韩镇蓬, 朱光灿, 陆勇泽, 等. 青藏高原地区城镇污水处理研究现状与发展需求[J]. 净水技术, 2022, 41(11):76-84,184.
HAN Z P, ZHU G C, LU Y Z, et al. Research status and development demands of urban wastewater treatment in the Qinghai-Tibet Plateau region[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):76-84,184.

扫我试试?

青藏高原地区城镇污水处理研究现状与发展需求

韩镇蓬[1],朱光灿[1,2,*],陆勇泽[1],李淑萍[2],陈 悦[2]
(1. 东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096;2. 西藏民族大学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)

摘 要 近年来,随着青藏高原地区生态文明建设的不断推进,高原城镇污水处理厂迎来了大规模的建设,但由于高原地区低压低氧、低温、强紫外辐射的自然条件以及低碳氮比(C/N)的污水水质,污水处理厂在运行过程中出现了脱氮效果差、污泥膨胀等问题。文章根据高原地区典型污水处理厂的进出水水质,分析了高原污水处理厂存在的问题及其可能的原因,并探究了高原环境和污水水质等对污水处理可能产生的影响,提出高原地区城镇污水处理未来发展的参考性建议。

关键词 青藏高原 污水处理 低压低氧 低温 脱氮 污泥膨胀
中图分类号:TU992 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2022) 11-0076-10
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.011

Research Status and Development Demands of Urban Wastewater Treatment in the Qinghai-Tibet Plateau Region

HAN Zhenpeng[1], **ZHU Guangcan**[1,2,*], **LU Yongze**[1], **LI Shuping**[2], **CHEN Yue**[2]
(*1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;*
2. Key Laboratory of Water Pollution Control and Ecological Restoration of Xizang, National Ethnic Affairs Commission, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China)

Abstract The plateau town wastewater treatment plants (WWTPs) have ushered in a large-scale construction in recent years, with the ongoing promotion of ecological civilization construction in the Qinghai-Tibet Plateau region. However, WWTPs in the plateau region face problems such as poor denitrification and easily activated sludge bulking due to natural conditions such as low atmospheric pressure and low oxygen, low temperature and strong UV radiation, and wastewater quality of low carbon-nitrogen ratio (C/N). Based on the quality of influent and effluent of typical WWTPs in plateau areas, this paper analyzed the problems of plateau WWTPs and their possible causes, and explored the potential effects of plateau environment and wastewater quality on wastewater treatment. This study offers reference suggestions for the plateau´s future development of urban wastewater treatment.

Keywords Qinghai-Tibet Plateau wastewater treatment low atmospheric pressure and low oxygen low temperature denitrification sludge bulking

相较于东部平原地区,我国高原地区城镇化率较低,高原城镇污水处理的研究和建设起步较晚。随着 21 世纪西部大开发战略的持续推进,高原地区的经济和社会快速发展,在城镇化率显著提高的同时,城镇生活污水及其他污水产生量急剧增加。由于高原地区生态环境脆弱,生产生活污水的排放易造成高原地区水环境污染,城镇污水处理对保护高原地区水生态环境具有重要作用。

[收稿日期] 2022-05-18
[基金项目] 国家自然科学基金地区基金:西藏城镇生活污水中汞的转化、迁移及其对功能菌群的胁迫(52160004)
[作者简介] 韩镇蓬(1998—),男,硕士,研究方向为水污染控制,E-mail:1971045432@qq.com。
[通信作者] 朱光灿(1972—),男,教授,研究方向为水环境生态修复,E-mail:gc-zhu@seu.edu.cn。

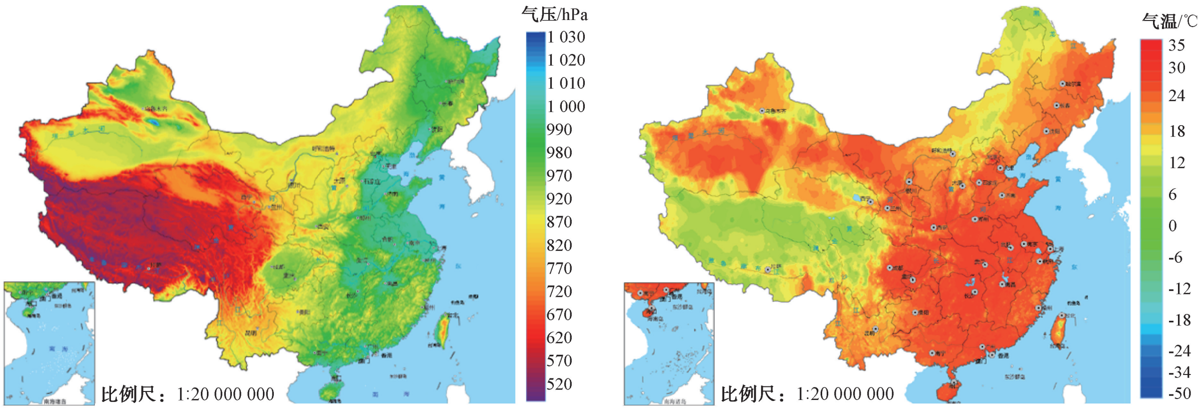
技术和资金的缺乏限制了我国高原地区城镇污水处理设施的建设。直至 2002 年,西宁市投资建设的第一污水处理厂顺利完工,这是青藏高原首座污水处理厂[1];2008 年,中德合作建设的昌都污水处理厂建设完成,是全球首座成功应用生物技术处理城镇生活污水的高原污水处理厂[2];2012 年,青海玉树结古镇污水处理厂竣工,该污水处理厂位于海拔 3 800 m 处,是截至目前全球最高的污水处理厂[3]。在过去的十几年中,西藏地区陆续建设了近 30 座污水处理厂,拟(在)建 50 余座污水处理厂[4-5]。高原地区污水处理厂的设计和建设通常直接借鉴内地经验,但由于高原地区独特的自然环境和社会生活特点,污水处理厂进出水水质往往不能满足设计的要求。同时,与平原地区相比,高海拔污水处理厂存在处理效率低、运行不稳定、能量消耗高等问题[6]。

本文基于高原地区低压低氧、低温、强紫外辐射的自然条件和低碳氮比(C/N)的污水水质,根据高原地区典型污水处理厂进出水水质情况,分析高原污水处理厂存在的问题及其可能的原因。再进一步分析低压低氧引起溶解氧浓度低、曝气强度改变、功能微生物变化和气体生成变化的原因,以及对污水处理产生的影响;分析低温引起的微生物活性差、脱氮效果差和污泥膨胀的原因,以及与低压低氧的协同关系;分析强紫外辐射和污水水质可能对污水处理造成的影响,为高原城镇污水处理发展提出建议。

1 高原地区特点

1.1 自然环境特点

青藏高原平均海拔超过 4 000 m,具有典型的高原气候特征。它的主要特点是:大气中的空气含量少,太阳辐射强烈,年总辐射量为 6 000~8 000 MJ/m^2,紫外线辐射含量是内陆其他地区的 1.5~2.5 倍,属于典型的高紫外线辐射强度地区[7-8];年平均气温低,日温差较大,日均最高气温为 17 ℃,日均最低气温为 3 ℃,相比于同纬度东部平原地区,冬季和夏季平均气温要低 15~20 ℃[9-10];低大气压、低氧分压,例如,拉萨市年平均大气压和氧分压只有海平面的 64%[11]。青藏高原与同纬度东部平原地区地面大气压力和日平均气温的差异如图 1 所示。



(a) 地面气压 (2021年8月1日14:00)　(b) 日平均气温 (2021年8月1日08:00)

注:相关数据来源于国家气象科学数据中心

图 1 全国夏季(2021 年 8 月 1 日)气象图

Fig. 1 Nationwide Weather Map in Summer on 1st August, 2021

1.2 社会生活特点

青藏高原地域广阔,总面积约为 250 万 km^2,约占全国总面积的 26%,但人口数量较少,总人口约为 1 300 万,约占全国总人口的 0.9%,人口地域分布上具有少数地域人口稠密、多数地域人口稀疏的特征[12]。该地区居民以少数民族为主,藏族是最主要的少数民族,此外还有回族、门巴族、珞巴族、羌族等少数民族。青藏高原地区主要产业是农牧业,工业占比较低且集中在清洁能源产业和食品加工业[13],因此,青藏高原地区污水处理厂的污水主要是城镇生活污水,工业废水的量很小。

1.3 污水水质特征

基于调研和文献报道发现,青藏高原地区城镇生活污水营养物浓度整体低于内地,有机物含量较低,属于低 C/N 污水,高原和平原典型污水处理厂进水水质情况如表 1 所示。

表 1　高原和平原典型污水处理厂进水水质

Tab. 1　Influent Quality of Typical WWTPs in Plateau and Plain

污水处理厂	COD_{Cr} 均值/($mg\cdot L^{-1}$)	氨氮均值/($mg\cdot L^{-1}$)	总氮均值/($mg\cdot L^{-1}$)	总磷均值/($mg\cdot L^{-1}$)	C/N	N/P
香格里拉污水处理厂[14]	98.4	12.1	28.2	1.80	3.49	15.67
高原某调研污水处理厂 1(夏季)	91.5	13.7	21.7	4.09	4.22	5.31
高原某调研污水处理厂 2(夏季)	152.0	20.2	25.1	2.21	6.06	11.36
北京市污水处理厂[15](36 座,2012 年)	359.3	38.1	48.8	5.2	7.36	9.38
上海市污水处理厂[16](50 座,2012 年)	300.2	24.0	35.1	4.9	8.55	7.16
广东省污水处理厂[17](356 座,2015 年—2017 年)	159.0	16.0	23.0	2.9	6.91	7.93

2　高原污水处理存在的问题

西藏地区目前已运行 18 座污水处理厂,试运行 14 座,在建 56 座[4-5],主要采用 AAO 工艺、氧化沟工艺、序批式活性污泥法(SBR)工艺以及上述工艺的改良型。对部分高原污水处理厂进行调研,调研污水处理厂位置如图 2 所示,污水处理厂 A、B、C 的海拔高度分别为 3 640、3 860、3 560 m,服务人口分别约为 5.5 万、10.2 万、8.6 万人,3 座污水处理厂自然环境差异不大。调研污水处理厂进出水水质情况如表 2 所示。

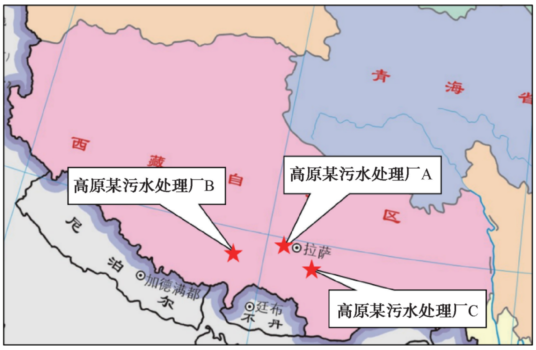


图 2　调研污水处理厂位置示意图

Fig. 2　Schematic Diagram of Locations of the Surveyed WWTPs

表 2　西藏地区典型污水处理厂进出水水质

Tab. 2　Influent and Effluent Quality of Typical WWTPs in Tibet Region

污水处理厂	工艺	实际处理规模/($m^3\cdot d^{-1}$)	污水性质	进水水质					出水水质			
				COD_{Cr}/($mg\cdot L^{-1}$)	氨氮/($mg\cdot L^{-1}$)	总氮/($mg\cdot L^{-1}$)	总磷/($mg\cdot L^{-1}$)	水温/℃	COD_{Cr}/($mg\cdot L^{-1}$)	氨氮/($mg\cdot L^{-1}$)	总氮/($mg\cdot L^{-1}$)	总磷/($mg\cdot L^{-1}$)
A 厂一期[a]	改良型氧化沟	1.5 万	生活污水	192	23.8	28.7	2.95	10.3	38.4	13.1	18.6	0.52
A 厂一期[b]	改良型氧化沟	1.5 万	生活污水	140	18.6	21.2	2.09	15.7	28.2	6.4	9.7	0.42
B 厂[b]	改良型 AAO	3.0 万	生活污水	118.4	17.5	20.3	1.59	14.2	22.7	8.4	12.5	0.39
C 厂[b]	AAO	2.5 万	生活污水	99	15.1	21.5	1.79	15.3	19.4	6.7	11.6	0.35

注:[a] 表示相关数据为冬季调研数据;[b] 表示相关数据为夏季调研数据

基于调研,从污水处理厂进出水水质情况可知,高原污水处理厂出水水质不达标的问题是由氨氮不达标引起的,其可能存在的原因有以下几个方面。

(1)污水水温较低

高原地区污水处理厂夏季进水水温在 15 ℃左右,冬季水温进一步降低,仅有 10 ℃左右,低温导致硝化菌的活性降低,硝化反应速率降低,氨氮的去除率也因此降低[18]。此外,在冬季温度较低情况下,生化池极易发生污泥膨胀,也可能会对氨氮的去除产生不利影响。

(2)曝气强度不足

氨氮降解过程发生在好氧池中,好氧池中需要维持一定的溶解氧浓度才能有效地降解氨氮,高原地区氧分压较低,不利于空气中的氧转移到污水中,因此,可能存在曝气强度不足的问题,导致硝化过程受阻[19]。

(3)污泥生物量不足

高原污水处理厂由于水温较低、进水浓度偏低,生化池中的微生物量增长缓慢,部分生化池出现污泥流失的问题,导致反应器中活性污泥量不能满足

工艺生化反应的需求。同时,部分污水处理厂为了维持污泥量,长时间不排泥,导致污泥老化上浮,沉降性能变差,也影响了污水的处理效果。

(4)工艺参数调控不合理

高原地区污水处理尚处于起步阶段,污水处理厂往往借鉴内地的工艺参数,但高原地区整体情况与内地并不一样,再加上水处理专业技术人员的缺乏以及污水处理工艺设备管理经验的不足,很多污水处理厂对工艺流程调控优化没有比较清晰的概念,也很难发现潜在的问题,很多控制参数都是按照原有设定,并没有根据实际情况调整。

此外,高原污水处理厂还面临进水浓度低的问题,这主要是以下几个原因造成的。

(1)基础设施建设不完善

高原地区的污水收集系统未实行雨污分流,在每年5月—8月的雨季,大量的雨水混入到污水管网中,稀释了污水处理厂的进水浓度。此外,污水收集系统的建设比较薄弱,污水收集不全,地下水渗入到污水管网中或者污水从管网中渗出。

(2)制度管理不完善

部分县城、乡镇对于自来水管理制度不严格,大量的自来水进入到污水中,稀释了污水,影响了处理设施运行效果,并且加大了污水处理厂的处理负荷。

3 高原环境对污水处理的影响

3.1 低压低氧的影响

3.1.1 低溶解氧浓度

高原地区海拔较高,大气压和氧分压显著低于平原地区,表3是西藏主要城市海拔、气压和氧分压的具体数据。

表3 西藏7个地级市的海拔、气压和氧分压

Tab. 3 Altitude, Air Pressure and Partial Pressure of Oxygen in Seven Cities in Tibet

项目	拉萨	昌都	日喀则	林芝	山南	那曲	阿里
海拔/m	3 658.0	3 306.0	3 836.0	3 000.0	3 551.7	4 507.0	4 278.0
当地分压/kPa	65.23	68.14	63.83	71.54	66.62	59.37	60.98
氧分压/kPa	13.67	14.28	13.37	14.99	13.96	12.44	12.78

注:相关数据来源于国家气象科学数据中心

根据双膜理论,氧分子通过气、液界面向液相传递。在此过程中,由于高原地区氧分压较低,污水中溶解氧饱和度随之降低,空气鼓入污水后氧的传质速率低,导致鼓入的空气量只有达到平原地区的3倍以上才可满足微生物生存与分解有机物的需氧量[20],而一般要求的供氧系数仅为1.33~1.61[3]。同时,氧分压降低不利于污水中溶解氧的保持和提高,如果保持较为合适的溶解氧水平,就需要增加曝气强度以及维持更长时间的曝气,这势必导致污水处理的能耗急剧增加。

如果曝气强度达不到需求,污水处理将面临低溶解氧的情况。在低溶解氧环境中,丝状菌对氧气的需求较低,且其比表面积较大,与菌胶团细菌竞争时具有明显的优势。所以,在较低的溶解氧浓度下,丝状菌仍然能迅速增殖,从而引发丝状菌污泥膨胀[21],造成泥水分离效果变差,污水处理效率降低。但也有相关研究[22]表明,如果生化池内不发生严重的污泥膨胀,只是低溶解氧浓度下的污泥微膨胀[污泥体积指数(SVI)为150~250 mL/g],将有利于氮磷去除。如果控制污泥处于微膨胀状态,使丝状菌增殖程度不影响二沉池的泥水分离效果,那么丝状菌延长的菌丝更利于摄取低浓度底物,并且可以在二沉池中形成密实的网状污泥,将细小的悬浮物捕获。同时,控制污泥微膨胀需要在低溶解氧环境,这将节约供气量,具有节省能耗的作用[23]。然而高原地区常年面临低温问题,低温和低溶解氧并存的情况下,难以控制污泥处于微膨胀状态,往往会发生严重的污泥膨胀问题,对污水处理造成严重的不良影响[2]。

3.1.2 引起曝气强度改变的影响

在高原地区低压低氧的环境下,污水处理厂往往需要通过增加曝气强度来维持好氧池中的溶解氧含量。但曝气过程不仅为活性污泥提供必要的溶解氧,产生的水力剪切作用也会对污泥理化性质和生物特性产生直接影响,进而影响污水系统处理能力。研究[24-25]表明,曝气强度改变会对污泥理化特性和结构、胞外聚合物、微生物种群结构等方面产生较大

影响。Feng 等[26]研究发现,曝气强度存在一个临界强度:当曝气强度小于临界值时,污泥聚集过程占主导地位,因为污泥细胞必须相互碰撞和黏附以形成聚集体;当曝气强度大于临界值时,污泥破碎过程占主导地位,因为较高的剪切力会破坏污泥聚集体。其中,松散附着胞外分泌物和紧密黏附胞外分泌物中腐植酸和蛋白质的含量也呈现出随着曝气强度的增加先升高后降低的规律,但没有观察到多糖的明显趋势。但李军等[27]研究发现,活性污泥中松散附着胞外分泌物含量随着曝气强度的增加逐渐升高,其中多糖含量及比例均随曝气强度的上升而增大,蛋白质和腐植酸含量受曝气强度影响不大,导致活性污泥沉降性能变差。Xin 等[28]通过改变曝气强度研究对微生物产生的影响,发现当曝气强度达到 0.4 MPa 时,群落生物多样性峰值出现,群落稳定性最好。较高的曝气压力(约为 0.6 MPa)会对群落多样性产生负面影响,并不可避免地损害群落稳定性。因此,高原地区增加曝气强度来维持活性污泥系统合适的溶解氧水平,可能有利于系统处理能力的提升,但也可能会对污水处理效果产生不利影响,需要进一步开展曝气强度对高原地区污水处理厂微生物群结构、污泥絮体和胞外分泌物等方面影响的研究。

3.1.3 对微生物的影响

研究[29]发现,大气压力会对污水处理厂微生物群落结构产生影响。Niu 等[30]分析了海拔对污水处理厂脱氮细菌群落的影响,发现在海拔 1 500 m 以上时,脱氮微生物的丰度随着海拔的升高而显著下降,不同污水处理厂之间的海拔高度差越大,脱氮微生物群落结构差异越大。Fang 等[31]通过对比高原地区和低海拔地区污水处理厂的脱氮微生物群落后发现,高原地区污水处理厂中氨氧化菌(ammonia oxidation bacteria, AOB)和亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidation bacteria,NOB)的相对丰度显著低于低海拔地区的相对丰度,这是高原污水处理厂的硝化效率低于低海拔地区的一个重要因素,同时发现高原污水处理厂中聚磷菌(phosphorus accumulating organisms, PAOs)和聚糖菌(glycogen accumulating organisms, GAOs)的相对丰度高于平原地区,但高原污水处理厂中 PAOs 与 GAOs 的丰度比低于平原地区,表明高海拔条件可能有利于 GAOs 的生长。陈悦[32]通过利用稳定运行 90 d 的同步硝化反硝化除磷系统污泥作为种泥,不同的大气压力(70、80、100 kPa)条件下进行了一组污泥活性测试,结果表明在压力降低时,AOB 的活性受到抑制,而 NOB 的活性急剧增加,促进了以亚硝酸盐为电子受体的反硝化细菌活性,而以硝酸盐为电子受体的反硝化细菌活性受到了抑制,同时 PAOs 活性增强。由于高原地区环境复杂,低温等其他环境因素也会对微生物群落结构造成影响,大气压力对微生物的影响仍需进一步研究。

3.1.4 对气体生成的影响

活性污泥微生物会通过合成代谢和分解代谢两条路径从污水中去除有机污染物,最终生成 CO_2 气体[33]。异养反硝化菌通过合成代谢将大部分有机污染物生成为细胞物质,再经过内源呼吸消耗掉这些细胞物质并产生 CO_2;此外,小部分有机污染物在曝气过程中通过分解代谢去除并产生 CO_2。无论是硝化反硝化脱氮还是厌氧氨氧化脱氮,污水中的氮素大部分会被转化为 N_2 从污水中去除。高原地区大气压力低,低压导致 CO_2 以及 N_2 分压降低,造成 CO_2 和 N_2 的溶解度下降。一方面,液气传质的限制将形成潜在的气体产物过饱和问题,抑制反应的正向进行[34];另一方面,低压有利于 CO_2 和 N_2 从污水中排放到空气中,从而可能有利于活性污泥微生物对有机物的降解以及氮素的去除。因此,低压对气体生成的影响取决于哪一方面起主导作用。张维嘉[35]探究低压对厌氧氨氧化的影响时发现,100 kPa 时 N_2 最终产生量为 0.77 μmol,75 kPa 时 N_2 最终产生量增加到 1.14 μmol,低压环境更有利于氮素的去除。同样,硝化菌在利用无机碳源的过程中,低压会使空气中的 CO_2 溶解到污水中的过程受到限制,污水中的无机碳源浓度会下降,影响硝化菌对无机碳源的摄取,而且 CO_2 溶解度的降低也将引起反应池的 pH 上升,影响微生物的正常代谢[36]。

3.2 低温的影响

3.2.1 微生物活性差

目前我国污水处理主要采用生物处理工艺,微生物活性的强弱对污水处理的效果有很大的影响。温度是影响微生物生长的重要因素,对微生物的活性有着重要的影响,在一定的温度范围内,微生物的活性与温度成正相关,当温度在 15 ℃以下,微生物的活性将迅速降低,到 4 ℃左右时,绝大部分微生物进入了休眠状态。活性污泥在降解污染物的过程

中,微生物胞内酶和胞外酶的催化作用起着主导作用[37]。脱氢酶是一种全程参与有机物分解的胞外酶,是微生物降解有机污染物所必需的酶[38],因此,可以用来反映微生物活性。研究[39]表明,随着温度的下降,脱氢酶的活性下降,会显著影响污染物的处理效能。高原地区由于海拔较高,全年气温偏低,污水处理厂进水水温偏低,相较于东部平原地区,高原污水处理厂普遍存在微生物活性衰弱的问题[40]。

3.2.2 脱氮效果差

大量研究结果表明,硝化反应的最适温度为25~30 ℃,反硝化反应的适宜温度是20~40 ℃。相比于反硝化菌,硝化菌属于自养菌,生长缓慢,世代周期较长[41],因此,在低温情况下,硝化细菌很难积累到一定的数量,从而对硝化反应和脱氮过程产生更为不利的影响。尚越飞等[42]研究发现,低温降低了硝化种属的数量,并对硝化速率形成了影响,但对反硝化种属丰度无显著影响。高原地区全年气温较低,污水处理厂夏季进水水温一般低于18 ℃ ,冬季进水水温低于10 ℃[43-44]。硝化菌的活性和增殖速率衰退,同时硝化菌也存在着数量不足的问题,硝化反应过程受到极大抑制,导致出水水质变差。此外,反硝化菌的活性降低,硝酸盐还原速率降低,硝酸盐的积累也间接对硝化反应造成了一定的抑制,最终共同导致污水处理厂的脱氮效果较差。

3.2.3 污泥膨胀

污泥膨胀是高原地区污水处理厂面临的最大问题,研究[45]发现,在水温低于12 ℃时,污水处理厂容易发生污泥膨胀,高原地区污水处理厂冬季进水水温低于12 ℃,极易发生污泥膨胀。污泥膨胀发生时,会出现二沉池泥水分离效果变差、活性污泥流失、出水水质不佳等问题[46]。污泥膨胀分为丝状菌膨胀和非丝状菌膨胀,丝状菌膨胀是由丝状菌过度繁殖所引发,非丝状菌膨胀是由菌胶团中大量积累的黏性多糖类物质所致,其中由丝状菌引起的膨胀可能占到90%以上[47]。低温既可能引发丝状菌膨胀,也可能引发非丝状菌膨胀。研究[48]发现,常见的丝状菌主要有 M. *parvicella*(微丝菌)、*Nostocoida limicola* 型菌、Eikelboom 021N 型菌、Type 1863 型菌、*Nocardia forms*(诺卡氏菌)、*Thiothrix* spp.(发硫菌属)和 *Haliscomenobacter hydrossis*(软发菌)等。陆鑫等[49]采集低温状态下的膨胀污泥进行测序试验,结果显示,发生过度生长的丝状菌是 *Haliscomenobacter* 和 *Trichococcus*,且 *Haliscomenobacter hydrossis* 在微生物群落结构中占据竞争优势。但高春娣等[50]研究发现,低温下污泥膨胀的发生会引起丝状菌群丰度的升高,其中以 *Thiothrix* 为代表的3种菌属的丰度增加,仅 *Haliscomenobacter hydrossis* 的丰度减少,这可能是有其他因素对其丰度产生了影响。此外,在污水水温较低且污泥负荷较高的情况下,污泥可能会发生非丝状菌膨胀,这是由于在低温条件下,微生物不能及时代谢吸附的有机物,大量高黏性的多糖物质累积在胞外,使得污泥沉降性能变差[51]。污泥膨胀发生原因复杂,通常存在多种诱发因素,并且在不同污水处理厂,甚至同一污水处理厂不同时期,也存在着不同的优势丝状菌,因此,目前尚无与高原污水处理厂污泥膨胀特别相关的丝状菌,其有待进一步研究。

3.2.4 与低压低氧的协同影响

高原地区最主要的两个环境因素是低压低氧和低温,两者共同导致了高原地区污水处理效果不理想。低温也会影响氧传质过程:一方面,水温降低会导致水的黏滞性增大,扩散系数降低,液膜厚度增大,氧总转移系数降低,不利于氧的转移;另一方面,水温越低溶解氧饱和度越大,液相中氧的浓度梯度增大,有利于氧的转移[52]。总体来说,低温有利于氧的转移,但相比于低压低氧对氧转移产生的不利影响,低温的影响往往可以忽略不计。低温引起的污泥脱硝效率低和污泥膨胀等问题,可以通过适当提高污水水力停留时间、增大污泥回流比以及提高污泥泥龄来应对[53]。但随着污泥泥龄的增加,污泥浓度也会增加,会导致氧传质速率下降[54],这将更不利于曝气过程,尤其是在低压低氧的高原环境下。在高原地区,维持合适的溶解氧水平需要增加曝气量,而曝气量的增加会使得低温空气带走污水中更多的热量,导致水温下降[44],所以在实际运行中,应适当减少曝气,减少不必要的热量损失。同时,适度提高曝气量有利于抑制低温污泥膨胀的发生,并且不会对污泥絮体结构造成破坏。

3.3 水质特征的影响

高原地区污水处理厂进水 C/N 较低,根据传统生物脱氮理论可知,充足的有机碳源是保证污水生物脱氮除磷的必备条件。反硝化脱氮和 PAOs 厌氧释磷都需要大量的有机碳源,但低 C/N 污水中有机

碳源含量较低,很难满足它们的碳源需求,导致脱氮除磷效果不佳[55]。Xu 等[56]研究发现,在高原地区 C/N 为 7 时,活性污泥微生物群落结构的相对丰度物种均匀度最大,污染物去除效果也最好,但高原地区 C/N 很难达到这一要求。针对碳源不足的问题,污水处理厂通常采取投加优质有机碳源的处理对策,如乙酸钠、葡萄糖和甲醇等,但是这会导致额外的运行成本和潜在的残留物,从而限制污水处理厂的可持续运行[57]。高原地区污水处理厂低温和低 C/N 的进水条件,对生物处理系统的脱氮效率提出了更为严峻的挑战。韦琦等[58]利用 AAO 中试装置探究了低温、低 C/N 进水条件对生物脱氮效率的影响,结果表明,低温、低 C/N 进水条件严重影响硝化和反硝化反应的速率,且总氮去除效果较差,主要是由于反硝化过程受到限制。张勇等[59]在间歇进水周期循环式活性污泥技术(CAST)工艺中通过优化填料加入量及位置、控制污泥龄、增加负荷等策略实现了低温、低 C/N 市政污水的高效处理,出水 COD_{Cr} 及氮、磷等指标可稳定优于一级 A 标准。Li 等[60]通过全流程脱氮除磷工艺在低温[(10±2)℃]、低 C/N(3.6)条件下实现了城市生活污水中养分的有效去除,且高污泥浓度控制条件和反硝化 PAOs 在处理过程中发挥重要作用。研究[61]发现,溶解氧浓度是处理低温、低 C/N 污水重要的控制条件,部分研究表明在低溶解氧下处理低温、低 C/N 污水是可行的,甚至更有利于脱氮除磷。因此,在高原地区低压低氧、低温的环境下,低 C/N 污水通过运行优化以及工艺改进,可以实现氮、磷的有效去除,但具体实践操作有待研究。

3.4 紫外辐射的影响

高原地区海拔高、空气稀薄,到达高原表面的太阳紫外线辐射衰减较弱,因此,高原区域紫外线辐射较高,较高的紫外线强度可能会对微生物的核酸产生破坏作用。方德新等[62]研究发现,在强紫外线条件选择下,部分微生物受到抑制甚至被淘汰,从而导致高原污水处理系统内微生物多样性下降,通过降低高原高寒地区露天污水处理系统所受的紫外辐照强度,有望改善微生物结构,提升污水处理效能。但也有研究发现紫外线可以增强活性污泥法处理效果。王未[63]研究发现微生物对不同辐射强度的紫外线辐射的抵抗力也不同,一定强度的紫外线照射将有利于系统中污染物的去除,但超过耐受辐射强度后,污染物去除效果下降。黄德才[64]研究高原地区紫外辐射对菌剂的影响时发现,室外菌种来源的菌剂比室内来源的菌剂更耐紫外辐射,比未经紫外辐射处理的对照组氨氮、总氮去除率更高,说明紫外辐射可能会提升室外菌种来源的菌剂生物活性。目前,紫外辐射对有机污染物的降解作用研究较多,但对城镇污水处理的影响研究较少。因此,在高原地区特殊的自然环境下,紫外辐射对高原地区污水处理产生的影响尚待进一步研究。

3.5 其他影响

(1)高原地区日温差较大导致水温波动明显,对污水处理系统造成了不小的冲击。王建芳等[65]研究发现,在昼夜温差达到 7~8 ℃时,COD_{Cr} 和氨氮的去除效率显著下降,并需要花费较长的时间才能恢复到初始运行状态。Zong 等[66]研究了在高原条件下,温度瞬时变化对污染物去除的影响,发现总磷、总氮、氨氮去除率变化明显,COD_{Cr} 去除率变化相对稳定。因此,在低温和水温波动共同存在的情况下,高原污水处理厂可能会出现氨氮、总氮等部分指标超标的问题。

(2)高原污水处理厂进水浓度低且水质波动大。进水浓度低会导致微生物生长繁殖所需的营养源不足,活性污泥增殖速度慢,污泥的活性和沉降性差,对污染物的降解效率低,无法达到较高的脱氮除磷效率[67-68],再加上进水水质波动大,对活性污泥系统的稳定性造成了不小的威胁。

4 建议

针对高原地区污水处理目前面临的问题,结合高原地区低压低氧、低温、强紫外辐射的自然环境特点以及低有机物浓度、低 C/N 的污水水质,对高原城镇污水处理提出以下建议。

(1)污水收集系统方面。高原地区需要加强污水收集管网的建设以及完善污水收集管理制度,提高污水的收集率,防止地下水渗入污水管道,避免非污水流入到污水管网中。同时高原地区需要开展雨污分流工程建设,避免雨水流入到污水管网中。

(2)污水处理设施建设方面。高原地区污水处理厂曝气池池体高度可以适当比平原地区高 1~2 m,在水力条件允许的情况下,污水处理厂各构筑物应尽可能设置在地下或室内,地面以上池体外壁

需要贴上保温材料,各个处理单元建设顶棚,以达到保温的作用。

(3)处理工艺选择方面。建议高原地区的污水工艺首选 CAST 工艺,相较于其他污水生物处理工艺,CAST 工艺集曝气、沉淀等功能于一体,运行灵活,具有较强的抗冲击能力,能有效应对高原低压低氧、低温的环境条件,处理低负荷(低 C/N)进水也更具优势。而且 CAST 工艺运行稳定,基质去除率高,脱氮除磷效果好,能够保证稳定达标的出水水质。同时,CAST 工艺是防止污泥膨胀方面公认最好的工艺,沉淀效果好,可有效应对污泥上浮、污泥流失等问题。此外,CAST 工艺控制、管理、运行的自动化、集成化、智能化程度高,可有效降低管理和运维操作难度。

(4)工艺运行优化方面。首先,高原污水处理厂应基于本厂的污水处理工艺,借鉴已有的高原污水处理经验,结合自己的实际情况,针对性地对工艺运行参数优化,发挥出工艺的优点,如降低生化池的有机负荷、调整污泥回流量、增加污泥龄等,使得高原污水处理厂在低温情况下能够较好地运行。其次,可在高原地区驯化培养活性污泥,从中筛选出适应高原环境的高效耐冷脱氮菌,通过一定的方式制备成生物菌剂添加到生物处理单元,提升生化池的处理效率。

(5)设备选型方面。高原地区的工艺设备应满足工艺和处理能力的要求,宜选用性能稳定、能效高、维修简便、使用寿命长且投资低、占地少、卫生条件好的系列化、标准化成熟的设备。其中,曝气机宜选用罗茨风机,曝气器宜选择动力效率和氧利用效率高的固定式平板型微孔空气器扩散器和膜片式微孔空气扩散器,脱水机宜选用叠螺式脱水机,电器设备需要选择高原型号,部分工艺设备还需要有保温装置,避免在低温情况下设备失灵。此外,高原地区设备存在功率衰减的问题,需要增加设备的功率富余量。

(6)运行管理方面。高原污水处理厂需要制定严格的运行管理规章制度,同时需要加强技术人员和管理人员的培养工作,提升厂内人员运行管理的能力。

参考文献

[1] 宋维营. 西宁市污水处理厂污水再生回用工程可行性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 西藏自治区生态环境厅. 2019 年西藏自治区生态环境状况公报[N]. 西藏日报(汉), 2020-06-05(2).

[5] 西藏自治区生态环境厅. 2020 年西藏自治区生态环境状况公报[N]. 西藏日报(汉), 2021-06-05(3).

[6] 杜甫义. 高寒缺氧地区温室型多介质人工湿地污水处理技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.

[7] 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.

[8] 晋亚铭. 西藏地空太阳辐射观测研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2019.

[9] 陈相宇, 郝凯越, 苏东, 等. A^2/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.

[10] 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 1961—2010 年青藏高原气候变化特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 911-919.

[11] 史继清, 甘臣龙, 边多, 等. 1981—2015 年西藏全区气候季节的变化[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1110-1119.

[12] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 255-267.

[13] 张琪. 青藏高原东麓产业结构优化研究[D]. 成都: 西南民族大学, 2021.

[14] 郭劲松, 潘颖雅, 王春燕, 等. 高原地区 CASS 工艺处理城镇污水的生产性调试[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 112-116.

[15] 孙艳, 张逢, 胡洪营, 等. 北京市污水处理厂进水水质特征的统计学分析[J]. 给水排水, 2014, 50(s1): 177-181.

[16] 孙艳, 张逢, 胡洪营, 等. 上海市污水处理厂进水水质特征的统计学分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5167-5173.

[17] 朱铁才, 刘舸, 马少杰, 等. 广东省城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 67-69.

[18] 茹春, 张爽, 路晖, 等. 低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 1-6.

[19] 李磊, 王社平. 低温条件下微孔曝气氧化沟中试装置的调试及启动[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 7-11.

[20] 王三反, 唐玉霖, 洪雷, 等. 青藏铁路中小站区生态大棚污水处理技术[J]. 中国铁道科学, 2007(4): 125-129.

[21] 陈浩林, 彭轶, 安东, 等. 分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀的诊断与调控[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 92-98.

[22] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J]. 环境科学, 2008(12): 3342-3347.

[23] 陈建, 周谐, 李萍, 等. 污泥微膨胀技术在低负荷生活污水处理中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2): 149-154.

[24] 闫玉涛, 周凌, 冯骞, 等. 紊动对活性污泥特性及微生物代

谢产物的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(5): 1-7.
[25] 于阳阳, 于少亭, 张淑君, 等. 不同曝气强度下 SBR 污染物去除性能研究[J]. 环境科技, 2017, 30(1): 26-30.
[26] FENG Q, GE R, SUN Y Q, et al. Revealing hydrodynamic effects on flocculation performance and surface properties of sludge by comparing aeration and stirring systems via computational fluid dynamics aided calculation [J]. Water Research, 2020, 172: 115500. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115500.
[27] 李军, 商卫纯, 蔡娟, 等. 不同曝气强度下活性污泥中松散束缚型胞外聚合物组分含量及其对污泥沉降性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 6-10.
[28] XIN X, HE J, WANG Y, et al. Role of aeration intensity on performance and microbial community profiles in a sequencing batch reaction kettle (SBRK) for wastewater nutrients rapid removal[J]. Bioresource Technology, 2016, 201: 140-147. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.11.053.
[29] ZHAO D, HUANG R, ZENG J, et al. Pyrosequencing analysis of bacterial community and assembly in activated sludge samples from different geographic regions in China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(21): 9119-9128. DOI: 10.1007/s00253-014-5920-3.
[30] NIU L, LI Y, WANG P, et al. Altitude-scale variation in nitrogen-removal bacterial communities from municipal wastewater treatment plants distributed along a 3 600-m altitudinal gradient in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 559: 38-44. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.175.
[31] FANG D, ZHAO G, XU X, 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.
[32] 陈悦. 高海拔地区同步硝化反硝化—反硝化除磷系统工艺优化及氮磷去除特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
[33] 魏源送, 林佳琪, 徐宇峰, 等. 基于微生物新陈代谢过程的污泥原位减量技术进展[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2291-2309.
[34] YEO H, AN J, REID R, et al. Contribution of liquid/gas mass-transfer limitations to dissolved methane oversaturation in anaerobic treatment of dilute wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(17): 10366-10372. DOI: 10.1021/acs.est.5b02560.
[35] 张维嘉. 生活污水碳磷捕获预处理及低气压对部分亚硝化耦合厌氧氨氧化过程的影响机制研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
[36] ROGER M, BROWN F, GABRIELLI W, et al. Efficient hydrogen-dependent carbon dioxide reduction by *Escherichia coli* [J]. Current Biology, 2018, 28(1): 140-145. DOI: 10.1016/j.cub.2017.11.050.
[37] 曹锦涛, 张琳, 宫春杰. 低温菌进行污水处理研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(4): 89-91.
[38] 刘锁, 牛川, 李贺. 低温下活性污泥处理废水技术的研究进展[J]. 环境科技, 2019, 32(1): 54-58.
[39] 苗月. 低温污水处理用复合生物反应器中生物膜的特性[J]. 化学工程与装备, 2020(9): 269-270.
[40] 吴永刚. 高原低温型城镇污水处理设计与体会. 水处理技术[J]. 2020, 46(12): 134-137.
[41] 王阿华, 杨小丽, 叶峰. 南方地区污水处理厂低温生物脱氮对策研究[J]. 给水排水, 2009, 45(10): 28-33.
[42] 尚越飞, 王申, 宗倪, 等. 污水生物处理工艺低温下微生物种群结构[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4636-4643.
[43] 薛正. 拉萨火车站污水处理系统设计[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2014, 4(5): 214-216.
[44] 翟俊, 陈明燕, 肖海文, 等. 太阳能预热/生物接触氧化/人工湿地处理西藏高原污水[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 42-45.
[45] 刘旭东, 张跃瀚, 王海曼, 等. 低温下微膨胀活性污泥法处理生活污水的研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 955-960.
[46] 王杰, 彭永臻, 杨雄, 等. 温度对活性污泥沉降性能与微生物种群结构的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 109-116.
[47] 王硕, 李长波, 赵国峥, 等. 活性污泥丝状菌膨胀生物群落及调控研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 535-542.
[48] 李倩. 城镇污水脱氮除磷系统污泥膨胀生物学成因及控制措施研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
[49] 陆鑫, 刘波, 谭云飞, 等. 低温条件下城市污水厂污泥膨胀的生物学成因[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3925-3930.
[50] 高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3373-3383.
[51] 焦二龙. 污水生物脱氮过程丝状菌污泥膨胀与控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
[52] 张自杰. 排水工程: 下册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
[53] 蒙小俊, 王秋利, 龚晓松. 城镇污水生物脱氮除磷工艺存在问题的调控措施[J]. 工业水处理, 2020, 40(8): 17-22.
[54] 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.
[55] 赵敏娟, 李雨季, 王佳彤, 等. 好氧颗粒污泥处理低 C/N 生活污水的新策略探究[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 112-115.
[56] XU J, WANG P F, LI Y, et al. Shifts in the microbial community of activated sludge with different COD/N ratios or dissolved oxygen levels in Tibet, China[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2284. DOI: 10.3390/su11082284.

(下转第 184 页)

参考文献

[1] 沈泽华. 智能水厂投矾加氯控制系统的研究设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

[2] 欧瑜婷. 厦门水务集团供水水质风险管理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.

[3] 李洪兴, 姚建义, 付彦分, 等. 农村供水系统中应用危害分析和关键控制点原理的实例研究[J]. 卫生研究, 2005(6): 110-112.

[4] 张健. HACCP 体系在水厂生产过程控制中的应用[J]. 供水技术, 2018, 12(2): 60-64.

[5] 张金松, 徐荣, 刘波, 等. 推进饮用水 HACCP 体系建设实现水质全过程管控的探索与实践[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 1-8.

[6] 黄小丽. 给水生产过程单元细节修正与优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[7] 丁文东, 何英华, 宋振洪. 磁力离心泵在水厂加药系统技改中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 139-142.

[8] 狄春华, 施学峰. 高盐基度聚氯化铝对控制饮用水中铝的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 69-74,107.

[9] 杨晓凡, 孙运运, 程澍, 等. 不同水温条件下聚合氯化铝优化试验研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 86-91.

[10] 邵志昌, 纪宏卓, 翁巧龙, 等. 净水厂次氯酸钠投加系统技术改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24): 97-100.

【编辑推荐】基于 HACCP 的风险管理体系正逐渐得到水务行业的认可并被使用,此前基于供水系统的风险点研究的工作较多,但在实际具体水厂生产运行中的应用还需要更多深入的研究和探索。文章以水厂投加系统为具体应用场景,应用 HACCP 理念开展风险管理体系建设,详细描述了 7 个关键控制点的研判和确认过程,具有操作性,对于正尝试开展 HACCP 体系建设的同行水厂具有实战的指导价值。

(上接第 84 页)

[57] ZHANG T, WANG B, LI X, et al. Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 330-337. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.188.

[58] 韦琦, 罗方周, 徐相龙, 等. A^2/O 工艺处理低温低碳氮比生活污水的脱氮效率及反应动力学[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1367-1376.

[59] 张勇, 韩京龙, 冉治霖. CAST 工艺处理低温低碳氮比市政污水中试研究[J]. 环境工程, 2017, 35(9):44-47.

[60] LI D, LI W, ZHANG K, et al. Nutrient removal by full-scale Bi-Bio-Selector for nitrogen and phosphorus removal process treating urban domestic sewage at low C/N ratio and low temperature conditions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 140: 199-210. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.011.

[61] ZHANG W, PENG Y, ZHANG L, et al. Simultaneous partial nitritation and denitritation coupled with polished anammox for advanced nitrogen removal from low C/N domestic wastewater at low dissolved oxygen conditions[J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123045. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123045.

[62] 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.

[63] 王未. 紫外线辐射对活性污泥脱氮除磷效果的影响[J]. 湖北造纸, 2012(1): 19-24.

[64] 黄德才. 适用于高原地区的不同来源脱氮复合菌剂的构建及环境适应性研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.

[65] 王建芳, 金文标, 赵庆良, 等. 好氧-沉淀-厌氧工艺处理效能及抗冲击负荷研究[J]. 环境科学, 2007(11): 2488-2493.

[66] ZONG Y, LI Y, HAO K, et al. Influence of transient change of water temperature on pilot-scale anaerobic-anoxic-oxic process under plateau environmental factors[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(5): 12191-12202. DOI: 10.15666/aeer/1705_1219112202.

[67] 周杨. 低进水浓度下微曝氧化沟的运行与管理[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[68] 罗国强, 侯巧玲, 尉国红, 等. 低浓度生活污水处理工艺调试运行[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 4-5.