

缺氧接触氧化/生物转盘组合工艺处理农村生活污水

王 刚, 刘春梅, 赵雪莲, 王俊安, 曲喜杰
(北京桑德环境工程有限公司, 北京 101102)

摘 要: 采用缺氧接触氧化/生物转盘组合工艺处理农村生活污水,研究了组合工艺对污水的处理效果和影响因素。反应器在室温($\geq 17\text{ }^{\circ}\text{C}$)下运行,当进水 COD 平均为 122.6 mg/L 、水力停留时间为 4 h 、回流比为 150% 、溶解氧为 2.23 mg/L 时,系统达到最优运行效果,此时对 COD、氨氮和 TN 的去除率分别达到 78.8% 、 84.9% 和 51.0% ,出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。该组合工艺可以有效处理低浓度、低碳氮比的农村生活污水,并且氨氮和 TN 的去除效果与水力负荷、回流比和转盘转速密切相关。

关键词: 农村生活污水; 缺氧接触氧化; 生物转盘; 水力负荷; 回流比; 转速

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0099-06

Treatment of Rural Domestic Sewage by Combined Process of Anoxic Contact Oxidation/Rotating Biological Disc

WANG Gang, LIU Chun-mei, ZHAO Xue-lian, WANG Jun-an, QU Xi-jie
(Beijing Sound Environmental Engineering Co. Ltd., Beijing 101102, China)

Abstract: The combined process of anoxic contact oxidation and rotating biological disc was used to treat rural domestic sewage, and the influence factors and treatment effect were studied. When temperature was higher than or equal to $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, influent COD concentration was 122.6 mg/L , HRT was 4 h , reflux ratio was 150% and DO was 2.23 mg/L , the combined process reached the optimum operational status. The removal rates of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN reached 78.8% , 84.9% and 51.0% respectively, and the effluent quality was better than the level A limitation of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The combined process could effectively treat low concentration and low C/N ratio rural domestic sewage, and the removal efficiencies of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were closely related to hydraulic loading, reflux ratio and rotating speed.

Key words: rural domestic sewage; anoxic contact oxidation; rotating biological disc; hydraulic loading; reflux ratio; rotating speed

近年来,农村生活污水处理逐渐成为环保行业的新热点,与市政污水相比,农村生活污水水量小、污染物浓度低且水量日变化系数大^[1],因此需要寻找适合低浓度污水且能够应对负荷频繁变化的污水处理工艺,同时考虑到农村污水厂数量大、分散度高,处理工艺还应具有自动化程度高、易维护和节能的特点^[2-3]。

我国南方地区污水 COD 浓度普遍低于 100 mg/L ,传统的活性污泥法易出现污泥流失、生物量降低等问题^[4]。本研究好氧段工艺采用生物转盘,该工艺属于生物膜法,依靠电机驱动转盘给水体复氧,省掉了曝气设备及配套机房,采用变速电机可精确控制转速对水体复氧,比曝气机更节能,同时盘片也提供了适于微生物生长的环境形成生物膜,能够实现水

力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)分离,有利于世代时间长的硝化菌的生长^[5-6]。另一方面,由于生物转盘缺少缺氧环境,TN去除率较低,为了提高系统的脱氮能力需要配置合适的缺氧段工艺^[7],同时考虑到生物转盘不需要活性污泥的特点,本研究采用缺氧接触氧化进行脱氮,构成双生物膜法组合工艺,可省掉污泥回流系统^[8]。为了进一步验证该组合工艺的适用性,笔者将通过小试考察系统的稳定性以及容积负荷、回流比和转盘转速等参数对系统处理效能的影响,为中试及工程应用提供参考数据。

1 试验材料和方法

1.1 原水水质

试验原水直接取自北京市通州区姚辛庄污水处理厂调节池,由于已经过沉淀处理,水中悬浮物较少,其各项污染物浓度均符合农村生活污水特征。原水水质如下:COD为70~160 mg/L、BOD₅为40~90 mg/L、SS为35~87 mg/L、TN为27~40 mg/L、NH₄⁺-N为15~33 mg/L、TP为1.9~3.5 mg/L、pH值为7.3~7.7。

1.2 试验装置

试验装置如图1所示。原水与回流硝化液混合后从缺氧反应器底部连续进水,之后通过溢流水从水面以下进入生物转盘,生物转盘出水依靠溢流进入出水桶。生物转盘底部设置回流口,依靠蠕动泵回流硝化液至缺氧反应器进水端。

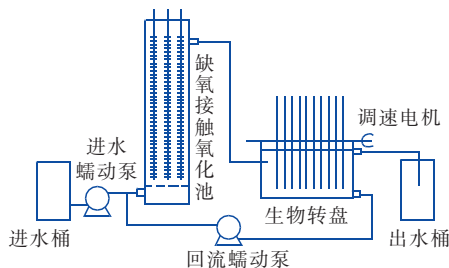


图1 缺氧接触氧化/生物转盘示意

Fig.1 Schematic diagram of anoxic contact oxidation and rotating biological disc

缺氧接触氧化反应器主体为有机玻璃,内径为12 cm,高为50 cm,反应器总容积为5.7 L,有效容积为5 L,内部悬挂3束碳纤维填料,底部设有三通。

转盘盘片由高强度聚乙烯制成,盘片直径为0.25 m,浸没比为40%,单盘片有效面积为0.098 m²,共10张盘片,总有效面积约为1 m²,转盘总容

积为7.5 L,有效容积为5 L^[9]。

1.3 试验方法

为了缩短试验周期,采用姚辛庄污水处理厂沉淀池回流污泥进行接种,污泥取回后加入C:N:P为100:5:1的营养液闷曝2 d,之后按照组合工艺有效体积的1/4进行接种,前3 d间歇运行,之后连续进出水进行挂膜,形成明显生物膜后逐渐提高容积负荷开始污泥驯化。

当反应器出水水质达到一级B排放标准时污泥驯化成功,试验进入参数调整阶段,通过调整回流比、容积负荷和转盘转速,观察不同条件下系统对COD、氨氮和TN的去除效果,分析系统对低浓度、高水量、低碳氮比农村生活污水的处理效果和最佳运行参数。试验过程中定期测定溶解氧浓度,观察溶解氧对氮素转化的影响,试验结束后分析系统生物膜活性。

1.4 分析项目和方法

COD:重铬酸钾法;NH₄⁺-N:纳氏试剂比色法;TN:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;TP:钼酸铵分光光度法;溶解氧:便携式DO测定仪;MLSS、MLVSS:重量法。

2 结果与讨论

2.1 组合工艺的启动

启动阶段进水COD平均为106.8 mg/L,挂膜期HRT为10 h、COD容积负荷为0.52 kg/(m³·d),污泥驯化期HRT为6 h、COD容积负荷为0.84 kg/(m³·d),回流比为100%,室温转盘转速为5~10 r/min,转盘出水DO浓度控制在2~3 mg/L。

反应器整个启动阶段对COD的去除效果比较稳定,出水COD平均浓度为32.7 mg/L。启动阶段对氨氮的去除效果很好,虽然污泥驯化期系统水力停留时间很短,但出水氨氮浓度为3.83 mg/L,去除率达到了83.3%。启动之初出水TN浓度不稳定,随着反应器进入稳定运行,出水TN浓度为18.1 mg/L,去除率最终达到37.1%,这是由于尚未进行参数调整,系统仍未进入最佳运行状态。由于该组合工艺采用的是双生物膜法,没有污泥回流,因此生物除磷效果较差。

由以上数据可见,该组合工艺启动速度较快,对除TP以外的其他污染物均有很好的去除效果,并且在HRT从10 h缩短至6 h后,水力负荷大幅提高,但是微生物并没有出现流失,确保了系统的处理

效果,这说明该工艺适合处理污染物浓度低且水力负荷较高的农村生活污水。

2.2 回流比对系统处理效能的影响

碳氮比低、碳源不足是农村生活污水的特点之一,这也是污水厂脱氮的限制因素,因此需要一种能够在低 C/N 值环境下实现脱氮的工艺。回流比是影响脱氮的核心参数,回流比低则脱氮效果不明显,回流比高又会带来高成本和缺氧环境被压缩的问题。该阶段主要探究组合工艺处理低碳氮比污水的适宜回流比,进水 COD 平均为 104.4 mg/L, HRT 为 6 h, 平均 COD 容积负荷为 0.81 kg/(m³·d), 室温下运行, 回流比分别设为 70%、100%、150% 和 200%。试验结果见图 2。

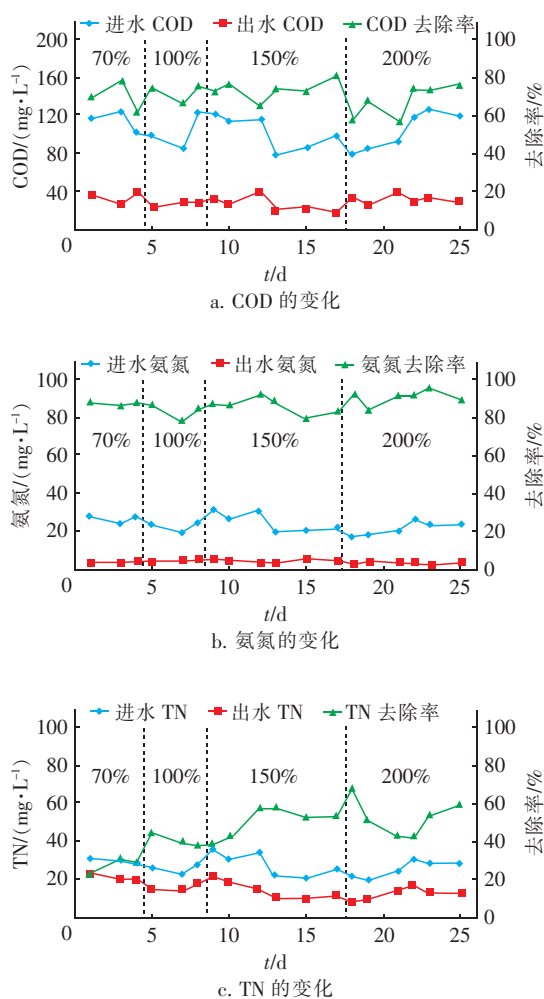


图2 不同回流比下主要污染物浓度变化

Fig.2 Variation of main pollutants under different reflux ratios

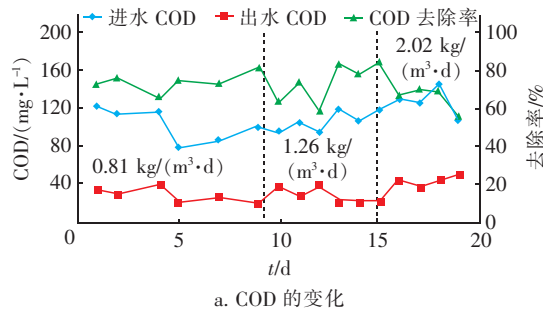
从图 2(a) 可知,不同回流比下系统对 COD 均能保持较高的去除率,出水浓度依次为 34.8、28.3、

27.4 和 32.4 mg/L;从图 2(b) 可知,出水氨氮浓度依次为 3.4、3.7、3.5 和 2.0 mg/L,由于进水氨氮浓度有所波动,对氨氮的去除率在 82.4%~90.2% 之间。由此可见,回流比对 COD 和氨氮的去除效果影响很小,但是在回流比为 200% 时出水氨氮降至最低值(2.0 mg/L),这可能是因为较高的回流比提高了系统的溶解氧分布,有利于氨氮去除。如图 2(c) 所示,回流比的变化主要影响了 TN 的去除效果,不同回流比下出水 TN 依次为 21.1、15.0、14.0 和 12.9 mg/L,去除率分别为 27.3%、40.4%、50.2% 和 52.5%,可知 TN 去除率随回流比的提高而提高,但当回流比达到 150% 时,再继续提高回流比,TN 去除率增幅有限,这主要是因为回流量过大压缩了系统的缺氧环境不利于反硝化脱氮,另一方面过多的溶解氧进入缺氧区也消耗了本就不多的碳源。

该阶段进水 C/N 均值仅为 3.9,说明双生物膜法组合工艺能够在较低的 C/N 值下实现稳定脱氮^[10],这主要是因为缺氧接触氧化和生物转盘虽然是串联工艺,但微生物基本是独立培养的,缺氧段没有杂菌竞争碳源和生存空间,有利于富集反硝化菌,提高了反硝化菌对碳源的利用率;另一方面,由于系统省掉了污泥回流,降低了进入缺氧接触反应器的溶解氧,这有利于缺氧段保持较低的溶解氧为反硝化提供环境。

2.3 容积负荷对系统处理效能的影响

容积负荷是影响污水处理系统正常运行的关键因素,而农村污水的特点之一就是水质、水量变化较大,因此需要考察组合工艺对容积负荷变化的承受能力。该阶段原水 COD 浓度在 77.9~143.6 mg/L 之间变化,平均浓度为 109.3 mg/L,保持浓度不变通过增加水量提高系统负荷,HRT 分别控制在 6、4 和 3 h,COD 容积负荷分别为 0.81、1.26 和 2.02 kg/(m³·d),室温,回流比控制在 150%,转盘转速为 10 r/min。试验结果见图 3。



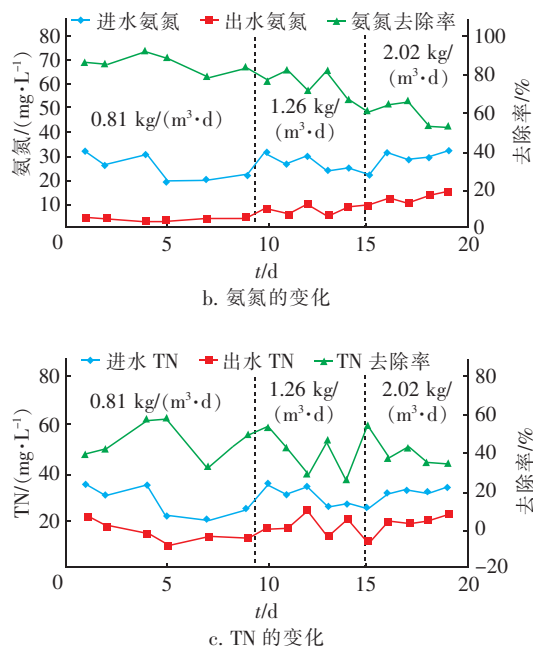


图3 不同容积负荷下主要污染物浓度变化

Fig. 3 Variation of main pollutants under different volume loading

由图3(a)可知,3个容积负荷下出水COD浓度分别为27.4、33.5和43.8 mg/L,去除率为65.0%~73.3%,负荷提高2.5倍后,出水COD依然能够达标,可见该工艺对有机物的去除能力较强。反观出水氨氮,随着负荷提高,出水氨氮分别为3.5、7.0和12.5 mg/L,去除率从85.3%下降至58.4%,负荷提高对氨氮的去除效果有明显影响。由图3(c)可知,虽然氨氮下降比较明显,但是TN去除率下降程度不大,随着负荷提高,出水TN分别为14.87、17.3和20.2 mg/L,去除率分别为46.2%、41.7%和37.3%。对氨氮的去除率下降了26.9个百分点,而对TN的去除率仅下降了8.9个百分点,但是出水氨氮占TN的比例从23.5%升高到61.8%,这主要是因为 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 含量下降,相对增加的碳源有利于 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的去除,出水TN不达标是因为氨氮浓度上升所致。

由以上分析可知,该组合工艺在面对容积负荷变化时受影响最大的是氨氮,原因有以下两点:系统的部分有机物和绝大部分氨氮都是由生物转盘去除的,因此转盘上主要富集了异养菌和硝化菌,两者呈竞争关系,当负荷提高后异养菌取得生长优势,硝化菌受到抑制;另一方面,由于没有调整转速,3个阶段生物转盘的溶解氧平均浓度分别为2.57、1.21和

0.69 mg/L(见图4),负荷逐渐提高后导致出水溶解氧下降,而溶解氧和出水氨氮呈明显的负相关关系,溶解氧的下降进一步降低了系统的硝化能力。预测负荷提高同时调整转速以提高溶解氧,应该能够有效强化系统去除氨氮的能力,而且即使在溶解氧仅为0.69 mg/L时,氨氮去除率依然保持在58.4%,可见该组合工艺的抗负荷冲击能力较强。

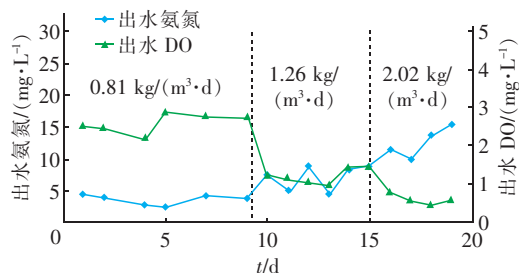
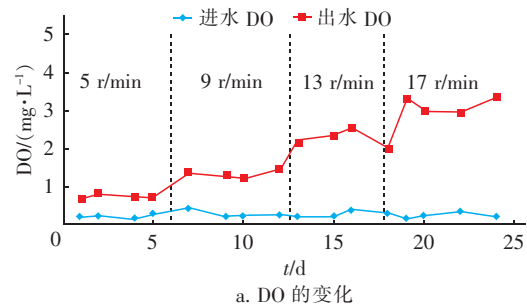


图4 不同容积负荷下生物转盘的溶解氧浓度变化

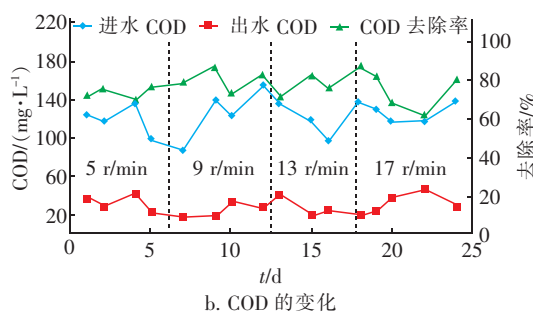
Fig. 4 Change of DO of RBC under different volume loading

2.4 转盘转速对系统处理效能的影响

由上一阶段可知,当负荷突变时影响系统出水的核心因素是溶解氧,而该组合工艺的溶解氧是由生物转盘提供的,溶解氧的高低会直接影响系统对COD、氨氮和TN的去除效果。由于溶解氧与进水水质有关且不稳定,本阶段通过控制转速调整溶解氧,观察转速为5、9、13和17 r/min时出水DO及其他污染物浓度的变化情况,该阶段COD平均浓度为122.6 mg/L、HRT为4 h、COD容积负荷为1.47 kg/(m³·d)、回流比为150%、室温。试验结果如图5所示。



a. DO的变化



b. COD的变化

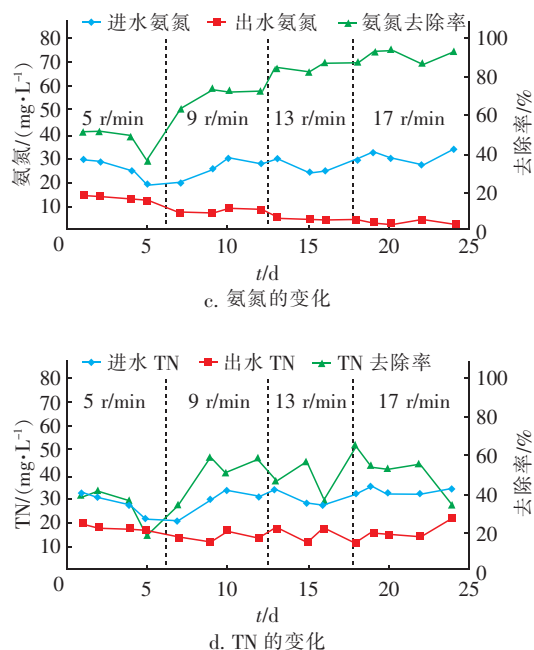


图5 不同转速下 DO 和主要污染物浓度变化

Fig. 5 Variation of DO and main pollutants under different rotating speeds

进水溶解氧平均浓度为 0.23 mg/L,随着转速的不断提高,出水 DO 平均浓度依次为 0.72、1.31、2.23 和 3.35 mg/L。溶解氧对 COD 的去除效果并没有太大影响,不同阶段出水 COD 平均浓度分别为 32.3、24.5、25.6 和 33.8 mg/L。但当转速达到 13 r/min 时,有一定的脱膜现象,出水 SS 增加。

反观氨氮的变化就十分明显了,随着溶解氧的提高,出水氨氮分别为 13.28、7.50、3.98 和 2.53 mg/L,去除率分别为 46.3%、68.2%、84.9% 和 91.5%,可见提高溶解氧能够明显改善氨氮去除效果,这也证明负荷提高时可以通过调整转速来提高对污染物的去除率。有一点值得注意,当转速为 5 r/min 时水体中溶解氧只有 0.72 mg/L,但是氨氮依然保持 46.3% 的去除率,通常当水体中溶解氧浓度较低时硝化反应会受到明显抑制,不会有如此高的去除率。针对此现象,本研究认为这和生物转盘的氧扩散方式有关,普通的接触氧化法溶解氧是从空气进入水中然后扩散入生物膜,而转盘的溶解氧是从空气先进入生物膜然后扩散入水中,也就是说生物膜整体的溶解氧浓度可能要高于水体,即使水体含氧量较低,但生物膜会周期性暴露在空气中,因此依然能保持较高的硝化能力。

不同转速下出水 TN 依次为 19.18、13.85、

14.70 和 16.93 mg/L,去除率分别为 33.7%、53.8%、51.0% 和 49.3%,呈先升高后下降的趋势。前期 TN 去除率低是因为溶解氧较低、氨氮去除率下降造成的,此时氨氮占 TN 的 69.2%;转速为 13、17 r/min 时 TN 去除率基本持平,但此时氨氮分别占 TN 的 27.0% 和 14.9%,由此可见溶解氧也并非越高越好,过高的回流比会压缩缺氧环境而抑制反硝化反应。

2.5 组合工艺的生物膜特征

该组合工艺由于没有污泥回流,缺氧接触氧化反应器和生物转盘的微生物基本是独立培养的。缺氧段生物膜由反硝化菌为主的厌氧、缺氧微生物组成,整体呈黑色;好氧段由于采取轴向进水,生物膜呈现阶段分布,转盘前端由于有机物浓度较高主要以灰色异养菌为主,生物膜较厚,后端随着有机物浓度降低则主要富集了褐色的硝化菌。试验结束后,分别取黑色、灰色和褐色 3 种典型生物膜检测了微生物活性,其 VSS/SS 值依次为 0.79、0.81 和 0.90,而通常活性污泥的 VSS/SS 值为 0.6~0.7,可见生物膜的微生物活性高于活性污泥,尤其是起硝化作用的生物膜虽然很薄但处理能力很强。

3 结论

① 采用缺氧接触氧化/生物转盘组合工艺处理农村生活污水,当温度 ≥ 17 °C、硝化液回流比为 150%、溶解氧为 2.23 mg/L (转速为 13 r/min)、COD 容积负荷为 1.47 kg/(m³·d) 时系统获得最佳处理效果,能实现 COD、氨氮和 TN 的同步去除,但双生物膜法不利于培养聚磷菌,故生物除磷效果差。

② 该组合工艺适用于处理污染物浓度低、负荷变化大的农村生活污水,因为采用双生物膜工艺能够有效分离 HRT 和 SRT,解决了低负荷下微生物流失的问题。另外,生物膜的 VSS/SS 值比活性污泥高,说明微生物的活性更好,处理能力更强,配合生物转盘对溶解氧较精确的控制,该组合工艺整体抗负荷冲击能力较强。

③ 生物转盘工艺能在很低的溶解氧环境下保持较高的氨氮去除效果,这主要是因为该工艺的溶解氧扩散方式与接触氧化法不同,生物转盘中生物膜的含氧量应该高于水体,因此即使水体中溶解氧含量较低,生物转盘依然能保持较好的硝化反应。

④ 该组合工艺脱氮需要的碳氮比较低,主要是因为并没有污泥回流,有利于保持前端的缺氧环境,

同时也有利于实现缺氧接触氧化和生物转盘的微生物独立培养,缺氧段没有杂菌竞争碳源和生存空间,有利于富集反硝化菌实现低碳脱氮。

参考文献:

- [1] 李发站,陆佳兴. 农村生活污水处理中存在的问题与对策[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版,2018,39(4):23-28.
Li Fazhan, Lu Jiaxing. Problems and countermeasures in rural domestic sewage treatment[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2018, 39(4): 23-28 (in Chinese).
- [2] 梁学颖. 村镇污水处理解决方案及应用[J]. 净水技术,2018,37(8):25-27.
Liang Xueying. Solution and application of sewage treatment in villages and towns[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 25-27 (in Chinese).
- [3] 文一波. 中国典型村镇污水处理系统研究[D]. 北京:清华大学,2016.
Wen Yibo. A Study on Wastewater Treatment System in Chinese Typical Villages [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [4] 袁晓燕,余志敏,施卫明. 大清河流域典型村镇生活污水排放规律和污染负荷研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1547-1557.
Yuan Xiaoyan, Yu Zhimin, Shi Weiming. Domestic sewage emission dynamics and pollutant loading capacity of the Daqing River Valley: A case study on the village scale[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(8): 1547-1557 (in Chinese).
- [5] 娄高彬,刘金泉,赵淑萍,等. 低温条件下生物转盘处理城镇污水的研究[J]. 中国给水排水,2015,31(23):101-103.
Lou Gaobin, Liu Jinquan, Zhao Shuping, et al. Experimental study on treatment of municipal wastewater by rotating biological contactor under low temperature conditions[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 101-103 (in Chinese).
- [6] 郑春燕,王艳华,李树苑,等. 四种小城镇污水处理工艺投资分析与探讨[J]. 中国给水排水,2014,30(12):63-67.
Zheng Chunyan, Wang Yanhua, Li Shuyuan, et al. Analysis and discussion on investments of four sewage treatment technologies in small towns[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12): 63-67 (in Chinese).
- [7] 谢敏,熊仁,冯传禄,等. 新型接触氧化工艺处理农村污水的研究[J]. 给水排水,2018,44(9):56-61.
Xie Min, Xiong Ren, Feng Chuanlu, et al. Study on new contact oxidation process for treating rural wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(9): 56-61 (in Chinese).
- [8] 王聪,王淑莹,张淼,等. 厌氧/缺氧/好氧生物接触氧化处理低碳氮比污水的物料平衡[J]. 农业工程学报,2014,30(19):273-281.
Wang Cong, Wang Shuying, Zhang Miao, et al. Material balance of anaerobic-poor oxygen-aerobic biological contact oxidation process treating sewage with low carbon/nitrogen ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 273-281 (in Chinese).
- [9] 霍鑫超,韩云平,刘俊新,等. 新型生物转盘处理农村生活污水研究[J]. 水处理技术,2014,40(11):103-106.
Huo Xinchao, Han Yunping, Liu Junxin, et al. Study on treatment of rural domestic sewage by a new rotating biological contactor [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(11): 103-106 (in Chinese).
- [10] 王丽丽,赵林,谭欣,等. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. 环境保护科学,2004,30(1):15-18.
Wang Lili, Zhao Lin, Tan Xin, et al. Influence of different carbon source and ratio of carbon and nitrogen for water denitrification [J]. Environmental Protection Science, 2004, 30(1): 15-18 (in Chinese).



作者简介:王刚(1986-),男,山西高平人,硕士,研发工程师,主要从事污水生物处理技术研究。

E-mail: wanggang_yf@163.com

收稿日期:2019-02-13