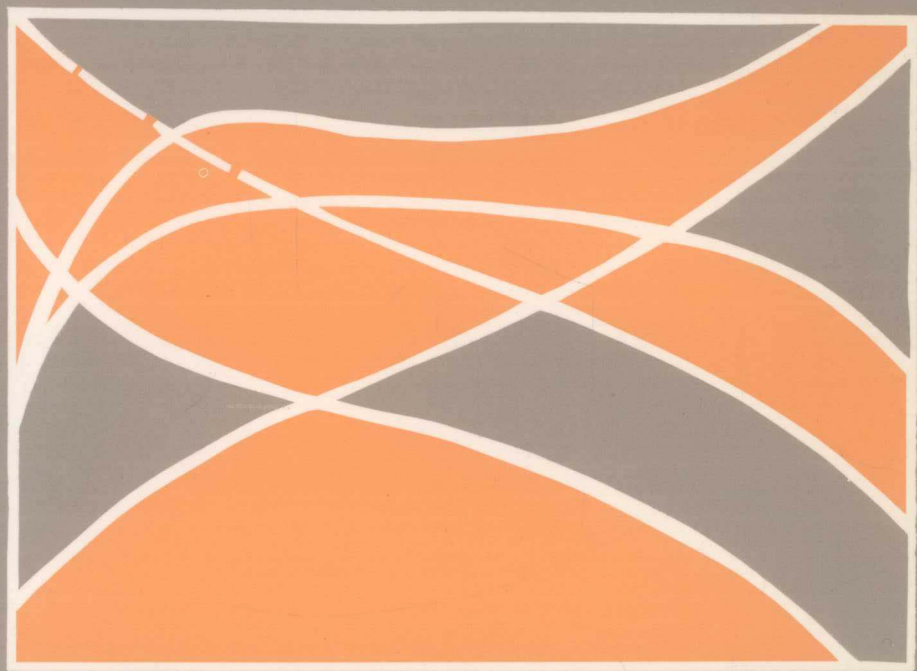


# 廢水生物處理數學模式

編著者 顧夏聲



曉園出版社

# 廢水生物處理數學模式

編著者 顧 夏 聲

曉 園 出 版 社

廢水生物處理數學模式 / 顧夏聲編著 . -- 初版 . -- 臺  
北市 : 曉園 , 1990  
203面 ; 15.6 × 22.4 公分  
參考書目 : 面 ,  
ISBN 957-12-0200-2 ( 平裝 )  
I. 污水處理  
445.48



## 版權所有 • 翻印必究

初 版

1992年12月第二次印刷發行

# 廢水生物處理數學模式

定價 : 新臺幣

幣 57 元

編 著 者 : 顧 夏 聲

發 行 人 : 黃 旭 政

發 行 所 : 曉 園 出 版 社 有 限 公 司

臺 北 市 青 田 街 7 巷 5 號

電 話 : (02) 394-9931 (六線)

郵 撥 : 1 0 7 5 7 3 4 - 4 號

F A X : 3 4 1 7 9 3 1

門 市 部 : 臺 北 市 新 生 南 路 三 段 96 號 之 三

電 話 : (02) 3637012 • 3627375

F A X : 3 6 2 7 3 7 5

印 刷 所 : 復 大 印 刷 廠

臺 北 市 武 成 街 36 巷 16 弄 15 號

出 版 登 記 : 局 版 臺 業 字 第 1244 號

著 作 執 照 : 臺 內 著 字 第 號

本書經清華大學出版社授權在台印行

ISBN 957-12-0200-2

# 內 容 簡 介

本書扼要地介紹了廢水生物處理過程中的數學模式，主要內容包括：曝氣與氧的轉移、生物增長動力學及其在活性污泥法和生物膜法中的應用、好氧生物處理系統最優化設計與運行的考慮以及反應動力學在厭氧生物處理中的應用。

本書可作為環境工程和給水排水工程專業研究生學習廢水生物處理課程的教材，也可供從事廢水處理工程和環境工程專業的技術人員參考。

# 目 錄

第一章 廢水水質有機污染指標 .....	1
(一) 概 述 .....	1
(二) 理論需氧量 .....	2
(三) 化學需氧量 .....	2
(四) 生化需氧量 .....	3
(五) 總需氧量 .....	16
(六) 理論有機碳 .....	16
(七) 總有機碳 .....	17
(八) 化學需氧量與生化需氧量的比較 .....	18
(九) 生化需氧量和化學需氧量之間的相互關係 .....	18
(十) <i>BOD</i> 、 <i>COD</i> 和其它一些指標的相互關係 .....	20
(十一) 工業廢水調研數據的統計分析 .....	22
第二章 氣體的轉移 .....	25
(一) 轉移理論 .....	25
(二) 水中氧的轉移 .....	31
(三) 活性污泥法曝氣池混合液中氧的轉移 .....	38
第三章 生物處理 ( 好氧生物處理 ) 動力學 .....	41
(一) 基質降解和生物增長動力學 .....	41
(二) 基質降解與生物增長量之間的關係 .....	78
(三) 基質降解與需氧的關係 .....	81
(四) 營養要求 .....	84
(五) 溫度的影響 .....	85

第四章	生物處理系統污泥最佳沉降條件	87
第五章	活性污泥法	91
	(一) 傳統活性污泥法	93
	(二) 完全混合活性污泥法	93
	(三) 多點進水法	108
	(四) 生物吸附(吸附再生或接觸穩定)法	116
	(五) 延時曝氣法	121
	(六) 純氧曝氣法	125
	(七) 深層曝氣(塔式曝氣)法	127
	(八) 最優化運行	128
第六章	曝氣塘	141
第七章	生物膜法	151
	(一) 生物濾池	151
	(二) 生物轉盤	157
第八章	厭氧生物處理	165
	(一) 概 述	165
	(二) 影響厭氧處理運行的主要因素	167
	(三) 厭氧生物處理動力學	170
	(四) 高濃度有機廢水的厭氧處理	175
	(五) 污泥的厭氧處理(污泥消化)	176
	(六) 污泥的好氧處理(污泥好氧消化)	178
第九章	水體的生化自淨	189
	(一) 水體的自淨	189
	(二) 生物氧化或生化自淨	190
	主要參考書刊	205

# 第一章

## 廢水水質有機污染指標

### (一) 概 述

有毒物質、有機物質、懸浮物、pH 值、顏色等都是表示水質污染情況的重要指標。由於生物處理法主要是用來除去廢水中膠體的和溶解的有機物質，所以這裡着重討論水質的有機污染指標。

有機物的組成比較複雜，要想分別測定各種有機物的含量比較困難。一般採用一些綜合指標來表示有機物的濃度。如果水中的有機物含有毒性，那時，就需要分別測定這些有毒物質的數量。

表示有機物的綜合指標可分兩大類：

#### 1. 以氧( $O_2$ )表示的指標

- (1) 理論需氧量 (ThOD)
- (2) 化學需氧量 (COD) [重鉻酸鹽氧化法和高錳酸鹽氧化法]
- (3) 生化需氧量 (BOD)
- (4) 總需氧量 (TOD)

#### 2. 以碳(C)表示的指標

- (1) 理論有機碳 (ThOC)
- (2) 總有機碳 (TOC)

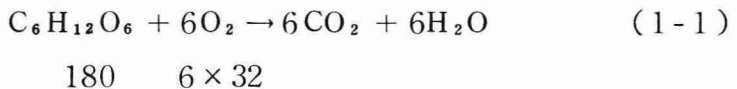
單位常以毫克 / 升表示。

爲什麼要測定水中的有機物？有機物進入水體後，將在微生物的作用下進行氧化分解，使水中的溶解氧逐漸減少。當水中有機物較多，氧化作用進行得太快而水體不能及時從大氣中吸收充足的氧來補充消耗時，水中的氧就可能降得很低，例如，低於 3 ~ 4 毫克 / 升，就

會影響魚類的生活。當水中溶解氧耗盡後，有機物便開始腐化，發生臭氣，影響環境衛生。有機物又是很多微生物（其中包括可引起傳染疾病的細菌）生長繁殖的良好食料，有毒的有機物更將直接危害人體健康和動植物的生長。因此，廢水中有機物的濃度是一個十分重要的水質指標。

### (二) 理論需氧量

理論需氧量是根據化學方程式計算求得的有機物全部氧化所需要的氧量。例如，含有 300 毫克 / 升葡萄糖溶液的理論需氧量可計算如下：



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

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

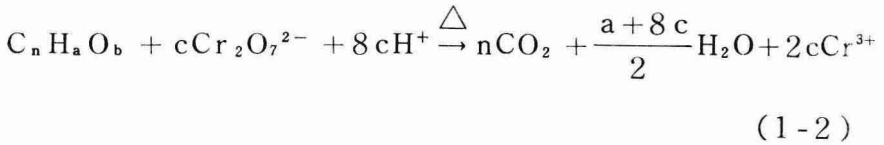
欲計算廢水的理論需氧量，必須對廢水進行全面的化學分析。故在實用上很少應用。

### (三) 化學需氧量

化學需氧量或耗氧量是指在一定嚴格條件下，水中有機物與強氧化劑（如重鉻酸鉀、高錳酸鉀等）作用所消耗的氧量。當用重鉻酸鉀作為氧化劑時，水中有機物幾乎可以全部被氧化，這時所測得的耗氧量即稱為化學需氧量（或重鉻酸鉀耗氧量），以 *COD* 表示。化學需氧量可以比較精確地測定有機物的總量，但測定手續比較複雜。用高錳酸鉀作為氧化劑所測得的耗氧量常即稱耗氧量，以 *OC* 表示。此法



的優點是比較快速，但不能代表有機物的全部含量。一般的情況是：不含氮有機物易被高錳酸鉀氧化，而含氮有機物就較難分解。在美國的水和廢水標準檢驗法，簡稱“標準法”中於1965年後此指標即為重鉻酸鉀耗氧量所替代。所以目前所稱的化學需氧量（*COD*）都指利用重鉻酸鉀測得的耗氧量。下式示重鉻酸鉀與有機物的化學反應：



式中  $C_n H_a O_b$  代表有機物， $c = \frac{2}{3}n + \frac{a}{6} - \frac{b}{3}$ 。

本法可將大部分的有機物氧化，但直鏈烴、芳香烴、苯等化合物不能被氧化；若加硫酸銀作催化劑，則直鏈化合物可被氧化，但對芳香烴類仍無效。

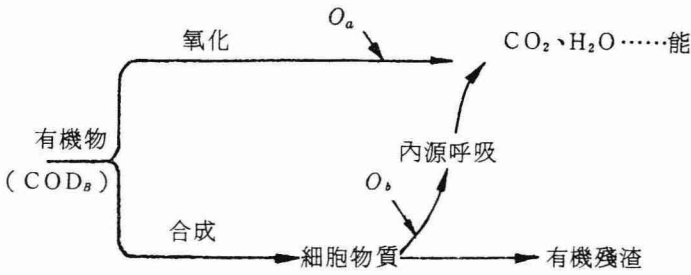
必須注意，無機性還原物質也包括在化學需氧量測定結果中，但化學需氧量不包括硝化所需的氧量。

## (四) 生化需氧量

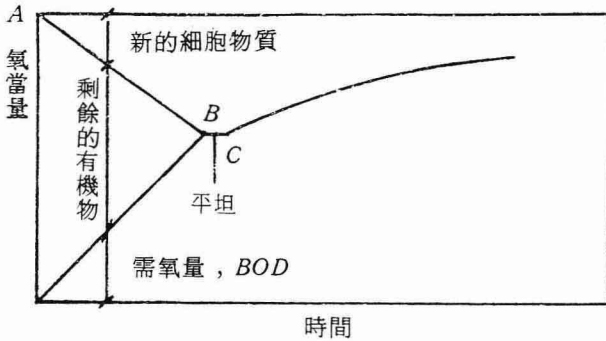
### 1. 定 義

在有氧的情況下，由於微生物（主要是細菌）的活動，可降解有機物穩定化所需的氧量，稱為生化需氧量，常以 *BOD* 表示。圖 1-1 (a) 示有機物（基質）的氧化和微生物細胞合成的關係。在圖中可以看出，微生物通過自身的生命活動——氧化、還原、合成等過程，把一部分被吸收的有機物氧化成簡單的無機物（如  $CO_2$  等），並放出其生長、活動所需要的能量，而把另一部分有機物以及有機物的某些分解產物轉化為生物體所必需的營養物質，組成新的細胞物質。 $O_0$  就是微

4 廢水生物處理數學模式



(a) 氧化合成的關係



(b) 有機物的生化轉換

圖 1-1 有機物的生物氧化 ( $COD_B$  表示有機物的可生物降解部分)

A—有機物總量 (以氧表示) ;

B—在 B 點全部有機物轉變成細胞和最終產物 ;

C—從 C 點開始內源呼吸成爲供應能量的唯一方式, 由於酶系統的轉換出現了平坦或落後期。

生物氧化被吸收的有機物的一部分所消耗的氧量。在微生物的生長過程中, 除吸收入菌體內的一部分有機物被氧化, 放出能量外, 組成微生物的細胞物質也在進行氧化, 同時放出能量。這種細胞物質的氧化稱爲內源呼吸<sup>①</sup>。 $O_b$  表示這部分氧化所消耗的氧量。 $O_a$  和  $O_b$  之和即

① 在混合培養物 (如活性污泥) 中, 內源呼吸的概念擴大了, 它包括了微生物之間的代謝 (例如原生動物以細菌爲食料)。

表示所產生的生化需氧量。

從圖1-1(b)也可看出，總的生化需氧量等於到達平坦時的 $BOD$  ( $BOD_{\text{平}}$ )加上生成的細胞氧化所需的氧量。

生化需氧量測定是一種生物學的測定方法，能在盡可能和天然條件相似的情況下，確定有機生物利用廢料中的有機物所消耗的氧量，從而間接表示出有機物的含量。所以在1933年即被列入美國“標準法”，並作為水污染控制工作的最廣泛採用的測定方法之一。

在有氧的情況下，廢水中有機物的分解一般是分兩個階段進行的(圖1-2)。

第一階段亦稱碳氧化階段，主要是不含氮有機物的氧化，但也包括含氮有機物的氨化以及氨化後生成的不含氮有機物的繼續氧化，這也就是有機物中碳氧化為二氧化碳的過程。碳氧化階段所消耗的氧稱為碳化需氧量。總的碳化需氧量常稱為第一階段生化需氧量(因為碳氧化總是首先發生)，也稱完全或總的生化需氧量，常以 $L_a$ 或 $BOD_u$ 表示。

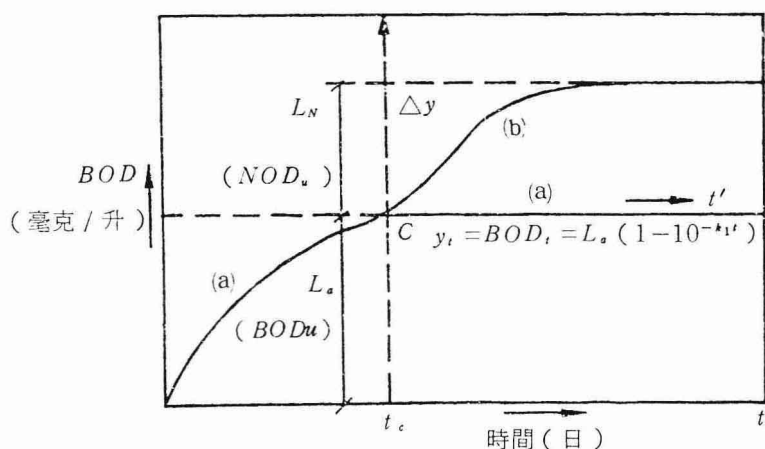


圖1-2 BOD 曲線

- (a) 碳化需氧曲線(在硝化被抑制的條件下測得)  
 (b) 碳化加硝化需氧曲線

在污染水中一般含有一些硝化細菌，因此在上述生物氧化過程中也會發生硝化作用，將水中原有的和含氮有機物氨化分解出來的氨氧化，最終轉化成硝酸。這個過程也需要氧。所以實際測定耗氧結果所得的曲線是  $b$ ，即碳化加硝化。對於一般的污染水（如生活污水或被生活污水污染的河水），硝化過程在大約 5~7 日甚至 10 日以後才能顯著展開，因而生物氧化的開始階段覺察不出有硝化的干擾。由於硝化作用所消耗的氧量稱為硝化需氧量或第二階段生化需氧量，可以  $L_N$  或  $NOD_u$  表示。因為氨已經是無機物質，所以作為有機物的指標只採用碳化生化需氧量，不包括硝化所需的氧量。

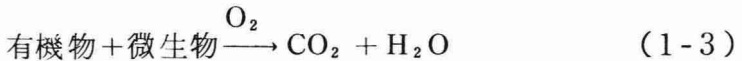
生化需氧量的反應速度在很大程度上取決於微生物的種類、數目及溫度，而在測定過程中溶解氧又是逐漸消耗的。所以測定生化需氧量就須保持一定的溫度，同時也需要規定一定的時間。通常是在 20°C 溫度下培養 5 天檢查溶解氧的損失，用  $BOD_5$  表示，單位以  $O_2$  毫克 / 升計。測定溫度用 20°C 是因為這個溫度比較接近溫帶地區夏季河水的最高平均溫度。在 20°C 溫度下，一般有機物的全部分解需時百日以上。這就是說，如欲求完全的生化需氧量需時 100 日，這樣在實用上是不可能採用的。實際觀察表明，在 20 日以後第一階段生化反應已進行得非常緩慢，故 20°C 20 日的生化需氧量（ $BOD_{20}$ ）可作為第一階段或完全生化需氧量（ $L_a$ ）。求定 20 日的生化需氧量仍嫌時過長，而且又考慮到，好氧分解速度一般在開始時最快，在 20°C 時，生活污水和多種工業廢水的  $BOD_5$  已約為其  $L_a$  的 70-80% 左右，此外，硝化過程在 5~7 日以後才有顯著影響，故現常以 20°C 5 日生化需氧量作為衡量污染水有機濃度的標準（最初採用 5 天作為標準時間的原因，實際上是由於  $BOD$  測定起源於英國，而英國大多河川的水流，從其上游流至海口最長不超過 5 天；當時測定溫度採用 18.3°C，因為這是英國河水夏季的平均溫度）。

對於含有硝化細菌較多的廢水，例如廢水生物處理構築物的出水，在 5 天培養時間內可能就會消耗較多的氧以致大大影響碳化需氧量的測定。在這種情況下，可以在測定  $BOD$  時投加化學藥劑以抑制硝化作用。據報導，某生物處理廠出水未加硝化抑制劑所測得的  $BOD_5$  竟約三倍於加抑制劑後所測得的  $BOD_5$ 。

## 2. 反應動力學

### (1) 第一階段反應動力學

生化需氧量反應動力學的研究表明第一階段  $BOD$  的變化是十分接近於單分子反應的，而實用上可認為具有一級反應的性質。這是因為有機物為微生物分解的作用雖可被認為是雙分子反應〔見式 (1-3)〕，但在這個反應中當反應進行到一定時間細菌非但不減少而且往往大量增加，一旦至細菌數目無多大變化時，就有機物來說，它的分解就具有一級反應的性質，即反應速度與任何時剩餘的有機物量成正比（如果存在着足夠的氧的話）。



$$\text{因此，} \quad \frac{d(L_a - L)}{dt} = K'_1 L \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \frac{dL}{dt} = -K'_1 L \quad (1-5)$$

式中  $L_a$  —— 第一階段  $BOD$  ( $BOD_u$ ) ；

$L$  —— 任何時  $t$  存有的  $BOD$  ；

$K'_1$  —— 耗氧常數。

$$\text{積分，} \quad \int_{L_a}^L \frac{dL}{L} = -K'_1 \int_0^t dt$$

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

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

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

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

如  $y_t$  或  $BOD_t$  為  $t$  時日內所吸收的氧量或所滿足的  $BOD$ ，則

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

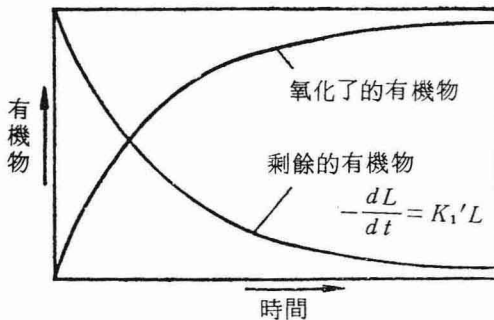


圖1-3 污染水生物氧化過程中有機物的變化

多年來當水溫為  $20^{\circ}\text{C}$  時常採用  $K_1 = 0.1 \text{ 日}^{-1}$ 。這是英、美等國對污染河水實測而得的平均值。自從在  $BOD$  測定時採用了所謂標準稀釋水和對各種不同廢水進行了試驗研究，發現  $K_1$  值隨水質的變化而是有相當大的差異的，一般變化在  $0.05 \sim 0.3 \text{ 日}^{-1}$  之間，而生物處理出水的  $K_1$  值則又小於進水的  $K_1$ ，常在  $0.05 \sim 0.1 \text{ 日}^{-1}$  的範圍

內。圖 1-4 示出  $K_1$  對  $BOD$  的影響 ( $L_0$  一定)。從圖中可以看出，由於  $K_1$  值不同， $BOD_5$  與  $L_0$  的比值也不相同。由此可見，如果利用式 (1-8) 從  $BOD_5$  求  $L_0$ ，必須先求得正確的  $K_1$  值。

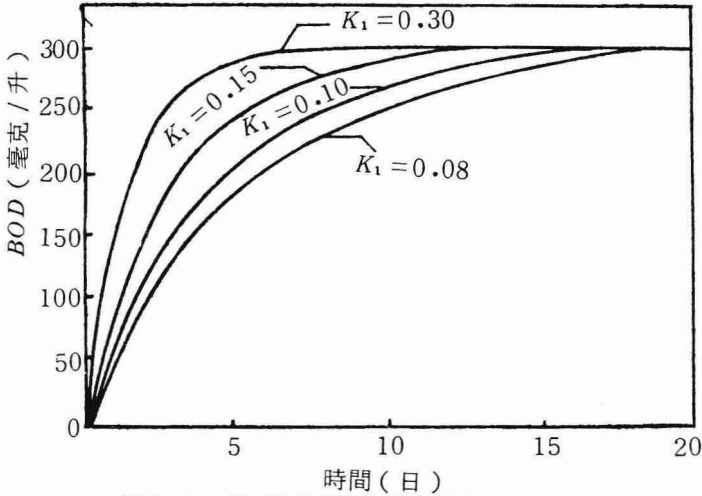


圖 1-4  $K_1$  對  $BOD$  的影響 ( $L_0$  一定)

圖 1-5 示出溫度對  $BOD$  的影響。

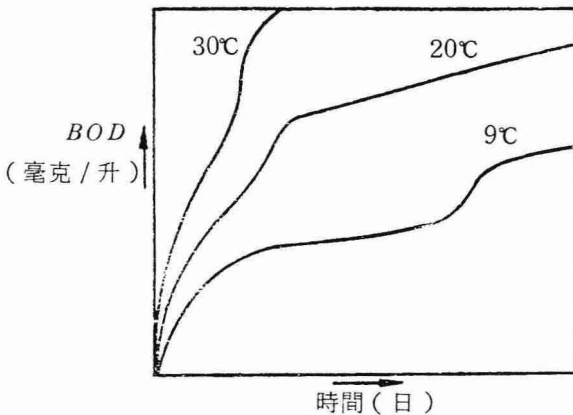


圖 1-5 溫度對  $BOD$  的影響

$L_a$  和  $K_1$  的確定：耗氧常數  $K_1$  和第一階段生化需氧量  $L_a$  的確定有好幾種方法，但均需用到生化需氧量的測定。下面介紹一種使用比較簡便，但也足夠準確的泰姆斯 ( Thomas ) 圖解法。

在  $y_t = L_a ( 1 - e^{-K_1' t} )$  中，

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

而

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

上兩式甚相似，故  $y_t$  可寫成：

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

或

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

上式是一直線方程，根據不同日子的  $BOD$  測定結果，並作圖 ( 如圖 1-6 )，即可求得  $K_1$  及  $L_a$  值。在圖 1-6 中，可以看出，

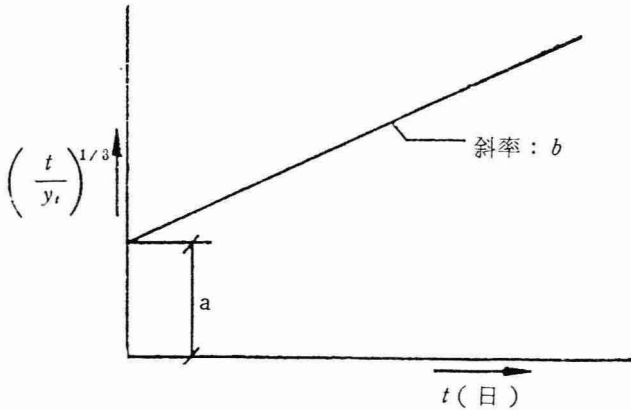
$$a = (K_1' L_a)^{-1/3} \quad (1-13)$$

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

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

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



圖 1-6 圖解法求  $K_1$  及  $L_a$ 。

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

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

對於一般的有機廢水， $t$  如限止於 10 天以內，誤差不大，但如廢水中含硝化細菌較多，則應採取措施，避免干擾。

所求得的  $K_1$  和  $L_a$  值相應於所培養的溫度。

在研究廢水分解所需氧量進度的變化時，有時會發現在開始時耗氧速度不很正常，或偏低或偏高。造成這種不正常的原因很多，水樣中缺乏適當的微生物是起始耗氧速度降低的原因之一，其它如有機物部分厭氧分解或者還原性物質的滲入等等均將影響起始的耗氧速度，此外如水中含有有毒物質存在，則甚至可能無法測出  $BOD$ 。圖 1-7 即表示這一類的耗氧曲線。

$K_1$  與溫度的關係： $K_1$  與溫度的關係可根據阿累尼烏斯 (Arrhenius) 經驗公式推導求得。