

## 土壤及地下水污染潛勢之研究

陳慶和<sup>1\*</sup>、劉偉麟<sup>2</sup>、邱英嘉<sup>2</sup>、楊捷婷<sup>1</sup>、劉凡鳳<sup>1</sup>、王榮薇<sup>1</sup>、  
鄭伉妙<sup>3</sup>、郭士鋒<sup>1</sup>、陳彥宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立台北教育大學社會與區域發展學系(所)

<sup>2</sup> 桃園創新技術學院環境科技與管理系

<sup>3</sup> 國立台灣大學地理環境資源學系(所)

### 摘要

土壤及地下水污染潛勢乃是預防污染事件發生之重要參考依據，然而目前評估對象仍多以污染源為主，較缺乏對於區域的土壤及地下水污染潛勢評估。本研究之目的乃是在發展一套結合空間資訊而能夠有效評估區域性質的土壤及地下水污染潛勢評估之方法論，以改善現有方法之缺點。本研究以系統思維的方法，將區域中土壤及地下水污染相關因子視為一個完整的系統，發展出土壤及地下水污染潛勢評估指標，共包括潛在污染源、土壤及地下水污染、污染傳輸途徑、土地及地下水利用等四大面向，共計有 17 個指標項目。本研究以桃園縣為案例研究地區，蒐集指標計算所需之資料，並以地理資訊系統之空間資料分析處理功能，協助進行各指標值之評估分析，其中 1 個指標因研究案例缺乏資料而未納入評估。依據本研究所蒐集得到之資料，初步評估結果顯示桃園縣並無嚴重或高污染潛勢地區，而中污染潛勢地區約占全部網格的 11%，其餘則為低、輕微、無或極低污染潛勢，而中污染潛勢地區影響最大者為土地及地下水利用面向，其次是潛在污染源面向。由於評估所需資料非常多，目前各單位之資料尚不夠完整，因此部分地區或項目的資料必須利用推估方式補足，以至於造成桃園縣的污染潛勢評估值可能高於實際狀況。由於本研究之重點在於建立方法論，評估案例乃用於驗證方法論之可行性，因此要能夠達成對污染潛勢的確切評估，實有賴於各單位資料之完整調查與建置。本研究所發展之土壤及地下水污染潛勢評估之方法論，期望可做為主管機關推動土壤及地下水污染管理工作之初步基礎。

**關鍵詞：**土壤及地下水污染、污染潛勢評估指標、系統思維、地理資訊系統

## **A Study on Soil and Groundwater Pollution Potential**

Ching-Ho Chen<sup>1</sup>, Wei-Lin Liu<sup>2</sup>, Ing-Jia Chiou<sup>2</sup>, Chieh-Ting Yang<sup>1</sup>, Ji-Feng Liu<sup>1</sup>, Rong-Wei Wang<sup>1</sup>, Kang-Miao Cheng<sup>3</sup>, Shi-Feng Guo<sup>1</sup>, Yen-Hung Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Social and Regional Development, National Taipei University of Education, Taipei City, 106, Taiwan

<sup>2</sup> Department of Environmental Technology and Management, Taoyuan Innovation Institute of Technology, Chung-Li City, 320, Taiwan

<sup>3</sup> Department of Geography, National Taiwan University, Taipei City, 106, Taiwan

### **Abstract**

Soil and groundwater pollution potential is an important reference for the prevention of pollution events. However, the pollution sources were mainly considered for potential assessment and the regional soil and groundwater pollution potential was seldom considered. The purpose of this study is to develop an assessment methodology with spatial information to effectively assess the regional soil and groundwater pollution potential. Based on systems thinking, related factors of soil and groundwater pollution in an area are considered as a complete system and an assessment indicator system is developed in this study. This proposed indicator system involves 17 indicators in four dimensions: potential pollution sources, soil and groundwater pollution, transmission pathways, land and groundwater uses. Taoyuan County is used as a case study. This study collects related data and uses Geographic Information System (GIS) to analyze these data for calculating the indicator values. One indicator isn't evaluated because the required data can't be obtained in this case. Assessment results based on collected data show that there are no serious or high pollution potentials in Taoyuan County. 11% of the total grids are medium pollution potential. The potentials of the rest grids are low, slight, or very low. The dimension of land and groundwater uses is the most important influence for the medium pollution potential regions, and the next influence is the dimension of potential pollution sources. This study must estimate some data of regions and items during assessment process because the data from various authorities are not complete. Therefore, the assessment results in this study may be higher than the actual pollution potentials of Taoyuan County. However, this study focuses on developing methodology and verifying the proposed methodology by case study. Therefore, the authorities should investigate and establish the complete data to practically assess the pollution potentials. The proposed methodology is expected to be used as bases to the authorities for soil and groundwater pollution management.

**Keywords: soil and groundwater pollution, pollution potential assessment indicators, systems thinking, geographic information system**

## 1. 前言

土壤及地下水污染情況往往是在地下水源受到污染後，或是土壤嚴重污染影響外部後才會被發現，為了能夠預防土壤及地下水污染事件發生，需要建立一套土壤及地下水污染潛勢評估方法，先掌握哪些地方較為可能發生土壤及地下水污染事件，然後事先加強相關管理措施，以保護民眾的生命財產安全。

我國目前的土壤及地下水污染潛勢評估對象仍多以潛在污染產生源為主，包括工廠、加油站等[1]，較缺乏對於區域的土壤及地下水污染潛勢評估。本研究認為，對於土壤及地下水污染潛勢不應只從污染產生來源來考慮，更應從受污染者(土地)及受影響者(民眾)的角度，分析較為可能發生土壤及地下水污染事件之區域，以做為相關管理目標及策略研擬之基礎。

由於土壤及地下水污染來自於土地上的各種人類活動(如工廠、加油站)，而受污染者為土地及其下的地下水層，受影響者為利用或接觸這些受污染土地與地下水的民眾，因此污染潛勢的各項因子具有顯著的空間性質。本研究乃以整體系統的觀點，發展以空間分布特性為考量之土壤及地下水污染潛勢評估指標，並且結合地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)功能，建立土壤及地下水污染潛勢評估之 GIS 資料庫。

綜合上述說明，本研究之目的為發展一套結合空間資訊而能夠有效評估區域性質的土壤及地下水污染潛勢評估之方法論，以期可做為主管機關推動土壤及地下水污染管理工作之初步基礎。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究範圍

本研究之研究範圍為桃園縣，由於復興鄉大部分為山地，居住人口密度低，人的直接影響相對較低，所以將復興鄉排除在本研究範圍。桃園縣(不含復興鄉)面積約870平方公里，本研究以系統思維的觀點，將桃園縣視為整個系統，再考慮到評估所使用資料量及其分佈，研究區域中的空間單元定為邊長為2公里之方形網格(共266個空間單元)，做為子系統，以利研究分析，如圖1所示。

### 2.2 土壤及地下水污染潛勢指標訂定、標準化、權重計算、污染潛勢分級

#### 2.2.1 土壤及地下水污染潛勢指標之建立

本研究乃以系統思維(Systems thinking)的方法[2][3][4][5]，考量土壤及地下水污染潛勢與污染發生階段、污染傳輸階段、污染衝擊階段等皆有關，因此將指標分為四大面向，包括潛在污染源、土壤及地下水污染物、傳輸途徑、土地及地下水利用等。每個面向又細分為數個指標項目，因此合計共有17個指標項目，如圖2所示。



圖1 研究範圍及網格

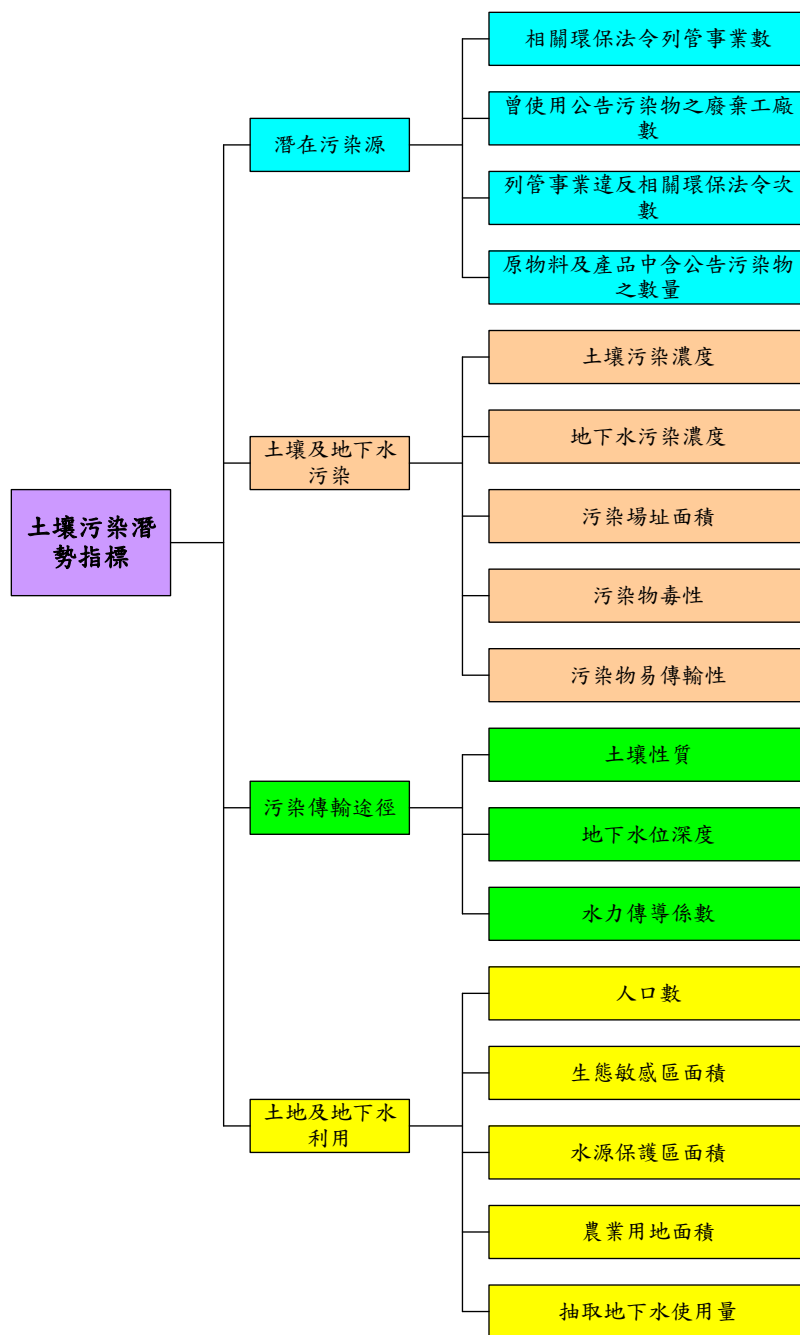


圖2 土壤及地下水污染潛勢評估指標架構圖

### 2.2.2 指標定義及其標準化

針對圖 2 中之各項指標，以「相關環保法令列管事業數」指標為例，本研究訂定其定義、目的及計算方法，如表 1 所示。

由於各指標的單位與數值範圍均不同，無法直接將各指標值加總計算與比較，因此本研究乃將指標值加以標準化，標準化分數在 0~1 分之間，分數越高代表污染潛勢越大，以「相關環保法令列管事業數」指標為例，乃依據所蒐集到之資料，做合理性之評估，訂定每平方公里若有 5 家以上列管事業，則在此指標中被歸為高污染潛勢以上，標準值大於等於 0.6；若每平方公里有 3 至 4 家列管事業，則在

此指標中被歸為中污染潛勢，標準值介於 0.4 到 0.5；若每平方公里有 3 家以下列管事業，則在此指標中被歸為低污染潛勢以下，標準值小於等於 0.3，如表 2 所示。

表 1 相關環保法令列管事業數定義

指標面向	(1)潛在污染源
指標名稱	(1-1)相關環保法令列管事業數
定義	加油站、列管大型儲槽之事業家數，以及由環保單位依據水污染防治法、毒性化學物質管理法、廢棄物清理法所列管之事業家數。
目的	加油站、列管大型儲槽之事業，以及水污染、毒性化學物質、廢棄物等列管事業之土壤及地下水污染物可能會排放到工廠廠區以外地區，影響民眾健康。以上列管事業越多者，代表污染物可能造成民眾健康之潛在影響越大，因此污染潛勢越高。
計算方法	指標值=相關環保法令列管事業數量/網格面積
單位	家/平方公里

表 2 相關環保法令列管事業數標準化

指標面向	(1)潛在污染源			
指標名稱	(1-1)相關環保法令列管事業數			
分級標準(家/平方公里)	標準值	分級標準(家/平方公里)	標準值	
$X \geq 10$	1	$5 > X \geq 4$	0.5	
$10 > X \geq 8$	0.9	$4 > X \geq 3$	0.4	
$8 > X \geq 7$	0.8	$3 > X \geq 2$	0.3	
$7 > X \geq 6$	0.7	$2 > X \geq 1$	0.2	
$6 > X \geq 5$	0.6	$1 > X \geq 0$	0.1	

註：分數越高代表污染潛勢越大

### 2.2.3 土壤及地下水污染潛勢綜合評估指標值之計算方法

針對研究區域(視為一個系統)中土壤及地下水污染潛勢相關因子相互作用之觀點，本研究界定潛在污染源、土壤及地下水污染等面向為污染發生階段，污染傳輸途徑面向為污染傳輸階段，土地及地下水利用面向為污染衝擊階段，三者對污染潛勢之影響為相互獨立，因此三者之間的關係為相乘，指標計算方法如下：

$$SGPPI = (W_{01} \times PS + W_{02} \times PT) \times TR \times LG$$

$$PS = W_{11} \times PS_1 + W_{12} \times PS_2 + W_{13} \times PS_3 + W_{14} \times PS_4$$

$$PT = (W_{21} \times PT_1 + W_{22} \times PT_2 + W_{23} \times PT_3) \times (W_{24} \times PT_4 + W_{25} \times PT_5)$$

$$TR = W_{31} \times TR_1 + W_{32} \times TR_2 + W_{33} \times TR_3$$

$$LG = W_{41} \times LG_1 + W_{42} \times LG_2 + W_{43} \times LG_3 + W_{44} \times LG_4 + W_{45} \times LG_5$$

其中：

SGPPI：土壤及地下水污染潛勢指標；PS：潛在污染源；PT：土壤及地下水污染；TR：污染傳輸途徑；LG：土壤及地下水利用；PS<sub>1</sub>：相關環保法令列管事業數；PS<sub>2</sub>：曾使用公告污染物之廢棄工廠數；PS<sub>3</sub>：列管事業違反相關環保法令次數；PS<sub>4</sub>：原物料及產品中含公告污染物之數量；PT<sub>1</sub>：土壤污染濃度；PT<sub>2</sub>：地下水污染濃度；PT<sub>3</sub>：污染場址面積；PT<sub>4</sub>：污染物毒性；PT<sub>5</sub>：污染物易傳輸性；TR<sub>1</sub>：土壤性質；TR<sub>2</sub>：地下水位深度；TR<sub>3</sub>：水力傳導係數；LG<sub>1</sub>：人口數；LG<sub>2</sub>：生態敏感區面積；LG<sub>3</sub>：水源保護區面積；LG<sub>4</sub>：農業用地面積；LG<sub>5</sub>：抽取地下水使用量；W<sub>ij</sub>：權重

#### 2.2.4 指標權重之訂定

本研究在訂定權重時乃是參考相關文獻，並與數位專家學者進行討論，最後由本研究之參與人員共同加以決定。指標權重之訂定方式乃是每個階段之權重總和為1，因此污染傳輸途徑、土地及地下水利用等面向之權重總和皆各為1，而潛在污染源、土壤及地下水污染等面向為同一階段，因此其權重總和為1。考量土壤及地下水污染面向代表土壤及地下水污染潛勢中已對土壤及地下水造成污染者，因此權重值較大，本研究設定為0.6；而潛在污染源面向代表可能造成污染潛勢者，因此權重值較低，本研究設定為0.4。

本研究再針對每個面向中之各指標項目，根據其相對重要性而將面向之權重分配至各指標項目。以潛在污染源面向為例，若原物料及產品中含有污染物，其對土壤及地下水的污染可能高，因此佔0.35；列管事業及曾使用污染物之廢棄工廠，著眼於工廠，並非如同前項指標著眼於污染物，因此各佔0.25；列管事業違反相關環保法令次數，為列管事業之指標延伸，調查違規次數，因此佔0.15。以上權重合計為1。各面向下各指標項目之權重如表3所示。

#### 2.2.5 污染潛勢分級之界定

根據土壤及地下水污染潛勢綜合評估指標之定義，在計算出評估指標值後，本研究乃加以分級。由於各指標值均為0~1，因此相乘後污染潛勢指標為0~1，評估指標值越大，則污染潛勢越高。本研究將污染潛勢分為6級，如表4所示，以嚴重污染潛勢為例，本研究考量單一指標值若是高於0.8，代表污染潛勢嚴重，因此以每項指標值平均為0.8計算，則污染潛勢指標為0.512，因此定義大於等於0.512為高污染潛勢。

表 3 各面向下各指標項目之權重

指標面向	指標項目	權重	
潛在污染源	相關環保法令列管事業數(W <sub>11</sub> )	0.25	
	曾使用公告污染物之廢棄工廠數(W <sub>12</sub> )	0.25	
	列管事業違反相關環保法令次數(W <sub>13</sub> )	0.15	
	原物料及產品中含公告污染物之數量(W <sub>14</sub> )	0.35	
土壤及地下水污染濃度	土壤污染濃度(W <sub>21</sub> )	0.3	1
	地下水污染濃度(W <sub>22</sub> )	0.3	
	污染場址面積(W <sub>23</sub> )	0.4	
	污染物毒性(W <sub>24</sub> )	0.5	1
	污染物易傳輸性(W <sub>25</sub> )	0.5	
污染傳輸途徑	土壤性質(W <sub>31</sub> )	0.3	
	地下水位深度(W <sub>32</sub> )	0.3	
	水力傳導係數(W <sub>33</sub> )	0.4	
土壤及地下水利用	人口(W <sub>41</sub> )	0.25	
	生態敏感區面積(W <sub>42</sub> )	0.1	
	水源保護區面積(W <sub>43</sub> )	0.1	
	農業用地面積(W <sub>44</sub> )	0.15	
	抽取地下水使用量(W <sub>45</sub> )	0.4	

表 4 土壤及地下水污染潛勢分級表

污染潛勢分級	評估值
嚴重	SPGGI $\geq$ 0.512
高	0.512 > SPGGI $\geq$ 0.216
中	0.216 > SPGGI $\geq$ 0.064
低	0.064 > SPGGI $\geq$ 0.027
輕微	0.027 > SPGGI $\geq$ 0.008
無或極低	0.08 > SPGGI

### 3. 結果與討論

本研究依據上述方法論，乃蒐集相關資料，並以 GIS 分析處理後，計算各項指標值以及土壤及地下水污染潛勢。其中「土壤污染濃度」資料屬於政府管制性，無法對外提供，因此本研究最後無法進行此項指標之評估。由於此項指標無指標值評估結果，因此此項指標所占之權重，乃分別給予同一面向中之「地下水污染濃度」及「污染場址」。

以「地下水污染濃度」指標為例，本研究蒐集行政院環境保護署環境水質監測資訊網[6]之2011年資料共25筆，以及桃園縣環保局[7]工業區及戰備水井之2011年監測資料共35筆，將座標以 Add XY data 方式建置為 GIS 資料，如圖3所示。



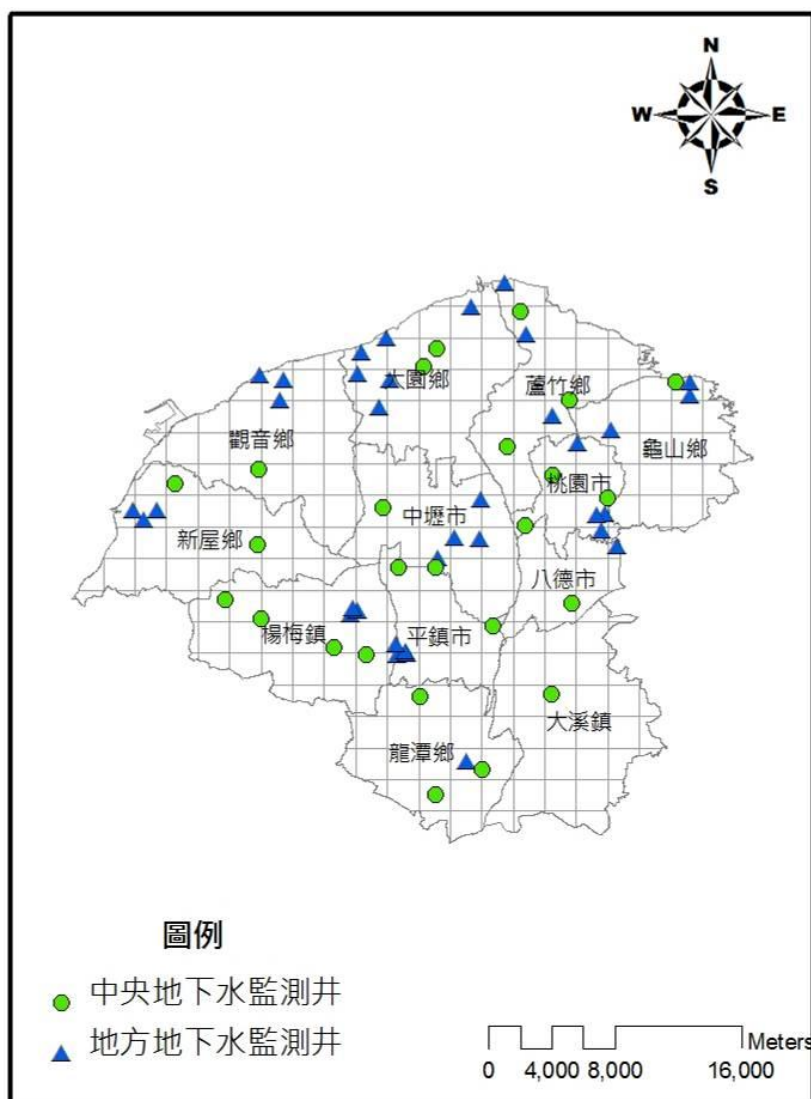


圖 3 桃園地下水監測井分布圖(原始資料來源:環保署,2011;桃園縣環保局,2011;  
本研究分析及繪製)

由於每個網格中不一定有監測井,缺乏監測井的網格無法由監測資料判斷其污染物濃度,所以本研究利用 ArcGIS 中的空間內插法中之一般克利金(Ordinary Kriging)分析功能,來推估各網格污染濃度,結果如圖 4 所示。此一方法雖能推估各網格之資料,然而未進行檢測之網格中,有可能存在比推估值更高或更低的污染濃度值,而影響潛勢評估結果。由於本研究僅能依據所蒐集到的資料進行分析,在污染潛勢分析評估結果上,可能存在一定之誤差,因此有待後續政府單位進行全面完整之調查,才能再進行更確切之評估。

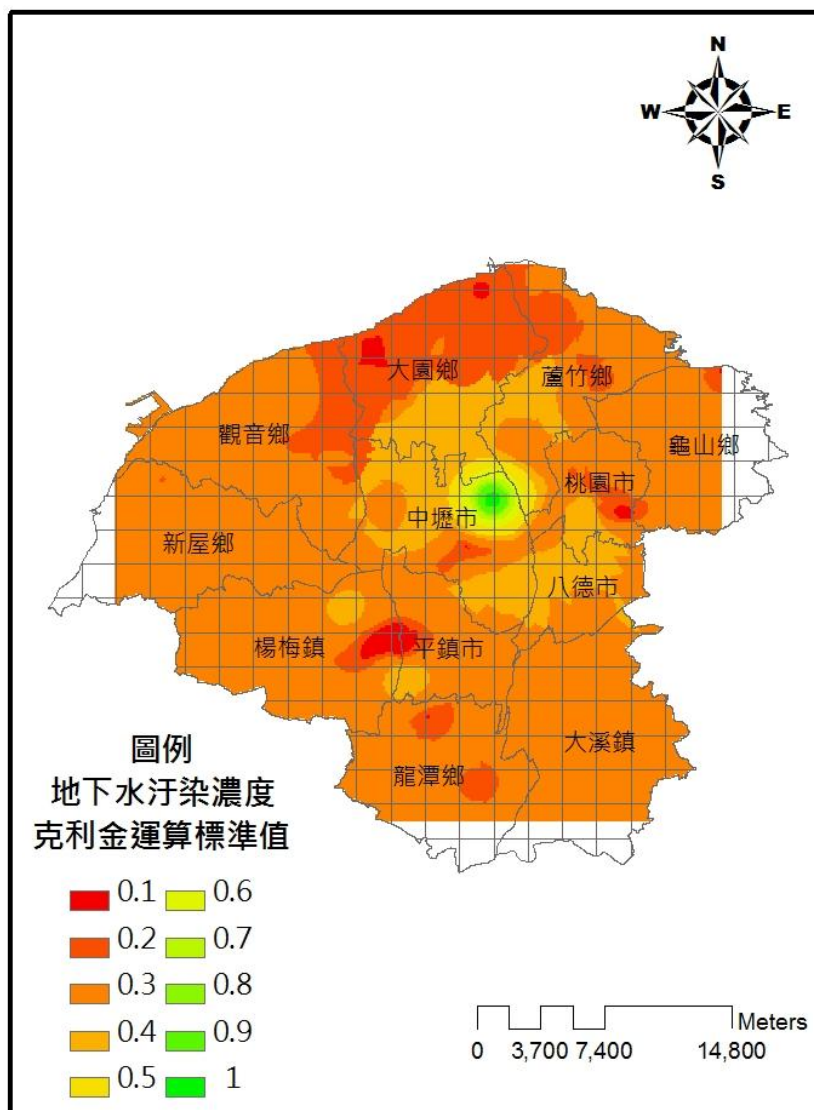


圖 4 桃園地下水污染濃度克利金法推估結果圖(原始資料來源：環保署，2011；桃園縣環保局，2011；本研究分析及繪製)

本研究將所有指標計算並加總後，可得到土壤及地下水污染潛勢分級結果，如圖 5 所示，分析結果顯示桃園縣並無嚴重或高污染潛勢地區，中污染潛勢約佔全部網格的 11%；低污染潛勢所佔比例最高，約佔全部網格的 56%；輕微污染潛勢約佔全部網格的 30%；無或極低污染潛勢約佔全部網格的 3%。

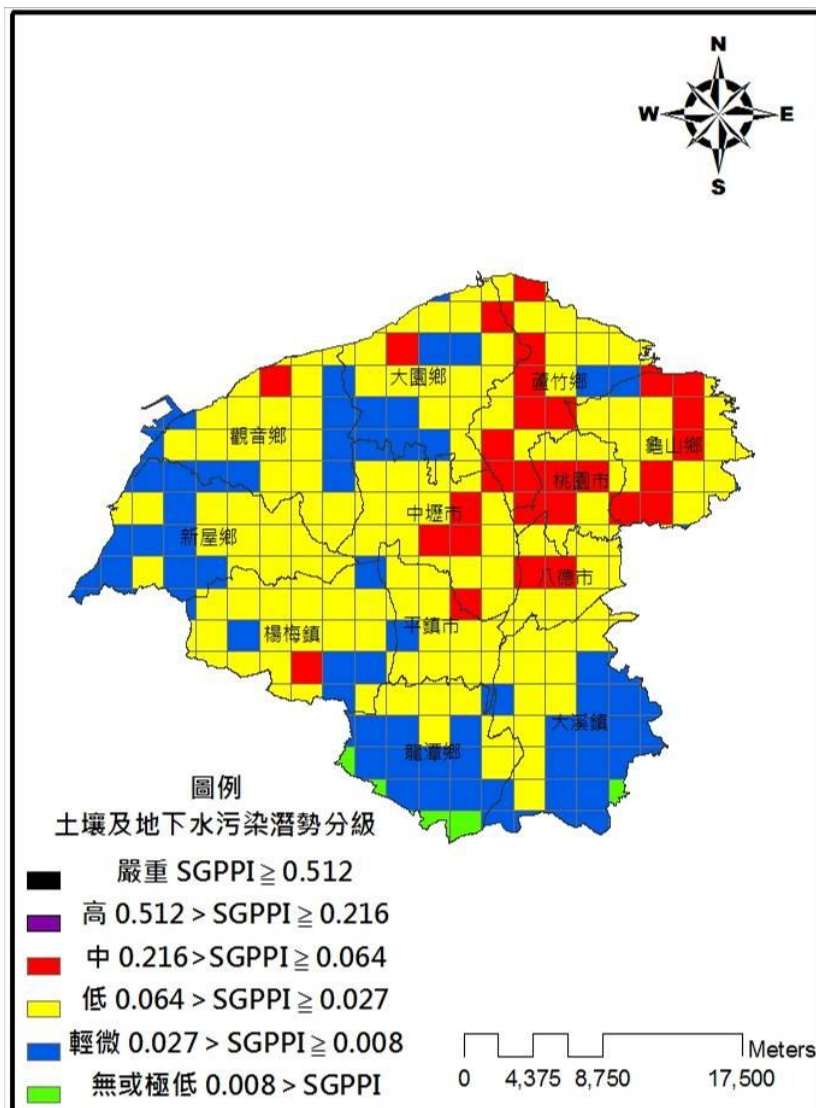


圖 5 全區污染潛勢分級示意圖

本研究區域中土壤及地下水污染潛勢分級為無或極低度者，總共有 8 個網格，分布地區為龍潭鄉、大溪鎮及觀音鄉，依據本研究所蒐集得到之資料分析，這些地區之土壤及地下水利用面向評估值幾乎都非常低，其次是因為土壤及地下水污染濃度之評估值低，因此須注意在這些地區萬一監測到較高之土壤及地下水污染濃度，即可能會升高其污染潛勢。

本研究區域中土壤及地下水污染潛勢分級為中度共有 29 個網格，以桃園市、蘆竹鄉兩區所占比例最高。依據本研究所蒐集得到之資料分析，這些地區最主要是因為土地及地下水利用面向之評估值較高，其次是潛在污染源面向之評估值較高，亦即因為人口數高，地下水用量大，列管事業數多，事業違反法令數多等而使污染潛勢較高，但部分地區是因為有污染場址及較高之地下水污染濃度所致。

#### 4. 結論與建議

本研究認為在界定土壤及地下水污染潛勢時，不應僅針對污染來源進行調查評估其污染潛勢，或僅以自然環境、地質條件為主來評估環境之污染潛勢，而是應以系統思維的方法，考量土壤或地下水整體之污染發生階段、污染傳輸階段、污染衝擊階段等，因此本研究界定之土壤及地下水污染潛勢評估指標，共包括潛在污染源、土壤及地下水污染、污染傳輸途徑、土地及地下水利用等四大面向，共計 17 個指標項目，本研究並界定桃園縣為案例研究地區，依據本研究提出之方法論，蒐集指標計算所需之資料而進行評估。依據前述本研究蒐集得到之資料分析，初步評估結果顯示桃園縣並無嚴重或高污染潛勢地區，而中污染潛勢地區約占全部網格的 11%，分布以桃園市、蘆竹鄉所占比例最高；低污染潛勢所占比例最高，約佔所有網格的 56%，輕微污染潛勢約佔全部網格的 30%，無或極低污染潛勢約佔全部網格的 3%。由評估結果顯示，本研究發展之指標，初步可完整地針對污染源、污染物、傳輸途徑、及土地及地下水利用等面向而呈現較為適當的污染潛勢。

針對桃園縣中污染潛勢地區分析，依據上述本研究蒐集得到之資料而言，造成這些地區污染潛勢較高的原因，影響最大者為土地及地下水利用面向，其次是潛在污染源面向，初步研判桃園縣達到中污染潛勢地區大多是因為人口數多、地下水使用量大、列管事業數量多、違反環保法令次數多等所致，部分地區則是因為監測數值高、或有已有污染場址所致。因此，本研究以整體系統的觀點，根據分析結果中各面向及各指標項目之評估值較大者而探討，期望可做為主管機關訂定土壤及地下水污染管理措施之初步參考依據。承上所述，由於資料不足而致污染潛勢評估值可能高於實際狀況，因此未來需由各單位進行資料之完整調查與建置後，再進行更確切的評估與分析。

本研究由於評估所需資料非常多，目前各單位之資料尚不夠完整，例如監測井數量不足，導致部分網格在計算上只能用推估的方式，和實際狀況有誤差；此外，本研究亦缺乏土壤污染濃度資料。在此狀況下所評估的污染潛勢評估值可能高於實際狀況。由於本研究之重點在於建立方法論，評估案例乃用於驗證方法論之可行性，因此建議未來各單位能進行資料之完整調查與建置，然後重新進行評估，以得到較為確切的桃園縣污染潛勢。

#### 參考文獻

- [1] 行政院環保署，(2012)。土壤及地下水污染整治網。  
<http://sgw.epa.gov.tw/public/index.asp>
- [2] Chen, C. H., and I. J. Chiou. (2008). Remediation of Heavy-metal-contaminated Farm Soil Using Turnover and Attenuation Method Guided with a Sustainable Management Framework. *Environmental Engineering Science*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-32.
- [3] Chen, C. H., R. S. Wu, W. L. Liu, W. R. Sue, and Y. M. Chang. (2009). Development of a Methodology for Strategic Environmental Assessment: Application to the Assessment of Golf Course Installation Policy in Taiwan. *Environmental Management*, Vol. 43, pp. 166-188.
- [4] Chen, C. H., W. L. Liu, and S. L. Liaw. (2011). Integrated dynamic policy management methodology and system for Strategic Environmental Assessment of golf course installation policy in Taiwan, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 31, pp. 66-76.

- [5] Chen, C. H., W. L. Liu, I. J. Chiou, and S. L. Liaw. (2012). Integrated Management Methodology for Sustainability and Land Use of a River Basin. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 121-126, pp 2789-2793.
- [6] 行政院環保署, (2011), 地下水區域性水質測站。取自環境地理資訊系統 <http://gis.epa.gov.tw/LayerListn.aspx>
- [7] 桃園縣環保局, (2011), 環境檢驗科水質監測資料。取自 [http://labweb.tyepb.gov.tw/03/left\\_0304.aspx](http://labweb.tyepb.gov.tw/03/left_0304.aspx)
- [8] 瑞竣科技, (2011), 桃園縣電子地圖。
- [9] 劉凡鳳、王榮薇、楊捷婷, (2012), 土壤及地下水污染潛勢評估之研究。國立台北教育大學社會與區域發展學系專題研究論文, 台北。