

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.001

纤维素对污水生物处理系统性能的影响及机理分析

郝晓地^{1,2}, 饶志峰^{1,2}, 刘然彬^{1,2}, 刘杰³

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中-荷未来污水处理技术研发中心, 北京 100044; 3. 首创生态环保集团, 北京 100044)

摘要: 厕纸等纤维素成分在污水中含量不菲,它们在生物处理过程中非但很难降解,反而会增加系统的运行负担。因此,国际上已开始从污水中分离纤维素的研究与实践。为探讨纤维素对污水生物处理系统性能与运行的影响,采用小试变形 UCT 工艺考察了它们的影响程度并揭示出影响机理。结果显示,纤维素存在只会在短期内影响 COD、N、P 去除,表现为曝气量不足。只要提高 2~3 倍曝气量便可恢复出水水质。微观研究揭示,纤维素线性形态和含有大量官能团特点能够明显提高污泥絮体密度,从而导致絮体内氧传质效率下降,这也是纤维素存在时需要加大曝气量的根本原因。纤维素对絮体的网捕卷扫作用使絮体致密的好处是可强化同步硝化反硝化(SND)作用,亦可减少出水 SS 含量。综合衡量,预处理分离纤维素有利于节能降耗,况且,纤维素大部分成分在曝气过程是难以降解的,最终会进入剩余污泥之中,增加污泥量。可见,从污水中回收纤维素不仅可实现废物资源再利用,亦有助于节能降耗,同时为升级污水处理增加处理空间。

关键词: 纤维素; 脱氮除磷; 絮体; 氧传质速率; 同步硝化反硝化; 节能降耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0001-06

Impact and Mechanism of Celluloses on the Performance of Biological Wastewater Treatment

HAO Xiao-di^{1,2}, RAO Zhi-feng^{1,2}, LIU Ran-bin^{1,2}, LIU Jie³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Sino-Dutch R&D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Beijing 100044, China; 3. Capital Eco-Pro Group, Beijing 100044, China)

Abstract: Wastewater contains a certain amount of celluloses which is not only difficult to be degraded in the biological treatment process, but also increases the burden of the system. As a result, the separation of celluloses from wastewater has been studied and practiced. To further clarify the influence of celluloses on the performance of biological wastewater treatment, a lab-scale modified UCT reactor was constructed to study its impact on pollutants removal and the associated mechanisms. The results indicated that the presence of celluloses in the influent resulted in the deterioration of removing COD, nitrogen, and phosphorus in a short term due to the deficiency of dissolved oxygen (DO). The effluent

quality was restored after doubling or tripling the aeration rate. In addition, the microscopic examination showed that the linear morphology and vast amounts of functional groups of celluloses could significantly increase the density of sludge flocs. Consequently, the mass transfer of DO in the flocs was undermined. This was also the reason why there was a need to increase the aeration rate to obtain a favorable performance when celluloses were present. However, this consolidation of sludge and the net trapping and sweeping effect had a positive effect on the simultaneous nitrification and denitrification (SND) capacity and the SS retainment. Overall, recovery of celluloses before the biological unit can reduce the energy input and costs, otherwise, they will contribute to the excess sludge production. In other words, the recovery of celluloses from wastewater can be valorized and leveraged to save energy and costs as well as to increase the capacity of wastewater treatment.

Key words: celluloses; nitrogen and phosphorus removal; flocs; oxygen transfer efficiency; simultaneous nitrification and denitrification (SND); energy saving and consumption reduction

污水作为能源与资源载体的认识已逐渐被业界所接受,特别是有机物和氮、磷资源。围绕这些资源的回收技术路线和产品也一直持续被研发并优化^[1-4]。事实上,污水中可回收资源并不仅仅局限于这些物质,污水中难以降解的有机物——纤维素其实也是一种宝贵资源^[5-9],回收后可用作沥青和混凝土添加材料,亦可以用于生产玻璃纤维、抹布的原材料^[10-12]。因此,从污水中回收纤维素具有可观的经济效益。

污水中的纤维素主要来自于厕纸、厨余垃圾或合流制管道雨水径流。厕纸中约70%~80%成分为纤维素^[10],在进入污水管道后,厕纸逐步分解为长度约1~1.2 mm的线状纤维素^[8]。因其降解速率缓慢,纤维素大多以悬浮固体(SS)形式进入污水处理厂。根据不同国家/地区社会发展水平和卫生条件差异,纤维素一般约占污水处理厂进水总SS的30%~50%(以COD计约占20%~30%)^[5]。纤维素进入污水处理厂后,初沉池可截留约20%~70%;生物处理单元基本上对纤维素无降解作用,大部分纤维素最终残留于剩余污泥中^[13]。

回收纤维素起源于荷兰,并已开始工程化应用^[8]。以旋转带式过滤机(筛网孔径=0.35 mm)回收纤维素平均去除率约35%(基于SS),其中,纤维素占回收固体部分的比例约为79%^[14]。回收纤维素不仅可降低剩余污泥量,还可以有效减少曝气能耗,相应增加处理系统负荷^[14]。然而,纤维素对污水生物处理系统,特别是脱氮除磷影响的研究还不多见^[15-16]。为此,通过小试生物脱氮除磷装置,以人工配制含纤维素生活污水的方式,考察纤维素对

有机物、氮、磷去除效率以及运行的影响,并分析相应的机理。

1 试验材料与方法

1.1 人工污水配制

试验采用人工配制模拟生活污水。其中,COD由无水乙酸钠(CH_3COONa)/工业级乙酸钠($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、葡萄糖($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、胰乳蛋白胨提供,投加量分别为35.7/78.12、14.15、3.94 g/100 L,最终浓度为450 mg/L;TN由氯化铵(NH_4Cl)和胰乳蛋白胨提供,投量分别为16.7、3.94 g/100 L,最终浓度为50 mg/L;TP由磷酸二氢钾(KH_2PO_4)提供,投量为4.39 g/100 L,最终浓度为10 mg/L。通过投加碳酸氢钠(21.2~42.4 g/100 L)控制碱度在100~200 mg/L(以 CaCO_3 计)。每100 L水中投加10 mL微量元素浓缩母液,微量元素组分及其占比参照国际水协出版的《Experimental Methods in Wastewater Treatment》^[17]。

为更好地模拟污水中纤维素形态和性质,在第36天直接投加经预处理后的卫生纸作为纤维素来源(以SS计为60~80 mg/L)。该卫生纸的原材料为原生木浆,产品规格为120 mm×120 mm/节(4层),其纤维素含量为 $(82.10 \pm 0.92)\%$ 。预处理方法:将10 g卫生纸溶解于100 L自来水中,并连续搅拌(40 r/min)1 d,使其充分分解至线状纤维素。

1.2 试验装置及运行

小试装置为变形UCT工艺,由有机玻璃材质制成,长×宽×高为1.44 m×0.3 m×0.3 m,有效容积为120 L,通过挡板分为5个反应区。小试装置反应区构成及其体积如图1所示。每个反应池设有搅

拌器,在混合池及好氧池底部各均匀布置6个曝气头。好氧池末端连接23 L柱状沉淀池,设计表面负

荷为 $0.64 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。为避免藻类滋生对试验产生影响,整个反应器池体用黑色遮光布进行遮光处理。

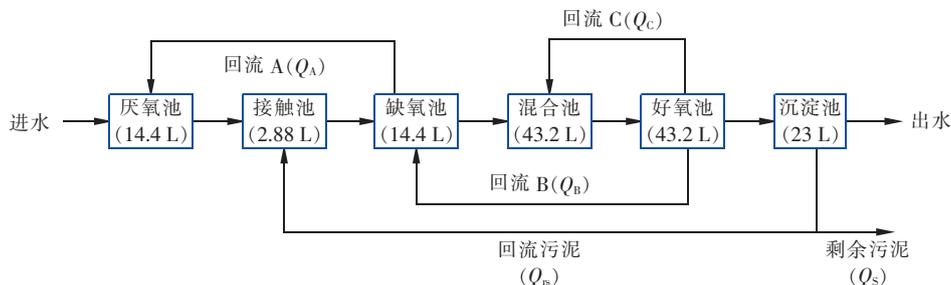


图1 变形UCT小试装置工艺流程

Fig. 1 Diagram of the lab-scale modified UCT reactor

装置采用连续流运行模式,根据进水有无纤维素分为两阶段,第一阶段:0~35 d,无纤维素投加;第二阶段:36~160 d,投加纤维素。两阶段水力负荷均为 $0.83 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$,反应器污泥浓度(MLSS)控制在 $3\ 500 \text{ mg}/\text{L}$ 左右,回流A、B、C分别为150%、300%、40%。污泥停留时间(SRT)设定为10~20 d(根据实际情况进行调整);第一、二阶段的污泥回流比(R)分别控制在100%和150%。其中,好氧池溶解氧(DO)控制在 $2\sim 5 \text{ mg}/\text{L}$,混合池根据出水水质灵活控制曝气开关,第一阶段和第二阶段均未对混合池进行曝气,其中DO为 $0.1\sim 0.2 \text{ mg}/\text{L}$ 。

1.3 常规检测分析方法

装置启动后,每2~3 d取样测定进出水水质(COD、N、P)。另外,在第15、68、74、159天于缺氧池/好氧池取2~3 L混合液用于微生物活性测试;在第20、124、140、145天,在好氧池取2~3 L混合液用于同步硝化反硝化(SND)批次试验。

其他各指标的检测参考《水和废水监测分析方法(第4版)》进行。

2 结果分析与讨论

2.1 纤维素对COD与P去除的影响

图2显示了小试装置在整个试验期间出水COD与磷浓度变化。在第一阶段进水TCOD浓度维持在 $450 \text{ mg}/\text{L}$ 时,出水TCOD平均为 $(39.7 \pm 16.1) \text{ mg}/\text{L}$,其中SCOD为 $(24.8 \pm 10.8) \text{ mg}/\text{L}$,符合国家一级A排放标准。然而,当第二阶段加入纤维素后,COD去除效果明显恶化,出水TCOD最高检测值高达 $95 \text{ mg}/\text{L}$ (SCOD为 $80 \text{ mg}/\text{L}$)。为探究加入纤维素后COD去除效果恶化原因,对出水TCOD的构成进行了分析。结果显示,加入纤维素后出水SS显著下降,从 $(48.25 \pm 3.29) \text{ mg}/\text{L}$ 降至

$(21.34 \pm 9.71) \text{ mg}/\text{L}$,由此可排除污泥沉降性能恶化导致出水COD升高问题。

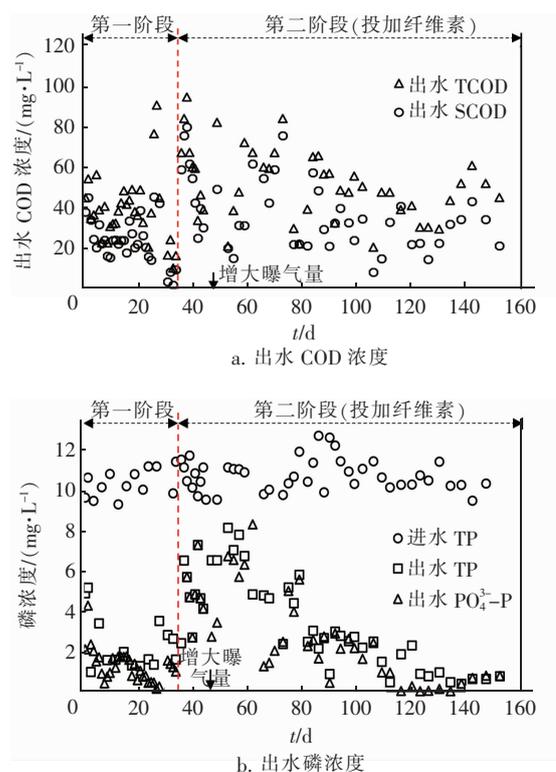


图2 小试装置出水COD、TP和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度变化

Fig. 2 Evolution of COD, TP and $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ concentration in the effluent

纤维素富含官能团且呈线状,因此其对污泥具有较好的网捕卷扫作用,可促进污泥絮体凝结并提高其紧密度^[18-19],这一现象通过污泥镜检也得到了印证。然而,不论是因纤维素自身作为COD消耗氧气,还是导致污泥絮体变得紧密都有可能降低氧传质,从而弱化了对COD的降解效率。为此,在第46天对好氧池运行进行调整,将曝气量提高至 $0.30\sim$

0.50 L/min(添加纤维素前为 0.10 ~ 0.20 L/min)。结果,出水 COD 开始逐渐下降并恢复至投加纤维素前水平(TCOD = 49.4 mg/L, SCOD = 34.2 mg/L)。可见,回收纤维素对曝气池运行有着积极影响,可提高氧气传质与利用效率。

与此同时,投加纤维素对磷去除的影响与 COD 类似,在纤维素投加初期(第 36 ~ 50 天),出水总磷(TP)和正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)浓度均开始升高,去除率分别降低至 51.99% 和 56.32%。从发生原因来看,DO 不足是导致磷去除效率下降的主因,可以从增大曝气量后出水 TP 浓度逐渐下降得到验证。然而,出水 TP 浓度在提高曝气量后的很长一段时间内也没有恢复至投加纤维素前水平,而是保持在 (2.86 ± 1.22) mg/L 左右。为进一步分析其原因,在第 68 天从曝气池末端取混合样进行了聚磷菌(PAOs)活性测定,并与投加纤维素前的活性进行了对比。结果显示,投加纤维素后,反应器中 PAOs 比释磷速率和比吸磷速率分别为 11.3 和 12.0 mg/(gVSS · h),与投加前的 10.8、13.4 mg/(gVSS · h)相比变化并不是很大。可见,纤维素的投加对 PAOs 活性的影响并不大。因此,反应器除磷效果恢复较慢的原因可能与纤维素投加初期导致的跑泥和生物量恢复较慢有关。

2.2 纤维素对氮去除的影响

图 3 为投加纤维素前后氮去除效果的变化。

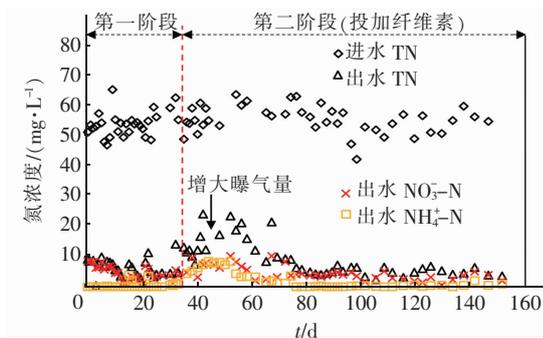


图 3 装置出水 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 3 Evolution of the effluent TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration

从整体上看,反应器无论是否投加纤维素均能够很好地完成脱氮,投加前出水 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 (5.9 ± 3.1) 、 (0.40 ± 0.96) 、 (4.59 ± 2.22) mg/L,投加后为 (7.80 ± 5.46) 、 (1.30 ± 2.00) 、 (4.11 ± 2.22) mg/L。只是

在纤维素投加初期,出水 TN 出现明显升高,此时出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 明显增多,这显然与上述氧传质受限有关。图 3 显示,在增大曝气量后对 TN 的去除效率迅速恢复,主要是因为硝化能力开始恢复。

进一步分析反应器氮沿程变化趋势(见图 4),第二阶段好氧池中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 并没有随 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝化而积累,说明反硝化并没有受到抑制,一方面因絮体密实而可能出现了同步硝化反硝化(SND)现象,另一方面也可能涉及纤维素中少量碳源成分降解。

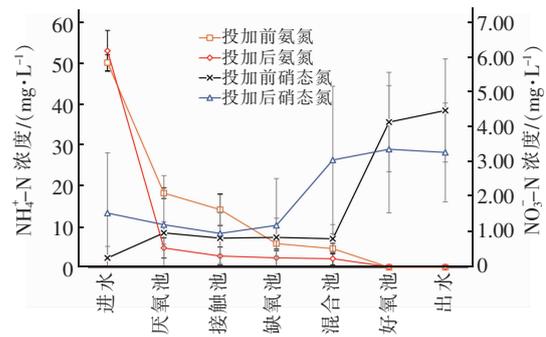


图 4 上清液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的沿程变化

Fig. 4 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration along the process

投加纤维素前后的 SND 效率见图 5,第一阶段(未投加纤维素)无论 DO 浓度多大,SND 效率均不高($< 8\%$),即使控制 DO 在 0.5 mg/L 时,SND 效率也不过 2.8%。相反,第二阶段添加纤维素后,SND 效率明显提高,DO = 0.5 mg/L 时达 48.69%,即使 DO 提高至 3 mg/L,SND 效率依然可以保持在 20%。这一结果深入揭示了纤维素对絮体致密性产生的絮体内 DO 梯度之重要作用。

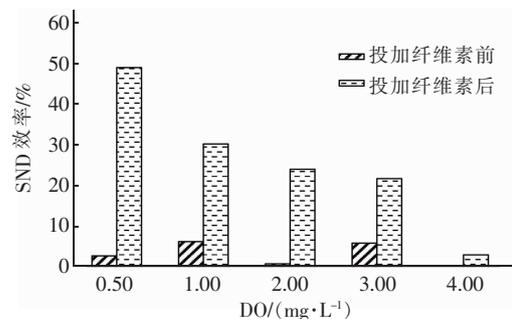


图 5 投加纤维素前后 SND 效率对比

Fig. 5 Efficiency of SND before and after adding cellulose

2.3 纤维素对运行的影响

纤维素对反应器运行影响是两方面的,似乎均与其对污泥絮体致密程度的改变有关。图 6 总结了

纤维素对反应器运行、能耗等方面的影响及其机理。纤维素通过自身线状形态和官能团的网捕卷扫作用将污泥絮体密实包裹,相当于促进絮凝,可降低出水SS以及其中所含N、P。

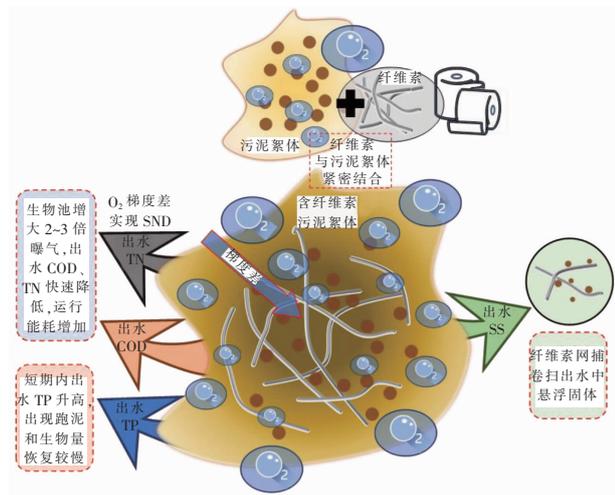


图6 纤维素对污水生物处理运行影响与机理

Fig. 6 Impact and mechanisms of cellulose on biological wastewater treatment system

纤维素另一个影响表现为影响絮体内氧的传质^[19],只有通过加大混合液曝气量方能让氧气渗入絮体,以维持必要的好氧反应(碳氧化与硝化)。第二阶段的曝气量较第一阶段提高了2~3倍,即增加了50%以上的曝气耗能。可见,实际污水处理厂若能实施纤维素的回收,可以大大减少曝气能耗^[8,14],有助于节能减排。然而,纤维素从污泥絮体中完全消失对絮体内SND现象不利,需要完善宏观好氧/缺氧环境以确保脱氮除磷能力。

总之,纤维素对生物处理系统的综合影响并不大,仅限于SS和SND,最大影响则是曝气量与能耗。因此,作为本身很难降解的有机物,纤维素进入生物系统的正面作用不大,应予以分离回收并加以利用。

3 结论

纤维素对生物处理系统的影响较短暂,对COD、N、P去除率的下降影响可通过加大曝气量加以解决,但这会成为系统能耗增加的主因。纤维素对污泥絮体的网捕卷扫作用可增加絮体致密性,从而强化SND并有利于降低出水SS。但也正因为如此,大大降低了絮体内氧传质效率,不得通过增大曝气量来提高氧向好氧层扩散的推动力。综合衡量,预处理分离纤维素有利于节能降耗,况且,纤维素大部分成分在曝气过程是难以降解的,最终会进

入剩余污泥中,增加污泥量。因此,从污水中回收纤维素不仅可实现废物资源再利用,亦有助于污水处理的节能降耗,同时,为升级污水系统增加了处理空间。

参考文献:

- [1] HAO X D, WANG X Y, LIU R B, *et al.* Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2019, 160: 268–277.
- [2] VERSTRAETE W, DE CAVEYE P V, DIAMANTIS V. Maximum use of resources present in domestic used water[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23): 5537–5545.
- [3] 郝晓地, 周健, 王崇臣, 等. 污水磷回收新产物——蓝铁矿[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(11): 4223–4234. HAO Xiaodi, ZHOU Jian, WANG Chongchen, *et al.* New product of phosphorus recovery—vivianite[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11): 4223–4234 (in Chinese).
- [4] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2018, 161: 74–77.
- [5] 郝晓地, 翟学棚, van Loosdrecht M C M, 等. 污水碳源分离新概念——筛分纤维素[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 9–12. HAO Xiaodi, ZHAI Xuepeng, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* A new concept of separating carbon source from wastewater: sieving fibers[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 9–12 (in Chinese).
- [6] CRUTCHIK D, FRISON N, EUSEBI A L, *et al.* Biorefinery of cellulosic primary sludge towards targeted short chain fatty acids, phosphorus and methane recovery[J]. *Water Research*, 2018, 136: 112–119.
- [7] LI S, WU Z, WU Z, *et al.* Enhancing fiber recovery from wastewater may require toilet paper redesign[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121138.
- [8] RUIKEN C J, BREUER G, KLAVERSMA E, *et al.* Sieving wastewater—cellulose recovery, economic and energy evaluation[J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 43–48.
- [9] 郝晓地, 王吉敏, 曹兴坤, 等. 剩余污泥中木质纤维素能源转化潜力分析[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(3): 1106–1114. HAO Xiaodi, WANG Jimin, CAO Xingkun, *et al.* Analyses of energy conversion potential of lignocellulose

- contained in excess sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(3): 1106 - 1114 (in Chinese).
- [10] PALMIERI S, CIPOLLETTA G, PASTORE C, *et al.* Pilot scale cellulose recovery from wastewater sludge and reuse in building and construction material [J]. Waste Management, 2019, 100: 208 - 218.
- [11] YOU S J, WU D C. Potential for reuse of high cellulose containing wastewater after membrane bioreactor treatment [J]. Desalination, 2009, 249(2): 721 - 728.
- [12] AKYOL C, FOGLIA A, OZBAYRAM E G, *et al.* Validated innovative approaches for energy-efficient resource recovery and re-use from municipal wastewater; from anaerobic treatment systems to a biorefinery concept [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 50(9): 869 - 902.
- [13] LI S, WU Z, LIU G. Degradation kinetics of toilet paper fiber during wastewater treatment: effects of solid retention time and microbial community [J]. Chemosphere, 2019, 225: 915 - 926.
- [14] RUSTEN B, ØDEGAARD H. Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater [J]. Water Science & Technology, 2006, 54(10): 31 - 38.
- [15] HOFSTEN B, EDBERG N. Estimating the rate of degradation of cellulose fibers in water [J]. Oikos, 1972, 23(1): 29 - 34.
- [16] RAHMAN N S A, YHAYA M F, AZAHARI B, *et al.* Utilisation of natural cellulose fibres in wastewater treatment [J]. Cellulose, 2018, 25(9): 4887 - 4903.
- [17] VAN LOOSDRECHT M C M, NIELSEN P H, LOPEZ-VAZQUEZ C M, *et al.* Experimental Methods in Wastewater Treatment [M]. London: IWA Publishing, 2016.
- [18] 曹兴坤. 预处理促进污泥中木质纤维素降解实验研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
CAO Xingkun. Experimental Study on Improving Degradation of Sludge Lignocelluloses by Pretreatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).
- [19] AHMED A S, KHALIL A, ITO Y, *et al.* Dynamic impact of cellulose and readily biodegradable substrate on oxygen transfer efficiency in sequencing batch reactors [J]. Water Research, 2021, 190: 116724.

作者简介: 郝晓地 (1960 -), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 研究领域包括污水处理碳中和技术集成、可持续污水处理技术研发、污水脱氮除磷及其模拟技术、污水处理资源化技术等, 目前担任水处理领域顶尖期刊《Water Research》区域主编 (Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2021-08-03

修回日期: 2021-08-16

(编辑: 李德强)

“第九届饮用水安全保障技术交流会”在杭州胜利举办

根据当前我国城乡供水存在的水质、水量差异等现状, 充分利用《中国给水排水》杂志社行业技术交流前沿平台和浙江等地区规范化水厂与现代化水厂建设成果, 以及农村饮用水达标提标巩固工程等先进经验, 保障饮用水安全优质, 使我国城乡供水事业更上新台阶, 让人民群众从“有水喝”“喝好水”到“水好喝”的目标宗旨, 2021年10月11日—13日, 《中国给水排水》杂志社与联池水务联合主办的“第九届饮用水安全保障技术交流会”在浙江杭州胜利举行。本次会议得到了中国市政工程华北设计研究总院有限公司、中国建设科技集团股份有限公司、杭州临安自来水公司等单位的大力支持。

浙江省城市水业协会方强秘书长、浙江联池水务设备股份有限公司池国正董事长出席会议并致欢迎辞。各位专家分别就现代化水厂建设、一体化设备水厂、HACCP体系建设、行业最新标准等方面进行了交流分享, 并参观了大型现代化不锈钢水厂——临安龙岗 150 000 m³/d 装配式一体化设备水厂。与会人员纷纷表示, 本次会议必将有力推进我国饮用水安全保障工作, 促进供水行业的稳健可持续良性发展, 携手共同努力振兴民族水工业!

(本刊编辑部)