

## 好氧强化降解湖底有机碎屑的初步研究\*

刘 苏<sup>1</sup>, 潘继征<sup>2\*\*</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 张占恩<sup>1</sup>, 柯 凡<sup>2</sup>, 李文朝<sup>2</sup>

(1: 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘 要:** 以巢湖湖底有机碎屑为研究对象, 基于对有机碎屑中总有机碳的测定, 研究了利用好氧强化降解湖底有机碎屑. 研究了有机碎屑的可生化性及好氧强化降解湖底有机碎屑的效果, 并讨论了有机碎屑的浓度及曝气量对其降解效果的影响. 结果说明, 处理的有机碎屑具有较好的可生化性, 在反应 30 h 左右, 降解达到了平衡, 总去除率达到了 50.69%, 降解速率常数  $K_{25}$  为  $0.19 \text{ h}^{-1}$ . 有机碎屑的浓度以及曝气量对降解效果具有一定的影响. 强化好氧法与传统的对底泥处理的方法相比具有更快、更好的效果, 为预防及治理水体黑臭现象提供了新的途径.

**关键词:** 好氧强化降解; 有机碎屑; 水体黑臭; 巢湖

## Aerobic enhanced degradation of organic detritus of lacustrine sediments

LIU Su<sup>1</sup>, PAN Jizheng<sup>2</sup>, ZHANG Lijun<sup>1</sup>, ZHANG Zhan'en<sup>1</sup>, KE Fan<sup>2</sup> & LI Wenchao<sup>2</sup>

(1: *School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

**Abstract:** The organic detritus in sediments of the Lake Chaohu were taken as research subject, based on measured total organic carbon in organic detritus. Research was undertaken on the organic detritus of biodegradability and the results of aerobic enhanced degradation of organic detritus, and the degradation effects of organic detritus on different concentrations of organic detritus and aeration rates. The results show the organic detritus has high biodegradability. In about 30 h, reaction reached equilibrium concentration, total removal rate was 50.69%, and the degradation rate constant  $K_{25}$  was  $0.19 \text{ h}^{-1}$ . The concentration of organic detritus and aeration rates have impacts on degradation effect. The method of aerobic enhanced degradation of organic detritus in sediments of the lake is better than traditional method, and provides a new way for the prevention and treatment of black and odorous water.

**Keywords:** Aerobic enhanced degradation; organic detritus; black and odorous water; Lake Chaohu

随着人类活动的不断加剧,大量的污染物排入湖泊、河流中,导致水质恶化,进而出现水体黑臭的现象. 目前许多湖泊、河流都出现过不同程度的黑臭现象. 如 2008 年 5—6 月太湖宜兴近岸带出现的“黑水团”现象<sup>[1]</sup>;太湖贡湖湾无锡市水源地南泉水厂附近发生水体黑臭现象造成水厂停产,致使市民多日无饮用水供应<sup>[2]</sup>. 巢湖北部<sup>[3]</sup>、滇池北部入河口<sup>[4]</sup>水体也曾出现黑臭现象. 水体黑臭给人们的生产、生活带来了巨大的影响. 通过对这些发生黑臭现象的湖泊、河流研究发现,湖泊、河流受到严重的来水污染(化工、皮革、造纸、石油和医疗等),沉积物污染程度较重、形成的有机碎屑的有机质含量较高. 有机碎屑在水体缺氧以及特定的条件下(温度、风浪、水流等)<sup>[5-6]</sup>进行厌氧发酵,在厌氧发酵过程中产生  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$  及一些低级脂肪酸,致使水体发臭,并造成水体严重的有机污染,导致水体黑臭现象出现. 可见水体黑臭现象的发生与有机碎屑有着

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07101-007-01)和中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目联合资助. 2013-06-18 收稿;2013-09-03 收修改稿. 刘苏(1988~),男,硕士研究生; E-mail:liu\_su1988@sina.com.

\*\* 通信作者;E-mail: jzhp@niglas.ac.cn.

直接的联系. 目前对有机碎屑的研究主要集中在水中悬浮有机碎屑的概念和来源上, 对沉降到湖底的有机碎屑层的形成与组成成分的研究较为缺乏. Hargrave<sup>[7]</sup> 通过研究淤泥、沙土和多种碎屑在微生物作用下对氧气的利用情况发现, 碎屑对氧气的消耗比沙土高 3 个数量级, 说明有机碎屑层的成分具有特殊性. Odum 等<sup>[8]</sup> 最早提出有机碎屑的概念, 包括 3 方面内容: (1) 来源于动植物尸体; (2) 是颗粒性的; (3) 细菌等微生物生活于有机碎屑基质中, 并消耗其高蛋白的部分. Rodina<sup>[9]</sup> 研究了 Ladoga 湖附近的 7 个贫营养湖 (其中 2 个是无营养湖) 的表层碎屑, 在冷光显微镜下观察发现, 碎屑并不是均一的物质, 主要为死亡的浮游动物和藻类, 而碎屑颗粒则是由一个有机质核心和附着的大量细菌组成. 而林婉莲等<sup>[10]</sup> 通过观察 4 种浮游生物碎屑的形成过程, 认为细菌侵入已死亡的有机体那一刻, 就是碎屑形成的开始. 有机碎屑在形成之后, 在没有被牧食的情况下, 慢慢沉降到水底, 在水底累积形成一层疏松而富含有机质的水底有机碎屑层<sup>[11-13]</sup>. 要解决水体黑臭现象, 就必须对引起水体黑臭的根本因素——湖底有机碎屑进行处理, 降低其中有机质的成分, 使其不足以因厌氧发酵而引起黑臭现象. 通过对以上有机碎屑的特点和组成分析发现, 其组成特点相似于剩余污泥中的活性污泥的性质. 活性污泥是一种以细菌、真菌、原生动物、后生动物等微生物和金属氢氧化物为主的污泥状褐色絮凝物. 沈耀良<sup>[14]</sup> 利用好氧消化工艺对污水厂贮泥池的新鲜排泥进行了研究, 污泥样品的 COD 为 1700 mg/L, 控制溶解氧含量为 2~3 mg/L, 温度为 40℃ 时, 3~4 d 内污泥的挥发性成分去除率可以达到 50%. 李文等<sup>[15]</sup> 对天津某污水处理厂的剩余污泥进行中温厌氧消化实验, 研究得出剩余污泥经过中温厌氧消化, 在水力滞留时间分别为 30、20、10 d 时, COD<sub>cr</sub> 的去除率为 38.1%、32.0%、18.8%. 由此可见, 可以利用对剩余污泥的处理方法来降解有机碎屑. 本研究的目的在于初步研究利用好氧强化降解湖底有机碎屑, 并讨论有机碎屑的可生化性及好氧强化降解有机碎屑的效果, 为预防及治理水体黑臭现象提供新的途径.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

巢湖是我国长江中下游典型的富营养化湖泊, 也是“十二五”重点治理的“三湖”之一. 巢湖是典型的浅水湖泊, 平均水深只有 3.06 m, 比较适合样品的采集. 结合巢湖沉积物分布以及富营养化状况, 在巢区的湖光村湖湾选择采样点 (31°60'81"N, 117°83'75"E), 利用自制的柱状采样器采集沉积物柱状样品, 把样品封存在柱状采样器的有机玻璃管中, 并采集相应采样点的湖水, 一同带回实验室. 因为有机碎屑比较疏松, 不能直接用切割的办法与沉积物进行分离, 所以利用虹吸管从有机玻璃管上部吸出, 吸出的有机碎屑放入容器中待用. 分离出来的有机碎屑一部分用于实验, 其余部分在 4℃ 条件下保存, 作为备用. 经过测定, 所采集的有机碎屑中, 纤维素所占的比例为 35.6%, 半纤维素为 18.5%, 木质素为 23.4%, 蛋白质为 10.9%, 其他物质 (糖、氨基酸和有机酸等) 为 11.6%<sup>[16]</sup>.

### 1.2 实验方法

将分离出来的有机碎屑与采集回来的湖水按一定比例混合成泥水混合物从而得到不同总有机碳 (TOC) 浓度的有机碎屑. 混匀泥水混合物, 测定其 TOC 浓度 ( $S_0$ ). 将玻璃球型培养瓶洗净烘干, 并依次标记为 1#~8#. 向 1#~8# 玻璃球型培养瓶中分别加入 500 ml 混匀的泥水混合物. 将玻璃球形培养瓶放入到生化培养箱中, 用多通道可控微量供气系统对每个培养瓶进行曝气并控制其曝气量, 用生化培养箱控制温度. 在一定的反应时间之后, 分别取出培养瓶, 测定其 TOC 浓度为 ( $S_1$ ). 以 TOC 的变量 ( $S$ ) 来表征有机碎屑的降解效果 ( $S = S_1 - S_0$ ). 实验装置如图 1.

### 1.3 分析方法

TOC 的测定采用重铬酸钾容量法; 可生化性的测定采用瓦氏呼吸仪法; 纤维素的测定: 样品经醋酸和硝酸混合液处理, 采用重铬酸钾-硫酸亚铁铵滴定法测定; 半纤维素采用铜碘法测定; 木质素采用醋酸和丙酮处理, 重铬酸钾-硫酸亚铁铵滴定法测定; 蛋白质的测定采用分光光度法.

## 2 结果与分析

### 2.1 湖底有机碎屑可生化性

研究好氧强化降解有机碎屑, 需要研究即将处理的有机碎屑的可生化性, 来确定采取的有机碎屑是否

具有较好的降解性质. 一般对废水的可生化性研究都是参考  $BOD_5/COD_{Cr}$  比值法(静态测定法)进行分析,但是由于有机碎屑的特殊性质,一般不对其  $BOD_5$  和  $COD_{Cr}$  进行测定,因此难以采用  $BOD_5/COD_{Cr}$  比值法进行分析. 而瓦氏呼吸仪法(动态测定法)是另一种对废水可生化性进行测定的方法<sup>[17]</sup>,其方法相对于  $BOD_5/COD_{Cr}$  比值法更加简单、快速<sup>[18]</sup>. 因目前对有机碎屑可生化性的研究尚少,没有一个统一的标准,本文即采用瓦氏呼吸仪法对有机碎屑的可生化进行研究. 瓦氏呼吸仪法的原理是比较内源呼吸线与生化呼吸线的位置关系<sup>[19]</sup>,当有机物生化呼吸线位于内源呼吸线之上时,该有机物易生化降解,生化呼吸线离内源呼吸线越远说明越易生化;当两线重合时,表明有机物具有可生化性,但可生化能力不是很高;当生化呼吸线位于内源呼吸线之下时,表示该有机物不可生化性. 可以看出瓦氏呼吸仪法不能像  $BOD_5/COD_{Cr}$  比值法那样运用数值定量计算确定物质的可生化能力,但该方法可以对物质的可生化进行定性,通过两线关系分为易生化性、可生化性和不可生化性 3 个等级. 从不同浓度有机碎屑的可生化性可以看出(图 2),2000 ~ 5000 mg/L 3 个浓度的有机碎屑的生化呼吸线都位于内源呼吸线之上,说明都具有良好的可生化性,浓度为 2000 mg/L 的生化呼吸线离内源呼吸线比较近,说明属于可生化性范围,而 3000 和 5000 mg/L 浓度高的生化呼吸线,相对于 2000 mg/L 来说,离内源呼吸线较远,则属于易生化性范围之内. 可见有机碎屑浓度越高的线离内源呼吸线越远,表明浓度越高可生化越好. 这是由于浓度高的有机碎屑有机物质的含量要比浓度低的高,微生物进行生理活动的营养物质多,消耗了反应瓶中更多的氧,从而表现出来的生物活动相对于浓度低的更加剧烈,具有更好的可生化性. 可见本实验中的有机碎屑属于可生化性与易生化性范围之内,降解性质较好.

### 2.2 湖底有机碎屑降解过程及降解效果

图 3 为在温度为 25℃ 下,曝气量为 1 L/min,初始 TOC 浓度为 3000 mg/L 的有机碎屑在 72 h 之内的降解动力学曲线. 通过拟合曲线可以看出,TOC 浓度的变化符合指数下降的规律,拟合的相关系数  $R^2$  为 0.9221 (图 3). 拟合的曲线为  $y = 1512 + 1349e^{-x/5.279}$ . 将拟合的结果转换为以下形式:

$$C_t = C_0(1 + 0.9e^{-Kt}) \quad (1)$$

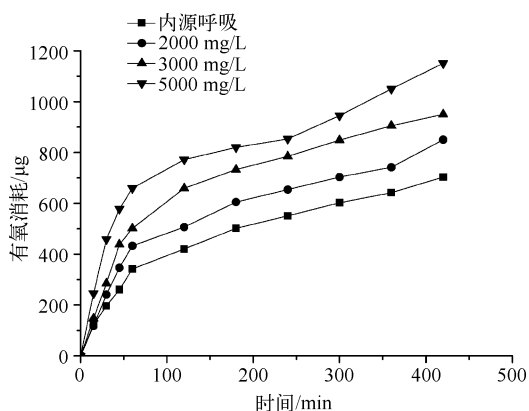


图 2 不同浓度有机碎屑的可生化性  
Fig. 2 The biodegradability of different concentrations of organic detritus

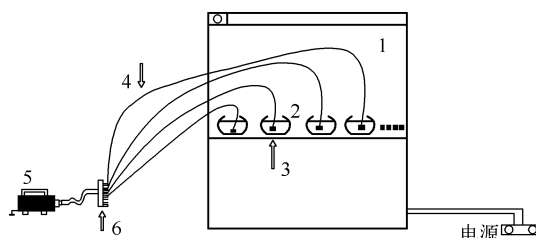


图 1 好氧强化降解有机碎屑装置

- (1:生化培养箱;2:1# ~ 8#玻璃球型培养瓶;
- 3:曝气石;4:硅胶管;5:供气系统;6:分气头)

Fig. 1 The device of aerobic biological method of degradation of new organic detritus

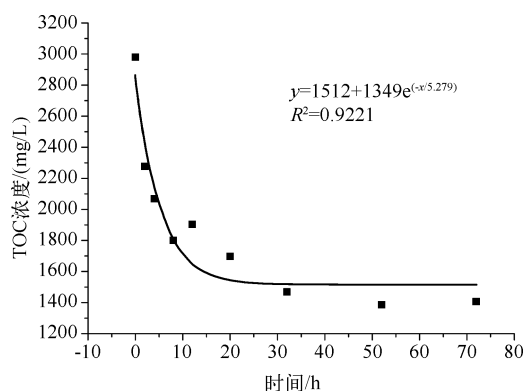


图 3 有机碎屑中 TOC 降解动力学曲线  
Fig. 3 Biodegradation kinetics curve of TOC in organic detritus

式中,  $C_t$  代表  $t$  时刻体系中 TOC 浓度,  $C_0$  代表降解达到平衡时的 TOC 浓度,  $t$  代表反应时间,  $K$  为降解速率常数. 结合降解曲线方程, 公式(1)可转换为:

$$C_t = 1512(1 + 0.9e^{-0.19t}) \quad (2)$$

从降解曲线及降解曲线方程可以计算出, 利用好氧强化降解湖底有机碎屑实验前 4 h 之内, 泥水混合物中 TOC 的降解速率达到了  $227.8 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ , 去除率达到了 30.56%; 实验 30 h 左右反应达到平衡, TOC 浓度为  $1512 \text{ mg}/\text{L}$ , 总去除率达到了 50.69%, 降解速率常数为  $K_{25} = 0.19 \text{ h}^{-1}$ .

郑忠明等<sup>[20]</sup>在用固定化微生物修复养殖池塘污染底泥的研究中发现, 分别用纤维网状活性炭、硅藻土和沸石作为微生物固定的载体, 在实验周期为 30 d 里, 底泥有机质分别降解了 27.5%、23.9% 和 20.9%. 经过换算平均每日最大降解率大约为 0.91%. 与本实验中的降解速率相差较大, 可见利用好氧强化降解底泥中的有机质相对于传统的微生物修复法来说具有更快、更好的效果. 吴华财<sup>[21]</sup>针对城市有机污染严重的特点, 考察原位投加氧化剂去除污染底泥黑臭的效果, 研究结果表明对污染底泥联合投加过氧化钙和硝酸钙, 在 45 d 内对底泥总 TOC 的去除率为 18%, 与本实验的总去除率 50.69% 也有较大的差异. 表明就去除率来说, 好氧强化降解法相比于原位投加法在短时间内对治理黑臭现象、改善湖水水质环境应该具有更好效果. 但好氧强化降解法相对于其他方法也有其不足的地方, 即处理对象难以针对. 好氧强化降解法需要针对处理底泥表层的有机碎屑, 需对其进行采取、富集、浓缩处理. 此问题需在今后的实际工程中加强研究.

### 2.3 有机碎屑的浓度对 TOC 降解的影响

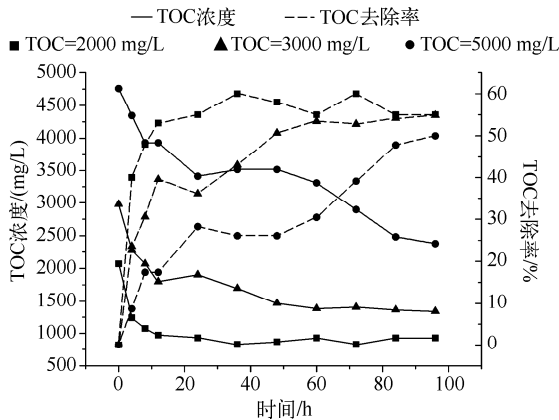


图4 不同浓度的有机碎屑降解效果比较

Fig. 4 The degradation effect of different concentrations of organic detritus

不同浓度的有机碎屑(以 TOC 表征, 下同)在  $25^\circ\text{C}$ 、 $1 \text{ L}/\text{min}$  曝气量的条件下, 经过 4 d 的好氧强化曝气反应, 达到降解稳定平衡(图 4). 在相同的条件下(温度、曝气量), 不同初始浓度的 TOC 在单位时间内去除量和去除率是不同的. 初始的 TOC 浓度大, 那么去除量就高, 反之则低. 如在好氧曝气的前 48 h 内, 初始 TOC 为  $2000 \text{ mg}/\text{L}$  的去除量为  $1200 \text{ mg}/\text{L}$ , 即去除速率为  $600 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ . 而初始 TOC 为  $3000 \text{ mg}/\text{L}$  的去除量为  $1500 \text{ mg}/\text{L}$ , 即去除速率为  $750 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ . 初始 TOC 为  $5000 \text{ mg}/\text{L}$  的去除量为  $2000 \text{ mg}/\text{L}$ , 即去除速率为  $1000 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ . 这是由于初始 TOC 浓度高, 那么其中所含的有机物质就多, 相应的微生物总量也多, 微生物以有机物质作为营养源进行代谢, 降解的有机物质的量就高, 从而在单位时间内的去除量则高. 这

说明初始 TOC 浓度较高时, 可以提高单位体积的处理能力, 从而减少设备的投入费用. 但另一方面可以发现初始 TOC 浓度较高时, TOC 的去除率低, 反之则较高. 在前 24 h 内, TOC 初始浓度为  $2000$ 、 $3000$  和  $5000 \text{ mg}/\text{L}$  时, 其去除率分别为 58.5%、36.1% 和 28.3%. 其中 TOC 浓度为  $2000 \text{ mg}/\text{L}$  时已经达到降解平衡. Casey<sup>[22]</sup>认为较高的初始 TOC 浓度会影响氧的传递速率, 从而在一定程度上影响微生物内源呼吸速率, 导致其去除率比低浓度的低. 这说明在 TOC 浓度较高时, 如果要保证其 TOC 在单位时间内的降解效果和去除率, 需加强曝气效果来保证其中微生物的内源呼吸速率. 虽然不同初始浓度 TOC 的去除率不同, 但是经过一定的时间, 都可以达到降解平衡 55% 左右(图 4), 只是达到平衡的时间有所不同, TOC 浓度为  $2000 \text{ mg}/\text{L}$  其达到平衡则需要 12 h 左右, 相应地, TOC 浓度为  $3000$ 、 $5000 \text{ mg}/\text{L}$  达到平衡则分别需要 48、96 h 左右, 其去除率仅分别为 39.6%、17.4%. 因而可以得出低初始 TOC 浓度相对于高初始 TOC 浓度来说, 可以缩短好氧强化反应的平衡时间. 因此, 在实际对有机碎屑的处理过程中, 是选择高浓度 TOC, 去除量高、处理时间慢、平衡时间长, 还是选择低浓度 TOC, 去除量低、处理时间快、平衡时间短需要综合考虑.

## 2.4 曝气量对 TOC 降解的影响

为考察不同曝气量对有机碎屑 TOC 去除率的影响,实验选取了 0.5、1 和 2 L/min 3 个曝气量对 3 种不同初始 TOC 浓度的有机碎屑进行曝气. 3 种曝气量对于初始 TOC 浓度为 2000 mg/L 的有机碎屑来说,其去除率并无显著差异(图 5a). 3 种曝气量对初始 TOC 浓度为 3000 和 5000 mg/L 的有机碎屑的去除率有一定的差异(图 5b、c),曝气量越大,其在相同时间内的去除率越高. 如初始 TOC 浓度为 3000 mg/L 的有机碎屑在曝气量为 0.5 L/min 条件下,24 h 的去除率为 31.3%,当曝气量分别增加到 1 L/min 和 2 L/min 时,去除率分别增加到了 36.1% 和 38.7%. 初始 TOC 浓度为 5000 mg/L 的有机碎屑也有相同的规律,而且可以看出通过曝气量的增加,去除率的增加效果比 3000 mg/L 的好. 如当在曝气量 0.5 L/min 条件下,24 h 内其去除率为 8.3%,而当曝气量分别增加到 1 和 2 L/min 时,去除率分别增加到了 28.3% 和 33.8%. 这是由于增加了曝气量,等同于增加了反应体系中的氧的传递速度,从而在一定程度上加速了其中微生物的内源呼吸速率,导致去除率的增加. 因为本实验采用的是 500 ml 的培养瓶,反应体积较小,当曝气量增加到 2 L/min 时,培养瓶中的泥水混合物开始不断翻滚,从而起到了搅拌的作用,进一步提高了反应体系中氧的传递,从而加强了微生物的代谢速率,进而提高了去除率. 在 25℃、24 h 条件下不同的曝气量对初始 TOC 浓度为 3000 mg/L 的去除率的影响曲线可以看出(图 6),随着曝气量的增加 TOC 的去除率先增加到一定的值,最后达到极限值 55% 左右. 表明初始 TOC 浓度一定时,曝气量对其去除率的贡献有一定的极限值. 这就证实了 3 种曝气量对初始 TOC 浓度为 2000 mg/L 的有机碎屑的去除率影响很小,因为 0.5 L/min 的曝气量可能已经达到其贡献的极限值,而对其他 2 种初始浓度的有机碎屑的去除率影响较大. 因此在实际运用中需根据不同有机碎屑的浓度,综合考虑曝气量的合理选择.

## 3 讨论与结论

1) 巢湖湖底有机碎屑处于可生化性与易生化性范围之内,降解性质较好,而且浓度高的有机碎屑的可生化性要比浓度低的更好,说明适合对其进行好氧强化降解处理.

2) 利用好氧强化降解湖底有机碎屑,实验前 4 h,500 ml 泥水混合物中 TOC 的降解速率达到了

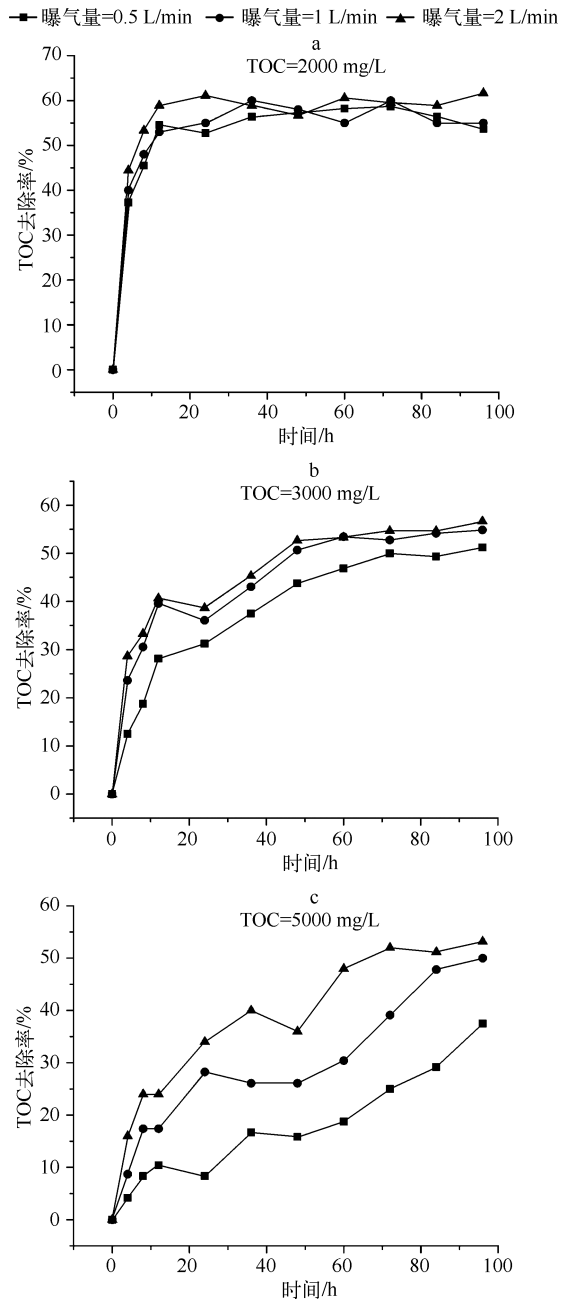


图 5 不同曝气量下有机碎屑的去除率  
Fig. 5 The removal rate of organic detritus under different aeration rates

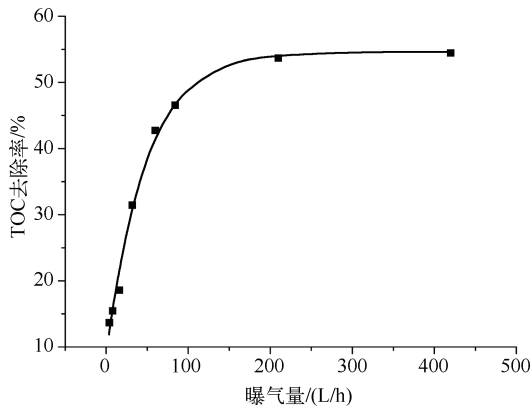


图6 TOC浓度为3000 mg/L时不同曝气量对有机碎屑去除率的影响

Fig. 6 The effect of different aeration intensities on the removal rate of organic detritus under the TOC concentration of 3000 mg/L

有一定的极限值.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析. 水利水电科技进展, 2011, **31**(4): 33-37.
- [ 2 ] 刘国锋, 钟继承, 何俊等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe, S, P 的含量及其形态变化. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [ 3 ] 孙贤斌. 巢湖生态环境污染防治对策. 国土与自然资源研究, 2001, (3): 50-52.
- [ 4 ] 赵学敏, 魏清伟, 周广杰等. 改良型生物稳定塘对滇池流域受污染河流净化效果. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 35-43.
- [ 5 ] 申秋实. 风浪条件下太湖藻源性“湖泛”的消退及其水体恢复进程. 科学通报, 2012, **57**(12): 1060-1066.
- [ 6 ] 王成林. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, **32**(2): 401-408.
- [ 7 ] Hargrave BT. Aerobic decomposition of sediment and detritus as a function of particle surface area and organic content. *Limnology and Oceanography*, 1972, **17**(4): 583-596.
- [ 8 ] Odum EP, de la Cruz AA. Detritus as a major component of ecosystems. *AIBS Bulletin*, 1963, **13**(3): 39-40.
- [ 9 ] Rodina AG. Microbiology of detritus of lakes. *Limnology and Oceanography*, 1963, **8**: 388-393.
- [ 10 ] 林婉莲, 刘鑫洲. 武汉东湖颗粒有机碎屑碳, 氮, 磷的沉降速率. 海洋与湖沼, 1989, **20**(2): 163-170.
- [ 11 ] Saunders GW. The transformation of artificial detritus in lake water. *Mem Ist Ital Idrobiol*, 1972, **29**: 261-288.
- [ 12 ] 郭晓鸣, 高光, 魏云等. 伊乐藻-草鱼圈养复合生态系统中水生生物的变化和影响. 湖泊科学, 1996, **8**(增刊): 79-92.
- [ 13 ] 李文朝, 尹澄清, 陈开宁等. 关于湖泊沉积物磷释放及其测定方法的议. 湖泊科学, 1999, **11**(4): 296-303.
- [ 14 ] 沈耀良. 污泥好氧消化处理工艺的研究. 苏州城建环保学院学报, 1994, **7**(1): 55-64.
- [ 15 ] 李文, 孙力平, 齐延斌. 污水处理厂剩余污泥的中温厌氧消化特性研究. 工业用水与废水, 2012, **43**(4): 85-88.
- [ 16 ] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程. 南京: 南京大学出版社, 1998: 175-196.
- [ 17 ] 丁绍兰, 王伟伟, 周莉等. 制革过程废水的可生化性研究. 中国皮革, 2011, **40**(3): 1-4.
- [ 18 ] 陈华, 李燕, 严莲荷等. 瓦氏呼吸仪对硝基苯类污染物可生化性的研究. 环境工程, 2004, **22**(5): 83-85.
- [ 19 ] 梁雯, 刘小芳, 李广科. 矿化垃圾粒径分布与其浸出液可生化性的关系研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2011, **34**(2): 127-130.
- [ 20 ] 郑忠明, 陆开宏, 蔡惠风等. 固定化微生物修复养殖池塘污染底泥的围隔试验. 水产学报, 2009, **30**(3): 462-468.
- [ 21 ] 吴华财. 城市感潮河道污染底泥原位处理小试研究. 人民珠江, 2012, **5**: 54-58.
- [ 22 ] Reece CS, Jr Grady CPL, Jr Roper RE. Aerobic digestion of waste activated sludge. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1979, **105**(2): 261-272.
- 227.8 mg/(L·h), 去除率达到了 30.56%; 30 h 左右反应达到平衡, 此时 TOC 浓度为 1512 mg/L, 总去除率达到了 50.69%, 降解速率常数为  $K_{25} = 0.19 \text{ h}^{-1}$ . 利用好氧强化降解底泥中的有机质相对于传统的对底泥处理的方法来说具有更快、更好的效果, 为预防及治理水体黑臭现象提供了新的途径.
- 3) 有机碎屑的初始浓度对降解其中的 TOC 有一定的影响. 初始浓度越高, TOC 的去除量越高但去除率越低, 且达到降解平衡的时间越长, 反之亦然. 因此, 在实际对有机碎屑处理过程中, 是选择高浓度还是低浓度的有机碎屑进行处理需要根据实际情况进行综合考虑.
- 4) 曝气量对降解有机碎屑中的 TOC 亦有一定影响. 增加曝气量能够提高 TOC 在单位时间内的去除率, 减少其达到降解平衡的时间. 相对于低浓度的有机碎屑来说, 增加曝气量对提高高浓度有机碎屑中 TOC 的去除率具有更好的效果, 但也具