

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

可同時硝化及脫硝之自營性薄膜生物反應槽之研發及其菌
群結構分析(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-032-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學環境工程學研究所

計畫主持人：曾四恭

計畫參與人員：何俊明

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 27 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

可同時硝化及脫硝之自營性薄膜生物反應槽之研發及其菌

群結構分析 (1/2)

計畫類別：※個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2211-E-002-040-

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：曾四恭

共同主持人：張育傑

計畫參與人員：何俊明

執行單位：台大環境工程學研究所

中 華 民 國 92 年 5 月 20 日

可同時硝化及脫硝之自營性薄膜生物反應槽之研發及其菌

群結構分析 (1/2)

中文摘要

本研究嘗試利用本研究室先前開發之 PVA 褐

藻膠-共聚包埋法將自營性硝化及脫硝菌同時包埋於矽硝管表面，發展一可同時硝化、脫硝

之自營性薄膜生物反應槽，其原理如圖 5-1 所示。於矽膠管中通入氫氣，反應槽中則進行曝氣作用，經過一段時間之馴養後，生物膜應會自動分層，外側為硝化層進行硝化作用而內側為脫硝層進行脫硝作用。硝化過程或產生之酸度可中和脫硝過程產生之鹼度，減少反應槽酸度或鹼度之加入量。此外，生物膜外側為硝化層進行硝化作用會消耗氧氣，避免溶氧對內側生物膜之脫硝造成干擾，因而達到同時硝化、脫硝之目的。

研究結果顯示，利用 PVA-褐藻膠共聚包埋法將硝化菌及脫硝菌固定於矽膠管表面之自營性生物脫硝反應槽確實具有同時硝化、脫硝之能力，可於單槽內去除水源中之氨氮及硝酸鹽，除可解決殘留有機碳源之問題外，亦可減少建廠之空間需求並簡化操作程序，深具應用之潛力。

關鍵詞：自營性、同時硝化及脫硝、薄膜生物反應槽、氨氮、硝酸鹽

Abstract

A PVA-immobilized biofilm, attached to the surface of a silicone tube, was used as the basis of a bioreactor for simultaneous nitrification and denitrification of water. The bioreactor was aerated with air to supply oxygen for nitrification and pure hydrogen was supplied to the silicone tube and diffused through the membrane wall to feed the biofilm for autotrophic denitrification. The bioreactor was effective for the simultaneous nitrification and denitrification of water after a short period of acclimation, while the biofilm exhibited good resistance to the inhibition of denitrification by dissolved oxygen; the denitrification rate decreased by only 8 % as the dissolved oxygen increased from 2 mg/l to saturation.

By using PVA crosslinked with sodium nitrate to entrap nitrifying and denitrifying sludge on the surface of a silicone tube, a novel bioreactor for simultaneous nitrification and denitrification was developed. In addition to performing as an immobilizing agent to strengthen the biofilm, PVA protected the denitrifying microorganisms to reduce the inhibition by dissolved oxygen under aerobic condition. Therefore, nitrification and denitrification occurred simultaneously within the biofilm. Furthermore, the immobilization technique shortened the acclimation period of the bioreactor. The described space saving and simple to operate bioreactor for nitrogen removal performed autotrophic denitrification to solve the problem of residual carbon in heterotrophic denitrification, and thus is suitable for removing nitrogen from drinking water.

Keywords: Simultaneous nitrification and denitrification, biofilm, PVA, silicone membrane

二、緣由與目的

傳統上之廢水生物處理系統去除水中氨氮的方式，大致上包括好氧硝化及無氧脫硝兩個步驟，參與此二反應之菌相不同，且操作之條件亦相互抵觸，好氧硝化菌需在高溶氧、低有機碳的環境下進行硝化作用，將氨氮氧化成硝酸鹽或亞硝酸鹽；而無氧脫硝菌則需在低溶氧、以有機碳為碳源下之條件下進行脫硝作用，以硝酸鹽或亞硝酸鹽為電子接受者，將其還原成氨氣。為避免溶氧干擾脫硝作用或有機碳干擾硝化作用，一般生物除氮系統設計大多分設硝化及脫硝兩個反應槽。然而，分設

兩個反應槽，需要較大之土地面積，操作上亦較複雜。同時，硝化作用會消耗鹼度，因此，往往必須在原水中額外添加鹼度。而脫硝反應則會產生鹼度，如果硝化槽添加過多的鹼度，很容易使脫硝槽的 pH 值升高，影響脫硝槽之脫硝速率。

本研究嘗試利用本研究室先前開發之 PVA 褐藻膠-共聚包埋法將自營性硝化及脫硝菌同時包埋於矽管表面，發展一可同時硝化、脫硝之自營性薄膜生物反應槽。於矽管中通入氫氣，反應槽中則進行曝氣作用，經過一段時間之馴養後，生物膜應會自動分層，外側為硝化層進行硝化作用而內側為脫硝層進行脫硝作用。硝化過程成產生之酸度可中和脫硝過程產生之鹼度，減少反應槽酸度或鹼度之加入量。此外，生物膜外側為硝化層進行硝化作用會消耗氧氣，避免溶氧對內側生物膜之脫硝造成干擾，因而達到同時硝化、脫硝之目的。

三、研究內容

利用本研究室開發之 PVA-褐藻膠共聚包埋法將先前培養之菌種予以包埋並固定於矽管表面，其程序如下：

取 16g 聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA) 與 1.2g 褐藻膠(Alginate Acid Sodium Salt)加水至 100ml，加熱溶解並攪拌混合均勻。當混合溶液加熱至半透明黏液狀時，停止加熱。將混合溶液靜置至室溫，取先前培養之菌液 100ml 一邊攪拌一邊緩慢加入，使其混合均勻。利用毛刷將包埋之菌液均勻地塗抹於 5 公尺之矽管表面，並盡量使其均勻，厚度約 0.2 公分。塗抹完成後將其緩緩浸入含 50%NaNO₃ 及 2%CaCl₂ 溶液中一小時，讓 PVA 固化，完成後以自來水沖洗之。包埋好之生物膜置入反應槽中，並以 1ml/min 之速度進流含氮之人工合成廢水，進行生物膜之馴養。馴養期間，監測出流水之水質，以了解反應槽硝化及脫硝之能力，俟反應槽具有同時硝化、脫硝能力且出流水水質穩定

後，則進行批次試驗。為證明反應槽確實具有同時硝化、脫硝之能力，及了解溶氧、不同碳源添加方式對反應槽之影響，於是進行一連串之批次試驗。並利用連續試驗評估不同鹼度添加量，不同氮負荷，不同磷酸鹽添加量及不同水力停留時間對反應槽之影響，期能找出反應槽之理想操作條件。

四、結果與討論

1 反應槽硝化、脫硝能力之評估

為了解反應槽中之生物膜硝化、脫硝之能力，分別加入含氮及硝酸鹽之人工合成廢水（其成分如前面所述）進行批次試驗，反應槽中氮、亞硝酸鹽氮及硝酸鹽氮之變化情形，如圖 1 所示。由實驗之結果發現，當反應槽加入含氮之人工合成廢水後，氮濃度因氮被氧化成硝酸鹽氮而逐漸減少，並於 12 小時內由 100mg/l 降至 0 mg/l，而硝酸鹽氮則因硝化速率大於脫硝速率而於前 12 小時逐漸累積至 30mg/l，後 12 小時因反應槽已無氮可供硝化，因此硝酸鹽氮之濃度因脫硝作用而逐漸降 0 mg/l。當反應槽加入含硝酸鹽之人工合成廢水後，硝酸鹽氮濃度因脫硝作用而逐漸減少，12 小時內由 100mg/l 降至 43.4 mg/l 並於 24 小時內由 100mg/l 降至 0，反應槽中僅有少量之亞硝酸鹽累積所示。此批次實驗證明，當反應槽加入含氮之廢水後，生物膜中之硝化菌會將氮氧化成硝酸鹽，而生物膜中之脫硝菌則將硝酸鹽還原成氮，且硝化速率明顯較脫硝速率為快，使硝酸鹽有累積之現象。當反應槽加入含硝酸鹽之廢水後，此時，反應槽只進行脫硝作用（因無氮可供硝化），使硝酸鹽逐漸降解。因此，反應槽中之生物膜確實具有同時硝化、脫硝之能力。

為進一步確認反應槽之硝化及脫硝作用，再次分別加入含氮及硝酸鹽之人工合成廢水進行批次試驗，惟停止於矽管中通入脫硝作用所需之氫氣，結果如圖 2

所示。由實驗之結果發現，當反應槽加入含氮氮之人工合成廢水後，氮氮仍會迅速被氧化成硝酸鹽氮，並同樣於 12 小時內被硝化完畢，而硝酸鹽氮濃度則因氮氮被硝化而逐漸累積，並於 12 小時內累積至 93 mg/l，後 12 小時其濃度則無明顯之變化。此乃因未於矽膠管中通入脫硝所需之能源氫氣，反應槽只進行硝化作用而無法進行脫硝作用，因而使硝酸鹽氮之濃度逐漸累積而無法被還原，且最後硝酸鹽氮之濃度與加入之氮氮濃度相當，此證明反應槽中大部分之氮氮皆因硝化作用而被氧化成硝酸鹽氮。當反應槽加入含硝酸鹽氮之人工合成廢水後，硝酸鹽氮之濃度並沒有隨時間而逐漸減少，此結果顯示，當矽膠管中未通入氫氣時，反應槽並未具有脫硝之能力。換言之，反應槽中之生物膜確實係利用氫氣來進行脫硝作用。上述實驗可以證明反應槽中之生物膜確實具有同時硝化及利用氫氣進行脫硝之能力。

2 反應槽硝化、脫硝速率之比較

若以批次試驗前 12 小時氮氮及硝酸鹽氮減少之濃度加以計算，反應槽之硝化及脫硝速率分別為 5.1 g-N/m²/d 及 2.88 g-N/m²/d。上述結果說明，反應槽硝化速率遠較脫硝速率快，此可由批次試驗時氮氮完全降解之時間（12 小時）遠少於硝酸鹽（24 小時）及反應槽中有硝酸鹽累積之情形獲得證實。硝化作用為生物除氮之第一步驟，廢水中之氮氮須先被硝化成為硝酸鹽才能被進一步脫硝還原成氮氣。而一般之硝化菌為自營菌，生長速率較慢，因此硝化作用常成為脫氮之限制因子。然而，對本反應槽而言，為有效解決殘餘外加有機碳源之問題，故利用氫氣自營脫硝菌進行脫硝，而氫氣自營菌因同樣屬自營菌，其脫硝速率不及異營菌，因此，脫硝作用反而成為脫氮之限制因子，值得注意。

3 溶氧對反應槽硝化、脫硝作用之影響

圖 3 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4

mg/l 及 2 mg/l 時，加入含 100 mg/l 氮氮之人工合成廢水，氮氮濃度之變化情形。結果顯示，當反應槽之溶氧維持於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，氮氮濃度於 12 小時內分別降至 0，3.3 及 54.6 mg/l，依前述方法計算，其硝化速率分別為 5.1 g-N/m²/d、4.9 g-N/m²/d 及 2.31 g-N/m²/d。上述結果顯示，反應槽中之溶氧對生物膜之硝化速率有明顯之影響，尤其當反應槽中之溶氧太低時，會因氧氣供應不足而嚴重影響硝化之速率。

圖 4 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，加入含 100mg/l 硝酸鹽氮之人工合成廢水，硝酸鹽氮濃度之變化情形。結果顯示，當反應槽之溶氧分別維持於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，硝酸鹽氮之濃度於 12 小時內分別降至 47.0，42.5 和 38.5 mg/l，依前述方法計算，其脫硝速率分別為 2.7 g-N/m²/d、2.9 g-N/m²/d 及 3.1 g-N/m²/d。上述結果顯示，反應槽中之溶氧對生物膜脫硝速率有些許之影響，惟並不嚴重。生物膜中之脫硝菌對溶氧有較佳之忍耐力，即使反應槽中之溶氧維持於飽和，生物膜仍具有不錯之脫硝能力。推測其結果，可能因包埋後氮氮自營脫硝菌得到較佳之保護，且經過馴養後，生物膜出現分層，外層為硝化菌而內層則為脫硝菌，外層硝化菌可作為屏障並消耗溶氧，以降低溶氧對脫硝菌產生之抑制。

4 溶氧對總氮去除量之影響

圖 5 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，加入含 100 mg/l 氮氮之人工合成廢水，硝酸鹽氮濃度之累積情形。當反應槽之溶氧分別維持於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，硝酸鹽氮之濃度於 12 小時內分別累積至 38.3，29.4，及 14.8 mg/l。結果顯示，當反應槽之溶氧增加時，硝酸鹽之累積亦有增加之現象，此乃因溶氧較高時，硝化速率快，而脫硝速率則受到抑制較多。而當溶氧較低時，硝化

速率變慢，脫硝速率受抑制較少之緣故。若計算總氮去除量「(合成廢水中之氮濃度) - (反應後之氮濃度 + 硝酸鹽氮濃度)」，三者 12 小時內之去除量分別為 61.7, 67.3 及 30.6 mg/l，此結果說明當反應槽溶氧太低時，會嚴重生物膜之硝化速率，而影響氮之去除。而當反應槽之溶氧太高時，則可能會對脫硝作用產生部分之抑制，同樣會影響氮之去除，此外，維持過高之溶氧亦會增加曝氣量，造成能源之浪費。因此反應槽中溶氧之控制顯得格外重要，由實驗結果分析，理想之溶氧約為 4 mg/l 左右，太高或太低皆不適當。

5 不同碳源添加方式對反應槽硝化、脫硝能力之影響

文獻資料有關自營性生物脫硝菌無機碳源之添加方式，大致可歸納為將 CO_2 直接曝入廢水中或於廢水中加入 NaHCO_3 兩種方式。然而，有些學者認為不同碳源 (CO_2 或 HCO_3^-) 可能會對脫硝作用產生影響，且先前之研究亦顯示，不同之碳源添加方式對反應槽脫硝速率有不同之效應。因此，本試驗分別於矽膠管中通入 20% 之 CO_2 或於人工合成廢水中加入 1g NaHCO_3 作為碳源，以探討不同之無機碳源添加方式對反應槽硝化、脫硝作用產生之影響。結果如圖 6 所示。由實驗結果發現不同碳源添加方式對反應槽硝化作用之影響並不顯著，反應槽中之氮皆可於 12 小時內降解完畢，其原因可能因自營硝化菌生長速率較慢，對碳源之需求量不多，因此，只要廢水中之碳源足夠，其硝化速率既不會受到影響。然而，不同碳源添加方式對反應槽脫化作用之影響則較為明顯，於廢水中加入碳酸氫根為碳源者，其結果與先前批次之結果類似，硝酸鹽氮會先逐漸增加至 mg/l，在逐漸降解。而以矽膠管中通入 20% 之 CO_2 為碳源者，其硝酸鹽氮之變化情形類似廢水中加入碳酸氫根為碳源者，惟硝酸鹽氮之累積情形更為明顯，且後來之降解速度亦較慢，顯見反應槽之脫

硝速率較前者慢。此外，實驗過程亦觀察到反應槽中之 pH 值於試驗過程會先逐漸下降至後再逐漸上升，此乃因試驗初期反應槽之硝化速率較脫硝速率為快，且硝化作用產生之酸度 (7.14 mg CaCO_3 / mg $\text{NH}_4\text{-N}$) 又較脫硝作用產生之鹼度 (3.57 mg CaCO_3 / mg $\text{NO}_3\text{-N}$) 多，因此使反應槽中之 pH 值先下降，當廢水中之氮被消耗完後，硝化作用停止，脫硝作用產生之鹼度會使反應槽中之 pH 值再次上升。其中以矽膠管中通入 20% 之 CO_2 為碳源者，其 pH 值之下降更為明顯，而以碳酸氫根為碳源者其 pH 值之下降較不明顯，因碳酸氫根除可提供碳源外，亦可提供鹼度中和試驗初期硝化作用產生之酸度，因此 pH 值之下降較不明顯，而以 CO_2 為碳源者，因 CO_2 本身為弱酸無法有效中和硝化過程產生之酸度，因此 pH 值之下降較為明顯，當反應槽中之 pH 值下降太厲害會影響其脫硝速率。此外，於矽膠管中通入 CO_2 會降低矽膠管中氮氣之濃度，影響氮氣擴散至生物膜之速率，進一步影響反應槽之脫硝速率，此試驗說明於廢水中直接源加入碳酸氫根為碳源較以矽膠管中通入 20% 之 CO_2 為碳源為佳。

6 不同鹼度添加量對反應槽之影響

先前批次式實驗中顯示反應槽中硝化速率較脫硝速率為快，且理論上每克 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 經硝化作用轉化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的同時要消耗 7.14 克鹼度 (as CaCO_3)，而每克 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 經完全脫硝則產生 3.57 克鹼度 (as CaCO_3)，因此進流廢水中需添加足夠之鹼度，避免反應槽因消耗過多之鹼度使反應槽之 pH 值下降而影響脫氮速率，因此本實驗分別於進流水中加入不同量之鹼度，期能找出反應槽之最佳鹼度添加量，作為反應槽實際操作之參考。

圖 7 為不同鹼度添加量對反應槽之影響，由實驗結果可以發現當鹼度添加量較少時，反應槽中之 pH 值會因鹼度不足而逐漸下降至 4，進而影響反應槽之氮去除

率，因此進流水中需添加適當之鹼度以維持反應槽之 pH 值，而實驗結果亦顯示過度之鹼度添加亦對反應槽之脫氮速率無幫助，由實驗結果計算適度之鹼度添加量約為 23.8 mg CaCO₃/mg NH₄-N。

7 磷酸鹽對反應槽之影響

磷酸鹽為微生物生長所必須之營養物質，因此生物反應槽中往往需添加適量之磷酸鹽。然而，過量之磷酸鹽亦為水庫優養化原因之一，因此有必要針對磷酸鹽濃度對反應槽硝化、脫硝所造成之影響加以探討，避免添加過量之磷酸鹽造成另一污染。

實驗結果如圖 8 所示，發現磷酸鹽濃度對反應槽脫氮速率有些許影響，添加之磷酸鹽濃度越高，脫氮速率越快，然而差距並不大，即使在添加低磷酸鹽濃度 (1mg/l) 下，反應槽亦具有脫氮之能力。其原因可能因本反應槽中之硝化菌及脫硝菌皆為自營菌，自營菌本身生長速率較慢，降低對磷酸鹽之需求。因此，反應槽中勿需添加太多之磷酸鹽。

8 氨氮負荷對反應槽之影響

圖 9 為不同氨氮負荷對反應槽脫氮之影響，由實驗結果可以發現，當進流之氨氮濃度越高，反應槽之去除速率亦有增加之現象，此乃因反應槽之硝化速率快，氨氮很快被氧化為硝酸鹽，因而增加反應槽中之硝酸鹽濃度，亦既增加硝酸鹽進入生物膜之質傳速率，使反應槽之脫氮速率增加。(因先前之實驗已經證實反應槽之硝化速率較脫硝速率快，換言之，反應槽之脫硝速率為速率限制因子)。

9 不同水力停留時間對反應槽之影響

圖 10 為不同水力停留時間對反應槽脫氮速率之影響，由圖中可以發現當水力停留時間越短，出流水質之氨氮及硝酸鹽氮濃度亦有逐漸增加之趨勢，且硝酸鹽氮濃度之增加較氨氮濃度明顯，此乃因反應槽之硝化速率較快，受水力停留時間之影響較小，而脫硝速率較慢，因而受水力時間之影響較大。

五、結論與建議

- 1、經本研究之結果證實，利用 PVA-褐藻膠共聚包埋法將硝化菌及脫硝菌固定於矽膠管表面之自營性生物脫硝反應槽確實具有同時硝化、脫硝之能力，可於單槽內去除水源中之氨氮及硝酸鹽，除可解決殘留有機碳源之問題外，亦可減少建廠之空間需求並簡化操作程序，深具應用之潛力。
- 2、反應槽中之溶氧對反應槽之硝化作用有明顯影響，當溶氧降至 2 mg/l 時，硝化作用明顯下降。當溶氧分別為 8 mg/l、4 mg/l 時兩者硝化速率相差不大。
- 3、經過包埋後之生物膜對溶氧對脫硝所產生之抑制作用有較佳之抵抗力，且生物膜外層之硝化菌可作為屏障並消耗氧氣，減小反應槽中之溶氧對脫硝產生之影響。
- 4、反應槽中理想之溶氧約為 4mg/l 左右，太高或太低皆對總氮之去除產生不良之影響。鹼度之添加量對反應槽之脫氮速率有明顯之影響，理想之鹼度添加量約為 23.8 mg CaCO₃/mg NH₄-N。
- 5、磷酸鹽之添加量對反應槽之脫氮速率有些許之影響，然而，即使添加低濃度之磷酸鹽 (1 mg/l)，反應槽亦具有脫氮之能力。
- 6、氨氮負荷會影響反應槽之脫氮速率，氨氮負荷越高，反應槽之脫氮速率越快。
- 7、水力停留時間亦會影響出流水之水質，當水力停留時間越短，氨氮及硝酸鹽氮之濃度越高，且出流水中硝酸鹽氮濃度增加之情形較氨氮嚴重。

六、計畫成果自評

本研究開發出之自營性薄膜生物脫硝反應槽不但可以有效去除水源中之氨氮及硝酸鹽，且操作容易具彈性，因此深具應用之潛力。此外，本研究成果並已整理表於 SCI 之國際學術期刊 (Letters in Applied Microbiology) 中，研究成果具學術及應用價值，已達預期之研究目標。

七、參考文獻

APHA, AWWA, and WEF (1995).
Standard Methods for the

- Examination of Water and Wastewater*, 19th edn. Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Bertanza, G. (1997). Simultaneous nitrification-denitrification process in extended aeration plants: pilot and real scale experience, *Water Science and Technology*, 35, 53-61.
- Chang, C. C. and Tseng, S. K. (1998). Immobilization of *Alcaligenes eutrophus* using PVA crosslinked with sodium nitrate. *Biotechnology Techniques*, 12, 865-868
- Chang, Y. J., and Tseng, S. K. (1999). A novel double-membrane system for simultaneous nitrification and denitrification in a single tank. *Letters in Applied Microbiology*, 28, 453-456.
- Ho, C. M., Tseng, S. K. and Chang, Y. J. (2001). Autotrophic denitrification in a novel membrane-attached biofilm reactor. *Letters in Applied Microbiology*, 35
- Lee, H. J., Bae, J. H. and Cho, K. M. (2001). Simultaneous nitrification and denitrification in a mixed methanotrophic culture, *Biotechnology Letters*, 23, 935-941.
- Mirvish, S. S., 1985, *nature*, 315, 461-462.
- Oh, J. and Silverstein, J. (1999). Oxygen inhibition of activated sludge denitrification. *Water research*, 33 1925-1937.
- Timberlake D. L., Strand S.E. and Williamson, K. J. (1988). Combined aerobic heterotrophic oxidation, nitrification and denitrification in a permeable-support biofilm, *Water Research*, 22, 1513-1517.
- Hsieh, Y. L., Tseng, S. K. and Chang Y. J. (2002). Nitrification using polyvinyl alcohol-immobilized nitrifying biofilm on an O₂-enriching membrane, *Biotechnology Letters*, 24,315-319.
- Uemoto H., and Saiki, H. (2000). Distribution of *Nitrosomonas europaea* and *Paracoccus denitrificans* immobilized in tubular polymeric gel for nitrogen removal, *Applied and Environmental microbiology*, 66(2), 816-819.
- Zhao, H. W., Mavnic, D. S., Oldham, W. K., and Koch, F.A. (1999). Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in two stage intermittent aeration process treating domestic sewage, *Water Research*, 133(4),961-970.

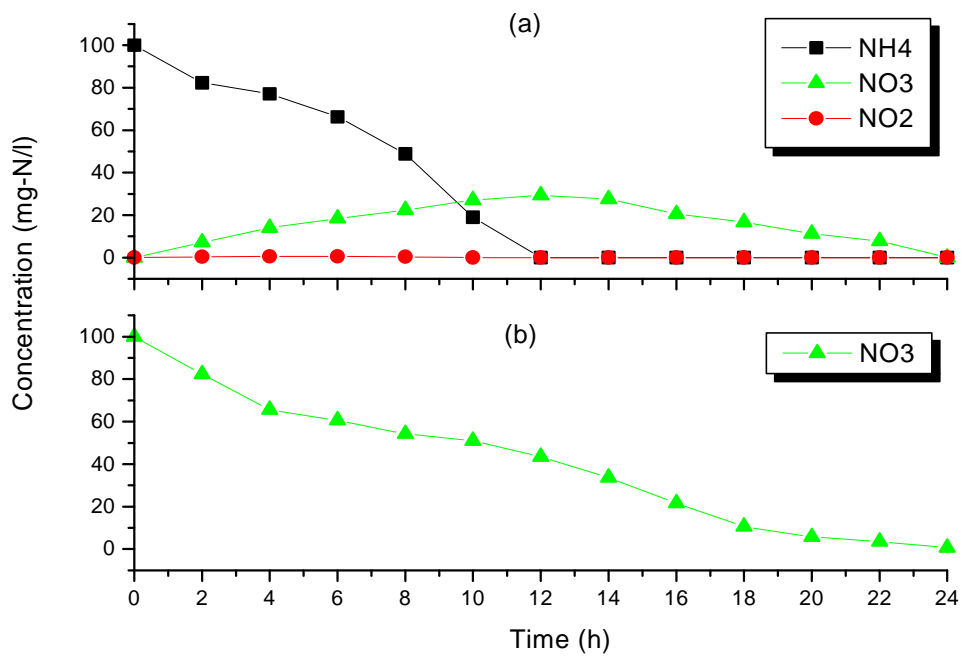


圖 1 加入含氨氮及硝酸鹽之人工合成廢水進行批次試驗，反應槽中氨氮、亞硝酸鹽氮及硝酸鹽氮之變化情形

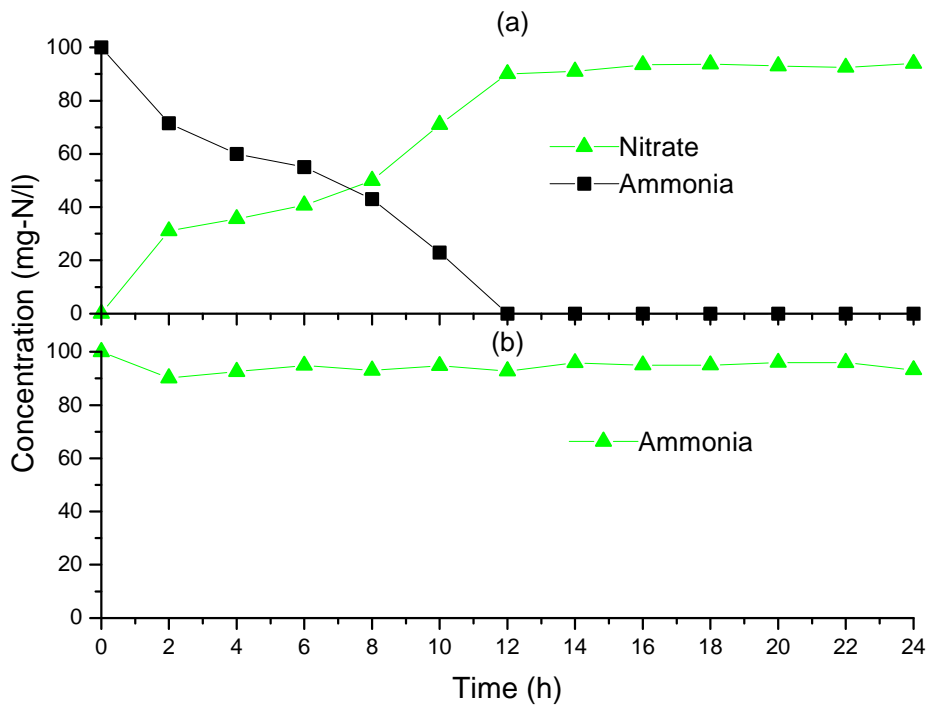


圖 2 停止於矽膠管中通入氫氣，分別加入含氨氮及硝酸鹽之人工合成廢水進行批次試驗，反應槽中氨氮、亞硝酸鹽氮及硝酸鹽氮之變化情形

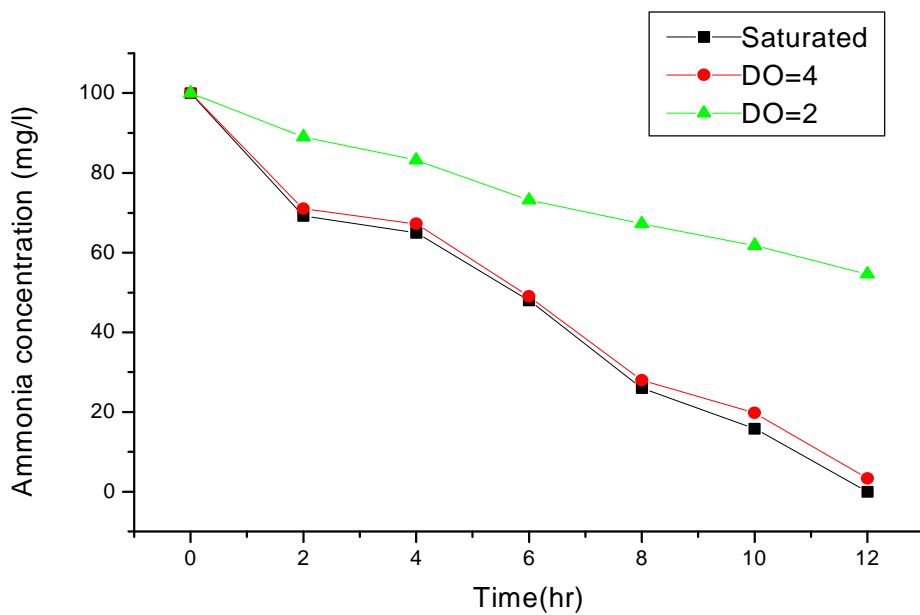


圖 3 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，加入含氨氮之人工合成廢水，氨氮濃度之變化情形

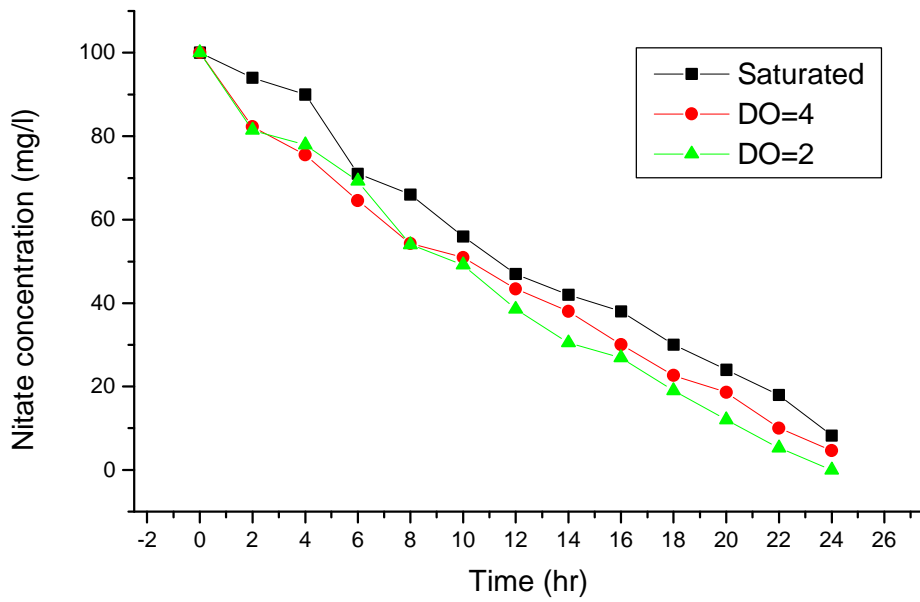


圖 4 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，加入含硝酸鹽之人工合成廢水，硝酸鹽氮濃度之變化情形

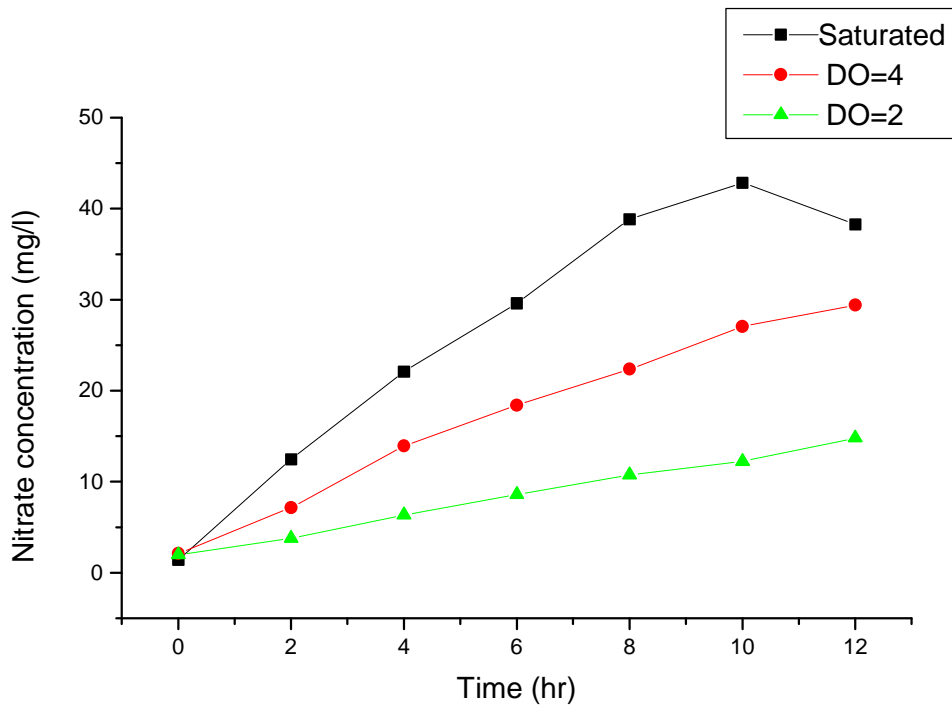


圖 5 為反應槽之溶氧分別控制於飽和、4 mg/l 及 2 mg/l 時，加入含氮氣之人工合成廢水，硝酸鹽氮濃度之累積情形

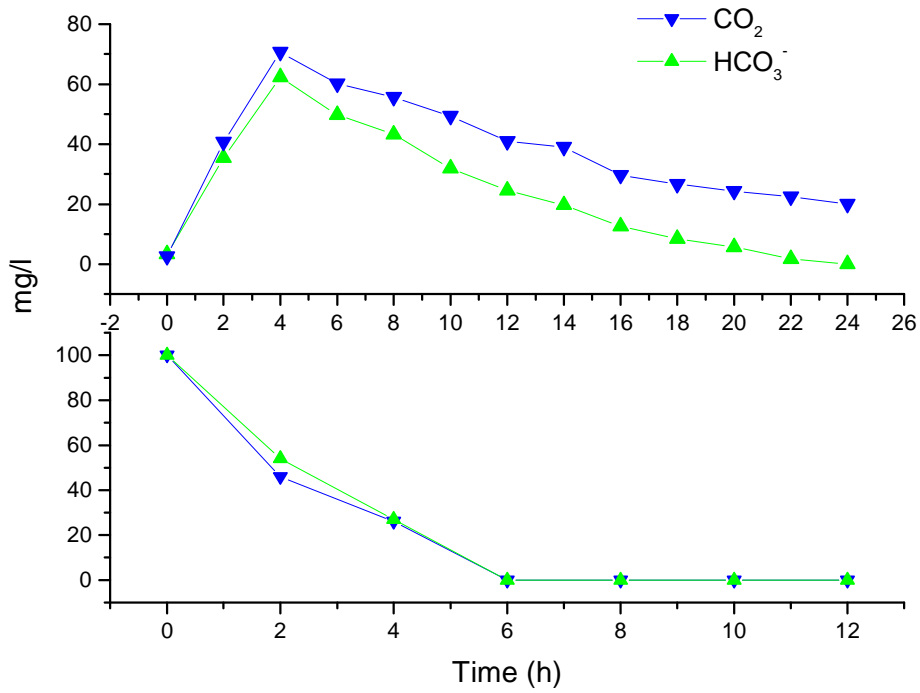


圖 6 不同碳源添加方式對反應槽硝化及脫硝速率之影響

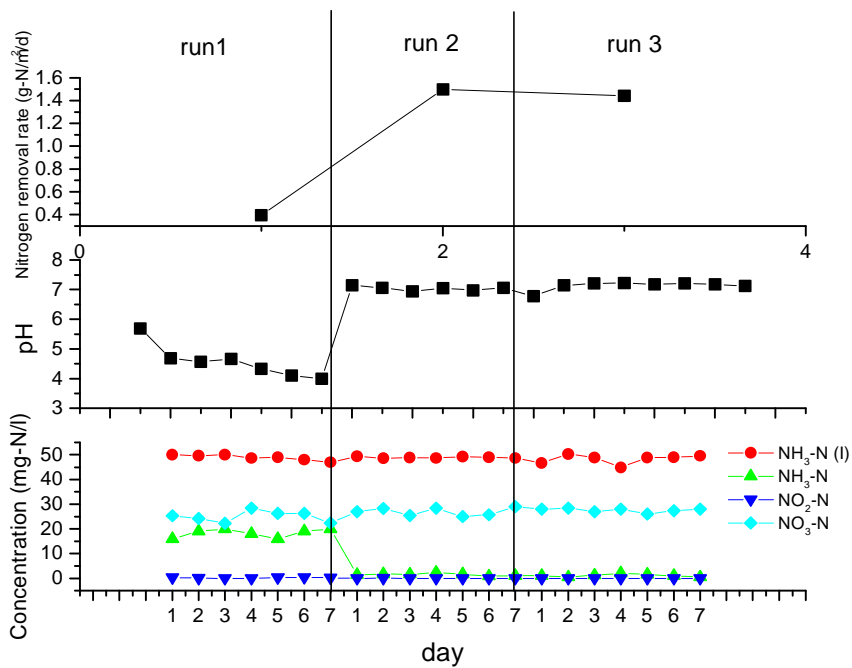
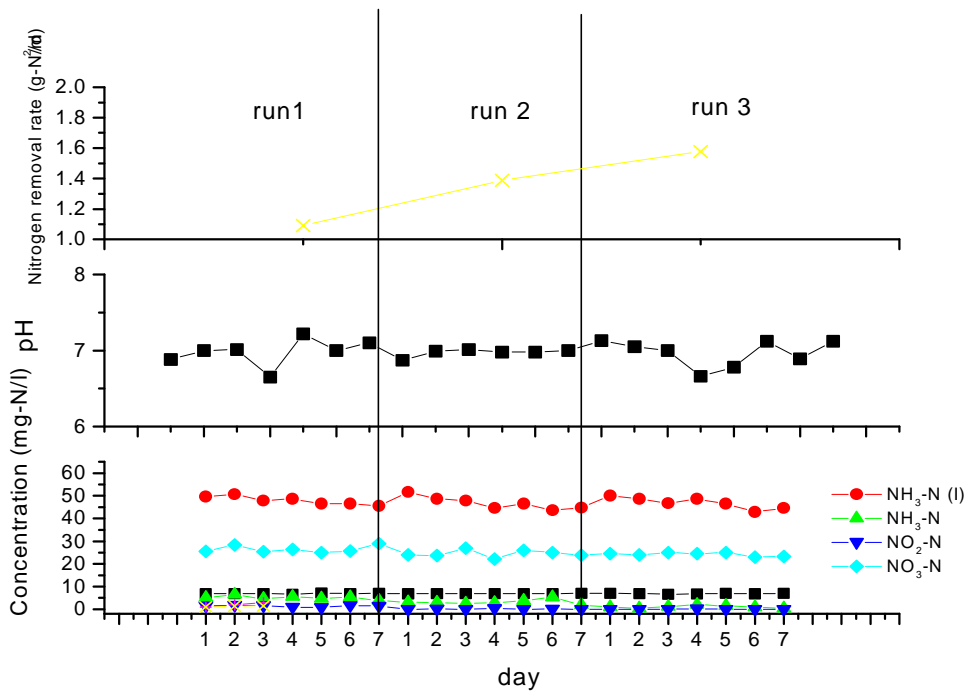


圖 7 不同鹼度添加量對反應槽之影響



圖

8 不同磷酸鹽添加量對反應槽之影響

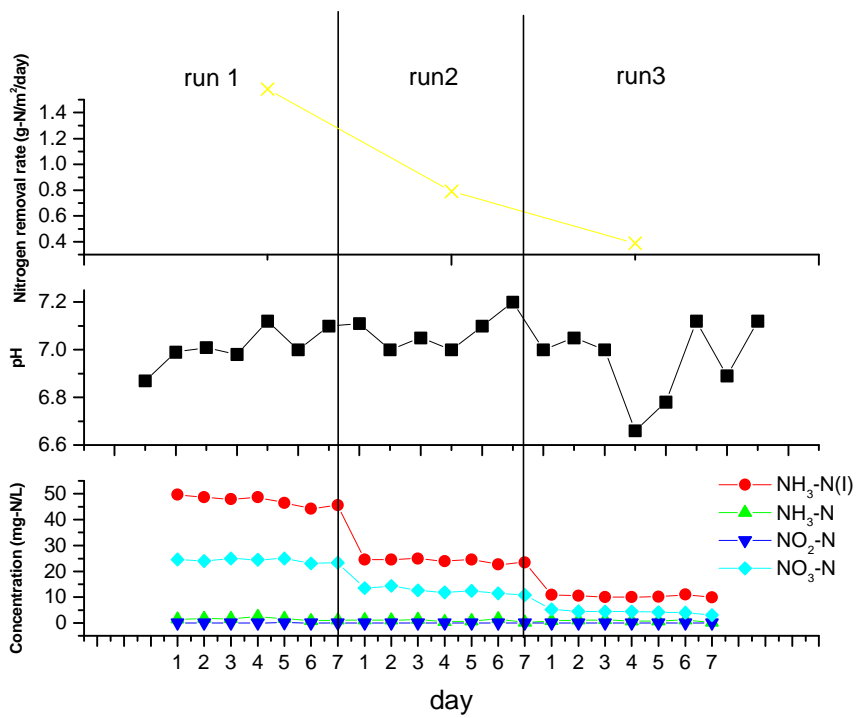


圖 9 不同氨氮負荷對反應槽之影響

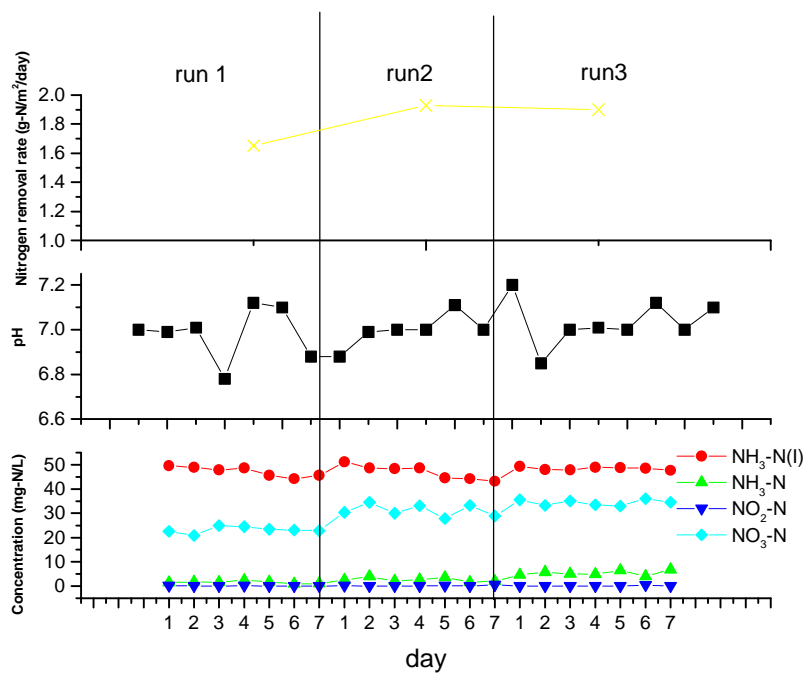


圖 10 不同水力停留時間對反應槽之影響