

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.010

低C/N污水处理过程中有机碳源的特性及转化分析

李惠平^{1,2}, 庞维海^{1,2}, 谢丽^{1,2}, 李芷昕^{1,2}, 张琨³, 刘源³,
赵力³, 沈康⁴

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 广东粤海水务股份有限公司, 广东 深圳 518021; 4. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: C/N值是影响污水脱氮效果的主要因素之一,为探究低C/N值城镇污水处理过程中不同特性有机碳源的利用水平,采用三维荧光光谱-平行因子分析技术(3DEEM-PARAFAC),对广东省某污水厂SBR工艺不同处理阶段的水质进行分析。结果表明,3DEEM-PARAFAC技术可有效表征低C/N污水处理过程中有机碳源的特征变化,并解析出4种荧光组分:类色氨酸、氨基酸、腐殖酸类和富里酸类。其中,类色氨酸和氨基酸占比较高,属于易生物降解碳源;腐殖酸类和富里酸类占比较低,属于难生物降解碳源。相关性分析表明,4种荧光组分与COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN指标之间存在显著相关性($p<0.05$),其中氨基酸呈现出最显著相关性,是影响脱氮效果的关键物质。

关键词: 城镇污水; 低C/N; 有机碳源; 平行因子; 深度脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0069-06

Characteristics and Conversion of Organic Carbon Sources during Treatment of Municipal Wastewater with Low Carbon to Nitrogen Ratio

LI Hui-ping^{1,2}, PANG Wei-hai^{1,2}, XIE Li^{1,2}, LI Zhi-xin^{1,2}, ZHANG Kun³,
LIU Yuan³, ZHAO Li³, SHEN Kang⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment <Ministry of Education>, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Guangdong GDH Water Co. Ltd., Shenzhen 518021, China; 4. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The carbon to nitrogen ratio (C/N) is one of the main factors affecting the nitrogen removal efficiency of wastewater. To investigate the utilization rate of organic carbon sources with different characteristics in low C/N municipal wastewater treatment, the effluent quality in different treatment stages of a SBR process in a wastewater treatment plant in Guangdong Province was analyzed by using three-dimensional excitation emission matrix and parallel factor analysis (3DEEM-PARAFAC). The 3DEEM-PARAFAC technology could effectively characterize the characteristics change of organic carbon sources in the treatment process of low C/N wastewater, and four fluorescent components were

基金项目: 广东省应用型科技研发及重大科技成果转化专项(2017B020236004)

通信作者: 庞维海 E-mail: pangweihai@tongji.edu.cn

identified, namely tryptophan-like, amino acids, humic acids and fulvic acids. Among them, tryptophan-like and amino acids were biodegradable organic carbon sources with high proportion, while humic acids and fulvic acids belonged to recalcitrant organic carbon sources with low proportion. Correlation analysis showed that there were significant correlations between the four fluorescence components and COD, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN ($p<0.05$). Among them, amino acids showed the most significant correlation and was the key substance affecting the denitrification efficiency.

Key words: municipal wastewater; low C/N; organic carbon source; parallel factor; advanced denitrification

目前,我国污水厂进水普遍存在C/N较低的问题。郭泓利等人^[1]2016年对我国127座污水厂进 waters 的调查发现,80%的污水厂进水 $\text{BOD}_5/\text{TN}<3.6$,大部分污水厂存在反硝化碳源不足的问题,这使得污水厂出水水质难以达到逐步严格的排放标准。相关研究发现,通过投加外碳源、调整工艺运行参数和优化分配原污水中的碳源等方式^[2-4]可有效提升低C/N污水的脱氮效果。然而城镇污水处理厂所在区域不同,其进水水质的差别很大,即便是在相同的C/N值情况下,由于原水碳源可利用程度不同,也会导致脱氮效果的差异。因此有必要进一步细分污水中的碳源,厘清各类碳源的利用效率,以便有效提升我国城镇污水处理厂的脱氮效果。

三维荧光光谱(3DEEM)技术是一种能高效表征水环境中溶解性有机物(DOM)组分特征的分析技术^[5]。与化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD_5)等有机物常规分析指标相比,3DEEM可同时实现水体中DOM的定性和定量分析,此外该方法还具有检测速度快、灵敏度高、不消耗样品以及无需使用化学药剂等诸多优点^[6]。因此,3DEEM技术近年来被广泛应用于湖泊、江河与海洋环境中DOM的成分分析,以及饮用水和污水处理过程中不同组分DOM的转化表征。在污水处理领域,将COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN等常规指标与3DEEM技术结合分析对实际生产具有一定的意义。鉴于此,笔者将常规指标与三维荧光光谱-平行因子分析技术(3DEEM-PARAFAC)相结合,考察了广东省某污水厂处理低C/N污水时不同运行阶段的碳源特征及其浓度变化,并将COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和TN指标与PARAFAC组分进行相关性分析,更进一步揭示低碳源污水处理过程中不同类型碳源与TN的变化关系,以期对低C/N污水处理技术优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

广东省某污水厂的处理规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,生化单元采用SBR工艺,设置8座反应池,分为一期和二期。一期采用间歇进水模式运行,控制时序为:进水曝气1 h→满水曝气1 h→沉淀1 h→排水1 h;二期采用连续进水模式运行,控制时序为:进水曝气2 h→沉淀1 h→排水1 h。单座SBR反应池尺寸:长×宽×高=94.50 m×50.00 m×7.80 m,排水比为30%,运行周期为4 h。为深入探究两种进水模式下有机碳源的转化规律,分别采集进水以及SBR工艺运行至0.5、1.5、2.5、3.5 h阶段的水样进行分析。所有水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后装入玻璃瓶中,低温保存运至实验室完成水质分析。

1.2 水质指标测定

在测定COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP指标前,先采用哈希DRB200消解仪对样品进行消解,然后采用哈希DR1010水质分析仪进行测定。三维荧光光谱采用F7100荧光分光光度计测定,光电倍增管电压设置为600 V,发射波长扫描范围为250~550 nm,激发波长扫描范围为200~400 nm,发射和激发扫描步长均为2 nm,扫描速度设置为12 000 nm/min。

1.3 三维荧光数据预处理及平行因子分析

所有三维荧光数据在分析前均与超纯水数据进行差减,以扣除Raman散射,然后通过单位转换公式^[7]将所有水样的荧光强度转化为Raman单位,以方便不同仪器测定结果的直接对比。完成数据预处理后,采用DOMFluor工具箱^[8]在Matlab 7.01软件平台完成PARAFAC运算,实现碳源组分分离。

1.4 相关性分析

本研究采用SPSS 23.0软件对SBR处理过程中COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN与4种PARAFAC组分的最大

荧光强度(F_{\max})进行了相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 原水水质分析

该污水厂进水 COD 浓度变化范围为 58.6~136.0 mg/L, TN 浓度变化范围为 32.3~61.0 mg/L (见图1)。一般将 COD<200 mg/L、C/N<8 的污水称为低碳源污水。该污水厂进水 C/N 值为 1.1~3.1, 远低于8,由此可见,该污水厂进水的有机碳源浓度过低,难以实现高效脱氮。

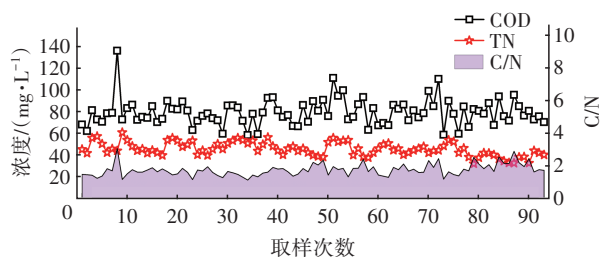


图1 某污水厂进水水质

Fig.1 Influent quality of a wastewater treatment plant

2.2 SBR 不同处理阶段的水质变化

为对比两种进水模式的运行特点,分别对两种模式下 SBR 工艺运行至 0.5 h (进水)、1.5 h (曝气)、2.5 h (沉淀) 和 3.5 h (排水) 的混合液取样进行分析,结果如图2所示。

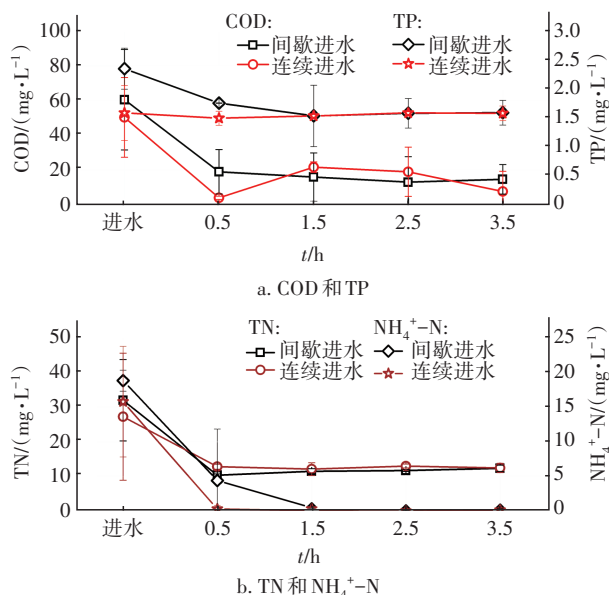


图2 SBR 工艺中不同阶段的污染物浓度

Fig.2 Pollutants concentration in SBR process at different stages

根据图2(a)中 COD 浓度的变化可知,间歇进水和连续进水两种模式下进水 COD 平均值分别为

60.5 mg/L 和 50.3 mg/L;好氧曝气反应至 0.5 h 时 COD 平均值分别为 19.0 mg/L 和 4.0 mg/L;反应至 3.5 h 时 COD 平均值分别为 14.7 mg/L 和 7.7 mg/L。据此可知,采用 SBR 工艺处理低碳源污水时,无论是间歇还是连续进水模式,COD 浓度在运行初期均迅速下降,且后续反应阶段保持在较低浓度。这主要是因为当 SBR 工艺的排水比设置为 30% 时,上一周期处理结束后反应器内剩余的 70% 泥水混合液会稀释新进入的污水,此外边进水边曝气的非限定性曝气方式对 COD 也存在持续降解作用。但值得注意的是,与间歇进水相比,连续进水模式下 SBR 工艺反应至 1.5 h 时 COD 浓度从 4.0 mg/L 升至 21.2 mg/L,然后在 3.5 h 时又逐渐降低至 7.7 mg/L,这是因为连续进水是将间歇处理模式下的同等处理水量以均匀分配的方式持续输入反应器内。由此可见,连续进水模式下 SBR 工艺的进水水质更加稳定,碳源调配效果也更好。但是根据现场观察,连续进水也会影响 SBR 工艺在沉淀阶段的泥水分离效果,从而增加出水 SS 升高的风险。

根据图2(a)中 TP 浓度的变化可知,在间歇进水模式下,TP 初始平均浓度为 2.4 mg/L,反应至 0.5、1.5、2.5、3.5 h 时,TP 平均浓度分别为 1.8、1.5、1.6、1.6 mg/L;除稀释作用外,聚磷菌在 0~2 h 的好氧曝气阶段将污水中的磷吸收储存至体内,而在后续缺氧段又释放出体内过量摄取的磷。但由于碳源浓度过低,聚磷菌对 TP 的吸收效果并不明显,这是生化池对 TP 去除率不高的原因。该污水厂在后续处理单元通过投加混凝剂进一步化学除磷。

由图2(b)可知,在间歇进水和连续进水模式下 NH_4^+-N 的进水平均浓度分别为 18.8、15.8 mg/L;反应至 0.5 h 时平均浓度分别为 4.4、0.3 mg/L;反应至 1.5 h 时平均浓度分别为 0.5、0.1 mg/L;到后续 2.5 h 和 3.5 h 阶段, NH_4^+-N 浓度几乎不发生变化。 NH_4^+-N 主要是在好氧条件下通过硝化细菌转化为 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,此过程对碳源的需求量小,因此较低的 COD 浓度对 NH_4^+-N 去除效果的影响不大。

根据图2(b)中 TN 浓度的变化规律,在间歇进水和连续进水模式下,当 SBR 工艺运行至 0.5 h 时, TN 平均浓度分别下降至 10.4、12.8 mg/L,且在后续反应阶段 TN 浓度几乎无变化。这也是因为在反应初期(0~1.5 h),上一周期的剩余泥水混合液对 TN 有一定的稀释作用,此外由于新碳源的引入以及初

始曝气时反应器内存在局部缺氧现象,也会对上一周期所累积的 NO_2^- 和 NO_3^- 进行还原。但结合图2(a)可知,由于原污水缺乏碳源,COD在0~1.5 h的好氧段几乎被完全稀释和降解,使得缺氧段的碳源缺失,无法为反硝化提供电子供体,难以进一步提高脱氮效果。

2.3 SBR不同处理阶段的有机物组分变化

为进一步分析SBR工艺不同处理阶段有机碳源的转化及利用效果,采用3DEEM-PARAFAC技术定性及定量表征处理过程中有机物组分及浓度的变化,所用样品与常规指标分析的样品为同一批(共36组),采用PARAFAC的半劈裂分析验证后,得出4种组分的模型最为稳定,组分图谱见图3。

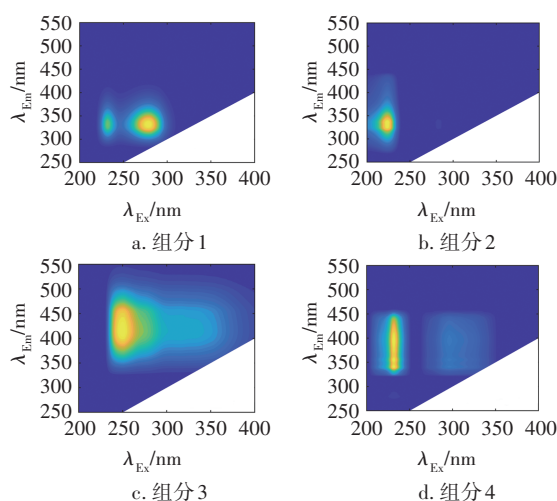


图3 4种组分的平行因子模型图谱

Fig.3 EEM contours of the four fluorescent components

由图3可知,组分1 [$\lambda_{\text{Ex}}=278 \text{ nm}$ (232 nm)、 $\lambda_{\text{Em}}=332 \text{ nm}$] 含有两个激发峰和一个发射峰,该荧光物质属于类色氨酸类蛋白质^[9-10],其荧光峰主要存在于两个区域: λ_{Em} 靠近325 nm的大分子蛋白质类和 λ_{Em} 靠近306 nm短波长处的小分子酚类物质^[11],在本研究中解析出的类色氨酸类物质主要是具有大分子特征的蛋白质类物质。组分2 ($\lambda_{\text{Ex}}=224 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{Em}}=336 \text{ nm}$) 具有单一的激发和发射峰,该物质属于游离态或蛋白质内的结合态氨基酸,分子质量较小并且具有较高的可生物降解性,主要来源于原位微生物的代谢活动,广泛存在于海洋及陆地水体中。组分3 ($\lambda_{\text{Ex}}=250 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{Em}}=416 \text{ nm}$) 和组分4 ($\lambda_{\text{Ex}}=232 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{Em}}=394 \text{ nm}$) 均属于类腐殖质类物质,其中组分3偏向于腐殖酸类,组分4偏向于富里酸类,富里酸为腐殖质代谢后的更小单位的物质,主要来源于陆

生性有机物,在自然水体中较常见^[12]。

通过追溯图3中各组分所对应的最大荧光强度(F_{max}),可实现不同特征有机碳源的定量分析,结果如图4所示。

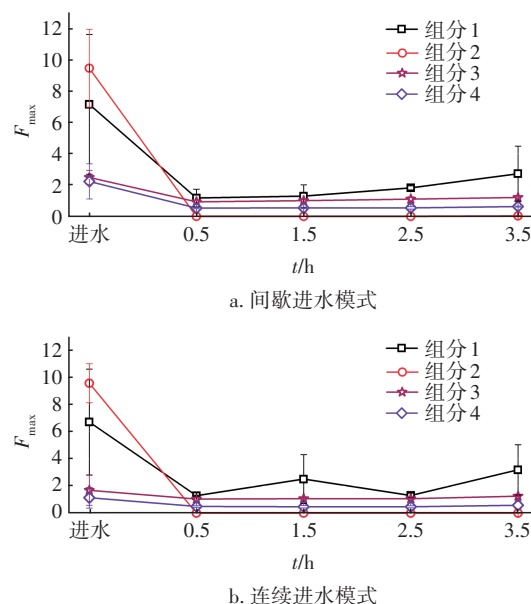


图4 SBR工艺不同处理阶段的各组分 F_{max} 变化

Fig.4 Changes of F_{max} of each component in SBR process at different stages

从图4(a)可以看出,SBR工艺进水中有机碳源组分主要为类色氨酸和氨基酸,二者占比之和达到78%,而腐殖酸类和富里酸类组分的占比之和仅为22%,由此可见,进水中的有机碳源具有较强的可生物降解性,但也含有部分难生物降解的腐殖质。4种荧光组分在好氧曝气0.5 h内降解效率最高,在后续的0.5~3.5 h阶段 F_{max} 值几乎未发生变化,这与COD浓度变化规律相似,主要是由于反应器内剩余混合液对4种组分的稀释作用以及初期的快速降解所致。由图4(b)可知,连续进水模式下4种荧光组分的 F_{max} 和占比的变化规律与间歇进水模式类似,也是在好氧曝气0.5 h内快速下降,且氨基酸的 F_{max} 占比降至0,这说明反应器内微生物对新进入污水中的碳源消耗速度极快。值得注意的是,4种荧光组分的强度变化存在一定差异性。不考虑稀释作用的影响,氨基酸的 F_{max} 在进水中占比最高,降解速率也最快。在间歇和连续进水模式下,进水中的氨基酸占比分别为44%和50%,但经过0.5 h的好氧曝气,氨基酸占比几乎降为0,这说明氨基酸是具有较小分子结构的生物易降解有机碳源^[13]。类色氨

酸的利用速率仅次于氨基酸,在间歇进水模式下,类色氨酸在进水以及0.5、1.5、2.5、3.5 h阶段的占比分别为34%、44%、45%、53%和59%,组分占比呈现上升趋势;在连续进水模式下,类色氨酸的占比也逐渐升高。由此说明,类色氨酸的变化与进水模式无关,而与微生物代谢产物有关,此类荧光物质同时包含可生物利用的有机碳源和微生物代谢产物,随着反应时间的增加,类色氨酸中的可生物降解物质逐渐转化为不可生物降解的代谢产物。进水中腐殖酸类和富里酸类的占比较少,此类物质具有大分子结构,与难生物降解有机物有关^[14],因此微生物对其利用速率较低。

2.4 相关性分析

根据2.2节和2.3节的分析结果可知,污水在不同处理阶段的COD、TP、NH₄⁺-N和TN与三维荧光平行因子组分的变化规律类似。相关研究表明,使用荧光光谱技术测定的DOM也可有效表征污水处理过程中有机物及其相关营养盐的变化关系^[15-16]。本研究中,在SBR处理低C/N污水过程中,常规水质指标与荧光组分的F_{max}之间具有显著相关性(见表1),R²由大到小为组分2、组分4、组分3、组分1。

表1 常规水质指标与荧光组分的相关性

Tab.1 Correlation between conventional water quality indexes and fluorescent components

项 目	组分1	组分2	组分3	组分4
COD	0.935*	0.985**	0.954*	0.973**
TP	0.929*	0.983**	0.959**	0.981**
NH ₄ ⁺ -N	0.931*	0.992**	0.956*	0.985**
TN	0.968**	0.999**	0.987**	0.998**
注: “*”表示在0.05水平(双侧)上显著相关; “**”表示在0.01水平(双侧)上显著相关。				

组分1既能表征易生物降解有机碳源,也可表征微生物代谢产物,在0~0.5 h阶段组分1中的易生物降解有机物被消耗转变为代谢产物,因此在2~3.5 h阶段有微弱上升趋势,这使得组分1与COD的相关性较其他3种组分略低。组分2与COD、氮、磷指标的相关性最高,该组分可表征具有小分子结构的氨基酸类物质,当污水中此类物质占比较高时有利于微生物代谢活动,从而有利于微生物的脱氮除磷。组分3和组分4属于腐殖质类有机碳源,此类物质在污水中占比较低,且与NH₄⁺-N和TN的相关性更高,Li等人也发现了类似现象^[13]。

3 结论

① 3DEEM-PARAFAC技术可有效表征低碳源污水处理过程中有机碳源的变化特征,并解析出4种荧光组分,分别是类色氨酸、氨基酸、腐殖酸类和富里酸类,其中,类色氨酸和氨基酸占比较高,属于易生物降解有机碳源。

② 4种荧光组分与COD、TP、NH₄⁺-N和TN指标之间的相关性显著,其中氨基酸是影响脱氮效果的关键物质,当污水中此类物质占比较高时,可生物降解性较强,易被反硝化菌利用。

③ 当污水的C/N值过低时,仅通过改变进水方式来优化碳源配置,难以提高反硝化脱氮效果,需通过投加外碳源的方式优化碳源类型及品质,从而有效提升脱氮效率。

参考文献:

[1] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, et al. Analysis on the characteristics of influent water quality of typical urban sewage treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (6) : 12-15 (in Chinese).

[2] 龚珊,吉芳英,张千,等. 基于固体碳源反硝化的低碳源污水生物硝化技术[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 30-34.
GONG Shan, JI Fangying, ZHANG Qian, et al. Novel technology of low-carbon wastewater biological nitrification based on solid carbon denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(9) : 30-34 (in Chinese).

[3] 郭建华,彭永臻,杨庆,等. 脉冲SBR处理城市污水深度脱氮的工艺特性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 62-66.
GUO Jianhua, PENG Yongzhen, YANG Qing, et al. The characteristics of the pulsed SBR for advanced nitrogen removal of municipal wastewater [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (1) : 62-66 (in Chinese).

[4] 王加蒙,彭澄瑶,辛振兴,等. SBR分段进水工艺提高污水厂的脱氮效率[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2131-2136.
WANG Jiameng, PENG Chengyao, XIN Zhenxing,

- et al.* Ways of SBR step feed process to improve efficiency of nitrogen removal in wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2131–2136(in Chinese).
- [5] PITTA E, ZERI C. The impact of combining data sets of fluorescence excitation-emission matrices of dissolved organic matter from various aquatic sources on the information retrieved by PARAFAC modeling [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 258: 119800.
- [6] 易莹, 周艳伟, Bridgeman J, 等. 三维荧光光谱法测定市政污水中有机污染物[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(5): 37–39.
- YI Ying, ZHOU Yanwei, BRIDGEMAN J, *et al.* Determination of organic pollutants in municipal sewage by three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2017, 29(5): 37–39 (in Chinese).
- [7] MURPHY K R, BUTLER K D, SPENCER R G M, *et al.* Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: an interlaboratory comparison [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(24): 9405–9412.
- [8] STEDMON C A, BRO R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2008, 6(11): 572–579.
- [9] MA C, XU H, ZHANG L, *et al.* Use of fluorescence excitation-emission matrices coupled with parallel factor analysis to monitor C- and N-DBPs formation in drinking water recovered from cyanobacteria-laden sludge dewatering [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640/641: 609–618.
- [10] LI H, CHEN Y, ZHANG J, *et al.* Pilot study on nanofiltration membrane in advanced treatment of drinking water [J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2043–2053.
- [11] 李惠平. 纳滤膜在高品质饮用水处理中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020: 28–30.
- LI Huiping. Research on the Application of Nanofiltration Membranes in the Treatment of High-quality Drinking Water [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020: 28–30 (in Chinese).
- [12] SANCHEZ N P, SKERIOTIS A T, MILLER C M. A PARAFAC-based long-term assessment of DOM in a multi-coagulant drinking water treatment scheme [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 1582–1591.
- [13] LI J, WANG L, GENG J, *et al.* Distribution and removal of fluorescent dissolved organic matter in 15 municipal wastewater treatment plants in China [J]. Chemosphere, 2020, 251: 126375.
- [14] 姜浩, 章婷曦, 杨帆, 等. 生活污水处理过程荧光光谱及紫外光谱特征分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 151–156.
- JIANG Hao, ZHANG Tingxi, YANG Fan, *et al.* Characteristics of fluorescence and ultraviolet spectra during domestic wastewater treatment process [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(6): 151–156 (in Chinese).
- [15] 张华, 全桂军, 黄健, 等. 废水DOM荧光强度与COD总氮的相关分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(10): 157–162.
- ZHANG Hua, QUAN Guijun, HUANG Jian, *et al.* Analysis of the correlation between the fluorescence intensity of the dissolved organic matter and COD and total nitrogen in wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40(10): 157–162 (in Chinese).
- [16] 黄健, 闫升, 张华, 等. 农药废水生物处理过程中溶解性有机物特性及荧光强度与COD的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(9): 830–835.
- HUANG Jian, YAN Sheng, ZHANG Hua, *et al.* Characteristics and fluorescence intensity of DOM in pesticides wastewater under bio-treatment and their relationships with concentration of COD [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(9): 830–835 (in Chinese).

作者简介: 李惠平(1995–), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理工艺优化。

E-mail: reneandlhp@163.com

收稿日期: 2021-06-30

修回日期: 2021-08-03

(编辑: 刘贵春)