

東海大學環境科學與工程學系

碩士論文

烏溪流域與彰化沿海地區之重金屬分佈

Distribution of Heavy Metals in Central River Basin and
the Changhua Costal Areas

研究生：黃瀞儀

指導教授：劉雨庭 博士

中華民國 104 年 07 月

東海大學環境科學系碩士班

論文口試委員審定書

環境科學與工程學系碩士班黃瀟儀君所提之論文

題目：中部流域與彰化濱海地區之重金屬分布狀態

Distribution of Heavy Metals in Central River Basin and
Changhua Costal Areas

經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員召集人 鄧裕民 (簽章)

委員

江博能

陳懿文

中華民國 104 年 7 月 30 日

東海大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

環境科學與工程學系黃靜儀君所提之論文

題目：中部流域與彰化濱海地區之重金屬分布狀態

Distribution of Heavy Metals in Central River Basin and
Changhua Coastal Areas

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授：  (簽章)

104年 7 月 31 日

致謝

在就讀研究所期間，謝謝指導教授 劉雨庭老師的悉心指導，使本論文能順利完成，並且在我打破 ICP 的玻璃器材時，老師盡力幫忙，使得我的實驗得以繼續進行下去。口試期間，承蒙 鄒裕民、江博能、陳鶴文教授撥冗指導論文，對於本研究給予許多寶貴建議，感謝各位老師慷慨分享經驗，使本論文得以更加完整。

在兩年的碩士生涯中，感謝文翰學長在研究室的指導與包容，一起去中教大做實驗還常常被我拖累，還幫我報離心機的帳，真是不好意思，但也恭喜你啦。感謝 LG、睿哲學長、宴琳、盈蓁以及曾經幫助我的大學部學弟妹們，大家都在實驗上幫了我很多。感謝一起去彰濱採樣的昆翰、浩銘、傻翔、宥鈞等學長姐們，還有 greens 採樣很辛苦的瀨儀學姊、伯彥學長及賴易德，才能順利取得這麼多樣品。在生活上感謝有土壤家(沂侯、慶錡、德瑋、家齊、鈺琮)、水質家(David 哥、許文志、志哲學長)、環微家(昆翰、浩銘、傻翔、宥鈞)、小郭家(佳崑、至榮、皓暉)、固廢家(歐哥、彥智、佳宏)、環管家(瑋倫、阿聖哥、金剛、彰邑、阿雞、姿吟、于婷、瑩喬)、鄧師家(柏穎、三毛)。還要感謝中興大學鄒老師實驗室的同學們，協助我分析總有機碳，使我的論文得以順利完成；以及教導我統計分析的朋友湘倫及韋齊學長，讓我在最不願面對的數據分析可以如此順利完成。感謝在背後為我加油、鼓勵、督促的朋友們，讓我更有毅力完成研究，謝謝大家。

最後感謝我最親愛的家人對我的支持以及陪伴，我才得以順利完成學業，在此僅將論文獻給最愛的你們。

摘要

隨著全球工業迅速的演進，工商業廢水未經妥善處理就排放至環境中，導致農田、土壤遭受重金屬污染，亦可能因雨水的淋溶作用，將污染物傳輸至地下水體進而污染地下水。烏溪流域內存在中部科學園區、台中工業區、台中精密科技創新園區、台中火力發電廠及傳統工業區等各類型產業；而鄰近彰化沿海的污染源包括彰化濱海工業區、第六套輕油裂解廠及許多小型電鍍廠。重金屬經由廢水進入水體使得水質劣化並累積於土壤底泥(Sediment)中，土壤底泥為沉澱於河床底部之物質，並經由水的流動進行傳輸，當底泥週遭環境改變時，將可能使累積於底泥中之重金屬再度釋出到水體中。

從烏溪北岸至濁水溪南岸，擁有豐富的生態資源，包括大肚溪口及大城濕地，而重金屬通常對水生生物具有顯著的毒性，經由食物鏈之生物累積與生物放大作用而干擾生態系統。美國環保署訂定飲用水最高容許濃度(maximum contaminant level for drinking water, MCL)，若長期暴露於該濃度可能導致肝腎損害、過敏性皮膚炎及高血壓。本篇研究烏溪流域與彰濱沿海為樣區，研究目的為調查烏溪流域與彰化濱海地區之土壤底泥中六大重金屬濃度與分佈；探討土壤基本特性與重金屬濃度之間的相關性。

重金屬濃度與分布之研究結果顯示，筏子河流域(F1~F6)之 Cr、Cu、Zn 與 Ni 均有超過其底泥品質標準上限之問題。烏溪流域(W1-W6)具有較大流量的幫助，在整體的重金屬濃度中僅有少部分土壤底泥樣品超過底泥品質標準上限。而彰濱沿海(CH01~CH20)六大重金屬均有超過其品質標準上限之問題。相關性分析結果得知烏溪流域中土壤底泥中的有機碳含量及無定型鐵鋁含量與 Cr、Ni、Cu、Zn 及 Pb 濃度間有很高的正相關。彰濱沿海之特性因子中 Eh 值及雨量對於六大重金屬含量皆無顯著相關；TOC 與無定型鐵鋁含量對六大重金屬有顯著相關；環境溫度對 Cd、Pb 與 Ni 顯示高度相關；無定型鐵鋁含量及黏粒含量對於 Cu、Ni、Pb、Cr 及 Cd 皆有顯著相關($p \leq 0.05$)；pH 值與 Cd、Ni 及 Pb 呈顯著相關，而與 Cr、Cu 及 Zn 呈負相關。

Keywords：底泥，重金屬，分布，冗餘分析

Abstract

As the development of the global industry rapid, the effluent wastewater release to environment without treatment, and lead to the heavy metal contamination of farmland and soil. The contaminants also may transfer to the groundwater by eluviation. There are many pollution sources distributed across the central river basin and Changhua costal areas. The discharge of wastewater may release heavy metals to the associated water bodies, thereby deteriorate the water quality and accumulation in the sediment, which is the matter that deposited on the bottom of the river, and transmitted via the water flow. When the surrounding environment changes, it may make the heavy metals in sediment re-released into the water.

It is plenty of ecological resources from Wu river north bank to the Zhuoshui river south bank, including Da-Du and Da-Cheng wetland. Heavy metal residues in contaminated habitats may accumulate in aquatic flora and fauna, which may enter into human food chain and result in health problems. USEPA set the maximum contaminant level for drinking water, which long-term exposure to the concentration may cause liver or kidney damage, allergic dermatitis and high blood pressure. The objective of this study is to survey the distribution of heavy metals in the sediment around central river basin and Changhua costal areas, and to discuss the relationship between soil characteristics and heavy metals concentration.

The result of heavy metal distribution shows that Fazih River contained higher amounts of Cu, Zn and Ni. The levels of such metals exceeded the top limits of sediment quality criteria. Due to the relatively higher flow rate in the Wu River, the heavy metal contents were generally lower than the top limits of sediment quality criteria. At Chang-hua costal area, the heavy metal contents were generally lower than the top limits of sediment quality criteria. The result of correlation analysis, at Wu river exhibited a significantly correlation between TOC and Cu, Zn, Ni, Pb, and Cr. Amorphous Fe and Al also have correlation with Cu, Zn, Ni, Pb, and Cr. At Chang-hua costal area, Neither Eh value and rainfall have correlation with Cu, Zn, Cd, Ni, Pb and Cr. TOC have correlation with that of Cu, Zn, Cd, Ni, Pb, and Cr. Temperature have correlation with Cd, Ni, and Pb. Cu, Ni, Cr, Cd and Pb exhibited the strong correlation with amorphous Fe and Al. pH value exhibited the positive correlation with Cd, Ni, and Pb, but negative correlation with Cr, Cu, and Zn.

Keywords : sediment, heavy metals, distribution, redundancy analysis

目 錄

一、 前言：	1
二、 文獻回顧：	4
2.1 重金屬污染之重要性	4
2.2 重金屬之物種	4
2.3 台灣地區重金屬污染	6
2.3.1 台灣地區重金屬污染來源與危害	6
2.3.2 台灣地區重金屬污染分佈	10
2.4 六大重金屬的管制標準	13
2.5 土壤對重金屬吸附之影響因子	14
2.5.1 pH 值	14
2.5.2 氧化還原電位(Eh 值)	15
2.5.3 土壤質地	16
2.5.4 降雨量	16
2.5.5 總有機碳	17
2.5.6 無定型鐵鋁含量(amorphous Fe and Al)	17
2.6 重金屬與土壤特性之相關性	18
2.7 重金屬與土壤基本特性因子之統計分析	19
三、 材料方法：	20
3.1 實驗設計	20
3.2 樣品採集	21
3.3 土壤與底泥前處理	23
3.4 土壤基本特性	23
3.4.1 pH 值	23
3.4.2 氧化還原電位	24
3.4.3 土壤質地分析	24

3.4.4 總有機碳含量	26
3.4.5 無定型鐵鋁萃取	27
3.5 王水消化法	28
3.6 六大重金屬分析	28
3.7 冗餘分析(Redundancy analysis, RDA)	29
四、 結果與討論：	31
4.1 土壤底泥之特性分析	31
4.2 土壤底泥中六大重金屬分析	40
4.2.1 烏溪流域	40
4.2.2 彰濱沿海	44
4.3 土壤底泥之六大重金屬與土壤特性因子之統計分析	48
4.3.1 六大重金屬含量與土壤特性因子之相關性	48
4.3.2 六大重金屬含量與土壤特性因子之冗餘分析	51
五、 結論	55
附錄 56	
附錄一、分析工作之品保/品管	56
附錄二、附圖與附表	57

圖目錄

圖 1	pH 值與氧化還原電位對土壤中 Cr 型態之影響.....	5
圖 2	pH 值與氧化還原電位對土壤中 Pb 型態之影響.....	6
圖 3	實驗架構圖.....	20
圖 4	烏溪流域採樣點示意圖.....	21
圖 5	彰濱地區採樣點示意圖.....	22
圖 6	美國農業部(USDA)之土壤質地分類三角圖.....	25
圖 7	總碳(Total Carbon, TC)分析流程.....	26
圖 8	彰濱沿海土壤底泥之 pH 值.....	32
圖 9	彰濱沿海土壤底泥之 Eh 值.....	33
圖 10	烏溪流域土壤底泥之總有機碳含量.....	34
圖 11	彰濱沿海土壤底泥之總有機碳含量.....	34
圖 12	黏粒含量與總有機碳濃度之相關性.....	35
圖 13	烏溪流域土壤底泥之無定型鐵鋁含量 (a) 2014 年 3 月 (b) 2014 年 6 月 (c) 2014 年 9 月 (d) 2014 年 11 月與 (e) 2015 年 1 月.....	36
圖 14	彰濱沿海土壤底泥之無定型鐵鋁含量(a) 2014 年 1 月 (b) 2014 年 2 月與 (c) 2014 年 3 月.....	38
圖 15	彰濱沿海土壤底泥之無定型鐵鋁含量(a) 2014 年 4 月 (b) 2014 年 5 月與 (c) 2014 年 6 月.....	39
圖 16	烏溪流域土壤底泥中重金屬(a) Cr (b) Cd 與(c) Zn 之含量.....	42
圖 17	烏溪流域土壤底泥中重金屬(a) Ni (b) Cu 與(c) Pb 之含量.....	43
圖 18	彰濱沿海土壤底泥中重金屬(a) Cr (b) Cd 與(c) Zn 之含量.....	46
圖 19	彰濱沿海土壤底泥中重金屬(a) Ni (b) Cu 與(c) Pb 之含量.....	47
圖 20	烏溪流域六大重金屬與土壤特性因子之 RDA 分析結果.....	52
圖 21	彰濱沿海六大重金屬與土壤特性因子之 RDA 分析結果.....	54

表目錄

表 1 台灣地區主要重金屬污染來源	9
表 2 台灣地區重金屬土壤含量等級區分表 (環保署, 土壤及地下水污染整治法 公布施行後過渡時期執行要點)	11
表 3 台灣地區土壤重金屬含量列為第五級地區與超過土壤污染管制標準面積分 佈	12
表 4 土壤、底泥及水體中重金屬含量標準	13
表 5 烏溪流域六大重金屬與物化性質之皮爾森相關係數	49
表 6 彰濱沿海六大重金屬與物化性質之皮爾森相關係數	50
表 7 土壤特性因子經 RDA 顯著性測驗結果	52
表 8 土壤特性因子經 RDA 顯著性測驗結果	54



一、 前言：

土壤在生態系統中扮演重要的角色，除了提供人類農業發展之外，更是動植物生存與演化的棲地。隨著全球工業迅速的演進，工商業廢水未經妥善處理就排放至環境中，重金屬污染已經成為現今干擾河川與湖泊生態系之正常運作的重要問題之一。而台灣因東西向地形較為窄短，使得汲水時間少，以及日漸嚴酷的溫室效應等氣候問題，實為一個水資源缺乏的國家。若將未經妥善處理的廢水作為灌溉用水使用，可能導致農田、土壤遭受重金屬污染，亦可能因雨水的淋溶作用，將污染物傳輸至地下水體進而污染地下水(李，2003)。土壤中重金屬的移動性與生物有效性，主要則受到重金屬物種及其吸附與脫附特性所影響，藉由溶解、沉澱及氧化還原等方式改變重金屬的移動性與生物有效性。這些累積於表層土壤之重金屬不但會對水生動植物造成危害，並可能經由食物鏈之累積進入人體或其他生物中，使我們的糧食安全與健康上出現嚴重的威脅。

而台中地區半導體製程技術發展演進，在不斷追求元件效能提升的需求下，摻雜金屬離子，如：砷(Arsenic)、鉻(Chromium)、鋁(Aluminum)、鎘(Cadmium)、硒(Selenium)、鎵(Gallium)及鋅(Zinc)的薄膜成長技術，導致製程中衍生的副產物或是殘留化學物質複雜度與日俱增，半導體製程技術發展已是現今重要的議題。然而，金屬元素的應用使得放流水的基質更加複雜，其中加入的金屬元素亦可能排放至附近的水域。有許多污染源位於烏溪流域與彰化濱海地區，包括台中科學園區、台中工業區、台中精密科技創新園區、台中火力發電廠、彰化濱海工業區、第六套輕油裂解廠及許多傳統工業區；彰化縣內亦有上百間小型電鍍工廠，特別是分布在彰化市與和美鎮，判斷該地區

土壤重金屬污染之主要來源應為電鍍工業。

上述污染源所排放的廢水可能包含鉻(Chromium)、鎘(Cadmium)、銅(Copper)、鉛(Lead)、鎳(Nickel)及鋅(Zinc)，於本篇將這些重金屬元素統稱為六大重金屬。重金屬經由廢水進入水體使得水質劣化並累積於土壤底泥(Sediment)中，且存在著被生物體所吸收之風險。土壤底泥為沉澱於河床底部之物質，並經由水的流動進行傳輸，沈積於河床底部的底泥是由泥土、砂、有機物及其他礦物所構成，當底泥週遭環境改變時，將可能使累積於底泥中之重金屬再度釋出到水體中。

從烏溪北岸至濁水溪南岸，彰化縣沿岸擁有豐富的生態資源，包括漢寶與大城濕地、河口自然保護區及野生動物保護區。而重金屬通常對水生生物具有顯著的毒性，進而經由食物鏈之生物累積與生物放大作用危害到生態系統(Dragos V Nica et al., 2012)。美國環保署訂定飲用水最高容許濃度(maximum contaminant level for drinking water, MCL)，若長期暴露於該濃度將導致可能導致腸胃不適、肝腎損害、過敏性皮膚炎及高血壓，甚至可能會使幼兒的身體及智力發育遲緩，重金屬不僅使自然生態受到干擾，進而影響到人類的健康(USEPA, 2009)。而土壤底泥中的重金屬會以不同溶解程度的形態存在，因此土壤底泥性質如：pH 值之變化、有機碳含量、土壤質地、鐵氧化物等等皆會改變重金屬在土壤底泥中的溶解度，改變重金屬之移動性及生物有效性(Peng et al., 2009)。

本篇研究以台中筏子溪與烏溪流域往南延伸至彰化縣海岸為樣區，為了評估上述六大重金屬(Cr、Cd、Cu、Zn、Ni、Pb)之排放對於烏溪流域與彰化濱海地區之環境影響，本篇研究的目的有：(一) 調查烏溪流域與彰化濱海地區之土壤底泥中六大重金屬濃度與分佈；(二)

探討土壤基本特性：如 pH 值、氧化還原電位、土壤質地、總有機碳及無定型鐵鋁含量，與重金屬濃度之間的相關性。



二、 文獻回顧：

2.1 重金屬污染之重要性

重金屬污染已經成為現今干擾河川與湖泊之正常運作的重要問題之一。底泥是重金屬最大的來源，不僅為污染物的載體，亦是水生系統中潛在的二級污染源，底泥在重金屬之傳輸扮演著重要的角色。重金屬隨著環境因子的改變，以游離態的形式進入水體中，並藉由物理化學作用、吸附、沈澱、化學錯合、及離子交換的作用沈積於河川底部形成底泥(Yu, 2001)。然而，重金屬無法永久被固定於底泥當中，已沈降於底泥的重金屬物種亦會因底泥環境因子的改變，使其分解並再進入水體；重金屬亦可能透過工業廢水、事業廢棄物、空氣落塵等媒介分佈於土壤、底泥及水體環境之間。重金屬若留在被污染的棲地中可能會累積於微生物、水生動植物中，進而透過食物或飲用水進入人的食物鏈，對人體健康造成危害(Peng et al., 2009; Sin et al., 2001)。又因重金屬在環境中不易處理且對生物具有毒性，重金屬污染為目前亟需關注的環境問題。亦有研究指出，因長期污染，重金屬經三個月之脫附實驗後仍未達平衡，因此欲將重金屬自底泥中依賴自然界的力量移除較為不易(刁，2003)。

2.2 重金屬之物種

重金屬會因不同溶解程度而以不同形態存在於土壤、底泥或水體中，包括：與無定型物質發生錯合反應；吸附在黏土表面或鐵錳氫氧化物上；以土壤溶液中的溶解狀態、有機及無機組成的可交換

型態；或者以晶格組成型式以及不溶解的沉澱型式存在(廖，2012; Peng et al., 2009; Aydinalp and Marinova, 2003; Heike, 2004)。

於本研究之六大重金屬中，如：Cr 在土壤中主要以 Cr^{3+} 及 Cr(VI) 的型式存在，其移動性可能依土壤性質而改變，在低 pH 值環境及高氧化還原電位的環境中，主要以 Cr^{3+} 的型式存在，其化學性質較為穩定，多吸附於土壤表面上；而在高 pH 值與好氧環境中，則主要以 Cr(VI) 的形式存在(如圖 1)，Cr(VI) 因具有強氧化力，與有機物質於酸性條件下易發生劇烈反應，對生物體易產生較大毒性影響，因此經常將 Cr(VI) 列入環境保護相關法規之管制項目。另外，Pb 在鹼性環境中易產生沉澱，形成不易溶解之物種(如圖 2)。

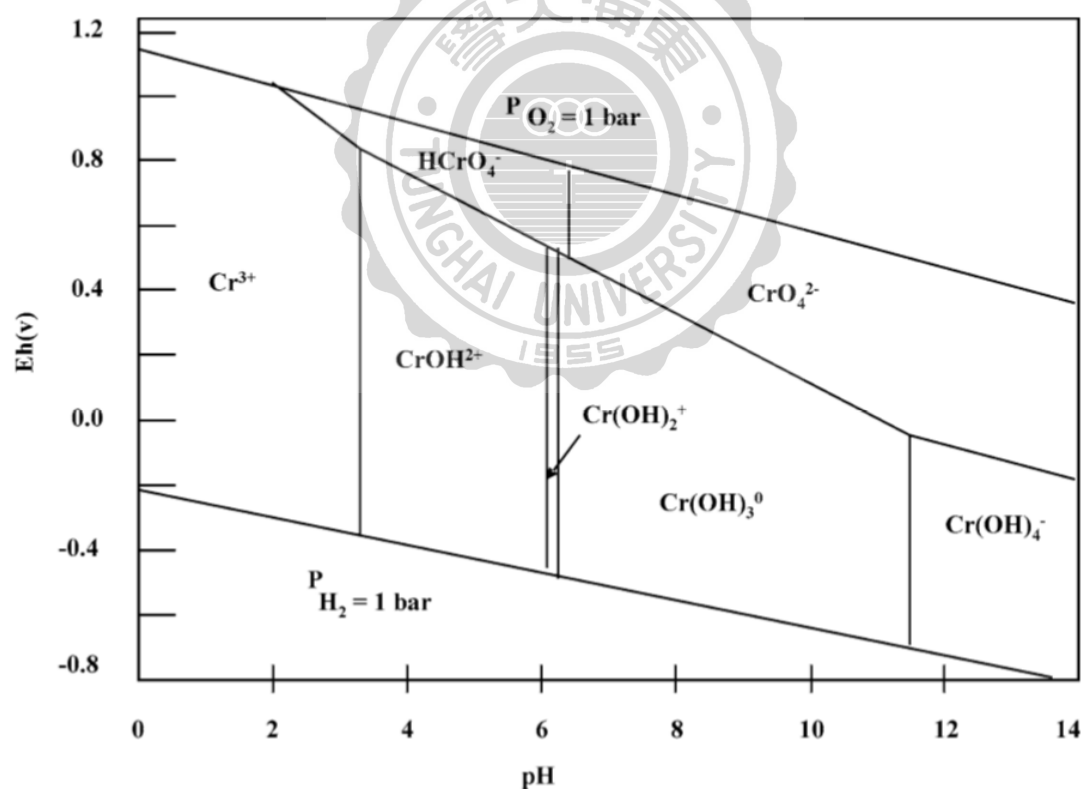


圖 1 pH 值與氧化還原電位對土壤中 Cr 型態之影響(Heike, 2004)

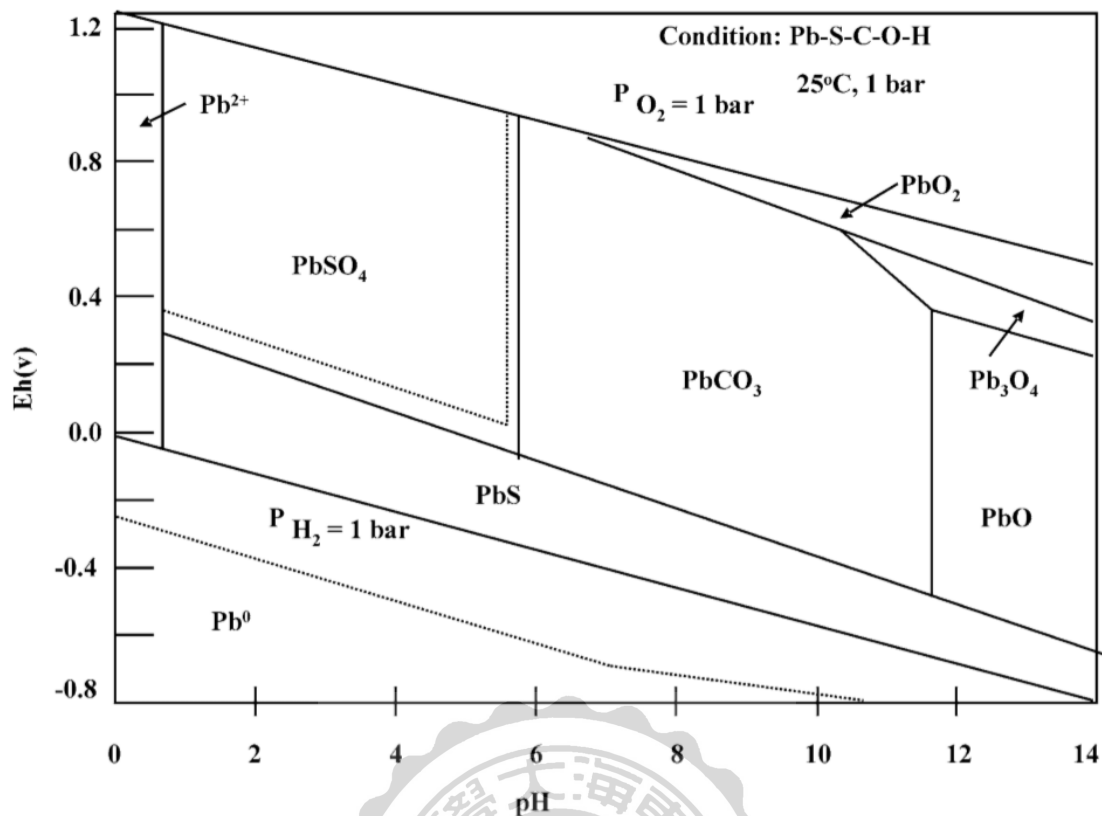


圖 2 pH 值與氧化還原電位對土壤中 Pb 型態之影響(Heike, 2004)

2.3 台灣地區重金屬污染

2.3.1 台灣地區重金屬污染來源與危害

除了土壤母質以外，工商業廢水及有害事業廢棄物是台灣農田與土壤污染的主要來源。由於重金屬的高累積性與低移動性且不易被微生物分解，不像有機化合物會在土壤中慢慢地分解，在重金屬含量不高的情況下，可以透過沉澱、吸附或氧化還原等作用降低溶解度。

土壤重金屬污染的主要元素有 Cd、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 等，台灣地區主要重金屬污染來源以工業污染為最大宗，包括電鍍及印刷工業排放未經處理之工業廢水污染農田灌溉用水，部分則是因礦業之開採及冶煉過程排放洗礦水以及交通業排放廢氣所導致，或是因農業使

用之農藥含 Cd 所引起之污染，有關台灣地區主要重金屬污染來源如表 1 所示 (羅，1997)。

Cr 主要污染來源為電鍍工業、鋼鐵製造業、顏料製造業、皮革業等。Cr 的暴露來自於食入含有 Cr 的食物及飲水或吸入工作場所中含有鉻的空氣。高濃度的 Cr(VI) 會傷害鼻子及造成癌症，食入後也會造成貧血或腸胃的損傷。Cr 雖是一種人體必需營養素，但國際癌症研究總署(Internation Agency for Research on Cancer, IARC)與美國環保署也確定 Cr⁶⁺ 為人類已知的致癌物質。吸入過量 Cr(VI) 會導致肺癌疾病；毒性物質及疾病登記署亦有研究發現人與動物喝下含有 Cr(VI) 的飲水會增加罹患胃部腫瘤的機會(ATSDR, 2008)。而 Cr³⁺ 對人體則毒性較低或無毒；總鉻在土壤中較不易溶出，大多吸附於礦物表面，於土壤中主要以 Cr³⁺ 及 Cr(VI) 的形態存在，在低 pH 值及高還原電位的環境下，則以 Cr³⁺ 的形態存在。

Cu 動植物而言，是必需的營養元素，其常見污染來源有電鍍工業、採礦、石油冶煉，或來自河川及水庫中大量繁殖藻類之硫酸銅滅藻劑，因其過度的使用使得水體及土壤遭受污染。人體缺乏 Cu 會引起貧血、毛髮及骨骼異常。但如果攝入過量的 Cu，可能導致腸胃不適，嚴重可能導致肝臟與腎臟功能損壞、造成中樞神經問題等。

Zn 為動植物所需之微量元素，其常見污染來源有電鍍工業、鋼鐵製造業、造紙業、染料業、焊接業、木材防腐業等。過量攝取 Zn 會降低銅的吸收，造成血銅濃度下降導致銅缺乏症，體重減輕、免疫力受損等症狀；亦會對泌尿系統造成損害。Zn 進入人體之途徑包含食入性中毒會引起噁心、嘔吐、腹痛等症狀，亦可能吸入氯化鋅(Zinc Chloride)的煙霧微粒造成咳嗽、呼吸困難，嚴重者會變成呼吸窘迫症，

甚至死亡；或是因皮膚接觸鋅化合物。

Ni 常見污染來源為電鍍工業、焊接業、電池及機械零件製造業。Ni 會對有過敏體質者造成過敏性皮膚炎，常見之鎳中毒可能為吸入有機鎳或誤飲遭受 Ni 污染的飲水或透析用水被污染所致之鎳中毒，症狀包含噁心、嘔吐、頭痛、頭暈、失眠並且伴隨血糖及尿糖上升，嚴重者會感到胸悶、呼吸困難、心悸及視力模糊甚至死亡。而人體中若累積高濃度的 Ni，會引起肺部、鼻腔及骨骼的致癌率(湯，2007)。

Cd 主要的污染來源有電鍍工業、採礦、金屬冶煉、含磷肥料等。其危害包含急性和慢性疾病，如痛痛病、腎功能損壞等。IARC 將 Cd 及其化合物列為人體致癌物質，Cd 容易累積在腎、肝臟，造成臟器損壞，或是引起軟骨症。日本富山縣發生的鎘中毒之痛痛病(Itai-Itai disease)，當地居民攝食過量的鎘米及受污染海鮮後影響腎臟功能，進而阻礙鈣的吸收，導致體內鈣質流失造成骨質軟化與骨折等現象，嚴重者將會致死。若攝食大量的 Cd 所引起的急性中毒，其症狀包含，嘔吐、頭暈與腹瀉等(Woodwell, 1967)。

Pb 主要污染來源多為蓄電池、添加於汽油中四乙基鉛的製造、彈藥等產業所造成。若環境中含過量的 Pb，經由食入或呼吸進入人體會導致鉛中毒，傷害神經系統、造成貧血、肝炎、腎臟損害及生殖系統等。無機鉛及其化合物皆被 IARC 列為人體可能致癌物。鉛對神經系統之危害甚大，因其與神經系統之親和力較強，也會影響到胎兒的發育而導致流產或畸形等症狀。鉛中毒可分三階段，初期鉛中毒發生於微量的 Pb 減少血紅素的合成造成貧血；中期症狀則是出現更加明顯的貧血、中樞神經系統受損並伴隨著頭痛、記憶力喪失等症狀；第三階段的症狀則會引起腎臟損害，嚴重者可能死亡(許等人，2009)。

表 1 台灣地區主要重金屬污染來源 (羅，1997)

重金屬類別	污染來源	說明
鎘(Cd)	工業	電鍍材料、油漆材料、電池、汽油及輪胎。
	農業	磷肥中含鎘。
鉻(Cr)	工業	金屬鍍鉻、顏料、染料、油漆、墨水、媒染劑、玻璃及皮革。
	工業	電線、電子、印刷電路板及金屬電鍍工業。
銅(Cu)	農業	殺蟲劑(硫酸銅及鹼性碳酸銅等無機化合物。)
	工礦業	開採及冶煉過程。
鉛(Pb)	交通業	汽機車排放含鉛廢氣。
鎳(Ni)	工業	合金、塗料、化妝品及電池。
	電鍍業	鍍鋅管。
鋅(Zn)	印刷業	油墨、油漆及影印紙。

2.3.2 台灣地區重金屬污染分佈

台灣早期在經濟快速成長的過程中，對於各種產業活動所產生的污染未加以管制，因此發生台灣局部地區的農田灌溉用水時常遭受工業廢水污染，環保署自 72 年起由中央環保機關以種植食用農作物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。調查項目包含土壤中的 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、Zn 及 Cu 八種重金屬含量。並針對調查結果將土壤中之重金屬含量程度分 5 級(表 2)，而土壤重金屬含量達第 5 級之地區，合計面積約一千多公頃，污染地區主要受到 Cu、Zn、Ni 及 Pb 的污染。受污染之詳細地區如表 2-3 所示，前人所整理出調查資料指出彰化地區之土壤重金屬污染情況最為嚴重，主要集中在彰化市、鹿港鎮及和美鎮(李，2003)。

方等人(2001)於彰化污染較嚴重的區域主要為東西二圳、八堡圳與荊仔埤等灌溉區進行土壤、農作物與水質之污染現況調查，結果顯示東西二圳過溝子制水門中下游等採樣點均有重金屬 Cu、Cr 及 Ni 污染。

行政院環境保護署因應執行土壤污染防治工作之需要，訂定行政指引—「重金屬土壤含量等級區分表」，如表 2 所示，其中第一級表示土壤中缺乏銅、鋅等農作物生長所需元素，尚無重金屬污染問題。第二級為土壤重金屬含量低於環境背景值，無重金屬污染問題。第三級表示土壤重金屬含量之環境背景值。第四級則應確認重金屬之污染來源，並應加強污染源之調查與管制。第五級則表示土壤中有外來重金屬之介入，應列入土壤污染防治地區，並進行土壤污染整治事宜(陳，1998)。

表 2 台灣地區重金屬土壤含量等級區分表 (環保署，土壤及地下水污染整治法公布施行後過渡時期執行要點)

單位：mg kg⁻¹

重金屬項目	第一級	第二級	第三級 (背景值)	第四級 (觀察值)	第五級	
					監測值	農地優先整治值
1.As(砷)		表土<4	4-9	10-60	>60	>60
		裡土<4	4-15	16-60	>60	>60
2.Cd(鎘)		<0.05	0.05-0.39	0.40-10*	>10	>10*
3.Cr(鉻)		<0.10	0.10-10	11-16	>16	>40
4.Cu(銅)	<1	1-11	12-20	21-100	>100	>180
5.Hg(汞)		<0.10	0.10-0.39	0.40-20*	>20	>20*
6.Ni(鎳)		<2	2-10	11-100	>100	>200
7.Pb(鉛)		<1	1-15	16-120	>120	>200
8.Zn(鋅)	<1.5	1.5-10	11-25	26-80	>80	>300

註：1. As 及 Hg 為全量，Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 為 0.1N 鹽酸抽出量；重金屬含量以三位有效數字表示為原則。

2. *栽種稻米之農地土壤，其鎘與汞含量大於 1mg/kg 時，應比照第五級地區，進行監測與整治事宜。

表 3 台灣地區土壤重金屬含量列為第五級地區與超過土壤污染管制標準面積分佈(李，2003)

縣市別	重金屬第五級面積(公頃) [*]	主要重金屬種類與面積(公頃) ^{**}	超過土壤污染管制標準面積(公頃) ^{***}
台北市	18	銅 3、鋅 12、砷 3、汞 2	0
高雄市	4	鉛 1、銅 2、鋅 1	0
基隆市	6	鉛 3、鋅 2、鉻 1	0
台北縣	79	鉛 7、銅 40、鋅 55、鉻 19	1.62
桃園縣	121	鉛 5、銅 59、鋅 44、鉻 9、鎳 1、鎘 3	11.46
新竹縣	0		0
新竹市	59	鉛 5、銅 28、鋅 48、鉻 22、鎳 16、砷 1、汞 2	27.54
苗栗縣	7	鋅 7	0.55
台中縣	33	銅 2、鋅 29、鉻 6、鎳 2	6.43
台中市	11	鉛 3、銅 5、鋅 1、鉻 6	0.3
彰化縣	546	鉛 4、銅 242、鋅 466、鉻 142、鎳 60	184
南投縣	6	鉛 5、鋅 1	0.39
雲林縣	1	鋅 1、鎘 1	0
嘉義縣	0		0
嘉義市	13	鋅 7、鉻 7	0
台南縣	29	鉛 5、銅 1、鋅 25、鉻 2	5.33
台南市	32	鉛 10、銅 10、鋅 25、鉻 1、鎳 1	1.86
高雄縣	41	鉛 7、銅 2、鋅 38、鉻 1	6.02
屏東縣	16	鉛 1、銅 1、鋅 13、鉻 1	6.9
宜蘭縣	0		0
花蓮縣	1	鋅 1	0
台東縣	1	銅 1	0
澎湖縣	0		0
合計	1024	鉛 57、銅 415、鋅 785、鉻 218、鎳 80、砷 4、汞 4	252.45

*統計資料係指截至 90 年 8 月 31 日，各地方環保機關進行土壤重金屬含量調查結果列為第五級之累計面積數。

**本表面積係以一公頃為調查單位估算而得，內涵農田道路、房舍與水路等面積。

***超過土壤污染管制標準濃度面積係環保署 91 年 6 月 10 日新聞稿資料。

2.4 六大重金屬的管制標準

表 4 為台灣行政院環保署訂定之土壤、底泥及水體中重金屬含量標準，包括：土壤監測標準、食用作物農地土壤監測標準、底泥品質標準上限值、海洋環境品質標準、放流水與飲用水標準(行政院環保署)；以及美國環保署訂定之飲用水最高容許濃度(Maximum contaminant level, MCL)與持續累積濃度(Criterion continuous concentration, CCC)，持續累積濃度的定義為淡水中之最高容許濃度，可使水棲生物系統長期暴露卻不會引發無法恢復的效應。

表 4 土壤、底泥及水體中重金屬含量標準

	Cr	Ni	Cu	Cd	Zn	Pb
	mg L ⁻¹					
飲用水 ^a	0.05	0.1	1.0	0.005	5.0	0.01
放流水 ^b	2.0	1.0	3.0	0.03	5.0	1.0
灌溉用水 ^c	0.1	0.2	0.2	0.01	2.0	0.1
海洋環境	0.05(Cr(VI))	-	0.03	0.01	0.5	0.1
最高容許濃度	0.1	0.1	1.3	0.005	5	0.015
持續累積濃度	0.011	0.052	-	0.00025	0.12	0.0025
	mg kg ⁻¹					
土壤 ^d	175	130	220	10	1000	1000
食用作物農地	-	-	120	2.5	260	300
底泥(上限值) ^e	233	80	157	2.49	384	161
底泥(下限值) ^e	76	24	50	0.65	140	48

- ^a 飲用水質標準係根據行政院環境保護署環署毒字第 1030001229 號令修正發布第三條條文之相關規定。
- ^b 放流水水質監測標準係根據行政院環境保護署環署水字第 1030005842 號令修正發布第二條條文之相關規定。
- ^c 灌溉用水水質標準係根據行政院農業委員會公告農林字第 0920031524 號之相關規定。
- ^d 土壤監測標準與食用作物農地土壤監測標準係根據行政院環境保護署環署土字第 1000008485 號令訂定發布全文共六條，監測標準係指基於土壤(地下水)污染預防目的，所訂定須進行土壤污染監測之污染物濃度。管制標準係指為防止土壤(地下水)污染惡化，所訂定之土壤污染管制限度。
- ^e 底泥品質指標為根據土壤及地下水污染整治法中底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法，底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法係根據行政院環境保護署環署土字第 1000116349 號令訂定發布全文七條。底泥品質指標值之上、下限值主要係以人體健康及生態安全上之意義作為考量，參考國外長期研究調查結果，經統計後取可能對敏感底棲小型生物造成最大影響機率五十%及二十五%的濃度分別訂出上、下限值。

2.5 土壤對重金屬吸附之影響因子

隨著環境因子的改變，重金屬以游離態形式進入水體中，並藉由物理沉降、吸附、生物濃縮、化學錯合、及離子交換的作用沈積於河川底部或砂石上。然而重金屬無法永久被固定於底泥當中，一旦河川的物化性質改變，這些重金屬會再度進入水體中造成危害，因此必須了解哪些環境因子會影響重金屬之移動性，才能有效評估其對於人類及生態環境之風險，下列幾項為影響重金屬於土壤中之移動性的重要因子。

2.5.1 pH 值

重金屬離子的氫氧化物和碳酸鹽大部分為難溶性鹽，而土壤 pH 定土壤溶液中氫氧根(OH⁻)及碳酸根(CO₃²⁻)離子的濃度，也因此影響

重金屬離子的溶解和沉澱作用。當 pH 值升高時，重金屬離子容易生成氫氧化物或碳酸鹽沉澱，重金屬在土壤中之移動性相對降低；當 pH 值降低時，則會增加金屬陽離子由土壤中溶解出來（廖，2012）。因此重金屬會受到土壤中 pH 值的變化而改變金屬的物種型態、並且影響吸附於礦物表面金屬之溶解度、及生物有效性，由此可見 pH 值的變化在土壤中扮演著重要的角色。

2.5.2 氧化還原電位(Eh 值)

當土壤處於還原狀態時($Eh < 0$)，硫酸根還原作用的進行，使得重金屬離子形成硫化物沉澱，降低重金屬離子在土壤溶液中的濃度，移動性相對降低。一般土壤氧化還原電位在+340mV 左右時氧氣尚足，至+225mV 時硝酸根(NO_3^-)開始還原，+200mV 時錳離子(Mn^{2+})開始還原，+120mV 時鐵離子(Fe^{2+} or Fe^{3+})開始還原，而-150mV 時硫酸根(SO_4^{2-})開始還原。當土壤底泥中之 Eh 值上升時，金屬硫化物的氧化速率與有機化合物的降解速率亦將相對增加，進而加速吸附與錯合在土壤表面的重金屬的釋放(Calmano et al., 1993)。而間接影響土壤中氧化還原狀況的主要因素包含下列四項(陳，2008)：

- (1) 土壤中易分解之有機質含量：有機質含量較多時，則氧氣消耗量較大，土壤形成厭氧造成氧化還原電位下降。
- (2) 土壤的通氣狀況：當土壤孔隙大、水分含量較低且通氣良好時，土壤為好氧狀態，氧化還原電位上升；而排水不良之土壤中，由於土壤中氧濃度較低，氧化還原電位則下降。
- (3) 植物根系的代謝：植物根系可分泌各種有機酸，可間接影響土壤的氧化還原反應。

- (4) 易氧化或易還原的無機物質含量：易氧化的無機物較多時，耗氧量較大，使氧化還原電位降低；而在易還原的無機物較多時，則易形成氧化狀態使得氧化還原電位升高。

2.5.3 土壤質地

土壤質地是指底泥中大小粒子之分佈，如用土壤系統區分，則為砂粒、粉粒及黏粒含量之相對比例。砂粒、粉粒與黏粒，其粒子粒徑分佈範圍分別為 0.05-2 mm、0.002-0.05 mm 與 < 0.002 mm，其中砂粒粒徑大、比表面積小、陽離子交換容量少，因此吸附重金屬的能力亦較低；相較於黏粒粒徑極為細小，因此比表面積較大，可吸附較多重金屬，黏粒之主要礦物成分為石英(Quartz)、赤鐵礦(Hematite)、水礬石(Gibbsite)及矽酸鋁鹽(Aluminosilicates)的複雜礦石—高嶺石(Kaolinite)、伊來石(Illite)及蒙特石(Montmorillonite) (USDA, 1999; 陳, 2008)。

土壤黏粒含量愈高，陽離子交換能力(cation exchange capacity, CEC)及可吸附重金屬的比表面積也愈大。因此，吸附重金屬的能力亦愈強，而土壤溶液中的重金屬濃度相對減低，造成重金屬移動性降低；一般而言，土壤底泥中的黏粒含量增加至某一程度，可增進水分與養分的儲存。

2.5.4 降雨量

降雨量及強度決定土壤滲濾(infiltration)水量的多寡，滲濾水量愈大，重金屬離子在土壤剖面中向下移動的可能性愈大。土壤溶液中的

重金屬離子也可隨著蒸發散的水分流動，而由土壤剖面下方往上移動，在蒸發散大的乾旱地區，重金屬離子愈易往上移動甚至累積於表土(李，2003)。

2.5.5 總有機碳

土壤中的有機質包含活生物體及死生物體，死生物體則分為未被分解與部分分解，也有完全被轉換成土壤有機質特有結構者。土壤有機質為儲存土壤養分的寶庫，其鍵鏈常有利土壤粒團的形成，許多化學的官能基使其陽離子或陰離子交換容量大於一般粘土礦物。有機質含量較高之土壤可提供較多位置使重金屬離子發生專一性吸附，土壤有機質之重要特性為具有高陽離子交換容量，土壤有機質含量愈高，陽離子或陰離子交換容量愈大。因此，吸附重金屬的能力也愈強，使得土壤溶液中的重金屬濃度相對減低，使得移動性降低。而土壤中可溶性有機碳能降低土壤表面的金屬吸附的金屬陽離子轉變為可溶性有機金屬錯合物，相較金屬陽離子可能優先被吸附於土壤表面(Guisquiani et al.,1998)。而土壤黏粒含量和有機質含量間，具有一定的相關性，黏粒含量較高的土壤中，適合累積較多的有機質(陳，2008)。

2.5.6 無定型鐵鋁含量(amorphous Fe and Al)

除了 Si 和 O 之外，地殼中最多的兩個元素為 Fe 跟 Al。在土壤及底泥中含有豐富的鐵氧化物存在，尤其以水鐵礦(Ferrihydrite)、赤鐵礦(Hematite)與針鐵礦(Goethite)為較常見之鐵氧化物，其結構由周圍的六個氧原子包圍一個鐵原子組成八面體結構。其表面之可變電荷

對重金屬離子具有專一性吸附。除了結晶性好的礦物外，鐵鋁礦物也可能具有無定形的排列結構，其離子間的結合未能依一定順序。無定型的礦物因為具有比結晶性良好礦物更高的比表面積，所以表面可吸附重金屬的位置也相對的多，導致無定型礦物為土壤中固定重金屬的重要成分之一。

2.6 重金屬與土壤特性之相關性

土壤特性中，pH 和 Eh 值可直接改變重金屬的溶解度，進而改變重金屬在底泥中之分布。土壤特性亦可說明土壤對重金屬吸附的潛力，有機質之濃度可用來評估 Cr、Cu 之移動性；相反地，Cd 與 Zn 之移動則取決於土壤 pH 值與 Cd、Zn 之移動相(Kalbitz and Wennrich, 1998)。前人之研究中發現，有機質與黏粒含量之間的關係為正相關，但與 pH 值沒有太大相關性 (Peng et al., 2009; Dragović et al., 2008)。在前人(李，2003)研究結果發現 pH 值對 Cu、Zn 及 Pb 在不同土壤中之化學型態分佈影響並不顯著；土壤有機質移除則會造成有機態及殘餘態 Cu、Zn 及 Pb 轉移至鐵錳氧化態及碳酸鹽態。而在胡伯瑜(1999)之研究中，五種台灣地區具代表性之土壤在相同模擬天然條件下，重金屬之脫附能力主要受土壤質地與有機質含量所影響。

亦有研究顯示，氟離子會使得底泥中重金屬的鍵結形態改變，造成 Cr 移動至可交換態及碳酸鹽結合態，而 Cu 主要則是移動至碳酸鹽結合態及有機態，Zn 的鍵結則以碳酸鹽結合態為主，底泥中最易受到環境改變而釋出的鍵結形態依序為可交換態及碳酸鹽結合態，因此氟離子對於底泥中的 Cr、Cu、Zn 有使其再釋出的危害潛勢(吳，2005)。

2.7 重金屬與土壤基本特性因子之統計分析

變數與變數間的關係可分為確定性關係與不確定性關係，變數間的關係如果可用精確的函數描述則為確定性關係；而不確定性關係是已知變數間存在某種關係，但無法以精確的函數描述出來。相關分析的目的為研究變數之間相互關係的密切程度和變化趨勢，並用適當的統計指標描述，為研究不確定性關係的一種統計方法。而迴歸分析則是把變數之間相互關係運用函數表達，此法傾向於研究變數間的確定性關係(林，2011)。冗餘分析(Redundancy Analysis, RDA)係一線性反應模式，將物種與環境變數間之相關係數以線性組合呈現(李，2003)。以環境變數為基礎，說明變數與變數間之相關性及每一變數之重要性與有效性，用以解釋環境變異量(林，2003)。

在土壤污染方面，徐(1998)之研究以因素分析法(Factor Analysis)來分析台灣地區土壤重金屬含量調查資料並探討造成污染的主要型態，分析結果顯示，主要影響台灣土壤重金屬污染的因子 Ni、Cr、Zn、Cu，其來源為電鍍、金屬表面處理等排放的工業廢水或廢污處置不當，污染地區以彰化、台中為主。RDA 較常應用於生物領域，如陳(2013)以 RDA 探討環境因子與浮游植物群聚之季節性變化關聯性；高(2012)以 RDA 分析環境因子與外生菌根真菌出菇季節性變化的關係；涂(2011)以 RDA 分析螞蟻與環境因子之相關性，顯示環境因子中之土壤濕度與螞蟻種類的分布呈顯著相關。

本研究以 RDA 分析影響六大重金屬分布之相關土壤特性因子；並利用環境變數與物種間之相關係數與特徵值(Eigenvalues)，探討其在梯度軸上之分布意義。

三、 材料方法：

3.1 實驗設計

本研究目的為評估六大重金屬(Cr、Cu、Cd、Ni、Zn、Pb)在中部流域與彰化濱海地區之濃度分布。本實驗分兩個階段：第一部分為調查土壤基本特性(pH 值、氧化還原電位、土壤質地、總有機碳與鐵鋁濃度萃取)與六大重金屬濃度；第二部分為探討土壤基本特性(pH 值、氧化還原電位、土壤質地、總有機碳與鐵鋁濃度萃取)與六大重金屬濃度之間的相關性。實驗架構如圖 3 所示：

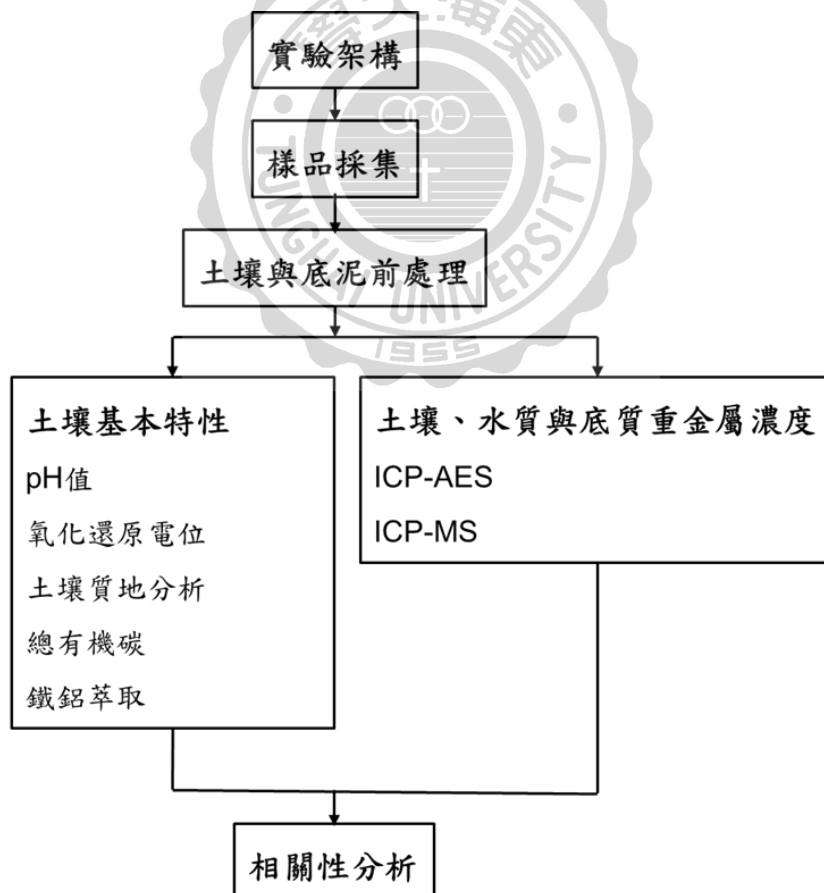


圖 3 實驗架構圖

3.2 樣品採集

烏溪流域之底泥樣品採樣點位於烏溪周圍流域與其相關之生態系包括台中工業區及台中科學園區污水廠放流口，並沿著筏子溪、烏溪流域往出海口方向採集底泥與水體樣品，共 13 處，水體樣品採樣點包括台中之筏子溪(F1~F6)、烏溪(W1~W6)及台中榮總、澄清醫院、精密科學園區、台中工業區、台中科學園區二期之放流口(S1~S5)等 17 處，如圖 4 所示。採樣頻率為每季一次，採樣深度為河川底泥表面，底泥以採樣鏟將表面底泥收集至塑膠廣口瓶中，水體樣品則是以塑膠廣口瓶盛裝後，帶回實驗室等待分析。

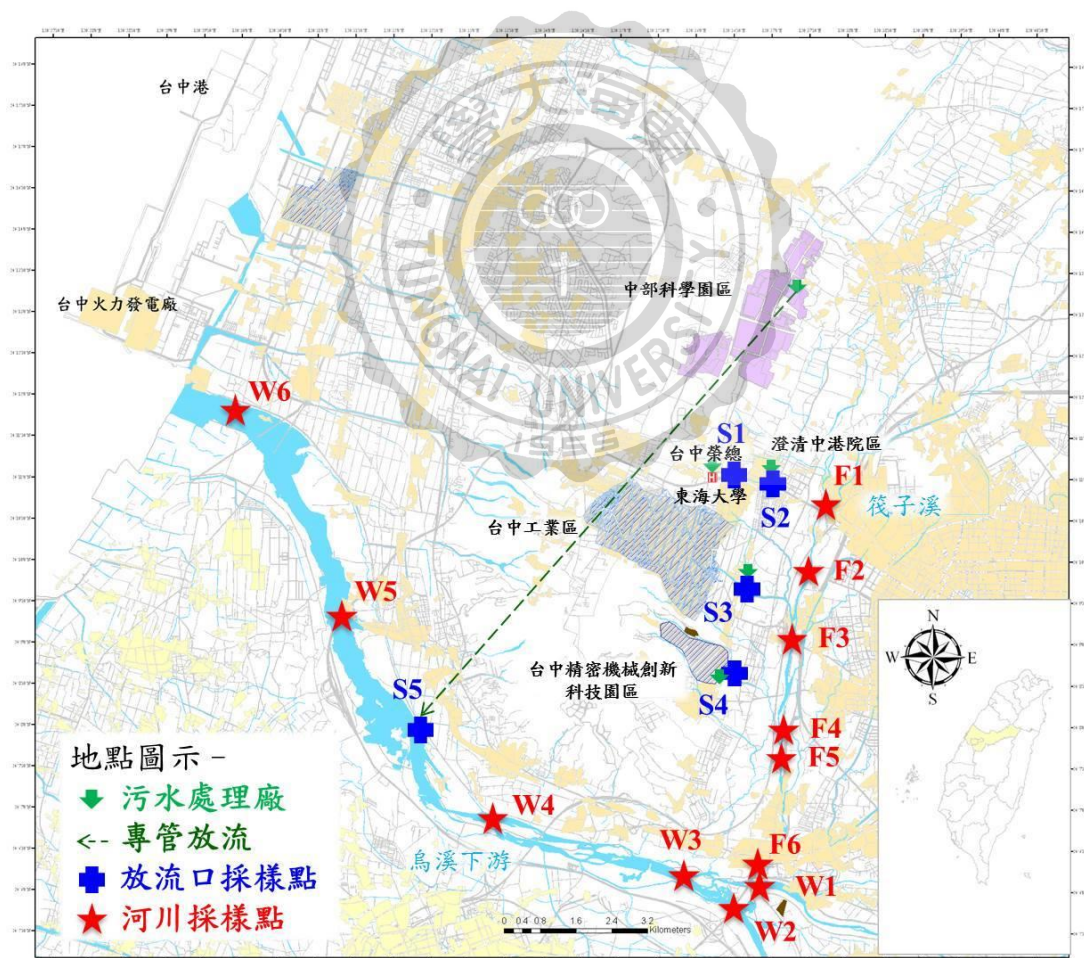


圖 4 烏溪流域採樣點示意圖

彰化濱海地區之土壤樣品採樣點從台中烏溪出海口北岸至雲林濁水溪出海口南岸，詳細採樣地點包含：大肚溪口北岸(CH01)、大肚溪口南岸(CH02)、伸港招潮蟹故鄉(CH03)、伸港什股灘地(CH04)、崙尾東灘-番雅排水口(CH05)、鹿港工業區北岸-洋仔溪口(CH06)、鹿港工業區南岸-員林大排(CH07)、福寶舊濁水溪口(CH08)、漢寶和寶溪口(CH09)、漢寶南側海堤(CH10)、漢寶灘地離岸 1km (CH19)、新寶萬興排水口(CH11)、王功後港溪口(CH12)、永興南側海堤(CH13)、芳苑灘地離岸 1km (CH20)、芳苑灘地(CH14)、新街海堤(CH15)、魚寮溪口(CH16)、濁水溪口北岸(CH17)、濁水溪口南岸(CH18)，共 20 處如圖 5 所示，採樣頻率為每月一次，採樣深度為土壤表面下 15 公分，以土鑽採集後收集至塑膠夾鏈袋中，帶回實驗室等待分析。

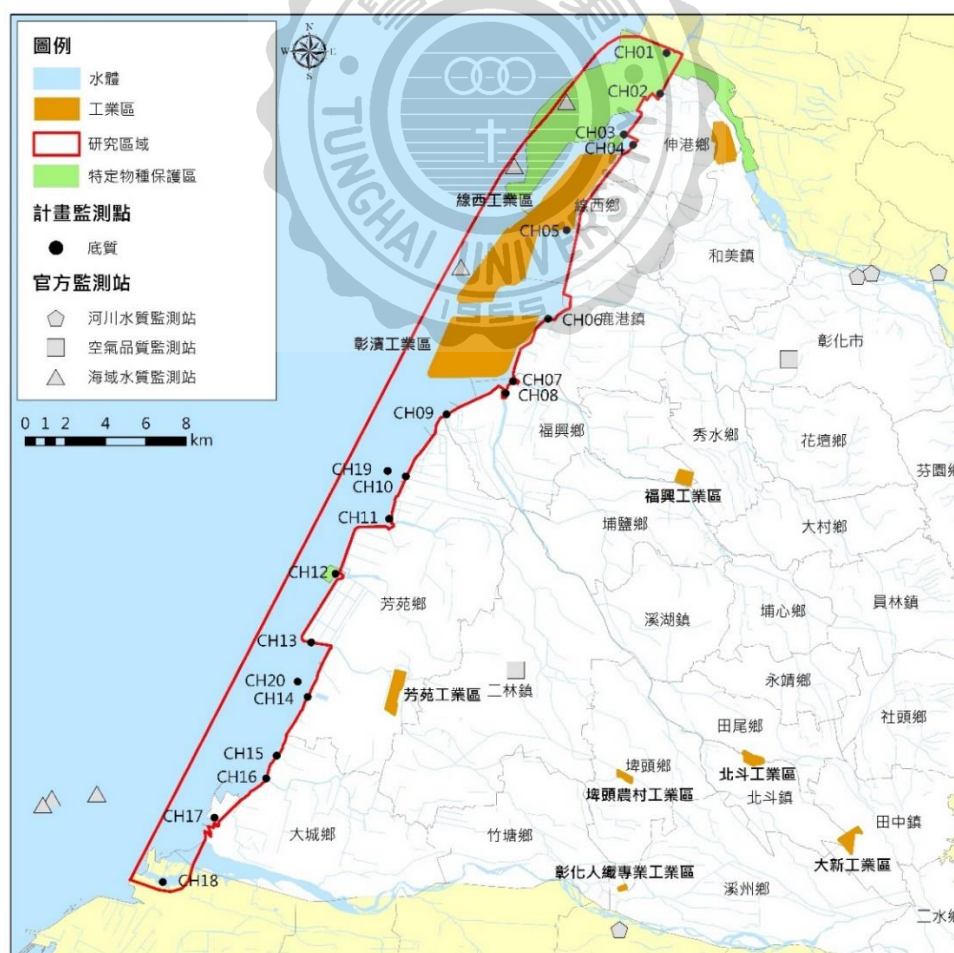


圖 5 彰濱地區採樣點示意圖

3.3 土壤與底泥前處理

土壤與底泥之前處理包括陰乾、磨碎與過篩三個步驟。將採集回來後之土壤樣品平鋪於之塑膠盤中，置放於晾乾架中陰乾，須避免接觸外界灰塵與雜質。待土壤樣品乾燥後，以玻璃瓶將土壤樣品磨碎並過篩，本研究使用網目 2 mm 之不鏽鋼標準篩網將土壤篩出並以塑膠夾鏈袋儲存，等待進一步分析。

3.4 土壤基本特性

3.4.1 pH 值

pH 電極由玻璃電極和甘汞電極組成，玻璃電極為指示電極，甘汞電極為參考電極。電極插入土壤懸浮液後，構成一電池反應，此一電池反應符合涅斯特方程式(Nernst equation)。指示電極與參考電極之間會產生一個電位差，由於參考電極的電位是固定的，所以此電位差的大小可以反應出土壤懸浮液中氫離子的活度。

本研究於採樣點現地測得之 pH 值所使用的儀器是 HORIBA U-50 系列多參數水質監測儀(Kyoto, Japan)，先進行儀器校正後，以去離子水潤濕沖洗電極棒，再將電擊棒直接插入現採的土水混和之底泥約 10 公分深度，待 pH 值穩定後，記錄讀值，電極棒插入過程不擾動底泥樣品，且為避免空氣之影響，插入之電極棒需與底泥緊密接觸，待讀值達穩定即可讀取。

3.4.2 氧化還原電位

在無氧氣存在的情況下，還原電位(Eh)是底泥還原程度的最好指標，其可提供其中化學和生物變化的訊息，尤其是還原電位低於+200mV 時，測定 Eh 較測定氧氣擴散速率(ODR)或還原物質的濃度為佳。底泥越還原時，Eh 越低。本研究測定 Eh 值所使用的儀器是 HORIBA U-50 系列多參數水質監測儀(Kyoto, Japan)。現地採樣前，先進行儀器校正後，以去離子水潤濕沖洗電極棒，再將電極棒直接插入現採的土水混和之底泥 10 公分深度，待氧化還原電位讀值穩定後，記錄氧化還原電位，電極棒插入過程不擾動底泥樣品，且為避免空氣之影響，插入之電極棒需與底泥緊密接觸。

3.4.3 土壤質地分析

土壤質地是指底泥中大小粒子之分佈，如用土壤系統區分，則為砂粒、粉粒及黏粒含量之相對比例。目前常用的一些分類系統對砂粒、粉粒及黏粒粒徑大小的分類標準，彼此間有些微的差距，而本研究採用美國農業部(United States Department of Agriculture, USDA)之分類標準，其土壤質地分類三角圖如圖 6 所示。USDA 分類標準將土壤顆粒分為三種大小等級，分為砂粒、粉粒與黏粒，其粒子粒徑分佈範圍分別為 0.05-2 mm、0.002-0.05 mm 與 < 0.002 mm。質地測定乃是透過粒徑分析來完成。在粒徑分析當中，最重要的步驟乃是使顆粒完全分散，使粒子單獨懸浮於水中，且不致破壞各單粒。為達此目的，可先將樣品做去除顆粒間膠結物質，如有機質、鐵氧化物、碳酸鹽和可溶性鹽等之前處理，再應用添加化學分散劑或物理或超音波之分散方法使土粒分散。分散後之土粒懸浮一再以過篩、沉降或其他方法，如光

散射法，測定粒徑分佈，或是比重計法，其根據之基本原理為史脫克斯定律(Stokes' law)，利用沈降法來測定粒徑分佈，即球型顆粒在流體中受重力影響向下沈降之終端速度(Terminal velocity)與顆粒半徑的平方成正比。其原理是球型顆粒在懸浮溶液中，會同時受到重力作用與流體之浮力作用所影響，而重力與顆粒重量成正比，而浮力則與顆粒體積及流體密度成正比。

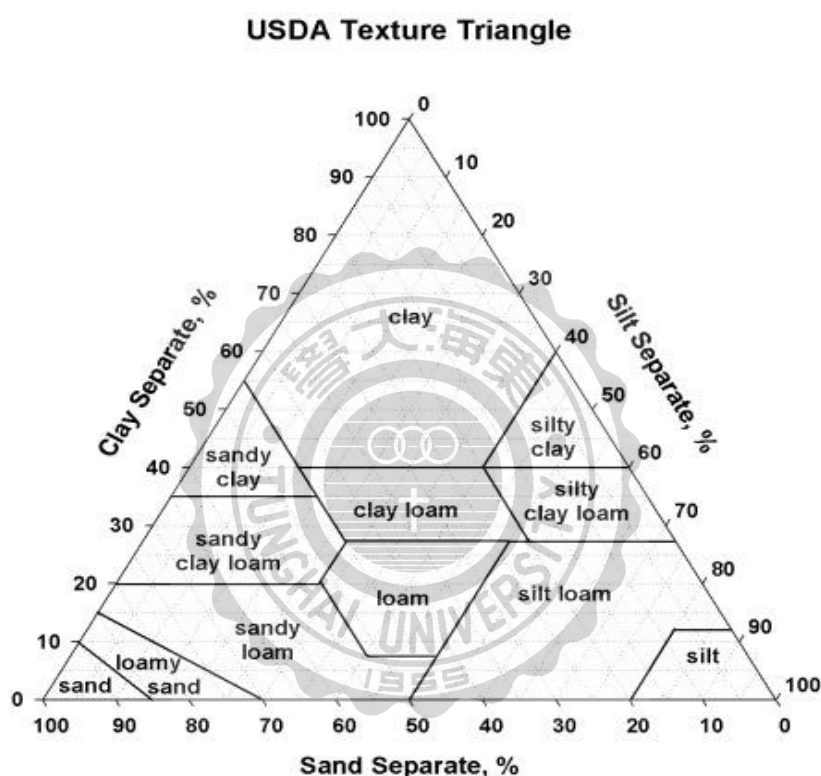


圖 6 美國農業部(USDA)之土壤質地分類三角圖

本實驗採比重計法，測定土壤質地所使用的儀器是 ASTM No.152H，具有以 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 標示之鮑式刻度(Bouyoucos scale)，實驗前需先配製 1N 偏磷酸鈉溶液(Alfa Aesar)，秤取 50 g 土壤樣品，將樣品加到攪拌杯混合 10 mL 1 N 偏磷酸鈉溶液，並加蒸餾水至半滿。安裝上攪拌器攪拌 5 分鐘使其均勻分散。接著倒入沉降筒內以洗瓶洗去攪拌杯內的樣品，並加蒸餾水定量至 1000 mL。以攪拌槳上下攪拌 20 次，20 秒後放入比重計，20 秒後記錄讀值為(P_s)並測量懸浮液溫度(T_1)，

再度攪拌均勻，為避免實驗受落塵干擾，使用鋁箔紙覆蓋後靜置 6 小時。靜置 6 小時後，放入比重計，紀錄讀值為(Pc)，溫度(T2)，將所得之讀值帶入式 1、式 2 及式 3，計算砂粒、黏粒與粉粒之百分率，再由圖 6 求得土壤質地。

$$\text{砂粒百分率} = (1 - (Ps \pm 0.3(T1 - 19.4)) / W) \times 100 \quad \text{式 1}$$

$$\text{粘粒百分率} = ((Pc \pm 0.3(T2 - 19.4)) / W) \times 100 \quad \text{式 2}$$

(其中表示：溫度高於 19.4 °C 為+，低於 19.4 °C 為-)

$$\text{粉粒百分率} = 100 - (\text{砂粒百分率} + \text{粘粒百分率}) \quad \text{式 3}$$

3.4.4 總有機碳含量

底質固體樣品送入高溫爐反應器內，在 900~1300 °C 燃燒時，有機碳被裂解產生二氧化碳和水，同時無機碳也被轉換成二氧化碳，這些二氧化碳以載流氣體送至非分散式紅外線分析儀，檢測所得為總碳濃度，總碳(Total Carbon, TC)分析流程示意圖如圖 7 所示。此外，若要測總有機態碳或無機態碳之含量，則需另一份的底質固體樣品酸化反應 12 小時，先利用酸化將樣品中的碳酸鹽類轉換成二氧化碳，此時檢測所得為總有機碳濃度。

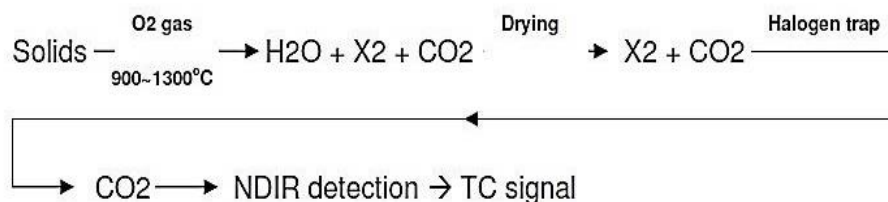


圖 7 總碳(Total Carbon, TC)分析流程

本實驗所使用之儀器為 Analytik Jena multi N/C 2100 系列 TOC 分析儀，先進行儀器設定校正或操作；以鄰苯二甲酸氫鉀(Potassium hydrogen phthalate, KHP)製備 1~150 mgL⁻¹ 之總有機碳檢量線。接著將已乾處理之土壤樣品稱取 0.5g 至樣品載船中，並記錄詳細重量。因採集之土樣分佈於海岸邊為去除樣品中之無機碳，加入 1 mL 10% 之磷酸(H₃PO₄)溶液於樣品中，使其充分反應 2 小時後，將樣品至如烘箱中以 105°C 烘乾，除去樣品中多餘水分。分析樣品中燃燒時所產生的 CO₂ 含量後，再以檢量線計算總有機碳濃度。

3.4.5 無定型鐵鋁萃取

本實驗之方法係參照 Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science Society America Book Series:5 之 Acid Ammonium Oxalate in darkness—Tamm's Reagent，由於本實驗可能受光干擾，造成萃取出之鐵沉澱，為避免影響實驗結果，採用棕色玻璃瓶為容器，先秤取 0.5g 之土壤再加入 30mL 草酸銨溶液，以 140 rpm 震盪 2 小時，待樣品沉澱後將其上清液稀釋至適當倍數，使用感應 (ICP-AES) 分析鐵、鋁濃度，其濃度代表無定型鐵鋁(Amorphous Fe&Al) 之含量。

試劑草酸銨(ammonium oxalate)之製備是以 24.87 g 之(NH₄)₂C₂O₄ ((NH₄)₂C₂O₄ · H₂O, Sigma ≥ 99.5%)與 12.61 g 之 H₂C₂O₄ (H₂C₂O₄ · H₂O, Vetec 98%) 溶於 800 mL 之去離子水中，再添加 NH₄OH 或 HCl 將草酸銨試劑之 pH 值調整至 3，再以去離子水定量至 1L(Bremner, 1996)。

3.5 王水消化法

本實驗之方法係參照環檢所之土壤中重金屬檢測方法—王水消化法(NIEA S321.63B)，將已預處理的土壤樣品與比例 3:1 之 HCl 和 HNO₃ 混合，在室溫下靜置萃取 16 小時，再加熱至 180°C 並迴流 4 小時。萃出消化液經定量，再以感應耦合電漿原子發射光譜儀(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES)分析消化液之六大重金屬濃度。

秤取適量已經風乾處理之土壤樣品，依照環檢所之土壤水分含量測定方法—重量法(NIEA S280.62C)測定土壤中水分含量，同時另取土壤樣品約 0.5 g，置於 100 mL 反應瓶中，緩慢加入 7.5 mL 濃鹽酸，再慢慢加入 3 mL 濃硝酸，搖盪充分混合均勻。為避免樣品加酸會產生強烈氣泡，須小心逐滴加入。再以蓋子蓋上於室溫下靜置此裝置 16 小時，可適時將反應瓶搖晃使充分反應之。16 小時後，緩慢加熱溶液至迴流溫度 180°C，使溶液在沸騰狀態下維持約 4 小時；冷卻樣品至室溫後，以大約 10 mL 0.5 M 稀硝酸沖洗冷凝管，並收集於反應瓶中，再加去離子水定量至 40mL 並搖勻，待不溶物沈降後，以 0.22 μ m 之濾膜(PVDF, Millipore)過濾，以免在霧化時堵塞原子吸收光譜儀之噴霧裝置或其他分析儀器之樣品進入裝置。

3.6 六大重金屬分析

將以王水消化方式酸解後的酸解液，以 SPECTRO GENESIS EOP 感應耦合電漿原子發射光譜元素分析儀(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES)測定其中六大重金屬之濃度。

3.7 冗餘分析(Redundancy analysis, RDA)

相關性分析是探討變數之間的相關程度，從皮爾森相關係數(Pearson coefficient)可以得知兩變數間的相關程度，其相關係數介於 1 到-1 之間，兩變數越接近 1 代表高度正相關，越接近-1 代表高度負相關，越接近 0 則代表越不相關。本研究利用此分析探討環境因子與土壤重金屬之間的相關性。分析兩個屬量變數 X 與 Y 之間的相關性時，可以用簡單的相關分析，計算取得簡單相關係數，以判斷兩者間的相關程度大小以及正相關或負相關；當所得到數據之大小與複雜性，使得整體評估困難，則可運用多變量統計方法。

冗餘分析是多變量分析的一種分析方法，冗餘意為解釋變異量。此方法與典型的相關分析的區別似於簡單線性回歸和線性相關分析之間的區別，前者為利用一個變數預測另一個變數，找出兩樣變數之間關係模式；後者為探討變數間線性關係的程度與方向。冗餘分析係以探討物種的分佈情形，找出影響物種分佈之相關環境因子(Ter Braak et al., 1994)，本研究係以統計軟體 R 3.2.1 (The R Foundation for Statistical Computing, 2015)進行冗餘分析。

將六大重金屬資料進行降趨對應分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)分析求得梯度軸，當物種梯度軸標準偏差大於 4，物種反應為單峰反應，適用 CCA 或 DCCA 分析；若小於 3 則屬於則表示物種屬於線性反應，適用 RDA 分析；梯度軸處於 3-4 間則兩者皆能使用(Lepš & Šmilaur,2003)。

本研究以 DCA 進行梯度軸長分析，結果顯示梯度軸長小於 3，因此本研究選擇以冗餘分析來探討土壤基本特性因子與六大重金屬濃度之關係，其中土壤特性因子包括總有機碳(TOC)、土壤酸鹼值

(pH)、氧化還原電位(Eh)、環境溫度(Temp)、月平均降雨量(rainfall)、無定型鐵鋁含量(Amorphous Fe&Al)及黏粒含量(clay)。將土壤特性因子之數值進行數據標準化。亦對六大重金屬進行開平方根號之數據轉換後再進行冗餘分析。

分析後得到之圖中每個因子之箭頭長度為特徵向量的長度，可視為該因子對物種解釋量的相對大小。兩個箭頭的夾角可視為因子對於物種之相關性大小。當夾角角度為 0~90 度之間，兩變數之間呈正相關；當夾角角度為 90~180 度之間則呈負相關；當夾角角度為 90 度時，表示兩者無顯著的相關關係(鄭，2013)。



四、 結果與討論：

4.1 土壤底泥之特性分析

圖 8 為彰濱沿海土壤底泥樣品中之 pH 值，整體數值分佈於 6.18~9.22，其數值變化並未隨著時間有趨勢性的改變。

土壤 Eh 值隨著月份有不規律變化，各月份間的 Eh 並沒有呈現穩定的數值，其數值座落於-265~364 mV 之間，但亦未有隨時間呈現具有趨勢的變化。土壤 Eh 值數據如圖 9 所示。

圖 10 為烏溪流域中土壤底泥樣品中總有機碳(TOC)之含量，其含量分佈範圍為 1.16~99.41 g kg⁻¹。從圖中可以得知在 F2、F3、F6 與 W3 有最高的 TOC 測值。圖 11 為彰濱沿海中土壤底泥樣品中總有機碳(TOC)之含量，其含量分佈範圍為 0.69~13.64 g kg⁻¹。TOC 並未隨著月份波動，呈現一穩定的數值。其中 CH07、CH08 及 CH13~CH16 相較於鄰近樣區，具有較高的總有機碳含量，其含量分別為 1.07~13.64 與 0.97~7.55 g kg⁻¹。

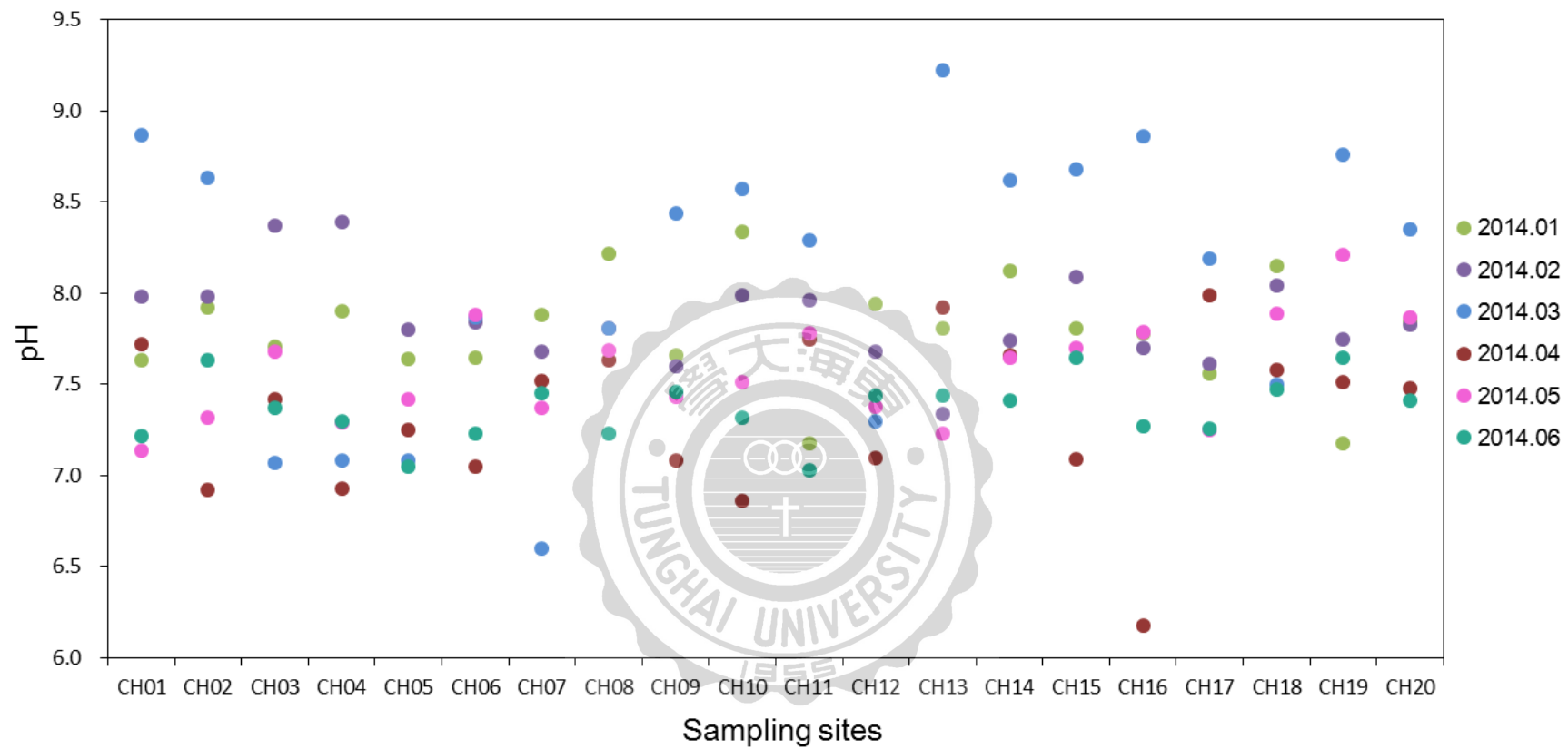


圖 8 彰濱沿海土壤底泥之 pH 值

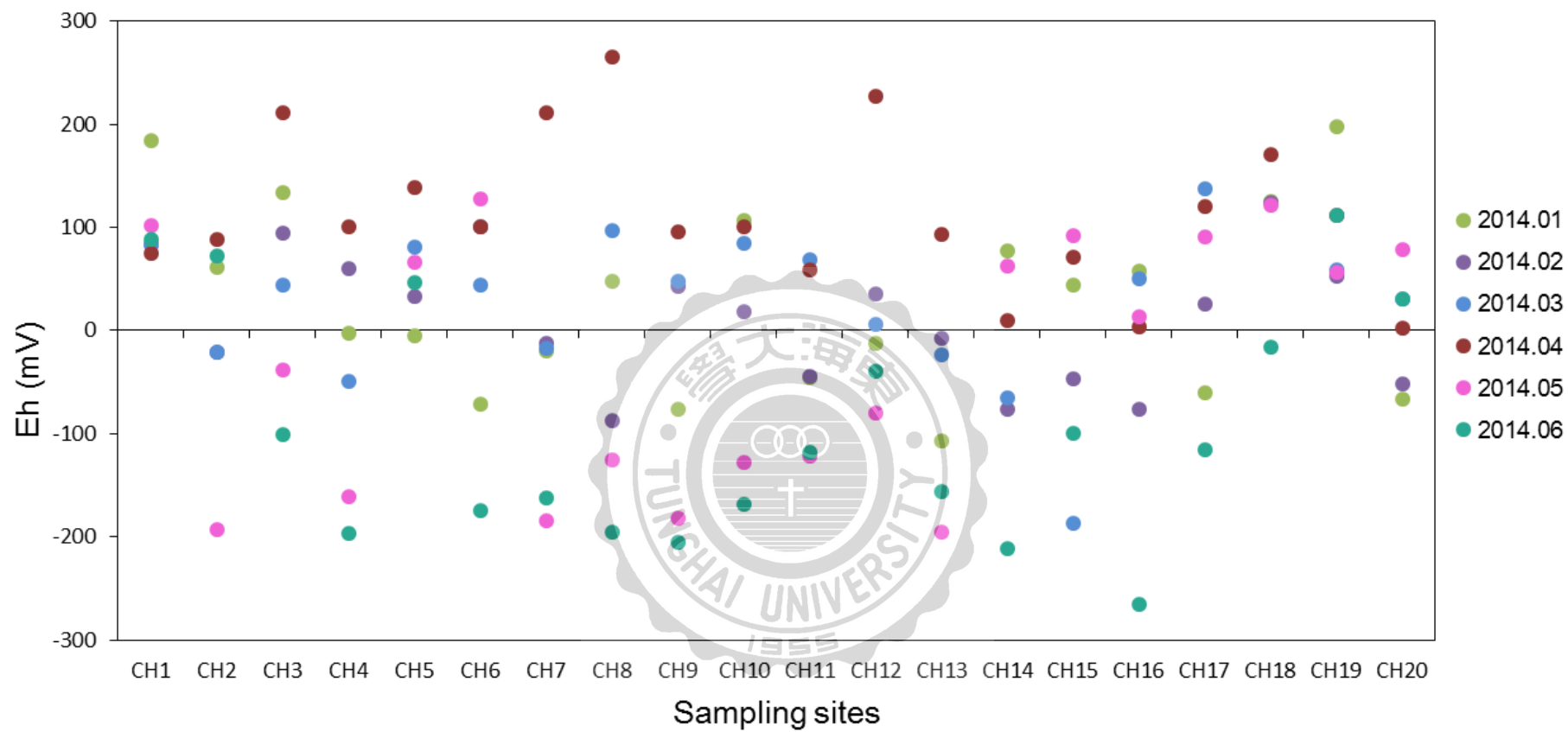


圖 9 彰濱沿海土壤底泥之 Eh 值

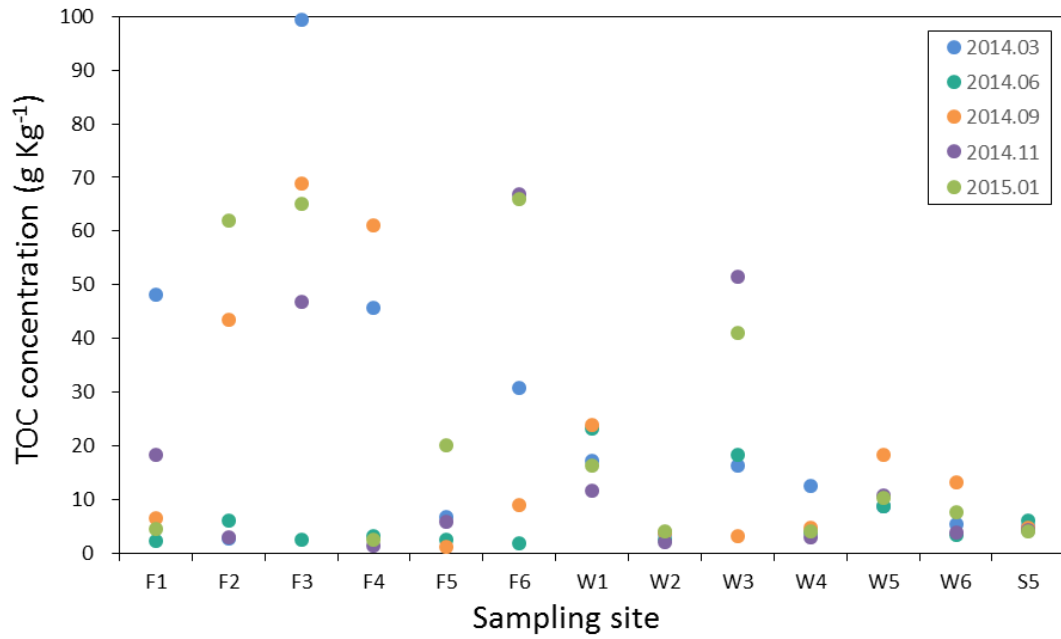


圖 10 烏溪流域土壤底泥之總有機碳含量

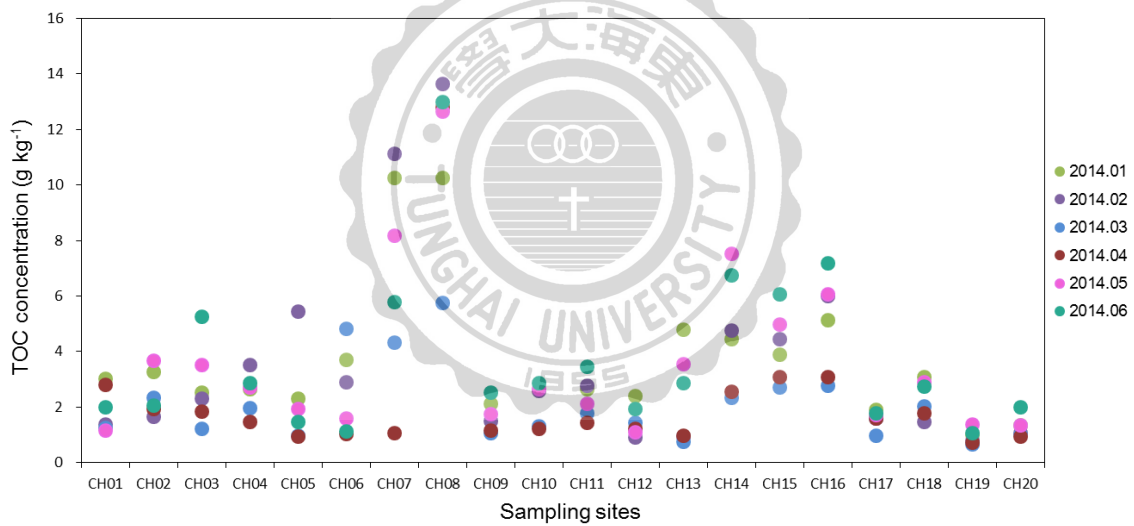


圖 11 彰濱沿海土壤底泥之總有機碳含量

質地分析中，黏粒含量介於 2.79~33.73%，其中黏粒含量低於 10% 之數值，與同一時間所測得知 TOC 濃度有高度相關性(見圖 12)， R^2 為 0.6207。

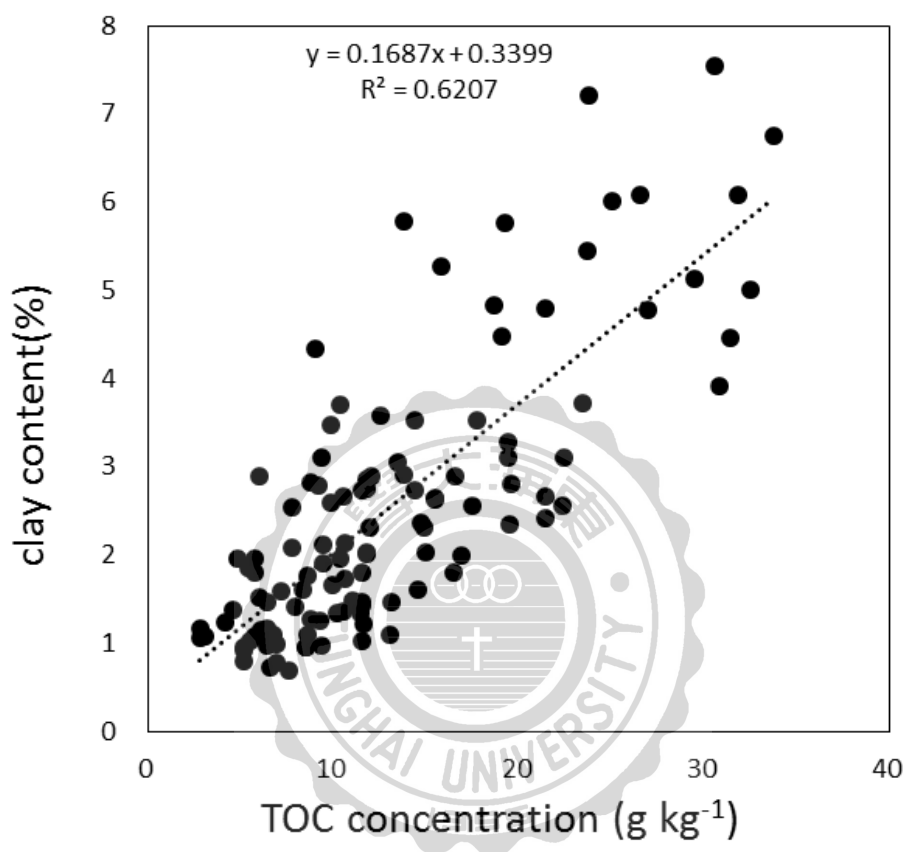


圖 12 黏粒含量與總有機碳濃度之相關性

烏河流域之無定型鐵鋁濃度如圖 13 所示，其濃度範圍介於 2097.50 ~ 33214.26 mg kg^{-1} ，其中以圖 13b 代表之 2014 年 6 月所測得數值最低，範圍介於 3021.35 ~ 15109.18 mg kg^{-1} 。無定型鐵鋁濃度並未隨著時間有相同趨勢，但於 F3、F6 得到較高的數值。圖 14、圖 15 為彰濱沿海之無定型鐵鋁濃度結果，其濃度範圍介於 5213.85 ~ 35947.71 mg kg^{-1} ，與烏河流域同於 2014 年 6 月(見圖 15c)所測得數值最低，範圍介於 5213.85 ~ 17986.64 mg kg^{-1} ，於不同時間濃度差異

變化不大。由各圖發現 CH06、CH08、CH14~CH16 等樣點，皆有較高之無定型鐵鋁濃度，其分佈型態亦與 TOC 之結果十分類似。

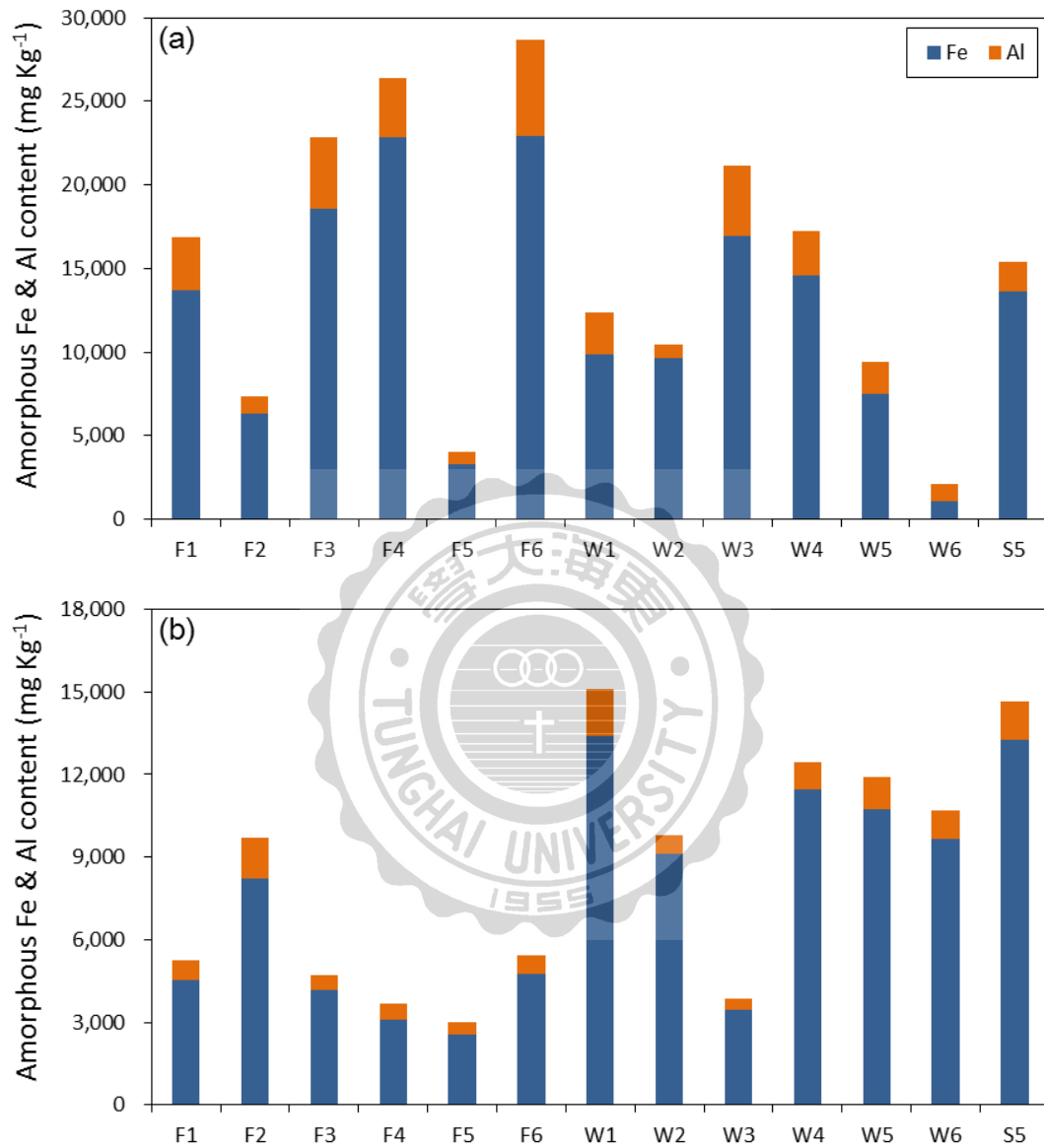


圖 13 烏溪流域土壤底泥之無定型鐵鋁含量 (a) 2014 年 3 月 (b) 2014 年 6 月 (c) 2014 年 9 月 (d) 2014 年 11 月與 (e) 2015 年 1 月

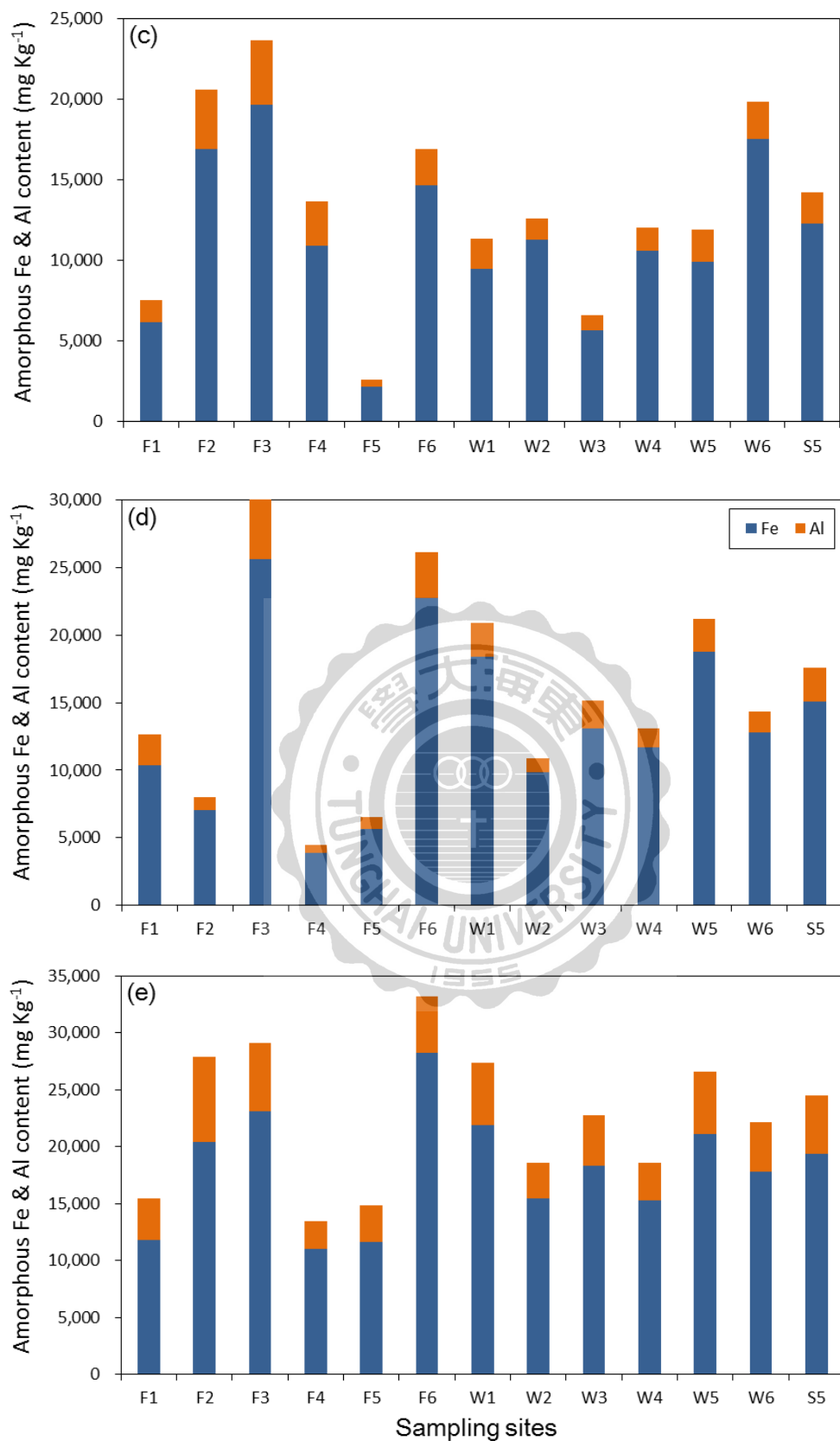


圖 13(續) 烏溪流域土壤底泥之無定型鐵鋁含量 (a) 2014年3月 (b) 2014年6月 (c) 2014年9月 (d) 2014年11月 與 (e) 2015年1月

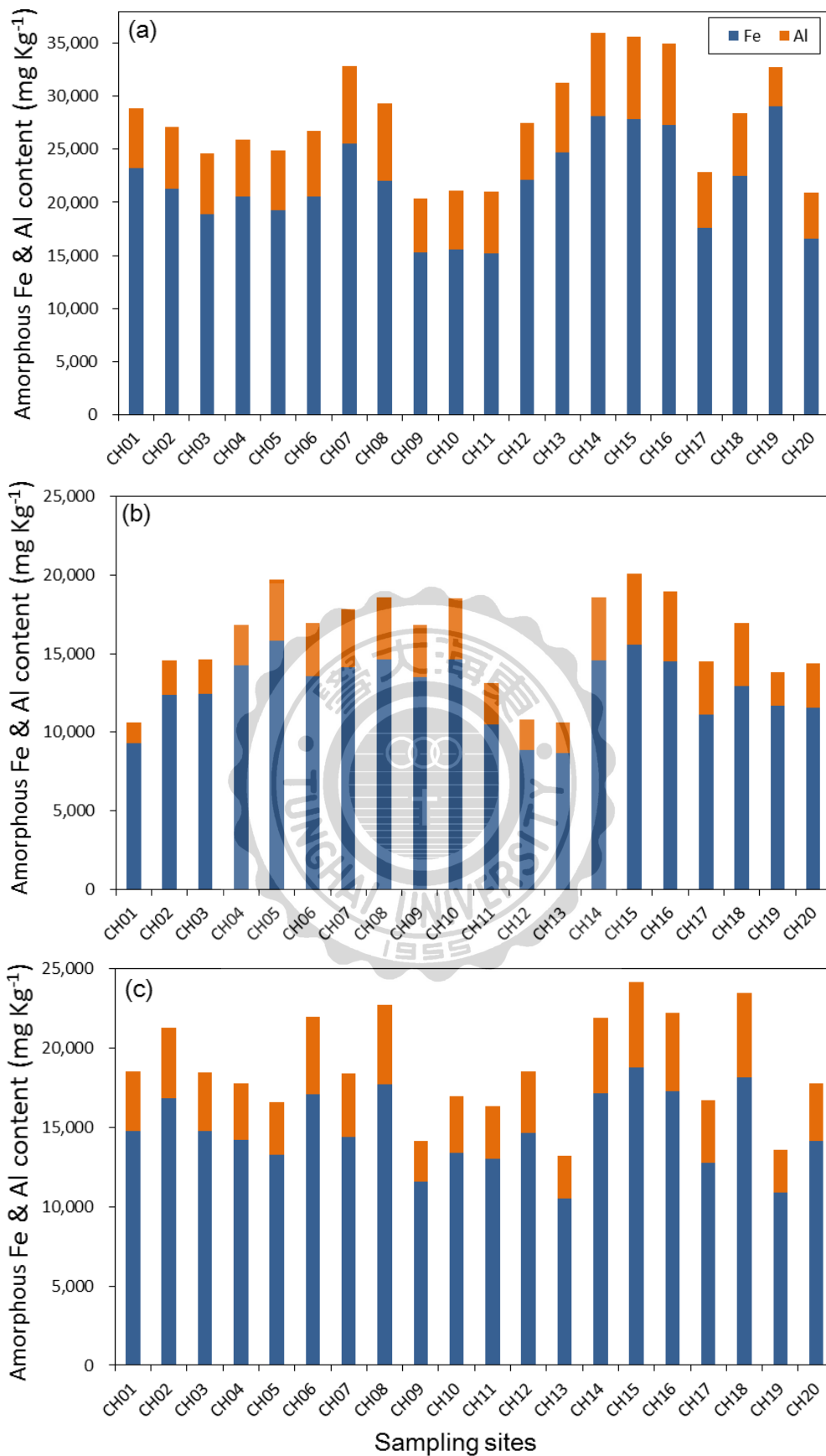


圖 14 彰濱沿海土壤底泥之無定型鐵鋁含量(a) 2014 年 1 月 (b) 2014 年 2 月與 (c) 2014 年 3 月

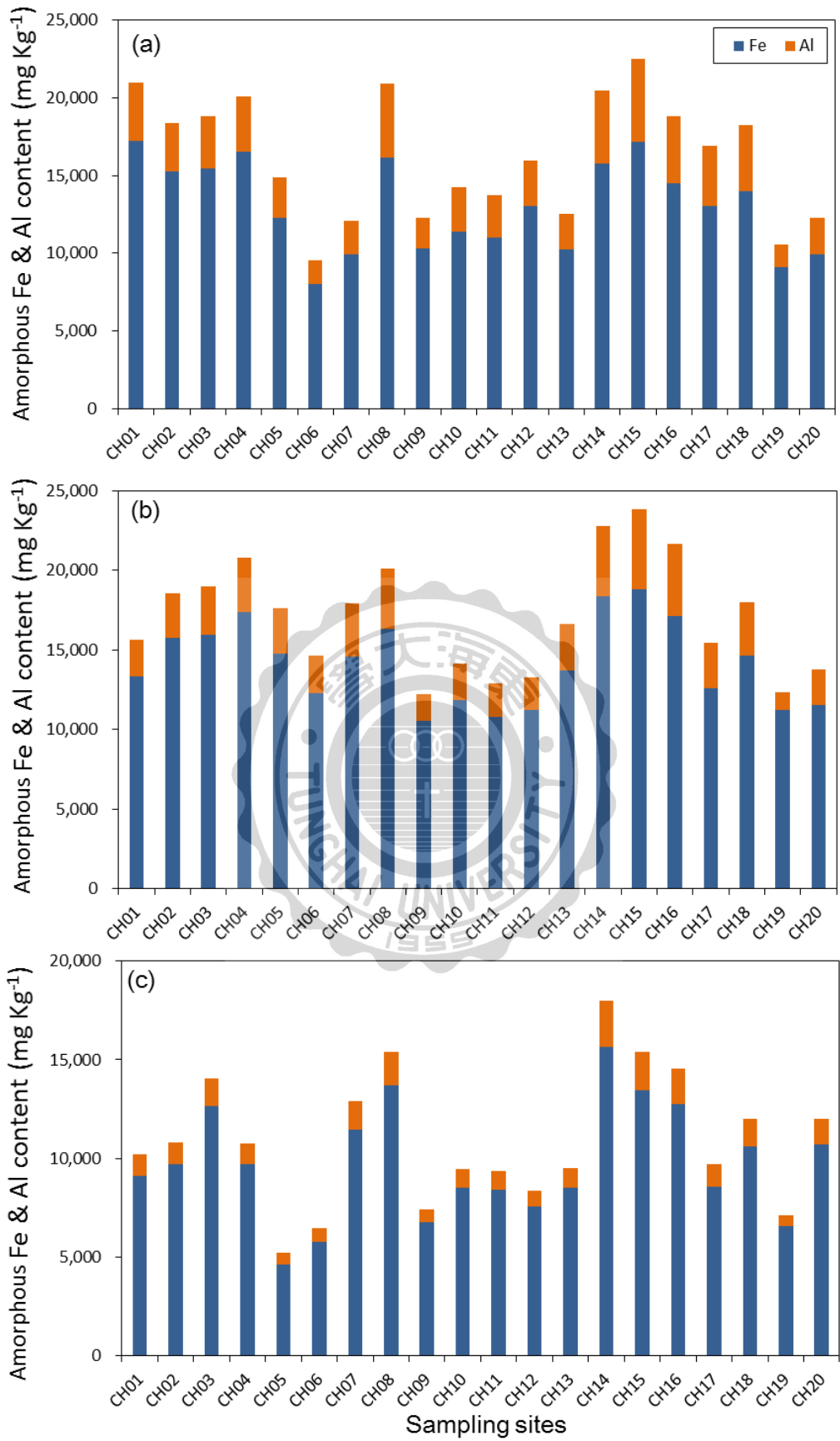


圖 15 彰濱沿海土壤底泥之無定型鐵鋁含量(a) 2014 年 4 月 (b) 2014 年 5 月與 (c) 2014 年 6 月

4.2 土壤底泥中六大重金屬分析

4.2.1 烏溪流域

烏溪流域之採樣點(F1~F6、W1~W6 與 S5，圖 4)之土壤底泥六大重金屬分析結果分別顯示於圖 16 與圖 17 之中，圖中橘色虛線代表方法偵測極限、藍色虛線代表的則為底泥品質標準之上限，其數值為經統計後取可能對敏感底棲小型生物造成最大影響機率 50% 及 25% 的濃度分別訂出上、下限值，其詳細規範數值詳列於表 4 之中。

圖 16 中為烏溪流域土壤底泥樣品中重金屬 Cr、Cd 與 Zn 之濃度，Cr 濃度範圍介於 16.57 ~ 297.32 mg kg⁻¹、Cd 濃度介於 n/a ~ 5.02 mg kg⁻¹、Zn 濃度則介於 60.21~900.20 mg kg⁻¹。由圖 16a 中可以看到 Cr 濃度較高的底泥樣品分別為 F6、W3，兩樣點於 2014 年 3 月 (248.76 mg kg⁻¹、247.70 mg kg⁻¹) 以及 F6 於 2014 年 11 月 (297.32 mg kg⁻¹) 高過底泥品質標準之上限 (233 mg kg⁻¹)，且 F6 於 2015 年 1 月份 (198.18 mg kg⁻¹) 之底泥樣品非常接近底泥品質標準上限。圖 16b 為 Cd 在土壤底泥中的濃度變化，因 Cd 在六大重金屬中具有較高的潛在風險，且其對於生物的毒性也較強，因此於底泥品質標準中為最低的值 (2.49 mg kg⁻¹)。Cd 之濃度分佈範圍為 n/a ~ 5.02 mg kg⁻¹，且土壤底泥樣品均為低於方法偵測極限 5.60 mg kg⁻¹。圖 16c 為 Zn 在烏溪流域土壤底泥中之分布情形。因為 Zn 在環境中為一常見元素，因此在土壤底泥中的含量相對比其他重金屬元素高。但在 F1、F2、F3、F4、F6 與 W3 之測值均有超過 Zn 之底泥品質標準上限 384 mg kg⁻¹。

圖 17a 為 Ni 在土壤底泥中之濃度介於 n/a ~ 291.55 mg kg⁻¹，其中 F3、F4、F6 與 W3 均超過 Ni 底泥品質標準上限 80 mg kg⁻¹。圖 17b 則為 Cu 在土壤底泥中的含量介於 6.88 ~ 200.82 mg kg⁻¹，濃度較高的

樣點有 F2、F6 與 W3。樣點 F2 在 2015 年 1 月測得 $166.16 \text{ mg kg}^{-1}$ 、F6 與 W3 則於 2014 年 3 月 ($186.38 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $200.82 \text{ mg kg}^{-1}$) 超過了 Cu 底泥品質標準 (157 mg kg^{-1})，而 F3 平均測值雖然未超過底泥品質標準之上限，但座落於其標準偏差之範圍內。土壤底泥中 Pb 濃度參見於圖 17c，測值均未超過底泥品質標準上限 (161 mg kg^{-1})，其濃度範圍為 $n/a \sim 56.80 \text{ mg kg}^{-1}$ 之間，於不同樣點間之濃度變化差異並沒有顯著的趨勢。

六大重金屬中 Cr、Cu、Zn 與 Ni 在土壤底泥中有著較類似的分佈趨勢，而 Pb 於不同樣點間之濃度變化差異並沒有顯著的趨勢。Cd 因其濃度大部分都非常貼近偵測極限，因此在趨勢上與其他重金屬較為不同，但相同的地方為在 F6 或 W3 有最大測值，其分佈型態與 TOC 十分類似。



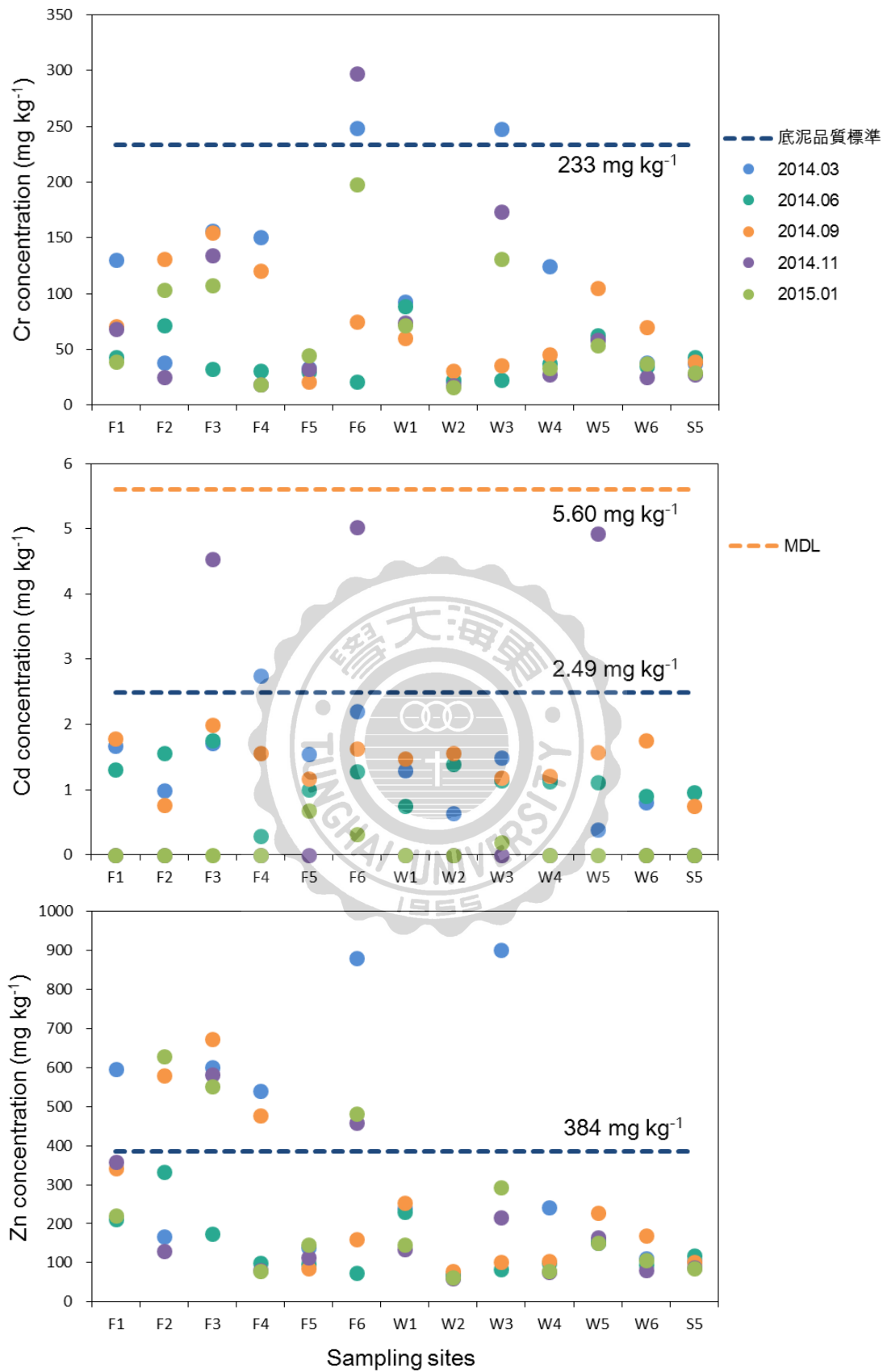


圖 16 烏溪流域土壤底泥中重金屬(a) Cr (b) Cd 與(c) Zn 之含量

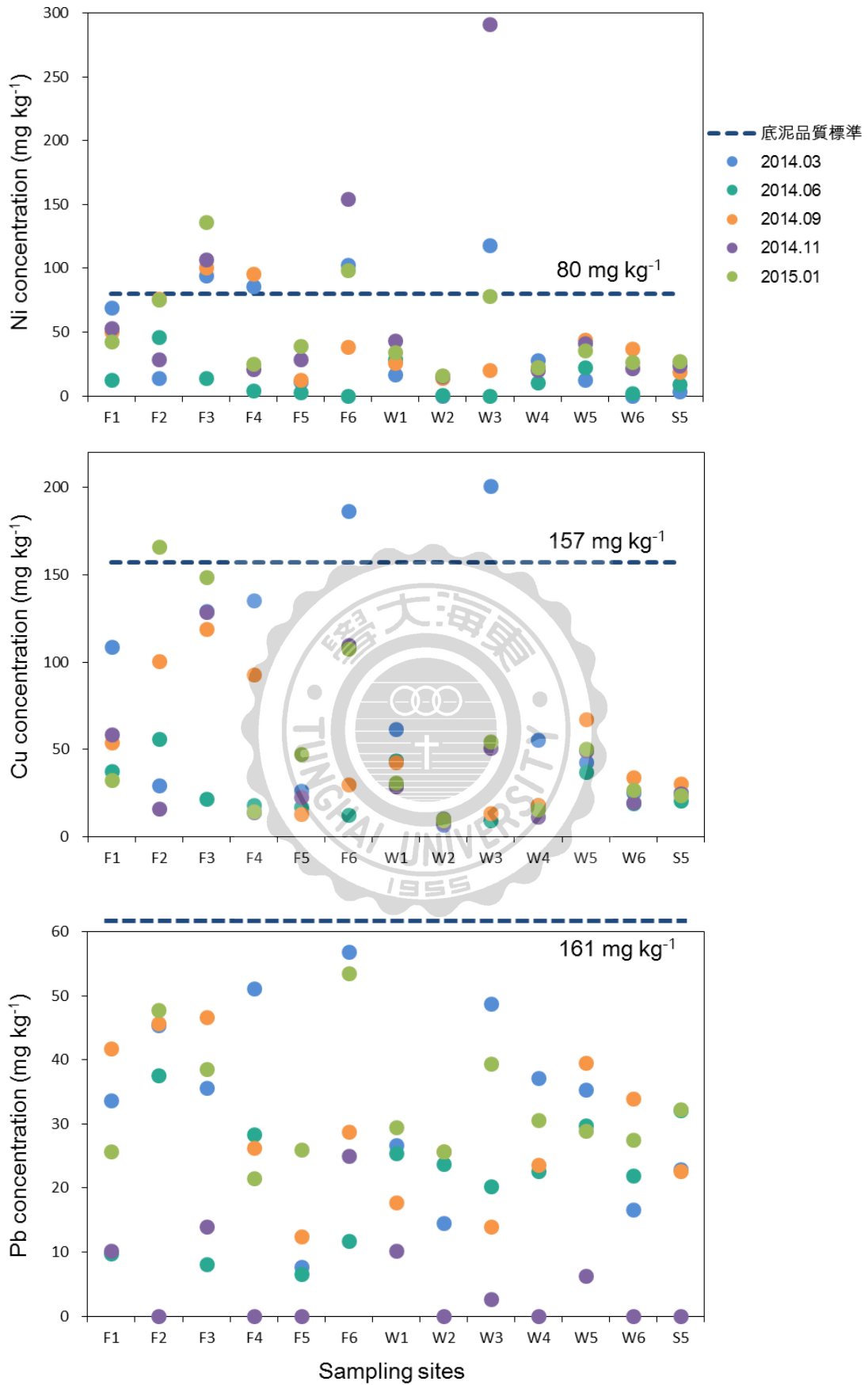


圖 17 烏溪流域土壤底泥中重金屬(a) Ni (b) Cu 與(c) Pb 之含量

4.2.2 彰濱沿海

彰濱沿海之採樣點(CH01~CH20, 圖 5)之土壤底泥六大重金屬分析結果分別顯示於圖 18 與圖 19 之中, 圖中之橘色虛線代表方法偵測極限、藍色虛線代表的則為底泥品質標準之上限, 其數值為經統計後取可能對敏感底棲小型生物造成最大影響機率 50%及 25%的濃度分別訂出上、下限值, 其詳細規範數值詳列於表 4 之中。

圖 18 中為彰化沿海土壤底泥樣品中重金屬 Cr、Cd 與 Zn 之濃度, Cr 濃度範圍介於 13.16 ~ 130.67 mg kg⁻¹、Cd 濃度介於 n/a ~ 7.18 mg kg⁻¹、Zn 濃度則介於 47.92 ~ 375.98 mg kg⁻¹。由圖 18a 中可以看到 Cr 濃度較高的底泥樣品分別為 CH06、CH07 及 CH08, 但皆無高於底泥品質標準上限, Cr 濃度從 CH01 至 CH08 有逐漸上升的趨勢。圖 18b 為 Cd 在土壤底泥中的濃度變化, 因 Cd 在六大重金屬中具有較高的潛在風險, 且其對於生物的毒性也較強, 因此於底泥品質標準中為最低的值(2.49 mg kg⁻¹)。有一半以上之土壤底泥樣品均為低於方法偵測極限 5.60 mg kg⁻¹。圖 18c 為 Zn 在烏溪流域土壤底泥中之分布情形, 其測值皆無高於底泥品質標準上限(384 mg kg⁻¹)。因為 Zn 在環境中為一常見元素, 因此在土壤底泥中的含量相對比其他重金屬元素高。由圖 18c 可看出 CH06 於 2014 年 4 月之測值(375.98 mg kg⁻¹)及 CH08 於 2014 年 3 月之測值(331.72 mg kg⁻¹)非常接近底泥品質標準上限, 且在 CH01 至 CH08 亦有逐漸上升的趨勢。

圖 19a 為 Ni 在土壤底泥中之濃度介於 0.62 ~ 62.13 mg kg⁻¹, 其數值均無超過 Ni 底泥品質標準上限 80 mg kg⁻¹。圖 19b 則為 Cu 在土壤底泥中的含量, 濃度介於 4.19 ~ 135.28 mg kg⁻¹, 濃度較高的樣點有 CH05、CH06、CH07 與 CH08。CH06 在 2014 年 3 月(135.28 mg kg⁻¹)

接近 Cu 底泥品質標準上限(157 mg kg⁻¹)，且在 CH01 至 CH08 亦有逐漸上升的趨勢。圖 19c 為土壤底泥中之 Pb 分佈，測值均未超過底泥品質標準上限(161 mg kg⁻¹)，其濃度範圍為 9.50 ~ 38.58 mg kg⁻¹ 之間，於不同樣點間之濃度變化差異並沒有顯著的趨勢。

六大重金屬中 Cr、Cu、Zn 與 Ni 在土壤底泥中有著較類似的分佈趨勢，而 Pb 於不同樣點間之濃度變化差異並沒有顯著的趨勢。Cd 因其濃度大部分都非常貼近偵測極限，因此在趨勢上與其他重金屬較為不同。



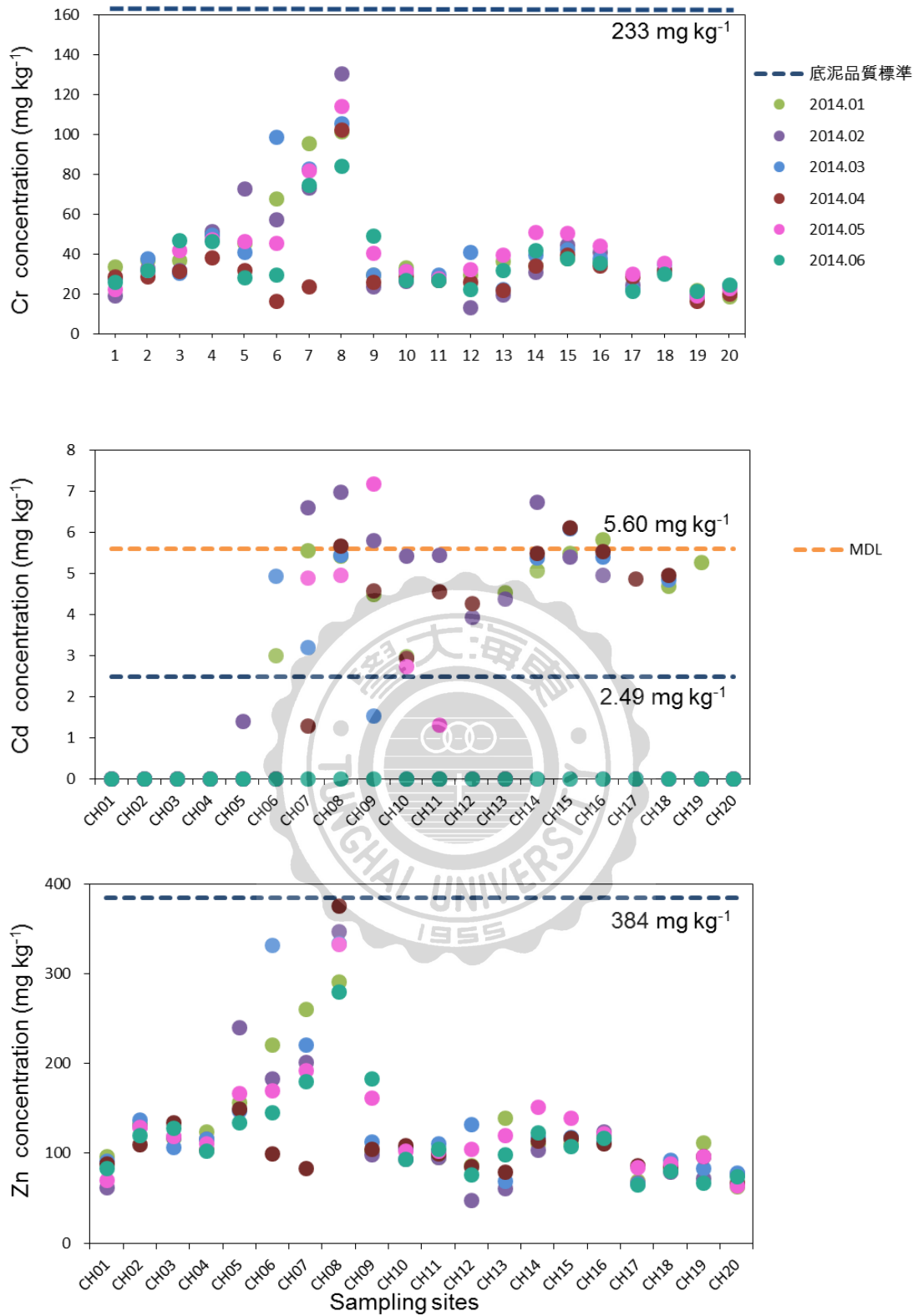


圖 18 彰濱沿海土壤底泥中重金屬(a) Cr (b) Cd 與(c) Zn 之含量

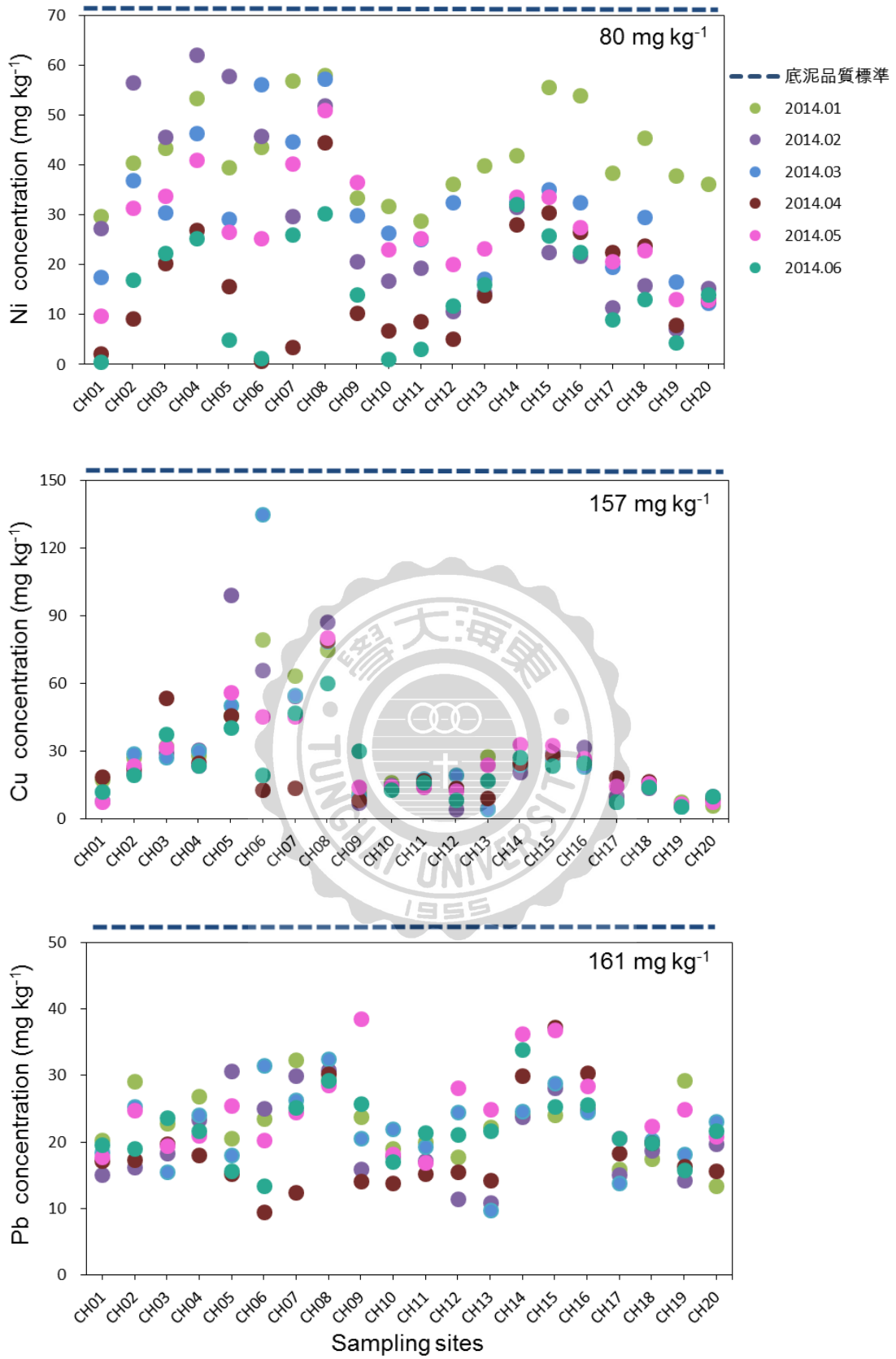


圖 19 彰濱沿海土壤底泥中重金屬(a) Ni (b) Cu 與(c) Pb 之含量

4.3 土壤底泥之六大重金屬與土壤特性因子之統計分析

4.3.1 六大重金屬含量與土壤特性因子之相關性

烏溪流域六大重金屬含量與土壤特性因子之相關性結果如表 5 所示，可得知雨量與六大重金屬含量之間無相關性，TOC 與無定型鐵鋁含量對 Cr、Ni、Cu、Zn 及 Pb 呈現顯著相關($p \leq 0.01$)，六大重金屬除了 Cd 以外，彼此間皆顯示高度相關($p \leq 0.01$)，Cd 與 Cr、Ni 呈顯著相關，與 Pb 呈顯著負相關($p \leq 0.01$)。

彰濱沿海六大重金屬含量與土壤特性因子之相關性結果如表 6 所示，可得知 Eh 值及雨量與六大重金屬含量之間無相關性，而 Eh 與 TOC 呈顯著負相關($p \leq 0.01$)。pH 值只與 Ni 之間有顯著相關($p \leq 0.01$)。TOC 與無定型鐵鋁含量對六大重金屬皆呈顯著相關($p \leq 0.01$)，溫度對於 Cd 與 Ni 有顯著負相關($p \leq 0.01$)，各重金屬元素之相關性亦呈顯著相關($p \leq 0.01$)。黏粒含量(clay)對於 Cu、Ni、Pb、TOC 有顯著相關($p \leq 0.01$)，與 Cr 及 Cd 亦呈相關($p \leq 0.05$)，而與 Zn 則無顯著相關。

由於皮爾森相關係數僅能簡單得知各物種彼此之相關係數，為了更深入探討重金屬與土壤特性因子之間以及土壤特性因子與土壤特性因子的關係，遂進一步進行冗餘分析。

表 5 烏溪流域六大重金屬與物化性質之皮爾森相關係數

	TOC	rainfall	amorphous Fe&Al
Cr	0.749**	-0.083	0.621**
Ni	0.739**	-0.196	0.546**
Cu	0.761**	-0.121	0.650**
Zn	0.750**	-0.027	0.578**
Cd	0.175	-0.024	0.080
Pb	0.448**	0.128	0.525**
TOC	1	-0.102	0.617**
rainfall		1	-0.397**
amorphous Fe&Al			1

** . 在顯著水準為0.01時 (雙尾), 相關顯著。

* . 在顯著水準為0.05 時 (雙尾), 相關顯著。

表 6 彰濱沿海六大重金屬與物化性質之皮爾森相關係數

	TOC	clay	pH	Eh	rainfall	temp	amorphous Fe&Al
Cr	0.829**	0.227*	-0.009	-0.169	0.065	-0.083	0.317**
Cu	0.654**	0.242**	-0.044	-0.048	-0.013	-0.116	0.295**
Ni	0.492**	0.503**	0.239**	-0.064	-0.119	-0.439**	0.694**
Cd	0.362**	0.197*	0.073	0.045	-0.255**	-0.311**	0.402**
Zn	0.770**	0.124	-0.034	-0.109	0.035	-0.044	0.263**
Pb	0.610**	0.538**	-0.012	-0.236**	0.222*	0.025	0.424**
TOC	1	0.364**	-0.016	-0.278**	0.078	0.023	0.323**
clay		1	0.141	-0.142	-0.039	-0.221*	0.585**
pH			1	0.108	-0.130	-0.385**	0.220*
Eh				1	-0.289**	-0.203*	0.185*
rainfall					1	0.678**	-0.271**
temp						1	-0.557**
amorphous Fe&Al							1

**. 在顯著水準為0.01時 (雙尾), 相關顯著。

*. 在顯著水準為0.05 時 (雙尾), 相關顯著。

4.3.2 六大重金屬含量與土壤特性因子之冗餘分析

烏溪流域以研究測定之六大重金屬和土壤特性因子(總有機碳含量、無定型鐵鋁含量及月平均降雨量)進行冗餘分析，得到顯著影響重金屬的土壤特性因子有(詳見表 7)：總有機碳含量($p=0.001$)與無定型鐵鋁含量($p=0.005$)。

研究分析結果中如圖 20 所示，影響 Pb、Cu、Zn 與 Cr 之環境因子為 TOC 與無定型鐵鋁含量；而 TOC 與無定型鐵鋁含量之箭頭夾角角度小於 90 度，因此在烏溪流域中，TOC 含量與無定型鐵鋁有顯著相關，在江凱楹等人(2006)之研究中指出可抽出之鋁及鐵的濃度與草酸及低分子量有機酸呈現相當高度相關性($p < 0.01$)；雨量則與 Pb 有顯著相關，白(2011)以室內淋溶柱研究了降雨量、降雨 pH 值、氮磷肥等因素對土壤中 Pb、Zn、Cd、As 等重金屬淋失的影響。在研究降雨量時發現在相同 pH 值，淋溶溶液中 Pb 濃度會隨著降雨量的增加而增加。本模型之解釋變異量達 0.6278。

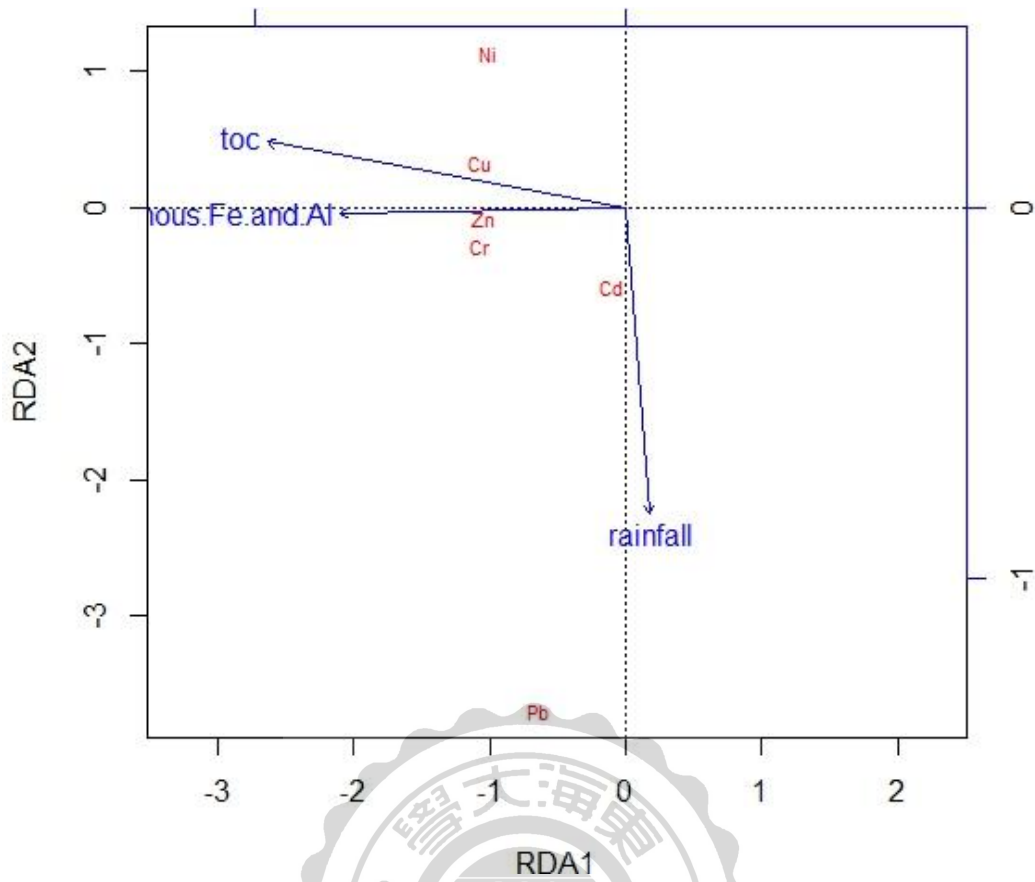


圖 20 烏溪流域六大重金屬與土壤特性因子之 RDA 分析結果

表 7 土壤特性因子經 RDA 顯著性測驗結果

土壤特性因子	P	F
總有機碳(TOC)	0.001 ***	93.67
平均降雨量(Rainfall)	0.220	1.47
無定型鐵鋁(Amorphous Fe&Al)	0.005 **	7.73

Signif. Codes : 0 : *** , 0.001 : ** , 0.01 : * , 0.05 : . , 0.1 :

彰濱沿海以研究測定之六大重金屬和土壤特性因子(總有機碳含量、pH 值、Eh 值、環境溫度、黏粒含量、無定型鐵鋁含量及月平均降雨量)進行冗餘分析，得到顯著影響重金屬的土壤特性因子有(詳見表 8):總有機碳含量($p=0.001$)、黏粒含量($p=0.001$)、土壤溫度($p=0.002$)與無定型鐵鋁含量($p=0.028$)。

分析結果如圖 21 所示，pH 值與 Cd、Ni 及 Pb 呈顯著相關，而與 Cr、Cu 及 Zn 呈負相關，李(2011)之研究結果指出，在相同的 pH 值下，系統中 Cd 的釋放主要受到 pH 的支配，且 Cu 的累積釋放量在相同的 pH 值下，表示可溶性有機碳可直接影響 Cu 之釋放，亦進行 Cu、可溶性有機碳以及黏粒之混合試驗，研究發現可溶性有機碳可減少 Cu 吸附於黏粒上，可溶性有機碳可能與懸液微粒競爭 Cu，使更多的 Cu 留存於溶液中。

而無定型鐵鋁含量對六大重金屬皆呈正相關，Caccia(2003)之研究結果亦指出 Ni、Pb、Cr、Cu 及 Zn 皆與 Al 含量有關，其受底泥中之質地較細的成分(鋁矽酸鹽)影響，因其擁有較大之比表面積供重金屬吸附於顆粒表面。

總有機碳含量與六大重金屬亦為正相關，而以 Cd 之相關性較不明顯，Caccia(2003)之研究結果亦指出 Ni、Pb、Cr、Cu 及 Zn 皆與有機碳含量成顯著相關。

於本研究結果中，環境溫度與鎘、鎳與鉛呈負相關，胡伯瑜(1999)探討溫度效應對於重金屬吸附與脫附行為，研究結果顯示重金屬脫附量隨升高溫度而增加的趨勢，表示環境溫度愈高，土壤重金屬會因脫附反應而移動至土壤溶液當中。本模型解釋變異量達 0.5721。

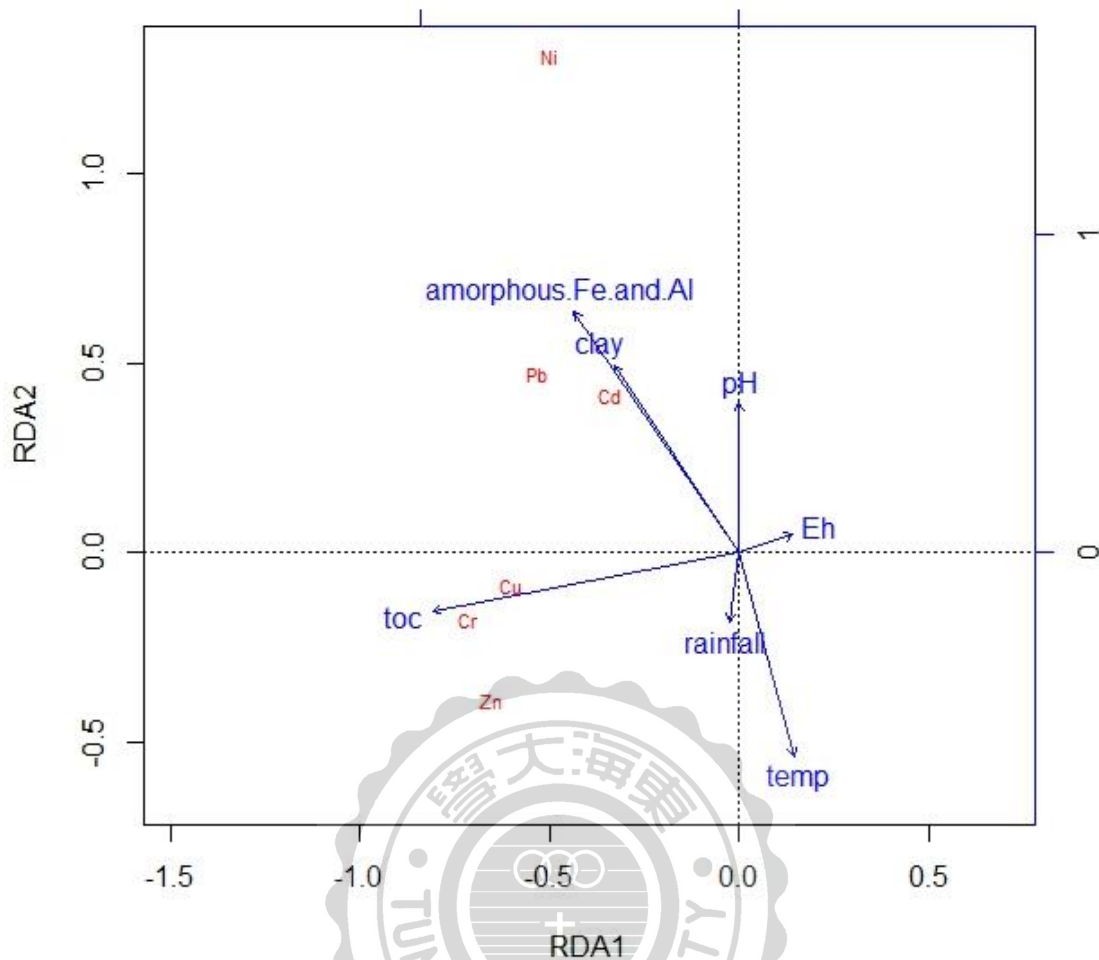


圖 21 彰濱沿海六大重金屬與土壤特性因子之 RDA 分析結果

表 8 土壤特性因子經 RDA 顯著性測驗結果

土壤特性因子	P	F
總有機碳(TOC)	0.001 ***	120.95
黏粒含量(Clay)	0.001 ***	8.50
酸鹼度(pH)	0.075 .	2.47
氧化還原電位(Eh)	0.124	2.06
月平均降雨量(Rainfall)	0.203	1.52
土壤溫度(temp)	0.002 **	9.99
無定型鐵鋁(Amorphous Fe&Al)	0.028 *	4.25

Signif. Codes : 0 : *** , 0.001 : ** , 0.01 : * , 0.05 : . , 0.1 :

五、結論

筏子溪流域(F1~F6)若以底泥品質標準來看，Cr、Cu、Zn 與 Ni 均有超過其品質標準上限之問題，上述重金屬濃度可能會對於敏感底棲生物與小型生物造成影響。而烏溪流域(W1-W6)具有較大流量的幫助，在整體的重金屬濃度中僅有少部分土壤底泥樣品超過底泥品質標準。

而烏溪流域中土壤底泥中的有機碳含量及無定型鐵鋁含量與 Cr、Ni、Cu、Zn 及 Pb 濃度間有很高的正相關。因為總有機碳含量及無定型鐵鋁含量較高的區域，其累積重金屬之能力也相對較高。長期累積後，其達到危害生態系的濃度則會導致不可逆的傷害。所以未來若是要設置污水排放口，環境中之總有機碳含量應列為參考指標。

彰濱沿海(CH01~CH20)若以底泥品質標準來看，六大重金屬均有超過其品質標準上限之問題。Cu、Zn 與 Cr 於 CH06~CH08 相對於其他樣點有較高濃度，且從 CH01 至 CH08 有逐漸上升的趨勢。Cd 在六大重金屬中具有較高的潛在風險，且其對於生物的毒性也較強，但有一半以上之土壤底泥樣品均為低於方法偵測極限 5.60 mg kg^{-1} 。未來建議使用偵測極限更精小之儀器如 ICP-MS 以得到更佳數據品質。Ni 與 Pb 在土壤底泥中的濃度較低，樣品間的測值差異不明顯且均未超過底泥品質標準上限。

彰濱沿海之特性因子中 Eh 值及雨量與六大重金屬含量之間無顯著相關，TOC 與無定型鐵鋁含量對六大重金屬呈現顯著相關，；環境溫度對於 Cd、Pb 與 Ni 顯示高度相關，無定型鐵鋁含量及黏粒含量對於 Cu、Ni、Pb 有顯著相關，與 Cr 及 Cd 亦有顯著相關($p \leq 0.05$)，pH 值與 Cd、Ni 及 Pb 呈顯著相關，而與 Cr、Cu 及 Zn 呈負相關。

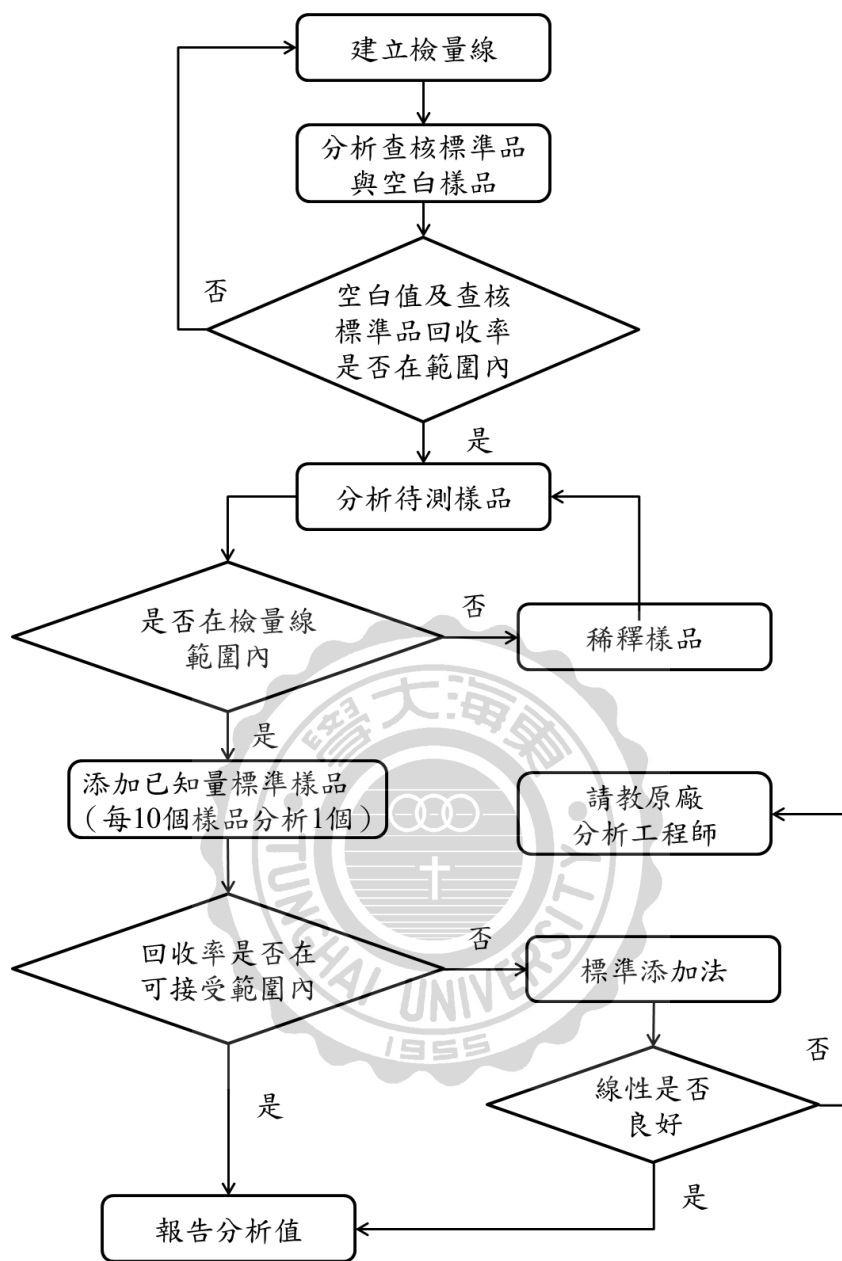
附錄

附錄一、分析工作之品保/品管

本研究中以精密性、準確性以及完整性的方法來確保分析工作品質管制。利用重複分析、計算相對差異百分比來確保精密性；查核樣品以及檢量線的來控制準確性；並計算回收率以確認品保目標。

附圖 1 為本計畫中有關樣品分析品保流程圖，為求得分析結果的準確性以及精密性品保與品管之工作落實是非常重要的。實驗分析每批次分為 10 個樣品，依照附圖 1 中的流程進行查核。濃度檢量線一次線性回歸值則要求在 0.995 以上。在本計畫中亦購置土壤以及水體標準品做為數據品質之控管，其標準品分別為美國國家標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)的土壤樣品 SRM 2709a (San Joaquin Soil)，並藉由監測其回收率來控管本計畫相關之實驗數據品質。

附錄二、附圖與附表



附圖 1 樣品分析品保流程圖

附表 1 彰化沿海之土壤底泥質地分析

	2013.10	2013.11	2013.12	2014.01	2014.02	2014.03	2014.04	2014.05	2014.06
CH01	loam	loamy sand	loamy sand	sandy loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand	sandy loam
CH02	loamy sand	sand	sand	loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	loamy sand
CH03	loam	loam	loam	sandy clay loam	loam	sandy loam	loam	loam	sandy loam
CH04	sand	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loam
CH05	silt loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	loam	sandy loam	loamy sand	sandy loam	loamy sand
CH06	loam	silt loam	silt loam	loam	loam	loam	sand	sandy loam	sand
CH07	sandy loam	sandy loam	sandy loam	silt loam	silt loam	loam	loamy sand	silt loam	loam
CH08	sandy loam	sandy loam	sandy loam	loamy sand	silt loam	loam	silt loam	silt loam	silt loam
CH09	sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand	loamy sand	loamy sand	sand	loamy sand	loamy sand
CH10	sandy clay loam	loam	loam	sandy loam	silt loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam
CH11	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam
CH12	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy clay loam	sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand	loamy sand
CH13	silt loam	silt loam	silt loam	loam	sand	sand	loamy sand	loam	sandy loam
CH14	silt loam	silt loam	silt loam	silty clay loam	clay loam	silt loam	silt loam	silty clay loam	silty clay loam
CH15	silt loam	silty clay loam	silty clay loam	silty clay loam	silt loam	silt loam	silt	silty clay loam	silty clay loam
CH16	silty clay loam	silty clay loam	silty clay loam	silty clay loam	silt loam	silt loam	clay	silt loam	silt loam
CH17	silt loam	silt loam	silt loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	silt loam	loam	loamy sand
CH18	sand	sand	sand	loam	loam	loam	loam	loam	loam
CH19	silt loam	loam	loam	sand	sand	sand	sand	sand	sand
CH20	loam	loam	loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand	loamy sand	sandy loam

附表 1(續) 彰化沿海之土壤底泥質地分析

	2014.07	2014.08	2014.09	2014.10	2014.11	2014.12	2015.01	2015.02
CH01	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	silt loam	sandy loam	loam	loam
CH02	loamy sand	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam	silt loam	sandy loam
CH03	silt loam	loam	loam	loam	loam	loam	loam	loam
CH04	silt	sandy loam	sand	loamy sand	loam	loam	loam	sandy loam
CH05	loamy sand	sandy loam	loamy sand	sandy loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand
CH06	silt loam	silt loam	sandy loam	loam	silt	loamy sand	silt loam	silt loam
CH07	silt loam	loam	loam	loam	sandy loam	silt loam	silt loam	loam
CH08	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt	silt loam	sandy loam
CH09	sandy loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loamy sand	loamy sand	sandy loam	sandy loam
CH10	loam	loamy sand	loam	sandy loam	silt loam	silt loam	silt loam	sandy loam
CH11	sandy clay loam	loam	sandy loam	loam	sandy loam	silt loam	loam	silt loam
CH12	sandy loam	sandy loam	loamy sand	sandy loam	sandy loam	sandy loam	loamy sand	loamy sand
CH13	loam	loamy sand	silt loam	silty clay loam	sand	silt loam	silt loam	silt loam
CH14	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	clay	sandy loam	silt loam	silt loam
CH15	silt loam	silt	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam
CH16	silt	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam
CH17	sandy loam	sandy loam	loam	sandy loam	silt loam	silt loam	silt loam	loam
CH18	sandy loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	silt loam	loam
CH19	sand	loamy sand	sand	sand	sand	sand	sand	sand
CH20	loamy sand	loamy sand	sandy loam	sandy loam	loam	sandy loam	sandy loam	sandy loam

附表 2 2014 年 3 月烏溪流域土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201403	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
F1	130.02±1.37	68.99±2.94	108.89±4.28	596.38±23.17	1.67±0.41	33.68±1.57
F2	38.32±1.85	13.72±0.78	29.62±1.13	167.94±2.07	0.99±0.14	45.35±45.11
F3	156.10±1.15	94.08±0.12	129.21±1.19	600.99±5.37	1.72±0.65	35.59±6.14
F4	150.39±0.85	85.62±1.80	135.20±0.91	538.98±5.95	2.75±0.27	51.08±5.36
F5	33.59±1.99	11.21±0.01	26.16±3.01	139.37±0.71	1.55±0.08	7.63±0.73
F6	248.76±2.25	102.53±3.41	186.38±2.59	880.20±17.54	2.20±1.30	56.80±2.72
W1	92.50±0.82	16.81±2.78	61.78±0.47	239.91±0.88	1.30±1.13	26.63±12.32
W2	22.21±0.52	n/a	6.88±0.65	66.50±0.92	0.64±0.01	14.51±0.73
W3	247.70±5.20	118.02±1.79	200.82±3.42	900.20±20.46	1.49±0.29	48.82±7.59
W4	124.29±1.02	28.28±1.43	55.56±0.48	242.62±0.94	1.19±0.15	37.23±9.59
W5	59.07±0.68	12.62±1.42	42.88±1.90	150.92±6.39	0.39±0.10	35.40±5.42
W6	38.33±6.29	n/a	25.15±4.24	112.09±17.67	0.80±0.05	16.58±11.93
S5	37.75±0.05	3.65±3.91	25.24±0.10	105.60±0.87	n/a	22.95±6.00

n/a：低於偵測極限。

附表 3 2014 年 6 月烏溪流域土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201406	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
F1	42.94±12.37	12.79±4.87	37.40±13.86	210.59±9.13	1.30±0.46	9.73±0.40
F2	71.82±0.37	46.39±0.78	56.26±1.35	333.01±7.76	1.56±0.20	37.58±15.03
F3	32.47±2.71	14.08±4.71	21.58±1.48	174.21±8.39	1.75±0.38	8.12±2.94
F4	31.08±0.16	3.99±0.69	18.16±1.29	100.67±4.11	0.29±0.41	28.36±2.85
F5	30.29±3.58	2.79±2.59	17.13±1.18	98.15±6.38	1.00±0.83	6.52±6.05
F6	21.14±0.37	n/a	12.50±0.36	74.45±2.92	1.28±0.08	11.76±11.46
W1	88.64±371	28.91±2.32	43.67±4.56	229.49±2.46	0.75±0.24	25.43±10.19
W2	22.86±0.23	0.76±1.07	10.35±0.71	70.90±0.34	1.40±0.58	23.74±2.58
W3	22.68±2.47	n/a	9.56±0.53	82.82±3.45	1.14±0.11	20.26±19.02
W4	37.39±1.00	10.36±1.95	18.22±1.10	100.91±2.10	1.13±0.31	22.66±3.26
W5	62.25±0.95	22.09±2.22	37.04±1.19	154.86±0.86	1.11±0.19	29.75±11.75
W6	34.83±1.11	2.02±2.27	18.94±0.09	94.29±2.89	0.90±0.76	21.96±4.65
S5	42.84±2.18	9.48±2.79	20.76±0.18	117.39±2.97	0.95±0.07	32.13±6.74

n/a：低於偵測極限。

附表 4 2014 年 9 月烏溪流域土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201409	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
F1	71.07±4.52	50.31±5.10	53.81±4.04	342.90±29.09	1.78±0.33	41.81±4.18
F2	130.95±0.37	76.08±1.69	100.84±2.89	579.35±14.36	0.77±0.24	45.62±0.74
F3	154.77±1.37	100.50±0.45	118.98±0.05	671.98±3.17	1.99±0.41	46.69±8.40
F4	120.72±1.26	95.98±0.72	92.73±1.75	477.94±3.42	1.56±0.56	26.25±1.05
F5	21.32±0.46	12.71±0.56	13.08±0.11	85.40±0.71	1.18±0.23	12.39±3.90
F6	74.80±2.56	38.33±0.73	29.89±0.80	160.64±0.36	1.63±0.27	28.72±0.58
W1	60.10±0.54	26.05±2.42	42.84±0.90	253.03±2.84	1.48±0.27	17.75±6.04
W2	30.53±0.37	14.02±3.77	9.92±0.18	79.02±3.64	1.56±0.45	25.77±4.25
W3	36.17±1.71	20.51±1.23	13.33±0.25	102.96±2.04	1.19±0.28	13.99±4.52
W4	45.89±1.38	22.14±1.26	18.08±0.66	103.47±1.38	1.21±0.33	23.62±6.14
W5	105.01±1.72	44.29±2.04	67.13±0.07	227.91±1.41	1.57±0.43	39.50±3.97
W6	69.66±0.45	37.30±1.03	33.98±0.16	169.46±0.04	1.76±0.01	33.94±0.4
S5	38.76±1.13	19.03±2.94	30.19±0.02	101.31±1.24	0.74±0.81	22.61±7.77

n/a：低於偵測極限。

附表 5 2014 年 11 月烏溪流域土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201411	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
F1	68.61±0.51	53.36±1.72	58.72±1.94	359.01±8.66	n/a	10.26±1.00
F2	25.52±1.54	28.61±0.81	15.91±1.76	130.94±0.22	n/a	n/a
F3	134.14±1.96	106.71±0.05	128.68±1.97	582.53±2.25	4.53±0.36	14.01±5.14
F4	18.96±0.09	20.68±1.63	14.23±0.90	80.74±0.53	n/a	n/a
F5	32.14±0.30	28.92±1.22	22.82±0.74	113.89±0.55	n/a	n/a
F6	297.32±0.02	154.47±1.81	109.91±2.50	457.23±4.29	5.02±0.25	24.97±1.71
W1	73.67±0.99	43.18±2.04	28.67±1.25	135.71±2.26	n/a	10.24±1.10
W2	17.73±0.45	15.71±0.12	8.05±1.86	60.21±0.72	n/a	n/a
W3	173.67±3.34	291.55±8.84	50.81±2.01	216.98±3.14	n/a	2.68±3.79
W4	27.47±0.20	20.45±0.91	11.53±0.45	76.17±5.03	n/a	n/a
W5	58.26±1.06	41.10±0.28	49.11±4.49	166.15±0.09	4.92±0.50	6.27±8.86
W6	25.55±0.22	21.48±1.71	19.84±0.88	80.46±6.11	n/a	n/a
S5	27.91±0.08	24.09±0.10	24.61±2.09	89.36±0.31	n/a	0.05±0.07

n/a：低於偵測極限。

附表 6 2015 年 1 月烏溪流域土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201501	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
F1	38.74±5.70	42.61±1.31	32.24±0.47	221.47±2.30	n/a	25.78±2.56
F2	103.72±1.59	75.27±5.03	166.16±0.92	628.83±0.63	n/a	47.79±1.94
F3	107.07±0.12	136.56±0.91	148.51±0.38	550.32±4.67	n/a	38.59±1.52
F4	18.57±2.49	25.54±2.22	14.50±1.48	79.05±3.92	n/a	21.55±0.40
F5	44.70±1.36	38.99±0.09	47.36±11.78	146.42±14.97	0.68±0.04	26.06±0.70
F6	198.18±0.19	98.30±0.21	107.86±7.05	482.20±16.18	0.31±0.02	53.56±0.03
W1	71.74±0.41	34.62±0.29	30.85±0.41	145.28±0.75	n/a	29.45±1.23
W2	16.57±0.15	15.97±0.52	9.33±0.58	63.27±0.49	n/a	25.67±1.99
W3	131.09±1.94	78.21±0.78	54.55±0.35	294.04±0.79	0.19±0.05	39.41±0.11
W4	33.69±2.76	22.43±0.08	15.37±1.76	78.83±1.12	n/a	30.58±4.39
W5	53.61±0.03	35.39±0.30	50.55±1.65	151.62±0.69	n/a	28.93±1.35
W6	37.60±0.46	26.89±0.31	26.61±1.67	107.08±1.31	n/a	27.48±0.10
S5	28.90±2.05	27.26±0.61	23.70±1.64	84.80±1.72	n/a	32.23±1.25

n/a：低於偵測極限。

附表 7 2014 年 1 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201401	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	33.59±1.96	29.79±0.38	17.63±0.17	96.43±3.27	n/a	20.26±1.60
CH02	37.03±2.23	40.47±1.42	27.25±0.77	133.79±14.64	n/a	29.14±7.75
CH03	36.81±0.48	43.51±0.73	32.26±1.05	117.31±1.47	n/a	22.76±1.13
CH04	50.33±1.15	53.48±0.99	28.03±0.74	124.24±1.24	n/a	26.88±2.67
CH05	45.83±1.19	39.50±0.58	45.95±0.48	156.81±0.67	n/a	20.54±1.05
CH06	68.12±0.90	43.62±0.72	79.70±0.53	220.81±2.41	3.00±2.60	23.48±1.66
CH07	95.62±1.54	56.90±0.72	63.42±4.13	260.30±1.85	5.56±0.04	32.30±5.33
CH08	101.39±0.52	58.02±0.46	74.98±0.99	291.03±3.22	5.43±0.04	29.27±0.74
CH09	29.82±0.22	33.49±0.34	11.81±0.31	103.34±0.83	4.50±0.04	23.80±1.15
CH10	33.28±1.09	31.71±0.18	16.46±0.62	104.82±1.40	2.98±2.58	19.08±4.27
CH11	28.52±2.52	28.88±2.41	14.68±1.59	95.97±7.73	n/a	20.04±3.83
CH12	29.58±1.36	36.19±0.71	13.42±0.56	86.79±2.003	n/a	17.74±0.36
CH13	36.35±1.01	39.89±0.82	27.69±0.49	139.45±1.71	4.53±0.00	22.27±0.52
CH14	34.40±1.25	42.03±1.13	23.83±0.13	111.45±0.61	5.07±0.09	24.15±0.81
CH15	38.00±1.91	55.74±1.35	24.38±0.24	110.85±1.12	5.50±0.01	24.06±1.46
CH16	36.01±0.36	53.90±1.76	25.46±0.65	120.35±2.65	5.82±0.08	24.81±2.52
CH17	23.03±1.07	38.50±0.28	9.86±0.24	69.55±0.59	n/a	15.98±0.40
CH18	31.14±1.21	45.45±0.88	14.34±0.36	84.78±1.27	4.70±0.01	17.42±1.26
CH19	21.72±3.23	37.99±2.22	7.68±0.87	112.55±15.97	5.26±0.45	29.25±4.28
CH20	18.91±1.34	36.17±1.03	6.10±0.08	62.90±1.04	n/a	13.46±0.30

n/a：低於偵測極限。

附表 8 2014 年 2 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201402	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	19.24±1.15	27.40±1.03	8.08±0.20	62.66±0.98	n/a	15.10±1.36
CH02	32.98±0.46	56.65±0.75	20.18±0.11	130.75±1.96	n/a	16.25±1.01
CH03	31.92±0.67	45.68±0.86	29.29±0.30	118.48±2.67	n/a	18.33±0.29
CH04	51.65±0.67	62.13±0.66	30.76±0.22	116.10±1.10	n/a	23.32±1.30
CH05	72.85±1.33	57.89±1.79	99.18±2.23	240.57±0.65	1.40±2.43	30.63±1.40
CH06	57.39±0.81	45.78±1.40	66.19±0.52	183.57±3.17	n/a	25.05±3.54
CH07	73.28±0.42	29.68±8.90	54.36±1.68	201.32±1.76	6.61±0.12	29.90±0.95
CH08	130.67±3.06	51.89±2.41	87.43±1.85	347.56±6.85	6.97±0.06	30.79±1.55
CH09	23.88±0.19	20.67±0.31	7.33±0.21	99.18±0.98	5.80±0.02	15.89±0.28
CH10	26.45±0.10	16.79±0.22	14.90±0.23	93.29±0.30	5.42±0.05	17.92±0.29
CH11	27.69±1.37	19.50±1.19	15.71±0.30	95.94±0.95	5.45±0.08	17.25±0.59
CH12	13.16±0.10	10.68±0.48	4.19±0.04	47.92±0.14	3.94±0.04	11.48±0.29
CH13	19.50±1.66	14.35±0.46	4.63±0.11	60.89±0.69	4.37±0.03	10.95±0.61
CH14	31.05±1.18	31.58±1.50	20.69±1.22	103.75±3.94	6.73±0.23	23.72±1.73
CH15	44.50±0.97	22.61±0.70	29.36±0.52	117.55±1.50	5.41±0.18	28.08±0.31
CH16	41.20±1.21	21.79±0.34	31.69±3.86	124.45±1.93	4.96±0.06	24.95±0.74
CH17	24.63±0.87	11.52±1.36	10.11±0.39	67.59±0.66	n/a	15.06±0.84
CH18	32.09±1.82	15.90±1.08	13.91±0.17	79.83±0.67	n/a	18.77±0.79
CH19	19.34±0.06	7.28±2.08	5.84±0.05	72.69±4.61	n/a	14.28±1.32
CH20	24.35±1.18	15.25±0.55	9.91±0.08	77.27±1.55	n/a	19.68±0.30

n/a：低於偵測極限。

附表 9 2014 年 3 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201403	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	27.70±1.69	17.53±0.70	12.14±0.47	92.11±0.95	n/a	18.43±0.32
CH02	37.69±1.02	36.96±0.24	28.88±0.59	137.94±0.82	n/a	25.33±1.40
CH03	30.75±0.26	30.57±0.65	27.40±0.51	107.47±0.81	n/a	15.45±1.12
CH04	49.66±1.14	46.38±1.02	30.27±0.21	115.84±1.34	n/a	24.05±3.01
CH05	41.23±1.79	29.26±0.73	50.43±1.40	147.74±3.70	n/a	18.06±1.29
CH06	99.03±2.17	56.29±0.88	135.28±3.12	331.72±3.21	4.94±0.04	31.47±0.33
CH07	83.14±1.85	44.79±0.55	54.98±0.09	220.81±2.28	3.21±0.04	26.29±1.54
CH08	105.76±1.84	57.26±1.00	78.86±1.15	334.31±6.00	5.44±0.04	32.45±1.52
CH09	29.86±1.08	29.96±0.31	10.63±0.31	113.53±0.21	1.53±3.25	20.52±0.14
CH10	31.64±0.67	26.48±0.98	14.76±0.61	105.75±3.17	n/a	21.92±1.68
CH11	29.68±0.03	25.09±0.73	17.97±0.55	111.13±1.92	n/a	19.25±2.08
CH12	40.91±0.28	32.56±0.62	19.59±0.39	132.53±2.89	n/a	24.53±4.76
CH13	22.39±2.18	17.27±1.17	4.27±0.77	69.06±3.36	n/a	9.75±0.61
CH14	39.81±0.38	32.70±0.62	24.14±0.11	118.15±2.24	5.38±0.02	24.66±1.31
CH15	42.55±0.53	35.11±0.40	26.01±0.17	118.02±0.85	6.10±0.17	28.86±0.41
CH16	37.77±0.42	32.52±0.17	23.20±0.18	112.90±0.47	5.40±0.01	24.52±0.82
CH17	22.32±1.65	19.67±0.51	7.60±0.59	66.72±1.89	n/a±0.00	13.78±1.80
CH18	35.31±0.24	29.49±0.33	16.43±0.45	92.39±1.11	4.84±0.02	20.22±0.95
CH19	18.53±1.41	16.61±0.48	5.51±0.39	83.08±8.51	n/a	18.18±1.06
CH20	24.17±1.12	12.39±0.69	8.92±0.36	78.66±1.23	n/a	23.05±1.59

n/a：低於偵測極限。

附表 10 2014 年 4 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201404	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	28.70±0.05	2.20±0.98	18.88±0.38	88.97±0.23	n/a	17.25±0.58
CH02	28.77±0.40	9.29±0.49	22.33±0.60	110.40±1.56	n/a	17.33±0.66
CH03	31.63±0.36	20.31±0.34	53.60±31.80	134.33±27.30	n/a	19.76±3.62
CH04	38.25±0.75	27.00±0.46	24.69±0.21	104.24±0.36	n/a	18.03±0.71
CH05	31.79±1.06	15.79±1.35	46.04±1.52	149.31±2.44	n/a	15.26±1.22
CH06	16.28±0.19	0.72±0.01	12.85±0.14	100.17±4.58	n/a	9.50±0.35
CH07	23.91±0.42	3.49±1.05	13.64±0.69	83.53±0.82	1.29±2.23	12.47±1.16
CH08	102.72±4.30	44.47±4.45	79.22±0.22	375.98±2.49	5.66±0.07	30.30±0.43
CH09	26.06±0.67	10.31±1.36	8.38±0.23	105.16±1.10	4.57±0.04	14.11±0.98
CH10	28.65±1.12	6.85±0.34	13.49±0.53	108.65±23.50	2.93±2.54	13.85±0.89
CH11	27.06±0.55	8.63±0.37	17.25±0.07	100.08±1.65	4.56±0.02	15.17±0.70
CH12	26.05±0.42	5.19±1.86	13.67±0.33	85.33±1.09	4.27±0.05	15.57±1.03
CH13	21.87±0.55	13.88±0.52	9.21±0.13	79.82±0.51	n/a	14.19±0.23
CH14	34.03±3.29	28.11±0.33	24.91±0.34	114.58±2.82	5.50±0.22	30.02±2.13
CH15	39.81±0.82	30.53±0.34	28.31±0.26	117.02±3.18	6.12±0.20	37.25±0.35
CH16	34.14±1.92	26.53±0.36	25.21±0.39	110.60±0.80	5.54±0.07	30.41±2.43
CH17	28.60±0.30	22.58±0.55	18.48±0.05	86.36±0.28	4.88±0.00	18.37±0.64
CH18	32.15±0.23	23.82±0.57	16.82±0.30	85.46±0.36	4.95±0.04	19.92±1.97
CH19	16.30±0.28	7.91±1.41	6.30±0.64	97.04±42.59	n/a	16.29±1.31
CH20	20.18±0.22	12.96±0.56	8.72±0.32	67.02±0.96	n/a	15.69±0.40

n/a：低於偵測極限。

附表 11 2014 年 5 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201405	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	22.23±1.13	9.77±0.63	7.80±0.03	70.80±2.08	n/a	17.78±2.39
CH02	32.16±1.72	31.43±2.01	23.65±0.40	129.22±7.64	n/a	24.74±2.22
CH03	42.19±0.78	33.81±0.40	32.01±0.90	119.20±0.76	n/a	19.39±1.39
CH04	47.47±0.35	41.04±0.79	23.73±0.65	110.95±1.95	n/a	21.03±0.52
CH05	46.51±1.03	26.64±0.32	55.99±1.90	166.63±3.25	n/a	25.41±0.44
CH06	45.72±0.31	25.33±1.13	45.28±0.78	170.10±0.48	n/a	20.22±2.45
CH07	81.85±2.14	40.35±0.77	45.41±0.49	192.30±3.77	4.90±0.06	24.47±0.96
CH08	114.18±4.25	51.05±1.58	80.55±1.48	332.84±6.00	4.96±0.07	28.59±1.02
CH09	40.41±27.94	36.70±24.48	14.07±10.38	161.77±108.96	7.18±4.89	38.58±26.27
CH10	31.38±0.60	23.15±2.48	14.78±0.74	103.18±2.84	2.73±2.37	18.24±2.75
CH11	27.79±0.26	25.32±0.29	14.12±0.39	102.92±1.32	1.32±2.29	16.85±0.45
CH12	32.32±1.75	20.16±1.52	12.50±0.62	104.84±5.49	n/a	28.08±1.52
CH13	39.89±4.09	23.33±1.76	24.16±2.46	120.24±11.97	n/a	24.90±2.73
CH14	50.89±2.57	33.58±2.41	33.27±2.15	151.47±9.28	n/a	36.29±1.34
CH15	50.65±0.81	33.59±0.77	32.89±0.64	139.33±2.19	n/a	36.84±0.85
CH16	44.22±0.69	27.58±0.34	27.13±0.67	122.12±1.68	n/a	28.39±0.66
CH17	29.94±2.22	20.76±1.09	14.70±1.06	84.16±6.76	n/a	20.53±1.84
CH18	35.53±1.80	22.98±1.04	15.88±1.13	88.39±5.35	n/a	22.35±1.56
CH19	19.03±0.77	13.11±1.25	6.70±0.40	96.48±20.36	n/a	24.98±2.59
CH20	22.80±1.67	13.02±1.31	7.75±0.89	64.04±4.47	n/a	20.83±3.26

n/a：低於偵測極限。

附表 12 2014 年 6 月彰濱沿海土壤底泥樣品中六大金屬濃度

單位：mg kg⁻¹

201406	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
CH01	26.00±0.32	0.62±0.02	12.25±0.49	83.38±0.95	n/a	19.55±0.47
CH02	32.13±1.83	17.06±1.61	19.56±1.04	120.70±5.92	n/a	19.05±1.10
CH03	46.92±0.89	22.39±1.13	37.83±0.74	128.49±1.86	n/a	23.65±0.57
CH04	46.66±0.45	25.25±1.28	23.77±0.70	103.27±1.45	n/a	21.70±0.51
CH05	28.51±0.99	5.07±0.70	40.34±6.58	134.05±1.71	n/a	15.72±0.48
CH06	29.51±1.17	1.30±0.61	19.52±0.37	146.06±15.27	n/a	13.42±0.64
CH07	74.68±1.80	25.98±1.12	47.24±1.84	179.95±4.49	n/a	25.20±0.31
CH08	84.12±8.59	30.34±3.43	60.33±12.62	279.56±84.72	n/a	29.26±3.44
CH09	49.12±33.88	14.14±13.22	30.13±32.47	183.10±123.54	n/a	25.77±4.85
CH10	26.79±0.11	1.17±0.97	13.06±2.01	94.11±1.06	n/a	17.05±0.48
CH11	26.91±1.73	3.06±1.23	16.35±0.85	104.80±6.90	n/a	21.36±2.86
CH12	22.38±0.12	11.77±0.67	8.46±0.48	76.85±0.35	n/a	21.07±1.73
CH13	32.14±0.33	16.09±0.58	16.99±0.55	98.64±4.60	n/a	21.63±0.37
CH14	42.15±0.47	32.11±0.58	27.43±0.30	123.53±1.88	n/a	33.93±1.59
CH15	37.82±0.25	25.91±1.30	23.76±0.64	107.91±1.41	n/a	25.36±5.10
CH16	35.53±0.99	22.47±0.90	24.92±0.09	116.66±0.36	n/a	25.57±0.69
CH17	21.58±0.32	9.07±1.33	7.51±0.56	65.77±1.67	n/a	20.55±1.75
CH18	30.33±0.65	13.16±10.25	14.06±0.28	80.85±1.28	n/a	19.83±1.22
CH19	21.54±3.26	4.51±3.75	5.54±0.54	67.25±1.30	n/a	15.82±0.53
CH20	24.57±1.71	14.12±0.24	10.09±0.70	74.76±0.12	n/a	21.66±4.24

n/a：低於偵測極限

附表 13 彰濱沿海土壤底泥中之黏粒含量 單位：%

	2014.01	2014.02	2014.03	2014.04	2014.05	2014.06
CH01	13.44	7.90	8.72	8.74	6.35	11.75
CH02	19.43	9.96	14.70	4.76	10.36	7.75
CH03	17.43	11.91	9.27	5.35	14.35	15.75
CH04	21.41	17.70	16.84	11.05	14.35	12.04
CH05	14.83	23.69	9.32	8.47	10.36	6.35
CH06	23.43	13.79	18.65	2.76	8.35	6.06
CH07	21.41	17.95	8.99	3.06	11.75	13.75
CH08	9.42	9.84	19.23	5.36	5.76	9.74
CH09	9.43	5.94	6.69	2.76	8.55	7.75
CH10	15.41	9.87	10.15	4.16	10.54	6.00
CH11	15.43	9.13	11.53	11.55	10.56	9.87
CH12	21.43	4.52	11.47	11.55	8.55	5.76
CH13	21.41	5.15	6.93	6.35	12.56	11.74
CH14	31.43	26.98	19.49	22.33	30.53	33.73
CH15	30.82	19.05	11.53	9.35	32.52	31.84
CH16	29.44	25.04	19.54	22.44	26.53	23.73
CH17	9.44	7.11	6.90	14.53	10.56	5.75
CH18	19.44	13.12	14.95	16.46	16.55	11.74
CH19	5.43	5.13	7.53	6.54	4.56	5.75
CH20	11.43	13.03	11.55	8.47	10.54	11.75

附表 14 台中縣降雨量資料(中央氣象局) 單位：毫米

月份	2014.03	2014.06	2014.09	2014.11	2015.01
平均 降雨量	10.5	19.2	28.4	5.8	3.3

附表 15 彰化縣降雨量資料(中央氣象局) 單位：毫米

月份	2014.01	2014.02	2014.03	2014.04	2014.05	2014.06
平均 降雨量	0.5	3.4	6.3	2.9	26.3	10.3

參考文獻

- 鄭暉，楠溪森林動態樣區直立木本植物葉功能特性之研究，碩士論文，2013。
- 廖怡慧，稻稈生質炭對重金屬銅、鋅、鎳、鎘、鉛吸附反應之探討，碩士論文，2012。
- 刁茂文，底泥中重金屬分佈特性之探討，碩士論文，2003。
- 羅良慧，土壤鎘污染危害頻架系統建立之研究，第十屆環境規劃與管理研討會論文集，p37-44，1997。
- 湯政明，添加幾丁聚醣對於受重金屬污染土壤植物復育影響之個案研究，碩士論文，2007。
- 吳憲昌，河川水中氟離子對於底泥重金屬溶出的影響，碩士論文，2005。
- 李春樹，銅鋅鉛在污染土壤中之化學型態及其萃取性研究，博士論文，2003。
- 陳愛玲，鉻在土壤中不同粒徑粒子之存在型態及不同萃取劑之清洗效率，2008。
- 徐貴新，台灣地區土壤重金屬含量空間特性分析，博士論文，1998。
- 李達源，土壤質地，P.1-24。土壤與肥料分析手冊(二)，中華土壤肥料學會，2009。
- 吳正宗，土壤酸鹼度，P.4-7，土壤與肥料分析手冊(一)，中華土壤肥料學會，2008。
- 曾國珍，土壤氧化還原電位，P.64-68，土壤與肥料分析手冊(二)，中華土壤肥料學會，2009。
- 方文村、劉玉雪、吳浚霖、祝德杭、蔡惠琳，嚴重污染灌溉水土-作物之調查(大甲溪灌區)，行政院農委會，2001。
- 江凱楹、王亞男、王明光、江博能，溪頭溫帶森林根圈及非根圈土壤中低分子量有機酸與重金屬物種之研究，台灣林業科學研究報告 21(3):327-37，2006。
- 謝添進，台北、高屏地區土壤污染涵容能力推估，2002。
- 胡伯瑜，土壤中水分境況與溫度效應對於重金屬吸附與脫附行為之探討，碩士論文，1999。
- 李家興，可溶性有機碳對兩種土壤吸脫附銅鋅鎘之影響，碩士論文，2011
- 李政賢，台灣東部海岸山脈新港山東測植群分析之研究，碩士論文，2003。
- 林坤益，藤枝森林遊樂區植群生態之研究，碩士論文，2003。
- 白梅，影響土壤中重金屬淋溶的主要因素的研究，碩士論文，2011。
- 涂冬員，以螞蟻做為湖山水庫鄰近地區棲地復育試驗之森林生態系指標(膜翅目：蟻科)，碩士論文，2011。
- 高明脩，合歡山地區台灣鐵杉與台灣冷杉的外生菌根真菌多樣性及生態，2012。

- 陳正又，毒龍潭大型底棲無脊椎動物及浮游生物相群聚結構之季節變化，2013。
- 許哲綸、高雅敏、周秀冠、鄭守訓、徐錦豐、施養志，2009，食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量之調查。藥物食品檢驗局調查研究年報，27，p205-215。
- 林傑斌、林川雄、馮兆康，SPSS 統計分析與實務，2011。
- 陳尊賢，台灣地區土壤環境重金屬背景值調查分析，行政院環保署，1998。
- 環境保護署，土壤中酸鹼值測定方法 NIEA S410.61C，2005。
- 環境保護署，水中總有機碳檢測方法—燃燒/紅外線測定法 NIEA W530.51C，2009。
- Aydinalp, C.,and S. Marinova,2003. Distribution and Forms of Heavy Metals in Some Agricultural Soils. *J. Environ. Stud.* 12:629-633
- ATSDR, 2008. Chromium - ToxFAQs™
- Bremner, J. M. 1996. Acid Ammonium Oxalate in darkness—Tamm's Reagent of Soil Analysis: Part 3-Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. D. L. Sparks et al., eds. Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc.
- V. G. Caccia, F. J. Millero, Albert Palanques, 2003. The distribution of trace metals in Florida Bay sediment. *Marine Pollution Bulletin* 46 1420-1433.
- Dragos V Nica, Marian Bura, Iosif Gergen, Monica Harmanescu and Despina-Maria Bordean, 2012. Bioaccumulative and conchological assessment of heavy metal transfer in a soil-plant-snail food chain *J. Chemistry Central*
- Jian-feng Peng, Yong-hui Song, Peng Yuan, Xiao-yu Cui, Guang-lei Qiu, 2009. The remediation of heavy metals contaminated sediment, *J. Hazard. Mater.* 161 633-640.
- K. Kalbitz, R. Wennrich, 1998. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter, *Sci. Total Environ.* 209 27-39
- Kuang-Chung Yu, Li-Jyur Tsai, Shih-Hsiung Chen, Shien-Tsong Ho, 2001. Chemical binding of heavy metals in anoxic river sediments, *Water Res.* 17 4086-4094.
- Suen-zone Lee, Herbert Allen, C.P. Huang, Donald L. Sparks, Paul F. Sanders, Willie J. G. M. Peijnenburg, 1996. Predicting Soil-Water Partition Coefficients for Cadmium. *J. Environ. Sci. Technol.*
- Lepš J. and Šimilaur P., 2003. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO Published by the press syndicate of the university of Cambridge. 1-261.
- Michael O. Angelidis and Maria Aloupi, 2000. Geochemical modeling of cadmium sorption to soil as a function of soil properties. *Marine Pollution Bulletin* 77-82
- M.A. Ashraf, M.J. Maah, and I. Yusoff, 2012. Chemical Speciation and Potential Mobility of Heavy Metals in the Soil of Former Tin Mining Catchment *J. Scientific World*
- Ming Chen and Lena Q. Ma, 2001. Comparison of Three Aqua Regia Digestion

Methods for Twenty Florida Soils. J. Soil Science Society of America

- RENE ´ P.T. J ANSSEN et al.,1997. Equilibrium partitioning of heavy metals in dutch field soils. I. Relationship between metal partition coefficients and soil characteristics J Env. Toxicology and Chemistry, Vol. 16, No. 12, pp. 2470–2478
- S. Dragović, N. Mihailović, B. Gajić, 2008. Heavy metals in soils: distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources, *Cemosphere* 72 491-495
- S.N. Sin, H. Chua, W. Lo, L.M. Ng, 2001. Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong. *Environ. International* 26 297-301
- Ter Braak, C. J. F., 1994. "Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods." *Ecoscience.*, vol. 1, iss. 2, pp. 127-140
- USEPA, 2009. National primary drinking water regulations.
- USDA, 1999. Soil Taxonomy - A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second Edition.
- Woodwell G. M., 1967. Toxic substances and ecological cycles *Sci. American* 216(3): 24-31.
- W. Calmano, J.F. Hong, U. Forstner, 1993. Binding and mobilization of heavy metal in contaminated sediment affected by the pH and redox potential, *Water Sci. Technol.* 28 223-235.
- Zalidis.,G.,N.Barbayirinis and M.T. Matsi, 1999. Forms and distribution of heavy metals in soils of the Axios Delta of Northern Greece. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*