

# 废水厌氧反应器处理效率影响因素的关联度分析

郭劲松 龙滕锐

(重庆建筑工程学院城建系, 重庆 630045)

**摘要** 应用灰色关联分析方法来研究影响反应器效率的主要因素的重要性。并以厌氧流化床反应器的试验数据为例进行了计算分析, 得到了与理性分析相一致的结论。结果表明, 用灰色关联方法分析反应器的效率影响因素, 与其它方法相比, 具有要求试验数据较少的优点。

**关键词** 灰色系统, 关联分析, 反应器。

废水处理生物反应器的效率一般受 2 类基本因素的影响: 一类是反应器本身的因素, 如持有的生物量、生物种类和活性、混合接触程度等; 另一类是施加的环境因素, 如营养比、负荷率、温度、pH 值、抑制剂或促进剂等。以往对反应器效率的研究只停留在利用试验数据对影响因素进行单一的分析, 没有进行比较研究来确定各影响因素的影响层次和主次顺序。实际上, 要想定量地确定各因素影响的大小及相互关系是很困难的, 因为有些因素间的关系难以数量化。因此, 这一问题具有灰色系统的特点。在关联空间内, 因素间的关联度大小顺序被用来描述因素间的关联程度<sup>[1]</sup>, 即关联度取值的大小, 并不改变灰色系统中各因素间关联程序的顺序。基于上述概念, 本文采用灰色关联分析法, 研究了影响厌氧流化床效率的主要因素的重要性顺序。这种分析方法同样也适用于其它废水处理生物反应器。

## 1 灰色关联分析方法

### 1.1 关联度的定义

在灰色系统理论中, 考虑  $m$  个数列:

$$\{X_1^{(0)}(K)\}, \quad K = 1, 2, \dots, m_1$$

$$\{X_2^{(0)}(K)\}, \quad K = 1, 2, \dots, m_2$$

$$\{X_N^{(0)}(K)\}, \quad K = 1, 2, \dots, m_N$$

$m_1, m_2, \dots, m_N$  均属自然数集, 且不一定相等, 这  $N$  个数列代表  $N$  种因素, 通常称  $X_i^{(0)}(K)$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 为子数列或比较数列, 如果给

定数列:

$$\{X_0^{(0)}(K)\}, \quad K = 1, 2, \dots, m_0$$

则称  $X_0^{(0)}(K)$  为母数列或参考数列。若存在  $r_0 \in \{0, 1\}$ , 且满足以下条件:

(1)  $r_0$  越大,  $X_0$  与  $X_i$  的几何形状越相似;

(2)  $r_0$  只与  $X_0$  及  $X_i$  的几何形状有关;

(3) 只有当数列  $X_0^{(0)}(K)$  与  $X_i^{(0)}(K)$  完全重合时,  $r_0$  才等于 1。

则  $r_0$  被定义为  $X_i$  对  $X_0$  的关联度。其具体计算步骤为<sup>[1]</sup>: 数据标准化处理, 计算关联系数和计算关联度。

### 1.2 数据标准化处理

在废水生物反应器中, 其效率的影响因素有: 有机负荷率、进水有机物浓度、水力停留时间等, 这些都是具有不同量纲的物理量, 因而无法进行直接比较, 只有对其进行标准化处理后, 才能考虑关联度, 也就是需要将各因素的原始数值, 在关联空间内进行变换, 使之统一为可以比较的量, 该变换称为标准化变换。

$$X_i^{(1)}(K) = \frac{X_i^{(0)}(K) - \min_K X_i^{(0)}(K)}{\max_K X_i^{(0)}(K) - \min_K X_i^{(0)}(K)} \quad (1)$$

或

$$X_i^{(1)}(K) = \frac{\max_K X_i^{(0)}(K) - X_i^{(0)}(K)}{\max_K X_i^{(0)}(K) - \min_K X_i^{(0)}(K)} \quad (2)$$

式中,  $X_i^{(0)}(K)$  意义如前所述;  $\max_K X_i^{(0)}(K)$  表示第  $K$  项因素在  $m_i$  数列中的最大值;  $\min_K X_i^{(0)}(K)$  表示第  $K$  项因素在  $m_i$  数列中的最小值。(1)式适合

于值越大效用越大的因素；(2)式适合于值越大效用越小的因素。

### 1.3 关联系数的计算

试验数据经过标准化处理后,以原始参考数列的标准化值构成参考数列  $\{X_j^{(j)}(K)\} (j=1, 2, 3, \dots, P; K=1, 2, \dots, m_0)$ ; 以各原始比较数列的标准化值构成比较数列  $\{X_i^{(i)}(K)\} (i=1, 2, \dots, N; K=1, 2, \dots, m_i)$ 。然后,按下式计算参考数列与比较数列的关联系数:

$$\xi_i(K) = \frac{\min_j \min_K \Delta_{0j}(K) + \rho \max_j \max_K \Delta_{0j}(K)}{\Delta_{0i}(K) + \rho \max_j \max_K \Delta_{0j}(K)} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  表示分辨系数,其取值在 0—1 之间;  $\xi_i(K)$  表示  $X_i$  对  $X_0$  在第  $K$  项因素处的关联系数;  $\Delta_{0i}(K) = |x_{(0)}(K) - x_i(K)|$ 。

### 1.4 关联度的计算

关联系数只反映参考数列与比较数列在因素  $K$  处的关联程度,因此是一个孤立而分散的信息,没有反映出第  $i$  个比较数列与参考数列的整个关联程度。为此,用  $m_i$  项关联系数的平均值作为参考数列与比较数列的整个关联程度的量度,即关联度。

$$r_i = \frac{1}{m_i} \sum_{K=1}^{m_i} \xi_i(K) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

比较  $r_i$  的大小便可得到因素对考察指标的关联程度,即其重要性顺序。

## 2 厌氧流化床处理效率的关联分析

本文以厌氧流化床处理效率为例。评价厌氧流化床的效率,一般用 2 项指标,即 COD 去除率和产气率。根据上述灰色关联分析方法,应将去

除率(%)和产气率(L/L·d)作为参考数列。

由上面分析可知,对于一个生物生长正常的厌氧流化床而言,影响其效率的主要施加因素有:进水 COD 浓度、HRT、进水 COD 负荷率、水温。笔者采用的数据来自于厌氧流化床处理高浓度有机废水所得的试验数据,试验温度控制在 26℃—34℃ 之间<sup>[2]</sup>,正好处于中温消化 26℃—37℃ 的最适温度范围,因而微生物生长良好,反应速率较高,加之厌氧流化床具有很大的生物量浓度,因而具有较高的活性酶浓度。因此,温度因素对处理效率的影响难于表现出来。故在进行关联分析时,没有考虑温度因素。这样本文只将进水 COD 浓度、水力停留时间(HRT)和进水 COD 负荷率作为比较数列。通过关联度的大小顺序来确定这 3 个因素对效率指标(COD 去除率和产气率)影响的重要性。

表 1 所列为厌氧流化床处理高浓度有机废水的试验数据<sup>[2]</sup>、数列名和代号。

根据试验和定性分析,对表 1 所列数据进行标准化处理。当以去除率为参考数列时,对  $X_1^{(1)}(K)$ ,  $X_2^{(2)}(K)$  采用(2)式标准化,  $X_3^{(3)}(K)$  采用(1)式标准化;当以产气率为参考数列时,对  $X_1^{(1)}(K)$ ,  $X_2^{(2)}(K)$ ,  $X_3^{(3)}(K)$  均采用(1)式标准化。计算结果列于表 2 中,其数列名仍用原数列名表示。

由表 2 数据不难求出比较数列与参考数列的绝对差  $\Delta_{0i}(K) = |x_0^{(j)}(K) - x_i^{(i)}(K)|$  数列,如表 3 所示。

由表 3,对去除率参考数列:

$$\min_j \min_K |x_0^{(1)}(K) - x_i^{(i)}(K)| = 0$$

$$\max_j \max_K |x_0^{(1)}(K) - x_i^{(i)}(K)| = 0.842$$

对产气率参考数列:

表 1 试验原始数据(生物膜厚 92μm)

代号	名称	序 号							数列
		1	2	3	4	5	6	7	
$X_1^{(1)}(K)$	COD 去除率(%)	90	89	86	91	84	89	88	参考数列
$X_2^{(2)}(K)$	产气率(L/L·d)	0.87	2.37	2.36	1.52	2.58	2.63	2.87	
$X_3^{(3)}(K)$	进水 COD 浓度(g/L)	3.343	4.967	5.454	5.092	5.036	4.108	3.165	比较数列
$X_4^{(4)}(K)$	HRT(h)	33.7	16.7	12.5	19.8	10.3	10.0	7.5	
$X_5^{(5)}(K)$	进水 COD 负荷(kg/m <sup>3</sup> ·d)	2.38	6.65	10.48	3.70	11.68	9.88	10.11	

表 2 比较数列和参考数列

代号	序 号							数列
	1	2	3	4	5	6	7	
$x_6^{(1)}(K)$	0.857	0.714	0.286	1	0	0.714	0.571	参考数列 <sup>1)</sup>
	0	0.750	0.745	0.325	0.855	0.880	1	
$x_1^{(0)}(K)$	0.922	0.213	0	0.158	0.183	0.588	1	比较数列 <sup>1)</sup>
	0.078	0.787	1	0.842	0.817	0.412	0	
$X_2^{(0)}(K)$	1	0.351	0.191	0.469	0.107	0.095	0	
	1	0.351	0.191	0.469	0.107	0.095	0	
$X_3^{(0)}(K)$	1	0.541	0.129	0.858	0	0.194	0.169	
	0	0.459	0.871	0.142	1	0.806	0.831	

1) 每组数据中上行为去除率值, 下行为产气率值

表 3 对应差数列<sup>1)</sup>

差 式	序 号							min K	max K
	1	2	3	4	5	6	7		
$ x_6^{(1)}(K) - x_1^{(0)}(K) $	0.065	0.501	0.286	0.842	0.183	0.126	0.429	0.065	0.842
	0.078	0.037	0.255	0.517	0.038	0.468	1	0.037	1
$ x_6^{(1)}(K) - x_2^{(0)}(K) $	0.143	0.363	0.096	0.531	0.107	0.619	0.571	0.096	0.619
	1	0.399	0.554	0.144	0.748	0.785	1	0.144	1
$ x_6^{(1)}(K) - x_3^{(0)}(K) $	0.143	0.173	0.157	0.142	0	0.520	0.402	0	0.520
	0	0.291	0.126	0.183	0.145	0.074	0.169	0	0.291

1) 每组数据中, 上行数字为去除率参考数列, 下行为产气率参考数列

$$\min_i \min_K |x_6^{(2)}(K) - x_1^{(0)}(K)| = 0$$

$$\max_i \max_K |x_6^{(2)}(K) - x_1^{(0)}(K)| = 1$$

用公式(3)计算关联系数, 式中分辨系数取  $\rho = 0.5$ , 去除率参考数列和产气率参考数列的计算结果分别列于表 4。

表 4 关联系数<sup>1)</sup>

	序 号							$r_i$
	1	2	3	4	5	6	7	
$\xi_1$	0.866	0.457	0.595	0.333	0.697	0.770	0.495	0.602
	0.865	0.931	0.662	0.492	0.929	0.517	0.333	
$\xi_2$	0.746	0.537	0.814	0.442	0.797	0.405	0.424	0.592
	0.333	0.556	0.474	0.776	0.401	0.389	0.333	
$\xi_3$	0.746	0.709	0.728	0.748	1	0.447	0.512	0.699
	1	0.632	0.799	0.732	0.775	0.871	0.747	

1) 3 组数据中, 上行为去除率参考数列, 下行为产气率参考数列

用公式(4)不难求出  $r_i$ , 其结果列于表 4 的最右列。

由表 4 可以看出:  $r_3 > r_1 > r_2$ , 即对于 COD 去

除率而言, 影响因素的重要性顺序为: 负荷率、进水 COD 浓度、HRT。

同样, 由表 4 可以看出:  $r_3 > r_1 > r_2$ , 即对于产气率而言, 影响因素的重要性顺序为: 负荷率、进水 COD 浓度、HRT。

由于从表 4 反映的因素重要性顺序完全一致, 因此对于厌氧流化床处理有机废水而言, 所考虑的 3 个因素的重要性顺序为: 负荷率、进水 COD 浓度、HRT。

### 3 讨论

由上所述, 负荷率对厌氧流化床的效率影响最为显著, 灰色系统分析得出的这一结论从工艺上讲是不难理解的。众所周知, 反应器的容积负荷率为:

$$N_v = \frac{Qc}{V} = \frac{c}{HRT} \quad (5)$$

式中,  $N_v$  为容积负荷率;  $Q$  为进水流量;  $c$  为进水 COD 浓度; HRT 为水力停留时间。

因此,负荷率是综合反映进水浓度和水力停留时间影响的因素,它决定着供给反应器内微生物的食料量。显然,一项总因素的作用必然会大于 2 项分因素的作用,因而无论对 COD 去除率,还是对产气率,它都是最重要的。

上述分析得出的进水 COD 浓度的影响大于 HRT 的结论,从反应器中有机物的分解过程来看也是不难理解的。从理论上讲,在反应器中应当存在一个最小 HRT 值。在生物膜法中,有机物的分解过程是有机物首先从主体液体传递入生物膜,然后在生物膜内被微生物所降解。显然这里存在 2 个时段:一是有机物向生物膜内传递所需的时间,它主要取决于传质速率;二是生物膜内微生物降解传入的有机物所需的时间,它主要取决于降解速率(反应速率)。只要废水在反应器中的实际 HRT 大于这 2 个时段中的较长者,HRT 的影响就不会很重要。微生物降解有机物属生物酶催化反应,酶催化反应速度比非催化反应速度高  $10^8$ — $10^{20}$  倍,比其它催化反应速度高  $10^7$ — $10^{14}$  倍<sup>[3]</sup>。所以只要微生物生长正常,降解速度是相当快的,也就是只要有机物传入生物膜中便可及时得到降解。而传质速度主要取决于主体液体的有机浓度、生物膜厚度以及反应器中的混合搅拌程度。在生物流化床中,只要膜厚小于

0.15mm,膜厚对有机物传递的阻力可以忽略<sup>[4]</sup>。本文所引试验数据的生物膜厚为 92 $\mu$ m,因此传质速率主要取决于主体液体的有机物浓度,而在一般二级处理所要求的废水排放浓度条件下(如 COD100mg/L),传质速率可以保证较快。综上所述,废水在反应器中的 HRT 对有机物去除率的影响比进水 COD 浓度,就显得不那么重要了。

#### 4 结 论

(1)用灰色系统关联度方法分析厌氧反应器处理有机废水的效率影响因素,比其它分析方法简单,试验数据可以较少但其结果可靠。

(2)本文以厌氧流化床为例进行了计算得出:厌氧流化床在最适温度范围内处理有机废水时,影响其效率(COD 去除率和产气率)的因素的重要性顺序为:负荷率、进水 COD 浓度、HRT。因此,设计和运行中首要应控制负荷率。

#### 参 考 文 献

- 1 邓聚龙. 灰色控制系统. 武汉:华中工学院出版社,1985:348—374
- 2 龙腾锐等. 中国给水排水. 1991,7(1):16
- 3 沈同等. 生物化学. 北京:高等教育出版社,1982:222
- 4 Yeun C Wu & Smith E D. Fixed-Film Biological Processes for Wastewater Treatment. Noyes Data Corporation, 1983:44

(上接第 46 页)砷烟气洗涤水进行了实验。首先向废水中按其含砷量的 2.0 倍加入漂白粉,将其中的 3 价砷氧化成 5 价砷,而后用石灰乳调节 pH 值至 10 左右,再按 Fe/As=2.5 加入硫酸亚铁除砷。

实验结果表明,对于含砷 782.5mg/L、pH=1 的酸性废水,采用氧化-铁盐中和法处理,经一级处理就可使废水中的砷含量降至 8mg/L 以下,二级处理后废水即可达标排放。

#### 5 结 论

理论分析和实验研究结果表明,在净化处理含砷废水的过程中,添加适宜氧化剂——漂白粉将其中的 3 价砷氧化成 5 价砷十分必要。这样做可以使现有含砷废水处理设施的除砷效果有较大幅度的提高。

#### 参 考 文 献

- 1 吴沈春. 环境与健康. 北京:人民卫生出版社,1982:338—343
- 2 南京化学工业公司研究院. 化工环保. 1981,1(4):26
- 3 赵宗升. 中国环境科学. 1988,8(6):63
- 4 段群章. 分析化学. 1985,13(2):127
- 5 钟竹前. 有色冶炼. 1982,8(5):28

An anomalous phenomenon was discussed, in which it was found from a calculation of the allowable discharge levels of water pollutants in the Huainan reaches of the Huaihe River that there was a large flow of water with a small allowable capacity of pollutant discharge. A quantitative analysis for the causes of this problem was made, based on the mechanism of forming the capacity of the river to receive pollutants and on the equations for calculating the discharge of pollutants. Finally, the reaches of the Huaihe River in Huainan city were taken as an example to preliminarily study how can identify and determine the design flow of a river.

**Key words:** allowable discharge level, water pollutants, design flow.

**Grey Systems Analysis of the Factors Affecting the Efficiency of Wastewater Treatment in Anaerobic Reactors.** Guo Jingsong, Long Tengrui (Dept. of Urban Construction, Chongqing Institute of Architecture and Engineering, Chongqing 630045); *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(4), 1994, pp. 62—65

The methods for grey systems analysis have been applied to studying the significance of each of major factors that would affect the efficiency of anaerobic reactors in treating wastewater. The data from the experiments in an anaerobic fluidized bed reactor were taken as an example to make a calculation analysis, resulting in a conclusion which was consistent with that based on a theoretical analysis. The results show that the use of a grey systems analysis for the factors affecting the efficiency of a biological reactor has the advantage of requiring relatively less data, as compared with other methods.

**Key words:** grey system, interference analysis, efficiency of wastewater treatment, anaerobic reactor, fluidized bed.

**Accelerated Simplex Algorithm to Determine the Longitudinal Dispersion Coefficient in a River by Tracer Test.** Zhang Jiangshan (Institute of Environmental Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007); *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(4), 1994, pp. 66—68

The accelerated simplex algorithm has been used to calculate the longitudinal dispersion coefficient in a river, as an example for which the Ynagkou reaches of the Futunxi River, a mainstream of the Minjiang River in Fujian province, was found to have a longitudinal dispersion coefficient  $D_2$  of  $2.62 \text{ m}^2/\text{s}$ . The results show that the accelerated simplex algorithm was more effective to be used for evaluating the parameters for a nonlinear model than the nonlinear approach algorithm. This was simply because the accelerated simplex algorithm had a process of optimization in which it was not necessary to calculate the partial derivative of the goal function and was not limited by the complexity of a model so that it was easy to be calculated and widely applicable. This algorithm could be widely used to fit

environmental and ecological models and to make parameters evaluation.

**Key words:** river water quality model, parameter estimation, longitudinal dispersion coefficient, accelerated simplex algorithm.

**Effects of Fumigation with sulfur Dioxide, Nitrogen Dioxide, Ozone and Mixtures Thereof on Ethylene Emissions from Rice.** Yu Fei et al. (Nanjing Institute of Environmental Sciences, NEPA, Nanjing 210042); *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(4), 1993, pp. 69—71

A study was carried out on the effects of fumigation with sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), ozone ( $\text{O}_3$ ) and mixtures thereof on the release of ethylene from rice plant being fumigated. It was found that the emission of ethylene as an internal hormone of plant increases when the crop rice is fumigated with  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , or mixtures thereof. This can be considered as an indicator for the level of environmental pollution. If the  $\text{O}_3$  level is constant, the emission of ethylene from rice is directly proportional to the levels of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  in fumigating gases, where  $\text{O}_3 + \text{SO}_2$  have a greater effect on the emission of ethylene from rice than  $\text{O}_3 + \text{NO}_2$ . If the total level of both  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  altogether is kept constant, an increased level of  $\text{SO}_2$  can lead to a higher emission of ethylene than an increased level of  $\text{NO}_2$ . A fumigation with  $\text{NO}_2$  at a concentration of 4 ppm for 2 hours has caused the leaves of rice to have bleached or yellow spots when ethylene and ethane are released at 7.70 and 2.30  $\text{nl/g} \cdot \text{F} \cdot \text{W} \cdot \text{h}$ , respectively.

**Key words:** rice, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, fumigation, ethylene, ethane, release.

**Watercolumn Barometer without Mercury Contamination.** Zhang Xiong (Dept. of Physics, Yunnan Normal University, Kunming 650092); *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(4), 1994, pp. 72—74

A miniaturized (1.2 m long) watercolumn barometer has been developed to solve the environmental problem of mercury pollution resulted from the production and operation of a mercury column barometer. The working principles, use methods and measurement errors of the watercolumn barometer were discussed and some aspects of its application were briefly described. This barometer can work well at 0—3 km above sea level and at an ambient temperature in the range of 6—40°C. The results from its measurement have a standard error of less than  $\pm 0.9 \text{ mmHg}$  and it can detect a change in atmospheric pressure of  $\pm 0.1 \text{ mmHg}$ . This newly developed barometer is applicable to measure the atmospheric pressure in a room where there will be a less change in ambient temperature. A conventional watercolumn barometer is very difficult to be used to measure the atmospheric pressure because the pressure of saturated water vapor varies largely with a change in room temperature. The use of this new barometer can also solve this problem.