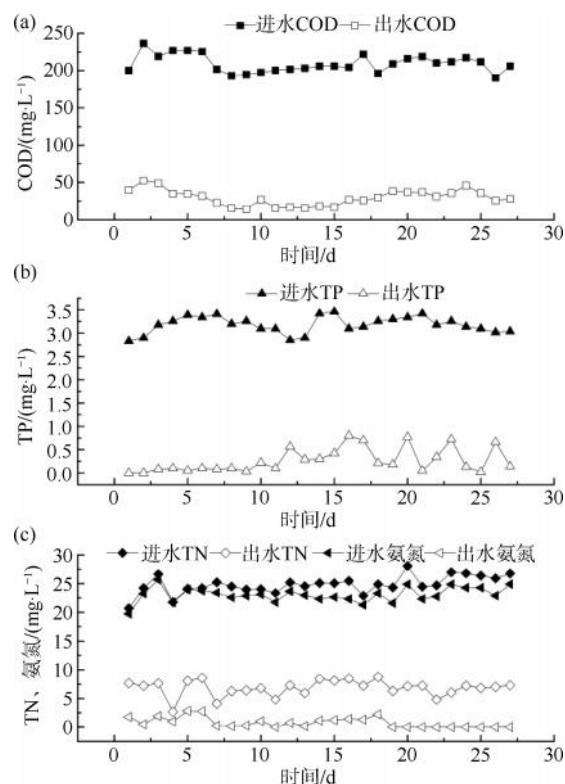


图 2 系统启动运行期间进出水水质变化  
Fig. 2 Changes of Influent and Effluent Quality during Start-Up and Operation of the System

氧池有机物浓度低导致反硝化过程受到抑制, 厌氧池氨氮浓度过高且不能被有效去除, 导致出水水质不能达标<sup>[18]</sup>。该系统在低压 (72 kPa) 条件下运行时, 低气压条件下相同的曝气量会导致 DO 浓度过低, 不能满足硝化和好氧吸磷过程所需要的氧气<sup>[19]</sup>, 进而影响系统的脱氮除磷效果。低氧池中的 DO 浓度是影响 SND 过程的关键因素之一。对于低氧池内的生物膜, 随着附着微生物的生长增殖使生物膜脱落, 更新不断加厚逐渐形成好氧区、厌氧区等不同区域, 有利于 SND 过程的发生<sup>[18,20]</sup>。DO 浓度过低, 会使得氨氮氧化不充分, 影响硝化菌的生长代谢, DO 浓度过高则不利于反硝化的进行<sup>[20]</sup>。HRT 是影响生物除磷脱氮工艺又一重要参数<sup>[21]</sup>, HRT 过短, 微生物与污染物接触不充分, 就不能保持足够的生物量, 造成运行稳定性和处理效果下降, 而 HRT 过长, 则易发生污泥膨胀<sup>[18,22]</sup>。RSR 直接影响 IDSPNR 工艺系统内的生物量、污泥性能和系统的运行效能。合适的 RSR 可以保持系统内活性污泥的浓度, 保证处理效果的稳定性, 并使污泥处于合适的增殖速率, 有利于二沉池的泥水分离<sup>[18]</sup>。因此,

本试验对低氧池: 厌氧池进水比、各单元 HRT、低氧池和曝气池的 DO 浓度、RSR 等运行参数进行优化。

### 2.2.1 进水比优化

IDSPNR 系统是一种泥膜混合 AAO 污水处理系统, 进水比影响着进入到低氧池和厌氧池的碳源量, 进而影响着泥、膜系统的处理负荷和氮、磷去除运行效能。

本试验在其他运行参数不变的情况下, 低氧池: 厌氧池进水比设置为 5:5、6:4、7:3, 污染物变化情况如图 3 所示。当低氧池: 厌氧池进水比分别为 5:5、6:4、7:3, COD 的去除率分别为  $87.71\% \pm 3.39\%$ 、 $85.06\% \pm 1.33\%$ 、 $86.70\% \pm 1.46\%$ , 进水比对 COD 的去除效率影响不大。随着进水比的增大, TN 去除率从  $72.16\% \pm 3.49\%$  上升至  $76.48\% \pm 5.54\%$ ; 当进水比为 7:3 时, TN 去除率下降至  $69.83\% \pm 8.97\%$ , 表明当进水比为 6:4 时, 低氧池碳源充足, 系统脱氮效果最佳。随着进水比增大, TP 去除率呈持续下降趋势, 当进水比分别为 6:4 和 7:3 时, TP 的去除率分别降至  $67.02\% \pm 17.09\%$  和  $66.92\% \pm 14.84\%$ , 与进水比为 5:5 相比, 去除率下降了 10%, 这可能是因为进水比增大至 6:4 和 7:3 时, 进入厌氧池的碳源不足, 影响了厌氧释磷, 进而影响了系统的除磷效率。邢嘉伟<sup>[23]</sup>利用短程硝化反硝化工艺深度处理生活污水时也发现, 降低厌氧区进水量会导致厌氧区为聚磷菌提供的碳源数量不足, 导致聚磷量降低, 与此同时好氧区 HRT 过低导致硝化反应不完全, 缺氧池中硝化液回流提供的硝酸盐量少以及反硝化聚磷菌活性差, 导致系统脱氮除磷性能下降。因此, 进水比为 5:5 时, TN 去除率有所下降, 但是 COD 和 TP 的去除率

表 2 低氧池不同 DO 浓度下的 TN 去除量、SND 以及缺氧池的聚磷量  
Tab. 2 TN Removal Amount, SND in Hypoxic Pool and Phosphorus Accumulation Capacity in Anoxic Pool under Different DO Concentrations

指标	DO 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		
	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
低氧池 TN 去除量/(mg·L <sup>-1</sup> )	8.83±2.24	13.09±0.90	10.14±1.43
SND	97.46%±4.39%	100.00%±0.00%	100.00%±0.00%
缺氧池聚磷量/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.01±1.29	4.18±0.93	2.53±4.04

### 2.2.3 HRT 优化

进水比为 5:5, 低氧池 DO 质量浓度控制为 2.0~2.5 mg/L, 其他运行参数不变的情况下, 对各

最高, 较好地平衡除磷脱氮功能。

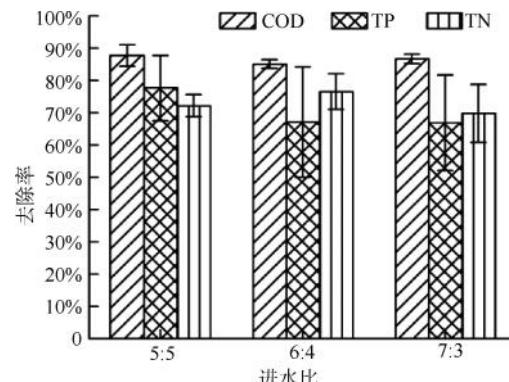


图 3 不同进水比下反应器 COD、TP 和 TN 的去除率  
Fig. 3 Removal Rates of COD, TP and TN in the Reactor under Different Influent Ratios

### 2.2.2 低氧池 DO 浓度对脱氮效果的影响

IDSPNR 系统低氧池中主要发生硝化和 SND 过程, 实现部分脱氮。试验设置进水比为 5:5, 其他运行参数采用启动运行期间的参数, 设置低氧池的 DO 质量浓度分别为 1.5~2.0、2.0~2.5 mg/L 和 2.5~3.0 mg/L。表 2 给出了低氧池不同 DO 浓度下的 TN 去除量、SND 以及缺氧池的聚磷量。DO 质量浓度为 1.5~2.0 mg/L 时, SND 为  $97.46\% \pm 4.39\%$ , 其他 2 个 SND 均为 100.00%, 低氧池中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 全部通过 SND 过程脱去, 低氧池出水中几乎无  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$ 。低氧池和厌氧池出水进入到缺氧池, 缺氧池发生了吸磷现象, 这是因为低氧池出水携带的分子氧, 缺氧池在好氧环境下聚磷来实现除磷的。

当低氧池 DO 质量浓度在 2.0~2.5 mg/L 时, SND 为 100.00%, 其脱氮量和缺氧池的聚磷量均最高。因此, 本系统稳定运行时低氧池的 DO 质量浓度控制为 2.0~2.5 mg/L。

当低氧池 DO 质量浓度在 2.0~2.5 mg/L 时,

SND 为 100.00%, 其脱氮量和缺氧池的聚磷量均最高。因此, 本系统稳定运行时低氧池的 DO 质量浓度控制为 2.0~2.5 mg/L。

反应池的 HRT 进行优化。

#### 1) 厌氧池 HRT 优化

本试验控制厌氧池不同 HRT(2.0、3.0、4.0 h)

时污染物去除效率如图 4 所示。当 HRT 分别为 2.0、3.0、4.0 h, COD 的去除率分别为  $88.89\% \pm 2.90\%$ 、 $83.6\% \pm 1.88\%$ 、 $85.64\% \pm 1.86\%$ , TN 去除率分别为  $83.46\% \pm 0.12\%$ 、 $69.56\% \pm 0.03\%$ 、 $68.81\% \pm 0.04\%$ , TP 去除率分别为  $82.27\% \pm 9.35\%$ 、 $54.37\% \pm 24.92\%$ 、 $27.81\% \pm 2.83\%$ 。HRT 为 2.0 h 时, COD、TP 和 TN 的去除率最高, 这是因为此时厌氧池碳源充足, 发生了完全释磷过程。随 HRT 的延长, 厌氧池的 COD 去除量基本不变, 而 TN 和 TP 的去除率迅速下降, 这可能是 HRT 的延长导致反应器内用于脱氮除磷的碳源不足<sup>[24]</sup>。因此, 改良双污泥除磷脱氮工艺系统稳定运行时, 厌氧池的 HRT 为 2.0 h。

### 2) 低氧池 HRT 优化

进水比和低氧池 DO 均采用优化后的参数, 其他参数仍为启动运行参数, 在此运行条件下, 本试验控制低氧池 HRT 为 3.0、4.0、5.0 h, 低氧池 TN 去除量、SND 以及缺氧池的聚磷量如表 3 所示。低氧池

表 3 不同 HRT 时低氧池 TN 去除量、SND 率以及缺氧池的聚磷量

Tab. 3 TN Removal Amount, SND in Hypoxic Pond and Phosphorus Accumulation Capacity in Anoxic Pool under Different HRT

指标	低氧池 HRT/h		
	3.0	4.0	5.0
低氧池 TN 去除量/(mg·L <sup>-1</sup> )	$13.57 \pm 1.47$	$5.19 \pm 2.99$	$10.91 \pm 1.25$
SND	$99.79\% \pm 0.36\%$	$97.59\% \pm 3.68\%$	$100.00\% \pm 0.00\%$
缺氧池聚磷量/(mg·L <sup>-1</sup> )	$8.17 \pm 1.34$	$5.31 \pm 1.17$	$6.89 \pm 1.09$

### 3) 缺氧池 HRT 优化

进水比、低氧池 DO 浓度、厌氧池和低氧池的 HRT 均采用优化后参数, 曝气池 DO 和 HRT、RSR 等参数采用启动运行参数, 控制缺氧池 HRT 为 3.0、4.0、5.0 h, 各污染物的去除效率如图 5 所示。缺氧池的 HRT 分别为 3.0、4.0、5.0 h, COD 的去除率分别为  $88.11\% \pm 4.48\%$ 、 $87.18\% \pm 2.42\%$ 、 $85.31\% \pm 1.62\%$ , TP 去除率分别为  $82.08\% \pm 1.50\%$ 、 $79.07\% \pm 0.04\%$ 、 $22.82\% \pm 2.18\%$ , TN 去除率分别为  $74.98\% \pm 0.08\%$ 、 $72.82\% \pm 0.08\%$ 、 $72.48\% \pm 0.05\%$ 。随着缺氧池 HRT 增大, COD、TN 和 TP 的去除率逐渐降低, 当缺氧池 HRT 为 3.0 h 时, 系统 COD、TP 和 TN 去除率最大, 因此, 在当前试验条件下控制缺氧池 HRT 为 3.0 h 是最优状态。

### 4) 曝气池 HRT 优化

除了 RSR 为启动参数外, 其他运行参数均为优

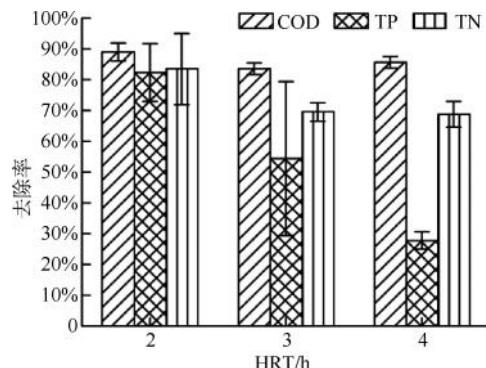


图 4 不同 HRT 时厌氧池各污染物的去除效率

Fig. 4 Removal Efficiency of Various Pollutants in Anaerobic Pond under Different HRT

HRT 分别为 3.0、4.0 h 和 5.0 h 时, TN 去除量分别为  $(13.57 \pm 1.47)$ 、 $(5.19 \pm 2.99)$  mg/L 和  $(10.91 \pm 1.25)$  mg/L。对本试验水质来说, 低氧池 HRT 为 3.0 h 时, 低氧池 TN 和 TP 去除率最高。其原因是过长的 HRT 导致反应器内 DO 浓度过高, 不利于同步硝化反硝化反应, 导致 TN 去除率降低<sup>[25]</sup>。

表 3 不同 HRT 时低氧池 TN 去除量、SND 率以及缺氧池的聚磷量

Tab. 3 TN Removal Amount, SND in Hypoxic Pond and Phosphorus Accumulation Capacity in Anoxic Pool under Different HRT

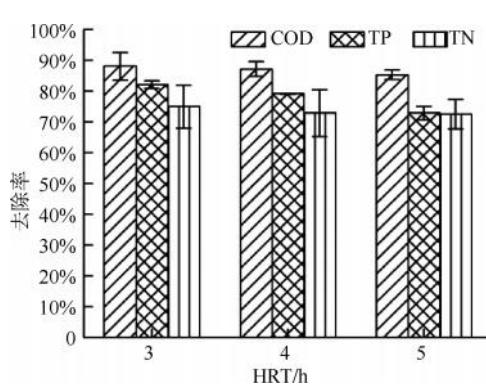


图 5 不同 HRT 缺氧池时系统各污染物的去除效率

Fig. 5 Removal Efficiency of Various Pollutants in the System under Different HRT in Anoxic Pond

化后参数, 此时, 控制曝气池的 HRT 分别为 2.0、3.0、4.0 h, 各污染物去除效率如图 6 所示。随着 HRT 的增长, COD 和 TN 的去除量差异不大, 但是 TP 去除率显著提升。曝气池 HRT 分别为 2.0、3.0、

4.0 h 时, TP 去除率分别为  $51.95\% \pm 24.68\%$ 、 $63.33\% \pm 27.38\%$ 、 $82.19\% \pm 3.78\%$ , 可以看出, 曝气池 HRT 为 2.0 h 和 3.0 h 时, TP 去除率低, TP 去除率的数据波动性较大, 表明曝气池除磷效果不稳定。综上可知, 在工况曝气池 HRT 为 4.0 h 时出水效果和稳定性最优。

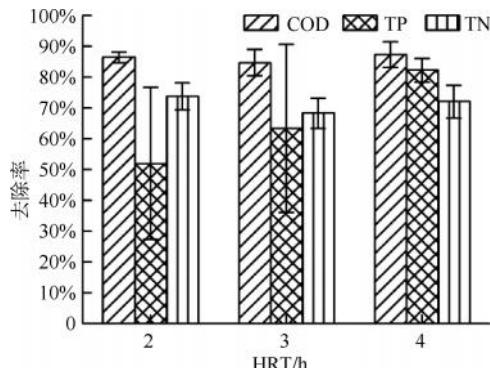


图 6 不同 HRT 曝气时系统各污染物的去除效率  
Fig. 6 Removal Efficiency of Various Pollutants in the System under Different HRT Aeration

#### 2.2.4 RSR 对污染物去除的影响

系统采用优化参数进行运行, 控制 RSR 分别为 25%、50% 和 70%。由图 7 可知, RSR 分别为 25%、50% 和 70% 时, COD 的去除率分别为  $92.83\% \pm 1.12\%$ 、 $88.71\% \pm 2.92\%$  和  $91.78\% \pm 2.42\%$ , TP 的去除率分别为  $71.25\% \pm 15.16\%$ 、 $80.00\% \pm 9.41\%$  和  $67.20\% \pm 20.25\%$ , TN 去除率分别为  $75.47\% \pm 0.06\%$ 、 $76.29\% \pm 0.06\%$  和  $77.72\% \pm 0.06\%$ 。因此, IDSPNR 系统的 RSR 为 50% 时, 实现了稳定和良好的脱氮除磷效率。

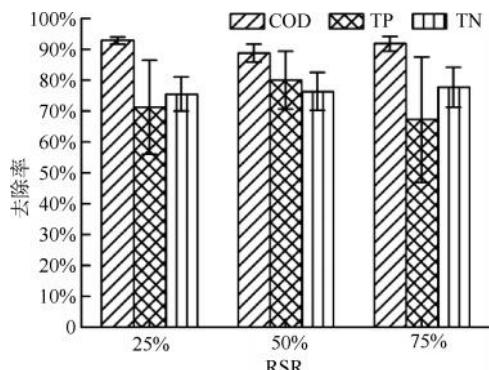


图 7 不同 RSR 比时各污染物的去除效率  
Fig. 7 Pollutants Removal Efficiencies at Different RSR

综上所述, 高原条件下 IDSPNR 工艺最优运行参数如下: 低氧池 : 厌氧池进水比为 5 : 5、低氧池

DO 质量浓度为 2.0~2.5 mg/L、厌氧池 HRT 为 2.0 h、低氧池 HRT 为 3.0 h、缺氧池 HRT 为 3.0 h、曝气池 HRT 为 4.0 h、RSR 为 50%。COD、TP、氨氮和 TN 的去除率可以达到  $88.71\% \pm 2.92\%$ 、 $80.00\% \pm 9.41\%$  和  $76.29\% \pm 0.06\%$ 。此外, 曝气池 DO 质量浓度控制为 3.0~4.0 mg/L。

#### 2.3 IDSPNR 工艺经优化后的长期稳定运行效能

IDSPNR 系统采用优化参数稳定运行。图 8 为优化参数稳定运行期间进出水水质, 出水 COD、TP、氨氮和 TN 质量浓度分别为  $(21.40 \pm 7.67)$ 、 $(0.62 \pm 0.52)$ 、 $(0.44 \pm 0.60)$  mg/L 和  $(5.40 \pm 2.28)$  mg/L, 出水水质达到了一级 A 标准。COD、TP、氨氮和 TN 的去除率分别达到了  $90.01\% \pm 3.29\%$ 、 $81.10\% \pm 15.78\%$ 、 $98.01\% \pm 2.71\%$  和  $76.48\% \pm 9.57\%$ 。IDSPNR 工艺系统采用优化参数稳定运行 27 d 后, TP 和 COD 的去除率得到提高, 脱氮率无显著变化, 表明该工艺在高海拔条件下能够稳定运行。此外, 与传统工艺相比, IDSPNR 工艺在低气压条件下的运行表现出较高的氮和磷去除性能<sup>[26]</sup>。黄德才等<sup>[27]</sup>研究发现温度为 20 °C 时低气压条件下 AAO 工艺出水未能达到一级 A 标准。李远威等<sup>[28]</sup>开展了高原生境下不同 HRT 对 AAO 工艺的影响研究, 发现该工艺出水水质指标不能稳定达到一级 A 标准。宗永臣等<sup>[29]</sup>研究了高海拔地区序批式生物膜反应器工艺的污水处理效果, 发现采用加热和控温措施都不能保障处理出水满足一级 A 标准, 提出对于高海拔区域的污水处理仍有待进一步研究。因此, 本工艺的提出有利于为改建或新建高原地区城镇生活污水处理厂工艺选择和运行优化提供基础技术支撑。

但是本工艺存在低氧池和缺氧池的单元功能仍未完全实现的, 其主要原因在于低氧池不能提供足够的电子受体, 可从以下方面改进: ①低氧池前增设一个水解池, 目的是去除有机物降低 COD 负荷, 提高低氧池的硝化效率降低反硝化效率, 保证低氧池可以提供足够的电子受体; ②改变低氧池的构型, 将其分为 1 区和 2 区, 降低 COD 负荷同时利于控制 DO, 便于调节硝化及反硝化强度, 保证低氧池可以提供足够的电子受体。

#### 3 结论

本研究以传统活性污泥系统为基础, 结合缺氧

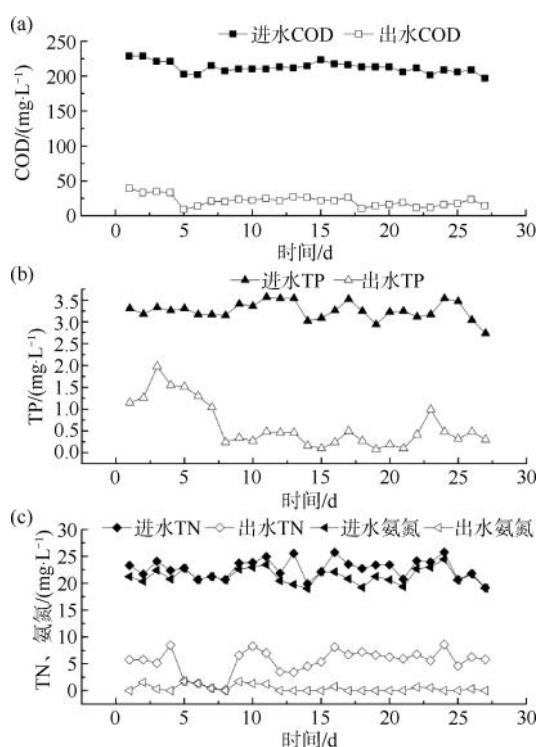


图 8 系统稳定运行期间进出水水质

Fig. 8 Influent and Effluent Quality during Stable Operation of the System

吸磷和内碳源反硝化技术,利用反硝化除磷与同步硝化反硝化技术。本文提出了一套IDSPNR工艺,构建了IDSPNR工艺装置,并在高海拔、低大气压(72 kPa)条件下启动运行,对进水比、HRT、DO浓度和RSR等参数进行了优化,确定了优化参数如下:低氧池:厌氧池进水比为5:5、低氧池DO质量浓度为2.0~2.5 mg/L、厌氧池HRT为2.0 h、低氧池HRT为3.0 h、缺氧池HRT为3.0 h、曝气池HRT为4.0 h、RSR为50%,曝气池DO质量浓度控制为3.0~4.0 mg/L。采用上述优化参数, IDSPNR工艺系统实现了稳定运行,出水COD、TP、氨氮和TN质量浓度分别为( $21.40 \pm 7.67$ )、( $0.62 \pm 0.52$ )、( $0.44 \pm 0.60$ ) mg/L和( $5.40 \pm 2.28$ ) mg/L,去除率分别达到了 $90.01\% \pm 3.29\%$ 、 $81.10\% \pm 15.78\%$ 、 $98.01\% \pm 2.71\%$ 和 $76.48\% \pm 9.57\%$ ,出水浓度满足一级A标准。因此, IDSPNR工艺适合于低气压地区,并为改造或搭建适用于低大气压条件的高原生活污水处理工艺提供了参考价值。

青藏高原地区各污水处理厂的进水水质、气压和温度跨度较大,在不同进水水质、气压和温度环境条件下运用IDSPNR工艺处理时,需开展不同工况

条件下运行效能和参数优化研究,诸如强化低温群落菌群、提高污泥浓度、优化低氧池构型及进水比、研制太阳能热电联产的加热工程措施等,为其在高海拔地区的推广应用提供更加充分的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 张培胜,李轶,王龙飞. 我国高原污水处理厂现存问题及其展望 [J]. 环境工程, 2019, 37(5): 82–86, 91.  
ZHANG P S, LI Y, WANG L F. Brief discussion on existing problems and prospects of plateau wastewater treatment plants in China [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5): 82–86, 91.
- [2] 陈相宇,郝凯越,苏东,等. A<sup>2</sup>/O法处理高海拔地区污水的特性研究 [J]. 水处理技术, 2018, 44(2): 93–96.  
CHEN X Y, HAO K Y, SU D, et al. Characteristic study on wastewater treatment in high altitude area by A<sup>2</sup>/O process [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(2): 93–96.
- [3] 张利强,杨刚,贾瑞贞. 西藏山南地区泽当镇污水处理厂工艺比选 [J]. 山西建筑, 2010, 36 (21): 173–174.  
ZHANG L Q, YANG G, JIA R Z. On sewage treatment plant process selection of Zedang Town in Shannan prefecture of Xizang [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36 (21): 173–174.
- [4] 周小平,祁彪,薛浩天,等. 人工湿地在青藏高原污水深度处理中的应用 [J]. 青海环境, 2014, 24 (4): 170–176, 189.  
ZHOU X P, QI B, XUE H T, et al. Application of artificial wetlands in deep treatment of wastewater in the Qinghai Tibet Plateau [J]. Journal of Qinghai Environment, 2014, 24 (4): 170–176, 189.
- [5] 宗永臣. 西藏地区自然环境对污水处理效果的影响初探 [J]. 市政技术, 2017, 35(3): 132–135.  
ZONG Y C. Preliminary influence study of Xizang natural environment on sewage treatment effect [J]. Journal of Municipal Technology, 2017, 35(3): 132–135.
- [6] 郝凯越,李远威,张宁,等. 不同工况对A<sup>2</sup>/O工艺的处理效果研究 [J]. 水力发电, 2020, 46(10): 10–14, 21.  
HAO K Y, LI Y W, ZHANG N, et al. Study on the treatment effect of A<sup>2</sup>/O process under different operating conditions [J]. Water Power, 2020, 46(10): 10–14, 21.
- [7] 方德新,赵革,徐晓英,等. 微生物群落特征 [J]. 生物资源技术, 2018, 249: 684–693. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.10.063.  
FANG D X, ZHAO G, XU X Y, et al. Microbial community structures and functions of wastewater treatment systems in plateau and cold regions [J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 684–693. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.10.063.
- [8] 方德新,吉芳英,许晓毅,等. 高原高寒污水处理系统的微生物群落特征 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1081–1088.  
FANG D X, JI F Y, XU X Y, et al. Microbial community characteristics of wastewater treatment systems in high-altitude

- and cold regions [ J ]. China Environmental Science, 2020, 40 (3) : 1081–1088.
- [ 9 ] 沈鸿滢, 郭玉, 王艳英, 等. 高原地区污水处理厂工程项目案例分析 [ J ]. 净水技术, 2014, 33(2) : 9–12, 21.
- SHEN H Y, GUO Y, WANG Y Y, et al. Case study on engineering projects of sewage treatment plants in plateau region [ J ]. Water Purification Technology, 2014, 33(2) : 9–12, 21.
- [ 10 ] 桑柳波, 周晓庆, 陈春霖, 等. 一种增氧式高原污水处理装置: 202011130903.3[ P ]. 2020-10-21.
- SANG L B, ZHOU X Q, CHEN C L, et al. An aerobic high-altitude sewage treatment device: 202011130903.3[ P ]. 2020-10-21.
- [ 11 ] 旦增, 马文臣, 布多, 等. 一种高原污水处理脱氮旋流式的生化反应装置及其设备: 202022952982[ P ]. 2021-07-27.
- DAN Z, MA W C, BU D, et al. A cyclone based biochemical reaction device and its equipment for denitrification of plateau wastewater treatment: 202022952982 [ P ]. 2021-07-27.
- [ 12 ] 韩震, 朱光灿, 李淑萍, 等. 一种适用于高原城镇生活污水处理的改良型双污泥除磷脱氮装置和工艺: 201911205387.3 [ P ]. 2020-03-24.
- HAN Z, ZHU G C, LI S P, et al. An improved dual sludge phosphorus and nitrogen removal device and process suitable for the treatment of domestic sewage in high-altitude urban areas: 201911205387.3 [ P ]. 2020-03-24.
- [ 13 ] CHEN Y, LI S P, LU Y Z, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal ( SNDPR ) at low atmosphere pressure [ J ]. Biochemical Engineering Journal, 2020, 160: 107629. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107629.
- [ 14 ] 李寒. 同步硝化反硝化与反硝化除磷耦合强化脱氮除磷微生物特性研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2017.
- LI H. Study of nitrogen and phosphorus removal and microbial character on the combination of simultaneous nitrification/ denitrification and denitrifying phosphorus removal [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [ 15 ] KATIE A, THIRD N B, RALF C R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate ( PHB ) as the electron donor in an SBR [ J ]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 83: 706–720. DOI: 10.1002/bit.10708.
- [ 16 ] 程辉. 双泥法多点进水 OAO 工艺处理生活污水的试验研究 [ D ]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- CHENG H. Research on the domestic sewage treatment by the doublemud method and multi-point influent OAO process [ D ]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [ 17 ] WEDE S, WILK R K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The polish perspective [ J ]. Renewable Energy, 2010, 35(9) : 1914–1919.
- [ 18 ] 韩震. 高海拔地区改良型双污泥除磷脱氮工艺优化研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2020.
- HAN Z. Research on optimization of improved double-sludge phosphorus and nitrogen removal process in high altitude area [ D ]. Nanjing: Southeast University. 2020.
- [ 19 ] 韩震, 李淑萍, 朱光灿, 等. 高原地区曝气池氧传质的影响因素研究 [ J ]. 水处理技术, 2021, 47(6) : 34–38.
- HAN Z, LI S P, ZHU G C, et al. Study on the influencing factors of oxygen mass transfer in aeration tanks in plateau area [ J ]. Technology of Water Treatment, 2021, 47 ( 6 ) : 34–38.
- [ 20 ] 王赛, 王淑莹, 彭永臻, 等. 同步硝化反硝化工艺中 DO 浓度对  $N_2O$  产生量的影响 [ J ]. 环境工程学报. 2011, 5(1) : 33–37.
- WANG S, WANG S Y, PENG Y Z, et al. Effects of DO concentrations on  $N_2O$  production in simultaneous nitrification and denitrification process [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering. 2011, 5(1) : 33–37.
- [ 21 ] HCLLINGA C, SCHELLEN A A J C, MULDER J W, et al. The SHARON process, an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [ J ]. Water Science and Technology, 1998, 37(9) : 135–142.
- [ 22 ] CARLSSON H, ASPEGREN H, HILMER A. Interactions between wastewater quality and phosphorus release in the anaerobic reactor of the EBPR progress [ J ]. Water Research, 1996, 30(6) : 1517–1527.
- [ 23 ] 邢嘉伟. 连续流分段进水短程硝化反硝化 ABR-MBR 深度处理生活污水 [ D ]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- XING J W. ABR-MBR for advanced treatment of domestic sewage with continuous flow staged influent short-cut nitrification and denitrification [ D ]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [ 24 ] 高志广, 周琪, 陈银广, 等. 厌氧 HRT 对 A/O 除磷工艺的影响 [ J ]. 水处理技术, 2006, 32(11) : 21–23.
- GAO Z G, ZHOU Q, CHEN Y G, et al. Influence of anaerobic HRT on phosphorus removal in A/O device [ J ]. Technology of Water Treatment, 2006, 32(11) : 21–23.
- [ 25 ] 马宁, 何鹏飞, 付金祥, 等. 多点进水多级生物接触氧化工艺处理农村生活污水 [ J ]. 环境工程学报, 2024, 18 ( 4 ) : 1113–1119.
- MA N, HE P F, FU J X, et al. Multi-stage biological contact oxidation process with multi-point influent for rural domestic sewage treatment [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(4) : 1113–1119.
- [ 26 ] 陈相宇, 郝凯越, 何六一, 等. 西藏地区城镇污水处理研究进展 [ J ]. 内江科技, 2020, 41(10) : 79–80.
- CHEN X Y, HAO K Y, HE L Y, et al. Research progress of urban sewage treatment in Xizang [ J ]. Nei Jiang Ke Ji, 2020, 41(10) : 79–80.
- [ 27 ] 黄德才, 李远威, 郝凯越, 等. 高原温度条件对 A<sup>2</sup>O 工艺污水处理效果影响研究 [ J ]. 水处理技术, 2021, 47(11) : 106–110.

(下转第 107 页)

- 术改造的实践与思考 [J]. 环境工程, 2020, 38(7): 19–24.  
YU Y, YU S H, CHEN D G. Practice and reflection on clean emission technology transformation of urban sewage treatment plants in Zhejiang Province [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 19–24.
- [4] 鲍任兵, 高廷杨, 宫玲, 等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述 [J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14–20.  
BAO R B, GAO T Y, GONG L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14–20.
- [5] 鲍任兵, 徐健, 张云志, 等. 多级 AO 工艺短程硝化反硝化的启动与运行调控 [J]. 净水技术, 2023, 42(9): 95–103.  
BAO R B, XU J, ZHANG Y Z, et al. Start-up and operation regulation of shortcut nitrification-denitrification in multi-stage AO Processes [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 95–103.
- [6] 戴仲怡, 王雪, 彭建国, 等. 曝气缺氧/多级 AO 工艺用于大型污水厂提标改造 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 50–54.  
DAI Z Y, WANG X, PENG J G, et al. Application of aeration
- anoxia-multi-stage ao process in improvement of large sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 50–54.
- [7] 支丽玲, 郑凯凯, 王燕, 等. 全流程分析 AAO 工艺碳源投加减量控制研究 [J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 119–121.  
ZHI L L, ZHENG K K, WANG Y, et al. Research on addition and decrease control of carbon source in AAO process based on whole process analysis [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(2): 119–121.
- [8] 程玉周, 赵静, 颜椿, 等. 城市污水处理厂改良 AAO 系统的物料平衡研究 [J]. 城镇供水, 2023(6): 74–78.  
CHENG Y Z, ZHAO J, YAN C, et al. Research on material balance of improved AAO system in municipal wastewater treatment plant [J]. City and Town Water Supply, 2023(6): 74–78.
- [9] 孙强强, 陈贻龙. 南方某省城镇污水处理厂碳排放特征 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3231–3244.  
SUN Q Q, CHEN Y L. Characteristics of carbon emission from municipal wastewater treatment plants in a south-China province [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3231–3244.

(上接第 90 页)

- HUANG D C, LI Y W, HAO K Y, et al. Research on the effect of plateau temperature on sewage treatment effect of anaerobic-anoxic-oxic process [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(11): 106–110.
- [28] 李远威, 郝凯越, 宗永臣, 等. 高原生境不同水力停留时间下 A<sup>2</sup>O 工艺活性污泥微生物代谢机制研究 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1): 20–26.  
LI Y W, HAO K Y, ZONG Y C, et al. Study on microbial metabolic mechanism of A<sup>2</sup>/O process activated sludge with different hydraulic retention time in plateau environment [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(1): 20–26.
- [29] 宗永臣, 陈相宇, 李远威, 等. 不同温度下 SBBR 工艺处理高海拔城市污水中试研究 [J]. 工业水处理, 2018, 38(6): 42–45.  
ZONG Y C, CHEN X Y, LI Y W, et al. Pilot study on the treatment of high-altitude urban sewage by SBBR with different temperatures [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(6): 42–45.