

利用多變量指標克利金法界定 土壤重金屬污染範圍

Using Multiple-Variable Indicator Kriging Method for Delineation of Heavy-Metals Contaminate Soils

東南工專環工科講師

徐 貴 新

Guey-Shin Shyu

台灣大學農工系教授

張 尊 國

Tsun-Kuo Chang

文化大學景觀系副教授

林 裕 彬

Yu-Pin Lin

台灣大學農工所碩士

徐 明 麟

Ming-Lin Shyu

摘 要

利用土壤重金屬含量調查之彰化縣中樣區 339 筆資料，以因子分析法取出四個主要共同因子，再由一般與多變量指標克利金法篩選出四個共同因子之代表變量，其分別為 Cu、As、Pb 及 Cd。再比較由八種重金屬與四個代表重金屬推估之結果，發現該四個代表重金屬能表達原本八種重金屬大部份之空間變異特性。並將分析結果，利用一般克利金推估因子得分在空間之分佈，結合一般指標克利金及多變量指標克利金法，預測彰化地區土壤重金屬超過最大容許值之機率分佈等值線，以做為界定污染範圍及土壤復育之參考，而其成果以地理資訊系統加以展示。

關鍵詞：土壤污染，重金屬，因子分析，克利金，地理資訊系統。

ABSTRACT

Factor analysis method was employed to analyze the soil heavy metals content data of Chang-Hwa county. Four common factors were extracted followed by Ordinary Kriging (OK) to estimate the spatial distribution of factor scores. Ordinary Indicator Kriging (IK) and Multiple-Variable Indicator Kriging (MVIK) were used to predict the

probability distribution of heavy metal contamination excess a maximum allowable level.
All results were shown with GIS.

Keywords: Soil pollution, Heavy metal, Factor analysis, Kriging, GIS.

一、前言

臺灣地區地狹人稠，工商發達，土地利用分區管制未臻妥當，農業地區內設有工廠已是普遍的現象，工業廢水及廢棄物未經妥善處理直接或間接排入灌溉渠道中，使灌溉水質遭受污染而造成農田土壤污染時有所聞。土壤重金屬污染事件在過去十多年間陸續發生，對社會造成極大之震撼。土壤重金屬污染分佈具有空間變異特性，因此八種重金屬污染範圍可藉空間分析方法加以推估。

地理統計之應用非常廣泛，包括水文、地下水、礦脈、環境地質、大氣污染、環境監測等領域。Yost R.S.(1982)以美國夏威夷表土及裏土共 80 個樣本，針對其土壤化學性質作地理統計分析，其半變異圖中發現在底土的 Ca、Mg、K 交換量有較大的變量，建議由土壤化學性質所得之半變異圖，可做為土壤管理及土壤分類之參考。Warrick et al.(1986)利用地理統計於土壤物理性質在空間分佈之變異研究。Jeffrey 等人(1993)利用多變量指標克利金來評價土壤品質，其整合多個土壤變量成爲一單一指標，並製做土壤品質圖。White 等人(1997)利用地理統計與地理資訊系統，繪製美國地區土壤鋅含量之等濃度圖。Davies (1997) 以英國威爾斯地區 70 個測站樣本資料，取對數後進行因子分析，以特徵值大於 1，選取 3 個主要因子，並以 Surfer 繪製因子中個別主要變量之等濃度圖，發現舊工業區提煉廠遺址及其廢棄物之堆積，可能是造成該地區土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 污染的主因。

本文以彰化縣中樣區八種重金屬含量調查結果爲資料，利用因子分析方法，首先分析出數個共同因子，並由因子負荷與因子得分之空間分

佈，去瞭解彰化地區土壤重金屬主要污染類型及可能來源與環境成因。因子分析所得之數個共同因子，作爲指標克利金變量選擇之依據。將各個共同因子內之數個主要影響變量，以一般指標克利金法推測變量超過最大容許值(maximum allowable level, MAL)之機率等值線分佈圖，本研究以環保署所訂四級下限爲其依據，並將各個共同因子內之主要影響變量整合成單一變量，以多變量指標克利金法，來預測該共同因子在彰化地區超過限值之機率等值線分佈圖並比較其差異。其成果展示結合地理資訊系統。

二、研究材料與方法

環保單位自民國 72 年起針對台灣地區之農田，以 1600 公頃爲一單位，檢驗其中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等八種重金屬含量，調查面積達 116 萬餘公頃，並依表 1 之標準來區分等級。其結果顯示四級者高達 30 萬餘公頃，約佔 25%；達到五級者亦有 790 公頃，反映問題之嚴重性，因此後續有中樣區及細密樣區之調查以確定污染之範圍及程度。本文以彰化縣中樣區(100 公頃爲單位，1km × 1km)表土(0~15cm)八種重金屬之調查資料爲對象，其採樣調查分佈如圖 1 所示，利用 ARC/INFO 將空間及屬性資料結合，以作後續地理統計分析之用。

本文針對上述資料分別進行基本統計分析、因子分析以及克利金推估。其使用之統計軟體爲 STATISTICA (StatSoft, 1994)；地理統計分析軟體爲 GSLIB (Deutsch and Journel, 1997)；等值圖繪製軟體爲 Surfer (Doug Keckler, 1994)，其將 GSLIB 之克利金推估結果爲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爲 PC Arc / Info 3.42 版(ESRI, 1993)以及 Arcview 3.0 版(ESRI, 1997)。

表 1 台灣地區土壤重金屬含量標準與等級區分表
(單位：mg/kg)

元素	第一級	第二級	第三級	第四級	第五級
砷 As		表土<4 裡土<4	4-9 4-15	10-60 16-60	>60 >60
鎘 Cd		<0.05	0.05-0.39	0.4-10	>10
鉻 Cr		<0.1	0.1-10	11-16	>16
銅 Cu	<1	1-11	12-20	21-100	>100
汞 Hg		<0.1	0.1-0.39	0.4-20	>20
鎳 Ni		<2	2-10	11-100	>100
鉛 Pb		<1	1-15	16-120	>120
鋅 Zn	<1.5	1.6-10	11-25	26-80	>80

* Arsenic and Mercury are in total concentration, the other six elements are in 0.1N HCl extractable concentration.

(一) 統計及因子分析

將彰化中樣區表土八種重金屬之 339 筆監測值，分析資料之平均值、最小值、最大值、全距、標準偏差以及偏歪值。並利用 KSc 值 (Critical value of kolmogorov - Smirnov test) 檢定土壤重金屬資料是否符合常態分布的假設。

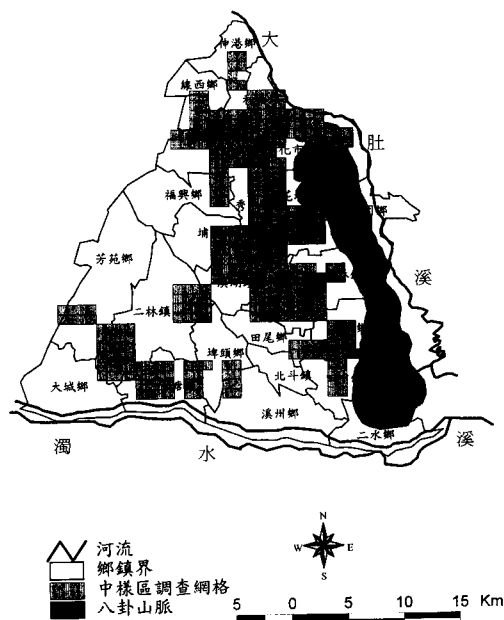


圖 1 彰化縣中樣區採樣網格分佈圖

在土壤重金屬含量調查中重金屬項目共有八項，然而這些變數之間具有相關性，而使得其所表現出來的訊息會相互重疊。本文利用因子分析加以歸類之目的是消除變量間之重疊訊息，重新組合新的獨立變數，如此將可挑選出主要的污染影響因子，並將各共同因子中之主要影響變量，作為指標克利金變量選擇之依據。

(二) 多變量指標克利金

1. 原始資料處理

原始資料為彰化縣中樣區表土八種重金屬 339 筆之監測值，其屬性為面資料，而每網格之檢測值為該網格內 10 筆代表性土壤取樣之平均值，該平均值可視為該網格內任何一點之期望值。因此為了利於進行點克利金之推估，利用 ARC/INFO 將各網格之中心點座標求出，並將此點之土壤濃度值定為網格之觀測值。

2. 界定值選定與指標值轉換

本文是利用一般指標克利金法與多變量指標克利金法進行推估，因此需先將原觀測值進行二元指標轉換之後，再進行指標半變異圖之分析。對於土壤是否遭受污染率，應以土壤中每種重金屬之最大容許值(MAL)為其判定之標準，而此最大容許值亦為指標克利金中之界定值(Cut-off Value)選取之依據。因目前 MAL 並沒有法定規範值，因此本文選擇台灣地區土壤重金屬含量，第四級濃度之下限值為各重金屬之界定值。

3. 一般與多變量指標半變異圖之分析

利用因子分析之結果為一般與多變量指標克利金預測變量之依據。再用 GS⁺ 地理統計軟體 (Gamma Design Software, 1995)，將經二元指標轉換之資料計算配對，先求得實驗指標半變異圖，再利用非線性最小迴歸分析，求得最佳吻合指標半變異圖模式及其參數。

4. 一般指標克利金與多變量指標克利金推估

本文利用 GSLIB 一般指標克利金中之子程式，並由 GS⁺ 所得之模式參數來修改 GSLIB 之參數檔(*.par)，以進行一般指標克利金及多變量指標克利金推估。程式運算後所產生之*.out 之檔案，即為推估之結果。其檔案屬性為文字檔，因

此需利用其他軟體來繪製土壤重金屬污染機率圖。

5. 繪製土壤重金屬污染機率圖

利用 Surfer 將 GSLIB 之一般指標克利金及多變量指標克利金推估結果來繪製等值線圖。所以在 Surfer 的 Grid 之設定需與 GSLIB 的*.par 有關 Grid 之設定需相同；也就是說 Surfer 之 Grid 點上之數值非由經 Surfer 運算內插的值，而是 GSLIB 之指標克利金推估之結果。接著將圖形檔轉為*.dxf 之格式，以利 PC ARC/INFO 轉為其專屬的圖層格式。並利用 PC ARC/INFO 將圖層屬性建立，其包含等濃度線(*.aat)與其污染區域面(*.pat)的屬性建立。最後利用 ARCVIEW 展示成果。

三、結果與討論

(一) 基本資料分析

表 2 列舉了資料之基本統計量與 KS 及 KSc 值。依台灣地區土壤重金屬含量標準與等級區分標準，八種重金屬之平均值皆在第三級。依全距(range)、標準偏差(standard deviation)和偏歪值(skewness)觀之，顯示資料具有偏歪、變異大以及具有極端值之特性。以 kolmogorov - Smirnov 試驗，檢驗樣本是否屬於常態分布，在可估度 $\alpha = 0.1$ 的條件下，給與一臨界值 $KSc = 0.805 / (n)^{0.5}$ ，n 為樣本包含觀測值個數。若是樣本之 KS 值小於此臨界值 KSc，則此樣本屬於常態分佈；反之則不屬於常態分佈 (Rao et al ; Yates & Warrick, 1987)。由分析結果發現八種重金屬之

KS 值都大於 KSc，所以其分佈皆不屬於常態分佈。

(二) 因子分析

1. 共同因子之特徵值和貢獻率

先將原始資料進行標準化處理，再進行因子分析，表 3 顯示現 Cr、Cu、Ni 及 Zn 四個金屬之間的相關性較大，其相關係數在 0.62 至 0.82 之間。表 4 顯示共同因子之特徵值和貢獻率。而共同因子數之決定，則是利用累積百分率法，逐次萃取因子一直到所萃取的諸因子能解釋的變異數達到某一水準以上(楊浩二，1995)，由表 4 發現，抽取四個因子其累積貢獻率已達 82.02%，特徵值累積至 6.57。

2. 抽取共同因子及估計因子負荷

利用主成分分析 (principal components method) 抽取共同因子，並估計因子負荷，結果如表 5。將因子負荷之絕對值超過 0.6 者予以標記，並視其為各個因子中之主要影響變量。因子 1、因子 2、因子 3 及因子 4 之主要影響變量分別為 “Cr、Cu、Ni、Zn”、“As、Hg”、“Pb” 及 “Cd”。雖然此時已找出了彼此相互正交獨立之共同因子 (common factor)，主要影響變量之因子負荷有正有負，使得各個共同因子所代表的環境成因意義不明。因此，利用變異數最大正交旋轉法來對因子負荷矩陣進行轉軸，以調整其因子負荷矩陣，使其結構簡單，以便於解釋因子模型的环境成因意義。

3. 因子旋轉

表 2 彰化地區中樣區表土重金屬(339 筆)之基本統計資料

Elements	Mean (mg/kg)	Min. (mg/kg)	Max. (mg/kg)	Range (mg/kg)	S.D. (mg/kg)	Skewness Arithmetic	KS	KSc
As	8.54	ND	33.14	33.14	4.47	2.24	0.2029	
Cd	0.33	ND	1.70	1.70	0.26	1.92	0.1635	
Cr	1.24	ND	30.96	30.96	3.13	5.82	0.3480	
Cu	18.88	ND	171.23	171.23	21.16	3.95	0.2916	0.0437
Hg	0.22	ND	1.16	1.16	0.13	2.16	0.1184	
Ni	7.52	ND	88.61	88.61	10.64	4.41	0.3155	
Pb	10.36	ND	33.20	33.20	3.79	0.92	0.0616	
Zn	18.88	ND	282.50	282.50	22.98	5.89	0.2353	

表 3 八種重金屬之相關矩陣 (R 值)

Variable	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1.00	-0.07	-0.04	-0.02	0.27	-0.01	-0.02	0.01
Cd	-0.07	1.00	0.39	0.37	-0.01	0.49	0.24	0.38
Cr	-0.04	0.39	1.00	0.73	0.16	0.82	0.33	0.67
Cu	-0.02	0.37	0.73	1.00	0.17	0.70	0.44	0.75
Hg	0.27	-0.01	0.16	0.17	1.00	0.14	0.22	0.13
Ni	-0.01	0.49	0.82	0.70	0.14	1.00	0.34	0.62
Pb	-0.02	0.24	0.33	0.44	0.22	0.34	1.00	0.32
Zn	0.01	0.38	0.67	0.75	0.13	0.62	0.32	1.00

表 4 共同因子之特徵值及貢獻率

Common factor	Eigen value	Cumulative Eigen value	Variance %	Cumulative Variance %
1	3.69	3.69	46.07	46.07
2	1.30	4.99	16.20	62.27
3	0.85	5.84	10.58	72.85
4	0.73	6.57	9.17	82.02
5	0.63	7.20	7.89	89.91
6	0.42	7.62	5.27	95.18
7	0.22	7.84	2.81	97.99
8	0.16	8.00	2.01	100.0

表 5 主成份分析法求得之共同因子及其負荷(未轉軸)

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
As	-0.014	*-0.770	-0.489	-0.201
Cd	0.575	0.254	-0.173	*-0.708
Cr	*0.881	0.052	-0.118	0.207
Cu	*0.882	-0.005	0.015	0.192
Hg	0.223	*-0.776	0.254	0.475
Ni	*0.879	0.067	-0.157	0.326
Pb	0.535	-0.171	*0.678	-0.270
Zn	*0.827	0.018	-0.122	0.190

以變異數最大正交旋轉(orthogonal rotation-varimax method) 後之因子負荷矩陣如表 6 所示。由表可以發現其因子負荷朝 0 與 1 之值分佈。比較轉軸前後因子中主要影響變量之種類與負荷的改變，轉軸前後的第一因子、第三因子及第四因子中主要影響的變量種類沒有變動，仍為“Cu、Ni、Cr、Zn”、“Pb”以及“Cd”，但

轉軸後之主要影響變量之負荷皆為正值。而第二因子中主要影響的變量種類及負荷則有變動。然而轉軸後之各共同因子中主要影響變量，其因子負荷皆為正值，並且因子負荷矩陣結構簡單，較易於反應出明顯之環境成因。另外將轉軸前後四個共同因子能夠解釋原資料信息的變異量(%)，如表 7 所示。

表 6 轉軸後(變異數最大正交旋轉)之因子負荷

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
As	-0.032	*0.928	-0.078	0.054
Cd	0.306	-0.009	0.101	*0.907
Cr	*0.900	-0.006	0.107	0.120
Cu	*0.865	-0.139	0.243	0.086
Hg	0.132	0.563	0.567	-0.257
Ni	*0.842	0.277	0.108	0.285
Pb	0.235	-0.095	*0.864	0.197
Zn	*0.844	0.027	0.102	0.109

表 7 轉軸前後共同因子之種類及變異量比較

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
non-rotation	3.685(Cu,Cr,Ni,Zn)	1.296(Hg,As)	0.846(Pb)	0.734(Cd)
after rotation	3.149(Cr,Cu,Zn,Ni)	1.190(As)	1.177(Pb)	1.045(Cd)

4. 一般及多變量指標克利金法推估

以因子分析簡化變量數目後，可作為一般與多變量指標克利金法選擇推估變量之依據。由前面因子分析結果得知，轉軸後之因子負荷矩陣符合簡單結構，並具有較明顯之環境形成意義。因此選擇轉軸後之各個共同因子中之主要影響變量為指標克利金法選擇變量之依據。因子 1 之主要影響變量分別為 4 個，因此需進行一般與多變量指標克利金之驗證；而因子 2、因子 3 與因子 4 之主要影響變量僅為 1 個，所以不需進行一般與多變量指標克利金之驗證步驟。

多變量指標克利金

1. 原始資料處理及說明

一般指標克利金法與多變量指標克利金法推估，需將原監測值進行二元指標轉換，再進行半變異圖之分析。界定值(Cut-off Value)之選取，依第四級濃度之下限值為各重金屬為界定值。表 8 顯示了一些採樣點位置、監測值和指標轉換值之範例，1 代表低於界定值，0 代表高於界定值。

2. 指標半變異圖結構分析

(1) 一般指標克利金之指標半變異圖

A. 指標實驗半變異圖與最佳吻合模式之參數

指標半變異圖能反映出表土重金屬之空間相依特性，而圖 2 為因子 1 中四種重金屬個別之實驗指標半變異圖。因實驗指標半變異圖選擇之最小間距等於中樣區 100 公頃網格兩中心點之距離，即 1000 公尺。利用 GS⁺ 地理統計軟體，將已經二元指標轉換之八種重金屬資料計算配對，以非線性最小迴歸分析進行套配，並選擇適當模式，八種重金屬之指標半變異圖模式參數如表 9 所示。

B. 實驗指標半變異圖之空間相依

由八種重金屬之實驗指標半變異圖形可知，除了重金屬 Cr 以外，其餘皆具有空間相依特性。另外，雖指標克利金具有分佈自由之特性，但其經二元指標轉換後，常使得模式中 C₀，即碎塊效應佔 Sill(C+C₀)的百分率過大，進而增加指標克利金預測之不確定性。

一般來說，土壤性質之空間相依特性(Trangmar et al.1985)。具有強度空間相依的土壤性質多決定於本質變異(Intrinsic variation)，如母質、質地及礦化程度等；而具有弱度空間相依特性之土壤性質，為被外在變異(Extrinsic variation)

表 8 因子 1 中影響變量之採樣資料點之座標值、偵測值及指標轉換值範例

Location		Parameter values (mg/kg)				Indicator value				
X	Y	Cu	Cr	Ni	Zn	Cu	Cr	Ni	Zn	Combined
197998	2670500	7.3	0.9	4.5	12	1	1	1	1	1
192998	2668500	51.5	0.8	7.4	53	0	1	1	0	0
192998	2667500	59	0.4	3.1	31	0	1	1	0	0
193998	2667500	19	1.5	22.5	29	1	1	0	0	0

表 9 因子轉軸後各主要因子利用指標克利金之最佳吻合半變異元模式

Factor	Elements	Type of Model	Nugget (C ₀)	Sill	Model a (A ₀)	Critical threshold value (mg/kg)	Number of Indicator value=0
1	Cr	Spherical	0.010	0.203	3140	11	6
	Cu	Spherical	0.080	0.153	4900	21	59
	Zn	Spherical	0.063	0.160	5470	26	59
	Ni	Spherical	0.036	0.112	4250	11	35
2	As	Gaussim	0.146	0.163	7350	10	71
3	Pb	Spherical	0.040	0.068	3200	16	22
4	Cd	Spherical	0.116	0.193	4360	0.4	78

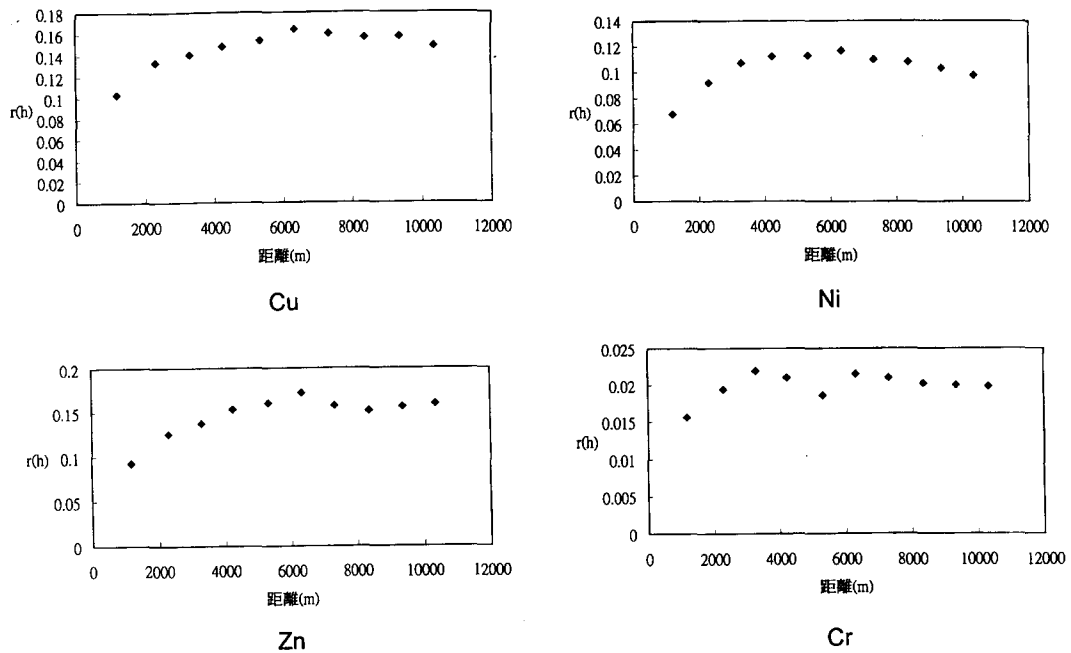


圖 2 中樣區表土因子 1 變量之指標半變異圖

表 10 因子 1(轉軸後)之最佳吻合多變量指標半變異元模式參數

Factor	Variable	Type of Model	Direction	Nugget (C ₀)	Sill	Model a (A ₀)	Number of Indicator value=0
1	Cu,Zn,Ni,Cr	Spherical	Isotropic	0.119	0.20	6910	88

所操控，如灌溉、施肥等。通常土壤性質的變異兼受到本質與外在變異之相互影響，故多呈現中度空間相依性(Cambardella et al, 1979)。

(2)多變量指標克利金之指標半變異圖

選擇轉軸後之因子 1 之主要影響變量，分別作為多變量指標克利金之多變量選擇。其實驗指標半變異圖分別如圖 3 所示；其最佳吻合半變異元模式及其參數如表 10 所示。

3. 繪製土壤重金屬超過限值之機率等值線

本文選擇第四級之下限值為各重金屬之最大容許值，亦即指標克利金法之界定值。利用表 8 及表 10 來修改 GSLIB 之參數檔(*.par)，以進行一般指標克利金及多變量指標克利金推估。再利用 Surfer 將 GSLIB 之克利金推估結果(*.out)，繪製等值圖(Contour)；並將圖形檔轉為*.dxf 之格式，以利 PC ARC/INFO 轉為其專屬的圖層格式。接著利用 PC ARC/INFO 將圖層屬性建立，最後以 ARCVIEW 展示結果。主要共同因子中影響變量 Cu、Zn、Ni、Cr 四金屬之土壤超過限值機率圖，如圖 4 至圖 7 所示。圖 8 則為因子 1 之 Cu,Zn,Ni,Cr 四金屬整合成單一指標之多變量指標克利金推估之結果。

4. 比較一般與多變量指標克利金推估結果

(1)比較因子 1 中影響變量之一般與多變量指標克利金推估之異同

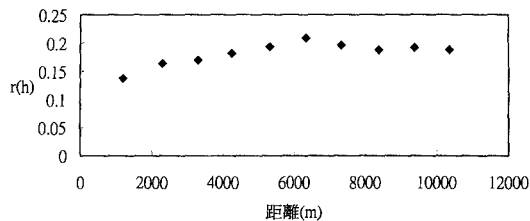


圖 3 因子 1 多變量(Cu,Zn,Ni,Cr)之指標半變異圖

由因子 1 中影響變量之推估結果發現，圖 4(Cu)、圖 5(Zn)、圖 6(Ni)與圖 8(組合)之超限機率(≥0.5)分佈的範圍甚為一致。若要挑選出 Cu、Zn 兩變量何者為因子 1 之代表變量，可由圖形判斷，因 Cu 之超限機率範圍比 Zn 還大，且較類似組合之預測結果，所以挑選 Cu 為因子 1 之代表變量。

(2)篩選代表變量之考量

對於共同因子中僅含單一主要影響變量者，則直接視其為該共同因子之代表變量；然而具有數個主要影響變量之共同因子者，可經由一般(單變量)與多變量指標克利金推估之結果，來決定何種金屬為該共同因子之代表變量。

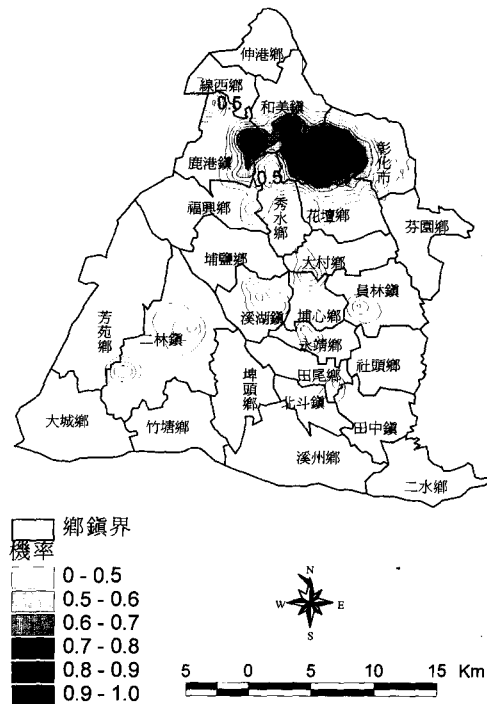


圖 4 彰化縣表土 Cu 含量超限機率分佈圖

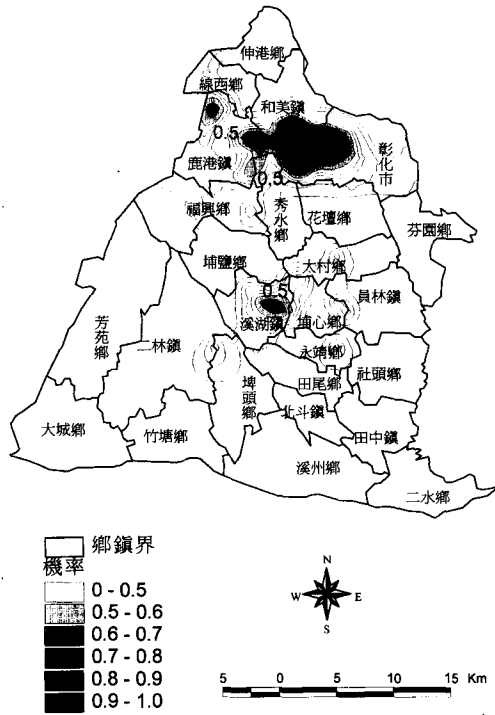


圖 5 彰化縣表土 Zn 含量超限機率分佈圖

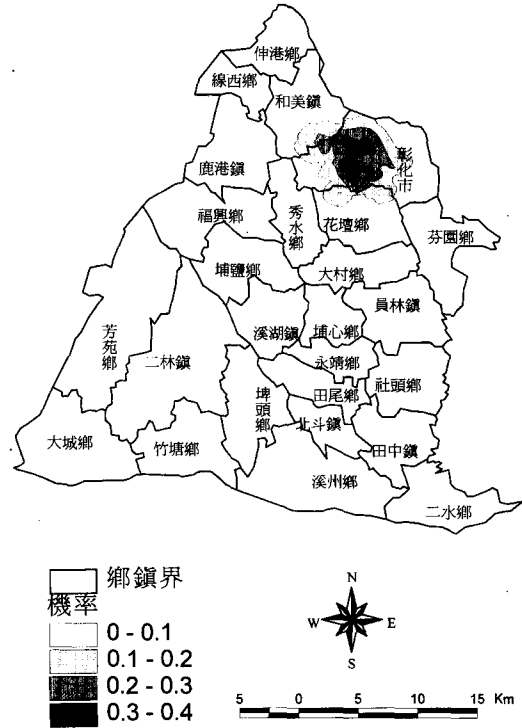


圖 7 彰化縣表土 Cr 含量超限機率分佈圖

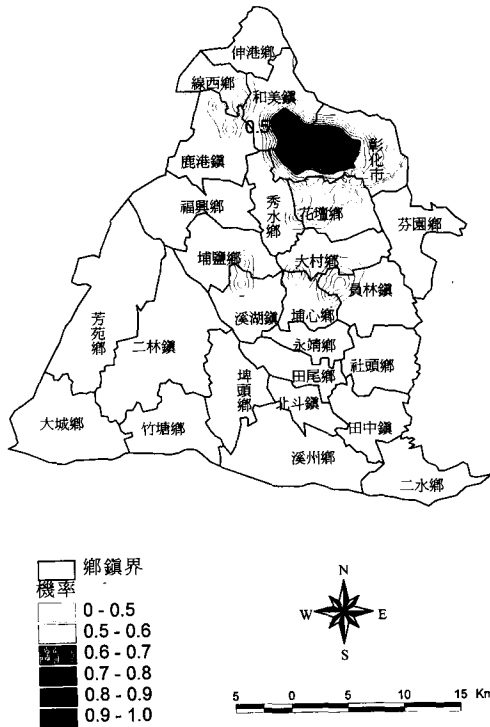


圖 6 彰化縣表土 Ni 含量超限機率分佈圖

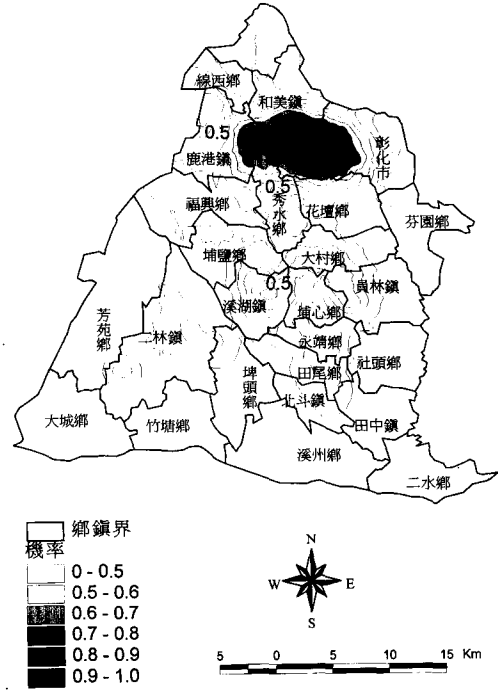


圖 8 彰化縣表土重金屬含量因子 1 (Cu,Zn,Ni,Cr) 超限機率分佈圖

5. 八種重金屬與四種代表重金屬之多變量指標克利金推估

四個代表重金屬分別是因子 1 之 Cu; 因子 2 之 As; 因子 3 之 Pb 以及因子 4 之 Cd。八種重金屬與四種代表重金屬之多變量實驗指標半變異圖分別如圖 9 及圖 10 所示; 而其最佳吻合半變異元模式及其參數如表 11 所示。接著步驟如前所述相同, 其預測結果如圖 11 及圖 12。可以看出圖 11 及圖 12 之超限機率分佈的範圍頗為一致, 也就是說由四個代表重金屬(Cu, As, Pb, Cd)所表達之土壤污染資訊可充分反應八種重金屬所表達之資訊, 若令監測工作以四項來取代現今之八項, 將可節省可觀之人力與費用。

四、結論

1. 彰化地區土壤重金屬含量中樣區調查之資料, 由因子分析結果得知, 因子 1 由 Cr、Cu、Ni、Zn 所組成, 影響最為顯著, 約佔 46%, 造成原因可能為電鍍及金屬表面處理業之廢水污染所致; 因子 2 由 As 組成, 影響變量 16%, 原因主要是受土壤母質背景影響; 因子 3 及因子 4 影響分別約佔 10% 及 9%, 分別由 Pb 及 Cd 組成。

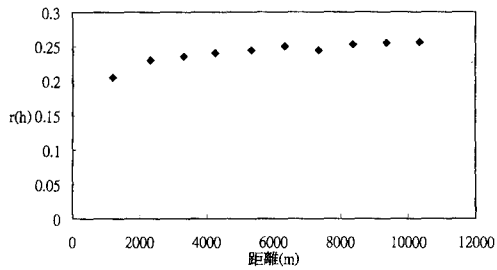


圖 9 八種重金屬之指標半變異圖

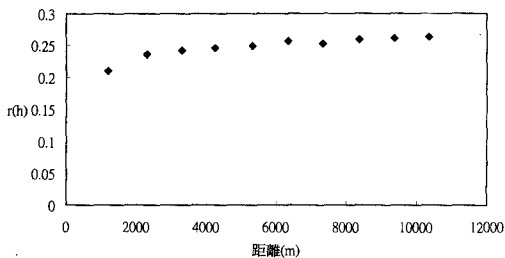


圖 10 四代表金屬(Cu,As,Pb,Cd)之指標半變異圖

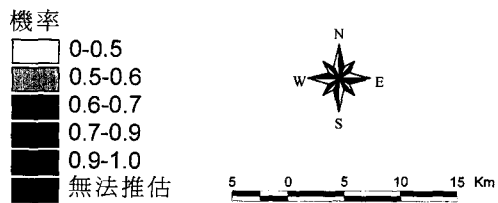


圖 11 彰化縣表土八種重金屬超限機率分佈圖

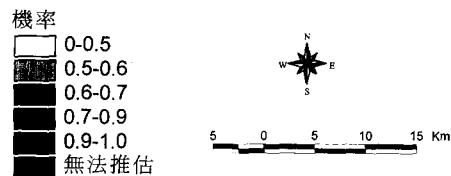


圖 12 彰化縣 4 個代表重金屬(Cu,As,Pb,Cd)之超限機率分佈圖

表 11 四代表變量與八重金屬多變量指標半變異元模式參數

Factor	Type of Model	Direction	Nugget (C ₀)	Sill	Model a (A ₀)	Number of Indicator value=0
Four	Spherical	Isotropic	0.202	0.258	6790	173
Total	Spherical	Isotropic	0.193	0.247	5600	194

2. 指標克利金利用指標函數將土壤監測值依污染最大容許值來劃分，因此經指標函數的轉換，使其指標值成為非連續且碎塊效應變大，其主要功用為評估超過某設定限值之機率。
3. 就土壤重金屬污染防治而言，指標克利金法所推估之個別重金屬超限機率分佈，可作為針對該特定重金屬，在土壤復育工作之參考依據；而經由多變量指標克利金預測土壤超限機率分佈，可能作為土壤污染管理政策及土地使用政策之參考。
4. 由一般與多變量指標克利金篩選出各個共同因子之代表變量，分別為 Cu、As、Pb 及 Cd。推估之結果發現，該四個代表變量能表達八種重金屬大部份之空間變異特性，依此規劃監測工作能掌握時效及節省經費。
5. 本文提供之方法同樣可針對細密調查之資料分析，對於土壤重金屬污染範圍之界定助益甚大。
4. Deutsch, C.V., and A.G. Journal. GSLIB: "Geostatistical software library and user's guide" 2nd ed. Oxford University Press, New York (1997).
5. Doug Keckler, "The Surfer for windows manual", Colorado: Golden Software, Inc., (1994).
6. Environmental Systems Research Institute "PC ARC/INFO" version 3.4D ESRI, Redlands, CA (1993).
7. Environmental Systems Research Institute "Arcview 3.0" ESRI, Redlands, CA (1997).
8. EPA-ROC "State of the Environment Taiwan" (1993).
9. Gamma Design "GS+: Geostatistics for the agronomic and biological sciences", Version 2.3, Gamma Design, Plainwell, MI (1994).
10. Jeffrey L. Smith et al., "Using Multiple-Variable Indicator Kriging for Evaluating Soil Quality". Soil Sci. Soc. Am. J.57:pp743-749(1993).

五、參考文獻

1. 楊浩二，多變量統計方法，華泰書局，增訂版，第 509 至 575 頁，台北市(1995)。
2. Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, K. L. Karlen, R.F. Turco and A. E. Konopka. "Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils." Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511(1979).
3. Davies, B.E. "Heavy Metal Contaminated Soils in an Old Industrial Area of Wales, Great Britain : Source Identification Through Statistical Data Interpretation" Water, Air, and soil Pollution 94:85-98 (1997).
11. StatSoft, Inc. "STATISTICA for Windows" StatSoft, Inc., Tulsa OK (1994).
12. Trangmar, B. B., R. S. Yost, and G. Uehara "Application of geostatistics to spatial studies of soil properties", Adv. Agron., 38:45-94(1985).
13. Warrick, A. W., D. E. Myers and D. R. Nielsen, "Geostatistical Methods Applied to Soil Science", in A. Klute(ed.) Methods of Soil Analysis, part1. P53~80 (1986).

14. White, J.G. , R.M. Welch and W. A. Norvell,
“ Soil Zinc Map of the USA Using
Geostatistics and Geographic Information
Systems”, Soil Sci. Am. J. 61:185-194 (1997).
15. Yost , R. S. , G. Uehara , and R. L. Fox.
“Geostatistical analysis of soil chemical
propertics of large land area. II. Kriging”. Soil

Sci. Am. J. 46:1033~1037 (1982).

收稿日期：民國 87 年 9 月 1 日

修正日期：民國 87 年 9 月 24 日

接受日期：民國 87 年 10 月 7 日