

移动床生物膜技术处理校园污水过程中 DOM 的光谱特征

周明罗^{1,2}, 陈海焱^{1,3*}, 谌书^{1,3}, 王彬^{1,3}, 周日宇¹, 郑睿¹

1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010

2. 宜宾学院资源与环境工程学院, 四川 宜宾 644007

3. 西南科技大学国家城市污水处理及资源化工程技术研究中心, 四川 绵阳 621010

摘要 研究了厌氧-缺氧-好氧移动床生物膜(MBBR)工艺对校园污水的处理效果,采用三维荧光光谱和紫外光谱分析了污水处理过程中溶解性有机物(DOM)的降解特性及其组成特征。结果表明,MBBR对校园污水具有较好的去除效果,COD, NH₃-N, TN, TP和DOC的去除率分别达到83.0%, 70.9%, 52.4%, 59.2%和62.2%。三维荧光光谱显示有3个明显的特征荧光峰,其中心位置分别在E_x/E_m=230 nm/325 nm(T峰)、E_x/E_m=280 nm/350 nm(S峰)、E_x/E_m=350 nm/440 nm(R峰)附近,污水中荧光类溶解性有机物主要包括类色氨酸(Trp)、类溶解性微生物代谢产物(SMP)和类腐殖酸(HA)。DOM特征荧光峰的中心位置及荧光强度随处理流程而变,说明污水中DOM的组成和相对含量经MBBR处理后发生变化。其中,类色氨酸、类溶解性微生物代谢产物荧光特征峰近乎消失,表明MBBR对这两类有机物质去除效果显著;溶解性微生物代谢产物荧光强度在厌氧池、缺氧池、好氧池分别为进水的37.1%, 20.3%, 13.1%,表明MBBR的各生化阶段,微生物均能很好的降解SMP;但类腐殖酸(R峰)荧光强度降低较小,微生物对类腐殖酸总的去除效果不明显。在MBBR工艺流程中,DOM腐殖化指数HIX、荧光指数FI、生物源指数BIX均逐渐增大,微生物对有机污染物降解起到了关键作用。其中,HIX值在缺氧池、好氧池、出水中增大到4以上,经MBBR处理后,DOM腐殖化程度和成熟度逐渐增加;缺氧池、好氧池及出水的荧光FI值接近1.9(分别为1.899, 1.881, 1.887),说明其中类腐殖质有机物质主要源于微生物代谢活动;缺氧池、好氧池及出水中DOM的BIX值约为1.0(依次为0.985, 1.018, 0.979),说明缺氧池、好氧池及出水中DOM也主要源于微生物代谢或死亡。污水的紫外特征值E₂₅₀/E₃₆₅随工艺流程逐渐减小、SUVA₂₅₄不断增大,表明经MBBR处理后,污水中DOM类型和含量均发生了较大变化,有机物的共轭不饱和和双键或芳香性基团增多,聚合度、腐殖化程度、分子量增大。

关键词 溶解性有机物;移动床生物膜;三维荧光;紫外光谱;校园污水

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2160-06

引言

厌氧-缺氧-好氧移动床生物膜工艺(moving bed bio-film reactor, MBBR)是通过向生化反应池中投加悬浮填料作为微生物生长的载体,并借助水力作用,使污水与生物膜充分接触,从而吸附、降解、净化污染物的一种污水处理技术。该工艺有效地结合了活性污泥和生物膜两种生物方法的优势,具有微生物丰富、处理能力高、耐冲击负荷强等特点,受到

了国内外的广泛关注^[1-3]。近年来,MBBR在污水厂升级改造、一体化集约型污水处理装置等方面得到了推广应用。

对MBBR的研究主要集中在悬浮填料改性、挂膜特性、污染物去除效果、生物膜微生物群落结构等方面^[4-6],对该工艺处理污水过程中溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)的降解特性及其组成特征却少有关注。然而,DOM对污水中污染物的去除、填料上生物膜数量及微生物活性都起着重要作用,是影响MBBR处理效果的关键因素。校园污水中DOM成份复杂,其组成及含量变化较大,传统

收稿日期:2018-05-29,修订日期:2018-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41403081),四川省科技厅国际合作项目(2016HH0086),四川省科技重点研发项目(2017SZ0178),四川省教育厅重点项目(18ZA0500)资助

作者简介:周明罗,1977年生,西南科技大学环境与资源学院博士研究生 e-mail:zhming29@126.com

* 通讯联系人 e-mail:chenhai-yan@163.com

的污染物指标,如化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、总有机碳(TOC)等只能反映有机物总量,无法表征 DOM 成份。采用合适的分析方法揭示处理过程中 DOM 的组成和降解特性,对 MBBR 工艺性能评价及开发应用具有重要意义。近年来,三维荧光光谱和紫外光谱已成为分析 DOM 特征的重要手段。其中,三维荧光光谱法能反映有机物的类型与性质,具有不破坏样品结构、灵敏度高、选择性好等优点,已被广泛用于城市污水处理厂、生活污水、工业废水中 DOM 的分析研究^[7-9];紫外光谱可用于有机质中共轭体系及芳环结构的定性和定量分析^[10]。

本研究选用 MBBR 处理校园污水,结合污染物去除效果和特点,采用三维荧光光谱和紫外光谱技术,对校园污水处理过程中 DOM 类型、组成、含量的变化特征进行分析,为 MBBR 工艺降解有机物的深入研究及在污水处理中的应用提供科学参考。

1 实验部分

1.1 试验装置及运行

试验采用 MBBR 处理校园污水,沿处理流程共设 5 个取样点,依次为:进水、厌氧池、缺氧池、好氧池和出水。工艺流程及取样位置见图 1。

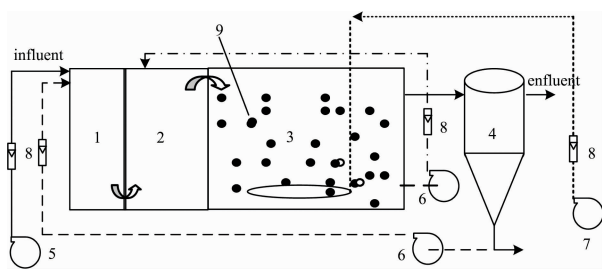


图 1 工艺流程图

1: 厌氧池; 2: 缺氧池; 3: 好氧池; 4: 沉淀池; 5: 进水泵; 6: 回流泵; 7: 空气泵; 8: 流量计; 9: 悬浮填料

Fig. 1 Flowchart of MBBR Process

1: Anaerobic tank; 2: Anoxic tank; 3: Oxic tank; 4: Settling tank; 5: Influent pump; 6: Return sludge pump; 7: Air pump; 8: Flowmeter; 9: Suspended carrier

厌氧池、缺氧池、好氧池有效容积分别为 0.13, 0.17 和 0.42 m³,好氧池中投加 25%(V/V)聚丙烯悬浮填料($\phi \times h = 10 \times 8$ mm,内设 5 个支撑片,比表面积 670 m²·m⁻³、密度 0.93 g·cm⁻³)。试验用水引自西南科技大学污水处理厂配水井,污水主要为校园和周边居民区排水,主要污染物浓度见表 1。试验从 2017 年 9 月底连续进行到 2018 年 2 月,稳定运行期间主要工艺参数如下:水力停留时间(HRT)8.4 h,进水量(50±5) L·h⁻¹,溶解氧(DO)浓度 1.9~4.3 mg·L⁻¹,污泥回流比 50%~70%,循环液回流比 270%~330%,好氧池活性污泥浓度(MLSS)2 065~2 580 mg·L⁻¹。

表 1 进水中污染物浓度

Table 1	Pollutants concentration of influent
污染指标	浓度/(mg·L ⁻¹)
COD	214~423
NH ₃ -N	32.6~43.5
TN	42.4~57.5
TP	3.14~6.38

1.2 分析方法

三维荧光光谱:水样经 0.45 μm 滤膜预处理、稀释 10 倍后,用 QuantMaster-40 荧光光谱仪(加拿大 PTI 公司)表征,扫描范围激发波长 E_x=220~450 nm,发射波长 E_m=250~550 nm,狭缝宽度 5 nm,响应时间 0.1s,重复扫描 50 次。

紫外光谱:水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,利用 Evolution300 型紫外-可见吸收分光光度计(美国 Thermo 公司)进行表征,扫描波长 200~400 nm,扫描间隔 1 nm。

化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)采用国家标准分析方法,参照《水和废水监测分析方法》(第四版);溶解性总有机碳(DOC),水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,用总有机碳分析仪(Liqui TOCII,德国 Elementar 公司)测定;硝酸根离子(NO₃⁻)、亚硝酸根离子(NO₂⁻)、氯离子(Cl⁻)、磷酸根离子(PO₄³⁻)经 0.45 μm 滤膜过滤后用离子色谱仪(ICS-900,美国 Thermo 公司)测定。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果

试验期间,进出水 COD, NH₃-N, TN, TP 每 3~4 d 取样分析 1 次,结果见图 2。系统运行稳定后,对各取样点 DOC 及主要阴离子每 7 d 检测一次,均值列于表 2。

由图 2 可知,系统启动和挂膜期间 COD 和 NH₃-N 出水浓度逐渐降低,去除效果不断提高。26 d 后,COD 和 NH₃-N 去除效果基本稳定,COD 平均去除率 83.0%、出水浓度 38.6~66.4 mg·L⁻¹,NH₃-N 平均去除率 70.9%,出水浓度 8.82~12.3 mg·L⁻¹。挂膜、启动成功后,TN 平均去除率 52.4%、出水浓度 16.5~27.1 mg·L⁻¹,TP 平均去除率 59.2%、出水浓度 1.03~2.69 mg·L⁻¹。以上结果说明 MBBR 工艺对 COD 和 NH₃-N 具有良好的处理效果,同时能较好的去除 TN 和 TP。由于进水中污染物浓度波动较大(见表 1),可知 MBBR 具有较高的抗冲击能力,这与系统中存在大量微生物有关。表 2 数据说明,校园污水经缺氧处理后,DOC 浓度从 48.2 mg·L⁻¹降到 24.4 mg·L⁻¹,去除率已超过 50%,再经好氧分解,最终出水浓度为 18.2 mg·L⁻¹,总去除率达到 62.2%。

2.2 三维荧光光谱特征

2.2.1 三维荧光光谱及 DOM 组成

系统稳定运行期间,同一取样点不同时间的污水三维荧光光谱图差别较小,以 2018 年 1 月 18 日水样的三维荧光光谱图(图 3)和特征峰荧光强度(图 4)为例分析。

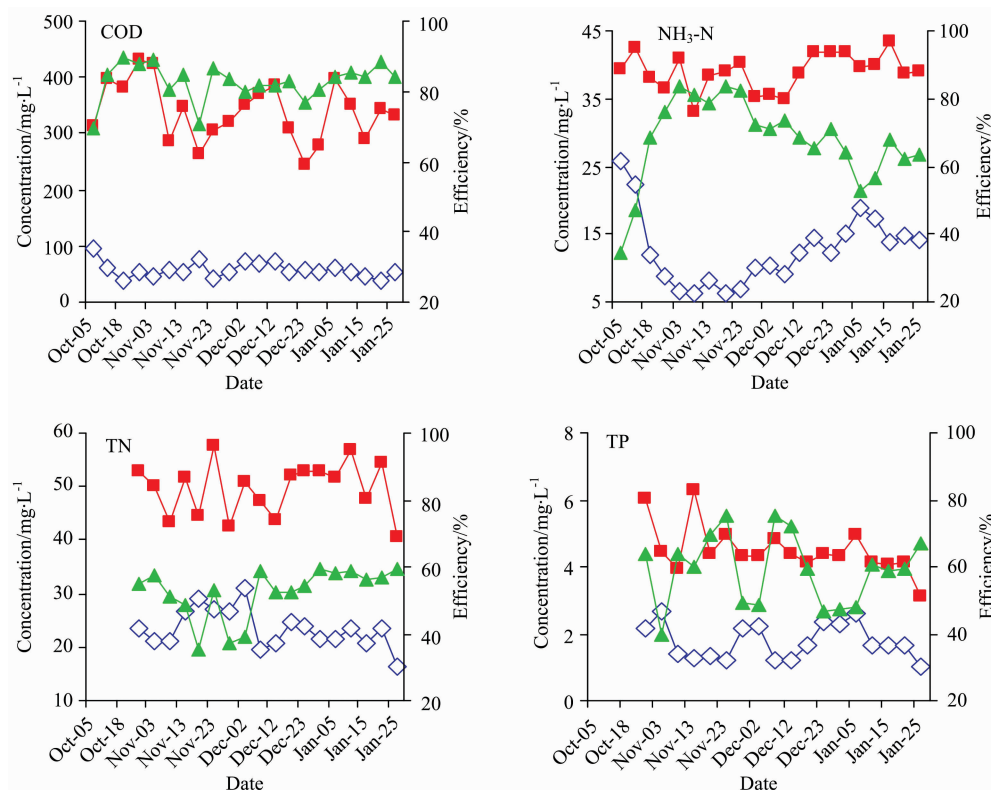


图 2 污染物去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of pollutants

表 2 各取样点水质指标

Table 2 Water quality parameters of different sampling points

取样点	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NO_3^- / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NO_2^- / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cl^- / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	48.2	3.95	0.60	48.9	17.7
厌氧池	33.8	3.24	0.53	52.3	10.5
缺氧池	24.4	2.41	0.57	53.1	12.5
好氧池	19.7	45.9	1.37	53.6	8.97
出水	18.2	13.6	2.23	52.7	15.9

由图 3 可以看出,进水的三维荧光光谱呈现出 3 个明显的特征荧光峰,中心位置分别在 $E_x/E_m = 230 \text{ nm}/325 \text{ nm}$ (T 峰)、 $E_x/E_m = 280 \text{ nm}/350 \text{ nm}$ (S 峰)、 $E_x/E_m = 350 \text{ nm}/440 \text{ nm}$ (R 峰)附近。其中, T 峰为典型类蛋白白色氨酸 (Trp) 荧光、S 峰为类蛋白溶解性微生物代谢产物 (SMP) 荧光、R 峰为类腐殖酸 (HA) 荧光。

由图 3 和图 4 可知,污水中有机物特征荧光峰的中心位置及荧光强度均发生了明显改变,说明校园污水中 DOM 的组成和相对含量经 MBBR 处理后变化。其中色氨酸和溶解性微生物代谢产物两种类蛋白荧光峰 (T 峰、S 峰) 经厌氧处理后几乎消失,说明 MBBR 对蛋白类有机物有显著的降解作用。这与蛋白类物质的易生物降解性有关,在生物处理过程中经过微生物酶促作用,部分转化成腐殖质等物质。溶解性微生物代谢产物荧光强度在厌氧段、缺氧段、好氧段分别为进水段的 37.1%, 20.3% 和 13.1%, 表明在 MBBR 工艺

中厌氧、缺氧、好氧生化阶段,微生物均能很好的分解 SMP。类腐殖酸特征荧光峰 (R 峰) 范围及中心位置发生了明显变化 [图 3(c, d, e)], 表明在 MBBR 处理污水过程中腐殖酸种类及其相对含量都发生了改变; 但 R 峰荧光强度降低较小, 微生物对类腐殖酸总的去除效果不明显, 这与类腐殖酸分子结构复杂、化学性质较稳定、难以被微生物降解有密切关系。

2.2.2 DOM 荧光特性分析

污水中 DOM 荧光特性参数: 腐殖化指数 (humification index, HIX)、荧光指数 (fluorescence index, FI)、生物源指数 (biogenic index, BIX) 见表 3。据文献 [11-12] 报道, HIX 值表示激发波长 $E_x = 254 \text{ nm}$ 处, 发射波长 E_m 在 435~480 和 300~345 nm 内的荧光强度积分值之比, 是表征 DOM 腐殖化程度和成熟度的指标, $\text{HIX} < 4$ 说明 DOM 腐殖化程度弱, HIX 越大 DOM 腐殖化程度和成熟度越高、结构越复杂; FI

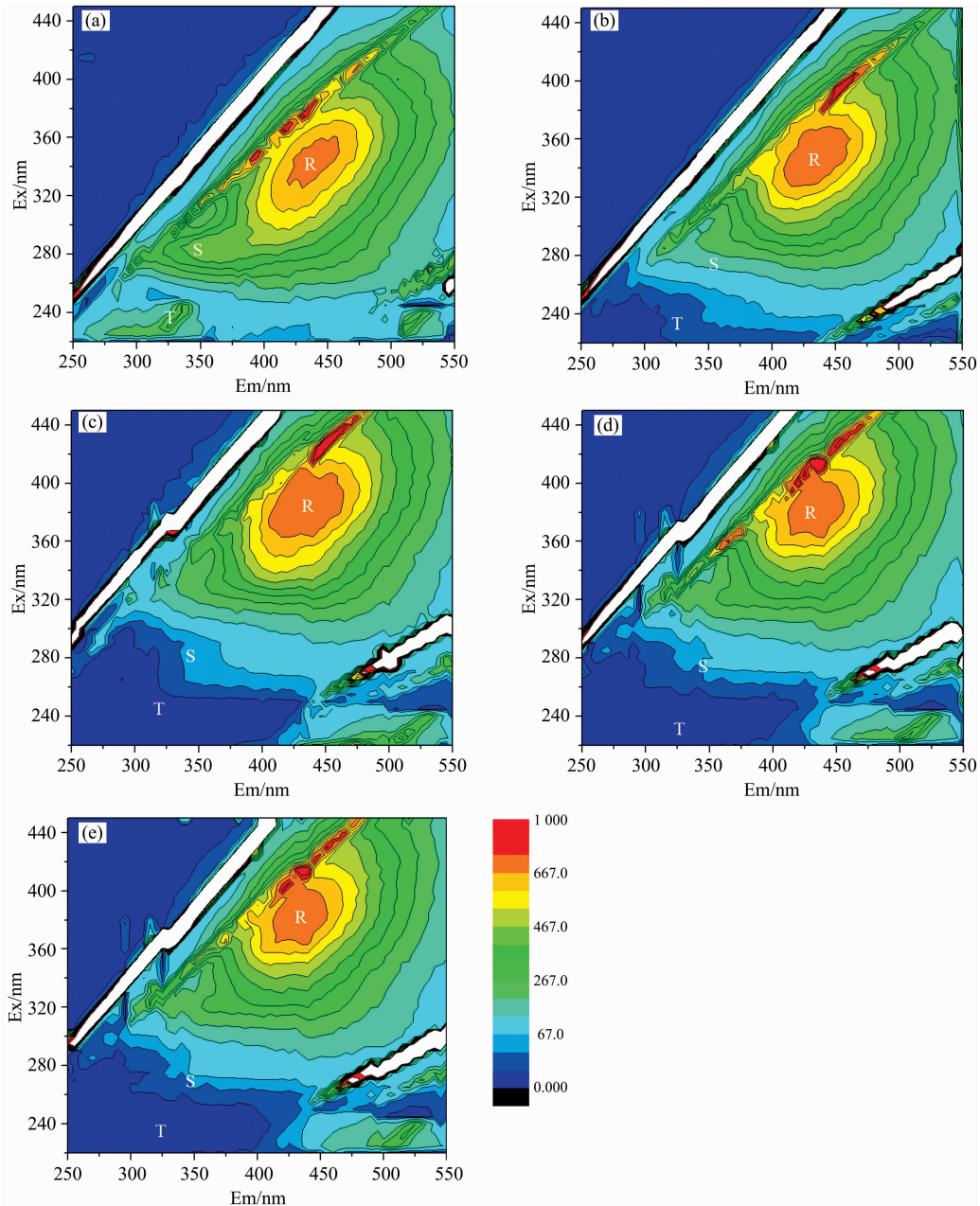


图 3 污水中 DOM 三维荧光光谱图

(a): 进水; (b): 厌氧池; (c): 缺氧池; (d): 好氧池; (e): 出水

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra for DOM in sewage

(a): Influent; (b): Anaerobic tank; (c): Anoxic tank; (d): Oxidic tank; (e): Effluent

是激发波长 $E_x = 370 \text{ nm}$ 处, 发射波长 E_m 在 450 和 500 nm 处荧光强度的比值, 表征 DOM 中富里酸、腐殖酸等类腐殖质的来源, $FI < 1.4$ 表明类腐殖质主要源于陆源输入或受人为影响较大, $FI > 1.9$ 表明类腐殖质主要源于微生物代谢活动; BIX 是激发波长 $E_x = 310 \text{ nm}$ 处, 发射波长 E_m 在 380 和 430 nm 处荧光强度的比值, 反映 DOM 来源的相对贡献, 当 $BIX > 1$ 时为微生物活动产生为主, 当 BIX 值为 $0.6 \sim 0.7$ 时代表 DOM 属陆源性为主或受人为影响较大。

表 3 污水荧光特性指数

Table 3 The fluorescence characteristic index of sewage

取样点	HIX	FI	BIX
进水	1.81	1.368	0.716
厌氧池	2.89	1.652	0.720
缺氧池	5.56	1.899	0.985
好氧池	5.27	1.881	1.018
出水	6.06	1.887	0.979

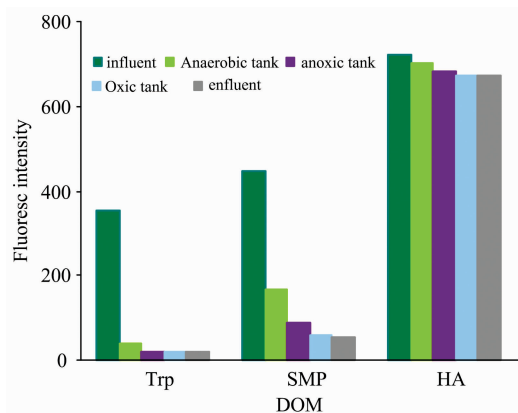


图 4 特征峰荧光强度

Fig. 4 The fluorescence intensity of characteristic peak

由表 3 可知,腐殖化指数 HIX 值在缺氧池、好氧池、出水中均大于 4(分别为 5.56, 5.27 和 6.06),表明在 MBBR 处理过程中,微生物作用能明显改变污水 DOM 的组成,使其腐殖化程度和成熟度逐渐增加,这与三维荧光光谱图中类腐殖酸荧光峰范围及中心位置的变化相互印证。进水 FI 值为 1.368 小于 1.4,表明进水中类腐殖质有机物主要受人类活动影响较大,而缺氧池、好氧池及出水的 FI 值接近 1.9(分别为 1.899, 1.881, 1.887),说明污水中类腐殖质主要源于微生物代谢活动。缺氧池、好氧池及出水中 DOM 生物源指数 BIX 值约为 1.0(依次为 0.985, 1.018, 0.979),说明缺氧段、好氧段及出水中 DOM 也主要源于微生物代谢或残体腐解。污水中 DOM 荧光特性参数 HIX, FI, BIX 沿处理流程而增大,说明 MBBR 工艺中微生物对有机污染物降解起到了关键作用。

2.3 紫外光谱特征

DOM 的紫外光谱特征与有机物的结构及性质密切相关,250 和 365 nm 处的吸光度之比(E_{250}/E_{365})与 DOM 的腐殖化程度、芳香聚合度及相对分子质量呈负相关^[13];UV-254 常用来表征 DOM 中芳香性物质的含量;特征紫外吸光度($SUVA_{254}$)是 254 nm 处的平均吸光度与 DOC 浓度之比,其大小可以反映有机物的腐殖化程度及芳香环有机物的相对含量, $SUVA_{254}$ 在 $4\sim 5\text{ L}\cdot(\text{m}\cdot\text{mg})^{-1}$ 之间时,水中有有机物

以腐殖性疏水性有机物为主, $SUVA_{254} < 3\text{ L}\cdot(\text{m}\cdot\text{mg})^{-1}$ 时,以非腐殖性、溶解性的有机物为主^[14]。本研究 MBBR 工艺处理校园污水过程中 DOM 的紫外特征值如表 4 所示。

表 4 污水中 DOM 的紫外特征

Table 4 The characteristics of ultraviolet absorption of DOM

取样点	E_{250}/E_{365}	$SUVA_{254}/[\text{L}\cdot(\text{m}\cdot\text{mg})^{-1}]$
进水	5.65	1.56
厌氧池	5.24	2.72
缺氧池	5.13	4.17
好氧池	4.88	4.13
出水	4.67	4.26

由表 4 可知,紫外特征值 E_{250}/E_{365} 沿处理流程逐渐减小,说明 DOM 腐殖化程度、相对分子质量逐渐增大,这与荧光特性参数 HIX 指示结果一致。但是, $SUVA_{254}$ 逐渐增大,出水 $SUVA_{254}$ 为 $4.26\text{ L}\cdot(\text{m}\cdot\text{mg})^{-1}$,表明有机物中共轭不饱和双键或芳香性基团含量增多,芳香化程度增高。 E_{250}/E_{365} 减小和 $SUVA_{254}$ 增大,说明在 MBBR 工艺中微生物对有机物降解起到了明显作用,污水经处理后 DOM 的共轭不饱和双键或芳香性基团增多,聚合度、腐殖化程度、分子质量增大,有机物类型和含量发生较大的变化,进一步说明了特征荧光峰范围及中心位置发生变化的原因。

3 结 论

移动床生物膜工艺对校园污水有较好的处理效果,COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP 和 DOC 去除率分别达到 83.0%, 70.9%, 52.4%, 59.2% 和 62.2%。

校园污水中主要含有类色氨酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸 3 种荧光物质,经 MBBR 工艺处理后,色氨酸、微生物代谢产物等 DOM 被很好地降解,而类腐殖酸等难生物降解有机物的去除效果不明显。缺氧池、好氧池及出水中类腐殖质和其他 DOM 均主要源于微生物代谢活动,经 MBBR 工艺处理后,DOM 的聚合度、腐殖化程度、分子质量不同程度增加,微生物的分解对有机污染物去除起到了至关重要的作用。

References

- [1] Torresi E, Gulay A, Poselel F, et al. Water Research, 2018, 138(7): 333.
- [2] Biswas K, Taylor M W, Turner S J. Applied Microbiological Biotechnology, 2014, 98: 1429.
- [3] YUAN Quan, WANG Hai-yan, LIU Kai, et al(苑 泉, 王海燕, 刘 凯, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2015, 35(3): 713.
- [4] TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, et al(谭 阳, 李 激, 徐 巧, 等). Environmental Science(环境科学), 2017, 38(6): 2486.
- [5] ZHENG Min, YANG Bo, WANG Cheng-wen, et al(郑 敏, 杨 波, 汪诚文, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2012, 32(10): 1778.
- [6] Bassin J P, Kleerebezem R, Rosado A S, et al. Environmental Science and Technology, 2012, 46(3): 1546.
- [7] JIN Wu-jisiguleng, XUE Shuang, WANG Zhi, et al(金乌吉斯古楞, 薛 爽, 王 智, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2014, 34(9): 2298.
- [8] Hur J, Lee T H, Lee B M. Environmental Technology, 2011, 32(16): 1843.

- [9] HUANG Zhen-rong, CHEN Cheng, TANG Jiu-kai, et al(黄振荣, 程 澄, 汤久凯, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(10): 3118.
- [10] WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, et al(王齐磊, 江 韬, 赵 铮, 等). Environmental Science(环境科学), 2015, (3): 879.
- [11] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706.
- [12] Li W T, Chen S Y, Xu Z X, et al. Environmental Science & Technology, 2014, 48(5): 2603.
- [13] CUI Dong-yu, HE Xiao-song, XI Bei-dou(崔东宇, 何小松, 席北斗). China Environmental Science(中国环境科学), 2014, 34(11): 2897.
- [14] Fan J, Li H B, Shuang C D, et al. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(8): 1567.

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Moving Bed Bio-Film Reactor Process for Treating Campus Sewage

ZHOU Ming-luo^{1,2}, CHEN Hai-yan^{1,3*}, CHEN Shu^{1,3}, WANG Bin^{1,3}, ZHOU Ri-yu¹, ZHENG Rui¹

1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. College of Resource and Environmental Engineering, Yibin University, Yibin 644007, China

3. National Research Center for Municipal Wastewater Treatment and Reuse, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract The anaerobic-anoxic-oxic moving bed bio-film reactor(MBBR) process was used to treat campus sewage, and the removal efficiencies of main pollutants were studied in this paper. The composition and transformation of dissolved organic matter (DOM) in wastewater were analyzed with three-dimensional fluorescence spectra and ultraviolet spectroscopy. The results showed that the MBBR process had good purification effect on contaminants. The removal rate of COD, NH₃-N, TN, TP and DOC had reached 83.0%, 70.9%, 52.4%, 59.2% and 62.2%, respectively. Moreover, there were three dominant peaks in the three-dimensional fluorescence spectrogram, and their central locations were near $E_x/E_m = 230/325$ nm(peak T), $E_x/E_m = 280/350$ nm(peak S) and $E_x/E_m = 350/440$ nm(peak R), respectively. The main fluorescent material in sewage included tryptophan (Trp), soluble microbial products (SMP) and humic acid (HA). The central position and fluorescence intensity of the peaks had changed along the MBBR process, indicating that the composition and concentration of DOM vary with the treatment process. The peaks of Trp and SMP almost disappeared after treatment, which revealed that MBBR process has remarkable effect on the removal of proteinoid. Meanwhile the fluorescence intensity of SMP in anaerobic tank, anoxic tank and oxic tank decreased to 37.1%, 20.3% and 13.1%, respectively, showing that the microorganism can well decompose SMP in each biochemical stage of the MBBR process. However, the fluorescence intensity of HA decreased slightly, and the process seemed to be ineffective on removing of humic acid. In addition, the vales of HIX, FI and BIX had gradually increased and the metabolism of microorganisms played an important role in the degradation of contaminants in the MBBR process. The humification and maturity of DOM had gradually enhanced with HIX during MBBR process. The FI values of wastewater from anoxic tank, oxic tank and effluent were about 1.9 (1.899, 1.881, 1.887, respectively), implying that the humus organic compounds in sewage were mainly derived from microbial metabolic activities. And the BIX values of DOM in anoxic pond, oxic pond and effluent were around 1.0 (0.985, 1.018, 0.979, respectively), indicating that other DOM in wastewater were also mainly caused by microbial metabolism. Besides, the value of E_{250}/E_{365} had decreased gradually along the process but SUVA₂₅₄ had risen continuously, which illuminated that the composition and content of DOM in sewage had changed significantly after being treated by the MBBR process. And the conjugate unsaturated double bonds of organic matter had increased, as well as the degree of polymerization, humification and molecular mass.

Keywords Dissolved organic matter; Moving bed bio-film reactor; Three-dimensional fluorescence spectrum; Ultraviolet spectroscopy; Campus sewage

(Received May 29, 2018; accepted Nov. 6, 2018)

* Corresponding author