

分置式膜-生物反应器处理生活污水及其体积负荷的确定*

孟耀斌, 文湘华, 邢传宏, 钱易 (清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084, E-mail: mengyb@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

摘要: 分置式膜-生物反应器处理生活污水的运行结果表明, 在不同的污泥龄和水力停留时间下, 处理效果稳定, 污泥上清液中 COD 浓度平均为 19.5 mg/L , 膜出水 COD 浓度平均为 5.3 mg/L 。对分置式-生物反应器的体积负荷进行推导表明, 浓缩区的存在是该工艺处理能力较大的原因。体积负荷由膜出水有机物浓度与污泥混合液有机物浓度之比 α 、浓缩区与反应器体积之比 β 和膜出水量与污泥混合液循环流量之比 λ 决定, 即可以通过增加浓缩区体积和调整循环流量来控制分置式-生物反应器的处理能力。

关键词: 分置式膜-生物反应器, 生活污水, 浓缩, 体积负荷, 处理能力。

中图分类号: X799.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2000)02-0024-04

Recirculated Membrane Bio-Reactor for Domestic Wastewater Treatment and Its Volumetric Loading Rate Determination*

Meng Yaobin, Wen Xianghua, Xing Chuanhong, Qian Yi (State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: mengyb@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

Abstract: Treatment efficiency of domestic wastewater by Recirculated Membrane Bio-Reactor showed that under various sludge age and hydraulic retention time, stable performance was observed and the COD concentration of the sludge supernatant and membrane filtrate averaged to be 19.5 mg/L and 5.3 mg/L respectively. The higher treatment capability of the system relies on the volume of concentration zone. A formula to calculate volumetric loading rate was obtained which showed its dependence on three ratios designated by α , the COD concentration of filtrate over that of the sludge suspension, β , the concentration zone volume over reactor volume and λ , the effluent flow rate over the recirculation rate. It consequently indicated that the volumetric loading rate can be elevated through increasing filtration rate of enlarging concentration zone volume.

Keywords: Recirculated Membrane Bio-Reactor, domestic wastewater, concentration, volumetric loading rate, treatment capability.

膜-生物反应器是一种将高效膜分离技术与传统活性污泥法相结合的新型水处理反应器^[1]。由于膜的过滤作用, 生物被完全截留在生物反应器中, 实现了水力停留时间与污泥龄的彻底分离^[2,3], 消除了传统活性污泥工艺中的污泥膨胀问题。由于膜-生物反应器具有对污染物去除效率高^[3,4], 硝化能力强^[2,5], 出水水质稳定^[1~7], 设计、操作简化^[7]等特点, 具有很大的应用潜力。本文根据分置式膜-生物反应器处理

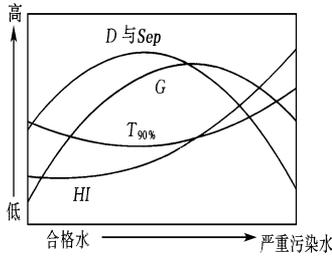
生活污水的试验结果, 就其处理能力的影响因素做些探讨。

1 试验条件

1.1 试验装置

* 国家自然科学基金项目 (Project Supported by the National Natural Science Foundation of China): 59878025
作者简介: 孟耀斌(1974~), 男, 博士研究生, 主要从事水处理理论与技术研究。
收稿日期: 1999-03-26

工艺流程如图 1 .



1. 进水箱 2. 进水泵 3. 生物反应器 4. 曝气器
5. 冷却器 6. 液位器 7. 排泥泵 8. 循环泵 9. 阀门
10. 膜组件 11. 流量控制阀门 12. 压力表

图 1 分置式膜-生物反应器工艺流程

出水流量阀门精确调节水力停留时间 (Hydraulic Retention Time, HRT); 通过排泥泵设定剩余污泥排放量进而控制污泥龄 (Sludge Retention Time, SRT) . 冷却器控制反应器温度在 30 左右 . 微孔曝气器、液位控制器控制进水泵的启闭, 以保持生物反应器内液位恒定; 阀门 9 调节过膜循环流量 .

1.2 试验用膜

试验用无机膜组件为法国 TECH-SEP 公司生产的 KERA SEP 系列管状陶瓷膜 . 每根膜

有 7 通道, 支撑体为疏松多孔陶瓷材料, 通道内表面为无机氧化锆 (ZrO_2) 膜 . 单通道直径 4.5mm, 长 40cm, 每根膜膜面积约 $0.04m^2$. 本试验中微滤膜的平均孔径为 $0.45\mu m$.

试验用水为清华大学北区生活污水, 基本水质情况为 COD $34 \sim 730mg/L$, SS $10 \sim 480mg/L$, NH_3-N $13 \sim 23mg/L$.

1.3 试验条件

全部试验共持续了 120 余天, 共分为 3 组 . 各组试验条件如表 1 . 表中污泥龄为 θ 表示试验期间不排泥 .

2 试验结果

2.1 出水水质

在每种工况下, 当污泥量稳定后连续监测反应器中污泥混合液的 COD (以 S_{sup} 表示) 和膜出水 COD (以 S_e 表示), 多天平均的水质如表 1 中所示 . 值得指出, 在稳定状态下, 虽然进水波动较大, 但无论 S_{sup} 还是 S_e , 都很稳定, S_{sup} 不超过 $40mg/L$, S_e 不超过 $12mg/L$, 而且很快又下降到较低水平 .

2.2 膜-生物反应器体积负荷的推导

表 1 试验条件与结果

污泥龄/d	5	30	30	30	15	平均值
水力停留时间/h	7.5	5	3.75	4.4	5	5
$S_{sup}/mg \cdot L^{-1}$	21.2	15.9	15.7	24.5	19.8	20.1
$S_e/mg \cdot L^{-1}$	5.1	5.3	5.3	5.6	5.5	5.2
COD 体积负荷 $U/kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$	0.39	0.91	1.81	1.70	0.40	0.78

反应器与膜组件在运行时的联系如图 2 .

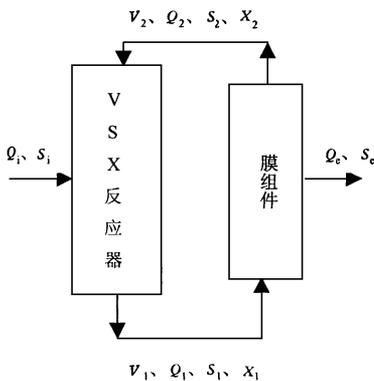


图 2 膜-生物反应器流程图

图 2 中, Q, S, X, V 分别表示流量, 基质浓度 (COD), 污泥浓度 (MLV SS) 和反应器或管路容积 . 下标参数 $i, e, 1, 2$ 分别表示原水, 膜过滤出水, 进入膜组件前和离开膜组件后的污泥混合液, 无下标代表完全混合反应器中污泥混合液参数 . 当污泥混合液 Q_1 在压力下通过膜组件时, 一部分流量 Q_e 通过膜过滤后形成出水, 而大部分 Q_2 则又回到了反应器中 . 基质 (COD) 有很小一部分进入出水, 极少一部分沉积于膜面上, 大部分回到反应器; 微生物则不可能进入出水, 而是全部返回到反应器 .

此处定义:

$$\alpha = S_e/S = S_e/S_1$$

$$\beta = V_2/(V + V_1) \quad V_2/V$$

其中 V_1, V_2 分别是进、出膜组件的管路容积。

$$\lambda = Q_e/Q_1$$

以膜组件为衡算对象,对流量、基质和生物量做衡算得:

$$Q_1 = Q_2 + Q_e \quad (1)$$

$$Q_1 S_1 = Q_2 S_2 + Q_e S_e \quad (2)$$

$$Q_1 X_1 = Q_2 X_2 \quad (3)$$

$$\text{得: } X_2 = \frac{Q_1}{Q_2} X_1 = \frac{1}{1 - \lambda} X_1 \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{Q_1 S_1 - Q_e S_e}{Q_2} = \frac{1 - \lambda \frac{S_e}{S_1}}{1 - \lambda} S_1$$

$$= \left[\frac{1 - \lambda \alpha}{1 - \lambda} \right] S_1 \quad (5)$$

$$[1 + (1 - \alpha)\lambda] S_1 \quad (6)$$

公式(6)中的简化基于本试验中的典型数据, $\alpha = S_e/S = S_e/S_1 = 5/20 = 0.25$, 远大于 $\lambda = Q_e/Q_1 = 0.010/2.4 = 0.0042$ 。由式(4)、(5)或(6)可知, S_2 比 S_1 大, X_2 比 X_1 大。所以, 可以将污泥混合液已通过膜组件未回到反应器的管路看成一个浓缩区, 记浓缩区体积为 V_2 。

下面考虑全部生物量分别在反应器(包括进膜组件前的管路)和在浓缩区对有机物的总去除速率。

根据莫诺特方程, 在反应器中有机物的去

$$\text{除速率为: } V_1 = X_1 \frac{V_m}{1 + \frac{K_s}{S_1}} \quad (7)$$

V_m : 基质最大比去除速率, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{g} \cdot \text{d})$

K_s : 基质半饱和浓度, mg/L 。

在浓缩区中有机物的去除速率为:

$$V_2 = X_2 \frac{V_m}{1 + \frac{K_s}{S_2}} = \frac{1}{1 - \lambda} X_1 \cdot \frac{V_m}{1 + \frac{K_s}{[(1 + \lambda + \lambda^2)(1 - \lambda\alpha)]S_1}} \quad (8)$$

在一次循环中, 该生物量在反应器和浓缩区中的停留时间分别为 t_1 和 t_2 , $t_1 - t_2 = (V + V_1) - V_2 = \beta$ (由于 V_1 比 V 小得多, 所以以下不

再区分 V_1 和 $V + V_1$)。则在 t_1 时间内, 该生物量去除的有机物量为:

$$R_1 = V_1 t_1 = X_1 \frac{V_m t_1}{1 + \frac{K_s}{S_1}} \quad (9)$$

在 t_2 时间内, 该生物量去除有机物量为:

$$R_2 = V_2 t_2 = X_2 \frac{V_m t_2}{1 + \frac{K_s}{S_2}} = (1 + \lambda) X_1 \cdot \frac{V_m t_2}{1 + \frac{K_s}{[(1 + \lambda + \lambda^2)(1 - \lambda\alpha)]S_1}} \quad (10)$$

设污泥循环周期, 即污泥循环一次所需时间为 T_r 。设在 T_r 中该生物量对有机物的总去除量为 R 。

$$R = R_1 + R_2 = V_1 t_1 + V_2 t_2 = \left[\frac{V}{V + V_2} V_1 + \frac{V_2}{V + V_2} V_2 \right] T_r \quad (11)$$

由于 V_2 比 V 小得多, 如本试验中, V_2 约有 3L , 而 V 却有约 30L 。所以, R 可以做一简化:

$$R \left[V_1 + \frac{V_2}{V} V_2 \right] T_r = (V_1 + \beta V_2) T_r \quad (12)$$

在一个水力停留时间内生物量对有机物的总去除量 L :

$$L = R \frac{\text{HRT}}{T_r} = (V_1 + \beta V_2) \text{HRT} \quad (13)$$

体积负荷:

$$U = \frac{L}{\text{HRT}} = V_1 + \beta V_2 = X_1 V_m \left[\frac{1}{1 + \frac{K_s}{S_1}} + \frac{\beta}{1 - \lambda} \frac{1}{1 + \frac{K_s}{[(1 + \lambda + \lambda^2)(1 - \lambda\alpha)]S_1}} \right] \quad (14)$$

3 讨论

污泥混合液每经过一次膜组件, 就被浓缩一次。即 S_2 比 S_1 大, X_2 比 X_1 或 X 大。浓缩的结果必然使得生物与有机物的亲和作用加强, 从而加快反应速率。

稳态时, 浓缩区的反应速率比污泥在反应器高, 这意味着在分置式膜-生物反应器系统中扩大浓缩区将有助于进一步提高处理能力。

式(14)表明,稳态时 U 取决于几个重要的比例关系:膜出水中中和污泥混合液中有有机物浓度(以COD表示)的比值,即 α ;浓缩区和反应器容积比值,即 β ;膜出水流量同循环流量的比值,即 λ 。

α β λ 对体积负荷的影响:

(1) 由于膜的过滤作用, S_e 可以稳定地控制在很低的数值,同样稳态时, S_{sup} 也大体上变化不大.如本试验中, α 大约0.25左右. α 值同废水性质和膜面性质有关,对特定的装置和水质, α 比较稳定.如果原水水质恶化, S_1 相应升高,导致 α 降低,将使得污泥的处理能力增强,所以, α 反映了膜-生物反应器稳定性的机理.

(2) λ 是在操作中控制的.根据(14)模拟不同 λ 下污泥负荷的变化,如图3所示.模拟条件^[8]: $S_1 = 20\text{mg/L}$, $S_e = 5\text{mg/L}$, $\alpha = 0.25$; $\beta = 0.1$; $V_m = 0.8\text{h}^{-1}$, $K_s = 25\text{g/m}^3$; $X = 1\text{g/L}$,系采用普通活性污泥法中典型污泥浓度,并设 $MLVSS/MLSS = 0.5$ 得到^[9].应注意到,虽然通过提高 λ 可以提高处理能力,但无论是通过增大出水量还是减少循环流量,都将加剧膜面污染,所以 λ 的取值变化应参考膜组件过滤特性而定.

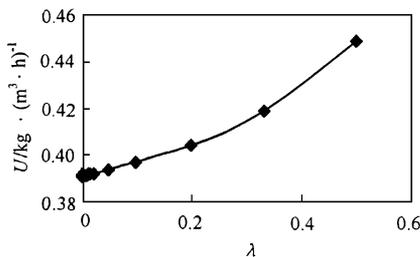


图3 体积负荷 U 与 λ 关系图

(3) β 取决于反应器和浓缩区的体积.虽然目前的试验装置没有专门的浓缩区,但通过(14)式可以看到 β 对污泥负荷有着很大的影响.根据(14)式模拟不同 β 下污泥负荷的变化,如图4所示.模拟条件: $\alpha = 0.25$; $\lambda = 0.0042$; $V_m = 0.8\text{h}^{-1}$, $K_s = 25\text{g/m}^3$; $X = 1\text{g/L}$.可见,通过增大 β ,可以显著增大处理能力.

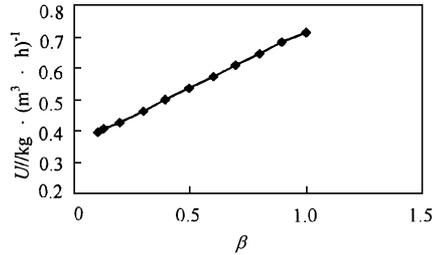


图4 体积负荷 U 与 β 关系图

4 结论

(1) 分置式膜-生物反应器处理生活污水效果稳定,污泥混合液和膜出水中有机物COD平均浓度分别为 19.5mg/L 和 5.3mg/L .

(2) 分置式膜-生物反应器中浓缩区的存在提高了系统的体积负荷.

(3) 提高浓缩区与反应器体积之比 β 可以显著提高系统体积负荷.

(4) 提高膜出水流量与污泥循环流量之比 λ 也可提高体积负荷.

参考文献

- Bailey A et al The Use of Crossflow Microfiltration to Enhance the Performance of an Activated Sludge Reactor. *Wat Res*, 1994, **28**(2): 297~ 301.
- Chaize S et al Membrane Bioreactor on Domestic Wastewater Treatment Sludge Production and Modeling Approach. *Wat Sci Technol*, 1991, **23**(7~ 9): 1591~ 1600.
- Muller E B et al Aerobic Domestic Wastewater Treatment in a Pilot Plant with Complete Sludge Retention by Crossflow Filtration. *Wat Res*, 1995, **29**(4): 1179~ 1189.
- Nagano A et al The Treatment of Liquor Wastewaters Containing High-Strength Suspended Solids by Membrane Bioreactor System. *Wat Sci Technol*, 1992, **26**(3 - 4): 887~ 895.
- Trouve E et al Treatment of Municipal Wastewater by Membrane Bioreactor: Results of a Semi-Industrial Pilot-Scale Study. *Wat Sci Technol*, 1994, **30**(4): 151~ 157.
- 邢传宏等 错流式膜-生物反应器处理生活污水及其生物学研究. *环境科学*, 1997, **18**(6) 23~ 26.
- Urban V et al Integration of Performance, Molecular Biology and Modeling to Describe the Activated Sludge Process. *Wat Sci Technol*, 1998, **37**(3): 223~ 229.
- 顾夏声 废水生物处理数学模式. 北京: 清华大学出版社, 1993 61.
- 顾夏声等 水处理工程. 北京: 清华大学出版社, 1985 160.

柴达木盆地水资源承载力研究*

李丽娟¹, 郭怀成², 陈冰², 孙海林² (1. 中国科学院地理研究所, 北京 100101, E-mail: lilj@dlsg.ac.cn; 2. 北京大学环境科学中心, 北京 100871, E-mail: hcguo@ces.pku.edu.cn)

摘要: 提出了以期望人口为核心的水资源承载力指标体系, 并应用于柴达木盆地水资源承载力的实际研究. 用柴达木盆地水资源承载力系统动力学仿真模型(SDMWRSCCB)计算了人口等承载力指标的预测值, 把期望值和预测值进行了深入分析比较, 推断出柴达木盆地水资源承载力.

关键词: 水资源承载力, 期望人口, 预测人口, 柴达木盆地

中图分类号: X37 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2000)02-0020-04

Water Resource Supporting Capacity of Chaidamu Basin*

Li Lijuan¹, Guo Huaicheng², Chen Bing², Sun Hailin² (1. Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China E-mail: lilj@dlsg.ac.cn; 2. Center for Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China E-mail: hcguo@ces.pku.edu.cn)

Abstract: The conception of water resource supporting capacity was explained, and the index system surrounding the kernel of expecting population was also put forward. In this study, the conception was efficiently applied to determine the water resource supporting capacity and its index system in Chaidamu Basin. The forecasting values of indexes were calculated by the System Dynamics Simulated Model for Water Resource Supporting Capacity of Chaidamu Basin (SDMWRSCCB). Then comparison with the expected values of the indexes was done to deduce supporting capacity combining other assistant indexes.

Keywords: water resource supporting capacity, expecting population, forecasted population, Chaidamu Basin

水资源承载力是一个描述水资源支持人类活动能力阈值的概念, 至今依然没有一个明确公认的定义, 有人认为是水资源供给人口的最大限值^[1], 或是归纳为水环境对人类活动支持能力的阈值^[2]等. 水是干旱区生态环境最重要的因素, 水资源承载力研究的意义更加突出. 本文通过对柴达木盆地水资源承载情况的深入分析, 从资源优化利用角度归纳出水资源承载力的概念和其具体的衡量指标体系.

1 水资源承载力指标体系

水资源承载力大小的判断依据是各项具体的水资源承载力指标. 承载人口是评价承载力大小最直接的指标, 以它为核心, 衍生出以资源总量及人均资源占有量、总产品数量及人均产品产量为主, 并辅之以其它的一个较完整的指

标体系. 承载人口是指在资源最有效利用和经济与环境协调发展的条件下, 该地区资源环境所能承载的最大人口容量. 期望人口应该是人口发展的上限, 实际中运用各种方法计算和预测出的人口(即预测人口)应与期望人口有一定的距离, 以留出一定的人口缓冲空间.

作为承载人口的重要辅助指标, 资源总量及人均资源占有量反映一个地区的资源潜力以及人口对资源的压力或资源负载水平, 而总产品数量及人均产品数量综合反映了一个地区可能的生产力水平及人口承载量. 具体的辅助性指标有: 水资源总量(包括地表水资源量、地下

* 国家“九五”重点科技攻关项目(The National Key Science and Technology Project during the Ninth Five-Year Plan Period): 96-912-04-01-03

作者简介: 李丽娟(1961~)女, 硕士, 副研究员, 主要从事水资源与环境水文研究.

收稿日期: 1999-05-07