

應用水庫水質模式評估日月潭水庫污染源及水質變化趨勢分析

APPLICATION OF RESERVOIR WATER QUALITY MODEL TO EVALUATE THE POLLUTION SOURCE AND WATER QUALITY OF THE SUN MOON LAKE RESERVOIR

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
研究生

陳怡安
Yi-An Chen

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
教授

張嘉玲*
Chia-Ling Chang

摘要

1

本研究區域為日月潭水庫，是台灣著名的觀光景點，其水庫功能主要是發電、觀光及供水，雖然日月潭地區的觀光業的興盛，可以為當地帶來極大的經濟效益，但是同時它也會影響到日月潭水庫的環境。本研究的目的為討論日月潭水庫的水質變化趨勢及污染源分析，並應用水庫水質模式簡易評估水庫水體之涵容能力，雖然目前的水庫水質尚未達到優養化的程度，但評估水庫水體尚能乘載的環境負荷能力是相當重要的。根據本研究結果顯示，由於日月潭水庫為離槽水庫，有約 87% 之污染是來自外部污染，但若扣除外部污染，主要之污染源為遊憩污染，約有六成。日月潭水庫水質近年來平均約 $12\mu\text{g/L}$ ，距離甲類水體水質標準，水體尚可再乘載 7,300kg/yr 之入庫總磷污染量，而距離達到水庫優養化，尚可再乘載 10,900 kg/yr 之入庫總磷污染量，依此分析結果可初步的得知日月潭水庫尚可承載的污染負荷量，以供作為水庫及集水區管理之參考依據。

關鍵詞：水庫水質、水庫管理、水質模式。

* 通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系教授，
40724 台中市西屯區文華路 100 號，clchang@fcu.edu.tw

APPLICATION OF RESERVOIR WATER QUALITY MODEL TO EVALUATE THE POLLUTION SOURCE AND WATER QUALITY OF THE SUN MOON LAKE RESERVOIR

Yi-An Chen

Feng Chia University
Department of Water Resources Engineering
and Conservation

Chia-Ling Chang*

Feng Chia University
Department of Water Resources Engineering
and Conservation

ABSTRACT

The study area is the Sun Moon Lake Reservoir, which is a famous sightseeing spot in Taiwan. The functions of the Sun Moon Lake Reservoir are power generation, sightseeing and water supply. The sightseeing development can bring economic benefit. However, it can also impact the environment. The objective of this study is to discuss the water quality trends, the pollution sources and the assimilative capacity of the Sun Moon Lake Reservoir. Although the present water quality of this reservoir has not been eutrophic, the assimilative capacity analysis is significant for reservoir management. The results show that about 60% of the pollution source of the reservoir comes from sightseeing. The average TP concentration of the reservoir is 12µg/L. The results indicate that the assimilative capacity is about 7,300kg/yr of TP load under the 1st grade water quality standard, and about 10,900kg/yr of TP load under the high degree of eutrophication. The analysis results can be useful references for reservoir management. The analysis of this study can be used as an important reference for reservoir management.

Keywords: Reservoir water quality, Reservoir management, Water quality model.

一、前言

1.1 研究動機

台灣的水庫常遇到兩個嚴重問題分別為土砂淤積及水庫優養化，主要原因與台灣降雨型態在空間及時間上分配不均的特性有關，在降雨型態分配不均條件下，使得此區域的豐枯水季現象更為明顯，為能夠滿足各項用水標的需求，需藉由水庫來貯存水源以供應其用水需求，因此水庫優養化的問題也日益顯示出其重要性(蔡福水，2007)。依據行政院環保署「民國 106 年環境水質監測年報」提到台灣的水庫普遍面臨優養化，當水庫優養化時，對於水資源分配上則出現供不應求的現象，藉由水庫周邊的污染源分析，瞭解當地污染情況並探討若水體中污染量超出可容納的污染量範圍時，需加以針對水庫之污染源進行污染源排放推動總量管制的策略，以便監督各事業單位是否超出排放許可量，建立合理的分配制度(林志勇，2007)。此時，水庫對於污染源的承載能力更顯得重要，僅有瞭解水庫的涵容能力，才能有效地針對水庫周邊的污染源進行管理，以達到永續保護水庫水質之目的。

1.2 研究目的

水庫一般可分為單一目標水庫及多目標水庫，而本研究的日月潭水庫為多目標水庫，水庫的功能以發電、供水及觀光為主，其中水源分配上以發電用水所佔比例最高，其次則為供應至下游區域之民生用水需求，而水庫本身也是具有其觀光發展之價值，因此其水質狀態理當重要。由日月潭近年來水質監測資料可知，水庫水質並無優養化，水質狀態尚佳，但隨著日月潭地區舉辦各項大型活動及湧入大量的觀光旅客，其所連帶產生的遊憩污水量亦會增加(楊國輝，2013)。為不讓水庫面臨優養危機，首要任務為掌握水庫集水區內各項污染源的情況，並透過水庫水質模式簡易分析水庫水體水質之涵容能力，若水庫的污染量已超越水體可承載之負荷量時，則需針對污染源進行總量管制分配策略，避免過多的污染進入水庫造成水質產生嚴重污染。因此，本研究目的係要探討日月潭水庫之污染源、水質變化趨勢，並且應用水庫水質模式評估水體的污染承載能餘裕量，雖然目前日月潭水庫並無優養化，但仍需掌握其尚可承載之入庫污染總量，再依此建立水庫與集水區管理相關策略。

二、研究方法

2.1 研究流程

本研究流程圖如圖 1 所示。本研究將先蒐集日月潭水庫的基本資料，包括環境基本資料及土地使用狀況等，再評估水庫周邊污染源及估算污染量，並分析水庫水質變化趨勢，以整體性掌握日月潭水庫現況。接續則是選擇適用之水庫水質模式，以作為評估水庫涵容能力分析之工具，應用水庫水質模式即可預測在入庫污染量提高的狀況下，日月潭水庫水質之變化情形，再依此去探討水庫尚可承載之污染總量，並簡易評估水庫水體水質之涵容能力。

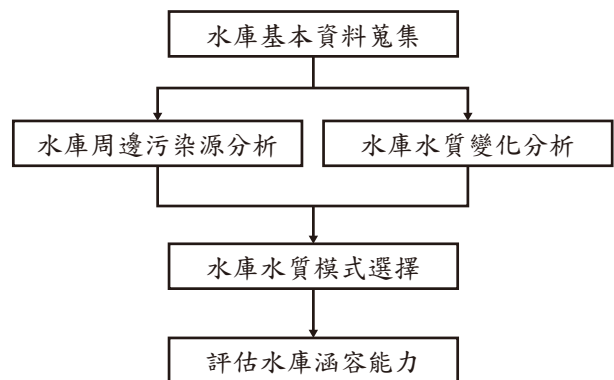


圖 1 研究流程圖

2.2 研究區域

本研究區域位於南投縣魚池鄉的日月潭水庫，位置分布如圖 2 所示。日月潭水庫屬於離槽式水庫，其水源是經由武界壩透過引水隧道將水引入庫區，此集

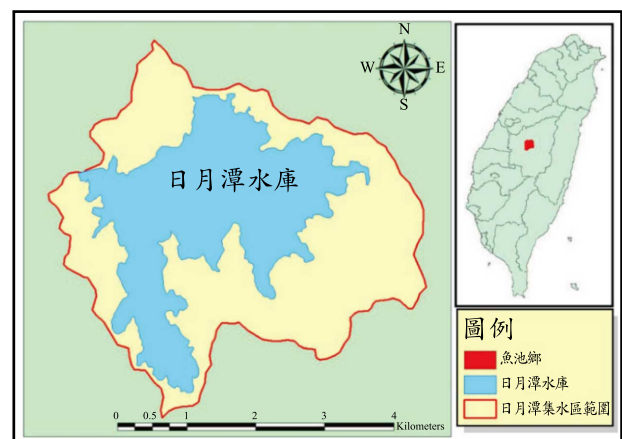


圖 2 研究區域圖

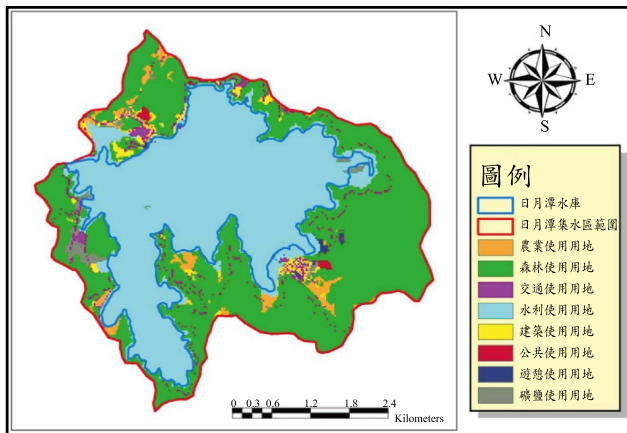


圖 3 日月潭水庫集水區土地利用分布圖

水區面積約為 17.08 平方公里，水庫滿水位面積為 8.4 平方公里，水庫總容量約為 1.7 億立方公尺，是台灣目前淤積與優養情形較輕微的水庫。日月潭水庫兼具水力發電、公共給水及觀光遊憩等功能，其水庫水源大部分供給大觀、明潭等電廠進行發電使用，其發電用水量約佔總用水量的 99%，由此可知日月潭水庫是以水力發電為主要功能。就觀光遊憩而言，日月潭水庫為台灣熱門的旅遊景點之一，常年皆有舉辦各項大型活動並吸引人潮前往觀光。

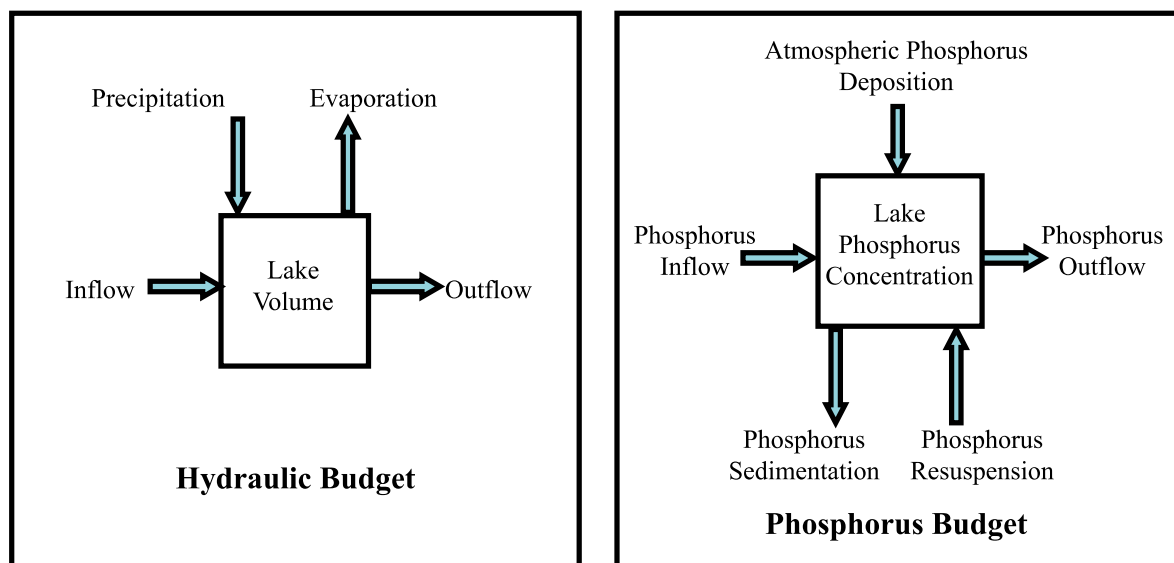
本研究區域之點源污染來源主要有生活污水、遊憩污水及外部污染等；而非點源污染的部分與土地使用型態有關，本研究區域之土地使用型態如圖 3 所示，若扣除水庫蓄水範圍，大多以森林用地為主，於庫區周邊則有少數的農業用地，而農業行為普遍會使用含有

磷成分的農藥進行施肥，導致土壤中亦含有磷污染，經雨天沖刷後將其污染隨著逕流的方式流入水庫，亦是造成水庫優養化的污染源之一，但因農業面積並不大，故非點源污染之影響有限。此外，依日月潭水庫水質監測資料報告顯示，目前水庫水質狀況佳，並未呈現優養化狀態。本文將於結果討論章節中，具體完整說明日月潭水庫污染源估算結果與水質現況及變化趨勢分析結果。

2.3 水庫水質模式

本研究使用的水庫水質模式為 Vollenweider 零維總磷質量平衡模式(Vollenweider, 1968)，為國內外廣泛被應用來分析水庫水質之模式，此模式主要是用來模擬總磷，並假設水體為完全混合的狀態，用以模擬在平均狀態的水體水質狀態，將水體中的總磷污染量及濃度，透過水體物理特性將其連結起來(Tapp, 1978)，而模式理論示意圖如圖 4 所示。由於總磷為影響水庫優養化狀態之關鍵水質項目，總磷與水庫優養狀態之相關性高於透明度與水庫優養之相關性，且總磷監測較藻類調查容易，資料也相對完整。基於此模式之主要功能符合本研究之需求，且模式所需資料均可取得，故本研究採用此模式作為水庫水質模擬之主要工具。

Vollenweider 模式演算之理論方程式如式(1)，其中 PV 為水庫總磷量、M 為總磷輸入量、P 為總磷濃度， R_p 總磷損失比例、 Q_{out} 水庫出流體積；因 Vollenweider 模式假設水體為 Steady state，即 PV 不隨時間變化，故可



(參考文獻：Vollenweider, 1968)

圖 4 Vollenweider 模式理論示意圖

表 1 Vollenweider 模式之參數說明表

參數	符號	單位	參數說明
全年水庫入流體積	Q_{in}	m^3/yr	查詢水庫水情資料
全年水庫出流體積	Q_{out}	m^3/yr	查詢水庫水情資料
磷損失的比例	R_p	-	$(v/v+q_s)$
總磷沉降率	v	m/yr	率定驗證得出
水力負荷	q_s	m/yr	進到水庫的水量/水庫表面積(Q_{in}/A)
水庫表面積	A	m^2	查詢水庫水情資料
全年磷輸入量	M	g/yr	總磷負荷/水體涵容總量
總磷濃度	P	g/m^3	水庫總磷濃度

推得式(2)。 R_p 總磷損失比例可由總磷沉降率(v)及水力負荷(q_s)求得，如式(3)；而水力負荷(q_s) 可由水庫入流體積(Q_{in})及水庫表面積(A)求得，如式(4)模式在參數應輸入的項目，分別為水庫全年總磷輸入量(M)、全年水庫入流體積(Q_{in})、全年水庫出流體積(Q_{out})、水庫表面積(A)，輸入以上參數後即可推估出總磷濃度(P)、磷損失的比例(R_p)、水力負荷(q_s)等項目。此模式可透過調整總磷沉降率(v)，進行模式之參數率定驗證工作，參考國內外對於總磷沉降率之範圍值，國外文獻建議之範圍介於 7.0~16.0m/yr，而台灣所使用之總磷沉降率皆略大於文獻所建議值，例如：翡翠水庫案例使用 25.0m/yr，鯉魚潭水庫案例則使用 20.0m/yr (Vollenweider, 1975; Chapra *et al.*, 1975; 佳偉等人, 2014)，因此本研究界定總磷沉降率之調整範圍落在 7.0~25.0m/yr，其水庫模式各項參數設定詳見表 1。

$$\frac{\Delta PV}{\Delta t} = M - (P \times Q_{out}) - (M \times R_p) = 0 \quad (1)$$

$$P = \frac{M \times (1 - R_p)}{Q_{out}} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{v}{v + q_s} \quad (3)$$

$$q_s = \frac{Q_{in}}{A} \quad (4)$$

2.4 簡易涵容能力分析方法

涵容能力指在不妨害到水體正常用途下，水體可承受之污染量，若水體中的污染量超過涵容能力時，即代表水體無法透過自淨作用將水質恢復至原本的狀

態，此時水體的使用價值與使用用途將受到影響，為此保護水體水質成為目前重要的議題之一，須依據不同水體狀態提出相對應的管制策略。像是當水體已呈現優養狀態，須提出污染減量之策略，若水體尚未呈現優養狀態，則代表水體水質具有污染承載能力，可透過涵容能力分析瞭解該水體對污染量的負荷程度。水體涵容能力在不同的環境情境條件下可能有所差異，本研究以簡易涵容能力分析方法，探討水庫水體水質在平均狀態下，對於污染尚可承載之能力與總量。

根據不同水體狀態所提出的管制策略可稱為總量管制，是以環境承載力作為基礎，確保環境資源的開發利用能在環境可承受的範圍內進行，降低不當的開發行為所導致的環境問題與災害為主(李明昌, 2006)。水體污染主要是受到事業單位所產生之污水，其污染物排放總量超過水體所承受負荷量時，水體用途將受到影響，為此推行總量管制時，應先行評估水體的污染承載能力，以擬定有效的污染削減策略，管制流域內各污染源的排放量，以便維護水體的正常用途(陳凱玄, 2015)。

台灣目前主要使用卡爾森營養狀態指標(CTSI)判斷水庫水質優養程度(傅薇, 2016)，CTSI 考量參數為水體的透明度(SD)、葉綠素 a (Chl- a)及總磷(TP)，其中透明度及葉綠素 a 會受到氣候條件的不同而變化，則總磷濃度通常會與集水區內各項人為活動所產生之污染相關，且如前述總磷為影響水庫優養化之關鍵水質項目，基於其具有客觀性、高相關性及容易監測等因素，本研究採用卡爾森單一總磷指標，評估水庫總磷濃度及其所呈現之優養化程度。依據環保署全國水質監測網提及，就卡爾森單一總磷指標而言，當總磷濃度小於 12 $\mu g/L$ 為貧養，若總磷濃度介於 12~24 $\mu g/L$ 為普養，但總磷濃度超過 24 $\mu g/L$ ，水體則會呈現優養化狀態。

本研究將應用水庫水質模式 Vollenweider 模式，

分析日月潭水庫水質現況其及水體涵容能力，並使用卡爾森單一總磷指標作為判斷依據，將水庫水質模式所模擬出的總磷濃度作為現況，分析目前水庫水體水質狀態，後續再評估若以甲類水體水質標準 (TP<20μg/L) 及水體優養化 (TP>24μg/L) 作為管制值，日月潭水庫尚有多少的涵容空間可承載入庫之總磷污染量，未來即可依此分析進行水庫水體總量管制。

三、結果與討論

3.1 日月潭水庫污染源評估

本研究區域為日月潭水庫，水庫周邊污染源可分為點源污染及非點源污染，當地點源污染大部分來自於生活污水、遊憩污水及外部污染，生活污水為當地民眾所產生的家庭污水為主，而遊憩污水區分為遊憩住宿污水及遊憩非住宿污水分別推估其污染量，外部污染為來自於新、舊武界隧道引水之水源中挾帶的污染量；非點源污染推估方式，透過集水區土地使用型態及各項不同土地使用型態所對應之非點源污染單位面積負荷表(詳見表 2)進行估算。評估集水區污染源時，須考量當地設置兩座污水處理廠的污水處理效益及九成的污水接管率，當地民眾之生活污水及一部分的觀光遊憩所產生之住宿污水，會透過管線收集至污水廠處理後來放流至水庫，而少部分的生活污水、遊憩住宿污水及遊憩非住宿污水為直接排放至水庫，依據各項污染源項目推估集水區範圍實際進入水庫之總磷污染總量。

表 2 各項土地使用型態之非點源污染單位面積負荷表

(單位：kg/ha/yr)

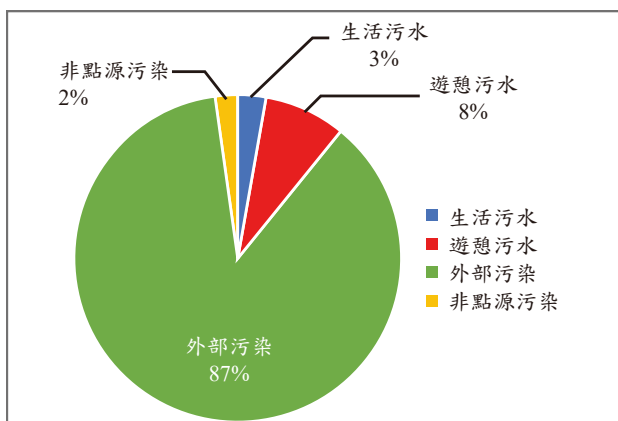
項目	土地利用類別	BOD	TP	TN	SS
1	水田	6.0	2.0	6.0	10.0
2	旱作	18.0	4.0	26.0	120.0
3	草地	5.5	1.0	4.0	60.0
4	社區	50.0	5.0	8.5	500.0
5	林地	5.0	0.2	3.0	85.0
6	遊憩用地	20.0	4.0	6.0	200.0
7	裸露地	600.0	15.0	36.0	7400.0
8	河川	0.0	0.1	1.0	0.0

(參考文獻：桃園縣政府，2012)

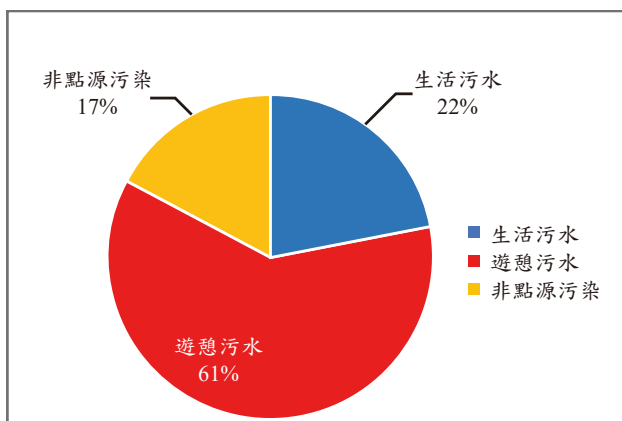
本研究推估水庫總磷污染總量為 10,948.54kg/yr，詳如表 3 及圖 5(a) 所示，進到庫區比例最高者為外部污染約佔總污染量的九成，分析可能原因為水庫每日需引取大量的水源以供水庫的用水需求，通常所引入的水源中挾有污染物一起進入水體。若扣除掉外部污染量，其總磷污染比例最高者為遊憩污水，約佔總污染量的六成，如圖 5(b) 所示，主要原因為研究區域為遊憩景點，當地常年皆有大批民眾前往觀光旅遊，觀光人潮產生的總磷污染量直接對於水庫水質造成影響。

表 3 日月潭水庫地區之總磷污染量推估表

類別	項目	總磷污染(kg/yr)	比例(%)
點源污染	生活污水	311.75	2.85
	遊憩污水	860.77	7.86
	外部污染	9542.98	87.16
非點源污染	非點源污染	233.04	2.13
合計		10,948.54	100.00



(a) 污染源比例圖



(b) 污染源比例圖(扣除外部污染)

圖 5 日月潭水庫地區之總磷污染源比例圖

3.2 日月潭水庫水質變化趨勢

環保署於日月潭水庫庫區設有五處水質監測站，監測站位置分布圖如圖 6 所示，蒐集並彙整近十年的日月潭水庫水質資料，利用這五處的水質監測資料分析目前水庫水質情況。本研究使用卡爾森營養狀態指標評估日月潭水庫優養程度，目前水庫呈現貧養至普養狀態，詳如表 4、圖 7 所示；若以卡爾森單一總磷指標，日月潭水庫平均總磷濃度落在 8~14 $\mu\text{g/L}$ ，為貧養至普養狀態，但從 2010 年開始水庫總磷濃度有逐漸上升，於 2016 年時總磷濃度為 12.71 $\mu\text{g/L}$ 屬於普養狀態，詳如表 5、圖 8 所示。

就整體而言，近十年的水質監測資料顯示水庫水質仍維持在貧養狀態，但從 2015 年起水庫水質稍有變差之情形，為能瞭解目前水庫水質狀態，彙整 2015 至 2017 年的水庫水質監測資料，得知水庫平均總磷濃度約為 11.78 $\mu\text{g/L}$ ，水體呈現貧養狀態。由表 5 可以得知

水庫引水口附近之日月潭水庫三測站的近十年間的平均總磷濃度普遍高於其餘四個測站。

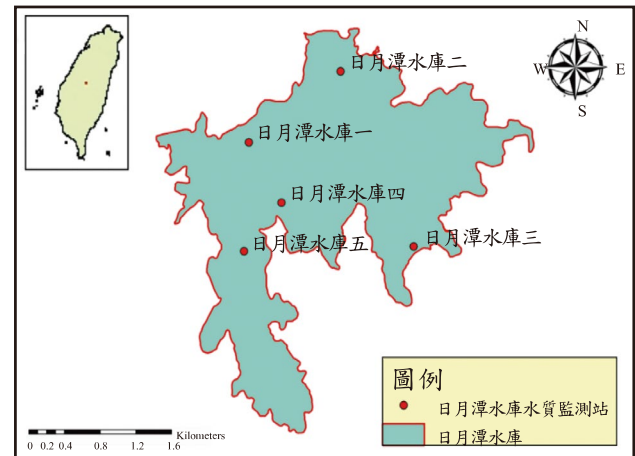


圖 6 日月潭水庫之水質監測站位置分布圖

表 4 日月潭水庫各測站之每年平均卡爾森營養狀態指標(CTSI)

測站 年份	日月潭 水庫一	日月潭 水庫二	日月潭 水庫三	日月潭 水庫四	日月潭 水庫五	平均值
2008	37.65	38.85	40.75	36.80	36.78	38.17
2009	34.90	36.50	36.24	36.10	34.54	35.66
2010	33.95	33.98	34.38	32.65	33.85	33.76
2011	38.60	38.25	38.83	37.80	38.45	38.39
2012	33.98	34.63	36.35	37.03	36.85	35.77
2013	40.68	38.70	39.90	40.25	37.83	39.47
2014	37.50	38.50	39.00	37.75	37.25	38.00
2015	41.25	40.25	40.50	40.00	38.50	40.10
2016	39.25	39.75	38.25	37.50	37.75	38.50
2017	40.46	40.36	41.27	40.73	39.91	40.55
平均值	37.82	37.98	38.55	37.66	37.17	-

表 5 日月潭水庫各測站之每年平均總磷濃度

測站 年份	日月潭 水庫一	日月潭 水庫二	日月潭 水庫三	日月潭 水庫四	日月潭 水庫五	平均值
單位	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$
2008	5.75	7.25	9.25	5.25	7.13	6.93
2009	5.28	6.45	5.60	6.04	5.37	5.75
2010	4.78	6.25	5.35	5.03	5.89	5.46
2011	6.88	6.70	6.95	5.03	6.54	6.42
2012	7.33	7.00	8.75	6.75	7.88	7.54
2013	10.00	8.25	9.25	9.00	9.06	9.11
2014	11.00	10.75	12.25	8.25	8.88	10.23
2015	13.75	10.75	9.75	10.50	10.06	10.96
2016	14.25	14.25	13.25	11.25	10.56	12.71
2017	12.00	11.00	13.00	12.00	11.00	11.80
平均值	9.10	8.87	9.34	7.91	8.24	-

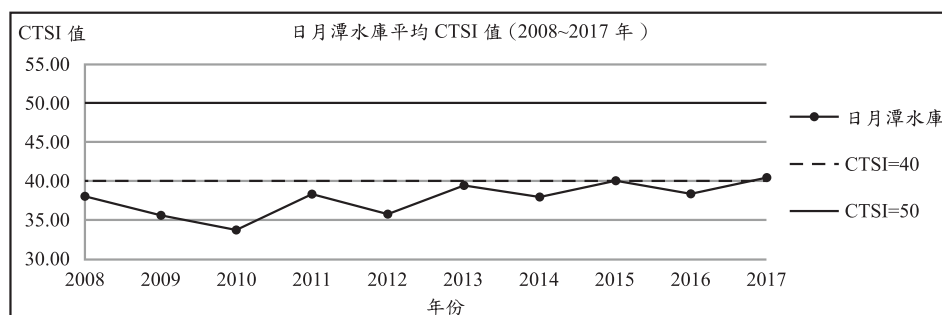


圖 7 日月潭水庫平均卡爾森指標(CTSI)值(2008~2017 年)

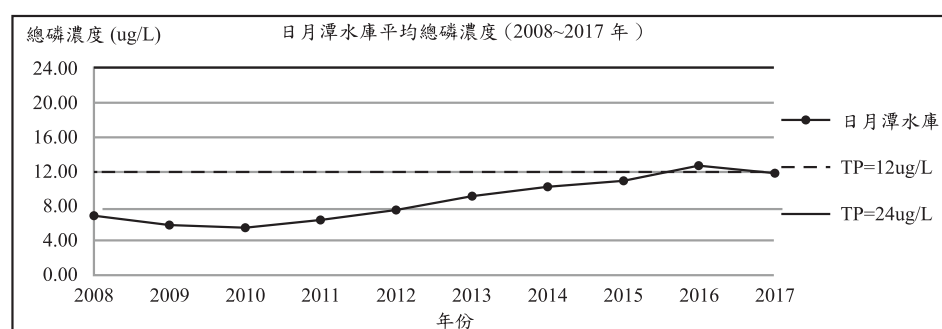


圖 8 日月潭水庫平均總磷(TP)濃度(2008~2017 年)

3.3 水庫水質模式檢定結果

本研究為確保所推估之進入水庫的總磷污染量是否符合現況條件，因此將透過水庫水質模式進行水庫水質模擬，於設定水庫水質模式將模式所需之基本資料並調整參數後，將已推估進入日月潭水庫之總磷污染負荷量 10,948.54kg/yr 輸入水庫模式，即可反推出日月潭水庫總磷濃度為 12.01 $\mu\text{g/L}$ ，為確保模式模擬結果具有可靠性需進行模式檢定，由於水質部分的實測數據較少且不具有連續性，故採用絕對百分比誤差(mean absolute percentage error, MAPE)判定模擬誤差之大小，其值若小於 50%為合理值(Lewis, 1982)，模式檢定結果之 MAPE 值為 1.95%，其值落在合理範圍，代表此模式結果是具有可信度，而水庫水質模式檢定結果如表 6 所示。

表 6 水庫水質模式 Vollenweider Model 檢定結果

項目 \ 年	2015	2016	2017	近三年平均 (2015~2017)
實際總磷濃度 ($\mu\text{g/L}$)	11.00	12.55	11.78	11.78
模擬總磷濃度 ($\mu\text{g/L}$)	12.22	12.93	10.58	12.01
MAPE (%)	11.09	3.03	10.19	1.95

3.4 日月潭水庫簡易涵容能力分析結果

本研究規劃之涵容能力及總量管制評估架構圖，如圖 9 所示，根據水庫水質控制目標，例如以甲類水體水質標準或優養化濃度門檻值為水庫水質保護之控制目標，當水體不超過控制目標的情況下，則水庫水質現況與控制目標水質之距離，則代表水庫水體水質之水體涵容能力，可依此再反推其可再容受之入庫污染量，但若水庫水質已超過控制目標，則應提出污染削減對策，以改善水庫水質狀態。無論是水庫尚具涵容空間或是已需進行污染削減策略，均須針對入庫污染總量進行總量管制，亦即應考量區域整體性污染總量對水庫水質之影響，非僅是考量單一污染源符合放流水標準而已。

本研究應用水質模式所模擬之日月潭水庫平均的總磷濃度約為 12.01 $\mu\text{g/L}$ ，與實際水質監測現況相符，依據卡爾森單一總磷指標，判斷日月潭水庫水質屬於普養狀態，也就是尚具額外之污染乘載能力，依此進行水庫之簡易涵容能力分析，探討在不同的管制標準值下，日月潭水庫就目前狀態尚可承受多少的入庫污染量。由研究分析結果可知，若水庫水質在不超過甲類水體水質標準的情況下，尚可再承受約 7,300kg/yr 之入庫總磷污染量；而若以卡爾森單一總磷指標水庫優養化

門檻值為水質控制目標，則日月潭水庫尚可再承受約 10,900kg/yr 之入庫總磷污染量，而本研究水庫簡易涵容能力分析結果詳見表 7 所示，水庫水質保護必須依照此結果研提總量管制策略。

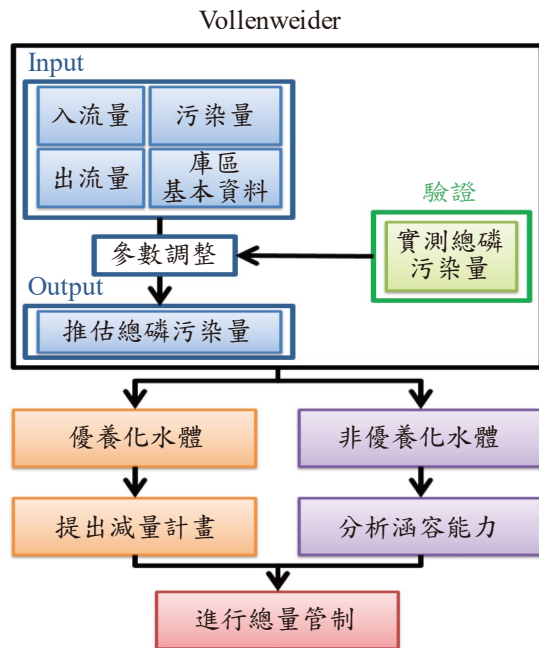


圖 9 涵容能力分析與總量管制評估架構及流程圖

表 7 日月潭水庫涵容能力分析結果總表

項目	總磷濃度 (μg/L)	總磷污染量(kg/yr)	尚可再容納之入庫總磷污染量 (kg/yr)
水庫水質現況	12.01	10,948.54	-
甲類水體水質標準	20.00	18,225.31	7,276.77
卡爾森單一總磷指標水庫優養化門檻值	24.00	21,870.37	10,921.83

四、結論與建議

1. 本研究結果顯示，日月潭地區周邊污染源主要可分為四大項，分別為生活污水、遊憩污水、外部污染及非點源污染，則實際進入水庫的總磷污染量為 10,948.54kg/yr，其中污染源比例最高者為外部污染，約佔整體污染量的 87%。若扣除掉外部污染量，則污染源比例最高者為遊憩污水，約佔整體污染量的 61%。
2. 本研究結果顯示，近十年的日月潭水庫水體營養

狀態呈現貧養狀態(水庫平均 CTSI<40)，若依據卡爾森單一總磷指標而言，水庫平均總磷濃度約落在 8~14μg/L，屬於貧養至普養狀態。近三年來日月潭水庫之總磷濃度有明顯上升之趨勢，表示水庫水質有開始稍微變差之情況。

3. 本研究結果顯示，將日月潭地區之總磷污染量輸入模式後，水庫總磷濃度之模擬值為 12.01μg/L，與實際值的水庫總磷濃度 11.78μg/L 相比，其 MAPE 值為 1.95%，落於合理範圍，代表此模式是具有可信度，可依此模式進行後續的情境分析。
4. 本研究結果顯示，日月潭水庫目前平均之水體水質尚未優養化，且距離甲類水體水質標準(TP<20 μg/L)約還有 7,300kg/yr 的污染承載能力，距離水庫優養狀態(TP>24μg/L)尚有約 10,900kg/yr 的污染承載能力。

參考文獻

1. Chapra, S. C. (1975). "Comment on "An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes" by W. B. Kirchner and P. J. Dillon, Water Resour. Res., 11, 1033-1034, 1975.
2. Lewis, C.D. (1982), "Industrial and Business Forecasting Methods: A practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting," Butterworth Scientific, London.
3. Tapp, J.S. (1978). "Eutrophication Analysis with Simple and Complex Models," Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 50, No. 3, pp.484-492, Mar, 1978.
4. Vollenweider, R. A. (1975). "Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology," Schweiz. Z. Hydrol., 37,53-84.
5. Vollenweider, R.A. (1968). "Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication." Tech. Report No. DAS/CSI/68.27.
6. 王佳瑋、陳起鳳、林鎮洋，「翡翠水庫蓄水範圍保護帶設置對水庫水質改善影響」，中華水土保持學報，45(3): 207-215 (2014)。
7. 行政院環境保護署，「民國 106 年環境水質監測年報」，2018。
8. 李明昌，「環境影響評估之總量管制應用研究」，碩士論文，國立中興大學環境工程學系，2006。
9. 林志勇，「永續環境管理之污染源管制制度研究」，博士論文，國立中央大學環境工程所在職專班，2007。

10. 桃園縣政府，「鳶山堰水庫蓄水範圍及鄰近集水區水質保護設施規劃」，2012。
11. 陳凱玄，「景美溪及基隆河之水污染總量管制策略研究」，碩士論文，明志科技大學環境與安全衛生工程系環境工程碩士班，2015。
12. 傅薇，「Vollenweider 模式與營養狀態指標評估水庫水質之研究」，碩士論文，淡江大學水資源及環境工程學系，2016。
13. 楊國輝，「日月潭周遭污水廠處理效能對水體水質之可能影響」，碩士論文，國立中興大學環境工程學系，2013。
14. 蔡福水，「台灣水庫之優養化指標評析」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所，2007。

收稿日期：民國 107 年 10 月 21 日

修正日期：民國 107 年 12 月 13 日

接受日期：民國 107 年 12 月 21 日