

生物濾床處理澄清湖優養化給水源之研究

Study on biological filter removing low concentration of nutrient compounds with the eutrophic water resource in Chen-Ching Lake

鄭幸雄¹、葉宣顯²、王文革³、王永福⁴、陳佩足⁵

摘要

本研究採用生物濾床處理澄清湖優養化之水源，探討生物單元應用在低濃度氮氮處理之各種功能。生物濾床採植種澄清湖原水中之硝化菌方式啟動，截留原水一個月後再利用添加高濃度氮氮、低進流量之馴養策略，馴養初期氮氮去除率即可達 90% 以上，顯示馴養效果非常良好。操作期間水源總磷平均含量高達 130 $\mu\text{g/L}$ ，葉綠素 a 亦有 44.5 $\mu\text{g/L}$ ，顯示澄清湖水體仍處於優養之程度。

原水氮氮範圍則是在 0.05~0.4 mg/L，生物濾床均可有效去除氮氮。原水有機氮則在 0.14~1.32 mg/L 之間，變動程度相當大，而生物濾床則有 53~73% 之去除率。NPDOC 濃度在 0.93~1.36 mg/L 之間，去除率僅有 10~12%，而原水 THM_{9P} 之濃度在 48~90 $\mu\text{g/L}$ 之間，其去除效果亦十分有限。試程二轉換到試程三後，生物活性從 60.9 下降到 7.6 mg O₂/g VSS hr，第一採樣口焦炭濾料上之生物質量則從 8.4 下降至 3.77 mg VSS/g Coke。

從模廠的操作結果可以得知，生物濾床的確可有效去除氮氮及有機氮，處於低氮氮的環境下生物活性及生物質量也可維持一定程度，並未因低濃度而降低其去除效率。

關鍵字：優養化、低濃度、有機氮、生物質量、生物活性

一、前言

南部的河川上游由於受到一般的畜牧、工業、及家庭污水的污染，提高水體中的氮、磷濃度，而淨水廠為了去除這些過剩的污染源，需採用前加氯的方式以去除氮氮及一些有機物，但是採用前加氯會形成對人體有害的消毒副產物 (disinfection by-products)。為了解決水源污染以有效降低消毒副產物的生成，需應用生物前處理單元，以微生物硝化過量氮氮及氧化有機物質，在前加氯之前去除容易與氯接觸形成消毒副產物之前驅物質 (precursor)，以有效減少加氯量。

受污染之天然水體中除了有氮氮之存在外，另外許多氮是以有機氮的形式存在，而這些有機氮會經由氨化作用裂解出氨氮，再由硝化作用硝化成亞硝酸鹽氮及硝酸鹽氮，整體反應如下圖所示。

1、2：國立成功大學環境工程系教授

3：國立成功大學環境工程系碩士

4、5：國立成功大學環境工程系研究生

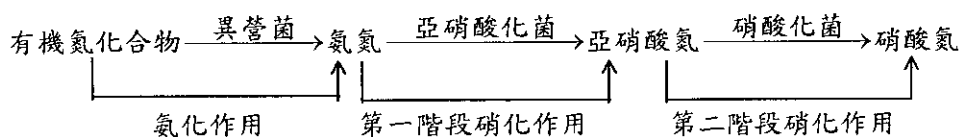


Figure 1.1 氮系化合物分解示意圖 (Anthonisen^[1], 1976)

所以藉由氨化作用及硝化作用可有效將污染源中之有機氮及氨氮轉化為硝酸鹽氮。

國內在近幾年來也有許多處理受污染源之研究，葉氏^[2] (1989) 於港西淨水廠應用生物濾床處理原水，其氨氮去除率可達 90% 以上。由陳氏^[3] (1990) 及羅氏^[4] (1994) 的研究中則顯示焦炭可截留較多的生物質量，所以本研究之擔體亦選取焦炭為濾材。同樣的在國外亦有許多生物處理去除氨氮之經驗，由 Bouwer^[5] (1988) 的研究整理所得，生物處理於實廠或模型廠等對於氨氮都可達到 90% 以上之去除效果。所以應用生物處理單元於淨水程序上，的確可有效去除過高的氮污染，減輕後續淨水程序的負擔。

二、實驗設備與方法

2-1. 實驗設備

本研究之實驗槽體是位於澄清湖高級淨水處理模型廠中之生物濾床，採用上流式曝氣氧化濾床，規格為 $\phi 100 \times H 420$ (cm)，內部填充卵石及焦炭為濾料，卵石層高 30 cm 粒徑 1~2 cm，焦炭層高 120 cm 粒徑 3~7 mm，填充率為 0.21。

2-2. 實驗試程

生物濾床的啟動考慮到淨水流程的安全性，因此並不以傳統植種污泥的方式進行啟動，而是採取天然原水植種的方法，利用濾料將菌體截留在反應槽中，試程時間約進行一個月，使生物濾床自然培養出硝化菌，操作期間濾速維持在 92 m/day，EBCT 為 43 min。

為了更快速提升硝化菌的濃度，便以降低濾速至 55 m/day，及外加氨氮至進流濃度約 5 mg/L 的操作策略，進行試程二的馴養期。馴養初期即可迅速分解氨氮達 90% 以上，前後三個月的操作中，氨氮去除率一般都可維持在 95% 以上，顯示馴養效果非常良好。

結束馴養期後即中止添加氨氮，直接進流原水，因此將濾速又調回 92 m/day。之後即穩定操作，觀察生物濾床對氨氮的去除效果，及生物質量與生物活性的變化情形。

2-3. 實驗分析方法

本研究所需分析的實驗項目中，溫度、pH 值、溶氧、比電導度、濁度等皆於現場直接偵測，其餘項目之水樣則在適當處理後，帶回實驗室分析，分析方法均參照美國 APHA 出版之 Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 第十九版，或環保署所公告之標準檢驗方法。

2-4. 生化反應動力理論

微生物在成長的過程中，基質的濃度與微生物的基質分解速率之間有相當程度的關聯性，為了探討這些現象，所以發展出生化反應動力的理論用來闡述這些關聯性。對非抑制性基質而言，最常用的生物分解動力模式是 Monod equation (1949)。而如果是抑

制型基質，就必需以抑制型生長模式解釋，本研究即是利用 Neufeld^[6] (1980) 所提出的抑制性反應動力模式，以得到其最大反應速率，其式如下所示。

$$r = \frac{r_{\max}}{1 + (K_s/S) + (S/K_i)^n}$$

式中 r ：反應速率 (1/day) r_{\max} ：最大反應速率 (1/day)

K_s ：半飽和常數 (mg/L) K_i ：抑制常數 (mg/L)

S ：基質濃度 (mg/L) n ：抑制階數

三、實驗結果與討論

3-1. 澄清湖給水源水質分析

澄清湖原水的主要特色即優養化的水質，長期以來過多的藻類一直是令淨水場感到相當棘手的問題，所以總磷及葉綠素 a 的濃度均相當高。操作期間，原水總磷共 53 次的分析，平均值為 130 $\mu\text{g/L}$ ，葉綠素 a 前後 15 次的分析，平均值為 44.5 $\mu\text{g/L}$ 。而原水中的氮氮並不高，約只有 0.15 mg/L，無法與前幾年枯水期可達 2 mg/L 的情形相比，不過原水中的有機氮平均可達 0.5 mg/L，所以澄清湖原水中的氮污染，有機氮佔了較主要的部份。

3-2. 生物濾床各試程之操作結果

試程一氮系之變化情形如 Figure 3.1 所示，原水之氮氮濃度均偏低，平均值為 0.08 mg/L，出流水部份則可降低至小於 0.05 mg/L，雖然可有效去除氮氮但因原水濃度太低，所以也很難判斷是否有硝化的情形存在。而原水之有機氮變動性相當大，範圍在 0.14 ~ 0.81 mg/L 之間，不過在出流水則有明顯的降解趨勢。

試程二氮系去除變化的情形則可參照 Figure 3.2，從圖上可見在提高氮氮濃度的初期即可有效分解氮氮，生物硝化能力相當良好，在經過一個多月的自然植種後，經提升氮氮負荷後仍可立刻完全去除，顯示在自然植種期間的確截留不少硝化菌在生物濾床中，而在馴養期間即可有效提高生物濃度及提升生物活性。

試程三的操作結果從 Figure 3.3 即可了解原水氮氮並未提高太多，平均為 0.14 mg/L，與前幾年枯水期 1~2 mg/L 相比，今年之水質的確較為良好。有機氮部份從圖中可發現自 2 月後即有大幅上升之情形，所以在枯水期間雖然氮氮並不高，但有機氮卻有明顯上升之趨勢。而生物濾床在試程三對有機氮之去除可從原水平均之 0.57 mg/L 降至出流之 0.2 mg/L，有 65% 之去除率。

碳系的分解則可參照 Figure 3.4，圖上顯示的是三個試程之 NPDOC 進出流變化圖，在 4 月時原水有提高的趨勢，最高可達 1.94 mg/L，而整體去除率並不高僅約 10%。綜合三個試程之結果，生物濾床對 NPDOC 的去除效果並不好，長期馴養下仍無法有效提升其去除率。而其餘的水質參數則請參考 Table 3.1 所示。

總而言之，生物濾床模型廠前後操作三個試程，各有一個月、三個月和四個月之實測結果，顯示澄清湖原水含有大量藻類與微生物，已將污染水質穩定至相當程度。且雖然濃度偏低，進流生物濾床時仍有相當大的變異，即使水力停留時間自 30 至 60 分鐘，其污染物質之生物分解也在有限範圍。其中氨氮可處理到 0.05 mg/L 安全水質，NPDOC 有機碳至 1 mg/L，而有機氮去除率最顯著，皆可自原水之 0.57 mg/L 分解至 0.1 mg/L。比較鄭氏^[7] (1998) 於澄清湖給水廠所做之調查，前一年的平均有機氮，由原水之 0.63 mg/L 到清水 0.46 mg/L，顯然，生物濾床之生物膜有良好的有機氮處理效率，值得重視。

Table 3.1 各試程之生物濾床進出流水質分析平均值

項目	試程一(87.8-87.9)		試程二(87.9-87.12)		試程三(88.1-88.4)	
	進流	出流	進流	出流	進流	出流
pH	8.4 (0.35)	8.3 (0.19)	8.3 (0.2)	7.9 (0.25)	8.4 (0.13)	8.2 (0.13)
濁度 NTU	20.9 (2.5)	18.5 (8.2)	20.8 (8.1)	13.4 (6.5)	16.7 (4.3)	8.4 (5.7)
鹼度 mg/L	140 (2.5)	139 (3.3)	144 (13)	111 (19.4)	181 (10.2)	179 (9.8)
TKN mg/L	0.59 (0.19)	0.25 (0.22)	6.07 (1.2)	0.15 (0.11)	0.71 (0.31)	0.27 (0.18)
有機氮 mg/L	0.51 (0.2)	0.24 (0.22)	0.37 (0.09)	0.1 (0.09)	0.57 (0.29)	0.2 (0.13)
氨氮 mg/L	0.08 (0.06)	<0.05 (0.02)	5.48 (1.85)	0.16 (0.46)	0.14 (0.09)	0.07 (0.07)
硝酸鹽氮 mg/L	0.76 (0.04)	1.06 (0.09)	1.01 (0.23)	6.07 (1.93)	1.27 (0.22)	1.62 (0.27)
亞硝酸鹽氮 mg/L	0.08 (0.04)	<0.01 (0)	0.07 (0.04)	0.01 (0.05)	0.12 (0.06)	0.01 (0.04)
NPDOC mg/L	1.36 (0.22)	1.16 (0.17)	0.93 (0.14)	0.82 (0.16)	1.12 (0.32)	1.01 (0.27)

註 1：試程二因額外添加氨氮馴養，所以氨氮及硝酸鹽氮濃度較高，氮系濃度均以 N 為單位。

註 2：試程一為 9 次採樣平均值，試程二為 23 次，試程三為 12 次。

註 3：括號內所代表的是標準差

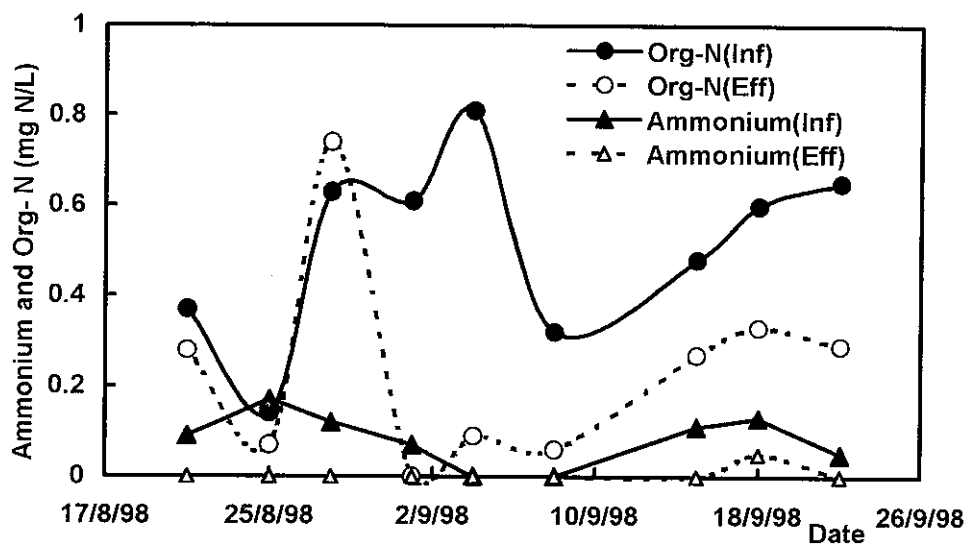


Figure 3.1 第一試程進出流氮氣及有機氮變化圖

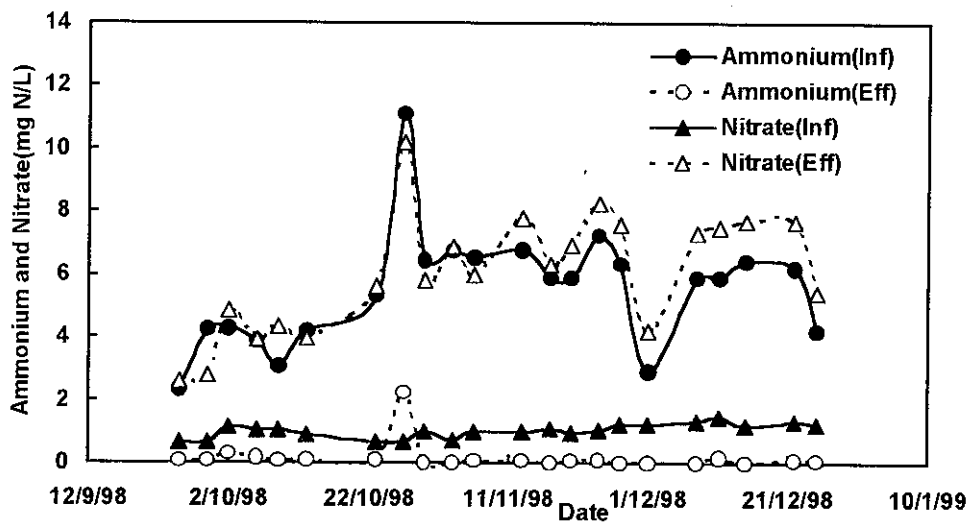


Figure 3.2 生物濾床第二試程進出流氮氣及硝酸鹽氮變化圖

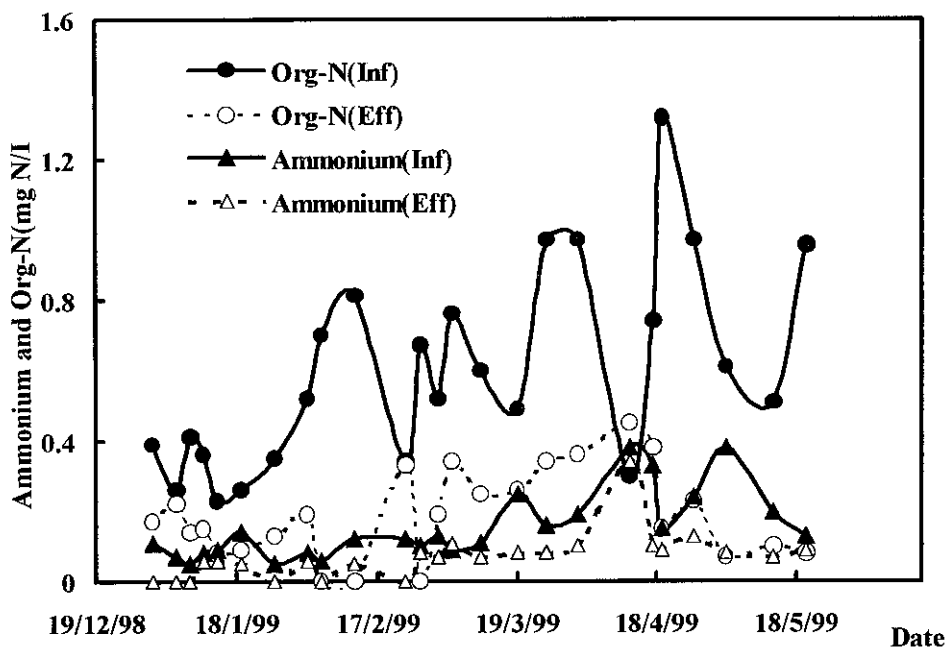


Figure 3.3 試程三氮氮及有機氮進出流變化圖

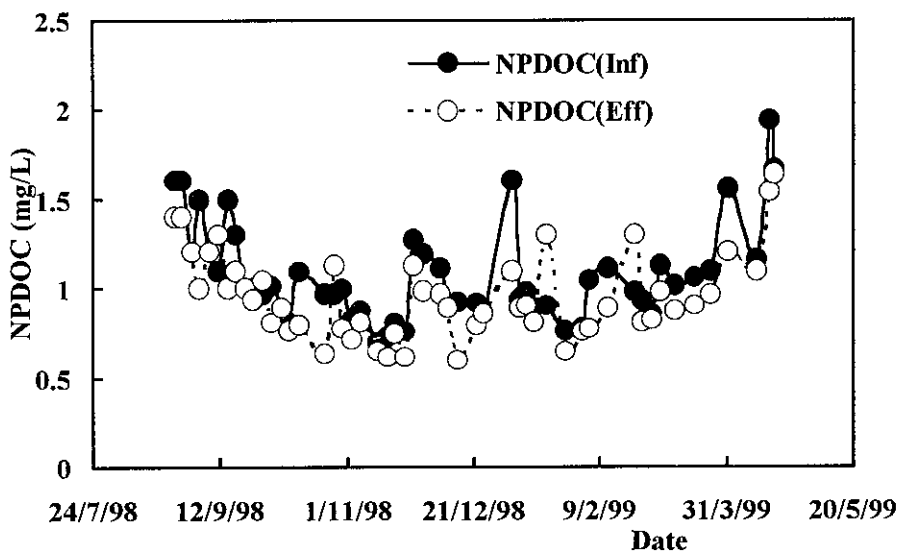


Figure 3.4 三個試程之 NPDOC 進出流變化圖

3-3. 生物質量及生物活性之變化

Figure 3.5 為層面生物質量分析圖，圖中之兩條曲線分別是在試程二馴養期及試程三穩定期所得到之結果，橫座標代表採樣口的位置，彼此相距 30 公分。

從圖上所得到之結果顯示，試程二微生物集中生長在前三個採樣口，生物質量分別為 8.4、7.95、7.05 mg VSS/g Coke，與羅氏^[4] (1994) 於實驗室經數月批次培養出之生物質量 13.93 mg VSS/g Coke 相比，雖有些許差距但顯示生物濾床之焦碳已累積相當程度之生物質量，不過第四採樣口則只有 3.87 mg VSS/g Coke。而試程三之生物質量則有大幅降低的現象，一、二採樣口約降低 50% 仍有 3.77 及 3.95，而三、四採樣口則已低到 1.35 及 0.54 mg VSS/g Coke。顯示轉換試程後，由於進流氮氣急遽降低，生物質量也有相當大的衰減，但仍可維持一定程度的生物質量。

生物活性的部份則可參照 Figure 3.6~3.8，圖中之模式曲線是以 Neufeld^[5] (1980) 所提出的生化動力模式模擬所得，分別代表試程二、試程二末期及試程三的生物活性。為方便比較，便將三次實驗所得之動力參數整理如 Table 3.2 所示。

Table 3.2 不同時期之生化動力參數比較表

動力參數	r_{max}	r^*	K_s	K_i	S^*	n	RSQ	RES
日期\單位	mg O ₂ /g VSS hr	mg O ₂ /g VSS hr	mg/L	mg/L	mg/L	-	-	-
87.11.29 (試程二)	60.9	51.5	1.4	18.3	9.1	5	0.99	13.8
87.12.27 (試程二末期)	30.3	23.5	2.1	18.7	9.2	4	0.98	11.3
87.3.1 (試程三)	7.6	5.5	0.4	4.3	1.6	2	0.82	4.5

註： r^* (臨界點反應速率)

S^* (臨界點基質濃度)

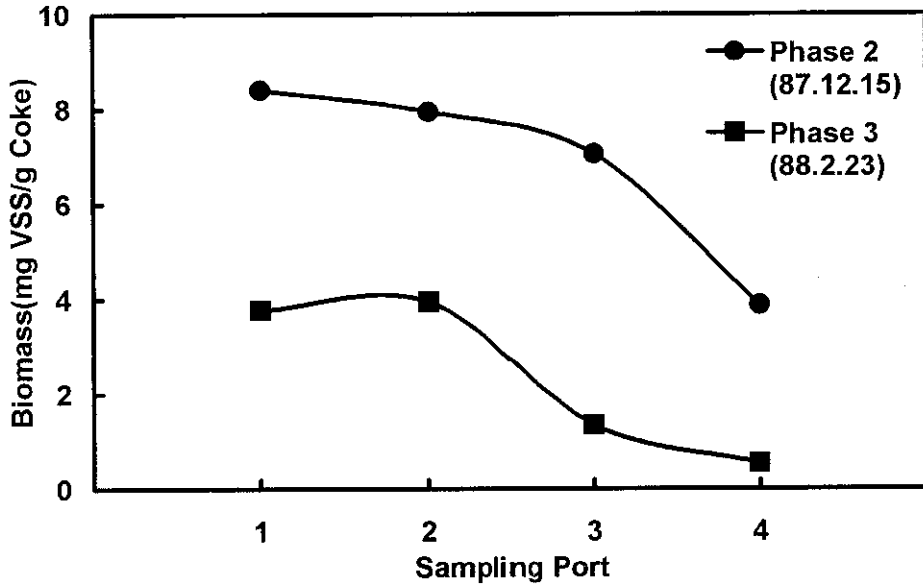


Figure 3.5 馴養期轉穩定期後之層面生物質量變化圖

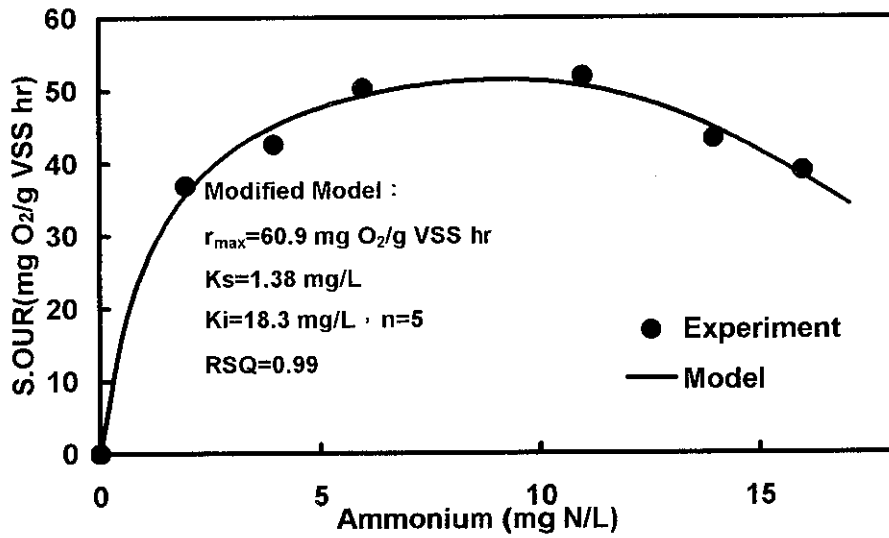


Figure 3.6 試程二硝化菌之生化反應動力模式(87.11.29)

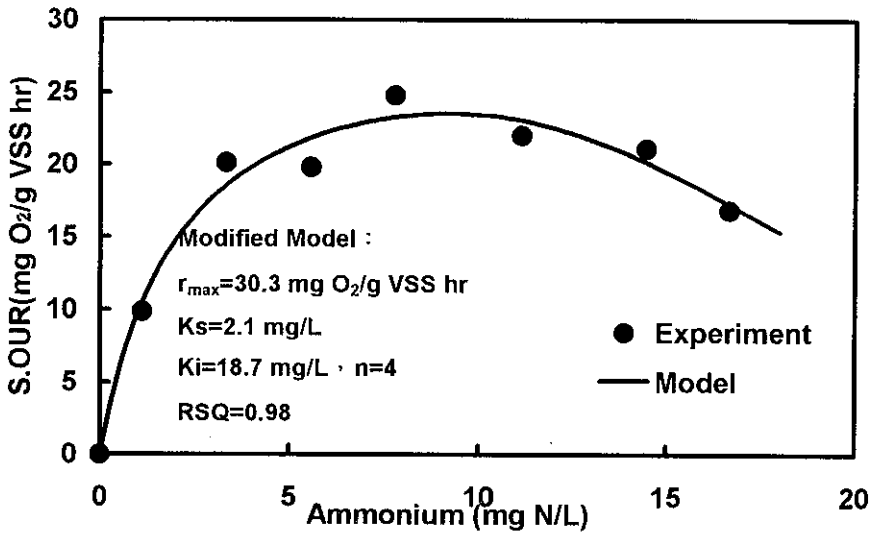


Figure 3.7 試程二末期硝化菌之生化反應動力模式(87.12.27)

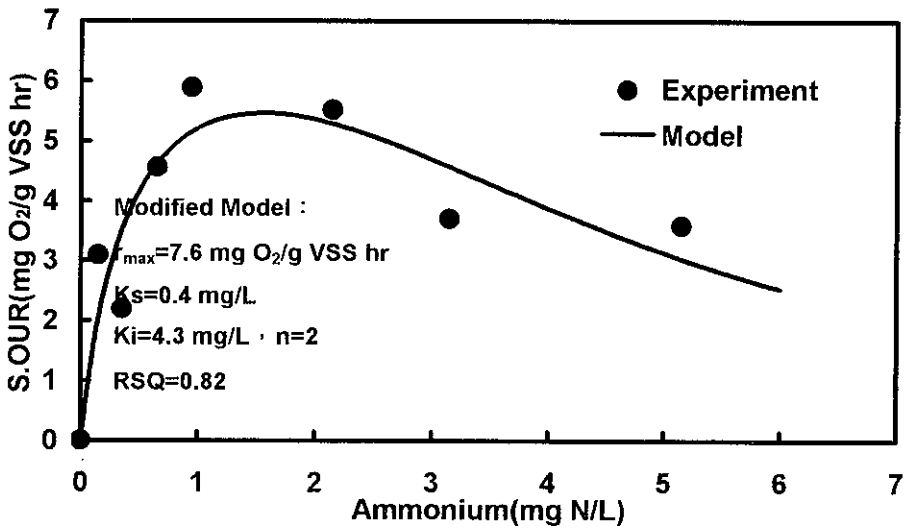


Figure 3.8 試程三硝化菌之生化反應動力模式(88.3.1)

首先比較試程二及末期之參數變化，試程二之 K_s 為 $1.4 \text{ mg NH}_4^+-\text{N/L}$ ，末期則因在低濃度下比攝氧速率降低程度較大，所以 K_s 略為上升至 $2.1 \text{ mg NH}_4^+-\text{N/L}$ ，顯示試程二末期不穩定操作的情形下，對氮的親和程度有降低的情形。不過兩次之 K_s 值均相當接近於 Rittmann⁽⁸⁾ (1984) 25°C 下所求得 *Nitrosomonas* 之 K_s 為 $0.5 \text{ mg NH}_4^+-\text{N/L}$ 及 *Nitrobacter* 之 K_s 為 $2.7 \text{ mg NH}_4^+-\text{N/L}$ 。而從 S^* 及 K_i 值去比較可發現幾乎沒有太大的變化， S^* 及 K_i 值均維持在 9 及 18 mg/L，因此可知其抑制模式並無太大變化，抑制濃度均

相當接近在 9 mg/L，但 r_{max} 則從 60.9 降至 30.3 mg O₂/g VSS hr，足足降了 50% 之多，從以上所述即可得知，在不穩定之操作條件下，雖然硝化菌抑制模式並未改變，但生物活性潛能已大大降低，顯示非穩定操作情況對生物活性影響甚巨。

試程三之 r_{max} 在進流氨氮降低的情形下已降至 7.6 mg O₂/g VSS hr，僅有馴養期穩定狀態下 r_{max} 之 12%。配合先前生物質量之結果，雖然第一採樣口轉換試程後生物質量只降低 50%，但生物活性潛能已降至只剩 12%，顯示轉換試程後生物活性潛能改變程度相當大。而較為特殊的現象是 K_s 已降至 0.4 mg NH₄⁺-N/L，可見因長期處在低氨氮的環境下，硝化菌為了競爭少量的氨氮，使得對氨氮的親和度大為提高，改變了原本之生理性質。 K_i 值也下降至 4.3 mg NH₄⁺-N/L，表示所能忍受的氨氮濃度已大幅降低。

綜合 3-3 節之探討，從試程二轉換到試程三時，在生物質量及生物活性都會有很大程度之改變。由 Rittmann^[6] (1984) 所推導出 25°C 下硝化菌維持生長所需之最小基質濃度，*Nitrosomonas* 是 0.3 mg NH₄⁺-N/L，*Nitrobacter* 則是 0.42 mg NO₂⁻-N/L，而以試程三之原水水質分析結果顯示，雖然氨氮濃度僅 0.1 mg/L，但有機氮轉化成氨氮被利用的部份約有 0.3 mg/L，所以仍可維持硝化菌的生長。

四、結論

1. 澄清湖的給水源仍有優養化的現象，給水源的氮污染以有機氮為主要的成份。
2. 生物濾床採種植種澄清湖原水中之硝化菌方式啟動，截留原水一個月後再應用添加高濃度氨氮、低進流量之馴養策略，馴養期初期氨氮去除率即可達 90% 以上，已有效提高生物濾床中之硝化菌濃度。
3. 生物濾床可穩定去除低濃度之氮污染，特別對傳統淨水流程難以去除之有機氮，生物濾床可達 53~73% 之去除率，較原水之 20~30% 有明顯提高的現象。
4. 試程二操作最穩定時，生物活性 r_{max} 可達 60.9 mg O₂/g VSS hr，轉換到試程三後由於進流氨氮大量降低， r_{max} 也降低至 7.6 mg O₂/g VSS hr。雖然生物活性大量降低，但在低濃度氨氮的環境下硝化菌依然可穩定生長。

誌謝

本研究承蒙台灣省自來水公司經費補助，在此特別誌謝。

參考文獻

- 【1】 Anthonisen, A. C., "Inhibition of nitrification by ammonia & nitrous acid", *JWPCF*, 148, pp. 835~852, (1976).
- 【2】 Yeh, H. H., Kao, H. C., "Testing a coke biofilter for the pretreatment of polluted surface water in Taiwan", *AWWA*, 85, pp. 96~102, (1993).
- 【3】 陳振正, "生物硝化、脫硝法處理污染源之研究", 國立成功大學環境工程研究所碩士論文, (1990)。

- 【4】 羅惠琴，「生物氧化濾床處理污染給水源之研究」，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，(1994)。
- 【5】 Bouwer, E. J. and Crowe, P. B., "Biological Processes in Drinking Water Treatment", *AWWA*, 80, pp.82~93, (1988).
- 【6】 Neufeld, R. D., Hill, A. J. and Adekoya, D. O., "Phenol and free ammonia inhibition to *Nitrosomonas* activity", *Wat. Res.*, 14, pp.1695~1703, (1980).
- 【7】 鄭幸雄、王文華、吳靜如，「澄清湖及港西淨水場水質特性之研究」，第十五屆自來水研究發表會報告集，(1998)。
- 【8】 Rittmann, B. E. and Snoeyink, V. L. , "Achieving Biologically Stable Drinking Water", *AWWA*, 76, 106~114, (1984).