

國立臺灣師範大學文學院地理學系

碩士論文

Department of Geography

College of Liberal Arts

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

應用 LOADEST 評估氣候變遷情境下河川輸出溶解態

有機碳之變化 —— 以翡翠水庫上游集水區為例

Applying LOADEST to assess changes in dissolved
organic carbon output from rivers under climate change
scenarios —— An example of upstream catchment of
Feitsui Reservoir

陳彥樺

Chen, Yan-Hua

指導教授：李宗祐 博士

中華民國 109 年 8 月

August 2020

中文摘要

台灣為亞熱帶地區多高山的小島國家，過去研究顯示，台灣的高山小河川在陸域有機碳輸出至海洋的過程中扮演重要角色，大部分研究的重點著重顆粒態有機碳輸出而鮮少討論溶解態有機碳輸出的重要性，然而，單位面積溶解態有機碳的年產出量高達每公頃 30 公斤，全球排名前 30%。故本研究以坪林集水區為例，利用過去近十年之溶解態有機碳觀測資料，透過汙染物負載量計算模式 Loadest 建立溶解態有機碳輸出之統計回歸模型，並進而推估 5 個 GCM 在 RCP8.5 氣候變遷情境下，於短期、中期一、中期二與長期，溶解態有機碳輸出之變化。

研究成果顯示，氣候變遷情境下，短期、中期一、中期二與長期下，多數模式顯示，年總溶解態有機碳輸出量並無顯著變化；然而冬、春兩季溶解態有機碳輸出量有在短期、中期一、中期二與長期皆有減少，且最多可減少達 30% 的趨勢，長期將降低達 37%；夏季則隨時間其增加在 CSIRO 模式下有增加趨勢。整體而言，在氣候變遷情境下，多數模式皆呈現減少之趨勢，即意味，未來，冬、春兩季水體內溶解態有機碳輸出將大幅減少，而夏、秋兩季則隨情境不同，輸出差異越大，但大抵呈現減少之趨勢。

關鍵字：溶解態有機碳、Loadest、SWAT 模式、氣候變遷、高山小河川

Abstract

Taiwan is a subtropical mountainous island country. The previous studies indicate that alpine streams in Taiwan play an important role in the process of exporting terrestrial organic carbon into the ocean. Most studies emphasize on the importance of particulate organic carbon but rarely discuss on the importance of dissolved organic carbon. However, the annual produce of dissolved organic carbon per unit area in Taiwan is as high as 30 kilograms per hectare, ranking at the 30% highest globally. Therefore, this study chooses Pinglin watershed as an example study area, and utilizes the pollution load calculation model, Loadest, to build a statistical regression model of dissolved organic carbon export from observation data in the near ten years. The data are further used to predict the difference of near-term, middle-term phase 1, middle-term phase 2 and long term dissolved organic carbon export of 5 GCMs under the climate change context of RCP 8.5.

The results show that most models indicate no significant change in annual dissolved organic carbon export in near-term, middle-term phase 1, middle-term phase 2 and long-term time frame under climate change context. However, the dissolved organic carbon export in both winter and spring season declines in the near-term, middle-term phase 1, middle-term phase 2 and long-term timeframe. The decline of the trend can be as much as 30% and is expected to decline to 37% in long-term. The dissolved organic carbon export in summer shows an inclining trend in CSIRO model as time goes by. Overall, most model shows declination in trends under climate change context, meaning that dissolved organic carbon export in winter and spring will decline drastically in the future while that in summer and autumn will have an overall declining trend but differ greatly depending on the contexts.

Keywords: Dissolved Organic Carbon, Loadset, SWAT, Climate Change, Alpine
Streams



目次

第一章	緒論.....	1
1.1	前言	1
1.2	研究背景與目的	2
1.3	氣候變遷之影響	2
1.4	研究方法與步驟	3
第二章	文獻回顧.....	5
2.1	碳循環與溶解態有機碳	5
2.2	氣候變遷	6
2.3	LOADEST 模式	7
2.4	TAIWAP 模式	8
2.5	SWAT 模式	9
2.6	小結	10
第三章	研究方法.....	11
3.1	材料及方法	11
3.2	研究區域	12
3.3	LOADEST 模式	13
3.4	TAIWAP 模式	15
3.5	SWAT 模式	20
第四章	河川態有機碳輸出模氣候變遷之衝擊.....	24
4.1	坪林集水區觀測流量與模擬情形	24
4.1.1	觀測雨量與流量趨勢.....	24
4.1.2	流量模擬.....	29
4.2	溶解態有機碳輸出情形	30

4.3	LOADEST 模擬成果.....	31
4.4	氣候變遷下溶解態有機碳輸出情形	35
4.4.1	逐月輸出情形.....	35
4.4.2	模式平均.....	42
4.5	氣候變遷下乾濕季溶解態有機碳輸出情形	45
4.5.1	濕季溶解態有機碳輸出情形.....	45
4.5.2	乾季溶解態有機碳輸出情形.....	53
4.6	模擬成果與分析	60
第五章	結論與建議.....	62
參考文獻		64



表次

表 3-1 AIC 數值配適度指標

表 3-2 Loadest 模式內涵模型

表 3-3 研究區域落在台灣北部分區以及全台灣所適合之 GCM 列表

表 4-1 坪林地區月降雨量 (mm)

表 4-2 各年度最大與最小月累積雨量及差異

表 4-3 2002 年至 2005 年及 2011 年至 2014 年逕流量

表 4-4 坪林集水區水文參數檢定表

表 4-5 Loadest 2002 年至 2005 年 AIC

表 4-6 Loadest 2012 年至 2014 年 AIC

表 4-7 以最小平方法求得之回歸式係數

表 4-8 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況

表 4-9 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比

表 4-10 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比

表 4-11 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之濕季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

表 4-12 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之乾季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

圖次

- 圖 3-1 翡翠水庫上游集水區
- 圖 3-2 Loadest 模式估算流程圖
- 圖 3-3 IPCC AR5 之不同氣候變遷情境下全球地表溫度變化
- 圖 3-4 TaiWAP 資料產製流程圖
- 圖 3-5 SWAT 模式模擬流程圖
- 圖 4-1 各年度雨量資料全距
- 圖 4-2 2002~2005 年逐月月均逕流量變化圖
- 圖 4-3 2011~2014 年逐月月均逕流量變化圖
- 圖 4-4 各年度乾季月份月均逕流量圖
- 圖 4-5 各年度濕季月份月均逕流量圖
- 圖 4-6 溶解態有機碳 2002-2005 年與流量時序圖
- 圖 4-7 溶解態有機碳 2012-2014 年與流量時序圖
- 圖 4-8 各模型年總輸出表現圖
- 圖 4-9 2002-2005 成果對數分配圖
- 圖 4-10 2012-2014 成果對數分配圖
- 圖 4-11 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況
- 圖 4-12 RCP 8.5 各情境下模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 日平均輸出
- 圖 4-13 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 日平均輸出
- 圖 4-14 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況
- 圖 4-15 HadGEM2-AO 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-16 CRISO-Mk3.6.0 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-17 CCSM4 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-18 bcc-csm1.1-m 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-19 NorESM1-ME 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-20 HadGEM2-AO 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-21 CRISO-Mk3.6.0 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-22 CCSM4 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-23 bcc-csm1.1-m 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 4-24 NorESM1-ME 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

圖 5-1 翡翠水庫蓄存水量變化



第一章 緒論

1.1 前言

量化及評估全球碳循環過程是永續發展的重要基礎。溶解態有機碳（Dissolved Organic Carbon）是水體中溶解有機物質的總和，與水體中浮游植物行光合作用、生物代謝及細菌活動息息相關，除為表現水體中有機物含量與生物活動的重要參數外，更是研究水體中碳循環重要的一項指標。近年來，因為大氣中二氧化碳增加造成全球暖化問題，碳循環在學術上也逐漸受到重視。

碳是構成生命的重要元素，亦是所有有機物質的基本成分，碳元素透過河川的連接在大氣圈、水圈、岩石圈及生物圈之間不斷交換。科學家分析冰芯內古大氣成分後發現，工業革命發生前的一萬年內，大氣中存在的二氧化碳濃度一直維持在在 260-280ppm 之間；工業革命後，由於全球人類活動交通、建設等各項活動頻繁，自然生態受到影響，大氣中的二氧化碳濃度更是在短短數百年間上升至 400ppm，嚴重改變地球大氣循環、水循環與碳循環之過程。除了人為降低二氧化碳排放量及各種長期封存措施之外，科學家也開始關注自然界透過陸地有機生物體活動，將大氣中的碳素經由生物、土壤，最終封存於海洋的過程。

過去的研究發現，河川與湖泊不僅是大氣主要的碳源之一（Raymond et al., 2013），全球河川每年更從陸地輸送九百萬噸的碳至海洋，其中 40% 為有機碳，另外 60% 為無機碳。Worrall 等人在 2004 年於 *Biogeochemistry* 期刊上指出，過去有許多研究發現在英國的河川與湖泊中，溶解態有機碳都有增加之趨勢；Bao 等人於 2015 年發表在 *Scientific Report* 發表之文章中，則注

意到位於大洋洲及其附近的小型高山溪流（SMRs）每年輸出高達 37 Tg（百萬噸）的碳，約占全球生物碳年輸出通量的 20%，然而，這些小河川的集水區總面積僅占地球陸域面積的 1.8%。該團隊研究更利用「木質素（Lignin）」作為示蹤劑，追蹤台灣高山小河川在颱風期間的生物源有機碳。研究成果顯示，颱風對於台灣河川物質輸送有很大的貢獻，提高了海洋碳埋藏的效率，同時也揭示了高山小河川對於全球有機碳輸出的重要性。近年來，隨著氣候變遷情況加劇，有必要評估氣候變遷情境下，台灣高山小河川溶解態有機碳輸出的變化，以了解其影響與衝擊。

1.2 研究背景與目的

過去台灣有機碳研究主要集中在海洋內顆粒態有機碳與有機碳循環上，直至近兩年，方有相關研究針對溶解態有機碳在氣候變遷下所受之影響進行相關分析。氣候變遷情境下，溶解態有機碳輸出與整體碳循環，海洋、陸地等碳庫息息相關，而了解台灣島內輸出情況、氣候變遷情況下輸出量的變化與水體內碳循環改變情況對生態及人類生活之影響為當務之急，故本研究欲以坪林集水區內溶解態有機碳輸出作為樣區，模擬氣候變遷情況下集水區內流量之變化並探討氣候變遷情境下各季節溶解態有機碳輸出之差異性。

1.3 氣候變遷之影響

自工業革命以來，人類大量製造如二氧化碳、氧化亞氮、甲烷與氟氯碳化物等氣體，人類對自然的影響開始不僅限於地表，快速擴張至大氣與海洋中，並透過河川連結大氣圈、水圈與生物圈。1980 年代以來，全球氣溫迅速上升，不尋常的氣候與天氣現象發生頻率提高，衝擊各地降雨與氣溫。

伴隨氣候變遷所造成之各地降雨型態改變，河川洪枯變化受到重大影響，亦改變了河川所輸出之污染物之型態，過去研究顯示，極端氣候造成台灣山

地集水區水文作用循環之改變，致使降雨逕流過程的改變 (Huang et al., 2014) 與隨之而來的土砂輸出量之改變 (Lee et al., 2015)，故，可知河水流量與其所輸出之土砂、汙染物等有顯著相關，故，評估氣候變遷情境下，台灣島內溶解態有機碳輸出量的變化，可做為未來環境政策擬定時之參考。

1.4 研究方法與步驟

為了評估氣候變遷下對水體內溶解態有機碳之影響，本研究分為三個部分。第一部分為利用由美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 開發之 Loadest 模式，以研究區採樣之溶解態有機碳濃度與流量建立負載物或汙染物之回歸方程式，藉由觀測值與連續流量監測值評估當前溶解態有機碳在水體內濃度之趨勢變化；第二部分則利用台灣大學生物環境工程學系永續發展研究室所開發之氣候變遷風險評估所需之氣候情境及氣象合成模式 TaiWAP 模擬氣候變遷下之短期、中長期與長期之氣候資料，再以美國農業局農業研究服務 (United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDA ARS) 的 Jeff Arnold 博士所開發之 Soil and Water Assessment Tool (以下簡稱 SWAT) 模式模擬氣候變遷情境下短期、中長期與長期流量變化與趨勢；第三部分則以前述建立之模式與模擬流量針對氣候變遷下水庫上游集水區在各個氣候變遷推估期間內溶解態有機碳之總體輸出。

在溶解態有機碳輸出量方面，是利用長期流量資料與連續觀測之濃度採樣值，透過數值方法建立迴歸關係式，因溶解態有機碳主要受流量影響 (Winterdahl et al., 2014)，故，為趨避多元迴歸分析中自變項之間產生之多元共線性，故以平減化 (Centered) 方式 (Echambadi and Hess., 2007) 處理資料，利用自變數、調節變數與中心值之差距進行計算以降低多元共線性

對整體回歸式之影響。

在氣候變遷情境資料方面，本研究參考科技部台灣氣候調適科技服務（Taiwan Climate Adaptation Technology Service, TaiCATS）網頁所載聯合國氣候組織（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）提供 RCP 情境中適合台灣的大氣環流模式（GCM）之資料，並根據 IPCC 最新報告《氣候變遷中的海洋與永凍圈特別報告》中預測氣候變遷情況將持續惡化的情況，故本研究以氣候變遷已達最嚴重之 RCP8.5 情境作為預測基準，並探討該情境下，短期、中長期與長期下，溶解態有機碳受氣候變遷之影響。



第二章 文獻回顧

2.1 碳循環與溶解態有機碳

全球的碳素以不同比例的形態及含量貯存在地球各碳庫之中，依碳貯量之多寡可分為海洋碳庫（Ocean pool）、陸域碳庫（Land pool）及大氣碳庫（Atmospheric pool）等，河流及湖泊系統則扮演著各碳庫間連通及調節的作用。自工業革命以來，由於人為活動激增導致大量碳素進入大氣碳庫，自然界內的碳循環系統亦受到重大影響。

河湖系統調節碳庫的方法，主要是透過轉移分布在大氣、植被、腐植質、土壤與水體沉積物中的有機碳。其中，溶解態有機碳即是代表水體中可溶解性有機質的總和。然而，溶解態有機碳還是維持生態系統正常運轉的重要營養鹽，為河口、海岸及海洋提供陸源的有機質，是水生微生物群落主要的能量來源，與水體中浮游植物行光合作用、生物代謝作用和細菌活動息息相關。溶解態有機碳除吸附營養物外（Kortelainen and Saukkonen, 1998），亦吸附金屬物質（Dillon and Molloy, 1997; Ravichandran, 2004）並降低河水表面紫外線輻射，保護水中生物（Wolf et al., 2017），為環境污染物重要的吸附劑（Schlesinger et al., 2000）與水源酸化主要原因（Bishop et al., 2000）。因此，其濃度與通量的變化，不僅意味著碳素在碳庫間的轉移，也會對水域生態、飲用水水質等方面造成影響。過去十多年間，許多研究指出，河流與湖泊內溶解態有機碳有逐漸增加之趨勢（Battin et al., 2009），並與氣候變遷、酸沉降降低（Monteith et al., 2007）、氮沉降增加（Findlay, 2005）、土地利用方式改變（Garnett et al., 2000）、降雨量與逕流模式改變或大氣中二氧化碳濃度增加（Evans et al., 2006）有關。其中，又以歐洲與美洲相關研究居多（Freeman et al., 2001），而多數歐洲研究顯示，歐洲境內河川中溶解態有機碳增加幅度較北美洲更高（Monteith et al., 2007）。然而，亦有研究顯示，溶解態有機碳

在歐洲境內並未隨時間增加 (Oni et al., 2013)，更有研究結果指出瑞士境內溶解態有機碳濃度在較長時間尺度下減少，而 Räike 等人在 2016 年於芬蘭的研究中則發現，1975 年至 2014 年之間，芬蘭境內 12 條河流中溶解態有機碳增加，2 條減少，其他 15 條無顯著變化。

台灣境內過去關注氣候變遷下之碳循環研究主要集中於大氣中之碳與水體內顆粒態有機碳，鮮少關注溶解態有機碳於碳循環中之增減，然而，台灣除據國際能源總署 IEA 於 2018 年出版之能源使用二氧化碳 (CO₂) 排放量統計資料顯示，2016 年能源使用 CO₂ 排放總量為 257.8 百萬公噸，占全球排放總量的 0.8%，全球排名第 21 位；每人平均排放量為 10.98 公噸，全球排名第 19 位，碳排放密集度為 0.26 公斤 CO₂/美元，全球排名第 47 位 (行政院環境保護署，2018)。2019 年，Lee 等人發表於 Scientific Reports 期刊報告中，目前每年由河川輸入海洋中的碳大約為 0.9Pg，其中溶解態有機碳佔其中 0.17~0.22 Pg，年均濃度為 5.29 mg/L (Lee, et al, 2019)，而台灣境內八個河川採樣點之溶解態有機碳平均濃度為 0.78 mg/L，遠低於世界平均之 5.29 mg/L，然而，其年均產量 22.51kg/ha/yr 卻遠高於世界平均之 14.4~19.3 kg/ha/yr，該研究更指出台灣境內河川溶解態有機碳產出與坡度、流量密切相關，因此，除關注大氣中排放之溶解態有機碳外，水體中之溶解態有機碳亦為氣候變遷情境下，必須審慎以待之碳循環改變中重要一環。

2.2 氣候變遷

氣候變遷議題近年來已成為全球共同關注且關注度極高之議題。研究指出，氣候變遷為長期氣候特性改變，並可能造成短期氣候變異加劇，極端氣候頻率增加，進而導致人類社會與自然環境災害增加 (Tung and Lin., 2008)。Walsh (2002)、Trenberth (2006) 等人之研究發現，受全球氣候變遷之影響，

颶風所帶來之降雨、降雨頻率與強度會隨之增加，且若在二氧化碳排放量為今之兩倍情況下，降雨強度將會更加劇烈。為彙整並了解氣候變遷之研究成果，聯合國成立政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）定期發布氣候變遷相關信息，並於 2013 年第五次評估報告（AR5）指出人類活動中「燃燒化石燃料」的行為，極可能是 1950 年來造成全球暖化的主要原因，且 21 世紀後期，中緯度陸地、潮濕之熱帶區域豪大雨發生頻率、強度及降雨量增加可能性將隨氣候變遷情況日益加劇而大增。經濟合作暨發展組織（The Organization for Economic Co-operation and Development, OECD）指出，亞洲超大型城市人口不斷成長，沿海都市居民將是最大受害者，台灣位處低緯、太平洋颱風生成路徑上與板塊交界帶上，地質條件脆弱，更是擁有多重風險。

Tung et al. (2002) 等人發現，全球暖化將使台灣地區的氣候與水文情況趨向極端化，柳中明於 2005 年之研究報告分析過去台灣地區降雨資料顯示，台灣地區因極端降雨事件之治災規模與範圍大幅增加，台灣隨著都市發展各種土地開發，土地利用型態產生改變，不透水面積增加，增加瞬時雨水逕流量，此種情形下，更易受氣候變遷影響。2012 年行政院經建會核定之「國家氣候變遷調適政策綱領」，提到在氣候變遷影響下，臺灣水資源領域所面臨之六大挑戰，其中一項便是河川污染問題，豐水期時河川濁度上升，影響河川生態，使供水系統惡化；枯水期河川自淨能力與容受能力下降。

綜合上述原因，氣候變遷對水質惡化有極大影響，故，本研究欲探究氣候變遷情境下，溶解態有機碳所受之影響。

2.3 LOADEST 模式

過去，許多集水區因其位於高危地區或設置固定採樣裝置困難而導致集

水區水文資料取得受到極大限制。為針對採樣困難或過去採樣資料缺乏等集水區進行水文評估，美國地質調查局以 FORTRAN 語言編碼開發 Loadest 模式，主要用於評估採樣頻率較低且資料缺乏之水體內營養鹽、汙染物、氮與磷之通量計算評估上（Bhasker et al., 2013）。

模式內透過統計方式進行多元迴歸分析與校正，建立回歸方程式，過去研究顯示，Loadest 模式估算水體內總懸浮物質、總氮及總磷等汙染物質皆能在一定誤差內準確評估其值（Sushil et al., 2013）。其中，在於評估集水區內總氮上，Loadest 模式推估結果與實際採樣結果差距小，其中一項研究結果顯示，在評估美國 Neuse River 流域六個採樣點中的總氮含量，五個採樣區僅高估 5%，另一個則低估 1%，整體 R^2 值介於 0.97~0.99 之間，NSE（Nash-Sutcliffe efficiency）值亦高達 0.71~0.92（Bhasker et al., 2013）。而在不同汙染物負載的估算上，Wickramaarachchi 等人（2014）的研究結果顯示，估算總懸浮固體上，斯里蘭卡境內的 Gin 河，其觀測值與估計值間之 R^2 達 0.85。

綜合上述，Loadest 模式為簡易且方便之估算工具，且能廣泛應用在估算水體中之汙染物，2016 年刊於美國地理研討會之研究以 Loadest 模式推估緬因灣內溶解態有機碳含量，並發現二十條採樣河川中有十條河川在 1950 至 2013 年間，冬季輸出均大幅增加，而十四條河川內有十三條河川在 1930 年至 2013 年間冬季亦大幅增加之趨勢（Huntington et al., 2016）。

2.4 TAIWAP 模式

氣候變遷整合評估模式（Taiwan Water Resources Assessment Program to Climate Change, TaiWAP）由台灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究

室所開發，包含了模式中包含氣候變遷預設情境（Scenarios）、氣候變遷產生器（Weather Generator）、集水區流量模擬（GWLF 水文模式）及氣候變遷風險評估所需的氣候情境以及氣象合成模式，亦同時針對氣候變遷下水資源風險評估，整合了水文模式、水資源評估模式、灌溉需水量評估模式等，並提供多準則排序評估法作為氣候變遷調適的支援決策工具，其主要功能為評估資源永續利用與因應氣候變遷之調適。

過去 Tung et al.等人（2014）利用 TaiWAP 模式評估氣候變化下區域供水系統的承載能力和可持續性，Li.（2013）以 TaiWAP 評估氣候變遷與土地利用對聖文森蒙特婁集水區流量之衝擊，其研究結果顯示，在氣溫方面個大氣環流模式中兩個時段都呈現上升趨勢，從+0.77 度至+3.28 度不等，雨量模擬在模式間則是呈現高度波動情形，從+46%至-75%不等，而在河川流量方面模式在兩時段皆呈現減少趨勢，從+39%至-99%不等，而 Chung.（2010）研究結果亦顯示，氣候變遷會導致枯水期流量大幅減少 0.2%~43.9%，而氣候變遷對流量豐、枯水期分佈之影響大於其對流量年總變化量之影響。

2.5 SWAT 模式

SWAT 模式（Soil and Water Assessment Tool）為美國農業局農業研究服務（United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDAARS）的 Jeff Arnold 博士所開發，是一個具有物理機制，須參數率定之集水區尺度水文水質模式，可以評估集水區在不同土地利用、土壤分佈與管理作業下對水文、泥砂、營養鹽、微生物和農藥承載之影響(USDA, 2019)。SWAT 模式為半分布模式（Semi-Distributed）之水文模式，次集水區的劃分為透過河流交會點來繪製，接著以土地利用、土壤特性與坡度等地文參數，定義門檻值，劃分次集水區及每一個水文單元（Hydrological Response Unit,

HRU)，以模擬單元內的流量輸出。

SWAT 模式應用廣泛，Pohlert et al. (2005) 於德國 Dill 河流域，應用 SWAT 模式對該地區但營養鹽點源及非點源污染進行模擬，其研究結果顯示，模式可以有效的模擬月營養鹽資料 ($NSE=0.66\sim0.77$)，且對於污染物的季節性趨勢，預測結果與實際情況大致符合；在輸砂方面，Addis et al. (2016) 以伊索比亞高原山區小型集水區為例，進行流量及輸砂量之模擬，研究結果顯示，SWAT 模式能有效模擬日流量；在氣候變遷衝擊下，Ficklin et al. 等人 (2009) 利用 SWAT 模式評估了加州聖華金集水區內對於氣候變遷之敏感度，並發現該地區對於氣候變遷之影響非常靈敏，而農業活動與灌溉時間等均會影響當地水質，而林冠州 (2017) 則利用 SWAT 模式模擬翡翠水庫上游集水區日流量與硝酸鹽氮輸出量 ($NSE>0.65$)，並從其模擬成果了解氮肥於農地移動的路徑與分布，並驗證 SWAT 模式在台灣集水區的適用性。整合上述資訊，SWAT 模式被廣泛應用在許多地區之水文、水質相關之研究與氣候變遷情境評估等，對於集水區內經營管理有非常大的幫助。

2.6 小結

由上述文獻回顧可以了解，過去諸多研究結果顯示 Loadest 模式可提供有效且簡易之統計回歸式作為水文資料欠缺之集水區評估與模擬污染物輸出量的模式，且能適切模擬該地區污染物輸出量，以彌補採樣不足等因素所造成之資料缺漏。透過 TaiWAP 模式所提供之氣候資料與 SWAT 模式模擬集水區日流量，可幫助了解未來氣候變遷情境下之污染物總輸出，

第三章 研究方法

本研究的目的是希望能藉由建立小島型高山溪流溶解態有機碳與流量間之輸出關係，藉以評估氣候變遷情境下，溶解態有機碳輸出情形。為了解溶解態有機碳在小島型高山溪流之輸出情形，本研究之研究區主要位於翡翠水庫上游坪林區內之北勢溪流域。溪流內溶解態有機碳總量將利用負載物估算模式 Loadest 進行估算，氣候變遷下之氣溫資料則由氣候變遷整合評估模式 TaiWAP 產出，流量則使用 SWAT 模式產出。

3.1 材料及方法

本研究使用的資料包含溫度、雨量、流量、及溶解態有機碳濃度，溫度及雨量部分則採用中央氣象局民國 91 年至 94 年、民國 100 年至 103 年于坪林測站之日觀察資料；流量監測資料主要係利用翡翠水庫管理局在坪林測站長期採樣之觀測結果；溶解態有機碳濃度係由國立臺灣大學地理系黃誌川教授研究團隊協助提供，其採樣期間為 2002 年至 2014 年之間，非颱風期間採樣頻率為 1 次/3.5 天；颱風樣本自 2012 年始，涵蓋 2012 年襲台之蘇拉颱風、天秤颱風；2013 年蘇力颱風、潭美颱風及 2014 年麥德姆颱風，採樣頻率則為 1 次/時。樣本以 1-L 低密度聚乙烯（LDPE）採集，並使用已預熱（450℃下預熱 3 小時）之 Whatman®玻璃纖維網（0.7 μ m）過濾。濾液分裝在預熱至 450℃之 40 毫升玻璃瓶後立即添加 0.25ml 濃縮磷酸（85%）至瓶中。樣本在運輸過程中皆儲存於冰箱內，並使用 Analytik Jena multi N/C® 3100 分析儀分析，再以純氧除去磷酸溶液內之無機碳，最後以 950℃之溫度燃燒樣本，用輻射非分散紅外線（NDIR）檢測儀測量釋放出之二氧化碳。

本研究溶解態有機碳採樣點位於坪林集水區內，詳如圖 3-1。

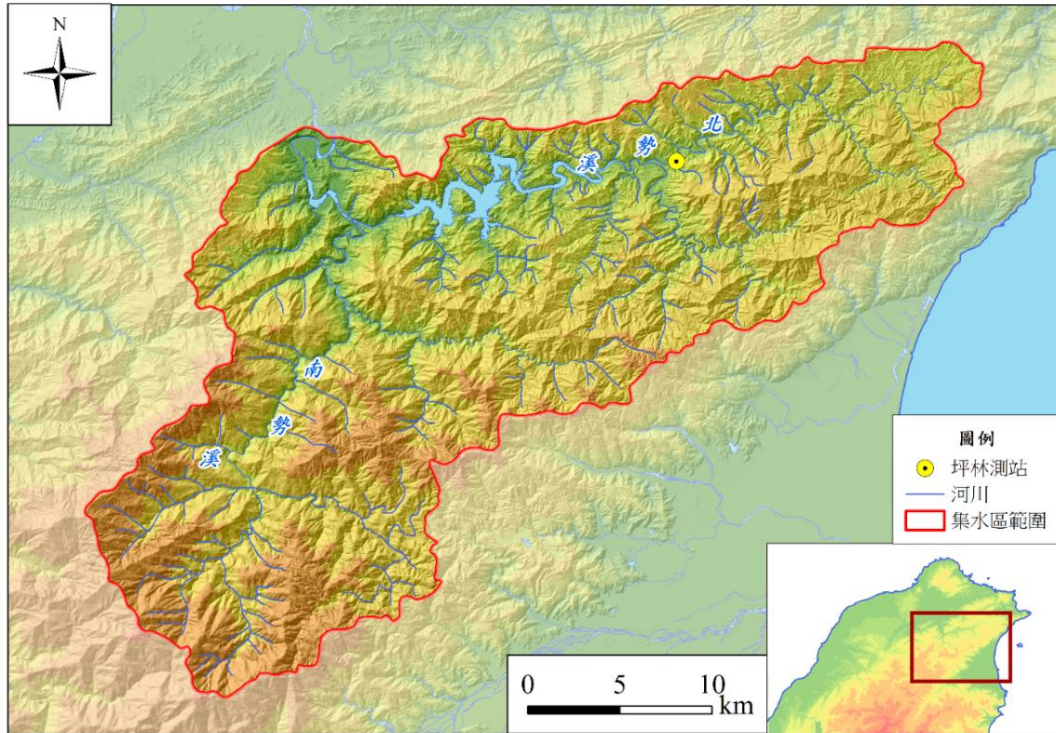


圖 3-1 翡翠水庫上游集水區

3.2 研究區域

本研究研究區主要為台灣庫容第二大的翡翠水庫上游，坪林區內之北勢溪，位於東經 121 度、北緯 24 度間，氣候類型屬副熱帶季風氣候，年均溫約攝氏 21.1 度，夏季均溫約攝氏 25.6 度，冬季均溫約為攝氏 15.9 度。在全年降雨量方面，據西元 1998 年至 2016 年之觀測資料顯示，本區年降雨量落在 2,520~5,740mm，年平均雨量約 3500mm，全年有雨，因受夏季強陣雨與颱風之影響，六至十月降雨強度大，冬季因常受大陸冷氣團南下影響，十至一月降水日數最多，年平均相對濕度約為 85.5%。採樣期間年平均氣溫與長期平均值一致，然採樣期間的年降雨量變化則較大，並出現不同波動。

本研究溶解態有機碳採樣點位於坪林集水區內（詳圖 3-1），坪林集水區面積為 10272.58 公頃，集水區海拔最高為 998 公尺，最低為 150 公尺，其地形屬丘陵，地形大致為南高北低，北勢溪主要在集水區中心部分由東向西

南流過，平坦河谷平原分布溪流兩岸，海拔約為 200 公尺，為典型台灣上游集水區。

本區土壤受氣候、地質及地形條件影響，厚度平均介於 60~90 公分之間，土壤可分為紅壤及黃壤，林班地內則屬灰壤化之棕色森林土，岩層為西南—東北走向，透水性低。

3.3 LOADEST 模式

本研究使用由美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 開發之 Loadest 模式 (負載物估算模式)，以 FORTRAN 語言編碼，用於計算河流與河流內負載物通量之工具，詳細使用流程見圖 3-2。Loadest 模型利用連續水量資料與離散的水質 (污染物濃度) 資料，建立負載物或污染物之回歸方程式如下：

$$\ln(F) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (1)$$

上述公式中，F 為估計的負載物通量，而 a_i 則為回歸式之相關係數， X_i 則是解釋變數，而 n 為解釋變數之數量。執行模式步驟為將濃度資料做日排序後匯入模式內，設定模式門檻值，再將流量資料進行日排序，剔除流量為零之值後，設定集水區面積資料，後進行模式校正。此外，Loadest 模式亦考慮水質資料流失之情況，並以統計方法—調整後最大概似估算法 AMLE (Adjusted Maximum Likelihood Estimation) 進行校準，進而估算不同時間尺度下 (日/月/季/年) 下的負載物通量。模式內提供共 11 種回歸方法 (如下表 3-1) 進行估算，並以 AIC (Akaike Information Criteria) 方法篩選出最適回歸式及模型。AIC 由日本統計學家赤池弘次在 1974 年提出，是衡量統計模型擬合優良性的一種標準，假設的條件是模型的誤差服從

獨立常態分布，藉由增加參數提高配適度，提供權衡模型複雜度和擬合數據優良性的標準 (Akaike, H., 1974)，其中， m 為參數的數量，其定義如下式：

$$AIC = -2 \ln(\text{likelihood}) + 2m \quad (2)$$

AIC 為當兩模型有近似相等之觀測數量時，若模型擁有較小之 AIC 值，模型表現越好，如下表 3-1：

表3-1 AIC 數值配適度指標 （資料來源：Cavanaugh and Neath, 2019）

$AIC_i - AIC_{min}$	模型配適度
0-2	可信的 (Substantial)
4-7	較不相關 (Considerably less)
>10	不建議採納 (Essentially none)



圖 3-2 Loadest 模式估算流程圖

表3-2 Loadest 模式內涵模型

Specified Value	Regression Model
0	automatically select best model from models 1-9.
1	$a_0 + a_1 \ln Q$
2	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln(Q)^2$
3	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 d_{time}$
4	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 (\sin 2\pi d_{time}) + a_3 (\cos 2\pi d_{time})$
5	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln(Q)^2 + a_3 d_{time}$
6	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln(Q)^2 + a_3 (\sin 2\pi d_{time}) + a_4 (\cos 2\pi d_{time})$
7	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 (\sin 2\pi d_{time}) + a_3 (\cos 2\pi d_{time}) + a_4 d_{time}$
8	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln(Q)^2 + a_3 (\sin 2\pi d_{time}) + a_4 (\cos 2\pi d_{time}) + a_5 d_{time}$
9	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln(Q)^2 + a_3 \sin 2\pi d_{time} + a_4 \cos 2\pi d_{time} + a_5 d_{time} + a_6 d_{time}^2$
10	$a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q per$
11	$a_0 + a_1 per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q per + a_4 \ln(Q)^2 + a_5 \ln(Q)^2 per$
99	User defined

3.4 TAIWAP 模式

氣候變遷衝擊評估由於並無未來氣象資料，故需建立未來氣候可能之情境與模式方能對未來氣候改變情況進行評估。本研究主要採用 TaiWAP 1.4 (Taiwan Water Resources Assessment Program to Climate Change) 版內之 TCCIP-AR5 之氣候變遷模擬產製未來降雨情境。

本研究採用氣候合成模式 WGEN (Weather Generator, Tung and Haith, 1995)，以日降水量模擬模式為基礎，產出符合氣候變遷情境下坪林之未來日溫與日雨量資料。該模式理論基礎如下：

以過去歷史降雨量作為基礎，模擬日降水量後將其分為降雨事件與降雨發生時之降雨量（Tung and Hiath, 1995）。降雨事件決定當日是否降雨，以事件當月之歷史統計資料中發生降雨的機率為 $P(W)$ ，第 $i-1$ 天將與且第 i 天也降雨的機率為 $(W|W)$ ，第 $i-1$ 天不降雨但第 i 天降雨的機率為 $P(W|D)$ 。當每月第一天的降雨情形則由連續均勻分布 $U(0,1)$ 模擬產生的隨機變數 RN 決定，若 RN 值小於或等於當月降雨機率 $P(W)$ 時，則表示每月第一天有降雨；除了每月第一天以 $P(W)$ 決定是否有降雨外，其餘天數則採用 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 來判定下一天是否有降雨。降雨判定方式如下：

(I) 若第 $i-1$ 天降雨量 >0 ，則當 $RN \leq P(W|W)$ ：第 i 天會降雨；否，則第 i 天不會降雨。

(II) 若第 $i-1$ 天降雨量 $=0$ ，則當 $RN \leq P(W|D)$ ：第 i 天會降雨；否，則第 i 天不會降雨。

在模擬降雨事件之降雨量值上，係根據洪念民（1996）降雨量模擬，採用指數分布（Exponential distribution）的累積機率函數（CDF）所求得，其方程式如下，其中 P 為日降雨量（cm）， $\mu_{ps}(i)$ 為對應第 i 月份 s 類別兩天的平均降雨量（cm）， RN 為介於 $(0,1)$ 間的隨機變數。

$$P = \mu_{ps}(i) \times [-\ln(1 - RN)]$$

後將產製資料輸入由台灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室所開發之氣候變遷整合模式 TaiWAP 模擬集水區各水文量。

為建立未來可能之氣候情境，挑選大氣環流模式（General Circulation Model, 簡稱 GCMs）與代表濃度途徑（Representative Concentration Pathways, 簡稱 RCPs）為本研究重要之一環。本研究參考科技部台灣氣候

調適科技服務 TaiCCAT 當中，研究區落在台灣北部分區內所對應之 GCMs 模式（表 3-3）。該表主要由 IPCC 提供之多個情境中，驗證排序適合台灣之 GCMs 報告及中央氣象局測站資料，分析各個情境後所得與台灣降雨之相關性與模擬表現度後挑選未來氣候情境。

GCM 為以物理性評估大氣內溫室氣體濃度增加所導致的全球暖化，其分析大氣、海洋、冰川與陸域系統間之交互作用後所得之初步設定，後被廣泛應用於氣候變遷評估與天氣預報中。根據 Lin and Tung (2017) 之驗證，台灣各區前五個適合的 GCM 如下表 3-3，本研究挑選適用於坪林集水區（台灣北部）的 GCM 模式進行模擬，分別為 HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3.6.0、CCSM4 及 bcc-csm1.1m 進行模擬。適合台灣北部之模式排名分別為 HadGEM2-AO、NorESM1-ME、CSIRO-Mk3.6.0、CCSM4 及 bcc-csm1.1m，其各地適合情境推估方式為：

1. 以 1986 年至 2005 年個氣象站歷史觀測雨量為基礎資料，統計出個氣象站月平均降雨量後，以統計方法之主成分分析求取個氣象站主要前三成分，後求得主成分分數，再以前述主成分分析計算個氣象站之間之距離，透過階層是層級分析法進行分析。
2. 以相關係數 (R) 將乾季除以濕季之均方根誤差 (Root-Mean-Square Deviation, RMSE) 為評估指標，後將適合台灣之 GCMs 進行計算，並將前述 1 之主要三成分排序，並將前三項排名加總，以名次最前之 GCMs 為優先選取模式 (Lin, C. Y. et al., 2017)。

表 3-3 研究區域落在台灣北部分區以及全台灣所適合之 GCM 列表

	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Rank 5
北部	HadGEM2-AO	NorESM1-ME	CSIRO-Mk3.6.0	CCSM4	bcc-csm1.1m
東北部	MRI-CGCM3	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO	NorESM1-ME
北部山區	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME	HadGEM2-AO	MRI-CGCM3
全台	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4	MIROC5	GISS-E2-R

(改編自 Lin, C. Y. et al., 2017)

在 IPCC 第五次評估報告中，以「代表濃度途徑」(Representative Concentration Pathways，簡稱 RCPs) 定義四組未來氣候改變情況，並以輻射強迫力在 1750 年與 2100 年之間的差值作為指標，區分不同情境。RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.0 情境分別為相較 1750 年輻射壓迫力增加 2.6、4.5、6.0 與 8.5 瓦之情況，其中 RCP2.6 之情境為暖化減緩之情境，而 RCP8.5 情境則是溫室氣體持續高度排放之狀況，本研究挑選與當前溫室氣體排放量相符，科學界定義之四組情境中，溫室氣體排放最高之情形 RCP8.5 (見圖 3-3) 作為主要探討之情境，並參考 IPCC 該次報告中所用之 1986~2005 年作為基期年，利用 TaiWAP 內所建氣候資料產生模組，產製未來 300 年氣候資料，取其平均值並取之近程 (Short-term: 2021-2040)、中程 (M1: 2041~2060) 中長程 (M2: 2061~2080) 與長程 (L: 2081~2100) 情境二與長期之氣候資料 (主要流程見圖 3-4)。

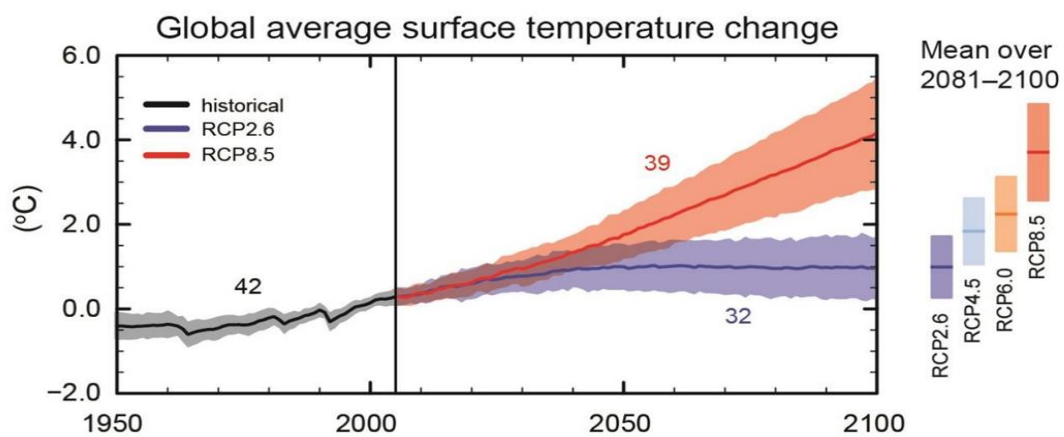


圖3-3 IPCC AR5之不同氣候變遷情境下全球地表溫度變化

(資料來源：Stocker, Thomas F., et al., 2013)



圖 3-4 TaiWAP 資料產製流程圖 (改繪自 TaiCCAT 簡報說明檔案)

3.5 SWAT 模式

SWAT 模式 (Soil and Water Assessment Tool) 為美國農業局農業研究服務 (United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDAARS) 的 Jeff Arnold 博士所開發，是一個具有物理機制，須參數率定之集水區尺度水文水質模式，可以評估集水區在不同土地利用、土壤分佈與管理作業下對水文、泥砂、營養鹽、微生物和農藥承載之影響(USDA, 2019)。SWAT 模式為半分布模式 (Semi-Distributed) 之水文模式，次集水區的劃分為透過河流交會點來繪製，接著以土地利用、土壤特性與坡度等地文參數，定義門檻值，劃分次集水區及每一個水文單元 (Hydrological Response Unit, HRU)，以模擬單元內的流量輸出。

最後將 TaiWAP 輸出成果代入 SWAT 模式後產製未來三百年之短程、中程、中長程與長程之日流量，並取其流量平均。SWAT 預設參數則參考林冠州 (2017)，土地利用部分，該集水區主要以森林為主，佔 90.35%，其次為農地 5.01%、都市 1.91%等；土壤分布則以幼黃土 40.89%最多，其次分別為崩積土 27.15%、石質土 18.98%等，集水區內主要經濟作物以茶為主。

本研究將 TaiWAP 輸出成果代入 SWAT 模式後產製未來三百年之短程、中程、中長程與長程之日流量，並取其流量平均。SWAT 預設參數則參考 SWAT 預設參數則參考林冠州 (2017)，土地利用部分，該集水區主要以森林為主，佔 90.35%，其次為農地 5.01%、都市 1.91%等；土壤分布則以幼黃土 40.89%最多，其次分別為崩積土 27.15%、石質土 18.98%等，集水區內主要經濟作物以茶為主。之後，將整個集水區劃分為多個子流域與不同的水文單元，計算每個水文單元之基本數據，包含高程、面積、坡度等係數，並輸入上述 TaiWAP 所產生之氣象資料，進行流量模擬 (見圖 3-5)。其流量模

擬涵蓋三部分：

1. 地表逕流模擬

SWAT 模式以 SCS Curve Number 法進行估算，該方程式最早應用在美國小型鄉村集水區，以雨水與逕流之間建立相關回歸式，並估算土地利用與土壤組成所產生之逕流量 (Rallison et al., 1982)。SCS curve number 公式如下：

$$Q_{Surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S} \quad (3)$$

Q_{Surf} 為累積地表逕流量 (超滲降雨量)，單位為公釐 (mm)， R_{day} 為當天之降雨深度， I_a 為初始入滲量， S 為保留係數。其中，當降雨量大於 I_a 時，才会有地表逕流的發生，若小於 I_a 則會全部滲入土壤中。

在較大的降雨事件發生時，SWAT 模式採合理化公式進行模擬，公式如下：

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times Area}{3.6} \quad (4)$$

q_{peak} 為洪峰流量 ($m^3 s^{-1}$)， C 為逕流係數， i 為降雨強度， $Area$ 為集水區面積 (km^2)，3.6 為單位換算係數。

2. 側向流模擬

除地表逕流外，SWAT 模式亦考慮側向流。模式中側向流以 Sloan et al. (1984) 之方法進行模擬，因側向流受水力傳導度較高的土壤、坡長與坡度影響，故，須達到門檻值，側向流才會發生，其公式如

下：除地表逕流外，SWAT 模式亦考慮側向流。模式中側向流以 Sloan et al. (1984) 之方法進行模擬，因側向流受水力傳導度較高的土壤、坡長與坡度影響，故，須達到門檻值，側向流才會發生，其公式如下：

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 \times H_0 \times \phi_d \times L_{Hill}}{2} \quad (5)$$

$SW_{ly,excess}$ 為坡地每單位面積之飽和含水量 (mm)， H_0 為坡地出水口顯示之飽和含水層厚度， L_{Hill} 為坡長 (m)，1000 為公尺轉換毫米。

3. 淺層地下水量模擬

淺層地下水層是河川機流補助機制的來源，其計算方式是透過水平衡，將河川基流補助與地表水滲透等進行加減複合運算，藉以瞭解其總量，公式如下：

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg,sh} - Q_{g,w} - W_{revap} - W_{pump,sh} \quad (6)$$

$aq_{sh,i}$ 為淺層地下水在第 i 天之儲水量 (mm)， $aq_{sh,i-1}$ 則為淺層地下水在第 $i-1$ 天之含量 (mm)， $W_{rchrg,sh}$ 為補助淺層地下水量 (mm)， $Q_{g,w}$ 為補助河川基流之水量 (mm)， W_{revap} 為土壤缺水時從淺層地下水補注回土壤之水量 (mm)， $W_{pump,sh}$ 為人為抽水量 (mm)。

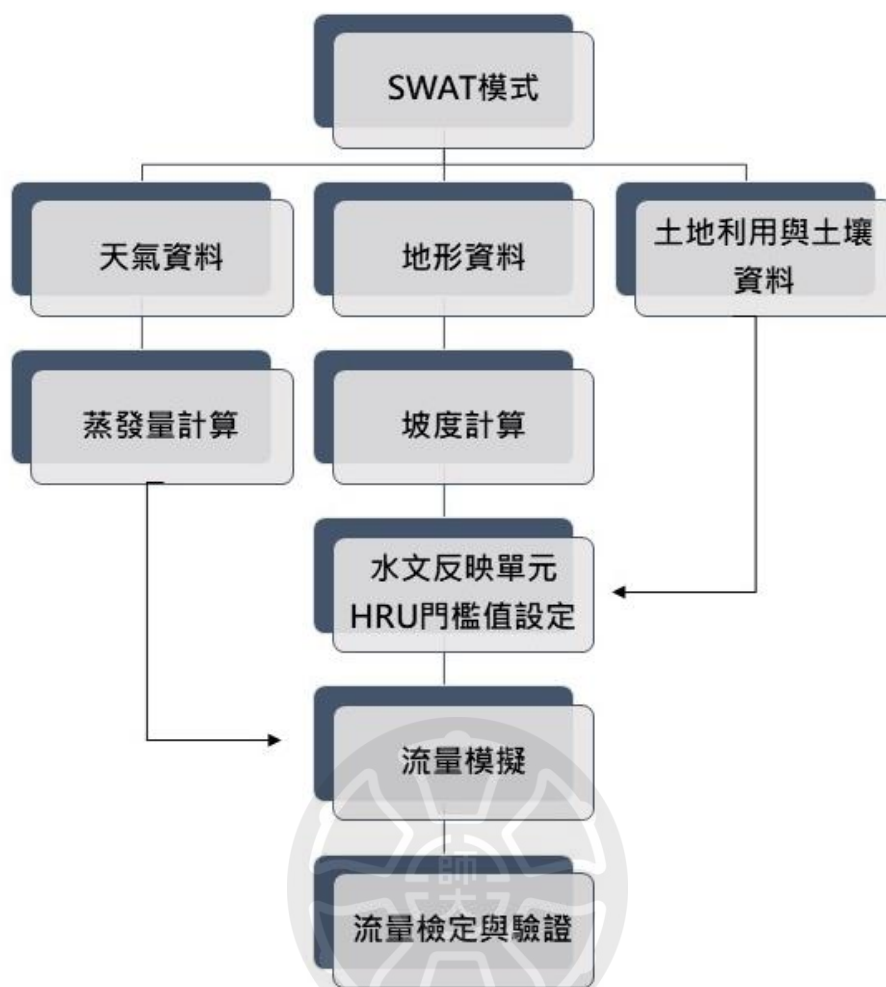


圖 3-5 SWAT 模式模擬流程圖（作者改繪自林冠州，2017）

第四章 河川態有機碳輸出模氣候變遷之衝擊

本研究模擬翡翠水庫上游坪林集水區氣候變遷下之流量，並透過翡翠水庫管理局之日流量資料進行檢定驗證，評估流量模擬成效與確認集水區參數檢定成果後，透過汙染物負載量模式模擬未來氣候變遷情境下，坪林集水區之溶解態有機碳輸出，評估氣候變遷對水體內溶解態有機碳之影響。

進行評估之前必須先瞭解未來氣候變遷下可能發生的氣候狀況，本研究為利用科技部所提供之適合台灣北部的五種 GCM 模式在 Short-term（近程）、M1（中程）、M2（中長程）與 Long-term（長程）下，溶解態有機碳之輸出。

4.1 坪林集水區觀測流量與模擬情形

4.1.1 觀測雨量與流量趨勢

台灣北部區域枯水期和豐水期河川流量有所差異，枯水期大致為 11 月至 4 月，北部河川總流量約為 56.2 億立方公尺，而豐水期為 5 月至 10 月，河川總流量大約為 94.8 億立方公尺（經濟部水利署，2013）。

本研究整理坪林集水區月降雨量如下表 4-1，最大降雨大多落在八月，2004 年月雨量達到 1032mm；月雨量最少月份多集中於 1 月至四月，2002 年適逢大旱，坪林集水區內一月累積雨量僅 7mm，亦發現 2002 年至 2004 年間，各年度內的雨量差異極大（見圖 4-1、表 4-2），2004 年降雨量最少之月份與降雨量最豐之月份差異達 977mm。2011 年至 2014 年間，各月雨量差異較小。

表 4-1 坪林地區月降雨量 (mm)

Rainfall (mm)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2002	7	32	19	33	112	178	655	219	297	180	137	181
2003	76	30	105	169	167	404	10	252	493	258	335	40
2004	67	55	244	145	546	174	334	1032	686	534	74	428
2005	103	367	257	43	652	216	479	953	545	457	115	131
2011	98	14	75	44	416	336	192	316	103	467	485	352
2012	270	199	102	216	378	545	236	433	391	102	237	238
2013	72	157	62	238	309	181	345	596	420	513	118	326
2014	274	61	134	126	551	533	277	215	215	206	200	127

(註：顏色越藍雨量越豐，顏色越紅雨量越少)

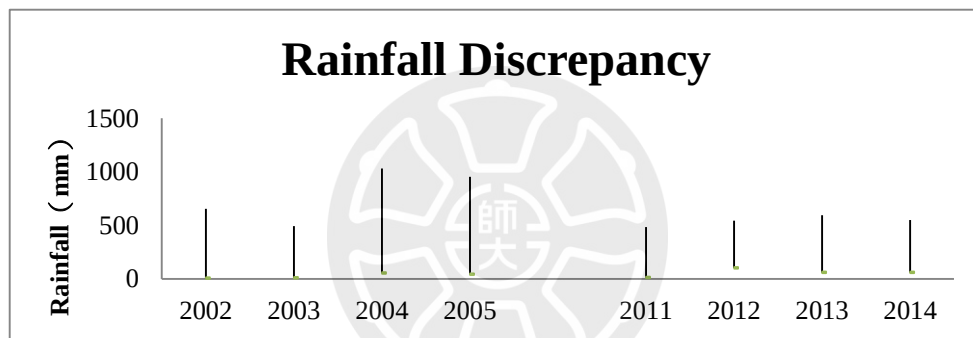


圖 4-1 各年度雨量資料全距

表 4-2 各年度最大與最小月累積雨量及差異

	2002	2003	2004	2005	2011	2012	2013	2014
Max	655	493	1032	953	485	545	596	551
Min	7	10	55	43	14	102	62	61
Discrepancy	648	483	977	910	471	443	534	490

流量部分，本研究整理坪林地區日平均流量與全年流量變化依乾濕季分，結果如下表 4-3 與圖 4-2、4-3，坪林地區降水主要集中於 10 月與 11 月乾濕季交接之時。2002 年全年少雨，該年 1 月至 4 月逕流量僅 569.74 立方公尺（圖 4-4），5 月至 10 月之間（圖 4-5），僅雷馬遜颱風與娜克莉颱風為該年度帶來大量降水，其濕季逕流量僅 1715.6 立方公尺。

表 4-3 2002 年至 2005 年及 2011 年至 2014 年一月均逕流量（cms）

Year/Month	2002	2003	2004	2005	2011	2012	2013	2014
Jan	5.12	5	6.66	16.18	24.21	23.52	14.33	6.5
Feb	7.52	2.75	14.17	27	20.36	20.6	7.93	18.13
Mar	3.44	3.66	12.47	13.72	15.65	11.94	2.62	11.44
Apr	3.14	6.57	8.73	5.19	9.55	8.56	8.21	6.8
May	3.34	4.69	10.06	24.75	20.51	20.39	10.38	19.43
Jun	6.2	16.23	6.32	10.59	15.11	21.49	3.56	23.51
Jul	25.18	2.46	9.97	17.83	9.64	5.27	6.58	12.22
Aug	5.01	3.54	17.94	20.31	13.46	24.31	8.94	6.59
Sep	8.59	11.87	22.03	31.23	10	13.33	17.97	9.1
Oct	7.76	20.9	18.69	26.88	35.42	7.16	18.12	12.43
Nov	7.86	38.42	11.57	10.92	37.12	8.42	14.56	19.42
Dec	9.72	10.79	17.54	10.74	36.67	17.61	20.72	14.85

（註：顏色越藍雨量越豐，顏色越紅雨量越少）

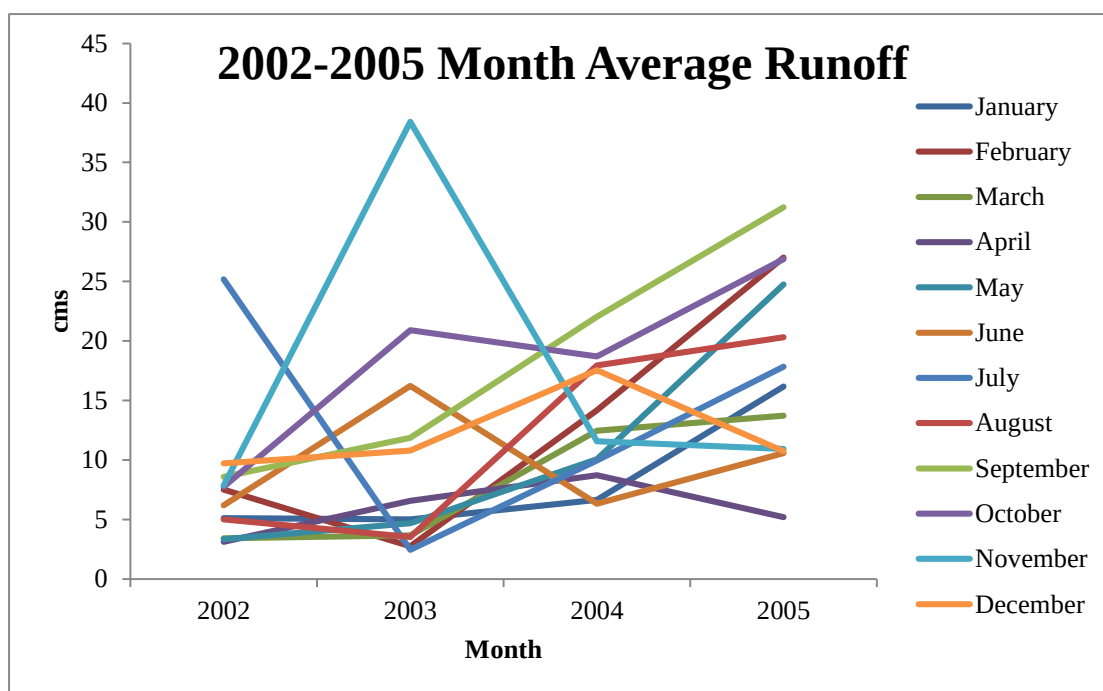


圖 4-2 2002~2005 年逐月月均逕流量變化圖

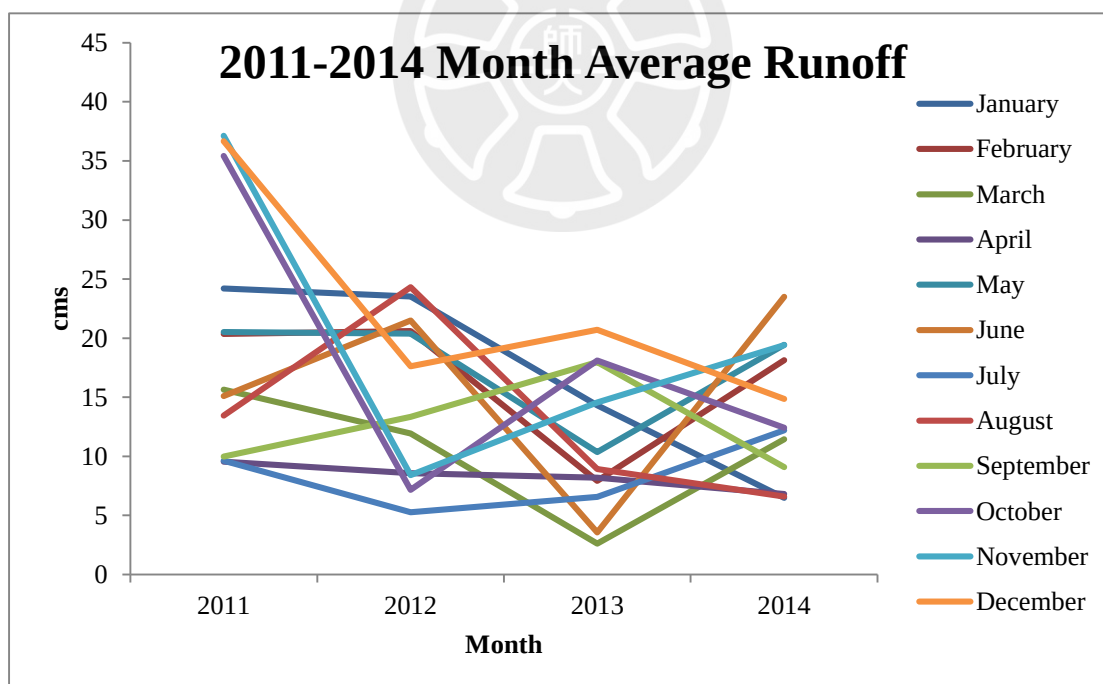


圖 4-3 2011~2014 年逐月月均逕流量變化圖

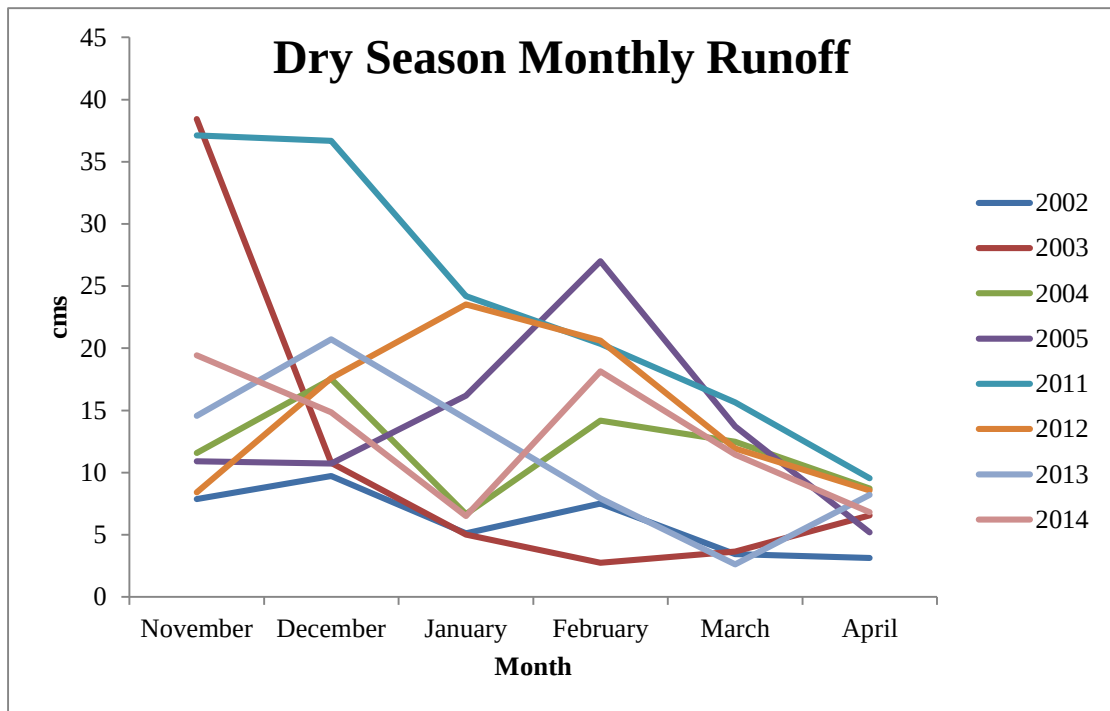


圖 4-4 各年度乾季月份月均逕流量圖

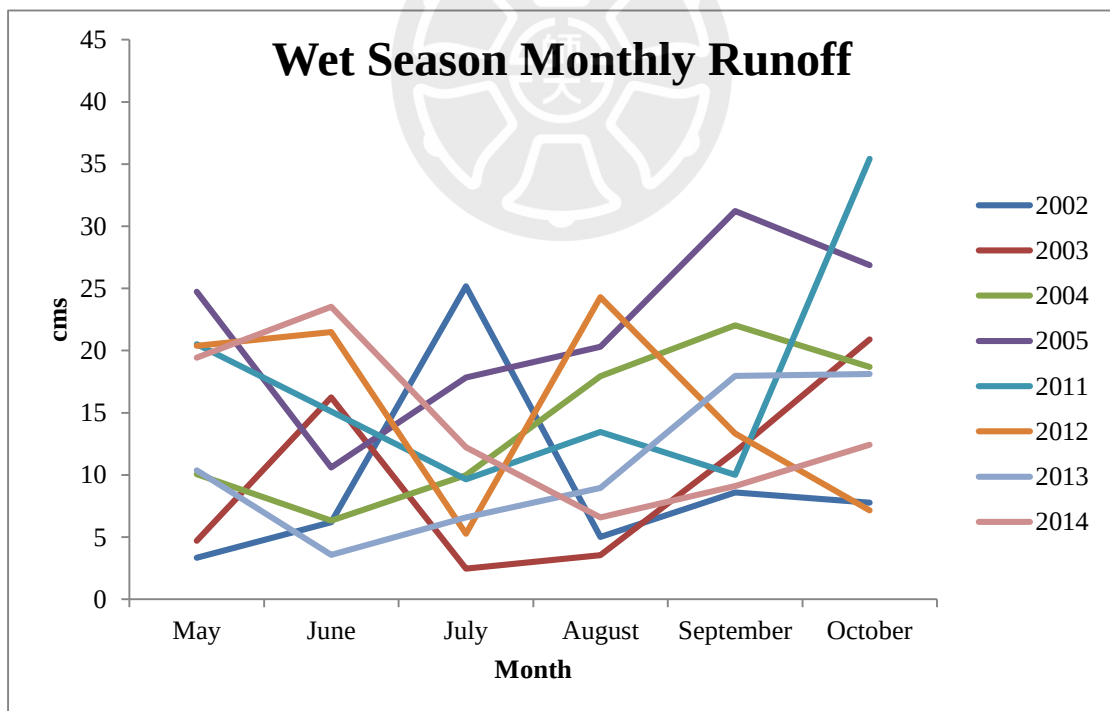


圖 4-5 各年度濕季月份月均逕流量圖

2003 年 1 月至 4 月仍維持旱象，坪林集水區逕流量僅 542.3 立方公尺，較 2002 年更加稀少，該年降水集中年底 10 月與 11 月的乾濕季交替期間，10 月逕流量達 627 立方公尺，11 月更達 1152.6 立方公尺，一解北台灣旱象。2004 年則逐步回到上升至年逕流量 4745.2 立方公尺，2005 全年逕流量約 6509.6 立方公尺。2011 年至 2014 年間，以 2011 年年逕流量最豐，2013 年年逕流量較少。

4.1.2 流量模擬

坪林集水區位於坪林地區集水區下游部分，以思源橋為界線進行區分。本研究參考林冠州（2017）檢定坪林集水區各次集水區之相關參數設定，參數設定如下表 4-4。流量檢定時期為 2012 年至 2014 年，流量驗證時期為 2005 年至 2008 年。流量檢定成果 $R^2=0.81$ 、Nash 值為 0.78，位於非常好的區間內。流量驗證部分，驗證時期為 2005 年至 2008 年，流量驗證成果 $R^2=0.71$ 、Nash 值為 0.71，位於良好的標準範圍內。

敏感性分析排名第一之參數為 CN 值，CN 值為 SCS Curve number 用以計算地表逕流之參數。CN 值檢定成果下降約 20%，檢定範圍為 $\pm 20\%$ ；敏感性排行第二的參數為 GW_Delay 地下水補充延時，檢定成果約為 11 天，檢定範圍介於 0 至 15 天之間；ALPHA_BF 為退水係數，檢定成果 0.212，檢定範圍介於 0 和 1 之間，敏感性分析排名第三；第四為 RCHRG_DP 淺層地下水滲透到深層地下水之係數，檢定成果 0.432，檢定範圍介於 0.22 和 0.74 之間；GWQMN 為地下水補注河川流量深度的門檻值，該檢定成果為 257，檢定範圍為 0 至 571.8mm，敏感性分析排名為第五，REVAPMN 主要為淺層地下水往上發生毛細現象的水深門檻值（mm），該敏感性最低，檢定成果為 219.3，檢定範圍為 59.36~353.14。

表 4-4 坪林集水區水文參數檢定表

Parameter	Method	subbasin	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Max_value
CN2	Relative	5,6,7,8,9	1	-0.198	-0.2	0.2
ALPHA_BF	Replace	5,6,7,8,9	3	0.212	0	1
GW_DELAY	Replace	5,6,7,8,9	2	11.351	0	15.518
GWQMN	Replace	5,6,7,8,9	5	257.017	0	571.784
RCHRG_DP	Replace	5,6,7,8,9	4	0.432	0.219	0.739
REVAPMN	Replace	5,6,7,8,9	6	219.323	59.357	353.142

(資料來源：林冠州，2017)

4.2 溶解態有機碳輸出情形

本研究使用坪林測站 2002 年至 2005 年、2012 年至 2014 年水質採樣資料，分析溶解態有機碳年輸出之趨勢。圖 4-6 為溶解態有機碳 2002-2005 年與流量時序圖，直條為流量，折線為溶解態有機碳濃度，由圖中可發現，2002 年至 2004 年間坪林集水區內流量不豐，而溶解態有機碳 (DOC) 在此時平均採樣濃度介於 0.44~1.75 (ppm) 之間，最大濃度落在 2004 年 7 月 1 日，後濃度隨測得流量減少大致呈現下降趨勢。

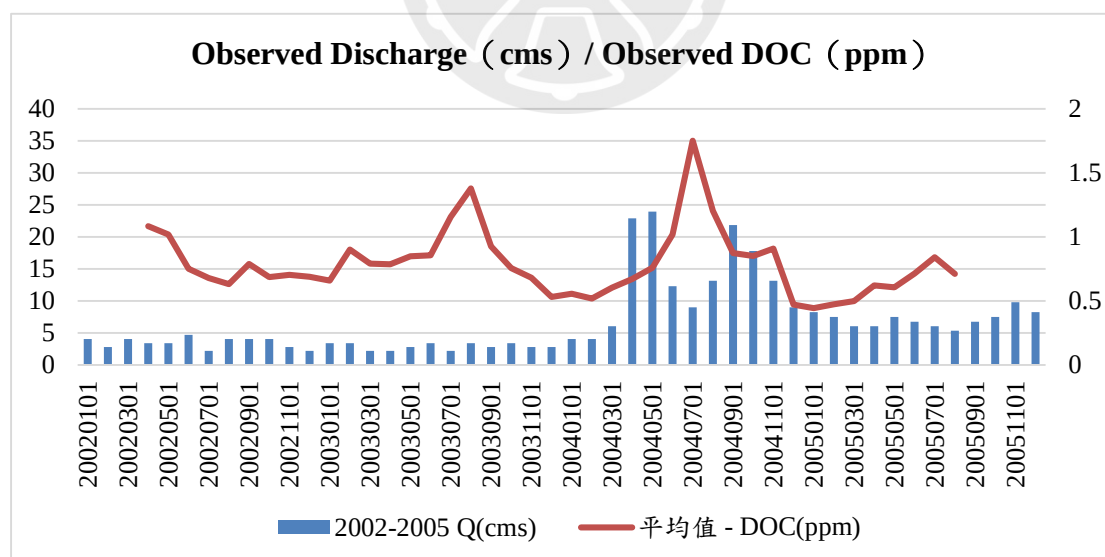


圖4-6 溶解態有機碳2002-2005年與流量時序圖

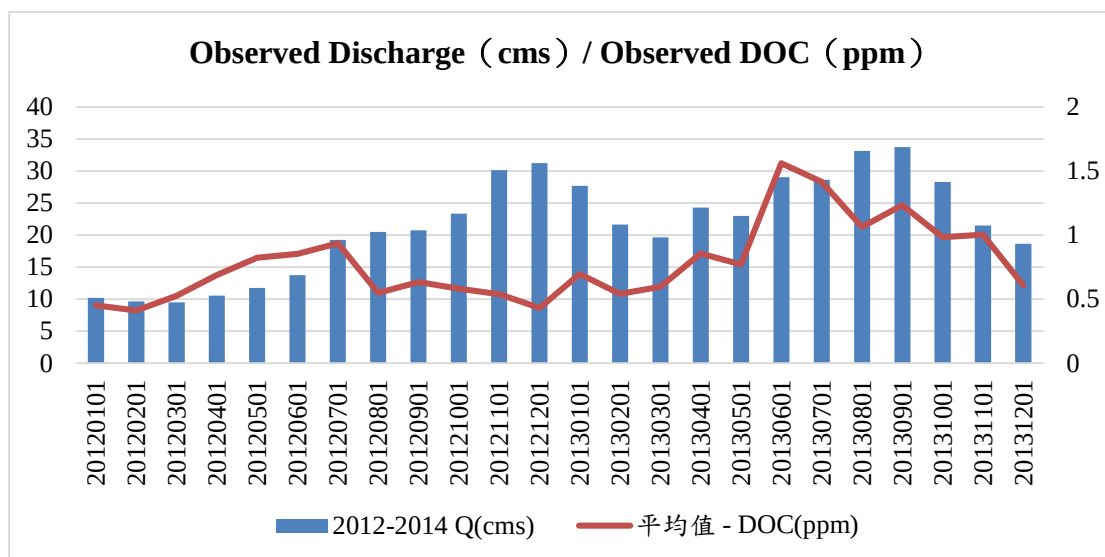


圖4-7 溶解態有機碳2012-2014年與流量時序圖

圖 4-7 為溶解態有機碳 2012-2014 年與流量時序圖，由圖中可發現測得有機態溶解碳濃度高峰發生於流量高峰後與連續有雨，延時洗出之情況下，如 2012 年 1 月 1 日至 2012 年 7 月 1 日之間，溶解態有機碳濃度隨流量增加，在 2012 年 7 月 1 日後，流量隨時間增加，溶解態有機碳濃度則在達到 7 月 1 日高峰後下降，並在 2012 年降至最低，後隨 2013 年初流量減少而增加，在同年 7 月達到高峰，後再隨流量增加而減少。

4.3 LOADEST 模擬成果

本研究以 Loadest 估算坪林測站每年溶解態有機碳輸出（圖4-8），並以赤池信息量準則（Akaike information criterion，AIC）選擇使用模型。AIC 為當兩模型有近似相等之觀測數量時，若模型擁有較小之 AIC 值，模型表現越好。（Akaike, H., 1974）第九模型 AIC 數值為（表4-5、4-6），表4-5可見 M9之 AIC 信息量在2002年至2005年之區間為0.064，表4-2中 M9的 AIC 信息量為0.948，相對於其他模型之表現較為更佳，另兩年際區間之決定係數 R^2 ，公式如下，決定係數為常用之檢定方法，主要用於判斷觀測與模擬是否一

致，當範圍介於0~1之間，即代表觀測資料與模擬資料之間之線性關係，當值越大，則誤差變異越少，並以超過0.5係數作為可接受之結果，(Santhi et al., 2001)，由前述可知 M9的表現也最佳，故選 M9作為估算坪林集水區溶解態有機碳輸出總量之回歸式模型。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (o_t - \bar{o})(s_t - \bar{s})}{\left[\sum_{i=1}^N (o_t - \bar{o})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (s_t - \bar{s})^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \quad (7)$$

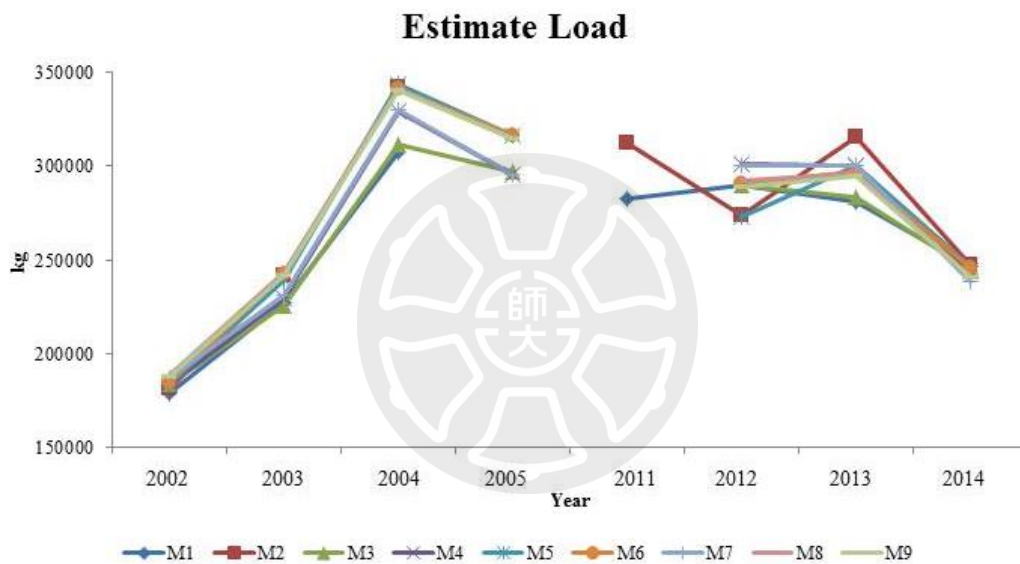


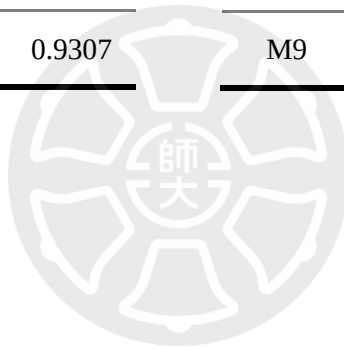
圖4-8 各模型年總輸出表現圖

表 4-5 Loadest 2002 年至 2005 年 AIC

	AIC	SPPC	R^2
M1	0.459	-82.571	0.894
M2	0.378	-70.511	0.9028
M3	0.449	-82.822	0.8956
M4	0.189	-40.135	0.92
M5	0.368	-70.736	0.9043
M6	0.152	-35.716	0.9233
M7	0.181	-40.593	0.9211
M8	0.143	-36.081	0.9245
M9	0.064	-24.323	0.9307

表 4-6 Loadest 2012 年至 2014 年 AIC

	AIC	SPPC	R^2
M1	1.203	-174.54	0.7751
M2	1.21	-177.28	0.7753
M3	1.194	-174.96	0.7789
M4	1.022	-152.45	0.815
M5	1.2	-177.68	0.7791
M6	1.029	-155.17	0.8152
M7	1.016	-153.43	0.8174
M8	1.022	-156.13	0.8176
M9	0.948	-147.41	0.8319



M9之公式如下：

$$\begin{aligned} Ln_{(Load)} = & a0 + a1LnQ + a2Ln(Q)^2 + a3 \sin 2\pi d_{time} + \\ & a4 \cos 2\pi d_{time} - a5d_{time} + a6d_{time}^2 \quad (8) \end{aligned}$$

M9 回歸式包含 a0~a6 共七個係數，上述公式中 $Ln_{(Load)}$ 為年溶解態有機碳總輸出量 (kg/yr)， LnQ 為取自然對數之日流量 (cms)， d_{time} 為十進位時間。回歸式以調整後最小平方法 (AMLE) 求得各項係數見表 4-3，回歸式如下，以估算溶解態有機碳年輸出量。

表4-7 以最小平方法求得之回歸式係數

	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
AMLE	6.0571	0.9103	0.0216	0.0107	0.2376	-0.0064	0.0035

代入後得到方程式如下，其中以 a0 與流量對溶解態有機碳輸出影響最大。而取自然對數下的時流量影響幅度居於第二位，輔以 Sin 與 Cos 函數進行校正後提高模式準確率。

$$\begin{aligned} Ln_{(Load)} = & 6.0571 + 0.9103LnQ + 0.0216Ln(Q)^2 + \\ & 0.0107 \sin 2\pi d_{time} + 0.2376 \cos 2\pi d_{time} - 0.0064d_{time} + \\ & 0.0035d_{time}^2 \quad (9) \end{aligned}$$

再將連續採樣之流量資料代入公式內，並以 1：1 圖比較採樣與模式間之關係，得到良好配適度。(見圖 4-9、4-10)

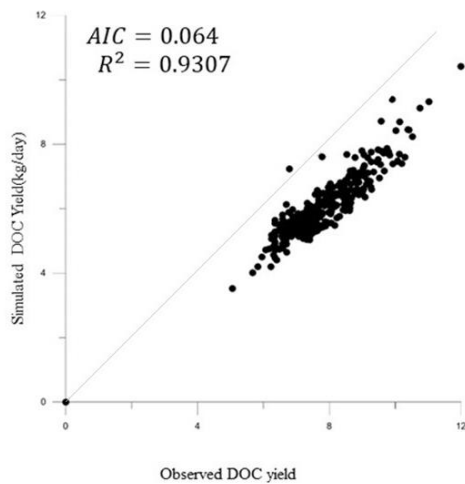


圖4-9 2002-2005成果對數分配圖

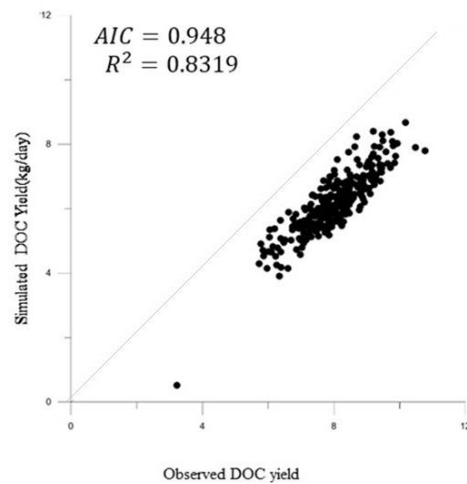


圖4-10 2012-2014成果對數分配圖

4.4 氣候變遷下溶解態有機碳輸出情形

4.4.1 逐月輸出情形

以 SWAT 模式產出之氣候變遷情境下近程(S)、中程(M1)、中長程(M2)與長程(L)之各 GCMs 之日流量，代入 Loadest 模式產生之多元迴歸式，並將其三百年每年總輸出取平均值後得表 4-8，表 4-8 顯示在 RCP_8.5 短程(S)情境下，HadGEM2-AO 輸出情況大致與 Baseline 相同，僅二月、六月、七月、九月與十二月較 Baseline 有小幅差異，然差異皆小於 1% (表 4-9)，而同情境下 CRISO-Mk3.6.0 輸出月差異大，最大溶解態有機碳輸出為九月之 1174 (kg/day)，最低輸出則為一月之 305 (kg/day)，其溶解態有機碳輸出在三月至十一月皆較 Baseline 多，輸出較 Baseline 少之月份僅十二月至一月。CCSM4 模式情境下，溶解態有機碳輸出自五月至十月皆較 Baseline 多；十一月至四月輸出則較 Baseline 情況少，但七月則較 Baseline 增加最多，差距達 38.1%。bcc-csm1.1-m 模式輸出結果溶解態有機碳相較 Baseline 多月份為五月至十一月，較少之月份為十二月至四月，且在一月時與 Baseline 輸出結果差異最大，達-22.1%。NorESM1-ME 溶解態有機碳輸出月際間差異小，

相較 Baseline 多之月份僅五月、八至十月，其餘月份均較 Baseline 少。

而在 RCP_8.5 中程 (M1) 情境下，HadGEM2-AO 輸出情況僅七月至十月輸出較 Baseline 多，又以八月份輸出最多，為 879 (kg/day)，二月份最少 (圖 4-11)；然而，與 Baseline 相差最大為六月之-25.05% (表 4-9)。同情境下 CRISO-Mk3.6.0 自二月至十月輸出皆較 Baseline 多，月差異大，最大溶解態有機碳輸出為八月份 985(kg/day)，最低輸出則為十二月之 292(kg/day)，其溶解態有機碳輸出在三月至七月皆較 Baseline 多出 25%以上。CCSM4 模式情境下，溶解態有機碳輸出在七月與八月分別輸出 1009 (kg/day) 與 1062 (kg/day)，但在九月即大幅下降至 685 (kg/day)，較 Baseline 減少 15.95%，十一月至四月輸出皆較 Baseline 情況少。bcc-csm1.1-m 溶解態有機碳模式輸出結果相較 Baseline 多之月份僅五月，其餘月份皆較 Baseline 輸出少，以三月、八月與十二月差異最多，並在八月差異最大，達-14.94%。NorESM1-ME 溶解態有機碳輸出各月份間變化無特定趨勢，在九月輸出最多，但相較 Baseline 多增加最多之月份為五月。

中長程 (M2) 情境下，HadGEM2-AO 輸出情況僅八月與九月輸出較 Baseline 多，又以八月份輸出較多，為 856(kg/day)，十二月份 262 (kg/day) 最少。然而，與 Baseline 相差最大為十一月之 273 (kg/day)，相差-31.58% (表 4-10)。同情境下 CRISO-Mk3.6.0 僅十月輸出 575 (kg/day) 較 Baseline 少 1.71%，其餘月份輸出皆較 Baseline 多，七月與八月輸出分別為 1250 (kg/day) 與 1092 (kg/day)，較 Baseline 增加 47.06%與 33.99%，為輸出最高之兩個月份，而輸出最少則為十一月之 401 (kg/day)。CCSM4 模式情境下，溶解態有機碳輸出在七月與八月分別輸出 807(kg/day)與 1095(kg/day)，分別較 Baseline 增加 25.9%與 28.82%，五月至九月間溶解態有機碳輸出皆較 Baseline 增加，但在十月即大幅下降至 483 (kg/day)，較 Baseline 減少

17.44%，自十月至四月輸出皆較 Baseline 情況少，又以二月減少最多，僅輸出 310 (kg/day)，較 Baseline 減少 23.81%。bcc-csm1.1-m 溶解態有機碳模式輸出結果相較 Baseline 多之月份僅七月與八月，分別輸出 712 (kg/day) 與 923 (kg/day)，較 Baseline 增加 11.08%與 8.59%，其餘月份皆較 Baseline 輸出少，以四月輸出 324 (kg/day) 與 Baseline 相差-16.71%最多，然而整體輸出最少月份為三月之 279 (kg/day)。NorESM1-ME 模式僅五月、六月與十月輸出 529 (kg/day)、616 (kg/day) 與 608 (kg/day) 較 Baseline 增加，分別增加 22.74%、23.45%與 3.93%，其餘月份均較 Baseline 減少。

長程 (L) 情境下，HadGEM2-AO 輸出情況僅七月至九月與十一月輸出 743 (kg/day)、1002 (kg/day)、730 (kg/day) 與 543 (kg/day) 較 Baseline 多，又以八月份輸出最多，但十一月與 Baseline 相差 36.09%最多。其餘月份均較 Baseline 少，其中十二月至二月、四月溶解態有機碳輸出均較 Baseline 少 30%以上，以十二月輸出 217 (kg/day) 與 Baseline 相差-37.28%最多。CRISO-Mk3.6.0 僅八月、十月與十二月輸出 848 (kg/day)、537 (kg/day) 與 325 (kg/day) 較 Baseline 少 0.24%、8.21%與 6.07%，然而，模式輸出量最大為八月份。其餘月份均較 Baseline 多，以五月輸出 661 (kg/day) 與 Baseline 相差 53.36 最多。CCSM4 模式情境下，溶解態有機碳輸出在七月與八月分別輸出 1090 (kg/day) 與 1133 (kg/day) 最多，亦與 Baseline 相差最大，分別相差 70.05%與 33.29%，自五月至九月與十一月均較 Baseline 多，但在十月即大幅下降至 457 (kg/day)，較 Baseline 減少 21.88%，相差最大。十二月至四月輸出皆較 Baseline 情況少。bcc-csm1.1-m 溶解態有機碳模式輸出結果自七月至九月、十一月至一月相較 Baseline 多，輸出最多之月份為八月之 930 (kg/day)，較 Baseline 增加 9.41%，而十一月輸出 603 (kg/day) 與 Baseline 相差 51.13%最多；輸出最少則為三月之 282(kg/day)，與 Baseline 相差-12.69%。NorESM1-ME 輸出以八月 854 (kg/day) 最多，但較 Baseline

增加之月份為三月、五月、六月、八月至十一月，其中又以十一月輸出 642 (kg/day) 與 Baseline 相比增加 60.9%最多。

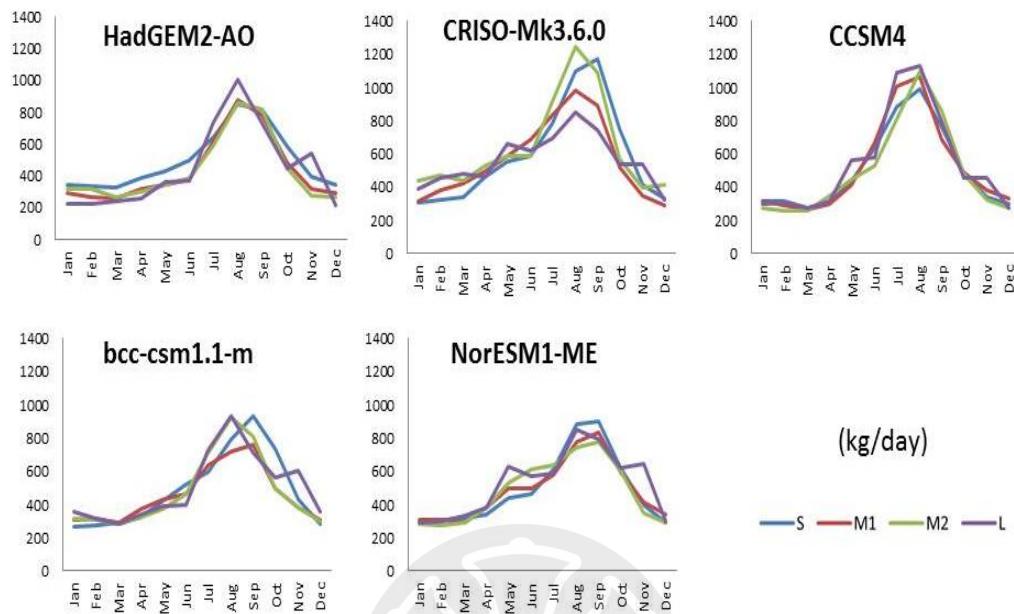


圖 4-11 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況

表 4-8 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況 (kg/day)

S	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2021-2040)												
Baseline	340	336	323	389	431	499	641	850	815	585	399	346
HadGEM2-AO	340	337	323	389	431	502	642	850	814	585	399	347
CRISO-Mk3.6.0	305	323	338	465	551	591	787	1095	1174	756	414	331
CCSM4	320	318	274	307	438	639	885	992	759	492	341	303
bcc-csm1.1-m	265	276	289	325	421	525	598	792	930	734	431	282
NorESM1-ME	288	310	315	343	437	466	612	883	903	617	398	291

表 4-8 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

(註：顏色越紅輸出越多，顏色越藍輸出越少)

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況 (kg/day)

M1	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2041-2060)												
Baseline	340	336	323	389	431	499	641	850	815	585	399	346
HadGEM2-AO	288	270	258	317	343	374	619	879	786	477	317	289
CRISO-Mk3.6.0	315	384	423	500	590	688	835	985	890	523	352	292
CCSM4	316	295	266	303	414	672	1009	1062	685	491	378	331
bcc-csm1.1-m	310	316	290	370	433	466	633	723	763	493	378	311
NorESM1-ME	309	311	289	385	500	496	579	781	838	597	418	337

(註：顏色越紅輸出越多，顏色越藍輸出越少)

表 4-8 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況 (kg/day)

M2	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2061-2080)												
Baseline	340	336	323	389	431	499	641	850	815	585	399	346
HadGEM2-AO	322	318	263	297	346	386	593	856	816	445	273	262
CRISO-Mk3.6.0	436	470	443	528	587	588	915	1250	1092	575	401	412
CCSM4	274	256	257	352	446	534	807	1095	856	483	323	278
bcc-csm1.1-m	313	310	279	324	377	461	712	923	807	499	381	296
NorESM1-ME	282	277	290	385	529	616	636	747	775	608	349	288

(註：顏色越紅輸出越多，顏色越藍輸出越少)

表 4-8 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬

坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況 (kg/day)

L	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2081-2100)												
Baseline	340	336	323	389	431	435	641	850	697	585	399	346
HadGEM2-AO	226	221	240	256	359	370	743	1002	730	444	543	217
CRISO-Mk3.6.0	394	455	478	465	661	623	697	848	746	537	538	325
CCSM4	299	304	272	317	559	579	1090	1133	794	457	453	278
bcc-csm1.1-m	359	319	282	341	394	400	731	930	712	559	603	357
NorESM1-ME	293	302	330	384	630	573	591	854	790	621	642	303

(註：顏色越紅輸出越多，顏色越藍輸出越少)

表 4-9 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比 (%)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	0	0.3	0	0	0	0.6	0.2	0	-0.1	0	0	0.3
CRISO-Mk3.6.0	-10.3	-3.9	4.6	19.5	27.8	18.4	22.8	28.8	44.1	29.2	3.8	-4.3
CCSM4	-5.9	-5.4	-15.2	-21.1	1.6	28.1	38.1	16.7	-6.9	-15.9	-14.5	-12.4
bcc-csm1.1-m	-22.1	-17.9	-10.5	-16.5	-2.3	5.2	-6.7	-6.8	14.1	25.5	8	-18.5
NorESM1-ME	-15.3	-7.7	-2.5	-11.8	1.4	-6.6	-4.5	3.9	10.8	5.5	-0.3	-15.9

(註：顏色越紅正差越多，顏色越藍負差出越多)

表 4-9 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比 (%)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	-15.3	-19.6	-20.1	-18.5	-20.4	-25.1	-3.4	3.4	-3.6	-18.5	-20.6	-16.5
CRISO-Mk3.6.0	-7.4	14.3	31	28.5	36.9	37.9	30.3	15.9	9.2	-10.6	-11.8	-15.6
CCSM4	-7.1	-12.2	-17.7	-22.1	-3.9	34.7	57.4	24.9	-16	-16.1	-5.3	-4.3
bcc-csm1.1-m	-8.8	-6	-10.2	-4.9	0.5	-6.6	-1.3	-14.9	-6.4	-15.7	-5.3	-10.1
NorESM1-ME	-9.1	-7.4	-10.5	-1	16	-0.6	-9.7	-8.1	2.8	2.1	4.8	-2.6

(註：顏色越紅正差越多，顏色越藍負差出越多)

表 4-9 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比 (%)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	-5.3	-5.4	-18.6	-23.7	-19.7	-22.7	-7.5	0.7	0.1	-23.9	-31.6	-24.3
CRISO-Mk3.6.0	28.2	39.9	37.2	35.7	36.2	17.8	42.8	47.1	34	-1.7	0.5	19.1
CCSM4	-19.4	-23.8	-20.4	-9.5	3.5	7	25.9	28.8	5	-17.4	-19.1	-19.7
bcc-csm1.1-m	-7.9	-7.7	-13.6	-16.7	-12.5	-7.6	11.1	8.6	-1	-14.7	-4.5	-14.5
NorESM1-ME	-17.1	-17.6	-10.2	-1	22.7	23.5	-0.8	-12.1	-4.9	3.9	-12.5	-16.8

(註：顏色越紅正差越多，顏色越藍負差出越多)

表 4-9 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比 (%)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RCP_8.5 (2021-2040)												
HadGEM2-AO	-33.5	-34.2	-25.7	-34.2	-16.7	-25.9	15.9	17.9	-10.4	-24.1	36.1	-37.3
CRISO-Mk3.6.0	15.9	35.4	48	19.5	53.4	24.9	8.7	-0.2	-8.5	-8.2	34.8	-6.1
CCSM4	-12.1	-9.5	-15.8	-18.5	29.7	16	70.1	33.3	-2.6	-21.9	13.5	-19.7
bcc-csm1.1-m	5.6	-5.1	-12.7	-12.3	-8.6	-19.8	14	9.4	-12.6	-4.4	51.1	3.2
NorESM1-ME	-13.8	-10.1	2.2	-1.3	46.2	14.8	-7.8	0.5	-3.1	6.2	60.9	-12.4

(註：顏色越紅正差越多，顏色越藍負差出越多)

4.4.2 模式平均

將各模式輸出結果求月平均後，得結果如下表 4-10。HadGEM2-AO 模式輸出在短程 (S) 情境下平均輸出量 497 (kg/day) 最多，中長程 (M2) 輸出量 431 (kg/day) 最少；CRISO-Mk3.6.0 輸出則以 M2 之 641 (kg/day)

最多，L 輸出 564 (kg/day) 最少；CCSM4 則以 L 輸出 545 (kg/day) 最多，M2 輸出 497 (kg/day) 最少；bcc-csm1.1-m 以 M1 輸出 457 (kg/day) 最少，L 輸出 499 (kg/day) 最多；NorESM1-ME 輸出則以 L 之 526 (kg/day) 最多，M2 輸出 482(kg/day)最少(圖 4-12)。而各模式之間，則以 CRISO-Mk3.6.0 平均輸出最多，HadGEM2-AO 平均輸出最少，CCSM4、bcc-csm1.1-m 與 NorESM1-ME 則相差不大(圖 4-13)。

根據 Lee et al. (2017) 研究結果顯示，台灣當前溶解態有機碳年平均單位面積產量約為 22.51 (kg/ha/yr)，即日平均輸出大約為 679.93 (kg/day)，據表 4-6 可發現，整體而言，本研究區在氣候變遷情境下 300 年之模擬結果在各模式下與台灣當前溶解態有機碳輸出現況皆呈現減少之趨勢。而各模式輸出趨勢如圖 4-14，除 CRISO-Mk3.6.0 無顯著趨勢外，HadGEM2-AO、bcc-csm1.1-m 與 NorESM1-ME 皆呈現先降後升之趨勢，而 CCSM4 則大致呈現增加之趨勢。

表 4-10 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出差異百分比 (%)

Average	S	M1	M2	L
Baseline	496	496	496	496
HadGEM2-AO	497	435	431	446
CRISO-Mk3.6.0	594	565	641	564
CCSM4	506	519	497	545
bcc-csm1.1-m	489	457	474	499
NorESM1-ME	489	487	482	526

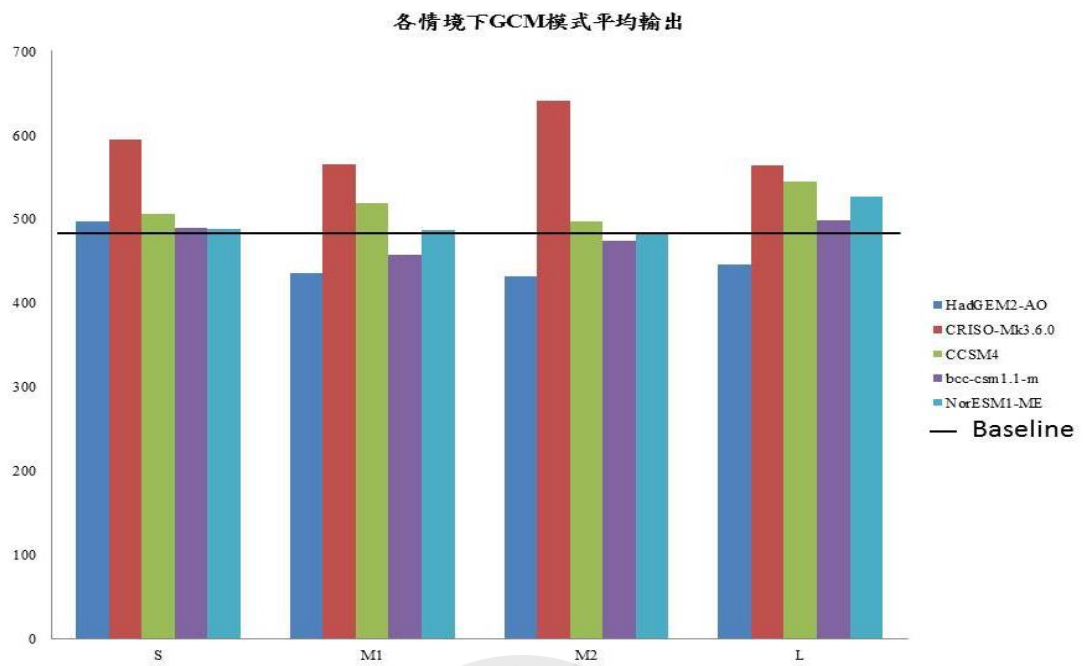


圖 4-12 RCP 8.5 各情境下模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 日平均輸出 (kg/day)

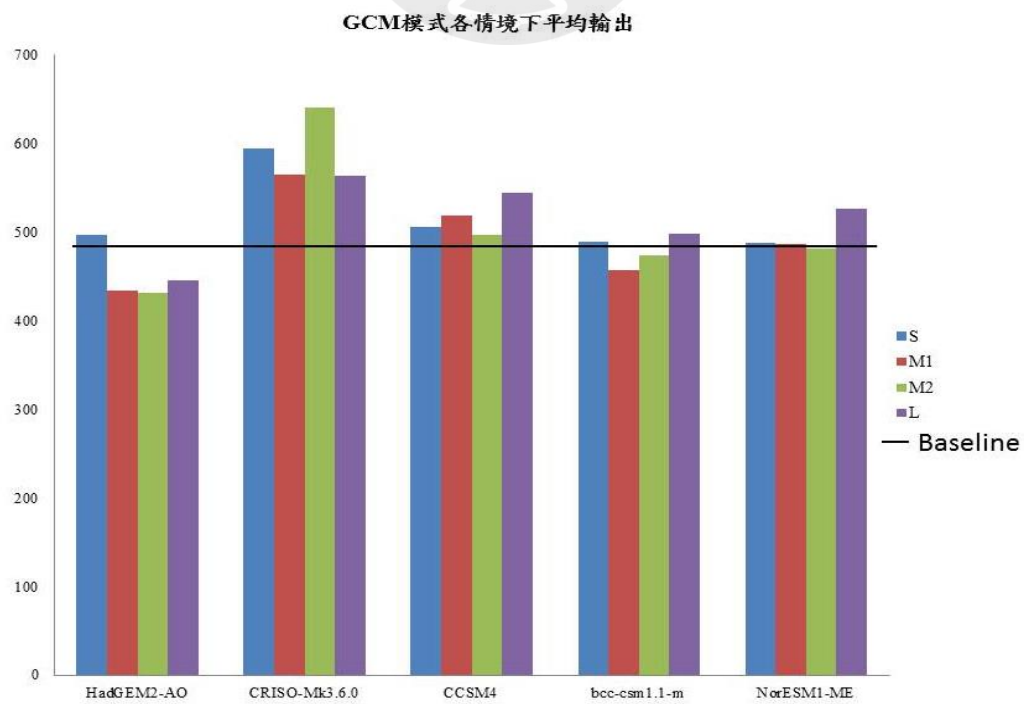


圖 4-13 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 日平均輸出 (kg/day)

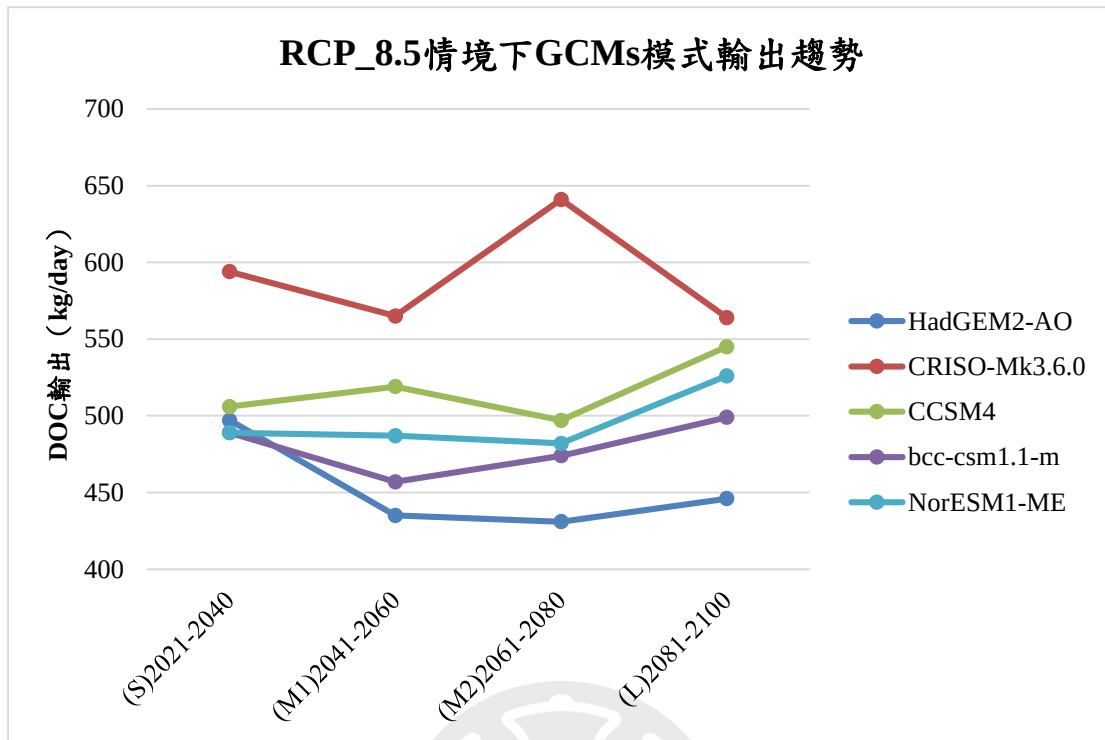


圖 4-14 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式

模擬坪林上游集水區 2021-2100 年之 DOC 輸出情況

4.5 氣候變遷下乾濕季溶解態有機碳輸出情形

4.5.1 濕季溶解態有機碳輸出情形

濕季溶解態有機碳輸出與 Baseline 之差異百分比如下表 4-7 與表 4-8，S 情境下 HadGEM2-AO（圖 4-10）與 Baseline 相差極小，CRISO-Mk3.6.0 在濕季時各月份較 Baseline 皆顯著增加，最大差異在九月時可達 44.05%；CCSM4 較 Baseline 增加之月份則主要為濕季開始的前四個月，五月至八月間，bcc-csm1.1-m 則與 CCSM4 相反，輸出較 Baseline 增加之月份主要落在濕季後半段，九月與十月間。而 NorESM1-ME 相較 Baseline 增減幅度較小，相較於 Baseline 輸出較多月份主要為八至十月份。

M1 情境下 HadGEM2-AO 溶解態有機碳輸出與 Baseline 相差大，五月與六月份較 Baseline 分別減少-20.42%與-25.05%，輸出主要集中於八月。CRISO-Mk3.6.0 在濕季時較 Baseline 增加最多的月份向前移至五月至七月，分別較 Baseline 增加 36.89%、37.88%與 30.27%，但較 S 情境 CRISO-Mk3.6.0 增加更集中特定月份，CCSM4 較 Baseline 增加之月份則主要為六至八月，其中七月與 Baseline 相差最大（圖 4-12），較 Baseline 增加 57.41%，而五月、九月至十月則相對較 Baseline 減少 3.94%、15.95%與 16.07%，由此可見 CCSM4 模式間月份差異大。bcc-csm1.1-m 輸出較 Baseline 增加之月份僅五月之 0.46%（圖 4-13），其餘濕季月份均較 Baseline 減少，且隨時間越靠近年底，減少越多。NorESM1-ME 在 M1 情境之濕季下較無趨勢，相較 Baseline 增加最多月份為五月之 16.01%，其餘月份與 Baseline 相差幅度較小。

M2 情境下 HadGEM2-AO 濕季溶解態有機碳輸出減少之趨勢與 M1 情境相差不大，整體而言濕季情境下 HadGEM2-AO 模式輸出較 Baseline 減少最多，五月、六月與十月分別較 Baseline 減少 19.72%、22.65%與 23.93%，僅八月與九月較 Baseline 分別小幅增加 0.71%與 0.12%，而七月減少幅度較小，僅減少 7.49%。CRISO-Mk3.6.0 較 M1 情境，與 Baseline 相比五月到九月間增加幅度大，分別增加 36.19%、17.84%、42.75%、47.06%與 33.99%，僅十月較 Baseline 減少 1.71%，與 M1 相比，輸出增加較 Baseline 最多之月份偏向七月與八月。CCSM4 較 Baseline 增加之月份與 M1 情境雷同，百分比增加最多之月份為七月與八月之 25.9%與 28.82%，僅十月減少 17.44%。bcc-csm1.1-m 濕季減少多，僅七月與八月小幅較 Baseline 增加 11.08%與 8.59%。NorESM1-ME 相較其他模式，與 Baseline 相較增加主要落在五月與六月之 22.74%與 23.45%，其餘月份小幅減少。

L 情境下 HadGEM2-AO 較 Baseline 增加之月份為七月之 15.91%與八月之 17.88%，五月與六月分別減少 16.71%與%；九月與十月則分別減少 10.43%與 24.1%，其中，六月與十月皆較 S、M1 與 M2 減少更多。CRISO-Mk3.6.0 在五月較 Baseline 輸出增加最多，增加 53.36%，後隨月份遞移逐漸減少，與 S、M1 與 M2 相比，增加許多，除此之外，與 Baseline 相比，增加月多之月份在 S 為九月、在 M1 時為六月、在 M2 時則移至八月，在 L 時，則退至五月，可發現，溶解態有機碳輸出與 Baseline 差異最大之月份隨時間遞移集中至春夏之際。CCSM4 較 Baseline 增加最多之月份為七月，相差達 70.05%，九月與十月較 Baseline 分別減少 2.58%與 21.88%。bcc-csm1.1-m 較 Baseline 增加之月份僅七月與八月，分別增加 14.01%與 9.41%，其餘月份均較 Baseline 減少。NorESM1-ME 與 Baseline 差異則無明顯趨勢（圖 4-14）為五月，差距達 46.17%。

整體而言，RCP_8.5 情境下，HadGEM2-AO 輸出情形主要為七、八月多，其餘月份減少，尤其以五月、六月與十月相較 Baseline 減少最多。而 CRISO-Mk3.6.0 則明顯隨時間尺度拉長，月份間差異越大且輸出量減少越多，尤其以 L 情境下減少最多；CCSM4 模式在各情境間輸出量與 Baseline 相差最大之月份皆為七月，最少月份皆為十月；bcc-csm1.1-m 與 NorESM1-ME 較無特定趨勢。

表 4-11 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區

2021-2100 年之濕季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2021-2040)	S Wet Season					
	May	June	July	August	September	October
HadGEM2-AO	0	0.6	0.16	0	-0.12	0
CRISO-Mk3.6.0	27.84	18.44	22.78	28.82	44.05	29.23
CCSM4	1.62	28.06	38.07	16.71	-6.87	-15.9
bcc-csm1.1-m	-2.32	5.21	-6.71	-6.82	14.11	25.47
NorESM1-ME	1.39	-6.61	-4.52	3.88	10.8	5.47

表 4-11 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之濕季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2041-2060)	M1 Wet Season					
	May	June	July	August	September	October
HadGEM2-AO	-20.42	-25.05	-3.43	3.41	-3.56	-18.46
CRISO-Mk3.6.0	36.89	37.88	30.27	15.88	9.2	-10.6
CCSM4	-3.94	34.67	57.41	24.94	-15.95	-16.07
bcc-csm1.1-m	0.46	-6.61	-1.25	-14.94	-6.38	-15.73
NorESM1-ME	16.01	-0.6	-9.67	-8.12	2.82	2.05

表 4-11 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之濕季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2061-2080)	M2 Wet Season					
	May	June	July	August	September	October
HadGEM2-AO	-19.72	-22.65	-7.49	0.71	0.12	-23.93
CRISO-Mk3.6.0	36.19	17.84	42.75	47.06	33.99	-1.71
CCSM4	3.48	7.01	25.9	28.82	5.03	-17.44
bcc-csm1.1-m	-12.53	-7.62	11.08	8.59	-0.98	-14.7
NorESM1-ME	22.74	23.45	-0.78	-12.12	-4.91	3.93

表 4-11 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之濕季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2081-2100)	L Wet Season					
	May	June	July	August	September	October
HadGEM2-AO	-16.71	-25.85	15.91	17.88	-10.43	-24.1
CRISO-Mk3.6.0	53.36	24.85	8.74	-0.24	-8.47	-8.21
CCSM4	29.7	16.03	70.05	33.29	-2.58	-21.88
bcc-csm1.1-m	-8.58	-19.84	14.04	9.41	-12.64	-4.44
NorESM1-ME	46.17	14.83	-7.8	0.47	-3.07	6.15

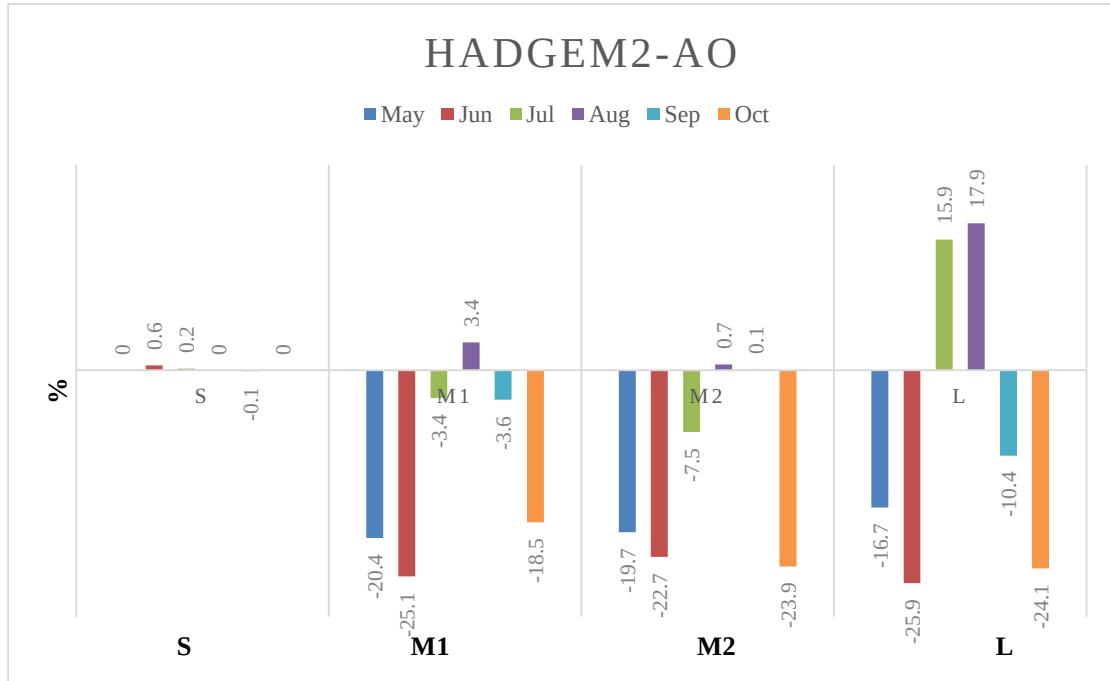


圖 4-15 HadGEM2-AO 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

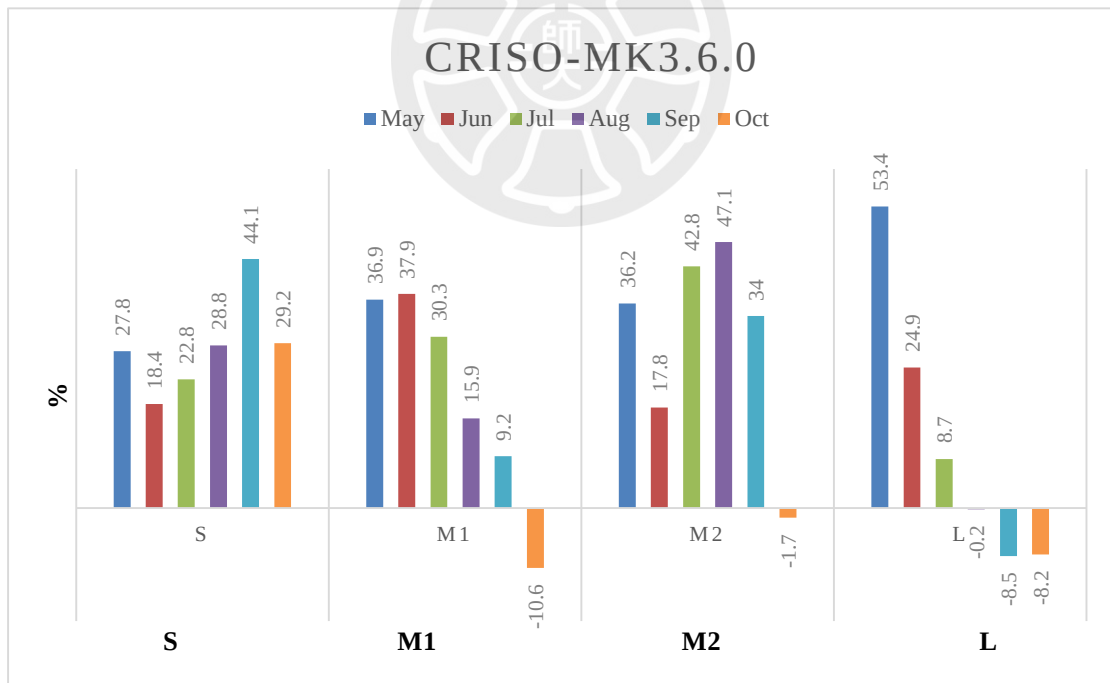


圖 4-16 CRISO-Mk3.6.0 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

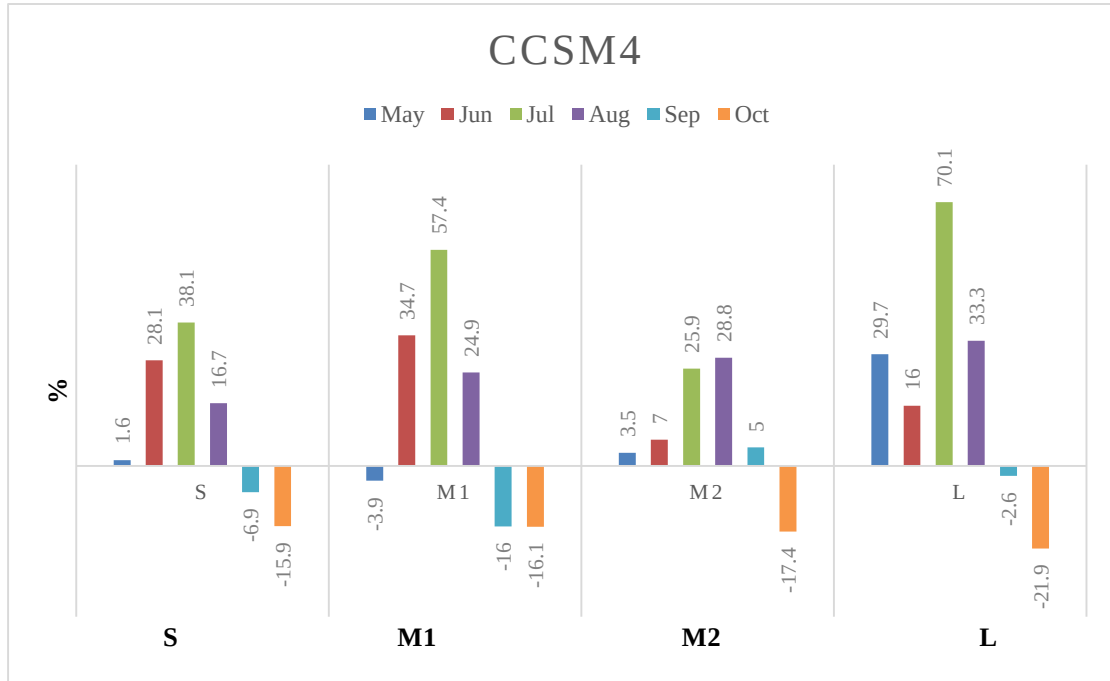


圖 4-17 CCSM4 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

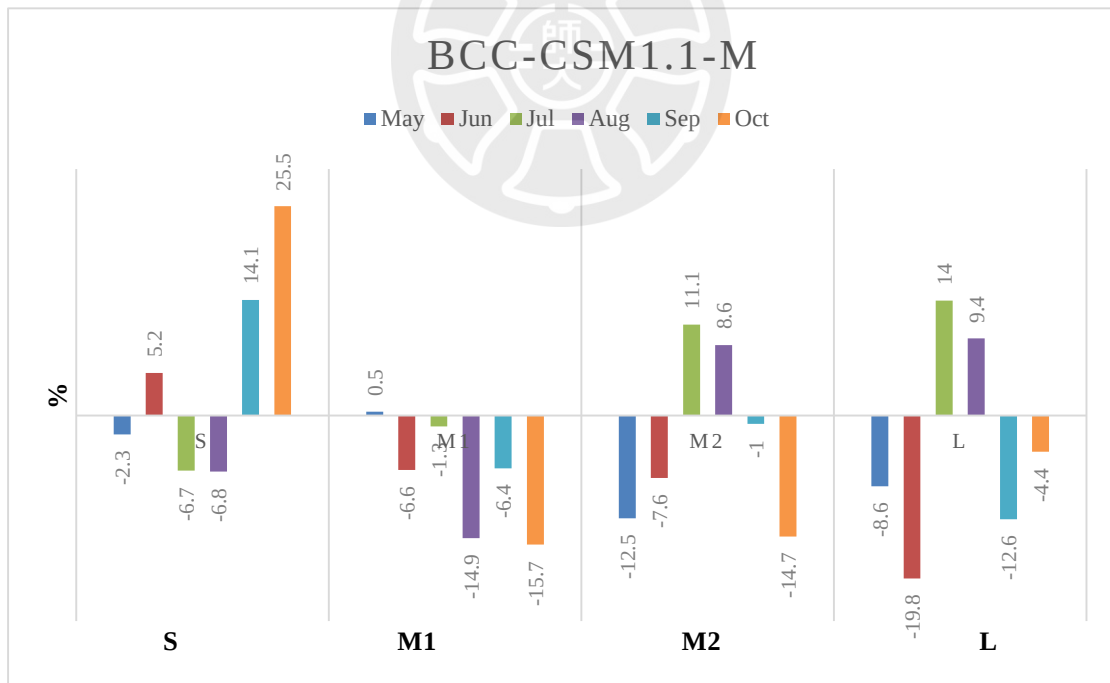


圖 4-18 bcc-csm1.1-m 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖

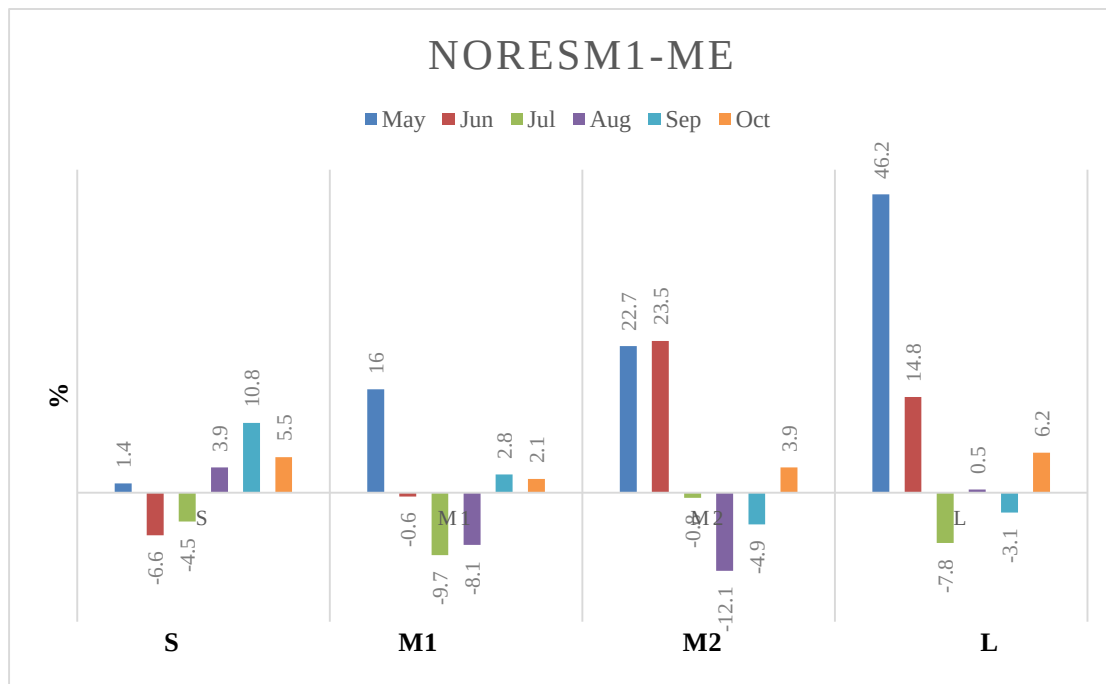


圖 4-19 NorESM1-ME 濕季輸出與 Baseline 差異百分比圖



4.5.2 乾季溶解態有機碳輸出情形

台灣北部乾季據經濟部水利署定義為每年十一月至隔年四月為乾季，本研究將乾季溶解態有機碳模式模擬結果與 Baseline 相差之百分比整理如下表 4-9、4-10。S 情境下 HadGEM2-AO 與 Baseline 相差極小（圖 4-15），僅二月與十二月相較 Baseline 微增加 0.3%，M1 情境下，以十一月與三月減幅最大，分別減少 20.6%與 20.1%，在 M2 情境下，同樣以十一月減幅 31.6%最大，然而，在 L 情境下，十一月卻較 Baseline 增加 36.1%，然而，在十二月情境下卻較 Baseline 大幅減少 37.3%，與十一月相差近 70%。CRISO-Mk3.6.0 在 S 情境下自十一月逐月減少（圖 4-16），自三月開始增加 4.6%，在四月時較 Baseline 增加最多；M1 情境模下月份間與 Baseline 相較之差異大，三月份溶解態有機碳輸出量較 Baseline 增加 31%，十二月輸出量則較 Baseline 減少 15.6。M2 情境下溶解態有機碳輸出量皆較 Baseline 增加，以二月時增加 39.9%最多，十一月增加 0.5%最少；L 情境下輸出量較 Baseline 增加最多為三月，增加 48%，僅十二月小幅減少 6.1%。

CCSM4 在 S 情境下較 Baseline 皆減少（圖 4-17），以四月溶解態有機碳輸出較 Baseline 減少最多達 21.1%，二月較 Baseline 減少最少，僅減少 5.4%；M1 則自十一月至四月較 Baseline 逐月減少，同樣以四月較 Baseline 減少 22.1 最多；M2 情境下，各個月皆較 Baseline 大幅減少，自十一月減少 19.1%逐月減少至二月的 23.8 後，微幅降低與 Baseline 之差異。L 情境下僅十一月較 Baseline 增加 13.5%後於十二月大幅減少 19.7%，整體而言，CCSM4 相較 Baseline 不論各情境皆呈現乾季溶解態有機碳輸出減少之趨勢。bcc-csm1.1-m 在 S 情境下自十一月較 Baseline 微幅增加 8%後（圖 4-18），十二月至四月皆較 Baseline 減少超 10%，以一月減少幅度 22.1%最多；而在 M1 與 M2 情境下趨勢雷同，十一月、

一月與二月減幅較小，其餘月份減幅較大；L 情境下十一月溶解態有機碳輸出較 Baseline 增加最多，增幅達 51.1%，而三月減幅最大，達 12.7%。

NorESM1-ME 在 S 情境下，皆較 Baseline 減少（圖 4-19），相較於 Baseline，輸出差異較小之月份為十一月與三月，分別減少 0.3%與 2.5%；在十二月與一月減少最多，分別減少 15.9%與 15.3%。在 M1 情境下，較 Baseline 小幅減少，僅十一月微幅增加 4.8%，而 M2 則全部較 Baseline 減少，僅四月減少較少，僅減少 1%。L 情境下，十一月較 Baseline 大幅增加 60.9%，而自十二月至二月，溶解態有機碳輸出模式模擬則與 Baseline 減少 12.4%、13.8%與 10.1%，在三月微幅增加 2.2%，四月又較 Baseline 減少 1.3%。

整體而言，各模式十一月在 L 情境下皆較 S、M1 與 M2 大幅增加，而除 CRISO-Mk3.6.0 外，其餘模式皆顯示十二月至四月之間，溶解態有機碳輸出較 Baseline 呈現減少之趨勢，尤以 HadGEM2-AO，各月份隨時間尺度增加，較 Baseline 減少越多。

表 4-12 RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林上游集水區

2021-2100 年之乾季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2021-2040)	Dry Season					
	November	December	January	February	March	April
HadGEM2-AO	0	0.29	0	0.3	0	0
CRISO-Mk3.6.0	3.76	-4.34	-10.29	-3.87	4.64	19.54
CCSM4	-14.54	-12.43	-5.88	-5.36	-15.17	-21.08
bcc-csm1.1-m	8.02	-18.5	-22.06	-17.86	-10.53	-16.45
NorESM1-ME	-0.25	-15.9	-15.29	-7.74	-2.48	-11.83

表 4-12 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之乾季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2041-2060)	Dry Season					
	November	December	January	February	March	April
HadGEM2-AO	-20.55	-16.47	-15.29	-19.64	-20.12	-18.51
CRISO-Mk3.6.0	-11.78	-15.61	-7.35	14.29	30.96	28.53
CCSM4	-5.26	-4.34	-7.06	-12.2	-17.65	-22.11
bcc-csm1.1-m	-5.26	-10.12	-8.82	-5.95	-10.22	-4.88
NorESM1-ME	4.76	-2.6	-9.12	-7.44	-10.53	-1.03

表 4-12 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之乾季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2061-2080)	Dry Season					
	November	December	January	February	March	April
HadGEM2-AO	-31.58	-24.28	-5.29	-5.36	-18.58	-23.65
CRISO-Mk3.6.0	0.5	19.08	28.24	39.88	37.15	35.73
CCSM4	-19.05	-19.65	-19.41	-23.81	-20.43	-9.51
bcc-csm1.1-m	-4.51	-14.45	-7.94	-7.74	-13.62	-16.71
NorESM1-ME	-12.53	-16.76	-17.06	-17.56	-10.22	-1.03

表 4-12 (續) RCP 8.5 情境下 5 種 GCM 模式模擬坪林

上游集水區 2021-2100 年之乾季 DOC 輸出情況與 Baseline 差異百分比 (%)

RCP_8.5 (2081-2100)	Dry Season					
	November	December	January	February	March	April
HadGEM2-AO	36.09	-37.28	-33.53	-34.23	-25.7	-34.19
CRISO-Mk3.6.0	34.84	-6.07	15.88	35.42	47.99	19.54
CCSM4	13.53	-19.65	-12.06	-9.52	-15.79	-18.51
bcc-csm1.1-m	51.13	3.18	5.59	-5.06	-12.69	-12.34
NorESM1-ME	60.9	-12.43	-13.82	-10.12	2.17	-1.29

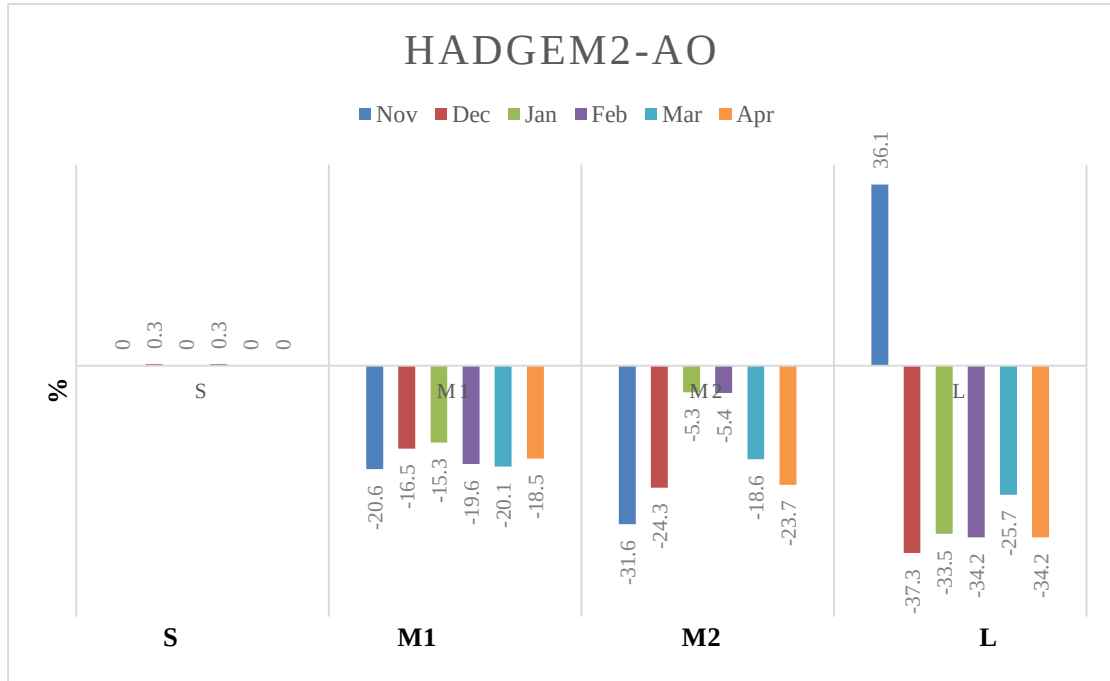


圖 4-20 HadGEM2-AO 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

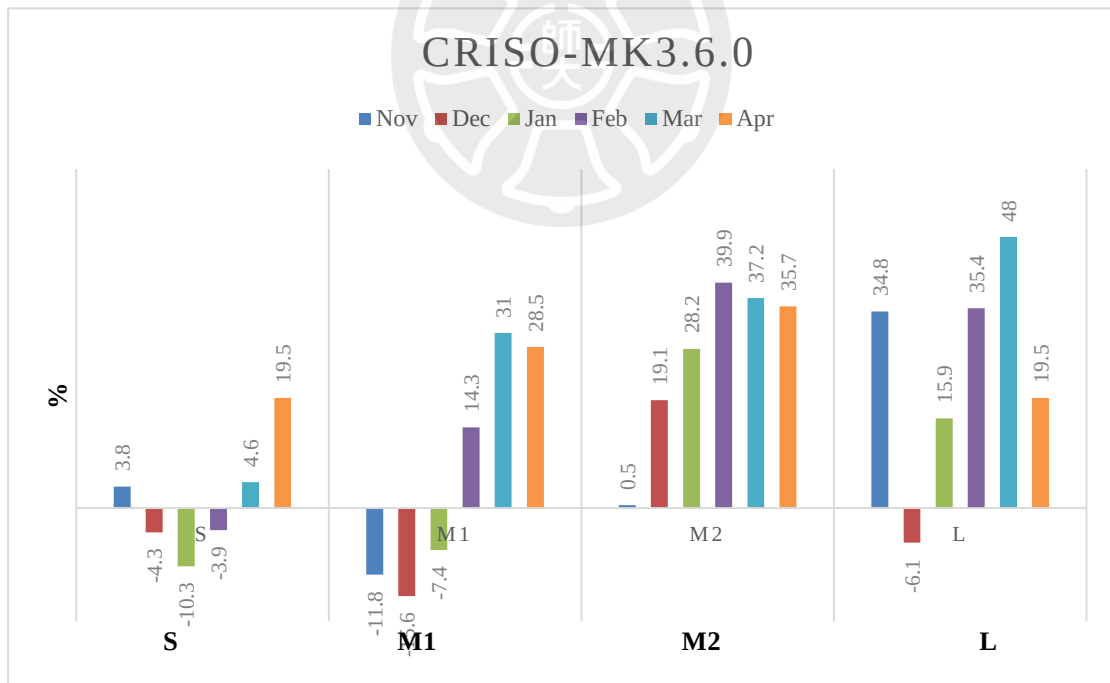


圖 4-21 CRISO-Mk3.6.0 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

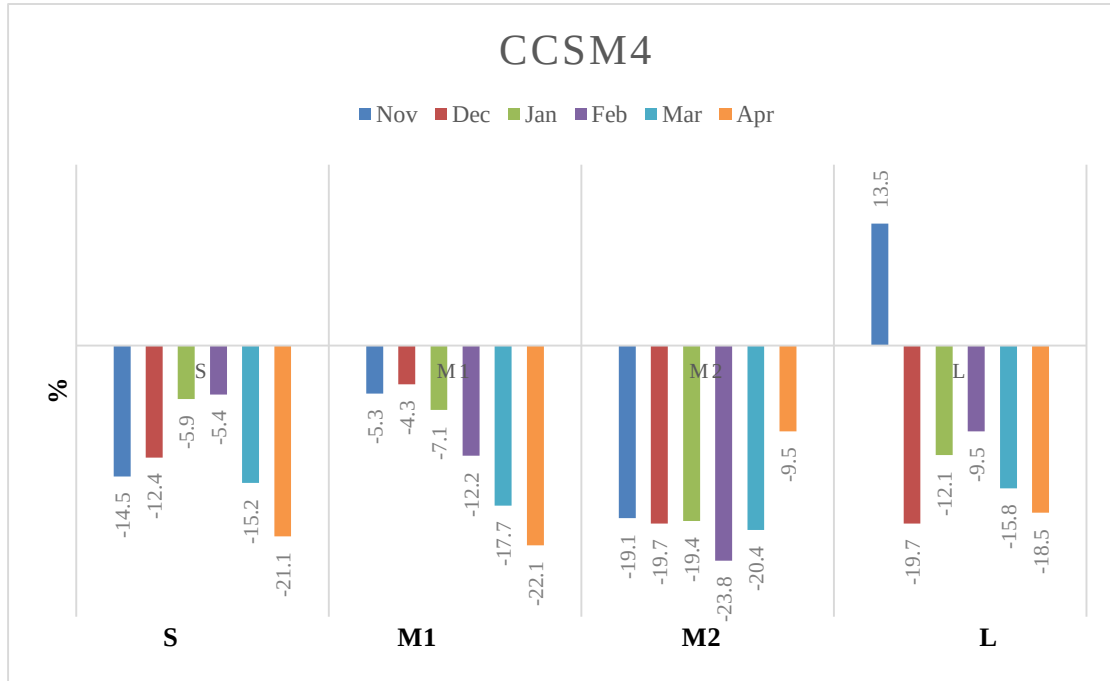


圖 4-22 CCSM4 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

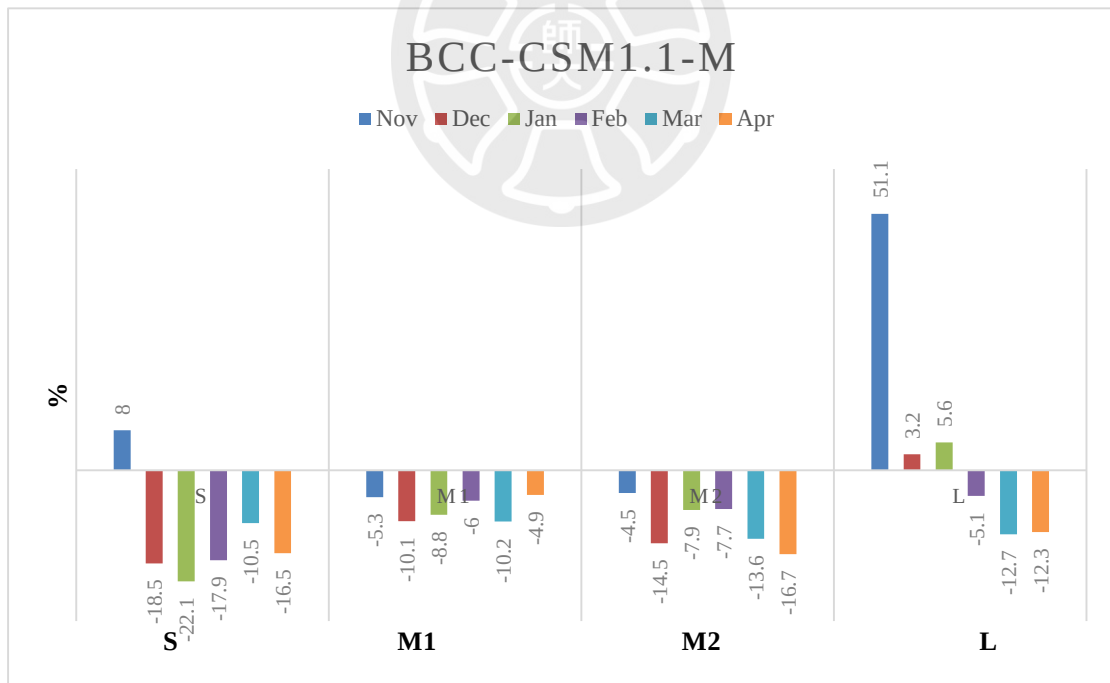


圖 4-23 bcc-csm1.1-m 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖

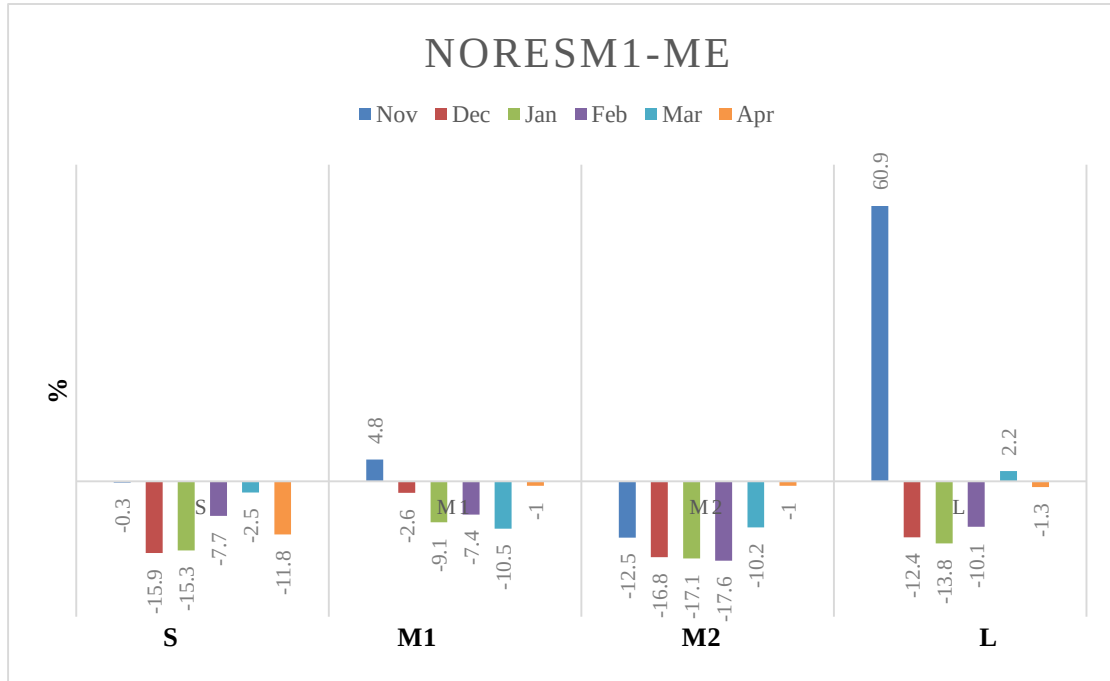


圖 4-24 NorESM1-ME 乾季輸出與 Baseline 差異百分比圖



4.6 模擬成果與分析

本研究藉由頻繁的水質採樣進行溶解態有機碳之推估，採樣期間為 2002 年至 2005 年與 2012 年至 2014 年之區間，匯入 Loadest 模式後估算坪林測站年溶解態有機碳之輸出，藉 Loadest 模式建立該集水區流量與溶解態有機碳濃度之多元迴歸式，再利用 SWAT 模式進行流量模擬翡翠水庫上游集水區坪林測站 RCP_8.5 情境下五種大氣環流模式下未來 2021-2100 年之流量，並統整月際與乾濕季之成果，了解集水區內在各種大氣環流模式下溶解態有機碳之變動情形。

針對水質採樣的研究分析，研究成果顯示流量確實會對溶解態有機碳輸出造成影響，故本研究使用 Loadest 模式內 Model 9 進行溶解態有機碳推估，以降低相關係數對輸出結果之影響，其 AIC 值為 0.064， R^2 值亦高達 0.93，代表其模擬結果位於可接受之範圍內，再將模擬之未來氣候變遷情境下之日流量匯入並進行資料統整後，發現各模式輸出之間差異大，在 S 情境下，HadGEM2-AO 與 Baseline 最相近，CRISO-Mk3.6.0 與 Baseline 差異最大；在 M1 情境下，CCSM4 與 Baseline 最相近，CRISO-Mk3.6.0 與 Baseline 差異最大；在 M2 情境下，NorESM1-ME 與 Baseline 最相近，CRISO-Mk3.6.0 與 Baseline 差異最大；在 L 情境下，bcc-csm1.1-m 與 Baseline 最相近，CRISO-Mk3.6.0 與 Baseline 差異最大；透過上述可發現，CRISO-Mk3.6.0 推估未來溶解態有機碳輸出與當前情況差異最大。

研究結果發現，翡翠水庫上游坪林集水區之流量與其溶解態有機碳輸出有顯著正相關，推測溶解態有機碳隨流量增加，溶解態有機碳輸出亦將顯著增加。而針對氣候變遷對溶解態有機碳輸出之影響，透過代入大氣環流模式在 RCP8.5 情境下的氣候條件模擬未來流量，並以未來流量代入迴歸後得近程(Short-term:2021-2040)、中程(M1:2041~2060)中長程(M2:2061~2080)與長程(L:2081~2100)之溶解態有機碳輸出量，整體而言，2021-2100 年

間總輸出量與年平均輸出量並不會顯著增加，且略呈現減少之趨勢，然而，將模擬結果分別分為乾濕季節後，可發現，各 GCM 模式間對未來乾季溶解態有機碳輸出的模擬較為一致，呈減少趨勢，而各模式對濕季輸出的評估差異亦較大。。



第五章 結論與建議

目前大台北地區仰賴北勢溪與南勢溪之水源（97.5%）作為日常用水，水資源利用為優先取用南勢溪川流水，當其水量不足時則由翡翠水庫放水補充，故翡翠水庫是大臺北地區無可替代的水資源命脈及民生穩定、工商經濟繁榮社經發展之關鍵基礎設施。據翡翠水庫操作管理手冊統計自民國 94 年至 107 年之資料顯示，由翡翠水庫供應的自來水原水量，平均每年 2 億 1,804 萬立公尺，占臺北自來水事業處取水量 24%。故，翡翠水庫上游溶解態有機碳輸入對於水庫內碳循環產生之影響不可忽視。

本研究分析，未來溶解態有機碳年平均輸出量並不會隨時間顯著增加，且大體上呈現減少之趨勢，然而，各模式顯示在氣候變遷下五月至八月的溶解態有機碳有些微增加的趨勢，因翡翠水庫供水季節主要為一月至七、八月間(如下圖 5-1)，是否進而影響供水期間進入民生用水系統有待進一步研究。

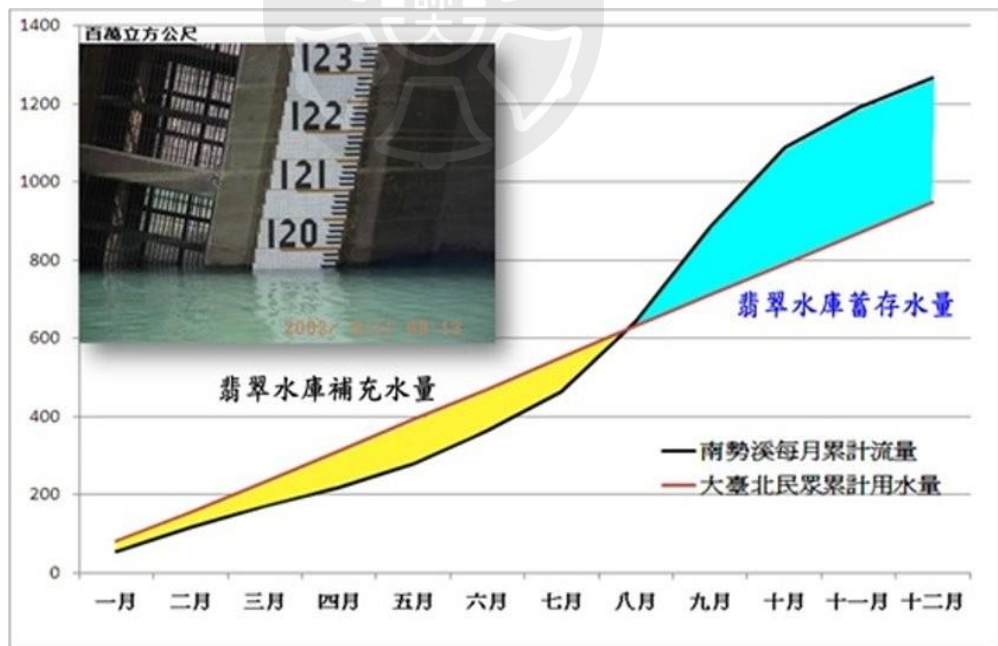


圖 5-1 翡翠水庫蓄存水量變化(資料來源：台北市翡翠水庫管理局)

為過濾庫體內之水質，淨水程序中將添加大量的氯。而近期的研究指

出，颱風不只會造成原水濁度飆升，還會提高水中溶解性有機碳與致癌物三鹵甲烷的總量，三鹵甲烷是加氯消毒後，與有機碳反應所產生的副產物，具有致癌的風險（林其鋒，2014），故，氣候變遷將增加台北地區民眾民生用水安全之疑慮，有關單位須重視水體內溶解態有機碳輸出之總量管制，制定相關法規管制集水區上游人為及生物源有機碳輸入，透過大氣環流模式模擬與 Loadest 模式推估，即可成為未來政策制定之相關參考依據，後續研究則須針對流量模擬檢定等更細節部分做更詳細之評估，以利維護集水區水源內之碳循環與生態。

氣候變遷下，如何因應環境變化穩定供水與供水安全性攸關民生與工業需求，水庫內碳循環與用水安全息息相關，建議未來配合季節針對上游集水區溪流進行定期溶解態有機碳監測，提早針對極端天氣下，水庫內有機物質濃度進行預防與策略制定。

對於後續深入研究，本研究提供未來研究者以下建議：

1. 為了建置完整溶解態有機碳資料庫，可增設相關 IoT 物聯網監測設施，收集集水區內更多測站與更長時間段之資料。
2. 為能更針對該集水區之狀況進行調控，建議未來研究可以更小之 HRU 為尺度探討溶解態有機碳之輸出，回應第一點，此一必須搭配更長時間之監測資料與。

參考文獻

- Addis, M. F., Tedde, V., Puggioni, G. M. G., Pisanu, S., Casula, A., Locatelli, C., ... & Uzzau, S. (2016) . Evaluation of milk cathelicidin for detection of bovine mastitis. *Journal of dairy science*, 99 (10) , 8250-8258.
- Akaike, H. (1974) . A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6) ,716-723.
- Bao, H., Lee, T. Y., Huang, J. C., Feng, X., Dai, M., & Kao, S. J. (2015) . Importance of Oceanian small mountainous rivers (SMRs) in global land-to-ocean output of lignin and modern biospheric carbon. *Scientific reports*, 5 (1) , 1-10.
- Battin, T. J., Luyssaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A., & Tranvik, L. J. (2009) . The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2 (9) , 598.
- Bishop, K. H., Laudon, H., & Köhler, S. (2000) . Separating the natural and anthropogenic components of spring flood pH decline: A method for areas that are not chronically acidified. *Water Resources Research*, 36 (7) , 1873-1884.
- Cavanaugh, J. E., & Neath, A. A. (2019) . The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 11(3), e1460.
- Das, S. K. (2016) . Management of Agricultural Non-point Source Pollution—A Case

Study on Yarra River (Doctoral dissertation, Victoria University) .

Dillon, P. J., & Molot, L. A. (1997) . Effect of landscape form on export of dissolved organic carbon, iron, and phosphorus from forested stream catchments. *Water Resources Research*, 33 (11) , 2591-2600.

Echambadi, R., & Hess, J. D. (2007) . Mean-centering does not alleviate collinearity problems in moderated multiple regression models. *Marketing Science*, 26(3) , 438-445.

Evans, C. D., Chapman, P. J., Clark, J. M., Monteith, D. T., & Cresser, M. S. (2006) . Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. *Global change biology*, 12 (11) , 2044-2053.

Ficklin, D. L., Luo, Y., Luedeling, E., & Zhang, M. (2009) . Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374 (1-2) , 16-29.

Findlay, S. E. (2005) . Increased carbon transport in the Hudson River: unexpected consequence of nitrogen deposition?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3 (3) , 133-137.

Freeman, C., Evans, C. D., Monteith, D. T., Reynolds, B., & Fenner, N. (2001) . Export of organic carbon from peat soils. *Nature*, 412 (6849) , 785-785.

Garnett, M. H., Ineson, P., & Stevenson, A. C. (2000) . Effects of burning and

grazing on carbon sequestration in a Pennine blanket bog, UK. *The Holocene*, 10 (6) , 729-736.

Huang, J.C., Lee, T.Y., Lee, J.Y., 2014. Observed Magnified Runoff Response to Rainfall Intensification under Global Warming, *Environmental Research Letters*, 9: 034008, DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/034008.

Huntington, T. G., Balch, W. M., Aiken, G. R., Sheffield, J., Luo, L., Roesler, C. S., & Camill, P. (2016). Climate change and dissolved organic carbon export to the Gulf of Maine. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121 (10) , 2700-2716.

Jha, B. (2013) . Rating Curve Development and Multivariate Statistical Analyses of Stream Water Quality in Greensboro, North Carolina (Doctoral dissertation, North Carolina Agricultural and Technical State University) .

Jha, B., & Jha, M. K. (2013). Rating curve estimation of surface water quality data using LOADEST. *Journal of Environmental Protection Vol.4 No.8(2013)*

Kortelainen, P., & Saukkonen, S. (1998) . Leaching of nutrients, organic carbon and iron from Finnish forestry land. In *Biogeochemical Investigations at Watershed, Landscape, and Regional Scales* (pp. 239-250) . Springer, Dordrecht.

Lee, T.Y., Huang, J.C., Lee, J.Y., Jien, S.H., Zehetner, F., Kao, S.J.,(2015). Magnified Sediment Export of Small Mountainous Rivers in Taiwan: Chain Reactions

from Increased Rainfall Intensity under Global Warming. PLoS ONE 10(9):
e0138283. doi:10.1371/journal.pone.0138283

Lee, T. Y., Lee, L. C., Huang Jr, C., Jien, S. H., Hein, T., Zehetner, F., ... & Shiah, F. K.
(2017) . The dynamics and export of dissolved organic carbon from
subtropical small mountainous rivers during typhoon and non-typhoon periods.
Biogeosciences Discussions, 1-34.

Lee, L. C., Hsu, T. C., Lee, T. Y., Shih, Y. T., Lin, C. Y., Jien, S. H., ... & Huang, J. C.
(2019). Unusual roles of discharge, slope and SOC in DOC transport in small
mountainous rivers, Taiwan. *Scientific reports*, 9(1), 1-9.

Lin, C. Y., & Tung, C. P. (2017) . Procedure for selecting GCM datasets for climate
risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 28 (1) .

Mimikou, M. A., Baltas, E., Varanou, E., & Pantazis, K. (2000) . Regional impacts of
climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of
Hydrology*, 234 (1-2) , 95-109.

Monteith, D. T., Stoddard, J. L., Evans, C. D., De Wit, H. A., Forsius, M., Høgåsen,
T., ... & Keller, B. (2007) . Dissolved organic carbon trends resulting from
changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 450 (7169) , 537

OECD/European Commission (2020), Cities in the World: A New Perspective on
Urbanisation, OECD Urban Studies, *OECD Publishing, Paris*,
<https://doi.org/10.1787/d0efcbda-en>.

- Oni, S. K., Futter, M. N., Bishop, K., Kohler, S. J., Ottosson-Lofvenius, M., & Laudon, H. (2013) . Long-term patterns in dissolved organic carbon, major elements and trace metals in boreal headwater catchments: trends, mechanisms and heterogeneity. *Biogeosciences*, 10 (4) , 2315-2330.
- Pohlert, T., Huisman, J. A., Breuer, L., & Frede, H. G. (2005) . Modelling of point and non-point source pollution of nitrate with SWAT in the river Dill, Germany. *Advances in Geosciences*, European Geosciences Union, 2005, 5, pp.7-12.
- Räike, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., & Thomas, D. N. (2016) . Long-term trends (1975–2014) in the concentrations and export of carbon from Finnish rivers to the Baltic Sea: organic and inorganic components compared. *Aquatic Sciences*, 78 (3) , 505-523.
- Ravichandran, M. (2004) . Interactions between mercury and dissolved organic matter—a review. *Chemosphere*, 55 (3) , 319-331.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., ... & Kortelainen, P. (2013) . Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503 (7476) , 355-359.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources*

Association, 37(5), 1169-1188.

Schlesinger, W. H. (2000). Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82 (1-3), 121-127.

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Intergovernmental panel on climate change, working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). New York.

Trenberth, K. E., & Shea, D. J. (2006). Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophysical Research Letters*, 33 (12).

Tung, C. P., & Haith, D. A. (1995). Global-warming effects on New York streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(2), 216-225.

Tung, C. P., & Lin, C. Y. (2008). The challenge and response for climate change. *Science Development*, 424, 28-33.

Tung, C., Liu, T., Chen, S., Ke, K., & Li, M. (2014). Carrying capacity and sustainability appraisals on regional water supply systems under climate change. *British Journal of Environment and Climate Change*, 4 (1), 27-44.

Walsh, K., Allan, R., Jones, R., Pittock, B., Suppiah, R., & Whetton, P. (2002). Climate change in Queensland under enhanced greenhouse conditions.

Melbourne, Australia: CSIOR–Atmospheric Research.

Wickramaarachchi, T. N., Ishidaira, H., Magome, J., & Wijayaratna, N. (2014) .

Impacts of Future Flow Regime Alterations on Iron Load Occurrence in Gin
River, Sri Lanka. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 70 (4) , I_127-I_132.

Wolf, R., Andersen, T., Hessen, D. O., & Hylland, K. (2017) . The influence of
dissolved organic carbon and ultraviolet radiation on the genomic integrity of
Daphnia magna. *Functional ecology*, 31 (4) , 848-855.

Worrall, F., Harriman, R., Evans, C.D. et al. Trends in Dissolved Organic Carbon in
UK Rivers and Lakes. *Biogeochemistry* 70, 369–402 (2004) .

Winterdahl, M., Erlandsson, M., Futter, M. N., Weyhenmeyer, G. A., & Bishop, K.
(2014) . Intra-annual variability of organic carbon concentrations in running
waters: Drivers along a climatic gradient. *Global biogeochemical cycles*, 28
(4) , 451-464.

李克里 (2013)。氣候變遷與土地利用變遷對集水區流量衝擊評估-以聖文森蒙特
婁集水區為例。國立中央大學國際永續發展碩士在職專班碩士論文，桃園
縣。 取自 <https://hdl.handle.net/11296/326w82>

林其鋒 (2014)。金門水庫水質變化及高有機性污染形態成因分析。國立臺灣大
學環境工程研究所碩士論文，台北市。取自
<https://hdl.handle.net/11296/k67m66>

林冠州 (2017)。應用非點源污染模式 SWAT 模擬翡翠水庫上游集水區流量及氮

素之輸出與移動。國立臺灣師範大學地理學系碩士論文，台北市。取自
<https://hdl.handle.net/11296/63tahg>

柳中明。(2005)。氣候變遷、衝擊、因應與永續發展研究進展 2005 (上)。國立臺灣大學全球變遷研究中心，台北。.

童慶斌、吳明進、張斐章、李明旭、柳文成、謝龍生。(2002)。氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建置-氣候. 水文, 生態部分 (一)。行政院環境保護署專題研究計畫報告。

童慶斌、李明旭、葉欣誠、范正成 (2006)。氣候變遷對災害防治衝擊調適與因應策略整合研究-子計畫: 水庫系統在變遷氣候中之脆弱度評估與支援決策技術發展 (I)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。

鍾寧心 (2010)。氣候變遷對營養鹽輸出量之早期預警指標—以翡翠水庫集水區為例。國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文，台北市。取自
<https://hdl.handle.net/11296/fhdj6u>

臺北市翡翠水庫管理局 (無日期)。翡翠水庫操作管理。2020 年 8 月 24 日。取自 <https://www.feitsui.gov.taipei/Default.aspx>