

浙江省某大型水质污水厂扩建项目设计实例

龚天翼, 相 宁, 张晟宁

(宁波市水务环境集团股份有限公司工程建设管理分公司, 浙江 宁波 315046)

摘 要: 针对浙江省某大型水质净化厂扩建项目面临的更加严格的出水水质要求, 提出一套稳定达标且低碳运行的工艺方案, 为高标准排放污水厂扩建及提标改造工程提供参考。在复核设计进出水水质和受纳水体容量约束的基础上, 构建了“粗格栅进水泵房+细格栅曝气沉砂池+改良型巴顿甫生物池+高效沉淀池+硫自养脱氮滤池+次氯酸钠消毒”的工艺路线, 并通过 200 m³/d 硫自养脱氮中试装置验证低温及峰值流量工况下的脱氮能力。中试结果表明: 进水水温 13 ℃以上、空床接触时间(EBCT)为 26.17~31.40 min 时, 硫自养脱氮滤池可保持稳定脱氮效果; 在峰值流量工况下, EBCT 为 20.93 min 仍可满足 6 mg/L 的脱氮需求。该工艺在低碳氮比条件下可有效减少对外加有机碳源的依赖, 并通过精准曝气、反洗控制及碱度管理, 实现总氮的稳定达标与低碳运行。

关键词: 污水处理厂; 深度脱氮; 硫自养反硝化; 中试验证

中图分类号: TU992.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0336-05

Design Example of an Expansion Project for a Large Water Purification Plant in Zhejiang Province

GONG Tianyi, XIANG Ning, ZHANG Shengning

(Engineering Construction Management Branch, Ningbo Water Environment Group Co., Ltd., Ningbo 315199, China)

Abstract: In view of the more stringent effluent quality requirements for the expansion project of a large-scale water quality purification plant in Zhejiang Province, a set of process schemes that are stable, compliant and operate in a low-carbon manner is proposed, providing a reference for the expansion and upgrading project of high-standard discharge wastewater treatment plant. Based on an recheck of the designed influent and effluent qualities and the capacity constraint of the receiving water body, a process route of “coarse screen and influent pump house + fine screen and aerated grit chamber + modified Bardenpho bioreactor + high-efficiency sedimentation tank + sulfur autotrophic denitrification filter + sodium hypochlorite disinfection” is built. And the denitrification capacity under low-temperature and peak flow conditions is verified through a 200 m³/d sulfur autotrophic denitrification pilot plant. The pilot-scale results show that when the influent temperature is above 13 ℃ and the empty bed contact time (EBCT) is 26.17~31.40 min, the sulfur autotrophic denitrification filter can maintain a stable nitrogen removal effect. Under the peak flow condition, the EBCT as 20.93 min can still meet the denitrification demand of 6 mg/L. This process can effectively reduce the reliance on external organic carbon sources under the condition of a low carbon-nitrogen ratio. And through the precise aeration, backwash control and alkalinity regulation, the stable compliance with total nitrogen standards and the low-carbon operation are achieved.

Keywords: wastewater treatment plant (WWTP); deep denitrification; sulfur autotrophic denitrification; pilot-scale verification

0 引 言

随着城镇污水处理厂排放标准趋严和流域水环境质量改善需求的提升, 污水厂扩建工程已由单纯的“增量建设方案”向“兼具扩容、提标、低碳化运行

与稳定化达标的协同设计方案”转变。对于受纳水体环境容量有限的地区而言, 污水处理厂对出水总氮的标准提出更高的要求, 需在生物脱氮、深度处理与运行控制之间形成协同的、系统化的设计。

国内外研究者们发现, 硫自养反硝化可利用还原态无机硫作为电子供体, 在低碳氮比的进水或二级出水深度脱氮的场景中, 可减少工艺对外加有机碳源的需求, 同时具有污泥产量低、碳源药剂消耗少

收稿日期: 2025-10-22

基金项目: 上海市政总院“拂晓计划”

作者简介: 龚天翼(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 从事城市净水设施运营及工艺研究工作。

的优势。但其在工业应用方面仍受温度、pH、碱度、溶解氧、硫酸盐生成及生物膜成熟周期等因素的影响,目前出水 TN 稳定控制在 4 mg/L 以下的案例相对有限^[1-2]。

现有的研究多集中于反应机理、滤料类型、微生物群落及中试运行特征,对大型污水厂扩建工程中对控制指标、工艺经济性与改造工程的衔接的综合设计阐述不足。本文以浙江省某大型水质净化厂扩建项目为例,结合硫自养脱氮中试数据,分析其改造后工艺的实际运行状况,为高标准排放污水厂扩建及提标改造工程提供参考。

表 1 设计进出水水质						单位:mg/L
项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ -N	TN	TP
设计进水水质	430	130	380	30	40	8
一期实测进水水质	419	122	464	24.8	29	8.2
一期实测出水水质	24	2	5	0.16	10.5	0.24
浙江省地方标准(一期扩容部分出水水质)	≤40	≤10	≤10	≤2(4)	≤12(15)	≤0.3
二期环保要求设计出水水质	≤30	≤10	≤10	≤1(2)	≤4(9)	≤0.2

工程建成后,一期出水水质仍执行浙江省地方标准,二期出水水质执行环保部门要求的更加严格的出水水质。分别对二期出水和一二期总排口进行在线监测。

2 工艺技术经济性比选

本工程的核心要点为扩建规模大、出水 TN 控制目标严、与一期工艺之间的改造衔接、工艺运行应尽量降低对外加碳源的依赖。结合常见深度脱氮处理技术,从出水达标可靠性、工艺占地、投资、药剂消耗、污泥增量、运行管理与现状工艺衔接等方面展开工艺比选,见表 2。

表 2 深度脱氮工艺技术经济性比选		
方案	技术经济特点	综合评价
方案 A	改良型巴顿甫+高效沉淀+硫自养脱氮滤池;低 C/N 适应性强,外加有机碳源少,污泥增量较小;需控制 DO、pH、碱度和反洗	达标可靠性、运行费用和低碳性综合较优
方案 B	后置异养反硝化滤池;工艺成熟、反应快,但需长期投加乙酸钠或甲醇,储运安全和投加控制要求高	投资中等,运行费用偏高;投加不足影响 TN,过量可能增加 COD
方案 C	MBR 或高强度膜处理+后置脱氮;SS 控制好,占地小,但投资、能耗、膜维护及与现状系统衔接成本较高	适合用地极紧或回用要求高场景,本工程综合经济性不占优

比选结果表明,方案 A 在满足严格的 TN 控制目标的同时,可有效减少外加有机碳源的消耗,同时与异养反硝化工艺相比,其不会带来额外的剩余污泥。

1 工程背景

浙江省某污水处理厂一期处理规模为 17×10⁴ m³/d。2021 年开始实施二期扩建工程,根据排水专项规划,远景年污水处理量为 27.3×10⁴ m³/d,考虑雨季水量,确定扩建后污水处理规模 33×10⁴ m³/d,包括对一期产线工程性改造扩容 3×10⁴ m³/d,新建 13×10⁴ m³/d 二期产线。二期工程设计出水水质在浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)^[3]的基础上,根据环保部门对排放水体容纳能力核算,对二期工程提出了更严格的出水水质要求。二期工程设计进水水质及出水水质要求见表 1。

此外,该方案的主要风险集中在硫自养设备启动、低温、低 pH 及高 DO 抑制等方面,可通过中试验证、滤料优化、精准曝气与反洗控制等方式,降低运行风险,提高工艺稳定性。

通过对工程背景的分析,以及对不同深度脱氮处理技术的经济性必选,可确定本工艺的技术路线,如图 1 所示。

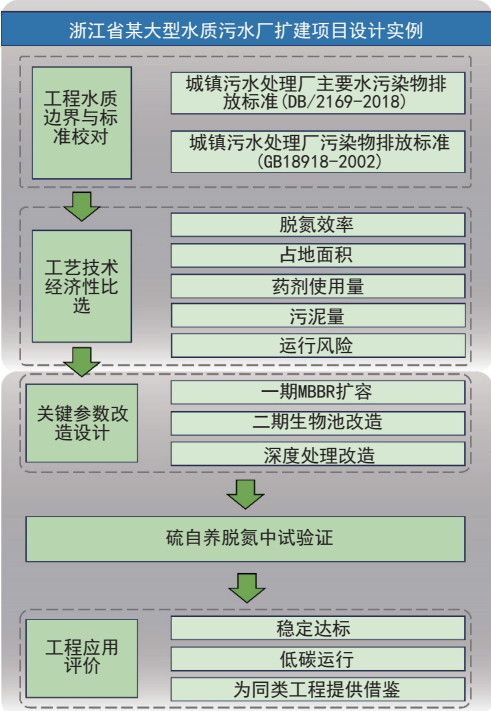


图 1 技术路线图

3 工程设计

针对设计进水水质及出水水质要求,本工程二期工艺流程采用“粗格栅进水泵房+细格栅曝气沉砂池+改良型巴顿甫生物池+高效沉淀池+硫自养脱氮滤池+次氯酸钠消毒”工艺。一期仅对现状生物池进行改造扩容。

3.1 一期扩容

现状一期工艺流程设计处理能力为 $17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,经核算,现状一期处理单元除生物反应池外,均可实现 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理能力。因此,通过改造生物反应池,使其提升 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理能力,即可使一期工艺流程提升至 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理能力。

按照 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理规模核算,一期生物池原设计均日水力停留时间为 13.57 h,其中缺氧区停留时间为 2.74 h,好氧区停留时间为 9.46 h。现状生物池布置如图 2 所示。

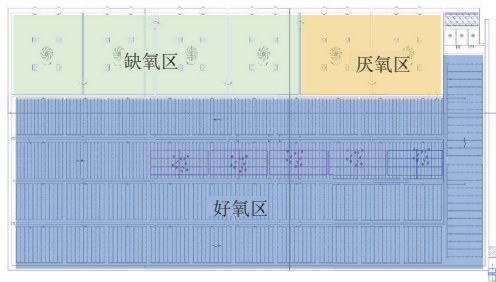


图2 一期生物池现状布置

根据二期设计进水水质对一期生物池水力停留时间进行核算,一期缺氧区需求停留时间为 4.8 h,好氧区需求停留时间为 10.1 h。现状生物池缺氧区、好氧区池容均无法满足二期设计进水水质下的停留时间要求,需进行改造扩能。

本次改造将部分好氧区池容改造为缺氧区,关闭曝气设备,增加潜水搅拌器,补足缺氧区所需池容,满足生物池出水总氮的要求,改造后缺氧池水力停留时间为 4.84 h,满足要求。在好氧区中采用“侧进水侧出水微动力循环 MBBR”的形式进行改造,采用泥膜复合形式,实现好氧池扩容。

经计算,好氧池池容需弥补 HRT 1.96 h,对应 BOD 处理量 $3\,467 \text{ kg}/\text{d}$ 。设计 MBBR 系统 BOD 负荷 $3.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,则填料添加量 $1\,084\,200 \text{ m}^2$ 。通过增加有效生物量弥补池容不足^[4]。改造后布置如图 3 所示。

3.2 预处理

预处理采用格栅沉砂池,其中粗格栅栅条间隙 20 mm,细格栅孔径 6 mm,针对进水水质中存在纤维杂物的情况,设置了精细格栅,孔径 3 mm。曝气沉

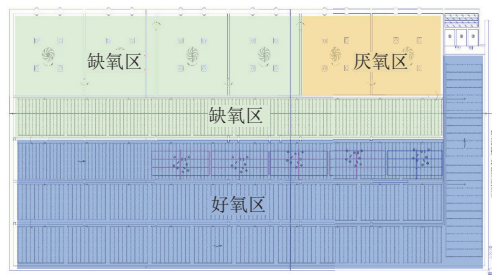


图3 一期生物池改造布置

砂池水力停留时间 7 min,采用排砂泵吸砂。

3.3 二级处理

生物反应池采用改良型巴顿甫池型^[5],平均水力停留时间 22.6 h,其中预缺氧池 0.75 h,厌氧池 1.5 h,一段缺氧池 5.85 h,一段好氧池 10.8 h,脱气池 0.45 h,二段缺氧池 2.4 h,二段好氧池 0.9 h。污泥浓度 MLSS 为 $4\,000 \text{ mg}/\text{L}$,设计气水比 $5.8:1$ ^[6]。

二沉池采用周进周出矩式二沉池,共 14 座,单池尺寸 $43.2 \text{ m} \times 11.5 \text{ m}$,表面负荷 $1.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,固体负荷 $224.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.4 深度处理

深度处理采用高效沉淀池及硫自养脱氮滤池。

高效沉淀池共 4 座,混合池水力停留时间 2.93 min,絮凝池水力停留时间 15.36 min,表面负荷 $12.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

硫自养脱氮滤池设计最大脱氮能力 $6 \text{ mg}/\text{L}$ 。滤池共 12 格,单格面积 98 m^2 ,设计滤速 $6.9 \text{ m}/\text{h}$ 。滤料采用 2.16 m 厚的脱氮滤料,配合 0.5 m 后的石英砂滤料。反冲洗气洗强度 $52.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水洗强度 $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反冲洗水系强度 $5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

3.5 污泥处理系统

污泥系统采用重力浓缩+离心脱水工艺。

设置污泥浓缩池 2 座,对高密度澄清池排放的化学污泥以及二沉池排放的剩余污泥进行浓缩处理,使其含水率降至 97%。单池池径 20 m,池边水深 4 m,固体负荷 $47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间 18.7 h。

新建二期污泥浓缩池与现状一期污泥浓缩池出泥管道连通,共同进入现状储泥池,进而使得现状一期和新建二期污泥系统互联互通。统筹考虑一期工程与二期工程计算日产泥量共计 $74.8 \text{ t DS}/\text{d}$,折合浓缩后含水率 97% 污泥为 $2493 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

二期工程新增 3 台离心脱水机,单台处理能力 $Q=60 \text{ m}^3/\text{h}$;包括现状 3 台脱水机在内,实现 5 用 1 备,工作时长 8~9 h/d。新增 3 台干污泥泵,单台输送能力 $Q \geq 12 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

新增 2 座污泥料仓,单座容积 200 m^3 。

3.6 曝气控制系统设计

DO 值过高对硫自养反硝化有抑制作用,同时,好氧池中 DO 值过高,会将大量溶解氧通过内回流输送至缺氧池,破坏缺氧环境,抑制生物池内反硝化脱氮过程^[7-8]。

本研究设计了精确曝气系统,在满足运行需求的前提下,控制生物池出水 DO≥2 mg/L。精确曝气系统采用了菱形空气调节阀和热式气体流量计,控制逻辑分为三级,包括了前馈开环控制、反馈闭环控制、鼓风机闭环反馈控制^[9]。控制鼓风机开启台数及运行频率,调节空气调节阀的开度,线性调节供气量,实现生化池各控制区的实际溶解氧在该溶解氧控制目标设定值上下小范围波动^[10]。

4 硫自养脱氮中试过程及分析

大型污水处理厂出水总氮在 4 mg/L 以下,采用硫自养技术^[11-12]的工程实例较少。为充分验证硫自养脱氮工艺对本工程的适用性,本项目进行了中试验证。

4.1 中试过程

硫自养中试设备处理能力 200 m³/d,进水为现状

一期高效沉淀池产水,出水就近排放至污水管网。中试选择在宁波市气温较低的 2 月份进行,基于污水厂实际出水碱度及溶解氧值,测试了不同空床停留时间下的脱氮能力及出水 SS 指标。中试装置如图 4 所示。



图 4 硫自养中试装置

4.2 中试运行数据

中试装置分为 1#高柱和 2#低柱,直径均为 1 m,其中 1#柱有效滤料高度 2.1 m,2#柱有效滤料高度 1.05 m,分别测试不同空床停留时间(EBCT)下的运行数据。中试装置调试完成后,部分运行数据如表 3 所示。

表 3 中试运行数据

序号	取样位置	检测项目/(mg·L ⁻¹)					EBCT/min	脱氮负荷 kgN/(m ³ ·d)
		TN	NO ₃ ⁻ -N	pH	温度/℃	DO		
1	进水	12.70	12.60	6.70	13.2	8.59		
	1#出水	0.82	0.78	6.00			47.10	0.363
	2#出水	1.74	1.35	6.10			52.33	0.302
2	进水	13.00	12.50	6.60	13.0	9.50		
	1#出水	1.26	0.72	5.90			47.10	0.359
	2#出水	2.02	1.26	5.50			52.33	0.302
3	进水	14.70	14.00	6.50	14.1	8.65		
	1#出水	3.20	2.76	5.90			26.17	0.633
	2#出水	5.70	5.62	6.00			31.40	0.413
4	进水	15.30	14.40	6.60	14.0	8.83		
	1#出水	5.16	4.77	6.00			26.17	0.558
	2#出水	7.56	7.50	6.10			31.40	0.355
5	进水	14.20	12.00	6.60	14.0	8.83		
	1#出水	4.74	4.13	6.00			20.93	0.651
	2#出水	7.49	6.49	6.10			18.84	0.513
6	进水	13.50	12.10	6.70	15.0	7.99		
	1#出水	5.20	1.55	6.00			26.17	0.457
	2#出水	4.85	4.13	6.10			31.40	0.397
7	进水	11.80	10.10	6.70	14.7	7.95		
	1#出水	9.57	1.55	6.30			26.17	0.123
	2#出水	3.15	2.96	6.40			31.40	0.397
8	进水	12.60	12.10	6.70	14.0	8.83		
	1#出水	3.21	2.64	6.30			26.91	0.502
	2#出水	4.42	2.66	6.30			31.40	0.375

从运行数据可看出,现状高效沉淀池出水 pH 介于 6.6~6.7,水温在 13 ℃ 以上。进水 DO 值偏高,主要

因为前序工艺段生物池、二沉池、高效沉淀池多次跌水充氧。水中 DO 值高,氧气(O₂)会优先作为电子受

体被利用(硫化物被氧化为 SO_4^{2-}),导致脱氮硫杆菌的酶活性被抑制,脱氮效率显著下降^[13-14]。

维持EBCT时间26.17~31.4 min运行,其中,1#高柱脱氮量分别为11.5 mg/L,10.14 mg/L,TN去除容积负荷0.633 kgTN/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),0.558 kgTN/($\text{m}^3\cdot\text{d}$),脱氮量与低负荷运行时差别不大,表明低负荷运行时填料潜力未被完全挖掘,因此提高负荷后运行,脱氮效果依然保持稳定。2#低柱两天脱氮量分别为9.0 mg/L、7.74 mg/L,TN去除容积负荷0.413 kgTN/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)、0.355 kgTN/($\text{m}^3\cdot\text{d}$)。脱氮量与去除容积负荷较低负荷运行时有所下降,是因为低柱填料高度较低(1 m),而硫自养脱氮受温度、pH、碱度、DO等影响较大^[15],部分高度填料用于消氧、对抗低温、低pH等不利条件,实际发挥脱氮功能的填料占比较小。而填料高度2 m时,实际发挥脱氮功能的填料占比较大,因此2号低柱效果下降,1号高柱效果相对稳定。

中试还测试了峰值流量下装置的脱氮能力。基于EBCT时间26.17~31.4 min,峰值流量工况试验数据如表4所示。

表4 峰值流工况中试脱氮数据

序号	取样位置	NO_3^--N / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	脱氮量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	EBCT/ min	脱氮负荷/ [$\text{kgN}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$]
1	进水	13.00			
	1#出水	6.40	6.60	20.93	0.454
	2#出水	9.40	3.60	18.84	0.275
2	进水	14.31			
	1#出水	7.18	7.13	20.93	0.490
	2#出水	9.79	4.52	18.84	0.345
3	进水	15.82			
	1#出水	7.43	8.39	20.93	0.577
	2#出水	11.41	4.41	18.84	0.337

峰值流量每次持续时间为4 h。经试验验证,在高脱氮负荷需求下,峰值EBCT时间20.93 min仍可满足去除6 mg/L的脱氮要求。

4.3 中试运行问题及解决措施

中试设施启动初期,发生了出水TP指标高于进水的情况,时间持续约7 d,TP升高25%~33%,出水颜色发白。

分析原因,中试设施启动之初体系中存留的微生物在放置期间脱落死亡,老化死亡的微生物分解,释放出磷酸盐、生物源单质硫(胞内硫)等随污水流出^[16]。磷酸盐释放量大于系统磷酸盐消耗量表现为TP升高。生物硫通常以胶体的形式存在,其粒径仅微米大小,出水往往呈现乳白色^[17]。

针对上述问题,对1#高柱进行了深度反洗,将体系中死亡的微生物排出。随后2 d监测进、出水TP指标:进水TP 0.454 mg/L时1#高柱出水TP 0.328 mg/L;进水TP 0.496 mg/L时1#高柱出水TP 0.334 mg/L。数据表明系统已进入正常。

5 结 论

针对更加严格的出水总氮指标,本项目采用改良型巴顿甫生物池作为二级处理,同时采用硫自养反硝化脱氮工艺做为深度脱氮工艺,获得了良好的效果。精确曝气系统可有效的控制好氧池出水DO值,为脱氮提供良好的条件。

参考文献:

[1] Wang T, Li X, Wang H, et al. Sulfur autotrophic denitrification as an efficient nitrogen removals method for wastewater treatment towards lower organic requirement: A review[J]. Water Research, 2023, 245: 120569.

[2] 陈秀娟,陈鹏,李东,等.硫自养反硝化技术及应用研究进展[J].中国给水排水,2025,41(8):22-31.

[3] DB33/ 2169—2018 城镇污水处理厂主要水污染物排放标准[S].

[4] 彭江喜,李益飞,肖涛,等.MBBR工艺用于南昌市某污水处理厂提标改造工程[J].中国给水排水,2021,37(14):85-88;92.

[5] 陈亭微,颜颢,王海锋.污泥龄和溶解氧对改良型Bardenpho-MBR工艺脱氮除磷效果的影响[J].环境工程,2023,41(增刊1):196-200.

[6] 周霄.活性污泥工艺简明原理及设计计算[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.

[7] 王拓,严冰.多级A/O工艺协同精确控制系统用于低C/N进水污水厂[J].中国给水排水,2021,37(12):65-69.

[8] 王舜和李,李朦,郭淑琴.张贵庄污水处理厂分段进水多级AO工艺的设计与运行[J].中国给水排水,2018,34(12):53-56.

[9] 邓欢忠,徐文丽,林梅山,等.精确曝气流量控制系统在污水处理厂的应用[J].给水排水,2019,55(增刊1):51-54.

[10] 余云龙,史彦伟,姜秀光,等.南方某污水处理厂精确曝气技术示范及评估分析[J].给水排水,2017,43(2):42-44.

[11] 江优优,涂辉,王婷,等.硫自养反硝化脱氮滤池在处理焦化废水中的应用[J].环境工程学报,2025,19(5):1259-1270.

[12] 陈秀娟,陈鹏,李东,等.硫自养反硝化技术及应用研究进展[J].中国给水排水,2025,41(8):22-31.

[13] 梁硕,负丹丹,王艳芝,等.硫自养反硝化滤池冬季低温脱氮中试[J].中国给水排水,2025,41(3):14-21.

[14] 袁海光.微生物在不同曝气强度驱动下的脱氮脱硫特性及其种间协同/竞争机制的研究[D].广州:华南理工大学,2021.

[15] 郝晓地,魏洪禹,于文波,等.硫自养反硝化技术优劣辨析[J].环境科学学报,2024,44(4):1-10.

[16] 李文骥,郑平.硫氧化细菌源单质硫的生成、转运和回收[J].微生物学报,2021,61(1):25-40.

[17] 刘宝峰,郭宇平.硫自养反硝化技术用于市政污水深度处理[J].中国给水排水,2022,38(22):91-95.