

## 地理統計結合地理資訊系統應用於土壤污染防治

### Applications of Geostatistics and Geographic Information System for Soil Pollution Protection

國立台灣大學生物環境系統工程學系

東南技術學院環境工程學系

中國文化大學景觀系

張 尊 國

涂 貴 新

林 裕 彬

Tsun-Kuo Chang

Guey-Shin Shyu

Yu-Pin Lin

#### 摘 要

地理資訊系統可以快速、精確、綜合地對複雜的地理特徵進行空間定位和過程動態分析，土壤污染防治關注地表及地下土壤中污染質之成分與來源分布，因此二者密切相關，再者地理統計為分析空間變異與關聯詮釋之工具。本文利用環保署台灣土壤重金屬含量之調查資料，汞、砷、鎘含量數據，應用上述工具以最小平方方法模擬建立之指數變異模式推估克利金網格值涵蓋全區，並以此建立土壤砷、汞、鎘之濃度分佈圖，以改進傳統網格之表達方式，使得調查結果更能彰顯。這些分佈圖將有助於研判土壤中重金屬含量空間分佈與土壤母質之相互關係，亦有助於對污染來源之追蹤研究。應用此法，以視覺展示濃度分布與工廠排放源位置，可迅速瞭解其污染之範圍及探討可能之污染來源，可作為土壤污染防治管理重要之參考依據。

**關鍵詞：**土壤，重金屬，地理統計，克利金，地理資訊系統。

#### ABSTRACT

GIS provides representations of the spatial features of the Earth, while soil pollution protection is concerned with the soil and its pollutant constituents over the land surface and in the subsurface environment. There is obviously a close connection between the two subjects. Meanwhile, geostatistics provides a set of statistical tools for analyzing spatial variability and spatial interpolation. Examples of Applications of Geostatistics and Geographic Information System for Soil Pollution Protection were illustrated and discussed in this paper.

Maps illustrating the heavy metals Hg As and Cd content of soils of Taiwan was developed using geostatistics and geographic information systems. Data were collected from Environmental Protection Administration's study targeting agricultural soils in

1980s. An exponential variogram model was fitted using least squares and used to kriging a grid covering study area. The map will be useful in future research to determine the relationship between heavy metals and parent soil material and industrial emission, and in considering the consequences of land disposal of sludge. The method has ability to support and foster scientific visualization and mapping. By doing so, decision maker can acquire an intuitive understanding of the effects of local information simply from visual inspection.

**Keywords:** Soil, Heavy metals, Geostatistics, Kriging, GIS.

## 一、前言

民國 71 年環保機關有鑒於日本發生鎘米污染事件，而國內灌溉用水又常受工業廢水污染，故著手進行土壤污染防治工作，將食用農作物生長之農田土壤列為優先防治重點，展開全國土壤重金屬含量調查，第一階段(72-75 年)土壤污染防治工作係針對台灣地區 116 萬餘公頃之農田土壤，進行採樣檢測工作，調查結果約有 40 萬公頃農地之土壤重金屬含量較高；第二階段(76-79 年)則針對第一階段調查結果中重金屬含量較高之農地進行調查，分列「台灣地區土壤重金屬含量標準與等級區分表」；第三階段(81-88 年)由環保署補助地方環保機關針對已篩選出未來應著重之污染防治地區，約 10 萬公頃農地進行縮小範圍調查。其間並於 80 年訂定「土壤污染防治草案」，89 年 2 月「土壤及地下水污染整治法」正式公布施行，除對污染者、污染土地關係人科以重罰外，並徵收污染整治費，對遭污染土地的善後及移轉規範甚嚴，顯示政府推動土壤污染防治之決心。

土壤污染防治的落實，必須加強環境監測與污染源管理工作之追蹤與考核，資訊管理系統成為必要之手段與工具。土壤為環境中的主要受體之一，但因其擴散、稀釋能力較低，因此土壤中毒性物質之累積現象較為顯著。據環保單位之調查資料顯示，台灣地區之土壤不論是重金屬抑或毒性有機物均陸續發現一些含量較高地區，亟需正視土壤與地下水污染的問題，而台灣地區土壤污染之來源由廢水導致約

占 80%，由空氣落塵造成約占 13%，其餘則由廢棄物、農藥、肥料、酸雨等所造成。是故土壤污染防治所涉及之層面極為廣闊，非有適當方法與工具無法奏效。現代管理理論認為，管理的實質就是一種資訊的流通，任何一個管理組織，其管理的效率有賴於管理者對內、外部情況的了解，資訊愈及時、品質越好，管理效率就愈高。環境監測資訊是為環境管理所需的數據與資料的收集、存儲、傳遞、加工和維護的手段，是環境管理現代化的重要標誌。地理資訊系統是將真實世界裡的人、地、物等空間資訊，整合在一完整的資料庫中，其具有輔助空間資料之輸入、儲存、尋取、分析及展示之功能，對於具空間特性資料庫之建立，極具效率，應用於環境管理極為切適，而地理統計更可將有限之監測數據經模式之導演發揮成具有價值之資訊以提供決策者判斷之依據。

毒性物質之累積是一般關注土壤污染之焦點，毒性物質監測工作之困難度較高成本昂貴，因此土壤污染監測數據較為貧乏。如何對環境監測資訊進行科學的分析和研究是提高環境管理水準的重要基礎，因此經由各方資訊整合與善用分析工具以補監測資訊不足之處是提高我國土壤污染防治工作的重要手段，也是現階段一個極為迫切的任務。

## 二、土壤污染防治資訊

環境管理資訊是一個涉及許多領域的綜合資訊，環境資訊內容極為豐富，其來源也十分廣泛，其主要內容與特徵於下：

- (1)環境監測數據量十分龐大，僅每年從土壤、水體、大氣、噪音、放射性、生態等環境監測方面獲得的數據，數以萬計。隨著環境管理的發展及監測技術的不斷改進，數據的產生量還將會成千上萬地增加。
- (2)環境品質、污染源狀態、氣象、水文等基礎數據是環境監測資訊中最主要部分，它們的狀態都是隨著時間的遷移而不斷變化的，具有很強的時效性，且通過它們變化趨勢的科學分析又將產生新的資訊。
- (3)環境是一個整體，無論是環境品質、污染源狀態、氣象、水文等基礎數據，各地域（縣、市、省、全國）、各斷面之間及不同時間所獲得的數據都具有可比性，可以進行不同地域範圍、不同時間範圍的比較，從中發掘出它們各自的時空分布特徵。
- (4)在各種環境監測資訊之間，具有十分強烈的相關性和綜合性。例如，土壤重金屬含量與電鍍廢水排放；燃料消耗、廢氣排放、氣象因素與大氣環境污染；工業用水與廢水排放；水文與水環境污染；產業結構、產值與廢汙排放等，可以透過綜合分析從中獲得更有深度的重要資訊。

管理資訊是指為某一管理業務使用的資訊，這類資訊必須與基礎資訊不重複。即為滿足該管理業務的資訊需求，除基礎資訊外另需補充相關之資訊，再經過各管理模組處理得到的直接為管理決策使用的結果資訊。從今後的發展看，應考慮以下三個方面：一是資訊資源的深度利用，包括深入的數據分析的趨勢預測等；二是建立各類模型，為環境管理的科學定量決策提供依據；三是運用地理資訊系統工具以處理、圖形、圖像，為主政者決策提供直觀、全面的資訊。

土壤重金屬含量調查，自民國七十二年起，由中央環保單位著手進行調查工作，調查方式由最早之 4 公里×4 公里之 1600 公頃大樣區網格調查起，分四年將全省之農地做了一次

完整的概況調查，同時針對該調查結果，將土壤中之重金屬含量程度分為五級，當大樣區之調查結果為第四或第五級時，再將大樣區劃分為 16 個中樣區，即 1 公里×1 公里之 100 公頃網格進行更詳細之調查；當中樣區仍呈現第四或第五級時，再將中樣區劃分為 4 個小樣品區(每個 25 公頃)進行調查，81 年起調查監測之工作已由中央移至地方主管單位，由各地方環保局針對疑似污染區所展開 100 公尺×100 公尺之 1 公頃小網格細密調查，目前仍持續進行之中，以徹底掌握全省土壤之實際污染狀況，台灣地區土壤重金屬污染概況如表 1 所示。為將過去數年累積之重金屬調查資料彙整並整合相關資訊，由台大農工系及前省環保處，經多年之努力共同完成土壤重金屬污染資訊管理系統之開發其架構如圖 1 所示（張尊國，1996），並利用此系統協助順利完成全省 21 縣市土壤重金屬含量調查參考手冊之彙編，並將系統分割移交各環保中心、縣市環保局使用（台灣省政府環境保護處，1998）。

根據 76-79 年農田土壤重金屬含量調查顯示，將近 5 萬公頃及 780 餘公頃農地之重金屬含量分列第四級（需進一步確認是否遭受污染）及第五級（土壤中有外來重金屬介入），其中第四級以雲林縣 1.5 萬公頃較多(占耕地面積 17%)，台南縣市 0.8 萬公頃(占 7.1%)次之；另列為第五級地區則以桃園縣、新竹縣市、彰化縣、台南縣市較為嚴重。依 81 至 88 年調查結果顯示，重金屬含量列為第五級之累積面積計 950 餘公頃，造成污染之主因為灌溉水遭廢污水污染，其中以彰化縣、桃園縣、台北縣之受污染面積較多，主要重金屬項目為鉻、鋅、銅。台灣地區農田土壤污染皆因廢水、空氣落塵、廢棄物所造成，在推動土壤污染改善工作之同時，掌握整體環境污染狀況亦為努力之重點。

### 三、材料與方法

本文使用之資料取自環境單位從 72 至 79 年委託學術研究單位針對台灣地區農田 116 萬

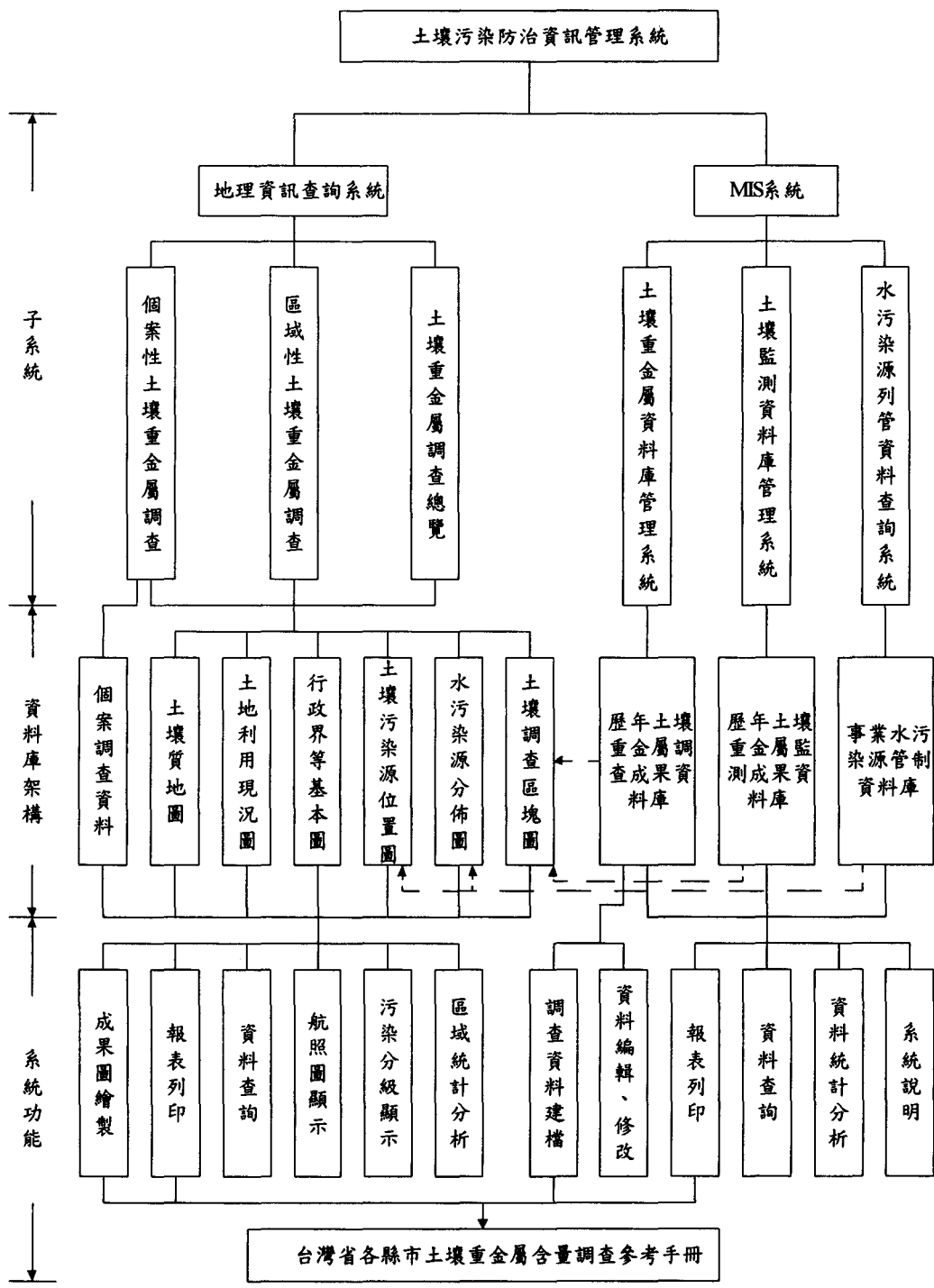


圖 1 土壤重金屬污染防治資訊系統架構圖

表 1 台灣地區土壤重金屬污染概況

地區別	76-79 年農田土壤重金屬含量調查				81-88 年土壤重金屬含量列為第五級地區調查	
	列為第四級		列為第五級		累積面積	主要重金屬種類
	面積 (公頃)	占耕地 (%)	面積 (公頃)	占耕地 (%)	(公頃)	
台北縣、市	790	2.0	40	0.1	92	鉻、銅、鉛、鋅
基隆市	-	-	-	-	6	鉻、鉛、鋅
宜蘭縣	5,830	20.7	-	-	-	—
桃園縣	1,740	3.9	150	0.3	103	鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅
新竹縣、市	1,410	4.3	130	0.4	46	鉻、銅、汞、鎳、鋅
苗栗縣	877	2.3	22	0.1	7	鋅
台中縣市	775	1.2	5	0.0	44	鉻、銅、鎳、鉛、鋅
彰化縣	5,190	7.3	160	0.2	534	鉻、銅、鎳、鋅
雲林縣	14,880	17.0	10	0.0	1	鎘、鉛
南投縣	1,865	3.0	-	-	6	鉛、鋅
嘉義縣、市	1,320	1.7	-	-	9	鉻、鋅
台南縣、市	7,560	7.1	185	0.2	51	鉻、銅、鎳、鉛、鋅
高雄縣、市	5,130	8.7	85	0.1	42	銅、鉛、鋅
屏東縣	980	1.3	-	-	16	鉻、銅、鉛、鋅
台東縣	-	-	-	-	1	銅
花蓮縣	1,640	3.7	-	-	1	鋅
澎湖縣	...	...	...	...	-	—
合計	49,987	5.6	787	0.1	959	

資料來源：行政院環保署（廢棄物管理處）。

餘公頃的土壤，以 1,600 公頃(4km×4km)為一單位網格，進行大樣區的概況調查之「台灣地區土壤重金屬含量調查總報告」(環保署，1987)，本研究選取台灣地區土壤重金屬汞(Hg)及砷(As)的 878 筆採樣資料，進行更詳細之研究及探討；以及中樣區調查報告中之彰化縣表土重金屬鎘(Cd)之 339 筆資料。採樣網格分布如圖 2、圖 3 所示。本研究針對上述資料分別進行基本資料處理以及克利金推估。其使用之地理統計分析軟體為 GSLIB (Deutsch and Journel, 1997)；等值圖繪製軟體為 Surfer (Doug Keckler, 1994)，其將 GSLIB 之克利金推估結果為其空間內插點之依據並繪製等值圖；地理資訊系統應用軟體為 PC Arc / Info 3.42 版(ESRI, 1993)以及 Arcview 3.1 版(ESRI, 1999)。

地理統計的克利金推估方法，是利用現有樣

本資料的空間相關性提昇未採樣地區推估值之精確度。所以地理統計分析包括了兩個主要之步驟：空間結構分析和空間內插推估。地理統計提供一個在統計的架構下，探討資料在空間上相關性的模式，包括空間和時間的共變異作用。這些模式一般而言是具有空間或時間的結構性，並且被定義為任何兩點間於空間之關係及相互影響距離，而大量的環境資料收集將有助於獲得較高之相關性及判別是否具有方向性。

地理統計之克利金推估方法是利用已採樣位置點之觀測值，依其空間相依性質之結構，則在所定義之區域內任一未採樣位置之推估值，可用週圍已採樣位置之觀測值的最佳化加權平均值估算。假如某事項的訊息一直不斷的出現於同個空間上，則距離那些點較近之點的推估值會獲得較高的權重，而此權重的選擇是以便推估值

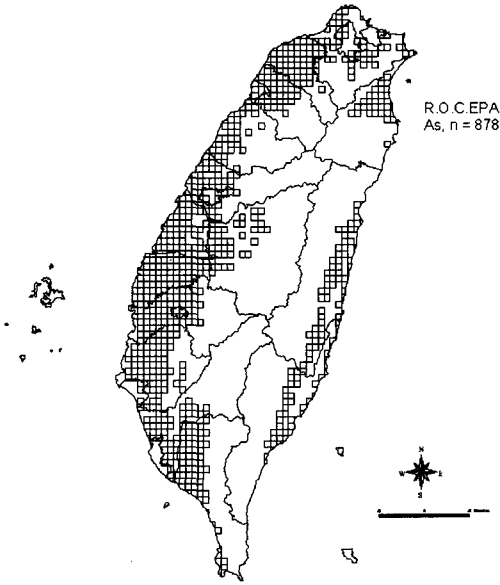


圖 2 台灣地區土壤重金屬含量調查大樣區採樣網  
格分布圖

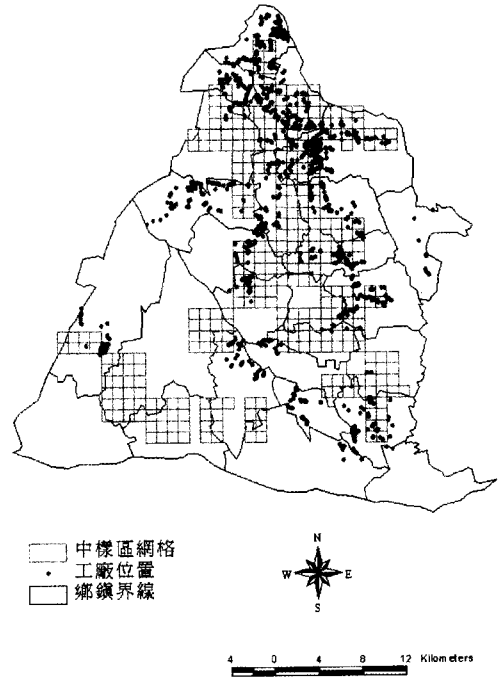


圖 3 彰化地區土壤重金屬含量調查中樣區採樣網  
格與工廠分布圖

之變異減到最小為原則，其目的是求得最佳推估之權重。因此地理統計是估算未採樣位置之空間最佳線性無偏估值 (Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)。

在進行地理統計時，通常會先算出樣品的空間相關與變異圖形，並找出最適當的迴歸曲線，利用克利金函數的關係，對土壤中各性質作內差網格與等濃度圖(Contour)。假設空間上有  $x_1$  與  $x_2$  兩點，其對應之值分別為  $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$ ， $\gamma(h)$  為變異數 (Variance)，則  $\gamma(h)$  可用下式表示：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \dots \dots \dots (1)$$

式中 ( $h$ ) 為在間距範圍(Lag)內，配對點間之距離； $\text{Var}$  為變異數； $Z(x)$  是位在  $x$  的區域化變數值； $Z(x+h)$  是位在  $x+h$  的區域化變數值。

利用 GSLIB 地理統計軟體計算配對，並考慮最佳套配結果，得到一般克利金之變異圖模式及其參數。在進行克利金網格點運算時，極端值會因為運算過程而降低，而網格點(Cell)上的推

估值分佈也會趨於常態分佈，相鄰點之資料被使用於每個網格之克利金運算，最後再將克利金推估值和標準偏差推估值，轉換成 Microsoft Excel 之格式，儲存並以地理資訊系統(GIS) 之軟體 Arc/Info (ESRI, 1993)轉成向量之格式，再以 Arcview3.1 (ESRI, 1999)軟體分析和展示。

#### 四、結果與討論

本文使用一般克利金法針對上述臺灣地區土壤重金屬調查數據進行空間結構分析，所選擇的最佳套配模式為指數模式 (Exponential Model)，在不同的間隔距離下所得變異圖結果來進行空間結構分析。指數模式通常比球形 (Spherical)或高斯(Gaussian) 模式，有較佳的套配密合性(White, 1997, Lin et al. 2000)，指數模式說明如下：

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/ A_0)] \dots \dots \dots (2)$$

式中  $\gamma(h)$  為距離在  $h$  時的變異數， $C_0$  為碎塊變異值 ( $C_0 \geq 0$ )， $C$  為結構變異值 ( $C \geq C_0$ )， $A_0$  為距離參數 (Range Parameter)；指數模式 (Exponential Model) 中的距離參數不是影響範圍 (Range)，而是距離的一個指標參數，它的影響範圍為在  $\gamma(h)$  到達閥值 (Sill,  $C_0 + C$ ) 的 95% 時的距離，約為距離參數的三倍 (即  $3A_0$ )。

由最佳套配參數進行各節點之土壤汞、砷、鎘之含量推估，並以推估結果所繪得之等濃度圖如圖 4、圖 5、圖 6 所示。克利金標準偏差 (Standard Deviations) 推估值所相對應的座標和等濃度圖使用相同的推估範圍及相同的參數，並以砷為例繪製出相對應的區域上標準偏差等值線圖，如圖 7 所示。

本文使用由克利金推估所得台灣地區土壤汞含量之等濃度圖 (Chang et al. 2000,)，可以看出土壤汞之地理統計分佈情形，顯示台灣地區有三個地方之濃度值分佈較高，在頭份、中彰交界和高屏交界地區。污染來源可能分別是鹼氫工廠使用電極、金屬精煉和工業區所產生。由台灣地區土壤中砷含量的克利金推估圖顯示 (Chang et al. 1999)，西南部沿海的濃度平均值偏高，尤其以雲林、嘉義地區的含量最高，土壤母質礦物是影響砷在土壤中含量的主要因子。克利金推估的標準偏差最高的地區發生在資料稀疏的地方，是由於變圖模式和樣本場址分佈在做克利金推估時所造成的一種的結果，這些克利金標準偏差不是從資料變異量測得，而是以推估方式求得未知點的濃度值及標準偏差，這些未知點的資料若經由採樣獲得之後，將可以降低推估之變異。本文針對彰化縣土壤重金屬中樣區調查資料，利用地理統計方法，探討工廠分佈與土壤重金屬污染程度間之關係及推估其污染之等濃度圖 (徐貴新等, 1999)，所獲得之結果發現彰化地區所有種類工廠分佈與中樣區濃度分佈略呈一致；工廠數 (污染源) 越多，土壤污染程度等級也越高。本文是僅以鎘金屬為研究對象，排放鎘之工業有化工、煉鋅、鋅礦、電鍍與礦石業，因此先對工廠進行分類篩選，再進行分析，如此才可得到較好之比對結果。

## 五、結 論

地理統計之克利金推估方法是一種已經被廣泛應用於採礦、土壤分析、生態等領域且證實有效。本研究顯示，一般克利金 (Ordinary Kriging) 法，在謹慎的統計分析和適當的變異圖選擇之下，可產生合理之結果，對土壤重金屬污染分析亦能適用。

由台灣地區土壤汞的克利金推估圖顯示，台灣地區有三個地方之濃度值較高，為苗栗頭份、中彰交界和高屏地區，結果與台灣地區汞之污染主要來源鹼氫工廠之分布以及含汞污泥棄置場所甚為吻合；而土壤含砷較高之推估地區則與台灣烏腳病之盛行地區一致，均顯示雖然只是大樣區之數據，且早於民國 75 年即已公布，至今經地理統計方法之分析與地理資訊系統工具之表達，仍極具參考價值；而較細密之中樣區調查資料更可將彰化地區鎘污染分布與工廠排放源做更直接之關聯，落實於執行面。故地理統計方法與地理資訊系統工具之結合可在有限之人力與經費之下有效地協助土壤污染防治工作之推行。

## 參考文獻

1. 行政院環境保護署，1987，「台灣地區土壤重金屬含量調查總報告」共四冊。
2. 行政院環境保護署，1991，「民國 76-79 年台灣地區土壤中重金屬含量調查資料參考手冊-彰化縣」。
3. 台灣省政府環境保護處，1998，「民國 81-86 年台灣地區土壤重金屬含量調查資料參考手冊-21 縣市」。
4. 張尊國等，1996，台灣省土壤污染資訊管理系統之建立，農工學報第 42 卷第 2 期。
5. 徐貴新等，1999，利用多變量指標克利金法界定土壤重金屬污染範圍，農工學報第 45 卷第 2 期。
6. Chang Tsun-Kuo, Guey-Shin Shyu, Yu-Pin Lin and Nan-Chang Chang, 1999, Geostatistical Analysis of Soil Arsenic Content in Taiwan. J.

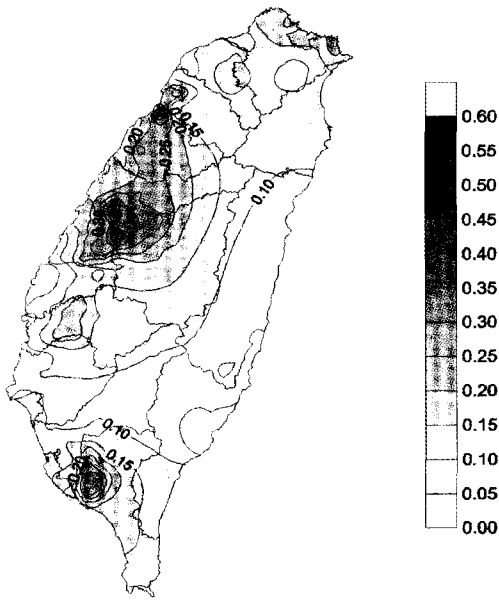


圖 4 台灣地區土壤重金屬汞含量推估分布圖

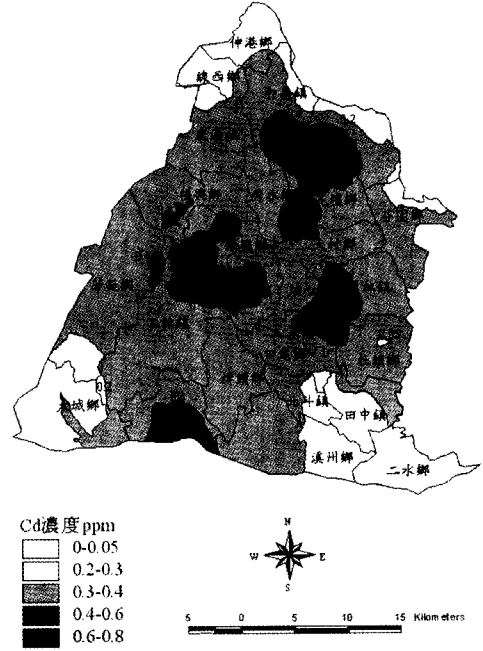


圖 6 彰化地區土壤重金屬鎘含量推估分布圖

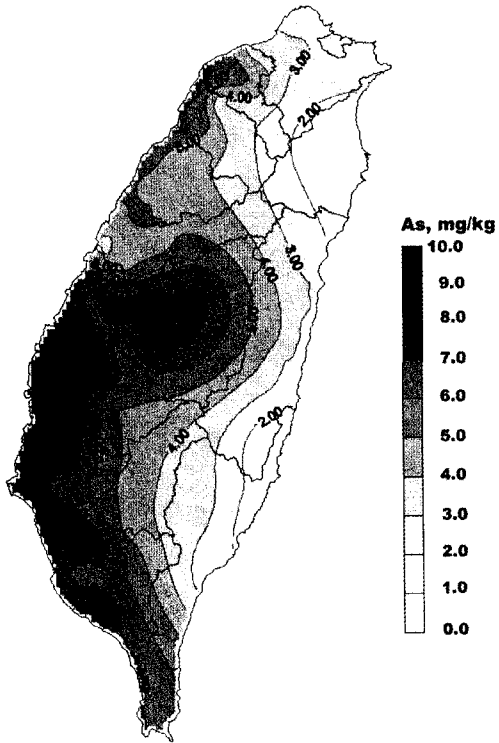


圖 5 台灣地區土壤重金屬砷含量推估分布圖

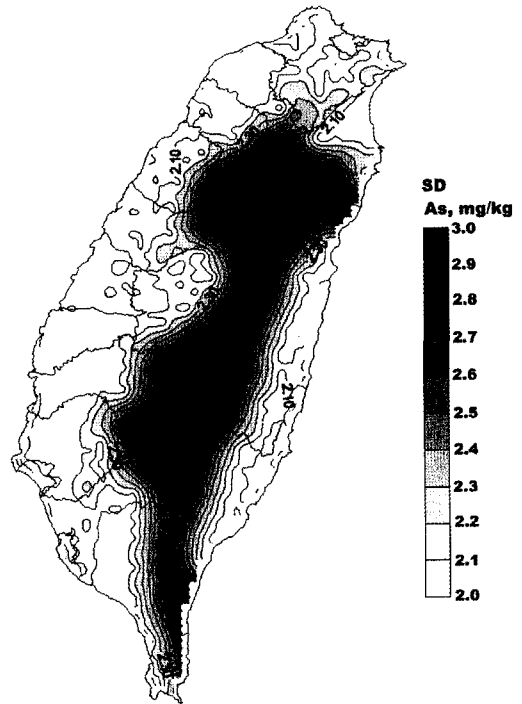


圖 7 台灣地區土壤重金屬砷含量克利金推估標準偏差分布圖



- of Environmental Sci. and Health Part A, Vol. 34 (7).
7. Chang Tsun-Kuo, Guey-Shin Shyu, Yu-Pin Lin and Nan-Chang Chang Mapping the Soil Mercury of Taiwan Using Geostatistics and Geographic Information Systems. J. of the Chinese Institute of Environmental Engineering. Vol. (10) 2000.
  8. Deutsch, C. V. and A. G. Journel, GSLIB: "Geostatistical software library and user's guide" 2<sup>nd</sup> ed. Oxford University Press, New York, 1997.
  9. Doug Keckler, "The Surfer for windows manual", Colorado: Golden Software, Inc., 1994.
  10. ESRI, "PC ARC/INFO", 1993 Environmental Systems Research Institute version 3.4D, Redlands, CA.
  11. ESRI, "Arcview 3.1", 1999, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA,.
  12. Lin Yu-Pin and Tsun-Kuo Chang, 2000, Geostatistical Simulation and Estimation for the Spatial Variability of Soil Zinc. J. of Environmental Sci. and Health Part A. Vol. 35 (2).
  13. White, J. G., R. M. Welch and W. A. Norvell, 1997, " Soil Zinc Map of the USA Using Geostatistics and Geographic Information Systems", Soil Sci. Am. J. 61, pp.185-194.

收稿日期：民國 90 年 5 月 30 日

接受日期：民國 90 年 7 月 31 日