

自來水配水管線微生物消長模式的研究

Model of the Microbial Process in the Drinking Water Distribution Pipes

張鴻耀¹ 盧重興²

摘要

由於淨水廠各種發展完備的處理方法，使得自來水水質在離開淨水廠時，大多能夠符合政府公布的安全水質標準。然而自來水一旦離開淨水廠，進入配水管線後，由於管線本身的複雜性及維修的困難，使得管線中的自來水水質再度受到威脅。以往國內對於配水管網的理論研究大多著重於發展水力模式，以便預估配水管線中的水壓、流速、水量及水頭損失等，而對水質模式卻很少被探討。因此，如何建立一兼具預測及警告功能的完整配水管網水質變化模式實為刻不容緩的事。

本研究以理論方式探討自來水配水系統中有機物、微生物及餘氯之間的消長情形。模式驗證中的餘氯消耗結果與實驗數據有不錯的一致性。在濃度穩定時間方面，餘氯、DOC、BDOC 在進流時間超過一個水力停留時間 24 小時後，濃度已達穩定。在流速的影響上，不論是微生物濃度分布或是餘氯濃度分布，均隨著流速變大而濃度分布曲線較為平緩。

壹、前言

由於自來水配水系統本身的複雜性及維修的困難，使得自來水離開淨水廠進入配水管線後，水質再度受到威脅。若要能夠有效掌握配水管網實際的水質(餘氯、細菌、三鹵甲烷、微粒、金屬離子等)變化情形，發展出一套完整的管網水質模式實屬必要。一旦所完成的管網水質模式經驗證後，即可應用於都市自來水系統的規劃、設計及輔助管理。

完整的自來水配水系統水質模式應包括：

1. 餘氯消耗模式(Chlorine residual decay model)
2. 細菌生長模式(Bacterial growth model)

¹ 國立中興大學環境工程學系碩士班

² 國立中興大學環境工程學系教授

3. 三鹵甲烷生成模式(Trihalomethanes formation model)

4. 金屬離子溶出模式(Metal ion leaching model)

5. 微粒傳輸模式(Particle transport model)

有效的自來水配水系統水質模式除了包括上述五點主題外，更應結合水力模式(包括水壓、水量、流量、水力坡降)及水質參數(pH、溫度)，並考慮管材(PVC管、Epoxy管、鍍鋅管)、管形(包括直管、彎管、分叉管、死端)、不規則管壁(孔穴、障礙物)及貯水設施(配水池、配水槽)對水質變化的影響。

在自來水文獻中的水質模式，均針對個別問題做探討，如餘氯消耗模式(Biswas et al., 1993 ; Lu et al., 1993 ; Rossman et al., 1994 ; Boulou et al., 1995)，THMs 生成模式(Kavanaugh et al., 1980 ; Engerholm and Amy, 1983 ; Engerholm and Amy, 1983 ; Amy et al., 1987 ; Koch et al., 1991 ; Garcia-Villanova et al., 1997 ; Clark, 1998)，生物消長模式(Laurent et al., 1993 ; Lu et al., 1995 ; Dukan et al., 1996 ; Bois et al., 1997)及微粒與金屬離子傳輸模式(Eilers and Clark, 1988 ; Galwin, 1989 ; Biswas et al., 1991)。然而，在實際情況中，問題通常不是單一發生的，彼此間也會互相影響，例如 THMs 形成模式中的溶解性有機碳(dissolved organic carbon, DOC)的消耗，會造成生物消長模式中微生物可利用的有機物減少，轉折點加氯模式中形成的一氯胺會抑制自來水中附著性微生物的生長等。因此，上述模式除了必需持續的修正與驗證外，彼此之間的整合工作也有其必要性。

本研究的主要目的即在發展一整合各項物理、化學與生物問題的配水管網水質模式，研究的初步成果乃著重於有機物質、微生物與餘氯之間的相互關係。

貳、理論與模式推導

1. 基本環境條件

在一般的自來水配水系統中，經常發生的一些問題，如管線中微生物再生長、THMs 生成及輸出水(finished water)中含有氯氣等。因此，在本研究中，將配水管線中各物種間的反應分為三個系統：THM 系統、氯-氯系統及生物系統，三個系統之間會隨著物種消長，而相互影響，如圖 1 所示。

在這模式中考慮幾個基本的物理、化學及生物現象：

(1) THMs 的生成反應可視為自由餘氯與 DOC 的二階反應(Clark, 1998)，其反應式表示如下：



- (2) 當輸出水中含有氯氣時，由於濃度很低，因此如果加氯於輸出水中，很容易形成轉折點加氯(breakpoint chlorination)，亦即氯與氯氣的莫耳比經常超過 1.5。其中氯氣的反應式如下(Morris and Issac, 1981):



- (3) 將管線中的微生物分為四部分(Bois et al., 1997): 懸浮性活菌(free living bacteria, FLB)、懸浮性死菌(free dead bacteria, FDB)、附著性活菌(attached living bacteria, ALB)、死附著性死菌(attached dead bacteria, ADB)。活菌會利用水中生物可分解的溶解性有機碳(biodegradable dissolved organic carbon, BDOC)而生長，但也會受到餘氯的抑制，甚至造成細菌死亡。
- (4) 附著性細菌會因水流的沖刷而脫落，增加懸浮性細菌的量，而懸浮性細菌也會附著在管壁上，增加附著性細菌的量。
- (5) 水中的 BDOC 會被微生物利用而減少，會因死亡微生物的分解而增加。
- (6) 活菌中因為受到餘氯的抑制作用，只有部分的活菌具有活性(active bacteria)，而能利用 BDOC 而生長，其關係式如下(Bois et al., 1997):

$$[\text{FLB}] = \exp(-k_{\text{inact}}[\text{HOCl}])([\text{FLB}]) \quad (5)$$

$$[\text{ALB}] = \exp\left(-\frac{k_{\text{inact}}}{K_2}[\text{HOCl}]\right)([\text{ALB}]) \quad (6)$$

其中 k_{inact} 為氯對微生物的抑制作用速率常數， K_2 為附著性微生物對氯抑制作用的阻抗因子。

- (7) 為了模擬在實際管線中，流量會隨著地區型態及大眾的生活習慣而有不同的變化。本研究將一天分為 12 個時段，每個時段有不同的流量，而流量大小變化是根據一般大眾用水情形所作的假設，通常用水量大的時段約在早上 8~11 點及晚上 7~10 點之間，而凌晨 1~4 點則為用水量最少的時段。其流量變化情形如表一所示。

2. 基本假設

下面是推導自來水配水管線水質模式時所做的一些假設：

- (1) 假設水溫及 pH 值保持一定值，且均在微生物生長容許範圍內，故不考慮其對微生物的影響；
- (2) 忽略軸向擴散與徑向擴散；
- (3) 微生物對基質的利用符合 Monod 的反應動力學(Lu et al.,1995;Bois at al.,1997)；
- (4) 各種反應是在柱塞流的情況下進行；
- (5) 進流的各物質濃度保持一定，不隨時間改變；
- (6) 每一種物質的濃度分布在管線的入口呈均勻混合；
- (7) 假設流量會隨著時間規律的變化，周期為 24 小時，每一次流量變化的時間間隔為 2 小時。

3. 模式建立

考慮各物種在平均流速 U_{av} 下的傳輸現象，並與上述的化學反應式結合，則各物質在管線中的質量平衡方程式可以表示如下：

總三鹵甲烷(TTHM):

$$\frac{\partial [TTHM]}{\partial t} = -U \frac{\partial [TTHM]}{\partial x} + k_i [HOCl][DOC] \quad (7)$$

溶解性有機碳(DOC):

$$\begin{aligned} \frac{\partial [DOC]}{\partial t} = & -U \frac{\partial [DOC]}{\partial x} + m_o k_{min} ([FDB] + [ADB]) - k_i [HOCl][DOC] - \frac{V_{max} [BDOC]}{K_s + [BDOC]} \\ & \left\{ \exp(-k_{min} [HOCl]) [FLB] + \exp\left(-\frac{k_{min}}{K_i} [HOCl]\right) [ALB] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

自由餘氯($Cl=HOCl+OCl$):

$$\frac{\partial[\text{Cl}]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{Cl}]}{\partial x} - k_n[\text{NH}_3][\text{HOCl}] - k_a[\text{NH}_2\text{Cl}][\text{HOCl}] - k_o[\text{NHCl}_2][\text{HOCl}] + k_{n1}[\text{NH}_2\text{Cl}] + k_{n2}[\text{NHCl}_2] \quad (9)$$

$$+ k_{n3}[\text{NCl}_3] - k_s[\text{HOCl}][\text{DOC}] - k_v[\text{HOCl}]$$

總氮量($\text{N}=\text{NH}_3+\text{NH}_4^+$):

$$\frac{\partial[\text{N}]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{N}]}{\partial x} - k_n[\text{NH}_3][\text{HOCl}] + k_{n1}[\text{NH}_2\text{Cl}] \quad (10)$$

一氯胺(NH_2Cl):

$$\frac{\partial[\text{NH}_2\text{Cl}]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{NH}_2\text{Cl}]}{\partial x} + k_{n1}[\text{NH}_3][\text{HOCl}] - k_a[\text{NH}_2\text{Cl}] - k_o[\text{NH}_2\text{Cl}][\text{HOCl}] + k_{n2}[\text{NHCl}_2] \quad (11)$$

二氯胺(NHCl_2):

$$\frac{\partial[\text{NHCl}_2]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{NHCl}_2]}{\partial x} + k_a[\text{NH}_2\text{Cl}][\text{HOCl}] - k_{n2}[\text{NHCl}_2] - k_o[\text{NHCl}_2][\text{HOCl}] + k_{n3}[\text{NCl}_3] \quad (12)$$

三氯胺(NCl_3):

$$\frac{\partial[\text{NCl}_3]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{NCl}_3]}{\partial x} + k_{n3}[\text{NHCl}_2][\text{HOCl}] - k_{n3}[\text{NCl}_3] \quad (13)$$

懸浮性活菌(FLB):

$$\frac{\partial[\text{FLB}]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{FLB}]}{\partial x} + k_{\text{FLB}} \frac{V_{\text{max}}[\text{BDOC}]}{k_m + [\text{BDOC}]} \exp(-k_{\text{FLB}}[\text{HOCl}])(\text{FLB}) - [k_s + k_{\text{FLB}}[\text{HOCl}]](\text{FLB}) \quad (14)$$

$$- k_{\text{FLB}}[\text{FLB}] + k_{\text{FLB}}[\text{ALB}]$$

附著性活菌(ALB):

$$\frac{\partial[\text{ALB}]}{\partial t} = k_{\text{ALB}} \frac{V_{\text{max}}[\text{BDOC}]}{k_m + [\text{BDOC}]} \exp\left(-\frac{k_{\text{ALB}}}{k_{\text{ALB}}}[\text{HOCl}]\right)(\text{ALB}) - \left[k_s + \frac{k_{\text{ALB}}}{k_{\text{ALB}}}[\text{HOCl}]\right](\text{ALB}) + k_{\text{FLB}}[\text{FLB}] \quad (15)$$

$$- k_{\text{ALB}}[\text{ALB}]$$

懸浮性死菌(FDB):

$$\frac{\partial[\text{FDB}]}{\partial t} = -U \frac{\partial[\text{FDB}]}{\partial x} + [k_s + k_{\text{FLB}}[\text{HOCl}]](\text{FLB}) - k_{\text{FLB}}[\text{FDB}] + k_{\text{FLB}}[\text{ALB}] - k_{\text{FLB}}[\text{FDB}] \quad (16)$$

附着性死菌(ADB):

$$\frac{\partial [ADB]}{\partial t} = \left[k_2 + \frac{k_{2max}}{k_1} [HOCl] \right] [ALB] + k_{12} [FDB] - k_{max} [ADB] - k_{1max} [ADB] \quad (17)$$

生物可分解的溶解性有機碳(BDOC):

$$\begin{aligned} \frac{\partial [BDOC]}{\partial t} = & -U \frac{\partial [BDOC]}{\partial x} + m_0 f_{cb} k_{max} ([FDB] + [ADB]) - k_3 [BDOC] [HOCl] - \frac{V_{max} [BDOC]}{k_m + [BDOC]} \\ & \left(\exp(-k_{max} [HOCl]) [FLB] + \exp\left(-\frac{k_{max}}{k_3} [HOCl]\right) [ALB] \right) \end{aligned} \quad (18)$$

4. 模式求解

方程式(9)(10)(15)~(19)是描述在自來水中存在的基質(DOC、BDOC)、消毒劑(Cl)、微生物時，其彼此間的相互影響，如抑制、利用、生長、死亡、殺菌、分解等作用，將這些方程式配合適當的初始條件聯立解，即可求得各物種在管中的濃度分布及隨時間的變化情形。

模式求解的方法是利用外顯式有限差分法(explicit finite-diffence)，先針對軸向分割成 n 等分，下一個時間間隔各物質濃度則由上一個時間間隔的各物質濃度聯立求解，因此在求解之前必須先設定其初始條件，其參數定義與數值如表二及表三所示(Bois et al., 1997)。

利用以上的邊界條件，先建立初始的濃度分布，有了初始的濃度分布後，再與下一個時間間隔的各種物質方程式聯立求解，又可得到此一時間的濃度分布。一直重覆這個程序直到整個管線中的濃度分布穩定為止。

為了求得適當的分割數 n，本研究模擬了 n=50、100、200，比較其模擬結果發現，n=100 與 n=200 的結果相差小於 3%，故取 n=200 為本研究的軸向切割數，而模式模擬結束時間為理論水力停留時間的 2 倍。

參、結果與討論

1. 模式驗證

本模式的驗證部分將以本實驗室所作的餘氯消耗試驗來比較。其管材為 PVC 管，管長為 187 公分，直徑為 10 公分，進流流量分別為 26 cm³/s 與 1309 cm³/s，即流速 20 cm/min 與 1000 cm/min，此時雷諾數分別為 363 與 18140，分別代表層流與紊流流況，進流餘氯濃度為 1.04 mg/L。

比較在餘氯濃度穩定後之軸向各點的餘氯濃度變化，結果如圖 2 及圖 3。由圖中可知在兩種不同流速下均有非常好的模擬結果。而在微生物濃度的驗證部分，由於實驗仍在進行中，有待進一步的驗證。

2. 流速對濃度分布的影響

在配水管線中流速是影響水質穩定的重要因子，因此本研究中模擬在三種不同的流速下(1 cm/s、5.32 cm/s、53.2 cm/s)，分別代表三種不同的流況(層流、過渡流、紊流)對配水管線中各物質濃度的影響，其結果如圖 4 及圖 5。由圖中可以發現不論是微生物濃度分布或是餘氯濃度分布，均會隨著流速變大，而使濃度在管線中的分布曲線較為平緩，因為在高流速時由於水力停留時間小，所以在軸向的濃度分布較為均勻，其濃度分布曲線也就較為平緩。

在流速對濃度的影響方面，餘氯濃度會隨著流速變大而上升，這是因為進流濃度固定，所以流速大時，進流的餘氯量較多，但餘氯消耗量並沒有跟著提高，而使得管線中的餘氯濃度上升。懸浮性微生物濃度則會隨著流速變大而下降，這是因為在流速大時，因水流流動帶走的懸浮性微生物量也增加，而進流的微生物量並沒有增加，故在管中的懸浮性微生物濃度會下降。

3. 濃度穩定時間

在一開始進流時，可以發現管線中的濃度分布會隨著時間不斷的變化，經過一段時間之後，整個的管線濃度分布才會呈現一個穩定狀態，從開始進流到濃度穩定所需的時間稱為濃度穩定時間。本研究模擬各物質在進流時間 6 小時、12 小時、24 小時後，管線中的濃度分布情形，其結果如圖 6~9。

由圖中可以看出在時間為 6 小時的時候，離進流口約 140 公尺處以前的管線，餘氯、DOC、BDOC 的濃度分布已不再隨著時間而變化，達到一個穩定的濃度分布狀態，同樣的在時間為 12 小時的時候，離進流口約 500 公尺處以前的管線中濃度分布已達穩定，而整個管線中的濃度分布達到穩定所需的時間約為 24 小時，大約為一個水力停留時間。

從穩定的濃度分布曲線來看，可以發現，在距進流口 400 公尺以後，各物質濃度變化極小，因為各物質間的大部分反應在 400 公尺以前已經反應完成，所以在 400 公尺以後各物質濃度變化量極小，濃度也較穩定。

4. 流量變化的影響

在本研究中設計周期性流量變化，來模擬實際生活中一天 24 小時用水量的變化(圖 10)，對配水管線中水質的影響，模擬結果如圖 11 所示。從圖中可發現餘氯濃度會隨著流量周期性變化的影響，而有周期性的濃度變化，週期大約為

24 小時，而在低用水量時，餘氯濃度也較低，原因是因為在低流量時水力停留時較長，而使得自來水中餘氯的消耗量較多，濃度因此下降。

從結果中可以發現在晚上 8-12 點間的平均餘氯濃度最高，而在凌晨 6-8 點的平均餘氯濃度最低，由於在凌晨時段的用水量最少，也使得這個時段的餘氯濃度最低，因此一旦在此時有污染物質進入配水管網中，將無法有效的控制自來水水質，而對飲用水安全造成威脅。

結論與建議

1. 不論微生物濃度或餘氯濃度的軸向分布，均會隨著流速變大而使分布曲線趨向平緩，因此若要使餘氯濃度分布均勻，應將流況保持在紊流的情況。
2. 餘氯濃度會隨著流速變大而上升，懸浮性微生物濃度則會隨著流速變大而下降，因此提高流速可以避免出現過高的懸浮性微生物濃度。
3. 餘氯、DOC、BDOC 在進流時間超過一個水力停留時間 24 小時後，各物質濃度已達穩定。
4. 各物質間的大部分反應在管線前段已經完成，所以在管線後段各物質濃度變化量極小，濃度也較穩定。
5. 餘氯濃度最低的時段約出現在凌晨，因此為保持自來水中一定的餘量，應特別監測夜間的餘氯變化情形。

誌謝

1. 本研究承蒙國科會部份經費補助(NSC 88-2211-E-005-012)，特此誌謝。
2. 本研究能順利的完成，乃因本研究室的自來水配水系統研究小組(WDSRG)共同協力，特此誌謝。

參考文獻

1. Amy, G.L.; Chadik, P.A.; Chowdhury, Z.K., "Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics", Journal AWWA., pp.89-97, (1987).
2. Biswas, P.; Lu, C.S.; Clark, R.M., "A model for chlorine concentration decay in drinking water distribution pipes", Wat. Res. 27, pp.1717-1724, (1993).

3. Biswas, P. ; Lu, C.S. ; Clark, R.M., "Particle and chemical transport in drinking water systems. Proc. Water quality modeling in distribution systems" , AWWA Research foundation , 3-5 Feb Cincinnati , OH , 323-363 , (1991).
4. Bois, F.Y. ; Fahmy, T. ; Block, J.C. ; Gatel, D., "Dynamic modeling of bacteria in a pilot drinking-water distribution system" , Wat. Res. Vol.31 , No.12 , pp.3146-3156 , (1997).
5. Boulos, P.F. ; Altman, T. ; Jarrige, P.A. ; Collevati, F., "Discrete simulation approach for network-water-quality models" , Journal of Water Resources Planning and Management , pp.49-60 , (1995).
6. Clark, R.M.,ASCE, "Chlorine demand and TTHM formation kinetics: A second-order model" , Journal of Environmental Engineering , January , pp.16-24 , (1998).
7. Dukan, S. ; Levi, Y. ; Piriou, P. ; Guyon, F. ; Villon, P., "Dynamic modeling of bacterial growth in drinking water networks" , Wat. Res. Vol.30 , No.9 , pp.1991-2002 , (1996).
8. Eilers, R.G. and Clark, R.M., "Flow separation conditions at pipe walls of distribution mains" , Annual Conference Proceedings , J. AWWA , Orlando , Florida , pp.1619-1624 , (1988).
9. Engerholm, B.A. and Amy, G.L., "A predictive model for chloroform formation from humic acid" , Journal Research and Technology , August pp.418-423 , (1983).
10. Galowin, L.S., "Separated flow conditions at pipe walls of Distribution mains" , U.S. EPA , (1989).
11. Garcia-Villanova, R.J. ; Garcia, C. ; Gomez, J.A. ; Garcia, M.P. ; Ardanuy, R., "Formation, Evolution and modeling of trihalomethanes in the drinking water of a town: II. in the distribution system" , Wat. Res. Vol.31 , No.6 , pp.1405-1413 , (1997)
12. Kavanaugh, M.C. ; Trussell, A.R. ; Cromer, J. ; Trussell, R.R., "An empirical kinetic model of trihalomethane formation: Applications to meet the proposed THM standard" , Journal AWWA , pp.578-582 , (1980).
13. Koch, B. ; Krasner, S.W. ; Scilimenti, M.J. ; Schimpff, W.K., "Predicting

the formation of DBPs by the simulated distribution system", Journal AWWA., pp.62-70, (1987).

14. Laurent, P. ; Servais, P. ; Randon, G., "Bacterial development in distribution networks-study and modelling", Water Supply, Vol.11, Nos 3/4, Berlin, pp.387-398, (1993).
15. Lewis A. Rossman ; Clark, R.M. ; Grayman, W.M., "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution system", Journal of Environmental Engineering, Vol.120, No.4, pp.803-820, (1994).
16. Lu, C.S. ; Biswas, P. ; Clark, R.M., "Modeling of Breakpoint Reaction in Drinking Water Distribution Pipes", Environment international, Vol.19, No.6, pp.543-560, (1993).
17. Lu, C.S. ; Biswas, P. ; Clark, R.M., "Simultaneous transport of substrates, disinfectants and microorganisms in water pipes", Wat. Res. Vol.29, No.3, pp.881-894, (1995).
18. Morris, J.C. ; Issac, R.A., "A critical review of kinetic and thermodynamic constants for the aqueous chlorine-ammonia system", In: Jolley, R.L. et al., eds. Water chlorination, environmental impact and health effects, Vol.4, Chap. 2. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science, (1981)

表一 在不同時段的流量係數表

時段(hour)	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
流量係數	0.2	0.3	0.5	0.8	1.5	1.4
時段(hour)	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
流量係數	1.2	0.9	1.0	2.0	1.9	0.8

表二 模式中各項參數定義與其數值

符號	定義	數值	單位
$f_{c/b}$	生物量(biomass)分解後的BDOC產率	0.39	無因次
$f_{c/lc}$	進流DOC中所含BDOC比率	0.69	無因次
K_{aff}	生物酵素分解BDOC之親和常數	2.8×10^{-3}	mg-DOC/L
K_{conv}	BDOC轉換成Biomass之比率	0.043	bacteria/mg-BDOC
K_{fix}	懸浮細菌附着到管壁上之速率常數	0.37	hour ⁻¹

K_{inact}	氯對細菌的抑制作用速率常數	0.35	L/mg-Cl
K_{lysis}	死亡細菌的分解速率常數	9×10^{-4}	hour ⁻¹
K_{r1}	附著性細菌對氯殺菌作用的阻抗因子	83	無因次
K_{r2}	附著性細菌對氯抑制作用的阻抗因子	129	無因次
K_{shear}	附著性細菌脫落速率常數	0.02	hour ⁻¹
K_x	細菌自然死亡速率常數	0.0227	hour ⁻¹
K_{xdes}	細菌因氯死亡速率常數	0.32	L/hour/mg-Cl
K_c	反應速率常數	0.15	L/mg/hour
K_p	管壁對氯的消耗速率常數	1.3×10^{-3}	hour ⁻¹
K_{f1}	反應速率常數	4.20×10^6	L/mg/s
K_{h1}	反應速率常數	2.10×10^{-5}	s ⁻¹
K_{f2}	反應速率常數	3.50×10^2	L/mg/s
K_{h2}	反應速率常數	7.60×10^{-7}	s ⁻¹
K_{f3}	反應速率常數	2.1	L/mg/s
K_{h3}	反應速率常數	4.50×10^{-5}	s ⁻¹
m_b	單一細菌重量	2.0×10^{-10}	mg
V_{max}	BDOC 最大消耗速率	4.0×10^{-11}	mg-BDOC/bacteria/h
X	軸向距離	---	cm

表三 模式中各項初始條件及其數值

U	流速	3600	cm/hour
ALB	附著性活菌	1.58×10^6	CFU/cm ²
ADB	附著性死菌	4.63×10^7	CFU/cm ²
FLB	懸浮性活菌	2.7×10^3	CFU/L
FDB	懸浮性死菌	2×10^7	CFU/L
Cl	自由餘氯濃度	3.5	mg/L
DOC	溶解性有機質	4	mg/L
BDOC	生物可利用溶解性有機質(=DOC × f_{clc})	2.76	mg/L
L	管長	86400	cm
D	管直徑	1.88	cm
Q	流量	10000	cm ³ /hour
$T_{residence}$	水力停留時間	24	hour
Re	雷諾數	188	無因次

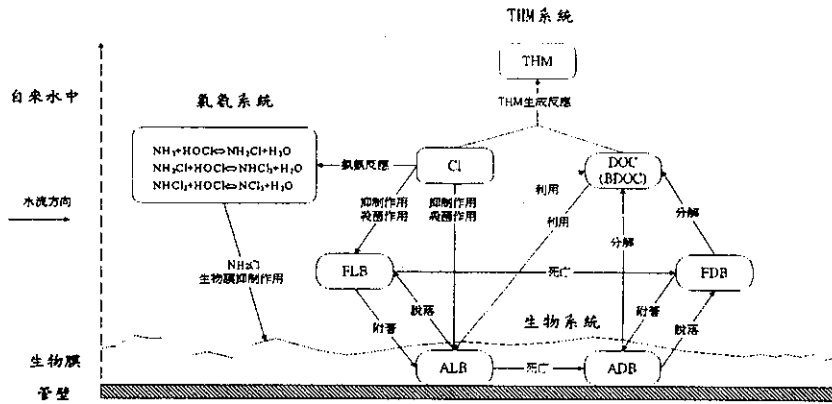


圖 1 模式各系統間關係的示意圖

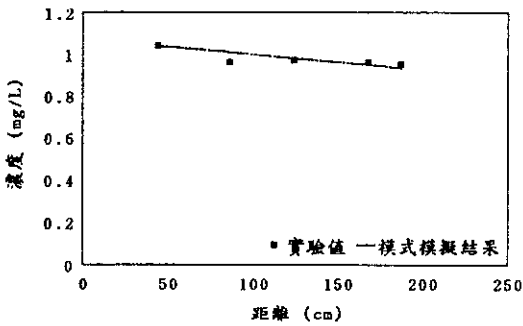


圖 2 流速 20cm/min 時, 實驗值與模式結果的比較圖

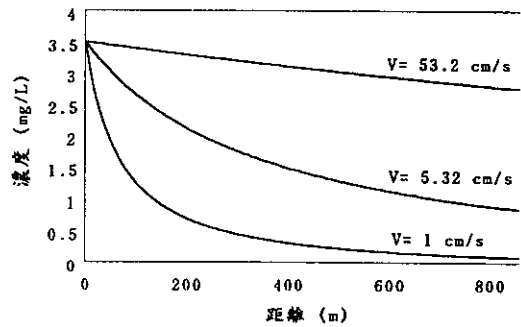


圖 4 餘氯在不同流速下的軸向濃度分布圖

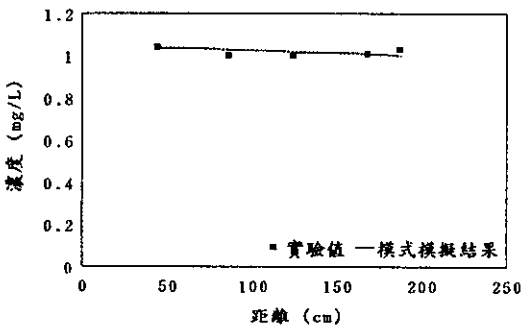


圖 3 流速 1000cm/min 時, 實驗值與模式結果的比較圖

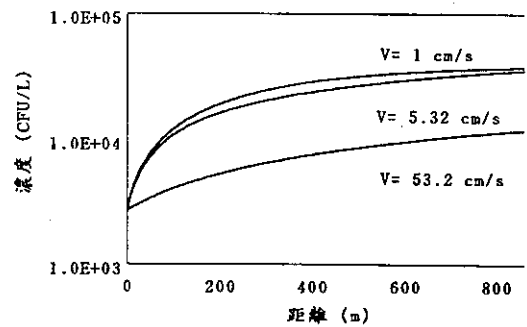


圖 5 FLB 在不同流速下的軸向濃度分布圖

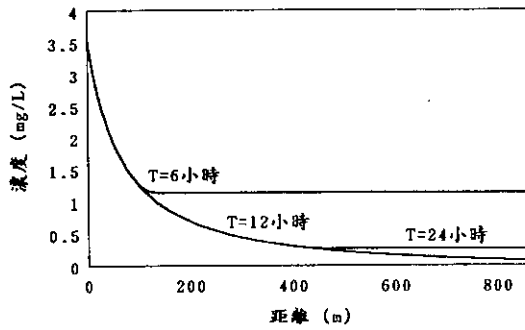


圖 6 餘氨在不同時間的軸向濃度分布圖

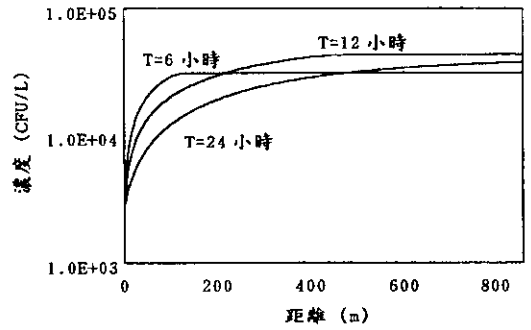


圖 9 FLB 在不同時間的軸向濃度分布圖

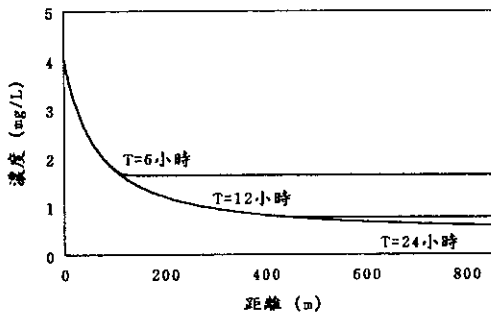


圖 7 DOC 在不同時間的軸向濃度分布圖

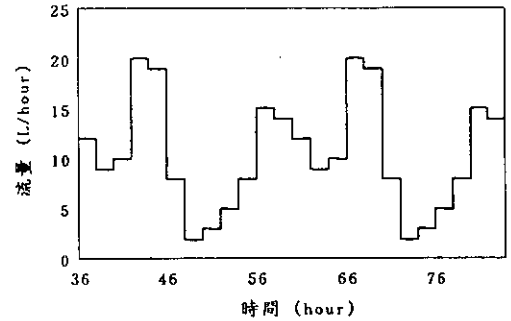


圖 10 流速隨時間周期性變化圖

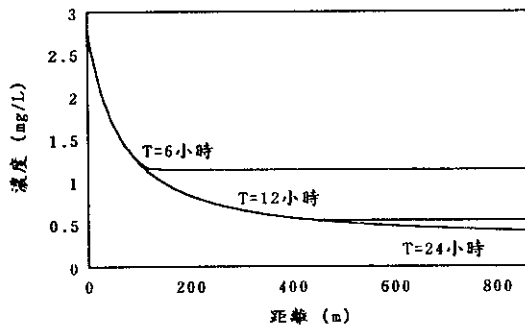


圖 8 BDOC 在不同時間的軸向濃度分布圖

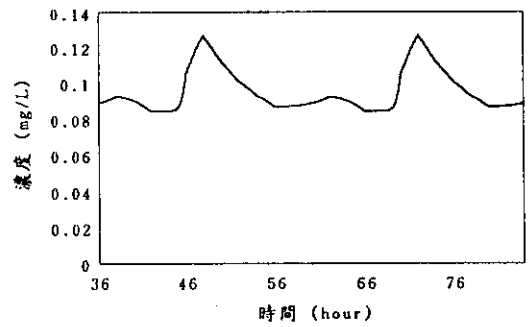


圖 11 出口口餘氨在流速周期性變化下的濃度變化圖