

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 回收海產廢棄物作為人工濕地介質之開發研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2622-E-041-005-CC3

執行期間：94年05月01日至95年04月30日

執行單位：嘉南藥理科技大學環境工程與科學系(所)

計畫主持人：林瑩峰

共同主持人：荊樹人

計畫參與人員：蘇璿煜、劉俊宏

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 95 年 7 月 17 日

# 國科會補助提升產業技術及人才培育研究計畫成果精簡報告

學門領域：環境工程

計畫名稱：回收海產廢棄物作為濕地生態工法基材之開發研究

計畫編號：NSC 94-2622-E-041-005

執行期間：94年5月1日至95年4月30日

執行單位：嘉南藥理科技大學 環境工程與科學系

主持人：林瑩峯

參與學生：

姓名	年級 (大學部、碩士班、博士班)	已發表論文或已申請之專利 (含大學部專題研究論文、碩博士論文)	工作內容
蘇璿煜、劉俊宏	碩士二年級	中華民國專利「適用於處理污水之表層下流動式人工濕地」	實驗、分析、採樣

中華民國九十五年七月一日

## 壹、合作企業簡介

### 一、合作企業基本資料

合作企業名稱：圓安營造工程股份有限公司

計畫聯絡人：許原哲

資本額：三百萬元

網址：

傳真：(06)2938139

電話：(06)2956828 / 0919165762

### 二、產品簡介

本系統適用於處理污水之表層下流動式人工濕地技術，此表層下流動式人工濕地係回收利用海產廢棄的生物性石灰物質作為濕地介質以處理污水，由於生物性石灰介質具有高孔隙率及表面積，加上為廢棄物再生材料、環保自然且極易獲得，不僅降低人工濕地設置成本，又能增強濕地的污水淨化效率。本研究以廢棄的生物性石灰介質取代礫石介質，以改善礫石介質之高成本及來源短缺之缺點。

此污水處理方法，係利用海產廢棄物之生物性石灰介質作為表層下流動式人工濕地之濕地介質以處理污水，由於生物性石灰介質具有高孔隙率及表面積，且以生物性石灰介質形成之表層下流動式人工濕地之水力停留時間(Hydraulic Retention Time；HRT)較長，加上環保自然且極易獲得的特性，不僅降低人工濕地設置成本，又能增強甚至增強濕地的污水淨化功能。

## 貳、研究摘要

表層下流動式(SSF, subsurface flow system)人工溼地為一種污染淨化效率頗高的廢水處理生態工法，可視為一個無須曝氣的生物濾床。雖然維護簡單且操作成本均較傳統生物率床為低，然而建造成本卻是另一種自由水層式(FWS, free water surface flow system)溼地的 6.5 倍，其中礫石(gravel)基材所需費用便佔了 SSF 溼地總設置成本的最主要項目(40~50%)。

本研究乃評估以海產廢棄物蚵殼取代礫石作為表層下流動式人工溼地基材之可行性。初步將測量並比較兩種材料之物理性質包括：真密度、假密度、空隙率、比表面積、水流移動速率、抗壓強度等，及化學性質包括：pH、陽離子交換能力、元素組成等。另一方面，本研究另外建立了數個小型 SSF 人工溼地(長 0.7m、寬 0.5m、高 0.6m)，探討以蚵殼(Oyster shell)與礫石(Gravel)作為介質之水質淨化效能比較。水質監測結果顯示，蚵殼介質之蘆葦溼地的啟動適應期比礫石介質之蘆葦溼地短。並且由於溼地基材的不同，使蚵殼介質溼地在出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度均較礫石介質低。在相同水力負荷試驗中，蚵殼作為介質之蘆葦溼地其  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除速率均高於礫石作為介質之蘆葦溼地。在水力負荷為  $0.12 \text{ m d}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  污染負荷為  $2.71 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  時，蚵殼作為介質之蘆葦溼地的去除速率為  $2.49 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，礫石作為介質之蘆葦溼地去除速率為  $2.35 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。若進一步增加負荷， $\text{NO}_3\text{-N}$  去除速率反而下降。回收蚵殼廢棄物作為表層下流動式人工溼地之介質是技術可行，不僅在  $\text{NO}_3\text{-N}$  之去除效能的表現上，使用蚵殼介質的溼地比使用礫石介質還優越，並且可顯著降低 SSF 溼地的建設成本。

**關鍵詞：**人工溼地、表層下流動式溼地、礫石、蚵殼、基材、生態工程

Subsurface flow (SSF) constructed wetland is an efficient ecological technology for wastewater treatment. This type of constructed wetland is similar to a biological biofilter process, but with benefits of moderate low cost and easy operation because it never needs aeration.

Nevertheless, its capital cost is still 6.5 times higher than that of free water surface flow (FWS), another type, constructed wetland. In an overall capital cost of a SSF wetland, gravel installation is normally the most costly item (e.g., 40~50%) due to SSF wetland requires a large amount of gravel using as the substrate for the growth of macrophyte and biofilm.

This project intends to evaluate the feasibility of recycling of wasted oyster shell to replace the gravel as the substrate material using in the SSF constructed wetland. Physical properties (including true density, bulk density, porosity, specific surface area, hydraulic conductivity, compression strength etc.) and chemical properties (including pH, cation exchange capacity, element composition etc.) of both oyster shell and gravel will be measured, and the results will be used to make a comparison each other. On the other hand, Another essential goal of this study was to investigate the feasibility of recycling the wasted oyster shell as substrates or media using in an SSF constructed wetland, since the exploit of gravel, a normally used substrates, is restrained by the local government and its price is becoming more and more expensive. Four small-scale SSF wetland beds (each with dimensions of 0.6 m width and 0.7 m length), in which two beds were packed with oyster shell and another two with gravel, were used for treating the same nitrate-contaminated groundwater as abovementioned. One oyster shell bed and gravel bed were planted with common reed, whereas another oyster shell bed and gravel bed were unplanted. The oyster shell beds seemed to need shorter period to achieve a stable nitrate removal than gravel bed. Oyster shell beds, both planted and unplanted, generally produced lower effluent nitrate levels than gravel beds under the same hydraulic loading rate. Planted oyster shell bed and gravel bed exhibited a nitrate removal rate of 2.49 and 2.35 g N m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, respectively, when hydraulic loading rate retaining 0.12 m d<sup>-1</sup> and nitrate loading rate maintaining 2.71 g N m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. Recycling the oyster shell as substrate for SSF constructed wetland was found economically and technically feasible.

**Keywords** : constructed wetland, subsurface flow, gravel, oyster shell, substrate, ecological engineering

## 參、成果說明

### 一、人才培育成果

本計畫之執行可使參與之研究人員及學生獲得生態工程、人工溼地技術、廢水處理工程學、材料學、廢棄物回收再生、環境生態保育等課題，在學理與實務上的知識及訓練，對職業技術教學而言可提供莫大的幫助。

### 二、技術研發成果

#### 前言

人工溼地系統通常可分為自由表面流動式(Free Water Surface System, FWS)及表面下流動式系統(Subsurface Flow System, SSF)。表層下流動式人工溼地為一種污染淨化效率頗高的自然處理系統，可視為一個無須曝氣的生物濾床。雖然維護簡單且操作成本均較傳統生物濾床為低，然而建造成本卻較另一種自由水層式溼地平均高出 67%，其中礫石(gravel)介質所需費用便佔了 SSF 溼地總設置成本的最主要費用(40~50%)。由於公共工程、營建工程及公路建設需求大量的砂石原料，臺灣目前正面臨著砂石不足的情況。經濟部水利司指出台灣每年容許採砂量約 4600 萬立方公尺，而目前每年約一億一千萬立方公尺採砂量的需求，河砂供給約 3600 百萬公噸，此與先進國家砂石料源取得八成來自陸上大不相同，而近 6000 萬噸砂石，只能靠陸砂及非法取得來填補，臺灣的海岸線在砂石

業者的盜採下也已滿目瘡痍；蚵殼(Oyster shell)為臺灣養蚵業中自然產生的海產廢棄物，在臺灣沿岸及漁村常常可見到任意棄置，不僅破壞生態也產生廢棄物的問題。有鑑於此，遂引起吾人之研究動機，在環境保護及成本效益的考量下，回收廢棄物蚵殼作為人工溼地介質處理受硝酸鹽污染之地下水，尋找天然的生態環保材料作為人工溼地介質為本研究主要的目標。

## 研究目的

選擇廢棄蚵殼作為 SSF 溼地中基材的原創構想，是基於蚵殼具有下列幾項適合作為基材的特點：

- (1) 為堅硬的惰性物質，浸於水中將耐久穩定；
- (2) 蚵殼的形狀屬彎曲薄片，可能讓它具有較礫石更高的空隙率，進而讓溼地具有較多的可利用體積(操作體積)，在一定的水力負荷下可增加水力停留時間，而促進水質淨化效果，並可避免堵塞；
- (3) 雖然有較高的空隙率，但是由於蚵殼的彎曲薄片形狀讓它可能有較礫石更大的比表面積，此特性將有助於生物膜的生長，並進而對微生物反應驅動的淨化機制：有機物的礦化、硝化(nitrification)、脫硝(denitrification)等作用有所助益；
- (4) 由於蚵殼富含石灰(碳酸鈣)，對水中磷酸鹽的吸附去除(固定化為磷酸鈣)，或其他離子交換作用有所助益；
- (5) 蚵殼屬廢棄物本質，即使須靠購買獲得其價格也較卵石來的便宜；
- (6) 廢棄蚵殼在本國尤其是南台灣(南台灣日照充足、氣候溫暖為人工溼地技術適合發展的區域)極容易獲得

基於以上理由，本研究將評估廢棄蚵殼回收再生做為 SSF 人工溼地基材的可行性，主要的研究目的有：

- (1) 測量並比較蚵殼及礫石兩種材料之物理性質包括：比表面積(specific area)、空隙率(porosity)、水流移動速率(conductivity)、抗壓強度(compression strength)、假密度(bulk density)、真密度(true density)等。
- (2) 測量並比較蚵殼及礫石兩種材料之化學性質包括：pH、陽離子交換能力、元素組成等。
- (3) 探討以蚵殼及礫石作為介質之 SSF 人工溼地的水質淨化的功能；
- (4) 進行蚵殼及礫石使用於 SSF 人工溼地時之成本分析；
- (5) 綜合評估利用廢棄蚵殼取代礫石作為 SSF 人工溼地之介質的可行性。

## 研究方法

### 1. SSF 人工溼地系統的建立與操作

本計畫共設計 6 組試驗規模之小型表面下流人工溼地(subsurface flow system constructed wetlands)系統，每一系統均為長 70 cm、寬 50 cm、高 60cm 的塑膠製水槽，其中 3 組槽內填滿礫石作為介質(media)；另 3 組槽內則填滿蚵殼作為介質，以溢流管控制水深約 50 cm，系統之有效容積控制於 0.15 m<sup>3</sup>。蚵殼床及礫石床內分別種植不同本土性的水生植物蘆葦(Phragmites communis L.)及狼尾草(Pennisetum alopecuroides L.)，並個別有一組為不種植物的對照組系統。

溼地系統中在進流端及出口端設置多孔 PVC 管(70 cm 長、直徑 5 cm)，以利水樣採集。系統進流水主要成份為地下水中加入 NaNO<sub>3</sub> 與 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 以模擬受硝酸鹽污染之地下水，NO<sub>3</sub>-N 與 PO<sub>4</sub>-P 目標濃度分別為 20 mg N/l 與 5 mg P/l。合成廢水配置方式為在一 4.5 m<sup>3</sup> 的加藥水塔配置完成後，再分別以重力方式入流於各系統。

在溼地系統操作期間，先以低的水力負荷(hydraulic loading rate)約 0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d 進行

啟動階段的操作，為期約 4 個月，由水質分析結果可比較不同基材在啟動過程，水質淨化效能達到穩定狀態的快慢。此後，各溼地組將逐漸提高水力負荷操作，預計持續進行 3 個試程，期水力負荷分別控制在 0.04、0.08、0.12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d。最後由水質淨化功能評估動力學參數(一次動力學去除速率常數,  $K_T$ )可進一步比較蚵殼及礫石作為 SSF 溼地基材之優劣性。

## 2. 植物生長的觀察

各種植植物的溼地組，除了比較水質淨化功能以外，還觀察各組的植物生長變化，以判斷蚵殼是否適合提供作為挺水植物生長的基材。植物生長以密度表示(株/m<sup>2</sup>)。

## 3. 水質淨化功能評估

溼地水力負荷(hydraulic loading rate)為進、出流平均流量(Q)除以溼地水面積(A)。溼地水力停留時間(t, nominal hydraulic retention time)以下式估算：

$$t = \frac{Ah\varepsilon}{Q} \quad (1)$$

其中，

A = 溼地長 × 溼地寬

h = 溼地水深

$\varepsilon$  = 床體空隙率(porosity)。

Q = 進流水流量及出流水流量的平均值

硝酸鹽氮負荷(LR, nitrate loading rate)，硝酸鹽氮去除速率(REM, nitrate removal rate)及硝酸鹽氮去除效率(EFF, percentage of nitrate removal efficiency)，則以下列三式計算：

$$LR = qC_i \quad (2)$$

$$REM = q(C_i - C_o) \quad (3)$$

$$EFF = 100 \frac{REM}{LR} = 100 \frac{C_i - C_o}{C_i} \quad (4)$$

其中，

$C_i$  = 進流水硝酸鹽氮濃度

$C_o$  = 出流水硝酸鹽氮濃度

許多文獻報導均認為溼地中的污染物去除可用柱塞流反應器的一次去除模式(first-order removal model for plug flow reactor)來描述：

$$\frac{C_o}{C_i} = \exp(-K_T t) \quad (5)$$

其中，

$K_T$  = 一次動力學去除速率常數，d<sup>-1</sup>

## 4. 水質分析

每星期採樣一次，分別採集入流水與各系統之出流水。水樣的各項水質分析，包括化學需氧量(COD)、TOC、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、正磷酸鹽(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)、硝酸氮(NO<sub>3</sub>-N)、亞硝酸氮(NO<sub>2</sub>-N)、懸浮固體物(SS)、氫離子濃度指數(pH)、溫度等，依照 Standard Methods 所列的方法進行分析。分析化學需氧量、亞硝酸氮、硝酸氮及正磷酸鹽之水樣，均預先以濾膜過濾，分析結果屬溶解態。

## 5. 經濟效益評估

經濟效益將評估對水質淨化功能之提升、人工溼地設置成本支降低、廢棄物回收之效益、材料之壽命等綜合性評估與比較。

## 結果與討論

### 1. 不同溼地材料(蚵殼與礫石)之啟動期表現

人工溼地中之生態系統(包括生物膜、植物根系、植物覆被等)往往需經過一段時間適應廢水性質、操作條件,系統才會穩定建立及表現出穩定之效能,此階段稱為系統啟動期。本研究透過溼地的處理效能變化,來探討蚵殼與礫石之溼地基材去除硝酸鹽所需的啟動時間。

#### (1) 植物生長

溼地植物在系統開始連續進流時密度並不高,蘆葦在蚵殼與礫石介質初期重植密度約  $10 \text{ 株}/\text{m}^2$ ,經 15 個月的操作,蘆葦在蚵殼與礫石介質最高密度約達  $400 \text{ 株}/\text{m}^2$ (圖 1)。一般人工溼地操作中,約需 3~4 個月至 2 年的啟動期,才能達到植物的覆蓋,溼地淨水功能將隨水生植物生態的形成而趨於穩定。

#### (2) $\text{NO}_3\text{-N}$ 的水質變化

溼地開始操期間, $\text{NO}_3\text{-N}$  平均入流濃度為  $22.13 \pm 2.7 \text{ mg N L}^{-1}$ ,蚵殼介質溼地之水力負荷為  $0.079 \text{ m d}^{-1}$ ,礫石介質溼地之水力負荷為  $0.043 \text{ m d}^{-1}$ 。觀察個溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  的出流水濃度(圖 2、圖 3),以蚵殼作為介質之蘆葦溼地一開始操作時即表現良好,自 2003 年 3 月  $\text{NO}_3\text{-N}$  出流水濃度便開始逐漸下降,至 2003 年 4 月初之後濃度大致已維持在  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  左右,而以礫石作為介質之蘆葦溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  出流水濃度則是到了 4 月底之後濃度才降至  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  左右。

實驗結果顯示,蚵殼介質溼地在水力負荷大於礫石介質溼地的情況下,連續操作約 40 天後即可表現出顯著的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效果。反觀礫石介質溼地,在水力負荷小於蚵殼介質溼地的操作下,仍需 70 天才能觀察到溼地穩定的去除  $\text{NO}_3\text{-N}$  結果,啟動期比蚵殼介質溼地多出約 30 天。

無種植植物的對照組出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度,蚵殼介質表現出良好的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效果,操作 38 天出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度已降至  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  左右,而礫石介質自 2003 年 2 月底~2003 年 6 月,出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度平均為  $14.02 \pm 3.89 \text{ mg N L}^{-1}$ ,硝酸鹽的去除率約 45%。

### 2. 不同溼地材料(蚵殼與礫石)之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 處理效能

由表 1 之結果得知,蚵殼與礫石比較下具有質量較輕、真實密度及視密度較小、空隙率較大及比表面積較高的性質。因此,密度較小之蚵殼使槽體結構所承受的重量負荷較輕。再者,蚵殼空隙率較大,使得蚵殼介質能提供較大的有效容積(空隙操作體積),延長污水在濕地中的水力停留時間,例如本研究蚵殼介質的 SSF 溼地的有效容積估算為  $2.31 \text{ m}^3$ ,而礫石介質的 SSF 溼地有效容積僅為  $1.2 \text{ m}^3$ 。此外,由於蚵殼的比表面積較高,使得蚵殼介質中有較多的表面積提供微生物生長,提升微生物對污染物的分解效率。

當溼地進入穩定期後, $\text{NO}_3\text{-N}$  的處理效能逐漸穩定。表 2 及表 3 為兩介質穩定期期間進出流水質平均表現,本研究初期之水力操作條件:蚵殼介質溼地之水力負荷為  $0.079 \text{ m d}^{-1}$ ,礫石介質溼地之水力負荷為  $0.043 \text{ m d}^{-1}$ 。比較蚵殼與礫石兩介質對  $\text{NO}_3\text{-N}$  處理效能與出流水質特性,蚵殼系統在水力負荷為  $0.079 \text{ m d}^{-1}$  的操作條件下,蘆葦及對照組之出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度均可達到  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  以下, $\text{NO}_3\text{-N}$  去除率分別為 98% 及 97%,二者差異不大( $P > 0.05$ ),均可獲得相當良好的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能。礫石系統在水力負荷為  $0.043 \text{ m d}^{-1}$  的操作條件下,蘆葦之出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度也可達到  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  左右, $\text{NO}_3\text{-N}$  去除率為 97%,而不種植植物對照組出流水  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度則維持在  $10 \text{ mg N L}^{-1}$  左右,平均去除效率維持在 44% 左右。此外,觀察各系統之亞硝酸氮與氨氮之平均出流水濃度表現,三者之出流水濃度為  $1 \text{ mg N L}^{-1}$  左右,由此可說明  $\text{NO}_3\text{-N}$  在溼地缺氧的環境下,並無經由還原作用轉換成亞硝酸鹽與氨氮而累積,顯示  $\text{NO}_3\text{-N}$  的確是在溼地中被去除。

另外，觀察溼地之進出流水 TOC 濃度，系統之進流水 TOC 含量，約在  $10\text{mg L}^{-1}$  左右，顯示地下水中的有機物含量並不高，但經過蚵殼介質溼地後的出流水 TOC 含量則高於進流水 TOC 濃度，其中出流水 TOC 濃度為：蘆葦溼地 > 對照組，但礫石介質溼地的出流水 TOC 濃度卻與進流水差異不大。雖然 SSF 溼地中枯萎的植物體無法直接留置水中，但脫硝菌仍可利用溼地植物根部所釋放出 5-18% 植物光合作用固定碳進行脫硝作用。又剛回收的蚵殼表面可能附有利於脫硝作用所需的碳源，所以能使系統在水力負荷大於礫石系統的情形下，仍可快速穩定且有效率的去除水體中的  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。

### 3. 不同水力負荷對兩種溼地材料(蚵殼與礫石)之 $\text{NO}_3\text{-N}$ 處理的影響

#### (1) 去除效率

圖 4 及圖 5 為不同水力負荷下，蘆葦及對照組於蚵殼與礫石介質之  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效率的關係圖。

第一試程溼地自 2 月 23 日開始操作，蚵殼介質溼地之水力負荷為  $0.079\text{m d}^{-1}$ ，礫石介質溼地之水力負荷為  $0.043\text{m d}^{-1}$ ， $\text{NO}_3\text{-N}$  平均入流濃度為  $22.13\text{mg N L}^{-1}$ 。脫離啟動期後，溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能均逐漸穩定，至第一試程操作結束(4 月 30 日)，蚵殼介質在水力負荷大於礫石與無外加碳源的操作條件下，蘆葦及對照組均可獲得相當良好的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能，去除率分別為 97% 及 97%。而礫石介質在  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除的表現上，對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除率為 44%，而蘆葦則有良好的表現， $\text{NO}_3\text{-N}$  去除率為 97%。

實驗結果發現，實驗初期蚵殼對照組系統對  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能可與有種植植物的蘆葦溼地達相同水準，而礫石對照組在  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除表現上則與蘆葦有明顯差異 ( $P < 0.05$ )，造成此結果之原因可能為剛回收而未經清洗的蚵殼表面附著有利於脫硝作用所需要的碳源所致。

第二試程自 2003 年 6 月 30 日開始操作，蚵殼介質溼地之水力負荷為  $0.13\text{m d}^{-1}$ ，礫石介質溼地之水力負荷為  $0.06\text{m d}^{-1}$ ， $\text{NO}_3\text{-N}$  平均入流濃度為  $22.66\text{mg N L}^{-1}$ 。在此試程操作期間，蚵殼系統之對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均去除率為 67%，蘆葦  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均去除率為 95%；礫石系統之對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能為 40%，蘆葦  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均去除率為 93%。實驗結果發現蚵殼系統在  $0.13\text{m d}^{-1}$  的水力負荷操作條件下，對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能開始降低，但蘆葦溼地對  $\text{NO}_3\text{-N}$  仍有良好的去除效能。另外，礫石系統之對照組在  $0.06\text{m d}^{-1}$  的水力負荷操作條件下去除效能也略為降低，但是蘆葦及狼尾草溼地仍有良好的  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除效能。此外，在本試程操作期間，出流水均偵測不到的亞硝酸鹽，氨氮濃度也在  $1\text{mg N L}^{-1}$  左右，顯示本試程的  $\text{NO}_3\text{-N}$  並無在無氧的環境還原成亞硝酸鹽與氨氮。

第三試程自 2003 年 10 月 13 日開始操作，蚵殼與礫石溼地之水力負荷均為  $0.106\text{m d}^{-1}$ ，溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均入流濃度為  $22.67\text{mg N L}^{-1}$ 。此操作期間仍監測不到溼地出流水的亞硝酸鹽濃度；另外，溼地的出流水氨氮濃度均為  $1\text{mg N L}^{-1}$  以下，顯示  $\text{NO}_3\text{-N}$  主要仍經由脫硝作用去除，並無經還原作用成亞硝酸鹽與氨氮。在本試程蚵殼系統之對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  之去除效能已明顯降低至 15%，而蘆葦溼地仍有 91% 的去除效能；礫石系統之對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  之去除效能也明顯降低至 10%，蘆葦溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  之去除效能也略微下降，但仍有 86% 的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能。

第四試程自 2004 年 4 月 1 日開始操作，蚵殼與礫石介質溼地之水力負荷均為  $0.12\text{m d}^{-1}$ ，溼地  $\text{NO}_3\text{-N}$  的平均入流濃度為  $22.67\text{mg N L}^{-1}$ 。在本試程蚵殼系統之對照組與礫石系統對照組  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能為 28% 及 17%，蘆葦在蚵殼與礫石介質的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能為 92% 與 87%。實驗結果發現，在蚵殼與礫石介質種植蘆葦之溼地，在本試程的  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能與第三試程差異不大。顯示水力負荷在  $0.12\text{m d}^{-1}$  及  $0.106\text{m d}^{-1}$  的條件操作下， $\text{NO}_3\text{-N}$  去除效能並無太大的差異，蘆葦溼地對  $\text{NO}_3\text{-N}$  均有良好的去除表現。



第五試程自 2004 年 5 月 20 日開始操作，蚶殼與礫石介質溼地的水力負荷均為 0.2m/d，溼地 NO<sub>3</sub>-N 平均入流濃度為 22.67mg N L<sup>-1</sup>。溼地因操作在較高的水力負荷，出流水 NO<sub>3</sub>-N 濃度已經升高。蚶殼對照組與礫石對照組出流水濃度分別為 20.63±0.89mg N L<sup>-1</sup> 及 21.81±1mg N L<sup>-1</sup>，NO<sub>3</sub>-N 去除率為 7% 及 2%。蘆葦系統在蚶殼及礫石介質 NO<sub>3</sub>-N 出流水濃度分別為 11.15±4.2mg N L<sup>-1</sup> 及 13.71±1.52mg N L<sup>-1</sup>，NO<sub>3</sub>-N 去除效能已明顯降低，分別為 50% 與 38%。

由以上實驗結果發現，在對照組系統中，蚶殼初期對 NO<sub>3</sub>-N 有良好的去除效能，隨著操作時間及水力負荷的增加，NO<sub>3</sub>-N 去除效能逐漸降低，但整體表現仍優於礫石系統。而蚶殼介質之蘆葦溼地對 NO<sub>3</sub>-N 的去除表現則是略優於礫石介質。

進一步考慮土壤與地下水污染防治與飲用水標準之規範，地下水之 NO<sub>3</sub>-N 含量須在 10mg N L<sup>-1</sup> 以下才符合標準，本研究控制不同水力負荷的試驗中，蚶殼與礫石介質之蘆葦溼地在水力負荷控制為 0.12m d<sup>-1</sup> 下操作，均可符合法規之規範。由以上之論述顯示，SSF 溼地因為介質材料的差異，其 NO<sub>3</sub>-N 的處理效能與出流水質的表現也有所差異，因此在人工溼地應用於脫硝程序上，蚶殼有能力取代礫石作為 SSF 溼地之介質。

## (2) 去除速率

去除速率為設計人工溼地的重要參考資料，表 4 為不同水力負荷操作下各系統之 NO<sub>3</sub>-N 去除速率之表現。在實驗剛啟動期間，由於蚶殼表面可能付著有利於脫硝作用所需求的碳源，因此，NO<sub>3</sub>-N 去除速率之表現非常良好。脫離啟動期後，觀察蘆葦溼地在蚶殼與礫石系統的 NO<sub>3</sub>-N 去除速率均隨著水力負荷而逐漸升高，但兩溼地介質系統在水力負荷達 0.2m d<sup>-1</sup> 之後，NO<sub>3</sub>-N 去除速率反而下降(圖 6)，顯示水力負荷達 0.2m d<sup>-1</sup> 之後，溼地 NO<sub>3</sub>-N 去除速率受到限制而不在上升。其中當入流的 NO<sub>3</sub>-N 污染負荷達 2.71g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，以蚶殼為介質之蘆葦溼地 NO<sub>3</sub>-N 去除速率為 2.489g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 大於礫石介質的 NO<sub>3</sub>-N 去除速率 2.344g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。而對照組系統中入流的 NO<sub>3</sub>-N 污染負荷達 2.71g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，礫殼去除速率為 0.744g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 大於礫石系統的 0.451g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>(圖 7)。

文獻報導之去除速率範圍為 0.01-1.512g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，與同為人工溼地並且入流水主要污染物為 NO<sub>3</sub>-N 之文獻值比較，本研究的最大去除速率大於 Xue et al. 所報導之最大去除速率(1.512g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)，另外，Reilly et al. 曾報導 SSF 溼地在 NO<sub>3</sub>-N 污染負荷為 2.28g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，NO<sub>3</sub>-N 最大去除速率為 1.071g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，低於本研究之去除速率。

## 結論

小型表層下流動式人工溼地系統中，蚶殼介質之蘆葦溼地的啟動適應期比礫石介質之蘆葦溼地短。並且由於溼地基材的不同，使蚶殼介質溼地在出流水 NO<sub>3</sub>-N 濃度均較礫石介質低。在相同水力負荷試驗中，蚶殼作為介質之蘆葦溼地其 NO<sub>3</sub>-N 去除速率均高於礫石作為介質之蘆葦溼地。在水力負荷為 0.12m d<sup>-1</sup>、NO<sub>3</sub>-N 污染負荷為 2.71g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 時，蚶殼作為介質之蘆葦溼地的去除速率為 2.49g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，礫石作為介質之蘆葦溼地去除速率為 2.35g N m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。若進一步增加負荷，NO<sub>3</sub>-N 去除速率反而下降。回收蚶殼廢棄物作為表層下流動式人工溼地之介質是技術可行，不僅在 NO<sub>3</sub>-N 之去除效能的表現上，使用蚶殼介質的溼地比使用礫石介質還優越，並且可顯著降低 SSF 溼地的建設成本。

## 參考文獻

1. Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1999) Physico-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 33(17), 3595-3602.
2. Drizo, A., Fost C. A., Smith, K. A., and Grace, J. (1997) Phosphate and ammonium removal

by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate. *Water Science and Technology*, 35(5), 95-102.

3. Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (2000) Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Water Research*, 34(9), 2483-2490.
4. 郭文健，張立弘，2000，生活污水之溼地處理及再利用研究(II)，永續發展研究研討會摘要論文集。
5. 郭文健，張立弘，2001，生活污水之溼地處理及再利用研究(III)，永續發展研究成果發表會暨研討會摘要論文集。
6. Mann, R. A., and Bavor, H. J. (1993) Phosphorus removal in constructed wetlands using gravel and industrial waste substrata. *Water Science and Technology*, 27(1), 107-113.
7. American Public Health Association. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19<sup>th</sup> ed. APHA, AWWA, and WPCF, Washington, DC.

#### 肆、技術特點說明

##### 一、可利用之產業及可開發之產品

將本研究開發的技術可直接應用於環境工程的廢污水處理技術、水產養殖的循環水處理產業、景觀水質改善及生態工程水質淨化產業上。

二、推廣及運用的價值：如增加產值、增加附加價值或營利、增加投資/設廠、增加就業人數……等。

應用本發明所提供之適用於處理污水之表層下流動式人工濕地，其優點在於此表層下流動式人工濕地係利用生物性石灰介質作為人工濕地之介質以處理污水，由於生物性石灰介質具有高孔隙率及表面積，加上環保且極易獲得。不僅降低人工濕地設置成本，又能增強濕地有效率的淨化功能。本發明以生物性石灰介質取代礫石介質，因此改善習知礫石介質之高成本及來源短缺之缺點。由上述本發明較佳實施例可知，應用本發明之污水處理方法，其優點在於利用生物性石灰介質作為表層下流動式人工濕地之介質以處理污水，由於生物性石灰介質具有高孔隙率及表面積，且以生物性石灰介質形成之人工濕地之水力停留時間較長，加上環保且極易獲得，不僅降低人工濕地設置成本，又能增強濕地有效率的淨化功能。

表 1 蚶殼的物理性質與礫石的比較

項目	蠔殼	礫石
真實密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1273	2283
視密度 (kg/m <sup>3</sup> )	289	1365
空隙率 (%)	77	40
單位質量比表面積 (m <sup>2</sup> /kg)	0.96	0.23
單位體積比表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	1217	527

表 2 蚵殼介質於不同水力負荷操作期間進出流平均水質

Parameters (mg/L)	蚵殼								
	q=0.079			q=0.13			q=0.106		
	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦
NO <sub>3</sub> -N	22.13±2.7	0.63±0.54	0.53±0.77	22.66±2.60	7.60±4.03	1.05±1.10	22.67±2.05	19.3±3.42	1.2±1.6
NO <sub>2</sub> -N	0.6±0.9	0.1±0.2	0.0±0.2	0.3±1.1	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.6	0.0±0.0	0.0±0.0
NH <sub>4</sub> -N	1.04±1.40	0.77±1.68	0.62±1.50	1.60±0.53	0.91±1.66	0.77±1.61	0.20±0.53	0.29±0.68	0.00±0.00
TKN	8.2±7.3	12.4±10.1	10.6±6.0	4.9±3.6	4.9±3.0	6.7±4.4	0.3±0.5	0.1±0.2	0.4±0.7
PO <sub>4</sub> -P	0.43±0.69	0.47±0.81	0.3±0.64	0.48±0.55	0.58±1.35	0.08±0.23	0.00±0.00	0.00±0.00	0.0±0.0
BOD <sub>5</sub>	5.9±3.4	3.1±2.7	2.9±2.3	6.1±2.8	2.8±1.0	3.9±1.7	4.2±1.6	1.9±1.0	2.8±1.0
TOC	10.7±6.8	12.1±4.7	20.8±6.9	27.7±25	21.1±2.5	56.9±27.7	25.4±14.2	27.4±18.9	41.5±47.9
DO	4.1±1.4	3.5±1.6	3.2±1.8	3.3±1.8	2.3±1.4	1.5±0.9	2.3±1.2	3.9±3.9	2.4±4.1
pH	7.6±0.2	7.9±0.2	7.5±0.2	7.6±0.6	7.9±0.3	7.2±0.3	7.4±1.5	7.7±1.5	7.0±1.4
TSS	17±17	29±19	40±24	22±15	17±8	35±15	16±12	14±10	25±17
Temperature(°C)	27.8±3.3	27.8±3.1	27.3±3.3	31.2±1.5	30.9±1.9	30.3±1.7	23.1±2.7	22.3±2.7	21.6±2.9
ORP(mV)	160±77	170±60	168±55	111±86	97±67	- 18±137	135±65	128±79	- 1±155
導電度(mS/cm)	12.5±0.5	13.5±0.5	16.1±0.5	11.7±3.4	9.4±4.8	16.1±7.6	9.8±4.7	9.7±4.2	15±6.9
鹽度(%)	0.7±0.2	0.8±0.2	1.0±0.1	0.6±0.3	0.6±0.3	1.1±0.2	0.5±0.2	0.5±0.2	1.1±0.4

表 2 蚵殼介質於不同水力負荷操作期間進出流平均水質(續)

Parameters (mg/L)	蠔殼					
	q=0.12			q=0.2		
	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦
NO <sub>3</sub> -N	22.57±0.75	16.37±3.20	1.83±0.83	22.24±1.09	20.63±0.89	11.15±1.42
NO <sub>2</sub> -N	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
NH <sub>4</sub> -N	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
TKN	0.2±0.1	0.2±0.3	0.3±0.2	0.0±0.0	0.0±0.1	0.1±0.1
PO <sub>4</sub> -P	0.2±0.4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
BOD <sub>5</sub>	6.3±1.2	3.6±1.8	4.6±1.9	0.6±0.4	3.3±1.3	0.2±0.2
TOC	10.81±2.82	9.93±6.34	27.74±14.07	23.50±16.25	21.04±3.93	48.11±6.43
DO	5.2±3.1	1.6±1.1	0.9±1.2	4.3±2.7	1.4±0.7	0.6±0
pH	7.7±0.4	8.0±0.2	7.4±0.2	8.0±0.3	8.2±0.3	7.4±0.2
TSS	16±7	13±4	38±15	10±5	9±0	7±1
Temperature(°C)	28.2±3.2	28.7±2.5	27.6±2.7	32.3±0.6	31.3±1.0	30.0±0.6
ORP(mV)	152±96	161±59	-47±187	194±20	207±35	- 223±4
導電度(mS/cm)	9.3±5.2	9.6±5.4	19.6±12.3	3.5±0.1	3.4±0.1	3.5±0.1
鹽度(%)	0.4±0.2	0.5±0.1	1.5±1.2	0.6±0.3	0.6±0.3	1.1±0.2

表 3 礫石介質於不同水力負荷操作期間進出流平均水質

Parameters (mg/L)	礫石								
	q=0.043			q=0.06			q=0.106		
	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦
NO <sub>3</sub> -N	22.13±2.7	12.91±2.79	0.66±0.57	22.66±2.60	13.63±3.42	1.70±1.70	22.67±2.05	20.39±4.06	3.25±1.34
NO <sub>2</sub> -N	0.6±0.9	0.2±0.5	0.0±0.0	0.3±1.1	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.6	0.0±0.0	0.0±0.0
NH <sub>4</sub> -N	1.04±1.40	0.18±0.23	0.14±0.19	1.60±0.53	1.16±1.70	1.18±1.95	0.20±0.53	0.17±0.40	0.09±0.39
TKN	8.2±7.3	4.2±4.4	9.4±8.5	4.9±3.6	3.7±4.0	7.6±9.7	0.3±0.5	0.2±0.5	0.2±0.3
PO <sub>4</sub> -P	0.43±0.69	0.33±0.53	0.11±0.30	0.48±0.55	0.17±0.29	0.01±0.03	0.00±0.00	0.0±0.0	0.0±0.0
BOD <sub>5</sub>	5.9±3.4	1.2±1.0	1.3±1.0	6.1±2.8	2.4±1.2	2.2±1.1	4.2±1.6	2.5±1.4	2.6±1.3
TOC	10.7±6.8	7.04±4.2	9.3±6.0	27.7±25	17.7±8.4	35.4±40.8	25.4±14.2	23.4±10.4	33.7±41.7
DO	4.1±1.4	4.0±1.4	3.5±1.3	3.3±1.8	2.7±1.2	2.2±1.1	2.3±1.2	3.1±2.5	2.3±2.6
pH	7.6±0.2	7.9±0.2	7.4±0.3	7.6±0.6	8.1±0.1	7.3±0.5	7.4±1.5	7.8±1.5	7.0±1.3
TSS	17±17	55±39	40±23	22±15	40±32	36±21	16±12	16±7	29±12
Temperature(°C)	27.8±3.3	29.2±2.2	28.4±3.1	31.2±1.5	31.1±1.9	30.6±1.8	23.1±2.7	21.5±3.9	21.8±2.9
ORP(mV)	160±77	159±57	164±59	111±86	159±57	36±99	135±65	78±92	- 11±150
導電度(mS/cm)	12.5±0.5	4.0±1.4	14.1±2.5	11.7±3.4	6.6±4.8	12.9±8.6	9.8±4.7	9.1±4.7	13.9±7.3
鹽度(%)	0.7±0.2	0.6±0.1	0.8±0.1	0.5±0.3	0.7±0.4	1.2±0.3	0.5±0.2	0.5±0.2	1.5±0.2

表 3 礫石介質於不同水力負荷操作期間進出流平均水質(續)

Parameters (mg/L)	礫石					
	q=0.12			q=0.2		
	Influent	對照組	蘆葦	Influent	對照組	蘆葦
NO <sub>3</sub> -N	22.57±0.75	18.81±1.67	3.03±0.73	22.24±1.09	21.81±1	13.71±1.52
NO <sub>2</sub> -N	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
NH <sub>4</sub> -N	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
TKN	0.2±0.1	0.3±0.4	0.3±0.4	0.0±0.0	0.1±0.1	0.0±0.0
PO <sub>4</sub> -P	0.2±0.4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
BOD <sub>5</sub>	6.3±1.2	3.3±1.9	4.8±1.7	0.6±0.4	3.7±0.6	5.2±0.4
TOC	10.81±2.82	7.13±3.83	27.94±15.14	23.50±16.25	27.79±9.64	51.33±4.54
DO	5.2±3.1	2.4±1.2	1.1±1.4	4.3±2.7	2.3±2.1	1.0±0.2
pH	7.7±0.4	7.7±0.2	7.3±0.3	8.0±0.3	8.2±0.4	7.2±0.4
TSS	16±7	17±10	47±10	10±5	14±13	24±20
Temperature(°C)	28.2±3.2	27.4±2.7	27.2±2.9	32.3±0.6	29.4±0.1	29.2±0.5
ORP(mV)	152±96	49±118	-38±178	194±20	80±23	-111±2
導電度 (mS/cm)	9.3±5.2	9.1±5.1	14.7±8.8	3.5±0.1	3.5±0.1	3.5±0.1
鹽度 (%)	0.4±0.2	0.8±0.2	1.0±0.1	0.6±0.3	0.4±0.1	1.3±0.2

q = HLR, m/d

表 4 蚶殼系統及礫石系統之水力負荷與 NO<sub>3</sub>-N 去除速率

水力負荷(m/d)	蚶殼系統之 NO <sub>3</sub> -N 去除速率(g N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	
	對照組	蘆葦
0.079	1.766	1.788
0.13	1.932	2.810
0.106	0.356	2.275
0.12	0.744	2.489
0.2	0.322	2.218
水力負荷(m/d)	礫石系統 NO <sub>3</sub> -N 去除速率(g N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	
	對照組	蘆葦
0.043	0.422	0.969
0.06	0.534	1.190
0.106	0.242	2.058
0.12	0.451	2.345
0.2	0.086	1.706

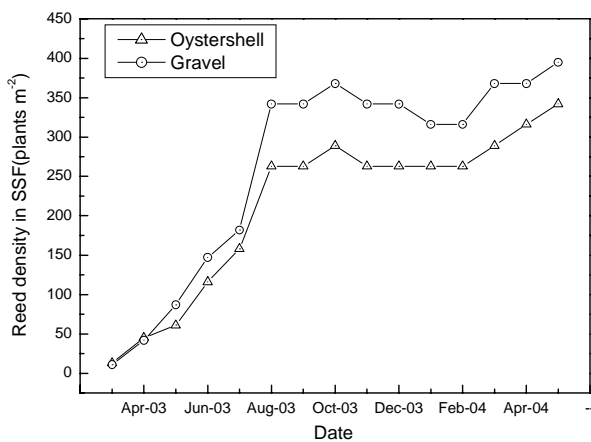


圖 1 SSF 溼地中的蘆葦在蚶殼與礫石介質內之植物密度 (株/m<sup>2</sup>) 變化

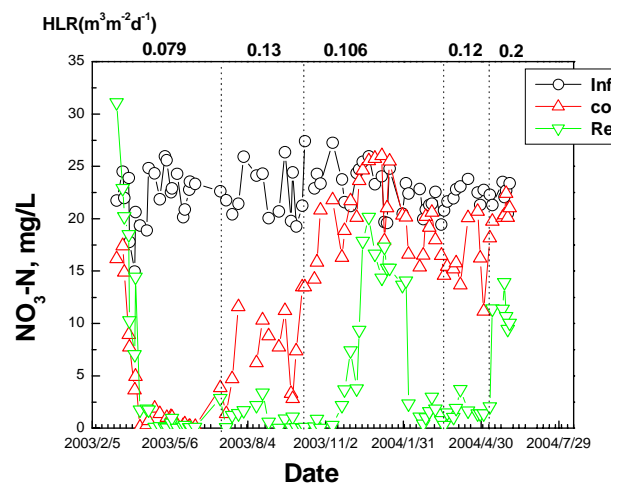


圖 2 蚶殼介質之 SSF 溼地進出流 NO<sub>3</sub>-N 濃度變化與時間關係圖

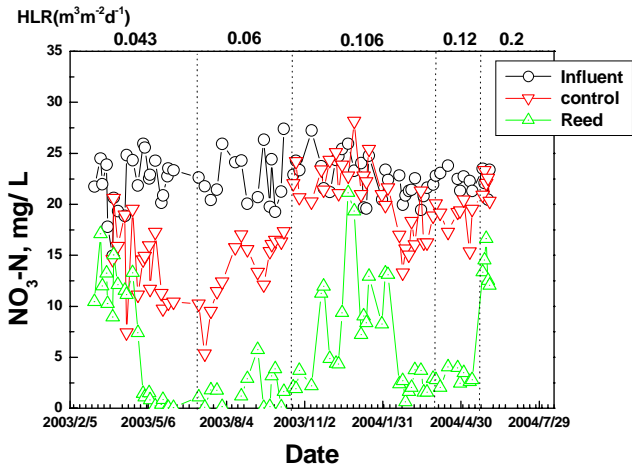


圖 3 礫石介質之SSF溼地進出流 NO<sub>3</sub>-N 濃度變化與時間關係圖

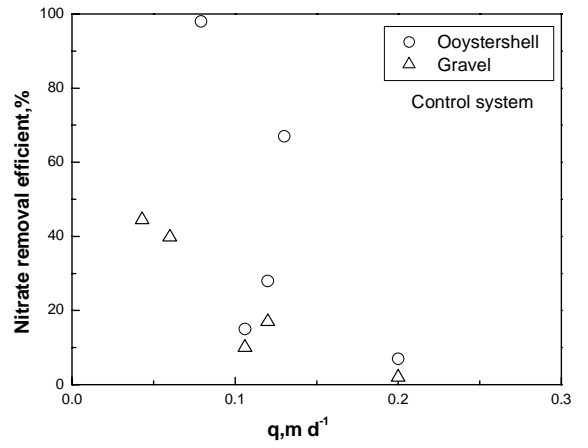


圖 4 不同水力負荷之控制組系統 NO<sub>3</sub>-N 去除效能

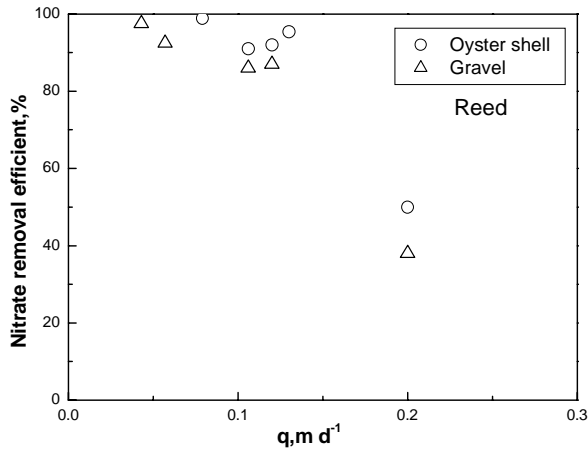


圖 5 不同水力負荷之蘆葦系統 NO<sub>3</sub>-N 去除效能

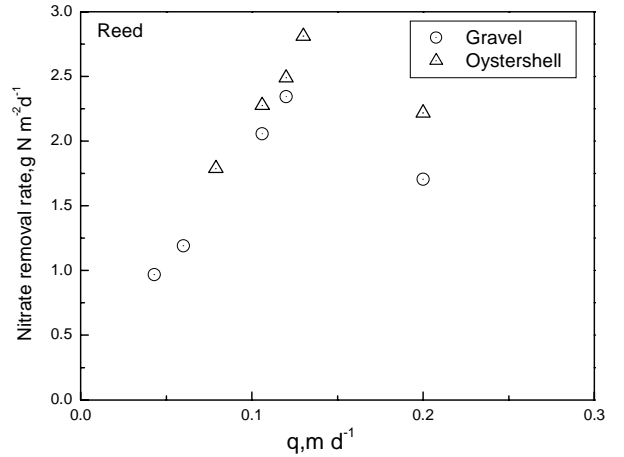


圖 6 不同水力負荷對蘆葦溼地在蚵殼與礫石介質之 NO<sub>3</sub>-N 去除速率的影響

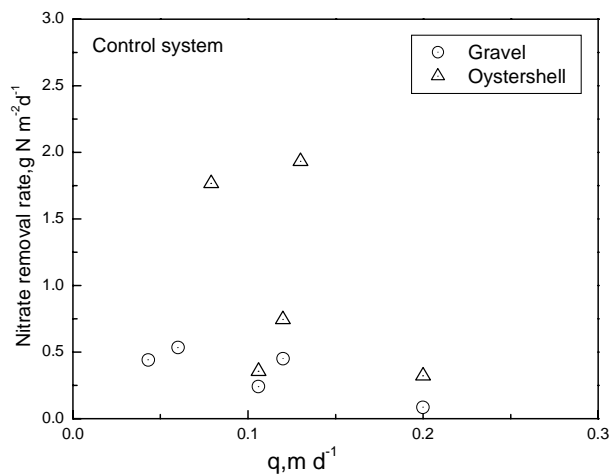


圖 7 不同水力負荷之對照組在蚵殼與礫石介質之 NO<sub>3</sub>-N 去除速率的影響