



以高解析度大氣環流模式資料 推估氣候變遷下北部水資源之衝擊

劉子明／國家災害防救科技中心 助理研究員

鄧澤宇／國家災害防救科技中心 佐理研究員

許晃雄／中研院環境變遷研究中心 特聘研究員兼專題中心執行長

本研究主要目的在於利用高解析度大氣環流模式模擬降雨與氣溫資料，再統計降尺度偏差修正至集水區尺度後，透過水文模式模擬以及水資源供水模式模擬，探討氣候變遷下北部地區（臺北、板新、桃園）水資源供需情形，並探討已完工之板新地區供水改善計畫二期工程（簡稱：板二計畫），在氣候變遷影響下之效益與衝擊。北部地區四個主要集水區在未來氣候變遷情境下，雨量呈豐水期微增，枯水期減少，但總雨量呈現全年減少情形。流量模擬顯示未來豐水期與枯水期以及年總流量皆為減少的趨勢。透過水資源系統動力模式進行有無板二計畫的北部地區供需水情境模擬，無板二計畫條件下的臺北地區、板新地區供水能力尚足，桃園地區出現少許供水缺口。板二計畫完工之後，模擬顯示臺北地區無明顯缺水情形；板新地區於春季、冬季缺水率有下降情形；桃園地區於全年缺水情況皆有顯著下降。加入氣候變遷對北部水資源衝擊影響，結果顯示臺北地區出現非常些微之缺水率；板新、桃園地區因豐枯水期雨量差距擴大，故於乾季（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯。

關鍵詞：氣候變遷、供水系統、系統動力模式

前言

近年來極端天氣事件頻傳，淹水災害及乾旱事件發生頻率也隨之增加，對人類生命財產造成嚴重災害。聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC）研究報告指出，全球暖化趨勢若持續增加，恐增加缺水之頻率與強度，嚴重

衝擊水資源管理，並加劇水資源之跨部門競爭。氣候變遷對人類生活圈，特別是水資源之衝擊影響受到各界重視，國際間亦積極研擬因應氣候變遷之水資源相關研究與調適策略，以做為氣候變遷下水資源永續利用之決策參考。而海島型國家如臺灣，受氣候變遷之影響相較之下更為顯著，相關領域之研究與落實更是刻不容緩。

臺灣地區流量之豐枯差異於時間與空間皆明顯，然總用水量（民生、工業、農業）卻是逐年上升，偶遇供水量吃緊時而乾旱事件多發生在冬、春兩季，主要原因是枯水期降雨減少以及豐水期的降雨不如預期（如颱風數量偏少）所造成。水資源為經濟與社會發展之基礎，隨著人口成長、都市化以及產業發展，用水量之總量需求與穩定性需求日益顯著，加重水資源供給面之挑戰。除現況面臨之問題外，近年極端氣候事件頻頻發生，降雨型態之變化趨勢傾向豐枯加劇，對於水資源供應之衝擊更趨嚴峻，而未來氣候變遷之影響，對於水資源究竟會造成何種影響，影響之程度如何，而現況硬體設施與軟性調配方案是否能因應未來水資源衝擊，尤其重要。

過去氣候變遷下水資源衝擊評估多使用 IPCC 所釋出的數十個大氣環流模式（General Circulation Models，簡稱 GCMs）結果，再透過統計降尺度至集水區進行應用與評估，由於 GCMs 的不確定性，各模式評估結果不一，雖然部分研究以 GCMs 在臺灣的降水模擬優劣程度，挑選與排序適合的 GCMs 結果進行衝擊評估，以此降低模擬的不確定性，但對於是否能夠合理模擬臺灣的降水，仍希望有更細緻的模擬結果進行評估。

近年來全球暖化影響，臺灣枯旱事件頻傳，未來在全球氣溫更高的情境下，臺灣水資源究竟會面臨怎麼樣的挑戰，現有水資源規劃方案是否能夠因應氣候變遷的衝擊，需要有能夠模擬解析台灣未來氣候變遷下降水變化的大氣環流模式進行評估。為此，本研究使用高解析度大氣環流模式之降雨與氣溫模擬結果透過統計降尺度偏差修正至集水區，再透過水文模式模擬未來集水區入流量，以供需求模式模擬與分析未來水資源供水可能遭受之衝擊。

文獻回顧

氣候變遷對台灣水資源衝擊評估的研究，多以 IPCC 第四次評估報告（IPCC Fourth Assessment Report，簡稱 IPCC-AR4）的情境進行分析為主，且多以統計降尺度的資料進行應用與探討。研究指出在 IPCC-AR4 的暖化情境下，以多模式成果推估世紀末（2080～2099）雨量變化狀況，北部地區模式推估冬季雨量減少情況較為一致，春季雨量偏向減少，而夏季雨量偏向增加，

秋季無明顯一致性，然而不降雨日數增加顯示高度一致性^[1]；另有研究顯示北部地區 9～12 月雨量減少之一致性較高，5～8 月雨量稍微偏向增加，而 1～4 月則無明顯一致性^[2]；北部地區年雨量呈現減少趨勢，最大不降雨日數全台狀況皆嚴重^[3]；未來氣候變遷影響下，北部地區豐水期雨量增加 1.9%，枯水期減少約 0.8%^[4]。

在 IPCC 第五次評估報告（IPCC 5th Assessment Report，簡稱 IPCC-AR5）出版與 GCMs 資料釋出之後，水利署^[5]則以 IPCC-AR4 與 IPCC-AR5 豐枯水期均減少之 GCMs 比較差異，結果顯示 IPCC-AR5 枯水期雨量減少但減少幅度不大，而豐水期雨量則有增加情形。周佳等人^[6]指出臺灣地區在 IPCC-AR5 世紀末（2080～2099）月雨量推估結果顯示，春季雨量以及冬季雨量呈現減少趨勢，而夏季雨量呈現增加趨勢，而秋季並無顯著趨勢。而陳宏宇等人^[7]則以 IPCC-AR5 的世紀末（2081～2100）日雨量進行分析，多模式系集平均結果顯示年平均雨量增加 17.14%，年最大連續不降雨日數增加 12.46%，降雨日數減少 5.77%，而降雨強度增加 23.76%。總體而言，比較 AR4 與 AR5，北部地區未來雨量變化冬季雨量減少與不降雨日數增加之訊號具高度一致性，春季雨量減少與夏季雨量增加具中度一致性，秋季則無明顯一致性。而 AR5 在乾季減少與夏季增加幅度相較 AR4 更為明顯。

而在未來氣候變遷情境下集水區流量推估部分，多數研究與報告顯示豐枯差距相較於雨量將更為擴大，特別是乾季流量減少情形更為顯著。水利署^[2]推估北部地區集水區流量成果，推估集水區在 1～4 月以及 9～12 月流量下降之模式數量較雨量更多，下降幅度更為顯著，但因為豐水期流量增加之故，北部地區整體供水缺口並無明顯擴大。然而林尉濤^[8]指出，以現況農業用水而言，枯水期（冬末春初）因正值一期稻作插秧灌溉，水資源經常面臨供不應求之狀況，馬家齊^[9]以 TCCIP 之 AR4 近未來（2020～2039）資料推估石門水庫供灌灌區之狀況，並用不同入流超越機率分析各種產期調配策略之成效，成果指出近未來枯水期流量僅現況之 88.4%，對農業供水造成嚴重影響，且隨入庫流量超越機率之降低，須採取相較現況更多或是更先期之節水因應措施。

本研究為國內首次使用高解析度大氣環流模式之結果，進行水資源衝擊評估之研究，雖然單以一個大氣環

流模式進行氣候變遷評估之結果較為主觀，但透過高解析度大氣環流模式推估的台灣地區降雨變化，較能以物理特性反應台灣地形特徵所影響之降雨，值得作為窺探未來氣候變遷可能衝擊之參考。

研究區域與資料

為探討氣候變遷對水資源乾旱風險之影響，乃以北部地區（臺北、板新、桃園供水區）為例，使用高解析度全球環流模式 GFDL-HiRAM^[10]（以下簡稱 HiRAM）進行基期（1986 ~ 2005 年）與世紀中（2040 ~ 2060 年）的氣溫與降雨資料，暖化情境採用 IPCC-AR5 之 RCP8.5 情境^[11]，並將氣象資料輸入水文模式模擬翡翠水庫集水區以及石門水庫集水區氣候變遷下之水文衝擊，接著使用所蒐集之北部地區水資源供水與需水資料，以 VENSIM 軟體建置北部地區水資源供水系統動力模式^[12,13]，模擬北部地區之基期（1986 ~ 2005 年）、考量社會經濟發展（民國 120 年）情境以及世紀中（2040 ~ 2060 年）之氣候變遷情境下之水資源供需狀況。

研究區域供水系統如圖 1 所示，水資源供需水模擬主要為翡翠水庫與石門水庫之供水系統，主要水源來自北勢溪、南勢溪、三峽河以及大漢溪，生活用水供水涵蓋台北、板新以及桃園等地區，在 2019 年板二計畫（板新地區供水改善計畫二期工程）完工並啟用之後，板新地區可藉由輸送管引用翡翠水庫的原水，考量行政區域與供水管轄單位不同，本研究模擬中之翡翠水庫供水仍以台北地區優先供水，再分配給板新與桃園地區。

即使是高解析度環流模式，但模擬結果與實際測站資料比對，仍存在誤差，因此必須透過偏差校正來修正

現況與未來的氣溫與降雨資料。本研究使用之 HiRAM 降雨與氣溫資料，乃透過中央研究院永續科學研究計畫^[14]經過偏差校正所提供，利用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP）整理的網格化觀測資料（簡稱 TCCIP 網格化觀測資料）作為偏差校正之基準，將模式資料依網格化觀測資料的座標內插，再以內差後的資料與 TCCIP 網格化觀測資料進行偏差校正。

水資源供需模擬與評估方法

本研究利用以 Vensim 系統動力學軟體所建置之臺灣北部水資源系統動力模式，更新修改後進行水資源供需模擬，模擬過程使用 TaiWAP^[15]進行資料輸入、水文模式模擬、需水量時間序列資料產生以及水資源系統動力模式銜接模擬之整合模擬，以進一步模擬與探討水資源供水系統供水情形。水文模式使用 GWLF（Generalized Watershed Loading Function）模式^[16]進行集水區流量模擬。

為了評估供水系統在現況與未來氣候變遷影響條件下，供水系統之供水能力是否能夠滿足系統之需水量，本研究使用旬平均缺水率，進行供水風險評估。

平均缺水率計算方式如下：

$$\text{平均缺水率}_{第i旬} = \sum_1^n (\text{缺水率}_{第i旬} / \text{旬需水量}_{第i旬}) / n \quad (1)$$

其中第 i 旬為一年中之第 1 至 36 旬， n 為模擬年數，TaiWAP^[15]使用氣象合成模式產生日資料，因為氣象合成模式產生日資料為隨機過程，為了讓資料與實際資料統計特性一致，必須產生多年合成資料才能讓最後平均結果與實際值接近，一般建議至少 100 年以上，本研究也使用 100 年氣象合成資料進行模擬與分析。

集水區未來水文學變化

北部地區主要依靠翡翠水庫與石門水庫供水，故於水文衝擊評估部分，分析翡翠水庫供水區水源相關之北勢溪、南勢溪，以及石門水庫供水區水源相關之大漢溪、三峽河。本研究分析上述四集水區雨量基期（1986 ~ 2005 年）與未來世紀中（2040 ~ 2060 年）推估之各月雨量，四個集水區未來變化趨勢相近，因此僅呈現北

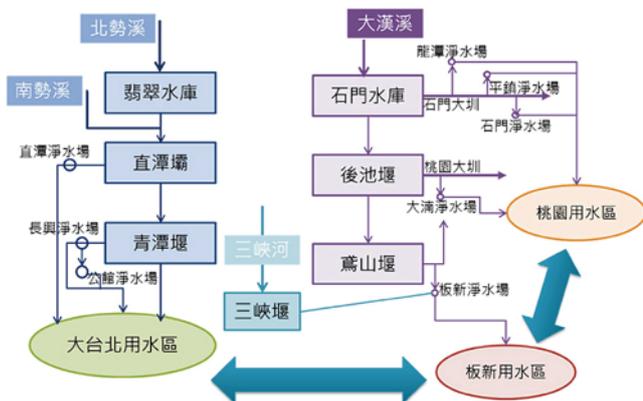


圖 1 研究區域供水系統示意圖

勢溪的結果來說明（如圖 2），並將四個集水區的豐水期（5～10月）與枯水期（11～4月）的雨量變化統計如表 1，結果顯示未來豐水期雨量微增，幅度從 +2%～+5% 不等，乾季（枯水季；11～4月）減少，變化幅度從 -16%～-24% 不等，而總雨量部份皆呈現全年減少情形，變化幅度從 -2%～-5% 不等。但如果由各月的雨量變化來看（如圖 2），可以發現豐水期雨量的增加集中於 8 月，對於水資源管理將會增加困難與挑戰。

北部地區四個集水區流量未來呈現相同改變趨勢，如表 2，因此僅以北勢溪的結果來呈現與說明（如圖 3），豐水期流量為減少趨勢，變化幅度從 -0.3%～-5% 不等，枯水期流量為亦減少趨勢，變化幅度從 -22%～-47% 不等，而總流量部份皆為減少情形，變化幅度從 -9%～-18% 不等。同樣的，如果從各月的變化趨勢來看，跟雨量的趨勢結果相同，流量集中於 8 月，整體而言 8 月的流量增加可能可以解除從春季以來的水庫蓄水量持續下降的危機，但也可能多數增加的流量並無法蓄存於水庫，更可能因為過多的洩洪造成下游的淹水。

水資源未來缺水率分析

本研究利用水資源系統動力模式，模擬北部地區供水情形，分別以三種模擬情境進行模擬與分析，為了讓情境模擬有相同基準，皆以民國 120 年的水資源需求條件進行模擬，為了探討板二計畫的效益，第一個模

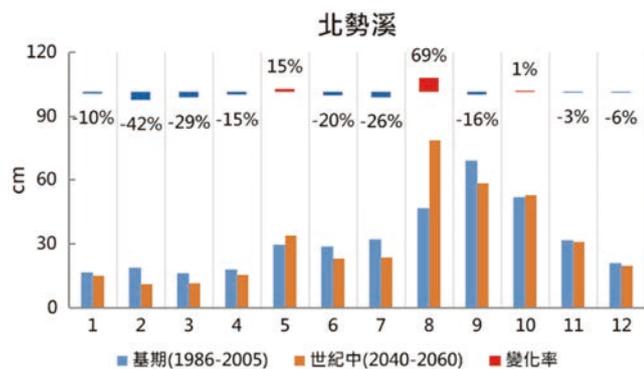


圖 2 基期月雨量與世紀中月雨量變化（以北勢溪流域為例）

表 1 集水區基期與未來豐枯水期雨量差異（RCP8.5 暖化情境）

集水區	雨量		
	豐水期	枯水期	全年
北勢溪	5%	-16%	-2%
南勢溪	2%	-16%	-4%
大漢溪	4%	-24%	-5%
三峽河	3%	-19%	-4%

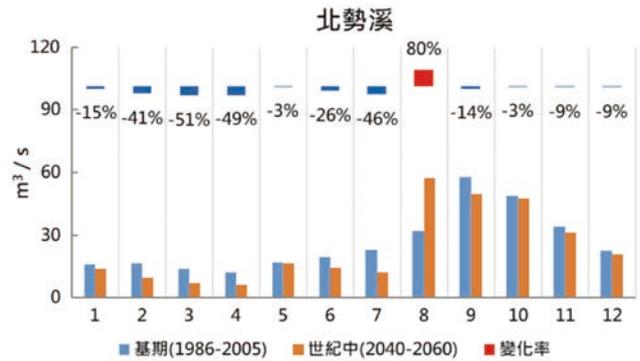


圖 3 基期月流量與世紀中月流量變化（以北勢溪為例）

表 2 集水區基期與未來豐枯水期流量差異（RCP8.5 暖化情境）

集水區	流量		
	豐水期	枯水期	全年
北勢溪	-0.3%	-24%	-9%
南勢溪	-4%	-22%	-11%
大漢溪	-5%	-44%	-16%
三峽河	-3%	-47%	-18%

擬情境為無板二計畫、第二個模擬情境為有板二計畫、第三個模擬情境則將氣候條件改為未來氣候變遷下的氣候，以高解析度大氣環流模式未來氣候變遷之結果（2020～2040 年 HiRAM-RCP8.5 情境），代入有板二計畫的水資源系統進行模擬，藉此探討北部地區的板二計畫所帶來的效益，同時也藉由情境式模擬了解氣候變遷下對於臺北、板新、以及桃園地區未來的風險。結果如圖 4 至圖 6。三個模擬情境在農業用水需水量上，皆為不休耕條件，雖與實際情況有些差距，但卻能反映出水資源規畫上面臨的缺水風險。

首先探討無氣候變遷條件下的板二計畫效益，模擬結果顯示臺北地區無論是無板二計畫或是有板二計畫支援板新與桃園的條件下，皆無明顯缺水情形；板新、桃園地區無板二計畫條件下，於冬季呈現較高缺水情況，板新地區一月平均缺水率可達 14%，桃園地區一月平均缺水率可達 22%；而板二計畫的加入，即使本研究之探討情境以優先供給台北地區進行模擬，仍可明顯看出板二計畫對於板新與桃園地區缺水率的改善效益，板新地區在春季與冬季之平均缺水率有明顯下降，桃園地區於全年的缺水率皆有顯著下降；板新地區一月的平均缺水率降為 7% 左右，桃園地區一月平均缺水率則降為 10% 左右。臺北地區因部分水量供給板新桃園地區，原本不缺水的臺北地區則出現了非常些微的缺水。

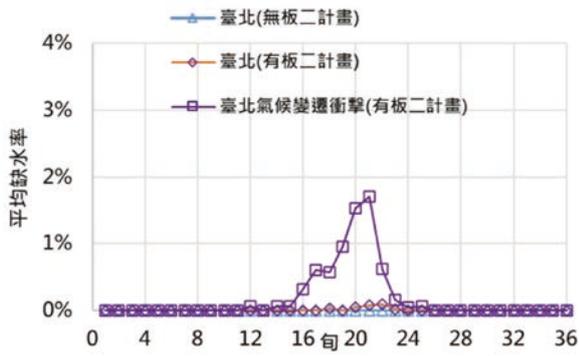


圖 4 臺北地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

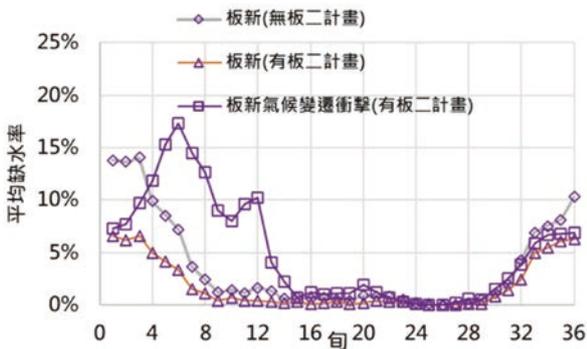


圖 5 板新地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

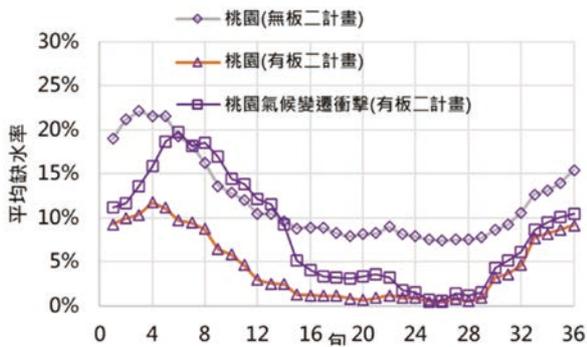


圖 6 桃園地區各種模擬情境下之各旬平均缺水率

而氣候變遷對於北部地區的水資源供水有何影響，可以從第三個模擬情境來探討，從圖 4 可以看出，氣候變遷影響下臺北地區平均缺水率非常些微的上升，不到 2%；板新、桃園地區因乾季濕季雨量差距擴大，故於乾季（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯，板新地區最大旬平均缺水率從 7% 上升至 17% 左右（圖 5），桃園地區最大旬缺水率從 12% 上升至 20% 左右（圖 6）。

結論與建議

本研究主要目的在於以 GFDL-HiRAM 高解析度大氣環流模式模擬結果，透過水文模式以及水資源供水模

式，探討氣候變遷下北部地區（臺北地區、板新地區、桃園地區）水資源供需情形與衝擊，並探討未來氣候變遷下之水資源風險。

北部地區四主要集水區（北勢溪、南勢溪、大漢溪、三峽河）在 RCP8.5 暖化情境下（基期：1986 ~ 2005 年）之推估（世紀中：2040 ~ 2060 年）結果，雨量在四集水區呈現相同趨勢，雨量呈豐水期（5 月 ~ 10 月）微增，枯水期（11 月 ~ 4 月）減少，而總雨量部份皆呈現全年減少情形。流量部分四集水區呈現相同趨勢，無論是豐水期、枯水期以及全年總流量皆為減少趨勢。

透過水資源系統模擬現況以及世紀中北部地區供需水狀況，顯示現況臺北地區、板新地區供水能力尚足，桃園地區出現少許供水缺口，現況由農業調度及北水處支援；臺北地區未來（民國 120 年）用水需求降低（民生用水降低、工業用水無成長），供水狀況無顯著影響，板新地區現況水源供給能力尚可滿足未來需求，而桃園地區因工業發展導致需水量增加，可能有更大供水缺口的發生。而考量新增水資源設施（板二計畫完工）之效益，臺北地區因部分水量供給板新桃園地區，缺水情形些微上升，但無明顯缺水情形；板新地區於春季、冬季缺水率有下降情形；桃園地區於全年缺水情況皆有顯著下降，最大旬平均缺水率從 10% ~ 20% 下降至 10% 以下。考量氣候變遷對水文情境影響後，臺北地區缺水情形些微上升；板新、桃園地區因豐枯水期雨量差距擴大，故於枯水期（春季、冬季）缺水情形加劇，春季尤為明顯，最大旬平均缺水率從 10% 以下上升至 20% 左右。

本研究目的在於呈現高解析度大氣環流模式應用於水資源供水衝擊評估之結果，未來應再增加其他統計降尺度 GCM 情境模擬或動力降尺度之結果輔以多種水文模式模擬，以呈現氣候變遷下水資源模擬之不確定性。

誌謝

本研究承蒙中央研究院永續科學研究計畫（2016 ~ 2018 年）「台灣乾旱研究：變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫」（AS-105-SS-A02）之經費支持，水資源供水模擬模式採用臺灣大學生物環境系統工程學系童慶斌教授之永續發展研究室所發展之北部水資源系統動力模式進行修改，特此感謝。

參考文獻

1. 許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 (2011), 「臺灣氣候變遷科學報告 2011 (精簡版)」, 國家災害防救科技中心。
2. 林裕彬 (2013), 「臺灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究」, 經濟部水利署。
3. 黃文政、吳彥樺、李俊韜 (2014), 「氣候變遷對臺灣地區 2046-2065 年降雨之衝擊評估」, 農業工程學報, 第 60 卷第 1 期。
4. 經濟部水利署 (2017), 「臺灣北部區域水資源經理基本研究」, 經濟部水利署。
5. 財團法人成大研究發展基金會 (2017), 「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估 (2-2) (精簡)」, 經濟部水利署。
6. 周佳、陳維婷、羅敏輝、李明安、許晃雄、洪志誠、鄒治華、盧孟明、洪致文、陳正達、鄭兆尊 (2017), 「臺灣氣候變遷科學報告 2017- 物理現象與機制」, 國家災害防救科技中心。
7. 陳宏宇、林李耀、陳永明、劉曉薇、童裕翔、林修立、陳正達 (2019), 「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集」, 國家災害防救科技中心。
8. 林尉濤 (2012), 「因應氣候變遷缺水之灌溉營運調適措施」, 2012 年推廣先進農業技術因應氣候變遷中日研討會。
9. 馬家齊 (2015), 「氣候變遷下因應枯旱之水庫供灌區農業用水管理」, 國立中央大學土木工程學系, 博士論文。
10. Chen, J.H. and Lin, S.J. (2013), "Seasonal predictions of tropical cyclones using a 25-km-resolution general circulation model," Journal of Climate, 26(2), 380-398.
11. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... and Rose, S.K. (2011), "The representative concentration pathways: an overview," Climatic Change, 109(1), 5-31.
12. 童慶斌 (2012), 「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
13. Tung, C.P., Liu, T.M., Chen, S.W., Ke, K.Y., and Li, M.H. (2014, Mar). Carrying Capacity and Sustainability Appraisals on Regional Water Supply Systems under Climate Change. British Journal of Environment and Climate Change, 4(1), 27-44.
14. 許晃雄、林傳堯、鄭克聲、陳亮全 (2018), 「台灣乾旱研究：變遷、水資源衝擊、風險認知與溝通計畫」, 永續科學研究計畫執行成果報告書, 中央研究院。
15. Liu, T.M., Tung, C.P., and Ke, K.Y. (2009), Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change. Paddy Water Environ 7, 301.
16. Haith, D.A., Mandel, R., and Wu, R. S. (1992), "GWLF, generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual," Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY. 

NOVA



華光工程顧問股份有限公司
CECI Nova Technology Co., Ltd.
HTTP://WWW.CECI-NOVA.COM.TW

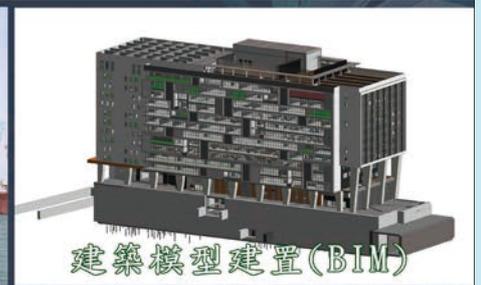
公廠環營
共商境建
工施監材
程工測料
規技分試
設術析驗
檢服改檢
測善善驗



工程規劃設計



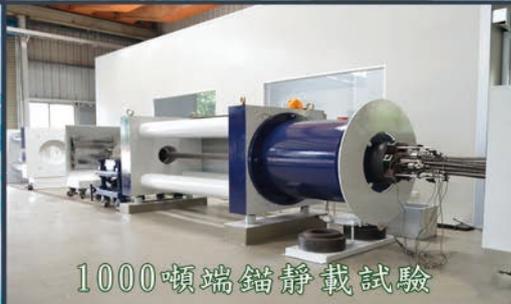
施工技術服務



建築模型建置(BIM)



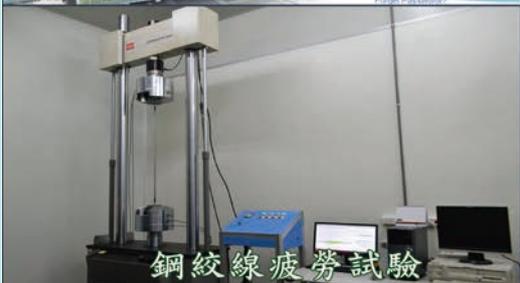
專案管理資訊系統(PMIS)



1000噸端錨靜載試驗



2000噸端錨動態疲勞試驗



鋼絞線疲勞試驗



鋼絞線彎折拉伸試驗



環境監測