

## 第五章 情境模擬與策略分析

### 5-1 現況模擬分析

本研究針對美濃鎮及湖內鄉作案例模擬，基於相關資料的取得完整性，模擬內容包括地表水質，將針對生化需養量(BOD)、總氮(TN)作探討；農田土壤則針對重金屬污染作討論，分別是鎘(Cd)、銅(Cu)、汞(Hg)、鉛(Pb)、鋅(Zn)；地下水則是針對硝酸鹽氮污染作分析。

#### 5-1-1 水質濃度

##### 5-1-1-1 BOD

##### 1. 農田回歸水 BOD 濃度



圖 5.1 中，「FINAL R.O.W.P 1」與「FINAL R.O.W.P 6」分別代表第一區塊及第六區塊回歸水污染濃度，可以發現因回歸水水量較少，所以其濃度較高，不過在經河川稀釋後，會降低濃度。較上游的農田回歸水水質又比下游好，其原因是大部分人類活動不論居住或工廠設立都在比較下游地方，因此下游污染增加量會增加；但圖 5.2 湖內鄉的回歸水 BOD 濃度卻剛好相反，上游濃度比下游高，主要原因是因為下游的農田回歸水量比上游多了將近七倍，導致上游回歸水 BOD 濃度比較高。

不過將美濃鎮與湖內鄉的回歸水放在一起做比較時(圖 5.3), 很明顯發現美濃鎮農田回歸水質遠好於湖內鄉, 這和最初始引用的灌溉水質有關, 美濃鎮是抽荖濃溪的水來灌溉, 水質較好, 而湖內鄉所用的灌溉水來自二仁溪, 汙染相當嚴重, 造成其農田回歸水 BOD 濃度相差非常大。

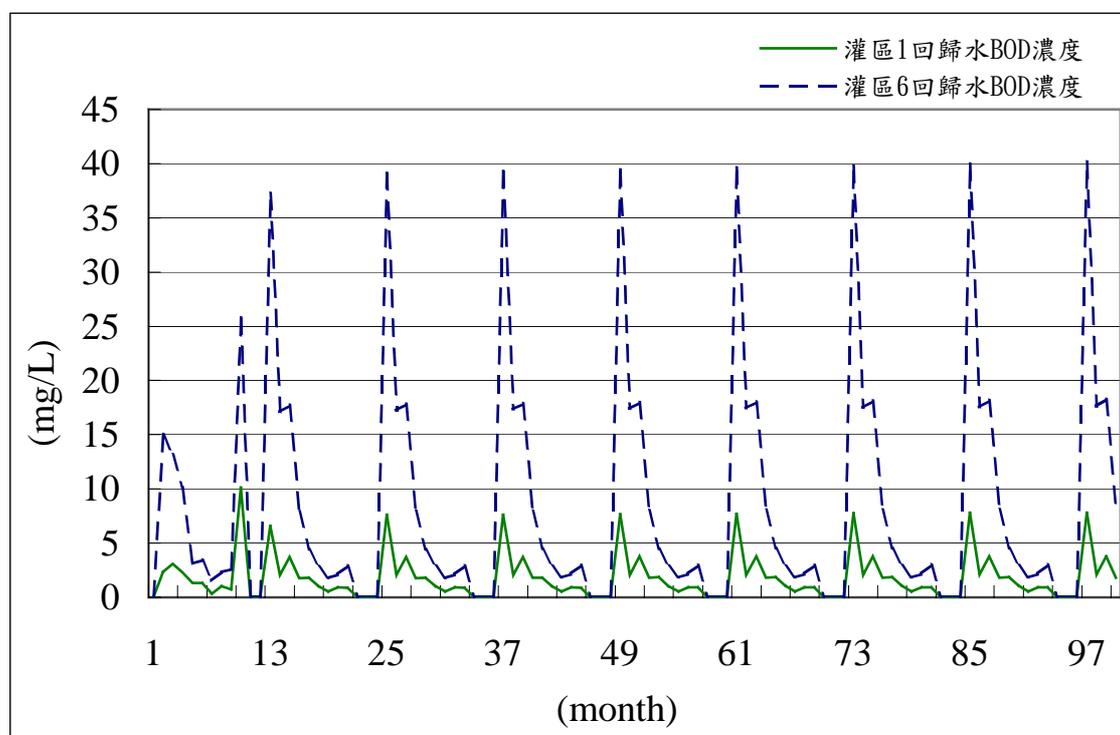


圖 5.1 美濃現況農田回歸水 BOD 濃度

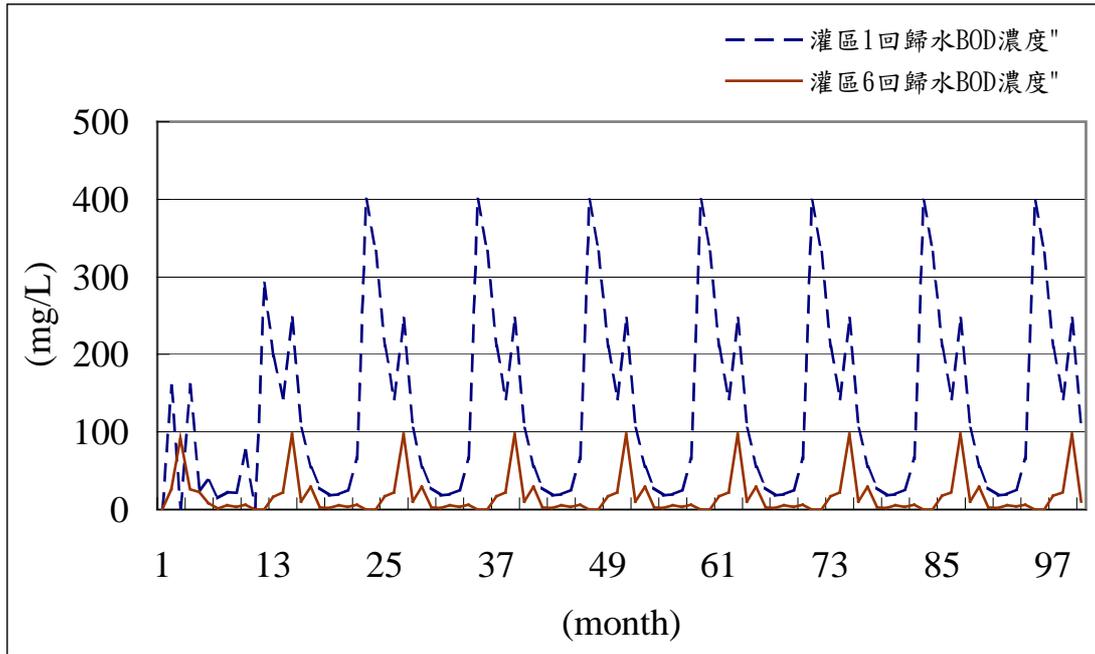


圖 5.2 湖內現況農田回歸水 BOD 濃度

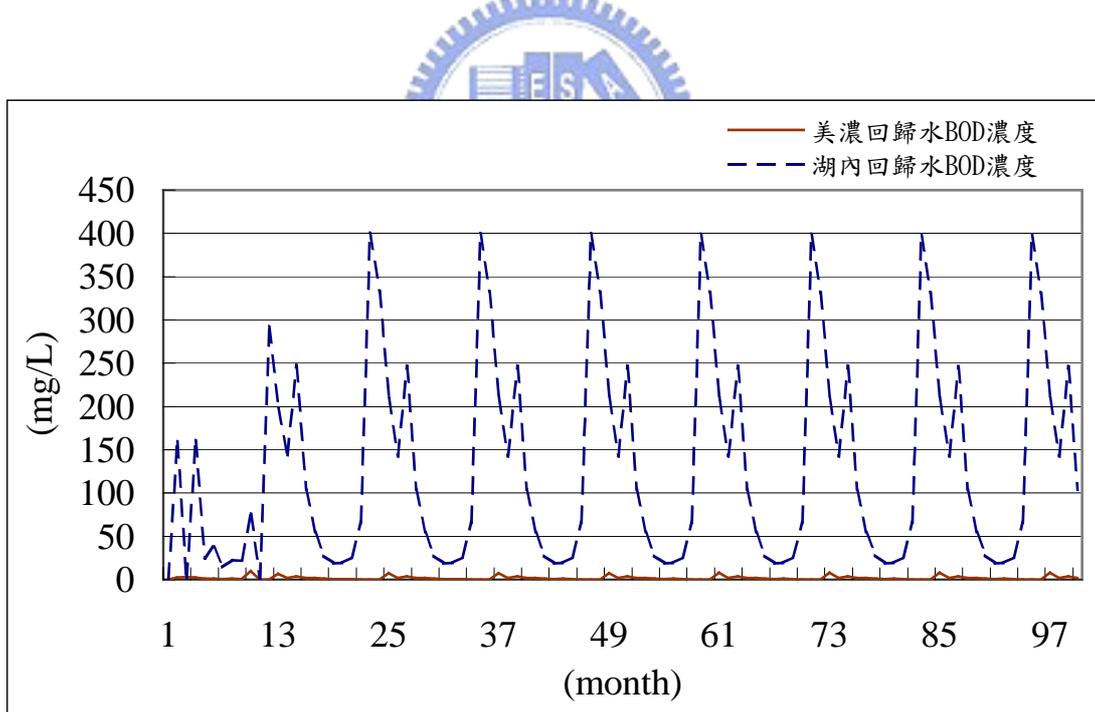


圖 5.3 美濃、湖內農田回歸水 BOD 濃度

## 2.灌溉水 BOD 濃度

本研究對灌溉水定義為最初抽取的灌溉水部分進入第一塊農田，當第一塊農田回歸水和原抽取之灌溉水 BOD 濃度混合成為第二塊農田的灌溉水時，將此時的水為灌溉水。表 5.1 為美濃鎮和湖內鄉的灌溉水質比較表，可以發現兩區域灌溉水質差很多，枯水期是汙染濃度差最多的時候，特別在十二月湖內鄉灌溉水濃度更達到 291.8 mg/L。至於美濃十一、十二月和湖內十一月 BOD 濃度為零是代表這段期間農田並不供水，且也沒有回歸水流到圳路。

表 5.1 美濃、湖內灌溉水 BOD 濃度 單位:mg/L

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
美濃	1.2	2.1	2.2	1.5	2.0	1.0	1.5	1.1	0.5	2.8	0	0
湖內	17.9	99.2	26.9	33.8	14.7	37.4	11.6	5.6	3.5	9.1	0	291.8

## 3.河川 BOD 濃度

農田回歸水最終會流至河川，圖 5.4 中，C1、C7 代表旗山溪上游與下游 BOD 濃度，C2、C6 代表美濃溪上游與下游 BOD 濃度，從圖中可看出旗山溪水質較佳，至於美濃溪因流量小，汙染濃度相對較高。

圖 5.5 中，C1、C2 代表二仁溪上游與下游 BOD 濃度，特別是在枯水期時，兩者 BOD 濃度甚至相差近 100 mg/L，在在都顯示二仁溪

嚴重汙染程度。

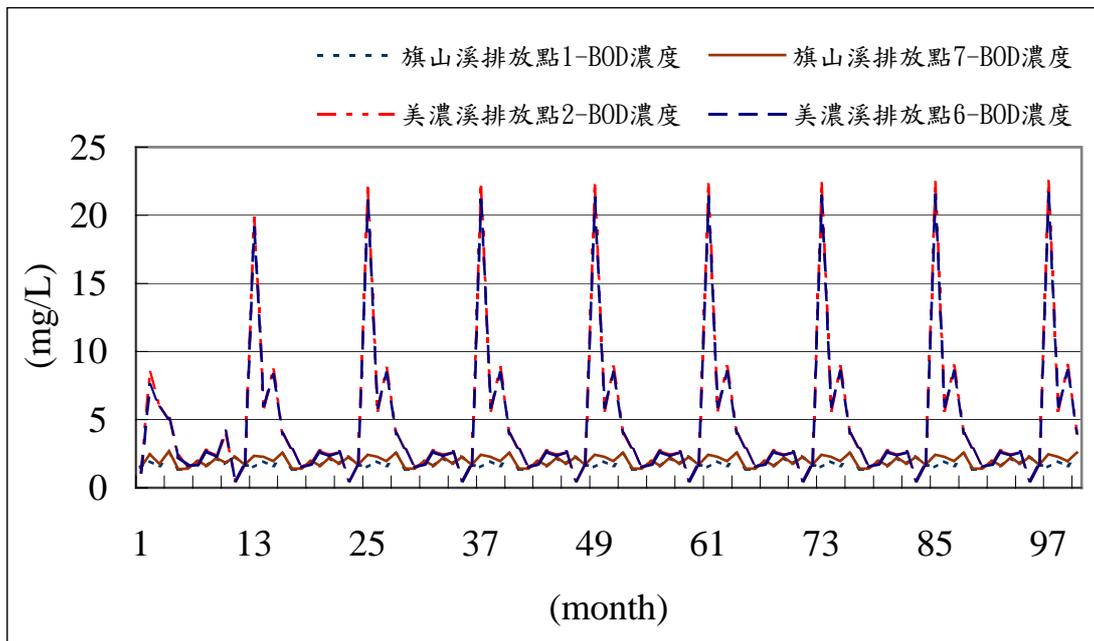


圖 5.4 美濃農田回歸水對河川 BOD 濃度之影響

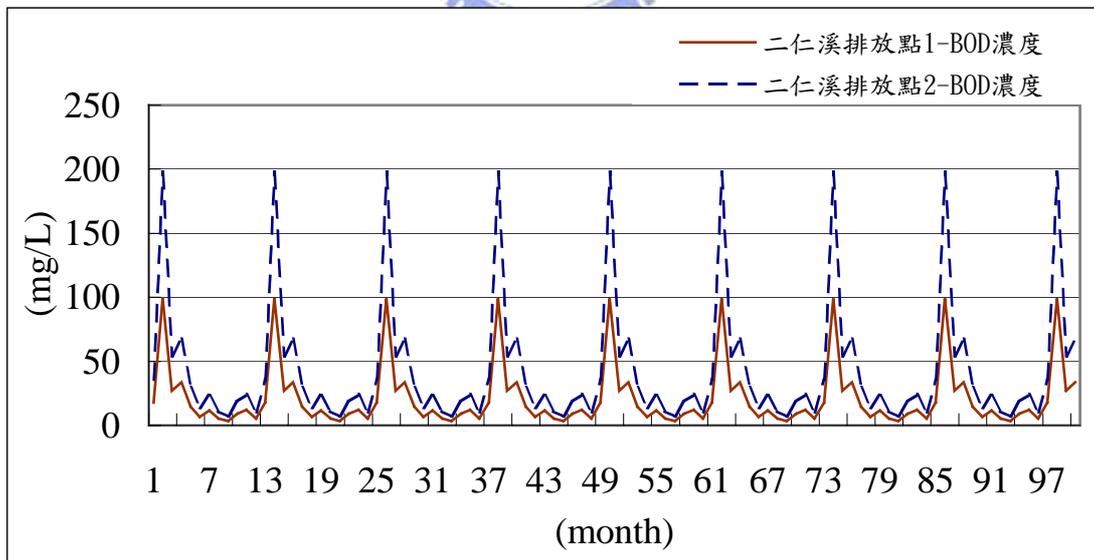


圖 5.5 湖內農田回歸水對二仁溪 BOD 濃度之影響

## 5-1-1-2 總氮

### 1. 農田回歸水總氮濃度

針對美濃跟湖內之回歸水做比較(圖 5.6)，兩區域回歸水總氮濃度的差距主要有兩個原因，一是原先灌溉水的水質汙染湖內鄉就比美濃鎮嚴重，再者是因為湖內鄉內工廠比美濃鎮多，產生之總氮濃度也相對增加。至於美濃鎮有些時候總氮之濃度為零，其原因是在枯水期時農田並沒有回歸水排放回圳路。

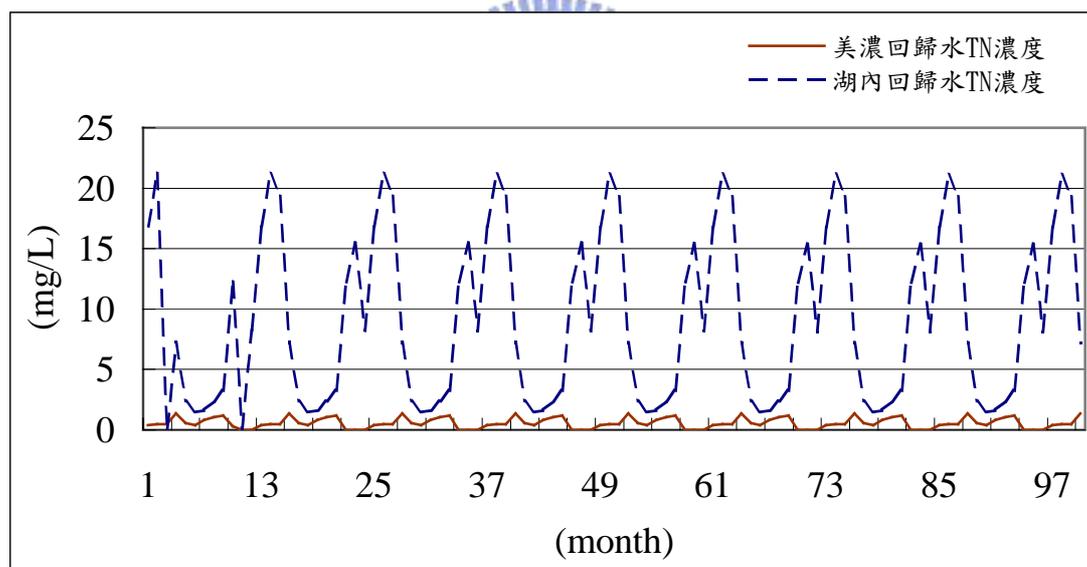


圖 5.6 美濃、湖內農田回歸水總氮濃度

## 2. 灌溉水總氮濃度

台灣灌溉用水水質標準對總氮濃度規定為 3 mg/L，從圖 5.7 中發現美濃鎮的灌溉水總氮濃度都在標準值內，不過二仁溪除了在豐水期六月的總氮濃度低於標準值外，其餘月份皆高於標準值，甚至在枯水期總氮濃度更高達約 22 mg/L，在後續的策略模擬也會針對這問題作模擬分析。

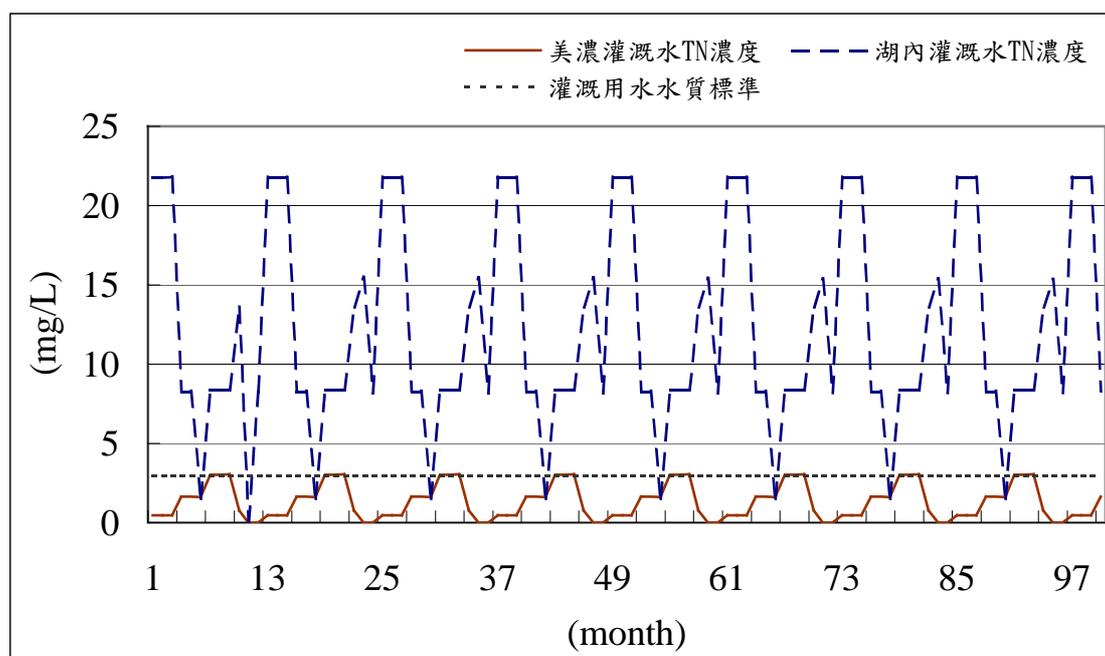


圖 5.7 美濃、湖內灌溉水總氮濃度

### 3. 河川總氮濃度

農田回歸水水質最終和河川原水質混合，圖 5.8 中，C1、C7 分別代表美濃溪之上、下游，C2、C6 則代表旗山溪上、下游，從圖中水質趨勢發現農田或工廠產生之 TN 污染量其實對美濃溪及旗山溪的水質影響並不大，所以河川上下游水質沒什麼變化。

不過圖 5.9 為二仁溪河川 TN 濃度，當上游的 C1 流到下游 C2 時，總氮濃度相差就很多，在豐水期差距約 10 mg/L，枯水期差距更達到將近 25 mg/L，由此可以看出湖內鄉內的農田耕作及工廠廢污水總氮濃度對二仁溪水質影響甚遽。

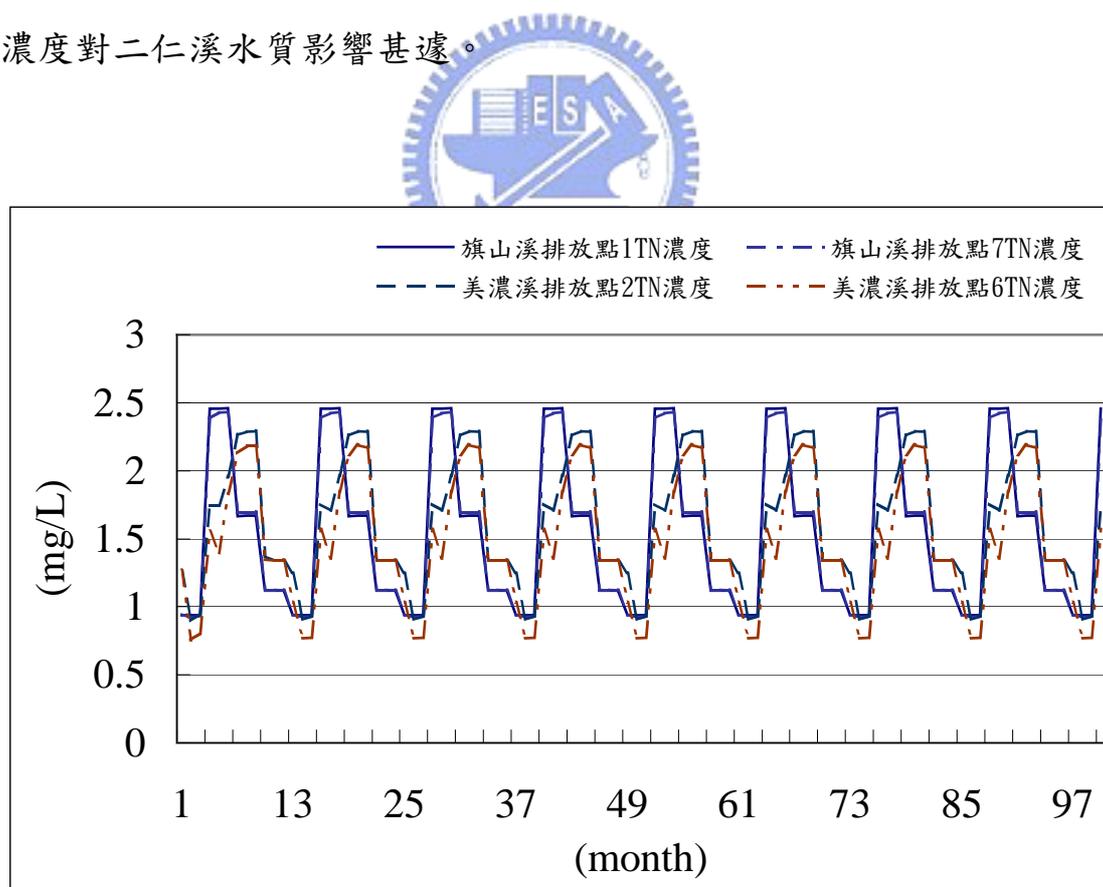


圖 5.8 美濃農田回歸水對河川總氮濃度之影響

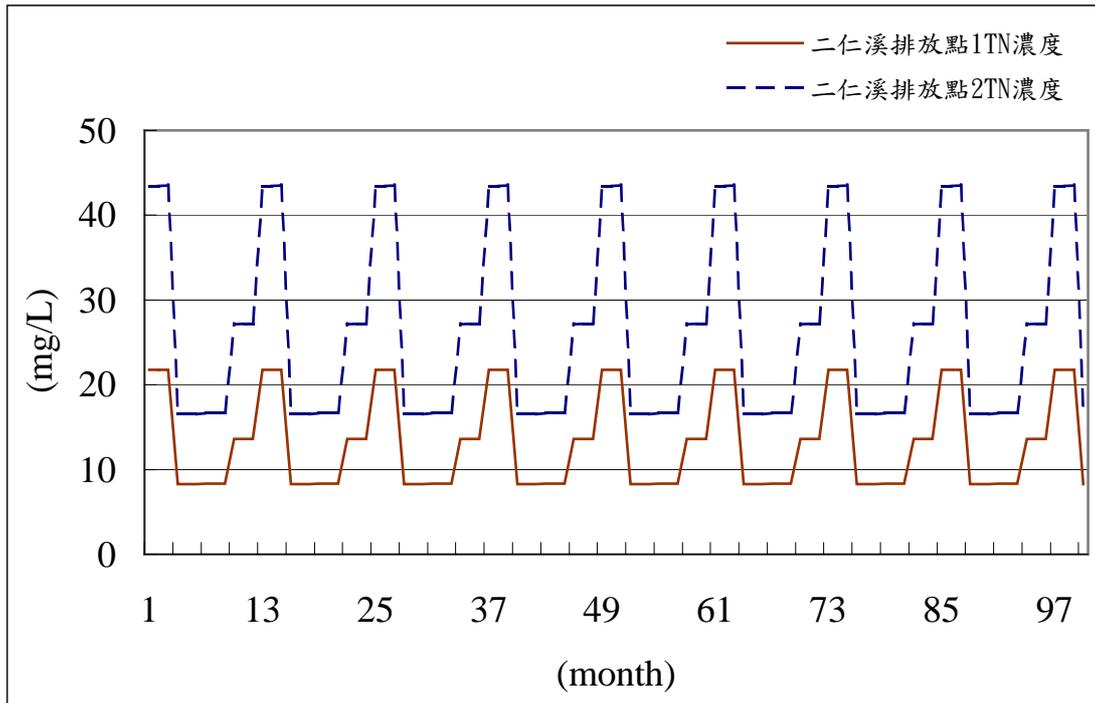


圖 5.9 湖內農田回歸水對二仁溪總氮濃度之影響

#### 4. 地下水硝酸鹽氮重量增加量

農田中氮殘留在土壤中，部分會被細菌分解，部分則繼續入滲至地下水位飽和層氧化形成硝酸鹽氮污染地下水，本研究並不考慮地下水位，因此僅估算地下水污染重量之增加量。

圖 5.10 即為美濃、湖內地下水硝酸鹽氮污染之增加重量，由於湖內鄉內總氮污染量較多，相對入滲到地下水變成硝酸鹽氮的量也會比較多，污染增加速度也比美濃鎮地下水污染快。

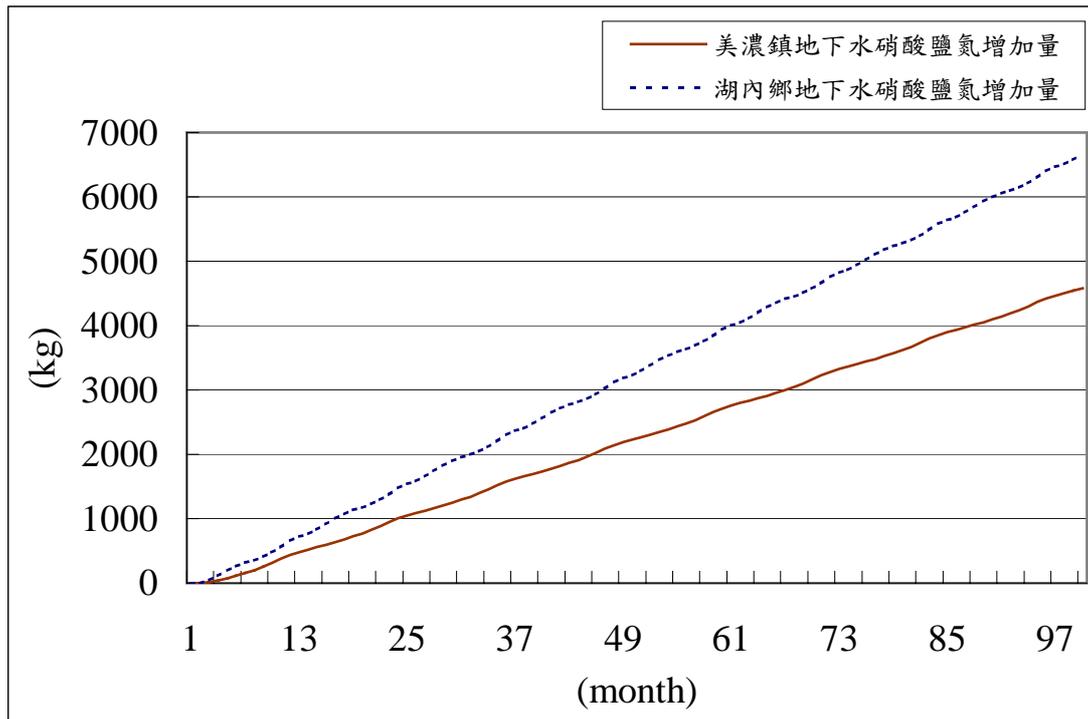


圖 5.10 美濃、湖內地下水硝酸鹽氮增加之重量



### 5-1-1-3 農地重金屬濃度

農地重金屬濃度計算方式為「農地中重金屬質量」除以「農地表土至牛踏層之土壤重量」，本研究假設表土至牛踏層厚度為 30 公分，土壤單位重為 2.65 克/立方公分，將「農地面積」乘以「牛踏層厚度」乘以「土壤單位重」即得到土壤重量。

針對美濃鎮現況輸入汙染值時發現，美濃農地的重金屬汙染濃度（表 4.15）皆在土壤汙染監測基準值內，且距離標準值甚遠，而無論灌溉水重金屬濃度或生活汙水、工業廢水，排放值都在偵測極限值以下，經過模擬後發現，部分重金屬種類之濃度變化相當小，甚至不造

成變化，對於本研究針對廢汙水所排放之重金屬汙染探討並不產生影響，故本研究對美濃鎮僅分析重金屬鋅的汙染濃度；至於湖內鄉將針對鉛、銅、鋅作探討。

### 5-1-1-3-1 美濃鎮重金屬汙染-鋅

圖 5.11 為美濃鎮回歸水排放到美濃溪和旗山溪時，美濃溪及旗山溪的重金屬鋅濃度變化情形，美濃溪因枯水期水量少，所以河川濃度變化比較明顯，不過濃度都在陸域地面水體水質標準 0.5 mg/L 內，沒有汙染情況。

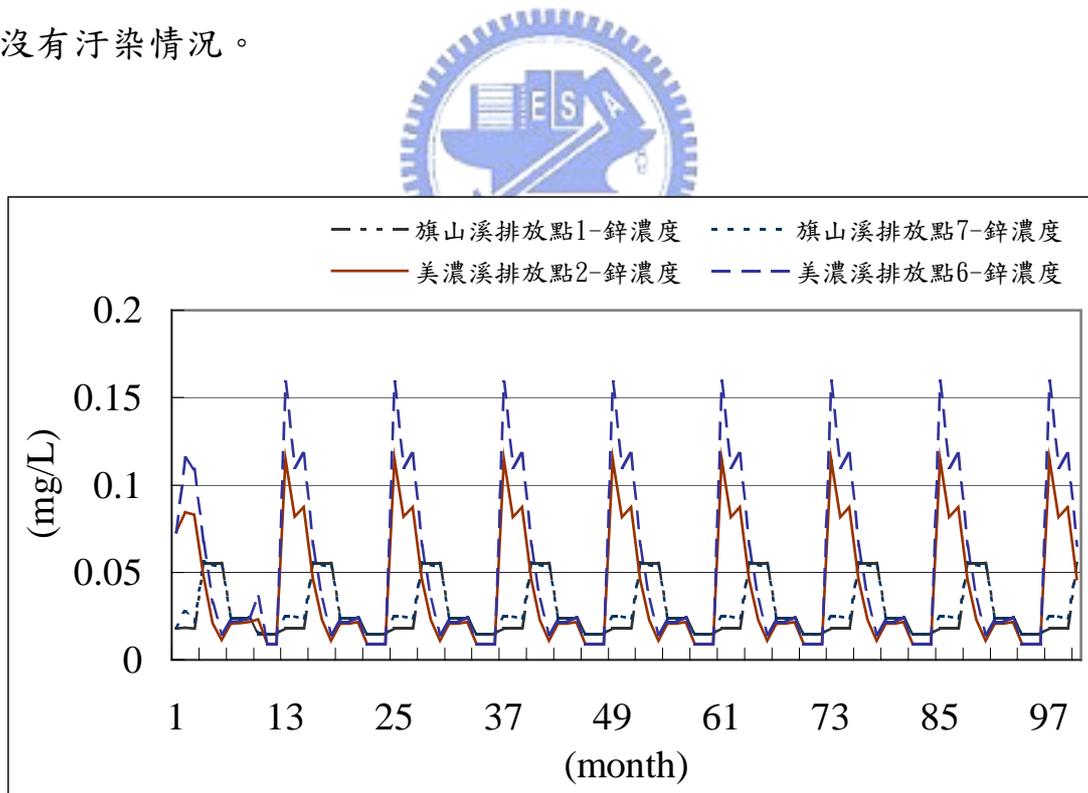


圖 5.11 美濃農田回歸水對河川重金屬濃度-鋅之影響

### 5-1-1-3-2 湖內鄉重金屬汙染

本研究在此先對湖內鄉農田回歸水排放回二仁溪時，二仁溪的中金屬汙染濃度作探討，而農地汙染將在後續策略分析時一併說明。

#### 1. 鉛

湖內鄉引用之二仁溪重金屬鉛濃度相當低，監測值小於最低極限監測值，所以本研究假定灌溉水中重金屬鉛濃度為零。圖 5.12 為二仁溪上下游鉛濃度變化圖，雖然下游水質較上游差，但是和陸域地面水體水質標準中鉛濃度 0.1 mg/L 相比，顯示二仁溪重金屬鉛之濃度不會造成汙染。

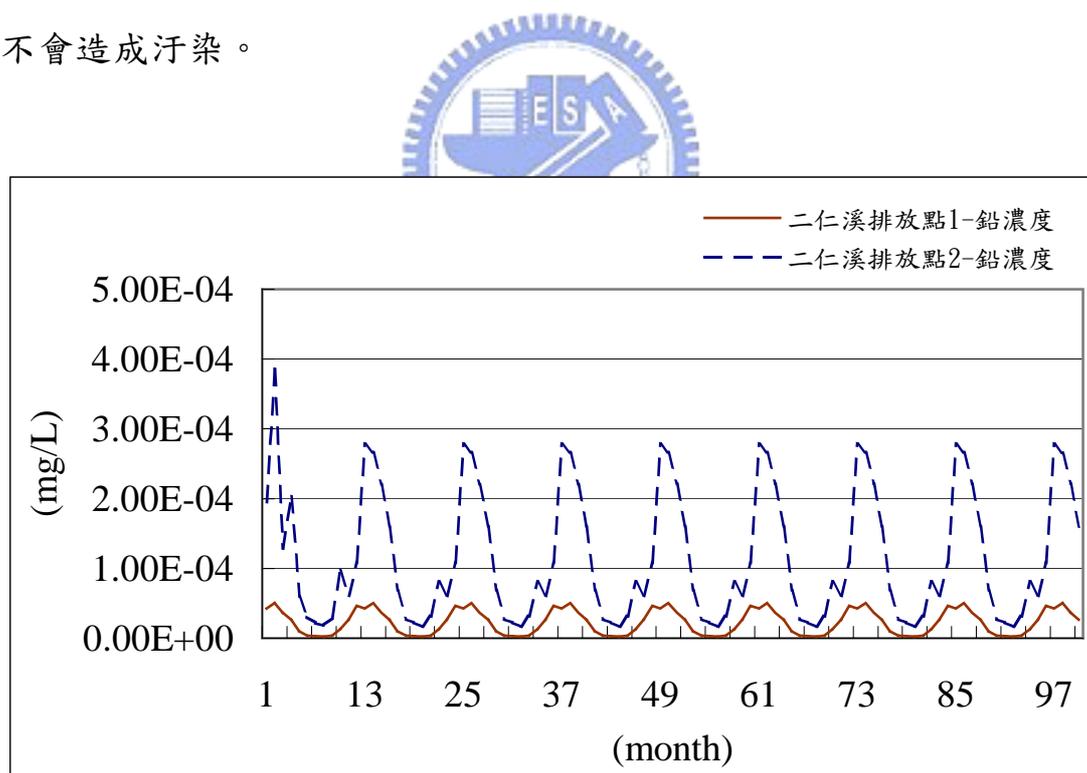


圖 5.12 湖內農田回歸水對二仁溪重金屬-鉛濃度之影響

## 2. 銅

圖 5.13 為二仁溪重金屬銅濃度變化圖，依據陸域地面水體水質標準中銅濃度為 0.03 mg/L，相較之下，不論上游或下游在枯水期的銅濃度都大過此標準。

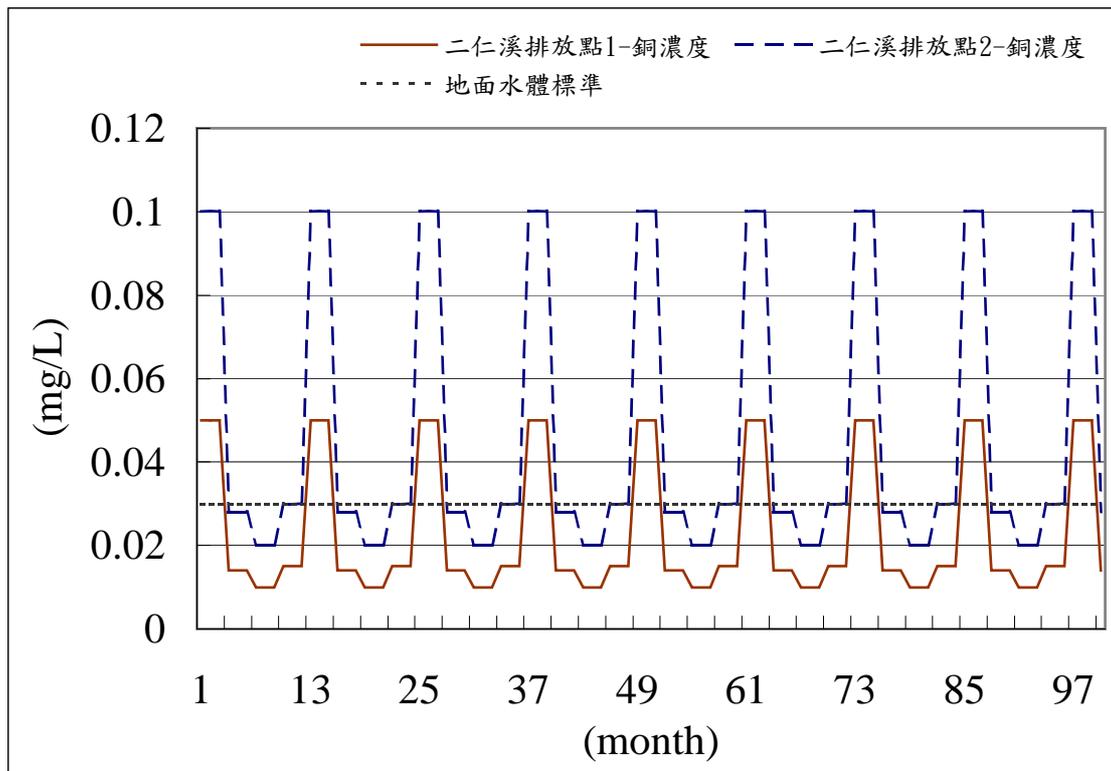


圖 5.13 湖內農田回歸水對二仁溪重金屬濃度-銅之影響

## 3. 鋅

從圖 5.14 發現二仁溪重金屬鋅之濃度與陸域地面水體水質之鋅濃度標準 (0.5 mg/L) 比較，一樣在枯水期時重金屬鋅濃度會超過標準值。在後續策略模擬會比較施行策略後之變化狀況。

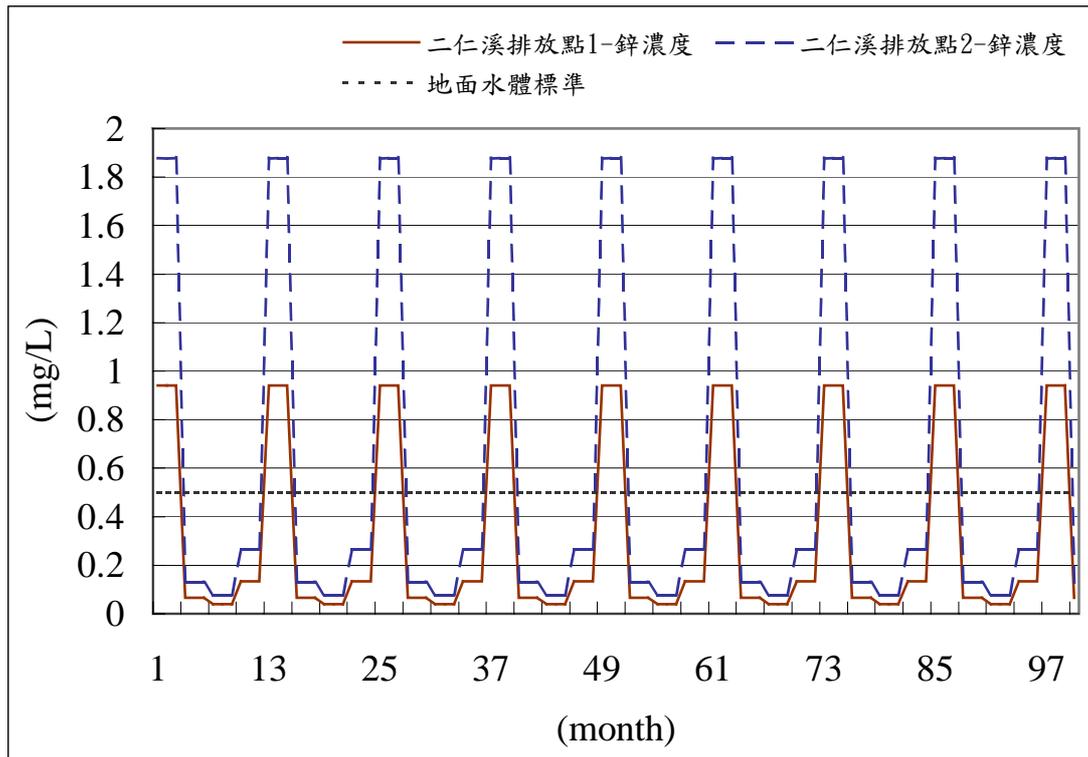


圖 5.14 湖內農田回歸水對二仁溪重金屬濃度-鋅之影響



## 5-2 策略模擬

### 5-2-1 深水灌溉

「深水灌溉」策略在台灣由台大甘俊二教授所提出，目的是希望能夠補助地下水。台灣降雨量相當多，但因為地勢陡峻，河川水流湍急，雖然夏季雨量豐沛，卻沒辦法有效留住這些雨水加以利用，有鑑於此，近年來行政院農業委員會積極推行「種水計畫」，希望在未來能將雨季及平時多於水量引入剩餘的水田面積進行儲存，強調水田調蓄洪水功能，倡導藉著將田埂加高來收集這些雨水，避免雨水直接流進大海。本研究也將對此策略進行模擬，探討地下水補助量多寡。

### 5-2-1-1 地下水補注增加量

本研究對深水灌溉的做法是將農田田埂高由現況的 6 公分增加到 25 公分，但是灌溉水量一樣依照原先水量灌溉，並不多抽取河川水來灌溉，原因是農民申請農田所需灌溉水量，大多超量申請，導致產生許多回歸水，並沒有徹底利用這些灌溉水。將田埂加高，把這些灌溉水留住，探討對地下水增加量有何幫助。對此也可以減少人們對於增加田埂高勢必要再多抽取灌溉水來灌溉，但在枯水期缺水時灌溉水量來源的迷思。

圖 5.15 為施行深水灌溉策略後，美濃鎮及湖內鄉之地下水增加量，當將田埂加高時，其水力坡降參數「 $i$ 」亦會增加，增加了地下水補注量，可以看出美濃鎮地下水在第 100 個月時比原先增加了近五百萬噸水量；湖內鄉則增加了近一百萬噸水量，顯現深水灌溉對於地下水補注的可行性。

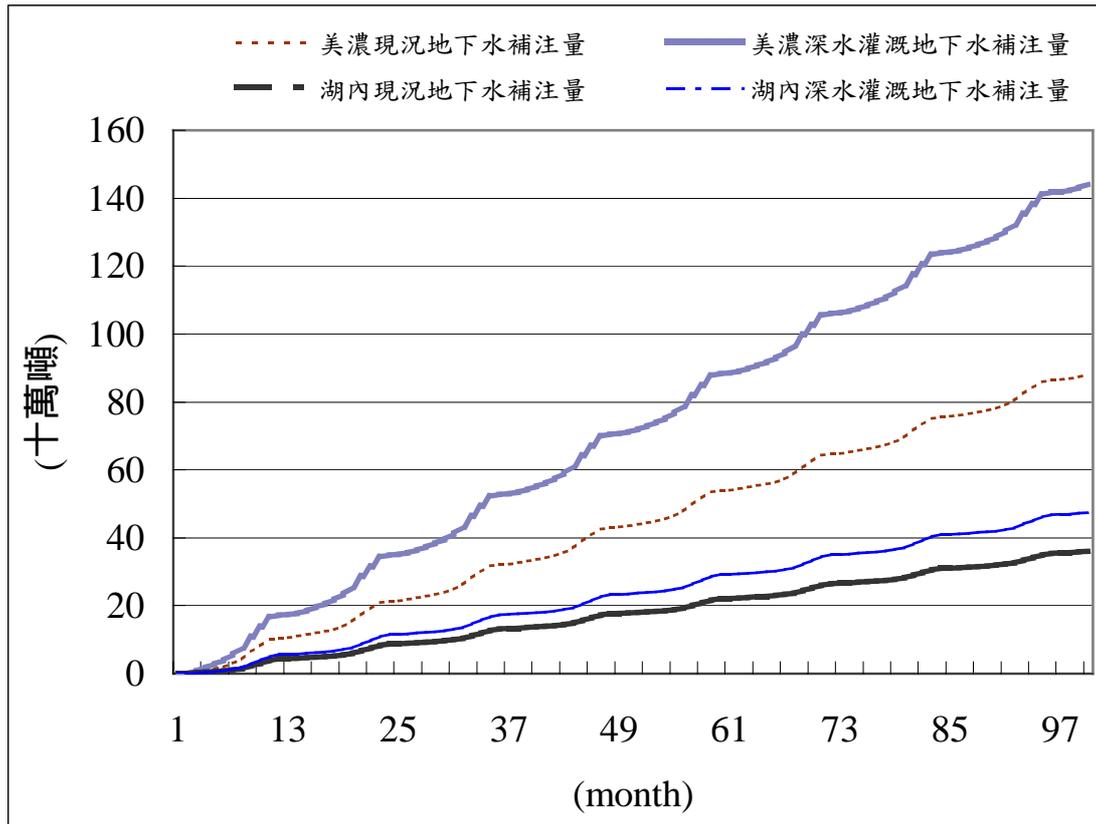


圖 5.15 美濃、湖內現況與深水灌溉之地下水補注增加量



### 5-2-2 灌排分離+下水道系統

在下水道系統和污水處理場沒有很普及的高雄縣，這些廢污水往往搭排到灌溉用水的圳路，所以灌溉水污染源主要來自於工業廢水跟家庭汙水。目前政府也一直在提倡灌排分離，不讓灌溉水與搭排的廢汙水混在一起，影響灌溉水水質；然而，這些廢污水若不進入農田系統，將會直接排放進河川，對河川水質影響甚遽，所以本研究在模擬灌排分離情況時，亦考慮到下水道系統，即是這些廢汙水不進入農田，在下水道處理，以此模擬來討論灌溉水質和河川水質變化，還有

農地重金屬污染是否會改善。

### 1. 旗山溪水質-BOD

由圖 5.16 所示，灌排分離對旗山溪水質有改善效果，不過在豐水期間水量多時，並不見其改善成效，原因是回歸水濃度雖然高但水量卻很少，在旗山溪水流量多時會對農田回歸水有稀釋作用，故看不出改善後的變化情形。

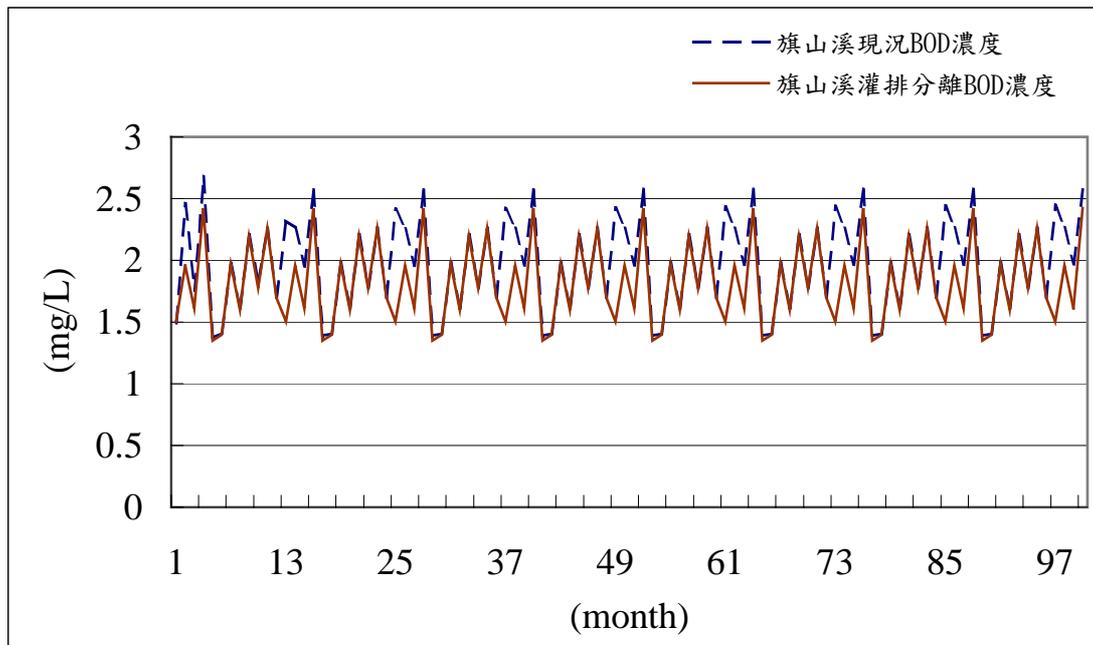


圖 5.16 旗山溪 BOD 濃度

### 2. 二仁溪水質 BOD

模擬結果發現灌排分離對二仁溪水質並沒有改善效果，主要原因是二仁溪原本上游 BOD 濃度就相當高，相對於湖內鄉內的農業活動

及廢汙水汙染量對二仁溪影響就顯得小了許多。

### 3. 美濃灌溉水水質-BOD

美濃鎮內工廠很少，產生 BOD 汙染不多，所以對灌溉水質有影響的就農業本身產生的汙染及生活汙水，不過汙染量都不大，BOD 濃度僅改善約 0.005 mg/L，如圖 5.17 所示，故灌排分離針對美濃鎮的汙染作用不明顯。

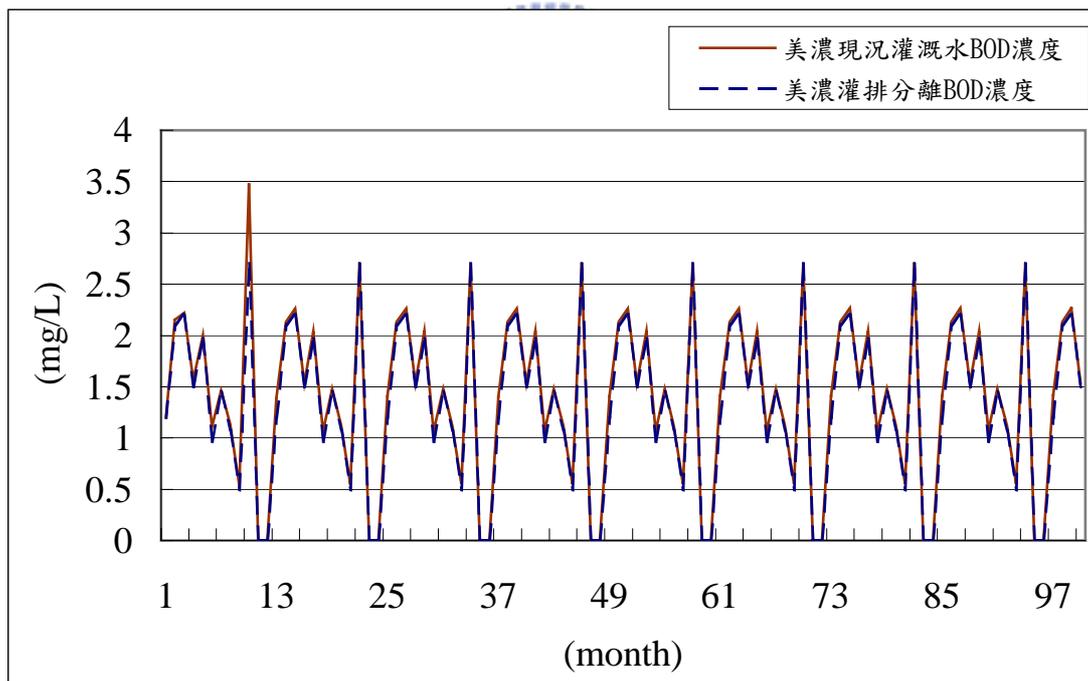


圖 5.17 美濃灌溉水 BOD 濃度

#### 4. 湖內灌溉水水質-BOD

圖 5.18 湖內灌溉水 BOD 濃度可以發現施以「灌排分離」策略後，影響最顯著在 11 月枯水期，從原先約 400 mg/L 降到 0 mg/L，原因是當廢汙水不進入農田，農田在不耕作時也不引灌溉水，所以並不會有回歸水產生，導致 BOD 濃度突然降為 0 mg/L。

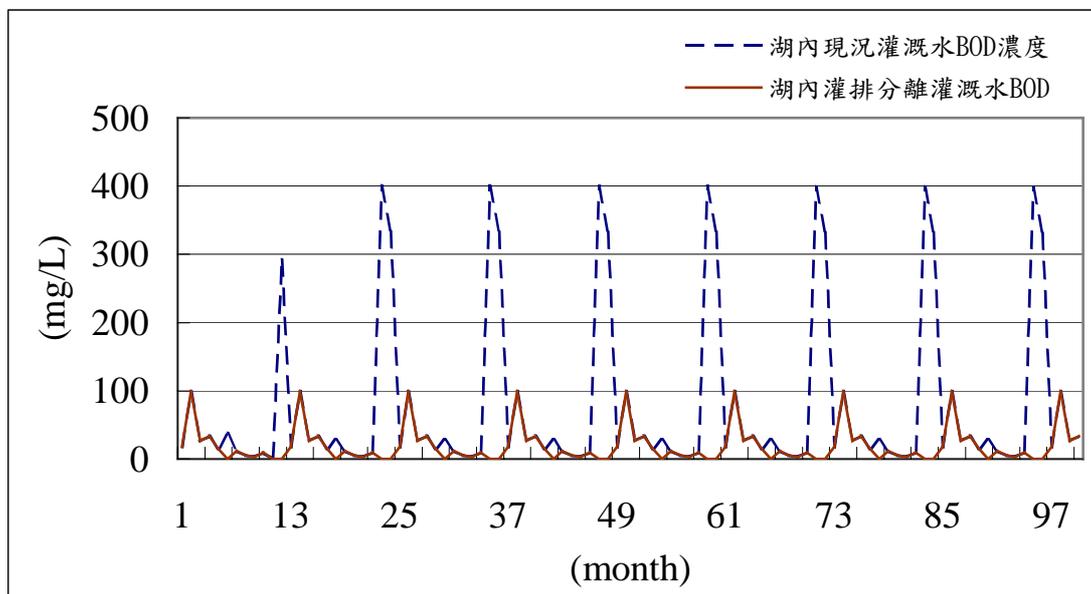


圖 5.18 湖內灌溉水 BOD 濃度

#### 5. 湖內農田回歸水對二仁溪重金屬鉛、銅、鋅濃度之影響

圖 5.19 為湖內鄉在施行策略前後二仁溪重金屬鉛的濃度變化，從圖中可以看出改善效果，但是對於重金屬銅和鋅卻沒辦法顯現成效，原因來自二仁溪水量及重金屬銅、鋅濃度皆大於農業或廢汙水產生的水量和汙染量，因此即使不讓廢汙水流入灌溉圳路系統，效果也

相當有限，唯有辦法是針對二仁溪更上游水質施行灌排分離策略，將可明顯看出改善成效。

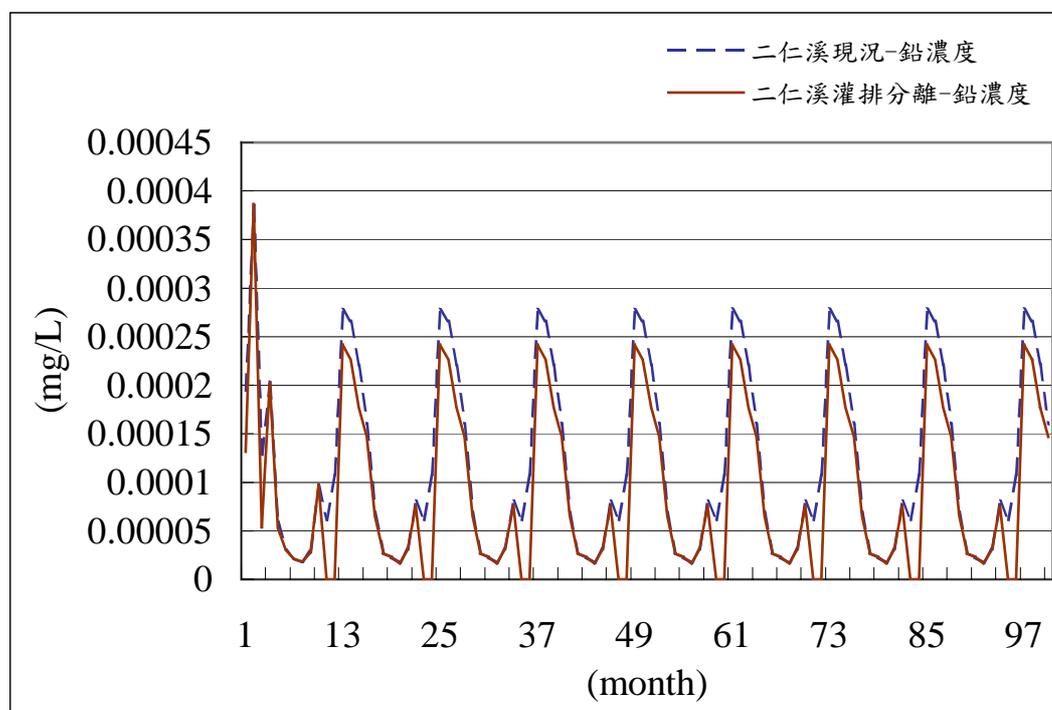


圖 5.19 二仁溪重金屬鉛濃度

### 5-2-3 農田休耕

當廢污水流進農田時，廢污水在農田裡會有沉降作用，讓部分污染物下沉，使從農田流出的回歸水夾帶污染物減少。本研究針對「土壤淨化法」此概念，讓水流進休耕的農田，將美濃鎮的第一、三、四、九、十二灌區和湖內鄉第一、二、三灌區當成休耕農田，以此來探討農田灌溉水的水質及回歸水到河川之水質是否有達到淨化效果。

## 1. 灌溉水水質

因為回歸水水量少，BOD 濃度比較大，而且美濃鎮原本自荖濃溪引進的灌溉水會稀釋回歸水，所以不容易看出水質變化情況，不過從圖 5.20 至少可以看出農田回歸水在施行策略前後的微小變化。

湖內鄉則是引進自二仁溪 BOD 濃度太高，故看不出水質淨化效果如何。由此看出將休耕農田當成溼地來淨化水質效果非常有限。

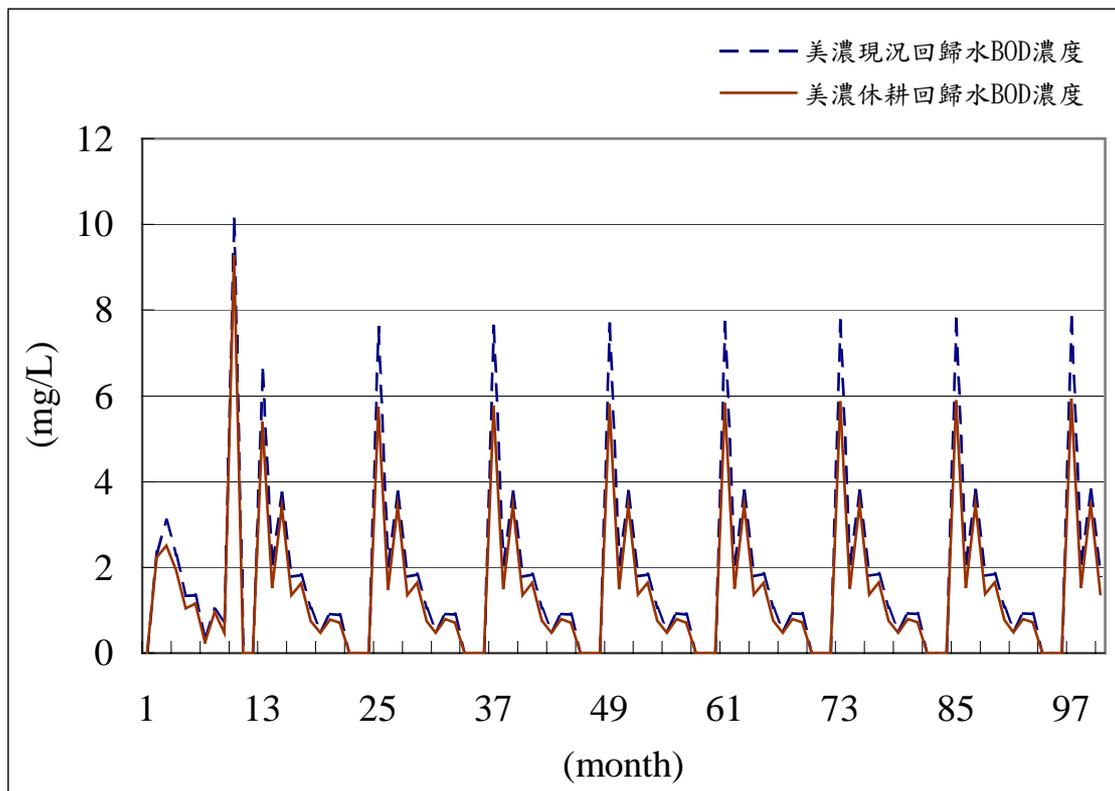


圖 5.20 美濃回歸水 BOD 濃度

## 2. 河川水質

下圖 5.21 為回歸水流到旗山溪的 BOD 濃度圖，可以發現當部分農田休耕時，對水質主要影響月份為一、二、三月，原因則是因為農田耕作時大都在這三個月份施肥或灑農藥，很自然由於農田休耕減少這些污染源進入。

由於湖內鄉灌區一開始引進來的二仁溪 BOD 濃度就非常高，相較之下，一般休耕農田處理掉之 BOD 污染量就相當小，因此從二仁溪的 BOD 濃度中，並不能看出休耕農田對水質淨化效用有多大。

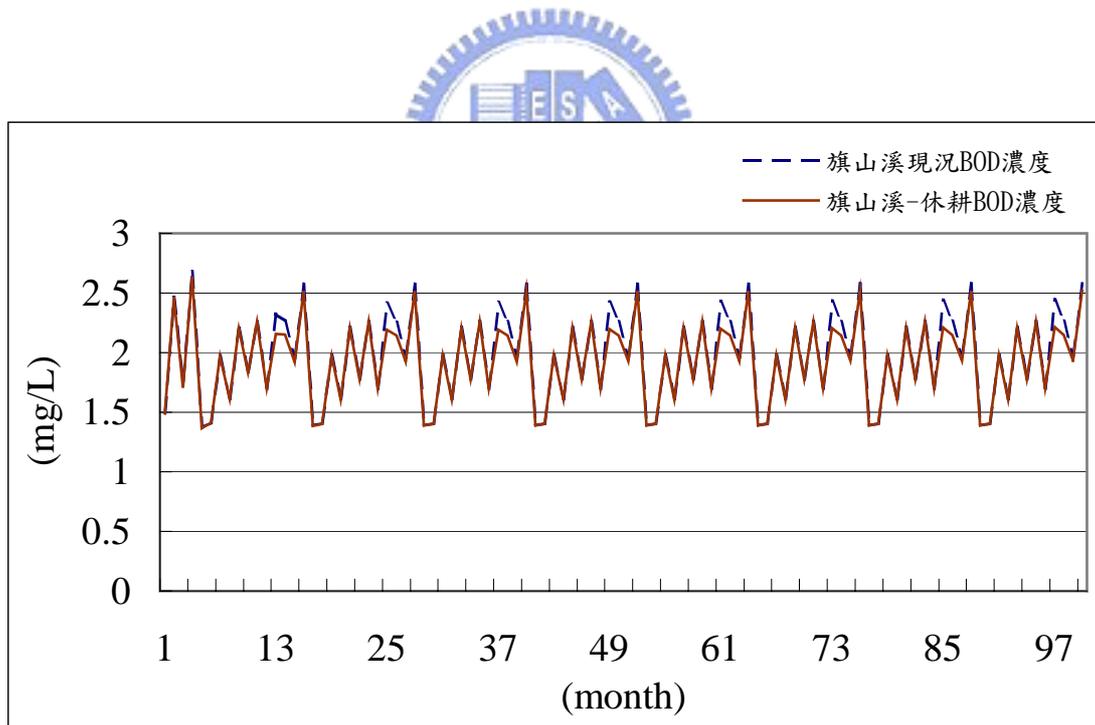


圖 5.21 美濃農田休耕對旗山溪 BOD 濃度影響

### 3. 重金屬

因為農田施用的農藥、肥料重金屬含量與灌溉水或河川重金屬含量相較下很少，而且休耕農田並沒有像國外溼地有沉降等處理機制，所以對灌溉水和河川水中的重金屬處理效用不大。模擬之後情況亦顯示如此，如圖 5.22 及圖 5.23 所示。

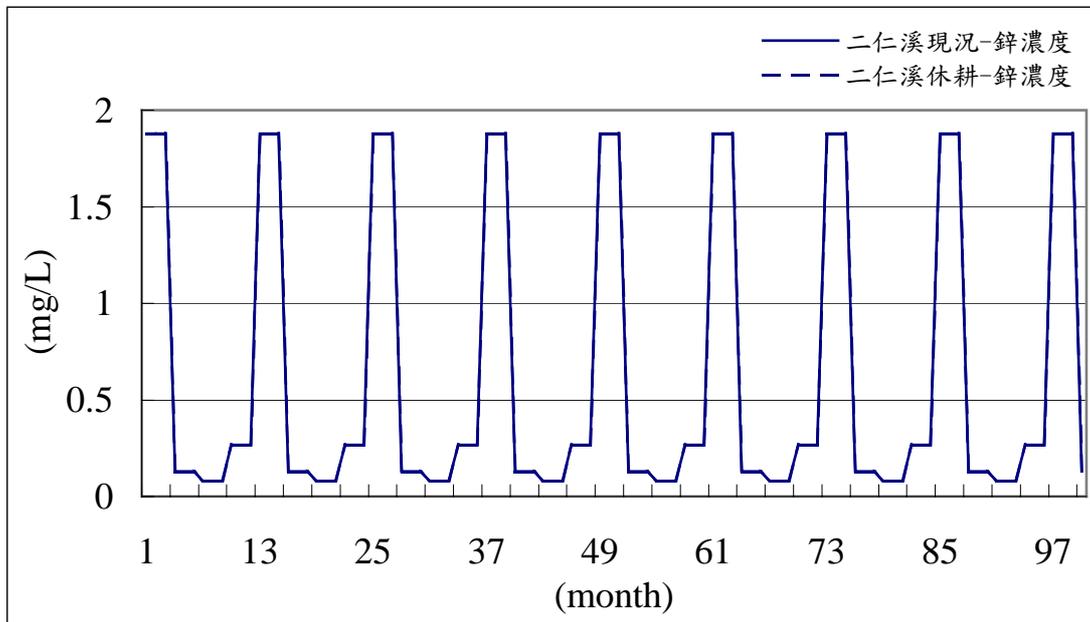


圖 5.22 二仁溪重金屬鋅濃度

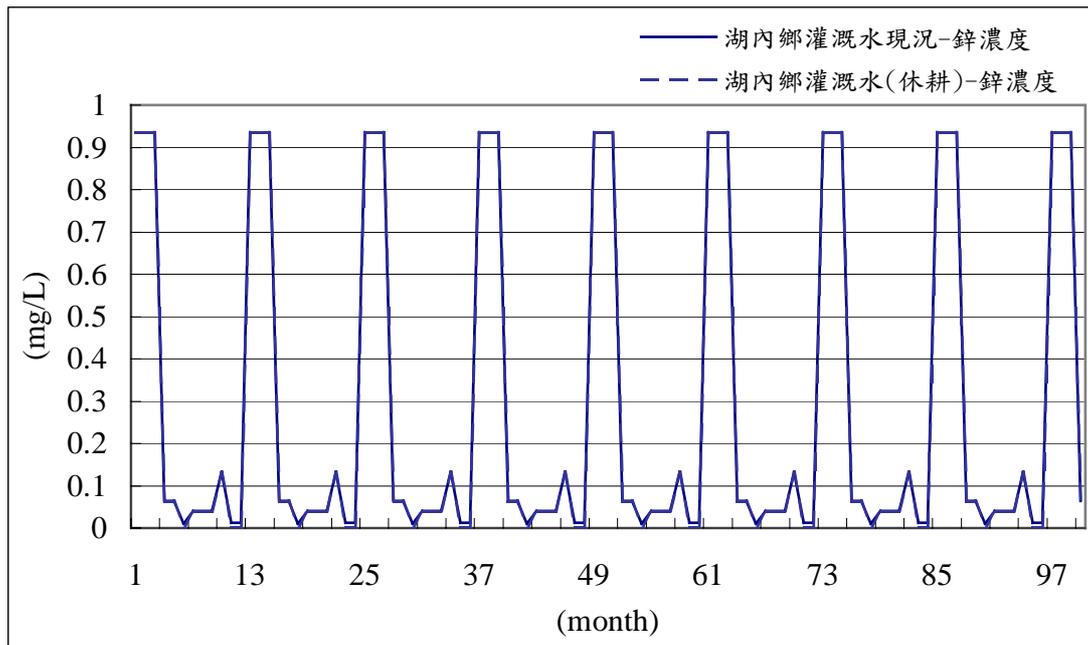


圖 5.23 湖內鄉灌溉水重金屬鋅濃度

#### 5-2-4 輪作

高雄縣農作大都是二期作，農田僅僅六月、十一月、十二月三個月時間沒有耕作，根本沒有什麼休息緩衝時間，經年累月的耕種下，由於灌溉水質中重金屬殘留在土壤裡，導致土壤重金屬含量日益增加，本研究的做法即將二期作改變成一期作，即上半年耕作，下半年轉而種植非食用性植物，例如花卉，由這些非食用性植物來吸附土壤中的重金屬，不但可以讓土壤獲得休息，也可以降低土壤重金屬含量，藉此來討論去除重金屬污染的成效及土壤中氮含量之變化，此法又稱「土壤植生法」。研究中因為美濃鎮農地重金屬含量相當低，所以僅對湖內鄉作策略模擬。

土壤植生法就是利用植物將土壤中的重金屬吸收並傳送到植物

本身的「根」、「莖」、「葉」貯存起來，於是只需處理收成後的農作物而非土壤本身，而且無需將土壤整個挖除，不但費用較「土壤清洗法」便宜，同時也比較不會破壞土壤原有的性質與生態。這觀念其實最早是應用在「溼地水生植物進行重金屬的吸收」，而將陸生植物應用在整治土壤中的重金屬早在數年前國內外亦曾有相關的研究，但是過去研究的成果發現整治所需時間過於冗長，直到近年來以添加物增加土壤重金屬的溶出量 (Raskin, 1997; Sridhar, 2002)，促使整治的時程縮短，此技術才又逐漸地受到重視。

本研究對農田輪作操作方法為將二期作改成一期作，再原本二期稻作期間改種植非食用性植物，研究中以種植繁星花來吸取農地中重金屬量假設種植密度為 28,000 株/公頃，每株重量為 200 公克。

## 1.鉛

從圖 5.24 顯示，湖內鄉第六灌區農地原本重金屬鉛殘留量為 9.19 mg/kg，期後模擬 100 個月，在不施行任何策略下，重金屬濃度變成 9.74 mg/kg，比原先濃度 0.55 mg/kg 增加了；而在輪作情況下，重金屬濃度變成 9.47 mg/kg，和現況相差了 0.27 mg/kg，因此對於輪作對農地重金屬鉛有一定影響效果。

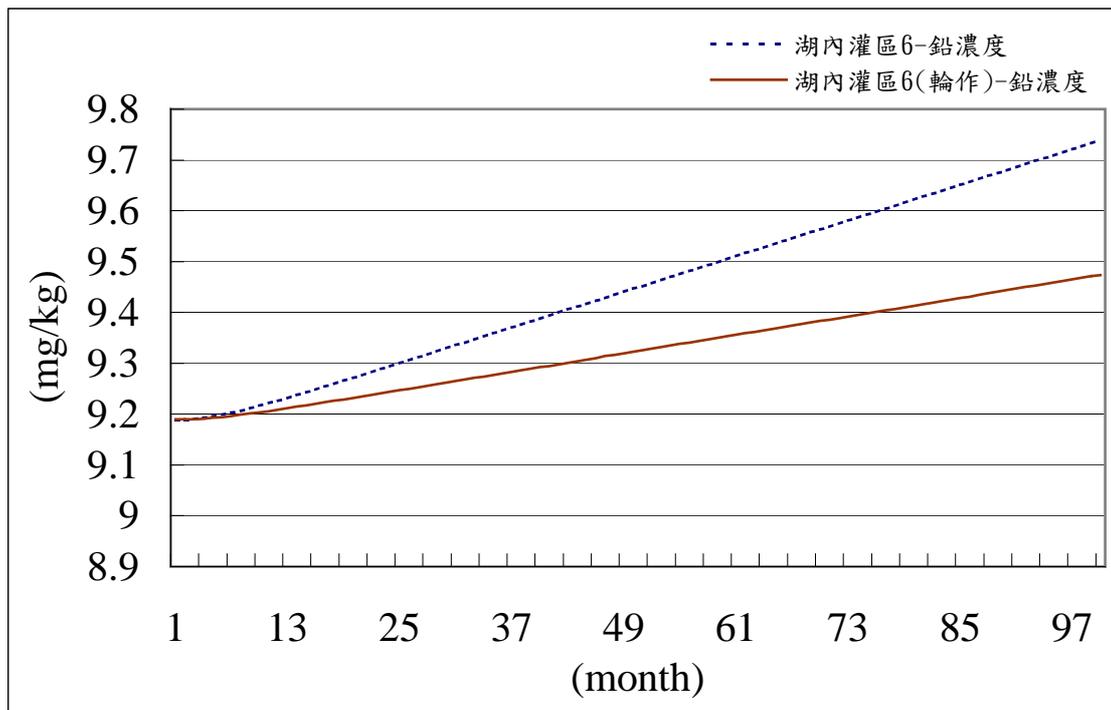


圖 5.24 湖內農地重金屬鉛殘留濃度

## 2.銅

從圖 5.25 顯示，湖內鄉第二灌區農地原本重金屬鉛殘留量為 3.19 mg/kg，期後模擬 100 個月，在不施行任何策略下，重金屬濃度變成 3.87 mg/kg，和原本濃度相差 0.68 mg/kg；而在輪作情況下，重金屬濃度變成 3.61 mg/kg，和現況相差了 0.26 mg/kg，因此對於輪作對農地重金屬銅有一定影響效果。

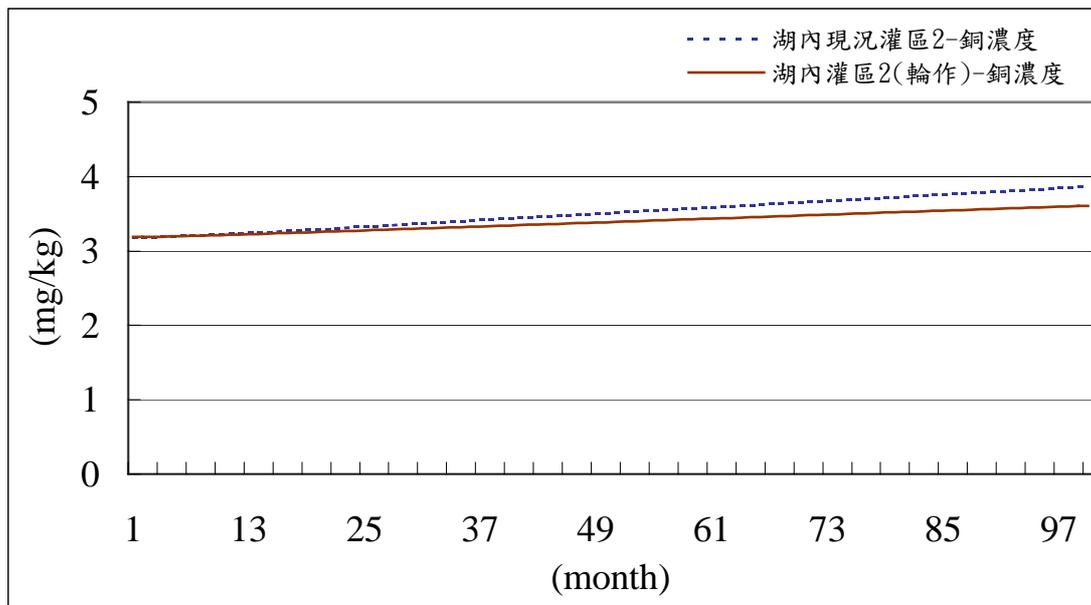


圖 5.25 湖內農地重金屬銅殘留濃度

### 3. 鋅

從圖 5.26 顯示，湖內鄉第六灌區農地原本重金屬鉛殘留量為 15.1 mg/kg，期後模擬 100 個月，在不施行任何策略下，重金屬濃度變成 17.34 mg/kg，和原來濃度相差 2.24 mg/kg，增加速度比鉛及銅快；而在輪作情況下，重金屬濃度變成 17.07 mg/kg，因此對於輪作對農地重金屬鋅有一定影響效果。

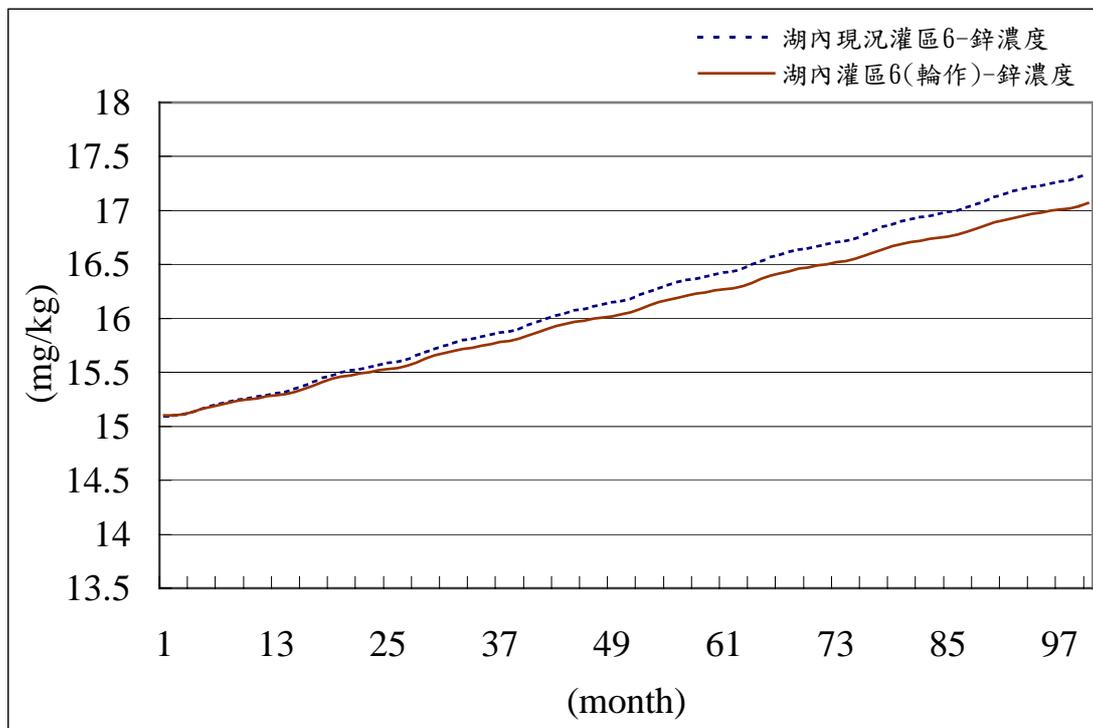


圖 5.26 湖內農地重金屬鋅殘留濃度