

两级 AO 砾间接触氧化工艺治理重度黑臭水体研究

黄 聪¹, 王 静², 周金艳², 彭 聃¹, 任晓玲², 李柏林²

(1. 中南安全环境技术研究院股份有限公司, 湖北武汉 430000;

2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

[摘要] 为提高两级 AO 型砾间接触氧化工艺治理重度黑臭水体的运行效能, 探究了系统的最佳水力停留时间 (HRT)、内回流比和进水量分配比, 并研究不同功能区的污染物降解规律。结果表明: (1) 系统最佳运行参数为 HRT 10 h, 内回流比 200%, 进水量分配比 6:4。在此工况下, 单位时间处理水量较启动期增加 20%, COD 和 TN 去除率分别为 88% 和 55%, 较启动期分别增加了 18% 和 15%, NH_4^+-N 去除率稳定在 90% 左右。(2) 内回流比适度增大提供更多 NO_3^--N 促进第一级 AO 反硝化, 进水量分配比增大能够优化反硝化碳源供给, 从而提升系统 TN 去除率。研究表明优化后两级 AO 型砾间接触氧化工艺对重度黑臭水体有较好的处理能力和较好的脱氮除碳效果。

[关键词] 砾间接触氧化; 两级 AO; 黑臭水体; 运行参数; 脱氮除碳

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)05-0089-07

Treating severe black and odorous water by two-stage AO gravel contact oxidation process

HUANG Cong¹, WANG Jing², ZHOU Jinyan², PENG Dan¹, REN Xiaoling², LI Bolin²

(1. Central-Southern China Safety & Environment Technology Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to improve the operating efficiency of the two-stage AO-type gravel contact oxidation process to treat severe black and odorous water bodies, the optimal hydraulic retention time (HRT), internal reflux ratio and influent water distribution ratio of the treatment system were investigated. And the pollutant degradation laws in different functional areas were also studied. The results showed that the best operating parameters of the system were: HRT was 10 h, internal reflux ratio was 200%, influent water distribution ratio was 6:4. Under this working condition, the treated water volume per unit time increased by 20% compared with the start-up period, and the removal rates of COD and TN were 88% and 55%, respectively, which increased by 18% and 15% compared with the start-up period. The removal rate of NH_4^+-N stabilized at about 90%. A moderate increase in internal reflux ratio provided more NO_3^--N to promote the first-stage AO denitrification, and an increase in influent water distribution ratio could optimize the supply of carbon source for denitrification, thereby increasing the TN removal rate of the system. Research showed that the optimized two-stage AO-type gravel contact oxidation process had greater processing capacity and better denitrification and carbon removal effects on severe black and odorous water bodies.

Key words: contact oxidation between gravels; two-stage AO; black and odorous water; operating parameters; nitrogen and carbon removal

黑臭水体治理是提高水环境质量的 key 内容之一。砾间接触氧化工艺因其经济、高效、绿色等优势^[1], 近年来在黑臭水体治理领域得到广泛关注。该工艺利用天然砾石作为填料, 微生物附着生长于

填料表面形成好氧层、缺氧层和厌氧层, 污染物通过吸附、沉淀、生物降解等作用得以去除^[2]。砾间接触氧化工艺在日本^[3-4]和中国台湾^[5]的微污染河流治理中得到了广泛应用, 根据以往研究, 其对 COD 和

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51708431)

NH_4^+-N 去除效果良好, 但 TN 去除效果不佳^[6]。

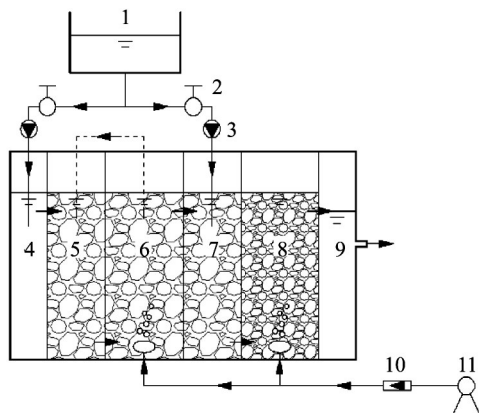
传统砾间接触氧化工艺没有严格的功能分区, 难以实现高效硝化反硝化^[7]。本研究将其与多级 A/O (缺氧/好氧) 技术结合, 使工艺具有更强的污染物去除能力^[8]。砾间接触氧化工艺多用于微污染水体治理^[9-10], 要使其达到理想的重度黑臭水体治理效果, 还需进一步优化性能。适当延长 HRT 可增强反应器脱氮效率^[11], 但 HRT 过长易导致成本增加甚至降低脱氮效果^[12]。内回流可将含有大量含 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的硝化液带入缺氧区, 促进缺氧区的反硝化作用^[13], 但回流的硝化液过多可能会破坏缺氧区的缺氧环境, 不利于反硝化菌生长^[14]。分段进水可优化碳源利用, 在无需外加碳源的条件下获得较高的脱氮效果^[15], 但不适宜的进水量分配比会导致反硝化区出现碳源不足或过多的情况^[16], 达不到提高脱氮效果目的。此外, 单一参数调控对工艺的污染物去除效果提升有限, 因此在本研究中, 笔者拟采用多参数调控方式对工艺进行系统性优化。

本研究采用两级 AO 型砾间接触氧化反应器治理重度黑臭水体, 通过调控 HRT、硝化液内回流比、A1 和 A2 区进水量分配比等参数强化污染物去除效果。根据沿程污染物浓度变化, 分析不同功能区对污染物的降解规律。在最优条件下考察污染物去除效果, 为两级 AO 型砾间接触氧化工艺治理黑臭水体提供一定的理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为自制的长方体有机玻璃反应器, 砾间接触氧化反应器示意图 1。



1—储水池; 2—进水阀门; 3—蠕动泵; 4—配水区; 5—A1 区; 6—O1 区; 7—A2 区; 8—O2 区; 9—集水区; 10—流量计; 11—空气泵

图 1 砾间接触氧化反应器

Fig. 1 Gravel contact oxidation reactor

反应器有效容积 126 L。进水方式为蠕动泵进水, 底部设有曝气、排泥和反冲洗管道。生物区中缺氧区 1 (A1 区)、好氧区 1 (O1 区)、缺氧区 2 (A2 区) 均填充粒径约 100 mm 的砾石, 填充率为 55%; 好氧区 2 (O2 区) 填充粒径约 6 mm 的蛭石, A 区和 O 区体积比为 3:4。为避免发生短流, 采用穿孔隔板式折流结构; 为充分利用碳源、提高脱氮效果, 采用两点进水方式, 并在第一级 AO 反应系统内设置回流。

1.2 实验用水水质

本实验进水为在自来水的基础上添加葡萄糖、 NH_4Cl 等药剂的模拟黑臭水。实验期间 COD 为 50~150 mg/L, NH_4^+-N 为 15~25 mg/L, 微量元素 I 和微量元素 II 的质量浓度均为 1 mg/L (配方见文献[17]), pH 保持在 8 左右。

1.3 启动运行效果

笔者课题组前期采用接种挂膜的方式启动反应器^[18], 进水平均 COD 和 NH_4^+-N 分别为 140 mg/L 和 20 mg/L。启动过程分三个阶段: 间歇培养阶段 (1~3 d)、快速启动阶段 (4~26 d) 和稳定运行阶段 (27~58 d)。反应器历时 21 d 成功启动, 之后通过缩短 HRT、增设内回流、多点进水使反应器运行稳定。最终 COD、 NH_4^+-N 、TN 的去除率稳定在 70%、90%、40% 左右。

1.4 实验方案

3 个平行反应器启动成功后, 分别调控不同反应器的 HRT、内回流比和进水量分配比以提升污染物去除性能, 并在最优工况参数条件下考察反应器对污染物的去除效果, 工况运行参数见表 1。

表 1 工况运行参数

Table 1 Different operational parameters in group

阶段	装置	HRT/h	内回流比/%	进水量分配比
水力负荷提升阶段	反应器 1	12	100	5:5
		10	100	5:5
		8	100	5:5
		6	100	5:5
		12	0	5:5
脱氮性能优化阶段	反应器 2	12	100	5:5
		12	200	5:5
		12	300	5:5
		12	100	6:4
	反应器 3	12	100	5:5
		12	100	4:6
		12	100	3:7
		10	200	6:4

1.4.1 系统性能优化阶段

(1)提升水力负荷降成本。为降低运行成本,缩短 HRT(12 h→10 h→8 h→6 h)以增大系统单位时间处理水量。分析不同 HRT 下污染物去除效果,在满足出水水质达标的前提下,选择较低 HRT。

(2)优化脱氮性能促高效。为提升反硝化能力,提高内回流比(0%→100%→200%→300%)以增加缺氧区 NO_3^- -N 含量;为充分利用碳源,降低进水量分配比(6:4→5:5→4:6→3:7)为二级 AO 提供更多电子供体。探究不同工况下污染物去除效果,确定系统运行最佳内回流比和进水量分配比。

1.4.2 最优工况运行阶段

保持其他条件不变,在最佳 HRT、内回流比、进水量分配比条件下运行反应器,研究系统优化后性能提升效果。

1.5 测试项目及方法

COD、 NH_4^+ -N、TN 的分析方法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)^[19],DO、pH、温度由哈希便携测试仪进行分析。

2 结果与讨论

2.1 水力负荷提升

为增强反应器处理水量性能,缩短 HRT 以增加单位时间处理水量。不同 HRT 下反应器对主要污染物的去除效果见图 2。

由图 2 可知,随着 HRT 降低,反应器对 COD 的去除效果逐渐降低。HRT 从 12 h 降低至 10 h 时,COD 平均去除率下降了 6%;从 10 h 降低至 8 h 时,COD 平均去除率下降 4%,HRT 的降低对 COD 去除率的影响不太明显;HRT 从 8 h 降至 6 h 时,COD 平均去除率下降 9%,降幅较大,此时 COD 平均去除率仅有 56%。HRT 从 12 h 降至 10 h 时,对 NH_4^+ -N 的去除效果影响不大;HRT 继续降低, NH_4^+ -N 去除率逐渐下降,这是因为 HRT 的缩短,不利于世代周期较长的硝化细菌生长繁殖^[20],使得出水 NH_4^+ -N 逐渐升高,与此同时硝化效果降低导致反硝化效果不佳,TN 去除率下降。综合考虑 COD、 NH_4^+ -N 和 TN 去除率,确定最佳 HRT 为 10 h。

不同 HRT 下反应器沿程 COD、 NH_4^+ -N、TN 的变化情况见图 3。

由图 3 可知,HRT 为 12 h 时,硝化细菌生长旺盛, NH_4^+ -N 去除效果优良,但 HRT 过长使得反应前期碳源大量消耗,反应后期反硝化碳源不足导致出水 TN 浓度较高;HRT 分别为 8 h 和 6 h 的情况下,

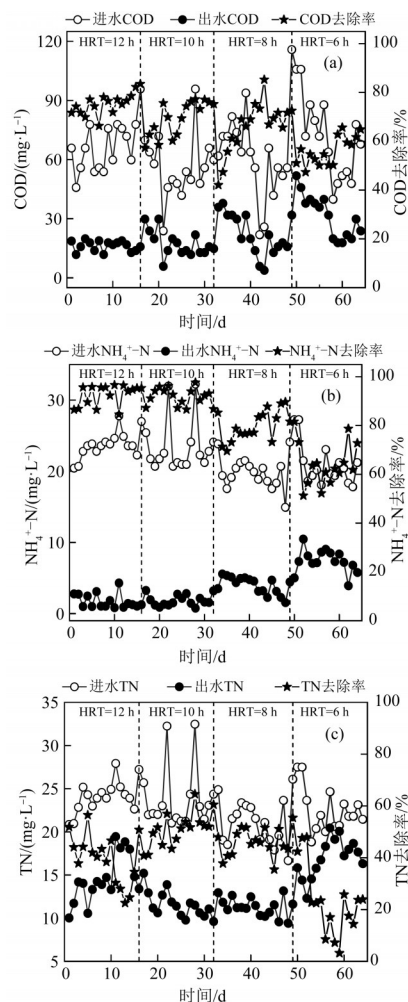


图 2 不同 HRT 下反应器对主要污染物的去除效果

Fig. 2 Removal effect of main pollutants in the reactor under different HRT

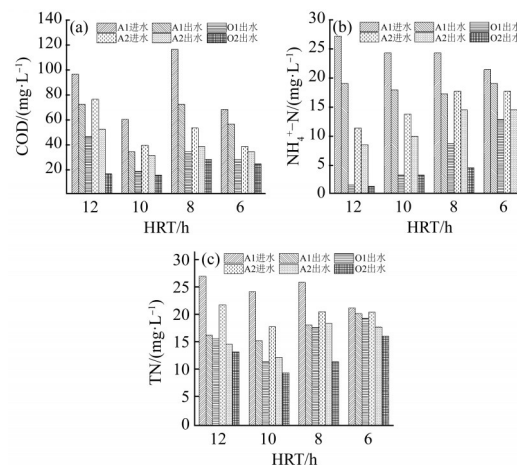


图 3 不同 HRT 下反应器沿程 COD、 NH_4^+ -N 和 TN 的变化情况

Fig. 3 COD, NH_4^+ -N and TN changes along the reactor under different HRT

NH_4^+-N 消耗不完全导致第一级出水 TN 升高, 第二级 AO 的 TN 出水浓度高更大程度上是由于 NO_3^--N 去除效果不佳。4 种工况下, 出水 TN 中 NH_4^+-N 占比分别为 9.36%、33.20%、38.14% 和 35.41%。

2.2 脱氮性能优化

2.2.1 内回流比优化

回流可为缺氧区提供更多的 NO_3^--N , 从而增强系统脱氮效果。不同内回流比下反应器对主要污染物的去除效果见图 4。

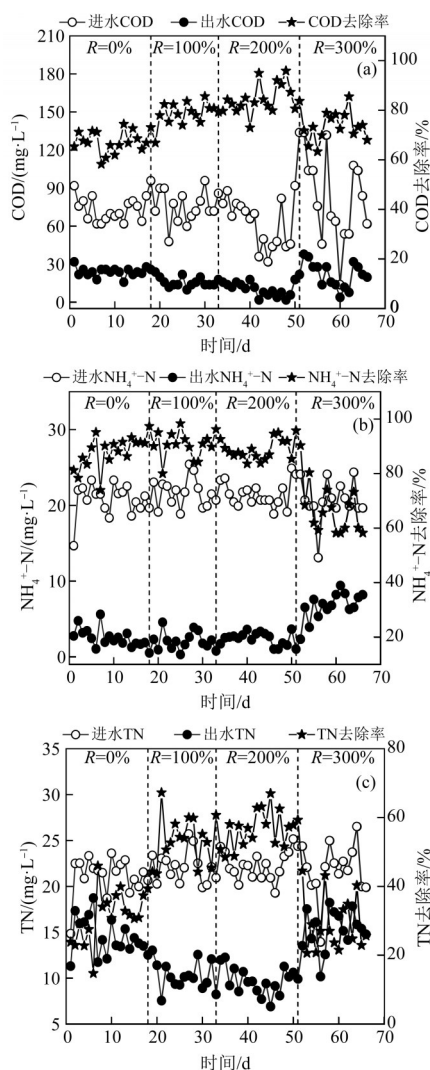


图 4 不同内回流比下反应器对主要污染物的去除效果

Fig. 4 Removal effect of main pollutants in the reactor under different internal reflux ratio

由图 4 可知, 内回流比为 0~200% 时, COD 平均去除率随内回流比的增大而升高, 回流比增至 300% 时, 回流硝化液携带较多 DO 破坏了 A1 区缺氧环境^[21], 导致 COD 去除率下降; 内回流比为 0~200% 时, NH_4^+-N 去

除率维持在 85% 以上, 内回流比为 300% 时, NH_4^+-N 的去除率大幅降低; 在内回流比为 0~200% 时, TN 去除率随内回流比增加而增加, 内回流比为 300% 时, TN 去除率下降。综合上述分析, 内回流比为 200% 时, 反应器具有较好的污染物去除效果。

2.2.2 进水量分配比优化

合理设定进水量分配比可使碳源得到充分利用, 提高反应器脱氮除碳效果。不同进水量分配比下反应器对主要污染物的去除效果见图 5。

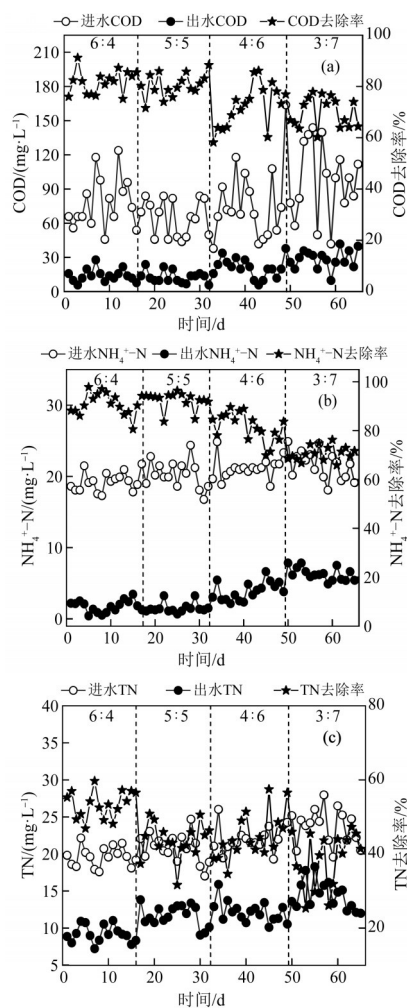


图 5 不同进水量分配比下反应器对主要污染物的去除效果

Fig. 5 Removal effect of main pollutants in the reactor under different influent water distribution ratio

由图 5 可知, 进水量分配比对 COD 和 NH_4^+-N 的去除都有一定程度影响, 进水量分配比越小, 出水 COD 和 NH_4^+-N 越高。可能是因为较小的进水量分配比增大了第二级 AO 的污染负荷, 致使污染物降解不完全。出水 TN 浓度也受到进水量分配比的

影响,4种工况下TN平均去除率分别为53.34%、43.77%、47.53%和38.88%。当进水量分配比为6:4时,A1区碳源充足, NO_3^- -N得到充分去除从而使TN去除率较高;当进水量分配比为3:7时,O2区硝化作用及蛭石的吸附作用有限, NH_4^+ -N反应不完全,限制了TN的去除。总体来看,进水量分配比为6:4时可以达到较高的TN去除效果,使碳源得到有效利用,因此6:4为最优进水量分配比。

2.2.3 不同功能区污染物降解规律

为了更深入探究系统内部污染物去除效能,通过测定不同功能区进出口污染物浓度,考察各功能区污染物降解规律,结果见图6、图7。

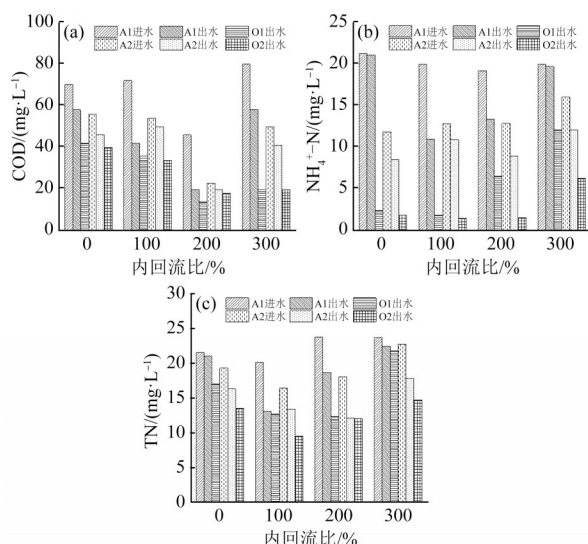


图6 不同内回流比下污染物沿程变化情况

Fig. 6 Changes of pollutants along the path under different internal reflux ratio

由图6可知,内回流比分别增至100%和200%时,第一级AO污染物去除效果逐渐提升。这是因为回流硝化液带来较多 NO_3^- -N促进反硝化作用进行^[22];另外O1区COD浓度降低使得自养硝化菌生长繁殖加快,硝化作用也得到增强^[14,23]。随着内回流比继续增加,A1区缺氧环境遭到破坏,COD去除主要贡献区由A1区转变为O1区。此时第一级AO脱氮效果不佳。虽然A2区可去除部分 NO_3^- -N,但O2区硝化能力有限且难以进行反硝化,第二级AO出水 NH_4^+ -N和TN明显升高。

由图7可知,随着进水量分配比逐渐减小,第一级AO脱氮除碳效果呈上升趋势。对于A1区,碳源减少削弱了反硝化作用^[2],但TN去除效果提升。推测该区域可能发生了厌氧氨氧化或自养反硝化反应,且这种反应随碳源量相对不足而增强^[24]。A1区反硝化脱氮

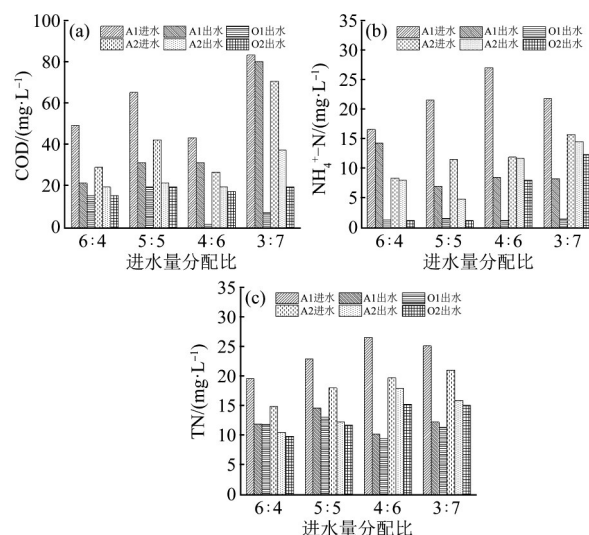


图7 不同进水量分配比下污染物沿程变化情况

Fig. 7 Changes of pollutants along the path under different influent water distribution ratio

贡献率降低导致出水COD升高,更多有机物在O1区去除。对于第二级AO,进水量增加,反硝化电子供体充足有利于反应进行;然而进水量增加也带来更多 NH_4^+ -N,O2区硝化能力有限,系统出水 NH_4^+ -N升高并成为导致出水TN升高的主要因素。

2.3 优化后运行效能分析

本实验最优参数:HRT=10 h,内回流比为200%,进水量分配比为6:4。在最优工况下运行反应器,污染物的去除效果见表2。

相对于启动稳定时的效果,优化后系统HRT缩短,单位时间内处理水量增多,脱氮除碳性能也有较大提升。COD平均去除率由70%升至88%, NH_4^+ -N平均去除率略有增加,出水两种污染物分别达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅰ类和Ⅴ类标准。TN平均去除率由40%升至55%,出水平均TN约9.25 mg/L。通过多个生物接触氧化工艺治理重度污染河道实例对比,可以看出:功能分区促进硝化反硝化进行;硝化液回流有利于脱氮除碳;多级AO分段进水效果提升的原因在于优化了碳源分配。优化后两级AO砾间接接触氧化工艺合理设置了功能分区、硝化液回流和分段进水,又可处理较大水量,因此具有优良的综合性能。

3 结论

(1)HRT过短严重影响污染物的去除;内回流比增加可显著增强TN去除效果,但较大的内回流比会抑制TN的去除;较小的进水量分配比会增大第二

表2 生物接触氧化技术治理重度污染河道实例

Table 2 Examples of biological contact oxidation technology for treatment of severely polluted rivers

工艺	进水主要污染物 质量浓度	运行条件	COD/%	NH ₄ ⁺ -N/%	TN/%
两级AO砾间接触氧化工艺(本实验)	COD 50~150 mg/L; NH ₄ ⁺ -N 15~25 mg/L	反应区填充砾石和蛭石,填充率55%。HRT=10 h,只在第一级AO设置硝化液回流,内回流比为200%,两个缺氧区进水量分配比为6:4。	88	90	55
生物接触氧化工艺 ^[25]	COD 65.4 mg/L; TN 25 mg/L	反应区采用微孔曝气,设置仿生材料和并投加高效人工菌。	40.1	—	13.5
生物接触氧化工艺 ^[26]	COD 80~200 mg/L; NH ₄ ⁺ -N 25~42 mg/L	池内填充粒径30 mm的砾石,温度11~16℃,沿水流方向设置非曝气区与曝气区。	80	70	50
三级AO型分段进水生物接触氧化工艺 ^[27]	COD 166.7 mg/L; NH ₄ ⁺ -N 31.9 mg/L	三段进水形式,各段体积比1:1:1。每段非曝气区设置弹性立体填料,曝气区设置组合填料,两者体积比1:3。	50	60	20
两段生物接触氧化+水生植物工艺 ^[28]	COD 131.2 mg/L; NH ₄ ⁺ -N 20.2 mg/L; TN 29.5 mg/L	无厌氧区,无污泥回流和硝化液回流装置,污泥不外排。采用阿科蔓填料,投加复配菌种提高硝化菌和亚硝化菌数量。	66	73	56
好氧生物接触氧化工艺 ^[29]	COD 150~350 mg/L; NH ₄ ⁺ -N 18~36 mg/L; TN 24~42 mg/L	总HRT=8 h,池内填充聚乙烯球形填料。	82	32	31

级AO的污染负荷,削弱反应器对污染物的去除。最终确定最优参数:HRT=10 h,内回流比为200%,进水量分配比为6:4。

(2)回流可为缺氧区提供电子受体从而促进A1区的反硝化作用,但较大的内回流比易破坏A1区缺氧环境,致使第一级AO污染物去除效果不佳,出水污染物浓度较高;分段进水可优化碳源利用,随着进水量分配比减小,第二级AO污染负荷增大,NH₄⁺-N成为导致出水TN升高的主要因素。

(3)在最优工况下,COD、NH₄⁺-N、TN平均去除率分别为88%、90%、55%,出水COD和NH₄⁺-N分别达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅰ类和Ⅴ类标准,出水平均TN约9.25 mg/L。

参考文献

- [1] 王俊,张超.砾间接触氧化技术在乡镇污水处理厂尾水深度处理中的应用[J].工业用水与废水,2017,48(4):54-56.
WANG Jun, ZHANG Chao. Application of gravel contact oxidation process in advanced treatment of tail water from township sewage treatment plant[J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(4): 54-56.
- [2] 蒋宇豪,李敏,唐明哲,等.砾间接触氧化/水平潜流人工湿地净化微污染河道水[J].中国给水排水,2021,37(5):57-65.
JIANG Yuhao, LI Min, TANG Mingzhe, et al. Purification of micro-polluted river water by hybrid process of gravel contact oxidation and subsurface flow constructed wetland[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 57-65.
- [3] 徐天勇.砾间接触氧化+河道人工湿地工艺在中小河流治理中的应用[J].安徽农业科学,2020,48(15):75-77.
XU Tianyong. Application of gravel contact oxidation+river constructed wetland process in small and medium-sized river management[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(15): 75-77.
- [4] WANG J, LIU X D, LU J. Urban river pollution control and remedia-

- tion[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1856-1862.
- [5] 游进裕,曹晴薇,林宗岳,等.关渡人工砾床砾间接触工程设计参数与水质处理成效关系分析[J].环境保护,2006,29(2):73-90.
YOU Jinyu, CAO Qingwei, LIN Zongyue, et al. Relationship between engineering design parameters and water quality for constructed cobble bed in Guandu[J]. Environmental Protection, 2006, 29(2): 73-90.
- [6] 李涛,石小峰,胡天媛,等.砾间接触氧化技术在流域治理中的应用[J].工业用水与废水,2017,48(3):43-48.
LI Tao, SHI Xiaofeng, HU Tianyuan, et al. Application of gravel contact oxidation process in watershed management[J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(3): 43-48.
- [7] 罗朝晖.生态河道构建技术及净污效果实验研究[D].南京:河海大学,2005.
LUO Zhaohui. Study on the construction technology of the ecological river and its purification efficiency[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [8] 钱殷,全向春,裴元生,等.生物接触氧化工艺处理高氨氮污染河水的研究[J].中国给水排水,2011,27(17):40-45.
QIAN Yin, QUAN Xiangchun, PEI Yuansheng, et al. Treatment of high ammonia nitrogen polluted river water by biological contact oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 40-45.
- [9] 葛俊,黄天寅,王涌涛,等.处理微污染水的生物膜反应器启动及群落结构分析[J].中国给水排水,2015,31(3):36-40.
GE Jun, HUANG Tianyin, WANG Yongtao, et al. Start-up of biofilm reactor in treating micro-polluted water and analysis of microbial community structure[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(3): 36-40.
- [10] HAN Xiangxiang, FENG Jingwei, ZHANG Liu, et al. Micro-polluted water treatment by biological contact oxidation process: Aeration mode and bacteria community analysis[J]. Environmental Engineering Science, 2019, 36(12): 1491-1502.
- [11] JUANG D F, TSAI W P, LIU W K, et al. Treatment of polluted river water by a gravel contact oxidation system constructed under riverbed[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2008, 5(3): 305-314.
- [12] 葛俊,胡小贞,庞燕,等.砾间接触氧化法对白鹤溪微污染水体的净化效果[J].环境科学研究,2015,28(5):816-822.

- GE Jun, HU Xiaozhen, PANG Yan, et al. Research on purifying lightly contaminated water in Baihe River by gravel contact oxidation process[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 816-822.
- [13] 沈翼军, 吴瑒, 杨殿海, 等. 运行方式对厌氧区碳源分流多级A/O工艺处理效果的影响[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(11): 25-30.
- SHEN Yijun, WU Yang, YANG Dianhai, et al. The influence of operation mode on removal efficiency of step-feed A/O system with flow distribution of carbon source from anaerobic zone[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(11): 25-30.
- [14] 曹诚文, 沈耀良. 回流比对前置反硝化BAF工艺脱氮效能的影响[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2009, 22(3): 9-12.
- CAO Chengwen, SHEN Yaoliang. Impact of reflux ratio on the denitrification performance of pre-denitrification biological aerated filter[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2009, 22(3): 9-12.
- [15] ZHU Guibing, PENG Yongzhen, MA Bin, et al. Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1/2/3): 195-201.
- [16] 夏云康, 马睿莉, 吴鹏, 等. 分段进水比对两级A/O-海绵填料工艺处理DMF废水的影响[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 85-91.
- XIA Yunkang, MA Ruili, WU Peng, et al. Effect of step-feed ratios on DMF wastewater treatment via two stage A/O-sponge packing process[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 85-91.
- [17] OZEKI S, BABA I, TAKAYA N, et al. A novel C1-using denitrifier *Alcaligenes* sp. STC1 and its genes for copper-containing nitrite reductase and azurin[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2001, 65(5): 1206-1210.
- [18] 余健, 周金艳, 黄聪, 等. 两级A/O型砾间接接触氧化工艺处理高污染黑臭河水的运行效能及菌群结构[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(2): 47-52.
- SHE Jian, ZHOU Jinyan, HUANG Cong, et al. Operation efficiency and microbial community structure of two-stage A/O gravel contact oxidation process for treatment of highly polluted black-smelly river water[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(2): 47-52.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-285.
- [20] 潘伟亮, 吴齐叶, 王清钰, 等. 移动床生物膜反应器处理农村污水中试研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(10): 103-107.
- PAN Weiliang, WU Qiye, WANG Qingyu, et al. Pilot study on treatment of rural sewage by moving bed biofilm reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(10): 103-107.
- [21] 阳琪琪. A/O生物接触氧化工艺处理城市污水试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- YANG Qiqi. Study on treatment of municipal sewage by A/O biological contact oxidation process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [22] 马睿莉, 徐乐中, 陈茂林. 高有机氮废水AO工艺脱氮研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 8-13.
- MA Ruili, XU Lezhong, CHEN Maolin. Research progress on treatment of high organic nitrogen wastewater with AO process[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 8-13.
- [23] 叶琼. AO生物同步脱氮除磷试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2013.
- YE Qiong. Experimental study on nitrogen and phosphorus removal of AO process synchronization[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013.
- [24] 李佳霖, 秦松. 弥河沉积物的反硝化和厌氧氨氧化过程[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1588-1596.
- LI Jialin, QIN Song. Denitrification and anammox processes in sediment of Mihe River, China[J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1588-1596.
- [25] 金竹静, 杨逢乐, 叶金利. 生物接触氧化法原位修复受污染河水的效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(3): 36-39.
- JIN Zhujiang, YANG Fengle, YE Jinli. In-situ remediation efficiency of polluted river water by biological contact oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(3): 36-39.
- [26] 王曼, 李冬, 张杰, 等. 生物接触氧化用于河道治理的快速启动性能研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(10): 27-31.
- WANG Man, LI Dong, ZHANG Jie, et al. Study on startup characteristic of bio-contact oxidation process for river sewage[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(10): 27-31.
- [27] 李璐, 温东辉, 张辉, 等. 分段进水生物接触氧化工艺处理河道污水的试验研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2227-2234.
- LI Lu, WEN Donghui, ZHANG Hui, et al. Pilot experiment on the treatment of the river wastewater by a step-feed biological contact process[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2227-2234.
- [28] 万杰. 布吉河污染生物修复工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- WAN Jie. Study on process of buji river pollution bioremediation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [29] 钱殷, 全向春, 裴元生, 等. 生物接触氧化工艺处理高氨氮污染河水的研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 40-45.
- QIAN Yin, QUAN Xiangchun, PEI Yuansheng, et al. Treatment of high ammonia nitrogen polluted river water by biological contact oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 40-45.
- [作者简介] 黄聪(1991—), 硕士, 工程师. 电话: 15972093292; E-mail: 594197172@qq.com. 通讯作者: 李柏林, 博士, 副教授. 电话: 13886099366; E-mail: bolly1221@whut.edu.cn.
- [收稿日期] 2022-03-18(修改稿)