

UF膜与砂滤生物接触氧化联用处理富营养化湖泊水

李发站, 吕锡武, 王华成, 戈 军
(东南大学环境工程系, 江苏 南京 210096)

摘 要:采用跌水曝气生物接触氧化、砂滤和 UF 膜分离的联用技术对太湖原水进行试验, 结果表明, 在冬季平均水温 7.6℃, 生物接触氧化的水力停留时间 (HRT)=1.6h 时, 组合工艺对浊度、氨氮、COD_{Mn}、藻类和 UV₂₅₄ 的去除率分别为 99.1%、44.0%、35.3%、97.9% 和 6.9%。而在相同的条件下, 采用常规净水工艺的无锡充山水厂对浊度、氨氮、COD_{Mn}、藻类和 UV₂₅₄ 的去除率分别为 98.7%、14.5%、36.4%、97.5% 和 5.6%。技术经济分析表明: 在投资和运行费用基本相当的情况下, 试验工艺的处理效率优于常规工艺。

关键词:超滤; 跌水曝气; 生物接触氧化; 富营养化

中图分类号: X524; TQ028.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2006)06-0041-04

近年来, 随着太湖周边地区工农业发展及生活排污量的增加, 水体富营养化日趋严重, 夏季水华频繁发生, 严重时造成绿色藻细胞覆盖整个水体, 水厂停水, 水乡居民无水喝的现象。在引起太湖水体富营养化的同时, 水中的有机物和氨氮含量严重超标, 特别是溶解性小分子有机物。根据文献^[1], 太湖溶解性 DOC 有机物占总有机物 COD_{Mn} 的比例为 88%, 其中分子量小于 4000 的溶解性有机物所占比例, DOC 和 UV₂₅₄ 各为 62% 和 61%。而常规饮用水处理工艺自身存在对有机微污染物、氨氮等无法有效去除的弱点, 氯化过程非但不能有效地灭活水中抗氯型的病原寄生虫等病原微生物, 还导致了对人体健康危害更大的有机卤化物的形成, 处理后的生活饮用水安全性难以保证, 已不能与现有的水质标准相适应, 必须开发新的水处理技术。

应用膜技术替代传统的饮用水处理工艺是目前国内外研究的热点。膜分离法具有占地面积小、出水水质好、自动化程度高等特点。UF 膜能去除寄生虫卵, 如贾第虫卵和阴孢子虫的卵囊, 并能去除最小的病毒 - 脊髓灰质炎病毒。由此可见, UF 膜可完全实现对饮用水的除浊和消毒, 并对进料浓度的波动相对来

说不太敏感。而 UF 膜对氨氮等溶解性小分子物质去除率不高, 为保证饮用水安全, 必须采取相应的处理措施。生物处理技术是目前解决饮用水氨氮等溶解性小分子物质问题最有效、最经济的方法之一^[2]。

1 试 验

1.1 水 质

试验期间的太湖水 (无锡充山水厂附近) 主要水质指标如表 1 所示。

表 1 太湖水主要水质指标
Table 1 Water quality indexes of Taihu Lake

水质指标	变化范围	平均
水温 (℃)	0.5~23	7.6
pH	7.3~7.7	7.5
DO (mg/L)	7.4~12.7	10.3
浊度 (NTU)	18~465	49
NH ₃ -N (mg/L)	1.07~5.95	3.16
COD _{Mn} (mg/L)	4.3~8.7	6.1
藻类 (×10 ⁶ 个/L)	2.8~32	10.2
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.084~0.126	0.103

1.2 试验装置

选择跌水曝气生物接触氧化 + 砂过滤 + UF 膜组合工艺作为中试处理工艺。



1.2.1 跌水曝气生物接触氧化

靠微生物的新陈代谢作用去除水中溶解性的有机物和氨氮。在本试验中,考虑到湖水本身溶解氧较高和水中污染物量少的特点,采用跌水曝气的方式充氧,也是本试验的一个亮点。原水经水泵一级提升后,分三级跌水,既满足了反应所需溶解氧又免除了购置曝气设备,减少了投资成本和运行电耗,使管理工作趋于简单。

1.2.2 砂滤

截留脱落的生物膜,去除水中大部分的悬浮固体和大分子有机物,提高膜通量。滤料为石英砂(粒径 $0.5\sim 1.2\text{mm}$),滤料层厚 0.7m ,下层承托层厚 0.4m 。

1.2.3 UF膜

截留水中微小絮凝体,去除水中残留的悬浮固体和部分有机物,进一步提高水质。试验用膜采用海南立升净水科技实业有限公司提供的LG0650 $\times$ 1-B立升超滤机,膜材质为PVC合金,内压式,有效膜面积 13m^2 ,切割分子量10万,过滤方式为终端过滤,产水通量为 $0.5\sim 1\text{m}^3/\text{h}$ 。

1.3 工艺流程

试验在无锡市太湖边上的充山水厂内进行。试验结果与同期的水厂出水水质进行比较。无锡市充山水厂采用采用混凝、气浮、过滤和消毒的常规处理工艺。

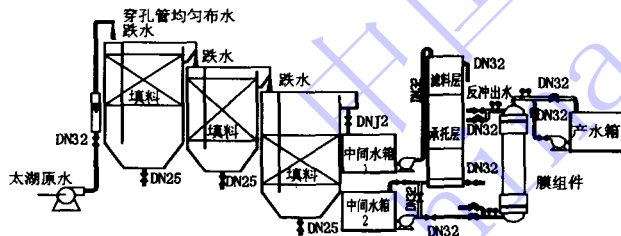


图1 处理工艺流程

Fig.1 Technological process

试验工艺流程如图1所示。太湖原水由泵直接提升至生物接触氧化池(BCO),BCO分三级跌水,跌水高度分别为 0.5m 、 0.4m 和 0.4m 。BCO出水进入中间水箱1,再经泵加压进入砂滤柱,砂滤柱采用下向流。砂滤柱出水进入中间水箱2,水箱2储水既是超滤膜的进水,又是砂滤柱反冲用水。膜的运行方式为外压式,即水由膜外表面通过膜过滤后,进入中空纤维膜内排出。膜过滤水进入产水箱,产水箱同时也是膜反冲洗水箱。

BCO采用弹性立体填料,三级填料区的体积分别为 0.53m^3 、 0.51m^3 和 0.53m^3 ,总水力停留时间控

制在 1.6h 。跌水充氧效果平均分别为 0.3mg/L 、 1.3mg/L 和 1.2mg/L ,三级BCO中溶解氧变化范围分别为: $5.8\sim 11.9\text{mg/L}$ 、 $4.5\sim 11.4\text{mg/L}$ 和 $4.8\sim 11.7\text{mg/L}$,均处于好氧状态。BCO底部设有泥斗,每 $2\sim 3\text{d}$ 排泥一次。砂滤柱滤速 $6\sim 7\text{m/h}$,每 24h 反冲一次,反冲时间 $20\sim 25\text{min}$,反冲强度 $5.7\text{L/m}^2\cdot\text{s}$ 。超滤运行方式为死端式间歇运行,每隔 40min 排放浓缩水一次,每 2h 进行清水反冲洗,反冲洗流量为 1800L/h ,历时 $2\sim 3\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 浊度的去除

由图2可知,组合工艺出水浊度始终低于 0.5NTU ,平均去除率达到 99.1% 。而同期的无锡充山水厂出水的浊度在 $0.8\sim 2.2\text{NTU}$ 之间,平均去除率也达到了 98.7% 。由此可见,组合工艺处理出水的浊度低于常规处理工艺出水的浊度。本试验结果充分证实了膜过滤在去除浊度上的优越性。

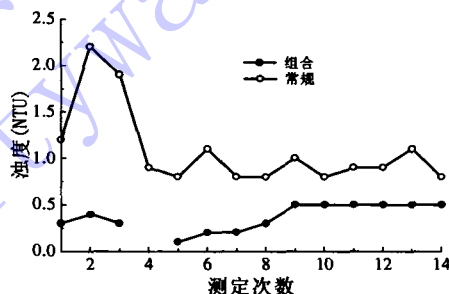


图2 组合工艺和常规工艺出水浊度比较

Fig.2 Comparison of effluent turbidity between combined technological process and routine process

2.2 氨氮的去除

太湖原水的氨氮在 $1.07\sim 5.95\text{mg/L}$ 之间,含量较高。由图3可见,组合工艺处理出水的氨氮一般低于 2.83mg/L ,平均为 2.15mg/L ,平均去除率达到

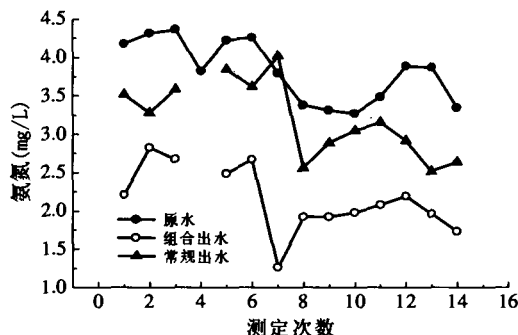


图3 组合工艺和常规工艺出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 比较

Fig.3 Comparison of effluent $\text{NH}_3\text{-N}$ between combined technological process and routine process



44.0%。而同期常规处理出水的氨氮常常高于 2.50mg/L, 平均达到 3.20mg/L, 平均去除率仅有 14.5%, 有时甚至出现负增长。这表明常规处理对氨氮去除效率较差, 导致消毒剂用量过大, 危及水的安全性。组合工艺出水氨氮浓度相对也较高, 但试验期间水温较低, 平均只有 7.6℃, 分析认为是由生物活性较低造成的。

2.3 COD_{Mn} 的去除

试验期间太湖水的 COD_{Mn} 在 4.3~8.7mg/L 之间波动, 平均 COD_{Mn} 为 6.1mg/L。由图 4 可知, 组合工艺出水 and 常规工艺出水对 COD_{Mn} 去除率都不高, 组合工艺出水 COD_{Mn} 在 3.6~5.1mg/L 之间波动, 平均去除率只有 35.3%; 常规工艺出水 COD_{Mn} 在 3.2~5.0mg/L 之间波动, 平均去除率也只有 36.4%。两种工艺的出水均不满足国家卫生部最新颁布的《生活饮用水卫生规范》中规定饮用水的 COD_{Mn} 在 3mg/L 以下要求。

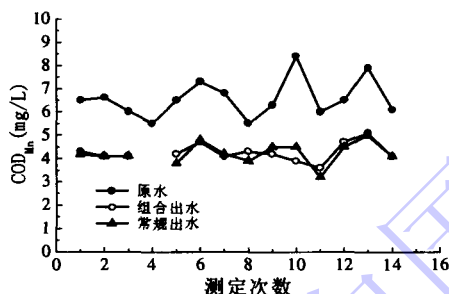


图 4 组合工艺和常规工艺出水 COD_{Mn} 比较

Fig.4 Comparison of effluent COD_{Mn} between combined technological process and routine process

组合工艺对 COD_{Mn} 去除率不高除受水温的影响较大之外, 另一个主要原因分析认为是由于 BCO 中水流较缓, 对生物膜的冲刷强度不高, 导致相当多的无机颗粒附着在填料表面, 严重影响生物活性和阻塞有机污染物扩散造成的。建议在以后的试验中改进 BCO 的水流状态, 提高对填料的冲刷强度。为了保证饮用水的 COD_{Mn} 达标, 而常规工艺对 COD_{Mn} 的去除率只有 30%左右, 这就要求水源的 COD_{Mn} 在 4.2mg/L 以下。目前太湖水中最低 COD_{Mn} 也在 4.3mg/L, 达不到国家标准在所难免。因此, 必须寻求新的净水工艺。

2.4 藻类的去除

藻类是一种低等的、含有叶绿素的植物, 包括用肉眼看得见和用显微镜才能看得见的微小藻类。藻细胞体内含有藻毒素, 当藻细胞死亡、破裂后藻毒素

就会溶出, 危及水体安全。吕锡武等人^[6]在试验中发现, 草履虫以很快的速度吞食蓝藻, 草履虫多时, 蓝藻和藻毒素去除效果好, 说明藻类的去除与藻毒素的去除具有正相关性。本实验在进水 $2.8 \sim 32 \times 10^6$ 个/L (平均为 10.2×10^6 个/L) 时, 组合工艺出水为 $0.05 \sim 0.57 \times 10^6$ 个/L (平均为 0.36×10^6 个/L); 常规工艺出水为 $0.22 \sim 0.62 \times 10^6$ 个/L (平均为 0.40×10^6 个/L)。去除率分别高达 97.9%和 97.5%。

2.5 UV_{254} 的去除

UV_{254} 作为水中芳香环有机物的指示指标, 可作为 TOC 和 THMs 前驱物的代用参数, 与三卤甲烷前驱物有很好的相关性。由图 5 可知, 在进水 $0.084 \sim 0.126 \text{ cm}^{-1}$ (平均为 0.103 cm^{-1}) 时, 组合工艺出水为 $0.090 \sim 0.105 \text{ cm}^{-1}$ (平均为 0.097 cm^{-1}); 常规工艺出水为 $0.092 \sim 0.105 \text{ cm}^{-1}$ (平均为 0.100 cm^{-1})。去除率分别为 6.9%和 5.6%, 组合工艺优于常规工艺。

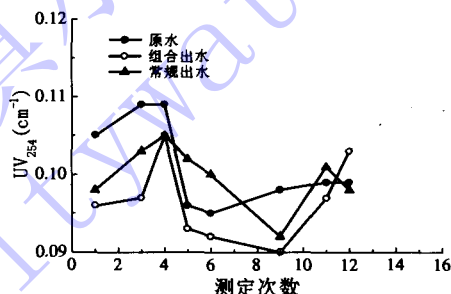


图 5 组合工艺和常规工艺出水 UV_{254} 比较

Fig.5 Comparison of effluent UV_{254} between combined technological process and routine process

2.6 膜通量的变化

从图 6 中可以看出, 在开始过滤的一段时间内, 膜通量下降迅速, 大约经过 100min 后膜通量下降越来越平缓, 此时比渗透通量已经降低为初始通量的 35%左右, 经定期排放浓缩水后膜通量有所回升, 经清水反冲洗后提高到初始值的 45%左右。如此周期反复, 膜通量平缓下降。当比渗透通量下降为初始通量的 32%左右, 采用清水反冲洗已经很难回复膜通量, 应采用化学清洗。药剂为 0.5%的 NaOH 加含有效氯量为 10mg/L 的 NaClO 混合溶液, 进行循环清洗 40min。从图 6 中还看到, 经化学清洗后比渗透通量恢复到初始通量的 80%左右, 清洗比较彻底。但是之后累积运行时间到达 150min 后, 通量迅速下降为初始值的 17.3%, 说明清洗后的膜孔很快又被堵塞, 形成凝胶层。经清水反冲洗后通量恢复到 35.9%。经过周期反冲洗和排放浓缩水, 膜污染得到



有效控制。但是到了四月份,膜的比渗透通量开始迅速回升。分析认为主要原因是,水温回升到 15℃,加上超滤机摆在室外帐篷内,篷内温度上升很快,最高时气温可达到 35℃,也加速水温的升高,减小水的粘度,提高透水能力。

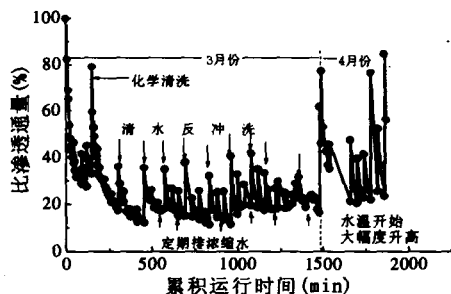


图 6 超滤膜通量随时间的变化

Fig.6 UF membrane flux vs.time

2.7 经济分析

本文仅以无锡太湖水作为原水,采用试验所用工艺,结合《全国市政工程定额》推算 1 万 m³/d 规模的水厂的基建和运行成本。基建费用包括取水泵房、生物接触氧化池、普通快滤池、超滤机组、二级泵房、反冲洗泵房以及设备安装等费用,合计 721.9 万元。运行成本包括人工费、电费、更换填料和膜组件费、消毒费以及设备折旧等,合计制水成本为 0.551 元/m³。据统计,同等规模的传统工艺净水厂的制水成本也基本相当。但本研究开发的跌水曝气生物接触氧化、砂滤和 UF 膜分离的联用组合工艺可以有效去除氨氮和有机物,减少消毒副产物(DBPs)的生成,制取安全卫生的饮用水,同时操作管理简便,

运行成本低、自动化程度高,这对提高流域内居民饮用水质量,推动生物处理微污染原水的技术的快速发展和推广使用将起到积极的作用。

3 结 论

本研究采用跌水曝气生物接触氧化、砂滤和 UF 膜分离的联用组合工艺对太湖原水进行试验,在平均水温为 7.6℃,生物接触氧化的水力停留时间为 1.6h 时,结果表明:(1) 组合工艺对浊度、氨氮、COD_{Mn}、藻类和 UV₂₅₄ 的去除率分别为 99.1%、44.0%、35.3%、97.9% 和 6.9%, 优于常规工艺的 98.7%、14.5%、36.4%、97.5% 和 5.6%。(2) 组合工艺对氨氮、COD_{Mn}、UV₂₅₄ 的去除率仍然较低,除受水温的影响较大之外,另一个主要原因分析认为是由于 BCO 中水流较缓,对生物膜的冲刷强度不高,导致相当多的无机颗粒附着在填料表面,严重影响生物活性和阻塞有机污染物扩散造成的。(3) 经济分析表明,组合工艺和常规工艺在基建和运行费用方面基本相当。

参考文献:

- [1] 董秉直,曹达文,范瑾初,等.天然原水有机物分子量分布的测定[J].给水排水,2000,26(1):30-33.
- [2] 叶辉,许建华.饮用水中的氨氮问题[J].中国给水排水,2000,16(11):31-34.
- [3] K H Lim, H S Shim. Operating characteristics in aerated submerged biofilm reactor for drinking water treatment [J]. Wat Sci Tech., 1997,36(12):101-108.
- [4] 吕锡武,稻森悠平,丁国际.有毒蓝藻及藻毒素生物降解的初步研究[J].中国环境科学,1999,19(2):138-140.

EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRAFILTRATION OF EUTROPHICATED LAKE WATER IN COMBINATION WITH SAND FILTER AND BIOLOGICAL CONTACT OXIDATION

Li Fa-zhan, Lv Xi-wu, Wang Hua-cheng, Ge Jun

(Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The experiments of ultrafiltration of Taihu Lake water with combination of sand filter and water-dropping aeration biological contact oxidation were evaluated. The results showed that the removal rates of turbidity, ammonia nitrogen, COD, algae, UV₂₅₄ by combined process were 99.1%, 44.0%, 35.3%, 97.9% and 6.9% separately under the conditions of the average water temperature of 7.6℃ in winter and the HRT of the biological contact oxidation was 1.6h. While the removal rates of turbidity, ammonia nitrogen, COD, algae, UV₂₅₄ by conventional purification process were 98.7%, 14.5%, 36.4%, 97.5% and 5.6% separately in Wuxi Chongshan Water Plant at the same water temperature; under the conditions of approximately equivalent investment and running expenditure by technological and economical analyses, the efficiency of combined process was higher than that of conventional purification processes.

Key words: ultrafiltration; water-dropping aeration; biological contact oxidation; eutrophication