



行政院環境保護署

108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

生態風險評估參數建置：以老街溪底泥 重金屬污染為例 期末報告（定稿）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立臺灣大學／生物環境系統工程學系
專案主持人：廖秀娟教授
專案執行期間：108 年 01 月 04 日起至
108 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 108 年 12 月 印製





專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究型 ☐ 模場型	
研究主題		☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 其他（風險評估參數建置）					
申請機構系所		國立臺灣大學/生物環境系統工程學系					
機構地址		臺北市大安區羅斯福路四段1號					
專案主持人		廖秀娟		職等／職稱		教授	
協同主持人		無		職等／職稱			
專案名稱	中文	生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例					
	英文	Development of ecological risk assessment indices: Using heavy metal contamination in sediments in Laojie River as a case study					
	關鍵字	生態風險評估、底泥、重金屬、老街溪					
執行期程		自民國 108 年 01 月 04 日起 至民國 108 年 11 月 30 日止					
專案主持人		姓名:廖秀娟 教授 E-mail: vivianliao@ntu.edu.tw 專線: 02-33665239					
專任助理		姓名:蔡鎮優 E-mail: r07622013@ntu.edu.tw 專線:02-33663440; 0978-080143					
經費分析總表 (僅模場試驗 專案需填寫兩 年度金額)		專案預估總經費		第一年申請金額		編列說明	
		1.	人事費用		315,000	(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費		0	(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用		285,964	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用		23,400	(含差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用		12,000	(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費		63,636	(1~5 項相加之 10%為限)	
		7.	自籌款		0	(申請單位自行籌備款項)	
		申請補助金額(1~6 項)		700,000		總金額：700,000	
計畫總金額(1~7 項)		700,000		總金額：700,000			

專案主持人：_____（簽名及蓋章） 日期：





研究成果(期末)摘要

國內重要河川底泥中含有不同污染程度的重金屬。當底泥污染物濃度超出標準時，應啟動適當之風險評估。本專案計畫於枯水期(2019年1月)以及豐水期(2019年6月)進行老街溪流域底泥採樣，並分析底泥重金屬的濃度及分佈。利用逆王水微波消化法分析底泥得知，枯水期及豐水期時，Cu、Ni、Pb、Zn在部份樣點超過底泥品質標準。由序列萃取法分析底泥得知，部份樣點Cu、Zn、Pb的可交換相、可還原相及可氧化相濃度於偏高。利用不同的污染指數，量化底泥中重金屬的污染程度，結果顯示，重金屬濃度高之樣點，與個別污染指數結果成正相關。總體污染程度指數(MCD)顯示，老街溪流域呈低至中度污染程度。評估底泥重金屬的生物效應及潛在的生態風險，結果發現，在枯水期及豐水期造成潛在生態風險比較嚴重的有Cu、Ni、Zn。各樣點的潛在生態風險指數(PERI)在枯水期中較高。風險評估編碼(RAC)顯示，Cd、Cu、Zn及Mn具有較高的生物可獲性。利用皮多變量統計方法分析發現，枯水期及豐水期，Cu、Ni、Zn為多個污染源的共同污染物，顯示此三種金屬可能來自相同來源。本專案計畫期末報告內容符合預期執行進度。



Abstract

Several major rivers in Taiwan have been reported to be contaminated by heavy metals with different degree. The sediment ecological risk assessment should be conducted while the concentrations of heavy metals exceed the upper limit of sediment quality guideline. In this final report, we have collected and analyzed sediment samples from Laojie River area in January, 2019 (dry season) and June, 2019 (raining season), respectively and analyzed the concentrations and distribution of the sediment samples. By using microwave-assisted acid digestion, the results showed that in both dry and raining seasons, Cu, Ni, Pb, Zn were the major contaminants and concentrations in some sampling sites were even higher than that of upper limit of sediment quality guideline. By using the sequential extraction approach, the results showed that concentrations of Cu, Zn, Pb in exchangeable, reducible, and oxidizable fractions in several sampling sites were very high. In addition, different pollution indices were used to quantify the degree of pollution posed by heavy metals. The results showed that several individual pollution indices are in agreement with the heavy metals concentrations in sediments in most sampling sites. Moreover, the overall contamination degree of most sampling sites showed low to moderate degree of contamination. Furthermore, ecological risk posed by heavy metals in the sediments was assessed. The results showed that in both dry and raining seasons, Cu, Ni, Zn showed highly potential ecological risk. Based on the potential ecological risk index (PERI), in general, most sampling sites in dry season pose higher potential ecological risk than that of raining season. Risk assessment code (RAC) further indicated that Cd, Cu, Zn, Mn exhibited higher bioavailability. Finally, based on the results of multivariate statistical analyses, we deduced that Cu, Ni, Zn originated from the same anthropogenic sources within Laojie River area. This final report fulfills the expected progress.



目錄

(一) 前言	1
(二) 研究目的	3
(三) 文獻探討	5
1. 重金屬污染及毒性	5
2. 臺灣河川底泥污染	7
3. 生態風險評估	8
4. 老街溪	11
5. 研究可行性	12
(四) 研究方法與過程	13
1. 現地採樣分析	14
2. 底泥分析	18
3. 生態風險評估指數	20
4. 多變量統計分析	23
5. 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	24
(五) 結果與討論	26
1. 現地採樣資料	26
2. 底泥分析結果	26
3. 污染程度指數	70
4. 生態風險指數	83
5. 多變量統計分析	91
(六) 結論與建議	100
(七) 參考文獻	102
(八) 專案成果績效自評表	111
(九) 附件	116
附件(一) 底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法	116
附件(二) 申請書審查意見回覆對照表	118
附件(三) 期中報告審查意見回覆對照表	121



附件(四) 期末報告審查意見回覆對照表	124
---------------------------	-----



表次

表一、老街溪 2019 年 1 月(枯水期)及 6 月(豐水期)採樣地點資訊.....	17
表二、老街溪底泥 pH 值及總有機碳分析	28
表三、逆王水微波消化法與序列萃取法重金屬總濃度.....	33
表四、序列萃取法重金屬濃度	48
表五、老街溪底泥重金屬地質累積指數 I_{geo}	73
表六、老街溪底泥重金屬富集因子 EF	75
表七、老街溪底泥重金屬污染因子 CF.....	78
表八、老街溪底泥總體污染程度(MCD-PLI).....	82
表九、重金屬底泥品質指標 SQGs	85
表十、老街溪底泥重金屬生態風險指數(PERI-TUs)	89
表十一、老街溪底泥重金屬皮爾森相關性(Pearson correlation)分析 ...	93
表十二、老街溪流域底泥重金屬主成分分析(PCA)	97



圖次

圖一、2019 年 1 月(枯水期)之老街溪採樣地點及其地理分布位置	15
圖二、2019 年 6 月(豐水期)之老街溪採樣地點及其地理分布位置	16
圖三、老街溪底泥重金屬之化學形態分布	59
圖四、老街溪流域底泥重金屬主成分分析(PCA)	99



(一) 前言

河川底泥為重金屬及不易分解污染物之累積終點。即使當河川水質獲得改善，底泥污染物即使濃度不再增加，沉積於底泥之污染物仍可能會再度釋回水體，進而造成人類健康及水中生物的潛在風險(Hill *et al.*, 2013)。因此，瞭解河川底泥污染物的潛在危害風險是重要的課題。

依行政院環境保護署歷年來的調查，國內重要河川底泥含有不同程度的重金屬及有機污染物(行政院環境保護署, 2018b)，有些污染物已超過其底泥品質指標上限值。依據「底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法」規定，當底泥及水產動物體的污染物濃度超出標準時，應啟動適當之風險評估，進一步確認污染物於底泥之污染趨勢，為主管機關決策之依據。

唯臺灣在生態風險評估較缺乏經驗，尤其是對於臺灣主要河川底泥污染的生態風險評估，較缺乏系統性或整合性的研究。現階段仍須確立本土的底泥生態風險評估指標及參數，需要建置更完整的風險評估參數，以協助底泥生態風險評估系統運作。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例



(二) 研究目的

本研究計畫以老街溪底泥重金屬污染為例，進行系統性的底泥重金屬生態風險評估，之後期能系統性或整合性的建置臺灣河川底泥生態風險評估參數。本研究計畫包括以下的目標：

- (1) 分析老街溪流域底泥重金屬的濃度及分布；
- (2) 利用不同的污染指數(pollution indices)，進一步探討底泥中個別及整體重金屬的污染程度；
- (3) 評估底泥重金屬的生物效應及潛在的生態風險；
- (4) 利用多變量統計方法(multivariate statistical methods)，分析重金屬污染的來源。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例



(三) 文獻探討

1. 重金屬污染及毒性

「重金屬」一般意指相對密度大於 5 g/cm^3 之物質(Jarup, 2003)。此外，重金屬亦可被定義為具有生物累積性的必需或非必需元素，其中包括金屬元素鉛(Pb)、鎘(Cd)、汞(Hg)、鉻(Cr)、銅(Cu)、鎳(Ni)、錳(Mn)、銀(Ag)、鐵(Fe)和鋅(Zn)，以及過渡元素砷(As)等(Suvarapu and Baek, 2017)。重金屬為地殼的微量組成成分，其地殼中存在比例因地而異，形成地域性的背景值差異(Caussy *et al.*, 2003)。重金屬具有許多工業、農業與礦業應用價值，因此被開採、冶煉、加工並大量及廣泛使用。然而，人為開採與應用顯著改變重金屬的自然循環，導致重金屬以有害的形式與濃度累積於生態圈，造成生態環境污染。由於重金屬在環境中難以降解，因此構成持久性污染，導致生態系統的風險(Manzoor *et al.*, 2018)。人類主要透過工業廢氣排放、廢水放流、肥料施用與污泥再利用等途徑將重金屬釋放到環境中(Weissmannova and Pavlovsky, 2017)，因此空氣、水與土壤是人為重金屬污染的首要介質。

重金屬在大氣中易吸附於微細懸浮顆粒(PM_{10} 與 $\text{PM}_{2.5}$)中，並隨大氣循環行長程運輸，因此大氣中的重金屬污染亦是全球性議題(Li *et al.*, 2013)。大氣中重金屬主要來自交通工具相關的 Cr、Pb、Cu、Zn、Cd 與 Fe；工業生產廢氣中的 As、Mn、Hg、Cd 與 Zn；以及燃煤排放的 As、Hg 及 Cr 等(Suvarapu and Baek, 2017)。以 $\text{PM}_{2.5}$ 而言，除了位於中東國家的高收入國，一般上中低收入國家如非洲各國、東南亞國家、太平洋區域的中國及菲律賓等，空氣中 $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度高於美洲、歐洲各國(WHO, 2016)。空氣懸浮顆粒主要透過乾沉降與溼沉降重新回到土壤與水體中(Wu *et al.*, 2018)。

土壤是環境中重金屬重要的累積基質。土壤內的重金屬濃度背景值取決於地質因素，例如鎂鐵質岩石(mafic rocks)的風化會造成周邊區域的土壤含較高濃度的 Fe 與 Mg (Khan *et al.*, 2013)。然而，人類活動可造成某些重金屬的富集，導致重金屬濃度達到污染的標準(Kowalska *et al.*, 2018)。例如，研究統計目前全球 Pb 的平均富集值約為地殼背景值的 6-35 倍之間，尤其以歐洲與北美國家最嚴重，估計 Pb 富集值為地殼背景值 100 倍以上(Marx *et al.*, 2016)。在中國，由於都市與工業的飛躍發展，造成境內約 16% 的耕地受到重金屬污染，其中尤其以 Cd 為最常見的污染物；其他常見的重金屬污染還包括 As、Cu、Pb、Cr 與 Zn (Duan *et al.*, 2016)。除了空氣中懸浮的重金屬沉降造成一般土壤污染，農業活動也透過肥料與農藥施用導致重金屬的富集。磷礦石(rock phosphate)與磷肥常含有 Cd、As、Pb 與 Hg，農藥中可能含有 Cu、Zn、Pb 與 As，回填的污泥與爐渣含有各種



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

重金屬，因此在農地重複施用以上物質，皆可透過重金屬污染逐漸將土壤劣化(Weissmannova and Pavlovsky, 2017)。

環境水體，尤其河川的重金屬污染是受高度重視的環境議題。雖然空氣中的懸浮顆粒沉降可影響河川重金屬濃度，然而河川最主要的重金屬污染源是來自農業、工業與一般都市廢水的排放(Gall *et al.*, 2015)。例如，製革、電池、電鍍、發電、冶金及礦業等產業都可能排放遠高於環境法規容許濃度的重金屬，造成周邊區域環境污染(Soares and Soares, 2013)。研究報告發現荷蘭一些農地的逕流水可將農地土壤中的重金屬(如 Pb 與 Zn)析出並流入河川，說明累積於土壤中的重金屬可透過降雨重新釋放到水體中(Bonten *et al.*, 2008)。此外，有研究利用統計分析指出中國揚子江流域的重金屬 As、Cd、Pb、Hg 及 Zn 污染與工業活動高度相關，同時也指出以上重金屬在羅龍鎮至李家沱兩個工業區之間流域的濃度最高(Yi *et al.*, 2011)。在孟加拉，缺乏規劃的紡織、染整、煉鋼及煉油等工業因不妥當排放廢水，造成 Karnaphuli 河嚴重受到重金屬 As、Cr、Cd 及 Pb 的污染，且該河流底泥中的 As、Cd 及 Pb 皆屬高度污染，顯示河川水體中的重金屬與底泥具有交互作用(Ali *et al.*, 2016)。

除了直接造成水體的污染，人為活動也造成河川底泥的污染問題。底泥因具有大量有機物質及複雜的組成，易與水中重金屬交互作用影響其流佈特性(Mohiuddin *et al.*, 2012)。在水環境中之重金屬離子會經由沉澱、水合(hydrolysis)、吸附等機制沉降到底泥中(Gaur *et al.*, 2005; Wunderlin, 2018)。並且，因重金屬具有難以降解之特性，使底泥中重金屬不易去除或稀釋，使底泥成為環境中重金屬之累積終點(sink)。此外，底泥中的重金屬之移動性受擾動、pH 值改變、生物作用、有機質等影響有可能增加(Du Laing *et al.*, 2009; Saeedi *et al.*, 2013)，並且其生物可獲性(bioavailability)亦可能隨氧化還原電位、底棲生物活動等增加(Zhang *et al.*, 2014)。綜上所述，底泥不僅是重金屬污染物之累積終點，同時可能也是污染源，除可能透過底棲生物之攝食行為進入生物體內造成毒性外，經移動性改變而重新釋出之金屬離子，對於水中之魚類等水生生物亦可能造成生態危害(Chen *et al.*, 2018; Wunderlin, 2018)，因此近年來的研究逐漸重視底泥的污染問題(Vaananen *et al.*, 2018)。

日本一項研究發現鶴見河因上游都市化、工業活動以及焚化爐運作，造成底泥中受到中度 Cd、Zn、Pb 及 As 的污染(Mohiuddin *et al.*, 2012)。中國錦州灣因上游同時存在 Zn 冶煉、兵工廠、煉油、化工及船塢等重工業，造成河口底泥中極為嚴重的 Zn、Pb、Cd 與 Cu 污染(Li *et al.*, 2012)。雖然以上研究提出底泥中確實出現嚴重的重金屬污染，這些污染數字未必真正反映出污染所造成的生態風險，因此有必要深入探討底泥中重金屬對生物造成的毒性效應。



有研究利用河口端足蟲(*Melita plumulosa*)之成體及幼體評估底泥重金屬 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 之環境風險，發現部分河口污染底泥之濃度已超過端足蟲幼體之最低致死劑量(King *et al.*, 2006)。此外，此研究亦發現結合於底泥顆粒中的重金屬，會透過攝食途徑進入底棲生物體內，造成生物累積效應(King *et al.*, 2006)。累積於底棲生物之重金屬，可能再經由食物鏈傳輸(trophic transfer)，形成生物放大效應 (Croteau *et al.*, 2005; Griscom and Fisher, 2004; Rainbow *et al.*, 2006)。亦有研究指出彩虹鱒(*Oncorhynchus mykiss*)透過攝食底棲生物，進一步累積底泥重金屬於體內(Woodward *et al.*, 1994; Woodward *et al.*, 1995)，因此底泥重金屬除透過釋出離子影響水中生物如魚類外，亦有可能透過食物鏈傳輸造成生物累積。

除致死率及體內累積外，生長與繁殖能力影響亦是評估底泥重金屬生態毒性之重要指標。有研究針對上游因採礦影響受 As、Cd、Cu、Pb、Mn、Zn 等嚴重污染之河川底泥，利用兩種底棲生物：淡水端足蟲(*Hyalomma azteca*)、搖蚊幼蟲(*Chironomus riparius*)進行底泥暴露試驗(Kemble *et al.*, 1994)。結果發現在暴露條件下，端足蟲之生長與性成熟明顯受到抑制，而與端足蟲比較之下，搖蚊幼蟲之毒性影像較不顯著(Kemble *et al.*, 1994)。此外，對於雙殼綱貝類(*Tellina deltoidalis*)之生長毒性，和與底泥結合之 Cu 濃度高度相關，因此透過濾食含重金屬之底泥顆粒可能造成貝類生長延遲(Campana *et al.*, 2013)，且其行為模式、濾食效率及酵素活性亦會受到重金屬影響(Naimo, 1995)。另外，對於河口端足蟲與哲水蚤(*Nitocra spinipes*)，其繁殖能力受到攝食底泥顆粒結合之 Cu 及影響而降低，且與底泥顆粒性質有關(Campana *et al.*, 2012)。

綜合而論，底泥中累積之重金屬對於底棲生物，可能透過攝食途徑造成體內累積濃度上升，並經由食物鏈傳輸至高等生物，造成水域生態系之潛在風險。此外，底泥重金屬亦可能對於底棲生物造成非致死效應如生長遲緩、繁殖能力下降等，造成其生物族群改變、影響其環境適應性(fitness)。此外，底泥中不同重金屬可能對於不同生物造成毒性差異，因此，完整而全面之底泥重金屬風險評估是十分重要的(Chen *et al.*, 2018; Dahms *et al.*, 2017; Ke *et al.*, 2017; Ranjbar Jafarabadi *et al.*, 2017)。

2. 臺灣河川底泥污染

臺灣曾因工業快速發展而犧牲環境資源，但隨著時間轉移，民眾的環保意識大幅提升。加上政府陸續展開污染整治工作及水質監測計畫，現今的河川水質污染狀況已有改善(行政院環境保護署, 2018a)。由 106 年河川污染指數(river



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

pollution index, RPI)分析結果得知，在全國 54 條流域中，約有 36.3%及 6.6%的河川屬於中度及嚴重污染，嚴重污染的河川包含南崁溪、新虎尾溪、急水溪及二仁溪，RPI 平均值為中度污染的河川包含老街溪、社子溪、新豐溪、客雅溪、北港溪、朴子溪、鹽水溪、東港溪及林邊溪(行政院環境保護署, 2018a)。進一步比對「106 年河川水質歷史資料」與「保護人體健康相關環境基準」得知，當河川 RPI 呈現中度至嚴重污染程度時，經常伴隨重金屬 Cu(不合格率約 17%)及 Pb(不合格率約 13%)之超標現象，其他重金屬元素(如 Cd、Cr、As、Hg、Zn、Mn、Ag 及 Se)則多數符合水質標準。

當河川水質獲得改善後，底泥污染物雖濃度不再增加，但經由底泥與水體的傳輸作用，沉積於底泥之污染物仍可能會再度釋回水體(Chen *et al.*, 2018)。因此，瞭解底泥污染情形顯得十分重要。由前人於 102 年彙整的歷史資料得知，大漢溪、新店溪、淡水河本流、南崁溪、老街溪、鹽水溪、二仁溪、阿公店溪及愛河等 9 條河川中，皆有 3 至 8 種重金屬濃度超過底泥品質指標上限值，超標頻率以 Cu 及 Zn 最高，其次依序為 Hg、Ni、Cr、Cd 及 Pb (陳建宏, 2013)。另由 102 年調查結果得知，大漢溪水質僅有 Cu 頻繁出現超標現象，而底泥部分則有 Cu、Zn 及 Ni 超出底泥品質指標上限；在 18 個測站中，有 11 個測站呈現生物危害風險高(陳建宏, 2013)。依「土壤及地下水污染整治法」及「目的事業主管機關檢測底泥品質備查作業辦法」規定，自 103 年起，各主管機關須定期於網路申報底泥檢測資料，但因多數計畫尚未執行完畢，目前能取得之資訊有限。由最新的「底泥品質調查結果」得知，大坑溪、東門溪、南崁溪、雙溪口溪及田心子溪均出現 Cu 超出底泥品質指標上限，大坑缺溪有 Cu 及 Pb 超出上限值，茄苳溪有 Cu、Zn 及 Ni 超出上限值，老街溪則有 Cu、Zn 及 Pb 超出上限值(行政院環境保護署, 2018b)。另由老街溪底泥重金屬含量調查結果得知，在 13 個樣品中，9 個樣品的 Cu 含量(271-571 mg/kg)超出底泥品質指標上限值(157 mg/kg)，7 個樣品的 Zn 含量(407-2557 mg/kg)超出上限值(384 mg/kg)，2 個樣品的 Pb 含量(172 及 283 mg/kg)超出上限值(161 mg/kg) (童心欣等, 2017)。

綜合上述結果顯示，老街溪水質雖屬中度污染，但底泥重金屬檢測結果有多項超過底泥品質指標上限，因此十分適合做為底泥生態風險評估的案例。

3. 生態風險評估

風險評估(risk assessment)為判定風險的過程，評估每一個事件的某種物質或是壓力是否能被容許，此過程具有相當程度的不確定性(Wilson and Crouch, 1982)。生態風險評估(ecological risk assessment, ERA)係用於估算生態系暴露於單



一或多重壓力下所承受的風險，壓力包含物理性、化學性或生物性等來源(U.S. Environmental Protection Agency, 1998)。由於生態風險評估提供對應環境污染源之策略，故在環境決策上扮演重要的角色。美國環境局科學顧問委員會建議將生態風險評估納為重要決策的參考依據，其重要性絕對不亞於人類健康風險評估(U.S. Environmental Protection Agency, 1990)。

在 1990 早期，美國環保署已公布一套基本的生態風險評估架構與準則，架構包含問題建立(problem formulation)、生態效應評估(effect assessment)、暴露評估(exposure assessment)、及風險特性鑑定(risk characterization) (U.S. Environmental Protection Agency, 1992)。生態風險評估和人類健康風險評估二者有許多共通及不同之處(U.S. Environmental Protection Agency, 1998)。人類健康風險評估單純以人類為最終受體，生態風險評估則需考量生態系統中的族群、群集、營養循環、食物網以及為數眾多的物化特性、生物環境壓力與交互作用等(U.S. Environmental Protection Agency, 1998)。相較於人類健康風險評估，生態風險評估需考量更多的環境變因及受體，因此生態風險評估顯得更為複雜且技術性高。生態風險評估常利用實驗毒理試驗結果推估更高層級的毒性效應，造成風險評估充滿不確定性(Bashkin and Demidova, 2008)。經費負擔大、缺乏評估技巧以及難以取得數據亦為環境風險評估窒礙難行之處(Bashkin and Demidova, 2008)。

3.1 國外生態風險評估執行情形

Ke *et al.* (2017) 評估中國察河保留區底泥重金屬濃度之生態風險，首先蒐集該地區內的重金屬污染濃度如(Cd、As、Cu、Ni、Pb、Cr及Zn等)，並利用地質累積指數(I_{geo})評估其為原生性或是人類行為污染之來源，接續以潛在風險指數(PERI)評估每一重金屬在該保留區內之潛在風險。另一方面亦利用多變量統計分析(multivariate statistical methods)包含主成分分析(principle component analysis, PCA)與皮爾森相關性分析(Pearson correlation)建立重金屬間之交互作用與群聚效應，更進一步比較出重金屬來源以及各重金屬污染間相關程度(Ke *et al.*, 2017)。

另有專家於中東伊朗蒐集 360 個表層底泥的 13 種重金屬資料(包含 Al、Fe、Mn、Zn、Cu、Cr、Co、Ni、V、As、Cd、Hg 及 Pb)，討論重金屬對海洋表層底泥與珊瑚礁岩岸造成之生態風險(Ranjbar Jafarabadi *et al.*, 2017)。比較底泥重金屬濃度及原生性地質濃度後，得知 Cd 與 Hg 在大多採樣點皆明顯高於地質背景值；再根據富集因子(EF)與潛在風險指數(PERI)判定 V、Ni、Hg 與 Cd 具有中度潛在生態風險(Ranjbar Jafarabadi *et al.*, 2017)。接續計算毒性指標(TU)與毒性風險指標



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(toxic risk index, TRI)，結果顯示 Hg 與 Cd 為影響風險指標之關鍵因子(Ranjbar Jafarabadi *et al.*, 2017)。由上述指標得知，人類工業活動的污染影響中東伊朗地區之生態風險，因此進一步利用 U.S. EPA 之風險商數(hazard quotient index, HQ)評估人類健康風險，結果顯示並無顯著人類健康風險(Ranjbar Jafarabadi *et al.*, 2017)。上述研究皆指出風險評估之重要性與可行性，生態風險評估結果亦可跟後續人類健康風險評估作相對比較。

另有研究將人類活動相關的污染物(如重金屬)濃度與生物地球化學(biogeochemical)循環的環境背景值相比，將污染程度量化為地質累積指數(geo-accumulation index, I_{geo}) (Karbassi *et al.*, 2008)、富集因子(enrichment factor, EF) (Raju *et al.*, 2011)、污染因子(contamination factor, CF) (Håkanson, 1980)、校正後整體污染程度(modified overall contamination degree, MCD) (Abraham and Parker, 2008)及污染物負擔指數(pollution load index, PLI) (Tomlinson *et al.*, 1980)等指標。另外，透過公式運算可將污染物濃度轉換為潛在生態風險指數(potential ecological risk index, PERI) (Håkanson, 1980)及毒性當量(toxic units, TUs) (Pederson *et al.*, 1998)，進而推估污染物的生態危害風險(Ke *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018)。此種利用不同指標呈現的環境污染程度及生態風險，已被用來評估底泥重金屬生態風險(Bashkin and Demidova, 2008; Ke *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018)。

3.2 臺灣生態風險評估執行情形

在臺灣，依據 101 年發布的「底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法」，當底泥污染物濃度高於上限且水產品污染物濃度偏高時，應啟動環境影響與健康風險評估。依據 105 年公告之「土壤及地下水污染場址環境影響與健康風險評估辦法」，環境影響風險評估對象係針對人體之外的其他生物體。土污基金會已於 103 年度建置相關底泥風險評估平臺，但內容以環境風險評估及人類健康風險評估為主。由於環境影響風險評估需針對不同生態環境及受體擬定適合的暴露途徑，故執行環境影響風險評估較不容易。另由「環保專案成果報告資訊系統」及「土壤及地下水污染整治基金管理會—結案成果報告」蒐集之資料得知，臺灣鮮少由生物地球化學循環的角度切入，評估底泥重金屬之生態危害風險。

由於高雄沿海高度工業化，造成該地區受到嚴重的重金屬污染，而重金屬污染最終宿命極為回到環境中底泥沉積物，因此高雄沿岸作為底泥風險評估的選址具有重要之代表性。Chen *et al.* (2018)分析臺灣西南沿海河口底泥重金屬時空分布情況，利用不同的生態風險評估指標，分析重金屬之風險危害程度，並



根據平均影響商數(mean ERM quotient)與潛在風險指標得知高雄港口區具有高度生態風險。另由毒性指標(TU)得知，此區具有負面影響的六種重金屬污染危害分別為 $Zn > Cu > Cr > Ni > Hg > Pb$ (Chen *et al.*, 2018)。相對於高雄港口一帶之高度人類行為累積之重金屬分布，其他河口海岸區域重金屬污染風險則相對較低(Chen *et al.*, 2018)。後續由主成分分析得知不同重金屬與該地地質組成(砂、礫或是黏土)有其相連性，組成顆粒較細之沙土地區，相對較易釋出重金屬(Chen *et al.*, 2018)。

雖然臺灣也曾於土污基金會 103 年度建置相關底泥風險評估平臺但其內容以環境風險評估及人類健康風險評估為主。本計畫則將人類活動相關的重金屬污染物濃度與生物地球化學循環的環境背景值相比，進而推估底泥重金屬污染物的潛在生態危害風險，目前臺灣仍較缺乏相關經驗。

因此，本專案計畫希望透過現地採樣研究，以老街溪流域底泥為案例，分析老街溪流域底泥重金屬污染狀況，探討其可能面臨的生態風險問題。期許能建立一個有效可行的底泥生態風險評估工具及流程，協助底泥之環境風險評估作業。

4. 老街溪

老街溪位於桃園市，起源於龍潭區三林里，流經龍潭大池、平鎮市區及中壢市區，最後於大園區出海。老街溪全長 36.7 公里，流域面積大約 82 平方公里(楊于嫻, 2014)。老街溪的上游河段(在龍潭地區)屬於輕微污染，污染來源主為生活污水；在平鎮地區，老街溪沿岸有高污染之工廠；在中壢地區，老街溪河岸曾因欠缺管理而導致攤販林立，進而出現垃圾任意傾倒與污水排放等問題(楊于嫻, 2014)。因此老街溪大部份的中、下遊河段，長期遭受畜牧污水、生活污水與工業廢水污染，屬於中度污染程度(行政院環境保護署, 2018a)。

由於老街溪為中壢區的重要河川，因此桃園市政府於 99 年執行老街溪整治計畫。不僅拓寬河道至 35 公尺，亦改建中正橋、中興橋及中央橋，提高河川之排洪能力，同時改善生活污水及工業廢水排放之問題(楊于嫻, 2014)。此外，設置礫間接觸曝氣氧化設施，降低生活污水之環境影響(楊于嫻, 2014)。然而，由楊于嫻(2014)研究結果得知，整治前後的老街溪水質狀況並無差異，因此水質改善仍有待加強。由近年的「底泥品質調查結果」得知，老街溪底泥的 Cu、Zn 及 Pb 超出其底泥品質指標上限值(行政院環境保護署, 2018b)。由童心欣等人(2017)的老街溪底泥重金屬含量調查結果得知，同樣以 Cu、Zn 及 Pb 超出底泥品質指標上限值。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

綜合上述得知，老街溪經過整治後，水質仍屬於中度污染程度，底泥重金屬污染亦超過底泥品質管制上限值。因此老街溪十分適合作為底泥風險評估的選址，瞭解重金屬污染物之生態危害風險。

5. 研究可行性

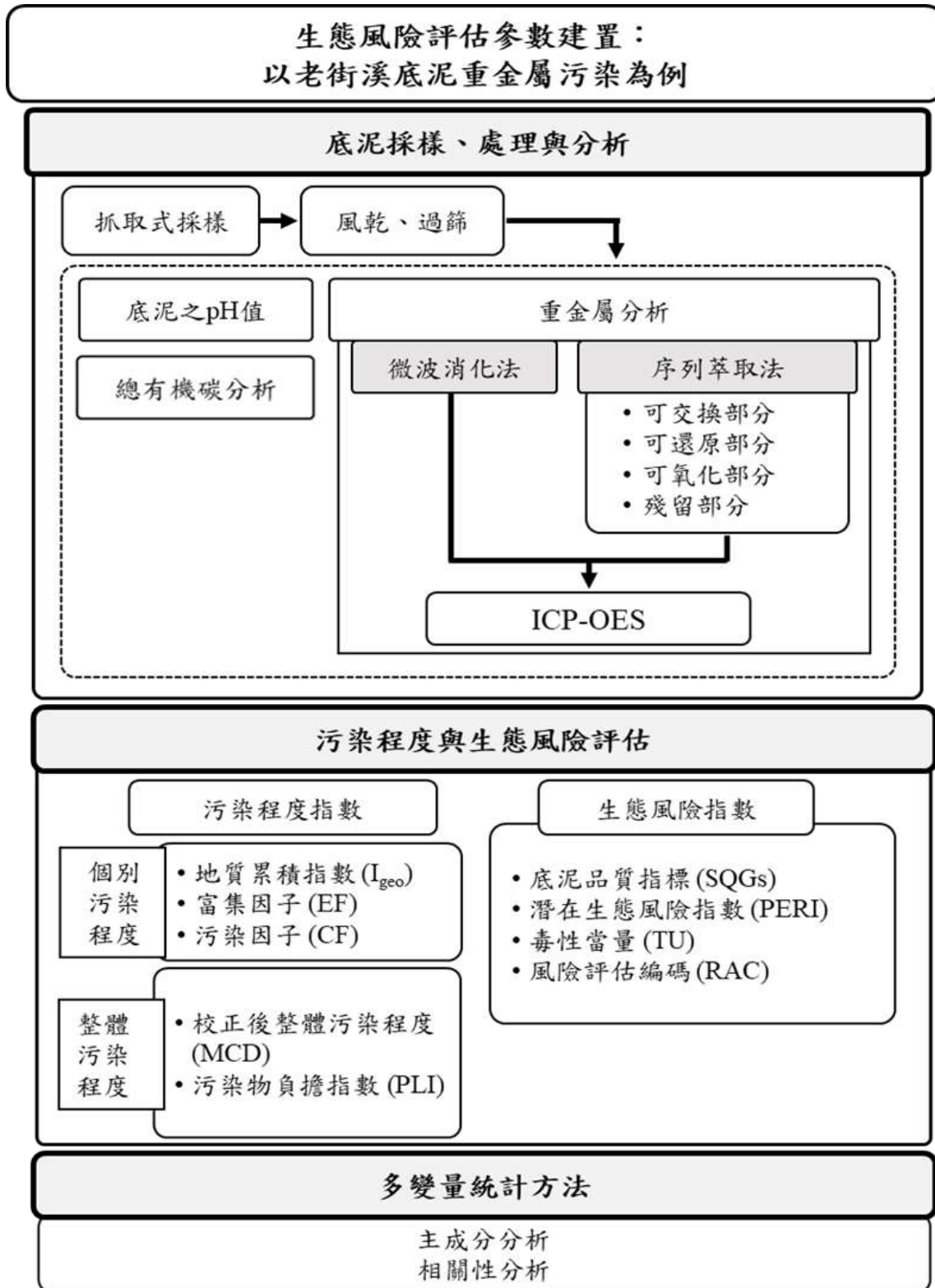
生態風險評估通常利用實驗毒理試驗結果，配合不同因子推估自然系統中更高層級的毒性效應(Bashkin and Demidova, 2008)。面對各種情境所制定的多種假設，造成環境風險評估充滿不確定性(Bashkin and Demidova, 2008)。除此之外，經費負擔大、缺乏評估技巧以及難以取得數據皆為環境風險評估窒礙難行之處(Bashkin and Demidova, 2008)。

因此，另有研究將人類活動相關的污染物(如重金屬)濃度與生物地球化學(biogeochemical)循環的環境背景值相比，藉由指標量化污染程度，進而推估污染物的生態危害風險，已被用來評估底泥重金屬生態風險(Ke *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018)。利用不同指標呈現的環境污染程度及生態風險，已被用來評估底泥重金屬生態風險(Bashkin and Demidova, 2008; Ke *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018)。由106年河川污染指數(RPI)分析結果得知，老街溪水質屬中度污染河川。由環境保護署「107年底泥品質檢測資料」及「106年環境檢驗所委託研究計畫」成果得知，老街溪底泥重金屬有多項超過底泥品質指標上限(行政院環境保護署, 2018b; 童心欣等, 2017)，因此老街溪底泥十分適合做為底泥生態風險評估的案例。



(四) 研究方法與過程

研究流程圖：





生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

1. 現地採樣分析

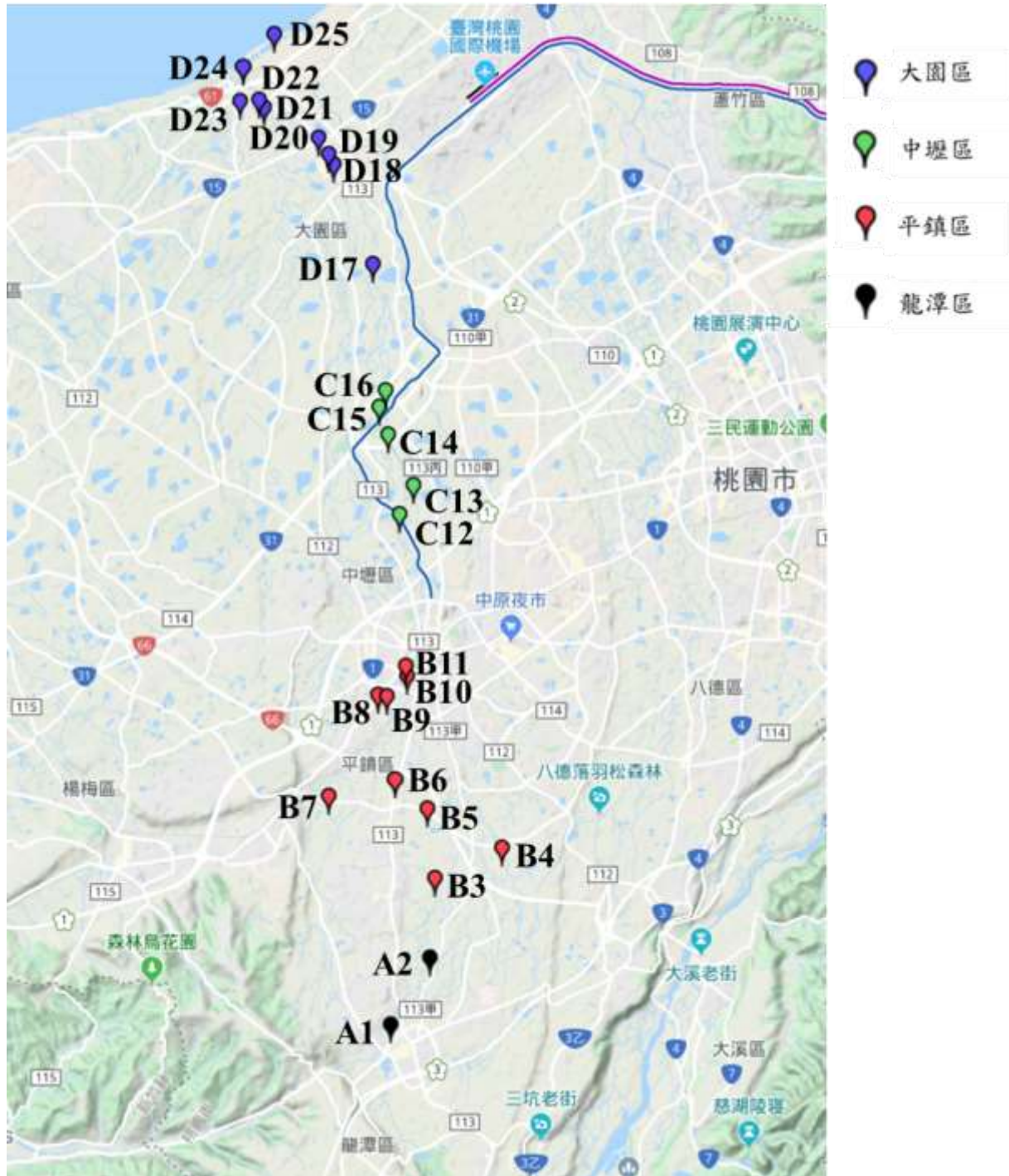
老街溪總長 36.7 km，從龍潭區一直經過平鎮、中壢、大園區等，其流域的面積大約有 82 km²，流經區域之中、下游河段已嚴重被住家以及工廠排出的廢水污染。

1.1 採樣資訊

本計畫參考童心欣等人(2017)之方法，於各採樣點河段上、中、下游採取底泥樣本，分析其內部污染物質，評估其生態風險。參考歷年水利署的年雨量資料，本研究分別於2019年1月(枯水期)及2019年6月(豐水期)採集底泥樣本。採樣地點資訊如圖一、圖二及表一，共計21~25個採樣點。枯水期之老街溪採樣地點及其地理分布位置如圖一，豐水期如圖二，主要以英文字母 ABCD 區分四個區域：龍潭區(A)、平鎮區(B)、中壢區(C)、大園區(D)。



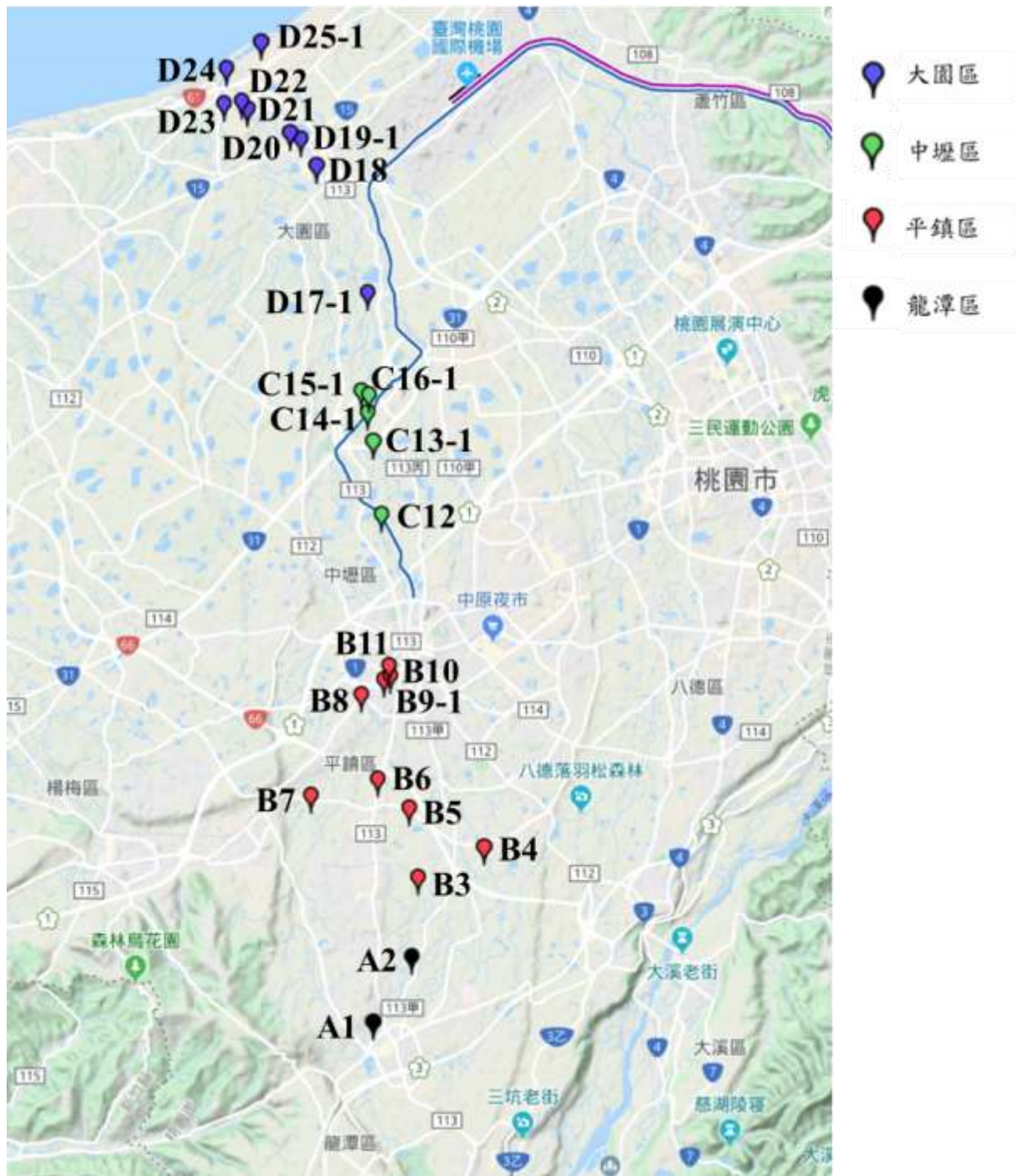
研究方法與過程



圖一、2019 年 1 月(枯水期)之老街溪採樣地點及其地理分布位置。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例



圖二、2019年6月(豐水期)之老街溪採樣地點及其地理分布位置。



表一、老街溪 2019 年 1 月(枯水期)及 6 月(豐水期)採樣地點資訊。

1 月採樣點	6 月採樣點	點位	行政區	緯度	經度
A1	A1	國驕橋	龍潭區	24.87039	121.2111
A2	A2	燈潭橋	龍潭區	24.8852	121.2209
B3	B3	長安橋	平鎮區	24.90304	121.2221
B4	B4	龍祥路	平鎮區	24.909898	121.238578
B5	B5	南華街	平鎮區	24.91858	121.2202
B6	B6	北勢橋	平鎮區	24.9251	121.2122
B7	B7	平鎮一號橋	平鎮區	24.9213	121.1958
B8	B8	大昌路	平鎮區	24.944149	121.207870
B9	-	環鄉橋	平鎮區	24.9437	121.2102
-	B9-1	環鄉橋	平鎮區	24.9474	121.21374
B10	B10	河濱步道	平鎮區	24.94839	121.2152
B11	B11	淨化場取水站	平鎮區	24.9505610	121.2148894
C12	C12	芝和橋	中壢區	24.98456	121.2132
C13	-	芝和路上	中壢區	24.99118	121.2167
-	C13-1	領航南橋	中壢區	25.000963	121.211011
C14 ^a	-	中正橋	中壢區	25.000433	121.211263
-	C14-1	老街溪橋	中壢區	25.007494	121.20976
C15	-	老街溪橋	中壢區	25.0084687	121.208292
-	C15-1	領航北橋	中壢區	25.012215	121.208022
C16 ^a	-	洽溪橋	中壢區	25.0123290	121.2098847
-	C16-1	洽溪橋	中壢區	25.011486	121.210174
D17	-	水源路上	大園區	25.04049	121.2065
-	D17-1	海峰大橋	大園區	25.034137	121.209654
D18	D18	中山南路	大園區	25.0629	121.1970
D19 ^a	-	大觀路	大園區	25.065094	121.195798
-	D19-1	大觀路	大園區	25.070296	121.190429
D20	D20	國際路	大園區	25.068783	121.193134
D21	D21	潮音路 103 巷	大園區	25.075587	121.179974
D22	D22	許厝港 一號橋	大園區	25.07735	121.1786
D23	D23	許厝港 二號橋	大園區	25.07696	121.1741
D24	D24	老街溪出海口	大園區	25.0847933	121.1745680
D25 ^a	-	大園石蚵	大園區	25.0921	121.1824
-	D25-1	大園石蚵	大園區	25.090700	121.183322

^a C14、C16、D19、D25 樣點，水流較快速，以致無法在河床邊堆積形成底泥，無法進行底泥採樣。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

1.2 底泥採樣方法

本計畫參考環保署-底泥採樣方法(NIEA S104.31B)，以抓取式採樣利用艾克曼採泥器，將其垂直向下至河床中抓取底泥。如採樣地點水深小於 1 m 內，則可利用不鏽鋼的採泥鏟挖出底泥。將取得的底泥樣本放入採樣袋，放入保冷箱，帶回實驗室後，將部分底泥風乾，以作後續分析實驗使用，剩餘底泥保存於-20°C 冰箱。

2. 底泥分析

風乾後的底泥經過 100 mesh 篩網以篩除大顆粒的碎石及木屑等，之後進一步分析底泥之 pH 值、總有機碳元素含量、以及重金屬(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)濃度。重金屬濃度分析採用微波消化及序列萃取兩種方法。

2.1 底泥之 pH 值

本測定參考土壤酸鹼值(pH 值)測定法-電極法(NIEA S410.62C)，秤取風乾過篩處理後的底泥 20 g 與 20 mL 去離子水進行混合，以玻棒大約攪拌 5 分鐘後靜置在室溫下 1 h，靜置期間每 5 分鐘進行攪拌，待其沉澱露出上清液後，利用桌上型微電腦酸鹼度計 SP-2300 來測定底泥酸鹼值。

2.2 總有機碳分析

本研究參考土壤有機質測定方法—燃燒／紅外線測定法(TARI S201.1B)測定樣品的總有機碳含量。為使樣品均勻化及提高反應效率，底泥樣品經風乾後，以研磨器研磨底泥樣品並使其通過 100 mesh 篩網。秤取 0.1 g 風乾過篩處理後的底泥到石英棉上，滴上 2 滴 5 % 磷酸放到 150°C 烘箱內 2 分鐘，去除底泥中無機碳元素，再放入總有機碳分析儀進行分析(Aurora 1030D TOC Analyzer, O.I. Analytical Co., TX, USA)。第一道燃燒管設定 550°C，第二道燃燒管設定 930°C，氮氣流速為 140 mL/min，氧氣則為 70 mL/min。其原理為底泥成分在高溫環境下燃燒，其主要成分碳會轉換成二氧化碳，再藉由使用檢測器(NDIR, 非分散式紅外線)偵測氣體，即可換算出底泥之碳含量。

2.3 微波消化法

本測定參考廢棄物及底泥中金屬檢測方法—微波輔助酸化法(NIEA



M301.00B)，秤取 0.5 g 過篩風乾後的底泥，以硝酸和鹽酸混合，並配合微波消化器處理(MARS 6™, CEM Corporation, NC, USA)，將消化液稀釋到適當體積後，參考感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.02C)，利用感應耦合電漿原子發射光譜儀偵測樣品的重金屬濃度(Agilent 5110 ICP-OES, Agilent Technologies, Inc., CA, USA)。

2.4 序列萃取法

以序列萃取法(sequential extraction)探討底泥中重金屬的化學形態分布，以不同試劑萃取出不同形態的重金屬之含量，主要依據 Commission of the European Communities Bureau of Reference (BCR)建議的底泥中重金屬序列萃取法(Ma *et al.*, 2016)，方法如下：

2.4.1 可交換相(exchangeable fraction)：將 1 g 過篩風乾後的底泥與 40 mL 0.11 M CH_3COOH 進行混合，以 150 rpm 轉速搖至隔夜。混合液經過 3000 rpm 離心，將上清液以 0.22 μm 過濾器過濾後保存到另一個新的容器再進行後續檢測。

2.4.2 可還原相(reducible fraction)：將 40 mL 0.5 M $\text{HONH}_2\cdot\text{HCl}$ 加到剛離心後的底泥殘渣，以 HNO_3 調整其 pH 值到 1.5，同樣以 150 rpm 的轉速搖至隔夜。混合液經過 3000 rpm 離心，將上清液以 0.22 μm 過濾器過濾後保存到另一個新的容器，作後續檢測。

2.4.3 可氧化相(oxidizable fraction)：將 5 mL 8.8 M H_2O_2 加到剛剛離心後的底泥殘渣，以 $85 \pm 2^\circ\text{C}$ 將其蒸乾，重複以上動作後，加入 50 mL 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ，以 HNO_3 調整其 pH 值到 2，同樣以 150 rpm 的轉速搖至隔夜。混合液經過 3000 rpm 離心，將上清液以 0.22 μm 過濾器過濾後保存到另一個新的容器，作後續檢測。

2.4.4 殘留相(residual fraction)：將 20 mL 的王水加到剛剛離心後的底泥殘渣，以微波輔助法處理後，將消化液稀釋至適當體積。混合液經過 3000 rpm 離心，將上清液以 0.22 μm 過濾器過濾後保存到另一個新的容器，作後續檢測。

針對 4 步驟(可交換、可還原、可氧化、及殘留部分)所萃取之上清液，利用感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP-OES)偵測樣品的重金屬濃度。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

3. 生態風險評估指數

3.1 污染程度指數

為量化老街溪底泥重金屬污染程度，本研究利用多種指數，以推測人為造成的底泥重金屬污染所造成的潛在危害。

3.1.1 地質累積指數(geo-accumulation index, I_{geo})

I_{geo} 是常用的底泥污染程度指數，因考慮到地殼本身的重金屬背景值，可用於量化人為造成的底泥重金屬污染程度(Singh *et al.*, 2005; Karbassi *et al.*, 2008)。 I_{geo} 的定義如式(1)，其中未污染程度($I_{geo} < 0$)；輕級污染程度($0 < I_{geo} < 1$)；中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)；中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)；嚴重污染程度($3 < I_{geo} < 4$)；極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)；超嚴重污染程度($I_{geo} > 5$)。

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \dots\dots\dots(1)$$

C_n ($\mu\text{g/g}$)：底泥測得重金屬濃度； B_n ($\mu\text{g/g}$)：該區域重金屬背景濃度，本研究以 Rudnick and Gao (2003)所報告之地殼上游重金屬平均濃度作為本次重金屬背景濃度($\text{As} = 4.80 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Cd} = 0.09 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Cr} = 92.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Cu} = 28.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Hg} = 0.05 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Ni} = 47.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Pb} = 17.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Zn} = 67.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Mn} = 775.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Al} = 81497.00 \mu\text{g/g}$ ； $\text{Fe} = 39176.00 \mu\text{g/g}$)；常數 (1.5) 為修飾常數，用於校正背景值。

3.1.2 富集因子(enrichment factor, EF)

EF 是另一常用重金屬累積指數，可透過將所探討底泥的測得重金屬濃度對大陸上層地殼平均(continental upper crustal average, UCC)鐵濃度校正，推測出人為活動所造成的重金屬濃度增加(Raju *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2007)。EF 的計算方式如式(2)，EF 可分為 7 個等級， $\text{EF} < 1$ 為無富集現象， $\text{EF} < 3$ 為輕度富集， $\text{EF} = 3 - 5$ 為中度富集， $\text{EF} = 5 - 10$ 為輕度嚴重富集， $\text{EF} = 10 - 25$ 為嚴重富集， $\text{EF} = 25 - 50$ 為非常嚴重富集， $\text{EF} > 50$ ，極度嚴重富集(Birth, 2003)。

$$EF = \frac{(C_i/C_{Fe})_{\text{Sample}}}{(C_i/C_{Fe})_{\text{UCC}}} \dots\dots\dots(2)$$



$(C_i/C_{Fe})_{\text{Sample}}$ ：待測底泥中重金屬濃度對鐵濃度的比例； $(C_i/C_{Fe})_{\text{UCC}}$ ：在 UCC 的重金屬對鐵濃度(39176.00 $\mu\text{g/g}$) (Rudnick and Gao, 2003)之比例。

3.1.3 污染因子(contamination factor, CF)

CF 同樣考慮重金屬背景值，以顯示人為活動所造成的底泥個別重金屬濃度增加(Håkanson, 1980)，其計算方式如式(3)：

$$CF = \frac{C_i}{B_i} \dots\dots\dots(3)$$

C_i ：底泥樣品的重金屬濃度； B_i ：背景的重金屬濃度(Rudnick and Gao, 2003)。

3.1.4 校正後整體污染程度(modified overall contamination degree, MCD)

MCD 進一步將個別重金屬污染程度整合，呈現總體的污染程度(Abrahim and Parker, 2008)，其計算方式如式(4)， $MCD < 1.5$ 代表極低程度污染， $1.5 \leq MCD < 2$ 為低污染， $2 \leq MCD < 4$ 為中等污染， $4 \leq MCD < 8$ 為中高度污染， $8 \leq MCD < 16$ 為高度污染， $16 \leq MCD < 32$ 為極高度污染，而 $MCD \geq 32$ 則代表極度嚴重污染(Abrahim and Parker, 2008)。

$$MCD = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} \dots\dots\dots(4)$$

CF_i ：個別重金屬的污染程度； n 為所探討的重金屬種類數目。

3.1.5 污染物負擔指數(pollution load index, PLI)

PLI 與 MCD 類似，亦整合各個重金屬之 CF，惟計算方式不相同(Tomlinson et al., 1980)，其計算方式如式(5)，當 $PLI < 1$ ，代表無污染， $PLI > 1$ 則代表底泥出現重金屬污染。

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \dots\dots\dots(5)$$

CF_i ：個別重金屬的污染程度； n ：所探討的重金屬種類數目。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

3.2 生態風險指數

3.2.1 底泥品質指標(sediment quality guidelines, SQGs)

SQGs 是基於重金屬在不同模式生物的毒理資料，經不同統計方式所求得 (MacDonald *et al.*, 1996)。透過比較 SQGs，可簡便比較所探討底泥污染是否具有潛在生態風險，並粗略界定該重金屬在所測區域底泥中是否超標。

3.2.2 潛在生態風險指數(potential ecological risk index, PERI)

PERI 整合各個重金屬在所探討區域的 CF 與重金屬的毒性資訊，推估底泥中測得重金屬濃度是否具有潛在生態風險(Håkanson, 1980)，其計算方式如式 (6)。PERI < 150 為低生態風險，150 ≤ PERI < 300 為中等生態風險，300 ≤ PERI < 600 為具生態風險，PERI > 600 則為高度生態風險(Håkanson, 1980)。

$$PERI = \sum_{i=1}^n ER_i = \sum_{i=1}^n (Cf_i \times Tr_i) \dots\dots\dots(6)$$

ER_i：各金屬的潛在風險商數；CF_i：待測底泥中各金屬污染指數；Tr_i：個別金屬的生物毒性因數，按定義，各金屬 Tr 值為 Hg = 40，As = 10，Cd = 30，Cr = 2，Cu = Pb = Ni = 5 及 Zn = 1 (Chen *et al.*, 2018)。

3.2.3 毒性當量(toxic units, TUs)

利用各個重金屬的 PEL 值，可求得個別重金屬的單位毒性當量，統整後即為整體的 TU 值，可以評估重金屬的急毒性(von der Ohe and de Zwart, 2013)。

$$\sum TU = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{PEL_i} \right) \dots\dots\dots(7)$$

C_i：底泥樣品中所測得個別重金屬濃度；PEL_i：對應的重金屬 PEL(probable effect level)，其中 As = 41.6 mg/kg，Cd = 4.2 mg/kg，Cr = 160 mg/kg，Cu = 108 mg/kg，Hg = 0.7 mg/kg，Pb = 112 mg/kg，Ni = 42.8 mg/kg 及 Zn = 271 mg/kg (MacDonald *et al.*, 1996)。

3.2.4 風險評估編碼(risk assessment code, RAC)



重金屬的生物可獲性(bioavailability)影響其生態風險，因此本研究也利用 RAC 評估重金屬生物可獲性(Perin *et al.*, 1985; Singh *et al.*, 2005)。RAC 表示為底泥中酸可溶解重金屬百分比(% acid soluble)，即序列萃取法得到之可交換部分。

4. 多變量統計分析

本研究以 SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)統計軟體進行統計分析。本研究以主成分分析(PCA)與皮爾森相關性(Pearson correlation)分析檢驗底泥中各重金屬之間的相關性，當 $p < 0.05$ 則為具統計上顯著意義。

主成分分析(PCA)是利用降維度之作法，將各採樣點之重金屬元素利用其代表元素數據並給予不同權重提取呈現，因此會使具有關聯性的重金屬元素群集在一起，並由此群集之重金屬元素比較背景重金屬濃度(富集因子等)，協助判斷此為原生性背景重金屬，或是人為污染所造成之重金屬累積群集。不同之人為污染如農業、工業會造成不同代表重金屬之群集現象。

皮爾森相關性分析則能夠提供不同重金屬彼此之間相關性，某一重金屬出現與另一重金屬之正相關或負相關性，進而推斷出此效應為人為污染伴隨或為地理背景重金屬濃度相關性。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

5. 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

2019 年/月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
蒐集資料	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※	※		
現地採樣	※					※							
底泥之 pH 值		※					※						
總有機碳元素分析		※	※	※			※	※	※				
重金屬濃度分析(微波消化法)		※	※	※	※		※	※	※	※			
重金屬濃度分析(序列萃取法)		※	※	※	※		※	※	※	※			
污染物累積程度相關指標				※	※	※			※	※	※		
生態風險指標				※	※	※			※	※	※		
多變量統計分析									※	※	※		
資料統整及分析			※	※	※	※			※	※	※		
報告撰寫					※	※				※	※		
工作進度估計百分比（累積數）	5%	10%	25%	35%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		



預定查核點	期中	1. 底泥樣本採集(2019 年 1 月及 6 月) 2. 分析 1 月底泥 pH 值、總有機碳元素及重金屬濃度 3. 計算污染物累積程度指標及生態風險指標
	期末	4. 分析 6 月底泥樣品之 pH 值、總有機碳元素及重金屬濃度 5. 計算污染物累積程度指標及生態風險指標 6. 利用多變量統計方法檢驗底泥中各重金屬之間的相關性 7. 不同採樣時間之重金屬濃度差異及生態風險評估結果
說明： 1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。		



(五) 結果與討論

1. 現地底泥採樣資料

本計畫分別於枯水期(2019 年 1 月)以及豐水期(2019 年 6 月)到老街溪上、中、下游河段採取底泥樣本，涵蓋四個區域：龍潭區(A)、平鎮區(B)、中壢區(C)、大園區(D)。枯水期(2019 年 1 月)實際採樣後總共於 21 個樣點採集了底泥樣本，因 4 個樣點水流較快速，無法順利採集底泥樣本，分別為 C14、C16、D19 以及 D25 樣點(表一)。豐水期(2019 年 6 月)總共在 25 個樣點採集底泥樣本，因採樣時間為梅雨季，老街溪上游地段水流川急，水位有所升高；中下游流速較為緩慢。相較枯水期採樣情形，豐水期之採樣工作較為困難。部分樣點如 B9-1 之命名方式是因為實際到樣點 B9 採樣時，因水流較快速而無法順利採集底泥樣本，所以於樣點附近另尋底泥樣本，為方便安排而表示 B9-1。樣點 B3 為老街溪與石門大圳之匯流口；樣點 B7 為大坑缺溪匯流口；樣點 C12 為老街溪與桃園大圳匯流口；樣點 D22 為老街溪與田心子溪匯流口(童心欣等, 2017)。而樣點 B4、B8、D20、D21、D22、D23 為光電廠、皮革廠等之工廠放流口(童心欣等, 2017)，詳細採樣資訊如表一。

2. 底泥分析結果

2.1 底泥 pH 值分析

重金屬可能隨著 pH 值的改變而再次釋出到自然環境之中，重金屬在 pH 值介於 6.5 至 7.0 的環境中最為穩定，pH 值低於 6.5 的環境會使重金屬與底泥的鍵結變弱，釋出到環境中(Ma et al., 2016)。

老街溪底泥 pH 值分析結果如表二，老街溪流域 pH 總平均值為 6.11。2019 年 1 月枯水期 pH 值介於 4.39 至 7.62 之間，除了樣點 A2、B6、B10、D21 及 D24 之外，其餘樣點底泥的 pH 值都小於 6.5。此外，枯水期老街溪流域、平鎮區(B)、中壢區(C)及大園區(D)的底泥平均 pH 值均小於 6.5；尤其是中壢區(C) 平均 pH 值只有 5.55。在 2019 年 6 月(豐水期)時，老街溪底泥 pH 值介於 5.90 至 8.13 之間，整個流域及四個區域(A-D)的平均 pH 值均大於 6.5，但樣點 A1、B5、C14-1、D17-1、D19-1、D21 以及 D23 的底泥 pH 值皆低於 6.5。

整體而言，枯水期可見到較多樣點的底泥 pH 值低於 6.5。除此之外，無論在枯水期或豐水期，A1(龍潭區國驕橋)、B5(平鎮區南華街)及 D23(大園區許厝港二號橋)等樣點之底泥 pH 值均低於 6.5，大園區鄰近樣點 D17(水源路上)及 D17-1(海峰大橋)之底泥 pH 值亦低於 6.5。其中，樣點 A1 為遠離市區的住宅區，B5 周圍有農地及零星工廠，D23 上游有多家染整廠，D17 及 D17-1 附近則為工



業區。因此，以上樣點之底泥重金屬濃度需要特別關注。

2.2 底泥總有機碳分析

有機化合物被視為重金屬的地質吸附劑，因此底泥中的總有機碳元素含量可能影響重金屬的分布情形(Zhang *et al.*, 2014)。老街溪底泥總有機碳分析結果如表二。在 2019 年 1 月(枯水期)時，老街溪流域之總有機碳介於 0.03 至 16.13%之間，平均值為 2.57%。其中，平鎮區(B)的總有機碳平均值最高(3.08%)，其次依序為中壢區(C)、大園區(D)及龍潭區(A)。在各樣點中，以樣點 B6 為最高，其餘總有機碳含量較高的樣點依序為 D17、B10、C13、D22、C15。在 2019 年 6 月(豐水期)時，總有機碳介於 0.12 至 8.73%之間，老街溪流域之總有機碳平均值為 1.07%。其中，以龍潭區(A)的平均值最高(2.07%)，其次依序為大園區(D)、中壢區(C)及平鎮區(B)。在各樣點中，以樣點 D25-1 為最高，其餘總有機碳含量較高的樣點依序為 C12、A1 及 D17-1。綜合來說，除了龍潭區(A)，其他區域(B-D)在豐水期的總有機碳平均值均較枯水期低。此外，樣點 D17(枯水期)及 D17-1(豐水期)之底泥均有 pH 值低及總有機碳含量高之特徵。



表二、老街溪底泥 pH 值及總有機碳分析。

樣點		pH 值		總有機碳 (%)	
1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	5.97	5.90	1.87	3.50
A2	A2	7.14	6.63	0.66	0.63
B3	B3	5.48	7.02	1.06	0.42
B4	B4	5.37	7.15	0.55	0.79
B5	B5	6.38	6.35	0.03	0.46
B6	B6	6.85	7.76	16.13	0.26
B7	B7	6.31	7.14	0.90	0.23
B8	B8	6.10	6.85	0.56	0.71
B9	-	5.84	-	1.13	-
-	B9-1	-	6.85	-	0.12
B10	B10	7.44	6.55	6.83	1.10
B11	B11	5.79	7.07	0.54	0.20
C12	C12	4.39	6.68	0.86	3.55
C13	-	6.03	-	5.39	-
-	C13-1	-	7.35	-	0.33
-	C14-1	-	6.48	-	0.24
C15	-	6.23	-	2.66	-
-	C15-1	-	6.97	-	0.46
-	C16-1	-	6.92	-	0.34
D17	-	5.68	-	7.62	-
-	D17-1	-	6.27	-	2.04
D18	D18	5.87	6.81	0.28	0.43
-	D19-1	-	5.92	-	0.41
D20	D20	5.91	6.53	0.33	0.57
D21	D21	6.61	6.43	0.34	0.17
D22	D22	5.24	7.90	2.88	0.53
D23	D23	6.04	6.43	1.67	0.29
D24	D24	7.62	8.13	1.61	0.16
-	D25-1	-	7.23	-	8.73
A 區平均值		6.56	6.27	1.27	2.07
B 區平均值		6.17	6.97	3.08	0.48
C 區平均值		5.55	6.88	2.97	0.98
D 區平均值		6.14	6.85	2.10	1.48
老街溪總平均值		6.11	6.85	2.57	1.07



2.3 老街溪底泥重金屬濃度分析結果

老街溪底泥重金屬濃度分析主要利用兩種方法，一種方法以逆王水微波消化法，以 3:1 濃硝酸比濃鹽酸之逆王水經微波消化器處理後，利用 ICP-OES 儀器測量重金屬總體濃度。另一種方法為序列萃取法，以不同性質試劑萃取不同化學形態之重金屬，探討底泥中重金屬的化學形態分布(Ma *et al.*, 2016)。

2.3.1 利用逆王水微波消化法分析

參照【底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法】(附件一)，分析結果發現(表三)，在 2019 年 1 月(枯水期)時，在多數樣點皆可見到 Cu、Ni、Pb、Zn 等重金屬濃度超過底泥品質標準。As、Cd、Cr、及 Hg 在老街溪流域及各區平均值低於底泥品質標準下限值(表三)。在只有在部分樣點超出底泥品質標準下限值(表三)。

在 2019 年 1 月(枯水期)時，Cu 老街溪流域(263.3 mg/kg)的平均值超過底泥品質標準上限值(表三)，其中 Cu 在平鎮區(223.3 mg/kg)、中壢區(323.8 mg/kg)、大園區(347.8 mg/kg)平均值都超過底泥品質標準上限值，龍潭區(56.8 mg/kg)平均值則超過底泥品質標準下限值(表三)。尤其是 Cu 在平鎮區(B3、B4、B6、B8、B10)、中壢區(C13)、大園區(D17、D18、D21、D22、D23)之濃度(158.0-760.4 mg/kg)超出其底泥品質標準上限值(157 mg/kg)；在部分龍潭區(A1)、平鎮區(B5、B7、B9、B11)、中壢區(C12、C15)、大園區(D20)部分樣點之濃度(85.8-154.7 mg/kg)則超過底泥品質標準下限值(50 mg/kg)(表三)。

在 2019 年 1 月(枯水期)時，Ni 在老街溪流域(52.3 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)，其中 Ni 在平鎮區(53.6 mg/kg)、中壢區(56.2 mg/kg)、大園區(59.1 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)；尤其是 Ni 除了樣點 A2 及 D24 外，其餘樣點之濃度均超過底泥品質標準，在平鎮區(B6、B10)、中壢區(C13)、大園區(D17、D21)樣點之濃度(84.2-112.1 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(80 mg/kg)，其他樣點濃度(25.0-75.9 mg/kg)則超過底泥品質標準下限值(24 mg/kg)(表三)。

在 2019 年 1 月(枯水期)時，Pb 在老街溪流域(62.6 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)，其中 Pb 在平鎮區(80.0 mg/kg)、中壢區(63.5 mg/kg)、大園區(50.5 mg/kg)平均值都超過下限值(表三)；尤其是 Pb 在樣點 B7(165.1 mg/kg)、B10(173.4 mg/kg)之濃度嚴重超出底泥品質標準上限值(161 mg/kg)，在其他平鎮區(B4、B6、B8、B9)、中壢區(C12、C13)、大園區(D17、D18、D21、D22)樣



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

點之濃度(50.0-112.5 mg/kg)則超過下限值(48 mg/kg) (表三)。

在 2019 年 1 月(枯水期)時，Zn 在老街溪流域(579.7 mg/kg)平均值超過底泥品質標準上限值 (表三)，其中 Zn 在平鎮區(632.6 mg/kg)、中壢區(553.9 mg/kg)、大園區(627.1 mg/kg)平均值都超過底泥品質標準上限值，龍潭區(214.2 mg/kg)平均值則超過底泥品質標準下限值(表三)。尤其是 Zn 除了樣點 A2 及 D24 外，其餘樣點之濃度均超過底泥品質標準，在龍潭區(A1)、平鎮區(B4、B6、B7、B10)、中壢區(C13)、大園區(D17、D18、D21、D22、D23) 樣點之濃度(397.3-1786.5 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(384 mg/kg)，其他樣點濃度(228.5-355.6 mg/kg)則超過底泥品質標準下限值(140 mg/kg) (表三)。

綜合上述結果得知，在 2019 年 1 月(枯水期)時，樣點 B6 共有 5 種重金屬(Cu、Ni、Zn、Cd、Hg)超過底泥品質指標上限值，樣點 B10 (Cu、Ni、Pb、Zn)及 D17 (Cu、Ni、Zn、Hg)則有 4 種重金屬超過底泥品質指標上限值，樣點 C13 及 D21 有 3 種重金屬(Cu、Ni、Zn)超過底泥品質指標上限值。在所有樣點中，僅有樣點 A2 未有重金屬濃度超過底泥品質指標下限值。因此平鎮區及大園區的這些樣點建議以後持續關注。

在 2019 年 6 月(豐水期)時，在多數樣點皆可見到 Cu、Ni、Pb、Zn 等重金屬濃度超過底泥品質標準。As、Cd、Cr、及 Hg 在老街溪流域及各區平均值低於底泥品質標準下限值 (表三)。在只有在部分樣點超出底泥品質標準下限值(表三)。

在 2019 年 6 月(豐水期)時，Cu 在老街溪流域平均值(111.7 mg/kg)高於底泥品質標準下限值，其中 Cu 在中壢區(177.4 mg/kg)平均值超過上限值，其餘區域超過下限值。尤其是 Cu 在平鎮區(B10)、中壢區(C12)、大園區(D17-1、D25-1) 樣點之濃度(209.5-553.1 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(157 mg/kg)，在龍潭區(A1)、平鎮區(B3、B5、B7 至 B9-1、B11)、中壢區(C13-1 至 C16-1)、大園區(D18 至 D22) 樣點之濃度(62.2-120.0 mg/kg)則超過下限值(50 mg/kg) (表三)。

在 2019 年 6 月(豐水期)時，Ni 在老街溪流域(27.8 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)，其中 Ni 在平鎮區(31.0 mg/kg)、中壢區(27.6 mg/kg)、大園區(25.9 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)。尤其是 Ni 在龍潭區(A1)、平鎮區(B3、B6 至 B11)、中壢區(C12、C14-1)、大園區(C17-1 至 D20、D25-1) 樣點之濃度(24.8-51.0 mg/kg)超出底泥品質標準下限值(24 mg/kg) (表三)。

在 2019 年 6 月(豐水期)時，Pb 在老街溪流域(60.0 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值(表三)，其中 Pb 在平鎮區(87.5 mg/kg)、中壢區(64.4 mg/kg)平均值都超過底泥品質標準下限值(表三)；尤其是 Pb 在樣點 B7 之濃度(410.7 mg/kg)嚴重超出底泥品質標準上限值(161 mg/kg)，在平鎮區(B8 至 B11)、中壢區(C12 至



C14-1、C16-1)、大園區(D17-1、D22、D25-1)樣點之濃度(42.6-105.9 mg/kg)則超過底泥品質標準下限值(48 mg/kg) (表三)。

在 2019 年 6 月(豐水期)時，Zn 在老街溪流域(289.3 mg/kg)平均值超過底泥品質標準下限值 (表三)，其中 Zn 在龍潭區(231.4 mg/kg)、平鎮區(302.7 mg/kg)、中壢區(318.1 mg/kg)、大園區(272.8 mg/kg)平均值都超過底泥品質標準下限值(表三)；尤其是 Zn 濃度除了樣點 A2、B6、D24 外，其餘樣點之濃度均超過底泥品質標準，在樣點 B7 (477.1 mg/kg)、B10 (581.1 mg/kg)、C12 (594.3 mg/kg)、D17-1 (514.7 mg/kg)、D25-1 (493.4 mg/kg)嚴重超出底泥品質標準上限值(384 mg/kg)，其他樣點濃度(146.0-381.3 mg/kg)則超過底泥品質標準下限值(140 mg/kg) (表三)。

綜合上述結果得知，整體而言，不論是枯水期或豐水期，老街溪流域底泥以 Cu、Ni、Pb、Zn 等重金屬污染情況最為嚴重，其重金屬濃度超過底泥品質標準。大致上在豐水期的超標狀況則較枯水期輕微。在 2019 年 6 月(豐水期)時，樣點 C12 共有 3 種重金屬(Cu、Zn、Hg)超過底泥品質指標上限值，樣點 B7 (Pb、Zn)、B10 (Cu、Zn)、D17-1 (Cu、Zn)、D25-1 (Cu、Zn)則有 2 種重金屬超過底泥品質指標上限值，顯示豐水期老街溪底泥重金屬超標的種類比枯水期少，即豐水期的污染程度較不嚴重。然而，樣點 C12 除了 As，其他重金屬在豐水期都有上升趨勢，Cu、Zn 及 Hg 甚至超過底泥品質標準上限值。此外，樣點 B7 的 Pb 在枯水期(165.1 mg/kg)已超過底泥品質標準上限值(161 mg/kg)，至豐水期(421.6mg/kg)更是嚴重超標。在豐水期的所有樣點中，僅有樣點 A2 未有重金屬濃度超過底泥品質指標下限值，與枯水期結果一致。

由童心欣等人(2017)之結果得知，於 106 年 5 月老街溪底泥污染情況嚴重，如 Cu 總濃度(271-573 mg/kg)於 9 個樣點超過底泥品質上限值(157 mg/kg)，於 2 個樣點(73.5-93 mg/kg)超過底泥品質下限值(50 mg/kg)。Zn 總濃度(407-2557 mg/kg)於 7 個樣點超過底泥品質上限值(384 mg/kg)，於 5 個樣點(288-383 mg/kg)超過底泥品質下限值(140 mg/kg)。Pb 總濃度(172-283 mg/kg)於 2 個樣點超過底泥品質上限值(161 mg/kg)，於 7 個樣點(50.2-99.9 mg/kg)超過底泥品質下限值(48 mg/kg)。上述超出底泥品質標準的樣點分別為本計畫中的樣點 B3、B5、B6、B7、B9、B11、C14、C15、C16、D18、D24、D25。胡惠宇(2017)由 103 至 105 年全國水質測站監測資料得知，老街溪平鎮第一號橋(樣點 B7)、環鄉橋(樣點 B9)、公園橋上游(樣點 C14 至 C16)及許厝港一號橋(樣點 D22)因事業廢水排放造成重金屬銅超標，需實施重金屬總量管制。因此，106 年老街溪底泥重金屬污染嚴重與水質污染有密切關係。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

上述樣點中，本計畫2019年1月(枯水期)有4個樣點測得之Cu總濃度(158.0-744.8 mg/kg)超過底泥品質上限值(157 mg/kg)，4個樣點(86.5-154.7 mg/kg)超過底泥品質下限值(50 mg/kg) (表三)。Zn總濃度則有3個樣點(536.8-746.9 mg/kg)超過底泥品質上限值(384 mg/kg)，5個樣點(228.8-331.6 mg/kg)超過底泥品質下限值(140 mg/kg) (表三)。Pb總濃度於樣點B7 (165.1 mg/kg)超過底泥品質上限值(161 mg/kg)，於3個樣點(60.6-73.6 mg/kg)超過底泥品質下限值(48 mg/kg) (表三)。樣點D24之Cu、Zn、Pb皆未超過底泥品質下限值。由上述結果得知，由106年5月至108年1月，老街溪底泥Cu、Zn及Pb濃度均有降低之趨勢，但是樣點B6及D18之Cu以及Zn仍超過底泥品質標準上限值，樣點B7之Pb濃度一樣超過底泥品質標準上限值。

由胡惠宇(2017)的調查結果得知，老街溪的排銅事業多集中在平鎮工業區(樣點B)及大園工業區(樣點D)，公園橋附近(樣點C14)亦有排銅事業。老街溪雖尚未針對水質實施重金屬總量管制，但由101至108年全國水質測站監測資料得知，老街溪的Cu超標狀況已於104年開始改善。然而，108年1月於平鎮一號橋(樣點B7)、環鄉橋(樣點B9)、公園橋上游(樣點C14)、許厝港一號橋(樣點D22)仍測到Cu超過保護人體健康相關環境基準，其中，平鎮一號橋(樣點B7)長期均Cu超標。綜合上述得知，老街溪底泥Cu濃度降低的趨勢可能與水中重金屬濃度降低有關。此外，台灣於春季及秋季的水質異常頻率較高，夏季因雨量豐沛而稀釋水中污染物濃度，因此夏季水質異常頻率較低(胡惠宇, 2017)。本計畫結果顯示，豐水期的底泥重金屬超標較不嚴重，推測是豐水期水量稀釋重金屬污染物，減少底泥的污染源濃度。另一方面，豐沛雨量使河川流速增加而造成底泥重金屬移動至下游，因此上游的底泥重金屬濃度較豐水期低，但最下游的大園石蚵(D25-1)之底泥重金屬卻明顯超標。除此之外，由水質測站監測資料得知，108年Cu以外的其他重金屬鮮少超過保護人體健康相關環境基準，但在底泥仍可見到重金屬超標的情況。

依據桃園市水務局資料得知，107年執行老街溪整治計畫，整治老街溪上游(自平鎮區延平橋至伯公潭)及下游區域(自中壢區環北橋往下游延伸中壢區青埔特區)，整治範圍介於本計畫的樣點B9至樣點C15之間。然而，此整治工程主要以河岸改造規劃為主，並非針對河川底泥污染物，因此108年底泥重金屬污染情況改善應與整治工程無關。



表三、逆王水微波消化法與序列萃取法 As 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		As			
		底泥品質標準上下限值(11~33 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	5.3	6.1	12.3	8.6
A2	A2	0.0	2.5	9.2	4.2
B3	B3	2.5	3.7	10.7	4.2
B4	B4	13.4	13.7	24.9	14.7
B5	B5	5.0	3.6	12.4	2.9
B6	B6	8.8	6.0	16.6	9.6
B7	B7	1.3	2.4	10.3	4.7
B8	B8	2.5	3.5	12.2	3.3
B9	-	3.7	-	10.6	-
-	B9-1	-	2.3	-	5.3
B10	B10	6.4	5.9	15.8	7.2
B11	B11	1.2	2.3	11.2	4.3
C12	C12	1.3	8.2	8.7	9.3
C13	-	7.9	-	18.6	
-	C13-1	-	2.5	-	4.9
-	C14-1	-	4.9	-	6.4
C15	-	5.1	-	13.9	
-	C15-1	-	3.7	-	7.3
-	C16-1	-	3.7	-	6.2
D17	-	13.4	-	26.4	
-	D17-1	-	6.1	-	9.3
D18	D18	8.5	3.7	18.6	5.8
-	D19-1	-	4.9	-	5.7
D20	D20	2.5	3.7	11.6	2.4
D21	D21	4.1	3.6	17.9	3.8
D22	D22	5.0	7.4	12.0	13.7
D23	D23	5.3	2.3	12.7	4.3
D24	D24	12.5	19.3	23.3	19.9
-	D25-1	-	13.5	-	16.5
A 區平均值		2.7	4.3	10.8	6.4
B 區平均值		5.0	4.8	13.9	6.2
C 區平均值		4.8	4.6	13.7	6.8
D 區平均值		7.3	7.2	17.5	9.0
老街溪總平均值		5.5	5.6	14.8	7.4



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表三(續 1)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Cd 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cd			
		底泥品質標準上下限值(0.65~2.49 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.00	0.00	0.53	0.00
A2	A2	0.00	0.00	0.00	0.00
B3	B3	1.24	1.24	1.90	0.98
B4	B4	1.49	0.00	1.21	0.00
B5	B5	0.00	1.20	0.50	0.48
B6	B6	3.78	0.00	4.11	0.00
B7	B7	0.00	0.00	0.00	0.00
B8	B8	0.00	0.00	0.00	0.39
B9	-	0.00	-	0.00	-
-	B9-1	-	0.00	-	0.00
B10	B10	1.28	1.19	1.03	0.88
B11	B11	0.00	0.00	0.00	0.00
C12	C12	0.00	1.18	0.40	1.29
C13	-	1.32	-	1.06	-
-	C13-1	-	0.00	-	0.40
-	C14-1	-	0.00	-	0.00
C15	-	0.00	-	0.00	-
-	C15-1	-	0.00	-	0.00
-	C16-1	-	0.00	-	0.39
D17	-	0.00	-	0.77	-
-	D17-1	-	1.21	-	0.90
D18	D18	1.42	0.00	1.14	0.00
-	D19-1	-	0.00	-	0.39
D20	D20	0.00	0.00	0.00	0.39
D21	D21	0.00	0.00	0.83	0.00
D22	D22	0.00	0.00	0.51	0.00
D23	D23	0.00	0.00	0.00	0.00
D24	D24	0.00	0.00	0.00	0.00
-	D25-1	-	0.00	-	0.49
A 區平均值		0.00	0.00	0.27	0.00
B 區平均值		0.87	0.40	0.97	0.30
C 區平均值		0.44	0.24	0.49	0.42
D 區平均值		0.20	0.13	0.46	0.24
老街溪總平均值		0.50	0.24	0.67	0.28



表三(續 2)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Cr 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cr			
		底泥品質標準上下限值(76~233 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	55.6	44.9	63.7	48.8
A2	A2	10.0	24.6	12.0	29.2
B3	B3	44.8	28.5	31.5	24.5
B4	B4	84.9	58.7	88.9	53.0
B5	B5	39.9	20.3	34.8	23.7
B6	B6	68.0	24.0	77.5	20.9
B7	B7	23.9	18.1	32.3	19.6
B8	B8	35.8	29.4	57.0	35.6
B9	-	24.7	-	31.0	-
-	B9-1	-	16.4	-	18.5
B10	B10	58.7	39.1	75.2	37.6
B11	B11	22.4	17.2	35.9	18.3
C12	C12	25.0	51.8	31.5	45.1
C13	-	71.4	-	82.2	-
-	C13-1	-	20.9	-	27.2
-	C14-1	-	28.2	-	30.0
C15	-	58.5	-	58.6	-
-	C15-1	-	28.4	-	27.5
-	C16-1	-	19.5	-	26.5
D17	-	92.1	-	99.4	-
-	D17-1	-	41.2	-	44.2
D18	D18	63.7	26.0	74.9	20.2
-	D19-1	-	23.2	-	26.6
D20	D20	27.4	23.6	34.5	21.3
D21	D21	198.9	15.6	246.3	15.5
D22	D22	77.8	25.8	84.7	25.9
D23	D23	66.1	17.5	87.7	15.5
D24	D24	20.1	22.9	34.7	25.7
-	D25-1	-	65.2	-	55.4
A 區平均值		32.8	34.8	37.9	39.0
B 區平均值		44.8	28.0	51.6	28.0
C 區平均值		51.6	29.8	57.4	31.3
D 區平均值		78.0	29.0	94.6	27.8
老街溪總平均值		55.7	29.2	65.4	29.5



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表三(續 3)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Cu 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cu			
		底泥品質標準上下限值(50~157 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	107.3	74.0	122.9	81.8
A2	A2	6.2	48.0	10.5	48.0
B3	B3	158.0	79.3	160.6	78.7
B4	B4	250.3	25.0	320.0	22.3
B5	B5	93.6	62.2	102.1	71.5
B6	B6	401.8	22.8	497.5	24.4
B7	B7	99.6	68.9	120.1	77.9
B8	B8	160.5	120.0	197.6	126.9
B9	-	154.7	-	190.3	-
-	B9-1	-	77.5	-	72.5
B10	B10	600.6	268.0	671.2	270.2
B11	B11	90.8	60.8	126.5	65.0
C12	C12	140.1	553.1	153.4	562.6
C13	-	744.8	-	920.4	-
-	C13-1	-	87.3	-	87.5
-	C14-1	-	93.2	-	98.1
C15	-	86.5	-	96.1	-
-	C15-1	-	75.3	-	78.2
-	C16-1	-	78.0	-	84.3
D17	-	506.4	-	634.2	-
-	D17-1	-	209.5	-	209.6
D18	D18	451.5	84.3	579.3	78.0
-	D19-1	-	92.7	-	81.9
D20	D20	85.8	90.5	112.1	86.0
D21	D21	760.4	69.4	976.9	66.5
D22	D22	334.0	62.6	391.9	60.3
D23	D23	273.6	24.5	354.5	23.6
D24	D24	22.6	21.7	30.4	22.2
-	D25-1	-	344.6	-	319.9
A 區平均值		56.8	61.0	66.7	64.9
B 區平均值		223.3	87.2	265.1	89.9
C 區平均值		323.8	177.4	390.0	182.1
D 區平均值		347.8	111.1	439.9	105.3
老街溪總平均值		263.3	111.7	322.3	111.9



表三(續 4)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Hg 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Hg			
		底泥品質標準上下限值(0.23~0.87 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.00	0.00	0.53	0.49
A2	A2	0.00	0.00	0.00	0.00
B3	B3	0.00	0.00	0.00	0.00
B4	B4	0.00	1.25	0.60	0.50
B5	B5	0.00	0.00	0.00	0.00
B6	B6	1.26	0.00	0.51	0.00
B7	B7	0.00	0.00	0.00	0.00
B8	B8	0.00	0.00	0.00	0.00
B9	-	0.00	-	0.00	-
-	B9-1	-	0.00	-	0.00
B10	B10	0.00	0.00	0.51	0.00
B11	B11	0.00	0.00	0.00	0.00
C12	C12	0.00	1.18	0.00	0.00
C13	-	0.00	-	0.53	-
-	C13-1	-	0.00	-	0.00
-	C14-1	-	0.00	-	0.00
C15	-	1.27	-	0.51	-
-	C15-1	-	0.00	-	0.00
-	C16-1	-	0.00	-	0.00
D17	-	1.92	-	0.77	-
-	D17-1	-	0.00	-	0.00
D18	D18	0.00	0.00	0.57	0.00
-	D19-1	-	0.00	-	0.97
D20	D20	0.00	0.00	0.00	0.49
D21	D21	0.00	0.00	0.00	0.98
D22	D22	0.00	0.00	0.51	0.98
D23	D23	0.00	0.00	0.00	0.97
D24	D24	0.00	0.00	0.00	1.43
-	D25-1	-	0.00	-	1.98
A 區平均值		0.00	0.00	0.27	0.25
B 區平均值		0.14	0.14	0.18	0.06
C 區平均值		0.42	0.24	0.35	0.00
D 區平均值		0.27	0.00	0.26	0.87
老街溪總平均值		0.21	0.10	0.24	0.35



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表三(續 5)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Ni 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Ni			
		底泥品質標準上下限值(24~80 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	27.8	27.9	27.8	28.7
A2	A2	5.0	17.2	4.9	20.2
B3	B3	75.9	47.1	65.0	33.1
B4	B4	43.2	21.2	40.3	19.8
B5	B5	25.0	21.5	25.3	22.2
B6	B6	112.1	27.6	119.3	27.6
B7	B7	36.5	33.8	42.5	41.2
B8	B8	38.3	33.0	43.1	37.1
B9	-	33.4	-	37.6	-
-	B9-1	-	23.5	-	40.6
B10	B10	84.2	51.0	89.2	52.8
B11	B11	33.6	20.6	36.0	24.3
C12	C12	36.3	44.7	29.3	47.0
C13	-	99.2	-	111.4	-
-	C13-1	-	22.1	-	26.3
-	C14-1	-	27.0	-	27.4
C15	-	33.1	-	31.3	-
-	C15-1	-	23.4	-	24.3
-	C16-1	-	20.7	-	28.5
D17	-	99.7	-	104.6	-
-	D17-1	-	44.8	-	45.4
D18	D18	67.9	24.8	69.3	26.0
-	D19-1	-	25.6	-	26.2
D20	D20	26.1	24.8	25.6	23.0
D21	D21	103.6	17.9	108.8	19.4
D22	D22	51.5	19.6	52.2	20.4
D23	D23	42.3	9.3	46.5	9.2
D24	D24	22.6	22.9	23.1	22.3
-	D25-1	-	43.1	-	41.1
A 區平均值		16.4	22.6	16.4	24.5
B 區平均值		53.6	31.0	55.4	33.2
C 區平均值		56.2	27.6	57.3	30.7
D 區平均值		59.1	25.9	61.4	25.9
老街溪總平均值		52.3	27.8	54.0	29.4



表三(續 6)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Pb 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Pb			
		底泥品質標準上下限值(48~161 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	46.4	42.5	47.3	45.8
A2	A2	5.0	18.4	6.0	69.9
B3	B3	34.8	23.5	28.0	19.0
B4	B4	84.9	25.0	103.9	25.7
B5	B5	30.0	15.6	27.7	21.8
B6	B6	70.5	13.2	67.3	12.7
B7	B7	165.1	410.7	171.4	551.9
B8	B8	64.2	75.3	96.2	78.9
B9	-	60.6	-	85.6	-
-	B9-1	-	86.9	-	112.8
B10	B10	173.4	98.4	183.3	129.7
B11	B11	36.1	39.0	37.9	61.5
C12	C12	50.0	105.9	54.7	146.4
C13	-	112.5	-	119.8	-
-	C13-1	-	88.6	-	159.1
-	C14-1	-	52.7	-	41.1
C15	-	28.0	-	31.9	-
-	C15-1	-	32.1	-	48.0
-	C16-1	-	42.6	-	54.1
D17	-	111.2	-	116.6	-
-	D17-1	-	76.3	-	99.4
D18	D18	73.6	29.7	87.3	39.8
-	D19-1	-	36.6	-	76.2
D20	D20	27.4	32.2	34.0	37.3
D21	D21	49.7	22.7	59.7	32.5
D22	D22	56.5	58.9	59.8	84.0
D23	D23	21.1	8.2	26.2	11.4
D24	D24	13.8	16.8	16.8	18.4
-	D25-1	-	48.0	-	37.5
A 區平均值		25.7	30.5	26.7	57.9
B 區平均值		80.0	87.5	89.0	112.7
C 區平均值		63.5	64.4	68.8	89.7
D 區平均值		50.5	36.6	57.2	48.5
老街溪總平均值		62.6	60.0	69.6	80.6



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表三(續 7)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Zn 總濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Zn			
		底泥品質標準上下限值(140~384 mg/kg)			
1 月 樣點	6 月 樣點	序列萃取法		逆王水微波消化法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	397.3	345.9	421.0	343.6
A2	A2	31.1	116.8	35.5	122.9
B3	B3	255.1	233.0	257.2	212.8
B4	B4	1786.5	337.1	2433.2	357.6
B5	B5	228.5	146.0	246.3	161.2
B6	B6	746.9	76.8	884.2	82.4
B7	B7	536.8	477.1	609.3	605.5
B8	B8	355.6	381.3	418.2	399.0
B9	-	331.6	-	409.8	-
-	B9-1	-	255.9	-	262.5
B10	B10	1193.6	581.1	1256.3	579.0
B11	B11	258.6	236.3	306.0	225.3
C12	C12	309.0	594.3	347.3	594.2
C13	-	1041.2	-	1139.5	-
-	C13-1	-	254.6	-	247.9
-	C14-1	-	277.1	-	264.0
C15	-	311.6	-	354.7	-
-	C15-1	-	224.6	-	233.4
-	C16-1	-	240.0	-	241.0
D17	-	1079.9	-	1266.2	-
-	D17-1	-	514.7	-	515.7
D18	D18	738.9	242.9	873.9	252.1
-	D19-1	-	302.6	-	284.7
D20	D20	271.1	278.9	309.8	256.4
D21	D21	1133.3	187.8	1405.1	181.2
D22	D22	636.6	175.4	710.4	157.9
D23	D23	429.6	157.3	499.8	169.5
D24	D24	100.3	102.3	120.4	106.7
-	D25-1	-	493.4	-	474.7
A 區平均值		214.2	231.4	228.3	233.3
B 區平均值		632.6	302.7	757.8	320.6
C 區平均值		553.9	318.1	613.8	316.1
D 區平均值		627.1	272.8	740.8	266.5
老街溪總平均值		579.7	289.3	681.1	293.2



表三(續 8)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Al 總濃度(單位：mg/kg)。

		Al			
1 月 樣點	6 月 樣點	逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	40792.6	30709.0	37980.6	31501.6
A2	A2	7164.6	19673.4	7767.1	19281.2
B3	B3	14931.4	16233.1	13636.7	12253.9
B4	B4	64962.7	46441.3	55110.8	39863.2
B5	B5	20723.0	15918.9	18507.8	16803.5
B6	B6	37157.3	13076.7	37500.4	15787.5
B7	B7	8140.6	7489.3	8948.4	6923.4
B8	B8	11976.3	11768.7	10727.9	10743.5
B9	-	10888.7	-	10350.1	-
-	B9-1	-	9390.2	-	9838.0
B10	B10	30988.3	16010.9	28663.0	21554.4
B11	B11	16163.3	11357.3	25695.6	11649.5
C12	C12	14260.3	32717.6	15101.8	24731.5
C13	-	51330.1	-	49441.2	-
-	C13-1	-	11193.0	-	15789.6
-	C14-1	-	13365.0	-	15765.4
C15	-	40187.2	-	34910.0	-
-	C15-1	-	9625.3	-	14223.5
-	C16-1	-	13034.6	-	15540.3
D17	-	65407.2	-	55276.8	--
-	D17-1	-	28215.4	-	29511.0
D18	D18	53789.4	14744.6	50018.5	11266.0
-	D19-1	-	12081.3	-	18537.1
D20	D20	18530.9	17108.2	18891.0	15509.0
D21	D21	74382.5	8613.5	72978.4	9089.2
D22	D22	28250.1	14963.5	24004.4	15165.5
D23	D23	16787.8	8391.5	19345.9	8363.9
D24	D24	13033.8	17809.1	22704.7	21082.4
-	D25-1	-	25349.1	-	23543.2
A 區平均值		23978.6	25191.2	22873.9	25391.4
B 區平均值		23992.4	16409.6	23237.9	16157.4
C 區平均值		35259.2	15987.1	33151.0	17210.1
D 區平均值		38597.4	16364.0	37602.8	16896.4
老街溪總平均值		30469.0	17011.2	29407.7	17372.7



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表三(續 9)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Fe 總濃度(單位：mg/kg)。

1 月 樣點	6 月 樣點	Fe			
		逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	33110.9	27067.6	33599.4	26921.2
A2	A2	5448.1	19550.4	4598.5	18789.6
B3	B3	22272.7	23792.0	19744.7	20941.3
B4	B4	47977.0	49687.2	44574.0	45219.5
B5	B5	19474.7	15440.1	18964.2	15045.8
B6	B6	31363.3	13556.6	29467.5	13319.8
B7	B7	11971.4	11354.7	10631.2	12101.3
B8	B8	22470.9	18712.2	20447.5	16676.7
B9	-	17322.9	-	16691.2	-
-	B9-1	-	15141.7	-	15070.6
B10	B10	32518.5	15299.3	30904.2	20086.2
B11	B11	24120.6	13307.5	23619.6	12891.6
C12	C12	13259.6	26480.1	12339.2	25459.7
C13	-	34793.4	-	36019.7	-
-	C13-1	-	16851.0	-	17220.7
-	C14-1	-	19986.2	-	18250.8
C15	-	30013.3	-	29332.2	-
-	C15-1	-	18510.2	-	20400.2
-	C16-1	-	14983.7	-	14994.7
D17	-	48144.3	-	44652.1	-
-	D17-1	-	38750.7	-	25206.6
D18	D18	40483.6	17966.1	37315.6	16876.5
-	D19-1	-	19281.3	-	16931.1
D20	D20	18033.5	15868.4	16206.7	13971.2
D21	D21	22376.9	11125.8	19877.9	11005.9
D22	D22	23981.2	23794.3	20999.3	23997.9
D23	D23	15862.5	9440.4	14766.8	9609.0
D24	D24	28448.7	27796.7	28116.7	28441.5
-	D25-1	-	30148.2	-	28997.9
A 區平均值		19279.5	23309.0	19099.0	22855.4
B 區平均值		25499.1	19587.9	23893.8	19039.2
C 區平均值		26022.1	19362.2	25897.0	19265.2
D 區平均值		28190.1	21574.7	25990.7	19448.6
老街溪總平均值		25878.5	20555.7	24422.3	19537.1



表三(續 10)、逆王水微波消化法與序列萃取法 Mn 總濃度(單位：mg/kg)。

1 月 樣點	6 月 樣點	Mn			
		逆王水微波消化法		序列萃取法	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	166.9	327.7	161.4	330.4
A2	A2	60.9	145.1	56.9	141.2
B3	B3	541.3	266.4	521.4	227.0
B4	B4	782.2	384.5	880.5	383.2
B5	B5	245.9	155.6	252.3	165.7
B6	B6	468.6	153.6	509.6	163.2
B7	B7	150.0	131.7	153.1	169.0
B8	B8	322.2	375.4	383.9	355.6
B9	-	243.8	-	275.3	-
-	B9-1	-	231.2	-	252.1
B10	B10	607.0	418.7	646.3	400.4
B11	B11	279.7	197.3	300.1	222.4
C12	C12	102.6	686.1	106.7	692.5
C13	-	1729.1	-	1749.4	-
-	C13-1	-	242.3	-	228.1
-	C14-1	-	169.2	-	178.1
C15	-	451.5	-	475.8	-
-	C15-1	-	185.1	-	191.3
-	C16-1	-	196.1	-	184.7
D17	-	3487.1	-	3686.9	-
-	D17-1	-	622.4	-	638.2
D18	D18	1480.6	174.7	1659.0	181.3
-	D19-1	-	151.3	-	150.9
D20	D20	151.7	229.3	170.2	198.8
D21	D21	406.1	100.5	470.3	108.5
D22	D22	329.0	272.3	338.5	262.6
D23	D23	141.4	99.1	152.2	111.9
D24	D24	334.6	393.5	407.7	420.8
-	D25-1	-	780.2	-	706.2
A 區平均值		113.9	236.4	109.2	235.8
B 區平均值		404.5	257.2	435.8	259.8
C 區平均值		761.1	295.8	777.3	294.9
D 區平均值		904.4	313.7	983.5	308.8
老街溪總平均值		594.4	283.6	636.1	282.6



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

2.3.2 利用序列萃取法分析

本研究以序列萃取法將重金屬的化學型態分成可交換相、可還原相、可氧化相及殘留相，最後將不同形態重金屬濃度加總，得到的序列萃取法重金屬總濃度如表三所示。整體而言，逆王水微波消化法與序列萃取法得到之重金屬總濃度相近(表三)，但以序列萃取法分析出的重金屬含量較高。至於各樣點之底泥重金屬是否超出底泥品質標準，由逆王水微波消化法與序列萃取法所得之結果一致(表三)。

可交換相(exchangeable fraction)之重金屬以離子態吸附於底泥顆粒中，因吸附能力低、鍵結力弱，所以容易受環境 pH 值及離子強度改變而釋出(Tessier *et al.*, 1979)，因此被認為是重金屬的移動力(mobility)，可能和人類的污染行為最相關(Borgese *et al.*, 2013)。可還原相(reducible fraction)及可氧化相(oxidizable fraction)之重金屬在環境中較可交換相穩定，但仍會因還原或氧化反應而釋出，因此重金屬的生物可獲性(bioavailability)被認為與可交換相、可還原相及可氧化相有關(Borgese *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2018)。殘留相(residual fraction)多以結晶形式固定，故與生物可獲性無關(Tessier *et al.*, 1979; Borgese *et al.*, 2013)。因此，序列萃取法可用於評估底泥重金屬的化學特性、移動能力、及生物可獲性(Borgese *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2018; Najamuddin *et al.*, 2016)，不同形態底泥重金屬之濃度及分布情形呈現於表四、圖三。

2.3.2.1 可交換相(exchangeable fraction)

在 2019 年 1 月(枯水期)可交換相結果中，可交換相僅有 Cd、Cr、Pb 及 Hg 在多數樣點未被偵測到濃度(表四)，大多可交換相重金屬濃度未超過底泥品質標準(表四、附件一)。值得注意的是，樣點 B4 之可交換相 Zn 濃度(544.3 mg/kg)超過底泥品質標準上限值(384 mg/kg)，樣點 D22 之可交換相 Zn 濃度(211.7 mg/kg)則超過下限值(140 mg/kg) (表四)。

在 2019 年 6 月豐水期可交換相結果中，僅有 Hg 未被偵測到濃度(表四)，但大多重金屬可交換相濃度未超過底泥品質標準(表四、附件一)。值得注意的是，樣點 C12 之可交換相 Cd 濃度(0.80 mg/kg)超過底泥品質標準下限值(0.65 mg/kg) (表四)；可交換相 Cu 則有 B10 (112.3 mg/kg)、C12 (185.7 mg/kg)、D17-1 (61.7 mg/kg)等樣點超過底泥品質標準下限值(50 mg/kg)，值得注意的是，中壠區(C)的 Cu 平均值(65.1 mg/kg)亦超過底泥品質標準下限值(50 mg/kg) (表四)；可交換相 Zn 有 B8 (229.7 mg/kg)、B9-1 (143.8 mg/kg)、C12 (2561.1 mg/kg)、D17-1 (207.5)等樣點超過底泥品質標準下限值(140 mg/kg) (表四)。綜合上述可知，老街溪流域



部份樣點可交換相 Zn、Cu 濃度偏高，豐水期時中壢區(C) Cu 的平均值甚至超過底泥品質標準下限值，因此可能和人類的污染行為最相關，值得特別注意。

2.3.2.2 可還原相(reducible fraction)

在 2019 年 1 月枯水期可還原相結果中，以 Cu、Pb、及 Zn 在老街溪流域及各區平均值高於底泥品質標準值，其中 Zn 超出底泥品質標準上限值(表四)。無論是老街溪流域(112.2 mg/kg)、平鎮區(B, 109.1 mg/kg)、中壢區(C, 122.9 mg/kg)或大園區(D, 138.7 mg/kg)，可還原相 Cu 濃度的平均值皆超過下限值(50 mg/kg)(表四)。可還原相 Pb 濃度在老街溪流域(53.6 mg/kg)、平鎮區(B, 74.4 mg/kg)及中壢區(C, 51.1 mg/kg)的平均值皆超過下限值(48 mg/kg)(表四)。可還原相 Zn 濃度在老街溪流域(443.5 mg/kg)、平鎮區(B, 490.4 mg/kg)、中壢區(C, 386.8 mg/kg)或大園區(D, 491.5 mg/kg)，可還原相 Zn 濃度的平均值皆超過上限值(384 mg/kg)，龍潭區(A, 149.6 mg/kg)則超過下限值(140 mg/kg)(表四)。值得注意的是，平鎮區(B)的 Cd 平均值(0.87 mg/kg)亦超出底泥品質標準下限值(0.65 mg/kg)，尤其在樣點 B6 之可還原相 Cd 濃度(3.59 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(2.49 mg/kg)(表四)。

在 2019 年 6 月豐水期可還原相結果之中，整體而言，相較於枯水期，各個可還原相重金屬濃度有下降趨勢，Cu、Pb、及 Zn 只有在部份區域平均值高於底泥品質標準下限值(表四)。值得注意的是，可還原相 Cu 濃度在中壢區樣點 C12(211.8 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(157 mg/kg)(表四)；可還原相 Pb 濃度在樣點平鎮區 B7(529.9 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(161 mg/kg)；可還原相 Zn 在樣點平鎮區 B7 濃度(429.3 mg/kg)超出底泥品質標準上限值(384 mg/kg)(表四)。

2.3.2.3 可氧化相(oxidizable fraction)

無論在 2019 年枯水期及豐水期，整體而言，大部分可氧化相重金屬濃度，在老街溪流域及各區平均值未超過底泥品質標準值(表四)。除了在 2019 年枯水期，可氧化相 Cu 在老街溪流域(180.3 mg/kg)、中壢區(224.4 mg/kg)及大園區(262.3 mg/kg)的平均值均超過底泥品質標準上限值(157 mg/kg)，平鎮區(134.0 mg/kg)的平均值則超過底泥品質標準下限值(50 mg/kg)(表四)；但在 2019 年豐水期時，可氧化相 Cu 濃度則顯著降低(表四)。值得注意的是，可氧化相 Hg 在平鎮區(B19-1)及大園區(D21-D25-1)有多個樣點超出底泥品質標準下限值(0.23 mg/kg)，但這些樣點之可氧化相 Hg 在 2019 年 1 月枯水期並未超出底泥品質標準



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

下限值(表四)。這些樣點大多在大園區，為光電廠、皮革廠等之工廠放流口(童心欣等, 2017)，因此大園區的平均值(0.33 mg/kg)亦超過下限值(0.23 mg/kg) (表四)。

2.3.2.4 殘留相(residual fraction)

因殘留相金屬穩定存在於底泥或土壤因此大多與污染無關，故與生物可獲性無關。因此部份樣點殘留相重金屬濃度即使超過底泥品質標準(表四)，以風險評及生物可獲性觀點而言，應不足以造成隱憂。

然而值得特別注意的是，綜合可交換相、可還原相及可氧化相的分析結果可知，老街溪流域部份樣點底泥中重金屬的可交換相、可還原相及可氧化相濃度於偏高，有些樣點底泥中重金屬濃度甚至已超過底泥品質標準上限值。因重金屬的生物可獲性被認為與可交換相、可還原相及可氧化相有關(Borgese *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2018)，因此可能造成水中生物及人類健康的潛在風險，值得提高注意。

2.3.2.5 老街溪底泥重金屬之化學型態分布

整體而言，Cr、Al、Fe 在殘留相的比例較高(圖三)，表示這些重金屬在自然環境中的傳輸能力較低且生物可獲性低(Najamuddin *et al.*, 2016)。然而，Cr 在低濃度對水生生物會產生慢性毒性(Velma *et al.*, 2009)，即便 Cr 的傳輸能力不高，仍需評估 Cr 之生態風險。由表三結果得知，Cu 及 Zn 之總濃度超過底泥品質標準的樣點最多，兩者的殘留相比比例低(圖三)，表示 Cu 及 Zn 的移動性可能對水生生物產生潛在危害。此外，Cu 及 Zn 總濃度在豐水期普遍較低(表三)，然而，在樣點 C12 以及 D17-1 之可交換相卻於豐水期超過底泥品質指標(表四)，由圖三同樣見到此兩種重金屬在可交換相的比例較高並於豐水期明顯增加，顯示 Cu 及 Zn 於豐水期之傳輸能力及生物可獲性不容小覷。Cu 易與有機物質形成穩定化合物，Zn 可與矽酸鹽鍵結，因此底泥中 Cu 及 Zn 的殘留相比比例應該不低(Ma *et al.*, 2016)。但老街溪流域有排 Cu 及排 Zn 事業(胡惠宇, 2017; 王根樹及吳章甫, 2018)，顯示人為活動干擾導致 Cu 及 Zn 可交換相的比例顯著提升。

將近半數樣點呈現 Pb 之總濃度超過底泥品質標準(表三)，由表四及圖三可見到 Pb 的可交換相的濃度及比例在豐水期均明顯增加，加上 Pb 的殘留相比比例不高(圖三)，表示當環境變動使 Pb 再度釋出時，對水生生物之影響不容忽視。As 總濃度在枯水期及豐水期相近(表三)，但殘留相於豐水期的比較較高(圖三)，可



交換相比比例出現下降之趨勢，顯示 As 在豐水期對水生生物之危害風險降低。Cd 及 Hg 之總濃度雖低，但部份樣點已超過底泥品質標準(表三)，其中，Cd 主要分布於可交換相及可還原相，可交換相之比例又於豐水期明顯增加(圖三)，Hg 則幾乎見不到可交換相的比例(圖三)，因此 Cd 總濃度一旦超標，可能影響水生生物健康。Ni 的可還原相在枯水期的比例較高，此外，部分總濃度超標樣點(表三)的殘留相比比例低(圖三)，顯示 Ni 的化學相組成比例易受環境影響而有變動。Mn 為地質背景相關元素，序列萃取的還原相與 Fe-Mn 氧化物有關(Tessier *et al.*, 1979)，枯水期可見到還原相比比例較高。然而，老街溪流域有排 Mn 事業(王根樹及吳章甫, 2018)，因此 Mn 的化學相變化與可能與人為活動有關。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表四、序列萃取法 As 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		As							
		底泥品質標準上下限值(11~33 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	1.3	0.8	1.6	1.5	5.3	1.0	4.2	5.4
A2	A2	1.6	0.4	1.0	0.0	5.1	1.0	1.5	2.9
B3	B3	1.2	0.8	1.5	0.5	5.5	0.0	2.5	2.9
B4	B4	1.9	0.8	3.0	0.5	9.1	0.5	10.9	12.9
B5	B5	1.2	0.0	1.5	0.0	6.2	0.5	3.5	2.4
B6	B6	1.2	0.4	3.6	4.4	7.2	1.5	4.6	3.4
B7	B7	1.2	0.8	1.0	0.5	5.0	1.0	3.0	2.5
B8	B8	1.6	0.4	1.5	0.5	6.1	0.0	3.0	2.4
B9	-	1.6	-	1.0	-	5.5	-	2.5	-
-	B9-1	-	0.4	-	0.5	-	1.0	-	3.4
B10	B10	0.8	0.4	4.1	2.0	5.7	1.5	5.1	3.4
B11	B11	1.2	0.4	1.0	0.5	5.0	1.0	4.0	2.4
C12	C12	1.2	0.4	0.5	3.0	5.0	1.0	2.0	5.0
C13	-	1.3	-	4.3	-	7.8	-	5.3	-
-	C13-1	-	0.4	-	0.0	-	1.5	-	3.0
-	C14-1	-	0.4	-	0.9	-	1.4	-	3.7
C15	-	2.1	-	2.1	-	5.1	-	4.6	-
-	C15-1	-	0.4	-	0.5	-	1.5	-	4.9
-	C16-1	-	0.4	-	1.0	-	1.4	-	3.4
D17	-	1.9	-	3.9	-	9.9	-	10.8	-
-	D17-1	-	0.8	-	1.5	-	1.5	-	5.5
D18	D18	1.4	0.4	4.0	1.0	7.0	1.0	6.3	3.5
-	D19-1	-	0.4	-	0.5	-	1.5	-	3.4
D20	D20	1.2	0.0	1.0	0.0	5.4	0.0	4.0	2.4
D21	D21	1.3	0.4	1.7	0.0	10.8	1.0	4.1	2.4
D22	D22	1.2	0.4	1.5	0.5	4.7	1.5	4.5	11.3
D23	D23	0.8	0.4	2.1	0.0	7.1	1.5	2.6	2.4
D24	D24	1.6	0.4	1.5	1.0	6.1	1.4	14.1	17.2
-	D25-1	-	1.2	-	7.9	-	2.0	-	5.4
A 區平均值		1.5	0.6	1.3	0.8	5.2	1.0	2.9	4.2
B 區平均值		1.3	0.5	2.0	1.0	6.1	0.8	4.3	4.0
C 區平均值		1.5	0.4	2.3	1.1	6.0	1.4	4.0	4.0
D 區平均值		1.3	0.5	2.2	1.4	7.3	1.3	6.6	5.9
老街溪總平均值		1.4	0.5	2.1	1.1	6.4	1.1	4.9	4.7



表四(續 1)、序列萃取法 Cd 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cd							
		底泥品質標準上下限值(0.65~2.49 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A2	A2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3	B3	0.40	0.00	1.50	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00
B4	B4	0.00	0.00	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B5	B5	0.00	0.00	0.50	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
B6	B6	0.00	0.00	3.59	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00
B7	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B8	B8	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B9	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
-	B9-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
B10	B10	0.00	0.39	1.03	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
B11	B11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C12	C12	0.40	0.80	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
C13	-	0.00	-	1.06	-	0.00	-	0.00	-
-	C13-1	-	0.40	-	0.00	-	0.00	-	0.00
-	C14-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
C15	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
-	C15-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
-	C16-1	-	0.39	-	0.00	-	0.00	-	0.00
D17	-	0.00	-	0.77	-	0.00	-	0.00	-
-	D17-1	-	0.40	-	0.50	-	0.00	-	0.00
D18	D18	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-	D19-1	-	0.39	-	0.00	-	0.00	-	0.00
D20	D20	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D21	D21	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D22	D22	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D23	D23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D24	D24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-	D25-1	-	0.00	-	0.49	-	0.00	-	0.00
A 區平均值		0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B 區平均值		0.04	0.09	0.87	0.22	0.06	0.00	0.00	0.00
C 區平均值		0.13	0.32	0.35	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
D 區平均值		0.00	0.13	0.46	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
老街溪總平均值		0.04	0.14	0.60	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表四(續 2)、序列萃取法 Cr 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cr							
		底泥品質標準上下限值(76~233 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.0	0.0	6.3	4.9	21.6	14.7	35.8	29.3
A2	A2	0.0	0.4	0.5	4.3	3.0	5.8	8.5	18.7
B3	B3	0.0	0.0	3.0	2.4	9.5	5.9	19.0	16.2
B4	B4	0.0	0.0	8.5	3.5	31.5	11.4	48.9	38.1
B5	B5	0.0	0.0	2.0	1.9	10.7	5.3	22.1	16.5
B6	B6	0.0	0.0	8.7	1.9	24.1	5.4	44.7	13.6
B7	B7	0.0	0.0	6.1	2.9	9.6	6.4	16.6	10.3
B8	B8	0.0	0.4	5.5	6.8	15.6	8.3	35.9	20.1
B9	-	0.0	-	5.5	-	10.5	-	15.0	-
-	B9-1	-	0.4	-	2.0	-	3.9	-	12.2
B10	B10	0.0	0.4	10.8	5.4	26.8	12.7	37.6	19.1
B11	B11	0.0	0.4	2.5	1.9	8.0	5.3	25.5	10.6
C12	C12	0.0	0.4	3.0	5.5	9.5	15.4	19.0	23.9
C13	-	0.0	-	16.0	-	37.0	-	29.3	-
-	C13-1	-	0.4	-	2.0	-	8.4	-	16.4
-	C14-1	-	0.4	-	1.4	-	7.9	-	20.4
C15	-	0.0	-	4.6	-	15.9	-	38.0	-
-	C15-1	-	0.4	-	2.0	-	6.9	-	18.2
-	C16-1	-	0.4	-	1.9	-	6.8	-	17.4
D17	-	0.0	-	12.4	-	32.0	-	55.0	-
-	D17-1	-	0.4	-	4.0	-	14.4	-	25.4
D18	D18	0.0	0.4	11.4	2.0	22.6	6.4	40.9	11.4
-	D19-1	-	0.4	-	2.4	-	6.3	-	17.5
D20	D20	0.0	0.4	5.0	1.9	8.4	4.9	21.1	14.1
D21	D21	0.0	0.4	20.7	1.5	159.2	5.9	66.3	7.8
D22	D22	0.0	0.4	16.2	3.4	36.2	6.4	32.3	15.7
D23	D23	0.0	0.4	23.7	1.9	42.4	4.9	21.6	8.3
D24	D24	0.0	0.4	2.5	1.4	5.0	2.9	27.2	21.0
-	D25-1	-	0.0	-	9.4	-	14.8	-	31.2
A 區平均值		0.0	0.2	3.4	4.6	12.3	10.3	22.2	24.0
B 區平均值		0.0	0.2	5.8	3.2	16.3	7.2	29.5	17.4
C 區平均值		0.0	0.4	7.9	2.6	20.8	9.1	28.8	19.3
D 區平均值		0.0	0.4	13.1	3.1	43.7	7.4	37.8	16.9
老街溪總平均值		0.0	0.3	8.3	3.1	25.7	7.9	31.4	18.1



表四(續 3)、序列萃取法 Cu 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Cu							
		底泥品質標準上下限值(50~157 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.8	3.1	31.6	22.0	66.3	47.4	24.2	9.3
A2	A2	0.4	13.8	3.0	13.5	5.6	15.9	1.5	4.8
B3	B3	6.8	4.7	81.4	45.1	62.4	22.5	10.0	6.4
B4	B4	3.4	0.0	126.2	6.4	163.9	5.4	26.6	10.4
B5	B5	10.8	2.3	38.2	38.7	40.5	24.7	12.6	5.8
B6	B6	0.0	1.9	116.0	12.2	347.1	6.8	34.4	3.4
B7	B7	5.6	0.4	72.1	55.0	36.8	19.1	5.5	3.4
B8	B8	4.4	38.4	107.3	45.0	76.0	36.2	10.0	7.3
B9	-	4.8	-	111.1	-	65.5	-	9.0	-
-	B9-1	-	34.4	-	21.0	-	12.7	-	4.4
B10	B10	3.3	112.3	272.9	101.2	357.4	46.9	37.6	9.8
B11	B11	3.2	30.2	56.9	18.9	56.4	12.1	10.0	3.9
C12	C12	17.6	185.7	70.4	211.8	55.4	141.2	10.0	23.9
C13	-	21.3	-	275.8	-	558.8	-	64.4	-
-	C13-1	-	34.9	-	21.3	-	25.8	-	5.5
-	C14-1	-	40.7	-	25.0	-	25.4	-	6.9
C15	-	2.1	-	22.6	-	59.1	-	12.3	-
-	C15-1	-	30.4	-	19.7	-	20.7	-	7.4
-	C16-1	-	34.0	-	22.2	-	21.7	-	6.3
D17	-	19.2	-	152.6	-	408.2	-	54.2	-
-	D17-1	-	61.7	-	65.2	-	68.2	-	14.4
D18	D18	14.1	28.9	169.4	19.3	356.6	22.8	39.2	6.9
-	D19-1	-	33.4	-	22.8	-	18.0	-	7.8
D20	D20	2.4	34.6	73.2	25.2	28.9	18.9	8.0	7.3
D21	D21	29.2	27.4	97.0	14.7	800.2	20.0	50.6	4.4
D22	D22	12.1	20.0	230.8	20.1	129.8	12.8	19.2	7.4
D23	D23	4.6	10.9	232.1	6.3	106.7	4.4	11.1	1.9
D24	D24	3.2	6.5	16.1	8.1	5.5	3.3	5.5	4.3
-	D25-1	-	8.7	-	87.6	-	155.8	-	67.8
A 區平均值		0.6	8.5	17.3	17.8	36.0	31.7	12.9	7.1
B 區平均值		4.7	25.0	109.1	38.2	134.0	20.7	17.3	6.1
C 區平均值		13.7	65.1	122.9	60.0	224.4	47.0	28.9	10.0
D 區平均值		12.1	25.8	138.7	29.9	262.3	36.0	26.8	13.6
老街溪總平均值		8.1	32.0	112.2	37.9	180.3	32.3	21.7	9.6



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表四(續 4)、序列萃取法 Hg 濃度 (單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Hg							
		底泥品質標準上下限值(0.23~0.87 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.49
A2	A2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B4	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.50
B5	B5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B6	B6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00
B7	B7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B8	B8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B9	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
-	B9-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
B10	B10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00
B11	B11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C12	C12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C13	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.53	-
-	C13-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
-	C14-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
C15	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.51	-
-	C15-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
-	C16-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
D17	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.77	-
-	D17-1	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
D18	D18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00
-	D19-1	-	0.00	-	0.00	-	0.49	-	0.49
D20	D20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49
D21	D21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.49
D22	D22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.51	0.49
D23	D23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.49
D24	D24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00	0.95
-	D25-1	-	0.00	-	0.49	-	0.49	-	0.99
A 區平均值		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.25
B 區平均值		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.06
C 區平均值		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00
D 區平均值		0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.33	0.26	0.49
老街溪總平均值		0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.12	0.24	0.22



表四(續 5)、序列萃取法 Ni 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Ni							
		底泥品質標準上下限值(24~80 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.4	2.3	4.7	3.9	7.4	7.8	15.3	14.7
A2	A2	0.4	1.9	0.0	3.4	1.5	5.3	3.0	9.6
B3	B3	15.6	0.8	26.0	12.7	15.0	8.3	8.5	10.8
B4	B4	2.4	0.0	8.5	3.0	7.7	2.5	21.7	14.4
B5	B5	2.0	2.3	6.5	6.8	6.7	5.8	10.0	7.3
B6	B6	5.3	0.8	66.7	3.4	31.3	6.3	15.9	17.1
B7	B7	3.6	3.9	21.2	24.5	8.6	7.4	9.1	5.4
B8	B8	4.0	8.2	16.5	11.7	11.2	7.3	11.5	9.8
B9	-	5.2	-	14.0	-	9.4	-	9.0	-
-	B9-1	-	5.5	-	10.7	-	10.7	-	13.7
B10	B10	9.9	13.7	42.7	16.6	19.6	10.8	17.0	11.7
B11	B11	3.6	5.4	12.0	6.8	10.0	6.3	10.5	5.8
C12	C12	4.8	6.8	6.5	10.9	9.0	13.4	9.0	15.9
C13	-	4.3	-	47.9	-	26.2	-	33.0	-
-	C13-1	-	4.0	-	5.5	-	8.9	-	7.9
-	C14-1	-	3.3	-	5.1	-	9.3	-	9.7
C15	-	0.4	-	8.2	-	8.2	-	14.4	-
-	C15-1	-	3.5	-	4.4	-	6.9	-	9.4
-	C16-1	-	3.9	-	5.8	-	10.1	-	8.7
D17	-	2.5	-	44.2	-	25.5	-	32.5	-
-	D17-1	-	7.6	-	9.0	-	13.9	-	14.9
D18	D18	3.6	3.2	27.3	4.5	15.7	9.9	22.7	8.4
-	D19-1	-	3.9	-	6.3	-	6.8	-	9.2
D20	D20	2.4	3.1	7.5	5.3	6.6	6.3	9.0	8.3
D21	D21	2.7	2.7	34.8	4.4	51.4	7.3	19.9	4.9
D22	D22	10.9	2.8	18.7	4.4	10.0	4.9	12.6	8.4
D23	D23	6.3	1.9	21.6	1.5	11.8	1.9	6.8	3.9
D24	D24	0.4	2.3	5.0	3.8	6.1	4.8	11.6	11.4
-	D25-1	-	5.9	-	10.9	-	9.9	-	14.3
A 區平均值		0.4	2.1	2.4	3.7	4.5	6.6	9.2	12.2
B 區平均值		5.7	4.5	23.8	10.7	13.3	7.3	12.6	10.7
C 區平均值		3.2	4.3	20.9	6.3	14.5	9.7	18.8	10.3
D 區平均值		4.1	3.7	22.7	5.6	18.2	7.3	16.4	9.3
老街溪總平均值		4.3	4.0	21.0	7.4	14.2	7.7	14.4	10.2



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表四(續 6)、序列萃取法 Pb 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Pb							
		底泥品質標準上下限值(48~161 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.0	0.4	34.7	34.7	6.8	6.4	5.8	4.4
A2	A2	0.0	22.3	4.0	41.3	1.0	2.4	1.0	3.8
B3	B3	0.0	0.4	22.0	13.7	3.5	1.5	2.5	3.4
B4	B4	0.0	0.0	83.9	15.8	13.3	4.0	6.6	5.9
B5	B5	0.0	0.0	19.6	16.9	5.1	1.5	3.0	3.4
B6	B6	0.0	0.0	45.7	7.8	13.9	1.9	7.7	2.9
B7	B7	0.0	0.4	157.8	529.9	10.1	17.7	3.5	3.9
B8	B8	0.0	1.6	80.3	69.0	8.4	4.9	7.5	3.4
B9	-	0.0	-	76.5	-	6.1	-	3.0	-
-	B9-1	-	31.3	-	65.0	-	6.8	-	9.8
B10	B10	0.0	3.5	153.5	110.5	22.1	10.8	7.7	4.9
B11	B11	0.0	11.2	30.5	43.5	4.0	3.9	3.5	2.9
C12	C12	0.8	1.2	46.4	123.3	4.5	14.9	3.0	7.0
C13	-	0.0	-	86.3	-	24.5	-	9.1	-
-	C13-1	-	44.1	-	104.7	-	6.4	-	4.0
-	C14-1	-	4.1	-	27.8	-	4.2	-	5.1
C15	-	0.0	-	20.6	-	6.2	-	5.1	-
-	C15-1	-	5.1	-	34.5	-	4.4	-	3.9
-	C16-1	-	5.8	-	40.1	-	4.8	-	3.4
D17	-	0.0	-	63.5	-	33.7	-	19.4	-
-	D17-1	-	2.8	-	81.7	-	10.0	-	5.0
D18	D18	0.0	3.2	60.8	28.2	16.8	3.5	9.7	5.0
-	D19-1	-	13.6	-	55.8	-	3.4	-	3.4
D20	D20	0.0	2.3	29.1	30.1	2.4	1.9	2.5	2.9
D21	D21	0.0	7.0	29.9	20.5	24.0	2.4	5.8	2.4
D22	D22	0.0	9.8	49.5	60.9	5.8	5.9	4.5	7.4
D23	D23	0.0	1.2	19.5	7.3	4.1	1.0	2.6	1.9
D24	D24	0.0	0.8	11.6	11.4	2.2	1.9	3.0	4.3
-	D25-1	-	0.4	-	16.8	-	12.4	-	7.9
A 區平均值		0.0	11.4	19.4	38.0	3.9	4.4	3.4	4.1
B 區平均值		0.0	5.4	74.4	96.9	9.6	5.9	5.0	4.5
C 區平均值		0.3	12.1	51.1	66.1	11.7	6.9	5.7	4.7
D 區平均值		0.0	4.6	37.7	34.7	12.7	4.7	6.8	4.5
老街溪總平均值		0.0	6.9	53.6	63.6	10.4	5.6	5.5	4.5



表四(續 7)、序列萃取法 Zn 濃度(單位：mg/kg)。

(超出底泥品質標準上限值以紅字表示，介於底泥品質標準上下限值之間以藍色表示)

		Zn							
		底泥品質標準上下限值(140~384 mg/kg)							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	18.5	118.4	286.7	136.3	67.3	49.8	48.4	39.1
A2	A2	6.0	48.4	12.5	30.3	9.1	21.1	8.0	23.1
B3	B3	34.0	7.4	135.8	146.5	53.4	29.4	34.0	29.4
B4	B4	544.3	13.5	1600.9	261.5	202.4	28.7	85.7	54.0
B5	B5	19.3	19.4	103.0	88.1	65.8	29.5	58.3	24.2
B6	B6	28.3	3.5	677.7	41.4	137.6	20.0	40.6	17.5
B7	B7	134.3	104.0	381.7	429.3	61.5	38.8	31.8	33.4
B8	B8	61.1	229.7	259.9	115.0	64.8	25.4	32.4	28.9
B9	-	88.4	-	230.1	-	63.3	-	28.0	-
-	B9-1	-	143.8	-	69.8	-	24.4	-	24.4
B10	B10	116.6	313.0	882.7	159.9	174.6	55.3	82.4	50.9
B11	B11	47.9	108.7	141.8	59.0	58.4	31.0	57.9	26.6
C12	C12	112.6	256.1	100.4	161.6	82.9	107.9	51.4	68.6
C13	-	32.8	-	820.0	-	201.0	-	85.7	-
-	C13-1	-	99.6	-	59.0	-	55.1	-	34.2
-	C14-1	-	102.1	-	56.4	-	66.1	-	39.3
C15	-	18.9	-	240.1	-	54.0	-	41.6	-
-	C15-1	-	89.5	-	51.3	-	53.2	-	39.4
-	C16-1	-	97.4	-	52.7	-	54.6	-	36.2
D17	-	37.2	-	888.6	-	210.2	-	130.2	-
-	D17-1	-	207.5	-	125.5	-	109.0	-	73.7
D18	D18	32.3	89.6	644.6	55.0	131.0	66.9	65.9	40.6
-	D19-1	-	103.7	-	76.2	-	53.4	-	51.4
D20	D20	33.3	91.3	171.1	73.3	66.8	48.6	38.6	43.2
D21	D21	34.5	64.9	1006.6	45.0	301.8	47.9	62.2	23.5
D22	D22	211.7	58.2	352.6	39.8	94.0	28.0	52.0	31.9
D23	D23	108.6	83.3	312.2	49.7	59.5	23.4	19.5	13.1
D24	D24	1.2	27.1	65.0	30.0	26.0	18.1	28.2	31.5
-	D25-1	-	113.6	-	244.4	-	59.9	-	56.9
A 區平均值		12.3	83.4	149.6	83.3	38.2	35.5	28.2	31.1
B 區平均值		119.4	104.8	490.4	152.3	98.0	31.4	50.1	32.1
C 區平均值		54.8	128.9	386.8	76.2	112.6	67.4	59.6	43.5
D 區平均值		65.5	93.2	491.5	82.1	127.0	50.6	56.7	40.6
老街溪總平均值		82.0	103.7	443.5	106.3	104.1	45.8	51.6	37.4



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表四(續 8)、序列萃取法 Al 濃度(單位：mg/kg)。

		Al							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	6.3	43.0	2998.8	2051.6	3619.6	3419.4	31355.9	25987.6
A2	A2	7.6	205.3	199.2	961.0	787.4	2018.1	6773.6	16096.8
B3	B3	6.8	3.9	963.9	833.0	1678.1	1666.0	10987.8	9751.0
B4	B4	3.4	1.2	2776.8	1634.1	6512.2	2822.5	45817.0	35405.4
B5	B5	6.8	6.6	954.2	677.7	1828.1	1549.0	15719.5	14570.3
B6	B6	2.5	8.6	5391.0	730.5	4158.8	2045.4	27930.5	13003.0
B7	B7	7.3	5.1	776.6	539.7	912.7	785.1	7261.3	5593.5
B8	B8	6.0	127.6	902.9	978.4	1542.1	1174.1	8280.9	8463.4
B9	-	10.0	-	1080.5	-	1513.2	-	7753.6	-
-	B9-1	-	118.0	-	488.4	-	976.9	-	8254.7
B10	B10	4.1	233.9	3450.4	1711.5	3059.0	2396.1	22144.5	17212.8
B11	B11	6.0	137.4	908.5	532.1	1916.9	1209.3	22862.7	9770.8
C12	C12	19.6	173.4	868.8	1789.7	1398.1	2833.6	12832.5	19934.9
C13	-	3.0	-	23855.2	-	6142.7	-	19435.6	-
-	C13-1	-	162.7	-	496.1	-	1587.5	-	13543.3
-	C14-1	-	178.3	-	416.3	-	1433.8	-	13736.9
C15	-	2.1	-	2416.4	-	3228.8	-	29254.4	-
-	C15-1	-	175.9	-	443.6	-	1281.5	-	12322.5
-	C16-1	-	170.5	-	531.7	-	1401.6	-	13436.5
D17	-	4.3	-	15805.0	-	7391.2	-	32075.0	-
-	D17-1	-	634.5	-	2290.2	-	2788.1	-	23798.2
D18	D18	4.1	217.6	10346.1	545.0	5218.5	1486.3	34449.0	9017.1
-	D19-1	-	243.0	-	679.4	-	1310.2	-	16304.5
D20	D20	6.0	263.0	968.1	776.9	1667.4	1359.5	16252.7	13109.6
D21	D21	8.0	145.1	26616.9	391.0	27446.1	1417.4	18905.5	7135.8
D22	D22	8.9	181.6	2424.5	786.0	2127.5	1375.6	19446.4	12822.3
D23	D23	7.6	233.7	5474.5	438.2	2812.2	730.3	11054.2	6961.8
D24	D24	4.4	149.9	906.3	715.2	1650.5	1525.8	20140.6	18691.4
-	D25-1	-	45.1	-	4699.6	-	3314.5	-	15484.0
A 區平均值		7.0	124.2	1599.0	1506.3	2203.5	2718.8	19064.8	21042.2
B 區平均值		5.9	71.4	1911.6	902.8	2569.0	1624.9	18750.9	13558.3
C 區平均值		8.2	172.2	9046.8	735.5	3589.9	1707.6	20507.5	14594.8
D 區平均值		6.2	234.8	8934.5	1257.9	6901.9	1700.9	21760.5	13702.7
老街溪總平均值		6.4	154.6	5242.1	1045.5	4124.3	1756.3	20034.9	14416.3



表四(續 9)、序列萃取法 Fe 濃度(單位：mg/kg)。

		Fe							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	28.6	54.3	9312.1	7815.8	3424.9	4787.2	20833.8	14263.8
A2	A2	43.0	290.2	747.1	2835.0	1483.4	3747.9	2340.9	11916.5
B3	B3	27.2	18.4	4025.5	3038.0	3710.9	3724.0	11986.7	14160.9
B4	B4	30.4	9.5	10805.3	5892.6	6582.2	7130.6	27164.3	32186.7
B5	B5	21.7	39.9	3003.3	2420.3	2694.3	3727.3	13208.4	8858.3
B6	B6	6.2	24.5	10422.6	1168.8	3183.3	4870.1	15813.6	7256.4
B7	B7	36.7	31.0	2415.4	2208.0	1956.5	2993.0	6252.8	6869.3
B8	B8	36.3	288.0	3756.4	3522.3	3955.7	2592.8	12720.7	10273.5
B9	-	45.6	-	3991.8	-	3439.1	-	9254.3	-
-	B9-1	-	270.8	-	2002.6	-	2930.7	-	9866.5
B10	B10	19.0	37.2	11278.2	5672.4	3934.5	5379.0	15655.6	8997.6
B11	B11	57.9	170.3	3708.9	1983.2	3394.5	3724.5	16473.1	7013.7
C12	C12	46.7	6.8	1677.7	6711.2	2117.1	3877.6	8538.3	14864.1
C13	-	6.8	-	12460.1	-	4830.7	-	18690.1	-
-	C13-1	-	155.2	-	1984.4	-	4316.0	-	10765.2
-	C14-1	-	166.1	-	1711.3	-	3468.9	-	12904.4
C15	-	15.2	-	7609.2	-	3732.6	-	17943.4	-
-	C15-1	-	142.0	-	1823.7	-	3302.4	-	15132.1
-	C16-1	-	108.3	-	1788.3	-	3576.6	-	9521.5
D17	-	9.3	-	11543.9	-	4270.5	-	28821.0	-
-	D17-1	-	14.3	-	4580.4	-	5028.5	-	15583.4
D18	D18	12.3	130.4	14211.6	1585.4	2609.3	3567.2	20464.7	11593.4
-	D19-1	-	189.8	-	2086.6	-	2620.4	-	12034.3
D20	D20	34.5	36.1	2262.3	2233.5	3033.8	2184.9	10885.3	9516.6
D21	D21	8.0	155.6	4726.4	1319.6	1741.3	3812.3	13349.9	5718.4
D22	D22	35.2	269.2	6212.7	4028.5	2831.4	4814.5	11920.4	14885.7
D23	D23	38.3	164.4	4000.6	1606.6	3602.2	1655.2	7158.9	6182.8
D24	D24	26.6	309.0	3383.6	2956.3	3699.8	3433.1	20996.6	21743.1
-	D25-1	-	8.7	-	8014.1	-	6183.7	-	14791.4
A 區平均值		35.8	172.3	5029.6	5325.4	2454.2	4267.6	11587.4	13090.2
B 區平均值		31.2	98.8	5934.2	3100.9	3650.1	4119.1	14281.1	11720.3
C 區平均值		22.9	115.7	7249.0	2803.8	3560.1	3708.3	15057.3	12637.5
D 區平均值		23.5	141.9	6620.2	3156.8	3112.6	3700.0	16228.1	12449.9
老街溪總平均值		27.9	123.6	6264.5	3239.6	3344.2	3897.9	14784.4	12276.0



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

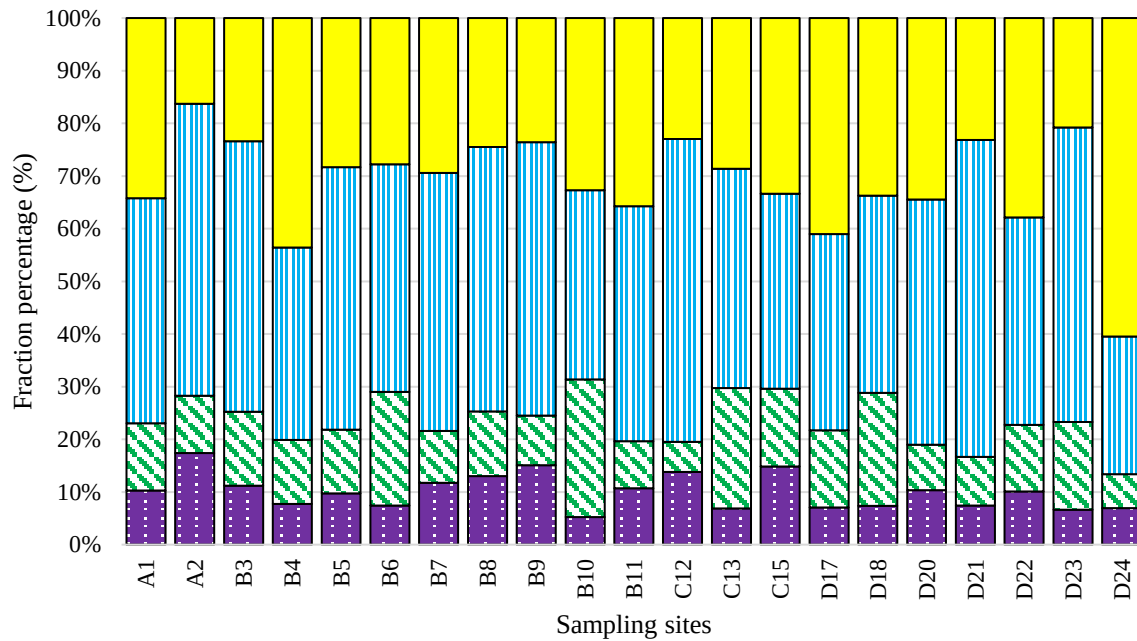
表四(續 10)、序列萃取法 Mn 濃度(單位：mg/kg)。

		Mn							
1 月	6 月	可交換相		可還原相		可氧化相		殘留相	
樣點	樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	4.6	145.8	72.6	107.5	32.6	34.7	51.6	42.5
A2	A2	31.5	63.8	15.4	26.4	2.0	15.9	8.0	35.1
B3	B3	199.8	15.3	246.7	136.2	31.5	21.6	43.5	53.9
B4	B4	260.3	4.4	473.3	251.6	58.8	30.7	88.1	96.6
B5	B5	66.3	45.7	118.5	68.3	20.8	18.9	46.7	32.9
B6	B6	23.4	24.9	379.4	75.0	50.3	30.7	56.5	32.6
B7	B7	31.1	24.7	72.6	76.1	11.1	16.2	38.3	52.0
B8	B8	79.4	149.1	209.5	135.0	34.6	19.1	60.4	52.3
B9	-	83.2	-	126.1	-	27.5	-	38.5	-
-	B9-1	-	93.4	-	81.6	-	20.0	-	57.1
B10	B10	88.6	168.6	441.3	157.0	60.8	34.2	55.6	40.6
B11	B11	89.5	110.7	125.3	57.6	30.5	20.8	54.9	33.4
C12	C12	38.7	161.1	19.5	428.5	15.0	48.2	33.5	54.7
C13	-	126.9	-	1424.9	-	143.7	-	53.8	-
-	C13-1	-	103.6	-	55.6	-	26.3	-	42.7
-	C14-1	-	72.2	-	22.2	-	23.1	-	60.6
C15	-	15.6	-	373.3	-	37.5	-	49.4	-
-	C15-1	-	86.4	-	31.1	-	23.7	-	50.3
-	C16-1	-	80.8	-	38.7	-	22.2	-	43.0
D17	-	313.6	-	3063.4	-	218.5	-	91.4	-
-	D17-1	-	327.0	-	218.1	-	43.3	-	49.8
D18	D18	186.9	73.3	1308.6	39.6	104.4	24.3	59.1	44.1
-	D19-1	-	54.3	-	31.1	-	19.4	-	46.1
D20	D20	36.5	104.1	75.2	46.1	16.3	14.1	42.1	34.5
D21	D21	42.5	43.0	318.4	17.6	63.0	18.6	46.4	29.3
D22	D22	136.2	118.7	137.4	60.4	21.5	24.1	43.4	59.4
D23	D23	40.0	54.9	52.6	15.1	20.6	10.2	39.0	31.6
D24	D24	28.2	159.1	202.4	90.6	59.3	42.9	117.8	128.3
-	D25-1	-	273.9	-	281.0	-	69.8	-	81.6
A 區平均值		18.1	104.8	44.0	67.0	17.3	25.3	29.8	38.8
B 區平均值		102.4	70.8	243.6	115.4	36.2	23.6	53.6	50.2
C 區平均值		60.4	100.8	605.9	115.2	65.4	28.7	45.6	50.3
D 區平均值		112.0	134.3	736.9	88.8	71.9	29.6	62.7	56.1
老街溪總平均值		91.6	102.4	440.8	101.9	50.5	26.9	53.2	51.4



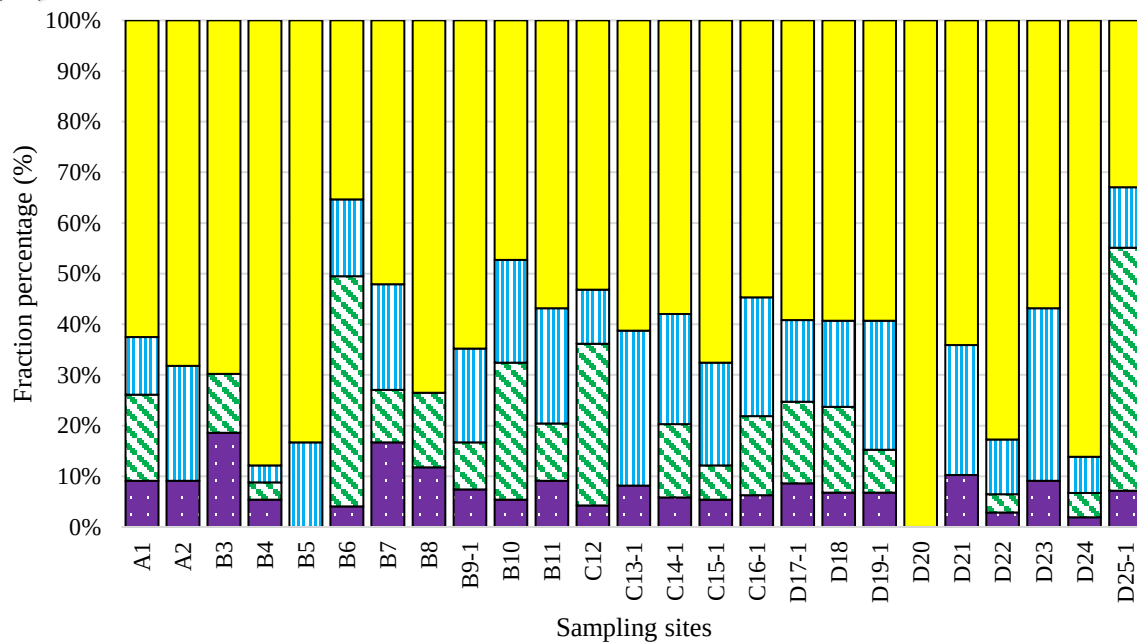
(A)

1月 - As



(B)

6月 - As



■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

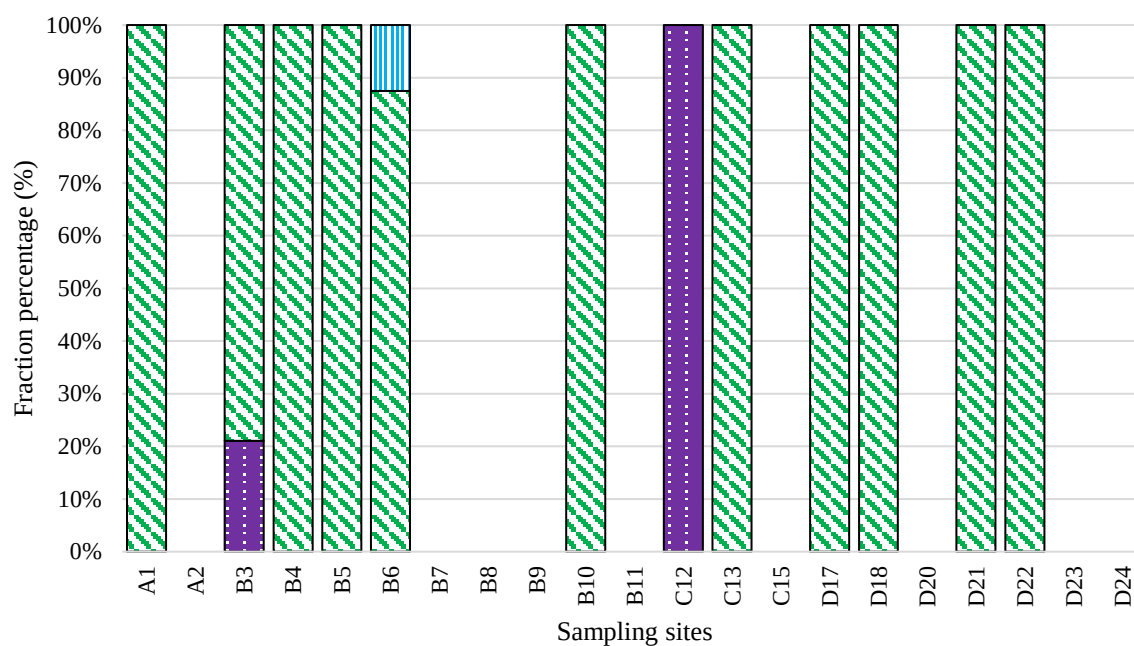
圖三、老街溪底泥 As 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

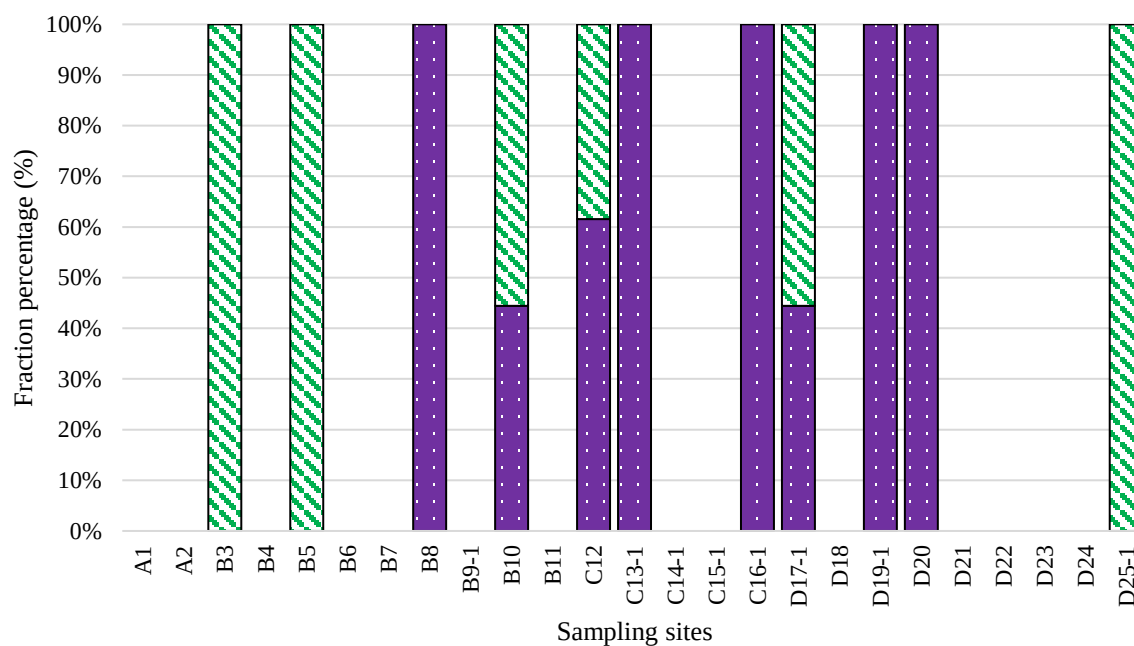
(C)

1月 - Cd



(D)

1月 - Cd



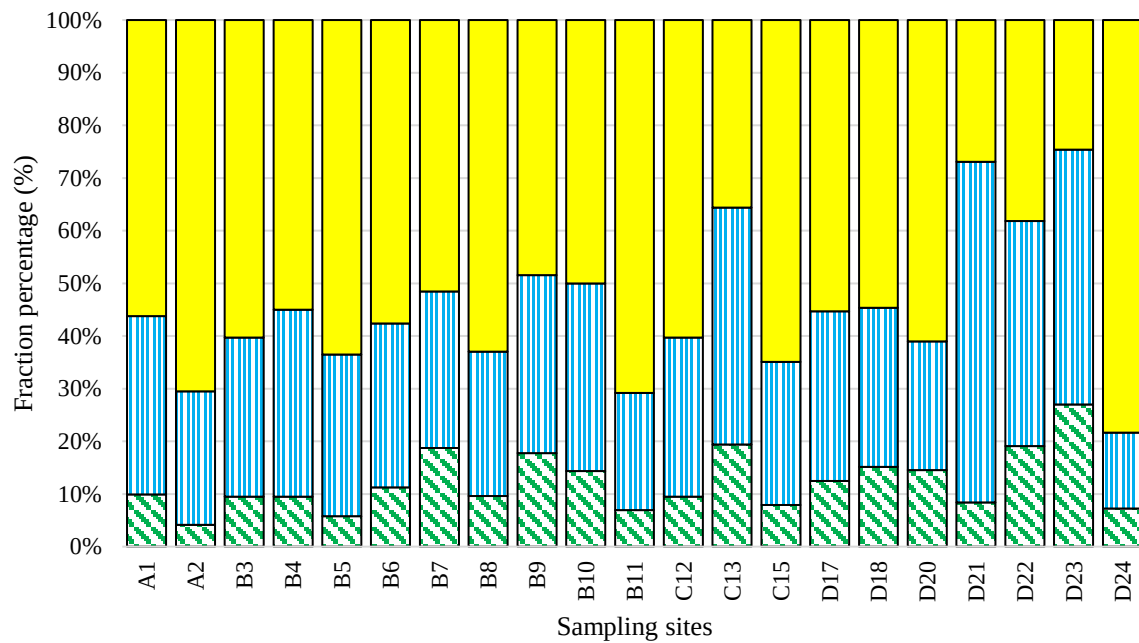
■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

圖三(續 1)、老街溪底泥 Cd 之化學形態分布。



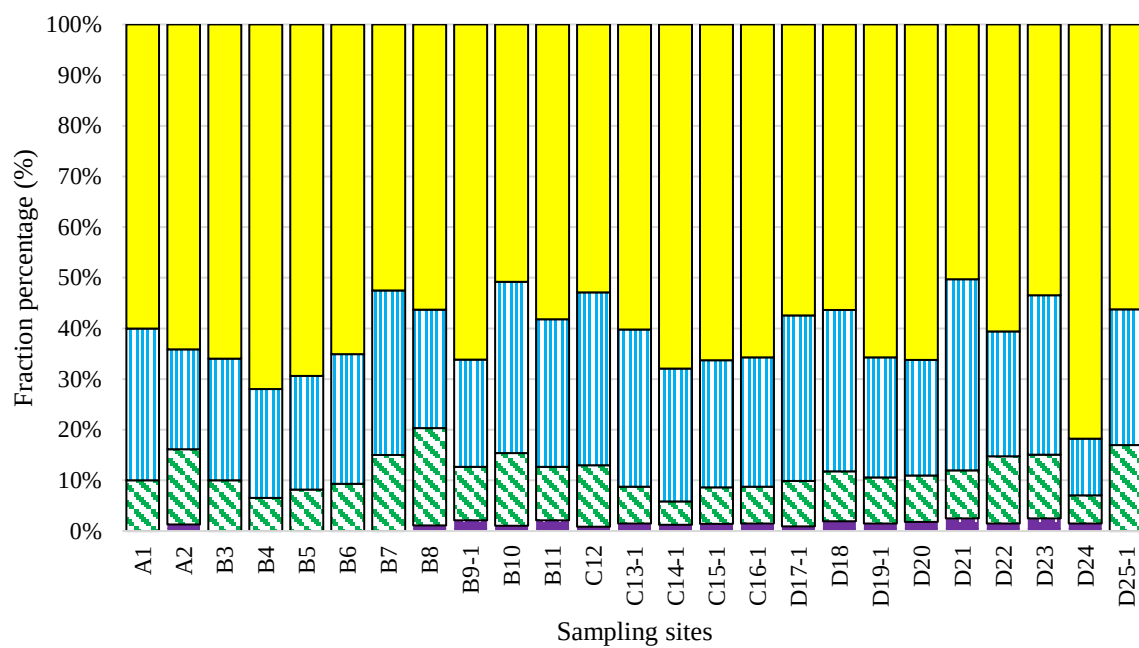
(E)

1月 - Cr



(F)

6月 - Cr



Exchangeable fraction Reducible extraction Oxidable fraction Residual fraction

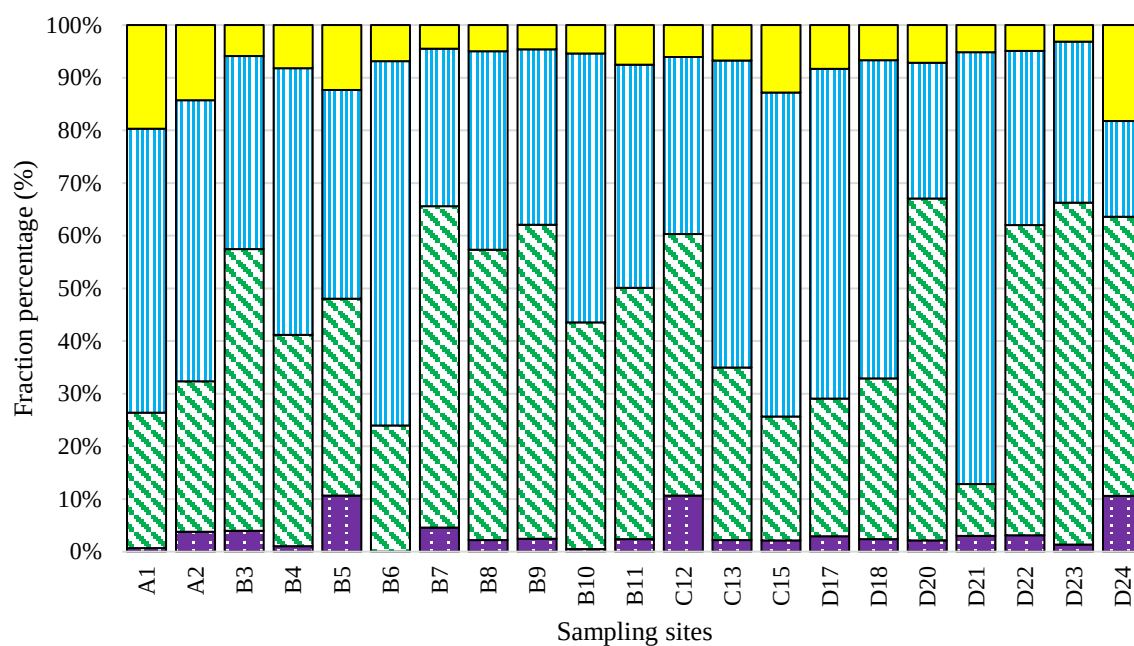
圖三(續 2)、老街溪底泥 Cr 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

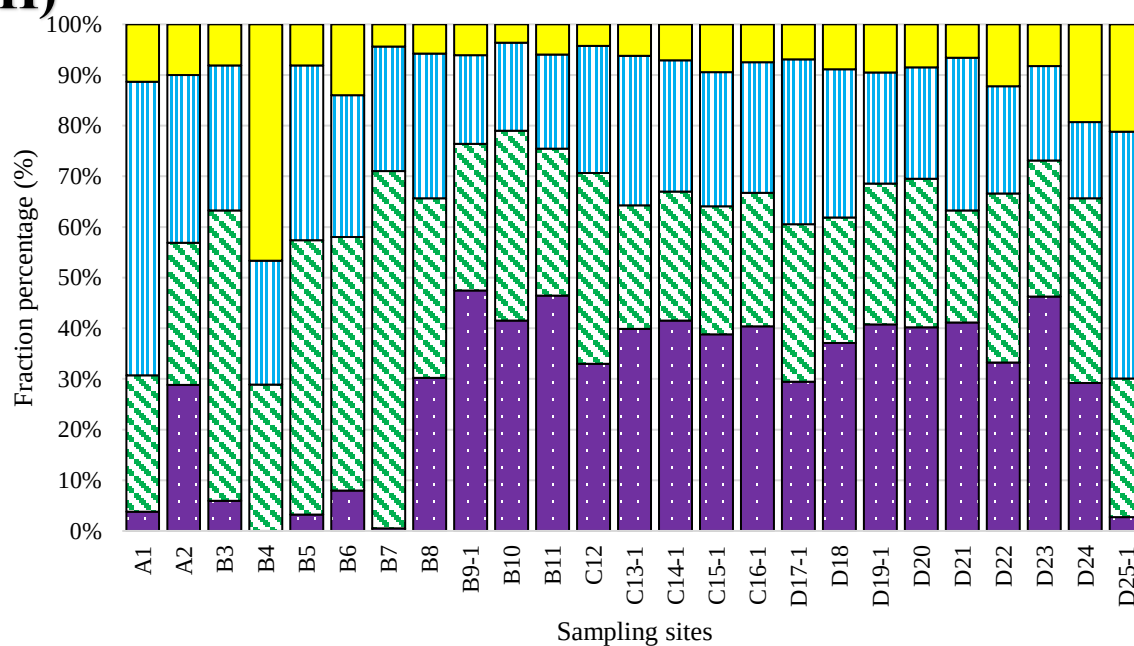
(G)

1月 - Cu



(H)

6月 - Cu



■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

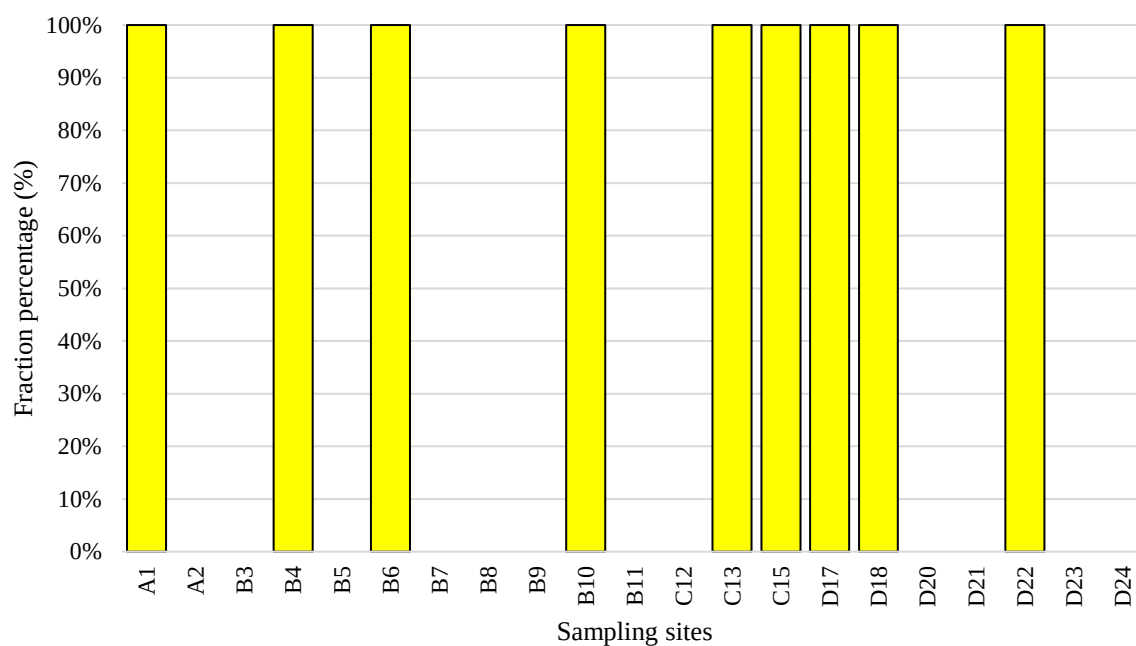
圖三(續 3)、老街溪底泥 Cu 之化學形態分布。



結果與討論

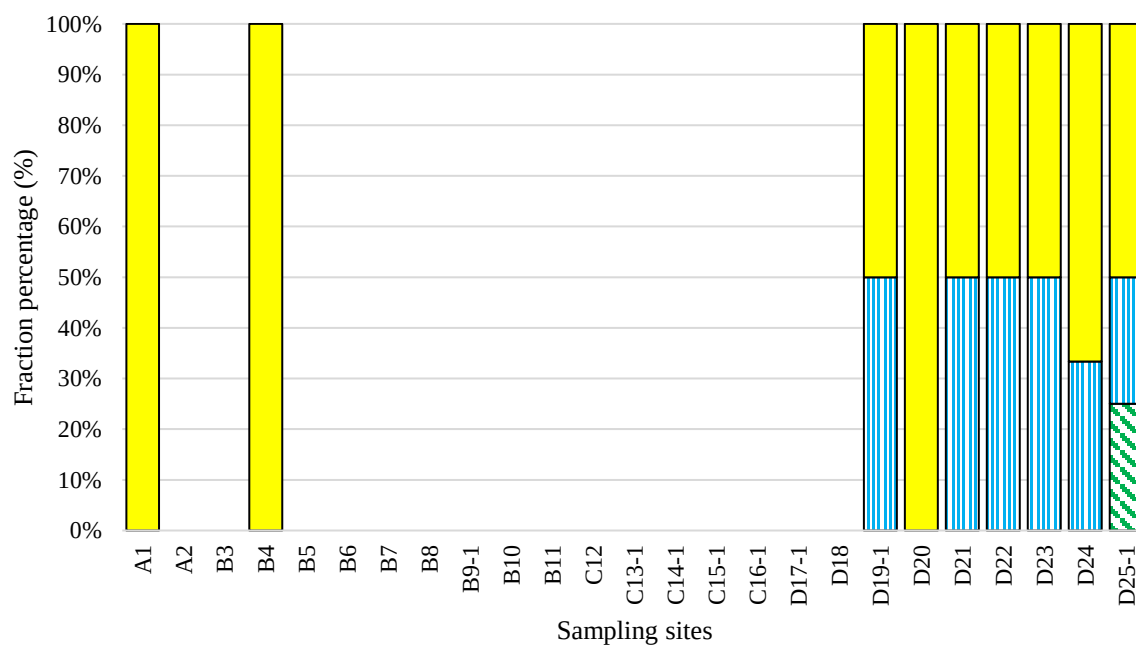
(I)

1月 - Hg



(J)

6月 - Hg



Exchangeable fraction Reducible extraction Oxidable fraction Residual fraction

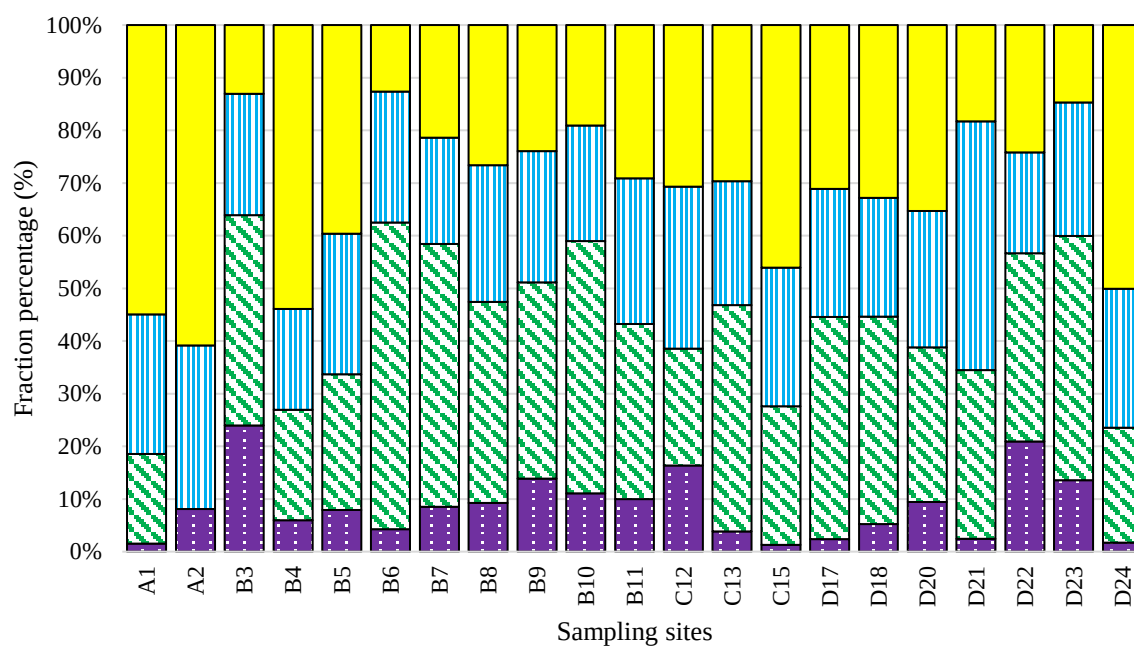
圖三(續 4)、老街溪底泥 Hg 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

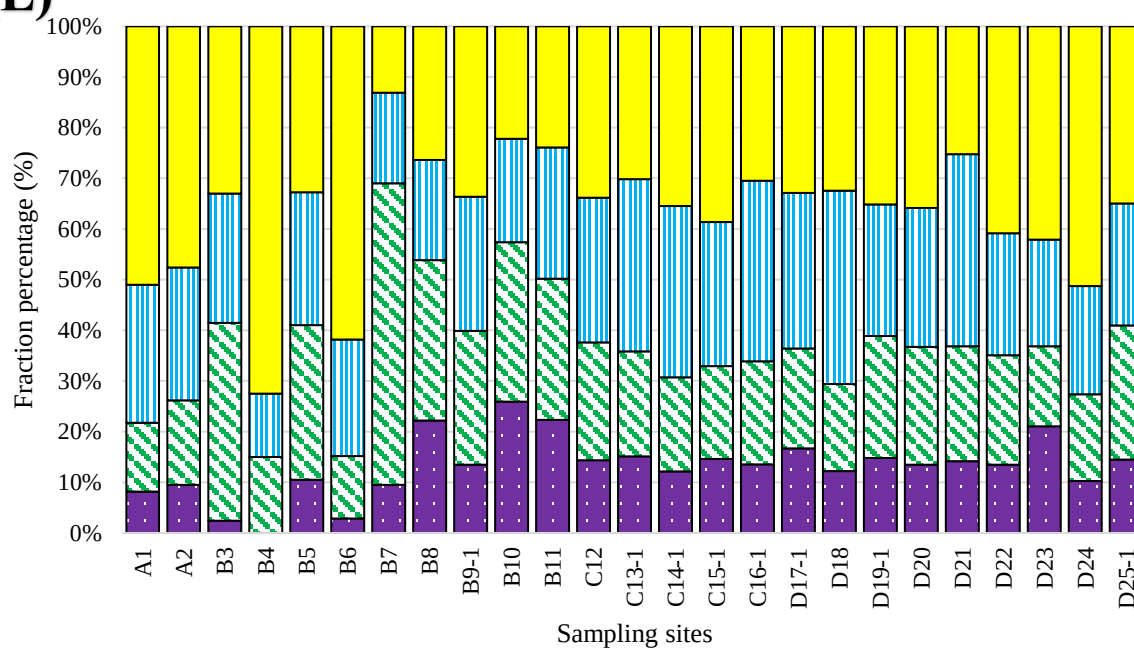
(K)

1月 - Ni



(L)

6月 - Ni



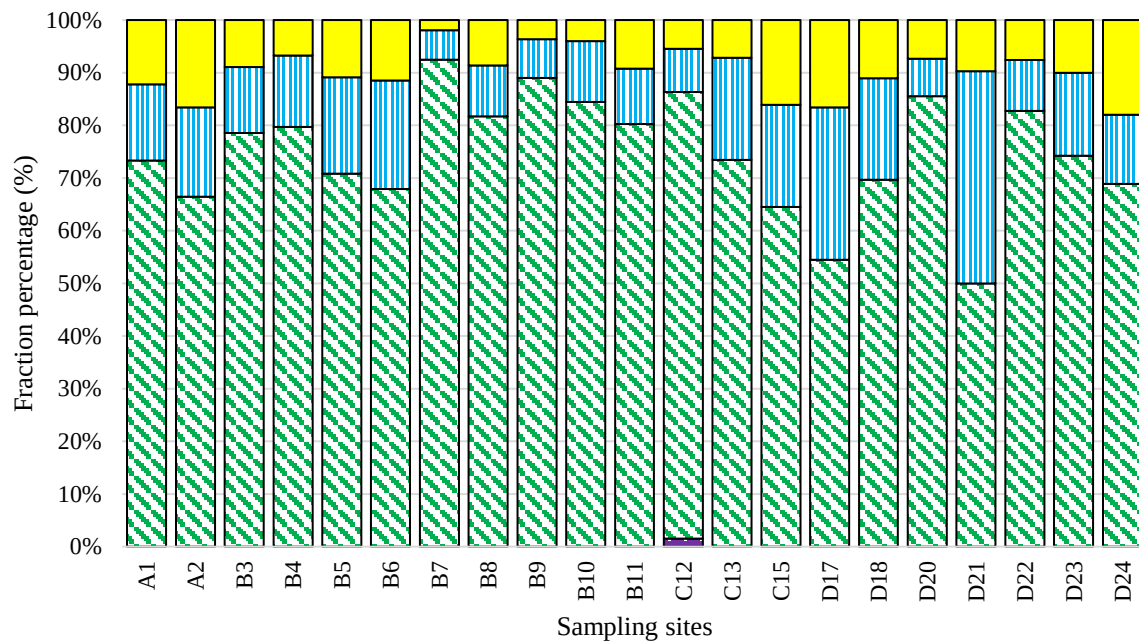
■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

圖三(續 5)、老街溪底泥 Ni 之化學形態分布。



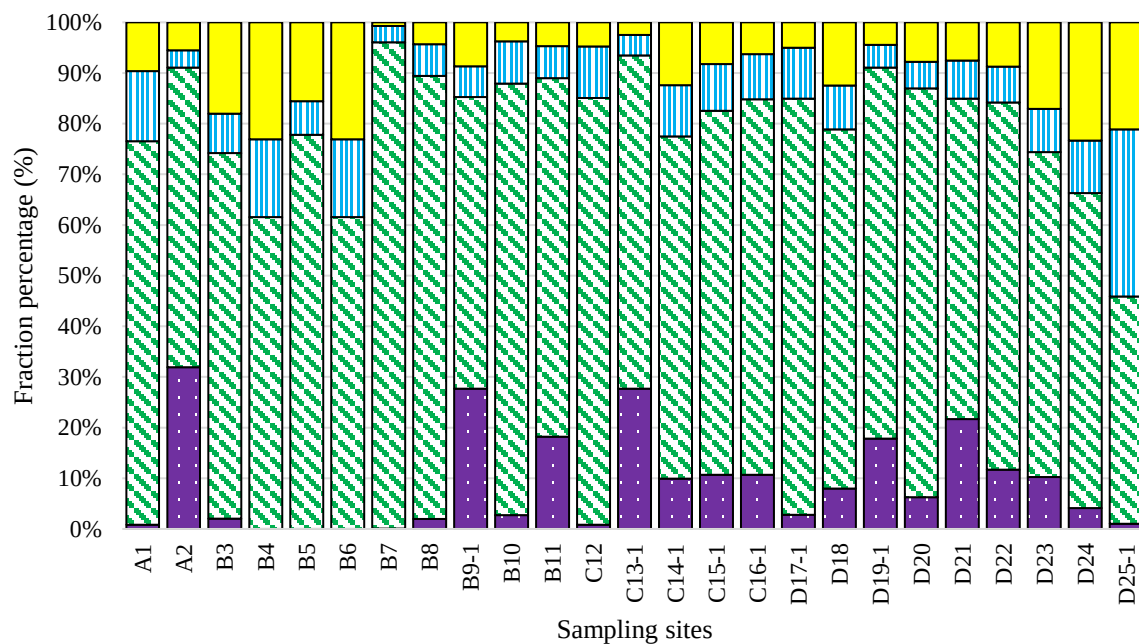
(M)

1月 - Pb



(N)

6月 - Pb



■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

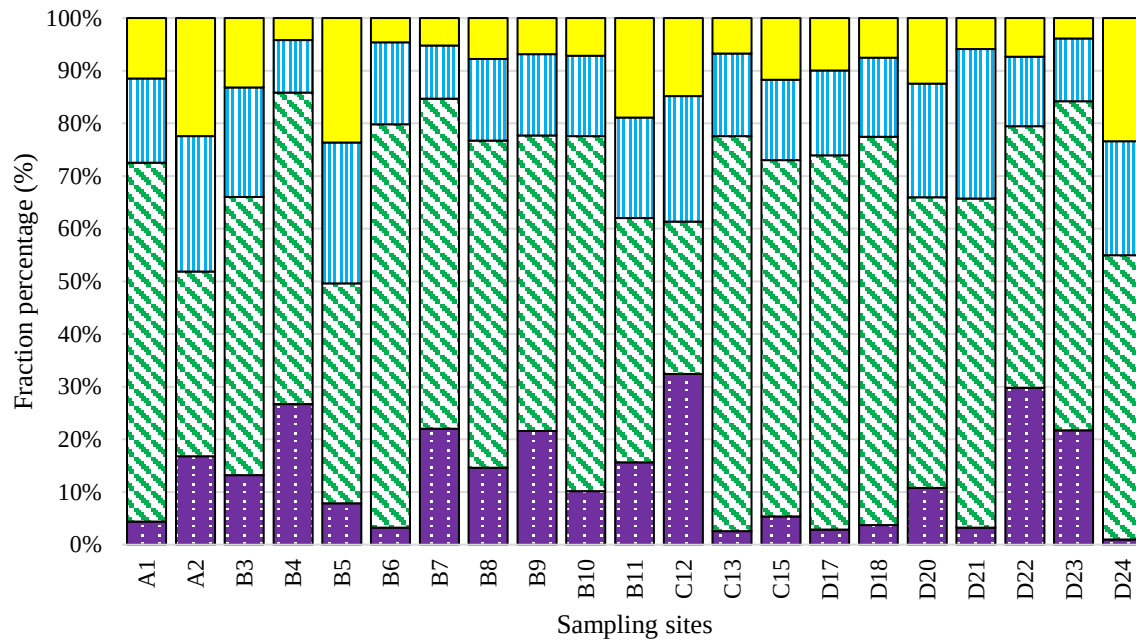
圖三(續 6)、老街溪底泥 Pb 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

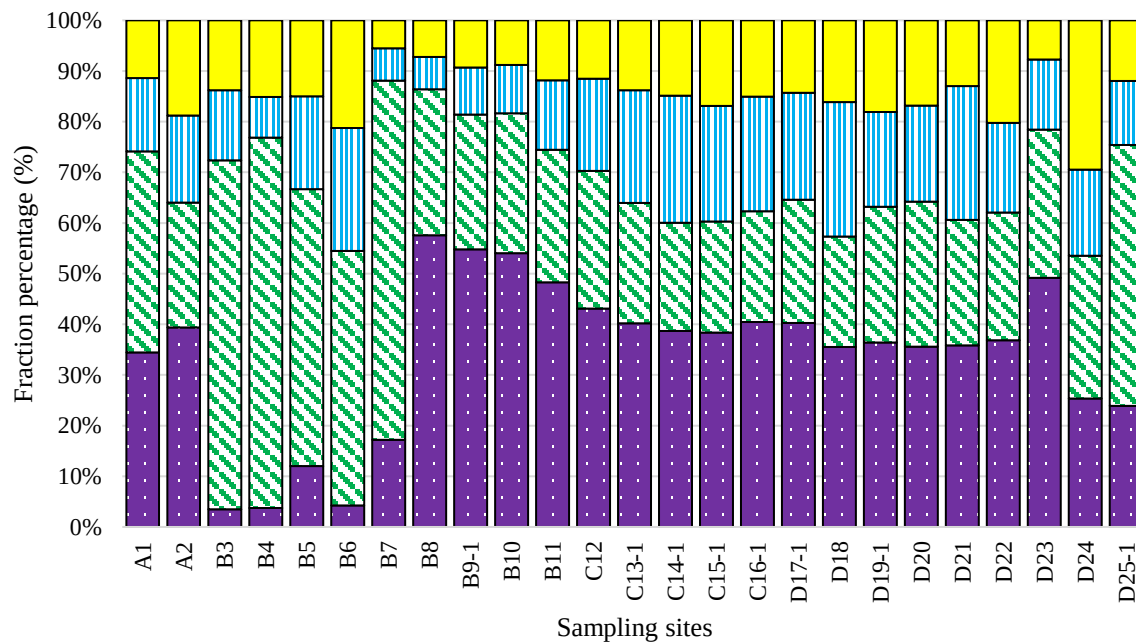
(O)

1月 - Zn



(P)

6月 - Zn



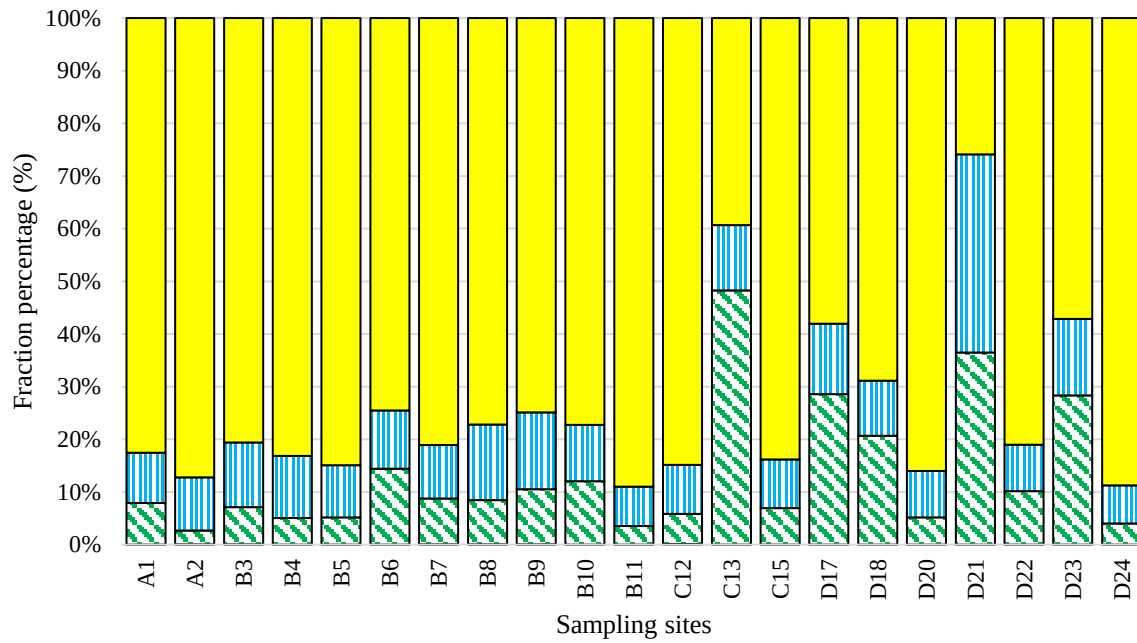
■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

圖三(續 7)、老街溪底泥 Zn 之化學形態分布。



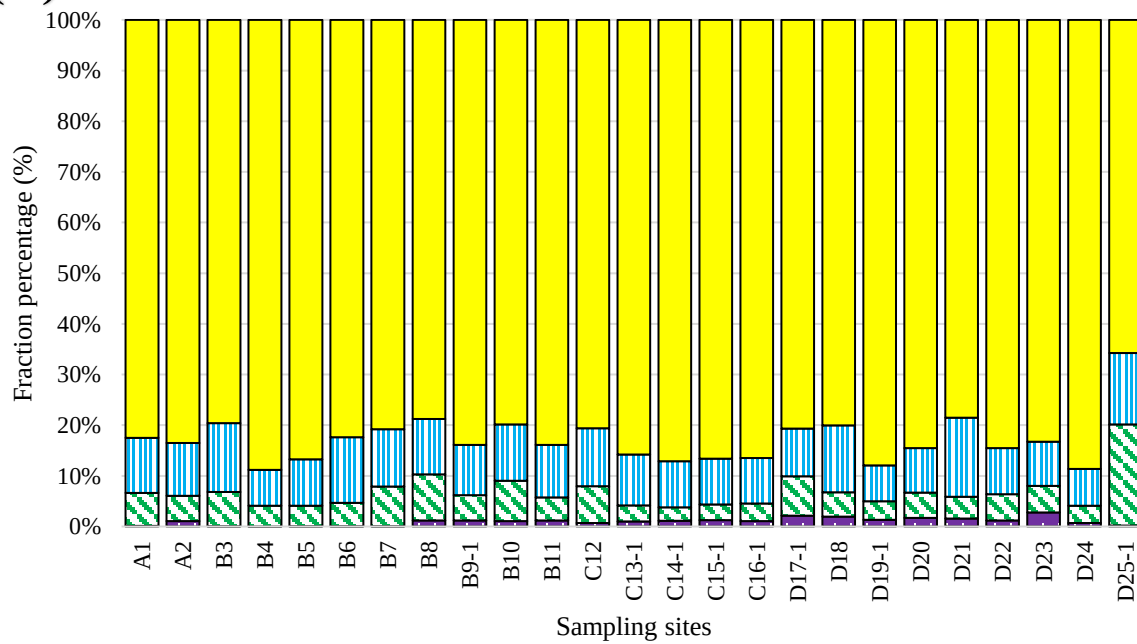
(Q)

1月 - Al



(R)

6月 - Al

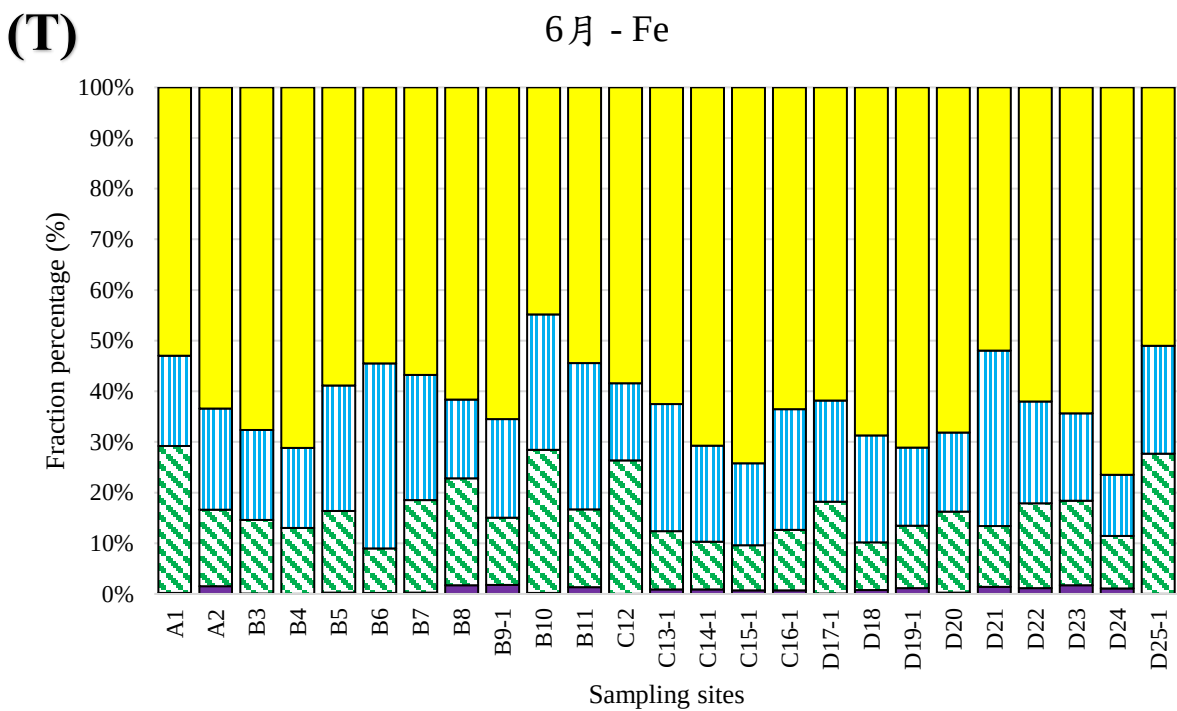
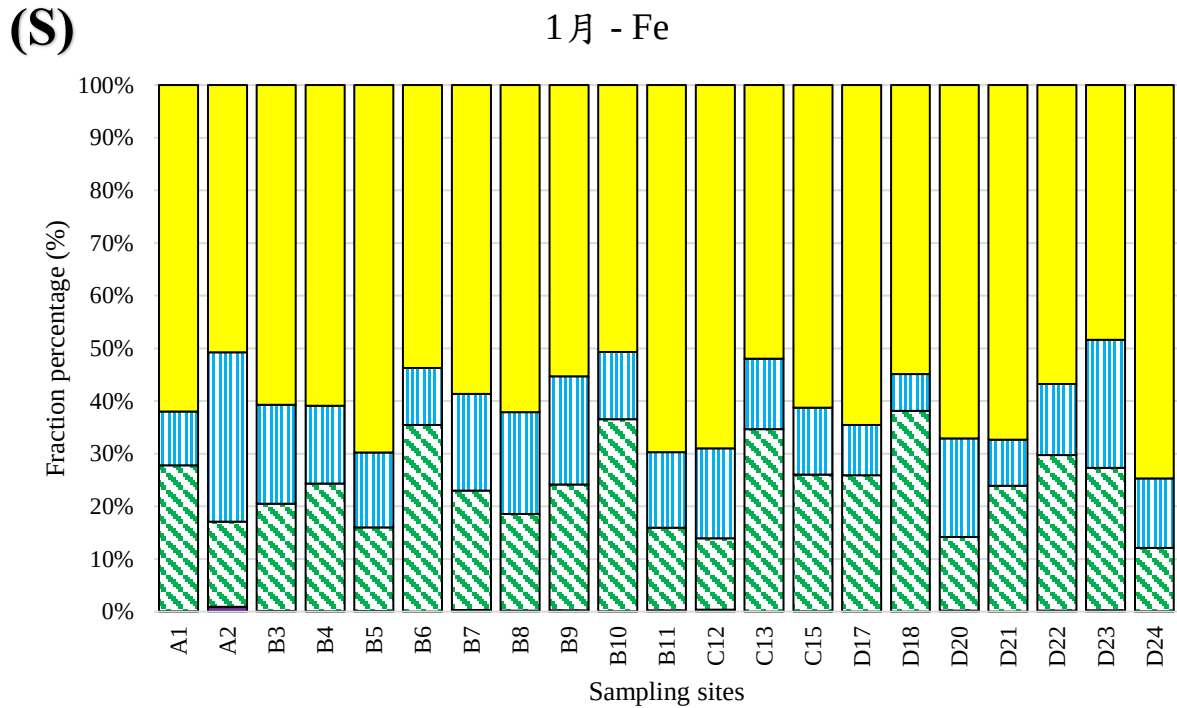


Exchangeable fraction Reducible extraction Oxidable fraction Residual fraction

圖三(續 8)、老街溪底泥 Al 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例



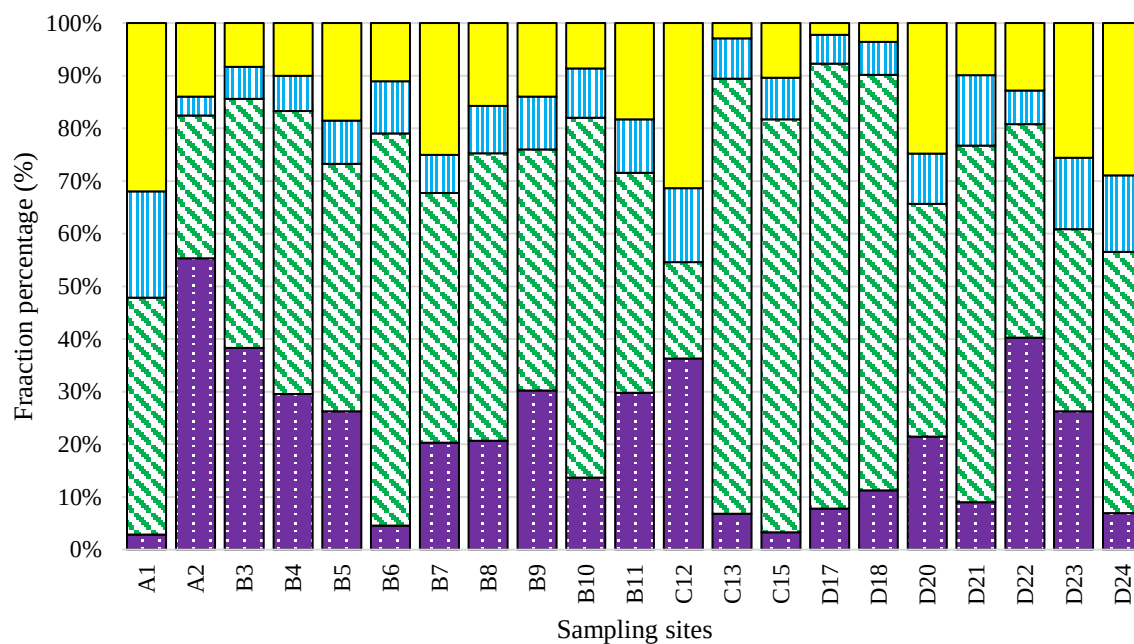
■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

圖三(續 9)、老街溪底泥 Fe 之化學形態分布。



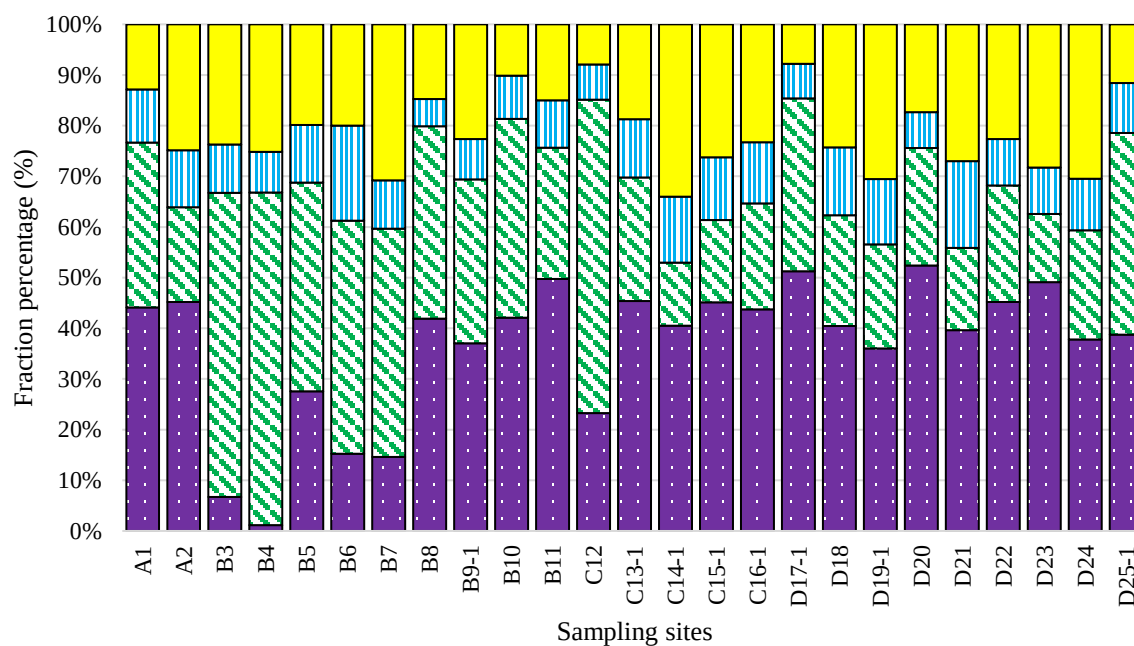
(U)

1月 - Mn



(V)

6月 - Mn



■ Exchangeable fraction ■ Reducible extraction ■ Oxidable fraction ■ Residual fraction

圖三(續 10)、老街溪底泥 Mn 之化學形態分布。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

3. 污染程度指數

3.1 地質累積指數(geo-accumulation index, I_{geo})

I_{geo} 已廣泛被用於評估底泥重金屬污染程度(Singh *et al.*, 2005; Karbassi *et al.*, 2008)，當底泥重金屬含量比該區重金屬背景值高時，即被定義為污染。該區重金屬背景值乃採用 Rudnick and Gao (2003)。污染程度分類如下：未污染程度($I_{geo} < 0$)；輕級污染程度($0 < I_{geo} < 1$)；中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)；中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)；嚴重污染程度($3 < I_{geo} < 4$)；極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)；超嚴重污染程度($I_{geo} > 5$)。老街溪上、中、下游不同樣點的 I_{geo} 結果如表五。參考前人方法(Singh *et al.*, 2005; Karbassi *et al.*, 2008)，本評估方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

在 2019 年 1 月枯水期結果中，Cd、Cu、Hg 以及 Zn 在部分樣點污染層級較嚴重。Cd 在老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)的 Cd 平均污染程度均呈中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。Cu 在平鎮區(B)、中壢區(C)及大園區(D)的 Cu 平均污染程度均落於中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)，老街溪流域的平均值(1.97)則呈中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。Hg 在中壢區(C)的 Hg 平均污染程度呈中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。在老街溪流域、平鎮區(B)、中壢區(C)及大園區(D)的 Zn 平均污染程度均落於中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)。

在 2019 年 6 月豐水期，以 Cd、Cu、Hg、Pb 在部分樣點污染層級較嚴重。Cd 在平鎮區(B)的平均污染程度較高，為中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。Cu 在中壢區(C)為中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。Hg 在樣點 B4 呈嚴重污染程度($3 < I_{geo} < 4$)，樣點 C12 呈極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)。Pb 在在樣點 B7 呈極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)，但各區域的 Pb 平均污染程度卻以中壢區(C)最高，為中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。值得注意的是，Zn 在各樣點的污染層級均未達嚴重程度($3 < I_{geo} < 4$)，但無論老街溪流域、平鎮區(B)、中壢區(C)或大園區(D)的 Zn 平均污染程度均落於中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)。

對比不同季節結果得知，樣點 C12 所有重金屬在豐水期 I_{geo} 都有升高的趨勢，尤其 Cd、Cu、Hg 最為明顯。樣點 B7 之 Pb 在豐水期 I_{geo} 亦明顯提高。除了中壢區(C)的 Pb 平均污染程度在豐水期些微提高，其他重金屬在老街溪及其他區域的平均污染程度均在豐水期降低。除此之外，As、Cr、Ni 均呈未污染程度。

3.2 富集因子(enrichment factor, EF)

EF 是對大陸上層地殼平均(UCC)鐵濃度校正，用於評估人為活動造成的重



金屬濃度的富集程度(Raju *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2007)。鐵濃度乃採用 Rudnick and Gao (2003)，污染程度分類如下：未富集程度($EF < 1$)；輕度富集程度($EF < 3$)；中度富集程度($3 < EF < 5$)；重度富集程度($5 < EF < 10$)；嚴重富集程度($10 < EF < 25$)；非常嚴重富集程度($25 < EF < 50$)；極嚴重富集程度($EF > 50$)。老街溪上、中、下游底泥重金屬的富集程度如表六。參考前人方法(Raju *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2007)，本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

在 2019 年 1 月枯水期結果中，整體來看，以 Cd、Cu、Hg、Pb 以及 Zn 的富集程度較嚴重。Hg 在部份樣點 B6、C15、D17 呈非常嚴重富集程度($25 < EF < 50$)。Cd 在平鎮區(B)的 Cd 平均富集程度呈現嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，老街溪流域及中壢區(C)則呈重度富集程度($5 < EF < 10$)，與 I_{geo} 相似。Cu 在老街溪流域、平鎮區(B)、中壢區(C)及大園區(D)的 Cu 平均富集程度均屬於嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，EF 呈現污染嚴重之樣點數較 I_{geo} 多，EF 呈現的老街溪流域 Cu 平均污染程度也較 I_{geo} 嚴重。Pb 在老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)的 Pb 平均富集程度皆為重度富集程度($5 < EF < 10$)，顯示以 EF 呈現 Pb 的污染程度較 I_{geo} 敏感。Zn 在街溪流域、平鎮區(B)中壢區(C) 及大園區(D)的 Zn 平均富集程度皆為嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，EF 呈現老街溪流域及各區域的 Zn 平均污染程度也較 I_{geo} 嚴重。

在 2019 年 6 月豐水期，整體來看，重金屬富集程度比枯水期輕微。同樣以 Cd、Cu、Hg、Pb 以及 Zn 的富集程度較嚴重。Hg 在樣點 C12 呈非常嚴重富集程度($25 < EF < 50$)。平鎮區(B)的 Cd 平均富集程度(10.0)接近嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，其中在樣點 B5、B10 呈非常嚴重富集程度($25 < EF < 50$)。中壢區(C)的 Cu 平均富集程度落於嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，老街溪流域、平鎮區(B)及大園區(D)的 Cu 平均富集程度則落於重度富集程度($5 < EF < 10$)，其中樣點 C12 呈非常嚴重富集程度($25 < EF < 50$)。Pb 在平鎮區(B)的 Pb 平均富集程度則落於嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，老街溪流域及中壢區(C)的 Pb 平均富集程度則落於重度富集程度($5 < EF < 10$)。Zn 在平鎮區(B)的 Zn 平均富集程度為嚴重富集程度($10 < EF < 25$)，老街溪流域、中壢區(C)及大園區(D)則重度富集程度($5 < EF < 10$)。

對比不同季節結果，樣點 C12 在豐水期之 Cd、Cu、Hg 都明顯升高，樣點 B7 之 Pb 在豐水期亦從非常嚴重富集升高至極嚴重富集程度。除了老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)的 Pb 平均污染程度在豐水期些微提高，其他重金屬在老街溪及其他區域的平均污染程度均在豐水期降低。除此之外，Cr、Al 多呈未富集程度。綜合上述可知，EF 值呈現 Cu、Hg、Pb 以及 Zn 的污染程度較 I_{geo} 值敏感，污染程度嚴重的樣點數普遍較多。



3.3 污染因子(contamination factor, CF)

CF 同樣以重金屬背景值為基準，可用於評估人為活動對底泥個別重金屬濃度之影響(Håkanson, 1980)，該區重金屬背景值乃採用 Rudnick and Gao (2003)，分析結果如表七。污染程度分類如下：低度污染因子($CF < 1$)；中度污染因子($1 < CF < 3$)；大量污染因子($3 < CF < 6$)；高度污染因子($CF > 6$)。參考前人方法(Håkanson, 1980)，本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

在 2019 年 1 月枯水期結果中，以 Cd、Cu、Hg、Pb 以及 Zn 的污染因子較高。Cd 在平鎮區(B)的 Cd 平均污染因子屬於高度污染因子($CF > 6$)，老街溪流域及中壢區(C)則為大量污染因子($3 < CF < 6$)，污染嚴重之樣點雖與 I_{geo} 值及 EF 結果相同，但以 CF 值評估污染程度，上述所有樣點均落於最嚴重的污染層級。Cu 在老街溪流域、平鎮區(B)、中壢區(C)及大園區(D)的 Cu 平均污染因子均屬於高度污染因子($CF > 6$)，許多樣點顯示 CF 值呈現污染嚴重之樣點數較 EF 值多，許多樣點的污染層級也被提高至較嚴重的層級。老街溪流域及大園區(D)的 Hg 平均污染因子則呈大量污染因子($3 < CF < 6$)，與 I_{geo} 值及 EF 值相似。Pb 在老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)的 Pb 平均污染因子則呈大量污染因子($3 < CF < 6$)，CF 呈現 Pb 的污染程度與 EF 相近。Zn 在老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)及大園區(D)的 Zn 平均污染因子皆呈高度污染因子($CF > 6$)，污染嚴重之樣點數較 EF 及 I_{geo} 多。

在 2019 年 6 月豐水期，同樣以 Cd、Cu、Hg、Pb 以及 Zn 的污染因子最高。Cd 在平鎮區(B)的 Cd 平均污染因子呈大量污染因子($3 < CF < 6$)。Cu 在中壢區(C)呈高度污染因子($CF > 6$)，老街溪流域、平鎮區(B)及大園區(D)的 Cu 平均污染因子則屬於大量污染因子($3 < CF < 6$)。Hg 在中壢區(C)呈大量污染因子($3 < CF < 6$)。Pb 在老街溪流域、平鎮區(B)及中壢區(C)的 Pb 平均污染因子呈大量污染因子($3 < CF < 6$)。Zn 在無論是老街溪流域、龍潭區(A)、平鎮區(B)、中壢區(C)或大園區(D)，Zn 平均污染因子皆呈大量污染因子($3 < CF < 6$)。

綜合以上結果，大部分樣點重金屬之 CF 值在豐水期都有下降，只有樣點 C12 在豐水期之 Cd、Cu、Pb 之 CF 值有升高的趨勢。除此之外，Cr、Al、Fe、Mn 多為低度污染因子($CF < 1$)。綜合個別重金屬污染程度指數之結果，相較於 CF， I_{geo} 以及 EF 值分類層級較多，較可以有效量化分類各個樣點的個別重金屬污染程度。

表五、老街溪底泥 As、Cd、Cr、Cu 地質累積指數 I_{geo} ^a。

重金屬		As		Cd		Cr		Cu	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	-0.44	-0.25	0.00	0.00	-1.31	-1.62	1.35	0.82
A2	A2	0	-1.55	0.00	0.00	-3.79	-2.49	-2.76	0.19
B3	B3	-1.53	-0.95	3.20	3.20	-1.62	-2.28	1.91	0.92
B4	B4	0.90	0.93	3.46	0.00	-0.70	-1.23	2.58	-0.75
B5	B5	-0.53	-1.00	0.00	3.15	-1.79	-2.76	1.16	0.57
B6	B6	0.29	-0.26	4.81	0.00	-1.02	-2.52	3.26	-0.88
B7	B7	-2.51	-1.58	0.00	0.00	-2.53	-2.93	1.25	0.71
B8	B8	-1.54	-1.03	0.00	0.00	-1.95	-2.23	1.93	1.52
B9	-	-0.96	-	0.00	-	-2.48	-	1.88	-
-	B9-1	-	-1.62	-	0.00	-	-3.07	-	0.88
B10	B10	-0.18	-0.28	3.24	3.14	-1.23	-1.82	3.84	2.67
B11	B11	-2.53	-1.65	0.00	0.00	-2.62	-3.00	1.11	0.53
C12	C12	-2.53	0.19	0.00	3.12	-2.46	-1.41	1.74	3.72
C13	-	0.14	-	3.29	-	-0.95	-	4.15	-
-	C13-1	-	-1.55	-	0.00	-	-2.72	-	1.06
-	C14-1	-	-0.55	-	0.00	-	-2.29	-	1.15
C15	-	-0.50	-	0.00	-	-1.24	-	1.04	-
-	C15-1	-	-0.96	-	0.00	-	-2.28	-	0.84
-	C16-1	-	-0.98	-	0.00	-	-2.82	-	0.89
D17	-	0.90	-	0.00	-	-0.58	-	3.59	-
-	D17-1	-	-0.25	-	3.17	-	-1.74	-	2.32
D18	D18	0.24	-0.95	3.39	0.00	-1.12	-2.41	3.43	1.00
-	D19-1	-	-0.56	-	0.00	-	-2.57	-	1.14
D20	D20	-1.53	-0.95	0.00	0.00	-2.33	-2.55	1.03	1.11
D21	D21	-0.80	-1.00	0.00	0.00	0.53	-3.15	4.18	0.72
D22	D22	-0.52	0.03	0.00	0.00	-0.83	-2.42	2.99	0.57
D23	D23	-0.45	-1.63	0.00	0.00	-1.06	-2.98	2.70	-0.78
D24	D24	0.80	1.42	0.00	0.00	-2.78	-2.59	-0.90	-0.96
-	D25-1	-	0.91	-	0.00	-	-1.08	-	3.04
A 區平均值		-0.22	-0.90	0.00	0.00	-2.55	-2.06	-0.71	0.51
B 區平均值		-0.95	-0.83	1.63	1.05	-1.77	-2.43	2.10	0.69
C 區平均值		-0.96	-0.77	1.10	0.62	-1.55	-2.30	2.31	1.53
D 區平均值		-0.19	-0.33	0.48	0.35	-1.17	-2.39	2.43	0.91
老街溪總平均值		-0.63	-0.64	1.02	0.63	-1.61	-2.36	1.97	0.92

^a 未污染程度($I_{geo} < 0$)；輕級污染程度($0 < I_{geo} < 1$)；中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)；
 中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)；嚴重污染程度($3 < I_{geo} < 4$)；極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)；
 超嚴重污染程度($I_{geo} > 5$)



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表五(續 1)、老街溪底泥 Hg、Ni、Pb、Zn 地質累積指數 I_{geo}^a 。

重金屬		Hg		Ni		Pb		Zn	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.00	0.00	-1.34	-1.34	0.86	0.74	1.98	1.78
A2	A2	0.00	0.00	-3.82	-2.03	-2.36	-0.47	-1.75	0.22
B3	B3	0.00	0.00	0.11	-0.58	0.45	-0.12	1.34	1.21
B4	B4	0.00	4.06	-0.71	-1.73	1.74	-0.03	4.15	1.75
B5	B5	0.00	0.00	-1.50	-1.71	0.23	-0.71	1.18	0.54
B6	B6	4.07	0.00	0.67	-1.35	1.47	-0.95	2.89	-0.39
B7	B7	0.00	0.00	-0.95	-1.06	2.69	4.01	2.41	2.25
B8	B8	0.00	0.00	-0.88	-1.10	1.33	1.56	1.82	1.92
B9	-	0.00	-	-1.08	-	1.25	-	1.72	-
-	B9-1	-	0.00	-	-1.59	-	1.77	-	1.35
B10	B10	0.00	0.00	0.26	-0.47	2.77	1.95	3.57	2.53
B11	B11	0.00	0.00	-1.07	-1.77	0.50	0.61	1.36	1.23
C12	C12	0.00	3.97	-0.96	-0.66	0.97	2.05	1.61	2.56
C13	-	0.00	-	0.49	-	2.14	-	3.37	-
-	C13-1	-	0.00	-	-1.67	-	1.80	-	1.34
-	C14-1	-	0.00	-	-1.39	-	1.05	-	1.46
C15	-	4.08	-	-1.09	-	0.13	-	1.63	-
-	C15-1	-	0.00	-	-1.59	-	0.33	-	1.16
-	C16-1	-	0.00	-	-1.77	-	0.74	-	1.26
D17	-	4.68	-	0.50	-	2.13	-	3.42	-
-	D17-1	-	0.00	-	-0.65	-	1.58	-	2.36
D18	D18	0.00	0.00	-0.05	-1.51	1.53	0.22	2.88	1.27
-	D19-1	-	0.00	-	-1.46	-	0.52	-	1.59
D20	D20	0.00	0.00	-1.43	-1.51	0.10	0.34	1.43	1.47
D21	D21	0.00	0.00	0.56	-1.97	0.96	-0.17	3.49	0.90
D22	D22	0.00	0.00	-0.45	-1.84	1.15	1.21	2.66	0.80
D23	D23	0.00	0.00	-0.74	-2.92	-0.27	-1.64	2.09	0.65
D24	D24	0.00	0.00	-1.64	-1.62	-0.89	-0.60	-0.02	0.03
-	D25-1	-	0.00	-	-0.71	-	0.91	-	2.30
A 區平均值		0.00	0.00	-2.58	-1.69	-0.75	0.14	0.12	1.00
B 區平均值		0.45	0.45	-0.57	-1.26	1.38	0.90	2.27	1.38
C 區平均值		1.36	0.79	-0.52	-1.42	1.08	1.19	2.20	1.56
D 區平均值		0.67	0.00	-0.46	-1.58	0.67	0.26	2.28	1.26
老街溪總平均值		0.61	0.32	-0.72	-1.44	0.90	0.67	2.06	1.34

^a 未污染程度($I_{geo} < 0$)；輕級污染程度($0 < I_{geo} < 1$)；中級污染程度($1 < I_{geo} < 2$)；
 中高級污染程度($2 < I_{geo} < 3$)；嚴重污染程度($3 < I_{geo} < 4$)；極嚴重污染程度($4 < I_{geo} < 5$)；超嚴重污染程度($I_{geo} > 5$)

表六、老街溪底泥 As、Cd、Cr、Cu 富集因子 EF^a。

重金屬		As		Cd		Cr		Cu	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	1.3	1.8	0.0	0.0	0.7	0.7	4.5	3.8
A2	A2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.8	0.5	1.6	3.4
B3	B3	0.9	1.3	24.3	22.7	0.9	0.5	9.9	4.7
B4	B4	2.3	2.3	13.5	0.0	0.8	0.5	7.3	0.7
B5	B5	2.1	1.9	0.0	33.7	0.9	0.6	6.7	5.6
B6	B6	2.3	3.6	52.4	0.0	0.9	0.8	17.9	2.4
B7	B7	0.9	1.7	0.0	0.0	0.9	0.7	11.6	8.5
B8	B8	0.9	1.5	0.0	0.0	0.7	0.7	10.0	9.0
B9	-	1.7	-	0.0	-	0.6	-	12.5	-
-	B9-1	-	1.3	-	0.0	-	0.5	-	7.2
B10	B10	1.6	3.2	17.1	33.7	0.8	1.1	25.8	24.5
B11	B11	0.4	1.4	0.0	0.0	0.4	0.6	5.3	6.4
C12	C12	0.8	2.5	0.0	19.3	0.8	0.8	14.8	29.2
C13	-	1.9	-	16.6	-	0.9	-	30.0	-
-	C13-1	-	1.2	-	0.0	-	0.5	-	7.3
-	C14-1	-	2.0	-	0.0	-	0.6	-	6.5
C15	-	1.4	-	0.0	-	0.8	-	4.0	-
-	C15-1	-	1.6	-	0.0	-	0.7	-	5.7
-	C16-1	-	2.0	-	0.0	-	0.6	-	7.3
D17	-	2.3	-	0.0	-	0.8	-	14.7	-
-	D17-1	-	1.3	-	13.6	-	0.5	-	7.6
D18	D18	1.7	1.7	15.2	0.0	0.7	0.6	15.6	6.6
-	D19-1	-	2.1	-	0.0	-	0.5	-	6.7
D20	D20	1.1	1.9	0.0	0.0	0.6	0.6	6.7	8.0
D21	D21	1.5	2.6	0.0	0.0	3.8	0.6	47.5	8.7
D22	D22	1.7	2.5	0.0	0.0	1.4	0.5	19.5	3.7
D23	D23	2.7	2.0	0.0	0.0	1.8	0.8	24.1	3.6
D24	D24	3.6	5.7	0.0	0.0	0.3	0.4	1.1	1.1
-	D25-1	-	3.7	-	0.0	-	0.9	-	16.0
A 區平均值		0.7	1.4	0.0	0.0	0.8	0.6	3.1	3.6
B 區平均值		1.5	2.0	11.9	10.0	0.8	0.7	11.9	7.7
C 區平均值		1.4	1.9	5.5	3.9	0.8	0.6	16.3	11.2
D 區平均值		2.1	2.6	2.2	1.5	1.3	0.6	18.5	6.9
老街溪總平均值		1.6	2.2	6.6	4.9	1.0	0.6	13.9	7.8

^a 未富集程度(EF < 1)；輕度富集程度(EF < 3)；中度富集程度(3 < EF < 5)；重度富集程度(5 < EF < 10)；嚴重富集程度(10 < EF < 25)；非常嚴重富集程度(25 < EF < 50)；極嚴重富集程度(EF > 50)



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表六(續 1)、老街溪底泥 Hg、Ni、Pb、Zn 富集因子 EF^a。

重金屬		Hg		Ni		Pb		Zn	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.0	0.0	0.7	0.9	3.2	3.6	7.0	7.5
A2	A2	0.0	0.0	0.8	0.7	2.1	2.2	3.3	3.5
B3	B3	0.0	0.0	2.8	1.6	3.6	2.3	6.7	5.7
B4	B4	0.0	19.7	0.8	0.4	4.1	1.2	21.8	4.0
B5	B5	0.0	0.0	1.1	1.2	3.5	2.3	6.9	5.5
B6	B6	31.5	0.0	3.0	1.7	5.2	2.2	13.9	3.3
B7	B7	0.0	0.0	2.5	2.5	31.8	83.4	26.2	24.6
B8	B8	0.0	0.0	1.4	1.5	6.6	9.3	9.3	11.9
B9	-	0.0	-	1.6	-	8.1	-	11.2	-
-	B9-1	-	0.0	-	1.3	-	13.2	-	9.9
B10	B10	0.0	0.0	2.2	2.8	12.3	14.8	21.5	22.2
B11	B11	0.0	0.0	1.2	1.3	3.4	6.8	6.3	10.4
C12	C12	0.0	34.8	2.3	1.4	8.7	9.2	13.6	13.1
C13	-	0.0	-	2.4	-	7.4	-	17.5	-
-	C13-1	-	0.0	-	1.1	-	12.1	-	8.8
-	C14-1	-	0.0	-	1.1	-	6.1	-	8.1
C15	-	33.2	-	0.9	-	2.1	-	6.1	-
-	C15-1	-	0.0	-	1.1	-	4.0	-	7.1
-	C16-1	-	0.0	-	1.2	-	6.6	-	9.4
D17	-	31.2	-	1.7	-	5.3	-	13.1	-
-	D17-1	-	0.0	-	1.0	-	4.5	-	7.8
D18	D18	0.0	0.0	1.4	1.1	4.2	3.8	10.7	7.9
-	D19-1	-	0.0	-	1.1	-	4.4	-	9.2
D20	D20	0.0	0.0	1.2	1.3	3.5	4.7	8.8	10.3
D21	D21	0.0	0.0	3.9	1.3	5.1	4.7	29.6	9.9
D22	D22	0.0	0.0	1.8	0.7	5.4	5.7	15.5	4.3
D23	D23	0.0	0.0	2.2	0.8	3.1	2.0	15.8	9.7
D24	D24	0.0	0.0	0.7	0.7	1.1	1.4	2.1	2.2
-	D25-1	-	0.0	-	1.2	-	3.7	-	9.6
A 區平均值		0.0	0.0	0.8	0.8	2.7	2.9	5.2	5.5
B 區平均值		3.5	2.2	1.8	1.6	8.7	15.1	13.8	10.8
C 區平均值		11.1	7.0	1.9	1.2	6.1	7.6	12.4	9.3
D 區平均值		4.5	0.0	1.8	1.0	4.0	3.9	13.7	7.9
老街溪總平均值		4.6	2.2	1.7	1.2	6.2	8.6	12.7	9.0

^a 未富集程度(EF < 1)；輕度富集程度(EF < 3)；中度富集程度(3 < EF < 5)；重
度富集程度(5 < EF < 10)；嚴重富集程度(10 < EF < 25)；非常嚴重富集程度(25
< EF < 50)；極嚴重富集程度(EF > 50)

表六(續 2)、老街溪底泥 Al、Mn 富集因子 EF^a。

重金屬		Al		Mn	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.6	0.5	0.3	0.6
A2	A2	0.6	0.5	0.6	0.4
B3	B3	0.3	0.3	1.2	0.6
B4	B4	0.7	0.4	0.8	0.4
B5	B5	0.5	0.5	0.6	0.5
B6	B6	0.6	0.5	0.8	0.6
B7	B7	0.3	0.3	0.6	0.6
B8	B8	0.3	0.3	0.7	1.0
B9	-	0.3	-	0.7	-
-	B9-1	-	0.3	-	0.8
B10	B10	0.5	0.5	0.9	1.4
B11	B11	0.3	0.4	0.6	0.7
C12	C12	0.5	0.6	0.4	1.3
C13	-	0.7	-	2.5	-
-	C13-1	-	0.3	-	0.7
-	C14-1	-	0.3	-	0.4
C15	-	0.6	-	0.8	-
-	C15-1	-	0.2	-	0.5
-	C16-1	-	0.4	-	0.7
D17	-	0.7	-	3.7	-
-	D17-1	-	0.4	-	0.8
D18	D18	0.6	0.4	1.8	0.5
-	D19-1	-	0.3	-	0.4
D20	D20	0.5	0.5	0.4	0.7
D21	D21	1.6	0.4	0.9	0.5
D22	D22	0.6	0.3	0.7	0.6
D23	D23	0.5	0.4	0.5	0.5
D24	D24	0.2	0.3	0.6	0.7
-	D25-1	-	0.4	-	1.3
A 區平均值		0.6	0.5	0.5	0.5
B 區平均值		0.4	0.4	0.8	0.7
C 區平均值		0.6	0.4	1.2	0.7
D 區平均值		0.7	0.4	1.2	0.7
老街溪總平均值		0.5	0.4	1.0	0.7

^a 未富集程度(EF < 1)；輕度富集程度(EF < 3)；中度富集程度(3 < EF < 5)；重度富集程度(5 < EF < 10)；嚴重富集程度(10 < EF < 25)；非常嚴重富集程度(25 < EF < 50)；極嚴重富集程度(EF > 50)



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表七、老街溪底泥 As、Cd、Cr、Cu 污染因子 CF^a。

重金屬		As		Cd		Cr		Cu	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	1.1	1.3	0.0	0.0	0.6	0.5	3.8	2.6
A2	A2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	0.3	0.2	1.7
B3	B3	0.5	0.8	13.8	13.8	0.5	0.3	5.6	2.8
B4	B4	2.8	2.9	16.6	0.0	0.9	0.6	8.9	0.9
B5	B5	1.0	0.7	0.0	13.3	0.4	0.2	3.3	2.2
B6	B6	1.8	1.2	42.0	0.0	0.7	0.3	14.4	0.8
B7	B7	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	0.2	3.6	2.5
B8	B8	0.5	0.7	0.0	0.0	0.4	0.3	5.7	4.3
B9	-	0.8	-	0.0	-	0.3	-	5.5	-
-	B9-1	-	0.5	-	0.0	-	0.2	-	2.8
B10	B10	1.3	1.2	14.2	13.2	0.6	0.4	21.5	9.6
B11	B11	0.3	0.5	0.0	0.0	0.2	0.2	3.2	2.2
C12	C12	0.3	1.7	0.0	13.1	0.3	0.6	5.0	19.8
C13	-	1.7	-	14.7	-	0.8	-	26.6	-
-	C13-1	-	0.5	-	0.0	-	0.2	-	3.1
-	C14-1	-	1.0	-	0.0	-	0.3	-	3.3
C15	-	1.1	-	0.0	-	0.6	-	3.1	-
-	C15-1	-	0.8	-	0.0	-	0.3	-	2.7
-	C16-1	-	0.8	-	0.0	-	0.2	-	2.8
D17	-	2.8	-	0.0	-	1.0	-	18.1	-
-	D17-1	-	1.3	-	13.5	-	0.4	-	7.5
D18	D18	1.8	0.8	15.7	0.0	0.7	0.3	16.1	3.0
-	D19-1	-	1.0	-	0.0	-	0.3	-	3.3
D20	D20	0.5	0.8	0.0	0.0	0.3	0.3	3.1	3.2
D21	D21	0.9	0.7	0.0	0.0	2.2	0.2	27.2	2.5
D22	D22	1.0	1.5	0.0	0.0	0.8	0.3	11.9	2.2
D23	D23	1.1	0.5	0.0	0.0	0.7	0.2	9.8	0.9
D24	D24	2.6	4.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.8	0.8
-	D25-1	-	2.8	-	0.0	-	0.7	-	12.3
A 區平均值		0.6	0.9	0.0	0.0	0.4	0.4	2.0	2.2
B 區平均值		1.0	1.0	9.6	4.5	0.5	0.3	8.0	3.1
C 區平均值		1.0	1.0	4.9	2.6	0.6	0.3	11.6	6.3
D 區平均值		1.5	1.5	2.2	1.5	0.8	0.3	12.4	4.0
老街溪總平均值		1.2	1.2	5.6	2.7	0.6	0.3	9.4	4.0

^a 低度污染因子(CF < 1)；中度污染因子(1 < CF < 3)；大量污染因子(3 < CF < 6)；高度污染因子(CF > 6)



結果與討論

表七(續 1)、老街溪底泥 Hg、Ni、Pb、Zn 污染因子 CF^a。

重金屬		Hg		Ni		Pb		Zn	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.0	0.0	0.6	0.6	2.7	2.5	5.9	5.2
A2	A2	0.0	0.0	0.1	0.4	0.3	1.1	0.5	1.7
B3	B3	0.0	0.0	1.6	0.9	2.0	1.4	3.8	3.5
B4	B4	0.0	25.0	0.9	0.5	5.0	1.5	26.7	5.0
B5	B5	0.0	0.0	0.5	0.5	1.8	0.9	3.4	2.2
B6	B6	25.2	0.0	2.4	0.6	4.1	0.8	11.1	1.1
B7	B7	0.0	0.0	0.8	0.7	9.7	24.2	8.0	7.1
B8	B8	0.0	0.0	0.8	0.7	3.8	4.4	5.3	5.7
B9	-	0.0	-	0.7	-	3.6	-	4.9	-
-	B9-1	-	0.0	-	0.5	-	5.1	-	3.8
B10	B10	0.0	0.0	1.8	1.1	10.2	5.8	17.8	8.7
B11	B11	0.0	0.0	0.7	0.4	2.1	2.3	3.9	3.5
C12	C12	0.0	23.5	0.8	1.0	2.9	6.2	4.6	8.9
C13	-	0.0	-	2.1	-	6.6	-	15.5	-
-	C13-1	-	0.0	-	0.5	-	5.2	-	3.8
-	C14-1	-	0.0	-	0.6	-	3.1	-	4.1
C15	-	25.4	-	0.7	-	1.6	-	4.7	-
-	C15-1	-	0.0	-	0.5	-	1.9	-	3.4
-	C16-1	-	0.0	-	0.4	-	2.5	-	3.6
D17	-	38.4	-	2.1	-	6.5	-	16.1	-
-	D17-1	-	0.0	-	1.0	-	4.5	-	7.7
D18	D18	0.0	0.0	1.4	0.5	4.3	1.7	11.0	3.6
-	D19-1	-	0.0	-	0.5	-	2.2	-	4.5
D20	D20	0.0	0.0	0.6	0.5	1.6	1.9	4.0	4.2
D21	D21	0.0	0.0	2.2	0.4	2.9	1.3	16.9	2.8
D22	D22	0.0	0.0	1.1	0.4	3.3	3.5	9.5	2.6
D23	D23	0.0	0.0	0.9	0.2	1.2	0.5	6.4	2.3
D24	D24	0.0	0.0	0.5	0.5	0.8	1.0	1.5	1.5
-	D25-1	-	0.0	-	0.9	-	2.8	-	7.4
A 區平均值		0.0	0.0	0.4	0.5	1.5	1.8	3.2	3.5
B 區平均值		2.8	2.8	1.1	0.7	4.7	5.2	9.4	4.5
C 區平均值		8.5	4.7	1.2	0.6	3.7	3.8	8.3	4.8
D 區平均值		5.5	0.0	1.3	0.5	2.9	2.2	9.3	4.1
老街溪總平均值		4.2	1.9	1.1	0.6	3.7	3.5	8.6	4.3

^a 低度污染因子(CF < 1)；中度污染因子(1 < CF < 3)；大量污染因子(3 < CF < 6)；高度污染因子(CF > 6)



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表七(續 2)、老街溪底泥 Al、Fe、Mn 污染因子 CF^a。

重金屬		Al		Fe		Mn	
1 月 樣點	6 月 樣點	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	0.5	0.4	0.8	0.7	0.2	0.4
A2	A2	0.1	0.2	0.1	0.5	0.1	0.2
B3	B3	0.2	0.2	0.6	0.6	0.7	0.3
B4	B4	0.8	0.6	1.2	1.3	1.0	0.5
B5	B5	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2
B6	B6	0.5	0.2	0.8	0.3	0.6	0.2
B7	B7	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2
B8	B8	0.1	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5
B9	-	0.1	-	0.4	-	0.3	-
-	B9-1	-	0.1	-	0.4	-	0.3
B10	B10	0.4	0.2	0.8	0.4	0.8	0.5
B11	B11	0.2	0.1	0.6	0.3	0.4	0.3
C12	C12	0.2	0.4	0.3	0.7	0.1	0.9
C13	-	0.6	-	0.9	-	2.2	-
-	C13-1	-	0.1	-	0.4	-	0.3
-	C14-1	-	0.2	-	0.5	-	0.2
C15	-	0.5	-	0.8	-	0.6	-
-	C15-1	-	0.1	-	0.5	-	0.2
-	C16-1	-	0.2	-	0.4	-	0.3
D17	-	0.8	-	1.2	-	4.5	-
-	D17-1	-	0.3	-	1.0	-	0.8
D18	D18	0.7	0.2	1.0	0.5	1.9	0.2
-	D19-1	-	0.1	-	0.5	-	0.2
D20	D20	0.2	0.2	0.5	0.4	0.2	0.3
D21	D21	0.9	0.1	0.6	0.3	0.5	0.1
D22	D22	0.3	0.2	0.6	0.6	0.4	0.4
D23	D23	0.2	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1
D24	D24	0.2	0.2	0.7	0.7	0.4	0.5
-	D25-1	-	0.3	-	0.8	-	1.0
A 區平均值		0.3	0.3	0.5	0.6	0.2	0.3
B 區平均值		0.3	0.2	0.6	0.5	0.5	0.3
C 區平均值		0.4	0.2	0.7	0.5	1.0	0.4
D 區平均值		0.5	0.2	0.7	0.6	1.2	0.4
老街溪總平均值		0.4	0.2	0.7	0.5	0.8	0.4

^a 低度污染因子(CF < 1)；中度污染因子(1 < CF < 3)；大量污染因子(3 < CF < 6)；高度污染因子(CF > 6)



3.4 總體污染程度(overall contamination degree)

校正後整體污染程度(modified overall contamination degree, MCD)與污染指數(pollution load index, PLI)係整合各個重金屬污染程度(CF)，進而獲得樣點之總體重金屬污染程度(Abrahim and Parker, 2008; Tomlinson *et al.*, 1980)。污染程度分類如下：無或非常低程度污染($MCD < 1.5$)；低程度污染($1.5 \leq MCD < 2$)；中程度污染($2 \leq MCD < 4$)；高程度污染($4 \leq MCD < 8$)；非常高程度污染($8 \leq MCD < 16$)；極高程度污染($16 \leq MCD < 32$)；超高程度污染($MCD \geq 32$)。無重金屬污染($PLI < 1$)；有重金屬污染($PLI > 1$)。老街溪底泥重金屬總體污染程度分析結果如表八。參考前人方法(Abrahim and Parker, 2008; Tomlinson *et al.*, 1980)，本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

在 2019 年 1 月枯水期 MCD 整合結果中，以 MCD 平均值來看，龍潭區呈無或非常低程度污染($MCD < 1.5$)，平鎮、中壢、大園區都呈中程度污染($2 \leq MCD < 4$)，老街溪流域總平均值呈中程度污染($2 \leq MCD < 4$)。值得注意的是，樣點 B6、D17 呈非常高程度污染($8 \leq MCD < 16$)。從 PLI 整合結果中，以 PLI 平均值來看，龍潭區呈無重金屬污染($PLI < 1$)，平鎮、中壢、大園區都有重金屬污染($PLI > 1$)，老街溪流域總平均值有重金屬污染($PLI > 1$)。整體來說，以 PLI 判定有重金屬污染($PLI > 1$)之樣點，其 MCD 總體污染程度呈中程度污染以上($2 < MCD < 4$)。

在 2019 年 6 月豐水期 MCD 整合結果中，以 MCD 平均值來看，龍潭、大園區呈無或非常低程度污染($MCD < 1.5$)，平鎮、中壢區都呈中程度污染($2 \leq MCD < 4$)，老街溪流域總平均值呈低程度污染($1.5 \leq MCD < 2$)。取 PLI 平均值來看，龍潭、大園區呈無重金屬污染($PLI < 1$)，平鎮、中壢區都有重金屬污染($PLI > 1$)，老街溪流域總平均值有重金屬污染($PLI > 1$)。值得注意的是，樣點 C12 呈高程度污染($4 \leq MCD < 8$)。除了樣點 B7，在 MCD 總體污染程度呈中程度污染以上之樣點，於 PLI 整合結果均為皆有重金屬污染($PLI > 1$)。

綜合以上結果，MCD 可以詳細計算出一個樣點的污染程度，適合用來分析對比重金屬總體污染程度以及重金屬各別污染程度之研究。PLI 值則沒能顯示污染程度，只能粗略判斷一個樣點是否具有污染。MCD 結果與 I_{geo} 、EF、CF 成正相關，只有少數樣點因沒有 Cd 以及 Hg 而有落差。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表八、老街溪底泥總體污染程度(MCD-PLI)。

1 月 樣點	6 月 樣點	MCD ^a		PLI ^b	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	1.5	1.3	1.1	1.0
A2	A2	0.1	0.6	0.2	0.5
B3	B3	2.7	2.2	1.3	1.1
B4	B4	5.9	3.5	2.9	1.5
B5	B5	1.1	1.9	0.8	0.8
B6	B6	9.4	0.5	3.3	0.5
B7	B7	2.1	3.2	0.8	0.8
B8	B8	1.6	1.6	1.0	0.9
B9	-	1.5	-	0.9	-
-	B9-1	-	1.2	-	0.7
B10	B10	6.3	3.7	2.7	1.7
B11	B11	1.1	0.9	0.7	0.6
C12	C12	1.3	7.0	0.7	2.8
C13	-	6.5	-	3.3	-
-	C13-1	-	1.3	-	0.7
-	C14-1	-	1.2	-	0.8
C15	-	3.6	-	1.5	-
-	C15-1	-	0.9	-	0.7
-	C16-1	-	1.0	-	0.7
D17	-	8.3	-	4.3	-
-	D17-1	-	3.4	-	1.9
D18	D18	5.0	1.0	2.8	0.7
-	D19-1	-	1.1	-	0.7
D20	D20	1.0	1.1	0.7	0.7
D21	D21	4.9	0.8	2.3	0.5
D22	D22	2.6	1.1	1.5	0.8
D23	D23	1.9	0.5	1.0	0.3
D24	D24	0.7	0.9	0.6	0.7
-	D25-1	-	2.6	-	1.7
A 區平均值		0.8	1.0	0.7	0.8
B 區平均值		3.5	2.1	1.6	1.0
C 區平均值		3.8	2.3	1.8	1.1
D 區平均值		3.5	1.4	1.9	0.9
老街溪總平均值		3.3	1.8	1.6	1.0

^a 無或非常低程度污染($MCD < 1.5$)；低程度污染($1.5 \leq MCD < 2$)；中程度污染($2 \leq MCD < 4$)；高程度污染($4 \leq MCD < 8$)；非常高程度污染($8 \leq MCD < 16$)；極高程度污染($16 \leq MCD < 32$)；超高程度污染($MCD \geq 32$)。

^b 無重金屬污染($PLI < 1$)；有重金屬污染($PLI > 1$)。



4. 生態風險指數

4.1 底泥品質指標(Sediment quality guidelines, SQGs)

底泥為水棲生物的棲息地，同時也是水體中污染物的主要累積終點，但大多數的環境調查對於底泥品質評估都缺乏完善的評估方法。本研究報告引用 MacDonald 等學者發表之底泥評估指標(sediment quality guideline, SQGs)來進行風險評估計算(MacDonald *et al.*, 2000)。SQGs 經不同統計方式，以毒性效應閾值濃度(threshold effects concentration, TEC)以及機率毒性濃度(probable effects level, PEC)等求得(MacDonald *et al.*, 2000)，可用於粗略界定重金屬在各樣點中是否超標進而造成潛在生態風險。TEC 經由毒性效應閾值(threshold effects level, TEL) (Smith *et al.*, 1996; US EPA 1996a)、效應區間十分位數(effects range low, ERL) (Long and Morgan, 1991)、最低效應值 (lowest effect levels, LELs) (Persaud *et al.* 1993)、最小毒性效應閾值(minimal effect thresholds, METs) (EC and MEN-VIQ, 1992)以及底泥品質諮詢值(sediment quality advisory levels, SQALs) (US EPA 1997a)等參數進行統計計算獲得(MacDonald *et al.*, 2000)，低於 TEC 值之底泥代表重金屬無污染，並且不會對當地生物造成潛在風險。PEC 經由毒性效應值(probable effects level, PEL) (Smith *et al.*, 1996; US EPA 1996a)、效應區間中位數(effects range median, ERM) (Long and Morgan, 1991)、嚴重效應值 (severe effect levels, SELs) (Persaud *et al.* 1993)以及毒性效應閾值(toxic effect thresholds, TETs) (EC and MEN-VIQ, 1992)等參數進行統計計算獲得(MacDonald *et al.*, 2000)，高於 PEC 值之底泥代表底泥重金屬污染會影響當地生物造成風險。參考前人方法(MacDonald *et al.*, 2000)，本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

2019 年 1 月枯水期 SQGs 結果顯示(表九)。以平均值來看，Cu (263.29 mg/kg)、Ni (52.25 mg/kg)及 Zn (579.67 mg/kg)高於 PEC 之值，會影響當地生物造成潛在風險。Cr (55.70 mg/kg)、Hg (0.21 mg/kg)以及 Pb (62.61 mg/kg)則介於 TEC 值與 PEC 值之間。2019 年 6 月豐水期 SQGs 結果顯示(表九)，以平均值來看，在豐水期造成潛在生態風險的重金屬較少，Cu (111.72 mg/kg)、Ni (27.91 mg/kg)、Pb (60.00 mg/kg)及 Zn (289.33 mg/kg) 介於 TEC 值與 PEC 值之間。

比較豐水期以及枯水期之平均值(表九)，豐水期數值除了 As 略為上升外，其餘數值都下降，顯示底泥污染物隨著河水沖刷而降低。其中 Cu、Ni、Zn 在枯水期當中原本平均數值大於 PEC，但在豐水期中期平均數值落於 PEC 及 TEC 中間，顯示其污染程度有所下降，但還是有部分樣點會對老街溪上、中、下游的生態系統造成潛在的風險。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表九、As、Cd、Cr、Cu 底泥品質指標 SQGs (超出 SQGs 上限值以紅字表示，介於 SQGs 上下限值之間以藍色表示)

		As		Cd		Cr		Cu	
SQGs	TEC ^a	9.79		0.99		43.40		31.60	
	PEC ^b	33.00		4.98		111.00		149.00	
		1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
老街溪底泥濃度 (mg/kg)	最小值	0.00	2.29	0.00	0.00	9.95	15.55	6.22	21.66
	最大值	13.43	19.25	3.78	1.24	198.91	65.22	760.40	553.14
	平均值	5.51	5.58	0.50	0.24	55.70	29.24	263.29	111.72
總和	樣本 < TEC	18	22	15	20	9	21	2	4
		(86%)	(88%)	(71%)	(80%)	(43%)	(84%)	(10%)	(16%)
	樣本介於 TEC 與 PEC 之間	3	3	6	5	11	4	7	17
		(14%)	(12%)	(9%)	(20%)	(52%)	(16%)	(33%)	(68%)
	樣本 > PEC	0	0	0	0	1	0	12	4
		(0%)	(0%)	(0%)	(0%)	(5%)	(0%)	(57%)	(16%)

^aTEC 數值來自 MacDonald *et al.* (2000)，低於 TEC 值之底泥代表重金屬無污染，並且不會對當地生物造成潛在風險

^bPEC 數值來自 MacDonald *et al.* (2000)，高於 PEC 值之底泥代表底泥重金屬污染會影響當地生物造成風險

表九(續 1)、Hg、Ni、Pb、Zn 底泥品質指標 SQGs (超出 SQGs 上限值以紅字表示，介於 SQGs 上下限值之間以藍色表示)

		Hg		Ni		Pb		Zn	
SQGs	TEC ^a	0.18		22.70		35.80		121.00	
	PEC ^b	1.06		48.60		128.00		459.00	
		1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月	1 月	6 月
老街溪底泥 濃度	最小值	0.00	0.00	4.98	9.32	4.98	8.16	31.10	76.78
	最大值	1.92	1.25	112.10	51.00	173.43	410.70	1786.47	594.33
	平均值	0.21	0.10	52.25	27.81	62.61	60.00	579.67	289.33
總和	樣本 < TEC	18 (86%)	23 (92%)	2 (10%)	8 (32%)	7 (33%)	11 (44%)	2 (10%)	3 (12%)
	樣本介於 TEC	0 (0%)	0	11 (52%)	16	12 (57%)	13	10 (47%)	17
	與 PEC 之間		(0%)		(64%)		(52%)		(68%)
	樣本 > PEC	3 (14%)	2 (8%)	8 (38%)	1 (4%)	2 (10%)	1 (4%)	9 (43%)	5 (20%)

^aTEC 數值來自 MacDonald *et al.* (2000)，低於 TEC 值之底泥代表重金屬無污染，並且不會對當地生物造成潛在風險

^bPEC 數值來自 MacDonald *et al.* (2000)，高於 PEC 值之底泥代表底泥重金屬污染會影響當地生物造成風險



4.2 潛在生態風險指數(potential ecological risk index, PERI)

潛在生態風險指數(potential ecological risk index, PERI)是一種計算土壤重金屬潛在生態風險評估的常用方法(Håkanson, 1980)，整合各個重金屬污染指數 CF 與生物毒性因素，推估出不同樣點的潛在生態風險。生態風險分類如下：低生態風險($PERI < 150$)；中等生態風險($150 < PERI < 300$)；中度生態風險($300 < PERI < 600$)；高度生態風險($PERI > 600$)。分析結果如表十。參考前人方法(Håkanson, 1980)，本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

由 2019 年 1 月枯水期結果中，發現樣點 B4、B6、B10、C13、C15、D17、D18 之 PERI 值(611.5–2402.6)都呈高度生態風險($PERI > 600$)；而樣點 B3 (471.3)則呈中度生態風險($300 < PERI < 600$)；樣點 D21 (191.3)呈中等生態風險($300 < PERI < 600$)；其餘樣點呈低生態風險($PERI < 150$)。綜合來說，平鎮區及中壢區的大多樣點在枯水期時有高度生態風險。

在由 2019 年 6 月豐水期結果中，樣點 B4 (1047.7)、C12 (1495.7)呈高度生態風險；而樣點 B3 (450.6)、B5 (427.1)、B10 (499.5)、D17-1 (489.5)則呈中度生態風險($PERI > 600$)；其餘樣點呈低生態風險($PERI < 150$)。比較枯水期與豐水期之結果，大多數的樣點皆呈下降趨勢，然而在 B5、B7 以及 C12 樣點卻顯著上升，尤其在 C12 樣點，重原本的低生態風險急遽上升至高生態風險。綜合來說，平鎮區的的大多樣點在枯水期時，呈中度生態風險至高度生態風險。

相同的，由比較總體污染程度(MCD)與污染物負擔指數(PLI)之結果也可發現，C12 樣點在豐水期中污染程度急遽上升，MCD 從原本低程度污染($MCD = 1.3$)上升至高程度污染($MCD = 7$)，PLI 從原本無重金屬污染($PLI = 0.7$)上升至有重金屬污染($PLI = 2.8$)。另外從個別金屬污染因子(CF)分析發現，在 C12 樣點 Cd、Cu 及 Hg 於豐水期皆顯著上升，其中 Cd 及 Hg 從原本的未檢測上升至高度污染因子($CF = 13.1$; $CF = 23.5$)。不排除在 C12 樣點附近有人為活動而造成其重金屬累積上升。

4.3 毒性當量(toxic units, TUs)

TUs 整合各個重金屬濃度 C_i 與 PEL 值，計算出重金屬在不同樣點上的毒性程度，分析結果如表十。本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。2019 年 1 月枯水期結果中，TUs 值超過 10 的樣點為 B4、B6、B10、C13、D17、D18、D21，與 PERI 高度生態風險的結果相符，這些樣點可能對其



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

水域生物具有急毒性。2019年1月豐水期結果中，TUs值超過10的樣點為C12，與PERI高度生態風險的結果相符。



表十、老街溪底泥重金屬生態風險指數 (PERI-TUs)。

1 月 樣點	6 月 樣點	PERI ^a		TUs	
		1 月	6 月	1 月	6 月
A1	A1	53.9	47.5	4.0	3.4
A2	A2	3.8	23.2	0.4	1.7
B3	B3	471.3	450.6	5.1	3.4
B4	B4	627.4	1047.7	11.9	4.7
B5	B5	42.9	427.1	2.9	2.3
B6	B6	2402.6	25.1	13.1	1.6
B7	B7	81.4	149.2	5.4	7.0
B8	B8	62.8	60.8	4.5	4.2
B9	-	62.2	-	4.2	-
-	B9-1	-	50.9	-	3.1
B10	B10	624.7	499.5	14.3	7.4
B11	B11	37.3	33.2	3.1	2.4
C12	C12	51.4	1495.7	3.9	11.8
C13	-	651.2	-	15.0	-
-	C13-1	-	53.4	-	3.2
-	C14-1	-	50.0	-	3.3
C15	-	1061.1	-	5.3	-
-	C15-1	-	37.1	-	2.6
-	C16-1	-	40.3	-	2.7
D17	-	1714.3	-	15.6	-
-	D17-1	-	489.5	-	6.3
D18	D18	611.5	38.4	10.1	2.8
-	D19-1	-	45.2	-	3.2
D20	D20	36.0	40.7	2.9	3.0
D21	D21	191.3	31.6	15.4	2.1
D22	D22	103.4	49.1	7.8	2.5
D23	D23	78.4	15.3	5.8	1.3
D24	D24	38.5	53.4	1.7	1.9
-	D25-1	-	117.2	-	7.2
A 區平均值		28.9	35.4	2.2	2.6
B 區平均值		490.3	304.9	7.2	4.0
C 區平均值		587.9	335.3	8.1	4.7
D 區平均值		396.2	97.8	8.5	3.4
老街溪總平均值		428.9	214.9	7.3	3.8

^a 低生態風險(PERI < 150)；中等生態風險(150 < PERI < 300)；中度生態風險(300 < PERI < 600)；高度生態風險(PERI > 600)



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

4.4 風險評估編碼(risk assessment code, RAC)

利用序列萃取法所提取的可交換相濃度，該型態遷移性強，易與水體發生交換，可以直接被生物利用，因此具有較高的生物影響性(Singh *et al.*, 2005)。風險評估編碼(risk assessment code, RAC)根據可交換相佔總量百分比的高低來評價其重金屬的生物可獲性(bioavailability)。RAC 分類如下：低度風險($RAC < 10\%$)；中度風險($10\% < RAC < 30\%$)；高度風險($30\% < RAC < 50\%$)；非常高風險($RAC > 50\%$)(Yu *et al.*, 2011)。結果如圖三。

根據 2019 年 1 月枯水期 RAC 結果中發現，Cu、Zn、Mn 在平鎮區及大園區的樣點呈中度至高度風險性。值得注意的是，Cd 在樣點 C12 呈非常高風險性($RAC > 50\%$)；Mn 在樣點 A2 中呈非常高風險性($RAC > 50\%$)。此外，從可交換相枯水期結果得知，以上提到之重金屬在樣點 C12 都有存在風險性。

根據 2019 年 6 月豐水期 RAC 結果發現，Cu、Pb、Zn、Mn 在平鎮區、中壢區及大園區的樣點呈中度至高度風險性。值得注意的是，Cd 在樣點 B8、C12、C13-1、C16-1、D19-1、D20 呈非常高風險性($RAC > 50\%$)；Zn 在樣點 B8、B9-1、B10 呈非常高風險性($RAC > 50\%$)；Mn 在樣點 D17-1、D20 中呈非常高風險性($RAC > 50\%$)。

根據 RAC 數值，Cd、Cu、Zn 及 Mn 具有較高的生物可獲性，可能是老街溪地區造成底泥生態風險的主要因子。值得注意的是，Mn 雖然未歸類在列管的重金屬當中，Mn 的毒性和帕金森氏症有關 (Parkinson's disease) (O'Neal and Zheng, 2015)，因此未來值得考量將 Mn 列在底泥管制物質。



5. 多變量統計分析

5.1 皮爾森相關性(Pearson correlation)

皮爾森相關性能夠分析不同重金屬彼此之間的正負相關性(Suresh *et al.* 2011, Wang *et al.* 2012)，進而推斷出此效應為人為污染伴隨或為地理背景重金屬濃度相關性，如果沒有相關性，則金屬不受單一因素控制(Kukrer *et al.* 2014)。相關性分析的經驗法則(rule of thumb)分類如下：非常高度正相關($r = 0.90 - 1.00$)、高度正相關($r = 0.70 - 0.90$)、中度正相關($r = 0.50 - 0.70$)、低度正相關($r = 0.30 - 0.50$)、無相關($r = 0.00 - 0.30$) (Mukaka, 2012)。分析結果如表十一。本研究參考 Chen *et al.* (2018)之方式，著重討論 $p < 0.01$ 之結果。本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

2019 年 1 月枯水期的分析結果顯示，老街溪底泥中多種重金屬之間具有統計顯著正相關($p < 0.01$)，包括 Cu-Ni、Cu-Cr 及 Cu-Zn 具有高度相關性($r = 0.70 - 0.90$)。此外，Zn-As、Zn-Cr、Zn-Ni、Ni-Cd 及 Ni-Cr 之間也具有中度相關性($r = 0.50 - 0.70$) ($p < 0.01$)。以上重金屬，尤其 Cu、Zn、Ni、Cr 之間的正相關性，顯示這些重金屬可能來自相同的污染源。此外，分析結果也顯示背景值較高的重金屬與多種重金屬具有相關性，例如 Fe 同時與 As、Zn、Al 具有正相關($p < 0.01$)，Al 與 As、Cr、Cu、Ni、Zn 具正相關($p < 0.01$)，Mn 則與 As、Hg、Ni、Al 及 Fe 具有正相關($p < 0.01$)。本研究結果亦發現枯水期時 TOC 與 Cd、Hg 與 Ni 具有正相關性($p < 0.01$)。此外，Pb 與 Zn 之間具有相關性($p < 0.01$)，顯示 Pb 的排放過程常伴隨 Zn 出現。最後，本研究結果顯示底泥 pH 與所有重金屬濃度無相關性。

在 2019 年 6 豐水期，發現 Cu-Ni、Cu-Cr、Cu-Zn、Cu-Cd、Zn-Cr、Zn-Ni、Ni-Cd 及 Ni-Cr 之間具有中至高度相關性($r = 0.50-0.90$) ($p < 0.01$)，可見這些重金屬可能來自相同的污染源，且結果與枯水期時相似，可發現 Cu、Zn、Ni、Cr 之組合。另一方面，Fe 與 As、Cr、Hg、Al 具有相關性($p < 0.01$)，Al 與 As、Cr、Hg、Fe 具有相關性($p < 0.01$)，Mn 則與 As、Cr、Cu、Ni、Al 及 Fe 具有相關性($p < 0.01$)，顯示 Fe、Al、Mn 在底泥中可能影響多種金屬的累積，其中 Fe 與 Al 之間可能具有交互作用，影響 As、Cr 及 Hg 的分佈。在豐水期，TOC 與 Cr、Cu、Zn、Mn 具有相關性($p < 0.01$)。與枯水期結果相似，本研究發現豐水期時 pH 與各重金屬呈低至無相關性。

根據前文所述，老街溪因流經市區、工業區及農田等，受到多種污染源的影響，導致底泥中多種重金屬濃度超過容許值。本研究透過相關性分析，發現無論是枯水期或是豐水期，Cu、Cr、Ni、Zn 與多種重金屬具有相關性，顯示以上重金屬為多個污染源的共同污染物。根據本研究採樣點的土地利用特性，可



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

發現底泥 Cu、Cr、Ni 及 Zn 濃度升高的樣點，包括 B4、B6、B10、C13、D17 及 D21 附近皆有工業活動；綜合這些位點的 EF 與 CF，可推測底泥中 Cu、Cr、Ni、Zn 是老街溪重要的工業污染物。另外，研究指出 TOC 是底泥重要的重金屬吸附劑(Charriau *et al.*, 2011)，因此底泥 TOC 可能與重金屬濃度具正相關。本研究結果顯示 TOC 在枯水期與豐水期時與不同重金屬具有相關性，其中枯水期時樣點 B6、B10、C13 與 D17 有 TOC 突然升高的情形，可能因此影響該樣點底泥重金屬的流布。枯水期時 TOC 與 Hg 具有正相關，可能與部分樣點 TOC 與 Hg 同時增加有關。

Fe 是地殼中最常見的元素之一，因此甚少被視為環境污染物。Fe 性質較為活潑，易與底泥中其他金屬產生交互作用，依周遭氧化還原態影響其他金屬的吸附與釋出(von der Heyden and Roychoudhury, 2015)。過去研究指出 As 易吸附於水鐵礦中(Mohan and Pittman, 2007)，因此無論枯水期、豐水期，As、Fe 具正相關性，符合預期。此外，底泥中的 Al 也參與金屬離子的吸附，有研究指出 Al 可吸附 Cr (Wuana and Okieimen, 2011)，因此造成 Al、Cr 在底泥中的含量具有正相關。Mn 容易與 Fe 在底泥形成沉澱(Tessier *et al.*, 1996)，在淺層底泥影響其他金屬的移動性，因此與 Al 類似，容易與多種重金屬呈正相關。然而，Mn 也是常見的工業污染物之一(Li *et al.*, 2014)，在樣點 B4、C13 與 D17 的濃度顯著增加，將影響底泥中各種重金屬的累積。本研究結果顯示，Mn 可能為多個樣點的共同污染物，推測人為排放的 Mn 對老街溪底泥各種金屬累積具有重要的影響。最後，雖然已知 pH 會影響底泥重金屬累積，本研究結果卻未發現 pH 與重金屬濃度之相關性，推測為多種因子共同作用，使 pH 并未能單獨影響重金屬的累積。

表十一、老街溪底泥重金屬皮爾森相關性 (Pearson correlation) 分析 – 2019 年 1 月枯水期^a。

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Mn	TOC	pH
As	1												
Cd	0.382 ^b	1											
Cr	0.330	0.146	1										
Cu	0.372	0.390	0.763**	1									
Hg	0.432	0.244	0.201	.166	1								
Ni	0.400	0.616**	0.669**	0.877**	0.416	1							
Pb	0.220	0.290	0.148	0.517*	0.120	0.488*	1						
Zn	0.597**	0.431	0.660**	0.732**	0.172	0.631**	0.621**	1					
Al	0.622**	0.297	0.827**	0.722**	0.385	0.640**	0.265	0.796**	1				
Fe	0.847**	0.422	0.396	0.470*	0.449*	0.506*	0.353	0.699**	0.771**	1			
Mn	0.629**	0.167	0.321	0.545*	0.607**	0.584**	0.401	0.499*	0.620**	0.713**	1		
TOC	0.411	0.727**	0.166	0.426	0.653**	0.664**	0.359	0.314	0.258	0.374	0.357	1	
pH	0.148	0.152	-0.004	0.073	0.032	0.040	0.063	-0.075	-0.080	-0.062	-0.128	0.267	1

^a 逆王水微波消化法總量

^b 皮爾森相關係數(Pearson correlation coefficient)

* $p < 0.05$

** $p < 0.01$

表十一 (續)、老街溪底泥重金屬皮爾森相關性(Pearson correlation)分析 -2019 年 6 月豐水期^a。

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Mn	TOC	pH
As	1												
Cd	-0.012 ^b	1											
Cr	0.585**	0.260	1										
Cu	0.209	0.518**	0.624**	1									
Hg	0.395	0.203	0.584**	0.430*	1								
Ni	0.196	0.662**	0.573**	0.722**	0.144	1							
Pb	-0.173	0.023	-0.059	0.167	0.016	0.321	1						
Zn	0.116	0.430*	0.635**	0.780**	0.357	0.798**	0.507**	1					
Al	0.585**	0.264	0.843**	0.375	0.746**	0.304	-0.163	0.399*	1				
Fe	0.677**	0.193	0.776**	0.228	0.591**	0.300	-0.161	0.326	0.888**	1			
Mn	0.597**	0.406*	0.831**	0.790**	0.409*	0.709**	0.027	0.702**	0.642**	0.649**	1		
TOC	0.424*	0.121	0.790**	0.668**	0.173	0.502*	-0.005	0.543**	0.487*	0.403*	0.788**	1	
pH	0.459*	-0.255	-0.054	-0.160	0.038	-0.083	0.073	-0.299	-0.080	0.088	0.087	-0.074	1

^a 逆王水微波消化法總量

^b 皮爾森相關係數(Pearson correlation coefficient)

* $p < 0.05$

** $p < 0.01$



5.2 主成分分析(principal components analysis, PCA)

主成分分析(PCA)透過降低原始數據維度，群聚具關聯性的數據，進一步分析數據間相似性、分佈特性及變因之間的可能交互作用(Jolliffe and Cadima, 2016)，透過將各採樣點之重金屬元素利用其代表元素數據並給予不同權重提取呈現，因此會使具有關聯性的重金屬元素群集在一起，並由此群集之重金屬元素比較背景重金屬濃度(富集因子等)，協助判斷此為原生性背景重金屬，或是人為污染所造成之重金屬累積群集，不同之人為污染如農業、工業會造成不同代表重金屬之群集現象(Loska and Wiechuła, 2003)。依據 Morrison (1967)主成分應要能說明大約 75%的總變異性(total variance)。主成分元件特徵值(eigenvalue)要 > 1 (Kaiser, 1960)。分析結果如表十二與圖四。本方法採用之重金屬濃度為逆王水微波消化法所萃取之結果。

分析 2019 年 1 月枯水期底泥數據，共有 3 個特徵值 > 1 的主成分元件，解釋 73.12%的總變異性。參考 Chen *et al.* (2018)以 loading > 0.7 進行分組，可發現 PC₁ (49.03%變異性)的因子包括 Cr、Cu、Ni、Zn 及 Al；PC₂ (13.16%變異性)包括 As、Hg、Fe 及 Mn；PC₃ (10.93%變異性)則有 Cd 與 TOC。

分析 2019 年 6 月豐水期時，則可分為 4 個特徵值 > 1 的主成分元件，可解釋 83.75%的總變異性，其中 PC₁ (47.4%變異性)包含 Cu、Ni、Zn、Mn 及 TOC；PC₂ (18.32%變異性)包括 Hg、Al 及 Fe；PC₃ (10.07%變異性)為 pH；PC₄ (7.97%變異性)則為 Pb。

綜合枯水期與豐水期的 PC₁ 結果，可發現 Cu、Ni、Zn 受控於同一變因，顯示此三種金屬可能來自相同來源，符合相關性分析所得之推論。鋼鐵生產、金屬冶煉、染整、電鍍、電池生產及油漆等工業廢水常含有多種重金屬，包括 Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、As 及 Pb (Barakat, 2011; Williams *et al.*, 1998)。枯水期時，PC₁ 的 Cu 具有最高的 loading (0.90) (表十二)。根據現地底泥數據顯示樣點 A1、B3、B4、B6、B10、C12、C13、D17、D18 及 D21 至 D23 附近底泥 Cu 濃度顯著高於鄰近樣點，且除了點 A1，上列樣點底泥 Cu 濃度超出底泥品質容許值上限。其他重金屬 Cr、Ni、Zn 皆符合以上趨勢。進一步探討發現上列樣點除了 A1 附近有廢棄物回收場址及 B3 周遭有田地及簡易工廠外，其餘樣點皆明顯與工業活動有關，從事事業包括科技產業、食品工業、建材、電機、電池生產、汽車行、光電、塑膠、玻璃及染整等。本研究之結果顯示以上事業可能與枯水期底泥中 PC₁ 之 Cr、Cu、Ni 及 Zn 有關。針對樣點 B3 之異常，雖然上游也有一些工業活動，但目前證據不足，建議未來可往上游(如石門大圳方向)繼續採樣分析。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

另外，由 2019 年 1 月枯水期 PC₂ (13.16%變異性)可發現 As、Hg、Fe、Mn 的濃度受同一因子的影響，顯示四種金屬可能來自相同來源。前文提到 Fe、Mn 多為環境背景值，而 Mn 也可能因排放而造成濃度遠高於背景值(例如，樣點 B4、C13、D17 與 D18)，與 Fe 形成沉澱，進而吸附其他重金屬改變其移動性(Tessier *et al.*, 1996)。相似於皮爾森相關性分析的結果，PCA 結果顯示，As、Hg 濃度與 Fe、Mn 相關。

2019 年 6 月豐水期時，PC₁ (47.4%變異性)的 Mn 與 TOC 具有最高且相近的 loading (0.86)。與枯水期相似，Cu 也具有高 loading (0.821)，然而根據底泥重金屬濃度數據，可以發現豐水期底泥各個重金屬的濃度比枯水期低，推測因河川流量增加，將表層底泥往出海口運送所致。此外，在 2019 年 6 月豐水期 PC₂ (18.32%變異性)，可發現 Hg、Fe、Al 受同一因子影響，考慮到 Fe、Al 的背景值較高，可視為 Hg 的排放較獨立於其他金屬，且容易受底泥中的 Fe、Al 吸附而造成累積。

枯水期時 TOC 與 Cd 具有相關性，在部分樣點確實有相同趨勢，兩者同時增加的情形在 B6、B10、C13 與 D17 最為明顯。根據當地土地利用情形，發現該地區確實有不同工業活動，推測 TOC、Cd 與工業排放相關。豐水期時，Pb 成為獨立的主成分元件，推測 Pb 的排放來自特定的來源。根據實驗數據，豐水期時 Pb 在 B7、C12 及 D17-1 的底泥濃度顯著增加。根據當地附近的產業，B7 位處 B6 工業區下游，C12 附近有光電產業，D17-1 附近為機械、玻璃及其他材料製造業，因此推測以上樣點具有特定的 Pb 排放源。枯水期時 pH 為獨立主成分元件，顯示各點位底泥 pH 值變化獨立於重金屬濃度變化，其中鄰近光電產業的樣點 C2 底泥 pH 明顯最低 (pH = 4.39)，顯示該區域可能受到酸液排放影響。

綜上所述，老街溪底泥中重金屬多與工業活動相關，部分樣點則可能與廢棄物回收場址或本研究未及的上游工業放流水有關。



表十二、老街溪流域底泥重金屬主成分分析
(PCA)- 2019 年 1 月枯水期。

	PC ₁	PC ₂	PC ₃
As	0.292	0.785	0.111
Cd	0.288	0.228	0.732
Cr	0.846	0.143	-0.094
Cu	0.902	0.149	0.242
Hg	-0.053	0.784	0.303
Ni	0.736	0.305	0.464
Pb	0.517	0.090	0.355
Zn	0.836	0.340	0.071
Al	0.767	0.536	-0.110
Fe	0.441	0.796	0.025
Mn	0.366	0.785	-0.003
pH	-0.068	-0.127	0.566
TOC	0.155	0.430	0.829
特徵值	6.37	1.71	1.42
變異%	49.03	13.16	10.93
累積變異%	49.03	62.19	73.12



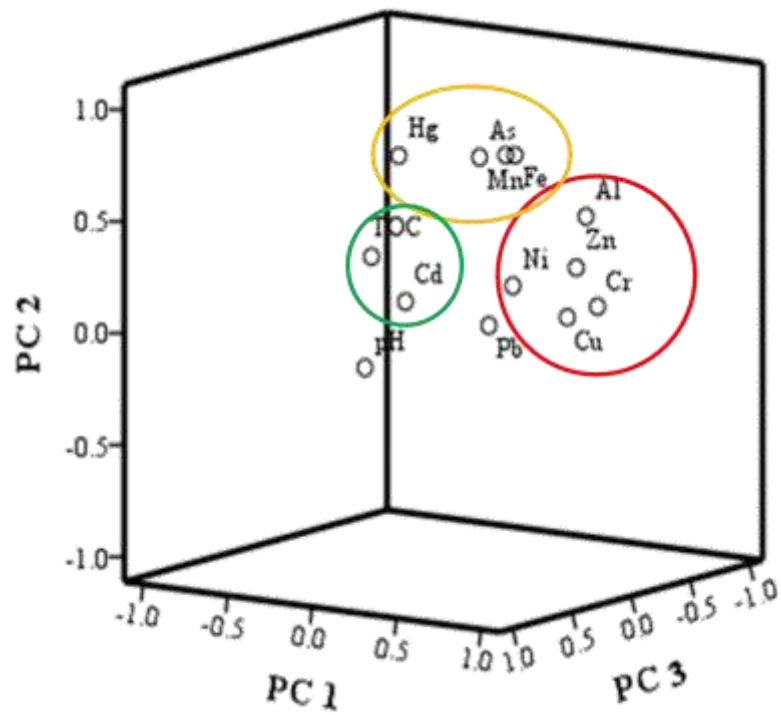
生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

表十二(續)、老街溪流域底泥重金屬主成分分析
(PCA)- 2019 年 6 月豐水期。

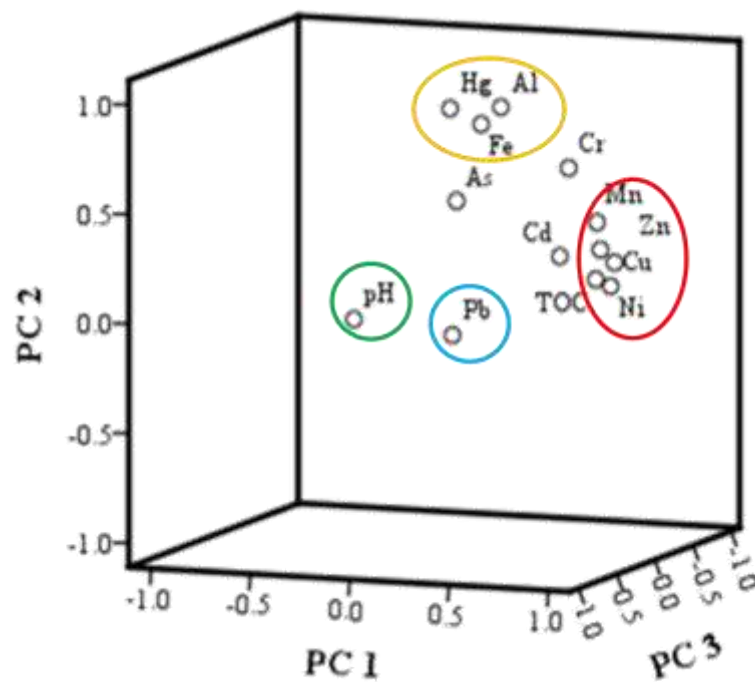
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
As	0.341	0.566	0.596	-0.194
Cd	0.424	0.168	-0.542	0.157
Cr	0.685	0.658	0.023	-0.107
Cu	0.821	0.200	-0.226	0.201
Hg	0.047	0.883	-0.084	0.208
Ni	0.817	0.098	-0.183	0.340
Pb	0.119	-0.127	0.072	0.918
Zn	0.726	0.247	-0.286	0.488
Al	0.313	0.906	-0.059	-0.141
Fe	0.288	0.852	0.134	-0.149
Mn	0.862	0.430	0.113	-0.005
pH	-0.066	0.043	0.883	0.153
TOC	0.857	0.170	0.114	-0.217
特徵值	6.16	2.38	1.31	1.04
變異%	47.40	18.32	10.07	7.97
累積變異%	47.40	65.72	75.78	83.75



(A)



(B)



圖四、老街溪流流域底泥重金屬主成分分析(PCA) (A) 2019 年 1 月枯水期；(B) 2019 年 6 月豐水期。



(六) 結論與建議

6.1. 結論

本專案研究計畫期末報告依計畫內容，於枯水期(2019 年 1 月)以及豐水期(2019 年 6 月)進行老街溪流域底泥採樣，並分析底泥重金屬的濃度及分佈。由逆王水微波消化法分析老街溪流域底泥結果得知，老街溪底泥在枯水期(2019 年 1 月)時，以 Cu、Ni、Pb、Zn 等重金屬超過底泥品質標準的情況最為嚴重。豐水期(2019 年 1 月)整體污染程度低於枯水期，超標之重金屬則以 Cu、Ni、Pb、Zn 較為嚴重。綜合來說，枯水期及豐水期在平鎮區及大園區皆有 2 至 5 種重金屬超過底泥品質指標上限值，這可能與其附近有工業區相關。

由序列萃取法分析老街溪流域底泥結果得知，老街溪流域部份樣點底泥中重金屬(Cu、Zn、Pb)的可交換相、可還原相及可氧化相濃度於偏高，有些樣點底泥中重金屬濃度甚至已超過底泥品質標準上限值且殘留相比比例低，顯示三者可能對水生生物造成潛在危害。因重金屬的生物可獲性被認為與可交換相、可還原相及可氧化相有關，因此可能造成水中生物及人類建康的潛在風險，值得提高注意。

利用不同的污染指數(pollution indices)，量化底泥中個別及整體重金屬的污染程度，結果發現，重金屬濃度高之樣點，與個別污染指數 I_{geo} 、EF 以及 CF 結果成正相關。總體污染程度指數(MCD)可呈現總體各個樣點的污染程度，大多老街溪流域底泥樣點，呈中程度污染以上污染程度，以老街溪流域底泥平均值來看，則呈低至中程度污染。

進一步評估底泥重金屬的生物效應及潛在的生態風險，結果發現，SQGs 在枯水期造成潛在生態風險比較嚴重的重金屬有 Cu、Ni、Zn；豐水期時潛在生態風險則較為降低。此外，平鎮區及中壢區的大多樣點在枯水期及豐水期有中度至高度生態風險。各樣點的潛在生態風險指數 PERI 在枯水期中較高。值得注意的是 C12 樣點，從原本的低生態風險急遽上升至高生態風險，不排除有人為活動而造成其重金屬累積上升，尤其 C12 位於老街溪與桃園大圳匯流口，建議加強此樣點工業排放水重金屬監測。風險評估編碼(RAC)進一步確認 I_{geo} 、EF、CF 及 PERI 分析結果，根據 RAC 數值，Cd、Cu、Zn 及 Mn 具有較高的生物可獲性，可能是老街溪地區造成底泥生態風險的主要因子。

老街溪因流經市區、工業區及農田等，受到多種污染源的影響，導致底泥中多種重金屬濃度超過容許值。本研究透過皮爾森相關性分析，發現無論是枯水期或是豐水期，Cu、Ni、Zn 為多個污染源的共同污染物；Mn 可能為多個點位的共同污染物，推測人為排放的錳對老街溪底泥各種金屬累積具有重要的影響；pH 並未能單獨影響重金屬的累積。



綜合枯水期與豐水期的 PCA 結果，可發現 Cu、Ni、Zn 受控於同一變因，顯示此三種金屬可能來自相同來源；Pb 在豐水期時成為獨立的主成分元件，推測 Pb 的排放來自特定的來源，以上符合相關性分析所得之推論。

6.2. 建議

1. 本專案研究計畫建議加強平鎮區及大園區工業排放水重金屬監測。
2. 比較逆王水微波消化法及序列萃取法，結果顯示逆王水微波消化法因未考量生物可獲性，容易高估潛在的生態風險，因此建議利用序列萃取法當作未來萃取底泥重金屬濃度之標準方法參考。
3. 綜合個別重金屬污染程度指數之結果，相較於 CF， I_{geo} 以及 EF 值分類層級較多，較可以有效量化分類各個樣點的個別重金屬污染程度。因此建議利用 I_{geo} 或 EF 量化各個樣點的污染程度。
4. 因 PLI 值則不能顯示污染程度，只能粗略判斷一個樣點是否具有污染。因此建議利用 MCD 評估總體污染程度。
5. SQGs 因風險分類較簡單，不易反映真正的潛在生態風險，因此建議利用 PERI 及 RAC 評估底泥重金屬的生物效應及潛在的生態風險。
6. 綜合 RAC 的數值，Mn 雖然未歸類在列管的重金屬當中，Mn 的毒性和帕金森氏症有關(Parkinson's disease)，因此建議未來考量將 Mn 列在底泥管制物質。

綜合以上建議，一套較有系統的生態風險評估方法為：以序列萃取法萃取底泥重金屬，再利用 I_{geo} 以及 EF 評估地區各別污染濃度，再以 MCD 評估總體污染程度，同時以 PERI 以及 RAC 評估重金屬之生物效應以及潛在生態風險程度，最後利用多變量統計分析人為以及地殼原生之重金屬以及污染源。

建議未來可針對臺灣目前較大河流底泥進行測定，確定其重金屬污染程度，判別污染源並對污染源進行提醒以及緊密監測。

本研究符合預期目標，期末完成度為 100%。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(七) 參考文獻

- 王根樹、吳章甫 (2018) 河川水體污染源鑑識作業程序建置與實例應用 (1/3) (計畫編號 EPA-107-E3S4-02-02)。行政院環境保護署，臺灣。
- 行政院環境保護署 (2018a) 2017 年環境水質年報。https://wq.epa.gov.tw/
- 行政院環境保護署 (2018b) 底泥品質檢測資料。https://data.gov.tw/dataset/71474
- 胡惠宇 (2017) 106 年度河川污染總量削減整合執行及整治策略評估計畫 (北區) (計畫編號 EPA-106-G103-03-A110)。行政院環境保護署，臺灣。
- 陳建宏 (2013) 底泥污染來源及傳輸模式調查計畫—以重點河川為例(計畫編號 EPA-100-GA102-02-A232)。行政院環境保護署，臺灣。
- 童心欣、于昌平教授、郭獻文 (2017) 以菌群分布作為鑑識污染源技術建立(1/2) (計畫編號 EPA-106-E3S5-02 -03)。行政院環境保護署，臺灣。
- 楊于嫻 (2014) 都市河川復育之研究—以老街溪為例。國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。83 頁。
- Abraham, G.M.S., and Parker, R.J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environ. Monit. Assess.* 136, 227-238.
- Adamo P., Arienzo M., Imperato M., Naimo D., Nardi G., and Stanzione D. (2005). Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere*. 61, 800-809.
- Ali, M.M., Ali, M.L., Islam, M.S., and Rahman, M.Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manage.* 5, 27-35.
- Barakat, M.A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arab. J. Chem.* 4, 361-377.
- Bashkin, V.N., and Demidova, O.A. (2008). Biogeochemical approaches to environmental risk assessment. pp. 378-386. *In: Jørgensen, S.E.; and Fath, B.D. (eds) Encyclopedia of Ecology*. Elsevier Science, New York, NY.
- Birth G. (2003). A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediments. *In: Woodcoffe CD, Furness R. A. (eds) Coastal GIS 2003*. Wollongong University Papers in Center for Maritime Policy, Australia.



- Bonten, L.T.C., Römkens, P.F.A.M., and Brus, D.J. (2008). Contribution of heavy metal leaching from agricultural soils to surface water loads. *Environ. Forensics* 9, 252-257.
- Borgese, L., Federici, S., Zacco, A., Gianoncelli, A., Rizzo, L., Smith, D.R., Donna, F., Lucchini, R., Depero, L.E., and Bontempi, E. (2013) Metal fractionation in soils and assessment of environmental contamination in the Vallecamonica, Italy. *Environ Sci. Pollut. Res. Int.* 20(7), 5067-5075.
- Campana, O., Blasco, J., and Simpson, S.L. (2013). Demonstrating the appropriateness of developing sediment quality guidelines based on sediment geochemical properties. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7483-7489.
- Campana, O., Simpson, S.L., Spadaro, D.A., and Blasco, J. (2012). Sub-lethal effects of copper to benthic invertebrates explained by sediment properties and dietary exposure. *Environ. Sci. Technol.* 46, 6835-6842.
- Caussy, D., Gochfeld, M., Gurzau, E., Neagu, C., and Ruedel, H. (2003). Lessons from case studies of metals: investigating exposure, bioavailability, and risk. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 56, 45-51.
- Charriau, A., Lesven, L., Gao, Y., Leermakers, M., Baeyens, W., Ouddane, B., and Billon, G. (2011). Trace metal behaviour in riverine sediments: Role of organic matter and sulfides. *Appl. Geochem.* 26, 80-90.
- Chen, C.W., Lim, Y.C., Chen, C.F., Ju, Y.R., and Dong, C.D. (2018). Spatial distribution and ecological risk assessment of sediment metals in a highly industrialized coastal zone southwestern Taiwan. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* s11356-018-2406-3.
- Croteau, M.N., Luoma, S.N., and Stewart, A.R. (2005). Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature. *Limnol. Oceanogr.* 50, 1511-1519.
- Dahms, S., Baker, N.J., and Greenfield, R. (2017). Ecological risk assessment of trace elements in sediment: A case study from Limpopo, South Africa. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 135, 106-114.
- Du Laing, G., Rinklebe, J., Vandecasteele, B., Meers, E., and Tack, F.M. (2009). Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Sci. Total Environ.* 407, 3972-3985.
- Duan, Q., Lee, J., Liu, Y., Chen, H., and Hu, H. (2016). Distribution of heavy metal



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

- pollution in surface soil samples in China: A graphical review. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 97, 303-309.
- EC and MEN-VIQ (1992). Interim criteria for quality assessment of St. Lawrence River sediment. Environment Canada, Ottawa.
- Gall, J.E., Boyd, R.S., and Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: A review. *Environ. Monit. Assess.* 187, 201.
- Gaur, V.K., Gupta, S.K., Pandey, S.D., Gopal, K., and Misra, V. (2005). Distribution of heavy metals in sediment and water of river Gomti. *Environ. Monit. Assess.* 102, 419-433.
- Griscom, S.B., and Fisher, N.S. (2004). Bioavailability of sediment-bound metals to marine bivalve molluscs: An overview. *Estuaries.* 27, 826-838.
- Guan, J., Wang, J., Pan, H., Yang, C., Qu, J., Lu, N., and Yuan, X. (2018) Heavy metals in Yinma River sediment in a major Phaeozems zone, Northeast China: Distribution, chemical fraction, contamination assessment and source apportionment. *Sci. Rep.* 8(1), 12231.
- Håkanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Res.* 14, 975-1001.
- Hill, N.A., Simpson, S.L., and Johnston, E.L. (2013). Beyond the bed: Effects of metal contamination on recruitment to bedded sediments and overlying substrata. *Environ. Pollut.* 173, 182-191.
- Jarup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.* 68, 167-182.
- Jolliffe, I.T., and Cadima, J. (2016) Principal component analysis: a review and recent developments. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 374 (2065), 20150202.
- Kaiser, H.F. (1960) The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol. Measure.* 20, 141-151.
- Karbassi, A.R., Monavari, S.M., Bidhendi, G.R.N., Nouri, J., and Nematpour, K. (2008). Metal pollution assessment of sediment and water in the Shur River. *Environ. Monit. Assess.* 147, 107-116.
- Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., and Guo, W. (2017). Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. *Chemosphere* 175, 473-481.



- Kemble, N.E., Brumbaugh, W.G., Brunson, E.L., Dwyer, F.J., Ingersoll, C.G., Monda, D.P., and Woodward, D.F. (1994). Toxicity of metal-contaminated sediments from the upper Clark-Fork River, Montana, to aquatic invertebrates and fish in laboratory exposures. *Environ. Toxicol. Chem.* 13, 1985-1997.
- Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., Wei, L., and Wang, T. (2013). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food Chem. Toxicol.* 58, 449-458.
- King, C.K., Gale, S.A., and Stauber, J.L. (2006). Acute toxicity and bioaccumulation of aqueous and sediment-bound metals in the estuarine amphipod *Melita plumulosa*. *Environ. Toxicol.* 21, 489-504.
- Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gasiorek, M., and Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination-A review. *Environ. Geochem. Health* 40, 2395-2420
- Kukrer, S., Seker, S., Abaci, Z. T., and Kutlu, B. (2014). Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of northern littoral zone of Lake Cildir, Ardahan, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 186, 3847-3857.
- Li, H., Qian, X., and Wang, Q. (2013). Heavy metals in atmospheric particulate matter: a comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation. *Environ. Sci. Technol.* 47, 13210-13211.
- Li, P., Qian, H., Howard, K.W., Wu, J., and Lyu, X. (2014). Anthropogenic pollution and variability of manganese in alluvial sediments of the Yellow River, Ningxia, northwest China. *J. Environ. Monit.* 186, 1385-1398.
- Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., Gao, B., and He, X. (2012). Integrated assessment of heavy metal contamination in sediments from a coastal industrial basin, NE China. *PLoS One* 7, e39690.
- Long, E.R., Morgan, L.G. (1991). The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA, 175 pp 1 appendices.
- Loska, K., and Wiechuła, D. (2003) Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere* 51(8), 723-733.



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

- Ma, X., Zuo, H., Tian, M., Zhang, L., Meng, J., Zhou, X., Min, N., Chang, X., and Liu, Y. (2016). Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques. *Chemosphere* 144, 264-272.
- MacDonald, D.D., Carr, R.S., Calder, F.D., Long, E.R., and Ingersoll, C.G. (1996). Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology* 5, 253-278.
- MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., and Berger, T.A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39:20-31.
- Manzoor, R., Zhang, T., Zhang, X., Wang, M., Pan, J.F., Wang, Z., and Zhang, B. (2018). Single and combined metal contamination in coastal environments in China: current status and potential ecological risk evaluation. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 25, 1044-1054.
- Marx, S.K., Rashid, S., and Stromsoe, N. (2016). Global-scale patterns in anthropogenic Pb contamination reconstructed from natural archives. *Environ. Pollut.* 213, 283-298.
- Mohan, D., and Pittman, C.U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *J. Hazard. Mater.* 142, 1-53.
- Mohiuddin, K.M., Otomo, K., Ogawa, Y., and Shikazono, N. (2012). Seasonal and spatial distribution of trace elements in the water and sediments of the Tsurumi river in Japan. *Environ. Monit. Assess.* 184, 265-279.
- Morrison, D. (1967) *Multivariate statistical methods*. McGraw-Hill, New York.
- Mukaka, M.M. (2012). Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med. J.* 24, 69-71.
- Naimo, T.J. (1995). A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels. *Ecotoxicology* 4, 341-362.
- Najamuddin, Prartono, T., Sanusi, H.S., Nurjaya, I.W. (2016). Seasonal distribution and geochemical fractionation of heavy metals from surface sediment in a tropical estuary of Jeneberang River, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 111(1-2), 456-462.
- O'Neal, S.L., and Zheng, W. (2015) Manganese toxicity upon overexposure: A decade in review. *Curr. Environ. Health. Rep.* 2(3), 315-328.



- Pederson, F., Bjornestad, E., Andersen, H.V., Kjolholt, J., and Poll, C. (1998). Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests. *Water Sci. and Technol.* 37, 233-240.
- Perin, G., Craboledda, L., Lucchese, L., and Orio, A.A. (1985). Heavy metal speciation in the sediments of Northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination. *Heavy Met. Environ.* 2, 454-456.
- Persaud, D., Jaagumagi, R., Hayton, A. (1993). Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario. Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, 27 pp
- Raju, K., Vijayaraghavan, K., Seshachalam, S., and Muthumanickam, J. (2011). Impact of anthropogenic input on physicochemical parameters and trace metals in marine surface sediments of Bay of Bengal off Chennai, India. *Environ. Monit. Assess.* 177, 95-114.
- Rainbow, P.S., Poirier, L., Smith, B.D., Brix, K.V., and Luoma, S.N. (2006). Trophic transfer of trace metals from the polychaete worm *Nereis diversicolor* to the polychaete *N. virens* and the decapod crustacean *Palaemonetes varians*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 321, 167-181.
- Ranjbar Jafarabadi, A., Riyahi Bakhtiyari, A., Shadmehri Toosi, A., and Jadot, C. (2017). Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran. *Chemosphere* 185, 1090-1111.
- Rudnick, R.L., and Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Geochem.* 3, 1-64.
- Saeedi, M., Li, L.Y., Karbassi, A.R., and Zanjani, A.J., (2013). Sorbed metals fractionation and risk assessment of release in river sediment and particulate matter. *Environ. Monit. Assess.* 185, 1737-1754.
- Smith, S.L., MacDonald, D.D., Keenleyside, K.A., Ingersoll, C.G., Field, J. (1996). A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *J. Great Lakes Res.* 22:624-638
- Singh, K.P., Mohan, D., Singh, V.K., and Malik, A. (2005). Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments - A tributary of the Ganges, India. *J. Hydrol.* 312 (1-4), 14-27.



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

- Soares, E.V., and Soares, H.M.V.M. (2013). Cleanup of industrial effluents containing heavy metals: A new opportunity of valorising the biomass produced by brewing industry. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97, 6667-6675.
- Suresh, G., Ramasamy, V., Meenakshisundaram, V., Venkatachalapathy, R., and Ponnusamy, V. (2011). Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Appl. Radiat. Isot.* 69(10), 1466-1474.
- Suvarapu, L.N., and Baek, S.O. (2017). Determination of heavy metals in the ambient atmosphere. *Toxicol. Ind. Health* 33, 79-96.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals. *Anal. Chem.* 51(7), 844-851.
- Tessier, A., Fortin, D., Belzile, N., DeVitre, R.R., and Leppard, G.G. (1996). Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurements. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 387-404.
- Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C., and Jeffrey, D. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgol. Meeresunters.* 33, 566-575.
- U.S. Environmental Protection Agency (1998). Guidelines for ecological risk assessment, EPA/630/R95/002F. Risk assessment forum. US. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1992). Framework for ecological risk assessment, EPA/630/R92/001. Risk assessment forum. US. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1990). Reducing risk: setting priorities and strategies for environmental protection, report of the science advisory board relative risk reduction strategies committee, SAB-EC-90-021. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996a). Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Hyaella azteca* and the midge *Chironomus riparius*. EPA 905-R96-008, Great Lakes National Program Office, Region V, Chicago, IL



- U.S. Environmental Protection Agency (1997a). The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States. Volume 1: National sediment quality survey. EPA 823-R-97-006, Office of Science and Technology, Washington, DC
- Vaananen, K., Leppanen, M.T., Chen, X., and Akkanen, J. (2018). Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: From science to environmental management. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 147, 430-446.
- Velma, V., Vutukuru, S.S., and Tchounwou, P.B. (2009). Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwater fish: A critical review. *Rev. Environ. Health* 24(2), 129-145.
- von der Heyden, B.P., and Roychoudhury, A.N. (2015). Application, chemical interaction and fate of iron minerals in polluted sediment and soils. *Curr. Pollut. Rep.* 1, 265-279.
- von der Ohe, P.C., and de Zwart, D. (2013). Toxic Units (TU) Indicators. pp. 1161-1170. *In: Férard, J.F., and Blaise, C. (eds) Encyclopedia of Aquatic Ecotoxicology.* Dordrecht: Springer, Netherlands.
- Wang, Y., H. J.W., Xiong K.N., Huang, X.F., and Duan S.M. (2012). Distribution of heavy metals in core sediments from Baihua lake. *Proced. Environ. Sci.* 16(4), 51-58.
- Weissmannova, H.D., and Pavlovsky, J. (2017). Indices of soil contamination by heavy metals - Methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environ. Monit. Assess.* 189, 616.
- WHO (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. (World Health Organization).
- Williams, C.J., Aderhold, D., and Edyvean, R.G.J. (1998). Comparison between biosorbents for the removal of metal ions from aqueous solutions. *Water Res.* 32, 216-224.
- Wilson, R., and Crouch, E.A.C. (1982). *Risk/Benefit Analysis*. Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA.
- Woodward, D.F., Brumbaugh, W.G., Delonay, A.J., Little, E.E., and Smith, C.E. (1994). Effects on rainbow trout fry of a metals-contaminated diet of benthic invertebrates from the Clark-Fork River, Montana. *Trans. Am. Fish. Soc.* 123, 51-62.



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

- Woodward, D.F., Farag, A.M., Bergman, H.L., Delonay, A.J., Little, E.E., Smith, C.E., and Barrows, F.T. (1995). Metals-contaminated benthic invertebrates in the Clark-Fork River, Montana - Effects on age-0 brown trout and rainbow trout. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52, 1994-2004.
- Wu, Y., Liu, J., Zhai, J., Cong, L., Wang, Y., Ma, W., Zhang, Z., and Li, C. (2018). Comparison of dry and wet deposition of particulate matter in near-surface waters during summer. *PLoS One* 13, e0199241.
- Wuana, R.A., and Okieimen, F.E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecol.* 2011, 402647.
- Wunderlin, D.A. (2018). *The Suquia River Basin (Córdoba, Argentina): An integrated study on its hydrology, pollution, effects on native biota and models to evaluate changes in water quality*. Springer International Publishing.
- Yi, Y., Yang, Z., and Zhang, S. (2011). Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environ. Pollut.* 159, 2575-2585.
- Yu, G.B., Liu, Y., Yu, S., Wu, S.C., Leung, A.O.W., Luo, X.S., Xu, B., Li, H.N., and Wong, M.H. (2011). Inconsistency and comprehensiveness of risk assessments for heavy metals in urban surface sediments. *Chemosphere* 85 (6), 1080-1087.
- Zhang, C., Yu, Z.G., Zeng, G.M., Jiang, M., Yang, Z.Z., Cui, F., Zhu, M.Y., Shen, L.Q., and Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environ. Int.* 73, 270-281.
- Zhang, L., Ye, X., Feng, H., Jing, Y., Ouyang, T., Yu, X., Liang, R., Gao, C., and Chen, W. (2007). Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 974-98



**行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案**

108 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：108 年 10 月 30 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 其他		
申請機構系所	國立臺灣大學/生物環境系統工程學系	專案主持人	廖秀娟 教授
專案名稱	生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出 發表名稱)
A 學術 產出 及 活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0				
		(2)研討會論文	0		1	100%	蔡鎮優、廖秀娟 (2019, July) 老街溪底 泥重金屬污染生態風 險評估。2019 年第一 屆生態毒理研討會。 桃園。
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1				
		(2)研討會論文	0				
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0				
		(2)研究報告	1		1	100%	
	4.專著(本數)		0				
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0				
		(2)成果發表會	0				
		(3)論壇	0				
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	0					
	(2)技術平台	0					
B 人 才 培	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1	200%	
		(2)博士	1	1	0	100%	
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0				
		(2)跨機構團隊	0				



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出 發表名稱)
項目							
育		(3)形成研究中心	0				
		(4)形成實驗室	0				
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)	0				

(二) 產業面

目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
項目								
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	0				
			新型/設計	0				
			合計	0				
		申 請 中	發明	0				
			新型/設計	0				
			合計	0				
B 研發技術移 轉	2.先期技術 成果移轉	件數		0				
		授權金(仟元)		0				
		衍生利益金(仟元)		0				
	3.技術移轉 (專利)	件數		0				
		授權金(仟元)		0				
		衍生利益金 (仟元)		0				
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數		0				
		授權金(仟元)		0				
		衍生利益金(仟元)		0				
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		0				
		(2)品種/系(件數)		0				
C 產學研合 作	6.促成合作 研究	件數		0				
		金額(仟元)		0				
	7.促成投資	件數		0				
		投資金額 (仟元)		0				
	8.促成取得	件數		0				



專案成果績效自評表

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
項目							
	業界科專	業界投資金額 (仟元)	0				
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)		0				



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數	0				
		收入(仟元)	0				
	2.諮詢服務	次數	0				
		收入(仟元)	0				
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0				
		(2)法規	0				
		(3)規範	0				
		(4)標準	0				
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0				
	5.獲得獎項(件數)		0				
	6.提升能源效率(%)		0				
	7.節能減碳效率(%)		0				
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)	0				



三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限）

本專案計畫期末報告依計畫內容，由逆王水微波消化法結果得知，老街溪底泥在枯水期時以 Cu、Ni、Pb、Zn 等重金屬超過底泥品質標準的情況最為嚴重。重金屬濃度高之大部份底泥樣點，於各別污染指數 I_{geo} 、EF、CF、MCD、PLI、PERI、TUs 結果成正比。多變量統計分析中，發現 Cu、Ni、Zn 受控於同一變因；TOC 吸附 Ni 與 Cd；Hg 容易受底泥中的鐵(Fe)、鋁(Al)吸附而造成累積，Pb、Mn 以及 pH 值來自特定的來源。

在學術成就方面，本計畫成果預計將可投稿一篇國外期刊及一篇研究報告，並培育一名碩士及一名博士。臺灣在生態風險評估較缺乏經驗，現階段仍尚未確立生態風險評估指標及參數，需要系統性或整合性的風險評估參數，獲得更完整的資訊以協助生態風險評估系統運作。本研究計畫初步以老街溪底泥重金屬污染為例，未來研究方法可以應用於其他主要河川底泥污染物的生態風險評估，並建置符合臺灣需求之生態風險評估參數及流程，期許底泥生態風險評估作業能更加完善，為主管機關提供決策之依據。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(九) 附件(一)

底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法

第一條 本辦法依土壤及地下水污染整治法(以下簡稱本法)第六條第六項規定訂定之。

第二條 本辦法專用名詞定義如下：一、毫克／公斤：指每一公斤底泥中（乾基）所含污染物之毫克數。二、奈克-毒性當量／公斤：指每一公斤底泥中（乾基）所含之污染物奈克-毒性當量（TEQ）數。三、上限值：指底泥品質分類時，底泥品質指標項目之高濃度限值。四、下限值：指底泥品質分類時，底泥品質指標項目之低濃度限值。

第三條 目的事業主管機關或各級主管機關依本法辦理各項底泥品質之監測、檢測或調查查證等工作時，應與底泥品質指標進行比對，並依第五條及第六條規定辦理。

第四條 底泥品質指標項目及其上、下限值規定如下：

底泥品質指標 項目	上限值	上限值
重金屬		
砷 (As)	三三・〇 毫克／公斤	一一・〇 毫克／公斤
鎘 (Cd)	二・四九 毫克／公斤	〇・六五 毫克／公斤
鉻 (Cr)	二三三 毫克／公斤	七六・〇 毫克／公斤
銅 (Cu)	一五七 毫克／公斤	五〇・〇 毫克／公斤
汞 (Hg)	〇・八七 毫克／公斤	〇・二三 毫克／公斤
鎳 (Ni)	八〇・〇 毫克／公斤	二四・〇 毫克／公斤
鉛 (Pb)	一六一 毫克／公斤	四八・〇 毫克／公斤
鋅 (Zn)	三八四 毫克／公斤	一四〇 毫克／公斤



* 圖表說明：

- 一、說明底泥品質指標項目及其上、下限值及本辦法中戴奧辛污染物之指標值計算基準。
- 二、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。而針對戴奧辛等高累積性污染物則由魚體對底泥累積關係推估人體食用致癌風險之基準值，分別以萬分之一及十萬分之一訂出上、下限值。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(九) 附件(二)

行政院環境保護署

「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

■申請計畫書 □期中報告

□期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	108 年度	計畫類型	■ 研究型 □ 模場型
計畫類別	□ 整治 □ 調查 ■ 其他 (風險評估參數建置)		主持人：廖秀娟 教授
計畫名稱	生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 規劃於 1 月及 5 月枯豐水期採樣底泥，建議豐水期採樣延後於 6-7 月再採樣。		謝謝委員的建議。已調整「研究方法及步驟」。	
2. 建議將流域上中下游之污染源工廠分佈進行瞭解。		謝謝委員的建議。本計畫將持續蒐集相關資料，並補充於後續報告。	
委員二			
1. 請補充說明污染指數(pollution indices)的訂定方式與具體內容。		謝謝委員的建議。污染指數如地質累積指數、富集因子、污染因子、校正後整體污染程度以及污染物負擔指數之方式與具體內容已說明於「研究方法及步驟」(3.1 污染程度指數)中。	
2. 建議補充說明本計畫所提之相關指數(例如地質累積指數、富集因子、污染因子...)對於老街溪底泥的適用性。		謝謝委員的建議。本計畫所提之相關指數是以地殼背景值作為校正參考，且國內外研究亦成功應用相關指數於不同河川底泥之評估(Ke <i>et al.</i> , 2017; Ranjbar Jafarabadi <i>et al.</i> , 2017; Chen <i>et al.</i> , 2018)，進而推估出底泥重金屬人為污染程度。綜上所述，本計畫所提之污染程度指數應適用於老街溪底泥。	
3. 請補充說明底泥重金屬的生物效應的具體評估方法。		謝謝委員的建議。底泥重金屬的生物效應的具體內容已說明於「研究方法及步驟」中(3.2 生態風險指數)。	



附件(三)

4. 請補充說明底泥品質指標(SQG)。	謝謝委員的建議。SQGs 是基於重金屬在不同模式生物的毒理資料，經不同統計方式如效應區十分位數(effects range low, ERL)與中位數(effects range median, ERM) (Long <i>et al.</i> , 1991)或毒理效應閾值(threshold effects level, TEL)與機率毒性濃度(probable effects level, PEL)等求得。進而探討底泥污染是否具有潛在生態風險以及粗略界定不同重金屬在所測區域是否有超標。
委員三	
1. 以老街溪重金屬分析與 SQGs 是否有代表此河段生態風險宜作各區域論過後再綜評。	謝謝委員的建議。本計畫將於後續報告提出綜合評估。
2. 取某一時段底泥是否具代表性，建議後續成果宜作再強化補述。	謝謝委員的建議。將於後續報告強化補述。
委員四	
1. 主持人的學術研究能力與土水污染技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本計畫。主持人近五年研究與土水污染技術發展績效亦佳。	謝謝委員的意見。
2. 本計畫執行團隊的學術研究能力與土水污染技術發展能力佳，其研發能力足以勝任本研究計畫。本計畫執行團隊近五年執行與土水污染相關計畫的執行績效佳。	謝謝委員的意見。
3. 本計畫的執行對國內未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動有其貢獻，但調查結果在實務上的意義應進一步說明解讀，採樣分析並不是模場試驗專案的主要工作。本專案的屬性為” <u>補助研究與模場試驗專案</u> ”，建議具體評估實務應用性與驗證。	謝謝委員的建議。本計畫屬研究性試驗，因現行資料不足而無法獲得相關污染指數，因此需採樣分析。臺灣在生態風險評估較沒有完善的評估參數，因此本計畫希望為臺灣本土建構出更完整的生態風險評估指標及參數，進而做為相關管理單位評估各大河川生態風險之範本，以減少成本及提高效率。



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

4. 依申請計畫書內所提出的成果績效自評表，可推估本專案所預估的執行成果對國內土水污染的技術研發有其貢獻。	謝謝委員的意見。
5. 本計畫書撰寫具體，計畫書中對研究方法的說明具可行性。但計畫執行成果對未來土水污染(底泥)的實務上的解讀與對潛在污染原判斷評估的應用性仍待評估。主持人之前所執行土污基金計畫的成果能否應用在本計畫？	謝謝委員的建議。本計畫非延續性計畫，因此之前所執行土污基金計畫的成果無法應用於本計畫。本計畫執行成果於相關實務應用性將於後續報告進行評估。
6. 本計畫書中對相關文獻蒐集尚完整。計畫主持人對國內外本研究領域現況了解。	謝謝委員的意見。
7. 本計畫書所規畫之執行期限合理，本計畫書對預期成果已有適當的說明。	謝謝委員的意見。
8. 本計畫書已將原初審意見加以說明(或修正)。	謝謝委員的意見。
本署審查意見	計畫單位回覆



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(九) 附件 (三)

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	108 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 其它	主持人：廖秀娟 NO：B5	
計畫名稱	生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 研究計畫的執行現況、流程及方法已具體說明(Sec (四))。		謝謝委員的意見。	
2. 計畫後續執行工作項目及內容已說明(P. 65)。		謝謝委員的意見。	
3. 計畫執行進度與預定進度符合，執行進度並無延遲。		謝謝委員的意見。	
4. 依期中報告所說明的成果，研究內容與計畫目的相符。		謝謝委員的意見。	
5. 本次報告屬於期中報告，完整的研究成果尚待於期末報告中說明。建議期末報告能根據研究內容提出具體的討論與建議，並建議說明研究成果與實務應用的關係(例如：底泥中 HM 以銅與鋅為主，表四顯示有機質亦高，就有效性與銅&鋅的特性而言，銅與鋅所致的潛在風險是否需將有機質高的因子列入評估?)		謝謝委員的建議，期末報告將會說明研究成果與實務應用的關係。	
6. 依期中報告的成果所示，本計畫目前的研究成果符合預期。		謝謝委員的意見。	
7. 有助(或學生)參與本計畫的執行，符合土水污染人才培育的預期。		謝謝委員的意見。	
8. 土水污染為國內目前所面臨的議題，本計畫的執行對污染整治技術發展，環境整治政策與社會經濟發展有所助		謝謝委員的意見。	



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

益。	
委員二	
1. 建議針對所擬探討之風險評估方式與既有之方式交互討論明確說明其差異。	謝謝委員的建議。期末報告將會針對所擬探討之風險評估方式與既有之方式交互討論明確說明其差異。
2. 何謂臺灣鮮少由生物地球化學循環角度切入評估生態風險。建議於文獻回顧中另闢章節說明此點，並就結果加以討論有無考量此點之優缺點。	謝謝委員的建議。期末報告將針對臺灣鮮少由生物地球化學循環角度切入評估生態風險做進一步討論。
委員三	
1. 季節對底泥特性之影響為何？其中採樣時期均為 1 月，是否具有代表性？請予以評估說明。	謝謝委員的建議。季節對底泥特性之影響是本計畫所要探討的內容之一，依據計畫預定進度，期中報告僅包含 1 月採樣結果，需待 6 月採樣底泥處理完畢才能探討季節對底泥特性之影響。
2. 底泥不同重金屬相態之分析濃度，及其變化趨勢應有討論與說明。	謝謝委員的建議。期末報告將針對底泥不同重金屬相態之分析濃度，及其變化趨勢做討論與說明。
3. 不同重金屬相態濃度，均超過底泥品質標準，而殘留相濃度符合品質標準，如何就法規面進行判斷？	謝謝委員的建議。從法規上來看，老街溪地殼原有重金屬濃度符合品質標準，但因人為污染造成其濃度超標，可利用多變量統計推斷出的可能污染源，對其進行調節及整治，以改善重金屬污染的情形。
4. 生態風險指數如何綜合底泥品質指標、潛在生態風險指數及毒性當量，進行合理之評估？請予以釐清與說明。	謝謝委員的建議。期末報告將針對生態風險指數如何綜合底泥品質指標、潛在生態風險指數及毒性當量，進行合理之評估進行說明。
委員四	
1. 本研究擬以老街溪流域底泥為研究對象，分析重金屬濃度，及評估其污染風險獻即可能來源。研究中採得 11 處位置樣底泥品，分析 11 種重金屬濃度，包括總濃度、可交換相、可還原	謝謝委員的意見。



附件(三)

相、可氧化相、及殘留相等。實驗進度符合規劃。	
2. 在生態風險部分，目前僅用底泥品質指標(SQGs)做為比較基礎，建議進一步說明其背景，例如如何得到、包含哪些指標生物在內、與本土物種之關聯性等？	謝謝委員的建議。期末報告將針對底泥品質指標(SQGs)之背景做進一步說明。
3. 計畫中擬以統計方法，分析污染來源；惟目前分析結果，似乎尚未與可能污染來源串聯，建議後續可以進一步解析與討論。	謝謝委員的建議。期末報告將針對統計方法及分析污染來源做進一步解析與討論。
4. 計畫中使用多種生態風險指標，建議能討論各指標間之差異性、以及在目標場址之適用性。	謝謝委員的建議。期末報告將會討論各指標間之差異性、以及在目標場址之適用性。
委員五	
1. 整體而言，期中報告進度符合預期且報告內容成果豐碩。	謝謝委員的意見。
2. 有關多變量分析與生態風險評估之關係為何？	謝謝委員的建議。多變量分析主要分析各個重金屬之間的相關性，從而推算出可能污染源。處於高生態風險評估的污染區則可針對污染源進行調節整治，改善生態環境。
委員六	
1. 符合原訂執行進度。	謝謝委員的意見。
2. 建議表五至表十增列底泥品質指標上限值，以利報告審視。	謝謝委員的建議。期末報告將針對表五至表十增列底泥品質指標上限值。
3. 建議增列原申請計畫書審查意見回覆對照表。	謝謝委員的建議。期末報告將增列原申請計畫書審查意見回覆對照表。
專案主持人：_____ (簽名及蓋章)	



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

(九) 附件 (四)

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	108 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 整治 別調查 ☒ 其它	主持人：廖秀娟 NO：B5	
計畫名稱	生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 本期末報告對計畫執行現況、流程及方法說明具體。		謝謝委員的意見。	
2. 計畫後續執行工作項目及內容已於 p.98 說明。		謝謝委員的意見。	
3. 計畫執行進度與預定進度查核表大致相符。		謝謝委員的意見。	
4. 本期末報告並未說明執行進度是否落後，也未說明計畫執行期間的困難點。		謝謝委員的建議。本期末報告符合預期進度。計畫執行期間遇到之困難點已在「結果與討論」(1. 現地底泥採樣資料)中說明，如在枯水期遇到 4 個樣點的流速較快，因此無法順利採集底泥樣本及豐水期採樣工作較枯水期困難，部分樣點因水流較快速而無法順利採集底泥樣本，所以於樣點附近另尋底泥樣本。(P.26)	
5. 本期末報告所提出的研究內容與計畫目的相符。		謝謝委員的意見。	
6. 根據研究內容所提出之討論與建議的可行性與應用性的說明，建議應更具體，以期具參考意義(例如：豐枯水期的污染主要成分類似，污染排出並無季節性上的顯著變化)(生物可及性的部分所代表的意義的討論，極具參考價值)(生態風險評估的部分則未提供具體的討論或建議…等)。		謝謝委員的建議。已調整「(六) 結論與建議」。(P.100-101)	
7. 本計畫執行有研究人員(學生或助理)參與。		謝謝委員的意見。	
8. 本計畫的學術產出為：本期末報告與研討會論文。		謝謝委員的意見。	



附件(三)

9. 本計畫執行期間有研究人員(學生或助理)參與，人才培育符合預期。	謝謝委員的意見。
10. 本期末報告並未對研究成果提出專利申請的說明，也未說明技術轉移的情況。	謝謝委員的建議。本計畫為研究型計畫，並未開發新的技術以及公式，主要目的是為臺灣建置一套完善的生態風險評估流程，讓作業系統更加完善。
11. 本計畫的執行與研究成果對土水污染整治的政策，以及對社會經濟發展的效益，不易由本報告中評估。	謝謝委員的意見。老街溪因流經市區、工業區及農田等，受到多種污染源的影響，導致底泥中多種重金屬濃度超過容許值。由本計畫得知，老街溪流域底泥樣點多呈中程度以上污染程度，樣點 C12 可能有人為活動而造成其重金屬累積上升，建議加強此樣點工業排放水重金屬監測。因此本計畫成果可作為環保署未來擬定土水污染整治相關政策之參考。
委員二	
1. 整體計畫結案報告撰寫優良。	謝謝委員的意見。
2. 結論與建議宜分開陳述，請明確於結論中說明此計畫之成果與實際污染狀況實務應用關聯或提出規劃建議。	謝謝委員的建議。已調整「(六) 結論與建議」。(P.100-101)
委員三	
1. 本研究針對老街溪底泥分析多項重金屬之相態分布，研究數據甚為豐碩，然不同重金屬之相態分布特性變化之因素為何？宜有深入之探討。此外重金屬相態變化除受到環境因子之影響外，與存在於底泥時間之長短(或累積)是否有關？若有進一步探討與評估，將有助於底泥重金屬管理策略之研擬。	謝謝委員的建議。底泥重金屬的相態分布與其化學特性有關，其中，與人為活動相關之重金屬的鍵結性較弱，因此移動性較高。本計畫主要探討與人類活動相關之重金屬分佈變化，因此未深入比較不同重金屬的化學特性差異所造成之相態分布變化。此外，底泥重金屬在自然環境中不會降解，且重金屬釋出及移動性主要受到環境所影響，因此本計畫未討論存在底泥的時間長短是否影響相態變化。
2. 研究針對底泥中多種重金屬間進行統計分析，結果顯示多種重金屬兩兩間有顯著正相關，請合理推測可能之原因；另底泥 pH 值與重金屬濃度無相關性，亦宜有學理之探討。	謝謝委員的建議。「 結果與討論 – 5.1 皮爾森相關性 」已有相關推測(P.91-92)，如：本研究透過相關性分析，發現無論是枯水期或是豐水期， <u>Cu、Cr、Ni、Zn 與多種重金屬具有相關性</u> ，顯示以上重金屬為多個污染源的 <u>共同污染物</u> 。根據本研究採樣點的土地利用特性，可發現底泥 Cu、Cr、Ni 及 Zn 濃度升高的樣點，包括 B4、B6、B10、C13、D17 及 D21 附近皆有工業活動；綜合這些位點的 EF 與 CF，可推測底泥中 Cu、Cr、Ni、Zn 是



生態風險評估參數建置：以老街溪底泥重金屬污染為例

	老街溪重要的工業污染物。雖然已知 pH 會影響底泥重金屬累積(Ma <i>et al.</i> , 2016)，本研究結果卻未發現 pH 與重金屬濃度之相關性，推測為多種因子共同作用，使 pH 並未能單獨影響重金屬的累積。
3. 污染程度指數之相關計算濃度，係以序列萃取分析結果，亦或是總量濃度(王水消化)?若是序列萃取，則以何種型態為計算依據?請補充說明於報告，以利確認其數據之合理性。	謝謝委員的建議。本計畫在污染程度指數之相關計算濃度是利用逆王水微波消化法所萃取出之重金屬總量濃度。已於「結果與討論－3. 污染程度指數」補充(P. 70、71、72、81、83、87、91、95)。
委員四	
1. 本研究以老街溪流域底泥為研究對象，分析重金屬濃度，應用統計方法，評估其來源及可能來源。研究中分四區、豐枯水季，於 25 處、採了 46 個樣品，搭配兩種前處理方法、分析 11 種重金屬，在樣品中的總濃度、可交換相、可還原相、可氧化相、及殘留相等濃度。並分析其污染程度指數、生態風險指數等，最後並應用統計分析，研判可能污染來源。整體實驗內容多，分析也合理。	謝謝委員的意見。
2. 錳如銅鐵一樣，亦是地下水中常見的天然污染物，且其毒性與研究中的其他重金屬比相對較低，對於錳的管制建議，建議可以再審慎評估。	謝謝委員的建議。錳雖如銅鐵，屬於地下水中的常見天然污染物，然而，銅已有管制標準。此外，本計畫結果顯示錳的生物可獲性高，老街溪流域又有排錳事業，因而建議是否需要訂定管制標準。
3. 建議後續研究，可以試著與可能污染來源連結，例如進行放流水重金屬分析、或是收集工業源排放資料，以進一步釐清污染源，提供管理參考。	謝謝委員的意見。
4. 計畫所建議的重金屬前處理方法、及污染程度評估方法，建議後續計畫可以深入解析，探討各種管制可行性，例如分析成本、管制意義、以與現行方法相較之優缺點等，可引領政策應用。	謝謝委員的意見。
委員五	
1. 整體而言，期末報告進度符合預期且報告內容成果豐碩。	謝謝委員的意見。
2. 有關底泥重金屬濃度是否能針對不同深度與上下游關係進行討論?	謝謝委員的建議。有學者(Adamo <i>et al.</i> , 2005)曾探討不同深度重金屬濃度變化，在深度小於 30 m 的表土，不同深度土壤的重金屬濃



附件(三)

	度相近。重金屬隨著水流從上游移動至下游區，因此樣點若出現重金屬濃度超標，可由其上游地區的重金屬濃度變化，追溯可能的污染源。
3. 底泥重金屬濃度在豐枯水期是否有一定之趨勢？若無請說明原因。	謝謝委員的建議。由本計畫結果得知，大部分重金屬在豐水期濃度較低，推測是豐水期水量稀釋重金屬污染物，減少底泥的污染源濃度。另一方面，豐沛雨量使河川流速增加而造成底泥重金屬移動至下游，因此上游的底泥重金屬濃度較豐水期低。
4. 是否可針對降雨狀況(暴雨沖刷因素)進行討論？	謝謝委員的建議。本計畫於豐水期只採集一次樣本，因此依目前數據，可能無法針對降雨狀況進行討論。