

廢水生物處理生物指標

李季眉*

摘要

本文介紹利用生物相作為廢水生物處理操作指標的基本概念，以期此種簡單的方法能廣泛地被接受，並作為廢水生物處理操作條件改善的參考。首先介紹在活性污泥系統中生物出現的順序，以及藉由微生物出現的種類瞭解處理廠有機負荷的大小，其次介紹原生動物、後生動物與活性污泥的操作以及作為毒性物質存在的指標，最後介紹絲狀菌的數量與種類與處理廠操作條件之關係。

【關鍵字】

- 1.生物處理(biological treatment)
- 2.生物指標(biological indicator)
- 3.原生動物(protozoa)
- 4.後生動物(metazoa)
- 5.絲狀菌(filamentous bacteria)

*國立中興大學環境工程學系教授

一、前　　言

生物處理法是利用微生物的代謝作用來分解廢水中複雜的有機化合物以處理廢水的方法，在生物處理的操作過程中，若能明白微生物的需求及其特性才能維持良好的處理效果，尤其如果瞭解微生物相與操作條件的關係，則可以藉著生物相的觀察來作為改善操作條件的參考。

與生物處理有關的微生物包括屬於原核細胞(procaryotes)的細菌及屬於真核細胞(eucaryotes)的真菌、原生動物(含鞭毛蟲類、變形蟲類、纖毛蟲類)及藻類，此外還有輪蟲、線蟲等微小後生動物。生物處理是利用自然繁殖的微生物，至少由20-30種以上的微生物所構成的混合培養，而各種不同的處理方式，其中所含的優勢微生物種類不同(須藤隆一, 1985)，在活性污泥主要由細菌與纖毛蟲構成的，微小的後生動物出現的頻率小；生物膜中細菌、纖毛蟲類極大量出現，真菌、鞭毛蟲、變形蟲、輪蟲大量出現；氧化塘中大量出現的生物為藻類；厭氣性消化法則除了細菌大量出現外，其餘種類幾乎不出現。因厭氣性消化法出現的種類幾乎只有細菌，而細菌的外形簡單無法單純由形態來辨認，故不易由生物相判斷其處理狀況。生物膜的處理方法雖然生物的種類多且可由形態辨認，但卻可藉著處理裝置的種類與其規範來決定處理的水質，不太能以操作管理的方法來控制(須藤隆一, 1985)，而對活性污泥方法而言，操作管理是很重要的因素，且微生物相與處理效率有密切的關係，當特定的微生物佔優勢而繁殖時才可得到良好的處理效果，故生物相的觀察有助於操作管理。

二、活性污泥生物出現順序

活性污泥法中生物的出現有一定的順序，首先出現細菌類，接著是賴細菌維生的原生動物，最後出現的是後生動物，其出現之時間與個數的關係示於圖1(千種薰, 1989)。

由圖1可看到，當基質濃度高時，細菌類佔優勢，而基質濃度低時，後生動物佔優勢，故可由佔優勢生物的種類，推定其基質負荷的情形。以下舉一例

72 廢水生物處理生物指標

子說明操作條件影響微生物相的情況，在活性污泥操作系統中，可依負荷量的大小將活性污泥之微生物相分成三種情況：

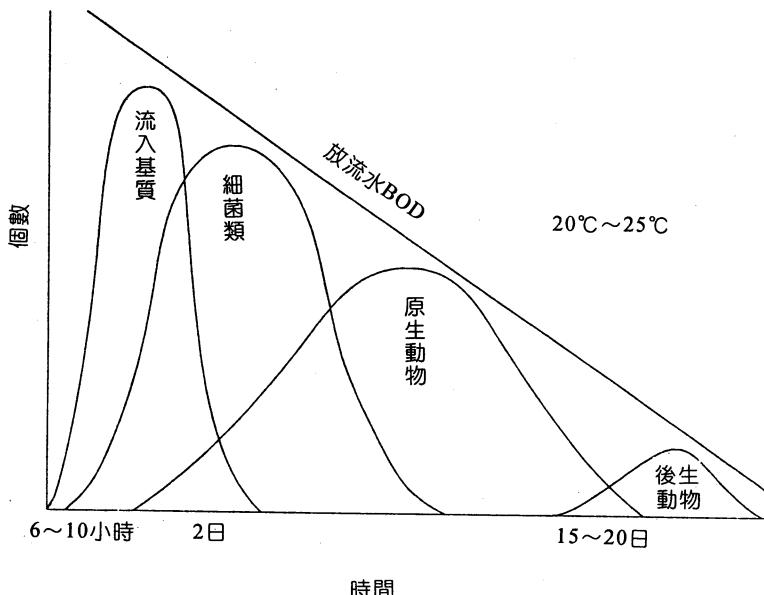


圖1 活性污泥生物出現順序(千種薰, 1989)

1. 負荷高或起始狀態或暫時性的超負荷時

細菌生成的膠羽邊緣向外突起呈星狀構造，而且在膠羽之間可看到個別的細菌參見圖2，除此以外，只有屬於原生動物的鞭毛蟲及變形蟲存在，亦即只有少數的微生物種類，但每種大量存在。

2. 正常負荷時

細菌膠羽緊密，有許多原生動物，尤其是纖毛蟲類。如 *Vorticella convallaria*、*Opercularia coarctata*、*Aspidisca costata*、*Euplates affinis*，鞭毛蟲及變形蟲少。

3. 低負荷時

細菌膠羽較小，而且膠羽中央顏色較深，邊緣顏色較淺參見圖3，存在的原生動物有許多種類，但每樣的數目少，除了纖毛蟲外，輪蟲和線蟲等後生動物也看得到。

由此可知操作條件確實會影響特定微生物的優勢生長，進而影響處理效率，但是也可以經由生物相的觀察可以推知操作的條件以及處理效率，進而找出引起操作不良的原因。

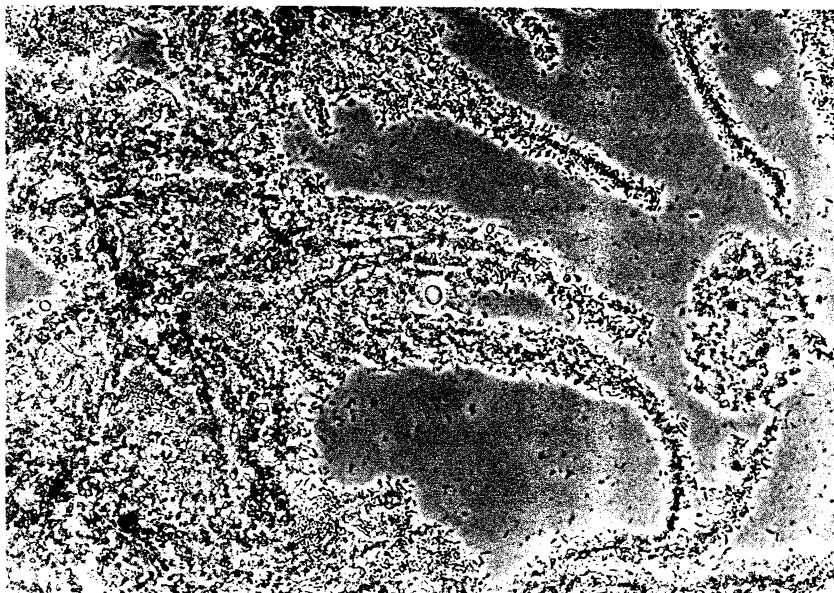


圖2 活性污泥法在負荷高時膠羽邊緣生成的星狀突起(Mudrack & Kunst, 1986)，位
相差，400×

三、原生動物、後生動物與活性污泥操作

原生動物及其他較高等的動物種類與處理廠之操作條件及放流水的性質有關，而且這些生物對於毒性的評估特別有用。原生動物及其他動物組成約佔5%的活性污泥生質量，活性污泥的原生動物約有200種，數目約為每毫升一百個至十萬個，最常見的是每毫升五百個至數千個。原生動物及其他生物之最重要

功能是會除去細菌、病原菌以得到澄清的放流水，此外也會幫助膠羽的生成，或是因運動而將大的膠羽打破。一般觀察原生動物的方法是取一滴(0.05 mL)活性污泥在載玻片上，放上一片蓋玻片，以位相差顯微鏡100×觀察，每片蓋玻片所算的數目乘上二十倍即為每毫升的生物數。(Richard, 1989)

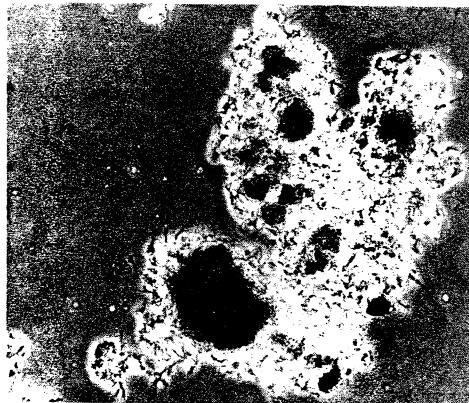


圖3 活性污泥法在負荷低時膠羽中央顏色較深、邊緣顏色較淺的狀態(Mudrack & Kunst, 1986)，位相差，100×

活性污泥中所含的原生動物及其他較高等的生物可以依其運動性分為鞭毛蟲、變形蟲、自由游動纖毛蟲、固著式纖毛蟲、輪蟲及其他無脊椎動物六類，分述如下：

- 1.鞭毛蟲類(flagellates)：體型小($5\sim 20 \mu m$)，橢圓或長形，靠一根或多根鞭毛運動。
- 2.變形蟲類(amoeba)：體型大($10\sim 200 \mu m$)，形狀會改變，以偽足運動。
- 3.自由游動纖毛蟲類(free-swimming ciliates)：圓形至橢圓形($20\sim 100 \mu m$)，靠一排短短的，髮狀的纖毛運動。
- 4.固著式纖毛蟲類(attached ciliates)：外形如自由運動的纖毛蟲類，但是靠一根柄附著在膠羽上，有的柄堅硬，有的可伸縮，有的是一個生物有一個柄，有的是許多生物共有一個柄。

5. 輪蟲類(rotifers)：有不同的形狀，比原生動物大一些($100\sim500\mu\text{m}$)，在構造上也較複雜，大部份都會運動，而且可以藉著可伸縮的足附著在活性污泥的膠羽上。
6. 無脊椎動物類(invertebrates)：含線蟲、緩步動物(tardigrades)及環形動物(annelides)。

原生動物在活性污泥中出現的種類與個數也會隨著淨化過程中有機物的減少而改變，一般原生動物的轉變順序是小型游泳性生物→大型游泳性生物→固著性生物(千種薰, 1985)，圖4詳細表示了原生動物的出現次序，由於這個出現次序的不同，可以藉著生物相來進行曝氣槽的診斷，假如觀察到大量的鞭毛蟲與纖毛蟲時，即顯示曝氣槽內的有機物量很多，此時即可(1)增加空氣量(2)增加污泥量(3)降低BOD、SS負荷(4)延長停留時間(5)將迴流污泥再曝氣，使F/M比變小，即可使情況好轉。假如觀察到大量固著性生物，亦即接近圖4之頂點狀態時，表示處理水中的有機物非常少，是處於好的狀態，因此繼續穩定地操作即可。假如雖然仍可觀察到固著性生物，不過大形變形蟲與後生動物輪蟲類越來越多，這是顯示由於F/M比變得非常小，污泥解體，而只有極少數的有機物殘留，必需(1)降低溶氧量(2)進行污泥的移除(3)提高BOD、SS負荷(4)縮短停留時間，才可改善處理狀況。

原生動物和後生動物依生長條件而在活性污泥消長，至於哪一類會佔優勢生長，是由食物的可利用性來決定的。鞭毛蟲類、變形蟲類及一些小的、自由游動的纖毛蟲類因為捕食機構沒有效率，需要較高的細菌數目(大於每毫升 10^6 或 10^7 個)，因此在處理廠的起動階段、低的細胞停留時間(SRT)及高的食微比(F/M)時，這些微生物都會佔優勢，相反的，固著式纖毛蟲、輪蟲及其他無脊椎動物，因為可以附著在膠羽上，而且可以靠纖毛的活動捕食，可以在較低的細菌數生長，在長的SRT及低的食微比下，這些微生物佔優勢，圖5顯示依照操作參數，活性污泥中原生動物及其他生物顯著的變遷情形。

適當的活性污泥操作應該是游動性纖毛蟲、固著式纖毛蟲及輪蟲維持平衡，若某些種類大量出現，可推知其有機負荷，表1所示為活性污泥的有機負荷與佔優勢的原生動物及較高等生物之關係。

毒性物質的評估也是微生物相觀察重要的應用之一，纖毛蟲和輪蟲一般而言是最早受毒性物質影響的，可以作為毒性物質或其他壓力的監測指標，慢或中斷的纖毛運動通常是最早可看到的毒性或壓力的信號。若佔優勢的原生動物轉變為鞭毛蟲及小的、游動性纖毛蟲大量繁殖時，有時高達每毫升一萬個生物，則顯示活性污泥的解體，以及作為食物來源的自由游動細菌的大量存在。當曝露在重金屬及氯化物時，原生動物及其他生物會受到嚴重的毒害，這些原生動物死亡後，可能會造成泡沫。其他的壓力尚且包括低的供氧量及溫度大於37~40°C。總之，活性污泥中的原生動物和其他較高等生物，可用來作為監測及正常操作的指標，尤其是SRT及食微比之選擇，更進一步可作為毒性或其他壓力的指標生物。

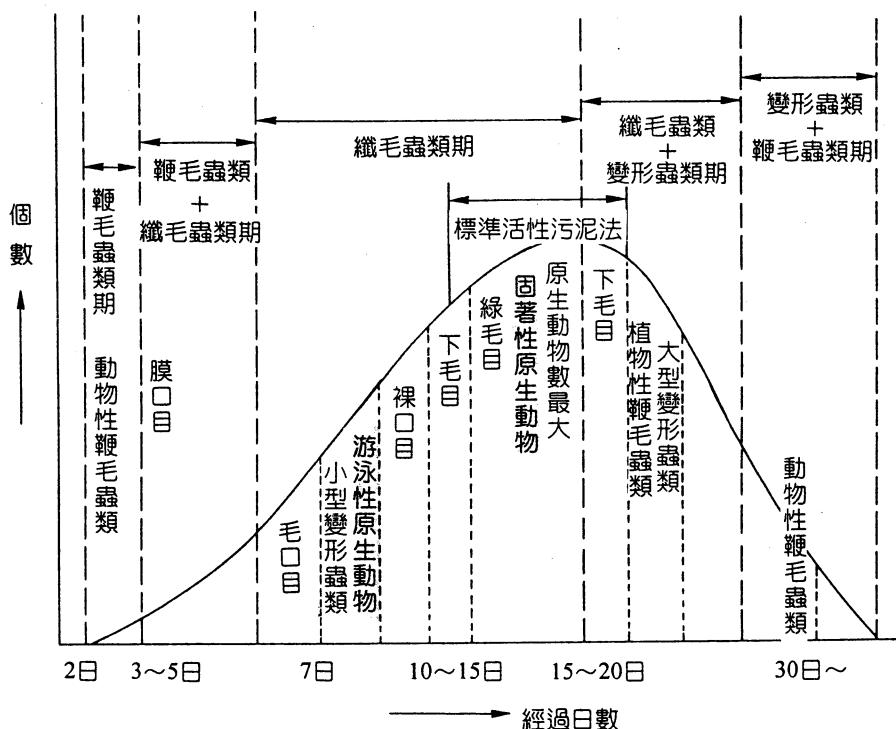


圖4 在活性污泥生成過程中原生動物的變遷(千種薰, 1985)

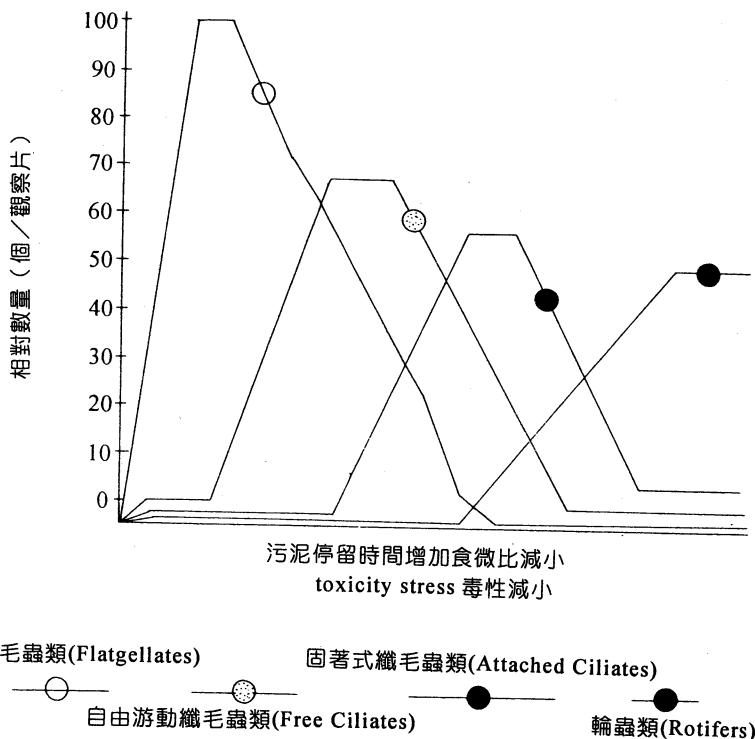


圖5 活性污泥中原生動物及其他生物的相對數量與操作條件的關係(Richard, 1989)

表1 在不同的有機負荷下，佔優勢的原生動物及其他生物種類(Richard, 1989)

條件	佔優勢種類
低有機負荷	固著式纖毛蟲、輪蟲及無脊椎動物，尤其是線蟲。
適當的有機負荷	生物的歧異度(diversity)高，游動性及固著式纖毛蟲佔優勢。
高有機負荷	鞭毛蟲、變形蟲及小的游動性纖毛蟲。

四、絲狀菌的膨化現象與處理廠操作條件的關係

在活性污泥中長出的細菌並非完全是膠羽生成菌，也有許多絲狀微生物會長，當絲狀微生物大量繁殖時會造成操作上之問題，如膨化現象(bulking)、泡沫生成(foaming)等問題。

許多的研究者認為活性污泥中絲狀菌的存在量與污泥沈降性有相關性，例如Finstein and Heukelekian (1974)指出活性污泥的SVI與每個膠羽的總菌絲長度相關，Sezgin等人也有相同的結果(Sezgin et al., 1980)。故絲狀菌的存在量可作為污泥沈降性的指標。絲狀微生物的存在量有幾種不同的方法來表示，其中的一種是含量分類法(abundance category)，此方法將絲狀微生物以位相差顯微鏡 $100\times$ 觀察，並依量多少評定0至6之數目(如表2)，以各種絲狀菌的總和評定一次，再針對每一種絲狀菌(以 $1000\times$ 觀察)個別評定一次，若總和評定時為4或大於4時，表示絲狀菌的存在對污泥沈降有影響，若個別絲狀菌為4或大於4時，表示此佔優勢種類，對膨化現象有最大的責任。另一方法是計算由膠羽表面延伸出去的絲狀菌總長度，以每毫升活性污泥菌絲長度表示(Sezgin et al., 1978)，更簡單的方法是目鏡中放入刻有格子的玻片，再計算每視野中與水平線交叉的絲狀菌數目。

表2 絲狀菌的含量與評定之類別(Richard, 1989)

評定之類別	描述
0	沒有絲狀菌
1	絲狀菌只在少數膠羽出現
2	絲狀菌在大約一半的膠羽出現
3	絲狀菌在所有的膠羽出現，但是密度低(每個膠羽1~5個菌絲)
4	絲狀菌在所有的膠羽出現，密度中等(每個膠羽5~20個菌絲)
5	絲狀菌在所有的膠羽出現，密度高(每個膠羽>20個菌絲)
6	絲狀菌佔優勢，大量繁殖，沒有膠羽

目前已知約有20種不同的絲狀微生物常在活性污泥中出現，而且每種皆可引起操作的問題，如能鑑定活性污泥中的絲狀微生物，將可以由所觀察的絲狀菌的關係來聯想造成的條件以評估復原的方法，David Jenkins等人提出特殊絲狀菌的膨化現象與處理廠操作條件的關係(表3)，此表可作為一般性的改善方針。鑑定膨化污泥中存在量最多的絲狀菌，可以知道造成此種菌的生長原因。例如，*Thiothrix*、*Beggiatoa*、Type 021N這些絲狀菌會進行硫氧化作用，將廢水中的S²⁻氧化成S⁰以獲得能量，再將S⁰堆積在體內，在硫化物含量高的廢水中，這些絲狀菌會佔優勢生長，故若鑑定出大量繁殖的絲狀微生物為這些硫氧化菌，可推知可能是由於廢水中硫化物含量太高之故。作絲狀菌鑑定時，要注意的是，在膨化發生早期就要觀察最初引起膨化現象的種類，因為膨化現象持續一段時間後，會造成許多種絲狀菌的繁殖，擾亂真正原因的診斷。在活性污泥中微生物族群的改變是很慢的，發生根本的改變一般約需2~3倍污泥齡，故一週觀察一次即可，但是在膨化開始時或在採取復育方法(如加氯)的時期，每天的觀察是必要的。

絲狀菌的鑑定方法是針對每一種絲狀菌瞭解下列之特性，再依據圖6的檢索圖，鑑定出其名稱或型式編號。(Jenkins et al., 1993)

1. 分支：是否存在？若有分支存在，是真分支還是假性分支？
2. 運動性：是否具有運動性？
3. 菌絲形狀：直的、微彎曲的、彎曲的、捲曲的、不規則形狀或菌絲狀。

表3 造成污泥膨化現象的條件與佔優勢絲狀菌種類的關係(Richard, 1989)

引起 的 條 件	絲 狀 菌 的 種 類
1.低溶氧量	Type 1701, <i>S. natans</i> , <i>H. hydrossis</i>
2.低有機負荷(低食微比)	<i>M. parvicella</i> , <i>Nocardia</i> spp., <i>H. hydrossis</i> , Types 021N, 0041, 0675, 0092, 0581, 0961 & 0803
3.含硫化物	<i>Thiothrix</i> spp., <i>Beggiatoa</i> spp., Type 021N
4.養分不足(氮、磷)	<i>Thiothrix</i> spp., Types 021N, 0041, 0675
5.低pH (pH< 6.0)	真菌

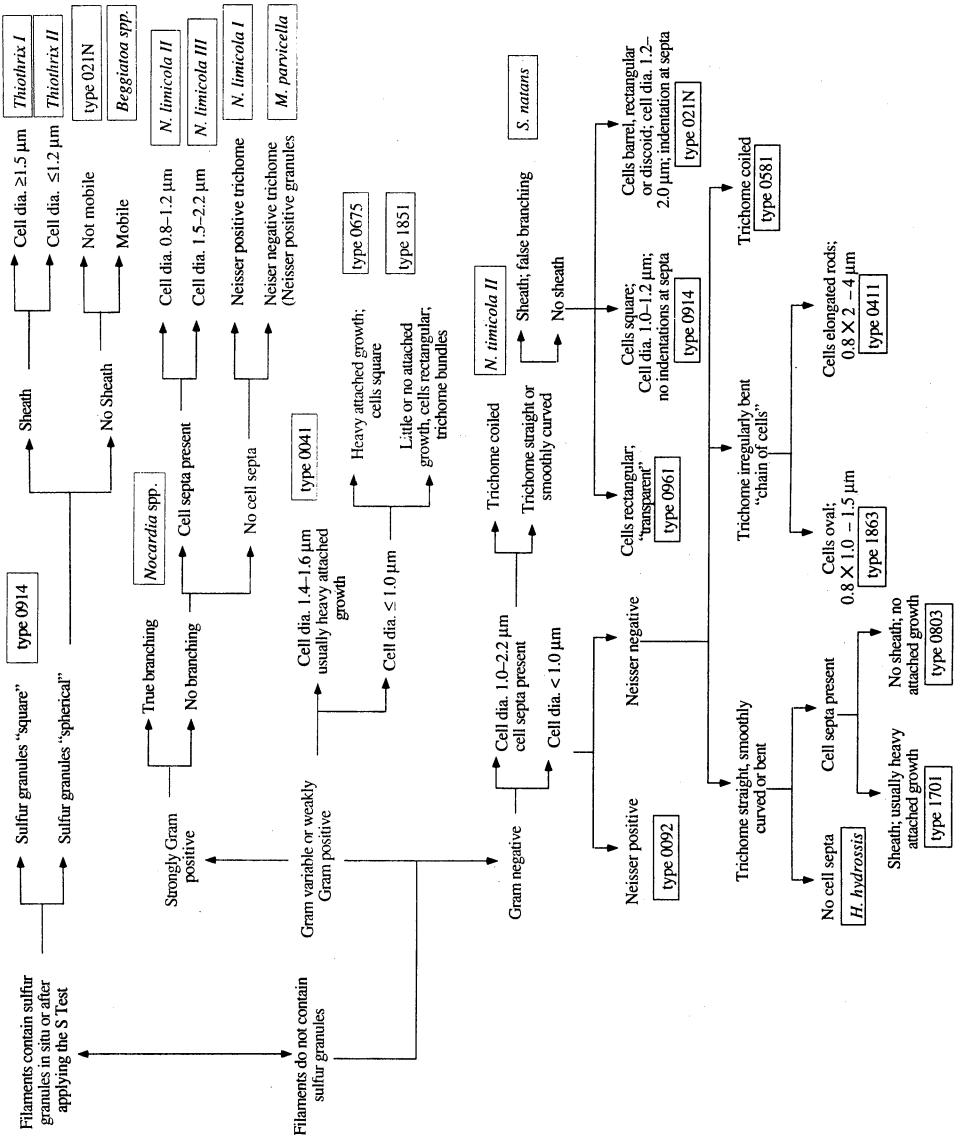


圖 6 活性污泥絲狀微生物鑑定檢索圖(Jenkins et al., 1993)

4. 菌絲的位置和長度：菌絲是單獨存在，或是由膠羽表面伸出？或大多在膠羽中央？量出每種菌絲的長度範圍。
5. 附著生長：是否有附生的細菌存在？
6. 是否有鞘存在？此點不容易看到，除非菌絲中有菌空缺才看得到，可以用鞘的染色法辨認。
7. 有無隔膜(cross wall, septa)存在？
8. 菌的直徑多少？重要的是注意直徑大於 1μ 或小於 1μ 。
9. 細胞形狀：細胞是正方形、長方形、橢圓形、桶狀、圓盤狀、圓端桿狀或不規則狀？
10. 細胞內硫顆粒是否存在？硫顆粒在位相差顯微鏡下呈亮黃色。
11. 染色反應如何？包括革蘭氏染色及Neisser染色。
12. 其他觀察項目。

五、結論

由以上的敘述可知，活性污泥中微生物的種類會反映處理廠的操作條件，例如有機負荷、毒性物質、溶氧量、硫化物、pH、污泥沈降性等等，因此可以藉著生物相的觀察來作為改善操作條件的參考，不過要達到此目的，首先需學習辨認各類微生物，先能區別細菌、原生動物、藻類、真菌、後生動物，再區別原生動物的鞭毛蟲類、變形蟲類、自由游動纖毛蟲類、固著式纖毛蟲類，再進一步區別各屬各種，以及鑑定絲狀菌，能辨認微生物的種類後，便可以將長期觀察的結果配合水質分析的結果，找出相關性，如此將有助於生物處理的操作。

六、參考資料

1. Finstein, M. S. and Heukelekian, H., Gross Dimensions of Activated Sludge Flocs with Reference to Bulking, J. Water Polln. Control Fedn., 39,33. 1974.

82 廢水生物處理生物指標

- 2.Jenkins, D., Parker, D. S., van Niekerk, A. M., Shao, Y-J and Lee, S. E., Relationship Between Bench Scale and Prototype Activated Sludge Systems, In : Scale-up of Water and Wastewater Treatment Processes, Ed. N. W. Schmidtke, and D. W. Smith, Butterworth, p. 307, 1983.
- 3.Jenkins, D., Richard, M. G. and Daigger, G. T., Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, 2nd. edition., 1993.
- 4.Mudrack, K., and Kunst, S., Biology of Sewage Treatment and Water Pollution Control, Ellis Horwood Limited, 1986.
- 5.Richard, M. G., Activated Sludge Microbiology, Water Polln. Control Fedn., Alexandria, VA. 1989.
- 6.Sezgin, M., Jenkins, D., and Parker, D. S., A Unified Theory of Filamentous Avtivated Sludge Bulking, J. Water Polln. Control Fedn., vol. 50, p. 362, 1978.
- 7.Sezgin, M., Palm, J. H. and Jenkins, D., The Role of Filamentous Microorganisms in Activated Sludge Settling, Prog. Water Technol., vol. 12, p. 171. 1980.
- 8.須藤隆一，生物相からみた處理機能の診斷，第三版，産業用水調査會，1985。
- 9.千種薰，活性汚泥の生物相，生物相からの維持管理，1989。