

台北翡翠水庫管理局

翡翠水庫底泥性質及對水質影響 潛勢研究（二）

成果報告書

委託單位：台北翡翠水庫管理局

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

中華民國九十一年十二月

目錄

	頁次
圖目錄	iii
表目錄	iii
符號說明	iv
第一章 續論	1
第二章 相關研究、文獻之探討	4
2.1 翡翠水庫背景及歷年水質、底泥之監測	4
2.1.1 地質與土壤	4
2.1.2 氣候與水文	4
2.1.3 水庫水質	5
2.1.4 水庫底泥	6
2.2 磷的循環及底泥的分類	6
2.3 底泥固相磷的分類	7
2.4 影響底泥磷移動化機制及環境因子	8
2.4.1 底泥無機磷的溶解與沉澱化學反應	9
2.4.2 底泥磷的吸脫附	10
2.4.3 底泥微生物影響	10
2.4.4 底泥 pH 值及氧化還原電位	11
2.4.5 孔隙水溶解相磷的傳輸	12
2.5 影響底泥-水邊界層磷釋出的機制及環境因子	12
2.5.1 底泥-水邊界層溶氧及鐵離子	12
2.5.2 底泥-水邊界層的質傳阻滯	14
2.6 底泥磷模式發展	14
2.7 現地示蹤劑試驗	15
2.8 模擬磷水質模式	16
第三章 研究材料與方法	17
3.1 例行性檢測分析	17
3.2 分年研究計畫	18
3.2.1 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式架構及分析方法	18
3.2.2 實驗室底泥磷釋出通量模擬管柱實驗	19
3.2.3 現地示蹤劑實驗	19
3.2.4 水質模式適用性探討	20

第四章 結果與討論	21
4.1 底泥例行性檢測分析結果	21
4.1.1 底泥一般及營養鹽類	21
4.1.2 底泥粒徑組成	24
4.1.3 底泥重金屬類	24
4.2 底泥磷的二層傳輸及通量模式	26
4.2.1 模式概念及基本假設	26
4.2.2 統御方程式	27
4.2.3 模式邊界條件與磷釋出通量	29
4.3 主要底泥固相磷物種確認	31
4.3.1 底泥與集水區土壤固相磷物種比較	31
4.3.2 底泥固相磷型態隨深度變化	32
4.4 底泥磷釋出通量模擬管柱實驗	33
4.5 現地示蹤劑實驗	35
4.6 底泥磷模式校正及驗證	36
4.7 水質模式參數彙整	36
4.8 大旱對水質的影響	37
第五章 結論	38
第六章 參考文獻	41

附錄一、檢驗項目之品保品管數據
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
附錄五、底泥磷模式(2B-SPTFM)數值方程
附錄六、底泥磷模式(2B-SPTFM)電腦程式
附錄七、期初評選會議紀錄
附錄八、期末審查會議紀錄
附錄九、期末審查會議紀錄

圖目錄

	頁次
圖 2.1 水庫集水區磷的循環	45
圖 3.1 翡翠水庫底泥及集水區土壤採樣點位置	45
圖 3.2 貫入式之套管底泥採樣器	46
圖 3.3 底泥固相磷序列萃取流程	47
圖 3.4 現地示蹤劑實驗裝置	48
圖 4.1 底泥粒徑組成分佈	49
圖 4.2 底泥磷模式概念示意圖	53
圖 4.3 底泥與集水區土壤磷之型態分佈	53
圖 4.4 大壩(S-5)底泥固相磷型態隨深度變化	54
圖 4.5 底泥固相磷與孔隙水溶解磷隨深度變化	55
圖 4.6 長時間 (A)組及(B)組底泥管柱上層水總磷濃度隨時間變化	56
圖 4.7 短時間 (C)組底泥管柱上層水總磷及反應性磷濃度隨時間變化	57
圖 4.8 現地大壩底層水總磷及溶氧隨時間變化	58
圖 4.9 現地底泥-水界面示蹤劑施放照片	59

表目錄

	頁次
表 2.1 可能與無機磷礦物反應有關的平衡式及溶度積常數	60
表 3.1 檢驗項目及分析方法	61
表 3.2 實驗室數據之品保目標	62
表 4.1 91 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(化學類)	63
表 4.2 91 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(化學類)	64
表 4.3 91 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)	65
表 4.4 91 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)	66
表 4.5 91 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類)	67
表 4.6 91 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類)	68
表 4.7 底泥與集水區土壤各固相磷物種的含量	69
表 4.8 實驗室管柱底泥磷釋出通量計算結果	70
表 4.9 底泥磷模式(2B-SPTFM)輸入參數一覽表	70
表 4.10 水化學模式 MINEQL+模擬平衡態無機磷濃度(EPC)結果	71
表 4.11 底泥磷模式模擬磷釋出通量結果	71
表 4.12 W2 模式所需模擬水質生化反應一覽表	72

符號說明

C_t	底泥總磷, mg/kg
C_s	底泥固相磷, mg/kg
C_w	底泥溶解相總磷, mg/L
C_{s1}	底泥固相有機磷, mg/kg
C_{s2}	底泥固相無機磷, mg/kg
C_{w1}	溶解有機磷, mg/L
C_{w2}	溶解無機反應性磷, mg/L
D_m	溶解相無機磷在底泥中之擴散係數, cm^2/day
ρ_b	底泥總體密度, g/cm^3
n	底泥孔隙率(V/V), 無因次
D_H	底泥溶解磷延散係數, cm^2/day
k_c	微生物對固相有機磷一階反應分解速率常數, day^{-1}
θ	溫度校正因子, 無因次
k_d	溶解有機磷的一階分解速率常數, day^{-1}
V_t	底泥孔隙水體積, cm^3
α	質傳係數, cm/day
$\overline{C_{w2}}$	平衡態的溶解相無機磷濃度, mg/L
L	特徵長度, 以 d_{65} 或 d_{50} 表示, cm。
$C_{O_2}(0)$	底泥-水界面的溶氧濃度, mg/L
Z_1	底泥有氧層 BOX-1 的深度, cm
Z_2	底泥無氧層 BOX-2 和掩埋層交界的深度, cm
q	底泥溶解磷進入上層水的通量, $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$
n_{ij}	底泥-水界面的平均孔隙率, 無因次
C_{wj}	為上層水(compartment j)溶解總磷濃度, mg/L
C_{wi}	為底泥孔隙水(compartment i)溶解總磷濃度, mg/L
L_{ij}	邊界層厚度, cm
R_{O_2}	底泥需氧量(SOD), $\text{g}/\text{m}^2\text{day}$
D_{O_2}	溶氧的擴散係數, cm^2/day
WT	底層水溫,
Z	距離, cm
t	時間, day

摘要

水庫湖泊底泥磷的釋出，是水庫重要磷的來源。為了掌握翡翠水庫底泥磷的釋出對水庫水質的影響，進而改善底泥環境以及研擬內部磷來源的控制策略，為本研究目的。本計畫分為兩年，除繼續配合水管局例行性的翡翠水庫底泥採樣暨檢測分析工作，今年度進行實驗室磷釋出通量實驗，校正及驗證底泥磷的釋出通量模式，現地示蹤劑實驗求取水流延散係數，以及就水質模式進行適用性比較等工作，以利下年度，運用底泥磷模式及水質模式模擬水體磷的變遷，量化底泥磷釋出量對水質之影響，作為落實水庫管理之有效工具。

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差異不大，推測在檢測期間水庫應無外來之重大污染。今年適逢水庫建庫以來最乾旱的一年，水位明顯下降，水庫水質有明顯的惡化，但底泥孔隙水溶解磷濃度卻較過去為低。由於溶解磷與底泥 pH 值、氧化還原電位(ORP)及孔隙水主要離子濃度均有關，今年底泥的還原狀態並不明顯，可解釋溶解磷濃度相對也較低的結果。從今年底泥性質推測，今年水質有明顯的改變可能是外部污染負荷增高的結果，而內部污染負荷相對較低。建議應加強入流水質的監測及集水區非點源污染改善工作。但水位降低，尤其是在水深較淺處，相對會使底泥負荷量對水質影響增加，建議應加強追蹤與預測藻類消長變化。

從集水區土壤與底泥的磷型態分佈比對結果，我們可以確認，存在集水區及底泥的

天然主要無機磷礦物是鋁結合磷(Al-P)。各測站底泥磷的組成有空間差異。灣潭底泥中的鈣結合磷較其他地點要高，可能是人為農業的污染進入底泥所造成。

長時間觀察底泥管柱上層水總磷濃度隨時間變化，我們發現添加亞硫酸鈉與否對曝氣環境的磷通量影響不大。實驗管柱模擬厭氧態下磷的通量約為 0.09~0.14 ug/cm²day，約在 1.0E-1 ug/cm²day 數量級，較現場好氧態的磷通量要高約一個數量級。表示氧的存在，使孔隙水三價鐵離子阻擾磷的移動，可能只有十分之一磷可以自由磷的型態移動到上層水中。

研發之底泥磷二層式傳輸及通量模式 (2B-SPTFM)包含水化學模式 MINEQL+，考慮包括微生物的一階分解反應，無機磷的溶解-沉澱反應動力，孔隙水分子物理性傳輸及溶氧的影響。模擬得到平衡態時，有氧層及無氧層的反應性無機磷濃度 (equilibrium phosphate concentration, EPC)顯示，底泥 EPC 多較實測磷濃度高，底泥屬於持續溶出狀態。

經過水下攝影機觀察示蹤劑施放後，在水中隨時間的擴散分布，初步估計水底延散係數約為 0.30-1.50 cm²/sec(平均值為 0.72 cm²/sec)。經過實驗結果確立，本次採用的示蹤劑攝影及施放裝備，在水底進行示蹤劑實驗是可行的。

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. The knowledge of the mechanisms and factors influencing sediment P release in the Feitsui Reservoir were needed.

The objective of this study was to evaluate the effect of sediment P on the water quality of the Feitsui Reservoir. In the first year of this two-year planning, the framework of this study included: (1) the continued sediment sampling and analysis works at five sampling sites in the reservoir; (2) the laboratory column studies to simulate the P flux; (3) the tracer experiments onsite to calculate the dispersion coefficient at the sediment-water interface; and (4) building up a 2 BOX-Sediment Phosphorus Transport and Flux Model (2B-SPTFM) at sediment-water interface to simulate the P flux to the overlying water.

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 P at five sampling sites and watershed soils indicated that Al-bound P was a dominant inorganic species of P in the sediments. By using a geo-chemical program, MINEQL⁺, with the input of the main ion concentrations in the porewater and AlPO_4 as a fixed entity, the time-varying

equilibrium phosphate concentration (EPC) was simulated. The simulated EPC was mostly larger than the measured reactive phosphate (RP) in the porewater, indicating the higher release potential of P into the overlying water.

The column studies revealed that the simulated P flux was about $1.0E-1 \text{ ug/cm}^2\text{day}$. It compared well with the P flux onsite. According to the investigation of the results monitored onsite or in the laboratory column experiments, the sediment P model (2B-SPTFM) was built and would incorporate with the water quality model, W2, to simulate the internal load of P and quantify the effect of them on the water quality. The technique applied in the tracer test in the Feitsui Reservoir has been proved feasible. The calculated longitudinal dispersion coefficient at the sediment -water interface was $0.72 \text{ cm}^2/\text{sec}$.

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.

第一章 續論

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 1987 年啟用至今，

提供北部近五百萬人之民生用水，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。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，及隨時間的變化以適時處理應變。

民國 89 年至 90 年，委由台大環境工程學研究所執行之底泥監測及研究計畫發現，近年來，底泥總磷量有增加的趨勢，隨底泥厭氧還原程度增加，酸鹼值及氧化還原電位會降低，促使孔隙水溶解性總磷濃度明顯地提高，會增加溶解性磷營養鹽進入水庫上層水體，使水質惡化之潛勢。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，量化底泥磷對水質影響的程度，進而改善底泥環境以及研擬內部磷來源的控制策略，為本研究目標。

全程計畫分為兩年，除繼續配合翡管局進行例行性的翡翠水庫底泥採樣暨檢測分析工作，接續民國 90 年(全程計畫第一年)本所已發展之底泥磷的釋出模式概念雛型，及觀察底泥磷移動性受環境參數影響等之研究成果，本計畫於今年度進行實驗室磷釋出通量

實驗，校正及驗證底泥磷的釋出通量模式，現地示蹤劑實驗求取水流延散係數，以及就水質模式進行適用性比較等工作，以利下年度，運用底泥磷模式及使用水質模式模擬水體磷的變遷。依預定進度，本計畫已分別於 91 年 5 月 27 日及 91 年 8 月 28 日完成 2 次底泥例行檢測分析工作。今年適逢水庫建庫以來最乾旱的一年，水位明顯下降，水庫水質有明顯的惡化。有關水質與底泥關係探討說明於後。

本計畫執行完成預期可達成下列目的：

1. 本計畫經由連續三年(包括全程計畫第一年(去年))之現地採樣與研究工作，觀察底泥磷濃度隨時間較完整的變遷，配合環境參數變化之掌握及模擬，由累積與連續性的數據判斷，較能解釋底泥磷的釋出受環境變化影響。
2. 經由底泥磷物種分選及吸持機制分析，可瞭解翡翠水庫集水區土壤背景礦物對水庫底泥磷釋出潛勢影響，並可提供集水區非點源污染管理及底泥環境改善之參考。
3. 由現地示蹤劑實驗求取水體延散係數，可供水體水質模式輸入應用，較能準確預測底泥磷釋出對水質影響。
4. 建立翡翠水庫底泥磷釋出模式，可用以量化底泥磷釋出量對水質之影響，為落實水庫管理之有效工具。
5. 經由本計畫研究成果，瞭解水庫中磷的來源及變化，將可供翡翠局進行水質及底泥改善策略研擬工作較完整的參考，以保護水質。
6. 提供翡翠局臨時性必要之技術支援與協助

第二章 相關研究、文獻之探討

2.1 翡翠水庫背景及歷年水質、底泥之監測

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(例如頁岩為 4.3~4.8%)(陳尊賢, 1997), 顯示集水區及水庫底泥屬於鐵質系, 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。

依據吳等人(2001)對翡翠水庫底泥及集水區土壤黏土礦物調查分析結果, 翡翠水庫五個測點包括灣潭、馬祖林、後坑子、火燒樟及大壩底泥與集水區土壤的黏土礦物種類相近, 成份主要含有大量的石英(quartz)及伊萊石(illite), 較少量之高嶺石(kaolinite)、蛭石(vermiculite)以及 gibbsite($\text{Al}(\text{OH})_3$)。

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, 形成蜿蜒之瓣狀水系。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。然而近年因氣候變遷的影響, 尤其是今年, 水文呈較不規則變化, 大幅影響翡翠水庫水位及容量變化。

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)。上游灣潭附近水質常發生優養, 主要是來自集水區非點源污染。近年來水庫曾出現短暫水質惡化, 包括冬天大壩區的低溫水密度流及夏秋季的颱風濁度流。大壩自

1996年起至2000年，每年1-2月天氣寒冷時，表水總磷曾達到40 µg/L，為OECD認定之水質優養等級。白(2000)及吳等人(2001)均認為，冬季冷水形成的密度流潛入水庫底部後，使下層水底部蓄積的磷被托升至上層，或是上、中、下層水溫趨於一致，發生翻轉，可能是水質惡化的成因，這也是翡翠水庫處於亞熱帶氣候環境所形成特殊的水文現象。颱風造成水庫內的濁度流，也曾使翡翠水庫濁度大幅增加，顯示水庫集水區的保護與水文循環的異常亟需重視與研究。今年以來，翡翠水庫水質有漸趨惡化現象，至8月止，Carlson 優養指標已達到優養等級，水中總磷濃度偏高區域主要在馬祖林、後坑子、火燒樟等中間水域。推測除了水庫貯水量在今年六月前大幅下降，水位低於120M，水量降低，提高營養鹽濃度，可能對水質有影響，去年9月納莉颱風帶來的大量泥砂與營養鹽進入水庫沉積後再釋放，可能也是水質惡化原因。自沉積底泥所釋放的磷對水質的影響未來需要進一步評估。

2.1.4 水庫底泥

統計翡翠水庫1994~2001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，底泥總磷含量變化(吳等人, 2001)，歷年磷含量範圍為200-800 mg/kg之間，隨時間有逐漸增加趨勢。五個點之間濃度差異並不明顯。比較底泥總磷量隨季節性的變化，每年例行兩次採樣，第2次(夏、秋季節)採樣通常都較第1次(春季)為高。推測磷含量的增加與季節性變化有關，係因夏季水體藻類生長較旺盛，死亡藻體沉降累積於底泥量亦增加所致，也顯示有機磷可能是底泥磷重要來源。2001年底泥孔隙水溶解總磷檢測濃度介於0.98~2.32 mg/L，五個固定底泥採樣點濃度之間變化並不明

顯，但孔隙水磷濃度已與其它國家水質富營養化的湖泊，底泥孔隙水總磷 1.20~2.25 mg/L(Hakanson and Jansson, 1983)相當，推測此磷的内部負荷對水庫水質應有潛在之影響。其次由分層孔隙水濃度分布顯示，底泥溶解磷有往上移動的趨勢，底泥深層磷的溶出成為上層磷的重要來源。

2.2 磷的循環及底泥的分類

集水區入流磷來源可能是點源或非點源的污染，如圖 2.1 所示，有來自人為開發的農業植作區肥料磷及自然界森林地表受到降雨沖蝕，以懸浮態或溶解態的型式進入水庫的含磷礦物。這些磷有的直接沉降(sedimentation)進入底泥，有的為藻類所攝取。底泥可依來源分為三大類(Seibold and Berger, 1982)：

1. Lithogenous sediment：

以顆粒或塊狀物進入水體，沉降到底部沉積者，可能包涵富含有機物的黏土質或細砂土等。

2. Hydrogenous sediment：

由水體或底泥孔隙水溶液中結晶析出的礦物，沉澱或沉降至底部所形成。

3. Biogenous sediment：

其來源與有機體有關，經由水生物體產生或生物殘骸產生的沉積物。例如藻類死亡的殘屑 (debris)，攜帶有機磷沉降至底泥，成為底泥的一部份。

每一類底泥均會攜帶磷進來。為不溶的固相磷，經過各種自然的生物地質化學作用，又再度溶解出來。有機磷經過底泥微生物的厭氧分解，會被移動化而溶解進入底泥孔隙

水中，也因厭氧還原促使氧化還原電位及酸鹼值的降低，造成底泥無機磷可能跟著溶出，一起成為水庫磷的內部來源，再進入水體被藻類所利用。

磷進入水庫中累積及再釋出的過程，形成水庫集水區磷的循環，由於底泥系統頗為複雜，要量化底泥磷的釋出量必須先對底泥中的磷分類，再進行影響磷釋出機制及環境因子的探討。

2.3 底泥固相磷的分類

底泥的非移動相，固相磷的分類又稱磷的型態分佈(P fractionation)。經過一系列萃取方法(Hietyes and Lijklema, 1980; Williams, 1976; Golterman, 1988)，將固相磷依操作型定義，分別為不安定的磷或吸附性磷(labile-P)、鈣結合磷(Ca-P)(或磷灰石磷, apatite P)、鐵、錳或鋁結合磷(Fe, Mn and Al-P)(或非磷灰石磷, non-apatite P)、有機磷(organic-P)及鈍性磷(residual-P)五類。其中，不安定的磷為以吸附方式，與黏土、鐵鋁氫氧化物等結合的無機磷酸鹽，可自固相被交換出來，進入孔隙水中。有機磷是水生物體產生或生物殘骸沉降底泥所形成的磷，可被微生物礦化分解或水解，生成溶解相有機磷。鐵鋁結合磷及鈣結合磷等是存在底泥原生礦物中或因成岩結晶析出的無機磷礦物。其會因氧化還原電位或酸鹼值的改變，及參與反應離子活性積變化，沉澱或溶解出溶解相無機磷。鈍性磷則屬於難溶或難反應之磷，在一般環境中均不易被轉化為移動性磷的部份。透過磷的分選將可了解各種磷相在底泥中佔有比例，進而找出主要參與底泥磷的釋出反應機制(Pettersson, 1998)。吳等人(2001)採用 Hietyes 與 Lijklema (1980)序列萃取方法實驗結果，除了鈍性磷(residual-P)外，翡翠水庫底泥主要磷的型態分佈為鐵、錳或鋁結合磷(非

磷灰石磷)，及有機磷。不安定的磷及鈣結合磷(磷灰石磷)含量很低，顯示翡翠水庫集水區是非鈣系(noncalcareous)地質土壤環境。

2.4 影響底泥磷移動化機制及環境因子

底泥-水邊界面自然的生物地質化學過程(biogeochemical process)會影響底泥磷的沉積，或稱成岩(diagenesis)作用，相對地也影響了底泥磷的溶出。底泥移動相磷包括溶解相有機磷及溶解相無機磷，其欲釋放至上層水中需經過兩過程，一為移動化(mobilization)，一為物理傳輸(transport)。前者是將固相磷轉化為溶解相磷，使能存在孔隙水中；後者則是將溶解相磷傳輸至上層水中(Hakanson et al., 1983)。以下將就各個可能之影響機制及環境因子做探討。

2.4.1 底泥無機磷礦物的溶解與沉澱化學反應

Mayer(1999)等人曾應用溶解沉澱動態平衡的熱力學原理所發展的飽和度指數(saturation index, SI)方法(Troup, 1974)，推測底泥各種無機磷礦物溶出磷能力，作為判斷底泥磷釋出潛勢的指標。如(1)式，當 SI 大於或等於零時，表示該礦物處於過飽和或飽和狀態，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。

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

(1)

其中：

k_{sp} ：礦物 A_aB_b ($n = a+b$) 之溶度積平衡常數；

IAP：離子活性積，各離子濃度乘積；

在自然界中，大多數底泥磷是以磷灰石磷為主，例如水合磷灰石(hydroxyapatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)及氟化磷灰石(fluoroapatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)。但也有磷可與鐵、鋁氧化物形成共沉澱，或被包圍在這些鐵鋁氧化物中(Hakanson and Jansson, 1983)。這些非磷灰石磷可能包括 vivianite ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)、anapatite ($\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、variscite (AlPO_4)、 MnHPO_4 等。表 2.1 為所有可能與無機磷礦物反應有關的平衡式及溶度積常數。參與上述反應的離子包括有鐵、錳、鈣、鋁、硫、氟、磷酸鹽、碳酸鹽等。底泥酸鹼值(pH)及底泥氧化還原電位(ORP)變化，會改變這些化物沉澱或溶解的趨勢 (Moore and Reddy, 1994)，以及可能因共同離子效應，使孔隙水中離子呈過飽和狀態(Runnells, 1969)。由於鐵、鋁、錳及鈣等陽離子尚可與其他陰離子如碳酸根、硫、氟等形成化物，亦應列入表 2.1 中。陳 (2001)曾分析翡翠水庫在 2000 年 1、6、9 月三個季節，底泥孔隙水主要離子濃度 6 月夏季底泥孔隙水的磷濃度最高，底泥氧化還原電位 ORP (介於-174.9 ~ -231mV) 及 pH 值 (介於 4.29 ~ 4.89)範圍亦較其它季節為低，顯示當底泥厭氧環境升高時，有利於底泥無機磷礦物溶出。然而，基於底泥系統中磷的溶出與沉澱並非隨時處於平衡狀態，反應的動向應透過水化學平衡的計算作確認。目前已發展計算水化學平衡的電腦軟體，是依據質量平衡原理及參與反應的平衡常數進行大量數值運算，如 MINTEQA2(Allison, 1991)、PHREEQC(Parkhurst, 1995)、MINEQL+(Schecher, 1998)等。House(2000)曾利用 PHREEQC 水化學軟體探討有那些化物可能因過飽和或飽和而析出，或持續溶出。

2.4.2 底泥磷吸脫附

與黏土、鐵鋁氫氧化物等結合的無機磷酸鹽，可被 OH 離子交換出來，進入孔隙水中。吸附磷在固相及液相之間的吸脫附機制，曾有人以 Freundlich 及 Langmuir isotherm 等溫吸脫附平衡關係來描述(House, 2000)。磷的分選結果得知，吸附磷含量很低，遠小於 1%(0.02~0.08%)(吳等人, 2001)。若以線性分配關係描述底泥固相及溶解相磷濃度關係，得到分配常數約在 200~400L/kg 之間。

2.4.3 微生物影響

底泥有機磷受到微生物的分解作用影響，已經實驗室或現場的數據加以證實(Bates et al., 1980; Di Toro and Matystik, 1980)。若將底泥管柱在不同溫度下培養，當溫度升高磷的釋出速率也有增高趨勢(Holdren and Armstrong, 1980)。在美國環保署所發展的 WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)模式中，對於底泥有機磷的分解速率以一階反應表示，約為 0.0004 day^{-1} 。由於底泥有機磷的分解過程，會影響底泥酸鹼值及氧化還原電位的改變，以及後續無機磷礦物的溶出或沉澱，顯示微生物的作用對固相磷的移動化貢獻很大。

2.4.4 底泥酸鹼值(pH)及氧化還原電位(ORP)

底泥酸鹼值及氧化還原電位的改變，將顯著影響底泥無機磷礦物溶出 (Moore and Reddy, 1994)。吳等人(2001)曾將底泥 pH 值與溶解離子濃度作相關性比對，發現兩者趨勢變化剛好相反，當 pH 值降低，溶解磷濃度會顯著提高。依磷分選結果，底泥主要的無機磷是鐵、鋁結合磷。已知鋁結合磷在 pH 值等於 6 時的溶解度最小，而當 pH 值升

高或降低時，則有助其溶出。鐵及錳結合磷亦然。翡翠水庫集水區土壤是屬於弱酸性土質，故底泥 pH 值約在 4~6 之間。底泥環境應有利於這些鐵、鋁結合磷的移動化。

底泥氧化還原電位(ORP)代表底泥還原狀態，吳等人(2001)觀察 2001 年 2 次採樣，接近底泥之底層水 ORP 值均由上游至下游依序遞減，表示底層水的還原狀態以大壩最低。然而底泥 ORP 的變化並不明顯，推測與當時是否有新鮮底泥進入及底泥有機質的分解等有關。若將底泥 pH 值及底泥 ORP 的改變，納入水化學計算，將可更精確協助判斷底泥磷移動化能力。

2.4.5 孔隙水溶解相磷的傳輸

在孔隙水中，影響溶解相磷的傳輸除分子擴散運動之外，可能有生物性擾動及底泥的壓密行為。Holdren 與 Armstrong(1980)指出生物擾動效果遠大於擴散效果。Starkel(1985)認為磷釋出量與底棲生物重量有關。吳 (1988)亦經由實驗證實，生物擾動引起的傳流較分子擴散對釋出通量影響要大很多。然而底泥的異質性會使底泥的傳流速度有很大的變化，較無法預測。一般仍多以分子擴散運動來描述(Ulrich, 1997; Hupfer et al., 2000)。據 Krom 及 Berner(1980)研究，在 20 °C 時，磷酸鹽的分子擴散係數是 $3.6E-2 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 。而 Freedman 及 Canale(1977)在未壓密的底泥(孔隙率大於 0.8)實驗得到的分子擴散係數約在 $1.0E-5 \sim 2.0E-5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 之間。

2.5 影響底泥-水邊界層磷釋出的機制及環境因子

2.5.1 底泥-水邊界層溶氧及鐵離子

底泥在微生物或細菌分解有機物質過程會發生耗氧反應，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)。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, 因氧化還原電位的變化, 底泥二價鐵會迅速氧化為三價鐵, 成為過氧氫氧化鐵 Goethite (α -FeOOH), 遂將磷酸根吸附或錯合, 以阻攔其進入上層水中。因此溶解鐵的含量也將影響被吸附或錯合磷的含量。然而當上層溶氧降為零時, 膠羽狀鐵(III)錯合物也會被還原, 隨即釋放出磷酸根。這種膠羽狀鐵(III)錯合物在過去翡翠水庫底泥採樣時, 均可於底泥採樣管中觀察到, 顯示底泥中此機制對磷傳輸有重要影響。Furrer(1996)認為, 雖然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, Holdren 及 Armstrong(1980)認為, Fe/P 莫耳比大於 1.8, 自由溶解磷數量便會因鐵離子的干擾而減少。由於翡翠水庫集水區是屬於非鈣系地質土壤, 鐵含量極高(約 3~4%), 應考慮鐵離子對溶解磷絆除的影響。

在底泥磷的釋出通量研究部份, 李 (1994)曾以翡翠水庫底泥管柱進行實驗, 經由實驗結果, 曝氮氣底泥模擬厭氧狀態, 在剛曝氮氣的一天內, 由於濃度梯度的影響, 計算的釋出通量是 $1.94 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ 。但之後上層水磷的濃度變化並不大, 可能是因為管柱中的溶氧無法完全被氮氣趕走所致, 磷通量結果便降下來。李以曝空氣來模擬好氧的磷通量結果為 $0.088 \text{ ug/cm}^2\text{day}$, 較模擬厭氧管柱通量要小約 20 倍。吳等人(2001)亦曾以相同的方法對翡翠水庫的底泥管柱進行曝氣實驗。由於底泥可能被曝氣水流擾動, 造成底泥再懸浮, 因此實驗得到的磷通量在初期 0.7 天內高達 $9 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ 。然而在後續磷通量則降至 $0.4\sim 0.6 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ 。造成初期磷通量值過高的原因除了是濃度梯度的影響外, 短期

內管柱孔隙水與上層水之間離子濃度及組成均變化較大，未達到穩定平衡也可能是原因之一。由於實驗室通氮氣方法無法將溶氧降至零，因此建議日後實驗可採用亞硫酸鈉等藥品，並模擬較長時間，觀察較平衡的狀態下管柱上層水磷的變化。

2.5.2 底泥-水邊界層的質傳阻滯

底泥-水邊界處流場相當複雜(Sechet,1999)，此處存在一個邊界混合層，並受到底床特性影響。大多數預測磷釋出通量時，都是以簡單分子擴散係數代入 Fick's Law 中計算(Ulrich, 1997；Hupfer et al., 2000)。Furrer(1996)認為底床擴散邊界層厚度與分子擴散係數，底床流速，動力黏滯係數及黏滯邊界層厚度等有關，並提出一個經驗關係式。藉由邊界層厚度計算得到的質傳係數，可決定磷釋出通量大小。

2.6 底泥磷模式發展

有關磷在底泥與水邊界層釋出的研究相當多(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，陸續有學者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(Furrer, 1996)；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，以氨的通量類比推算磷通量的方法，其模擬值會低估實測值。Di Toro 推測可能在上層水溶氧高時，鐵錯合磷蓄積在底泥中並未釋出，等到底泥厭氧時錯合錯除的效應降低，遂增加了磷的釋放量。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。在底泥行微生物分解或礦化反應時，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及底泥無機礦物磷溶解析出的無機磷。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。

2.7 現地示蹤劑試驗

天然河川河道的幾何形狀較不規則，例如沙洲及底床粗糙度等均會影響水流的延散運動。利用現地示蹤劑施放方法，觀察示蹤劑在底床的流動軌跡，將有助瞭解底床水流特性，及計算出水底部的延散係數。1970 年美國地質調查所(USGS)提出以染料作為示蹤劑進行試驗的方法與指導原則(guidelines)之後，亦有人使用六氟化硫(SF_6) 氦氣(^3He) 或氬等作為示蹤劑(劉格非，1998；Clark，1996；Pujol，1999)。Adler(1999)更結合染料示蹤劑及遙測技術方法推求河川的延散係數。如何透過影像技術協助，進行現地示蹤劑實驗，以更精確地量化延散係數，值得深入研究。

2.8 模擬磷水質模式

模擬水庫營養鹽磷之環境模式相當多，國內多使用以美國環保署研發之 WASP5 模式進行模擬。郭振泰 (2001) 曾使用 WASP5 及 W2 模擬翡翠水庫水質；李佳芳(1994)利用 WASP5 模式建立翡翠水庫一維磷濃度模式；林文隆 (1994)利用 WASP5 建立寶山水庫磷內部負荷模式推估程序等。由模式使用經驗顯示，WASP5 模式為一優良水質模式，可模擬多維及動態水庫水質優養化的變化。但郭振泰(2001)認為，WASP 考慮水質參數的生物化學轉化反應較完整，但是在水理模擬部份，無法考慮水庫內水溫變化造成的熱平衡(heat balance)效應，因此必須先以 W2 建立流場，再代入 WASP 模擬。然而從其研究成果發現，在兩個模式的網格連接部份還有問題，值得再改進研究。

WASP5 模式所設計磷系統分為無機正磷酸鹽及有機磷兩類，在水庫中磷的循環機制包括：藻類行光合作用攝食無機磷、藻類代謝死亡產生有機磷、有機磷沈降及有機磷經底泥礦化分解出無機磷。WASP5 模式並未考慮底泥成岩過程可能溶解析出或懸浮擴散出來的無機磷。本計畫所發展底泥磷釋出通量模式，考慮底泥無機礦物磷溶出無機磷，計算得到之磷通量將較能量化磷的內部負荷，改善 WASP5 模擬準確度。

第三章 研究材料與方法

3.1 例行性檢測分析

每年 2 次的底泥檢測分析，依計畫要求，本計畫應分別於大壩(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。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。為瞭解底泥營養鹽磷之釋出潛勢，除例行性檢測包括底泥金屬及重金屬(鐵、錳、鋅、鉛、銅、砷、汞)、有機質、底泥總氮、底泥總磷、粒徑分析、底泥酸鹼值、含水量，並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，以進行孔隙水磷的化學平衡計算。

現場底泥採樣設備為貫入式之管狀採樣器，如圖 3.2 所示。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 公分處及上層水之氧化還原電位，水溫，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。詳細檢測項目及分析方法如表 3.1 所示，分析方法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 S321.61C 及 W306.50A 等系列，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。配合實驗室品保品管程序查核，數據規劃之品保目標如表 3.2。

3.2 分年研究計畫

3.2.1 翡翠水庫底泥磷釋出通量模式架構及分析方法

檢討前一年底泥磷模式雛型，依據現地及實驗室底泥磷的各項分析研究成果，撰

寫翡翠水庫底泥磷模式的電腦程式。模式將包含運用水化學軟體 MINEQL+(Schecher, 1998)所計算的孔隙水平衡態溶解相無機磷濃度(equilibrium phosphate concentration, EPC), 以預測底泥磷的分層濃度及磷釋出通量, 及作模式的校正及驗證工作。在模式中, 所考慮的環境參數將參考文獻收集各參數的經驗數值, 或以 curve fitting 方式求出參數值, 以進行後續的模式校正及驗證工作。

在模擬孔隙水平衡態溶解相無機磷濃度之前, 需先確認出影響底泥孔隙水磷濃度的主要磷礦物, 因此本計畫將採用 Hietyes and Lijklema(1980)磷的序列萃取方法進行底泥及集水區土壤固相磷之分選, 其實驗萃取流程詳圖 3.3。分離出的磷型態包括: 以 NH_4Cl 萃取的吸附性磷(labile-P)、以酸 HCl 萃取的鈣結合磷(Ca-P)、以 CDB($0.3\text{M Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.1M NaHCO_3 , $0.005\text{M Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)及 NaOH 萃取的鐵、錳或鋁結合磷(Fe, Mn and Al-P) 以 NaOH 及 HCl 萃取之有機磷(organic-P)及鈍性磷(residual-P)(以底泥總磷扣除前面四種磷)五類。粗略分, 以 CDB 萃取磷主要是針對鐵或錳氧化物的結合磷, 以 NaOH 萃取的主要是鋁結合磷。但實際萃取時, 仍視酸鹼值的變化範圍對底泥這些結合磷的萃取能力而異。對部份底管柱, 本計畫將管柱進行分層, 取上層 10 公分底泥, 以每 2 公分間距為一個樣本分析, 以瞭解現場底泥分層溶解磷濃度隨深度垂直變化, 供模式校正及驗證, 及推估磷的釋出通量。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無機磷, 溶解有機磷則為前兩種磷之差值計算而得。

3.2.2 實驗室底泥磷釋出通量模擬管柱實驗

持續前一年之例行監測，並參考前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。該實驗目的希望模擬底泥在厭氧（溶氧近於零）之下溶解性磷的傳輸行為，及推求磷釋出通量。實驗分為 (A)組：長時間添加亞硫酸鈉及曝氮氣，(B)組：長時間曝氮氣，(C)組：短時間曝氮氣，共三組進行。三組底泥管柱均採自大壩(S-5)底泥。

3.2.3 現地示蹤劑實驗

水庫現地水理狀況將影響水庫中磷濃度的變化，本計畫擬規劃在水庫底泥-水邊界處，以示蹤劑施放方法推估底泥與水界面附近的水流延散係數。利用現地試驗，將有助瞭解底泥邊界之水流環境，估算底泥磷通量及運用於水質模擬工作。利用現地所採集的濃度隨時間的分佈數據，本計畫將參考 Fischer(1968)建議之”methods of moments”方法計算水流延散係數：

$$E = \frac{\sigma_{td}^2 - \sigma_{tu}^2}{2 * (t_d - t_u)} \quad (1)$$

其中

σ_{td}^2 ：下游點示蹤劑濃度分布隨時間變化的變異數(variance)；

σ_{tu}^2 ：上游點示蹤劑濃度分布隨時間變化的變異數(variance)；

t_d ：到達下游點的平均旅行時間(mean time of travel)；

t_u ：到達上游點的平均旅行時間(mean time of travel)；

茲假設底部延散係數 E_x 是等向性(isotropic)及均質性(homogeneous)的，透過水下攝影機觀察示蹤劑在水中 plume 的分布面積隨時間變化，代表(1)式中 σ_t^2 變異數 (variance)，再以影像處理軟體計算面積大小，即可計算出延散係數 E 。本計畫所選擇具保守性及對人體無害的示蹤劑為天然的白色黏土 - 高嶺土，或是紅色的可食用色素六號，作成懸浮液，以圖 3.4 所列之施放設備，包括水下攝影機、施放管件、基座及繩索，在船上以幫浦將示蹤劑抽送到水底施放。

3.2.4 水質模式適用性探討

下一年度計畫將運用底泥磷傳輸模式及水質模式進行磷水質模擬。本計畫將就目前廣為大家使用的模式，如 WASP 及 CE-QUAL-W2 模式做適用性比較討論，以選擇較適合翡翠水庫特性的水質模式。此外亦將初步收集、彙整模式所需的參數及合理範圍，供下年度模式模擬用途。

第四章結果與討論

4.1 第一次底泥例行性檢測分析結果

本計畫於 5 月 27 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。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。今年上半年適逢大旱，第一次採樣當日大壩水位只有 128 米左右。因原第一點(S-1)灣潭的水位過低，無法行採樣船，故改於石碇子附近(33

斷面)採樣。第二次採樣，大壩水位有 145 米，但依據翡翠管局人員告知，上游降雨沖刷，使上游灣潭底泥多是粗砂，已經沒有細顆粒底泥，故乃維持在石碇子附近採底泥樣品。兩次採樣期間，均在水表面看到明顯呈長鏈狀的小氣泡，可能是水生物的光合作用旺盛產氣的結果。茲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 4.2 所示。

(1) 底泥 pH 值及氧化還原電位(ORP)

從底泥 pH 值及氧化還原電位(ORP)變化，可反應底泥還原狀態。5 月底泥 pH 值介於 5.2-6.5 之間，8 月底泥 pH 值介於 5.8-6.6 之間，和底泥歷年 pH 值平均範圍在 4~6 之間跳動相當，與去年同期相較，底泥 pH 值有漸漸升高趨勢。各測站 pH 值變化，自上游(S-1)至下游(S-5)，底泥 pH 值依序降低。5 月底泥 ORP 介於-58~ -138 mV 之間，8 月介於-55~ -124 mV 之間，相差不大。今年度底泥 ORP 較過去要高，表示底泥還未臻長期穩定的還原狀態。造成上述原因可能是有許多新鮮的底泥隨著去年颱風帶入大量泥砂沉降所形成，亦或是今年不穩定的水文狀況，使底部有許多外界水流進入，保持較高溶氧所影響。

(2) 底泥含水量

5 個採樣點，5 月底泥含水量介於 50~57%之間，較去年 37~55%要高些。8 月底泥含水量介於 39~61%，從上游往下游遞增。比較兩次含水量可知，第一次底泥可能還沒有

被壓密及穩定下來，含水量較高，之後則有逐漸穩定的趨勢。大壩(S-5)含水量最高，可能是因大壩的底泥粒徑較細，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

5月有機質介於 1.9~3.1%。以石碇子(S-1)最小，後坑子(S-3)最高。8月有機質介於 1.9~4.9%。從上游至下游遞增，以石碇子(S-1)最小，大壩(S-5)最高。假設上游外來泥砂攜帶的有機質含量不高，大壩高濃度的有機質可能是水生物殘屑沉降累積結果。

(4) 底泥營養鹽總磷

5月底泥固相總磷介於 203~488 mg/kg 之間，8月總磷介於 270~389 mg/kg 之間，兩次差異不大，沒有明顯的季節變化特性。磷含量以後坑子(S-3)及大壩(S-5)較高。從底泥固相磷分選結果，有機磷是主要的磷物種。比較孔隙水溶解相磷，孔隙水溶解總磷濃度介於 0.21~0.66 mg/L，溶解反應磷(無機磷)濃度介於 0.08~0.23 mg/L，均較過去測值分別為總磷 1.45~2.32 mg/L 及反應磷 0.31~1.36 mg/L 要低。溶解磷濃度大小與底泥還原態：底泥 pH 值、氧化還原電位(ORP)及孔隙水主要離子濃度等均有關。從前述比較底泥 pH 值及氧化還原電位(ORP)變化說明已發現，今年底泥還原狀態並不明顯，應可解釋溶解磷濃度較低的結果，亦表示底泥釋出的磷內部負荷可能較過去要少。

(5) 底泥營養鹽總氮

兩次底泥總氮變化不大，介於 934~1750mg/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，顯示底泥總氮變化相當穩定。

(6) 底泥孔隙水溶解性硫

5月溶解性硫測值介於 0.06 ~ 0.23 mg/L，8月介於 0.16 ~ 0.46 mg/L 之間。上游測點的溶解性硫濃度較高，8月硫濃度較5月為高，表示來自上游外部的污染可能使底泥厭氧性物質濃度增加。

(7) 底泥孔隙水溶解性氟

溶解性氟可能是自礦石分解溶出。由於環檢所公告電極法適用於較高氟濃度(0.15mg/L),而底泥氟濃度較低,並不適用。因此本計畫另參考美國 APHA 之 Standard Method 建議,以離子層析(IC)法,重新分析孔隙水溶解性氟。比對品保品管數據(附錄一)可知, IC 法偵測極限及相對誤差均較電極法要低。IC 法操作較為簡單,同時所需樣品體積亦較少,由於離心孔隙水體積不多,可供個別項目分析體積多只有數毫升,因此稀釋所造成誤差也可能提高。從儀器靈敏度及方法適用性比較,IC 法均優於電極法,故本計畫建議日後分析氟方法改為 IC 法進行。

分析結果顯示,5月溶解性氟濃度為 0.009~0.015 mg/L,較低於8月氟濃度 0.019~0.042 mg/L,並以上游測點濃度較高。亦表示來自上游外部的污染可能使底泥外來物質濃度增加。

4.1.2 底泥粒徑組成

底泥粒徑分析結果如表 4.3 及表 4.4 所示。底泥粒徑多小於 106 μ m,50%集中於小於 38 μ m 粉粒之粒徑範圍,5月份為 55~84%,8月份為 39~92%不等,且有自上游往下游

遞增的趨勢，表示在此蜿蜒的帶狀水系，粒徑分選的效果十分明顯。底泥顆粒很小，也十分容易被擾動，懸浮帶起。吸附或存在顆粒上的污染物便可能很容易被水流攜帶運送。

4.1.3 底泥重金屬類

1.底泥總量重金屬類

底泥各類重金屬檢測含量結果請參考表 4.5 及表 4.6。除了錳以外，其他金屬測值和歷年檢測數據結果相當，無明顯變化。過去錳在大壩(S-5)濃度一直維持在 3000 mg/L 左右，和其他四點介於 300-1000mg/L 範圍差很多，然而今年在大壩測值分別是 5 月 1614 mg/L 及 8 月 818mg/L。其他測站數值亦呈由上游至下游遞增趨勢。已有許多研究發現，水庫湖泊底泥可能形成錳礦。這是因為在水中，微生物的作用可能將錳氧化，形成氧化錳而沉降。從今年數據並無法確認此一生物機制是否被破壞，建議後續可進行研究，繼續觀察追蹤。將底泥重金屬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) 及民國 90 年 11 月 21 日新公告的「土壤污染監測基準」(詳附錄四) 內容進行比較，翡翠水庫底泥砷、汞、鉛、銅及鋅之底泥含量均低於監測基準值規定濃度，屬於正常值範圍。表示底泥應無外來的重大污染。

2.底泥溶解性重金屬類

如表 4.5 及表 4.6，溶解性鐵、錳、鋁、鈣及鎂濃度與去年測值範圍相當。底泥孔隙水溶解性的鈣及鎂濃度在 5 月時以後坑子(S-3)較高，8 月時以上游石碇子(S-1)及馬祖林(S-2)較高。過去馬祖林(S-2)及灣潭(S-1) 的鈣、鎂濃度較其他點要高，可能是來自上游

集水區農業行為施肥造成。但今年測值隨地點濃度分佈差異並不明顯，亦即鈣、鎂在下游測點的濃度提高了，表示可能有較多經過農業污染的土壤進入水庫下游區域中。這些溶解離子濃度變化將會影響底泥磷礦物在孔隙水中的化學溶解沉澱反應，亦即影響磷的溶出。後續將應用這些實測的溶解離子濃度於水化學模式 MINEQL+中，模擬平衡狀態的底泥孔隙水溶解反應性磷濃度。

4.2 底泥磷的二層傳輸及通量模式

4.2.1 模式概念及基本假設

1. 模式概念

如圖 4.2 為底泥磷傳輸概念模式示意圖。假設底泥可因溶氧存在與否自上往下分成有氧層(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作用主要發生在上面兩層。研究主要探討在底泥有氧層(BOX-1)及無氧層(BOX-2)中磷的一維傳輸行為，包括從固相釋出至移動相，及在孔隙水中向上移動傳輸過程，並將其訂為底泥動態的磷二層式傳輸及通量模式(2 BOX-Sediment Phosphorus Transport and Flux Model, 2B-SPTFM)。如圖 4.2，在模式中我們將考慮底泥有機磷與無機磷自固相被移動化為溶解磷的反應，包括微生物的一階分解反應、無機磷的溶解與沉澱質傳

反應及在孔隙水中的分子擴散傳輸。

2. 模式基本假設

- (1) 模式不考慮底泥-水界面的生物擾動、底泥擠壓 (compaction) 或壓密 (consolidation) 行為，溶解磷的傳輸完全以分子擴散作用描述。
- (2) 模式不考慮底泥的再懸浮 (resuspension)、底床泥砂運動 (bed load transport) 及水體懸浮物的沉降 (settling)。主要考慮的是溶解磷向上進入上層水體的通量。
- (3) 溶解總磷包括溶解有機磷及溶解無機反應性磷兩種。
- (4) 底泥固相總磷包括有機磷及無機磷。
- (5) 微生物反應以一階反應動力描述固相有機磷被分解移動為溶解性有機磷或無機磷過程。
- (6) 底泥固相無機磷與溶解無機磷之間的溶解與沉澱化學反應，將引入水化學軟體 MINEQL+(Schecher, 1998)，計算平衡態時的溶解無機磷濃度 (equilibrium phosphate concentration, EPC)，以確認底泥固相磷是溶解磷的源 (source) 或匯 (sink)。亦即當孔隙水中溶解無機磷濃度大於 EPC，反應向沉澱方向進行，為溶解磷的匯，反之往溶解方向，為溶解磷的源。此一關係擬以一階質傳反應，包括一階質傳速率反應常數及濃度梯度 (孔隙水溶解無機磷濃度與平衡濃度差值) 乘積關係表示。
- (7) 底泥溫度變化與上層水溫度變化一致，基於翡翠水庫上、下游底部水溫變

化較大，且全年底部入流水溫隨季節的變化很大，故擬將反應速率常數設定為溫度的函數。

4.2.2 統御方程式

模式以一維分子擴散運動模擬底泥磷的垂直向傳輸。底泥總磷(C_t)包括固相(C_s)及溶解相磷(C_w)。溶解總磷包括溶解有機磷(C_{w1})及溶解無機反應性磷(C_{w2})。底泥固相總磷包括有機磷(C_{s1})及無機磷(C_{s2})。

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

$$C_t = nC_w + \rho_b C_s = n(C_{w1} + C_{w2}) + \rho_b (C_{s1} + C_{s2}) \quad (3)$$

$$C_s = C_{s1} + C_{s2}$$

$$C_w = C_{w1} + C_{w2}$$

茲分別探討反應項部份：

1. 溶解有機磷(C_{w1})於反應項的變化：

$$n \frac{\partial C_{w1}}{\partial t} = \rho_b k_c \theta^{(T-20)} C_{s1} - n k_d \theta^{(T-20)} C_{w1} \quad (4)$$

反應項包括底泥固相有機磷(C_{s1})的分解及溶解有機磷(C_{w1})進一步礦化分解為溶解無機磷(C_{w2})。

2. 溶解無機磷(C_{w2})於反應項的變化：

$$n \frac{\partial C_{w2}}{\partial t} = nk_d \theta^{(T-20)} C_{w1} + n\alpha(\overline{C_{w2}} - C_{w2})$$

(5)

固相無機磷礦物與孔隙水溶解相無機磷之間存在動態的反應，未必達到平衡。反應項包括溶解有機磷(C_{w1})分解生成無機磷(C_{w2})及底泥固相無機磷(C_{s2})溶解生成無機磷，以一階質傳反應式表示。(5)式引入平衡態時的溶解相無機磷濃度，EPC ($\overline{C_{w2}}$)與溶解相無機磷(C_{w2})濃度差值及質傳係數(α)表示固相無機磷的溶出能力。當孔隙水濃度達到平衡濃度時，停止溶出，反之，若孔隙水濃度大於平衡濃度，呈現過飽和時，此反應項即成為匯(sink)。

質傳係數(α)以下式關係表示，

$$\alpha = \frac{D_m}{L}$$

(6)

L 代表特徵長度，以 d_{65} 或 d_{50} 表示。 D_m 是分子擴散係數。

平衡態的 EPC ($\overline{C_{w2}}$)的求取是將實測孔隙水各離子濃度輸入水化學軟體 MINEQL+運算而得，該模式可考慮底泥當時的還原狀態，較能真實反應底泥磷受地質化學作用的影響。然而在底泥有氧層(BOX-1)，溶氧會提高底泥氧化還原電位，使二價鐵離子被氧化為三價鐵，形成三價鐵的過氧化物，過氧氫氧化鐵 Goethite (α -FeOOH)，極易將磷酸根離子吸附或錯合，以阻攔其進入上層水中。因此有氧層(BOX-1)及無氧層(BOX-2)的 EPC 應分開計算，再納入模式中。

4.2.3 模式邊界條件與磷釋出通量

1. 下邊界

假設在底泥無氧層(BOX-2)與掩埋層間，底泥固相磷幾乎不再與移動相發生反應，而底泥孔隙率亦很小，幾乎沒有下層水與上層水交換。因此在下邊界(Z_2)處，模式將以通量邊界條件(Newmann boundary condition)表示：

$$\frac{\partial C_t(Z_2, t)}{\partial Z} = 0 \quad (9)$$

2. 上邊界

在底泥-水界面的上邊界($Z=0$)處，磷的釋出通量關係式即成為上邊界條件：

$$q = n_0 \frac{D_H}{L_0} (C_{W20} - C_W) \quad (10)$$

其中

n_0 ：表示在底泥-水界面的平均孔隙率。

D_H ：為底泥-水界面溶解磷擴散或延散係數。

C_{W20} ：為上層水(compartment j)溶解總磷濃度。

C_W ：為底泥孔隙水(compartment i)溶解總磷濃度。

L_0 ：為邊界層厚度。

3. 底泥有氧層(BOX-1)深度的決定

假設溶氧在底泥中的傳輸為一維分子擴散運動，當趨於穩定時，不隨時間而變，底泥需氧量(SOD)消耗速率以 R_{O_2} 表示，溶氧在底泥中的傳輸方程式如 (11)式，

經解析解(12)式可決定底泥 BOX-1 深度 Z_1 :

$$D_{O_2} \frac{\partial^2 C_{O_2}}{\partial^2 Z} - R_{O_2} = 0 \quad (11)$$

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

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

$$Z=Z_1 = \sqrt{\frac{2D_{O_2}C_{O_2}}{R_{O_2}}} \quad (12)$$

當上層溶氧為 6mg/L, Z_1 的深度約為 2~3 cm, 當溶氧近乎零時, Z_1 的深度幾乎為零。

因此底泥有氧層厚度是變動的, 視溶氧大小而異。

在模式中, 所考慮的環境參數將參考文獻收集各參數的經驗數值, 或以 curve fitting 方式求出參數值, 以進行後續的模式校正及驗證工作。底泥模式之數值化方程式及以 FORTRAN 程式撰寫之電腦程式請詳附錄五及六內容。

4.3 主要底泥固相磷物種確認

在地質化學反應中, 除了必須考慮孔隙水各離子濃度, 底泥主要固相磷物種的確認對估算 EPC 很重要。因此在應用水化學軟體 MINEQL+ 之前, 應先調查翡翠水庫的底泥固相磷物種。吳等人(2001) 已於去年經由磷的分選實驗得知, 除了鈍性磷(residual-P) 外, 主要底泥固相磷物種是有機磷與無機的鐵、錳或鋁的結合磷(Fe, Mn or Al-P), 再其

次是鈣結合磷(Ca-P)。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，顯示這些磷是可忽略的。各測站底泥磷的組成有空間差異。例如，去年 5 月採樣，灣潭的鈣結合磷 (23.9%) 與鐵、錳或鋁的結合磷 (26.2%) 的比例相當。灣潭的鈣結合磷較其他點要高原因，可能是人為農業的污染進入底泥所造成，集水區人為干擾，可能改變底泥磷型態。為了進一步確認來自集水區天然的背景主要磷礦物，本研究遂將底泥與土壤的固相磷均進行序列萃取分選，以觀察固相磷的變遷與兩者的差異。

4.3.1 底泥與集水區土壤固相磷物種比較

如圖 4.3 底泥與集水區土壤磷之型態分佈結果，我們發現，存在集水區的天然主要無機磷礦物是 NaOH 可萃取的鋁結合磷(Al-P)，佔 10-16%。其次是鐵或錳結合磷(Fe,Mn-P)，佔 1.1-1.6%。鈣結合磷(Ca-P)較少，佔 0.5-0.6%。不過灣潭茶園(Soil-2)的鈣結合磷實際含量較河川天然沖積土(Soil-1)要高許多 (詳表 4.7)，可證實灣潭底泥的鈣結合磷極可能是來自集水區農業污染造成。將集水區土壤與底泥磷的型態分佈進行比較，發現底泥的鐵、錳結合磷及鈣結合磷比例有較集水區土壤增加的趨勢。這些在底泥中逐漸形成的結合磷可能是經過底泥成岩作用逐漸產生，屬於後生礦物。相對地，底泥的原生磷礦，鋁結合磷在底泥中則可能逐漸溶解，成為底泥溶解無機磷的源。將把鋁結合磷以 $AlPO_4$ 表示，設定為活性為 1 的物種(Species)，輸入 MINEQL+中進行模擬。

以底泥總磷含量相較，底泥磷含量比集水區土壤要高些，可能是在水庫中的水生物體產生或生物殘骸的有機磷沉降至底泥所致。此外，也可能是粒徑分選作用，小顆粒粉壤土吸附較高的磷較容易被帶入水庫中，遂提高了單位土壤的磷含量。比較磷含量變化

(表 4.7)，底泥磷含量多較集水區的土壤要高，可能是水庫中水生物的排洩物或生物殘骸的有機磷沉降至底泥所累積，也可能是粒徑的分選作用。前者底泥有機質和總磷之間可能存在特定比例關係；後者則係假設小顆粒粉壤土吸附較高的磷，易被帶入水庫，提高單位底泥的磷含量。根據調查，翡翠水庫底泥粒徑小於 $38\mu\text{m}$ 粉粒或黏粒佔 55-83% ，但總磷與粒徑之間沒有明顯相關性。底泥總磷較高的後坑子(S-3)及大壩(S-5)有機質相對較高。顯示藻類沉降有機磷，是底泥總磷重要來源。

4.3.2 底泥固相磷型態隨深度變化

將第一此採樣(91 年 5 月 27 日)大壩 (S-5)底泥管柱以每 2cm 分層，觀察固相磷型態隨深度變化。如圖 4.4 所示，底泥固相磷以有機磷為主，並隨深度有增加趨勢(自 50~290 mg/kg)。有機磷在底泥深度 13cm 以上者比 13~20cm 深度的較少，推測在這段時間新鮮底泥累積的可能多是來自集水區入流泥砂，較少來自藻類沉降有機磷。底泥無機磷部份，在最表層，鋁結合磷(Al-P)，鐵或錳結合磷(Fe,Mn-P)及鈣結合磷(Ca-P)相當，但隨深度增加，鋁結合磷(13~51 mg/kg)為主要，其次為鐵結合磷(7~22 mg/kg)，鈣結合磷(1~9 mg/kg)次之。鐵結合磷及鈣結合磷在底泥動態的成岩過程中逐漸生成，但原生的鋁結合磷則傾向逐漸溶解。吸附磷隨深度沒有明顯變化，約為 2~5 mg/kg 之間。

為比對固相磷與溶解相磷濃度之間隨深度變化，茲取馬祖林(S-2)及大壩(S-5)底泥管柱分層孔隙水進行分析。結果如圖 4.5。我們發現，在深度 3cm 以下，兩支管柱的溶解相有機磷濃度與底泥固相有機磷濃度隨深度有明顯的相關。兩支管柱的溶解相無機磷與底泥鋁結合磷(Al-P)濃度隨深度變化也十分相近。假設這些固相及溶解相之間處於平衡

的狀態，由此應可證實，這些底泥溶解相磷的大小主要是受到有機磷及鋁結合磷的影響。這些固相磷的濃度及在底泥中的分解與溶解沉澱反應主導了底泥溶解磷的釋出能力。在第 4.6 節中，我們將分別以底泥有機磷(代表 C_{S1})及無機的鋁結合磷(代表 C_{S2})，輸入底泥模式進行電腦模擬工作。

4.4 底泥磷釋出通量模擬管柱實驗

本實驗主要希望模擬底泥在厭氧態（溶氧近於零）下溶解相磷在短時間及長時間分別的釋出通量，瞭解上層溶氧變動對磷釋出的影響。由於實驗室通氮氣方法可能無法將溶氧降至零，因此實驗分為 (A)組：長時間添加亞硫酸鈉及曝氮氣，(B)組：長時間曝氮氣，(C)組：短時間曝氮氣，共三組進行。

如圖 4.6，我們發現長時間觀察底泥管柱上層水總磷濃度隨時間變化，上層水總磷濃度均隨時間有顯著增加，表示底泥磷會進入上層水中。從上層水隨時間累積磷含量乘以管柱水量換算磷的釋出通量，如表 4.8 計算磷通量結果，(A)組：添加亞硫酸鈉及(B)組：不添加亞硫酸鈉，僅曝氮氣的磷通量分別為(A) $0.05\sim 0.15 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ ，(B) $0.01\sim 0.39 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ 。兩者相差並不大，表示長期來看，在水中添加亞硫酸鈉除氧的方法，和僅曝氮氣結果，對磷釋出的影響相當。圖 4.7 是(C)組短時間上層水總磷及無機磷隨時間的變化。我們觀察在短時間(一天以內)，上層水總磷的跳動較大，所計算出來的磷通量也高達 $7\sim 9 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ ，較長期磷通量大約 1-2 個數量級，但隨後濃度變化穩定下來，沒有明顯的上升。從實驗結果可知，當外在環境忽然改變時，底泥磷的釋出很容易受到影響。若採用後端的磷濃度作磷通量的計算，如表 4.8 所示，(C)組總磷通量範圍是 $0.04\sim 0.13$

ug/cm²day，反應性磷是 0.02~0.09 ug/cm²day。由於實驗期間，(C)組管柱的溶氧並沒有顯著下降，實驗結束時溶氧約為 2.72 mg/L。因此，(C)組管柱所計算出來的磷通量應不能代表底泥在厭氧態（溶氧近於零）的釋出通量。

以長時間實驗模擬厭氧態下磷的通量約為 0.09~0.14 ug/cm²day(取(A)及(B)組的平均值)，相當 1.0E-1 ug/cm²day 數量級。茲與去年 1 月~9 月觀察現地大壩底層水總磷隨時間的變化(圖 4.8)所計算的磷通量比較(吳等人，2001)，其時在有氧存在的環境下，磷通量約為 0.006~0.026 ug/cm²day，相當 1.0E-3~1.0E-2 ug/cm²day 數量級。以實驗室模擬的厭氧磷通量約較現地好氧的磷通量大一個數量級。以上結果表示氧的存在，使孔隙水三價鐵離子阻擾磷的移動，可能只有十分之一磷可以自由磷的型態逸逃到上層水中。我們若以 0.01-0.1 ug/cm²day 數量級代表底泥溶解總磷的年平均通量，將通量乘以水域面積 10.24 km²，得到水庫內部總磷負荷量為 500-3800 kg/yr。

4.5 現地示蹤劑實驗

本計畫於 91 年 11 月 28 日在翡翠水庫第 42、44 及 46 斷面(約在上游永安及石碇子附近)的底泥-水界面處施放示蹤劑，現場攝影照片如圖 4.9 所示。經過現勘，這些斷面當時水深分別為第 42 斷面:18m；第 44 斷面:16m；第 46 斷面:10m。翡翠水庫冬季時，因上游入流水溫較低，密度較大，因此水下攝影觀察到水底部流速很快，以目視估計最大流速約為 10-15 cm/sec。所施放的示蹤劑形成明顯的煙流被水流帶走，使示蹤劑在水中 plume 的分布面積隨時間變化不很明顯。其次，水底的光線不足，使攝影機觀察的影像不甚清楚，可能也是原因之一。茲以 Photoshop 影像處理軟體計算 plume 面積大小，

代表第 3.2.3 節中，(1)式中 σ_t^2 變異數(variance)，除以時間差 Δt ，估計第 46 段面處，水底的延散係數 E 約為 0.30-1.50 cm^2/sec (平均值為 0.72 cm^2/sec)。茲假設底部延散係數是等向性(isotropic)(在 X, Y, Z 向的延散係數均相同)及均質性(homogeneous)，將上述數據和 Thomann (1987)彙整湖泊的垂直向延散係數，約為 0.05-20 cm^2/sec 範圍比較，翡翠水庫底部屬於擴散能力較小的水體。經過實驗結果，本次採用的示蹤劑攝影及施放裝備，在水底進行示蹤劑實驗是可行的。本計畫後續將以上述實驗數據 E 估計翡翠水庫底泥-水界面溶解磷的擴散或延散係數 D_H ，模擬該處底泥磷通量及水體水質。

4.6 底泥磷模式應用

底泥磷模式(2B-SPTFM)，應用於翡翠水庫底泥環境的參數如表 4.9 所示，將整合 MINEQL+ 模式進行模擬。以大壩為例，將實測底泥孔隙水各離子濃度輸入水化學模式 MINEQL+ 模擬，得到平衡態時，有氧層及無氧層的反應性無機磷濃度 EPC，如表 4.10。從數據顯示，底泥 EPC 多較實測磷濃度高，顯示底泥屬於持續溶出狀態。將上述數據輸入底泥模式模擬後，可計算出底泥磷通量，如表 4.11。如表所示，模擬值和現地大壩底層水磷隨時間累積量換算的磷通量較接近。下一年度計畫仍將繼續進行底泥磷模式的參數敏感度分析，使模式模擬結果更符合現場的狀況。

4.7 水質模式參數彙整

翡翠水庫屬於深且長的水體，水溫分層變化明顯，復有夏季濁度流及冬季密度流的現象，水庫水理及水質的變化很大。模擬優養水質的模式以 WASP5 模式較優，但其水理的模擬能力較差，無法模擬水溫造成密度流的變化。美國陸軍工兵團水道試驗所(Water

Experimental Station, U.S. Army Corps of Engineers)所發展之 CE-QUAL-W2(簡稱 W2)模式，適用於模擬類似翡翠水庫深且長的水體，可模擬水庫熱分層現象及溫度在二維方向(X 及 Z)方向的變化(郭，2001)，並可模擬水質(總磷、葉綠素 a、溶氧等)，因此本計畫建議採用 W2 模式模擬翡翠水庫水質，以量化水庫來自底泥的磷內部負荷對水質的影響。有關 W2 模式所需的輸入參數彙整如表 4.12。

4.8 大旱對水質的影響

今年適逢水庫建庫以來最乾旱的一年，水位明顯下降，水庫水質有明顯的惡化。依據吳(2002)藻類與水質關係之長期監測研究結果，藻類相有明顯消長，水中濁度及總磷濃度自今年 6 月大雨後明顯升高。在大壩中層形成類似濁度流。廖(2002)碩士論文曾以動態藻類模式模擬藻類生長，發現 2001 年納莉颱風使水中濁度大增，水中透明度降低，藻類生長漸緩。但水中總磷增加，水質澄清後仍有增長可能。因此，今年產生的大量藻類死亡沉降後亦可能成為底泥有機磷豐富來源，在經過代謝後再釋放出磷進入水中。因此後續的水質追蹤應密切注意。

水位降低，相對會使底泥負荷量對水質影響增加，尤其是在水深較淺處。而水庫濁度流對水質的影響可能有短、中、長期的影響，也建議應加強追蹤與預測藻類消長變化。

第五章 結論

依據本計畫今年度研究成果，有以下數點結論。

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，變化不大。推測在檢測期間應無外來之重大污染。
2. 底泥的氧化還原電位(ORP)比過去監測範圍較高，推測可能是去年 9 月納莉颱風帶入的泥砂沉降的新鮮底泥，或是進入水庫下層水的高溶氧影響。因此可能使底泥呈還原狀態較不明顯。
3. 溶解磷濃度較過去為低。由於溶解磷與底泥 pH 值、氧化還原電位(ORP)及孔隙水主要離子濃度均有關，今年度計畫發現底泥的還原狀態並不明顯，應可解釋溶解磷濃度相對也較低的結果。
4. 由於底泥孔隙水檢測的氟濃度過低，不適合使用環檢所公告電極法(適用於較高氟濃度，0.1 ~ 5mg/l)，本計畫日後將採用 Standard Method 建議的離子層析(IC)法(適用氟濃度，0 ~ 1.4mg/l)進行分析。
5. 從集水區土壤磷之型態分佈結果，我們可以確認，存在集水區的天然主要無機磷礦物是鋁結合磷(Al-P)，其次是鐵或錳結合磷(Fe, Mn-P)及鈣結合磷(Ca-P)。灣潭茶園土壤(Soil-2)的鈣結合磷含量較河岸沖積土(Soil-1)要高許多，顯示灣潭的鈣結合磷極可能是農業污染造成。
6. 除了鈍性磷(residual-P)外，主要底泥固相磷物種是有機磷與無機的

鋁結合磷(Al-P)。各測站底泥磷的組成有空間差異。灣潭底泥中的鈣結合磷較其他地點要高，可能是人為農業的污染進入底泥所造成。

7. 將集水區土壤與底泥磷的型態分佈進行比較，底泥的鐵或錳結合磷及鈣結合磷比例有較集水區土壤增加的趨勢。這些在底泥中逐漸形成的結合磷可能是經過底泥成岩作用逐漸產生，屬於後生礦物。
8. 從底泥固相磷與溶解磷隨底泥深度變化可知，底泥溶解相磷主要受到有機磷及鋁結合磷的影響。其固相磷的濃度及在底泥中的分解與溶解沉澱反應主導了底泥溶解磷的釋出能力。
9. 將鋁結合磷(Al-P)視為主要的磷礦物，輸入 MINEQL+ 模式進行模擬得知，平衡態反應磷濃度 EPC 多大於實測磷濃度，顯示底泥屬於持續溶出狀態，對水體是污染源。
10. 長時間觀察底泥管柱上層水總磷濃度隨時間變化，我們發現 (A)組添加亞硫酸鈉及(B)組不添加亞硫酸鈉，僅曝氮氣的磷通量相差並不大，表示添加亞硫酸鈉除氧的方法，和僅曝氮氣結果對磷釋出的影響相當。
11. 實驗管柱模擬厭氧態下磷的通量約為 $0.09\sim 0.14 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ ，約在 $1.0\text{E-}1 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ 數量級上下，較現場好氧態的磷通量要高約一個數量級。表示氧的存在，使孔隙水三價鐵離子阻擾磷的移動，可能只有十分之一磷可以自由磷的型態移動到上層水中。
12. 經過水下攝影觀察示蹤劑施放後，plume 在水中隨時間的分布，初

步估計水底延散係數約為 $0.30-1.50 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (平均值為 $0.72 \text{ cm}^2/\text{sec}$)。經過實驗結果可確立，本次採用的示蹤劑攝影及施放裝備，在水底進行示蹤劑實驗是可行的。

13. 本研究所建構之底泥磷的二層傳輸及通量模式(2B-SPTFM)，考慮包括微生物的一階分解反應，無機磷的溶解-沉澱反應動力，孔隙水分子物理性傳輸及溶氧的影響，將可符合翡翠水庫底泥的現況，有效模擬磷的傳輸。
14. 從今年底泥性質推測，今年水質有明顯的改變可能是外部污染負荷增高的結果，而內部污染負荷相對較低。建議應加強入流水質的監測及集水區非點源污染改善工作。

第六章參考文獻

- Alder, M.J., G. Stancalie. and C. Raducu, “ Integrating tracer with remote sensing techniques for determining dispersion coefficients of the Dambovita River, Romania”, *Proceedings of the 1999 IUGG 99, the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, 75-81(1999).
- Allison, J.D., D.S. Brown and K.J. Novo-Gradac, “ *MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user’s manual*”, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, USEPA, Athens, Georgia 30605(1991).
- Bates, M.H. and N.J. Neafus, “Phosphorus release from sediments from Lake Blacwell, Okalahoma”, *Wat. Res.*, 14, 1477(1980).
- Clark, J.F., P. Schlosser, M. Stute, and H.J. Simpson, “ SF6-3He Tracer Release Experiment: A New Method of Determining Longitudinal Dispersion Coefficients in Large Rivers”, *Environ. Sci. Technol.*, 30,1527-1532(1996).
- Di Toro, D.M., *Sediment Flux Modeling*, John Wiley & Sons, Inc., Publication (2001).
- Di Toro, D.M. and W.F. Matystik, *Mathematical models of water quality in large lakes, part 1: Lake Huron and Saginaw Bay*, EPA-600/3-80-056, 28-30(1980).
- Fischer, H.B., “Dispersion Predications in Natural Streams, J. Sanit Eng. Div., *Proc. Am.Soc. Civ.Eng.* 94(SA5), 927-944(1968).
- Fischer, H.B., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, New York: Academic Press, 483(1979).
- 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).
- Freedman, P.L. and R.P. Canale , ”Nutrient release from anaerobic sediments”, *ASCE. E.E.*, 103, 223-244(1977).
- 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).

- Hupfer, M., R. Pthig, R. Bruggemann and Geller W., “ Mechanical resuspension of autochthonous calcite(seekreide) failed to control internal phosphorus cycle in a eutrophic lake”, *Wat. Res.*, 34(3), 859-867(2000).
- Kashefipour, S.M. and R.A. Falconer, “Longitudinal Dispersion Coefficients in Natural Channels”, *Wat. Res.*, 36, 1596-1608(2002).
- 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).
- Parkhurst. D.L., “Users guide to Phreeqc, a computer program for speciation, reaction-path, advective-transport and inverse geochemical calculations, *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report95-4227, Lakewood, Colorado* (1995).
- Pettersson, K., “Mechanisms for Internal Loading of Phosphorus in Lakes”, *Hydrobiologia*, 373/374,21-25(1998).
- Pujol, L and J.A. Sanchez-Cabeza, “ Determination of longitudinal dispersion coefficient and velocity of the Ebro river waters(Northeast Spain) using tritium as a radiotracer”, *J. Environ. Radioact.*, 45(1), 39-57(1999).
- Runnells, D.D., “ Diagenesis, chemical sediments, and the mixing of natural waters”, *J. of Sedimentary petrology*, 39, 3, 1188(1969).
- Schecher, W.D. and D.C. McAvoy, *MINEQL⁺: a chemical equilibrium modeling system, version 4.0 for Windows User's Manual*, ME: Environmental Research Software (1998).
- Sechet, P and B.LE Guennec, “ The Role of Near Wall Turbulent Structures on Sediment Transport”, *Wat. Res.*, 33(17), 3646-3656(1999).
- Seibold, E. and W.H. Berger, *The sea floor, an introduction to marine geology*, 288(1982).
- 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).
- Starkel, W.M., “Predicting the effect of Macrobenthos on the sediment/water flux of metals and phosphorus”, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42, 95(1985).
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller, *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins Publishers Inc., New York(1987).
- 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).
- Ulrich K.U, “ Effects of land use in the drainage area on phosphorus binding and mobility in the sediments of four drinking water reservoirs, *Hydrobiologia*, 345(1), 21-38(1997).
 - **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).**
 - 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).
 - Wanninkhof, R. et al., “Gas Exchange, Dispersion, and Biological Productivity on the West Florida Shelf: Results from a Lagrangian Tracer Study”, *Geo. Res. Letters*, 24(14), 1767-1770, 1997.
 - Stumm, W., *Chemistry of the Solid-Water Interface*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.(1992).
 - Williams, J.D.H., “Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie”, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 413-429(1976).
 - Wu, S.C., *Transport of hydrophobic organic compounds between water and natural sediments*, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute Technology (1986).
 - 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(1998~2001)。
 - 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)。
 - 劉格非、蒲子超，淡水河河口延散係數之實測及推估模式之建立，第九屆水利工程研討會，中央大學，C69-C76(1998).
 - 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）。
 - 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).
 - 吳先琪，陳怡靜，翡翠水庫底泥檢驗，台北翡翠水庫管理局，台大環境工程學研究所 (2000).
 - 吳先琪，陳怡靜，王上銘，翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究計畫(第一年)，台北翡翠水庫管理局，國立台灣大學環境工程學研究所(2001)。
 - 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)。
- 吳俊宗，高麗珠，黃文亞，翡翠水庫藻類與水質關係之長期監測(II)，台北翡翠水庫管理局，中央研究院植物研究所(2002)。
- 廖文蓓，翡翠水庫中藻類種群消長之動態模擬，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文(2002)。

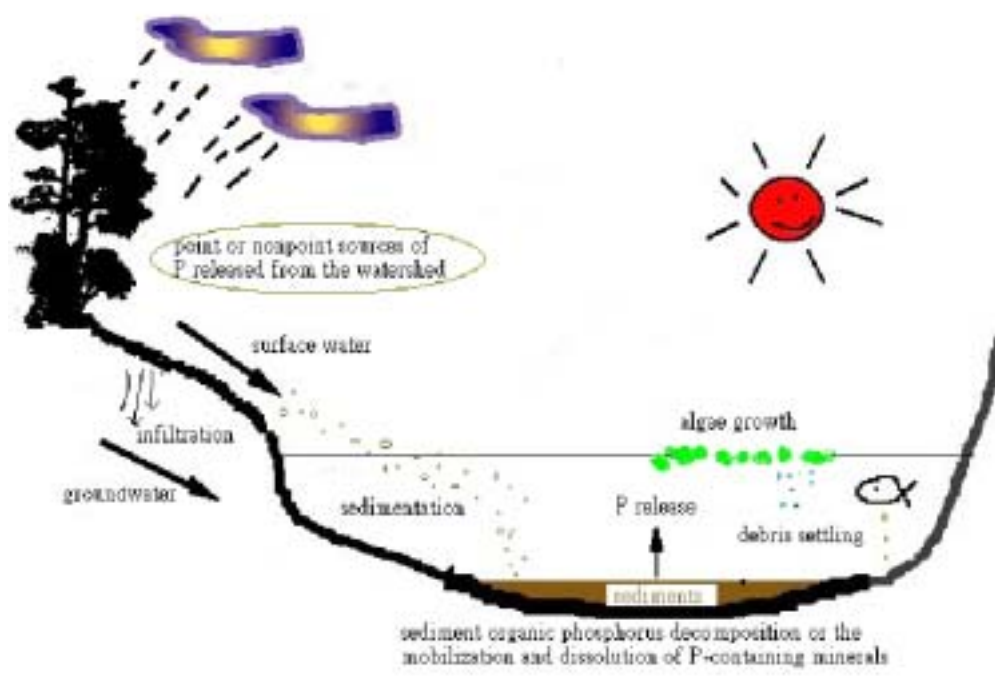


圖 2.1 水庫集水區磷的循環

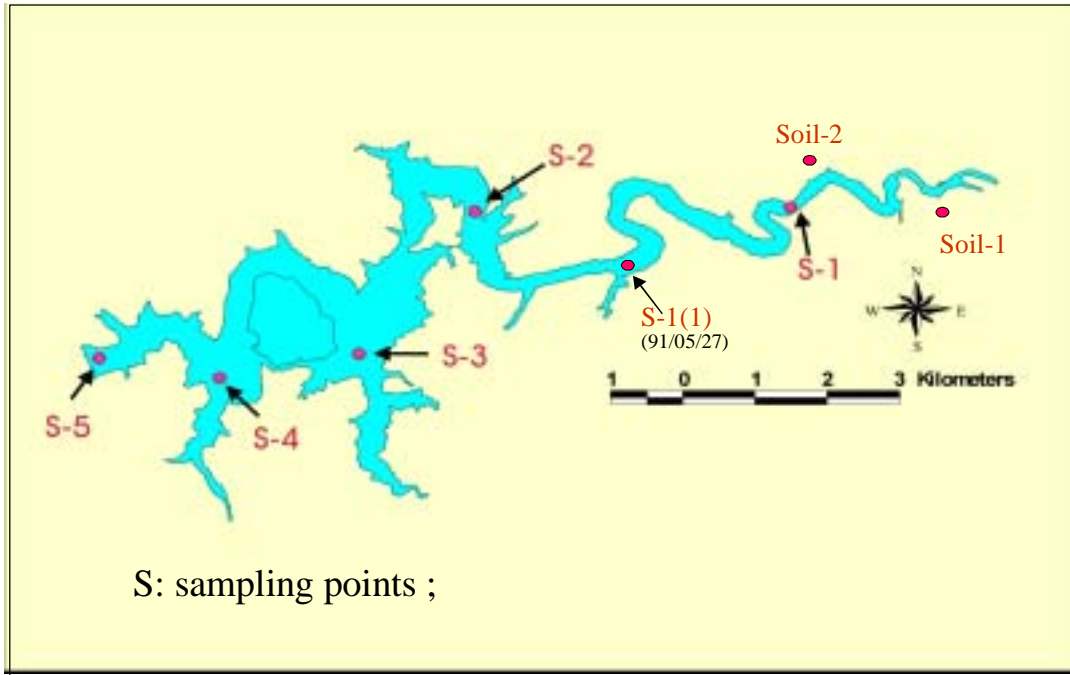
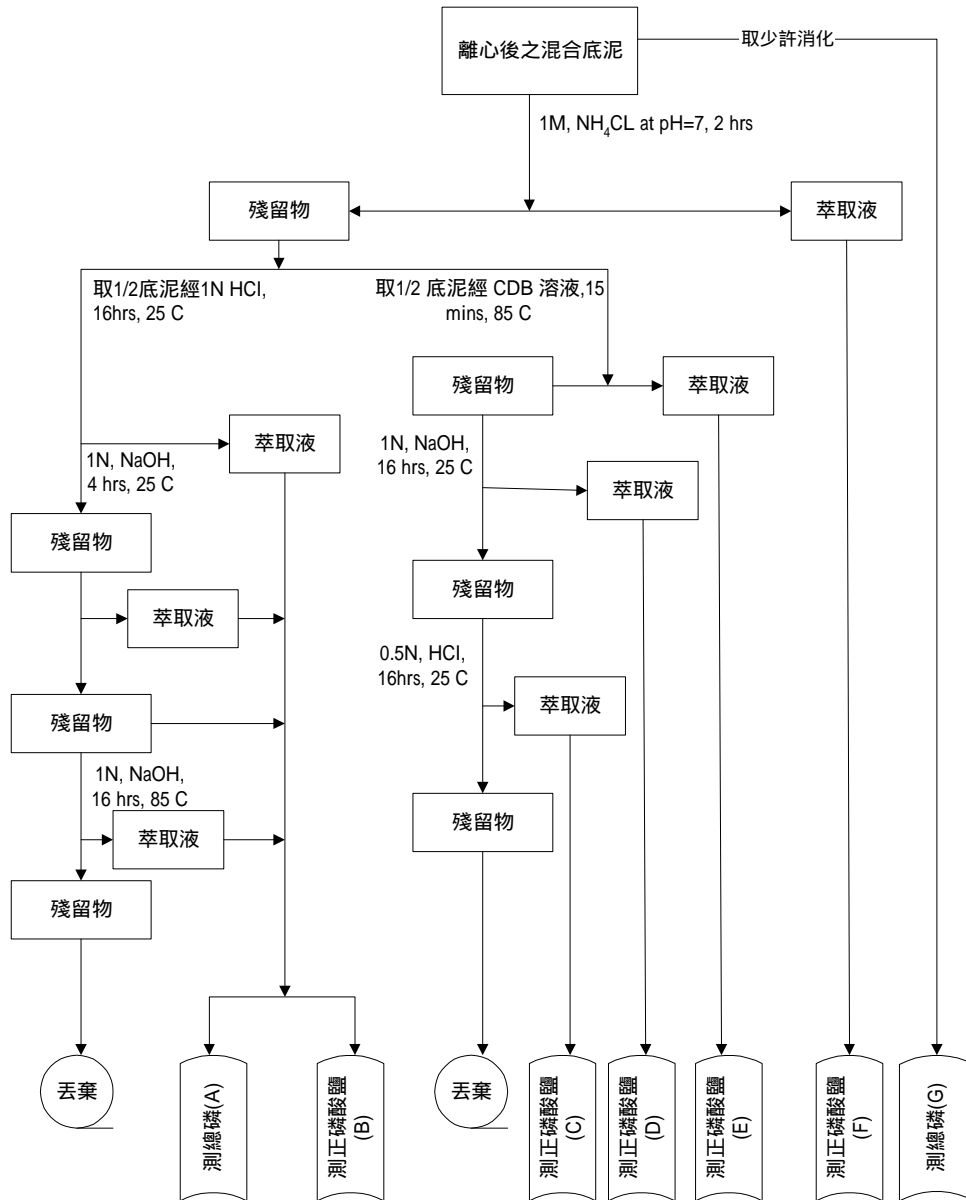


圖 3.1 翡翠水庫底泥及集水區土壤採樣點位置



圖 3.2 貫入式之套管底泥採樣器



- (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 3.3 底泥固相磷序列萃取流程



圖 3.4 現地示蹤劑實驗裝置

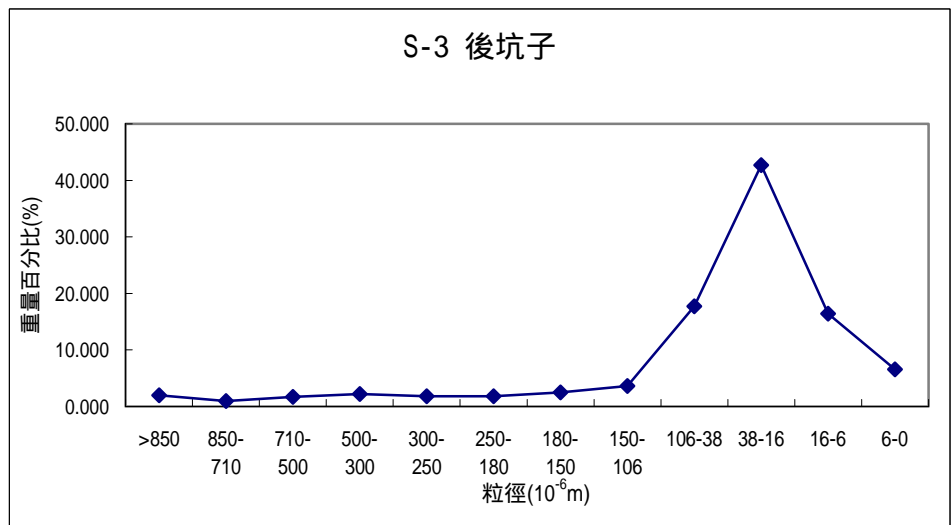
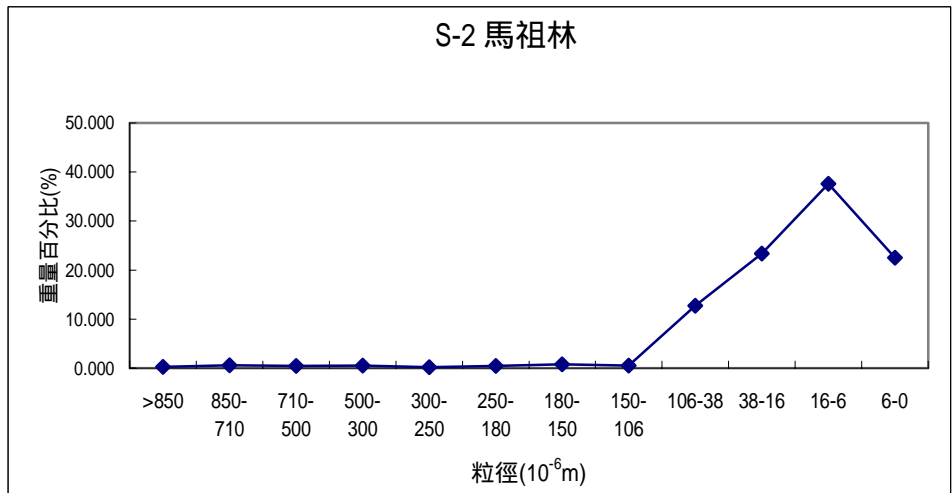
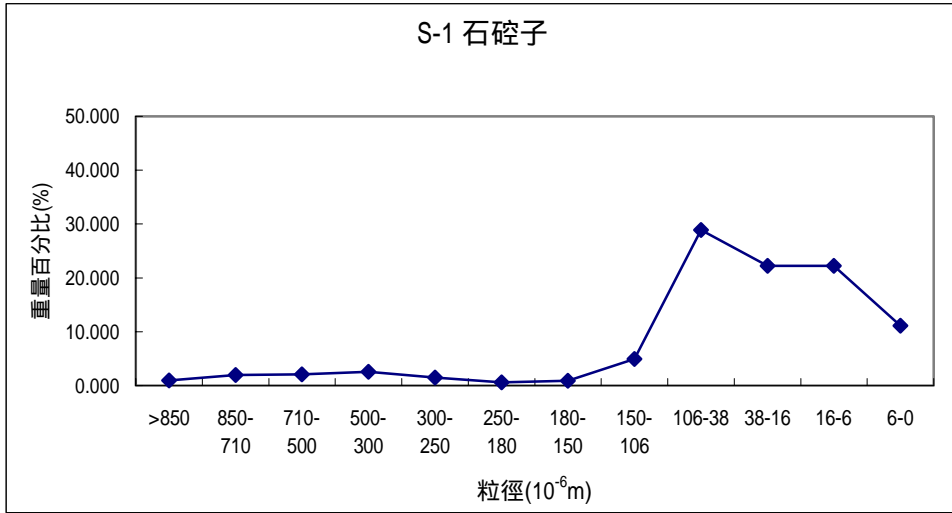


圖 4.1-A 底泥粒徑組成分佈(91 年 5 月)

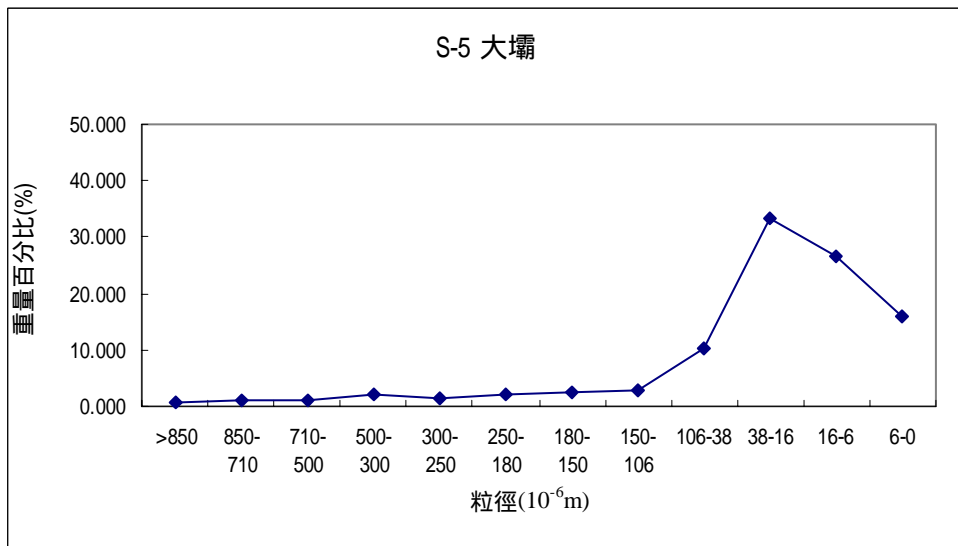
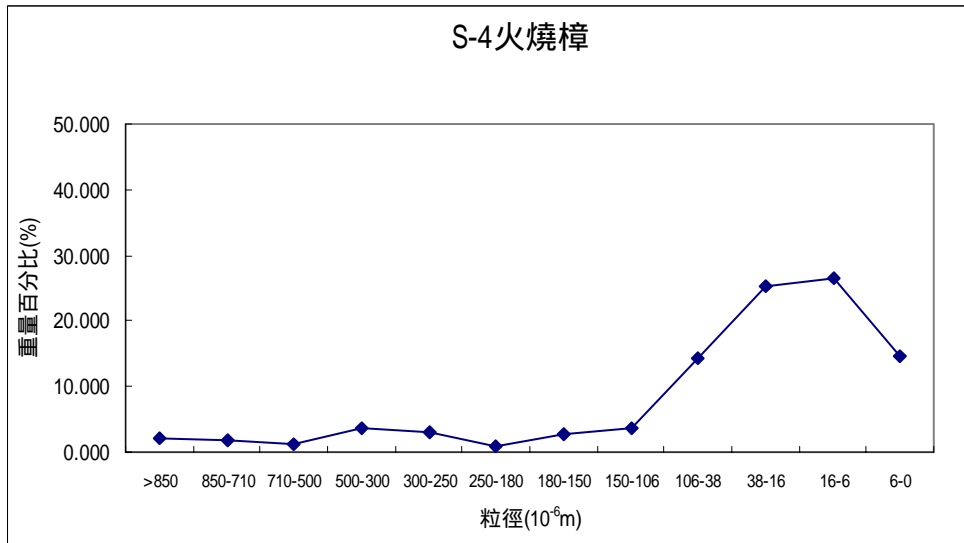


圖 4.1-A 底泥粒徑組成分佈(91 年 5 月) (續)

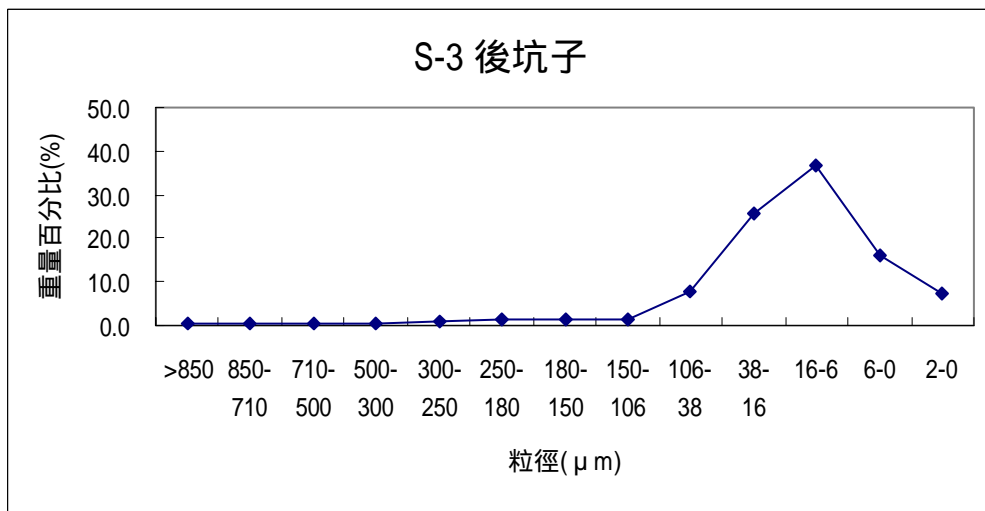
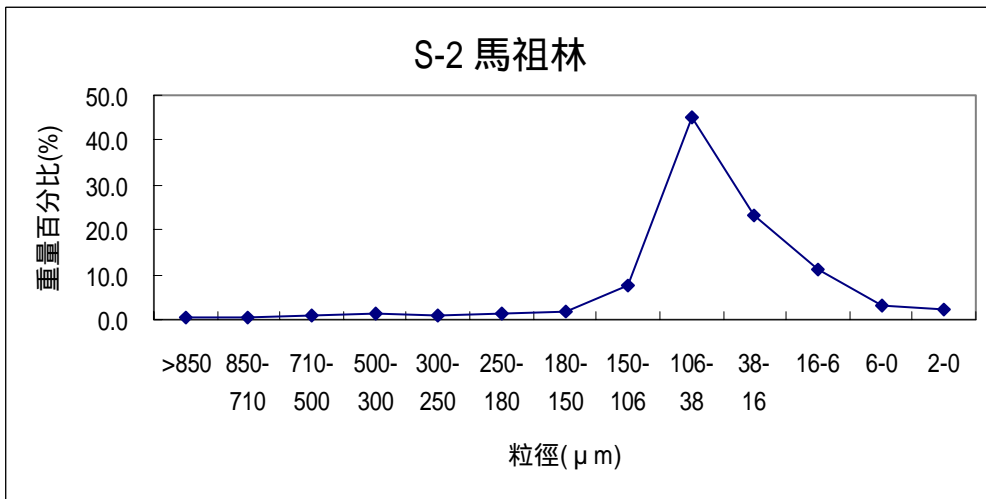
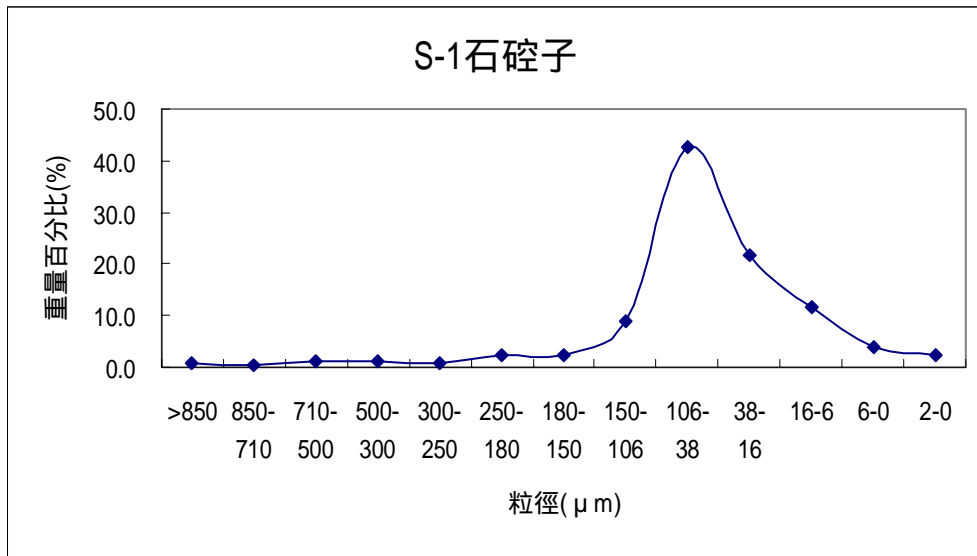


圖 4.1-B 底泥粒徑組成分佈(91 年 8 月)

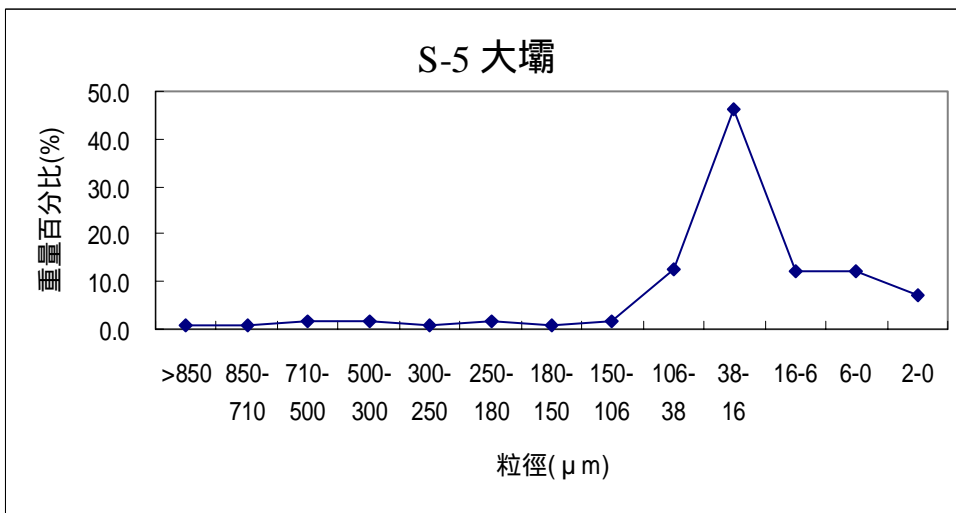
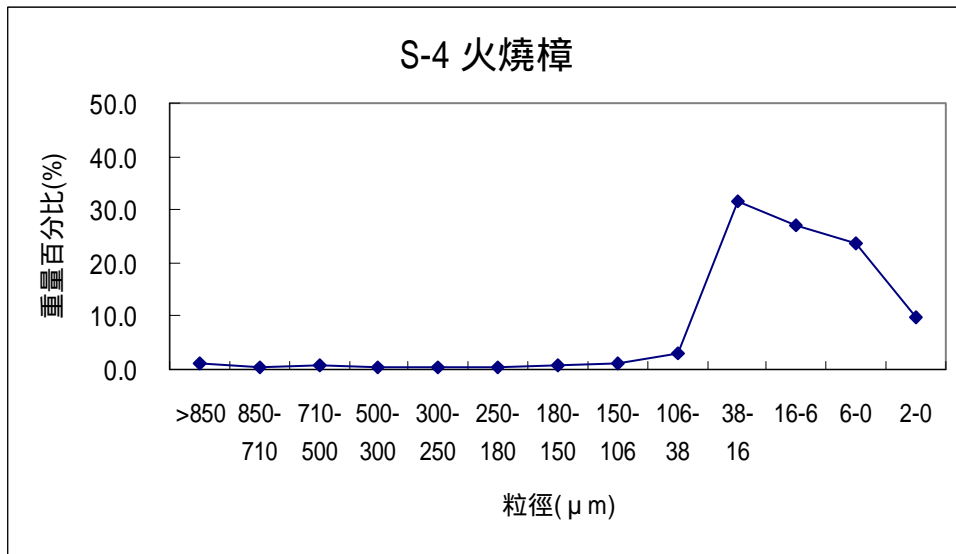


圖 4.1-B 底泥粒徑組成分佈(91 年 8 月)(續)

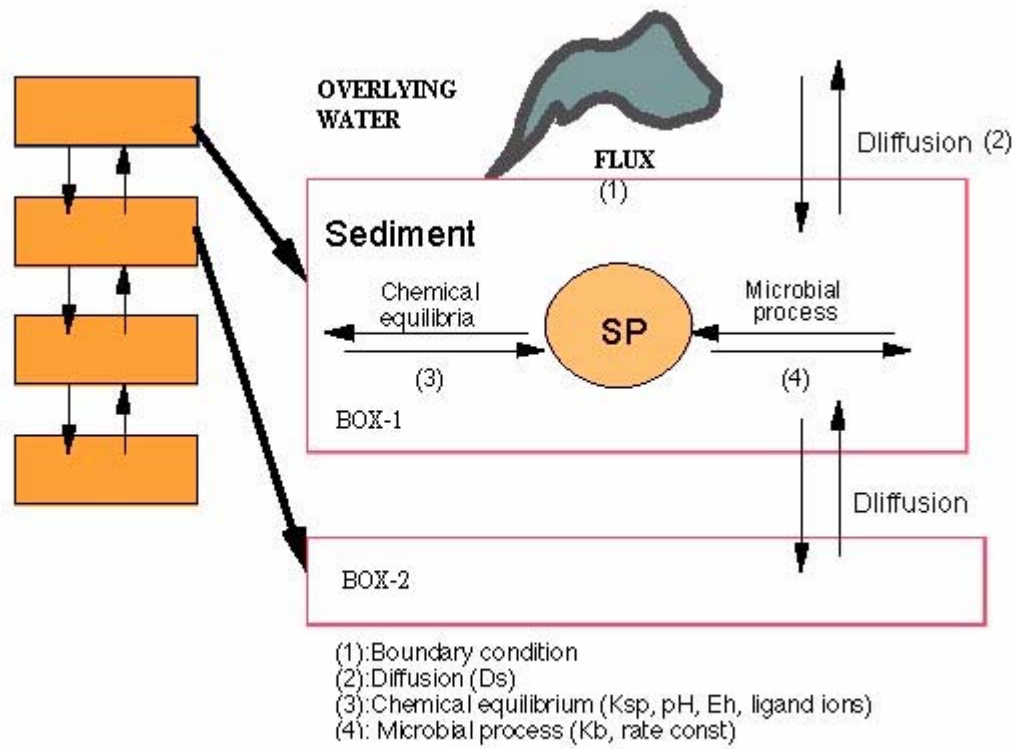


圖 4.2 底泥磷模式概念示意圖

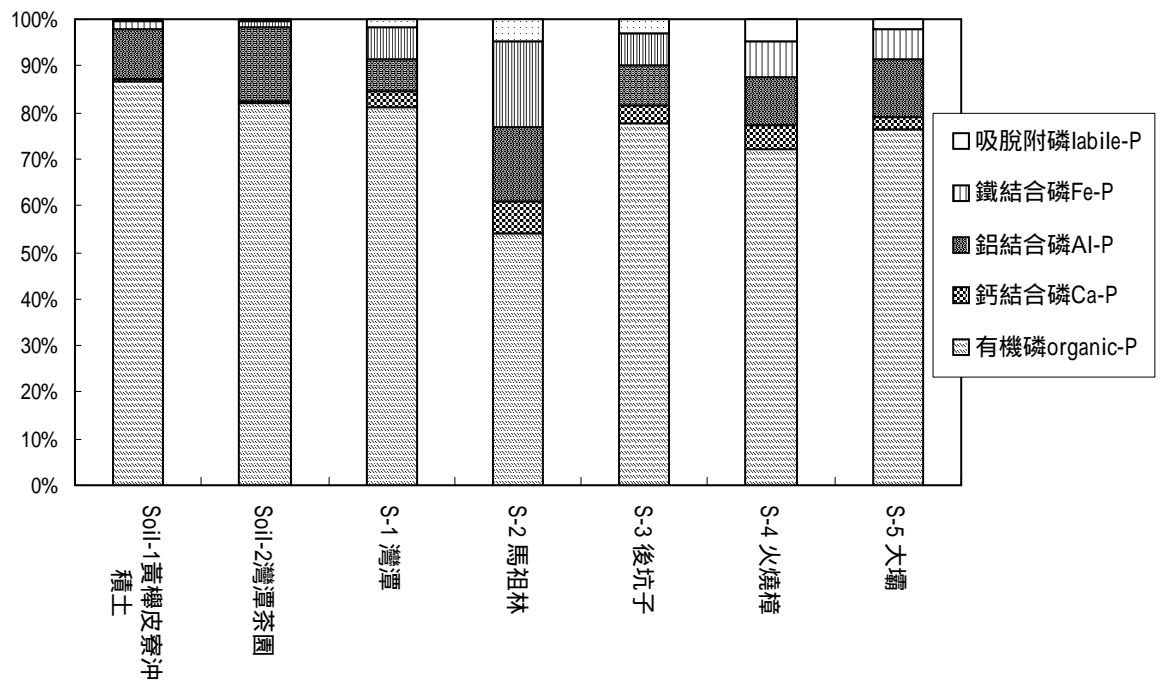


圖 4.3 底泥與集水區土壤磷之型態分佈

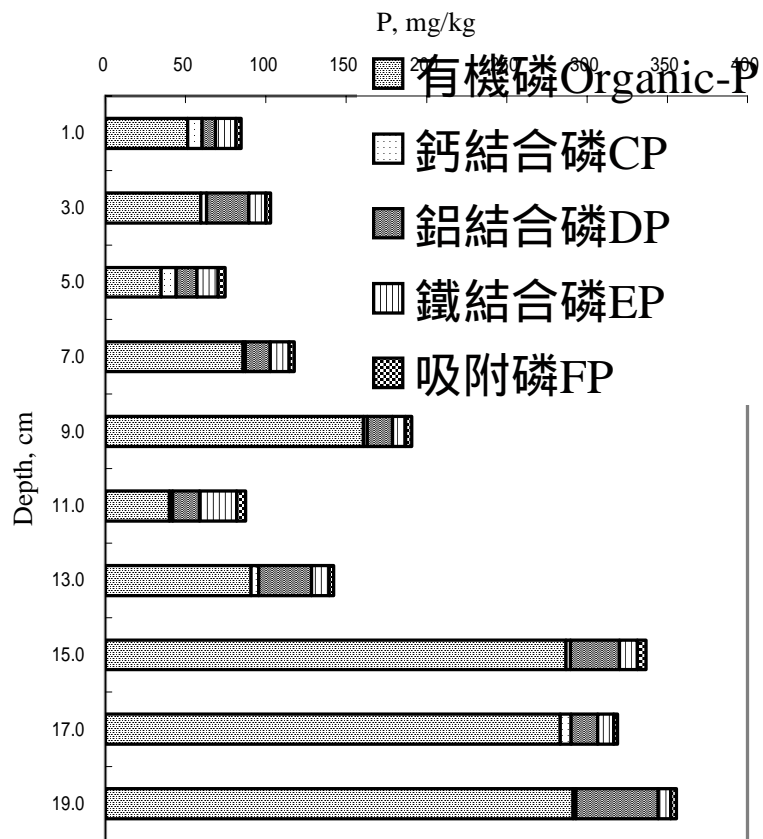


圖 4.4 大壩(S-5)底泥固相磷型態隨深度變化

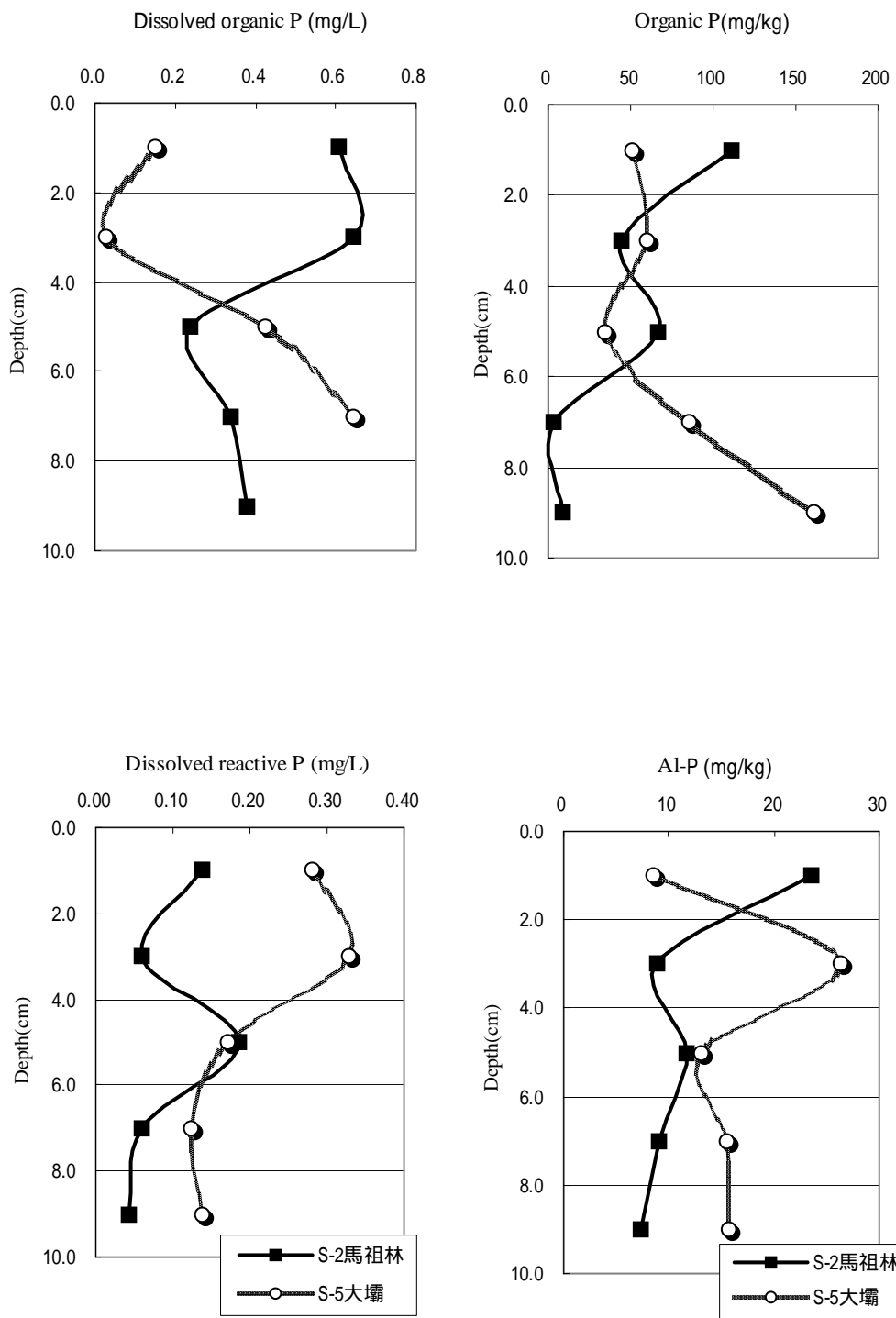


圖 4.5 底泥固相磷與孔隙水溶解磷隨深度變化

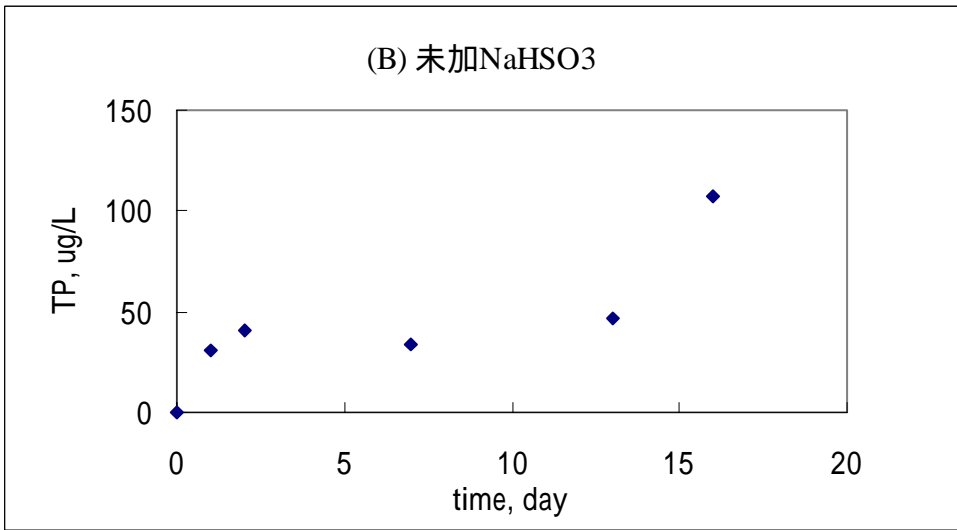
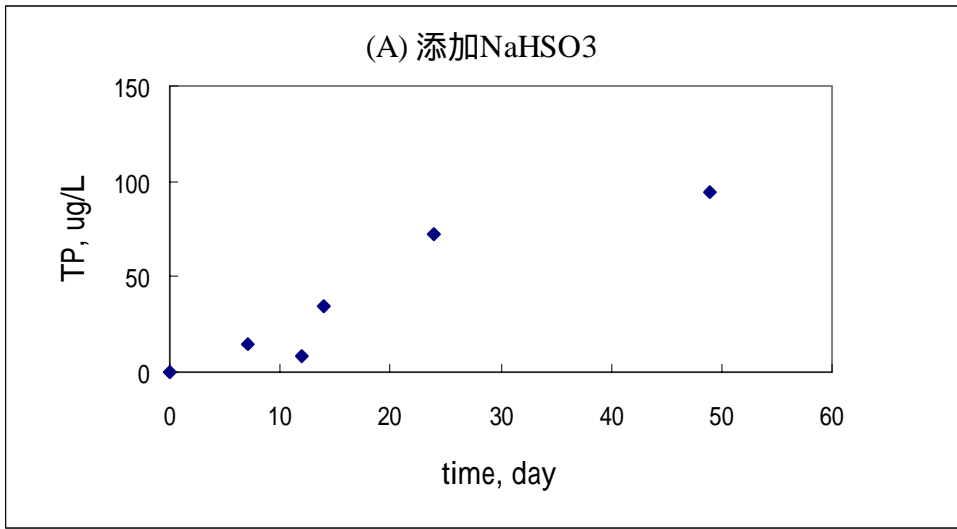


圖 4.6 長時間 (A)組及(B)組底泥管柱上層水總磷濃度隨時間變化

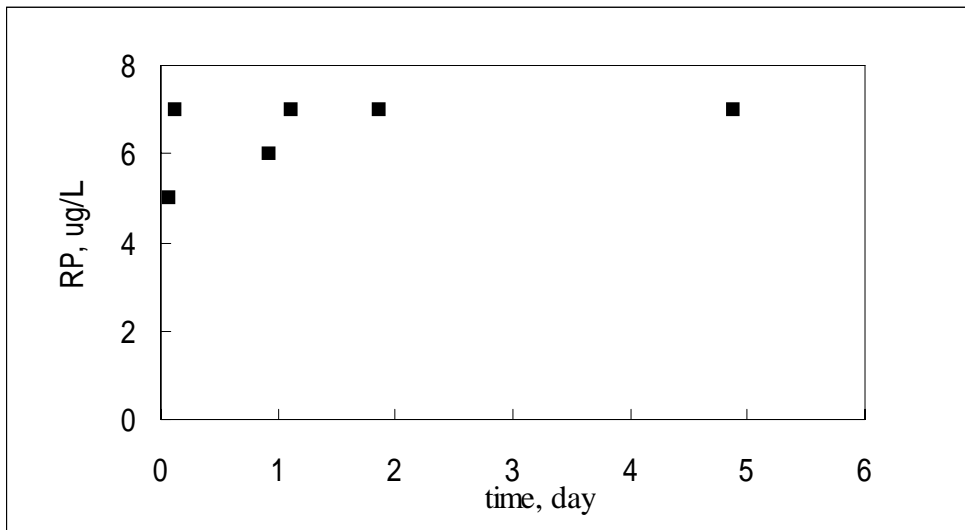
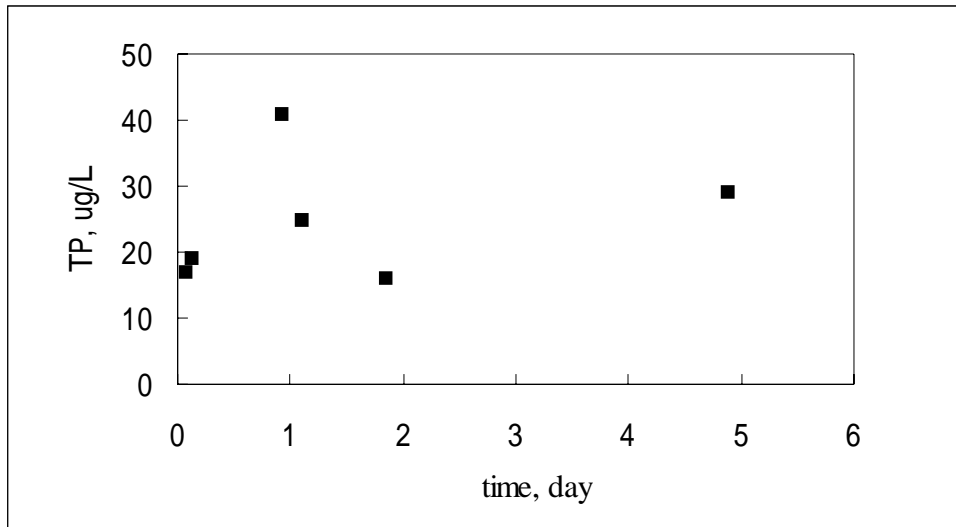


圖 4.7 短時間 (C) 組底泥管柱上層水總磷(TP)及反應性磷(RP)濃度隨時間變化



圖 4.8 現地底泥-水界面示蹤劑施放照片

表 2.1 可能與無機磷礦物反應有關的平衡式及溶度積常數

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)
$\text{Ca}_2\text{OHPO}_4 = 2\text{Ca}^{2+} + \text{PO}_4^{3-} + \text{OH}^-$	25.4	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} = 3\text{Mn}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-} + 3\text{H}_2\text{O}$	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)
$\text{MnHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Mn}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$	25.4	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{CaHPO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$	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)
$\text{Ca}_2\text{FPO}_4 = 2\text{Ca}^{2+} + \text{PO}_4^{2-} + \text{F}^-$	18.7	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{CaHAl}(\text{PO}_4)_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+ + 2\text{HPO}_4^{2-}$	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)
$\text{Al}(\text{OH})_3 = \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} - 3\text{H}^+$	-8.77	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{MnCO}_3 = \text{Mn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	10.41	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	8.48	MINEQL ⁺ (1998)
$\text{Al}(\text{OH})\text{O}_2 = \text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} - 3\text{H}^+$	-6.87	MINEQL ⁺ (1998)

附註：參考溫度為 25

表 3.1 檢驗項目及分析方法

項次	分析項目	分析方法
1	底泥鐵	NIEA S321.61C
2	底泥錳	NIEA S321.61C
3	底泥鋅	NIEA S321.61C
4	底泥鉛	NIEA S321.61C
5	底泥銅	NIEA S321.61C
6	底泥砷	NIEAS310.61C
7	底泥汞	NIEAM317.00C
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 S280.61C
19	粒徑分析	濕篩法及雷射粒徑分析儀
20	底泥總氮(TKN)	ASTM 4500-N
21	底泥總磷(TP)	ASTM 4500-P
22	溶解性磷(SP)	NIEAW427.51B

表 3.2 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%	0.018mg/kg
2	底泥錳	< 20%	80~120%	100%	0.005 mg/kg
3	底泥鋅	< 20%	80~120%	100%	0.005 mg/kg
4	底泥鉛	< 20%	80~120%	100%	0.043 mg/kg
5	底泥銅	< 20%	80~120%	100%	0.013 mg/kg
6	底泥砷	< 20%	80~120%	100%	
7	底泥汞	< 20%	80~120%	100%	0.23 mg/kg
8	孔隙水溶解性鐵	< 20%	80~120%	100%	3.3E-4 mg/L
9	孔隙水溶解性錳	< 20%	80~120%	100%	1.6E-5 mg/L
10	孔隙水溶解性鋁	< 20%	80~120%	100%	7.4E-7 mg/L
11	孔隙水溶解性鈣	< 20%	80~120%	100%	1.3E-4 mg/L
12	孔隙水溶解性鎂	< 20%	80~120%	100%	8.1E-6 mg/L
13	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	< 20%	80~120%	100%	0.01mg/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%	0.173 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 91 年 5 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(化學類)

項目/斷面	大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	石碇子
-------	----	-----	-----	-----	-----

		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
氧化還原電位 ORP(mV)	上層水	-21.5	92.0	43.8	4.5	41.3
	底泥	-138.0	-68.0	-89.7	-115.9	-58.8
pH 值		5.2	5.6	6.1	6.2	6.5
含水量(%)		57.7	56.1	50.9	50.3	52.4
有機質(%)		2.8	2.2	3.1	2.2	1.9
底泥總氮量(mg/kg)		1713	1731	1657	1430	1736
底泥總磷量(mg/kg)		488.5	203.4	242.7	229.8	242.7
孔隙水溶解性總磷(mg/L)		0.54	0.38	0.55	0.54	0.21
孔隙水溶解反應性磷(mg/L)		0.23	0.12	0.08	0.21	0.12
孔隙水溶解性硫(mg/L)		0.07	0.10	0.23	0.06	0.07
孔隙水溶解態氟(mg/L) ^a		0.029	0.031	0.032	0.036	0.045
孔隙水溶解態氟(mg/L) ^b		0.009	0.009	0.015	0.013	0.011

a. 以電極法分析氟; b.以離子層析(IC)法分析氟

表 4.2 91 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(化學類)

項目/斷面	大壩	火燒樟	後坑子	馬祖林	石碇子
-------	----	-----	-----	-----	-----

		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
氧化還原電位 ORP(mV)	上層水	-36.0	14.4	47.0	-8.8	18.5
	底泥	-110.5	-124.3	-112.8	-55.5	-72.1
pH 值		6.1	5.8	6.1	6.4	6.6
含水量(%)		61.3	55.1	50.4	43.2	39.4
有機質(%)		4.9	3.4	2.0	2.3	1.9
底泥總氮量(mg/kg)		1666	1267	1212	1093	934
底泥總磷量(mg/kg)		341	213	389	334	270
孔隙水溶解性總磷(mg/L)		0.35	0.35	0.50	0.14	0.66
孔隙水溶解反應性磷(mg/L)		0.06	0.12	0.29	0.06	0.05
孔隙水溶解性硫(mg/L)		0.16	0.16	0.41	0.46	0.39
孔隙水溶解態氟(mg/L) ^a		0.019	0.026	0.020	0.036	0.042

a.以離子層析(IC)法分析氟

表 4.3 91 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	火燒樟	後坑子	馬祖林	石碇子
	S-5	S-4	S-3	S-2	S-1

>850	0.99	2.13	1.96	0.23	0.96
850-710	1.19	1.70	0.96	0.56	1.99
710-500	1.35	1.32	1.69	0.44	2.06
500-300	2.36	3.76	2.22	0.54	2.58
300-250	1.70	3.16	1.79	0.21	1.46
250-180	2.35	0.86	1.79	0.47	0.58
180-150	2.48	2.68	2.49	0.78	0.90
150-106	2.78	3.76	3.65	0.54	4.96
106-38	15.73	14.28	17.72	12.75	28.90
38-16	31.03	25.21	42.71	23.38	22.24
16-6	23.88	26.54	16.43	37.57	22.24
6-0	14.20	14.60	6.59	22.53	11.13

表 4.4 91 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	石碇子 S-1
--------	-----------	------------	------------	------------	------------

>850	0.7	1.0	0.4	0.6	0.9
850-710	1.0	0.3	0.2	0.4	0.4
710-500	1.8	0.8	0.6	1.0	1.1
500-300	1.7	0.5	0.5	1.5	1.2
300-250	0.8	0.5	0.9	1.1	0.6
250-180	1.7	0.3	1.4	1.2	2.2
180-150	0.7	0.6	1.2	1.8	2.5
150-106	1.6	1.1	1.4	7.4	9.1
106-38	12.4	3.1	7.9	45.1	42.6
38-16	46.4	31.4	25.5	23.4	21.7
16-6	12.0	27.0	36.8	11.0	11.6
6-0	19.2	33.4	23.2	5.5	6.1

表 4.5 91 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	石碇子
-------	----	-----	-----	-----	-----

		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
底泥 (mg/kg)	鐵(Fe)(%)	4.2	4.4	3.6	4.0	3.4
	錳(Mn)	1613.6	1148.9	788.5	590.7	594.1
	鋅(Zn)	239.3	134.7	100.5	110.4	102.8
	鉛(Pb)	57.7	37.8	34.5	37.6	31.7
	銅(Cu)	26.3	22.0	20.6	20.3	20.0
	砷(As)	3.1	1.8	4.4	2.2	2.8
	汞(Hg)	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2
孔隙水 (mg/L)	鐵(Fe)	31.2	26.9	61.3	19.2	30.1
	錳(Mn)	13.9	10.6	8.9	2.9	2.4
	鋁(Al)	19.8	25.5	24.7	15.6	38.8
	鈣(Ca)	31.1	8.8	64.2	8.8	24.1
	鎂(Mg)	11.2	5.6	29.8	23.4	21.6

表 4.6 91 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	石碇子
-------	----	-----	-----	-----	-----

		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1
	鐵(Fe)(%)	4.1	4.1	3.6	3.0	2.7
底	錳(Mn)	818.3	732.4	551.9	472.8	449.4
	鋅(Zn)	141.1	150.6	136.8	166.4	174.3
	鉛(Pb)	43.9	45.0	27.8	31.2	40.0
	銅(Cu)	48.6	52.2	56.5	30.8	39.8
(mg/kg)	砷(As)	3.3	2.3	3.4	3.3	5.2
	汞(Hg)	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
孔	鐵(Fe)	41.9	59.0	69.2	45.7	136.5
	錳(Mn)	11.7	10.7	10.6	9.5	12.4
隙	鋁(Al)	23.5	41.8	63.7	23.9	76.3
	鈣(Ca)	31.7	9.6	17.5	70.5	44.9
	鎂(Mg)	18.5	14.0	24.3	36.5	37.9

表 4.7 底泥與集水區土壤各固相磷物種的含量

	有機磷 organic-P	鈣結合磷 Ca-P	鋁結合磷 Al-P	鐵結合磷 Fe-P	吸脫附磷 labile-P	鈍性磷 residual-P	總磷 TP
Soil-1 黃櫨皮寮沖積土	115.80	0.64	14.19	2.16	0.62	-4.79	131.08
	88.3%	0.5%	10.8%	1.6%	0.5%	-3.7%	
Soil-2 灣潭茶園	262.56	1.80	51.11	3.42	1.43	63.13	392.57
	66.9%	0.5%	13.0%	0.9%	0.4%	16.1%	
S-1 灣潭	118.75	5.09	10.01	9.64	2.63	271.32	417.43
	28.4%	1.2%	2.4%	2.3%	0.6%	65.0%	
S-2 馬祖林	30.97	3.82	9.23	10.54	2.66	197.07	254.29
	12.2%	1.5%	3.6%	4.1%	1.0%	77.5%	
S-3 後坑子	59.50	2.86	6.65	5.12	2.37	332.84	409.34
	14.5%	0.7%	1.6%	1.3%	0.6%	81.3%	
S-4 火燒樟	32.52	2.48	4.49	3.65	2.06	157.80	203.40
	16.0%	1.2%	2.2%	1.8%	1.0%	77.6%	
S-5 大壩	138.46	4.41	22.68	11.90	3.73	317.48	498.65
	27.8%	0.9%	4.5%	2.4%	0.7%	63.7%	

unit: mg/kg

表 4.8 實驗室管柱底泥磷釋出通量計算結果

	TP	RP
長時間曝氮氣		
1.添加 NaHSO ₃	0.05~0.15 (0.06)	
2.未添加 NaHSO ₃	0.01~0.39 (0.14)	
短時間曝氮氣	0.04~0.13 (0.07)	0.028~0.09 (0.04)

unit: ug/cm² day

表 4.9 底泥磷模式(2B-SPTFM)輸入參數一覽表

說明	符號	輸入值
溶解相無機磷在底泥中之擴散係數, cm^2/day	D_m	0.3 (Krom and Berner, 1980))
底泥總體密度, g/cm^3	ρ_b	1.293(實測)
底泥孔隙率(V/V), 無因次	n	0.61(實測)
底泥-水界面溶解磷延散係數, cm^2/day	D_H	7.2 (示蹤劑實驗)
微生物對固相有機磷一階反應分解速率常數, day^{-1}	k_c	0.02(WASP data)
溫度校正因子, 無因次	θ	1.08
溶解有機磷的一階分解速率常數, day^{-1}	k_d	0.0004(WASP data)
底泥無機磷礦物的比表面積, cm^2/g	A_s'	100(假設)
底泥無氧層 BOX-2 和掩埋層交界的深度, cm	Z_2	10(假設)
底泥-水界面的平均孔隙率, 無因次	n_{ij}	0.81(0.5* n +0.5*1)
為上層水(compartment j)溶解總磷濃度, mg/L	C_{Wj}	0.05(實測)
質傳係數, cm/day	α	8.57=(D_m/L)
平衡態的溶解相無機磷濃度, mg/L	$\overline{C_{W2}}$	MINIEQL+計算
特徵長度, 以 d_{65} 或 d_{50} 表示, cm。	L	0.00035(實測)
邊界層厚度, cm	L_{ij}	5(假設)
底泥需氧量(SOD), $\text{g}/\text{m}^2\text{day}$	R_{O2}	0.07(現地 DO 隨時間變化換算)
溶氧的擴散係數, cm^2/day	D_{O2}	1.78(20)

表 4.10 水化學模式 MINEQL+模擬平衡態無機磷濃度(EPC)結果

	1	2	3	4	5	6
實測底泥孔隙水無機磷濃度(1)	8.8	33	14.6	27.4	17.6	7.5

無氧層(BOX-2)模擬之平衡態無機磷酸鹽濃度, EPC02(2)	660	1.5	58.5	562	1600	15.3
(2)/(1) 比值	75	0.05	4.01	20.51	90.91	2.04
有氧層(BOX-1)模擬之平衡態無機磷酸鹽濃度, EPC01(3)						
(3)/(1) 比值						

a 單位 μM .

b.底泥採樣期間分別為 : (1) 2000/1/7 ; (2) 2000/6/21; (3) 2000/9/29; (4) 2001/5/24; (5) 2001/8/28, (6)2002/5/27

表 4.11 底泥磷模式模擬磷釋出通量結果

表 4.12 W2 模式所需模擬水質生化反應一覽表

說明	符號	單位	係數範圍
水平黏滯係數	A_X	m^2/sec	
水平延散係數	E_X	m^2/sec	
藻類飽合生長率	G_{MAX}	1/day	1.5-2.5

藻類死亡率	D_Z	1/day	0.01-0.03
藻類沉降率	K_{Sa}	1/day	0.08-0.11
藻類代謝死亡率	D_{Pl}	1/day	0.01-0.01
飽和日光強度	I_s	ly/day	100-400
平均日光強度	I_a	ly/day	500-1000
光線消散係數	K_e	1/m	0.18-4.0
磷半飽和常數	K_{MP}	mg/L	0.002-0.0475
氮半飽和常數	K_{MN}	mg/L	0.01-0.4
有機氮分解率	K_{nl}	mg/L	0.04
氨氮硝化率	K_{n2}	mg/L	0.03-0.2
底泥需氧量	SOD	gm^3/sec	0.07

附 錄

附錄一、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
		91年5月	第2次	91年5月	第2次	91年5月	第2次	
1	底泥鐵	4.5%	9.5%	106.9%	89.4%	100%	100%	0.0565mg/kg
2	底泥錳		18.7%	100.6%	92.4%	100%	100%	0.0062 mg/kg
3	底泥鋅	4.9%	7.9%	101.3%	97.2%	100%	100%	0.0191 mg/kg
4	底泥鉛	28.3%	2.8%	90.2%	35.9%	100%	100%	0.1289 mg/kg
5	底泥銅		35.3%	107.7%	97.9%	100%	100%	0.0227 mg/kg
6	底泥砷		12.9%	112.6%	84.1%	100%	100%	
7	底泥汞	4.9%	9.9%	93.9%	112.3%	100%	100%	0.23 mg/kg
8	孔隙水溶解性鐵	0%	18.5%	68.9%		100%	100%	0.017 mg/L
9	孔隙水溶解性錳	3.3%	12.0%	101%		100%	100%	0.01 mg/L
10	孔隙水溶解性鋁	4.5%	15.1%	102.1%	93.2%	100%	100%	0.38 mg/L
11	孔隙水溶解性鈣	11.2%	51.4%	113.6%	106.9%	100%	100%	0.02mg/L
12	孔隙水溶解性鎂	6.9%	29.6%	58.0%	119.7%	100%	100%	0.27mg/L
13	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	1.8%	5.4%	104.4%	103.6%	100%	100%	0.0241 mg/L

14	孔隙水溶解性氟(F)(以電極法分析)	2.5%		106.9%		100%		0.0057 mg/L
14-1	孔隙水溶解性氟(F)(以離子層析IC分析)	1.8%	4.6%	93.2%	117.9%	100%	100%	0.0012 mg/L
15	pH					100%	100%	
16	氧化還原電位(ORP)					100%	100%	
17	有機質	4.4%	12%	82.0%	76%	100%	100%	
18	粒徑分析	3-70%	6-40%			100%	100%	
19	底泥總氮(TKN)	10.9 %	2.3%	67%	97.5%	100%	100%	0.083mg/kg
20	底泥總磷(TP)	15%	37.8%	90%	129.6%	100%	100%	8.37mg/kg
21	溶解性磷(SP)	22%	18%	110%	110%	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(二)						
採樣記錄員：朱象熙			採樣日期：91 年 5 月 27 日			
			天氣：晴 氣溫：24.5			
一、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子) 採樣位置(UTM)E/N <u>0361069/2758277</u> 今日大壩水位： <u>130</u> m 採樣點絞盤旋轉圈數： <u>11</u> 估計水深 <u>11</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>棕</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	灰黃	48	5.41	24.5	6.18	45	-51.5
S1-2	灰黃						
S1-3	灰黃						
S1-4	灰黃	48		24.5	6.50	37.5	-66.1
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:石碇子(灣潭無法到達 , 改為石碇子採樣)							

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 (二)							
採樣記錄員：朱象熙				採樣日期：91 年 5 月 27 日			
天氣：晴 氣溫：24.5							
一、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子) 採樣位置(UTM)E/N 0361069/2758277 今日大壩水位：130 m 採樣點絞盤旋轉圈數：20 估計水深 20 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述： 距 河口 游 約 m，距河左岸約 40 m 水面有波紋；表水顏色 棕 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	
S2-1	灰黑,上覆土黃色	20.6	0.44	26.2	6.49	65.6	-130.5

S2-2							
S2-3	灰黑,上覆 土黃色	42.5		26.7	6.47	-56.6	-101.2
S2-4							
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:石碇子							

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 (二)							
採樣記錄員：朱象熙				採樣日期：91 年 5 月 27 日			
				天氣：晴 氣溫：24.5			
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_0360505/2755544 今日大壩水位：130 m							
採樣點絞盤旋轉圈數：26 估計水深 26 m(轉一圈約 1m)							
二、採樣現場描述：							
距____河口____游 約 ____m，距河左岸約 15 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	灰黃	24	4.13	26.0	6.47	55.6	-88

S3-2	灰黃	32		26.4	6.28	31.9	-91.3
S3-3							
S3-4							
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:石碇子							

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 (二)							
採樣記錄員：朱象熙				採樣日期：91 年 5 月 27 日			
				天氣：晴 氣溫：24.5			
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_0358357/2755163 今日大壩水位：130 m							
採樣點絞盤旋轉圈數：_____ 估計水深_____ 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	
S4-1	灰黑	32	7.24	26.6	6.59	65.1	-56.3

S4-2							
S4-3							
S4-4	灰黑	32		26.6	6.46	118.9	-79.7
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:石碇子							

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 (二)							
採樣記錄員：朱象熙				採樣日期：91 年 5 月 27 日			
				天氣：晴 氣溫：24.5			
四、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子) 採樣位置(UTM)E/N 0356776/2755750 今日大壩水位：130 m 採樣點絞盤旋轉圈數：90 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 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	
S5-1	灰黃	43	7.80	19.7	6.54	-7.0	-120.7

S5-2		34		20.2	6.41	50.0	-154.7
S5-3							
S5-4							
S5-5							
S5-6							
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:石碇子							

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-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 (二)						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：91 年 8 月 28 日			
			天氣：晴 氣溫：28.8			
五、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子)						
採樣位置(UTM)E/N 0364147/2757128 今日大壩水位：145 m						
採樣點絞盤旋轉圈數：27 估計水深 27 m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距 河口 游 約 m，距河左岸約 50 m						
水面有波紋；表水顏色 棕 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

S1-1	灰黑	33	5.41	28.9	6.05	3.0	-111.2
S1-2	灰黑	26		28.8	6.06	33.5	-32.9
S1-3	灰	53					
S1-4							
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:石碇子(灣潭無法到達 , 改為石碇子採樣)							

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 (二)						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：91 年 8 月 28 日			
			天氣：晴 氣溫：28.8			
一、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子)						
採樣位置(UTM)E/N 0362145/2757146 今日大壩水位：145 m						
採樣點絞盤旋轉圈數：42 估計水深 42 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 水面有冒泡，可能是藻類光合作用產氣 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	灰黃	25		25	6.32	-8.8	-55.5
S2-3	灰黑	27					
S2-4	灰黑	45		26.7	6.24	10.8	-61.7
S2-5		42					
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:石碇子							

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 (二)						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：91 年 8 月 28 日			
			天氣：晴 氣溫：28.8			
六、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭						
採樣位置(UTM)E/N 0360265/2755998 今日大壩水位：145 m						
採樣點絞盤旋轉圈數：70 估計水深 70 m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距後坑子溪 河口 下游 約 200 m，距河左岸約 150 m						
水面有波紋；表水顏色 綠 有優養的跡象 有枯枝飄浮水面						
其他水面有冒泡，可能是藻類光合作用產氣 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	20		28.2	6.32	47.0	-112.8
S3-2	灰黑	30					
S3-3	灰黑	30			6.03	12.9	-76.9
S3-4	灰黑	30					
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:石碇子							

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 (二)						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：91 年 8 月 28 日			
			天氣：晴 氣溫：28.8			
七、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭						
採樣位置(UTM)E/N 0360271/2755851 今日大壩水位：145 m						
採樣點絞盤旋轉圈數：87 估計水深 87 m(轉一圈約 1m)						
二、採樣現場描述：						
距火燒樟溪 河口 下游 約 50 m，距河左岸約 20 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 水面有冒泡，可能是藻類光合作用產氣附近有 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	30		26.3	6.25	14.4	-124.3
S4-2	灰	30			6.25	-11.1	-121.4
S4-3	灰	30		25.6			
S4-4	灰	40		26.3			
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:石碇子							

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 (二)						
採樣記錄員：陳怡靜			採樣日期：91 年 8 月 28 日			
			天氣：晴 氣溫：28.8			
八、採樣地點：大壩 火燒樟 後坑子 馬祖林 灣潭(石碇子)						
採樣位置(UTM)E/N_0356792/2755739 今日大壩水位：145 m						
採樣點絞盤旋轉圈數：128 估計水深 128 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____ 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

S5-1	灰黃	30		29.5	6.38	-36.0	-110.5
S5-3		40			6.13	40.8	-74.8
S5-4	灰黑	40		29			
S5-5							
S5-6							
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:石碇子							

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。

附錄五、底泥磷模式(2B-SPTFM)數值方程

統御方程式

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

$$C_t = nC_w + \rho_b C_s = n(C_{w1} + C_{w2}) + \rho_b (C_{s1} + C_{s2})$$

$$C_s = C_{s1} + C_{s2}$$

$$C_w = C_{w1} + C_{w2}$$

茲分開說明溶解有機磷(C_{w1})及溶解無機磷(C_{w2})：

1. 溶解有機磷(C_{w1})：

$$n \frac{\partial C_{w1}}{\partial t} = \rho_b k_c \theta^{(T-20)} C_{s1} - n k_d \theta^{(T-20)} C_{w1}$$

以 Crank-Nicolson 數值方法將上述方程式離散化

$$n \frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} = \frac{A}{2\Delta Z^2} \left[(U_{j+1}^{n+1} - 2U_j^{n+1} + U_{j-1}^{n+1}) + (U_{j+1}^n - 2U_j^n + U_{j-1}^n) \right] + B - CU_j^n$$

$$A = 0.5 * n * Dm * DT / (DZ)^2$$

$$B = \Delta_b * Kc * C_{S1} * \oplus^{(WT-20)}$$

$$C = n * Kd * \oplus^{(WT-20)}$$

2. 溶解無機磷(C_{W2}) :

$$n \frac{\partial C_{W2}}{\partial t} = nk_d \theta^{(T-20)} C_{W1} + n\alpha (\overline{C_{W2}} - C_{W2})$$

以 Crank-Nicolson 數值方法將上述方程式離散化

$$n \frac{V_j^{n+1} - V_j^n}{\Delta t} = \frac{A}{2\Delta Z^2} \left[(V_{j+1}^{n+1} - 2V_j^{n+1} + V_{j-1}^{n+1}) + (V_{j+1}^n - 2V_j^n + V_{j-1}^n) \right] + CU_j^n + D(EPC - V_j^n)$$

$$D = n * \square$$

3. 邊界條件

Lower boundary condition

$$\frac{\partial C_t(Z_2, t)}{\partial Z} = 0$$

$$n \frac{V_{j+1}^n - V_j^n}{\Delta Z} = 0$$

Upper boundary condition

$$q = n_0 \frac{D_H}{L_0} (C_{W20} - C_W)$$

$$V_j^n - V_j^{n-1} = 2A(V_{j+1}^n - V_j^n)$$

附錄六、底泥磷模式(2B-SPTFM)電腦程式

```
!C      PROGRAM 2B-SPTFM(2 BOX SEDIMENT PHOSPHORUS TRANSPORT AND FLUX MODEL)
!C  THIS PROGRAM COMPUTES THE 1-D SEDIMENT PHOSPHORUS DIFFUSION-REACTION EQUATION
!C  THE NUMERICAL SCHEME,CARNK-NICOLSON METHOD IS APPLIED.
!C  DATA DEFINITION:
!C  CT = SEDIMENT TOTAL PHOSPHORUS(mg/cm3)
!C  CS1= SEDIMENT ORGANIC PHOSPHORUS(mg/kg)
!C  CS2= SEDIMENT INORGANIC PHOSPHORUS(mg/kg)
!C  CW = SEDIMENT DISSOLVED TOTAL PHOSPHORUS(mg/L)
!C  CW1= SEDIMENT DISSOLVED ORGANIC PHOSPHORUS(mg/L)
!C  CW2= SEDIMENT DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS(mg/L)
!C  CW1W = DISSLOVED ORGANIC PHOSPHORUS IN OVERLYING WATER(mg/L)
!C  CW2W = DISSLOVED ORGANIC PHOSPHORUS IN OVERLYING WATER(mg/L)
!C  EPC1= EQUILIBRIUM SEDIMENT DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS IN AEROBIC LAYER(BOX-1)(mg/L)
!C  EPC2= EQUILIBRIUM SEDIMENT DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS IN ANAEROBIC LAYER(BOX-2)(mg/L)
!C  DM = MOLECULAR DIFFUSION COEFFICIENT OF PHOSPHATE(cm2/day)
!C  DH = HYDRODYNAMIC DISPERSION COEFFICIENT OF PHOSPHATE AT SEDIMENT-WATER INTERFACE(cm2/day)
!C  RHO= BULK DENSITY OF SEDIMENT(g/cm3)
!C  MP = MEAN POROSITY IN SEDIMENT(cm3/cm3)
!C  KC = ORGANIC PHOSPHORUS DECOMPOSITION RATE CONSTRAINT (day-1)
!C  KD = DISSOLVED ORGANIC PHOSPHORUS MINERALIZATION AT 20C(day-1)
!C  THETA = TEMPERATURE COEFFICIENT (NONE-DIMENSION)
!C  WT = WATER TEMPERATURE NEAR THE SEDIMENT (C)
!C  AS = SPECIFIC AREA OF SEDIMENT INORGANIC PHOSPHORUS( cm2/g)
!C  ALPHA = MEAN MASS TRANSFER COEFFICIENT OF PHOSPHORUS FROM SOLID TO DISSOLVED PHASE(cm/day)
!C  ML = MEAN CHARACTERISTIC LENGTH (cm)
!C  Z1 = DEPTH OF AEROBIC LAYER(BOX-1) OF SEDIMENT(cm)
!C  Z2 = DEPTH OF ANAEROBIC LAYER(BOX-2) OF SEDIMENT(cm)
!C  FLUX = DISSOLVED TOTAL PHOSPHORUS FLUX FROM SEDIMENT INTO OVERLYING LAYER(ug/cm2/day)
```

```

!C FLUXW1 = DISSOLVED ORGANIC PHOSPHORUS FLUX FROM SEDIMENT INTO OVERLYING LAYER(ug/cm2/day)
!C FLUXW2 = DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS FLUX FROM SEDIMENT INTO OVERLYING LAYER(ug/cm2/day)
!C O2W = DISSOLVED OXYGEN IN OVERLYING WATER(mg/L)
!C O21 = DISSOLVED OXYGEN IN SEDIMENT(mg/L)
!C DO2 = DIFFUSION COEFFICIENT OF DISSOLVED OXYGEN(cm2/day)
!C RO2 = SEDIMENT OXYGEN DEMAND(g/m3/day)
!C MPW = AVERAGE POROSITY AT SEDIMENT-WATER INTERFACE(cm3/cm3)
!C MLW = AVERAGE MIXING LENGTH(cm)
!C DX = SPACE STEP
!C DT = TIME STEP
!C FT = FINAL TIME
!C NX = NUMBER OF X INTERVALS
!C RATIOA = 0.5*MP*DM*DT/(DX)**2
!C RATIOB = RHO*KC*CS1*THETA**(WT-20)
!C RATIOC = MP*KD*THETA**(WT-20)
!C RATIOD = AS*CS2*RHO*ALPHA
!C
!C Type declaration.....
!C
      DIMENSION CT(101)
      DIMENSION CW(101),CW1(101),CW2(101), EPC(101)
      REAL    FLUX,FLUXW1,FLUXW2
      REAL    CS1, CS2, CW1W, CW2W
      REAL    DM, DH, D02
      REAL    EPC1, EPC2, RHO, MP
      REAL    KC, KD, THETA, WT
      REAL    AS, ALPHA, ML
      REAL    Z1, Z2, MPW, MLW
      !REAL    O2W, O21, RO2
      REAL    RATIOA, RATIOB, RATIOC, RATIOD
              real a(100),b(100),c(100)
!C Data statements.....
      DATA CS1 /138.46/, CS2 /22.68/, CW1W /0.01/, CW2W / 0.04 /, DM /0.3/,&
& DH /2.5/, DO2 /1.0/
      DATA EPC1 /0.01/, EPC2 /1.82/, RHO /1.293/,&
& MP /0.61/
      DATA KC /0.02/, KD /0.0004/, THETA /1.08/, WT /20/
      DATA AS /100/, ML /0.00035/, Z2 /10.0/, MPW /0.81/, MLW /2/,&
& O2W /2.5/, RO2 / 0.07/

      OPEN(10,FILE='DATA.DAT')
      OPEN(11,FILE='OUTPUT.OUT')
!C
!C INPUT PARAMETERS.....
!C
10 WRITE(*,100)
20 WRITE(*,101)
      READ*, DX
      WRITE(*,102)
      READ*, DT
      WRITE(*,103)
      READ*, FT
      WRITE(*,104)
      READ*, ISW
!C
!C
!C COMPUTE GRID.....
!C
      AX=(Z2/DX)+0.1
      NX=AX+1
      N1=NX-1
      N2=NX-2
      NT=((FT/DT)+0.1)+1

      WRITE(*,105) DX,NX,DT,NT
!C
!C CALCULATE THE LENGTH OF BOX-1(Z1) AND THE LENGTH OF BOX-2(Z3)
!C
      Z1=(2*D02*O2W/RO2)**0.5
      Z3=Z2-Z1
      AX2=(Z1/DX)+0.1
      N3=AX2+1

      WRITE(*,106) Z1

```

```

WRITE(*,107) Z3

!C SET INITIAL CONDITION .....
!C
DO 40 I=1,NX
  CW1(I)=0.20
  CW2(I)=0.20
  CW(I)=CW1(I)+CW2(I)
  EPC(I)=0.20
  IF (I.LT.N3) THEN
    EPC(I)=EPC1
  ELSE
    EPC(I)=EPC2
  ENDIF

40 CONTINUE
!C
!C CHECK INPUT
!C
WRITE(*,108) MP,DM,RHO
WRITE(11,108) MP,DM,RHO
WRITE(*,109) CS1,KC,KD,WT
WRITE(11,109) CS1,KC,KD,WT
WRITE(*,110) CS2,AS,ML
WRITE(11,110) CS2,AS,ML
RATIOA = 0.5*MP*DM*DT/(DX)**2
RATIOB = RHO*KC*CS1*THETA**(WT-20)
RATIOC = MP*KD*THETA**(WT-20)
ALPHA = DM/ML
RATIOD = AS*CS2*RHO*ALPHA
WRITE(*,111) RATIOA,RATIOB,RATIOC,RATIOD
WRITE(11,111) RATIOA,RATIOB,RATIOC,RATIOD

!C NUMERICAL SOLUTION.....
!C
IT=0
T=0.

!C WRITE T, (CW1(I),I=1,NX), (CW2(I),I=1,NX)
IF (ISW.EQ.1) THEN
  WRITE(11,112) DX,DT,FT
  WRITE(11,113) T, (CW1(I), I=1,NX)
  WRITE(11,114) T, (CW2(I), I=1,NX)
  WRITE(11,115) (EPC(I), I=1,NX)
ENDIF
DO 50 J=2,NT
  IT=IT+1
  T=T+DT

!C CALCULATE DISSOLVED ORGANIC PHOSPHORUS (CW1(I),I=1,NX)
CALL CRANK1(NX,N1,DX,DT,MP,RATIOA,RATIOB,RATIOC,CW1)

!C CALCULATE DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS (CW2(I),I=1,NX)
CALL CRANK2(NX,N1,DX,RATIOA,RATIOC,RATIOD,EPC,CW1,CW2)

!C CALCULATE THE SEDIMENT PHOSPHORUS FLUX
FLUXW1= (MPW*DH/MLW)*(CW1(1)-CW1W)
FLUXW2= (MPW*DH/MLW)*(CW2(1)-CW2W)
FLUX=FLUXW1+FLUXW2

!C PRINT RESULTS
!C
!C WRITE T, (CW1(I),I=1,NX), (CW2(I),I=1,NX), (CW(I),I=1,NX)
WRITE(11,116) T, (CW1(I),I=1,NX)
WRITE(11,117) T, (CW2(I),I=1,NX)
WRITE(11,118) T, (CW(I),I=1,NX)
WRITE(11,124) FLUXW1, FLUXW2, FLUX

50 CONTINUE

!C WRITE FINAL VECTOR TO FILE

```

```

WRITE (10,119) DX,DT,FT,(CW1(I),I=1,NX)
WRITE (10,120) DX,DT,FT,(CW2(I),I=1,NX)
WRITE (10,121) DX,DT,FT,(CW(I),I=1,NX)
WRITE (10,124) FLUXW1, FLUXW2, FLUX
WRITE(*,122)
READ*,IANS
IF (IANS.EQ.1)THEN
WRITE(*,123)
READ*,JANS
!IF(JANS -1) 20,30,30
ENDIF

100  FORMAT(' ', '      THIS PROGRAM SOLVES A 1-D PARABOLIC P.D.E.')
```

```

101  FORMAT('   SPACE STEP, DX = ?')
```

```

102  FORMAT('   TIME STEP, DT = ?')
```

```

103  FORMAT('   FINAL TIME = ?')
```

```

104  FORMAT('   SAVE ALL RESULTS ON FILE (Y=1)?')
```

```

105  FORMAT('DX=',F6.3,3X,'NUMBER OF SPACE NODES= ',I4,&
&'DT=',F6.3,3X,'NUMBER OF TIME NODES=',I4,/)

106  FORMAT('   THE DEPTH OF THE AEROBIC LAYER(BOX-1) IS',F5.2)
```

```

107  FORMAT('   THE DEPTH OF THE ANAEROBIC LAYER(BOX-2) IS',F5.2)
```

```

108  FORMAT(1X,'/MP=',F7.4,3X,'DM=',F7.4,3X,'RHO=',F7.4)
```

```

109  FORMAT(1X,'/CS1=',F7.4,3X,'KC=',F7.4,3X,'KD=',F7.4,3X,&
&'WT=',F7.4)
```

```

110  FORMAT(1X,'/CS2=',F7.4,3X,'AS=',F7.4,3X,'ML=',F7.4)
```

```

111  FORMAT('RATIOA=',F6.3,3X,'RATIOB=',F6.3,3X,'RATIOC=',F6.3,3X,&
&'RATIOD=',F6.3)
```

```

112  FORMAT(1X,'/DX=',F7.4,3X,'DT=',F7.4,3X,'FT=',F7.4)
```

```

113  FORMAT(1X,'TIME=',F7.4,'(CW1(I)=,I=1,NX)/1X,101(E13.6,3X))
```

```

114  FORMAT(1X,'TIME=',F7.4,'(CW2(I)=,I=1,NX)/1X,101(E13.6,3X))
```

```

115  FORMAT(1X,'(EPC(I)=,I=1,NX)/1X,101(E13.6,3X))
```

```

116  FORMAT(1X,'TIME=',F7.4,4X,'NUMERICAL SOLUTION: '/1X,'CW1(I)=, I=1,NX'&
&/1X,101(E13.6,3X))
```

```

117  FORMAT(1X,'CW2(I)=, I=1,NX'/1X,101(E13.6,3X))
```

```

118  FORMAT(1X,'CW(I)=, I=1,NX'/1X,101(E13.6,3X))
```

```

119  FORMAT(1X,3(F7.4,3X),/1X,'CW1(I)=, I=1,NX'/1X,101(E13.6,3X))
```

```

120  FORMAT(1X,3(F7.4,3X),/1X,'CW2(I)=, I=1,NX'/1X,101(E13.6,3X))
```

```

121  FORMAT(1X,3(F7.4,3X),/1X,'CW(I)=, I=1,NX'/1X,101(E13.6,3X))
```

```

122  FORMAT(' ', ' ANOTHER CASE(Y=1)? ')
```

```

123  FORMAT(' ', ' SAME GRID(Y=1)? ')
```

```

124  FORMAT(1X,'THE DISSOLVED ORGANIC PHOSPHORUS FLUX IS', F6.3,&
&/1X,'THE DISSOLVED INORGANIC PHOSPHORUS FLUX IS', F6.3,&
&/1X,'THE DISSOLVED TOTAL PHOSPHORUS FLUX IS', F6.3)

      STOP
      END

!C
!C
!C  SUBROUTINE OF CRANK-NICOLSON METHOD
!C
      SUBROUTINE CRANK1(NX,N1,DX,DT,MP,RATIOA,RATIOB,RATIOC,CW1)
      DIMENSION CW1(101),RHS(101),A(101),B(101),C(101)

!C
!C  SETTING UP THE MATRIX
!C  FIRST SET THE BOUNDARY CONDITIONS AT THE TOP AND BOTTOM ROWS
      A(1)=-2.*RATIOA
      B(1)=1.+2.*RATIOA
      C(1)=0.0
      !A(NX)=1.0
      !B(NX)=0.0
      !C(NX)=-1.0

!C
      DO 10 I=2,N1
      A(I)=RATIOA/(1.+2.*RATIOA)
      B(I)=-1.0
      C(I)=RATIOA/(1.+2.*RATIOA)
10  CONTINUE

!C
!C  COMPUTING THE RIGHT HAND SIDE
!C
      RHS(1)=-1.*CW1(1)
      RHS(NX)=CW1(NX)

```

```

!C
    DO 20 I=2,N1
        RHS(I)=(RATIOA/(1.+2.*RATIOA))*(CW1(I-1)+CW1(I+1))+(1.-2.*RATIOA-RATIOC*DT/MP)*CW1(I)
20 CONTINUE
!C
!C ADDING CONSTANTS TO RHS AND SUBSTRACTING FROM MATRIX
!C
!C SOLVING THE SYSTEM AND REPEATING FOR THE DESIRED NUMBER OF STEPS
!C
    CALL TRDIAG(N1,A,B,C,CW1,RHS)
    RETURN
    END

    SUBROUTINE CRANK2(NX,N1,DX,RATIOA,RATIOC,RATIOD,EPC,CW1,CW2)
    DIMENSION CW1(101),CW2(101),EPC(101),RHS(101),A(101),B(101),C(101)
!C
!C SETTING UP THE MATRIX
!C FIRST SET THE BOUNDARY CONDITIONS AT THE TOP AND BOTTOM ROWS
    A(1)=-2.*RATIOA
    B(1)=1.+2.*RATIOA
    C(1)=0.0
    !A(NX)=1.0
    !B(NX)=0.0
    !C(NX)=-1.0
!C
    DO 10 I=2,N1
        A(I)=RATIOA/(1.+2.*RATIOA)
        B(I)=-1.0
        C(I)=RATIOA/(1.+2.*RATIOA)
10 CONTINUE
!C
!C COMPUTING THE RIGHT HAND SIDE
!C
    RHS(1)=-1.*CW2(1)
    RHS(NX)=CW2(NX)
!C
    DO 20 I=2,N1
        RHS(I)=(RATIOA/(1.+2.*RATIOA))*(CW2(I-1)+CW2(I+1))+&
        &((1.-2.*RATIOA-RATIOD)/(1.+2.*RATIOA))*CW2(I)+(RATIOC*CW1(I)+RATIOD*EPC(I))/(1.+2.*RATIOA)
20 CONTINUE
!C
!C ADDING CONSTANTS TO RHS AND SUBSTRACTING FROM MATRIX
!C
!C SOLVING THE SYSTEM AND REPEATING FOR THE DESIRED NUMBER OF STEPS
!C
    CALL TRDIAG(N1,A,B,C,CW2,RHS)
    RETURN
    END

!C
!C SUBROUTINE OF TRIDIAGONAL SYSTEMS OF EQUATION
!C
    SUBROUTINE TRDIAG(N,A,B,C,X,G)
    DIMENSION A(500),B(500),C(500),X(500),G(500),BB(500)
!C TRIDIAGONAL SYSTEMS OF EQUATIONS ARE SOLVED BY GAUSS-
!C ELIMINATION. THE PROGRAM SOLVED IS MX=G WHERE M=TRI(A,B,C).
!C N=NUMBER OF EQUATIONS SOLVED(UP TO 500)
!C FORWARD ELIMINATION;BB IS A SCRATCH ARRAY NEEDED TO AVOID DESTROYING
!C B ARRAY.
!C
    DO 10 I=1,N+1
        BB(I)=B(I)
10 CONTINUE
    DO 20 I=2,N+1
        T=A(I)/BB(I-1)
        BB(I)=BB(I)-C(I-1)*T
        G(I)=G(I)-G(I-1)*T
20 CONTINUE
!C
!C BACK SUBSTITUTION
!C
    X(N+1)=G(N+1)/BB(N+1)
    DO 30 J=N,1,-1
        X(J)=(G(J)-C(J)*X(J+1))/BB(J)

```

附錄七「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究(二)」 評選會議紀錄

時間：民國九十一年五月二十四日上午九時三十分

記錄：李秉修

地點：臺北翡翠水庫管理局第一會議室

主席：周祖勇召集委員

出席委員：如簽到表

主席致詞：略

主辦科報告：略

廠商簡報：略

綜合討論：

發言委員：台灣大學土木工程研究所 郭振泰教授

- 一、 磷的沉降及釋放為非均勻性(時間及空間)，如何了解其變化？
- 二、 底泥示蹤劑實驗之底泥攝影及取樣並不容易，是否有其他參考文獻？
- 三、 若利用 WASP5 模式，其水流資料如何取得？如何模擬底泥之分層？其他變數(葉綠素 a、氮等)之關係(對 P 而言)如何？
- 四、 一維模式在底泥與水面之交換不是「分子擴散」，而是受到紊流、垂直流速、生物擾動之影響，故應稱為延散係數。

吳教授答覆：

- 一、 本計畫並不作水庫中磷的沉降實驗，因此這部份的數據將引用前人文獻來參考。主要還是考慮底泥磷的釋放量，上下游底泥水邊界層水流及溶氧等狀況可能不同，故會在模式中盡量考慮這些環境參數的變化對磷釋出能力的影響。
- 二、 目前還未開始蒐集相關文獻，會盡快蒐集與深水攝影及示蹤劑施放有關資料進行研究。
- 三、 已知在先前翡翠水庫相關研究計畫中發現，WASP 模式在應用於翡翠水庫水溫及水流狀況模擬有困難。但對水質模擬良好。因此，如果沒有水理資料，擬考慮以零維 WASP5 模式或其他可同時模擬水理及水質的適用模式取代。在水質模式中會考慮浮游生物對磷及氮營養鹽的攝取。底泥分層將應用本計畫所發展的底泥模式來模擬。
- 四、 是的，應稱為垂直向的水流延散係數。

發言委員：台灣大學海洋研究所 白書禎 教授（請假 提書面審查意見）

- 一、 本計畫延續前一年研究，對水庫底層厭氧區日益擴大提出合理模式解釋，並嚴密監測後續發展。
- 二、 計畫書針對底泥磷之釋出為主體，目標正確，採行方法合宜。工作團隊已累積豐富經驗，相信可達成計畫書所述之成效。
- 三、 評審意見為「通過」。因只有一家競標，建議以議價方式進行。

吳教授答覆：

- 一、 遵照辦理。
- 二、 謝謝委員之肯定。

發言委員：中興大學土壤環境科學系 王敏昭 教授

- 一、 簡報內容第 20 頁：測定孔隙水溶解性硫 S₂-之目的為何？是否亦藉此推估孔隙水還原狀態？
- 二、 簡報內容第 25 頁：準確性(回收率)定為 80~120%，其是為標準參考物質(SRM)之回收率？或僅為添加標準品(spiked)？方法偵測極限(MDL)之表示(孔隙水之部份)請修正。
- 三、 簡報內容第 29 頁：使用 bentonite 作為示蹤劑應為可行。建議使用時注意其粒徑大小(particle size)，以免產生沉降作用(sedimentation)。
- 四、 服務說明書第 8 頁：倒數第 6 及 7 行，黏土(黏粒)吸附(特性吸附)磷能力

強弱之排序應是：高嶺土(kaolinite)大於蒙特土(montmorillonite)。

五、服務說明書第 15 頁：第 2 行，以氮(N₂)氣來去除氧以達成厭氧環境，技術上頗為困難，建議應從減少管柱容積，改進打氣石之除氧氣泡(愈小愈佳)著手。

吳教授答覆：

一、在底泥中會考慮含磷礦物的溶解與沉澱化學平衡。硫化鐵是底泥含鐵的重要礦物組成，因此所測定硫化物濃度將會代入反應平衡式中，參與與磷有關的化學平衡的計算。

二、本計畫在實驗的品保品管中係規劃添加標準品方式以測試回收率；另方法偵測極限之表示遵照辦理。

三、在選擇示蹤劑實驗用的黏土樣品時，會考慮選用均一且粒徑較小的黏土進行實驗。事實上示蹤劑實驗所用的施放量及施放時間都非常短，因此如果用黏土當示蹤劑應不致和北宜快速道路施工時所用的皂土(也是黏土的一種)相混淆。其次向國外購買的黏土是溫帶國家的礦石，和國內的土質也應不相同。

四、參採修正。然而本計畫主要是考慮底泥總體吸附特性，並未考慮特定吸附能力。

五、以氮(N₂)氣來去除氧以達成厭氧環境，並不容易。溶氧最多僅能降到 1 mg/L。底泥管柱大小已固定，無法改變。故將從曝氣方式上進行改善，及加入亞硫酸鈉方式以盡量達成厭氧環境。

發言委員：台北科技大學環境規劃與管理研究所 陳孝行 教授

- 一、 本計畫延續以往之研究，可行性甚佳。
- 二、 示蹤劑之使用及如何追蹤請在期中報告中補充說明。
- 三、 實驗室底泥管柱實驗中，加入亞硫酸鈉，是否使原水之成份複雜化？
- 四、 利用 apatite-P、organic-P 等評估入流污染源之指標，可否較為量化？如有機磷達到若干百分比時，代表某種污染？
- 五、 底泥磷帶來之污染已相當確定，可否在未來防治對策上作一些敘述。

吳教授答覆：

- 一、 遵照辦理。
- 二、 遵照辦理。
- 三、 添加亞硫酸鈉會促使若干物質被還原，改變底泥氧化還原電位。但添加產生的硫酸根及鈉離子除可能改變離子強度，應不致大幅影響原水組成。
- 四、 國外已有利用底泥污染指標來評比底泥品質的方法，例如使用有機質或生物毒性。從過去底泥監測數據來看，翡翠水庫底泥還不致成為污染來源。是否有利用磷分選結果來量化為污染指標，目前還未蒐集相關資料查證。然而磷的分選與集水區地質特性有很大關係。例如翡翠水庫主要是鐵磷，鈣磷偏低。但德基水庫主要為鈣磷。其次，有機磷來源並非完全來自集水區，目前分析磷物種的方法也不能區分是來自人為或天然的鈣磷。此部份將蒐集其它國家相關文獻資料再做評估。
- 五、 本計畫將在第三年計畫中進行有關防治對策的研究。

發言委員：臺北市政府工務局衛生下水道工程處 陳永輝 廠長

- 一、 翡翠水庫之權管單位究為北市環保局或其他單位，請予澄清。

吳教授答覆：

- 一、 翡翠水庫之主要權管單位中央為環保署，地方為縣環保局及台北水源特定區管理局。

發言委員：臺北翡翠水庫管理局 林瑞廷 技正

- 一、 示蹤劑使用之選擇應考量其適用性與安全性，以免造成水質安全疑慮。

吳教授答覆：

- 一、 遵照辦理。

發言委員：臺北翡翠水庫管理局 郭常康 科長

- 一、 示蹤劑使用應先經環保單位同意，但若未獲環保單位同意時是否有替代方案？
- 二、 水庫底層水是否適合作為飲用水水源 若爾後監測底泥時發現不適合作為飲用水水源，應如何處置以讓民眾了解？

吳教授答覆：

- 一、 本計畫會盡量選用天然而無毒的物質作為示蹤劑。因此對水質的影響微乎其微。但如果環保單位不同意進行實驗，以求取水庫內的延散係數，本計畫只好選擇例如於密集時間內使用濁度或懸浮固體的分層數據來估算水流延散係數。
- 二、 以過去大壩底層水的水質監測數據評估，水中重金屬的濃度不高。其次進入淨水廠還有沉澱過濾等處理步驟。不過為了安全起見，仍建議翡翠局加強分層水質的監測，更應注意避免優養水質發生，藻類大量繁殖。

發言委員：臺北翡翠水庫管理局 王為森 股長

- 一、 水庫底泥中磷來源是人為或天然 能否加以區別是否需要特殊儀器？

吳教授答覆：

- 一、 底泥磷的萃取分選方法無法區別屬於人為或天然的磷。過去曾使用黏土礦物物種分佈作為判識集水區可能污染來源的方法，但靈敏度太低而失敗。除非有大量外來污染，方可鑑別出相異之處。

評選委員分數統計：總平均八七、八七五分。

主席宣佈評選結果：

- 一、 本次評選會議結果由國立台灣大學取得本案優先議價權。
- 二、 得標廠商請將各委員意見列入本案研究執行時參考。

散會：十一時。

附錄八、九十一年度「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究(二)」委託研究案期中審查會會議記錄

時間：中華民國九十一年九月四日上午九時三十分

地點：台北翡翠水庫管理局管理室

主席：郭局長瑞華

紀錄：李秉修

出席人員：

台灣大學環境工程研究所	李公哲教授
中興大學土壤環境科學研究所	王敏昭教授
逢甲大學環境工程與科學系	吳俊哲教授
台北科技大學環境規劃與管理研究所	陳孝行教授

臺灣大學環境工程研究所	吳先琪教授 陳怡靜
經濟部臺北水源特定區管理委員會	周文祥
臺北市政府研究發展考核委員會	程瑞娟
臺北自來水事業處	江清蓮
臺北市政府環境保護局	(請假)
臺北縣政府環境保護局	(請假)
臺北翡翠水庫管理局	林瑞廷、陳秋種、賴炎定、李健元、 洪章哲

發言單位：台灣大學環境工程研究所 李公哲教授

- 四、 本計畫宜以推測磷的來源為最主要目標之一。建議在期末報告儘可能加以確認。
- 五、 過去研究顯示水庫磷之來源在夏季以水庫底泥為主，故建議儘可能在模式中考慮季節之影響。
- 六、 本計畫擬以土壤監測基準及整治標準為參考值，惟因底泥環境與土壤環境不盡相同，故建議收集國外(如日本)相關水庫底泥整治相關標準以為參考。
- 七、 建議底泥磷的變化與其他有關藻類物種及數目之相關計畫加以比對或連結，以發揮本計畫之相乘效果。
- 八、 有關示蹤劑之選擇如用高嶺土等，宜考慮檢測時可能之干擾。

吳教授答覆：

- 一、 謝謝指正。磷的人為與天然的來源推測的確很重要，這部份我們會繼續進行，據知北科大過去曾做過集水區磷的來源之推估，建議在有關的集水區研究計畫中亦能加強此一工作項目。
- 二、 本研究在下一年度工作中將會在模式中儘可能考慮季節之影響。例如水溫的變化有季節性的差別，會影響水的分層。但是降雨等變異度很大，有困難性。
- 三、 底泥基準依據瞭解在美國、加拿大及日本等國都已有。但以美國為例，目前他們還在研議的階段，且可能不預期會採建立固定的標準，而是考慮底泥中化合物本身的活性。目前本計畫擬先用國內的土壤污染基準來評估，以確認是否有外來的污染。
- 四、 本實驗室已在進行底泥與水質關係的研究。亦曾向吳俊宗博士索取其過去在水庫監測藻類數據進行分析。未來仍會持續進行。
- 五、 示蹤劑的施用量預估可能只有數公斤，並不多。施用地點只有在底泥與水的界面而已，非大區域施放，相信不會對水質造成太大影響。使用示蹤劑時的確可能會受到水中濁度的影響，在實驗前我們會先作報備說明。

發言單位：中興大學土壤環境科學研究所 王敏昭教授

- 一、 截至目前，底泥之總磷量(total P, TP)上昇至幾乎是最高值，是否與今年特異之大旱有關。
- 二、 底泥與水體之間本是平衡的體系，亦即在一定環境條件下(pH, ORP 及溫度)，水體會有一定磷濃度。欲監測某些特定採樣點是否有磷污染，宜有一或二個背景監測位址，更能彰顯特定污染位址之磷污染潛勢。
- 三、 請說明底泥之粒徑分析時，是否預先以分散劑分散。有否使用非分散劑會影響各粒徑範圍之百分比。
- 四、 中央研究院植物所吳俊宗教授目前亦從事水庫藻類之研究與監測。建議將研究結果與吳俊宗教授之研究結果互相聯結解釋，更可詮釋目前之研究結果。
- 五、 建議仍暫用土壤之重金屬含量標準(監測基準)評估底泥之重金屬狀態。但是可於期末報告補充有關河川底泥之其他國家標準。

吳教授答覆：

- 一、 不清楚。因水質的變化還與集水區入流負荷量有關，希望能在第三年的水質模擬工作時，進行模擬及解釋。
- 二、 過去本實驗室即曾希望在集水區中找一些水質的背景監測位址。然而調查結果顯示，在翡翠水庫中不易找到水質或底泥的背景監測位址，因每個地方都有茶園或果園，既使找到也可能不會有底泥累積。
- 三、 本計畫在作粒徑分析時，並沒有使用分散劑。原因之一是希望瞭解團粒受重力的影響。會在期末報告中提出說明。
- 四、 本實驗室已在進行底泥與水質關係的研究。亦曾與吳俊宗博士合作分析其過去在水庫監測藻類數據。未來仍會持續進行。依據底泥有機質分析結果，大壩有機質較高可能就是藻類的貢獻。其次我們所作藻類的動態模擬，使用 stella 軟體運算結果也顯示，底層水對上層 algal 有明顯的影響。。
- 五、 參採修正。

發言單位：逢甲大學環境工程與科學系 吳俊哲教授

- 一、 底泥孔隙水溶解性磷與底泥酸鹼值、氧化還原電位及孔隙水主要離子濃度有關，本計畫未來是否可以建立其數學相關性，國內外文獻是否有此資料佐證。
- 二、 模式之部份，建議增加『圖形』說明，以利閱讀。並建議有系統地列出各控制方程式(包括各相之磷)。底泥需氧量之速率如何決定？可否補充說明。
- 三、 本計畫使用一維模式進行底泥磷的傳輸，未來如何結合二維水質模式的介面宜預作考量。
- 四、 實驗室模擬管柱實驗使用三種方式進行，水中溶解氧氣濃度分別為何？是否有明顯差異。厭氧磷通量是好氧磷通量的 10 倍，此數據是否太保

守？

五、本計畫執行內容相當完善。執行進度亦符預期。

吳教授答覆：

- 一、國外已有相關文獻論及孔隙水溶解性磷與其他參數如酸鹼值、氧化還原電位等之關係。除了使用經驗公式之外，主要是利用如 MINEQL 水化學軟體計算各主要離子(包括磷在內)的平衡濃度。
- 二、遵照辦理。將在期末報告中補充。
- 三、遵照辦理。
- 四、因為實驗管柱仍無法完全模擬現地完全厭氧的環境，因此模擬值有低估的可能。過去文獻(李佳芳，1994)亦曾使用底泥實驗管柱方式求得厭氧磷通量，約為 1 ug/cm²day，比本次實驗結果大 10 倍。未來仍會考慮以水質模式來驗證底泥磷通量，再作確認。

發言單位：台北科技大學環境規劃與管理研究所 陳孝行教授

- 一、今年度之 ORP 較高，孔隙水溶解磷較低。然而今年水庫之總磷並未降低，是否代表底泥磷之釋出影響不大？
- 二、以 MINEQL 化學軟體估計水中物種可加以考量動力學上之問題。
- 三、通量管柱研究中，是否可以提供 pH 及 ORP 之數據，以加強與現場資料之比對。
- 四、示蹤劑之使用請留意水源保護區之相關規定。

吳教授答覆：

- 一、無法確定。因為底泥磷的釋出量隨地點而異。上游水深較淺，磷內部負荷可能相對較下游為高。其次因暴雨造成底床的沖刷也可能將富含磷底泥再懸浮，其對水質的影響必須再詳細評估。本計畫認為今年自 1,2 月開始，水質即明顯惡化，若能經過詳細磷的質量平衡計算方有助解釋成因。
- 二、參採修正。
- 三、未來若繼續進行管柱實驗時，會考慮補充分析。
- 四、示蹤劑的施用量預估可能只有數公斤，並不多。施用地點只有在底泥與水的界面而已，非大區域施放，相信不會對水質造成太大影響。在實驗前我們會先作報備說明。

發言單位：經濟部臺北水源特定區管理委員會 周文祥先生

- 一、報告中顯示灣潭的鈣結合磷較高係由於農業污染造成，是否可以進一步量化其對於水庫底泥磷含量之影響如何，建議予以量化分析後，俾利後續研究或管理之參考。
- 二、水庫水質磷之改善，可否以增加水庫區域曝氣設施，再經由底泥清淤方

式達到去除磷之目的？建議研究單位可納入考量，如可行，亦可於報告中建議翡管局研辦。

吳教授答覆：

- 一、 參採修正。
- 二、 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。

發言單位：臺北市政府研究發展考核委員會 程瑞娟小姐

- 一、 由於市府預算逐漸萎縮，各局及委託研究案的經費逐年呈遞減，不過由於翡翠水庫的供水與大台北地區人民的民生用水關係十分密切，研考會對翡管局的研究案還是十分支持，這點希望翡管局能多體諒。

吳教授答覆：

- 一、 感謝台北市研考會之支持。

發言單位：臺北自來水事業處 江清蓮先生

- 一、 期中報告有關水庫底層磷釋出量約為管柱實驗值的十分之一，是否因管柱實驗係在持續氣曝對流情況，有別於水庫底層之靜態所致，值得深入探討。
- 二、 水庫底層呈厭氧狀態導致底泥之氧化還原電位(ORP)趨向還原電位，由此推論底泥還原電位(ORP)並非底層磷之釋出唯一原因。有關底泥磷釋出管柱實驗設計，建議進行厭氧態與好氧態之磷釋出量比對實驗。

吳教授答覆：

- 一、 本管柱實驗採曝氣方式擾動上層水是希望取得混合均勻的水樣，和底層水靜態環境是有些許出入。但現場水庫底層還處於有氧存在狀況，和實驗室長期曝氮氣擬製造無氧環境是不同的，故磷通量也就不一樣。在無氧下磷通量會比較大。
- 二、 去年計畫便曾經作過厭氧態與好氧態之磷釋出量比對實驗。結果好氧態的磷通量低於厭氧磷通量，顯示氧存在的確對磷釋出有阻滯影響。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 林瑞廷 技正

- 一、 八月份底泥採樣是在大旱期間上游原淹沒區已變成小溪沖刷底泥入庫及其後之颱風亦將上游庫底底泥沖移入下游之後，可否由採樣結果釐清此時段底泥對水質之影響。
- 二、 集水區內磷確切來源及底泥磷釋出量有多少？其對水質之影響多大？國內外文獻是否有相關集水區水源水質保護及整治方法提供本局參考。
- 三、 根據報告顯示底泥磷在好氧狀況時較不易釋出，是否有實用之技術或水庫操作方法可予以改善水體溶氧狀態，請提供本局參考。
- 四、 期中報告第 30 頁水庫內部總磷負荷計算之水域面積是否配合當時水位下之水域面積加以估算。

吳教授答覆：

- 一、 本計畫無法從底泥採樣結果說明底泥的新舊及進入時間。不過本計畫會將兩次的採樣結果底泥各分析項目的前後變化予以探討說明。
- 二、 集水區農業對磷的貢獻量的影響在本計畫工作中不易加以評估，建議可配合北科大的計畫結果一起作比較。有關磷進入水庫對水質的影響將在下一年度工作進行。
- 三、 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。
- 四、 參採修正。本研究會在期末報告中補充說明。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 李健元 股長

- 一、 有關示蹤劑之施放請速決定使用何種示蹤劑及用量、日期等事宜，並正式來函告知本局。
- 二、 由第 33 頁結論 7.底泥的鐵及鈣結合磷比例有較集水區土壤增加的趨勢，談及北宜高速公路中雪山隧道之湧水含有高量鐵質，而該湧水施工時均由二、三號豎井及坪林端出口導入水庫，希望本研究案日後能釐清此現象是否與雪山隧道之湧水導入水庫有關。
- 三、 由第 10 頁及第 19 頁談及以 ORP 推測底泥之新舊，想請教的問題是：本水庫於乾旱後之娜克莉颱風期間水質採樣時發現水域內各採樣點之總磷均偏高，尤其是火燒樟總磷更達到 421.49ug/L，本局研判是受 EL119 至 EL170 間水庫邊坡及河道的底泥被沖至下游與集水區內長期乾旱後遇豪雨將全部污染源帶入水體造成，教授之意見如何？而上述原有底泥與娜克莉颱風豪雨沖入之砂土，於 ORP 檢驗中能否區別？
- 四、 第 5 頁所提每年例行兩次採樣（底泥）第二次（夏秋季）採樣通常底泥總磷量較第一次（春季）為高，而一般水質採樣時於春耕期（88/2 月、91/2 月）總磷較高，兩者之關係如何演變即水中之總磷是否要經數月後才沉入底泥中，或經藻類吸收、死亡沉降累積於底泥。

吳教授答覆：

- 一、 遵照辦理。
- 二、 地下水多含有高濃度的鐵、錳離子。建議可由水質監測紀錄分析是否其水中濃度有增加。
- 三、 ORP 的檢測結果雖然表明第一次採樣底泥的還原狀態可能不明顯。但無法推測是來自何處底泥及其運動的路徑。且因僅作單一點的檢測，沒有隨深度分布，亦無法作為區分是原有底泥或沖刷的砂土。由於去年計畫曾使用黏土礦物分析嘗試鑑別特定子集水區或支流的土壤性質，結果集水區內的土壤性質非常相近。要實際鑑別這些砂土的沖刷有其困難性。
- 四、 以磷的循環為例說明，春天進入的外部負荷，在水中提供營養鹽供藻類生長，夏天的繁殖與死亡沉降量的增加，使得底泥磷含量也增加。表示進入水庫的磷並未消失，只是轉化為不同型式存在。夏秋天底泥磷含量

比春天高是正常的生態消長機制的結果。

主席結論：

本研究案期中審查原則通過，請計劃主持人參照審查委員建議作修正，充實後納入期末報告書，並按規定執行。

附錄九、九十一年度「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究（二）」委託研究案期末審查會會議記錄

時間：中華民國九十一年十二月十七日上午九時三十分

地點：臺北翡翠水庫管理局管理室

主席：周副局長祖勇

紀錄：李秉修

出席人員：

臺灣大學環境工程研究所

臺灣大學海洋研究所

臺灣大學土木工程研究所

中興大學土壤環境科學研究所

臺北科技大學環境規劃與管理研究所

經濟部臺北水源特定區管理委員會

臺北市政府研究發展考核委員會

臺北自來水事業處

臺北市政府環境保護局

臺北縣政府環境保護局

臺北翡翠水庫管理局

李公哲教授（請假）（提書面意見）

白書禎教授

郭振泰教授

王敏昭教授

陳孝行教授

周文祥

劉晃美（請假）（提書面意見）

江清蓮

（請假）

（請假）

林瑞廷、李衍振、陳秋種、郭常康、

李健元等

計畫主持人

助理代為報告與討論）

臺灣大學環境工程研究所

吳先琪教授（請假，由陳怡靜研究

傅崇德、王美雪、林明郁

發言單位：臺灣大學環境工程研究所 李公哲教授（請假）（提書面意見）

六、 依本年度「翡翠水庫藻類與水質關係之長期監測(II)」之研究顯示，水庫中之藻類群落已起變化，藍綠藻類之優勢降低，而從藻細胞密度評估，綠藻已成為最優勢，而上述之變化是否與底泥性質之變化有關聯性，及是否與其他外來污染有關，建議本計畫可加以研析，分析可能之原因，以為水管局參考。

七、 灣潭底泥中之鈣結合磷較其他點為高，本計畫歸因於可能為人為農業污染進入底泥，惟是否鈣結合磷有可能因成岩作用中逐漸產生，建議併研

析之。

- 八、 今年年初逢乾旱，然六月後又降大雨，故自集水區可能帶來大量營養鹽，是否對底泥性質有影響，且上述之污染物有一段時間影響底泥性質及水庫水質，建議本計畫儘可能加以評析。

陳研究助理答覆：

- 一、 的確，依據觀察，翡翠水庫水質正在進行大規模的變化。但從今年底泥性質的分析及與過去比較，並未發現底泥有明顯的污染物增加的情形，甚至底泥磷的含量也較去年要低些。因此本計畫推測，底泥內部負荷應不是水質惡化污染主要的來源。並建議翡管局應加強入流水質的監測工作。
- 二、 在水庫中各底泥測點均有鈣結合磷存在。並可由水化學模式 MINEQL+ 模擬得到印證，這些鈣結合磷可能因成岩作用逐漸產生。但灣潭的鈣結合磷量較高，且孔隙水中的鈣及鎂離子也較多，則極可能是上游農業施肥進入水中的結果。
- 三、 在五月及八月各一次採樣中，有觀察到上層底泥是黃色、新鮮及較不還原的狀態。顯示這些底泥是剛進來不久的。五月採到的底泥應是去年納莉颱風帶進來的，八月在大壩採到的底泥則可能是今年六月進來的。這些底泥的磷含量都不高，也沒有明顯季節變化的特性。短期內大雨及乾旱的影響對底泥累積營養鹽效果不大。但後期如果因藻類大量繁殖及沉降，推測則可能會累積大量有機磷到底泥中，也會加速底泥還原，釋放出磷。需要追蹤注意。

發言單位：臺灣大學海洋研究所 白書禎教授

- 一、 報告內容紮實完整，尤其水下攝影部份令人印象深刻，為一份精彩的期末報告。
- 二、 水庫磷為主要控制因子，應繼續深入探討。

陳研究助理答覆：

- 一、 謝謝。
- 二、 遵照辦理。下一年度將對水庫水質的磷進行模擬，確認底泥負荷量對水質的影響。

發言單位：臺灣大學土木工程研究所 郭振泰教授

- 一、 化學變化程式 MINEQL+ 之檢定及驗證精度如何？實測的化學物質是否足夠來驗證模式？
- 二、 示蹤劑擴散試驗的目的在了解擴散(延散)係數，但如何掌握時間空間上

的變異，例如垂直方向變溫層之影響，仍值得深入分析。

- 三、目前垂直一維底泥模式計算出的磷釋放量 $1.0E-2 \text{ ug/cm}^2\text{day}$ ，其準確度如何？如何作模式之檢定驗證？

陳研究助理答覆：

- 一、MINEQL+是一個計算水化學平衡的模式，基於質量守恆及熱平衡原理所發展，並受到廣泛應用。但我們會考慮使用具相似功能的其他軟體，例如 Minteq 模式來確認計算的結果。
- 二、水體中污染物的延散擴散具有時間空間上的變異。但本計畫的目的主要是探討底泥-水邊界處的污染物擴散延散行為，不是探討整個水體。欲探討垂直方向變溫層的影響可能要藉由觀察類似濁度等天然的污染物在水中的擴散延散行為，這些現地分析的數據可以作深入分析。
- 三、有關底泥模式的檢定及驗證工作希望在下一年度中繼續進行。

發言單位：中興大學土壤環境科學研究所 王敏昭教授

- 一、期末報告已頗完整，但是仍請於期末報告定稿增加「摘要」一章。
- 二、第 3 頁，倒數第四行：鋁英石為 allophane，並非 gibbsite。前者為 Si 與 Al 莫耳比為接近 1 之礦物。後者之化學式為 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。請區分查明是為鋁英石或 gibbsite。
- 三、第 23 頁，為何特別強調粒徑小於 $38\mu\text{m}$ 者？一般粒徑分析之分級為 $2\text{mm}-53\mu\text{m}$ 為砂粒， $53\mu\text{m}-2\mu\text{m}$ 為粉粒， $< 2\mu\text{m}$ 為黏粒。
- 四、第 66 與 67 頁，表 4.5 與表 4.6 所列重金屬數值之有效數字位數，請參考環保署環檢所有關檢測數據之有效數字位數位之規定。例如，砷(As)及汞(Hg)之位數應為 3 位。
- 五、附錄一、檢驗項目之品保品管數據，底泥鉛及銅之重覆分析之相對偏差超過 20% 之品保目標，是否有採取相關措施。
- 六、請於期末報告定稿，增加列入期中與期末簡報時，各委員所提意見與執行單位改善措施之執行情形。

陳研究助理答覆：

- 一、遵照辦理。
- 二、本計畫的黏土礦物分析結果是指 gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。謝謝指正。
- 三、本計畫發現大部份的底泥比例是落於 $16-38\mu\text{m}$ 之間。本計畫在實驗時並沒有加分散劑，目的是想瞭解現地團粒的大小。以後會在報告中加註說明分析的方法，以免造成誤導。
- 四、謝謝指正。
- 五、謝謝指正。本計畫已重新要求對這兩個分析項目再作實驗確認。銅的重覆分析已達到品保要求 20% 之內，但鉛的分析還是不理想，回收率也較

差。已查詢確認可能是 AA 燈管老舊造成。下年度會改進。

六、 遵照辦理。

發言單位：臺北科技大學環境規劃與管理研究所 陳孝行教授

- 一、 第 17 頁之 CDB 為何。第 22 頁重覆氟之部份。
- 二、 請補充期中報告之委員意見回覆。在報告中可否加入預期成果。
- 三、 由溶解性鈣或鈣結合磷，推論灣潭地區受茶園影響，是否進一步瞭解其肥料成份(如台肥一號、豆餅等)，以供主管單位參考。
- 四、 底泥和藻類之相關性，可否加以解釋。
- 五、 報告中提到「新鮮底泥」，是否在報告中和「合理淤積量」作比較或文字敘述，以免造成誤導。

陳研究助理答覆：

- 一、 參採修正，第 17 頁之 CDB 將於期末報告定稿本中詳細說明。
- 二、 參採修正。
- 三、 下一年度擬查詢茶園施用的肥料成份，進行確認。
- 四、 底泥有機磷可能有大部份是死亡沉降的藻體所貢獻。而這些磷再被分解回到水中又繼續成為藻類的營養，形成一個生態系統。當藻類較多時，已觀察到底泥有機磷量也明顯增多，具有正相關性。
- 五、 謝謝指正。

發言單位：經濟部臺北水源特定區管理委員會 周文祥先生

- 一、 由中研院植物所吳教授之研究成果顯示卡爾森指數之值，本身即會隨季節變動，且於暴雨濁度高時，其數值更不適於表示優養化之關係，故本研究報告第 4 頁所示之卡爾森指數已達優養化等級，有待斟酌。
- 二、 又由中研院吳教授之研究報告顯示，BOD 氨氮於近年已有降低之趨勢，唯一升高者僅為磷且為短期暴雨、颱風沖刷所致。此現象以物化及生化之現象解釋，係因磷除了轉化為固態以外(包括被生物吸收利用、吸附)，若未於溶解性被排出水庫，則其以 Mass Balance 之觀念，必然是蓄積的。
- 三、 另由本報告研究成果顯示水中溶氧之存在，可有效遏止磷之釋放，故建議於缺水或枯水期，於水庫設置底部曝氣設備以控制底泥之釋放。
- 四、 中興及黎明顧問公司於 84 年起即有相關澄清湖等水庫底泥之有機物分佈研究，其結果顯示分佈表層約 40-50 公分，而本報告約為 20 公分，顯示翡翠水庫目前有機物沉積現象比起其他水庫來得好。惟暴雨及颱風沖刷在台灣是每年無可避免之現象，故為解決此問題，依據中興及黎明之研究顯示，只要清除底泥表面三十公分之底泥即能達到 96% 水質及優養化改善。此成果已於今年台灣水庫之枯水期清淤後，再蓄水其水質卡爾

森指數均明顯下降獲得印證。故建議長期翡翠水庫仍應進行底泥之清除，並於颱風暴雨期間進行排砂工作。

陳研究助理答覆：

- 一、 參採修正。
- 二、 本研究在下一年度工作中會就集水區入流水質進行分析，希望可統計入流磷量及隨時間之變化，有助解釋水庫整體的磷的循環。
- 三、 本研究將在下年度進行水庫水質模擬，希望能作為翡管局改善策略研究參考。
- 四、 非計畫之研究範圍。

發言單位：臺北市政府研究發展考核委員會 劉晃美小姐（請假）（提書面意見）

- 一、 本案研究單位已調查的很週詳，研究單位在第五章亦有相當篇幅的結論敘述，惟請研究單位臚列相關具體建議，俾便翡翠水庫在實際執行面上能夠有所依循。
- 二、 總結研究報告請研究單位將本研究中、英文摘要附於研究報告主文前，歷次審查會會議紀錄附載於研究報告之後。
- 三、 請研究單位將本報告基本資料上網(網址：<http://www.grb.gov.tw>)，送行政院國家科學委員會。另請翡翠水庫將總結報告送國科會及國家圖書館各二冊。

陳研究助理答覆：

- 一、 遵照辦理。
- 二、 遵照辦理。
- 三、 遵照辦理。

發言單位：臺北自來水事業處 江清蓮先生

- 一、 本研究以高嶺土為示蹤劑配合水中攝影，發現三十公尺水深下底泥上方之微粒呈現規則性單向流動，異於靜止水體中微粒之布朗運動，建請探討當時水庫是否進行放水及放水高度所牽引水流。
- 二、 期末報告所列今年水庫水體磷濃度含量上升，應與乾旱季節水體平均滯留時間有關，建請後續研究再對水庫水體中磷總量及進放流水含磷總量進行探討。由於導電度及酸鹼度之連續監測設備費用不高，建請翡管局考量籌設。
- 三、 冬季表水層水溫驟降，導致含磷量較高之底層水上揚，若能在藻類繁殖前自高程放水，或可降低優養化之衝擊。建請後續研究能建立類似之異常因應對策。

- 四、藉由氣曝降低水體表層之二氧化碳含量，及對水體磷釋出量之控制，可能牽動藻類生長機制，建請先於實驗室進行探討。若氣曝能實際應用於水庫表層其所帶出之微粒，不致對下游淨水處理造成太大衝擊。

陳研究助理答覆：

- 一、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。
- 二、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。
- 三、非計畫之研究範圍。
- 四、非計畫之研究範圍。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 林瑞廷 技正

- 一、請於期末總結報告加入中英文摘要，第五章加入具體建議，並將歷次審查會會議記錄附錄於書末。
- 二、水庫水質恐在明年持續惡化而產生藻華之可能，是否有具體之方案提供本局參考？

陳研究助理答覆：

- 一、遵照辦理。
- 二、本研究將在下年度進行水庫水質模擬，希望能作為翡管局改善策略研究參考。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 郭常康 科長

- 一、經由示蹤劑試驗是否可以了解底泥磷於垂直深度方向之擴散現象，供本科擬定操作策略時之參考依據。
- 二、據了解蘭潭水庫及澄清湖水庫曾經試辦過曝氣以改善水質，但成效不佳，故曝氣法是否適合於本水庫實施應再作詳細評估。

陳研究助理答覆：

- 一、本次底泥水界面的示蹤劑實驗發現，底部流速很快，故橫向的擴散延散遠大於垂直向的延散。有關水庫大區域的垂直延散視水流及水溫變化影響很大，亦非本計畫實驗目的。但本計畫認為仍可以考慮使用濁度的變化來推算其短時間內的延散係數，上述建議提供貴局參考。
- 二、本研究將在下年度進行水庫水質模擬，希望能作為翡管局改善策略研究參考。但實際應用及工程評估仍建議應另立專案計畫辦理，以收實效。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 李健元 股長

- 一、首先補充說明：

- (1) 水庫今年有於上游地區灣潭地區清淤且歷年來均於颱風或暴雨期間選擇排放濁度較高的水體，估計排渾蓄清成果每年至少排出十萬多噸以上之泥砂含量，但每每因下游自來水事業處之淨水場無法快速處理泥餅恐影響自來水供水量，而與本局協調放水濁度事宜。
- (2) 今年至今為止水庫發生兩次優養月份（六、七月）但因今年葉綠素 a 之檢驗數據有偏低現象，已會同中研院吳博士及檢驗單位找出原因，係過濾萃取時步驟應再精確，所以本年五月份亦有優養之現象，此亦為水庫水質有逐年惡化之隱憂，故應更加強集水區污染源之管制。

本局每月水質採樣作業於本年 7 月 8~10 日時正巧逢娜克莉颱風，雖不合採樣標準規定須天晴 72 小時之需求，但仍送至自來水事業處水質中心檢驗，所得數據供作為集水區上游沖下污染源之證據，並提供委託研究案教授參考，而該次顯示總磷之污染相當嚴重。

- 二、 本年水庫於大乾旱後，於水位標高 119 公尺以上覆著於河床及邊坡上之底泥於暴雨後已被沖刷至水域中下游處，於報告中結論 3 溶解磷濃度較過去為低，請教於 8 月份底泥取樣時是否有發現新舊層之區別而有上述現象產生。
- 三、 示蹤劑之實驗依今年施作結果，請教何種季節、深度適合施放示蹤劑，建議明年應依季節溫度、地點位置及深度不同施放示蹤劑，並多作幾次實驗以取得數據。

陳研究助理答覆：

- 一、 無。
- 二、 未看到有明顯的底泥分層現象。
- 三、 示蹤劑的觀測視當時的時間及空間的變化而定。從本次實驗可以證實冬季底部流速很高，冷水多從下部通過，也可能將底部較高磷濃度水輸送到水庫下游去。但夏季熱分層的影響，底部的流動率可能降低。我們希望在明年夏天能再作一次示蹤劑，確認此季節性的流況差異。但由於採用的儀器設備有深度的限制(30-40M)，目前能施做的範圍仍只能侷限在水庫上游。

審查委員評分：依據本案合約第十一條規定：『本研究計畫為期二年，九十一年度為研究計畫執行之第一年，期末報告審查由審查委員評分，通過標準為平均八十分，作為下年度是否繼續委託之依據，乙方有爾後年度之優先議價權。』經審查委員於討論結束後進行評分並當場統計分數，平均分數為八十九分。

主席結論：

本計畫之期末報告審查原則通過，請計畫主持人將報告按委員之意見作修正和

補充，並於約定的期限，按規定程序完成結案。

本案期末報告經審查委員評分，平均分數為八十九分，依本案合約規定，國立臺灣大學取得本案下年度之優先議價權。