

# 底泥顆粒之物化特性對重金屬自底泥各鍵結型態釋出之影響

Effect of physicochemical characteristics of particles on the remobilization of heavy metals from binding fractions of contaminated river sediments

計畫編號 NSC-88-2211-E-041-001

執行期間 87年8月1日至88年7月31日

主持人 何先聰 嘉南藥理學院工業安全衛生系

協同研究人員 余光昌 張錦松 蔡利局

嘉南藥理學院環境工程衛生系

## 一中文摘要

二仁溪下游河段為臺南地區受污染最嚴重的河段之一。本研究針對採樣自不同深度泥層之二仁溪下游河段底泥，進行底泥顆粒粒徑分佈分析，將底泥分成五種不同粒徑成份( $<2\mu\text{m}$ ,  $2\sim16\mu\text{m}$ ,  $16\sim32\mu\text{m}$ ,  $32\sim63\mu\text{m}$ 及 $>63\mu\text{m}$ )並分析底泥比表面積(specific surface area)、有機物含量、碳酸鹽含量、鐵氧化物含量、錳氧化物含量及黏土(clay)、粉土(silt)、砂(sand)組成百分比等物化特性。其次，採用逐步萃取法(sequential extraction procedure)分析銅(Cu)、鋅(Zn)、鉛(Pb)、鉻(Cr)、鈷(Co)及鎳(Ni)在各深度泥樣中和五種鍵結型態(可交換態、與碳酸鹽鍵結態、與鐵氧化物鍵結態、與錳氧化物鍵結態、與有機物鍵結態)的鍵結量分佈。其中存於可交換態型式之重金屬代表最易被環境因子影響而自底泥釋出到外面水體者，與碳酸鹽鍵結態之重金屬釋出難度逐漸增加，至於與有機物鍵結態之重金屬更難被釋出。故若底泥顆粒的物化特性能使可交換態等較易被釋出型態的重金屬鍵結量增加，代表此物化特性有益於重金屬釋出。最後，將全部變數進行多變數統計分析(multivariate analysis)，包括相關性矩陣(correlation matrix)，及主成份分析(principal component analysis, PCA)，以探討底泥顆粒之物理化學特性對重金屬在各鍵結態分佈及釋出的影響。

結果顯示，底泥顆粒各種粒徑大小分佈百分比、比表面積大小對Cu、Zn、Pb、Cr、Co及Ni在五種鍵結型態分佈及被釋出量無顯著相關性存在。但Fe和Mn各種鍵結型態量及總量和黏土百分比、比表面積呈正相關。底泥顆粒有機物含量增加，則與有機物鍵結之Pb、Cu、Cr及Fe量隨之增加，使得Pb、Cu、Cr及Fe更不易被釋出；但存於可交換態型式之Ni及Zn量反而增加，使得Ni及Zn易被釋出。底泥顆粒碳酸鹽含量對各鍵結型態重金屬(Cu、Zn、Pb、

Cr、Co及Ni)的釋出難易之影響不明顯。而底泥顆粒鐵氧化物含量對Cu、Zn、Pb、Cr、Co及Ni在各鍵結型態的分佈影響也不明顯。底泥顆粒錳氧化物含量增加，與錳氧化物鍵結之Cu、Zn、Pb、Cr、Co及Ni量則明顯隨之降低。

關鍵詞：底泥、物化特性、連續萃取法、重金屬

## Abstract

Lower section of the Eii-Ren river, locates in area of Tainan, have been heavily polluted with domestic, agricultural, and industrial pollutants. This study aims to investigate the remobilization behaviors of heavy metals affected by physicochemical characteristics of the Eii-Ren river sediments. The experiments were divided into three sections. In the first section, the samples collected from different sediment depths were air-dried and then analyzed the physicochemical characteristics of sediments, including particle size distributions, specific surface area, and contents of organic matters, carbonates, iron (Fe) oxides, manganese (Mn) oxides, clay, silt, and sand.

In the second section, sequential extraction procedure (SEP) was used to study the binding behaviors of six heavy metals (Nickel (Ni), Chromium (Cr), Copper (Cu), Zinc (Zn), Cobalt (Co), and Lead (Pb)) in sediment fractions. Five binding fractions are exchangeable, bound to carbonates, bound to Mn oxides, bound to Fe oxides and bound to organic matters. The sum of heavy metals existing in five binding fractions is defined as TEHMs. Among the five binding fractions, the heavy

metals existing in exchangeable fraction were the most easily remobilized to water body as affected by environmental factors. The order of remobilization possibility of heavy metals from the five binding fractions was: exchangeable, bound to carbonates, bound to Mn oxides, bound to Fe oxides, and to bound to organic matters. If the physicochemical characteristics of sediments can increase the amounts of exchangeable heavy metals, these characteristics also can increase the remobilization of heavy metals.

In the third section, the multivariate statistical analyses, including correlation matrix and principal component analysis (PCA) were used to clarify the effects of these physicochemical characteristics on the remobilization of heavy metals from sediments.

Results show that the correlations among particle size distributions, specific surface area, and binding distributions of Cu, Zn, Pb, Cr, Co and Ni among the five fractions were not prominent. The positive correlations among percent of clay, specific surface area, the amounts of total extractable Fe and Mn and the amounts of both Fe and Mn bound to the five fractions were found. In addition, the more the organic matters existed in sediments, the more amounts of Pb, Cu, Cr and Fe were bound to organic matters. However, the exchangeable Ni and Zn increased with the contents of organic matters in sediments.

Both carbonates and Fe oxides existed in sediments did not significantly affect the remobilization of Cu, Zn, Pb, Cr, Co and Ni from sediments.

The amounts of Cu, Zn, Pb, Cr, Co and Ni bound to Mn oxides significantly decreased with the increase of Mn oxides in sediments.

## 二緣由及目的

底泥顆粒的物理化學特性中，粒徑( $d_p$ )是很重要的一項特性參數。粒徑愈小，比表面積就愈大，就愈有蓄積重金屬的能力[1, 2, 3, 4, 5]。但也有研究[6]指出顆粒粒徑小於 $2\text{ }\mu\text{m}$ (粘土粒)愈多，顆粒上所蓄積的重金屬Cd, Zn, Cu及Pb就愈少。另外 Warren L.A. and

Zimmerman A.P. [7]指出顆粒粒徑與重金屬含量間並未有很一致之相關性，因此無法由粒徑大小來預測重金屬在顆粒之鍵結量。Stone M. and Droppo I.G. [2] 則發現隨著顆粒粒徑減小，顆粒中鐵錳氧化物所蓄積的重金屬Zn及Pb的比率大幅增加，比率也最高；而有機物所鍵結的Zn, Cu及Pb的比率也大幅增加，比率僅次於鐵錳氧化物所蓄積的量。然而，Cu及Pb與碳酸鹽之鍵結比率卻隨粒徑減小而逐漸減小，但鍵結量仍然增加。由上述可見粒徑減小所能增加的重金屬蓄積量，主要依賴鐵錳氧化物及有機物所吸附及鍵結所致。重金屬的鍵結型態會影響螯合劑自底泥再溶出重金屬的效果，因此有必要釐清顆粒粒徑，化學組成(有機物，碳酸鹽含量，鐵氧化物、錳氧化物含量)與重金屬各鍵結型態之相關性，以推求重金屬自底泥各鍵結型態再釋出之可能關鍵為何。

本研究計畫的目的，乃延續前幾年對二仁溪，鹽水溪、曾文溪、急水溪、朴子溪及北港溪底泥重金屬的各種鍵結型態之研究，來探討底泥顆粒的物理化學特性對重金屬自二仁溪底泥再溶出重金屬之影響，本計畫也將利用統計方法(相關性矩陣及主成份分析)[5]探求各種底泥之物理化學特性值和各鍵結型態中重金屬種類及含量之相關性，以及影響各種重金屬自底泥顆粒釋出之可能參數。

## 三 研究方法

### (一) 混樣採集及前處理

本研究在二仁溪下游污染河段以Sediment core採樣器(Wildco Corp., U.S.A.)，選3個採樣站採取泥樣，供不同深度泥樣中重金屬鍵結型態分析之用。由PE採樣管中推擠出底泥，依0-10 cm部份切成五塊(每塊2 cm)，10 cm以上每5 cm切成一塊，各塊待解凍後再進行風乾，風乾後始進行泥質之物化特性分析。

### (二) 顆粒物化特性分析

- (1)雷射粒徑分析儀：計算底泥粒徑分佈百分比及比表面積
- (2)以Walkley-Black method [8]測定顆粒中有機物含量
- (3)以approximate gravimetric method測定顆粒中碳酸鹽含量
- (4)以原子吸收光譜儀測定鐵、錳含量

### (三) 底泥中不同鍵結型態重金屬的連續萃取法

本研究修正Tessier A. et al.(1979)[9]及Nelson et al.(1982)[10]的萃取法，進行底泥中重金屬鎳、鉻、銅、鋅、鈷及鉛之鍵結型態(可交換態(F1)、與碳酸鹽鍵結態(F2)、

與鐵氧化物鍵結態(F3)、與錳氧化物鍵結態(F4)、與有機物鍵結態(F5))分析。而各鍵結態所鍵結重金屬含量之總和定義為總可萃取重金屬量(Total extractable heavy metals, TEHMs)。

操作條件如下：

鍵結型態	萃取液	操作條件
F1	1M CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> , PH 7.0	攪拌 0.5 小時，靜置 2 小時
F2	1M CH <sub>3</sub> COONa, PH 5.0	攪拌 5 小時，靜置 2 小時
F3	1M NH <sub>2</sub> OH · HCl in 0.1N HNO <sub>3</sub>	攪拌 0.5 小時，靜置 2 小時
F4	0.04M NH <sub>2</sub> OH · HCl in 25% (V/V) CH <sub>3</sub> COOH	96 °C 下，攪拌 6 小時
F5	(1) 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +0.1N HNO <sub>3</sub> (2) 3.2M CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> in 20% (V/V) HNO <sub>3</sub>	先加(1)混合液 85 °C 下，攪拌 5 小時，冷卻後加入(2)混合液攪拌 0.5 小時

#### (四) 統計分析

- (1)以相關性矩陣方法，分析河川底泥顆粒之物理化學特性(粒徑，比表面積、有機物、鐵氧化物、錳氧化物)之含量對各鍵結型態重金屬釋出量之相關性。
- (2)以主成份分析來探求底泥各鍵結型態蓄積金屬量之釋出，受顆粒之物理化學特性影響之程度。

以下文中 R 代表統計分析的相關係數；M-F<sub>n</sub> (單位為 mg/kg)代表各種重金屬在五種鍵結型態之可被釋出量，其中 M 代表 Ca, Cr, Cu, Zn, Ni 或 Pb, n=1,2,3,4,5。有機物、碳酸鹽含量 鐵氧化物 和錳氧化物含量皆以重量(%)表示。

## 四結果與討論

表一為二仁溪不同深度泥樣中八種重金屬(Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, 及 Cr)在五種鍵結型態累積量統計分析，由各重金屬最大值、最小值、及標準偏差值，可判讀出二仁溪不同深度泥樣重金屬濃度變化很大，代表其受到高度重金屬污染。其中 Cu, Pb, Zn, Ni, 及 Cr 之平均值都比背景值高出甚多倍，尤其是 Cr。

### (一) 底泥顆粒各種粒徑分佈百分比、比表面積對重金屬在五種鍵結型態被釋出的影響

由表二，底泥比表面積和小於 2 μm 顆粒分佈百分比成非常明顯之正相關(R=0.99)，但和 63 μm 以上顆粒分佈百分比成明顯之負相關(R=-0.53)。底泥顆粒比表面積和與碳酸鹽鍵結

的 Fe、與鐵氧化物鍵結的 Mn 和 Co、以及與有機物鍵結的 Mn 和 Co 量存在有正相關，但和八種重金屬的其餘鍵結型態之鍵結量之間無明顯相關存在。比表面積和錳氧化物含量(R=0.73)，鐵氧化物含量(R=0.56)有明顯正相關。比表面積和碳酸鹽含量(R=0.25)正相關性小，和有機物含量(R=-0.04)無相關性。粒徑小於 2 μm 顆粒百分比和與鐵氧化物鍵結的 Mn(R=0.72)和 Co(R=0.47)量，及與碳酸鹽鍵結的 Fe(R=0.6), Mn(R=0.55)量有明顯正相關；但粒徑小於 2 μm 顆粒百分比和八種重金屬的其餘鍵結型態之鍵結量之間無明顯相關性存在。

粒徑在 2 μm 和 16 μm 間顆粒分佈百分比，和與碳酸鹽鍵結的 Mn 量(R=0.44)、與錳氧化物鍵結的 Mn 量(R=0.55)以及與鐵氧化物鍵結的 Mn 量(R=0.57)之間有正相關。但和 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 在五種鍵結型態的鍵結量分佈有負相關趨勢存在。

粒徑在 16 μm 和 32 μm 間顆粒分佈百分比，和 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 在五種鍵結型態的鍵結量分佈一樣有負相關趨勢存在。粒徑在 32 μm 和 63 μm 間顆粒分佈百分比，和 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 在五種鍵結型態的鍵結量分佈無相關趨勢存在。

粒徑大於 63 μm 顆粒分佈百分比愈高，即砂含量愈多的底泥，鐵、錳氧化物含量愈少。底泥中黏土(<2 μm)含量愈高，總可被萃取 Fe 和 Mn 量(TEHM-Fe, TEHM-Mn)愈多，但總可被萃取 Cu, Zn, Co, Ni, Pb 及 Cr 量(TEHM-Cu, TEHM-Zn, TEHM-Co, TEHM-Ni, TEHM-Pb, 及 TEHM-Cr)則不受影響。粉土(2<d<sub>p</sub><63 μm)含量愈高，TEHM-Fe 和 TEHM-Mn 量不受影響，但 TEHM-Cr, TEHM-Pb, 及 TEHM-Cu 則與之呈現負相關。

### (二) 底泥顆粒化學特性對重金屬在五種鍵結型態被釋出的影響

由表三、四之結果顯示，底泥顆粒中有機物含量增加時，與有機物鍵結之 Pb, Fe, Cu, Cr, 及 Mn 量也隨著增加(因 R 值為正相關且明顯)，表示這些重金屬因有機物增加而更不易被釋出；但存於可交換態的 Ni 和 Zn，跟著有機物含量增加而增加(因 R 值(0.71,0.55)為正相關且明顯)，表示底泥有機物含量增加時，Ni 和 Zn 在其他鍵結型態的量會轉移到可交換態，此時 Ni 和 Zn 容易被釋出。

底泥顆粒中碳酸鹽含量增加時，與鍵結在碳酸鹽態、鐵氧化物態、及錳氧化物態之 Mn 量有正相關存在。但碳酸鹽含量和 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 等重金屬在五種鍵結型態的鍵結量分佈無相關性存在。

鐵氧化物含量增加，對 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 與鐵氧化物鍵結量增加無相關，亦不影響

這些重金屬在其餘四種鍵結型態的分佈，即鐵氧化物含量改變，不造成重金屬在五種鍵結型態上的轉移。當鐵氧化物鍵結量增高時，鍵結在有機物上的 Fe 量也增加( $R=0.63$ )，鍵結在鐵氧化物上的 Mn 量亦存有正相關( $R=0.61$ )。

錳氧化物含量增加，對 Cu, Cr, Zn, Co, Ni 及 Pb 在五種鍵結型態的結合量存有負相關( $R$  皆為負值)，尤其是 Pb, Zn 和 Cu 較明顯。底泥錳氧化物含量和與碳酸鹽鍵結的 Mn、Fe 量 ( $R=0.96, 0.80$ )、與鐵氧化物鍵結的 Mn 量 ( $R=0.96$ )、及與錳氧化物鍵結的 Mn 量( $R=0.96$ )存有明顯正相關。

### (三)主成份分析

由主成份分析可將 64 個變數(如表五、六所示)簡化成以四個主因子 (principal factors) 就可充份說明變數間的關係，其可解釋原來變異的 81.7%，剩下的 60 個因子其總供獻小於 18.3%。第一個主因子可解釋 42.2% 的變異 (variance)，可用於說明 Co, Pb, Ni, Cu, 和 Zn 在五種鍵結型態結合量、及總可萃取量間的相關性，這 30 個變數間的權重都很高，大部份在 0.9 以上，表示 Co, Pb, Ni, Cu 和 Zn 的五種鍵結型態結合量隨總量增加，且可能來自同一污染源之排放。因存在相同化學性質的重金屬，才能和底泥維持相同結合能力。第二個主因子可解釋 20.64% 的變異，用於解釋有機物含量對 Cr, Pb 和 Ni 在與碳酸鹽鍵結態、與鐵氧化物鍵結態、與錳氧化物鍵結態、及與有機物鍵結態之鍵結量的影響。第三個主因子可解釋 13.72% 的變異，可用以說明底泥粒徑分佈百分比對 Fe, Mn 在各鍵結型態分佈的影響，黏土和粉土對 Fe, Mn 在各鍵結型態分佈具有正面貢獻，砂粒則為負面供獻。

## 五參考文獻

- 1.Sakai H., Y. Kojima and K. Saito, 1986, Distribution of Heavy Metals in Water and Sieved Sediments in the Toyohira River, *Water. Res.*, Vol.**20**, No.5, pp.559-567.
- 2.Stone M. and I. G. Droppo, 1996, Distribution of Lead, Copper and Zinc in Size-Fractionated River Bed

Sediment in Two Agricultural Catchments of Southern Ontario, Canada, *Environmental Pollution*, Vol.**93**, No.3, pp.353-362.

- 3.Adamo, P., S. Dudka, M. J. Wilson and W. J. McHardy, 1996, Chemical and Mineralogical Forms of Cu and Ni in Contaminated Soils from the Sudbury Mining and Smelting Region, Canada, *Environmental Pollution*, Vol.**91**, No.1, pp.11-19.
- 4.Borghigiani C., T. Ristori and J. L. Arenas, 1996, Mercury in Marine Sediment from a Contaminated Area of the Northern Tyrrhenian Sea: < 20  $\mu$ m Grain-Size Fraction and Total Sample Analysis, 1996, *The Science of the Total Environment*, Vol.**192**, pp.63-73.
- 5.Horowitz A. J. and K. A. Elrick, 1987, The Relation of Stream Sediment Surface Area, Grain Size and Composition to Trace Element Chemistry, *Applied Geochemistry*, Vol.**2**, pp.437-451.
- 6.Houba C., J. Remacle, D. Dubois and J. Thorez, 1983, Factors Affecting the Concentrations of Cadmium, Zinc, Copper and Lead in the Sediments of the Vesdre River, *Water Res.*, Vol.**17**, No.10, pp.1281-1286.
- 7.Warren L. A. and A. P. Zimmerman, 1993, "Trace Metal-Suspended Particulate Matter Associations in a Fluvial System : Physical and Chemical Influences", *Particulate Matter and Aquatic Contaminants*, S. S. Rao, Ed., Lewis Publishers, Florida, pp.127-155.
- 8.Sims J.T., S.E. Heckendorn, 1991, Methods of Soil Analysis, University of Delaware, College of Agricultural Sciences. Soil Testing Laboratory.
- 9.Tessier A., P.G.C. Campbell and M. Bisson, 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation on Particulate Trace Metals, *Analyt. Chem.* Vol.**51**, No.7, pp.844-851.
- 10.Nelson D.W., and Sommer L. E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. In : Methods of soil Analysis, part 2, Chemical and Microbiological Properties, Page A. L., (Ed.) American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 539-580.

表一 二仁溪底泥中重金屬在五種鍵結型態分佈之描述性統計分析

	Valid N	Mean**	Minimum**	Maximum**	Std.Dev.**
Cr-F1	29.00	0.17	0.00	0.50	0.18
Cr-F2	29.00	7.99	0.12	27.75	8.08
Cr-F3	29.00	6.37	0.17	36.47	9.81
Cr-F4	29.00	69.77	1.89	418.40	102.09
Cr-F5	29.00	19.68	2.25	97.30	26.98
Fe-F1	29.00	1.47	0.00	5.79	1.59
Fe-F2	29.00	459.70	132.96	1202.37	254.32
Fe-F3	29.00	972.43	406.13	1983.08	426.36
Fe-F4	29.00	5601.65	3401.85	1.02E+04	1854.30
Fe-F5	29.00	5112.81	1890.00	1.04E+04	2387.12
Mn-F1	29.00	6.73	0.00	28.80	8.30
Mn-F2	29.00	70.07	25.72	129.31	27.29
Mn-F3	29.00	34.77	17.53	72.53	11.52
Mn-F4	29.00	45.25	23.87	80.92	13.57
Mn-F5	29.00	21.22	9.38	46.76	9.40
Co-F1	29.00	0.13	0.00	0.53	0.15
Co-F2	29.00	1.41	0.45	12.65	2.18
Co-F3	29.00	0.86	0.21	5.16	0.86
Co-F4	29.00	1.85	1.03	5.25	0.78
Co-F5	29.00	1.87	0.18	4.32	0.77
Pb-F1	29.00	2.50	0.00	43.38	7.98
Pb-F2	29.00	34.17	0.93	198.67	51.59
Pb-F3	29.00	16.42	0.02	151.67	33.83
Pb-F4	29.00	45.84	3.28	211.00	61.75
Pb-F5	29.00	31.68	2.51	219.32	52.26
Ni-F1	29.00	1.20	0.00	8.89	2.15
Ni-F2	29.00	22.91	0.91	199.33	39.05
Ni-F3	29.00	14.09	0.87	70.13	19.31
Ni-F4	29.00	23.65	2.73	269.93	51.37
Ni-F5	29.00	15.43	2.27	171.40	31.15
Cu-F1	29.00	1.52	0.10	18.67	3.47
Cu-F2	29.00	50.44	1.39	618.40	116.42
Cu-F3	29.00	18.36	0.35	142.73	38.99
Cu-F4	29.00	4.24	0.70	69.73	12.65
Cu-F5	29.00	309.88	4.96	1207.80	412.23
Zn-F1	29.00	16.29	0.00	97.93	30.67
Zn-F2	29.00	312.25	6.07	2800.00	551.59
Zn-F3	29.00	123.22	4.27	1022.47	216.77
Zn-F4	29.00	95.09	15.27	749.07	143.34
Zn-F5	29.00	73.54	10.29	1246.30	226.83
TEHM-Cr	29.00	103.99	4.95	541.60	140.76
TEHM-Fe	29.00	1.21E+04	7304.22	2.11E+04	3980.89
TEHM-Mn	29.00	178.04	110.16	316.19	49.23
TEHM-Co	29.00	6.11	2.82	27.91	4.33
TEHM-Pb	29.00	130.61	9.68	520.41	171.93
TEHM-Ni	29.00	77.29	6.91	712.78	137.86
TEHM-Cu	29.00	384.44	8.87	2057.33	521.66
TEHM-Zn	29.00	620.39	37.70	5906.03	1130.59

\*\*:單位為(mg/kg dry wt.)

表二 底泥顆粒物理特性對八種重金屬在五種鍵結型態分佈的相關性矩陣

	Clay	Silt	Sand	A*	B*	C*	D*	E*	F*
Clay	1.00								
Silt	-0.16	1.00							
Sand	-0.53	-0.75	1.00						
A*	0.99	-0.14	-0.54	1.00					
B*	0.99	-0.12	-0.56	0.99	1.00				
C*	0.69	0.38	-0.79	0.64	0.70	1.00			
D*	-0.08	0.91	-0.73	-0.08	-0.03	0.57	1.00		
E*	-0.43	-0.20	0.46	-0.35	-0.45	-0.87	-0.54	1.00	
F*	-0.52	-0.76	1.00	-0.53	-0.54	-0.77	-0.73	0.44	1.00
Cr-F1	-0.45	-0.01	0.31	-0.48	-0.43	-0.13	0.14	-0.18	0.31
Cr-F2	-0.08	-0.49	0.47	-0.12	-0.14	-0.21	-0.39	0.03	0.47
Cr-F3	-0.15	-0.48	0.51	-0.18	-0.17	-0.28	-0.38	0.07	0.51
Cr-F4	-0.04	-0.46	0.43	-0.08	-0.09	-0.18	-0.37	0.01	0.43
Cr-F5	-0.06	-0.45	0.43	-0.09	-0.11	-0.19	-0.36	0.02	0.43
Fe-F1	0.17	-0.03	-0.08	0.19	0.15	0.04	-0.03	0.02	-0.08
Fe-F2	0.57	0.16	-0.52	0.58	0.60	0.50	0.20	-0.30	-0.52
Fe-F3	0.27	-0.54	0.29	0.21	0.23	0.13	-0.35	-0.29	0.30
Fe-F4	0.47	-0.09	-0.23	0.47	0.42	0.34	-0.03	-0.23	-0.23
Fe-F5	0.28	-0.12	-0.08	0.29	0.23	0.09	-0.11	0.00	-0.08
Mn-F1	0.04	-0.52	0.42	0.00	0.00	-0.15	-0.42	-0.01	0.43
Mn-F2	0.52	0.29	-0.59	0.56	0.55	0.44	0.25	-0.17	-0.59
Mn-F3	0.68	0.22	-0.64	0.71	0.69	0.55	0.22	-0.26	-0.64
Mn-F4	0.71	0.24	-0.67	0.74	0.72	0.57	0.21	-0.26	-0.67
Mn-F5	0.40	-0.06	-0.22	0.42	0.37	0.21	-0.06	-0.05	-0.22
Co-F1	0.31	-0.07	-0.14	0.27	0.28	0.36	0.04	-0.36	-0.13
Co-F2	0.08	-0.06	0.00	0.07	0.04	0.03	-0.11	0.02	0.01
Co-F3	0.07	-0.14	0.07	0.05	0.03	0.03	-0.16	-0.02	0.08
Co-F4	0.50	-0.04	-0.30	0.51	0.47	0.32	-0.06	-0.14	-0.29
Co-F5	0.37	0.01	-0.26	0.37	0.31	0.28	0.00	-0.14	-0.24
Pb-F1	0.05	-0.14	0.09	0.04	0.01	-0.01	-0.16	0.01	0.10
Pb-F2	-0.11	-0.43	0.44	-0.14	-0.13	-0.23	-0.35	0.05	0.45
Pb-F3	-0.04	-0.33	0.31	-0.07	-0.07	-0.14	-0.29	0.03	0.32
Pb-F4	-0.02	-0.41	0.37	-0.05	-0.08	-0.13	-0.34	-0.01	0.38
Pb-F5	-0.02	-0.43	0.38	-0.05	-0.07	-0.11	-0.32	-0.06	0.39
Ni-F1	-0.05	-0.46	0.43	-0.08	-0.10	-0.17	-0.36	0.00	0.43
Ni-F2	-0.01	-0.30	0.26	-0.03	-0.07	-0.10	-0.28	0.02	0.27
Ni-F3	-0.06	-0.48	0.45	-0.10	-0.12	-0.19	-0.40	0.02	0.46
Ni-F4	0.03	-0.23	0.18	0.01	-0.02	-0.04	-0.22	0.00	0.19
Ni-F5	0.05	-0.18	0.12	0.03	0.00	-0.02	-0.18	0.00	0.13
Cu-F1	0.00	-0.21	0.18	-0.01	-0.05	-0.06	-0.21	0.01	0.19
Cu-F2	0.00	-0.17	0.15	-0.02	-0.05	-0.07	-0.19	0.05	0.16
Cu-F3	-0.09	-0.34	0.35	-0.12	-0.11	-0.18	-0.29	0.05	0.36
Cu-F4	0.03	-0.10	0.06	0.02	0.00	-0.01	-0.13	0.02	0.07
Cu-F5	-0.05	-0.49	0.46	-0.08	-0.11	-0.19	-0.41	0.02	0.47
Zn-F1	-0.03	-0.48	0.44	-0.07	-0.08	-0.17	-0.38	0.00	0.44
Zn-F2	0.00	-0.31	0.27	-0.02	-0.05	-0.09	-0.29	0.01	0.28
Zn-F3	0.01	-0.37	0.32	-0.02	-0.04	-0.11	-0.31	-0.01	0.33
Zn-F4	0.06	-0.29	0.21	0.03	0.00	-0.03	-0.26	-0.03	0.22
Zn-F5	0.07	-0.11	0.05	0.06	0.03	0.02	-0.13	-0.01	0.06
碳酸鹽	0.21	0.21	-0.32	0.25	0.20	0.13	0.13	0.05	-0.31
有機物	-0.01	-0.43	0.38	-0.04	-0.09	-0.12	-0.34	-0.02	0.38
TEHM-Cr	-0.06	-0.49	0.46	-0.09	-0.11	-0.20	-0.38	0.02	0.46
TEHM-Fe	0.45	-0.16	-0.16	0.46	0.40	0.26	-0.10	-0.16	-0.15
鐵氧化物	0.56	-0.18	-0.22	0.56	0.51	0.40	-0.08	-0.31	-0.21
TEHM-Mn	0.73	0.18	-0.64	0.76	0.74	0.54	0.17	-0.24	-0.63
錳氧化物	0.70	0.20	-0.64	0.73	0.71	0.54	0.19	-0.25	-0.63
TEHM-Co	0.22	-0.07	-0.09	0.21	0.18	0.14	-0.09	-0.06	-0.08
TEHM-Pb	-0.05	-0.48	0.45	-0.09	-0.10	-0.18	-0.39	0.00	0.46
TEHM-Ni	0.01	-0.29	0.24	-0.01	-0.05	-0.08	-0.26	0.01	0.25
TEHM-Cu	-0.04	-0.46	0.42	-0.08	-0.10	-0.18	-0.40	0.03	0.43
TEHM-Zn	0.02	-0.30	0.24	0.00	-0.03	-0.07	-0.27	0.00	0.25

\*A: specific surface area (m<sup>2</sup>/g), B: d<sub>p</sub><2i m , C: 2i m<d<sub>p</sub><16i m, D: 16i m<d<sub>p</sub><32i m,E: 32 μ m<d<sub>p</sub><63 μ m, F: d<sub>p</sub>>63 μ m

表三 底泥顆粒化學特性及 Pb, Ni, Cu, Zn 在五種鍵結型態分佈的相關性矩陣

	Pb-F1	Pb-F2	Pb-F3	Pb-F4	Pb-F5	Ni-F1	Ni-F2	Ni-F3	Ni-F4	Ni-F5	Cu-F1	Cu-F2	Cu-F3	Cu-F4	Cu-F5	Zn-F1	Zn-F2	Zn-F3	Zn-F4	Zn-F5	碳酸鹽	有機物	鐵氧化物	錳氧化物
Pb-F1	1.00																							
Pb-F2	0.07	1.00																						
Pb-F3	0.85	0.49	1.00																					
Pb-F4	0.60	0.63	0.65	1.00																				
Pb-F5	0.22	0.54	0.29	0.84	1.00																			
Ni-F1	0.20	0.74	0.42	0.73	0.63	1.00																		
Ni-F2	0.92	0.32	0.86	0.84	0.54	0.49	1.00																	
Ni-F3	0.66	0.68	0.81	0.94	0.72	0.78	0.88	1.00																
Ni-F4	0.94	0.19	0.81	0.80	0.51	0.37	0.98	0.80	1.00															
Ni-F5	0.97	0.08	0.80	0.70	0.40	0.27	0.96	0.72	0.99	1.00														
Cu-F1	0.96	0.08	0.81	0.67	0.34	0.29	0.96	0.74	0.97	0.98	1.00													
Cu-F2	0.94	0.07	0.80	0.64	0.27	0.25	0.94	0.71	0.94	0.96	0.99	1.00												
Cu-F3	0.68	0.40	0.91	0.42	0.09	0.35	0.68	0.68	0.60	0.61	0.68	0.68	1.00											
Cu-F4	0.99	-0.02	0.81	0.56	0.19	0.14	0.90	0.62	0.94	0.97	0.97	0.96	0.65	1.00										
Cu-F5	0.53	0.74	0.68	0.95	0.84	0.77	0.79	0.95	0.72	0.62	0.60	0.56	0.50	0.47	1.00									
Zn-F1	0.58	0.71	0.76	0.84	0.57	0.89	0.77	0.94	0.67	0.60	0.63	0.59	0.67	0.51	0.86	1.00								
Zn-F2	0.92	0.36	0.89	0.84	0.53	0.49	1.00	0.89	0.98	0.95	0.95	0.93	0.71	0.90	0.80	0.78	1.00							
Zn-F3	0.86	0.32	0.87	0.75	0.43	0.59	0.93	0.87	0.88	0.87	0.91	0.87	0.80	0.84	0.72	0.85	0.93	1.00						
Zn-F4	0.91	0.27	0.81	0.85	0.57	0.47	0.99	0.85	0.99	0.97	0.95	0.92	0.61	0.90	0.78	0.74	0.98	0.91	1.00					
Zn-F5	0.99	-0.02	0.79	0.59	0.25	0.15	0.91	0.62	0.95	0.98	0.97	0.95	0.61	0.99	0.50	0.51	0.91	0.83	0.92	1.00				
碳酸鹽	-0.01	-0.32	-0.27	-0.09	-0.02	-0.37	-0.07	-0.25	0.01	0.02	-0.01	0.01	-0.36	0.01	-0.15	-0.37	-0.09	-0.30	-0.06	0.04	1.00			
有機物	0.02	0.50	0.14	0.62	0.70	0.71	0.38	0.61	0.27	0.18	0.23	0.23	0.12	0.00	0.65	0.55	0.35	0.36	0.35	0.03	-0.04	1.00		
鐵氧化物	0.00	-0.16	-0.12	0.11	0.36	-0.07	0.08	0.03	0.11	0.13	0.09	0.03	-0.22	-0.01	0.14	-0.11	0.07	-0.02	0.13	0.07	0.31	0.35	1.00	
錳氧化物	-0.18	-0.57	-0.44	-0.50	-0.40	-0.53	-0.39	-0.58	-0.29	-0.21	-0.26	-0.45	-0.17	-0.54	-0.57	-0.39	-0.44	-0.33	-0.14	0.49	-0.33	0.51	1.00	

表四 底泥顆粒化學特性及 Cr, Fe, Mn, Co 在五種鍵結型態分佈的相關性矩陣

	Cr-F1	Cr-F2	Cr-F3	Cr-F4	Cr-F5	Fe-F1	Fe-F2	Fe-F3	Fe-F4	Fe-F5	Mn-F1	Mn-F2	Mn-F3	Mn-F4	Mn-F5	Co-F1	Co-F2	Co-F3	Co-F4	Co-F5	碳酸鹽	有機物	鐵氧化物	錳氧化物
Cr-F1	1.00																							
Cr-F2	0.05	1.00																						
Cr-F3	0.02	0.74	1.00																					
Cr-F4	-0.02	0.90	0.77	1.00																				
Cr-F5	-0.05	0.88	0.52	0.85	1.00																			
Fe-F1	-0.07	0.03	0.12	0.06	0.03	1.00																		
Fe-F2	-0.18	-0.57	-0.58	-0.55	-0.47	-0.15	1.00																	
Fe-F3	0.10	0.53	0.57	0.44	0.43	0.14	-0.08	1.00																
Fe-F4	0.00	0.16	-0.32	-0.08	0.15	0.04	0.28	0.08	1.00															
Fe-F5	-0.13	0.59	0.11	0.46	0.54	0.04	-0.03	0.01	0.69	1.00														
Mn-F1	-0.03	0.85	0.86	0.93	0.74	0.09	-0.50	0.61	-0.16	0.35	1.00													
Mn-F2	-0.30	-0.69	-0.72	-0.67	-0.59	-0.03	0.78	-0.44	0.38	0.03	-0.69	1.00												
Mn-F3	-0.29	-0.60	-0.62	-0.63	-0.55	0.23	0.81	-0.18	0.50	0.06	-0.60	0.91	1.00											
Mn-F4	-0.33	-0.47	-0.63	-0.51	-0.42	0.11	0.74	-0.30	0.63	0.28	-0.55	0.89	0.94	1.00										
Mn-F5	-0.31	0.42	0.27	0.49	0.25	0.28	-0.03	-0.05	0.31	0.72	0.43	0.10	0.15	0.31	1.00									
Co-F1	0.09	0.04	0.08	0.15	-0.05	0.16	0.01	0.33	0.08	0.00	0.22	0.12	0.16	0.06	0.19	1.00								
Co-F2	0.11	-0.01	-0.02	-0.05	-0.07	0.08	-0.05	0.44	-0.07	-0.22	0.13	-0.11	-0.03	-0.14	-0.19	0.52	1.00							
Co-F3	0.10	0.13	0.16	0.11	0.06	0.14	-0.18	0.53	-0.13	-0.20	0.28	-0.23	-0.14	-0.26	-0.13	0.58	0.96	1.00						
Co-F4	-0.15	-0.11	-0.17	-0.14	-0.16	0.09	0.28	0.37	0.22	-0.01	0.02	0.28	0.37	0.30	0.07	0.62	0.86	0.80	1.00					
Co-F5	-0.05	0.03	-0.24	0.03	0.00	0.16	0.07	0.13	0.40	0.27	0.05	0.20	0.26	0.31	0.37	0.55	0.63	0.57	0.74	1.00				
碳酸鹽	-0.07	-0.26	-0.50	-0.31	-0.11	0.28	0.29	-0.21	0.34	0.15	-0.41	0.50	0.50	0.48	-0.01	0.16	0.05	-0.01	0.23	0.18	0.10			
有機物	0.07	0.89	0.53	0.78	0.78	0.19	-0.43	0.40	0.35	0.70	0.70	-0.48	-0.38	-0.27	0.50	0.13	-0.03	0.08	-0.07	0.13	-0.04	1.00		
鐵氧化物	0.00	0.19	-0.25	-0.05	0.17	0.05	0.37	0.27	0.97	0.63	-0.08	0.36	0.52	0.61	0.28	0.14	0.03	-0.03	0.31	0.40	0.31	0.35	1.00	
錳氧化物	-0.35	-0.55	-0.61	-0.54	-0.48	0.09	0.80	-0.28	0.51	0.18	-0.54	0.96	0.96	0.96	0.27	0.17	-0.09	-0.20	0.35	0.28	0.49	-0.33	0.51	1.00

表五 底泥顆粒物理化學特性及八種重金屬在五種鍵結型  
態分佈的主成份分析

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Clay	0.10	0.00	-0.87	0.30
Silt	-0.14	-0.54	-0.16	-0.19
Sand	0.05	0.47	0.72	-0.03
A*	0.08	-0.04	-0.85	0.33
B*	0.05	-0.05	-0.88	0.25
C*	0.04	-0.16	-0.85	0.02
D*	-0.14	-0.42	-0.30	-0.23
E*	-0.03	-0.03	0.63	0.11
F*	0.07	0.47	0.71	-0.03
Cr-F1	0.14	-0.01	0.41	-0.05
Cr-F2	0.09	0.94	0.11	0.16
Cr-F3	0.07	0.81	0.05	-0.42
Cr-F4	0.04	0.97	0.00	-0.05
Cr-F5	0.03	0.88	0.14	0.24
Fe-F1	0.09	0.04	-0.20	0.01
Fe-F2	-0.10	-0.53	-0.51	0.26
Fe-F3	0.53	0.54	-0.18	-0.08
Fe-F4	-0.01	0.03	-0.27	0.88
Fe-F5	-0.16	0.50	-0.21	0.70
Mn-F1	0.21	0.93	-0.08	-0.18
Mn-F2	-0.17	-0.68	-0.47	0.39
Mn-F3	-0.07	-0.61	-0.61	0.41
Mn-F4	-0.18	-0.49	-0.62	0.55
Mn-F5	-0.17	0.43	-0.51	0.27
Co-F1	0.56	0.05	-0.39	-0.03
Co-F2	0.99	-0.11	0.01	-0.03
Co-F3	0.97	0.05	-0.02	-0.12
Co-F4	0.85	-0.18	-0.39	0.20
Co-F5	0.63	-0.06	-0.30	0.40
Pb-F1	0.99	0.03	0.02	-0.09
Pb-F2	-0.01	0.86	0.06	-0.24
Pb-F3	0.80	0.35	0.06	-0.32
Pb-F4	0.60	0.72	0.11	0.12
Pb-F5	0.25	0.72	0.19	0.41
Ni-F1	0.16	0.90	0.00	-0.09
Ni-F2	0.92	0.38	0.10	0.02
Ni-F3	0.64	0.75	0.11	-0.06
Ni-F4	0.96	0.24	0.08	0.07
Ni-F5	0.98	0.12	0.06	0.07
Cu-F1	0.97	0.15	0.08	0.01
Cu-F2	0.96	0.13	0.07	-0.02
Cu-F3	0.63	0.31	0.06	-0.46
Cu-F4	0.99	-0.03	0.04	-0.08
Cu-F5	0.51	0.79	0.15	0.10
Zn-F1	0.53	0.78	0.01	-0.22
Zn-F2	0.91	0.39	0.08	-0.01
Zn-F3	0.84	0.44	0.04	-0.16
Zn-F4	0.92	0.35	0.05	0.07
Zn-F5	1.00	-0.02	0.03	0.00
碳酸鹽	0.05	-0.35	-0.09	0.51
有機物	0.05	0.80	0.06	0.38
TEHM-Cr	0.04	0.98	0.04	-0.01
TEHM-Fe	-0.05	0.34	-0.30	0.84
鐵氧化物	0.09	0.07	-0.35	0.82
TEHM-Mn	-0.16	-0.42	-0.69	0.48
錳氧化物	-0.13	-0.54	-0.63	0.46
TEHM-Co	0.97	-0.09	-0.14	0.07
TEHM-Pb	0.49	0.80	0.13	0.03
TEHM-Ni	0.93	0.34	0.09	0.04
TEHM-Cu	0.70	0.68	0.14	0.04
TEHM-Zn	0.94	0.33	0.06	-0.03
Expl.Var	19.77	16.15	8.13	5.79
Prp.Totl	0.32	0.26	0.13	0.09

Factor Loadings (Varimax normalized)

\*A: specific surface area (m<sup>2</sup>/g), B: d<sub>p</sub><2 μ m , C: 2 μ m<d<sub>p</sub><16 μ m

D: 16 μ m<d<sub>p</sub><32 μ m, E: 32 μ m<d<sub>p</sub><63 μ m, F: d<sub>p</sub>>63 μ m

表六 主成分分析之特徵值

	Eigenval.	% total Variance	Cumul. Eigenval.	Cumul. %
1	25.73	42.19	25.73	42.19
2	12.59	20.64	38.33	62.83
3	8.37	13.72	46.70	76.55
4	3.15	5.16	49.84	81.71

Extraction: Principal components