

鯉魚潭水庫水質變異對自來水處理效益之影響

李漢鏗¹ 蔡桂郎² 葉怡巖³

摘要

離槽水庫水質之變異對於淨水廠的處理效率重要的影響。本研究對鯉魚潭水庫與淨水廠進行採樣分析，利用水質污染指標 (RPI)、台灣河川水質指標 (NCKU-WQI) 及水庫優養化指標 (Carlson-TSI) 對水庫水質進行評估，並且初步評估淨水廠處理單元對微量有機物之處理效率。調查分析結果顯示歷年水庫之 RPI 值介於 1~3.75，屬於輕度至中度污染狀況；WQI 值介於 56~76，介於乙至丙類水體標準；Carlson-TSI 介於 43.6~63.4，屬於普養至優養狀態。

由於 THMs 生成與 TOC 含量具有相關性，因此 TOC 與 UV_{254} 的量測可作為淨水處理適當與否之重要參數。 UV_{254} 與 TOC 之比值可當作水庫與淨水廠間水質的評估指標。實驗結果顯示水庫 UV_{254} 與 TOC 之比值範圍為 0.031~0.039；淨水廠的範圍為 0.012~0.033。其去除效率大約為 37%，顯示傳統的淨水處理過程對於 TOC 及 UV_{254} 無法加以降低。對於抑制致癌物質生成，將為淨水廠是否需要改變處理方式的重要參考指標。

關鍵字- 離槽水庫，淨水廠，總有機碳(TOC)，THMFP (trihalomethane formation potential)， UV_{254} : TOC 比值

1：逢甲大學水利工程學系副教授

2：逢甲大學水利工程學系專任講師

3：逢甲大學水利工程學系專任助教，土木及水利工程研究所研究生

一、前言

水庫中藻類利用氮、磷等營養鹽大量繁殖使得優養化現象產生。光合作用 (photosynthesis) 是藻類產生ECP (extracellular cells products) 的代謝作用，而ECP為影響水質污染的主要物質，會增加淨水廠的混凝劑及消毒劑 (氯) 的加藥量，而加氯消毒的方法是一般淨水廠用來控制水庫表面水中細菌及藻類的繁殖。前人研究顯示加氯消毒的過程會導致三氯甲烷 THMs (trihalomethanes) 的形成 (Symons *et al.*, 1975)°Hoehn *et al.*, (1980), Oliver *et al.*, (1980), Fu Kushima *et al.*, (1983), Wachter *et al.*, (1984), Scully *et al.*, (1988) 等研究發現在藻類及ECP為產生THMs 的前趨物質，THMs 具有致癌的性質並且對於人體健康會有影響是已經經過實驗證實的結果(WHO, 1993)。

對於優養化水質與飲用水安全之間的風險分析，可以利用水庫中總磷的負荷量的變異來達到風險管理。總磷負荷量的鏈分析可以用來評估水庫及淨水廠中水質的變異及改善程度。(Steven C. Chapra, *et al.*, 1997)°Walker (1983) 曾經針對美國的34個集水區及3個湖泊計算出他們總磷與TOC的相關性。Miller *et al.*, (1990) 研究證實總有機碳與THMFP (Trihalomethane Formation Potential) 有正相關性。本文將利用實驗數據來探討鯉魚潭水庫總磷濃度與TOC的關係。

在水庫與淨水廠中自然有機物質 (NOM) 的黃酸及腐質酸含量可利用其產生芳香族化的特性，即UV₂₅₄: TOC 比值來表示 (Reckhow *et al.*, 1990)°腐質酸 (humic) 與黃酸 (fulvic) 物質已經證實為THMs 的前趨物 (Twort and Law, 1994)。利用此比值我們可以經由實驗的結果來探討傳統方式的淨水廠其對於NOM處理效率做一評估。

二、實驗程序與方法

1、鯉魚潭水庫環境概況

鯉魚潭水庫位於北緯 24°20'40"，東經 120°46'35"，其本身屬於離槽水庫 (off-channel reservoir) 其與大安溪上游士林壩串連，供應大台中地區民生及灌溉用水。水庫標高 300 公尺，面積 432 公頃 (ha)，流域面積達 53.45 平方公里。總蓄水量為一億兩千六百萬立方公尺，有效容量為一億兩千三百萬立方公尺。

水庫的主要目標為公共用水，灌溉及水力發電。自 1992 年到 1999 年其平均供水能力為 2.2×10^5 tons/day，到了 2000 年士林壩完成串連供水時，其供水能力將達到 9.0×10^5 tons/day。

2、水樣採集

本研究於鯉魚潭水庫攔污索及出水口設置四個採樣點，於淨水廠的取水口、過濾前、過濾後及清水池設置四個採樣點，自 1999 年七月至十二月每個月共半年時間至研究地點採樣，送回實驗室分析。

採樣點如圖一所示，UV₂₅₄ 量測是採用琥珀色 40ml 之 Pierrec #13075 採樣瓶；TOC 量測則是採用 120ml 之 Supelco # 2-3234 採樣瓶。這種採樣瓶是 Pierce #

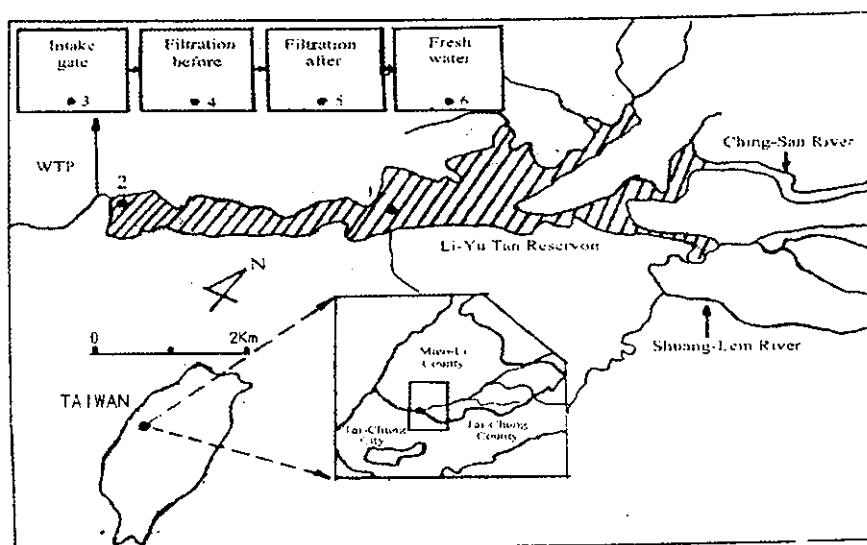
12722軟墊片，一面為矽膠，具緊迫功能，避免水樣漏；另一面為鐵弗龍(Teflon)。為避免瓶內微生物反應，水樣放置於暗處並維持在4°C。

3、分析試劑

本研究實驗均採用Millipore Milli-Q (16-18 MΩ) 去離子水來配藥；所有的化學試劑均採用分析級試藥。

4、實驗分析方法

- (1) 水庫樣品分析：pH、溶養(DO)、生化需養量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、總磷(TP)，懸浮固體物(SS)、濁度(TD)、總有機碳(TOC) 與UV₂₅₄。
- (2) 淨水廠樣品分析：pH、濁度、總有機碳及UV₂₅₄。
- (3) pH 量測：pH 計使用pH 320/set-2 Best-Nr. 100, 739 WTW/Germany, 緩衝溶液為pH 4,7,10。
- (4) DO量測：DO計使用Oxi 320/set-2 Best-Nr. 200, 212 WTW/Germany。
- (5) TD 量測：濁度計使用DRT-15CE, Scientific Inc/U.S.A量測。
- (6) BOD₅、NH₃-N、TP 與 TD 實驗：採用環保署環境檢驗法NIEA W510.50A、W416.50T、W427.50A 與 W219.50A。
- (7) TOC：使用OIA/U.S.A. WINTOC 1010 分析儀 (19th standard method, 1993)。
- (8) UV₂₅₄：UV₂₅₄ 量測使用1 cm 高度的石英管，儀器為Tasco/U.S.A. V₅₃₀ 分光光度計(19th standard method, 1993)。



圖一 鯉魚潭水庫及淨水廠之採樣點

三、結果與討論

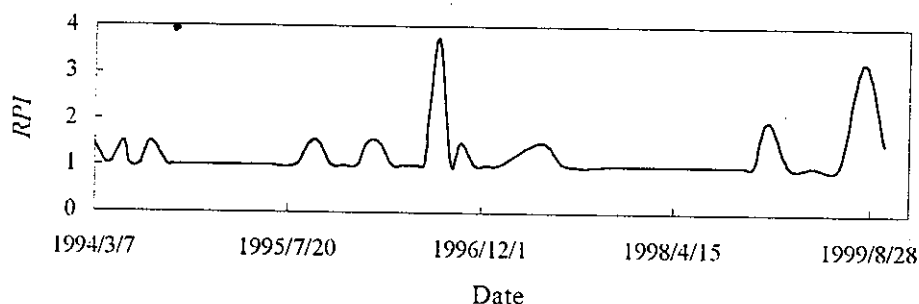
1、鯉魚潭水庫水質評估

(1) 河川污染指數 (RPI)

利用鯉魚潭水庫提供之資料 (自1994年3月至1999年8月) BOD₅, DO, NH₃-N 及 SS濃度來分析RPI。

$$RPI = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i$$

S_i : pollution rating. 圖二顯示鯉魚潭水庫水質介於輕度至中度污染狀況(RPI: 1~3.75, 定義範圍如下; 2以下為未受污染, 2.0~3.0為輕度污染, 3.1~6.0為中度污染, 6以上為嚴重污染)。



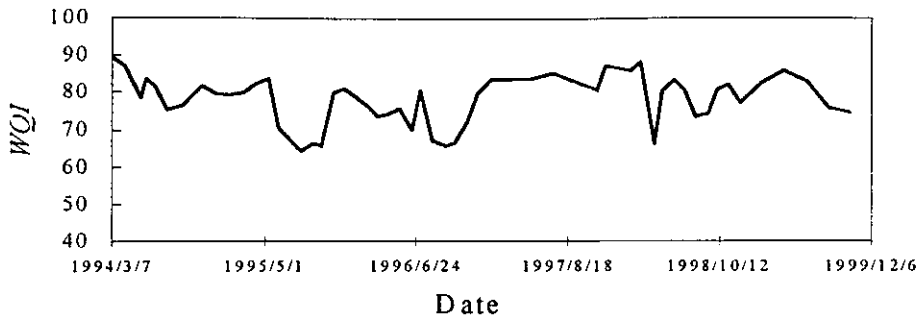
圖二 鯉魚潭水庫歷年之RPI值

(2) 水質指標 (WQI)

成大溫清光教授依據National Sanitary Foundation (NSF) 發展之WQI 修改成為NCKUWQI₈, 其更能適合於評估台灣河川的水質。其採用BOD₅、DO、pH、NH₃-N、Total-Coliform、TD、TP 與比電導度 (specific conductivity) 作為WQI之評估。

$$WQI = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=1}^8 w_i q_i \right)^{1.5}$$

WQI=0 to 100. w_i =weight of water quality parameter. q_i =rating of water quality parameter. 結果顯示鯉魚潭水庫介於乙至丙類水體水質標準, 詳見圖三 (WQI=56~76, 甲類: 91~100, 乙類: 76~90, 丙類: 51~75, 丁類: 31~50, 戊類: 16~30, 超戊類: 0~15)。



圖三 鯉魚潭水庫歷年WQI值

(3) 優養化指標 (TSI)

Carlson TSI 可評估水庫水質的優養化狀態，利用葉綠素chlorophyll a (Chl-a)，透明度 (SD) 與總磷濃度的資料便可將這四種計算成個別之TSI，將四種TSI計算其平均值便可得到CTSI，利用CTSI便可以評估水庫水質的優養化狀況。圖四顯示鯉魚潭水庫呈現普養至優養狀況(CTSI=43.6-63.4，貧養： <40 ，普養： $40-50$ ，優養： >50)。

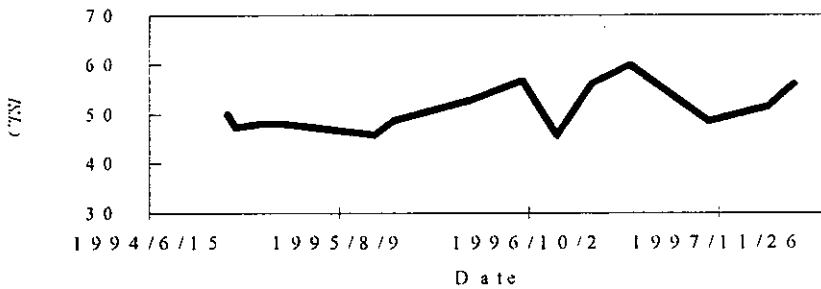


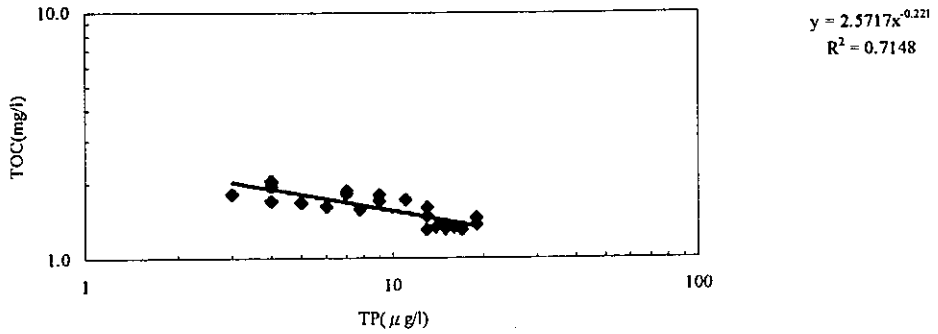
Fig. 4. CTSI of LYT reservoir

(4) 線性回規模式 (Linear Regression Model, LRM)

由前述之探討得知，水庫水質優養化與藻類繁殖有關，而藻類繁殖所需的營養鹽又以總磷的濃度為限制因子，故利用總磷當作優養化的關連因子，探討線性回規模式中的不確定性因素是值得探討之應用(Reckhow and Chapra, 1983)。總磷濃度與TOC的關係首先是由Walker (1983)所探究，利用實驗室數據結果顯示於圖五，模式的計算是利用Microsoft EXCEL (version 2000)。座標軸經過對數轉換後符合LRM模式，關係式如下：

$$TOC = 2.5717TP^{0.221} \quad (n=24, r^2=0.7148)$$

TP:TOC 相關性存在較大的變異，因為在自然水中磷的濃度會影響TOC濃度層次，尤其是allochthonous 與 autochthonous 碳源將會影響TP:TOC相關的不確定性增加。因此以質量平衡模式 (mechanistic mass-balance models) 在預測TOC濃度層次是需要的(Connolly and Coffin, 1995, Canale et al., 1997)。



圖五 總磷與TOC的關係式

(5) 原水特性

表一顯示水庫水質的一般特性。利用前人對於水源有機物的報告，黃酸及腐質酸其UV₂₅₄: TOC比值分別為0.03-0.04 與0.05-0.07 (AU l/mg-C) (C.J. Nokes, *et al.*, 1999). 表二顯示在水庫及淨水廠的UV₂₅₄: TOC 比值範圍為0.031-0.039 及0.012-0.033。全部之UV₂₅₄: TOC 比值在 Reckhow's 研究報告指出腐質物質中黃酸為主要成分，其屬於低至中度芳香族化。

本研究顯示UV₂₅₄: TOC 比值絕大多數自然界有機物質呈現低至中程度芳香族化；由水庫至淨水廠的UV₂₅₄: TOC比值去除率約為 37%。

四、結論

鯉魚潭水庫之總磷與總有機碳之關係式在本文已經利用實驗值證實 (TOC=2.5717TP^{-0.221})，總磷為水庫優養化之限制因子。碳源的變異是產生總磷與總有機碳相關性的不確定性主因；由於採樣時間為七月至十二月，季節因素將是影響此相關性的重要因素之一。利用RPI及WQI配合Carlson TSI 指數，其可提供水庫水質變異之狀態，對於評估淨水廠水質狀況有功能性的貢獻。

大量的藻類繁殖會引起水庫之優養化，藻類細胞在淨水廠經過加氯消毒後，其會引起 THMs 的產生。THMs 已經證實有致癌的性質並會影響大眾之健康，這是我們今後的研究主題。

UV₂₅₄: TOC 比值為評估水庫至淨水廠水質變化的指標。減少腐質酸及黃酸的濃度將可減低THMs的形成。傳統之淨水廠可以藉由增加處理單元（如臭氧，GAC 與membrane filtration 等）來增加去除效率。

表一 水庫水質之一般特性 (mean concentration from Mar. 1994 to Aug. 1999)

Parameter	Turbidity (NTU)	pH	Total Coliform (MPN/100ml)	Specific Conductivity (μ v/cm)	Transparency (SD)	Chl-a (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	TP (mg/l)	SS (mg/l)
Concentration	5.8	8.1	2,257	343	1.6	9.17	0.17	7.1	1.0	0.024	9

表二 水庫及淨水廠UV₂₅₄:TOC之比值 Abbreviations: TOC-total organic carbon.

UV₂₅₄-absorbance at 254 nm (path-length=1 cm), AU: absorbance units

Sampling stations	TOC (mg-C/l)	UV ₂₅₄ (AU)	UV ₂₅₄ :TOC (AU-l/mg-C)
LYT reservoir			
Upper stream (surface)	1.6	0.05	0.035
Upper stream (middle)	1.5	0.06	0.036
Downstream (surface)	1.6	0.06	0.039
Downstream (middle)	1.7	0.05	0.031
LYT WTP			
Intake gate ^a	1.2	0.03	0.024
Filtration before ^a	1.1	0.02	0.012
Filtration after	1.0	0.03	0.033
Freshwater	1.0	0.02	0.020

a: R% \leq 20 (n=5, 921 earthquake in Taiwan (1999) destroyed these equipments for one month), the remainder stations are R% \leq 20 (n=6)

致謝

感謝國科會提供經費 (NSC-89-2815-C-035-001-E), 另感謝於採樣及實驗期間自來水公司王國堅經理提供之協助; 鯉魚潭水庫及淨水廠人員的協助, 僅以此致謝意。

參考文獻

- APHA, AWWA and WPCF (1993) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th edn, eds A.E. Greengerg, L.S. Clesceri and A.D. Eaton. American Public Health Association, Washington,DC.
- C.J. Nokes, E. Fenton, and C.J. Randall, (1999) Modelling the formation of brominated trihalomethanes in chlorinated drinking waters. *Wat. Res.* 33(17), 3557-3568.
- Canale, R.P., Chapra, S.C., Amy, G.L., and Edwards, M.A. (1997) Trihalomethane precursor model for Lake Youngs, Washington. *J. Water Resour. Plng. And Mgmt.*, ASCE (submitted for publication).
- Connolly, J. P., and Coffin, R.B. (1995) Model of carbon in planktonic food webs, *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 121(10), 682-690.

- FuKushima, H.T., Aizawa, T. and Tasumoto, M. (1983) Evaluation of trihalomethane precursor produced during the life stage of algae, *Japan J. Wat. Pollut. Res.*, **6**, 175-182.
- Hoehn, R.C., Barnes, D.B. Thompson, B.C., Randall, C.W., Grizzard, T.J. and Shaffer, P.T.B. (1980) Algae as source of trihalomethane precursor, *J. Am. Wat. Ass.*, **172**, 344-350.
- [Http://alphapc.epagov.tw/envdatahome.html](http://alphapc.epagov.tw/envdatahome.html), *Water quality monitoring database of water body in Taiwan*. EPA, Taiwan.
- Miller R.E. et al., (1990), Organic carbon and THM formation potential in Kansas groundwaters. *J.AWWA*, **82**(3),49-62.
- Oliver, B.G., and Shindler, D.B. (1980) Trihalomethanes from the chlorination of aquatic algae, *Environ. Sci. Tech.* **14**, No. 12, 1502-1505.
- Reckhow D.A., Singer P.C. and Malcolm R.L.(1990) Chlorination of humic materials: by-production formation and chemical interpretations. *Environ. Sci. Technol.* **24**, 1655-1664.
- Scully, F. E. Howell, G.D. Kravitzoand, R. Jewell, J.T. Hahn, V. and Speed M. (1988) Proteins in natural waters and their relation to the formation of chlorinated organics during water disinfection, *Environ. Sci. Tech.* **22**, NO.5, 537-543.
- Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, and Gary L. Amy (1997) Empirical models for disinfection by-products in lakes and reservoirs. *Journal of Environmental Engineering*, 714-715.
- Symons J. M., Bellar J.A., Carswell J.K., DeMarw J., Kroop K.L., Robeck G.G., Seeger D.R., Slocum C.J., Smith B.L. and Steven A.A. (1975) Natural organic reconnaissance survey for halogenated organics. *J. Am. Wat. Wks Assoc.* **67**, 534-647.
- Twort, A. C., and Law, F.M. (1994) *Water supply*. 4th ed. London, Edward Arnold.
- Wachter, J.K. and Andelman, J.B. (1984) Organhalide formatic on chlorination of algal extracellular products, *Environ. Sci. Tech.* **18**, 811-817.
- Walker, W. W. Jr. (1983) Significance of eutrophication in water supply reservoirs. *J. AWWA*, **75**(1), 38-42.
- Wen C.G. (1992) *Handout of water pollution control*, pp.26-39, Research Institute of Environmental Engineering of Cheng-Kung University, Taiwan.
- World Health Organization (WHO,1993), *Guidelines for drinking water quality*, 2nd ed. Geneva, WHO.