

自來水配水槽異營菌變化分析之研究

*余孟懷，**盧重興，***黃立維，****朱振華
*碩士，**教授，***碩士班學生，****博士班學生
國立中興大學環境工程學系

摘要

自來水配水系統的目的，是為了適時適量地供應安全、足量且高品質的飲用水給消費者，而生物性污染卻常造成水質不穩定。配水池普遍存在於配水系統中，雖能提供穩定的供水，也被視為化學與生物的反應池，對水質造成負面的效果，但是至目前為止，對於配水槽微生物影響水質方面的研究並不多。

本研究主要目的，主要是探討加氯濃度及水力停留時間，對配水槽內異營性細菌消長之影響，包括內部附著性細菌與進出流懸浮性細菌的變化。

由配水槽餘氯試驗結果可以得知，當出流餘氯濃度達到穩定的情況下，進出流濃度會有濃度差的現象，而隨著水力停留時間的增加，餘氯濃度消耗會有增加的趨勢。此外水槽內部層化現象會較為明顯，混合效果較差，並且有餘氯濃度偏低的死角區形成。

由附著性細菌分析可以得知，餘氯濃度越高，抑制附著性細菌生長的效果越好；而水力停留時間越短，生物膜的密度亦會有降低的趨勢。水槽內部不同位置生物膜密度，則以水槽底部（死角區）累積最高，出口次之，而進流口與水槽頂部之生物膜密度最低。由懸浮性細菌分析結果顯示，提高加氯濃度以及縮短水體於水力停留時間，對於懸浮性細菌的抑制效果

較為顯著。

前言

自來水是人類生活維持生存所不可或缺的重要物質，因此，自來水的品質，會直接影響到我們的安全與健康。自來水配水系統的目的，是為了穩定地供應安全、足量且高品質的飲用水給消費者。

隨著科技及淨水設備的進步，水源經淨水場處理後，水質大部分能符合現行法規的標準，但民眾對於水質方面的反應卻不甚理想。水質不穩定的因素包含許多，最主要的原因是自來水於運送過程中受到二次污染的緣故，而配水系統二次污染以生物性污染被公認為最主要的問題，即使添加消毒劑（例如：餘氯）加以控制水中微生物生長，但仍有生物膜累積、懸浮性細菌增加的問題。

配水池雖能提供穩定的供水，但不良的操作方式和設計卻會導致配水池內水質的變壞，包括提高在配水槽中的水力停留時間、消毒劑的損耗、消毒副產物和微生物菌數的增加等，因而造成負面的效果。

目前國內多數自來水管理單位仍以加氯消毒作為主要控制方法，因此對於餘氯與配水系統內微生物的關係，必需加以深入了解，以求得改進之道，以提高國人飲用水的品質。而實場配水池非常複雜，無

法針對不同的控制條件加以研究探討，故有必要於實驗室進行基礎性的試驗，探討實場配水池的變化。

研究方法

操作條件與試驗方法

本試驗為連續進出流之方式，試程共分為六組，進行三週至四週之試驗，其中進流餘氯濃度分別為 0、0.3、0.8 mg/L，每一種餘氯濃度又分別為 0.1 及 0.5 L/min 兩組進流量（水力停留時間各為 90 及 18 小時），各試程操作條件如表 1 所示。

配水槽水位高度設定為 90 公分高，徑高比為 1.0，進流口位於配水槽之上方側面（水位 90 公分高），出流口則位於水槽下方側面，其所採用之實驗設備如圖 1 所示

其所有監測位置與生物膜採樣片位置皆相同，而槽內生物膜採樣片設置處圖 2 所示。

(1) 餘氯濃度試驗

因自來水水體本身有餘氯的存在，且濃度隨時間、季節、使用量及水塔清洗等因素，濃度非常不穩定，因此先利用硫代硫酸鈉 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 溶液將自來水之餘氯去除，再將配置的次氯酸鈉 (NaOCl) 穩定注入，讓進流口以穩定的餘氯濃度進入槽體，探討各試程及槽內各位置餘氯濃度變化情形。

採樣時間方面，停留時間 18 小時之試程，採樣時間為每 3 小時一次，監測 24 小時；而停留時間 90 小時之試程，於試程開始之 24 小時，採樣時間訂為每 5 小時，而後則為每 10 小時採樣一次，直到 120 小時。

(2) 總異營菌計數分析

主要是探討加氯量、水力停留時間與

相對位置等因素，對配水槽異營菌生長之影響。在水槽內設置生物膜採樣片前，首先將採樣片浸泡於 95% 酒精中 24 小時後，以軟毛刷及超純水清洗表面；接著置於盛有超純水的燒杯中，以超音波洗淨機清洗 30 分鐘；最後以鋁箔紙將採樣片密封，經高壓滅菌釜滅菌 45 分鐘後，冷卻保存，以確保沒有任何微生物附著於採樣片上。

抽出採樣架上之採樣片時，應注意不要過度擾動到水槽的水體，避免不必要地採樣誤差；取出後，需立即放入盛有 50 mL、4°C 無菌水的玻璃容器中，於 4 小時內進行超音波震盪取樣分析。

而試驗初期，因生物膜在生長初期累積速率較快，採樣間隔須較密集，將採樣時間定為培養後 24 及 72 小時；之後因生物膜成長速率減緩，故在衡量效益下將採樣間隔定為 1 週，直到 3 週為止。

(3) 總有機碳與溶解性有機碳之分析

隨生物膜採樣時間，監測水槽各位置總有機碳與溶解性有機碳之濃度。

結果與討論

餘氯濃度分析

由表 2 中可以看出，水力停留時間較短之試程，達到穩定時進出流之餘氯濃度差為 0.13 mg/L，而水力停留時間較長之試程，餘氯濃度差則為 0.20 mg/L，說明了水體於水槽中的水力停留時間的增長，造成了餘氯濃度損耗加劇，水質因而受到了一定的影響，亦顯示了自來水經過配水槽後，確實會導致餘氯的消耗。

以不同停留時間兩種試程之比較中可發現，流量較小時，即水力停留時間較長的試程，配水槽內部分層現象較為明顯，

混合效果非常的差；而流量較大時，層化現象較不顯著。而兩試程皆有餘氯濃度偏低的死角區形成。

總異營菌密度分析

附著性細菌分析

圖 3~8 為餘氯濃度在 0、0.3、0.8mg/L 之附著性細菌隨時間變化圖，以下將就餘氯濃度、水力停留時間與採樣片不同位置等因素探討之。

(1) 餘氯濃度之影響

在不添加氯的試程中，初期水槽壁面生物膜累積速度最快，且在試程結束後，生物膜密度會到達 $10^6 \sim 10^7$ CFU/cm² 的程度；而在低加氯濃度(0.3 mg/L)的試程裡，採樣片最後累積的生物膜密度，約達 $10^5 \sim 10^6$ CFU/cm² 上下，略低於不加氯試程的結果。而若在水體為高加氯(0.8 mg/L)，則能夠在培養初期，造成強烈的抑制效果，並且讓生物膜密度在試程結束時，僅累積到 $10^4 \sim 10^5$ CFU/cm² 的程度，說明了提高餘氯添加量，能有效的壓抑水槽內附著性細菌的生長情形。

(2) 水力停留時間之影響

由圖 3~5 與圖 6~8 比較可以得知，進流量的減少導致了水力停留時間的增加；較低的進流量亦造成水槽內部混合動力的不足，使得餘氯濃度混合效果大打折扣，位於死角區的水體無法及時補充新鮮之水體，水體間的交換流率較小，使微生物有充裕的時間能利用水中的基質，因而菌量增多，對水質產生不良的影響。

此外，較低的進流量注入水槽後，受原本內部水體的阻力影響較大，所能提供的混合動力明顯的降低許多，水槽內的流況便較為溫和，因此帶給生物膜表面的剪力沖刷，相對於較高的進流量造成的影響，效果較為不顯著，故微生物的生長更

加活躍。

由實驗數據結果分析，說明了水力停留時間的增長將對附著性微生物的生長產生助益，使水槽內生物膜密度增加。

(3) 採樣片位置之影響

進流水體進入水槽後，遭受水槽內原本水體的阻力的影響，流速、剪力會產生減弱的效應，而無法有效的混合內部水體，造成各位置之餘氯濃度分佈不均及水力沖刷等條件的不同，而這便是造成生物膜採樣片上總異營菌密度差異的因素。

水槽內不同位置之採樣片生物膜密度，以水槽底部(死角區)位置累積最高，出口口次之，進流口與水槽頂部之生物膜密度最低。

懸浮性細菌分析

自來水由處理廠流出後，水中部分未被消毒劑所抑制的微生物，或是原本存在於管線中或污染途徑進入管線的微生物，藉由適當的管線環境而繁殖的現象，一般稱為微生物再生長現象 (Brazos and O'Connor, 1985)，這是管線中懸浮性細菌主要的來源。懸浮性細菌隨時間變化圖如圖 9~14 所示，以下就餘氯濃度與水力停留時間等因素探討。

(1) 餘氯濃度之影響

試程之原水是自來水經過濾後導入水槽的，因此試程中進流水的懸浮性細菌量較為穩定，維持在 10^2 CFU/mL 上下。發現提高水體的加氯濃度，對於懸浮性細菌的抑制效果較為顯著；相反的，在試驗時間內，不添加餘氯的試驗中，懸浮性細菌量將會是高加氯試程(0.8 mg/L)的菌量的 10 倍以上。

(2) 水力停留時間之影響

管線與水槽的水力條件比較下，管線

裏的水體流速較快，對異營菌是屬於較為不穩定的生長環境，而水槽的體積龐大，相較於管線的條件，水體於水槽內部的流速減緩，擾動的情況較不顯著，提供了異營菌穩定的環境以利生長。

如不加氯試程之圖 9 與圖 12 所示，試程中懸浮性細菌在 72 小時呈現一明顯的落差，圖 9 之進出流菌量相差 10 倍以上，而圖 12 之差距則相去不遠。這是因為水力停留時間較短之試程，水流剪力較大，附着性細菌遭沖刷後脫落的菌量較高，因而測得之菌量較高；相反的，水力停留時間較長之試程，因水流剪力較小，附着性細菌遭沖刷後脫落的菌量較少，因此所測得之菌量較低。

圖 9 與圖 12 相比較，可以發現較高的水力停留時間，讓出流水的懸浮性菌量，呈現一較高的趨勢。而低加氯及高加氯試程變化圖，所得知的現象也相仿。水體於水槽內的水力停留時間的拉長，讓異營菌有足夠的時間及穩定的空間，能利用水體中的 BDOC(Biodegradable Dissolved Organic Carbon, 生物可降解溶解性有機碳)而生長，使得水體經過一儲水設備後，多會有微生物增加的情形產生。因此，縮短水體於水槽內的水力停留時間，對於懸浮性細菌有不錯的抑制效果，也較附着性細菌抑制為顯著。

總有機碳與溶解性有機碳之分析

總有機碳 (TOC) 之分析(圖 15-16)

試驗初期以監測總有機碳為主，但數據結果較無一致性，探究原因則是因配水系統中之有機物質，成分較為複雜，檢測分析樣品時，儀器無法區分不同物質之間的差異，形成了數據探討上的盲點，因此，改以監測溶解性有機碳為主。

溶解性有機碳 (DOC) 之分析(圖 17~20)

將試程的進流 DOC 濃度加總後設為 100%，則底部、頂部及出口相對於進流口位置，所佔 DOC 濃度的百分比分別為 87%、90% 及 89%，這些數據顯示了在水槽內有 DOC 的消耗產生，以及間隔間彼此 DOC 的交換。而配水系統中的異營菌是攝取自來水中 BDOC 當作基質生長，BDOC 又是 DOC 的一部分，因此 DOC 的消耗一部分可解釋為被異營菌吸收利用所造成的。

由附着性細菌分析所得之結果顯示，底部的附着性細菌量較高；而另一方面，水槽底部的 DOC 濃度佔一較低的百分比數值，即此處的 DOC 消耗較多，可能是因死角區所造成的物質傳輸不易，另一方面，亦可顯示微生物所攝取的 DOC 量較多，所轉換成異營菌數量亦較多。

結論與建議

本研究是以實驗室的配水槽試驗系統，探討水槽內微生物之變化，研究中包括：配水槽中餘氯濃度分布的情形、進流餘氯濃度及水力停留時間對總異營菌之影響。

結論

1. 由餘氯濃度分佈試驗結果可以得知，隨著水力停留時間的增加，出流餘氯濃度消耗會有增加的趨勢，且層化現象會較為明顯，有餘氯濃度偏低的死角區形成。
2. 由附着性細菌分析可以得知，餘氯濃度越高，抑制附着性細菌生長的效果越好；而水力停留時間越短，生物膜的密度亦會有降低的趨勢。
3. 由水槽內部不同位置生物膜密度結果可以得知，以水槽底部（死角區）累積最高，出口次之，而進流口與水槽頂部之生物膜密度最低。

4.由懸浮性細菌分析結果顯示，提高水體的加氯濃度，以及縮短水體於水槽內的水力停留時間，對於懸浮性細菌的抑制效果較為顯著。

建議

- 1.由試驗結果及文獻中均指出，流經儲水設備的自來水，會有微生物增加的趨勢，因此建議應進行實場的試驗，了解微生物變化情形，以及配水槽餘氯的消耗、層化與滯留區的現象。
- 2.由於微生物種類包含複雜，本研究僅考量其中之異營菌消長，在結果方面會有低估水槽微生物量的情形，因此未來應採用能夠觀察所有微生物的試驗方式，以建立更為詳細的資料。
- 3.配水池的外型設計受環境的影響因子相當大，因此型式也相對較多元化，而不同外型的配水槽水力條件、混合效果不一，必須進行研究個別的水質變化情形。
- 4.微生物的存在會導致水質的變差，而國內外對於配水池內微生物的再生長情形與其生長機制的資料仍相當缺乏，有必要獲得更深入的資訊。

參考文獻

- 1.江柏霖，自來水配水槽餘氯濃度之研究，國立中興大學環境工程學系碩士論文，民國90年6月。
- 2.李連堯、盧重興，"自來水配水系統水質二次污染的研究：(二)微生物的再生長現象"，自來水會刊雜誌第十七卷第三期，19-48頁，民國87年8月。
- 3.Grayman, W. M., deiningger, R. A., Boulos, P. F., and Bowcock, R. W., "Water quality and mixing models for tanks and reservoirs." J. AWWA, 88:7:60-73. (1996)
- 4.Gauthier, V., Besner, M.C., Barbeau, B.,

Millette, R., Prevost, M., "Storage tank management to improve drinking water quality: case study." Journal of Water Resources Planning and Management, 221-228. (2000)

- 5.Kennedy, M. S., Moegling, S., Sarikelli, S., and Suravallo, K., "Assessing the effects of storage tank design." J. Am. Water Works Assn., 85 (7), 78-88. (1993)
- 6.Rossman, L. A., and Grayman, W. M., "Scale-Model studies of mixing in drinking water storage tanks." J. Envi. Eng. 755-761. (1999)

表 1 各試程操作條件表

| 試程 | 條件 | 餘氯濃度 (mg/L) | 水力停留時間 (小時) |
|----|----|-------------|-------------|
| 一 | | 0 | 18 |
| 二 | | 0 | 90 |
| 三 | | 0.3 | 18 |
| 四 | | 0.3 | 90 |
| 五 | | 0.8 | 18 |
| 六 | | 0.8 | 90 |

表 2 餘氯濃度分布百分比表

| 理論水力停留時間(小時) | 穩定時各採樣點所佔之餘氯濃度百分比 (%) | | | | 穩定時進出流之餘氯濃度差 (mg/L) |
|--------------|-----------------------|----|----|-----|---------------------|
| | 進流口 | 底部 | 頂部 | 出流口 | |
| 18 | 100 | 75 | 95 | 85 | 0.13 |
| 90 | 100 | 58 | 93 | 78 | 0.20 |

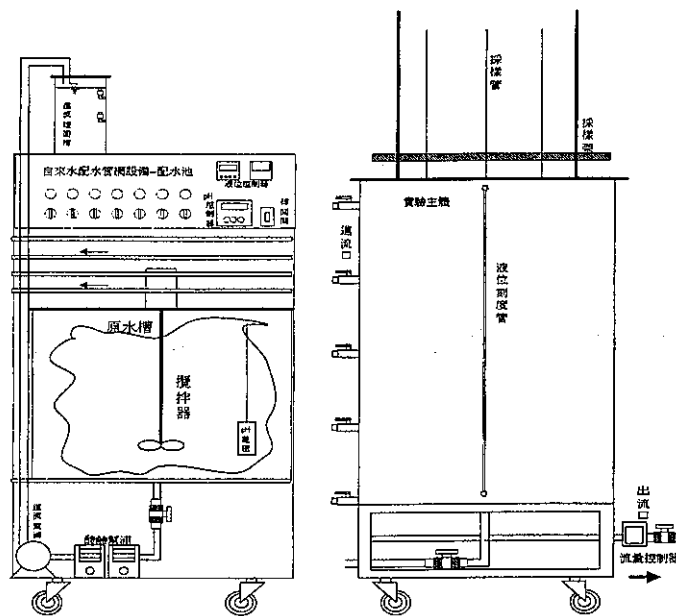


圖 1 配水槽試驗設備圖

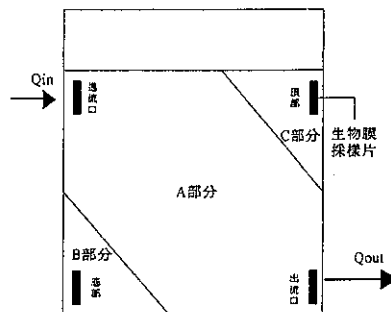


圖 2 生物膜採樣片設置圖

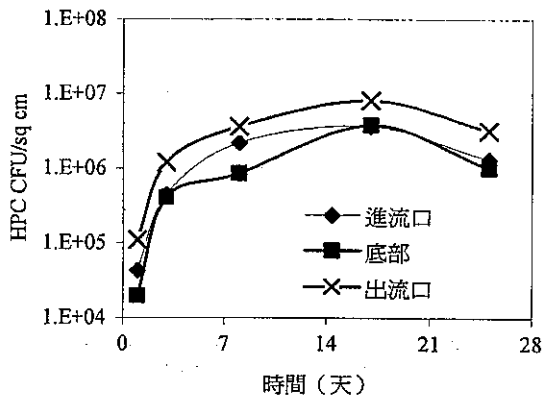


圖 3 不加氯試程

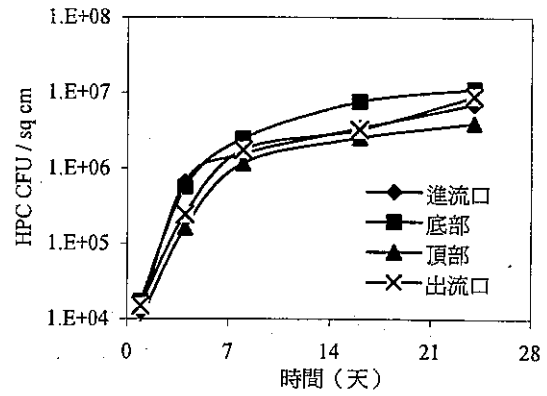


圖 6 不加氯試程

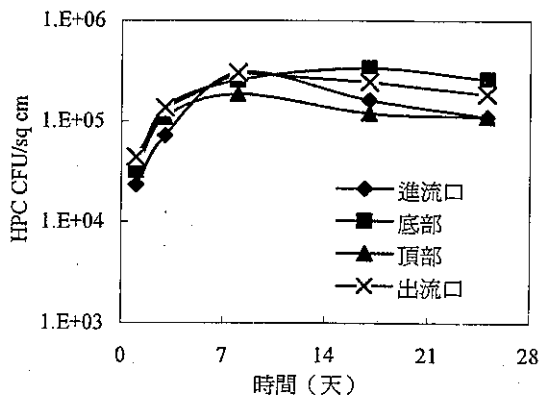


圖 4 低加氯試程(0.3 Cl₂ mg/L)

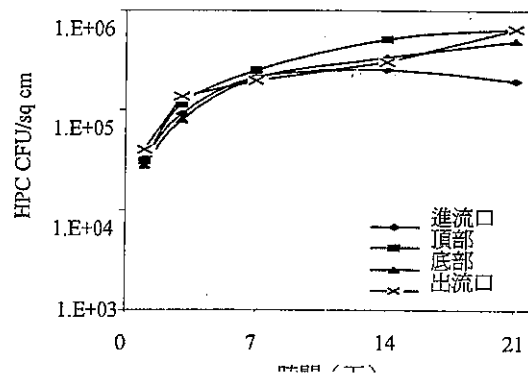


圖 7 低加氯試程(0.3 Cl₂ mg/L)

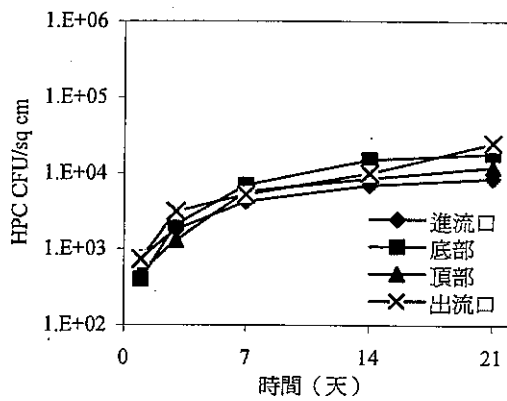


圖 5 高加氯試程(0.8 Cl₂ mg/L)

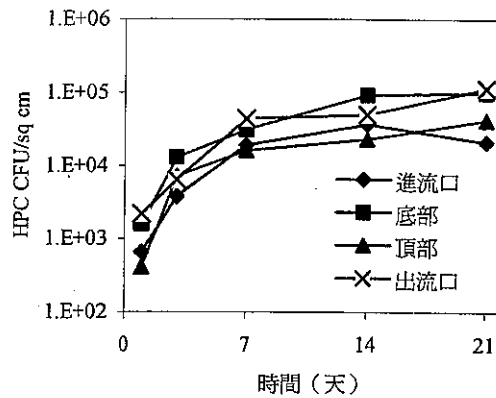


圖 8 高加氯試程(0.8 Cl₂ mg/L)

停留時間為 18 hr

停留時間為 90 hr

附着性細菌變化圖

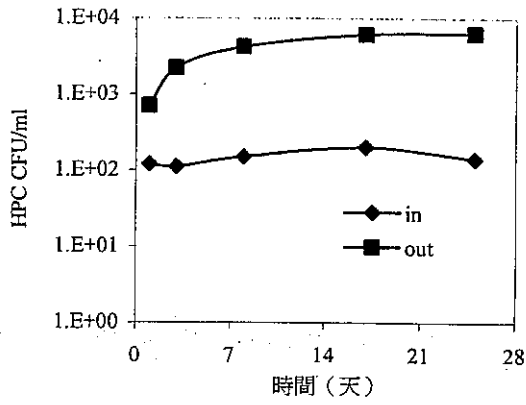


圖 9 不加氣試程

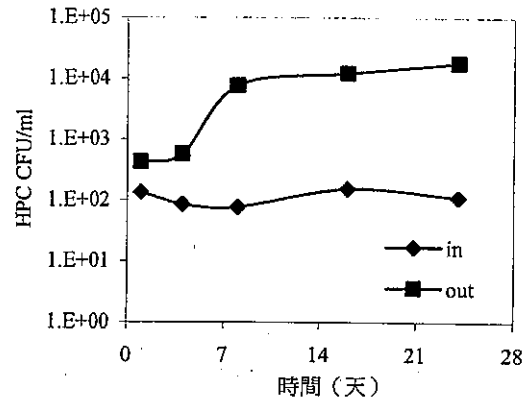


圖 12 不加氣試程

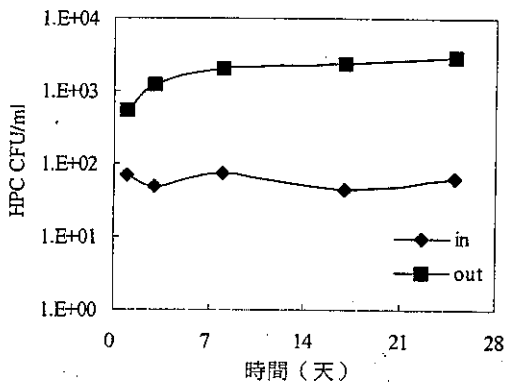


圖 10 低加氣試程(0.3 Cl₂ mg/L)

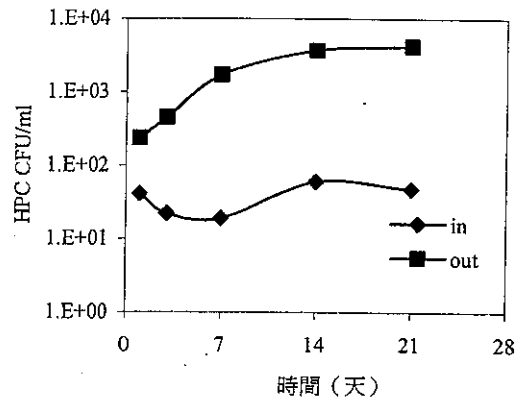


圖 13 低加氣試程(0.3 Cl₂ mg/L)

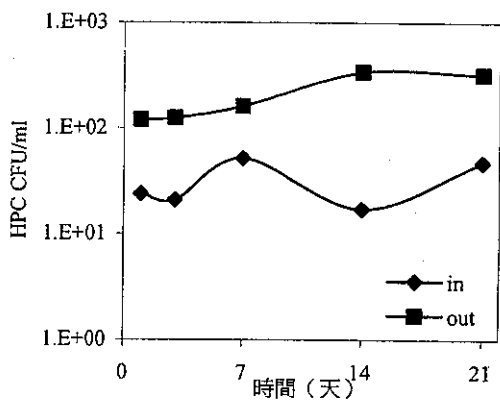


圖 11 高加氣試程(0.8 Cl₂ mg/L)

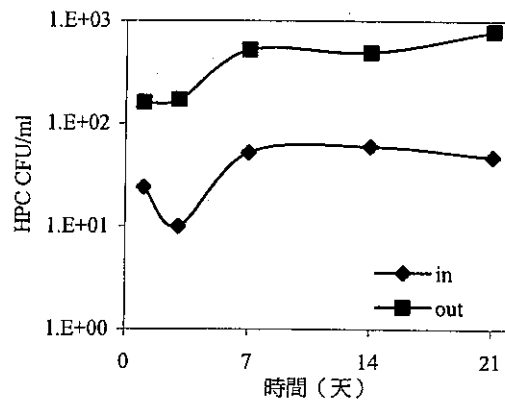


圖 14 高加氣試程(0.8 Cl₂ mg/L)

停留時間為 18 hr

停留時間為 90 hr

懸浮性細菌變化圖

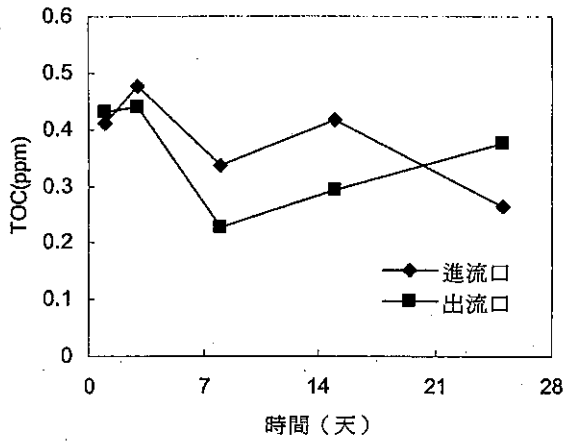


圖 15 不加氣試程，停留時間 18 hr

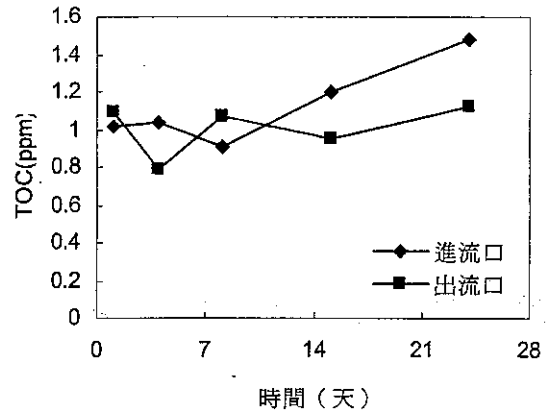


圖 16 不加氣試程，停留時間 90 hr

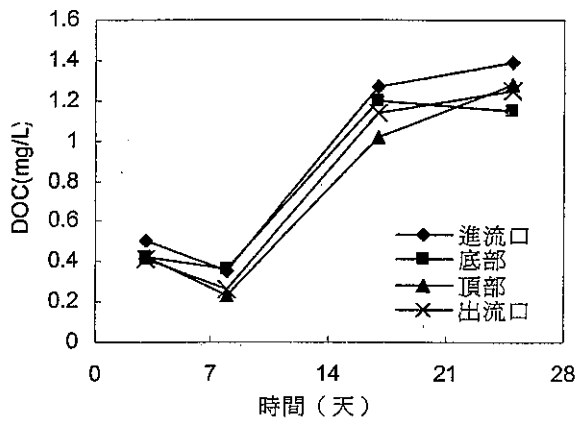


圖 17 低加氣試程，停留時間 18 hr

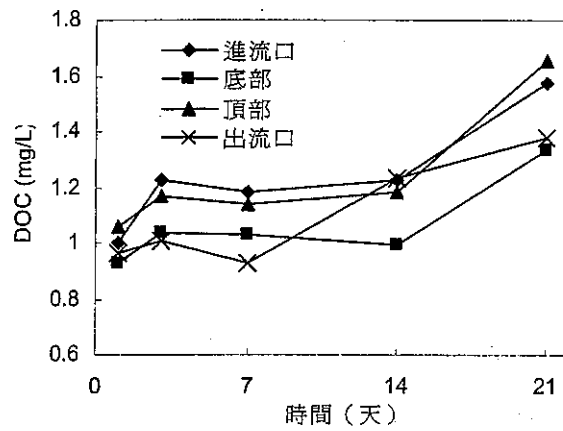


圖 18 低加氣試程，停留時間 90 hr

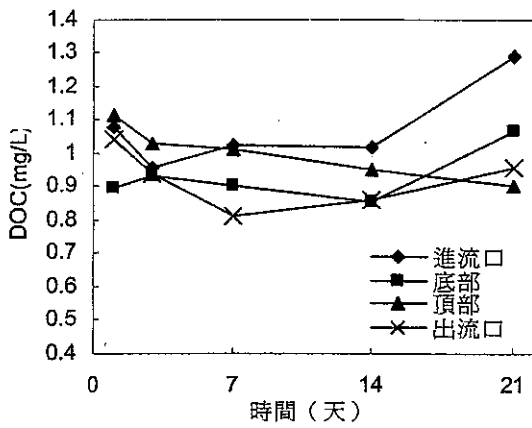


圖 19 高加氣試程，停留時間 18 hr

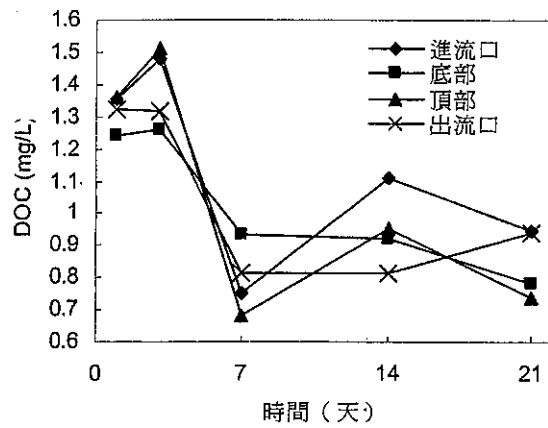


圖 20 高加氣試程，停留時間 90 hr

有機碳變化圖