

# 炭泥生物再生系统循环吸附降解有机物研究

朱兆亮<sup>1</sup>, 崔山<sup>2</sup>, 葛孝新<sup>3</sup>, 任仰龙<sup>1</sup>, 赵桂云<sup>4</sup>, 刘昌明<sup>4</sup>

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南市人防建筑设计研究院有限责任公司, 山东 济南 250014; 3. 高密市孚日自来水有限公司, 山东 高密 261500; 4. 山东捷大环保技术有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要:** 炭泥生物再生系统包括生物再生池、吸附池、混凝池和沉淀池。将沉淀池中吸附高浓度有机物的活性炭、泥渣回流到生物再生池中进行生物降解与炭泥生物活化,活化后的炭泥再次参与原水的吸附处理和强化混凝处理。考察了温度、有机物等因素对系统处理效果的影响,探究了炭泥系统循环吸附降解技术(CSCAB)的特性。结果表明,该系统吸附池对原水中 COD、UV<sub>254</sub>、氨氮与藻类总数的平均去除率分别为 21.27%、15.69%、15.23%、17.10%;炭泥强化混凝对原水中 COD、UV<sub>254</sub>、氨氮、藻类总数及浊度的平均去除率分别为 32.72%、28.36%、43.40%、23.04%、56.11%;生物再生池对沉淀池排泥水中 COD、UV<sub>254</sub>、氨氮的平均去除率分别为 53.09%、33.74%、28.66%,对绿藻、蓝藻、硅藻、隐藻的平均去除率分别为 32.19%、51.89%、50.94%、38.89%。

**关键词:** 炭泥生物再生系统; 循环吸附; 有机物; 藻类

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0061-05

## Circle Adsorption and Bio-degradation of Organic Matter by Carbon - Sludge Biological Regeneration System

ZHU Zhao-liang<sup>1</sup>, CUI Shan<sup>2</sup>, GE Xiao-xin<sup>3</sup>, REN Yang-long<sup>1</sup>, ZHAO Gui-yun<sup>4</sup>,  
LIU Chang-ming<sup>4</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Jinan Air Defence Architectural Design and Research Institute, Jinan 250014, China; 3. Gaomi City Furi Tap Water Co. Ltd., Gaomi 261500, China; 4. Shandong Jianda Environmental Technology Co. Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:** Carbon - sludge biological regeneration system contains a biological regeneration tank, an adsorption tank, a coagulation tank and a sedimentation tank. Activated carbon and sludge that adsorbed high concentration organic matters in the sedimentation tank were returned to the biological regeneration tank for bio-degradation and biological activation, and activated carbon - sludge was once again involved in the adsorption of raw water and enhanced coagulation treatment. The treatment efficiency and the effects of temperature and organic matter concentration on the system were investigated. The results showed that the average removal rates of COD, UV<sub>254</sub>, ammonia nitrogen and total algae by adsorption tank were 21.27%, 15.69%, 15.23% and 17.10%, respectively. The average removal rates of COD, UV<sub>254</sub>, ammonia nitrogen, total algae and turbidity by enhanced carbon - sludge coagulation were

32.72% , 28.36% , 43.40% , 23.04% and 56.11% , respectively. The average removal rates of COD ,  $UV_{254}$  and ammonia nitrogen in sedimentation tank effluent by the biological regeneration tank were 53.09% , 33.74% and 28.66% , respectively , and the average removal rates of *Chlorophyta* , *Cyanobacteria* , diatoms and *Cryptophyta* by biological regeneration tank were 32.19% , 51.89% , 50.94% and 38.89% , respectively.

**Key words:** carbon – sludge biological regeneration system; circle adsorption; organic matter; algae

地下水与地表水中有机污染物和氮、磷等污染不断加剧,河流、湖泊和水库等水体中藻类大量繁殖,给传统水处理工艺产生较大影响。笔者针对混凝/沉淀/过滤工艺对有机物、藻类去除率较低<sup>[1]</sup>,而活性炭吸附运行成本高,生物预处理面临水源水中有机物含量低、温度变化大,生物接触氧化或生物滤池启动慢、预处理难度较大等问题,提出了炭泥生物再生系统循环吸附降解技术(CSCAB)。该技术可有效解决传统生物预处理存在的水源水有机负荷低、生物量较少、水温影响大、去除效果不佳等问题,充分发挥生物预处理工艺的优势,能有效去除有机物、藻类与氮污染物,且可以减少活性炭投量,经济效益较高<sup>[2]</sup>。同时还可以利用活性炭泥吸附富集有机物能力、生物泥发挥生物絮凝剂助凝作用提高混凝效果,保证出水水质。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 原水水质

原水采用北方某市城北水库水,具体水质如下:COD 为 10 ~ 16 mg/L、 $UV_{254}$  为 0.125 ~ 0.350  $cm^{-1}$ 、氨氮为 0.3 ~ 0.6 mg/L、藻类总数为 (10 ~ 25)  $\times 10^3$  cell/mL、pH 值为 7.0 ~ 8.4。可以看出,该水库水存在有机物含量高、藻类数量多等特点。

### 1.2 试验装置

炭泥生物再生系统包括生物再生池、吸附池、混凝池和沉淀池,工艺流程如图 1 所示。该系统主要利用生物活性炭泥吸附水中有机物,炭泥参与吸附、混凝、沉淀后,部分炭泥沉淀物进入生物再生池,生物再生池内布设曝气系统,并布置悬挂式软性填料<sup>[3]</sup>,使其形成生物膜,利用微生物的生命活动进行有机物的降解与炭泥活化,经生物再生后的炭泥协同部分微生物回流到原水中,进行有机物的吸附与部分降解,同时炭泥和微生物在混凝阶段发挥生物絮凝及强化混凝作用,经沉淀后,再次回流至生物再生池完成循环吸附降解有机物过程。

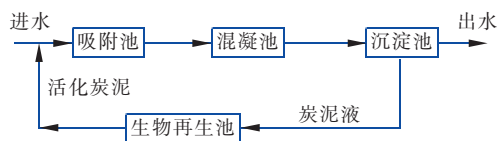


图 1 CSCAB 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of carbon – sludge circle adsorption bio-degradation technology

### 1.3 分析项目及方法

COD:重铬酸钾法;  $UV_{254}$ :TU – 1901 双光束紫外可见分光光度计;氨氮:纳氏试剂分光光度法;藻类:藻类测定仪;pH 值:PHSJ – 4A 型实验室 pH 计;浊度:HACH 2100N 浊度仪;絮体变化特性:智能光散射分析仪 IPDA;DO:AZ8403 型溶解氧仪;水温:水温计;炭泥浓度:重量法(101A – 1 电热鼓风干燥箱)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 炭泥生物再生系统启动

取沉淀池外排炭泥液(前期原水中活性炭投加量为 5 mg/L)投加到生物再生池,测得 10 d 内生物再生池 COD 均值为 87.85 mg/L、氨氮均值为 0.52 mg/L、SS 均值为 2 326 mg/L。适量投加营养物质以保证生化反应正常进行。

生物池培养初期(1 ~ 5 d):对生物池进行曝气处理,供气量约为 1  $m^3/h$ ,控制 pH 值为 6.5 ~ 7.5、温度约为 20  $^{\circ}C$ 、DO 为 3 ~ 5 mg/L,持续闷曝;中期(6 ~ 10 d):为增加炭泥浓度,进行间断曝气,静置 1 h 后去除部分上清液,每天投加等量沉淀池排泥水,使炭泥浓度增加到 4 000 mg/L;后期(11 ~ 30 d):进行不间断连续曝气,25 d 后生物降解池中上清液 COD 浓度逐渐趋于稳定,测得 25 ~ 30 d 的 COD 均值为 67.9 mg/L、氨氮均值为 0.44 mg/L、炭泥浓度达到 3 863 mg/L,说明此时生物池中微生物培养基基本完成,炭泥活化成功。通过显微镜观测发现填料上附着大量菌胶团,而且出现了轮虫、钟形虫等原生

动物,可见生物膜已基本形成<sup>[4,5]</sup>。

## 2.2 生物再生池处理效果

将炭泥吸附的高浓度有机物回流到生物再生池中进行生物降解与炭泥生物活化,利用生物降解池生物量大、炭泥吸附有机物浓度高等特点进行有机物的生物降解,从而提高降解率。生物再生池容积负荷约为 $0.1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,停留时间为 $10 \text{ h}$ ,流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,试验时间为6月—7月,水温为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ ,对 $\text{COD}$ 、氨氮、 $\text{UV}_{254}$ 和藻类的去除效果如图2所示。可以看出,生物降解池对各项指标的去除效果均较好,一开始去除率波动较大,随着生物量的增加,去除率逐渐趋于相对稳定的状态,对 $\text{COD}$ 、氨氮和 $\text{UV}_{254}$ 的平均去除率分别为 $53.09\%$ 、 $28.66\%$ 、 $33.74\%$ 。

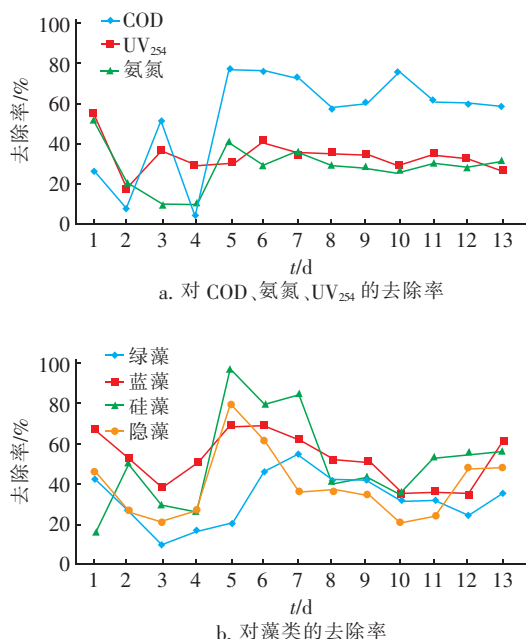


图2 生物再生池处理效果

Fig. 2 Removal rate of  $\text{COD}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{N}$ ,  $\text{UV}_{254}$  and algae by biological regeneration tank

原水中蓝藻所占比例最大为 $51\%$ ,其次是绿藻 $47\%$ ,硅藻与隐藻所占比例较小,分别为 $1.6\%$ 、 $0.4\%$ ;生物降解后各蓝藻所占比例下降,降至 $42.6\%$ ,绿藻所占比例上升至 $55.8\%$ ,硅藻、隐藻所占比例变化不大。随着生物量的不断增加,优势菌种逐渐形成,对藻类整体的去除率趋于稳定,对绿藻、蓝藻、硅藻、隐藻的平均去除率分别为 $32.19\%$ 、 $51.89\%$ 、 $50.94\%$ 、 $38.89\%$ 。由于蓝藻为简单的单细胞生物,微生物容易吸附降解,因此蓝藻的降解效

果优于其他藻类。可以看出,炭泥吸附的高浓度有机物回流到生物再生池对有机物有很好的去除作用,生物除藻效果也较为明显<sup>[6]</sup>。

## 2.3 生物活性炭泥吸附、混凝效果

### 2.3.1 生物活性炭泥的吸附效果

分别将未活性炭泥与活性炭泥按照浓度约为 $100 \text{ mg}/\text{L}$ 的比例加入到 $1 \text{ L}$ 原水中进行吸附试验,吸附 $15 \text{ min}$ 后静置 $30 \text{ min}$ ,取上清液检测各指标浓度。试验结果表明,活性炭泥的除污效果高于未活性炭泥,对 $\text{COD}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、氨氮的去除率分别提高了 $5.94\%$ 、 $9.09\%$ 、 $4.30\%$ ,对绿藻、蓝藻、隐藻、硅藻的去除率分别提高了 $0.24\%$ 、 $3.66\%$ 、 $0.41\%$ 、 $4.50\%$ 。可见,活化后炭泥恢复了吸附能力,对有机物、藻类有一定的去除效果。

将生物再生池中活性炭泥按体积比为 $3\%$ (炭泥浓度约为 $105 \text{ mg}/\text{L}$ )投加到原水中,进行吸附降解试验。记录原水、吸附池出水(静置 $30 \text{ min}$ 取上清液)的 $\text{COD}$ 、氨氮、 $\text{UV}_{254}$ 和各藻类指标,原水与吸附池出水各指标的浓度差即为活性炭泥的吸附降解量。试验结果见图3。可以看出,投加活性炭泥后吸附池对 $\text{COD}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、氨氮与藻类的平均去除率分别为 $21.27\%$ 、 $15.69\%$ 、 $15.23\%$ 、 $17.10\%$ 。

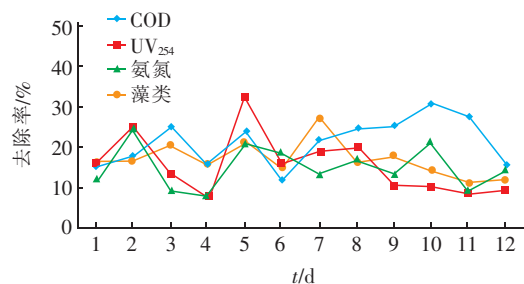


图3 活性炭泥吸附降解 $\text{COD}$ 、氨氮、 $\text{UV}_{254}$ 与藻类效果

Fig. 3 Adsorption and degradation efficiency of  $\text{COD}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{N}$ ,  $\text{UV}_{254}$  and algae by activated carbon - sludge

### 2.3.2 生物活性炭泥的混凝效果

活性炭泥吸附完成后进入混凝池进行强化混凝过程,对比了加入活性炭泥强化混凝效果与只加入絮凝剂(PAC)的常规混凝效果。活性炭泥投加量约为 $100 \text{ mg}/\text{L}$ ,PAC投加量为 $15 \text{ mg}/\text{L}$ 。混凝过程:先快速( $200 \text{ r}/\text{min}$ )搅拌 $90 \text{ s}$ ,再慢速( $60 \text{ r}/\text{min}$ )搅拌 $10 \text{ min}$ ,静置 $30 \text{ min}$ 。利用智能光散射分析仪(IP-DA)分析絮体生长特性。通常采用 $R$ 值反映悬浊液混凝程度<sup>[7]</sup>,图4为两种混凝过程的 $R$ 值变化。

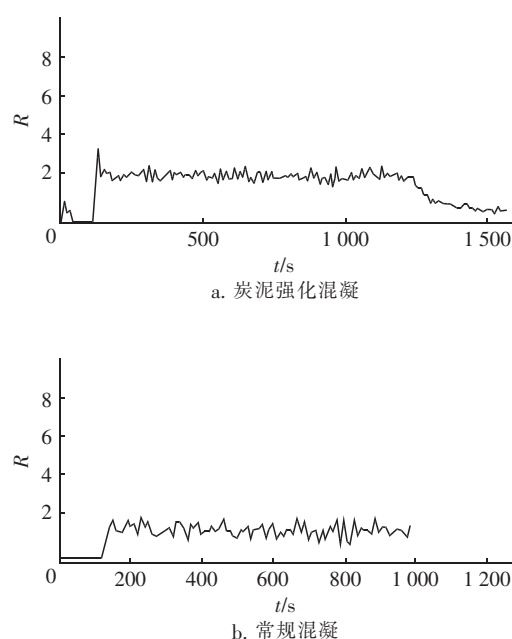


图4 炭泥强化混凝絮体和常规混凝絮体的生长变化  
Fig.4 Growth of flocs in enhanced coagulation process and conventional coagulation process

由图4可以看出,滞后约80 s后, $R$ 值迅速升高,并且很快达到最大值,然后 $R$ 值基本趋于稳定,凝结和破坏作用达到一种平衡<sup>[8]</sup>,此时的 $R$ 值代表絮体的最终大小。对比图4(a)、(b)可知,加入活化炭泥的强化混凝过程,絮体 $R$ 值较大,平均值约为2.2;而只加入PAC的混凝过程,絮体 $R$ 值较小,平均值约为1.8。可以看出,投加炭泥未对混凝效果产生消极影响,相反炭泥颗粒有利于絮凝剂的吸附架桥作用,能进一步降低水体浊度。

此外,对比了炭泥强化混凝与常规混凝对有机物、藻类及浊度的去除效果,如图5所示。

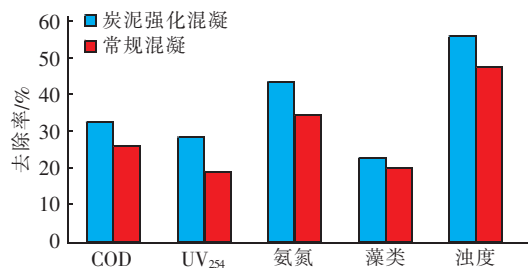


图5 炭泥强化混凝效果与常规混凝效果对比  
Fig.5 Comparison of enhanced coagulation efficiency and conventional coagulation efficiency

由图5可知,炭泥强化混凝对COD、UV<sub>254</sub>、氨氮、藻类及浊度的平均去除率分别为32.72%、

28.36%、43.40%、23.04%、56.11%,常规混凝对上述指标的平均去除率则分别为26.24%、19.45%、34.34%、19.74%、47.57%。说明炭泥强化混凝效果比常规混凝效果好,对有机物、藻类的去除率较高,絮体沉降性较好。

系统正常运行后,对原水及沉淀池出水进行了为期两周的水质监测,得到原水COD为15.5 mg/L、UV<sub>254</sub>为0.19 cm<sup>-1</sup>、氨氮为0.33 mg/L、藻类总数为17 306 cell/mL、浊度为3.60 NTU,沉淀池出水COD为6.83 mg/L、UV<sub>254</sub>为0.10 cm<sup>-1</sup>、氨氮为0.13 mg/L、藻类总数为10 331 cell/mL、浊度为1.58 NTU。

## 2.4 炭泥生物再生系统处理效果的影响因素

### 2.4.1 温度对炭泥生物再生系统处理效果的影响

温度对炭泥生物再生系统处理效果的影响见图6。可以看出,随着温度的不断升高,各指标的去除率也不断增加。温度达到28.4℃时COD去除率达到最大值,29.7℃后COD去除率则有所下降;而藻类去除率随着温度的升高而不断升高,说明升高温度有利于藻类的去除;UV<sub>254</sub>的变化与COD的变化趋势相似,28.4℃时去除率最高;氨氮浓度受温度影响较小。可见,升高温度对去除水中有机物有利。

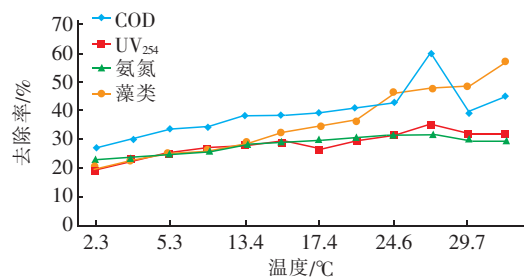


图6 温度对炭泥生物再生系统处理效果的影响  
Fig.6 Effect of temperature on treatment efficiency of carbon-sludge biological regeneration system

### 2.4.2 有机物浓度对处理效果的影响

将6种不同浓度原水(利用反渗透膜浓缩模拟),分别加入到6个1 L的烧杯中,再分别加入3%活化炭泥(炭泥浓度约为105 mg/L),吸附10 min,搅拌强度为60 r/min;随后加入15 mg/L的PAC,1 min后加入0.8 mg/L的PAM,搅拌强度与时间分别为200 r/min、30 s和60 r/min、10 min;静置30 min后取上清液进行检测。试验结果如图7所示。可以看出,随着COD浓度的升高,COD与藻类的去除率也不断增加,当COD浓度>25.74 mg/L时,COD与



藻类的去除率有所下降。说明有机物不断增加,活性炭泥吸附降解率也随之升高,有利于对原水中有机物的去除,减小对后续工艺的影响;但当有机物浓度过大( $>25.74 \text{ mg/L}$ )时,炭泥吸附率下降,对有机物的去除率也下降。

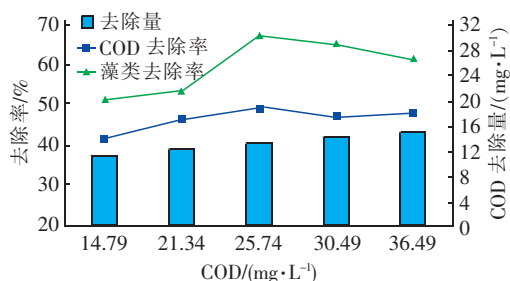


图7 原水 COD 浓度对炭泥生物再生系统处理效果的影响

Fig.7 Effect of COD concentration on treatment efficiency of carbon-sludge biological regeneration system

### 3 结论

① 炭泥生物再生系统循环吸附降解技术能有效去除原水中有机污染物,对原水中 COD、UV<sub>254</sub>、氨氮与藻类总数的平均去除率分别为 53.99%、44.04%、58.63%、40.14%,出水 COD、UV<sub>254</sub>、氨氮、藻类数及浊度分别为 6.83 mg/L、0.10 cm<sup>-1</sup>、0.13 mg/L、10 331 cell/mL、1.58 NTU。

② 温度对系统降解效果有一定的影响,15~28℃条件下降解效果较好;系统具有一定的吸附降解弹性,原水中有机物浓度升高时,去除率相应升高,可保证出水水质。

### 参考文献:

- [1] 邵迎,姚峻荣. 混凝除藻在常规工艺自来水厂中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(21):47-49.  
Shao Ying, Yao Junrong. Application of coagulation for algae removal in waterworks using conventional treatment process[J]. China Water & Wastewater,2013,29(21):47-49(in Chinese).
- [2] 汪小雄,姜成春,朱佳,等. 微生物在除藻方面的应用研究[J]. 工业水处理,2011,31(2):1-3.  
Wang Xiaoxiong, Jiang Chengchun, Zhu Jia, et al. Research on the application of microbial techniques to algae removal[J]. Industrial Water Treatment,2011,31(2):1-3(in Chinese).
- [3] 赵贤慧. 生物接触氧化法及其研究进展[J]. 工业安全与环保,2010,36(9):26-27.  
Zhao Xianhui. Bio-contact oxidation and its research process[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2010,36(9):26-27(in Chinese).
- [4] Monroe D. Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms[J]. Plos Biology,2007,5(11):2458-2461.
- [5] Renner L D, Weibel D B. Physicochemical regulation of biofilm formation[J]. MRS Bulletin,2011,36(5):347-355.
- [6] 蒋道松,刘其城,章俭,等. 除藻技术新进展[J]. 常德师范学院学报:自然科学版,2000,12(1):25-30.  
Jiang Daosong, Liu Qicheng, Zhang Jian, et al. The latest progress in alga-killing techniques[J]. Journal of Changde Teachers University: Natural Science Edition,2000,12(1):25-30(in Chinese).
- [7] 于水利,李圭白,田永平. 悬浊液透光脉动颗粒在线检测技术及其应用(续2)——透光脉动颗粒检测装置的研制[J]. 工业用水与废水,2001,32(2):1-3.  
Yu Shuili, Li Guibai, Tian Yongping. An on-line monitoring technique for transmitted light fluctuation in high-turbidity water and its application (continued)—Development of a monitoring device for transmitted light fluctuating particles[J]. Industrial Water & Wastewater,2001,32(2):1-3(in Chinese).
- [8] 许兵. 黄河高浊度水絮凝机理探索[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.  
Xu Bing. The Explore of Mechanism of Flocculation of the Huanghe River High Turbidity Water[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2003(in Chinese).



作者简介:朱兆亮(1975-),男,山东济南人,博士,副教授,研究方向为微污染水预处理技术。

E-mail:262263065@qq.com

收稿日期:2017-12-11