

好氧生物膜滤床去除 COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的研究

徐 元 勤*

(大连保税区发展建设总公司)

韩 月 玲

(沈阳建工学院)

摘 要 利用生化、物化一体化的新技术处理微污染水,根据生物降解机理建立去除 COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的数学模型,并用试验数据加以验证。

关键词 好氧;生物膜;有机物;氨氮;数学模型

中图分类号 X524

水源微污染,首先是水中氨氮浓度显著升高,有机物种类增加,浓度提高。其中氨氮污染是水体受到有机污染的重要指示性指标。我国“七·五”期间开展富营养化调查的结果表明^[1],所调查的 13 个大中型湖泊和水库的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量范围为 0.029~1.508 mg/L;城郊小湖泊的氨氮含量远高于大中型湖泊,含量范围为 0.262~17.849 mg/L。

氨氮对水生生物有毒,且硝化时需消耗水体中的溶解氧。含氮有机物降解时会产生氨,鱼、虾等代谢产物中也有氨,所以除去水中氨及 COD 是水产养殖用水循环使用的一个重要环节。

1 试验装置及载体选择

本试验工艺采用生物膜过滤技术,整个系统由供水、陶粒、砂双层滤床、供气及反冲洗四个单元组成,其工艺流程如图 1。

该处理工艺的最大特点是整个滤床由有助于细菌附着生长的好氧生物区和位于其下的过滤区组成,是一个既可去除 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的生化作用,又可去除脱落生物膜和悬浮物的物化作用一体化的新技术。

生物膜过滤技术的关键问题之一是载体的选择。所选取的载体既要有良好的过滤性能,同时又要使作为生物的载体能为生物生长提供大的表面积,水流均匀流过生物膜时,有充分的空间使空气畅通,且不被脱落的生物膜所堵塞,应具有化学和力学的稳定性,机械性能好,质轻价廉就地取材等特点,表 1 为不同载体的参数比较。

有人^[2]曾就上述滤料的某些物理特性、化学特性、表面特性作了分析。从技术、经济两方面综合考虑,笔者采用陶粒作为滤床载体。

收稿日期: 1996-05-20

* 徐元勤: 1964年生,男,工程师,硕士。

表 1 不同载体的参数比较

载体类型	松散容量 $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	视比重 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	有效孔隙率 $\%$	总孔隙率 $\%$
陶 粒	550~ 900	1.5~ 2.0	2.4~ 2.6	65.1	76.8
无烟煤	819	1.59	1.59	48.5	48.5
石英砂	1560~ 1610	2.69	2.63	44.7	44.7

载体的粒径是影响过滤性能和出水水质的一项重要指标，要求它既要具有良好的生物过滤特性又能保证一定的过滤周期。通过筛分试验^[3]，并进行分组对比试验，确定采用 1~ 5 mm 之间的陶粒滤料，不均匀系数 $k_{80} = 1.72$ ，比表面积 $a_v = 0.536$ 。

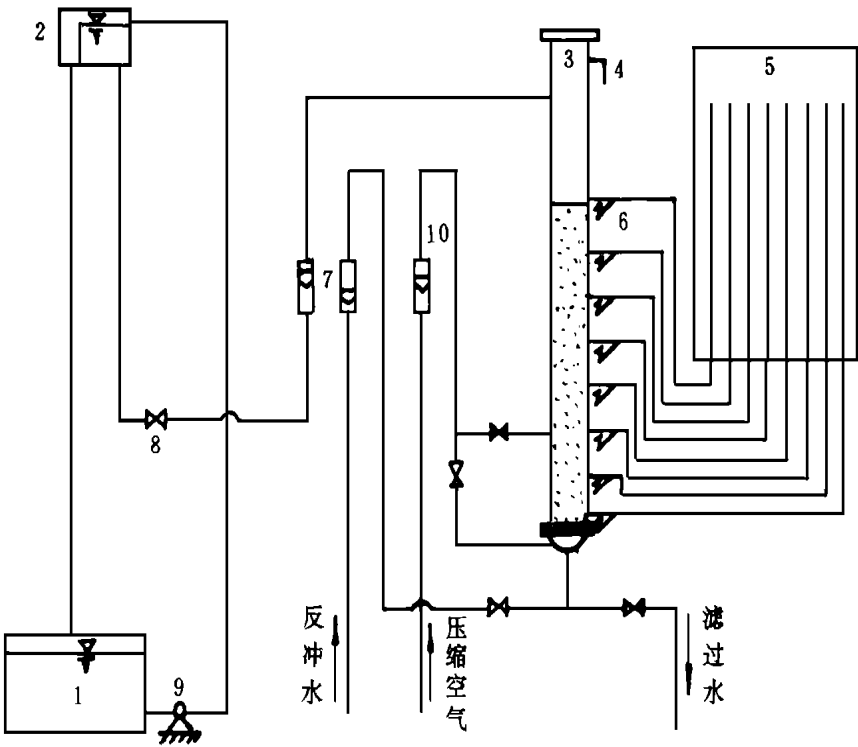


图 1 试验装置示意图

1. 原水储水箱 2. 高位水箱 3. 滤床 (内径 80 mm) 4. 反洗出水 5. 测压管板
6. 取样点 (间距 20 cm) 7. 液体流量计 8. 调节阀 9. 水泵 10. 气体流量计

2 试验方法

2.1 挂膜

固定床生物膜滤床采用自然挂膜，挂膜期间的水力负荷从 $1.0\text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 逐渐增至 $3.0\text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，试验采用 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、 DO 、浊度四个指标来观察床体的运行状况。挂膜期间原水水温 $24\sim 26^\circ\text{C}$ ， $\text{NH}_3\text{-N}$ $0.24\sim 0.68\text{ mg/L}$ ， COD_{Mn} $7.2\sim 12.20\text{ mg/L}$ ， DO $0.8\sim 3.65\text{ mg/L}$ ，浊度 $10\sim 20\text{ mg/L}$ ，供气量 $3\sim 5\text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。自然挂膜约 13 d 基本完成，滤料上可见土黄色菌膜，并有钟虫、寡毛虫等存在， $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、浊度去除率分别达到 91%、19.1% 和 50% 以上，此后处理效果趋向稳定。

2.2 动力学模型

影响 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除的因素很多，笔者通过试验分析，分别确定了当微污染水（IV、V 级）经过好氧固定床生物膜滤床处理后达到《地面水环境质量标准》中三级以上标准的运行参数^①：水力负荷、停留时间、滤床高度、有机负荷、氨氮负荷、供气量、通气口位置、过滤周期、反冲洗方式及其反冲洗强度、适宜的 pH 值和水温等。本文仅探讨根据生物降解机理分别建立了去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 的数学模型，并用试验数据加以验证。

按照文献介绍，当进水浓度较低时，推流式基质的去除动力学遵循一级反应^[4]，即

$$-\frac{ds}{dt} = ks$$

(1)

式中： k ——生物除基质反应常数；

s ——水中基质的瞬时浓度

在一定的滤床高度内，假设反应速度自上而下均一，并引入主要影响参数，可以得出基质降解数学模型^[3]：

$$\frac{s_e}{s_0} = e^{-k' a_v s_0^d \left(\frac{Q}{A}\right)^f H}$$

(2)

式中： s_0 、 s_e ——滤床进水、下渗水中的基质浓度， mg/L ；

a_v ——滤料的比表面积， m^2/g ；

k' ——与进水水质、滤料有关的系数；

Q ——体积流量， m^3/d ；

A ——滤床截面积， m^2 ；

H ——滤床高度， m ；

f 、 g ——与滤床特性、滤率有关的系数；

d ——与进水水质有关的系数

为分别确定 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 降解数学模型中的 k' 、 d 、 f 、 g 值，在挂膜实验完成后，于

① 徐元勤：微污染水预处理工艺的研究，中国给水排水，待发表

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1992年 7~ 9月期间, 通过改变进水水力负荷, 分别在不同高度取样口取样测定不同进水浓度时的滤床出水 COD $\text{NH}_3\text{-N}$ 值, 水温保持自然条件下的温度不加以控制。分析方法: COD_{Mn} 依据《水和废水监测分析方法》 3 版中高锰酸钾法, $\text{NH}_3\text{-N}$ 依据《美国水与废水标准检验法》 15 版中纳氏试剂比色法

1) 求解 COD 去除率方程

将测得数据按进水 COD 浓度分档, 按不同水力负荷列出滤床不同深度处的 COD 浓度, 如表 2 然后将上述多参数非线性方程转化成多参数线性方程, 编成电算程序, 将试验数据串入电子计算机进行回归计算。经第一次回归计算, 去掉进水浓度 (s_0) 这个参变量。再进行第二次回归计算, 计算所得 k' , f , g 值及相关系数 R 值, 见表 3

即 $k'_{av} = 11.67$, 故 $k' = \frac{11.67}{0.536} = 21.27$

表 2 不同水力负荷、不同深度 COD 浓度

		mg/L					
水力负荷		滤床深度 /m					
$/\text{m}^3$	$(\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
168		11.15	10.74	10.58	10.20	9.70	9.53
144		11.12	10.68	10.21	9.66	9.38	8.80
120		11.15	10.67	9.95	9.58	8.76	8.02
96		11.76	11.00	10.12	9.53	9.15	8.29
72		11.82	10.88	10.06	9.40	8.71	8.13
60		12.95	11.83	10.02	10.14	9.36	8.47
168		9.25	8.90	8.75	8.39	8.26	8.15
144		9.15	8.74	8.45	8.12	7.85	7.45
120		9.12	8.68	8.10	7.64	7.36	6.86
96		9.21	8.63	8.18	7.65	7.20	6.83
72		9.13	8.55	8.10	7.55	7.18	6.72
60		8.84	8.17	7.64	7.23	6.74	6.32
168		5.92	5.70	5.60	5.46	5.38	5.32
144		6.12	5.82	5.68	5.42	5.18	5.12
120		6.92	6.59	6.23	5.92	5.69	5.43
96		6.82	6.44	6.17	5.89	5.57	5.32
72		7.11	6.64	6.31	5.91	5.62	5.42

注: 实验水温 26~ 18℃

所得去除 COD 的数学模型为

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-11.67H^{0.93}q^{-0.82}}$$

(3)

式中: $q = \frac{Q}{A}$ 表面水力负荷, $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

2) 求解 NH₃-N 去除率方程

方法同上,列出不同水力负荷、滤床不同深度处 NH₃-N 浓度,如表 4,进行回归计算,计算所得 k' 、 d 、 f 、 g 值及相关系数 R 值,见表 3

表 3 各参数回归计算结果

参数	回归次数	k'_{av}	d	f	g	R
COD	第一次回归	14.44	0.12	-0.92	0.97	0.8888
	第二次回归	11.67	0	-0.82	0.93	0.9654
NH ₃ -N	第一次回归	28.64	0.30	-0.49	0.78	0.9605

表 4 不同水力负荷、不同深度 NH₃-N 浓度

		mg/L				
水力负荷 /m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹		滤床深度 /m				
		0	0.2	0.4	0.6	0.8
144	3.20	1.48	0.66	0.26	0.14	0.12
120	3.40	1.30	0.64	0.23	0.09	0.05
96	3.56	1.35	0.65	0.12	0.08	0.03
72	3.12	0.98	0.42	0.16	0.07	0.04
144	2.77	1.30	0.70	0.48	0.35	0.14
120	2.52	0.96	0.56	0.39	0.20	0.06
96	2.14	0.65	0.21	0.14	0.08	0.04
72	2.01	0.45	0.18	0.12	0.09	0.05
168	1.46	0.70	0.36	0.20	0.18	0.16
144	1.64	0.66	0.32	0.19	0.17	0.15
120	1.66	0.62	0.29	0.16	0.06	0.05
96	1.62	0.56	0.26	0.12	0.08	0.04
72	1.24	0.34	0.16	0.10	0.08	0.08
60	1.54	0.42	0.18	0.06	0.05	0.04
168	0.39	0.22	0.18	0.16	0.13	0.12
144	0.62	0.38	0.21	0.14	0.10	0.08
120	0.90	0.40	0.28	0.12	0.06	0.04
96	0.62	0.33	0.22	0.12	0.06	0.02
60	0.60	0.28	0.18	0.10	0.05	0.01

注:实验水温 26~ 18℃

即 $k'_{av} = 28.64$, 故 $k' = \frac{28.64}{0.536} = 53.43$, 所得去除 NH₃-N 的数学模型为

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{28.64}{50} H^{0.78} q^{-0.49}}$$

(4)

2.3 方差分析

通过试验数据,可以把多元线性回归方程计算出来,但因变量 y 与自变量 x_1, x_2, x_3 , ... 是否确定存在相关关系? 回归方程是否有意义? 是否每个自变量都起显著作用? 为此,有必要对多元线性回归进行显著性检验。

1) 去除 COD 数学模型的方差分析

第一次回归计算:

取可信度为 75%。查表 $^{[5]}F_{0.25}(1, 81) = 1.34 > F(1) = 0.54$, 说明参变量进水浓度 (s_0) 对出水 (s_e/s_0) 影响不显著, 此时应从回归方程中剔除之。

第二次回归计算:

取可信度为 99%。查表 $F_{0.25}(2, 81) = 4.87 \ll F = 562.81$, 影响极为显著。

查表 $^{[5]}F_{0.01}(1, 82) = 6.95 \ll F(I), I = 1, 2, F(1) = 261.35, F(2) = 864.26$, 说明水力负荷 (Q/A), 滤床深度 (H) 对 (s_e/s_0) 都有显著作用。

2) 去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 数学模型的方差分析

取可信度为 99%。查表 $^{[5]}F_{0.01}(3, 91) = 4.0 \ll F = 361.03$, 影响极为显著。

查表 $^{[5]}F_{0.01}(1, 91) = 6.92 \ll F(I), I = 1, 2, 3, F(1) = 157.2, F(2) = 107.75, F(3) = 805.1$, 说明进水浓度 (s_0), 水力负荷 (Q/A), 滤床高度 (H) 对 (s_e/s_0) 都有显著作用。

2.4 数学模型的验证

稳定运行从 1992 年 10~12 月, 水温为 $20 \sim 6^\circ\text{C}$, 笔者详细测得当水力负荷为 $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时出水 COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度随进水浓度的变化情况。发现当水温降至 12°C 以下时, 试验数据与模型计算值偏差较大, 于是引入温度修正系数 θ 值进行校正, 最终得出本试验去除 COD 的数学模型为

$$\frac{s_e}{s_0} = e^{-11.67\theta H^{0.93} q^{-0.82}} \quad (5)$$

适用条件: $T > 12^\circ\text{C}, \theta = 1; T < 12^\circ\text{C}, \theta = 0.85$, 进水 COD 浓度 $< 8.2 \text{ mg/L}$

本试验去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的数学模型为

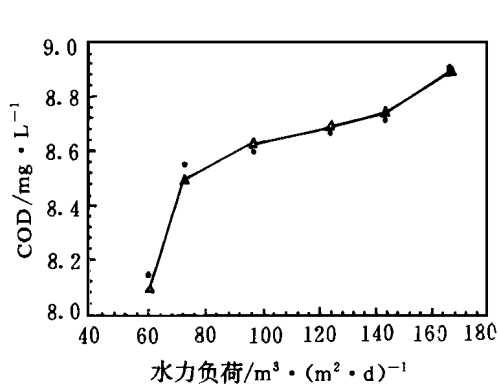
$$\frac{s_e}{s_0} = e^{-28.64\theta s_0^{0.30} H^{0.78} q^{-0.49}} \quad (6)$$

适用条件: $T > 12^\circ\text{C}, \theta = 1; T < 12^\circ\text{C}, \theta = 0.65$; 进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 $< 3.4 \text{ mg/L}$

图 2 3 4 5 6 分别说明实验值与模型计算值的对比, 从图中可以看出两者吻合良好。

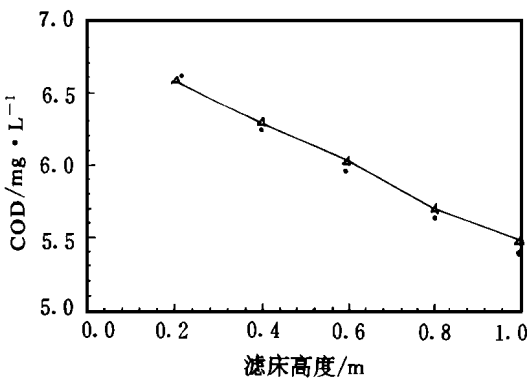
3 结论

1) 陶粒生物膜滤床是一种推流式反应器, 基质降解遵循一级反应动力学, 并由此建立了好氧生物膜滤床降解 COD $\text{NH}_3\text{-N}$ 的数学模型, 推导出不同进水浓度、不同水力负



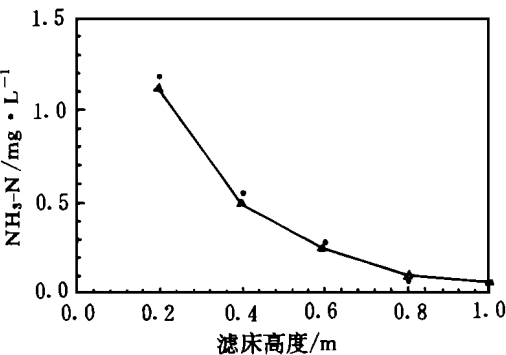
· 实测值 \triangle 模型计算值
滤床深度 0.2 m $T = 24^\circ\text{C}$
进水浓度 8.84~9.25 mg/L

图2 出水浓度随水力负荷的变化



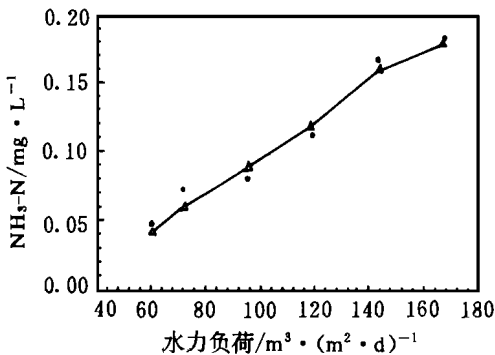
· 实测值 \triangle 模型计算值
进水浓度 6.92 mg/L
水力负荷 $120 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

图3 出水 COD 浓度沿滤床高度的变化



· 实测值 \triangle 模型计算值
进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 3.4 mg/L
水力负荷 $120 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$

图4 出水浓度沿滤床高度的变化



· 实测值 \triangle 模型计算值
进水浓度 1.24~1.66 mg/L
滤床深度 0.8 m $T = 24^\circ\text{C}$

图5 出水浓度随水力负荷的变化

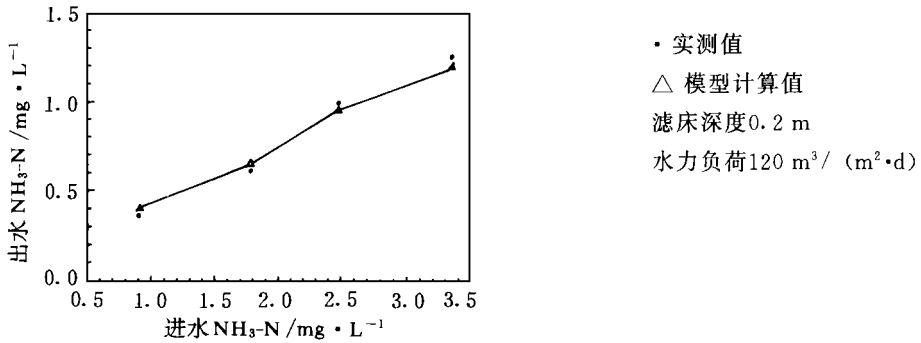


图6 出水浓度与进水浓度的变化

荷、不同滤床高度的 COD $\text{NH}_3\text{-N}$ 变化规律的数学表达式,如式(5)(6)所示,并用试验数据加以验证。它对进一步搞好中试及生产性试验有一定的指导意义。

2) 本研究将生化、物化作用集于一体,与传统工艺相比具有流程短、操作简便、投资省、节约药剂等特点。预计在微污染水的预处理方面将有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 金相灿等. 我国主要湖泊和水库水体的营养特征及其变化. 环境科学研究, 1991, 4(1)
- 2 胡玉民. 生物膜过滤技术应用于二级出水深度处理的研究: [学位论文]. 天津: 天津大学土木系, 1990
- 3 徐元勤. 好氧固定床生物膜法处理微污染水的研究: [学位论文]. 天津: 天津大学土木系, 1993
- 4 秦麟源. 废水生物处理. 上海: 同济大学出版社, 1989
- 5 田广武. 统计学. 天津: 天津大学出版社, 1988

Study on Removing Organic Matter and Ammonia Nitrogen with the Aerobic Biofilm Filter Bed

Xu Yuanqin

(Dalian Free Trade Zone Development and Construction Co.)

Han Yueling

(Shenyang Architectural Engineering College)

Abstract In this paper, it was utilized to treat the micropolluted water that the bio-chemical physicochemical new unified technology. The mathematical models which describe the removal of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ according to the mechanism of biodegradation respectively were presented and verified by the datum of the experiment.

Key words aerobic; biofilm; organic matter; ammonia nitrogen; mathematical model