

自組織映射特徵網路應用於地表面流式人工濕地水質分析之研究

陳鈞華⁽¹⁾、宋建明⁽²⁾、蔡瀚德⁽³⁾、徐貴新⁽⁴⁾、甘俊二⁽⁵⁾⁽¹⁾屏東科技大學土木工程系副教授 水利技師⁽²⁾屏東科技大學土木所博士班⁽³⁾屏東科技大學土木所碩士班⁽⁴⁾東南科技大學環境管理系副教授兼研發處處長 水利技師⁽⁵⁾七星農田水利研究發展基金會董事長 水利技師

摘 要

本研究利用自組織映射特徵網路圖(self-organizing feature map ,SOFM)模型，針對地表面流人工濕地(surface-flow constructed treatment wetlands)的(SS、VSS、TCOD、BOD₅、NH₃-N、PO₄-P) 6種污染質去除率和入流量，進行分類和預測，同時也利用相關分析和徑路分析，探討相關性和物理意義。在地表面流人工濕地中，經由相關分析得知入流量與水力負荷為高度線性正相關，入流量與氨氮去除率為高度線性負相關，氨氮去除率與正磷酸鹽去除率高度線性正相關，正磷酸鹽去除率與生化需氧量去除率高度線性正相關。經由徑路分析得知，入流量與水力負荷為+0.99相關，可知由入流量來計算水力負荷，在徑路係數中是有修正值存在的必要性。入流量與氨氮去除率為-0.31相關，表示入流量大時氨氮去除率並不會相對性變化很大。氨氮去除率與正磷酸鹽去除率為+0.33相關，正磷酸鹽去除率與生化需氧量去除率為+0.55相關，換句話說，當流量或水力負荷大時氨氮去除率相對性稍微減少，變化並不會太大，但正磷酸鹽去除率和生化需氧量去除率會相對性增加一些。經由SOFM模型，可以適當地區分和預測地表面流人工濕地的污染質去除率(定性關係)。經由相關分析和徑路分析可以明顯的表示污染質相關程度(定量關係)。

關鍵字：自我組織類神經網路，地表面流人工濕地，污染質。

1、前言

最早由芬蘭赫爾辛基大學教授 Teuvo Kohonen(1982)^[1]，提出自我組織特徵映射類神經網路(self-organizing feature map,SOFM)理論模型，為一種模擬生物大腦之非監督學習式類神經網路運算法，SOFM網路具有將資料維度“縮減”或稱“映射”，由高維度(輸入)樣本空間以非線性映射運算到低維度二維(輸出)特徵空間，換句話說，SOFM運算模型，是以簡單的特徵性質描述原本複雜原始資料型態。Kohonen(1995)以拓撲鄰域(Topological neighborhood)

和定義一個核(Kernel)函數，提出改良式類神經網路學習法，修正只有唯一能獲勝之神經元擁有學習之權力的 Winner-Take-All 運算模型，Kohonen 推導出來之運算模型，主要特色為神經元在競爭後不僅只有獲勝的一個神經元獲得權重學習，周圍其他的神經元也獲得不同權重可以學習。Kohonen et al.(1996a)，SOFM理論配合 Matlab 軟體寫出軟體套件，達到高維度可視化統計數據圖形。(Kohonen et al., 1996^[7]; Lee and Scholz, 2006^[6]; Kalteh et al., 2007)。SOFM

基於一個非監督的類神經網路演算法，可運用於分析大型數據資料庫，有效率的劃分成不同集群。其中重點為在原始資料映射成特徵過程中，其轉換信號之拓撲關係維持不變。由此特性，SOFM 被廣泛運用至多種複雜數據分析領域。其中，運用於濕地水質分類，Liang Zhanga et al.(2008)^[4]運用 SOFM，預測一個農業生態系統人工濕地(ICWs)之逕流排放的氨氮和可溶性活性磷的濃度，在中，以 SOFM 模式分析得知，鹽分濃度低和較高的溫度時，可有效去除氨氮。可溶性活性磷(Soluble reactive phosphorus,SRP)去除率主要受到鹽份和溶氧量(dissolved oxygen,DO)的影響，溫度和 pH 值與 SRP 去除率呈現弱相關。延續此研究結論繼續討論其他污染質去除率主要受

到哪些因素影響。Carroll et al., (2005)^[9]ICWs 為自由表面流式人工濕地，設計理念基於有效率使用土地，包括設計適宜的景觀造物和維持生物多樣性以及水體和污染質流入和流出的適當控制。Liang Zhanga et al.(2008), 以 SOFM 評估綜合型人工濕地(ICWs)之脫氮、除磷功能 Lee, B.-H., Scholz, M.,(2006) , 運用 SOFM 分析評估重金屬去除表現在人工濕地。由以上 SOFM 運用於地表面流人工濕地之水質分析(包括氨氮、可溶性活性磷)研究文獻，延伸出本研究所要探討之重點為運用 SOFM 探討地表面流式人工濕地之水質分析(包括入流量、SS、VSS、TCOD、BOD₅、NH₃-N、PO₄³⁻)。

2.材料與方法

2.1 實驗場地

本試驗田區(玉里鎮禹東段 36 號地目田面積一·0一七三公頃)(圖 2.1)位於花蓮縣玉里鎮大禹里，與玉里鎮中心相鄰。秀姑巒溪位於本區東側，本區東西寬八 00 公尺，南北長四 000 公尺，對外交通非常便利。台灣省水利局陸續興建完成秀姑巒溪大禹堤防計一三五 0 公尺，東部土地開發處配合延建完成二六五 0 公尺，開發土地二四 0 公頃。

2.1.1 計畫需水量

全區開發可得耕地淨面積一九二公頃，其中五四公頃水稻田，成田耕地已由水利會配水灌溉，餘一三八公頃配合承購戶多角化經營，以最大水田需水量推估灌溉用水，即整田田間需水一八公分，日數二十日，本田灌溉率二 00ha/cms，混凝土給水渠道輸水損失採二 0%，需水量為

一·0四二 CMS。經洽水利會同意自該會所屬大禹峻末端引用 0·八 CMS，以埋設涵管 1.8M 長度九 00 公尺，橫跨卓溪引入本區供水外，不足數 0·二四二 CMS 引至秀姑巒溪水源補注。

2.1.2 地下流人工濕地設計單元

地下流人工濕地設計單元係利用加強污染質入滲率，來作為小面積地區去除污染質之淨化設施，其構造為以大顆粒砂石(3-6 公分)填塞之溝渠，在砂石與土壤間置有過濾纖維或濾布(filter fabric)，作為減少對地下水之污染及土壤細顆進入砂石間空隙，造成砂石間淤塞(clogging)。其剖面構造可參考(圖 3)地下流人工濕地設計單元(Schueler, 1987)^[16]，其對污染質去除之原理包括重力沉澱、吸附等，當污染質藉雨水進入土壤中，因物理(沉澱、吸附)、化學(反應)及生物(根部攝取、轉換)等作用而被

去除。其設計單元為長條狀梯形斷面，以抽水機截取溪水分流後分別流進，人工濕地底層先鋪設不透水塑膠布，每道長 50 m，石層上底淨寬 1.98m，下底寬 0.45 m，總高 1.0m。最底層放置 3 支 4" ϕ PVC 排泥管，礫石層高 0.5 m (排水管上方鋪設 20cm 厚 5" ϕ 卵石後；上方再鋪設 15cm 厚 3" ϕ 碎石層；最上層鋪設 15cm 厚 1" ϕ ~ 2" ϕ 礫石)，每道總體積 38.4 m³，平均孔隙率 0.457，有效體積 17.54m³，有效面積 49.5m²。石床上方種植空心菜。實驗自 1998 年 11 月至 1999 年 5 月，以及 1999 年 11 月至 2000 年 5 月兩個枯水期操作，進流水量 1.7~127.6 m³/day，水力停留時間 HRT 為 120~1.6 hrs，水力負荷從 0.034~2.57 m³/m²-d。

2.1.3 試驗設備及材料之準備

供水系統包括水塔、抽水機、管路及入流管。運作方式由抽水機自水源抽水入水塔，經由管路及入流管供應試區用水。

- 將水塔注滿水，並記錄注水容量，計算污染物之量。
- 將調配好之污染物(葡萄糖、無水磷酸二氫鉀、無水硝酸鉀、無水氯化氨、高嶺土)(表 1)加入水塔內，啟動水塔內攪拌馬達使污染物溶解均勻。
- 打開出水閥門，並控制所需之流量大小，開始計時，並記錄水錶讀數。
- 記錄採樣坑水流到達時間，收集水樣。
- 將收集之水樣稱重、記錄、並放入冰箱中冷藏。
- 啟動採樣坑抽水馬達將多餘剩水排出。
- 依序間隔 5 分鐘重複步驟 4 至 6。
- 一小時後關閉閥門，將水樣送至實驗室內分析。

2.2 水體採樣分析

定期採樣分析入流量 (Q)、生化需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅)、總化學需氧量 (Total Chemical Oxygen Demand, TCOD)、懸浮固體物 (Suspended Solids, SS)、VSS (揮發性懸浮固體)、氨氮 (NH₃-N)、正磷酸鹽 (PO₄³⁻)。分析方法，依照環境保護署環境檢驗所公告的標準方法[2]

2.3 統計分析工具

本研究圖表使用 Matlab R2007b, R, SPSS 14 等軟體，統計資料型態表達方式，其顯著性(p<0.05)。

2.4 自我組織神經網路映射模型

SOFM 是一個神經網路模型和算法，其實現了非線性特徵向量的預測，可從高維空間的資料型態或其他輸入資料型態降維到一個低維數空間，並已廣泛運用於三維可視化系統和數據採礦^{[3][4][5]}。SOFM 屬於一種競爭學習神經網路和無監督學習的模式。^[7]

2.4.1 參數設定及建立網路

首先建立 SOFM 網路，網路數量依照 (Vesanto et al., 2000)^[12]的建議， $M \approx \sqrt{n}$ ，M=神經元數目，n=樣本數目。本研究樣本數目為 350 將建立，一個二維分隔數為 [4×5]，為六角網格，輸入變化範圍分別為 [0 1]、[0 2]。接續根據 Kohonen 學習規則，要同時修正獲勝神經元附近區域 $N_{i^*}(d)$ 內所有神經元，其中， $N_{i^*}(d)$ 包括獲勝神經元以 d 為半徑區域內的所有神經元。如下為調整公式，依此加以訓練 SOFM 網路：

$$i^{w(q)} = i^{w(q-1)} + \alpha(p(q) - i^{w(q-1)}) \quad (1)$$

$$i^{w(q)} = (1 - \alpha)i^{w(q-1)} + \alpha p(q)$$

其中， $N_{i^*}(d) = \{j, d_{ij} \leq d\}$

其中，神經元間距離為歐幾里德距離，如

下：

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, X = (x_1, x_2, \dots, x_n), Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (2)$$

2.1.2 SOFM 模型訓練

SOFM 為單層神經網路，分為輸入層與輸出層(自組織映射層)，主要訓練階段分為兩階段，一為排列順序階段，其此階段以指定的步數，將排序階段學習率降至調整階段之學習速率。二為調整權值階段，此階段是對神經元的權值進行調整，調整中，網路的鄰域距離將調成排列順序將不會再改變，則其網路學習率將會慢慢收斂。

本研究排列順序學習率為0.9，排列順序步數為1000，調整學習率為0.02，調整鄰域距離為：1。依照輸入矩陣P、激發矩陣A₂、學習率lr，可得到權值變化矩陣值，其公式如下：

$$\Delta W_{(i,j)} = lr * A_2 * (P_{(j)} - W_{(i,j)}) \quad (3)$$

其中，激發矩陣A₂經由輸入矩陣A、目前鄰域距離nd和神經元距離D而定。

$$a_2(i,q) \begin{cases} = 1, a(i,q) = 1 \\ = 0.5, a(i,q) = 1, D(i,j) \leq nd \\ = 0, other \end{cases} \quad (4)$$

3.結果與討論

3.1 自我組織神經網路映射模型

- 1.可以由視覺化的方法有效率之檢驗問題數據，而加以探討了解。如本研究中，以視覺化之判斷圖2左上角BODr之數據非常高，相對於與其他六種污染質的關係，顯得需要探究其問題性，由右下角Labels的標籤上可以得知此數據位於88/11/24，BODr為42.7%此數據可能為人為操作上之誤差所產生的，可建議刪除。
- 2.由圖中在相對比較下，可明顯的判斷，本

2.5 路徑分析

在路徑分析中，一個變項實際上為對應一個迴歸方程式每個迴歸方程式都有一個確定係數，它表示變項平均差中能夠在該方程式中所表示的比例，而1-R²為剩餘的部分，其對應所有的變項的殘差和對於有P個變項的模型，其可計算出如下指數：

$$Rc^2 = 1 - (1 - R_1^2)(1 - R_2^2)(1 - R_3^2) \cdots (1 - R_n^2)$$

該指數表示由模型能夠解釋的廣義平均差佔總廣義平均差的比例。將原模型與化簡後模型的指數相比，則可得到一個測量值Q：

$$Q = (1 - R_{\text{原模型}}^2) / (1 - R_{\text{簡化模型}}^2)$$

根據量測值，可以計算出一個統計量W：

$$W = -(n-d) \ln Q$$

其中n為樣本量，d為簡化模型中刪除的路徑數目，當樣本夠大時，W服從自由度為d的卡方分佈。

研究中懸浮性物質(SS)去除率，最高可達78.5%，平均也有48.4%，總化學需氧量(TCOD)去除率，最高可達74.2%，平均也有46.2%，氨氮(NH₃-N)去除率，最高可達79.3%，去除效果最好。故本研究中對於懸浮性物質和氨氮去除具有一定的效果，經由本研究的實驗配置中，因為有空心菜種於人工濕地上，空心菜的支根具有攔截懸浮性物質的能力，所以SS可達一定的效果，其人工濕地石頭間已經有了生物膜所以推估可以有效率分解氨氮，另

外空心菜也需要硝化作用後之亞硝酸和硝酸鹽當作養分，故推估氮氣去除率高的原因為此。

3.88/4/18~88/5/17 之間（大概是夏季的時候）的正磷酸鹽（ $\text{PO}_4\text{-P}$ 或 PO_4^{3-} ）為去除率較高（約 35%）的時候，其他時間普遍是偏低的。故推論本研究地表面流人工濕地配置，正磷酸鹽（ $\text{PO}_4\text{-P}$ 或 PO_4^{3-} ）去除率偏低。

4.入流量(Q)對於 SS 去除率的影響，由圖 2 中判斷，影響性蠻大的，流量大時 SS 去除率就比較小；流量小時 SS 去除率就比較大。此為本研究地表面流人工濕地配置的主要特性之一。

5.入流量(Q)對於 TCOD 去除率的影響，入流量(Q)小時，TCOD 去除率高；入流量(Q)高時，TCOD 去除率慢慢變小，推論當每天慢慢的增加入流量時，可以有效率的降低 TCOD 濃度。

3.2 徑路分析

六種實驗污染物推估得出去除率，進行相關分析，取得有 95%信賴區間下，達顯著水準之連續變項，排除線性關係及交互作用，得地表面人工濕地之污染物標準化之相關徑路圖(圖 1)，係本研究中地表面流人工濕地配置模擬之結果，流量與 VLR 共變數為 0.99；VLR 與氮氣共變數為 -0.30；流量與氮氣共變數-0.31；氮氣與正磷酸鹽共變數為 0.33；正磷酸鹽與 BOD5

4.結論

- 1.SOFM 分析具有定性分類的優點，本研究中由 SOFM 視覺化圖型中可以有效率地，分類出七種污染質之間的定性關係。
- 2.在本研究中，經由 SOFM 和路徑分析，可以定性後再定量得知地表面流人工濕

地中 1.以 SOFM 方法定性分類後入流量(Q)、 NH_3N 去除率、 PO_4P 去除率對於將污染質 BOD₅ 去除率，具有高相關性，再由路徑分析得知直接和間接相關係數，得到定量關係。

3.3 自我組織神經網路映射模型與徑路分析比較

本研究中經由 SOFM 方法得圖 2(Final quantization error: 0.846;Final topographic error:0.000)由圖中視覺化判斷可得知。依 7 種取樣污染質，進行相關分析，取得有 95%信賴區間下，達顯著水準之連續變項，排除線性關係及交互作用，得本研究人工濕地之污染物標準化之相關徑路係，由圖 3 表示之。

- (1)圖2得知，當Q高時，SSr中，VSSr低，TCODr低，BOD₅低， NH_3Nr 中， PO_4^{3-}r 低。經圖2辨別後可得定性的基礎判斷。再由徑路分析中得知Q與 NH_3Nr 關係係數-0.31，與上述定性符合。
- (2)圖2得知，當Q低時，SSr高，VSSr中高，TCODr高，BOD₅中高， NH_3Nr 高， PO_4^{3-}r 高。當 NH_3Nr 中高， PO_4^{3-}r 部分中高。再經由徑路分析中得到相關係數+0.33，與上述定性符合。
- (3)當BOD₅r中高與 $\text{PO}_4\text{-Pr}$ 部分中高。經由徑路分析中得到相關係數+0.55，與上述定性符合。

3.建議，因已經瞭解到影響地表面流人工濕地中污染質的主要關係為何，接續可以利用本研究參數，以倒傳遞類神經的方法，預測出氮氮去除率、生化需氧量去除率、正磷酸鹽去除率。

4.建議，如有更完整更長時間的人工濕地數據，可分四季，建立起各污染質之SOFM的比較圖，應該可以得到更多有關污染質之間的重要關係。

5.圖表範例

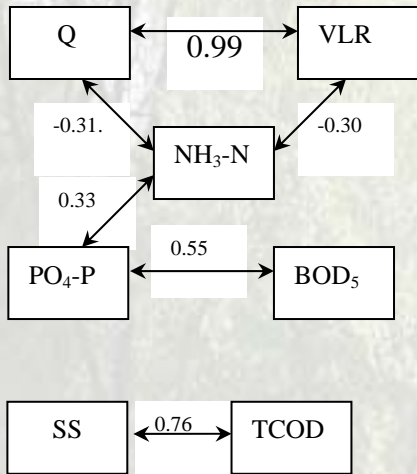


圖1 玉里人工濕地標準化之徑路關係係數圖

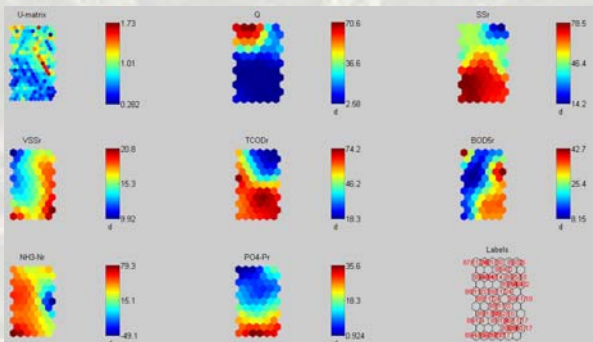


圖 2 使用 SOFM 於入流量 (Q)、生化需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅)、總化學需氧量 (Total Chemical Oxygen Demand, TCOD)、懸浮固體物 (Suspended Solids, SS)、VSS (揮發性懸浮固體)、氮氮 (NH₃-N)、正磷酸鹽 (PO₄-P) 的視

覺化圖

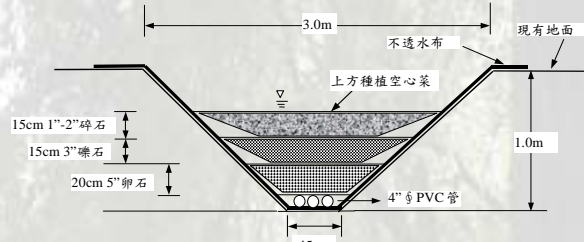


圖 3 地下流人工濕地設計單元(郭文健研究室)

表 1 污染質調配情形

試藥名稱	模擬污染質	設計濃度 (mg/L)	調配方法 (g/m ³)
葡萄糖 (C ₆ H ₁₂ O ₆)	COD	40	37.5
無水磷酸二氫鉀 (KH ₂ PO ₄)	PO ₄ ⁻³ -P	0.4	1.758
無水硝酸鉀 (KNO ₃)	NO ₃ ⁺ -N	0.5	3.61
無水氯化氮(NH ₄ Cl)	NH ₃ ⁺ -N	3	11.46
高嶺土	SS	300	300

6.參考文獻

1. Alhoniemi, E., Hollmen, J., Simula, O., Vesanto, J., (1999). Process monitoring and modeling using the self-organizing map. Integr. Comput. Aided Eng. 6 (1), 3-14.
2. Application of the self-organizing map as a prediction tool for an integrated constructed wetland agroecosystem treating agricultural runoff
3. Assessment of the nutrient removal performance in integrated constructed wetlands with the self-organizing map
4. Carroll, P., Harrington, R., Keohane, J., Ryder, C., (2005). Water treatment performance and environmental impact of integrated constructed wetlands in the Anne Valley watershed, Ireland. In:

- Dunne, E.J., Reddy, K.R., Carton, O.T. (Eds.), Nutrient Management in Agricultural Watersheds: A Wetlands Solution. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
5. Kalteh, A.M., Hjorth, P., Berndtsson, R., (2007). Review of the selforganizing map (SOFM) approach in water resources: analysis, modelling and application. Environ. Model. Softw. (in press). Available online since 19 November 2007.
 6. Kohonen, T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics, 43:59-69.
 7. Kohonen, T. (1995). Self-Organizing Maps. Springer, Berlin.
 8. Kohonen, T., Oja, E., Simula, O., Visa, A., Kangas, J., (1996). Engineering applications of the self organizing map. Proc. IEEE 84 (10), 1358-1384.
 9. LE´ OPOLD SIMAR, (2003), Detecting Outliers in Frontier Models: A Simple Approach, Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands., Journal of Productivity Analysis, 20, 391-424.
 10. LE´ OPOLD SIMAR, (2003), Detecting Outliers in Frontier Models: A Simple Approach, Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands., Journal of Productivity Analysis, 20, 391-424.
 11. Lee, B.-H., Scholz, M., (2006). Application of the self-organizing map (SOFM) to assess the heavy metal removal performance in experimental constructed wetlands. Water Res. 40, 3367-3374. Kohonen, T., Oja, E., Simula, O., Visa, A., Kangas, J., 1996. Engineering applications of the self organizing map. Proc. IEEE 84 (10), 1358-1384.
 12. Schueler, T. R. (1987), "Controlling Urban Runoff : A Practical Manual for Planning and Design Urban BMPs." Metropolitan Washington Council of Governments Washington
 13. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (1992), 18th Ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, D.C
 14. T. Kohonen, (1984), "Self-organization and associate memory", Springer-Verlag London.
 15. T. Kohonen, (1982), "Self-organized formation of topologically correct feature maps," Biological Cybernetics, Vol. 66, pp 59-69.
 16. Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., Parhankangas, J., (2000). SOFM Toolbox for Matlab 5 Documentation. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland Available online at /http://www.cis.hut.fi/projects/SOFMtoolbox/S.
 17. 宋建明、陳鈞華、郭文健(2005)，休耕水田復育成生態濕地之水質淨化分析研究。
 18. 黃俊英(1995)，多變量分析，(第五版)，華泰書局。
 19. 楊浩二(1995)，多變量統計方法，(第一版)，華泰書局。
 20. 環境保護署環境檢驗所(網站：<http://www.niea.gov.tw/>)

收稿：100年5月4日
修改：100年5月7日
接受：100年5月11日