

八掌河流域主要水庫水質及污染源分析之研究

RESEARCH ON WATER QUALITY AND POLLUTION SOURCE ANALYSIS OF MAJOR RESERVOIRS
IN THE BAZHANG RIVER BASIN

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
研究生

吳忠達
Zhong-Da Wu

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
研究生

張嘉玲*
Chia-Ling Chang

摘要

本研究區域為八掌河流域與其流域內的仁義潭水庫及蘭潭水庫，八掌河流域主要供應嘉義地區農業、工業及民生用水，而其兩座水庫在其中占據了十分重要的角色。本研究結合都市暴雨逕流管理模式(Storm Water Model, SWMM)進行集水區水質流量模擬，及零維總磷質量平衡模式(Vollenweider Model)進行水庫水質模擬，主要目的為探討及分析蘭潭及仁義潭水庫集水區內污染源及污染熱區。由研究結果可知仁義潭水庫之水源有 91 %引自竹山堰，而蘭潭水庫之水原有約 83 %引自仁義潭水庫，此兩座離槽水庫其污染與竹山堰集水區息息相關，因此，竹山堰集水區管理工作更顯重要；由污染熱區分析結果可知，竹山堰集水區最下游子流域(S1)之單位面積總磷污染量最高(約有 177 kg/yr/km²)，為主要污染熱區，因此，若要提升水庫水質，可優先進行此區域之污染削減，且應加強非點源污染控制。

關鍵詞：污染削減、水庫水質、集水區管理。

* 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

RESEARCH ON WATER QUALITY AND POLLUTION SOURCE ANALYSIS OF MAJOR RESERVOIRS IN THE BAZHANG RIVER BASIN

Zhong-Da Wu

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 research area is the Renyitan Reservoir and the Lantan Reservoir in the Bazhang River Basin. The Bazhang River Basin mainly supplies water for agriculture, industry and people's livelihood in Chiayi. This study combines the urban storm water runoff management model (Storm Water Model, SWMM) and the zero-dimensional total phosphorus mass balance model (Vollenweider Model) to simulate the watershed responses and the reservoir water quality. The purpose of this study is to explore the pollution sources of the two off-site reservoirs and to analyze pollution hotspots in the watershed. The research results show that most of the pollution entering the reservoirs is from the Zhushan Weir Watershed. The main pollution hotspot is in the subbasin S1. In order to protect the reservoir water quality, it is important to improve the management strategies in the Zhushan Weir Watershed, particularly the pollution control in the pollution hotspots.

Keywords: Pollution reduction, Reservoir water quality, Watershed management.

一、前言

台灣四面環海，年降雨量可高達 2,500 mm，屬於海洋島嶼型之氣候特性，由於台灣具有降雨時空分布不均之特性，使台灣地區的豐枯水季現象顯著，短延時的強降雨易將地表的沉積物沖刷入河川當中，因此水庫容易產生淤積及優養化之現象，根據環保署的環境水質監測年報，台灣許多水庫皆存在優養化的問題，使得水源問題逐漸浮上檯面。水庫水質常會受到氣候變遷或是集水區範圍人為活動影響，造成水質波動幅度甚大，嚴重時甚至導致水體呈現優養情形。氣候變遷的影響是指當極端降雨事件頻率增加或是豐枯水季現象更為顯著，會於短時間內帶來豐沛的降雨量進而形成地表逕流量，挾帶著土壤中的污染物進入水體，造成水庫產生泥砂淤積且原水濁度過高等問題；人為活動則是與集水區的土地使用型態有密切關係，像是農業用地、人為用地產生之污染量就會稍高於森林用地(Hsu and Chen, 2002; De Wit and Stankiewicz, 2006; Dixon and Brook, 2007; Kay *et al.*, 2009; Dunn *et al.*, 2012; Ahmadi *et al.*, 2014; Molina-Navarro *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2015)。八掌溪流域供給嘉義地區用水，其主要重點水庫為蘭潭水庫及仁義潭水庫，根據十一年來的監測資料可以得知，兩座水庫都有著卡爾森指數略微上升的傾向，為了保障嘉義地區用水安全，本研究分析八掌溪流域之污染來源與污染熱區，並為後續之策略提供參考指引，以達到水資源永續發展之目的。

二、研究區域

2-1 環境基本資料

本研究區域為八掌溪流域及蘭潭、仁義潭水庫，八掌溪流域位於台南市與嘉義縣之間為縣界溪及嘉義縣與嘉義市之縣市界溪，源頭於嘉義縣竹崎鄉奮起湖，是中央管河川。全長 80.86 公里，流域面積 474.74 平方公里，流經區域有嘉義縣義竹鄉、布袋鎮、鹿草鄉、水上鄉、中埔鄉與番路鄉；嘉義市西區、東區；臺南市北門區、學甲區、鹽水區、後壁區、白河區，出海口位於嘉義縣布袋鎮虎尾寮，有著赤蘭溪、頭前溪等支流(經濟部水利署，2014)。

仁義潭水庫位於嘉義縣番路鄉，為一離槽水庫，自八掌溪竹山攔河堰取水，經由沉砂池導入仁義潭水庫，集水區面積為 3.66 平方公里，壩頂標高為 1,535

公尺、寬 9 公尺。水庫滿水面積為 2.32 平方公里，竹山堰集水區總面積為 8,850.76 公頃，有效蓄流量為 2,506 萬立方公尺。仁義潭水庫為嘉義地區重要之蓄水水庫之一，其水源起源於嘉義縣竹崎鄉奮起湖，現為臺灣自來水股份有限公司第五區管理處所管轄。仁義潭水庫於民國 68 年興建至民國 76 年完工，其主要之功能效益為公共、工業及觀光用水，而仁義潭水庫為蘭潭水庫及自來水公司公園淨水場之水源來源，前者蘭潭水庫位於嘉義市東區鹿寮里，於民國 33 年興建完成；後者公園淨水場則是於民國 76 年完工通水。

蘭潭水庫位於嘉義市東區鹿寮里，為一離槽水庫，取水自仁義潭水庫，經由配水工長約 3.8 公里之明、暗渠及隧道等混合組成之導水路進入蘭潭水庫。集水區面積為 1.97 平方公里，水庫由東至西長達 1 公里，南北寬度約為 2 公里，壩頂標高為 77.30 公尺，最大壩身高度 31 公尺，壩頂長度 546 公尺、寬 8 公尺，滿水位標高 75.3 公尺，蘭潭之滿水面積為 80.0 公頃(0.8 平方公里)，有效蓄流量為 925.7 萬立方公尺，為嘉義地區重要之蓄水水庫之一。其水源與仁義潭水庫相同，起源於嘉義縣竹崎鄉奮起湖，現為臺灣自來水股份有限公司第五區管理處所管轄。若水庫水質遭受污染，可能造成嘉義地區供水之影響，因此可透過探討兩座水庫之水源狀況，以利於往後可針對此地區之污染狀況進行改善及規劃，仁義潭、蘭潭水庫及集水區之位置分布圖如圖 1 所示。

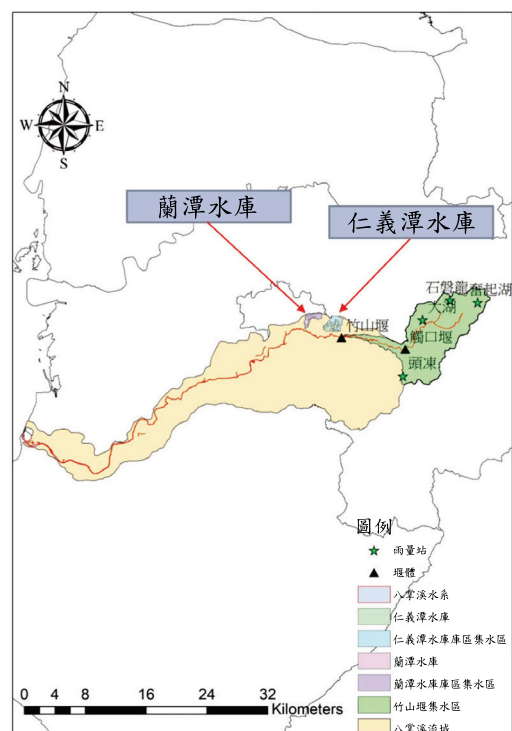


圖 1 研究區域圖

2-2 地文資料

本研究針對蘭潭水庫、仁義潭水庫及竹山堰集水區之土地利用情形進行統計及分析，可以透過計算此區域之土地利用情形，初步了解污染分布的狀況，土地利用之圖層是源自於國土測繪中心之嘉義縣市土地利用圖層，先以公開資料之全台集水區圖層切割出蘭潭水庫、仁義潭水庫、竹山堰及其集水區之圖層，而後將切割後之土地利用圖層與集水區圖層進行套疊分析，並且通過套疊出來的數據進行統計分析，三集水區之土地利用分布表如表 1 所示。

表 1 土地利用統計表

竹山堰集水區	面積(ha)	比例(%)
農業使用用地	2038.40	23.48
森林使用用地	5863.52	67.55
水利使用用地	252.69	2.91
人為使用用地	206.19	2.38
荒地及裸露地	319.87	3.68
總和	8680.67	100
仁義潭水庫庫區	面積(ha)	比例(%)
農業使用用地	26.29	7.18
森林使用用地	86.72	23.67
水利使用用地	224.80	61.37
人為使用用地	28.51	7.78
荒地及裸露地	0	0
總和	366.31	100.00
蘭潭水庫庫區	面積(ha)	比例(%)
農業使用用地	14.79	7.48
森林使用用地	91.05	46.07
水利使用用地	74.12	37.51
人為使用用地	17.65	8.93
荒地及裸露地	0.00	0.00
總和	197.61	100.00

(資料來源：內政部國土測繪中心)

蘭潭水庫及仁義潭水庫之周邊包含了都市計畫區的風景特定區，其庫區集水區扣除蓄水範圍外，其餘區域主要以果園、檳榔以及闊葉林為主，其中最大宗之土地使用類別為森林使用用地，其次為水利使用用地。而此地區之人為用地大多分布在庫區北部、南部邊緣，為居民與觀光產業，在山坡地之開發包含了果園與檳榔園。蘭潭水庫與仁義潭水庫之間有規劃之建築區，嘉義大學亦坐落於此區位，為鄰近蘭潭水庫集水區人口集中的區域，位於蘭潭右方與八掌溪相鄰，社區的排水經由嘉義大學畜牧場旁野溪或其他排水溝等，將水流排入八掌溪主流中，對水庫的影響較小。

2-3 水庫水質資料

本研究蒐集環保署水質監測網之資料，採用測站為蘭潭水庫測站一至測站三與仁義潭水庫測站一至測站四之各項水質資料並計算平均值，時間範圍為 2009 年至 2019 年共十一年，採用之水質項目包含卡爾森指數、葉綠素 a、透明度及總磷濃度，而由水質統計資料可知，蘭潭水庫與仁義潭水庫之卡爾森指數近十一年之平均值約為 42.45 與 45.43，目前兩座水庫雖是屬於普養狀態，但由數據可發現，至 2009 年至 2019 年間污染有增長的趨勢。卡爾森指數之三項因素為葉綠素 a、透明度及總磷濃度，因此亦針對此三數據進行分析便得出水質狀態，水質資料如表 2 所示。總磷濃度與優養化有著直接關係，總磷是水中藻類生長所需的必要因素之一，因此如果讓總磷濃度持續上升，那麼將會爆發水域優養化的危機；與此同時，當水中藻類大量增生時，葉綠素 a 也會持續攀升，而水中的透明度也會進一步下降，因此總磷濃度直接牽掛著卡爾森指數的起伏。

表 2 水庫水質資料彙整表：(a)仁義潭水庫

年份	項目	總磷濃度 mg/L	判定值	透明度 m	判定值	葉綠素 a µg/L	判定值	卡爾森指數	判定值
2009		0.010	貧養	2.06	普養	2.48	貧養	42.05	普養
2010		0.013	普養	2.07	普養	1.46	貧養	41.01	普養
2011		0.017	普養	1.51	優養	1.41	貧養	44.51	普養
2012		0.013	普養	1.82	優養	2.71	普養	43.84	普養
2013		0.017	普養	1.47	優養	3.01	普養	46.99	普養
2014		0.020	普養	1.44	優養	5.78	普養	49.31	普養
2015		0.025	優養	1.61	優養	3.74	普養	47.81	普養
2016		0.019	普養	2.07	普養	2.49	貧養	43.81	普養
2017		0.018	普養	1.65	優養	2.76	普養	45.98	普養
2018		0.020	普養	1.63	優養	6.09	普養	48.98	普養
2019		0.014	普養	2.25	普養	7.21	優養	46.69	普養
平均值		0.017	普養	1.73	優養	3.19	普養	45.43	普養

(資料來源：行政院環境保護署水質監測網)

表 2 水庫水質資料彙整表：(b)蘭潭水庫

年份 \ 項目	總磷濃度 mg/L	判定值	透明度 m	判定值	葉綠素 a µg/L	判定值	卡爾森指數 -	判定值
2009	0.011	貧養	2.84	普養	1.80	貧養	39.30	貧養
2010	0.009	貧養	2.71	普養	1.47	貧養	39.06	貧養
2011	0.012	貧養	3.27	普養	1.48	貧養	39.06	貧養
2012	0.010	貧養	3.75	普養	2.47	貧養	40.16	普養
2013	0.012	貧養	3.11	普養	2.37	貧養	40.51	普養
2014	0.010	貧養	3.05	普養	2.27	貧養	41.29	普養
2015	0.013	普養	2.39	普養	3.00	普養	44.00	普養
2016	0.013	普養	2.42	普養	3.31	普養	43.99	普養
2017	0.015	普養	2.14	普養	4.68	普養	46.96	普養
2018	0.015	普養	2.63	普養	6.59	普養	46.00	普養
2019	0.014	普養	2.25	普養	7.21	優養	46.69	普養
平均值	0.012	貧養	2.78	普養	3.33	普養	42.45	普養

(資料來源：行政院環境保護署水質監測網)

三、研究方法

3-1 研究流程

本研究採用 SWMM 模式及 Vollenweider Model 作為集水區流量水質模擬及水庫水質模擬之工具進行研究，為了確保以上數據之可信度，需先進行模式率定及驗證工作，時間皆以 2014 年到 2016 年為率定，並以 2017 年到 2019 年為驗證。竹山堰集水區流量以觸口堰測站檢定，集水區水質以竹山堰測站檢定，仁義潭水庫水質以仁義潭水庫四測站平均檢定；蘭潭水庫水庫以蘭潭水庫三測站平均檢定。本研究完成模式率定驗證工作，即確保模式模擬結果具可信度後，方進行污染源及污染熱區分析。

3-2 集水區及水庫模式應用

暴雨逕流管理模式 (Storm Water Management model, SWMM) 為美國環保署所開發，第一版 SWMM 始於 1971 年，廣泛使用於都市地區，亦可使用於非都市地區，可進行水文、水力和水質模擬，本研究用於模擬竹山堰集水區流量及水質。SWMM 模式屬於動態的模擬降雨逕流的模式，可模擬區域的降雨事件或是長期的降雨量所衍生出的逕流，主要用來評估集水區集流點匯流之水質流量反應 (United States Environmental Protection Agency, 2015)。SWMM 模式在水文部分，由降雨(或溶雪)開始經過非線性蓄水模型的演算，將溢流之流量變成地表逕流，中間過程經過蒸發及入滲，入滲部分即進入地下水，接著會進入

至匯流點，流進河道排出水流；而水質部分，由晴天(未降雨時間)地表開始累積污染物，透過降雨產生的地表逕流沖刷後，伴隨著水流進入匯流點及河道排出，依據不同土地利用型態產生的非點源污染進行分析，土地利用模組依據晴天累積(Buildup)、逕流沖刷(Washoff)及街道清掃(street cleaning)模擬非點源污染量(行政院環境保護署，2011)。

Vollenweider 模式為一零維質量平衡模式，這個模式假設湖泊水庫內磷的時間變化量等於進到水體的量扣除損失量，損失量考慮沉降量與隨出流水流輸出量。進到水庫的磷假設為完全混和，出流磷的濃度與水庫中磷的濃度相同，經沉降損失的磷量與水庫磷濃度成比例關係，不考慮水文以及磷負荷的季節變化(王佳偉，2013)。其視水體為不隨時間與空間變化的黑盒(black box)，之後進行湖泊或水庫等水體優養化與水力特性(如水深、水表面積)的分析，Vollenweider 模式可用於模擬蘭潭水庫及仁義潭水庫庫區之水質，本研究之參數如表 3 所示。

表 3 Vollenweider 模式參數表

參數名稱	代號	單位	參數來源
全年總磷輸入量	M	g/yr	進入水庫之總磷負荷量
模擬輸出	P	mg/L	$M*(1-R_p)/Q_{out}$
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
總磷損失比例	R_p	-	$v/v+q_s$
沉降系數	v	m/yr	建議範圍 7.2~2.4
水力負荷	q_s	m/yr	進到水庫的流量/水庫表面(Q_{in}/A)
水庫表面積	A	M^2	查詢水庫水情資料

3-3 污染源分析方法

本研究之研究區域為八掌溪流域與其主要水庫，其兩座水庫皆屬於離槽式水庫，因此水源多由它處引入至庫區，取水處水質狀況對庫區之水質有較大之影響。本研究針對蘭潭及仁義潭水庫庫區周邊與竹山堰集水區之污染源進行分析，並將水庫與竹山堰集水區之污染源分成三項，包含水庫庫區集水區之點源污染、非點源污染及取水污染，以上加總合即為蘭潭與仁義潭水庫之所有污染量；竹山堰集水區污染則為集水區點源污染與非點源污染的總和。所謂點源污染乃是指污染物來自一固定地點排放，如工廠或都市排水溝之污水排放；非點源污染則是指污染物成線、面排放，如森林或是農田等等。

蘭潭水庫主要水源是仁義潭取水，自仁義潭取水之污染源占了絕大部分的比重，庫區周邊之污染源僅占一小部分；仁義潭水庫從竹山堰取水。庫區周邊包含點源污染及非點源污染，前者主要是生活污水，後者則來自其庫區集水區內的林地、農地。由於離槽水庫是由他處取水，取水處之污染量將通過管道直接進

入離槽水庫之中，因此取水處進入離槽水庫之污染視為點源污染，污染計算方法如表 4 所示。此外，各參數—每人每日污染負荷量為 2 g/人/天(經濟部水利署水資源局，2001)，人口數依據內政部戶政司之人口統計資料，非點源污染各土地利用參數(行政院環境保護署，2017)。

3-4 模式檢定方法

本研究採用決定係數(r^2)判定流量模擬誤差之大小，若值大於 0.5 即為合理值(Wahyu, 2010)，計算如(式 1)；因水質部分實測數據少且不具連續性，故採平均百分比誤差(MAPE)判定模擬誤差大小，其值若小於 50% 為合理值(Lewis, 1982)，計算如(式 2)，率定驗證資料建議至少有各五筆資料，以上皆為建議數值而非強制規範模式，適配判定指標如表 5。竹山堰集水區之流量測站採觸口堰測站，水質測站採五虎寮橋測站；仁義潭水庫水質測站採仁義潭水庫四測站平均；蘭潭水庫水質測站採蘭潭水庫三測站平均。

$$r^2 = \left[\frac{\sum(\text{實際值} - \text{平均實際值})(\text{模擬值} - \text{平均模擬值})}{\sqrt{\sum(\text{實際值} - \text{平均實際值})^2 \sum(\text{模擬值} - \text{平均模擬值})^2}} \right]^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{MAPE} = \left| \frac{\text{實際值} - \text{預測值}}{\text{實際值}} \right| \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

表 4 水庫污染計算方法及使用參數

污染源類別	區域	計算方式	仁義潭水庫參數	蘭潭水庫參數
點源污染	水庫庫區	生活污水產生之污染負荷量=人口數×每人每日污染負荷量×流達率	1.人口數：381 人 2.每人每日污染負荷量：2 g/人/天 3.流達率：0.4	1.人口數：278 人 2.每人每日污染負荷量：2 g/人/天 3.流達率：0.3
	上游集水區	以 SWMM 模式模擬	上游集水區人口數：6,027 人 上游集水區流達率：已納入 SWMM 模式考量	蘭潭水庫引水自仁義潭水庫為點源污染，此引水產生之污染負荷量為仁義潭水庫污染濃度乘蘭潭水庫進流量。
非點源污染	水庫庫區	非點源污染之污染負荷量=各土地利用面積×單位面積輸出係數×流達率	1.各地土地利用面積 2.單位面積輸出係數： 農業使用地為 4 kg/ha/yr 森林使用地為 0.2 kg/ha/yr 人為使用地為 5 kg/ha/yr 裸露地及荒地為 15 kg/ha/yr 3.水庫庫區流達率：0.4	1.各地土地利用面積 2.單位面積輸出係數： 農業使用地為 4 kg/ha/yr 森林使用地為 0.2 kg/ha/yr 人為使用地為 5 kg/ha/yr 裸露地及荒地為 15 kg/ha/yr 3.水庫庫區流達率：0.3
	上游集水區	以 SWMM 模式模擬	上游集水區流達率：已納入 SWMM 模式考量	-

表 5 模式檢定評鑑指標

指標	接受值	預測標準
平均百分比誤差(MAPE)	<10 %	高精確度
	10 %~20 %	良好
	20 %~50 %	合理
	>50 %	不正確
決定係數(r^2)	>0.9	高精確度
	0.7~0.9	良好
	0.5~0.7	合理
	<0.5	不正確

四、結果與討論

4-1 模式率定驗證結果

4-1-1 集水區模式檢定

仁義潭水庫與蘭潭水庫有著共同的源頭，為八掌溪流流域上游的奮起湖，仁義潭水庫於八掌溪流流域上游之竹山堰取水，SWMM 模式流量模擬結果之檢定由竹山堰集水區中的觸口堰測站進行檢定，檢定結果如圖 2 所示。通過流量檢定之後，便能夠進行進一步的水質檢定，先進行竹山堰集水區 SWMM 模式模擬結

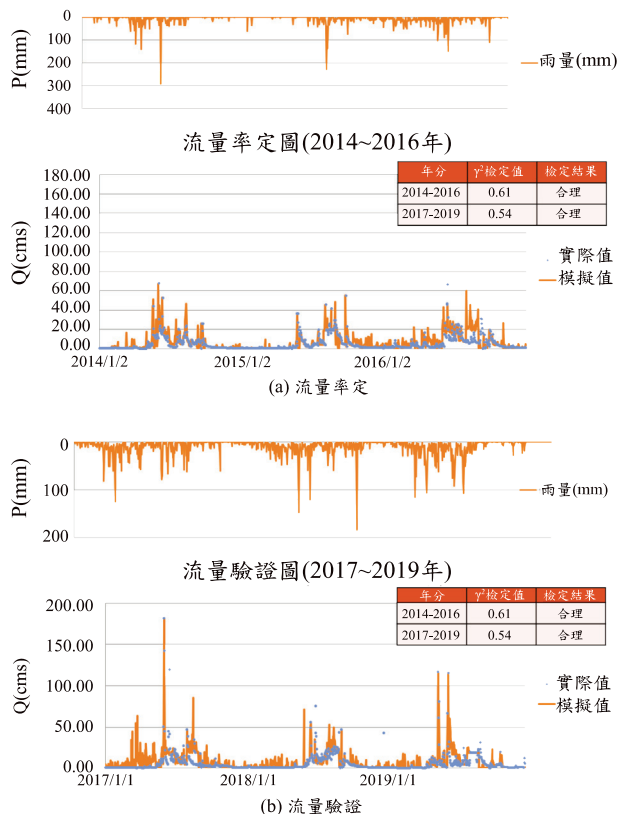


圖 2 竹山堰集水區流量檢定

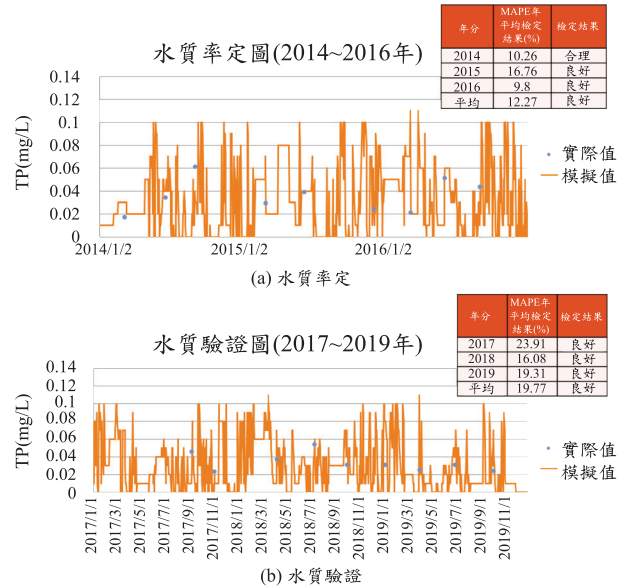


圖 3 竹山堰集水區水質檢定

果之平均百分誤差檢定後，先後使仁義潭水庫及蘭潭水庫之 Vollenweider 模式模擬結果以平均百分比誤差檢定。竹山堰集水區 SWMM 模式水質模擬平均百分比誤差檢定結果如圖 3 所示，由此兩圖可知模式經率定驗證後，模擬結果具可信度，可進行後續應用與分析。

4-1-2 水庫模式檢定

確定集水區模式的正確性之後，將模擬結果帶入 Vollenweider 模式以進行最後的檢定，通過 Vollenweider 模式模擬將其結果以平均百分比誤差檢定，仁義潭水庫平均百分比誤差檢定之平均為 12.26 %；蘭潭水庫檢定之平均為 27.02 %，兩者檢定結果皆為通過，結果如表 6 所示。

4-2 污染源及熱區分析

本研究之研究區域內、集水區控制範圍之中並無任何列管之畜牧業與工業，因此庫區集水區入流之點源污染只有生活污水一項，並且將非點源污染與其總和，可得仁義潭水庫年均污染總量為 2343.66 kg/yr 與蘭潭水庫年均污染總量為 642.96 kg/yr，詳細資料以表 7 所示。仁義潭庫為一離槽水庫，取水自八掌溪竹山堰，竹山堰平均每日放流量約有 24 % 進入仁義潭水庫，剩餘 76 % 則進入順流至下游成為農業用水，取自竹山堰的水約占仁義潭水庫的 91 % 進水量，剩餘 9 % 則來自庫區集水區，而仁義潭水庫總污染量的 91 % 來自於竹山堰取水；蘭潭水庫亦為離槽水庫，取水自仁義潭水庫，仁義潭水庫平均每日放流量約有 40 % 進入

表 6 水庫水質模式模擬平均百分誤差檢定結果

(a)仁義潭水庫

仁義潭水庫	竹山堰入庫點源總磷污染量	竹山堰入庫非點源總磷污染量	竹山堰入庫總磷污染量	庫區點源總磷污染量	庫區非點源總磷污染量	入庫總磷污染量	總磷污染濃度模擬值	總磷污染濃度實際值	模式檢定指標 MAPE
年分	kg/yr	kg/yr	kg/yr	kg/yr	kg/yr	kg/yr	mg/L	mg/L	%
2014	313.81	1815.86	2129.68	111.11	106.02	2346.80	0.020	0.018	9.85
2015	429.07	1377.07	1806.14	111.11	106.02	2023.27	0.017	0.025	31.82
2016	292.93	2385.47	2678.40	111.11	106.02	2895.53	0.021	0.019	10.31
2017	400.76	2066.44	2467.20	111.11	106.02	2684.33	0.018	0.018	1.52
2018	447.69	1736.99	2184.67	111.11	106.02	2401.80	0.023	0.020	12.14
2019	450.72	1042.38	1493.10	111.11	106.02	1710.23	0.011	0.012	7.92
平均值	389.16	1737.37	2126.53	111.11	106.02	2343.66	0.018	0.019	12.26

(b)蘭潭水庫

蘭潭水庫	仁義潭水庫總磷污染濃度	仁義潭水庫取水量	仁義潭水庫取水總磷污染量	庫區點源總磷污染量	庫區非點源總磷污染量	入庫總磷污染量	總磷污染濃度模擬值	總磷污染濃度實際值	模式檢定指標 MAPE
年分	mg/L	m ³ /yr	kg/yr	kg/yr	kg/yr	mg/L	mg/L	mg/L	%
2014	0.020	27644700	551.17	60.81	49.69	661.665	0.016	0.010	61.11
2015	0.025	28370100	708.66	60.81	49.69	819.160	0.018	0.013	34.94
2016	0.019	36603600	688.61	60.81	49.69	799.104	0.016	0.013	22.21
2017	0.018	24597000	449.45	60.81	49.69	559.953	0.013	0.015	12.99
2018	0.020	24004700	488.10	60.81	49.69	598.595	0.015	0.015	2.71
2019	0.012	25687200	308.78	60.81	49.69	419.281	0.010	0.014	28.17
平均值	0.02	27817883	532.46	60.81	49.69	642.96	0.015	0.013	27.02

表 7 水庫各類污染源分析

仁義潭水庫			蘭潭水庫		
污染類別	總磷污染量(kg/年)	比例(%)	污染類別	總磷污染量(kg/年)	比例(%)
庫區周邊點源污染	111.11	4.74	庫區周邊點源污染	60.81	9.46
庫區周邊非點源污染	106.02	4.52	庫區周邊非點源污染	49.68	7.72
仁義潭水庫自竹山堰取水	2126.53	90.74	蘭潭水庫自仁義潭水庫庫取水	532.46	82.82
總和	2343.66	100	總和	642.96	100

蘭潭水庫，剩餘 60%則進入公園淨水場，取自仁義潭水庫的水約占蘭潭水庫 83%進水量，剩餘 17%則來自庫區集水區，蘭潭水庫總污染量約 83%來自於仁義潭水庫取水，如圖 4 所示。

本研究完成模式率定驗證後進行總磷污染負荷熱區分析，以 2014 至 2019 年平均污染資料及參數作表，可得如表 8 所示之子流域總磷污染種類總表，並可得圖 5 之污染熱區圖。由表 8 可得知，S5 子流域為總磷污染產出最高之區域，總磷年均產量為 3356.47 kg/yr，S4 子流域為污染產出最低之區域，總磷年均產量為 1148.33 kg/yr，經分析之後，可以得知 S5 污染產量與其面積最大、居住人口最多有關；以單位面積計算之後，可得知 S1 子流域為單位面積污染產量最高之區域，單位面積總磷年產量為 176.61 kg/yr/km²，而 S2 子流域為單位面積污染產量最低之區域，單位面積總磷年產量為 89.44 kg/yr/km²。

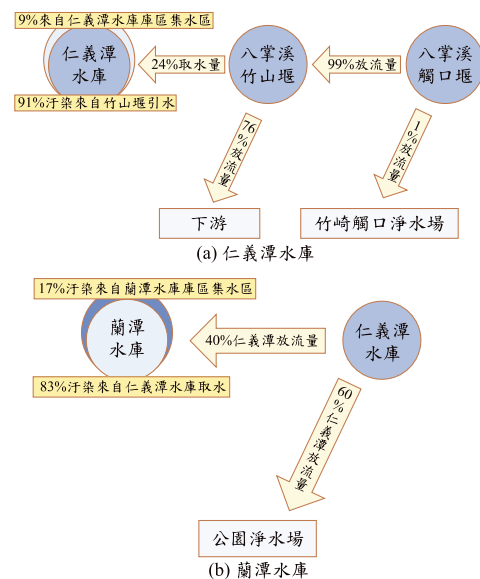


圖 4 水庫水源占比分析

表 8 竹山堰集水區污染熱區分析結果

子流域	人口	面積	點源總磷污染量	非點源總磷污染量	總磷污染量	單位面積點源總磷污染量	單位面積非點源總磷污染量	單位面積總磷污染量
代號	人	km ²	kg/yr	kg/yr	kg/yr	kg/yr/km ²	kg/yr/km ²	kg/yr/km ²
S1	622	8.69	356.72	1178.33	1535.05	41.04	135.57	176.61
S2	778	22.16	424.51	1553.55	1978.06	19.20	70.25	89.44
S3	1230	22.71	750.53	1791.93	2542.46	33.04	78.89	111.93
S4	701	10.46	444.66	703.68	1148.33	42.51	67.27	109.78
S5	2696	22.78	1344.92	2011.55	3356.47	59.04	88.30	147.34

表 9 竹山堰集水區各子流域土地利用表

子流域	S1		S2		S3		S4		S5	
土地利用	面積(ha)	占比(%)	面積(ha)	占比(%)	面積(ha)	占比(%)	面積(ha)	占比(%)	面積(ha)	占比(%)
農業用地	274.57	31.59	652.61	29.45	470.52	20.71	254.47	24.33	386.22	16.95
森林用地	423.66	48.74	1412.70	63.75	1634.12	71.94	678.62	64.87	1714.42	75.26
人為用地	78.35	9.01	41.34	1.87	52.86	2.33	14.21	1.36	65.94	2.89
水利用地	89.48	10.29	34.91	1.58	38.22	1.68	9.21	0.88	34.37	1.51
其他	3.13	0.36	74.43	3.36	75.73	3.33	89.56	8.56	77.02	3.38
總和	869.19	100	2216.00	100	2271.44	100	1046.06	100	2277.97	100

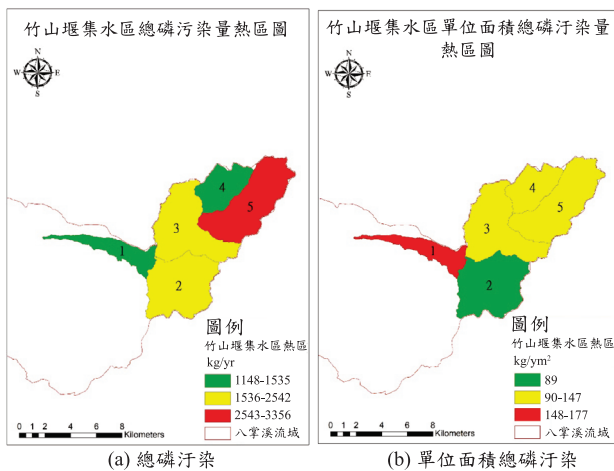


圖 5 污染熱區圖

綜合研究結果可知，竹山堰集水區之污染熱區為 S1，其單位面積非點源總磷污染量為 135.57 kg/yr/km²，而單位面積點源總磷污染量為 41.04 kg/yr/km²；根據個子流域各類土地利用情形(如表 9)可知，S1 子流域之人為用地高於其他子流域，相反地，S1 子流域之森林用地占比遠低於其他子流域，故此區域為竹山堰集水區之污染熱區，未來若要推動集水區污染削減工作，本研究則建議應優先從 S1 子流域開始推動，且此區域之非點源污染之控制較點源污染控制更為重要。

五、結論與建議

1. 八掌溪流供水系統中的兩座水庫仁義潭水庫及蘭潭水庫，為大嘉義地區之重要水源，兩座水庫均為

離槽水庫，有約八~九成之水源引自竹山堰集水區，而在竹山堰集水區污染源中，非點源污染高於點源污染，因此，若要有效保護仁義潭及蘭潭水庫水質，確保其供水安全，則應優先從竹山堰集水區非點源污染控制著手。

2. 本研究結合集水區模式(SWMM 模式)及水庫水質模式(Vollenweider)，建立集水區系統與水庫系統之連結，經由模式檢定過程，提高模擬結果可信度，未來可應用於集水區污染削減策略對水庫水質改善成效之評估分析。
3. 根據本研究污染源及污染熱區分析結果可知，竹山堰集水區較接近下游之 S1 子流域為單位面積污染產量最高之區域，其非點源污染占比亦高，若要保護水庫水質，可優先從此子流域進行污染削減；惟目前兩座水庫水質尚未有優養情形，本研究建議無須採用過於積極之污染減量措施，而若有政府預算配合可於農作周邊設置植生綠帶，以削減非點源污染量。

參考文獻

1. 王佳偉、陳起鳳、林鎮洋(2013)，「翡翠水庫蓄水範圍保護帶設置對水庫水質改善影響」，社團法人中華水土保持學會 102 年度年會。
2. 行政院內政部戶政司(2019)，人口統計資料，檢自 <https://www.ris.gov.tw/app/portal>。
3. 行政院內政部國土測繪中心(2009)，全台土地利用圖

層，檢自 <https://maps.nlsc.gov.tw/>。

4. 行政院經濟部水利署(2019)，2019年八掌溪系統供水資料，檢自 <https://www.wrasb.gov.tw/>。
5. 行政院經濟部水資源局(2001)，「水庫集水區污染源之調查評估」。
6. 行政院環境保護署(2011)，「環境影響評估河川水質評估模式技術規範」。
7. 行政院環境保護署(2017)，「水庫水質永續管理計畫」。
8. 行政院環境保護署(2019)，「108年度北區水庫水質治理前瞻綜合管理計畫」。
9. 行政院環境保護署(2019)，2009年至2019年八掌溪地區水質水量資料，檢自 <https://wq.epa.gov.tw/EWQP/zh/Default.aspx>。
10. Dunn, S. M., Brown, I., Sample, J., and Post, H. (2012). Relationships between climate, water resources, land use and diffuse pollution and the significance of uncertainty in climate change. *Journal of Hydrology*, 434, 19-35.
11. Hsu, H. H. and Chen, C. T. (2002). Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79, 87-104.
12. Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V. A., and Jones, R. G. (2009). Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92(1-2), 41-63.
13. Lewis, C.D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods: A practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting*. Butterworth Scientific, London.
14. Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., and Jeppesen, E. (2014). Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *Journal of Hydrology*, 509, 354-366.
15. United States Environmental Protection Agency (2015). *Storm Water Management Model (SWMM) version 5.1 User's Manual*.
16. Wahyu, A., Kuntoro, A.A., and Takao Yamashita. (2010). Annual and Seasonal Discharge Responses to Forest/Land Cover Changes and Climate Variations in Kapuas River Basin, Indonesia. *Journal of international development and cooperation*, 16(2), 81-100.
17. Yu, P. S., Yang, T. C., Kuo, C. M., Tseng, H. W., and Chen, S. T. (2015). Climate change impacts on streamflow drought: a case study in Tseng-Wen Reservoir catchment in southern Taiwan. *Climatic Change*, 3(1), 42-62.

收稿日期：民國 110 年 03 月 04 日

修改日期：民國 110 年 04 月 06 日

接受日期：民國 110 年 04 月 26 日