

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 (三)

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、林明郁、王上銘

中華民國九十二年十二月

目錄

圖目錄	iii
表目錄	iii
符號說明	iv
第一章 研究主旨與背景說明	1
第二章 相關研究、文獻之探討	3

頁次

2.1 翡翠水庫背景及歷年水質及底泥之監測	3
2.1.1 地質與土壤	3
2.1.2 氣候與水文	3
2.1.3 水庫水質	4
2.1.4 水庫底泥	5
2.2 水庫中磷的循環及質量平衡	6
2.2.1 磷的循環	6
2.2.2 底泥磷的動態及內部負荷	6
2.2.2.1 底泥固相磷的分選	7
2.2.2.2 底泥磷內部負荷	7
2.2.3 集水區磷的外部負荷	8
2.2.4 磷的質量平衡	9
2.3 水庫優養化對水質的影響	10
2.4 水質優養控制改善策略	11
2.5 水質模式 CE-QUAL-W2	13
第三章 研究材料與方法	14
3.1 例行性檢測分析	14
3.2 翡翠水庫磷模式	16
3.2.1. 水庫中磷循環之概念模式	16
3.2.2. 底泥釋出磷的模式 2B-SEPF	17
3.2.3. 水質模式 CE-QUAL-W2	18
3.3 水質控制改善策略研究	24
3.3.1 水庫狀況之診斷	24
3.3.2 選擇水庫改善方案	24
3.3.2.1 截斷外部營養來源	24

3.3.2.2 底泥磷的穩定化	24
3.3.2.3 用水稀釋	25
i	
3.3.2.4 抽排下層水	25
3.3.2.5 強制循環	25
3.3.2.6 利用食物鏈控制藻類	25
3.3.2.7 生物防治藻類	26
3.3.2.8 收穫藻類	26
3.3.2.9 降低水位	26
3.3.2.10 底泥覆蓋	26
3.3.2.11 底泥移除	27
3.3.2.12 底層水曝氣	27
3.3.3 選擇改善措施	27
3.4 底泥-水界面的示蹤劑實驗	27
第四章 結果與討論	29
4.1 底泥例行性檢測分析結果	29
4.1.1 底泥化學類	29
4.1.2 底泥粒徑組成	32
4.1.2.1 討論底泥推移之可能性及清淤之可行策略	33
4.1.3 底泥重金屬類	33
4.2 底泥隨深度變化	36
4.3 底泥磷模式 2B-SEPF 參數檢定及敏感度分析	38
4.3.1 參數敏感度分析	39
4.4 水質模式 CE-QUAL-W2 輸入參數整理	41
4.4.1 水理模擬	41

4.4.2 水質模擬	43
4.4.3 評估底泥狀態對上層水質之影響	46
4.5 翡翠水庫優養成因的診斷	46
4.5.1 水庫外部負荷推估	46
4.5.2 水庫內部負荷推估	48
4.6 水質控制改善策略評估	49
4.6.1 調控取水深度	49
4.6.2 底層水抽排	49
4.6.3 底層曝氣	50
4.7 底泥-水界面示蹤劑實驗	52
第五章 結論	54
第六章 參考文獻	60

附錄一、檢驗項目之品保品管數據

ii

附錄二、底泥現場採樣記錄表

附錄三、土壤污染監測基準

附錄四、底泥磷模式(2B-SEPF)數值方程

附錄五、CE-QUAL-W2 模式輸入控制檔(W2_CON.NPT)

附錄六、期初評選會議紀錄

附錄七、期中審查會議紀錄

附錄八、期末審查會議紀錄

圖目錄

頁次

圖 1.1 本計畫研究進度及預定完成工作項目	63
圖 2.1 水庫水文氣象站分佈	64
圖 2.2 水庫歷年月雨量組體圖	64
圖 2.3 水庫水質監測站	65
圖 2.4 歷年水質 Carlson 指標變化	65
圖 2.5 水庫集水區磷的循環	66
圖 3.1 本計畫研究架構流程	66
圖 3.2 翡翠水庫底泥採樣點位置	67
圖 3.3 貫入式之套管底泥採樣器	67
圖 3.4 水庫磷循環之概念模式	68
圖 3.5 現地示蹤劑實驗裝置	69
圖 3.6 水庫優養控制改善策略決策樹	70
圖 3.7 現地示蹤劑實驗裝置	71
圖 4.1 2001-2003 年底泥 ORP 值變化	72
圖 4.2 2001-2003 年底泥 pH 值變化	73
圖 4.3 2001-2003 年底泥含水量變化	74
圖 4.4 2001-2003 年底泥有機質變化	75

圖 4.5 2001-2003 年底泥總氮變化.....	76
圖 4.6 2001-2003 年底泥總磷變化.....	77
圖 4.7 2001-2003 年底泥孔隙水總磷變化.....	78
圖 4.8 2001-2003 年底泥孔隙水反應性磷變化.....	79
圖 4.9 2001-2003 年底泥孔隙水溶解硫變化.....	80
圖 4.10 2001-2003 年底泥孔隙水溶解氟變化.....	81
圖 4.11 2001-2003 年底泥粒徑組成變化.....	82
圖 4.11 2001-2003 年底泥粒徑組成變化(續).....	83
圖 4.12 2001-2003 年底泥金屬含量變化(鐵、錳).....	84
圖 4.13 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(鋅、鉛).....	85
圖 4.14 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(銅).....	86
圖 4.15 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(砷).....	87
圖 4.16 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(汞).....	88
圖 4.17 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鐵、錳).....	89
圖 4.18 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鋁、鈣).....	90
圖 4.19 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鎂).....	91

iv

圖 4.20 大壩(S-5)及後坑子(S-3)底泥分層含水量、有機質、總磷及總氮變化...	92
圖 4.21 大壩(S-5)及後坑子(S-3)底泥分層金屬及重金屬(總鐵、錳、鋅、鉛、銅、砷及汞)變化	93
圖 4.22 模擬底泥孔隙率變化對底泥磷通量之影響.....	94
圖 4.23 模擬底泥-水界面孔隙率變化對底泥磷通量之影響.....	94
圖 4.24 模擬底泥-水界面垂直向延散係數變化對底泥磷通量之影響.....	95
圖 4.25 模擬底泥微生物對固相有機磷好氧一階反應分解速率常數變化對底泥磷通量之影響	95
圖 4.26 模擬底泥微生物對溶解有機磷好氧一階分解速率常數變化對底泥磷通量之影響	96
圖 4.27 模擬底泥-水界面水溫變化對底泥磷通量之影響.....	96

圖 4.28 模擬底泥需氧量變化對底泥磷通量之影響	97
圖 4.29 模擬底泥上層水溶氧濃度對底泥磷通量之影響	97
圖 4.30 模擬底泥孔隙水平衡態磷濃度變化對底泥磷通量之影響	97
圖 4.31-1 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直水溫模擬(檢定)	98
圖 4.31-2 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直水溫模擬(檢定)	99
圖 4.32-1 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直溶氧模擬(檢定)	100
圖 4.32-2 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直溶氧模擬(檢定)	101
圖 4.33-1 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直水溫模擬(驗證)	102
圖 4.33-2 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直水溫模擬(驗證)	103
圖 4.34-1 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直溶氧模擬(驗證)	104
圖 4.34-2 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直溶氧模擬(驗證)	105
圖 4.35 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站葉綠素 a 模擬與實測結果圖 (檢定)	106
圖 4.36 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站總磷模擬與實測結果圖 (檢定)	107
圖 4.37 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站氨氮模擬與實測結果圖 (檢定)	108
圖 4.38 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站硝酸氮模擬與實測結果圖 (檢定)	109
圖 4.39 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站懸浮固體模擬與實測結果圖 (檢定)	110
圖 4.40 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站溶氧模擬與實測結果圖 (檢定)	111
圖 4.41 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站葉綠素 a 模擬與實測結果圖 (驗證)	112
圖 4.42 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站總磷模擬與實測結果圖 (驗證)	113
圖 4.43 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站氨氮模擬與實測結果圖 (驗證)	114
圖 4.44 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站硝酸氮模擬與實測結果圖 (驗證)	115
圖 4.45 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站懸浮固體模擬與實測結果圖 (驗證)	116
圖 4.46 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站溶氧模擬與實測結果圖 (驗證)	117
圖 4.47 典型的注氣揚水曝氣法	118
圖 4.48 Aqua Technique 的 Limno 半揚水式深層曝氣機.....	119

圖 4.49 翡翠水庫施放現地水下示蹤劑情形 120

v

圖 4.50 水下 85 米處示蹤劑施放畫面 121

表目錄

頁次

表 2.1 翡翠水庫集水區歷年非點源污染量推估	122
表 2.2 各種水庫湖泊治理方案	123
表 3.1 檢驗項目及分析方法	124
表 3.2 實驗室數據之品保目標	125
表 3.3 CE-QUAL-W2 模式輸入資料檔.....	126
表 4.1 92 年 4 月翡翠水庫上游至下游的底泥性質分析結果(化學類).....	127
表 4.2 92 年 4 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)	128
表 4.3 92 年 4 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類).....	129
表 4.4 92 年 8 月翡翠水庫上游至下游的底泥性質分析結果(化學類).....	130
表 4.5 92 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(粒徑分析, %)	131
表 4.6 92 年 8 月翡翠水庫水庫底泥性質分析結果(重金屬類).....	132
表 4.7 底泥磷模式(2B-SEPF)應用於翡翠水庫輸入參數一覽表	133
表 4.8 底泥模式模擬與實驗室管柱實驗、現地觀測結果比較	134
表 4.9 底泥模式參數檢定範圍	135

表 4.10 W2 模式所需模擬水質生化反應一覽表.....	136
表 4.11 湖泊以底層抽水改善水質的案例	137
表 4.12 深層曝氣之湖庫及其特性	138

vi

符號說明

SP	懸浮性總磷，ug/L
SPorg	懸浮性有機磷，ug/L
SPmin	懸浮性固相無機磷，ug/L
SPr	懸浮性反應性磷，ug/L
DP	總溶解磷，ug/L
DPr	溶解反應磷，ug/L
DPo	溶解有機磷，ug/L

SPbio	懸浮性生物性的磷，ug/L
u, w	流速(L/T)
t	時間(T)
P	壓力(M/LT ²)
ρ	水體密度(M/L ³)
q	側流或出流流率(L ³ /T)
η	水面高程(L)
h	水深(L)
T	流體溫度(°C)
τ_{xx}, τ_{xz}	紊流剪應力(L ² /T ²)
D_x, D_z	溫度擴散係數(L ² /T)
H_n	進出水面熱量(L ³ °C/T)
V	體積(L ³)
C	水質污染物濃度(M/L ³)
E_x, E_z	污染物延散係數(L ² /T)
qc	側流或出流污染物流率(M/L ³ T)
S	污染物消生或生成之反應 (M/L ³ T)
K_{agmax}	藻類飽合生長率(20)
K_{ag}	藻類生長率 (sec ⁻¹)
K_{ar}	藻類內呼吸率 (sec ⁻¹)
K_{ae}	藻類代謝死亡率 (sec ⁻¹)
K_{am}	藻類死亡率 (sec ⁻¹)
ω_a	藻類沉降率 (m sec ⁻¹)
Φ_a	藻類濃度 (ppm)

P_p	磷半飽和常數，mg/L
P_N	氮半飽和常數，mg/L
α	阻斷係數 (m ⁻²)

vii

符號說明(續)

β	水面上日光輻射量被吸收的比例
I_s	飽和日光強度 (Wm ⁻²)
I_0	水面上的日光輻射量 (Wm ⁻²)
d	所考慮的單元，其頂端的深度 (m)
Φ_p	磷酸鹽的濃度 (gm ⁻³)
P_p	磷半飽和常數 (gm ⁻³)
Φ_n	硝酸態氮與氨氮的總濃度 (gm ⁻³)
P_n	氮半飽和常數 (gm ⁻³)
D_m	溶解相無機磷在底泥中之擴散係數，cm ² /day
ε_z	底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係數，cm ² /day
n	底泥孔隙率(V/V)，無因次
ρ_b	底泥總體密度，g/cm ³
n_{ij}	底泥-水界面的平均孔隙率，無因次
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

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
V_t	底泥孔隙水體積， cm^3
α	質傳係數，cm/day
$EPC1, EPC2$	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。
$O2W$	上層水溶氧，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， ug/cm^2day
MLW	邊界層厚度，cm
R_{O2}	底泥需氧量(SOD)， g/m^2day
D_{O2}	溶氧的擴散係數， cm^2/day
WT	底層水溫， $^{\circ}C$

viii

符號說明(續)

A_s	底泥無機磷礦物的比表面積， cm^2/g
$CW1$	初始孔隙水中有機磷濃度，mg/L
$CW2$	初始孔隙水中無機磷濃度，mg/L
Z	距離，cm
A_x	水平黏滯係數， m^2/sec

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(民國 91 至 92 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，第一年係進行實驗室磷釋出通量實驗，發展水庫底泥磷的釋出通量模式(SEPF)，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；第二年係運用校正及驗證之底泥磷模式(SEPF)及水質模式(CE-QUAL-W2)模擬水體水質變遷，建立一磷的水庫質量平衡概念模式來量化底泥磷釋出量對水質之影響，及提出水庫可行之水質控制改善策略建議，作為落實水庫管理之有效工具。另執行一次現地深水示蹤劑實驗以瞭解底層水流狀況對底泥表層污染物的垂直向延散程度影響。

經由二年之研究成果，我們得知，從民國 90-92 年這三年來翡翠水庫底泥各項檢測項目之分析結果差異不

大，推測在檢測期間水庫應無外來之重大污染。民國 91 年適逢水庫建庫以來最乾旱的一年，民國 92 年水資源亦不足，水庫水質有明顯的惡化，但底泥孔隙水除鈣、鎂之外，溶解磷濃度及主要離子濃度卻較過去為低。從底泥性質及水質模擬結果得知，秋冬底部缺氧時，上游底層水污染負荷升高，是造成大壩水質惡化的重要因子；其它時間，水質污染明顯是外部污染負荷增高的結果，而內部污染負荷相對較低。水庫磷的內部負荷約為 4,100kg/yr，相當於外部年入流溶解反應總磷量之 21.7%。

從底泥模式參數敏感度分析得知，當溶氧低於 2.0 mg/L，至為零時，總磷通量較溶氧為 2.0 mg/L 時增加近兩倍。顯示在低溶氧時，溶氧對磷的釋出是一個重要的影響因子。觀察底泥隨深度變化，底泥表層的污染物濃度多較下層濃度要高，尤其是營養鹽類的總磷、總氮。間接確認這些污染物都是由上層水而來，經過底泥礦化作用遂可能逐漸減少。

應用 W2 模式模擬大壩站分層水溫變化，水庫由夏季有明顯的分層，變溫層約在水下 15-60 公尺處，但到了冬季垂直水溫分佈逐漸均勻，水庫此時在水深 30-45 公尺內可能有垂直混合運動。特別在年初 1 至 3 月，大壩底層水可能被上游低溫水抬升，從模擬結果顯示，抬升高度接近水深 50 公尺處，建議此時應將底部缺氧水予以

排除，保護水質。模擬藻類生長結果不佳，本研究發現春秋氣候可能有特殊藻種形成，藻類之間的競爭代謝機制也值得再深入研討。

水質控制改善策略評估結果，除了儘可能降低集水區點源及非點源之磷輸入量外，控制取水深度，底層水抽排及底層曝氣為最有可行性之水庫內優養控制改善方法。從底泥粒徑組成比對結果，底泥具有向下推移之可能性，底泥的運動也可能對大顆粒底泥具有淘洗的作用。在水庫水位下降到河床裸露時，可以進入河床以人工方式清除淤泥，對水位上升後之蓄水量，應有相當助益。

從水下攝影機觀察得知，夏季大壩有明顯分層，底部流況幾乎呈靜止狀態。從現地示蹤劑實驗結果，夏季底泥-水界面之垂直向延散係數為 $0.3-2.5\text{cm}^2/\text{sec}$ 。

Abstract

Recently, the concentration of total phosphorus (TP) in Feitsui Reservoir has increased at a rate sufficient to cause

public concern. In addition to the external load of phosphorus (P) from the watershed, P released from the sediment of the reservoir is also considered an important internal source of P to the water body. The understanding of the mechanisms and factors influencing sediment P release in Feitsui Reservoir is needed.

The objective of this study was to evaluate the effect of sediment P release on the water quality of Feitsui Reservoir and the alternatives that could maintain the water quality efficiently. In the first year of this two-year project, the continued sediment sampling and analyses at five sampling sites in the reservoir, the laboratory column experiments to simulate the P releasing flux, a 2 Box-Sediment Phosphorus Transport and Flux Model (SEPF) at the sediment-water interface to simulate the P flux to the overlying water were performed. In the second year, the study included: (1) establishing a conceptual model of the phosphorus in the reservoir to explain the mass balance of P; (2) conducting the water quality simulations integrating both the sediment SEPF model and CE-QUAL-W2 water quality model to reveal the effect of internal load of P; (3) discussions of the vertical variation of the sediment pollutants; (4) evaluation of the water quality controlling strategies; (5) performing tracer experiments onsite to estimate the vertical dispersion

coefficient at the sediment-water interface.

By comparing the sampling results of this year (2003) with those of the other years (2001-2002), there was no significant difference between them. It is suggested that no accidental pollution event has occurred in the reservoir this year. However, the serious drought occurred in 2002 and continued to the following year, accompanied with the eutrophication of the surface water, was an extreme climate condition to be worried about. The porewater concentrations of phosphorus and main ions in 2002 and 2003 were low except for those of the calcium and magnesium. According to the sediment properties and water quality simulation result, it is shown that in the autumn and the winter the devoid of oxygen at the sediment water interface was an important factor enhancing the internal load of P which deteriorated the water quality at Dam. In the other seasons of the year, the external loads of P rather than the internal load of P, should be the main source of P for the eutrophication of the water body.

The internal load of P predicted by the model accounted for 4,110 kg/yr, equivalently to 21.7% of the total dissolved phosphorus of the external loads (18,900kg/yr). According to the sensitivity analysis of the parameters of the

SEPF model, it is shown that if the dissolved oxygen (DO) above the sediment was lowered than 2 mg/L, the sediment TP flux could be enhanced to 2 folds larger than that with higher DO concentration.

The vertical distributions of the sediment pollutants were varied. The surfacial concentrations of the pollutants, like total phosphorus and total nitrogen, were all higher than those at the deeper layers. Similar with other lakes and reservoirs, these pollutants were verified coming from the overlying water undergoing the sediment decomposition and mineralization mechanisms.

The verification of the vertical water temperature and DO at Dam by CE-QUAL-W2 model in 1999 and 2000 were also done. It reveals that there is obvious thermal stratification at Dam in the summer season. The location of thermocline is between 15-60m at depth. However, due to the cooling down of the water temperature, the thermocline will disappear in the winter. The vertical movement of the surface water occurs at the upper 30-45 m, which is beneficial for the vertical mixing of the pollutants. Besides, the model also reveals the fact that in January to March, the bottom water with low DO could be uplifted to the middle layer if the density current with cold water occurred in the

upstream. The simulation results suggest that the bottom water with low DO could be withdrawn out for preserving the water quality. The simulation results of the algal growth are not matching the real data well. Further efforts should be focused on the factors that affect the algal growth in the spring or autumn seasons and the competition of different algal species on nutrient.

To reduce the threats of the possibility of the water quality deterioration, some alternatives were evaluated and suggested. In addition to the reduction of the external loads of the nonpoint sources from the watersheds, three alternatives can be applied in Feitsui Reservoir included: (1) to adjust the depth of the withdrawal; (2) the hypolimnetic withdrawal; (3) the deep water reaeration. The artificial dredging of the sedimentation is feasible as the water level of the reservoir will be lowered.

At last, the technique applied in the tracer test in the Feitsui Reservoir has been proven feasible. The vertical dispersion coefficient at the sediment -water interface was 0.3-2.5 cm²/sec estimated from the tracer experiments.

第一章 研究主旨與背景說明

翡翠水庫位於大台北地區，北迴歸線以北，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，水域面積為 10.24 平方公里。水庫最高常水位 170 公尺時總蓄水量 406 百萬立方公尺。最大水深於大壩處達 113.5 公尺，平均水深為 38.5 公尺，平均滯留期為 100 天。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。目的為藉由底泥監測數據瞭解翡翠水庫底泥重金屬、有機氯農藥及營養鹽氮、磷等污染物含量的多寡，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，隨酸鹼值及氧化還原電位降低，促使孔隙水溶解性總磷濃度明顯地提高，而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，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，為本計畫研究目標。

本計畫為二年全程計畫的第二年，預定至民國 92 年完成。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 91 年(全程計畫第一年)已發展之底泥磷釋出模式、實驗室磷釋出通量實驗及現地示蹤劑實驗，本計畫於今年度進行聯合底泥磷模式及 W2 水質水理模式的水體水質模擬及水庫水質改善方案評估建議工作等。期能有效分析翡翠水庫水質變化趨勢，量化底泥磷釋出對水質影響的程度，及提出適當改善策略，落實水庫水資源之有效管理。

依圖 1.1 計畫預定進度，本計畫已分別於 92 年 4 月 4 日及 92 年 8 月 28 日完成兩次底泥例行檢測分析工作。於 92 年 7 月 25 日完成期中簡報，92 年 12 月 18 日完成期末簡報，及計畫相關工作。

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及底泥之監測

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沉降形成。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，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(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，北迴歸線以北，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。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 5 月至 10 月颱風季節所帶來的豪大雨。翡管局在大壩處設有綜合型氣象站，在水系內設有水位雨量站，分佈如圖 2.1 所示，以掌握該區內水文氣候變化資訊。近年因氣候變遷的影響，全台灣水文均呈較不規則變化。1988 至 2001 年翡翠水庫年雨量變化在 2400-5736mm 之間，其中發生超過 5000mm 以上降雨量時間分別為 1998、2000 及 2001 年，單位時間降雨強度也有明顯增大及不規則變化趨勢(如圖 2.2)。2002 年 1 至 6 月乾旱，使大壩水位降低至 120

公尺以下，影響水庫操作，雖然後續有顯著降雨，但水文循環異常已引起大眾關注。其次，依翡翠水庫操作年報資料，冬季冷鋒過境時，大氣最低溫可低至 11-13°C 甚至更低，尚比大壩底部終年水溫約 16~19°C 要低。由於入流量及水溫變化均會影響水庫流場，使水庫混合能力發生改變，對水質可能也具有相當程度影響。

2.1.3 水庫水質

翡翠水庫設有固定水質監測站，分佈於水域及五條支流內，如圖 2.3 所示。水庫整體平均水質以 Carlson 指標變化圖(圖 2.4)評估，1996 年以前屬於貧養至中度優養程度，1996 年後水質有數次達優養狀態，顯示水庫水質有逐漸惡化趨勢。在水域內，位於上游灣潭附近的水質時常發生優養。大壩自 1996 年至 2001 年，每年 2 月天氣寒冷時總磷多次達到 40 $\mu\text{g/L}$ ，OECD 認定之水質優養等級。白 (2000)，陳及吳 (2002) 從分層水溫變化及模式模擬推測，冬季上游冷水形成的密度流潛入水庫底部後，使下層水蓄積的磷被托升至上層，或發生翻轉，可能是水質惡化的成因。這是翡翠水庫處於亞熱帶氣候環境所形成特殊的水文現象，可見水庫內部的磷負荷對水質的影響亦不容忽視。翡翠水庫底泥水邊界層磷釋出動態與上層水質之間的關係，應深入探討。

颱風暴雨造成水庫內發生濁度流，也曾使翡翠水庫水中濁度大幅增加，透明度降低，提高水質惡化的潛勢。

1996 年賀伯颱風及 2001 年納莉颱風期間均曾在大壩深度 50-60 公尺處發現一層濁度達 800NTU 的渾水層。由於密度的影響，這層渾水層不易和其他深度水層發生混合而被稀釋，翡翠局採排渾納清的方式，利用標高 108 公尺排放口，將近一個月才逐漸將渾水層清除。由於降雨強度的增大將增加土壤沖蝕能力，上述也顯示水庫集水區邊坡土壤保護與水文循環的異常亟需重視。

2.1.4 水庫底泥

本計畫第一年(2002 年)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)五個固定採樣點，歷年底泥磷含量範圍為 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。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，可能是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優養化的湖泊，底泥孔隙水總磷 1.20~2.25 mg/L(Hakanson and Jansson, 1983)相當，顯示磷的內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 水庫中磷的循環及質量平衡

2.2.1 磷的循環

集水區入流磷來源可能是點源或非點源的污染，如圖 2.5 所示，來自人為開發植作區肥料的磷，遊憩行為或社區生活污水的磷，林地或邊坡因降雨沖蝕，伴隨泥砂的天然磷，均可以懸浮態或溶解態的型式進入水庫。這些磷有的沉降進入底泥(sedimentation)，有的直接被藻類攝取。當藻類死亡，殘屑 (debris)漸漸沉降至底泥，成為底泥的一部份。這些殘屑中的有機磷經過底泥微生物的厭氧分解，也會被移動化，逐漸溶解進入底泥孔隙水中。因厭氧促使底泥氧化還原電位及酸鹼值的降低，將有助底泥有機磷及無機磷礦物均跟著釋出，一起成為水庫磷的內部來源，再被藻類所利用。磷在水庫中累積及再釋出的過程，形成水庫集水區磷的循環，當磷累積到一定量，超過水庫水體的承載負荷，便會對水質造成影響。

2.2.2 底泥磷的動態及內部負荷

底泥依來源主要分為岩生性底泥(lithogenous sediment)、水成岩性底泥(hydrogenous sediment)及生物性底泥

(biogenous sediment)三類(Seibold and Berger, 1982)。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，成為移動相的溶解磷。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。

2.2.2.1 底泥固相磷的分選

底泥的非移動相，固相磷的分類又稱磷的型態分佈(P fractionation)。過去一系列萃取方法(Hietyes and Lijklema, 1980； Williams, 1976； Golterman, 1988)陸續發展，吳及陳(2002)採用 Hietyes and Lijklema(1980)發展之方法已確認出，翡翠水庫底泥主要固相磷是有機磷和 NaOH 萃取的鐵、錳或鋁結合磷(Fe, Mn and Al-P)。從底泥與集水區土壤的磷分選結果及相關性比對，再確認出鋁結合磷是其中最主要的磷礦物。鈣結合磷(磷灰石磷)含量很低，也確認翡翠水庫集水區是非鈣系(noncalcareous)地質土壤環境。由於翡翠水庫集水區土壤是屬於弱酸性土質，底泥 pH 值也在 4~6 之間，在此類底泥土壤環境下，厭氧環境及低酸鹼值均有利於鐵、鋁結合磷的移動化，增加其進入水體的潛勢。

2.2.2.2 底泥磷內部負荷

底泥-水邊界層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。從底泥磷分選成果，在無機磷的溶出部份，可應用已發展之水化學平衡的電腦計算軟體，如 MINTEQA2(Allison, 1991)、PHREEQC(Parkhurst, 1995)、MINEQL+(Schecher, 1998)等進行模擬推估。House(2000)曾利用 PHREEQC 模式探討有那些化物可能因過飽和或飽和而析出，或持續溶出。本計畫第一年 (2002)也運用 MINEQL+模式模擬翡翠水庫底泥孔隙水磷的平衡濃度 (equilibrium phosphate concentration, EPC)，模擬結果顯示，底泥 EPC 多較實測磷濃度高，顯示底泥屬於持續溶出狀態。

然而在底泥—水界面，底泥磷的釋出仍受到上層水溶氧影響。本計畫第一年(2002)從實驗室磷通量實驗得知，不擾動底泥時，厭氧反應磷的通量最大為 0.15-0.39 $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$ ，有氧存在的反應磷通量是 0.02~0.09 $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$ 。而現地大壩磷通量在有氧存在的環境下，約為 0.006~0.026 $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$ ，相當 1.0E-3~1.0E-2 $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$ 數量級，比實驗室數據較低。若以 0.01-0.1 $\text{ug}/\text{cm}^2\text{day}$ 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 km^2 ，得到水庫內部總磷負荷量為 374-3738 kg/yr 。

2.2.3 集水區磷的外部負荷

翡翠水庫集水區土地利用型態(包括茶園、農地、住宅、林地及施工區)造成地形及地表覆蓋情形變化，會影響地表逕流量與入滲量消長，及入流污染物多寡。依據經濟部水利署(2001, 2002)，環保署(2000)，翡管局委託台北科技大學 (2001) 研究結果，均指出翡翠水庫非點源污染的磷負荷相當高，約為點源污染的 4 倍。由於非點源污染與土地利用型態有直接關係，常使用各土地利用型態之單位時間、單位面積的污染量(單位污染負荷量，kg/ha/yr)表示(台大農工系，1995；環保署，2000；台北科大，2000)。其次也有以模式模擬再回推出非點源污染量者(台大農工系，1995；台大土木系，1995)。吳(1991)及陳(2000)發展總磷與懸浮固體間的定量關係方法，曾依據輸砂量推算出德基水庫集水區總磷的外部負荷量為每年 107~709 公噸，和陳秋揚(2000)以校正及驗證過的「德基水庫與集水區整合模式」(IWMM-TC)推算磷年輸出量 369~503 公噸之數量級相當，而遠高於單位面積負荷法的每年 20~50 公噸。顯示該方法以實測數據為基礎，亦具實用價值。表 2.1 彙整翡翠水庫集水區歷年總磷非點源污染量推估方法及推估數據。由表中得知，吳 (2001)以水庫淤積量換算的總磷負荷量(1,803,000kg/yr，1803 公噸)也遠高於其它方法計算結果(9,677-35,671 kg/yr，9-35 公噸)。造成差異可能有二：(1)引用的翡翠水庫淤積量數據不代表水庫集水區真正入流的輸砂量：由於在暴雨期間缺乏懸浮固體的數據，而水域河岸有許多崩

塌地極易被沖刷，因此並非所有淤積量均為自集水區入流的懸浮固體輸砂量，遂高估了實際的磷外部負荷；(2)

單位面積法或模式模擬方法主要針對溶解性總磷進行採樣分析，因此可能低估所有可能入流磷負荷量。

2.2.4 磷的質量平衡

彙總前述水庫磷的內部負荷與外部負荷推估成果，以年為基礎，磷內部負荷為 500-3,800 kg/yr(平均為 2150 kg/yr)。分別為以面積負荷法推算磷外部負荷(9,677-35,671 kg/yr)的 22-6%，以懸浮固體與總磷關係法推算磷外部負荷(1,803,000kg/yr)的 0.12%。由於進入水庫後有許多磷伴隨懸浮固體會直接沉降到底泥中，不會立即釋放出來，因此本計畫以 CE-QUAL-W2 水質水理模式模擬成果說明水中磷濃度變化。

2.3 水庫優養化對水質的影響

水庫湖泊優養化形成因營養鹽負荷來源可分為天然優養化(natural eutrophication)與人為優養化(artificial eutrophication)。前者乃湖泊生態系自然演化，後者形成是人為活動增加，將大量營養鹽帶入水中，引起生態急速變化，產生高濃度營養鹽、高數量水生植物、底層缺氧與混濁水體等，其變化極快速，只需數年或更短時間(環保署，1992)。近年世界各地許多水庫湖泊均面臨到水質優養化問題。美國 1983 年調查全國有 7145 座水庫湖泊

面臨優養(開元, 1992), 中國大陸如長江中下游太湖、洞庭湖等五大淡水湖泊、西湖等(吳, 2001), 及台灣澄清湖、鳳山、蘭潭、永和山、石門等許多水庫水質業均已面臨優養化問題。翡翠水庫去年四、五月乾旱發生時, 依翡翠管局對外新聞稿(6/26/2002)指出, 天氣炎熱, 翡翠水庫的藻類繁殖速度加快, 加上水位下降, 包括透明度、總磷、葉綠素等水庫水質指標都明顯惡化, 五月「卡爾森優養指數」更上升逼近五十, 意謂水質已處於優養化邊緣。水質優養化不僅將使水體老化, 生態改變, 藻類死亡藻體及在水中產生的臭味(geosmin)及氣泡(scum)對下游淨水場產生阻塞濾床、增加水中消毒副產物, 還會增加人體健康風險。翡翠管局在新聞稿即曾表示, 十幾年前翡翠水庫也一度發生短暫「藻華」現象, 即一層藻類像地毯般蓋在水面上, 幸好只是發生在水庫的上游, 並未影響到下游淨水場的水處理。由於 2002 年乾旱及 2001 年納莉颱風影響, 翡翠水庫水質有明顯惡化。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。但除了水文氣象條件變化之外, 集水區外部負荷也可能是重要的影響因子。翡翠水庫中存在的藻種包括藍綠藻、矽藻、隱藻、裸藻、綠藻、金黃藻、渦鞭毛藻等。依據吳(2002)藻類與水質關係之長期監測研究結果, 2002 年藻類相有明顯消長, 原本優勢的藍綠藻種

轉變為綠藻及褐藻。研究預測藻類生長量可能在今年出現高峰，使水質惡化。因此翡翠水庫優養水質發生時機及機制變化亟待研究澄清。

2.4 水質優養控制改善策略

由近數年來之研究結果顯示，翡翠水庫受到外部及內部營養源輸入之影響，水中藻類濃度變化很大，時有超出優養範圍之情形，而其增生之成因亦有跡可循，並非偶然事件。此外，水庫水體生態系包括其他的浮游動物、魚類及其他的大型動物，也因水質及藻類的改變及可能外來物種之引進而產生變化。例如近年來原生種之魚種如粗首蠟(溪哥仔)逐漸消失，而被外來種之曲腰魚(總統魚)取代。生態系統之平衡及多樣性除了做為水質良好穩定之指標之外，實亦肩負維持生態健全及維持水質穩定之功能，更遑論翡翠水庫獨特之生態系統本身之珍貴價值。因此維護及恢復水庫生態系統的健全是亟需評估及進行預先規劃的。

保護及恢復水庫生態健全的首要工作無疑是防治過多的營養、有機質及泥沙進入水庫。水庫與河川不同之處是這些營養鹽、污染物與泥沙等會累積在水庫中，無法隨水排除。而更有甚者，當外部的污染負荷停止後，水庫內部循環所造成之回饋負荷，仍會引發持續之優養問題。

復育優養的湖泊水庫是一件困難的事。Hasler(1947 in Cooke (1993))曾說：『目前為止尚無方法能倒轉優養的程序』。優養水庫水質改善策略可由兩方面考慮，一為控制營養鹽來源，一為控制藻類生長。包括水庫集水區外部營養鹽負荷量削減、水庫內部底泥營養鹽負荷量控制、水庫內抑制藻類生長、底部供氧曝氣等措施。表 2.2 為常用之各種水庫湖泊治理方案(駱(1992)，Cooke(1993))。

有關翡翠水庫集水區的污染管制策略研究報告已相當多(台北水源特定區管理委員會，2001；行政院環保署，2000；經濟部水資局，2000，2001；郭，1998-2000；台大農工系，1995；駱，1994)，並依據非點源污染貢獻量提出控制策略。國內曾經考慮以曝氣及底泥抽淤方式來整治水庫者有澄清湖、蘭潭、永和山、寶山水庫等(開元，1991 及 1992；郭，1990)。這些水庫均面臨水質嚴重優養化問題，需要加速整治。澄清湖及蘭潭水庫已採用過曝氣方式進行水質改善。蘭潭水庫水深較深，約 20 公尺。過去常發生冬季翻轉，使水質在一夜之間惡化。經過曝氣增加內部水循環能力後，水質已有明顯改善。澄清湖水庫較淺，因底泥淤積及釋放營養鹽量較多，外部污染也不易控制，故曝氣效果不甚理想，近年已考慮底泥清除方式改善。大陸許多淺形湖泊也面臨水質優養

化問題，其中，有相當數量湖泊惡化是來自底泥營養鹽或還原性物質的釋出，例如江蘇太湖，雲南滇池及杭州西湖等。西湖整治即採用底泥抽淤方式，成效尚佳。

美國 EPA 曾推動一項『清潔水庫計畫(Clean Lake Program, CLP)』進行一系列工作及出版『水庫管理』及『水庫復育指引』等手冊。加拿大及歐洲各國也都進行過許多水庫復育之大規模試驗工作。

2.5 水質模式 CE-QUAL-W2

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。模擬水庫營養鹽磷之環境模式相當多，郭（2001）曾使用 WASP5 及 W2 模擬翡翠水庫水質。由模式使用經驗顯示，WASP 考慮水質參數的生物化學轉化反應較完整，但其水理的模擬能力較差，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。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。

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)，並可模擬包含葉綠素 a、有機磷、無機磷、有機氮、氨氮、亞硝酸氮、硝酸氮、懸浮固體、溶氧等水質項目。除了應用在翡翠水庫外，W2 模式也曾應用於曾文水庫(唐，2001)，德基水庫，韓國 Daechong 水庫(Ha，2002)等深水水庫，顯示其具有良好應用性。

第三章 研究材料與方法

如圖 3.1 研究架構流程，本計畫於第一年(民國 91 年)已完成底泥模式開發及建置、實驗室實驗及示蹤劑實驗部份工作。依本計畫要求，今年度計畫包括：

1. 翡翠水庫例行之底泥採樣監測工作
2. 運用底泥磷模式 2B-SEPF 及水質模式 CE-QUAL-W2，模擬水質
3. 水庫底泥磷對水質影響的改善策略研究
4. 底泥-水界面的示蹤劑實驗

計畫涵概現地檢測、實驗分析及模式模擬工作，期能透過完整的研究規劃，確實解讀現地變化，供翡翠管

局參考。以下分別說明詳細工作內容範圍。

3.1 例行性檢測分析

依本計畫要求，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 3.2。本計畫採樣點選取是延續過去水管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。然而由於去年乾旱及七月暴雨的關係，原灣潭採樣點底泥被沖刷後，底床多只剩下粗砂，沒有底泥可採，以及水太淺，採樣船無法上去，故今年採樣均改至較下游的石碇子 (33 斷面)採樣。

現場底泥採樣設備為貫入式之管狀採樣器，如圖 3.3 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先經陰乾程序，再以 20 號篩過篩。詳細檢測項目如表 3.1 所示，檢驗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 未公告者則以水及廢水分析標準方法(Standard Methods)或土壤分析方法(Methods of Soil Analysis)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。底泥重金屬檢測結果係與民國 90 年 11 月 21 日新公告的「土壤污染監測基準」(詳附錄三)內容進行比較，以確認是否有外來重大污染。

為瞭解底泥營養鹽磷之釋出潛勢，例行性檢測項目包括底泥金屬及重金屬(鐵、錳、鋅、鉛、銅、砷、汞、鎘)、有機質、底泥總氮、底泥總磷、粒徑分析、底泥酸鹼值、含水量，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。今年分析項目增加底泥重金屬鎘，係因農業施肥的成份中含有鎘，故計畫擬從底泥重金屬鎘含量，瞭解集水區非點源污染的可能貢獻量。

今年計畫依規定，作一次底泥分層分析，比對近三年來新舊底泥污染成份變化。在第一次採樣時，計畫分別在後坑子(S-3)及大壩(S-5)多採了底泥樣品，予以分層分析之。

3.2 翡翠水庫磷模式

3.2.1. 水庫中磷循環之概念模式

水庫中磷循環之概念模式如圖 3.4。水庫中磷的物種至少可分為懸浮性總磷及溶解性總磷。翡翠水庫之懸

浮性總磷(SP)主要又可分為有機磷(SPorg)，NaOH 萃取的鐵、錳或鋁結合磷(Fe, Mn 及 Al-P，總稱其為固相無機磷 SPmin)，以及較容易釋出的懸浮性反應性磷(SPr)。總溶解磷(DP)包括溶解反應磷(DPr)及溶解有機磷(DPo)兩類。在水中溶解磷可直接被細菌及浮游生物(phytoplankton)所直接攝取，或由細胞外酵素水解為正磷酸鹽後再行利用，因此溶解磷對水庫水質有立即性影響。

翡翠水庫入流水磷的物種中，SPorg+SPmin、SPr、DPr、DPo 之平均分率分別為 0.23、0.42、0.20、0.15 (吳及陳，2001)。因此可知水中的磷進入水庫後(標示於圖中之 $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$)，有約三分之二的磷會沉降進入底泥被逐漸深埋(f_{14})或伺機溶解釋出(f_{13})；有約三分之一的磷進入水層。底泥磷的深埋或釋出與沉降速率及底泥上層水質有關。此模式將於下一節中討論。

進入水體的溶解性磷，大部分會隨著水庫的取水而離開水底(f_{15}, f_{16})；只有一部份進入表水層藻類生長的區域(f_1, f_2, f_{11})，成為藻類生長的基質。經生物攝取成為懸浮性生物性的磷(SPbio)之後(f_9, f_{10})，一部份磷會隨著食物鏈進入更高的營養階層，仍然是懸浮性生物性的磷；一部份會被排泄分解成為溶解反應磷(f_9, f_{10})，可再被藻類所利用；最後一部份會隨著動植物的排泄物及屍體，沉降成為底泥懸浮性磷(f_{12})。最後這種方式的

掃除作用(scavenging process)，是從上層水中移除磷的主要手段，若沒有外來的磷來源時，可以使優養的上層水回復到貧養的狀態。水體中磷的動態與水文變化關係密切。這部分將在第 3.2.3 節中詳述。

以較長時間來看，水庫各個空間區域之磷通量總和為零，也就是遵守質量平衡之原則。例如以整個水庫為範圍(圖右半邊之大方框)，則由集水區進入之總量應等於取水及深埋離開之量，即

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 = f_{14} + f_{15} + f_{16} \quad (3.1)$$

但是若以衝擊最大之表水層來看，則溶解性磷之進入量加上自深層水擴散進入之通量，應等於沉降及取水而離開之量。

$$f_1 + f_2 + f_{11} = f_{12} + f_{15} + f_{16} \quad (3.2)$$

3.2.2. 底泥釋出磷的模式 2B-SEPF

為瞭解翡翠水庫底泥磷釋出對水質影響，本計畫第一年發展底泥動態的磷二層傳輸及通量模式(2 BOX-Sediment Phosphorus Transport and Flux Model， 2B-SEPF)。如圖 3.5 為底泥模式 2B-SEPF 之概念示意

圖。模式係以 FORTRAN 程式撰寫，依底泥溶氧存在與否，我們將底泥分為有氧層及無氧層兩層，再分別考慮了底泥有機磷與無機磷分別自固定相被移動化為溶解態磷的反應，包括微生物的一階分解及礦化反應、無機磷的溶解與沉澱反應，及在孔隙水中分子擴散運動等。模式特別應用地質水化學模式 MINEQL+ (Schecher, 1998)計算平衡態時孔隙水中溶解無機磷濃度(equilibrium phosphate concentration, EPC)，以反應底泥無機固相磷對溶解磷釋出的影響，使底泥磷受到生物地質化學反應程度能確實表現出來，及將底泥磷通量模擬值提供予水質模擬應用。

3.2.3. 水質模式 CE-QUAL-W2

本計畫應用底泥磷模式預測磷釋出通量，配合水質模式 CE-QUAL-W2 模擬水庫平時及暴雨環境下，外部入流磷或底泥磷進入對水質變化之影響。計畫係參考郭(2000-2001)應用 W2 模式分段及分層建立網格方法進行二維模擬。該法將翡翠水庫分為 19 個分段，依水深由上游 6 個分層遞增至大壩附近 54 個分層。

1. W2 模式輸入資料

W2 模式輸入資料檔如表 3.3 所列，概分為水理、水文、水質及控制資料四部份：

- (1) 水理資料：包括水庫主流及支流之實測入流及出流量。有些支流包括後坑子溪及火燒樟溪沒有支流量，故係以水庫大壩總入流量依集水區面積分配而得。
- (2) 水文資料：包括各分段單元之體積、表面積、單元長度、深度、降雨、實測溫度、風速、風向及陽光強度等。
- (3) 水質資料：各單元之起始水質濃度、支流水質負荷、主流測站實測水質濃度等。
- (4) 控制資料：模擬時間間距設定、資料格式選擇、模擬項目選擇、起始及終止日期、輸出資料項目控制等。

為探討水庫水質優養化現象，雖然本計畫主要是針對磷考慮，但模擬水質時仍應以藻類生長為主，故在 W2 模式中模擬水中生化反應項目包括葉綠素 a、總磷、氨氮、硝酸氮、溶氧、懸浮固體六項。模式所需的水文及斷面淤積資料係參考翡翠水庫操作年報。水庫氣象、入流量及水質資料係參考翡翠水庫操作年報在大壩氣象測站與上游測站之監測數據。

2. 模式基本控制方程式

描述水庫內水理現象之基本控制方程式分別為動量方程、不可壓縮流之連續方程與熱平衡方程，及水質

污染物傳輸方程，以數學式表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = q \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h u dz - \int_{\eta}^h q dz \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{H_n}{V} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = qc + SC \quad (3.8)$$

式中，

u, w = 流速 (L/T)

t = 時間(T)

P = 壓力(M/LT²)

ρ =水體密度(M/L³)

q =側流或出流流率(L³/T)

η =水面高程(L)

h =水深(L)

T =流體溫度(°C)

τ_{xx} , τ_{xz} =紊流剪應力(L²/T²)

D_x , D_z =溫度擴散係數(L²/T)

H_n =進出水面熱量(L³°C/T)

V =體積(L³)

C =水質污染物濃度(M/L³)

E_x , E_z =污染物延散係數(L²/T)

qc =側流或出流污染物流率(M/L³T)

S = 污染物消生或生成之反應 (M/L³T)

水密度為水溫、總溶解固體及懸浮固體濃度的函數：

$$\rho = f(T, TDS, SS) \quad (3.9)$$

W2 模式以有限差分法來求解上述(3.3)至(3.8)式。7 個方程式將可求解 7 個未知數： η 、 P 、 u 、 w 、 C 、 T 及 ρ 。

3. 藻類生長模式

CE-QUAL-W2 模式中，和藻類有關的重要輸入參數為藻類生長率、藻類死亡率、藻類代謝死亡率、藻類內呼吸率以及沉降速率。藻類濃度便是由這些參數所決定的，方程式如下所示：

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial t} = K_{ag} \times \Phi_a - K_{ar} \times \Phi_a - K_{ae} \times \Phi_a - K_{am} \times \Phi_a - \frac{\omega_a}{\Delta z} \times \Phi_a \quad (3.10)$$

其中

K_{ag} ：藻類生長率 (sec⁻¹)

K_{ar} ：藻類內呼吸率 (sec⁻¹)

K_{ac} ：藻類代謝死亡率 (sec^{-1})

K_{am} ：藻類死亡率 (sec^{-1})

ω_a ：藻類沉降率 (m sec^{-1})

Δz ：模式所考慮的單元深度 (m)

Φ_a ：藻類濃度 (ppm)

假設藻類濃度的時變率和本身的濃度成正比，係數部分就是上述的參數，藻類生長使得藻類濃度增加，藻類代謝、自然死亡或被捕食、沉降...等行為則使得藻類濃度降低。

藻類的生長率會受到日照、營養鹽如氮或磷的影響，若這些條件不充足則會對藻類的生長造成限制，也就是實際的生長速率等於最大生長速率乘以限制因子，該限制因子取日照限制因子、磷鹽限制因子、氮鹽限制因子三者的最小值，意即該因素對於生長速率為最敏感的條件。日照限制因子如下：

$$\lambda_1 = \frac{e}{\alpha \Delta z} \times e^{-r_2} - e^{-r_1} \quad (3.11)$$

其中

$$r_1 = -\frac{(1-\beta)I_0}{I_s} e^{-\alpha d} \quad (3.12)$$

$$r_2 = -\frac{(1-\beta)I_0}{I_s} e^{-\alpha(d-\Delta z)} \quad (3.13)$$

α ：阻斷係數 (m^{-2})

β ：水面上日光輻射量被吸收的比例

I_s ：飽和日光強度 (Wm^{-2})

I_0 ：水面上的日光輻射量 (Wm^{-2})

d ：所考慮的單元，其頂端的深度 (m)

由於水體本身也會吸收掉一部分的日光輻射量，故在混合區生長的藻類實際所接收到的日光比在水面上所量測到的來得少，並有隨著深度而遞減的趨勢。阻斷係數代表的是“在水面上對曝光造成阻絕的因素”，例如藻類細胞數量太多，位在上方的就會遮擋一些光線，使得其下的藻類細胞的曝光受到阻礙。飽和日光強度指的是

藻類的光合作用達到最大速率時的日光強度，超過飽和日光強度也不能再加強藻類的光合作用。

營養鹽的限制因子為 Monod equation 的形式：

$$\lambda_p = \frac{\Phi_p}{P_p + \Phi_p} \quad (3.14)$$

$$\lambda_n = \frac{\Phi_n}{P_n + \Phi_n} \quad (3.15)$$

其中

Φ_p ：磷酸鹽的濃度 (gm^{-3})

P_p ：磷半飽和常數 (gm^{-3})

Φ_n ：硝酸態氮與氨氮的總濃度 (gm^{-3})

P_n ：氮半飽和常數 (gm^{-3})

營養鹽的部分分為磷鹽限制因子與氮鹽限制因子，分別和磷鹽和氮鹽的濃度有關，舉磷鹽限制因子來說

明（假設磷鹽限制因子為三者中的最小值）：位在分母的磷半飽和常數的意義是「當水體中的磷酸鹽濃度等於磷半飽和常數，限制因子為 1/2，使得生長率變為最大生長率的一半」。當水體中的磷酸鹽濃度很低，磷鹽限制因子幾乎正比於磷酸鹽濃度，意即濃度愈小，限制因子愈小，對生長速率產生更大的抑制。當水體中的磷酸鹽濃度很高，遠大於磷半飽和常數，則磷鹽限制因子接近 1，對生長速率幾乎沒有抑制的效果。承前所述，限制因子是取三者之最小，故如果某種營養鹽的濃度很高，充分滿足了藻類生長時對該營養鹽的需求，該營養鹽必然不會成為藻類生長的限制因子。

3.3 水質控制改善策略研究

3.3.1 水庫狀況之診斷

要使得水庫的維護或改善能成功，必須要有完整的調查與診斷，包括集水區的特性及長期連續的進流水質水量的資料，水庫內之物理化學參數之連續時空分布，適當之水文及地化模式及經過校正之模式參數，水庫生態之評估及預測。事實上，充分的瞭解自然是保護自然的第一步。沒有適當調查與診斷，維護改善的工作有時候不但失去功效，甚至適得其反。

3.3.2 選擇水庫改善方案

改善水庫問題的方法很多，各有其解決問題之對象，及適合之水庫條件。茲簡述如下，並且針對翡翠水庫之特性，做一初步之篩選。

3.3.2.1 截斷外部營養來源

優養的主因基本上是營養鹽的濃度過高，因此水庫管理的第一步就是儘可能截斷外部營養來源，而且這也是相對來說成本低而效益高的最有效方案。由於有關翡翠水庫集水區的污染管制策略研究報告已很多，且已有相當具體之建議，本研究不再重複此部份之工作。

3.3.2.2 底泥磷的穩定化

底泥磷造成的內部負荷是相當重要，甚至是最重要的磷來源。在水中施用鋁鹽，令生成之氫氧化鋁膠羽沉降覆蓋於底泥表面，形成一毯子狀的阻絕層，可以有效阻止磷釋出。此法相當有效且常被採用，甚至下層水是處於缺氧(anoxia)的狀態也可應用。將底泥氧化，令生成之鐵離子與磷酸形成穩定之化合物也屬此法。

3.3.2.3 用水稀釋

當外部或內部營養源無法降低時，用營養鹽濃度很低之水置換或稀釋水庫的水可以將營養鹽濃度降低，甚至將藻華沖走。此法需要大量額外的水源，因此不適合在翡翠水庫中應用。

3.3.2.4 抽排下層水

利用虹吸、抽水或選擇適當之取水口，將底層富含營養或缺氧的水抽除，可以有效加速營養鹽的排除、降低表層水中之磷濃度及改善水庫底層溶氧狀況。

3.3.2.5 強制循環

用攪拌或曝氣等方法強制庫水循環，破壞水庫的溫度分層，可以改善缺氧的狀況，同時降低水中的鐵錳含量。甚而將藻類送進入底層缺少光線的水體，可以克制藍綠細菌的大量繁殖。此方法頗適用於小型的水庫，但是由於動力需求太大，且會使原本水質相當好的水體變得較差，並不適合翡翠水庫的環境條件。

3.3.2.6 利用食物鏈控制藻類

將捕食浮游生物之魚類捕捉或毒殺，可以讓浮游動物的數量增加，因而可以抑制藻類的數量。這種技術看似簡單，也不昂貴，但是由於對於生態系統所知仍有限，方法之不確定性很高，相關經驗也不充足，尚不宜在

大型之水庫來試用。

3.3.2.7 生物防治藻類

這種方法與上一種方法很類似，但是是放養濾食藻類的魚蝦等，以生物方法減少藻類。此方法對於大型藻類相當經濟且有效，但是對浮游藻類則不十分一定，甚至有因營養循環反而造成藻類增生的疑慮。近年來的研究正朝向對生態系統整體之瞭解，此方法仍有很多發展的空間。

3.3.2.8 收穫藻類

此方法曾在大陸的一些水庫實施過，也有相當之效果，但是較適合大型之藻類如布袋蓮、浮萍等。翡翠水庫以綠藻及藍綠細菌為主要之優養藻種，人工收穫的難度較高，可能並不適用。

3.3.2.9 降低水位

降低水位對於去除高莖著生型藻類有效，可以使其根部暴露於空氣中因缺水、太熱或太冷而死亡。其他的效果包括可以趁機會挖除底泥或清除某些魚類。對翡翠水庫而言，靠近大壩的水深及庫底之地形均不利於降低水位來暴露底部，但是如果再次發生如過去兩年的乾旱，水庫較上游的河段卻可以輕易的進行底泥的挖除或穩

定化工作。

3.3.2.10 底泥覆蓋

將底泥以不透水材料覆蓋對於抑制著生型藻類很有功效，但是價格昂貴，並不適合大型水庫應用。

3.3.2.11 底泥移除

底泥移除有多重的效果，可以將營養鹽的內部來源大大降低，也可以增加水庫的容積，甚至移除有毒的底泥。實施底泥移除費用頗高且要注意抽出底泥的妥善廢棄問題。

3.3.2.12 底層水曝氣

底層水曝氣通常不會擾動庫水的分層。底層冷水抽到水面，經過曝氣後再送回底層，如此可以改善底層水的厭氧狀態，也可以消除臭味產生的機會，可提昇做為自來水的原水品質。當然如果底層水含有高濃度的磷、鐵或錳，也會因為溶氧增高而較容易沉澱下來。此項措施對於底棲生物或底棲魚類之維護有絕對的好處。

3.3.3 選擇改善措施

水庫管理者在選擇改善措施之前，必須對水庫進行充分之調查研究與診斷。選擇方案時，除了考慮成本及

改善之效益之外，方法的可靠性及延續效果(永續性)也是重要的考慮因素。圖 3.6 為一個簡單的決策樹。

3.4 底泥-水界面的示蹤劑實驗

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。本計畫第一年(民國 91 年 11 月 28 日)曾在水庫上游第 42、44 及 46 斷面(約在上游永安附近)的底泥-水界面處施放示蹤劑，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。證實冬季上游水因水溫的影響可能下沉進入底層水。夏季熱分層的影響，水底部的流動率可能降低，故季節性的流況改變可能影響底泥磷的釋出。計畫在今年夏天又作一次示蹤劑，確認此季節性的流況差異，同時估計出垂直向延散係數。

本計畫係參考應用高斯分布原理所發展之延散係數方法(Fischer, 1968)計算水流延散係數：

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{2 * (t_2 - t_1)} \quad (3.16)$$

其中

σ_1^2 : 示蹤劑在時間 t_1 濃度分布之變異 (variance) ;

σ_2^2 : 示蹤劑在時間 t_2 濃度分布之變異 (variance) ;

這是一個統計方法的推估，假設示蹤劑的擴散呈高斯分布，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，再以影像處理軟體計算面積大小，即可推估出延散係數。本計畫選擇具保守性及對人體無害的示蹤劑牛奶，作成懸浮液，利用水下攝影機裝置(圖 3.7)觀察示蹤劑在水底施放情形。

第四章 結果與討論

4.1 例行性檢測分析

本計畫於 4 月 4 日及 8 月 28 日分別進行第一、二次現地採樣，其分析結果彙整於表 4.1~4.3 及表 4.4~4.6。茲將近三年(2001-2003)來底泥各項檢測項目的變化彙整於圖 4.1~4.19 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。

採樣當日大壩水位為 141 米(4/4/2003)及 135 米(8/28/2003)。因原第一點(S-1)灣潭的水位過低，無法行採樣船，且據翡管局人員表示，灣潭底泥多是粗砂，已經沒有細顆粒底泥，故改於石碇子附近(33 斷面)採樣。兩次採樣時均曾於石碇子及後坑子看到水表面冒著小氣泡，可能是水生物行光合作用產氣的結果。茲討論檢測分析結果如后，並與近三年(2001-2003)來的測值變化一併討論。

4.1.1 底泥化學類

(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。如圖 4.1，今年 4 月測得底泥 ORP 較過去一年(2002 年)要低，推測過去因颱風帶入大量泥砂沉降所形成新鮮的底泥，已開始趨向還原狀態。但今年 8

月的底泥 ORP 又略高些，顯示底泥還原態易受到外界的影響。底泥歷年 pH 值平均範圍在 5~7 之間跳動(圖 4.2)，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。

(2) 底泥含水量

5 個採樣點，今年 4 月底泥含水量介於 45~56%之間，從上游往下游遞增。但今年 8 月底泥含水量介於 41~56%之間，卻以 S-2 馬祖林較低(見表 4.4)。比較歷年含水量(圖 4.3)，灣潭的底泥含水量明顯較石碇子要低，各點的含水量隨時間的變化並不明顯。

(3) 底泥有機質

今年 4 月測得底泥有機質介於 1.7~3.3%，8 月測值介於，和過去測值範圍相近。比較歷年來的變化(圖 4.4)均以大壩處最高，若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) 底泥營養鹽總氮

今年 4 月測得底泥總氮介於 723~1,360mg/kg 之間，8 月測值介於 1,139~1,543mg/kg 之間，比過去測值(2002 年底泥平均值 1,308~1,960mg/kg)略低，和 1992-1996 年總氮平均值，1,540 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。各點的變化，馬祖林和火燒樟的變化較穩定，但石碇子、後坑子及大壩的變化則較不規則(圖 4.5)。

(5) 底泥營養鹽總磷

今年 4 月測得底泥固相總磷介於 224~1,130 mg/kg 之間，變化極大，且較去年測得的底泥總磷增加許多(圖 4.6)。今年測得的磷含量以馬祖林(S-2)及大壩(S-5)較高，馬祖林在 2001 年 8 月總磷也曾超過 1,200mg/kg。推測此處的底泥周邊可能有外來的農業污染，使底泥磷含量升高。今年 4 月採樣時，曾發現該處底泥十分容易被擾動，推測這些可能是剛進入水庫的泥砂，這些高含量的底泥磷也隨著進入。然而比較孔隙水溶解相磷，馬祖林的溶解總磷濃度為 0.07mg/L，比其他測點總磷 0.19-0.55 mg/L 都要低，推測這些底泥磷可能還未穩定及分解，故對水質的影響還未反應出來。今年 8 月底泥總磷介於 389~616 mg/kg。比較 4 月測值，石碇子和後坑子底泥磷濃度有增加，但馬祖林、火燒樟和大壩卻降低了。

(6) 底泥孔隙水溶解磷

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。今年孔隙水的磷濃度和去年一樣，仍不高(圖 4.7，圖 4.8)，約為 0.14-0.43 mg/L，較 2001 年測值 1.5-2.0 mg/L 要低很多。推測今年底泥 pH 值及氧化還原電位(ORP)均較高，可能是有利磷的穩定化，降低磷溶出的原因。但底泥含磷量已開始增加，假設底泥還原反應持續進行，孔隙水溶解磷仍可能會逐漸增加。

(7) 底泥孔隙水溶解硫

今年溶解態硫測值均較低，4 月測值介於 0.04~0.11 mg/L 之間，8 月更低，介於 0.02-0.05 mg/L 之間。上下游之間的變化和過去一樣，和底泥 ORP 從上游往下游增加的趨勢相近，表示底泥還原時，厭氧性物質濃度也隨著增加。和過去的測值相較(圖 4.9)，溶解硫濃度有明顯降低。

(8) 底泥孔隙水溶解性氟

溶解性氟可能是自礦石分解溶出。今年 4 月測得溶解氟濃度為 0.059~0.128mg/L，較去年氟濃度增加，有向上升高的趨勢(圖 4.10)。但今年 8 月測值除馬祖林和後坑子之外，其他點濃度值都是 ND(non detectable)。2001

年是採用電極法分析氟，此法偵測極限較高，而當年測值也較高，故可能無法和 2002 年之後的氟濃度比較。

整體而言，底泥氟的濃度都屬微量。

4.1.2 底泥粒徑組成

底泥粒徑分析結果如表 4.2 及表 4.5 所示。底泥粒徑多小於 106 μm ，50%集中於小於 38 μm 粉粒之粒徑範圍。

由上游至下游的粒徑分佈變化來看，上游（石碇子）粒徑以 38 ~ 106 μm 為主，幾達 80%，且和過去測得的粒徑變化相近。馬祖林以 106 ~ 150 μm 為主（35%），較過去分布，粗顆粒比例有往上增加趨勢(圖 4.11)。更下游之後坑子與大壩，粒徑分布往小顆粒 16 ~ 38 μm 集中。火燒樟粒徑分布則較為均勻，6 ~ 16 μm 及 16 ~ 38 μm ，皆佔 20%。

從 2001-2003 年之粒徑分佈變化來看，各採樣點隨時間主要粒徑皆有在大粒徑與小粒徑間來回往復的現象。以後坑子為例，主要粒徑在 90 年 5 月為 150 ~ 106 μm ，在 90 年 8 月及 91 年 5 月為 38 ~ 16 μm ，91 年 8 月為 16 ~ 6 μm ，92 年 4 月增加到 106 ~ 38 μm ，但 92 年 8 月又回到 16 ~ 6 μm 。另外後坑子、火燒樟、大壩皆有類似

之情形。推測這些底泥受到外界泥砂進入及組成比例的影響很大。底泥的運動也可能對大顆粒底泥具有淘洗的作用。

4.1.2.1 討論底泥推移之可能性及清淤之可行策略

本次底泥粒徑由上游至下游之趨勢(圖 4.11(6))顯示上游石礫子細粒徑(38 μ m 以下)比例明顯降低，有流失之情形；而大粒徑部分沒有增加，應不是暴雨沖刷土壤沉積的結果。推其原因，可能是水位下降，靠近底泥之水流速較強，經過再懸浮與沉降，將細顆粒搬運至較下游之河段，留下非常均勻粒徑(106-38 μ m)之中顆粒。此種水文變化引起之底泥遷移並不能將底泥移除，只是將細顆粒往下游搬運而已。在水庫水位下降到河床裸露時，亦可以進入河床以人工方式清除淤泥，對水位上升後之蓄水量，仍有相當之助益。

4.1.3 底泥重金屬類

1.底泥總量重金屬類

今年 4 月第一次採樣，底泥各類重金屬檢測含量結果請參考表 4.3。近三年來底泥各類重金屬檢測含量變化整理於圖 4.12-圖 4.19 內。

(1) 鐵

比較各測點鐵含量隨時間變化(圖 4.12)，鐵含量今年在石碇子的濃度較低，其餘各點在近兩年皆無顯著變化。

(2) 錳

除大壩外，其餘四個採樣點在今年四月錳含量皆有明顯增加(圖 4.12)。其他測站的錳含量呈自上游至下游遞增趨勢。過去錳在大壩(S-5)濃度一直維持在 3,000 mg/kg 左右，和其他四點介於 300-1,500mg/kg 範圍差很多，然而自去年開始大壩測值分別是 91 年 5 月 1,614 mg/kg，91 年 8 月 818mg/kg，今年 4 月及 8 月分別為 640mg/kg 及 495mg/kg。已有許多研究發現，水庫湖泊底泥可能形成錳礦。這是因為在穩定的水域中，微生物的作用可能將錳氧化，形成氧化錳而沉降。從兩年數據尚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。

(3) 鋅

近年來，各點大致維持在 100 到 150mg/kg 之間(圖 4.13)，無明顯變化。

(4) 鉛

整體而言，各點的底泥鉛含量沒有顯著增加趨勢（圖 4.13），今年測值和往年差不多，應無有外來的污染。

(5) 銅

整體而言，各點的底泥銅含量沒有顯著增加趨勢（圖 4.14），推測應無外來的污染。

(6) 鎘

今年增加檢測底泥鎘含量在 4 月為 3.63-3.93 mg/kg 之間(表 4.3)，8 月為 1.08-1.85 mg/kg。下游比上游濃度略高。

(7) 砷

今年 4 月檢測底泥之砷含量介於 0.61-1.18 mg/kg 之間，較去年要低。但 8 月砷含量明顯增高至 6.05-10.85 mg/kg（圖 4.15）。經確認本實驗之品管品管數據(詳附錄一)，實驗準確性和精密度均已達到計畫要求，該監測數據應具代表性。雖然本次底泥砷含量未超過「土壤污染監測基準」(詳附錄三)規定限值，30 mg/kg，計畫推測底泥砷含量可能有外來的污染。建議能與水質監測數據比對，進行確認。

(8) 汞

底泥汞含量變化不大(圖 4.16)。可以顯示底泥並未遭受外來的重大污染。

將底泥重金屬檢測結果與民國 90 年 11 月 21 日新公告的「土壤污染監測基準」(詳附錄三)內容比較，翡翠水庫底泥砷、汞、鉛、銅、鋅及鎘之底泥含量均低於監測基準值規定濃度，屬於正常值範圍。

2.底泥溶解性重金屬類

底泥溶解性鐵、錳、鋁、鈣及鎂濃度結果請參考表 4.3。近三年來底泥溶解性重金屬檢測含量變化整理於圖 4.17-圖 4.19 內。

(1) 溶解性鐵

底泥孔隙水溶解性鐵在每年上半年的濃度均較低，呈三角形振盪，似乎與季節變化(圖 4.17)有關。以今年為例，4 月濃度介於 10.8-17.0 mg/L，相對於 8 月為 24.7-40.2 mg/L 要低些。

(2) 溶解性錳

錳的濃度趨勢大致和鐵一致(圖 4.17)，今年 4 月及 8 月的濃度均較低，介於 1.1-5.3mg/L 之間。

(3) 溶解性鋁

今年 4 月測得溶解性鋁濃度介於 9.5-18.1mg/L，8 月為 5.6-19.8 mg/L。除大壩和去年測值接近，其餘各點濃度均較過去要低很多(圖 4.18)。

(4) 溶解性鈣

今年 4 月溶解性鈣測值介於 80-157 mg/L，8 月為 31-110 mg/L。各點皆有逐漸上升趨勢，且幅度可觀。原本鈣濃度以上游的灣潭及馬祖林較高，但這兩年下游點的底泥鈣含量也逐漸升高(圖 4.18)，底泥孔隙水中的地化可能也已在改變。

(5) 溶解性鎂

和鈣濃度的變化相近，今年 4 月下游點的底泥孔隙水溶解鎂濃度也往上升高，增幅約 1.5 倍(圖 4.19)。但 8 月鎂測值均顯著下降，濃度介於 2.0-4.7 mg/L。

綜合而言，今年的孔隙水鐵、錳、鋁、濃度皆較往年為低，鈣濃度有逐漸上升或變幅增加趨勢。比較上游至下游變化，鈣及鎂濃度均在上游馬祖林(S-2)最高，和過去趨勢相同，推測可能來源是上游集水區農業行為施肥造成，也正逐漸改變底泥孔隙水組成及地化反應平衡。

4.2 底泥隨深度變化

隨著時間，懸浮固體逐漸沉降至底泥累積，因此越下層的底泥年代越久。從底泥分層變化應可作為觀察底泥隨時間變化依據。茲彙整底泥化學類性質包括總磷、總氮、有機質及含水量的分層變化，如圖 4.20 所示，彙整底泥金屬及重金屬類分層變化，如圖 4.21 所示，以下分述之。

1. 底泥總磷

大壩底泥表層總磷含量較下層底泥高出甚多，甫沉降的底泥還沒有經過礦化分解作用，可能是使底泥磷含量仍較高原因。而後坑子的總磷分層變化較不明顯。

2. 底泥總氮

大壩底泥表層總氮含量也是較下層要高，但後坑子的總氮分層變化亦較不明顯。從兩處的營養鹽類的分層變化推測，大壩所沉降的懸浮固體的營養鹽含量比後坑子高，可能和上層藻類濃度及生長特性有關。

3. 底泥有機質

兩處底泥有機質的分層變化不明顯，但大壩有機質比後坑子高些。

4. 底泥含水量

大壩底泥含水量比後坑子高，與過去從上游到下游含水量遞減之測定結果相符。而分層變化有隨深度遞減的關係，可能和底泥壓密有關。

5. 底泥總鐵

兩處底泥總鐵隨深度變化，均為上層較下層略高。推測由於其來源是從上層水而來，故隨深度及時間會逐漸分解。

6. 底泥錳

兩處底泥錳含量相近，且隨深度變化不大。

7. 底泥鋅

兩處底泥鋅含量相近，且隨深度變化不大。

8. 底泥鉛

兩處底泥鉛含量相近，且隨深度變化不大。

9. 底泥銅

兩處底泥銅含量相近，且隨深度變化不大。

10. 底泥砷

兩處底泥砷含量相近，上層砷濃度較高。推測由於其來源是從上層水而來，故隨深度及時間會逐漸分解穩定。

11. 底泥汞

兩處底泥汞含量相近，上層汞濃度略高。由於底泥汞含量甚低，在深度 5 公分及 15 公分的測值為 ND(non detectable)。其偵測極限列於附錄一內。

4.3 底泥磷模式 2B-SEPF 參數檢定及敏感度分析

為瞭解翡翠水庫底泥磷釋出對水質影響，本計畫於第一年(民 91 年 5 月)翡翠水庫採集底泥樣品時，曾取兩支大壩(S-5)底泥管柱於實驗室進行底泥磷通量釋出實驗。如表 4.8 所示，管柱模擬之實驗室磷通量為總磷(TP)0.09-0.14 ug/cm² day，反應磷(RP)0.023-0.038 ug/cm² day，而現地觀察底層水磷隨時間的累積所換算的磷通量為總磷(TP)0.013 ug/cm² day，反應磷(RP)0.01 ug/cm² day。實驗室通量比現場通量要大些。計畫將應用當時分析得到之底泥性質，及參考文獻值於模式參數設定，如表 4.7 所示，進行底泥磷通量的模擬。

模式模擬出 91 年 5 月的底泥環境下，穩態的底泥磷通量為總磷(TP) $0.11 \text{ ug/cm}^2 \text{ day}$ ，反應磷 $0.032 \text{ ug/cm}^2 \text{ day}$ ，有機磷 $0.082 \text{ ug/cm}^2 \text{ day}$ (表 4.8)。模擬數據和實驗室通量實驗值較接近，略大於現場以上層水濃度隨時間累積所換算出來的磷通量。模擬之總磷年內部負荷量為 $4,110 \text{ kg/yr}$ 。

4.3.1 參數敏感度分析

受到現場底泥環境的變化，若干底泥模式中參數的變動可能對模式模擬磷通量有相當程度的影響。計畫擬評估包括底泥孔隙率(n)、底泥-水界面的平均孔隙率(n_{ij})、底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係數(ϵ_z)、微生物對固相有機磷好氧一階反應分解速率常數(k_{cl})、溶解有機磷一階好氧分解速率常數(k_{dl})、底泥在有氧層及無氧層個別的平衡反應性無機磷濃度(EPC1 和 EPC2)、底泥-水界面的水溫(WT)、底泥需氧量(SOD)及底泥上層水溶氧(DO)濃度等變化時(如表 4.9)對磷通量的影響。

模式為探討底泥在有氧層及無氧層平衡態反應性無機磷濃度(EPC)對磷通量的影響，將 2000-2002 年五次實測大壩底泥孔隙水各離子濃度數據輸入水化學模式 MINEQL+ 中計算出五組(EPC1, EPC2)，再輸入底泥模式模擬。然而其他的環境條件參數並沒有改變，所模擬的磷通量並不能代表當時的磷通量，只能比較相對大

小變化。

如圖 4.22-圖 4.30，模擬各參數變化對底泥磷通量結果發現，底泥磷通量受到底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係數(ϵ_z) (圖 4.24)、微生物對固相有機磷好氧一階反應分解速率常數(k_{cl}) (圖 4.25)、底泥-水界面的水溫(WT) (圖 4.27)、底泥平衡態無機磷濃度(EPC) (圖 4.30)及底泥上層水溶氧(DO)濃度(圖 4.29)的影響較大，是模式重要的影響因子。而變化底泥孔隙率(n) (圖 4.22)、底泥-水界面的平均孔隙率(n_{ij}) (圖 4.23)、溶解有機磷一階分解速率常數(k_d) (圖 4.26)及底泥需氧量(SOD) (圖 4.28)對磷通量有較輕微的影響。如圖 4.24，底泥水邊界之垂直向延散係數(ϵ_z)越大，磷通量的傳輸擴散能力越大。很可惜，本次作現地底泥-水界面示蹤劑實驗結果不甚理想(參考第 4.7 節內容)，而現場底泥水界面流況變化甚大，建議該界面實驗能於後續計畫中持續，找出較真實的現地垂直向延散係數。

如圖 4.27，當底泥水溫升高將會加速底泥有機質分解，且影響孔隙水酸鹼值的變化，因此水溫的影響會改變地化反應磷礦物的溶解沉澱反應，並表現在平衡態反應性無機磷濃度(EPC)計算的結果中。底泥上層水溶氧，提供底泥界面氧化環境，可使三價鐵離子和磷結合而減少磷的釋出。然而溶氧擴散進入底泥所形成之

好氧層，依本模式計算及文獻值(Wang, 2003)，約在 0.1-3.5 公分左右，底泥許多還原性物質促使底泥迅速消耗溶氧，因此從圖 4.29 溶氧之敏感度分析可知，溶氧大於 2.0 mg/L，其對磷通量的影響已不明顯，但當溶氧降為零時，總磷通量卻較溶氧為 2.0 mg/L 時增加近兩倍。顯示，在低溶氧時，溶氧對磷的釋出是一個重要的影響因子。

與平衡態的溶解相無機磷濃度(EPC1, EPC2)大小相較，可代表孔隙水磷濃度的反應動力方向，當其 EPC 較大，表示平衡會促使孔隙水磷濃度增加。從五次 EPC 數據代入底泥模式計算結果，底泥無機磷相的地化反應很明顯對溶解磷濃度貢獻很大。也顯出水庫地化特性在水庫磷的循環動態是一個很重要的機制。

由以上分析結果，本計畫發展之底泥模式能確實反應磷傳輸的行為，可適用於翡翠水庫。

4.4 水質模式 CE-QUAL-W2 模擬

本計畫依水質模式 CE-QUAL-W2 要求建立各項輸入檔(詳表 3.3)，進行模擬。其中輸入參數控制檔 w2_con.npt 內容列於附錄五內。計畫係以民國 89 年翡翠水庫年報數據進行模式校正，以民國 88 年之年報數據進行驗證。

4.4.1 水理模擬

在水理模擬方面，主要是模擬溫度垂直分佈情形，並以垂直溶氧的變化來確認流場。由於水庫在大壩有垂直水溫及溶氧監測資料，數據較為詳盡，故擬以大壩站之資料進行模擬。大壩取水口設於 128 公尺處(第 22 層)。上游有三條支流：金瓜溪、後坑子溪及火燒樟溪，入流口分別在第 3、14 及 17 個斷面。

依據圖 4.31，大壩站分層水溫變化可知，水庫在夏季有明顯的分層，變溫層約在水下 15-60 公尺處，但到了冬季垂直水溫分佈逐漸均勻，水庫此時在水深 30-45 公尺內可能有垂直混合運動。特別在年初 1-3 月，大壩底層水可能被上游低溫水抬升，從垂直溶氧模擬結果(圖 4.32)顯示，底層缺氧水被抬升高度接近水深 40-50 公尺處，建議此時應將底部缺氧水予以排除，保護水質。從民國 89 年的水溫檢定結果發現，模擬水溫在夏季 7 月以後表層水溫都比實測水溫要低約 1 至 2°C，經檢討模式輸入條件後發現，大壩站氣象測站的全年氣溫偏低，可能是造成水溫模擬值比實測水溫低的原因。其次，由於本模擬條件是假設大壩以高程 128 米出水口，終年排水，然而依翡翠管局人員描述，實際出水口包括高程 108 米及 128 米兩個出水口是不定期調整操作的，所以冬季進入大壩庫底的低溫水，在模擬時並未排放掉，也可能使整個熱平衡的計算結果造成誤

差。

民國 88 年的水溫驗證數據(圖 4.33)，也是從 6 月以後至 10 月，模擬表層水溫偏低。不過模擬深層水溫變化與實測值接近，顯示 W2 模式在翡翠水庫水理模擬應用良好，可有效解釋實際流場。再比對民國 88 年的垂直溶氧驗證數據(圖 4.34)，全年垂直模擬結果和實測值在 2、3、4、5 及 12 月較接近，但 1 月及 11 月的中層水(40-80 米)模擬值較實測值要低。推測此時可能有來自上游高溶氧水進入，類似 2000 年 2 月冷水進入之作用，但模擬結果沒有看到。從 6 月以後至 10 月，模擬表層水 15-20 米以內的溶氧均低於實測值，誤差值達到 2-3.5mg/L。此顯示，表層水除曝氣產生溶氧之外，有旺盛的生物性作用產生超飽和氧氣。從模擬葉綠素 a 結果，模擬值較實測值略低(圖 4.41)，可解釋溶氧模擬值偏低的結果。其次，88 年全年底層水溶氧均很低，到 12 月時，幾乎 80 米以下均呈缺氧狀態。88 年全年都沒有暴雨或颱風，8 月時水位下降到 148 米，可能是底部水未受擾動的原因。

4.4.2 水質模擬

表 4.10 列出了大部分 CE-QUAL-W2 模式所需的參數值範圍及其來源。郭與楊(民 89)曾利用 WASP5

水質與 W2 水理模式的連結，對翡翠水庫水質進行模擬，故其參數範圍具有參考價值。郭與吳（民 79、80）在環保署所委託的「台灣地區給水水源優養評估法之建立及其優養程度調查」中的「翡翠水庫生化反應係數檢定表」亦可作為參考。莊（民 87）在「水庫優養控制優選模式之發展與應用」中將其模式應用在翡翠水庫上，採用的磷半飽和常數範圍介在 0.005 到 0.05 之間，和郭與楊（民 89）所採用的範圍（0.002-0.0475）相近。關於藻類飽和生長率，從廖（民 91）的「文獻中藻類各參數總整理」可知，翡翠水庫中許多藻種其各自的飽和生長率不盡相同，若藻類飽和生長率在模式中僅由單一的參數代表，其正確值可能不易預估。郭與吳（民 79、80）採用的參數範圍甚大（0.2-8），可提供本模式作為參考。另外，依不同的參考資料，藻類代謝死亡率的範圍分別為 0.01 到 0.04，0.05 到 0.25 與 0.08 到 0.1，雖皆以翡翠水庫作為應用對象，但所採用的數值範圍卻有明顯出入。經過模式檢定及驗證，計畫得到參數檢定範圍均落在上述文獻值範圍內，以下說明模式模擬及與真實值比對結果。

(1) 模式檢定

以翡翠水庫管理局委託台灣大學海洋所作的「翡翠水庫水質垂直結構季節性變化檢驗與監測」(八十八年

七月至八十九年十二月)，為 W2 水質模式參數校正的依據，共模擬六個水質參數：葉綠素 a、總磷、氨氮、硝酸氮、懸浮固體以及溶氧濃度。上游和下游分別選擇兩個具有代表性的測站—灣潭與大壩，作為校正的依據，模擬值與實測值的比較見圖 4.35 至圖 4.40。

圖 4.35 至圖 4.40 亦附上八十九年翡翠水庫操作年報的表水數據作為比較參考。葉綠素 a 的部份（圖 4.35），模擬值大致符合季節性的變化，唯海洋所於大壩測站在三月與十一月時各測得一個 $4 \mu\text{g/L}$ 的濃度高峰，模擬值並未表現出。然而，灣潭的模擬可以表現出三月的峰值，十月份至十二月份的模擬亦十分良好，故在大壩測站三月與十一月是否有模式尚未考慮到的事件、或適於春秋氣候環境條件之特殊藻種的形成，值得再深入研究討論。

圖 4.36 模擬總磷變化，模擬值大都落在實測數據的範圍內。翡翠水庫年報在灣潭測站十月份有一個高達 $76 \mu\text{g/L}$ 的峰值，猜測可能為污染事件，但海洋所測值是 $16 \mu\text{g/L}$ ，模式模擬值是 $28 \mu\text{g/L}$ ，模擬的結果和海洋所較為接近。

氨氮與硝酸氮的模擬結果顯示（圖 4.37 與圖 4.38），灣潭測站的氨氮略有高估而硝酸氮的模擬良好。大

壩的氮氮模擬值和海洋所的測值有相同趨勢，但硝酸氮略有高估。比較翡翠水庫年報的測值可知，模擬結果仍在可接受的範圍內。

由於海洋所監測數據中並沒有懸浮固體的項目，故僅列出模擬值和水庫年報的測值作為比較參考。大壩與灣潭的溶氧模擬大致良好，唯大壩測站於三月與九月的實測值波動情形與模擬值略有出入，推測應與葉綠素 a 的模擬有關。

(2) 模式驗證

以八十八年的翡翠水庫操作年報作為模式驗證的依據。由圖 4.41 至圖 4.46 顯示，W2 模式的預測大致符合實際情況。值得探討的幾個地方：八十八年初在上游有一很大的磷入流量，對於上游水質的影響持續到二月底，大壩的模擬值亦反應了該事件，總磷維持高濃度長達數月，和二月的大壩實測值吻合，但是顯然存在一模式未考慮到的消耗項，使得三月份的實測值從二月的高峰降至個位數。另外，雖然實測和模擬的葉綠素 a 都有從上游到下游遞減的趨勢，但大壩測站的模擬值仍然偏低，此為本模擬需要再加強改善的部份。

(3) 小結

一般而言翡翠水庫的葉綠素 a 濃度以夏季為高峰期，而總磷濃度主要受外部負荷影響。W2 模式所考慮的水質參數可以大致涵蓋實際的情況，故具有一定程度的預測能力，模擬結果具有參考價值。由於實測數據以月作為時間單位，對 W2 模式而言精度略顯不足，模擬結果可能會和實際情形有所出入。若能增加實測數據量，並利用模擬結果探討可能原因，相信能對水庫水質有更好的掌握。

4.4.3 評估底泥狀態對上層水質之影響

綜合前述翡翠水庫水理及水質模擬結果，底層水的抬升及混合發生時機多在冬季(11 月至隔年 3 月)，模擬發現夏季停留在底層水的磷，很可能在翻轉的時候被攜帶到表層。由於水庫底床很陡，當上游馬祖林、灣潭及火燒樟的底層溶氧在秋天均消耗至零時，有很明顯的底層水磷累積現象。因此，上游磷進入大壩之後，遂造成了大壩表層水磷濃度忽然升高結果，如圖 4.36 及圖 4.42 所示。

底泥釋出磷通量換算為總量為 4,110kg/yr，相當於外部輸入總反應性磷(18,900kg/yr)的 21.7%。除了外部控制污染源入流之外，建議翡管局能加強大壩垂直水溫、溶氧及總磷的監測(目前較缺乏垂直向磷濃度監測)，將高濃度磷入流水適時排出，方可減輕對表層水質的威脅。

4.5 翡翠水庫優養成因的診斷

4.5.1 水庫外部負荷推估

水庫由集水區進入之總量應等於取水及深埋離開之量，即如圖 3.4 之大框所是之範圍及 3.1 式所示。文獻中集水區之輸入通量常無法區分各物種之個別輸入量，即無法區分 f_1 至 f_7 。若將其併為輸入總量 F ，則應等於文獻中估計之集水區營養鹽負荷。由歷年各研究報告中以各種非點源模式推估之總磷外部輸入量，最低為 9,677 kg/yr 至 35,671 kg/yr。至於其他之方法，自來水處用流量推估法得到 120,071 kg/yr 之高值；甚至台大環工所以懸浮固體輸入量來估計，得到非常高的 1,803,000 kg/yr。

另一種估計外部負荷之方法是由進流濃度乘上不同時間之進流水量累積而得。由於水庫年平均之取水量約為 14 億立方公尺，乘上主要支流坪林之總磷濃度 38.5 μ g/L(因為其他支流沒有定期監測之總磷濃度資料)，進流總磷亦可估計約為 54,000kg/yr。此值較非點源模式估出之方法仍然要高。這些結果的不一致性雖源於方法的差異，但是很主要的原因是缺乏長期連續的進流水水量及水質資料。

影響藻類生長的，應該只有溶解性的磷，因此實際的外部輸入應該只有總磷的 35%，即 18,900 kg/yr。

至於取水離開之量，f15 + f16，只能從取水之水中含量乘上取水量來推估。若以二號橋之水質代表取水之水質，其 85 年至 92 年平均之總磷濃度為 24.9 $\mu\text{g/L}$ ，反應性磷之濃度為 12.1 $\mu\text{g/L}$ ，均較上游主要支流坪林之總磷濃度為 38.5 $\mu\text{g/L}$ ，反應性磷之濃度為 18.6 $\mu\text{g/L}$ 略低，但卻均為溶解性磷。取水排除總磷量可計算得為 35,000kg/yr，此值較輸入之溶解性的磷高很多，甚至比非點源模式估計之總磷輸入量還高，顯示非點源模式之估計方法有問題。

被深埋的磷量大約等於底泥沉積速度乘上已成岩化之單位體積底泥含磷量。估計底泥沉積速度至少為 0.5 cm/yr。而根據民國八十五年翡翠水庫年報估計之平均年淤積量約為 100 萬立方公尺，則對應之底泥沉積率應為 10 cm/yr。此外，從底泥中有機物質含量之深度週期變化，也可以看出大壩附近底泥的沉積率約為每年 8 公分。若以磷的含量為 200mg/L，沉積面積為 10 平方公里，則被深埋的磷量大約 100,000 kg/yr 至 2,000,000 kg/yr。此值比估計之輸入沉降性磷高出很多，但是其上限值卻與台大環工所估計之進流量值接近。

由以上所估計進流及出流之總磷量來看，顯然文獻中以非點源模式估計之集水區營養鹽負荷偏低，其上

限值僅略等於取水總磷量，尚無法考慮深埋離開之量。而粗估之深埋量亦大於文獻中輸入量之最大值。兩者有如此大之出入，其原因可能為：一、暴雨期間高逕流中含有非常高濃度的懸浮固體及懸浮性磷，可能因為監測頻率不足，沒有完全紀錄到濃度之變化；二、可能水體中產生大量生物性或非生物性的次生礦物顆粒或膠羽，受重力作用沉積到底泥中(以水底攝影機拍攝接近底部之景象時，可以見到這些沉降到底部的膠羽，在未壓密前約有 1.5 公尺厚)。

4.5.2 水庫內部負荷推估

水庫內部負荷主要為底泥釋出之量(f_{13})，與進流中之溶解性磷量($f_1 + f_2 + f_3 + f_4$)同為水體總磷量之來源，而與沉降之磷(f_{12})及取水移除之磷量($f_{15} + f_{16}$)平衡。其中進流中之溶解性磷量約為總磷量之 35%(見 3.2.1. 節)，則進流輸入之溶解性磷量約為 18900 kg/yr。而若以 0.01-0.1 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{day}$ 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 km^2 ，得到水庫內部總磷平均負荷量為 4,110 kg/yr(見 2.2.2.2. 節)，約為輸入總反應性磷量(18,900 kg/yr)之 21.7 %。

估計之取水總磷量為 35000kg/yr，已超過輸入總反應性磷量及內部總磷負荷量之總和，顯然估計方式有

不合理之處，可能是低估輸入總量(見上節)或高估取水排除總量。

4.6 水質控制改善策略評估

根據 3.3.節之討論，除了儘可能降低集水區點源及非點源之磷輸入量外，控制取水深度，底層水抽排及底層曝氣為最有可行性之水庫內優養控制改善方法。

4.6.1 調控取水深度

實際說起來水庫取水是排除營養鹽的唯一機制，所以如果能選擇磷濃度最高的時間及深度排除之，可以有效地減少水庫磷的總蓄積量。例如上游進流水通常比水庫原有的水含有更多的磷，所以掌握入流水潛入庫水的深度，儘量開啟最靠近該層的取水口，可以使磷尚未被利用或沉降到底泥前，將其排除。要做到取水深度的最佳化，必須對取水口處水質的垂直分布能即時監控，以及流況的正確模擬。此方法除了增設監測設備外，不需增加其他設施即可進行，是最經濟有效的方法。

4.6.2 底層水抽排

底層水抽排是將一般在上層的取水口盡量移到最底部，如此可將營養高的底層水排除，使得擴散進入上

層的磷減少；同時也可以縮短底層水的停留時間，減少氧氣耗盡的機會。抽除下層水可以避免有分層現象的水庫因底部厭氧而釋放出磷、有毒金屬、氨及硫化氫。因此，此方法有排除磷及抑制磷釋出的雙重效果。

抽排的裝置是一虹吸管，其一邊開口在水庫底層，大約距離底部一至二公尺處，另一邊開口在水壩外的且在水位線以下。自底層適量的抽水不會破壞水體的分層，但是要注意排出之水的水質可能較上層水差，在利用做為發電或自來水水源前，可能要有適當之曝氣，以保持其好氧狀態。

Dooke 曾統計 18 座裝設底層抽排設施之水庫(見表 4.11)，絕大多在五年內都可以看到顯著的改善效果。在這些例子裡，其中美國的柏林吉湖(41 公頃，抽水量 $3.4 \text{ m}^3/\text{min}$)之建造費為美金 304,000 元；瓦拉莫格湖(287 公頃，抽水量 $6.3 \text{ m}^3/\text{min}$)之建造費僅美金 45,000 元。

4.6.3 底層曝氣

由本研究前述之實驗室及現場觀察結果可知，翡翠水庫底層水處於厭氧狀態時，磷的釋出量會大增。而且由於深度大，上游進流水溫度要達到 15 度以下，才有機會進入底層將厭氧的底層水置換。因此，底層水曝氣可以改變底層水的厭氧狀態，阻止磷的釋出以及消除厭氧造成的不利環境，例如高濃度的氨、錳和

鐵。

底層曝氣有兩種主要方法，一是將水抽至水面，曝氣後再注回底層；一是直接在底層曝氧氣或空氣。揚水至水面的方法，可以在一個曝氣槽中用空氣曝氣。由於接觸時間短，氣體交換的效率可能會較差，可以用純氧來代替。

注氣揚水法之一是利用注氣泵將氣體注入一豎管的下端開口內部，同時因氣體的浮力將深層水帶到上層。待水接觸空氣後，水中氣泡散去，抽出之水由另一豎管送回深層。典型的設計如圖 4.47 及圖 4.48 所示。

底層曝氣的設計是依據底層水的總體積、底泥的攝氧率及曝氣後水中可能的溶氧量得到需要的水量。然後計算根據深度及水流之阻力，計算管徑大小及總水頭損失。接著計算需要之空氣量以推動水柱及足夠的空氣壓力及空壓機的馬力。關鍵的設計參數是深層水之需氧量，常以單位面積之需氧率表示(Oxygen Deficit Rate, ODR, $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)。現場估測可以兩次量測之深層水溶氧濃度及深層水深度來估計：

$$\text{ORD mg/m}^2/\text{day} = Z \{ \text{DO}_1 - \text{DO}_2 \} / (t_1 - t_2) \quad (4.1)$$

其中 Z 為平均深度(m)，DO₁ 及 DO₂ 分別為測量開始及終點之溶氧濃度，t₁ 為 t₂ 為開始及結束之時間。

空氣需要量可以計算如下

$$\text{理論空氣量 m}^3/\text{day} = \text{ORD} \times \text{Ah} \times 2 \times 10^{-6} / 1.205 \times 0.2 \quad (4.2)$$

其中 Ah 是深層水之總面積，2 是安全係數，0.2 是氧的分壓，1.205 是 20°C 一大氣壓下空氣中氧氣的重量(kg/m³)。此外，氣泡在水中的氧氣傳輸率大約是每一公尺 2.5%(Bernhardt, 1967)，依此可估計實際的空氣量。表 4.12 為應用底層水曝氣的一些案例。

4.7 底泥-水界面示蹤劑實驗

為確認底泥—水界面流況對底泥磷釋出通量之影響，。本計畫於今年 7 月 10 日大壩進行現地底泥-水界面示蹤劑實驗。當天施放情形請參考圖 4.49。示蹤劑成份是具保守性及對人體無害的示蹤劑牛奶，透過水下

攝影機觀察示蹤劑在水中 plume 的擴散、移動及分布面積隨時間變化，再以影像處理軟體計算面積大小，即可推估出延散係數。當天大壩水深約為 87 米，當水下攝影機到達底部時，光線非常微弱，以水底攝影機拍攝接近底部之景象時，見到大量沉降到底部的膠羽，在未壓密前約有 1.5 公尺厚。因此調整深度至 85 米，進行示蹤劑實驗。拍攝影像如圖 4.50 所示，示蹤劑施放之後，有逐漸往水平及上方移動，參考公式(3.16)計算，垂直向延散係數約為 $0.3-2.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 範圍。

由於夏季大壩有明顯分層，從現地示蹤劑實驗觀測，底部流況幾乎是呈靜止狀態。然而在水下 30m 處，有一股流速很大的水流，經查證可能是電廠發電的抽排水。

在實驗過程中我們發現水下攝影機組架在水中可能有受到繩子扭力旋轉的影響，使得螢幕上示蹤劑的延散擴散受到擾動，因此所推測之延散數據可能有高估情形。建議後續研究能改進設備，提高實驗精度。

第五章 結論

綜合整理，本計畫有以下數點結論：

1. 例行性檢測分析

(1) 翡翠水庫今年底泥砷、汞、鉛、銅、鋅及鎘之含量均低於「土壤污染監測基準」規定濃度，屬於正常值範圍。

(2) 今年4月底泥砷含量介於0.61-1.18 mg/kg，但8月砷含量明顯增高至6.05-10.85 mg/kg (圖4.15)。雖然該砷含量未超過「土壤污染監測基準」(詳附錄三)規定限值，30 mg/kg，計畫推測可能有外來的污染，建議加強水質監測及比對，予以確認。

(3) 今年增加檢測底泥鎘含量在4月為3.63-3.93 mg/kg之間(表4.3)，8月為1.08-1.85 mg/kg。下游比上游濃度略高。

(4) 今年底泥孔隙水各溶解性離子濃度除鈣之外，均較往常要低。而原本鈣、鎂濃度以上游點為高，今年各點均有顯著增加，底泥孔隙水中的地化反應可能已在改變，遂影響包括磷在內的孔隙水中各離子濃度。

(5) 各測點底泥營養鹽總氮及有機質含量和過去相當，但底泥營養鹽總磷的含量變化極大，4月測值介於224~1,130 mg/kg之間，8月測值介於389~616 mg/kg。比較4月測值，石碇子和後坑子底泥磷濃度有增加，但馬祖林、火燒樟和大壩卻降低了。

(6) 底泥粒徑組成，粒徑多小於106 μm ，50%集中於小於38 μm 粉粒之粒徑範圍。從2001-2003年之粒徑分佈變化來看，各採樣點隨時間主要粒徑皆有在大粒徑與小粒徑間來回往復的現象。推測這些底泥受到外界泥砂進入及組成比例的影響很大。底泥的運動也可能對大顆粒底泥具有淘洗的作用。

(7) 討論底泥推移之可能性，本次底泥粒徑由上游至下游之趨勢顯示上游石碇子細粒徑(38 μm 以下)比例明顯降低，有流失之情形；而大粒徑部分沒有增加，應不是暴雨沖刷土壤沉積的結果。可能是水位下降，靠近底泥之水流速較強，經過再懸浮與沉降，將細顆粒搬運至較下游之河段，留下非常均勻粒徑(106-38 μm)

之中顆粒。

(8) 底泥清淤之可行策略，在水庫水位下降到河床裸露時，可以進入河床以人工方式清除淤泥，對水位上升後之蓄水量，仍有相當之助益。

(9) 觀察底泥隨深度變化，底泥表層的污染物濃度多較下層濃度要高，尤其是營養鹽類的總磷、總氮。間接確認這些污染物都是由上層水而來，經過底泥礦化作用遂可能逐漸減少。而下層 2.5 公分以後的分層變化則不大。

2. 運用底泥磷模式 2B-SEPF 及水質模式 CE-QUAL-W2，模擬水質

(1) 底泥磷模式 2B-SEPF 預測磷通量和實驗室管柱實驗及現場結果接近。模式模擬出翡翠水庫總磷年內部負荷量為 4,110kg/yr，約為外部輸入總反應性磷量(18,900 kg/yr)之 21.7 %。

(2) 從模式參數敏感度分析結果顯示，底泥磷通量受到底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係數(ϵ_z)及底泥在有氧層及無氧層平衡態反應性無機磷濃度(EPC)影響甚大，是模式重要影響因子。本計畫底泥模式將無機磷礦物的溶出反應納入考慮，也確認出水庫地化特性在水庫磷的循環動態是一個很重要的機制。

(3) 從圖 4.29 溶氧之敏感度分析可知，當溶氧大於 2.0 mg/L，其對磷通量的影響已不明顯，但當溶氧降為零時，總磷通量卻較溶氧為 2.0 mg/L 時增加近兩倍。顯示在低溶氧時，溶氧對磷的釋出是一個重要的影響因子。

(4) 應用 W2 模式模擬水理，從大壩站分層水溫變化圖(圖 4.31-32)可知，水庫由夏季有明顯的分層，變溫層約在水下 15-60 公尺處，但到了冬季垂直水溫分佈逐漸均勻，水庫此時在水深 30-45 公尺內可能有垂直混合運動。特別在年初 1 至 3 月，大壩底層水可能被上游低溫水抬升，從模擬結果顯示，抬升高度接近水深 50 公尺處，建議此時應將底部缺氧水予以排除，保護水質。

(5) 模擬水溫在夏季 7 月以後表層水溫都比實測水溫要低約 1 至 2°C，經檢討模式輸入條件後發現，大壩站氣象測站的全年氣溫偏低，可能是造成水溫模擬值比實測水溫低的原因。由於水庫面積廣大，存在微氣候的差別，建議翡管局對氣象測站之監測設備及數據做查核，或在水庫上游加設氣象測站，較能反應出水域的氣象資訊。

(6) 應用水質模式 CE-QUAL-W2 模擬翡翠水庫六個水質參數：葉綠素 a、總磷、氨氮、硝酸氮、懸浮固

體以及溶氧濃度。葉綠素 a (圖 4.35)，模擬值大致符合季節性的變化，但在三月與十一月時雖然實測數據各測得一個 $4 \mu\text{g/L}$ 的濃度高峰，模擬值並未表現出。該時間是否有模式尚未考慮及輸入的事件、或適於春秋氣候環境條件之特殊藻種的形成，值得再深入研究討論。

(7) 圖 4.36 模擬總磷變化，模擬值大都落在實測數據的範圍內。翡翠水庫年報在灣潭測站十月份有一個明顯高濃度總磷 $76 \mu\text{g/L}$ ，猜測當時有外來污染。但模擬值並未模擬出來，模擬的結果和海洋所數據較為符合。

氨氮與硝酸氮的模擬結果顯示 (圖 4.37 與圖 4.38)，灣潭測站的氨氮略有高估而硝酸氮的模擬良好。大壩的氨氮模擬值和海洋所的測值有相同趨勢，但硝酸氮略有高估。比較翡翠水庫年報的測值可知，模擬結果仍在可接受的範圍內。

(8) 以民八十八年的翡翠水庫操作年報作為 W2 模式驗證的依據。由圖 4.41 至圖 4.46 顯示，W2 模式的預測大致符合實際情況。然而八十八年初在上游有一很大的磷入流量，對於上游水質的影響持續到二月底，大壩的模擬值反應了該事件，和二月大壩實測值吻合。但是三月份總磷實測值從二月的高峰降至個

位數，和總磷模擬值維持高濃度長達數月有出入，模擬的葉綠素 a 也偏低，上述誤差原因值得再探討及模擬改進。

(9) 計畫所建構水庫中磷循環之概念模式將入流磷種類予以細分，以探討翡翠水庫的磷質量平衡。依據磷的外部負荷綜合討論結果，文獻中以非點源模式估計之集水區營養鹽負荷偏低，其上限值僅略等於取水總磷量，尚無法考慮深埋離開之量大約 100,000 kg/yr 至 2,000,000 kg/yr。其原因可能為：一、暴雨期間高逕流中含有非常高濃度的懸浮固體及懸浮性磷，可能因為監測頻率不足，沒有完全紀錄到濃度之變化；二、可能水體中產生大量生物性或非生物性的次生礦物顆粒或膠羽，受重力作用沉積到底泥中(以水底攝影機拍攝接近底部之景象時，可以見到這些沉降到底部的膠羽，在未壓密前約有 1.5 公尺厚)。此部份建議能在後續之研究中，進一步釐清。

3. 水庫水質控制改善策略研究

(1) 水質控制改善策略評估結果，除了儘可能降低集水區點源及非點源之磷輸入量外，控制取水深度，底層水抽排及底層曝氣為最有可行性之水庫內優養控制改善方法。

(2) 做到取水深度的最佳化，必須對取水口處水質的垂直分布能即時監控，以及流況的正確模擬。此方法除了增設監測設備外，不需增加其他設施即可進行，是最經濟有效的方法。

(3) 底層水抽排可以縮短底層水的停留時間，減少氧氣耗盡的機會。抽除下層水可以避免有分層現象的水庫因底部厭氧而釋放出磷、有毒金屬、氨及硫化氫。因此，此方法有排除磷及抑制磷釋出的雙重效果。本計畫提供美國湖泊應用此改善方法實例及經費供翡管局參考。

(4) 由本研究前述之實驗室及現場觀察結果可知，翡翠水庫底層水處於厭氧狀態時，磷的釋出量會大增。而且由於深度大，上游進流水溫度要達到 15°C 以下，才有機會進入底層將厭氧的底層水置換。因此，底層水曝氣可以改變底層水的厭氧狀態，阻止磷的釋出以及消除厭氧造成的不利環境，例如高濃度的氨、錳和鐵。

4. 底泥-水界面的示蹤劑實驗

(1) 從水下攝影機觀察得知，夏季大壩有明顯分層，底部流況幾乎是呈靜止狀態。從現地示蹤劑實驗結果，夏季底泥-水界面之垂直向延散係數為 $0.3-2.5\text{cm}^2/\text{sec}$ 。然而由於架設的水下攝影機在水中有受到繩子

扭力旋轉的影響，使示蹤劑的延散擴散受到擾動，計算延散數據可能有高估，建議後續研究能改進設備，提高實驗的精度。

第六章 參考文獻

- Allison, JD, Brown, DS, Novo-Gradac, KJ. *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).
- Chen YJ, Wu SC. Effects of sediment phosphorus release associated with the density current on water quality of a sub-tropical and deep reservoir in Taiwan. *Water Science and Technology*, 48 (10), pp.151-158 (2003).

- Cole, T. M., E. M. Buchak. CE-QUAL-W2: A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, User Manual, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers (1993).
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. and Newroth, P. R. Restoration and Management of Lakes and Reservoir, 2nd, ed., Lewis Publishers, Boca Raton (1993).
- Golterman, HL, Booman, A. Sequential Extraction of Iron-Phosphate and Calcium-Phosphate from Sediments by Chelating Agents. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 23, 904-909(1988).
- Ha, SR, Bae, GJ, Park, DH, Cho, JH. Improvement of Pre- and Post-processing environments of dynamic two-dimensional reservoir model CE-QUAL-W2 based on GIS. 9th International Specialized Conference on Watershed and River Basin Management, September 11, Edinburgh, Scotland, UK (2002).
- Hakanson, L, Jansson, M. *Principles of Lake Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1983)
- Hieltjes, A, Lijklema, L. Fractionation of Inorganic Phosphate in Calcareous Sediment. *J. Environ. Qual.*, 9,405-407(1980).
- House, WA, Denison, FH. Factors Influencing the Measurement of Equilibrium Phosphate Concentrations in River Sediments. *Wat. Res.*, 34(4), 1187-1200(2000).
- Parkhurst, DL. 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)
- Schecher, WD, McAvoy, DC. *MINEQL⁺: a chemical equilibrium modeling system, version 4.0 for Windows User's Manual.*, ME: Environmental Research Software (1998).
- Seibold, E, W.H. Berger. *The sea floor, an introduction to marine geology*, 288(1982).
- Thomann, RV, J.A. Muller. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row, Publishers, New York (1987).
- Williams, JDH. Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie. *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 413-429(1976).

- 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)。
- 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一新店”(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委託，國立台灣大學環境工程學研究所執行(2001)。
- 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二(第一年)，台北翡翠水庫管理局委託，國立台灣大學環境工程學研究所執行(2002)。
- 台北翡翠水庫管理局，翡翠水庫操作年報,1988-2001.
- 台北翡翠水庫管理局，翡翠水庫操作年報，1996.
- 唐太山，曾文水庫二維水理水質之模擬與風險分析，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文(2001)。
- 陳怡靜，吳先琪，郭振泰，德基水庫集水區暴雨期磷營養鹽釋出型態及水庫磷質量平衡研究，集水區保育—水庫集水區整治規劃與管理研討會，161-178 (2000)。
- 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)。
- 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)。
- 駱尚廉，湖泊水庫水質改善及優養化評估法之建立和調查，台灣大學環境工程研究報告 No.342 (1992)。
- 吳先琪，水庫中磷的質量平衡及控制策略研究(第二年)，行政院環保署委託，EPA-79-003-12-024，台灣大學環境工程學研究所執行（1991）。
- 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，集水區保育—水庫集水區整治規劃與管理研討會，677-700 (2000)。

- 台北水源特定區管理委員會，台北水源特定區水源水質水量保護執行成果報告(2001)。
- 台北翡翠水庫管理局網站，<http://www.feitsui.gov.tw/>, 2003。
- 林鎮洋，黃丕陵，黃正義，陳孝行，余嘯雷等，水環境研究中心 89 年度綜合執行計畫，經濟部水資局委託，台北科技大學執行(2000)。
- 林鎮洋，黃丕陵，黃正義，陳孝行，余嘯雷等，水環境研究中心 90 年度綜合執行計畫，第二部份：建立前瞻性水質水量管理策略，經濟部水資局委託，台北科技大學執行(2001)。
- 林鎮洋，黃丕陵，黃正義，陳孝行，余嘯雷等，水環境研究中心 91 年度綜合執行計畫，第二部份：建立前瞻性水質水量管理策略，經濟部水資局委託，台北科技大學執行(2002)。
- 林鎮洋，余嘯雷，黃丕陵，翡翠水庫集水區管理規劃之研究，台北翡翠水庫管理局，台北科技大學 (2000)。
- 張尊國，余嘯雷，范正成，張斐章，鄭克聲，蘇明道，環境敏感地帶調查—台北水源特定區水質管理系統之建立，第一至第四部份，行政院環保署委託，台灣大學農工所執行(1995)。
- 駱尚廉，余嘯雷，環境敏感地帶調查—水源水質水量保護區不同土地使用型態對水體水質之影響，行政院環保署委託，台灣大學環境工程學研究所執行(1994)。
- 台灣自來水(股)公司，澄清湖與蘭潭水庫水質改善規劃報告，開元工程顧問股公司執行(1991)。
- 台灣自來水(股)公司，寶山及永和山水庫水質改善規劃，開元工程顧問股公司執行(1992)。
- 郭振泰，吳先琪，李鴻源，澄清湖底淤泥清除研究，台灣大學土木工程學研究所，水利工程組研究報告第 7909 號(1990)。
- 吳新國，熊華軍，湖泊沉積物中有機質的快速釋放對水質影響的模擬研究，21 世紀可持續發展之環境保護—第七屆海峽兩岸環境保護學術研討會論文集， 519-523(2001)。
- 莊子旺，水庫優養控制優選模式之發展與應用，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文(1998)。
- 郭振泰、吳俊宗等，台灣地區給水水源優養評估法之建立及其優養程度調查(一)，環保署委託，台大土木工程研究所執行，民國 79、80 年
- 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研究所碩士論文(2002)。

圖 1.1 本計畫研究進度及預定完成工作項目

進度內容	2 個	4 個	6 個	8 個	10 個
	月	月	月	月	月
1. 參考文獻蒐集彙整	[Progress bar from 0 to 4 months]				
2. 例行性底泥檢測分析	[Progress bar from 0 to 8 months]				
2.1 第一次採樣	[Triangle icon at 2 months]				
2.2 第二次採樣	[Triangle icon at 6 months]				
3. 底泥磷模式 2B-SEPF 參數校正及敏感度分析	[Progress bar from 0 to 6 months]				
4. 水質模式 CE-QUAL-W2 輸入參數整理	[Progress bar from 0 to 8 months]				
4.1 參數彙整及資料蒐集	[Progress bar from 0 to 4 months]				
4.2 模式校正及驗證	[Progress bar from 4 to 8 months]				
4.3 水質模擬	[Progress bar from 6 to 8 months]				
5. 翡翠水庫磷的質量平衡	[Progress bar from 4 to 8 months]				
6. 水質控制改善策略可行性評估	[Progress bar from 6 to 10 months]				
7. 現地示蹤劑試驗	[Progress bar from 6 to 8 months]				
8. 期中報告書及期中簡報	[Triangle icon at 6 months]				
9. 期末報告書初稿及期末簡報	[Triangle icon at 10 months]				
10. 送交期末報告書定稿本	[Progress bar from 8 to 10 months]				

期中簡報

期末簡報

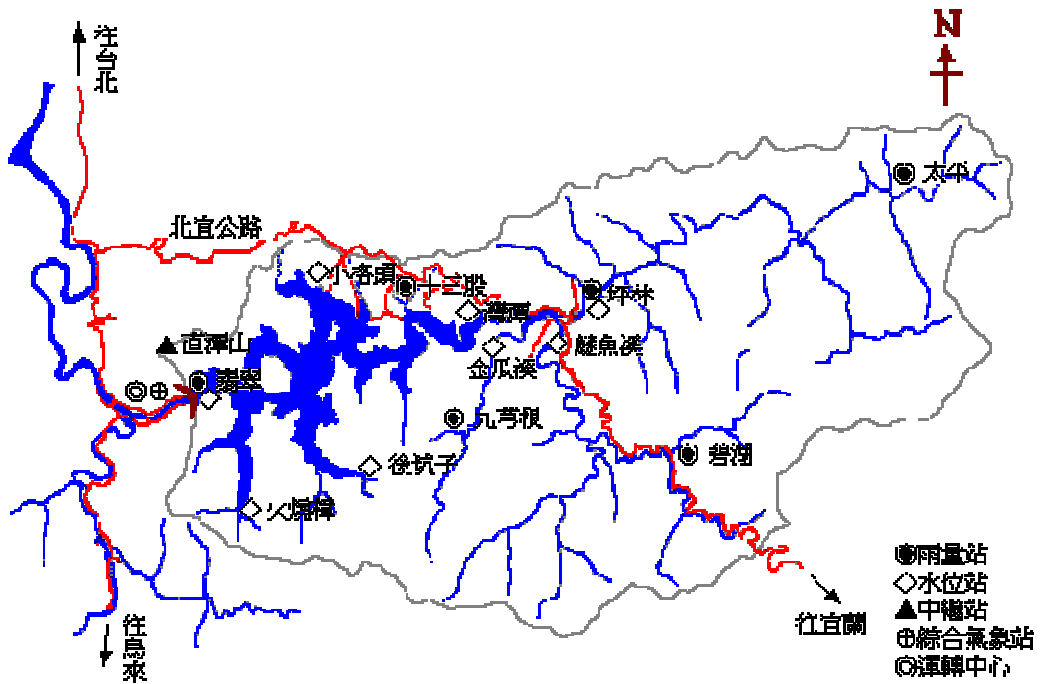


圖 2.1 水庫水文氣象站分佈

(資料來源: 翡管局網站 http://www.feitsui.gov.tw/index_Chinese.html, 2003)

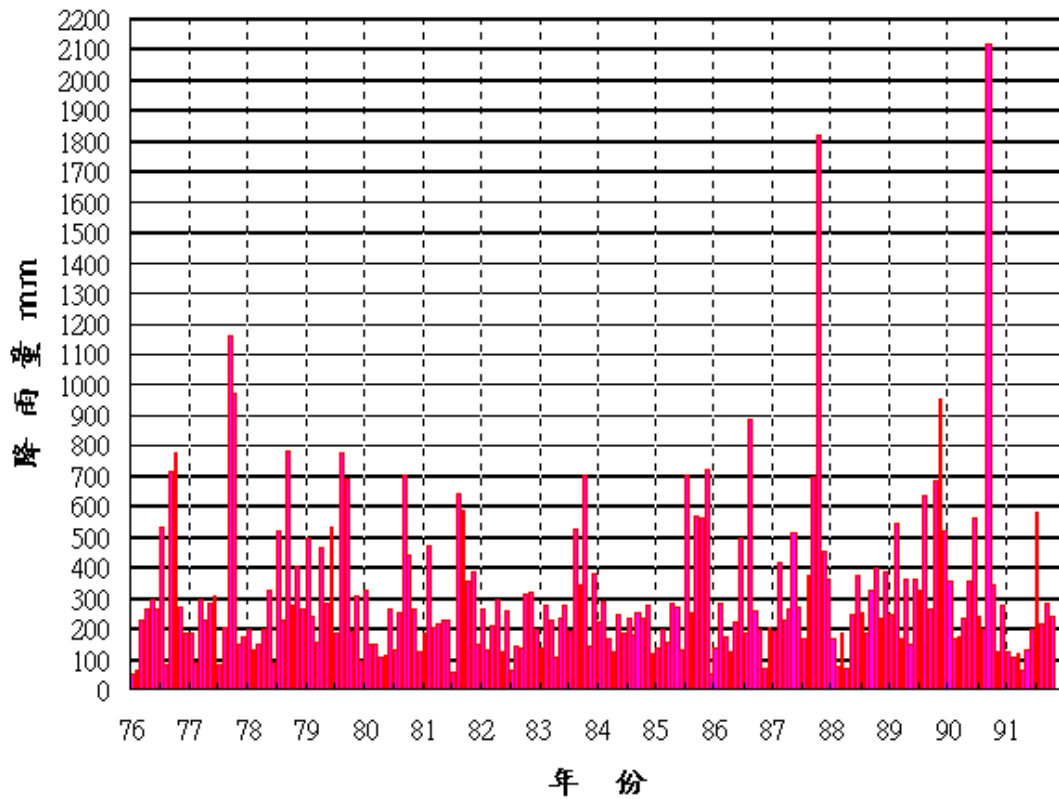


圖 2.2 水庫歷年月雨量組體圖

(資料來源: 翡管局網站 http://www.feitsui.gov.tw/index_Chinese.html, 2003)



圖 2.3 水庫水質監測站

(資料來源: 翡管局網站 http://www.feitsui.gov.tw/index_Chinese.html , 2003)

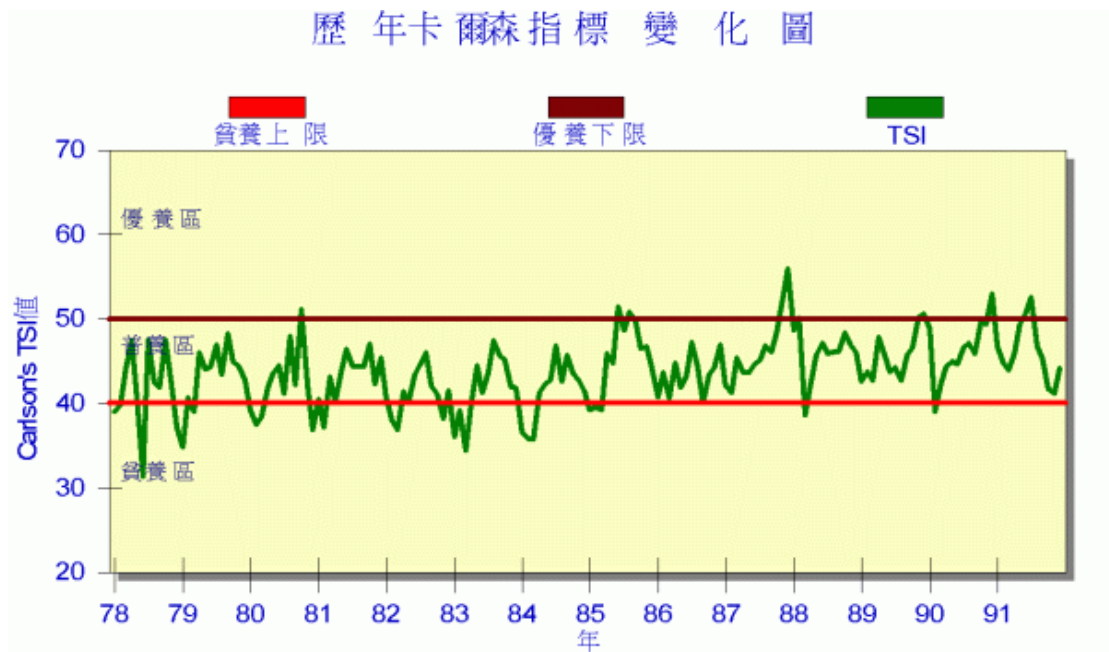


圖 2.4 歷年水質 Carlson 指標變化

(資料來源: 翡管局網站 http://www.feitsui.gov.tw/index_Chinese.html , 2003)

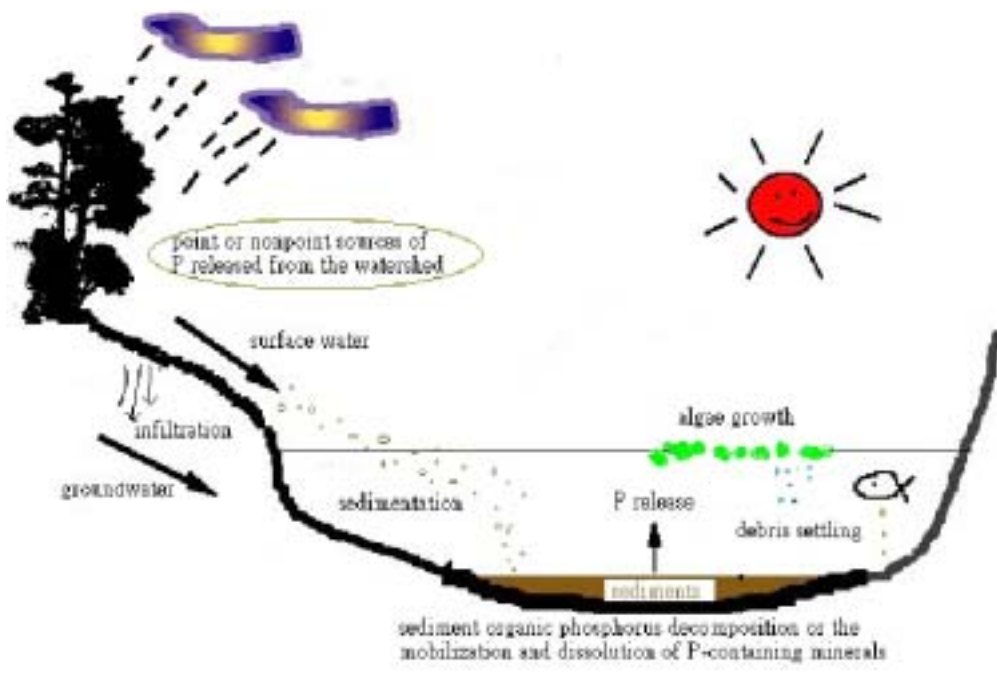


圖 2.5 水庫集水區磷的循環

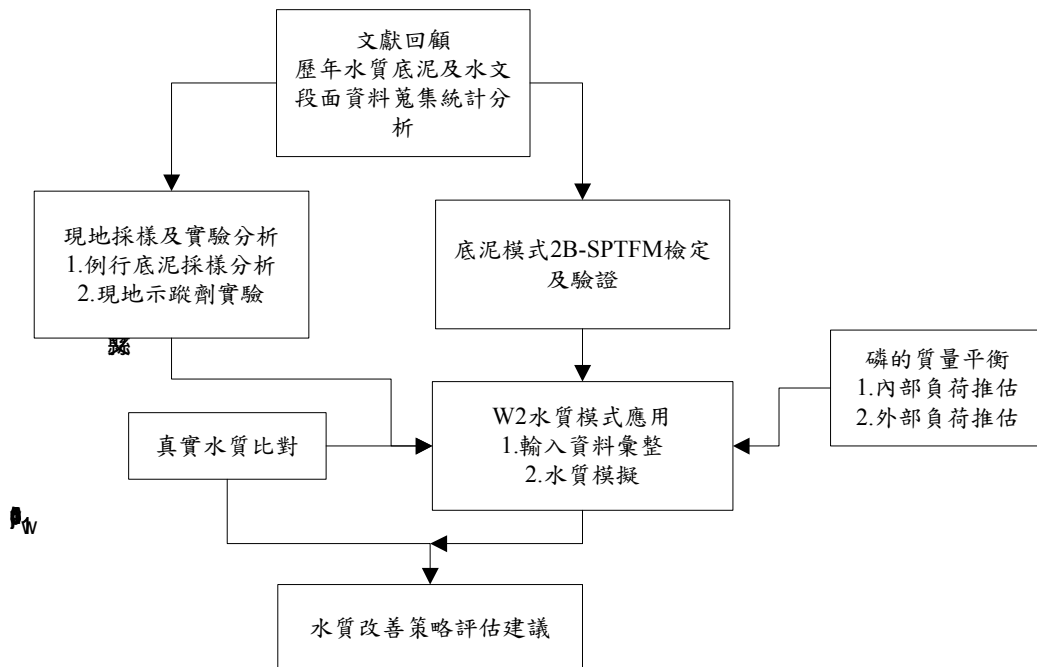


圖 3.1 本計畫研究架構流程

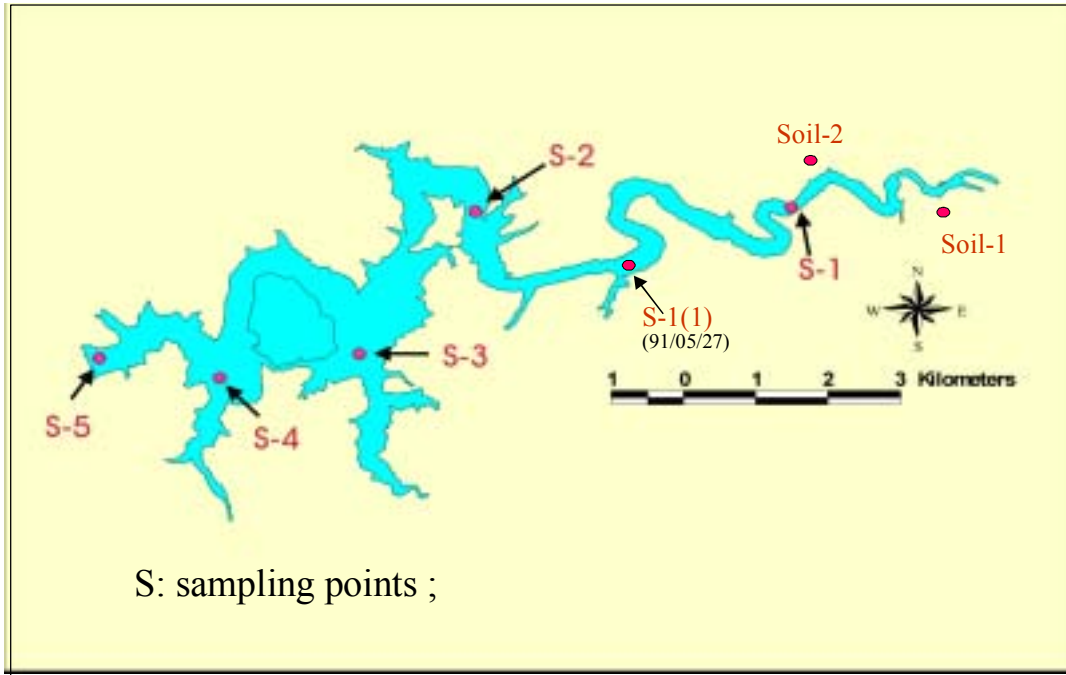


圖 3.2 翡翠水庫底泥採樣點位置



圖 3.3 貫入式之套管底泥採樣器

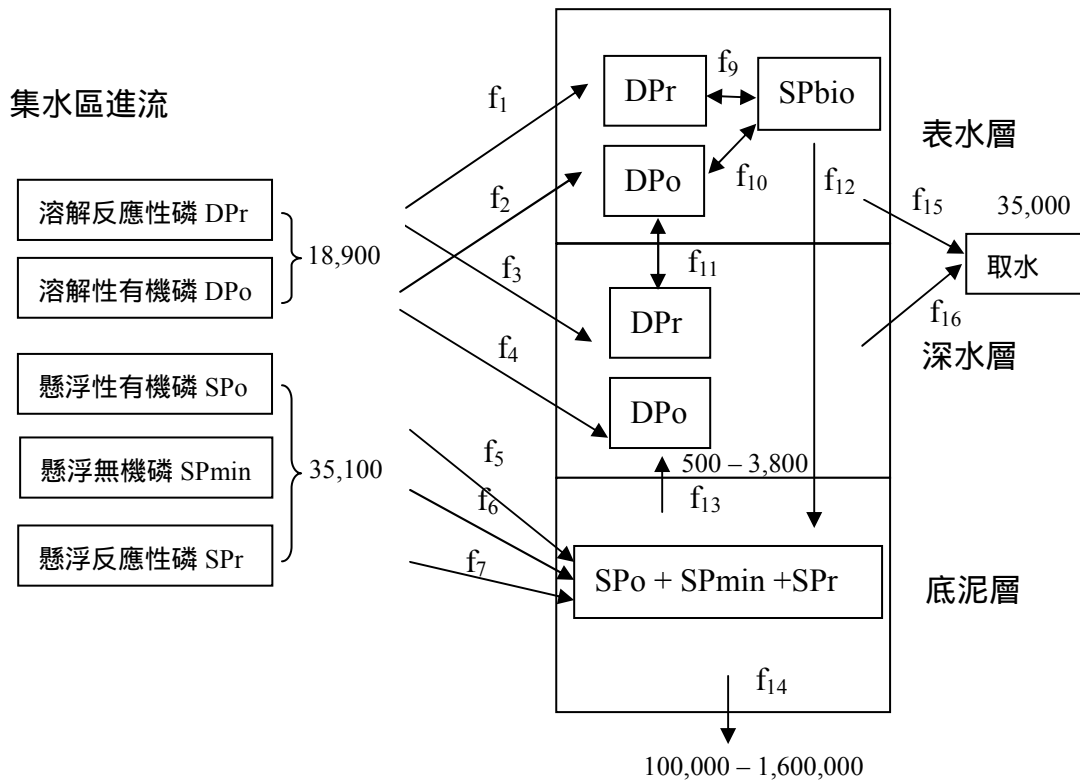


圖 3.4 水庫磷循環之概念模式

$\Sigma f_1 \sim f_8 = 54,000 \text{ kg/yr}, 9,677 \sim 1,803,000 \text{ kg/yr}$ (進水濃度乘上流量，

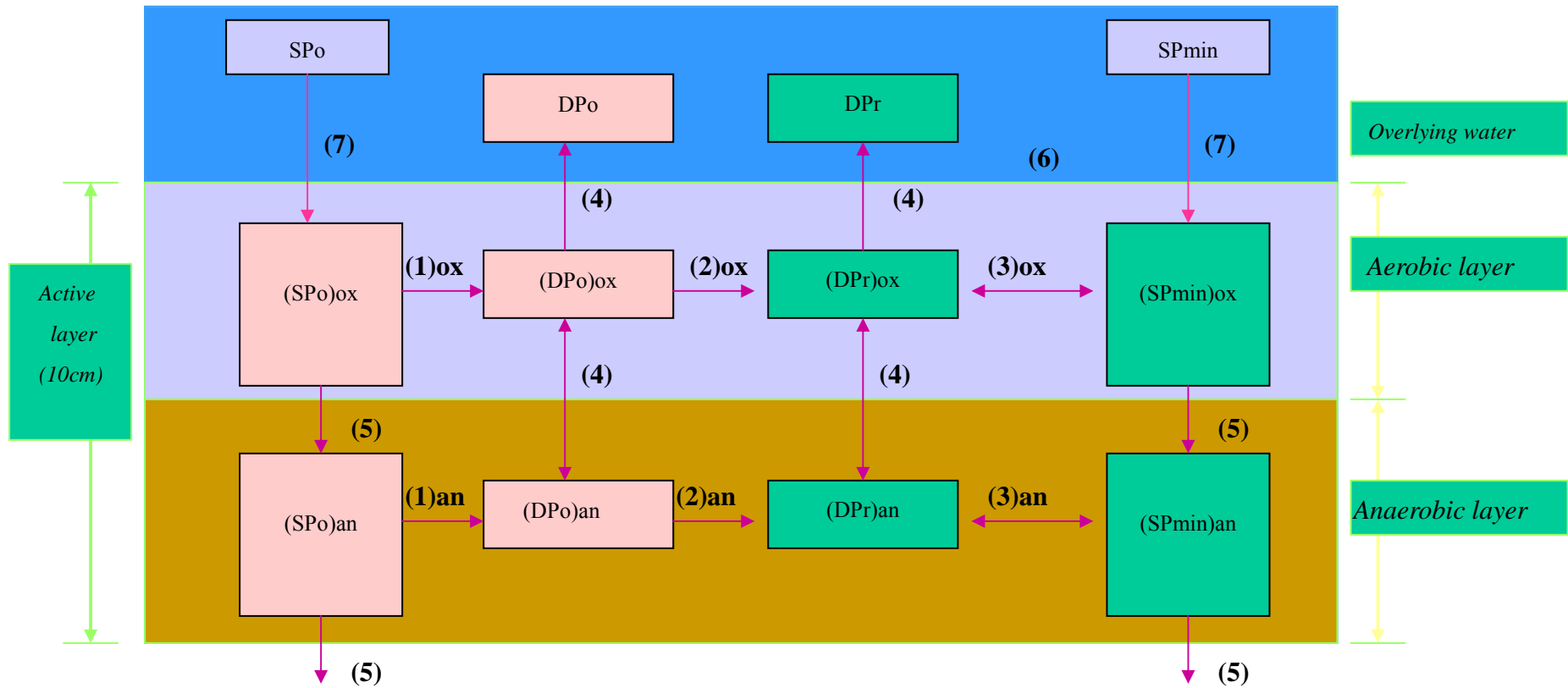
Table 2.1 推估之非點源量)

$\Sigma f_1 \sim f_4 = 18,900 \text{ kg/yr}$ (溶解性磷 = $0.35 * 54,000 \text{ kg/yr}$)

$f_{13} = 500 \sim 3,800 \text{ kg/yr}$ (實驗及現場測量及乘上底面積)

$f_{15} + f_{16} = 35,000 \text{ kg/yr}$ (取水濃度乘上流量)

$f_{14} = 100,000 \sim 1,600,000 \text{ kg/yr}$ ($0.5 \sim 8 \text{ cm/yr}$ 之沉埋率)



Mechanisms: (1) Microbial decomposition ; (2) Mineralization; (3) Geochemical reaction; (4) Diffusion; (5)Burial;(6)Boundary condition(vertical mixing) (7) Sedimentation.

圖 3.5 底泥磷模式 2B-SEPF 的概念模式

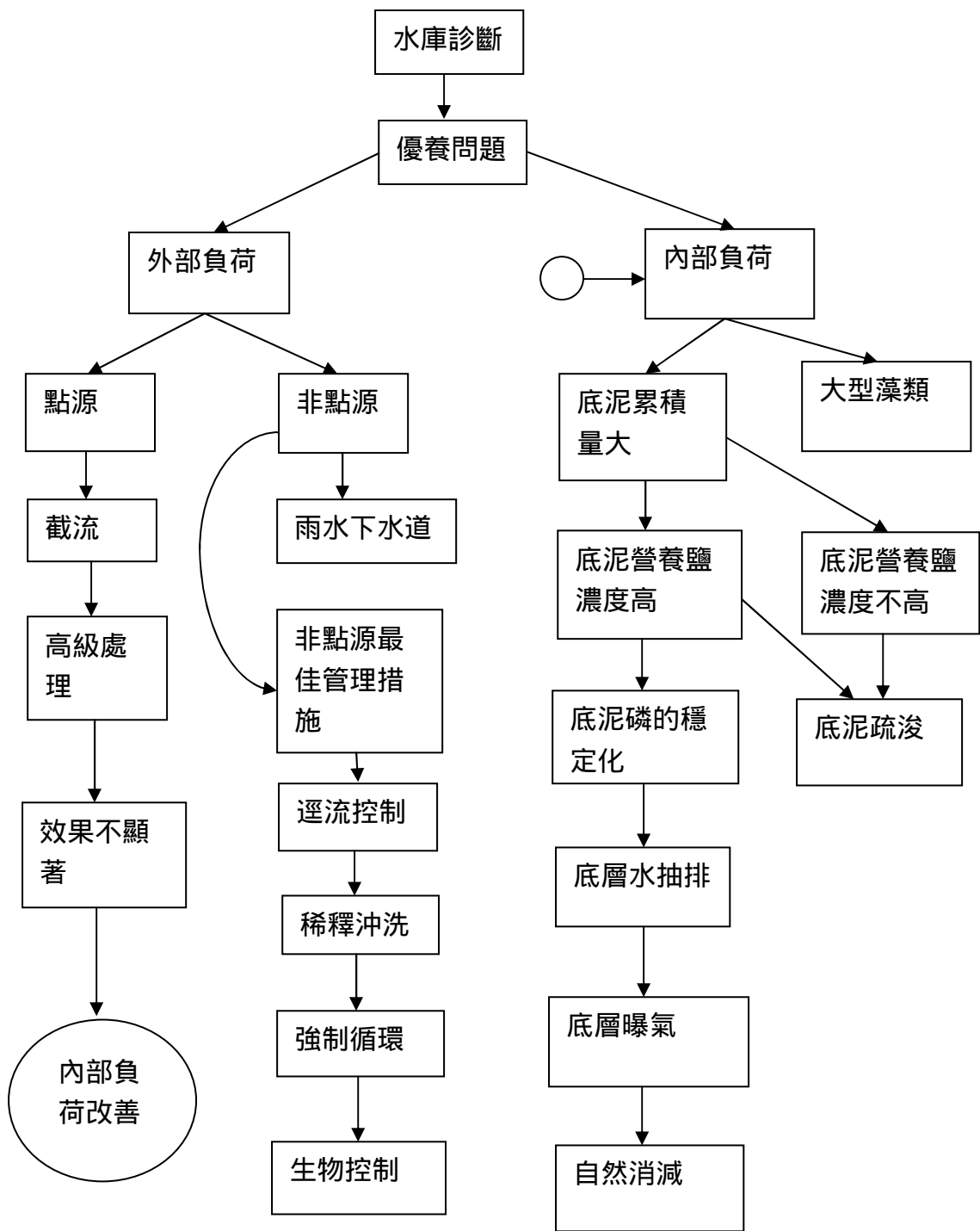


圖 3.6 水庫優養控制改善策略決策樹

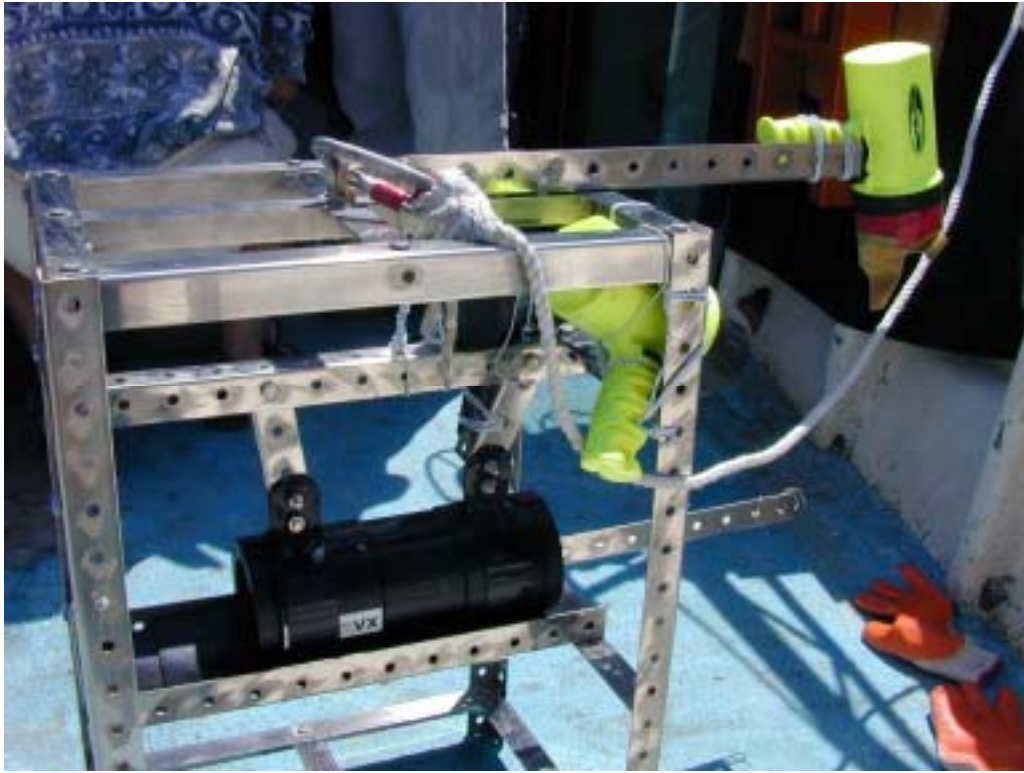
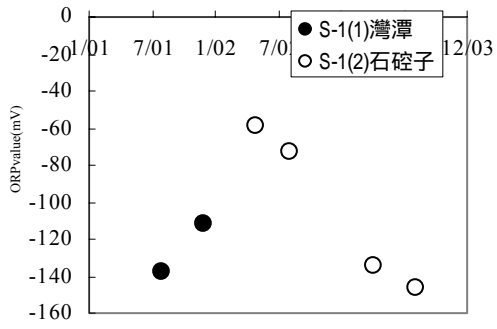
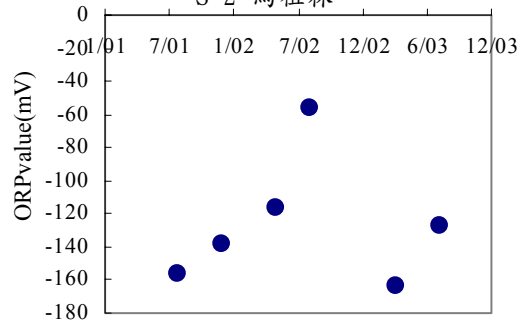


圖 3.7 現地示蹤劑實驗裝置

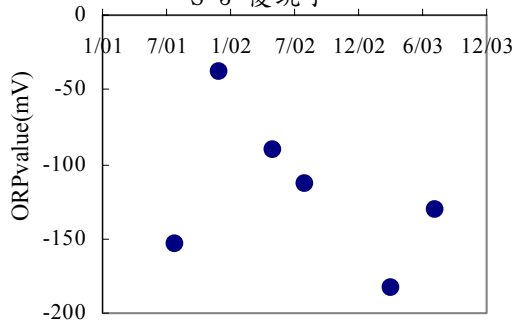
S-1(1) 灣潭或 S-1(2) 石碇子



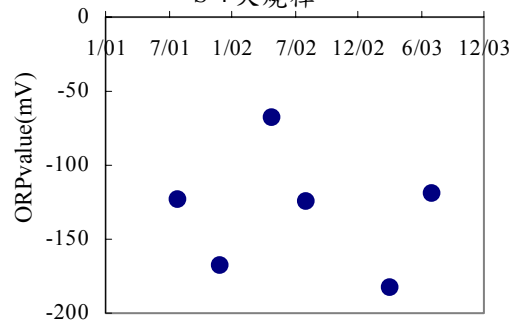
S-2 馬祖林



S-3 後坑子



S-4 火燒樟



S-5 大壩

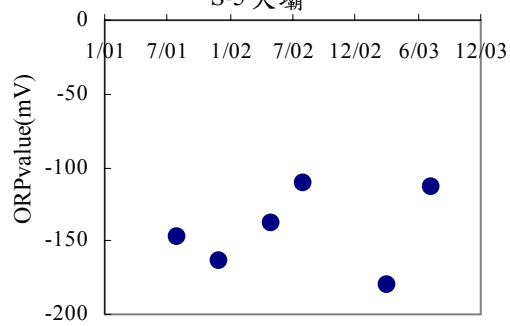


圖 4.1 2001-2003 年底泥 ORP 值變化

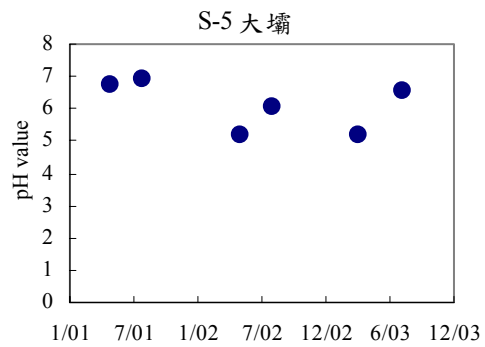
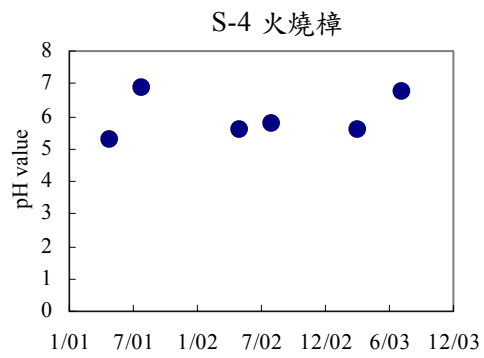
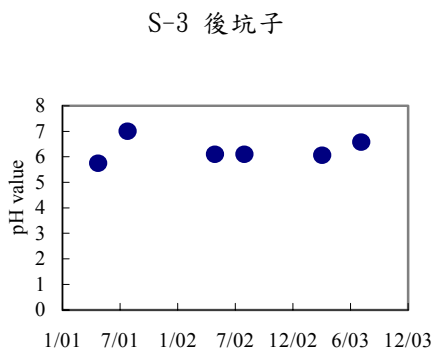
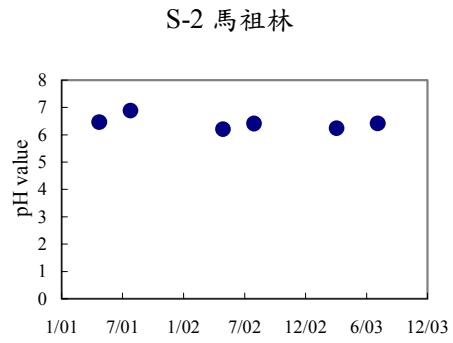
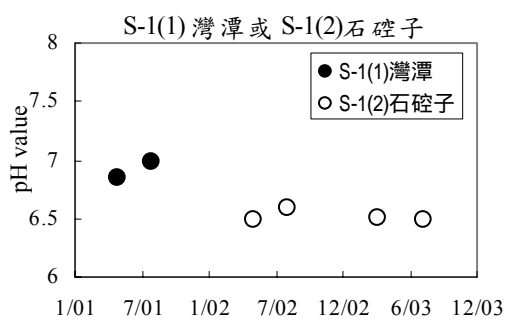


圖 4.2 2001-2003 年底泥 pH 值變化

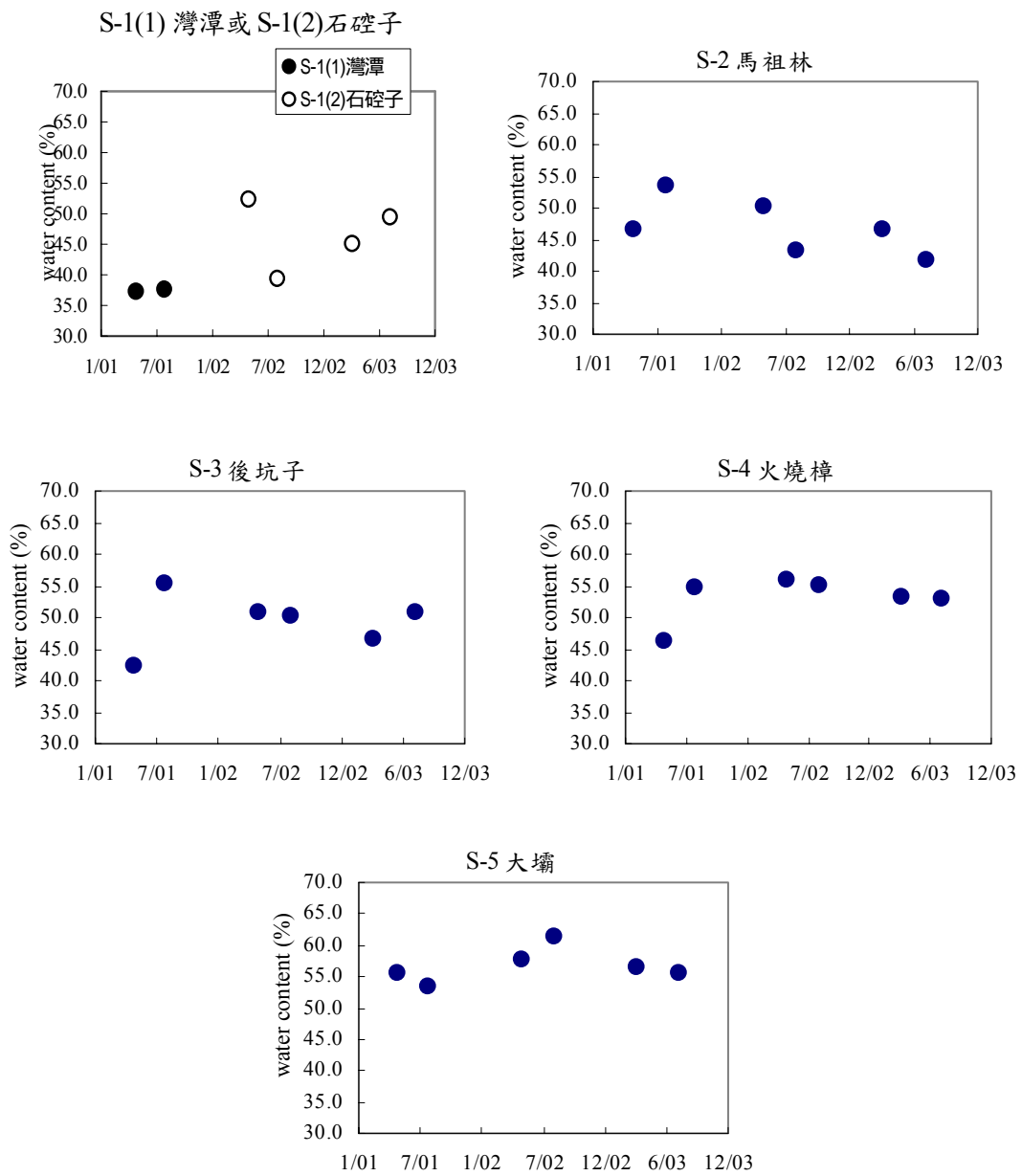


圖 4.3 2001-2003 年底泥含水量變化

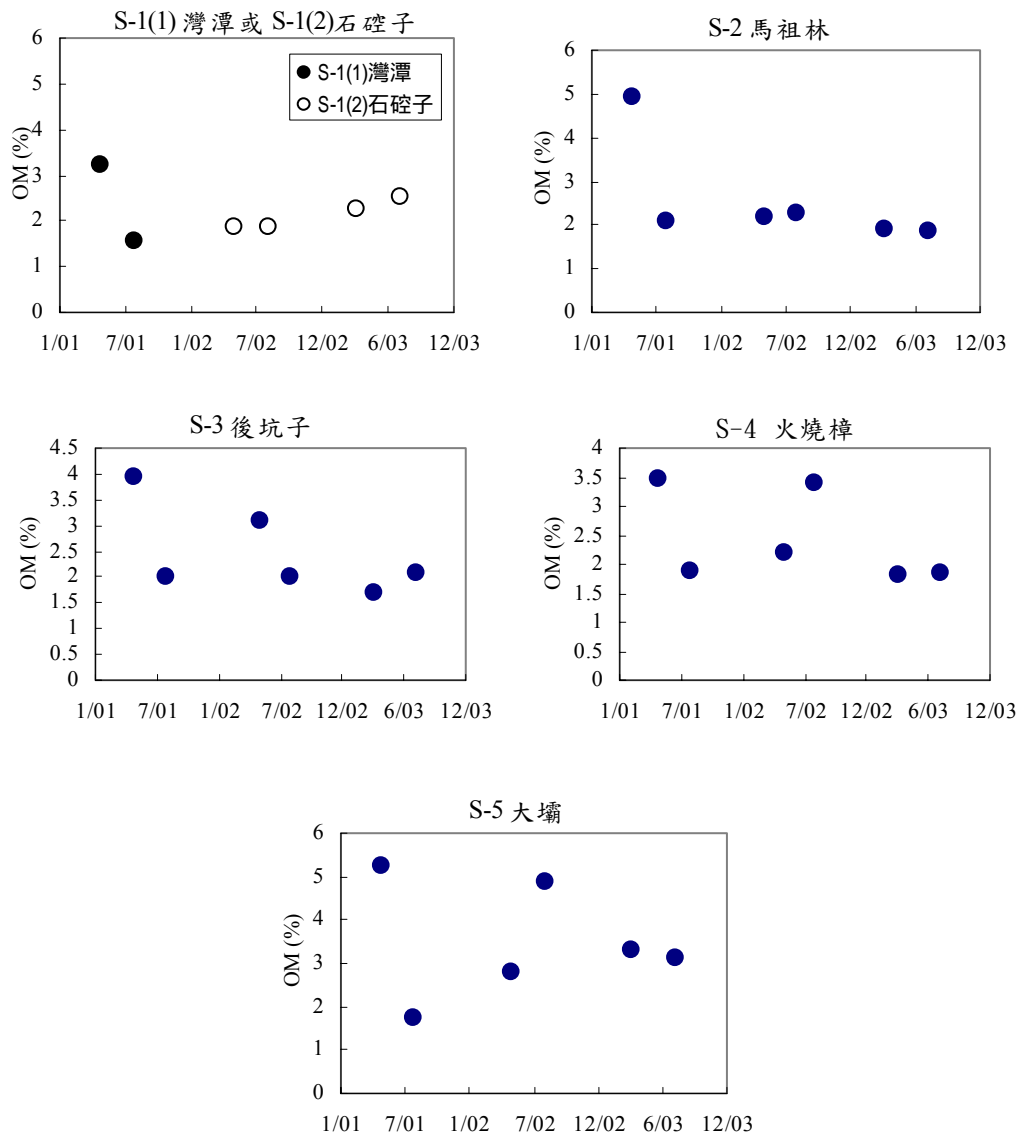


圖 4.4 2001-2003 年底泥有機質變化

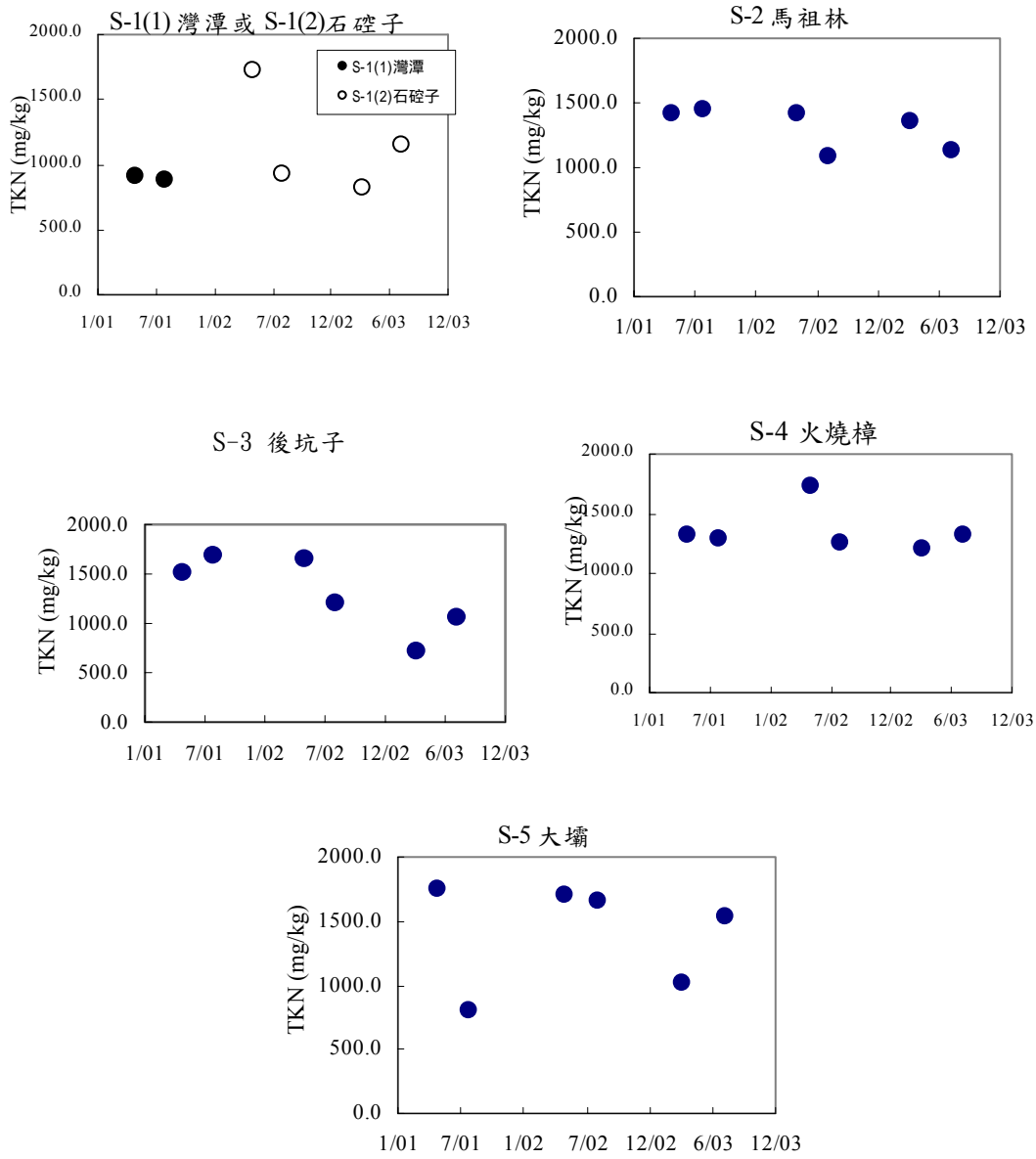


圖 4.5 2001-2003 年底泥總氮變化

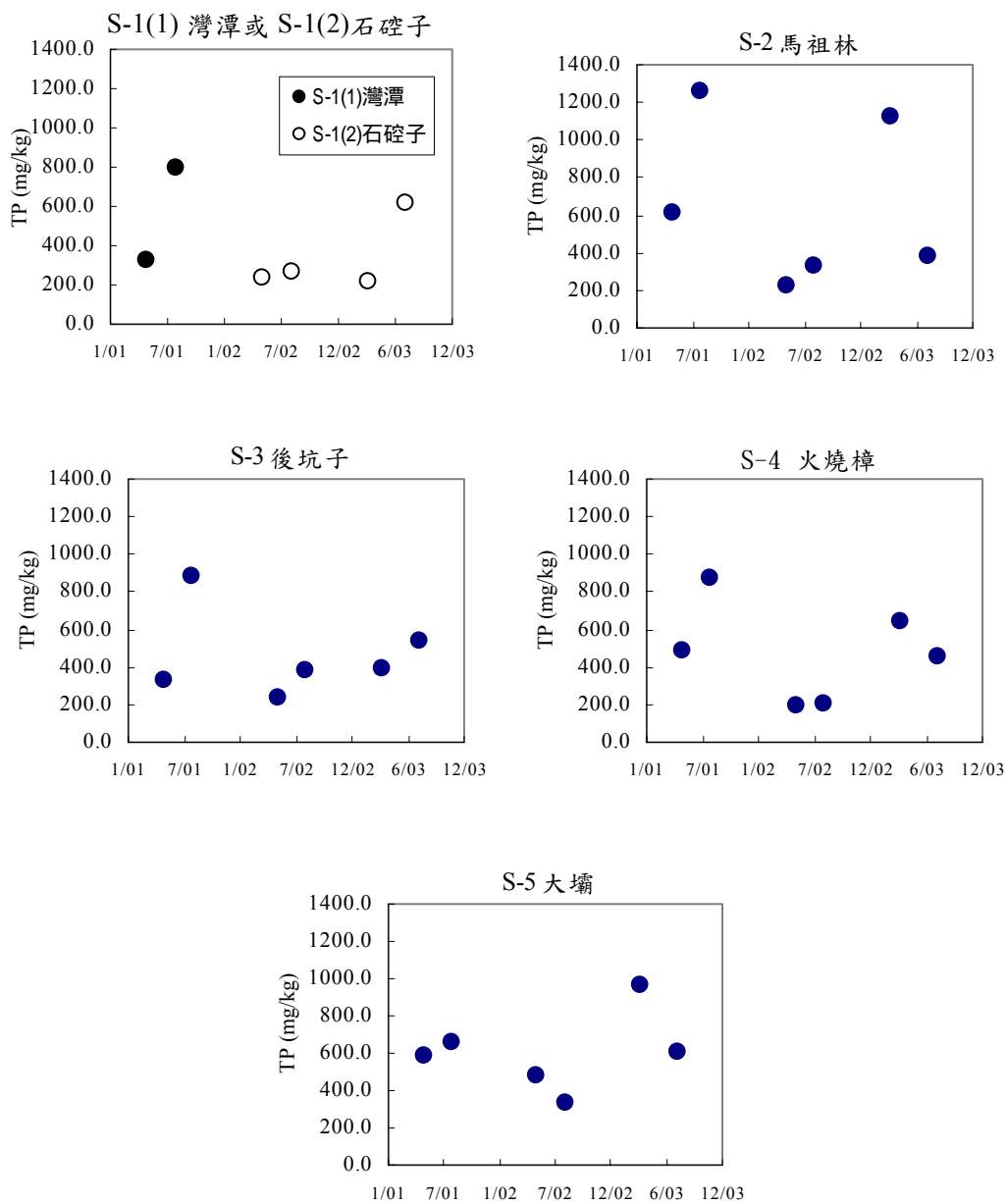


圖 4.6 2001-2003 年底泥總磷變化

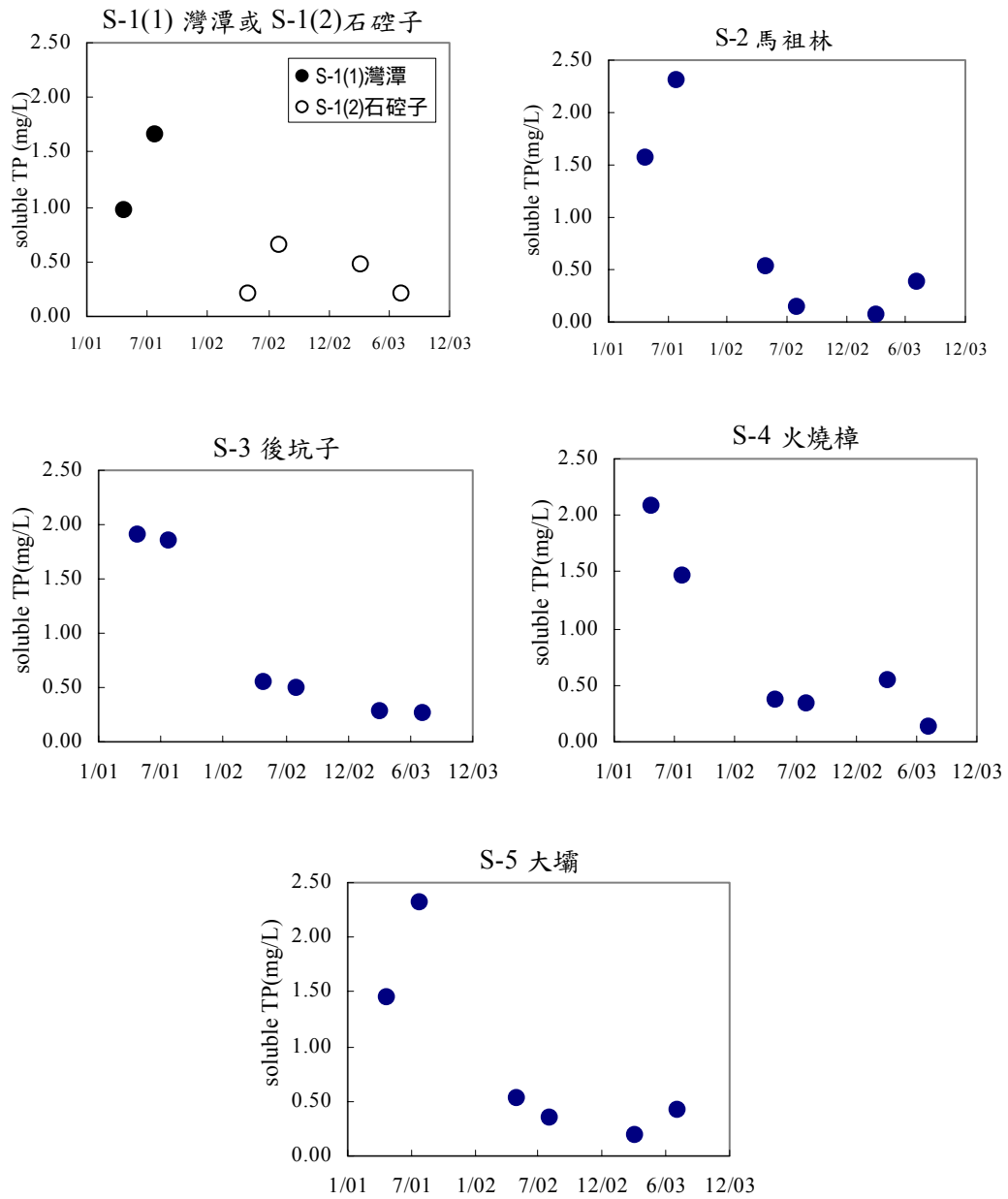


圖 4.7 2001-2003 年底泥孔隙水總磷變化

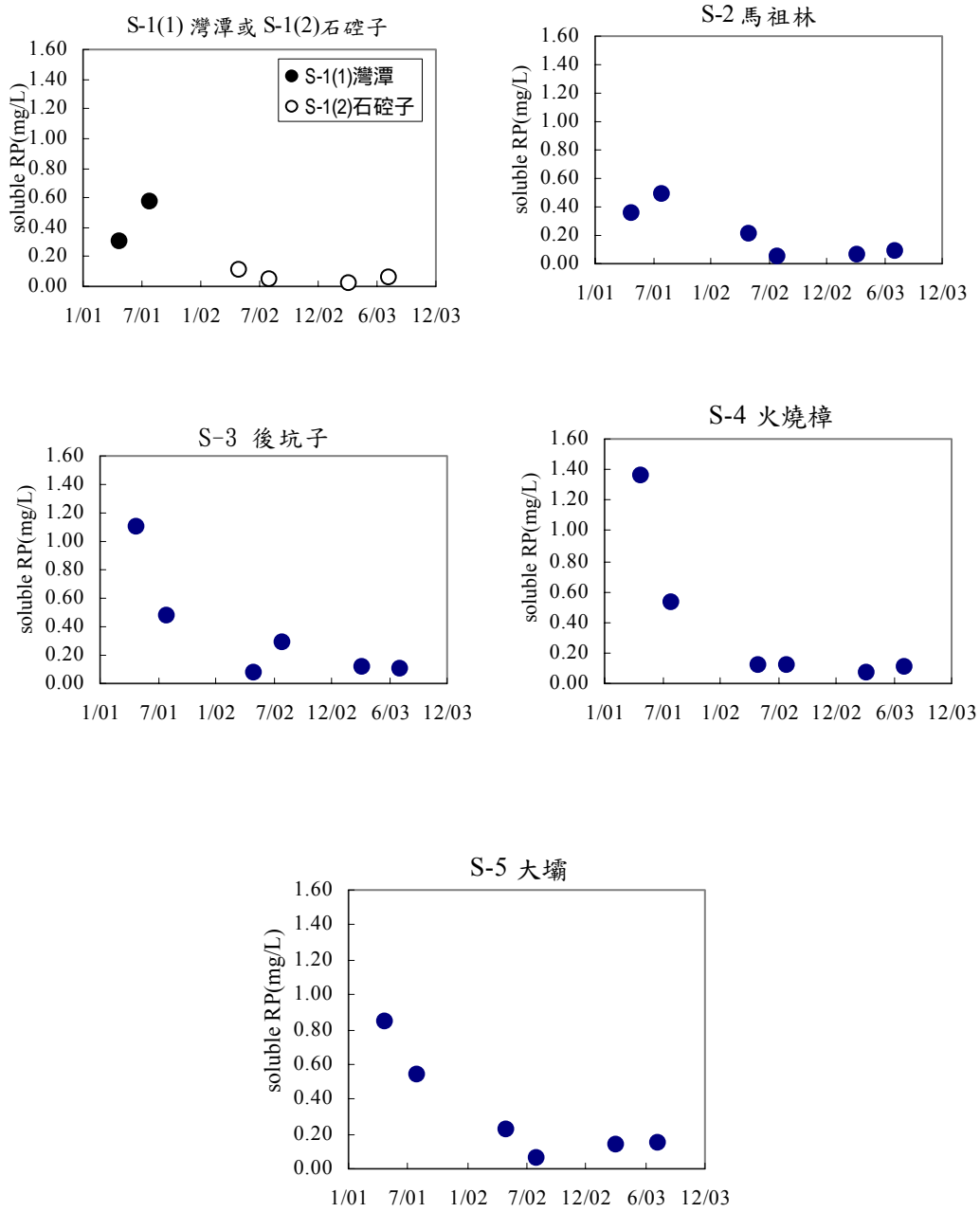


圖 4.8 2001-2003 年底泥孔隙水反應性磷變化

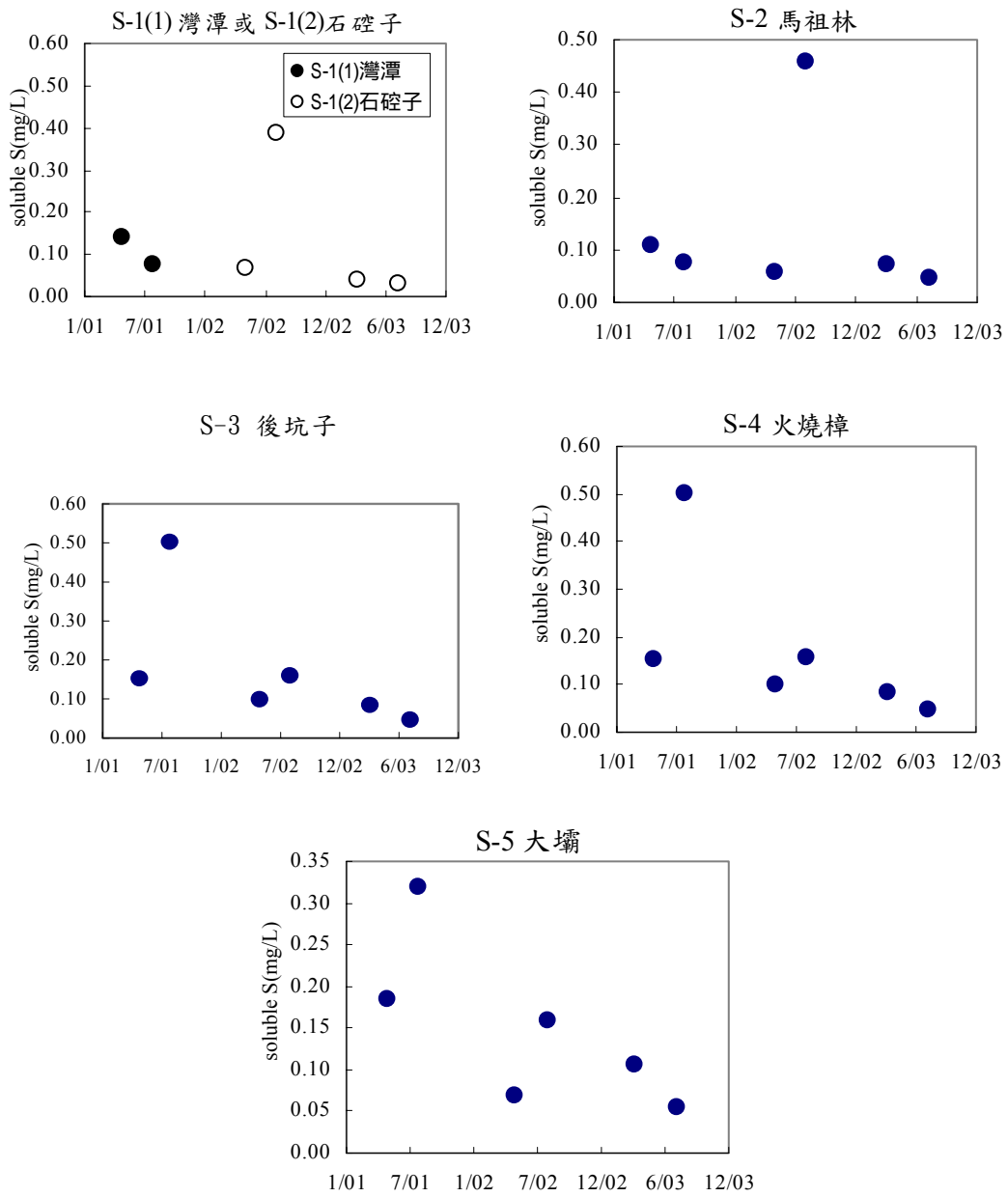


圖 4.9 2001-2003 年底泥孔隙水溶解硫變化

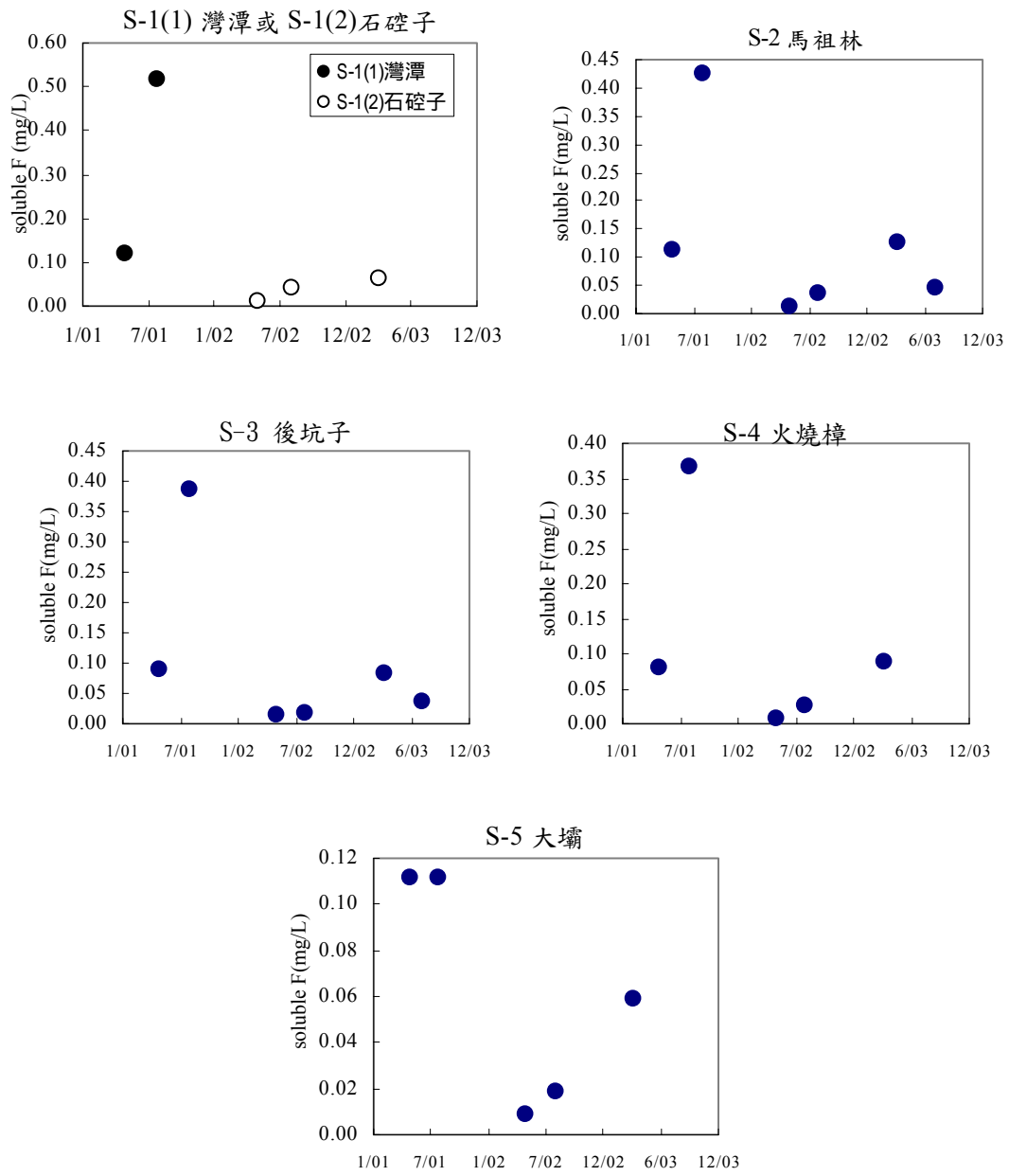
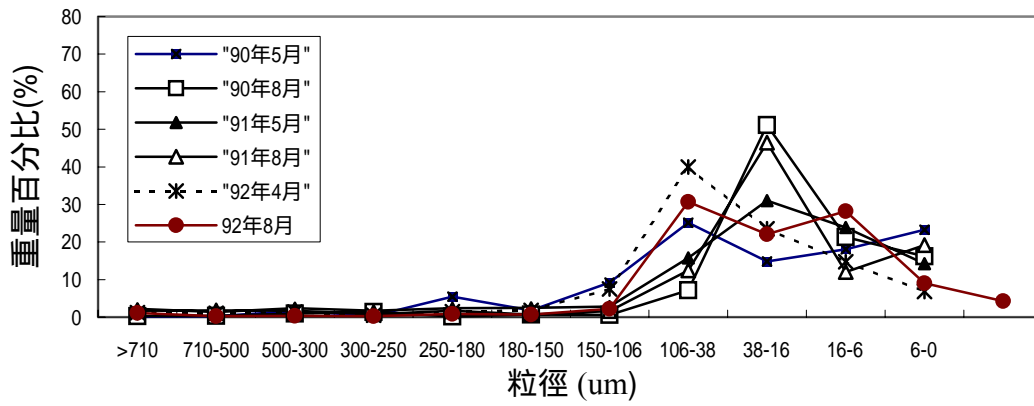


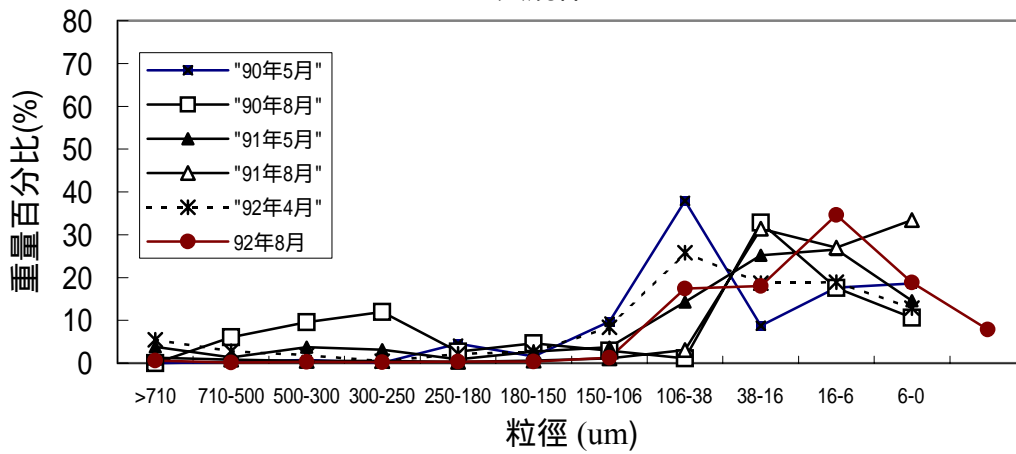
圖 4.10 2001-2003 年底泥孔隙水溶解氟變化

S-5 大壩



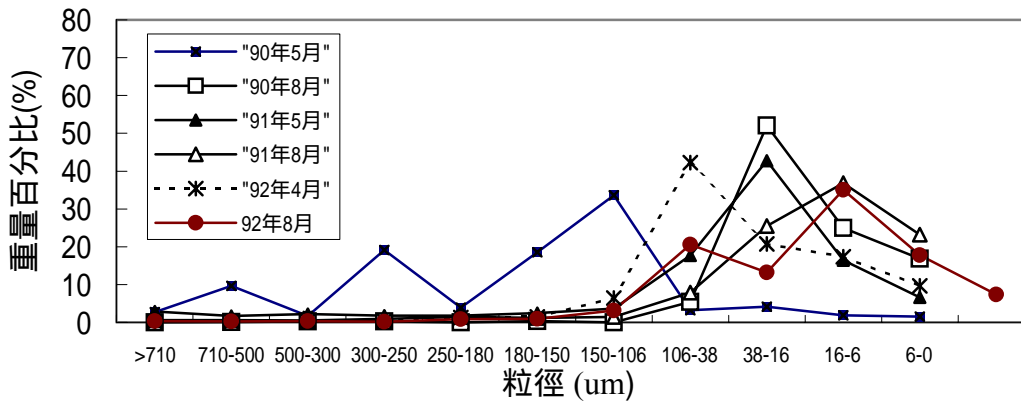
(1)S-5 大壩 (民 90-92 年)

S-4火燒樟



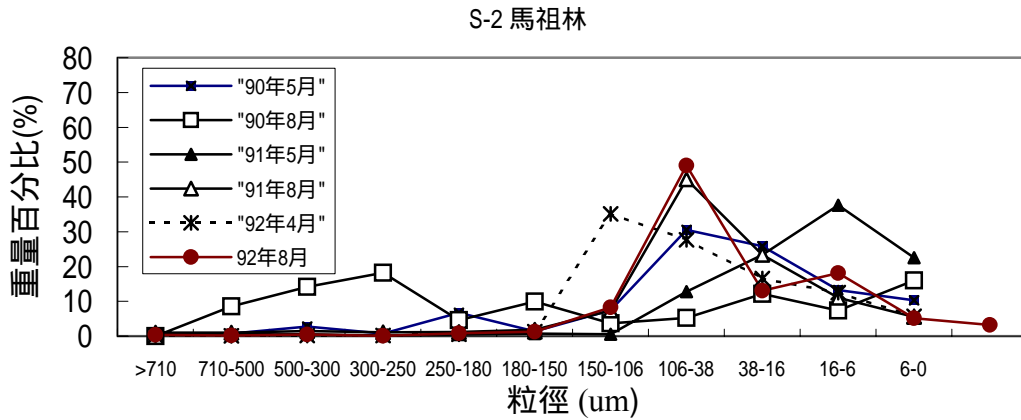
(2)S-4 火燒樟 (民 90-92 年)

S-3 後坑子

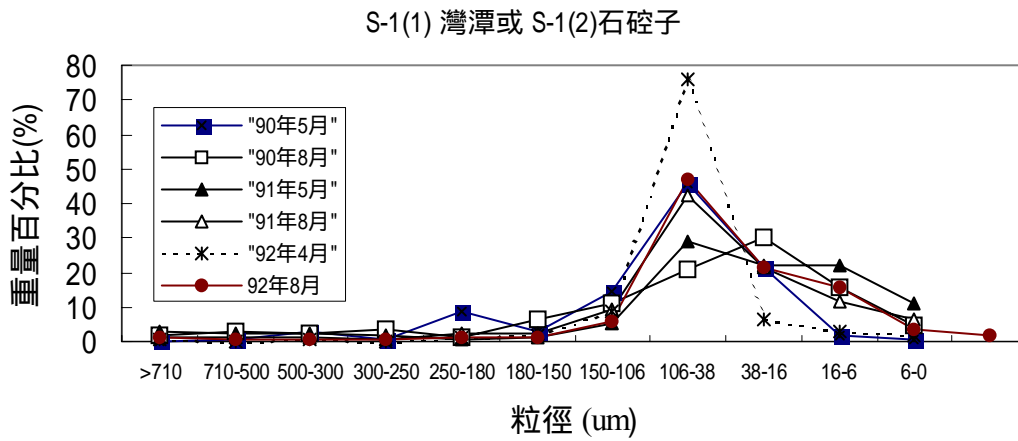


(3)S-3 後坑子(民 90-92 年)

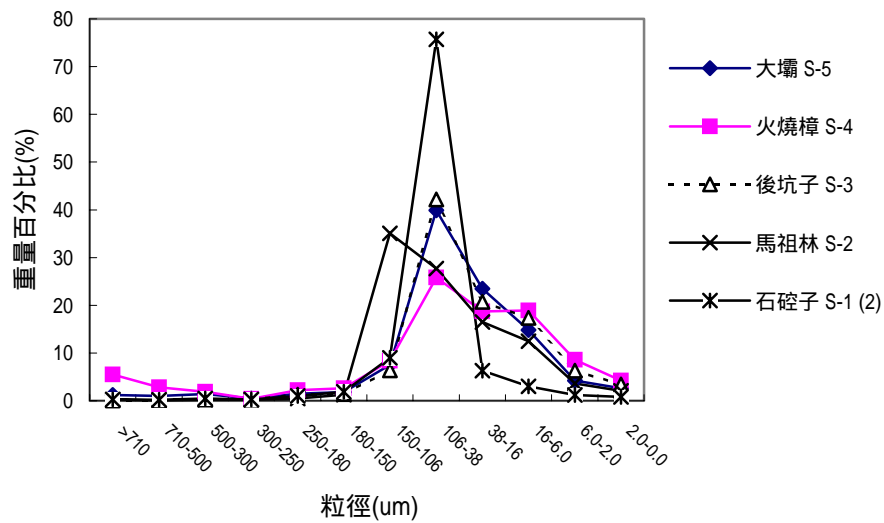
圖 4.11 2001-2003 年底泥粒徑組成變化



(4)S-2 馬祖林 (民 90-92 年)



(5) S-1 灣潭 (民 90 年)及石碇子 (民 91-92 年)



(6) 92 年 4 月不同採樣點粒徑分布之比較

圖 4.11 2001-2003 年底泥粒徑組成變化(續)

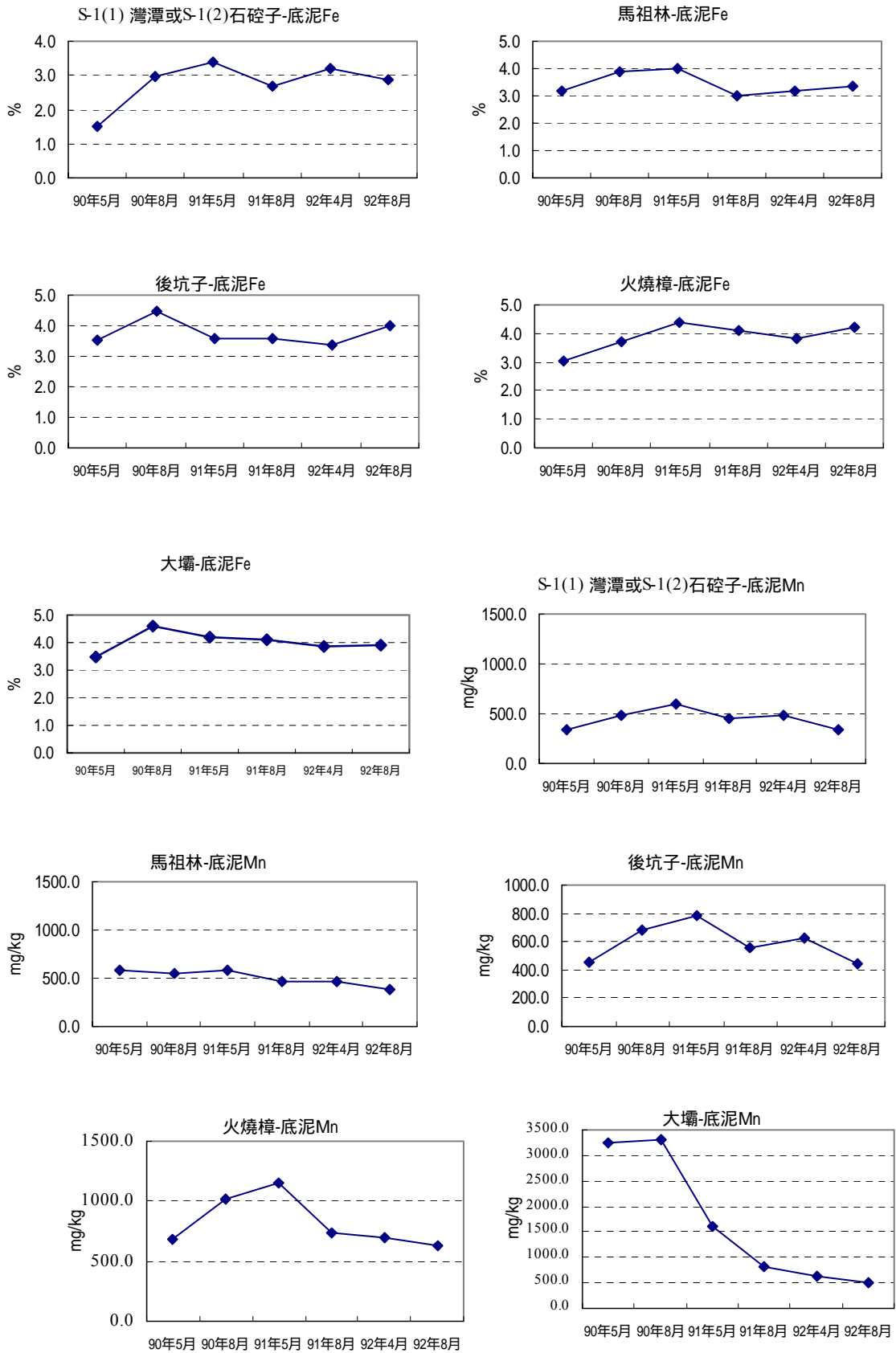


圖 4.12 2001-2003 年底泥金屬含量變化(鐵、錳)

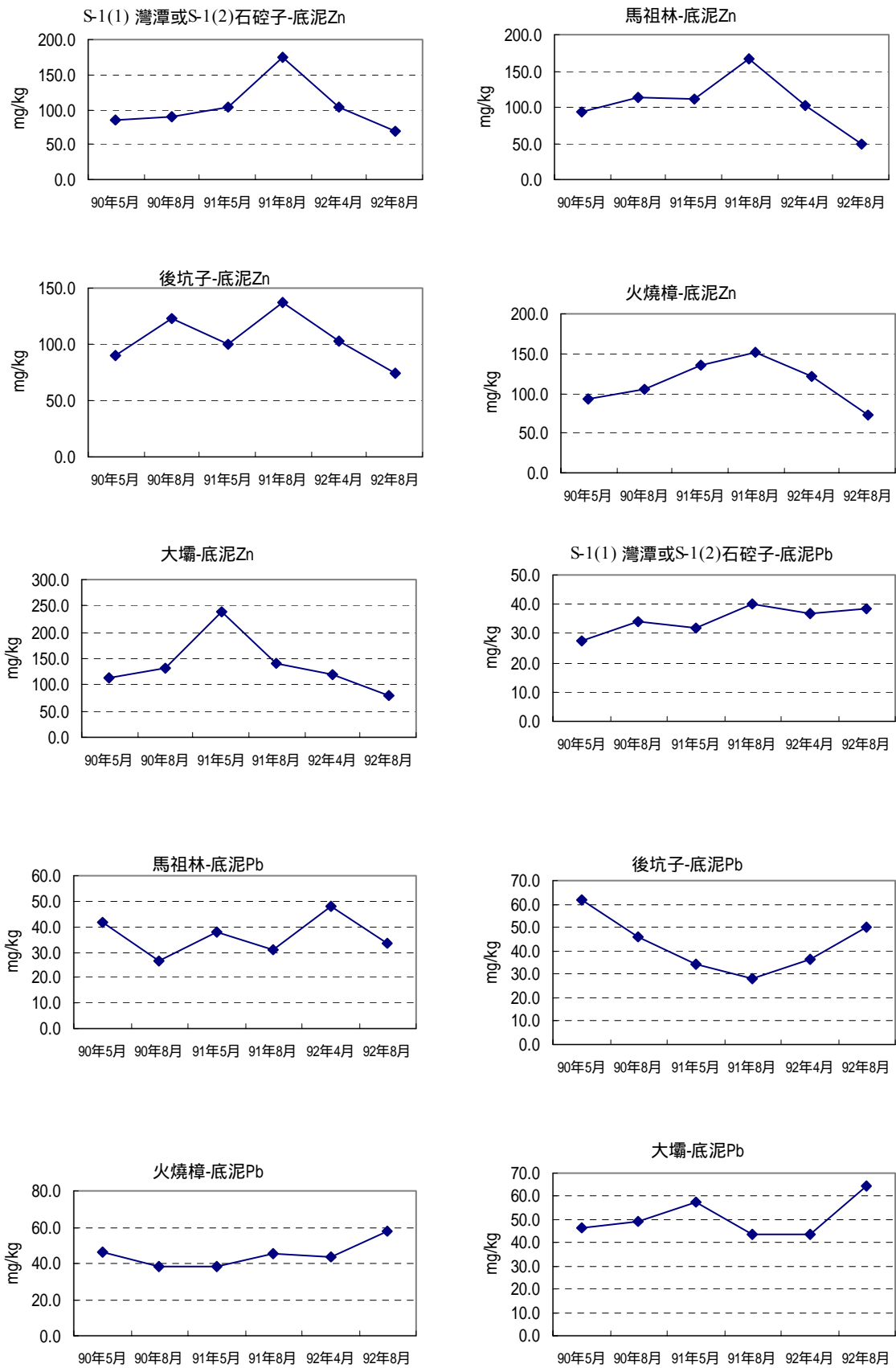


圖 4.13 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(鋅、鉛)

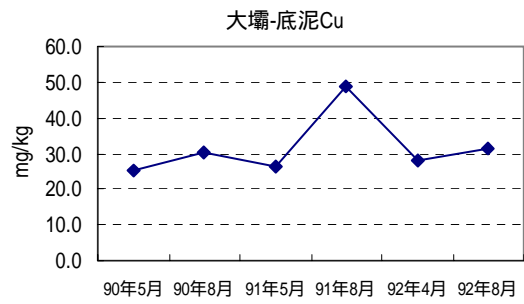
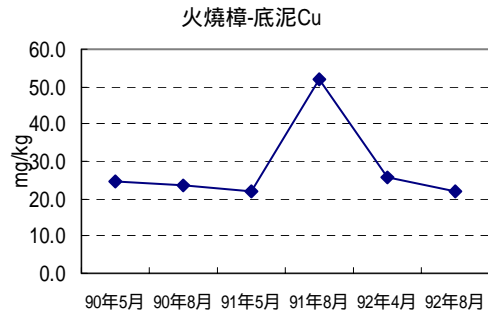
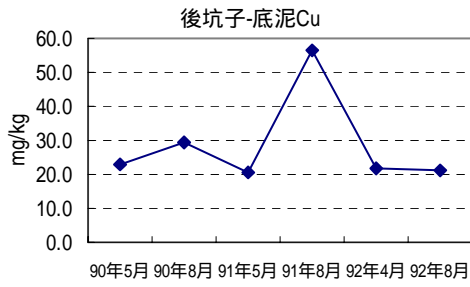
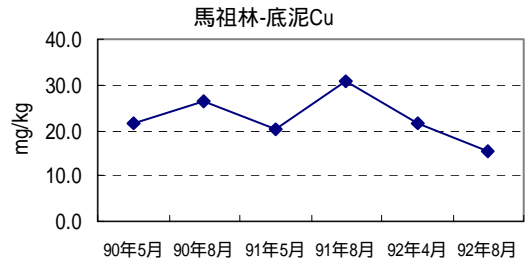
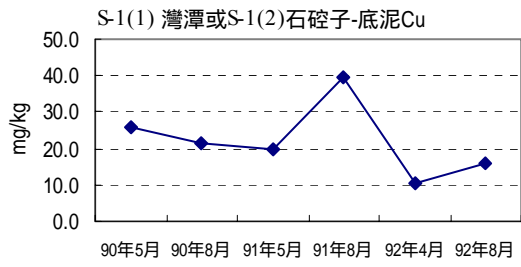


圖 4.14 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(銅)

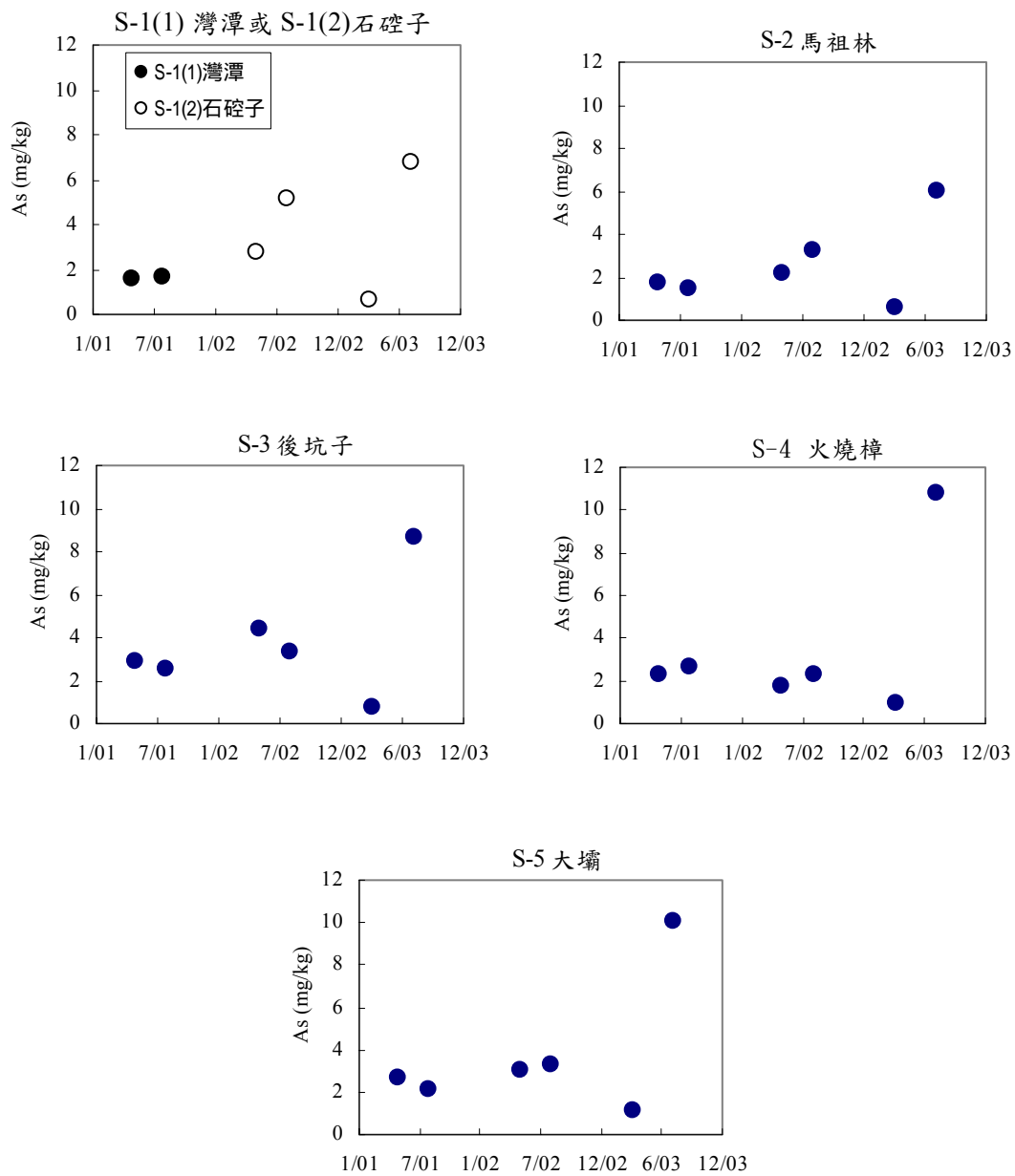


圖 4.15 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(砷)

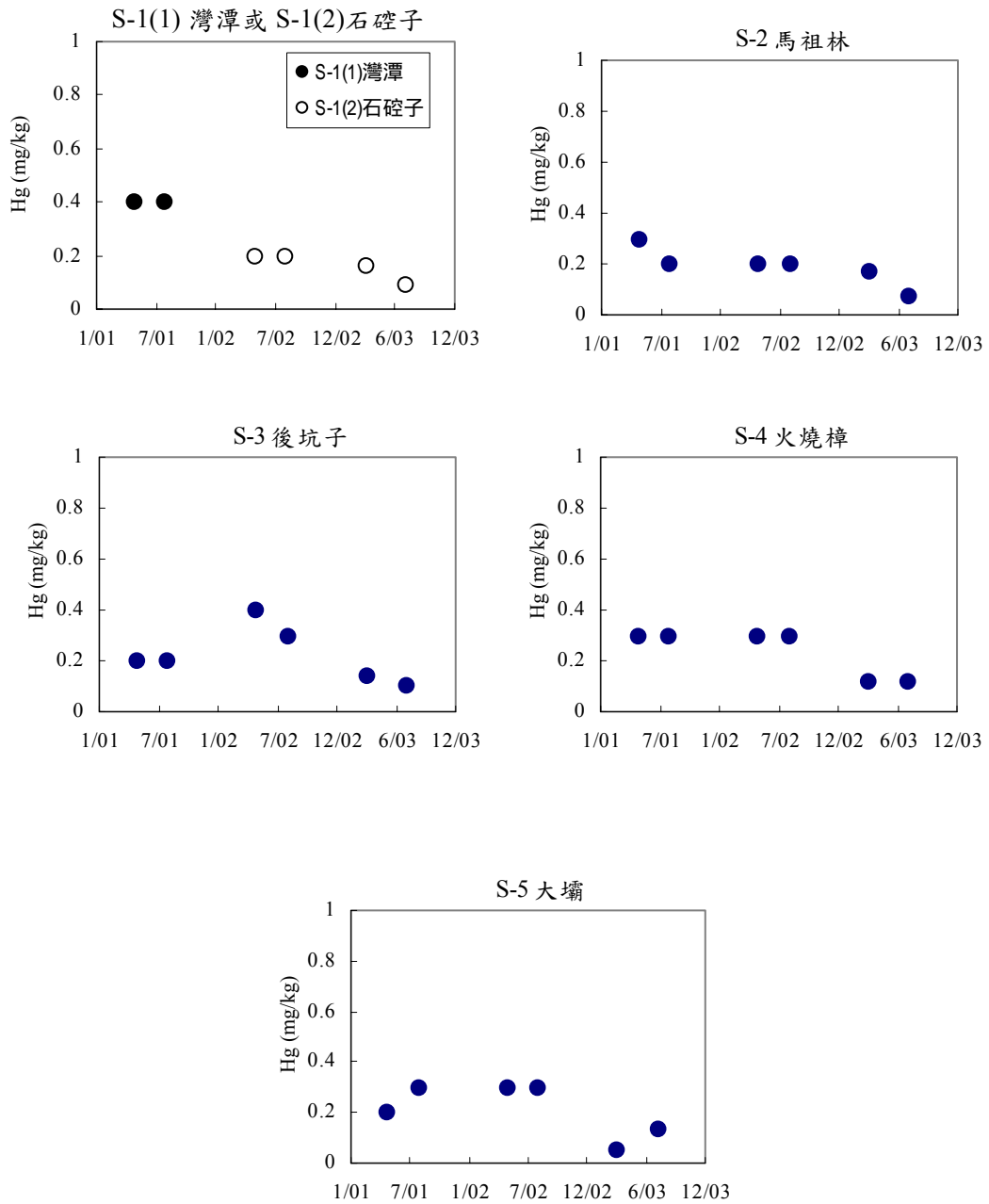


圖 4.16 2001-2003 年底泥重金屬含量變化(汞)

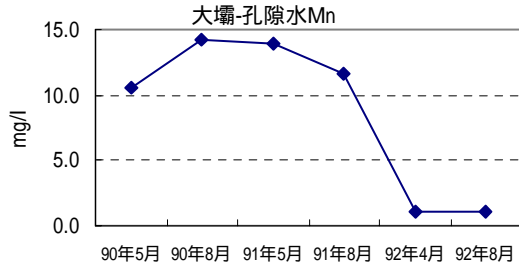
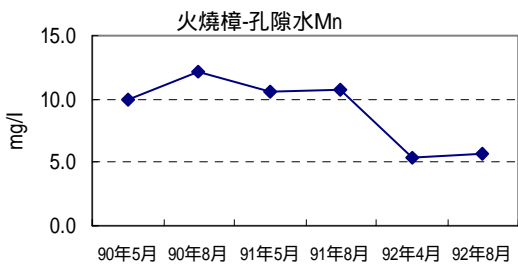
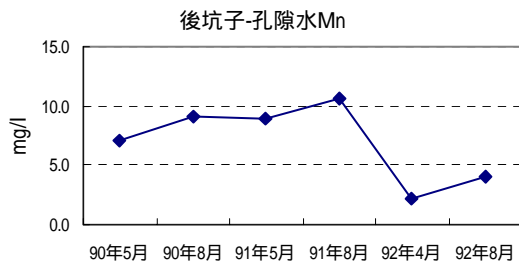
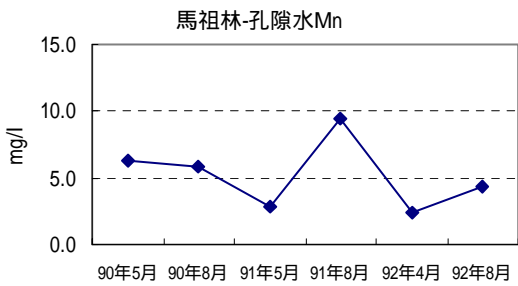
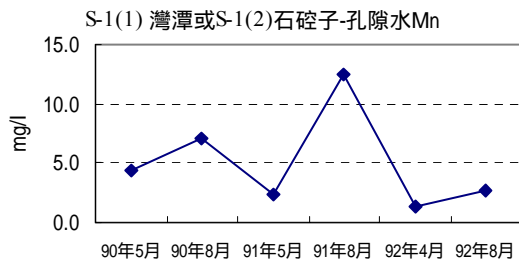
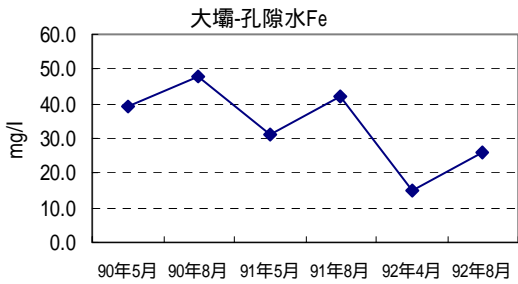
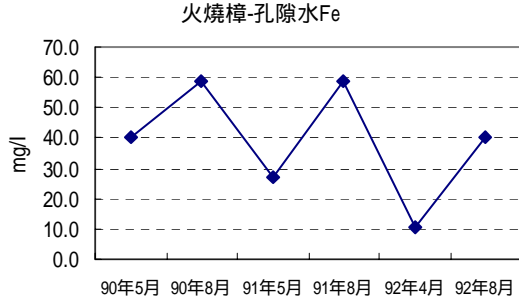
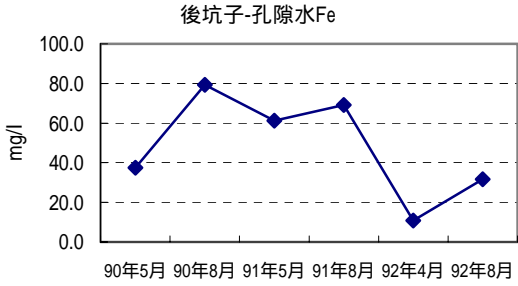
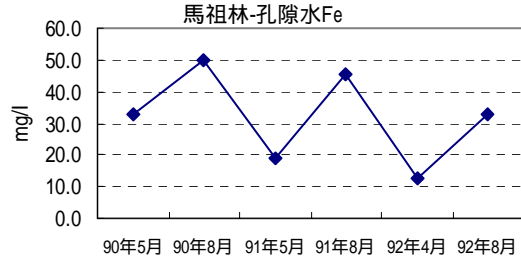
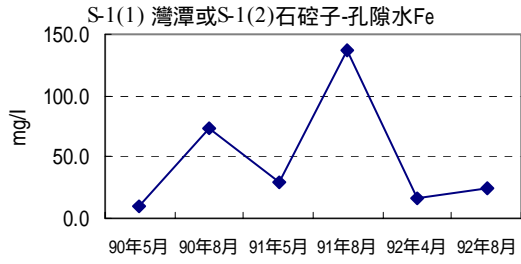


圖 4.17 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鐵、錳)

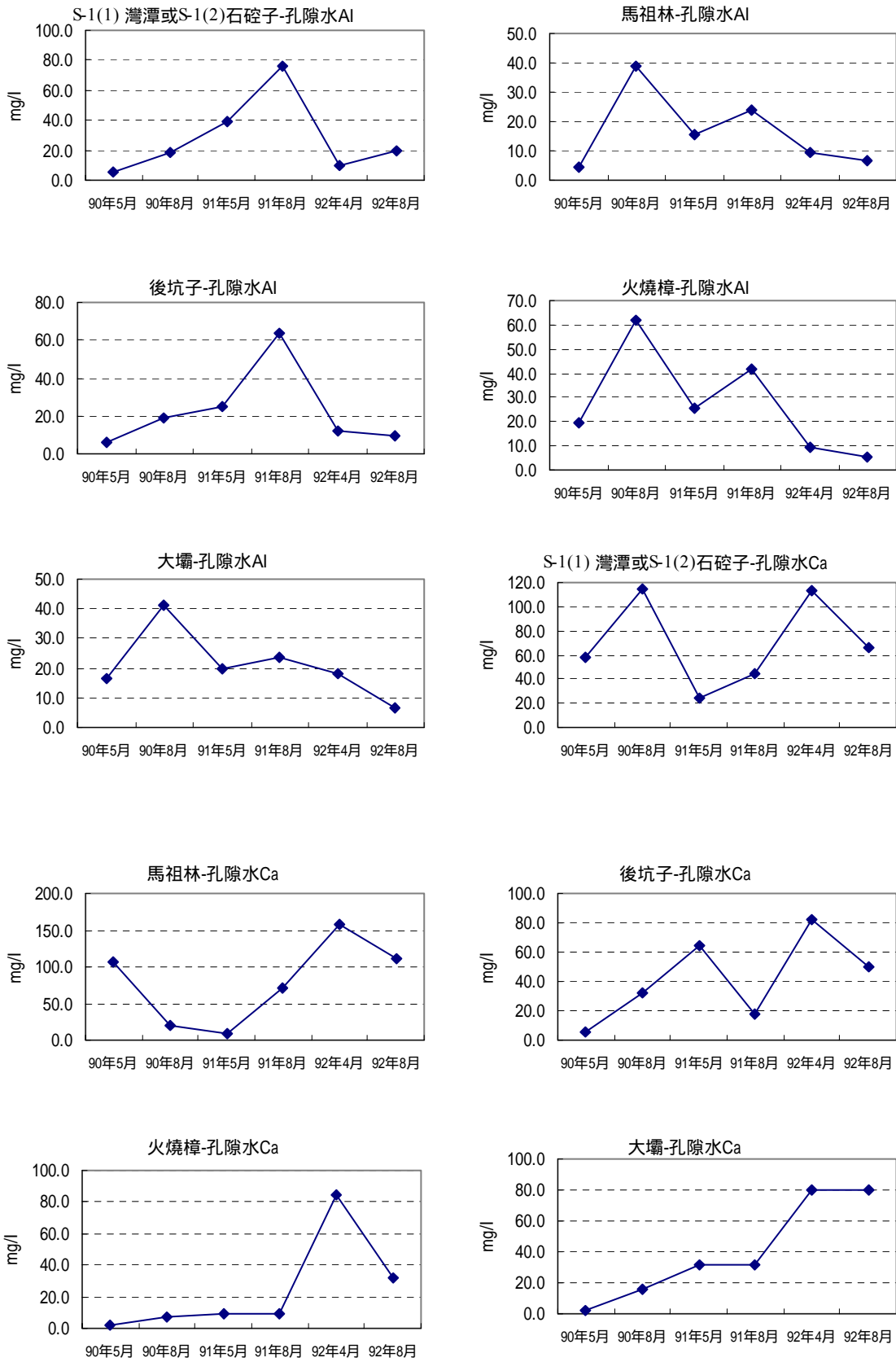


圖 4.18 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鋁、鈣)

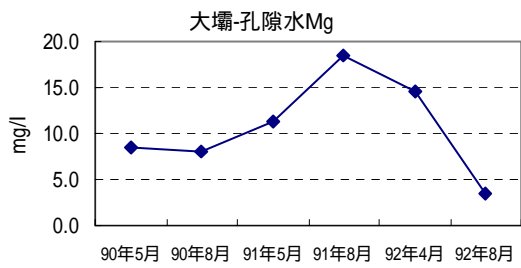
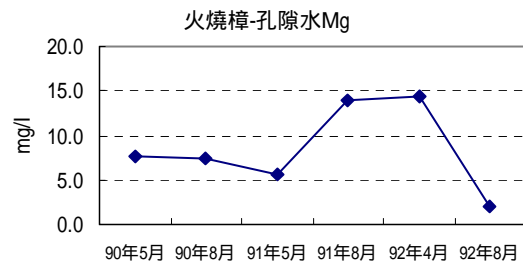
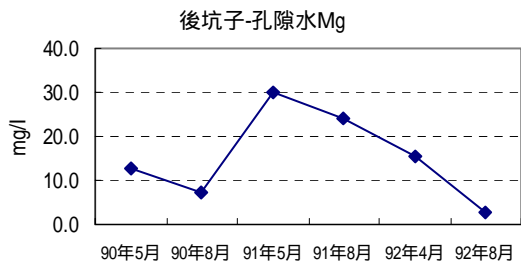
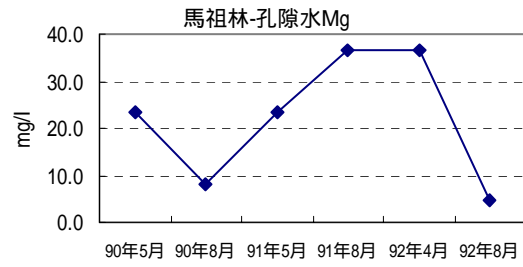
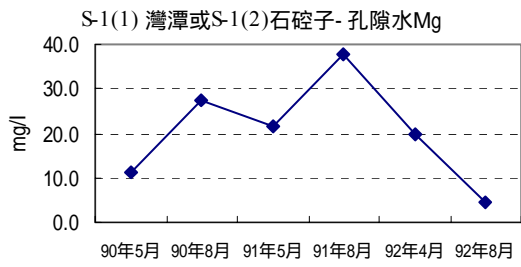


圖 4.19 2001-2003 年底泥孔隙水溶解金屬含量變化(鎂)

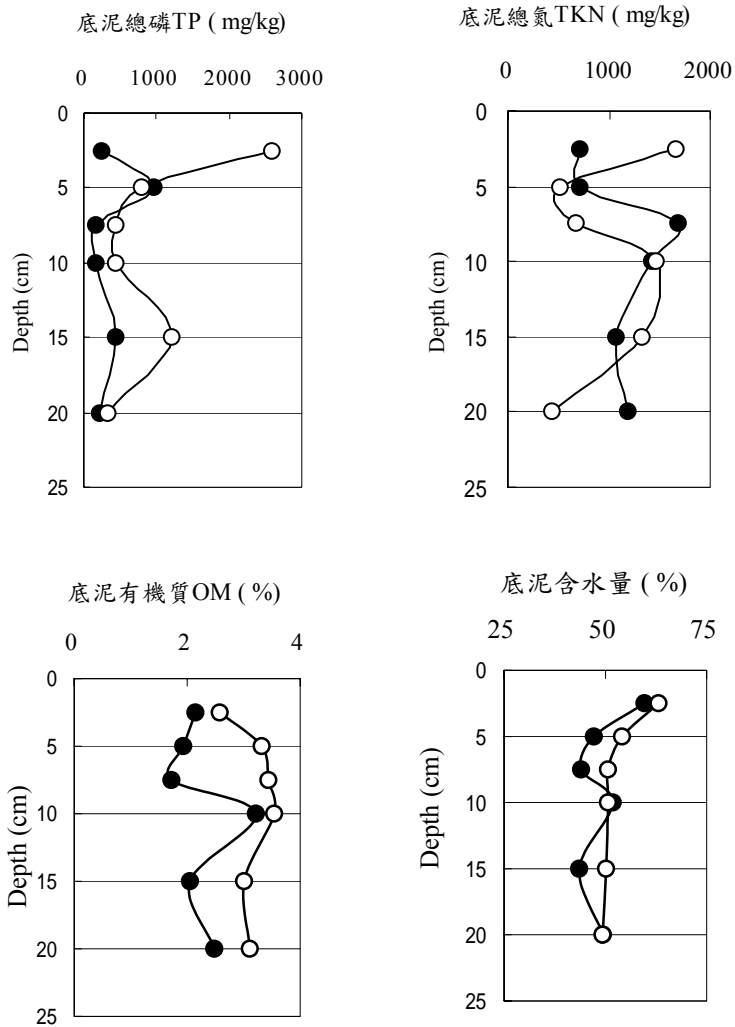


圖 4.20 大壩(S-5)及後坑子(S-3)底泥分層含水量、有機質、總磷及總氮變化
(標示符號分別為大壩：—○— 後坑子：—●—)

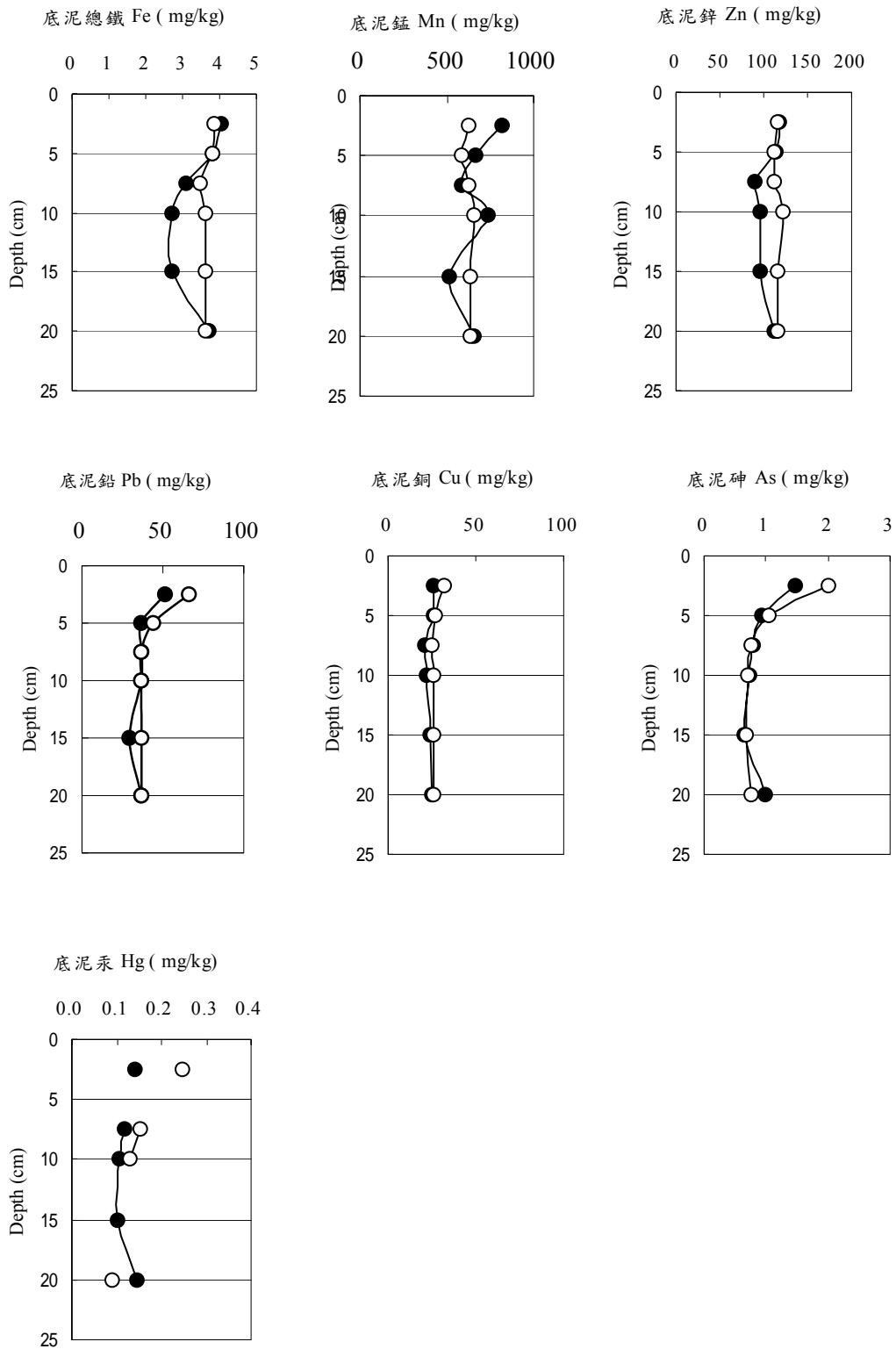


圖 4.21 大壩(S-5)及後坑子(S-3)底泥分層金屬及重金屬(總鐵、錳、鋅、鉛、銅、砷及汞)變化 (標示符號分別為大壩：—○— 後坑子：—●—)

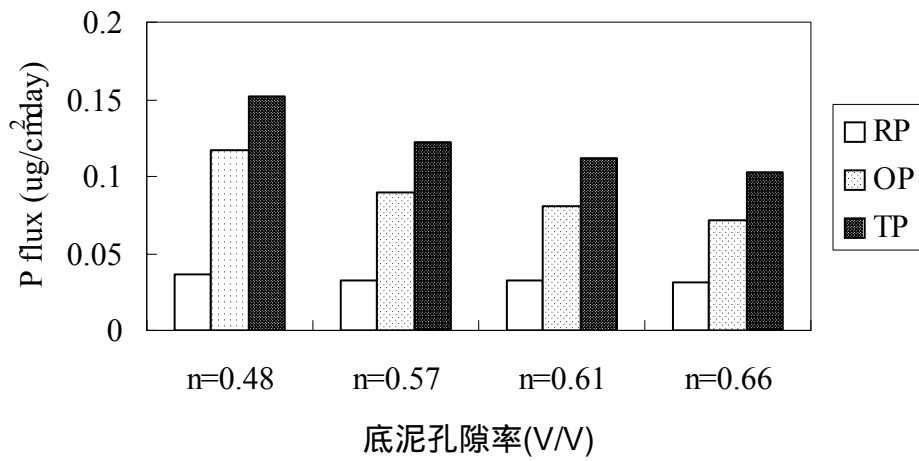


圖 4.22 模擬底泥孔隙率變化對底泥磷通量之影響

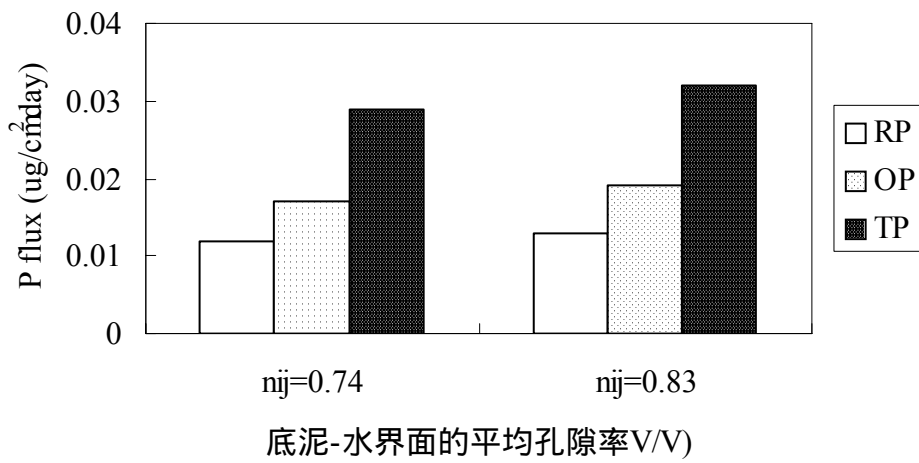


圖 4.23 模擬底泥-水界面孔隙率變化對底泥磷通量之影響

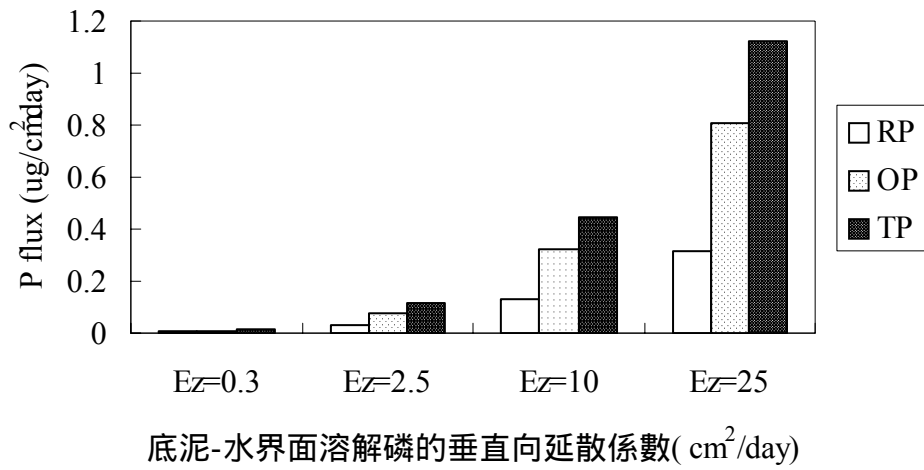


圖 4.24 模擬底泥-水界面垂直向延散係數變化對底泥磷通量之影響

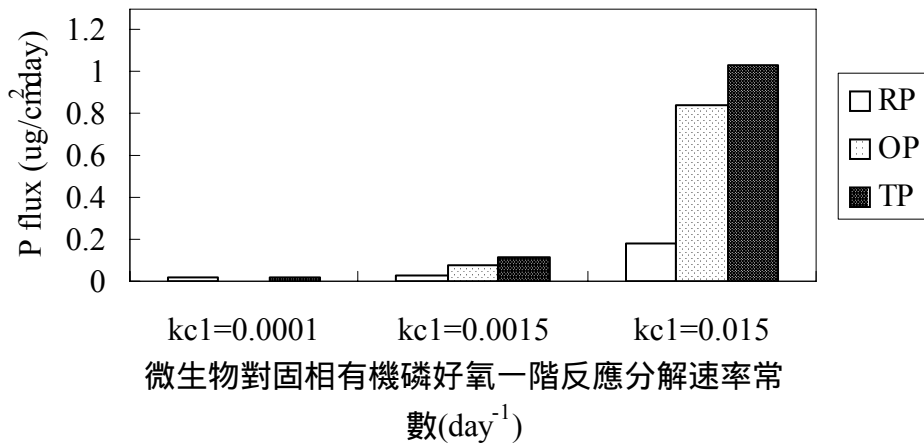


圖 4.25 模擬底泥微生物對固相有機磷好氧一階反應分解速率常數變化對底泥磷通量之影響

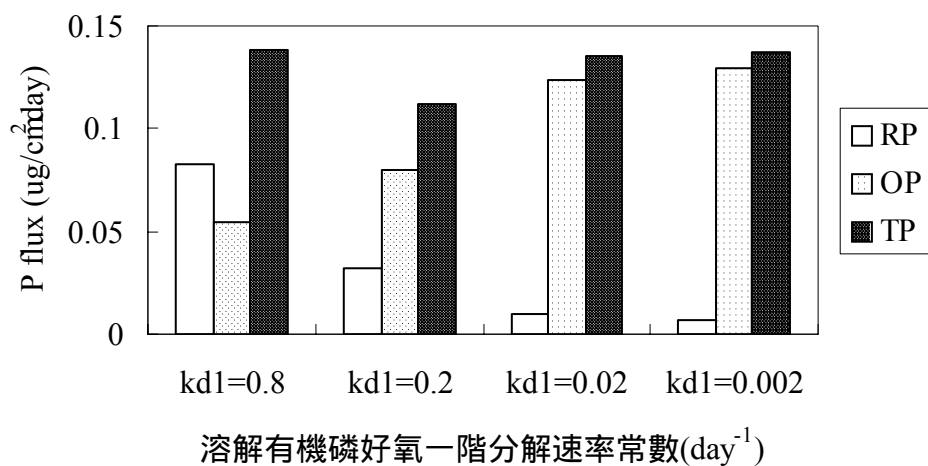


圖 4.26 模擬底泥微生物對溶解有機磷好氧一階分解速率常數變化對底泥磷通量之影響

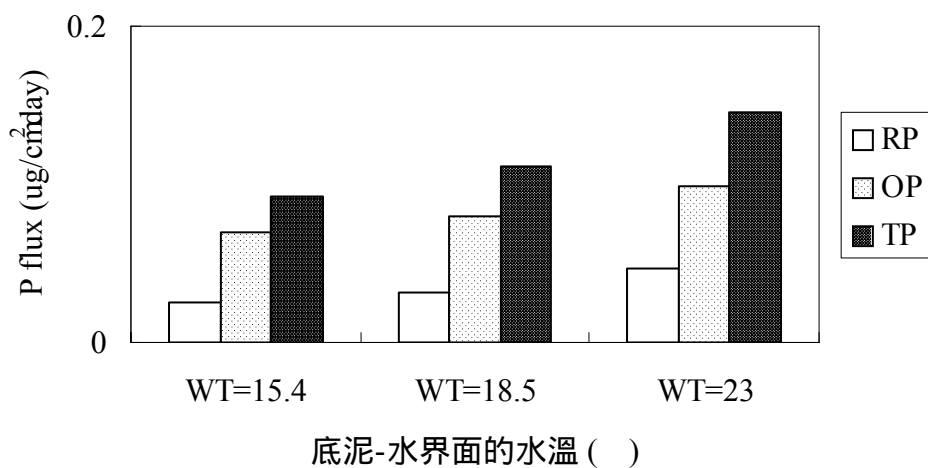


圖 4.27 模擬底泥-水界面水溫變化對底泥磷通量之影響

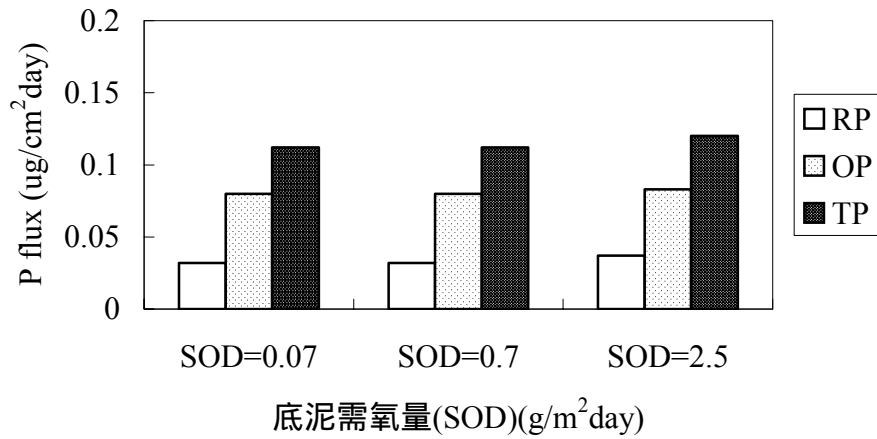


圖 4.28 模擬底泥需氧量變化對底泥磷通量之影響

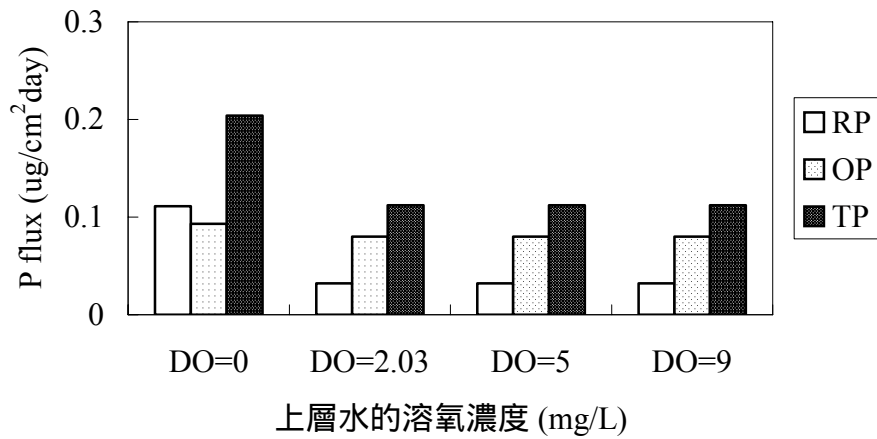


圖 4.29 模擬底泥上層水溶氧濃度對底泥磷通量之影響

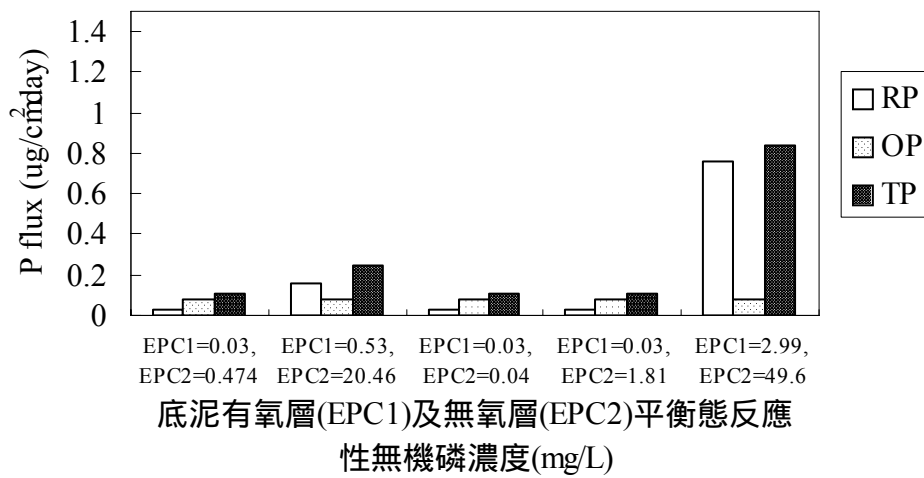


圖 4.30 模擬底泥孔隙水平衡態磷濃度變化對底泥磷通量之影響

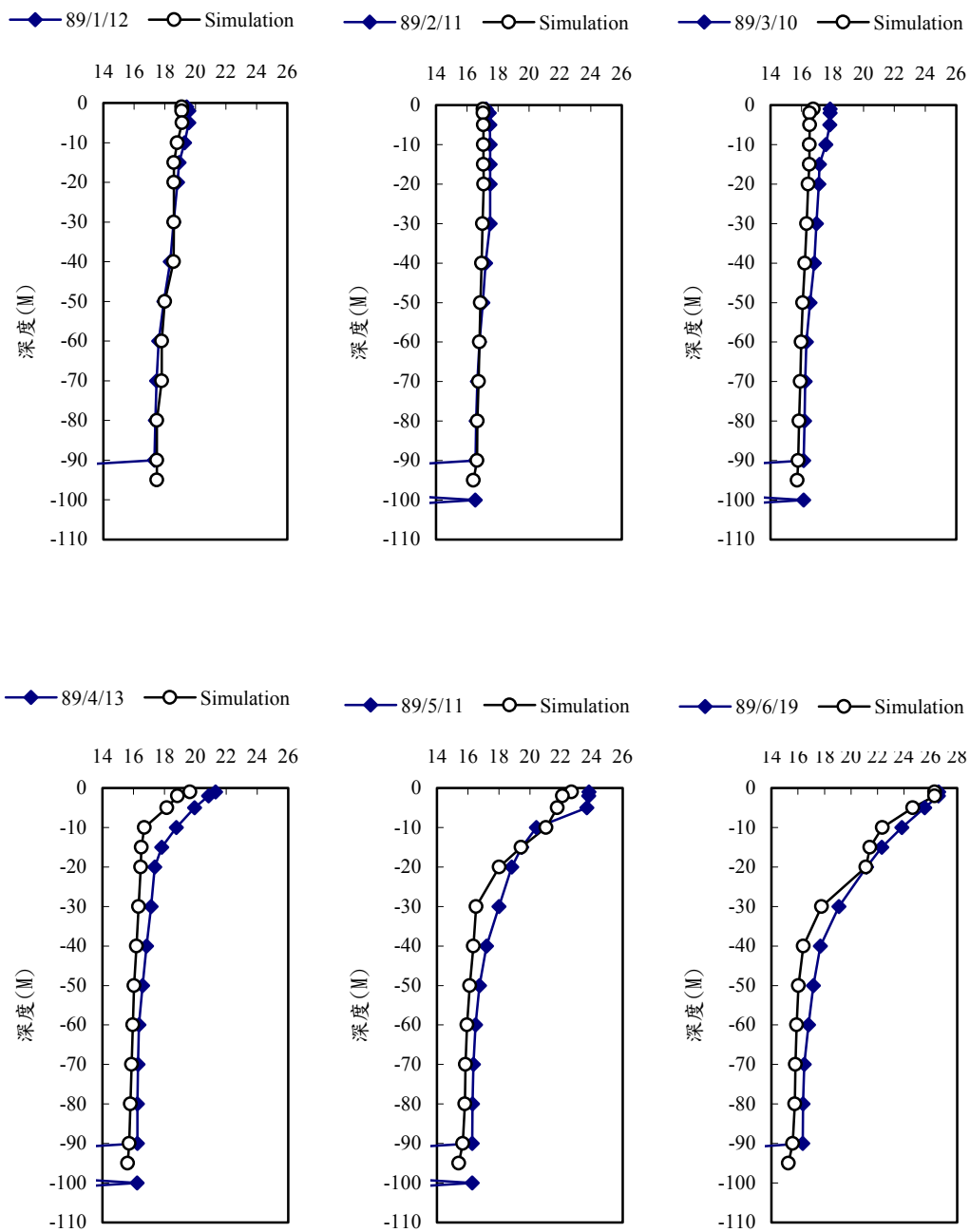


圖 4.31-1 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直水溫模擬(檢定)

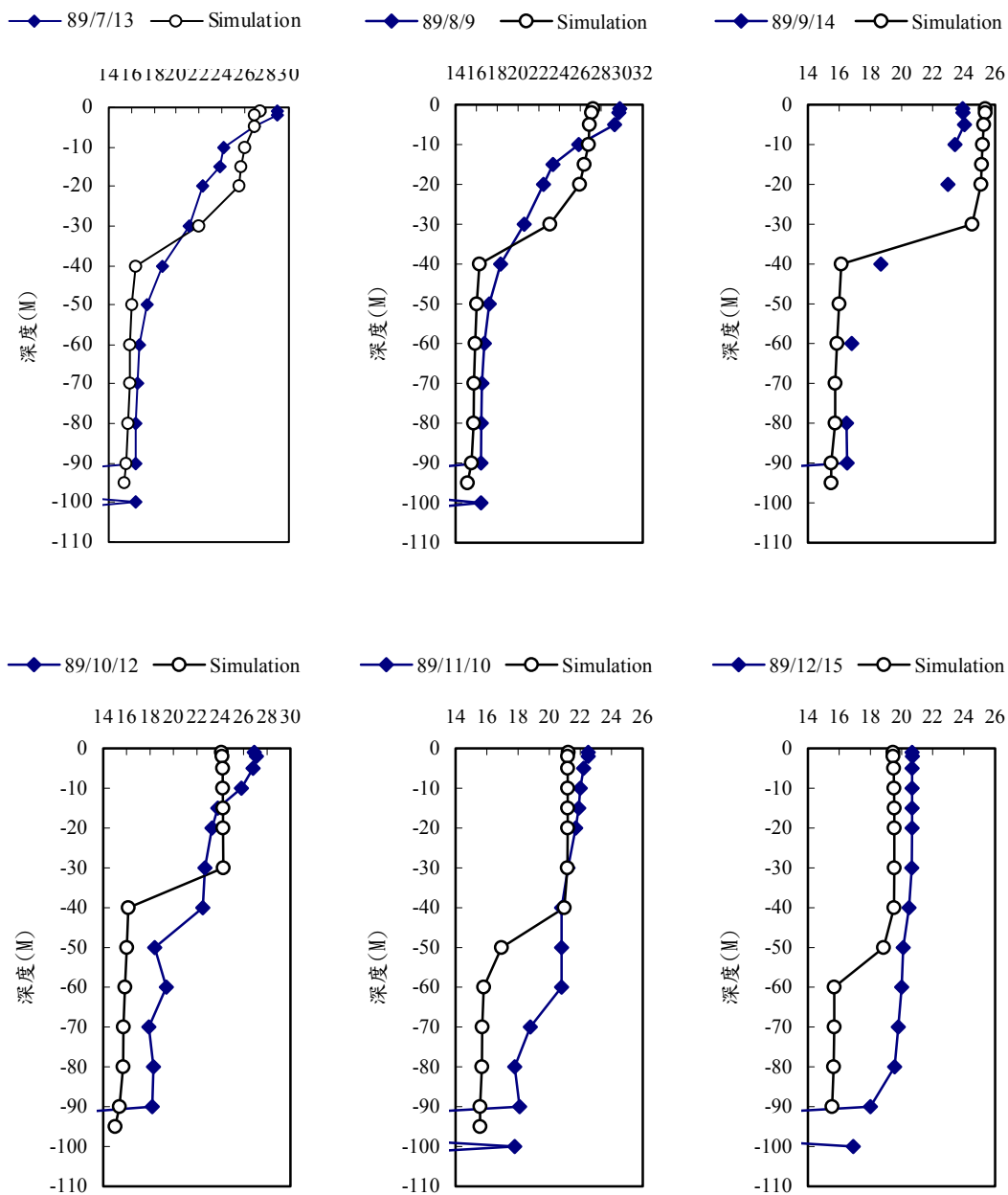


圖 4.31-2 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直水溫模擬(檢定)

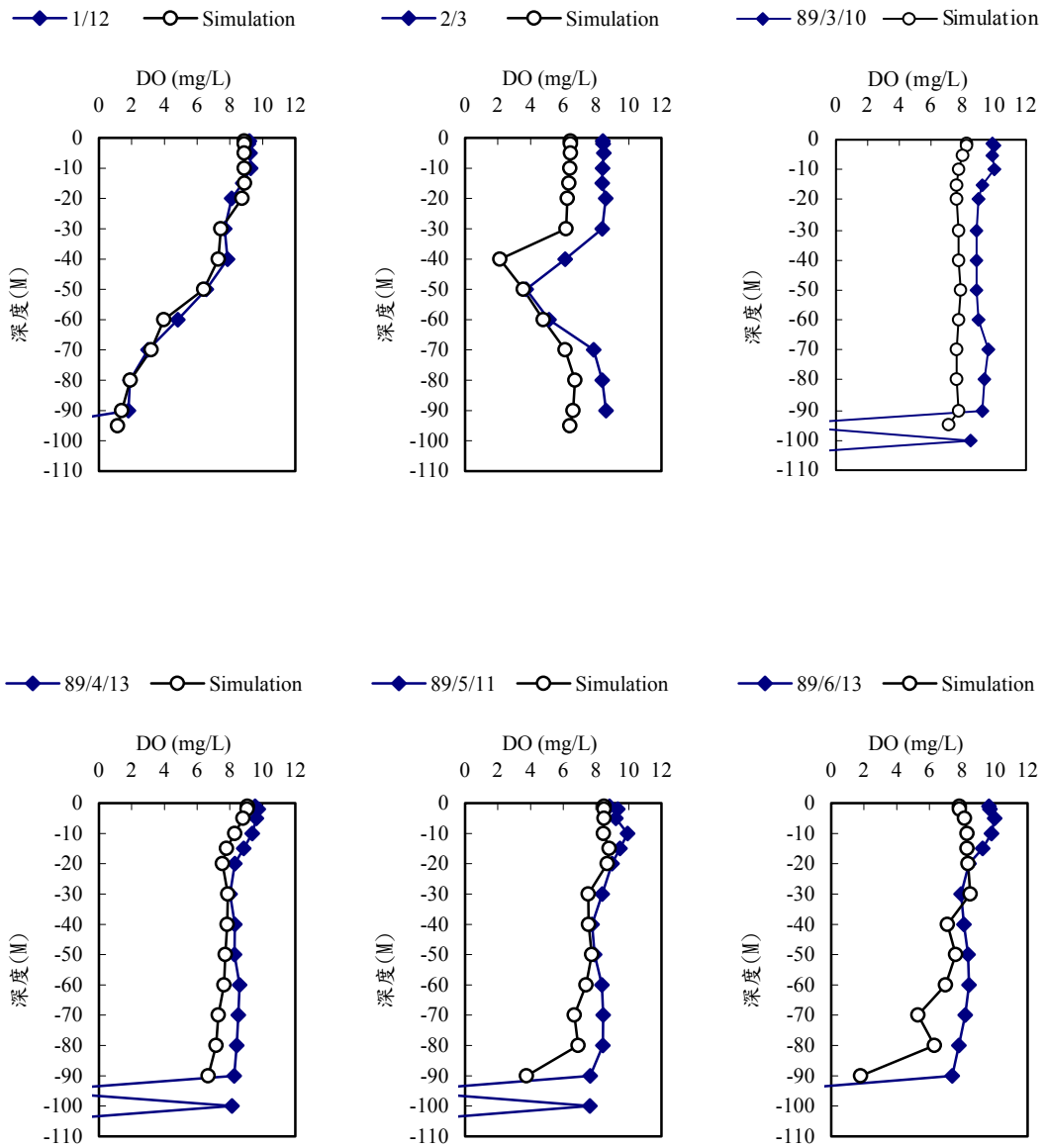


圖 4.32-1 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直溶氧模擬(檢定)

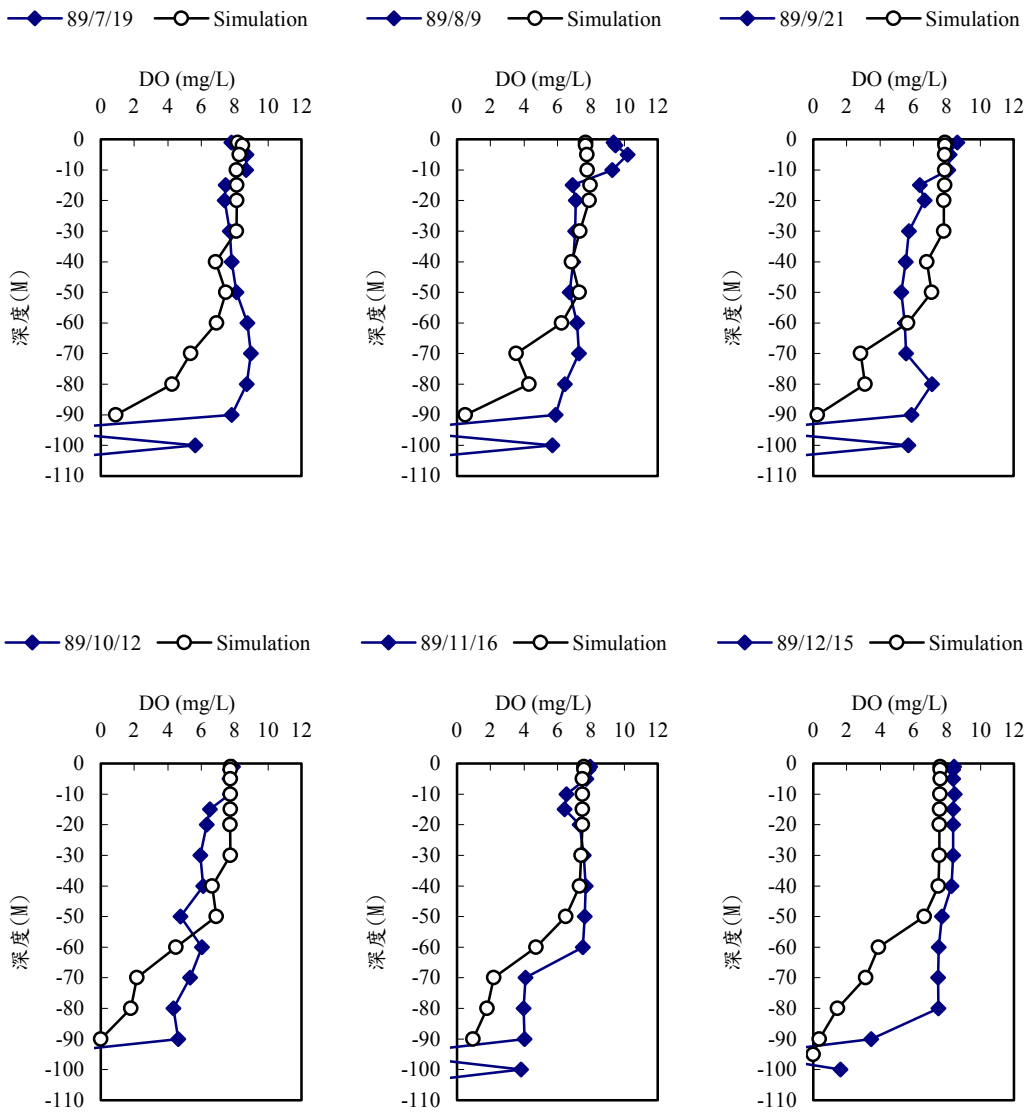


圖 4.32-2 翡翠水庫民國 89 年大壩垂直溶氧模擬(檢定)

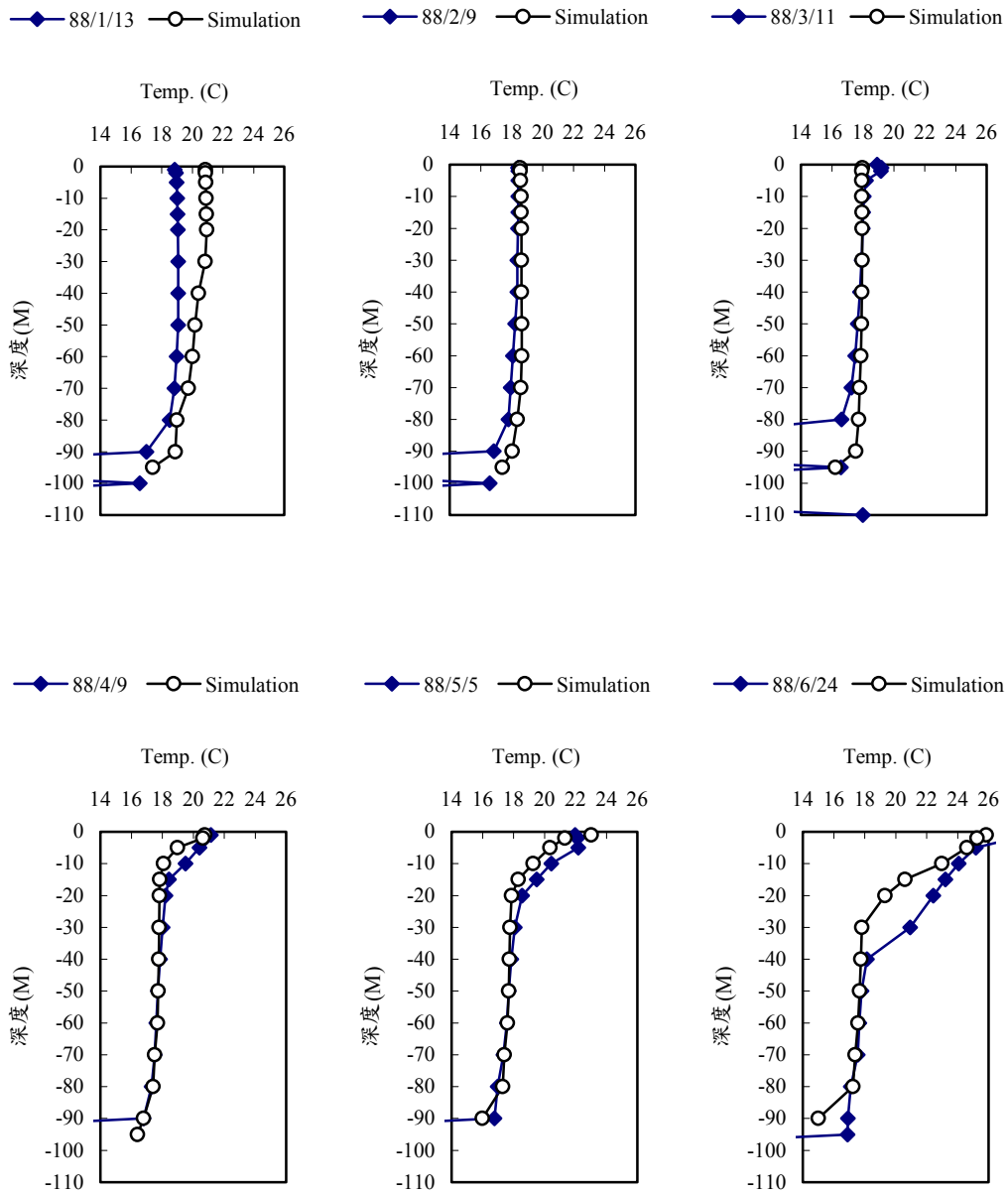
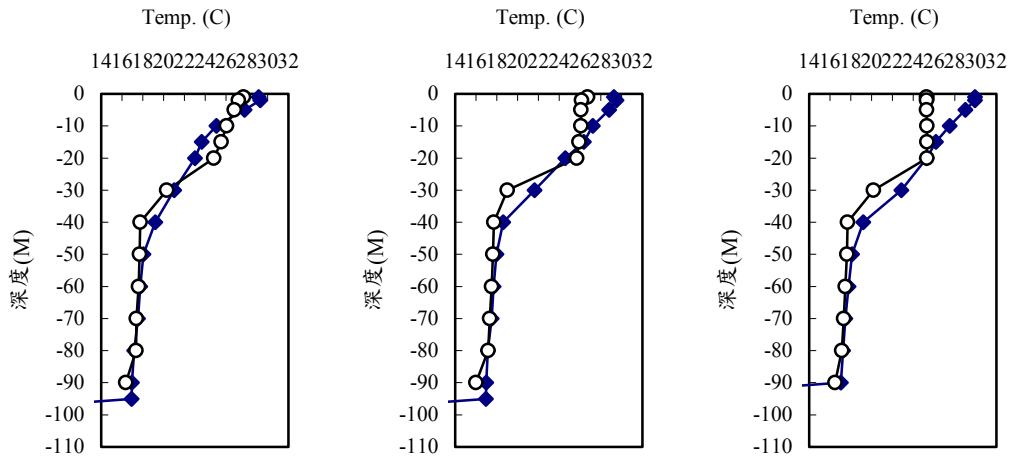


圖 4.33-1 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直水溫模擬(驗證)

88/7/7 Simulation 88/8/12 Simulation 88/9/8 Simulation



88/10/15 Simulation 88/11/11 Simulation 88/12/16 Simulation

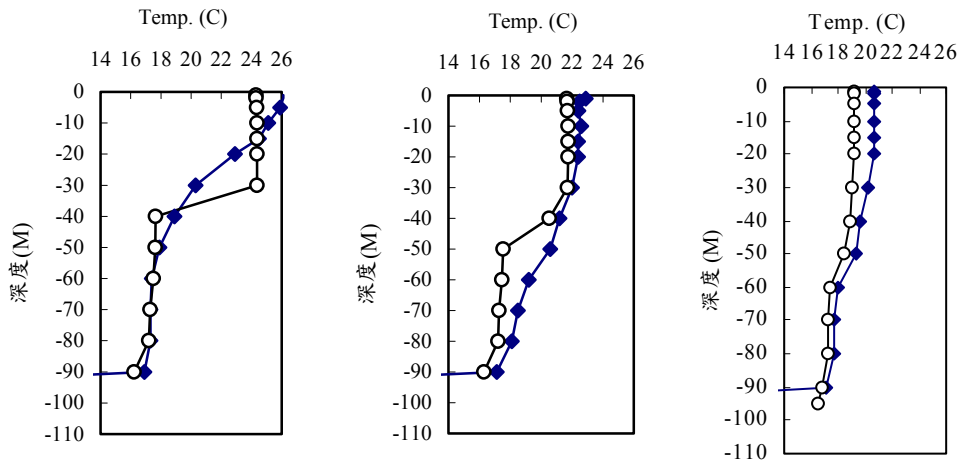


圖 4.33-2 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直水溫模擬(驗證)

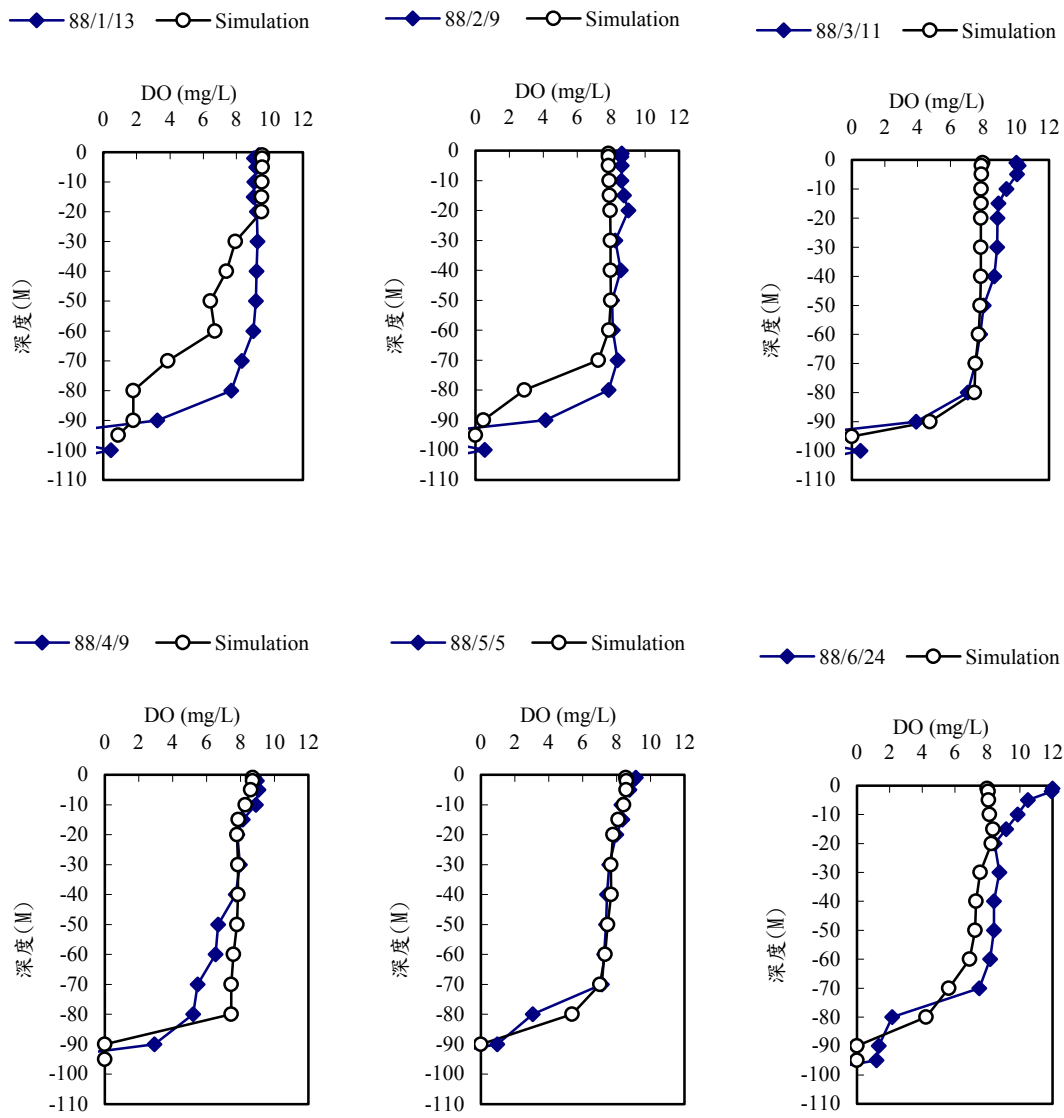


圖 4.34-1 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直溶氧模擬(驗證)

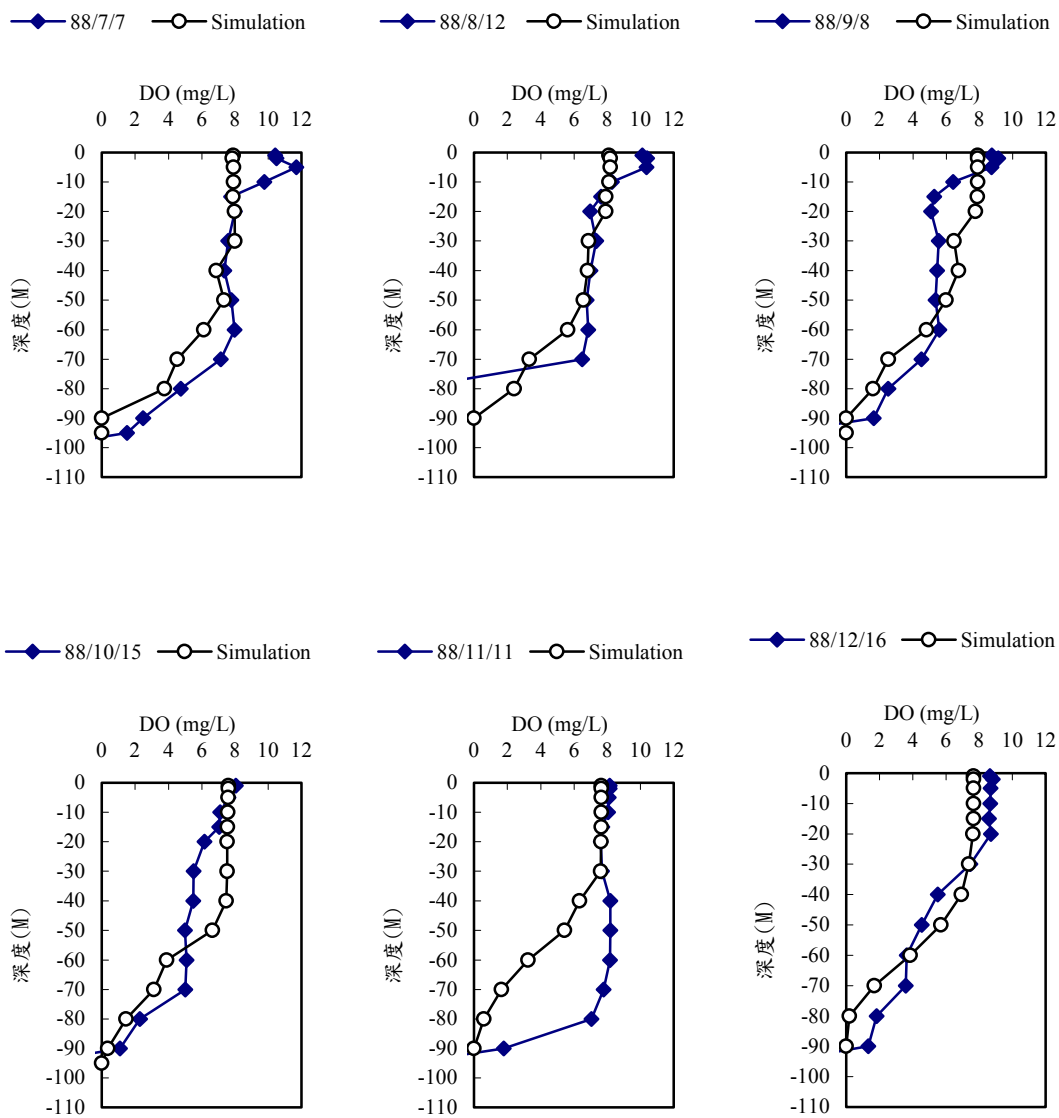


圖 4.34-2 翡翠水庫民國 88 年大壩垂直溶氧模擬(驗證)

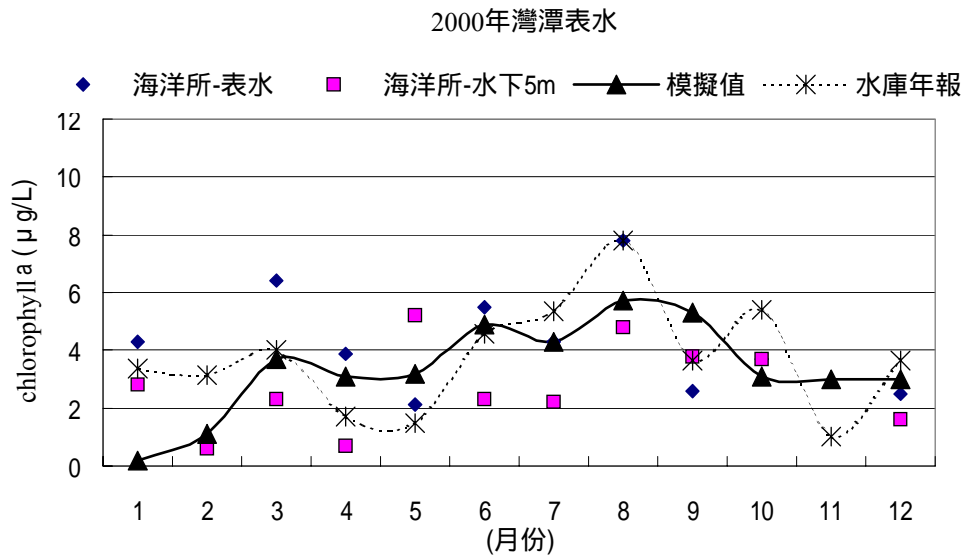
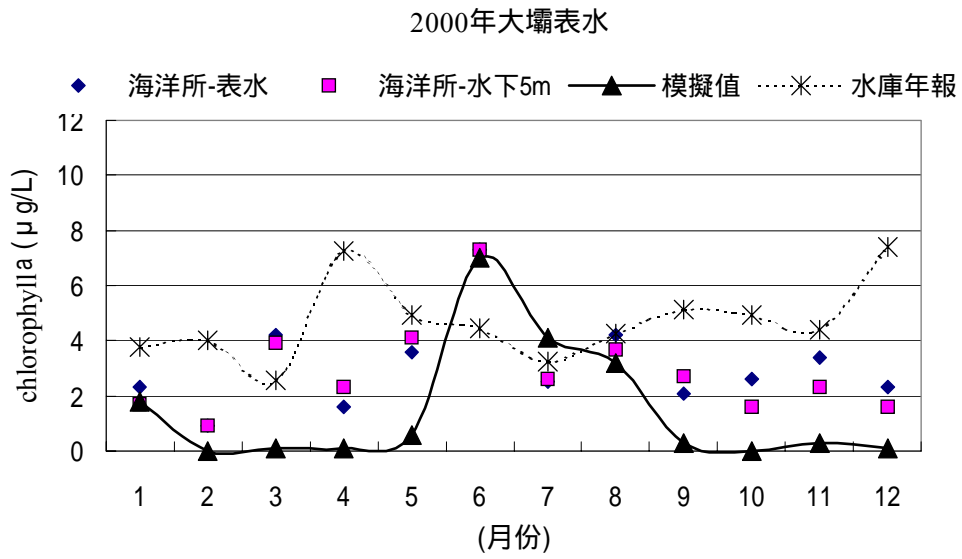


圖 4.35 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站葉綠素 a 模擬與實測結果圖 (檢定)

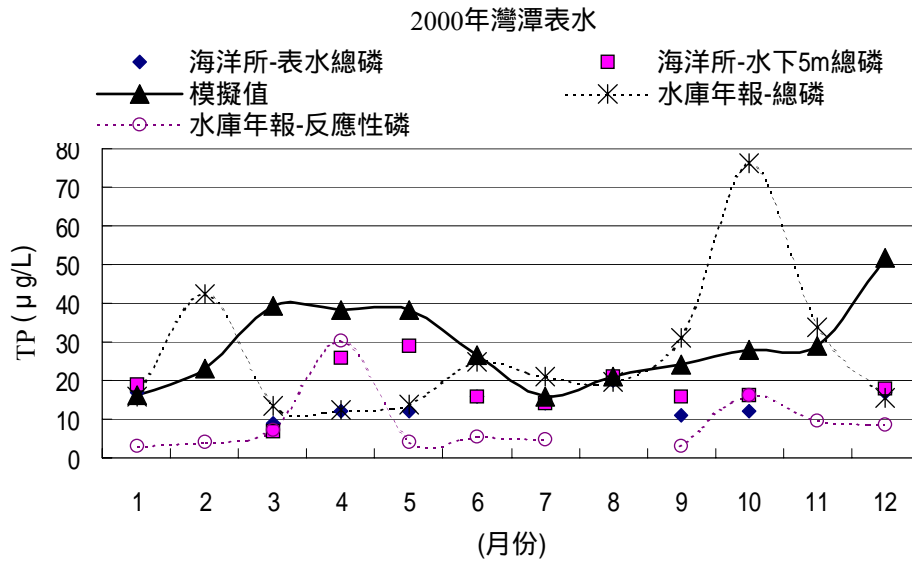
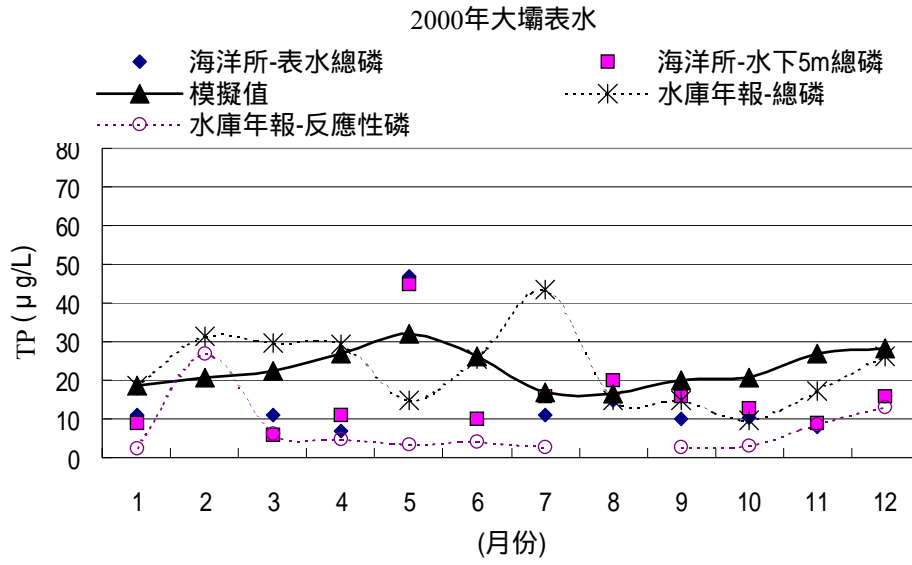


圖 4.36 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站總磷模擬與實測結果圖 (檢定)

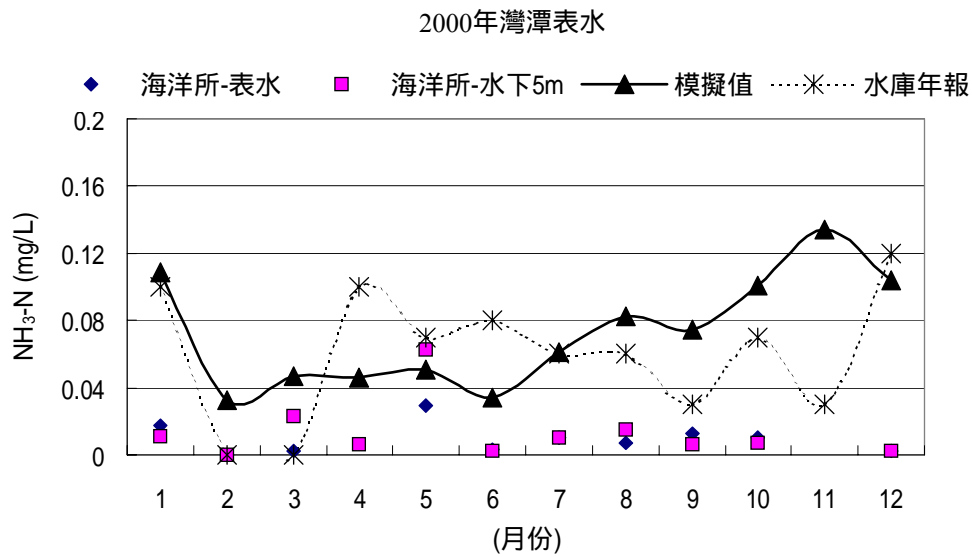
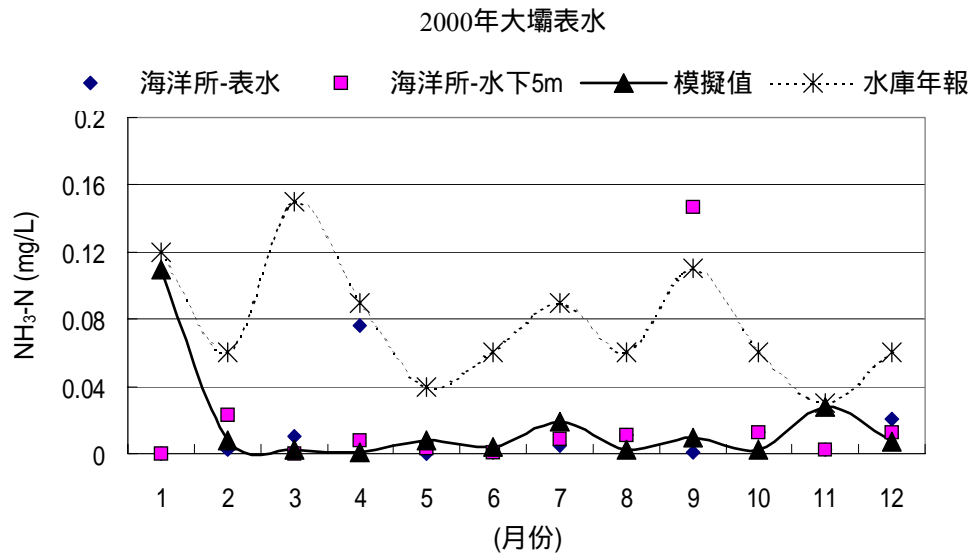


圖 4.37 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站氨氮模擬與實測結果圖 (檢定)

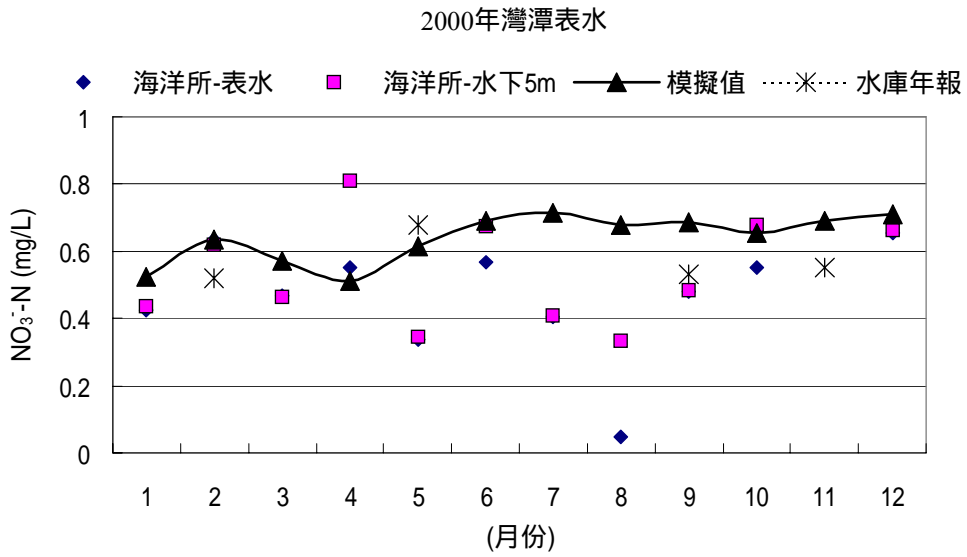
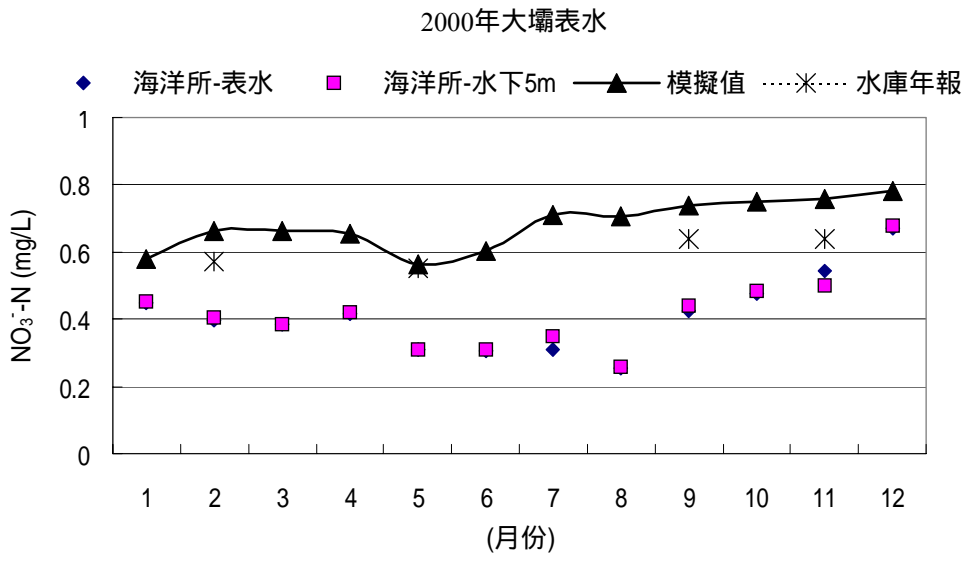


圖 4.38 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站硝酸氮模擬與實測結果圖 (檢定)

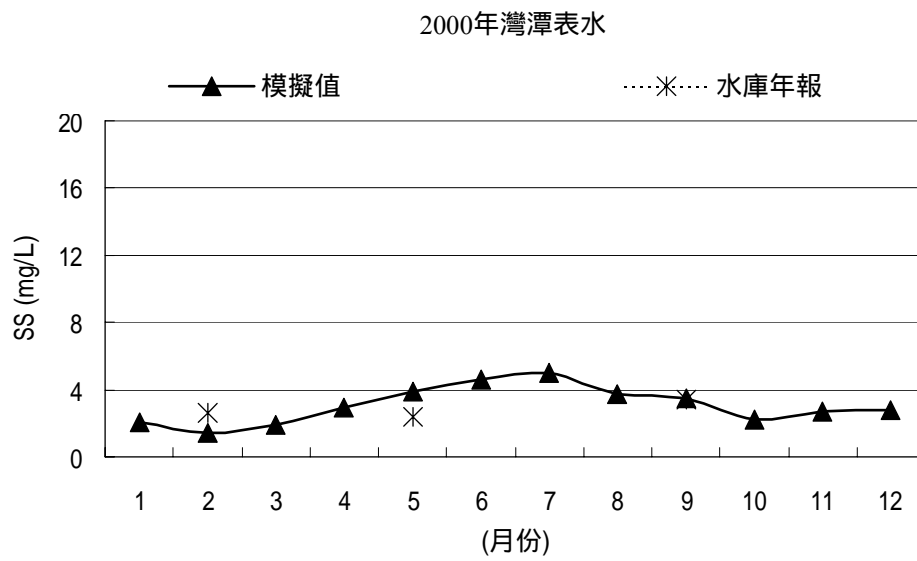
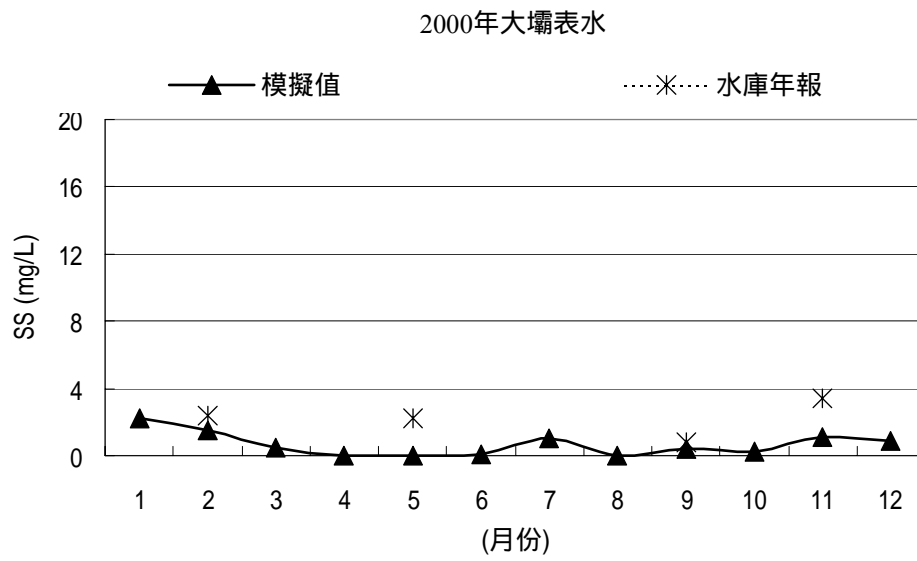


圖 4.39 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站懸浮固體模擬與實測結果圖 (檢定)

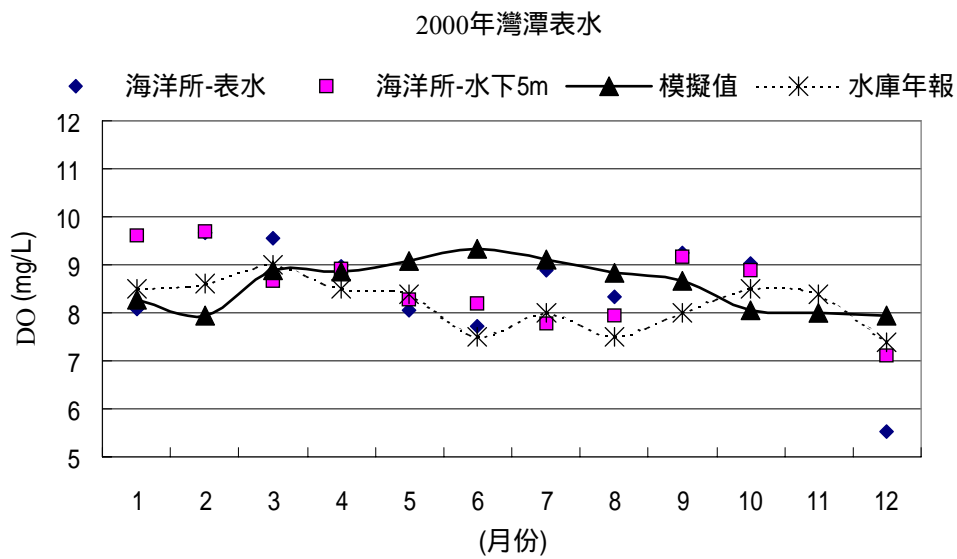
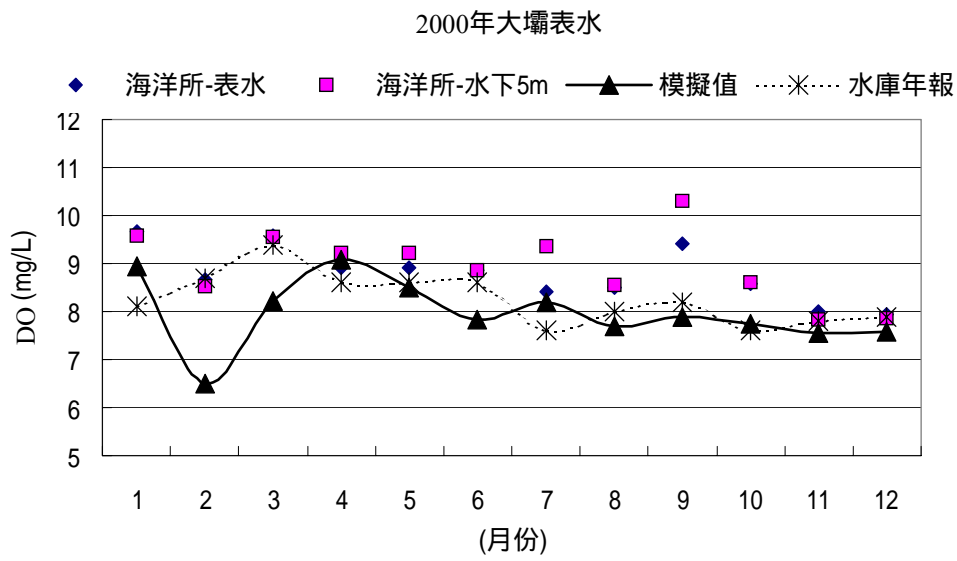
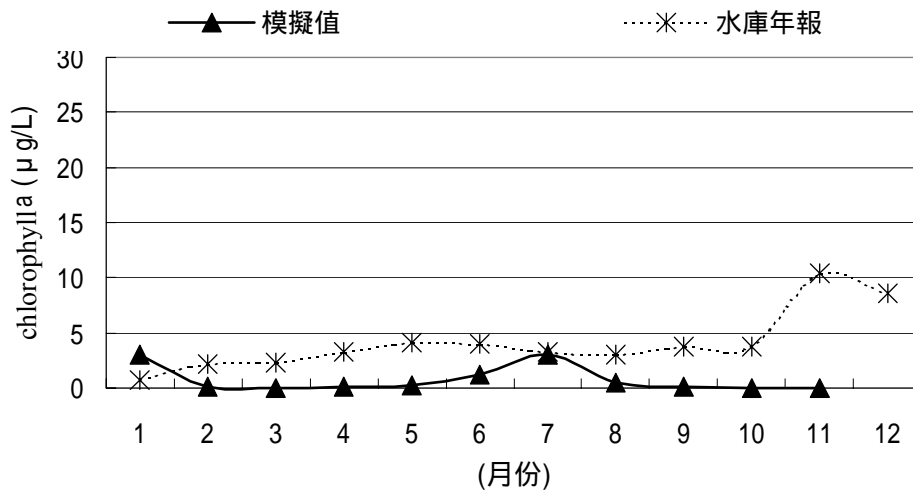


圖 4.40 翡翠水庫 89 年大壩與灣潭站溶氧模擬與實測結果圖 (檢定)

1999年大壩表水



1999年灣潭表水

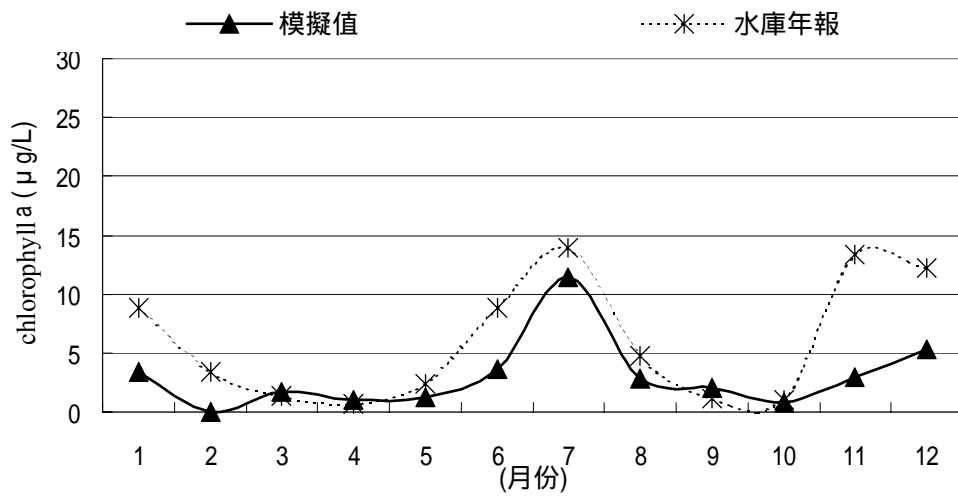
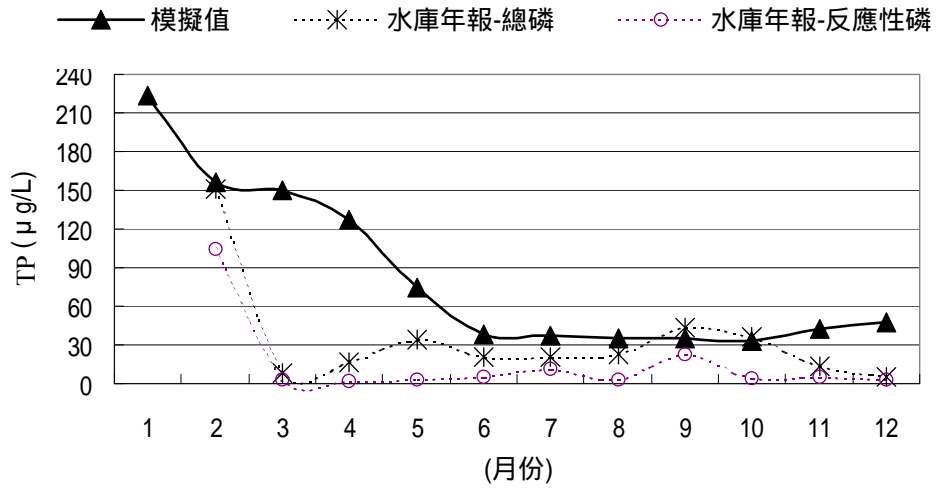


圖 4.41 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站葉綠素 a 模擬與實測結果圖 (驗證)

1999年大壩表水



1999年灣潭表水

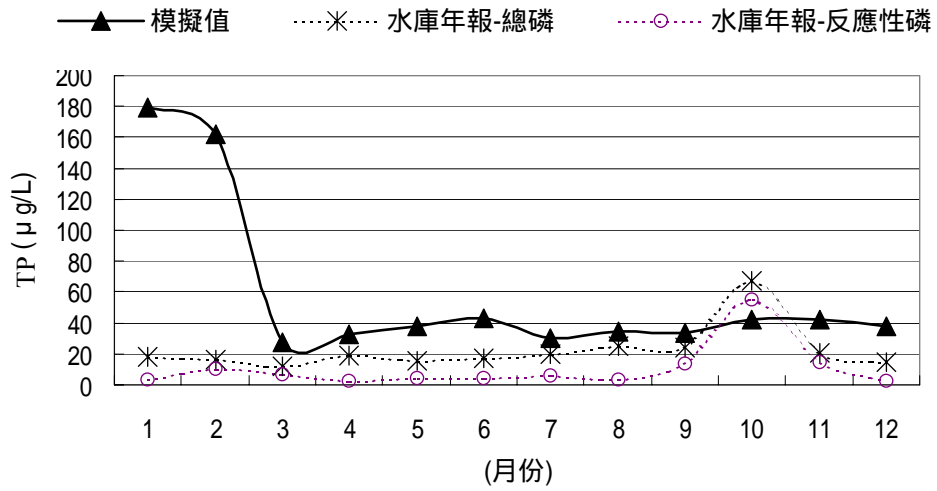


圖 4.42 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站總磷模擬與實測結果圖 (驗證)

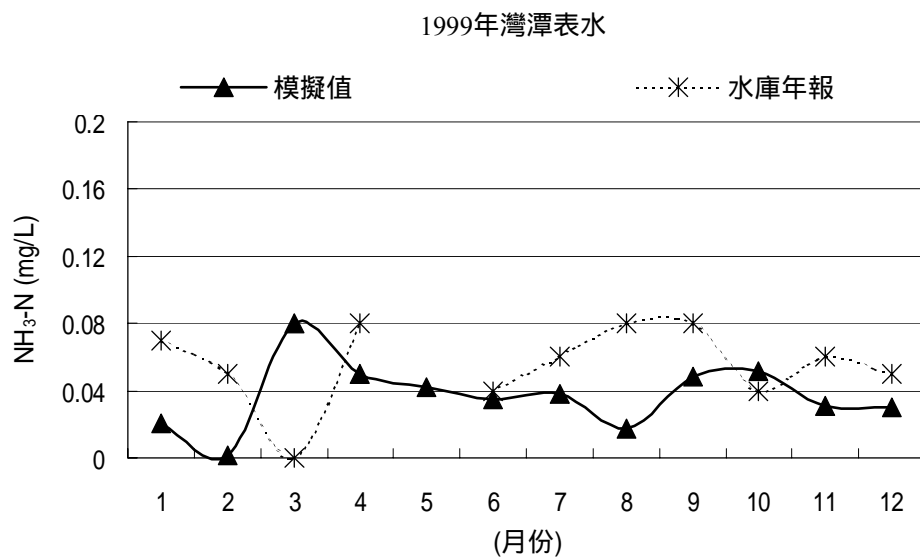
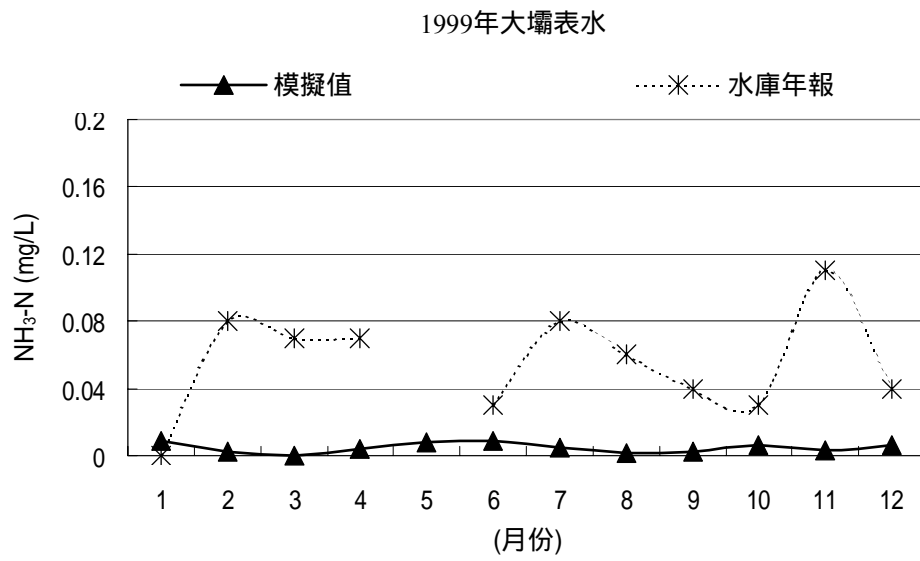


圖 4.43 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站氨氮模擬與實測結果圖 (驗證)

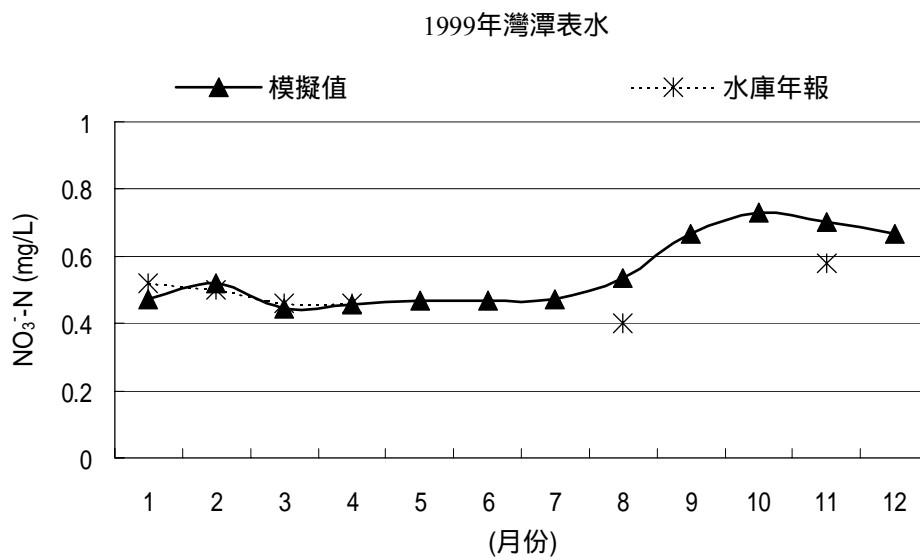
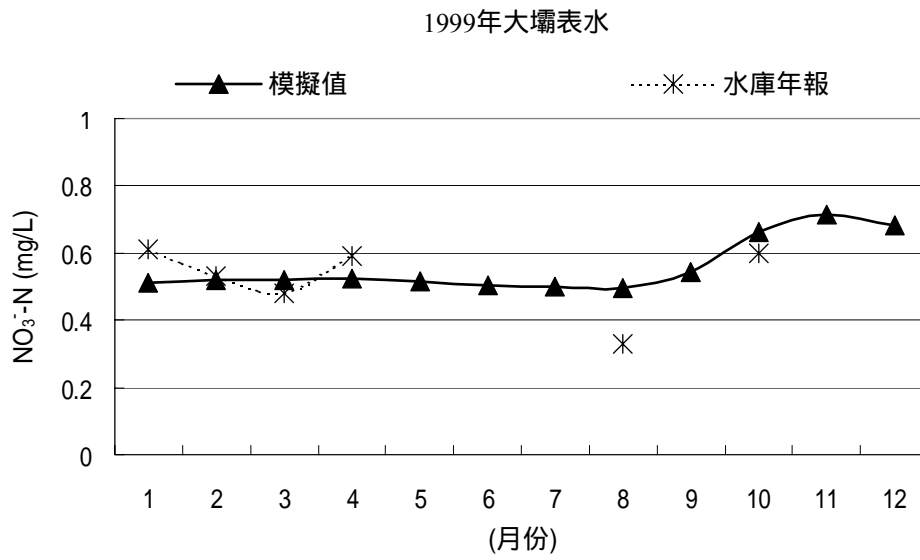


圖 4.44 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站硝酸氮模擬與實測結果圖 (驗證)

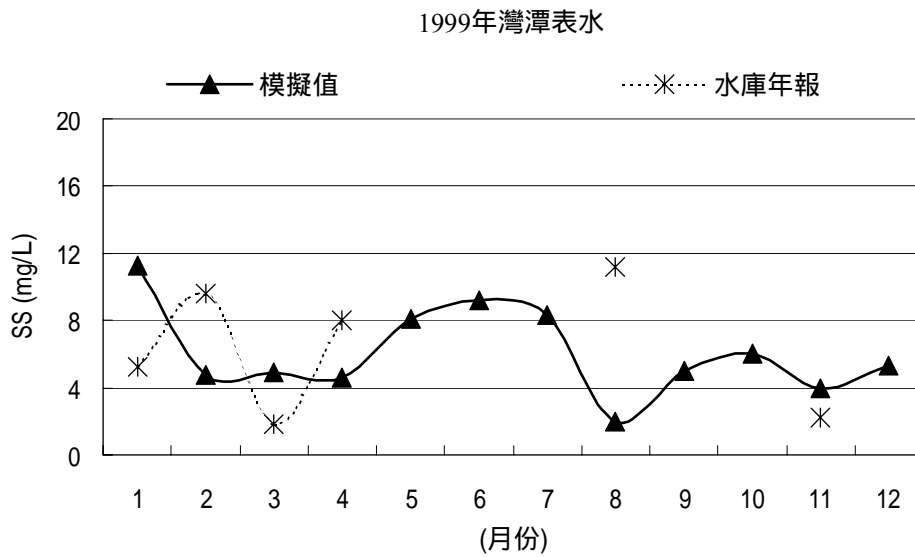
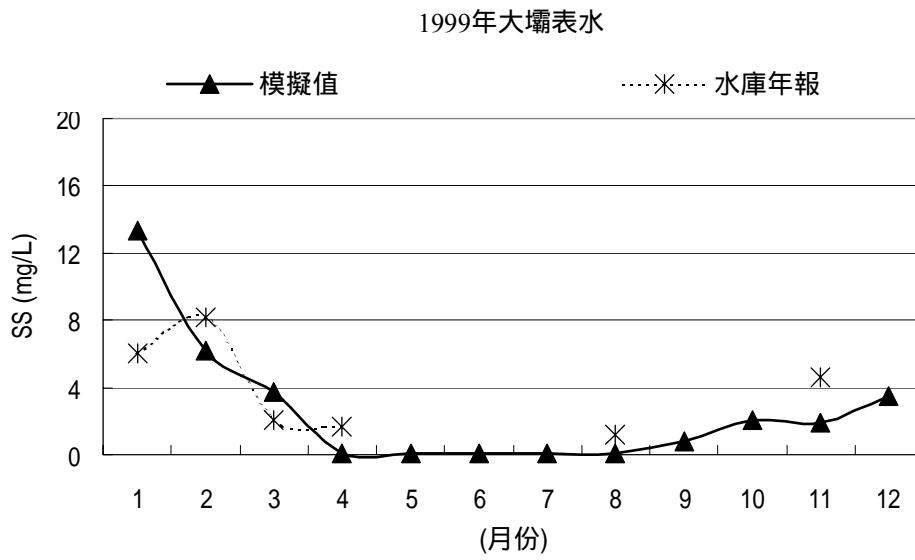


圖 4.45 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站懸浮固體模擬與實測結果圖 (驗證)

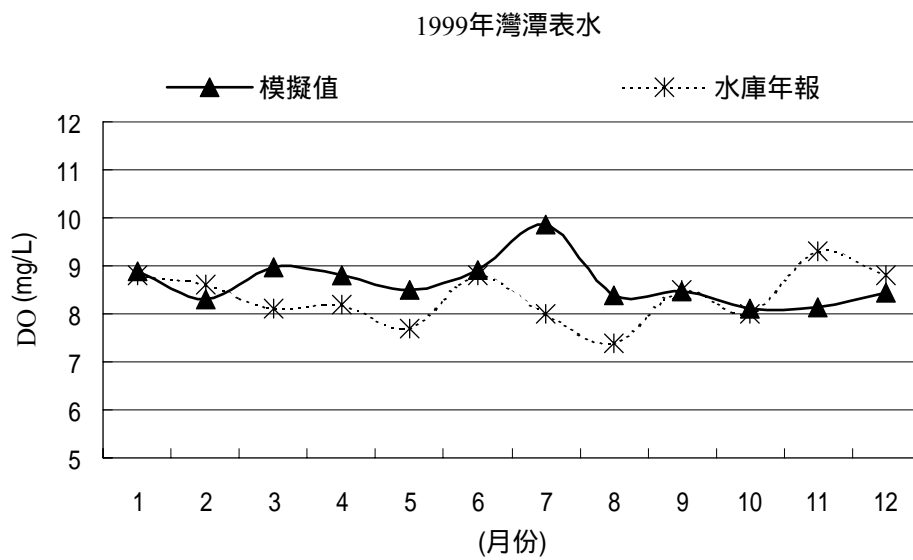
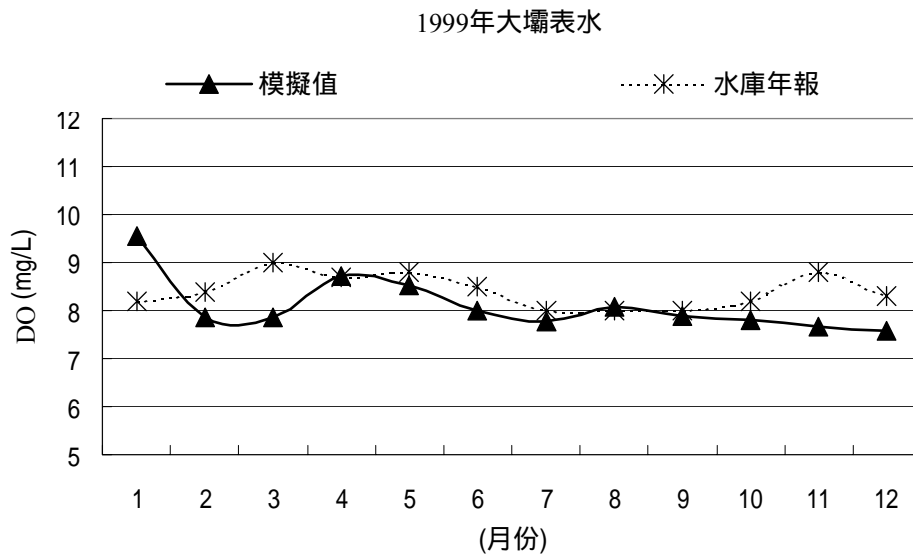


圖 4.46 翡翠水庫 88 年大壩與灣潭站溶氧模擬與實測結果圖 (驗證)

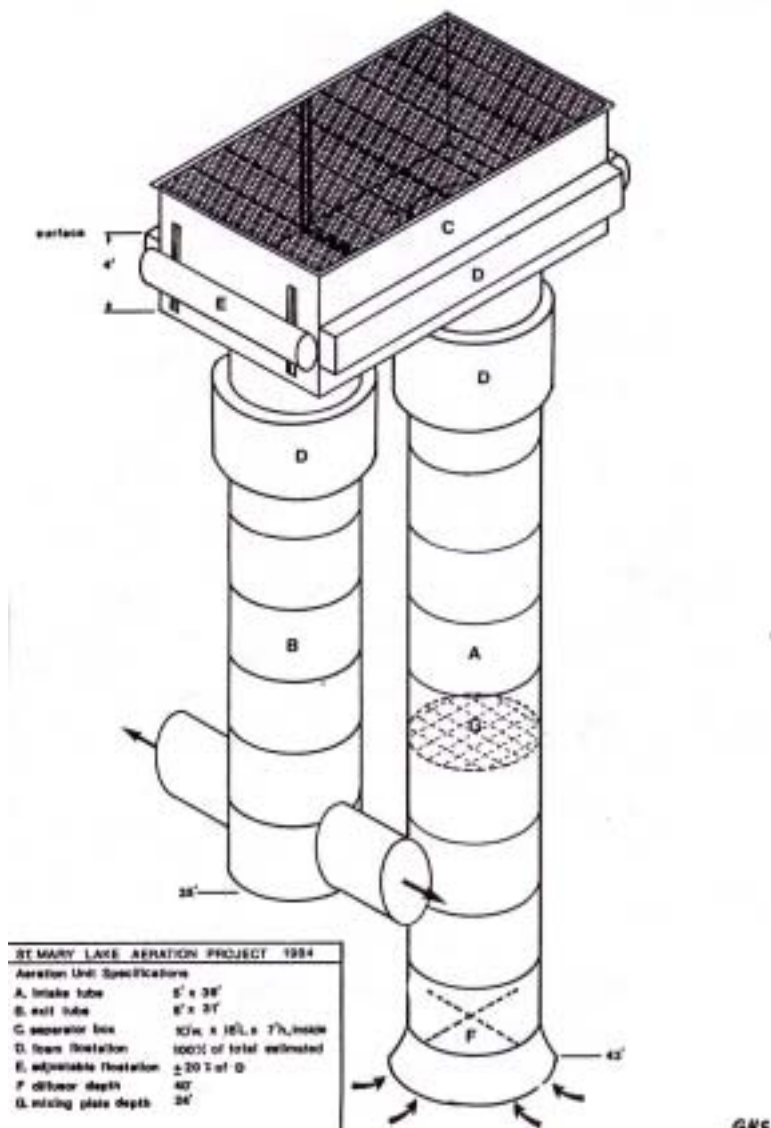


圖 4.47 典型的注氣揚水曝氣法。A: 上昇水管，B: 下降水管，C: 氣水分離槽，D: 浮桶，E: 可調節浮桶，F: 散氣深度，G: 混合板高度。(由加拿大英屬哥倫比亞溫哥華，環保部魚類及野生生物保護處，魚類研究及技術服務中心 Ashley, K. I. 設計)

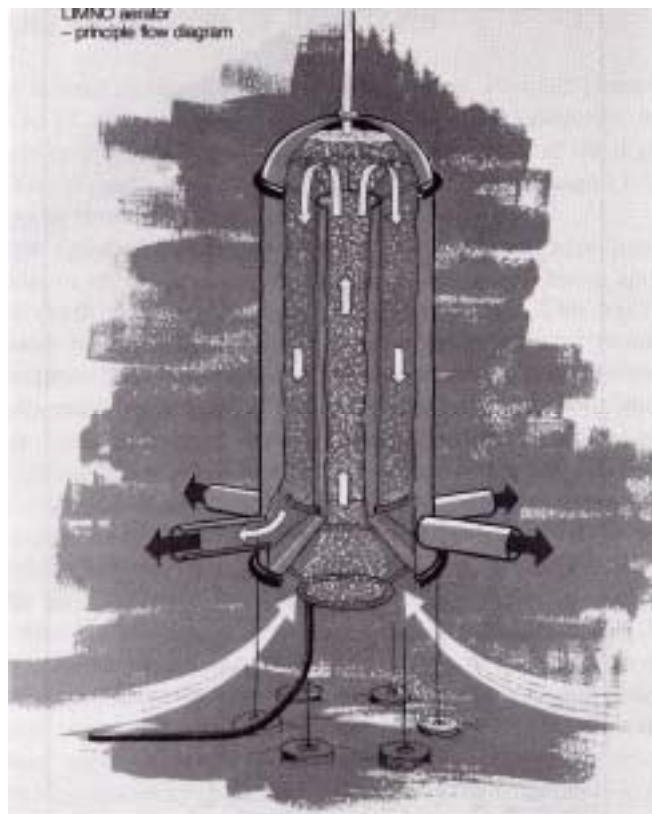
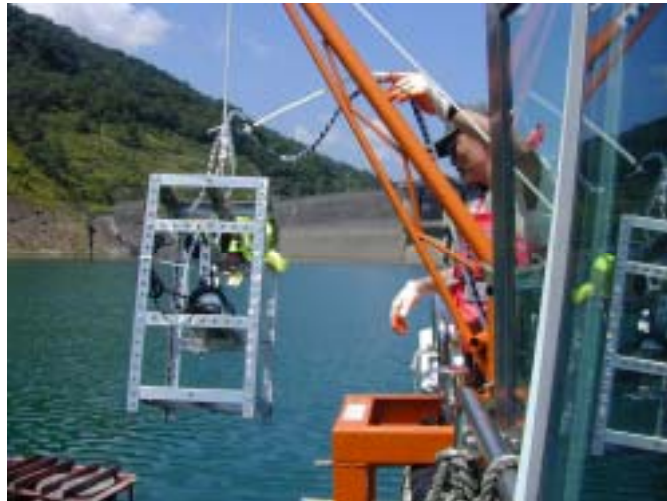


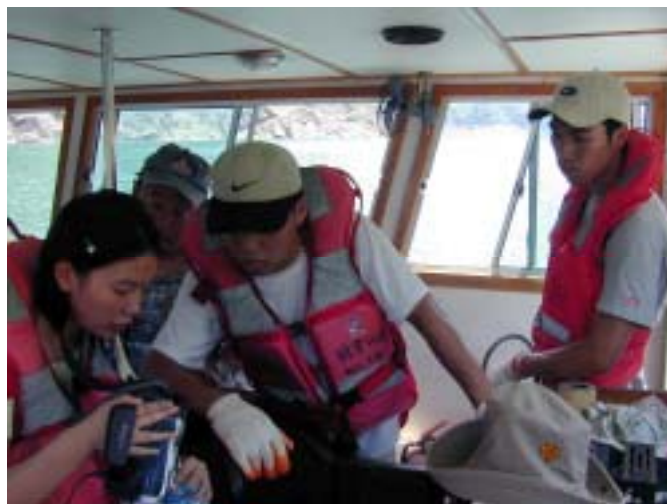
圖 4.48 Aqua Technique 的 Limno 半揚水式深層曝氣機。箭頭顯示水及空氣流動之方向。此種設計之水及空氣是在水底某個深度分離，水回到深層，空氣則由上方排到水面去。此法之成本較低，也比較不受水面劇烈升降之影響。標準深度為 10m，置於底部上方 1.2m，全高約 12m。此為 Aqua Technique 商業化之產品



(1)量測施放管口與攝影機鏡頭距離



(2)吊起組架送入水中



(3)在船上監視水下示蹤劑施放情形

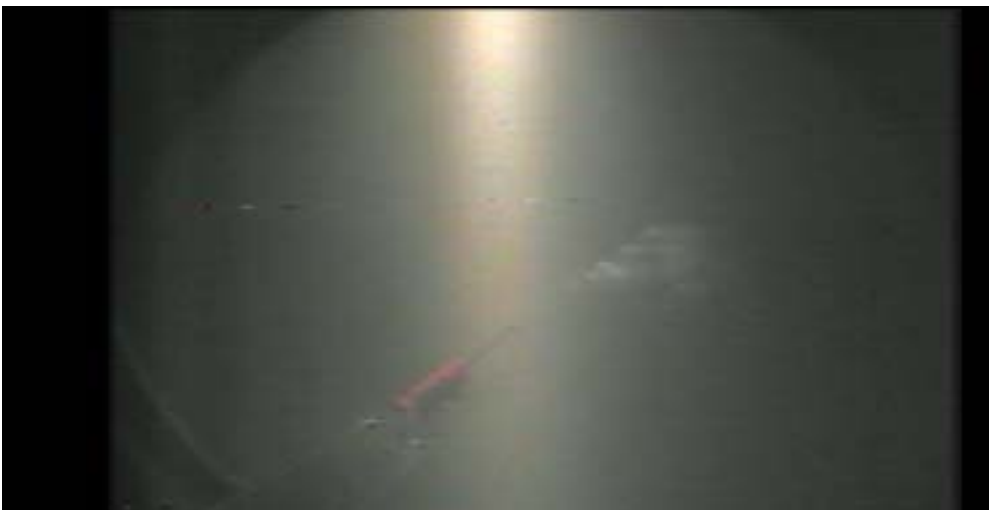
圖 4.49 翡翠水庫施放現地水下示蹤劑情形



(1) 時間 t_0



(2) 時間 t_1



(3) 時間 t_2

圖 4.50 水下 85 米處示蹤劑施放畫面

表 2.1 翡翠水庫集水區歷年非點源污染量推估

估算方法	估算單位	集水區範圍	非點源污染量 (總磷 kg/yr)
流量推估法	台北自來水事業處(1992)	翡翠水庫集水區	120,017
單位面積法	巨廷工程顧問公司(1993)	翡翠水庫集水區	9,677
VAST 模式	台大農工所(1995)	翡翠水庫集水區	35,671
單位面積法	台大農工所(1995)	翡翠水庫集水區	10,645
VANTU 法	台大土木系(1995)	翡翠水庫集水區	18,659
單位面積法	環保署(1999)	翡翠水庫集水區	16,136
單位面積法	崑山技院環工系(1999)	翡翠水庫集水區	16,636
單位面積法	美商傑明公司(2000)	翡翠水庫集水區	21,618
單位面積法	台北科大土木系(2000)	逮魚崛溪集水區	9,892
SS 與 TP 關係法	台大環工所(2001)	翡翠水庫集水區	1,803,000

資料來源：

1. 林鎮洋等(2001)
2. 吳及陳等(2001)

表 2.2 各種水庫湖泊治理方案

整治方法	說明
1.引水(Diversion)	將富營養化之水引開，使不進入水體中
2.稀釋/沖洗(Dilution/Flushing)	將不含(或含微量)營養之水引入，使整個水體營養程度降低；或將富營養之水抽出，以地下水補注稀釋。
3.加深(Deeping)	針對較淺水體，由於風關係使底泥揚起擾動，會釋放營養物質。可提高水面或濬深以增加水層高度避免此種現象。
4.底泥清除(Dredging)	由於底泥是內在營養來源，湖泊水庫隨著年代久遠亦越營養。故將表層底泥清除可降低營養鹽循環利用能力。
5.放乾(Drawdown)	此方法可使底泥直接與空氣接觸，加速某些營養物分解對含高量有機質之底泥效果佳，並使底泥自然壓縮，利於清除。
6.底層水抽出(Hypolimnetic withdrawal)	將底層富營養及缺氧水直接排放，可降低整個水體中營養物質平均濃度。
7.湖底封覆(Lake bottom sealing)	將底泥與水層界面隔絕，使由底泥釋出營養無法到達水層。通常使用飛灰、黏土、沸石、或金屬氧化物。
8.化學藥品處理(Chemical treatment)	加藥如明礬、鐵鹽、硝酸鹽固磷，使營養沉澱，或使生物利用性降低。殺藻劑不被視為一種控制方式，因短期內大量藻類死亡，會使水質急遽惡化。分解後其營養成份依然出現於水體中。
9.生長環境改變(Habitat manipulation)	利用對藻類生長環境改變降低其生產力，如添加活性碳或飛灰於水表，減少陽光入射等。
10.破壞分層與再曝氣(Destratification and reaeration)	以人為少量動力強制水體上下循環流動方式改善，提升水中溶氧使產生化學氧化及生物分解作用，以及抑制底泥營養鹽的釋出。
11.生物體收集(Biomass harvesting)	將優養化水體中的水生物體包括藻類、大型植物體、魚類等移除，減輕營養程度。
12.生物控制(Biological controls)	雖無法使水體營養程度降低，但可將產生問題之物種加以控制，例如放養以藻類為食的魚類等。

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 S321.62C
2	底泥錳	NIEA S321.62C
3	底泥鋅	NIEA S321.62C
4	底泥鉛	NIEA S321.62C
5	底泥銅	NIEA S321.62C
6	底泥砷	NIEAS310.61C
7	底泥汞	NIEAM317.00C
8	底泥鎘	NIEA S321.62C
9	孔隙水溶解性鐵	離心後依總量方法分析
10	孔隙水溶解性錳	離心後依總量方法分析
11	孔隙水溶解性鋁	離心後依總量方法分析
12	孔隙水溶解性鈣	離心後依總量方法分析
13	孔隙水溶解性鎂	離心後依總量方法分析
14	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	NIEAW433.50A
15	孔隙水溶解性氟(F ⁻)	Standard method(APHA, 1995) , 4500-F, IC method
16	pH	NIEAS410.60T
17	氧化還原電位 ORP	電極法
18	有機質	Method of Soil Analysis II29-3,-4
19	含水量	NIEA S280.61C
20	粒徑分析	濕篩法及雷射粒徑分析儀
21	底泥總氮(TKN)	Method of Soil Analysis II, Regular Kjeldahl Method
22	底泥總磷(TP)	Method of Soil Analysis II, Total Phosphorus Method
23	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%	0.056mg/kg
2	底泥錳	<20%	80~120%	100%	0.005 mg/kg
3	底泥鋅	<20%	80~120%	100%	0.019 mg/kg
4	底泥鉛	<20%	80~120%	100%	0.013 mg/kg
5	底泥銅	<20%	80~120%	100%	0.027 mg/kg
6	底泥砷	<20%	80~120%	100%	—
7	底泥汞	<20%	80~120%	100%	0.23 mg/kg
8	底泥鎳	<20%	80~120%	100%	—
9	孔隙水溶解性鐵	<20%	80~120%	100%	3.3E-4 mg/L
10	孔隙水溶解性錳	<20%	80~120%	100%	1.6E-5 mg/L
11	孔隙水溶解性鋁	<20%	80~120%	100%	7.4E-7 mg/L
12	孔隙水溶解性鈣	<20%	80~120%	100%	1.3E-4 mg/L
13	孔隙水溶解性鎂	<20%	80~120%	100%	8.1E-6 mg/L
14	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	<20%	80~120%	100%	0.024mg/L
15	孔隙水溶解性氟(F ⁻)	<20%	80~120%	100%	0.0012 mg/L
16	pH	—	—	100%	—
17	氧化還原電位(ORP)	—	—	100%	—
18	有機質	<20%	80~120%	100%	—
19	含水量	<20%	80~120%	100%	—
19	粒徑分析	<20%	—	100%	—
20	底泥總氮(TKN)	<20%	80~120%	100%	0.08 mg/kg
21	底泥總磷(TP)	<20%	80~120%	100%	8.73 mg/kg
22	溶解性磷(SP)	<20%	80~120%	100%	0.007 mg/L

表 3.3 CE-QUAL-W2 模式輸入資料檔

檔名	說明
QIN_BR1.NPT	入流 Inflows
TIN_BR1.NPT	入流溫度 Inflow temperatures
CIN_BR1.NPT	入流污染物濃度 Inflow constituents concentrations
QTR_TR1.NPT	支流入流 Tributary inflows
TTR_TR1.NPT	支流入流 Tributary inflow temperatures
CTR_TR1.NPT	支流入流濃度 Tributary inflow constituents concentrations
EUH_BR1.NPT	上游點水頭高程 Upstream head elevations
TUH_BR1.NPT	上游點邊界溫度 Upstream head boundary temperatures
CUH_BR1.NPT	上游點邊界污染物濃度 Upstream head boundary constituents concentrations
EDH_BR1.NPT	下游點水頭高程 Downstream head elevations
TDH_BR1.NPT	下游點邊界溫度 Downstream head boundary temperatures
CDH_BR1.NPT	下游點邊界污染物濃度 Downstream head boundary constituents concentrations
QOT_BR1.NPT	出流 Outflows
QWD_BR1.NPT	取水口取水 Withdrawals
VPR.NPT	大壩垂直剖面的起始條件 Vertical profile at dam for specifying initial conditions
W2_CON.NPT	輸入參數及程式的控制檔 Control file for each application

表 4.1 92 年 4 月翡翠水庫上游至下游的底泥性質分析結果(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 (2)
上層水	-1.45	-22.8	35.1	13.8	62.5
氧化還原電位 ORP(mV) 底泥	-180.1	-182	-182.1	-162.8	-133.8
pH 值	5.2	5.6	6.1	6.2	6.5
含水量(%)	56.5	53.4	46.8	46.6	45.1
有機質(%)	3.32	1.82	1.72	1.93	2.26
底泥總氮量(mg/kg)	1015.4	1207.5	722.5	1360	819.8
底泥總磷量(mg/kg)	970.7	643.7	392.5	1129.4	224.0
孔隙水溶解總磷(mg/L)	0.19	0.55	0.29	0.07	0.47
孔隙水溶解反應性磷 (mg/L)	0.14	0.08	0.12	0.06	0.02
孔隙水溶解硫(mg/L)	0.106	0.085	0.106	0.074	0.043
孔隙水溶解氟(mg/L)	0.059	0.088	0.085	0.128	0.065

表 4.2 92 年 4 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 (2)
>710	1.2	5.5	0.1	0.2	0.3
710-500	1.0	2.8	0.2	0.1	0.2
500-300	1.4	1.9	0.3	0.2	0.5
300-250	0.5	0.4	0.3	0.2	0.3
250-180	1.5	2.2	1.3	0.5	1.0
180-150	1.8	2.6	1.4	1.3	1.9
150-106	7.5	8.4	6.4	35.1	9.0
106-38	39.9	25.8	42.2	27.7	75.7
38-16	23.5	18.7	20.7	16.5	6.3
16-6.0	14.8	18.9	17.4	12.5	3.0
6.0-2.0	4.2	8.6	6.3	3.6	1.2
2.0-0.0	2.6	4.2	3.4	2.1	0.8

表 4.3 92 年 4 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	石磴子
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1 (2)
底 泥 (mg/kg)	鐵(Fe)(%)	3.86	3.80	3.35	3.16	3.22
	錳(Mn)	1279.92	1392.55	1256.30	954.72	960.58
	鋅(Zn)	120.15	121.63	102.84	102.48	102.82
	鉛(Pb)	88.00	87.97	73.42	95.46	73.40
	銅(Cu)	56.47	51.03	43.85	42.96	21.02
	鎘(Cd)	3.93	3.93	3.35	3.64	3.93
	砷(As)	1.18	1.01	0.84	0.61	0.72
	汞(Hg)	0.05	0.12	0.14	0.17	0.16
孔 隙 水 (mg/L)	鐵(Fe)	14.72	10.85	10.85	12.40	17.04
	錳(Mn)	1.13	5.33	2.25	2.39	1.27
	鋁(Al)	18.05	9.51	11.95	9.51	9.51
	鈣(Ca)	80.34	85.00	82.46	157.03	113.81
	鎂(Mg)	14.53	14.39	15.67	36.50	19.61

表 4.4 92 年 8 月翡翠水庫上游至下游的底泥性質分析結果(化學類)

項目/斷面		大壩 S-5	火燒樟 S-4	後坑子 S-3	馬祖林 S-2	石碇子 S-1(2)
上層						
	水	-10.1	-4.9	-32.2	-81.9	-14.9
氧化還原電位 ORP(mV)	底泥	-113.4	-119.4	-129.9	-126.7	-146.1
pH 值		6.6	6.8	6.6	6.4	6.5
含水量(%)		55.6	53.1	50.9	41.8	49.5
有機質(%)		3.14	1.86	2.09	1.86	2.52
底泥總氮量(mg/kg)		1543.5	1324.5	1064.8	1139.4	1162.7
底泥總磷量(mg/kg)		611.8	455.5	541.2	389.0	616.1
孔隙水溶解性總磷(mg/L)		0.43	0.14	0.27	0.39	0.21
孔隙水溶解反應性磷(mg/L)		0.15	0.11	0.11	0.10	0.07
孔隙水溶解性硫(mg/L)		0.055	0.047	0.022	0.047	0.03
孔隙水溶解態氟(mg/L)		ND	ND	0.036	0.046	ND

氟的偵測極限為 0.030 mg/L

表 4.5 92 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	石磴子 S-1(2)
>710	1.1	0.6	0.4	0.3	0.9
710-500	0.3	0.1	0.3	0.2	0.5
500-300	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4
300-250	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3
250-180	0.9	0.4	0.8	0.8	1.1
180-150	0.7	0.4	1.0	1.3	1.0
150-106	2.3	1.2	3.1	8.2	6.0
106-38	30.6	17.4	20.6	49.0	47.1
38-16	22.1	18.0	13.2	13.1	21.5
16-6.0	28.2	34.6	35.1	18.1	15.7
6.0-2.0	9.0	18.8	17.8	5.1	3.5
2.0-0.0	4.2	7.9	7.3	3.2	2.0

表 4.6 92 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	石磴子
		S-5	S-4	S-3	S-2	S-1(1)
底 泥 (mg/kg)	鐵(Fe)(%)	3.91	4.24	4.02	3.36	2.88
	錳(Mn)	495.29	634.30	447.34	390.43	345.08
	鋅(Zn)	79.48	72.78	73.91	49.30	67.97
	鉛(Pb)	64.62	58.15	49.93	33.58	38.44
	銅(Cu)	31.57	21.94	20.91	15.41	15.67
	鎘(Cd)	1.85	1.53	1.59	0.92	1.08
	砷(As)	10.07	10.87	8.67	6.05	6.84
	汞(Hg)	0.14	0.12	0.10	0.07	0.09
孔 隙 水 (mg/L)	鐵(Fe)	25.84	40.22	31.66	32.59	24.70
	錳(Mn)	1.13	5.64	4.03	4.29	2.72
	鋁(Al)	6.63	5.61	9.59	6.51	19.82
	鈣(Ca)	80.05	31.65	50.50	110.35	65.50
	鎂(Mg)	3.51	2.07	2.77	4.74	4.35

表 4.7 底泥磷模式(2B-SEPF)應用於翡翠水庫輸入參數一覽表

說明	符號	輸入值	數據來源
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	翡管局年報(1994)
底泥孔隙率(V/V)，無因次	n	0.61	實測值
底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係 數，cm ² /day	\mathcal{E}_z	0.3-2.5	示蹤劑實驗
微生物於好氧層對固相有機磷一階 反應分解速率常數，day ⁻¹	k_{c1}	0.0015	Calibration data
微生物於厭氧層對固相有機磷一階 反應分解速率常數，day ⁻¹	k_{c2}	0.001	Calibration data
溶解有機磷於好氧層一階分解速率 常數，day ⁻¹	k_{d1}	0.2	Calibration data
溶解有機磷於厭氧層一階分解速率 常數，day ⁻¹	k_{d2}	0.0004	Di Toro and Connolly (1980)(cited by WASP manual)
溫度校正因子，無因次	θ	1.08	WASP manual
底泥無機磷礦物的比表面積，cm ² /g	A_s'	100	假設值
底泥厭氧層 BOX-2 和掩埋層交界的 深度，cm	Z_2	10	假設值
底泥-水界面的平均孔隙率，無因次	n_o	0.81	(0.5* n +0.5*1)
特徵長度，cm。	L	0.0035	Calibration data
無機磷礦物溶出的一階質傳反應速 率常數，cm/day	α	857.14	=(D_m/L)
平衡態的溶解相無機磷濃度，mg/L	$EPC1$ $EPC2$	0.03 (有氧層) 0.474 (無氧層)	MINIEQL+計算結果
邊界層厚度，cm	MLW	1	假設值
底泥-水界面的水溫，°C	WT	18.5	實測值
底泥需氧量(SOD)，g/m ² day	R_{O2}	0.67	現地 DO 隨時間變化， 以零階反應模擬而得
上層水溶氧，mg/L	$C_{O2}(0)$	2.03	實測值
溶氧的擴散係數，cm ² /day	D_{O2}	1.78 (20°C)	分子擴散係數法計算
底泥有機磷含量，mg/kg	CSI	78	實測值

表 4.7 底泥磷模式(2B-SEPH)應用於翡翠水庫輸入參數一覽表 (續)

說明	符號	輸入值	數據來源
易分解底泥有機磷比例	f	0.5	假設值
底泥鋁結合磷含量, mg/kg	CS_2	22.68	實測值
上層水溶解有機磷濃度, mg/L	CW_{1W}	0.013	實測值
上層水溶解無機磷濃度, mg/L	CW_{2W}	0.002	實測值
初始孔隙水中有機磷濃度, mg/L	C_{1j}	0.31	實測值
初始孔隙水中無機磷濃度, mg/L	C_{2j}	0.23	實測值

表 4.8 底泥模式模擬與實驗室管柱實驗、現地觀測結果比較

	總磷 TP	無機反應性磷 RP	有機磷 OP
實驗室管柱實驗	0.09-0.14 (0.10)	0.023-0.038 (0.029)	
現地大壩底層水觀測 磷濃度隨時間累積 量換算	0.006-0.026 (0.013)	0.003-0.031 (0.010)	
底泥模式模擬	0.112	0.032	0.082

unit: $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \text{ day}$

表 4.9 底泥模式參數檢定範圍

說明	符號	輸入範圍	數據來源
底泥孔隙率(V/V)，無因次	n	0.57 (± 0.09)	2001-2002 年實測值(N=25)
底泥-水界面的平均孔隙率，無因次	n_{ij}	0.74-0.83	($0.5 * n + 0.5 * 1$)
底泥-水界面溶解磷的垂直向延散係數， cm^2/day	ϵ_z	2-50	Di Toro (2001)
微生物於好氧層對固相有機磷一階反應分解速率常數， day^{-1}	k_{cl}	0.015-0.0001	增加 10 倍
溶解有機磷於好氧層一階分解速率常數， day^{-1}	k_{dl}	0.8-0.002	增加 10 倍
底泥有氧層平衡態反應性無機磷濃度， mg/L	$EPC1$	0.03-22.19 (Averaged 4.30)	2000-2002 年實測大壩底泥孔隙水離子濃度計算而得(N=6)
底泥無氧層平衡態反應性無機磷濃度， mg/L	$EPC2$	0.04-49.6 (Averaged 14.96)	2000-2002 年實測大壩底泥孔隙水離子濃度計算而得(N=5)
底泥-水界面的水溫， $^{\circ}\text{C}$	WT	15.2-23.0 (Averaged 17.4)	底層水溫實測值
底泥上層水溶氧濃度， mg/L	DO	0-9	底層水溶氧實測值
底泥需氧量(SOD)， $\text{g}/\text{m}^2\text{day}$	R_{O2}	0.07-2.5	WASP manual

表 4.10 W2 模式所需模擬水質生化反應一覽表

說明	符號	單位	參考係數範圍	出處	檢定值
水平黏滯係數	A_X	m^2/sec	1.0	[1]	1.0
水平延散係數	D_X	m^2/sec	0-1.2	[1]	0.5
藻類飽和生長率(20)	K_{agmax}	1/day	1.5-2.5	[1][4]	3.0
			0.2-8	[3]	
藻類死亡率	K_{am}	1/day	0.01-0.03	[1]	0.03
藻類沉降率	$\omega_a/\Delta z$	1/day	0.08-0.11	[1]	0.05
藻類代謝死亡率(20)	K_{ac}	1/day	0.01-0.04	[1]	0.04
			0.05-0.25	[2]	
			0.08-0.1	[3]	
藻類內呼吸率	K_{ar}	1/day	-	-	0.15
飽和日光強度	I_s	ly/day	100-400	[1][2]	350
			70-550	[3]	
磷半飽和常數	P_p	mg/L	0.002-0.0475	[1]	0.025
			0.005-0.05	[2]	
(氨)氮半飽和常數	P_N	mg/L	0.01-0.4	[1][2]	0.014

註：上列參數有關時間的單位，在模式中需換成以秒作單位。在模式中，氮對生長速率的限制以氮半飽和常數的形式代表。

1. 郭振泰、楊明德等，民國 89 年
2. 莊子旺，民國 87 年
3. 郭振泰、吳俊宗等，民國 79、80 年
4. Thomann, R. V. and J.A. Muller, 1987

表 4.11 湖泊以底層抽水改善水質的案例

湖庫名稱	集水區面積 (10 ³ m ²)	水庫面積 (10 ³ m ²)	水庫體積 (10 ³ m ³)	水停留 時間(yr)	平均深度 (m)	最大深度 (m)
Ballinger, 美國	11,720	405	1838	0.26	4.5	10.0
Bled, 南斯拉夫	NA	1438	25,690	3.6	17.9	30.2
Burgaschi, 瑞士	3190	192	2483	1.4	12.9	32.0
Germundener, Maar, 德國	430	75	1330	8.0	17.7	39.0
Hecht, 奧地利	2221	263	6428	2.8	24.4	56.5
Kleiner, Montiggler, 義大利	1252	52	518	NA	9.9	14.8
Klopeiner, 奧地利	NA	1106	24,975	1.5	22.6	48.0
Kortowo, 波蘭	NA	901	5293	NA	5.9	17.2
Kraiger, 奧地利	NA	51	245	2.0	4.8	10.0
Mauen, 瑞士	4300	510	1989	0.6	3.9	6.8
Meerfelder Maar, 德國	1270	248	2270	4.5	9.2	18.0
de Paladru, 法國	48,000	3900	97,000	4.0	25.0	35.0
Piburger, 奧地利	2640	134	1835	1.9	13.7	24.6
Reither, 奧地利	NA	15	67	0.3	4.5	8.2
Stubengerg, 奧地利	NA	450	NA	NA	NA	8.0
Waramaug, 美國	37,000	2866	24,758	0.8	8.6	12.8
Wiler, 瑞士	257	31	325	1.0	10.0	20.5
Wononscopomuc, 美國	5994	1400	15,500	4.0	11.1	32.9

台灣翡翠水庫之對照參考資料：

集水區面積(10³m²)：303,000；水庫面積(10³m²)：10,240；水庫體積(10³m³)：406,000；水停留時間(yr)：0.27；
平均深度(m)：38.5；最大深度(m)：113.5。

表 4.12 深層曝氣之湖庫及其特性

湖庫名	深度			體積 (m ³ x 10 ⁶)	面 積 (ha)	Q 空氣 (m ³ /min)	參考 文獻
	最大	平均	最小				
Brunsviken, 瑞典			13		100	15.5	
Caldonazzo, 義大利	50		11		700	44	
Hemloc, MI	18.6		18.6		2.4	2.8	
Jarlasjön,瑞典	24	9.3	24	7.8	84	22.8	
Kolbotnvatn, 挪威	18.5	10.3	18.5	3.1	30.3	5.5	
Larson, WI	11.9	4.0	11.9	0.188	4.8	0.45	
Mirror, WI	13.1	7.6	12.8	0.4	5.3	0.45	
Ottoville Quarry, OH	18		18	0.063	0.73	0.11	
Spruce Run, NJ	13.1		12.2			0.15	
Tegeler See, 德國	16		12/16		420	12	
Waccabuc, NY	13		13	4.053	53.6	7.93	
Wahnbach,德國	43	19.2		41.63	214.5	9	
Spruce Knob, WV	5.7	2.1	5.2	0.224	10.5	1.3	
Ghirla, 義大利	14	8.0	14.0	2.0	24.5		
Tory, Ontario 加拿大	10	4.5	9.0	0.055	1.23	3.54	

參考文獻

Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. and Newroth, P. R. Restoration and Management of Lakes and Reservoir, 2nd, ed., Lewis Publishers, Boca Raton, 1993.

台北翡翠水庫管理局，翡翠水庫操作年報，1996。

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
		92年4月	92年8月	92年4月	92年8月	92年4月	92年8月	
1	底泥鐵	0-5 %	8.1%	93.6%	128%	100%	100%	0.0565mg/kg
2	底泥錳	1.3-6.4%	12.6%	102.15%	112.3%	100%	100%	0.0062 mg/kg
3	底泥鋅	1.7-6%	5.9%	107.9%	103.5%	100%	100%	0.005 mg/kg
4	底泥鉛	13-15.4%	26.9%	102.9%	87.2%	100%	100%	0.23 mg/kg
5	底泥銅	3.5-4.2%	9.5%	100.9%	119%	100%	100%	0.03 mg/kg
6	底泥砷	0.0	0.11%	59 %	—	100%	100%	0.0049 mg/kg
7	底泥汞	1.4 %	0.23%	129.3 %	95.5%	100%	100%	0.003 mg/kg
8	底泥鎘	16.1%	7.1%	98.5%	101%	100%	100%	0.014 mg/kg
9	孔隙水溶解性鐵	21%	33.2%	93.56%	106.7%	100%	100%	2.07 mg/L
10	孔隙水溶解性錳	0.0	12.5%	101%	112%	100%	100%	0.02 mg/L
11	孔隙水溶解性鋁	40.5%	28.9%	109.5.1%	87.5%	100%	100%	0.13mg/L
12	孔隙水溶解性鈣	11.4%	25.4%	119.7%	103.6%	100%	100%	0.135mg/L
13	孔隙水溶解性鎂	0.63 %	11.6%	58.0%	94.5%	100%	100%	0.135mg/L
14	孔隙水溶解性硫(S ²⁻)	34 %	19%	92.0%	153%	100%	100%	0.005 mg/L
15	孔隙水溶解性氟(F ⁻)	3.6%	8.6%	32.37%	109%	100%	100%	0.03 mg/L
16	pH	0.5 %	0.5 %	—	—	100%	100%	—
17	氧化還原電位(ORP)	0.5 %	0.5 %	—	—	100%	100%	—
18	有機質	9 %	6.3%	75%	—	100%	100%	—
19	粒徑分析	2-87%	8-158%	—	—	100%	100%	—
20	底泥總氮(TKN)	35 %	3.9%	67%	83%	100%	100%	0.083mg/kg
21	底泥總磷(TP)	15%	0.7%	90%	76%	100%	100%	8.37mg/kg
22	溶解性磷(SP)	20%	16%	114.8%	—	100%	100%	0.0004 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 (三)							
採樣記錄員：陳怡靜				採樣日期：92 年 4 月 4 日			
				天氣：陰 氣溫：22.2 °C			
一、採樣地點： <input type="checkbox"/> 大壩 <input type="checkbox"/> 火燒樟 <input type="checkbox"/> 後坑子 <input type="checkbox"/> 馬祖林 <input checked="" type="checkbox"/> 灣潭(石碇子) 採樣位置(UTM)E/N <u>0363961/2757061</u> 今日大壩水位： <u>141.22</u> m 採樣點絞盤旋轉圈數： <u>24</u> 估計水深 <u>22</u> m(轉一圈約 0.9m)							
二、採樣現場描述： 距石碇子溪下游 約 20m，距河左岸約 <u> </u> m <input type="checkbox"/> 水面有波紋；表水顏色 <u>棕</u> <input type="checkbox"/> 有優養的跡象 <input checked="" type="checkbox"/> 有枯枝飄浮水面 其他 <u> </u> 附近有 <input type="checkbox"/> 住家 <input type="checkbox"/> 果園 <input type="checkbox"/> 茶園 <input checked="" type="checkbox"/> 森林							
三、採樣安全注意事項： <input checked="" type="checkbox"/> 有戴手套 <input checked="" type="checkbox"/> 船上有救生衣 <input type="checkbox"/> 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 (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S1-1	灰黑	47	5.9 (62.8%)	18			-131.1
S1-2	灰黑	25			6.65	-0.6	-127.9
S1-3	灰黑	36			6.54		
S1-4	灰黑			17.7	6.59		
					6.62	125.6	-142.5
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) 3. 表水有明顯冒泡							

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 (三)							
採樣記錄員：陳怡靜				採樣日期：92 年 4 月 4 日			
				天氣：陰 氣溫：22.2 °C			
一、採樣地點： <input type="checkbox"/> 大壩 <input type="checkbox"/> 火燒樟 <input type="checkbox"/> 後坑子 <input checked="" type="checkbox"/> 馬祖林 <input type="checkbox"/> 灣潭(石磴子)							
採樣位置(UTM)E/N <u>0362037/2757644</u> 今日大壩水位： <u>141.22</u> m							
採樣點絞盤旋轉圈數： <u>39</u> 估計水深 <u>34</u> m(轉一圈約 0.9m)							
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>100</u> m							
<input checked="" type="checkbox"/> 水面有波紋；表水顏色 <u>綠</u> <input type="checkbox"/> 有優養的跡象 <input checked="" type="checkbox"/> 有枯枝飄浮水面							
其他 <u> </u> 附近有 <input checked="" type="checkbox"/> 住家 <input type="checkbox"/> 果園 <input type="checkbox"/> 茶園 <input checked="" type="checkbox"/> 森林							
三、採樣安全注意事項：							
<input checked="" type="checkbox"/> 有戴手套 <input checked="" type="checkbox"/> 船上有救生衣 <input type="checkbox"/> 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 (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S2-1	上層水混濁,底泥易被擾動	40	6.01 (64.4%)	17.7	6.50	2.59	-162.6
S2-2	灰黑				6.52	33.7	-160.3
S2-3	灰黑	42.5			6.14	-18.1	-165.5
S2-4	灰黑						
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:石磴子							

S5-6		42.5					
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-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 (三)							
採樣記錄員：陳怡靜				採樣日期：92 年 8 月 28 日			
				天氣：晴 氣溫：31.5 °C			
二、採樣地點： <input type="checkbox"/> 大壩 <input type="checkbox"/> 火燒樟 <input type="checkbox"/> 後坑子 <input type="checkbox"/> 馬祖林 <input checked="" type="checkbox"/> 灣潭(石碇子)							
採樣位置(UTM)E/N <u>0363961/2757061</u> 今日大壩水位： <u>135</u> m							
採樣點絞盤旋轉圈數： <u>16</u> 估計水深 <u>12</u> m(轉一圈約 0.9m)							
二、採樣現場描述：							
距石碇子溪下游 約 <u>20</u> m，距河左岸約 <u> </u> m							
<input type="checkbox"/> 水面有波紋；表水顏色 <u> </u> <input type="checkbox"/> 有優養的跡象 <input type="checkbox"/> 有枯枝飄浮水面							
其他 <u> </u> 水面有冒泡 <u> </u> 附近有 <input type="checkbox"/> 住家 <input type="checkbox"/> 果園 <input type="checkbox"/> 茶園 <input checked="" type="checkbox"/> 森林							
三、採樣安全注意事項：							
<input checked="" type="checkbox"/> 有戴手套 <input checked="" type="checkbox"/> 船上有救生衣 <input type="checkbox"/> 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 (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S1-1	灰黑	25	5.9	28.9	6.54	-12.4	-147.8
S1-3	灰黑	30		29.1	6.61	-6.1	-146.0
S1-2	灰黑	20		29.3	6.72	-26.1	-127.5
S1-4	灰黑	20		29.3	6.60		

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:石磑子(灣潭無法到達，改為石磑子採樣)							
3.表水有明顯冒泡							

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 (三)							
採樣記錄員：陳怡靜				採樣日期：92 年 8 月 28 日			
				天氣：晴 氣溫：31.5 °C			
一、採樣地點： <input type="checkbox"/> 大壩 <input type="checkbox"/> 火燒樟 <input type="checkbox"/> 後坑子 <input checked="" type="checkbox"/> 馬祖林 <input type="checkbox"/> 灣潭(石磑子)							
採樣位置(UTM)E/N_0362037/2757644 今日大壩水位：_135_ m							
採樣點絞盤旋轉圈數：_33_ 估計水深_30_ m(轉一圈約 0.9m)							
二、採樣現場描述：							
距____河口____游 約 ____m，距河左岸約_100m							
<input checked="" type="checkbox"/> 水面有波紋；表水顏色_綠_ <input type="checkbox"/> 有優養的跡象 <input checked="" type="checkbox"/> 有枯枝飄浮水面							
其他 _____附近有 <input checked="" type="checkbox"/> 住家 <input type="checkbox"/> 果園 <input type="checkbox"/> 茶園 <input checked="" type="checkbox"/> 森林							
三、採樣安全注意事項：							
<input checked="" type="checkbox"/> 有戴手套 <input checked="" type="checkbox"/> 船上有救生衣 <input type="checkbox"/> 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 (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S2-1	灰黑	40	2.13	26.0	6.57	-81.9	-132.1
S2-2	灰黑	40		28.4	6.53	18.7	-121.2

樣品編號	外觀	樣品厚度 (cm)	DO (mg/L)	Temp (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S4-1	灰黃	50	3.48	20.0	6.71		
S4-4	灰黃	50		22.1	6.85	-4.9	-119.4
S4-3							
S4-2							

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:石磴子

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 (三)	
採樣記錄員：陳怡靜	採樣日期：92 年 8 月 28 日
	天氣：晴 氣溫：31.5 °C
一、採樣地點： <input checked="" type="checkbox"/> 大壩 <input type="checkbox"/> 火燒樟 <input type="checkbox"/> 後坑子 <input type="checkbox"/> 馬祖林 <input type="checkbox"/> 灣潭(石磴子) 採樣位置(UTM)E/N <u>0356792/2755739</u> 今日大壩水位： <u>135</u> m 採樣點絞盤旋轉圈數： <u>99</u> 估計水深 <u>80m</u> (轉一圈約 0.9m)	
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 <input checked="" type="checkbox"/> 水面有波紋；表水顏色 <u>藍綠</u> <input type="checkbox"/> 有優養的跡象 <input type="checkbox"/> 有枯枝飄浮水面 其他 <u>有冒泡</u> 附近有 <input type="checkbox"/> 住家 <input type="checkbox"/> 果園 <input type="checkbox"/> 茶園 <input checked="" type="checkbox"/> 森林	
三、採樣安全注意事項： <input checked="" type="checkbox"/> 有戴手套 <input checked="" type="checkbox"/> 船上有救生衣 <input type="checkbox"/> 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 (°C)	pH	ORP(mv) 上層水/底泥	
S5-1	灰黑	51	2.35	23.5			
S5-2	灰黑	40.5		23.6	6.43	-6.2	-101.7
S5-3	灰黑	36		23.1	6.66	-14.0	-125.1
S5-4		53					
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:石磴子							

附錄三、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。

附錄四、底泥磷模式(2B-SEPF)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})：

$$n \frac{\partial C_{w1}}{\partial t} = \rho_b k_c \theta^{(T-20)} C_{S1} - nk_d \theta^{(T-20)} C_{w1}$$

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

$$q = n_0 \frac{D_H}{L_0} (C_{w20} - C_w)$$

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

附錄五 CE-QUAL-W2 模式輸入控制檔(W2_CON.NPT)

```

FEITSUI Reservoir
TITLE C .....TITLE.....
      FEITSUI Reservoir, 1999 AND 2000
      Temperature and water quality simulation
      *****
Station @ dam

TIME CON  TMSTRT  TMEND  YEAR
          14.0   366.0  2000

```

DLT CON	NDT	DLTMIN							
	1	1.0							
DLT DATE	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD	DLTD
	14.0								
DLT MAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX	DLTMAX
	900.0								
DLT FRN	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF	DLTF
	0.90								
BRANCH G	US	DS	UHS	DHS	NL				
Br 1	2	18	0	0	2				
LOCATION	LAT	LONG	ELBOT						
	24.9	121.6	56.5						
INIT CND	T2I	ICETHI	WTYPEC						
	-1.0	0.0	FRESH						
CALCULAT	VBC	EBC	MBC	WBC	PQC	EVC	PRC		
	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF		
INTERPOL	INFIC	TRIC	DTRIC	HDIC	OUTIC	WDIC	METIC		
	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON		
DEAD SEA	WINDC	QINC	QOUTC	HEATC					
	ON	ON	ON	ON					
ICE COVER	ICEC	SLICEC	SLHTC	ALBEDO	HWI	BETAI	GAMMAI	ICEMIN	ICET2
	OFF	DETAIL	TERM	0.25	10.0	0.6	0.07	0.05	3.0
TRANSPORT	SLTRC	THETA							
	QUICKEST	0.55							
WSC NUMB	NWSC	WINDH							
	1	10.0							

WSC DATE	WSCD 14.0	WSCD	WSCD	WSCD	WSCD	WSCD	WSCD	WSCD	WSCD
WSC COEF	WSC 0.90	WSC	WSC	WSC	WSC	WSC	WSC	WSC	WSC
HYD COEF	AX 1.0	DX 0.5	CHEZY 70.0	CBHE 7.0E-8	TSED 14.0				
SEL WITH	SWC ON	SWC	SWC	SWC	SWC	SWC	SWC	SWC	SWC
N STRUC	NSTR 1	NSTR	NSTR	NSTR	NSTR	NSTR	NSTR	NSTR	NSTR 磅
K BOTTOM Br 1	KBSW 54	KBSW	KBSW	KBSW	KBSW	KBSW	KBSW	KBSW	KBSW
SINK TYPE Br 1	SINKC POINT	SINKC	SINKC	SINKC	SINKC	SINKC	SINKC	SINKC	SINKC
E STRUC Br 1	ESTR 128.0	ESTR	ESTR	ESTR	ESTR	ESTR	ESTR	ESTR	ESTR
W STRUC Br 1	WSTR 6.4	WSTR	WSTR	WSTR	WSTR	WSTR	WSTR	WSTR	WSTR
N OUTLET	NOUT 1	NOUT	NOUT	NOUT	NOUT	NOUT	NOUT	NOUT	NOUT
O LAYER	KOUT 22	KOUT	KOUT	KOUT	KOUT	KOUT	KOUT	KOUT	KOUT
N WDRWAL	NWD 0								
W SEGMENT	IWD	IWD	IWD	IWD	IWD	IWD	IWD	IWD	IWD

W LAYER	KWD	KWD	KWD	KWD	KWD	KWD	KWD	KWD	KWD
N TRIBS	NTR								
	3								
TRIB PLACE	TRC	TRC	TRC	TRC	TRC	TRC	TRC	TRC	TRC
	DENSITY	DENSITY	DENSITY						
TRIB SEG	ITR	ITR	ITR	ITR	ITR	ITR	ITR	ITR	ITR
	3	14	17						
TRIB TOP	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT	ETRT
TRIB BOT	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB	ETRB
DST TRIB	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC	DTRC
	OFF								
SCR PRINT	SCRC	NSCR							
	ON	1							
SCR DATE	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD	SCRD
	14.0								
SCR FREQ	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF	SCRF
	1								
SNAPSHOT	LJPC	UPRNC	WPRNC	TPRNC	DTPRNC				
	III	ON	ON	ON	OFF				
SNP PRINT	SNPC	NSNP	NISNP						
	ON	1	17						

SNP DATE	SNPD 14.0	SNPD	SNPD	SNPD	SNPD	SNPD	SNPD	SNPD	SNPD
SNP FREQ	SNPF 1	SNPF	SNPF	SNPF	SNPF	SNPF	SNPF	SNPF	SNPF
SNP SEG	ISNP 2 11	ISNP 3 12	ISNP 4 13	ISNP 5 14	ISNP 6 15	ISNP 7 16	ISNP 8 17	ISNP 9 18	ISNP 10
PRF PLOT	PRFC OFF	NPRF 0	NIPRF 0						
PRF DATE	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD	PRFD
PRF FREQ	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF	PRFF
PRF SEG	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF	IPRF
SPR PLOT	SPRC ON	NSPR 1	NISPR 1						
SPR DATE	SPRD 14.5	SPRD	SPRD	SPRD	SPRD	SPRD	SPRD	SPRD	SPRD
SPR FREQ	SPRF 1.0	SPRF	SPRF	SPRF	SPRF	SPRF	SPRF	SPRF	SPRF
SPR SEG	ISPR 16	ISPR	ISPR	ISPR	ISPR	ISPR	ISPR	ISPR	ISPR
TSR PLOT	TSRC ON	NTSR 0							
TSR DATE	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD	TSRD

14.5

TSR FREQ	TSRF 1.0	TSRF	TSRF	TSRF	TSRF	TSRF	TSRF	TSRF	TSRF
VPL PLOT	VPLC OFF	NVPL 0							
VPL DATE	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD	VPLD
VPL FREQ	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF	VPLF
CPL PLOT	CPLC OFF	NCPL 0							
CPL DATE	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD	CPLD
CPL FREQ	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF	CPLF
RESTART	RSOC OFF	NRSO 0	RSIC OFF						
RSO DATE	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD	RSOD
RSO FREQ	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF	RSOF
CST COMP	CCC ON	SDC OFF	LIMC ON	KFU 15					
CST ACT	ACC OFF ON	ACC ON ON	ACC OFF ON	ACC OFF OFF	ACC OFF OFF	ACC OFF OFF	ACC ON OFF	ACC OFF OFF	ACC ON OFF

	OFF	OFF	OFF						
CST ICON	C2I	C2I	C2I	C2I	C2I	C2I	C2I	C2I	C2I
	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	-1.0
	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0						
CST PRINT	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC	CPRNC
	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON
	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF						
CIN CON	INACC	INACC	INACC	INACC	INACC	INACC	INACC	INACC	INACC
	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON
	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF						
CTR CON	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC	TRACC
	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON
	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF						
CDT CON	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC	DTACC
	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF						
CPR CON	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC	PRACC
	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	OFF	OFF	OFF						
EX COEF	EXH20	EXSS	EXOM	BETA					
	4.00	0.20	0.5	0.60					
COLIFORM	COLQ10	COLDK							
	1.04	1.4							

S SOLIDS	SSS								
	1.0								
ALGAE	AG	AM	AE	AR	AS	ASAT	APOM		
	3.0	0.03	0.04	0.15	0.05	350.0	0.80		
ALG RATE	AT1	AT2	AT3	AT4	AK1	AK2	AK3	AK4	
	5.0	30.0	35.0	40.0	0.1	0.99	0.99	0.1	
DOM	LDOMDK	LRDDK	RDOMDK						
	0.30	0.010	0.001						
POM	LPOMDK	POMS							
	0.08	0.30							
OM RATE	OMT1	OMT2	OMK1	OMK2					
	5.0	30.0	0.1	0.99					
SEDIMENT	SDK	FSOD							
	0.08	1.0							
S DEMAND	SOD	SOD	SOD	SOD	SOD	SOD	SOD	SOD	SOD
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	0.7								
CBOD	KBOD	TBOD	RBOD						
	0.25	1.047	1.85						
PHOSPHOR	P04R	PARTP	AHSP						
	0.002	0.006	.025						
AMMONIUM	NH4R	NH4DK	AHSN						
	0.05	0.10	0.014						
NH4 RATE	NH4T1	NH4T2	NH4K1	NH4K2					
	5.0	25.0	0.1	0.99					

NITRATE N03DK
0.10

N03 RATE N03T1 N03T2 N03K1 N03K2
5.0 25.0 0.1 0.99

SED C02 C02R
0.0

IRON FER FES
0.5 2.0

STOICHMT O2NH4 O2OM O2AR O2AG BIOP BION BIOC
4.57 1.4 1.4 1.4 0.011 0.08 0.45

O2 LIMIT O2LIM
0.20

BTH FILE.....BTHFN.....
bth.npt

VPR FILE.....VPRFN.....
vpr.npt

LPR FILE.....LPRFN.....
lpr.npt - not used

RSI FILE.....RSIFN.....
rsi.npt - not used

MET FILE.....METFN.....
met.npt

QWD FILE.....QWDFN.....
qwd.npt - not used

ELO FILE.....ELOFN.....
Br 1 elo.npt

QIN FILE.....QINFN.....

Br 1 qin_br1.npt

TIN FILE.....TINFN.....

Br 1 tin_br1.npt

CIN FILE.....CINFN.....

Br 1 cin_br1.npt

QOT FILE.....QOTFN.....

Br 1 qot_br1.npt

QTR FILE.....QTRFN.....

Tr 1 qtr_tr1.npt

Tr 2 qtr_tr2.npt

Tr 3 qtr_tr3.npt

TTR FILE.....TTRFN.....

Tr 1 ttr_tr1.npt

Tr 2 ttr_tr2.npt

Tr 3 ttr_tr3.npt

CTR FILE.....CTRFN.....

Tr 1 ctr_tr1.npt

Tr 2 ctr_tr2.npt

Tr 3 ctr_tr3.npt

QDT FILE.....QDTFN.....

Br 1 qdt_tr1.npt - not used

TDT FILE.....TDTFN.....

Br 1 tdt_tr1.npt - not used

CDT FILE.....CDTFN.....

Br 1 cdt_tr1.npt - not used

PRE FILE.....PREFN.....

Br 1 pre_br1.npt - not used

TPR FILE.....TPRFN.....

Br 1 tpr_br1.npt - not used

CPR FILE.....CPRFN.....

Br 1 cpr_br1.npt - not used

EUH FILE.....EUHFN.....

Br 1 euh_br1.npt

TUH FILE.....TUHFN.....

Br 1 tuh_br1.npt

CUH FILE.....CUHFN.....

Br 1 cuh_br1.npt - not used

EDH FILE.....EDHFN.....

Br 1 edh_br1.npt - not used

TDH FILE.....TDHFN.....

Br 1 tdh_br1.npt - not used

CDH FILE.....CDHFN.....

Br 1 cdh_br1.npt - not used

SNP FILE.....SNPFN.....

snp.opt

TSR FILE.....TSRFN.....

tsr.opt

PRF FILE.....PRFFN.....

prf.opt

VPL FILE.....VPLFN.....

vpl.opt

CPL FILE.....CPLFN.....
cpl.opt

SPR FILE.....SPRFN.....
spr.opt

附錄六、期初評選會議紀錄

「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究(三)」期初審查會議紀錄

壹、時間：九十二年二月二十五日下午一時三十分

貳、地點：臺北翡翠水庫管理局會議室

參、主持人：局長康世芳

肆、出席人員：

台灣大學環境工程研究所

李公哲教授（請假）

台灣大學土木工程研究所

郭振泰教授

朝陽科技大學環境工程與管理研究所

王敏昭教授

台北科技大學環境規劃與管理研究所

陳孝行教授

環境保護署環境檢驗所

王漢泉研究員

經濟部水利署臺北水源特定區管理局

周文祥科長

臺北市政府研究發展考核委員會

臺北市政府環境保護局

臺北自來水事業處

臺北縣政府環境保護局

台北翡翠水庫管理局

台灣大學環境工程研究所

劉晃美

翁秀蕙

江清蓮

周祖勇、林瑞廷、陳秋種、李衍振、
郭常康、李健元、洪章哲、李秉修等
吳先琪教授、陳怡靜

	審查委員意見	辦理情形
國立台灣大學土木系郭振泰教授	1.水庫入流營養鹽(P 及 N)的推估是很重要的，國內缺乏暴雨期的採樣資料(指流入水庫點)故可加強這方面的分析。	本計畫並不包含暴雨期的入流水質採樣作業。暴雨期的入流負荷的確很大，數據的不確定性也很大，會在計畫中就相關的數據再作檢討。
	2.另一個方法是建立一個完善的集水區非點源污染物傳輸模式(如 HSPF, Basins, Vart 等)，但仍需要有暴雨期採樣資料來檢證驗證模式，有待台北水源局及翡翠管局來加強研究。	請翡翠管局參考。
	3.W2 模式只能模擬總磷，無法分別出有機磷及無機磷等，WASP 可以但沒有水理功能，這些特性必須掌握，以了解模式優劣點。	WASP 模式在應用於翡翠水庫水溫及水流狀況模擬的確有困難，從過去研究已發現水文變化對水庫流場與底泥磷的釋放對水質的影響十分顯著，以 W2 模式來模擬總磷還是比較合適的。
朝陽科技大學環境工程與管理	1.此研究案為第二年之延續計畫，基本上已綜合第一年計畫之建議事項，然而能於期初在不增加工作負擔之情況下彙整增加一些較優先的工作項目可使將來研究成果更具體些。	將會注意可深入研究之工作項目，視負擔之情況進行。
	2. 第一頁，倒數第 4 行「厭氧還原程度」與「氧化還原電位」為同一件事，可刪除其中之一。	謝謝指正，有重覆的地方會修改之。
	3. 感謝採納建議增加探討底泥鎘(Cd)含量。重金屬鎘為磷肥之主要副成份，並且已有諸多文獻報導土壤磷含量與重金屬鎘污染量有甚高之相關。	本年度將納入檢測項目。

	審查委員意見	辦理情形
系 所 王 敏 昭 教 授	4.第 17 頁，建議底泥採樣不要混樣，並且增加採樣數為 4，如此可以統計不同採樣位址之磷含量差異，進一步追蹤外來負荷之來源。	本計畫在同一個採樣點採三個底泥管柱後再混合的目的是在去除空間差異的干擾，找平均值，這也是參考土壤採樣的方法。事實上從歷年來採樣數據的統計結果來看，由於水庫固定五個採樣點之間的相對距離很大，主要的外來負荷也已確定多集中在上游，底泥的磷含量已有明顯的相對變化關係存在，且具有季節變化特性。若要在同一處採 4 個點，找空間變異，將視工作人力許可再評估，但承諾作一個點的重覆分析，探討分析的差異性。
	5.第 39 頁檢驗項目如在工作量可負荷之情況下，建議作離子層析分析時增加探討不同型態之氮，例如 NO_2^- 與 NO_3^- 。	計畫暫時僅對 S 及 F 分析，因他們是地質重要元素，且對磷物種的分布有影響，也是污染元素。由於 N 並不是水庫藻類生長量的控制因子，計畫評估增加分析項目將影響工作人力，暫時不考慮加以分析。
台 北 科 技 大 學 環 境 所 陳 孝 行 教 授	1. 期能在未來量化現有底泥之磷量，並和其他外部負荷作比較。	遵照辦理。
	2. 未來對於水庫水質改善方案之建議工作(第 37 頁)，能結合水庫之操作現況，如利用暴雨期之排泥等方式。	當會優先考慮水庫較容易執行的操作策略。
	3. 是否可以結合現有的證據，如灣潭地區的鈣結合磷偏高等，訂出水庫有效管理之優先順序。	灣潭底泥的鈣結合磷很多，鈣離子的濃度也很高，不過翡管局不能僅從分析結果來進行管制行動，建議可從其他管道更積極的確認污染源，依據相關法規，提出集水區管理建議來減輕底泥污染。
環 保 暑 檢	1.水庫底泥採樣的採樣點位置如何，是否需要取三點混樣，方具代表性。另可否以 ORP 之數值判斷底泥是否有代表性。	計畫會把採樣方法訂出來提供參考。

	審查委員意見	辦理情形
驗所王漢泉先生	2.底泥內部磷負荷除了考量藻類死亡沉降，其他水生生態系內其他生物死亡或水庫內淹沒區未砍伐之樹木對內部磷負荷是否有影響。 3.底泥氮磷數據可否以美國 USEPA 有關港灣湖泊底泥污染判斷標準來評估水庫 N, P 之污染程度。	水生物包括大型水生物在內，及淹沒區的樹木進入底泥或分解均會釋放出磷，自然會對水庫磷的內部負荷有影響，但淹沒區水中植生的影響已隨時間降低。 目前美國加拿大均還未訂出底泥品質標準，既使有些地區有訂也不是僅用單一濃度為標準。
經濟部水利署台北水源特定區管理局周文祥先生	1. 本研究計畫於前兩年已有初步之水庫底泥磷之改善策略研擬評估，包括清淤，排泥，其成果如何，建議能列於報告中俾找出最佳相關策略及其需改善之點。 2.由表 2.1 中顯示，不同的數值模式所推估之污染量差距可達 10-200 倍，而本研究所使用之 2B-SPTFM 及 CE-QUAL-W2 模式其推估值和其他模式比較結果如何？建議能列於報告中，又其與其它模式如何確認為較準確的方式？ 3.另本研究經由兩年模式模擬結果如何？建議能予以彙整列於報告中，此模擬結果所代表意義為何？亦建議能一併陳述。	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。 模式推估結果可差 10 倍，因為採樣點的多寡及採樣時間都會影響模式預測能力。因此表 2.1 彙整過去相關計畫對磷的外部負荷推估結果，還需再作檢討確認。本研究所使用之 2B-SPTFM 及 CE-QUAL-W2 模式是用來模擬水庫的內部負荷及水質，和表 2.1 無關，這兩個模式初步評估可適用於翡翠水庫，將在今年計畫中進行模擬工作。 參採修正。
台北市研考會劉	1.請翡管局依最新修正之本府委託研究暨規劃作業要點附件三有關合約書範例，辦理簽約事宜。 2.請翡管局配合台北市政府研考資訊系統研究發展子系統上線作業，於期初審查會後六日上網填報本案相關資料。	遵照辦理。 遵照辦理。

	審查委員意見	辦理情形
晁美小姐	3.請研究團隊於本案簽約後三日內上國科會政府研究資訊系統登錄本委託研究計畫相關資料。	遵照辦理。
自來水事業處江清蓮	1. 郭教授振泰建議應掌握暴雨初期進流量及水質情況，所增加異常水樣之檢驗負荷，本處將持全力配合。 2. 水庫上游主要支流水質之連續掌握，以國內科技水準應可自動組裝自動採樣設備，惟須預先評估如何克服高低揚程之取樣技術及取樣 pump 維護。	—
先生	3. 陳教授孝行建議暴雨期間排泥以減少底泥沉積量。水處建議如下：當河川自然流量可持續大於淨水場原水需求量時，預先告知下游淨水場後再進行底泥排放，俾採取因應措施，以降低自水來之泥土味。另有關暴雨後水庫自中層排放含新鮮底泥之高濁度原水，下游淨水場內淤泥若能適時處置，應不致於影響供水水質。	本計畫會將上開建議納入改善策略的參考。
翡翠水庫管理局林瑞	1.水庫大壩設有三層深度發電取水口，當時設計目的即具有提供利用改變取水深度達到改善水質的功能，希望教授能於研究中提出結合水庫水源操作運用之相關經濟可行方案提供本局參考。	遵照辦理。

	審查委員意見	辦理情形
廷 技 正	2.去年乾旱及後來發生之暴雨造成上游淤積之底泥往較下游推移，除有關新舊底泥之研究外，請分析底泥與推移分佈之關係及其組成粒徑分析，提供本局將來底泥排除或淤積疏浚之參考。	本計畫進行底泥粒徑分布分析之數據可提供貴局評估底泥推移的可能之參考。
	3.去年於水庫上游進行示蹤劑施放以求取水庫底部水流延散係數，希望今年能於數個不同地點施作採取更多樣本，找出較具代表性之數值，以為模式之應用。	由於水下攝影機有耐水壓的限制，目前能作到的深度是水下約 30 米，目前還在蒐尋能耐更深的攝影機，希望能找到，在較下游取樣及實驗。
	4.希望在研究中分析相關總磷之推估值，較合理非點源污染之總磷量，提供本局參考。	遵照辦理。
翡 翠 水 庫 管 理 局 操 作 科 郭 常 康 科 長	1.去年乾旱期間本局於灣潭地區進行部分清淤工作，而年底進行淤積測量結果發現上游灣潭區之底泥沖刷至石碇子、媽祖林一帶，希望今年度計劃中能採樣分析，與近三年底泥性質變化情形予以分析探討。	遵照辦理。
翡 翠 水 庫	1.有關底泥檢驗若貴單位並非環保署認證之檢驗室，是否可委由經環保署認證之檢驗室進行，以利底泥檢驗報告本局將來清淤時之利用。	目前國內還未公告底泥檢驗的標準方法，所以本計畫也是參考有公告的土壤分析方法進行底泥檢驗。

	審查委員意見	辦理情形
管理局李健元股長	2.有關示蹤劑施放之水下攝影，去年由於設備深度限制故僅在上游淺水區進行，據了解台大海研所已添購設備可使用於 90-100m 深，希望教授今年在施作時可與海研所洽借，使示蹤劑施放試驗能於水庫大壩區進行。	會和台大海洋所確認瞭解其設備狀況。

主席結論：

- 一、本委託研究計劃期初審查會原則通過。
- 二、感謝各位專家、學者及相關單位代表提供寶貴意見，請計劃主持人吳教授將意見參採情形納入研究計畫說明之，並依限完成。

附錄七、期中審查會議紀錄

九十二年度「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究（三）」委託研究案
期中審查會會議記錄

時間：中華民國九十二年七月二十五日上午九時三十分

地點：台北翡翠水庫管理局管理室

主席：康局長世芳

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（請假，提書面意見）
台灣大學土木工程研究所	郭振泰教授（請假，提書面意見）
朝陽科技大學環境工程與管理研究所	王敏昭教授（請假，提書面意見）
台灣大學動物研究所	陳弘成教授
台北科技大學環境規劃與管理研究所	陳孝行教授
環境保護署環境檢驗所	王漢泉研究員
經濟部水利署臺北水源特定區管理局	李維仁

臺北市政府研究發展考核委員會

臺北市政府環境保護局

臺北自來水事業處

臺北縣政府環境保護局

台北翡翠水庫管理局

台灣大學環境工程研究所

劉晃美

翁秀蕙

江清蓮、邱兆安、陳郁屏

林瑞廷、李衍振、郭常康、李健元、
洪章哲、李秉修 等

吳先琪教授、陳怡靜

發言單位：台灣大學環境工程研究所 李公哲教授（請假，提書面意見）

- 一、底泥表層之總磷之來源究竟是因死亡之藻類沉積累積至底泥，或是由集水區農業行為施肥造成，建議進一步探討，以瞭解非點源污染是否有增加之虞。
- 二、馬祖林(S-2)之磷含量偏高，是否確有週邊之外來農業污染，宜進一步追蹤加以確認，同時馬祖林孔隙水溶解磷反而較他處低，原因何在？宜研析之。
- 三、溶氧(DO)與底泥磷之移動有關，同時亦可使三價鐵離子濃度增加，並與磷酸根發生沉澱(或吸附)，歷年期中報告有關溶氧部份的探討較少，建議在期末報告中加以研究之。

計畫主持人答覆：

- 一、本計畫並未包涵集水區的污染來源監測，故無法確定屬於何種來源。
- 二、遵照辦理，孔隙水磷濃度和孔隙水其他離子濃度有關，後續會進一步計算其平衡動力，以瞭解磷濃度變化的原因。
- 三、遵照辦理。

發言單位：台灣大學土木工程研究所 郭振泰教授（請假，提書面意見）

- 一、結論的第十點提到不同的藻類有不同的生長率，是否有足夠的資料可加以分析？
- 二、結論的第十一點，推估的總磷量為 35,000 kg/yr，但採樣的資料缺乏暴雨期的水質情形，是否須進一步分析？
- 三、希望由本研究所得到的詳細磷的反應及平衡，改進 W2 模式的精度。

計畫主持人答覆：

- 一、目前沒有，先前是用自行建立的藻類模式做參數的 fitting 得到的。
- 二、是，會進一步分析。
- 三、遵照辦理。

發言單位：朝陽科技大學環境工程與管理研究所王敏昭教授(請假，提書面意見)

- 一、第 28 頁及第 84 頁之粒徑分級可能是雷射粒徑分析儀之分級，然而在工程及農業之粒徑分級為 2000-53，53-2，以及 $<2\mu\text{m}$ 為砂粒、粉粒及黏粒粒徑範圍，可依此範圍配合討論。
- 二、第 31 頁，底泥鎘之含量範圍在 3.63-3.93 mg/kg 之間，雖然其等含量未超過土壤重金屬之監測基準值，但是仍超過食用作物農地之監測基準值(2.5 mg/kg)，值得注意追蹤。
- 三、第 51 頁，圖 3.4 水庫磷循環之概念模式，集水區進流有懸浮性有機磷，無機磷及反應性磷之分隔，但是為何沒有溶解性反應磷之分隔。
- 四、附錄一，部份檢測數據之準確性(回收率)未達到第 81 頁既定之品保目標，例如底泥砷、孔隙水溶解性氟、有機質及底泥總氮(TKN)等。部份精密度者亦同，例如孔隙水溶解性鋁。

計畫主持人答覆：

- 一、可以，但目前所採用的分級方法對解釋主要粒徑範圍似乎更有意義。
- 二、遵照辦理。
- 三、圖 3.4 磷循環之概念模式內有溶解性反應磷一項，其代號為 DPr。
- 四、本次檢驗結果有若干項目未達到品保品管目標，要改進。不過其未達成者數目小於 20%，且評估報告數據對危害性影響尚低，對結論的影響應不大。

發言單位：台灣大學動物研究所 陳弘成教授

- 一、本研究之質與量均極佳，為這幾年來少見之佳作。
- 二、總磷量逐年增加值得小心，由資料得知各測點的磷量流入流出及負荷均不相同，故各站宜加仔細分析。另外各站的總磷量在七月最高但間隙水則是最低，此應有生物與環境意義，宜加討論。
- 三、馬祖林、高工局排放之氮磷相當高，宜加強調查及管制。
- 四、底泥含銅量從 20 mg/kg 增加到 60mg/kg，雖未達到土壤之標準，但表示仍有污染之可能，宜追蹤。
- 五、底泥去除方法最好能加入 land field leachate 的處理方式。用魚來作生物控制並不適宜。

計畫主持人答覆：

- 一、謝謝委員之肯定，將繼續努力。
- 二、每個點要持續調查磷來源，但上游的來源不清楚，是比較困難。後續希望利用水質模式來分析。
- 三、請翡管局參考。
- 四、本計畫並未包涵集水區的污染來源監測，故無法確定屬於何種來源。
- 五、後續研究將會就表 2.2 整治策略內容，進一步探討說明其優缺點。

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、簡報中有解釋進流、出流及累積之質量平衡圖，可增加讀者了解。
- 二、底泥磷釋出之質量平衡，和參數之選用有絕對關係。但在不同季節、不同pH、ORP，甚至在暴雨期間，參數均可能不同，如何將參數合理化？
- 三、未來計畫完成後，可否將成果以電腦程式或其他方法簡化，使翡翠管人員易於使用推估磷的釋出？
- 四、未來對策(表 2-2 治理方案)，可否選定幾種翡翠管較可行之方案，作 SWOT 分析，以利於應用？

計畫主持人答覆：

- 一、將遵照意見置於期末報告中。
- 二、參數隨時間的變化必然存在，將儘量分析各種參數合理的變化。
- 三、能建立一個好用容易操作的管理模式是後續的目標。
- 四、遵照辦理。

發言單位：環保署環境檢驗所 王漢泉研究員

- 一、有關底泥採樣及檢測分析在第三章研究材料與方法中介紹太簡略，建議對分析方法更詳細描述。
- 二、國外有關底泥孔隙水溶解性總磷及底泥總磷與優養化關係之濃度指標可否作為翡翠或台灣水庫優養化之指標。
- 三、數據品質目標中各項檢測物質是否有標準參考品之檢測數據。

計畫主持人答覆：

- 一、遵照辦理。
- 二、國外多是作底泥準則(guideline)，有關底泥品質指標，在期末報告時會作討論。
- 三、本計畫有使用自行配製的參考樣品在實驗中配合分析確認。

發言單位：研考會 劉晃美小姐

- 一、報告中每一個採樣點應有其代表性，但報告中說明其中因灣潭水量少而沒改採樣點為石碇子，如此是否會影響本案分析結果。
- 二、報告格式文中所敘述的圖表均附錄於報告書之後，而非緊接著所敘說的文字之後，不利閱讀。
- 三、請翡翠管局上研考資訊系統研究發展子系統填寫登錄本次審查會相關資訊。

計畫主持人答覆：

- 一、採樣點是不得已更換的，但石碇子還是所有採樣點的最上游，仍可代表集水區入流特性。
- 二、參考改進。

發言單位：台北自來水事業處 江清蓮先生

- 一、翡翠水庫底泥採樣分析其含水率約 30% 至 60%，研判如此高濃度含泥量之水體將不受密度流影響翻轉，建議對水庫底泥之定義作說明，並於底泥採樣時考量人力酌增不同深度之底泥採樣，俾進一步了解水庫底部底泥流動之邊界層。

計畫主持人答覆：

- 一、本計畫在進行現地示蹤劑實驗時觀察到，在底泥上方 1.5m 以內水層是十分混濁的，有很多懸浮質存在，顯示這一層底泥邊界層界面可能在底泥層至上方 1.5m 之間。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 郭常康科長

- 一、有關結論第八項「大壩底泥含水量比後坑子高，與過去從上游到下游含水量遞減的結果相符。」其語意是否相反，請查明。
- 二、有關第 78 頁表 2.1 翡翠水庫集水區歷年非點源污染量推估，其中 SS 與 TP 關係法推估總磷量為 1,803,000 kg/yr，與其他方法推估量差異極大，能否說明。

計畫主持人答覆：

- 一、經檢查是筆誤造成，會予以修正。
- 二、各種集水區的輸入量推估方法不同，將進行釐清。主要也是因為考慮的入流磷型態的不同所致。從 SS 與 TP 關係法推估總磷量的確較大，但其中有很多懸浮磷在進入水庫後就被深埋入底泥，對水質並沒有太大的影響。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 李健元股長

- 一、請刪除第 11 頁最後一行「在翡翠水庫水體內.....水質控制策略措施」，因「底泥初步清淤可行性研究」之預算從未通過，而此研究亦從未存在過，故請刪除此段文字。
- 二、由藻類研究案知道，本年度藻類密度比近三年平均值略高，且最近一個月來天氣炎熱，表水溫 31.65°C 而水下 80m 深處水溫只有 17.27°C，且 pH 值於水面下 5m 處為 9.16 但 10m 處 pH 卻為 6.93。請問狀況如果再惡化時於第 24 頁提到使用底部曝氣方式改善水質時，曝氣設備應離底泥多遠，才不致於擾動底泥使水質更混濁，或者請再詳述其他水質改善措施策略。

計畫主持人答覆：

- 一、遵照辦理。
- 二、水下 5m 處的高 pH 值顯示該層的光合作用十分旺盛，曝氣點的位置需要再研究考慮。

主席結論：

- 一、本案期中審查原則通過。請主持人吳教授

將委員意見參採情形列入會議記錄並納入 期末報告修正之。

三、請主持人於期末報告完成後另製作 4 至 8 頁精簡報告，以便將研究成果呈現於網頁供社會各界參考。

附錄八、期末審查會議紀錄

九十二年度「翡翠水庫底泥性質及對水質影響潛勢研究（三）」委託研究案

期末審查會會議記錄

時間：中華民國九十二年十二月十八日下午一時三十分

地點：台北翡翠水庫管理局管理室

主席：康局長世芳

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（請假，提書面意見）
台灣大學土木工程研究所	郭振泰教授（請假，提書面意見）
朝陽科技大學環境工程與管理研究所	王敏昭教授
台北科技大學環境規劃與管理研究所	陳孝行教授
環境保護署環境檢驗所	王漢泉研究員
環境保護署北區環境督察總隊	劉志仁隊長
	莊越靖
經濟部水利署臺北水源特定區管理局	劉秀鳳
臺北市政府研究發展考核委員會	劉晃美（請假，提書面意見）
臺北市政府環境保護局	羅裕堂
臺北自來水事業處	王昭月（請假，提書面意見）
臺北縣政府環境保護局	（請假）
台北翡翠水庫管理局	林瑞廷、郭常康、李健元、洪章哲、 李秉修 等
台灣大學環境工程學研究所	吳先琪教授、陳怡靜、林明郁

發言單位：台灣大學環境工程學研究所 李公哲教授（請假，提書面意見）

- 四、 往年之馬祖林底泥含量均偏高，然本年研究其總磷則明顯降低，反而在石碇子及後坑子底泥總磷濃度增加，其原因何在？宜研析之。
- 五、 圖 4.29 顯示底泥上層水的溶氧為零時，底泥總磷通量增加近兩倍，該釋出的大量磷是否會帶入大壩區影響水質，建議宜進一步研析，並瞭解是項影響與集水區非點源之磷輸入量相較，是否具有甚大意義，以為翡管局採取因應措施之依據。
- 六、 本研究建議可考慮以底層水曝氣以改變底層水之厭氧狀態，惟是項曝氣是否會遲滯磷酸鹽之沉澱或吸附建議予以分析之。

計畫主持人答覆：

- 四、 底泥總磷之變化確實很大，推測與這幾年水庫進水及氣溫變化均有關係。
- 五、 當底泥上層水溶氧下降，的確會增加磷通量，從水質模擬結果可得知，在秋冬時間，下游底層水的溶氧降為零的機率很高，此時從底部入流水會攜帶高營養鹽，累積在大壩，需要適時加以排出。本文第 49 頁已有關於磷內部負荷與集水區非點源之磷輸入量之比較，請加以參考。
- 六、 應該不會，但曝氣深度及曝氣量等需要再深入評析。

發言單位：台灣大學土木工程學研究所 郭振泰教授（請假，提書面意見）

- 四、 圖 4.35 及圖 4.41 葉綠素 a 之模擬結果仍可改進。

- 五、 水溫及 D0 之垂直向模擬仍可改進。
- 六、 每年進入水庫之總磷及總氮負荷量應該是多少？值得進一步探討。或可用集水區模式，如 BASINS 來分析。
- 七、 暴雨期之採樣未來可加強。

計畫主持人答覆：

- 四、 **本次模式模擬已最佳化，限於實測數據缺乏及變動性很大，遂使模擬結果和實測數據落差較大。後續如能提高現地監測頻率，或許可改善模擬之結果。**
- 五、 **同第一項回答內容。**
- 六、 **本計畫於第 4.5 節，有關於水庫磷負荷量的探討，並已分析得知過去模式預測磷量顯有低估之虞。過去本實驗室也有學生以 BASINS 模式作過入流量之預測，但結果仍不盡理想。**
- 七、 **非常同意，直接監測是最有效的方法。**

發言單位：朝陽科技大學環境工程與管理學研究所王敏昭教授

- 五、 請於期末報告定稿時增加「摘要」一章。
- 六、 在期末報告書中，請將預期語句字眼刪去，例如第 27、28 頁，以及其它頁數者。
- 七、 第 49 頁，建議「對取水口處水質的垂直分佈能即時監控」，提及增設監測設備，請具體建議是增設深水自動水質測定儀或人工深水採樣。
- 八、 以牛奶做為測定延散係數之示蹤劑是很好之想法。
- 九、 本計畫所使用之模式模擬程式，是否會隨期末報告定稿轉移予委託單位，以為將來委託單位繼續模擬監測用？
- 十、 水庫集水區及底泥屬於鐵質系，亦即非鈣系之地質環境。水庫水體及孔隙水鈣、鎂含量增加應是外來污染。應進一步查察集水區是否有含鈣、鎂肥料資材之大量施用。
- 十一、 第 56 頁第 14 點結論提及「大壩站氣象測站之全年氣溫偏低」，建議翡管局對氣象測站之監測設備及數據做查核，是否意謂監測數據有誤，設備需校正。
- 十二、 第 107 頁，圖 4.36 指出 2000 年 4 月份，水庫年報資料表水之反應性磷

(約 30 μ g/L)較總磷量(約 12 μ g/L)高許多，應是誤植請查明。

計畫主持人答覆：

- 五、 遵照辦理。
- 六、 遵照辦理。
- 七、 該建議是指裝設能即時監控水質垂直上下移動之深水自動水質測定儀。其設置亦應考慮現地水流狀態，再細步評估之。
- 八、 謝謝委員之肯定。
- 九、 本計畫所選用之水質模擬程式 CE-QUAL-W2 是美國陸軍工兵團發展及開放的程式，無版權問題，可隨期末報告定稿時移轉給翡翠局使用。
- 十、 從底泥監測結果分析，底泥的鈣、鎂成份增加很顯然是有外來的污染。亦建議翡翠局能聯合水源局共同對集水區的農業行為進行抽查及瞭解。
- 十一、 本計畫認為大壩測站氣溫是有偏低現象，可能與水面氣溫通常較一般氣溫低而氣象站位置距離水面稍遠有關。
- 十二、 經查翡翠局年報確認，民國 89 年 4 月的灣潭表水檢驗結果，的確是反應性磷濃度 (約 30 μ g/L)較總磷量(約 12 μ g/L)高。

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

- 五、 請補摘要、縮短結論，並增加對翡翠局之建議。
- 六、 磷通量佔 21.7% (4,110kg)是否受其它條件之影響，如 pH、ORP 等？
- 七、 本研究文中建議之三種方式做為對策：(一)底部取水 (二)調取水深度 (三)底部曝氣，是否可針對以上三種方式做 SWOT 分析，或可在建議中陳述。又是否建議未來針對本主題之後續作為或研究，如補足或加強部份數據，或如底部取水要取多少，或底部曝氣曝多久，或何季節曝氣等，並補足表 4-12 之數據。
- 八、 第 47 頁錯字請修正。

計畫主持人答覆：

- 五、 遵照辦理。
- 六、 這個數據是一個模擬值，和實驗實測值很接近。然目前只能約略作為一個代表值，並沒有長期的變化數據。
- 七、 該三項可行的策略進一步的 SWOT 分析可再加強，遵照辦理。
- 八、 遵照辦理。

發言單位：環保署環境檢驗所 王漢泉研究員

- 四、 底泥重金屬含量及磷含量與國內其他水庫或湖泊相比是否較低。
- 五、 水庫分層時與翻轉時是否皆會釋出底泥磷。
- 六、 第 11 頁水庫原生種魚如粗首蠟(溪哥仔)逐漸消失，被外來種的曲腰魚取代，是否有調查證據。

計畫主持人答覆：

- 四、 國內數據較少，很難做比較。
- 五、 水庫分層明顯時，下層磷不易被攜帶到表水來。水庫翻轉發生時，有助於上下水的交換，較容易將磷帶到表水來。事實上，底泥是否釋放磷一直是與下層水的狀態密切相關的。
- 六、 該資料是由翡翠局人員提供。

發言單位：行政院環保署北區環境督察大隊 劉志仁隊長

- 甲、 以模式模擬可窺出各參數之變化趨勢及概況，提出改善策略，尤其在大範圍研究可收立竿見影之成效。
- 乙、 第 2 頁本計畫為二年全程計畫的第二年，是否有筆誤？
- 丙、 第 16 及 38 頁，反應性磷之定義究為 1. 懸浮性反應性磷加上溶解反應磷；2. 溶解反應磷加上溶解有機磷；3. 溶解反應磷；4 或其他？
- 丁、 第 27 頁全面性底層曝氣在本水庫似不太可行。
- 戊、 第 44 頁，模式檢定及模式驗證有何區分？
- 己、 第 57 及 58 頁，模式與實測值吻合不佳，因變數太多，建議回修參數值。模式尚有待補強，如文提及暴雨期間之懸浮固體及懸浮性磷數據取得不易，請受委託單位酌予補強。惟作業安全考慮為最重要。另懸浮性磷是否為懸浮性總磷，文中之筆法請一致性。
- 庚、 第 12 及 43 頁文中及文獻年代請統一用「西元」或「民國」年代。
- 辛、 細菌、藻類、植物體等均為磷來源。

計畫主持人答覆：

- 甲、 謝謝委員之肯定。
- 乙、 本計畫因發包關係，的確為二年全程計畫的第二年。
- 丙、 依分析操作型定義，不消化而直接呈色者就是反應性磷。
- 丁、 本計畫所提建議主要是在大壩執行，非全水域。
- 戊、 模式的檢定和驗證是不同的，前者在確認模式參數的範圍，後者在確核模式應用的可信度。
- 己、 本計畫也是建議翡翠局能加強暴雨期的採樣。
- 庚、 依一般原則，文獻規格是用西元，口語文字則是以民國表示。
- 辛、 藻類死亡殘體仍是磷最大來源。

發言單位：研考會 劉晃美小姐

- 四、 期末總結報告請依本府委託研究暨規劃作業要點規定：請研究主持人將本案中、英文摘要附於研究報告主文前，歷次座談會、審查會議紀錄附載於報告之後。
- 五、 請 貴局於本案合約期到期後二個月內，將研究報告五份及建議事項採行情形追蹤表報府核定。另請研究單位上國科會政府研究資訊系統 (<http://www.grb.gov.tw>) 登錄委託研究計畫相關資料。貴局承辦人員再

上網確認資料。

計畫主持人答覆：

- 三、遵照辦理。
- 四、遵照辦理。

發言單位：台北自來水事業處 王昭月小姐

- 一、在中研院吳俊宗博士對翡翠水庫藻類與水質關係之長期監測研究報告中，有表示近二年來，水庫中之綠藻類增加數量明顯增加，係與水中鈣、鎂等濃度增高，造成硬度增加有關。此結果與翡翠水庫地質之鐵含量極高，使集水區及水庫底泥屬於鐵質系，亦即非鈣系之地質環境，有相異之研究結論，是否能進一步了解底泥變化造成硬度增加之因素。

計畫主持人答覆：

- 一、底泥不會使鈣、鎂濃度增加，很可能是外部來源。整個集水區的生物地質變化現象的確十分有趣，這也是本計畫執行研究以來的貢獻之處。上述現象值得於後續計畫中繼續探討及觀察。

發言單位：經濟部水利署臺北水源特定區管理局 劉秀鳳課長

- 甲、第 57 頁，結論 18. 「民 88 年初在上游有一很大的磷入流量」，其磷為何種磷，總磷或反應性磷，或其它？是單站或總量？
- 乙、第 84-86 頁，第 89-91 頁，金屬含量是否有標準值可供比較？
- 丙、第 137 頁表 4.11 之「NA」意義為何？翡翠水庫深度最深，規模最大，但水停留時間最短？
- 丁、鈣、鎂濃度增加，可否提供可能污染源供參考。

計畫主持人答覆：

- 三、該事件是指大壩站的總磷量有明顯提高，如圖.42 所示。模擬值和實測值均反應出有外來的污染。推測是在前一年末的上游入流磷進入大壩中層水累積後被翻轉到表水所致。
- 四、目前並沒有所謂的底泥標準，國外也多是作底泥準則(guideline)。
- 五、表 4.11 內以「NA」表示意義是指缺乏該欄位內的數據。翡翠水庫的地形地貌，取水量以及水文特性是其水庫停留時間較短的原因。國外多是天然的湖泊，水力停留時間較長。
- 六、鈣、鎂濃度增加原因不是很清楚，可能是施有機肥料造成、地下水滲入或其它原因，需要再分析。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 郭常康科長

- 三、於研究計劃結束後將本研究內相關模式技術移轉給本局人員以利未來應用。
- 四、本水庫目前未採用底層抽水及深層曝氣等方式改善水質，請修正第 137 及 138 頁中之比較表。

計畫主持人答覆：

- 一、 遵照辦理。
- 二、 遵照辦理。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 林瑞廷簡任技正

- 一、請教授於研究計劃結束後提供教育訓練，將計劃中之模式與應用移轉給本局人員。

計畫主持人答覆：

- 四、 遵照辦理。

發言單位：臺北翡翠水庫管理局 李秉修先生

- 甲、 今年一至九月水庫水域總磷皆較低（水域平均低於 $28\mu\text{g/L}$ ），但十月、十一月即升高至 $39.69\mu\text{g/L}$ 、 $40.73\mu\text{g/L}$ ，請問老師對這現象有何看法？
- 乙、 報告推測底泥砷可能有外來污染，請問集水區中砷之可能污染源有哪些？

計畫主持人答覆：

- 甲、 是否可能有外來的污染不得而知，如有進流量、水質等相關資料可進一步分析。
- 乙、 其來源並不清楚，需要再進一步分析。

主席結論：

- 一、本案期末審查原則通過。請主持人吳教授將委員意見參採情形列入會議記錄並納入期末報告修正之。
- 二、請主持人於期末報告完成後另製作 4 至 8 頁精簡報告（請參考環工學會格式），以便將研究成果呈現於網頁供社會各界參考。