

翡翠水庫集水區磷污染源之調查研究

A Survey of Phosphorus Source in Fei-Tsui Reservoir catchment Area

郭瑞華* 陳曼莉** 楊炳坤*** 廖于恒****撰

一、緒論

「水」為人類生活三要素之一，不可一日或缺。本處供水區除台北市外，還包括三重、新店、中和、永和地區，由於工商業及人口成長迅速，用水量急劇增加，預計至民國80年需水量將增至 2.13×10^6 CMD (1)，幾乎為目前之兩倍，現有水源將不敷所需。因此，台北市政府於民國62年開始研擬遠程自來水建設計畫。在民國63年完成之台北區自來水第四期建設計畫可行性研究報告中，建議在新店溪支流北勢溪翡翠谷興建水庫，作為遠程水源開發方案，並於民國67年2月完成定案研究報告，於68年1月11日經行政院院會核定後實施。(2)

翡翠水庫完成後，總蓄水量可達 4.06×10^8 立方公尺，五十年後有效容量為 3.27×10^8 立方公尺，故完成後當可為台北地區自來水提供長期需要之水源(2)。

由於水污染情形日趨嚴重，湖泊、水庫發生優養現象之情形屢有可聞，歐、美、日等已開發國家問題更為嚴重；我國的澄清湖、明德水庫等也曾發生此類問題。

優養現象所造成之藻類暴殖情形，不僅貽害水質，使水產生臭、味等問題，且會造成淨水處理上之困擾，使濾牀阻塞、縮短濾程等，直接或間接造成水處理成本之增加。由於藻類之生長，使形成自來水中可能致癌物質—三鹵甲烷 (THM) 之前驅物質增加，更是近年來頗受重視之問題。

根據最低需要定律 (Liebig's Law of Minimum)，磷應為藻類生長之限制因子 (limiting factor)，亦即藻類生長之關鍵。

本研究之主要目的即在於對翡翠水庫集水區之磷含量作一全面性之了解，探討各污染源對未來水庫水質所造成的影響，以提供作為維護水庫水質、水庫管理、及淨水場作業之參考。

二、翡翠水庫集水區概述

2-1 流域環境

翡翠水庫大壩壩址位於新店溪支流北勢溪上，在龜山合流口上游 2.3 公里之翡翠谷，距

- * 郭瑞華：台北自來水事業處生產科科長
- ** 陳曼莉：台北自來水事業處生產科副工程師
- *** 楊炳坤：台北自來水事業處生產科工程師
- **** 廖于恒：台北自來水事業處生產科工程師

台北市約30公里，集水區包括雙溪鄉、坪林鄉、石碇鄉之大部分地區，以及新店鎮之小部分地區，集水區內北勢溪主流長約50公里，主要支流包括灣潭溪、鯉魚堀溪、金瓜寮溪及後坑溪，流域面積為303平方公里(2)。全區均已劃入68.2.10內政部公告之「青潭水源水質水量保護區」且在「台北水源特定區」之計畫範圍內(圖一)。

集水區內年雨量為3,520公厘，年平均溫度22.7℃，相對濕度85%，年平均流量為25.09立方公尺/秒(詳如表一)。區域內重要之村落有泰平、濶瀨、漁光、新昇、坪林、石槽、大林、粗坑、乾溝、碧山、永安、格頭等十二村，全部人口約八千餘人。

水庫淹沒區域由壩址上溯至坪林(黃櫨皮寮)附近，總面積約1,024公頃，淹沒區大部分在石碇鄉轄區內，約占總面積92%，其餘則分屬坪林鄉及新店鎮。區內土地以公有土地為大宗，私有地約占 $\frac{1}{4}$ 。居民大多集中於石碇鄉碧山村之火燒樟及乾溝。土地利用以造林地及果園地為主，其中果園地約有376公頃，集中在火燒樟及乾溝一帶。

2-2 污染源概況

2-2-1 點污染源

2-2-1-1 家庭污水

一般而言，集水區內人民生活相當節儉，每人每日用水量約60~80升。由於居民之生活特性，故該地區家庭污水中磷之含量略低於一般建議值(表二)。(3)

各村落之家庭污水皆直接由陰溝排入北勢溪中，造成局部污染。

2-2-1-2 垃圾及水肥

集水區內除坪林鄉有垃圾車清運垃圾外，其餘村落均將垃圾棄於曠野。坪林垃圾場於民國70年12月啟用，雖計畫為衛生掩埋場，但實際上為露天棄置未作任何處理，為免污染水域，已由坪林鄉公所覓地遷移中。近期內當可獲得改善。

水肥之處理，舊式建築仍使用坑廁，新式建築雖使用化糞池，但其出流水仍排入溝渠流入溪中。

2-2-1-3 養殖廢水

集水區內之養殖廢水以養豬廢水為主，目前區內之養豬戶數約3,651頭(17)，80%以上以傳統之貯存槽方式來處理，對污染極具威脅。

2-2-2 非點污染源

主要指農藥及肥料之流失。肥料及農藥大量使用後殘存於土壤中，暴雨時經由地表冲刷或逕流水而匯入河流中，其中之磷亦會進入水體或沈積於水體。

集水區內此類資料極缺乏，無法正確估計其量。

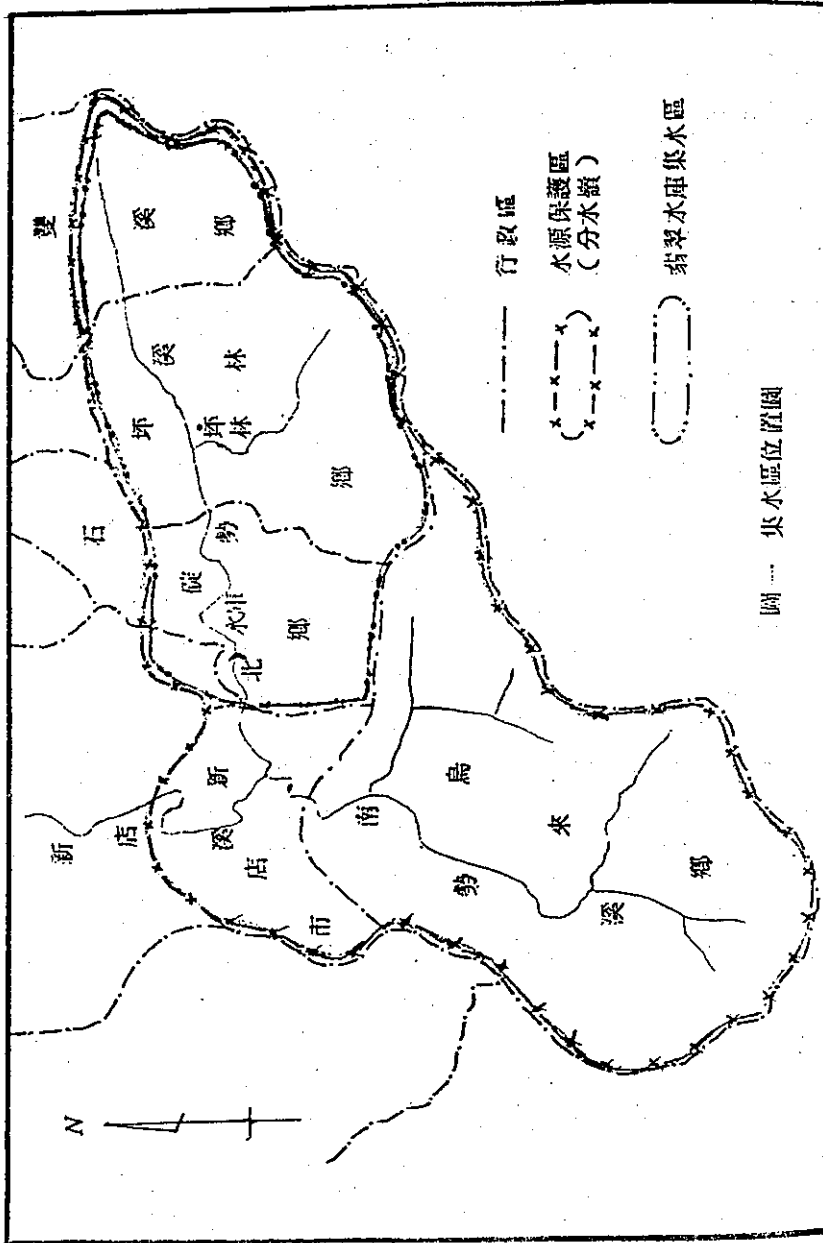


圖... 集水區位置圖

流域面積		主流長度	平均波降	年平均流量	
305 km ²		50 km	1/110	25.09 CMS	
月 份	項 目	平均氣溫 (°C)	平均蒸發量 (mm)	相對濕度 (%)	日照時數 (hrs)
一	月	12.0	27.5	89	868
二	月	14.9	32.5	88	766
三	月	17.6	50.5	87	913
四	月	22.5	75.2	83	1,112
五	月	26.5	87.1	82	1,340
六	月	28.5	97.5	82	1,532
七	月	30.2	141.1	80	2,161
八	月	29.1	130.1	82	2,153
九	月	27.5	132.4	83	1,838
十	月	23.9	100.0	88	1,371
十	一 月	20.7	57.7	88	1,034
十	二 月	16.7	30.0	89	897
平	均	22.7	合計 869.8	85	1,332

表一 北勢河流域概況及水文特性

地 點	次 數	一	二	三	平 均
	坪	總 磷	3.81	4.32	3.65
無 機 磷		2.16	2.87	1.96	2.33
有 機 磷		1.65	1.45	1.69	1.60
石	總 磷	4.27	3.60	4.06	3.98
	無 機 磷	2.79	1.89	2.81	2.50
	有 機 磷	1.48	1.71	1.25	1.48

表二 家庭污水含磷量

單位:mg·P/l

三 水庫與優養現象

3-1 優養現象 (Eutrophication)

湖泊或水庫中，由於營養物質之累積而使藻類等植物性浮游生物大量繁殖，這種現象即稱之為優養現象，亦可稱為營養過剩 (Nutrient excess)，或富營養化 (Well-Nourished)。優養現象之形成速率主要決定於下列數種因素：(4)

- (1) 水庫或湖泊所在地區之地質地性。在石灰岩或砂岩等沈澱性岩石區所形成之湖泊，含有較多之溶解性礦物質及無機型態之碳，所以營養程度高於堅硬岩石區所形成之湖泊。
- (2) 水庫或湖泊之大小及形狀。較淺的湖由於其水體大部分皆能接受日照，而使植物性浮游生物得以生長，故其營養化之程度高於較深之湖泊。通常可以深度／體積比來表示湖泊之生產力。
- (3) 集水區域之形狀及大小。若集水區域地勢平緩，土壤涵容能力佳，沖蝕情形輕微，且植被茂盛，則河川流速緩慢，沈澱物質多，導致腐植性及其他有機性物質之累積，所能提供給植物性浮游生物之營養環境自然較佳。
- (4) 水庫或湖泊之所在位置及高度。充足的日光及適當的溫度等對植物浮游生物之生長皆有直接的影響，這些條件皆與湖泊所在地之環境有關。
- (5) 人類之活動。人類活動對優養現象所造成的影響雖然很難作正確地估計，但不可諱言地，人類對整個水域系統有相當大的影響。人類的每一種活動、行為皆會直接或間接地影響到水中營養性物質之含量。例如：開發集水區域使成為農業用途，則必然會有一定比例的肥料由土地中沖刷出來，且會產生沖蝕作用，這些沖刷或沖蝕之物質會進入水體中，使優養化之速率增加。

3-2 優養現象與自來水事業(5)

3-2-1 對水庫水質之影響

由於水庫中營養物質之累積導致藻類之大量繁殖，對水庫中之水質會產生如下之影響：

- (1) 增加顆粒性有機物質，如：動物性浮游生物、植物性浮游生物、細菌、黴菌等。
- (2) 藻類族群傾向藍綠藻等更不為人所欲之種類。
- (3) 增加溶解性有機物，且具有下述特性：
 - a 具有螯合或複合性質。
 - b 產生臭及味。
 - c 增加色度。
 - d 為三鹵甲烷類之潛在前驅物質。
 - e 供給淨水場及輸配水系統中細菌滋長之基質。
 - f 可能造成腐蝕。
- (4) 增加 pH 值及其日變化性。

- (5)使水與沈澱物接觸面之溶氧大量減少，造成有機物之厭氧分解而產生 H_2S , NH_3 , P, Fe Mn，其他金屬， CH_4 及其他還原性有機物。

3-2-2 對淨水處理之影響

由於水質之變化，對淨水處理之操作及成本會產生如下之影響：

(1)對膠凝作用之影響：

- a 溶解性有機物質阻碍膠羽之形成。
- b 增加調整 pH 所需之化學藥品及操作費用。
- c 造成藻類及其他顆粒性物質之“貫穿”現象。

(2)對過濾作用之影響：

- a 因為藻類及其他顆粒性物質之增加，使濾牀易阻塞。
- b 縮短濾程。
- c 增加反沖洗時之水頭損失及能源之消耗。

(3)對消毒作用之影響：

- a 由於有機物質及氮氣而使需氯量增加。
- b 由於濁度增加使消毒效果減低。
- c 氯和溶解性有機物作用而形成三鹵甲烷 (THM) 等氯化有機物。

(4)對輸配水系統之影響：

- a 由於有機物含量增加，易造成細菌在配水管中之“再生長”。
- b 由於有機物之分解，產生令人不悅之臭與味。
- c 增加鐵及錳之沈積。

(5)增加其他處理對策之設施及費用：

- a 設立水庫水質之監視系統，以確實了解各類問題。
- b 增設鐵、錳之去除設備。
- c 需增設各種特殊設備以防止藻類生長、去除臭、味、微量有機物質。

3-2-3 對自來水用戶之影響

前述各項問題，可能對用戶產生以下之影響：

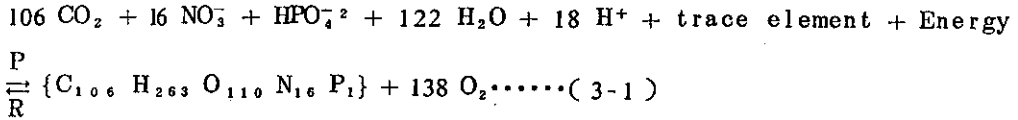
- (1)對用水水質之抱怨。
- (2)增加曝露於具潛在毒性及致癌性有機物質與病原菌之危險性。
- (3)由於鐵、錳之沈積及有機物所造成之腐蝕作用，使抽換管線及洗衣之費用增加。
- (4)對於水質要求嚴格之工業用水用戶，可能導致處理費用之增加。
- (5)由於淨水處理設施及費用之增加而致水費上漲。

由於水污染之情形日趨嚴重，優養現象已經成為國際間普遍的話題，幾乎存在於每個國家。歐、美、日等已開發國家問題更為嚴重；我國的澄江湖、明德水庫、蘭潭及金門太

湖等亦曾發生因藻類而產生臭味及水處理上之問題。

3-3 磷與藻類之生長

只有溶解性正磷酸鹽才能為藻類及其他浮游性生物所利用，其他形式之磷鹽則須經細胞酵素水解始能被利用。藻類對磷酸鹽之攝取量和日光、水溫、氣溫、pH 值及硬度有關，其一般通式如下：(6)



高能的磷酸鍵 (~P) 在 ATP, ADP 間反復作用，供給生化作用過程中所需之能量。所以，磷雖然不是構成蛋白質的元素，但若沒有磷的存在却無法形成蛋白質。

藻類所需之養分，可由其細胞漿質之組成式得知。各組成元素之莫耳比為：

$$\Delta \text{O}_2 : \Delta \text{N} : \Delta \text{C} : \Delta \text{P} = 110 : 16 : 106 : 1$$

由上式可知，磷是需要量最低的元素，構成最低需要定律 (Liebig's Law of Minimum) 中之「限制因子」(Limiting factor)，為藻類生長之關鍵。(7)

除前述各元素外，日光、空氣、溫度等皆為藻類之生長要素。本集水區內日照時間約 1,500 小時/年，年平均溫度為 22.7 °C(8)。非常適合藻類生長，因此對於磷的管制是防止藻類滋生最具體也是絕對必要之作法。

美國優養調查組織小組 (National Eutrophication Surveys) 調查了磷濃度與優養狀況之關係，而制定了 EPA 優養狀態區分表。(如表三)

優 養 狀 況	總 磷 (mg/l)
貧乏 (Oligotrophic)	≤ 0.010
中度 (Mesotrophic)	0.010 ~ 0.020
優養 (Eutrophic)	> 0.020

表三 EPA 優養狀態區分表

3-4 磷之循環

3-4-1 磷之來源

3-4-1-1 自然界中的磷

自然界中沒有游離磷存在，多以磷酸鹽類之狀態存在，為構成土壤肥份及動植物中原生質的要素。其主要來源為有機物和岩石礦物。

據估計，地球上磷酸鹽總量約 1.1×10^{19} 公噸，存在於 187 種不同的礦物中，其中以磷灰岩 (Apatites) 含量最高。重要的磷酸鹽礦物有：(9)

(1) 磷灰岩 (Apatites) : $\text{Ca}_5 (\text{F}/\text{OH}/\text{Cl}) (\text{PO}_4)_3$

(2)磷酸三鈣 (Tricalcium Phosphate) : $\text{Ca}_3 (\text{PO}_4)_2$

(3)磷酸二鈣 (Dicalcium phosphate) : $\text{Ca}_2 (\text{HPO}_4)_2$

(4)磷酸一鈣 (Monocalcium phosphate) : $\text{Ca} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

其中以磷灰岩最不易溶解，亦最不易被植物吸收利用。磷酸二鈣及磷酸一鈣最易被植物吸收，但含量最少。

有機磷化合物約佔總磷量的20—60%，在岩石及土壤中含量甚大，須經微生物作用分解成可溶性的無機磷，方可被植物吸收利用。

3-4-1-2 農業廢水中的磷

根據 Raymond C. Lochr 之報告，施用於農地之磷肥，只有5—10%被植物吸收，其餘皆轉化為非溶解性之磷化物（在酸性土壤中會形成磷酸鐵或磷酸鋁，在鹼性土壤中則形成磷酸鈣）(10)。流入水體之量受施肥量、施藥量、地形、地質、氣候、降雨等之影響，很難正確估計。一般可以施用量之2%來估計，或以0.11公斤/公頃/每年來計算。

此外，植物枯死後經細菌分解亦會釋出磷鹽，其量則因植物之種類而異，含量大致為：草灰—0.92%，木質灰—0.17%，濶葉灰—1.54%，針葉灰—1.1%，腐植質—0.94%。(11)

3-4-1-3 降雨、土壤沖蝕及野生動物之磷排放量

雨中之含磷量會受燃燒廢氣、汽車排氣、火山、森林火災等人為因素和自然災變的影響。根據美、英等國之研究，雨中之含磷量與地區工業化之程度有明顯地相關。本集水區內工業化之程度極低，雨中之含磷量應可忽略。

區域內缺乏大型野生動物，雖可見到野豬、刺鼠、羌、獼猴、野貓、松鼠、野兔等哺乳類、蛇、蛙及近50種飛禽類，因人為的開發及捕獵，已為數不多，其量亦可忽略。

由表面逕流或風化作用之移轉所造成磷的漏失，則不可忽略。在人類活動頻繁的土地上，每公頃土地若流失1公厘的土壤，則其磷流失量約為10公斤（氮流失量10~20公斤，磷流失量100~250公斤）。而據估計，在坡度5°之坡地上表面沖蝕量為每年10公厘，若坡度為62°則沖蝕量可達43公厘(11)。本集水區內多為丘陵地形，坡度多在10°~30°以上，沖蝕量應甚鉅。

3-4-1-4 人與畜殖動物之磷排放量

人類所排放的磷量，因其所攝取之蛋白質量而異，一般以每人每日1.5公克或每公斤體重每天0.02公克計算。人類和其他幾種動物排泄物中之含磷量如表四所示。

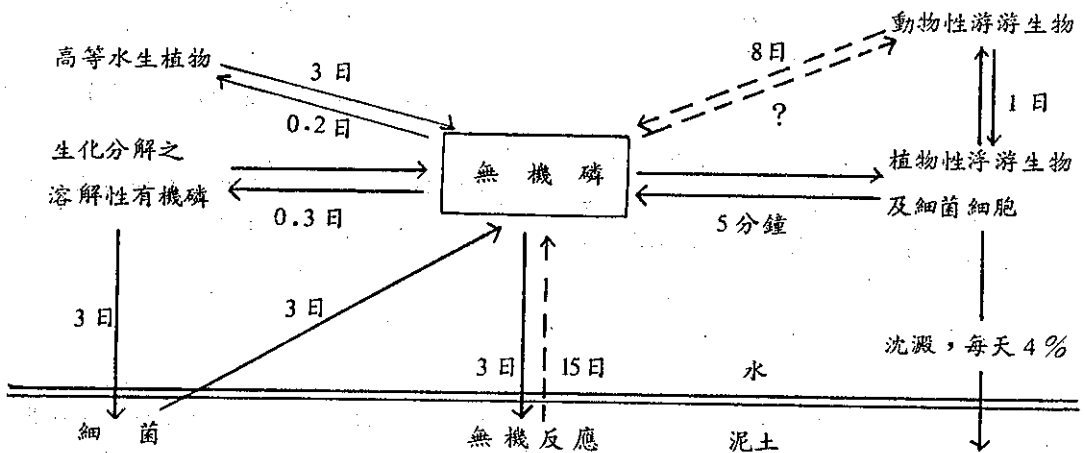
動物種類	肉牛	乳牛	馬	豬	雞	人
	360 ~ 450 公斤	500 ~ 700 公斤	450 ~ 800 公斤	45 ~ 100 公斤	2 ~ 2.5 公斤	75 公 斤
含磷量	0.09	0.069	0.12	0.17	0.4	0.02

表四 人類及其他動物排泄物中含磷量

3-4-2 磷循環

磷在水體中之循環與水庫或湖泊之形狀、深度、蓄水量、地質、水的分層現象 (Stratification) 及水的移動有關。水中有機物代謝及磷本身之轉化速率亦和磷之循環有關。

Hayes 及 phillips (12) 曾以 P^{32} 進行試驗，以瞭解各形態磷酸鹽間之互變過程，其模型如下：



圖二 磷之循環

四 研究方法與實驗步驟

4-1 研究對象

本研究之主要目的在於全面了解目前南、北勢溪及新店河流域之水質狀況。同時更對流域內之含磷量作連續性調查，以確實了解流域內受污染之情況，推斷未來翡翠水庫發生優養現象之可能性。

4-2 研究方法

4-2-1 採樣方法

採樣點係依據下述原則選定：

- (1)河道平直之河段，直段河道之斷面較規則。
- (2)污染源排入位置之上、下游。
- (3)主支流匯合處。
- (4)人員、設備易於接近之位置。

研究中所選定之採樣點分述如下：

(1)北勢溪流域：

由上游起選定 8 個取樣點—潤瀨村、漁光村、石槽村、下鶯子瀨、大林村、坪林村(上)、坪林村(下)、黃檗皮寮。

(2)翡翠水庫：

分別採取火燒樟，主流匯入處，水庫中心(目前)、及大壩附近之水樣，俾對水庫內水質作全面了解。

(3)南勢溪流域及新店溪

選定 4 個取樣點—烏來(上)、烏來(下)、雙溪口、及青潭堰。

採樣點位置詳如圖三。

翡翠水庫內目前水深已達 25 公尺左右，為避免深度不同而造成實驗誤差，係分別採取上、中、下三種深度之水樣分別測定。

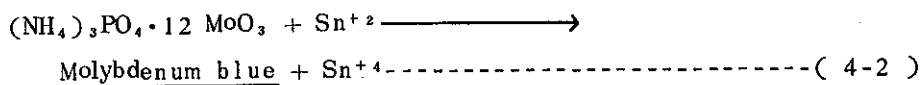
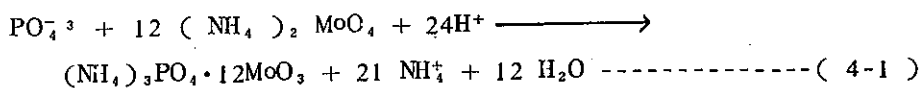
採樣後，為防止其中之磷發生變化，於每升水樣中加入 4 ml 氯化汞 (HgCl₂) 溶液。(氯化汞溶液之濃度為 10 mg HgCl₂/ml)。

4-2-2 檢驗方法

4-2-2-1 磷酸鹽之檢驗

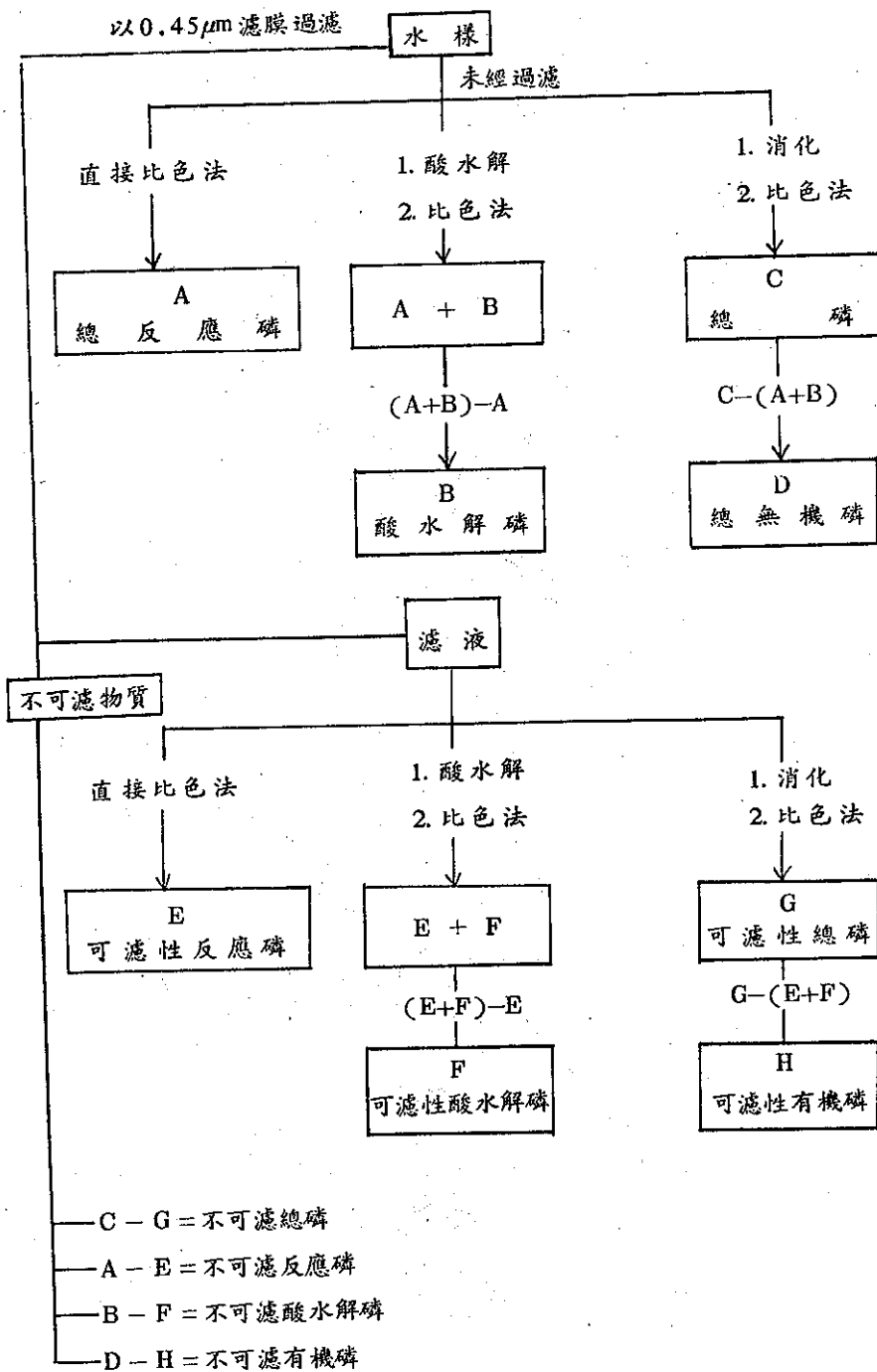
本研究中所檢驗的水樣係取自南、北勢溪、新店溪及翡翠水庫，其磷酸鹽含量甚低，故採用靈敏度較高之氯化亞錫法 (Stannous Chloride Method)，此法最低可測至 0.007 mg P/l。(13)

氯化亞錫法之原理為：在酸性條件下，使磷酸鹽和鉬酸銨作用形成鉬酸磷酸銨 (Ammonium phosphomolybdate)，再以氯化亞錫還原為藍色之鉬藍 (Molybdenum blue)，測其吸光度即可換算為濃度。過程中之反應式簡述如下：



由於 Sn⁴⁺ 極易生成 Sn(OH)₄ 沈澱造成混濁，使上述反應所生成之藍色發生變化。所以顯色後應在 10 分鐘內測定吸光度，以免發生誤差。

由於磷會和有機物併存，所以在測定總磷時須經消化過程，將有機物氧化後使有機磷釋出後再進行檢驗。常用之消化法有三種：過氯酸法、硝酸—硫酸法，及過硫酸塩氧化法。本研究中採用最簡便之過硫酸塩法。



註：反應磷：主要係指正磷酸塩

酸水解磷：係指複磷酸塩

上述二種形態之磷即為無機磷

4-2-2-2 模式之應用

掌握各種磷污染源及負荷量後，理論上應可推算出水體中之磷濃度。國外對於污染之研究起步較早，對湖泊、水庫均有長期之觀察及記錄，因而發展出許多計算模式。國內則因此類問題過去未受重視，各項基本資料極為缺乏，故未能發展出計算模式。本研究中嘗試使用國外常用模式中參數較為簡化之 Vollenweider 模式，來推測水庫中之磷含量與實測值作一比較，以提供為污染源部分去除後，水庫中磷含量估算之參考。茲將此模式之基本理論簡述於下：(14)

基本假設：

- (1) 湖泊或水庫為一混合良好的水體系統，能接受一定的水力和養分負荷。
- (2) 磷的進流速率，流出速率及沈澱速率各為一定值。
- (3) 出流水之磷濃度和水體中之磷濃度相同。
- (4) 磷之沈積量和水體中磷濃度成比例。

質量平衡公式：

$$V \frac{dP}{dt} = M - V_s P A - P Q \text{ ----- (4-3)}$$

V：水體容積 ($10^6 m^3$)

P：水體中之磷濃度 ($g/m^3, mg/l$)

M：水體中之磷之進流量 ($10^6 g/yr$)

V_s ：磷之沈降率 (m/yr)

A：水體之底面積 ($10^6 m^2$)

Q：出水速率 ($10^6 m^3/yr$)

將上式除以 A，可得

$$Z \frac{dP}{dt} = L - V_s P - q_s P \text{ ----- (4-4)}$$

Z：V/A，水體深度 (m)

L：M/A

q_s ：Q/A

在穩定狀態下，可將 (4-4) 式再簡化為：

$$P = \frac{L}{V_s + q_s} \text{----- (4-5)}$$

kenneth H. Reckhow 曾由47個湖泊之資料，以統計方式得到下列關係式：

$$V_s = 11.6 + 0.2 q_s \text{----- (4-6)}$$

將(4-6)式代入(4-5)式中，可使模式再簡化為：

$$P = \frac{L}{11.6 + 1.2 q_s} \text{----- (4-7)}$$

本研究中即以(4-7)式來推算水庫中之磷含量。

五、結果與討論

5-1 一般水質概況

5-1-1 翡翠水庫及其集水區(北勢溪流域)檢驗結果如表五所示。

由結果可知，集水區內一般水質狀況尚稱良好，僅坪林(下)、下鶯子瀨及大林等處之BOD略超過甲類水體標準所訂定之1.0 ppm。其主要原因為：

- (1)坪林(下)係受家庭污水排入之影響，而使BOD值由坪林(上)之0.4增為1.1。
- (2)下鶯子瀨為一露營區，遭受人為污染之機會較大，所以其BOD含量亦略高。
- (3)大林村為集水區內豬隻飼養頭數最多之村落，因受家庭污水及養豬廢水排入之影響，致使水中之BOD增高。

5-1-2 南勢溪、新店溪流域

此流域為目前本處青潭取水口之主要集水區，檢驗結果如表六。

由BOD結果可知，由於烏來之人口集中，遊客頻繁，各類人為活動及開發行為，使河川之品質降低。另由本處生產科之檢驗結果得知，青潭水源之大腸菌類數近年來已由甲類水體標準降為乙類水體標準，間或有超過乙類標準而達丙類標準之情事，此問題必須予以正視。

5-2 磷之含量

5-2-1 翡翠水庫及其集水區(北勢溪流域)檢驗結果如表七所示。

由檢驗結果可明顯看出：

- (1)目前全區域內磷含量皆偏高，皆大於美國EPA優養狀態區分表中優養狀態之限值—0.020 mg/l。
- (2)由上游至下游磷濃度有漸漸增加之趨勢，可知沿線各家庭污水、養殖廢水、肥料施用、土地開發及土壤沖蝕等對水域所造成的影響。

項	樣	點	湖	漁	坪	坪	坪	石	下	大	黃	翡
目	林	林	光	林	林	槽	鴛	林	子	林	榨	翠
	(上)	(下)		(上)	(下)		湖		湖		皮	水
											寮	庫
濁度 (turbidity)	2.8	2.8	3.6	2.8	2.8	1.6	3.2	2.0	2.0	2.0	2.3	5.3
總鹼度 (total alkalinity)	20	22	18	20	22	20	22	18	18	20	20	20
P H	7.0	7.0	7.1	7.0	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
氯堿 (Cl ⁻)	5.0	7.0	6.0	5.0	7.0	6.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	7.0
硫酸鹽 (SO ₄ ²⁻)	15	17	20	15	17	23	16	21	21	18	18	14
游離氨氣 (NH ₃ -N)	0.01	0.01	N.D	0.01	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D	0.01	0.01	0.02
亞硝酸氮 (NO ₂ -N)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
硝酸氮 (NO ₃ -N)	0.36	0.32	0.70	0.36	0.32	0.22	0.16	0.34	0.34	0.31	0.36	0.43
總硬度 (total hardness)	32	32	24	32	32	34	22	28	28	28	26	29
溶解總固體量 (D.S.)	22	22	25	22	22	27	20	26	26	26	23	27
鈣 (Ca ⁺²)	8.8	7.2	8.8	8.8	7.2	10.4	8.8	8.8	10.4	10.4	10.4	7.2
鎂 (Mg ⁺²)	2.5	3.5	0.5	2.5	3.5	2.0	0	1.5	1.5	0.5	0	2.7
鐵 (Fe)	0.07	0.05	0.04	0.07	0.05	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.14
錳 (Mn)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
懸浮固體量 (S.S.)	0.6	0.4	2.2	0.6	0.4	0.2	2.0	0.6	0.6	0.2	0.6	1.7
溶氧量 (D.O.)	8.9	9.0	8.8	8.9	9.0	8.3	8.8	8.3	8.3	8.8	8.3	6.5
生化需氧量 (BOD)	0.4	1.1	0.6	0.4	1.1	0.9	0.4	1.1	1.1	1.1	0.4	0.8

註：翡翠水庫之檢驗結果為上、中、下三種不同深度檢驗結果之平均值。

表五 翡翠水庫及其集水區（北勢溪流域）之一般水質概況

項 目	採 樣 點	烏 來 (上)	烏 來 (下)	雙 溪 口	青 潭
濁度 (turbidity)		3.2	2.5	4.2	4.3
總鹼度 (total alkalinity)		20	24	18	24
pH		7.1	7.1	7.2	7.0
氯鹽 (Cl^-)		6.0	6.0	6.0	7.0
硫酸鹽 (SO_4^{2-})		16	15	10	15
游離氨氮 (NH_3-N)		0.04	0.01	0.03	0.02
亞硝酸氮 (NO_2-N)		N.D	N.D	N.D	N.D
硝酸氮 (NO_3-N)		0.35	0.32	0.31	0.52
總硬度 (total hardness)		42	24	42	28
溶解總固體量 (D.S)		39	36	36	32
鈣 (Ca^{+2})		16	15.2	14.4	10.4
鎂 (Mg^{+2})		0.5	1.0	1.5	0.5
鐵 (Fe)		0.03	0.02	0.08	0.08
錳 (Mn)		0	0	0	0
懸浮固體量 (S.S)		0.4	0.2	0.6	0.8
溶氧量 (D.O)		8.2	9.0	8.7	8.0
生化需氧量 (BOD)		0.4	1.2	0.8	0.4

單位：除濁度 (NTU) 及 pH 外，皆為 mg/l

表六 南勢溪、新店河流域一般水質概況

地點 項 月 別	湖			澗			光			坪林(上)			坪林(下)			石			下鶯子湖			大			林			黃榜皮寮			翡翠水庫						
	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷							
73	0.0024	0.0046	0.0070	0.0029	0.0035	0.0064	0.0033	0.0042	0.0075	0.0057	0.0047	0.0104	0.0024	0.0061	0.0085	0.0054	0.0055	0.0109																			
9.	0.0197	0.0114	0.0311	0.0224	0.0040	0.0264	0.0168	0.0098	0.0266	0.0154	0.0110	0.0264	0.0422	0.0078	0.0500	0.0209	0.0100	0.0309																			
10.	0.0276	0.0078	0.0354	0.0245	0.0050	0.0301	0.0263	0.0069	0.0332	0.0274	0.0073	0.0374	0.0469	0.0082	0.0551	0.0325	0.0078	0.0403																			
11.	0.0068	0.0275	0.0343	0.0035	0.0286	0.0321	0.0263	0.0063	0.0326	0.0269	0.0067	0.0336	0.0025	0.0075	0.0100	0.0060	0.0078	0.0138																			
12.	0.0380	0.0118	0.0498	0.0466	0.0142	0.0608	0.0418	0.0062	0.0480	0.0446	0.0064	0.0510	0.0189	0.0102	0.0291	0.0495	0.0059	0.0554																			
74	0.0236	0.0117	0.0353	0.0270	0.0126	0.0396	0.0268	0.0122	0.0390	0.0321	0.0124	0.0445	0.0162	0.0106	0.0268	0.0199	0.0126	0.0325																			
2.	0.0118	0.0133	0.0251	0.0114	0.0149	0.0263	0.0073	0.0157	0.0230	0.0131	0.0258	0.0389	0.0116	0.0122	0.0238	0.0092	0.0157	0.0249																			
3.	0.0202	0.0211	0.0413	0.0190	0.0236	0.0426	0.0204	0.0289	0.0493	0.0211	0.0335	0.0546	0.0104	0.0294	0.0398	0.0127	0.0313	0.0440																			
4.	0.0072	0.0167	0.0239	0.0234	0.0166	0.0400	0.0095	0.0272	0.0367	0.0132	0.0315	0.0447	0.0191	0.0309	0.0500	0.0126	0.0380	0.0506																			
6.																																					
平均	0.0175	0.0140	0.0315	0.0201	0.0137	0.0338	0.0198	0.0131	0.0329	0.0222	0.0154	0.0376	0.0189	0.0137	0.0326	0.0187	0.0150	0.0337																			

註：(1)單位：mg/l。

(2)翡翠水庫之水樣係取自大燒棒，主流匯入處、水庫中心及大埔附近，每點取上、中、下三種深度之水樣，檢驗結果平均之。

表七 翡翠水庫及茶集沙區各點之磷含量

- (3) 本研究中採樣之最大游點為潤瀨村，交通不便，人煙稀少，但水中磷含量仍達 0.0315 mg/l ，足見北勢溪中磷之天然含量已相當高，就磷之負荷量而言，北勢溪之污染負荷已達飽和。本研究中限於技術及人力，未能再探討磷之自然來源。
- (4) 各採樣點中以大林村之磷濃度最高，因大林村之養豬戶為集水區中最具規模者，足證養豬廢水為極重要之磷污染源。
- (5) 磷濃度次高之黃樺皮寮、坪林（下）皆為人口較集中之區域，受家庭污水及其他人為活動之影響，故使磷濃度增加。
- (6) 翡翠水庫中磷濃度達 0.0361 mg/l ，超過優養狀態之限值 0.02 mg/l 甚多，而集水區內平均氣溫為 22.7°C ，日照時間約 $1,300 \text{ 小時/年}$ ，且水中溶氧充足，各項條件對藻類之生長皆甚有利，所以未來集水區中之水質等狀況必須予以密切監視。

5-2-2 南勢溪、新店河流域

檢驗結果如表八。

由烏來至青潭之間，磷濃度亦呈逐漸增加之趨勢，或可歸因於沿途各社區、遊樂區所造成之影響。且因此流域之開發較早，較具規模，故其磷含量普遍高於北勢河流域。

5-3 模式之計算

5-3-1 由現況估算翡翠水庫中之磷含量

利用前章述及之 Vollenweider 來推估水庫中之磷含量。

$$P = \frac{L}{11.6 + 1.2 qs} \text{ ----- (4-7)}$$

$$L = M/A \quad qs = Q/A$$

磷進流量之估算簡述如下：

(1) 北勢溪中磷之自然含量 (M_1)

以本研究中北勢溪之最上游採樣點—潤瀨，所測得之值為準。

磷濃度： 0.0315 mg/l

河川流量： $25.09 \text{ m}^3/\text{sec}$

$$\begin{aligned} \therefore M_1 &= 0.0315 \text{ mg/l} \times 25.09 \text{ m}^3/\text{sec} \times 86400 \text{ sec/day} \times 365 \text{ day/yr} \times \\ &\quad 10^3 \text{ l/m}^3 \\ &= 2.4924 \times 10^{10} \text{ mg/yr} \\ &= 24.924 \times 10^6 \text{ g/yr} \end{aligned}$$

(2) 家庭廢水中之磷含量 (M_2)

本區人口約 $8,600$ 人，每人每日污水量約 60 l ，流入率以 0.9 計。

月	地點 項目 別	烏來 (上)			烏來 (下)			雙溪口			青潭		
		有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷	有機磷	無機磷	總磷
73.	9.	0.0344	0.0120	0.0464	0.0087	0.0388	0.0475	0.0091	0.0388	0.0479	0.0233	0.0082	0.0315
	10.	0.0410	0.0094	0.0504	0.0372	0.0111	0.0483	0.0402	0.0134	0.0536	0.0437	0.0087	0.0524
	11.	0.0104	0.0160	0.0264	0.0078	0.0216	0.0294	0.0097	0.0114	0.0211	0.0063	0.0184	0.0247
	12.	0.0278	0.0169	0.0447	0.0315	0.0157	0.0472	0.0353	0.0094	0.0447	0.0406	0.0126	0.0532
74.	1.	0.0242	0.0098	0.0340	0.0329	0.0094	0.0423	0.0273	0.0114	0.0387	0.0367	0.0121	0.0488
	2.	0.0112	0.0165	0.0277	0.0116	0.0180	0.0296	0.0237	0.0176	0.0413	0.0195	0.0200	0.0395
	3.	0.0148	0.0219	0.0367	0.0198	0.0207	0.0405	0.0228	0.0266	0.0494	0.0293	0.0293	0.0586
	4.	0.0104	0.0260	0.0364	0.0109	0.0274	0.0383	0.0122	0.0357	0.0479	0.0088	0.0342	0.0430
	平均	0.0217	0.0161	0.0378	0.201	0.0203	0.0404	0.0226	0.0205	0.0431	0.0261	0.0179	0.0440

註：單位 mg/l

表八 南勢溪、新店溪之磷含量

本區家庭廢水中之磷濃度：3.96 mg/ℓ (3)。

$$\begin{aligned}\therefore M_2 &= 3.96 \text{ mg/}\ell \times 60 \ell \text{ pcd} \times 8600 \text{ cap} \times 365 \text{ day/yr} \\ &= 7.4583 \times 10^8 \text{ mg/}\ell \\ &= 0.746 \times 10^6 \text{ g/hr}\end{aligned}$$

(3)水肥中之磷含量 (M_3)

每人每日之磷排放量約1.5 g，流達率以0.6計。

$$\begin{aligned}\therefore M_3 &= 1.5 \text{ g/cap/day} \times 8600 \text{ cap} \times 365 \text{ day/yr} \\ &= 4.7085 \times 10^6 \text{ g/yr}\end{aligned}$$

(4)養殖廢水中之磷含量 (M_4)

本區內之養殖業以養豬戶為主，故以養豬廢水代表養殖廢水。流達率以0.35計。

養豬頭數：3,651頭(17)

排泄物之磷含量：0.17 g/kg wt/day

豬之平均重量：60Kg

$$\begin{aligned}\therefore M_4 &= 0.17 \text{ g/kg}\cdot\text{day} \times 60 \text{ kg} \times 3651 \times 365 \text{ day/yr} \\ &= 1.3593 \times 10^7 \text{ g/yr} \\ &= 13.593 \times 10^6 \text{ g/yr}\end{aligned}$$

(5)非點源之磷含量 (M_5)

集水區面積約303平方公里，其中農作面積約4,800公頃，住宅區約1,000公頃，其餘24,500公頃為森林地。

由各不同開發程度之土壤中流失之磷量可估計如下：(15)(6)

都市區：1 kg p/hectare/yr

農業區：0.5 kg p/hectare/yr

森林區：0.1 kg p/hectare/yr

$$\begin{aligned}\therefore M_5 &= 0.5 \text{ kg/ha/yr} \times 4800 \text{ ha} + 1.0 \text{ kg/ha/yr} \times 1000 \text{ ha} + 0.1 \text{ kg/ha/yr} \\ &\quad \times 24500 \text{ ha} \\ &= 5850 \text{ kg/yr} \\ &= 5.850 \times 10^6 \text{ g/yr}\end{aligned}$$

合計：

$$\begin{aligned}M &= M_1 + M_2 \times 0.9 + M_3 \times 0.6 + M_4 \times 0.35 + M_5 \\ &= (24.924 + 0.746 \times 0.9 + 4.7085 \times 0.6 + 13.593 \times 0.35 + 5.850) \\ &\quad \times 10^6 \text{ g/yr} \\ &= 39.028 \times 10^6 \text{ g/hr}\end{aligned}$$

A = 1024 ha (淹沒區面積)

$$= 10.24 \text{ km}^2$$

$$= 10.24 \times 10^6 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 25.09 \text{ m}^3/\text{sec} \\
 &= 25.09 \times 86400 \times 365 \text{ m}^3/\text{yr} \\
 &= 791.24 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}
 \end{aligned}$$

$$L = M/A = 3.81$$

$$qs = Q/A = 77.27$$

代入(4-7)式中, 可得

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{L}{11.6 + 1.2qs} = \frac{3.81}{11.6 + 1.2 \times 77.27} \\
 &= 0.0365 \text{ mg}/\ell
 \end{aligned}$$

所得結果與翡翠水庫中磷之實測值—0.036 mg/ℓ, 甚為相近。假設此模式可適用於本集水區, 繼續進行以下之估算。

5-3-2 截流部分污染源後, 估算翡翠水庫中之磷含量

在集水區內興建污水下水道系統以收集家庭廢水及水肥至污水處理廠處理後排放至下游, 並輔導養豬戶遷移, 則

$$\begin{aligned}
 M &= M_1 + M_5 \\
 &= (24.924 + 5.850) \times 10^6 \text{ g/yr} \\
 &= 30.774 \times 10^6 \text{ g/yr}
 \end{aligned}$$

$$L = M/A = 3.005$$

再代入(4-7)式中, 而得

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{3.005}{11.6 + 1.2 \times 77.27} \\
 &= 0.029 \text{ mg}/\ell > 0.020 \text{ mg}/\ell
 \end{aligned}$$

採取上述措施後, 磷污染之情況雖可獲得改善, 但仍高於0.02 mg/ℓ (優養現象之限值), 所以欲徹底解決磷污染之問題, 除應採上述措施外, 更須加強集水區之水土保持工作, 期使北勢溪中天然之磷含量減低。

六 結論與建議

1. 目前翡翠水庫集水區內之磷含量皆已超過優養狀況之限值(0.020 mg p/ℓ), 即就磷污染之觀點而言, 污染量已超過水體所能負荷之量, 為維護集水區內之水質不容許再納入任何污染源。
2. 翡翠水庫中磷濃度之實測值與 Vollenweider 模式之估算結果幾乎相同。不過, 因水庫興建時未進行淹沒區之整地工作, 日後其中草木、土壤之釋出量, 可能會使水庫中之磷含量略高於估計值。

由此模式推算結果, 若將集水區內之家庭廢水及水肥截流至衛生下水道系統進行污水處理排放至下游, 並遷移區內所有養豬戶, 則水庫內之磷含量可由0.0365 mg/ℓ降至0.029 mg

10，雖可獲明顯改善，但仍具發生優養現象之潛勢，所以必須同時進行磷之天然來源的控制。

3. 為有效控制磷之天然來源，必須加強集水區內之水土保持工作，加強取締濫墾、濫建、濫葬情事，以減少沖蝕量。
4. 為有效掌握未來水庫水質之變化情形，應由蓄水初期起進行物理、化學、生物等各項基本水質資料之收集。
5. 集水區肥料及農藥之使用應予以管制並作紀錄，以了解使用情況，避免因濫用而造成污染。
6. 優養現象之發生對淨水處理有很大的影響，今後應加強對藻類去除問題之研究，以使本處之水處理工作得以更臻完善。

參 考 資 料

1. 台北自來水事業處，"台北區自來水第四期建設給水工程後段計畫"，民國71年。
2. 台北市政府，"翡翠水庫計畫簡介"，民國68年3月。
3. 許整備、胡思聰，"翡翠水庫集水區磷之含量及其對自來水水源影響之研究"，民國72年6月。
4. J.A. Borchardt, " Eutrophication-Causes And Effects ", J. AWWA, June, 1969 。
5. William W. Walker Jr., " Significance of Eutrophication in Water Supply Reservoirs ", J. AWWA, Jan. 1983 。
6. Stumm and Morgan, " Aquatic Chemistry " 2nd ed. pp 562 ~ 565 。
7. David L. Correll, " The Measurement of phosphorus in Metabolism in Natural Populations of Microorganisms, Bioassay Techniques and Environmental Chemistry ", pp. 425 ~ 431, 1975 。
8. 經濟部水資會，"淡水河流域流量與水質之研究"，民國71年。
9. 王光遠，"肥料學"，民國69年，pp. 143 ~ 170 。
10. Raymond C. Loehr, " Characteristics and Comparative Magnitude of Non-point Sources ", WPCF, Vol.46, No.8 。
11. G.W. Cooke et. al, " The Phosphorus Involved in Agricultural Systems and Possibilities of its Movement into Natural Water ", Water Research Vol.7, 1973 。
12. George K. Reid., " Ecology of Inland Waters and Estuaries." pp. 187 ~ 193 。
13. " Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater " 15th ed. pp. 409 ~ 425 。
14. Dintie S. Mahamah et. al " Performance of Some Emperical Phosphorus Models ", ASCE 1982, EE4 。
15. H. Golterman, " Quantifying the Eutrophication Process " Water Technology, Vol. 12, 1980 。
16. Douglas A. Haith et. al, " Nonpoint Source Pollution from Agricultural Runoff " ASCE, 1976, EE5 。
17. 台北水源特定區管理委員會，"台北水源特定區養豬戶調查報告"，民國74年3月。