

文章编号: 1006-4710(2014)01-0040-06

SMF-MBR 工艺对 UV_{254} 表征的 有机污染物处理效果研究

崔燕平^{1,2}, 姚秉华¹

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 在零剩余污泥排放条件下, 研究了 SMF-MBR 工艺对生活污水处理过程中 UV_{254} 表征有机物的去除效果, 通过同时监测生活污水原水及反应器出水 UV_{254} 和 COD 值, 探讨了 COD 和 UV_{254} 的相关性, 并分别建立了原水和出水 COD 和 UV_{254} 之间的关系式。结果表明, 该工艺对系统内 UV_{254} 表征的有机物去除效果明显, 平均去除率为 76.3%, 而且在系统内没有出现大量 EPS 和 SMP 的积累, 同时发现 SMF-MBR 工艺的污泥浓度分区可有效减缓污泥浓度对膜的污染。

关键词: SMF-MBR 工艺; UV_{254} ; COD; 水处理; 生活污水

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A

A study of removal efficiency of UV_{254} characterized organic pollutions with SMF-MBR process

CUI Yanping^{1,2}, YAO Binghua¹

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The removal efficiency of UV_{254} characterized organic pollutions is investigated by the SMF-MBR process treating domestic sewage under the condition of zero discharge excess sludge. With monitoring UV_{254} and COD values of the sewage and reactor effluent simultaneously, their relationship formulas are established respectively. The results show that the SMF-MBR process has the obvious removal efficiency of UV_{254} characterized organic pollutions with the average removal rate of 76.3%, and the accumulation of EPS and SMP could not be observed in the system. Moreover, it is also found that the sludge concentration partition in the SMF-MBR system can effectively reduce the membrane fouling.

Key words: SMF-MBR process; UV_{254} ; COD; water treatment; domestic sewage

UV_{254} 是 254 nm 波长下单位比色皿光程的紫外吸光值, 是 20 世纪 60 年代开始研究的评价水中有机污染物的指标。根据光谱分析的结果, 一般的饱和烃在近紫外区无吸收, 而芳香烃、具有双键或羰基的共轭体系如木质素、丹宁、腐殖质等在紫外区有明显的吸收或特征峰^[1]。 UV_{254} 作为水中特征有机物替代参数得到了国内外学者的广泛关注。韩国的 Kim 等^[2]探讨了不同废水 COD、BOD 和紫外吸光

度之间的关系, 得到了较好的相关性。日本学者 Yoshinaga 等^[3]发现污水的高锰酸盐指数与紫外吸光度之间有很好的相关性, 验证了紫外吸收光谱在连续监测水质污染指标方面应用的可行性。陈文春等^[4]报道紫外吸收光谱与 COD_{Mn} 值无显著性差异, 校准曲线基本满足快速测定的需要。金伟等^[5]通过对活性炭处理自来水前后的水质进行分析, 研究表明 UV_{254} 与 COD_{Mn} 具有良好的相关性。戴小波等^[6]

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21276208); 陕西省科技厅攻关资助项目(2011K17-03-02); 陕西省教育厅专项基金资助项目(12JK0606)。

作者简介: 崔燕平, 女, 讲师, 博士生, 研究方向为水污染控制。E-mail: 13613823874@163.com。

姚秉华, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为膜分离与光催化氧化。E-mail: bhyao@xaut.edu.cn。

同时用标准方法和紫外分光光度法对染色废水出水口的废水进行采集和比对实验,证实了紫外法检测水质参数的可行性。以上研究表明,UV₂₅₄与COD指标之间具有明显的相关性,而UV₂₅₄的测定比国标方法测COD要方便快捷得多,在实际应用中可以采用UV₂₅₄作为水体中芳香烃、双键或羰基的共轭体系有机物在水中含量的替代参数。近年来许多研究表明UV₂₅₄值的大小可间接反映水体的有机污染程度,可以作为一种特征有机污染物去除效果的常用指标^[7-9]。

溶解性微生物产物(SMP)是出水中溶解性有机物(DOM)的主要成分,水体中的SMP组成复杂、分子量分布范围广、可生化性较差、对重金属离子有螯合性,可能对微生物活性产生抑制,并能堵塞生物膜,其浓度和性质直接影响了生物处理工艺的出水水质和处理效率^[10]。SMP主要产生于微生物的基质分解和内源呼吸过程,通常为多糖、蛋白质类似物、腐殖酸、富里酸等芳香族化合物和脂肪族长链碳水化合物化合物的混合物,其产生量和性质受到系统操作运行状况(泥龄、水力停留时间、有机负荷、基质种类等)的影响^[11]。而UV₂₅₄值的大小可以很好地代表水体中芳香烃、具有双键或羰基的共轭体系,这些物质正好也是出水中SMP的主要组成成分,另外细胞死亡溶解产生的细胞壁等惰性大分子物质也可以用UV₂₅₄进行表征。

膜生物反应器(MBR)作为一种新型的水处理技术,由于使用超滤膜作为固液分离手段,可以完全截留悬浮物和细菌^[12],不仅在污染物去除方面表现出良好的优势,而且在长污泥龄条件下运行可实现剩余污泥减量甚至可实现零剩余污泥排放。随着污泥处理法律法规的日益严格和环境问题的日益凸显,MBR技术在污泥减量化方面的研究和应用也日益广泛。

本试验采用自行研制的SMF-MBR装置对实际生活污水进行处理,以零剩余污泥排放为前提,探讨了该工艺对系统内UV₂₅₄表征有机污染物的去除效果,为进一步工业化应用提供实验基础。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

SMF-MBR试验装置如图1所示,生物反应器由有机玻璃制作,分为缺氧区A区和好氧区O区两个区:A区有效容积为6L,内置次毫米过滤(Sub-milli filtration,简称SMF)组件,运行过程中SMF组件表面形成动态生物膜,可以把污泥截留在A

区,实现A区污泥浓度高、O区污泥浓度低的污泥浓度分区的目标;O区采用MBR工艺,有效容积为12L,内置聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜组件,膜面积为0.5m²,孔径为0.1μm,以保证出水水质。系统将A区和O区污泥浓度分区,O区MBR膜组件在适宜污泥浓度条件下运行,整个系统在无剩余污泥排放条件下运行,在保证出水水质的前提下,实现零剩余污泥的排放并减缓污泥对O区MBR造成的膜污染。

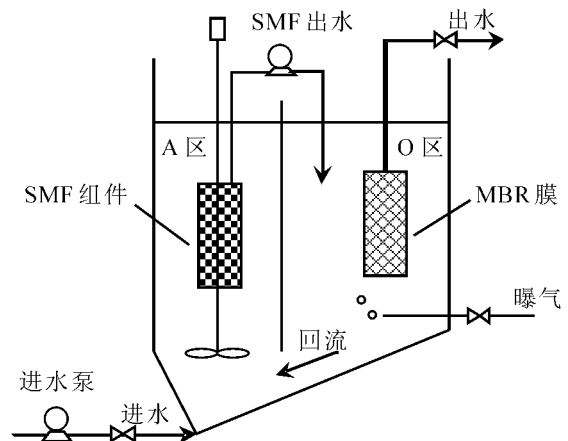


图1 SMF-MBR试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMF-MBR test apparatus

1.2 试验方法

试验原水:本试验原水取自郑州某大学学生生活区的污水井,主要是学生生活污水和食堂废水,原水经过简单预处理后作为SMF-MBR实验装置的进水。进水水质pH值为6.5~8.5,COD值为200~300mg/L,UV₂₅₄为0.48~0.65。

试验方法:为了避免原水中悬浮物在系统内积累造成对膜的污染,在进水蠕动泵吸水口设置了一个SMF组件(孔径为300μm)进行过滤,以去除大部分悬浮物后再进入A区。为减缓MBR膜组件的膜污染,O区MBR出水采用抽吸8min、停吸2min的运行方式。运行过程中根据设定的膜清洗条件,定期对膜组件进行清洗,以保证膜通量。整个系统连续运行100d。通过分别监测进水、出水的UV₂₅₄和COD浓度,探讨系统内UV₂₅₄和COD的相关性。在此基础上考察SMF-MBR工艺在零剩余污泥排放条件下对生活污水中UV₂₅₄表征有机物的去除效果。COD的测定按照重铬酸钾快速密闭催化消解和滴定标准方法进行^[13]。UV₂₅₄的测定方法如下:

(1)水样采集:使用去离子水清洗滤膜(孔径0.45μm)和过滤装置,保证至少50mL不含有机物的清洗水通过滤膜。采集过滤水样时,弃去前20mL不用,取后面过滤的水样作为测试用水样。

(2) 吸光度测定:用 755B 型紫外可见分光光度计(上海菁华)在波长为 253.7 nm 下,以去离子水作空白进行测定水样吸光度。如果水样吸光度超过 0.900,则用去离子水对水样进行适当稀释。

(3) UV_{254} 计算:根据水样吸光度 a 、稀释倍数 n 和比色皿厚度 b ,计算水样 $UV_{254} = na/b$ 。

2 结果与讨论

2.1 原水 UV_{254} 与 COD 的相关性

根据试验设计,系统进水 COD 需维持在 (250 ± 50) mg/L,而原水水质和水量均不稳定,随时间会发生较大的变化,如何控制进水 COD 浓度在设定范围内是本试验要解决的一个现实问题。 UV_{254} 与 COD 虽具有较强的相关性,但由于不同水质的污水组成成份相差较大,两者的相关关系式也不尽相同^[6],因此在实际应用中需要根据水质实际情况建立应用关系式。

为了建立本试验过程中原水 COD 与 UV_{254} 的相关关系式,从试验开始即同时对原水进行 COD 和 UV_{254} 的监测,监测数据如图 2 所示。由图 2 可以看出,两者的变化趋势是一致的,COD 浓度大时,对应 UV_{254} 也较大;COD 浓度小时,对应 UV_{254} 也较小。原水的 COD 与 UV_{254} 的关系如图 3 所示。可见两者

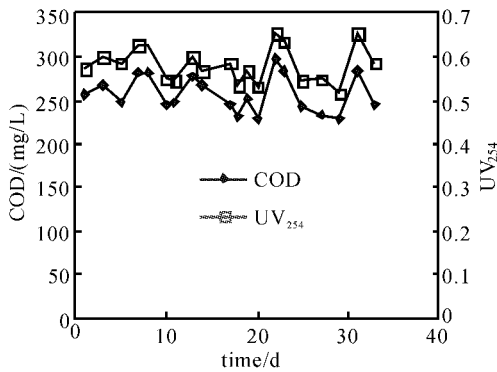


图 2 原水 COD 和 UV_{254} 的监测数据
Fig. 2 Data of COD and UV_{254} of raw water

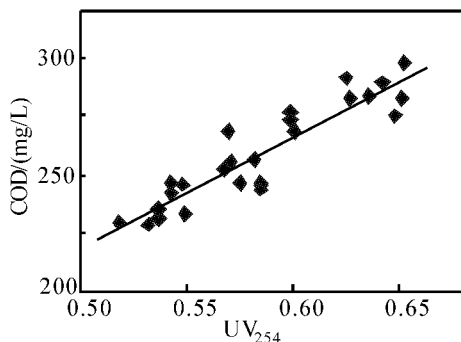


图 3 原水 COD 与 UV_{254} 的关系曲线
Fig. 3 The relation curve of COD and UV_{254} of raw water

之间存在显著的相关性,拟合方程为 $COD = 480.61UV_{254} - 22.095$,相关系数 $R^2 = 0.8477$,表明 UV_{254} 和 COD 之间具有较好的线性关系。

实测 COD 数据与计算 COD 数据的相对误差与 UV_{254} 的关系见图 4。大部分数据的相对误差都在 $\pm 4\%$ 之内,最大相对误差为 $\pm 6.2\%$,表明通过对原水进行 UV_{254} 测试,利用上述拟合方程计算的 COD 值与实测值的误差在可接受的范围内。需要说明的是在试验过程中,取水后先快速进行原水水样 UV_{254} 的测定,根据原水 UV_{254} 和 COD 相关关系式进行 COD 计算,若计算值在 (250 ± 50) mg/L 范围内,则直接采用原水作为进水,若差值超过此范围,则添加葡萄糖或加水调节 COD 浓度大小至设定范围后,再作为系统进水进行试验。

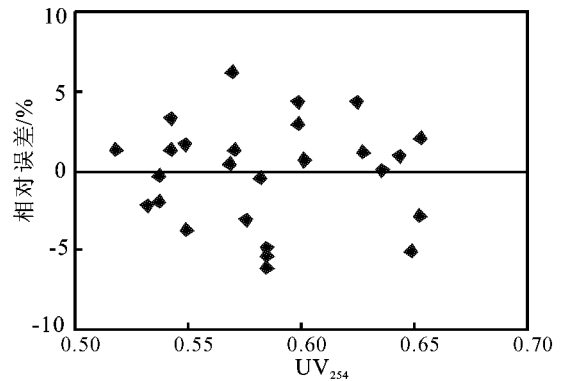


图 4 原水实测 COD 与计算 COD 值的相对误差与 UV_{254} 的关系
Fig. 4 The relation of the relative error of measured COD and calculated COD and UV_{254} values

2.2 出水 COD 与 UV_{254} 的相关性

废水中的一些有机物,如木质素、丹宁、腐殖质等各种芳香族有机化合物都是苯的衍生物,也是天然水体和污水二级处理出水中的主体有机物,约占 TOC 的 40%~60%^[14]。鲍秀瑾等^[16]研究表明同一套装置对废水中有机污染物的去除具有可比性,且出水中可以产生紫外吸收的有机物占 COD 的比值也较固定。

本试验共连续运行了 100 d,出水 COD 与 UV_{254} 数据如图 5 所示。从图 5 可看出,出水 COD 最大值为 29.38 mg/L,最小值为 5.27 mg/L,平均值为 17.76 mg/L,而进水 COD 浓度平均值控制在 250 mg/L,由此可知 SMF-MBR 工艺对生活污水 COD 的平均去除率达 93%。出水水质 COD 浓度优于《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918-2002)》一级 A 标准要求的 50 mg/L。

对出水 COD 与 UV_{254} 数据进行线性回归,获得拟合方程:

$$COD = 197.37UV_{254} - 5.9895$$

相关系数 $R^2 = 0.9412$, 表明出水 COD 和 UV₂₅₄ 之间存在着良好的相关性。分析其原因主要是出水由 MBR 膜组件抽吸出水, 进水中有机污染物除了在 A 区和 O 区进行生物降解外, MBR 膜对微生物及大分子有机物具有很强的截留作用, 对系统出水有机物组份的稳定性起了决定性作用, 使得系统出水中的有机物组成相类似。

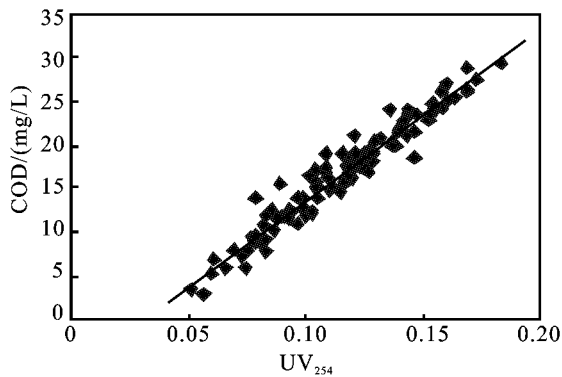


图5 出水 COD 与 UV₂₅₄ 相关曲线图

Fig. 5 The simulated curve of COD and UV₂₅₄

由拟合的相关系数 R^2 可以看出, 出水 UV₂₅₄ 和 COD 的相关性比原水的相关性更好, 这主要是由于生活污水原水中的 COD 组成较复杂, 其中含有一些小分子的紫外吸收很弱的物质^[16], 比如分子量小于 500 的物质其在紫外区域的吸收就比较弱, 而此类物质一般可为微生物所利用降解, 而经过生化处理后的出水中组成 COD 的主要成分为可以产生紫外吸收的有机物, 出水的 COD 和 UV₂₅₄ 值具有很好的相关性, 与文献^[15] 研究结果相同。

2.3 系统对 UV₂₅₄ 表征有机物的去除效果

在污染物去除效率方面, MBR 表现优异, 但同时, 许多研究表明 MBR 内污泥特征与膜污染状况紧密相关。膜污染是影响 MBR 高效而低成本运行的最主要因素, 由于较长的污泥停留时间和较低的 F/M 值, 微生物在自裂解和代谢过程中逐渐积累了大量的次生级代谢产物如胞外聚合物 (EPS)、溶解性微生物产物 (SMP) 等, 而这些物质是膜污染的主要物质。Barker^[11] 和张海丰等^[10] 研究表明 SMP 和 EPS 类物质属于 UV₂₅₄ 表征的有机污染物, 因此本系统通过测试进水、出水 UV₂₅₄ 来评价工艺对系统内 UV₂₅₄ 表征有机污染物的去除效果。

系统对 UV₂₅₄ 表征有机物的去除效果如图 6 所示。进水 UV₂₅₄ 最大值为 0.65, 最小值 0.48, 平均值为 0.57。从图中可以看出, 中间部分进水 UV₂₅₄ 数据相比前后阶段都较小, 主要是由于此段时间属于学校放暑假, 水质水量都发生了较大的变化而引起的。出水 UV₂₅₄ 最大值为 0.17, 最小值为 0.

05, 平均值为 0.10。最大去除率达 88.5%, 平均去除率为 76.3%, 表明系统对 UV₂₅₄ 具有较好的去除效果。其原因主要是由于 A 区 SMF 组件相当于动态膜, 通过控制 SMF 组件出水悬浮物 (SS) 调控 O 区污泥浓度的同时, SMF 组件也把大量的大分子物质截留在 A 区, 而缺氧或厌氧 (在 A 区会因污泥浓度高或混合的均匀性问题出现厌氧环境) 环境下, 可以使得组成 SMP 的中、低分子量物质进一步地降解消化, 最后仅残存难降解的高分子量的物质。

Xu 等^[17] 通过对生活垃圾焚烧厂渗滤液进行厌氧消化处理, 发现中等分子量区域物质是由高分子量的易生物降解有机物降解产生, 而延长水力停留时间 (HRT) 可以使得出水的中、低分子量物质进一步地降解消化, 最后仅残存难降解的高分子量物质, 而此类物质又可通过超滤等技术去除。张海丰等^[10] 研究也表明, MBR 系统 SMP 随着污泥停留时间 (SRT) 延长呈现逐步下降并趋于稳定的变化现象, 指出 SMP 可以作为基质而被微生物利用, 但微生物驯化过程需要较长的时间 ($t > 35$ d)。

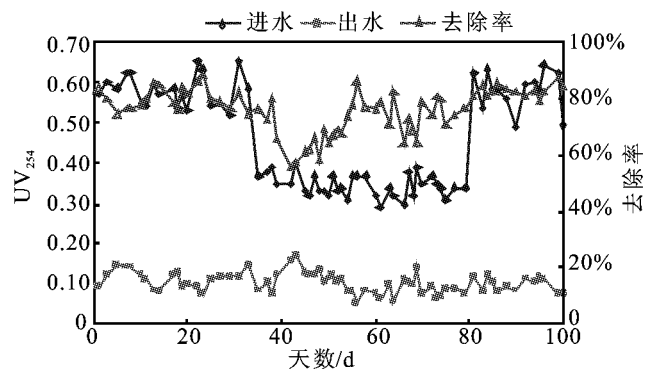


图6 系统对 UV₂₅₄ 表征有机物的去除效果

Fig. 6 The removal efficiency of UV₂₅₄ characterized organic pollutants in the system

而本系统运行时没有排泥, SRT 趋于无穷大, 系统内微生物相发生了较大的变化, 有些专性菌属能够在系统内获得生长, 从而可以对一些常规生物处理工艺无法去除的较难生物降解有机物也具有一定的去除效果, 因此系统内的微生物具有较强的降解 SMP 中、低分子量物质的作用, 而大分子的 SMP 物质可以通过 MBR 的膜截留作用进行去除, 因此, 出水中的 UV₂₅₄ 随运行时间呈现逐步下降的趋势。

范举红等^[18] 的研究以 MBR 池内污泥混合液上清液的总有机碳 (TOC) 浓度表征 SMP 和 EPS 总量, 试验数据表明, 系统内的 SMP 和 EPS 呈现先上升后下降的变化趋势, 进一步分析认为接种污泥为传统活性污泥, 初期运行工况的改变使微生物次生级代谢的产物增加, 产生累积现象, 但随着 MBR 工艺对活性污泥的驯化, 活性污泥具备降解这些产物

的能力,从而使 SMP 和 EPS 总量变化由富集向降解转化,本试验结论与之一致。

其他研究者也有类似的发现。Heijnen^[19]曾在试验中发现,污水处理系统中并没有惰性物质的积累现象。对此, van Loosdrecht 等^[20]认为,所谓的惰性物质并不是绝对不可降解的,它们可能会缓慢降解,或仅仅可以被某些泥龄非常长的微生物降解。因此,惰性物质的存在与否则取决于 SRT 的长短。假如 SRT 足够长,则系统可能没有惰性物质的积累,相反,惰性物质将不可避免地在系统内得到积累,且积累的量也主要取决于 SRT 的长短。

由此可见,长时间不排泥条件下,系统内微生物菌属与短 SRT 条件下相比发生了较大的变化,有利于专性菌属的生长,从而可以获得较难生物降解有机物的降解,也可以减缓 SMP 和惰性物质对膜污染的影响,A 区和 O 区的高低污泥浓度分区保证了系统的长期稳定运行。

3 结 论

在零剩余污泥排放条件下,采用 SMF-MBR 工艺处理生活污水,主要研究了试验用水原水和出水中 COD 与 UV₂₅₄ 的相关关系,以及该工艺对系统内 UV₂₅₄ 表征有机物的去除效果,得到如下结论:

1) 生活污水原水的 COD 与 UV₂₅₄ 具有较好的相关性,以此拟合公式按照监测的 UV₂₅₄ 进行原水 COD 计算可快速判断原水中有机物浓度大小,可为水处理过程监控提供一种快速便捷的方法。

2) SMF-MBR 工艺处理生活污水出水的 COD 与 UV₂₅₄ 也具有较好的相关性,因为生物处理出水中的成分多是可产生 UV₂₅₄ 吸收的物质,再加 MBR 膜的截留作用,出水水质的组成成分相对稳定,用 UV₂₅₄ 值代替 COD 可快速判断生化系统处理效果。

3) 在零剩余污泥排放条件下,SMF-MBR 工艺处理生活污水对系统内 UV₂₅₄ 表征的有机物具有较好的去除效果,平均去除率为 76.3%。通过试验分析,高低污泥浓度分区保证了系统的长期稳定运行,系统内没有造成大量 EPS 和 SMP 物质的积累,有效减缓了其对于膜污染的影响。

参考文献:

[1] 蒋绍阶,刘宗源. UV₂₅₄ 作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(2): 61-65.
Jiang Shaojie, Liu Zongyuan, The meaning of UV₂₅₄ as an organic matter monitoring parameter in water supply & wastewater treatment [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(2): 61-65.

[2] Kim S H, Choi U W. UV absorption of wastewaters [J]. Punsok Hwahak, 1982, 2: 38-40.
[3] Yoshinaga T, Yanagase K. Relation between COD and UV absorption of sewage[J]. Yosui to Haisui, 1983, 25 (11): 1157-1165.
[4] 陈文春. 紫外分光光度法在纯水 COD 测定中的应用 [J]. 水处理技术, 1998, 24: 333-335.
Chen Wenchun, Determination of COD in RO water by ultraviolet absorption spectrometry [J]. Technology of Water Treatment, 1998, 24: 333-335.
[5] 金伟,范瑾初. 紫外吸光值(UV₂₅₄)作为有机物替代参数的探讨[J]. 工业水处理, 1997, 17(6): 30-33.
Jin Wei, Fan Jinchu. Studies on the UV(254nm) absorbance as a surrogate parameter of organic matter [J]. Industrial Water Treatment, 1997, 17(6): 30-33.
[6] 戴小波,曹鹏. 无汞盐紫外分光光度法快速测定染色废水 COD [J]. 泰州职业技术学院学报, 2002, 2(4): 4-5.
Dai Xiaobo, Cao Peng, Fast check of waste water COD from dyeing process with Hg free ultraviolet spectrophotometric titration [J]. Journal of Taizhou Poly technical Institute, 2002, 2(4): 4-5.
[7] 左名景,阮文权,薛涛,等. 臭氧氧化法深度处理城市污水厂生物处理出水研究 [J]. 水处理技术, 2012, 38(6): 102-105.
Zuo Mingjing, Ruan enquan, Xue Tao, et al, Advanced treatment of bio-treated effluent in municipal wastewater treatment plant by ozonation process [J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(6): 102-105.
[8] 詹德明,汪晓军,刘智颖,等. 新型 Fenton 工艺对垃圾渗滤液 MBR 出水预处理研究 [J]. 水处理技术, 2013, 39 (7): 112-115.
Zhan Deming, Wang Xiaojun, Liu Zhiying, et al, The research on pretreatment of the landfill leachate MBR effluent by a new Fenton process [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(7): 112-115.
[9] 陈小亮,楼紫阳,谷麟,等. 水化深度处理渗滤液尾水中的有机物 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1656-1660.
Chen Xiaoliang, Lou Ziyang, Gu Lin, et al, Removal of organic matters from landfill leachate effluent by hydration reaction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1656-1660.
[10] 张海丰,孙宝盛,赵新华,等. 溶解性微生物产物对浸没式膜生物反应器运行的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29 (1): 82-86.
Zhang Haifeng, Sun Baosheng, Zhao Xinhua, et al, Effects of soluble microbial product on the performance of submerged membrane bioreactor [J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 82-86.
[11] Barker D, Stuckey D. A review of soluble microbial

- products (SMP) in wastewater treatment systems[J]. *Water Research*, 1999, 33(14): 3063-3082.
- [12] 裴亮, 姚秉华, 王理明, 等, PAC-HFUM系统处理微污染水的实验研究[J]. *西安理工大学学报*, 2009, 25(1): 85-88.
Pei Liang, Yao Binghua, Wang Liming, et al, Research on treatment of tiny pollution water with PAC-HFUM system[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(1): 85-88.
- [13] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] Cronan C S, Lakshman S, Patterfson H H. Effects of disturbance and soil amendments on dissolved organic carbon and organic acidity in red pine forest floors[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21: 457-463.
- [15] 鲍秀瑾 邵争辉, 武献春, 等, UV₂₅₄在焦化废水处理中的应用[J]. *燃料与化工*, 2011, 42(6): 42-43.
Bao Xiujin, Shao Zhenghui, Wu Xianchun, et al, Application of UV₂₅₄ in coking wastewater treatment[J]. *Fuel & Chemical Processes*, 2011, 42(6): 42-43.
- [16] Edzwald J K. Coagulation in drinking water treatment: particles, organics and coagulants. control of organic material by coagulation and floc separation process [M]. *Water Science Technology*, Oxford: Pergamon Press, 1993, 21-35.
- [17] Xu S Y, He P J, Lü F, et al. Transformation of organic matters in fresh leachate during anaerobic degradation under long hydraulic retention time[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(9): 1302-1308.
- [18] 范举红, 余素林, 张培帅, 等, 膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 950-954.
Fan Juhong, Yu Sulin, Zhang Peishuai, et al, Mechanism of membrane fouling and filtration characteristics in a membrane bioreactor for industrial wastewater treatment[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 950-954.
- [19] Heijnen J J, Hols J, Van der Lans R G J M, et al. A simple hydrodynamic model for the liquid circulation velocity in a full scale two and three phase internal air-lift reactor operating in the gas recirculation regime[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52: 2527-2540.
- [20] Van Loosdrecht M C M, Henze M. Maintenance, endogenous respiration, lysis, decay and predation[J]. *Water Science Technology*, 1999, 39(1): 107-117.

(责任编辑 杨小丽)