

翡翠水庫底泥性質及對水質影響 潛勢研究計畫(第一年)

期末報告 (定稿本)

委託單位：臺北翡翠水庫管理局

執行單位：國立台灣大學環境工程學研究所

計畫主持人：吳先琪

研究助理：陳怡靜、王上銘

中華民國九十年十二月

摘要

水庫湖泊底泥磷的厭氧釋出，是水庫內部重要磷的來源。為了掌握翡翠水庫底泥磷的釋出對水庫水質的影響，改善底泥與水體環境，以落實水庫水資源之有效管理，本計畫於三年總計畫的第一年，除接續進行臺北翡翠水庫管理局的例行性水庫底泥採樣暨檢測分析工作，亦進行對翡翠水庫底泥磷來源及組成調查、集水區磷入流負荷量推估及翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型之建立等研究。

經由本年度之研究成果，我們得知，翡翠水庫今年底泥各項檢測項目分析結果與過去底泥數據之差異不大。推測在檢測期間水庫應無外來之重大污染。翡翠水庫底泥固相磷中的有機磷和鐵及鋁結合磷是兩種主要的磷型態。然而隨著採樣地點，上游灣潭(S-1)及馬祖林(S-2)具有較高的鈣結合磷，可能與上游集水區農業行為造成肥料中磷酸鈣等的進入有關。將集水區及底泥土壤之黏土礦物性質以 X-ray 繞射方法進行比對得知，底泥黏土礦物以伊萊石為主。採樣底泥均有較一致的黏土礦物分佈，並與集水區土壤黏土礦物相近，表示底泥應沒有集水區以外的泥砂進入。分析歷年來底泥含磷量變化，五個底泥採樣點之間總磷含量差異並不明顯。然而比較今年及去年底泥總磷含量隨季節變化，夏秋季的底泥總磷含量較冬季及春季時要高，推測應是夏季光合作用旺盛，使沉降的藻體量增加而累積於底泥所致。因此，若以底泥磷的飽和度指數 (SI)，作為判斷底泥磷釋出潛勢的指標，夏季底泥處於較高的還原態，的確促使礦物磷有較高的溶出潛勢，及增加了溶解性磷的濃度。

在建置底泥磷一維傳輸及釋出通量概念模式雛型的研究中，我們經由現地檢測數據及實驗室實驗確認出影響底泥磷的重要環境參數，除了底泥有機磷的生物分解速率常數(K_b)，尚包括氧化還原電位(ORP)、酸鹼值(pH)、溶氧(DO)及磷的吸脫附平衡係數(K_p)。由歷次現地檢測數據分析，當底泥的 ORP 及 pH 值降低，溶解磷濃度相對增加。從管柱實驗結果，當上層水 DO 較高，會抑制底泥磷的移動進入上層水中，因為 DO 存在使三價鐵離子濃度增加，會和磷酸根發生沉澱或吸附。而將現地通量數據與模式預測值相較，顯示底泥磷的移動還是可能受到底泥吸附而遲滯的影響。

本計畫亦對歷年來大壩(S-5)採樣點水質進行統計分析，發現水庫每年冬季 1,2 月時，上、中、下層水溫會趨於一致，而發生水流混合現象。其原因可能來自上游因低溫形成的密度流。當其進入水庫後會供給底部豐富溶氧，使被底泥消耗之溶氧再度補注。然而壞處則是被密度流推擠，原來存在底部因底泥厭氧而釋出的大量磷營養鹽可能被攜帶進入大壩區，隨著水體混合而帶到表水，使表水磷濃度瞬間驟升，甚至超過 OECD 的優養水質標準，40 ug/L。由於水庫水文水理機制將對水庫底泥 - 水邊界水流狀態影響甚巨，亦將影響底泥磷的釋出，除建議翡管局未來應加強底部溶氧的觀測及研究氣象水文變化對水質影響，未來兩年本計畫亦將結合底泥及水質模式進行模擬研究，希望能結合底泥磷組成與傳輸的研究成果，有效量化出水庫底泥磷對水質的影響，俾謀求有效的水質改善策略。

Abstract

Recently, the concentrations of total phosphorus (TP) in the Feitsui Reservoir have increased at a rate sufficient to cause public concern. In addition to the external load of phosphorus (P) from the watershed, P releases from the sediment of the reservoir was also considered an important internal source of load to the water body. Therefore, knowledge of the mechanisms and factors influencing sediment phosphorus release in the Feitsui Reservoir were needed.

The objective of this study was to evaluate the effect of sediment phosphorus on the water quality of the Feitsui Reservoir. In the first year of this study, the framework of this study included : (1) the continued sediment sampling and analysis works at five sampling sites in the reservoir; (2) the understanding of the chemical composition and mobility of sediment phosphorus; (3) the possible sources and loading of phosphorus in the watershed; (4) the factors influencing the release of sediment phosphorus; and (5) building up a conceptual model of the one-dimensional sediment phosphorus transport at sediment-water interface.

By comparing the sampling results of this year with those of the other years, there was not significant difference between them. It was suggested that no accidental pollution had occurred in the reservoir this year. The analysis of the fractionation of sediment phosphorus at five sampling sites indicated that not only organic P but Fe, Al-bound P (non-apatite P) were also the dominant species of phosphorus in the sediments. However, the increase of

apatite-P(Ca-P) found in two sampling sites (S-1 and S-2) which were in the upstream and near the agricultural area of the watershed implies that the accumulation of apatite-P might be the result of fertilization application.

The dissociation of the non-apatite P in the sediment in anoxic state would result in the release of phosphorus into the underlying water. By using the SI index method to evaluate the mobilization ability of sediment phosphorus releasing from the P-containing minerals, the results showed that with more reduced state due to the higher microbial activity in the sediments in summer, there was higher potential for sediment to mobilize and dissolve in the porewater. The increased soluble P and reduced ORP and pH value in summer support this suggestion. In addition, not only the biological decay rate constant as the factor governing organic-P decomposition, the ORP, pH value, DO and the adsorption-desorption constant(K_p) were also identified as the important factors influencing the sediment phosphorus release process. According to the investigation of the results monitored or observed onsite or in the laboratory column experiments, we build up a conceptual model explaining the sediment phosphorus transport and the flux in the sediment-water interface.

In the next two years, by incorporating the sediment model with the water quality model which has been well used and accepted by others, we are going to predict the amount of phosphorus transported from the sediment to the water body of Fei-tsui Reservoir and try to quantify the effect of sediment phosphorus on the water quality.

Hopefully, future work would give more information about the cycle of P in the reservoir and provide sound strategies for the improvement of the water quality.

目錄

頁次

圖目錄.....	iii
表目錄.....	iv
第一章 續論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 計畫工作及預定進度.....	2
第二章文獻回顧.....	6
2.1 翡翠水庫背景及歷年水質監測.....	6
2.1.1 地質與土壤.....	6
2.1.2 氣候與水文.....	6
2.1.3 水庫水質.....	7
2.2 底泥磷的動態.....	8
2.2.1 底泥磷的溶解與沉澱化學平衡.....	8
2.2.2 底泥固相磷的組成.....	9
2.2.3 底泥磷的傳輸.....	10
2.2.4 底泥磷模式發展.....	11
第三章研究方法與內容.....	13
3.1 例行性檢測.....	13
3.2 分年研究計畫.....	14
3.2.1 翡翠水庫底泥磷潛在負荷量評估.....	14
3.2.1.1 歷年底泥檢測數據分析.....	14
3.2.1.2 底泥及集水區土壤中黏土礦物種類調查.....	14
3.2.1.3 推估集水區入流磷負荷量.....	15
3.2.2 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型建立.....	15
3.2.2.1 底泥孔隙水磷的分層變化.....	15
3.2.2.2 底泥固相磷的分選.....	15
3.2.2.3 底泥磷的溶解與沉澱化學平衡.....	16
3.2.2.4 影響磷釋出的主要環境參數.....	16
3.2.2.5 底泥磷模式之發展.....	16
第四章結果與討論.....	17
4.1 例行性檢測分析.....	17
4.1.1 底泥一般及營養鹽類.....	17
4.1.2 底泥粒徑組成.....	20
4.1.3 底泥重金屬類.....	20
4.2 底泥磷潛在負荷量評估.....	21
4.2.1 歷年底泥總磷含量變化.....	21

4.2.2 底泥及集水區土壤黏土礦物分析.....	21
4.2.3 翡翠水庫集水區入流磷負荷量評估.....	23
4.3 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式建立.....	24
4.3.1 底泥固相磷的分選.....	24
4.3.2 底泥磷的溶解與沉澱化學平衡.....	25
4.3.3 分層底泥孔隙水磷的變化.....	25
4.3.4 影響磷釋出的主要環境參數.....	26
4.3.4.1 氧化還原電位(ORP)及酸鹼值(pH)	26
4.3.4.2 溶氧(DO)	27
4.3.4.3 底泥吸脫附平衡係數(K_p)	28
4.3.4.4 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型建立.....	28
4.3.4.5 現場底泥磷釋出通量初步預測.....	31
第五章 結論與建議.....	33
第六章 參考文獻.....	36

附錄一、本年度檢驗項目之品保品管數據結果

附錄二、底泥現場採樣記錄表

附錄三、台灣地區土壤重金屬含量等級區分表

附錄四、土壤污染監測基準

附件一、期中審查會議紀錄

附件二、期末審查會議紀錄

圖目錄

頁次

圖 2.1 歷年大壩(S-5)分層總磷變化.....	39
圖 2.2 歷年大壩(S-5)分層水溫變化.....	39
圖 2.3 歷年大壩(S-5)底層溶氧變化.....	40
圖 2.4 水庫集水區磷的循環.....	40
圖 2.5 底泥固相磷之序列萃取流程.....	41
圖 3.1 翡翠水庫底泥及集水區土壤採樣點位置說明	42
圖 3.2 貫入式之套管底泥採樣器.....	42
圖 4.1 底泥粒徑組成分佈(90 年 5 月).....	43
圖 4.2 底泥粒徑組成分佈(90 年 8 月).....	45
圖 4.3 歷年底泥總磷含量變化.....	47
圖 4.4 底泥磷之型態分佈.....	48
圖 4.5 底泥孔隙水溶解總磷剖面分布.....	50
圖 4.6 底泥孔隙水溶解反應性磷剖面分布.....	50
圖 4.7 底泥磷模式概念示意圖.....	51
圖 4.8 實驗室底泥管柱上層水總磷隨時間之變化.....	51
圖 4.9 今年(2001 年 1 月~9 月)大壩底部總磷與溶氧隨時間變化.....	52

表目錄

	頁次
表 2.1 磷礦物的化學平衡常數一覽表.....	53
表 3.1 底泥及集水區土壤採樣點說明.....	54
表 3.2 檢驗項目及分析方法.....	55
表 3.3 實驗室數據之品保目標.....	56
表 4.1 90年5月翡翠水庫底泥性質分析結果(一般及營養鹽類).....	57
表 4.2 90年5月翡翠水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %).....	58
表 4.3 90年5月翡翠水庫底泥性質分析結果(重金屬類).....	59
表 4.4 90年8月翡翠水庫底泥性質分析結果(一般及營養鹽類).....	60
表 4.5 90年8月翡翠水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %).....	61
表 4.6 90年8月翡翠水庫底泥性質分析結果(重金屬類).....	62
表 4.7 底泥及集水區土壤樣體黏土礦物之組成及其含量.....	63
表 4.8 翡翠水庫入流磷年負荷量推估.....	64
表 4.9 各磷礦物之飽和度指數(SI)變化.....	65
表 4.10 底泥總磷釋出通量推估(以大壩為例)	66

第一章 續論

1.1 研究緣起

翡翠水庫位於大台北地區，北回歸線以北，屬於亞熱帶氣候。自 1986 年啟用至今，提供北部近四百萬人之民生用水，為重要水資源。翡翠水庫攔截北勢溪上游支流，形成蜿蜒之辮狀水系。集水區面積為 303 平方公里，最大水深於大壩處達 113.5 公尺，總蓄水量 406 百萬立方公尺。翡翠水庫及其集水區經劃定為「台北水源特定區」及「水源水質水量保護區」，相關的水庫水質及集水區土地利用等環境品質問題，持續由臺北翡翠水庫管理局(以下簡稱翡管局)委託之計畫進行調查研究工作。其中，翡翠水庫之底泥性質監測，歷年來陸續委託台大農業工程中心、台大與嚴慶齡工業發展基金會合設之工業研究中心及台大環境工程學研究所執行。以藉由監測數據瞭解翡翠水庫底泥中，重金屬、有機氯農藥及營養鹽氮、磷等污染物之含量的多寡，受集水區外來污染影響之程度，及隨時間的變化。

民國 89 年委由台大環境工程學研究所執行之底泥監測計畫發現，檢測期間，隨底泥厭氧還原程度增加、酸鹼值降低及氧化還原電位降低，孔隙水溶解性總磷濃度明顯地提高，間接增加磷進入水庫上層水體之潛勢。由於底泥環境的變化可能具有隨季節性及空間位置變化之特性，水庫湖泊底泥磷的厭氧釋出，也是水庫重要磷的來源。因此，為水庫湖泊進行底泥磷負荷量的先前調查及研擬磷的內部控制策略，為本計畫之研究目標。

本年度之研究計畫乃三年總計畫的第一年，除將配合翡翠管局進行例行性的翡翠水庫底泥採樣暨檢測分析工作，透過基礎研究實驗與環境數據的解讀，本計畫期望能有效分析、預測磷的釋出潛勢與機制，建立底泥磷的釋出模式雛型，以接續第二年及第三年，求取現地之環境參數數據、現地實驗及模式模擬等工作。經由本研究成果，提供水庫湖泊管理者較詳細的底泥資訊，使能基於永續的理念思考水庫湖泊之自然變化，預期將有助改善翡翠水庫底泥與水體之環境，落實水庫水資源之有效管理。

1.2 計畫工作及預定進度

本計畫自民國 90 年開始，預定至民國 92 年完成，為期三年。除例行檢測分析工作，計畫預定工作項目包括如下：

第一年(民國 90 年)

1.翡翠水庫底泥磷潛在負荷量評估

- (1) 歷年檢測數據分析。分析磷濃度在底泥中隨時間及五個固定採樣點位置變化之趨勢。希望從長時間趨勢觀察底泥季節性變化週期的動態。
- (2) 磷來源及組成之調查。採樣分析底泥及集水區土壤中黏土礦物種類及粒徑組成，探討底泥黏土礦物對磷的吸附能力。其次透過底泥及集水區土壤礦物之比對，期望能推測出主要攜帶磷的礦物在集水區的區位。
- (3) 參考翡翠水庫年報，泥砂淤積量或水中輸砂量及入流磷濃度數據，推估集水區入流磷負荷量，作為水質模式輸入用途。
- (4) 配合底泥磷的分選及底泥磷檢測數據，推估對水質具有潛在影響的底泥

磷負荷量。

2.翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型建立

- (1) 推測影響磷釋出的主要環境參數，此可能包括實測底泥及底床上層水之 pH 值、氧化還原電位(ORP)、含水量，溶氧等。將設計實驗觀察底泥磷移動化受環境參數之影響。
- (2) 底泥磷物種之分選 (Speciation)，擬參考 Hietyes and Lijklema(1980)方法，隨採樣季節，將底泥磷萃取分類，以瞭解在翡翠水庫底泥中的優勢磷物種及隨季節之變化。
- (3) 實測分層底泥孔隙水磷濃度，建立底泥剖面磷濃度分布趨勢。據此可探討各採樣點的分層溶解性磷濃度間所處平衡狀態，由濃度梯度關係推估磷的釋出通量。
- (4) 應用例行檢測孔隙水中溶解性重金屬離子及磷濃度數據，參考美國環保署所研發之地化模式 MINTEQA2，估算含磷礦物的飽和度指數，從反應動力推測主要含磷礦物種，預測溶解性磷濃度的變化。
- (5) 由(1)~(4)實驗結果，建立底泥磷的釋出模式雛型，探討參與化學、生物反應與物理傳輸機制。

第二年(民國 91 年)：

1.翡翠水庫底泥監測及磷釋出實驗

持續第一年之例行監測，並參考第一年實驗底泥磷移動化受環境參數影

響之研究成果，進行實驗室磷釋出通量實驗。

2. 翡翠水庫現地示蹤劑實驗

使用六氟化硫(SF₆)為示蹤劑在水庫上游施放，並採集下游分層水樣分析，以觀察水體分層狀態與流向分佈，藉以評估入流磷進入水庫之動向，及計算水流延散係數。供第三年執行磷質量平衡模式模擬水質用途。

3. 建置翡翠水庫底泥磷釋出通量模式

延續第一年模式雛型，撰寫翡翠水庫底泥磷電腦程式，計畫將參考實驗室及現地底泥環境數據，作模式校正及驗證工作。

第三年(民國 92 年)：

1. 建置翡翠水庫底泥磷環境資料庫

此包括歷年底泥磷監測濃度彙整及趨勢分析。

2. 運用磷底泥模式及 WASP5 等水質模式，進行磷水質模擬

結果將可解釋及量化水中磷受入流磷或底泥磷進入量之影響，隨時間或距離磷濃度變遷之意義。

依預定進度，已分別於 90 年 5 月 14 日及 8 月 28 日完成本年度共 2 次例行檢測分析工作。並於 5 月 14 日配合水管局每月固定水庫水質採樣之作業，同時間於現地採集樣品，俾比對當時底泥與上層水質之關係。

第二章 文獻回顧

2.1 翡翠水庫背景及歷年水質監測

2.1.1 地質與土壤

水庫底泥係由集水區土壤經沖蝕

後隨著地表水進入水庫沈降形成。翡翠水庫集水區位於雪山山脈地質區北隅，依經濟部中央地質調查所(2000)之地質圖，集水區母岩主要為砂岩、頁岩、硬頁岩及板岩。由於地質之鐵含量極高(如頁岩為4.3~4.8%)(陳尊賢，1997)，集水區屬於鐵質系，亦即非鈣系(non-calcareous)之地質環境。

本區北勢溪岸邊母岩多為崩解堆積岩塊及沉積岩相，受風化與植被影響形成淺薄而含石量較多之黏重土壤。淹沒區內壩址附近有紅土礫石之

階地堆積層，及以黏土、砂、礫石構成沖積層。所發育地形為河階地，在陡坡處土壤易受到嚴重沖蝕。土壤呈酸性，pH 在 5 左右。

2.1.2 氣候與水文

翡翠水庫位於台灣大台北地區，北回歸線以北，屬於亞熱帶氣候。翡翠水庫攔截北勢溪上游支流，形成蜿蜒之辮狀水系。集水區面積為 303 平方公里，最大水深於大壩處達 113.5 公尺，總蓄水量 406 百萬立方公尺。其上游降水主要來自冬季大陸性冷氣團籠罩，東北季風挾帶之豐沛雨

量，以及夏季颱風季節所帶來的豪大雨。當冬季冷峰過境時，依中央氣象局資料，大氣最低溫可至 11℃，尚比大壩底部終年水溫約 16~19℃ 左右要低。

2.1.3 水庫水質

水庫整體平均水質過去以 Carlson 優養指標評估，屬於貧養至中度優養狀態(郭振泰,1998)。然而位於上游灣潭(S-1)附近水質常發生優養，大壩(S-5)自 1996 年起至 2000 年，每年 2 月天氣寒冷時也發生總磷達到 40 µg/L(參見圖 2.1)，為 OECD

認定水質優養等級，顯示水庫水質有逐漸惡化趨勢。探討水理動態，白書禎(2000)認為，前述大壩上層表水總磷超過 $40 \mu\text{g/L}$ 的原因，乃冬季冷水形成的密度流潛入水庫底部後，使下層水自底部托升所致，而大壩底部有累積豐富總磷。經參考歷年大壩水溫分層監測記錄(如圖 2.2 所示)，本研究遂發現，水庫在每年 1,2 月時，上、中、下層水溫會趨於一致，使水體的溫度分層被破壞，而發生翻轉。此是否為該低溫密度流進入水庫後，使水溫發生變化尚不得而知，但從圖 2.3

歷年大壩底部溶氧監測數據觀察，大壩底部存在以年為週期的溶氧循環特性的確可能是低溫密度流所造成。此乃翡翠水庫處於亞熱帶氣候所形成水庫內特殊的水文現象，在溶氧升高時，有助抑制底泥磷的釋出，具有穩定水庫水質功能。然而隨著近年來大壩水質漸趨惡化的情形推測，水庫水理狀態可能異於往年，亦或水庫底泥釋出的總磷負荷量升高，對水質造成威脅。綜言之，翡翠水庫底泥水邊界層磷釋出動態與水質之間的關係，有待深入探討。

2.2 底泥磷的動態

從集水區入流水庫的磷來源可能是點源或非點源的污染，如圖 2.4 所示，來自人為開發區的農業植作區肥料中的磷或是邊坡受降雨沖蝕，泥砂中天然的含磷礦物，可能以懸浮態或溶解態的型式進入水庫中，沉降(Sedimentation)進入底泥，或直接為藻類所攝取。然而當藻類死亡，其殘屑沉降(Debris)也會漸漸沉降至底泥中，成為底泥的一部份。等到底泥微生物的厭氧分解反應發生，使固相磷被分解而移動化後進入底泥孔隙水中，底泥磷的釋出也將成為水庫磷的內部來源，再為藻類所利用。此一磷累積及釋出的過程，遂形成水庫集水區磷的循環，使底泥磷的動態對水質造成影響。

2.2.1 底泥無機磷的溶解與沉澱化學平衡

底泥水邊界層的生物地質化學作用(Biogeochemical process)會影響湖庫水質及底泥沉積，或稱成岩(Diagenesis)作用。Mayer(1999)等人曾應用以溶解沉澱動態平衡之熱力

學原理為基礎，計算底泥中各種無機磷礦物的飽和度指數 (Saturation index, SI)的方法，推測底泥磷是否由母岩溶出，成為水體水質污染來源，或反向沉澱為含磷礦物。飽和度指數最早是由 Troup(1974)所提出，如(1)式，當 SI 大於或等於零時，表示該礦物處於飽和態，當 SI 小於零，表示處於未飽和態，可從固相繼續溶解，生成更多溶解磷，以滿足溶解沉澱動態平衡原理。

$$SI = \frac{1}{n} \log \left(\frac{IAP}{k_{sp}} \right)$$

其中：

k_{sp} ：礦物 A_nB_b ($n=a+b$)之溶度積常數；

IAP：各離子濃度之乘積；

如表 2.1，是本計畫所彙整有關無機磷礦物之反應平衡式及溶度積常數。溶解性鐵、錳、鈣、鋁、硫、氟等離子及底泥酸鹼值(s-pH)及底泥氧化還原電位(s-ORP)均會影響這些化合物沉澱或溶解的趨勢 (Moore and Reddy , 1994)。

2.2.2 底泥固相磷的組成

底泥固相磷的組成又稱磷的型態分佈(P speciation)，將底泥磷分類為不安定的磷 (labile-P)、鈣結合磷 (apatite-P)、鐵及鋁結合磷

(non-apatite- P)、有機磷(organic-P)及鈍性磷(residual-P)五類。其中，不安定的磷定義為可基於吸脫附平衡關係，被脫附溶解進入孔隙水中的磷，又稱可交換的磷。有機磷由水庫內水生物殘屑或排洩物沉降底泥所形成，可經微生物分解為溶解性的磷。鐵鋁磷及鈣結合磷是屬於原生礦物中的無機磷礦物，這些礦物磷存於懸浮泥砂上，自集水區進入水庫時，並不容易被脫附出來，故會跟著沉降於庫底形成底泥。但在底泥處於厭氧環境時，基於氧化還原電位或酸鹼值

的改變，這些礦物磷仍可能被溶解及移動出來。鈍性磷屬於難溶或難反應之磷，故在底泥中可視為幾乎不會反應及移動之物質。Hietyes and Lijklema(1980)、Williams (1976)及Golterman(1988)等人陸續發展出不同磷的序列萃取方法進行底泥各類固相磷之分選，如 Hietyes and Lijklema(1980)之實驗流程參見圖2.5。因此，透過磷的分選吾人將可了解這些磷相在底泥中佔有比例，進而推測磷在底泥中主要參與反應機制 (Pettersson, 1998)。過去陳世裕

(1990) 曾參考 Hietyes and Lijklema(1980)方法，對澄清湖水庫之底泥進行分選，而發現底泥的主要磷相是鈣結合磷(apatite-P)。

其次，不安定的磷又稱為可交換的磷，其在固相及液相之間的吸脫附關係，House(2000)引用吸脫附平衡理論，Freundlich 及 Langmuir isotherm 來描述。他曾以 X 光繞設方法分析黏土礦物種類，及根據黏土特性判斷吸附磷能力。由攜磷礦物風化釋放的磷以及施肥為植物所攝取的殘留物及殘留肥料通常為黏土部

份(Black , 1967 ; Rajan , 1974)。依據歷年底泥粒徑分析結果，底泥粒徑組成以小於 $32\mu\text{m}$ 的壤土或黏土粒徑居多，且隨著進入距離由上游灣潭至下游大壩而遞增，例如民國 89 年底泥採樣紀錄，大壩小於 $32\mu\text{m}$ 粒徑即高達 91.6 %。這些小顆粒懸浮固體，如同前述文獻所述，可能因表面積較大，吸附位址較多，而較易吸附或攜帶污染物。故底泥吸脫附磷的動態值得進一步研究。

2.2.3 底泥磷的傳輸

底泥磷來自水庫沉降的浮游藻體

及泥砂懸浮固體。底泥受生物或細菌耗氧反應分解有機物質的結果，將生成溶解態有機磷或無機磷。同時，因底泥層酸鹼值(s-pH)及氧化還原電位(s-ORP)的改變，也會影響若干底泥無機磷礦物溶解釋出 溶解性磷 (Moore and Reddy, 1994)。影響底泥磷通量釋出最重要因子是水中的溶氧 (Mortimer,1941)。這是因為當底層水呈好氧態時，位於底泥層上方會形成薄好氧層，在此層內，底泥二價鐵迅速氧化為三價鐵，成為過氧氫氧化鐵 Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$)後，將磷

酸根吸附或錯合，以阻攔其進入上層水中。然而當上層溶氧降為零時，膠羽狀鐵(III)錯合物即被還原，遂釋放出磷酸根。這種膠羽狀鐵(III)錯合物曾於 2000 年執行翡翠水庫底泥採樣時，於底泥採樣管中觀察到，顯示在底泥中此機制對磷傳輸有重要影響。Furrer(1996)認為，雖然在早期成岩時需考慮微生物作用，但底泥水界面，鐵、錳離子與磷酸根的錯合反應會影響其自由離子比率，如 Holdren 及 Armstrong(1980)，當 Fe/P 莫耳比大於 1.8，自由溶解磷數量便

因鐵離子的干擾而減少。由於翡翠水庫存在富含鐵的底泥，為確認鐵離子對溶解磷絆除的影響，底泥水界面處之溶氧及鐵濃度應與磷的數據進行聯合分析。

2.2.4 底泥磷模式發展

過去有關磷在底泥與水邊界層的釋出研究已相當多 (Syers, 1973; Bostrom, 1982)，描述磷在底泥與上層水之間進行交換的經典模式主要便是建立在鐵與磷，在有氧及缺氧條件下相互作用的基礎上 (Hakanson and Janson, 1983)。近年來，也陸續

有學者 Furrer(1996)曾發展可考慮磷的化學型態分佈、微生物反應的分層底泥磷模式，應用於優養湖泊的模擬。Di Toro(2000)發展底泥磷通量的穩定態解析方程及數值解。經應用現場量測磷通量數據與模擬值比對後發現，在溶氧高於 2 mg/L 時，模式和實測值之間的關係良好，但溶氧小於 2 mg/L 時，僅考慮底泥有機質厭氧分解，以氨的通量類比算出來的磷通量模擬值會低估實測值。Di Toro 推測可能是在溶氧高時，由於鐵錯合磷蓄積在底泥中未釋出，等到底泥厭

氧時錯合絆除的影響降低，遂增加了磷的釋出量。Van Der Molen(1991)將底泥溶解磷分為有機磷及無機磷兩種，考慮底泥礦化速率對該兩種磷的影響。目前廣為大家使用的美國環保署所發展的 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program) 模式，也將磷分為溶解及懸浮態的有機磷及無機磷，共四相磷，作為優養模組-EUTRO 的輸入參數。在底泥行礦化反應時，有機質分解生成溶解相有機磷，而溶解相有機磷可再進一步礦化生成溶解相無機磷，但模式未考慮

鐵對磷吸附錯合的影響。由美國陸軍工兵團所發展的 **CE-QUAL-W2(a Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0)** 模式也可模擬湖泊水庫磷的傳輸。其底泥磷的傳輸模式較簡單，僅考慮底泥有機質一階反應分解，或將底泥總磷的釋出直接以零階反應速率表示。

第三章 研究方法與內容

3.1 例行性檢測分析

本計畫每年 2 次的底泥檢測分析，分別於大壩 (S-5)、火燒樟(S-4)、後坑子(S-3)、馬祖林(S-2)及灣潭(S-1)五個水庫固定採樣點採樣，其地理位置請參見圖 3.1。採樣點說明如表 3.1。本計畫的採樣點選取是延續過去翡翠局的底泥計畫設定點位置。其好處是能和過去資料作比對，具有延續性。且分布點涵蓋水庫內上中下游及重要支流匯流口，具有其代表性。底泥採樣設備為貫入式之管狀採樣器，如圖 3.2 所示。因前數年之調查結果中，底泥中之鎳、鉻、銅、硒，以及有機氯農藥，均在背景濃度或偵測極限以下，故自去年度起不再檢測。而為瞭解底泥營養鹽磷之釋出潛勢，增加檢測底泥孔隙水中溶解性重金屬(鐵、錳、鋁、鈣、鎂)、溶解性總磷、溶解性硫、氟及底泥表面氧化還原電位等項目。

當現地以貫入式之套管底泥採樣器予以採樣後，現場先量測底泥代表深度 5 公分處之氧化還原電位，再將採樣底泥柱密封包覆攜回實驗室，取上層 10 公分底泥作為樣本，進行分析化驗。底泥前處理，溶解孔隙水係以離心機分離而得，分析底泥總量

之樣品則先經陰乾程序，再以 20 號篩過篩。主要係依據行政院環保署公告之標準程序與方法執行：重金屬為 NIEA S321.60T 及 W306.50A 系列，其他相關檢測項目為 NIEA W 或 S 系列，NIEA 未公告者則以標準方法(Standard methods)或土壤分析方法 (Soil analysis methods)及文獻刊載為主。詳細檢驗項目及分析方法請參見表 3.2 內容。配合實驗室品保品管程序查核，數據規劃之品保目標如表 3.3。

3.2 分年研究計畫

3.2.1 翡翠水庫底泥磷潛在負荷量評估

為評估底泥貯蓄庫中對水質具有潛在影響之磷負荷量，本計畫擬執行之工作項目如下所述。

3.2.1.1 歷年底泥檢測數據分析

希望從長時間趨勢觀察底泥季節性變化週期的動態。本計畫將彙整歷年底泥總磷含量變化之數據。已知歷年來每年於 3-4 月及 9-11 月各有兩次底泥採樣工作。去年委由台大環境工程學研究所執行計畫則分別於 1 月、6 月及 9 月，代表冬天、夏天及秋天三個不同季節進行底泥採樣。

3.2.1.2 底泥及集水區土壤中黏土礦物種類調查

希望透過底泥及集水區土壤黏土礦物性質之比對，有助於確認集水區土壤沖刷區位，底泥來源，供有關集水區研究計畫參考。本次採樣地點請參考圖 3.1 及表 3.1 說明。由於土壤性質可能因不同子集水區而異，故本研究採集不同集水區包括坪林北勢溪上游、逮魚岷溪及金瓜溪流域的土壤進行黏土礦物分析實驗，即希望擴大集

水區土壤黏土礦物樣本，比較不同的底泥來源及其性質。其次由分析結果探討底泥黏土礦物對磷的吸附能力。黏土礦物係採用 X 光繞射儀(靶-銅靶)分析鑑定，為避免有機質或鐵鋁的干擾，需進行黏粒樣品之分離與純化。黏粒懸浮液($< 2 \mu\text{m}$)分別做鈣、鎂及各種處理後，上機分析之。該方法主要係參考中華土壤肥料學會出版之「土壤分析手冊」內第八章，王明光、莊作權所編著之黏土礦物分析方法進行實驗。

3.2.1.3 推估集水區入流磷負荷量

參考翡翠水庫年報，泥砂淤積量或水中輸砂量及入流磷濃度數據，推估集水區入流磷負荷量。本研究在下年度計畫中會將年入流磷量，進入底泥部份納入水庫質量平衡計算，並將其結合水質模式。

由於年報內缺乏降雨期磷的實測數據，本計畫擬參考吳先琪等(2001)之實測數據，估計磷的輸入量。

3.2.2 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型建立

3.2.2.1 底泥孔隙水磷的分層變化

為瞭解現場底泥分層溶解性磷濃度之間的分布情形，及作為模式校正及驗證用途，進一步推估磷的釋出通量。將取上層 10 公分底泥，以每 2 公分間距一個樣本，進行分析。實驗之前處理方法同第 3.1 節內容所述。分析項目包括溶解總磷及溶解反應性磷。

3.2.2.2 底泥固相磷的分選

本計畫採取 Hietyes and Lijklema(1980) 建議磷的序列萃取方法進行底泥各類固相磷之分選，以瞭解底泥磷的組成。實驗萃取流程詳圖 2.4。

3.2.2.3 底泥磷的溶解與沉澱化學平衡

本計畫將應用 2 次檢測之各類溶解性離子濃度數據，參考表 2.1，有關無機磷礦物之反應平衡式及溶度積常數，配合離子強度校正，計算各種無機磷礦物的飽和度指數 (Saturation index, SI)。該方法是假設底泥孔隙水中各類溶解性離子間存在立即性的平衡，故從反應動力推測溶解性磷濃度的變化。因整個計算作業已可於 Microsoft EXCEL 程式軟體中執行，故不擬採用美國環保署所研發之地化模式 MINTEQA2。

3.2.2.4 影響磷釋出的主要環境參數

經參考文獻初步分析，除了底泥有機磷的生物分解速率常數(K_b)，影響磷釋出的主要環境參數尚包括底泥 pH 值、氧化還原電位(s-ORP)、溶氧、溶解性鐵、吸脫附磷之平衡常數等。將配合現地採樣數據結果，或規劃實驗觀察及解釋底泥磷移動化受環境參數改變之影響。

3.2.2.5 底泥磷模式之發展

本計畫將參考若干水質模式如 WASP 的底泥模組，配合翡翠水庫實際觀察現況，進行模擬設計。例如加入底泥溶解性鐵對磷吸附錯合的影響，使水質模擬結果能符合翡翠水庫實際情形。

第四章 結果與討論

4.1 例行性檢測分析

本計畫於 5 月 14 日第一次現地採樣分析結果，彙整於表 4.1 4.3。8 月 28 日第二次現地採樣分析結果，彙整於表 4.4 4.6。為補充第一次採樣時，因儀器故障，使底泥氧化還原電位數據遺漏缺失，另於 12 月 6 日再去現場採樣一次，亦彙整當時底泥的氧化還原電位及 pH 值於表 4.4 內。本計畫分析之品保品管數據結果如附錄一所示。底泥現場採樣記錄表如附錄二所示。5 月第一次採樣前幾天有大雨發生，因此採樣時觀察到部份底泥管有約 1 公分土黃色的底泥覆蓋在上層，與下層呈灰黑色的還原態有差別。推測是從集水區進來甫沉降的新鮮底泥。8 月第二次採樣時，翡翠水庫水位較 5 月時降低近 20 米，採樣時上游表水呈灰綠色，明顯有優養跡象。12 月 6 日第三次採樣，因 9 月納莉颱風影響，表層水呈黃綠色混濁，大壩分層濁度仍高，底泥管柱上層有明顯土黃色底泥覆蓋。茲分別討論檢測分析結果如后。

4.1.1 底泥一般及營養鹽類

兩次底泥一般及營養鹽類分析結果如表 4.1 及 4.4 所示。

(1) 底泥 pH 值及氧化還原電位

第 1 次採樣(表 4.1) 底泥 pH 值介於 5.3-6.8 之間,較第 2 次 (表 4.1)介於 6.9-7.0 之間為低,與過去平均在 4-6.5 範位相當,也與集水區土壤 pH 值 4-6 之間相近。比較各測站 pH 值變化,第 1 次採樣的火燒樟(S-4)最低,灣潭(S-1)最高。相對地,溶解性總磷、反應性磷、鐵、鋁、錳濃度卻均以火燒樟(S-4)最高,灣潭(S-1)最低。底泥 pH 值與溶解離子濃度之間剛好成反比的情形與去年底泥採樣分析的結果相似。顯示當底泥 pH 下降,可能促使固相污染物移動及溶解進入孔隙水中。

若以底泥 ORP 表示底泥還原狀態,2 次數據底泥上層水 ORP 變化均由上游至下游依序遞減,然而第 2 次採樣的底泥 ORP 的變化則不大,僅代表底泥均處於還原至狀態。

(2) 底泥含水量

比較 2 次五個採樣點結果,均以灣潭(S-1)最小(約 37%),其他介於 42~55%。推測底泥含水量與底泥粒徑組成有關,灣潭之粒徑較粗,遂使底泥孔隙率降低。由於第一次採樣剛有大雨發生,故 S-2~S-5 四點的含水量變化不大,介於 53~55%。但第二次採樣結果,S-2~S-5 四點的含水量已有明顯差異,除了底泥初期有壓密行為,降低底泥含水量外,亦可能因瓣狀水系的水流特性有助懸浮顆粒在河川中之粒徑篩選作用,使大壩粒徑較細,故孔隙率較其他點為高,亦使含水量相對較高。

(3) 底泥有機質

第 1 次採樣有機質介於 3.26 ~ 5.27%。以灣潭(S-1)最小,大壩(S-5)最高。整體

而言較去年測值 1.95 ~ 2.56 mg/kg 要高。第 2 次有機質介於 1.59 ~ 2.09%，較第一次為低。

(4) 底泥營養鹽總磷

底泥總磷第 2 次採樣數據較第 1 次為高。比較五個採樣點，兩次採樣均以馬祖林(S-2)最高。推測磷含量的增加可能與季節性變化有關，因夏季水體藻類生長較旺盛，相對地，死亡的藻體沉降累積至底泥亦增加。此情形和去年採樣分析結果相似，顯示沉降有機磷是底泥磷重要來源。其次比較孔隙水溶解性磷，兩次溶解磷的變化並不大。溶解磷與底泥還原狀態有關，雖然底泥總磷量增加，溶解磷不一定隨著增加。由於孔隙水溶解總磷濃度介於 0.98 ~ 2.32 mg/L，與其它國家已富營養化的湖泊，底泥孔隙水總磷達 1.20~2.25 mg/L(Hakanson and Jansson, 1983)之程度相當，推測翡翠水庫磷的內部負荷對上層水庫水質已有潛在之影響。

(5) 底泥營養鹽總氮

兩次底泥總氮變化不大，介於 880~1750mg/kg 之間，與去年底泥平均值 1308 ~ 1960mg/kg 相近，也和民國 81~85 年總氮平均值，1540 mg/kg (台大慶齡工業研究中心,1999)相當，顯示底泥總氮變化應已趨於穩定。

(6) 底泥孔隙水溶解性硫及氟

溶解性硫除了第 2 次的大壩(S-5)測站為 0.50mg/L 外，其他與去年測值 0.21 ~ 0.29 mg/L 相當。推測可能是 S-5 測站厭氧程度較劇烈，遂累積相當的還原性硫。溶解性氟來源可能是存在礦石中因厭氧分解而溶出。第 2 次測值整體而言高於第 1

次測值，也較去年測值 0.07 ~ 0.1 mg/L 為高。

4.1.2 底泥粒徑組成

兩次底泥粒徑分析結果如表 4.2 及 4.5 所示。五個採樣點之個別粒徑分布圖請詳圖 4.1 及圖 4.2。由結果比較，底泥粒徑主要以小於 106 μ m 為主，在第 2 次採樣結果，五個採樣點粒徑多集中於 16-38 μ m 粉粒範圍，佔 29-52% 不等。與過去檢測結果相近。

4.1.3 底泥重金屬類

1. 底泥總量重金屬類

兩次底泥各類重金屬檢測含量結果請參考表 4.3 及表 4.6 和歷年檢測數據結果相當，無明顯變化。其中，錳在大壩(S-5)濃度一直維持在 3000 mg/L 左右，和其他四點 300-1000mg/L 範圍差很多，值得繼續追蹤觀察。將檢測結果與行政院環保署於民國 89 年 5 月公告「土壤及地下水污染整治法公布施行後過渡時期執行要點」內，表一、台灣地區土壤重金屬含量等級區分表(詳附錄三)加以比較，翡翠水庫底泥之砷、汞、鉛、銅之底泥含量居於第三級(背景值)或第四級(觀察值)，屬於正常值範圍。而鋅含量雖屬於第五級(監測值)範圍，但經查陳尊賢(1997)「特定河川底泥微量元素含量與水質關係之調查研究(第一年)」報告書內，發現北勢溪地質母岩中微量元素之資料，鋅平均含量為 10~120 mg/kg，與本年度監測數據範圍相當。顯示底泥鋅重金屬檢測濃度為當地母岩背景值所造成，故研判在檢測期間應無外來重大污染。其次和民國 90 年 11 月 21 日新公告的「土壤污染監測基準」(詳附

錄四)內容相較，翡翠水庫底泥砷、汞、鉛、銅及鋅之底泥含量亦低於監測基準值規定濃度。

2.底泥溶解性重金屬類

如表 4.3 及表 4.6，整體而言，第 2 次測值較第 1 次為高，顯示底泥厭氧程度可能提高。溶解性的鈣及鎂，均在前兩點馬祖林(S-2)及灣潭(S-1)較高，且和其他點差異甚大。本計畫推測除了地質背景濃度外，可能有部份鈣、鎂是來自鄰近集水區農業行為施肥造成。經與底泥總磷含量比對，馬祖林(S-2)兩次的磷含量均偏高，可能也是肥料中的磷酸鈣造成。已知刻由行政院環保署委託計畫”大台北水源保護區之污染源調查與評估計劃(EPA-90-G103-02-216)”正在執行，該計劃對於本區農業行為造成的非點源污染調查資料或許有助澄清底泥磷及鈣、鎂含量偏高的原因。

4.2 底泥磷潛在負荷量評估

4.2.1 歷年底泥總磷含量變化

翡翠水庫自 1994 至 2001 年於大壩 (S-5)、火燒樟(S-4)、後坑子(S-3)、馬祖林(S-2)及灣潭(S-1)五個採樣點之底泥總磷含量變化彙整於圖 4.3 內。五個點之間濃度差異變化並不明顯，歷年磷含量的變化落在 200-800 mg/kg 之間，由圖上推測底泥磷含量有往上增加的趨勢。

4.2.2 底泥及集水區土壤黏土礦物分析

如圖 3.1 及表 3.1 本次採樣地點說明，希望透過底泥及集水區土壤黏土礦物性質之比對，有助於確認集水區土壤沖刷區位，底泥來源，供有關集水區研究計畫

參考。從黏土礦物實驗結果顯示，如表 4.7，2 次採樣的底泥(No.1~10)，均有較一致的黏土礦物分佈，除了 No.2 有少量蒙特石(montmorillonite)，No.4、No.6~8 有少量綠泥石(chlorite)之外，其餘分佈皆為一致。成份主要含有大量石英(quartz)與伊萊石(illite)，另外還有較少量之高嶺石(Kaolinite)、蛭石(vermiculite)以及鋁英石(gibbsite)。

在集水區土壤(No.11~20)方面，No.11(火燒樟溪口塌土)含有部分綠泥石而缺乏高嶺石，No.13(坪林隧道口施工棄土)因為有機物質較多因此黏粒含量較少，圖譜較不明顯但仍可看出主要礦物之分佈趨勢，No.15、No.17、No.20 含有較多含量之 HIV(Hydroxy Interlayer Vermiculite)，其他土層則與 No.1~No.10 分佈相似。另外發現 No.2(馬祖林)與 No.16(石槽)含有蒙特石，且此兩個土層之黏土礦物分佈趨勢相當一致。

由上述比對結果，翡翠水庫五個測點底泥與集水區土壤的黏土礦物種類相近，可證實除集水區土壤外，底泥應無其他來源。但因所有子集水區的黏土礦物的物種及含量比例均相近，無法區分出不同區位之間的差異，本方法判釋結果遂無法協助確認集水區土壤沖刷主要區位，供有關集水區研究計畫參考。其次土壤黏土成份主要含有伊萊石(illite)，此黏土性質對污染物的吸附能力較蒙特石或高嶺石要低，推測由黏土吸附磷含量應不高。

4.2.3 翡翠水庫集水區入流磷負荷量評估

除了溶解性磷之外，有相當部份的懸浮態磷是隨著泥砂入流進入水庫。因此吳先琪等人(2001)曾利用降雨期在水庫上游渡南橋採樣的磷與懸浮固體數據，得到兩

者間良好的線性相關($R^2=0.84$)之關係。過去，吳先琪(1990)及陳怡靜(2000)等均曾採用此種磷與懸浮固體之間存在的線性相關迴歸經驗式推估集水區入流磷負荷量。在德基水庫(陳怡靜,2000)計算出的磷年負荷量與陳秋楊(2000)使用水質模式推估的負荷量數量級相當，而遠大於一般以單位面積法計算不同土地使用目的所承載的土壤含磷負荷量所計算出來的磷輸入量。造成此估計誤差的原因可能是缺乏國內對不同土地使用的土壤含磷負荷量之實測數據，且國內集水區的土壤沖刷量大，因此採用國外數據可能低估便可能低估入流磷負荷量。因此在本計畫中，擬採用從河川採樣的實測數據所得磷與懸浮固體之間存在的線性相關迴歸經驗式推估集水區入流磷負荷量。在泥砂部份擬參考翡翠水庫年報，泥砂淤積量數據予以推估。因為水庫缺乏暴雨期入庫泥砂的數據，僅用平時流量下的懸浮固體濃度推算年泥砂負荷量，將可能低估實際入流磷負荷量。相較之下，翡翠局現地測量之泥砂淤積量較為可信，遂擬以泥砂淤積量數據代入迴歸經驗式中推估磷的負荷量。如表 4.8 為 1988 年至 2000 年之推估數據，1988 年以前翡翠水庫運作初期，由於淹沒區的邊坡尚不穩定，使淤積量偏高，因此該年磷數據不應與其他年加以比較。1991 年至 2000 年間，除了 1996 年的賀伯颱風帶來相當大的泥砂量，使入流磷負荷量升高至 7462 Ton/yr，其他年落在 1000-3000 Ton/yr 間範圍。淤積量的來源除了從上游北勢溪及其支流進入外，還有相當數量可能是水庫內邊坡土壤崩落造成。因此，所計算的數據和德基水庫的入流磷量約在數百個 Ton/yr 相比要大很多。由於這些進入水庫的磷在水庫中隨著其沉降過程逐漸釋出的數量和當時水

庫水文及季節環境有關，本研究在下年度計畫中會將年入流磷量，和水庫內部磷一起納入水庫質量平衡計算，以確核水庫的外部磷對水庫磷濃度的實際影響。

4.3 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式建立

4.3.1 底泥固相磷的分選

底泥五個採樣點固相磷的型態分佈結果如圖 4.4。除了鈍性磷(residual-P)外，第 1 次底泥固相磷組成主要是鐵及鋁結合磷(non-apatite- P)，除了火燒樟 (S-4)，其次主要是有機磷(organic-P)，再其次是鈣結合磷(apatite-P)。第 2 次底泥固相磷則以有機磷較多，其次為鐵及鋁結合磷。推測可能是夏天沉降的藻體量提高遂使底泥有機磷相對增加。兩次吸附磷(labile-P)佔總磷約 0.02 ~ 0.08% 比例，相較於其他磷相要小很多。隨著地點，各個底泥磷的組成還是有個別差異。例如，第 1 次採樣灣潭的鈣結合磷(apatite-P) (23.91%) 與鐵及鋁結合磷(non-apatite- P) (26.18%) 的比例相當。參考第 4.2.2 節黏土礦物分析，五個測點的底泥來源並無顯著差異，因此灣潭的鈣結合磷較其他點要高原因，應可去除背景地質影響，而可能是人為的污染進入底泥所造成。與第 4.1.3 節底泥溶解性重金屬檢測鈣含量偏高的結果吻合。

4.3.2 底泥磷的溶解與沉澱化學平衡

引用 2 次採樣數據計算表 2.1 所列候選的礦物飽和度指數(SI)，結果如表 4.9。在 11 個候選的含磷礦物中，發生未飽和礦物的個數以火燒樟(S-4) 最多，據查此處的底泥 pH 值最低而溶解磷最高，表示當底泥還原時，pH 值的降低將趨使底泥

固相磷溶解出來，增加溶解磷濃度，也間接提高了其進入上層水體的潛勢。然而第 2 次測得 pH 值略高(6.9-7.0)，計算 SI 值多大於零，則顯示此時各類礦物溶出能力下降。表中 AlPO_4 的 SI 值最大，是因為在 pH 等於 6 時，其溶解度最小。陳怡靜(2001)曾以 2000 年翡翠水庫底泥檢測數據，計算各礦物之飽和度指數 (SI)，發現 6 月夏季時飽和度指數(SI)小於零(呈未飽和狀態)的個數最多，其次為 9 月及 1 月。6 月測得底泥氧化還原電位 ORP (介於-174.9 -231mV) 及 pH 值 (介於 4.29 4.89)範圍也最低，顯示夏季底泥厭氧環境升高時，極有利於底泥中的無機磷礦物持續溶解釋出，此時底泥內部磷的釋出實為水庫磷的一大來源。總體而論，使用飽和度指數雖無法估計出溶解磷的濃度，但可作為判斷底泥磷釋出潛勢的指標。

4.3.3 分層底泥孔隙水磷的變化

2 次採樣於五個採樣點之底泥分層孔隙水，溶解總磷及反應性磷濃度之分佈分別如圖 4.5 及 4.6 所示。由圖看出，底泥溶解磷具有明顯的向上移動趨勢，將促使磷進入上層水中，成為水體磷的來源。在第 1 次採樣(90 年 5 月)，馬祖林(S-2)溶解磷濃度值及濃度梯度最大，其他四點分佈範圍相當。此結果和表 4.1，以底泥上層 10 公分為代表樣本分析平均的底泥孔隙水溶解總磷及反應性磷數據得到的，以火燒樟(S-4)濃度最高的情形不同，推測可能是採樣時因船受水流影響而移動，致改變底泥採樣點位置所致。也顯示，馬祖林(S-2)的底泥環境可能有較大之異質性。日後將加強採樣人員的操作熟練度，並切實記錄採樣點之座標。其次，觀察濃度對深度的變化，0-5 公分之間，各點的磷濃度分布多較均勻，自 5 公分以後溶解

磷濃度就顯著地變化。假設各點隨時間進入底泥的磷含量及組成相近，造成底泥溶解磷變化除了物理傳輸機制以外，則可能與底泥溶氧進入深度有關。因為溶氧存在促使自由磷酸根被三價鐵所吸附，降低溶解磷濃度。

4.3.4 影響磷釋出的主要環境參數

4.3.4.1 氧化還原電位(ORP)及酸鹼值(pH)

本計畫將 2000 年底泥檢測數據分析得知，酸鹼值(pH)與溶解總磷的正相關性存在，其 R^2 為 0.79，比氧化還原電位(ORP)要高($R^2=0.57$)，如先前討論，底泥固相磷會受 pH 值影響而溶解移動。茲將 2000 年翡翠水庫水質連同底泥監測數據予以聯合分析也發現，底泥 ORP 及 pH 與水體表面之葉綠素 a (chloro-a)、大氣溫度(AT)及水底部酸鹼值 (w-pH)變化有明顯的相關，相關係數 ρ 介於 0.7 0.85 之間。若從影響底泥 ORP 及 pH 變化的微生物反應速率動力來解釋，可能是底泥厭氧反應速率和夏季豐富的沉降物基質造成，亦即與上層水體富營養化狀態有關，因此底泥磷的釋出亦將可能持續使水質發生惡化。由於底泥 ORP 及 pH 變化也是厭氧反應的結果，且無法量化的預測，因此無法將其作為造成底泥磷釋出的直接原因，在模式中作為輸入參數。僅將其作為數據比對及解釋現象之用途。

4.3.4.2 溶氧(DO)

由先前文獻回顧已知，溶氧存在會使三價鐵和磷酸根結合，影響底泥磷釋出通量大小。茲於實驗室進行底泥管柱實驗，觀察底泥磷移動化受溶氧影響。將兩支現場採集底泥管柱取回分別通以氮氣及空氣，以模擬無氧及有氧存在情形。如圖

4.7 為實驗結果。在實驗初期，兩支管柱均有明顯的濃度升高，隨後降低現象。推測可能是水流使底泥有再懸浮效應所致。在前 0.7 天從濃度累積量換算為底泥釋出的通量，分別為管柱 A， $12.9 \text{ ug/cm}^2 \text{ day}$ 及管柱 B， $9.7 \text{ ug/cm}^2 \text{ day}$ 。顯示通空氣的管柱 B 仍有受到氧氣抑制的影響。不過其後管柱 A(通氮氣)的上層水溶氧在第 5.7 天以後雖逐漸降低至 1.4 mg/L ，但是在通氮氣過程中，其濃度隨時間的變化並沒有與管柱 B(通空氣)有顯著差異，原因可能是此時管柱溶氧仍偏高，故仍對底泥磷釋出有抑制作用。從實驗過程觀察到，管柱表面有紅褐色的膠羽生成，應是三價鐵，遂可能開始吸附磷酸根。其次，管柱 B 的底泥孔隙水原始濃度為 1065 ug/L ，高於管柱 A 的 554 ug/L ，也可能是 A 與 B 管柱濃度分佈差異性降低的原因。實驗室通氮氣方法無法使上層水溶氧降到零，以後將嘗試使用亞硫酸鈉等藥品，使實驗管柱水中溶氧降至零，以模擬厭氧條件時底泥磷通量釋出情形。

4.3.4.3 底泥吸脫附平衡係數(K_p)

假設底泥固相及溶解相之間存在吸脫附平衡，本計畫擬使用線性分配的理論，以分配係數(K_p)來表示兩相間的關係。當溶解相濃度達到一定值與固相平衡時，固相磷即不再繼續釋出。故 K_p 大小將決定固相磷進入溶解相的能力。如圖 4.5 及 4.6，底泥孔隙水溶解磷濃度剖面分布，在底泥較深處，往往溶解磷濃度有最大值。假設其和固相磷之間有瞬間平衡關係，計算各點固相磷濃度與溶解磷最大值的比例， K_p 值介於 $200\text{-}400 \text{ L/kg}$ 範圍。

4.3.4.4 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式雛型

1. 簡介

假設底泥可因溶氧存在與否分成有氧層(oxic zone), 無氧層(anoxic zone)及掩埋層(burial zone)。底泥磷移動化受底泥地質化學生物因子作用主要發生在上面兩層。因此, 研究主要探討的是有氧層及無氧層底泥磷的移動及傳輸行為, 並將其訂為底泥磷傳輸的"2-BOX SEDIMENT PHOSPHORUS MODEL(2BSPM)"。模式不考慮底泥的再懸浮(resuspension)及底床泥砂運動(bed load transport)。

經由翡翠水庫現地採樣分析結果, 底泥磷主要以有機磷及無機礦物磷的鐵及鋁磷為主, 可交換磷或稱吸附磷次之, 鈣磷也有一部份, 但因地質中鈣組成較小, 故鈣磷的比例不若鐵及鋁磷高。至於鈍性磷, 因其不易發生反應促使磷的移動, 不將其納入模式中。

2. 底泥磷一維傳輸及釋出通量概念模式方程

如圖 4.8 為底泥磷傳輸概念模式示意圖。模式以一維分子擴散運動模擬磷的物理傳輸行為。底泥總磷(C_t)包括固相(C_s)及溶解相磷(C_w)。在反應項部份, 假設底泥有機磷(C_{s1})受到一階厭氧生物分解反應及礦化反應, 生成溶解態有機磷及無機磷。而溶解磷與固相無機磷(包括鐵及鋁結合磷、鈣結合磷及吸附磷)(C_{s2})之間存在線性分配關係。當溶解磷濃度增加到一定值與固相平衡時, 固相磷即不再繼續釋出。

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[n^2 D_m \frac{\partial C_w}{\partial Z} \right] + f(\text{reaction} - \text{terms}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
C_t &= nC_w + \rho_b(C_{S1} + C_{S2}) = [n + (1-n)\rho_b(K_{P1} + K_{P2})] \cdot C_w = R_d C_w \\
C_S &= K_P C_w \\
C_w &= C_t / R_d \\
C_S &= C_{S1} + C_{S2} \\
C_w &= C_{w1} + C_{w2} \\
f_w &= \frac{C_w}{1 + k\rho_b}
\end{aligned}$$

重寫(1)式為(2)式：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_t}{\partial t} &= D_{app} \frac{\partial^2 C_t}{\partial Z^2} + f(\text{reaction} - \text{terms}) \\
D_{app} &= \frac{n^2 D_m}{R_d}
\end{aligned} \tag{2}$$

茲分別探討溶解有機磷(C_{W1})及溶解無機磷(C_{W2}) 於反應項的變化：

$$\frac{\partial C_{W2}}{\partial t} = k_{pzd} \theta_{pzd}^{(T-20)} a_{pc} f_{op} C_{S1} - k_{OPD} \theta_{OPD}^{(T-20)} f_{W2} C_{W2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial C_{W1}}{\partial t} = k_{pzd} \theta_{pzd}^{(T-20)} a_{pc} (1 - f_{op}) C_{S1} + k_{OPD} \theta_{OPD}^{(T-20)} f_{W2} C_{W2} + \alpha(K_{P2} / C_{S2} - C_{W1}) \tag{4}$$

由於 BOX1 溶氧將使二價鐵離子轉化為三價鐵，將溶解無機磷(C_{W2})吸附，因

此 BOX1 中的分配係數 K_{P2-1} 會大於 BOX2 的 K_{P2-2} ：

$$\begin{aligned}
K_{P2-1} &= K_{P2-2}(\Delta K) \text{ for } O_2(0) > O_{2 \text{ critical}} \\
K_{P2-1} &= K_{P2-2}(\Delta K)^\beta \\
\beta &= \frac{O_2(0)}{O_{2 \text{ critical}}} \text{ for } O_2(0) < O_{2 \text{ critical}}
\end{aligned} \tag{5}$$

So if $\beta = 0$, $K_{P2-1} = K_{P2-2}$

$$K_{P2} = f(k_{pzd}, k_{OPD}, DO, totalFe)$$

3.底泥磷的釋出通量方程：

$$Z=0; q = \frac{D_{app} n_{ij}}{L n_{ij}} \left(\frac{f_{wj} C_{Wjk}}{n_j} - \frac{f_{wik} C_{Wik}}{n_i} \right) \quad (6)$$

其中 n_{ij} 表示在底泥水界面的平均孔隙率； f_{wj} 表示溶解磷 C_{Wj} 的比例；

4.底泥 BOX1 深度的決定

假設底泥溶氧的傳輸趨於穩定態，不隨時間而變，而持續有底泥需氧量消耗 (SOD)，以 R 表示，其反應式如下，

$$D_{O_2} \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial^2 Z} - R = 0 \quad (7)$$

$$Z=0; C=C_{O_2}$$

$$Z=Z_1; \frac{\partial C_{O_2}}{\partial Z} = 0; C_{O_2} = 0;$$

$$Z=Z_1 = \sqrt{\frac{2D_{O_2} C_{O_2}}{R_{O_2}}} \quad (8)$$

在下一年度計畫中，將完成篆寫底泥磷傳輸數值模式工作，及應用現場數據以檢定與驗證模式。並將繼續檢討模式內容，使模擬更接近翡翠水庫底泥磷的傳輸現象，作為有效的預測工具。

4.3.4.5 現場底泥磷釋出通量初步預測

參考翡翠水庫今年度大壩分層水質的紀錄，將底部總磷與溶氧變化彙整於圖

4.9。由圖看出，大壩底部溶氧逐漸降低，至 8 月甚至幾近於零。而底部總磷卻持續升高。倘若底部總磷無底泥磷釋出以外的來源，且未受擾動，則其累積量應可視為底泥磷通量釋出造成。茲應用簡單之分子擴散理論 Fick's Law，先初步估磷通量：

$$F = -n^2 D_m \frac{\partial C}{\partial X} \quad (9)$$

其中：

F：磷通量，ug/cm²day

n：孔隙率，無因次

D_M：擴散係數，cm²/day(茲採用 Krom 及 Berner(1980)，磷於 20 之擴散係數為 3.6E-6 cm²/sec)

C：孔隙水溶解磷濃度，ug/L

X：底泥有效深度，假設為 5cm

採用兩次大壩(S-5)採集之孔隙水總磷及底層水濃度的梯度預測磷通量，與底層水總磷累積量隨時間變化反推求的實測通量進行比較，假設底層水未擾動厚度為 1m，計算結果如表 4.10。結果顯示，單純以 Fick's Law 預測之磷通量 0.032~0.049 ug/cm²day，略高於實測值 0.013~0.014 ug/cm²day。因此若考慮底泥的吸附產生遲滯效應以及生物分解反應，如本計畫的磷模式，應較能反應底泥實際狀況，及較準確的推估磷通量。現場的磷通量和實驗室通空氣的管柱 B，9.7 ug/cm² day 的磷通量(詳第 4.3.4.2 節)相比較，實驗室通量較現場要大約 100 倍。兩者差異如此大的原因可能是實驗室管柱底部因通氣造成水流流動，有底泥再懸浮效應所致。顯示，水流狀況對底泥磷釋出的影響極大。未來，仍將再作重覆實驗以進行比對。

茲假設兩次採樣期間，全區水庫的底泥磷通量均相同，以水域面積 10.24 KM² 估計，水庫內部總磷之負荷量約為 115-178 kg/yr。在下一年度計畫中，該計算數

據將代入水庫磷的質量平衡計算中加以確核，以量化其對水庫水中磷濃度的影響。

第五章 結論與建議

本計畫第一年度研究成果之結論與建議如后：

1. 翡翠水庫今年底泥各項檢測項目分析結果與過去底泥數據相較，差異不大。推測在檢測期間應無外來之重大污染。
2. 從底泥鈣、鎂及總磷含量推測，上游灣潭(S-1)及馬祖林(S-2)可能有來自鄰近集水區農業行為非點源之污染。建議翡管局配合相關單位進行追蹤調查。

3. 底泥黏土礦物以伊萊石為主。採樣底泥均有較一致的黏土礦物分佈，並與集水區土壤黏土礦物相近，表示底泥應沒有集水區以外的泥砂進入。
4. 分析歷年來底泥含磷量變化，五個底泥採樣點之間含磷量差異並不明顯。然而比較今年及去年底泥磷含量變化，可看出隨著季節變化，夏秋季的底泥總磷較冬季及春季時要高，推測應是夏季光合作用旺盛，使沉降的藻體量增加累積於底泥造成。
5. 推估翡翠水庫入流磷年負荷量，以泥砂與總磷之間類似線性分配關係的迴歸式方法推估入流磷負荷量，除了 1996 年賀伯颱風挾帶大量泥砂，使推估值升高至 7462 Ton/yr，其他年落在 1000-3000 Ton/yr 間範圍。此方法推估數據未來會結合底泥磷的內部負荷量作水庫質量平衡確核。
6. 底泥固相磷的型態分佈，主要為鐵及鋁結合磷(non-apatite- P)及有機磷(organic-P)。隨季節變化，第 2 次(8 月)的有機磷高於無機的鐵及鋁結合磷。
7. 底泥磷的飽和度指數 (SI)，可作為判斷底泥磷釋出潛勢的指標。達到飽和點(SI 大於等於零者)的含磷礦物個數最少，表示底泥還原態較有助於溶解性磷的生成，遂提高其進入上層水體的潛勢。
8. 依據底泥分層孔隙水的溶解總磷及反應性磷濃度剖面分布顯示，五個採樣點底泥溶解磷均有一明顯的向外濃度梯度潛勢，促使磷向外移動進入上層水中。
9. 從底泥檢測數據分析及實驗室試驗得知，影響磷釋出的主要環境

參數包括氧化還原電位(ORP)、酸鹼值(pH)、溶氧及磷的吸脫附平衡係數(K_p)。

10. 初步建構之底泥磷一維傳輸及釋出通量概念模式雖型有考慮底泥有機磷的厭氧分解、礦化反應、無機固相磷與溶解磷之間的分配關係以及因溶氧存在使有氧層的磷受到鐵離子吸附的影響。將可符合翡翠水庫底泥的現況，模擬磷的傳輸。
11. 以今年大壩分層水質監測數據為例，利用分子擴散運動 Fick's Law 推估的磷通量 $0.032\sim 0.049\text{ ug/cm}^2\text{day}$ ，略高於實測值 $0.013\sim 0.014\text{ ug/cm}^2\text{day}$ 。顯示底泥磷的移動還是受到底泥吸附及生物厭氧反應的影響。
12. 水庫每年 1,2 月時，上、中、下層水溫會趨於一致，使溫度分層被破壞，而發生翻轉。其好處是低溫形成的密度流進入水庫後會供給底部豐富溶氧，使被底泥消耗之溶氧再度補注。然而壞處則是造成因水體發生混合作用，將中下層高濃度磷帶到表水，而使水質發生優養。雖然今年 2 月大壩沒有出現高濃度磷，據推測可能與今年是暖冬，底部並未發生足夠的水流混合有關。然而從大壩底部持續累積的高濃度磷推測，如果今年的冬天夠冷，還是可能有低溫的密度流進入水庫底部，翻轉而使底部豐富的磷被帶到表水。建議翡管局未來應加強底部溶氧的觀測及研究氣象水文變化對水質的影響，有助澄清大壩水理與水質現況發生原因，俾謀求有效的水質改善策略。

第六章 參考文獻

- **Black, C.A.,** “*Soil-plant Relationships*”, **John Wiely & Sons (1967).**
- **Bostrom, B. and K. Petterson,**

“Different Patterns of Phosphorus Release from Lake Sediments in Laboratory Experiments”, *Hydrobiologia*, 92, 415-429(1982).

- . Bruce, J.P., “Impact of Climate Change on Lakes and Reservoirs”, *Guidelines of Lake Management*, vol.8., *The World’s Lakes in Crisis*, Chap.1, International Lake Environment Committee, UNEP(1997).**
- . Di Toro, D.M., “*Sediment Flux Modeling*”, John Wiley & Sons, Inc., Publication (2001).**
- . Eckert, W., A. Nishri and R. Parparova., “Factors regulating the flux of phosphate at the sediment-water interface of a subtropical calcareous lake: a**

simulation study with intact sediment cores”, *Water, Air and Soil Pollution*, 99(4), 401-409(1996).

- . Furrer, G. and B. Wehrli, “Microbial Reactions, Chemical Speciation, and Multicomponent Diffusion in Porewaters of a Eutrophic Lake”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13), 2333-2346(1996).**
- . Golterman, H.L. and A. Booman, “Sequential Extraction of Iron-Phosphate and Calcium-Phosphate from Sediments by Chelating Agents”, *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 23, 904-909(1988).**
- . Hakanson, L. and M. Jansson, “*Pinciples of Lake Sedimentology*”,**

**Springer-Verlag, Berlin,
Heidelberg, New York,
Tokyo(1983)**

- Hieltjes, A. and L. Lijklema, "Fractionation of Inorganic Phosphate in Calcareous Sediment," *J. Environ. Qual.*, 9,405-407(1980).
- **Holdren, G.C. and D.E. Armstrong,**
"Factors affecting phosphorus
release from intact lake sediment
cores", *Environ. Sci. Technol.*, 1,
79-87(1980).
- **House, W.A. and F.H. Denison,**
"Factors Influencing the
Measurement of Equilibrium
Phosphate Concentrations in
River Sediments", *Wat. Res.*, 34(4),
1187-1200 (2000).
- **Krom, M.D. and R.A. Berner,**
"The experimental Determination
of the Diffusion Coefficient of
Sulfate, Ammonium and

- Phosphate in Anoxic Marine Sediment”, *Limnol. Oceanogr.*, 25, 237(1980)**
- **Mayer, T., C. Ptacek and L. Zanini, “Sediments as a Source of Nutrients to Hypereutrophic Marshes of Point Pelee, Ontario, Canada”, *Wat. Res.*, 33(6), 1460-1470 (1999).**
 - **Moore, P.A. and K.R. Reddy, “Role of Eh and pH on Phosphorus Geochemistry in Sediments of Lake Okeechobee, Florida”, *J. Environ. Qual.*, 23,955-964(1994).**
 - Mortimer, C. H., “Chemical Exchanges between Sediments and Water in the Great Lake-Speculation on Probable Regulatory Mechanisms”, *Limnol. Oceanogr.*, 16, 387(1971).
 - **Murphy, T. P., “Coprecipitation of Phosphate with Calcite in a Naturally Eutrophic Lake”,**

- Limnol. Oceanogr.*, 28(1), 58(1983).
- **Pettersson, K., “Mechanisms for Internal Loading of Phosphorus in Lakes”, *Hydrobiologia*, 373/374,21-25(1998).**
 - **Rajan, S.S.S., K.W. Perrott and W.M.H. Saunders, “ Identification of phosphorus-reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values”, *J. Soil Sci.*, 25, 438-447(1974).**
 - **Seo, Dong-il and R.P. Canale, “Analysis of sediment characteristics and total phosphorus models for Shagawa Lake”, *J. Environ. Eng.*, 125(4), 346-350(1999).**
 - **Syers. J.K., R.F. Harris and D.E.**

Armstrong, “Phosphate chemistry in Lake Sediments”, *J. Environ. Qual.*, 2,1-14(1973).

- Stumm, W. and J.J. Morgan, “*Aquatic Chemistry*”, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y. (1996).
- Troup, B.N., “*The interaction of iron with phosphate, carbonate, and sulfide in Chesapeake Bay interstitial waters: a thermodynamic interpretation*”, Ph.D. thesis, John Hopkins Univ., Baltimore, MD.(1974).
- Weatherly, G.L., “A study of the Bottom Boundary Layer of the Florida Current”, *J. Phys. Oceanogr.*, 2, 54-72(1972).
- Williams, J.D.H., “Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie”, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 413-429(1976).
- **Van Der Molen, D.T., “ A Simple, Dynamic Model for the Simulation of the Release of Phosphorus from Sediments in Shallow, Eutrophic Systems”, *Wat. Res.*, 25(6), 737-744 (1991).**
- **陳尊賢， “ 特定區內河川底泥微量元素含量與水質關係之調查研究 (第一年)，台北水源特定區管理委員會委託計畫 ” (1997) .**
- **陳世裕， “ 水庫中底泥磷釋出模式之研究 ” ，國立台灣大學環境工程**

學研究所碩士論文(1990)。

- **郭振泰、龍梧生，“翡翠水庫水質模擬與應用（一）（三）”，台北翡翠水庫管理局委託，台灣大學土木工程學研究所執行(2000)。**
- **白書禎，“翡翠水庫水質垂質結構季節性變化檢驗與監測”，台北翡翠水庫管理局委託，台灣大學海洋研究所執行(2000)。**
- 經濟部中央地質調查所，“五萬分之一台灣地質圖說明書第九號 - 新店”(2000).
- 台大環境工程學研究所，“翡翠水庫底泥檢驗”，台北市政府翡翠水庫管理局委託執行計畫”(2000).
- 台大慶齡工業研究中心，“翡翠水庫底泥性質基準調查(第二年)，台北市政府翡翠水庫管理局委託執行計畫”(1999).
- 台北翡翠水庫管理局，“翡翠水庫操作年報”，1988-2000.
- 陳秋楊、王廷哲、洪惠祥、簡俊傑、陳唯心，「水庫集水區整體治理非點污染源控制及改善水質之研究」，跨世紀水資源經營管理研討會，第 677-700 頁(2000).
- 鄭淑君，“甲苯於不同黏土礦物中吸脫附動力現象之探討”，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文(2000).
- 林文隆，“水庫湖泊磷內部負荷模式推估程序之建立”，交通大學環境工程學研究所碩士論文(1994).
- 李佳芳，“水庫水體中磷濃度的一維模式”，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文(1994).
- 吳先琪、陳怡靜、葉宗育，“水庫集水區磷輸出量估計”，千島湖海峽兩岸“人、水、環境、發展”研討會(2001).
- 陳怡靜，“翡翠水庫底泥磷營養鹽釋出潛勢研究”，第 14 屆環境規劃與管理研討會，4-56 (2001).

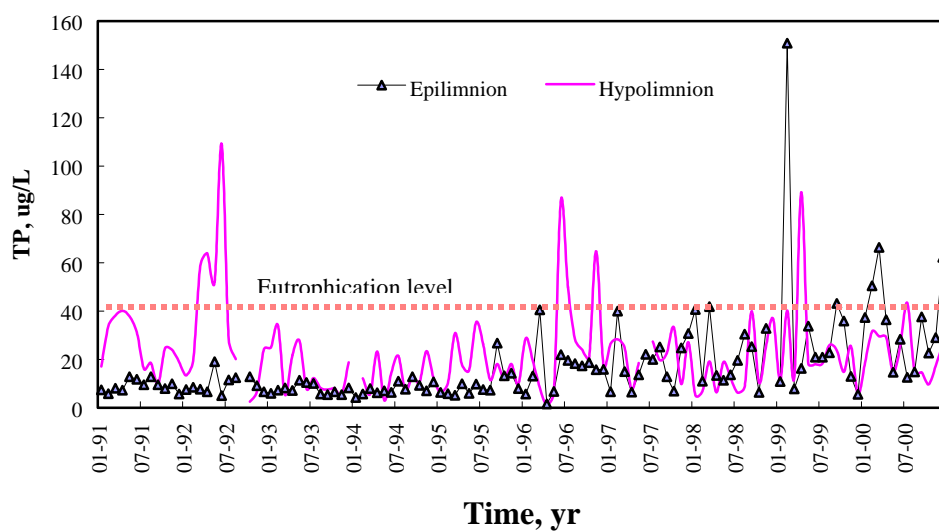


圖 2.1 歷年大壩(S-5)分層總磷變化

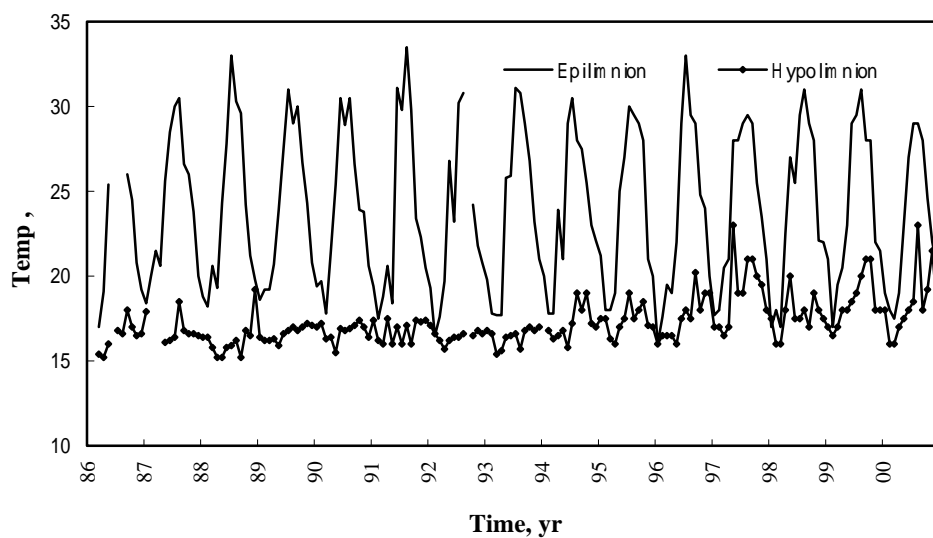


圖 2.2 歷年大壩(S-5)分層水溫變化

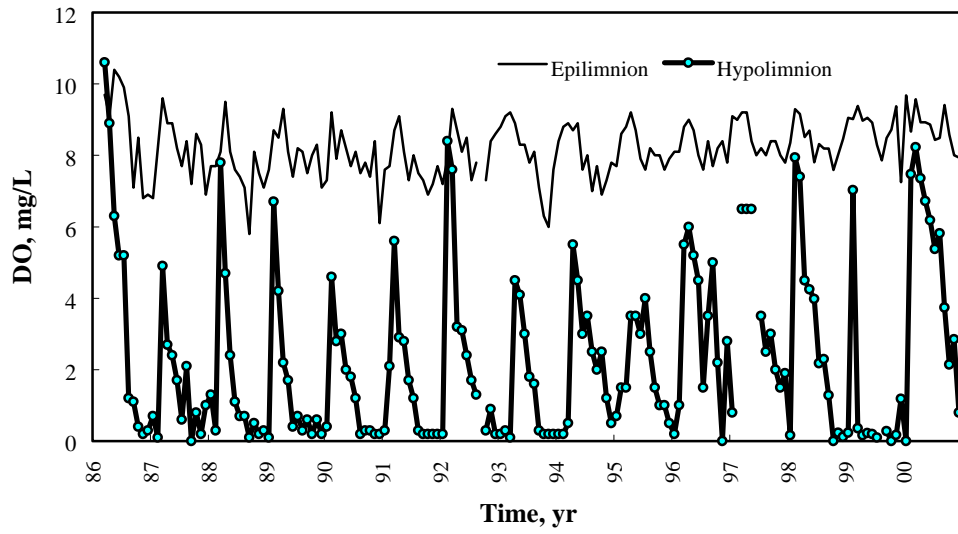


圖 2.3 歷年大壩(S-5)分層溶氧變化

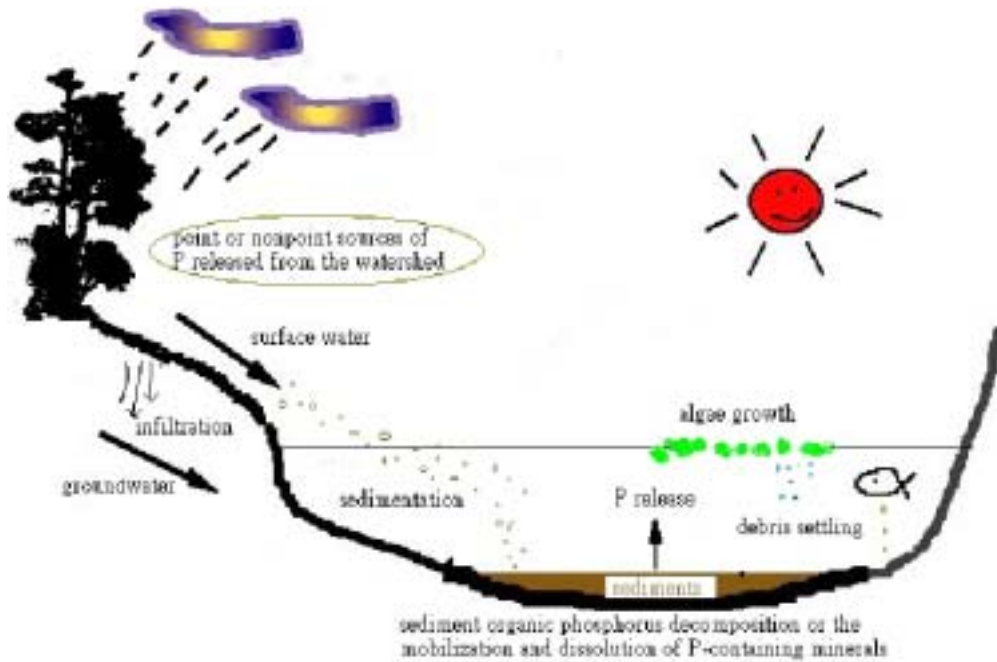
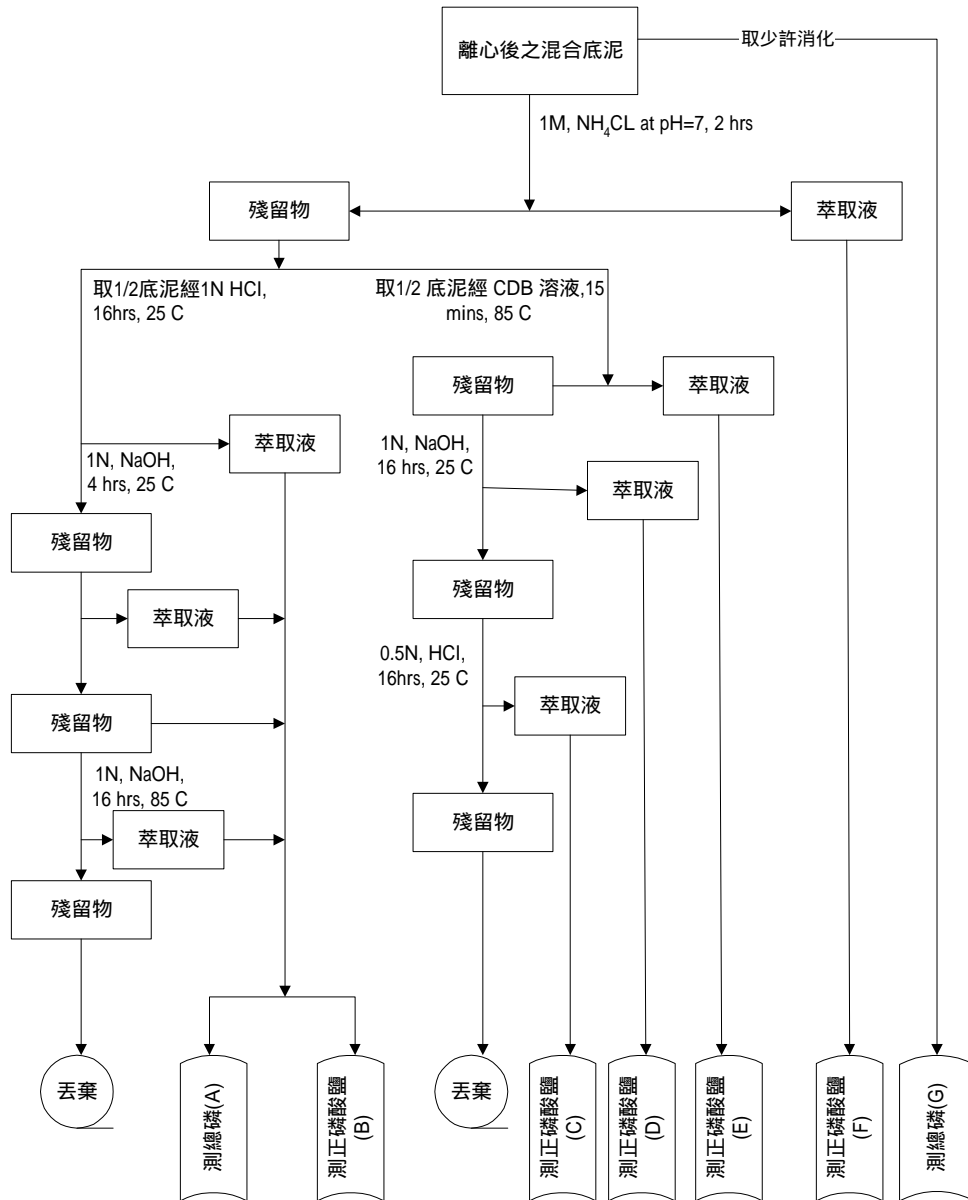


圖 2.4 水庫集水區磷的循環



- (A)-(B)= 有機磷(organic-P)
- (C)=鈣結合磷(apatite-P)
- (D)+(E)=鐵及鋁結合磷(non-apatite-P)
- (F)=不安定的磷(labile-P)
- (G)=總磷(TP)
- (G)-(C)-(D)-(E)-((A)-(B))=鈍性磷(residual-P)

圖 2.5 底泥固相磷之序列萃取流程



圖 3.1 翡翠水庫底泥及集水區土壤採樣點位置



圖 3.2 貫入式之套管底泥採樣器

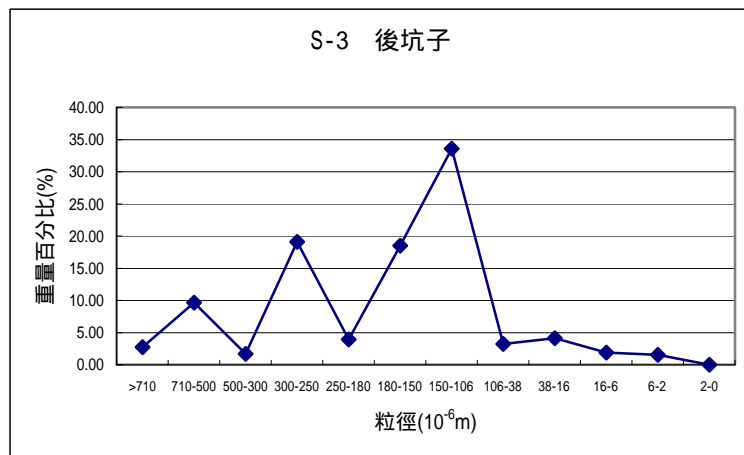
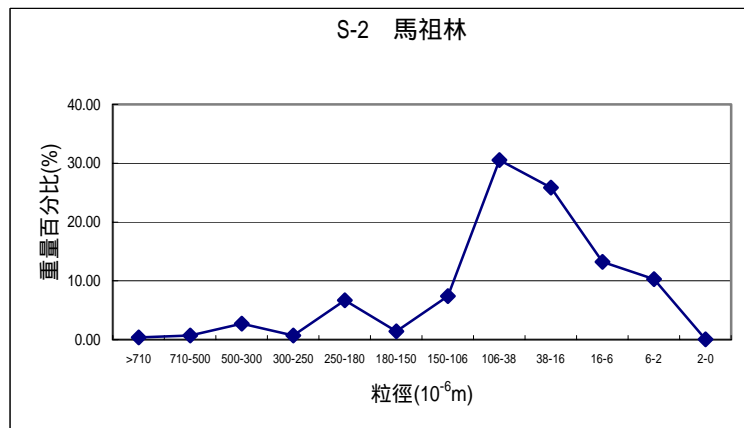
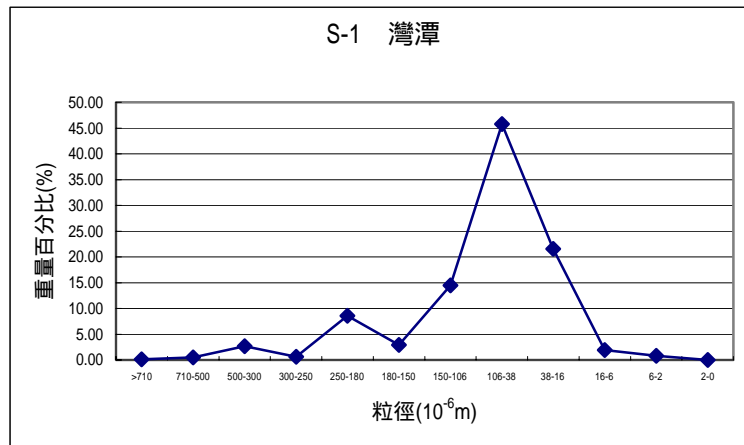


圖 4.1 90 年 5 月底泥粒徑組成分佈

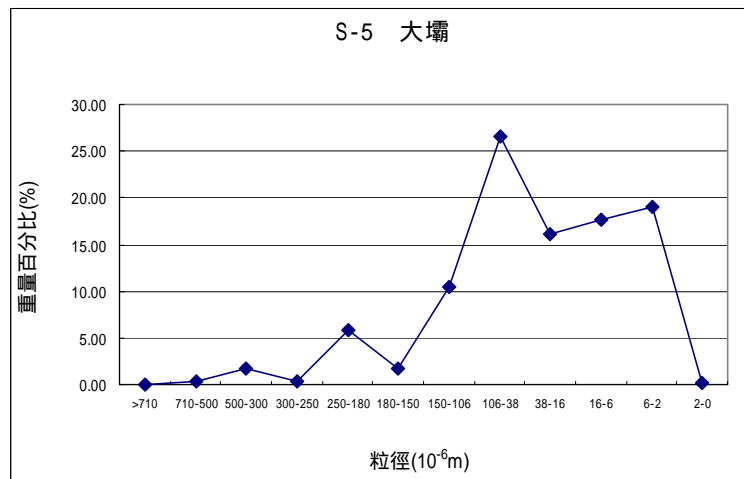
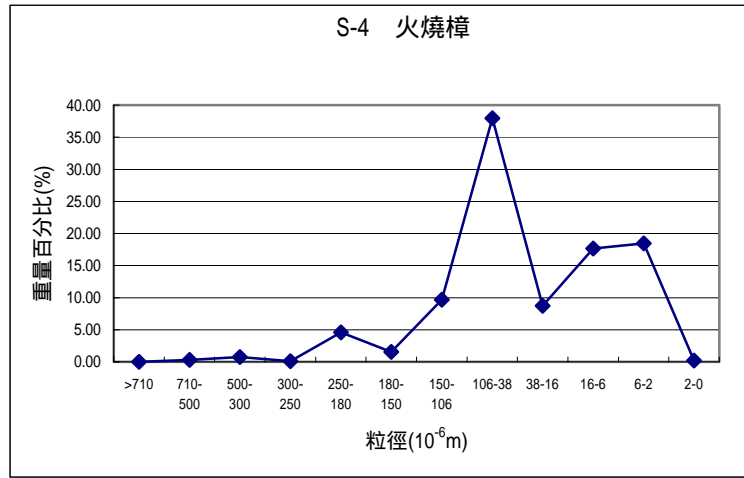


圖 4.1 90 年 5 月底泥粒徑組成分佈(續)

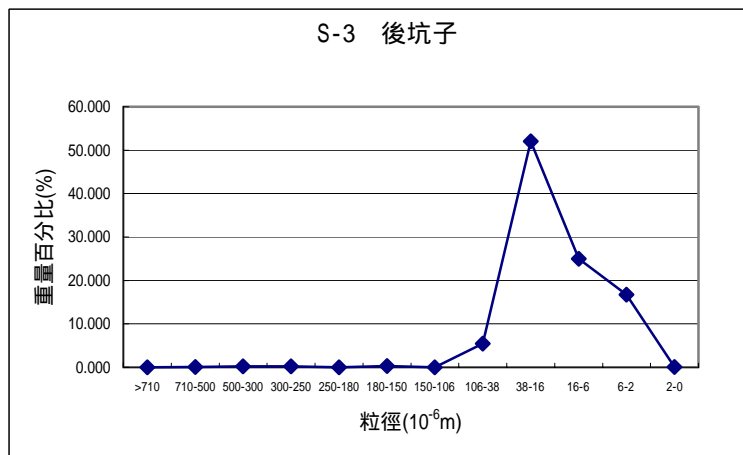
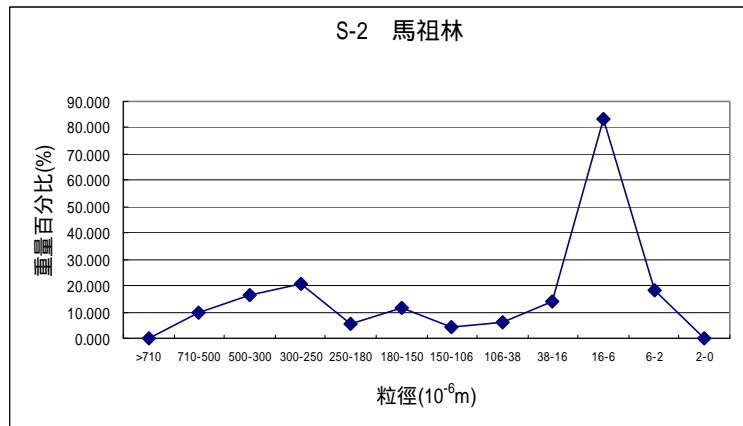
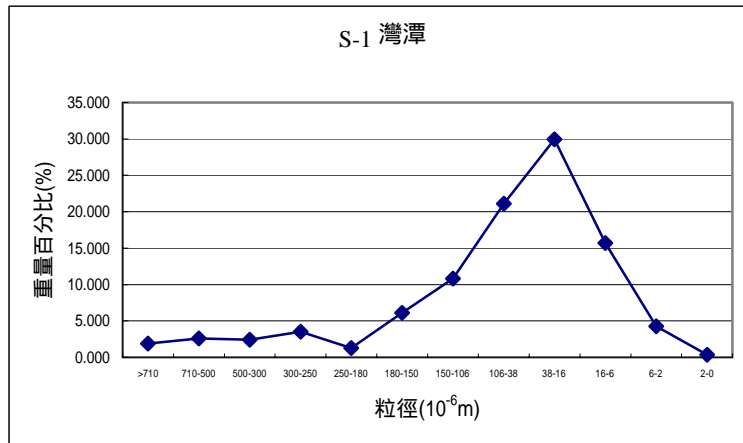


圖 4.2 90 年 8 月底泥粒徑組成分佈

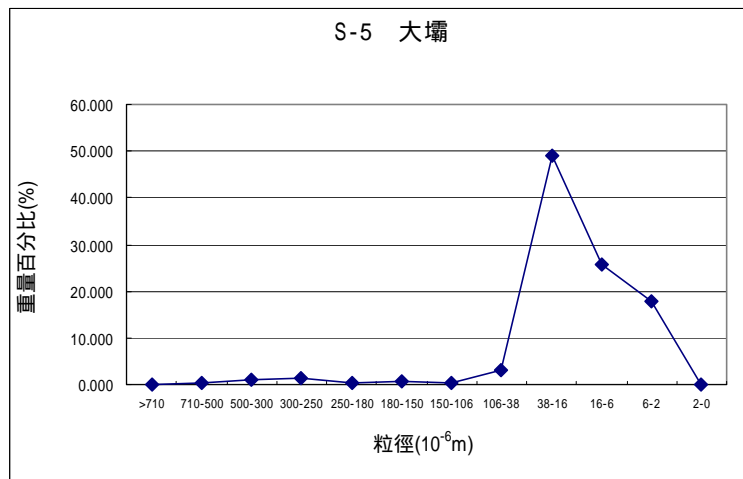
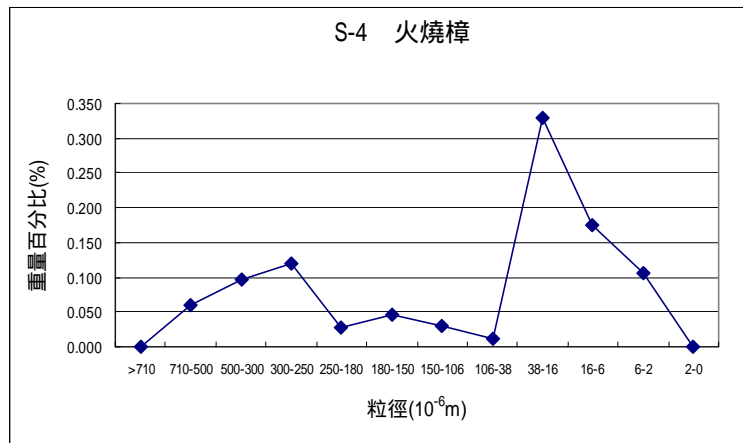


圖 4.2 90 年 8 月底泥粒徑組成分佈(續)

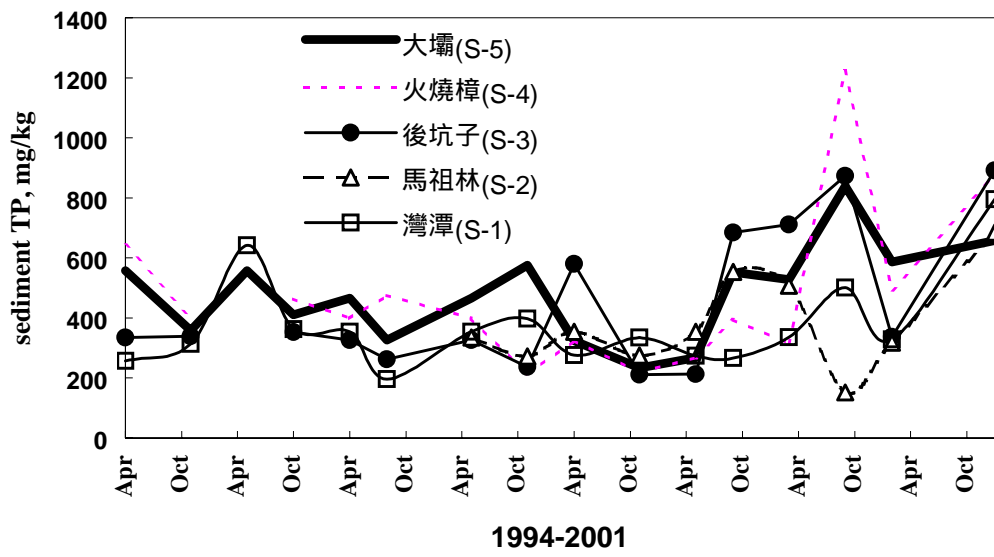
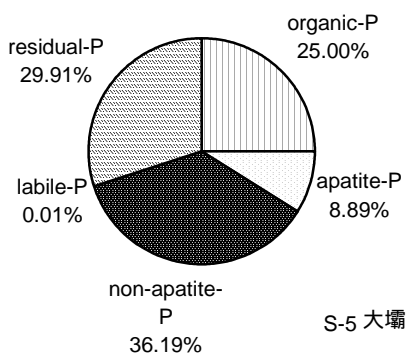
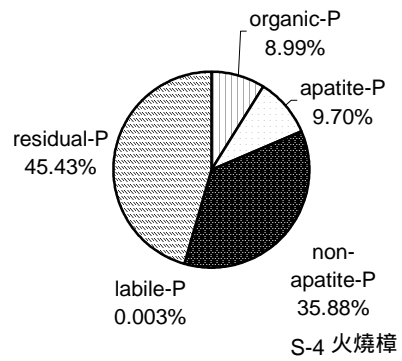
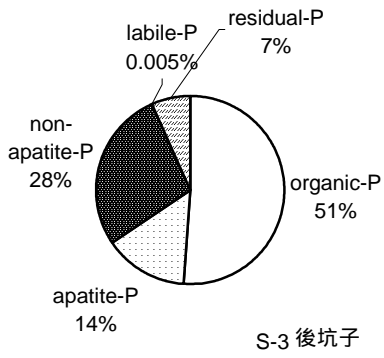
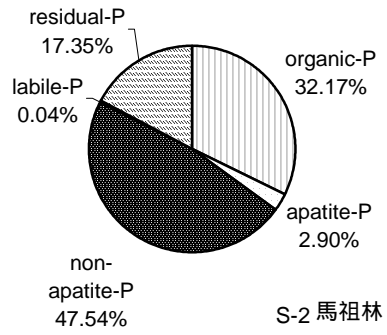
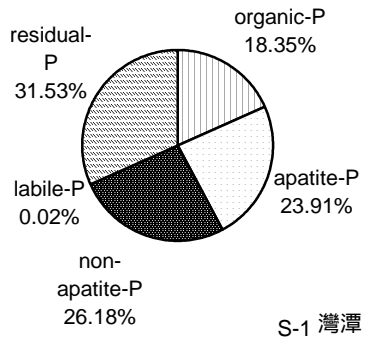
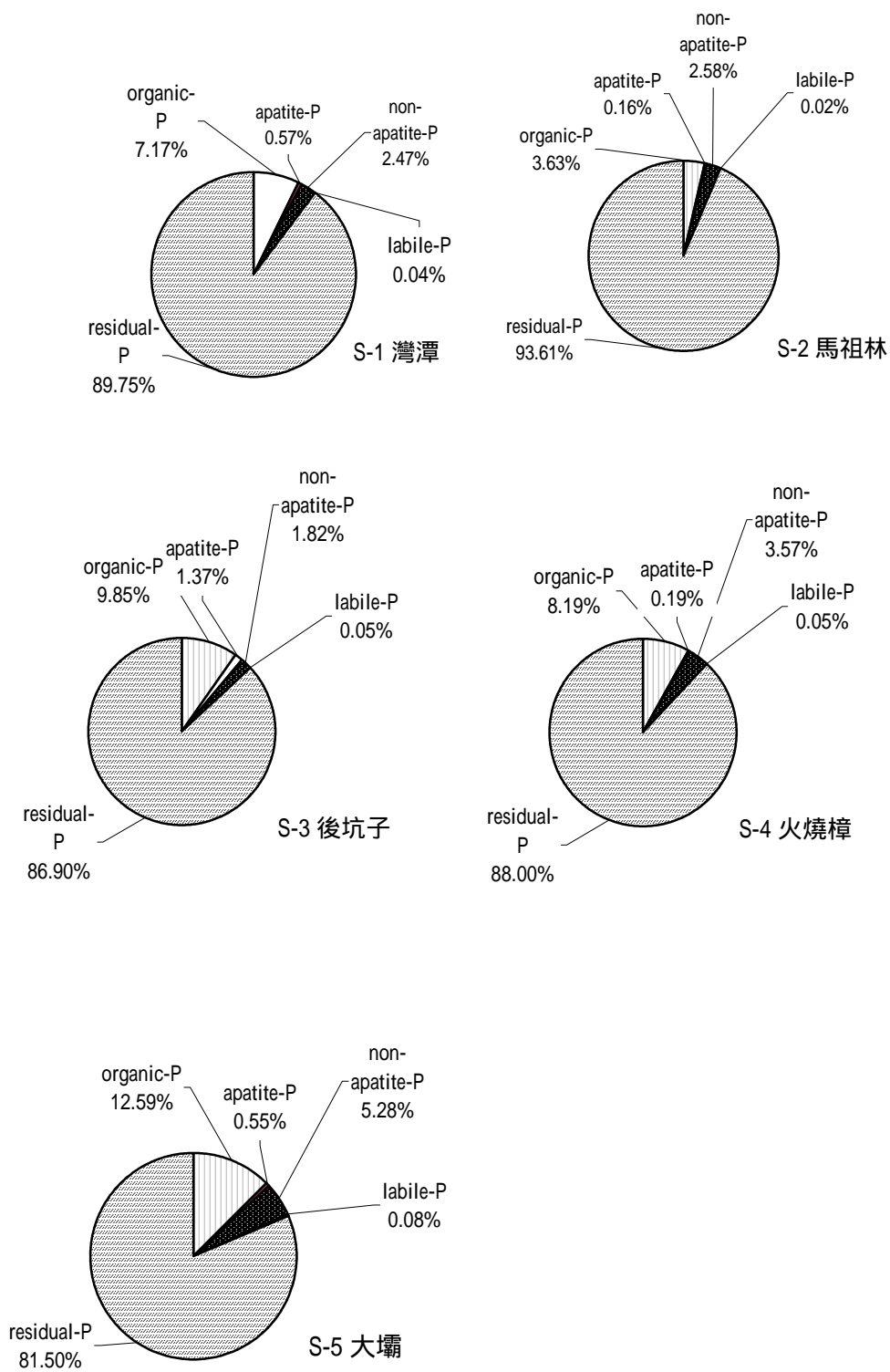


圖 4.3 歷年底泥總磷含量變化



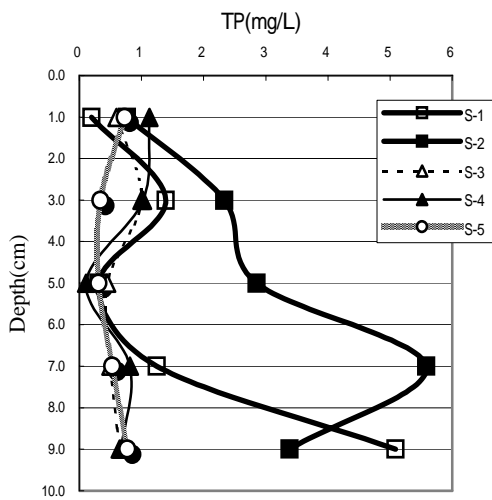
(1)90年5月

圖 4.4 底泥磷之型態分佈

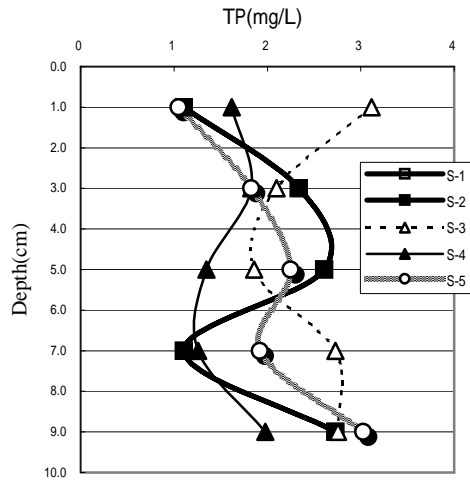


(2)90年8月

圖 4.4 底泥磷之型態分佈(續)

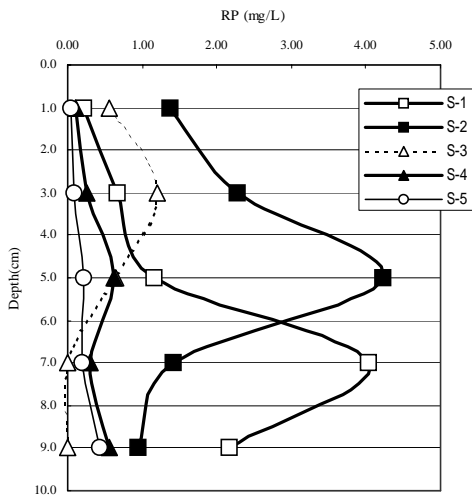


(1)90年5月

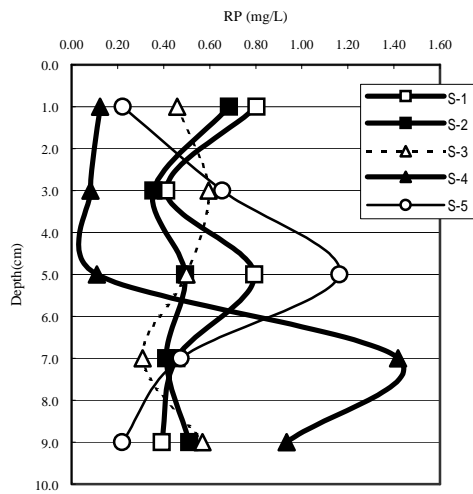


(2)90年8月

圖 4.5 底泥孔隙水溶解總磷剖面分布
(S-1:灣潭 ; S-2 馬祖林 ; S-3:後坑子 ; S-4:火燒樟 ; S-5:大壩)



(1)90年5月



(2)90年8月

圖 4.6 底泥孔隙水溶解反應性磷剖面分布
(S-1:灣潭 ; S-2 馬祖林 ; S-3:後坑子 ; S-4:火燒樟 ; S-5:大壩)

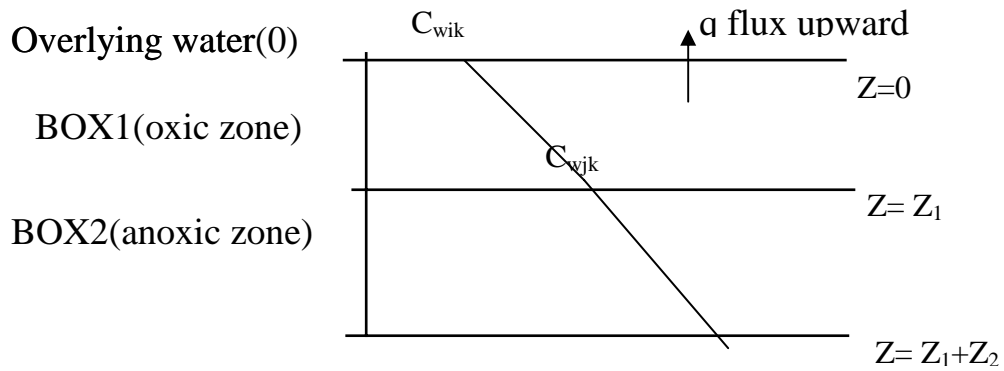
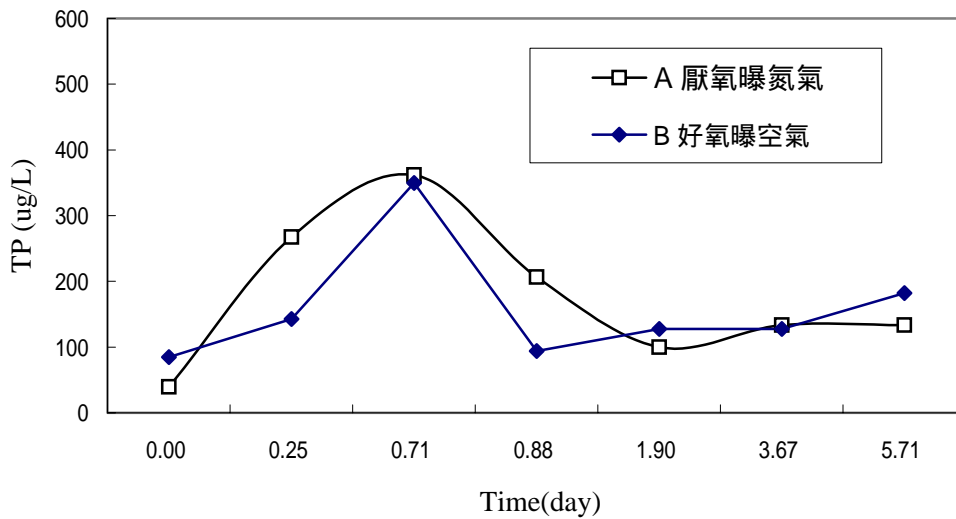


圖 4.7 底泥磷模式概念示意圖



sample no.	Time(day)	A-DO	B-DO
1	0.25	6.4	6.1
2	0.71	3.6	8.5
3	0.88	2.1	8.9
4	1.90	2.0	9.0
5	3.67	1.9	9.4
6	5.708	1.4	8.6

DO unit: mg/L

圖 4.8 實驗室底泥管柱上層水總磷隨時間之變化 (其中 A 為曝氮氣管柱, 孔隙水總磷濃度為 554 ug/L ; B 為曝空氣管柱, 孔隙水總磷濃度為 1065 ug/L)

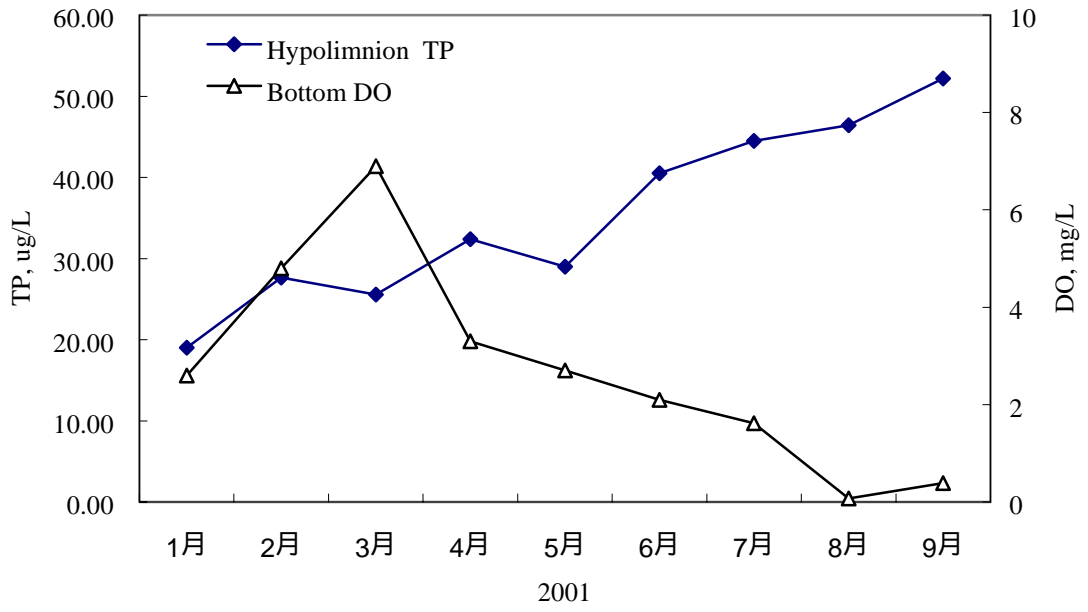


圖 4.9 今年(2001 年 1 月~9 月)大壩底部總磷與溶氧隨時間變化

表 2.1 磷礦物的化學平衡常數一覽表

Reaction	pK	Source
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O} = 3\text{Fe}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} + 8\text{H}_2\text{O}$	36.0	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{2+} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} + 4\text{H}_2\text{O}$	34.2	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-}$	28.5	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 = 4\text{Ca}^{2+} + \text{H}^+ + 3\text{PO}_4^{3-}$	46.9	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} = 5\text{Ca}^{2+} + 3\text{PO}_4^{3-} + \text{OH}^-$	57.8	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{Mn}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} + 3\text{H}_2\text{O}$	31.8	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}^{2+} + \text{PO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O}$	26	Stumm and Morgan(1996)
$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Al}^{3+} + \text{PO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O}$	21	Stumm and Morgan(1996)
$\text{CaHPO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$	6.6	Stumm and Morgan(1996)
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2 = 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{PO}_4^{3-} + 2\text{F}^-$	118	Stumm and Morgan (1996)
$\text{CaHAl}(\text{PO}_4)_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+ + 2\text{HPO}_4^{2-}$	39	Stumm and Morgan (1996)
$\text{FeS} = \text{Fe}^{2+} + \text{S}^{2-}$	16.9	Holdren and Armstrong(1986)
$\text{FeCO}_3 = \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	10.68	Holdren and Armstrong(1986)

附註：參考溫度為 25

表 3.1 翡翠水庫底泥及集水區土壤採樣點說明

編號	採樣點位置	地質區	位置說明	採樣時間
底泥樣品				
1	灣潭	大桶山層,粗窟層	51-52 斷面	2001/5/14
2	馬祖林	乾溝層,粗窟層	30-31 斷面交界	2001/5/14
3	後坑子	乾溝層,粗窟層	18 斷面	2001/5/14
4	火燒樟	大桶山層,粗窟層	B1-8 斷面交界	2001/5/14
5	大壩	大桶山層,粗窟層	01 斷面	2001/5/14
6	永安	乾溝層	42-43 斷面	2001/8/28
7	馬祖林	乾溝層,粗窟層	30-31 斷面交界	2001/8/28
8	後坑子	乾溝層,粗窟層	18 斷面	2001/8/28
9	火燒樟	大桶山層,粗窟層	B1-8 斷面交界	2001/8/28
10	大壩	大桶山層,粗窟層	01 斷面	2001/8/28
土壤樣品				
11	火燒樟溪口塌土	大桶山層,粗窟層	火燒樟溪	2001/8/28
12	後坑子口溪口塌土	大桶山層,粗窟層		2001/8/28
13	坪林隧道口棄土	木山層,大桶山層	坪林北勢溪	2000/6/21
14	灣潭茶園	粗窟層	灣潭邊坡	2000/6/21
15	黃欖皮寮	木山層, 沖積層	逮魚岷溪及坪林溪匯流	2000/6/21
16	石槽	大桶山層	逮魚岷溪上游	2001/7/26
17	大林橋	沖積層	逮魚岷溪口	2001/7/26
18	虎寮潭	大桶山層,粗窟層	坪林北勢溪上游	2001/7/26
19	坪林公路	大桶山層,粗窟層	坪林北勢溪上游	2001/7/26
20	金瓜溪	木山層	金瓜寮溪	2001/7/26

註:編號 1-10 為底泥採集樣品,11-20 為集水區土壤樣品

表 3.2 檢驗項目及分析方法

項次	分析項目	分析方法
1	底泥鐵	NIEA S330.60A
2	底泥錳	NIEA S330.60A
3	底泥鋅	NIEAS321.60T
4	底泥鉛	NIEAS321.60T
5	底泥銅	NIEAS321.60T
6	底泥砷	NIEAS310.60T
7	底泥汞	NIEAS340.60T
8	孔隙水溶解性鐵	離心後依總量方法分析
9	孔隙水溶解性錳	離心後依總量方法分析
10	孔隙水溶解性鋁	離心後依總量方法分析
11	孔隙水溶解性鈣	離心後依總量方法分析
12	孔隙水溶解性鎂	離心後依總量方法分析
13	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	NIEAW433.50A
14	孔隙水溶解性氟(F ⁻)	NIEAW413.50A
15	pH	NIEAS410.60T
16	氧化還原電位 ORP	電極法
17	有機質	Method of Soil Analysis II29-3,-4
18	含水量	NIEA S280.60T
19	粒徑分析	雷射粒徑分析儀
20	底泥總氮(TKN)	ASTM 4500-N
21	底泥總磷(TP)	ASTM 4500-P
22	溶解性磷(SP)	離心後依總量方法分析
23	底泥黏土礦物	X 光繞射
24	土壤黏土礦物	X 光繞射

表 3.3 實驗室數據之品保目標

項次	項目	精密度(重覆分析相對百分偏差)	準確性(回收率)	完整性	方法偵測極限
1	底泥鐵	< 20%	80~120%	100%	3.13mg/kg
2	底泥錳	< 20%	80~120%	100%	1.56 mg/kg
3	底泥鋅	< 20%	80~120%	100%	0.63 mg/kg
4	底泥鉛	< 20%	80~120%	100%	6.25 mg/kg
5	底泥銅	< 20%	80~120%	100%	3.13 mg/kg
6	底泥砷	< 20%	80~120%	100%	
7	底泥汞	< 20%	80~120%	100%	
8	孔隙水溶解性鐵	< 20%	80~120%	100%	0.080 mg/L
9	孔隙水溶解性錳	< 20%	80~120%	100%	0.097 mg/L
10	孔隙水溶解性鋁	< 20%	80~120%	100%	0.001 mg/L
11	孔隙水溶解性鈣	< 20%	80~120%	100%	0.000 mg/L
12	孔隙水溶解性鎂	< 20%	80~120%	100%	0.006 mg/L
13	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	< 20%	80~120%	100%	0.023 mg/L
14	孔隙水溶解性氟(F)	< 20%	80~120%	100%	0.003 mg/L
15	pH			100%	
16	氧化還原電位(ORP)			100%	
17	有機質	< 20%	80~120%	100%	
18	粒徑分析	< 20%		100%	
19	底泥總氮(TKN)	< 20%	80~120%	100%	11.70 mg/kg
20	底泥總磷(TP)	< 20%	80~120%	100%	8.73 mg/kg
21	溶解性磷(SP)	< 20%	80~120%	100%	0.007 mg/L

表 4.1 90 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(一般及營養鹽類)

項目/斷面		大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
氧化還原電位 ORP(mV)	上層水	72.9	57.7	92.6	120	196
	底泥	-195	-	-	-	-
pH 值		6.75	5.32	5.73	6.45	6.86
含水量(%)		55.5	46.5	42.4	46.7	37.3
有機質(%)		5.27	3.5	3.95	4.96	3.26
底泥總氮量(mg/kg)		1758.5	1321.1	1518.5	1423.3	917.4
底泥總磷量(mg/kg)		586.0	493.8	336.8	615.3	328.2
孔隙水溶解性總磷(mg/L)		1.45	2.09	1.92	1.58	0.98
孔隙水溶解反應性磷(mg/L)		0.85	1.36	1.10	0.35	0.31
孔隙水溶解性硫(mg/L)		0.18	0.15	0.26	0.11	0.14
孔隙水溶解性氟(mg/L)		0.11	0.08	0.09	0.11	0.12

附註：氧化還原電位測定儀故障，故部份測點讀值遺漏。

表 4.2 90 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)

粒徑(μm)	大壩 S-5	火燒樟 S-4	後坑子 S-3	馬祖林 S-2	灣潭 S-1
>710	0.05	0.02	2.72	0.39	0.11
710-500	0.22	0.30	9.65	0.70	0.49
500-300	1.63	0.77	1.69	2.74	2.69
300-250	0.33	0.11	19.09	0.73	0.64
250-180	5.43	4.58	3.93	6.70	8.60
180-150	1.83	1.56	18.51	1.41	2.91
150-106	9.23	9.69	33.58	7.41	14.49
106-38	25.11	37.94	3.24	30.53	45.80
38-16	14.85	8.72	4.13	25.85	21.56
16-6	18.04	17.68	1.90	13.21	1.93
6-2	23.06	18.45	1.55	10.27	0.78
2-0	0.22	0.18	0.01	0.06	0.00

表 4.3 90 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類)

項目/斷面		大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
底 泥 (mg/kg)	鐵(Fe)(%)	3.5	3.1	3.5	3.2	1.5
	錳(Mn)	3260.4	686.5	451.1	583.3	334.6
	鋅(Zn)	114.7	93.2	90.3	93.0	84.6
	鉛(Pb)	46.5	46.1	62.0	41.8	27.4
	銅(Cu)	25.5	24.7	22.8	21.4	25.7
	砷(As)	2.7	2.3	2.9	1.8	1.6
	汞(Hg)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4
孔 隙 水 (mg/L)	鐵(Fe)	39.4	40.2	37.5	32.7	9.1
	錳(Mn)	10.5	9.9	7.0	6.3	4.4
	鋁(Al)	16.6	19.3	5.7	4.5	5.9
	鈣(Ca)	2.1	1.7	5.8	107.5	57.8
	鎂(Mg)	8.6	7.6	12.6	23.4	11.1

表 4.4 90 年 8 月及 12 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(一般及營養鹽類)

項目/斷面		大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
氧化還原電位 ORP(mV) ^(a)	上層水	-90.2	10.2	-54.1	27.1	29.6
	底泥	-147.0	-123.0	-153.1	-155.3	-137.7
pH 值 ^(a)		7.0	6.9	7.0	6.9	7.0
氧化還原電位 ORP(mV) ^(b)	上層水	31.2	116.1	185.5	154.1	177.8
	底泥	-163.3	-167.7	-37.4	-138.2	-110.9
pH 值 ^(b)		6.7	6.8	6.9	6.9	6.9
含水量(%) ^(a)		53.4	54.8	55.4	53.7	37.7
有機質(%) ^(a)		1.76	1.90	2.03	2.09	1.59
底泥總氮量(mg/kg) ^(a)		810.0	1295.0	1694.0	1452.5	882.3
底泥總磷量(mg/kg) ^(a)		658.4	874.0	891.4	1268.3	795.3
孔隙水溶解性總磷(mg/L) ^(a)		2.32	1.48	1.86	2.32	1.66
孔隙水溶解反應性磷(mg/L) ^(a)		0.55	0.53	0.49	0.49	0.57
孔隙水溶解性硫(mg/L) ^(a)		0.32	0.50	0.21	0.08	0.08
孔隙水溶解性氟(mg/L) ^(a)		0.11	0.37	0.39	0.43	0.52

Note : (a) : 90/8 測值 ; (b) : 90/12 測值。

表 4.5 90 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)

粒徑(μm)	大壩 S-5	火燒樟 S-4	後坑子 S-3	馬祖林 S-2	灣潭 S-1
>710	0.29	NA	0.00	NA	1.89
710-500	0.31	6.04	0.09	9.77	2.61
500-300	0.91	9.57	0.22	16.17	2.43
300-250	1.35	11.99	0.24	20.70	3.51
250-180	0.20	2.69	0.04	5.26	1.26
180-150	0.67	4.62	0.31	11.32	6.13
150-106	0.57	2.95	0.04	4.24	10.82
106-38	7.13	1.13	5.43	5.98	21.10
38-16	51.09	32.85	52.06	13.80	29.95
16-6	18.04	17.58	1.90	83.58	1.93
6-2	23.06	10.51	1.55	18.29	0.78
2-0	0.22	0.07	0.01	0.11	0.00

NA: not available

表 4.6 90 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類)

項目/斷面		大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
底 泥 (mg/kg)	鐵(Fe)(%)	4.6	3.7	4.5	3.9	3.0
	錳(Mn)	3319.6	1024.4	680.6	555.9	485.1
	鋅(Zn)	131.2	104.6	122.4	113.7	88.9
	鉛(Pb)	49.3	37.9	45.7	26.5	33.9
	銅(Cu)	30.3	23.6	29.4	26.5	21.4
	砷(As)	2.2	2.7	2.6	1.5	1.7
	汞(Hg)	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4
孔 隙 水 (mg/L)	鐵(Fe)	48.1	59.0	79.3	50.1	73.3
	錳(Mn)	14.2	12.2	9.1	5.8	7.1
	鋁(Al)	41.3	61.7	19.2	39.1	18.3
	鈣(Ca)	15.5	7.1	32.1	21.0	114.1
	鎂(Mg)	8.1	7.5	7.3	8.0	27.3

表 4.7 底泥及集水區土壤樣體黏土礦物之組成及其含量

sample	Q	G	K	I	V	C	M	H
No.1	+++	+	++	+++	++	-	-	-
No.2	++	+	++	+++	+	-	+	-
No.3	+++	++	++	++	++	-	-	-
No.4	+++	++	+	+++	+	+	-	-
No.5	+++	++	++	+++	++	-	-	-
No.6	+++	+	++	+++	+	+	-	-
No.7	+++	+	+	+++	++	+	-	-
No.8	+++	+	+	+++	++	+	-	-
No.9	+++	+	++	+++	++	-	-	-
No.10	+++	+	++	+++	++	-	-	-
No.11	+++	++	-	++	++	+	-	-
No.12	+++	++	+	+++	++	+	-	-
No.13	+++	+	++	++	+	-	-	-
No.14	+++	+	++	+++	++	-	-	-
No.15	++	+	+	++	++	-	-	++
No.16	+++	++	++	+++	+	-	+	-
No.17	+++	+	++	++	++	-	-	++
No.18	+++	++	++	++	++	-	-	-
No.19	+++	++	++	++	++	-	-	-
No.20	++	+	++	++	++	-	-	++

Q : Quartz

G : Gibbsite

K : Kaolinite

I : Illite

V : Vermiculite

C : Clorite

M : Montmorillonite

HIV : Hydroxy Interlayer Vermiculite

- : not-detectable, + : <10%, ++ : 10-25%, +++ : 25-50%.

表 4.8 翡翠水庫入流磷年負荷量推估

年度	懸浮固體		總磷
	10 ³ m ³ /yr	Ton/yr	Ton/yr
1988	5972	7,721,796	12820.5
1989	1021	1,320,153	2191.9
1990	970	1,254,210	2082.4
1991	981	1,268,433	2106.0
1992	964	1,246,452	2069.5
1993	406	524,958	871.6
1994	889	1,149,477	1908.5
1995	486	628,398	1043.3
1996	3476	4,494,468	7462.2
1997	777	1,004,661	1668.0
1998	1377	1,780,461	2956.1
1999	484	625,812	1039.0
2000	840	1,086,120	1803.3
2001			
2002			
2003			

附註:

1. 表中磷負荷量推估依據為降雨期總磷(y)(ug/L)與懸浮固體(x)(mg/L)之線性迴歸關係式:
 $y = 1.6603x + 16.67 (R^2 = 0.84)$, 將年淤積量視為年入流泥砂負荷量, 代入經驗式中計算磷的年負荷量。
2. 泥砂淤積量數據來源: 翡翠水庫管理局, 翡翠水庫操作年報民國 89 年。
3. 懸浮固體密度以 1293 kg/m³ 估計, 數據來源為, 翡翠水庫操作年報民國 83 年, 表 5.10。

表 4.9 各磷礦物之飽和度指數 (SI)變化

(1)90 年 5 月

站名/斷面	大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
化學式	S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$	1.687	0.057	0.496	1.131	1.292
$\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)$	0.839	-0.828	-0.167	0.943	1.224
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	-0.550	-2.235	-1.470	-0.115	0.218
$\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3$	-0.478	-1.874	-1.241	-0.137	0.140
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	0.253	-1.315	-0.603	0.675	0.983
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$	1.508	-0.121	0.316	0.948	1.084
$\text{Fe}(\text{PO}_4)$	-1.138	-3.008	-2.453	-1.480	-1.172
AlPO_4	4.364	2.348	2.689	3.477	4.117
CaHPO_4	-3.321	-5.405	-4.586	-3.237	-2.744
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2$	0.605	-0.818	-0.151	1.025	1.302
$\text{CaHAl}(\text{PO}_4)_2$	1.358	0.005	0.380	1.064	1.447
FeS	0.522	-0.945	-0.435	0.072	0.274
FeCO_3	0.390	-0.767	-0.401	0.152	0.157

表 4.9 各磷礦物之飽和度指數(SI)變化(續)

(1)90年8月

站名/斷面	大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	灣潭
化學式	S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$	1.920	1.902	2.048	1.803	2.059
$\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)$	1.379	1.198	1.543	1.305	1.753
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0.138	-0.117	0.328	0.085	0.641
$\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3$	0.086	-0.126	0.241	0.039	0.501
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	0.899	0.662	1.077	0.852	1.367
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$	0.800	0.697	0.706	0.450	0.670
$\text{Fe}(\text{PO}_4)$	-0.497	-0.330	-0.420	-0.717	-0.272
AlPO_4	4.753	4.734	4.643	4.586	4.670
CaHPO_4	-4.276	-4.425	-4.167	-4.307	-3.960
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2$	1.216	1.048	1.444	1.241	1.728
$\text{CaHAl}(\text{PO}_4)_2$	1.386	0.033	0.407	1.164	1.520
FeS	0.901	0.989	0.934	0.513	0.707
FeCO_3	0.564	0.575	0.680	0.518	0.664

表 4.10 底泥總磷釋出通量推估(以大壩為例)

月份	底層水 TP, ug/L	底泥總磷通量, ug/cm ² day	
		實測值	預測值
1月	19.03		
2月	27.67	0.011	
3月	25.57	0.008	
4月	32.4	0.006	
5月	28.99	0.014	0.032
6月	40.53	0.026	
7月	44.51	0.010	
8月	46.43	0.013	0.049

附 錄

附錄一、本年度檢驗項目之品保品管數據結果

項次	項目	精密度(重覆分析相對偏差)		準確性(回收率)		完整性		方法偵測極限
		第1次	第2次	第1次	第2次	第1次	第2次	
1	底泥鐵	3.9%	2.4%	88.9%	102.3%	100%	100%	0.018mg/kg
2	底泥錳	3.9%	0.1%	90.6%	100.4%	100%	100%	0.005 mg/kg
3	底泥鋅	5.1%	0.6%	98.5%	100.8%	100%	100%	0.005 mg/kg
4	底泥鉛	0.2%	15.7%	110.5%	94.2%	100%	100%	0.043 mg/kg
5	底泥銅	1.4%	1.3%	83.8%	110.3%	100%	100%	0.013 mg/kg
6	底泥砷	10.5%	10.2%	120%	97.2%	100%	100%	
7	底泥汞	17%	5.3%		103.8%	100%	100%	0.23 mg/kg
8	孔隙水溶解性鐵	43.2%	6.3%	119.6%	106.9%	100%	100%	3.3E-4 mg/L
9	孔隙水溶解性錳	2.4%	2.6%	118%	104.7%	100%	100%	1.6E-5 mg/L
10	孔隙水溶解性鋁	14.6%	3.5%	124.8%	98.7%	100%	100%	7.4E-7 mg/L
11	孔隙水溶解性鈣	0%	12.4%	161.9%	12.5.8%	100%	100%	1.3E-4 mg/L
12	孔隙水溶解性鎂	0.9%	6.3%	108.8%	119.9%	100%	100%	8.1E-6mg/L
13	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	18.6%	3.1%	97%	94.9%	100%	100%	0.01 mg/L
14	孔隙水溶解性氟(F ⁻)	1.9%	9.8%	93.2%	95.3	100%	100%	
15	pH		0.5%			100%	100%	
16	氧化還原電位(ORP)						100%	
17	有機質	0.8%	31.4%	87.0%	59.9%	100%	100%	
18	粒徑分析	2-60%	2-77%			100%	100%	
19	底泥總氮(TKN)	2%	18.6%	92%	100.9%	100%	100%	0.1734mg/kg
20	底泥總磷(TP)	15%	20%	143%	129%	100%	100%	8.37mg/kg
21	溶解性磷(SP)	11.7%	15%	110%	140%	100%	100%	0.007 mg/L

附錄二、底泥現場採樣記錄表

台大環工所底泥現場採樣記錄表-1

委託單位：台北翡翠水庫管理局						
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：90 年 5 月 14 日			
			天氣：晴 氣溫：25.9			
一、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭						
採樣位置(UTM)E/N <u>0365376/2758144</u> 今日大壩水位： <u>163</u> m						
採樣點絞盤旋轉圈數： <u> </u> 估計水深 <u>10</u> m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距 <u> </u> 河口 <u> </u> 游 約 <u> </u> m，距河左岸約 <u> </u> m						
水面有波紋；表水顏色 <u>綠</u> 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面						
其他 <u> </u> 附近有 住家 果園 茶園 森林						
三、採樣安全注意事項：						
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具						
其他 <u> </u>						
四、樣品編號及現場分析項目						
樣品 編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥
S1-1	土黃	25	8.49	20.6	6.8	
S1-2	土黃	25	8.25	20.3	6.6	
S1-3	土黃	25				
S1-4	土黃	25				
備註欄						
1. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP						
2. 底泥管編號:S # -1,S # -2.....						
# =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭						

台大環工所底泥現場採樣記錄表-2

委託單位：台北翡翠水庫管理局						
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：90 年 5 月 14 日			
			天氣：晴 氣溫：25.9			
二、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭						
採樣位置(UTM)E/N <u>03653881/2758125</u> 今日大壩水位： <u>163</u> m						
採樣點絞盤旋轉圈數： <u>66</u> 估計水深 <u>66</u> m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距 <u> </u> 河口 <u> </u> 游 約 <u> </u> m，距河左岸約 <u>20</u> m						
水面有波紋；表水顏色 <u>綠</u> 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面						
其他 <u> </u> 附近有 住家 果園 茶園 森林						
三、採樣安全注意事項：						
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具						
其他 <u> </u>						
四、樣品編號及現場分析項目						
樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥
S2-1	灰黑,上覆土黃色	70	4.06	21.9	6.61	
S2-2	灰黑,上覆土黃色	50	5.57	20.7	6.38	
S2-3	灰黑,上覆土黃色	45	5.44	22.5	6.44	
S2-4	灰黑	40	5.67	21.7	6.52	
備註欄						
3. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP						
4. 底泥管編號:S # -1,S # -2.....						
# =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭						
P.S.底泥很軟，可能是前一天大雨沖入的新鮮底泥						

台大環工所底泥現場採樣記錄表-3

委託單位：台北翡翠水庫管理局						
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：90 年 5 月 14 日			
			天氣：陰微雨 氣溫：25.9			
三、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 採樣位置(UTM)E/N 0359516/2755907 今日大壩水位：163 m 採樣點絞盤旋轉圈數：92 估計水深 90 m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述： 距 河口 游 約 m，距河左岸約 m 水面有波紋；表水顏色 綠 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面 其他 附近有 住家 果園 茶園 森林						
三、採樣安全注意事項： 有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具 其他						
四、樣品編號及現場分析項目						
樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥
S3-1	灰黑		5.82	19.0	6.65	
S3-2	灰黑		6.40	20.0	6.83	
S3-3	灰黑					
S3-4	灰黑					
備註欄 5. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP 6. 底泥管編號:S # -1,S # -2..... # =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭						

台大環工所底泥現場採樣記錄表-4

委託單位：台北翡翠水庫管理局						
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：90 年 5 月 14 日			
			天氣：陰微雨 氣溫：25.9			
四、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 採樣位置(UTM)E/N <u>0357610/2755623</u> 今日大壩水位： <u>163</u> m 採樣點絞盤旋轉圈數： <u>112</u> 估計水深 <u>100</u> m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述： 距 <u> </u> 河口 <u> </u> 游 約 <u> </u> m，距河左岸約 <u> </u> m 水面有波紋；表水顏色 <u> </u> 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面 其他 <u> </u> 附近有 住家 果園 茶園 森林						
三、採樣安全注意事項： 有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具 其他 <u> </u>						
四、樣品編號及現場分析項目						
樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥
S4-1	灰黑		2.80	19.0	6.52	
S4-2	灰黑		2.21	19.0	6.44	
S4-3	灰黑					
S4-4	灰黑					
備註欄 7. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP 8. 底泥管編號:S # -1,S # -2..... # =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭						

台大環工所底泥現場採樣記錄表-5

委託單位：台北翡翠水庫管理局						
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：90 年 5 月 14 日			
			天氣：陰微雨 氣溫：25.9			
五、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭						
採樣位置(UTM)E/N <u>0355895/2755968</u> 今日大壩水位： <u>163</u> m						
採樣點絞盤旋轉圈數： <u>121</u> 估計水深 <u>100</u> m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距 <u> </u> 河口 <u> </u> 游 約 <u> </u> m，距河左岸約 <u> </u> m						
水面有波紋；表水顏色 <u> </u> 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面						
其他 <u> </u> 附近有 住家 果園 茶園 森林						
三、採樣安全注意事項：						
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具						
其他 <u> </u>						
四、樣品編號及現場分析項目						
樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥
S5-1	灰黑,上覆土黃色		0.28	18.8	6.32	
S5-2	灰黑,上覆土黃色		2.72	18.9	6.50	
S5-3	灰黑,上覆土黃色					
S5-4	灰黑,上覆土黃色					
備註欄						
9. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP						
10. 底泥管編號:S # -1,S # -2.....						
# =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭						

台大環工所底泥現場採樣記錄表-6

委託單位：台北翡翠水庫管理局							
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫							
採樣記錄員：王美雪			採樣日期：90 年 8 月 28 日				
			天氣：陰 氣溫：30				
六、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 永安							
採樣位置(UTM)E/N_今日大壩水位：144 m							
採樣點絞盤旋轉圈數：10 估計水深 10 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述：							
距__河口__游 約 __m，距河左岸約__m							
水面有波紋；表水顏色 灰綠 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面							
其他 水混濁,表面有冒泡沫 附近有 住家 果園 茶園 森林							
三、採樣安全注意事項：							
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具							
其他_____							
四、樣品編號及現場分析項目							
樣品 編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S1-1	灰	36		29.7	6.67	35.1	-129.1
S1-2	灰	34					
S1-3	灰	33		29.6	6.66	24.0	-146.2
S1-4	灰	33.5					
備註欄							
11. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP							
12. 底泥管編號:S #-1,S #-2.....							
#=5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭							
13.因灣潭水深太淺,採樣船無法上去,故改以永安替代為採樣點第 1 點							

台大環工所底泥現場採樣記錄表-7

委託單位：台北翡翠水庫管理局							
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫							
採樣記錄員：王美雪			採樣日期：90 年 8 月 28 日				
			天氣：陰 氣溫：30				
七、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 永安							
採樣位置(UTM)E/N_今日大壩水位：144 m							
採樣點絞盤旋轉圈數：50, 51 估計水深 50.5 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述：							
距__河口__游 約 __m，距河左岸約__m							
水面有波紋；表水顏色_濁綠_ 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面							
其他 __水混濁,表面有冒泡沫_ 附近有 住家 果園 茶園 森林							
三、採樣安全注意事項：							
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具							
其他_____							
四、樣品編號及現場分析項目							
樣品 編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S2-1	灰	25		25.4	6.56	-57.9	-149.9
S2-2	灰	28.5				54.2	
S2-3	灰	23.5		29.7	6.58	85.0	-160.6
S2-4	灰	29					
備註欄							
13. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP							
14. 底泥管編號:S #-1,S #-2.....							
# =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭							

台大環工所底泥現場採樣記錄表-8

委託單位：台北翡翠水庫管理局							
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫							
採樣記錄員：王美雪			採樣日期：90 年 8 月 28 日				
			天氣：陰雨 氣溫：30				
八、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 永安 採樣位置(UTM)E/N_今日大壩水位：144 m 採樣點絞盤旋轉圈數：72 估計水深 72 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述： 距__河口__游 約 __m，距河左岸約__m 水面有波紋；表水顏色_綠_ 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面 其他 __水混濁,表面有冒泡沫_ 附近有 住家 果園 茶園 森林							
三、採樣安全注意事項： 有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具 其他_____							
四、樣品編號及現場分析項目							
樣品 編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S3-1	灰	43		22.7	6.58	-67.9	-149.5
S3-2	灰	19					
S3-3	灰	23.5		24.3.	6.52	-40.3	-156.6
S3-4	灰	41.5					
備註欄 15. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP 16. 底泥管編號:S #-1,S #-2..... #=5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭							

台大環工所底泥現場採樣記錄表-9

委託單位：台北翡翠水庫管理局							
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫							
採樣記錄員：王美雪			採樣日期：90 年 8 月 28 日				
			天氣：陰雨 氣溫：30				
九、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 永安							
採樣位置(UTM)E/N_今日大壩水位：144 m							
採樣點絞盤旋轉圈數：93 估計水深 93 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述：							
距__河口__游 約 __m，距河左岸約__m							
水面有波紋；表水顏色_藍綠_ 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面							
其他 __水混濁,表面有冒泡沫_ 附近有 住家 果園 茶園 森林							
三、採樣安全注意事項：							
有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具							
其他_____							
四、樣品編號及現場分析項目							
樣品 編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S4-1	灰	37		21.7	6.45	91.2	-87.6
S4-2	灰	41		22.8	6.51	-70.8	-158.4
S4-3	灰	17					
S4-4	灰	10					
備註欄							
17. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP							
18. 底泥管編號:S #-1,S #-2.....							
#=5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭							

台大環工所底泥現場採樣記錄表-10

委託單位：台北翡翠水庫管理局							
委託計畫名稱：翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫							
採樣記錄員：王美雪			採樣日期：90 年 8 月 28 日				
			天氣：陰雨 氣溫：30				
十、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭 永安 採樣位置(UTM)E/N_今日大壩水位：144 m 採樣點絞盤旋轉圈數：125,126,127 估計水深 126 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述： 距__河口__游 約 __m，距河左岸約__m 水面有波紋；表水顏色_綠_ 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面 其他 __水面有少許泡沫_ 附近有 住家 果園 茶園 森林							
三、採樣安全注意事項： 有戴手套 船上有救生衣 有防滑鞋具 其他_____							
四、樣品編號及現場分析項目							
樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp ()	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S5-2	灰	28		21.6	6.56	-108.3	-160.4
S5-4	灰	11					
S5-5	灰	25					
S5-6	灰	25.5		21.0	6.56	-72.1	-133.5
S5-7	灰	35					
備註欄 19. ORP 電極插入底泥上層處測定底泥 ORP 20. 底泥管編號:S #-1,S #-2..... # =5:大壩；=4:火燒樟；=3:後坑子；=2:馬祖林；=1:灣潭							

附錄三、台灣地區土壤重金屬含量等級區分表

單位：mg/kg

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

註：一、As 及 Hg 為全量，Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 為 0.1N 鹽酸抽出量；重金屬含量以三位有效數字表示為原則。

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

附錄四、土壤污染監測基準

土 壤 污 染 監 測 基 準

九十年十一月二十一日（90）環署水字第 七三六五四號令發佈

- 一、 本基準依土壤及地下水污染整治法第五條第二項規定訂定之。
- 二、 土壤非因外來污染而其物質濃度達本基準所列監測項目之監測基準值者，不適用本基準。
- 三、 本基準所稱濃度單位之毫克 / 公斤，指重金屬全量分析每一公斤土壤中（乾基）所含污染物之毫克數。
- 四、 本基準適用於地下水最低水位以上之未飽和含水層之土壤。
- 五、 污染物之監測項目及監測基準值（濃度單位：毫克 / 公斤）如下：

監 測 項 目	監 測 基 準 值
砷 (As)	30
鎘 (Cd)	10 (食用作物農地之監測基準值為 2.5)
鉻 (Cr)	175
銅 (Cu)	220 (食用作物農地之監測基準值為 120)
汞 (Hg)	10 (食用作物農地之監測基準值為 2)
鎳 (Ni)	130
鉛 (Pb)	1000 (食用作物農地之監測基準值為 300)
鋅 (Zn)	1000 (食用作物農地之監測基準值為 260)

- 六、 事業及其所屬公會或環境保護相關團體得提出具體科學性數據、資料，供中央主管機關作為本基準修正之參考。

附 件

附件一、「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫」期中審查會議紀錄

- 壹、時間：九十年九月六日下午二時
 貳、地點：臺北翡翠水庫管理局會議室
 參、主持人：副局長周祖勇
 肆、紀錄：翡翠水庫管理局李秉修

	審查委員意見	辦理情形
台灣 大學 郭 振 泰 教 授	1.磷的沉降、垂直延散如何估計？值得進一步探討。	已知在翡翠水庫過去李佳芳(1994)曾於現地進行沉降物捕集實驗，本研究將參考歷年有關翡翠水庫研究及國外文獻有關磷的沉降及垂直延散係數的數據進行分析及討論。
	2.集水區土壤的成份變異大，若欲分析其組成要加以注意其不均勻性。	土壤性質可能因不同子集水區而異，故本研究採集不同集水區土壤進行黏土礦物分析實驗，即希望擴大集水區土壤黏土礦物樣本，比較不同的底泥來源及其性質。
	3.暴雨期之污染源排入量大，對水庫內磷的平衡不可忽略。	本研究在計算磷的輸入量時，會就暴雨時的輸入量加強分析研究。目前有關暴雨期實測數據缺乏，磷的質量平衡計算時較欠缺足夠的評估基礎。
台灣 大學 陳 弘 成 教 授	1.磷量來源最好加以估算，並計算外來磷量如何進入底泥及其加入量如何？	本研究會將年入流磷量，進入底泥部份納入水庫質量平衡計算，並將其結合水質模式。此工作在下年度計畫中會進行。
	2.底泥之磷量由於水溫一直維持在16~17 之間，故 turnover 情形並不明顯。冬天磷量的增加係因冬天藻類數量少而已。	由本研究及白書禎數據顯示，水庫有翻轉的機率很大，不過有關藻類 scavenge 的效應也是存在的，在水質模擬時會將其考慮進去。
	3.若能從底泥的分層現象得知每年或每 2 年的底泥中磷的加入量，則對於現象的解釋更能明瞭。	有關底泥的定年，本研究亦曾考慮過，但水庫底泥淤積特性與一般湖泊不同，將先評估每年平均淤積深度，以規劃適合採樣深度及定年方法。其次參考過去定期的底泥採樣檢測數據也有助對磷加入量的瞭解。
	4.若能將水質與藻類量加入配合分析則更佳。	未來作水質模擬時會參考本局其他研究成果中之表水水質及藻類量數據進行分析。
逢甲 大學 吳 俊 哲	1.底泥粒徑與化學組成將影響其表面吸附性及有機物的分佈，這些因子勢必與磷的釋出有關。請綜合探討其主要控制因子的差異性及比較。	參採修正。期末報告時會補充說明。
	2.請補充磷模式的基本假設條件。	期末報告時會補充說明。

	審查委員意見	辦理情形
教授	3.底泥之氧化還原電位與酸鹼值所建立之合理經驗式的統計群體多大？是否具代表性？大氣溫度對底泥厭氧程度的影響似乎不若水底部濁度的影響,如果底部溫度相關性極低,是否存在矛盾？	本研究所採用之統計群體數據為 2000 年三次採樣計 15 筆數據。僅一年數據實較欠缺代表性,故迴歸式將僅供數據解釋現象用途,而不會拿來作為預測工具。其次,有關底部溫度與底泥氧化還原電位與酸鹼值相關性低的原因,表示底部溫度對底泥生物活性影響較小,故對底泥還原狀態改變的能力亦小。但大氣溫度的變化還納入了水生物的生長週期的影響,故其可能間接影響的是沉降有機質的增加,遂造成底泥厭氧狀態改變。此與底部水溫對底泥的影響途徑不同,要分開考慮。
台北科技大學	1.SI 之計算已不用 Mintage2 模式,可將其拿掉。	遵照辦理。原先是想結合 Mintage2 於模式中,然而評估後認為無法連結,故不擬再採用。
陳孝行教授	2.p.24 之統計模式所用之參數,除葉綠素 a,大氣溫度 AT 及水底層 w-pH 之外,是否有其它參數?因為如溶氧等也可能是因素之一。	本研究考慮的水質參數還包括表層水 pH 值、底部溶氧及底部水溫,但該三者與底泥氧化還原電位及底泥 s-pH 相關性較低。表層水 pH 值主要和水生物行光合作用釋放二氧化碳有關,底部水溫的影響主要是對底泥水生物的活性,而溶氧對底泥還原態的影響,主要是在底泥水邊界面,實際進入底泥的擴散深度可能只有數公分,故可能因此降低其對底泥深層還原態的影響。
	3.底泥磷成份依照 SI 之計算,並未考慮 kinetics 之問題,可列入參考。	使用底泥孔隙水各離子濃度計算 SI,的確不是真正動態平衡計算,但在底層少受擾動的底泥中,還是可以假設底泥是在某一個 timescale 下有局部的平衡關係。
	4.集水區面積廣大,用示蹤劑 tracer 是否有其困難性？	本研究群過去曾在淡水河感潮河段作過示蹤劑實驗,故執行能力應無困難。惟本工作仍在撰寫實施計畫階段,在水庫施作也較為敏感,尚待評估中。

	審查委員意見	辦理情形
台北自來水事業處 史 午 康 主 任	1. 由水庫放流水(二號橋)含藻量(~5000 cell/ml)接近水庫上層含藻量多之水質,顯示雖然放流口大都在水面下 50 公尺左右,應非屬含藻水層,然整個取水水流在水庫水體造成之水理影響,值得模式分析者重視,該水流阻隔 overturn,對底層磷之釋出、氧之補充及對水體磷的影響等,皆值得深入探討。	本研究會向翡管局請教有關水庫放水操作的情形,及其相關資料,以利於模式模擬時之評估工作。
	2. 該二研究等皆需與集水區污染負荷等資料作對應分析,建請由翡管局、水處及水管會三個單位藉每月例行之檢討會,設法分工合作建立水庫集水區污染源之 inventory,並設法掌握集水區土地利用變遷等資料,以利掌握水土沖刷之變化及其對磷負荷之影響。	若能建立翡翠水庫集水區污染源清冊,及更新土地利用資料,將有助量化磷負荷現況,及對水質影響。
	3. 翡翠水庫魚體含鋅量較其他水庫高一倍之原因,可能係因為其水質為低鹼度(~20 mg/L),促使底泥溶出鋅較多所致。	翡翠水庫底泥偏向弱酸性(pH 值在 4~6 之間),可能有助重金屬的溶出。
台北水源特定區管理委員會 林 文 昭 先 生	1. 水庫底泥含磷,其來源可能為集水區崩塌土、農業施肥肥料流失、遊憩或其他人為有機污染,能否結合相關研究計畫加以評估各來源可能貢獻之比率及影響,以為集水區磷源削減措施之參考。	欲量化集水區的非點或點污染源負荷需要配合集水區非點污染源模式進行模擬及比對,非本研究之預定工作項目。不過,本研究所進行的土壤黏土礦物比對,將有助於確認集水區土壤沖刷區位,底泥來源,供有關集水區研究計畫參考。
	2. 農業施用肥料,主要以過磷酸鈣形態居多。本報告中底泥所含鈣結合磷是否與施肥流失有關?有無辦法區分?	本研究所分析底泥固相磷的型態分佈,在最上游灣潭(S-1),其鈣結合磷的比例(23.91%)與鐵鋁結合磷(26.18%)相當,有可能是灣潭茶園的肥料磷所貢獻。因其他四個測點的鐵鋁結合磷均較鈣結合磷要多出 1 至 15 倍,顯示集水區背景天然的鈣結合磷的比例並不高。然而,本研究所採用之底泥萃取方法並無法細分出人為或天然的鈣結合磷組成。

	審查委員意見	辦理情形
經濟部水資局黃琮逢先生	1.本計畫所蒐集之資料，是為模式校正及驗證之用，有關於採集點之選取，是否有其依據原則，請加以補充說明，可作為日後相關研究之參考。	本研究的採樣點選取是延續過去翡翠管的底泥計畫設定點位置。其好處是可和過去資料作比對，具有延續性。且分布點涵蓋水庫內上中下游及重要支流匯流口，具有其代表性。不過未來本計畫還是會就模式模擬結果檢討底泥採樣點合適位置，與翡翠管局商討。
	2.建議可蒐集國外作過相關研究的情形及實施案例，若要在國內實施時，請討論兩者之異同點及執行之情形。	遵照辦理，將於期末報告補充說明。
	3.本計畫分析水庫底泥之性質，能否就其性質評估底泥可否應用於其他方面的用途(如農業土壤改良上...)?	底泥本身還原性物質相當豐富，且鬆軟含水量高。要改良作為其他再生用途，需要另行配合實驗評估之，本計畫暫無法提供具體建議。
	4.本計畫之預期效益，可否具體說明之。	本計畫完成後預期將可提供較完整的底泥資訊包括底泥磷的釋出潛勢，整合模式，將底泥磷釋出通量納入水質模式模擬量化底泥的影響等，及協助決策者研擬底泥磷的內部控制策略，保護水質。
翡翠水庫管理局操作科李健元股長	1.報告中 p.23 採樣時船因受水流影響而移動，以致改變位置所致，建議日後底泥採樣時使用手機式衛星定位儀定位及熟練人員操作，使採樣工作更精確。	本研究在採樣時有使用 GPS 衛星定位儀定位採樣船的位置，然而水流影響乃不可避免，日後將加強採樣人員的操作熟練度，並切實記錄採樣點之座標。
翡翠水庫管理局林	1.配合研究內容需要，建議於翡翠水庫藻類採樣點分佈圖及翡翠水庫底泥採樣點位置圖中繪出北宜公路及北宜高速公路位置，以明顯相關位置及可能影響。	遵照辦理。

	審查委員意見	辦理情形
瑞 廷 技 正	2.水庫水質以往係在冬季或初春時可達貧養等級，民國 85 年以後反而在冬季出現優養等級，此種同季節卻完全不同水質狀況請說明原因。	台大海洋所白書禎(2000)認為，大壩在每年 2 月冬季初春時，出現上層水總磷超過 40 $\mu\text{g/L}$ 優養等級原因，乃冬季冷水之密度流潛入水庫底部後，下層水被上移使底部托升造成。本研究亦發現，水庫每年 1,2 月時，上、中、下層水溫會趨於一致，使溫度分層被破壞，而發生翻轉。其好處是該低溫密度流進入水庫後會供給底部豐富溶氧，使被底泥消耗溶氧再度補注。然而其壞處則是造成表水優養，建議未來應加強底部溶氧的觀測及研究氣象水文變化對水質的影響。
	3 依底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫得知，相關參數顯示磷含量不斷在水體中釋出，是否為磷濃度增加之原因？又有否改善抑制或排除之法以維護水質。	如前述，冬季發生的水質優養極可能是底泥磷的釋出所造成。此時建議可在冬季冷峰來臨前先調整水庫放水深度，將底部蓄積豐富磷營養鹽去除，減緩被冷水抬升進入上層水體磷量等。其他改善抑制之方法，將於期末報告中提出。

伍、時間：九十年十二月十一日下午二時

陸、地點：臺北翡翠水庫管理局會議室

柒、主持人：副局長周祖勇

捌、紀錄：翡翠水庫管理局李秉修

	審查委員意見	辦理情形
交大環工所高正忠教授	1.底泥磷的 cycle 及與各因子之間之關係宜繪圖表示之。	謝謝指正，本研究會在期末報告中加入並說明之。
	2.若擬用 WASP，宜盡快就模式目的及需求規劃所需的資料。	本研究在下一年度中會就模式所需資料進行蒐集及彙整工作。
	3.是否空間性有差異。宜瞭解之。	本研究已在報告中對於水庫內上游至下游各採樣點之底泥進行比較說明，其基本組成之差異並不大，但上游兩點底泥總磷可能受農業施肥的影響較顯著。
	4.除了採用 WASP，亦可考量配合監測值建立較簡易模式(或許誤差反而較小)。	本研究會在下一年度中就應用性進行比較，以及評估是否建立較簡易模式之可行性。
	5.改善對策是否亦可思考一下。	本研究在下一年度中會就改善對策進行討論說明。
	6.請用雙面印刷。	遵照辦理。
	7.颱風等較明顯的 event 之影響亦宜分析之。	本研究會在下一年度中就颱風等較明顯的 event 之影響進行分析。
	8.建議針對集水區 loading 宜與其他單位共同合作或直接由管理局進行調查及建置資料。	建議翡翠局在集水區相關研究計畫中進行。
台灣大學郭振泰教授	1.收集的資料豐富，分析方法詳盡正確，對水庫內部養分的平衡增加不少的瞭解。	謝謝指正。
	2.這些資料希望能輸入簡化水質模式及複雜水質模擬模式(如 WASP 或 CE-QUAL-W2)加以分析，與資料正確性互相印證，並瞭解其他水質項目之變化情形。	本研究會在下一年度中就模式應用性進行比較，以及評估是否建立較簡易模式之可行性。俾將模擬水質與現況進行比對，瞭解水質惡化之真正原因。
台灣大學陳弘成教授	1.從翡翠水庫之藻類報告，水庫內在冬天之水體翻轉現象並不明顯，最多水塊的混合只集中於 50-80 公尺。	本研究在下一年度中會嘗試運用水體水質模式，以期能分析大壩區水流運動變化，以合理解釋水流混合現象。
	2.底泥之磷量隨深度而遞增，這應是外來的污染凝混及沈積物之沈澱所引起，故水庫磷量之增加應屬污水帶來，而底泥的沈積磷的貢獻較不大。	底泥是從集水區泥砂進入水庫沈澱形成，然而隨著時間底泥發生分解反應，使得磷再度從底泥進入上層水體。本研究在下一年度中會嘗試運用水體水質模式，模擬量化底泥沈積磷對水體磷貢獻量之大小。

	審查委員意見	辦理情形
	3.p.57 表 4.3 在馬祖林的孔隙水中在 5 月特多，應有污染源或農園施肥的結果。另外底泥的鋅及銅亦不少，銅可能是以前施肥的結果。	本研究持類似推論。
	4.底泥有機物分解的重要因子應包括細菌。	同意，因此本研究在底泥磷傳輸模式中有考慮底泥有機磷的生物分解作用。
	5.在期末報告若能列出水中磷量之垂直分析則更佳。	本研究在下一年度中會參考本局其他委託計畫之結果，嘗試運用水體水質模式，模擬水中磷量之垂直分析。
	6.研究資料與成果均有參考價值，值得肯定。	謝謝指正。
逢甲大學 吳俊哲教授	1.本計畫期末報告針對翡翠水庫底泥性質及磷釋出潛勢已獲得初步結論，對未來兩年的計畫進行已建立基礎。	謝謝指正。
	2.歷年底泥總磷含量變化之極度落差主要肇因於分析方法之差異，可否在文字間增加分析方法相異之處及原因所在。	造成底泥總磷含量變化落差的原因除了底泥背景差異，還有分析實驗室的品保品管程序，而應和使用不同分析方法的差別不大。因此本計畫在報告書中已刪除有關底泥分析方法的討論文字。
	3.底泥重金屬錳在大壩位置的濃度均維持在 3000 mg/kg 以上，此特殊現象是否真正反應其濃度(可與其他相關文獻資料比較)，或是其他原因。	翡翠水庫集水區土壤錳濃度和其他底泥採樣點濃度都在幾百個 mg/kg 數量級，因此對於錳在大壩累積的機制目前仍不清楚，本計畫會在下一年度繼續追蹤討論。
	4.溶氧影響底泥磷釋出通量的實驗，可否以添加亞硫酸鈉及氯化亞鈷來去除水中溶氧的方式，可以避免擾動現象將表層溶氧帶入水層中。	謝謝，本計畫會在下一年度的實驗中考慮此添加方法。
台北科技大學 陳孝行教授	1.本計畫內容相當完整，已對未來的延續計畫立下基礎。	謝謝指正。
	2.降雨之水質資料可參考台北科大與翡管局今年之研究計畫。	參採修正。
	3.SI 計算可否考慮溫度及離子強度。	謝謝指正。
	4.文中提到因分析方法之不同，造成磷數據之不同，可否介紹其不同處。	造成底泥總磷含量變化落差的原因除了底泥背景差異，還有分析實驗室的品保品管程序，而應和使用不同分析方法的差別不大。因此本計畫在報告書中已刪除有關底泥分析方法的討論文字。
	5.p.47 頁應為圖 4.4	謝謝指正。
	6.p.32 可更正為 0.013~0.014。	謝謝指正。

	審查委員意見	辦理情形
台北自來水事業處江清蓮先生	1. 枯水期結束前(迄今年 8 月)之水庫底泥粒徑相對大於梅雨季之後(今年 5 月), 研判水庫自中底層放水發電時, 不排除於底泥附近形成水流將微粒帶出, 同時引入上層水體產生類似 overturn 現象而加速底層磷的擴散, 值得深入探討。	本研究會向翡管局請教有關水庫放水操作的情形, 及其相關資料, 以利於研判放水對底泥再懸浮之影響。
	2. 雨季後水體在水庫之平均停留時間較短, 水體含藻類數量相對下降, 顯示水體與底泥之平均接觸時間亦為優養化之關鍵因子。	所述極有可能。本研究在下一年度中會嘗試運用水體水質模式, 模擬水體停留時間對水質影響。
	3. 本處直潭壩及青潭取水口之藻類數量高於翡翠水庫排放水之含量, 除受新店溪上游社區排放污水影響外, 建議另對水庫表水及排放水進行設計藻類培養實驗, 則有助於評估在不同磷含量及光源條件下之藻類增長模式。	非計畫之研究範圍。
台北水源特定區管理委員會林文昭先生	1. 本特定區地質脆弱, 暴雨沖刷及自然崩塌, 造成水庫泥沙淤積在所難免, 就報告所提水庫水質總含磷量有升高趨勢, 且屬於未穩定狀況, 是否有考慮階段性處理方式, 如浚堦、排水口操作等其他方法來控制磷。	本研究在下一年度工作中會提出有關之控制策略與翡管局參考。
	2. 根據本會本年度在水庫水域進行觀察, 經潛水拍攝發現尚存未剝除的樹木及為數可觀的魚群。另幾次颱風造成水庫區內的浮木很多。有機物浸泡釋出及生態循環對水中磷貢獻之量及比例為何?	本研究在下一年度工作中會蒐集相關文獻並做成建議予翡管局參考。
台北市研考會程瑞娟小姐	1. 建議事項採行情形追蹤表。	遵照辦理。
	2. GRB 部分請將期末摘要上國科會 GRB, 並將總結報告送國科會及國家圖書館各兩本。	遵照辦理。
	2. 總結報告請附上中英文摘要。	遵照辦理。