

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以地理統計與多變量分析辨別土壤污染控制場址之特性

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-030-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所

計畫主持人：張尊國

計畫參與人員：鄭百佑、蔡志偉、陳信諭

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 28 日

摘要

利用協同因子克力金法(factorial cokriging method)分析土壤重金屬濃度，區分出重金屬的空間變異結構，以獲取較佳之因子分析解釋變異量。彰化東西二圳灌溉系統，結果顯示空間結構包含碎塊效應及兩個球形模式，球形模式之影響範圍分別為 160 公尺、2400 公尺。桃園中福地區之空間結構包含兩個球形模式，其影響範圍分別為 70 公尺、560 公尺。而以個別結構下的協同區域化矩陣(coregionalization matrix)進行因子分析，可以顯示出不同尺度下土壤重金屬污染的可能肇因。而在各種尺度空間結構下前兩個因子的累積解釋變異百分比皆較不考慮空間結構之結果更高。

關鍵詞：協同因子克力金、土壤重金屬污染、重金屬、空間結構

Abstract

Using factorial cokriging methods analyze the soil heavy metal concentration, by filtering spatial variation on different scales in order to increase the cumulative percent of variance. In the north of Changhua County, the variograms and cross-variograms can be modeled in three spatial structures including nugget effect and two spherical structures with ranges of 160 and 2400m for short-range and long-range spatial scales. In Chung Fu area of Taoyuan County, the variograms and cross-variograms can be modeled in two spatial structures including two spherical structures with ranges of 70 and 560m for short-range and long-range spatial scales. Using factor analysis method on coregionalization matrices may interpret possible causes of soil heavy metal pollution on different spatial scales. Each cumulative percent of variance of the first two factors on different spatial scales is higher than those ignoring spatial scale.

Key words : factorial cokriging, soil heavy metal pollution, heavy metals, spatial structures

前言

台灣地區因區域排水系統未臻完善，部份灌溉用水引自受污染河川、埤池、或因事業單位廢水以直接、或間接方式排入灌溉渠道，使得農業灌溉用水含污染物質，或使渠道累積污染底泥，導致部份農田及其生產農作物遭受污染。歷年來地重金屬污染事件包括桃園水利會中福地區、新街溪、黃墘溪；彰化水利會東西二圳系統；近期則有雲林水利會之台

灣色料案、台中水利會鄰幼獅工業區之農田案等，凸顯出國內農地污染問題的嚴重性。

近二十年來，土壤特性的空間變異研究已經有了相當的發展，區域化變數理論，或稱作地理統計法，已經十分廣泛地應用在土壤科學方面。然而，大多數的應用都是以單變量地理統計法(Univariate Geostatistics)為主，多變量地理統計(Multivariate Geostatistics)的應用則相對較少，國內則僅有(Lin, 2002)曾將其運用在土壤重金屬污染的分析。土壤污染監測經常必須同時量測多種不同的可能污染變量加以檢視，不論哪一種變量超過了管制上限都必須採取相應措施，避免對人體以及環境造成危害；當變量一多，為了能夠找出繁雜現象背後所潛藏的少數因子，以方便了解污染成因及加以管控，最常使用的方法就是多變量統計法。在各種空間結構下，可利用協同區域化矩陣進行多變量分析，在考慮空間相關性的先決要件下找出繁雜現象的背後肇始原因。

研究目的

多變量分析提供了一個區分多種變數間所可能存在某些特定相關關係的方法。常用的因子分析法可把多種變數間的特定關係找出，轉化成數目較少的獨立變數，以便我們了解形成某些特定現象的背景原因。然而傳統的多變量分析並未考慮到空間上的關聯性，因此漏失了其中所可能存在的重要訊息。而多變量地理統計法則結合了地理統計法與多變量分析法，如協同因子克金法(Factorial cokriging method)，可用來解析具有空間關聯性的多變量為何在空間上會存在變異的來由，克服了傳統多變量分析的弱點。本研究將利用協同因子克力金法，推估造成彰化東西二圳地區以及桃園中福地區農地之重金屬濃度空間變異的各種來源，進一步套疊現地工廠資料以及航照圖，推論造成污染的主要原因。

文獻探討

多變量地理統計是結合地理統計與多變量分析的分析方法。由於先前用來分析地質方面的地理統計法都是以單變量為主；然而在大多數情形下，探討一個地區的特別現象時經常必須量測數種變量，再利用傳統的多變量分析法如主成分分析法、因子分析法來分析造成此地區變量起伏的背景因素。傳統的多變量分析法並未考慮變量與變量間所具有的空間相關性，這經常會造成分析上的偏差。為了克服傳統多變量分析法的這種缺失，1982年法國數學地質學家 Mathron 首先提出了因子克利金分析法(Factorial kriging analysis)，此法結合了多變量半變異元擬合、主成分分析，以及協同克利金法。

多變量分析提供了一個可以將造成數種變量間互相關聯的因素解析而出的途徑。其中，因子分析是一種極為普遍使用於環境方面的多變量分析法，目的在於將多個變數簡化為較少的因子，藉由原始變量來反映因子的特性以解釋因子的成因。然而傳統的多變量分

析法忽略了樣本間的空間相關性，而在其中可能存有重要的訊息(Einax and Soldt 1998)。Wakernagel et al.(1988)及 Sousa(1989)利用區域化因子得分(regionalized factors)及傳統的主成分分數(classical leading components)以鑑別礦物種類及其空間分佈邊界，研究結果皆顯示區域化因子得分較能做出正確的區別。Goovaerts 與 Webster(1994)利用因子克利金法推估由局部性空間變異(local variation)而造成的重金屬濃度分佈圖，可推論得知是由人類活動以及局部性地質改變所造成。Dobermann 等(1995)利用因子克利金法分析菲律賓地區之老陳土(Ultisol)，推論其在不同尺度的空間變異下所特有的土壤化學特性其背後之形成機制。Einax 與 Soldt(1998)利用因子克利金法推估與繪製各種尺度的空間變異下之重金屬濃度以分析影響因子，結果得到個別因子的高因子得分部份會發生在不同種類的工廠位置上，可以清楚看出造成污染的來源與種類。

研究方法

針對彰化地區與桃園地區不同污染來源特性，所造成之土壤污染，是否會反映在多變量因子分析結果與克利金法半變異圖之空間結構之中。

1. 研究範圍

- a. 研究範圍選取了彰化北部東西二圳灌溉系統區域的農地重金屬表土濃度採樣值。範圍包含和美鎮南部與彰化市西北部，面積約為1120公頃，鎘、鉻、汞、銅、鎳、鉛、鋅等七種重金屬，採樣時間由民國九十一年一月至十一月間，共有2549個採樣點，分布如下圖1.所示。
- b. 桃園中福地區位於蘆竹鄉之西南方，此處採樣農地區域之面積約為40公頃，主要引灌水源為黃墘溪。此處採樣分析之重金屬為砷、鉻、汞、銅、鎳、鉛、鋅等七種，採樣點數計280點，分布如下圖2.所示。

2. 背景資料蒐集與核對

蒐集彰化與桃園研究區內零星的工廠分佈概況，與最新的水利會灌溉渠道系統圖，高彩航空像片基本圖，歷年農地污染調查資料，以協助污染問題判讀。

1.因子分析及協同區域化分析比較

表 1 彰化東西二圳地區因子分析結果表

	h=A11 ¹		h=0m ²		h=160m ³		h=2400m ⁴	
	Factor1	Factor2	Factor1	Factor2	Factor1	Factor2	Factor1	Factor2
Cd	0.62841	0.33176	0.80054	0.03309	0.59548	-0.46704	0.67439	0.52593
Cr	0.90540	-0.21700	0.95008	-0.02488	0.93732	0.02842	-0.56985	0.26731
Cu	0.88468	-0.14071	0.92053	-0.05761	0.88498	0.08099	-0.41420	0.75372
Hg	0.22533	0.75782	0.17768	0.98307	0.31108	0.83749	0.88945	0.34839
Ni	0.88444	-0.15138	0.85852	-0.13160	0.92289	0.00343	-0.40418	0.90550
Pb	0.45004	0.66550	0.54890	-0.00757	0.45478	-0.11450	0.94388	0.25090
Zn	0.80755	-0.27725	0.87093	-0.02891	0.91287	0.03052	-0.72369	0.08739
解釋變異百分比(%)	52.64	18.48	61.38	15.78	56.31	15.30	47.73	32.66
累積解釋變異百分比(%)	52.64	71.13	61.38	77.16	56.31	71.61	47.73	80.39

註: □ 因子負荷大於 0.7

¹ 不區分空間尺度

² 有效範圍 0 公尺，碎塊效應尺度

³ 有效範圍 160 公尺，短距尺度

⁴ 有效範圍 2400 公尺，長距尺度

表 2. 彰化東西二圳地區可能污染源種類及家數

行業類別	主要污染重金屬種類	污染源數目
電鍍、金屬表面工業	Cr、Cu、Zn、Ni、Cd	51、11
金屬工業	As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、Ni	43
紡織業	As、Cd、Cu、Hg、Pb、Ni	8
畜牧業	Cu、Zn	3
染整業	As、Zn、Cr、Pb、Cd	8
製藥業	Cu、Hg	3
化工業	As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Ni	2
製革業	As、Cr、Cu、Hg、Zn	1
造紙業	Cr、Cu、Hg、Ni	2
橡膠業	As、Cd、Cu、Pb	1
食品業	Cr、Zn、Cu、Pb、Hg	1
醫事檢驗所	Hg	3
其他工業	-----	8

分析結果列於表 1. 在未區分出空間尺度時，因子分析結果顯示因子 1 與鉻(Cr)、銅(Cu)、鎳(Ni)、鋅(Zn)同時具有高度正相關。因子 1 的解釋變異百分比為 52.64%。因子 2 只與汞(Hg)有比較高的正相關，解釋變異百分比為 18.48%，此二者的累積解釋變異百分比達到 71.13%。

在碎塊效應尺度下，因子分析結果顯示出因子 1 與鎘(Cd)、鉻(Cr)、銅(Cu)、鎳(Ni)、鋅(Zn)呈高度正相關，解釋變異百分比為 61.38%。顯示出在碎塊效應尺度下，此五種重金屬的空間變異來源是極為近似的，比較此處的工廠分類調查與各種產業所可能排放的重金屬種類，發現因子 1 可能為電鍍業，金屬表面處理及金屬工業所造成；而就空間特性而論，這代表極近距離之下的重金屬濃度變動現象，反映在此工廠分佈極為緊密且管制並不周延的地區，可以推論這可能是經由近距離的廢水排放，或者是廢棄物的非法傾倒所造成重金屬濃度在空間分佈上的突變現象。

而因子 2 與汞(Hg)呈現高度正相關，代表有著不同的空間變異來源，此因子的解釋變異百分比各為 15.78%，總共為因子 1 的 0.257 倍，相較於未區分出空間尺度時，後者為前者的 0.351 倍，因子 1 在碎塊效應尺度下佔有更高的影響力。因子 2 的影響力相對較小，雖然影響力變小了，但是其因子負荷卻提高了，代表此因子在微尺度下的變異有進一步被確定其與汞有正相關的關聯性，而影響力變小則是與因子 1 的影響力增大有關。與因子 1 有相關的重金屬及因子負荷也提高了，表示在微尺度下電鍍業，金屬表面處理及金屬工業近距離廢水廢棄物的排放效應被放大。

在短距離尺度，也就是有效範圍為 160 公尺的尺度下，因子 1 與鉻(Cr)、銅(Cu)、鎳(Ni)、鋅(Zn)有高度相關性。初步推論應該由電鍍業，金屬表面處理及金屬工業排放廢水經由灌排渠道的近距離傳輸流佈所造成，第二因子與汞(Hg)相關，可以發現這時候的結果和典型多變量分析是極度相似的，推論在這個尺度下所造成的污染對這個地區有著比較顯著的影響，彰化東西二圳地區可能污染源種類及家數分析結果如表 2. 所示。在長距離尺度下，有效範圍為 2400 公尺時，因子 1 與汞(Hg)、鉛(Pb)有明顯正相關，與鋅(Zn)有負相關，與鎘(Cd)則有比較弱的正相關。因子 2 則與銅(Cu)、鎳(Ni)有正相關，可以發現與各因子相關的重金屬種類有著明顯的改變，這是由於在不同的空間距離之下，變數間會有不同的相關性，進而造成了因子分析的結果有所改變，也就是在大範圍之下造成某些重金屬呈現高度類似分佈型態的肇因被解析出來。而進一步的推斷必須配合因子得分等值圖與渠道分佈圖探討。

桃園中福地區因子分析結果如表 3. 所示，在短距離尺度下，因子分析結果顯示出因子 1 與鉻(Cr)、銅(Cu)、鉛(Pb)呈高度正相關，與鎳(Ni)、鋅(Zn)則具有比較微弱的正相關，解釋變異百分比為 57.23%，顯示出在短距離尺度下，此五種重金屬的空間變異來源是極為近似的，由於此處的工廠調查不確實，因此無法直接推論是由哪一類的工廠所造成，不過值得注意的是，因子 1 與空間結構未區分時的因子 1 極為類似，代表可能造成此地區主要空

間變異的因素是由相同的污染排放造成。而因子 2 與汞(Hg)呈現負相關，解釋變異百分比為 14.49%。

表 3 桃園中福地區因子分析結果表

	h=All ¹		h=70m ²		h=560m ³	
	Factor1	Factor2	Factor1	Factor2	Factor1	Factor2
As	-0.17906	0.75363	-0.22085	0.55194	0.17448	0.94078
Cr	0.96556	0.00032	0.97829	0.04244	0.85688	-0.17115
Cu	0.92948	-0.10329	0.94861	-0.03552	0.66838	-0.41837
Hg	0.10429	-0.59323	0.30867	-0.75845	-0.95249	0.3004
Ni	0.76792	0.26291	0.77784	0.24402	0.75193	0.62309
Pb	0.93672	-0.08259	0.95514	0.01247	0.70793	-0.42387
Zn	0.69374	0.24215	0.69251	0.21991	0.82161	0.55856
解釋變異百分比 (%)	54.11	15.22	57.23	14.19	59.14	27.99
累積解釋變異百 分比(%)	54.11	69.32	57.23	71.41	59.14	87.13

註：因子負荷大於或極近似於 0.7

¹ 不區分空間尺度

² 有效範圍 70 公尺，短距尺度

³ 有效範圍 560 公尺，長距尺度

2. 協同因子克利金法與因子得點圖分析

進一步的推斷必須配合因子得分等值圖與渠道分佈圖探討，故以協同因子克利金法推估的八種重金屬濃度分量圖，目的是為了便於看出濃度分佈所具有的點源外擴方式，以解釋空間變異的來源。結果如圖 3. 所示為彰化東西二圳地區小尺度空間變異之因子 1 得分圖；圖 4. 為彰化東西二圳地區大尺度空間變異之因子 1 得分圖；圖 5. 為桃園中福地區小尺度空間變異之因子 1 得分圖；圖 6. 為桃園中福地大尺度空間變異之因子 1 得分圖。並進一步套疊現地工廠資料以及航照圖，可清楚分辨造成污染的主要來源與成因。

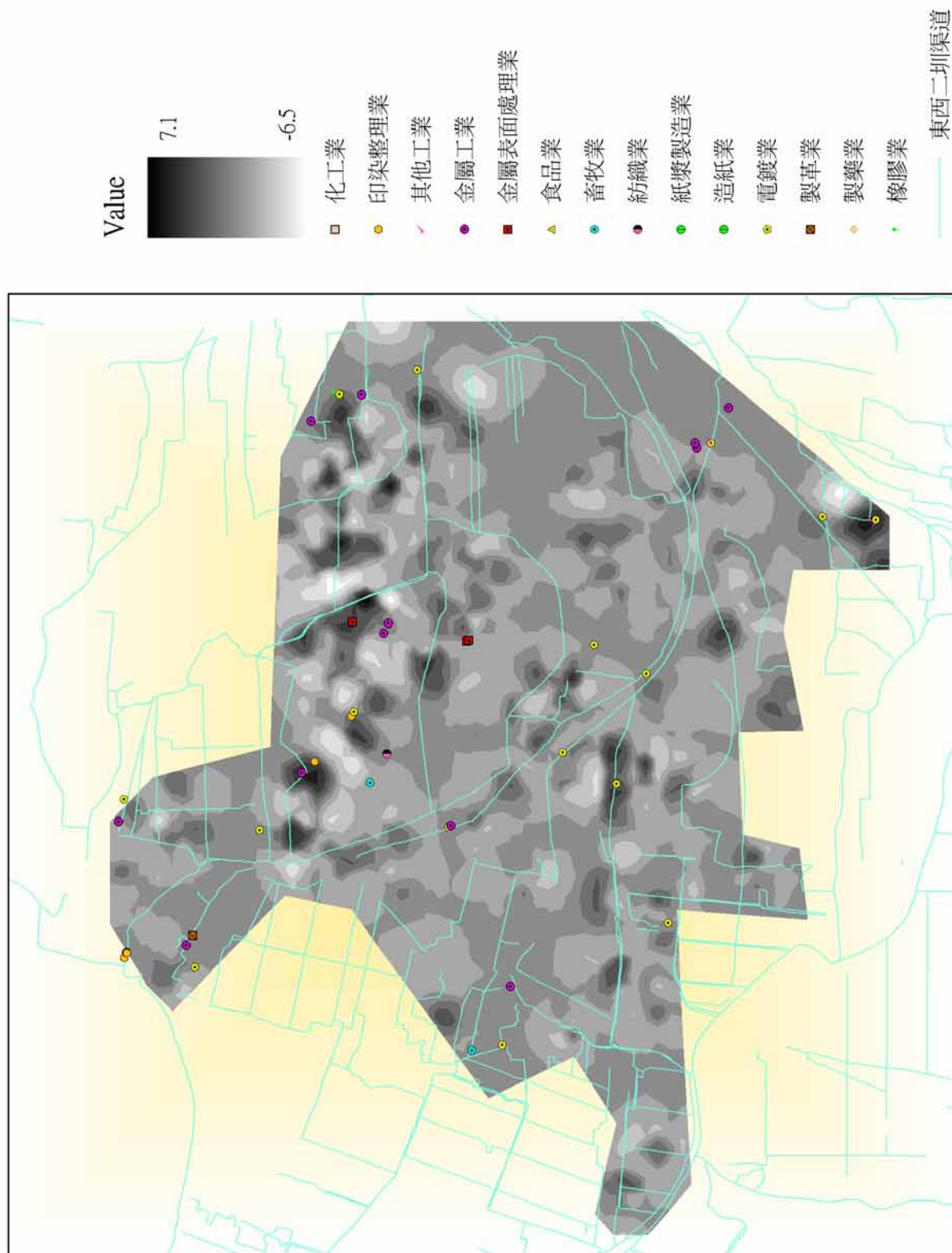


圖 3. 彰化東西二圳地區小尺度空間變異之因子 1 得分圖

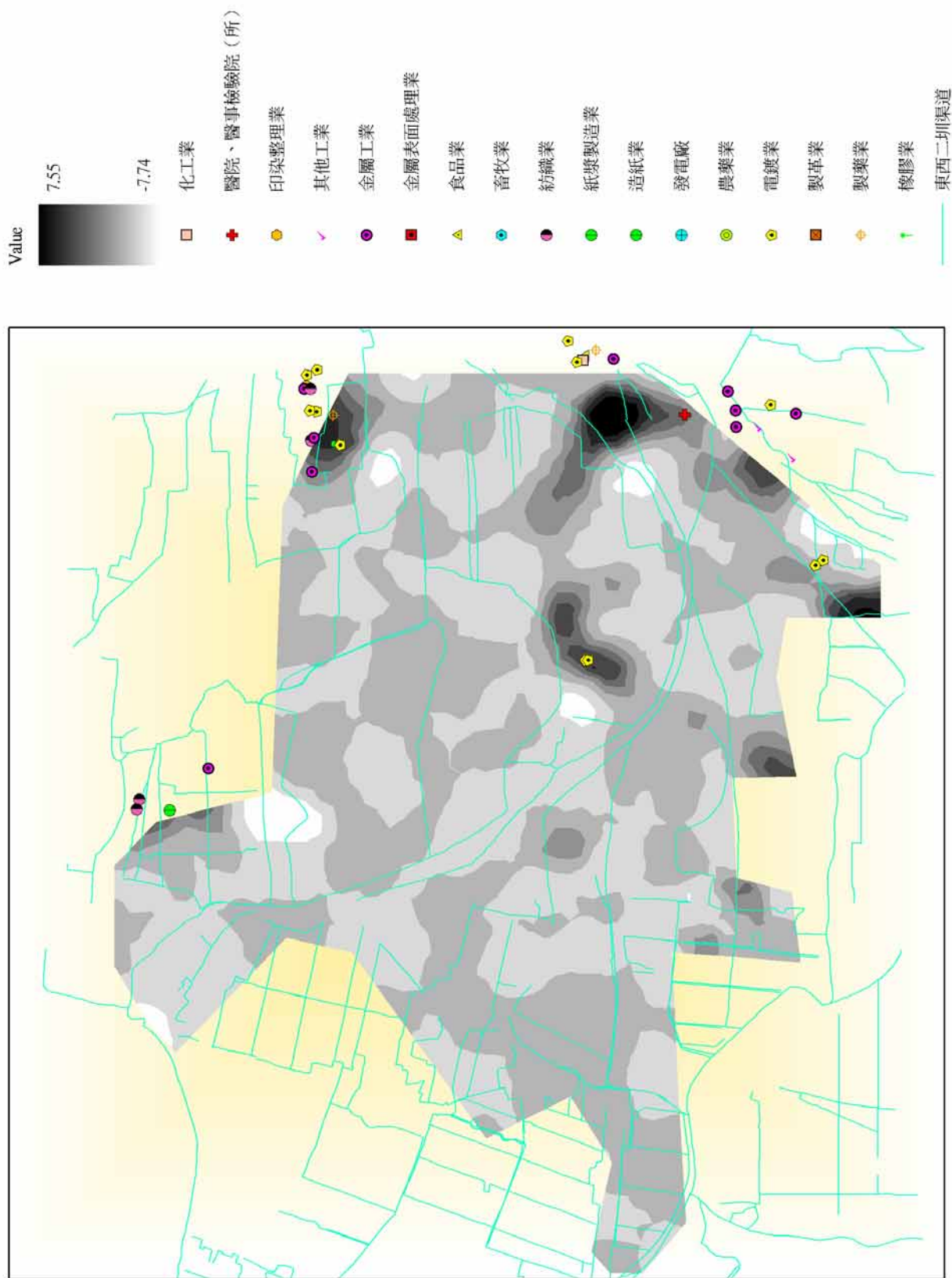


圖 4. 彰化東西二圳地區大尺度空間變異之因子 1 得分圖



圖 5. 桃園中福地區小尺度空間變異之因子 1 得分圖

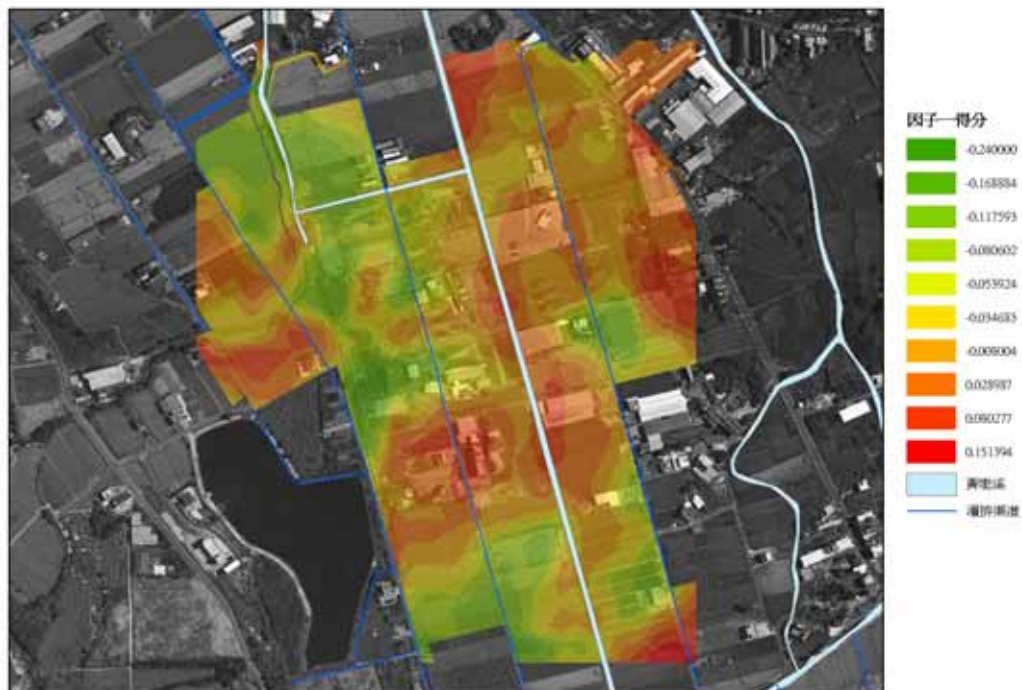


圖 6. 桃園中福地大尺度空間變異之因子 1 得分圖

計畫成果自評

本計畫經由大小不同空間尺度，解讀彰化地區與桃園地區不同污染型態與傳輸方式，發現彰化東西二圳主要污染原因為金屬工業、金屬表面處理業以電鍍業由許多工廠所造成，在調查田間點源污染分佈廣闊遍及整個研究區(1120ha)，碎塊尺度約在 10 公尺左右。桃園地區則主要以中壢工業區單一主要污染來源經由渠道輸送所構成污染。土壤污染調查最終希望解析污染來源與成因，提供將來整治策略研擬與後續如何驗證整治成功與否。現今土壤污染整治工作已步入法規執行面，在陸續公告控制場址後，環保署亦責成地方環保局進行整治工作，在有限之經費及經驗技術不足下勢將面臨許多挑戰，本計畫經由大小不同空間尺度分析解讀，有助於對污染來源與成因之掌握。

參考文獻

1. Doberman, A., Goovaerts, P., and George, T., 1995, "Sources of soil variation in an acid Ultisol of the Phillipines," *Geoderma*, Vol. 68, pp. 173-191.
2. Einax, J. W., and Soldt, U., 1998, "Multivariate geostatistical analysis of soil contaminations," *Fresenius J. Chem.*, Vol. 361, pp. 10-14.
3. Facchinelli A., E. Sacchi L., Mallen, "Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils" *Environmental pollution* 114 (2001) 313-324.
4. Gooverts, P., Webster P., 1992."Factorial kriging analysis: a useful tool for exploring the structure of multivariate spatial soil information," *Journal of soil science*, No.43, pp.597-619.
5. Ferreyra, R.A., Apezteguia, H.P., Sereno, R., Jones, J.W., 2002. Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing. *Geoderma* 110, 265-289.
6. Lin, Y.P., Chang, T.K., 2000. Simulated annealing and kriging method for identifying the spatial patterns and variability of soil heavy metal. *J. of Environ. Sci. Health*, A35 (7).
7. Sousa, A. J., 1989, "Geostatistical data analysis-an application to ore typology," *Geostatistics*, Vol.2 , pp. 851-860.
8. Wakernagel, H., 1995, *Multivariate geostatistics: An introduction with Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.