

## 結合模糊分析網路程序法與模糊邏輯於 營建工程環境影響評估 (I)：理論研究

劉豐瑞 賴嘉宏

大葉大學環境工程系

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

### 摘要

環境影響評估是一種決策，利用科學化決策方法來進行環境影響評估，例如多評準決策分析法 (multi-criteria decision analysis, MCDA)，是目前環境影響評估方法論研究的主流之一。使用 MCDA 的方法時，通常有幾點之假設：第一，準則是相互獨立的；第二，準則都是定義良好的；第三，準則都是確定的。然而這些假設與環境因子的特性並不相符，因為根據我們的觀察，以 MCDA 的方法進行環境影響評估方法，有以下的議題：第一，環境因子間具有相依性 (dependence)，並非是獨立的；第二，環境因子的評估具有主觀上的不精確性 (imprecision)；第三，有些因子並不適合採用權重法，而是利用專家的知識來進行評估。因此，為了解決這些議題，我們提出利用模糊分析網路程序法 (fuzzy analytical network process, FANP)，來解決環境因子間之相依性 (議題一)，評估環境因子時之模糊性 (議題二)，並與模糊邏輯結合 (fuzzy logic, FL)，來處理主觀評估的面向 (議題三)。另外，本研究著重於營建工程施工之環境影響評估，首先建立營建工程的環境影響因子，並探討其環境影響因子間的相依性，再者，建立營建工程單項環境影響因子的模糊評估模式，因此而形成一個整合式的環境影響評估決策架構。

**關鍵詞：**環境影響評估，模糊分析網路程序法，模糊邏輯

## An Integration of the Fuzzy Analytic Network Process with Fuzzy Logic for Environmental Impact Evaluation, I: Theory

KEVIN F. R. LIU and JIA-HONG LAI

*Department of Environmental Engineering, DaYeh University*

*No. 112, Shanjiao Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.*

### ABSTRACT

The purpose of environmental impact assessment (EIA) is to identify, assess and describe the likely impact of proposed activities on the environment, analyze the possibilities for the prevention and mitigation of such impact and make proposals regarding the choice of the most suitable solution. The essential element in environmental impact assessment is decision-making. Although techniques



such as multi-criteria decision analysis (MCDA) have been widely recognized as a primary methodology for EIA, several assumptions about the criteria are inappropriate. I.e., the criteria are independent, well defined, and certain. The inappropriateness arises from faulty insight into EIA. First, some environmental factors are not independent. Second, qualitative assessment is pervaded by fuzziness. Third, subjective assessment has an important role in EIA. To address these issues, this research proposes an integration of the fuzzy analytical network process (FANP) with fuzzy logic (FL) to resolve the dependence problem among environmental factors, their fuzziness, and the subjectivity in evaluating them.

**Key Words:** environment impact evaluation, fuzzy analytical network process, fuzzy logic

## 一、前言

環境影響評估是指開發行為對環境包括生活環境、自然環境、社會環境及經濟、文化、生態等可能影響之程度及範圍，事先以科學、客觀、綜合之調查、預測、分析及評定，提出環境管理計畫。對於計劃方案的進行環境影響評估需要一套有組織性、可重複施行及科學的整合技術。有組織性意指須針對理化、生態、文化及社會經濟等各方面環境之可能影響加以廣泛、有次序及科學之考慮。而評估的結果應可由其他調查團體重覆獲得。最後，更須整合許多學科專長之所得以確保此項評估的完整性，並公開說明及審查。

依據環境影響評估作業所需的目標不同，均有其適當之方法論，常用之評估方法論有：專家委員法 (ad hoc method)、疊圖法 (overlay method)、明細表法 (checklist method)、矩陣法 (matrix method)、網路法 (network method) 等，我國目前採用較類似專家委員法，將每個環評個案均已個別方式探討，並公開說明及審查。

環境影響評估是一種決策 (decision-making)，因此，除了上述的常用的方法論外，尚有利用科學化決策方法來進行環境影響評估。多準則決策分析法 (multi-criteria decision analysis, MCDA)，是目前環境影響評估方法論研究的主流之一 [12]。MCDA 的方法，首先要定義出決策的準則 (環境因子)，如果這些準則無法輕易被評定，則必須再進行分解 (decomposition)，形成更多次準則，如此類推而形成了一個階層結構，而這種階層結構內的下層準則是上層準則的屬性 (attribute)。利用適當的方法來決定每個準則的權重，與每個方案在最下層準則的 (相對) 評分，才得以加權平均的方法來進行綜合評估計算。

使用 MCDA 的方法時，必須要先瞭解這個方法的假設 [8]：

- 假設此問題結構為層級結構，其中所有準則間都是相互

獨立的 (independent)，才得以加權平均的方法來進行綜合評估計算。

- 層級結構中，最下層的準則都是定義良好的 (well defined)，換言之，可輕易的評定。
- 這些準則的評估值都是確定的 (certain)，換言之，評定的值沒有不確定性。

然而這些假設與環境因子的特性並不相符，因為根據我們的觀察，以 MCDA 做環境影響評估方法，有以下的議題：

- 環境因子的相依性 (dependence)：環境汙染會影響生態、經濟、社會，經濟發展亦會造成環境、生態的衝擊，這些因子存在相依性。在階段式矩陣法 (stepped matrix) 中，考慮了開發行為對環境因子造成的直接衝擊與所引致的二次及三次的影響，使得直接與間接衝擊的複雜關係都得以清楚描述。MCDA 雖然是環境影響評估的方法論工具，但通常其基本假設是準則間 (環境因子) 的獨立性，才得以加權平均的方法來進行綜合評估計算。但是，這個假設又與前述的環境因子具有相依性的認知相互違背。因此，一個可以處理準則間相依性問題的決策分析技術，才是適用於環境影響評估的方法論 [15]。
- 環境因子的不精確性 (imprecision)：一般可將環境因子分成定性環境因子與定量環境因子，但不論是定性或定量，在進行環境影響評估時，皆會定義其尺度化的標準 (scaling)，以利於綜合評估的計算。而這種評估尺度等級，或是評估者進行評估尺度值時，都具有不精確性的特性 [11, 14]，例如，“嚴重衝擊”、“中等衝擊”、“輕微衝擊”之尺度等級，就屬一種模糊的用語。因此，一個可以處理評估尺度模糊性的決策分析技術，才是適用於環境影響評估的方法論。
- 有些因子並不適合採用權重法，而是利用專家的知識 (評估法則) 來進行評估。本研究中某些因子的評估方法並



非是數學方程式，而是邏輯性。例如環境評估系統中，在生態環境（biological environment）這個準則下，可分解出水域生物（aquatic），在接這分解出物種多樣性（species diversity）。但是，要直接評估生物多樣性是很困難的，且這種主觀的評估法通常含有不確定性，因此較適合模糊推理（fuzzy reasoning）的方式加以評估。

根據這三個議題，我們提出利用模糊分析網路程序法（fuzzy analytical network process, FANP）[10]，來解決環境因子間之相依性（議題一），評估環境因子時之模糊性（議題二），並與模糊邏輯（fuzzy logic, FL）[16] 結合，來處理主觀評估的面向（議題三）。因此，我們提出將 FANP 與 FL 結合而成的整合式決策架構，以作為環境影響評估之方法論，此方法將在本文第二節中詳述。另外，本研究著重於營建工程施工之環境影響評估，將建立營建工程的環境影響因子，並探討其環境影響因子間的相依性，再者，建立營建工程單項環境影響因子的模糊評估模式，因此而形成一個整合式的環境影響評估決策架構，此部分將在本文第三節中詳述。其上述之整個研究流程如圖 1 所示。

## 二、研究方法

### （一）模糊分析網路程序法

分析階層程序法（analytic hierarchy process, AHP）[13]，是一種著名的多準則決策分析法，將一個複雜的決策系統，根據目標與問題性質加以分解一階層結構，並強調準則間的成偶比對來決定權重。分析網路程序法（analytic network process, ANP）[13] 是由 AHP 法所延伸而來，將 AHP 加上回饋（feedback）機制，強調準則間的相依性（dependence），因而形成類似網路而非階層的結構。模糊分析網路程序法

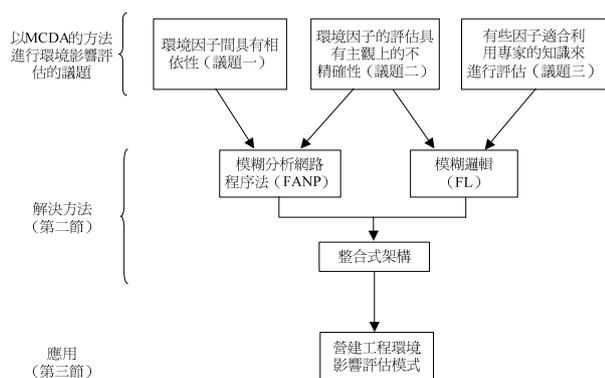


圖 1. 本研究架構流程圖

[10] 是由 ANP 法所延伸而來，改善了原 ANP 法權重的決定方式，允許當進行準則間的重要性成偶比對時，可用模糊的詞語。

一般可將環境因子分成定性環境因子與定量環境因子，但不論是定性或定量，在進行環境影響評估時，大都會定義其尺度化的標準（scaling），以利於綜合評估的計算。例如：AHP 的評估中，將評估值分成九個尺度，如等強、等強與稍強，而這種尺度等級，或是評估者進行評估時，都具有不精確性的特性 [11, 14]，就屬一種模糊的用語。因此，在使用這種尺度的評估，或許可以使用模糊的方法加以代替。將 ANP 法加入模糊的概念形成的模糊分析網路法，才是適用於環境影響評估的方法論。

Mikhailov 等人 [10] 將 FANP 法中決定權重之方法分成五個步驟如下：

1. 步驟一：此階段的目的為找出決策準則間的相依關係。例如環境評估的三個因子為環境污染、生態及社會經濟，在這裡我們考慮它們相依的關係，例如：環境污染會影響到生態或人類的社會經濟，然而人類的社會經濟也會影響到環境的污染與生態，並且生態的改變亦會影響環就與人類之社會經濟。而根據這些關係可以形成一個網路架構圖，如圖 2。圖 2 中，箭頭（ $A \rightarrow B$ ）表示 A 會影響 B，而箭頭（ $A \rightarrow A$ ）表示 A 對自我的影響。
2. 步驟二：對所有因子進行成偶比對矩陣，然而其中比對數值可用精確的值、區間值或是模糊值。例如在環境污染這個準則下，環境污染、生態、社會經濟的重要性成偶比對結果如表 1 所示。例如，表 1 中第 2 行第 1 列（灰色部分）為 4，意指“大約 4”，代表環境污染與生態對環境污染這個準則的相對影響大約為 4 倍。
3. 步驟三：利用模糊截集（ $\alpha$ -CUTS）技術先將模糊評估值轉變為區間值，再利用區間值求解之技巧求出權重值。將表 1 分別進行  $\alpha=0, 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 10$ ，共得 11 組區間的成偶比對矩陣。再分別對每一區間矩陣，利用模糊線

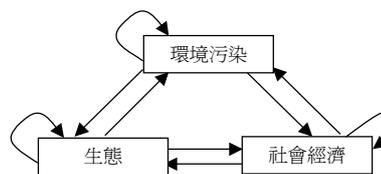


圖 2. 環境評估網路架構



表 1. 環境污染準則下準則間成偶比較表

(環境污染)	環境污染	生態	社會經濟
環境污染	$\sim 1$	$\sim 4$	$\sim 3$
生態	$\frac{1}{4}$	$\sim 1$	$\sim 2$
社會經濟	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\sim 1$

性規劃 (fuzzy preference programming, FPP) 的方法來求權重。如此可得到 11 組的權重，最後再利用結和 (aggregation) 的方法，算出總權重。

根據上面所計算可以得知環境污染準則下中環境污染自我的影響為 0.636，受到生態影響為 0.205，受到社會經濟的影響為 0.159；生態準則下中環境污染為 0.462，受到生態自我的影響為 0.500，受到社會經濟的影響為 0.038；社會經濟準則下中環境污染自我的影響為 0.074，受到生態影響為 0.274，受到社會經濟的自我的影響為 0.652。於是可將此相依之關係表示如圖 3。

- 步驟四：將所有完成的權重值填入超級矩陣中，形成一未加權的超級矩陣如表 2。假設有權重關係也必須加入加以計算，便可得到一個已加權的超級矩陣。例如，表 2 中第 2 行第 1 列為 0.462，代表生態受到環境污染的影響程度為 46.2%。
- 步驟五：透過標準化使每一列的總和為 1，再經由極限化運算 (連乘) 極限化的超級矩陣使計算值收斂如表，得到最後所有環境因子的最後權重，如表 3。根據表 3 可知環境污染權重為 0.445、生態為 0.311、社會經濟為 0.244。

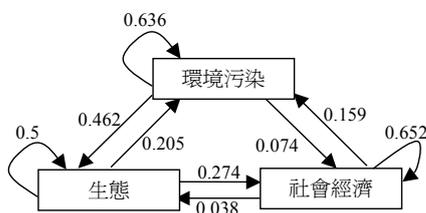


圖 3. 環境因子之相依性

表 2. 未加權的超級矩陣

	環境污染	生態	社會經濟
環境污染	0.636	0.462	0.074
生態	0.205	0.500	0.264
社會經濟	0.159	0.038	0.662

表 3. 極限化的超級矩陣

	環境污染	生態	社會經濟
環境污染	0.445	0.445	0.445
生態	0.311	0.311	0.311
社會經濟	0.244	0.244	0.244

- 步驟六：對每一個候選方案  $i$  而言，它的得分  $\phi_i$  是以權重來計算的，如下：

$$\phi_i = \sum_{k=1}^3 w_k \phi_{ik} \quad (1)$$

其中  $w_k$  與  $\phi_{ik}$  分別代表準則  $k$  之權重與候選方案  $i$  在準則  $k$  之得分。

## (二) 模糊邏輯

模糊邏輯 [16] 可以被視為一種模擬人類以模糊資訊進行推理的機制，可以模擬人類對複雜系統與決策的定性思考過程，因此，模糊邏輯適合於環境評估中。

### 1. 以模糊邏輯為知識表現法

在模糊邏輯中，這種以定性與感知為基礎的推理知識，是藉由“IF-THEN”形式的模糊法則來表達。一個具有多個前件部 (antecedent) 的模糊法則表示如下：

$$\text{IF } p_1 \text{ AND } p_2 \text{ AND } \dots \text{ AND } p_n \text{ THEN } q \quad (2)$$

其中  $p_i$  代表模糊命題，具有“ $X_i$  is  $F_i$ ”的形式，而  $X_i$  是一個語意變數 (linguistic variable) [17]， $F_i$  是一個模糊值。這種口語化的模糊法則是由專家知識擷取而來，具有易被瞭解與操作的特性。

例如一個河川的品質，以“景觀品質”、“水品質”與“氣味品質”來評估河川品質的決策點，具有下列的法則形式：

IF 景觀品質 is 佳 AND 水品質 is 佳 AND 氣味品質 is 佳 THEN 河川品質 is 非常佳

其中“河川品質”、“景觀品質”、“水品質”與“氣味品質”被視為語意變數，而“佳”、“普通”、“差”與“非常佳”分別是它們的模糊值。

語意變數是一種變數，其值可為精確值、模糊值甚至是字詞。例如，“河川品質”是一個複雜與模糊的概念，因此，它可被視為一個語意變數，而它的可能值有下列 7 個口語的字詞：“非常差”、“差”、“稍差”、“普通”、“稍佳”、“佳”與



“非常佳”。同理，語意變數“景觀品質”有 3 個模糊值：“佳”、“普通”與“差”；語意變數“水品質”有 3 個模糊值：“佳”、“普通”與“差”；語意變數“氣味品質”有另外 3 個模糊值：“佳”、“普通”與“差”。定義完這些語意變數與其模糊值後，針對這個評估架構中的非結構決策點討論出 27 個模糊法則，如表 4。例如，法則 19 為“如果景觀品質為佳且水品質為普通且氣味品質為佳則河川品質為佳”。

為了模擬模糊值與字詞，Zadeh [16] 發展了一個數學的工具—模糊集合論。一個模糊集合 F 的基本概念為這個集合中的元素，對於這個集合的隸屬度是一種程度（degree），可用隸屬度函數來定義： $\mu_F(x)$ ，其中 x 是在論域 U 中的一個元素，而  $\mu_F(x)$  代表 x 屬於 F 的程度。語意變數“河川品質”的 7 個模糊值“非常佳”、“佳”、“稍佳”、“普通”、“稍差”、“差”與“非常差”的隸屬度函數，定義在圖 4(a)；同樣的，語意變數“景觀品質”、“水品質”與“氣味品質”的 3 個模糊值分別定義在圖 4(b)、(c)與 (d)。

2. 推理機制

假設有一個模糊法則（i.e., 假設為第 i 條法則）與 3 個模糊事實，要推論出一個新的模糊結論，如下：

$$\begin{aligned} &\text{IF } X_1 \text{ is } F_{i1} \text{ AND } X_2 \text{ is } F_{i2} \text{ AND } X_3 \text{ is } F_{i3} \text{ THEN } Y \text{ is } G_i \\ &\underline{X_1 \text{ is } F_1' \text{ AND } X_2 \text{ is } F_2' \text{ AND } X_3 \text{ is } F_3'} \\ &Y \text{ is } G_i' \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $X_j$  與 Y 為語意變數； $F_{ij}$  與  $F_j'$  為論域  $U_j$  中的模糊集合； $G_{ij}$  與  $G_j'$  為論域 V 中的模糊集合。利用 compositional rule of inference [17]， $G_i'$  可以 (4) 式來計算：

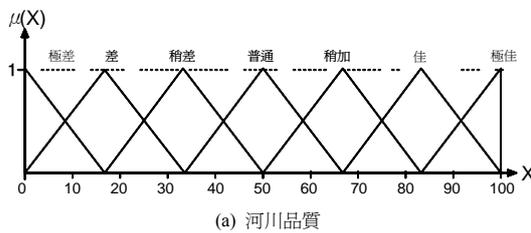


表 4. 河川品質推理法則

法則編號	景觀品質	水品質	氣味品質	河川環境品質
1	佳	佳	佳	極佳
2	佳	佳	普通	佳
3	佳	佳	差	佳
4	佳	普通	佳	佳
5	佳	普通	普通	佳
6	佳	普通	差	普通
7	佳	差	佳	普通
8	佳	差	普通	差
9	佳	差	差	差
10	普通	佳	佳	極佳
11	普通	佳	普通	佳
12	普通	佳	差	普通
13	普通	普通	佳	普通
14	普通	普通	普通	普通
15	普通	普通	差	普通
16	普通	差	佳	普通
17	普通	差	普通	差
18	普通	差	差	極差
19	差	佳	佳	佳
20	差	佳	普通	佳
21	差	佳	差	普通
22	差	普通	佳	普通
23	差	普通	普通	普通
24	差	普通	差	差
25	差	差	佳	差
26	差	差	普通	差
27	差	差	差	極差

$$G_i' = (F_1' \wedge F_2' \wedge F_3') \circ ((F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3}) \rightarrow G_i) \quad (4)$$

其中  $\wedge$  代表一個 t-norm 運算子， $\circ$  是一個 composition 運算子， $\rightarrow$  代表一個 implication 運算子。

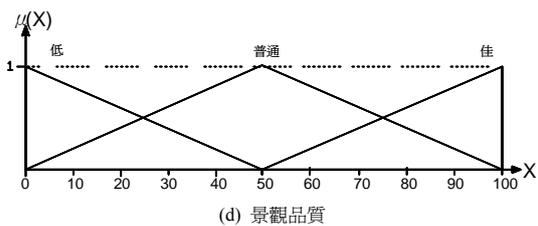
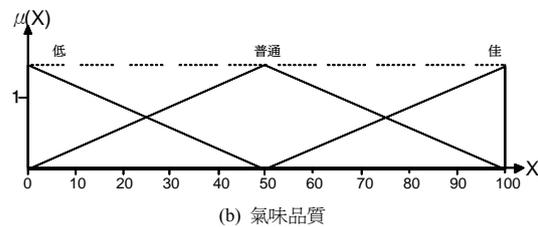
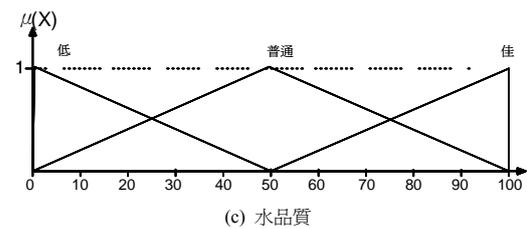


圖 4. 語意變數的模糊值與其隸屬度函數



要計算  $G'$ ，運算子的選擇是很重要的議題。如果“sup-min”被選擇成為 composition 運算子 [16]，則  $G'$  的隸屬度函數可用下式計算：

$$\mu_{G'_i}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F'_1 \wedge F'_2 \wedge F'_3}(u_1, u_2, u_3), \mu_{F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge F_{i3} \rightarrow G}(u_1, u_2, u_3, v)] \quad (5)$$

再者，如果“min”選為 t-norm 運算子 (i.e.,  $a \wedge b = \min(a, b)$ ) 與 implication 運算子 (i.e.,  $a \rightarrow b = \min(a, b)$ )，則 (5) 式成為知名的“Mamdani's fuzzy reasoning” [9] 並表示成如下的式子：

$$\mu_{G'_i}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F'_1}(u_1), \mu_{F'_2}(u_2), \mu_{F'_3}(u_3), \mu_{F_{i1}}(u_1), \mu_{F_{i2}}(u_2), \mu_{F_{i3}}(u_3), \mu_G(v)] \quad (6)$$

(6) 式可以再繼續表示成：

$$\mu_{G'_i}(v) = \min[\max_{u_1} \mu_{F'_1 \wedge F_{i1}}(u_1), \max_{u_2} \mu_{F'_2 \wedge F_{i2}}(u_2), \max_{u_3} \mu_{F'_3 \wedge F_{i3}}(u_3), \mu_G(v)] \quad (7)$$

圖 5(a) 展示了 (7) 式的推理過程： $F'_j \wedge F_{ij}$  表示  $F'_j$  與  $F_{ij}$  的交集； $\max_{u_j} \mu_{F'_j \wedge F_{ij}}(u_j)$  是交集的最高隸屬度並被解釋為  $F'_j$  與  $F_{ij}$  之間的適合度 (compatibility)  $C_{ij}$ ；而  $\min[\max_{u_1} \mu_{F'_1 \wedge F_{i1}}(u_1), \max_{u_2} \mu_{F'_2 \wedge F_{i2}}(u_2), \max_{u_3} \mu_{F'_3 \wedge F_{i3}}(u_3)]$  則

可看成是法則與事實之間的整體適合度  $C_i$ ，並且  $C_i$  是用來截切  $G_i$  以成為  $G'_i$ 。

如果  $F'_j$  是一個精確值 (i.e., 假設為  $\bar{u}_j$ )，(7) 式變成如下的形式：

$$\mu_{G'_i}(v) = \min[\mu_{F_{i1}}(\bar{u}_1), \mu_{F_{i2}}(\bar{u}_2), \mu_{F_{i3}}(\bar{u}_3), \mu_G(v)] \quad (8)$$

(8) 式可以圖 5(b) 來解釋： $\min[\mu_{F_{i1}}(\bar{u}_1), \mu_{F_{i2}}(\bar{u}_2), \mu_{F_{i3}}(\bar{u}_3)]$  看成是法則與事實之間的整體適合度  $C_i$ ，並且  $C_i$  是用來截切  $G_i$  以成為  $G'_i$ 。

如果“product”取代“min”成為 t-norm 運算子 (i.e.,  $a \wedge b = a \cdot b$ )，式 (6) 應改成：

$$\mu_{G'_i}(v) = \max_{u_1, u_2, u_3} \min[\mu_{F'_1}(u_1) \cdot \mu_{F'_2}(u_2) \cdot \mu_{F'_3}(u_3), \mu_{F_{i1}}(u_1) \cdot \mu_{F_{i2}}(u_2) \cdot \mu_{F_{i3}}(u_3) \cdot \mu_G(v)] \quad (9)$$

同理，如果  $F'_j$  是一個精確值  $\bar{u}_j$ ，(9) 式變成如下的形式：

$$\mu_{G'_i}(v) = \min[\mu_{F_{i1}}(\bar{u}_1) \cdot \mu_{F_{i2}}(\bar{u}_2) \cdot \mu_{F_{i3}}(\bar{u}_3), \mu_G(v)] \quad (10)$$

(10) 式可由圖 5(c) 來展示： $\min[\mu_{F_{i1}}(\bar{u}_1) \cdot \mu_{F_{i2}}(\bar{u}_2) \cdot \mu_{F_{i3}}(\bar{u}_3)]$  看成是法則與事實之間的整體適合度  $C_i$ ，並且  $C_i$  是用來截切  $G_i$  以成為  $G'_i$ 。

這篇論文中，“product”、“sup-min”與“min”分別被選

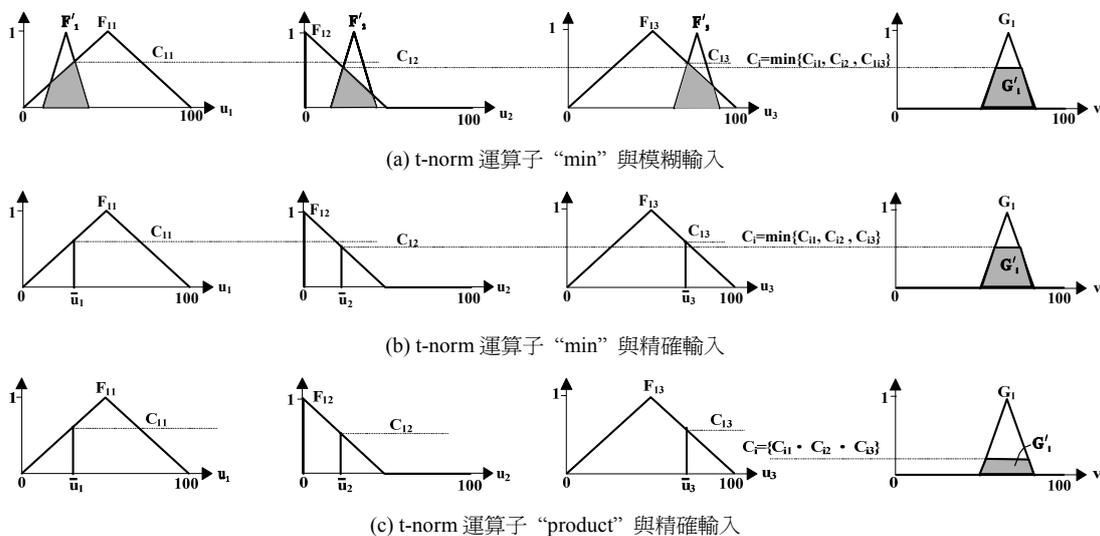


圖 5. 模糊推理的圖示



擇成爲 t-norm、composition 與 implication 的運算子。我們不採用較常被使用的“min”爲 t-norm 運算子，而改採用“product”的原因在於每一個輸入的事實都會參與計算  $G_i'$ ，而“min”只允許其中之一的輸入事實會去影響  $G_i'$  的計算。

根據這 24 個模糊法則的法則庫（表 4），假設此時有 3 個精確的事實：

Fact1：水品質 is 80

Fact2：氣味品質 is 70

Fact3：景觀品質 is 60

我們將推理過程分成 4 個步驟來解釋（參見圖 6）：

1. 步驟一：計算適合度。適合度是指有相同語意變數的前

件部與事實之間的相似程度，或是指某一個法則與與事實之間的適用程度。以 Rule 19 爲例，Fact 1 與“水品質”之適合度爲  $(80) = 0.5$ ；Fact 2 與“氣味品質”之適合度爲  $(70) = 0.6$ ；Fact 3 與“景觀品質”之適合度爲  $(60) = 0.2$ 。

2. 步驟二：截切結論。一旦每個法則的整體適合度求出後，代表每個法則的前件部被滿足的程度也已知。如圖 6 所示，以法則適合度去截切原來三角形的結論，而推导出梯形的新的結論。

3. 步驟三：整合截切的結論。這 27 個具有相同語意變數的新結論應該要被整合成一個整體的結論。如同圖 6 所示，最後的結論是將原 27 個結論採用聯集而得。

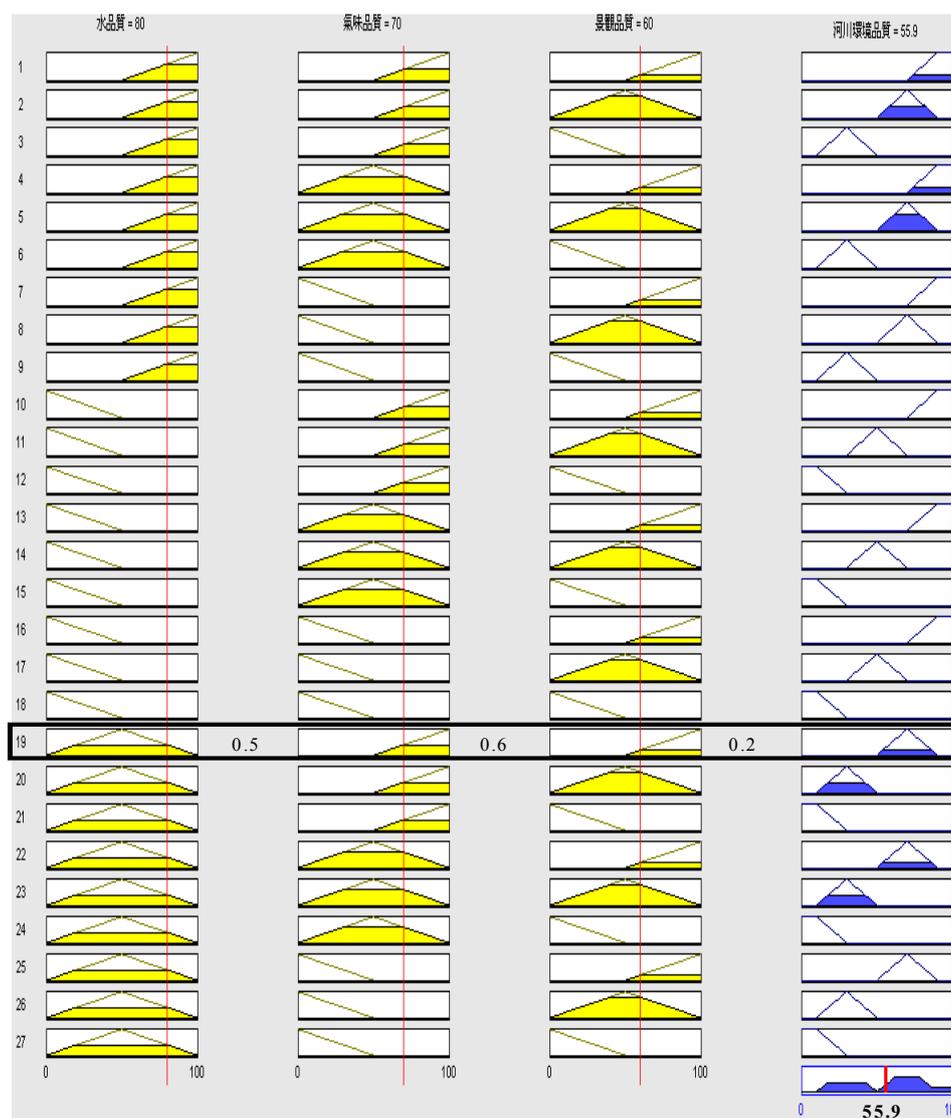


圖 6. 河川品質模糊推理模式



4. 步驟四：最後結論的去模糊化。在許多的應用裡，尤其是控制方面，推理出的結論必須是精確值而非模糊值，因此，需要去模糊化的技術 (defuzzification)。所謂去模糊化，是指將模糊集合轉換成精確值的方法。我們將採用重心法 (center of gravity method) 來進行去模糊化，亦即將模糊集合之隸屬度函數的面積取重心。由圖 6 展示了這個去模糊化的結果為 55.9。

### (三) 模糊分析網路程序法與模糊推理之整合式決策架構

在環境影響評估中有許多影響因子，本研究是利用模糊分析網路程序法與模糊推理整合成一個決策架構。假設某一個決策問題有三個準則 C1、C2 及 C3，且非相互獨立，這些準則間會相互影響，形成一個相依與回饋的問題，若我們以箭頭表示相依性，可得如圖 7 中 A 部分的網路結構。因此，我們可依 2.1 節之 FANP 法來求得 C1、C2 與 C3 的權重 W1、W2 與 W3。另外 C1、C2 及 C3 中還可以細分出數個次準則：C1 可以細分出 C11、C12 及 C13；C2 可細分出 C21 及 C22，C23；C3 可細分出 C31 及 C32，C33 (如圖 7)。然而，C1、C2 與 C3 與其次準則之關係屬於一種因果關係，並不適合以 AHP 或 ANP 法來評量，而比較適合以邏輯的方法評估。因此，我們可依 2.2 節的模糊推理來進行評估。整合模糊分析網路程序法與模糊推理之方法可以獲一個融合屬性、因果、定性及定量之整合式決策架構，本研究將採用此整合式架構來進行環境影響評估。

## 三、營建工程環境影響評估

### (一) 營建工程施工之環境影響因子

營建工程施工過程中，使用不同的施工方法與器械時會產生營建公害。在本文中之營建公害係指營建工程在施工階

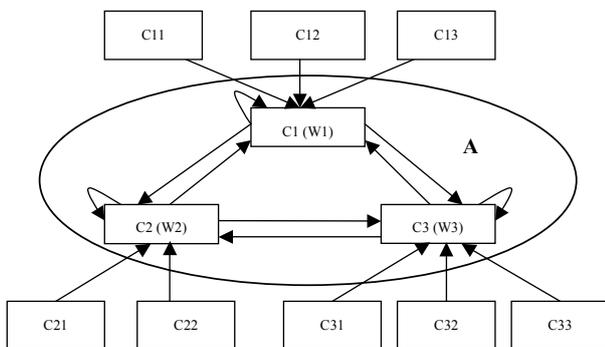


圖 7. 融合模糊分析網路程序法與模糊推理的整合式決策架構

段，因各種工程需要所進行的活動而妨礙了公眾健康或舒適生活現象者。

根據文獻中營建工程中所考慮的環境因子 [1-7]，與參考環保署「開發行為環境影響評估作業準則」，我們將營建工程施工中環境因子分為自然環境、生態及社會三個類別。

#### 1. 自然環境

自然環境包含水污染、空氣污染、土壤污染、固體廢棄物與噪音與振動。其中水污染可再細分為：(1) 溶氧 (DO)，其常用單位為 (mg/l)；(2) 生物需氧量 (BOD<sub>5</sub>)，其單位為 (mg/l)；(3) 總懸浮固體 (suspension solid, SS)，其單位為 (mg/l) 與 (4) 氨氮 (NH<sub>3</sub>-N)，其單位為 (mg/l)。空氣污染可再細分為：(1) 一氧化碳 (CO)，其單位為每 8 小時 (ppm) 與 (2) 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)，其單位為每 24 小時 (ppb)；(3) 總懸浮微粒 (TSP)，其單位為 (μg/m) 與 (4) 二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)，其單位為 (ppb)。土壤污染可再細分為：(1) 氣體殘留物與 (2) 空氣殘留物。廢棄物可再細分為：(1) 一般廢棄物；(2) 事業廢棄物。噪音與振動可再細分為：(1) 噪音，其單位為 (dB)；(2) 振動，其單位為 (dB)。

#### 2. 生態

生態包括陸域生態及水域生態兩種，其陸域生態中可再細分為：(1) 營建工程中所影響陸域動物之比例 (%)；(2) 營建工程中所影響陸域植物之比例 (%)；與 (3) 營建工程中所影響陸域中瀕臨絕種極受保護族群的動物植物之比例 (%)。其水域生態中可再細分為：(1) 營建工程中所影響水域動物之比例 (%)，(2) 營建工程中所影響水域植物之比例 (%)；與 (3) 營建工程中所影響水域中瀕臨絕種極受保護族群的動物植物之比例 (%)。

#### 3. 社會與經濟

社會與經濟包括社會環境、經濟環境與文化環境。其中社會環境可再細分為：(1) 公共設施；(2) 交通運輸與 (3) 社區阻隔。經濟環境可再細分為：(1) 土地利用與區域發展；(2) 生活水準及經濟與 (3) 產業活動。文化環境可再細分為：(1) 古蹟與 (2) 景觀。上述的十個環境影響因子與其細部因子可以圖 8 來表示。

### (二) 環境因子評估

我們將這個影響評估架構分為二部份：第 A 部份為十大項環境影響因子的評估，所採用的是 2.1 節所提出的模糊分析網路程序法；第 B 部份為各類環境影響因子之細項的評估，所採用的是 2.2 節所提出的模糊推理；最後再以 2.3



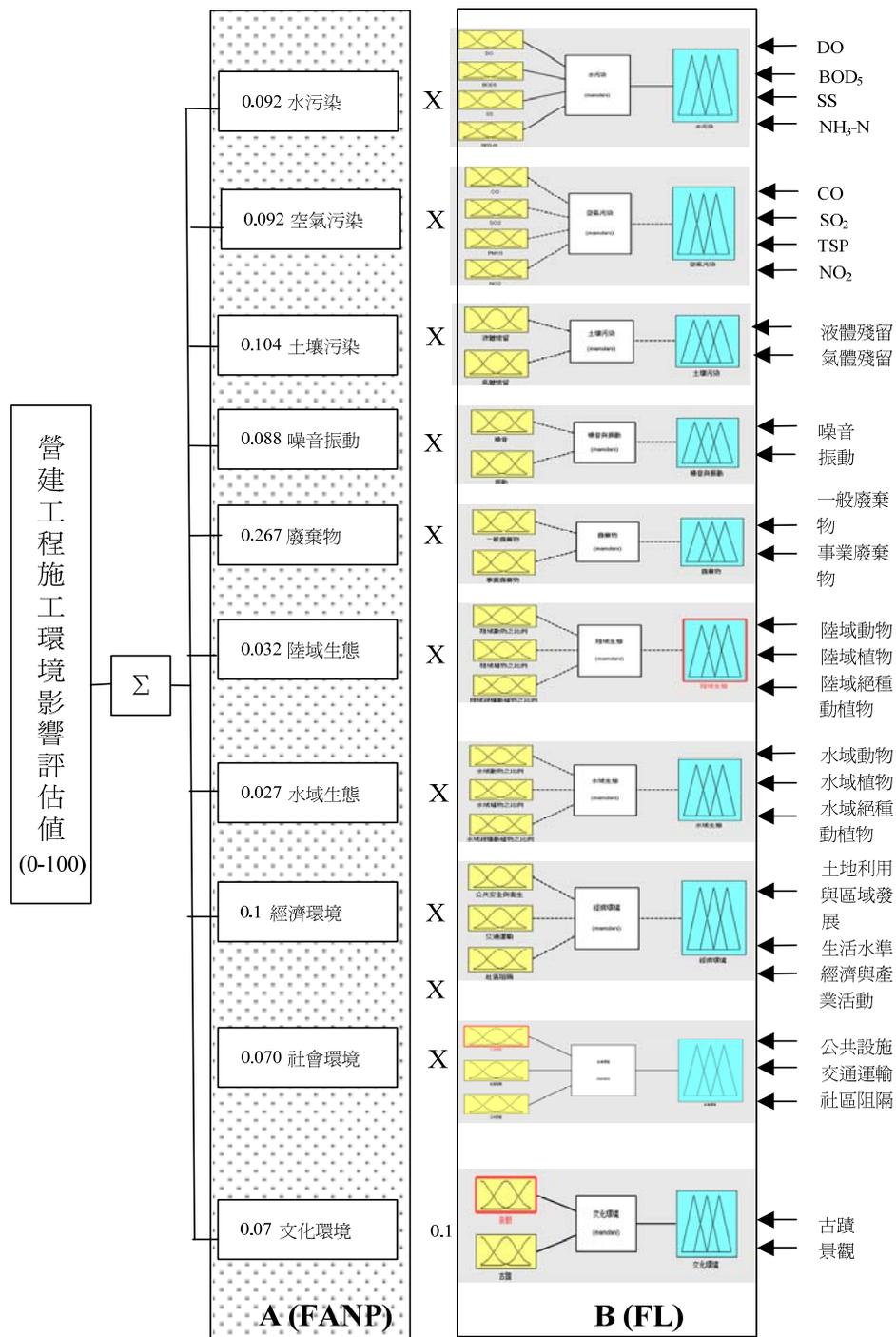


圖 8. 營建工程環境影響評估架構

節所提出的整合決策架構將模糊分析網路法與模糊推理加以結合，來進行環境影響評估。

1. 第 A 部分：FANP 法

根據 2.1 節 FANP 法的五個步驟為基礎，將營建工程中十個環境影響因子以模糊分析網路程序法進行評估：

(1) 步驟 1：釐清問題並找出準則與準則間的相依關係，

因此行程一個網路圖。例如工程中廢水產生污染，其中廢水會產生惡臭然而惡臭又會影響空氣污染，所以水污染也會對空氣污染產生影響。

(2) 步驟 2：以水污染為例，求出與其他因子之相依關係。在參考相關文獻後本研究自行整理水污染環境因子下的所有因子寫的成偶比對矩陣，如表 5，其中這裡所



表 5. 水污染模糊成偶比對矩陣

水污染	水污染	空氣污染	土壤污染	廢棄物	噪音振動	陸域生態	水域生態	社會環境	經濟環境	文化環境
水污染	1	$\tilde{35}$	$\tilde{7}$	$\tilde{7}$	$\tilde{65}$	$\tilde{35}$	$\tilde{25}$	$\tilde{65}$	$\tilde{65}$	$\tilde{65}$
空氣污染	$1/35$	1	$1/5$	$1/5$	$\tilde{2}$	$\tilde{1}$	$2/3$	$\tilde{2}$	$\tilde{2}$	$\tilde{2}$
土壤污染	$1/7$	$\tilde{5}$	1	$\tilde{1}$	$\tilde{10}$	$\tilde{5}$	$\tilde{4}$	$\tilde{10}$	$\tilde{10}$	$\tilde{10}$
廢棄物	$1/7$	$\tilde{5}$	$\tilde{1}$	1	$\tilde{10}$	$\tilde{5}$	$\tilde{4}$	$\tilde{10}$	$\tilde{10}$	$\tilde{10}$
噪音振動	$1/65$	$1/2$	$1/10$	$1/10$	1	$1/2$	$3/10$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$
陸域生態	$1/35$	$\tilde{1}$	$1/5$	$1/5$	$\tilde{2}$	1	$2/3$	$\tilde{2}$	$\tilde{2}$	$\tilde{2}$
水域生態	$1/25$	$3/2$	$1/4$	$1/4$	$10/3$	$3/2$	1	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$
社會環境	$1/65$	$1/2$	$1/10$	$1/10$	$\tilde{1}$	$1/2$	$1/3$	1	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$
經濟環境	$1/65$	$1/2$	$1/10$	$1/10$	$\tilde{1}$	$1/2$	$1/3$	$\tilde{1}$	1	$\tilde{1}$
文化環境	$1/65$	$1/2$	$1/10$	$1/10$	$\tilde{1}$	$1/2$	$1/3$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	1

使用的比對評估值為模糊值。例如，表 5 中第 2 行第 1 列（灰色部分）為  $\tilde{35}$ ，表示水污染對水污染這個準則是空氣污染又才對水污染的影響之模糊數。

- (3) 步驟 3：利用模糊截集 ( $\alpha$ -CUTS) 技術先將模糊評估值轉變為區間值，再利用區間值之矩陣與線性規劃之技巧可求出權重值。將表 5 的模糊評估矩陣分別取  $\alpha$ -CUTS = 0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.0，共得 11 組區間的成偶比對矩陣。再分別對每一區間矩陣，利用模糊線性規劃的方法來求權重。因此，可分別求出每個  $\alpha$ -CUT 的權重，整理如表 6 ( $w_k$  代表準則 k 之權重， $\lambda^*$  代表最大滿意度)。

利用結合 (aggregation) 的方法，算出的權重，如下式。

其中  $w_k$  代表準則 k 之權重， $\lambda^*$  代表最大滿意度。

$$W_k = \frac{\sum_{l=1}^L \alpha_l w_k(\alpha_l) \times \lambda_l^*}{\sum_{l=1}^L \alpha_l \times \lambda_l^*}, k=1, 2, 3, \dots, 10 \quad (11)$$

最後，求得這 10 個環境影響因子，水污染對自己本身的影響最大，達到 0.68，而其他因子如空氣污染、土壤污染、廢棄物、噪音與振動、陸域生態、水域生態、社會環境、經濟環境與文化環境亦對水污染產生影響，其程度分別為 0.02、0.10、0.10、0.01、0.02、0.03、0.01、0.01 與 0.01。分別對水污染的影響程度，如表 7 中之第 1 行。

- (4) 步驟 4：重複步驟 2 至 3，將所有環境因子與其他因子的影響程度（權重）求出，並將所有完成的 100 個權重值填入超級矩陣中，形成一未加權的超級矩陣，如表 7。

表 6.  $\alpha$ -cut=0~1 的權重表

$\alpha$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$w_1$	0.667	0.669	0.671	0.673	0.676	0.678	0.68	0.68	0.68	0.69	0.69
$w_2$	0.018	0.018	0.018	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
$w_3$	0.113	0.112	0.11	0.109	0.108	0.106	0.105	0.105	0.102	0.102	0.102
$w_4$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$w_5$	0.018	0.018	0.018	0.0185	0.0186	0.0187	0.0188	0.019	0.019	0.019	0.019
$w_6$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$w_7$	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
$w_8$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$w_9$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$w_{10}$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$\lambda^*$	0.975	0.974	0.974	0.974	0.973	0.973	0.972	0.972	0.972	0.971	0.971



表 7. 超級矩陣

	水污染	空氣污染	土壤污染	廢棄物	噪音振動	陸域生態	水域生態	社會環境	經濟環境	文化環境
水污染	0.68	0.02	0.10	0.02	0.01	0.11	0.11	0.01	0.02	0.01
空氣污染	0.02	0.70	0.02	0.02	0.01	0.11	0.11	0.01	0.01	0.01
土壤污染	0.10	0.10	0.49	0.10	0.01	0.11	0.11	0.01	0.01	0.01
廢棄物	0.10	0.10	0.30	0.77	0.05	0.11	0.11	0.01	0.01	0.01
噪音振動	0.01	0.01	0.01	0.01	0.87	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01
陸域生態	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.42	0.01	0.01	0.01	0.01
水域生態	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.42	0.01	0.01	0.01
社會環境	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.83	0.20	0.10
經濟環境	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.67	0.10
文化環境	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.73

(5) 步驟 5：再經由極限化運算，經過 1250 次超級矩陣連乘後可得一收斂的始超級矩陣，如表 8。最後，我們求得水污染、空氣污染、土壤污染、廢棄物、噪音與振動、陸域生態、水域生態、社會環境、經濟環境及文化環境之權重分別為 0.092, 0.092, 0.104, 0.267, 0.088, 0.032, 0.027, 0.100, 0.07, 0.072。

## 2. 第 B 部分：模糊邏輯法

十大項環境影響因子中再細分出的影響因子，則是利用模糊推理為基礎來進行評估：首先，針對每一細項因子建立語言變數，定義其模糊值與其隸屬度。細項因子之污染程度一般分為“高”、“中”、“低”，而十大項環境影響因子之模糊值有七種，分別為“極低”、“低”、“稍低”、“中”、“稍高”、“高”與“極高”。再者，根據專家知識建立十大項環境影響因子之推理法則。如此可以用這些模糊推理模式來評估十大項環境影響因子的污染程度。例如圖 9 所示為水污染之模糊推理法則，以 DO、BOD<sub>5</sub>、SS 及 NH<sub>3</sub>-N 為環境因子之細項，推理出水污染的污染程度。

## (三) 整合決策架構

根據第一部分環境影響因子的 FANP 評估法及第二部分環境影響因子細項的評估法，整合成一個營建工程的環境影響評估決策的結構圖，如圖 8。其中 A 區域為因子的權重利用 FANP 部分加以求得，B 區域的評估值則以模糊推理加以求得。左邊為最後計算出所有營建工程施工中影響因子的程度。

## 四、結論

本研究是提出一個整合模糊分析網路法與模糊推理之決策架構，使其可以處理準則具有相依的情形，並能模擬人類主觀之評估。換言之，本研究提供一個整合式的決策工具，可同時考慮準則間為屬性或是因果關係，並同時進行定量或定性決策。主要達成目標如下：

- (1) 提出整合式的決策架構：本研究將模糊分析網路法與模糊邏輯結合，始能處理準則具有相依的情形，並能同於處理定性或定量的決策；

表 8. 極限化之超級矩陣

	水污染	空氣污染	土壤污染	廢棄物	噪音振動	陸域生態	水域生態	社會環境	經濟環境	文化環境
水污染	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092
空氣污染	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092	0.092
土壤污染	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104	0.104
廢棄物	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267
噪音振動	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
陸域生態	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
水域生態	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
社會環境	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
經濟環境	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
文化環境	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072



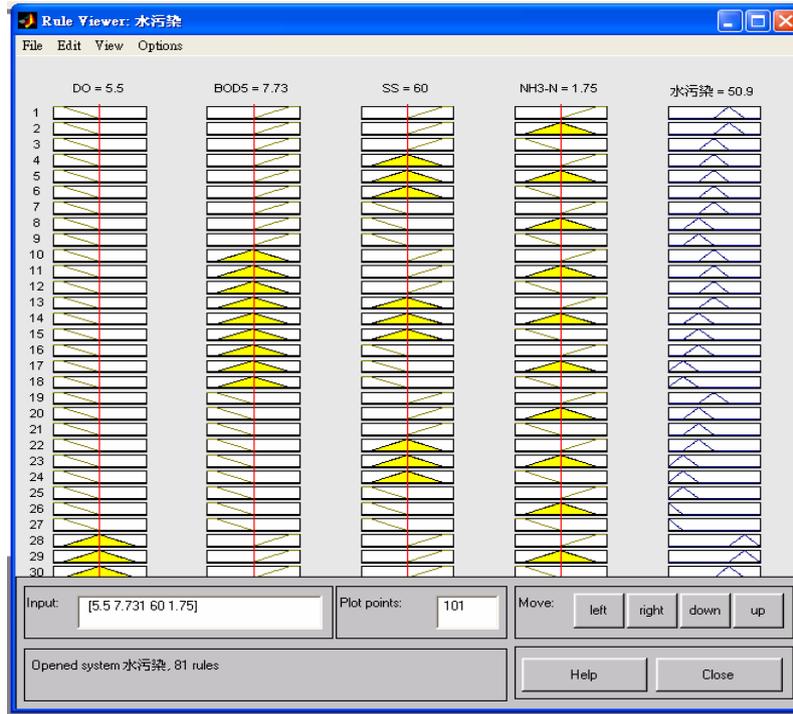


圖 9. 水污染之模糊推理法則

- (2) 提出營建工程的環境影響因子：本研究將營建工程施工中所涉及的環境影響因子整理為十大項，以利參考；
- (3) 建立營建工程環境影響因子間的相依性：以模糊分析網路法，建立營建工程環境影響因子的相互影響的程度；
- (4) 建立營建工程單項環境影響因子的模糊評估模式：以模糊推理之方法建立營建工程單項環境影響因子的模糊法則。

### 誌謝

作者感謝中華民國國家科學委員會的贊助（NSC 94-2211-E-212-005）。

### 參考文獻

1. 交通部高速鐵路工程籌備處（民 85），高速鐵路環境影響評估報告，交通部高速鐵路工程籌備處。
2. 林素貞（民 66），德爾菲技巧與階層分析法之應用，環境影響評估講習第二冊，頁 III-2-1，淑馨出版社，台北。
3. 張月珠（民 77），水庫計畫環境影響評估，環境影響評估講習第三冊，頁 IV-6-1，淑馨出版社，台北。

4. 陳璋鵬、徐淑女（民 77），道路工程之環境規劃、景觀規劃理念於道路工程之應用，環境影響評估講習第三冊，頁 1-20，淑馨出版社，台北。
5. 陳王琨（民 85），營建工程環境管理與污染防治，淑馨出版社，台北。
6. 黃世孟（民 77），都市建設環境影響評估綱要，環境影響評估講習第三冊，頁 IV-4-1，淑馨出版社，台北。
7. 潘國樑（民 77），地形地質衝擊評估，環境影響評估講習第二冊，頁 III-11-1，淑馨出版社，台北。
8. Goyal, S. K. and V. A. Deshpande (2001) Comparison of weight assignment procedures in evaluation of environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 21, 553-563.
9. Mamdani, E. H. (1977) Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 26(12), 1182-1191.
10. Mikhailov, L. and G. Madan (2003) Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support system. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Application and Reviews*, 33(1), 33-41
11. Phillis, Y. A. and L. A. Andriantiatsaholiniaina (2001)



- Sustainability: An ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, 37, 435-456.
12. Ramanathan, R. (2001) A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 63, 27-35.
  13. Saaty, T. L. (2001) *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*, RWS, Pittsburgh, PA.
  14. Silvert, W. (2000) Fuzzy indices of environmental conditions. *Ecological Modelling*, 130, 111-119.
  15. Tran, L. T., K. C. Gregory, R. V. O'neill and E. R. Smith (2004) Integrated environmental assessment of the mid atlantic region with analytical network process. *Environmental Monitoring and Assessment*, 94, 263-277.
  16. Zadeh, L. A. (1973) Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 28-44.
  17. Zadeh, L. A. (1975) The concepts of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8(3), 199-249.

收件：95.04.06 修正：95.09.11 接受：95.11.03

