

# 废水生物处理数学模式

顾夏声 编著

清华大学出版社

# 废水生物处理数学模式

夏声

清华大学出版社

1982

## 内 容 简 介

本书扼要地介绍了废水生物处理过程中的数学模式，主要内容包括：曝气与氧的转移、生物增长动力学及其在活性污泥法和生物膜法中的应用、好氧生物处理系统最优化设计与运行的考虑以及反应动力学在厌氧生物处理中的应用。

本书可作为环境工程和给水排水工程专业研究生学习废水生物处理课程的教材，也可供从事废水处理工程和环境工程专业的技术人员参考。

### ● 废水生物处理数学模式

顾夏声 编著

清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

☆

开本：787×1092 1/32 印张：6 1/2 字数：157千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数 1—12000

统一书号：15235·34 定价：0.85元

# 目 录

一、废水水质有机污染指标	1
(一) 概述	1
(二) 理论需氧量	2
(三) 化学需氧量	2
(四) 生化需氧量	3
(五) 总需氧量	17
(六) 理论有机碳	17
(七) 总有机碳	18
(八) 化学需氧量与生化需氧量比较	18
(九) 生化需氧量和化学需氧量之间的相互关系	19
(十) <i>BOD</i> 、 <i>COD</i> 和其它一些指标的相互关系	21
(十一) 工业废水调研数据的统计分析	23
二、气体的转移	26
(一) 转移理论	26
(二) 水中氧的转移	32
(三) 活性污泥法曝气池混合液中氧的转移	38
三、生物处理(好氧生物处理)动力学	41
(一) 基质降解和生物增长动力学	41
(二) 基质降解与生物增长量之间的关系	77
(三) 基质降解与需氧的关系	80
(四) 营养要求	83
(五) 温度的影响	84

四、生物处理系统污泥最佳沉降条件	85
五、活性污泥法	89
(一) 传统活性污泥法	90
(二) 完全混合活性污泥法	91
(三) 多点进水法	106
(四) 生物吸附(吸附再生或接触稳定)法	113
(五) 延时曝气法	118
(六) 纯氧曝气法	122
(七) 深层曝气(塔式曝气)法	124
(八) 最优化运行	125
六、曝气塘	138
七、生物膜法	147
(一) 生物滤池	147
(二) 生物转盘	153
八、厌氧生物处理	161
(一) 概述	161
(二) 影响厌氧处理运行的主要因素	164
(三) 厌氧生物处理动力学	166
(四) 高浓度有机废水的厌氧处理	171
(五) 污泥的厌氧处理(污泥消化)	172
(六) 污泥的好氧处理(污泥好氧消化)	174
九、水体的生化自净	185
(一) 水体的自净	185
(二) 生物氧化或生化自净	186
主要参考书刊	201

# 一、废水水质有机污染指标

## (一) 概述

有毒物质、有机物质、悬浮物、 $pH$  值、颜色等都是表示水质污染情况的重要指标。由于生物处理法主要是用来除去废水中胶体的和溶解的有机物质，所以这里着重讨论水质的有机污染指标。

有机物的组成比较复杂，要想分别测定各种有机物的含量比较困难。一般采用一些综合指标来表示有机物的浓度。如果水中的有机物含有毒性，那时，就需要分别测定这些有毒物质的数量。

表示有机物的综合指标可分两大类：

### 1. 以氧 ( $O_2$ ) 表示的指标

(1) 理论需氧量 (ThOD)

(2) 化学需氧量 (COD) [重铬酸盐氧化法和高锰酸盐氧化法]

(3) 生化需氧量 (BOD)

(4) 总需氧量 (TOD)

### 2. 以碳 (C) 表示的指标

(1) 理论有机碳 (ThOC)

(2) 总有机碳 (TOC)

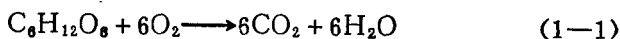
单位常以毫克/升表示。

为什么要测定水中的有机物？有机物进入水体后，将在微

生物的作用下进行氧化分解，使水中的溶解氧逐渐减少。当水中有机物较多，氧化作用进行得太快而水体不能及时从大气中吸收充足的氧来补充消耗时，水中的氧就可能降得很低，例如，低于 3—4 毫克/升，就会影响鱼类的生活。当水中溶解氧耗尽后，有机物便开始腐化，发生臭气，影响环境卫生。有机物又是很多微生物（其中包括可引起传染疾病的细菌）生长繁殖的良好食料，有毒的有机物更将直接危害人体健康和动植物的生长。因此，废水中有机物的浓度是一个十分重要的水质指标。

## (二) 理论需氧量

理论需氧量是根据化学方程式计算求得的有机物全部氧化所需要的氧量。例如，含有 300 毫克/升葡萄糖溶液的理论需氧量可计算如下：



$$180 \quad 6 \times 32$$

$$\frac{180}{300} = \frac{6 \times 32}{\text{ThOD}}$$

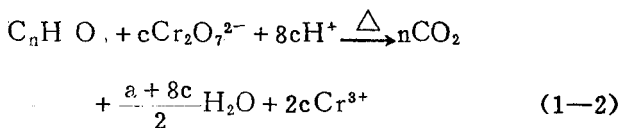
$$\therefore \text{ThOD} = 320 \text{ 毫克/升 (以氧表示)}$$

欲计算废水的理论需氧量，必须对废水进行全面的化学分析。故在实用上很少应用。

## (三) 化学需氧量

化学需氧量或耗氧量是指在一定严格条件下，水中有机物与强氧化剂（如重铬酸钾、高锰酸钾等）作用所消耗的氧量。当用重铬酸钾作为氧化剂时，水中有机物几乎可以全部被氧化，这时所测得的耗氧量即称为化学需氧量（或重铬酸钾耗氧量），以 *COD* 表示。化学需氧量可以比较精确地测定有机物的总

量，但测定手续比较复杂。用高锰酸钾作为氧化剂所测得的耗氧量常即称耗氧量，以  $OC$  表示。此法的优点是比较快速，但不能代表有机物的全部含量。一般的情况是：不含氮有机物易被高锰酸钾氧化，而含氮有机物就较难分解。在美国的水和废水标准检验法，简称“标准法”中于 1965 年后此指标即为重铬酸钾耗氧量所替代。所以目前所称的化学需氧量 ( $COD$ ) 都指利用重铬酸钾测得的耗氧量。下式示重铬酸钾与有机物的化学反应：



式中  $C_nH_aO_b$  代表有机物， $c = \frac{2}{3}n + \frac{a}{6} - \frac{b}{3}$ 。

本法可将大部分的有机物氧化，但直链烃、芳香烃、苯等化合物不能被氧化；若加硫酸银作催化剂，则直链化合物可被氧化，但对芳香烃类仍无效。

必须注意，无机性还原物质也包括在化学需氧量测定结果中，但化学需氧量不包括硝化所需的氧量。

#### (四) 生化需氧量

##### 1. 定义

在有氧的情况下，由于微生物（主要是细菌）的活动，可降解有机物稳定化所需的氧量，称为生化需氧量，常以  $BOD$  表示。图 1-1 (a) 示有机物（基质）的氧化和微生物细胞合成的关系。在图中可以看出，微生物通过自身的生命活动——氧化、还原、合成等过程，把一部分被吸收的有机物氧化成简单的无机物（如  $CO_2$  等），并放出其生长、活动所需要的能量，



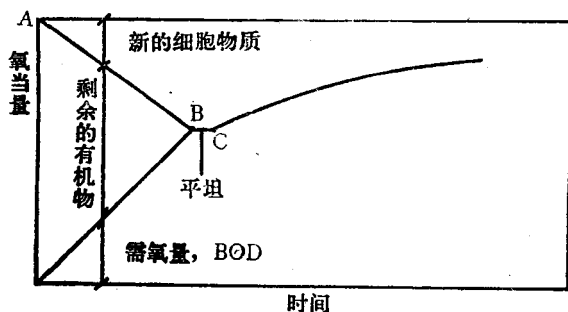
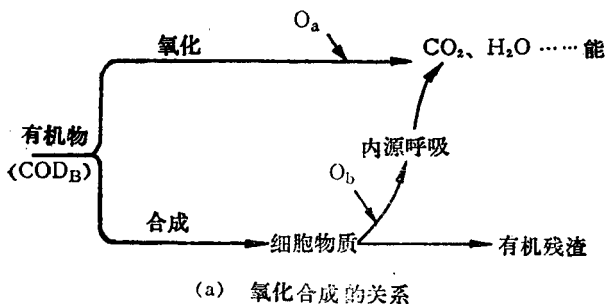


图 1-1 有机物的生物氧化 ( $COD_B$  表示有机物的可生物降解部分)

- A—有机物总量 (以氧表示) ;
- B—在 B 点全部有机物转变成细胞和最终产物;
- C—从 C 点开始内源呼吸成为供应能量的唯一方式, 由于酶系统的转换出现了平坦或落后期。

而把另一部分有机物以及有机物的某些分解产物转化为生物体所必需的营养物质, 组成新的细胞物质。  $O_a$  就是微生物氧化被吸收的有机物的一部分所消耗的氧量。在微生物的生长过程中, 除吸收入菌体内的一部分有机物被氧化, 放出能量外, 组成微生物的细胞物质也在进行氧化, 同时放出能量。这种细胞

物质的氧化称为内源呼吸<sup>①</sup>。  $O_b$  表示这部分氧化所消耗的氧量。  $O_a$  和  $O_b$  之和即表示所产生的生化需氧量。

从图 1-1 (b) 也可看出, 总的生化需氧量等于到达平坦时的  $BOD$  ( $BOD_{\text{平}}$ ) 加上生成的细胞氧化所需的氧量。

生化需氧量测定是一种生物学的测定方法, 能在尽可能和天然条件相似的情况下, 确定有机生物利用废料中的有机物所消耗的氧量, 从而间接表示出有机物的含量。所以在 1933 年即被列入美国“标准法”, 并作为水污染控制工作的最广泛采用的测定方法之一。

在有氧的情况下, 废水中有机物的分解一般是分两个阶段进行的 (图 1-2)。

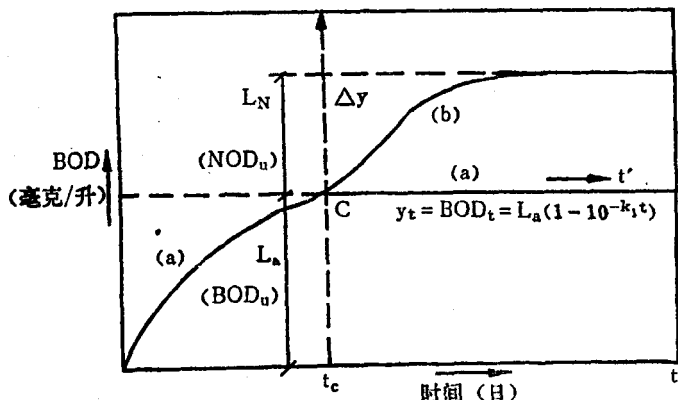


图 1-2 BOD 曲线

- (a) 碳化需氧曲线 (在硝化被抑制的条件下测得)
- (b) 碳化加硝化需氧曲线

第一阶段亦称碳氧化阶段, 主要是不含氮有机物的氧化,

① 在混合培养物 (如活性污泥) 中, 内源呼吸的概念扩大了, 它包括了微生物之间的代谢 (例如原生动物以细菌为食料)。

但也包括含氮有机物的氨化以及氨化后生成的不含氮有机物的继续氧化，这也就是有机物中碳氧化为二氧化碳的过程。碳氧化阶段所消耗的氧称为碳化需氧量。总的碳化需氧量常称为第一阶段生化需氧量（因为碳氧化总是首先发生），也称完全或总的生化需氧量，常以  $L_a$  或  $BOD_u$  表示。

在污染水中一般含有一些硝化细菌，因此在上述生物氧化过程中也会发生硝化作用，将水中原有的和含氮有机物氨化分解出来的氨氧化，最终转化成硝酸。这个过程也需要氧。所以实际测定耗氧结果所得的曲线是  $b$ ，即碳化加硝化。对于一般的污染水（如生活污水或被生活污水污染的河水），硝化过程在大约 5—7 日甚至 10 日以后才能显著展开，因而生物氧化的开始阶段觉察不出有硝化的干扰。由于硝化作用所消耗的氧量称为硝化需氧量或第二阶段生化需氧量，可以  $L_N$  或  $NOD_u$  表示。因为氨已经是无机物质，所以作为有机物的指标只采用碳化生化需氧量，不包括硝化所需的氧量。

生化需氧量的反应速度在很大程度上取决于微生物的种类、数目及温度，而在测定过程中溶解氧又是逐渐消耗的。所以测定生化需氧量就须保持一定的温度，同时也需要规定一定的时间。通常是在  $20^{\circ}\text{C}$  温度下培养 5 天检查溶解氧的损失，用  $BOD_5$  表示，单位以  $\text{O}_2$  毫克/升计。测定温度用  $20^{\circ}\text{C}$  是因为这个温度比较接近温带地区夏季河水的最高平均温度。在  $20^{\circ}\text{C}$  温度下，一般有机物的全部分解需时百日以上。这就是说，如欲求完全的生化需氧量需时 100 日，这样在实用上是不可能采用的。实际观察表明，在 20 日以后第一阶段生化反应已进行得非常缓慢，故  $20^{\circ}\text{C}$  20 日的生化需氧量 ( $BOD_{20}$ ) 可作为第一阶段或完全生化需氧量 ( $L_a$ )。求定 20 日的生化需氧量仍嫌时过长，而且又考虑到，好氧分解速度一般在开始

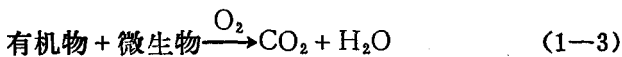
时最快，在  $20^{\circ}\text{C}$  时，生活污水和多种工业废水的  $BOD_5$  已约为其  $L_0$  的 70—80% 左右，此外，硝化过程在 5—7 日以后才有显著影响，故现常以  $20^{\circ}\text{C}$  5 日生化需氧量作为衡量污染水有机浓度的标准（最初采用 5 天作为标准时间的原因，实际上是由于  $BOD$  测定起源于英国，而英国大多河川的水流从其上游流至海口最长不超过 5 天；当时测定温度采用  $18.3^{\circ}\text{C}$ ，因为这是英国河水夏季的最高温度）。

对于含有硝化细菌较多的废水，例如废水生物处理构筑物的出水，在 5 天培养时间内可能就会消耗较多的氧以致大大影响碳化需氧量的测定。在这种情况下，可以在测定  $BOD$  时投加化学药剂以抑制硝化作用。据报道，某生物处理厂出水未加硝化抑制剂所测得的  $BOD_5$ ，竟约三倍于加抑制剂后所测得的  $BOD_5$ 。

## 2. 反应动力学

### (1) 第一阶段反应动力学

生化需氧量反应动力学的研究表明第一阶段  $BOD$  的变化是十分接近于单分子反应的，而实用上可认为具有一级反应的性质。这是因为有机物为微生物分解的作用虽可被认为是双分子反应 [见式 (1—3)]，但在这个反应中当反应进行到一定时间细菌非但不减少而且往往大量增加，一旦至细菌数目无多大变化时，就有机物来说，它的分解就具有一级反应的性质，即反应速度与任何时剩余的有机物量成正比（如果存在着足够的氧的话）。



因此，

$$\frac{d(L_0 - L)}{dt} = K_1 L \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \frac{dL}{dt} = -K_1' L \quad (1-5)$$

式中  $L_0$ ——第一阶段 BOD ( $BOD_0$ ) ;  
 $L$ ——任何时  $t$  存有的 BOD ;  
 $K_1'$ ——耗氧常数。

$$\text{积分,} \quad \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = -K_1' \int_0^t dt$$

$$\therefore \ln \frac{L}{L_0} = -K_1' t$$

$$\text{或} \quad \frac{L}{L_0} = e^{-K_1' t} \quad (1-6)$$

$$\lg \frac{L}{L_0} = -K_1 t \quad (K_1 = 0.434 K_1')$$

$$\text{或} \quad \frac{L}{L_0} = 10^{-K_1 t} \quad (1-7)$$

如  $y_t$  或  $BOD_t$  为  $t$  时日内所吸收的氧量或所满足的 BOD, 则

$$\begin{aligned} y_t = BOD_t &= L_0(1 - e^{-K_1' t}) \\ &= L_0(1 - 10^{-K_1 t}) \end{aligned} \quad (1-8)$$

多年来当水温为  $20^\circ\text{C}$  时常采用  $K_1 = 0.1 \text{ 日}^{-1}$ 。这是英、美等国对污染河水实测而得的平均值。自从在 BOD 测定时采用了所谓标准稀释水和对各种不同废水进行了试验研究, 发现  $K_1$  值随水质的变化而是有相当大的差异的, 一般变化在  $0.05 - 0.3 \text{ 日}^{-1}$  之间, 而生物处理出水的  $K_1$  值则又小于进水的  $K_1$ ,

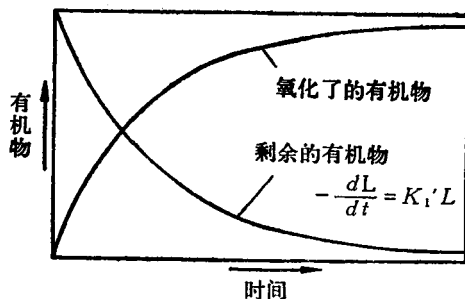


图 1—3 污染水生物氧化过程中有机物的变化

常在  $0.05-0.1 \text{ 日}^{-1}$  的范围内。图 1—4 示出  $K_1$  对  $BOD$  的影响 ( $L_0$  一定)。从图中可以看出，由于  $K_1$  值不同， $BOD_5$  与  $L_0$  的比值也不相同。由此可见，如果利用式 (1—8) 从  $BOD_5$  求  $L_0$ ，必须先求得正确的  $K_1$  值。

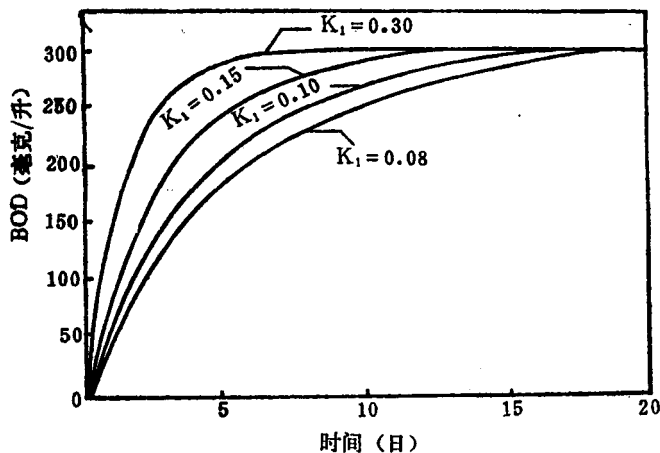


图 1—4  $K_1$  对  $BOD$  的影响 ( $L_0$  一定)

图 1—5 示出温度对  $BOD$  的影响。

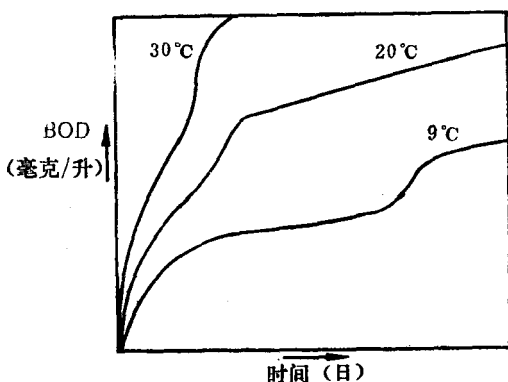


图 1-5 温度对 BOD 的影响

$L_0$  和  $K_1$  的确定：耗氧常数  $K_1$  和第一阶段生化需氧量  $L_0$  的确定有好几种方法，但均需用到生化需氧量的测定。下面介绍一种使用比较简便，但也足够准确的泰姆斯(Thomas)图解法。

在  $y_t = L_0(1 - e^{-K_1't})$  中，

$$1 - e^{-K_1't} = K_1't \left[ 1 - \frac{K_1't}{2} + \frac{(K_1't)^2}{6} - \frac{(K_1't)^3}{24} + \dots \right] \quad (1-9)$$

$$\text{而 } K_1't \left( 1 + \frac{K_1't}{6} \right)^{-3} = K_1't \left[ 1 - \frac{K_1't}{2} + \frac{(K_1't)^2}{6} - \frac{(K_1't)^3}{21.6} + \dots \right] \quad (1-10)$$

上两式甚相似，故  $y_t$  可写成：

$$y_t = L_a K_1' t \left( 1 + \frac{K_1' t}{6} \right)^{-3} \quad (1-11)$$

$$\text{或} \left( \frac{t}{y_t} \right)^{1/3} = (K_1' L_a)^{-1/3} + \left( \frac{K_1'^{2/3}}{6 L_a^{1/3}} \right) t \quad (1-12)$$

上式是一直线方程，根据不同日子的 BOD 测定结果，并作图（如图 1-6），即可求得  $K_1$  及  $L_a$  值。在图 1-6

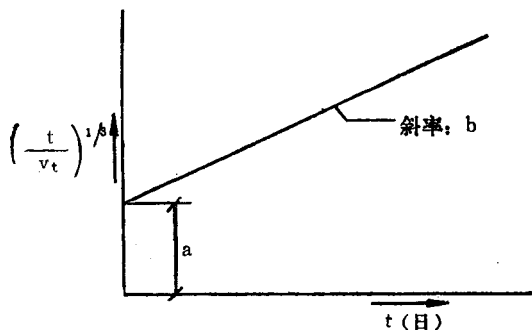


图 1-6 图解法求  $K_1$  及  $L_a$

中，可以看出，

$$a = (K_1' L_a)^{-1/3} \quad (1-13)$$

$$b = \frac{K_1'^{2/3}}{6 L_a^{1/3}} \quad (1-14)$$

$$\therefore K_1' = \frac{6b}{a} \quad (1-15)$$

$$K_1 = 0.434 K_1' = 2.61 \frac{b}{a} \quad (1-16)$$

$$\therefore L_a = \frac{1}{K_1' a^3} \quad (1-17)$$



$$\therefore L_0 = \frac{1}{2.3K_1 a^3} \quad (1-18)$$

对于一般的有机废水， $t$  如限于 10 天以内，误差并不大，但如废水中含硝化细菌较多，则应采取措施，避免干扰。

所求得的  $K_1$  和  $L_0$  值相应于所培养的温度。

在研究废水分解所需氧量进度的变化时，有时会发现在开始时耗氧速度不很正常，或偏低或偏高。造成这种不正常的原因很多，水样中缺乏适当的微生物是起始耗氧速度降低的原因之一，其它如有机物部分厌氧分解或者还原性物质的渗入等等均将影响起始的耗氧速度，此外如水中含有有毒物质存在，则甚至可能无法测出  $BOD$ 。图 1-7 即表示这一类的耗氧曲线。

$K_1$  与温度的关系： $K_1$  与温度的关系可根据阿累尼乌斯 (Arrhenius) 经验公式推导求得。

阿累尼乌斯经验公式：

$$K = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1-19)$$

或 
$$\ln K = -\frac{E}{RT} + \ln A \quad (1-20)$$

式中  $K$ ——反应速度常数 (这里就是耗氧常数)；

$E$ ——活化能，对于废水，一般为 2000—20000 卡/克分子；

$T$ ——绝对温度 ( $^{\circ}K$ )；

$R$ ——气体常数 (1.99 卡/ $^{\circ}K$ -克分子)；

$A$ ——频率因子 (即反应分子间的碰撞率)；

$E$  和  $A$  一般可视作常数。

将式 (1-20) 微分，得：